

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

共同走向科学：百名院士科技系列报告集

(上)



## 前 言

中共中央组织部部长 张全景

为了贯彻党中央、国务院关于加速科技进步和加强科普工作若干意见的精神，实施“科教兴国”和“可持续发展”战略，落实全国科技大会和全国科普工作会议提出的提高全民科技意识和科技素质的任务，中国科学院、中国科协和中国工程院在北京、上海、天津、沈阳、长春、南京、合肥、武汉、广州、昆明、成都、西安、兰州等10多个中心城市，组织了百名院士面向社会，主要是面向党政领导干部作科技系列报告。这是一项很有意义的活动。

由中组部、中直机关工委、中央国家机关工委、中国科学院、中国科协和中国工程院共同举办的首场报告会，于1996年3月18日在刚刚落成的、由江泽民总书记题名的“中国科技会堂”隆重举行，百名院士科技系列报告拉开帷幕。出席首场报告会的领导同志有：中共中央政治局委员、国务院副总理邹家华，全国人大常委会副委员长吴阶平，全国政协副主席钱正英，中共中央纪律检查委员会副书记陈作霖，中共中央办公厅主任、中直工委书记曾庆红，以及中直机关、国家机关部委办负责人。著名科学家、中国科学院院长周光召院士作了题为《科学技术的发展趋势和它对社会的影响》的报告。

百名院士科技系列报告，涉及现代科学技术的各个领域和经济、社会可持续发展中重大科技问题的各个方面，广大听众很受启发，很受教育。为了使更多的干部学习科学知识，受益院士的科技报告，现将院士们在各地的报告汇集成册，投放社会，定将深受读者的欢迎！

1978年3月18日，邓小平同志发表了“科学技术是生产力”的重要讲话，党中央、国务院非常重视科技进步和科学技术的普及工作，号召各级领导干部努力学习科学技术知识。江泽民同志深刻指出：“加速我国的科技进步，一定要提高各级领导干部的科技素质。”当今世界，科学技术的发展日新月异，已成为经济发展、社会进步的决定性力量。我们要加速建设有中国特色的社会主义，实现“九五”计划和2010年远景目标，实现经济体制和经济增长方式的两个转变，必须努力学习和掌握科技知识。各级领导干部要深刻领会邓小平同志关于科学技术是第一生产力的科学论断，从国家富强、民族振兴的高度，深刻认识学习科技知识的重要性，增强学习的自觉性。要充分认识到，提高领导干部的科技素质是提高领导水平，提高决策能力，做好领导工作的不可缺少的重要条件。要把学习科技知识与学习政治理论通盘安排，纳入统一的学习计划。一方面提高干部的政治素质，自觉做到讲政治，坚定正确的政治方向、政治立场，树立鲜明的政治观点，自觉遵守政治纪律，增强政治辨别力和政治敏锐性；一方面努力提高干部的科技素质，使之了解世界科技发展的趋势，拓宽知识面，或者对某一学科领域有更深入的了解，或者掌握某一方面的专业知识。各单位要联系各自的实际，做出计划，精心组织实施，使学习科学技术知识蔚然成风。各单位的主要领导同志，要带头学习，善于挤时间学习，要有知难而进的勇气，不耻下问的精神，注意学习效果，不断提高学习质量。由江泽民同志作序，宋健同志主编的《现代科学技术基础知识》一书，比较全面系统地对一系列现代科技重大问题作了深入浅出的论述；周光召、朱光亚院士主编的《共同走向科学——百名院士科技系列报告集》又提供了一本很好的学习材料，其内容涉及到经济、社会

和科学技术发展的各个方面，都可以作为学习的基础教材，组织干部学习，以提高干部的科技素养和决策的科学化。

## 让我们共同走向科学

### ——《共同走向科学——百名院士科技系列报告集》序

温家宝

由中国科协、中国科学院、中国工程院发起并组织的百名院士科技系列报告活动，是一件很有意义的事情。这么多著名科学家，在做好本职的教学、科研工作的同时，走向社会，给各级领导干部宣讲科技知识，开展科学普及工作，这对于实施科教兴国的伟大战略，提高全民族的科学文化素质，必将起到重要的推动作用。

我们所处的时代，是一个科学技术飞速发展的时代。科学技术已经成为经济发展和社会前进的首要推动力量，成为现代文明的象征，深刻改变着经济发展的方式和人们的社会生活。科学技术与经济的结合，科学技术向现实生产力的转化，科学精神在人们的思想观念和生活方式中的渗透，使我们生存的这个世界，与科学发现和技术飞跃的联系越来越紧密。邓小平同志及时把握时代脉搏，以他的远见卓识和敏锐洞察力，提出“科学技术是第一生产力”的英明论断，这是对马克思主义关于科学技术和生产力学说的重大发展。密切关注和跟踪现代科学技术发展的动向，切实把发展科学技术事业放在现代化建设的關鍵位置，这是我们在激烈的国际竞争中立于不败之地的根本所在，是国家强盛、民族兴旺的希望所在。

充分发挥科学技术是第一生产力的作用，把我国建设成为富强、民主、文明的社会主义现代化国家，需要浩浩荡荡的科技工作者队伍，需要提高全民族的科学文化素质。我们党和国家的各级领导干部，要做一个现代化建设的合格的领导者，就要不断学习科学技术知识，掌握科技发展的趋势和最新动态，使自己能够站在时代的前列。1994年，在江泽民同志的倡导下，由国家科委等单位专家组织编写了《现代科学技术基础知识》，介绍世界科技发展的状况、趋势和我们的对策。江泽民同志在序言中指出：“现代科学技术的发展日新月异，新发明、新理论层出不穷，知识更新异常迅速，我们只有锲而不舍地努力学习，不断吸取新的知识，充实自己，才能提高决策水平和领导艺术。”我们要按照江泽民同志的要求，在广大干部中掀起学习科学技术知识的热潮，努力提高广大干部的科技素质。

组织著名科学家给各级领导干部作科技报告，既是领导干部学习科学技术的一种好的方式，也是进行科学普及工作的一种好的形式。院士作科技报告不但具有权威性，而且具有感召力，他们在科学事业上的成就本身就是最富于说服力的教育。这种活动应该经常进行，提倡我们的科学家，尤其是著名科学家、院士，到社会和群众中去，介绍科学知识，宣传科学精神，这是建设社会主义精神文明，提高全民族的科学文化素质的一项基础工作。

百名院士的科技系列报告取得了良好的社会效果，深为广大干部群众所欢迎。现在编辑出版他们的报告集，可以让更多的人了解各门学科发展的最新动态，了解科学技术对经济和社会发展的作用。我们相信，只要广大科技工作者都来关心科学普及工作，只要广大干部群众都能认真学习现代科学技术知识，重视和支持科技工作，我们国家的科技事业就大有希望，社会主义现代化建设就能早日成功。

让我们共同走向科学！

共同走向科学

# 科学技术的发展趋势和 它对社会的作用

周光召

中国科学院

周光召 理论物理、粒子物理学家。1929年5月15日生于湖南长沙,1951年毕业于清华大学并入北京大学研究生院学习三年。曾任中国科学院理论物理所所长、中国物理学会副理事长、中国国际交流协会副会长等职。现任中国科学院院长、中国科协主席、国际纯粹与应用物理联合会副主席等职。1980年当选为中国科学院院士(学部委员)。他同时为美国、前苏联等13个科学院外籍院士,并曾获意大利爵士勋章。主要从事高能物理、核武器理论等方面的研究并取得突出成就。

## 认识世界和改造世界

《中共中央、国务院关于加速科学技术进步的决定》中指出:科学技术是第一生产力,是经济和社会发展的首要推动力量,是国家强盛的决定性因素。

科学与技术既有联系又有区别,科学是人类在认识世界和改造世界过程中形成的,正确反映客观世界的现象、内部结构和运动规律的系统理论知识。科学还提供认识世界和改造世界的态度和方法,提供科学的世界观和处世的科学精神。技术是在科学的指导下,总结实践经验所得到的,在生产过程和其他实践过程中,从设计、装备、方法、规范到管理等的系统知识。技术直接指导生产,是现实的生产力。

科学产生技术,技术推动科学,这两者互相促进,有非常密切的关系。大家知道,科学技术最早是来源于生产的。它们从生产中独立出来成为人类的三大实践活动之一以后,科学就远远走在了生产的前面。无论是在它研究的空间范围、时间范围,还是研究的物质层次和规律上面,都走在了现实的生产前面。特别是它的基础研究部分,其中有暂时还看不到有实际应用价值的部分。恩格斯曾经在《在马克思墓前的讲话》中讲过一段名言,他说:“在马克思看来,科学是一种在历史上起推动作用的革命的力量。任何一门理论科学的每一个发现,即使它的实际应用甚至无法预见,都使马克思感到衷心喜悦。”从这里,大家可以看到马克思对待科学的态度。

## 基础研究,应用研究和开发研究

基础研究、应用研究和开发研究的特点和差别在哪里?

基础研究以认识客观世界的物质结构、各种基本运动形态和运动规律为己任,它不着眼于当前的应用。基础研究的重大发现常常带来生产的革命性变化。它的研究工作基本上在学科前沿,并在实验室中进行。

应用研究一般有明确的目的,是为了进一步发展某门技术,提高生产效率,拓宽应用的领域;利用基础研究的新发现开辟新的生产力和新的生产方向;它还要研究合理使用和节约资源,保护环境和生态等。100年以前,在实验室里发现了放射性,99年前在实验室里发现了电子,放射性和本世纪初

发现的相对论，就导致了今天整个原子能产业和核武器的诞生；而电子和本世纪初诞生的量子论及在本世纪中诞生的半导体、三极管产生了现在的整个电子工业。应用研究也要从认识规律出发，只有认识了才能更好地运用它去解决生产中的实际问题。所以在应用研究中间，我们有一部分叫应用基础研究，指的就是认识客观现象中运动规律的研究。

开发研究从事生产的技术改造、工艺革新、产品更新等，是科技转化的主要环节。

应用研究和开发研究的成果不断推动生产进步，使生产过程合理，效率提高，产品更新，成本降低，它的发展受到社会需求的强烈推动。

现在的基本发展趋势是：科学的研究成果转化为生产力的周期越来越短，速度越来越快。由基础研究带来的新兴产业和产业革命将继续发生，由应用研究和开发研究带来的技术进步和产品更新将持续不断。在 21 世纪，科学研究的水平将决定一个国家的竞争实力和一个社会精神文明的水平。科学研究的成就有赖于创新，而创新需要很高的理论水平。恩格斯在《自然辩证法》中说，“一个民族想要站在科学的最高峰，就一刻也不能没有理论思维。”

### 一些基础科学的发展趋势

#### 数学

数学对数、形和逻辑的研究将更加深入，数学将会更广泛地应用于科学研究、预测、管理和生产中。数学虽然是基础学科，它也对当今的生产产生作用。例如，在信息传输过程中，如何压缩信息是一个重要的问题，应用数学的成果发展信息压缩的技术是大有可为的。现在数学中有一门学问叫做小波分析，在信息压缩技术中有很重要的作用，大家知道日本在发展高清晰度电视中没有重视数字化而遭到失败，就是因为信息压缩技术没有很好地解决。美国应用数学研究成果，使得它在信息压缩技术方面超过了其他国家。因此，现在美国的计算机多媒体技术以及网络传输技术已经领先于日本，成为世界上信息技术最先进的国家。

#### 天体科学

现有实验和理论认为，我们所在的宇宙是约 150 亿年前，由一次大爆炸中产生的。科学家经过长期的研究和对大量天体观察的结果，看到我们现在所在的太空中的所有星球都是在向外运动的，离开爆炸点越远，运动速度越快，表明它们是从一个点中爆炸出来的，形成现在的宇宙。目前科学家正在研究，在这之前和这一宇宙之外是什么？大爆炸是如何发生，宇宙是如何演变，星球是如何形成和死亡的？这些都是当今研究的热点。例如，科学家从微观的研究中推测，在很高的能量状态下，电磁作用、弱相互作用、强相互作用以及重力作用都可能是统一在一起的，随着爆炸过程，温度逐步降低，它们逐步分离出来，成为单独形式的作用力。宇宙一次大爆炸产生后  $10^{-48}$  秒时，重力场开始分离出来作为独立的作用力；到  $10^{-11}$  秒时，电磁作用开始产生；在  $10^{-4}$  秒时，“夸克”开始形成质子和中子；到了爆炸后而距今 30 万年左右，宇宙开始形成现有的原子核和原子；10 亿年前形成银河系；到了爆炸后的 150 亿年左右，形成了现在的世界。

世界上最新的望远镜——哈勃望远镜，通过航天飞机已送到 600 公里以外的太空上，那里没有大气层的干扰，所以这个望远镜几乎可以观察到宇宙起源那么远的时间和地点。大家知道，光每秒走 30 万公里，我们平常计算宇



宙的距离按照光走一年的时间来计算。这里有一张哈勃望远镜观察到的银河系的图片，光从这个银河系走到地球需要 6000 万光年的时间。所以，我们说这是 6000 万光年之前的一个银河系。在这个银河系里有一个非常亮的星体，还有一个比太阳重 1 亿倍的黑洞。

### 高能物理和场论

构成核子的共有 6 个夸克，其中第四个夸克，即粲夸克是由中国血统的学者丁肇中和美国物理学家 Richter 分别独立发现的，最后一个顶夸克已于去年发现。6 个夸克先由理论上预言，到去年为止基本都发现了，证实了现有的理论预测。作用于夸克上的胶子场也已有实验验证，现在正进一步研究夸克和胶子场会不会是更基本的超对称场和统一的相互作用的产物。在能量很高、距离很小的时候，所有的相互作用是统一在一起的，而我们的现实世界又不是那么对称的。因此，要研究高度对称的系统是如何实现对称破缺，以形成丰富多彩的世界的。原来人们认为运动中的对称性是不能破坏的基本规律，1956 年李政道、杨振宁首先提出左右对称在弱作用下是破缺的，后来发现有系列更高的对称性实际上也已经被破缺，现在正在研究对称性是如何被破缺的。

### 地球和环境科学

大气中臭氧层的破坏，温室气体的增加，地球上生物多样性的减少，以及水土流失和污染的加剧都带来了严重的环境问题。保护环境，改良生态，控制全球变化是科学研究的前沿问题。全球变化是指由于人类活动造成环境变化后对全球带来的影响。例如，温室气体的增加可以引起温度上升，会带来全球气候的变化，地球上生物多样性的减少也是全球性的问题。前不久做过一个实验，在冰岛有很深的冰雪层，是若干年以前积累起来的。在其中可以找到当时气候的资料，如大气中二氧化碳有多少，当时的温度是多少，从中可以看出从 15 万年前到现在二氧化碳含量及温度的分布。这里有一张图片，可以看出宏观上二者大体相应的情况，说明温室气体的产生对全球气候有一定影响，但它也不完全是对应的。最近地球上的温度波动很厉害，而二氧化碳一直在上升，所以全球的温度也不是完全由二氧化碳所决定的。有很多因素尚待科学家们去研究。另外从历史上看，大自然也会影响二氧化碳的增加或减少。现在的变化是否完全由于人为产生的温室气体造成的，还需进一步研究。值得注意的是，有人企图用这个来限制发展中国家增加生产能源，借此来抑制发展中国家的发展。这既是科学问题，可能也有政治上的问题。我们不能在科学上没弄清之前，就轻易地作出结论。地球科学还要研究海洋和地壳深部的构造与资源，研究地壳板块运动和地震活动。地震在经济发达的时候危害会更重，必须通过研究事先掌握地震的规律。

### 非线性科学和复杂系统

非线性科学和复杂系统科学预计在下一世纪会有重大突破，非线性复杂系统中经常出现所谓的混沌现象和自组织、自适应状态，对这些现象的进一步研究将得到规律性的认识和广泛的应用。混沌这个词在中国古代就有，所谓开天辟地之时是一片混沌，是无序的。实际上混沌并不是完全无规则的，它的形成是有一些普遍的规律的。而且形成以后，表面上看起来杂乱无章，实际上里面是有规律可循的。现在我们已经发现很多现象在一定的条件下都会出现混沌，只要是比较复杂的系统非线性相互作用下，这种现象都可能出现。包括人体里一些电波的跳动，也包括大气的环流，甚至于股票的涨落

等等都有混沌的出现，所以它是一个很普遍的现象。我们知道在很复杂的条件下，常常会出现能够自己组织起来并能适应这个环境的状态，这是很重要的问题。比如说生命的起源，生物是怎么产生的，在地球刚开始的时候并没有生物，是混沌的。在一片混沌的原始世界上，有高度组织、各部分协同的系统，有规则的各种空间结构模式是如何自动生成的？这都是当前研究的前沿问题。这种有序系统的形成带有一定的必然性，它又是如何在偶然性中展开的？反过来，对决定论力学运动的研究也发现，一些参数的微小变化能产生巨大的后果，可能出现混沌，差之毫厘，失之千里。偶然性也会在必然性中出现。

### 材料、能源和空间科学

材料工业是我国国民经济建设中的重要工业，也是非常重要的研究方向，材料可以说是所有工业的基础。预计智能材料、强场材料、仿生和有机功能材料、高强轻型复合材料和纳米材料等将大量应用。现在有些材料可以加入某些电子的技术，增加感知的能力。例如将来服装能够感知外界的温度，这种智能材料和仿生材料有某种关系。这种材料可以用在飞机上。飞机容易出事故，是因为出现很多裂纹。将一种材料涂在飞机的部件上，就可以感知其内部裂纹，预防事故。这些都是科学界正在研究的方向。室温超导材料一旦有所突破，将会改变电力、交通、传感、仪器、电脑等的面貌。这些材料都有可能在下世纪获得突破。

我们目前的能源是石油、天然气、煤等，这些能源储藏有限，有的还会带来很大的污染。如燃煤会产生温室气体和二氧化硫等有害气体，带来全球气候变化和酸雨。到下世纪中叶，必须用清洁的能源代替。我国也正在研究清洁煤的技术，如循环流化床，能够使燃烧过程更加完全、脱硫，这样的技术在我国正在小规模地进行研究。下世纪中叶，聚变能和太阳能应成为主要能源。西欧的托卡马克装置是世界上最大的研究聚变的装置，前不久首次在上世界上实现了热核反应，第一次达到输出的能源略多于输入的能源。通过国际的合作，美国、俄国、日本、西欧预计用 20 年左右的时间，要在世界上建设一个聚变实验反应堆。

在空间科学方面，卫星对地球的监控已可以观察到单个士兵的活动。卫星将对资源勘探、气候预报、战争预警、环境监测、全球通讯和定位等发挥重要作用。中国科学院遥感所在去年南方洪涝灾害时，提供灾情监测，很快确定洪水的面积及受灾范围，为防汛指挥部决策提供了依据。预计到下个世纪，人类还将开拓月球，做定居太空的试验。现在有一个国际合作计划，拟设立一个很大的航天站，可以较长时间地观测人类在太空的活动。

### 生命科学和认知科学

生命科学、认知科学和信息科学的结合和突破，不仅将回答生命和智力的起源，而且将实现用机器部分模仿人的脑力活动。由于集中了专家的经验 and 知识，机器可以比一般人更聪明。当然机器若想比全体人的智慧高现在看来是不可能的。因为机器是人创造出来的，机器的智慧也是人给的。人类的总体智慧会超越机器，但是个别人的智慧会低于机器。

先谈一下生命科学。每个成人都由一个受精卵发育而来。人的全部遗传信息储存于受精细胞内染色体的 DNA 中。人的遗传基因约 10 万个，每个遗传基因是由 A、T、G、C 四种核苷酸，按次序排列在两条互补的组成螺旋的 DNA 长链上。核苷酸总数达 30 亿左右，DNA 储存了制造蛋白质的信息，基因中由

三个密码字母组成一个氨基酸，许多不同氨基酸的排列形成蛋白质长链，再经过折叠而成有活性的蛋白质。DNA 犹如存储生命之歌的磁带。这里有一张用隧道扫描显微镜拍摄的 DNA 图像，可以看出它是双螺旋。和 DNA 密切相联的另一长链，称为 RNA，它也带有全部遗传密码，它能将信息由细胞核内带出来，在细胞质中制造蛋白质。最原始的生命可能由 RNA 产生。现在科学界在讨论到底是 RNA 还是 DNA 是最早的生命起源。DNA 可以生成 RNA，RNA 也可以生成 DNA，因为 RNA 也带有全部的遗传信息，它本身还带有生物酶的作用，很可能 RNA 是最早的生命体。现在世界都关注防治艾滋病，这要先了解艾滋病毒如何侵入人体的问题，人的免疫细胞是用来防御的，是抵抗外来病菌的。当免疫细胞被艾滋病毒侵袭时，病毒通过细胞膜进入，然后将病毒的遗传物质 RNA 放出来，复制成它的 DNA，再进入到细胞核中去，和细胞本身的 DNA 组合、复制，然后分离出来，组成一个全新的病毒。一部分组合成外壳，一部分就是病毒遗传物质本身，同时破坏了这个免疫细胞。

人如何由一个细胞发育而成？遗传基因如何启动和调控？各种器官和系统是如何按时间顺序和空间位置发育？细胞间信息如何传导？神经系统如何指挥、协同？疾病和衰老是如何发生的？这些都是今天生物学家在着重研究的问题。例如，一个正常的果蝇有两只触角。果蝇的发育是由它的遗传信息所决定的。科学家将它的遗传密码的位置掉换一下，改变了它的发育在空间的结构，使果蝇的足长到了它的触角的位置上。同样的情况在其它动物身上也可以实现，如把老鼠的脊椎骨放到尾巴上。遗传基因的排列次序对它的时间和空间发育是非常重要的。例如人的某些器官损坏了，能否重新启动他的基因，使其重新生长出新的器官，因为原来在人的发育过程中，基因都是启动过的，成人之后就关闭停止了。在正常的情况下，不能再启动。损坏的肢体或器官能否有可能再产生出来，在现在看来是科学幻想，但是也不敢说没有实现的可能。一个弄清人的全部基因排列次序的国际计划正在进行，在下世纪初，就可以把 30 亿个密码的排列情况，10 万个基因的情况研究清楚。

目前中国正在组织全国的科学家执行一个弄清水稻全部基因的计划。在这方面，日本比中国早进行几年，但是中国科学家以更高的智慧，在水稻基因图谱方面，发展了一种新的方法。中国科学家还与美国科学家合作，从水稻基因中分离了抗性基因，该基因是水稻基因组研究中第一个采取定位克隆战略分离的基因。这个结果已经超过了日本的进展水平。预计中国可以在世界上第一个得到全部水稻基因的图谱。

再谈一下认知科学。人脑有百亿个神经元，相互通过千万亿个突触相联接，分布在两毫米厚的大脑皮层上。人脑是如何工作的？人的意识、情绪、意志、感情、理智、智力是如何由脑神经细胞产生的？这个问题不仅具有重大的科学价值和应用前景，而且有重大的哲学价值。这是唯物主义和唯心主义最后争论的焦点。人的意志、情绪等，是由物质所产生的，还是独立的存在。研究这个问题是非常困难的，但现在已经开始进行，而且有了一些初步的进展。预计下一世纪会有很大发展。

#### 未来的生物技术

生命科学的发展对我们的生活有非常密切的关系，未来的生物技术对农业、环境、健康、化工等都是非常重要的。

利用生物技术将来可以由转基因生物生产食物、药品和移植器官。将来植入人体的各种智能芯片可以提高记忆，恢复视力、听力等。现在恢复视力

的芯片已经发明出来，并植入人体。还可采用基因疗法治疗肿瘤、心血管等的常见病。

将来可以用转基因植物直接生产塑料和化工原料。现在我们的化工厂污染也很厉害，用生物来直接生产化工原料是可能的。生物酶比化学的催化剂更有优越性，因为生物酶常常在常温的条件下进行催化。我们人体就是一个大的化工厂，是靠生物酶来作用的。而很多化学催化剂需要很高的温度，还会带来很多问题。用生物酶作催化剂发展化学工业，用生物清理垃圾和清除污染，用生物防治代替化学农药，用经微生物处理的有机肥代替化学肥料，这是发展方向。现在化学农药污染是相当严重的，前不久有消息说，广东有些人因食用被污染的蔬菜而生病，这就表明我们目前使用的农药毒性太高，将来要解决这个问题，很重要是采用生物防治的办法。

生物技术也可以应用于电脑产业上，生物芯片和生物电脑能更好地模仿人脑的功能。

还可让具有自组织、自适应和自修复功能的仿生材料和器件成为商品。例如人的骨骼有自修复的功能，那么，机器的零部件损坏了，能否自己识别、自己修复，看来这也不是完全不可能的。

### 农业和医药

将来农业生产将实行工厂化、信息化，不靠天，肥料有机化，农药生物化。高产、优质、抗逆性强的转基因动植物将成为重要的农作物品种和生产药物及化工原料的“机器”。基因工程药物和基因疗法将普遍使用。转基因异种器官移植将成为可能。这里有一张转基因花卉的图片，用不同的转基因，可以使花卉只生长花瓣、花蕊或者花叶。将来可以用转基因的方法生产出各种各样的植物以达到高产优质。

### 人口、资源和环境

恩格斯在《劳动在从猿到人转变过程中的作用》中说，“我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利。对于每一次这样的胜利，自然界都报复了我们。为了得到耕地，把森林都砍光了，但是他们想不到，这些地方今天竟成为荒芜不毛之地。”世界上重视环境问题是在本世纪中叶，而恩格斯早在 100 年前就提出环境问题，可见他有很高的预见性，也说明了哲学对科学的重要指导作用。

人口过多、资源相对不足、环境退化三者相互影响，恶性循环，是人类面临的巨大挑战。可持续发展战略是唯一的选择。它要求控制人口增长，节约和合理使用资源，保护环境，消除贫困，普及教育，发展科技和文化，提倡文明、道德和适度消费等。这是世界性的问题，也是中国的问题。

#### (一) 现状

和世界人均相比，目前我国可耕地为 1/3；淡水为 1/4；森林为 1/6；草地为 1/3；矿产为 1/2；石油、铁矿石、钾盐、铜等缺少；资源利用率不高，浪费严重。

我国环境问题非常严重，水土流失面积达 179 万平方公里，每年流失表土达 50 亿吨；沙化面积近 150 万平方公里；森林覆盖虽有所上升，已近 14%，但仍远低于先进国家水平；湖泊面积日益缩小，主要河流和湖泊污染日益严重；我国每年排放二氧化硫 1800 万吨，烟尘 1400 万吨，废水 360 亿吨，废渣 6.17 亿吨；长江流域已经普遍出现酸雨。城市空气污浊，水质不洁，农药残留，白色污染有增加的趋势。

我国自然灾害也日益增加，如表所示：

年份	受灾面积 (万公顷/年)	成灾面积 (万公顷/年)
1952—1959	2450	1047
1960—1966	3760	1773
1970—1979	3767	1158
1980—1989	4155	2038

## (二) 期望的情况

将来全球变化的不利趋势将得到控制，大气和河流将恢复自洁功能，这是我们所要求的，也是可以达到的。还应大规模治理沙漠、荒漠和荒山，以改变气候和改良生态。要使环境意识普及，绿色科技和绿色产品占据统治地位，可持续发展成为共识，人类应以适度消费作为健康的生活方式，这些对我们国家非常重要。我们还在发展之中，但超前高消费意识已经在一部分人中间滋长，这是完全不符合我国持续发展战略的。

### 信息科技

微电子、电脑、各种仪器的迅速更新，将推动科学技术、生产、教育、传媒和服务业的继续快速发展，成为生产力中发展最快、带动面最大的科技。信息科技将从根本上改变社会的生产方式和生活方式。信息科技的重要性可以反映在一句古语上，即“知己知彼，百战不殆。”在信息工业的带动下，工业生产过程和产品将实现数字化、网络化、集成化、智能化、移动化、个性化，以及参与式和交互式。在信息科技中提出的虚拟现实，在人的参与下用计算机来模拟现实中发生的情况，将改变教育、训练、研究、设计、模拟、实验的方式。

## 科技发展对社会的影响

### (一) 信息社会的来临

信息高速公路的建成标志世界信息社会的到来。最近世界上不少国家都在建设信息高速公路，我国的金桥工程也在建设中。信息网络将把国家、地区、单位和个人联成一个整体。世界上任何地区发生的政治、经济、社会、生态的事件都会立刻产生全球影响。世界上已经没有独善其身的乐土。

实时观测和信息反馈系统，使集中调控、市场监视和灾害预警成为可能。利用信息网络的并行工程将设计、试制、生产、销售一体化；在新产品开发中实行并行工程，达到和超过这些功能，将在设计的过程中不断反馈生产部门、销售部门的意见，设计出来的东西用虚拟现实，送到消费者面前加以评价和选择，然后改进和实现小批量、多品种的生产，这样将大大缩短新产品上市的时间。一部分工厂将实现远距离电脑控制，全自动化、无人现场操作的生产。所以，以机器部分代替脑力劳动将开辟生产力大发展的新产业革命，其意义和影响将大于以机器代替体力劳动的第一次工业革命。

### (二) 信息社会中的家庭

马克思在《1844年经济学哲学手稿》中说，自然科学却通过工业日益在实践上进入人的生活，改造人的生活，并为人的解放作准备。

在信息社会中，家庭中配备综合事务处理工作站，集成高清晰度电视、高保真音响、数字电视电话、传真、电子邮件、电脑等功能，通过信息高速

公路与工作单位、学校、图书馆、博物馆、研究所、新闻库、电视库、商店和服务单位进行交互式联系，解决生活和工作中的各种问题。在这种情况下，集中办公已无必要，可以通过电视电话办公，实现协同和调控。家庭将成为生活、学习和娱乐的共同场所。家庭再次成为社会最重要的基本单元。在这样的家庭里，妇女将获得彻底的解放，将更多地参加工作和社会活动。儿童的家庭教育也将变得更为重要。

### （三）未来的掌上计算机

现在的笔记本电脑已经可以有几亿次的运算速度，有几千兆的存储量。未来掌上计算机将达到和超过这些功能，将配备数字电话和全球定位系统，连通国际信息高速公路，对工作进行远距离实时控制。能进行文件处理，信息传送、储存、分析和判断，语音识别和控制，实时翻译等。它还是个人身份证、信用卡、会员证、票证等；还可实施家庭电子管理和安全预警，电子定货，购物和结算；它同时是学习课本和辅导教师，又是微型电视，收音和游戏机；还可以对人们实行健康监护。比如加装各种传感器，测量血压、脉搏等。

### （四）信息社会的景况

工业将实现由顾客参与设计的多品种、少批量的生产，满足顾客的不同需要。与过去不同的是顾客将参与设计，如购买汽车，可先自行对样式、设备要求进行设计，然后定货，交付使用。家庭购物也可以通过电视进行交互式对话。第二产业将和第一产业一样，产品越来越丰富，但就业人数越来越少。将来以知识和高新技术武装的，范围广阔的服务业将成为主要的就业途径。而就业人员的知识水平和知识更新的速度成为最重要的竞争因素。终身学习和成人教育将是社会的重要职责。

有人预测，知识将代替权力和资本成为最重要的社会力量。普及教育和科技是消灭贫困和两极分化的根本出路，也是消灭城乡差别，脑力劳动和体力劳动差别的根本途径。从这些都可以证明邓小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的论断的深远意义。

## 科技发展对社会精神文明的影响

科技不仅是生产力，而且是强大的精神力量，科学不仅提供关于客观世界运动和发展的规律性知识，而且提供了系统的认识世界和改造世界的方法，提供了在社会中对待事物的科学态度和处世立身的科学精神。恩格斯在《英国状况》中说，“科学和哲学结合的结果就是唯物主义”。今天在社会上弘扬科学精神，提倡科学态度和科学方法具有重要的现实意义。科学态度的基本要求是严肃认真，一丝不苟，客观公正，实事求是。科学方法则基本上就是毛主席在《实践论》和《矛盾论》中所论述的方法的具体化。

毛主席在《实践论》中说，“必须经过思考作用，将丰富的感觉材料加以去粗取精，去伪存真，由此及彼，由表及里的改造制作工夫，造成概念和理论的系统”。我想就毛主席所说的去伪存真谈点看法。要做到去伪存真是很不容易的，因为现实中存在有意地作伪，如动物的保护色，军事上人为的伪装和隐形，制造假相，散布虚假信息等。同时不掌握唯物论的认识论，不掌握科学方法和基本的科学知识，就会轻易相信未经严格证明的表演等，就很难存真。所以，耳听为虚，眼见也未必为实。

自然科学通过精确的仪器，在严密控制的条件下，进行可重复和可比的

实验，同时对比、分析和综合其他有关实验结果，并利用数学方法进行严格的逻辑推理和误差分析，以求得正确的认识。这就是说，要严格控制条件，进行可以重复和可比的实验。例如实验新药，要知道它的治愈率有多高，一定要作双盲实验，即找两个条件相当的人群，在不知情的情况下，一个给药，一个给安慰剂，经过实验后，才能确定真正的疗效，否则结果是不可靠的。

科学精神是彻底的唯物主义精神，它的要点可以概括如下：

科学要求认识客观世界的运动规律，因此客观、求实是科学精神的首要要求。科学认为世界的发展、变化是无穷尽的，认识的任务也是无穷尽的。因此，不断求知也是科学精神的要求。

科学要追求真理，不盲从潮流，不迷信权威，不把偶然性当做必然性，不把局部看作整体。未经严密的科学方法所作的反复实验证明和严格的科学推理，不轻易相信所谓的新发现。科学的怀疑精神也是科学精神的组成部分。

科学认为具体的真理都是相对真理，都有适用的条件和范围，因而是可以突破的。新的发现将拓广原有的真理，使之适用于更大的范围和更少的条件。创新精神是科学精神的重要组成部分，相对论和量子论都推广了牛顿力学，并适用于更大的范围。

科学又认为，相对真理是不断逼近绝对真理的，绝对真理是由相对真理构成的，在每一具体真理适用的范围和条件之内，它是不能违反的，新发现的真理必须包含原有的真理内容。例如，相对论发展了牛顿力学，但当运动速度变小时，相对论就自动趋于牛顿力学。继承是科学精神的组成部分。现在有很多新发现是不讲继承的，它们违反了许多反复证明过的真理，只用自己的表演来说明新的发现。这是不符合科学精神的。

科学已成为社会三大实践活动之一，是社会有组织的群体活动，因此团队精神、民主作风、百家争鸣都是科学精神的组成部分。科学不仅是认识世界客观规律，创造新技术和新知识，而且要参与社会的变革，促进社会的进步，要从理性的认识发展到变革的实践。

毛主席在《实践论》中曾经讲过一段非常精辟的话，“通过实践而发现真理，又通过实践而证实真理和发展真理。从感性认识而能动地发展到理性认识，又从理性认识而能动地指导革命实践，改造主观世界和客观世界。实践，认识，再实践，再认识，这种形式，循环往复以至无穷，而实践和认识之每一循环之内容，都比较地进到了高一级的程序，这就是辩证唯物论的全部认识论，这就是辩证唯物论的知行统一观。”

### 发展科学的动力

科学本身不仅要在学科前沿，而且更要在经济和社会发展中获得推动力量，才能不断向前发展。我们必须从科教兴国、振兴中华的历史召唤中汲取力量，鼓舞全国科技、教育界投身经济建设和社会发展的主战场，并在科学前沿上努力拼搏，才能赢得中国科技事业的再度辉煌。恩格斯说，“社会一旦有技术上的需要，则这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。”因此，我们科技界一定要把主要的力量投入到促进国家发展和经济建设的主战场上去，这不仅是社会的需要，也是科学自身发展的需要。

在科学的发展中，国际合作和交流是非常重要的。因为科学技术没有国界，发展科技是人类共同的责任。开展国际合作和交流，努力学习和引进国外先进技术是必要的，但是学习和引进是为了创新，为了自立于世界民族之

林。中国作为世界人口最多的国家，还应当为世界科技发展作出应有的贡献。科学家是有祖国的，中国科学家一定要努力让中国工业建立在本国的知识产权基础上。

马克思在《机器，自然力和科学应用》中说，“科学分离出来成为与劳动相对立的，服务于资本的独立力量，一般说来属于生产条件与劳动相分离的范畴，并且正是科学的这种分离和独立成为发展科学和知识的潜力的条件。”所以科学从生产中分离出来，成为独立的社会实践活动，是社会进步的要求，科学研究的时空范围和对物质结构的深入探索都远超出了当今生产的实践，科学的超前发展不断开辟着新的生产领域。科学和经济的紧密结合是正确的，是必需的，但把科学活动都归为经济活动则是不正确的。

马克思在《剩余价值理论》中还说过一段很重要的话，“对脑力劳动的产物——科学的评价，总是比它的价值低得多，因为再生产所必要的劳动时间，同最初生产所需要的劳动时间是无法相比的。”这段话说明了创造新知识是一项艰苦的劳动，社会应当为此准备必需的物质和精神条件，要有配备先进仪器，集中优秀人才的研究基地，要有足够的运行经费，要有促进创新的交流制度和学术气氛。掌握知识产权的多少将决定一个国家的竞争实力，决定它在世界上的地位。希望大家从马克思的话里能够了解到创新是非常不容易的，创新知识的价值远远超过去模仿、引进的知识价值的本身。

### 普及科学，破除迷信

从历史上看，辛亥革命后，社会上宣扬鬼神的迷信盛极一时。上海有灵学会，出版《灵学丛志》；北京有悟善社，出版《灵学要志》；当时，风水算命，卜卦，画符，念咒，扶乩，炼丹，运气，迎神，说鬼，无奇不有，横行国中。在李大钊、陈独秀的发起下，《新青年》杂志高举科学和民主的旗帜，对迷信活动进行了有力的批判和反击，迎来了“五四”新文化运动。一般来讲，在社会变革的时期，人们不了解发展的趋势，不能掌握自身的命运，或发横财，或遭破产，都有神秘和不安定感，在缺少精神支柱时，人们感于今生，期于来世，以宗教信仰或迷信活动来寻求心理安慰，都有一定的社会根源。时下迷信的泛滥与辛亥革命后出现的情形何其相似，就说明了这一点。

目前，我们破除迷信需要加强精神文明建设，对用迷信活动诈骗的行为要进行法律制裁和舆论谴责，将普及教育和科学知识等多方面工作相配合。这是一项长期的系统工程，普及教育和科技知识是根本的措施，要坚持不懈地做下去。



# 当代工程技术发展趋势及 应引起重视的几个问题

朱光亚

中国工程院

朱光亚 原子核物理学家。1924年12月25日生于湖北宜昌。1945年毕业于西南联合大学。1949年获密执安大学物理学博士学位。历任北京大学副教授，东北人民大学教授，北京第九研究所（后改为第九研究院）副所长、副院长，国防科学技术工业委员会副主任，国防科学技术工业委员会科技委副主任、主任。1980年当选为中国科学院院士（学部委员）。1994年被选聘为中国工程院院士，当选为首任院长。先后当选为中国核学会副理事长，中国科协副主席、主席，中国共产党中央委员会候补委员、委员，中国人民政治协商会议全国委员会副主席。是我国核科学技术的主要开拓者之一，在我国核武器事业的发展中起了关键作用，作出了极为卓越的贡献。

1980年前后，钱学森同志在论述现代科学技术的特点和体系结构的几篇著作中指出，工程技术是现代科学技术体系中的一个分支。它是综合应用技术科学、自然科学和社会科学的知识，使自然资源最佳地为人类服务而发展起来的一类专门技术。工程技术直接为经济建设和社会发展作贡献，它的任务是改造客观世界并取得实际的成果。近几个世纪以来，人类社会的各个领域，都在不同程度上受到工程技术发展的影响。进入20世纪，由于自然科学领域的重大发现和技术科学领域的不断创新，工程技术发展的步伐加快了，对经济建设和社会发展的影响也更为显著。

## 一、当代工程技术发展的五大特点

与过去相比，当代工程技术发展有五大特点。这五个特点反映了当代工程技术发展的基本趋势。

### 1. 信息技术革命在产业化过程中的作用日益增强

人类社会赖以生存和发展的三大要素是物质、能量和信息。在农业社会中，人们对物质的认识比较深刻而对能量的认识较少；在工业社会中，人们又普遍认识到了能量的重要性。现代工业社会可以说是建立在物质和能量的基础之上的；而以往的产业革命，可以说是在挖掘劳动资料的机械、物理和化学属性的潜力。但是，与以往产业革命不同的是，在推动当代社会进化的能量流、物质流、信息流中，信息流起着越来越重要的作用。

1938年，发现铀原子核裂变。曾有预言：人类进入了原子能（核能）时代。20世纪虽有巨大进步，但未能实现这一乐观预计。据1994年终IAEA统计，核电在各国发电量中所占比例：法国75.29%，瑞典51.13%，韩国35.48%，西班牙34.97%，日本30.70%，美国21.98%，加拿大19.07%，我国为1.49%。

1957年和1961年，前苏联曾先后成功地发射了世界上第一颗人造卫星和发射第一艘载人飞船；1969年7月美国实现宇航员登月。也曾有预言：人类进入了空间时代。现在看来，空间技术虽有重大进步，但发展亦有限。而且，正是由于信息技术的发展进步，通信、广播、遥感、气象卫星等产业才取得了迅速扩大的市场和效益。

1958 年研制出第一块硅集成电路，从此信息技术由电子管、半导体器件跨入以集成电路为基石的阶段而飞速发展。专家们一致认为：近 30 年来，信息技术在世界新技术革命中一直处于核心地位；它不仅作为一项独立的技术而存在，还广泛渗透于其它各个技术领域，成为它们发展的基本依据和重要手段。电子信息技术能优化现代生产过程的控制、物质流动过程的控制和金融资本流通过程的控制，使得计算机乃至更小的信息处理装置能够嵌入到控制生产过程的装置或设备之中，从而大大提高能源和基本物质的利用率，从根本上促使工程技术与生产力更为紧密地凝结在一起。这种倍增器的作用和效能，已成为越来越多人们的共识。

仅举电子信息技术在第三产业中一个应用实例作点补充，即正在迅速发展的信用卡由磁带型向芯片型转变。芯片型信用卡可携带的信息量比磁带型更大（10~100 倍），能执行身份证、信用卡、通电话付款、乘公共车付款、自动付款机用卡、医疗用信息卡等多种功能。芯片型信用卡（或称“灵巧”卡）是由电话通讯的需要引发的。美国通话费用很低，为防止被人滥用，只需附装磁带型识别、确认器（reader）就足够。而欧洲电话费用高，欺诈、盗用率高而且呈上升趋势。80 年代中期法国即开始发展芯片型“灵巧”卡，以替代磁带型卡，发行量已达 2000 万个。而代替现金和支票进入商业流通中的付款用“灵巧”卡已开始在美国、德国、澳大利亚、香港等国家和地区应用，发行量达到百万量级。据经济学家估计，在各种商业交易中使用付款“灵巧”卡后，可节约 4%。而且现金不呆滞在个人身边而存在银行的利息也是可观的。

信息和知识具有全球扩展、光速传输、非线性效应、用之不竭、多方共享等独特功能，已成为信息时代的生产要素。正象海湾战略和波黑冲突初步表明的，信息和知识在战争中能发挥重要作用，是重要的毁灭（杀伤）力量，也是力量倍增器。信息技术改变了过去单纯以计算有多少装甲师、航空联队、航母战斗群来衡量军事能力的传统观念，现在还必须考虑一些无形的力量，如计算能力、通信容量和可靠性、实时侦察能力……战争实践表明，“计算机中一盎司集成电路芯片产生的效应也许比一吨铀的作用还大。”

总之，信息技术正在改变原有社会产业结构和经济结构，改变人们的劳动方式和生活方式，改变社会生产组织和管理体制，成为决定生产力发展速度和经济竞争力高低的关键。这是当代工程技术发展的最为重要的特点。

与世界发达国家相比，我国的信息科学技术尚有较大的差距。我国目前还处于工业化阶段，能源和物质利用率低。例如，我国目前能源的有效利用率为 30%，而发达国家为 40~50%；我国钢材利用率为 60%左右，而发达国家通常在 80%以上。由此可见，我国目前的经济增长在很大程度上是资源消耗所推动，技术进步的推动作用还比较小。当然，这也说明我国经济增长的潜力很大，依靠信息技术、制造技术、新材料技术的进步，就能使我国经济持续地以较大幅度增长。

## 2. 微观尺度生产领域制造技术的演进与革命方兴未艾

微观尺度生产领域制造技术主要涉及微电子技术、微机械技术和纳米级制造技术。

（1）微电子技术的发展，为信息技术革命提供了最坚实的物质技术基础

微电子技术已经历了大规模（LSI）、超大规模（VLSI）、特大规模（ULSI）集成时代，并于 1995 年进入吉规模（GSI）集成时代。“吉”是千兆或十亿

的意思，即集成度达到 256 兆位动态随机存储器，在 350 平方毫米的芯片上集成 5 亿个元件。已上市的这种产品为大于 600 万个元件，相应的微细加工尺寸为 0.35 微米。这种情况还在继续，预计上千万个元件、微细加工尺寸达到 0.25 甚至 0.16 微米的芯片不久即可上市。半导体材料的发展由最初的锗到硅再到砷化镓，生产工艺经历了平面型工艺，分层工艺，图形产生（光刻）以及硅平面型技术的标准工艺和集成电路经济规模的生产制造工艺的演进过程。

计算机已经改变了人类社会的面貌。推动这场正在进行中的革命的动力就是微处理器。由于生产工艺的不断进步、创新，从大规模集成电路芯片研制成功的 25 年以来，其集成度每隔 18 个月就翻一番，而每隔 3 年就能以同样的价格买到性能比 3 年前高 4 倍的芯片。这种状况似乎是罕见的。然而，随着微细加工尺寸达到深亚微米，目前使用紫外线刻制电路的光刻技术会出现一些技术障碍（最高分辨率受到光线波长的限制）。转用 X 射线来生产集成度更高的芯片，制造工艺装备更新又将要求巨额投资。因此，不少科学家预测，今后微电子技术的发展从本质看将是渐进性的，而不再是革命性的。即便如此，到 2020 年，大规模集成电路芯片仍将使微处理机的软件发生革命性变化，其计算能力十分惊人。

### （2）微机械技术会像微电子器件一样给社会带来深刻影响

微机械技术是指在几厘米以下及至微米尺度上制造微机械装置。研究者们利用微电子材料和工艺制作了微型梁、槽、齿轮、薄膜和微马达。这种马达可用来移动原子或开闭阀门抽取微升量级的液体。像晶体管一样，这些微米级机械可同时制作上百万个。

电子计算机和集成电路威力巨大，但究其实质，只不过是电子的运动进行通断控制。在今后 50 年中，微机械装置将为电子系统提供通向外部物质世界更加直接的窗口，使它们可以感受并控制运动、光、声、热及其他物质作用。

微机械与电子系统的结合（被称为机电系统），将在众多的科学和工程领域取得巨大的技术进步，使得各种各样的微型装置得以面世。例如，美国加州大学的一个工程师小组想要展示一下机电系统最终是如何影响空气动力学设计的，他们概述了替换机翼的相当大的活动表面的技术概念，计划在翼表面镶上几千条 150 微米长的平板，静止时它们平铺在机翼表面；加电压时，平板一端从表面升起（最大角度达 90°），因而能控制流过机翼横截面的空气涡流。传感器可以监测机翼的高速气流并发出信号以便调节平板的位置。这些活动的平板（即作动器），具有类似于常规飞机巨大襟翼微观改型相同的功能。翼面控制的微调将使飞机转弯更快，飞行更平稳，并且因飞行效率更高而节省燃料。由这种“灵巧蒙皮”获得的附加气动力控制能力，可能导致飞机设计的根本性变化：去掉襟翼、舵甚至机翼，使飞机从“带翼圆柱体”变成“飞翼”。

专用集成微型仪器的原型已可以探测局部地区和遥远地区的环境。专用集成微型仪器将引起航天器和航天系统技术的深刻变革，将可能产生重量小于 0.1 公斤的纳米卫星。用五六百个这样的卫星覆盖全球，完成监视和信息转发；再用无人机等撒布神经系统、植入了微机器人电子失能系统的昆虫去进行侦察、破坏甚至杀伤……胜似神话，不是神话。

### （3）纳米级制造技术将是微观尺度生产领域另一惊人发展

纳米技术是指在 0.1 ~ 100 纳米 ( $10^{-9}$  米) 尺度上研究和利用原子和分子结构、特征及其朴素作用的高新技术。它的最终目标是直接以分子、原子在纳米尺度上制造具有特定功能的产品, 实现生产方式的飞跃。自 1990 年 3 月在美国召开世界上首次纳米技术学术会议之后的短短几年间, 这个领域取得了日新月异的新成就。研究者们认为, 作为纳米技术重要组成部分的纳米电子学, 将是纳米技术发展的主要动力, 它将立足于最新的物理理论和最先进的工艺手段, 按照全新的概念来构造电子系统, 超越传统的极限, 实现信息采集和处理能力的革命性突破。例如, 有关专家估计, 利用纳米技术将可能使美国国会图书馆的全部藏书存储在一个直径为 0.3 米的硅片上。

微米级制造工艺包括光刻、刻蚀、淀积、外延生长、扩散、离子注入、测试、监测及封装。纳米级制造包括微米级制造中的一些技术的延伸, 如 X 射线、电子束、离子束刻蚀, 但也包括对材料进行原子量级的修改与排列的技术。目前这种技术仍处于实验室研究、开发阶段。

纳米技术的另一诱人研究方向是发展分子器件和生物器件。自然分子机器 (如核糖体) 的普遍存在导致人们设想人工分子机器, 像分子装配机器、基于分子装配的复制、机械纳米计算机和细胞修复机器等。更重要的是, 生物分子制造物质的真正优点是它们能自我组装。研究人员希望未来能研制出由单个分子组成连线 and 晶体管的分子电路, 最终是实现分子电脑。

在纳米技术中, 纳米电子学与纳米生物学既相互联系又相互促进。最近, 用原子力显微镜对 DNA (脱氧核糖核酸) 分子链上的任何确定部位进行了分子切割。这类手术再结合分子操纵, 是迈向在纳米尺度上改选基因的重要进展。第一代分子机器是生物系统和机械系统的有机结合体; 第二代分子机器应是能直接从原子、分子装配成有一定功能的纳米尺度的装配装置, 第三代分子机器将是含有纳米计算机的、可人机对话的并有自我复制功能的纳米装置。分子机器一旦研制成功, 它能在 1 秒钟内完成数十亿个动作, 用足够多的分子机器就可以在几秒钟或几分钟内完成现在几天或几个月才能完成的工作。

### 3. 材料技术成为不同工程领域产业化的共性关键技术

当代每一项重大新技术的出现都有赖于新材料的发展。对国民经济、国防和现代科学技术具有重要作用的半导体材料就是一个明显的例证。

据美国商业部 1990 年发表的一个报告预测: 到 2000 年, 全世界包括超导体、先进半导体器件、高性能计算机、新材料等 12 项新技术的世界市场总营业额将达到 1 万亿美元, 其中各种新材料将达到 4000 亿美元, 占 40%。

目前世界上已有传统材料几十万种, 而新材料的品种正以每年大约 5% 的速度在增长。90 年代新材料的发展方向是高功能化、超高性能化、复合化和智能化。

材料技术的发展趋势归纳起来主要体现在以下两个方面:

一是功能材料的小型化、信息化。功能材料的使用性能主要是光、电、磁、热、声等功能性能, 它是各种高、新技术蓬勃发展的基础和先导。例如, 目前硅材料仍是大规模集成电路的基石。然而, 由于砷化镓有更高的禁带宽度, 其器件可用于更高的工作温度, 运算速度比硅器件高好几倍。因而砷化镓比硅更有发展前景。而且, 用砷化镓材料研制的器件具有重要的光电效应, 可使其成为激光光源, 这是实现光纤通信的关键。更重要的是由于原子及分子量级加工技术的发展, 如分子束外延 (MBE)、金属有机化合物汽相外延

(MOVPE)、液相外延(LPE)等方法,可将两种(或两种以上)不同半导体(或同种半导体的N型和P型)极薄层交替排列组成周期阵列超晶材料。例如,在砷化镓基片上,把镓、铝、磷、砷等相结合为多层堆积,通过不同掺杂,达到控制能带结构、带隙、能态密度、光学吸收系数、折射率等多种参数,从而获得多功能材料。这些具有优异的电、磁、光、声或超常的力学、热学性能的新型功能材料,种类多,用途广且自成体系,对信息技术及其新兴产业的发展起到了极大的推动和催化作用。

信息材料中还包括敏感材料、光导纤维材料、信息记录材料等,它们分别是信息探测传感器、信息传输和信息存取必不可少的材料,在民用和军用方面都大有可为。

新能源材料有光电转换材料、超导材料、高密度储氢材料和高温结构陶瓷材料,它们是为开发新能源而研制成的。例如,光电转换材料中,国外非晶硅薄膜于1990年在不聚集时的光电转换率达23%。

二是结构材料的复合化。结构材料在产业化中一直发挥至关重要的作用,从日常民用和工业、建筑,到汽车、飞机、卫星、火箭等,所有这些均以某种形式的结构构架获得其外形、大小和强度。今天汽车用的大部分结构材料为钢,飞机为铝合金,它们有其自身确定的强度/重量比值,强度的大小直接与重量有关,这在工程设计上是矛盾的。当代新型结构材料的发展表明,追求高强度、高模量、耐高(低)温和低密度材料的方向就是结构材料的复合化。目前所谓的先进复合材料,一般是指具有比强度大于 $4 \times 10^6$ 厘米和比模量大于 $4 \times 10^8$ 厘米的结构复合材料。

结构复合材料由能承受载荷的增强体和能连结增强体成为整体材料,同时又起传递力作用的基体构成。增强体包括各种玻璃、陶瓷、碳素、高聚物、金属以及天然纤维、织物等,基体则有高聚物、金属、陶瓷、玻璃、碳和水泥等。通过复合工艺组合而成的这些新型材料,既能保留原组成材料的主要特色,又能通过复合效应获得原组分所不具备的性能,还可以通过材料设计使各组分的性能互相补充,从而获得优越的性能。以飞机为例,军用飞机已在承受轻载的结构中采用了复合材料;最近投入使用的波音777客机的结构重量中,9%是由复合材料制作的,相当于波音757和767客机的3倍。今后10年内,飞机结构设计师将与材料学家共同来降低机身和机翼的重量,一种很有前途的材料是铝锂合金,与铝合金相比其密度较低,强度更高,正因为如此,欧洲空中客车公司的A330和A340客机,其机翼前缘段就采用了铝锂合金。据报道,Alcoa公司还正在研制一种新的铝锂合金,其抗裂韧性要比现代的铝合金提高1/3以上。

复合材料设计中的仿生技术也是近来发展较快的一种技术。生物体(或生物材料)绝大多数是复合材料。以竹为例:管状纤维分散于基体中,由表面到里层——由细、密到粗、疏,分层螺旋状交替排列。另一例是鲍鱼壳,它是一种陶瓷基复合材料,由多层交错的碳酸钙(95%)和已知是控制碳酸钙生长的一层蛋白质薄膜(5%)组成。其断裂韧性比单块碳酸钙高10倍。人们按照这种结构由碳化硼和铝薄层构成的高温陶瓷仿制品,其断裂韧性比普通碳化硼—铝陶瓷合金高4倍。

材料发展中的一种新趋势是结构材料和功能材料的互相渗透,即结构材料的多功能化和功能材料的结构化。这正是材料发展中的综合集成。

除了上述材料技术两个方面的发展趋势外,还有以下两点值得注意。一

是高温氧化物超导体的发现和进展。1986年，伯诺兹和缪勒发现临界温度为35K的镧钡铜氧化物超导体，在科技界引起巨大反响。不久液氮77K温区钇钡铜氧化物超导体被发现，随后短短几年内共找到100多种氧化物超导体，其中临界温度最高的已达135K。虽然这种高温超导机制还有待深入探讨，但在应用研究上已取得不少重要进展。例如，现在已可以制造长度超过1公里的氧化物高温超导体长线，其临界电流密度超过每平方米1万安培。预期在继续研究克服若干技术、工艺障碍后，这种高温超导材料可在输电和磁悬浮等技术方面得到应用。

另一前沿领域是纳米材料，即晶粒尺寸一般为10~100纳米（ $10^{-9}$ 米）的材料。由于晶粒尺寸减小，其比表面能变化，使其对光、电、机械应力作用的反应能力与微米级、毫米级晶粒有很大不同，用纳米材料制造的成品具有一系列优异性能。例如，由纳米晶粒制成的铜，强度比通常的铜制品高5倍；纳米陶瓷制品与通常的陶瓷相比，能抗破裂。近年来国外已建立有专门经营纳米材料与技术的公司。存在的问题是纳米材料制备技术的产率还有待改进、提高。

#### 4. 生物技术为农业、医药、化工、环保和国防的发展带来重大变革

生物技术是应用于有生命物质的技术。可分为传统生物技术和现代生物技术两大类。人类几千年来使用的酿酒、制酱、育种等是传统生物技术。近20年来，随着与生物技术相关的众多基础理论和技术以及试验手段的发展，传统的生物技术逐步走出被动、低效的状态，而发展成主动、高效的现代生物技术，步入高技术领域。

传统的生物技术因应用对象、目的的不同而分为发酵工程、细胞工程、酶工程和遗传育种工程几大发展领域。现代生物技术，按照现代高技术丛书《生物技术》卷编著者们的表述，是指运用现代生物科学、工程学和其它基础学科的知识，按照预先设计，对生物进行控制和改造，或模拟生物及其功能，用来发展商业性加工、产品生产和社会服务的新兴高技术领域。在现代生物技术中，有两项尤为引人注目，即基因工程技术（也叫DNA重组技术）和蛋白质工程技术。前者是随着生物学特别是分子生物学理论的发展和当代各种尖端技术在生物领域的运用而诞生的一种具有划时代意义和战略价值的高技术。它的产生彻底改变了传统生物技术的被动状态，使得我们能够按照自己的意愿改造生物种属。

世界上至少有200万种生物种属，生命现象的表现形式虽各不相同，但构成生命的物质基础都是一致的，即都是蛋白质、酶、核酸等大分子。生物种类之所以不同，就在于组成细胞中主要遗传物质DNA的基因不同。正由于此，有可能通过改变生物的基因组成，人为地改变生物的遗传特性，按照人的需要创造新的物种。

改变基因组成可以采用二种方法。一种是将不同生物体内的DNA分子取出，进行体外加工，构成新的重组DNA分子，然后再放回受体细胞内，使外源基因得到表达。这就是“基因工程”技术。另一种是通过移植染色体或细胞核，而达到转移基因，从而改变生物基因组成的目的。这就是“细胞工程”技术。通常将这二种工程技术称为遗传工程技术。

蛋白质工程于本世纪80年代初发展起来，它起源于细胞中RNA（核糖核酸）催化作用的发展。这一发现表明，RNA不仅是携带遗传信息的分子，也是一种生物催化剂。可借助现代科学技术手段，如计算机图像显示和辅助设

计等，提出新分子设计方案，以获得全新的蛋白质。

运用以基因工程为主导的现代生物技术可使许多领域产生前所未有的变革。例如，可为人类生产出各种动物蛋白、激素药物和抗病疫苗；可为谷物类植株根部固氮，从而大大提高粮食产量；可从根本上治愈各种遗传病；可逐步解决环境问题；还可使一些生物产生甲烷、氢气等可燃性气体，增加石油产量等等。

至今，生物工程应用于工业化生产的，主要是微生物。微生物具有比表面积大（代谢活性强）、转化能力强、繁殖速度快（20分钟一代，24小时可繁殖成 $4 \times 10^{20}$ 个）、变导与适应性强、分布范围广等优势。应用于能源工业，通过微生物发酵或固相化细胞或酶的技术，可将绿色植物秸秆，木屑，工农业生产中的纤维素、半纤维素、木质素等废弃物转化为液体和气体燃料（酒精和沼气）。应用于冶金工业，发展出了细菌冶金技术，如利用氧化亚铁硫杆菌的氧化作用，可从含硫、砷矿化物的金矿石中除去硫、砷，浸取黄金。据报道，加拿大建有日处理100吨含金矿石的工厂，提取率近100%；还可利用某些微生物的聚集和吸附黄金的能力。

用于化学工业，则产生了生物降解塑料技术。在一定条件下，如光、热、水分、氧等作用下，组成塑料的高分子链发生断裂，使分子量降低，伴随着机械强度、延伸率降低，到分子量足够低时，最终能被微生物所利用，这个过程称为降解。新型生物降解塑料可彻底消除由塑料薄膜引发的“白色污染”，具有价格低廉、不污染环境等优点，是替代不可分解的塑料的理想产品。

生物降解塑料主要有两类：一类是用生物或化学合成方法合成聚合物，如PHB（聚3-羧基丁酸酯）、PLA（聚乳酸）、PCL（聚乙丙酯）等。性能好，但价格昂贵。另一类是用天然产物（淀粉、纤维素、多糖的衍生物）与合成树酯的共生物。原料来源广泛，价格低。比如，“百康”淀粉基降解塑料，由玉米淀粉、合成树酯、淀粉改性剂、增容剂、可逆交联剂和降解促进剂等添加剂，用双螺杆挤出机，经过熔融、混炼，形成共聚共混物。使用后废弃于土壤、垃圾等微生物较丰富的环境中，淀粉首先被微生物降解。据报道，该产品已远销台湾、泰国、日本、美国。

目前降解塑料只是刚刚兴起，生产量、使用量尚微乎其微。全世界每年包装业消耗塑料3000多万吨；若30%用降解塑料，则需近1000万吨，市场前景广阔。

目前还出现了一种所谓“EM生物技术”。“EM”是“有益微生物群”（Effective Microorganisms）的英文缩写，用它萃取的“EM”粉（液）可降解土壤中化肥、农药残留的有害成份，不仅有助于作物增产，而且可避免环境污染。“EM”中有一种可能生存于700℃以上高温环境的微生物，将掺有这种微生物的粘土烧结成“EM陶瓷”，制成汽车油箱、发动机缸体的内衬，可以明显提高燃烧效率，减少尾气排放，净化城市空气。含有“EM陶瓷”的再生塑料可用于加工能自行降解的保鲜袋，里面的大米可在4年内无虫蛀、不霉变。

生物技术也有广泛的军事用途。例如，开发生物传感器，提高对毒剂、炸药和麻醉剂的实时探测与识别能力，提高非声水下探测能力；研制特种生物材料，如单兵或集体防护用的自消毒材料的催化聚合物等。

总之，生物技术的冲击波将改变各种产业结构，改变整个工业、农业、

医药业的根本面貌，甚至将使政治、法律、伦理观念和人类文明产生新的变革。

#### 5. 综合集成在工程技术最终转化为生产力过程中发挥着关键作用

当代工程技术发展的另一重要特点是，综合集成在工程技术转化为生产力的过程中发挥日益重要的作用，也是工程技术转化为生产力过程的最终的、最为关键的环节。综合集成可以弥补单元产品的不足；更重要的是，综合集成可以使原有的工业界限或极限不断得到突破。当代工程技术的竞争更多地体现在综合集成上。综合集成既是一门工程技术，也是一门艺术。综合集成是我们面临复杂工程系统挑战的工具，是方法论，也是实现工程技术向现实生产力转化的重要手段和途径。

综合集成包括以下几方面的工作：系统工程，软件集成，综合集成演示，科学的计划管理。

综合集成的事例很多。如柔性制造系统(FMS)可以把若干台数控加工系统、物件搬运系统、上下工件系统(回转式转盘和工业机器人)、立体仓库、优化调度(信息控制)系统综合集成在一起，形成较完整的生产体系。它能自动完成加工、装卸、运输、管理，具有监视、诊断、修复、自动转换加工产品品种的功能，并具有一定的柔性和灵活性，适合于多品种小批量生产。

80年代开始出现的计算机集成制造系统(CIMS)，又进一步将计算机辅助设计(CAD)与制造(CAM)、柔性制造单元与系统(EMS)和管理信息系统(MIS)综合集成起来，以适应市场竞争中多变化的需求，获得多品种、中小批量产品生产的高效益。

90年代又出现了并行工程(Concurrent Engineering)工作模式，对产品及其制造过程和支持过程进行并行、一体化设计、运行与管理。这种工作模式力图使开发者们从一开始就考虑到产品全寿期中的所有因素，包括质量、成本、进度和用户需求。它是一种新的系统工程管理方法，要求在产品开发的全过程中加强各部门之间的协同与合作，按并行方式而不是串联方式进行。它利用先进的计算机辅助工具，通过大量信息和数学仿真的综合集成，分析和预测产品开发全过程中的问题和“瓶颈”，并预先采取措施，从而达到质量、成本、进度和用户需求。

在军事领域里，武器平台和收集、处理战场信息情报的电子信息装备的大规模结合，是一项极大的系统综合集成任务。这样一种大规模的系统综合集成，是商业世界前所未有的。在美国国防工业独领风骚的那些公司，正是知名的系统综合集成商，而不仅仅是制造者。综合集成方法的实质是把科学理论和经验知识结合起来，人脑思维和计算机分析结合起来，个人决断与群体结合起来，发挥综合系统的整体优势。这对于作战指挥具有重要意义。

90年代末以来，国外许多大企业在R&D领域与其他企业结成技术联盟，分工协作，风险同当，利益共享，走共同技术创新的道路。如在“信息高速公路”技术方面，日本电气、东芝、日立和索尼等与美国太阳微系统公司、米普斯计算机公司、惠普公司等结成几十个技术联盟。在汽车生产领域，德国奔驰公司与日本三菱公司，日本丰田、铃木公司与美国通用汽车公司等等的技术联盟。这种技术联盟就是综合集成在经营管理上的应用范例。

对于综合集成的作用，国外一直比较重视。美国总统科技顾问及一些科学家提出：为了继续确保美国在工业上的领先地位，出路在于“综合集成”。德国《经济周刊》1994年1月14日刊登了一篇题为“系统时代”的文章，



讲到德国提出开发新技术不是只搞几项高技术，而是要系统配套，才能真正发挥作用。

## 二、应引起重视的几个问题

以上主要从技术的发展线索上，概括论述了当代工程技术的发展趋势。工程技术要得以顺利发展，除了技术本身的不断进步外，还有社会的、经济的因素在起作用。因此，在持续不断地推动技术进步外，还应注意考虑并解决好以下几个问题。

### 1. 可持续发展与保护全球生态环境

1972年，国际上著名的未来学研究团体罗马俱乐部发表了一篇叫做《增长的极限》的研究报告。报告的一个结论是：“如果在世界人口、工业化、污染、粮食生产和能源消耗方面按现在的趋势继续下去，这个行星上增长的极限有朝一日将在今后一百年中发生……”，“工业的增长，最迟在下一个世纪内一定会停止”。

然而，70年代中期以来，美国、日本和西欧发达国家的经济并没有沿着《增长的极限》所预言的轨迹发展。按不变价格计算，1980~1990年，美国、日本和西欧国民生产总值（GNP）年增长率分别为2.97%、8.53%和1.02%。其中，工业产值年增长率分别为2.66%、4.07%和1.61%。而同期能源消耗年均增加分别为0.49%、1.65%和0.17%。

下面让我们来简单分析一下其中的原因。传统的工业化经济，表征经济增长的GNP的增长与每单位GNP使用的能源量呈平行增长的趋势。《增长的极限》一书也是遵循这一基本思路的。然而，在信息化经济时期，伴随GNP持续增长的是：单位GNP的能耗不再增长。因此，可以将GNP的持续增长以及同时期单位GNP能耗降低作为经济发展新时代的一个参考性标志。美、日等发达国家的这个转折点大致发生在70年代末，其产业结构的特点是GNP中服务业产值开始超过物质产品业产值。进入80年代后，美、日、西欧GNP迅速增长，而单位GNP能耗则大幅度降低。目前信息技术无论对采掘业、制造业、建筑业和农业等物质产值，还是对商业、运输、邮电、金融等服务业产值都起着重要作用。一些发达国家已将信息技术逐步形成一个最庞大的产业体系，其产值的增长速度已大大超过GNP的增长速度。据报道，1984年美国信息类产品占非农业国内生产总值的比例已超过60%。1982年，全世界信息产业的产值为2370亿美元，1988年上升到4700亿美元，预计到2000年可高达35000亿美元。

当代工程技术的发展，特别是信息技术革命，改变了《增长的极限》的预测，展现了一种与之不同的增长趋势。在稍后几年，罗马俱乐部的观点也有所变化。在其1977年发表的研究报告《超越浪费时代》中就得出比较乐观的结论：在日益膨胀的世界人口的需要不断增加的条件下，只要适当地利用科学技术的最新成就，人类在能量、原料和食物三个方面遇到的大多数问题都能得到解决。

罗马俱乐部创始人奥莱里欧·佩切依博士后来也表示，微电子学的出现“可能是人类历史上最伟大的革命”。罗马俱乐部主席亚历山大·金前不久指出：1988年是历史上的转折点。事实上，这时各国领导人已认识到邓小平同志英明论断“科学技术是第一生产力”的正确性。

改革开放18年来我国经济建设已取得重大成就，为举世瞩目。但目前还

处于工业化阶段，第一、二、三产业整体素质仍较低，经济增长在很大程度上是靠资源消耗推动。能源有效利用率，中国约 30%，发达国家已达 40~50%；水重复利用率，中国只有 20~30%，发达国家近 70%；钢材利用率，中国不到 60%，而发达国家大于 80%。从单位国民生产总值（GNP）的能源消耗（折合为吨标准煤/百万美元）看，美国为 633，日本为 399，印度为 1548，而中国为 3165。

我国也是水资源贫乏国家之一，分布极不均匀，节水措施又很不得力。有些地方大量开采深层、难于再生的地下水资源，后果将是严重的。

就全球范围而言，能源的合理开发、利用，仍是非常重要的课题。一次性能源——煤、石油、天然气仍将占主要地位。但必需采取措施，保护生态环境。同时，要积极开发核能以及太阳能、风能、海洋能、生物能等新能源。

在核能利用领域，要大力改进现有成熟反应堆型的安全性能，实行模块化制造生产以缩短建设周期、降低成本和建设费用；同时还要积极研究、开发“洁净”核能系统，使它所产生的放射性废物、特别是其中的长寿命裂变产物和少量锕系元素在系统中被“嬗变”为短寿命或稳定核素。其中由不少科学家再次提出有发展前景的一种，是加速器驱动的次临界装置，由中能（1-1.5Gev）、强流质子加速器与次临界装置（热中子或快中子）相耦合，结合“原址”的放化分离流程所构成。

对有效利用能源、实施可持续发展等课题，各国科学家已有许多论述。在这里仅举一两例。

美国科学家 Robert A. Frosch 在《21 世纪的工业生态学》一文中提出：“一种干净而有效的工业经济，将是能模仿自然界具有材料（原料）再循环利用能力、同时又产生最少废弃物的经济。”因而，不仅在设计一种产品时要考虑制造、装配工艺，还应加上分解、再循环、适应环境等的设计。

这种思路，不仅是个设计、制造技术问题，而且也是个系统集成问题（例如企业集成）。

从自然界的生态系统看，一种生物体的废弃物，常常是另一种生物体的可用原料与能源。例如，微生物消化、分解工业有害废物，种庄稼施有机肥。

德国环境保护部部长 Henrich Von Levsner 认为，21 世纪的技术进步，对全球生态环境保护至关重要。能源的产生与转换是其中主要问题之一。德国可能在这方面作出重要贡献。例如，即使在欧洲中部地区，住房所需能源也可全部从太阳能获得。

在淡水的高效利用方面，德国的纺织工业已采用设备对工业废水过滤，经过滤后的水和过滤器内收集的化学添加剂均可再循环使用。不仅对改善环境有帮助，而且一年半时间就可回收设备投资。

有鉴于过去忽视环保、污染后再处理，既浪费钱又有害于社会的教训，德国 21 世纪的战略是：尽最大可能防止这种状况的出现。不得不产生的废物将受到严格限制，不允许对子孙后代构成危害。例如，对废物进行低温炭化热处理和高温下焚烧的处理方法，很快将在德国应用。

同时，制造商要将产品生产过程中发生的废弃物减到不可再少的程度，采用“接近最后尺寸的制造”。制造商要从法律上和经济上负责其产品的最终可处置性。

## 2. 经济可承受性与效费比高，是开发高技术产品的重要条件

### （1）民用商品，正在实现这一要求

民用商品一方面要适应社会的需要，另一方面也必须以适当的、消费者可能承受的价格向社会提供。在商品投放市场初期，由于尚未被消费者所认同，一般产品批量不是很大，生产费用较高，因此效费比较低；但随着市场的开拓，必须以最大的努力来提高其效费比，把价格降到广大消费者能接受的水平。这里，市场预测及经济核算在开发高技术产品之前是至关重要的工作。

Motorola 公司称已研制成功迄今为止世界上最小的和最轻的移动电话，这就是该公司的 StarTAC。它仅有目前的寻呼机的大小，重 3.1 盎司，使用者可连续通话一小时。但它的价格很高（2000 美元），因而目前使用的人并不很多。

轿车是支柱产业之一，应否尽快发展，在我国尚有争议。从技术上看，发展方向可能是有利于环保的电动或电动 / 小功率内燃机驱动组合。上海科峰电动车公司和连云港江苏省太阳能研究所联合研制的“中国一号”太阳能电动轿车，用 10 个蓄电池和太阳能电池驱动，最高时速达到 88 公里。北京有色金属研究总院与北京工业大学、清华大学等单位共同研制的固体镍电池安装在小轿车上使用，时速可达 112 公里，充一次电可行驶 121 公里。但由于成本太高，经济上目前还未能达到消费者所能承受的地步，因此还不能大量推广。

可以预期，随着技术水平的不断提高以及广大消费者的日益认同，这几种产品终究可以达到经济上的可承受性及合理的效费比，从而占领市场。

(2) 某些高技术的开发也从过去只重视水平和能力转向强调经济可承受性

这方面在航天产品研制中尤为突出。航天技术既是综合性的高技术领域，也是耗资巨大的技术领域。一方面运载火箭是一次性使用，卫星发射费用巨大，另一方面卫星的技术越来越复杂，造价越来越高，且研制周期长，风险大。因而限制了航天技术本身的发展。

冷战结束后，各国政府迫于财政困难，对本国航天的经费投入呈减少趋势。在这种新形势下，过去那种由政府投资、单纯强调产品性能、忽视经济效益比的传统做法正被逐步抛弃。要继续发展和应用航天技术，就必须从观念上强调效费比，实现实在的产业化。

这种观念的转变，反映在以下三方面：

改变卫星的传统设计思想，发展经济实用的小卫星。随着微型计算机、微电子、微机械、高精度机械加工、轻型材料、新工艺等高新技术的发展，小卫星应运而生。所谓小卫星是指重量小于 500 公斤的卫星，其设计思想是简单化、功能单一化，其基本意义在于增加容量、确保性能、减少体积和重量、降低成本和风险。它具有重量轻、体积小、研制周期短、成本低、性能好等特点，政府、公司、大学和研究所等单位都可以参与研制和经营，因而易于实现卫星应用技术的产业化，并且正在实现产业化。

小卫星所具有的优点，决定了其特别适于在局部战争和突发事件中用于对战场和事发地区进行短期监视、跟踪与通信。俄罗斯已经把小卫星作为实用型战术通信卫星，每年至少发射 15 ~ 20 颗。美国继海湾战争期间应急发射两颗低轨道通信小卫星之后，目前正抓紧研制这类小卫星，供美国三军通信指挥使用。战术成像小卫星（如“观测镜” - [ Eyeglass ]）的地面分辨率可以到米级，覆盖宽度几十到几百公里，相当于过去大型侦察卫星，而整星重

量在 200 ~ 300 公斤，工作寿命可长达 5 年。

变革卫星制造方法。美国 Motorola 公司以其高度竞争性的电子生产线而知名于世，该公司正在通过“铱”星计划推进卫星制造方法的革命。“铱”星系统由 66 颗低轨道卫星构成，准备从 1998 年开始提供世界范围内点对点无线通信服务。该计划完全是一种商业风险计划。按照传统的单件生产方式，同一时间只能制造两颗卫星，每颗卫星的生产周期大约为一年；Motorola 公司采用流水线作业方式，在同一总装生产线上制造 60-70 颗卫星，每颗的生产周期仅为 21 天。国外分析认为，“铱”星计划所采取的卫星制造方法如果获得成功，其意义就像亨利·福特当年发明汽车自动生产线一样重大。

发展更经济的卫星运载工具。高额的航天运输费用是制约航天技术发展的另一个重要因素。因为对任何实用型航天系统的基本评价原则是可靠性和费用——它决定着商业服务的成败。用户首先感兴趣的是可靠性和合理的发射费用，其次才是有效载荷容积和技术先进性。目前的航天运输系统主要是一次性使用的运载火箭，操作复杂，费用昂贵，发射准备时间长达数月，所需地面工作人员成千上万。在设计思想上，传统的做法是优先考虑性能，追求最大有效载荷，仅在运载器设计完成以后才对每次发射费用作最后的测算。而现在则不一样了，费用变得比性能更为重要。以降低费用、谋求像飞机那样运营为目的，以简化操作、硬件重复使用为手段的可重复使用航天运输系统，在一开始设计时就每次发射费用作为运载器概念设计和选择的主要准则，吸引了众多的私营公司竞相参与，为航天产品的产业化铺平道路。预计这种转变在不久的将来可开始实现。

总之，小卫星设计概念、卫星制造方法的变革，以及可重复使用的经济的卫星运载工具，正在打破过去航天产品单纯追求性能而不重视效费比的传统观念，给整个航天技术的发展注入了新的活力。

### (3) 重视发展两用技术，以实现国家对技术投资的高收益率

在工程技术迅速发展的今天，“军用”、“民用”的界线已变得越来越模糊。一方面，现有绝大部分军用技术都有潜力用于民品生产，为发展经济服务；另一方面，随着工程技术的发展，民用市场上也有更多的质优价廉的产品适合军事装备的需要。这表明，过去那种把为军事目的发展起来的新技术完全禁锢在军事应用的做法，已变得越来越不可取；现在则要求军事部门在开发新的军事工程技术之初，就应当考虑到该技术的民用前景，使之尽快转化为两用产品。过去那种什么都得从头做起、另起炉灶搞一套的做法同样也变得越来越不可取，现在越来越有可能充分利用民用技术的成果及其产品。正是这种观念上的转变促使世界各国越来越重视开发军民两用技术。

当前，科学技术实力已经成为决定国家综合国力强弱的重要因素，加速科技发展，提高科技竞争力，已成为各国普遍采取的战略措施。在此形势下，许多发达国家（如美、日、英、法等）竞相把发展两用技术作为国防科技发展的重要技术政策。加强两用技术的发展，可以促进国防和经济的协调发展，既有利于加强国防科技工业基础，又有利于增强国家经济实力，也是我国需要长期坚持的一项重要技术政策。

美国先期研究计划局（ARPA）1994 年 4 月提交众院预算委员会的报告中称：几年前我们的计划都毫无例外地集中于先进的能力。今天，我们的重点主要集中于经济可承受能力，着重发展制造技术和工艺以降低费用。

### 3. 深化改革，重视发挥人和管理的作用

江泽民总书记在 1995 年 5 月全国科技大会上的讲话指出 科技工作要始终把经济建设作为主战场，把攻克国民经济发展中迫切需要解决的关键问题作为主要任务。党中央、国务院《关于加速科学技术进步的决定》中提出：当前，要大力加强农业科技工作；要加快传统产业的技术改造，特别要重视用现代技术武装基础产业和支柱产业，加速实现经济和社会管理的信息化、自动化和智能化；要积极发展高技术，实现产业化；要十分重视解决环境保护、资源合理开发利用等社会发展领域的科技问题。

八届全国人大四次会议审议通过的《纲要》又一次明确提出：加大科技体制改革力度，加快改革和建立科研、开发、生产、销售紧密结合的机制，特别是切实“加强科研院所、高等院校和企业之间的联合与合作，推动以技术开发为主体的科研院所进入大型企业集团或转化为高技术企业，……努力使企业成为技术研究开发的主体。”

现代科学、技术、生产日益结合为统一体系，促进了科研、设计与生产部门的结合，产生了一种新型的组织形式——科研生产联合体。其主要任务是不断创新科技产品、提高产品的科技含量，缩短新技术的研究与应用周期，加速产业部门的科技进步。它一般包括从理论研究到生产应用各个环节的科研、设计和生产部门。它们通常以工业研究机构为核心，根据担负的不同任务选择组成单位，如科研、设计、工艺机构、实验室、实验厂、批量生产厂、调试和安装部门等。这些单位通过共同的目标联合在一起，完成理论探索—新技术研究—生产应用的全过程。为促进这种结合，国内已有不少城市组建了起“孵化器”作用的工业科技中心。

1993 年组建的香港工业科技中心公司（HK Industrial Technology Center Corporation）就属于这种性质，它在实现科技转移、转化及服务方面进行了积极的实践，取得了良好的效果。该公司的宗旨为协助香港工业界从劳动密集转型为科技密集。两年来已进行 3 项计划：（1）培训，即孕育从事开发高技术的企业，提供多种商务服务，以降低其开支成本，并提供有关市场扩展，财务、科技与管理的专业顾问与中介服务；（2）科技转移，产、学、研结合；（3）研究与开发的支援及服务（应用软件开发、多媒体、集成电路芯片设计等）。

要发展科学技术，加速科技进步，关键在于人才。谁培养并拥有最优秀的人才，谁就能在未来的竞争中取胜。西方各国都十分重视科技人才的培养及引进，在世纪之交，纷纷对 20 世纪、尤其是二战以来的国内教育体制进行认真的总结，学习其他国家在教育上的优势与经验，研究改革的方向与措施，以达到优化人才培养机制的目的。我国也有许多教育界、科学技术界的人士十分关心这个问题。

在工程科技人才培养与教育改革方面，有以下几点应引起注意并认真进行探讨：

（1）当今的科学技术发展十分迅速，新技术、新设备不断涌现。人才培养尤其是工科教育必须适应这种情况，学校教育要注意不断用新的知识和理论来武装学生；但又切不可忽视学生对基础科学课程的学习和掌握，因为这是培养自主创新能力所不可缺的。另一方面，知识的更新、新技术的掌握，也不可能全都依赖学校，而应通过对于工程技术人员继续教育和在实践中自学来解决。

（2）当今科学技术的发展，不同学科相互渗透的趋势日益明显，在教育

及人才培养中对复合型人才的需求也在增长。例如，为发展分子器件、纳米生物学等，要求骨干人才既懂得生物技术又懂得微电子学；在开发 CIMS 及 FMS 时，要求主要人员既是机械制造与自动控制方面的专家，又熟悉和掌握生产管理的知识。教育界要为企业与科研部门培养更多的各类复合型人才，以适应这方面的需要。另一方面，即使复合型人才具有较宽的专业知识面，也不可能对新技术所涉及的各有关领域的知识都掌握，还必须提倡各种不同专业类型人才的配合与互补，实行科研人才上的综合集成，大力倡导并积极创造有利于人才结合的机制。

(3) 在培养人才中，要重视利用信息技术创造出来的新的教育媒体与工具。比如，多媒体的计算机辅助教学系统(CAI)，INTERNET，交互式广播电视网等，以提高教育的效率、效果。

另外，当代工程技术的发展与现代科学管理和科学管理的发展息息相关。它们相互渗透，相互促进，相辅相成。

人类在从事生产斗争的漫长历史进程中，从早期的经验管理，到 20 世纪初的科学管理的理论和方法在实际中应用，发展到今天，把科学管理原理与战略、战术、方针、政策等的研究结合起来，加上利用电子计算机等最新的科学技术成就，逐步形成了一门新的科学，即管理科学。工程技术的发展需要科学的管理，更需要对复杂的系统工程进行科学的综合性的管理。

邓小平同志在南巡讲话时指出：“社会主义要赢得与资本主义相比较的优势，就必须大胆吸收和借鉴人类社会创造的一切文明成果，吸收和借鉴当今世界各国包括资本主义发达国家的一切反映现代化生产规律的先进经营方式、管理方法。”江泽民同志号召“我们不但要大力培养各类科学技术人才，还要注重培养善于进行现代经营管理的各类专家”。朱镕基同志在 1997 年 7 月召开的管理科学学科发展座谈会上讲话，对国家自然科学基金委员会管理科学组升格为管理科学部这一举措给予了很高的评价，并强调指出：科教兴国，包括自然科学和社会科学两个方面，当然也包括了管理科学；要大力宣传加强企业的经营管理，要大力提倡振兴中国的管理科学，要总结中国管理实践的经验。遵照这些重要讲话指示精神，在走向 21 世纪的今天，需要我们各级领导干部在努力学习现代科学技术知识的同时，积极学习并逐步掌握现代科学管理方法，用现代管理理论来指导实践工作，以进一步提高管理、决策水平。

当代工程技术的发展，已改变了人们生产和社会生活的许多方面。可以预期，随着工程技术的进一步发展，人类将创造一个更加美好的明天。我们相信，在党中央、国务院的正确领导下，我国工程技术界将努力拚搏，提高我国工程技术水平，为实现我国跨世纪的宏伟蓝图作出更大贡献。

# 高科技和基础科学的关系及 它们对国防和经济发展的影响

周恒

天津大学

周恒 力学家。1929年11月21日生于上海市,1950年毕业于北洋大学。历任天津大学力学系主任、研究生院院长(现任该校教授),并任亚洲流体力学委员会副主席、国务院学位委员会力学学科评审组召集人、国家教委工程力学专业教学指导委员会主任、中科院非线性连续介质力学开放研究实验室学术委员会副主任等职。1993年当选为中国科学院院士(学部委员)。主要从事流体力学的研究与教学并取得多项重要成果。

在当今暂时没有大战危险的情况下,国与国之间的竞争在很大程度上表现在对人才的争夺及抢占科学技术的制高点。即使国家小到如新加坡,也在这方面不遗余力地在进行努力。

科学技术包含的面很广:一头包含着数学、物理学、化学、天文学、地学、生物学及力学等基础科学,另一头则包含着所谓的高科技。中间还有广大的其它科学技术。

如果以“863计划”包含的内容来看,高科技包括航天、信息、能源、自动化、激光、材料及生物技术。但实际上不止这些,例如航空也是高科技。研究这些高科技的最终目的,是要形成直接可以应用的产业。高科技产业的形成,一方面将大大改变人类的生产及生活水平,同时也将产生巨大的经济效益。因为高科技产业中包含着由于科技知识及手段带来的高附加值。例如在生产过程中增加的附加值,科技含量在其中所占的比重,汽车行业是25%,钢铁行业是29%,而航空业则达44%。有资料表明,如果以单位重量产品价值来比较,以船舶为1,则小汽车为9,彩电为50,电子计算机为300,喷气式客机为800,航空发动机竟达1400。尽管这种比较有失全面,但也从一个侧面反映了科技含量对产品价值形成的影响。

作为一种产业来说,高科技产品必将带来巨大的利益,因为其科技带来的附加值高。但是,有高科技产业的地区或国家,本身并不一定能直接得到这些巨大的经济效益。关键是看谁提供的科技含量,谁拥有这些高新科技的知识产权。例如,我们可以从国外引进一条有高科技含量的生产线。十几年以前的彩电生产线就属于这一类(现在彩电技术已不属于高新技术了,除非是未来的高清晰度彩电)。但是,真正的高额利润是被掌握其关键技术的外国公司拿去了,国内的厂家只能赚中国人自己的钱。美、日、法、德等国,高科技产品出口占这些国家出口总值的比例,分别达40%,40%,20%,20%左右。所以,即使从经济角度看,也要有自己的高科技知识产权,更不用说还应从国防上考虑,如果没有自己的高科技,往往要被动挨打。1991年海湾战争,西方国家在38天空袭中,就摧毁了伊拉克1/3的坦克大炮,瓦解了10万部队。只经过短短的100小时的地面战争,自己仅伤亡了79人,就战胜了伊拉克。这其中的重要原因之一,是高科技发挥了很大作用。所以美国即使在目前军费大量削减的情况下,仍继续实施耗资588亿美元的先进隐形战斗机F-22的研制计划。

基础研究以认识自然规律为目的，不从事产品生产，看起来没有直接经济效果。但实际上并非如此。日本东京在 1926 年由于关东大地震，在第二次世界大战中又由于遭受盟军轰炸，房屋两次都大部被毁。由于东京是地震多发区，战前不允许建高楼。但是力学研究的结果改变了这一观念。现在东京高楼林立，其房地产的价值当以万亿美元计。没有这一改变人们观念的研究，就不可能形成这么大的产业。又如石油开采，按通常的办法，即自喷、抽取、注水等办法，只能将约 35% 的储量开采出来。经过对多孔介质中油、气、水在不同物理、化学条件下流动规律的研究（细观渗流力学的研究领域），现已有可能采用注入有特定物理、化学性质的液体，多采出 10% 储量的原油。这也是一个有巨大经济效益的基础研究成果。

高科技和基础研究似乎是科技发展的两端，但事实上又是紧密相连的两个部分。只要分析一下高科技的内容及其形成就会发现：（一）高科技都是一种综合性很强的科技，需要多学科的支持。例如航空、航天就至少要有力学、材料、机械、自动化、电子、燃烧等学科的支持。信息科学至少要有物理、材料、精密机械、自动控制、数学（信息论）等学科的支持，等等。（二）高科技都是在基础科学的某一方面有重大突破之后产生的。例如，在有关高速运动流体的规律上有突破性的新认识后（空气动力学、高速空气动力学、稀薄气体动力学等），才形成了现代的航空、航天技术；在凝聚态物理（当时固体物理）中没有对半导体的突破性认识，就不可能有今天的半导体器件，包括大规模及超大规模集成电路的出现，也就不可能有现代的信息产业；激光技术也是在凝聚态物理的突破性研究成果基础上形成的。（三）高科技不但在形成时依赖于基础科学的突破，而且在其成长过程中，仍要不断依靠基础科学的新成果。航空、航天技术的进一步发展，离不开力学的继续发展。能多次使用的空天飞机，能超音速飞行的大型民航机，这些新一代的新技术，已经向力学提出了许多新的问题。不解决这些问题，就无法实现上述目标。集成电路的集成度已逐渐接近于其极限，计算机能力的进一步提高，也期待着物理学上新的突破。

高科技和传统科技还有一点不同：传统科技的发展多少有点渐进式，其发展在依靠经验的成份上远大于高科技；高科技是前所未有的产业，没有多少经验可以依靠，几乎每一步进展都离不开科学的发展。由此可见，高科技和基础科学看似两个不同的部分，实际上离开了基础科学的发展，是不可能形成高科技的。当然，现代很多基础科学的研究已是“大科学”的研究方式，需要大型、精密的仪器设备。而这些仪器设备则又是高新技术发展的成果。没有计算机的发展，很多科学问题无法精确计算，甚至于一些经典的数学难题，没有计算机的帮助也很难解决。所以基础科学的发展也离不开高科技的发展。

高科技在战争中的作用，已经为海湾战争所证实。其实有些基础科学的研究也能起很大的作用。例如，第二次世界大战中，盟军不断地破译了德、日所用的通讯密码，对取得战争胜利起了重要作用。其中数学研究的成果是关键，不少数学家直接参与了具体的工作；我国原子弹、氢弹的研制成功，至少有一半的功劳要归于参加研制工作的物理学家、力学家等等。当然，这些研制的过程，不是这些学科已有成果的简单运用，而是要不断解决新的问题。未来的战争中，信息战是一个重要方面，相信数学家又将发挥重要作用。

由以上一些例子可以看出，发展高科技和重视基础科学是一个事物的两



个方面，缺一不可。

为了发展高科技，还有一些概念要弄清楚。高科技综合了多学科的成就，所以同时也是知识密集型的。但知识密集的科技不一定能称为高科技。因为高科技带有某种突破性，从而在知识的某些方面具有垄断性。因此高科技是买不来的。没有自己在知识技术上的突破，就只能永远跟在别人后面，买一些过时的二手货。

高科技的发展，至少是其中某些方面的发展，例如自动化及信息技术的发展及大量应用，是否会造成失业，是人们关心的问题。有人就不愿意“过早”地用自动化替代劳动密集型生产。自动化和信息技术的发展，当然会在某些方面减少对普通人的需求，但是它们同时又会创造很多新的就业机会。自动化要有必要的新设备、新仪表，这就需要新的行业。问题是这些新的行业要求从业人员有新的知识和技能。所以作为领导来说，必须重视在职人员的再教育，否则就不能适应科技日新月异的发展。美国现在的科技水平远远高于它在二次世界大战前的水平，人口也比那时增加了约1亿，但现在的失业率却低于当时的水平。这不仅证明了科技的发展会创造很多新的就业机会，也说明了美国由于教育的普及和对再教育的重视，人们适应新工作的能力相当强。反看我国，除了教育不够普及外，在很多工科大学教育中，还沿袭着过去从苏联学来的以产品为纲的培养模式。例如为了发展汽车工业，就兴办汽车专业等等。殊不知任何一种大的产业，都要依靠多个学科的支持，一个人是不可能全面掌握全部知识的。而这种以产品为纲的培养模式，束缚了人的思路，会妨碍新产业的形成，也不利于为适应新产业而对自己工作性质的调整。

我们还可以举化工为例。不少人都以为化工主要是化学的问题。其实化工的化学问题在实验室里就已经解决了，真正的问题出在：要在连续不断的过程中大规模地、动态地完成指定的化学反应及其它物理过程，如分离、淬取等。而这里正是因为物料的流动、混合等过程不清楚，妨碍了不经小试、中试等过程就直接完成大规模生产。所以化工的发展很大程度上有赖于流体力学的发展。同样地，未来生物技术运用于大规模产品的生产时，也会遇到同样的问题。利用细胞工程来生产某些特定产品时就会遇到培养液流动时的应力对细胞生长甚至生存的影响这一问题。这在国外已经引起了注意，不少力学工作者正在从事这方面的研究。即使限制在生物本身，也同样有一个不能仅仅限制于生物学领域的问题。例如人类骨骼的生长是在受力状态下完成的，而骨骼的主要作用又是承受外力，研究这一问题不能不考虑到受力状态的影响。

总之，我们的看法是：高科技和基础科学是不可分割的两部分。现代科技，尤其是高科技，是综合性的科技，不是靠单一学科可以形成的。科学技术的发展，归根到底要由高素质的人去完成，科技发展带来的生产上变化也要求生产者有更全面的知识结构，教育和再教育的作用是不能低估的。作为领导来说，必须对科技的发展有一个较全面的认识，能够制定出一个既有重点，又比较均衡的科技发展政策，同时十分重视教育。只有这样，中国在21世纪才能在世界上取得其应有的地位。

# 放射性“洁净”核能系统

丁大钊

中国原子能科学研究院

丁大钊 核物理与高能物理学家。1935年1月12日生于江苏苏州，1955年毕业于复旦大学，1956年至1960年苏联杜布纳联合原子核研究所进行高能物理研究。现任中国原子能科学研究院学术顾问委员会委员兼中科院高能物理所北京正负电子对撞机国家实验室副主任。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事核物理与高能物理等方面的研究并取得多项重要成果。

能源是人类社会发展的最基本要素。自工业革命以后，一直以化石燃料作为基本能源，利用燃料发电是现代能源供应的基本形式。在世界范围内，燃煤发电大体上占50%，在我国可能要达80%强。燃煤是全过程污染的能源；燃后小范围的粉尘直接危害人民健康、大范围的酸雨破坏生态平衡，由于排放CO<sub>2</sub>而引起全球性的温室效应，后果更为长期。统计资料表明，工业革命后，大气中CO<sub>2</sub>浓度的增加与全球平均气温的上升有正相关是确定的事实。可持续发展战略把生态平衡、环境保护提到极度重要的地位，我们要为后代留下一个洁净、协调、美好的地球，对“洁净”能源的研究与开发就成为首要任务。所以说，“洁净”能源问题的提出是社会发展的需要。人类从自然界获取赖以生存的一切，经使用与消费，又把其一切“剩余”返回自然界，如处置不当，则会破坏自然界的平衡，影响社会的继续发展。

煤的洁净化燃烧技术正在研究、开发中。但值得注意的是煤的资源有限。以我国为例，如果依报道的地质储量1万4千亿吨为准推算，可采储量大体折合五六千亿吨标准煤。我国人均能耗是世界平均值的五分之一。如果到2030年，我国人均产值要达到当前中等发达国家水平，取能源增长与GNP增长比（弹性系数）为1.5，在采取强有力的节能措施条件下，也需把能源供应量从目前的十几亿吨标准煤提高到四五十亿吨煤！则煤的储量只够百余年之所需。

可再生能源中水力当然是首选。水承担着发电、灌溉、航运等多种任务。我国是一个水资源贫乏的国家，据报道一条河流合理开发、利用的水流量应为总流量的三分之一。黄河上游开发了不少水利设施，但近10余年来，年年在下游断流，且有越来越烈的趋势。这也许对我们有所启示。再则水源受环境影响而不稳定，我国大部分水力资源在荒无人烟的横断山脉，开发难度大，因此可以预期我国水利资源的开发规模比不上俄、美等国的水平。

风能、潮汐能、太阳能发电因其单位质量或单位面积的“出力”较小，生物能的利用也只适于小规模的开发。因此，这类能源适于在某些条件合适的地区作为补充。

下世纪“洁净”能源的优先选择将是核能、核能发电。核能有裂变能与聚变能两类。裂变能是重原子核在中子轰击下分裂成两个中等质量的原子核时有一部分质量转化成的能量，此过程中还生成几个中子。在一定条件下，这些中子又引起其他重原子核的裂变，称为“链式反应”，因此，源源不断地提供核能。示范性的核电站在50年代中期建成，到70年代，核能发电已

成为一个重要的产业。聚变能是两种氢的同位素（氘和氚）原子核在高温、高压的一定条件下，聚合成氦原子核，同时放出一个中子的反应。可利用这个中子，从锂-6 生产聚变燃料氚。这反应中，也把一部分质量转化为能量。不可控的聚变反应早已应用于军事目的，但可控地释放聚变能的反应装置，从物理问题、技术条件、装置系统等方面都还在研究中。这项研究从 50 年代开始，在美、英、日、俄等国均已花费了大量资金，但离目标仍然很远，目前有各国进行联合研究的趋势。对于聚变能的商业化应用的前景有种种估计，可能比较适当的估计是在下世纪中叶，所以近几十年间所谓核能仍然是裂变能的应用。

释放核能的装置称反应堆。根据反应堆内引起裂变反应的中子能量，分为热中子反应堆及快中子反应堆两大类，二者中子能量差千万倍。热中子反应堆中只能利用占天然铀资源 0.75% 的 U-235 同位素，因此资源利用率不高；也可能用不可裂变的 Th-232 转换为自然界不存在的 U-235 可裂变同位素，这个过程称核燃料增殖。但由于历史及技术原因，这条技术路线迄今尚未充分研究及开发。快中子反应堆中每消耗一个 U-235 核，可从不可裂变的占铀资源 99.25% 的 U-238 中增殖 1.6 个自然界中不存在的 Pu-239 核燃料，是充分利用铀资源的一种途径。

快中子反应堆有时又称增殖堆。经过 40 年的研究与开发，现在法、日、英、美、俄等国已建成了相当规模的示范性发电站，但其安全性与经济性尚待进一步论证。当前形成产业，发电成本低于煤电的有几种类型热中子反应堆电站。已在我国运行的秦山核电站和大亚湾核电站是热中子反应堆中安全性最佳、国际上积累运行经验最多的加压轻水堆核电站。我国的实验性快中子增殖堆工程亦在“863”计划支持下开始启动。因此，我国核电技术已有了相当基础和良好的开端。

核电有很多优越性。

首先，单位质量出力大是核能突出的优点。1 公斤 U-235 裂变所产生的能量相当于 2800 吨煤的燃烧能。因此，同样功率的煤或核电站用于燃料运输及其配套条件与运行费差别极大。虽然核电站基本建设价高于煤电站，但综合起来，核电电价低于煤电。

其次，资源充分。按国外资料估计，在假设全球能耗要求相当于当前美国耗能的 100 倍条件下，只计及陆上地壳中 U、Th 及可产生氚的锂贮量（理论贮量）均可分别满足 500 万年左右的需求。这当然仅是个示意性的估计，但核能资源比化石资源更能充分满足人类发展所需则是可肯定的。

再次，废物的绝对量少。因此，可以集中管理、处置，短期内对环境的危害也相对较小（存在的问题将在下面谈到）。

据国际原子能机构 1995 年发表的统计表明，到 1994 年底，核电占全世界发电量的 23.16%，其中几个大户是美-21.98%、日本-30.70%、法国-75.29%、加拿大-19.07%、瑞典-51.13%、西班牙-34.97%、韩国-35.48%。这说明核电已是世界主要发达国家能源构成中的支柱。据另外统计资料表明，除韩国以外，这些电站大多数均始建于 80 年代初期之前。目前，核电站建设似有一个“低谷”，在建电站的装机容量只占已建成数的十分之一弱。这可能由多种因素综合而致。例如，石油危机的缓解；三里岛与切尔诺贝利两次电站事故对公众及政治家的影响，某些国家中绿党势力的影响；核科技与工业界对更安全的反应堆的开发周期等等。但从资料中可以看出，法、日两家

仍将持发展核电的政策，发展中国家及初步发达国家（或地区）也在努力开发核电。

目前，我国核电占发电总量的 1.49%。如果根据上述的发展趋势看，“洁净”能源以洁净煤燃烧技术、水电及核电为支柱的话，则我国核电必会有很大的发展。

当然，我们也要看到，核能也存在一些问题，主要有以下四个方面。

- 一、热中子反应堆电站的资源利用度低；
- 二、反应堆燃后卸出的乏燃料中，含有放射性寿命极长、毒性大的废物，其最终“处置”技术尚待解决；
- 三、安全性还应进一步提高；
- 四、要符合核不扩散的要求。

前三者属原理及技术问题，后者则还有政治因素。

几十年来，核科学技术工作者为解决这些问题，分别地进行了许多研究工作，取得了相当的进展。

快中子增殖反应堆把 U-238 转化为 Pu-239，经二三十年运行后，系统即可以用增殖所生的 Pu-239 自持运行，铀资源利用率将提高六七十倍。这是一个技术上已验证了的路线。但快堆的启动要以大量浓缩 U 或 Pu-239 为依托，在热中子电站乏燃料中未积累起足够的 Pu-239 库存前，快堆难以大量发展。

热中子电站燃后的乏燃料中，除含可经后处理回收的 U、Pu 之外，还有两类“废物”留存在后处理的高放废液中。一是比 U 原子序数高的锕系核素，记为 MA。二是裂变产物，记为 FP，属于衰变核，其中一些核的寿命也相当长。这二者成为难于最终处置的高放废物。以 MA 的 Np-237 为例（寿命 214 万年），一座 1000MW 压水堆电站年卸料中含量约 10 公斤，要用 6000 万吨水稀释后，才能达到排放标准，长期贮存则有向生物圈泄漏之虞。FP 中以 Tc-99 为例，年产量为 19 公斤，寿命为 21 万年，如稀释则需用水 3000 万吨！从放射性强度讲 MA 的危害比 FP 更大，经 1000 年存放后，MA 比 FP 强四万倍。目前，一般认为比较可行的处置高放废液的方法是：暂存-固化-包装-深埋。即暂存一段时间，待其中短寿命核素衰变后，用玻璃或陶瓷使其固化，经多层包装后，深埋入远离人群的稳定的地层中。其基本要求是多层包装在极长时间内不被腐蚀且地层在数百万年间是“稳定”的，但这一点人类还不能判断。因此，仍有泄入生物圈的潜在风险。

反应堆是个中子倍增系数等于 1 的自持系统，因此原则上仍存在发生核事故的可能性。现在反应堆技术已经采取了多重保护、纵深设防的措施，核安全是有保障的，且仍在不断改进、提高中。但由于三里岛、切尔诺贝利事故后，公众对其关心成为一个热点。尽管这两次事故均非核事故，但要使核能成为公众“放心”接受的一种平常的能源，最好构建一个“自动核安全”的核能系统。

这就是近十年来发展的放射性“洁净”核能系统。这个系统将把提高资源利用率、减少放射性废物量、根本上改变核能系统的安全性三个问题一并解决。同时这系统也不会产生导致核扩散的敏感核材料。

要充分利用铀资源，必须使核燃料增殖。除利用快堆增殖外，从 60 年代末，即有利用中能强流质子加速器产生的快中子，经一定慢化后，把 U-238 转化为 Pu-239 的设想。但按当时的概念分析，所要求加速器的功率为那时技术上能达到的几万倍。因此，这条技术路线被搁置了许多年。80 年代中期以

后，随着加速器技术的提高和增殖系统概念的发展，核科学工作者发现，从加速器技术讲，功率与目前已达到的差 10 至百倍，而且增殖系统是一种在核工程上相对成熟的堆型——次临界装置，因此重又开始把加速器转化核燃料技术引入核能系统的研究。

80 年代以来，形成了一种新的技术路线以处理高放废液，称分离-嬗变 (P-T) 法。即用放化方法从废液中高效率地分离、提取 MA 和 FP，经加工成组件后，置入某种核装置中，用中子轰击，经核反应使 MA 变成可裂变核，这样不仅“焚烧”了 MA，而且使 MA 成为附加的能源供应核素；FP 在吸收中子后，嬗变为稳定核或短寿命核。高放废物经分离-嬗变后则成为相对较易处置的低放废物。P-T 法是一条极有生命力的处理核废物的技术路线。至于反应堆系统，如果它的工况处于中子倍增系数小于 1 的次临界状态，在无外源中子作用下，它是不能维持链式反应的，所以次临界装置是一种“天然”核安全的系统，在技术上是相当成熟的。

放射性“洁净”核能系统是集中以往核科技、工程界研究和开发的成果，而形成的一个新型的核能系统构想，它具有的基本性能归纳为：

1. 充分利用资源，系统具有转化核燃料的能力，在系统中，把不可裂变的 U-238 核素转化成一个稳定的 Pu-239“库存”，并为 Th-U 资源的利用开辟新途径；

2. 系统具有嬗变核废物的能力；

3. 结合“原址”的放化处理装置，使核燃料循环过程尽量少与环境接触，系统排放的是低放、低毒的废物；

4. 系统具有“固有”的核安全性；

5. 系统有高的能量输出，并有长的运行周期。一次装料后，可以连续运行若干年（例如 5 到 10 年），使系统有高的负荷因子。

简言之，放射性“洁净”核能系统是一个充分利用资源，不排放高放、高毒废物且有自身核安全性，原则上不存在核扩散问题的新型核能系统。它将填补聚变能在商业性广泛应用前对核能的需求，且易为公众接受的具有良好资源效益、环境效益、安全效益、经济效益与社会效益的“新一代”核能系统的技术途径。

放射性“洁净”核能系统的构成由四大部分组成。

驱动器：

提供外加中子源的中能强流质子加速器。1GeV 的质子在重原子核的靶上通过散裂反应，可产生 30~40 个快中子，产生每个中子的平均能耗为 25~30MeV，是迄今我们所知产生中子能耗最“经济”的一种中子源（实现点火后的聚变反应除外）。

中子产生器：

是具有特定性能及构形的产生中子的靶。它是驱动器与系统的产能核心——次临界反应堆的耦合部。它决定外源中子的产额、能谱、空间分布、质子束功率的耗散等对系统性能至关重要的参数。

次临界反应堆：

这是系统的核心。外源中子慢化到所需的能量及空间分布后，核燃料的转化、核废物的嬗变、决定允许的燃耗深度、能量的产生及传输等过程都在其中发生。次临界反应堆有热中子次临界反应堆及快中子次临界反应堆之别，由系统设计的性能要求而定。

“原址”放化分离设施：

根据系统设计的具体结构，或是在线“实时”，或是“离线”处理次临界反应堆排出的放射性废物，把其中长寿命的 MA 及 FP 经一定加工后，回送到反应堆中被嬗变。

这个系统中，最关键的设备是中能强流加速器和次临界反应堆。不论系统的具体结构如何，向系统输入的是电能及“原始核燃料”（天然铀、贫化铀及一定百分比的 U-235 或 Pu-239），而系统输出的是电能与低放废物。这就是所谓“洁净”的涵义。

放射性“洁净”核能系统所涉及的基本物理过程是熟知的，其中绝大多数已有定量的数据，可以作为研究、分析的基础。例如，非裂变核在中子核作用下转化为可裂变核，已在热中子堆、快中子堆中实现；长寿命核废料在中子作用下，嬗变为可提供“附加”能量增益的裂变核（指 MA）或是稳定（或短寿命）衰变核（指 FP），在实验室内亦已常规地研究过。因此，根据核素演化规律，这系统中的核过程是可以定量地计算的。

事实上，从 50 年代开始，核物理工作者已提出了嬗变这一概念，并分析了光核反应、中能质子直接轰击等过程，最终一致认为利用中子核反应嬗变是最有效的。在 80 年代的文献中，有称这过程为“灰化”或“焚烧”的，并分析了利用反应堆来实现嬗变的可行性。在 90 年代前期，核科技界的多数人认同于利用加速器驱动的次临界反应堆是最有希望的技术途径，近些年来举办的系列国际会议称之为“加速器驱动嬗变技术”。因此，这一核能系统概念是依托以往长期基础研究的积累而形成的。

从高发废液中，以极高的回收率分离 MA 的放化工艺流程是后处理回收 U、Pu 的自然延伸。美、日等一些国家于 70 年代即已开始进行研究，法、德、意等国也开展了不少工作，现在发展湿法为主的流程，均各有特点。我国的放射化学家也提出了一种流程，受到国际同行的重视。现在的问题在于要使回收率达到 99.9%，甚至更高，则还要求做进一步的努力。

分离-嬗变的技术路线是有坚实的物理与放射化学基础的。

中能强流加速器及次临界反应堆是这个核能系统的关键装置。

根据不同设计，系统对驱动器（即加速器）的能量要求一般约在 1-1.5GeV 间，而束流强度要求则在 20mA-200mA 间，这一流强指标与目前运行近 20 年的加速器有 1 至 2 个量级的差距，这在技术上及加速器物理上是个挑战。对于这样强流的加速器有两个基本要求：1）高效率，即从电功率转换成束功率的效率应达 40%-50%，比现在已达到的要求高 1 个量级；2）低束损，即束流在加速器结构及输运过程中的损失要少，不然会在加速器中引起严重的感生放射性，影响运行与维修。理论上要求束流传输 1 米的损失不大于千万分之一，这比现在已达到的要求高 2 个量级。目前的技术在高效率转换电功率方面已有很大进展，对于低束损问题正在开展理论及实验的研究。

次临界反应堆是比较成熟的技术。不同的系统设计对于次临界反应堆中的中子注量率要求在  $10^{14}$  中子/平方厘米-秒到  $10^{16}$  中子/平方厘米-秒间。一般处理  $10^{14}$  或  $10^{15}$  的中子注量率水平，堆工技术是成熟的，但对于  $10^{16}$  则会遇到一些新的堆物理、工程技术及材料等方面的问题。从更有效地嬗变 MA 的角度看，希望反应堆中的中子能量比目前技术上成熟的钠冷快堆更高一些，因此有人建议用铅作慢化与载热剂，这当然是一项新技术。由于铅有低熔点、高沸点、化学性能稳定的优点，所以有些国家正拟议在快中子反应堆

中开发这项技术。

从总体上讲，放射性“洁净”核能系统是一个新的概念，一条新的技术路线，但它是在过去长期核科学研究、核能开发、核工程建设基础上发展起来的。

可以取能量增益因子  $G$ （系统输出能量与加速器束能之比）作为衡量系统效益的一个指标，而第二个指标是嬗变废物的能力（以被嬗变废物的等效寿命或被嬗变核素的绝对量计）。当  $G=1$  时，可看作为物理上的“得失相当”；但反应堆输出的热能转换为电能的效率一般为 33%，加速器效率取 45%，因此技术上的“得失相当”应为  $G=7$ ；此时并无实际可应用的电能输出；如果以大于 80% 电能上网作基本要求的话，则  $G$  必当大于 30。但根据系统设计的要求，在  $G$  因子及嬗变能力之间将有所折衷。

国际上目前对放射性“洁净”核能系统的研究处于对系统的概念进行研究的阶段；对某些必须解决的技术关键则在进行小规模的技术探索性预研，例如强流加速器及放化分离流程等。

由于一些核能大国已积累了相当数量的放射性废物，其最终处置的问题将影响今后核能的发展，因此美、俄、法、日等国都制定了加速器嬗变废物的研究计划，并提出了目标性方案。在 1994 年底，西欧核研究中心的卡·鲁比亚小组提出一个与分离-嬗变概念不同的概念，称为能量放大器。鲁比亚是一位获得诺贝尔奖的粒子物理学家，他从在研制高能粒子探测器时发现的一种能量增益的现象得到启发，进而发展了能量放大器这一新型核能系统的概念，并提出了一个目标方案。

下面概略介绍美、日及西欧 3 个方案。

美国：由洛斯-阿拉莫斯国家实验室的核物理学家及加速器专家提出了一个“加速器嬗变废物”(ATW)计划，由一台 1.5GeV、125mA(或 0.8GeV、250mA)强流加速器，轰击铅靶与一座分成内、中、外 3 层同心柱状活性区的熔盐型热中子次临界反应堆构成。反应堆外层用重水慢化，温度为 70℃，Th-232 在其中转化为 U-233，通过在线放化处理，把 U-233 燃料馈入中层，此处为熔盐型堆，温度 600~700℃，此区内产生能量。中层产生的废物经在线分离后，馈入重水慢化的内层嬗变，此区的温度亦为 70℃。这个系统要求的热中子注量率为  $10^{16}$  中子/平方厘米-秒。系统能量增益  $G=15$ ；嬗变能力以 MA 的等效寿命计为 0.01 年，FP 小于 15 年。

日本：由日本原子能研究所及部分核工业企业合作，提出了一个“从钢系核获得额外增益的选择”(OMEGA)计划。这计划的目的明确为嬗变 MA。次临界装置取钠冷快中子堆，分别分析了熔盐型及固体组件型两种堆型，相应加速器的要求分别为 1.5GeV、25mA 及 1.5GeV、40mA。能量增益相应为 21 及 14。嬗变 MA 能力均为 250 公斤/年，即一个系统可以嬗变 10 座 1000 兆瓦核电站年产的废物。

西欧：顾名思义，这个方案是以获得核能为目标的，主要的分析重点在于 Th-U 燃料循环，但分析结果表明，这系统还具有嬗变核废料的能力与产生核废料少的优点。系统以一台 1GeV、20mA 加速器及一座铅冷快中子次临界装置为主体设备，总装料为 27.6 吨 Th，并加入一定数量的 U-235 或 Pu-239，系统的能量增益因子  $G=120$ 。在 U-Pu 循环中，Pu 的等效半衰期约 10 年。

如用 Th-U 循环，则该系统是相当“洁净”的。下列估计值作为参考，取同样功率的系统运行 40 年，并经 1000 年冷却后，其剩余放射性的比值为：

惯性约束核聚变装置	1 ~ 20
Th—U 循环能量放大器	1 (经嬗变) ~ 100 (废物未嬗变)
燃煤	33
磁约束核聚变装置	1000
快中子增殖反应堆	20000

由于这个系统所要求的加速器流强指标相对较低，结合西欧的技术贮备，他们正利用瑞士已运行了近 20 年的 0.6GeV、1mA 加速器展开技术预研。

此外，俄、法等国也有各自的计划及设想；瑞典、韩国、捷克等国的核科技界也开始关注这一系统的研究动向。国际原子能机构也介入组织有关的专家会议。这些动态说明对这一新概念核能系统的研究在日益发展中。

由于中能强流加速器不仅在此核能系统中是必要的，而且具有广泛的应用，所以美、日、俄等国都花很大精力对强流加速器进行预研。最近，从私人通讯中了解到，美国在停止了对用于粒子物理研究的预期耗资 80 亿美元的超级超导对撞机计划后，能源部已决定在橡树岭国家实验室建设一台指标为 1GeV、5mA 的加速器，作为多用途核研究设施，今年开始拨款进行预研。如果这台加速器建成，无疑将是强流加速器物理及技术上一个里程碑性的工程。

核能系统的研究、开发是个周期长、投资大、涉及学科门类多的巨大的系统工程。尤其这一新技术路线把过去一直相对独立发展的加速器、反应堆、放射化学等学科汇于一炉，涉及的问题更为复杂。

从我国的核电发展看，到下世纪初将会达到 8400 兆瓦的装机容量。将积累起成吨的 MA 及 FP，对其处置的问题亦将提上日程。因此，在开始发展核电的同时，主动地研究对废物的处置方案是必要的。

目前，我们的研究工作方针可以归结为：跟踪国际动态，深化概念研究，适度技术贮备，加强国际交流。我们认为充分利用国际核科技界的研究成果，促进我们对系统的概念（从物理分析到准工程性系统）的研究是一条有效的途径。对必须的技术贮备（如加速器、放化流程）宜从小到大，从局部到整体，从“冷”试验到“热”试验逐步开展，以期从总体上形成我们的方案。

我们认为这个新的核能系统是有生命力的，不仅可以填补下世纪前半叶对核能的需求，也可能在相当长一段时间内与聚变能的利用并存。就我国资源情况看，就目前已掌握的铀资源量而言，如采取这一技术路线，则可能提供相当于前述可采煤的 1/5 ~ 1/4 能源供应，相应发电能力中所占的比例就更大。这样可确定核能成为我国下世纪能源构成中支柱之一的地位。



# 今日数学及其应用

王梓坤

北京师范大学

王梓坤 数学家。1929年4月30日生于湖南零陵,1952年毕业于武汉大学,1958年获苏联莫斯科大学副博士学位,1988年获澳大利亚麦克里大学名誉科学博士学位。先后任南开大学和北京师范大学教授(1984年至1989年任该校校长),同时任汕头大学(1993年起任该校数学研究所所长)教授。1991年当选为中国科学院院士(学部委员)。专长概率论,并在随机过程等方面的研究与教学中取得多项系统的重要成果。

## 一、数学科学、高新科技与国家富强

1. 对数学的新认识之一 “国家的繁荣富强,关键在于高新的科技和高效率的经济管理。”这是当代有识之士的一个共同见解,也已为各发达国家的历史所证实。在我国,邓小平同志把科技对生产建设的重要性提到前所未有的高度;在美国,科学院院士J.G.Glimm也曾幽默地说过:40年前,中国有句话说“枪杆子里面出政权”,而从90年代起,在全球应是“科学技术里面出政权”。他的话反映了国外许多人士对科技重要性的新认识。从最近海湾战争可以看出,高技术是保持国家竞争力的关键因素。“高新技术的基础是应用科学,而应用科学的基础是数学”。这句话把数学对高新技术的作用,从而对国富民强的作用,清楚地表达出来。当代科技的一个突出特点是定量化。人们在许多现代化的设计和控制中,从一个大工程的战略规划、新产品的制作、成本的结算、施工、验收、直到贮存、运输、销售和维修等等都必须十分精确地规定大小、方位、时间、速度、成本等数字指标。精确定量思维是对当代科技人员共同的要求。所谓定量思维是指人们从实际中提炼数学问题,抽象化为数学模型,用数学计算求出此模型的解或近似解,然后回到现实中进行检验,必要时修改模型使之更切合实际,最后编制解题的软件包,以便得到更广泛的方便的应用。

2. 新认识之二 数学科学对经济发展和竞争十分重要。好的经济工作者决不止是定性思维者,他不能只满足于粗线条的大致估计,而必须同时是一位定量思维者。数学科学不仅帮助人们在经营中获利,而且给予人们以能力,包括直观思维、逻辑推理、精确计算以及结论的明确无误。这些都是精明的经济工作者和科技人员所应具备的工作素质;大而言之,也是每个公民的科学文化素质。所以数学科学对提高一个民族的科学和文化素质起着非常重要的作用。

3. 新认识之三 “高技术本质上是一种数学技术”。这种观点已为越来越多的人所接受。许多西方公司意识到:利用计算技术去解决复杂的方程和最优化问题,已改变了工业过程的组织和新产品的的设计。数学大大地增强了他们在经济竞争中的力量。无怪乎美国科学院院士J.G.Glimm不仅称数学为非常重要的科学,而且说它是授予人以能力的技术。他说:“数学对经济竞争力至为重要,数学是一种关键的普遍适用的,并授予人以能力的技术。”时至今日,数学已兼有科学与技术两种品质,这是其它学科所少有的,不可

不知。

由于对数学重要性的重新认识，在欧洲建立了“欧洲工业数学联合会”，以加强数学与工业的联系，同时培养工业数学家去满足工业对数学的要求。在一篇有关的报告中，列举了欧洲工业中提出的 20 个数学问题，其中包括：齿轮设计、冷轧钢板的焊接、海堤安全高度的计算、密码问题、自动生产线的设计、化工厂中定常态的决定、连续铸造的控制、霜冻起伏的预测、发动机中汽轮机构件的排列、电化学绘图等等。

4. 数学与诺贝尔经济奖 数学对经济学的发展起了很大的作用。今天，一位不懂数学的经济学家决不会成为杰出的经济学家。1969 年至 1981 年间颁发的 13 个诺贝尔经济学奖中，有 7 个获奖工作是相当数学化的。其中有 Kantorovich“由于对物资最优调拨理论的贡献”而获 1975 年奖，Klein“设计预测经济变动的计算机模式”（获 1980 年奖），Tobin“投资决策的数学模型”（获 1981 年奖）等等。在经济学中，用到的数学非常广泛，有的还很精深。其中包括线性规划、几何规划、非线性规划、不动点定理、变分法、控制理论、动态规划、凸集理论、概率论、数理统计、随机过程、有限结构（图论、格论）、矩阵论、微分方程、对策论、多值函数、集值测度，以及 Arrow 的合理意图次序理论等等，它们应用于经济学的许多部门，特别是数理经济学和计量经济学。

5. 爱因斯坦的见解 在数学与其他科学的关系方面，培根曾说数学是“通向科学大门的钥匙”；伽利略说“自然界的伟大的书是用数学语言写成的”。物理定律，以及科学的许多最基本的原理，全是用数学公式表示的。引力的思想早已有之，但只有当牛顿用精确的数学公式表达时，才成为科学中最重要、最著名的万有引力定律。另一位物理大师爱因斯坦认为，“理论物理学家越来越不得不服从于纯数学的形式的支配”；他还认定理论物理的“创造性原则寓于数学之中”。他自己的工作证实了这一思想，正是黎曼几何为广义相对论提供了数学框架。科学大师们的工作和思想，引导到如下的信念：“我们生活在受精确的数学定律制约的宇宙之中”，正是这种制约使得世界成为可认识的。世界可知是唯物认识论中的最重要的原理。

6. 数学是什么？ 恩格斯说：数学是研究现实中数量关系和空间形式的科学。虽然时间已过去一百多年，这一答案大体上还是恰当的，不过应该把“数量”和“空间”作广义的理解。数量不仅是实数，而且是向量、张量，甚至是有代数结构的抽象集合中的元；而空间也不是仅指三维空间，还有  $n$  维、无穷维以及具有某种结构的抽象空间。这样，恩格斯的答案已基本上包含了数学的主要内容，尽管还有一些重要的篇章如数理逻辑等包不进去。

7. 数学的特点 数学的特点是：内容的抽象性、应用的广泛性、推理的严谨性和结论的明确性。数学虽不研究事物的质，但任一事物必有量和形，所以数学是无处不在、无时不用的。两种事物，如果有相同的量或形，便可用相同的数学方法，因而数学必然、也必须是抽象的。同一个拉普拉斯（Laplace）方程，既用来表示热平衡态、溶质动态平衡、弹性膜的平衡位置，也可表示静态电磁场、真空中的引力势等等。数学中严谨的推理和一丝不苟的计算，使得每一数学结论不可动摇。这种思想方法不仅培养了数学家，也有助于提高全国人民的科学文化素质。它是人类巨大的精神财富。爱因斯坦关于欧氏几何曾说：“世界第一次目睹了一个逻辑体系的奇迹，这个逻辑体系如此精密地一步一步推进，以致它每一个命题都是绝对不容置疑的——

我这里说的是欧几里得几何。推理的这种可赞叹的胜利，使人类的理智获得了为取得以后成就所必需的信心。”

8. 数学的成份 数学大体上可分为三大部分：基础数学、应用数学和计算数学。基础数学是数学中的核心，也是最纯粹最抽象的部分。它大致由三个分支组成：分析、代数和几何。这三者又相互交叉和渗透，从而产生解析几何、解析数论、代数几何等学科。此外研究随机现象的概率论、研究形式推理的数理逻辑等，也属于基础数学。

应用数学研究现实中具体的数学问题，它既采用基础数学的成果，同时又反过来从实际中提炼问题、探讨新思想和新方法以丰富基础数学。数学应用的领域虽无边际，但大致也可分为三方面：经济建设（工、农、商等）；科学与技术（特别是高科技）；军事与国防，详述见后。运筹学、控制论与数理统计等学科中，大部分内容属于应用数学；而经济数学、生物数学等，则是比较标准的应用数学学科。

计算数学偏重于计算，早期它致力于求出各种方程（代数方程、（偏）微分方程、微积分方程等）的数值解。近 40 年来，计算数学有了极其迅速的发展，这主要是由于电子计算机的出现。计算机的高速计算使得许多过去无法求解的问题成为可解，从而大大扩展了数学的应用范围。例如，短期天气预报、高速运行器的控制，离开计算数学和计算机是不可能的。近期，由于计算机模拟、计算辅助证明（如四色问题的证实）在人工智能中的应用，以及计算力学、计算物理、计算化学、计算几何、计算概率等新学科的诞生等等，使得计算数学雄风大振。今天，人们已把计算作为与理论、实验鼎足而立的第三种科学方法而引入科学界。

基础数学、应用数学与计算数学既有各自的特点又紧密相互联系。一个重大的数学问题，特别是从实际中提出的数学问题，都需要上述三种数学的内容和方法。建立数学模型，寻求解题方法，需要基础数学和应用数学，而使解题方法得以实现，则离不开计算数学。这三种数学互相补充，互相渗透，大大地促进了整个数学科学的发展。

9. 现代数学的新特点 数学内部各分支间的相互渗透、数学与其他科学（如控制论）的相互渗透、电子计算机的出现，正是当代数学三个新的特点。由于相互渗透而导致许多新问题和古老难题的解决，其成绩往往出乎意外而使人惊异。例如，对素数的研究以往认为很少有实用价值，却不料它在密码学中受到重用。密码学认为，千位以上的整数的素因子分解，几十年内在计算上不可能实现。但荷兰数学家得到了一个当前最好的因子分解算法，这严重地冲击了上述想法和密码的安全性。又如泛函分析中的无穷维 Von Neumann 代数解决了拓扑学三维空间中打结理论中一些难题。描写孤立波的 KdV 方程用于代数中，解决了 Riemann 提出的一个重要问题。描写随机现象的 Malliavin 演算给出了著名的 Atiyah-Singer 指数定理的新证明，并推广了这一定理。更使人感叹的是物理中的杨振宁——米尔斯规范场与陈省身研究的纤维丛间的紧密联系，二者间的主要术语竟可一一对应。例如，规范形式——主纤维丛、规范势——主纤维丛上的连络、相因子——平行移动、电磁作用—— $U(1)$  丛上的连络等等。无怪乎杨振宁说：“我非常惊奇地发现，规范场说是纤维丛的连络，而数学家们在提出纤维丛上的连络时，并未涉及到物理世界”。

学科间的相互渗透是当今各门科学技术高速发展的必然后果，也是重要

原因；只有置身于众多高新科技急剧发展的大背景中，数学内、外部的相互渗透才是可能的，也是容易理解的。

10. 数学发展的趋势 今后数学的发展必然比最近数十年更迅速，成绩更巨大。科学技术越积累，人类认识、利用和改造自然的能力越增长，科学技术便越快发展，形成一良性循环。作为其中的一部分，数学也必然如此。总体上，高速发展是完全可以预言的；但至于哪些分支发展得更快些，更好些，则既依赖于该学科本身的活力又依赖于科技大背景的波动和社会的需要，难以肯定回答。不过从目前的情况看，非线性数学是一重要发展方向。线性方程的特征是叠加原理成立：如  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  是方程的两个解，则  $a_1\phi_1 + a_2\phi_2$  也是解，其中  $a_1$ 、 $a_2$  是常数。例如薛定谔方程

$$i \frac{\partial \phi}{\partial t} = H\phi,$$

或拉普拉斯方程

$$\sum_{i=1}^d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i^2} = 0$$

都是线性的。线性数学比较成熟。但还有许多问题是非线性的，如牛顿引力论中的基本定律是平方反比关系，粮食产量对肥料未必成正比等。引人注目的冲击波、孤立子、混沌现象、n 体问题等都是非线性的。非线性问题，不仅涉及面广，而且难度也大，这反而更能引发人们研究的兴趣。

除去非线性数学外，离散数学（涉及数论、抽象代数、数理逻辑、组合论、图论、博弈论、规划论等），概率论与数理统计、计算数学以及数学对生物学、经济学、语言学、管理学、控制论、复杂性等的渗透和应用，都会有更大的发展。其它数学也同样会有迅速的进展；甚至会爆出新的、出人意料的大冷门；晴空一鹤排云上，更引诗情到碧霄，这也是非常可能的。

## 二、大哉数学之为用

1959年5月，华罗庚教授在《人民日报》上发表了《大哉数学之为用》，精彩地叙述了数学的各种应用：宇宙之大、粒子之微、火箭之速、化工之巧、地球之变、生物之谜、日用之繁等各个方面，无处不有数学的重要贡献。很难比这篇文章写得更全面了。下面只举些60年代以后数学的若干重大应用，以见一斑。我们会看到，有些重要问题的解决，数学方法是唯一的，也就是说，除数学外，用任何其他方法、仪器、手段都会一筹莫展。

1. 沙漠风暴与数学战 1990年伊拉克点燃了科威特的数百口油井，浓烟遮天蔽日。美国及其盟军在沙漠风暴以前，曾严肃地考虑点燃所有油井的后果。据美国《超级计算评论》杂志披露，五角大楼要求太平洋-赛拉研究公司研究此问题。该公司利用 Navier-Stokes 方程和有热损失能量方程作为计算模型，在进行一系列模拟计算后得出结论：大火的烟雾可能招致一场重大的污染事件，它将波及到波斯湾、伊朗南部、巴基斯坦和印度北部，但不会失去控制，不会造成全球性的气候变化，不会对地球的生态和经济系统造成不可挽回的损失。这样才促成美国下定决心。所以人们说第一次世界大战是化学战（火药），第二次是物理战（原子弹），海湾战争是数学战。

数学在军事方面的应用不可忽视。再举三个例子，海湾战争中，美国将大批人员和物资调运到位，只用了短短一个月时间。这是由于他们运用了运筹学和优化技术。另一例是：采用可靠性方法，美国研制 MZ 导弹的发射试验

从原来的 36 次减少为 25 次，可靠性却从 72% 提高到 93%。再者，我国研制原子弹，试验次数仅为西方的 1/10，从原子弹到氢弹只用了 2 年 8 个月，重要原因之一是有许多优秀数学家参加了工作。

2. 太阳系是稳定的吗？地球的前途如何？是一个虽然遥远却非常有趣而重要的问题。将来太阳系是否会保持现状？是否有某行星脱离太阳系？行星间是否会碰撞？数学证明，太阳系在相当长时间内是稳定的，至少 10 亿年内如此。科学家还用计算模拟以研究恒星消亡过程。太阳最后变成一颗白矮星；但一颗质量约为 8-10 倍于太阳的恒星则会发生超新星爆炸：由于热源枯竭而收缩到一个小城市大小，密度达到原来的 100 万亿倍。这些物质产生巨大的刚性反弹而爆炸，恒星外壳被炸掉而剩下的残余成为中子星。天文学是数学的重要用武场所，1846 年勒维耶通过计算在笔尖上发现海王星，在科学史上传为佳话。在多体问题的研究中，由于初始条件不同，多体系统的运动或表现为规则的，或表现为混沌的。行星沿椭圆运动是规则运动的例子，而小行星在 Kirkwood 窗口的运动是混沌运动的例子：与木星的共振相互作用导致偏心率随机的变化，有时朝这一方向，有时朝另一方向；无规则变化的偏心率可能变得很大，这时小行星便可能陨落，例如落到火星上。

3. 石油勘探 这是数学取得重大经济效益的应用场所之一。石油深藏地下，人们通过人工地震记下反向回来的地震波，波形随着地层地质的不同而变化。用计算机处理所得的波形数据可以提供地下岩层、岩性以及有关石油、天然气等的知识。1991 年 5 月，美国壳牌石油公司应用计算技术于新奥尔良以南 39 公里的河流之下 930 公里处，探明了一个储量超过 10 亿桶的大油田。我国在这方面也做了许多工作（见后）。在数据处理中，Wiener 滤波起到重要作用。

4. DNA 与 CT 如果说二次大战以前，数学主要用于天文、物理，那么，现在数学已深入到化学、生物和经济、管理等社会科学中。例如，DNA 是分子生物学的重要研究对象，是遗传信息的携带者，它具有一种特别的立体结构——双螺旋结构，后者在细胞核中呈扭曲、绞拧、打结和圈套等形状，这正好是数学中的扭结理论研究的对象，北京大学姜伯驹教授对此深有研究。下面两项有关生物、医学和化学的高技术中，数学起着关键性作用。X 射线计算机层析摄影仪（简称 CT）的问世是本世纪医学中的奇迹，其原理是基于不同的物质有不同的 X 射线衰减系数。如果能够确定人体的衰减系数的分布，就能重建其断层或三维图像。但通过 X 射线透射时，只能测量到人体的直线上的 X 射线衰减系数的平均值（是一积分）。当直线变化时，此平均值（依赖于某参数）也随之变化。能否通过此平均值以求出整个衰减系统的分布呢？人们利用数学中的 Radon 变换解决了此问题，Radon 变换已成为 CT 理论的核心。首创 CT 理论的 A. M. Cormack（美）及第一台 CT 制作者 C. N. Hounsfield（英）因而荣获 1979 年诺贝尔医学和生理学奖。另一项高技术是 H. Hauptman 与 J. Karle 合作，发明了测定分子结构的新方法，利用它可以直接显示被 X 射线透射的分子的立体结构。人们应用此方法，并结合利用计算机，已测出包括维生素、激素等数万种分子结构，推动了有机化学、药物学和生物学等的发展；二发明人分享了 1985 年的诺贝尔化学奖。由此可见此二项技术中数学的关键作用。

5. 飞机制造 制造业中广泛地用到数学，今以飞机为例，设计师必须考虑结构强度与稳定性，这是用有限元来分析的，而机翼的振动情况则需解特

征值问题；为了使飞机省油与提高速度必需找到一种最佳机翼和整个机体的形状；如何为飞行员选择最优控制参数，也是必须考虑的问题。飞机设计在极大程度上以计算为基础，人们研究描绘机翼和整个机体附近气流的方程。工程设计和制造工艺主要靠计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）两大工具，而这两者又都以数学为理论基础。计算流体力学可以帮助人们设计新的飞行器。数学模型已代替了许多的实验，如风洞实验，既便宜、省时，又有适用性、安全性。以前利用风洞设计飞机某一部件，若要改变某一部位，必须在机械车间建一模型；而今天设计一数学模型，只要通过键盘打进新的参数即可。自动导航与自动着陆系统是根据卡尔曼滤波的方法设计的，而后者主要又是数学。在涡轮机、压缩机、内燃机、发电机、数据存储磁盘、大规模集成电路、汽车车身、船体等的设计中，也都用到了类似的先进数学设计方法。

**6. Hardy 的故事** G. H. Hardy (1877—1947) 是英国著名的数学家，他推崇数学的“纯粹”和“美”，认为数学是一种永久性的艺术品。他从不谈（甚至轻视）数学的应用，他写道：“我从不干任何有用的事情，我的任何一项发现都没有，或者说不可能给这个世界的安逸带来最细微的变化……他们（指某些数学家）的工作，也和我的同样无用”。但他万万没有想到，1908年他发表的一篇短文却在群体遗传学中得到重要应用。那篇文章可直观地解释如下：人的某种遗传学病（如色盲），在一群体中是否会由于一代一代地遗传而患者越来越多？20世纪初有些生物学家认为确会如此，如果这样，那么势必后代每个人都会成为患者。Hardy 利用简单的概率运算，指出这种说法是错误的。他证明了：患者的分布是平稳的，不随时间而改变。差不多同时，德国的一位医师 Weinberg 也得到同样的结论。这一发现被称为 Hardy - Weinberg 定律。

**7. 高超的数学工具——在宏观经济中的应用** 宏观经济学研究经济综合指标的控制，例如研究失业、价格水平以及收支平衡的控制等。而微观经济学则针对买方和卖方，讨论消费与生产中的选择问题。1972年以来，承担调整美国经济的政府机构联邦储备局，以最优控制方法，特别是线性二次方法为背景，提出了包括失业与通货膨胀平衡的政策建议。1973年，《商业周刊》登了一篇文章，概述了最优控制在经济学中的潜在作用，文章说：“你如何努力地及时地刹住过于繁荣的经济，而又不至于滑入灾难性衰退的危险之中？……美国的决策者们恰好面临这种情形，而从经济学家那里极少得到明确的建议……对这种两难的情况，可从最优控制理论得到方法上的帮助”。利用控制理论和梯度法，人们求解了南朝鲜经济的最优计划模型（参考 *Economet - rica*, Vol.33, May, 1970, D.Kendrick 等的文章）。美国、加拿大、智利等也有类似的经济模型。

**8. 提高产品质量——数字在微观经济学中之应用** 数理统计学的应用极为广泛，它的优势是从有限次的观察或实验中提取重要的信息。数理统计中的篇章“实验设计”、“质量控制（QC）”、“多元分析”等对提高产品的质量往往能起到重要的作用。一家美国电视机制造公司被日本人买下，这家公司的废品率非常高。通过运用 QC 后，废品率下降到 2%。下面的例子说明美国电话电报公司如何使用 QC 以提高质量。问题是关于自动化装配线，这一装配线由几个机件组成，其生产率出奇的低，而人们又找不出原因。QC 方法首先是收集数据以确定失败模式，很快找出问题的症结是生产线上所用的

塑料成分的尺度变化太大；这些塑料部件过分弯曲；金属元件间的焊接点过厚，使机件运行阻塞。经过一年的改进，生产率增加 121%，工作时间减少 61%，产品成功率从 90% 增到 98%。

一般地，某产品的质量依赖于若干个因素（原料、工艺时间等等），每一因素又有若干种可能的选择，如何挑出最优的选择搭配以求获得最佳的产品，是统计实验设计（SED）的主要研究问题。SED 有一段发展史，20 年代，R. A. Fisher 在农业中运用 SED，取得前所未有的成功。20 年代中叶蒂皮特运用 SED 于棉纺工业，随后又用于化学和制药工业。50 年代，美国戴明把 SED 介绍到日本，对日本制造业产生很大影响，日本工程师田口用此法以减小产品性能异性从而提高产品质量。日本工业广泛运用统计质量控制，后又发展成全面质量管理，这项措施大大提高了日本产品的质量，在国际上最有竞争力，引起了巨大的反响。80 年代，许多美国工业公司通过田口把统计方法用到设计和制造中，产品质量不断地得以提高。

### 三、近年来数学在我国的应用

1992 年 9 月，中国工业与应用数学学会召开了第二次大会，会上李大潜教授宣读了《努力发展中国的工业与应用数学》的报告，其中叙述了我国应用数学的新进展。本节便以这篇报告为基础，补充若干新材料。后者是由一些研究所和大学所提供的，自然是挂一漏万。如前所述，数学应用可分成在经济建设（1—8 段）、在科学技术（9—14，16）、在军事与安全（15）三者中的应用。

1. 优化、控制与统筹 人们希望在一定条件下，在多种策略中选取其一以获得最大利益；数学上，这要求目标函数（代表利益）达到极大。目标函数也可代表损失，于是要求它达到极小。这类问题往往化为求目标函数的条件极值，或者化为变分问题。优选法、线性规划、非线性规划、最优控制等，都致力于研究优化问题。如果有好几件工作要做，便发生如何合理安排，以使收效最大（时间最短、劳力或成本最省等），这是统筹（或运筹学）的研究对象。70 年代，华罗庚教授登高一呼，并且亲自动手，率领研究小组，深入到工厂、农村、矿山，大力推广优选法与统筹法，足迹遍及 23 个省市，成果遍及许多行业，解决了许多问题。例如，纺织业中提高织机效率与染色质量，减少细纱断头率；电子行业中试制新的 160V 电容器，使 100 万米废钼丝复活；农业中提高加工中的出米率、出油率、出酒率等等。目前张里千、陈希孺教授等正在开展的现场统计，对国家经济建设也起了很好作用。

由于改善数学模型，运用最优控制理论和改进计算方法，生产过程和工艺参数的优化已在钢铁、冶金、电力、石油化工中取得很好效果。武汉钢铁公司、上海石油化工总厂、南京炼油厂、燕山石化公司通过上述优化技术，提高生产率最高可达 20%，一套装置每年可增加几百万元的经济效益。攀枝花钢铁公司建立了提钒工艺流程系统优化的数学模型，进行全面调优后使钒的回收率达到国际水平，使我国从钒进口国一跃而为钒出口国。云南大学统计系运用多元回归分析研究钢的成份与性能关系，使昆明钢铁厂甲类镇静钢的合格率由原来的 40%~81% 提高到 95% 以上。华东师大数学系与上钢五厂合作，利用自适应技术，使力学蠕变炉温度调节由 6~7 小时减少为 2~3 小时，控制精度由  $\pm 4$  提高到  $\pm 2$ ，并使罩式退火的保温时间缩短 5%~20%，提高了炉温控制精度，保证了退火质量。上海科技大学数学系用最优化

数学，制成“E型电源变压器计算机优化设计系统”，可缩短设计周期，节约生产成本。

现代大型工业是多线路的联合作业，成为一完整的系统，因而产生系统的控制问题，在化工联合企业，半导体集成电路、电力传输系统、电话网络、空间站等方面都有此问题。上海石化总厂采用网络优化，建立了用电子计算机编制共四级（总厂、分厂、车间、机台）设备的大型网络计划体系。清华大学关于电力系统过渡过程的研究，相当巧妙地运用微分几何，取得了很好的经济效益，在国际上领先，曾荣获国家自然科学奖二等奖。

曲阜师范大学自动化研究所应用数学方法，对汽车发动机调温器进行了研究，提高了调温器的质量，从而延长发动机的寿命，并节约耗油量。他们还采用随机线性模型及定积分近似算法，提高了碘镓灯晒版机的质量，产品进入了国际市场；此外，他们制成智能广义预测鲁棒控制器，可用于生产过程中温度、压力的控制；他们还将山东机床附件厂的车间、生产、财务、销售、人事、动力等八个点实行计算机联网，进行优化管理。

运筹学起源于二战中军需供应管理，主要应用于工商经营部门和交通运输以对生产结构、管理关系、人事组合、运输线路等进行优化。应用数学所运用运筹学指导全国原油合理分配和石油产品合理调运，年增效益2亿元；另外，他们所发展的下料方法可节省原材料10%-15%。上海石油化工总厂、镇海石化总厂等运用运筹方法，每年可增加利税数百万乃至千万元。华南理工大学和甘肃外贸局合作，建立新的存贮数学模型和管理决策原则，每年可节省存贮费用近百万元。

2. 设计与制造 工程的设计与建造、产品的设计与制造是国民经济的重要支柱，也是数学大可用武之领域。随着电子计算机技术的飞速发展，数学在制造业中的应用进入了新阶段。波音767飞机的成功设计，与应用数学家Garabedian对跨音速流和激波进行的计算密切相关，由此设计出了防激波的飞机翼型。目前以CAD和CAM技术为标志的设计革命正波及整个制造业。CAD是数学设计技术和计算机技术相结合的产物。我国在老一辈数学家苏步青教授的亲自开拓和大力倡导下，许多数学家在几何造型方面做了大量的工作，所取得的成果已成功地应用于飞机、汽车、船体、机械、模具、服装、首饰等的设计。南开大学吴大任、严志达教授等在船体放样及齿轮设计上也做了很好的工作。

复旦大学数学系与工程人员合作，对内燃机配气机构建立新的数学模型，发展了新的数学方法，使用此方法可以省油、降低噪声和抑制排污，有很好经济效益，曾获国家科技进步奖一等奖。上海应用数学咨询开发中心等开发研制服装CAD系统，为服装行业创汇提供了基础。

3. 质量控制 提高产品质量是国民经济中的一个关键问题。二战中由于对军用产品的高质量要求，特别是对复杂武器系统性能的可靠性要求，产生了可靠性、抽样检查、质量控制等新的数学方法，这些方法在美国、日本等国家取得了巨大成功。从60年代中期开始，我国应用推广质量控制等统计方法到工业、农业等部门，收到良好的效果，以手表、电视机为代表的机电产品的质量得到明显提高。清华大学、天津大学等研究了裂纹的扩展过程，有助于改善产品。同时，我国还制定了一系列质量控制的国家标准，对产品的质量提出了明确的要求。

4. 预测与管理 自然科学的主要任务是预测、预见各种自然现象。在经



济和管理中，预测也非常重要，数学是预测的重要武器，而预测则是管理（资金的投放、商品的产销、人员的组织等）的依据。我国数学工作者在天气、台风、地震、病虫害、鱼群、海浪等方面进行过大量的统计预测。中科院系统所对我国粮食产量的预测，获得很好的结果，连续 11 年的预测产量与实际产量平均误差只有 1%。上海经济信息中心对上海的经济增长进行预测，连续多年预测的误差都不超过 5%。云南大学统计系运用多元分析和稳健统计技术，通过计算机进行了地质数据处理和矿床统计预测。

为了配合机构改革，中科院应用数学所周子康等完成了“中国地方政府编制管理定量分析的研究”，建立了编制与相关因素分析模型等五组数学模型，构成了同级地方政府编制管理辅助决策分析体系，使编制管理科学化、现代化。

5. 信息处理 在无线电通讯中运用数学由来已久，编译码、滤波、呼唤排队等是传统的问题。近年来，长途电话网络系统中出现的数学问题更为可观，例如，需要用数目巨大得惊人的线性方程组来描述系统的操作性能；一般的数值法对它们毫无用处，人们不得不用很大力气设计一些新算法。北京大学在信息处理方面，做了很多工作：他们研究的计算机指纹自动识别，效率远高于国际上通行的方法；研究成功新一代图像数据压缩技术，压缩比指标达 150 倍（而传统的 JPEG 国际标准算法只能达 30 倍）；研究计算机视觉，创造了从单幅图像定量恢复三维形态的代数方法；应用模式识别和信息论，在时间序列和信号分析的研究中取得新的进展；应用代数编码，使计算机本身具有误差检测能力，以提高计算机的可靠性。

6. 大型工程 工程设计以周密的计算、精确的数据为基础，大型工程尤其如此。中国科学院计算中心早在 60 年代，运用冯康教授等创立的有限元法，设计了一批工程计算专用程序，在国家重点工程建设中发挥了作用，他们先后完成 23 个工程建筑的设计，解决重大工程技术问题 58 项，并对 18 座水坝工程进行过计算，其中包括葛洲坝工程、新丰江大坝、白山电站、长湖水电站等。与此同时还进行了技术转让，造就了一批专门人才，发表了許多有价值的论文。

中国科学院武汉数学物理研究所仔细研究了古老而又青春长驻的都江堰渠道工程。根据历史典籍、数学模型与实例资料，揭示了此项工程的系统科学原理，阐明了它“千年不衰”的原因；并提出了发展开拓这一古老工程的具体建议；在此基础上他们扩大战果，提出了可行的、合理的《都江堰集中调度系统》数学模型与优化决策算法结构，其中包括水情预报模型、需水模型等等。原则上他们的研究成果可适用于一切灌溉水系及“流系系统”（如交通运输流、金融财政流、商品供销流等）的调度与规划。

三峡水利工程是举世关注的超大型工程，其中一个严重的施工问题是大量混凝土在凝结过程中化学反应产生的热，它使得坝体产生不均匀应力，甚至形成裂缝，危害大坝安全。以往的办法是花大量财力进行事后修补。在我国已研制成可以动态模拟混凝土施工过程中温度、应力和徐变的计算机软件。人们可用计算方法来分析、比较各种施工方案以挑选最佳者，还可用它来对大坝建成后的运行进行监控和测算，以保障安全。

7. 资源开发与环境保护 在石油开发中我国数学界进行了长期的工作，参加的单位很多。70 年代中期北京大学闵嗣鹤教授等出版了关于石油勘探数学技术的专著，系统地介绍了有关的数学理论和方法。人们分析大量的

人工地震的数据，以推断地质的构造，为寻找石油、天然气的储藏位置提供依据；运用数理统计、Fourier 分析、时间序列分析等数学方法，成功地开发了具有先进水平的地震数据处理系统。近年来还用波动方程解的偏移叠加、逆散射等方法处理地震数据。参加这方面工作的先后有中科院计算中心张关泉等课题组，山东大学、清华大学等。南开大学胡国定教授等别开生面地用纯分析方法推导出所谓反褶积预测公式，在南海石油勘探中效果显著。

在石油开发的重要手段——测井资料解释方面，复旦大学等建立了电阻率测井的偏微分方程边值问题的模型，研制了高效能的数值方法，并据此进行优化设计、制造了新的测井仪器。采用此仪器和解释方法可发现容易忽视的薄夹层油层，以减少资源浪费。此仪器已被国内十多个油田采用，节省了几百万美元的进口外汇。应用数学所开展不稳定试验方法评价油藏特征研究，采用解微分方程和优化相结合的办法，成功地估计油气储藏量以及油井到油藏边界的距离，对新疆塔里木盆地雅克拉地区中生界油气的富集取得了明显的地质效果。北京大学数学系用三维有限元方法，对大庆油田地层滑移建立数学模型并模拟，据此以预报和预防，这样可减少损失。

水资源的研究十分重要。清华大学等建立了各种地层结构的数学模型，利用有限元方法计算地下水资源，建立了一套地下水资源评价的理论和办法，用于河南商丘和南京仙鹤门等地取得了实际效益，并在农田灌溉及理论研究上得到许多成果。云南大学统计系利用三维趋势分析，通过电子计算机模拟显示，拟合云南某矿区铅锌矿带分布方向、矿体定向位置，预测出三个成矿地段；同时指出东南方向矿藏变薄，从而及时撤回对该地段的勘探，避免了浪费。他们探矿的两篇论文发表在美国《Mathematical Geology》杂志上，法国、瑞典曾来函购买计算程序。此外，他们还建立了水生细菌生态学的数学模型，找出了 *E. Tor* 弧菌的最佳和最劣生长条件及生长规律，肯定了此种菌能越冬生长。

在环境保护与预防自然灾害方面，李国平教授发表过《数理地震学》专著。其它有关运用数学方法进行预报的书也不少见。

数学工作者对江、湖、河口的污染扩散，土壤洗盐等问题成功地进行了分析和模拟；对北京、天津、成都等城市的交通、管理自然条件和社会的容纳力做了深入的研究、预测和评价。例如，上海市关于地面沉降及地下储能的探讨，山东大学对西安市地下水污染模拟及预测，都是值得称道的工作。

8. 农业经济 中国科学院武汉数学物理研究所在分析了我国传统的生态农业思想与人类开发关系等问题之后，提出了一个生态农业经济发展及整治的理论框架与行动措施，以图高产、优质、高效来增加农民收入。他们建立了 18 个数学模型，其中包括：一般水环境整治与扩建、水电能源的投入产出与经济系统的优化、林业开发、土地资源开发等优化模型。

中国科学院系统所王毓云运用数学、生物、化学与经济学交叉的研究成果，建立了黄淮海平原农业资源配置的数学模型。按照模型计算，制定了黄淮海五省二市的资源配置规划。通过十年实施，农业发生了巨变。此项研究获得了国家重大攻关奖及国际运筹学会荣誉奖。

曲阜师范大学运筹学研究所所长长期面向农业，他们先后与山东省 23 个县市的农业部门合作，取得了经济和社会效益。他们运用线性规划、对策论、参数规划等数学工具，为长清县种植业和畜牧业制定最优的结构布局方案；采用模糊聚类分析方法，建立了桓台县水产业最优结构的模型；为郯城县剩余

劳力提出了合理转移方案；根据陵县的农业生态环境，建立了“盐、碱、荒地”、“低产田”，“中产田”开发治理的优化模型；为济南市的蔬菜产销结构，畜禽结构提出最优方案，并已于济南市有关部门所采用和执行。

9. 机器证明 计算机能进行高速计算，此为人所共知。计算机也能证明几何定理吗？这是关系到人类智能大大扩展和解放的大问题。1976年吴文俊教授开始进行研究，并在很短的时间内取得重大突破。他的基本思想如下：引进坐标，将几何定理用代数方程组的形式表达；提出一套完整可行的符号解法，将此代数方程组求解。此两步中，一般第二步更为困难。周咸青利用和发展吴文俊方法，编制出计算机软件，证明了500多条有相当难度的几何定理，并在美国出版了几何定理机器证明的专著。吴方法不仅可证明已有的几何定理，而且可以自动发现新的定理；可以从Kerler定律推导牛顿定律；解决一些非线性规划问题；给出Puma型机器人的逆运动方程的解。吴文俊教授还将其方法推广到微分几何定理的机器证明上。

10. 新计算方法 近年来国内研制出多种新的算法，具有很高的水平。中科院计算中心冯康研究组提出哈密顿系统的辛几何算法，获得了远优于现有其它方法的效果。研究成果在天体力学、等离子体流体力学、控制论等领域有现实应用或潜在应用，此工作获得中科院自然科学奖一等奖。

有限元分析的最主要的位移模式中通常使用两种元，即协调元与非协调元。后者具有更高的精确度，但收敛性较难保证。石钟慈研究了非协调元收敛性的各种性质，建立了收敛判别法；证明了许多种极有应用价值的非协调元的收敛性等等。

早在70年代，华罗庚、王元二教授开展了近代数论方法在近似分析中应用的研究，对多重积分的近似计算卓有成效，被称为华-王方法，其理论基础是数论中的一致分布论。近年来，王元与方开泰合作，发展了此方法并应用于数理统计，推广了“均匀设计法”，与通常“正交设计法”相比可减少试验次数，节省工作量与经费2/3，此方法已在航天部有关单位使用。四川大学柯召教授等在不定方程的研究中，以及徐利治教授在近似计算中，也做了很好的工作。

计算中心余德浩在自然边界元方法和自适应边界元方法研究中，得到了系统完整的成果，开辟了边界元研究的新方向，获得中科院自然科学奖一等奖。

北京大学数学系应隆安教授等独立于西方发展了无限元计算方法，20年来主要用于两方面：应力强度因子的计算和流体计算。用此种算法计算方腔流，在角点处得到了无穷多个向角点收缩的涡旋，这是用其它方法所得不到的。

北京大学张恭庆教授对无穷维Morse理论与方程的多重解，中科院计算中心袁亚湘对非线性规划的理论和算法，都取得重要研究成果。

计算是我国古代数学家的特长，例如祖冲之计算圆周率的巧妙算法，达到当时数学的顶峰。中科院系统研究所林群教授创立了“最优剖分”方法，发扬了祖冲之的优良传统。他发现剖分的形状可以决定计算的成败，因而必须选择最优剖分。这一成果得到国际同行高度评价，获中科院自然科学奖一等奖，并在我国及巴基斯坦的核电站中使用。

为了便于概率统计计算，中科院计算中心制成“随机数据统计分析软件包”（简记为SASD），在科研、教学、生产、管理等方面发挥了重要作用，

至今已有 200 多个单位购买和安装了 SASD。此外，中科院软件研究所陶仁骥等人在自动化方面的工作，也取得了重要进展。

11. **数学物理** 数学与物理是联系最紧密的两门科学。本文所说的数学物理只是指数学在物理中的应用。这方面人才济济，许多优秀的数学家都做过与物理有关的研究工作。中科院武汉数学物理研究所主编的《数学物理学报》，为推动数学物理的研究起了很大作用。南开数学研究所在这方面的研究中成绩显著。复旦大学谷超豪教授研究规范场的数学理论，发表了《经典规范场理论》等专著，目前他正致力于非线性数学的研究。周毓麟教授关于深水波的传播方程以及非线性伪抛物型方程、丁夏畦教授关于等熵气流方程的初值问题以及廖山涛教授对动力系统的深刻研究，都来源于物理或与物理紧密相关。陆启铿教授等将旋量分析运用于引力波，在引力波场方程求解方面获得成功的结果。

孤立子是非线性波动方程的一种具有粒子性状的解，它是由数学家首先发现的；它的发现及相应的数学理论的发展是当今数学的一件大事，在基本粒子、流体力学中有广泛应用。复旦大学胡和生教授对孤立子与微分几何中若干问题进行研究，得到系统的成果。中科院计算中心屠规彰等研究了非线性波方程的不变群守恒律、贝克隆变换等，解决了一类重要的非线性演化方程守恒律个数的猜想。中科院计算中心孙继广对广义特征值的扰动理论找到了一条好的研究途径，得到了一系列扰动定理，并解决了 Moler 等人提出的几个问题。上述计算中心三项工作均获得中科院科技成果奖一等奖。

12. **最短网络** 1990 年，中科院应用数学所研究员堵丁柱与美籍华人黄光明合作，证明了有关网络路线最短的一个猜想 (Pollak - Gilbert 猜想，1968 年提出)，在美国离散数学界引起轰动，被列为 1989—1990 年度美国离散数学界与理论计算机科学界的两项重大成果之一。设 ABC 为等边三角形，连接三顶点的路线 (称为网络)。这种网络有许多个，其中最短路线者显然是二边之和 (如 AB + AC)。但若允许加新点 P，连接 4 点的新网络之路径长为 PA + PB + PC。最短新路径之长 N 比原来只连三点的最短路径 O 要短。推广到任何 n 点 (不必成等边)，上述猜想为

$$\frac{N}{O} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 86.6\%$$

此猜想持续 22 年，是贝尔实验室一直关注的难题，它在供电线路设计、计算机电路设计中都有应用，无怪乎解决后引起强烈反响。

13. **几何设计** 用计算机作为辅助工具制作影片，是一有趣的新课题，其中用到计算几何学与分形 (Fractal) 几何的知识和方法。北方工业大学 CAD 研究中心完成三项成果：

a. 1990 年亚运会期间，首次在我国把电脑三维动画搬上银幕，做成亚运会体育大舞台电影片的片头。继而又完成 14 个节目头；为中央电视台制作新闻联播片头；1991 年春节前，完成国内第一部电脑卡通寓言电视片《咪咪钓鱼》。

b. 1992 年完成国内第一部全电脑制作的科教片《相似》，被评为“它在中国电影技术发展史上有重要影响”的事件。

c. 利用计算机制作三维动画广告多个。

14. **模糊推理** 人脑能从模糊的观察对象提炼出有用的甚至精确的信息，即使对象蒙上伪装也能识别，这是计算机所望尘不及的。大脑的这种卓

越的功能真令人惊叹不已。模糊数学研究的正是模糊的对象。请不要误以为这种数学本身是模糊的、不精确的。北京师范大学汪培庄教授等从事模糊数学的理论和应用的研究。基于他们自创的理论，研究成功国际上第二台模糊推理机。推理速度比日本的第一台（1987年7月推出）提高50%，而样机体积只有它的1/10。随后又研制成功总线级推理机，达到了标准化和通用化。在家用电器方面，开发成功模糊空调器、模糊电冰箱等。在工业应用方面，制成“电气化铁路输电线几何参数图像识别系统”、“心肺功能数据处理系统”以及为首钢制造的“给水系统模糊控制器”等。

我国研究模糊数学而且成绩显著者还有四川大学刘应明、陕西师大王国俊等教授。

15. 军事与国防 上面已提到，我国所以能在很短时间内制成原子弹、氢弹和其他先进武器，发射火箭与卫星，是由于许多优秀科技工作者的共同努力，其中也凝聚着数学家的劳动和智慧，他们的贡献暂时默默无闻，然而必将永照史册。

运用数学对重要信息加密或破密，形成一门新的应用数学——密码学，即密码分析与讯息安全设计。北京大学段学复教授等对此进行了长期研究，他们的成果对于一类重要的特殊情况能提高计算时效2000倍；此外，还开设了几届进修班。中科院系统研究所万哲先研究员等人相互独立同时完成对移位寄存器序列的理论，进行了潜心的研究，他们的成果丰富了线性及非线性移位寄存器序列的理论，在保密通信中有重要作用；再者，他们运用典型群方法，进行了认证码的构造，这也是保密通信的一个重要方面。以上段、万二位的工作都得到高度评价和奖励。中国科技大学曾肯定教授等对密码分析及讯息安全保护，也做了重要的工作。

在刑事案件中，常遇到被烧毁的纸灰，如能利用它以鉴别纸张类型，对侦破有时有重要意义。云南大学统计系利用聚类分析、判别分析等统计方法，做了这方面的研究，据此侦破案件多起而获奖。

曲阜师范大学自动化研究所运用系统辨识等方法制成重烧伤输流电脑测算仪，提高了对烧伤病人的医护水平。此仪器已为四所军医大学及其它单位所采用，并获中国人民解放军科技进步奖二等奖。

16. 其它 数学应用多种多样。北京大学黄敦教授与杨淳等研究冲击波及滑流的四种数值概型，得到很好的结果。计算物理学家用 Monte-Carlo 方法计算了子宫颈癌腔内放射治疗剂量的分布，既准确又简便，提高了治疗效果。国外提出了几种艾滋病的数学模型，如 HIV / AIDS 传播动态模型、危险行为模型等；对肿瘤也有数学模型，如 Mendelson 模型、Conpertz 模型等。关于卫生保健，云南大学对云南省学生体质进行了调查，形成了“体调数据库”，建立了“指标综合数学模型”等。

#### 四、为数学强国而奋斗

三年前在南开大学举行的 21 世纪数学展望会上，陈省身教授及与会的数学家都认为，数学是我国人民擅长的学科，我国完全有希望在 21 世纪前期成为数学大国、数学强国；他们还提出：数学应该率先赶超国际先进水平。的确，我国古代数学有过辉煌的成就；近几百年由于封建社会政治腐败和帝国主义侵略，数学落后了。新中国诞生后，我国数学有了很大的发展。在 1956 年科学发展规划的指导下，建立和发展了微分方程、概率统计、计算数学、

泛函分析、多复变函数论、运筹学、控制论等分支学科。到 1965 年，我国数学的基础研究已具有相当规模，并且有自己的特色，在国际上有一定地位。我国的《数学学报》曾被美国全部译成英文出版。十年动乱中，数学研究受到严重破坏。改革开放以来，数学界恢复了活力，国内的学术风气非常活跃，陈景润、王元、潘承洞等在数论和杨乐、张广厚等在函数论方面的优秀成果饮誉国际，从而大大鼓舞了士气。研究队伍和方向也进行了重新组合和调整，一批新的数学研究所（如南开数学研究所）相继建立。国外来访的专家讲学频繁，同时我国也有不少专家到国外讲学或参加国际学术会议。大批中、青年学者则以访问、进修或攻读学位的方式出国留学。学术上的内外交流沟通了信息，提高了水平。更令人欣喜的是，一批优秀的青年博士学成回国开始填补若干重要的空白领域如代数几何等；国内自己培养的博士也逐渐崭露头角，研究工作出色者大有人在。原先有较强实力的领域，如数理逻辑、数论、代数、函数论、拓扑学、微分几何、微分方程、泛函分析、概率统计、控制论、运筹学、计算数学等，以及起步较晚的一些学科，如代数数论、代数几何、非线性泛函分析、动力系统、整体微分几何、随机分析、机器证明和模糊数学等，都在近年内做出了达到或接近国际先进水平的成果。最近两届国际奥林匹克数学竞赛，我国连获团体冠军，个人金牌数也名列前茅，消息传来，全国振奋。我国数学，现在有能人，后继有强手，国内外华人无不欢欣鼓舞。

然而另一方面也必须看到，从整体上看，我国数学研究的水平与世界先进国家相比，还有相当差距。另一严重情况是，到 2000 年，高校数学师资将面临严重短缺。以高校理科而言，现有数学教师约 24,000 人，到 2000 年若有 55% 退休，即退休 13,200 人，那么，即使以全部研究生补缺，仍短少约 2,000 人。因此，必须吸引更多年轻人学习数学。

为了使数学更健康地发展，更好地为社会主义建设服务，特提出下列建议：

1. 在指导思想方面，提倡“全面发展，重点扶持，办出特色”。发展科学文化，“百花齐放、百家争鸣”的方针是正确的。数学中子学科繁多，而且不断有新学科出现，每门新学科的发展前途，难以逆料。因此，应该给各学科以充分发展的机会，在发展中竞争。所谓重点，是指那些对科学发展或实际应用已逐步展示其重要作用的学科或项目，如非线性数学、计算数学、计算机数学、离散数学的某些方面，数学物理、数学的其他边缘学科、概率统计等。对重点学科，应给以较大扶持。任何一个国家都不可能在数学的各方面都领先。为了赶超国际先进水平，只能重点突破；在某几个学科或项目上率先突破，这就必须有我国自己的特色。特色是什么？这是一个值得深入研究的大问题。

2. 空气哺育万物而自身无赏；同样，数学教育众人而报酬极低；桃李无言，下自成蹊。另一方面，学习数学又难，成为拔尖人物更难。无怪乎现代青年人大都不愿学数学，即使有数学天才者也避而远之；奥林匹克竞赛优胜少年，又有几人立志数学？这实在令人感叹而忧伤。要区别对待各类人才。对有成就的数学家，要更好发挥他们的作用，在社会地位、生活待遇上有一定优先，因为他们的今天是青少年的明天，对青少年起着示范和吸引作用；对达到国际第一流水平的学者应重金聘请；对博士，无论国外或国内培养者要同样待遇，今后逐步过渡到以国内培养为主。惜乎现在博士生源枯萎，报

考者寥寥无几。要多吸引优秀青年学成后回国工作。国家自然科学基金委员会每年举办数学讲习班，请留学国外的博士回来短期讲学，效果很好，是一创举，如能提供单程国际机票，则会吸引更多学子回来。对 30 岁左右学业有成的学者，需提供条件，使其在工作、出访、职称、生活等方面均能得到相应的待遇，以便早日脱颖而出。中小学数学教学，既要有科学性，又要有趣味性，以提高青少年学数学的兴趣。对成绩优秀者，给以奖励，奥林匹克金牌获得者应予重奖，金额应接近体育金牌获得者。

3. 数学研究设备虽比较少，但计算机、图书资料、国内外交流、人才培养等都需要大量经费，“一支笔、一张纸”的研究方式已成历史。应大力开辟财源，除国家拨款外，国家自然科学基金对数学与物理的资助以 1:3 为宜。社会名流、企业和财团的支持应是一重要财源，这方面开发得还很不够，应对他们进行宣传，给予技术帮助，使他们从中获益，从而体会到数学的好处。

4. 学科的强大生命力在于对社会进步的贡献，数学也不例外。数学的贡献在于对整个科学技术（尤其是高新科技）水平的推进与提高，对科技人才的培养和滋润，对经济建设的繁荣，对全体人民的科学思维与文化素质的哺育，这四方面的作用是极为巨大的，也是其它学科所不能全面比拟的。数学工作者应主动联系实际，了解与数学有关的各种问题。同时也希望社会各界人士多予关注、支持与帮助，多与数学界合作，主动提出各种咨询，以使数学科学更深入地扎根于实际，为我国的社会主义建设多作贡献。

# 空间天文学——当代科学前沿

艾国祥

## 中国科学院北京天文台

艾国祥 天体物理学家。1938年2月17日出生于湖南益阳,1963年毕业于北京大学。1993年当选为中国科学院院士(学部委员)。现任国际天文学会太阳活动委员会副主席,1997年升任主席、国家自然科学基金“太阳磁场与速度场观测和研究”重点项目组长,美国基金会与中科院合作项目“中美太阳联测”、国家科委与日本文部省合作协议项目“中日太阳物理合作”中方首席科学家等职务,并在太阳物理观测研究中取得重要成就。

### 一、空间天文学发展状况

空间——太空,是地球稠密大气层之外的范围(100~120公里高之外),是除陆地、海洋和大气层之外,人类的第四环境。空间——太空,是包括地球卫星、太阳系飞船、星际飞船等的活动范围。从一定意义上讲,空间天文活动包括气球和火箭,甚至包括机载天文仪器的探测。本文仅涉及航天器天文的活动范围,即第四环境中的天文探测。

1957年至1993年9月30日,全世界成功的空间发射为3548次,其中美国占27.5%,前苏联(俄)占68%,日本占1.3%,欧空局占1.5%,中国占0.9%;已发射航天器4500余个,含多星发射,美国成功发射航天器1366次,失败159次,占11%,全世界载人飞船164次,科学航天器为841个,占19.13%。与天文学有关的大约400个(前苏联的难以全面统计),约占10%左右。

全世界航天方面,大概花费了12000亿~15000亿美元(平均一次发射大概花3亿美元,一个航天器平均2.5亿美元)。估计与天文有关的开支,为1200亿~1500亿美元左右,占10%左右(美国至1993年实际开支4074亿美元,若换算到1993年的等值数是7391亿美元)。欧洲空间局在1993年的预算中,空间科学占10.4%(不包括微重力与应用卫星),为294MAU(2亿美元),这个预算不包括发射费用。欧洲空间局的空间科学项目中有10项,除一项地球物理卫星之外,其他9项都是空间天文项目。美国宇航局1989—2005年经费中,共投入2195亿美元,其中空间科学(不包括运载和发射)为493.7亿美元,占22.5%。空间天文学是重要领域,地面的天文设备,只有极少数投资能够达到1亿~3亿美元;空间天文用航天器的平均投资为2亿~4亿美元,而大型空间天文活动花几十亿美元的,已达几十次。30多年来,空间天文设备的花费大约是地面天文设备的10倍左右。大型项目,如Appollo登月计划、行星际探测站、IUE(紫外天文卫星)、IRAS(红外天文卫星)、COBE(宇宙微波背景辐射探测器)、Hipparcos(天体测量卫星)、Hubble(空间望远镜)、ROSAT(X射线卫星)、GRO(射线卫星)、Yohkoh(太阳卫星)以及SOHO等,都是耗资几亿甚至几十亿美元的项目。著名的Hubble空间望远镜,长13米,直径4.3米,主镜口径2.4米,总重12.5吨,研制历时13年,运行5年,耗资超过了30亿美元。它具有0.1角秒的成像分辨率,可观测到比地面观测暗40倍的天体,使观测天体的数目增加数



百倍；光谱范围有紫外、红外、可见光，集高新技术之大成，是空间天文发展史上的重大里程碑。去年底发射的太阳和日球天文台（SOHO）是十几个国家联合发射的太阳和太阳系飞船，耗资达 20 亿美元，载有 12 大设备，对太阳和日地空间环境将进行史无前例的重大探测。

21 世纪初，超大型月基和空基的直径 10 米~16 米的光学望远镜、卫星群天文光学干涉仪、大型 射线天文台等正在预研究。月基 16 米望远镜预计花费 50 亿~100 亿美元（2015 年建成）。笔者曾参加 COSPAR（国际空间科学协会）1993 年汉堡会议，随后又参加 IAU（国际天文协会）海牙大会，深感天文学在空间科学中的突出地位（我估计为 50%），感到参加 COSPAR 大会的天文学家似乎已超过参加 IAU 大会的人数，而且级别高、费用多，看来空间天文成了天文学的主要领域。

就第二次世界大战后的现代科学而言，从笔者不完全了解的情况来看，似乎没有一项科学事业的规模和投资，超过了空间天文学。物理学关于基本粒子的研究和加速器制造是耗资巨大的，但比之空间天文学，仍有明显差距，可以夸张点讲，空间天文学是现代科学的“天之骄子”。空间天文学成了现代科学十分突出的前沿。

## 二、空间天文学成了科技发展的前沿热点

### 1. 空间天文观测的优势和困难

天文学是一门依赖观测的科学，观测台址则是天文学发展的最重要基础之一。纵观天文台发展历史，观测台址有过四次变迁：市中心（北京建国门古观象台、伦敦格林尼治天文台）——远郊（基特峰天文台、兴隆天文台）——远山、远海（欧南台、夏威夷天文台、加纳利天文台）——太空。

天文观测走向太空，这是太空独有的最佳观测条件所决定的，也是天文学发展的内部动力所需要的。空间天文观测的优点是，全波段、全时段、全方位、无大气抖动和散射光、超长干涉基线。这些特点决定了天文观测向太空发展的必然趋势。与传统天文观测相比，航天器提供的不仅仅是观测，它还能游弋到行星际中去，实地采样和近距探测。

空间的天文探测是一项高科技事业，主要困难是技术难度大，投资大，周期长，并且具有较大的风险。这些困难是对一个走向现代化，并将自立于世界民族之林的国家，提出的严重挑战和考验。

### 2. 天文学的第三次大发展

一门科学的发展，有其内部的运行规律和发展动力（如到大气外去观测，无疑是一种必然的趋势），但是一门科学的发展，只有与社会发展的大需要结合之时，才会有突破性进展和辉煌成就的出现。

天文学发展的动力有两条，其一是人类已有的认识与天文学无穷无尽未知世界之间的矛盾，推动人类不断去认识宇宙，这是天文学科长期存在和发展的基础；其二是社会发展的需要和强大作用，这是天文学能否获得巨大发展的关键。历史上，天文学第一次辉煌的发展，是发达农业社会需要的结果，为了农业季节、历法以及记时的需要。我国古代天文学的辉煌成果，是第一次辉煌发展的典型代表。天文目标的神秘色彩，被统治阶级利用来维护其地位，天文常被用于预测重大政治事件和朝代的兴衰变迁，这对天文学获得重视和经费是有利的，但限制和束缚了对宇宙天体目标本质的科学研究。天文学的第二次辉煌是从哥白尼—伽利略—牛顿—爱因斯坦关于日心说、望远

镜、牛顿力学、相对论力学建立和发展之中出现的。在现代科技的创建中，天文学做出了巨大的贡献。第二次突飞猛进，充分体现了天文学对现代自然科学的巨大贡献，并奠定了发展的基础，也是冲破神学对天文学（对自然科学）束缚的胜利。这一进展不仅有重大科学价值，而且具有明显的政治和社会意义（例如日心说的斗争），因此为社会广泛关注。

天文学发展的第三次辉煌出现在第二次世界大战后，人类进入了空间科学技术的时代。在此期间，人类利用空间技术对于行星地球、太阳、太阳系（行星及其卫星、彗星、小行星）、银河系及更为遥远的天体，获得了大量崭新的知识和突破性进展。空间科技的产生，是伴随巨大的政治和军事的需要而发展起来的。天文学为这个发展做出了显著贡献，反过来又借助空间技术的发展，使天文学进入全波段天文学的时代，并构成第三次的辉煌发展。

### 3. 天文学是空间科学技术发展的必要基础

天体力学为各种人造天体的轨道计算和设计，提供了理论基础和方法。天体测量对人造天体观测、确定其轨道、方位和距离，并提供精确的时间。恒星准确的方位和自行知识，卫星敏感器的制作，为人造天体的姿态控制提供依据。天体物理研究关于太阳系物理（流星、小行星、月亮、大行星、彗星）的知识；关于太阳物理（太阳辐射、爆发、太阳风）研究的成果，以及宇宙线的情况的了解，为人造天体以及宇航员提供了空间环境知识，并做出太阳活动的安全期和通讯骚扰预报等防护措施（空间天气学及预报）。太阳辐射的能谱为空间太阳能的利用，以及航天器的热状况的设计提供依据。天文仪器和方法，包括各种望远镜的知识和设计，各种高灵敏接收器的原理和应用，都为航天部门的遥测遥控所广泛应用。概括起来，天文学在航天器轨道、定轨、姿态、时间、能源、通讯、热状态、遥控、遥测系统、空间环境方面以及各种有效载荷等方面均有重大运用和作用。

天文学作为一门基础科学，它对社会的直接影响，自古至今都表现在对社会提供时间、历法和方位上。自近代史开始的四百多年来，它对社会的影 响，主要是科学的影响，通过牛顿力学和相对论力学的建立而体现出来。二次大战之后，空间事业的出现和发展，是天文学作为基础科学，全方位的（天体力学、天体测量、天体物理、天文仪器及方法）第一次对社会的发展做出重大的贡献。可以毫不夸张地说，没有近代天文学，就不会有今天的航天科技及其应用。近代天文学是航天事业发展的重大而必要的基础。这也是一个基础科学一旦被运用，就能转化为巨大的社会力量的生动实例。

### 4. 空间天文是集政治、军事、空间技术、物理学、天文学等 5 个方面的共同科学事业，即综合性、战略性交叉科技事业

物理学关于基本粒子的研究与天体演化研究出现了新的汇合趋势，物理学的各种辐射与物质相互作用的理论，在全波段天文学发展中经受考验并得以发展。天文目标的多种多样性、对飞行器的多种奇特要求，均把技术能力运用到极限，促进了空间技术的发展，并为空间技术的应用打下了基础。天文学中的各种望远镜及其接收系统、自动控制系统，为航天提出了方法和技术。天文学在空间科技发展中的独特作用，是其它基础学科所不具备的。二次大战后，许多实例说明，不少精明的政治家利用天文学为公众关心的特点，施展政治才能，不少军事家也利用天文卫星进行军事项目的实验和预研，至于航天技术专家利用天文卫星来提高其技术水平和实验更是家常便饭。这样，空间科学便成为一个国家强大的重要标志，空间天文学便成了政治家和

大众支持的科学热点。

### 三、空间天文学的巨大成就

\*地球辐射带的发现和磁层的确立\*太阳风的发现——日球确立，行星际磁场的确立

\*月球及近地行星、彗星性质的新发现

\*太阳耀斑认识的推进

\*太阳日冕被发现具有极丰富的活动和大量物质抛射

\*宇宙微波背景辐射的证实、COBE 卫星探测有利于大爆炸学说

\*红外造父变星测量表明，哈勃常数太大，导致宇宙年龄太小，小于一些恒星的年龄，将引起现行天体演化有关模型的修正

\*1987ASN，膨胀云被拍出来（HST）

\*原是大于质量 200M 的恒星被分辨开后，实际是多星系统

\*发现许多红外星系光度非常高，与类星体类似，有利于发现原星系或尘埃星系的形成，如 F10214 + 4742，有  $3 \times 10^{14}L$  和  $3 \times 10^{11}M$ ，是至今最显著的红外源

\*发现高亮度红外源与相当部分的射电源相一致

\*发现织女星恒星外行星系统，发现原星盘系统

\*COBE 探测到宇宙背景辐射的不对称性，并与黑体辐射有偏离

\*Hipparcos 获得 1.5 毫秒位置和 1 毫弧秒 / 年的自行精度

\*ROSAT，EUV 使源增加 400 倍，有 80000X 射线源

\*X 射线双星际，黑洞存在的可能性，低质量 X 射线双星的准周期振荡

\*发现 M87 星系中心周围有高达 200 万公里 / 秒的向心会聚速度，可能是含有一个几十亿个太阳质量的黑洞

### 四、中国空间天文学发展的探讨

1. 历史上，中国科学和技术有过辉煌的成就，为世界科技的发展做出过杰出的贡献

当前我国正在为摆脱 100 多年来的不发达状态，为在下世纪中期发展成为科技强国而努力。毫无疑问，在科学和技术上也应对世界做出新的贡献。就天文学而言，由于当前主要发展趋势是空间天文学，在这方面我国有其特殊的有利发展条件。在建设强大国家的进程中，我国老一代政治家和科学家，以超凡的胆略和魄力，发展了我国的空间技术，发射了中国的火箭和卫星。这是中国人引以为自豪的伟大成就，将成为传世之宝。自推行改革开放的发展战略以来，我国空间技术的应用，包括军事、通讯、气象、资源、材料，都做出了积极的安排，并取得了长足的进步，中国已经成为空间大国之一。我国的空间技术，是真正够得上“五大强国”地位的领域（美、俄、欧、中、日），是在空间技术的综合方面具有世界先进水平的国家。在这个领域的建立过程中，我国的天文工作者，在轨道、观测、空间环境、时间和技术等方面做出了应有的贡献。我国的天文工作者有责任在今后 10~15 年、15~30 年、30~50 年之内，充分利用我国的空间技术条件，有所作为，积极发展空间天文学，并促进空间技术发展。

2. 空间技术、空间应用和空间科学的协调发展

我国空间科技的发展战略，应该在继续加强空间技术（发射、卫星、通

讯、控制和接收等)和空间应用(军事、通讯、资源、气象等)的同时,把空间科学(天文、生命、材料、地球物理)的发展提到议事日程上来,并做出长远规划。历史经验、目前能力、国际上的发展趋势都表明,忽略空间科学发展,将不仅仅是影响其科学本身的现代化,而且从长远观点看,将严重影响和限制空间技术及其应用的发展(缺乏技术创新和技术储备,把很多的基础科研工作者隔离在外,智力和新技术就会短缺)。我国是世界空间大国,但又不是第一流空间大国。我国的空间技术多属仿制,创造性尚有所不足,除经济实力尚不足之外,科学基础较薄弱,也是原因。目前,国内在卫星技术、卫星姿态控制和稳定性、探测分辨率、空间环境预测、轨道精度等方面以及各种有效载荷方面均有待赶上世界水平,这些不足之处在一定程度上,与空间科学没有做出适当安排有关。空间科学与基础科学一样,好比植树造林,这是利在当代,造福子孙的大业。我们不妨想一想,在20年、30年、50年之后,当中国成为第一流的大国之时,当中国成为人类社会发展的主要动力之时,我们向谁去仿制呢!那就必须依靠基础研究,在空间技术不少方面依靠空间科学和空间天文学的发展,从现在开始就重视它们的协调发展。外国经费安排的情况,在空间技术、空间应用(包括军事)和空间科学上的比例大体是4:4:2,我国理应做出调整,增加空间科学活动的投入,以保证持续和长远的发展。

### 3. 中国空间天文发展的建议

尽管我国空间天文有较好的发展条件,但这些条件并未完全得以利用,加上技术复杂、投资多、周期长、风险大,使得我国空间天文学的发展,呈现出非常困难的局面。因此,提出如下发展设想,以探讨中国空间天文学的发展。

天文学的各分支的科学工作者,要更多关注空间天文学的发展,在自己所从事的领域内,提出有创新、有重大价值的课题,开展科学目标和方案性的预研究,借以形成中国空间天文学发展的科学基础。这种小型的不花很多经费的探讨应有5~10项,形成储备和候选项目,等待机会——机会只给有准备的人。

利用各种搭载和空间技术实验,尽可能做一些练习性,甚至独出心裁的小型实验,加强与空间技术部门的联合和合作,扩大影响,锻炼队伍。

选择有重大影响的项目,突出来,形成有世界水平的国际影响,如像日本的X射线天文计划那样,跻身于世界先进行列,甚至处于领先地位,使我国空间天文有大的显示度和影响。由于空间项目周期长,应尽快做出安排。

除了天文界的努力之外,关键性的一项措施,应该是组织落实。目前似乎存在着各个国家主管部门都没有将空间科学作为一项重要的工作抓起来的问题,因此空间科学的发展仍有待于明确归口主管部门,并做出切实的长期规划,否则就会再拖上十几、二十年,仍处于不发达状态。

## 五、空间太阳望远镜

1. 基于空间天文是天文学发展的主流方向,高分辨的太阳磁场研究是天体物理学的一个重要前沿。鉴于太阳活动对人类和空间环境的严重影响,应借助我国高水平的空间技术,并把我国科学卫星水平提到一个新的水平,特提出空间太阳望远镜:在2001年(太阳第23周峰年)发射总重2.0吨左右的卫星,太阳同步极轨,三轴稳定,姿态稳定度为6角秒左右,轨道高730

公里左右，运行 3 年，由长征 4B 发射。有效载荷是主望远镜为口径 1 米的光学望远镜，带 8 通道二维同时光谱仪，以及 4 个软 X 射线望远镜、白光日冕仪、白光-H $\alpha$  望远镜、宽带频谱仪、太阳和行星际射电频谱仪等。正在与德国学者进行评估和合作研究，以期获得两国国家联合立项。

## 2. 其主要目标如下：

通过实现高空分辨率（0.1 角秒）和高时间分辨率的多层次的、太阳矢量磁场和速度场的观测，实现太阳物理研究的重大突破。

空间环境的扰动来自太阳磁场的变化，即太阳耀斑。此项目重点是，耀斑及地球物理和空间环境效应；将在 23 周太阳活动峰年期间，为空间环境（空间天气）预报和人类灾害影响的研究预报提供重要依据，并争取重大进展。

使我国卫星技术及有关的高新技术提高到先进水平。如姿态控制达到 6 角秒水平，望远镜成像达到 0.1 角秒，软 X 射线达到 0.5 角秒等。

## 3. 主要特色分析：

0.1 角秒的成像分辨能力。Hubble 望远镜几经努力，实现了 0.1 角秒的成像分辨能力，这是光学波段的成像分辨率的一个重大里程碑，比地面分辨率提高了一个数量级。它的天文成就很大一部分，都来自这个被突破的性能。空间太阳望远镜成像分辨率，比之 Hubble 望远镜，除要求达到 0.1 角秒之外，还有进一步的要求：其一，是在太阳强光照射之下实现，这就要求能克服较大的热不均匀性；其二，它是对偏振光进行探测，要求在信噪比为 10000:1 的情况下能正常工作。这两点在天文学的研究上有重要价值。0.1 角秒的成像分辨率的突破也有重要应用价值，如对地侦察和观测时，当卫星高度为 100 公里~500 公里时，其分辨能力为 5 厘米~25 厘米，将有很大的实用价值。

0.1 角秒的磁元探测能力，在天文上将是一项重要的突破，在宇宙电动力学的各种研究中，无疑将引起新的进展，这是许多国家想要实现的大目标。

0.1 角秒的成像分辨能力，将促使我国成像光学技术达到国际领先水平。

Stokes 参数轮廓的同时观测。以往的三大光谱仪（光栅、傅里叶和可调滤光器）在实现成像光谱探测时，都不是同时的，因此，只有相对低的时间和空间分辨率，特别对快速变化和爆发过程的探测无能为力。我们创新的两维同时光谱仪，是光谱仪发展史上的新里程，它能同时获得二维成像面上的磁场、速度场、温度、密度、电子密度、压力、元素丰度等众多物理量，对天文学发展有重大意义，并在其它领域预示着新的应用前景。历史上，光栅光谱仪就是一个太阳物理学家发明的，后来成为了光谱学的核心仪器。

## 4. 把我国的卫星技术推向新的高度

一个 2 吨的科学卫星从整体来说是对我国卫星技术的新挑战、新发展。

6 角秒的三轴稳定姿态控制，将把我国卫星三轴稳定长期停留在 6 分（360 秒）的状态，提高近两个数量级。过去之所以提不高，是由于长期缺乏新的要求的结果。科学卫星的要求将起到促进作用。

0.1 角秒的可见光探测能力和 0.25~0.5 角秒的 X 光探测能力。

## 5. 世界科学显辉煌

这个卫星有较多的世界第一：是空间天文学的一个重要领域（太阳物理、

日地关系、空间环境等) 和一个新里程碑, 并将在 21 世纪, 使我国空间天文达到世界领先水平; 将提高我国科技现代化在国际上的显示度, 我们期待国家支持这个投资较大但适度的项目。尽管有难度, 但有能力克服, 我们期待这一意义重大的科学项目的实现。

# 加速器非核应用与国民经济

谢家麟

中国科学院高能物理研究所

谢家麟 加速器物理学家。1920年8月8日生于河北武清，1943年毕业于燕京大学，1951年获美国斯坦福大学物理系博士学位。历任中科院高能物理所副所长、八七工程加速器总设计师、北京正负电子对撞机工程经理、合肥国家同步辐射加速器工程总顾问、国家高技术主题专家组顾问和中国粒子加速器学会理事长、中国高能物理学会副理事长等职。1980年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事加速器物理与技术等方面的研究并取得重要成就。

## 一、引言

带电粒子加速器（以下简称加速器），是研究核物理、高能物理，认识微观世界的一个主要手段，随着60余年加速器物理和技术的发展，它衍生出许多不属于核物理、高能物理研究的非核应用，与国民经济发生了密切的联系。本报告的目的就是试图简单地就此加以介绍。

核物理、高能物理都属于基础研究的范畴，表面看来，无关当前的国计民生。实际上基础研究的结果直接奠定了人类今天的文明、文化和高生活质量的基础。以物理方面的基础研究而言，没有本世纪初伦琴对X光的发现，就不会有现今诊断疾病的不可少的手段——X光透视；没有汤姆逊对气体导电的研究，赫兹对电磁波的实验，普朗克量子论的提出，就不会有今天与人类生活息息相关的无线电、电视、雷达、激光、半导体、计算机等等；没有核物理领域的基础研究，就不可能出现原子能、同位素等等。事实上，在早年科学大师们刻苦耕耘的基础上，人类至今仍在不断地通过研究与发展，采撷其结果，开拓其应用，享受其效益。至于作为高能物理、核物理基础研究的手段——加速器，与国民经济的发展又有什么联系呢？这就是本报告将要讨论的问题。下面我们首先介绍加速器及其发展概况，然后阐述它的一些主要应用，以便说明它与国民经济的联系。

## 二、加速器——人类认识微观世界的主要手段

自古以来，人类就试图了解自身以外的客体事物的本质，所用手段，不外是手足、耳目所及。后来，由于科技的发展，在大的尺度方面，有了望远镜、天文望远镜、射电望远镜等，使人类可以观测到约 $10^{26}$ 米的宇宙空间（约100亿光年的距离），可以探索宇宙形成的初期的遗迹；在小的尺度方面，通过光学显微镜、电子显微镜、隧道扫描显微镜，可以观测到从微米到纳米的范围。但更小尺度的物体就只能用另外的间接的手段来观测了，这个手段就是加速器。加速器产生的粒子的能量愈高，就愈能观测更小的物质组成。目前已经测量到原子、原子核、核子（质子、中子、电子等）和夸克，尺度从 $10^{-10}$ 米到 $10^{-18}$ 米。最近又观测到夸克以下层次的“基本”粒子存在的迹象（图1）。为了研究更小层次的物质结构和运动规律，就需要更高的能量，

这就是物理学家建造能量愈来愈高的加速器的根本原因。（图 2）

这里应该指出，建造高能加速器的目的是研究“基本”粒子。“基本”粒子与天体演化在尺度上是两个极端，但近年为人们广泛接受的大爆炸宇宙形成理论，表明在宇宙形成之初的高温度、高密度的状态下，物质存在的形式也只能以极基本的粒子形态出现。因此，研究其小无内的高能物理学又与研究其大无外的宇宙学相联系了。

### 三、加速器发展简述

加速器发展初期，由于它能量较高可用以产生核反应，人们管它叫做“原子击碎机”。这个名称正像后来使用“原子能”一样，是一个历史上的误解，正确的提法应该是“核子击碎机”和“核子能”才对。

加速器的基本工作原理是带电粒子在电场中受力而得到加速。当然，在粒子能量很高时，它运动的速度接近光速，变化很少，而明显增加的是它的质量。因此叫它为加质器也许是更恰当的。

早期的加速器使用直流高压加速带电粒子，叫做高压加速器。为了克服直流高压不能避免的击穿的限制，发明了使用高频电压的直线谐振加速器。为了使粒子在同一高频电压间隙能多次得到加速，采用磁场偏转粒子使做近似的螺旋运动，半径逐渐扩大，多次通过间隙，同时使它的角速度与高频角速度相等。这叫回旋加速器。使用它可以产生多种放射性同位素。它的发明人劳伦斯为此获得 1938 年诺贝尔物理学奖。当粒子能量进一步提高，质量随能量提高而明显增加，以致回旋率逐渐降低而与高频间隙电压不能维持同步，这就构成了回旋加速器能量的极限（对质子而言，约为 25MeV）。显然，如果让垂直于磁场的高频加速电场的频率随粒子回旋速度而变化，就可以维持同步的关系了。这种高频电场频率周期性变化的加速装置叫同步回旋加速器。它可以把质子加速到 700MeV 左右。由于它的周期性的工作状态，输出电流只约有一般回旋加速器的万分之一。后来又发明了使用特殊磁场分布的等时性回旋加速器，它既突破了回旋加速器能量的限制，又避免了同步回旋加速器因高频频率周期性变化而导致的低流强的缺点。不过，它使用的仍然基本上是实心的磁铁。磁铁重量和加工就构成了提高能量的技术上的限制。一个 450MeV 的同步回旋加速的磁铁重量已高达 2200 吨。为了摆脱这个提高能量的限制，发明了使用环形磁场的同步加速器。1952 年又发明了强聚焦原理，结果使磁铁重量大大地减少，可将质子加速到 TeV ( $10^{12}$  电子伏) 的量级了。

使用加速后的粒子打靶，产生高能反应进行实验时，由于反应产物向前运动携带的动量，加速粒子只有一部分能量用于产生反应，能量愈高，这部分有用能量所占的比例愈少。为了克服这个限制，发明了对撞机这种特殊的加速器形态，它使两束高能同类粒子或正、反粒子在加速器中对头相撞。这样全部加速器能量都可用于产生高能反应。因此，近年建造的高能加速器，无例外的都以对撞机的形式出现。

图 3 给出加速器能量随年代增长的势态，可说是上文的一个概括的总结。由图可见，经过大约 60 年的发展，加速器的能量提高了 9 个数量级。这样的增长速度，在各种科学技术的发展史中是很罕见的。图中也清楚地说明



了当一种加速器的能量增长达到了原理或技术的极限时，人们就会发明一种新的加速器取代它，继续向能量的高峰攀进，使人有“山穷水尽疑无路，柳暗花明又一村”之感。人类无穷无尽的创造力，在加速器物理和技术的发展史中得到很好的验证。

#### 四、加速器的应用

加速器发展的动力本来源自高能物理和核物理基础研究的需要，但在发展过程中，人们逐步认识到它在许多科技和国民经济领域，有着广阔的十分重要的应用，这样，加速器就开始沿着基础研究和应用两个不同方向分道发展了。下面表 1 给出加速器的主要应用，我们将摘要分别加以介绍。

##### (一) 医疗应用

##### 1. 治疗应用

加速器应用于肿瘤治疗（放疗），已有 50 余年的历史，其基本原理是利用加速器产生的粒子束或射线的电离作用，最大限度地破坏肿瘤细胞而最少地影响正常组织，这是当前癌症治疗的三大手段（放疗、药疗（化疗）、手术）之一。调查表明，癌症患者 80% 要接受放疗，我国每年新发病患者即达 160 万。癌症是城市居民和农村男性居民中排列第一的死亡原因。为了满足患者的治疗需要，估计约需 3000 台医用加速器。

表 1 加速器应用要览

医 疗 应 用	治 疗	射线 电子束 质子束 中子束 重离子束 光子束 介子束	能 源 应 用	干净能源 核废料处理 自由电子激光聚变趋动 等离子体加热微波源 重离子趋动聚变 聚变反应堆材料试验
	诊 断	同位素生产 正电子断层照相 双色心血管造影 准单能 X 光照相	国 防 应 用	闪光照相 电子学器件加固 剂量校准 无损探伤燃料检查 核爆模拟
工 业 应 用		聚合物改性 喷漆固化 医疗器械消毒 机械零件表面活化 离子注入 线及中子探伤 食品灭菌与谷物杀虫	环 保 应 用	污水处理 废气处理 化学废料处理

评判不同粒子束或射线治疗肿瘤的有效程度是根据电离作用在人体内的深度分布曲线，因为电离作用结合相对生物效应就表征了对癌细胞的破坏能力。图 4 给出一些粒子束和射线的剂量在水中（模拟人体）人体中的电离分布，由图可见，它们各自适应不同位置的病灶。目前看来，最为理想的照射手段是使用重离子束（如碳离子等），它的电离分布曲线很窄，进入人体的

表层剂量较低，故如确知肿瘤位置，则通过对离子能量的控制（决定电离曲线峰值的位置）和流强的调制（决定电离峰值的大小），可以设定肿瘤各部位的剂量，取得三维最好的疗效。日本在千叶县已建成一台重离子医用加速器（HIMAC），投资超过3亿美元，这么高造价的治疗装置，显然是难以推广的。美国 LOMALIN-DA 医院使用的质子加速器，每年约可治疗 1000 名患者，造价近 5 千万美元，可能较易推广。

放射疗法的一个重要发展，是从多个方向将束流或射线照射肿瘤，这样，肿瘤剂量与健康组织剂量的比例就可以大大提高，在一定程度上弥补了非理想的剂量分布。刀、X 刀就属于这个范畴。从剂量分布的角度看，手术开腹时作一次性大剂量照射，杀死手术残余的靠近重要器官的瘤细胞，可能会对疗效有所改进。放疗的另一发展途径是将含有对人体某器官有亲附性的元素的化学药品注入人体，然后使粒子束或射线与之作用。例如：利用脑组织对硼的吸收和硼对热中子的吸收的“硼中子俘获疗法”，可以用质子加速器的 p-Li 或 p-Be 反应提供中子；另一种是“光子激活疗法”。利用同步辐射加速器产生的 X 射线，激活注入体内的药物，在特定的部位发生作用。这时要求 X 射线能量与药物的吸收谱线相近，故有足够强度的准单能 X 射线的产生成为重要的环节。

## 2. 诊断应用

自从放射性同位素广泛用于医学诊断（治疗）以来，回旋加速器就成为主要的生产工具。目前世界上约有 60 台能量为 30MeV 左右、流强为 300 微安左右的回旋加速器从事缺中子同位素生产。与研究使用的加速器不同，它们必须是紧凑、小型而且运行方便，可靠性高，以便在医院现场生产短寿命的同位素，如铊-201、碘-123 等。

回旋加速器应用的另一重要方面是在正电子断层显像装置中，正电子发射断层显像，是采用发射正电子的短寿命核素标记的药物的方法。从体外动态地观测人体吸收葡萄糖、氨基酸等在分子水平的生理、生化过程。它既是早期诊断某些疾病的工具，又是研究人脑认知活动的独特手段，目前世界上此项装置已有 100 余台，它包括回旋加速器或其它能发射正电子同位素的加速器、放射性药物合成、分析系统以及正电子照相机。

## （二）科技应用

### 1. 同步辐射装置

当高能量的电子在加速器中受磁场偏转而沿弧线运动时，将产生高亮度的广谱电磁辐射。这种电子强烈的发光现象于 1947 年首先在美国通用电器公司的一台同步加速器中被发现，因而名为同步辐射。同步辐射最初是被看成限制圆形电子加速器提高能量的障碍，后来逐渐认识到它在物理、化学、生物、地质、天文等学科的研究工作中具有广泛的应用，由此在世界范围内得到极大的发展，由寄生于高能物理实验发展到专用装置，又由一般专用装置发展到以插入元件为主的高亮度装置，迄今已经经历了三代。目前建成的和正在建造中的第三代同步辐射装置已有 15 台，下面将要谈到的自由电子激光为特征的第四代光源，也是遥遥在望了。我国有与北京正负电子对撞机兼用的第一代装置，合肥的第二代装置和台湾的第三代装置，目前正在考虑在上海建造一台性能更为优异的设备供科技界进行前沿研究之用。

同步辐射装置无疑是加速器的重要应用之一，因为大家对它比较熟悉，

这里就不拟多谈了。只想提一提一个极有发展前景的例子：使用同步辐射进行的微加工。它可以制造微型的电机、齿轮、传感器、执行器、手术器械等，尺寸大小约为几十到几百微米，汽车安全气囊的加速度传感器、光纤开关、微透膜等都已经初步研制成功。将来很可能发展为一个重要的高技术产业。

## 2. 自由电子激光装置

自由电子激光是加速器产生的高能电子在极性交替变化的磁场中做扭摆运动而产生的电磁辐射。它虽名为激光，但与常规的基于电子在原子、分子中能级跃迁而产生激光的工作原理完全不同，只是由于两者产生的都是相干辐射，因而使用了“激光”这个名称。

自由电子激光的工作物质是高能电子束，它携带巨大的能量，故具有产生极强的光辐射的潜力，而且波长连续可调，光束质量优异。1977年自由电子激光振荡器发明之后，曾被美国纳入“战略防御计划”（俗称“星球大战”），耗资10余亿美元，希望能达到破坏对方战略导弹的目的；后来由于政治局势的变化和研制过程中遇到的巨大的技术困难，此计划以失败而中断。不过，自由电子激光的非军事应用，却在继续发展，如大功率自由电子激光在化纤或其他化学工业方面的应用，美国连续电子束加速器实验室（CEBAF）和俄罗斯新西伯利亚核物理研究所都在兴建装置。使用直线加速器或储存环产生高亮度、短脉冲的自由电子激光作为第四代光源的研究，正方兴未艾，势将对科技发展起重要的推动作用。

### （三）工业应用

加速器用于工业生产，以低能加速器和离子源为主，包括辐射加工、无损探伤、离子掺杂等方面。

辐射加工是通过加速器产生的电子束对高分子材料照射导致聚合物交联，从而改善性能。电缆经过辐照，可以大大提高耐温，辐照后的热缩薄膜或管材，有加热后恢复原形的“记忆”，都有十分广泛的应用，我国已经形成了年产值达10亿元的产业。辐射还可缩短喷漆、彩印的固化时间，减少了贮存待干的厂房面积。药品、手术器械和食品的消毒、灭菌、保鲜是辐照应用的另一些方面。

使用电子加速器产生 $\gamma$ 射线，用于大型机械锻、铸件中的无损探伤，已有几十年的历史。近年一个有意义的发展是将加速器与核物理探测技术相结合，对集装箱进行加速、定时透视检查。此装置已由清华大学研制成功，它对进出口贸易频繁的经济发达国家的海关，显然是一个必要的设施（图5）。

使用离子源产生的不同能量、脉宽的各种离子束注入到基金属中渗杂、改性或者制造新材料，已经得到了应用。使用回旋加速器将金属或陶瓷等机械零件的表面薄层活化，再根据放射性产生的 $\gamma$ 射线，测量其磨损情况，这是检验各种耐磨措施（如用离子注入提高硬度）的有效方法。

传统的中子探伤是使用反应堆进行的，如涡轮叶片、核燃料、爆炸物等的探测。近年发展起来的一种小型RFQ加速器，可把质子或氘加速到几个MeV，用以轰击铍靶，就可制成可移动式的强中子源。电子束焊接一般需在真空中进行，如果采用1MeV左右的小型电子加速器进行深层焊接，就不需要将焊物体放在真空室内，而可以大大加快操作的速度。

### （四）能源应用

#### 1. 裂变反应堆

利用裂变反应发电（核电站）已是一些国家的主要发电设施，也是解决人类未来能源的一个重要途径。目前世界已有 1/5 的电能来自核电，我国大陆也有秦山和大亚湾两座核电站在运行中。

不过，核电也存在一些问题，最主要的就是核废料的处理。长寿命的高放废料半衰期有的长达亿年，如何处理就构成一个棘手的问题。目前的办法是首先加工使之浓化、固化，然后找一个安全的地方贮存、深埋。这是十分困难而且耗资巨大的措施。另一方面，现在的核电站多以  $^{235}\text{U}$  为燃料，它只占天然铀资源的 0.7%，长期燃料资源的考虑要求使用快增殖堆将含量较丰的  $^{238}\text{U}$ （或  $^{232}\text{Th}$ ）加以利用。

针对以上核电的问题，日本、前苏联和美国很早就提出了使用加速器驱动嬗变技术（ADTT）的方案，它可将高放废料转化为短半衰期或根本无放射性的废料。这些方案的主要思路是利用强流质子直线加速器（约 1Gev 能量，100ma 流强）的质子束轰击周围有裂变的物质的液态铅靶，产生的中子经慢化、倍增后，与经过适当处理的循环流动的核燃料及裂变产物相作用。图 6 是这个方案的示意图。

ADTT 方案可用 Th 发电，同时燃烧核废料，若设计为次临界状态，则因加速器可以瞬时停止，故整个装置比较安全可靠。它发出的电能约有 20% 供加速器运行，而其余的 80% 则可并入电网使用。

ADTT 和鲁比亚（C.Rubbia）等人最近提出的能量放大器发电是很具有吸引力的干净、安全的能源，受到科学家的青睐。当然，它也有它的问题：首先是强流加速器的技术困难，它的束流损失必须极小（约为每米纳安的量级），不然会将加速器高度活化；可靠性必须很大；再则是初始投资十分庞大。不过随着科技的进步，技术问题可以克服，投资要求也会下降，这种干净、安全的电站是迟早会出现的。

## 2. 聚变反应堆

核聚变反应可以释放能量一事，约在 80 年前就被科学家发现了。例如氘的同位素氘氘聚变，就可产生氦核和中子，同时放出 17.6Mev 的能量，而氦又可由氘产生。氘在海水中有丰富的蕴量，作为聚变能源的燃料，估计可供  $10^9$  年之用。聚变反应堆的放射性较裂变堆为低，安全性高，可以说是取之不尽、用之不竭的理想能源。

建造聚变反应堆发电目前正在沿着两条可能的技术路线发展：一是磁约束，一是惯性约束。哪个更为易于实现，目前尚无定论，但两者都与加速器有关。

对磁约束装置而言，托卡马克型的闭合环形等离子体装置占有重要的位置，它的运行参数已接近建堆的要求，装置中的等离子体需要射频电磁场进行驱动与加热。荷兰已建成使用加速器的自由电子脉泽，作为下一代等离子体聚变装置加热的微波源。另外，为了加热等离子体、驱动电流及填充燃料，基于加速器离子源技术的中性束注入器，也在一个装置中取得圆满的结果。

对惯性约束装置而言，需要使用激光或离子束将热核燃料压缩到极高密度并加热点燃。目前激光驱动最为常用，一般使用钕玻璃激光器。但到正式建堆时，需要考虑能量效率，而钕玻璃激光器的效率是偏低的，因此有的研究所在进行以自由电子激光器代替钕玻璃激光器的探讨。

使用加速器产生的离子束轰击靶球的惯性约束聚变装置有它独特的优

势，就是效率高，重复频率高，并可长时间使用。诺贝尔奖获得者鲁比亚曾提出了一个使用重离子加速器和自由电子激光结合的系统方案。

不论最后聚变反应堆发电采用哪种方案，当前有一个共同的亟待解决的问题就是能耐强烈中子轰击的建堆材料的研究。目前国际上正在考虑建造作为强中子源的聚变堆材料试验加速器，来检验各种材料的性能。

### （三）国防应用

#### 1. 闪光照像

使用能量为几十兆电子伏、流强为几个千安、脉宽为几十纳秒的感应电子直线加速器的聚焦电子束产生极强的 X 光，可进行核武器内爆系统的流体动力学及有关的瞬态过程的试验，美国已建造三代这样的装置，即 PHERMEX，FXR 及 DARHT。

#### 2. 电子学加固和辐射剂量校准

电子直线加速器产生的束流打靶产生的  $\gamma$  射线，可模拟核爆的辐射，用以研究电子学器件的辐射加固或剂量仪器的校准。

#### 3. 无损探伤

为了检查导弹内部，特别是使用固体燃料时燃料块间的缝隙，已经研制成装在汽车上的电子直线加速器，以便在现场进行探测。

#### 4. 核实验模拟

核武器改进和检查，除地下核试外，可在实验室建立惯性聚变反应研究装置，产生微型热核爆炸，在参考实际核试验测得的数据，就可以相当可靠地模拟核爆过程，改进性能，了解状态。

### （六）环保应用

前苏联新西伯利亚核物理研究所曾生产过大约 120 台电子加速器供国内外应用，其中包括下水道废水处理和电厂排烟的净化应用。在当前人类面临严重缺水的情况下，将废水处理后合理使用，显然是应该认真考虑的措施。燃煤电厂的废气中含有  $\text{SO}_2$ ， $\text{NO}_x$ ， $\text{HCl}$ ， $\text{HF}$  等，造成严重污染，在日本、美国、德国、波兰、俄罗斯都在研究使用加速器的电子束进行处理，试验结果表明在多种处理技术方案中，电子束法是很有竞争力的。我国成都电厂拟兴建一个规模居世界之首的电子束废烟处理工程。

使用脉冲电子束处理化工废料中的毒性，也在试验研究之中，原理是通过射解形成自由基，而自由基对拆裂化学键是十分有效的。

### （七）加速器应用产生的经济效益

讨论加速器应用产生的经济效益，是一个复杂的问题，因为有些社会效益是不能以数字度量的，有些是间接的，即便是直接效益，由于牵扯方面很广，也难以确切地统计。不过有一点是肯定的，就是加速器的非核应用，已给社会带来了十分巨大的经济效益。

就上面提到的 6 个方面应用而言，国防应用对一个国家的安全至关重要，但经济效益却难以度量。同样，关于医疗应用，人的生命是无价的，又怎样用经济效益来表达呢？国外曾有人根据放疗患者平均工作寿命的延长，再参考其增加的产值来估算放疗的经济效益，这个数字是十分惊人的，但也只能供参考而已。

加速器的科研应用（包括核与非核）产生了新的学科分支（如同步辐射、自由电子激光等）和带动各种科技的发展，其结果当然是伴随着巨大的经济效益。世界上功率最大的速调管，规模最大的超导致冷系统，体积最大的超

高真空系统等等，都是因研制加速器而出现的。西欧核子中心曾对 160 家承担高能加速及实验设施的高技术工厂（包括电子、电器、真空、焊接、精密机械、光学仪器、计算机等）进行过调查，把由于承担任务而导致的营业额的增加和成本的减少与合同金额的比数称为效益，统计结果表明平均效益为 4.2，这也许可以作为间接效益的举例吧。

直接的经济效益，应该表示扣除成本后同一产品应用加速器技术之后与应用之前的产值的差异，譬如一种规格的电缆辐照改性前后价格是不同的，机械工具硬化处理前后价值也是不同的。这些方面的数据，仍有待于收集和整理。

## 五、结语

从上面远非全面的介绍，可以看出加速器在非核领域有广阔的应用，而且许多应用还在发展之中，有些则已经形成相当规模的产业。就医疗应用而言，世界上医用电子直线加速器现有 2000 ~ 3000 台；生产同位素和正电子发射断层显像的回旋加速器约有 200 台，制造这些加速器的工厂、大学、研究所仅在国内就有近 10 个。如果没有经济效益的话，这种情况是不会出现的。可以预言，随着非核领域加速器的进一步应用，它必将为人民保健、国家安全、科技进步、工业生产做出更大的贡献，有力地推动国民经济的发展。

# 核燃料及其循环使用

王方定

中国原子能科学研究院

王方定 化学家。1928年12月21日生于辽宁沈阳。1953年毕业于四川化工学院。历任核工业部九院二所研究室主任、所副总工程师，中国原子能科学研究院研究员、院科技委主任，中国核工业总公司科技委顾问。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事核武器研制中的放射化学工作，取得多项重要成果。

## 一、前言

人类利用能源的水平与人类文明的发展息息相关。随着人类社会的发展，世界能源结构已经经历了两次重大的变化。自本世纪70年代以来，能源结构又进入了以煤、核能和再生能源等多种能源替代以石油为中心的新的转变。40年来，从第一座试验性核电站运行（苏联，1954，5000kw）开始，到60年代进入实用阶段，至今已有30个国家发展核电，正在运行的核电站已达437座。根据1995年的统计，核发电量已占世界总发电量的17%，其中法国（76.14%）、比利时（55.52%）、立陶宛（85.59%）的核电已超过总发电量的一半。我国秦山和大亚湾核电站也已投入商业运行，此外还有：秦山、大亚湾二期和辽宁核电站正在筹建中。我国核电站技术已经出口（巴基斯坦恰希玛核电站是目前我国最大的高技术出口项目，该核电站功率30万千瓦，于1993年8月1日动工，现已进入全面安装阶段，预计将于1999年并网发电），是世界上继美、法、加、俄后第五个核电技术输出国，也是世界上少有的几个具备整套核燃料循环体系的国家之一。

在控制核武器扩散方面，核燃料是最敏感的对象。追踪生产核燃料的能力或取得燃料的途径是估计一个国家能否制造核武器的重要方法。

在我国《国民经济和社会发展“九五”计划和2010年远景目标纲要》中，“能源工业”一段里提到我国发展核能的方针是：“大力推进核技术的和平利用，重点发展核电，配套建设核燃料循环体系”。下面先对核燃料循环体系作一轮廓的介绍。

在核反应堆中能燃烧（产生自持的链式核反应以提供能量）的材料称为核燃料。核燃料进入反应堆前需要进行一系列处理，包括：矿石的开采，从矿石中提取和精制燃料元素——铀，铀的转化，铀的同位素浓缩，燃料元件的制造。组装成的燃料组件在反应堆中燃烧，剩下的乏燃料取出反应堆后又需要进行一系列处理，包括：中间存储，铀、钚、裂变产物和超铀元素的分离，可利用燃料再进入反应堆燃烧，以及放射性废物的处理和最终处置。由于从乏燃料中分离出的铀和钚可以重新制成燃料元件，再次进入反应堆中燃烧，形成燃料的循环，所以把这种核燃料从矿石开采到最终处置的全过程叫核燃料循环。

## 二、核能及核燃料

无论是木材、煤炭、石油或天然气燃烧，发生的都是化学反应。所释放

的能量只与原子的外层电子的能量有关。一般都是电子伏特 (ev) 量级。而核能则来自位于原子内深层的原子核，原子核虽然在体积上只占原子的极小部分 (半径为原子的  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ )，但却集中了几乎全部原子的质量。根据 Einstein 质量与能量的当量关系：

$$E=mc^2$$

(式中  $c$  是光速  $3 \cdot 10^{10}$  厘米 / 秒)，可见原子核中蕴藏着巨大的能量。即：对于质量  $m$  的能量是等于该质量乘以光的巨大速率的平方，因此每一单位质量都有巨大数量的能量。同等质量的物质发生核反应放出的能量要比发生化学反应放出的能量大数百万倍。例如一公斤铀燃烧 (裂变) 放出的能量 ( $\sim 2 \cdot 10^{10}$  千卡) 相当于 250 万公斤煤燃烧所放出的能量，而一公斤氘燃烧 (聚变) 放出的能量相当于 750 万公斤煤燃烧放出的能量。

人类文明发现这样巨大的能量只是最近几十年的事。正如 Einstein 在《 $E=mc^2$ ：我们时代最迫切的问题》一文中所说：“如果每一克物质含有这样大的能量，为什么它会那样长期地没有引人注目呢？答案是够简单的：只要没有能量向外面放出，就不能观察到它。”1939 年，德国科学家 Hahn 和 Strassmann 用中子轰击铀，使一个铀原子核分裂成两个较轻原子核时，实现了这一巨大能量的释放。被用作玻璃和陶瓷的颜料的铀一跃成为人类划时代的新能源。铀从此成为最重要的核燃料，成为最敏感的战略物资。

原子核由中子和质子组成 (最轻的氢原子核由一个中子和一个质子组成，自然界中最重的铀原子核由 146 个中子和 92 个质子组成)。但是任何一个原子核的质量总是小于组成该核的全部中子和质子的质量的和。这一质量之差称为原子核的结合能。结合能是原子核结合紧密程度的度量，结合能越大 (生成该核时释放出的能量越大) 原子核结合越紧密。

不同原子核具有不同的平均结合能是实现释放核能的基本核性质。当平均结合能较小的原子核转化成平均结合能较大的原子核时，就可释放核能。中等质量核素的平均结合能最大，而轻或重核素的平均结合能较小。轻核素尤其突出。这就是说：当把轻核素聚合成较重的核素 (例如把氢聚合成氦) 或把重核素分裂成较轻的核素 (例如把铀分裂成钼和锡) 时，将伴随着释放能量。这就是通常所说的聚变和裂变。可以发生聚变或裂变的核素不少，原则上都可能成为核燃料。聚变必须在很高的温度下才能进行，所以也称热核反应。裂变则须在中子激发下才能进行。

目前在聚变能的释放上，虽然已经实现了氢弹爆炸，但由于还不能控制它，所以还不能用作民用的能源。裂变能则已经成功地用于发电，也就是我们常说的核电站。

铀是目前核电站可用的唯一的天然核燃料。它由  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  两种同位素组成，各占 0.7% 和 99.3%。目前商用核电站只利用了  $^{235}\text{U}$ ，可见对天然核燃料的利用效率是很低的。为了提高核燃料的利用效率，显而易见就是用  $^{238}\text{U}$  作核燃料。这可以使  $^{238}\text{U}$  吸收一个中子变成  $^{239}\text{Pu}$  (钚，它具有和  $^{235}\text{U}$  相似的核性质) 来实现。此外，天然存在的钍 ( $^{232}\text{Th}$ ) 也可以吸收一个中子变成具有和  $^{235}\text{U}$  相似核性质的  $^{233}\text{U}$ 。今天我们所指的核燃料一般包括：铀 (U)、钚 (Pu)、钍 (Th) 三个元素，尤以铀为最重要。

### 三、核燃料循环

核燃料以反应堆为中心循环使用。



(一) 铀的开采、冶炼、精制及转化：铀是比较分散的元素。世界上重要的产铀国家有：加拿大、美国、独联体、澳大利亚、刚果、尼日利亚等。我国的东北、西北、西南及中南地区都蕴藏有铀。但是可提供一定铀产量的铀矿石的含铀量的品位较低 ( $10^{-4} \sim 10^{-2}$ )，掘出的含铀矿石必须经过复杂的化学富集，才能得到可作粗加工的原料。过去开采铀矿石都采用传统的掘进方式（耗能大、成本高、生产周期长，还有运输、尾矿等问题）。近来根据铀矿石性质的多样性，又开发了地表堆浸、井下堆浸以及原地浸取等方式。

我国的铀矿石属低品位等级，一般在千分之一含量就要开采，成本较高。为了降低成本，充分利用低品位矿石，80年代以来就积极开发堆浸、地浸技术，现已投产。例如地表堆浸，处理品位为  $8 \times 10^{-4}$  的沙岩矿，成本降低 40%。原地浸取工程也已经开工。原地浸取采矿的优点是：成本低（投资只有掘进的 1/2）、工艺简单、节约能源（省去了磨碎、运输等工序，可节约能源 60%）、节约劳动力、减轻劳动强度（节约劳动力数十倍，工人进行流体物操作，劳动条件大为改善）、矿山建设周期短、可以充分利用低品位铀资源。因此受到重视而被称为铀矿冶技术上的一场革命。

浸取液经过离子交换、萃取以富集铀，再经过酸性条件下沉淀（与铀金属及碱土金属分离）和碱性条件下溶解（与过渡元素分离）以进一步净化铀，最后得到铀的精炼物。将此精炼物进一步纯化，并将铀转化成低沸点的  $UF_6$ 。（升华温度：1 大气压下 56 °C；0.13 大气压下 25 °C），即可用作浓缩  $^{235}U$  同位素的原料。

(二)  $^{235}U$  同位素的浓缩： $^{235}U$  是唯一天然存在的易裂变核素。不同设计的反应堆需要不同浓缩度的铀（如：压水堆——当前核电站应用最多的堆型——需要 2~3%；游泳池堆需要 10%；快堆需要 25%；高通量材料试验堆需要 90%）。而核弹则需要更高的浓缩度。因此生产浓缩铀是核工业中十分重要的环节。

同一元素的同位素化学性质相同，只在质量上有所差别。利用这一差别可以实现同位素的浓缩/分离。核素越重，质量差别越小（如：氘、氕相差一倍；而  $^{235}U$ 、 $^{238}U$ 。则相差 ~1%）。可见实现  $^{235}U$  同位素的浓缩，技术上的难度很大。

利用因质量不同而引起的速度效应或离心力效应可以分离同位素，并已达到工业化的程度。它们分别是气体扩散法和气体离心法，此外空气动力法也有了中间工厂。

气体扩散法：这是已实现工业应用多年（1946~）的大规模生产方法。其原理是：不同分子量的气体混合物在热运动平衡时，具有相同的平均动能，因而速度不同。由  $M_1 V_1^2 = M_2 V_2^2$  可得： $\sqrt{M_1/M_2} = V_2/V_1$ ，即轻分子运动速度稍大于重分子运动速度，从而实现同位素分离。

由于升华温度适当（工作时可呈气态，存储及运输时可呈固态）， $UF_6$  是唯一可用的工作介质。下图是气体扩散法的示意图。由图可见：轻分子碰撞扩散膜的次数比重分子多，由于膜上有允许  $UF_6$  分子通过的微孔，穿过膜的  $UF_6$  中， $^{235}U$  同位素略有浓缩（浓缩程度用上述的  $\sqrt{M_1/M_2}$  表示，称为分离系数  $\alpha$ ；这里应为： $\sqrt{352/349} = 1.0043$ 。这只是理论值，实际值远低于此，一般不超过 1.002）。由于单级的分离效果很小，为了达到一定的浓缩度，需要串联许多级才能完成（3%需要一千多级，90%需要几千级）。

扩散膜是气体扩散法的关键技术。它的孔径在  $0.01-0.03\ \mu$ ，每平方厘米有几亿个微孔，还要能经受住  $UF_6$  的腐蚀和两端的压差；由于需不断压缩穿透过膜的低压  $UF_6$ ，继续进行扩散分离，所以要消耗大量电能；压缩气体消耗的功，转变成了废热需要排除，所以要消耗大量冷却水（大型扩散厂每公斤分离功单位约需消耗  $2500\sim 3000\text{kw/hr}$  的电能，一座年产量 9000 吨分离功单位的扩散厂，需要附设 240 万 kw 容量的电站；排除压缩废热相当于电站排热量的  $1/2$ ）。

气体离心法：在强离心力的作用下，可以实现轻、重同位素的分离。在离心力作用下，重分子在离心机的外周浓集，轻分子在轴线浓集。分别引出气体流，便可得到贫化和加浓两种流份。

离心法比扩散法的分离系数高（外周线速度 300 米/秒时， $\sim 1.058$ ），因此只需要较少的级数便可得到扩散法同样的分离效果。如为了获得 3% 的  $^{235}\text{U}$  只需要 100 级左右。但因为单级离心机的生产量很小，所以每一级需要联合多台机器，才能实现一定的产量。一座年产 6000~10000 吨分离功的大型分离厂，需要一二百万台离心机，可见它的维修工作量是很大的。它的突出优点是电能消耗小，约为扩散法的  $1/10$ ，现正在逐步取代扩散法。

高转速的离心机是本方法的技术关键，（理论上，单位时间内的分离功数量与转筒外周速度的四次方成正比，与转筒长度成正比）一般要求达到  $300\sim 500$  米/秒的外周速度，当转筒直径为 10 厘米时，相当于  $6\sim 10$  万转/分。这需要开发高强度的材料（如高强度合金、纤维复合材料）和长寿命的离心机。

激光分离同位素：上述两种方法虽然都已具有工业应用的意义，但是他们也有共同的问题，即：（1）必须把许多分离效果很小的单元串连成庞大的系统；（2）消耗相当大的电能。这些都使分离功的成本很高（轻水堆核电站燃烧费中，铀加浓约占  $1/3$ ，其中 60% 是电费，35% 是基建费），因此人们不断地研究新的分离方法。激光法就是目前被认为最有希望的方法。

在原子或分子中，各同位素的吸收光谱有细微的差别。利用单色性好的激光有选择地激发某一种同位素至特定的激发态，然后与未被激发的同位素分离。

例如对于金属铀蒸气，许多吸收谱线都很窄。可以用单色性好的激光束选择性地激发  $^{235}\text{U}$  原子使其电离，而不激发（电离） $^{238}\text{U}$  原子。电离了的  $^{235}\text{U}$  原子经过电磁场被偏转而与  $^{238}\text{U}$  分离。它有以下显而易见的优点：（1）有很大的分离系数，单级分离即可生产出轻水堆用的浓缩铀（天然铀 6%）；（2）贫料丰度能降到很低；（3）可以用其他分离方法已不能用的尾料（2%  $^{235}\text{U}$ ）作进料。

（4）其它方法：热扩散法，质量扩散法，空气动力法等都是曾经研究过的方法。其中南非的 UCOR 法（一种空气动力法）已经在大型中间工厂中实现。

（三）燃料元件的制造：核燃料的燃烧过程和化学燃料的燃烧过程相似，是一个不断消耗燃料、产生废物的过程。但是核燃料是具放射性的物质，核反应产生的废物具有更强的放射性，都不能像化学燃料那样直接与环境相接触，而需要加以密封包装，制成燃料元件才能进入反应堆。

不同类型的反应堆，需要的燃料形式和燃料元件形式不同。现以目前建造数量最多的核电站压水堆说明燃料元件及其制造：

动力压水堆普遍采用低浓度  $\text{UO}_2$  陶瓷燃料（ $^{235}\text{U}$  浓缩度  $1.66\sim 4.4\%$  的难

熔化合物如：铀的碳化物 UC，氧化物 UO<sub>2</sub>）。将烧结、磨光的 UO<sub>2</sub> 陶瓷芯块（芯块的高度 / 直径 ~ 1 : 1.5）装入包壳管（φ=10 ~ 15mm；L ~ 4m），使芯块在管内叠成柱形。包壳材料用锆合金（Zr-4 合金：Zr-Sn 合金中添加少量 Fe、Cr），壳厚 ~ 0.7mm。为防止芯块变形挤涨包壳，两者间留有微小空隙（~ 0.1mm），为改善因此而发生的传热性能变坏，管内充以氦气（20 ~ 30 大气压）。最后焊封包壳管（是阻止放射性物质外泄的第一道屏障），成为燃料棒。

将若干根燃料棒按一定的排列方式组合在一起即成为（棒束型）燃料元件。压水堆采用 14 × 14 ~ 17 × 17 的正方形。

燃料元件是在十分苛刻的条件下工作的（核燃料的能量高度集中，在反应堆中燃烧的时间又很长，核电站中大约 3 ~ 4 年，核潜艇中可达十年以上）。在反应堆中长时间地受到强中子流的辐照，高流速、高温度冷却剂的冲刷，裂变产物的辐照和化学侵蚀等诸多作用下，还要求燃料元件在整个工作期间保持其性能、形状、尺寸稳定。因此所用的燃料元件（核燃料及包壳管）必须耐高温、耐辐照、耐腐蚀并有良好的机械性能和核物理性质。这不仅要求选用特殊材料，而且还要求材料有很高的纯度（如硼含量需在 10<sup>-7</sup>）。为了确保燃料元件安全可靠，新元件还要在完全仿真的条件下进行运行考验。可见燃料元件制造成本很高，这一费用约占燃料费的 30%。

（四）在反应堆中燃烧：功率为 100 万千瓦压水堆核电站所用反应堆中，上下堆芯板间插入 193 根燃料组件，为反应堆堆芯，初装料共约 80 吨铀（浓缩度 2.6%），元件在堆内停留时间三年。

堆芯置于厚重的压力壳内（也是阻止放射性物质外泄的第二道屏障），使热水（用作冷却剂及中子慢化剂）在 120 ~ 160 大气压，300 ~ 330 °C 下将核燃料产生的热带出，在一回路产生蒸汽。一回路和堆本体又都包在安全壳（或混凝土材料）内，成为阻止放射性物质外逸的第三道屏障。有此三道屏障，使核电站安全有了保证。

（五）乏燃料后处理：燃料在堆中燃烧（即铀裂变成为中等质量的核素），产生吸收中子的毒物，<sup>235</sup>U 浓缩度减小，燃料元件也可能发生变形、肿胀等现象，到了一定程度，必须将燃料元件取出反应堆。这种燃料称为乏燃料。

乏燃料的组分主要是：<sup>235</sup>U（浓缩度 0.83%），<sup>238</sup>~<sup>242</sup>Pu，Np，Am，Cm，及裂变产物。其中 <sup>235</sup>U 和 <sup>239</sup>，<sup>241</sup>Pu 是核燃料，可以回收再用作反应堆进料；同时也可提取其他核素供科学研究或工、农、医学之用。这一主要以回收 U，Pu 为目的的过程称为乏燃料后处理。其简要过程为：

1. 乏燃料元件的“冷却”：燃料元件从堆中卸出后，必须放置一段时间，才能保证所得产品的纯度或产率，也才能使化学分离操作在较低的放射性水平下进行。如：为了保证分离出的铀中无 <sup>237</sup>Np，需冷却到 <sup>237</sup>U 衰变完全，（<sup>237</sup>U 经衰变生成 <sup>237</sup>Np，T<sub>1/2</sub>=6.75 天）；为了得到 <sup>239</sup>PU 的最大产率，需冷却到 <sup>239</sup>Np 衰变完全（<sup>239</sup>Np 经衰变生成 <sup>239</sup>Pu，T<sub>1/2</sub>=2.35 天）等。考虑到放射性毒素和挥发性都很强的 <sup>131</sup>I 的 T<sub>1/2</sub>=8.05 天，将碘的完全衰变作为控制冷却时间的主要因素。对压水堆核电站的乏燃料一般至少需冷却 150 天左右。这时，只剩下十几种较长半衰期的裂变产物核素和 U、Np、Pu、Am、Cm 的长寿核素。较长半衰期裂变产物的放射性强度约下降 30 倍（3.76 × 10<sup>9</sup>Ci ~ 1.14 × 10<sup>8</sup>Ci）。

燃料元件一般放在特制的水池中冷却。

2. 乏燃料元件的首端处理：为了进行乏燃料的化学分离，需将燃料元件组合体先行解体，然后除去包壳，将芯块溶解。这个过程称为首端处理。

组合的燃料元件，从水池中取出后，首先用机械切割法（锯、铣）分解，以卸除非燃料构件部分如：端件、定位格架、元件盒等。

分解得到的元件棒被切割成短段（2~5厘米），使芯块暴露出来，然后选择适当的化学试剂（可用硝酸使能溶解芯块而不溶解元件包壳）使芯块（U、Np、Pu、Am、Cm、及裂变产物）溶解，而锆合金包壳不溶。溶解液经过调整价态（如铀呈4价，钚、镅呈3价）以便下一步分离。

3. 化学分离：将可重新进入核燃料循环的铀、钚与燃烧中生成的裂变产物分开并达到必须的纯度，是乏燃料后处理的主要内容。

Purex 流程是广泛用于处理动力堆低浓铀核燃料的化学分离方法。

“共去污”和“铀、钚分离”两过程是化学分离流程的关键。都采用有机溶剂 TBP 萃取法。基本原理是利用不同元素在不同条件下在有机相和水相中的溶解度不同而进行分离。在共去污过程，铀和钚同时被萃取入有机相而与裂变产物和锕系元素分离。水相中集中了燃烧产物（放射性废物）。应用核能的高放废物就是从这里产生的，需要作专门处理。有机相中的铀、钚经还原反萃（将钚还原成不被萃取的3价状态），使钚进入水相而与铀分离。再将铀、钚分别净化到燃料纯的标准。

化学分离的难点在于：溶解液组分复杂约20种元素共存于溶液中；属于这些元素的放射性核素有35种左右其辐射作用不仅使操作复杂化而且会导致萃取剂的变化；为了满足核燃料再循环使用时对核性质和辐射安全的要求，产品要求的纯度很高（如铀的净化需要 $10^7$ ，钚的净化需要 $10^9$ ）；为此在分离过程中，要不断地进行分离纯化，一般要进行三次纯化，才能达到要求。分离纯化是利用元素的化学价态不同时，在水和有机相中的溶解度不同；和介质的组成不同（氧化性、还原性、酸度、浓度等的不同）时，对不同元素的作用不同来进行的。这样，在每一化学步骤，都有复杂的操作过程。成为乏燃料后处理最关键的内容。

乏燃料后处理工厂的基本特点是：放射性强和有临界安全的危险（核燃料在一定条件下，可能达到超临界状态而产生射线辐照和放射性污染）。对前者要采取屏蔽措施，使与生态环境相隔离。主要是用混凝土、钢材将工艺设备包装在内（热室），用机械手操作；对后者要用控制物料浓度、质量、设备周围物质、容器大小来防止。

乏燃料后处理的产品是可用作核炸弹的敏感物质，因此是核监督的重要对象。主要的对象是 $^{235}\text{U}$ 和 $^{239}\text{Pu}$ ，近来由于 $^{237}\text{Np}$ 的积累不少，几个核大国正打算也加以控制（美、俄、英、法、日共议后认为目前世界上已有4吨 $^{237}\text{Np}$ ，2010年将达12吨）。

（六）核废物的管理：核燃料的生产、使用过程中将产生放射性废物。废物主要来自核燃料在反应堆中燃烧时产生的强放射性裂变产物，但它被包在燃料元件包壳中，固定在一定位置上，并不外泄；待成为乏燃料从堆中取出，在后处理工厂经解体、去壳、溶解、化学处理等步骤，便产生固体、液体、气体三种状态的废物，简称“三废”。可见，放射性三废表现上都在乏燃料后处理工厂产生（占核工业的99%）。

固体放射性废物：核燃料后处理厂解体燃料元件组合体的各种部件及退

下的包壳等固体废物，可先行减容，然后埋藏。对一些有机废物（棉花、纸张、树脂等）可以压缩减容埋藏，也可以焚烧减容埋藏。

液体放射性废物：核燃料芯块溶解后所进行的化学处理过程，是排放液体废物的主要过程。它含有裂变产物元素和超铀元素。由于在流程的不同出口，排出废液的放射性强度不同，可按其放射性水平分为高、中、低三类放射性废液。这三种废液必须严格分开，分别处理。

高放射性废液是后处理厂产生的。它含有几乎全部裂变产物元素和超铀元素。其中含 的长寿命超铀元素危害大、时间长，是所处理废液的重中之重，是全世界普遍关心的问题。为此投入了大量人力、财力，研究了许多方案。主要思路是：将高放废液与玻璃（陶瓷、人造岩石）原料一起熔融，煅烧成稳定的玻璃体，然后深埋在稳定的地质层中。虽然做了许多工作，但尚未在工业上完全实践。因此，现在的高放废液都还储存在不锈钢罐中。另一思路是将高放废液先进行化学处理，把寿命长、毒性大的超铀元素分离出来，然后再进行物理处理，使之变成寿命短的核素，再作深埋处置。这样，废物处置的安全性将更加可信。

中、低放射性废液来自后处理厂及其它生产、科研部门。可以实行浓缩（蒸发、沉淀、离子交换、渗透），然后将放射性浓集液、残渣用水泥或沥青固化，净化后的水可以排放。

气体放射性废物：后处理厂的废气主要是  $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $3\text{H}$ ，反应堆及其它生产、科研部门也可能产生废气。 $^{131}\text{I}$  危害较大。吸附法是净化气体常用的方法。对于危害小、量少的废气可以用高烟囱排入高空。放射性气溶胶（<微米量级的粒子）是造成人体内照射的主要威胁，因此在通过烟囱排放前，需要过滤。

#### 四、核燃料循环的发展前景

人们对核燃料循环的研究，主要着重在两个问题。即：充分利用核燃料资源和使核燃料的利用清洁化。

1. 充分利用铀（钍）资源：目前核能主要是利用  $^{235}\text{U}$ ，但它只占天然铀中的 0.7%，即使考虑到压水堆的转换比为 0.6，天然铀的利用率也只有  $0.7\% + 0.7\% \times 0.6 = 1.1\%$ 。目前已探明世界上（经济上）有开采价值的铀为 500 万吨，而一座 1000 兆瓦（100 万千瓦）的核电站，要消耗的铀为：初装量 365 吨+年补充量 174 吨（运行 30 年约需天然铀 5500 吨）。能源专家按年增长率 2.5%（1989 ~ 1990 的低潮增长率）估算，现有储量只能维持到 2035 年左右。可见用现在类型的核电站，铀作为燃料资源并不丰富。

但是如果能将天然铀中未被热中子堆利用的、占 99.3% 的  $^{238}\text{U}$  利用起来，情况将发生本质的变化。

利用快中子增殖堆能够解决这个问题。在快中子增殖堆中，有足够富裕的中子能将  $^{238}\text{U}$  转换成  $^{239}\text{Pu}$ 。 $^{239}\text{Pu}$  与  $^{235}\text{U}$  相同，是可以燃烧的。这样就可以把铀资源的利用率从 ~ 1% 提高到 60 ~ 70%，可见铀资源在能源中的位置所起的作用。再加上快堆对燃料的利用比热堆充分（能耗大 3 倍左右），就可能更充分地利用铀。这样人们就不必再为化石燃料的污染环境（我国烧煤每年排入大气的  $\text{SO}_2$  1460 万吨，烟尘 2300 万吨，此外还有世界性的温室效应）和引起交通紧张（我国煤运量占铁路的 40%，占海运的 30%，而 1000Mw 电站需要运输的煤量为 330 万吨）而烦恼。

和  $^{238}\text{U}$  相似,  $^{232}\text{Th}$  也能吸收中子而转换成能做核燃料的  $^{235}\text{U}$ 。但因  $^{233}\text{U}$  中的  $^{232}\text{U}$  的子体具有很强的放射性, 操作起来很不方便, 近来除印度这样的铀资源匮乏而钍资源丰富的国家外, 其他国家暂时放弃了对它的研究。

2. 核能应用清洁化: 后处理厂共去污流程产生的高放废液的最终处置, 是人们最关心的问题。它含有反应堆中产生的全部裂变产物、镅和超铀元素。裂变产物的放射性在储存 300 年后将降到比天然铀矿还低的水平。而镅、镎、钷等超铀元素在储存几十万年后仍保留有相当的水平。一座 1000Mw (e) 的核电站每年将生产 25 公斤超铀元素 [1990 年世界核电站装机容量为 325870Mw (e), 可产生超铀元素 ~ 8 吨, 如果用 U+Pu 的混合燃料此值还将加大]。对于这样长寿命的放射性物质, 进行几十万年的长期埋葬, 不能不引起公众的忧虑。

缩短放射性废物辐射危害达到环境允许水平的的时间, 将从根本上消除这一疑虑。这样人们就能够从有人类历史文献记载的时间尺度来评价地层的稳定程度, 从而做出不容置疑的结论。这个目的可借用中子嬗变长寿命裂变产物和超铀元素的方法来实现。

在中子作用下, 上述元素或嬗变成稳定的核素 [如:  $^{99}\text{Tc} (n, \gamma) ^{100}\text{Tc}$   $^{100}\text{Ru}$ ], 或经过裂变反应燃烧成短寿命裂变产物 [如  $E_n > 0.5\text{MeV}$  时的  $^{237}\text{Np} (n, f)$ ;  $^{241}\text{Am} (n, \gamma) ^{242}\text{Am} (n, f)$ ], 这时不但清除了长寿命核素, 而且还为核燃料提供了能量, 达到一举两得的目的。

高放射性废液经过上述物理处理后, 剩下的只是半衰期 30 年左右的裂变产物 ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  等), 只需要几百年的时间就可达到安全水平。

## 五、结束语

我国是世界上的核大国, 具备一整套核燃料循环体系。这一套宝贵财富是在老一代革命家和科学家的关怀和具体指导下建立发展起来的, 至今已经 40 年了。40 年来在全国各方的无私支援下, 我国的核燃料生产不但满足了核武器、核电站的需要, 而且尚有富余, 可以出口 (微堆、核电站等)。近十年来, 在 863 计划中, 核能技术也成为能源技术领域的重要内容之一。但是在新形势下也还存在着许多困难: 设备陈旧、工艺老化、后继乏人、资金不足等。但核工业部门的全体人员, 在第二次创业的鼓舞下, 是有信心夺取新的胜利的。

## 21 世纪初石油化工 技术进步的展望

李大东 闵恩泽

中国石油化工总公司石油化工科学研究院

李大东 石油炼制催化剂和工艺方面的专家。1938 年 2 月 24 日生于北京。1962 年毕业于北京大学化学系。现任中国石油化工总公司石油化工科学研究院院长，教授级高级工程师。兼任中国石油学会常务理事，石油炼制分会主任，中国化学会催化专业委员会主任等。1994 年当选为中国工程院院士。长期从事石油加工催化剂的研究与开发。

闵恩泽 石油化工催化领域的专家。1924 年 2 月 4 日生于四川成都。1946 年中央大学毕业。1951 年获美国俄亥俄州立大学博士学位。历任石油化工科学研究院总工程师、副院长、首席总工程师、学术委员会主任等职。曾任中国石油学会副理事长、中国化学会常务理事等。1980 年当选为中国科学院院士(学部委员)，1992 年当选为中国科学院学部主席团成员和化学部副主任。1993 年当选为第三世界科学院院士，1994 年当选为中国工程院院士。长期从事工业催化剂的研制与开发，成果丰硕。

我国石油化学工业(以下简称石化工业)包括从原油生产汽油、煤油、柴油、润滑油等石油产品的石油炼制，也包括以蒸汽裂解生产的乙烯、丙烯等为原料生产合成树脂、合成橡胶、合成纤维以及基本有机原料等的石油化工。到 1994 年底，我国原油加工能力已达到 1.81 亿吨/年(其中中国石化总公司 1.52 亿吨/年，占 84%)，在世界上排第四位。从世界前十位炼油公司排序看，中国石化总公司已成为世界第三大炼油公司，列于英/荷壳牌公司和美国埃克森公司之后。1994 年底我国乙烯生产能力达 238 万吨/年(其中中国石化总公司 210 万吨/年，占 88%)，在世界上排第八位。迈入 21 世纪初我国石化工业又面临一个不可多得的历史发展机遇，振兴石油化工建设支柱产业初步设想是：第一步，到 2000 年，使原油年加工能力达到 2 亿吨左右，乙烯年生产能力达到 500 万吨左右，基本形成支柱产业的框架；第二步，到 2010 年，原油年加工能力达到 3 亿吨以上，乙烯年生产能力达到 800~1000 万吨，使我国石化工业有一个更大的发展，在技术上达到世界先进水平。这样，展望 2010 年国际和我国石化技术进步的前景就成为值得探讨的一个问题。回顾石化技术进步的历史，技术进步可以有两类：一类是在原技术基础上的连续式技术进步；另一类是另辟蹊径，转移到一个全新的科学技术知识基础上的非连续式技术进步。下面试图从技术进步的推动力，去展望国际和我国石化工业这两类技术进步的前景。

### 一、国外炼油技术进步的展望

国外炼油技术进步的推动力主要来自环境保护、保健和安全的严格要求。国外为保护环境，要求使汽油和柴油成为“环境友好”产品，对其质量制定了严格的规格指标。例如 1990 年美国清洁空气法(修正案)规定，将逐步推广使用含氧汽油(Oxy-Fuel)和新配方汽油(Reformulated Gasoline)，减少汽车废气等空气的污染。汽油组成将发生深刻的变化，不仅要求限制汽

油的蒸汽压、苯含量、芳烃和烯烃含量等，还要求在汽油中加入相当数量的含氧化合物，比如甲基叔丁基醚（MTBE）、甲基叔戊基醚（TAME）。这种新配方汽油的质量要求已推动了生产汽油的有关炼油技术沿着下列方向发展：

催化裂化由单一生产高辛烷值汽油，通过开发新催化剂和改进工艺，转向既生产高辛烷值汽油，又生产异丁烯、异戊烯等醚化原料，同时还要减少裂化汽油中的芳烃含量；

催化重整要降低操作苛刻度，以减少重整生成油中的芳烃含量；

异丁烷与丁烯烷基化生产高辛烷值汽油组份，原料烯烃将扩大到包括丙烯、丁烯和戊烯；

轻质烷烃异构化，其原料将由正戊烷、正己烷扩大到正庚烷；

由于甲基叔丁基醚、甲基异戊基醚等含氧化合物已成为汽油的重要组份，其生产技术将不断改进，包括配套所需增产异丁烯的正丁烯异构化技术，新的含氧化合物的生产技术如从丙烯生产二异丙基醚等还会继续开发。为了降低汽油中的苯含量，轻汽油馏份苯加氢抽提蒸馏分离苯等技术均在开发。同时，炼厂还减少汽油中丁烷与 C<sub>5</sub> 馏份的调入以降低蒸汽压，将它们作为石油化工原料。由上可见，由于汽油是石油炼制工业中最主要的产品，其质量的变化已对石油炼制技术带来多么深刻和广泛的影响，而上述这些影响将继续推动有关炼油技术的连续式技术进步。

柴油是另一重要的石油产品，新的“环境友好”柴油要求硫含量不大于 0.05%，芳烃含量不大于 20%，同时十六烷值不低于 40。这些要求将推动现有柴油加氢技术，开发新催化剂、改革工艺等来达到上述目的。“环境友好”汽油、柴油等的推广应用，还会对润滑油质量提出相应的要求，也将推动其技术进步。

以上这些环保要求已大大推动了近年炼油技术的发展。进入 21 世纪初还将继续推动炼油技术沿着这些方向的连续式进步。

炼油技术除受环境保护因素的推动外，21 世纪初还会有原油资源、产品市场等因素影响炼油技术发展。延迟焦化还会不断改进，渣油加工的组合工艺也会发展。从世界石油资源的开发趋势来看，原油有变重趋势，同时高硫、高金属原油增多，这将增加今后渣油加工的难度，所以开发焦炭选择性更好、更能抗重金属污染的渣油催化裂化催化剂仍是重要的课题。渣油固定床加氢处理仍会继续向多床层和多个反应器体系发展，用多种不同功能的催化剂来对付劣质原料油。从石油产品市场的构成看，柴油的需求量将会增加，这将推动进一步改进催化剂的选择性来提高加氢裂化所产柴油的收率，同时开发从气体烯烃叠合生产柴油馏份的技术。

展望 21 世纪初，炼油技术的重大突破可能有三：一是固体酸异丁烷 / 丁烯烷基化，二是馏份油的生物催化脱硫，三是使用固体碱的汽油、煤油硫醇氧化脱臭。为了代替 HF、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 催化剂以减少环境污染，各大公司均在大力研究环境友好的固体酸烷基化工艺，一种负载型液体酸烷基化工艺也已中试成功，准备开始工业试验。一套柴油生物催化脱硫中试装置正在建设。据称生物催化脱硫可比现有技术减少投资 50%，节省操作费用 15%。生物催化脱硫也适用于汽油和原油脱硫。这些是可望发生于 21 世纪初炼油技术的非连续式技术进步。采用固体碱代替苛性碱溶液的汽油、煤油硫醇氧化脱臭技术正在开发，其目的是避免废碱液排放引起对环境的污染。新催化材料的发现，新催化反应工程的应用也可能带来一些技术突破，如新型超大孔分子筛的发



现，纳米级分子筛的合成及应用，新催化膜反应器的应用等。

## 二、我国炼油技术进步的展望

为了充分利用石油资源，多产轻质油品，我国石油炼制从 60 代至今一直是走深度加工的道路。深度加工技术以发展催化裂化为主，这是把 350 ~ 520 减压重油馏份裂化为汽油并副产柴油和液化气的一种工艺。我国开发成功了多种催化裂化工艺和一系列催化裂化催化剂。对于 > 520 渣油的加工，掺渣油催化裂化工艺近年来得到迅速发展，还进一步发展了延迟焦化、减粘、溶剂脱沥青等工艺。同时对这些渣油装置加以联合，开发成功多种组合工艺，进一步提高了轻质油收率。此外，还发展了高压加氢裂化，把重油更多地转化为喷气燃料和柴油。对于提高汽油辛烷值，已有半再生式和连续移动床两种形式的催化重整。对于油品精制，已开发了多种加氢精制工艺和催化剂品种，为了综合利用好催化裂化副产的大量气体，已有异丁烷 / 丁烯烷基化和异丁烯醚化等生产高辛烷值汽油组份的技术，还有生产化工产品的技术，如顺丁橡胶、聚丙烯、异丙醇生产技术等。我国炼油技术基本上是六七十年代依靠自己力量开发的，近十年也引进了一些炼油新技术，进一步提高了水平，这是我国炼油技术今后前进的基础。

展望 21 世纪初，我国炼油技术的发展，其推动力和发展主要有几方面：

(1) 为了利用有限的原油满足大幅度增长的石油产品市场需要，要求进一步提高轻油收率。目前轻油收率平均为 60%，2000 年希望达到 75%。由于催化裂化是我国重油转化为轻质油的主要手段，所以催化剂要形成品种系列以满足各种原料油、装置和产品分布的需要，特别要开发高选择性的裂化催化剂以增产轻油，开发生焦少的渣油裂化催化剂以达到多掺渣油，同时还要大力降低裂化催化剂生产成本。渣油催化裂化进一步提高，延迟焦化、溶剂脱沥青等渣油加工工艺要进一步完善，同时优化匹配各种渣油加工组合工艺，提高轻油收率。

(2) 从我国市场的需要出发，柴油消费量大于汽油消费量。受价格因素的影响，我国每年的柴油产量却小于汽油产量，南方一些地区大量进口柴油。这一产品结构需要改变，要开发多产柴油的催化裂化催化剂和工艺。由于催化裂化从本质上讲是生产汽油为主的手段，提高柴油收率受到一定限制，因此还是要靠发展加氢裂化来大幅度增产柴油，特别是要开发投资省的中压加氢裂化技术。此外，开发烯烃叠合生产柴油馏份的技术也是一条新途径。

(3) 面对国内、国际两个市场，汽油需要升级换代，适应国内市场需要，要推广使用 90 号高辛烷值汽油及无铅汽油，同时生产一部分新配方汽油出口。有关催化裂化、催化重整等技术均要按此方向发展。近年已开发成功多产烯烃和高辛烷值汽油 (MGG) 的技术，多产异丁烯、异戊烯 (MIO) 的催化裂化技术等，仍要继续提高。要进一步提高醚化、烷基化技术水平。

(4) 我国炼油厂所炼原油种类将日益增多，国内以低硫、石蜡基原油为主，但也有高酸性、环烷基原油等，还有高粘度的稠油。今后还要大量进口中东的高硫、高金属、高沥青质原油，炼油技术也要适应这些原油性质的变化，特别是开发高硫原油加工技术，防止设备腐蚀，精制油品等。对于高硫原油渣油的加工，发展加氢处理脱硫、脱氮、脱金属、脱沥青技术是十分迫切的任务。

(5) 我国炼厂的原油加工能力还要大幅度提高，利用现有炼油装置，消

除“瓶颈”，通过技术改造提高处理能力是经济有效的途径。为此，需要开发技术以提高原油蒸馏、催化裂化、加氢裂化、延迟焦化、半再生式催化重整等处理能力。

此外，我国炼厂装置的大型化（1000万吨/年规模）、计算机的应用、污水、废气等的处理也将面临一系列科技问题，需要开发新技术来加以解决。对于国外已开发的属非连续式技术进步的技术，我国也已开展研究。如固体酸烷基化已按自己的新构思在开展研究，还在开展固体碱的汽油催化脱硫醇研究。跟踪国外生物催化脱硫的科研工作尚待开展。争取21世纪初在这些领域有中国自己的创新技术。

### 三、国外基本有机原料、合成树脂发展的展望

对于基本有机化工原料的生产，环境保护技术的开发，除开发污染物（废气、废水、废渣等）的治理技术以治标外，已转向治本，即化学加工技术的开发由过去首先强调目的产品的转化率，转向重视化学反应的选择性，企图减少副产品的生成量，减少废物排放，以减少治理环境污染的费用，甚至追求达到无副产物生成的“零排放”技术。对于烃类选择氧化，国外正大力提高这类反应的选择性。提高烃类选择氧化的选择性，不仅能降低生产成本，而且还能减少副产品对环境的污染。如正丁烷氧化制顺酐，由流化床氧化已发展到提升管晶格氧氧化，选择性已大幅度提高，其它为烃类的晶格氧氧化也正在开发；近年分子筛作氧化催化剂是分子筛应用的重大发展，钛硅分子筛过氧化氢氧化苯酚、丙烯等，选择性大幅度提高，成为新一代的环境友好工艺，前者已工业化；均相络合催化氧化也是大力研究的领域。预期到21世纪初这类环境友好的烃类选择氧化制醛、酮、酸等的技术会有大发展。国外正寻找固体酸催化剂来代替一些石化过程中所用的 $\text{HF}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{AlCl}_3$ 催化剂以减少环境污染和改善劳动条件。在苯与烯烃烷基化生产乙苯、异丙苯、长链烷基苯等过程中已开发成功使用分子筛催化剂的新过程，到21世纪初还会有新的改进。为了减少溶剂挥发污染环境，采用水做溶剂进行化学反应甚为理想，近年来水溶性均相络合催化剂受到重视，这是原因之一。同时水溶性均相络合催化剂易于与产品分离，克服了油溶性均相络合催化剂与产品互溶而分离麻烦的缺点。丙烯水溶性均相络合催化氢甲酰化制丁醛已工业化，其它烯烃的氢甲酰化、羰化等正在开发。由上可见，环保的要求，正推进新一代基本有机化工原料生产工艺的开发，其中大多数是非连续式技术进步。

由于原料费用通常占石化产品成本的60%~70%，利用廉价原料生产石化产品始终是石化工业技术发展的方向。近年来的发展趋势是用烷烃作原料生产石化产品。液化气芳构化制造芳烃已工业化，丙烷氨氧化制造丙烯腈已在中试，从丙烷、丁烷、异丁烷制造相应的烯烃有多种工艺，展望到21世纪初，利用烷烃代替烯烃为原料生产石化产品会有新进展。由于每年发现的天然气储量大于消费量，世界天然气的储量不断增长。从长远看，天然气将成为生产石化产品更重要的原料。所以，各国均在大力开发甲烷氧化偶联制乙烯、甲烷脱氢偶联制芳烃、甲烷控制氧化制甲醇等技术。这些技术尚有不少技术难关需要攻克才有工业化可能。

国外预测未来聚烯烃将变得更为重要，将形成一种“聚烯烃材料工业”。80年代烯烃聚采用金属茂催化剂是一项重大技术突破。其特点是催化活性高，大约可达 $10^6$ 克聚合物/克金属；单一活性中心，使聚合物的分子量均

匀；可制备具有特殊优异性能的树脂，如所生产的间规聚丙烯具有较好的透明性、耐辐射性等。金属茂聚烯烃催化剂已迅速工业化，预计到 1996 年底，所产的聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等将达到 86.8 万吨/年，到 21 世纪初，这种采用金属茂催化剂的烯烃聚合技术还会继续大发展。

#### 四、我国石化技术发展的一些展望

我国现代化大型石油化工联合企业基本是靠引进国外技术建立的。近年来在消化、吸收的基础上，引进装置所用的催化剂绝大多数实现了国产化，其中有的达到国际先进水平。对于乙烯、丙烯等烯烃的生产，开发成功自己的 CLB—1 和 SH—1 两种蒸汽裂解炉型，同时还自主开发成功我国的 DCC 重油催化裂解制烯烃技术。对聚烯烃、基本有机化工原料的生产技术已开展大量研究和开发。以上这些是今后技术前进的基础。

展望 21 世纪初，我国石化技术的发展，对于我国近年开发成功的 CBL-1 和 SH-1 两种蒸汽裂解炉，还应优化裂解炉设计和结构，提高裂解温度、缩短停留时间、降低烃分压，从而提高烯烃收率和热效率，同时增加对原料的适应性和操作弹性，此外还要扩大规模。蒸汽裂解的原料要轻质化、多样化和优化，因此要继续开发各种原料的加氢改质技术，以充分发挥现有蒸汽裂解炉的潜力。我国自主开发的重油催化裂解制丙烯的技术，为发展石油化工开辟了一条新途径，还要从催化剂、裂解装置结构等方面继续完善，以保持国际领先水平。

到 21 世纪初，我国基本有机原料的生产技术，要在消化、吸收引进装置的前提下，继续有所创新。已达到国际先进水平的环氧乙烷、丙烯腈、二甲苯异构化、乙苯脱氢等催化剂要继续开发，争取达到领先水平。同时以这些催化剂为基础，完成配套的工艺、专用设备开发，形成自己的成套技术。大力开发环境友好的基本有机原料生产技术，努力在分子筛催化剂合成乙苯、分子筛催化剂合成异丙苯、异丙苯氧化分解制苯酚和丙酮、烯烃水溶性均相络合催化氢甲酰化合成丁、辛醇和高碳醇、液固流化床合成烷基苯等方面有所突破，形成我国的专利技术。

到 21 世纪初，对于合成树脂技术的开发，要加快聚乙烯、聚丙烯引进装置所用催化剂的更新换代，特别要大力开发金属茂催化剂，迎头赶上世界先进水平。同时也要在聚乙烯、聚丙烯的工艺技术和关键设备等方面有所突破，形成自己的成套技术。如丙烯聚合环管本体——气相流化床组合工艺，浆液法高密度聚乙烯生产工艺等。从市场需要出发，努力增加合成树脂的品种，重点开发一些专用料，如农用塑料系列专用料、包装用系列改性新产品材料、家电、办公用具用系列专用料、汽车用系列专用料、工程塑料及合金系列材料等。同时还要重视己烯-1、4-甲基戊烯-1 等共聚单体制备技术的开发，以便能通过共聚增加塑料的品种牌号。

#### 五、加强定向性基础研究以创新

“基础性研究性和高技术研究，是推进 21 世纪现代化建设的动力源泉”。石油炼制和石油化工发展的历史经验告诉我们：石油炼制和石油化工技术的重大技术突破往往来源于新催化材料的发现、新反应工程的开发和廉价原料的新化学反应的利用。近年来，我国在这些有关石化工业发展的重大科技领域已开展了定向性的基础研究。在新催化材料领域，已在新型分子筛、

杂多酸、固体超强酸、固体碱、金属超微粒子、非晶态合金等方面广泛开展研究，发现了一些新技术生长点。在新反应工程领域，催化蒸馏、液固流化床、超临界反应、磁稳定流化床等领域，研究工作已经展开，也有一些进展。关于廉价原料的新反应，我国对甲烷氧化偶联制乙烯、甲烷控制氧化制甲醇、乙烷丙烷氧化脱氢等也已进行了大量的研究，有的研究已取得可喜的进展。我们应大力加强这些定向性基础研究，争取在科学技术知识上有所新发现，形成新构思，开发成功几个中国独特的石化技术，21 世纪初在世界上占有一席之地。

# 中国合成纤维的需求与发展

袁晴棠

中国石油化工总公司

袁晴棠 女,石油化工专家。1938年5月12日出生于河南省南召县。1961年天津大学毕业。现任中国石油化工总公司总工程师,高级工程师。兼任中国石油学会副理事长。1995年当选为中国工程院院士。长期从事国内乙烯裂解技术开发,组织石化总公司的科研开发和重大科技攻关,取得多项重要成果。

合成纤维工业是为纺织工业提供原料的重要原材料工业。合成纤维自本世纪30年代工业化以来,已有60年的发展历史。由于性能优良,用途广泛,原料来源丰富,不受自然条件限制等因素,发展相当迅速。世界合成纤维产量1950年仅6.9万吨,1990年已达1552万吨,40年间平均年增长率达到14.2%。同期,天然纤维(棉、毛、丝、麻)的年平均增长率仅2.5%。合成纤维在纺织纤维中占的比例从1950年的0.7%提高到1990年的38.2%,预计2000年将达到42%。1995年世界合成纤维产量为1819万吨。合成纤维工业的发展使纺织原料结构发生了重大变化。

合成纤维是合成材料的重要组成部分,合成纤维的发展对解决12亿人口的穿衣以及粮棉争地问题有着密切的关系,在国民经济中具有重要的作用。为了加速合成纤维工业的发展,国家已在“九五”计划和2010年远景目标纲要中把合成纤维和合成纤维原料作为发展重点加以规划。因此,本文拟对我国合成纤维的需求与发展做一简要叙述。

## 一、我国合成纤维工业的现状

我国合成纤维工业50年代末期开始发展,1970年总产量3.6万吨。70年代中期,随着我国石油化工的发展,先后建立了上海、辽阳、天津、川维四大合纤基地,为我国合成纤维工业的发展奠定了基础。80年代,又引进了一批国外先进技术,建设了仪征及上海石化二期等大型合纤工程,进一步推动了我国合成纤维工业的发展。进入90年代,我国的合成纤维工业持续增长,1994年合纤产量为205.72万吨(其中涤纶151.53万吨、锦纶201.18万吨、腈纶18.46万吨、维纶5.62万吨、丙纶9.93万吨)。1995年,产量为250万。全国合纤生产能力已达290万吨/年,仅次于美国,居世界第二位。

1983年,中国石油化工总公司的成立,促进了我国合成纤维工业的发展。经过十几年的努力,1995年,石油化工总公司拥有合成纤维单体生产能力133万吨/年,占全国总能力的90%;合成纤维生产能力55.2万吨/年,占全国总能力的19%,在我国合成纤维工业生产中具有重要地位。

80年代以来,我国合成纤维工业虽然有了长足的进步,但与国民经济发展的需要相比,仍有较大的差距。一是合成纤维的产量仍不能满足纺织工业发展对原料的需求。1994年,我国进口合成纤维超过100万吨。其中,涤纶和腈纶缺口较大,分别占到进口合成纤维总量的60%和35%。大量合成纤维的进口,不仅耗用外汇,而且对世界合成纤维的需求产生了影响。如日本的

合成纤维生产 1994 年除尼龙长丝外，均较 1993 年增长了 1.8%，主要原因是对中国等国的出口激增所致。1995 年日本合成纤维产量继续增长，总产量达 151 万吨，比 1994 年增长了 2.3%。此外，合成纤维原料（单体）的进口量也较大，1994 年进口 DMT（对苯二甲酸二甲酯）、乙二醇、丙烯腈、PTA（精对苯二甲酸）、己内酰胺、尼龙 66 盐等合成纤维单体 57 万吨（见表 1）。1995 年进口上述合纤单体 81.9 万吨（见表 2）；二是产品结构有待调整。1990 年世界上四大纶的比例是涤纶：锦纶：腈纶：丙纶为 54.8：24.9：15.0：5.3。同期，我国五大纶的比例是涤纶：锦纶：腈纶：丙纶：维纶为 72.2：7.8：8.5：7.4：4.1。1994 年为 73.7：9.8：9.0：4.8：2.7。其中，涤纶的比重已占到 70% 以上，远高于世界平均水平，而锦纶和腈纶的数量明显不足，这在我国合成纤维进口品种构成中也有所反映；三是合成纤维品种单一，差别化率低。发达国家如日本合纤差别化率在 30% 以上，并已开发出具有复合功能的第三代、第四代合成纤维。目前，我国合纤新品种少，差别化率低，只有 10% 左右；另外，国内合纤在装饰及工业领域的应用也有待进一步开发；四是技术和装备水平需要进一步改进和提高。

## 二、需求预测

纺织工业是我国的传统工业，也是传统的出口产业，1994 年出口额占我国出口总额的 29.4%。合成纤维工业直接依存于纺织工业，我国生产的合成纤维绝大多数都用于纺织工业，直接出口的纤维只占极少数。反过来，纺织工业对合成纤维工业的依存度也越来越高。1994 年，纺织工业所需的 780 万吨纤维中，仅涤纶、腈纶、锦纶和丙纶就达 282 万吨，约占 36%。1994 年国内合成纤维及单体消耗见表 1。

目前，我国合成纤维工业满足不了市场需求。无论是单体、聚合物，还是纤维的产量都有缺口。产品结构、品种、牌号以及生产技术还有较大的差距。因此，大力发展合成纤维工业，为纺织工业和相关工业提供原料，解决人民群众穿衣问题，是“九五”期间石化工业的一项重要任务。

表 1 1994 年国内合成纤维及单体消耗

（单位：万吨）

品种	产量	进口量	出口量	表观消费量
涤纶	151.53	66.39	2.17	215.75
腈纶	18.46	38.52	2.38	54.60
锦纶	20.18	5.27	0.53	24.92
丙纶	9.93	0.25	0.003	10.18
DMT	22.57	1.31	0.05	23.83
乙二醇	38.99	12.90	0.55	51.34
丙烯腈	19.11	5.10	0.002	24.21
PTA	71.88	23.93	0.70	95.11
己内酰胺	2.40	11.54	0.002	13.94
尼龙 66 盐	3.89	2.73	0.006	6.61

中国石化总公司咨询公司根据其宏观经济需求预测模型，按“九五”计划确定的 8% 的国民经济增长速度，对 2000 年我国合纤需求进行了预测，结

果列于表 3。预测结果表明，到 2000 年，国内合纤需求量接近 400 万吨 / 年（不包括聚酯等聚合物）。与之相适应，合成纤维的主要原料也要有一个较大的发展。国家“九五”计划和 2010 年远景目标纲要确定：到 2000 年，合成纤维原料生产能力将增加到 480 万吨 / 年（含聚酯等聚合物）。

表 2 1995 年国内主要合纤原料（单体）生产和消费表  
（单位：万吨）

品种	产量	进口量	出口量	消费量
DMT	23.7			23.7
乙二醇	42.5	20.5	0.5	62.5
丙烯腈	23	6.6	0.2	29.4
PTA	90.3	40.1	1.3	129.1
己内酰胺	6.6	12.4	0.1	18.9
尼龙 66 盐	4.4	2.3	0.1	6.6

表 3 2000 年合成纤维及其单体预测  
（单位：万吨）

品种	产量
涤纶	251
腈纶	63
锦纶	35
丙纶	23
维纶	5
乙二醇	106
丙烯腈	81
PTA	219
DMT	30
己内酰胺	29
尼龙 66 盐	17

### 三、发展展望

党的十四届五中全会提出了今后 15 年的奋斗目标和战略任务。到 2010 年，要实现国民生产总值比 2000 年翻一番，使人民的小康生活更加宽裕，形成比较完善的社会主义市场经济体制。这一宏伟的蓝图也预示着我国的合成纤维工业将有一个大的发展。

为满足国民经济发展的需要，合纤工业按年平均递增 8~9% 的发展速度进行预测，到 2000 年可望接近 400 万吨 / 年的生产能力。发展合纤的重点是合纤原料。合纤原料增长速度要高于合纤抽丝发展速度。发展合纤原料（单体）的重点是发展精对苯二甲酸（PTA）、乙二醇（EG）、丙烯腈（AN）、己内酰胺（CPL）和尼龙 66 盐等。

合成纤维的发展仍以涤纶为主，适当增加锦纶和腈纶的比例。涤纶在国内外都是合纤的重要品种。1994 年世界涤纶产量总计 1107 万吨。预计 1995~

2000年涤长、涤短纤维将分别以4.6%和1.9%的年平均增长率发展。我国涤纶的产量已从1990年的104.2万吨提高到1994年的151.5万吨。预计，到2000年涤纶产量将超过240万吨/年。与此同时，锦纶和腈纶也将得到进一步的发展，以调整在合纤构成中的比例。

通过开发合纤新品种，发展功能性特种合成纤维的生产和应用，到2000年，使差别化纤维在合纤中的比重由目前的10%提高到15%~20%，以满足衣着、装饰和工业用合纤的需要。

鉴于石化总公司所属企业合纤原料（单体）的生产能力占全国生产能力的90%，因此，在合纤维工业的发展中，石化总公司承担着提供合纤原料的艰巨任务。面对合纤工业加速发展的形势，石化总公司在“九五”期间十分重视合纤的发展，并做了相应的安排。在发展方针上实行三个为主：一是以发展合纤单体为主，为我国纺织工业提供原料；二是以发展涤纶、腈纶为主，适当发展锦纶和丙纶，维纶主要生产工业用纤维；三是以现有老企业、老基地的改扩建为主。根据资源条件和合理布局，新建装置原则上在老企业内建设，不布新点。老装置的改造和新装置的建设都要采用先进技术，力求达到经济规模。

#### 四、若干思考

从合成纤维工业目前的水平出发并考虑到2010年我国长远发展目标以及在人口、耕地等方面的压力，在今后合成纤维工业发展中，有以下几点思考，值得引起注意。

1. 为了满足国民经济发展和人民生活水平提高的需要，未来15年，合成纤维工业必须要有一个新的发展。但是合纤的发展又受合纤原料发展的制约，因此，在我国未来合纤工业发展中，要特别注重合成纤维原料的发展。

2. 我国未来15年对合纤产品的巨大需求，吸引了世界厂商来华投资建厂和推销产品，占领市场份额。考虑到我国在加入世贸组织之后，国内合纤企业将面临巨大的竞争压力。面对这种形势，依靠技术进步，加强科学管理，是提高企业竞争力的唯一出路。

3. 国外的合纤工业，已经进入成熟时期，但是技术进步仍然很快。为加速我国合纤工业的技术进步，要加大科技投入，组织好科研开发工作，大力加强合纤科研开发基地的建设。要加快已经确定的上海石化“国家合纤工程研究中心”的建设，力争“九五”期间在新技术、新品种、新牌号的开发方面发挥作用。当前，要抓好丙烯腈、腈纶等成套技术的开发工作，为合成纤维工业的发展提供技术支撑。

4. 在未来合成纤维工业的发展中，要注意调整产品结构。在发展涤纶的同时，注意增加锦纶、腈纶的比重，适当发展丙纶；要发展差别化纤维，注意提高合成纤维的差别化率；要加强非服用纤维的发展，扩大合成纤维的用途，增加经济效益。



# 提高重大混凝土工程耐久性对 节约资源能源、保护环境意义重大

唐明述

南京化工大学

唐明述 无机非金属材料专家。1929年3月31日出生于四川省安岳县。1956年南京工学院研究生毕业。现任南京化工大学名誉所长、教授。1995年当选为中国工程院院士。主要从事水泥等无机非金属材料的研究，并取得多项重要成果。

## 前言

建国以来，特别是改革开放以来，我国的基本建设取得举世瞩目的成就。在世纪之交的未来若干年内，我国的基建规模必将以高于世界平均水平的速度发展。1994年我国水泥产量已超过4亿吨，在世界上遥遥领先，约占世界总产量的1/3。相应的混凝土工程量在世界上也名列第一。为使我国人民生活水平达到或接近先进国家的水平，水泥和混凝土需求量还要成倍增加。根据预测2025年和下世纪30、40年代，我国人口将分别达到15亿和16亿。以人均年水泥用量500kg计，则水泥产量将要求达到7.5~8亿吨。这个数字相当于当前世界水泥产量的2/3，约为1950年世界水泥产量6倍。按目前投资计算要将水泥年产量增加4亿吨，需投资4000亿元，还有矿山建设和铁路运输的巨大压力。而问题的另一面是我国一些重要自然资源人均占有率很低，人均占有耕地和人均占有量年径流量均为世界平均水平的1/4。人均能源储量也是少的，煤约为平均值的50%，油为12%。因此，我国必须走资源节约型的国民经济发展道路。要改变投入多产出少的传统的经济增长模式，提高经济整体素质和效益。就涉及混凝土工程的基本建设而言，最关键的任务是提高质量，延长混凝土工程的使用年限，减少巨额维修费用。从战略出发可以考虑分两步走，首先是力争所有重大混凝土工程，如港口、大坝、桥梁、高速公路、机场等达到预定的30~50年的使用寿命。第二步应考虑综合运用国内已有的先进技术，使桥梁、大坝等混凝土工程寿命达到100~125年以上，机场、预制构件等寿命达到50年以上。则将节约大量资源能源。由于基建投资中，水泥混凝土工程所占比例不少，据称当前一亿基建投资将需水泥3~4万吨与之配合，因此延长工程寿命对于节约资金也是十分可观的。这方面发达国家已有深刻教训，根据美国1988年报道，美国混凝土基础工程（公路、桥梁、大坝、供水系统等）估计价值达6万亿美元。而其后每年用于维修和重建费用将高达3000亿美元，即大约相当于我国1990年国民生产总值。目前，我国正处于建设的高潮，若不吸取教训，重视提高工程寿命，同样将在未来若干年内深感维修和重建费用的严重负担并制约进一步发展。因此，从国情出发，现在就在各个方面采取措施，提高工程质量，为发展耐久性混凝土而努力，必将获益匪浅，造福于子孙后代。

## 一、水泥混凝土有广泛应用的发展前景

在人类发展过程中混凝土已逐渐成为人类社会生活、文化生活的基础，

城市化、高速公路、港口码头、立交桥、机场、大坝等建设中应用最大量、最广泛的是混凝土。公元 126 年所建的罗马万神殿至今仍著名于世。1756 年英国西南部港湾中所建埃迪斯頓灯塔使用百余年成为海工混凝土的里程碑，历史悠久的古长城亦为胶凝材料砌筑而成。从 1824 年发明波特兰水泥之后，1850 年之后又出现了钢筋混凝土，1940 年又采用预应力钢筋混凝土，这些突破性技术发展，使得摩天大楼和大跨度桥梁在世界各地蓬勃发展。在近约 100 年内，世界水泥产量增加了几百倍，成为不可取代、应用量最大的建筑材料。

作为建筑材料，水泥混凝土之所以获得广泛应用，是由于在众多方面均优于木材和钢材。下面将从工程性能(Engineering Properties)、节能(Energy saving)、经济(Economical)和生态(Ecological)等四个方面进行具体分析(即英文所谓的四“E”分析)。

### 1. 工程性能

从北海采油平台的要求出发进行分析，认为预应力钢筋混凝土结构在工程性能上有如下的一些优点：

**维修：**混凝土不腐蚀，不需要表面处理，随着时间的推移，强度还会增长。因此混凝土结构基本上不需要维修。而在海上环境条件下，钢结构易受严重腐蚀，需要价值昂贵的表面处理和其他保护方法，维护修补量大。

**耐火：**在海上，火极易使温度达到钢结构永远破坏的温度。这将对人员的安全和投资造成严重威胁。而钢筋混凝土中的钢筋由于混凝土层的保护作用，不致因过热而失效。

**抵抗循环载荷：**焊接点、腐蚀坑、几何尺寸的突变，如由薄条至厚框架的接点等的局部应力区对钢结构的疲劳强度影响较大，而根据绝大多数的实用规范，混凝土的允许应力值约为其极限强度的 50%，因而混凝土的疲劳强度一般是没有问题的。据报道，1980 年钢结构的采油平台曾因疲劳断裂而发生严重事故。

**消振：**在生产平台上操作，结构和机器基础振动小而消振效果好对工作人员是十分重要的。钢的平台面由于自重小对振动和动力载荷消振的效果不如混凝土台面。

**挠度控制：**与同样细长的钢梁相比，预应力混凝土的挠度为前者的 35%。同时根据所施预应力，可使其在自重下呈向上弯曲，而在满载荷时曲度为零。

**抗爆裂性：**由于预应力混凝土梁中的钢筋有很高的弹性限，其抗爆裂性优于一般钢梁。

**抗低温性：**在北极的海工建筑，将承受冰冲击的局部高压，可达 11.5MPa，典型的钢结构在加强杆之间缺乏应力分布，而混凝土壳和板，当预应力恰当，并用强钢筋约束能够承受这种冲击剪切。此外一般结构钢低温下将变脆，失去抗冲击性，而预应力钢筋混凝土槽用于储存-162 的液化天然气仍性能良好。看来低温下预应力混凝土是唯一经济而易得的材料。

### 2. 能耗对比

混凝土中水泥耗能是以 1300Kwh / t 计。钢的能耗约为 8000Kwh / t，为水泥的 6 倍。由于集料耗能仅 8Kwh / t，故普通混凝土耗能约为钢的 1 / 25 至 1 / 40。钢筋混凝土构件为 800 ~ 3200Kwh / t，预应力钢筋混凝土构件为 700 ~ 1700Kwh / t，这包括预制构件的热处理(耗能 50Kwh / m<sup>3</sup>)和运输耗能 1000Kwh / m<sup>3</sup>。当载荷相同时水泥、砖和钢筋的能耗比为 1 : 3.6 : 6。一般钢

钢筋混凝土梁与同载荷的钢梁相比前者耗能约为后者的 1 / 4 至 1/6。

### 3. 生态环境

目前世界各国工业生产固体废渣将以亿万吨计。制造水泥混凝土是处理这些废渣的最好途径。堆放废渣将占用农田耕地或需要投入巨额资金修建专用堆场。无论是堆放或将废渣填坑或用作路基都有一个污染环境的问题。其中微量有毒金属将危害人类的健康。一旦用作水泥的混合材或混凝土的掺和料，这些有毒物质将与水泥水化产物固结从而消除其危害性，形成良好的生态环境。我国目前矿渣利用已达 80% 以上，在水工建筑物中已大量掺用粉煤灰。这一方面保护了环境，另外又节省大量煅烧水泥熟料所需的能耗，而且在一定条件下还能显著改善混凝土的性能。

### 4. 经济

生产水泥和混凝土的原材料易得。与木材钢材相比价格低廉。代木代钢在我国已取得极良好的经济效益。

由于水泥混凝土在以上各方面均具有突出的优越性，全世界的产量均日益增多。从 1980 年到 1994 年世界水泥产量仅由 10 亿吨增长到 13 亿吨，而我国的水泥产量则由 8000 万吨增长到 4 亿吨。从水泥剧增的这一侧面也反映了我国基本建设规模的突飞猛进发展。这是可以理解的，因为发达国家基本建设已达到或接近饱和状态，而我国正处于建设高潮之中。预期在未来若干年内我国还将有大的发展。高速公路才刚刚起步，修建大坝、港口、铁路及工业民用建筑均将需要大量水泥混凝土。据称在今后 15 年内，基建投资将达 30 ~ 50 万亿，以一亿基建投资需水泥 3 万吨计，则年需水泥量将达 6 ~ 10 亿吨。混凝土方量将达数十亿吨。这样庞大的规模，即意味着今后我国每年基建中混凝土方量相当于 80 年代世界各国的总和。而问题的另一方面是若不注意提高重大混凝土工程的质量和寿命，则每年用于维修和重建的巨额费用必将制约我国经济的持续发展。为此很有必要从现在起予以高度重视。

## 二、提高混凝土的耐久性，延长工程寿命 已成为全球关注的重大课题

随着经济建设的持续增长，人民生活水平的提高，人口增长并向城市集中以及现代交通的迅速发展，水泥混凝土在大坝、桥梁、公路、铁路、隧道、海港、码头、机场、地铁、高层建筑、工业及民用建筑等方面均获得日益广泛的应用。但随着时间的推移人们已深刻认识到已建工程并非都是耐久的，远低于设计寿命过早破坏的事例已屡见不鲜。沉重的重建与维修费用已使人提出“混凝土耐久性危机- Crisis of Durability of Concrete”，以便使人们像重视“石油危机- Crisis of Oil”一样来对待它。正处于高速发展的中国更应重视这方面的教训。

与人们预期的不一样，混凝土和钢筋混凝土并不是在任何情况下永远耐久的，寿命不需要担心的。事实恰恰相反，在许多情况下均发生短期内严重破坏的事例。特别值得注意的是，科学技术高速发达的 80 ~ 90 年代的有些重大工程，使用寿命反而不如 20 ~ 30 年代的。引起混凝土破坏的因素主要有：（1）硫酸盐腐蚀，（2）冰冻破坏，（3）钢筋锈蚀，（4）碱集料反应。此外还有人为因素，如使用不合格材料以及不按规范施工，造成质量低劣的建筑物和制品等。近 20 ~ 30 年来，由于使用除冰盐，扩大海工工程，扩大原材料范围，在严酷条件下使用混凝土等，因而更加增添了破坏因素。下面将举

实例和数字予以说明。

美国：近十几年来美国非常重视混凝土工程的耐久性，1980年和1984年分别进行了调查研究，写成“美国水泥和混凝土研究现状”及“混凝土耐久性——节省数十亿美金的机遇”。研究发现问题是严重的，既有技术方面的问题也有制度方面的问题。美国是当今发达的资本主义国家。据统计混凝土基础工程的总价为6万亿美元，但今后每年用于维修和重建的费用将高达3000亿美元。屈艾特所著“美国在破坏中”一书中估计，包括公路、桥梁、下水道、供水饮水系统和公共交通在内，修理美国的全部费用要高达3万亿美元，比当时美国一年的国民生产总值还多得多。仅混凝土桥面就有25万座遭受程度不同的损害，其中有的使用还不到20年，而且今后每年还将有35000座加入被损坏的行列。由于广泛使用除冰盐，造成过早破坏，甚至在5年内就明显出现钢筋锈蚀。美国在1969年及1978年用于修复公路桥面板费用分别达到26亿及63亿美元。在美国的耐久性调查报告中，在分析短期破坏原因时，不仅提出了科学技术问题，特别还着重分析了社会制度方面存在的问题。如：

1. 承包商不对耐久性负责，承包商在工程完成后只要符合规范就不错了，不可能对之后的耐久性负责，因此他们宁愿花钱研究施工方法而不愿花钱研究耐久性。

2. 建筑物的产权所有者也不愿花钱维护和注意耐久性，因为在若干年内出售反而有利。

3. 对耐久性或工程建筑物的寿命不易作出科学评价。一方面是由于影响因素复杂而难以预测，另一方面要用短期内完成的快速试验预测今后几十年的结果，可靠性如何也难以琢磨。

根据1988年资料，英国全部建筑和土木工程维修费为150亿英镑，其中混凝土工程维修费为5亿英镑，约相当于人民币60~70亿。

据我国驻贝鲁特记者报道，许多海湾国家沿海地区大批城市建筑遭受破坏迅速，这包括巴林、阿拉伯联合酋长国、卡塔尔、沙特阿拉伯和科威特等，导致巴林政府大厦和阿联酋的沙加国际机场的部分建筑及迪拜的钟楼等许多建筑物停用或大修。原因是这些地区高温、潮湿、昼夜温差大和海风带来的高含量硫酸盐和氯化钠等，加以这些国家凭借巨额石油收入，急于求成，连续进行了大规模建设，造成建筑质量差，易受侵蚀。

笔者考察加拿大、英国的众多公路、桥梁、大坝，亲眼目睹因碱集料反应和除冰盐而造成的严重破坏。日本阪神高速公路的桥梁和众多港口以及澳大利亚、法国、南非等国的立交桥、大坝、预制构件如轨枕等均有在短期内遭受碱集料反应严重破坏的报道，这既造成重建和维修的巨额损失，对交通路线还将造成影响铁路、公路正常运行的大量间接经济损失。

我国区域辽阔，地跨温热二带，北方为寒冷地区，海岸线长达18000多公里，因此各国面临的严酷条件，在我国不同地区均有存在，黑龙江低温建研所对三北地区的调查表明，处于水位突变区或受水浸润的钢筋混凝土结构，在使用20~70年内均因反复冻融而导致破坏。严寒地区不少水工建筑物不到十年就需要大修，问题还不能彻底解决。

根据南京水利科学研究院资料，华南、华东海港码头和浙东沿海水闸的钢筋混凝土结构，处于浪浅区的梁板底部，由于钢筋过早锈蚀，发生顺筋开裂、剥落，问题相当严重，相当普遍，而且开裂、剥落后，破坏日益加剧。

1981年调查了18座仅使用7~25年海港混凝土码头结构，其中因钢筋腐蚀而破坏或不持久的占80%。最近考察表明，宁波北仑港十万吨矿石中转码头是全优工程，水平框架已普遍顺筋锈裂，准备大修，连云港新建庙岭材料码头主梁，不到3年已显著顺筋锈裂。这些短期破坏的工程经济损失是巨大的。

近年来我们反复考察鉴定了北京地区的集料、立交桥和混凝土制品，证实北京地区集料具有碱活性，在工程中，北京立交桥和京秦线、兖石线上铁路桥梁以及上海站、贵阳站等轨枕（北京制造的预应力钢筋混凝土构件）均遭受明显破坏，对华北、东北地区机场跑道的考察研究，证实因碱集料反应造成程度不同的破坏，这将使机场提前报废或进行大修。

少数实例已表明重大工程在远低于设计年限以内破坏损失是巨大的，我国正处于蓬勃发展的高速建设之中，吸取西方国家的“前车之鉴”是大有补益的。延长使用寿命是节约资源能源的最佳途径，因每建一个百万吨水泥厂投资需要10亿，每吨水泥耗能0.2吨标准煤，每吨水泥制成混凝土尚需矿石材料5~10吨。对钢筋混凝土制品每10万吨水泥约需1.5~4万吨钢筋，因此在延长寿命上下功夫是十分值得的。

对于海工工程不同结构的使用寿命根据日本海岸的经验有如下数据：

大型致密海岸堤坝	75~85年
大支墩上的堤坝和载体	70~75年
巨型堤坝和墩	45~50年
钢盘混凝土上的支架	14~16年

当前不少科学家均主张力求延长混凝土工程寿命，Gexwick主张主要的桥梁使用寿命应按100~125年来设计，水科院洪定海提出根据我国国情海港工程应争取寿命为100年。实际上我国已有长寿命的工程实例，若能总结经验，综合采用国内外的先进技术延长工程寿命是完全有可能的。

### 三、生产水泥混凝土与环境保护

前面谈到水泥混凝土是处理工业固体废渣的最佳途径，这是问题有利的一面。但水泥生产也有其不利的一面，将增加环境的污染。

生产水泥熟料的主要原料是石灰石（ $\text{CaCO}_3$ ），在煅烧过程中： $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ 将释放大量 $\text{CO}_2$ ，而且煅烧熟料所用燃料也将放出 $\text{CO}_2$ 。经计算每生产一吨水泥熟料，从原料中将放出0.55吨 $\text{CO}_2$ 。燃烧约放出0.4吨，二者相加为0.95吨，即每生产一吨水泥大约将产生1吨 $\text{CO}_2$ 。而产生温室效应的气体中， $\text{CO}_2$ 占55%，甲烷占15%，含氯氟烃占14%，因此 $\text{CO}_2$ 的量占有很大比例。据计算以1987年全世界水泥产量为10亿吨计，则将排出10亿吨 $\text{CO}_2$ ，约占当年全球 $\text{CO}_2$ 排出量的5%。所占比例是不小的。按预测，2000年世界人口将达60亿，到2050年将达到80亿，若以每人占有水泥量为300~500kg计，则届时全球水泥产量将分别达到18~30亿吨和24~40亿吨，其放出的 $\text{CO}_2$ 也将达到同一数字，其对温室效应的影响将显著增加。此外水泥生产还将排出大量 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ ，这也是十分不利的。

其次水泥生产将消耗大量燃料和能量，以每吨水泥标准煤耗为0.2吨计，当我们水泥产量为4亿吨时，耗煤8000万吨，若产量进一步提高势必更将增加能源的紧张状态。以每吨水泥生产混凝土时消耗6~10吨砂石材料计，我国每年将生产砂石材料24~40亿吨，全球已面临优质砂石材料短缺的

问题，我国不少城市亦将远距离运送砂石材料。因此提高耐久性对保护环境、节约能源，资源意义是十分显著的。

#### 四、我国对延长混凝土工程寿命应采取的对策和建议

在探讨有效的措施之前，我们将从发展数据对我国水泥混凝土建筑工程有一个估价，从 1950 年到 1994 年全球产量仅增加约 10 倍，而我国产量增加 100 倍之多。其次美国产量一直增加不多。近年来也只是在 7000 ~ 9000 万吨之间徘徊。日、加、德、法也有类似情况。特别是我国改革开放之后，1980 ~ 1990 年十年间，我国水泥产量增长了一亿吨之多，1990 ~ 1994 年增加近 2 亿吨。统计看来 1995 年我国水泥产量约相当于美、日、英、法、意、德、俄、奥之和，约占世界总产量的 1 / 3。就以人口平均计，我国已达 338kg / 人 · 年，与美国人均值 341kg / 人 · 年十分接近。广东省计划 2000 年水泥产量达到 8000 万吨，人均 1000kg / 人 · 年。就其总产量而言，已与美、日相近，人均占有量即将成为美国的两倍。以 1994 年我国水泥产量 4 亿吨计，每年混凝土工程量将达 15 亿方。这些数字充分说明我国基本建设中土建工程取得了迅猛的发展，也从一个侧面反映了我国经济建设的大好形势。而且目前仍在高速发展，将使水泥产量再翻一番达到 7.5 亿 ~ 8 亿吨（据《中国建材报》，我国目前生产能力已达 4.5 亿 ~ 5 亿吨）。水泥混凝土在基本建设中的作用是巨大的。

在我们看到水泥混凝土产量急剧增长的可喜局面时，还应冷静思考其负面影响以及当前应注意的一些问题和必须采取的措施。当前经济界人士多次指出，要改变传统的以速度外延为特征的经济增长模式，把着眼点放在提高整个经济增长的质量上来。不能主要依靠扩大投资规模，消耗大量原材料、能源和劳动力等生产要素。来进行数量的扩张。这是高投入、低产出的经济发展模式。我们将按照这一原则来审视水泥混凝土今后的发展战略。

从历史发展的历程来看，美、日、英、法等资本主义国家的基本建设已越过高潮达到相对稳定。而我国正处于基本建设的快速上升阶段，需求猛增是完全可以理解的。从当前情况看来，我国有众多大型混凝土工程刚刚起步仍需大力发展。为大力发展水电能源和水利资源，将建设众多大坝、提灌系统和南水北调等工程。为扩大对外贸易，将加快港口建设。为发展交通运输，正步入建设高速公路时期，机场也将成百增加。因此提高水泥混凝土产量，以满足高速发展的需要是完全应该的，也是必要的。但唯其面广量大，对目前存在的问题和今后可能出现的问题及早提出将具有极大的经济效益和社会意义。

##### 1. 水泥工业要提高高标号水泥的比例

如前所述，以 1994 年的产量计，我国已超过 8 个发达国家的总和。但仔细分析并不意味着我国基本建设的规模，或混凝土工程质量也具有同等价值。原因是我国水泥中 80% 系小水泥厂所产，标号较低。用低标号水泥建设相同标号的混凝土水泥用量要大得多。国外基本上不生产的 325 水泥在我国还占有不少比例，但问题是它们的能源和资源消耗并不低很多。这就是资源、能源的巨大浪费。今后我国在考虑水泥的发展战略时，一方面要力求增加产量，但最重要的是应该使高标号水泥所占比例能有大幅度提高，特别是熟料的标号要有大幅度提高，这样即便生产低标号水泥可以多掺混合材，这是水泥工业节约资源、能源的最佳途径。

## 2. 水泥生产应着重考虑混凝土工程的耐久性。

近年来全世界混凝土工程界一致认为在设计时不仅要考虑强度指标，更重要的是要考虑工程的耐久性，因此出现了根据耐久性设计混凝土的专家系统（Expert System of Durability of Concrete），这需要全社会的共同配合，譬如，世界许多国家如英国、日本、新西兰等在发现碱集料反应对工程的严重破坏作用之后，很快采取措施，选用低碱原料生产低碱水泥，甚至将高碱水泥厂关闭。而我国华北、西北、东北地区由于原料的限制，碱含量一直偏高。在已经证实北京地区存在碱活性集料的情况下，这将给京津地区带来很大的潜在危害。为此建议今后新建水泥厂，应从优选原料改进工艺流程入手，力求生产低碱水泥。已存在的高碱水泥厂应力争生产混合水泥。

## 3. 在工程合同中应有耐久性条款

目前我国正处于计划经济向市场经济转轨的过渡时期。若不把经济杠杆作用引入工程耐久性之中是无法激励工程技术人员严格注意耐久性的。当前的现实是快速施工，提前完工，与个人所得经济利益直接有关，而一个工程5~10年出现问题，甚至需要大修或重建，但都无任何单位或个人负经济责任，甚至工程曾被评为全优工程。这一局面不改变，则承包单位是不愿花费精力或经费进行耐久性预防的研究或采取措施的。在这方面我国已有很多实例。铁道轨枕或桥梁原设计为30年寿命，但有的路段甚至在不到10年甚至5年就全部损坏需要大修或重建。若能在设计和施工经费中抽取少量费用进行耐久性的预防研究和长期耐久性的奖励基金，必将获益巨大，望有关部门予以研究。

## 4. 调查研究

这是“老生常谈”，但做起来很不容易，原始资料不全，历史上的情况很难搞清楚，甚至就像亚运村等近年建成的工程，要想知道原材料的来源，准确的配比，外加剂的掺用等就十分困难，出现问题只能归结于“原因是多方面的，综合的”。但这样的笼统结论对今后的工作是没有任何借鉴作用的。因此要真正搞好调查研究是要花费很大力气的。

首先要做到心中有数。“没有调查研究就没有发言权”。我们应该知道我国基本建设中的投资总量，目前用于重建或维修的费用，今后每年费用的预测，其中因种种原因未达设计寿命需大修或拆毁的占多少？心中无数是下不了决心的。

调查研究必须有重点。对象应是影响大的重大工程，如核电站、采油平台、港工、大坝、桥梁、大型预制构件、机场、隧道、高速公路、立交桥等。为了得出准确结论，各个单位必须相互配合。韩国在汉城大桥破坏之后撰文谈日本经验时谈到：“只强调过去的宏观力学的土木工程技术作用还不够，而必须强调从微观上解释破坏现象的材料工程学。”因此必须设计、施工、管理与实验室研究人员仔细考察研究，以期得出符合实际的科学结论。

对比研究好坏程度不同的工程意义重大。常说混凝土没有不裂的。这样一来就没法分出好坏。从微观而言，在显微镜下、电子显微镜下、甚至放大镜下所有混凝土都是有微裂纹的。但这并不等于会有0.1~1mm甚至1~5mm的裂缝存在。建于1968年的南京长江大桥，大型桥墩和巨型梁至今十分完好，南京中央门立交桥也有相同结果。同样是处于寒冷的北方地区，每年都有冻融对混凝土工程造成危害，但天津1982年所建十一经路立交桥十分完好，但其后所建的八里台、中山门、长江道、京津等立交桥损坏就严重得多。

北京丰台的老铁路桥建于 30 年代至今桥墩和档墙完好，基本上无裂缝，而新建的铁路公路两用的平台新立交桥，档墙已遍布网状裂纹。从观察来看，南京长江大桥和天津十一经路立交桥。甚至 30 年代的丰台老铁路桥很可能在今后 20~30 年内尚无大问题，但是京津的某些立交桥和北京的某些大建筑可能就得考虑大修或若干年后的重建问题。再如处于同样运载负荷下的兖石线上的铁路桥，由四家不同地区（原材料不同）的工厂制造的铁路桥，有的已在修补，有的仍基本完好。进行对比的调查研究，找出优劣的根本原因，是推动向耐久性方向发展的重要途径。在同一环境条件优劣差异悬殊，本身就能排除环境和客观条件破坏的因素。我们在考察机场跑道破坏时，发现有 60 年代初的跑道十分完好，而近年来建成的跑道却出现大面积的损坏，对比研究给我们极有益的启示。

#### 5. 建立重大混凝土工程的数据档案库

我国各建筑工程特别是大型工程可能已有自己的历史档案资料，但均分散保存，信息交流也十分不够，导致教训重演。美国在 1982 年由国家科学基金支持建立了“建筑与工程性能信息中心”（AEPIC, Architecture and Engineering Performance Information Center）已收集 4 万案例。建立这样的中心并使数据档案规范化对我国经济建设的发展将能提供宝贵的信息资料。

#### 6. 大力推广能提高耐久性的先进技术和经验

几十年来在这方面国内外均有一整套的成熟的先进技术和经验。若能被大家所接受和理解并用之于实际，必将获得巨大效益。

（1）采用高效减水剂，降低水灰比，提高混凝土的致密度。因为混凝土为多孔材料，侵蚀介质无论是水、气或化学物质均将通过孔隙才能进入内部，因此致密化必将成倍提高抗腐蚀性能；

（2）使用加气剂提高抗冻性。这在严寒地区十分有效，只要在施工现场严格控制含气量，将不致使强度损失过多而抗冻性将显著提高；

（3）阴极保护是防止钢筋锈蚀十分有效的措施，对已经锈蚀的工程也十分有效；

（4）使用特种水泥和混合材。对于海工工程，使用掺有矿渣、硅灰、粉煤灰的水泥，强度不仅不降低，在多数情况下强度还有所增加，在这些情况下采用混合水泥比纯硅酸盐水泥好很多。实践证明铁铝酸盐水泥和硫铝酸盐水泥也具有良好的抗蚀性和抗冻性；

（5）对碱集料反应重点在于预防，采用低碱水泥和混合水泥是十分有利的。

英国提出用于重大工程混凝土的集料的采石场，应有详细的地质勘测资料，并在采石场建立集料碱活性的日常检测，以确保集料无碱活性。这一经验是特别值得重视的。

实际上以上这些技术并非不为人知或做不到。最关键的在市场经济的环境下，工程的耐久性和寿命无经济利益予以支撑，特别是没有与个人经济利益相结合，激发不起重视寿命的积极性。有时一个技术措施虽明知对耐久性不利，但能加速施工，而后者的经济效益是能立竿见影的，则宁肯牺牲耐久性而保证快速施工。如明知对活性集料不能掺用含碱外加剂，但后者能保证冬季施工加快施工速度，而耐久性是 5~10 年之后的事，则往往宁可不顾寿命而大量掺加。因此最重要的必须认识到“寿命”是有很经济价值的。避



免大修是可以节省巨额资金的，最终是节约了资源和能源。若能在施工合同中注明奖金和评优要在 5~10 年后才能兑现，若 5~10 年后出现严重损坏将予重罚，只有这样才能真正重视耐久性和寿命。

#### 7. 整理修订标准规范

我国大部分标准规范主要是在 50~60 年代沿袭美、苏而来，但时至今日，美国的许多标准世界各国在长期实践中均已提出不少问题，美国标准也已修改和增添了新的内容，在这种情况下，我国各建筑行业均有把标准重新审视的必要，根据国情增添必要的内容或进行修改。而特别重要的是工程人员必需熟悉标准制定的背景及使用中的局限性。否则在工程中将带来极大的浪费。

#### 8. 建立权威性的检测鉴定中心

影响混凝土耐久性的主要因素是：化学腐蚀，冰冻循环，钢筋锈蚀，碱集料反应以及近年来特别感到严重的除冰盐及酸雨等的腐蚀作用。但混凝土确实复杂，而需要作出判断或采取措施的工程，往往涉及到几亿甚至数十亿的投资，今后还会涉及涉外工程，援外工程等。为此必须有先进设备及配套的实验检测手段以及长龄期试验条件。为此需要有较大的投资来满足这些条件。这些年来国内的科研院校已经在某些领域形成特色，若能继续给以扶持即可形成在国内外能产生影响的中心。同时结合工作也可培养跻身国际的跨世纪的人才。

# 土壤动物与人类的关系

尹文英

中国科学院上海昆虫研究所

尹文英 女，昆虫学家。汉族。1922年10月18日生于河北平乡。1947年毕业于国立中央大学生物系。历任中央研究院动物研究所助理员，中国科学院水生所助理研究员，上海昆虫所副研究员、研究员、副所长。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。长期从事寄生桡足类，鱼病学和土壤动物学的研究。

今天我要向同学们介绍一门你们目前可能还不熟悉的、但与人类关系十分密切的学科——土壤动物学。

在我们的生活空间里，天上飞的鸟和蝴蝶，地上走的狮子、老虎和大象，水里游的鱼、虾和螃蟹，你们已是很熟悉的，但是当同学们走在田野里或树林中时，会不会想到在你的脚下泥土中生存着千千万万各种微小的动物，它们出生、成长、繁衍后代，忙忙碌碌地生活着。它们之中大部分是对人类有益的，要进行保护和繁殖，一小部分对人类是有害的，要设法控制和防除。

对于土壤动物的研究工作通常认为是从达尔文对蚯蚓生物学的研究开始，在我国直到80年代中期才开始系统地进行土壤动物学的研究。

## 一、什么是土壤动物？

是指动物的一生或生命过程中有一段时间定期在土壤中度过，而且对土壤产生一定影响的动物。

土壤动物涉及的门类很广泛，从单细胞的原生动物，扁形的涡虫，头上生小轮盘的轮虫，像小猪般的熊虫，还有细长的线虫、线蚓，蚯蚓和蚂蟥（蛭），像芝麻粒大小的螨和跳虫是土壤中数量很多的类群，还有大型的蜈蚣、马陆、西瓜虫和甲虫，以及蜘蛛和昆虫等的幼虫。

近10年来，通过我国学者们的辛勤工作，迄今已经从土壤中发现1000多种不同的土壤动物，其中常见的代表性种类见图1。

## 二、为什么要研究土壤动物？

土壤动物是人类生活中不可缺少的助手，亿万年来它们默默无闻地分解着生物残体，改变着土壤的理化性质，促进大自然的生产与物质循环。如果土壤缺少了它们，粮食、蔬菜不能生长，花草、树木枯萎死亡，我们人类也就失去了生存与发展的物质基础！因此，研究土壤动物是为了保护它们，让它们持续地、更好地为人类的美好生活而永不停息地工作下去！

土壤动物的功能主要有以下三个方面：

1. 为人类活化土壤，长期提供免费的肥料，促进植物的生长。

土壤的诞生，众所周知是从大石块风化而成的，开始时是没有活性和肥力的“死土”，只有通过众多土壤动物和微生物，粉碎和分解地表的枯枝落叶和动物尸体，而且由于土壤动物在土壤中不断地上下活动，起到了搅拌与耕耘的作用，把腐植质、动物粪便和泥土混合起来，才形成了有“活性”和

“肥效”的熟化土壤，才能维持各类庄稼、花木的正常生长。

2. 持续进行自然界的物质循环，亿万年来为人类创造吃、穿、用等财富。

自然界中营养物质循环，是土壤肥力调节的最基本过程之一，也就是把植物碎片中来自土壤中的营养物质，经过腐败、分解，又释放出来到土壤中，再被植物根系吸收利用的全过程。在此过程中，至少粉碎和消化、释放和再循环等是由土壤动物的活动来实现的。（见图 2）如果土壤中能够长期保持土壤动物的多样性，也就能使自然界中的物质循环永不休止。我们人类也从而得到粮食、蔬菜、水果、棉花和木材，保证了人类生活的必需品。

3. 帮助人类诊断土壤是否健康的指示生物。

在不同类型的土壤中栖息着不同的土壤动物类群，所以某些土壤动物种类就可以作为土壤类型的一个指标，如蚯蚓通常在中性土壤中较多，而在酸性较强的土壤中就偏少。

从环境保护的目的来看，人类的活动如森林采伐，施放杀虫剂与除草剂，化学肥料，以及重金属、放射性污染等等对于土壤动物都有一定的影响。我们研究清楚土壤动物对各类污染物的反应特点后，就不难找出指示生物。一般说来凡土壤动物多样性丰富的地方，往往也是土壤健康的表现。

更重要的是，近年来还发现土壤动物能够对退化了的土壤起恢复健康的作用，其中尤以蚯蚓的作用最为明显，如在草原地区的无机肥料系统中，利用蚯蚓可以大大加快土壤的熟化，并大量增产牧草。

### 三、土壤中有多少动物？

通过 10 年来我们在不同地区调查的数据，一般在林区的土壤中，一个平方米（ $M^2$ ）的面积，约有 5 万个土壤动物（原生动植物未计在内）。当我们在森林中行走时，脚下踩到了多少土壤动物？下面我教同学们一个简单的计算方法。（见图 3）

### 四、怎样采集土壤动物？

在我国林区的土壤中，土壤动物的种类和数量都很丰富，所以采集也不困难。至于烘虫器的设计有各式各样，这里只向同学们介绍一种简易的烘虫器，很容易制作。

动身采集之前要准备几只布袋或塑料袋，带一只小铲子就可以了。到了目的地，选择枯枝落叶丰厚的场所，用手扒除表面大型枝叶，然后把细碎的地表枯枝落叶和土壤（用小铲子挖）装进布袋中，带回学校。

烘虫器的制作，可用金属片、塑料片或硬纸片，做成 1 尺多长的漏斗，漏斗口上装一筛网（可用塑料窗纱和铅丝制作）就成功了。另外找一只纸盒做漏斗的支架（或用方凳翻转当支架）。然后把采集来的土壤和枯枝落叶，放进漏斗上的筛网中（约半寸厚为宜），在漏斗下面接一只饭碗或广口瓶，内装 70% 酒精。这时在漏斗上用 40~60 支光电灯烘烤（灯泡距土壤约 10 厘米）。经过至少 6 小时（最好过一夜）烘烤以后，取出漏斗下的容器，在放大镜或解剖镜下观察，就会看到各种不同的土壤动物混杂在一起，把它们按类别一一分拣开来，保存在 70% 的酒精中，以备进一步制片观察鉴定之用。

今天简单介绍土壤动物学，希望同学们对这门学科感兴趣！

## 加快农业现代化建设 推动农业持续发展

卢良恕

中国工程院

卢良恕 小麦育种、栽培、农业与科技发展专家。1924年11月3日生于浙江湖洲。1947年毕业于金陵大学。历任江苏农业科学院院长、研究员、中国农业科学院院长、农业部科学技术委员会副主任、中国农学会会长等职。现任中国工程院副院长、国家食物与营养咨询委员会主任等。1994年被选聘为中国工程院院士。主要从事小麦遗传育种、栽培、农业生产、食物安全科技发展工程及其宏观战略等方面的研究。

我国80%的人口、90%以上的国土在农村。农民、农业和农村问题，是关系国家现代化建设的关键，只有农业实现现代化，才会有国家的现代化。在我国，“九五”~2010年农业要完成计划经济向社会主义市场经济、传统农业向现代农业的历史性转变，农业肩负着十分重要而艰巨的任务。因此，加快农业现代化建设的进程，促进我国农业持续稳定健康发展，是未来一个时期内我国经济发展、社会安定、民族团结、国家强盛的头等大事。

### 一、农业现代化建设是我国 整个现代化建设中最为艰巨的任务

#### (一) 认识国情、认清国力，是农业现代化建设的前提

1. 人口基数大，总量继续增长一时尚不可逆转。到2000年将达13亿人口，按人均400公斤粮食，粮食总需求量将达5亿吨左右，而1995年仅为4.65亿吨，需努力再上一个新台阶。人口增长与粮食生产矛盾将是相当长期、持续的。

2. 随着国民经济发展，工业化、城镇化进程加快，城镇建设用地和工业用地的扩大，人均耕地等资源紧缺状况不可逆转。目前我国人均耕地仅1.18亩，“七五”期间平均每年减少352万亩，“八五”前四年平均虽然降至282万亩，但在一定时间内耕地还会逐年减少。到本世纪末实现粮食总产5亿吨的目标，在播种面积稳定在16.5亿亩的前提下，年均亩产需提高5公斤左右，超过“八五”年平均增长幅度，难度是不小的。可见我国资源短缺与农业发展的矛盾也将是长期、持续的。

3. 随着人民生活逐步向小康的迈进，人们消费水平不断提高，对农产品的需求将由单纯的数量目标转向量、质和多样化的多重目标不可逆转。人民生活水平提高对农产品需求的不断增长与农业发展的矛盾也将是长期、持续的。

综合以上三个不可逆转的国情，今后农业乃至整个国民经济长期发展的一个首要的基本问题是：满足庞大的人口对农产品数量和质量日益增长的需求。解决这一突出矛盾的根本出路在于紧紧依靠科技进步和提高农业综合生产能力，加速计划经济向市场经济、传统农业向现代农业、粗放经营向集约经营的转变，提高土地生产率、劳动生产率、资源产出率和产品商品率，加快实现农业现代化。

## （二）转变观念，积极探索有中国特色的农业现代化建设途径

1. 以大幅度提高农业生产力为主线，牢牢把握实施农业现代化这一总方向，做好总体部署与布局。

从总体上看，我国农业生产力水平还相当低，同先进的发达国家差距明显，按 1994 年的统计数据，我国每公顷谷物产量，每个劳动力负担耕地、生产谷物和肉类分别只相当于法国的 69.5%、1.7%、2.5%和 2.5%，这既是差距，同时也是发展潜力之所在，实现农业现代化是根本出路。

建国 46 年来，我国农业现代化建设时起时伏，近年来农业界和全社会对实现农业现代化呼声不高，措施不够得力，连原有的农业现代化试点县工作也处于自流和停顿状态，而其他一些非主体农业模式反而受到青睐，因此，必须转变观念，把加速实现农业现代化作为一个总体战略来统帅农业发展的全局，尽快制定我国农业现代化建设的全面长远规划，做出总体部署和布局。同时，考虑到现代农业本身就是高产优质低耗高效农业，因此，要把它纳入农业现代化体系之中，使两者结合起来，有利于现代生产要素的配置和优化，并与国际上接轨。

2. 以农民为主体，建设发达的现代农业基础产业。

——实践证明，农民是现代农业基础产业的主体建设者，实现农业现代化所需资金的主要积累者，推动工业化进程的奉献者，农村经济组织的创新者，也是独立的商品生产者和经营者。因此，振兴中华，必须首先振兴农业；振兴农业和农村经济，必须首先处理好农民问题。要以农民为主体，把农业、农村和农民三者紧密联系起来，克服以往单纯就农业论农业、就粮食论粮食的狭窄做法，并据此制定利农、护农政策，把最大限度调动农民积极性和提高农民收入作为各项政策的出发点。要从调整国民经济布局和工农关系，城乡关系着手，把工农发展速度比调至 2~3:1，把城乡居民收入差距拉大局面扭转过来，并加强工业反哺农业。给农民以有利可图、发展市场经济的有利宏观环境。

——从世界农业发展进程看，农业已经由唯一生存基础的传统产业演变为同发达工业并驾齐驱的强大的现代基础产业，我们要树立两个基本观点：一是现代农业完全有可能由低效产业转变为高效产业；二是仅仅把农业作为国民经济的“基础”已难以适应新形势的要求，而必须用现代产业的新观念，把农业提高到“现代基础产业”的高度上，来重新认识农业、改造传统农业、建设现代农业基础产业，要按现代基础产业要求大力发展农村规模经济，积极推进产业化经营，以支柱产业、“高新技术产业带”和市场体系建设等来带动农民实现产加销和贸工农一体化，把农业建设成科学化农业、工业化农业、集约化农业、市场化农业、社会化农业和现代化农业。

——从农业产业化和现代农业基础产业发展看，必须明确重点。首先要以商品粮基地建设为重点，建设专业化、一体化、现代化的粮食产业体系，确保粮食与食物安全，在此基础上，确立现代食物的新观念，实施“粮食——经济作物——饲料作物”的“种植业三元结构工程”，促进食物供需的基本平衡。其次要以农产品加工业为重点，向农业产后领域拓展和延伸。在产业布局上，逐步将农产品加工业由城市转向农村；在结构上，要大力支持发展现代食品工业、饲料工业等；在政策上，应积极鼓励和引导农村的农产品加工工程的建设；在技术上，应大力开展多层次的技术开发和研究，大力应用当代高新技术；在产品上，要向高质量、高档次、高附加值方向发展。

3. 以乡镇企业为强大支柱，大力发展小城镇，走农村工业化、城镇化带动农业现代化的路子。

80年代以来，我国农村工业化和城镇化迅速发展，农村工业大大超过了农业总产值，成为农村经济和全国工业的重要支柱。小城镇是城乡经济联系的重要桥梁，乡镇企业的有效载体，农村剩余劳动力转移的巨大“蓄水池”，物质文明与精神文明建设的新型社区和中心，推动农业现代化建设的坚实基础，缩小工农差别和城乡差别的必然选择。因此，我们研究农业和农村经济发展问题，必须把农业现代化同农村工业化、农村城镇化紧密联系起来，走三者同步、协调发展的道路。

4. 以保护农业自然资源和环境为重要基础，建立现代农业可持续发展的支撑体系。

从总体上看，特别是80年代以来，我国农业基本上是持续发展的；农业生产条件和生产能力在总体上是改善的，但也存在局部恶化的问题。由于受人口迅速增长压力的影响，一部分持续性因素日益突出，主要表现为农业资源承载量过重，生态环境受到破坏。面对这一情况，我们要把经济、社会、技术发展同农业自然资源与环境保护密切结合起来，确立农业持续发展的战略概念，即在农林牧副渔全面发展，确保粮食安全，发展现代农业，促进农村经济不断增长的同时，保持资源的合理利用，建设良好的生态环境，逐步形成一个协调平衡的农业经济、技术、生态系统以及健全发达的社会系统，以保障农业和农村经济的可持续发展。

5. 以改进政府宏观管理为保障，为农业现代化建设和农业持续发展创造有利的宏观经济环境。

要用现代工业装备农业，将农用工业基本建设投资占国家基本建设投资总额的比重尽快恢复到5%；要抓紧制定《国家农业资金投入法》，规范政府投资行为，力争将农业基本建设投资比重在“九五”时期恢复到6%以上的水平，2010年提高到10%；要紧靠依靠科技进步，把农业科技投资占农业总产值的比重由目前的0.2%提高到1%以上；实行让利于农民的政策，让农民尽快富裕起来，逐步成为农业现代化建设的投资主体；加大中、西部农业区域综合开发的力度，积极吸取沿海地区的经验，在云贵川资源“金三角”、甘肃“河西走廊”、新疆“粮棉基地建设”、西南“岩溶扶贫地区”等地建立内陆的综合开发区，以加快改革、开放、开发的步伐，实现东、中、西部协调发展，推动农业现代化建设。

## 二、科学技术是推动现代农业持续发展的强大动力

科学技术的巨大进步，导致社会生产力的迅速提高，在即将来临的世纪之交，科学技术作为增加综合国力的主导因素，将会直接影响甚至决定一个国家在世界竞争中的地位和作用，即未来世界综合国力的竞争，实质上是科技水平的竞争。

### （一）科技进步为我国农业持续发展发挥了重要作用

建国以来，我国农业科学技术的发展，大大促进了农业的发展，为农业增产增收增效发挥了重要推动作用，突出表现在：遗传学理论的深入应用和育种技术的突破，使农业产量大幅度提高；耕作制度的改革、栽培（饲养）技术的改进完善和综合配套，使农产品产出率得到提高；生物措施和工程措施相结合综合防御农业灾害，有效地减少了农产品的损失；生物技术、计算

机技术、核技术等高新技术和传统农业技术的有机结合，促进农业生产力的进一步提高。

据统计，1949年以来，我国科技工作者共培育作物新品种、新组合达5000多个，农作物品种更换了4~5次，每更换一次，增产10%~30%。迄今已推广杂交水稻累计达20多亿亩，增产粮食达2000多亿斤，粮棉等主要作物良种覆盖率已达80%~90%；林木良种自“六五”以来，获得新品种、新无性系2000多个，其材积生长量可提高10%~50%，造林成活率提高了20%。耕作制度的改革，使全国复种指数提高了25个百分点，增加播种面积4亿多亩；粮食单产水平比1949年提高了3倍多；还有橡胶大面积北移、对虾工厂化育苗和养殖、马传贫弱毒疫苗。中国美利奴羊等取得不少新的成果。目前，科技进步在农业增长中的贡献份额已提高到35%左右。人民温饱问题已基本解决，绝大部分食物和农产品原料可在国内生产并满足13亿人口的消费。

## （二）我国农业科技发展前景和“九五”科技攻关部署

“九五”是我国农业科技必须打好基础，积累必要的后劲，缩短与世界水平差距，争取在21世纪率先跃居世界先进水平的关键时期，必须确定总体发展战略并实施相应配套的战略措施。

### 1. 我国农业科技发展前景

从我国目前研究基础及发展趋势看，到2000年，我国主要农业科学技术能够达到80年代中期的先进水平，到2010年有能力达到90年代中期的世界先进水平，并在若干领域继续保持领先地位。科技在农业增产中的作用将进一步增大，2000年将达到50%以上，2010年将达到60%左右，农业高附加值产品的市场占有率，2000年将达50%，2010年将达70%。“九五”~2010年，我国将以现代科学和现代工业为强大支柱，以现代管理为基础，把传统农业转到现代集约持续农业上来，以大幅度提高土地利用率、资源产出率、劳动生产率和产品商品率为目标，建立起现代化的农业科学技术体系。

### 2. 我国农业科技发展重点

“九五”期间，我国农业科技工作要坚持经济建设必须依靠科技进步，科学技术必须为经济建设服务，努力攀登农业科学技术高峰的方针；坚持基础、应用、推广等科技工作互相衔接、协调发展的方针；坚持继续深化农业科技体制改革，促进农业科技与农村经济密切结合的方针；坚持联合国家和部门的专业技术力量、高等院校的力量、企业研究开发力量和民营科技力量等各方面科技力量，充分发挥各自优势的方针；坚持集中力量联合攻关办大事的方针。近几年，国家科委经费盘子中，农业占22%以上。“九五”期间，国家科委重中之重科技攻关项目共15项，其中农业占5项，与农业相关的有3项，一多半与农业有关。其重点：一是为2000年新增1000亿斤粮食、1000万担棉花、1000万吨肉类和1000万吨水产品提供50%以上份额的贡献。二是为下世纪初农业上新台阶、主要农副产品等有效供给、农民收入提高和改善生态环境继续上新台阶攻克一批关键性技术，提供可靠支撑，为加快高产优质低耗高效农业发展提供技术保障。三是为促进农村经济全面持续发展，为农民奔小康，提高农业综合生产能力，加快实现农业现代化提供科技保证。其主要任务包括：

（1）加速成果转化，综合配套推广成熟的先进适用技术，努力提高普及率、覆盖面和规模效益，提高农业综合生产力。

（2）集中力量、突出重点，攻克一批已有一定基础、近期即可见效的关



键性生产技术。

(3) 大力发展高产、优质、低耗、高效农业，针对农业、农村经济发展中的重大难题和发展战略组织重点科技攻关。

(4) 加强基础性研究，为发展现代农业提供技术储备。

(5) 加强高新技术研究及其应用和加快产业化进程。

(6) 加强农副产品综合加工技术研究，使农产品附加值提高 30% 左右。

(7) 提高乡镇企业的技术和管理水平，提高其经济效益。

(8) 统筹规划、合理布局，在加速农村经济技术进步的同时，为农村第三产业发展提供技术支撑，促进剩余劳动力的转移。

(9) 积极引进消化吸收国外先进农业科学技术，尽快提高我国农业技术水平，增强技术创新能力。

总的思路是突出重点，突出应用，突出技术创新，突出力量集成，突出经济和社会效益，突出发展与改革的结合，分为重中之重、重点和计划内项目三个层次，解决关键性、战略性和综合性技术难题，另安排好应急攻关和调剂项目及有关农业的基础性研究和高新技术的研究。

### 三、现代集约持续农业是 我国农业现代化建设的必由之路

#### (一) 可持续农业是世界农业发展主要趋势之一

当今人类社会最为关心、最为迫切需要解决的问题是生存与发展问题，围绕这一主题，许多国家和国际组织从 50 年代开始，尤其是进入 80 年代后，积极努力寻求经济、社会发展与资源、环境相互促进、相互协调发展的道路，持续发展就是在这样的背景下产生的一种比较合适的发展模式。农业的持续发展是人类社会、经济持续发展的基础，没有农业的持续发展，就不可能有人类社会、经济的持续发展。

持续农业的兴起，有利于更好地解决农业发展和环境的双向协调，在发展的同时，注意资源、环境的保护，使资源、环境能永续地支撑农业发展；有利于重新认识农业的地位和作用，使农业的功能不断拓宽，促进农村全面、综合、协调发展，增加农村就业，增加农民收入，缩小城乡差距；有利于各国从本国国情出发，调整农业发展战略和方向，选择适合本国国情的现代农业发展道路。

(二) 我国人多地少，人均资源相对紧缺，地区发展不平衡，经济、技术基础相对薄弱，面临资源、环境和人口等多重压力，发展现代集约持续农业是必然选择。

(三) 我国农业发展中面临农业和农村经济政策的执行、落实力度不够；农业投入不足，增加了农业和农村经济持续稳定增长的难度；主要农产品粮食和棉花生产不够稳定；城乡居民收入差距明显；地区性发展不平衡；农村剩余劳动力日益增加等新情况和新问题，也促使我们选择一条现代化、集约化、持续性的农业发展道路。

#### (四) 现代集约持续农业的内涵

1. 现代集约持续农业的目标：以现代工业和科学技术为基础，充分利用我国传统农业的有效技术精华，实现持续增长的生产率，持续提高的土壤肥力，持续协调的农村生态环境，持续利用的农业自然资源，实现高产、优质、低耗、高效，逐步建立起一个采用现代工业装备、现代科学技术和现代经营

管理方法的农业综合体系。

2. 现代集约持续农业的概念：在实现社会主义市场经济和农业现代化的过程中，调整结构，优化产业和产品构成；增加投入，提高农业综合生产力；依靠科技，增加资源产出率；防止污染，保持农业生态平衡；增加收入，走向共同富裕；逐步建设成为一个资源节约型、经营集约化、生产商品化的现代农业。

3. 现代集约持续农业所包涵的具体内容：

(1) 在现代食物观念的引导下，确保国家食物安全和人民健康。

(2) 进一步依靠科技进步，以继承和发展我国传统农业技术的精华和吸收现代高新科技相结合。

(3) 目前仍以技术密集和劳力密集相结合为主，逐步发展技术、资金密集型的现代农业生产体系。

(4) 保护资源和大力改善农村生态环境。

(5) 重视提高农民素质和发扬中华民族农业文化的精华相结合。

(6) 切实保证农民收入持续稳定增长。

(7) 发展多种经营方式，多种生产类型、多层次的农业经济结构，注意逐步向新的集体化、集约化和发展农村规模经济。

(8) 从现代农业的要求上看，要在决不放松粮食生产与积极发展多种经营的基础上，从不同层次上优化农业和农村经济结构，促进乡镇企业与农林牧渔、种养加、贸工农相结合，把农业与农村发展联系在一起，从而推进农业向专业化、社会化、商品化发展，逐步实现农业现代化、农村工业化、农村城镇化、农村文明化和城乡一体化的高层次结合。

“现代集约持续农业”是个历史的渐进过程，不可能一蹴而就，需要长期不懈的努力。在实施过程中，需遵循从初级到高级、由局部到全面的循序发展原则；因地制宜、科学合理、多样化地开发利用资源原则；集约经营、持续发展原则；增收增效、共同富裕原则；防止环境污染、保护资源和环境原则。根本目的就是要实现农业的集约性、高效性、持续性和多样性，保证经济效益、社会效益和生态效益兼优，促进农业持续发展、社会安定、国家富强。

#### (五) 现代集约持续农业的区域发展战略

我国地域辽阔，自然环境多样，经济发展不可能平衡推进，农业生产显示出明显的区域特征。形成了东部、中部和西部三个不同发展水平的经济地带。为此，现代集约持续农业必须实施区域发展战略。

##### 1. 三大经济地带的基本情况比较

东、中、西部地带人口和主要资源的分布比重：占国土面积的比重分别为 14%、29%、57%，农业人口占全国农业人口的比重为 41%、35%、24%，耕地面积占全国的比重为 32%、44%、24%，人均占有耕地面积为 0.95 亩、1.5 亩、1.3 亩。农民人均收入 400 元以下的人口分布为 10%、30%、60%。东中西部地带农民人均收入有扩大的趋势，1985 年东、中、西部的比例为 1.59 1.18 1，到 1993 年扩大为 1.87 1.19 1。

##### 2. 三大经济地带现代集约持续农业的发展战略选择

###### (1) 东部地带：

——农业要加快向技术和资金集约型转变。在农业劳动力迅速转移的同时，逐步扩大经营规模，提高机械化水平。要加快发展沿海外向型农业，重

点发展高产优质低耗高效农业，以增强国际市场竞争能力，特别应当重视饲料工业和食品工业的发展。

——要加快发展沿海大中城市城郊型“菜篮子”工程，要建立蔬菜生产基地和设施农业。关于畜牧业，要扩大郊区规模化养禽、养猪、养牛事业，在发展郊区奶牛业的同时，相应发展配合饲料产业和青贮饲料及青饲技术。

——建设一个海上东部经济地带。充分利用沿海资源优势，加快发展近海水产养殖，重视保护近海经济鱼类资源，扩大增种养殖资源，合理利用水产资源，逐步推进远洋资源的开发利用。

——建设沿海和江河沿岸及农田防护林体系。充分利用水资源充足的优势，加快发展速生丰产林，相应地发展速生木材加工业，这也是增加农民收入的一条重要途径。

——重点加强对乡镇工业的合理布局和防治工业污染工作。在继续提高乡镇企业竞争能力的同时，重视调整乡镇企业产业结构和技术结构。逐步把企业集中到乡镇发展中心，统一规划，重新建立基础设施，严格治理和保护农村环境。

——在发展种植业和养殖业的同时，提高有机肥利用水平，逐步控制和减少大量使用农业化学物质带来的污染，依靠技术进步，调整农用化学物质的结构，减少和消除有污染的化学物质。

#### (2) 中部地带：

——加快我国主要农产品商品生产基地的现代化建设，特别是商品粮、棉、油、猪、牛和家禽基地建设。要对基地实行有效的保护政策，重视增加农业投入和农业基本建设（特别是防洪、排涝和抗旱、抗灾等工程）以及中低产田的改造，提高农产品商品综合生产能力和有效供给能力。

——在粮食集中产区要加快实施“种植业三元结构工程”。要建设相对独立的产业体系，相应发展养殖业，加快建设华北肉牛带，推进南方亚热带丘陵地区草山草坡畜牧业的发展，推动东北平原商品粮基地饲料粮的就地转化。同时，要相应地发展食品和农产品加工业，逐步实行种养加、贸工农一体化的农业产业化经营体系。

——建设我国最大的淡水水产养殖基地。在这一地带要加快推广小水体精养集约高产技术，尽快提高淡水水产资源生产力。加快池塘养鱼的基础建设，扩大湖泊围栏养殖面积和网箱养殖规模，完善水产品渔工商一体化建设。

——建设我国最大的速生丰产林基地。利用广阔的南方亚热带丘陵地区和华北及东北平原的自然资源和经济资源的优势，加快速生丰产林体系和多种果树业的建设，加强立体农业的建设，实行农林牧综合经营。同时，要提高开发农业建设水平。

——要尽早规划中部地区乡镇企业的合理布局，避免工业“三废”对农业基地的污染。这一地带即将加快发展乡镇企业和增加农业化学物质的投入，要重点预防农村工业化和农业现代化可能带来的生态环境污染和破坏。

#### (3) 西部地带：

——采取有效政策保护和建设西部地带有限的“基本农田”。为控制西南山地高原坡地的过度开垦，必须保护河谷地带宝贵的基本农田和实施“坡改梯”工程，重点加强水利设施建设和提高基本农田的集约生产能力。同时要加强对西北优质棉花和特产、水果以及蔬菜基地的建设，提高灌溉水的利用率，积极推广管道灌溉和喷灌滴灌技术。

——逐步提高牧区牧业集约建设水平。增加投入要重点建设水热资源比较充足的草地，发挥人工草场的生产潜力。对干旱冷凉的草地要控制放牧，严禁超载过牧，保护草场资源的再生能力。

——重点建设人工池塘水产养殖体系。在西南的丘陵河谷地带或山区的水塘水库，都有发展水产养殖的良好资源，稻田养鱼也有相当的潜力。推行小水体精养高产技术，是发挥水域资源的主要途径。

——建设两江上游和西北防护林体系。这个防护林体系不仅关系到西部地带的水土流失，而且严重影响到长江和珠江中下游地带的环境和经济发展。西北防护林体系也是关系到西北水土流失和黄河中下游安全的重大工程，需要国家和地方、上游和中下游的联合共同建设。

——东西部联手综合开发西部资源。为了加快开发西南的磷硫矿藏、水和能源、特种生物资源和南亚热带农业资源，西北的石油、钾矿、光能、风能、特产经济作物资源，需要同东部的资金和技术优势实行互补和结合，以尽快发挥资源的优势，推进农业和农村的持续发展。

从总体上来看，三大经济地带在推进现代农业和农村发展的过程中，应当把生产、技术、经济、生态和社会五大系统有机地结合起来，根据本地带的实际情况的资源环境，加强区域间的协作，逐步实现区域内的现代集约持续农业的稳步协调发展。

#### （六）现代集约持续农业的重点发展领域

现代集约持续农业是我国处在世纪之交时期农业发展的必然选择。为了推进现代集约持续农业的发展，需要确定一批优先重点发展的领域：

1．建立农业持续发展的科学管理体系，要对已有的重大农业技术政策进行持续性评估，制定管理细则，提高持续发展的管理水平。

2．建立食物安全和预警系统。贯彻实施《90年代食物结构改革和发展纲要》，建立食物安全和预警的信息系统和模拟运行系统，制定配套的食物安全政策，确保我国人民的食物供应。

3．建立实施“种植业三元结构工程”规程。有重点地、分区域地进行试点和示范，制定不同区域的三元结构工程体系，并对资源开发、作物种植制度、养殖体系、加工体系、销售体系进行一体化的规划和建设。

4．建立资源开发利用监测体系。对农业自然资源分类、分区进行评估和核算，纳入国民经济核算体系，制定相应的资源管理政策和法规。

5．建立农业生态工程 and 环境保护体系。对农业生态环境进行分类和分区评估，制定农业生态环境信息系统和模拟运行系统以及动态监测系统。

6．建立持续性农业科学技术的推广体系。对现有农业技术进行持续性评估，制定和推广提高农业投入物质利用效率的技术，如化肥、农药施用规程，以及节水、培养地力和多途径开发利用农村能源的措施等。

7．建立持续性农业知识和技术培训体系。鼓励农民自觉地参与现代集约持续农业的示范推广活动，通过多种途径，提高农民科学技术水平。

### 四、面向 21 世纪，树立推进 农业现代化建设的八个新观念

到 21 世纪初叶，我国农村经济将全面快速增长，农村产业结构发生新的变化。届时将呈现第一、二、三产业协调发展、相互促进的局面，农业综合生产能力和出口创汇水平将大大提高，在“大农业”结构中，将特别重视农、

林、牧的合理配套，非农产品产值在农村社会总产值的比重将占 2 / 3 以上。总体上将向农业现代化、农村工业化、农村城镇化、农村文明化和城乡一体化的方向发展。

农业要加快实现“两个根本性转变”，实施“科教兴农”和“可持续发展战略”，促进农民生活实现小康进而迈向富裕，是本世纪末和 2010 年前，我国整个现代化建设中最为重要而艰巨的任务。要实现“九五”~ 2010 年我国农业和农村经济发展目标，必须更新思想，开拓思路，牢固树立起八个新观念：

1. 由粗放经营向集约经营发展的观念。
2. 由工农、城乡长期隔离的二元经济结构转变为工农协调、城乡结合发展，全盘考虑安排国民经济建设的观念。
3. 传统农业转变为现代农业的观念。
4. 传统粮食观念转变为现代食物，广辟食物的观念。
5. 农业种植业由“二元结构”转向“三元结构”的观念。大力发展饲料作物，促进农牧结合、共同发展的观念。
6. 种好 15 亿亩耕地的同时面向整个国土资源的观念。科学开发利用非耕地资源，广辟食物来源，增加食物总量的观念。
7. 大力发展养殖业、饲料工业和食品工业，提高科技含量，增加附加值，提高农业总体效益的观念。
8. 重视“两个投入”的观念，既要重视资金、物质投入，也要重视智力投入。提高广大农民的文化科学素质，加强农村经营管理。管理是一门科学，管理出水平、出效益。

## 遗传育种与粮食增产

庄巧生

中国农业科学院作物育种栽培研究所

庄巧生 遗传育种学家。1916年8月5日生于福建闽侯。1939年毕业于金陵大学农学院，获学士学位。1945~1946年在美国堪萨斯州农学院、康乃尔大学进修。历任华北农业科学研究所研究员，中国农业科学院作物育种栽培研究所研究员、副所长、国际玉米小麦改良中心理事会理事，中国作物学会理事长等职。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事遗传育种学研究。

### 一、作物育种在粮食增产中的作用

增产粮食的途径很多，毛主席概括为土、肥、水、种、密、保、工、管八个字，称为农业八字宪法。种是其中投资最少而效益相当高的一项措施，而且是其他增产措施赖以发挥作用的基础，其他七个字都是围绕着种这个核心（内因）的要求来做贡献的。所以建国以来，党和政府十分重视优良品种的推广应用和种子建设。“六五”以来国家把主要粮食、棉花、油料、蔬菜的育种研究做为重点科技项目组织攻关，取得了显著的经济、社会效益。根据1996年1月国家科委对“八五”期间主要粮食作物新品种选育技术研究项目执行情况组织验收的汇报资料，该项目（包括水稻、小麦、玉米、大麦、谷子、高粱六大粮食作物）共育成审（认）定品种301个，其中达标的207个，占68.8%；这些新品种连同“七五”后期审定品种在“八五”期间扩大种植的面积在内，累计推广15.8亿亩；按平均增产8%计，可增产粮食393亿公斤，再以70%的缩值系数折算，估计实际增产粮食275亿公斤，获得经济效益427亿元。而5年投入2775万元，投入产出比为1:1538，这个比例是很可观的。

关于品种改良在农业科技进展中占有多大比重，其说不一，一般约占30%。据1984年美国农艺学会和美国作物学会联合发行的一份题为“五大作物增产中的遗传贡献”小册子所载（表1），高粱、玉米、大豆、棉花、小麦五大作物由于推广种植优良品种，每亩每年增产0.47~6.13公斤不等，占各自作物单产的0.70~1.78%，高粱、玉米的年增产率较高，在1.5%上下；大豆、小麦、棉花较低，为0.7%左右。粗略地说，各类作物通过品种改良每年可提高产量1%上下，如果栽培管理进一步改善，其贡献还会增大。

表1 美国五大作物品种改良对产量的贡献

作物	年限	年增长率	
		公斤/亩	%
高粱	1950-1980	3.66	1.30
玉米	1930-1980	4.86-6.13	1.42-1.78
大豆	1902-1977	1.25	0.70
棉花	1910-1980	0.47-0.69	0.74
小麦	1958-1980	0.83	0.74

优良品种除能提高产量潜力外还可抗御自然灾害，改善产品质量和增进生产效率，即高产、稳产、优质、低耗四个方面兼而有之。譬如：种植抗寒或早熟品种可使作物分布逐渐向高纬度和高海拔地区扩展；选用耐旱品种是半干旱地区稳产的重要途径，也是发展节水农业的内在因素或基础。利用品种抵抗病虫害为害，既经济有效又不污染环境，是各国作物育种研究最活跃的领域。同一作物不同品种之间，其产品的营养成分、加工性能等品质性状有着很大的差异。选育株矮秆壮，抗倒伏，穗层整齐，成熟一致，不易落粒的谷类作物品种，便于机械化收获；种植有限生长习性和短果枝的棉花，使大部分棉铃能同期吐絮，可减少机械收获的损失等。遗憾的是，这些优点往往分散在不同的品种材料中，而且时常和一些不良性状联系在一起。育种家的任务就是根据生产和生活的需要，按照各类性状的遗传规律，通过育种手段将以上四方面的优越性有重点地逐步集中在一个优良品种上，使其尽可能臻于完善，以满足农业生产不断发展的要求。

## 二、常用的育种方案、途径和做法

从育种学的观点，作物基本上可分为两大类：即自花授粉（自交）作物和异花授粉（异交）作物。一般说来，天然异交率小于4%的为自交作物，如水稻、小麦、大麦、谷子、花生、大豆、烟草、亚麻、豌豆、菜豆、番茄等；天然异交率在50%以上的是异交作物，如向日葵、黑麦、甜菜、大白菜、甘蓝、萝卜（以上雌雄同花）、玉米、西瓜、草莓（以上雌雄异花）、大麻、菠菜（以上雌雄异株）等。天然异交率介于二者之间的叫常异交作物，如棉花、高粱、蚕豆等。自交作物的自然群体是单一的基因型或一些纯合基因型的混合物，其个体在遗传上是高度纯合的。自交后代生育正常，没有衰退现象。异交作物的自然群体是异质的，含有很多不同的基因型，在遗传上是高度杂合的，自交后呈现不同程度的衰退，再杂交时又恢复正常的健壮状态。

自交作物最主要的育种方法是品种间杂交，包括单交、三交、双交、回交等，其目的是将来自不同亲本品种的优良性状组装在一起，形成新的纯系。现在也在积极利用杂种第一代的优势挖掘增产潜力，已在水稻、烟草、番茄、小麦等作物上应用。异交作物最主要的育种方法是自交系间杂交，包括单交、三交、双交和顶交，都是以利用杂种第一代优势为归宿的，其中以单交种的优势最强，整齐度最好，在生产上应用最广。同时，还常采用轮回选择的方法来改良育种群体。它是高一级的混合选择，即从原始群体中选择优良单株，一方面进行自交，同时与测验种测交以测定其一般配合力，然后根据测交结果选择最优的一些自交系进行互相杂交，组成新的育种群体。这样轮复一轮

地自交——测交——互交加上选择，可以把原始群体内的优良基因逐步聚集在一起，形成改良群体，以便从中选育出更好的自交系或合成综合杂交种。所谓综合杂交种就是选择一般配合力好的一些优良自交系（5~10个）混合种植，任其随机互交，以产生异质性大、杂合度高而又相对整齐一致的品种群体。这样的群体可以连续使用多代。常异交作物对自交没有不良影响，其育种原理和方法与自交作物基本相同。此外，还有无性繁殖作物如马铃薯、甘薯、甘蔗、草莓等，其表现型虽然整齐一致，而基因型则高度杂合。它们在自然情况下常会发生芽变，可以进行个体选择；也可在特定条件下进行有性杂交加以改良，其杂种第一代异质性大，可选择优株进行无性繁殖，成为整齐一致的无性系或品种。表2概括说明现用生产品种的类型和基本特点。

表2 生产品种群体的类型与特点

繁殖方式	交配体系	群体类型	基本特点
有性	自交	纯系	同质，纯合；亲本纯系杂交后在第二至第六代选择超亲后代。
有性	异交	杂交种	同质，高度杂合；选择配合力好的自交系进行杂交，利用第一代优势。
有性	异交	开放授粉群体	异质，杂合；改良群体，增加有利基因频率；或选择优良亲本品系或无性系混合组成综合种。
无性	异交	无性系	同质，杂合；杂合亲本品系杂交的第一代选择超亲的无性系。

利用杂交种第一代的优势（表现在产量、品质、抗逆、低耗等方面）是育种工作的发展方向，但需要每年制种、换种。为了节省人工去雄、授粉的麻烦，配制杂交种可采用以下几种途径：（1）核质互作雄性不育系——即不育系、保持系、恢复系“三系”配套法，已在玉米、高粱、水稻、油菜、小麦等作物上应用。（2）光（温）敏核雄性不育系——即一系两用（不育系兼保持系）的“两系法”，已开始在水稻、小麦上应用。（3）自交不亲和系——有配子体型（如烟草）自交不亲和与孢子体型自交不亲和（如白菜、甘蓝等十字花科植物）之分。（4）化学杀雄，已在小麦上应用。其中以核质互作雄性不育系应用最广，但化学杀雄最为简便，如果价格合理又无残毒则更便于推广。

以上是作物育种的“主流”做法，或称常规育种。在实际工作中，配合常规技术进行的还有诱变育种、双单倍体育种和远缘杂交。前者利用理化因素如射线、中子、离子束以及甲基磺酸乙酯（EMS）、硫酸二乙酯（DES）、叠氮化钠（NaN<sub>3</sub>）等化学诱变剂诱发遗传变异，但其变异是随机的，而且有益突变率很低，一般为10<sup>-5</sup>~10<sup>-3</sup>，所以多与品种间杂交结合进行。双单倍体育种则通过花药培养或孤雌生殖产生单倍体，继之以染色体加倍形成二倍体，此法可以加速纯合进程，但因诱导频率低（一般不到5%），出现优良基因型的机率小，只能作为辅助措施应用。至于远缘杂交，一般指不同种、属之间的杂交，由于亲缘关系相距稍远，经常会出现杂交不亲和，幼胚不成活，杂种第一代不育，杂种后代育性差和“疯狂”分离等现象。随着科学技术的进展，如利用带有广亲和基因、可交配性基因、部分同源群染色体配对基因、染色体自然加倍基因等的“桥梁”亲本，以及生长激素处理，幼胚、



幼穗培养，秋水仙素染色体加倍处理等办法，可在不同程度上克服前述的一系列问题。应该指出，远缘杂交是针对常规育种难以解决的问题或旨在人工创造新类型而制定的，其潜在的遗传变异性很大，但技术难度也高，不是短时间所能奏效的，一般多是为常规育种培育一些中间材料如双二倍体、附加系、代换系、易位系等，以便进一步育成可供生产利用的新品种。

### 三、扩大遗传变异和灵活运用遗传规律 是搞好作物育种的关键

上述四个基本育种方案的实施，包括以下三个基本环节，即遗传变异的发现与创制、优良遗传变异的选择与固定（或配合力及杂种优势检测）和育成品种（组合、群体）的产量和适应性评价。其中遗传变异的发现与创制是最基本的，也是带有战略性的环节，因为没有优良的遗传变异就不可能育成优良品种。育种家要在注意发现与利用已有变异的同时，千方百计扩大育种群体的遗传变异，创造符合育种和生产需要的新的优良变异。异花授粉作物如玉米的轮回选择或群体改育就寓有这个意思。对于自花授粉作物如小麦来说，除了参照运用轮回选择的原理进行群体的性状改良外，还可采用以下两种做法扩大育种群体的遗传变异：

1. 利用雄性不育基因组建综合杂交混合群体——搜集在育种上各具特点的一些亲本材料取样混合作为一方，以具有推广品种遗传背景的若干核雄性不育材料的混合群体为另一方，间行种植，通过自然和人工辅助授粉收取雄性不育株上的种子混合，组成遗传基础广泛复杂的杂种群体。这种群体经过年复一年的自然杂交、自然选择和人工辅助授粉、定向选择，使优良基因不断重组，遗传基础日趋丰富和优化，可供各类目标的育种方案随时从中进行选择，从而育成新的优良品种。国际上已用此法于大麦育种并收到一定成效。在小麦方面，我国70年代后期以来利用太谷显性核不育基因开展各类性状的轮回选择，以丰富亲本材料的遗传基础和选育新品种，也取得良好效果。

2. 双列杂交选择交配——选择一些各具特点的优良亲本进行双列杂交，这是第一轮亲本；下年在F<sub>1</sub>间有选择地进行第二次双列杂交，这是第二轮亲本；第四年在第二轮亲本经过混合选择的F<sub>2</sub>中选择优良单株互相交配，即第一次选择交配，组成第三轮亲本；第五年又在第三轮亲本的F<sub>1</sub>代植株之间进行第二次选择交配，组成第四轮亲本，……如此类推；而对每轮亲本的F<sub>1</sub>代杂种，都进行混合选择以繁殖F<sub>2</sub>代，然后按常规程序继续选育。这样就把亲本创新与丰富杂种后代遗传基础融为一体，已在燕麦、棉花上取得成效。

从遗传学上说，性状大体上可分质量性状和数量性状两大类；控制性状的基因其作用有大有小，大的叫主效基因，小的称微效基因。质量性状是受一至少数几对主效基因控制的，其表现型差异明显，容易区分，受环境的影响较小，如花、果实、种子颜色、茸毛有无、麦芒有无、抗病感病等。数量性状是由许多微效基因控制的，每个基因的效应（贡献）很小，且容易受环境条件的影响，所以呈现连续变异，没有明显界限，如产量高低、品质好坏、分蘖多少、穗子大小、抗逆性强弱等。还有一些性状是介于二者之间，既有主效基因起主导作用，又有为数不等的微效基因起修饰作用，如植株高矮、抽穗早晚等。作物育种方案中所考虑的目标性状大多是数量性状。

基因在染色体上占有特定的位置（位点）。同一位点上的基因称等位基因，其作用有显、隐性之分，显性基因能掩盖或抑制隐性基因的表达。不同

位点上的基因称非等位基因，它们之间也有不同的相互作用，有相加的，也有非相加的（如互相排斥、相辅相成、互为消长等）。不在一条染色体上的基因，它们在性细胞减数分裂时的分离与组合是独立的，互不干扰。位于同一条染色体上的基因，则彼此联合在一起传递到下一代的机率较大，这种连锁遗传的程度取决于这两个位点的距离。如果相距很近，那就难分难解，紧密连锁遗传；如果相距较远，则可自由组合。正因为控制性状的基因在数目多少、效应大小、作用性质、位点分布以及它们与环境条件的互作等方面各不相同，各种性状在上下代的遗传传递关系就显得错综复杂，常因亲本材料、交配对手和杂种后代所处的环境条件而异。对这些遗传变异规律的认识，需要通过有关实验和育种实践逐渐积累并加以总结和深化。这样，育种家才能灵活运用这些遗传学知识来掌握如何正确选择亲本、配置组合，确定杂种群体规模与种植方式，创造有利于暴露和培育目标性状的环境条件，以及对不同目标性状分别进行恰如其分的选择，逐步把所需要的优良性状集中到一个个体上发展成为品系，再通过多年多点的鉴定与评价，尽快决选出最有生产利用价值的优良品种。一般而论，从开始杂交到育成品种投入生产应用，假定一年只种植一代，需要8~10年的时间。如果这个育种“车间”能够正常运转，则10年之后应该可以源源不断地育出优良品种。不过，农业研究受气候条件等影响很大，就目前科学技术水平而言，还难以做到这样理想的境界。正因为如此，作物育种工作要相对稳定。

#### 四、我国作物育种工作现状和前景

1949年以来，我国作物育种事业虽然取得了很大成绩，主要粮食、经济作物经历了4~6次品种更换，每次品种更换都能增产10%上下，但也存在一些不可忽视的问题。如果说作物育种工作可以分割成育种前、育种中和育种后三个阶段，我国的育种前和育种后工作相对说来是薄弱环节。我们对育种前的基础工作和理论研究（包括材料和方法）做得较少，还不能对育种实践起到应有的指导作用，也就是说，我们的育种实践在相当程度上还停留在以经验为主的状态。育种后这一领域虽然“技术含量”不高，却关系到如何更有成效地把科学技术转化为现实生产力的大问题，和先进国家相比则更显得软弱无力，差距很大。国家农业部早在70年代后期就提出种子生产专业化，加工机械化，质量标准化，品种布局区域化和以县为单位统一供种的“四化一供”种子工作方针，但缺乏落实的具体政策和措施，所以长期以来生产上品种“多、杂、乱”现象一直未能得到解决，而且有日益加重的趋势。近几年，有些农民不问品种好坏与适应性争先播种新品种，企图以贩卖新种子作为生财之道，人为地缩短推广品种寿命并造成混乱，同时在种子经营上也常出现假、冒、伪、劣的坑农行为，严重挫伤了农民的生产积极性。因此一要建立健全良种繁育体系，切实做到种子生产专业化。除要求国营农场和种子部门的良种场承担良种繁育任务外，在一个县的范围内还要选定若干有条件的生产单位作为良种基地，有计划地组织生产各种级别的良种种子。二要认真执行种子检验制度，做到种子质量标准化。政府部门要设立种子检验机构，负责检验繁种单位的种子质量，按标准定级，优级优价。不经检验和检验不合格的种子不能在市场上销售。种子检验机构和种子生产、经营单位是彼此独立的系统，前者对产品质量拥有监督权。三要科学用种，做到因地制宜，合理布局，因种栽培，良种良法配套，使地尽其利，种得其所，充分发

挥良种的增产增收性能。过去不少地区在领导生产时习惯采用以“高产”品种带路的做法，主观愿望是好的，但要注意到单产潜力大的品种往往比较“娇气”，对肥水等外界环境条件比较敏感，一旦肥水跟不上或遭受不良气候条件的袭击，容易造成减产。所以应该强调“对口”种植，不搞“一刀切”。

我国从事作物育种的单位不少，但都习惯于单一专业各自为战，而且大多在一个地点进行培育和选拔，不能把早期世代材料有计划地分发给若干有代表性的地点种植，接受不同生态环境和栽培条件的考验。因而育成品种的适应性比较狭窄，难以在生产上发挥更大作用，同时在筛选过程中很有可能丢掉一些不该淘汰的材料，影响育种效率。这是一个严重的缺点，应从体制和政策上加以引导，逐步求得解决。此外，育种规模太小，研究手段落后，田间作业基本上靠人工操作，室内检测设备也十分简陋，影响工作质量和进度。这只能靠增加投入来解决。

作物育种是一门综合性很强的应用科学，需要植物遗传、细胞、生态、病理、昆虫、农业气象、品种资源、作物栽培、生物统计、生物技术等学科的知识做支撑，其中最重要的是遗传学，包括分子遗传学。所以在育种前和育种中围绕育种工作的需要，开展有关性状的组分、形成、发展及其与环境条件的关系，性状本身从群体到分子水平的遗传控制，性状之间的相互关系，高产、优质、多抗的生理生化基础，昆虫抗性与病菌、害虫生物型间的相互关系，基因型与环境互作，以及分子生物学、基因工程技术在作物育种中的应用等研究，对提高作物育种水平和工作效率十分重要，应该安排足够的力量，分别轻重缓急予以实施。只有这样才能把作物育种发展为有坚实理论做指导和精确方法武装起来的一门应用科学。

就我国当前和今后一个时期的作物育种工作来看，在育种目标上，应该处理好高产与优质、高产与稳产的关系。我国人多、地少、底子薄，吃饭问题关系重大。选育高产、稳产的优良品种仍是当务之急，也是一个长期的战略任务。从总体上说，高产是优质的前提，离开产量谈品质是行不通的。高产与稳产（抗逆性能）也常有矛盾，高产品种一般产量不够稳定，而抗逆性能强的品种又往往不高产。在育种过程中和利用品种时，都应注意协调好这些方面的关系。在育种途径上，当前要处理好杂种优势利用与常规育种（指品种间杂交）、高新技术与常规技术的关系。从理论上说，杂种优势利用比常规品种增产潜力大，应是努力发展的方向。但不同作物情况不一，玉米、高粱杂种优势较大，小麦、大豆杂种优势较小。在自交作物中，水稻是二倍体作物，杂种优势较大，小麦是六倍体作物，它在进化过程中已经发生过两次自然杂交和染色体加倍，剩余的杂种优势较小。再者单个植株的生育优势是随种植密度增大而降低的，生产上各种作物的种植密度不一，所以其群体优势也各不相同。还应该指出，常规育种是杂种优势利用的基础，用以生产杂种一代优势的亲本品系（自交系、不育系、恢复系等）多来自常规育种，后者的性状水平提高了，杂种优势利用的效果也就更加显著；而杂种优势利用的发展又可进一步推动常规育种水平的提高，二者是互相促进的。

近十多年来，植物基因工程技术有了长足的进步，现在科学家已能人工分离、合成和克隆一些特定基因，采用生物（与根癌农杆菌共培养）、物理（电穿孔、微射弹、微注射）、化学（聚乙二醇）等方法将目标基因导入植物细胞或胚胎，并通过组织培养或直接转化（花粉管通道）获得转基因植物。它已开始打破生物间亲缘关系的界限，初步实现不同植物间优良基因的交流。

流，既可扩大远缘杂交的范畴，又能缩短育种进程，还有可能将微生物或动物的有益基因向植物中输送。这对提高植物育种水平和效率具有重要的战略意义。现在已有 100 多种植物获得了转基因植株，包括不少重要的农作物如烟草、马铃薯、油菜、亚麻、棉花、甜菜、大豆、苜蓿、番茄等。被批准进行田间试验的转基因植物达 1800 多例，涉及抗虫、抗病毒、抗除草剂、品质改良、雄性不育、延熟保鲜等方面，其中延熟保鲜转基因番茄、抗除草剂转基因烟草、大豆等已获准进入市场。我国的抗花叶病毒转基因烟草已在大面积生产上应用，抗棉铃虫转基因棉花也正在扩大示范之中。最近报道，携有抗白叶枯病基因 Xa21 的转基因水稻和抗黄矮病毒的转基因小麦已获成功。这些都是十分可喜的新进展。不过，总的说来，目前的基因工程技术体系多适用于转化双子叶植物，对于小麦、水稻、玉米等单子叶植物的遗传转化虽有进展，尚未取得明显突破。

对于多基因控制的数量性状，现已在几种主要农作物上采用 RFLP (限制性片段长度多态性) 技术绘制出接近饱和的 DNA 分子标记遗传图，通过分析实验群体中每个个体或株系所携带的分子标记及其与数量性状表现型值间的关系，可将数量性状基因 (QTL) 逐一定位到染色体的相应位置并估算其遗传效应。有了这样的资料，育种家就可以根据与某些 QTL 紧密连锁的分子标记进行选择，即分子标记辅助选择，其精确性要比按表现型选择好得多。这是生物技术在作物育种上的又一个新进展。不过不同作物的 DNA 多态性不一样，遗传图上分子标记的分布与饱和度各不相同，其辅助选择的效率也就有所差别。为了使这类技术更加简便实用，科学家正在努力探讨一些新的分子标记。

总之，植物基因工程和现代生物技术已不断取得令人瞩目的进展，但它毕竟还在成长之中，不够成熟，而且研究成本很高，距离实际应用还有一段路程。然而，从发展上看，它的应用前景十分诱人。我们必须密切注视，积极支持，促其更快地向实用化发展。即使将来“生物技术育种”或“分子育种”在技术上已臻成熟并达到实用化，也仍然要以常规育种 (包括杂种优势利用) 为基础，并与之密切结合，才能充分发挥高新技术的作用，把作物育种科学推向更高的水平。

## 可持续发展战略与生态学

刘建康

中国科学院水生生物研究所

刘建康 鱼类学家、生态学家。1917年9月1日生于江苏省吴江县。1938年毕业于苏州东吴大学理学院生物系，获理学士学位。1947年获加拿大麦基尔大学哲学博士学位。历任中央研究院动物研究所研究员，中国科学院水生生物研究所研究员、副所长、所长、名誉所长。1980年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事淡水水生生物生态学研究。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展“九五”计划和2010年远景目标的建议》第36条中指出“加强环境、生态、资源保护”和“到本世纪末，力争环境污染和生态破坏加剧趋势得到基本控制，部分城市和地区环境质量有所改善；2010年基本改变生态环境恶化的状况，城乡环境有比较明显改善。”李鹏同志在该项建议的说明里强调：“‘九五’计划和15年远景目标，一定要体现可持续发展的方针。这是造福当代、泽及子孙的大事。在保护资源和环境的问题上，大家一定要把眼光放得更远大些。”

早在120年前，恩格斯（1876）在《自然辩证法》里就提出了下面的告诫：“可是我们不要过于得意我们对自然界的胜利。对于我们的每一次胜利，自然界都报复了我们。每一次的这种胜利，第一步我们确实达到预期的结果，但第二步和第三步却有了完全不同的意想不到的结果，常常正好把第一个结果的意义又取消了。美索不达米亚、希腊、小亚细亚以及其他各地的居民，为了想得到耕地把森林都砍完了，但是他们却梦想不到这些地方今天竟因此成为荒芜不毛之地……”“因此我们必须时时记住：我们统治自然界，决不像征服者统治异民族一样，决不像站在自然界以外的人一样，——相反地，我们同我们的肉、血和头脑一起都是属于自然界，存在于自然界中；我们对自然界的整个支配，仅仅是因我们胜于其他一切动物，能够认识和正确运用自然规律而已”。革命导师120年前的告诫，至今仍有现实意义。

10年前（1986）第三世界环境保护专家们在一起开会，他们提出我们居住的地球存在十大问题，如果不能采取办法解决，就会给人类生存带来威胁，这十大问题是：

一、沙漠化日益严重。世界沙漠面积正在不断扩大，每年有两千公顷农田被沙海吞没。

二、森林遭到严重砍伐。森林正在以可怕的速度减少，造成严重的水土流失。

三、野生动物大量灭绝，野生动物的生活环境遭到破坏，许多动物绝种，影响生态平衡。

四、世界人口急剧增长，估计到2010年，世界人口比1986年增加一倍。

五、饮水资源越来越少，供饮用的甜水源逐渐减少，人类饮水问题越来越大。

六、渔业资源逐渐减少。一些国家在海上盲目捕鱼，世界上25%的渔场遭到破坏。

七、河水遭到严重污染。大量工业废水倒入河中，危害水生资源和人们

的健康。

八、大量使用农药，这不仅使农作物受到影响，也给人体带来危害。

九、地球温度明显上升。近百年来，世界平均温度在上升，对赤道和非洲国家影响很大。

十、酸雨现象正在发展。含有毒物的工业废气造成的酸雨，给农作物和人体的健康带来危害。

近来，又增加了臭氧层空洞扩大的问题，紫外线的辐射量的增加造成对动植物有害的影响和人类皮肤癌的增加等。环境与资源本来就是生态学研究领域里的问题，“持续发展”概念是从生态学角度提出来的，或者至少是在生态思想影响下提出来的。1992年6月巴西里约热内卢“联合国环境与发展”大会以后，可持续发展为世界各国普遍接受作为发展的模式。

生态学是作为研究生物与环境之间的关系的一门生物学分支学科开始的，但今天生态学已被称为“生存的科学”（Science of Survival）。德国生态学的领头人之一，H·Lieth在一篇文章中写道：“生态学已变成了一门为了生存的首要的科学。在过去，农业和医学被认为是为了生存的关键性科学。随着人口的增加和工业技术的快速发展，现在已很清楚，人不能光考虑增长，而必须思考其本身人口的大小、区域生态系统的承载力，以及地球上地球化学平衡之间的一种稳定关系。”当然，生态学也致力于生产力的提高，但是这种提高不能以破坏环境、破坏发展的基础为代价的。

可持续发展概念是20多年前在西方提出来的，1987年“联合国环境与发展委员会（WCED）”发表的《我们的共同未来》使它得到了普及。1993年许多国家的生态学界都对这一主题展开讨论。例如美国生态学会1993年年会讨论的题目就是“生态学与全球可持续发展”。我国第一次持续发展与生态学学术讨论会是1993年12月份召开的。这是中国生态学会第一次召开这样以国家重大问题为讨论对象的学术讨论会。可持续发展的重要基础是生物资源的持续利用，我国早在两千多年以前的春秋战国时代，许多先儒已有明确的资源持续利用思想，如《孟子》、《逸周书》、《荀子》、《吕氏春秋》等都有这方面的记述。例如荀子在《王制篇》中说：“圣王之制也，鼯兽鱼鳖鳅鱣孕别之时，网罟毒药不入泽，不夭其生，不绝其长也”。孟子也有同样的概念，他说“数罟不入洿池，鱼鳖不可胜食也”等等。可是作为一门自然科学来研究生物资源和环境保护问题则是从生态学开始的。下面我就来介绍生态学这个名词的起源，这门学科的研究内容和基本概念，以加深对可持续发展战略的认识，从而增强贯彻执行这个造福当代、泽及子孙的方针的自觉性。

## 生态学的基本概念

### 1. 生态学

生态学（Ecology）一词最早是由德国生物学家黑格尔（Ernst Haeckel）在1869年提出的，名词的英文词首和经济学（Economics）是相同的，都是Eco，起源于希腊文Oikos，是家庭居处或环境的意思，可见生态学和经济学、家庭、环境等，从词源和词义上说是密切关系的。

生态学原是一门研究动植物与其生活环境相互关系的科学，是生物学主要分科之一。由于人类环境问题和环境科学的发展，生态学就扩展到人类生活和社会活动方面，把人类这一个生物种 摘自王翊亭等（1985）《环境学

导论》，清华大学出版社。也列入生态系统中，来研究并阐明整个生物圈的生态系统的相互关系问题。这样就使生态学成为一个领域更广泛、内容更丰富的科学。同时，现代科学技术的新成就也已经渗透到生态学的领域中，赋予它新的内容和动力，成为多学科的、当代较活跃的科学领域之一。研究生物的形态、生理、遗传、细胞等结构和功能为基础的生物学部分与环境相结合形成的生态学，又与系统工程学、经济学、工艺学、化学、物理学、数学相结合而产生相应的新兴学科，是60年代以来生态学的一个重要发展趋势。

生态学的发展进程中，有三个主要特点：

(1) 从定性探索生物与环境的相互作用，到定量研究；

(2) 从个别生态系统到复合生态系统，由单一到综合，由静态到动态地认识自然界物质循环与能量转化规律；

(3) 与基础科学和应用科学相结合，发展了生态学，扩大了生态学的研究领域。生态学的许多基本原理同样也可以应用于环境科学中，来研究和解决人类生活与环境问题。

## 2. 生态系统

一个生物物种在一定范围内所有个体的总和，在生态学中称为种群 (Population)，一定的自然区域中许多不同种的生物的总和称为群落 (Community)，任何一个生物群落与其周围非生物环境的综合体就是生态系统 (Ecosystem)。生态系统就是生命系统和环境系统在特定空间的组合，在生态系统中，各种生物彼此间以及生物与非生物环境因素之间互相作用，关系密切，而且不断地进行着物质和能量的流动。人类所生活的生物圈 (Biosphere) 内有无数大小不同的生态系统，在一复杂大生态系统中又包含无数个小生态系统。池塘、湖泊、河流、草原和森林等都是典型的例子。城市、矿山、工厂等等从广义上也可以说是一种人为的生态系统。这许多各种各样的生态系统组成了统一的整体就是人类生活的自然环境，因此，整个生物圈便是一个最大的生态系统。

生态系统的组成包括必要和非必要的两部分，必要的部分又分为非生物成分和生物成分两种。前者包括阳光和营养成分，供生产者 (植物) 合成有机物之用。后者包括生产者、分解者和转变者：生产者又称自养者 (Autotrophs)，以绿色植物为主 (高等植物和藻类浮游植物)，分解者 (Decomposers) 包括一部分细菌和真菌，能使生物体分解为无机物质，转变者也是细菌，其作用是将分解后的无机物转变为可供植物利用的营养分。细菌的分解和转变作用在生态系统中非常重要，没有它，生产者就会缺乏养分，无法自养，不能生存。

不必要的部分主要是各级消费者，它们是靠生产者的有机物质为生的，故又称异养者 (Heterotrophs)。按其食性，消费者可分为草食动物、肉食动物、寄生生物和腐食动植物 (Scavengers) 等。它们在生态系统中只能消费，不能生产。归纳起来，生产者、消费者、分解者和转变者、无机营养分是生态系统的四个基本组成部分。生态系统中能量和物质的流动都是通过这四个部分来实现的。

生态系统的类型：

1) 陆地生态系统：又可分自然和人工两类。自然陆地生态系统如森林生态系统、草原生态系统、荒漠生态系统等，人工陆地生态系统如农田、城市、工矿区等。

2) 淡水生态系统, 包括池塘、湖泊、河流、水库。

3) 海洋生态系统, 包括海岸、河口、浅海、大洋、海底等。

生态系统中的各种生物基于生产者和各级消费者的营养关系, 构成了生态系统中的食物链 (Food chain)。所谓食物链, 就是一种生物以另一种生物为食, 彼此形成一个以食物联接起来的链锁关系。在一个生态系统中, 食物关系往往很复杂, 各种食物链互相交错, 形成食物网。能量的流动、物质的迁移和转化, 就是通过食物链和食物网进行的。

生态系统的能量流动具有下述五个特点:

1) 生产者即绿色植物对太阳能利用率很低, 只有 1% 左右。

2) 能量只朝单一方向流动 (不是可逆流动)。

3) 流动中能量逐渐减少, 每过一个营养级都有能量以热的形式散失掉, 而且各营养层次自身呼吸所耗用的能量都在其总产量的一半以上, 各级的净产量至多只有总产量的一小半。

4) 各级消费者之间能量的利用率平均约 10%, 即食物链中后一级能量总是小于前一级的能量, 因此, 食物链的营养层次增加时, 净产量就急剧下降。如果说植物的净产量为 100 千卡, 则草食动物的净产量只有 10 千卡, 而肉食动物只有 1 千卡, 这说明为什么一般食物链的层次不超过四级或至多五级。这也说明为什么人类以植物为食要比以动物为食经济有利得多。生态学把食物链各层次能量递减的法则称为能量金字塔 (Energy pyramid) 或简称能塔图。

5) 只有当生态系统生产的能量与消耗的能量相平衡时, 生态系统的结构与功能才能保持动态的平衡。

生态系统中的物质循环:

生物体全部原生质中约有 97% 以上是由氧、碳、氢、氮和磷五种元素组成 (还有硫、钙、镁、钾等等)。这些主要的化学元素在生物圈中的物质循环过程, 包含有生物学的、地学的和化学的过程, 因而称为生物地球化学循环 (Biogeochemical cycle)。这里只是简单提一下, 氮在许多环境问题中起着重要的作用。氮在燃烧过程中被氧化成氮氧化物, 能造成大气中光化学烟雾的严重污染事故。1943 年 3~10 月美国洛杉矶 (有汽车 400 多万辆), 每天耗汽油 2400 万升, 每天有 1000 多吨碳氢化合物进入大气, 石油工业和汽车废气在紫外线作用下生成光化学烟雾, 致使大多数居民患病, 65 岁以上老人死亡 400 多人, 另外, 在氮肥生产中, 采用氯化汞和硫酸汞作催化剂, 含甲基汞毒水废渣排入水体, 通过鱼这一食物链环节使人中毒, 1953 年日本九州熊本县水俣镇 180 多人中毒, 死亡 50 多人。用氮制造的合成化学肥料在施用时也可能引起水体污染。

磷是维持生命所必需的另一重要元素。生物在新陈代谢过程中都需要磷。人类大量应用磷类洗涤剂和磷肥的结果, 都使水体中磷养分过多, 使水生植物生长过盛, 引起对环境的危害。

### 3. 生态平衡

任何一个正常的生态系统中, 能量流动和物质循环总是不断地进行着, 但在一定的时期内, 生产者、消费者和还原者之间都保持着一种动态的平衡, 这种平衡状态就叫生态平衡。在自然生态系统中, 平衡还表现为生物种类和数量的相对稳定。生态系统之所以能保持动态的平衡, 主要是由于内部具有自动调节的能力。例如对污染物质来说, 就是环境的自净能力 (亦即所谓环



境容量)。当系统的某一部分出现了机能异常时,就可能被不同部分的调节所抵消。生态系统的组成成分越多样,能量流动和物质循环的途径越复杂,其调节能力也越强,相反,成分越单纯,结构越简单,其调节能力也越小。但是,一个生态系统的调节能力再强,也是有一定限度的,超过了这个限度,调节就不再起作用,生态平衡就会遭到破坏。如果现代人类的活动使自然环境剧烈变化,或进入自然生态系统中的有害物质数量过大,超过自然系统的调节功能或生物与人类可以忍受的程度,那就会破坏生态平衡,使人类和生物受到损害。

破坏生态平衡的因素有自然原因,也有人为的因素。自然原因如火山爆发、山崩海啸、水旱灾害、地震、台风、流行病等自然灾害。人为因素主要指人类自然资源的不合理利用,工农业发展带来的环境污染等问题,人为因素引起的生态平衡的破坏,主要有三种情况:

(1) 物种改变引起平衡的破坏。人类有意或无意地使生态系统中某一种生物消失或往其中引进某一种生物,都可能对整个生态系统造成影响。例如:澳大利亚原来并没有兔子,后来从欧洲引进了兔子,以作肉用并生产皮毛。引进后,由于当地没有天敌予以适当限制,致使兔子大量繁殖,在短短的时间内,繁殖的数量惊人,遍布数千万亩田野,在草原上每年以 70 英里的速度向外蔓延,该地区原来长满的青草和灌木全被吃光,再不能放牧牛羊。田野一片光秃,土壤因无植物保护而被雨水侵蚀,造成生态系统的破坏,澳大利亚政府曾鼓励大量捕杀,但不见效果,最后不得不引进一种兔子的传染病,使兔群大量死亡,总算将兔子造成的生态危机控制住了。另外如滥猎滥捕鸟兽,收割式地砍伐森林,都会因某物种的数量减少或灭绝而使生态平衡受到破坏。

(2) 环境因素的改变。工农业的迅速发展,有意或无意地使大量污染物质进入环境,从而改变生态系统的环境因素,影响整个生态系统,甚至破坏生态平衡。由于空气污染,热污染,除草剂和杀虫剂的使用,肥料的流失,土壤侵蚀或未处理的污水进入环境而引起富营养化等等原因,改变生产者、消费者和分解者的种类与数量,破坏了生态平衡并引起了环境问题甚至造成公害。

(3) 信息系统的破坏。许多生物在生存的过程中,都能释放出某种信息素(一种特殊的化学物质)以驱赶天敌、排斥异种,或取得直接或间接的联系以繁衍后代,化学生态学就是研究这类信息素的。例如某些昆虫在生殖时期,雌虫会排出一种性信息素,靠这种性信息素引诱雄性个体来繁殖后代,但是,如果人们排放到环境中的某些污染物质与某一种动物排放的性信息素起了化学作用,使其丧失引诱雄性个体作用时,就会破坏这种动物的繁殖,改变生物种群的组成结构,使生态平衡受到影响。

#### 4. 生态学规律

前面介绍了有关生态学、生态系统和生态平衡方面的基本知识。这里就对生态学规律简要地概括成以下五方面:

##### (1) 相互制约与相互依赖的规律

以食物链(网)形成的相互制约、相互依赖的关系,本身是建立在一定的数量基础上。一个生物群落或生态系统中,各种生物个体的大小和数量之间都存在一定的比例关系。生物间的相互制约作用,使生物保持数量的相对稳定,这是生态平衡的一个重要方面。此外,无论动物或植物,都有其一定

的生境，它们因释放出某些分泌物或激素而表现为共生或抗生，同一环境中的物种越多，该生态系统也越稳定（例如混交林发生大规模虫害的机率远小于单调林）。

#### （2）物质循环转化与再生的规律

自然界通过植物、动物、微生物和非生物成分，一方面不断地合成新物质，一方面又随时分解为原来的简单物质，重新被植物所吸收，进行着不停顿的新陈代谢作用。但是如果人类的社会经济活动过于强化，超过了生态系统的调节限度，就会出现区域性甚至全球性的物质循环失调现象，给人类造成严重的恶果。

#### （3）物质输入输出的动态平衡规律

这里所指的物质输入输出的平衡规律，是适用于生物、环境和生态系统三方面的。在自然生态系统不受人活动干扰时，生物体一方面从周围摄取物质，另一方面向环境排放物质，不论对生物来说，或对环境来说，或是对于一个稳定的生态系统来说，物质的输入与输出总是平衡的。当生物体所需的输入不足时，例如农田肥料不足或虽然肥料（养分）足够，但未能分解而不可利用，或施肥的时间不当而不能被作物很好的利用，结果作物必然生长不好，产量下降。在质的方面，存在输入大于输出的情况。例如人工合成的难降解的农药和塑料或重金属元素，生物体吸收的量虽然很少，但因难以排出，形成体内积累而造成危害。对环境系统而言，如果营养物质输入过多，环境自身吸收不了，打破了原来的输入输出平衡，就会出现富营养化现象（湖北省东湖的情况正是如此）。

#### （4）相互适应与补偿的协同进化规律

生物与环境之间，存在着作用与反作用的过程，也就是说，生物给环境以影响，反过来环境也会影响生物。植物从环境吸收水和营养元素，这与环境的特点，如土壤的性质、可溶性营养元素的量、以及环境可以提供的水量等紧密相关。同时，生物体则以其排泄物和尸体把相当大的一部分水和营养素归还给环境，最后获得生物与环境协同进化的结果，这条规律对于逐步改造不利的环境（如沙漠）有指导意义；相反，如果损害了生物与环境相互补偿与适应的关系，例如某种生物过度繁殖，则环境就会因物质供应不及而造成生物的饥饿死亡，从而进行报复。这就告诉我们，人类必须按自然规律办事，否则自然界就会对我们和子孙后代加以惩罚。

#### （5）环境资源的有效极限规律

自然界中存在的、作为生物赖以生存的各种环境资源，在质量、空间和时间等方面，都有其一定的限度，不能无限制地供给。过去曾一度流行“人有多大胆，地有多高产”的提法，是完全违背自然规律的。

上面的五条生态学规律，也是生态平衡的基础。生态平衡以及生态系统的结构与功能，又与人类当前面临的人口、食物、能源、自然资源（其中包括水资源）、环境保护五大社会问题紧密相关。

# 人类基因组和白血病的 分化、凋亡诱导

陈 竺

上海第二医科大学附属瑞金医院  
上海血液学研究所

陈 竺 分子生物学家。1953年8月17日生于江苏镇江。1981年获上海第二医科大学医学硕士学位。1989年获法国巴黎第七大学圣·路易医院血液研究所博士学位。历任上海第二医科大学附属瑞金医院主治医师、上海血液学研究所分子生物学实验室主任、法国巴黎圣·路易医院血液中心实验室外籍住院医师。现任上海第二医科大附属瑞金医院、上海血液学研究所研究员、所长，上海生命科学研究中心副主任，复旦大学-上海第二医科大学遗传和医学科学中心副主任等职。1995年当选为中国科学院院士。从事血液学研究。

## 一、人类基因组计划的提出及意义

人类基因的现代定义为：合成有功能的人体蛋白质多肽链或 RNA 所必需的全部 DNA 顺序。DNA 是遗传信息的载体，其长度用碱基对 (bp) 或千碱基 (kb) 或兆碱基 (Mb) 表示。人类基因组则是指人的 24 条染色体 (22 条常染色体和 X、Y 2 条性染色体) 上全部 DNA 所携带的遗传信息的总和，总长度为  $3 \times 10^9$  bp，约含 8~10 万个基因。

人类基因组计划 (Human Genome Project, HGP) 是美国科学家 Renato Dulbecco 于 1986 年在 Science 杂志上发表的短文中率先提出的，旨在阐明人类基因组的全部序列，从整体上破译人类遗传信息，使得人类第一次在分子水平全面地认识自我。美国于 1990 年正式启动人类基因组计划，预计在 15 年时间内提供 30 亿美元的资助。欧共体、日本、加拿大、前苏联、巴西和印度等国也提出了类似的计划。由于各国政府和科学家的共同努力，HGP 已成为全球性的重大国际合作项目，为此还专门成立了国际人类基因组组织 (HUGO) 来统一协调这一计划，目前已有 15 个国家和欧共体加入 HUGO。

人类基因组计划的意义十分重大，因为它不仅能通过揭示人类生命活动的遗传学基础而带动整个生命科学的发展，而且将为 21 世纪的分子医学 (基因诊断、基因治疗和基因工程产品开发) 奠定基础。6 千多种人类单基因遗传病和一批严重危害人类健康的多基因病 (如恶性肿瘤、心血管疾病等) 将有可能由此得到预防、诊断和治疗，农业、工业和环境科学也将从中获益匪浅。

## 二、人类基因组计划已取得的成果

HGP 自 1990 年 10 月正式启动至今已有 5 年多时间，这 5 年所取得的成就使得人们不再像 80 年代后期那样对 HGP 的可行性持怀疑态度，正如美国 HGP 负责人 Francis Collins 所说的，我们已从人类基因组计划中学到最重要的一课是这个计划是可以完成的。而且在 HGP 5 周年之际，人们发现在资金未能达到原定资助强度的条件下，已提前完成了原定的进度。HGP 主要包括四项任务：(1) 遗传图谱的建立；(2) 物理图谱的建立；(3) DNA 顺序测

定；(4) 基因的识别。具体地来说这 5 年来有着如下四个方面的进展：

#### 1. 遗传图谱

遗传图谱是通过计算连锁的遗传标志之间的重组频率来确定它们之间的相对距离，测定单位用厘摩(cM)表示，1cM 相当于 1% 的重组频率，大致相当于 1Mb 的长度。遗传连锁图无论对于物理图谱的构建还是对于重要生物学性状或疾病的定位都是至关重要的。至 1994 年底，在法国和美国科学家共同努力之下，完成了应用 RFLP 标志和可用 PCR 方法进行批量分析的微卫星 DNA 为标志，包含 5826 个位点，覆盖 4000cM，分辨率高达 0.7cM 的遗传图谱的制作。1996 年 3 月法国科学家又报道了完全以微卫星标志构建的遗传连锁图，其中包括 2335 个位点，分辨率为 1.6cM。这些工作提前完成了原定于 1998 年完成的分辨率为 2~5cM 的计划，不仅为进一步的物理图谱构建提供了重要的依据，还可应用这张遗传图谱，通过基因组扫描(Genomic Scanning)技术，对那些具有复杂性状的多基因病(如高血压、糖尿病、冠心病等)进行连锁分析，以完成这些疾病所涉及的易感基因的定位。

#### 2. 物理图谱

物理图谱用于确定各遗传标志之间的物理距离，其制作主要是通过大片段 DNA 操作技术，对标志进行定序和距离测定，为基因的分选、识别和基因组 DNA 顺序测定奠定基础。物理图谱的构建这 5 年来也有了长足的进步：建立了以 15086 个顺序标签位点(Sequence Tagged Site, STS)为标志，分辨率达 199kb 的物理图谱和构建了由 225 个 YAC 连续克隆重叠群组成的、覆盖范围达整个人类基因组 75% 的物理图谱。预计原定由 30,000 个 STS 标志组成，分辨率达 100kb 的物理图谱将于 1997 年完成。此外，应用放射杂交制图(Radiation Hybrid Mapping)技术来制作物理图谱也在紧锣密鼓地进行中。

#### 3. DNA 顺序测定

人类基因组全部 DNA 顺序的测定是 HGP 的核心部分，在过去的 5 年中这方面也有了异常迅猛的发展。目前随着遗传和物理图谱工作的已经和即将完成，测序就成为今后 10 年工作的重中之重。在基因组计划上马之际，完成的最长的 DNA 顺序是 250kb 的巨细胞病毒顺序，花费了数年时间。而今，一个大测序中心可在一个月内完成一个细菌基因组(大于 1Mb)的测序工作。至目前为止，世界上已有 L. Hood、B. Booe 和 Sanger 中心等三个研究小组完成了长度大于 1Mb 的人基因组顺序测定，其中包括 T 细胞受体区段、9 号及 22 号染色体部分区段和 Hunting-ton 舞蹈病基因区段。大规模 DNA 测序技术以及分析大片段 DNA 序列的生物信息技术的进步，对完成人类基因组全部核苷酸顺序测定起着决定性作用，目前的方法有待进一步改进乃至革命。预期全部人类基因组测序工作将于 2005 年之前完成。

#### 4. 基因的识别

HGP 的重要内容之一，是识别全部人类基因即基因组中发生转录表达的功能单位，并对其结构进行研究。目前常采用的策略有二：(1) 从基因组 DNA 顺序中识别那些转录表达顺序即基因；(2) 随机从 cDNA 文库中挑取克隆并进行部分测序。这些随机测出的部分 cDNA 顺序称为表达顺序标签(Expressed Sequence Tags, EST)。根据转录顺序的位置和距离绘制的图谱即转录图。过去 5 年里许多重要疾病(如脆性 X 综合征、Hunting-ton 舞蹈病、Wilson 氏病、多囊肾病)的致病基因被通过定位克隆技术

(positional cloning) 克隆, 而随着转录图中所定位的基因的密度和精度的提高, 定位克隆技术将逐步被定位候选克隆法 (Positional - candidate Cloning) 所取代。

人类基因组计划中还包括若干个模式生物体基因组计划 (见表), 我国重点支持的水稻基因组研究计划似亦可划入这一范畴。模式生物体一直就是生命科学领域研究的基本模型, 加之它们与人类相比基因组结构简单、单位 DNA 长度上基因密度高, 易于基因的识别, 而且从低等至高等的各个模式生物是研究基因分子进化的绝佳材料。各模式生物体之间的比较性研究将有助于人类基因的结构与功能的阐明。对于在整体水平研究基因的功能, 模式生物体更有着无法取代的地位。

### 三、我国人类基因组研究计划

中国是占世界人口 1/5 强的泱泱大国, 有 56 个民族和若干遗传隔离群, 以及众多疾病的大家系, 是研究人类遗传多样性和克隆致病基因不可多得资源。在国际人类基因组计划提出伊始, 我国科学家就给予了热切的关注。80 年代后期, 在国家“863”高科技生物技术领域和国家自然科学基金的支持下, 我国陆续开展了与 HGP 相关的课题研究。继开展作为模式生物体的水稻基因组计划后, 国家自然科学基金委员会于 1993 年批准了题为《中华民族基因中若干位点基因结构的研究》的重大项目, 由国内 19 个实验室共同协作, 标志着中国人类基因组计划的正式开始。我国限于投资强度, 不可能像国外那样全面铺开, 该重大项目从我国的国情出发, 提出自 1994 年到 1997 年的 3 年启动阶段, 完成以下三方面的研究内容。

1. 以永生细胞株和 DNA 的形式, 保存若干具有代表性的少数民族基因组, 同时搜集各民族遗传病家系的样品, 为开展人类遗传多样性研究及致病基因的克隆提供资料。

2. 建立和改进人类基因组研究中的新技术, 其中有包括 YAC 在内的人基因库的引进和构建、基因定位技术 (如 FISH)、染色体显微切割技术、相对大规模 DNA 和 cDNA 测序、生物信息技术等, 目的是建立各种必要的基本技术和数据中心, 并稳定和培养一批从事该领域研究的队伍。

3. 结合我国特点、优势及原有研究基础, 选择若干与人类疾病相关的位点及区域进行结构和功能研究, 力争克隆到一批与疾病相关或具有重要生物学功能的基因。

### 四、基因组研究和人类白血病

Renato Dulbecco 在 1986 年发表于 Science 上的题为《癌症研究的转折点——测定人类基因组序列》的短文中, 提出进行人类基因组研究计划的直接原因, 是要从根本上解决肿瘤分子遗传问题。肿瘤的基因组异常是当代生物学研究的重点之一。作为肿瘤重要组成部分的人类白血病, 则因其取材方便, 易于病理学和临床的观察, 成为肿瘤研究的突破点和主要模式之一。现已明确的白血病细胞基本生物学特征是增殖失控、分化受阻和凋亡异常, 导致这些特点的根本原因在于三大类基因即癌基因、抑癌基因和凋亡基因的结构及 / 或功能异常。有趣的是, 白血病的基因异常与白血病细胞的分化系列以及分化阶段有着密切的关系, 大多数是由于染色体易位, 造成基因结构的变化 (嵌合基因) 或表达的失控。阐明白白血病的基因异常, 不仅对理解其

发病原理，而且也将对其诊断和治疗产生重大影响。

近年来，笔者所在实验室作为我国 HGP 的参加单位之一，在急性早幼粒细胞白血病 (APL) 的分子病理学基础和新型治疗及其原理的研究中取得了若干突破。首先通过对 APL 特异染色体易位  $t(15;17)$  和  $t(11;17)$  的分子生物学研究，发现了由 17 号染色体的维甲酸受体 基因 (RAR) 分别与 15 号染色体的早幼粒白血病基因 (PML) 和 11 号染色体的早幼粒白血病锌指蛋白基因 (PLZF) 所形成的 PML-RAR 和 PLZF-RAR 融合基因。进一步的研究发现，PLZF 基因作为一种转录因子可能涉及细胞生长和分化的调控，在造血生成和神经系统发育过程中有重要作用。对 PML-RAR 和 PLZF-RAR 这两种融合基因的蛋白产物生物学特性进行的研究发现，它们很可能是通过“显性负”作用阻断粒细胞的分化以及凋亡，诱发恶性增殖。 $t(15;17)$  和  $t(11;17)$  易位所共同受累 RAR 基因异常，对 APL 的发病可能是个决定性的因素。

### 五、维甲酸诱导分化治疗的分子机制

传统的治疗肿瘤的细胞毒疗法（化疗和放疗）是针对肿瘤细胞的增殖失控所设计的，由于对肿瘤细胞没有选择性，所以会产生骨髓抑制等严重的毒副作用，而且某些肿瘤对放、化疗并不敏感，因此，在原有基础上，继续寻找新的、更为合理的治疗途径是十分必要的。

1986 年上海第二医科大学附属瑞金医院、上海血液学研究所国际上首先应用分化诱导剂——全反式维甲酸 (ATRA) 治疗急性早幼粒细胞白血病获得成功，成为分化诱导治疗肿瘤的第一个范例。比较性研究发现，ATRA 能够调变 PML-RAR（见于绝大多数 APL）的构型和功能，并诱导白血病细胞的分化，而带有 PLZF-RAR（见于约 1-2% 的 APL）细胞则对 ATRA 无反应。我们认为，ATRA 实际是对 PML-RAR 融合基因及其蛋白产物的靶向治疗，结果是解除其对细胞分化的阻碍。

为了更好地了解维甲酸诱导白血病细胞分化，实现肿瘤细胞发生逆转的机制，需要阐明维甲酸作为配基与受体结合后，通过调控基因的转录表达，在细胞内所启动的一系列事件，而那些受维甲酸调控、在细胞分化过程中至为关键的开关基因，将有可能成为肿瘤基因治疗的靶点。为此，我们应用国际上新近发展的一种分离特异性表达基因的技术——差示 PCR (DD-PCR)，来筛选和分离受维甲酸调控的基因。在此研究中克隆到了一批受维甲酸调控的新基因，其中两个基因即 RIG-E 和 RIG-G 的全长核苷酸顺序已测定，并被国际人类基因组数据库 GenBank 所接受。进一步的研究表明，该两个基因涉及细胞的信号传导。发现更多的受维甲酸调控的基因，将有助于揭开维甲酸作用于白血病的奥秘，并为分化疗法推广至其它人类癌症提供依据。

### 六、砷剂诱导凋亡的研究

大量的研究表明，细胞凋亡受阻在许多人体恶性肿瘤的发生学上占有十分重要的地位，因此采用某些特定的方法和药物，特异性地诱导恶性细胞凋亡，使得这些细胞走向“自杀”之路，可望成为肿瘤治疗学上的新突破。但是，迄今尚未有特异性诱导凋亡疗法治疗恶性肿瘤成功的报道。

最近笔者所在单位与哈尔滨医科大学合作，在对从祖国医学宝库中发掘的氧化砷治疗 APL 机理的研究中，意外地发现砷剂选择性地诱导 APL 细胞凋

亡，并伴随凋亡相关基因 bcl-2 表达下调及 PML-RAR 蛋白亚细胞定位的改变和降解，这个结果显示它在细胞内的靶分子也是 PML-RAR，说明了砷剂选择性地诱导 APL 细胞凋亡的原因。因此，氧化砷通过诱导 APL 细胞凋亡来治疗白血病，可能是单一无机化合物经诱导凋亡途径有效地治疗恶性肿瘤的第一个成功范例。

对白血病和肿瘤的基因组研究，有可能识别出各种恶性细胞中的特异遗传学改变，最终将有可能导致基因和基因产物的靶向疗法，这一疗法与经典的化疗、放疗和造血干细胞移植联合应用，必将能从根本上改善白血病的治疗及预后，造福于患者。

## 七、我国人类基因组研究的概况及对策

我国的基因组研究工作起步较晚，而且是基础差、底子薄、资金少，与国际上这 5 年 HGP 的惊人速度相比，我们的差距很大，并且这种差距有进一步加大的可能。我们认为整个中国生命科学界若在如下几个方面共同努力，也许可能有较大的作为：

表 模式生物体基因组研究概况

生物体	基因组大小 ( bp )	基因数目	基因数/Mb	测序完成年份
流感嗜血杆菌	$1.8 \times 10^6$	1727	960	1995
大肠杆菌	$4.2 \times 10^6$	4000	650	1997
酿酒酵母	$1.5 \times 10^7$	6000	400	1996
拟南芥菜	$1.0 \times 10^8$	25000	250	-
美丽线虫	$1.0 \times 10^8$	13000	130	1998
果蝇	$1.2 \times 10^8$	10000	83	-
小鼠	$3 \times 10^9$	80000	27	-
人类	$3 \times 10^9$	80000	27	2005

1. 尽快收集和利用我国宝贵的多民族基因组资源和遗传病家系材料，并阻止这些资源盲目流向国外。

2. 集中人力、物力和财力，建立互相配套的、集分子遗传学、自动化技术和信息技术为一体的中心，才能卓有成效地开展工作。

3. 依照我国国情和原有工作基础，做到有所为而有所不为，走“短平快”和出奇制胜的道路，直接楔入基因组研究中最关键的部分——基因识别，如走“cDNA 计划”道路，尽可能地克隆一大批新基因，在人类 8 万~10 万个基因中占有一定的份额。同时，由于基因组 DNA 测序是一项劳动和技术密集性工作，如能引进技术，培训一支高水平的技术队伍，完全有可能将人类基因组测序的一部分工作吸引到我国。

4. 充分利用国际基因数据库中已有信息，建立生物信息技术，推进我国基因组研究工作，并在基因组转录顺序的认识及基因功能推测方面多做工作。

5. 多渠道筹措资金，在维护知识产权的前提下开展国际合作。

历史已将中国当代科学家推上了人类基因组计划这一国际合作和竞争的大舞台，他们责无旁贷地要为供养自己的国家和人民负责，为 21 世纪中国的

科学、技术和产业负责，唯有高瞻远瞩地认清当前的形势和不辞劳苦、不计得失地拼搏，才有可能在国际人类基因组计划中占有一席之地，有着交换和分享数据的资本，共同品尝人类基因组这一全人类的“ 圣餐 ”。



# 心血管病的自我保健

陈可冀

中国中医研究院西苑医院

陈可冀 医学家。1930年9月30日生于福建福州。1954年毕业于福建医学院。历任中国中医研究院西苑医院主治医师、副研究员、研究员、心血管病研究室主任、老年医学研究室主任、副院长，中国老年学学会副会长、中国中西医结合学会会长、世界卫生组织传统医学顾问等职。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。他是新中国第一代西医学习中医学者，中西医结合先行者之一。

## 一、现状的严峻性

广义的心脏血管疾病应包括心脑血管疾病。根据世界卫生组织统计，全世界每年因此病而夺走了1,200万人的生命，是全世界最大的流行病。我国随着社会发展和人民生活水平的提高，疾病谱和死因顺位也发生了明显变化。据统计，我国城市居民1994年总死亡率为534.16/10万，其中脑血管病死亡率为129.58/10万（1957年为39/10万）；心血管病死亡率为87.94/10万（1957年为47.2/10万）。我国成人中高血压患者约9,000万人（8961万）。1978~1980年普查结果经人口标化后患病率为7.49%，1991年为9.41%，若将临界高血压计算在内，为11.44%，增加25.6%，新发高血压病人每年300多万人；新发脑卒中病人150多万人，脑卒中幸存者500~600万人，其中75%不同程度丧失劳力，重度致残率达40%，给家庭和社会带来很大负担。

以北京市为例，根据生命统计部门资料，1994年人口总数为10,617,510人，因交通事故死亡为1,062人（车祸）及38人（交通原因受害者），共1,100人。但因心脑血管病死亡数则高得多。全市总死亡数为60,977人，占5.77‰；因病死亡率5.43‰，心血管病死亡数为122.36/10万，脑血管病死亡数为150.16/10万，心脑血管病病死率共为总病死数的47.47%，死亡人数达2.9万人，高于全国的均值。亦即每隔20分钟便有1个人死于脑血管病或心脏病，主要为脑卒中和急性心肌梗死。目前北京市有高血压患者200万人，几乎每10年上升十个百分点，（1957年为7%，1979年为13%，1991年为22%），45岁以上每5人中有1人高血压，60岁以上每3人中有一个。北京房山区对10万农民心血管病普查资料表明，15岁以上人群高血压患病率为15.4%，35岁以上为26.5%，60岁以上为45.0%，有相当的农村代表性。

由于心脑血管病以中老年为多，人口老龄化呈世界性趋势，中国也不例外，所以，这是对中老年人的严峻挑战。美国人心脑血管病死亡者中，65岁以上占72%，冠心病死亡者中80%为65岁以上老年人。中国的死亡数字已接近发达国家水平，脑卒中尤多，与日本相似。以上现状向我们提出了不容回避的现实问题。

## 二、对策的考虑

面对上述严峻的现实，世界上许多国家都采取了干预措施，死亡率有所

下降。世界卫生组织近年公布了 297 个工业化国家的趋势，死亡率呈下降型者有美国、加拿大、日本；中间型者（稳定）有丹麦、捷克；上升型者有匈牙利、波兰等。美国已从 50 年代每年死于此病的 70 万人降低了 40%，原来每年耗资（直接及间接）1,000~1,200 亿美元也已明显减少。

上述国家经验表明，高科技目前仅能解决一部分问题，包括发展冠状动脉及脑血管架桥术，球囊扩张术，溶栓疗法，甚至换心术（心脏移植），但 2/3 以上甚至全部都需靠自我保健的结合。

美国和日本取得一定的成功，主要在于政府和科技界的共同努力。近 20 余年以来，美国政府、食品药品监督管理局、疾病控制中心、农业部、卫生部、精神卫生、酒精及烟草管理部门和国家体育运动部门，先后发布了 10 个有重大影响的决议，教育群众注意饮食结构的改进，重视体格锻炼、心理卫生、戒烟戒酒教育等等，取得进展。

近 10 年，国内外对心脑血管病的病因学、发病因素研究取得了重大进展，从遗传基因调控到社会环境因素，个人后天因素等作出很多阐明，但在很大程度上还是一个“灰色系统”，距离应用尚有时日，如高脂血症，对氧化低密度脂蛋白(oxLDL)过高的家族性高脂血症，以 oxLDL 受体在肝脏植入，已有 9 例，取得近期效果，但问题还不少。从目前情况看，预防着手，自我保健仍应放在第一位。

所以，对策可分两大类：一为人群（防治）策略，一为个体（高危因素控制）策略。

吴英恺院士是我国心血管病流行病学学科的奠基者，他自 70 年代初期就强调人群干预策略，取得了成功经验，他从当时开始就在首钢建立高血压、心脑血管病防治区（点），进行人群干预，高血压管理率达 95% 以上，控制率达 70.6%，1993 年该管理区未发生脑卒中患者。他并组织全国 20 多个省市组织防治点，都有一定进展。作为世界性的 Monica（The Multinational Monitoring of Trends and Determinants in Cardiovascular Diseases）方案的领导者之一，参与多国（28 国，47 个医疗中心）3,000 多万人心血管病人纵向监测的研究，中国共监测 581 万人。各地参加工作的经验也是很好的，贵在坚持下去。

个体高危因素干预策略，主要是针对有高血压、高胆固醇血症、肥胖、以及吸烟者的个体化处理。这些高危因素都是与心脑血管中具有因果关系，独立存在，有预测意义的，高危因素层次越高，发病率也越高。以高血压为例，较之无高血压者中风发病率高约 3~7 倍。

以上两种干预方式应结合进行。预防是可以取得成效的。

### 三、提高自我保健的自觉性

心血管病是头号杀手（great killer），如果人们自己不懂得提高自我保健自觉性，等于当了帮凶，成了自己的敌人，应当相反地使自己成为“医生”。

问题是“病盲”太多。以高血压为例，1991 年 100 多万人的调查数据表明，人们的知晓率（status of people awareness）太低。查出的高血压患者中，仅有 1/4（城市为 36%，农村为 14%）知道自己患有高血压，而且其中仅有不到 1/2 的病人在服用降压药治疗，得到控制的高血压患者仅占全部高血压病人的 1/3。城市情况好一些，这是因为医疗条件和

就医方便，以及接受健康教育机会多些之故。由于高血压未获规范性治疗，使中风患病率明显增多，这就是国外称之为把自己也变成了健康的敌人了。

脑中风的三大隐患是：1. 忽视高血压，不把它当回事，不作治疗；或治疗时不规范，没有做长期用药准备，时用时不用，引起血压波动或反跳；由此导致中风的病例我们见到的太多了。2. 用药不当，用过了头，随意加量，在加量基础上为了睡好觉又加了大剂量安定药，第二天醒来时已是偏瘫的脑血栓形成的身躯，这可称为“与药物有关的自杀”（drug-related suicide）。3. 生活或环境的不良因素诱发，如精神或心理上的不良因素，占 30%~50%，如易激怒、“好斗”等。

实际上，轻症病人用少量降压药，以致于仅用罗布麻片、葛根片、汉防己甲素片等中药，就能安全地降压，中等度以上患者则要用一些其他强度大些的药物，应听从医生指导，并按时监测血压。诸多病例虽未能根治，但却可控制。

又如有些冠心病病人，心电图缺血改变很明显，不听医生指导，认为自己身体还可以，到颐和园爬万寿山佛香阁试试，实为赌博（gambling），结果欲罢不能，为此患急性心肌梗死住进我们医院的，我见过多例，而且是十分类似的例子。这说明病人要有自知之明，提高自觉性，防病于未然。

#### 四、要有一个稳定的精神情绪状态， 要保持一定的自控能力。

养生首重养神，或养性，很重要。不可以动不动就发“雷霆之怒”，我们临床见到不少脑中风病人是因为七情内伤，情绪不节制，血内儿茶酚胺等交感神经介质增多，血压剧升，血管破裂而得病。有的急性心肌梗死病人易激怒，不耐烦，生气，心率加快，心肌耗氧量上升，血小板聚集性增强，导致冠状血管血栓形成而梗塞的。猝死或心脏骤停，也常因强烈交感反应而使心脏电生理紊乱，心室颤动阈值降低而致，作为诱因，高达 40%~50%。顺便说一下，关于健康的定义，应包括躯体和心理两方面的健康，以及具有良好的社会适应状态。

《三国演义》中讲诸葛亮三气周瑜，把周瑜活活气死。人际间关系（同事、亲友、婆媳、夫妇、邻里等等）如何以友好的“和为贵”相待很重要。有的老同志过去“一呼百应”，离退休后“百呼不应”，因为买东西受不了售货员的几句气话，立即气倒，得急性心肌梗死，因心室壁瘤而作手术，耗资数万元；说明了要有自控能力，保持心理平衡。要活得洒脱一些，自得其乐，不要“好斗”（“其乐无穷”？）。清代一东阁大学士阎敬铭有首《不气歌》，写得很好，是实际体会之作：“他人气我我不气”，“倘若生病中他计”，“气出病来无人替”，“不气不气真不气”，这是其中的几句，很好。说明应能拿得起，放得下，少些失落感。当然，现在心理学界也有主张“anger out”的，不主张“anger in”的，我主张要善自排解。

过多的紧张，也不合适，stress-related syndrome 中有一部分血压就高了；会计、统计、电话员等经常接触噪声者，常可导致血压升高。动物实验中，可给犬、大鼠以持续噪声、铃声、刺耳的尖叫声，使其昼夜不得安宁，不几天高血压模型自可形成，便是例子。所以，乐观的情绪，充足的睡眠，知足常乐和超脱的心态是很重要的。“及其老也，戒之在得”；“静胜躁，动胜寒”，不愉快时不妨先静下来。

## 五、一张体力活动处方

缺乏体力活力，会带来很多恶果，首先是肥胖和超重。超重 10 公斤等于平常干什么事都要多背上 10 公斤肉干活，何等累赘！超重和肥胖还给心脏及血管增加一系列负担，肥胖与高血压呈正相关，比不胖者患病率多达 5 倍，与血胆固醇增高也呈正相关。血脂也可升高，贻害无穷。所谓“小孩长骨头，青年人长肉，中年人长腰围，老年人突肚子”，后二者便是缺乏活动所致。

中国人的适宜体重是：身高 (cm) - 105 = 体重公斤数。科学计算的标准体重指数 (BMI) 为：体重 (kg) / 身高 (m<sup>2</sup>)，当然还有计算腰围 / 臀围比值的。

中国人平均 BMI=21，广东人平均 22~23，北京人平均 23.5~23.9。中老年人肥胖者不少为向心性或苹果型的肥胖，需要有坚强的意志来减重。美国由于肥胖人太多 (1/3)，现在有 4,400 万人加入减肥行列。中国有句古话：“流水不腐，户枢不蠹”，“一身动则一身轻”，动以养生是传统医学的一个重要流派，足以使气血和畅。血管韧弹性改善，心脏负担减轻，机体对血压的调节也可改善，这是国际上公认的。

体力活动 (physical activity) 经常化后，可提高体力耐受性 (physical fitness)。通常运动方式有两大类，比较科学的方式为耐力型运动，如散步、练太极拳、快步行走、慢跑、骑自行车、游泳、球类运动等；另一种如举重等属力量型运动，比较剧烈紧张，运动时使收缩压及舒张压均上升，可诱发心律失常或脑卒中或心脏事件，不宜列入日常的、合适的、大众可接受可坚持的运动方式。近年世界卫生组织提倡步行锻炼，认为比慢跑或快跑好，适合不同年龄及不同体格状况者，只要有一双合适的鞋即可，每天走 2~3 公里为好，若能长期坚持，有助于微循环开放。运动量可因人而异，当然以“动而不劳”，不气喘，不发生心绞痛，自我感觉好为宜。有的学者主张运动以达到最大心率 (即 210 - 年龄 / 分) 的 50~70% 为指标，其实这也并不十分精确，因每人基础心率不同；有的人用 受体阻断剂或钙拮抗剂治疗中，也影响了心率的计算。应结合自我感觉选择体力活动量。以运动后心率不持续快，不头痛头晕，不疲劳为好。关于体力活动频度，也有主张每周 3~6 次，每次 1 小时或半小时者，长期坚持，可调节血压。比较年轻的，慢跑每日一次，每次 30~60 分钟，也可以。

每日坚持练太极拳者 (体力差，练半套，1/4 套也可)。广州及上海的一项 5 年随访研究，证明可提高肺活量，握力，并改善睡眠。练静功每日 1 次，每次半小时，意守丹田，有镇静安神作用；我访问印度，听印度学者介绍研究证明做瑜伽 (yoga) 功者可立见血浆儿茶酚胺水平下降，交感神经活力下降，心率减缓，认为有助于调整血压。

我曾见一中年高血压病肥胖患者，体重 160 公斤，我到病房巡诊时，请他坐起来听听心肺情况，他竟口出骂声：“你没看到我能坐得起来吗？”，的确此患者胖得没法起坐，以后此患者死于脑溢血。肥胖作为危险因子是肯定的。高血压和肥胖两个危险因素若并存，脑卒中发生率增多 2.5~3 倍。所以中老年人体力虽减退，但适当活动仍属必要，应忌懒，更应忌“多吃少动” (eating more and exercising less)。

## 六、日常生活中的几件事

基本要求是：作息定时，保持节律；睡眠充足，劳逸结合；不纵恣口腹而饮食有节（请参见七：“合理的膳食，一张食品单”）；遵医嘱按时服药；检查血压、心电图作动态观察；探亲访友也要保持规律生活。

1. 三个“半分钟”。中老年人常有动脉硬化供血不足或椎基底动脉供血不足，或心肌缺血表现，劳累时加剧，突然起床时可加剧眩晕欲倒或卒中。所以，夜间起床排尿或晨间起床，最好实行三个“1/2分钟”办法，即醒后卧床1/2分钟，坐起1/2分钟，起身再1/2分钟，以策安全。

2. 北京人有遛早习惯，这是健身的好习惯，迎着晨曦散步也很好。但冠心病动态心电图所见不少病人早6~12时多有心肌缺血，易致心脏发作，这是人体生物钟节律或劳累性变化的结果。所以，对于不少有病的人来说，有时傍晚散步会更好，微循环也较好开放了，危险性会少些。

3. 老年人应保持每日尿量在1,500cc以上，以保证肾、脑、心的健康，避免血液过于粘稠；若见尿黄而少，应补充饮水量或饮茶量。广东人喜欢饮茶、喝汤，这也许对改善血粘度有益，脑卒中较少，值得借鉴。

4. 高血压病程长，心脑血管靶器官随病程可受损，应记住按时用药，也要避免诊断后的标签效应（labelling effect），负担过重，独立感下降；更应避免甘冒风险不用药。作为个人活在地球上时间不长，要努力提高生活质量，健康工作。

5. 腔隙性梗塞为腔隙部细小穿通动脉闭塞所致，多为高血压所致（75%~90%），直径3~15mm，CT检查阳性率高，一年内再发率为18%，要减少紧张、恐惧程度，避免血管痉挛。

6. 有溃疡病等出血倾向者，不宜用Ticlid或Aspirin，可用中药冠心2号（现名精制冠心冲剂）、复方丹参片等。

## 七、合理的膳食，一张食品单

对于中老年人，尤其是血压高、肥胖、血胆固醇水平高，或有冠心病、动脉硬化者，饮食如何注意，是十分重要的事情。

1. “饮食有节”，这是《黄帝内经》里的句子，很有道理。但也有古人说：“食唯半饱无兼味”，我想七八分饱可以，无兼味恐指不过多零食，当然还是注重杂食为好，营养结构合适。重要的是不宜“塞饱”，热卡过多，食欲旺盛，更易招致肥胖（diet-ing mania make fatter）；腹部脂肪增多，向心性肥胖，一般经验认为似能反映动脉粥样硬化程度。

2. 不少心血管病肥胖人有爱吃肉和黄油的习惯，我曾遇见两位农民心肌梗死，生前是一天可吃下半个猪头肉，外加10余个鸡蛋。这会使血脂升高（每克脂肪氧化代谢可产生9Kcal热量，每克碳水化合物或蛋白质为4Kcal热量，每克酒精为7Kcal热量），所以最好少食用猪肉、黄油和奶油。限制脂肪不仅指过量的动物脂肪，即使食用豆油、菜籽油、芝麻油或玉米油，也不宜过多。

3. 黄油是十分可口的食品，但它和动物内脏及鱼子一样不宜多吃。即使是人造黄油，也以少吃为好。我们原以为人造黄油好，但实际上是由部分氢化的油脂构成，即含有反式（trans）脂肪酸的食油，有害人体。在其双键周围的氢原子位于碳原子的两侧，而一般不饱和脂肪酸则位于同侧（顺式，cis）。不少点心、蛋糕、饼干、炸土豆片也用反式脂肪酸油脂（因不易氧化变质，食品商用它代替动物油）。美国不少吃快餐的人胖得很，因为20%以

上热量来自它（法国人仅 7%），所以尽管正餐吃不多也肥胖，抱怨 We are not big mealtime eaters, but big snackers.

4. 由于心血管病人机体处理脂肪能力下降，所以美国在降低心血管病食谱中，近 10 年全脂奶饮量减少，代之以低脂或脱脂奶，Coca Cola 也有低热量的 Diet Coca Cola；肉类及鸡蛋、鱼子等进食减少，平均 5 个鸡蛋/周，倡导吃蔬菜水果、海产品，我国传统提倡食品当清淡也很合理，有利于人群策略实施。

5. 世界卫生组织资料指出，人群胆固醇血清水平升高 1%，冠心病病死率增高 2%；近年北欧及欧美膳食结构调整后，病死率下降，露出新曙光。我们临床见到冠心病高脂病人抽血检验可见血色为乳糜状，十分惊人。所以每日总脂肪摄入量应在 30% 以下（饱和脂肪 < 10%），胆固醇每天在 300mg 以下为宜，日本、希腊、上海、广东人群血胆固醇相对低，保持平均寿命于世界前列，很可借鉴。1995 年 2 月 AHA（美国心脏病协会）建议主要少吃肥肉、高脂奶产品如奶酪及冰淇淋，但认为完全不吃鸡蛋不合理（因其中含铁和其他营养来源），有冠心病者每周不超过 4 个为宜，超重者少吃。有人认为低胆固醇水平与癌症有关，美国 7 年干预试验注意到，在低胆固醇 1/10 组，即 < 4.4mmol (168mg/dl)，癌症死亡率固比他组高，但死亡率增多主要在头 2 年，随后不再出现，说明是癌症前期使胆固醇降低，并非低胆固醇诱致癌症。

6. 少吃精糖（精制糖）。例如糖果、糕点，因可产生过多热量，没有什么其他营养成分，不宜多吃。我国传统五谷杂粮较好，含复合碳水化合物，但吃太多也不好。中国营养学会推荐：男性轻劳动及极轻劳动者每日总热量为 2400~2600Kcal（其概念为每 500g 米面类可产生 1750Kcal），所以主食一般老人每天不宜大于 5 两。平时不应大吃大喝，或过多零食。当然，厌食以致营养不良也不行。我就见到老年贫血者，其生活条件原本不差。

7. 限制盐的摄入。食盐（其中的钠盐）过多可使 30%~50% 的高血压病人血压上升，这些病人对盐敏感。盐进食过多使血压升高是国际公认的。我国北方人（北京、山西、黑龙江等）口味重，食盐多，13~19 克/日，高血压病人多。南方（两广，江苏）7~8 克/日，患病率少得多。理想的是控制在 2~3 克/日（一般人 5 克/日），约相当于 2 个半小牙膏盖的容量，可减少降压药用量，使轻病人不必用药，减少脑卒中发生。如测定尿钠水平，应 < 360mmol/24 小时尿。具体办法是少吃腌制物（腌鱼、肉、蛋，梅干，火腿，香肠，酱豆腐）。传统先着盐做菜可改为后着盐，同时巧用各种调味品等。

8. 关于烟、酒。吸烟和高血压因果关系有不同意见。但长期吸烟肯定对血管不好，其血管痉挛，心脑血管事件或猝死者增多。饮酒与血压有一定关系，饮用量大与血压增高呈正相关。一般建议至多 < 15 克/半杯白酒/天为宜。中医认为少量饮酒活血，提神；多用则伤神，耗气升高血压。有研究指出，经常吸烟者，冠心病机率增加 30%，经常饮酒者，增加 25%~45%。

9. 一张食品单。

绿茶和乌龙茶：传统认为可提神消油腻。茶叶中除了含 2%~3% 咖啡因对少数人不宜外，多数有益。茶叶中含多种维生素、矿物质，多酚（polyphenol）类化合物。实验及临床证明有保护心血管功能及降脂作用。降低血浆肾素活性，有利于调节血压。传统中医并认为有清热抗炎，通腑泻

浊作用。也有保肝作用（每日不超 10 克为宜，具体有的病人可饮淡茶或浓茶）。

菊花茶：清肝明目。对稳定血管反应性并改善冠脉供血有益处，我院实验研究有同样结论。

芹菜：平肝活血。所含内酯成分芹菜甲素等可通过血脑屏障。电凝动物大脑中动脉致脑梗塞模型，实验防治证明可减少梗塞面积和脑细胞含水量。可生用绞汁服；也可做芹菜大枣煎服，或炒食。有轻度调节血压作用。

黑木耳：活血消滞，舒达筋骨。本品野生，寄生于阴湿木干上，状如人耳，多取自桑、柳、楮、榆；今多栽培于椴木上。水泡煮蒸食用。美国和中国都证明有降脂改善动脉粥样硬化病变功效。

白木耳：可与黑木耳、豆腐同煮食，称双耳。

黄花菜：为金针菜一种，属百花科多年生宿根草本。又名萱草。菜食有利尿消肿预防心悸功用。

大蒜：为含硫化物的混合物，有降脂和防止血栓形成作用，3 克 / 日为宜。

洋葱：含烯丙基二硫化物及少量硫氨，也含一定量 PGA，有舒血管、降脂及预防动脉粥样硬化作用。

燕麦：含极丰富的亚油酸，及丰富的皂甙素，有降胆固醇及甘油三酯及预防动脉粥样硬化作用。

荞麦：大致同上。

玉米：含丰富钙、镁、硒等元素，及维生素 E、卵磷脂；有降胆固醇作用。印第安人患高血压而合并冠心病者少，分析得益于此，减少血管内皮的过氧化。玉米须利尿消肿，有益于高血压患者。

青菜：进食 16 克 / 日以上膳食纤维，可降低缺血性心脏病病人危险性达 25%，且有益于通便。

番茄：含番茄素和膳食纤维，可结合胆固醇代谢物，防止动脉硬化。

山楂：“露水白时山里红”，成熟在白露前后，其果、叶均含黄酮类化合物，有益于心脑血管。传统中医认为具有“活血”、“消肉积”功用。可以 30 ~ 50 克 / 日泡茶用。

鱼：含人体必需的多种不饱和脂肪酸，抑制血小板聚集，降脂，1 ~ 3 次 / 周进食，可降低冠心病的患病率和危险度。

莲子心茶：清心火、安神。其总碱有温和的降压作用。

决明子茶、陈葫芦茶：清肝明目，润肠排浊，对高血压、高脂血症者有益。

海蜇皮及海带：传统认为可软坚散结。对血管结构和功能有益，机理尚待研究。

# 探索脑的奥秘

杨雄里

中国科学院上海生理研究所

杨雄里 神经生理学家。1941年10月14日生于上海。1963年毕业于上海科技大学生物系。1980~1982年在日本国立生理学研究所进修，获学术博士。现任中国科学院上海生理研究所研究员、所长，亚太地区生理联合会副主席，中国生理学会副理事长，中国科技大学、复旦大学、美国贝勒医学院等校兼职教授。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。长期从事视觉神经机制的研究。

人被誉为“万物之灵”，这是因为人具有高度发达的大脑。我们为什么能看到色彩缤纷、千姿百态的世界？为什么能听到悦耳动听的鸟的啼啭和动人心弦的音乐旋律？我们为什么有智力、能思维？为什么又有喜怒哀乐？这既是科学家们久已魂系梦牵的重大问题，又是普通人十分关心的自然之谜。探索和揭示脑的奥秘是当代自然科学面临的最重大的挑战之一。

人类对精神、思维本质的探索源远流长。早在2000多年前哲学家已经开始思考精神的本质，以及精神、灵魂和肉体的关系。柏拉图认为精神必定是处于头颅之中，他的论据是：头颅是圆形，而圆在柏拉图看来是最高几何形式。但是亚里士多德却坚持说，精神处于心脏中，其理由是：温热意味着活力，血液是温热的，而心脏又泵出血液。到了中世纪，虽然相当多的科学家都同意精神来自大脑，但对它如何产生仍然几乎一无所知。法国哲学家笛卡儿的观点在当时很有代表性，他宣称，精神可能居于脑中，但它是一非物质的东西，与头颅中的任何物质都没有关系。

很难确切地判定，从何时起人们真正地从科学的意义上把精神和大脑联系起来，19世纪奥地利科学家高尔（F. J. Gall）可能是较早的一位，他被誉为“大脑生理学的创始人”。自此之后，大量实验证据已令人信服地表明了大脑和精神活动之间密切的、不可分的关系，精神活动即是脑的高级功能。人类对精神、思维本质的认识从此归之于对脑的奥秘的探索。

但是对脑的奥秘的探索并不局限于脑的高级功能，在科学界里，脑与神经系统在许多意义上是等同的，而脑的高级功能与神经系统的许多其它功能又是休戚相关的。感知和运动都是我们进行精神活动的基础，实际上就是精神活动的一部分。因此，所谓探索脑的奥秘就是认识神经系统是如何实现其各种功能，简而言之，科学家们在这场挑战中孜孜以求的目标是：揭示神经系统的工作原理。我们的脑具有 $10^{11}$ 的神经细胞（神经元），大抵相当于银河系的星球数，加上彼此间联系的接点（突触），总数达到 $10^{14}$ 。与这么一个庞大、复杂的系统打交道确实是一场无与伦比的挑战。

## 一、脑的工作特点

让我们先用一个实例来形象地说明脑是如何工作的。阅读是日常生活中一个常见的行为。这个行为包括以下几个组分：首先，我们要感知书本上的印刷符号，理解符号的意义；之后通过眼肌的运动，把眼睛移至下一个句子或段落。为了了解这个行为是如何发生的，自然需要追踪神经信号的传递通



路。在这个行为中，神经信号最初是在视网膜中产生的，由视神经将此信号从眼传至大脑的枕叶（视皮层，感知印刷符号），然后又通过中枢不同部分间的联系把信号传送至大脑额叶（理解信号的意义），转而又通过运动性通路去控制眼睛的运动。这是在系统或神经通路水平对行为的认识。要了解这些系统的工作机理，又必须分析脑中由众多神经元组成的神经回路或神经网络，他们接受和处理信息，彼此间不断地交换信息，是实现神经系统功能的基本单元。进而，每一个神经元都是可兴奋的细胞，是神经信号（神经冲动）的发源地，它们之间通过突触联结起来，或产生兴奋或产生抑制。突触是一个复杂的结构和功能单元，就神经系统中最常见的化学突触而言，上游神经元（突触前神经元）释放神经传递物质（递质）或调制物质（调质）直接或间接地（通过第二信使）与下游神经元（突触后神经元）膜上的离子通道蛋白（受体）相互作用，引起跨膜离子流的增加或减少，这是神经信号在分子水平的表现形式。这样一种分析把行为化解为不同的组构层次，也反映了现代神经科学家在不同层次上对脑的工作原理的探索。当然，从神经活动的真实过程来看，首先是在分子水平上发生的各种事件导致神经元信号的产生和传输，在回路中的信息处理、整合，在不同回路间的相互作用，以及在不同中枢间活动的相互作用和协调，最终产生行为。

## 二、脑科学的重大进展

对脑的探索最初是在神经解剖学和神经生理学这两个传统分支领域中展开的，即通常所说的神经系统的结构和功能的研究。在 60 年代之前，主要的研究工作是在系统和回路水平，大量知识的逐渐积累和详尽的分析促成了这些领域的成熟。在对神经系统的许多通路、回路的组构和工作方式的认识深入到一定程度之后，在细胞生物学和分子生物学急速发展的推动下，神经科学家固有的进取心促使他们不断思考这样的问题：对于神经活动的基本过程，脑的高级功能，神经系统的发育，神经和精神疾患的病因分析和诊治，在细胞和分子水平我们能说些什么呢？既然已经拥有了细胞生物学、分子生物学所提供的强大武器，我们能不能干得更好呢？

研究深入到更微观的层次也是自然科学本身发展的规律使然。在物理学中，这种转变发生得似乎更早一些。1901 年普朗克的量子论标志着从经典物理学对物理现象宏观的描述跨入了对微观物理世界的分析。这一跨越在物理学中激起的宏大浪潮，是物理学成为 20 世纪领头学科的最重要特征之一。现在轮到神经科学了。把对脑的研究推向细胞和分子水平显然是神经科学的最重要的发展趋势。这 30 年来，在细胞和分子水平的重大发现和成果接踵而至，使人目不暇接。

现代神经科学的一个重要目标是揭示神经系统中神经元之间联系的模式。为了达到这一目标，我们首先需要了解神经元是如何对刺激作出反应的。神经元反应的基本形式是电信号，这种信号可以用尖端极细（小于 1 微米）的玻璃微电极刺入细胞内部加以记录，如果在微电极的尖端事先充灌上染料并注入细胞，就能把细胞的形态特征同时显示出来，这样，我们就可能在单个神经元水平上把结构和功能联系起来。用更通俗的语言来表达，我们就有可能了解各种神经元在某种刺激条件下分别在干些什么。细胞内记录和染色技术的迅速发展已经使我们对许多神经回路的组构有了相当细致的了解。视觉系统是一个有代表性的例子。目前，对于光照射时视网膜的各类神经元是如

何活动的，对不同的神经元之间如何通过突触联系起来相互作用对信息进行处理、传递信号也有了大体上的了解。对这些信号传入视觉中枢后，那里的神经元又怎样对信息做进一步加工，形成视知觉已经有了相当深刻的认识。

现代神经科学的另一个重要目标是阐明神经活动的某些基本过程。脑不同部位的神经元形态不同，反应特性迥异，由此产生不同的神经活动和功能。但是，所有的神经活动都有一些共同性的基本过程，这包括：神经元产生信号的机制、突触传递和调制的规律等。这些基本过程的阐明无疑有着普遍的意义。

神经信号的基本形式是神经冲动（即所谓动作电位），它是受刺激时神经细胞膜发生瞬时的离子通透性变化的综合结果。离子在膜内外的交换是通过“离子通道”进行的。虽然“离子通道”的概念已有多年的历史，但其分子实体的鉴定和特性的深入研究是80年代才真正开始的。新的分子生物学方法（如重组DNA技术）使我们对通道结构的认识有了显著的改观，而近代电生理方法（如膜片钳位技术）已使人们能对离子通道功能作直接的、高分辨的观察和分析。

在神经系统中，所有信息处理都涉及经由突触的通讯，因此突触的研究在神经科学中占有中心的位置。突触传递过程的几个侧面都已相当清楚。被鉴定的神经递质已经达40余种，包括氨基酸、胺、神经肽。对突触小泡内递质的合成、维持、释放、调节的分子机制的认识已今非昔比。

在阐明脑的高级功能的细胞和分子机制方面也有重大进展，其中最突出的是学习和记忆的研究。学习是一个过程，记忆是一种状态。不断重复的学习将增加记忆的强度和滞留时间，这种关系是由什么决定的？记忆是否是单一的过程？短期记忆（持续几分钟到几小时）和长期记忆（持续几周、数月，甚至终生）是单一过程还是多重过程？如果是通过不同的过程所实现，二者之间的关系是平行的还是串行的？通过对低等动物（如海兔）简单行为的研究，已经对这些问题回答提供了启示。从目前的研究结果来看，短期记忆和长期记忆的细胞水平的机制似乎是相似的，均伴有神经递质释放和神经元兴奋性的增高，但是在分子水平两者有明显的不同：短期记忆所需要的基因产物是预先存在的，更新较慢，而长期记忆所需的基因产物必须是新合成的。与此相应，在哺乳动物上进一步发现，长期记忆需要通过蛋白的合成来加以存储。近年来，反向遗传学介入了脑的研究，这种方法通过制造定位、定向突变改变细胞的基因型，进而还可以改变小鼠等哺乳动物的基因型以产生转基因动物，这为研究某些基因产物在学习、记忆等过程中的作用提供了有利的条件，已经开始取得显著的成功。

对神经疾患和精神疾患的研究同样反映了神经科学家在分子水平所作的努力。家族性老年痴呆症基因定位的成功是人们经常列举的例子。老年痴呆症表现为记忆力和推理能力进行性丧失，其中1/4病例有明显的遗传倾向。目前对家族性老年痴呆症的基因缺陷定位已获成功，证明系常染色体显性遗传病。这为研究其发病机制、产前诊断和进一步的基因治疗奠定了基础。

### 三、从整合的观点认识脑功能

对神经活动的细胞、分子机制的研究就其本质而言，在哲学上来说是一种还原论式的方法，即把脑的功能“还原”成细胞和分子水平所发生的一些事件。不论从事这些研究的科学家在主观上是否意识到，这种分析合理性的

基础是：神经活动实际上是那些细胞和分子事件的反映。这种观点有其正确的一面，因为一些简单过程往往是自然界复杂性的基础。但是我们脑的功能只是林林总总的这些事件的总和吗？

不妨举一个例来说明，我们的视觉感知中对脸的辨认是一个重要方面，近年来确实已经发现猴大脑中某些区域（如下颞叶）中某些神经元对脸有特异反应的神经元。这是否意味着对脸的辨认即能归结为这种细胞的活动？或者说，能否想象存在着特殊的细胞来处理每一张熟悉的脸，或每一件熟悉的物体？科学家们目前一般不这么认为，一个被广泛接受的观点是：对视觉图像的感知最终需要平行性处理过程，即需要大脑不同区域的神经元的共同活动，它们各自相对于视景（如脸）的某一特殊方面进行编码。质言之，分立的各部分状态可能并不代表整体，重要的是它们之间的关系。这就像一幅照片的情况，单颗银粒并无意义，正是银粒的集合才表示一种视景。

因此，对于脑这个自然界最复杂系统的奥秘的揭示，显然不能完全依赖于细胞和分子水平的研究。这是因为当分子组成了细胞，分子就不是原来意义上的分子；当神经元组成了回路，神经元就不单纯是神经元，更不要说神经元回路最后组织成脑了。这就是说，当一些基本的单元或过程组合或组织起来以后，必然会产生一些各个组分并不具有新的性质。这就是说，把神经活动还原成更低一级层次时不可避免会失去许多信息。既然我们不可能单从羽毛的结构来推测鸟是如何飞行的；既然我们不能从最简单的硅芯片的活动来推测巨型计算机的功能和工作方式，我们又怎么能设想从分析单个离子通道、神经元、突触的性质就能推论脑是如何工作的呢？

因此，完全囿于纯粹的还原论分析，将使神经科学成为跛足的巨人。脑的活动的本质决定了脑研究必然是多层次的、从整合的角度对脑的活动的探索最近正在重新引起科学家们的注意。

神经网络的研究是一个比较突出的方面。基于数学、物理、计算科学、神经科学的协同研究，目前已建立了各类神经网络，其中一些综合解剖和生理学的资料，不仅模拟某些神经过程或功能，重要的是它们的算法也为揭示神经系统的工作原理提供了启示。例如计算视觉的研究已经为阐明视觉系统的图像识别的机理开辟了新途径，也有力地促进了人工智能和计算技术的进一步发展。神经网络的研究目前正在推进到对智力、思维过程的探索，有人提出，思维过程实际上就是不同神经元集群活动的时空模式间相互竞争占领脑的工作空间的过程；在我们的举手投足间思维的动作，表现出达尔文过程的基本原理。

在清醒、活动的动物实施行为（如摄食、饮水）或某种动作和操作（如运动、视觉分辨）的过程中，用微电极记录、分析大脑神经元的活动，并把两者相关起来，是另一个令人瞩目的进展。例如，对运动皮层、脑干核团、小脑等神经元活动模式与行为相关的描述，已使我们对运动发生和执行的神经机制的了解向前跨进了一大步。

新的大脑造影技术的发展为在无创伤条件下分析完整脑的功能特性、区域性相关，以及神经化学的变化提供了新的手段。除了已经进入常规医疗实践的X射线计算机断层造影术（CT）外，正电子发射断层造影术（PET）和功能性核磁共振成像，使人们有可能在无创伤条件下研究受体结合、递质代谢等，不仅能提供静态的信息，也能追踪动态的变化，并进一步与行为关联起来。

#### 四、“脑的十年”和脑研究的前景

鉴于神经科学近年来取得的重大进展，以及这些进展所揭示的广阔前景，科学家们认为对脑的研究正处于关键时刻。在科学家的倡议下，90年代已被命名为“脑的10年”。从目前的情况来看，我们可以对脑研究的发展做怎样的预测呢？

1. 对神经活动基本过程的了解将进一步深入，这些研究的进展不仅是人类认识上的飞跃，也将为癫痫、帕金森氏症、老年痴呆症、精神分裂症等神经疾患提供更有效的治疗手段。例如，目前治疗精神分裂症的药物是阻遏多巴胺对  $D_2$  受体的作用，这些药物虽然有效地改善了行为上的症状，但会产生严重的运动系统异常。目前，运用克隆多巴胺受体位点来作筛选，正在开发选择性阻遏  $D_1$  受体的药物，可以达到同样或更好的治疗效果，又有可能消除上述副作用。另一方面，随着分子神经遗传学的急剧发展，有充分理由预计，在未来几十年内，很有可能确定大多数遗传性神经疾患的未来表达或缺损基因的定位，从而为分析乃至纠正其致命的缺陷奠定基础。

2. 神经系统的发生和发育的研究肯定是一个成果丰硕的领域。在胚胎时期神经系统从无到有，最终形成完整的组构，但是机体一旦成熟，大脑和脊髓的神经联系受损后通常就不能再生，功能也就不能恢复，截瘫就是一个常见的例子。由于对神经营养因子的了解的深入，科学家们正在逐渐创造条件，应用植入胚胎组织和其它方法，导致新的神经联系的建立，从而为神经系统的恢复展示了有希望的前景。

3. 对神经信息处理机制的深入分析将导致计算科学发生重大变化。脑可以看作是一种平行信息传输机构，它比传统计算机具有极大的速度优势，又是容错的，可以长期持续地工作，它的分布式存贮信息的方式可使各部分信息的存取极易进行。这些特点正在为计算科学家提供启示，而新的神经计算机的诞生已为此作了最好的注解。

4. 对于脑的高级功能，诸如感知、运动控制、记忆、思维、语言、情绪等的认识，科学家们正期待着某种突破。应该说，这是在探索脑的奥秘的挑战中，人类显得最无力的，而这又正是这场挑战的终极目标。从根本上来说，对于由细胞和分子水平上的事件为基础的局部神经网络，如何组装起来构成庞大而复杂的脑，并实现上述的高级功能，人类在理论上只有模糊的想法，也缺乏有效的研究手段。例如，语言能力是人类特有的高级功能，但对于语言的中枢表象我们还陷在迷雾之中，甚至对如何应用适当的方法入手来研究问题也缺乏头绪。问题的实质是，我们必须发展新的方法，探索新的思路，去揭示由大量神经元组装成的功能系统的设计和工作原理。这虽然并非是完全未经开垦的处女地，但确实是一片难于涉足的茂密的原始森林，许多科学家预测，在真正意义上的突破可能就发生在对这片森林的开拓之中。

\* \* \* \* \*

人们探索自然已经走过了漫长的历程，现在人们正在认识自身。我们正在从事的探索是关于“认识主体”的研究，说得更形象些，我们正在用自己的大脑认识脑本身。这个任务具有高度的复杂性以及蕴涵的深邃的哲理，已经“引无数英雄竞折腰”，并将吸引更多的科学家为之而献身。有一个时期，不少人曾经对“用脑认识脑”表示怀疑，它们经常引用的一则比喻是：“人能手拉着自己的头发脱离地球吗？”现在看来，神经科学家们干得不错，

他们的研究所取得的进展是史无前例的，他们做出的新发现不断地粉碎陈旧的思维定势所设置的藩篱，例如，人们常说：“感知是客观世界的映象”，这在某种意义上当然是正确的，但近年对视觉的研究表明，这一论断不够全面，它忽视了一个基本的事实：视觉是作为一种主动过程进行运作的。这种认识的深化将对社会的发展产生不可估量的影响。但是，这决不意味着我们已经逼近认识的终点，我们甚至离看到终点都还有遥远的距离，不过我们可能正在接近一个良好开端的终结期。神经科学正日趋成熟，“路漫漫其修远兮”，神经科学家们在探索脑的奥秘的征程中还将“上下求索”。

# 地球物理与经济建设

刘光鼎

中国科学院地球物理研究所

刘光鼎 海洋地质、地球物理学家。1929年12月29日生于山东蓬莱。1952年毕业于北京大学物理系。历任矿部海洋地质调查局副总工程师，同济大学海洋地质研究所所长、教授，地矿部海洋地质司副司长，石油地质海洋地质局副局长，中国科学院地球物理所所长，中国海洋学会副理事长，中国地质学会石油地质专业委员会主任，中国地球物理学会理事长。1980年当选为中国科学院（学部委员）院士、第三世界科学院院士。主要从事地球物理勘探，应用综合地质地球物理方法研究海洋地质、石油地质和大地构造等工作。

## 一、地球物理是研究地球的高科技

地球物理是应用物理学（力、声、光、热、电、磁与核变）的理论、方法和技术，对地球进行宏观与微观的观测研究，以认识地球及其内部结构、运动和各种动力学过程。

经过半个多世纪的探索和实践，地球物理学已形成重力学、地磁学、地电学、地震学等多种分支学科，而由于近代工业发展的需求和导向，促使地球物理的应用研究飞速进步，并形成重力勘探、磁力勘探、地震勘探、电法勘探，以及放射性测量和遥感等多种实用技术。应该说明，现代地球物理发展的特点之一，就是迅速而广泛地采用各种科学技术的最新成就，不断地提高勘探精度、扩大应用领域，使之不仅能在固定台站上进行连续观测，大多还能在陆地的地表、井中和巷道里作可移动的观测，甚至可以通过各种运载工具在深海、大洋里，以及在不同高度的空间环境中采集数据。此外，采用高速大容量电子计算机进行各种数据处理，采用人机交互工作站进行资料解释，使地球物理能为研究地球提供定量的内部结构，动态地模拟其中的动力学过程。因此，在地球科学研究中，地球物理被认为是探查地球内部结构的高科技，具有先导作用。

### 1. 重力与重力勘探

地球的重力是地球质量在地面上的引力与地球自转所产生离心力之和。重力学是研究重力在地面上的分布，从而为大地测量学的基本问题——地球形状的研究提供资料。实质上，重力观测就是对重力加速度值的测定，它有绝对测量与相对测量两种，而以后者应用最广。相对重力测量仪器，其精度已由毫伽级发展到微伽级，可以满足各种比例尺观测的要求。小比例尺的宏观重力观测，例如在卫星运行中采集重力数据，主要与地球形状和地壳深部构造有关；而精细测量给出重力场的微观变化，则与地壳内密度不均匀性有关。

将观测重力值  $g$ ，经过地形高程校正  $g_h$ ，换算到海平面（大地水准面）上，再减去海平面上的重力值  $g_0$ ，就得到空间（Free air）重力异常  $g_f$ ：

$$g_f = g - g_0 - g_h$$

它在海洋地区内得到广泛应用。在大陆地区内，还需要经过中间层校正  $g_m$ ，即去掉中间层质量的影响，而得到布格（Bouguer）重力异常  $g_b$ ：

$$g_b = g_f - g_m$$

这两种重力异常值在平面上展布所得到的重力异常图，分别与海陆地壳中的密度界面（ ）有关，从而可以勾绘出地壳不同层位的构造起伏。此外，根据均衡假说，还可以经过校正求出重力均衡异常  $g_i$ ，给出地球内部质量分布的状态：盈余、亏损，还是均衡。

## 2. 地球磁场与磁力勘探

地球具有磁场。在地磁台站上观测地磁要素，可以发现，其磁化强度和方向因地而异，甚至还随时间而变化。地磁场的场源及其长期变化是地球内部原因引起的，也许来源于核幔边界，甚至处于地核之内。地磁场的瞬时变化则是地球外部原因所致。因此，瞬变磁场的分析研究关系到地球的电磁空间环境，其中磁暴、极光与气辉、太阳风以及大气层的物理性质，是和通讯、导航、航天活动紧密相关的。古地磁学通过岩石样品的剩余磁性测量来追溯地球磁场的历史，建立地磁转向时标，给出大陆的极移曲线，为大陆漂移提供证据。

现代高精度磁测，使用质子旋进式或光泵式磁力仪，可以在地面上观测，也可以拖曳于载体的后面，在海洋上或不同高度的空中采集数据。将观测值  $T$  减去正常磁场值  $T_0$ ，就得到地磁异常值  $T$ ：

$$T = T - T_0$$

地磁异常与地壳上部岩石磁化率 分布不均匀性（ ）有关。将地磁异常带曲线与平面图进行推断解释，可以发现断裂带，并为寻找金属矿床提供重要线索。

## 3. 大地电场与电法勘探

地球具有自然电场。大地电场是变化的。研究大地电场给我们一个启示，将直流电或交流电输送到地下，可以形成人工电场，再在不同位置上设置的电极测量此电场的分布，进而了解地壳，甚至岩石层的结构及其电性参数，因为地电场异常值是 与地下岩石电阻率分布不均匀性（ $\rho_k$ ）直接相关的。

由于输入电流的强度和频率不同，电场观测中供电电极与测量电极的布设方案不同，电法勘探有多种形式，从而也有不同的勘探能力，应根据任务规定所要解决的问题进行选择。一般地说，金属矿床与其围岩之间有明显的电性差异，交、直流电法都可以发挥良好作用。电阻率层析成像适于在矿井、巷道中对矿体作精细研究，而电磁波层析成像大多在井间测量。大地电磁测深能够对岩石层深部电性不均匀性提供重要信息。

## 4. 地震学与地震勘探

地球上经常发生地震，其中有些会造成严重的灾害，使人民的生命、财产，甚至整个城市毁灭于顷刻之间。因此，人类一直关心地震，研究地震的震级、烈度和能量，观测地震，并企图预测地震。但是，地震也给我们带来大量地球内部的信息，通过地震波传播建立起走时表和速度 - 深度曲线，可以了解地球的分层性，以及密度、压力、重力和弹性常数的变化。

地震波在地球介质中的传播，有体波和面波之分。体波有纵波（P）和横波（S）两种，都是在介质内部传播，只是质点振动方向与传播方向一致的为纵波，相互垂直的为横波。体波遇到地震界面会产生反射和折射，并有波型

的转换。面波则主要与地质界面（如作为半空间的地表）有关，距离界面越远，面波能量的衰减越大。但不同波长的面波有不同的穿透深度，所以，研究面波频散曲线可以给出岩石层的速度结构。

地震勘探利用人工方法（炸药和非炸药震源，如空气枪和可控震源等）激发地震波；再用速度或加速度传感器接收自地球内部反射或折射回到地表的地震波，经过模数转换和瞬时浮点增益，记录到数字磁带上，完成地震勘探的野外数据采集。目前广泛应用的是反射地震方法。为了提高地震能量，压制干扰，在野外工作时，大多采用共深度点叠加技术（Common Depth Point）。地震数字磁带需要使用电子计算机解编、滤波、偏移、叠加等项处理，自动绘制出地震反射时间剖面，作为采集的成果。

应该说明，地球物理发展到今天，电子计算机的应用是极其广泛和普遍的。反射地震法如此，其它重、磁、电法也都应用计算机处理所采集到的数据，并用工作站的人机联作方式反复进行资料解释。

应用反射地震的时间参数（运动学特点），可以对沉积层中界面作构造研究。现在还可以利用动力学特点（振幅、频率、相位、速度等）作岩性研究。例如，根据时间剖面中的地震相，来识别沉积相，判断沉积环境，甚至作层序地层学研究，以寻找地层岩性圈闭。

在地震成象技术中，对地震波作密集观测，可以取得速度参数的层析成象（Tomography）给出地质体的三维结构。此项技术既可以使用可移动的三分量台站研究造山带和盆地，又可以使用检波器在井中、巷道中对矿体作精细探查。

#### 5. 热流

在海底未固结的疏松沉积中，测量不同深度上的温度梯度，可以求得现代热流值。在钻孔中，通过测井，可以取得古热流值。热流测量的关键在于热传导率的确定，并应排除测量过程中的各种干扰因素。如果我们能够取得充分的热流数据，则对地球的认识将会迈进一大步，其中包括对地球热历史的了解、放射性元素的迁移以及地幔对流等重大地球物理问题的解决。

#### 6. 放射性

放射性同位素的裂变为岩石地层提供了绝对记年，并将其时标延展到显生宙以前的地质时期，甚至可能建立起地球的年龄。在地表、井中测量放射性，其异常将为寻找铀、钍等放射性矿床提供指示，并为环境保护服务。

#### 7. 遥感及其它

在卫星、飞机等载体上进行遥感测量，包括光学的、放射性的，能够监测环境，也能给出与油田和金属矿床有某种联系的异常分布情况，只是它们的成因仍在探索之中。

总之，地球物理方法是多种多样的，其解决地质问题的能力既广泛又不同。应该而且必须采用多种地球物理方法去解决同一个地质任务，因为任何一种地球物理方法都是以一种岩石物性为依据的，对于地质体，它仅只能给出一个侧面的认识，而不是全貌。只有综合应用各种地球物理方法，使它们的解释结果相互补充、相互印证，才有可能取得比较全面的认识。此外，任何地球物理方法的反演（解释）问题都是多解的，也只有通过综合地球物理研究，特别是与地质的紧密结合，增加约束条件，才能提高求解反演问题的收敛速度，使解答逼近于真实。



## 二、地球物理的应用

地球物理有着极其广泛的应用领域，能够而且应该很好地为国民经济建设服务。

傅承义教授曾经明确地指出，地球物理的任务是：资源勘探、环境保护、灾害防治，以及认识地球。其中认识地球是基本问题，属于基础研究，而前三者则是地球物理的主要应用领域，具有重要的社会效益。

### 1. 资源勘探

我们必须大力寻找并开发能源（石油、天然气、煤炭、地热等）、金属（金、铜、铀等）和非金属矿床，以满足国民经济建设的需求。

#### （1）石油和天然气

我国现已年产原油 1.4 亿 t。但已探明的油气地质储量还不能保证开采的要求；天然气产量在油气比例中仅占 2%，还低于一般水平；而油气的采收率太低，只有 30% 左右，大部分油气资源仍残留于地层之中。

油气资源存在于沉积盆地中，并受地球动力学条件的制约。为此，首先应用地质、地球物理方法，在整体上查明盆地的构造史和沉积史，再用电子计算机对盆地的沉降史、热史、生烃史和运移聚集史进行定量的动态模拟，评价盆地的油气潜力，部署油气勘探。例如，面积 56 万  $\text{Km}^2$  的塔里木盆地，估算其油气资源已超过 100 亿 t，但迄今止，只找到 3 亿 t 的储量，显然不仅应重新考虑勘探部署，而且应在寻找构造圈闭的同时，大力开展层序地层学研究，寻找隐伏的地层圈闭。

提高油气采收率的关键在于详细地描述油气储集层的结构，具体了解其孔隙度、渗透率和含油饱和度等多种岩性参数，并对油、气、水的活动进行动态监测，为开采提供依据。

#### （2）煤炭资源

我国有丰富的煤炭蕴藏，估计其储量可达 1.44 万亿 t，占世界煤炭总资源量的 13%。现年产量达 10 亿 t，列世界前茅，而采收率仅为 32%，有些中小煤窑甚至低至 15% ~ 25%。这样，提高煤炭的可采储量，并解决煤田开采中的一系列问题，如陷落柱、老窑水、瓦斯气等，都很迫切，尤其是在机械化综采中。

应用现代地球物理技术，如高分辨率反射地震、微伽重力、高精度磁力和可控源音频电磁测深（CSAMT），可以在地表查明煤层的埋藏深度与产状、煤层厚度变化及其分叉，以及断层展布及其落差等；也可以在巷道中进行地震波与电阻率层析成像，提供精细三维结构及其中大小断层、陷落柱和采空区的位置。

#### （3）金属与非金属矿床

国家经济建设急需的矿种，如金、铜、铀等。目前大都处于“等米下锅”的状态，甚至需要依赖进口。现在地表出露与浅部易于寻找的矿体多数已被发现并开采，以致找矿难度日益增加。因此，当前的任务是“攻深探盲，寻找隐伏大矿”。这就必须在地质成矿理论的指导下，通过地质、地球物理和地球化学方法取得资料，探索其区域标志和大地构造成矿作用，深入认识大型矿床的特殊成矿背景，成矿作用，及其时空演化规律，为探矿工程提供科学依据。

地球物理方法中，遥感、重力、磁力和多种电法，结合放射性和地球化学方法，从不同角度提供信息，以综合研究深部隐伏矿床和盲矿体的存在。

## 2. 环境保护

当今世界正面临资源、人口、粮食和环境四大危机。它们直接威胁着社会进步和人类生存。我国由于城市数量、规模和人口的增长，环境污染日益严重。此外，水土流失、草原退化、森林破坏，使生态环境恶化，而工业废弃物和垃圾堆放、烟尘、废水、废气的排放，又人为地加剧环境的恶化。地球物理应该能够从光、热、电、磁等物理场的变化来认识环境变化过程，并进行监测，或对放射性、二氧化碳等有害物质进行快速测量，为环境保护提供背景场资料。

饮用淡水的短缺，是环境中的一个重大问题。过去曾采取许多重大措施如南水北调、引黄工程、多个水库的兴建，都是企图解决淡水资源问题。同时也应用了地球物理方法寻找并开发地下水。

## 3. 灾害防治

自然灾害往往使环境发生突然的变异，极大地威胁着人类的生命安全，造成严重的经济损失。为此，在 90 年代里推进“国际减轻自然灾害十年计划”，希望通过全体人类的努力，对自然灾害的减轻和防治作出贡献。

中国的自然灾害是十分广泛的。气象变异能够导致旱涝、霜冻、冰雹、寒潮、暴雨、暴风雪、龙卷风和热带风暴等。地震会引起和诱发房屋坍塌、城市大火、地裂沙涌、水库决堤，以及海啸、山崩等，地质上常见的灾害有：崩塌、滑坡、泥石流、水土流失、土地退化（盐碱化、沙漠化等）、地面沉降、火山喷发。此外，还有洪水泛滥、江河决堤，以及海洋上出现的风暴潮、赤潮、海冰、海水入侵和回灌等灾害。其中破坏力最大、危害最严重的应是洪水和地震，其次则是旱涝、森林火灾、滑坡、泥石流等。

中国历史留下了许多关于洪水泛滥的记载，也留下了大量地震现象的描述。抗御洪水，我国已经取得修建堤坝和疏浚江河两方面的经验，现在更要结合航运交通和水电开发作全面考虑。地球物理不仅应积极地在其前期工程（基础调查、边坡等）中服务，更应为消除堤坝中的隐患作出贡献。

地震预报是造福人类社会的崇高事业，但是，虽然经过长期的探索，始终还是没有找到一条行之有效的临震预报方法。在全球构造理论的指引下，通过全球覆盖的、地区性的地震台网，以及根据需要布设可移动的地震数字台站来研究大陆板块内部的震源机制、地球内部结构与深部过程，来认识地震的成因机制及其孕育过程，探索地震长、中、短期预报方法，仍是具有基本意义的。

至于森林火灾、火山喷发、旱涝灾害以及滑坡和泥石流等，地球物理也应积极地投入工作，至少应对它们的监测提供手段。

## 三、地球物理要为国民经济建设服务

地球是地球科学研究的对象，也是地球物理的天然实验室。它通过野外观测、数据处理和资料解释，可以取得对地球结构及岩石物理性质的成果。如果使地质、地球物理与地球化学相互结合起来，综合研究，作高层次的理论探索，能够深化对地球的认识，协调人类社会与自然之间的关系，为国民经济建设服务。

地球科学在本世纪内已经形成体系，建立起全球大地构造理论，并要求地质、地球物理和地球化学进行综合研究，以深化对地球的认识，并为资源勘探、环境保护和灾害防治服务。地球物理作为地球科学的高科技，无论是

仪器装备，还是技术方法都有了长足的进展，特别是计算机的广泛应用，不仅提高了勘查能力，而且极大地扩展了应用领域，可以并应该为满足社会经济发展的需求作出更多的贡献。

中国的国民经济建设规模宏大，领域广阔，发展迅速，同时也对地球物理提出了更高、更广泛的要求，其中有些甚至是从从来没有遇到过的难题。这既是挑战，又是机遇。地球物理学必须积极地投入国民经济建设主战场，参与竞争，主动地迎接挑战，用创造性去开拓新领域，解决新问题，并谋求发展。

应该看到，中国大陆岩石层的形成、结构及其动力学过程，对资源分布、环境变迁、地震灾害和气候变化的影响，不仅关系到国计民生，而且受到国内外的瞩目。用综合地质、地球物理方法，特别是深地震的反射技术，来研究造山带和盆地的演化史，建立中国大陆岩石层地球动力学体系，对于世界地球科学和中国经济建设都有理论指导意义。

此外，地球的浅层（深度在 0~1000m 范围内）是和国民经济建设关系极其密切的，例如，地下水资源、各种金属与非金属矿床、生物气和部分天然气，以及水利、电力、铁路、交通、航运和国防所要开发的隧道、堤坝、港口、码头、地下和 underwater 电缆、管道的敷设等工程项目，都在这个深度内。只要能够开拓出浅层地球物理工程，来具体地解决这些问题，就可以和众多的国民经济建设部门发生联系，为他们服务。常规地球物理方法和技术固然能对浅层工程问题给出某些结果，但无法回避不均匀性所带来的难题，更必须按照工程项目的要求或任务，接受检验。因此，浅层地球物理工程必须创造性地建立适用于浅层不均匀性的理论，采用相应的现代化仪器设备，因地制宜地选择工作方法，并结合地质资料，切实地解决多种实际问题。

开拓浅层地球物理工程，将会使地球物理适应市场经济，求得进一步发展，展示出美好而广阔的前景。

# 对地观测新技术与社会可持续发展

李德仁

武汉测绘科技大学

李德仁 航测、遥感与地理信息学家。原籍江苏镇江,生于江苏泰县。1963年毕业于武汉测绘学院,1981年获该校硕士学位。1985年获联邦德国斯图加特大学博士学位。武汉测绘科技大学教授。1991年当选为中国科学院院士(学部委员)。1994年当选为中国工程院院士。主要从事高精度摄影测量定位与测量系统的可靠性研究,并取得多项重要科研成果。

## 一、对地观测技术与 当今社会发展基本问题的关系

叶笃正院士在中国科学院第六次学部委员大会上论地球变化时指出:“自地球诞生之日起,它的环境就在不断变化。到现阶段,人类赖以生存的环境是由地球的大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈支持着。在这几个圈的非常复杂的非线性相互作用下,人类生存环境继续向前演变。”“自然界引起的地理环境的变化是双向的,即变坏之后,还会变好。而人类影响则是单向的。”从最近几个世纪的历史看,人类活动对地球环境的影响主要是向变坏的方向发展。随着世界人口的急剧增加,造成资源的大量消耗、生态环境的恶化这已是全世界有目共睹的事实了。例如化石燃料的燃烧,能源的过度使用,反刍动物的大量饲养和水稻的大量种植等等,大大地增加了大气中温室气体的含量,从而影响了气候。再如农业、林业和各种土地利用,工业活动,废物处理中的对自然的破坏污染,严重地影响了陆地以及沿海的生态系统,进而引起了动植物生产力,水资源和大气化学的变化,这些变化又直接地造成酸雨和平流层臭氧含量的减少,给人类带来严重的危害,因此可以概括地讲,人口、资源、环境和灾害是当今人类社会所面临的四大问题。为此全世界各国首脑在1992年曾会聚巴西里约热内卢,专门讨论全球的环境与发展问题。

当代地学研究和应用的目的之一就是要协同各个学科的科学家和政治家来科学地回答和解决这些问题。1993年中国科学院地学部提出了“上天、入地、下海——地学新技术新方法研究应用问题”:上天,即要利用现代航天技术从更高的角度观测地球,搜集各种反映地球和整个宇宙变化的数据;入地,是向地球内部深钻,取得地球内部物理和化学变化的数据;下海,则是走向海洋深度去取得从海面到海底的有关海洋的物理过程、生物过程以及洋流、环流等多方面的数据,将这些数据综合起来进行分析研究。这是一条用现代化技术手段全方位深入研究地球的道路,也是研究和解决上述四大问题的一个关键。

对地观测新技术主要指卫星通信技术、空间定位技术、遥感技术和地理信息系统技术,这些技术的集成将使我们有可能源源不断地、快速获取地球表面随时间变化的几何和物理信息,了解地球上各种现象及其变化,从而指导人们来合理地利用和开发资源、有效地保护和改善环境,积极地防治和抵御各种自然灾害,不断地改善人类生存和生活的环境质量,以达到经济腾飞

和社会可持续发展的双重目的,这也是党的十四届五中全会和“九五”与 2010 年发展规划对全党全民提出的要求。下面简要介绍现代通信技术、卫星定位技术、遥感技术和地理信息技术的最新成就和跨世纪的发展特点,并探讨这些技术的社会公益性和创造市场经济价值的前景。

## 二、信息革命与信息高速公路

本世纪 50 年代以来,一场信息革命的浪潮席卷全世界。以电子计算机的发明为标志的第一次信息革命,开始形成信息产业。1990 年,世界信息产业的产值已达 1489 亿美元,到 90 年代中期,即最近一两年内将突破 1 万亿美元,成为跃居传统产业(包括工业和农业等)之上的最大产业。现在,发达国家信息产业的产值占国民经济生产总值的比重已达 40%~60%,年增长率是传统产业的 3~5 倍。

以微电子技术、空间技术、信息技术和现代通讯技术相结合为特征的第二次信息革命,是一次深远的产业革命。工业革命是用蒸汽机,及后来的电力机械代替畜力、体力劳动。而现在的信息革命,是用信息和计算机化的智能并入整个社会的生产、管理、服务和生活系统,改组现有的全部社会产业构成。所以它对社会经济、政治、军事、文化等一切方面所产生的影响,将比上一次工业革命更加巨大。

“想要富,先修路”。工业革命过程中,以高速公路为代表的现代化交通,起着十分关键的作用。今日,在冷战结束之后,国际竞争热点从军事转到经济和科技,能大幅度提高综合国力的信息高速公路,自然成为各国竞争的焦点。例如,美国作为信息高速公路的首倡者,实施信息高速公路计划的第一步目标,是到 2000 年将现有的生产率提高 20%~40%,带来 35000 亿美元的经济效益。

所谓信息高速公路(Information Super Highway)是建立一个能够给用户大量信息,由通讯网、计算机、数据库及各种日用电子设备(包括多媒体技术)组成的完备网络。这一巨大网络就好像现在运营中的地面高速公路,但它是用光缆、微波站和通讯卫星将通讯网、计算机网和有线电视网连接、延伸和扩展,使之遍及整个国家乃至全世界。同时运用数字化技术和光纤通讯技术,成千上万倍地提高信息传输能力,通过集电话、传真、电脑、电视、录像等为一身的信息处理、传输和显示的多媒体(multimedia),将文字、声音、图形和影像等高密度信息,以高速度、大容量和高精度传送到每一个家庭、办公室、实验室、图书馆和医院,为人们提供声音、数据、文字、图形和影像的交互式多媒体服务。

信息高速公路计划始于美国,美国副总统阿尔·戈尔(即美国州际高速公路倡议人阿尔伯特·戈尔之子)于 1991 年在《全球信息系统将促进发展》一文中提出的,克林顿总统于 1993 年 2 月以《国情咨文》形式在国会发表报告,正式提出美国决定建设“信息高速公路”——国家信息基础设施(National Information Infrastructure,简称 NII),以此作为产业发展的基础,带动新学科和交叉学科发展,形成高新企业群,提高生产率,增强国际竞争能力,促进经济腾飞。为此,美国将为整个信息高速公路工程耗时 20 年,总投资达 4000 亿美元。目前已在运行的 Internet 网,可以看作是信息高速公路的雏型。

我国完全必要和可能建立中国国家高速信息基础设施(Chi - na

National Information Infrastructure, 简称 CNII), 目前已经具备了“起步”的基础。国家公用电信网、包括干线光缆网已经有了一定基础和规模, 以它为基础, 估计需投资 1500~2000 亿美元, 可望在 2020 年左右建成覆盖全国国民经济和社会生活各主要领域的、门类齐全的 CNII, 即建成中国的信息高速公路。“九五”期间将投入数亿元, 先建设中低速信息网, 即“金桥工程”。

### 三、空间定位技术的发展趋势

这里主要指全球定位系统 (GPS) 技术的发展。

80 年代以来, 尤其是 90 年代以来, GPS 卫星定位和导航技术与现代通信技术相结合。在空间定位技术方面引起了革命性变革, 用 GPS 同时测定三维坐标的方法将测绘定位技术从陆地和近海扩展到整个海洋和外层空间, 从静态扩展到动态, 从事后处理扩展到实时 (准实时) 定位与导航, 从而大大拓宽它的应用范围和在地信息产业中的作用。

根据国内外实践表明, 用不同的作业和处理方法, GPS 可以达到各种要求的精度。利用 C/A 码的广播星历, 伪距法单点静态定位精度可达到  $\pm 15 \sim 20$  米, 静态伪距差分可达到  $\pm 2 \sim 5$  米精度。

美国军方从 1993 年底开始采用 SA 政策将卫星轨道参数广播星历从 25 米降到 100 米 (技术), 同时对卫星的基准频率 (10.23MHz) 施加高频抖动 (技术), 此外还采用 AS 政策, 将原来 L2 频率的 P 码改为 Y 码, 使用户无法接收精码。为此, 各国发展了广域差分 GPS 技术。所谓广域差分 GPS (WAGPS) 系统, 是通过设在已知坐标点的一个主站和几个副站对 GPS 卫星进行同步观测, 从而求出 GPS 观测值中的卫星星历误差改正、卫星钟差改正及电离层时间延迟改正, 并将这些改正值传送给所有用户站, 从而大大提高实时差分的精度, 使之达到  $\pm 1.0$  米之内, 而且差分距离可由 100Km 增加到 1000~1500Km。在未来 5 年之内, 各国 (包括我国) 可望建成广域差分 GPS 网。

载波相位差分 GPS 还可以提供更高的相对定位精度。利用设在地面参考点上和飞机上的 GPS 接收机进行载波相位差分测量和自动空中三角测量, 可以满足各种比例尺空间数据库要求, 在小范围内可以达到厘米级精度。星载 GPS 接收机, 测定在轨及其垂直方向的位置精度  $\pm 10$ m, 而高度的测定精度为  $\pm 15$ m。美国航天局与法国国家空间研究中心于 1992 年联合发射的 Topex / Poseidon 海洋测量卫星上利用星载 GPS 接收机和微波测高仪, 以求获得海面地形测量达到  $\pm 10$ cm 的高精度。

接下去的发展是卫星全球导航、定位、通讯三位一体系统, 即卫星全球导航 / 移动通讯系统, 从而在“信息 + 经营 = 财富”的全球经济剧变中, 将整个世界收缩为一个崭新的电子地球村 (Electronic Global Village)。

### 四、未来 10 年中的遥感对地观测计划及其特点

随着计算机技术和空间技术的发展, 卫星遥感和卫星定位技术经历了 30 年的发展和进步, 目前将进入一个能快速、及时提供多种对地观测海量数据的新阶段。

遥感 (RS) 图像的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率都有极大的提高。利用 CCD 阵列传感器, 可望达到 1m 分辨率, 军用甚至达到 10cm。带侧

向倾斜的一行 CCD 影像只能提供由两个轨道上获取的立体像对；利用二行或三行 CCD 阵列可由同一轨道上获取几乎无时差的立体像对；可任意旋转  $45^\circ$  的一行 CCD，则可提供同轨或异轨立体像对。成像光谱仪可以达到  $5 \sim 10\text{nm}$ （纳米）的光谱分辨率，如 EOS 地球观测系统计划中装有  $0.4 \sim 1.04 \mu\text{m}$  的 64 波段中分辨率和  $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$  的 192 波段高分辨率成像光谱仪，从而获得影像立方体的丰富图谱数据。微波遥感，尤其是合成孔径雷达，可以包括 L 波段（ $24\text{cm}$ ）、C 波段（ $5.7\text{cm}$ ）和 X 波段（ $3.1\text{cm}$ ）和四种不同极化方式，以解决阴天、雾天、雨天下的遥感信息获取。各种不同空间分辨率传感器具有不同的时间分辨率。如 METEOSAT 每 30 分钟即可获得同一地区图像，NOAA 气象卫星每天收到二次图像，EOS 重复周期为 1~3 天，ERS - 1 为 3 天，陆地卫星为 16 天，MOS - 1 为 17 天，SPOT 为 26 天，印度的 IRS - 1 为 22 天，日本的 JERS - 1 为 44 天。

未来的卫星遥感计划将尽可能地集多种传感器、多级分辨率、多谱段和多时相为一体，并与 GPS、惯性导航系统（INS）、激光测高及激光断面扫描技术相集成，形成智能传感器。

合成孔径雷达，除了全天候、影像纹理信息丰富外，还有另一个引人注目的是雷达干涉测量技术（INSAR），它可以用来提供大范围内的 DEM（数字高程模型），而且差分干涉雷达技术（D—INSAR）还可以用来监测地表的水平和垂直移动，以及地表面土地利用状况的变化，比较乐观的报道，利用沿着或垂直于飞行轨迹的两个天线构成的基线，可以由雷达相位观测值中导出地面的高差，精度可达到  $\pm 3$ （近程）到  $\pm 9$ （远程）米。基于空间重复轨道的雷达干涉测量，例如利用相隔几天的 ERS - 1 重复轨道数据和最近用 ERS - 1 和 ERS - 2 的重复轨道数据出了  $\pm 5$  米最佳精度的 DEM。差分干涉雷达测定相对位移量甚至可达到厘米和毫米精度。

表 1 为目前已列入计划的未来 10 年中陆地数据卫星的发射计划。可以明显地看出追求高空间分辨率和高光谱分辨率的特点。表 1 中的同轨指的是在同一轨道上向前、向下或向后扫描，这样获得的影像没有明显的时间差。而异轨立体指的是在不同两个轨道上的侧向倾斜扫描获得立体像片，它一般有良好的基高比，但可能有较大的时间差，而影响立体量测。从表 1 中还可看出，美国现有三家商业公司对发射高分辨率计划有极大兴趣。这是因为  $1 \sim 2\text{m}$  高分辨率具有重要的军事和经济价值，是生成数字高程模型（DEM）和正射影像数据（DOQ）的主要数据源。

表 1 未来十年中目前已计划的陆地数据卫星发射计划

国别	项目名	经费来源	性质	计划日期	仪器类型	分辨率(米)			波段数	立体方式
						全色	多光谱	雷达		
法国	SPOT5B	政府	运营	2004	全色、多光谱	5	10		4	同轨
美国	EOSAM - 2/L - 8	政府	运营	2004	全色、多光谱	10	30			
法国	SPOT5A	政府	运营	1999	全色、多光谱	5	10	4	同轨	
印度	IRS - 1D	政府	运营	1999	全色、多光谱	10	20		4	异轨
美国	Space Imaging	商业	运营	1998	全色、多光谱	1	4		4	同轨
韩国	KOMSAT	政府	运营	1998	全色、多光谱	10	10		3	同轨
美国日本	EOSAM - 1	政府	运营	1998	多光谱	15	15		14	同轨
美国	LANDSAT - 7	政府	运营	1998	全色、多光谱	15	30		7	
欧空局	ENVISAT	政府	运营	1998	雷达			30	0	
美国	Space Imaging	商业	运营	1997	全色、多光谱	1	4		4	同轨
美国	OrbitalSciences	商业	运营	1997	全色	1	8		4	同轨
法国	SPOT - 4	政府	运营	1997	全色、多光谱	10	20		4	同轨
美国	Earth Watch	商业	运营	1997	全色、多光谱	1	4		4	同轨
美国	Earch Watch	商业	运营	1996	全色、多光谱	3	15		3	同轨
美国	CTA Clark	政府	试验	1996	全色、多光谱	3	15		3	同轨
美国	TRWLewis	政府	试验	1996	全色、多光谱	5	30		384	
俄罗斯	ALMA22	政府	运营	1996	雷达			5		
日本	ADEOS	政府	运营	1996	全色、多光谱	8	16		4	异轨
中国 - 巴西	CBERS - 1	政府	运营	1996	全色、多光谱	20	20		7	异轨
加拿大	Radarsat	政府	运营	1995	雷达			9		
印度	IRS - 1C	政府	运营	1995	全色、多光谱					异轨
俄罗斯	Resours - 02	政府	运营	1995	多光谱		27		3	

### 五、地理信息系统的兴起与广泛应用

信息作为一种新兴的产业越来越受到人们的重视，信息革命的浪潮正冲击着人类社会。在这场革命中，地理信息系统(GIS)作为集计算机科学、地理学、测绘遥感学、环境科学、城市科学、空间科学、信息科学和管理科学为一体的新兴边缘学科迅速地兴起和发展起来。

GIS 研究计算机技术与空间地理分布数据的结合，通过一系列空间操作和分析方法，为地球科学、环境科学和工程设计，乃至企业经营提供对规划、管理和决策有用的信息，并能回答用户所提出的有关问题。

随着我国四化建设、改革开放的深入和社会主义市场经济发育，从中央到地方，各行各业对 GIS 的需求愈来愈多，各种形式的 GIS，尤其是城市 GIS 和土地信息系统(LIS)正如雨后春笋。目前地理信息系统进入了新的发展阶段，已成为一种包括硬件生产、软件研制、数据采集、空间分析及咨询服务的新兴信息产业，并开始为政府的职能转变提供宏观调控的现代化工具尤其在我国已显示出巨大的潜在市场。

地理信息系统(GIS)是一种特定而又十分重要的空间信息系统，它是以采集、存贮、管理、分析和描述整个或部分地球表面(包括大气层在内)与



空间和地理分布有关的数据的空间信息系统。由于地球是人们赖以生存的基础，所以 GIS 是与人类的生存、发展、进步密切关联的一门信息科学与技术，受到人们愈来愈大的重视。

地理信息系统按其范围大小可以分为全球的、区域的和局部的三种。范围大的一般分辨率低，反之则高。通常 GIS 主要研究地球表层的若干个要素的空间分布，属于 2~2.5 维 GIS，布满整个三维空间建立的 GIS，才是真三维 GIS。一般也常常将数字位置模型（2 维）和数字高程模型（1 维）的结合称为 2+1 维或 3 维、加上时间坐标的 GIS 称为四维 GIS 或动态 GIS。

GIS 的应用范围极广。大到全球变化与监测的研究。例如美国地质测量局（USGS）的地球资源观测卫星数据中心（EROSData Center）和加拿大遥感中心（CCRS）合作，将连续 10 天的 NOAA AVHRR 数据在一起，形成北美指数图，将它与 GIS 中各种数据结合从而建立起北美土地复盖数据库，供全球变化研究之用。又如联合国粮农组织（FAO）在意大利建立的遥感与 GIS 中心，负责对欧洲和非洲的农作物生产的病虫害防治提供实时的监测技术服务。

在一个国家范围内，GIS 技术可用来进行全范围的自然资源调查、环境研究、土地利用状况、森林管理、农作物生产、各种灾害预测和防治、国民经济调查和宏观决策分析等。

在一个城市范围内，GIS 技术可用作土地管理、房地产经营、污染治理、环境保护、交通规划、上下管线管理、市政工程服务和城市规划等。澳大利亚昆士兰州布里斯班市的城市规划、市政管理、公共交通、上下水服务、公园化、房地产管理等子系统，成为市政府管理城市的有力助手。

在一个企业范围内，GIS 技术可用作生产和经营管理。例如德国的露天煤矿，利用航测方法建立和更新矿区 GIS（包括 DEM），在此基础上设计开采面作业计划、矿石运输线路、废矿石堆放位置，从而使生产达到最佳化作业。

GIS 应用的另一个极好的实例是在海湾战争中美国国防制图局（DMA）的战场 GIS 实时服务。该局为战争需要，在工作站上建立了 GIS 与遥感的集成系统。它能用自动影像匹配和自动目标识别技术，处理卫星和高低空侦察机实时获得的战场数字影像，及时地（不超过四个小时）将反映战场现状的正射影像图叠加到数字地图上，数据直接传送到海湾前线指挥部和五角大楼，为军事决策提供 24 小时的实时服务。

GIS 作为商业产品，创造了企业在空间上的竞争优势。GIS 一改传统的商业战线中制图用图的模式，用现代计算机技术来管理和分析空间数据，并将结果可视化，成为现代企业和各级政府管理部门制定科学经营和管理的重要手段，给人耳目一新的感觉，GIS 作为商业产品，属于高技术范畴。它提高了企业对错综复杂外界和市场经济的认知能力和信息处理能力，从而创造了企业在空间上的竞争优势。一个典型的例子是我国南方沿海开放特区和有关省份，为了有偿使用和转让土地使用权、引进外资和企业开发新的产业，自下而上地、主动地投资来建立 GIS 和 LIS，充分显示了 GIS 的商业价值。

下面再举一个例子来看看 GIS 的价值

美国爱达荷州 Potiatch 公司，负责着该州 60 万英亩林场 4900 个林区。若采用传统的手绘地图来经营管理，永远不可能跟上现状的变化。现在每年花 180 万美元，花在基于 GIS 的森林经营系统，在美国是十分便宜的。然而，GIS 给该公司提供每分钟的林木信息。森林管理员坐在计算机终端旁，通过对数字地图的变焦和漫游，便可能在几分钟内检查林场中的任一土地块的采

伐情况和产权变化。该 GIS 的硬、软件花去 65 万美元，带来的年利润大于投资的 27%。

GIS 的市场目前十分活跃。据统计，1985 年 GIS 产业的产值仅为 2 亿美元，1995 年达到 35 亿美元，估计 2000 年将突破 100 亿美元。我国若县级以上城市建立城市信息系统和土地信息系统，每套系统需计算机硬、软件 10 套以上，则全国就需要 2~3 万套，产值当在 5~10 亿元以上。

## 六、地理信息科学与信息高速公路的接轨

空间定位系统 (GPS)、遥感 (RS) 和地理信息系统 (GIS) 走向集成，是当前国内外的发展趋势，简称“三 S”技术集成，已列为我国“九五”科技发展的十五个重中之重攻关项目。在这种集成中，GPS 主要用于实时、快速地提供目标的空间位置；RS 用于实时、快速地提供大面积地表物体及其环境的几何与物理信息及各种变化；GIS 则是对多种来源时空数据的综合处理分析和应用的平台。

这种高新技术的集成有多种方式：GPS 与 GIS 的集成可用于自动导航、自动驾驶、农田作业管理、渔船捕鱼、公安消防车指挥调度等方面，GPS 与 RS 的集成可用于自动定时数据采集环境监测、灾害预测等方面，RS 与 GIS 的集成可用于全球变化，空间数据自动更新等。三 S 的整体集成应用将更为广泛，例如美国俄亥俄州立大学、加拿大卡尔加里大学分别在政府基金会或工业部门的资助下进行了集 CCD 摄像机、GPS、GIS 和惯性导航系统 (INS) 为一体的移动式测绘系统的研究与开发，用于高速公路和高速火车的自动监测维护。美国的巡航导弹和爱国者导弹也都装了三 S 集成系统，用于自动导航、跟踪和打击目标，三 S 集成系统在我国将构成星、地、空一体化的灾情监测和农作物监测估产和系统。

对地观测的三 S 集成系统的进一步发展是引入专家系统和现代化通讯技术，从而形成地理信息科学与工程。专家系统的引入将力求使数据采集、更新、分析和应用更加自动化和智能化。现代通讯技术，尤其是正在兴建的信息高速公路将为地理信息在各部门的传播和应用提供保证。

地理信息学的形成和发展是整个信息科学和技术发展的一个重要组成部分，将会给相关学科的发展带来机遇和挑战。

地理信息学与信息高速公路有着相互依存、相互促进、共同发展的十分密切关系。

首先信息高速公路的建设为地理信息科学和地理信息产业的发展铺设了通行无阻的金光大道。由于地理信息和大量的空间数据，都是以文字、数字、图形和影像方式表示的，将它们数字化、送入电子计算机，便可方便、快速和及时地将地理信息传送到需要的地方去，以发挥地理信息在国民经济建设、国防建设和在文化教育等各行各业中的应用价值。

其次，信息高速公路为空间定位系统 (GPS)、遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS) 和专家系统 (ES) 的集成提供了必要的通讯和数据传输的保证。差分 GPS 依赖远程通讯而成为实时的高精度定位和导航方法；遥感利用卫星通讯而获得源源不断的对地观测数据；而地理信息系统的空间数据库则通过信息高速公路实现全国以至全球的数据交换和数据共享，并促成三 S 集成。三 S 的集成，使得测绘、遥感、制图、地理、管理和决策科学相互融合，成为快速而实时的空间信息分析和决策支持工具。例如利用 GIS 中电子地图和 GPS

接收机的实时差分定位技术，可以组成各种电子导航系统，用于交通、公安侦破、车船自动驾驶、大田农作物因地施肥、科学耕种和海上捕鱼等。利用 GPS、GIS 和 CCD 摄像机加 DPS 进行自动影像获取和处理的集成系统，可以用作高速公路、铁路的线路状况自动管理，GIS 的实时更新，以及作战时的现场侦察和自动指挥系统等。

另一方面看，地理信息学对信息高速公路的建设和运行也有着十分重要的贡献。地理信息系统的硬软件就是行驶在信息高速公路的重要列车，空间数据库存贮中的数据和由之而得到的信息就是信息高速公路上运送的货物。由于 GIS 存贮的是描述地球表层，即大气圈、生物圈、水圈和岩石圈的空间及其相互关系的信息，它不是一般的“货物”，而是关于人们赖以生存的地球的昨天、今天和明天的重要信息，对社会持续发展起着重要的作用。由于地理信息具有时空的变化和多尺度特点，将构成信息高速公路上川流不息的繁忙景象。

## 七、大力推进我国地理信息产业的发展

从以上分析可以看出，空间定位系统（GPS）、遥感（RS）技术和地到信息系统（GIS）技术的成就和未来十年的发展，已经使地理信息学（Geomatics）快速形成和将成为从工业化向信息化过渡，实现全球信息社会的一个重要信息产业，已列为美国和西方七国集团的行动计划。

改革开放以来，尤其进入 90 年代，我国的地理信息产业从无到有，迅速建立起来。在此期间，国家测绘局在全局实施数字化测绘生产基地的建设，作为我国地理信息产业的基本力量，我国相继建成了一批基础信息系统和专业信息系统，并已在国民经济和社会的规划决策中发挥了良好作用。有代表性的信息系统有：

（1）国家测绘局建成了百万分之一“国家基础地理信息系统”（NLGIS），为全国其他专业信息系统的研建提供了空间数据支撑。NLGIS 由 3 个数据库组成，分别为全国百万分之一地形数据库，全国百万分之一地名数据库和试验性重力数据库，此外还建成了全国百万分之一数字高程模型（DEM）。到目前为止，NLGIS 已向许多专业部门提供了数据服务，取得了明显的社会效益和一定的经济收益。比如，NLGIS 数据的应用，增强了秦山核电站处理突发事件的能力；NLGIS 数据与军事要素叠加在作战指挥演示系统中发挥了良好作用，受到解放军二炮部队首长的好评；DEM 数据与地震数据相结合，可用于我国中长期地震预报等。

（2）1993 年国家测绘局与国务院办公厅秘书局联合建成了“国务院综合国情地理信息系统”（9202 工程）。“9202 工程”是一个融 GIS 与办公室自动化为一体的空间型信息系统，它遵循 GIS 建设的基本原理和方法，以 NLGIS 数据、政务信息数据和国民经济统计数据为基础，旨在为国务院高层领导机关研建一个以高新技术为支撑的宏观分析决策系统。到目前为止，一期工程已经完成，已在国务院办公厅秘书局、中共中央办公厅信息中心和若干省政府办公厅投入运行，受到各级领导的好评。一期工程的应用推动了省级 GIS 的建设，河北省、江苏省、山东省、陕西省和广西壮族自治区的综合省情信息系统进展较快，已初见成效。

（3）重大自然灾害的监测评价信息系统。该系统由 7 个子系统构成，以监测和评价洪水、干旱、林火、地震、雪灾、沙害和松毛虫害等 7 种主要灾

害为目标,分别建成了相应的数据库、分析评价模型和试运行系统,提出了自然灾害区划和综合自然灾害程度的分区,从而构成一个以GIS和RS技术为支撑的重大自然灾害监测评估的集成系统。该系统在监测评估近年来发生的重大自然灾害方面发挥了重大作用,受到各专业用户的好评。

(4) 重点产粮区主要农作物估产信息系统。该系统以估算松辽平原、黄淮海平原、江汉平原和太湖流域的玉米、小麦和稻米的产量为目标,综合利用GIS和RS技术并与野外调查相结合,提出了上述农作物播种面积的估算方法建立了各自的单产模型,经过多次完善和多级集成,建成了重点产粮区农作物估产的信息系统。

(5) 辽宁省国土资源信息系统。该系统是一个多要素、多层次的空间型信息系统,是全国第一个省级国土资源信息系统,旨在为辽宁省政府机关提供一个用于对国土资源进行分析评价和规划应用的辅助决策工作。系统的一期工程已经完成,且已投入试用。在一期工程中,建成了覆盖全省的1:25万综合数据库,开发了辽宁省中部地区土地资源评价模型和矿产资源分布与工业布局模型,为研建省级国土资源信息系统积累了宝贵经验。目前海南省启动澳援项目,正在建设海南基础地理信息系统,包括全岛影像数据库。广东省国土厅也正在建立广东省地理空间数据框架。

除上述有代表性的GIS外,各专业部门还建了各具特色的信息系统,如:城市地理信息系统,地籍管理信息系统,军事指挥信息系统,城市公安信息系统,投资环境信息系统,旅游资源信息系统等。

在研建上述空间地理信息的过程中,我国造就了一批GIS专家和产业队伍,形成了多个GIS的研究基地、培训基地和数据生产基地,我国地理信息产业的雏形已初步形成,为我国地理信息产业的持续发展打下了基础。

但是与西方七国相比,我国的地理信息产业尚处于起步阶段,中国的国民生产总值约为4300亿美元,据外商估算,1993年是我国地理信息系统大发展的一年,其投入也只有200万美元,占国民生产总值的比例仅为0.47/10000,与美国投入3.3/10000相差一个数量级。中国是一个发展中国家,未来十年将是从小农型向集约型经济转变的关键时刻,不仅要大力推动工业化,而且也同样是从工业化向信息化,进入信息社会的关键时刻。控制人口,节约资源,保护环境和防治灾害是关系到社会可持续发展的重大战略问题。地理信息系统作为信息社会中一种重要的基础信息,既是社会公益性产品,又有市场价值。因此,加强领导,增大投入,大力发展我国地理信息产业是一项十分重要而又紧迫的任务。

# 中国的煤炭资源

杨 起

中国地质大学

杨 起 煤田地质学家。1919年5月17日出生。山东蓬莱人。1943年昆明西南联合大学毕业。1946年北京大学研究生毕业。中国地质大学教授。1991年当选为中国科学院院士(学部委员)。主要从事煤田地质学研究,在解决中国煤种分带规律,预测炼焦煤地区及我国煤田分布规律和含煤建造类型研究等方面做出了突出贡献。

## 一、我国煤炭资源概况和应重视的问题

我国经济建设的发展在较长一段时期内离不开煤炭。世界上公认煤是通向未来可以再生能源为基础的持久能源体系的桥梁。在伦敦召开的第二届世界煤炭会议上比较一致的看法是:煤以其储量丰富和价格低廉将在今后的能源市场上起主要作用。据估计,若按目前煤的年开采速度计算,世界硬煤储量够开采170年,褐煤够开采390年,因此今后相当长的一段时间内,煤仍将是世界的主要能源,世界对煤的需求也将继续增加。1973~1993年世界能源产量增长38%;其中天然气增60%,石油增12%,煤增28%。

我国煤炭资源丰富,储量居世界第三位。全国2300多个县市中1458个有煤赋存;鄂尔多斯是资源量大于5000亿吨的特大型煤盆地,准噶尔和吐哈盆地也都赋存着巨大的煤资源量。我国预测煤炭资源量按不同埋深分别为:1200米以浅为2万亿吨;1500米以浅为3.8~4万亿吨;2000米以浅为5万亿吨。煤类有褐煤、弱粘结煤、不粘结煤、长焰煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫煤、无烟煤和超无烟煤,其中低煤级煤占比例最大,炼焦用煤约为20%。我国又是产煤大国,1995年产煤已超过12亿吨,处在世界第一位。

根据煤炭资源丰富程度、开发利用情况、供需关系、地区经济发展水平等开发的内部和外部条件,我国煤炭资源赋存等的简况可概括如下:

1. 东部地区,包括黑、吉、辽、冀、鲁、皖、苏、京、津、沪十省市。该区总的条件较差,据1987年统计,煤的探明储量占全国总探明储量的9.7%,以炼焦用煤为主,煤层较薄,建井条件和水文地质条件较复杂;开采难度大、成本高;煤层埋藏较深,可露天开采者极少,老矿井报废加快,后备资源不足;人口密度大,地面建筑多,地下压煤量大等是不利条件。而该地区具有经济发达、煤炭需求量大、交通方便、电力与原材料供应方便、农业基础好等又是有利条件。东部地区为煤炭调入区。

2. 中部地区,包括蒙、晋、陕、宁、豫五省区。该区有利条件较多,据1987年统计,探明储量占总探明储量的70.0%。煤炭资源丰富,煤类多样,各煤类之间的比例相差不大。且优质煤比重大;煤层较稳定且多为中厚与厚煤层,不少矿区适于露天开采,水文地质条件较简单。不利条件为,晚古生代煤将因开采含硫量较高的太原组煤而增加环境污染,内蒙东部中生代褐煤热值低,除晋、豫两省外,本区其它地区经济还不发达,煤产量大而自销量少,需大量外运而运输力量不足,且水资源短缺,农业基础差,对矿业发展不利。中部地区为煤炭调出区。

3. 西部地区,包括新、甘、青、藏、川、黔、滇七省区。有利条件是煤炭资源量较大,探明储量以 1987 年总储量计占 14.2%。其它条件不太有利,中生代低煤级煤比例较大,其中云南以第三纪褐煤为主,川、黔、滇的高硫煤比重较大;新疆煤的资源较丰富,但距内地遥远,贵州多山,地质构造又较复杂;产煤外运都有困难。除四川经济较发达外,其它省区经济尚处于落后状态。西部地区为煤炭自给区。

4. 南方地区,包括浙、闽、湘、赣、鄂、桂、粤、海南(不包括台湾)八个省区。按 1987 年统计,这些省区的探明储量仅占全国的 1.1%,以贫煤和无烟煤为主。煤炭资源量少,分布零星,煤层薄而不稳定,构造和水文地质条件都较复杂,而且高瓦斯矿井较多是不利条件。有利条件为地处沿海,经济发达,开发煤炭资源具有很高的经济价值。南方地区为煤炭调入区。

从以上我国煤炭资源的分析可以归纳为:(1)煤炭资源量及煤类的分布都不均衡;(2)优质动力用煤资源丰富而优质炼焦用煤因“超前”开采而紧张;(3)内部和外部条件都优越的地区少。

我国是用煤大国,煤在能源消费结构中占到 70%以上,75%的工业燃料和动力、65%的化工原料、83%的城市民用能源和 55%的农村商品能源都是由煤提供的。本世纪末我国计划年产煤 14~14.5 亿吨,规划 2010 年产 17.5 亿吨,2020 年产 21 亿吨。到 21 世纪初能源需求增长部分的 75%左右仍需由煤来满足,即在今后相当长一段时间内我国以煤炭为主的一次能源结构不会有大的变化。

我国煤炭资源丰富,但也存在不容忽视的问题。

1. 煤炭资源在地理分布上极不均衡,西多东少,北多南少。煤储量在昆仑山-秦岭-大别山一线以北约为 94%,以南只有 6%左右;大兴安岭-太行山-雪峰山一线以西占储量约 89%,此线以东只有 11%左右。煤类的分布也不均衡,约 76%的无烟煤集中在山西、贵州两省,炼焦煤的 80%分布在华北,而低煤级煤 90%以上赋存于西北各省。因此,北煤南运,西煤东运的格局将会长期存在。而我国水资源与煤炭资源却呈反向分布,所谓的探明储量 60%以上集中在水资源严重匮乏,生态环境十分脆弱,交通不便,距离经济发达、能源消费高的地区较远的山西、陕西和内蒙西部,因而集中开发的难度很大。从煤质看,我国的难选煤多,高灰、高硫煤的比重大。大部分煤含灰分 25%以上,平均 17.6%;煤中硫分 2%以上者占 12.78%,平均含硫分为 1.11%;西南地区煤中含硫 2.43%,重庆可燃煤含硫高可达 3.24%。

2. 回采率低。只有 30%或稍高,在回采中丢弃的大量煤炭,已难于再开采出来,浪费很大。煤在运输、储存过程中也造成不应有的损失。而开采计划性差的严重后果之一是仅占我国煤炭资源总量 1/5 的炼焦用煤近年来的开采量竟高达煤年产总量的 50%,我国实际用于冶金的煤仅占 8%,显然大部分本来可用于制取焦炭或作为化工原料的煤就浪费在直接燃烧中。而且大部分优质的低灰、低硫、粘结性强的炼焦煤已经超前开采,土法炼焦只能用粘结性强的煤,造成很大浪费,所剩下的多为劣质部分,导致炼焦用煤紧张,此种状态必须改变,对余下的炼焦用煤进行计划开采。我国用煤的转化率低,只有 20%+,因而产品能耗高。据 1985 年资料,我国每百万美元产值的能耗为 3165 吨标准燃料,是印度 1548 吨的两倍多,是美国 623 吨的 5 倍多,日本 399 吨的近 8 倍;1990 年国内外四种重要产品的单位能耗比较,我国的平均能耗都不同程度地高于发达国家。

3. 缺煤的东北、华东、京津冀以及中南地区的煤矿开采强度大，产量衰减多、报废速度快，加以回采率低，最近 10 年来国营煤矿每年衰减报废能力近 1000 万吨，到本世纪末，我国约有 160 处矿井将相继报废或关闭，将减少产量近 6000 万吨。而年均新投产能力约为 2700 万吨，除去补偿抵销报废，净增能力有限，况且近年来新井建设投资有缩减趋势，新增产能力不大。我国的煤炭资源消耗过快。

4. 近年来出现一种对我国煤炭资源过分乐观的看法，似乎我们的煤多到可以取之不尽，用之不竭的程度。诚然，我国煤的储量居世界第三位，但人均占有量只相当于煤资源中等的国家。对我国煤炭资源丰富程度估计过高的重要原因之一，是所谓的“中国煤的探明储量”逐年加码，1994 年接近 1 万亿吨。这个数字的确不小，几乎是我国煤炭 1200 米以浅预测储量的一半。但却是名不符实。作为探明储量原意，应有较高比例可供建井设计的精查储量，但实际却是 C + D 级储量占到 70% ~ 80%，符合于世界能源委员会建议的探明储量定义的不过 30%。本来就不多的高级储量中除去用于建井，再减去因地质构造条件复杂、煤质欠佳等近期尚难利用的储量，余下的不过 300 多亿吨，距计划 2000 年产煤 14 ~ 14.5 亿吨所需的精查储量还有较大差距。就是这近 1 万亿吨的探明储量除储量级别低之外，因煤田勘查工作而逐年增加，但却未减去生产井和建井已经利用的 2300 余亿吨的储量。如此只增不减，好像中国的煤炭资源不是一次能源而是可与可再生能源相比了。

“探明储量”促成一些人认为我国的煤炭资源可以高枕无忧，因而不加爱惜。在开采、运储、使用中造成巨大浪费，并且放松、削弱了有关的煤地质科研工作，进而影响到几乎放弃煤田地质与勘探专业人才的培养，这对于摸清我国煤炭资源家底，有计划地开发、利用极为不利。对这种名不符实的所谓“煤的探明储量”，有人建议改为“勘查储量”或者“普查储量”。可见要做到 2000 年产煤 14 ~ 14.5 亿吨和 21 世纪初期的规划产量，并做到煤矿区分布合理，产量和煤类能适应经济建设发展的需要，煤地质研究工作和煤田勘探的工作量是巨大的。我们应该实事求是地对待我国煤炭资源，从长远着想，不应放松煤田地质勘探与煤地质研究工作，不再浪费，走开发与节能并重的发展道路。

另一方面，煤炭资源还应该包括来源于煤层和煤系的煤成气与煤成油。煤与油气同为化石能源，由于成矿条件的差异，以往认为产煤区不利于生油，而含油的地层煤层不发育。实际上，尽管煤来自有机质高度集中堆积的沼泽相，油气主要与湖泊和海相的泥岩、碳酸盐岩中分散有机质的富集有关，但实际上随基底的升降变迁，在同一盆地内聚煤和成油气的沉积相条件沿横向上可以并存，在垂向上可以互相交替。而且在煤的演化过程中沥青化作用的进行必然会产生油气。本世纪 50 年代末荷兰发现了与石炭纪煤系有关的格罗宁根特大型气田后，世界各地相继在含煤盆地中发现大型气田。我国自从“煤成气开发研究”被列为国家“六五”科技攻关项目后，陆续在四川、鄂尔多斯盆地、东海、南沙等处发现了一批煤成气田和含煤成气构造。据估计，世界上大气田和天然气储量的 70% ~ 80% 来自含煤岩系。煤成气是一种高效、洁净的燃料和原料。对于浅层煤成气，即煤层甲烷全国平均每采一吨煤的排放量为 1.0 ~ 1.1m<sup>3</sup>，每年排放到大气总量是十分可观的。煤层甲烷的开发除作为能源外，对煤矿来说可以减轻煤矿灾害，是变害为利，还可减少向大气排放甲烷，有利于环保和减缓大气温室效应。1996 年 5 月我国成立由煤

炭部、地矿部和石油天然气总公司组建的“中联煤层气公司”，将联合开发煤层气资源。大力开发利用煤层气有利于改善我国以煤为主的能源结构。

60年代后期开始，在澳大利亚的吉普斯兰盆地、印度尼西亚的库特盆地、加拿大的斯科舍和马更些盆地以及北海默里盆地先后发现了一批与中、新生代煤系有关的重要油气田。我国自1989年以来在吐哈盆地鄯善弧形构造带找到了与侏罗纪含煤岩系有关的油气田，继而在塔里木盆地北部、准噶尔盆地、酒泉东等又有重要发现，展示了我国含煤岩系中找油气的良好前景。我国煤成气资源丰富，应作为第二煤炭资源开发利用，现已起步；煤成油也将增加其在我国能源结构中的比重。

## 二、用煤造成的环境污染

煤是不洁净能源，其造成的污染贯穿在开采、运输、储存和利用转化的全过程。就开采而言，仅统配煤矿每年矿井酸性涌水约14亿 $m^3$ ；采煤排放的 $CH_4$ 约占人类活动排放甲烷量的10%； $CH_4$ 是一种重要的温室效应气体。平原区地下每采万吨煤平均地面陷落面积达2000 $m^2$ ，我国堆积的煤矸石已超过15亿吨，占地86.71 $km^2$ ，矸石堆易自燃，会排放出大量污染气体、液体。每年约有6亿吨煤靠铁路长途运输，使用敞篷车造成约有300万吨煤尘排放在铁路沿线，造成污染。储存煤不仅占去大面积土地，而且储存时间长的煤在氧化、风化作用下，炼焦煤会失去粘结性，煤堆会自燃，污染环境。此处仅涉及煤在燃烧利用中对环境的污染，尤其是大气的污染。我国煤的利用以燃烧为主，约90.4%的煤用于发电、工业锅炉、炉窑、民用炉灶和铁路。由于燃烧技术落后，供煤不合理而造成煤的利用率低，浪费能源，污染环境，以致全国排放到大气中80%的烟尘和90%的 $SO_2$ 来自燃煤。煤是由有机质和无机质构成的，主要元素为C、H、O、N、S；工业分析内容为固定碳、挥发成分、灰分和水分；显微镜下可区分出镜质组、惰质组和壳质组三组有机显微组分。煤在燃烧、利用过程中造成的污染物有烟尘、烟气和炉渣。

烟尘含有由煤中矿物质、伴生元素转化来的飞灰和未燃烧的炭粒，1987年以来的统计，我国每年排放到大气中的烟尘量在1300多万吨到1400多万吨之间。每燃烧1吨煤会排放出6~11kg烟尘，1990年我国北方城市大气中烟尘达475 $\mu g/m^3$ ，南方城市为268 $\mu g/m^3$ ，远超过世界卫生组织发布的人体健康允许的含尘量60-90 $\mu g/m^3$ 和我国大气一级标准150 $\mu g/m^3$ 。浙江某煤矿的空气中的降尘，即 $>10\mu m$ 的悬浮微粒，其可燃物与不可燃物的比例为7:10，形成大量的烟尘。上海市大气中悬浮颗粒物浓度已被列入世界污染最严重的十大城市之中。

烟气含有 $SO_2$ 、 $CO_2$ 、CO、 $NO_x$ 、蒸气以及多环芳烃等烃类化合物和其它有机化合物。其中 $CO_2$ 在大气中含量增多会造成“温室效应”，使大气变暖，破坏臭氧层。CO是窒息性气体，量大时能在很短时间内使人的大脑缺氧而死亡。已知在炼焦过程中排放烟气中多环芳烃浓度大，焦炉工人患肺癌率高与之有关。如苯并芘为强致癌物，国际抗癌组织推荐的大气中的浓度为0.1 $\mu g/100m^3$ 以下，我国不少城市仍超标。

煤中硫在燃烧转化过程中产生 $SO_2$ 。我国中高硫煤和高硫分煤占煤总储量的1/3，1989年我国排放到大气中的 $SO_2$ 为1560万吨，1989年全国城市 $SO_2$ 的平均浓度为105 $\mu g/m^3$ ，远超过我国大气 $SO_2$ 一级标准20 $\mu g/m^3$ 。 $SO_2$



对人类健康和植物的生长都有危害，它刺激粘膜，引起呼吸道疾病，能使植物枯死。我国用煤量在相当长一时期内将继续增长，若不及时采取有效治理措施，主要燃煤区的污染，特别是大气的污染程度将要加剧。根据东南地区燃煤的  $\text{SO}_2$  排放量的增长趋势，预测从 1990 年到 2000 年将增长 27%，从 2000 年到 2020 年增长 50%。

$\text{SO}_2$  排放量大的山东、河南和湖南是由于用煤量大，而且煤的含硫量高；湖南的耗煤量并不多，但湖南煤的硫含量较高。 $\text{SO}_2$  排放量增长速度快的省市依次为河南、山东、湖北、上海和江苏。东南地区的煤电厂、钢铁厂和化工厂需要扩建并建设新厂。污染区将扩大并有可能成群、成线和成片出现。如上海、南通、苏州与嘉兴、长沙、湘潭和株洲趋于成群；上海则又与苏州、镇江、南京、马鞍山成线；煤矿区与煤发电厂相结合则易污染成片，如鲁西、苏西北、河南永城、淮北，河南境内的平顶山、巩义、焦作和郑州则易污染成片。

用煤排放到大气中的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  与水蒸气化合生成硫酸和硝酸。这两种酸与水分子结合生成硫酸雾，硫酸雾与烟尘接触形成硫酸尘，与降水接触成为酸雨。所谓酸雨，是指 PH 值小于 5.6 的雨水以及冻雨、雪、雹、露等大气降水，它们使土壤酸化，妨碍植物生长；使水酸化影响水生生物的繁衍生息，当然还会使建筑物受到腐蚀。酸雨在我国呈加速发展的趋势。1985 年的降酸雨面积约  $175\text{Km}^2$ ，1993 年扩大为  $280\text{Km}^2$ ，1984 年 PH 值小于 4.5 的重酸雨区仅为重庆、贵阳、长沙、萍乡少数城市，到 1993 年除上述各所在省外还向鄂、桂、粤、闽、浙发展，重庆酸雨的 PH 值已低至 3.0 左右，长沙为 2.85 ~ 4.4。目前华北主要开采含硫量较低的山西组煤，往深处采含硫量高的太原组煤时， $\text{SO}_2$  和酸雨污染面积和强度还会扩大。这已与北美和西北欧重酸雨区的 PH 值相近。美国 1977 年纽约州阿迪朗达克区 219 个湖泊已酸化无鱼；原西德由于土壤酸化造成森林枯死面积占全国的 34%。但他们发现得早，已采取措施控制  $\text{SO}_2$  排放量，酸雨基本得到有限控制。

四季中因燃煤情况不同而污染程度有别，酸雨量也不同。美国纽约州和新英格兰北部一半以上酸雨是 6 ~ 9 月，冬季强西北风能迅速将有害气体吹到大西洋去，而夏季雨水多，所以 6 ~ 9 月烧西部白垩纪低硫煤，其它月份烧东部石炭纪高硫煤。煤中砷燃烧时形成剧毒的  $\text{As}_2\text{O}_5$  进入大气，在人体内累积诱发癌症，因此食品工业用煤的砷含量必须控制在 8ppm 以下。大气中  $\text{As}_2\text{O}_5$  含量国内外规定应小于  $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，水中应小于  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但某些燃煤电厂附近大气中  $\text{As}_2\text{O}_5$  含量高达  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，滇东、黔西一些地方的晚二叠世龙潭组煤经受后期热液影响，砷的含量极高，贵州开阳、织金、兴仁和兴义燃煤造成砷中毒的人数以千计，仅兴仁县交乐乡就有 42 人死亡；60 年代湖南锡矿山冶炼锡过程中排出的含砷烟尘，加以炉渣露天堆放，污染了井水使 308 人中毒，6 人死亡。

炉渣亦称煤灰，主要由煤中矿物质转化而来，含有害物质。1982 年全国排出的炉渣达 1.7 亿吨，既占去大面积土地，所含有害物质又对大气、水域、地下水和土壤造成污染源。

经济发展应与环境资源相互协调发展，不能以牺牲环境为代价来发展经济，因此如何有效地治理因用煤造成的环境污染就成为紧迫的研究任务，务使煤炭资源的开发利用与环境效益结合起来。

### 三、我国煤炭资源的展望与建议

我国煤炭资源丰富，但是煤的储量和煤类的地理分布很不均衡，炼焦煤因超前开采而吃紧，因水资源匮乏、生态环境脆弱、交通不便等增加了开发难度；能开采出的煤的数量只是建井储量的一部分；由于各个环节的资源浪费而加速了煤炭资源尤其是优质煤的消耗等不利因素估计不足；以及因短期内用煤问题不大而掩盖了未来开发利用可能面临的难题等等，都应及早引起重视，并在以下几点加以注意：

1. 根据我国经济发展状况和煤炭资源分布不均衡的特点，应尽可能地在东部地区较长时期地保持煤炭稳定生产。除在老矿区外围找煤外，掩盖区仍存在发现新煤田的潜力，并且应将东部地区晚古生代煤田受底部岩溶水威胁的高达约 150 亿吨的煤解放出来。从长远看煤田的开发势必西移，以独联体和美国煤炭开发找矿转移和与我国的情况相比较，我国应优先开发山西省和地跨晋、陕、蒙、甘、宁的鄂尔多斯盆地靠东部的煤田；控制优质炼焦煤的开采，增加动力煤与无烟煤的产量；大力发展坑口电站，并增加煤田勘探和矿井建设的投入；同时，大力发展计算机技术，包括模拟与地质成图；在勘探技术上开展高精度、高分辨地球物理技术手段的研究与应用。

2. 加强综合利用和洁净煤技术。煤不只是燃料，它还是多种工业的原料。煤炭的浪费还表现在将优质煤作为劣质煤用，将可以用于其它工业用途的煤直接燃烧掉。李四光教授曾指出：“像煤炭这种由大量丰富多彩的物质集中构成的原料，不管青红皂白一概当做燃料烧掉，这是无可弥补的损失”。根据德国的资料，煤中组分多达 475 种。用煤作原料制成的产品，其经济效益可大幅度提高。以用煤炼焦为例，除主要产品冶金焦炭外，还可获取煤焦油和焦炉煤气。煤焦油可以用来生产化肥、农药、合成纤维、合成橡胶、塑料、油漆、染料、药品、炸药等产品；焦炭除主要用于冶金外，还可用来制造氮肥。焦炉煤气可用于平炉炼钢和焦炉本身的燃料、城市煤气。也可作为化肥、合成纤维的原料。煤的气化、液化在煤的综合利用中更是重要内容。我国有多种可以制取液体燃料的煤类，如各种残殖煤、藻煤、烛煤等，山西浑源藻煤的焦油产率高达 32%；壳质组含量高的腐殖煤，如淮南煤田部分气煤的壳质组含量为 15%~26%，焦油产率为 12~15%。

为了减少用煤造成的环境污染并增加煤的使用价值，应从多方面发展洁净煤技术。包括增加煤的入洗量，我国煤的洗选程度低，仅 20%，而国外一般在 42%~100%，采用先进高效的选择性絮凝重液旋流分选和浮选脱硫等，在煤投入使用前就降低其含硫量和矿物质；发展成型煤和水煤浆，烧型煤比烧散煤可节煤 20%~30%，减少  $SO_2$  排放量 40%；水煤浆的灰分和硫分都低，燃烧效率高，烟尘、烟气排放量都较低；以及制取气体、液体燃料等。在煤燃烧上推广应用流化床、粉煤燃烧技术，提高煤转化为电力、热力、煤气等洁净二次能源的比例，发展洁净煤技术，并与节能技术综合利用相结合。针对中小锅炉燃煤情况，要重视燃煤过程中的脱硫技术研究，开发简易实用的烟道气净化技术。

3. 加强煤地质研究。为了能真正摸清我国煤炭资源的家底和保证从质量和数量上提供所需的煤炭资源，并防治因用煤对环境的污染，建议对以下几个方面的煤地质研究加强力度。

1) 对煤和含煤岩系沉积环境的研究上，运用比较沉积学的理论方法，通

过将沉积相分析与煤相分析相结合，从煤的显微组分层次上研究煤层，预测煤质；运用层序地层学的理论方法，从沉积学和地层学两方面揭示沉积体的空间分布规律，建立沉积盆地，特别是陆相沉积盆地的等时地层格架和演化模式；通过对现代的泥炭聚集环境研究古环境对聚煤的控制作用，以及不同沉积环境下的聚煤模式。

2) 以发展演化的观点开展沉积盆地分析，对整个盆地的古构造、古地理、沉降史、热演化史和形成矿产的各项参数进行全面分析，得出盆地中沉积矿产在数量上和质量上的整体概念，对于矿区邻近和新区找煤，包括寻找富煤带和低硫低灰的优质煤效果较好。也利于对含煤岩系中其它矿产如耐火粘土、高岭土、锗、镓、钒以及与煤有成因联系的油、气的综合研究与综合勘探。

3) 经过几个五年计划的科技攻关，我国多数大型盆地四川、鄂尔多斯、准噶尔和塔里木以及东海、南海等已证实是大型的煤、油、气共生盆地。人们对含煤岩系的有机质能够形成油、气和含煤盆地能形成具有工业价值的油气藏的事实已不再怀疑，但对于在什么特定环境下的聚煤盆地可以形成工业性的油气藏还有待深入研究。据了解，“九五”期间计划在北方侏罗纪煤盆地开展找油气工作，这正是在同一盆地通过对沉降史、热史、煤化作用、成烃地球化学、聚煤与成油、气沉积相的交替与并存进行探讨，综合研究煤、油、气的成因联系，以及它们的形成和演化模式的好时机，当能收到事半功倍之效。

4) 针对目前煤类的不合理开采，优质煤劣用浪费资源，因用煤污染环境严重以及出口煤炭需要提高煤质才能增强在国际市场上的竞争力等，有不少出口煤因洗选后硫含量降不到国际通用的  $St, d < 1\%$  的标准而被外商拒收。应该强调运用煤岩学、地球化学与煤化学密切结合，相辅相成地进行煤质研究，并深入到显微组分层次，以便更有效地做好选煤、炼焦配煤、气化、液化等，与之同时加强研究煤中的污染源如硫、砷、汞、铅、镉、铬、氟、氯等在煤中的聚集机理、赋存状态、分布特点以及它们在煤燃烧转化过程的动态与去向。如萍乐凹陷煤中砷主要以砷黄铁矿 ( $FeS_2 \cdot FeAs_2$ ) 形式存在；煤中氟部分溶于水，部分氟在燃烧时以氟化物排入大气，氟化氢对生物的危害比  $SO_2$  大 20 ~ 100 倍。这样就有可能不仅仅是在用煤中和用煤后，而是在煤投入使用之前就采取有针对性的措施，为制定因用煤造成环境污染的保护和治理对策提供依据。

我们应该改变重数量轻质量的做法，加强煤质研究，包括加强污染环境的煤中有害物质的研究，走提高煤质、合理用煤、综合利用煤的道路，务使煤尽其用。并在煤投入使用之前，就采取防治措施，清除煤中的污染源，做到防患于未然，能收到事半功倍之效，避免重蹈国外走过的先污染后治理的老路。既能发展经济而又不以牺牲环境作为代价，又能提高煤的利用率，使一吨煤发挥出多于目前一吨煤的效益。可以不必单纯依靠增加产量来满足对煤日益增长的需要，从而有可能不急于在 2000 年将煤产量增加到 14 ~ 14.5 亿吨，不仅可以节约大量人财物的投入，还可不增加环保的负担。

# 地震及其灾害的减轻

陈颢

国家地震局

陈颢 地球物理学家。1942年12月31日生于四川重庆。1965年毕业于中国科技大学。历任国家地震局地球物理研究所研究员、副所长、所长、国家地震局副局长。并任中国地球物理学会副理事长、中国地震学会副理事长、国际地震学和地球内部物理学会的地震预报和灾害委员会主席。1993年当选为中国科学院院士(学部委员)。主要从事实验地球物理学、地震物理和地震灾害预测等方面的研究,并取得多项成果。

地震和地震灾害是全世界共同关心的问题。

公元132年,东汉的张衡(公元78~139年)发明了世界上第一架地震仪——候风地动仪,用以测量地震发生的方位(图1)。这一测量本身包含着一个本质性的观念,即地震是沿一定方向从远处传来的地面震动。直到18世纪和19世纪,这一概念才被英国的米歇尔(J. Michell)和马利特(R. Mallet)重新确认。因此,中国张衡研制候风地动仪,被认为是地震科学发展的里程碑。

中国自古以来就一直是最活跃的地震区之一。因此,中国人自然会保存有大量的地震记载,而这些记载现在确实已成为世界各地地震记录中最悠久、最完整的记录。目前地震学家将地震活动分成平静期和活跃期的做法,以及地震虽然会影响很大的地区,但是一般情况下不会在几个地区同时发生的认识,主要得益于对历史地震的宝贵记录的分析。

中国近代地震仪器记录最早始于台北(1887年)。以后,在台湾相继建立了台南(1898年)、台中(1902年)、台东(1903年)等台站。1904年,法国耶稣会所属上海徐家汇观象台增设了地震观测项目,建立了中国大陆第一个地震台。1930年李善邦先生在北京鹫峰建立了中国人自行设置的第一个地震台,并达到当时第一流水平。总的来说,20世纪上半叶中国的近代仪器观测,经历了缓慢而崎岖的道路。60年代以后,由于经济建设的需要(三峡台网,1958~1960年)、美国维拉计划(地下核爆炸侦察和核爆炸地震效应,1962年)的影响以及社会对地震预报的要求(邢台地震,1966年),现代地震观测系统正式建立并不断发展与完善。

地震科学的产生是密切为经济发展和社会进步服务的。地震科学产生之后,基本上沿着两个方向发展:一是对地震灾害的预测与预防,减轻地震灾害;二是利用地震波研究地球内部。本文仅就减轻地震灾害方面的问题进行简要介绍。

## 地震预报

全球人口的迅速增加及其在地域上相对集中,经济发展所带来的生命线工程和社会易损性的增加,使得一次地震所造成的损失也在不断地增长,这是一个全球性的现象。本世纪中国大陆死于各种自然灾害的人数中,死于地震灾害的约占一半。因此,在地震发生之前作出某种程度的预报,显然对于

减少人员伤亡和保持社会安定有着重要的意义。

地震预测是人类面临最古老的问题，也是世界范围的科学难题。目前预测方法有两种，一种是理论性方法，另一种是经验性方法。

理论性方法是建立在对地震过程基本了解基础之上的。根据一定的理论模型，推导各种可能的前兆及不同前兆之间的关系，然后通过各种实践的检验来修改模型。目前，这种方法很难对地震预报给出实用性指导，然而它无疑是给出关于地震成因的本质性理解的重要途径。

经验性方法是利用有限的震例，总结出经验性规律推广应用于未来的地震。一般说来，大地震发生之前都会出现一些异常现象，从这些异常现象中提取地震发生的前兆信息并加以综合，就成为用经验性知识预报地震的方法。1975年辽宁海城地震就是用这种经验方法预报出来的。经验性预报方法的局限性在于前兆异常的机制并不十分清楚。从表1所列的预测实例可以看出：我们能够对某些类型的地震作出一定程度的预报，但还不能预报大多数地震。这就是地震预测目前的科学水平（图2）。

目前的地震预报主要是经验性的。图2给出了进行地震预报的逻辑推理框图。 $E_1 \dots E_n$  分别代表震前观测到的各种异常现象，如小地震发生频次的增加、地面变形速率的变化、地下水位变化和动物异常等。 $CF(E_i)$  表示第*i*种异常中包含的前兆信息量， $CF(H, E_i)$  表示在第*i*种异常出现后发生地震的概率。用不精确推理方法可以将各种信息综合在一起，得到地震可能发生的概率 $CF(H)$ 。在以上框图中， $CF(E_i)$ ， $CF(H, E_i)$  都是根据过去的经验，由专家进行判断而给出的。尽管目前地震预报利用了上面的不精确推理的专家系统，但由于经验有限，震例有限，仍然面临小样本统计学的科学问题。

表1 地震预报情况一览表

时间	地震	中期预报	短期预报
73.2.6	四川炉霍 $m = 7.6$	无	无
74.5.11	四川永善 $m = 7.1$ 无	无	
75.2.4	辽宁海城 $m = 7.3$ 有	有	
76.5.29	云南龙陵 $m = 7.4$ 无	有	
76.7.28	河北唐山 $m = 7.8$ 无	无	
76.8.16	四川松潘 $m = 7.2$ 有	有	
88.11.6	云南澜沧 $m = 7.4$ 有	无	
90.4.26	青海共和 $m = 7.0$ 无	无	
94.9.16	台湾海峡 $m = 7.3$ 无	无	

正是由于目前地震预报的科学水平十分有限，我们在地震预测方面，面临着对策问题：如果我们能准确地预报所有未来的地震，那就不存在着对策问题，需做的事情就是简单地发布预报；如果我们根本不能预报任何地震，那也不存在着对策问题，只需向社会公众宣布无能为力罢了。但我们恰恰处于这两种极端情况之间：我们能够预报一些地震，我们又不能预报所有的或大多数地震，当我们的科学处在这种特殊位置时，如何对待地震预报的对策问题就十分突出了。

目前，地震预报的决策包括预报的提出、科学评审和预报的发布。任何科技人员，只要有可靠的观测资料和一定的科学根据，都可以提出地震预报

意见，但这种意见只能报告给有关部门，不得以任何形式向社会上传播，更无权对外发布。地震部门收到预报意见后，组织有关科学家进行科学评审，经过科学评审后所确定的预报意见是否向社会发布，已不单纯是科学问题，而是涉及到方方面面的社会问题，应由政府来决策。

众所周知，地震预报对社会的影响极大，必须明确权限，以避免给社会造成无谓的恐慌与混乱，尽可能减少不必要的经济损失。一般说来，长期（几年 - 几十年）预报意见，由国家地震局提出，作为国家规划和建设的依据。中期（1 年至几年）预报由每年一度的全国地震趋势会商会提出，经政府批准后，对预报的地区作出防震工作部署，中期预报不向社会公布；短期临震（几天至几个月）预报，由省政府批准发布。在有中期预报地区，如发现明显前兆异常而又情况紧急来不及向省政府报告时，当地市、县政府可以发布 48 小时的临震预报。各种预报发布之后在预期的时间内如无地震发生，由原发布预报的政府作出撤销或延长预报的决定，并妥善处理有关问题。

综上所述，预报管理对策的要点可以概括为：

- （1）鼓励从事预报研究与严格管理预报发布相结合；
- （2）专家的科学判断与政府行政决策相结合。

### 地震灾害预防

地震预报是减轻灾害的重要方面，但由于地震预报在科学技术上尚未完全过关，最大限度减轻地震灾害，不能单单依靠预报。而且，在人类没有充分的证据证明地震预报具有的精确性之前，任何国家政府不会在一个百万人口以上的城市进行紧急疏散和撤离，因为一旦出现误报、虚报或混乱造成的损失不会比一次中型灾害小。因此，利用地震科学的成果，做好灾害预防是十分重要的。

灾害预报包括工程措施和非工程措施两类工作。搞好工程建设的地震安全设防，是减轻地震灾害的最主要的工程措施。1987 年开始，许多地震学家组织起来，开始编制新的中国地震烈度区划图。这张区划图比较全面地考虑了特别是大陆地区的地震活动和地震地质特征，对国际通用的地震危险性分析概率方法作了重要的改进，采用三种不同超越概率水平下的地震烈度作为不同的设防水准。1990 年国家地震局和建设部正式颁布了新一代的地震烈度区划图（1：400 万，1990 年）（图 3），作为国土利用、城市规划和一般工业与民用建筑抗震设防的依据。但是一些重大工程和易于引发次生灾害的工程，必须通过进一步的包括考虑场地条件的地震危险性分析，从而选择相对安全的建设场地和确定合理的设防标准。

建立地震的早期警报系统，也是减轻地震灾害的工程措施之一。加勒比海 Cocos 板块边界，在本世纪已经发生过 42 次 7 级以上的大地震。1985 年 9 月 19 日，在该边界上又发生了一次 8.1 级地震，尽管震中离墨西哥城有 400 公里之远，但由于墨西哥城地基土质条件极差，这次地震仍造成了死亡 1 万人的严重灾害。为此，从 1989 年开始，用了 2 年时间在该地区建立了世界上第一套地震的早期警报系统。由于 Cocos 断层离墨西哥城最近之处也有 320 公里，一旦地震发生，设在断层附近的地震台马上接收到地震信号，该台站立即将发生地震的警报用无线电自动向全国广播。由于无线电波以非常快的光速传播，而地震波以每秒数公里的较慢速度传播，这样，在当地地震波到达墨西哥城之前，人们已从广播中收听到了地震警报，并作出了相应的准备。

1995年9月14日，一次7.3级地震在Cocos断层上发生了，当人们从广播中听到地震的警报后，墨西哥城的人72秒钟后才感到地面的震动。这是地震早期警报系统在减灾中发挥作用的成功例子。近年来，类似的地震早期警报系统，先后在日本、台湾等地投入了应用。

震灾预防的非工程措施，主要是通过各种宣传、教育，提高全民族的防震减灾意识和主动参与意识。如每年选择在一些地区进行防震减灾演习。1980年8月，香港一家报纸载文说，闽南地区“下月中旬可能发生8级大地震”，引起当地部分居民的恐慌。地震学家根据观测资料认真分析，否定了这个消息。由于平时地震知识的科普宣传做得好，该地区很快平息了谣传。对稳定社会秩序、保障经济生产起了良好的作用。

震灾预防实行重点防御、兼顾一般的原则，在对未来地震灾害预测的基础上，设立了地震重点监视防御区作防震减灾的重点地区，强化防震减灾工作。目前重点监视防御区的总面积占国土的10%左右，而预期这些地区中发生的未来地震灾害损失将占全国60%以上。

### 地震科学技术研究

依靠科学技术进步，是减轻地震灾害的根本途径。概括来说，目前正在进行的科技研究可以分成三个方面：

#### 1. 以确定地震发生地点和强度为主要目标的长期预报研究。

板块内部地震孕育的构造环境研究。利用天然地震的地震波研究中国大陆及其邻近地区的地壳上地幔三维结构。配合国际地球断面计划（GGT），中国地震学家负责7条地学大断面的编制。对中国大陆深部环境进行探查。

利用现代空间技术对板块内部的地壳变形场进行测量。应用甚长基线干涉（VLBI）、人造卫星测距（SLR）、全球定位系统（GPS）和合成孔径雷达（SAR）等技术，从地壳变形动力学角预测未来地震发生的地点和强度。

活动构造研究。通过对大陆地区主要活动断裂的大比例地质填图和新生代实验测定，积累主要强震区活动构造的定量化资料。特别重视全新世1万多年以来活动断裂的运动方式、滑动速率，古地震和强震重复率等研究，为进一步开展大陆活动构造体系和动力学提供基础。

板内地震孕育过程的阶段性和周期性研究。一次地震孕育过程中表现出阶段性，许多次地震的活动性表现出周期性。地震活动这种在时间上的不均匀的发展，为几年到几十年的长期地震预报提供了一种新的线索。例如一次大地震发生后，几十年内该地区再次发生大地震的可能性很小。因此，地震孕育构造环境是未来大地震发生的必要条件，而地震活动性的时间特征分析将成为地震发生的充分条件。

#### 2. 以确定未来地震发生时间为主要科学目标的地震短期预报研究。

强化观测系统。观测是利用前兆现象进行地震预报的基础，应增加观测数据和资料的可比较性，以便能够逐步建立板内地震前兆数据库；同时，不断地探索前兆观测的新方法，例如地热前兆方法、电磁波方法和断层气观测等。

加强从异常现象提取地震发生前兆信息方法的研究。应用信息理论，对异常现象中前兆信息量进行提取和分析，研制地震预报的专家系统。把计算机智能化技术和地震预报的经验结合起来。

3.开展地震学、工程科学和社会经济学之间跨学科、综合性的基础研究。

吸收现代物理学和其它相关学科的新的研究成果，在物理模型和数值计算方面开展旨在理解地震现象复杂性的震源物理研究。深入开展地震成因、地震孕育过程等方面的理论与实验研究。

加强工程地震和救灾技术的研究，例如：开展预防性工程技术措施研究，进行工程结构抗震设防标准的研究，开展工程结构隔震减震技术和工程建筑物损伤探测技术的开发，提高强地面运动的观测能力和水平。

地震灾害的观测。估计某个地区未来会遭到多大的地震灾害损失，对于减轻地震灾害是十分重要的科学问题。因为未来地震预防和救灾的基础是对未来地震灾害的定量估计。这涉及到工程、社会、经济、心理等众多的学科和方面。中国大陆已作出了未来 50 年的地震灾害损失预测图（1 / 1000 万），但是它只考虑了建筑物的损失。1995 年日本兵库南部地震教训表明，生命线工程和社会功能损失，对于大中城市而言，比建筑物破坏的损失要更加严重。可以预料，地震灾害量化的预测，将结合地震学、工程学和其它众多学科，形成减灾科学中一个新的生长点。

### 展望

在科学上更深刻地认识地震的本质，是减轻灾害的基础，也是地震科学的发展方向。在这方面，新的观测和新的理论则是发展的重点。地震观测技术在本世纪将全面地进入数字化时代，不仅在记录地震的频带和动态范围方面有新的突破，而且在地震记录的分析解释方面也将会有新的进展。地震是地球整体运动和演化过程中的一种自然现象。从空间角度对地球进行观测将在本世纪成为地震科学的一种新的技术，特别是合成孔径雷达（SAR）和空间定位系统（GPS）的出现，将地震的孕育环境与整个地球的变形与变化联系起来。本世纪中全球通讯网络（如 INTER - NET）的发展与完善，可以为各国科学家分享其它国家的地震资料和经验，大大加快震例的积累，促进经验性预报的发展。20 世纪最后 20 年中自然科学发展的一个显著特点，就是各个学科几乎在同一时间内都开展了复杂现象的研究。所谓复杂现象，是指用传统的理论难以解释的现象，如天文学中的三体问题，生物学中昆虫数目随时间的涨落，灾害天气的发生、海洋物理中的洋流和赤潮等，面对复杂现象，非线性科学有了长足发展。应用非线性科学中的理论、概念和方法，对地震灾害的预测，将会由目前纯经验方法向动力预测方法发展。

在地震灾害预防方面，由于中国面临由计划经济向市场经济的转变时期，以及所有制的改革，从市场力量的角度对采取减灾工程措施方面有更大的推动。新型抗震材料和设计的广泛应用，建筑物和工程设施抗御地震的能力将会有所提高，但和发达国家的多震地区相比，仍将有一定的差距。

在灾害预防的非工程措施方面，估计会有比工程措施更快的进步。人们已经开始认识到，目前社会公众的减灾意识是十分不够的。社会公众已经知道，在火灾发生时如何使用灭火器，如何进行疏散；社会公众也知道，每一次乘坐飞机时，乘客遇到的第一件事，就是听取飞机乘务员宣讲安全知识，知道在发生紧急情况下应该做些什么。火灾、飞机紧急情况时是如此，那么如何面对地震灾害呢？这方面的知识和宣传是很不够的。在今后一段时期，通过宣传、科普和地震演习，估计这方面会有很大的进展。

历史学家往往以能控制和减轻灾难，作为评价一个朝代功过的重要依据



之一。大禹治水的动人传说和张衡发明地动仪的创举，至今仍广为人民传诵和敬仰。能否积极防御和有效地减轻灾害损失，已成为衡量一个社会文明程度的重要标志。这把尺子在中国历史上，在中国人民心中早就有了，如今已经成为全世界的共识。

作为曾经创造过无数奇迹的中华民族，我们也曾创造过成功预报海城、松潘等地震，取得历史上第一次地震减灾实效，从而令全世界瞩目的成就。今天，科学家们仍将通过坚韧不拔的努力，去实现最大限度减轻地震灾害的目标。

# 城市化与地理信息系统

陈述彭

中国科学院地理研究所

陈述彭 地理学、地图学、遥感应用专家。江西萍乡人。1941年毕业于浙江大学史地系。中国科学院遥感应用研究所名誉所长，地理研究所研究员，中国航天工业总公司、国务院环境保护委员会、国家遥感中心顾问。曾任中国地理学会理事长，资源与环境信息系统国家重点实验室主任，国际地理协会地理信息系统委员会副主席，国际地圈与生物圈计划中国委员会委员，国际空间年地球科学与技术专家组成员，《地理信息系统杂志》特约编委。1980年当选为中国科学院学部委员。1992年当选为第三世界科学院院士。1995年当选为国际亚欧科学院院士。

## 城市化的激流

城市化是人/地关系的焦点，是社会经济发展中，地区性的内外循环相互作用流场中的涡旋。我们可以用地理信息系统来描述、模拟和显示城市化时空变化的图像。高度城市化的结果，使城市中人流、物流、能流和信息流在内循环中高速运行和高度摩擦，正面表现为经济财富的迅速增值能力，高科技力量和人类智慧知识的高度集中，以及物质的高消费和生活的高水准；而负面效应则是城市臃肿和膨胀，贪婪地噬食良田，形成“水泥森林”，造成严重缺水、水质污染、热岛效应增强，传染病易于蔓延，居民的健康水准下降，自然灾害损失上升。人类为城市的经济发展付出巨大的环境代价。每个城市不得不考虑它可持续发展前景，选择它的最佳方案的规模，优化它的功能区划。

### 城市化进程

世界超过百万人口的城市，从1950年至1995年，发达国家由49个增加到112个，而发展中国家由34个剧增到213个。千万以上人口的大城市，1995年为14个，预计2000年将达24个，2015年将达27个。

我国近代设市的建制源于清代。建国前夕共设市67个。建国初按新中国标准共有城市136个，1950~1957年新建市5个，1958~1965年间减少8个，1966~1976年间增加17个，1977~1985年间新建市135个，1986年以后增设市33个。新中国45年累计新建市524个，合并和撤消38个，其中还有62个经历了反复的过程。

改革开放对加速我国城市化进程创造了空前的机遇。

1. 1979~1993年间，国民生产总值（GNP）年均增长率高达9.3%。以1978年/1993年为例对比，第一、二、三产业所占比重发生了巨大的变化。第一产业由28.4%下降至21.2%，第二产业由48.6%上升为51.8%，第三产业由23%上升至27%。经济的迅速发展和非农产业比重的提高，强有力地推动了城市化进程。

2. 1985~1993年，随着乡镇企业的兴起，乡镇企业在全国工业总产值中的比重由18.8%上升至44.5%；从业人数由6979万增到12345万人，年均递增7.4%，从而促进了小城镇的繁荣和众多新城市的诞生。加以由乡村流

向城市从事第二、三产业的民工潮，城市流动人口每年不下 6000~7000 万人。大中城市人口急剧膨胀。

世界十大城市发展预测（人口统计：百万）

1995	2015
1. 东京 ( 26.8 )	1. 东京 ( 28.7 )
2. 圣保罗 ( 16.4 )	2. 孟买 ( 27.4 )
3. 纽约 ( 16.3 )	3. 拉各斯 ( 24.4 )
4. 墨西哥 ( 15.8 )	4. 上海 ( 23.4 )
5. 孟买 ( 15.1 )	5. 雅加达 ( 21.2 )
6. 上海 ( 14.1 )	6. 圣保罗 ( 20.8 )
7. 北京 ( 12.5 )	7. 卡拉奇 ( 20.6 )
8. 洛杉矶 ( 12.4 )	8. 北京 ( 19.4 )
9. 加尔各答 ( 11.7 )	9. 达卡 ( 19.0 )
10. 汉城 ( 11.6 )	10. 墨西哥 ( 18.8 )

（据联合国第二次人类住区会议——新华社）

3. 90 年代以来，沿海、沿江、沿边城市相继批准对外开放，1993 年全国直接对外开放的市、县已达 1258 个。1993 年进出口贸易总额增至 1957 亿美元，1979~1993 年累计实际利用外资 1379 亿美元。三资企业和出口加工等外向型经济，大力加速了城市化的进程。

4. 城市建设引入市场运行机制，尤其是城市土地使用权的转让和房地产业的经营，促进了城市建设自我发展、自我积累的能力。1993 年在全社会城镇和工矿区的基本建设投资中，自筹资金占 48.1%，国内贷款等占 38.9%，外资占 8.2%，国家财政投资只占 4.8%。浙南龙港就是农民集资建成的农民城。

“七五”末期，我国城市约 450 个，人口约 3.2 亿，面积约 4.5 万平方公里，中央对城市发展的基础性投资为 390 亿元；而“八五”期末，城市已增至 640 个，人口约 5.1 亿，面积约 6 万平方公里，基础性投资达 480 亿元。

中国现有建制镇 1.7 万个，比 1995 年同期增加了 783 个，中小城镇所占比例大幅度上升。去年年底，特大城市（市区非农业人口 100 万以上）数目没有增加，大城市（50~100 万）增加 2 个，中等城市（20~50 万）增加了 15 个。

全国城市化水平为 22.74%，辽宁省达 43.73%。青海、宁夏、内蒙、山西等西部地区城市化步伐加快。特大城市中非农业人口增长率为 2.32%，而小城镇达 4.19%。

国家按地区经济布局，以中心城市为核心，制定了全国城市群联合发展规划。以上海为中心的华东城市群，地理区位相近，类型、规模相似。如长江流域 24 个城市，沿江或沿公路、铁路呈带状分布。目前全国已有 5 个超大型城市群，即沪宁杭、京津唐、珠江三角洲、四川盆地和辽宁中部；还有 8 个城镇密集区，它们是中原、湘中、关中、福（建）厦（门），哈（尔滨）大（庆）齐（齐哈尔）、武汉、山东半岛以及台湾西海岸等城镇密集带。

其他次一级的城镇体系，如欧亚大陆桥、浙赣铁路、京九铁路沿线，以及福州、北部湾为中心的经济协作区，也在逐步形成。

## 城市群（链）及其相互作用

城市化促进城市群的发展，成为某一级区域经济发展的龙头。人们充分利用它在地理区位中的定位，最大限度地扩大它的辐射范围，乃至超越流域分水岭或行政管辖界线，袭夺或兼并其它城市原有腹地，改变原有的流场。

1. 顺应国际化和区域集团化的潮流。随着各国经济结构的调整和地域分工集团化格局的变化，欧洲、北美和东亚三大区域中心逐步形成。亚太是当前和未来世界经济发展最活跃的地区。发挥我国的地缘与区位优势，积极参与欧亚大陆桥和泛亚铁路的建设，实现港澳回归和两岸三通，促进华夏文化圈的经济合作，加速海岸带国际城市化的进程，是更好地与国际接轨，抓住机遇，迎接挑战，全方位地改革开放和建设国际大城市的前提。

2. 加强对城镇体系的宏观调控，逐步优化生产力布局。面对日益加快的城市化进程，要把握好全国、区域和城市之间的协调发展，要以国民经济和区域社会经济可持续发展能力建设为依据，搞好城镇体系布局。把握好区域城市化速度，设市数量和规模，合理布局。城市之间，其功能类型、等级规模不同，作用也不相同，具有相互促进相互制约的作用。我国 80 年代提出“控制大城市规模，合理发展中小城市”，在实际执行曾出现一刀切的现象，间接导致城市基础设施的滞后。90 年代以来，上海、北京等特大城市，一再突破人口控制规模；而各地中小城市，则盲目追求“大城市化”。

3. 城市与乡村的协调发展问题更加严重：城镇和开发区占用和浪费耕地，“六五”期间每年减少 700 万亩；“七五”期间每年减少 1000 万亩；东南沿海城郊，重商轻农，农业投入不足，高产稳产良田被任意占用或弃耕现象尤为突出。城乡结合部和乡镇企业所在地环境恶化，污染严重，最终影响城市本身的健康发展。此外城镇化也是农村现代化的重要标志。

80 年代以来，农村工业与乡镇企业的崛起，为农村城镇的发展注入了蓬勃生机，把农村区域经济增长的轴心从乡村转移到城镇；城镇带动农村产业结构、劳动就业、经济产值乃至生活方式的转变，成为农村政治、经济、文教、金融、贸易、科技、信息的中心和农村经济的发展极和增长极，先进生产力的生长点。

城镇化有利于促进我国传统农业、农村工业和现代工业三元结构的发展与转换。以城镇为依托的工贸小区，是形成集约经营，产生规模效益，促进专业协作，推动横向联合，利于剩余劳动力转移的必由之路。“社会主义有条件比资本主义更快地发展生产力”（邓小平）。各国实现现代化的道路是殊途同归的：早期的英国主要通过独立发明，德、美是通过技术与管理的革新，而日、韩则是通过技术引进、消化、创新，但都离不开国家的经济干预和调节机制。领先与落后不是永恒的。日本用 40 年的时间，完成了欧美 200 ~ 300 年的现代化伟业，有力地证明科学技术是实现现代化的强大推动力和获胜的法宝。

## 城市地理信息系统

在所谓的“国际经济新秩序”中，大城市是全球经济的焦点。权力，对新技术的控制以及传播新象征的能力都集中在城市。随着通信和通信技术的发展，全世界的大城市都联结在一起，各地区的重要城市互相联系的时空距离愈来愈近，信息流代替人流、物流和能量流，人际交往主要通过计算机语言，使城市的作用发生根本的变化。

地理信息系统是城市化过程中信息流场的载体，同时也是加速城市化的催化剂。地理信息系统不仅是用来收集、存储、检索城市化过程的过去和现状，更主要的是返过来辅助城市发展的评估、规划和决策，模拟和预测城市化的未来。

### 地理信息系统建设与城市化过程的磨合

地理信息系统建设与城市化过程的磨合，大约可以分为三个历史阶段：

第一阶段，是面向土地资源管理。回顾发展中国家的许多大城市的发展历史，由于长期殖民地统治和小农经济的历史流毒，分而治之，各自为政，根本上缺乏整体规划；城市管理的着重点是放在房地产权的宗地登记、查询和检索上，从而开展了超大比例尺的地籍图测绘业务。建立城市地理信息系统的最基础的工作，就是使原有的地籍图（1：500~1：1000）或地形图转换为数字化的空间图形数据库和宗地档案文件库。

第二阶段是面向城市规划。随着工业化的高速发展，交通和通讯、水、气管网等基础设施和商贸、文教、医疗等服务中心的建设，城市的功能分区和流通网络的局域地理信息系统也具备了自动化设计（CAD）和办公自动化的功能，扩大了服务范围，由静态纪录提高到城市化的动态监测与模拟，以及对市政工程设计的优化与评估。例如为消防、交通管制、自来水、煤气管理收费、商业网点、学校、医院的调控与布点、桥梁、机场选址、高速公路、地铁建设的选线……等等。城市地理信息系统的建立和应用，对于克服当前片面追求经济效益，牺牲环境为代价的现象，纠正过量占用耕地、污染环境，监测电磁干扰，防治噪声扰民，对于合理强调整城市内部产业结构，加速基础设施等方面，发挥愈来愈显著的作用。我国城市地理信息系统的建设，已经或即将进入这一历史阶段。但还不是所有的城市信息系统都已经达到了这个阶段。与工业发达国家中高度现代化的城市相比，我们还有很大的差距。美国首都华盛顿特区启用34个子系统加强城市动态管理，每天发布交通塞断路段预报，即其一例。

第三个阶段，是面向城市可持续发展能力建设。虽然目前尚属于探索阶段，但已展示出更加宽阔的前景。当现代城市继续向集团化的方向发展，卫星城市和城市群落逐步形成，城市的规划、建设和管理扩大到城市辐射所及的腹地，城市化趋向于区域社会经济发展同步的时候，地理信息系统也由于与全球定位系统、对地观测系统（卫星、航空与地面台站网）、数字通信网络的互联、互补，功能有了飞跃的进步，城市地理信息系统具备一定的宏观调控能力，发挥城市作为区域可持续发展中的内核和龙头的作用，预测城市化的前景和可持续发展能力建设的规模，为城市发展战略、长远规划的制定作出更巨大的贡献。例如伦敦市的污水治理与绿化，巴黎的工厂搬迁，莫斯科的地下空间利用，东京的填海造陆，都取得了巨大的社会效益和生态效益。

最近白山市，位于著名的长白山国家级自然保护区，在清华大学的支持合作下，从社会、经济、环境、资源四个截面着手，根据其产业结构现状和演进轨迹，以遥感和实地调查相结合，建立了区域可持续发展动态数据库，进行分析评价。制定长远产业战略规划、产业政策、技术政策以及教育、金融、法律和社会保障体系。我们高兴地看到，这是城市地理信息系统保护生态环境，参与国际合作的良好开端。

### 信息网络对城市地理信息系统的支撑

上海是中国人口密度最大的市区，平均每平方公里达 2043 人，远远超过北京和天津，它们各自仅有 628 人和 787 人。上海 2010 年将建成信息港，正在运用计算机和现代通信技术，抓住面向全社会的关键性应用，推动各行各业信息化进程，进行有效的管理，以改变人们传统的工作方式，生活方式，提高劳动生产率。为此，正在进行若干骨干工程的建设：具有宽带、高速、大容量、多媒体等特征的信息传送平台，包括上海信息交互网（SHIX）、上海社会保障网（SSS）、上海国际经贸电子数据交换网（EDI）、社区服务网（SCS）、金卡与商业增值网（GC/POS）。

上海粮油期货交易中心拥有 250 个交易席位，通过 120 个网络和 10 多台小型服务器，延伸出 250 个远程网，以适应粮油期货和商品交易吞吐量与日俱增的需求，保障万无一失的故障自动消除的可靠性。

以北京为中心的首都圈为例，在东经 113° ~ 120°，北纬 38.5° ~ 41°，面积约 15 万平方公里范围内，布设了密集的地震前兆监测网点，其中精密水准路线 5200 公里，精密重力点 240 个，固定的地壳形变观测点 70 处。国家地震局决定建立全球定位系统监测网，平均点距 100 公里以内，强化部位在 50 公里左右。全区每年普测，重点地区每年 2~3 次。布点加密、观测周期缩短和全球定位系统的应用，有助于中期水平地壳位移的观测和地震短临前兆信息的捕捉。为保障北京首都圈内的城市生命线工程、能源、交通、通信和水利工程的安全，及时提供信息服务。

再以四川省为例，1995 年 10 月，已选用 CLI 公司 Radiance 电视系统作为省会议电视网，采用多点控制器（MCU），联通全省 23 个地、市、州，提供 576 线、每秒 30 帧的图像分辨率、可调速率达 64K 至 2Mbps。并可成功运动于 ATM、DDN、TSDN、CDMA、VSAT 等现有各种网络；实现与国家会议电视骨干网联通，实现出席控制、远程摄像机遥控等功能。其它如吉林、辽宁等经济比较发达的省区，也都在加速境内的信息网络建设，并逐步与全国数据通信网络互联。

全国数据通信网络技术水平正在发生质的变化。国务院办公厅已建成全国政府首脑机构办公决策服务系统（CHINA - PAC），中纪委建立了全国纪检计算机网络系统，国家外汇管理局和各证券分公司均已利用数据网开通中国外汇交易系统，国家经贸委建立了全国生产流通信息网络，在全国数据网上，与全国 1000 多家大中企业形成联网关系。此外，国家经贸委、税务总局、外经贸部、中国科学院、国家教委、中国旅行社、煤炭、铁路、公安、气象等部门，纷纷利用公用数据网平台组建应用系统。1995 年底，这一完整、统一、多功能的公用数字数据网和分组交换网，已通达全国县以上城镇 2000 多个。提供远程教育和医疗服务，会议电视系统、点播视像节目等多媒体通信业务。无论规模能力和技术可靠性，“九五”期间必将登上一个新台阶，使城市信息化发生质的飞跃。深刻影响城乡人民的生产、生活和交往方式和城市现代化的进程。

遗憾的是，祸不单行。我国自行研制的“东方红三号”通信卫星于 1994 年发射失利，由保险公司赔款购买了应急替代卫星，将于 1996 年年底再次使用长征火箭发射；1996 年 8 月发射美国休斯顿公司制造的中星 7 号，是一颗地球同步通讯卫星，原拟用以接替“超期服役”的中星 5 号，不幸再度失败。发射事故使我国卫星通信目前明显落后于印度。

城市现代化

本世纪中叶，尤其是近 30 年来信息革命，使发达国家处于由工业化向信息化转变的过程。现代化不再等同于工业化，信息化即将替代工业化成为现代化的核心，已经是大势所趋，指日可待的事情。信息技术给企业带来竞争和开放的机制，国际间的开放与合作导致更高层次上的竞争，更进一步激发企业的技术和经济活力，这就是信息技术促进生产力魔幻般增长的内在活力。现代化也不能等同于西方化和资本主义化。中国的社会主义建设有条件比资本主义现代化更快。

搞好城市的规划、建设和管理和现代化，具体地说，我赞同建设部毛如柏副部长（1995）的意见：首先需要有城市化意识。特别是沿海地区出现一些区域性城镇群的同时，需要加速与工业化相伴随的乡村城市化的过程，依靠众多的小城镇网络，吸收原来涌向大城市的剩余劳动力；其次要培养现代化意识。应该认识到城市化不仅是农业人口转化为城镇人口的过程，同时也是人民生活方式的改变和人口素质提高的过程。房屋现代化，屋外脏乱差，基础设施欠账太多，文化教育落后，必将影响精神文明建设，制约城市化的进程；第三要具备社会化的意识，包括建立社会化的服务体系，促进第三产业的发展；实现城市综合开发和房地产经营，推动城市按规划进行建设和管理；第四要强化规划意识，包括城镇和人口的宏观布局，城镇职能和性质的定位，城市设计与周边环境的协调。规划不能落后于建设；第五要增强环境意识，注意改善城市居民的生活质量，重视绿化，防治污染，创造宜人的生活环境，而不仅是房屋和马路的建造；最后一点是树立管理意识，抓好市容市貌整顿，从宏观的经济管理到微观的社区管理、行政管理，克服脏、乱、差，保障生产、生活有条不紊。归根结底，这需要决策者观念的根本转变，对城市化和城市规划要有区域可持续发展的意识和环境意识。需要高屋建瓴，遵循城市化自身的规律，因地制宜，因势利导，去进行规划、建设和管理，促进城市的现代化。

# 面向 21 世纪的中国大地 测量“九五”任务纲要

陈俊勇

国家测绘局

陈俊勇 大地测量学家。1933 年 5 月 16 日出生。原籍浙江宁波，生于上海。1960 年武汉测绘学院毕业，1968 年该院研究生毕业。1981 年在奥地利格拉茨技术大学获科学技术博士学位。曾任国家测绘局总工程师。中国测绘学会理事长，国际大地测量协会（IAG）副主席。现任国家测绘局特邀顾问，国际大地测量与地球物理联合会（IUGG）执行局执委。1991 年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事大地测量、地球重力场及地球动力学等方面的研究。

## 前言

大地测量在理论、技术、方法等方面的研究对象已逐渐从静止的转变为动态的；由陆地表面扩展到海洋，深入到地球内部；离线的信息获取发展到在线的信息获取；由数字的后处理发展到数字的实时处理；短距离的测量发展到长距离的测量；单一学科的研究发展到和其它测绘学科或其它地学学科的综合研究。

一、回顾“六五”、“七五”期间完成的大地测量方面的重要工作

1. 平面基准：建立了独立的大地定位，完成了全国天文大地网整体平差（约 5 万个点），具有 3ppm 的相对精度，确立了我国新的二维坐标系统（西安 1980 系）。

2. 高程基准：确立了更符合实际的黄海 85 高程基准，完成了全国二期一等水准网的布设和计算（100 个环，9.7 万 km）

3. 重力基准：在我国多点（13 个点）多次重复进行了绝对重力测量，在我国直接建立重力基准，消除了波茨坦重力原点起始误差及其长距离的传算误差，完成了重力 85 基准网和重力一等网的布测和计算。

4. 空间大地网：建立了国家卫星多普勒网（35 个点， $\pm 2 \sim 3\text{m}$  精度），建成了 VLBI 站一个（上海），SLR 站二个（上海、武汉）。

5. 野外基线长度基准：建立了符合国际标准的最高精度的北京长阳野外基线长度基准；建立了分布全国的十余个 EDM 长度检定场和北京沙河的 GPS 基线检定场。

6. 天文经度基准：完成了全国天文经度基准网的布设。

7. 航摄检定场：建立了对航摄精度、底片畸变、像机质量等进行检定的野外航摄检定场。

8. 其它：二网改造等。

80 年代（即“六五”和“七五”期间）大地测量工作的特点是：按当时世界上的测绘先进技术对 50 至 60 年代所建立的大地测量基准的更新、补充和发展。

二、“七五”末期建议 90 年代我国要完成的大地测量六项重大任务，即：国家第二期一等水准的复测；国家空间大地网的布设；中国地区重力场



参数的精化；全球定位系统（GPS）卫星追踪网的建立；沿海地区陆海相对垂直位移的研究；青藏地区地壳运动的监测。下面将这些任务在“八五”进行的情况作一回顾。同时对这些任务在“九五”的要求和发展进行评述。

## 国家第二期一等水准的复测及 中国地区地壳垂直形变的研究

### 一、目的和意义

1. 遵循《大地测量法式》所规定的每 20~25 年国家一等水准应复测一次的规定。

2. 采取技术措施，消除和削弱第二期一等水准测量中没有顾及的下列四种主要的系统误差，以向国家和社会提供更精确、更可靠的高程数据。

(1) 将视距由原规定的 35m 缩短至 30m，并将中丝视线高不得低于 0.5m 的规定应用于下丝，以消除垂直折光的系统性影响。这是我国根据折光理论结合我国多山区的实际作出的世界首创性的作业规定，经过 5 年 5 万公里的实践，资料初步统计表明，每公里往返平均值误差已由原来的  $\pm 0.5\text{mm}$  降低为  $\pm 0.3\text{mm}$ ，达到了削弱水准垂直折光后水准测量精度的世界先进水平。

(2) 严格水准外业观测的时间记录，以准确利用观测时间计算潮汐对垂线偏差的影响，以消除潮汐对南北水准路线的系统性影响。

(3) 建立专门检验设施，不准对地球磁场有较大响应的自动水准仪进入一等水准作业，以消除地球磁场对高精度水准测量的系统性影响。

(4) 通过引进和自建，建立了对水准尺标准长度的分划改正检验设备，以精确改正水准读数的尺长改正。从而消除水准尺长误差的系统影响。

3. 提供更可靠的全国地壳垂直形变及其速率，这将对地学、工程建设和抗灾减灾作出贡献。

### 二、今后任务

1. 目前陆地高程测量中，最精确可靠的还是水准测量。国家二期一等水准的复测工作在“八五”已完成过半，应“遵纪守法”不动摇地在“九五”继续进行下去，按期完成这一国家高程基准的复测与完善。

2. 完成全国地壳垂直形变速率的推算工作。此外，还应利用这一资料结合其它学科，对我国地壳运动的机制及其可能的后果进行研究和做出评估。

## 建立国家空间大地网， 建立国家高精度三维坐标系统

### 一、“八五”期间工作的回顾

国家空间大地网是为了确立我国的三维坐标系统，它不仅改善我国原有的二维坐标系统，而且也是地球科学和空间科学的迫切需要，这个空间大地网应包括 VLBI、SLR 和 GPS 技术所建立和施测的站。

我国目前已建成上海、乌鲁木齐二个 VLBI 站。建成了上海、武汉、长春、北京四个 SLR 站。完成了国家 A 级 GPS 网的布设和计算，已交付使用。1995 年已完成国家 B 级 GPS 网（约 760 个点）的布设。

我国的 VLBI 和 SLR 站的地心坐标精度大体上达到了  $\pm 2\sim 6\text{cm}$ ，有高有低。国家 A 级 GPS 网平均边长 650km，由于采用了当时比较精确的 SIO 精密星历，10 个 IGS 全球 GPS 跟踪站的高精度地心坐标及其 GPS 跟踪数据，这些数据与 A 级网一起平差，因此取得了该网边长的相对精度达  $1\times 10^{-8}$ ，点的

地心坐标在 ITRF91 坐标框架中的绝对精度达  $\pm 0.2\text{m}$ 。至于根据国家 B 级 GPS 网的初步计算资料表明，其相对精度优于  $2 \times 10^{-7}$ 。

## 二、今后任务

GPS 技术经过这十年发展已趋成熟，无论在定位、测速、测时的精度和应用范围都有了很大发展，特别是在获取地球动力学的数据方面，如监测地壳形变、板块运动、极移等，若和 VL - BI 和 SLR 技术在投资费用、维持费用、技术难度、数据获取率、数据精度等方面比较，GPS 明显处于优势。因此在“九五”期间，现有的 VLBI 和 SLR 要不断提高精度，进入世界水平，并保持作业率，继续发挥多方面的作用，但不宜再投资兴建新的台站。

在“九五”期间国家 B 级 GPS 网应完成数据处理并交付使用。由于 B 级网施测时间长，在数据处理中会涉及不同历元、不同系统的精密星历、不同坐标框架和地壳运动等一些特殊问题，因此要有仔细考虑的平差方案才能保证 B 级网成果的科学性，使它在一个确定的坐标框架内，在一个确定的历元，有较高的相对和绝对精度。

### 中国地区重力场参数的精化， 以适应资源勘探和空间技术的发展

一、继续填补中国大陆的重力测量空白地区。力争用 3 个五年计划（至 2010 年）填补以  $1^\circ \times 1^\circ$  为格网的重力测量空白地区，力争实测分辨率达到  $10'' \times 10''$ 。

二、“九五”期间完成优于  $15 \sim 20\text{mgal}$  精度（含西部地区）的民用  $1^\circ \times 1^\circ, 30'' \times 30''$  的格网平均重力异常值的推算，力争利用重力场模型和可能获得的国内外重力、地形和测高数据，将中国相当部分地区的格网平均重力异常值的分辨率提高到  $5'' \times 5''$ ，并力争达到优于  $8 \sim 10\text{mgal}$  的精度。

三、完成具有分米级精度似大地水准面的推算工作。推算时以国家 B 级 GPS（水准）网为基础，尽可能利用原有的一、二等天文重力水准网，结合重力和地形资料（全球和局部）改善分辨率。

四、大力利用卫星测高资料改善中国海域的栅格平均海面地形和平均重力异常的精度和分辨率。

五、积极开展小波理论应用于（局部）地球重力场的研究和将这一理论应用于中国多山地区的局部重力场表示。

### 着手建立我国实时动态定位和导航服务系统

#### 一、“八五”期间的进展

基本建成上海、拉萨、乌鲁木齐、北京、武汉五个 GPS 高精度 GPS 永久性跟踪站，并已投入正式运行。

二、“九五”期间应进一步完善和发展全国跟踪网，并在此基础上发展成为我国实时动态空位和导航的综合性服务系统。这一服务系统的功能基本包括三个方面。

#### 1. GPS 跟踪站数据的采集、处理和提供信息等服务。

建立 GPS 跟踪网的通讯和数据处理中心，同时它也是 GPS 的服务中心，这个中心的任务是：

- （1）实时或准实时采集跟踪网的 GPS 追踪数据；
- （2）实时或定期处理这些追踪数据，计算跟踪站的坐标和 GPS 卫星轨

道、星钟偏差、电离层改正等参数；

(3) 建立和国内外 GPS 追踪网 (如 IGS) 的通讯联系, 收集国外 GPS 精密星历, 收集 IGS 追踪站的坐标及其 GPS 追踪资料;

(4) 向社会提供 GPS 精密星历、国内外追踪站坐标、追踪资料等有关信息;

(5) 提供 GPS 的硬件、软件、外业、内业服务。

## 2. 建立全国性和地区性差分 GPS (WADGPS 和 LADGPS) 信息服务

我国 GPS 接收设备, 若顾及用于导航的在内, 超过万台以上, 而且由于 GPS 设备的小型化, 多用途, 低价, 它将在任何与地理环境有关的行业中得到广泛的应用。但是由于美国 AS 和 SA 政策影响, 定位精度大大降低, 特别是对实时 (静态和动态) 定位 (包括陆、海、空的导航和制导), 考虑到今后在经济和国防建设、运输和导航的需要, 利用 DGPS 的伪距或相位差分信息进行实时改正, 将实时定位精度由  $\pm 100\text{m}$  提高到  $\pm 1 \sim 3\text{m}$ 。

在“九五”期间, 应在经济比较发达的省会和省城建立 LADGPS 信息服务。这一信息服务由四个部分组成, 一是在一个具有精确地心坐标的大地点上, 装备一台能输出 DGPS 信息的 GPS 接收机; 二是将这一信息转输至当地 FM 电台的通讯设施; 三是该 FM 电台利用它播发节目频率的边频带发出 DGPS 信息给用户; 四是用户的调制解码芯片和 GPS 接收机。

全国性的 WADGPS 信息服务, 投资大, 运作复杂, 要视美国在 AS 和 SA 政策走向而后慎重决定。

## 3. 将 GPS 信息和 GIS 和 RS 结合起来

GPS 的巨大市场和广泛应用或者说它的生命力在于它和 GIS 的结合。一旦 GPS 和各种类型 GIS 结合或集成所生产的 GPS - GIS 装备, 将在各种行业、各种工种、各种领域中得到应用, 这将是今后十年中最有前途的测绘市场。它的实时动态形式, 将是 GPS - RS, 它的技术完善和用户还有待进一步开发。

概括起来说, 实时动态定位和导航服务系统是一种以固定站长期追踪 GPS 卫星, 采集 GPS 追踪站数据, 处理追踪站数据, 提供 GPS 有关信息服务 (包括差分信息服务) 并发展成与 GIS 和 RS 结合的体系。目前追踪站已初具规模, 对轨道计算、定位软件与 GPS 国际追踪站的通讯联系技术都已基本掌握, 因此在“九五”应不失时机的着手建立这一服务体系, 这种集 GPS 追踪, GPS 数据采集, 数据通讯, 数据处理和提供 GPS 信息服务于一体的网络体系, 是一种集成式的系统工程。

### 陆海相对垂直运动的研究, 为研究全球变化、减灾防灾做出贡献

海平面上升是全球变化中一种长期的、渐进的, 相当长时间内不易逆转的一种灾害性现象, 这一后果结合风暴潮, 对沿海地区的国计民生影响巨大, 危害严重。我国有 18000km 的海岸线, 沿海地区是中国的财富带和生命带, 因此海平面变化不仅是全球变化中世界性的三大课题之一, 更是作为海洋大国的中国在全球变化中的重大课题之一, 通过研究应该提出中国沿海地区海平面相对运动的预测及建立相应的专题地理信息系统和可能涉及的灾害预测和灾害风险评估。

### 青藏地区地壳运动的监测

由于这个课题涉及全球性的地学问题，引起世界性关注，因此有关部委已利用多种渠道，获得国内外经费资助，在“八五”用GPS在该地区重复多次布网，已进行了第一期地壳运动监测工作。此外，还进行了珠峰地区和珠峰高程的第三次复测，并在该地区建立了集大地测量各种技术的一个基本点，可以作为今后珠峰地区和珠峰高程复测的起始点。

“九五”期间应在该地区第二期地壳运动监测的基础上，积极开展该地区地壳运动机制及相关的地质、地球动力学方面的研究。

### 结束语

建议“九五”期间我国的大地测量重大工程项目要在“八五”的基础上，根据现代科学技术的发展，结合我国国情，做出如下安排：

一、国家二期一等水准复测及相应地壳垂直形变的研究。

完成国家二期一等水准复测的外业任务，数据处理任务，地壳垂直变形速率的推算工作。并结合其它学科，开展动力学机制方面的研究，结合实际资料，总结在消除水准测量系统误差方面的经验和教训。

二、完善国家空间大地网，建立国家高精度三维坐标系统。

1. 对我国VLBI和SLR的关键是提高精度，多得成果。不论是满足需要，还是技术走向，或是投入产出比例，这二类技术在我国不宜再在数量上做进一步发展。

2. 国家B级GPS网要完成数据处理。由于观测时间跨度长，数据处理中涉及一系列新问题。要提出相应的计算方案解决这些问题。

三、中国重力场参数精化，以适应资源勘探和空间技术的发展。

力争在2010年前消灭 $10 \times 10$ 的重力测量空白地区。

研究和完成分米级精度似大地水准面的推算，并结合重力和地形资料改善它的分辨率。大力开展利用卫星测高的在海面地形和海洋重力场方面的研究，开展小波理论应用于局部重力场精细表示的研究。

四、着手建立我国实时动态定位和导航服务系统。

将GPS追踪资料，星历、星钟差、电离层等有关信息和数据向用户提供服务。研究和开发GPS—GIS集成装置在各种领域中的应用。建立一至二个LADGPS信息服务台示范台，使这一技术能在大城市应用于实时动态定位和导航等。

五、继续开展陆海相对垂直位移的研究，为全球变化、减灾防灾研究作出贡献。

提出中国沿海地区海平面相对运动的预测报告和可能受到的灾害评估，以及建立一个相应的专题地理信息系统。

六、青藏地区地壳运动的监测和研究

进行第二期地壳运动的监测工作和对它的机制及影响进行研究。

# 西北水资源问题与对策

程国栋

中国科学院兰州冰川冻土研究所

程国栋 冻土学、水文地质与工程地质学家。1943年7月11日出生。上海人。1965年毕业于北京地质学院水文地质与工程地质系,1986年获美寒区研究与工程实验室名誉研究员称号。中国科学院兰州冰川冻土研究所研究员、所长。国际冻土协会(IPA)主席。1993年当选为中国科学院院士(学部委员)。主要从事冻土学研究。

西北地区,包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆五省区及内蒙西部,在战略上是支撑我国21世纪的社会经济可持续发展的重要基地。为了实现国家可持续发展战略,开发该地区丰富的矿产和土地资源,缩小东西部发展的差距,发展少数民族经济,安定边疆,以及使西部一些地区尽快脱贫致富,都需要尽快开发和发展这一地区。目前国家已作出开发和发展西北地区的重大决策,加大了对该地区的投入。

西北地区总面积占全国国土面积的1/3,土地资源丰富,本地区具有较大的土地开发潜力,是全国宜农荒地资源分布较广的地区;加上本区光热资源异常充足,草场资源丰富;农业生产的农作物病虫害少,发展农牧业有很强后劲,是缓解我国粮食、肉类等农牧产品供需矛盾的希望。在当前土地资源日益耗竭的现实情况下,西北广大未开发和利用的土地资源成为我国21世纪可持续发展的战略后备资源。

西北地区矿产资源种类多、储量大,在全国具有举足轻重的地位。此外,本地区具有绵长的国境线,居民仅占全国总人口的8%左右,而且还是许多兄弟民族长期安居乐业之处。这说明本区除了具有重大经济价值之外,还拥有国防、政治和社会等方面的重要意义。

开发和建设西北地区是我国国民建设的需要。实现全国人民生活水平奔小康,首先要减少东西差距扩大的趋势,只有建设好西部,西部奔小康,才能实现全民富裕的宏伟目标。

邹家华副总理在“国家计委加快西北经济发展战略座谈会”上指出:“西北地区发展最大的制约因素是水,当然还有其它制约因素,但是在西北地区,制约占第一位的是水,对经济发展影响很大。不把水的问题安排好,出了问题很难办。”国务委员、国家科委主任宋健也提出:“大西北水资源到底能容纳多少人。一方面祁连山的冰在融化,冰川积雪在减少;另一方面又要大发展,是否有个界限,这样才不至于将来大家都要搬家,形成新的楼兰。”

自80年代以来西北地区水资源就进入了十分紧张的状态,供需缺口越来越大,缺水城镇增加,工农业用水紧张,农、林、牧间用水矛盾与一条河流上、中、下游间用水矛盾日益尖锐,已经影响到中下游地区生态和社会经济发展,有些缺水地区经济发展受到严重的约束;另一方面水资源开发利用的前景面临着许多新的挑战,这是因为:淡水资源显得越来越少,不再成为廉价的资源,目前作为后期可取用的淡水几乎均已开发,或者在今后要进行开发的可引用水资源投资昂贵。这里的人口仍在稳定地增长,随着我国经济向西部转移,势必带来工业、农业和生活需水及其它用水的成倍增加。

人类活动增加，越来越多的废物、废水，污染着有限的可引用水源，尤其是污染地下含水层，在西北地区将带来急剧减少和损失淡水资源的严重后果。

未来新修水利工程，或因投资较高和资金缺乏，或因社会和环境原因而将拖延实施，使本来存在的供需矛盾加剧。因此，面临 21 世纪的环境与发展的重大问题，归纳总结西北地区水资源研究成果，分析目前水资源开发利用的问题和潜力，提出全面统筹规划、合理安排，持续地利用西北干旱区可利用水资源，来缓解西北地区水资源危机十分必要。

## 一、西北水资源的特点

### 1. 高山与盆地相间分布

西北地区高山环列，基本上形成高山与盆地相间的地貌单元。这种地貌格局使水资源在水文气象条件上，不仅存在水平地带性差异，还存在明显的垂直地带性差异。高山的存在能够截获较多的水汽。如天山西部年降水量最高可达 900mm 以上，并且发育有大面积的冰川和积雪。正是由于高山的存在，西北地区才有较多降水，发育了众多的河流，水资源相对丰富，为我国开发利用西部地区提供了有利的条件，并形成众多的绿洲。

(1) 西北的内陆盆地与高山相间分布的地形，使所有发源于高山地区的河流都向盆地汇集，组成向心式水系。一些水量不大的小河在出山后不久即消失于沙漠与戈壁之中；一些水量较大的河流，在盆地的最低洼处储成内陆湖泊。这些内陆河的上游山区大都有冰川的调节，高山冰雪融水补给比重较大，径流量年际变化相对较小，保证率较高。径流在年内分配上，集中在夏秋季，与农作物需要水量最多季节基本一致，有利于农业生产的供水。

(2) 西北地区盆地结构特别有利于地下水的储存，地下水资源比较丰富。一般来说，西北干旱区盆地的降水很少，对盆地地下水的形成和补给意义不大，但由四周注入盆地的河流，几万年几千年以来渗漏到地层下面积成地下海和地下湖，水量估计是相当可观的。据粗略计算塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地和河西走廊山前平原的地下天然资源约为 314 亿立方米。

(3) 西北地区水资源的变化强烈受气候因素影响。西北地区气候条件对水文的影响主要体现在气温上。温度的情势不仅是蒸发的一个重要因素，影响着水分平衡的各个因素，而且山区的温度状况还直接影响着高山冰雪融水和季节积雪融水量的多寡。特别是一些发源于天山、昆仑山、祁连山等山地的河川径流，融水补给占有较大比重。因此山区流域内气温的高低和变化，会直接影响到河川径流量的变化。

### 2. 共同的地貌纵剖面

西北地区每一个内陆河水系，由源头到尾闾都要流经山区、山前洪积、冲积倾斜平原，冲积或冲积湖积平原，沙漠等地貌单元。在岩相上则分别为：裂隙基岩，大孔隙洪积砾石，冲积中细砂和粉砂。从而使地下水埋深分布，在平原地区具有自山前向盆地中心逐渐由深变浅的规律。山区的河流多数是山区基岩裂隙水的排泄通道，因而山区的地下水在河流出山前几乎全部转化成地表水，经河道排到山外。河流进入山前平原后，地表水大量渗漏转化成地下水，然后地下水又在适当条件下以泉水的形式溢出地面，变为地表水，并成平原河流。即地表水 - 地下水 - 地表水的转化过程。西北地区平原地带分布着前山构造，因此可以使这样“渗入”、“溢出”的水资源转化过程重复多次。如甘肃河西走廊地区，由径流区到散失区要经过：中高山地区 - 山

麓丘陵区 - 洪积扇群 - 细土平原 - 低山丘陵 - 洪积、冲积、湖积平原。

(1) 地表水与地下水相互间的大量转化表明,西北地区山前平原现存的地表水、地下水、泉水等各种形式的水资源,在成因上有不可分割的内在联系。地下水资源补给来源,绝大部分是地表水的渗漏,而泉水则又是出露的地下水,二者基本上是出山口地表水的转化与重复,不是完全独立的水资源形式。如果不注意西北地区山前平原水资源存在的这种特殊情况,把地表水、地下水、泉水等作为互不相干的,完全独立的水资源形式,进行相加,就会过分夸大实有水资源数量,造成对西北水资源评价和利用上的混乱。西北地区这种地表水与地下水之间的大量转化与重复,有利于水资源重复引用,使利用率提到很高的水平。如转化条件较好的甘肃河西走廊石羊河流域,在合理开发利用地表水和地下水的情况下,流域总水资源的利用率可以达到75%左右。

(2) 西北地区水资源的大量转化和重复,对各种形式的水资源的开发和利用有着深刻的影响和明显的制约。只要牵动转化中的一个环节,以下环节将随之发生变化,并影响到水资源的利用方式。如上游修建水库和高标准防渗渠道的施工,渠系利用率的提高,使地表水在洪积扇的渗漏量不断减少,将大大减少地表水转化为地下水的数量,随之使下游地区泉水的溢出量和溢出地点、平原河流的径流量及其以下地区地下水的补给量减少。又如在上游地区大规模开发利用地下水,降低地下水位,将导致下游地区的泉水及平原河流水量大幅度减少。

## 二、西北水资源问题

### 1. 水量较少

#### (1) 水资源现状

西北地区年径流量大约为1000亿 $m^3$ ,占全国的4%左右。人均占有量和耕地亩均占有量则更少(如表1、2)。河西走廊地区人均占有地表径流量为世界平均水平的15.2%,为全国平均水平的72.7%;石羊河流域分别为6.9%和32.8%;新疆分别为50.1%和23.9%;但乌鲁木齐市则只为6.0%和28.7%。耕地亩均占有年径流量,全国平均为1,886 $m^3$ /亩,河西走廊为全国平均的39.4%,石羊河流域不及18.5%,新疆92.4%,昌吉州只有21.6%,内蒙西部阿拉善内流区年径流量只有0.24亿。

表1 西北人均占有地表径流量

地区	占世界平均水平	占全国平均水平
石羊河流域	6.9 %	32.8 %
河西走廊	15.2 %	72.7 %
新疆	50.1 %	239 %
乌鲁木齐	6.0 %	28.7 %

表2 西北地区耕地亩均占有年径流量

地区	亩均占有年径流量
河西走廊	39.4 %
石羊河	18.5 %
新疆	92.4 %
昌吉州	21.6 %

加上部分水资源盐碱度高，难以利用，使水资源可利用量更少，水资源数量贫乏。尤其是西部经济较发达地区，缺水的矛盾更加尖锐。

### (2) 未来变化趋势

由于气候变化和人类活动的影响，整个地区呈现干旱化的趋势。自 20 世纪以来，全球变暖，气温波动上升，以 80 年代和 50 年代相比，新疆升高 0.59℃，青海升高 0.31℃，超过全球同期增温 0.24℃；80 年代和 60 年代相比，青海升温 0.47℃，甘肃升温 0.28℃，蒸发和消融增强，显示西北是全球变暖中的敏感地区。与此同时引起水资源量产生了巨大变化，表现在以下几个方面：  
**冰川：**高山固体水库减少，如乌鲁木齐河流域冰川面积从 1964 年的 48.2km<sup>2</sup> 减至 1992 年的 40.9km<sup>2</sup>，损失 15.1%；1 号冰川物质平衡亏损，60 年代为 -53mm/a，80 年代增至 -346mm/a，而到 1990/1991 年增至 -706mm/a。  
**河川径流：**新疆 60 年代年径流量为 805 亿 m<sup>3</sup>，80 年代降为 724.5 亿 m<sup>3</sup>。新疆北部和祁连山东段径流减少显著，新疆南部以冰川补给为主的径流量略有增加。  
**湖泊：**大量湖泊萎缩以至干涸，青海湖 1908~1957 年间水位剧烈下降，平均每年下降 17.2cm，显然经历了一个大的干旱期；1958~1990 年平均水位每年下降 7.4cm，相当于年净亏损水量 3.25 亿 m<sup>3</sup>，其中人为用水因素只占 27%。还有若干湖泊因水资源开发利用不当而干涸，如玛纳斯湖（50 年代面积为 550km<sup>2</sup>）、艾丁湖（50 年代面积为 12km<sup>2</sup>）、罗布泊（30 年代面积为 1,900km<sup>2</sup>）、西居延海（水面曾达 560km<sup>2</sup>）等。  
**积雪：**平原积雪，北疆稳定积雪区域 1978~1987 年 10 年间较 1957~1987 年的 30 年间冬季积雪量平均减少了 13.6 亿 m<sup>3</sup>，高山积雪则略有增加。  
**地下水：**若干地区地下水过量开采，如乌鲁木齐附近、甘肃民勤附近地下水开采量远大于补给量，地下水位下降数十米以至上百米（如乌鲁木齐猛进水库以北承压水埋深 20 年下降了 70~110m）。随着未来气候继续变暖，预期 2030 年左右西北地区温度上升 1℃左右，降水增减的不确定性较大，增加的可能性较大。人为用水因生产发展而大幅度增加，而冰川积雪、湖泊将进一步萎缩，山区许多固体水库的消失，河流水量不稳定性增加。以冰川融水补给为主的河流将经历初期流量增加，后期大幅度减少的过程。

### (3) 供需预测

如表 3 所示到 2000 年西北地区预测总缺水量为 150 亿 m<sup>3</sup>，最大缺水将发生在农业生产上，这将给我国未来的农业建设带来极大的阻碍。



表3 西北干旱区水资源总供需平衡表 \* 亿 m<sup>3</sup>

	工业	农业	畜牧业	农村人畜饮水	城市生活用水	不可预知
总需求	28	470	165	27	5	5
700	4 %	67%	24%	4%	0.5%	0.5%
总供给	地表径流			地下水		
550	450			100		
盈亏	总供给 - 总需求					
	550 - 700					

\*据国家计委及国家统计局资料,西北干旱区至 2000 年缺水 150 亿 m<sup>3</sup>

## 2. 分布不均匀

西北干旱区水资源分布不均表现在两个方面：

(1) 地域上：北多南少，西多东少。新疆水资源集中在较湿润的西北部，阿尔泰和伊犁地区的地表径流量占全疆的 35.6%，而政治、经济、文化和工业中心乌鲁木齐市只有 1.1%。吐哈盆地为新的石油基地，地表径流只有 2.0%。面积约 56 万 km<sup>2</sup> 的塔里木盆地为近年来石油开发的热点地区，地表径流只占全疆的 39% 左右，而且还主要分布于盆地边缘。河西地区三流域，以东部石羊河流域水资源量最少。

(2) 季节上：春旱、夏涝、秋缺、冬少。降水量季节分配的区域性变化较大，受西北环流和北冰洋气流输送水汽影响的北疆地区，降水多集中于春、夏季，秋季次之，冬季最少；受太平洋和印度洋季风环流输送水汽影响的甘肃地区，降水则主要集中于夏季，其次为春秋季节，冬季降水量很少。南疆地区降水的季节分布和甘肃地区类似。除了阿尔泰和塔城等少数区域外，春旱是新疆最大的自然灾害，同时，夏季又经常有洪水泛滥。在河西走廊，4~6 月份河道天然来水量只占 19%~31%，而这段时期灌溉需水量则占全年的 34%~45%，来水量满足不了目前条件下的农业灌溉需要，造成大面积农作物的大量减产。据统计在平水年份，河西地区由缺水而延迟灌溉，使受旱面积占播种面积的 30% 左右。这种状况影响和制约着西北地区的生态环境变化和社会经济的持续发展。

## 3. 水资源严重浪费

西北水资源一方面很紧缺，另一方面浪费现象十分严重，大部分流域沿袭历史上多口引水的方式灌溉，水量浪费大。中游绿洲的平原水库和地下水位较高的地区，由蒸发造成的无效消耗的水量也不少。

(1) 农村：农田毛灌定额大，超量引水，大水漫灌、串灌现象依然存在。北疆地区毛灌定额达 1000~1500m<sup>3</sup>/亩，个别达 2000m<sup>3</sup>/亩，造成水资源的大量损失。目前采用节水措施的农田面积不大，且多为常规节水方法，田间水利用率很低，渠系利用系数平均为 0.3~0.45，加上渠管没有建立完整的引排水控制设施，排水出路不畅。当洪水来临，地下水位抬高次生盐渍化严重。石羊河河川径流引用率为 73%，全流域净利用率为 41%，一半以上水浪费掉；黑河流域河川径流引用率 65%，净利用率仅 31%，近 2/3 的水没有发挥作用。流引用率 65%，净利用率

(2) 城市：乌鲁木齐市人均日耗水量为 89 升/人·日；石河子为 100

升/人·日。自备井人均平均用水量为 220 升/人·日。由于自来水管理不严格和收费较低造成浪费十分严重。

(3) 工业生产：工业生产上浪费水的现象也较普遍。工业生产综合万元产值需水量兰州地区为 370 吨，乌鲁木齐为 707 吨，西宁为 1764 吨，而东部青岛仅用 97 吨，体现西北工业生产耗水量较大。

#### 4. 水环境恶化

水环境恶化包括：土地荒漠化、土壤盐渍化和水体污染化。

##### (1) 土壤荒漠化

中国沙漠化土地约为 149 万  $\text{km}^2$ ，占全国总面积 15.5%，西北地区荒漠化土地则占荒漠化总土地的 90%。

土地荒漠化正在逐渐蚕食人们赖以生存的绿洲，新疆 90% 以上的人口聚居在占总面积的 4% 的绿洲上，前景也不容乐观。在过去 25 年间，西北干旱区土地荒漠化约为 15 万  $\text{km}^2$ ，每年以 0.2~0.3 万  $\text{km}^2$  速度增加，其主要原因在于浪费水资源和不合理开发利用水资源，如再不加大治理强度，后果将不堪设想。

##### (2) 土壤次生盐渍化

西北干旱区由于水资源利用不当，土壤盐渍化面积约为 3000 多万亩，占全国盐渍化土地的 1/3。新疆有 1883 万亩盐渍化土地，占总耕地面积的 30.6%，而南疆为 484 万亩，占耕地总面积的 48.8%。

##### (3) 水体污染化

由于灌区回归水和城市、工业废水的排放，地表水、地下水污染严重。

塔里木河阿拉尔站近 30 年来矿化度逐渐上升。

1960 年 5~12 月矿化度为 0.33~1.28g/L；1965 年洪水期为 0.36~0.45g/L，枯水期为 2.0~3.5g/L；1966~1977 年为 0.44~1.02g/L，枯水期为 2.56~5.4g/L；到了 1981~1984 年矿化度变为 0.4~4.0g/L；1988 年最大矿化度超过 7g/L。

乌鲁木齐市水磨河沿岸几家纺织、印染、皮革和化工厂排放的未处理的废水约为  $4 \times 10^3 \text{m}^3$ /日。1985 年乌鲁木齐市污水为  $0.78 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中工业废水为  $0.53 \times 10^8 \text{m}^3$ ，有害物质为 200 多吨，而废水处理仅占总污水的 32%，造成地下水污染面积超过  $400 \text{km}^2$ 。

石羊河 70 年代中至 90 年代初，开采地下水量累计超过  $36.28 \times 10^8 \text{m}^3$ ，地下水位下降 2~17m，绿洲内部形成面积达  $986 \text{km}^2$  的三个漏斗。下游民勤提取地下水  $4.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，地下水矿化度上升 1~7g/L，使 7.6 万人和 12.4 万头牲畜饮水困难，37 万亩耕地弃耕。由于水质恶化使西北地区地方病加剧，如青海北乐都居民饮用硫酸盐含量较高的水，得地方性腹泻；饮用含碘较低的自来水，得地方性甲状腺肿瘤。而宁夏固原地区由于水中含氟高，使氟骨病普遍存在。陕西延安、甘肃庆阳地区易得克山病和大骨节病就是由于本地水中含较高的腐殖酸和硒的含量过低。

### 三、可引水量和可用水量

可引水量系指流域内运用各种水利设施和手段引进渠道和管道的毛水量（包括重复引水水量）。由于在西北干旱区地表水与地下水之间有较大数量的转化，水资源可重复引用，因此，它可大大超过流域的水资源总量。如新疆乌鲁木齐河流域，水资源总量为  $6.431 \times 10^8 \text{m}^3$ ，而可引水量为  $8.478 \times$

108m<sup>3</sup>，是水资源总量的 131.8%。河西石羊河流域的水资源总量为 16.995 × 108m<sup>3</sup>，可引水量达到 18.569 × 108m<sup>3</sup>，是总量的 109.3%。

可用水量系指通过各种水利设施和手段输送到用水户的水量，在农业上为末级渠道引水量，在工业和生活上则为各用户的供水量。根据水量平衡原理，由于水资源在输送和循环过程中不可避免地要有蒸发损耗，能够利用的只是其中的部分，所以可用水量总是要小于水资源总量。如乌鲁木齐河流域可用水量为 5.579 × 108m<sup>3</sup>，是总量的 86.8%；而石羊河流域为 12,875 × 108m<sup>3</sup>，是总量的 75.7%。水资源最大可引量和可用水量与流域水利化和水资源开发利用程度密切相关，渠系和田间水利用率越低，可引水量越大，可用水量越小。

#### 四、对策

对于西北这样一个特定的地区要搞好水资源的合理开发利用需要做到：强化管理，科技兴水，增加投入。

##### 1. 强化管理

西北水资源管理工作滞后，至今仍大体上实行清朝雍正年间的“均水制”。从横向上看，本区域跨越新疆，内蒙，陕西，甘肃，宁夏等地区；从纵向上看，农业、水利、林业、环保、城建等部门分别管理农、林、牧、工矿业、城市用水。这种格局无法按流域实行科学的管理，所以必须改变现在管水体制，尽快成立按流域统一的，有权威的水利管理机构。健全各级灌区水管所（站），统一管理水利工程，协调用水，监督各用水户遵守水法、水规，按方收费，实行全流域强有力的统一的调度。只有这样才能克服目前水资源开发利用上的诸多弊端。这种按流域统一管理的体制可确保水资源合理、高效的开发与利用。

##### 2. 科技兴水

西北地区水资源合理开发利用是一项复杂的系统工程，必须依靠科技兴水，努力使科学技术与治理实践紧密结合，加强典型示范，培训专门人才，重视适用技术的推广和新技术的应用研究，要在管理的全过程中贯穿科学技术的应用，把科技转化为生产力，真正做到科学管理。

依靠科技兴水，要做好四方面的工作即摸清家底、合理配置、高效利用、优化环境。

##### (1) 摸清家底

一个地域空间总存在一个阈资源，对承载能力的大小起主导作用。湿润地区，水资源充沛，因而起主导作用的是土地资源和矿产资源。但在西北干旱区，水资源有限，而土地资源和矿产资源相当丰富，因而水资源就成为西北干旱区的阈资源，水资源的多少决定了其承载能力的大小。所以在西北地区要使社会、经济持续发展必须搞清水资源的家底，了解水资源可利用量的多少，为此需要：

预测在气候暖干化、冰川退缩的情况下，未来出山口径流的变化。加强上、中、下游河道水量预报和估算，评价流域环境质量。目前河西流域的现状用水情况大致清楚，但还有需进一步查明的问题，如甘蒙输水渠修建后，黑河地表水对地下水补给的影响问题仍需进一步研究，维系绿洲的生态用水量也待进一步查明。

##### (2) 合理配置

在摸清家底的基础上，应按照“以水定地、以水定人口、以水定发展规模”的原则，对西北干旱区内陆河流域的水资源进行合理配置。按照流域是一个完整的地表水和地下水相互联系的生态系统的观点，科学地处理好上、中、下游用水关系；农、林、牧、生态与工矿、城市用水关系。地表水和地下水联合开采的关系，以求得社会效益、经济效益和生态效益的统一。

处理好节水和调水的关系。按照西北地区的实际情况，应以节水为主，适当调水，调水也应是在节水基础上的调水。从长远发展看，必要的跨流域调水工程是需要的，要在全流域规划的基础上，作好工程前期的可行性论证。

开展流域水资源多目标规划和管理的研究。

### (3) 高效利用

西北地区必须建设高效节水型环境。无论是农、林、牧、工矿城市用水还是生态用水，都要从高效节水的观点出发去考虑问题，要像推广计划生育那样推行高效节水，在宣传、措施、技术、队伍上落到实处。节流是目前缓解西北干旱区缺水矛盾的关键所在。一方面西北干旱区节流潜力很大，另一方面是既缺水，又因开发管理不善和技术条件落后，造成水资源大量浪费。目前西北地区水资源的利用率仍很低，一般情况下每方水仅生产 0.2~0.5 公斤粮食或 0.1~0.8 公斤生物生产量，若按目前在试验地的经济用水种植，不仅可大大节约用水，而且还可提高单位水的产值和产量。

引起灌溉水浪费主要为渠系渗漏和田间损失。渠系渗漏的原因有渠系工程不配套，灌区工程配套水平低，渠道防渗衬砌率低。目前渠系利用系数仅达 0.30~0.55。即使在渠系利用较高的河西灌区，也是经过十多年努力由原来 0.3 提高到现今的 0.55，若增加农田水利工程投入，以提高渠系利用系数入手，在农田灌溉上节约 10%~15% 的水量是完全可能的。田间损失是由于农田灌水技术落后，土地不平整，耕作粗放，灌水不适时适量，管理水平低造成，因此从加强农田基本建设，平整土地，改大块灌为小块灌、改漫灌为畦灌等都是最简单有效的节水措施，节水也可以达 10%~15%。只要在已建成的灌区中采取节水措施，就可以挖掘出很大潜力，如采用了喷、滴灌、渗灌和地膜覆盖耕作等新的节水灌溉技术，节水潜力更大。此外西部地区在工业、林业上节水潜力也很大。

### (4) 优化环境

西北地区生态环境十分脆弱，而水资源的开发利用又对这种脆弱的生态环境有决定性的影响，“有水是绿洲，无水是沙漠，水多盐渍化”。所以在西北地区水资源开发利用上必须贯彻生态环境优先的原则，以求得生态效益和经济效益的统一。生态环境的变化具有一定的调控性。人类在开发利用西北地区自然资源过程中，变自然生态系统为人工生态系统，使其向高效能方向发展。生态环境的变化又具有必然性。其中有些变化对人类有利，是追求的目标；有些变化对人类不利，需避免、防止。有些变化是可以避免的，有的则不可避免。片面强调保护，使生态系统回到低效能自然平衡中的想法是不切实际的；片面强调经济效益而严重破坏生态环境是不可取的。所以开展西北干旱区天然绿洲转化的有效途径的研究十分必要。

## 3. 增加投入

要达到水资源的合理开发利用，投入是关键。

(1) 西北地区水土资源开发潜力很大，应成为我国未来农业经济开发重点区域。水利是命脉，按照国家向中西部倾斜的政策，考虑到西北地区的长

远发展，国家应在投入上对西北的水利建设有所加强。

（2）节水为主、适当调水是西北地区水资源合理开发利用的基本原则。但国家目前的政策导向不利于节水的提倡。1995 年国家对农业增加投入 35 亿，其中 30 亿用于大中型水利工程，对小水利工程投入较少，而在节水方面投资更少，使西北水资源的经济效应未能充分发挥。建议国家在政策导向上采取鼓励节水的有效措施，促进西北地区开发和利用水资源新模式的尽快形成。

# 现代土壤学中的农业持续发展问题

赵其国

中国科学院南京土壤研究所

赵其国 土壤地理学家。1930年2月25日出生。湖北武汉人。1953年华中农学院毕业。曾任中国科学院南京土壤研究所所长、研究员。现任中国科学院农业研究委员会主任、江苏省科协副主席；中国土壤学会理事长、国际土壤学会盐渍土委员会主席、国际土壤学会东亚和南亚土壤协会主席等职。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。

主要从事土壤地理、土壤资源评价等研究。曾获国际道库恰耶夫奖和多项国家科技奖。

“民以食为天，食以土为本”。土壤是人类生存的基本资源，是农业发展的重要基础。当前在我国传统农业正向高产、优质、高效的现代农业转变时期中，土壤学也正在随着社会发展，朝向现代土壤学的方向转变。因此如何从土壤及现代土壤学的观点，特别是从土壤肥力与土壤植物营养的观点，正确地认识与解决我国，包括江苏省当前农业持续发展中所面临的问题，具有重要的理论与实践意义。

## 一、现代土壤学的发展趋向

随着社会的不断发展，土壤作为人类赖以生存的重要自然资源，亦正在逐渐或迅速地发生变化，当今土壤学已由原来仅研究土壤本身向土壤圈及其与各圈层之间的关系的方向扩展。

土壤圈是地球上气圈、水圈、生物圈及岩石圈交界面上的一个圈层，它处于四个圈层的中心，既是地球各圈层物质循环与能量交换的枢纽，又是地球各圈层间相互作用的产物。由于土壤圈处于地圈系统，即上述四个圈层的中心，因而它具有：永恒的物质迁移与能量交换；最活跃与最丰富的生命力；“记忆块”与“基因库”；时空变异与限制性；资源的再生、利用与保护等特性，并且具有支持与调节生物过程与养分循环（对生物圈）；影响大气组成，水平衡与释放温室气体（对气圈）；影响降水分配与平衡（对水圈）；影响土壤发生与地质循环（对岩石圈）等功能，它的作用在于通过土壤圈与其它圈层的物质交换影响全球变化，通过人为活动对土壤圈的强烈作用，对人类生存与环境起重大影响。

因此，从土壤学的发展看，今后的研究共有两个方向：

第一、研究土壤圈与地球其他圈层的关系。

第二、研究土壤圈物质迁移与能量平衡对人类生存环境（持续农业）的影响。

上述研究方向可概括为以下四项研究任务：即土壤圈物质循环与全球土壤变化；水土资源时空变化、开发利用与恢复重建；土壤肥力演变规律、发展趋向与调控对策；农业持续发展、区域治理与生存、环境建设，其中通过土壤圈物质与养分循环，研究与解决农业持续发展与生态环境建设是关键。

## 二、现代土壤学面临的挑战

从当前社会与经济发展对土壤的要求看，现代土壤学正在面临着严峻的挑战。

### 1. 人口与粮食

到本世纪末，世界人口总数将达到 62.41 亿，其中发达国家 12.72 亿，发展中国家 49.69 亿，将来世界粮食需求增长率对发达国家应在 1.2%，发展中国家应在 3.1%~3.7%才能满足社会发展的需要。所以到 2000 年，世界粮食的需求量为 21.3~22 亿吨，比 1990 年的粮食总量要净增 3.5 亿吨。面对这样的严峻形势，生产条件落后的发展中国家将承受巨大的粮食生产压力。

目前我国人口每年正以 1400 万净增人数增长，预计到本世纪末，人口总数可达 13 亿左右。以人均 400 公斤的年消费水平计算，需要粮食 5.2 亿吨，然而要在仅占世界耕地面积 6.8%的土地上，获得世界粮食生产总量的 23.6%，任务是极为艰巨的。

江苏省 1991 年人口是 1949 年的 1.95 倍，1993 年人口为 6967 万人，粮食总产 3035 万吨，人均达 435 公斤，从全国看，粮食产量较高，但 30 年来，由于人口增长，人均耕地已不足 1 亩，耕地负载量比 60 年代增加 2.5 倍，问题也十分严峻。

### 2. 资源与环境

当前，全世界拥有耕地 7.3 亿公顷，预计到本世纪末可再扩大耕地 1.8 亿公顷，总共为 9.1 亿公顷。但是，由于人类不合理的开垦土地，近年来土壤退化不断加剧。全球范围内的水土流失面积已发展到总土地面积的 16.8%；沼泽化、沙漠化的面积也分别达到总面积的 10%和 33%；次生盐渍化面积约 12 亿公顷；耕地被侵占近 2 亿公顷；20%耕地存在着养分亏缺；在 76 个发展中国家中，森林以每年 1130 万公顷的速度砍伐，而造林仅为 110 万公顷。世界上仅有 0.27%的水资源可为农业、工业和城市利用，有人预测，不出 20 年，淡水的供给将不能满足需要。

我国的水土及森林资源按其绝对量来说名列前茅，但人均占有量很低。人均耕地、林地和草地分别仅占世界人均量的  $1/3$ 、 $1/5$  和  $1/4$ ；水资源总量居世界前列，而人均只占世界的  $1/4$ ；森林资源居世界第七，但人均量是第 130 位。在此情况下，土地承载压力巨大。全国中低产田已占总耕地面积的  $2/3$ ，目前约有 2000 万公顷的耕地受到干旱威胁。水土流失面积占国土总面积的  $1/5$ ；沙漠化的土地达到 3330 万公顷，并且平均每年以 15 万公顷的速度扩展；草原退化面积 8700 万公顷，并且每年以 120 万公顷左右速度增加。随着工业的发展，污染日益严重，每年废水排放量为 368 亿吨，烟尘排放量为 1445 万吨，受污染的耕地面积约 670 万公顷，酸雨对江南农业生产的影响也越来越严重，仅  $SO_2$  的危害，每年可达 270 万公顷。

江苏省人多地少，自然资源有限，土地总面积 10.28 万平方公里（占全国 1.1%），总人口 6843 万人（占全国 5.7%），建国以来，累计占耕地 1887 万亩，实际减少 402 万亩，人均耕地由 2.77 亩降至 1.2 亩（按农业人口计），低于全国水平。低产田 4538 万亩，占耕地 66%（耕地面积为 6782 万亩），每年废水排放总量近 4 亿吨，全省几乎找不到未受污染的 1 级水，太湖地区 80%的河湖呈不同程度的富营养化。

面对上述挑战，今后相当长的时期内，提高粮食生产是主要的任务。现代土壤今后的发展必须为人类享有充足的食物和清洁的环境作出贡献。

从一般意义上讲，提高粮食生产可通过扩大播种与灌溉面积、合理增施化肥、选育优良品种、采用先进的科学技术、实行集约化经营、增加劳动力投入等途径来实现，归结起来是扩大生产规模和提高集约化程度。对于扩大生产与土地规模，对我国来说潜力不大，全国仅有荒地 3300 万公顷，可利用的草原 2 亿公顷；可利用的淡水水面及沿海滩涂 1300 万公顷。江苏省耕地的后备资源仅有 600 万亩，其中海涂约 200 万亩，荒地及荒丘约 400 万亩，据分析，若在本世纪开发 1100 万公顷的宜农荒地和垦殖 90 万公顷的滩涂，需要投资 740 ~ 1060 亿元，这是现有国力难于承担的。因此，重点宜放在提高资源的集约化与利用效率，即从解决粮食增产与农业持续发展的途径着手，其中包括五点：（1）中低产田的综合治理；（2）提高化肥利用率；（3）提高水资源，特别是土壤水资源的综合利用率；（4）提高现有耕地集约化程度；（5）优化农业生态模式。同时，必须采用开发和治理并举的政策。防止造成环境污染，对社会形成公害和产生经济效益。

### 三、土壤肥力与农业持续发展

土壤肥力是土壤的本质特性，土壤的概念是和它的肥力分不开的。由于土壤具有肥力，并能不断地提供植物（包括农作物）生长所需的各种土壤因素，保持农产品产量与质量的稳定与提高，因此，土壤肥力是农业持续发展的重要基础。

#### 1. 土壤肥力的概念

土壤肥力是指“土壤在某种程度上，能不断地同时供应在植被生长期中所需要的养分、水分、空气与热量的能力”。这一概念，共包括以下内容：

第一、土壤养分、水分、空气与热量（即养、水、气、热）是土壤在生物与环境共同作用下不断发展形成的，它们处在不断循环与再循环的相互作用中，人为活动是决定土壤肥力因素发展方向的基本动力之一。

第二、土壤肥力处在持续（提高）、退化与重建的动态平衡中并具有明显的时、空特征，在自然条件、特别是在人为作用影响下，土壤肥力处于持续（提高），退化与重建的相互转化的不稳定阶段。

第三、土壤肥力（养分）退化与肥力（养分）重建过程是普遍存在的，人类的任务在于调节这两个相反的过程，使其向有利于土壤肥力提高的方向发展，其中调节土壤生态系统养分循环与平衡是关键。

第四、土壤肥力的保持与提高是在动态平衡中建立的，除土壤肥力退化外，需在土壤物理性质改善基础上（空气与热量平衡），根据不同植物的需求，调整养分与水分的比例与水平，并注意有机无机肥料的平衡施用，其中调节再循环过程是核心。

第五、由此可见，土壤肥力是建立持续农业的重要的物质基础，通过调节土壤退化与重建过程，不断培育持续高产的土壤肥力，是建立持续农业的根本措施。

#### 2. 土壤植物营养在持续农业中的作用

土壤植物营养元素，即土壤养分是土壤肥力的主要组成部分，它对农业持续发展有重要影响。

据我国 1978 ~ 1984 年 6 年统计，每亩增施化肥 4.1 公斤，增产粮食 68 公斤；1984 ~ 1993 年 9 年间，每亩增施 6.1 公斤，增产粮食 34.92 公斤。这与过去记载的每公斤化肥（养分）能增产粮食 8 公斤，粮食增产有 35% 是靠



施用化肥的结果相一致，说明氮、磷、钾肥的施用对作物增产的明显影响。

首先，氮素是作物营养元素之首，施用氮肥是提高农产品产量最有效的手段之一。据联合国 FAO 统计，1991 年全世界氮肥施用量为 8000 万吨氮（相当于 4.0 亿吨硫酸铵），其中，我国氮肥施用量达 1726 万吨氮（相当于 8630 万吨硫酸铵）占世界氮肥用量的 21.6%，为世界首位。江苏省氮肥施用量 157 万吨，占全国 9%，但值得注意的是，各种氮肥品种的氮素，当季利用率均不高：硫酸铵为 30%~42.7%，尿素为 30%~35%，碳酸铵为 24%~31%。这是因为，氮挥发和硝化 - 反硝化作用的结果。据近 30 年的研究，水田化学氮肥损失为 50%，旱地为 40%，即每年损失的化肥氮量相当于 3884 万吨硫酸铵，价值人民币 285 亿元，如果把氮素损失减少 10%，每年即可减少损失 30 多亿元。此外，农田生态系统中加入的肥料氮的损失通过径流及淋洗进入水体（ $\text{NO}_3^-$  等），不仅污染饮用水，而且也引起河、湖富营养化，如太湖地区 50% 的饮用水样中  $\text{NO}_3^-$  浓度超标，38% 的井水样  $\text{NO}_3^-$  浓度超标，因此，如何合理施用并控制氮肥损失，是氮肥在农业生产的重要问题。

磷也是重要的植物营养元素之一。据有关资料“磷是不能重复利用的资源，如以每年耗磷矿 9400 万吨计算，世界磷矿的储量只能使用 100 年”。据 1993 年统计，我国磷肥用量已达 750 万吨（ $\text{P}_2\text{O}_5$ ），江苏省 38.3 万吨，占全国 6%，但当季植物只能利用 10%~25% 左右，有近 75%~90% 的磷肥积累在土壤中，其数量相当可观。研究表明，磷肥施入土壤后，大都被固定，各地区土壤全磷通常高于有效磷几百倍。由于长期施用磷肥（1991 年我国磷肥消耗为世界第二位），我国从 70 年代中期起，农田磷素循环即基本达到平衡。因此，如何利用土壤中的累积态磷，是重要的科学问题。此外，随着土壤中累积态磷的增加，释放到径流中的磷将会增加，水体中只要含 0.02ppm 的磷，将使水体开始富营养化，并威胁水生生物的生存，这一问题也应引起注意。

我国钾肥资源紧缺，钾素化肥的利用近年虽有增加（1991 年，我国钾肥消耗量占世界第四位），但从钾的投入与产出量比较，每年均为亏缺，近年亏缺量达 500 万吨左右。1993 年，全国施用钾肥仅 212 万吨，江苏省 7.9 万吨，占全国 3%。从目前情况看，要从作物中将所摄取的钾素全部归还给土壤仍很困难。因此，耕地土壤严重缺钾的状况将继续存在。

微量元素在氮、磷、钾施用的基础上，也出现不平衡与亏缺情况，并对植物生长起限制作用，它们在植物营养中也很重要，我国从 50 年代开始，广泛开展了土壤、作物微量元素含量丰缺研究和微肥施用技术的试验示范，制定了几种主要作物锌、硼肥的施用技术规范，取得显著效益。

除了氮、磷、钾素以外，有机肥也是很重要的植物营养来源，并对农业持续发展有重要影响。我国是具有施用有机肥传统的国家，1990 年与 1949 相比，我国有机肥增加了 2.6 倍，但由于化肥用量增加，有机肥在肥料总量中的比重不断下降。80 年代初，有机肥与化肥各占一半，1990 年有机肥占总肥料的 37.4%，其中 N、 $\text{PO}_5$  分别占 23.8% 和 31.7%，而  $\text{K}_2\text{O}$  占 79.3%，说明有机肥在调节氮、磷、钾比例中的作用。但目前有机肥用量不断减少的趋势，值得引起注意。

此外，土壤 - 植物根际营养自 70 年代末以来已成为土壤学研究的最活跃领域之一。我国对在水稻根 - 土界面的显微特征、根际养分浓度梯度变化、禾谷类作物缺锌条件下根系特定分泌物等方面，都开展了大量研究，这些研

究对推动农业持续发展具有重要的理论与实践意义。

以上简单概括了我国在土壤植物营养研究方面，对农业持续发展所取得的进展。但从粮食增产与植物营养，特别是氮、磷、钾肥投入产出的平衡情况看，还存在不少值得重视问题。

### 3. 土壤植物营养在促进农业持续发展中的问题

当前，在我国农业持续发展，特别是在加速粮食增产的形势下，如何注意在施肥条件下，土壤植物营养的投入、协调与平衡，具有重要的理论与实践意义。

#### (1) 调整氮、磷、钾的施肥比例，注意平衡施肥

最近的研究表明，我国在化肥大量投入初期（以 1978 年为代表，全国化肥总量为 884 万吨），全国各个地区粮食单产均随化肥增加而提高；在化肥大量投入中期（以 1984 年为代表，全国化肥投入总量 1739.8 万吨），东北、西北、华北和西南地区粮食单产继续随化肥增加而增高，但在东南地区，则出现了粮食单产增长速度与化肥使用量增长速度不成比例的现象；在化肥大量投入的近期（以 1993 年为代表，全国总用量达 3156.3 万吨），东南地区出现了增加化肥而减产的趋势，其他地区虽保持多施化肥多增产的势头，但增产强度有所差异。产生这种现象的原因，从植物营养平衡的角度看，主要是我国化肥一直以氮肥为主，到 1993 年，仍占施肥总量的 68.5%，氮、磷、钾比例为 1 : 0.31 : 0.12。江苏省的比例为 1 : 0.24 : 0.05，而 1985 年世界化肥的比例已达 1 : 0.43 : 0.37。值得注意的是，在过去氮肥充分施用和磷肥不断补充的情况下要特别重视钾肥及微量元素的补充和平衡施用问题。此外，必须注意不同地区、不同土壤特点，并针对作物需求，提出不同的 N、P、K 比例，采用平衡施肥技术，只有这样才能保持农产品产量的稳定增长。

#### (2) 充分发挥农田养分循环的肥源潜力

从土壤植物营养元素在农田中再循环的角度看，根据我国实情，需要逐步建立低能源（化肥）投入、高养分循环与高作物产出的持续农业发展模式。通过研究，如按 1989 年农业资料计算，我国目前可能用于养分再循环的肥源潜力高达 3514.3 万吨养分，其中包括人畜粪肥、秸秆、绿肥和饼肥，这些养分比我国 1989 年的化肥总量多 1.96 倍，比同年消耗化肥量高 1.69 倍，是当年化肥进口量的 4.5 倍。人畜粪含有丰富的氮素，秸秆主要含钾，水稻籽实中氮、磷占地上部分总量的 60%，玉米占 70%，小麦占 80% 以上，小麦秸秆含钾量占总量的 80%。所有这些充分说明，我国农业增产在发挥农田养分再循环的肥源潜力上有着广阔的前景。

为了充分发挥农田养分循环的潜力，首先要在农田养分再循环的基础上，建立定量的有机养分的施肥体系。现在可以通过建立模型，计算出某一有机肥源（如秸秆还田）条件下，化肥（如钾肥）的合理用量。第二、要注意绿肥种植与秸秆还田，江苏省过去绿肥面积曾达 3000 万亩，现仅 500 万亩，如能提高到 1000 万亩，则可占水稻面积的 27%，每亩水稻可增产 10% 左右，达到平衡有机质的作用，据了解全省近年约有 3500 万吨秸秆被烧掉。第三、江苏不少地区有泥肥施用，城肥下乡，复合肥施用的习惯，这是发挥农田养分平衡的有效措施。此外，粪肥施用引起的污染，有机肥与化肥的配合施用，均是当前农业持续发展中，值得注意解决的问题。

#### (3) 不断防治土壤肥力（养分）退化

土壤退化，特别是土壤养分退化，是当今全球及全国共同关注的问题。

土壤养分退化主要是人类长期对土壤资源不合理利用的结果。在我国 4400 万公顷养分退化的中低产田中，普遍缺氮，59.1%缺磷，22.9%缺钾，50%的耕地土壤有机质在 5~20 克/千克之间；南方占耕地 66%的 2000 万公顷的低产田，普遍缺氮、78%缺磷，58%缺钾，90%缺硼和钼，49%缺锌。江苏省近 10 年内，土壤有机质含量除太湖及里下河地区外，均有所减少，土壤磷素稍较稳定，土壤钾素归还严重不足，土壤速效钾含量每年以 2.3 毫克/公斤的速度减少。据最近统计，我国南方长江中、下游及东南沿海在 1949~1958 年、1958~1978 年、1978~1984 年三个时期中，粮食增长占全国总量分别为 58%、59.8%和 59.5%，其增长率接近全国的 60%，而 1984 年至今的 10 年间，北方各片粮食增长量占全国 97.5%，而南方片下降到 2.5%，其中东南地区 9 省 10 年粮食反而减少了 39.8 亿公斤，由“南粮北调”变为“北粮南调”，分析原因，除因播种面积与复种指数减少外，土壤养分退化与耕地贫瘠也是重要原因之一。

最近，通过我国东南丘陵区旱地土壤养分退化评价研究，按照土壤养分退化等级标准，对该区 10 省 619 个县 113 万平方公里范围内，1994 年土壤中各种养分状况，编制了三幅土壤养分分布图，这些图幅表明，我国东南地区（包括江苏省江南丘陵区 8 个县）近年来土壤养分贫瘠化问题已经达到十分严重的程度。

针对上述土壤养分退化问题，结合近年来在南方工作的经验，提出应注意以下几个方面：

第一、通过合理耕作，增施有机肥，防止养分的侵蚀与淋失。这是克服养分数量退化的重要措施。由于各种养分施入土壤中均有不同程度的淋失（包括土壤侵蚀），并在不同施用时期中养分形态有不同转化，而且养分增长速度也有所不同。针对此特点，应采用各种防止养分淋失的耕作、施肥措施，使土壤养分的形态转化与增长速度满足植物生长的需要。

第二、通过合理施肥注意养分库重建，防止养分有效性退化。养分有效性退化表现在磷、铵、钾素在土壤中的固定，因此必须对不同开垦利用的红壤进行平衡施肥，实验表明，经过 4 年合理施肥，退化红壤的养分库可发生变化。此外，只要养用结合，不断补充肥源，红壤已退化的养分是可逐渐重建的。

第三、注意生态系统中的养分循环和平衡，防止养分发生生物消耗性退化。在旱地、水耕、林草及果园生态系统中，土壤养分的循环与平衡各具特色。应通过不同生态系统，提出配套的施肥、耕作及管理措施与方案，促使土壤肥力不断提高和保持稳定。

总之，土壤养分退化防治必须从上述三方面，即防止养分有效性退化、数量退化及生物消耗性退化着手，通过生态系统养分循环和平衡的综合措施，才能取得成效。

#### 四、现代土壤学在农业持续发展 中应研究的问题

现代土壤学在农业持续发展应研究的问题很多，但主要包括以下三个方面。

##### 1. 持续农业与土壤圈物质循环的研究

应研究以下六个结合：即农、牧、微（生物）相结合；无机、有机相结

合；内、外循环相结合；土壤物质循环与景观生态结构优化相结合；传统技术与现代化技术相结合；物质循环与环境保护相结合。

## 2. 土壤肥力与农业持续发展的研究

维持和提高土壤肥力，达到稳定、均衡和协调供应养分，是发展持续农业的关键。研究内容具体包括九个方面：（1）不同生态系统中土壤肥力演变规律研究；（2）高度集约化条件下施肥制度的建立；（3）区域土壤养分消长规律及肥料需求预测；（4）土壤-植物根际营养研究；（5）土壤生物工程（内容包括研究植物营养的遗传特性，养分吸收的分子机制以及植物营养性状的遗传学改良等）；（6）植物营养元素在土壤中的化学行为及其有效性研究；（7）持续农业条件下土壤氮、磷、钾研究（包括：提高氮素利用率，减少氮素损失，控制损失的氮素对环境质量可能产生的不利影响，在土壤磷素的研究中，重点探讨施入土壤磷肥的转化，及作物磷素营养之间的关系，特别是磷在水稻土中的行为（吸附、解吸）以及与水稻生长的关系；研究钾在土-根表面的化学行为和生物学行为，同时，探讨钾肥和气候因素的交互作用，钾的循环与生物钾肥的开发利用；（8）集约农业条件下新出现作物对养分需求特点的研究。（9）施肥技术和提高肥料利用率的研究。

## 3. 土壤水分平衡与调控的研究

土壤是唯一能保持可用淡水的庞大场所，因而研究土壤水的平衡运动及其溶质运移的关系，不仅对提高水资源利用率，促进农业的持续发展，而且对改善生态、环境有重要意义。在水分问题的研究中，除应研究区域水文整治与农田水分调控；农田水量平衡；根际土壤环境与植物耗水的关系以外，还必须进行水分良性循环的研究，这是因为，我国水资源用量已占全国总用量的1/5，占全国能利用水资源的1/2。当前水体污染正日益加重，全国95000公里河川，有20%受到污染，其中25%已受严重污染。江苏省地表水人均占有量为全国的15%，实际上水资源相对贫乏。据统计，全省废水排放量居全国第二位，排放密度居第一位，水污染事故与赔款居第一位。太湖水质恶化与富营养化的进程明显加剧，1990年藻类大爆发，损失达1.3亿元。在海州湾、废黄河口、启东咀等地，其水质与底泥的污染值均高于其他地区。水环境的恶化，必将给滩涂开发带来严重影响，江苏全省施用化肥共5301万吨，若按上述流失量计算，则进入水中的化肥量为530万吨，其损失与影响可观。

为此，必须开展对水环境的研究，包括统一社会对环境认识，加强对水环境的管理；防止海水环境污染，加强节水研究，减少水体污染负荷；重视与加强太湖环境与水质污染的治理；注意防治水污染与提高资源利用率的密切结合等。

## 五、江苏省在提高耕地质量、 促进农业持续发展方面应注意的问题

近几年来，由于城乡经济建设的不断发展，江苏省在耕地利用开发与农业持续发展上出现了四个突出矛盾；一是人地矛盾；二是农贸需求与供应矛盾；三是经济发展与生态环境建设矛盾；四是土地利用与耕地质量矛盾。从这些矛盾的根本看，解决土地的数量与质量，即保护耕地，提高耕地质量是关键。

江苏省以6824万亩耕地，养育着6843万人，人均耕地已不足1亩。据粗略统计，30年来，全省耕地平均每年减少25万亩，人口却增长了80多万，

一增一减，使耕地负载量比 60 年代增加了 2.5 倍。可是本省可开发宜耕地资源还不到 160 万亩。从耕地质量看，由于耕作管理粗放，有机肥大量减少，投入不足，造成土壤有机质、钾素不断下降，某些微量元素在土壤和作物上的缺乏面积越来越扩大，土壤耕层变浅，容重增加，抗逆能力下降。全省现有中低产田 4538 万亩，占耕地面积的 66.21%，此外，在苏南经济发达及太湖地区，由于耕地利用中盲目过量施用化学氮肥（水稻施用氮肥每公顷达 120~450 公斤，平均达 345 公斤/公顷），不但造成浪费，而且如前所述，对土壤、水体及农产品产生严重污染，并由于过量施用氮肥，造成土壤 N、P、K 失调，特别是钾素亏缺，据太湖耕地测定，每年每亩缺钾 7.5 公斤，这是影响耕地质量的重要问题。

针对上述情况，要提高全省耕地质量，保证农业持续发展，必须注意以下问题：

第一、珍惜耕地资源，控制耕地的非法占用，对废弃地进行科学复垦，以稳定基本耕地面积，保证耕地数量。

第二、不断提高耕地质量，既要从兴修水利、治水改土、植树造林、平整田地等措施来改善农田生态环境，又要采取耕作、轮作等措施来培育土壤。在肥料施用，首先应控制太湖地区水稻氮肥用量，一般以每公顷 120~180 公斤为宜，如果能增施有机肥，则化学氮肥用量还可以减少。同时采取“补钾工程”措施，促进土壤养分平衡，以不断提高耕地质量，达到农业稳定高产。

第三、加强对全省 4538 万亩中低产田进行培育改良，在增加投入的基础上，如果针对各种类型中低产田存在的障碍因子采取综合治理，以每亩增产粮食 50~100 公斤计算，则可增产粮食 22.7~45.4 亿公斤。看来只要增加投入，集中消除 1~2 个障碍因子，调整好水、肥、气的协调关系，每亩增产 100~200 公斤粮食是并不困难的。

第四、积极开展下列科技兴农项目：

（1）加强沿海滩涂开发，建立 1 万亩中低产田改良区及 10 万亩示范区。

（2）在太湖常熟市藕渠镇建立设施农业试验示范工程中心，开展现代设施农业的研究。

（3）建立与健全江苏省耕地保护与质量监测网络系统，对重点地区的耕地进行质量监测。

（4）宁镇杨丘陵区，发展潜力大，应提高土地综合地力，种植经济果、林、发展节水农业与节水配套措施，如旱育秧、高产旱作、滴管、喷溉技术工程，积极开展这方面的试验示范研究。

（5）开展规模农业社会化服务体系的配套施肥技术的示范与研究。

## 六、结论

1. 随着社会经济不断发展，现代土壤学研究的总方向是：“研究土壤圈物质组成，性质和物质循环、能量转化及其对人类生存环境，特别是农业持续发展的影响”。这是当前自然科学发展有资源环境影响下，对土壤学研究提出的新趋向。

2. 现代土壤学面临人口与粮食、资源与环境的严峻挑战，土壤学今后的发展必须为人类享有充足的食物和清洁的环境做出贡献。解决粮食增产与农业持续发展的途径是扩大播种与灌溉面积；合理增施化肥；选育优良品种；

实行集约化经营；改良中低产田及优化生态模式。

3. 土壤肥力是建立持续农业的重要物质基础，从土壤植物营养的角度看，必须注意解决调节 N、P、K 施肥比例与平衡施肥；充分发挥农田养分再循环的肥源潜力与不断防止土壤养分退化三个方面的实际问题。

4. 江苏省在土地利用与农业持续发展上，当前存在四个主要矛盾，其中土地数量与质量，即保护耕地与提高耕地质量是关键，因此，必须采取控制耕地占用与提高土壤肥力的有效措施，并积极开展科技兴农项目。我们深信，只要通过努力，江苏省必将为全国跨世纪的经济与农业持续发展，做出更大的贡献。

# 热喷涂技术和材料

丁传贤

中国科学院上海硅酸盐研究所

丁传贤 材料表面与界面专家。1936年2月11日出生于江苏省海门市。1959年毕业于复旦大学。现任中国科学院上海硅酸盐研究所研究室主任、研究员。1995年当选为中国工程院院士。主要从事等离子喷涂涂层配方、工艺、性能、结构、应用和相关应用基础研究，并取得多项重要成果。

机械零件和钢结构的破坏多自表面开始，诸如腐蚀、氧化、磨损以及热疲劳破坏的发生。因此，采用涂层技术对表面实行保护，可使部件寿命大幅度延长，这比采用整体材料既经济又方便。此外，涂层技术还可赋予材料新的功能，主要有红外辐射、化学催化、生物相容等等。总之，涂层技术是一种量大面广、效果显著的材料保护和表面改性方法，应给予高度重视。

在众多的涂层技术中，热喷涂技术占有显著的地位。早在19世纪初，美国的M.Schoop首先将氧-乙炔焊炬用来喷涂金属线材，从此开始有了热喷涂。由于航天、航空、核工业的快速发展，对材料的要求日益苛刻，热喷涂技术得到了飞速发展，先后发展了等离子和爆炸喷涂。80年代初期，低压等离子喷涂和高速火焰喷涂技术的出现，使热喷涂技术形成了一个完善的体系。

随着科学的进步，对热喷涂技术的工艺与工艺参数加强了控制，并配合计算机技术，不仅步入了先进材料的研究领域，而且在高技术产业和传统工艺技术改造中获得了广泛的应用，并取得了明显的效果。据报道，1990年北美热喷涂技术市场约为8亿美元，预计2000年可达20亿美元。1994年美国高性能陶瓷涂层的销售额为5.25亿美元，预计2000年可达9.40亿美元，其年平均增长率可达10.2%，占各类陶瓷材料之首。在我国，热喷涂技术和材料的推广应用亦取得了明显的社会、经济效果。1981~1985年期间的年销售额为17亿元，1986~1990年期间为24亿元。

## 一、热喷涂技术

在热喷涂过程中，粉末或丝状材料经高温熔融，形成液体或液体加固体的微粒。以较高的速度碰撞于基体材料表面，形成具有不同功能的涂层材料。

热喷涂工艺主要有火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂三种，它们的工艺特性和适用范围现分述如下：

### 1. 火焰喷涂

火焰喷涂主要是利用氧-乙炔燃烧产生高温火焰，将喷涂材料熔融，再利用周围压缩空气使熔融材料或微粒喷射黏附于基材表面。由于燃烧气体的温度限制，喷涂材料的熔点一般低于2500℃。火焰喷涂方法比较简单，设备也不复杂，因此在工业上被广泛应用。最近又开发出一种超音速火焰喷涂，采用氧-丙烷或氧-丙烯为燃料，其喷射速度高达音速的两倍，熔融粉末颗粒的速度可高达400米/秒，约分别为火焰喷涂的4倍和等离子喷涂的2倍。故涂层更为致密，结合强度大，特别适合于喷涂碳化物涂层。另外，此种方法有沉降效率高，涂层性能稳定等特点，预计是开拓涂层市场的有效技术途

径。

## 2. 电弧喷涂

以金属丝作为喷涂材料的电弧喷涂与其他的热喷涂方法有很大的不同，它是由两根作为喷涂材料而不断被消耗的载流金属丝短路，产生连续电弧而使金属丝端部熔融，用高速冷空气射流使熔化的金属丝端部雾化喷射到基材表面。冷喷涂是电弧喷涂的一个特点，即喷涂时不会提高基体表面的温度。另外，喷涂效率也比线材火焰喷涂提高 2~6 倍。电弧喷涂成本低，约为火焰喷涂的 1/10，设备投资为等离子喷涂的 1/3，但它只用来喷涂金属丝材，应用受到一定的限制。

## 3. 等离子喷涂

等离子喷涂是热喷涂技术中最为重要的一种。利用直流电弧放电，把高温加热的氩气、氮气、氦气等气体部分电离成离子束，在电弧放电部位四周强制流过低温气体，产生热收缩效应，使电弧放电部位断面缩小，导致能量密度和电流密度升高，最高温度可达 20000。由于等离子喷涂温度高，气氛可控制，可以用来喷涂各类高熔点的金属、氧化物和其他各种材料。最近 10 年开发的真空等离子喷涂设备，不仅使涂层的品种扩大，质量提高，而且可以进行新材料的合成和材料表面的改性。例如，在低真空下，利用等离子技术合成金刚石膜。在氮气中进行钢表面氮化，提高它的硬度，扩大应用等。

## 二、热喷涂涂层材料的性能

由于热喷涂技术的工艺手段很多，所以喷涂材料的选择范围很广。从塑料、低熔点金属，到难熔金属、陶瓷及其混合物。任何一种具有稳定液态的材料，至少可以用其中一种方法喷涂。同时，热喷涂涂层材料性能各不相同。表 1 列出了等离子喷涂涂层的物理性能。

表 1 涂层的物理性能

涂层材料	气孔率 (体积%)	体积密度 (g/cm <sup>3</sup> )	假比重 (g/cm <sup>3</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 1	30	2.58	3.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 2	5.7	3.23	3.47
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.7	4.52	4.72
ZrO <sub>2</sub>	8.7	5.52	5.73
TiO <sub>2</sub>	6.0	4.01	4.26
80% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 20% TiO <sub>2</sub>	6.0	3.48	3.71
80% WC - 20% Co	10.8	13.87	15.56
75% Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - 25% NiCr	10.8	6.16	6.89
80% Ni - 20% Al	5.7	6.42	
W	12.0	15.19	18.20
Mo	13.5	7.85	9.15
53% NiAl - 47% ZrO <sub>2</sub>	7.1	6.27	6.32
50% W - 50% ZrO <sub>2</sub>	12.2	9.32	
50% Mo - 50% ZrO <sub>2</sub>	9.8	6.8	

由表 1 可知，涂层有 5%~30% 的气孔率，与喷涂工艺参数密切相关。涂



层体积密度与假比重的差异，表明涂层中还有一定量的闭口气孔，等离子喷涂涂层中加入适量的金属可提高涂层的抗折强度，见表 2。

表 2 涂层的抗折强度

涂层材料	抗折强度 ( MPa )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 1	49.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 2	55.6
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74.7
ZrO <sub>2</sub>	49.0
TiO <sub>2</sub>	82.1
80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 20%TiO <sub>2</sub>	89.4
80 % WC - 20%Co	112.7
75 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - 25%NiC	274.4
80 % Ni - 20%Al	348.9
W	117.6
Mo	127.7
53 % NiAl - 47%ZrO <sub>2</sub>	169.5
50 % W - 50%ZrO <sub>2</sub>	66.6
50 % Mo - 50%ZrO <sub>2</sub>	112.7

表 3 为涂层的显微硬度和摩擦系数。由表 3 可知，等离子喷涂涂层具有低的摩擦系数和高的硬度。图 1 为涂层的导温系数。

表 3 涂层的显微硬度和摩擦系数

涂层材料	显微硬度 ( GPa )	摩擦系数 ( 与不锈钢配对 )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.2	0.12 - 0.20
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.0	0.14 - 0.15
TiO <sub>2</sub>	8.2	0.10 - 0.15
80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 20%TiO <sub>2</sub>	10.4	0.10 - 0.11
80 % WC - 20%Co	12.1	0.11 - 0.13
75 % Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - 25%NiCr	10.5	0.13 - 0.15

由图 1 可知，大多数氧化物涂层的热扩散系数随温度的升高而减小，而 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 涂层的热扩散系数却随温度的升高而增大，这有利于抗磨损。ZrO<sub>2</sub> 涂层具有低的热扩散系数，是理想的防热材料。

### 三、热喷涂涂层材料的主要功能

热喷涂涂层具有耐摩擦和润滑、热保护、抗氧化、抗腐蚀、导电和电绝缘、生物医用、化学催化、复合材料制备及部件修复等功能。概述如下：

1. 耐磨涂层是热喷涂技术的最大应用方面，通常具有高硬度、低气孔率、坚韧、与基体结合力强等优点。采用合适的组分，还可以减少摩擦。主要的喷涂材料有镍基合金和钴基合金、碳化物、硼化物、氧化物等。航空发动机是热喷涂涂层的最大应用市场。航空发动机叶片的凸台、密封部件加涂等离

子喷涂碳化钨、氧化铝、硅藻土涂层，以提高耐磨和密封性能；燃烧室等部位采用耐热涂层保护。汽车工业的同步齿环和活塞环，通常采用火焰喷涂钨涂层。加涂耐磨涂层的钢铁工业、造纸工业的轧辊，可提高产品质量。采用氧化铝 - 氧化钛涂层的化纤工业的部件，可提高零件的耐磨性和消除静电。石化工业的磨环和轴套，加涂氧化铬、氧化铝 - 氧化钛涂层，解决了跑、冒、漏、滴等问题。耐磨涂层的主要用途和功能见表 4。

表 4 热喷涂耐磨涂层的主要应用

领域	零部件	涂层材料
航天工业	火箭喷嘴	W
航空工业	叶片、密封环	WC、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、硅藻土
汽车工业	活塞环、齿环	Mo、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub>
汽车与机械工业	轧辊、叶片	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、WC、Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 、硬质合金
造纸与印刷工业	轧辊、印刷辊	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、WC、硬质合金
纺织工业	导纱器、喂入轮	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub> 、Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
动力工业	叶片、喷嘴	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、NiAl、Mo
化纤工业	磨环、轴套	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - TiO <sub>2</sub>

## 2. 隔热涂层

隔热涂层，又称热障涂层，主要有氧化铝和 CaO、MgO、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub> 和稳定的氧化锆组成。这些具有高的熔点和低导热系数的涂层，含有众多的气孔，体积气孔率在 5% ~ 30% 之间。气孔的存在，进一步降低涂层的导热系数，提高涂层的隔热效果。

为了提高氧化物隔热涂层与基体的结合力，通常用 NiCr、NiAl、NiAlCrY 各种金属涂层作为结合涂层。防热涂层主要用于火箭发动机和航空发动机燃烧室防热，也用于化工行业和冶金工业高温热保护。NiCrAlY - ZrO<sub>2</sub> 涂层用于航空发动机叶片，可使叶片使用温度提高 150，发动机的热效率提高 1%。若能获得工业应用，效果甚大。

为了减小涂层与基体金属的热应力，提高涂层的热冲击能力，近年来发展成功金属 - 陶瓷梯度涂层。此类涂层已在火车和汽车柴油机活塞顶上获得了试用，不仅提高了活塞的使用寿命，而且提高了柴油机的效率。

汽车发动机的热喷涂市场潜力很大，可望在以后的十年内有发展。美国汽车制造商都有积极的热喷涂涂层研究和发展计划，拟在汽车汽缸内衬和排气部位使用热障涂层，在活塞环、阀、凸轮、曲轴等部位使用耐磨涂层，这些涂层将提高部件的使用寿命和热效率。

## 3. 抗氧化和防腐蚀涂层

抗氧化和防腐蚀涂层主要是金属和氧化物涂层，前者为 NiCr、NiAl、NiAlCrY、WCoCr、Zn、Al 和 ZnAl 的合金，后者主要为 ZrSiO<sub>4</sub>、MgO - ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层。MgO - ZrO<sub>2</sub> 涂层具有极好的抗熔融钎和铀腐蚀能力，可防止熔炼过程中石墨坩埚的污染。氧化铝涂层浸渍有机树脂后，可用于化学工业冷凝器和其它装置的抗酸碱腐蚀。NiCrBSi 和 WC 涂层具有良好的抗气蚀能力，可用于轮船螺旋桨的防气蚀。火焰喷涂的 Zn、Al 和 Zn - Al 合金涂层进行长效防腐十分有效，可用于电视铁塔、桥梁、水闸、输电铁塔、竖井井筒等大型

工程。近年来，在电弧喷涂铝合金涂层表面加封孔剂，对舰船防腐取得了十分满意的效果。在海岸大桥钢结构表面喷涂铝合金防腐，能取代油漆，可以节省大量维修资金和人力。

#### 4. 喷涂成型

涂层是由熔化了了的颗粒堆积而成，涂层具有一定的强度。采用热喷涂技术可制备异型和复杂形状的部件，这比常规方法更为经济、方便。采用真空等离子喷涂，以石墨作为模型，已制备出性能优良的钨和钼坩埚和管材。大功率等离子喷涂设备（100kw 以上），用来喷涂氧化铝氧化锆材料，成功地制备厚为 15mm 的大尺寸制品，其经济性与实用性优于传统方法的陶瓷制品。此外，用等离子喷涂技术还可以制备颗粒、晶须、纤维补强的复合材料。

#### 5. 医用生物材料

热喷涂技术主要是等离子喷涂技术，它是制备医用生物材料的重要方法之一。金属具有较高的强度，可以制成各种形状的人工骨和人工齿根，但其生物相容性较差；陶瓷材料不与人体体液作用，脆性较大，使其作为生物材料受到一定的限制。发挥二者的优点，克服缺点，以金属材料（主要为钛合金）为骨架，在其表面喷涂生物玻璃、氧化物、羟基磷灰石等制成复合材料，已在临床上得到应用。

表 5 为热喷涂医用生物涂层材料的特性。

材料性能	生物惰性涂层材料			生物活性涂层材料		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( 1 )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( 2 )	ZrO <sub>2</sub>	活性玻璃	羟基磷灰石	微晶玻璃
气孔率 ( % )	30	5.7	8.7	0	13.2	12.3
体积密度 ( g/cm <sup>3</sup> )	2.58	3.23	5.52	2.90	2.78	3.00
抗折强度 ( MPa )	49.0	55.6	49.0		46.7	45.3
剪切强度 ( MPa )	19.3	23.2	21.0		21.2	20.8
与体液的反应	涂层在体液中不溶解、与体液无反应			各类涂层在体液中均有一定程度的溶解性		
与机体的反应	涂层与机体组织无反应			涂层与机体组织之间形成中间层，并且逐渐转化为机体骨组织		
与骨组织的结合	物理固定，形态固定			生物固定，生物活性固定		
优点	材料硬度大，而磨损			材料能促进机体骨组织生长		
应用	人工关节、人工齿根			人工骨、齿根等。		

#### 6. 其它功能涂层材料

热喷涂光、电、磁陶瓷是热喷涂技术的又一重要研究、开发、应用领域。喷涂铝、铜金属是典型导电涂层。氧化铝、氧化锆涂层是很好的电绝缘材料，可用作磁流体发电机的通道壁材料。热喷涂氧化锆涂层具有较好的离子迁移性能，已成功地用作汽车传感器零件，亦用来作为氧传感器探头，测定钢水中的氧含量。

从 60 年代开始研究热喷涂的光学材料和磁学材料，包括铁氧体、氧化物、碳化物、金属硬磁合金。等离子喷涂 Sm / Co 和 NdB 等材料，由于快速凝

固，在沉积物中含有细颗粒，为磁性应用提供了特殊的优势。如非常小的磁畴，典型的 P/M 结构，提高了沉积物的磁性。

热喷涂涂层的又一重要研究开发领域是制备节能材料。将  $ZrO_2 - TiO_2 - Nb_2O_5$  喷涂在电热元件表面，不仅将电热元件的辐射系数由 0.72 提高到 0.85，而且辐射率向长波方向扩展，大大提高了电热元件的能量利用率。制碱工业和电解水制氢工业消耗大量的电力，若能降低电解槽中的氢、氧过电位，具有明显的节电效果。采用等离子喷涂技术，喷涂 Ni - Al - Mo 涂层，再除去 Al 相，形成多孔的 Ni - Mo 涂层，可使电解室的电压降低 0.2V，达到节电的目的。

应当指出，热喷涂技术的另一重要研究课题是合成金刚石膜。金刚石膜具有极高的硬度，高的导热系数和禁带宽度大等特点，在新技术产业方面具有广泛应用。因此，世界各国的科技界与工业界采用各种方法合成金刚石膜。合成金刚石膜的主要方法有下列四种，即热丝化学蒸气沉积、等离子气相 CVD 法、燃烧火焰法和等离子喷涂法。其中受到广泛注意的是等离子喷涂技术。在低压等离子喷涂室中，注入  $CH_4$  和  $H_2$ ，在基体材料表面沉积金刚石膜，金刚石膜的生长速率可达 920 微米 / 小时，是其它方法无法比拟的。

#### 四、结束语

热喷涂技术种类齐全，使用方便，涂层材料变化无穷，可根据不同的要求进行选择，是节约原材料，提高工作效率的重要途径，既可为新兴工业服务，又可为传统工业技术的改造服务。

# 光电子技术和产业的发展

干福熹

中国科学院上海光学精密机械研究所

干福熹 光学材料、非晶态物理学家。1933年1月3日出生于浙江杭州。1952年毕业于浙江大学。1959年获前苏联科学院硅酸盐化学研究副博士学位。曾担任中国科学院上海光学精密机械研究所所长、中国科学院上海分院副院长。1980年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事光学和激光玻璃，光电子材料方面的研究。

光电子学技术是继电子学技术之后发展起来的一门新兴技术，是由光学技术与电子学技术相结合而形成的。本世纪60年代激光技术的产生，极大地推动了光电子学技术的发展，可以说，光电子学技术是电子学技术在光频段延伸与扩展。

当代社会和经济发展中，信息的容量日益骤增，随着大容量和高速度的信息发展，电子在速度、容量和空间相容性上的缺点，使电子学和微电子学遇到其局限性，而光作为更高频率和速

度的信息载体，会使信息技术和发展产生突破。信息的探测、传输、存储、显示、运算和处理将由光子和电子共同参与来完成。所以，光电子技术的主要应用在信息领域。

光子也可以做能量的载体，因此，强激光可以应用于材料加工、医疗手术、同位素分离、核聚变等方面，成为光电子技术另一应用领域。

光电子技术产业包括光电子材料和元件、器件和装置以及系统和应用。往往在材料和元件上的突破，才使得光电子技术得到应用而形成产业。例如，本世纪70年代初在工艺技术上解决了低损耗的熔石英纤维和长寿命的半导体激光管后，才有可能实现光纤激光通信，以后作为主要的光电子技术产业进入信息领域。光电子产业是本世纪后期迅速兴起的一个新产业，也是本世纪以来发展快、应用综合性高的新技术产业，与生物工程和材料科学一起被誉为21世纪三大新型高技术产业。

经过近30年的发展，光电子技术在以下几个方面发挥了重要作用并且在国外已形成了规模生产的光电子产业：

1. 光存储技术。主要为光盘存储技术，包括只读式（ROM）、一次写入多次读出式（DRAW）和可擦重写式（DRAW - E）各种光盘片和驱动器等。短波长记录和高密度光盘存储技术以及纳米、全息和三维超高密度光存储技术为主要发展方向。

2. 光输出和输入装置。主要包括激光打印机、复印机、传真机等。采用紫外激光器，改进喷墨技术，开拓新的感光材料以提高分辨率和输入输出速度。

3. 光电子显示技术。一般指液晶技术（LCD）和发光二极管（LED）为主的平板显示器及装置，有些国家已包括了阴极射线管（CRT）显示器。以高清晰度电视、电视电话、汽车用及个人数字化终端显示为主要目标，发展高效高光亮度多色发光二极

管、场致发光平面显示器 (FED)、有源矩阵型液晶显示器 (AMLLCD)、薄膜二极管液晶显示器 (TFT - LCD) 等技术。

4. 光通信技术。主要为光纤通信, 包括光纤、无源器件和系统装置 (干线、区域、用户网络)。提高光电子集成器件和光纤的性能, 降低成本, 采用多波复用、光孤子技术、高速传输和交换技术等, 除了长距离高速信息传输和管理系统外, 今后更侧重于短距离光通信, 如: 光缆电视、监控网和局部演示系统等。

5. 激光技术。主要为半导体、气体和固体激光器及其应用装置。半导体激光器主要应用于光通信和光存储; 固体和气体激光器就用于激光加工, 计量和激光医疗; 激光的军事应用主要在测距、雷达、制导和武器。

目前国际上公认, 光电子产业以日本最为发达。1995 年日本光电子产业的生产规模见表 1, 总产值为 433 亿美元。表中的五大类技术的产品产值为 162 亿美元 (光存储)、90 亿美元 (光

输出和输入装置)、66 亿美元 (光电显示, 不包括 CRT)、53 亿美元 (光通信) 和 15 亿美元 (激光), 其分布见图 1。光电子技术系统、设备和元件的比例为 1 : 6 : 3。光电子设备中主要为光盘, 其次为输入输出设备, 见图 2; 而光电子元件中以显示元件为主, 见图 3。这就概括地显示了日本光电子产业的结构。

美国光电子工业发展协会 (OIDA) 1994 年报道 1993 年全球光电子产业产品 (主要为元件、材料、器件和装置) 总产值为 750 亿美元, 预测 2003 年为 2300 亿美元, 2013 年世界市场为 4360 亿美元, 年均增长率为 9.5%, 见图 4。目前, 美国光电子产业以光电显示 (包括阴极射线管 CRT) 为主 (占 30%), 其次为光通信和光存储 (各占 20% 左右)。1994 年总产值 100 多亿美元。

光电子技术的主要技术突破产生于美国, 在 R&D 方面走在世界的前列, 而光电子产业的形成又往往在日本, 这主要是日本注重生产技术和家用 (Consumer) 市场的开发。巨大的投资产生了巨大效益。至今, 日本在半导体激光器、激光打印机、液晶显示器、光盘产业等方面在世界上处于垄断地位。美国 OIDA 在对比了美国和日本的光电子技术发展情况后, 认为美国首先在光电显示、光通信和光存储产业中加强生产技术的发展; 光通信产业要注意市场开发; 光电显示要加强制造业; 光存储要加强研究开发。制定出了 5 年、10 年、15 年和 20 年的发展规划, 要奋起直追, 见表 2。

表1 日本光产业生产规模 ( 1995 )

总产值	43 , 378 亿日元 ( ~ 433 亿美元 )
光盘	1 , 614 , 798 百万日元 ( ~ 162 亿美元 )
驱动器	851 , 169 百万日元
光盘	768 , 631 百万日元
光输出输入装置	898 , 055 百万日元 ( ~ 90 亿美元 )
激光打印机	514 , 538 百万日元
复印机	181 , 327 百万日元
传真机	178 , 063 百万日元
光显示	658 , 771 百万日元 ( ~ 66 亿美元 )
LCD	587 , 283 百万日元
平板显示	39 , 843 百万日元
装置	31 , 646 百万日元
光通信	524 , 598 百万日元 ( ~ 53 亿美元 )
系统装置	330 , 636 百万日元
( 干线、区域、用户 )	
光纤	140 , 876 百万日元
无源器件	53 , 086 百万日元
激光	147 , 908 百万日元 ( ~ 15 亿美元 )
气体、固体	23 , 994 百万日元
半导体	75 , 057 百万日元
装置	48 , 857 百万日元

表2 光电子工业发展预测

OIDA ( Optoelectronics Industry Development Association )

1994 世界市场总产值 : 1993 年 : 750 亿美元 ; 2003 年 : 2300 亿美元

OIDA recommendations

	光显示	光通信	光存储	光复制输入和输出
市场发展				
美国制造业				
制造技术				
标准和计量				
研究和开发				

新积极性      增强效应      维持强度      一般

\* 光通信包括通讯、数据传输、光开关和光计算

我国从 60 年代起就开始发展激光技术为主的光电子技术。激光科学技术的研究和发展受到国家的很大重视，在国防建设和社会应用上起了重要作用。我国光电子产业的原始基础是军事光学、军用光电子学和红外技术。自 60 年代以来，我国完全依靠自己的力量，研制出“神光”核聚变高功率激光装置、激光分离同位素装置、军用靶场激光经纬仪、激光卫星测距仪、高速摄影机、红外线扫描仪等重要的大型光电子设备，并在此过程中，形成了实

力雄厚的 10 多个光电子技术研究基地。70 年代末，光纤通信的研究和开发也在我国兴起。自行研制出四次群（256Mb/s）、五次群（565Mb/s）和  $4 \times 622\text{Mb/s}$  波分复用光纤通信系统，完成了近 500 公里光纤光缆，近 20 条光纤光缆干线，建立了百余城市的网络。实现了 21km, 2.5GHz 光纤孤子通信，研制出红外量子阱探测器和  $1.3\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$  激光器。80 年代中期光盘技术和光电平面显示技术得到发展。国家组织了“七五”、“八五”科技攻关，自行研制出可擦重写磁光型和相变型数字光盘和驱动器，开发出高性能的光盘库、光盘应用系统和电子出版系统。在光显示方面研制出场致发光平面显示器和超扭曲向列型液晶显示器。已研制出 10 英寸 STN 彩色显示器，铁电液晶的研究也得到发展。近 10 年中激光加工（应用于汽车、冶金、和电子行业等）和激光医疗技术（外科、皮肤、心血管、治癌等）都有较大的发展。为了发展我国光电子技术和产业，国家建立了若干个国家重点实验室和工程研究中心。但应该指出的是，光电子技术在我国主要是在研究和开发上，产业的形成是比较迟的，规模也比较小。1991 年我国的光电子技术的产值为 15 亿人民币，其中光纤通信 4 亿元，光盘 2 亿元，显示器件 3 亿元，光学传感器 1.5 亿元，发光管 2 亿元，激光和红外产业 1 亿元。

我国实行改革开放政策以来，由于“军转民”的战略转移，以及吸引外资和引进成套光电子技术的生产线，使我国光电子产业有大幅度的增长，1993 年的产值约为 35 亿人民币，1995 年的产值达 100 亿，各类产业的发展见表 3。但占世界光电产业的产值仍不到 5%。

国际社会，特别是发达国家对光电子学技术给予高度重视，今后将更注意光子的作用，继光电子学后光子学技术正在崛起。如美国把“电子和光子材料”和“微电子学和光电子学”列为国家关键技术，认为“光子学在国家安全与经济竞争方面有着深远的意义和潜力”，“通信与计算机研究与发展的未来属于光子学领域”。

光电子产业的前景是非常好的，10 年后的市场规模将比现在扩大 10 倍。表 4 列举了从 1995 年到 2003 年世界市场中各类光电子产业的发展。技术和产业的发展决定于市场，而市场依赖于社会和人们的需求。显然，民用或家用市场是今后光电子技术应用的主要方面。

也要正确分析我国光电子产业的市场。如上所述，光电子技术的主要应用领域是在信息方面，当然主要是在民用信息领域。由于我国人口众多，家用光电子产品有着巨大的市场。以光盘技术产业例，1993 年的总销售值只有 3~4 亿人民币，而 1995 年达 30 亿人民币。这主要是由于 CD、VCD 光盘进入了家庭。今后随着个人电脑和多媒体技术进入家庭，将带来光电显示器、光电通信器件、光盘存储产品的巨大市场。

今后光电子技术和产业的发展趋势如下：

目前光纤通信在长距离和主干线应用上已趋完善的情况下，今后光纤通信的主要市场是在区域网络、计算机网络和多媒体通信进入家庭。所以，价格低廉、高性能的有源和无源光电集成化的功能元件将有很大的发展。光存储无疑是以进入家庭市场的高密度光盘存储技术为主，同时以低价格的海量存储器代替磁存储，光盘将作为主要的多媒体的存储介质。从表 4 可以看到激光声盘的产量将下降，而激光视盘和计算机用数字光盘将上升。随着个人电脑的普及和大屏幕、高清晰度电视的兴起，平板型光电显示和光电输入和输出设备将会有很大的增长。到下世纪初，在光电显示中 CRT 仍占主要生产



地位，而 LCD 会有很大的增长，其中以 AMLCD 技术为主，而大屏幕显示以场致发光为主，60%的显示器应用于办公自动化。光输出和输入技术则以提高分辨率和输入输出速度为主要方向。在光电子技术中激光技术是起主导作用的，先进的激光推动了诸如光通信、光存储和光处理等光电子技术的发展，而激光技术产业本身是不大的。激光技术的重要应用还存在于军事和国防应用上，如测距、雷达、制导和战术武器等以及重大的科学实验上，如激光核爆模拟、激光战略武器、激光分离同位素等。所以，国外对激光技术的 R&D 投入很大，如表 5 所示，1994 年世界激光产品的销售仅 12 亿美元，其中美国为 5 亿美元，而美国政府在与激光技术密切有关的重大实验工程的 R&D 上投入了 6 亿美元。

表 3 国内光电子产业发展

	种类 1991 (亿元)	1993 年 (亿元)	1995 年 (亿元)
光显示			
LCD	3	5	10
LED	2	4	5
光存储	2	5	30
激光和红外	2	3	5
光通信	4	10	15
光输入输出	1	4	15
其它	1	4	5
总计	15	35	95

表 4 国际光学和光电子产业发展

种类	1993 (亿美元)	2003 年 (亿美元)
光显示		
LCD	60	150 (其中 AMLCD 占 75%)
LED+场致发光	15	150 (60%用于办公自动化, 25%用于影视音响)
CRT	200	2000
光存储 (光盘)	150	300 (CD - DA 从 70%降到 20%, VCD 从 10%升至 40%, 计算机用数字光盘从 0%升至 50%)
光通信	100	300 (光纤光缆从 70%降到 50%, 计算机网络从 10%升至 40%)
光输入和输出	35	150
激光	12	30
光学 (照相机, 望远镜, 光学元件和仪器)	70	150
总计	500	2300
	700 (+CRT)	4000 (+CRT)

对进一步发展我国的光电子技术和产业，提出以下几点措施和建议：

1. 加强 R&D 的投入，建立我国的技术基础和支撑

国外主要的光电子科技企业，皆以年产销值的 5% ~ 10%投入 R&D。除了

发展新技术和应用基础外，主要用于生产技术和生产设备的提高和开发。相比之下，我国在光电子技术的 R&D 投入实在太低。光电子技术产品的生产设备大部分是专用的，而我国高技术设备的开发和制造基础较薄弱。因此，近 10 年内我国在光电子技术和产业的建立中，不得不从国外引进生产技术和设备。如果同时我国在光电子技术发展中有更大的投入，有我们自己的技术支撑和技术基础，就容易引进国外先进技术，而且可以在国外技术的基础上开发出更完善和更新的技术，否则引进设备由于缺乏先进性，将很快被淘汰。这也是我国光电子技术和产业能较快地和在经济效益方面较好地发展的关键。

表 5 全世界激光市场 ( 1994 ~ 1995 )

激光器总产值：	12.00 亿美元
二极管激光管：	4.73 亿美元
光存储：	0.86 亿美元
光通信：	3.07 亿美元
固、气激光器：	7.67 亿美元
激光应用领域总产值：	230.00 亿美元
信息领域占：	70 %

## 2. 有自己技术基础的外向型合作

我国光电子技术的各方面应用还滞后于国外先进国家，因此我国光电子技术产业是外向性的。开发国外市场和引进国外先进技术，寻找合适的国外合作者对发展我国光电子技术产业十分重要。但是这种合作不全是依附性质的或是来料加工和装配性质的，这需要有自己的技术基础，需要组织研究和开发单位以及工程技术中心积极参与重大引进项目和重要中外合作项目。目前这种参与特别是有组织的参与太少，而且参与的作用太小。

## 3. 首先发展材料和元件技术和生产基地

光电子材料和元件是发展光电子技术和建立产业的基础。光电子材料和元件是紧密结合在一起的，是很难分割的，它们的发展是要和装置与系统密切沟通而且互有反馈。至今我们还是重视装置和系统的发展，因为这比较容易显示。如上所述，光电子产业的发展中材料和元件与装置和系统差不多各占一半，而且不论是光存储、光显示和光通信，往往又是材料和元件的发展而推动了技术的更新。全部用进口材料和元件建立的装置和系统产业是不能持久和缺乏竞争力的。

## 4. 跨行业和部门的组织光电子产业促进会和技术发展协调咨询会

光电子技术是多种学科技术的组合，而它的应用也是多方面的，很难归类于哪个部门和哪个行业。目前我国光电子产业的形成，一部分是国家政府部门有计划建立的，而另一部分是根据市场发展，计划以外组织的（集资、合资、中外合作），因此，跨行业和部门组织光电子产业促进会和技术发展协调会，跟踪了解国内外光电子产业和技术发展情况，研究我国光电子产业的发展战略对发展重大问题提出建议和咨询意见，协助实行行业的宏观规划与管理。

建议把光电子技术作为有带动性的高、新技术，把光电子产业作为 21 世纪的支柱产业来抓，制定相应的技术政策和产业政策，对“九五”期间选

中的研究项目、攻关项目、中试项目，从发展科学技术，促进产业化的角度给予大力支持，加大投资强度，对目前已逐步形成的大型生产集团和生产项目，统一步骤和协调发展，使之成为我国的产业支柱。

# 微 - 纳尺度科学与技术

王立鼎

中国科学院长春光学精密机械研究所

王立鼎 精密机械和微纳机械专家。1934年12月2日出生于辽宁辽阳。1960年毕业于吉林工业大学。中国科学院光学精密机械研究所研究员。兼任中国仪器仪表学会精密机械学会精密机械工艺与材料专业委员会副主任，中国科技大学和吉林工业大学兼职教授。1995年当选为中国科学院院士。是我国著名的精密齿轮专家之一，从事亚微米及纳米机械、微型机械领域等的研究。

## 一、概述

本世纪初开始，物理学在探索微观世界方面取得了辉煌的成就，建立起人类对电子、原子结构、晶体结构、分子结构、短波长电磁波、物质波、质能互变、量子原理等的深刻认识。本世纪中期开始，又在分子生物学、半导体、受激辐射等科学以及随后的扫描隧道显微术等方面取得了重大突破，使科研手段和应用技术的研究也向微观世界大步前进。

对微观尺度物质世界的认识与直接改造是纵贯本世纪的自然科学和技术科学诸重大方向中发展势头最猛的一个。各主要发达国家的科学领导部门都已预见到其在科学和应用上的头等重要地位，将它列为跨世纪的十几个研究方向之一。

从60年代至今，以微电子为先驱，在短短的几十年时间里，芯片的集成度提高了几个数量级。微电子还推动了微光学的发展，诞生了光电子学。80年代末期，借助于半导体IC工艺制作出微米级静电马达，从此又诞生了崭新的微机械领域。

随着对微观科学与技术的深入研究，随着当今世界对功能密度、信息密度不断追求，以1990年国际上召开的第一届纳米会议为标志，建立了更加微观的纳米科学与技术(Nano ST)科学体系。

半个世纪前的科学发展其独立性特点较浓，近代科学的发展趋势，具有显著的科学间交叉、渗透与综合等特点。在微电子、微机械与微光学之间，在技术上逐渐形成三微集成，以致多微集成。在纳米领域里也将是如此，以期实现日益深化的功能密度、信息密度的追求。

“微”的科学与技术已从诞生趋向成熟，有的已形成，另一些正在形成庞大的产业。“纳”科学与技术的萌发，立即引起了国际上的极大关注，科学家们从“微”科学与技术的发展中，可以预测到“纳”科学与技术将给世界带来更大规模的技术革命。

要使“微”与“纳”的科学与技术为人类造福，必须着眼于从基础研究做起。目前，科研经费仍很紧张，对从事“微”与“纳”的科学与技术应用基础研究有个如何安排其位置的问题。不久前，中央领导对基础研究有这样的意见：“对前沿的科技项目要有所赶，有所不赶，对于可以充分利用我们的长处或我们在这一领域已有相当积累，相对来说不需要巨大投资，而一旦突破可以带动新产业革命的项目就应该赶，在稳住一头中也要抓住重点”。

“微”与“纳”的科学技术，在本文中归纳为“微-纳尺度科学与技术”。它的科学意义与价值，是符合中央领导同志所说的“前沿的科技”、“有所赶”的那一类型。

“微-纳尺度科学与技术”，概括了微米科学与技术（微电子、微机械、微光学等）和纳米科学与技术（纳米材料、纳米机械、纳米生物、纳米电子、纳米化学等）的综合范畴。

## 二、本领域的国内外现状及发展超势

### 1. 微米科学与技术方面

1958年，美国研制成第一块IC电路，开创了世界微电子学的历史。经历5个阶段，集成度提高了2个数量级。1988年，日本用亚微米级的微细加工技术，在硅片上刻线线宽 $0.8\mu\text{m}$ ，芯片集成度达4Mb DRAM，从而进入了超大规模集成(ULSI)时代，1991年线宽 $0.6\mu\text{m}$ 的芯片投产。1992年线宽 $0.5\mu\text{m}$ 的16Mb芯片投产；1994年线宽 $0.35\mu\text{m}$ 的64Mb芯片投产。

我国微电子技术与国际先进水平相比差距很大，落后10~15年。80年代中期，研制成功线宽 $2.5\mu\text{m}$ 的64Kb芯片。80年代末期，研制成功线宽 $1\mu\text{m}$ 的1Mb芯片，但尚未向大生产转化。最近，成都光电所研制成功线宽 $0.8\sim 1\mu\text{m}$ 的光刻机。

目前，美、日等国正在研究深亚微米级缩小投影式软X射线光刻技术，在实验室条件下，线宽已达 $0.2\sim 0.1\mu\text{m}$ ，可望2000年以前使芯片集成度达到1Gb。

微电子机械系统(MEMS，简称微型机械)始于美国用IC工艺制作出毫米级以下的硅静电马达，它是80年代末迅速发展起来的一门综合性新兴学科。微型机械包含微能源、微驱动器、微传感器(如声、光、热、力、电、化等)、微控制器和微操作器等构成，集成于一个微小的空间，实现一种或多种设定的功能。它是一个多科学交叉为一体的科技前沿领域。由于微型机械在生物医学、航天、国防、工业、农业以及家庭具有重要的广泛的应用前景，在它诞生仅仅几年的时间里已成为当今世界范围内的热点技术。

美国已投入上千万美元研究微型机械，美国国会并把微机械列入21世纪重点学科发展规划。日本在微机械方面的研究虽然起步晚于美国，但目前注重程度和投资强度均超过美国。1989年日本成立了微型机械研究会，调集科学界产业界的精密机械、半导体技术、医疗仪器和医学方面的研究人员进行开拓性的全面研究开发。1992年，通产省正式启动一项为期10年，耗资约1.9亿美元的“微型机械研究计划”。日本政府又投资3000万美元，筹建一座新的“微型机器人中心”。90年代初，德国研究技术部将微型机械系统工程列为新开发的重点项目，为之提供了4亿马克的经费。德国创造了LIGA工艺技术，制作出微机械和微光学元件与系统。前不久，又补充了6亿马克用于微机械研究。西欧的英国、荷兰、瑞典、瑞士、比利时、挪威、加拿大等国家也相继投资进行微机械研究。日本对西欧的统计，只是联合研究微机械LIGA工艺一项就有72个单位参加。在国外，不只是大学和研究所参与研究微机械，企业部门也投资参与或组成联合体投资微机械研究。

1993年在微型机械领域，国外已研制出直径 $0.8\text{mm}$ 的电磁式电机、 $4.8\text{mm}$ 的电机驱动的4轮小汽车，微型传感器已开始用于汽车自动驾驶和安全保障系统等。

我国微型机械的研究起步于 1989 年，长春光机所微机械工程研究室、上海冶金所国家传感技术开放实验室和清华大学等单位，承接了国家基金委、中国科学院设立的微机械三个重点课题及一般课题，从事微机械基础理论、制作工艺、装配及测试技术等方面研究。已制作出数百微米尺寸的静电马达、直径 3mm 可输出力矩与功率的压电马达、微流量排放系统单元等。在国家科委的攀登计划中，微型机械研究开始了微机械综合系统的研究工作。自 1995 年末开始，国防科工委将投入较多的经费从事微惯性测量装置的研究。

在 2000 年以前，国际范围内的微型机械研究，主要是侧重基础理论和基础工艺研究，同时开展系统组成和应用研究。在 21 世纪将形成大规模的高技术产业。

1987 年，在加拿大召开的光通信会议上，日本内田先生应邀作了关于“微光学”的特邀报告，开始诞生了一个新的学科领域。1988 年，在德国汉堡召开了第一次微光学国际会议。会上收录 23 篇论文，并把“微光学”定义为发展三维微小装置（或器件）的光学技术。

微光学的诞生与发展也是同其他学科相关联的。随着发光二极管、半导体激光器取代钨灯和单色光谱灯，半导体探测器取代光电管和光电池，光纤技术的出现，光学与微电子学的相互渗透，电子器件的快速微型化以及相关科学的发展，从系统工程的观点出发，迫切要求系统结构（包括光学系统结构）微型化，从而诞生了微光学。

近年来，由于微光刻工艺的迅速发展，美国研制的微光电一体化芯片及衍射光学元件为主的微光学称之为“现代的微光学”技术。以衍射光学（二元光学）元件为主的微光学元件将是下一步发展的主流。另一方面，集发射、处理、接收为一体化的光学芯片（如 Bell 实验室研究的 SEED 器件）及阵列化将是微光学系统的一个重要趋势。美《科学新闻》在回顾 1993 年重大科技成就中报道，研究人员演示了第一台多种用途的光学计算机，这里包含了各种微光学器件的应用。

在我国，长春光机所在衍射光学元件设计和制作技术上，完成了 Damman 光栅、菲涅耳透镜阵列的制作。利用常规光学 CAD 和衍射元件校正像差的 CAD 软件设计正在进行之中。西安光机所是国内研究梯度折射率具优势的单位，它可用于复印机和光通信中。上海技物所正在研制较低集成度的光电神经元芯片。北京光电子工艺中心，在完成“863”的 307 专题中研制了 SEED 器件。清华大学金国藩院士带领一个组从事二元光学研究。

在微米科学与技术发展的过程中，各分支学科间的交叉、渗透越来越多，多学科技术集成化与综合而强化功能以致创造新的体系已成历史必然。如微电子与微光学的结合形成了微光电子学。而借助微电子工艺基础发展起来的微机械元件和微光学元件，逐渐实现光机电三微集成化以致多微集成化系统。

## 2. 纳米科学与技术方面

纳米科学与技术（Nano ST）是一门极有前途的新兴科学。广义地说，纳米科学与技术可定义为在纳米尺度上的工程学，一般泛指 100nm ~ 0.1nm 的尺度范围。

Nano ST 的产生源头可追溯到 50 年代末，当时美国物理学家 Richard Phillips Feynman（诺贝尔奖获得者）曾提出，逐级地缩小生产装置，以致最后直接由人类按需排布原子，制造产品。这在当初只是一个美好的梦想。

1977年，麻省理工学院的德雷克斯勒认为，上述想法可以从模拟活细胞中生物分子的人工类似物 - 分子装置开始，并命名为纳米技术（Nanotechnology）。1982年，G.Binnig和H.Rohrer发明了扫描隧道显微镜（STM），以空前的分辨率为我们揭示了一个“可见的”原子、分子世界。到80年代末，STM已不仅是一个观察的手段，而且是一个可排布原子的工具。STM与AFM（原子力显微镜）借助于隧道电流效应，用扫描探针实现直接观测原子、分子以及生物蛋白（DNA）结构。不仅如此，还可用探针迁移物体表面层原子，使它们成为有序图形。IBM公司首次实现原子排布组成的“IBM”和美洲地图，而后中国科学院化学所排布出“中国”和中国地图。其尺寸仅为200nm×200nm。1990年7月在美国巴尔的摩召开了第一届国际NST会议，这标志着纳米科学与技术作为一门学科开始得到科技界的共识。当时，冠以纳米（Nano）新名词、新概念不断出现，如纳米电子学（Nanoelectronic）、纳米材料学（Nanometer scale materials）、纳米生物学（Nanobiology）和纳米显微学（Nanoscopy）等等。国际刊物《Nanotechnology》和《Nanobiology》等出版。

NST的历史还很短，而其进展却很引人瞩目。如纳米生物学中的蛋白质机器 - 生物传感器和生物分子计算机等；纳米电子学中的量子效应、隧道效应及共振隧道二极管、量子阱激光器及量子干涉仪等；纳米材料学中的纳米陶瓷、金刚石、晶体和非晶合金材料的制备、结构、特性、改性与应用研究；纳米机械学中的纳米分辨率的驱动系统与工作母机；纳米化学中的分子自组织合成方法；STM已作为纳米尺度的表征与制作工具等等。

NST的潜在重要性毋庸置疑，Nano时代的到来不会很久。美国最早成立了Nano研究中心，开展了预研究，IBM公司和德克萨斯仪器公司是积极参加者。美国自然科学基金会将NST作为优先支持的项目，从1987年开展所谓M3工程，美国国会又把NST作为21世纪重点发展的科学技术项目。日本制定了庞大的国家规模的NST研究计划。早在1985年，在日本研究发展合作组织（JRDC）的领导下，制定了先进技术的开拓研究（ERA - TO）规划，共14个课题，其中12个与NST有关。日本国际贸易与工业省另提供1.87亿专项拨款发展NST，并制定了一个10年发展规划。英国政府在财力困难的条件下也支持NST研究。在1992年之前，来自128个公司的350名成员参加了5个NST课题研究。在1992年，英政府又投入1280万英镑用于17个NST项目的研究。IBM公司首席科学家阿姆斯特朗认为：“正像70年代微电子技术产生了信息革命一样，NST将成为下一信息时代的核心，……”我国科学家钱学森也认为：“纳米左右和纳米以下的结构是下一阶段科技发展的一个重点，会是一次技术革命，从而将引起21世纪又一次产业革命”。

在我国，1990年3月中国科学院组织了纳米固体讨论会，1991年11月又组织了多学科NST研讨会，1992年8月，中国真空学会组织了第一届全国NST学术会议，论文报告百余篇。1994年和1995年，国家教委、国家自然科学基金委、国防科工委和清华大学主办两届全国性的微米/纳米科学与技术学术研讨会。第二届会议丁衡高主任、朱光亚主席、韦钰副主任和王大珩等十几位院士到会，盛况空前。在短短的几年时间里虽列项的大课题极少，但对这一领域有兴趣、愿意介入的不下数百人。单在纳米材料领域就有70~80个单位在研究与开发。中科院的北京化学所、北京大学、上海原子核所和中国科大等单位已建造了中国自己的扫描隧道显微镜（STM），为开展我国纳米生物

学、纳米材料学、纳米电子学和纳米化学研究掌握了重要工具。同时，在建造 STM 中采用了部分纳米机械技术。我国 NST 领域的各分支学科都已开始启动研究，只待有远见有魄力的组织，有集中的较大投入，定会得到更快的发展。

### 三、该研究领域的应用前景和应用价值

该领域中可见的和潜在应用前景和应用价值，在前面已略述一二，全面介绍和全面估价还难以做到，因为它主要还处于基础研究和应用基础研究阶段。

在微米科学与技术中，就拿发展只有几十年的微电子来说，它的影响之深和应用之广已众所周知，当今，电子产业居各业之首。电子学的发展水平与产业规模，已经成为衡量一个国家国力和现代化程度的主要标志。刚刚兴起的微机械，又被各发达国家列为科技发展规划中的重中之重，成为世界性的十大科技之一。因为它可以实现单细胞操作，在人体器管与血管里定位、定量施药与手术。它可以使各种复杂装置与仪器袖珍化、微型化，进而一方面可进入航天等专门领域，另一方面还向便于携带和普及发展。它可以把电池、电机、传感器（声、光、磁、热、力、电等）、控制器和执行器集成于一个芯片的大小，去执行各种各样的功能，远超过一个微电子芯片所能达到的功能。微机电再与微光学结合与集成，则进一步又可以生成五彩缤纷的各种产品，开拓崭新的应用领域和市场。

在纳米科学与技术这个更微观而却是更宏伟的领域里，中外许多科学家都做了十分美好的发展前景预测。例如，预测纳米电子芯片可比微电子芯片再提高几个数量级的集成度。在纳米生物学中，人们从事研究蛋白质的结构（如 DNA 的螺旋形态）、构成去了解生命现象，通过改变基因来改变生物功能。在纳米生物学领域可以创造与制作纳米化工厂、生物传感器、生物分子计算机元件、生物分子计算机、生物分子马达以及生物分子机械人等。在纳米材料学和纳米化学中，实现分子、原子级操作，可以创造人工新物质等等。

对于微米科学技术和纳米科学与技术所形成的微 - 纳尺度科学和技术广阔领域里，其应用前景和应用价值可归纳成如下几点：

1. 设计制造出新材料，由多种成份组织而成，具有指定的性能，或具有新的表面性能，如吸附、催化、换能……

2. 按需要改造生物物种，改变农业面貌。

3. 设计制造新器件，由微 / 纳尺度的光学、电子、机械、传感器等集成。

4. 使产品超微型化，具有节材、节能、小惯性、易控制、高速度、高信息密度、高功能密度、高互连密度等。这些超微产品（如测试仪器、通讯、办公或医疗设备、计算机和特种加工机器等）不仅能大幅度提高工作效率，降低成本，缩减实验室与办公室占地面积，还有可能在工、农、商、交通、运输或事故抢救现场就地即时处理问题，得出结果。这些产品易于普及，将能创造广阔的新市场，建立新产业。

5. 微 - 纳尺度科学与技术，其多样性及领域之广是微电子不能比拟的。尽管我国在世界发展微 - 纳尺度科学与技术中会遇到微电子工业基础严重落后的不利因素，但是，由于其覆盖面之广，有很多我国的特色可资利用，机遇会远远大于挑战。



# 稀土发现 200 年与 2000 年稀土发展展望

王淀佐

中国有色金属总公司北京有色金属研究总院

王淀佐 矿物加工与冶金专家。1934 年 3 月 23 日出生于辽宁省锦县。1961 年毕业于中南工业大学。历任中南工业大学校长，北京有色金属研究总院院长、教授。兼任中国有色金属学会副理事长等职。1991 年当选为中国科学院院士（学部委员），1994 年当选为中国工程院院士。主要从事在浮选理论和浮选药剂等领域中应用有机结构和表面化学等方面的研究。

稀土的发现与应用，至今已届 200 年，经历了初级应用到高科技应用阶段，发挥了重要作用。我国稀土资源丰富，稀土科技有相当基础。展望下世界，稀土应用潜力极大，必将产生巨大作用和经济效益。

## 一、稀土在高技术领域中的应用

### 1. 磁性材料

#### (1) 稀土永磁材料

稀土永磁材料是本世纪 60 年代发展迅速的新型功能材料。60 年代开发出了第一代稀土永磁材料  $\text{SmCO}_5$ ，70 年代出现第二代永磁体  $\text{Sm}_2\text{CO}_{17}$ ，至 80 年代初又发现了第三代稀土永磁材料  $\text{NdFeB}$ 。由于钕原料相对较丰富，磁体中不含昂贵而稀少的战略物资  $\text{Co}$  及具有更强的磁性， $\text{NdFeB}$  永磁体的出现大大加速了稀土永磁材料的发展，预计到 2004 年世界  $\text{NdFeB}$  用量将达到 20000 吨（表 1）。

表 1 世界钕铁硼永磁材料产量（吨）

年份	1989	1994	1999	2004*
年产量*	2000	4000	10000	20000

\*钕铁硼永磁体包括烧结、粘接各向同性、粘接各向异性

我国在稀土永磁材料的研究方面成绩卓著。早在 70 年代我国即具备了生产  $\text{SmCO}_5$ 、 $\text{Sm}_2\text{CO}_{17}$ ，型永磁材料的能力，上海跃龙有色金属有限公司利用北京有色金属研究总院的技术形成了年产 30 吨钕钴粉的能力。钕铁硼问世后，我国与国外几乎同步开发了这种新型磁体，至 1994 年已建成钕铁硼磁体生产厂 100 余家，但 90% 的厂年生产能力在 20 吨以下，设备落后，产品质量不能保证。中国科学院三环公司的成立，在永磁材料的开发与生产方面迈出了重要的步伐，取得令人瞩目的进展。

钕铁硼磁体居里温度低，温度稳定性较差；易锈蚀，化学稳定性欠佳，这些都限制了钕铁硼磁体的应用，促使科技界设法寻找新一代的永磁材料。1990 年北京大学用氮气或氮氮化  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  的方法使氮气以间隔原子的形式进入  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  的晶格，在世界上首次制成  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ ，将居里温度提高到 480，且成本低于钕铁硼磁体，从而开拓了世界永磁材料研究与开发的新领域，有望成为第四代稀土永磁材料。

#### (2) 磁光材料

磁光存储是一种磁的纪录，它通过光加热和施加反磁场在稀土非晶合金的垂直磁化膜上产生磁畴，利用读磁畴进行信息的写入，另一方面利用克尔效应等磁光效应读出。

磁光盘是磁带、磁盘的发展，磁光盘兼有磁盘的可重写性和光盘的大容量、非接触等优点，寿命长、可反复擦写、存储容量大，发展十分迅速。稀土元素铽、镝、钆等与铁、钴的非晶态合金膜是制作磁光盘磁光膜的材料。发达国家在 1988 年将磁光盘推向市场，发货量 500 台，1989 年发货量 5000 台，1990 年激增至 14 万台，预计 1996 年将达 200 万台，磁光盘 1000 万张。预计 2000 年仅日本磁光盘系统市场将达 1 万亿日元。

我国上海冶金所从 1972 年开始先后研究了稀土石榴石单晶薄膜、Gd—Co、Tb—Fe、Gd—Fe 非晶薄膜，于 1985 年制备出我国第一块 5 英寸磁光盘薄膜。1995 年 8 月底国内第一家磁光盘生产企业投产，可年产磁光盘 40 万片。

### (3) 超磁致伸缩材料

所谓磁致伸缩就是在磁化方向上铁磁体伸长或缩短的现象。早在 40 年代，就已发现了磁致伸缩材料，只是这些材料的值都小，仅几十 ppm，难以应用。进入 70 年代，研究发现稀土元素 Pr、Sm、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Y 与 Fe、Co、Ni 的化合物明显显示出比一般材料高得多的磁致伸缩值，有的甚至大 100~1000 倍，故称之为超磁致伸缩材料。

稀土磁致伸缩材料不仅具有高的磁致伸缩值，而且随磁场产生巨大的应力，其典型材料是具有 TbFe<sub>2</sub> 组成的立方晶系化合物。美国和瑞典已开发出实用产品，为 Tb—Dy—Fe 系化合物，它可产生强大的力，而且能在高功率水平下做快速而精确的运动，还能高效地进行磁（电）能机械能转换。

我国对磁致伸缩材料的开发研究才刚刚起步。

### (4) 磁致冷材料

所谓磁致冷即利用磁性体的磁距在无序态（磁熵大）和有序态（磁熵小）之间来回变换的过程中，磁性体放出或吸收热量的冷却方法。

目前用于磁致冷的磁性体主要有钆镓石榴石 Gd<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub> (GGG) 和 Dy<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (DAG) 等，其中 GGG 用得最多。使用 GGG 可制成致冷起始温度 16K、输出功率 1.5J/s、最大液化能力为 2.5 × 10<sup>-3</sup>M<sup>3</sup>/h 的氦液化装置。由于其温度范围小，不能用作冰箱用磁致冷材料。

最近的研究表明，RNi<sub>2</sub> 和 RA1<sub>2</sub> 系有希望成为室温磁致冷材料，Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub> 居里温度为 300K，表明该材料能在大温度范围使用，用该材料制作的磁致冷器具有冷却效率高、功耗低、无污染、无噪声等特点，有希望取代现有的电冰箱，并已研制出一些样机，其性能已接近实用水平。

由于 2000 年将禁止使用氟利昂制冷剂，因而磁致冷材料具有很大的潜在市场。

## 2. 发光材料

### (1) 荧光材料

#### 1) 彩色电视荧光粉

彩电红色荧光粉属阴极射线荧光粉。1962 年由美国 Sylvania 公司开发。我国从 70 年代末引进国外设备技术，实现了工业化。目前国内外产品水平接近，主要产品为 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>S:Eu。由于世界范围内彩电产量趋于饱和，彩电粉的产

量增加幅度不大，年增长率约 3%，年产量约 50 吨。

### 2) 三基色荧光粉

1974 年荷兰飞利浦公司首次开发了稀土激活的铝酸盐体系的三基色荧光粉。

目前我国的红粉和蓝粉与国外水平（日本日立、美国索恩等）接近，但绿粉的亮度一般要偏低 5%~10%。

三基色荧光粉由于光效高（65lm/w），制成的灯比白炽灯（10lm/w）节电 80%以上。我国 1995 年生产三基色荧光灯近 亿支（表 2），但与白炽灯的年产量（~30 亿）相比仍非常小，应大力推广。

表 2 历年三基色荧光粉产量

年份	1986	1989	1991	1993	1994	1995
三基色粉（吨）	2	15	41	50	80	120 ~ 130
三基色灯（万支）	200	1500	3500	4000	7000	~ 10000

### 3) 其它荧光粉

主要有 X-射线增感屏用荧光粉、投影电视荧光粉、高压汞灯荧光粉、验钞灯用荧光粉、诱蚊（虫）用黑光灯荧光粉、重氮复印荧光粉、长余辉荧光粉、超短余辉荧光粉、高亮度阴极射线荧光粉、计算机终端显示荧光粉、彩色装饰荧光粉等。这些荧光粉国内都进行过研究，少数（如高压汞灯荧光粉、重氮复印荧光粉、验钞用荧光粉）已能批量生产，虽用量不大，但其制成的器件在高技术领域有重要用途。

#### (2) 金属卤素灯用发光材料

金属卤素灯从本质上讲是添加了金属卤化物的高压汞灯，其发光材料为各种金属卤化物。

稀土金属卤素灯是一种高效节能光源，具有光效高、显色性好等优点（表 3），因而受到人们的广泛重视。近年来，这种灯发展很快，并向小型化方向发展，在发达国家已研制出小功率（最小为 35w）金属卤素灯并已投放市场，用于商场、宾馆及家庭等室内照明。

表 3 几种常见光源性能比较

光源种类	光效 ( lm/w )	显色指数 Ra
普通白炽灯	13	100
大功率白炽灯	18	100
管形卤钨灯	21	100
高压汞灯	55	40
稀土三基色荧光灯	60—80	70—90
稀土金属卤素灯	75—100	65—95

我国自 70 年代中期开始，已完成了灯用稀土金属碘化物和溴化物及相关金属的碘化物、溴化物的制备方法的研制并试生产。产品用于生产和研制镝灯、钪钠灯、各种彩灯及不同波长的紫外灯，北京有色金属研究总院为国内唯一全面研制和生产金属卤素灯用发光材料的单位，其产品纯度为 99.95~99.999%，基本满足了国内灯厂的需求。此外，还完成了钪钠灯和镝灯两大系列的定组分混合问题，研制出了相应的定组分混合卤化物产品用于生产钪

钠灯和镝灯，提高了灯的寿命，增强了光色的一致性。

目前国内有金属卤素灯生产厂 80 多家，包括从国外引进的 5 条金属卤素灯生产线，年产各种金属卤素灯 200 多万支。预计 3~5 年内我国金属卤素灯的产量将达到 600 万支。此外也开始小型卤素灯的研制工作，开发出了 70w 的小功率金属卤素灯并已供应市场。

国内也有单位开发出了颗粒状卤化物，但产品纯度低、颗粒均匀性一致性差，技术还不过关。目前国内引进的生产线全部从国外进口颗粒状卤化物制灯，而每克颗粒状金属卤化物的价格高达 25~30 美元。因此，金属卤化物的提纯及造粒工艺急待解决。

### (3) 固体激光材料

自 1960 年实现红宝石激光振荡以来，对激光材料进行了积极的研究开发。掺钕钇铝石榴石 (Nd:YAG) 激光器是目前技术上最完善、高性能的固体激光器，在半导体产业方面用作激光加工装置、医疗用手术刀、止血凝固用激光器等。1989 年日本固体激光材料市场约 30 亿日元，且呈稳定增长势头。

我国早在 1965 年就开始了稀土激光晶体的研制工作，用熔体生长法提出 Nd:YAG 晶体，经过 30 年对工艺技术和晶体技术的深入研究，目前已投入批量生产并在吉林设厂生产，部分产品开始进入国际市场。同时，对优质大尺寸 Nd:YAG、多掺杂 YAG、氟化钪钇  $YLiF_2$  以及在国际上受到广泛重视的钆钽石榴石 ( $Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$ , GSGG)、铝酸镁镧等晶体的研制也都全面展开。目前我国正在研制和生产的激光晶体已有 20 余个品种，其中绝大部分都以稀土为主成分 (基质) 或为激活离子。就研制水平而言，Nd:YAG 晶坯的尺寸已达  $\phi 60 \times 200\text{mm}$ ，制成的板条激光器单条输出为 450w，Nd:YAP 激光器单棒输出达到了 700w 的水平。在研制新的激光晶体方面，如多掺杂 YAG 和 Q 开关色芯 YAG，还显示出中国自己的特色。

### (4) 电致发光材料

外加高电场激发荧光粉发光的现象叫电致发光。

在基质材料 ZnS 或  $PbTiO_3$  中加入各种稀土化合物，于电场作用下会发出各种颜色的光：TbF<sub>3</sub> (绿)、EuF<sub>3</sub> (红)、DyF<sub>3</sub> (黄)、TmF<sub>3</sub> (蓝)、PrF<sub>3</sub> (白)。可以在低压下发光，且调正电压可得到从绿到红的光，耗电少，使用温度范围广 (-40~+700C)，光亮度大。

稀土电致发光材料可用于大面积超薄型显示屏，是一种极有发展前途的功能材料。

### 3. 贮氢材料

1970 年发现  $LaNi_5$  稀土贮氢材料。近年来，以稀土贮氢材料作为阴极活性材料制造 Ni/MH 二次电池的开发引人注目，其问世时间很短，但发展迅速，从 80 年代至今，短短几年，小型圆柱密封 Ni/MH 电池已实现规模生产。由于 Ni/MH 电池与目前广泛使用的 Ni/Cd 电池有互换性，比容量更高，并且没有 Ni/Cd 电池中 Cd 对环境的严重污染问题，以及以 3C (Camcorder 摄录一体机，Computer 计算机，Communication 通讯) 为代表的现代电子设备对大容量充电电池越来越强劲的需求，推动了镍氢电池产业的快速发展。据报导，日本市场对镍氢电池的需求增长，贮氢材料生产公司纷纷增加设备，扩大生产能力，预计 2000 年世界 Ni/MH 电池市场规模为 8.77 亿支 (表 4)，作为关键材料的稀土贮氢材料也会有很大发展。

表4 世界二次电池需求预测 (单位:百万支)

年份	合计	镍镉电池	镍氢电池	锂离子电池
1993	882	808 ( 91.6 )	72 ( 8.2 )	1.8 ( 0.2 )
1994	987	775 ( 76.6 )	206 ( 20.8 )	26 ( 2.6 )
1995	1106	719 ( 65.0 )	332 ( 30.0 )	55 ( 5.0 )
1996	1239	706 ( 57.0 )	434 ( 35.0 )	99 ( 8.0 )
1997	1387	694 ( 50.0 )	27 ( 38.0 )	166 ( 12.0 )
1998	1554	684 ( 44.0 )	621 ( 40.0 )	249 ( 16.0 )
1999	1740	679 ( 39.0 )	748 ( 43.0 )	313 ( 18.0 )
2000	1949	663 ( 34.0 )	877 ( 45.0 )	409 ( 21.0 )

自 90 年代以来,我国也广泛开展了 Ni / MH 二次电池用稀土贮氢电极材料的研究开发,取得了不少进展。如用浙江大学开发的富镧混合稀土 (Mi) - 镍基多元合金制成的 AA 型 Ni / MH 电池容量达 1000mAh;用北京有色金属研究总院研制的 Mm / NI 系合金的 AA 型电池,容量为 1100mAh,最高达 1400mAh,并已开始进入产业化生产;天津富斯特用南开大学技术组建了镍氢电池有限公司,生产塑料粘结式贮氢合金电极,具有贮氢量高 (>=860mAh / cc)、电催化活性好、在碱性介质中稳定的特点,适宜于制作各种型号的镍 - 金属氢化物电池的负极,具有一系列优越性能。

目前国内建成的 Ni / MH 电池生产厂家已达几十家,生产能力 1 亿安时,计划到“九五”达到 2 亿安时,贮氢材料 2000 ~ 3000 吨。我国稀土贮氢电极材料的生产与国外相比还存在着很多的差距,目前急待解决的问题有:

(1) 生产规模小,产品一致性均匀性差。生产批量小,每批稀土贮氢合金间均匀性差,影响了 Ni / MH 电池的性能和使用寿命,而日本每批可处理 20 吨混合稀土金属,一次制成 60 吨稀土贮氢合金粉末,可供 1000 万支 Ni / MH 电池的生产;

(2) 稀土贮氢合金成分的优化,确定配比与电池性能间的定量关系。

(3) 开发廉价、有效的表面包覆技术及快速凝固技术,确定合金制备技术与电极稳定性的定量关系。

与此同时国内还进行了电动汽车用大容量大功率动力电池的研制,并已开发出了自行车、残疾人三轮车用动力电池,制出了样车。

#### 4. 催化剂

稀土催化剂除用于传统的石油催化裂化外,另一引人注目的应用是汽车尾气净化。

汽车尾气中的有害成分主要有一氧化碳 (CO)、碳氢化合物 (HC)、氮氧化合物 (NO<sub>x</sub>)。世界上许多发达国家主要的大气污染源是汽车。目前世界汽车保有量 6 亿辆,据估算每年将排放 CO20 亿吨,HC4 亿吨,NO<sub>x</sub>2 亿吨。美国大气污染中 CO 的

64.7%, HC 的 45.7%, NO<sub>x</sub> 的 36.6%来自汽车尾气。安装催化尾气净化装置是降低汽车尾气对环境的污染的有效办法。

美、日是最早开展汽车尾气净化技术的研究的国家,主要以铂、铑等贵金属作催化剂,采用电控系统和三元催化装置相结合的办法净化汽车排放的有害气体 CO、HC 和 NO<sub>x</sub>。近年来,开始研究用稀土氧化物作为添加剂制作三

元催化剂并部分取代贵金属，以提高催化剂的性能、降低成本。目前日本拥有汽车 1 亿辆，1992 年生产汽车尾气催化剂 5080 吨，消耗稀土量 413 吨，预计到 2000 年将达 1900 吨（表 5）。

表 5 日本汽车及尾气净化剂

年份	1989	1990	1991	1992
汽车产量（万辆）	1302	1349	1324	1234
催化剂发货量（吨）	5518	5687	5273	4898
催化剂发货金额（亿日元）	505 . 59	527 . 89	597 . 78	452 . 25

我国汽车尾气净化研究开展较晚，仅十几年历史，主要采用稀土和其它一些贱金属制备催化剂，这种催化剂具有良好的活性、热稳定性和抗铅中毒能力，在使用含铅汽油和车况较差的情况下，其使用寿命仍可达 5~10 万公里，稀土在催化剂中的作用主要有：1) 提高催化剂载体的机械强度（15%~25%）；2) 提高催化剂的热稳定性。添加稀土氧化物可稳定载体晶格结构，防止体积收缩；3) 提高催化剂的活性。稀土具有贮氧和助催化功能；4) 提高催化剂的抗铅中毒能力；5) 具有三元催化剂作用。

#### 5. 稀土在农林牧等方面的应用

近 20 年来，我国开展了在农业、林业、畜牧业、水产养殖业以及医学等方面应用稀土的研究工作，取得了很大的进展。以轻稀土 LA、CE 为主要成分的稀土硝酸盐作为植物生长调节剂，在近 50 种作物、20 余种苗木和牧草上研究了对作物增产效应和产品品质的影响，并组织了大面积推广应用，使用面积达 3 亿亩。此外还研究成功抗坏血酸稀土和柠檬酸稀土两种有机稀土盐，用于 10 万余种畜禽作为矿物饲料添加剂，喂养的畜禽总数达 4000 万头（羽），其增产效应已得到肯定。部分试用结果见表 6。同时还进行了稀土植物生理学、稀土土壤学、毒理卫生评价等多学科研究。

从大量的研究和大面积示范推广应用表明：适当的稀土元素可以促进作物以 N、P、K 和其它微量元素的吸收，促进种子萌发，加速生根和根部及苗期生长，增加叶面积和光合强度，提高叶绿素含量，使产量增加品质改善。但目前还不能证明稀土是作物的必需元素。对其作用机制，长期使用对环境、生理等的影响还需作更深入的研究。

#### 6. 超导材料

我国的高温超导研究始终处于国际领先地位，在钇系超导材料块材、线材、带材和薄膜的制备工艺、应用技术及应用基础研究等方面都取得了不同程度的进展，其中上海冶金所 YBaCuO 块材的  $J_c$  值为  $8.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  (77.3K, 7.5T)，北京有色金属研究总院 YBCO 单晶膜材为  $8.0 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  (77.3K, 0T)，均已达到国际先进水平。在 1995 年第 23 届日内瓦发明博览会上，北京有色金属研究总院的发明“混合稀土 - 钡 - 铜 - 氧超导体”，由于为高温超导体的大规模应用开拓了新的途径而荣获第 23 届国际发明博览会金奖。这项世界首创系采用低纯度混合稀土氧化物按适当比例配制，适用范围广、工艺先进、零电阻下的  $T_c=80-91\text{K}$ ，且混合稀土氧化物的价格仅为  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的 1/10，为大规模应用高温超导扫除了成本上的障碍。

表 6 稀土在农作物、牧草、林木、畜禽上的应用效果

名称	使用方法 和用量	生理效应 (增加%)	增产效果		对产品 品质影响
			%	kg ha	
小麦	拌种, 100mg/kg, 喷施浓度 500ppm, 三叶期、四叶期	小麦穗提前分化, 叶绿素提高 34 ~ 42, 光合速度提高 13 ~ 19, 穗数和千粒重增加	8	420	麦粒赖氨酸增加
玉米	每千克 400MG 拌种, 苗期喷施 0.05% 拌种, 45g/15kg 种, 叶喷 40 亩, 浸种 0.08%	促使种子萌芽, 根茎叶生长加快	10 9	450 465	百粒重提高 0.2 ~ 0.35%
甘蔗	0.03% 浓液 50kg, 于分蘖期喷施	根增 2 克/株, 分蘖率 9, 单株功能叶增 6, 叶绿素增 8 ~ 14.4	10	6000	含糖量 0.5%
油菜	拌种 5g/kg, 蕾期和初花期分别喷施 300、500ppm	主茎绿叶数分别增 6.9 和 9.9, 根茎增 8.6 ~ 11, 叶绿素增 48, 千粒重增 6.2	20	80	含油量增加 2%
老芒麦 羊茅	拌种、丸衣、叶喷, 50 ~ 350, 现蕾期喷 40 克/亩	叶面积增 5.6 ~ 13.3, 光合强度增 9.4 ~ 22.5, 叶绿素增 1.3 ~ 35.4, 株高增 3.2 ~ 19	干草: 20 种子: 12	750 ~ 300	粗蛋白增加 3% ~ 9%
兴安落 叶松	浸种: 50 - 150ppm 喷幼苗: 80 克/亩	发芽势提高 5.3 ~ 9.4, 发芽率 6.4 ~ 9.5, 根容量增 20 以上, 同苗高增 9 ~ 15	苗量: 12 成苗率: 13 鲜重: 10	4000 (棵/亩)	苗木等级率提高, 抗病性增加
育猪	日粮中加入 40mg	增重率提高 6 - 29, 饲料利用率提高 10			

此外, 我国在开展无限层铜氧化物  $ACuO_2$  ( $A=$ 碱土金属) 超导体的研究方面也取得了新进展, 国家超导实验室在高压条件下成功地合成了  $(Sr, Nd)CuO_2$  和  $(Sr_{1-x}Y_x)CuO_2$  两个电子型无限层结构超导体, 为探索新型高温超导体及深化高温超导机理的认识起了良好的推动作用。

## 7. 特种玻璃

### (1) 掺铒光纤放大器

光纤通信信息容量大, 其抗干扰能力强、保密性好、重量轻。到 1992 年, 全世界已铺设光缆 2500 多万公里。光在光纤中传输也有衰减。为放大信号, 光缆铺设一定长度 (60 ~ 70 公里) 以后, 设一中继站, 将光信号变成电信号, 电信号放大后再变成光信号, 然后传送。这种放大方式使信号传输速度降低, 信息容量受到抑制, 又增加费用。80 年代后期, 美、日等国家研究掺稀土铒的石英光纤 (EDF), 以 EDF 代替中继站对光信号进行放大, 故称为掺铒放大器。铒离子受激辐射的波长为  $1.53 - 1.55 \mu m$ , 正好在石英光纤最低损耗的波长 ( $1.55 \mu m$ ), 故 EDF 本身就是低损耗的波导, 铒受激本身就等

于放大。据报道,1989年日本国际电信电话公司在900公里光纤线路上放置11个EDF放大器,实现了长距离通讯目标,并且,电话容量可增加4倍多,价格仅是原来的1/10。1990年,美国电话电报公司也用EDF作为1.02万公里的光通讯实验。每25米光纤中加入2米EDF,试验获得了成功。此外,日、美这两家公司正联手共建横跨太平洋的第二条光缆,采用EDF放大光信号,预计工程于1996年完成。

我国近年也开展了光纤激光器、光纤传感器和光纤放大器的研究,于1991年研制成功了EDF光放大器,1993年清华大学利用EDF在国内首次实现21公里的光纤孤子传输或孤波通讯,为我国的超高速、大容量、超长距离通讯技术奠定了基础。

### (2) 法拉第旋转玻璃(光隔离器)

光通讯系统中,半导体激光器发出的光在光纤连接处被反射,若返回激光器,将使激光振荡不稳定,产生信号误差。为拦截反射光,使用光隔离器,其原理是利用磁光效应中的法拉第效应:线偏振光沿外加磁场方向通过介质(法拉第元件)时偏振面发生旋转。激光器发出的光先通过起偏器,使其成线偏振光,沿磁场方向通过介质,引时线偏振光旋转45°,然后经检偏器发射出去。当反射光返回通过检偏器,再透过介质时又旋转45°,与入射的线偏振光成90°下交,于是被起偏器挡住而不能反射至激光器。

稀土-铁石榴石( $\text{Re}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ )或稀土-铁铝镓石榴石可用于制作光隔离器的法拉第元件,其中稀土可使用Gd、Tb、Dy、Jp、Yb、Lu或Y等。光隔离器中产生磁场的磁体可用Sm-Co或NdFeB永磁体。据报道1986年日本光隔离器产量为4900个,1987年激增至7100个,1992年40~50万个,5年间约增加6倍。

法拉第旋转玻璃还可用作核聚变的隔离器。可以添加Ce、Nd、Tb,现使用加铯的玻璃。

### (3) 低损耗光纤玻璃

氟化物玻璃作光学通讯用光导纤维引人注目。现使用的二氧化硅光导纤维理论损耗临界值为0.2分贝/公里,而氟化物玻璃理论损耗临界值可接近0.001分贝/公里。目前正研制在锆、钆等氟化物中添加La、Gd或Y氟化物制作光纤。可以想象,这样的光纤若用于通讯,几乎可取消中继站或含铷的光放大器。单一稀土加入量5%~15%(克分子百分数),但要求纯度高,据报道需5N、7N甚至9N级单一稀土化合物。

## 8. 精密陶瓷

陶瓷电容器属功能材料,是电器电路中的基本元件,其主要材料是钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ ),其介电常数虽高,但不稳定,加入氧化铈可使介电常数在宽温范围保持稳定;同时还加入氧化镧,使电容器寿命大为延长。陶瓷电容器是稀土应用稳定增长的领域,日本为其最大生产国,1976年年产144.3亿支,1981年214.75亿支,1986年462.6亿支,1991年957.96亿支,大体上每5年翻一番。

现在,集成电路基片多采用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,但已有被AlN取代的趋势。在AlN中加入3%的 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,形成 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,其导热率(230W/m·K)高出数倍。

锆钛酸铅镧(PLZT)是一种透明陶瓷,可用作光开关,即可以通过光线,当对其施加电压时光的折射率发生变化,用两个偏振(起偏器和检偏器)中



间夹一块表面装有两个电极的 PLZT 板就是一个光开关。两个偏振片能透过的线偏振光成正交。故当入射光透过起偏口时产生线偏振光，穿过 PLZT 到达检偏器时光就被挡住，即把光“关”住了。若接通 PLZT 板上的电源，其上的两电极之间产生电压，入射的线偏振光产生偏转，偏转  $90^\circ$  就能通过检偏器，于是光路被“打开”。这种光开关可望用于光计算机。

结构陶瓷中可能最有前途的是氮化硅。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  无熔点，烧结温度高，故烧结时蒸汽气压大；此外， $\text{Si}_3\text{N}_4$  为共价化合物，扩散系数小，仅靠本身烧结难以致密。多用  $\text{Y}_2\text{O}_3$  或  $\text{La}_2\text{O}_3$  作助烧结剂，以制得致密的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷，其高温强度高、硬度高、抗蠕变、抗氧化、耐腐蚀，且比重小，三菱、日产等公司已将其用于汽车发动机摇杆、增压涡轮转子，重量为耐热合金的  $1/2$ ；五十铃已用其制作电热塞用于轿车，使用 2000 小时仍保持完好，而金属电热塞仅 200 小时就得换新。据报道我国已开始生产  $\text{Si}_3\text{N}_4$  电热塞。

精密陶瓷是一个具有很大市场潜力的应用领域，其中日本的市场规模现在和将来都占主导地位。1985 年日本精密陶瓷市场约 8577 亿日元，预计到 2000 年日本陶瓷市场约为 4.1 万亿日元（表 7），其中电子陶瓷占 1.8 万亿日元，年增长率  $\sim 8\%$ ，电容器介质与集成电路基片约占  $2/3$ 。

表 7 日本精密陶瓷市场规模（亿日元）

陶瓷部件用途	1985 年	2000 年
电磁方面	6008	17830
机械方面	1060	2570
热方面	580	4220
化学医学方面	595	1770
光学方面	322	10070
其它	12	4910
合计	8577	41370

## 二、展望

如前所述，稀土元素由于其特殊的物质结构具有的优异的物化、磁、光、电学特性，被人们誉为高新技术材料的宝库、高技术的摇篮。稀土支持了高新技术材料，这些材料又进一步推动了高新技术终端产品行业的发展（表 8）。

表8 日本与稀土有关的材料、器件产量

		1982	1991
彩电(万台)	Y, Eu, Ce	1216.2	1344
彩电显像管(万支)	Y, Eu, Ce	2198.5	2151
黑白显像管(万支)	Ce	406.5	-
工业显像管(万支)	Ce, Y, Eu	340.7	1488
荧光灯(亿支)	Y, Tb, Eu	2.56	4.02
水银灯等(百万支)	Y, Eb	4.4	8.6
复印机(万台)	Eu, Tb	142	254.2
陶瓷电容器(亿支)	La, Nd	236.47	957.96
视频摄像机(万支)	La, Ce	88.5	1174.1
35MM像机(万架)	La, Ce	1381.9	1764.7
永磁(吨)	Sm, Nd, Ce	108	1698
光学玻璃(吨)	La, Gd, Y	7755	11340
防公害催化剂*(吨)	La, Ce	4016	(5248)*
球墨铸铁(万吨)	MM	74.5	141.3

\*1991 仅含汽车尾气净化催化剂

#### 1. 信息高速公路的召唤

人类已进入信息时代，其特征是远距离、大容量、高速度的信息传递。信息时代是光、电、磁的时代，也可以说将是稀土高科技应用的时代。今天，一些稀土材料已经或开始进入信息领域。

信息高速公路——

信息传送： 光纤激光器

光纤

光纤放大器

光隔离器

信息存储： 磁光盘

磁盘驱动器

信息终端： 彩电、计算机、大面积超薄型显示器

移动电话、立体声音响、

打印机、复印机、传真机等

(使用稀土材料，详见支柱产业)

1993年9月美国政府正式提出“全国信息基础设施”(NII)的行动计划，俗称信息高速公路。信息高速公路就是由光导纤维组成的光缆，用光缆把每个家庭、学校、医院、企业、机关、图书馆、研究机构、商店、电视台、报社、银行、证券交易所等联成巨大的信息网络，利用多媒体技术把计算机、电视、电话、传真等功能融为一体，利用由光缆组成的信息网络巨大的信息传输能力实现实时声、文、图、像(活动图像)的交互式(双向或多向)交流。因此，有了光缆就可以在家工作、学习、查找资料、开会、购物、进行商贸与金融活动。

美国预计2010年完成NII计划，估计需耗资4000亿美元；日本通产省已估算出2000年日本的信息通信市场规模，大约59~67万亿日元，超过1990年日本第一产业汽车业的市场(40万亿日元)，邮政省估计，因“随着光

纤网络的充实而新生出来的市场”，2010年日本的信息通信市场将达123万亿日元，比2000年约翻一番。

## 2. 向支柱产业渗透

我国已确定将机械、电子、石油化工、汽车与建筑作为国民经济的支柱产业的目标，进行支持以促进其发展。稀土在上述产业均有广泛的应用，由此可以想见在经济建设中将发挥越来越大的作用。

稀土是我国富有的矿产资源，储量占全世界的80%，并且矿床种类齐全，轻重稀土配比良好，得天独厚。我们应该充分利用这一优势，发展稀土科技，化资源大国为科技强国，为“九五”及下世纪科教兴国，做出更大贡献。

## 城市的文化特色

齐康

东南大学

齐康 建筑学家。1931年10月28日出生于江苏南京。1952年9月毕业于南京大学建筑系。历任南京工学院副院长、东南大学建筑研究所副所长。现任东南大学建筑研究所所长，建筑设计研究院总顾问，国务院学位委员会委员，中国城市规划设计研究院高级顾问。1993年当选为中国科学院院士。长期从事建筑和城市规划的科研、设计和教学工作。

为什么要研究城市文化特色，而城市文化特色又包含些什么，研究城市的文化特色对城镇建筑环境规划设计与管理又起着什么样的作用？

我们说城市形态，它是社会多系统作用于城市所表现出的物质和精神形态，它不只是城市外部的、内部的形式，有形的表现而且包含了更广的文化内涵。

城市是载体，它的客观存在是人类聚居最基本最重要的组织形式，是物质精神的综合反映，我们剖析形态就是从城市形态发展的过程中寻求其特征的表现。

一般地说，城市的特色是城市物质形态内外空间形象的表现，它既是外在的又是内在的。

当我们回忆起已经到过的城市，或新来到一个城市时，其中最敏感、新鲜而刺激的感觉就是城市形象的标志（Landmark）。历史性的古建筑、著名的公共建筑和广场引起人们视觉形象的反应，给人们以深刻的记忆和联想。城市中繁华的街道，构成城市内地区的特色，人群的精神面貌、情趣等构成的氛围，是不能不引起人们的兴趣和注视的。当您游览北京人民大会堂、北京故宫时，层层叠叠的宫殿深院，壮丽的建筑群会映入您的眼帘；当您乘游船环游塞纳河时，那高矗的巴黎圣母院、美丽的石桥、大型公共建筑物，使您仿佛来到水石交相辉映的神奇世界；当您驱车由南京至上海，最引人注目的是镇江金山寺、苏州虎丘塔和北寺塔，以及无锡的惠山。我们看电视气象预报，荧屏上总是以某些特定的标志性符号作为城市象征。这种象征或以高塔建筑，或以园林寺庙，或以风景名胜与纪念建筑，或以公共建筑物、城市的构筑物（如电视塔）等为标志，这一切都会引起人们的注视、记忆和回想。在那些大城市、特大城市中，这种标志符号又分层次、分地段，用城市地区的特点来表现——这就是城市景象。

建筑师要注重城市的环境设计，对那些重要地段的广场、公共建筑，纪念性、标志性的建筑等都要从环境的特点作好设计。因为它们表现城市的时代建筑文化，表现城市艺术风格，一座有历史文化的城市，都能从潜在的历史事件、事迹、社会变革的特征、革命胜地、人物的纪念地得到显现，它们之中有的形象消失了，有的残存着，但传统文化影响的“因子”却作为文化的“烙印”代代相传，永远留在人间。那些可歌可泣、悲壮英勇的历史事迹，那些一度繁华而灿烂的历史文化，都是人类历史情感的表现。这些历史文化影子又会在一定的社会环境气氛中再现，这就是“再文化”的现象。合肥市城隍庙古街、北京琉璃厂的修复与重建，南京夫子庙建筑群的建造等都是再

现历史的表现。现实生活与过去的时代相距遥远，但人们生存现实的文化价值，从这“再现”中获得某种光彩，某种社会心理平衡。

有特殊艺术形象的建筑，它显然对城市形象起着主导、主宰(Dominant)、控制、突出的作用，但它又寓于城市广大建筑群中。城市的生活环境——住宅街坊和群体，城市的生产环境——工厂区、仓库及交通、动力、公共设施，以及人们游息的公园绿地等都是城市文化特色不可分割的组成部分，寓于一般的建筑环境之中，其规划设计仍具有同等重要的设计价值。

### 一、城市文化特色是城市文化历史发展的 积累、积淀和更新的表现

随着城市的生存和发展，人们在不断建造环境的同时，又不断改造着所形成的环境。城市的社会价值观念也随着城市的发展而得到变迁。于是城市中一些物质精神文化留了下来，一些就被更替了，若此循环往复，在时代共同的价值观中，城市的一部分建筑文化得以积累，如古建筑、古迹和有历史文化使用价值的建筑等，这种文化的深层含义就是使人们怀念过去，研究过去品赏其意义，共同认可的得以保留。新的生产生活永远不停地改造更新着城市发展，陈旧的无价值的将不断被摒弃和淘汰。那些得以留下的建筑和遗迹就成为城市发展的历史见证和人类活动的印记。而被淘汰的（或破坏的）将永远一去不复返，人类共同的文化感情将那些先辈们经过创造性劳动的文化标志视为城市永恒的标志。希腊的雅典卫城、帕提农神庙、罗马的斗兽场、水渠，中国的北京故宫等等，凡是经历了历史发展的城市都具有历史性，在建筑环境中最最突出的就是建筑物的遗迹，如若我们漫游巴黎，就会发现围绕巴黎圣母院的林肯岛，沿着塞纳河这根城市轴，卢浮宫、万神庙等一组组轴线建筑群不断地展示开来，不同时期、不同时代的建筑风格沿着成网的干道向城市四周推开，从城市的骨架(Structure)、城市的肌理(Texture)可以寻找出城市发展的文脉和城市文化发展的轨迹。在我国，从北京、西安、洛阳、南京、苏州、上海、天津等地，都可以寻找出这种文化积淀的轨迹，它浸透了人类的文明和文化，深深地印刻的痕迹，留在城市中，留在人们的生活中，它们的影响、传统教育和启迪印刻在人们的脑海里，成为人类共同文化的知识特征。城市规划设计者应把握住所设计的建筑和建筑群所处的轨迹，它对今后的设计、改造所起的作用，它的工作又处在什么地位上，这要引起我们的重视。

### 二、城市的特色是人类聚居活动不断适应 和改造自然特征性的反映

世界上几乎所有的历史名城都和山、川、河、湖紧相毗邻，它们给于城市的形态、功能布局、景观以很大的影响。莫斯科有莫斯科河、圣彼得堡(列宁格勒)有涅瓦河、伦敦有泰晤士河、巴黎有塞纳河、维也纳有多瑙河、布拉格有伏尔塔瓦河。而旧金山、纽约、伦敦、上海等除河流穿过城市外而且还是出海口的特大城市。我国的许多省会城市中，不少是背山面水的，如福州有鼓山和闽江、济南有千佛山和大明湖、南京有紫金山和玄武湖等。美丽的风景，如画的城市离不开江河湖山。城市的生长发展，开发也离不开自然，自然与城市相依共生。人们适应“上帝”赐予的“自然”，自然与社会相得益彰。城市的选址利用自然，大多数是由于水源、运输以及发展起来的经济

文化。在古代也有不少城市利用山、水作为防御的屏障，山、水是城市城防的组成部分。人类还利用自然取得生态平衡。现代城市中由于工业、交通及城市污水废气的排放带来了环境的污染，所以又可以说城市依托的自然环境不能不反馈到对“城市自然”的保护。自然给城市以特色、以景观、以生态平衡和心理平衡，利用自然要以保护自然为准则。一旦自然生态遭到损害，那么赖以生存的城市社会的生存和发展就要受到制约和威胁，许多城市病的产生，都是对自然的利用不加以控制所致。自然环境和城市的组织与保护是保护城市特色的重要措施。

城市均处在不同的经纬度上，气候寒冷和炎热的区位差、温湿的变化以及自然的种种灾害，城市采取必要的防灾措施等都对城市的特色起了保护作用。寒冷与亚热带地区的建筑规划和建筑设计有明显的差异，这又很自然地反映到城市的景观上来。总之城市的建设要以适应和克服大自然影响为目的，而大自然的能量仍然影响着城市，即使在科技发达的今天，城市特色仍然离不开大自然的总体环境，城市规划和城市设计、建筑设计都需充分反映这些特点。城市的开路要顺应自然地形、自然的河湖沿岸线，要寻找对景，修建建筑与自然景观相呼应，要与山形湖景相陪衬、相衬托。这是设计者必须遵循的原则。

### 三、城市文化特色综合反映了城市的社会行为、 观念、行为模式特点，反映了城市社会活动的总和

从某种意义上说，城市的社会特点是城市文化特点不可分割的组成部分。如果说城市的物质形式是建设城市的“硬件”，那么社会组织活动的反映是其“软件”。它们之间的互动构成城市的总和和城市总的特色。对不同规模、不同性质的城市，城市活动的节奏和效率是不同的。可以认为城市现代化程度愈高，信息愈快，城市运转就快，反之则缓慢。纽约的金融经济具有世界性，城市活动的效率就高。瑞士苏黎士也是世界著名金融中心，它的金融活动和伦敦、纽约一样重要。有人认为，如果每天的金融行情缺少苏黎士，那么世界的金融交易就有困难，这就反映了城市活动的世界性。城市的行为观念、行为模式因城市所处国家、社会制度、体制、观念形态的不同而有所差异。社会主义和资本主义国家的城市制度、体制等方面有很大的不同。又如经济对城市的投入、投资方式、管理体制、规划等方面的差别，显然都要反映到城市特色和形态上，我们可以这样认为，建筑的表现是一种“观念的建筑”，那么观念对于城市也是“观念的城市”。我国50年代建造的大学，建筑布局受到苏联建筑模式的影响，这就形成了一种观念。有的在校门口处设大门，对准大门必然是主楼建筑，而现今西方的大学、大学城，有的则是没有明显的“大门”，只有检查汽车的入口道，没有围墙，有的则是建筑群集中布置。这样除功能特点，不能不认为社会活动的行为和观念对城市的特色是有影响，有时甚至产生巨大的影响。中国古代城市的“前朝背市”、印度古城的星象，日本古代城市的守卫阁，以及法国巴黎的“星广场”等都反映了制度、观念对城市特色的影响。其它如城市的社会习俗、趣味、群众的爱好以及宗教、政治活动等无一不透过人的行为活动及其作用影响城市物质形态、景观和形象。研究一个时期城市的具体观念（城市社会的）是我们研究城市形态特色需要注意的地方。城市设计和建筑设计既受到观念的制约，又要在新的科技文化影响下对约定的观念来一个突破，不断探求新时代科技

文化对设计的要求。

#### 四、城市的性质和规划影响城市的特色

这个问题前面已作了些阐述。一般地讲，特大城市、大城市的基础设施比较完整（尤其在中国），城市的科技文化条件比较完善，智力相对密集，生产效率高，交通信息也较之一般城市为快。但大城市又伴随人口拥挤、土地紧张、建筑密度高、环境质量差。由于工业相对集中，交通运输、废水、废气、废品处理以及城市的应变能力常常成为矛盾的焦点。如何调整好城市的产业经济结构，协调各子系统之间的矛盾，保护环境质量是管理者的重要任务。在科技发达的今天，发达国家中大城市能获得的福利设施，中小城市也有可能达到，加之科技进步所引起的产业性质变化，大城市的某些优势有时会发生“逆反”，反城市化现象的出现就是个例子。

至于城市性质，不难看出风景旅游城市不同于工矿城市，以采矿、冶炼为主的城市不同于一般综合型的城市。商业贸易发达、以金融为中心的城市又有自己的特色。城市的不同性质决定和影响了城市社会人群活动方式和活动的特点。

大城市中的人际关系、社会交往与小城市邻里关系有明显差别，而且，城镇中还存在着亲缘血缘关系，人际关系的疏密程度会在社会的种种观念中得到反映（当然还有其它深层的原因）。归纳起来大城市的现代化、社会化、现代科技、现代信息、现代交通以及较为丰富的文化生活等都会给城市的观念文化提出新的环境规划设计要求和设计上的种种创新。

城市行政管理的级别，城市所在地区的首位度都影响城市的文化特色。城市的行政级别、行政信息、政府政策的管理水平、实施水平、行政效率等都影响城市的文化特色和素质。城市管理者的能力、水平和作风、组织结构及所采取的行政措施以及综合产生的文明程度，可称之为“隐性而潜在的城市性格”、“城市品格”和“城市风格”。为此我们的设计要尽可能体现城市的性质和规模，要十分强调城市和建筑的地方性，并注重城市的结构和机理、尺度使之与规划相匹配。

#### 五、现代化的城市设施、现代化的

##### 科学技术给城市以新的文化特色

城市的现代化必将伴随着城市的社会化，现代科技在城市建设中的种种表现仍然是现代城市和建筑文化的标志之一，城市社会化程度的提高反映出城市生活的便捷和繁荣，综合反映出城市的效率。城市社会改革、经济体制和城市职能的更新，及城市中种种新的技术的应用，都使我们面临着一场新的挑战。现代城市文化离不开现代新科技，城市文化特色的变化是大势所趋。高大的电视塔、快速的交通及立体交叉的建筑物、地下铁道等等都给城市以新的特色。具有历史传统文化的城市，其发展必须与现代化相结合，这是我们研究城市特色所不可忽略的。

现代化的发展、社会化的管理、产业结构和生活方式的变化，特别是表现现代建筑文化是高层建筑、大空间建筑的出现、多功能的综合利用，引起了城市和建筑内部空间立体轮廓的变迁，这在许多城市立体轮廓线中已呈现出来。各城市规划和管理水平有很大的差别，以维也纳为例，它是欧洲的历史名城，城市管理相对地较为严格，高层建筑只能在城市外环以外建设，古

城区的设施水平提高了，但城市原有的历史风貌依然存在。在日本，名古屋也是东方历史名城，它有很好的规则，古建筑群得到景观控制，城市中央近百米宽的林荫道被规划而留了出来，城市的形象显得十分美丽。现在日本建筑师们认识到要吸取以往建设中的教训，重视景观设计并成立了相应的机构。可见，现代化科技能给予城市以新的特点，但仍要注意规划、管理、控制、保护、设计好城市的新环境，而景观设计是其重要内容。

#### 六、从某种意义上讲城市文化特色是不同历史时期，不同管理者、规划者、设计者水平和素质的综合反映

从建筑史可知，城市文化特色水平的高低都和一个时期管理者的水平素质、管理体制、法规等有直接或间接的联系，巴黎、华盛顿、北京（古城）、西安（古城）等的优秀规划和管理反映了这个问题。18世纪法国豪夫曼的巴黎规划及艾伯克隆比的伦敦规划以及它们的实施也清楚地说明了这一点。另外，不同时期建筑设计的水平及其作品都给城市形象产生了深远的影响。以北京为例，古建筑如故宫、天坛、颐和园，解放后的优秀建筑以及近年来建起的住宅群和公共建筑等都反映了不同时期城市风格和艺术发展的过程，也反映了城市文化艺术的特征。

我们强调的是，一个时期管理者、规划者的决策对城市负有历史的责任。他们的建设活动都浸透了那个时期社会活动带来的印记。城市设计反映漫长的城市建设过程的需要，是不断延续调整的规划设计过程，是一件长期性的工作。多样性的城市设计，后来者的观念的连贯性，使文脉和设计紧紧结合起来，每个设计者、管理者的统筹决策、群众的参与、有序的合理建议，都是正确管理城市建设不可缺少的要素。

综上所述，城市的特色离不开自身发展的现状基础。城市的基础设施是城市的基本骨架，它的形成一是由于城市原有的设施，当时的建造方式、法规、形制、功用；二是由于城市的发展、扩展，或由于技术进步使城市的设施以及组织居住建筑不断更新所致。城市的道路和基础设施一旦形成，就会开始两边及周围建筑的建设。因此，它对城市型态及特色的变化起着十分重要的作用。许多历史城市中，原有设施的骨架大多被改造更新，它是城市型态中最深的烙印。城市基础设施（地下）的“形”不能不受到自然环境的影响。山、河、地质构造等种种现象都制约了城市道路网设施的形式，它影响城市的形态，产生了城市自身的特点。城市的基础设施（这儿指的是道路及地下的工程设施）在城市的经济投入中占有相当的比重，它的更改也应有相应的经济价值，它的技术特点、进步程度很大程度上反映了城市建设的发展，这个“地下魔鬼”操纵了城市发展的态势。而基础设施规则设计对未来城市发展的作用，可以认为是一双具有潜在能力的“魔手”。城市特色的现代化程度，技术进步的水平都要以它作为重要标准。

我们评价一座城市不能只看到可见的“形象”，不可忽视那些不可见的在地下影响整个城市生产生活的“血管”。这些血管牵动了有形的城市，也牵动了有形无形的城市生活，其结果仍然是有形的。现代城市若停一天水，停一天电或交通，都会给城市生活带来不稳定。因此不能等闲视之。

#### 七、结束语

由以上可见，城市特色具有综合性、地方性，它是城市的历史、文化、



社会经济、地理、科技……的综合结果，而不是孤立存在的。所以城市的设计也应当是综合的有地方特点的。

我们是在一定的时间、空间结构中研究城市特色的，它是动态过程的表现。既然是一个过程，那么我们就强调城市设计的连续性，不然难以体现这个设计的整体过程。

在研究城市的特色时，将文化看成是综合的特点至关重要。我们要把经济发展的特点、精神文明的特点，分别按不同价值观加以综合评述。

在现代化城市中，要强调城市的综合效益，社会的、经济的、环境的效益，三者有机结合，缺一不可。在现实生活中，在许多方面三者是互补的、相互促进的。

城市社会的有机组成、社会人的组织状态、所反映的精神文明以及对城市建设保护的能动作用，仍然是研究城市特色的重要因素。

城市特色不是消极客观的反映，它要求管理者、决策者、参与者能动地发挥、利用、保护已有的城市特色，使城市向着创造出符合时代、展望未来、求得更新的特色方面发展，最大限度地满足城市人民最大的物质和精神需求。

当今中国的建筑世界里，往往充满了千篇一律的现象，形式上的照搬照抄充满了各类城市，这也算是时代的一种反映吧。原有的地方特色几乎被统一模式的建筑所替代。这种建筑造得快，能较快地满足社会各种类型的需要，这是它的优点，但是，地方的个性逐渐暗淡了、埋没了。这是个值得深思的问题。

我们再进一步探讨一下是否除特色之外城市具有风格呢？如果指形象而言，无疑是有风格的，建筑风格的总和和自然构成了城市的风格。

是否城市也具有性格呢？如果指城市社会生活长期形成的特点，或者通俗地说“脾气”、“习惯”，那么也可以说是一种城市社会的性格。城市是个社会体，总有自己的约定俗成。一个国家，一个民族有它自己的制度、体制和特点，作为一座具体的城市也有自己的性格。这也是社会的综合反映。

是否城市具有自身的品格呢？我们从精神文明这一点来分析，城市之间是有区别和差别的。这里我们强调的是城市社会人的素质和道德风尚。

我们如果能从城市的风格、性格、品格及其获得的种种特点来评定城市文化特色的价值观，这将十分有利于我们从事城镇建筑的规划和设计。

# 新材料的现状与展望

师昌绪

中国工程院

师昌绪 金属学、材料科学专家。1920年11月15日出生于河北省徐水县。1945年毕业于西北工学院，1952年美国欧特丹大学获博士学位。历任中国科学院金属研究所所长、国家自然科学基金委员会副主任，曾任中国材料联合会主席、中国薄板深冲学会理事长。1980年当选为中国科学院院士（学部委员），1994年被选聘为中国工程院院士，现任该院副院长。主要从事高温合金及合金钢等方面的研究。

新材料是发展高新技术的物质基础，也是改造传统产业的必备条件，因此，世界各工业发达国家都给予高度重视，把新材料的研究与开发列为关键技术的重要组成部分。最近德国 Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research 分析了世界各国发展计划，总结出在 21 世纪初的九大重点领域，它们是：先进材料，纳米技术，微电子学，光子学，微系统工程，软件与计算机模拟，分子电子学，细胞生物技术，信息、生产与管理工程。在这九个领域中又列出了 80 个课题，其中属于先进材料的 24 项，在其它领域中也包含着不少与材料直接相关的课题，如纳米技术中的纳米材料，微电子学中的信息存储、微电子材料、超导及高温电子学等，共有 27 项。因而，在未来技术 80 个课题中，有关材料方面的课题在 60% 以上，这足以说明新材料在未来技术中的地位了。

从目前到下世纪初，新材料的发展主要有以下几方面：

## 一、信息功能材料是新材料中最活跃的领域

所谓信息行业，主要包括通讯、计算机及控制等三个方面，指信息的获取、传输、存储、显示、处理等，这些都以材料为基础。

当前已进入信息时代，其主要标志：一是就业人员，从事与信息职业有关的人员占有很高的比例，图 1 为美国从事信息行业人员的变化情况。其次是具有普遍性，必须是无所不在，计算机是信息产业的关键。早在 1906 年就发明了电子管，1948 年半导体晶体管出现，1958 年在晶体管的基础上又出现了集成电路。集成电路出现以后，计算机的体积大为缩小，功能日益改善，可靠性不断提高，价格不断下降，从而计算机得到广泛应用。没有计算机的普及，信息时代是不会到来的。第三则是具有重要性，由于信息产业的发展，使人类社会难以脱离信息而生存，信息已成为人们生活的重要组成部分。由于信息时代的进入，有关信息的设施得到高速发展，从而信息功能材料随之受到高度重视。

信息一般以电子为载体，可是电子有质量（ $9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$  / 电子），不但速度慢，而且在输运过程中受阻发热，产生磁场效应，在一定条件下有量子效应，影响计算机的进一步提高，因而近年来光子学得到大发展，光子不但速度快，而且能荷载超大信息流（如 TGb / s）的传输。光子的产生起源于电能的激发，离开电子，光子器件的功能也不能得到施展，因此，一般称之

为光电子学。

### 1. 信息产业以集成电路为基础

集成电路的关键在于半导体材料和封装材料与技术。目前硅是最主要的半导体材料（在 95% 以上），在今后二三十年内也不会有很大改变。但对硅材料的要求却愈来愈高，晶片尺寸愈大，质量要求愈高，如表 1，这是由于线宽愈来愈细的缘故。IBM 预测，到 2007 年线宽将达到  $0.10 \mu\text{m}$ ，那时所发热量足以使基片熔化，量子效应也就会更明显，封装材料与封装技术将更为关键，金刚石薄膜或其它导热而不导电的封装材料（如 AlN）可能问世。

GaAs 是仅次于硅的一种 III-V 族半导体材料，由于其比硅具有优异的性能和受激发光的特点，对发展高密度、高速度芯片有利，在今后会得到更高速度的发展。但是近年来多孔硅的发现及在硅单晶上形成的纳米 SiC 都是可发光的半导体材料，有可能在光电子学中得到应用。

表 1 单晶硅晶片发展趋势及其要求

	单位	1995	1998	2001
DRAM（动态随机存取）	Mbit	64	256	$1 \times 10^3$
设计线宽	$\mu\text{m}$	0.35	0.25	0.18
晶片直径	mm	200	200 ~ 300	> 300
表面微观粗糙度	nm	< 0.5	< 0.3	< 0.2
表面沾污与缺陷亮点	每片数目	10	1 1	
缺陷尺寸	$\mu\text{m}$	0.12	0.05	0.03
表面金属原子	原子数/cm <sup>2</sup>	$10^{10}$	$10^9$	$10^8$
氧含量	at %	$0.0029 \pm 4$	$0.0026 \pm 2$	$0.0023 \pm 2$

为了实现高密度、高速度，超导技术的应用与超晶格的发展都是有效的，后者还可实现一个芯片的多功能化。目前正在酝酿中的光计算机、生物计算机恐怕为期更远了。

### 2. 记录材料

记录材料多种多样，分为磁、磁光与光记录材料几大类。磁记录材料发展最早，目前仍占很重要位置，种类也很多，除  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CrO}_2$ 、 $\text{BaO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$  以外，还有薄膜。用磁粉（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）涂布，其密度每平方英寸为 30,000 点，溅射薄膜（Co - Cr）达 70,000 点以上，而垂直双层膜（Co - Cr / Fe - Ni）则大于 500,000 点，目前发展到  $3 \times 10^{12}$ ，磁光存储，密度高（ $10^{10}\text{bit} / \text{cm}^2$ ）、寿命长（> 105 次）、保真好，并可擦除，发展很快，其材料成分为 GdCo、GdTbFe、TbFeCo 或 Co 与 Pt 薄膜重叠。光存储的密度极高（800Mb / 英寸<sup>2</sup>），而且价格低廉，但不能代替磁存储而只能是补充。目前常用的材料为 Te—Se—Pb 的 30 - 50nm 的薄膜，也可以是  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  及  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的多层薄膜。

### 3. 敏感材料与敏感元件

计算机用于控制主要靠敏感元件，它决定着控制的精度。很多敏感材料属于氧化物陶瓷，但是有机物也可作为敏感材料，如人体的各种感知，都靠有机体的分子识别。金属敏感材料中最有名的要算形状记忆合金了。

### 4. 光导纤维

光导纤维的特点在于容量大（如图 2）、保密性强、不受干扰、节约资

源、中继线网络距离长,1994 年全世界已近 1 亿公里,10 倍于集成电路的发展速度,是信息高速公路的关键技术。

光导纤维主要是掺杂的石英(如  $\text{GeO}_2$  或稀土)拉制而成,目前损耗已接近理论值( $0.1\text{Bd}/\text{Km}$ ),而今后是向卤素化物发展,如此可以得到更低的损耗,中继距离可达数千公里。同时传输容量也在不断增加,目前在研容量远比现已工业化的容量大得多。

除无机非金属光导纤维以外,有机光导纤维损耗虽较高( $100\sim 200\text{Bd}/\text{Km}$ ),但由于其柔软、可操作性强而广泛用于医学诊断及其它短距离光信息传输。

## 二、结构新材料向高比强度、高比刚度、耐高温、耐腐蚀、耐磨损方向发展

为满足航空、航天及国防、节约资源和能源以及提高工业生产力的需要,必须高度重视结构材料的发展,因为一般来说,结构材料量大面广,对经济效益影响很大。

### 1. 金属材料仍在不断发展

由于历史的继承,生产已具有相当规模,生产、设计和使用已有成熟的技术和经验;性能价格比和可靠性都较高,因而人们想尽一切办法在现有基础上进行改进和创新。如在铝合金中加入 2~3% 锂,可使比重降低 10%,刚度提高 10%。在一架波音 747 中,铝合金近 20 吨,若采用 Al-Li 合金可产生很大的经济效益;卫星的收益就更大,所以成为当前铝合金中的研究热门。喷气发动机的关键部件为高温合金涡轮叶片和涡轮盘,其工作温度决定着发动机的功能和燃效,但是目前高温合金已接近其熔点,从而想到金属间化合物,不但有较高的熔点,且比重较低,但是这些化合物具有室温脆性和环境敏感等缺点,成为当前研究的重点,而且已有所突破。其中最吸引人的为钛铝系合金,通过中间化合物的研究,使钛合金的工作温度从 600 左右有可能提高到 800~900,这将是很大的突破。 $\text{Ni}_3\text{Al}$  也达到应用的程度,不但可作高温材料,也可作为耐磨、耐空蚀的材料。 $\text{Fe}_3\text{Al}$  能代不锈钢用作耐蚀和高温抗氧化材料。

新金属材料的改进重点在于开发新的制备工艺,如快冷技术或控制微量元素含量以减少偏析,成为均质合金。

### 2. 工程陶瓷有广阔前景

工程陶瓷分功能陶瓷与结构陶瓷,前者包括范围很广,如铁电、压电、电光、半导体、电解质、热释电、敏感,以及多种多样的人工晶体和高温超导体,都属于陶瓷,且多数已得到应用。本节所谈只指用于结构的工程陶瓷,如  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、Sialon、SiC、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,莫来石( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 系)等,这类陶瓷多数资源极为丰富。耐高温( $1200\sim 1600$ )、耐磨、耐蚀、摩擦系数小、比重低、膨胀系数小等特点。缺点是室温脆性高,性能分散,价格贵,加工难,回收困难等。但是经过原料的控制(超纯、超细)、晶界控制、第二相的加入、纤维增强以及利用相变应力( $\text{ZrO}_2$ ),可以提高陶瓷的韧性。目前最好陶瓷材料的韧性已接近工程合金,如图 3。

工程陶瓷的应用范围很广，除了集成电路的封装及其它功能材料以外，用作刀具和模具材料，已经成熟；作为汽车发动机虽然有很大优越性（节能），但在经济上还存在问题；作为发动机零部件，已显示出应用前景；用于燃气轮机导向叶片在本世纪内可能实现，而涡轮叶片，特别是航空发动机涡轮叶片是下世纪的事了。要做到工程陶瓷的广泛应用，除了进一步提高性能以外，至少要在以下几个方面下功夫：一是开发降低成本的制造技术；二是改变以金属为主的设计思想；三是发展适用于陶瓷的无损探伤技术，把好质量关。

### 3. 工程塑料在高分子材料中的比重日趋重要

高分子材料在近几十年来发展是最快的，每年以 10% 以上速度增加，10 年前世界高分子材料所占比例，从体积上已超过钢铁。这是因为有廉价而丰富的原料，制造过程能耗低、建设周期短、投资少、利润高的缘故；更重要的是具有优异性能和成型性。

工程塑料是高分子材料中具有高强度（如 50MPa）、高模量、高使用温度（ $> 150$ ）或有特殊功能（导电、导光、吸波、磁性）的材料。结构工程塑料是很多单元以共价键结合在一起的大分子，其数目可达百万，这些高分子处于熔化或非晶状态时，就像一盘煮熟了的面条，弹性好、强度不高，橡胶便属于此类；如果结晶度接近 100% 时，则具有很高的强度和模量，如尼龙。

高分子共聚物的强度还可通过合金化及嵌段共聚等手段，使两种以上不同性质的分子成链；也可通过共混得到不同性能的材料。因此，当前高分子材料已进入按需要进行设计的阶段，即所谓“分子复合”。

## 三、不同材料的复合是改善性能、节约资源的有效途径

天然生体绝大部分以复合形式存在，如动物皮层、牙齿、竹和木材等，可见复合材料是最合理的结构形式。钢筋水泥及玻璃钢是已广泛应用的复合材料，树脂基、金属基、陶瓷基、及碳碳复合材料则称之为先进复合材料。

### 1. 树脂基复合材料

以高分子、碳、陶瓷或金属纤维强化的树脂基材料是先进复合材料中比较成熟的一类材料，复合后可以大幅度提高树脂的比强度和比刚度，碳纤维复合材料已大量用于飞机，也有可能代钢用于汽车，如此一辆车可减重半吨以上，而且每单位重量吸收能量的能力比钢大 2.5 倍，有利于降低汽车的振动。

### 2. 金属基复合材料

金属基复合材料是金属用陶瓷、碳纤维、晶须或颗粒增强的一类材料，从而大幅度提高比强度或比刚度。长纤维增强最为有效，但是价格昂贵，主要用于宇航。但晶须与颗粒增强已大量用于民品，如加 20%  $Al_2O_3$  的铝合金可提高刚度 35%，用于汽车片状刹车转子（diskbrakerotor）可比铸铁减重 60%，每升油可多行 0.1km。 $Al_2O_3$ 、石墨或 SiC 颗粒强化复合材料可用于汽车发动机。氧化物增强铜用于电力和电子器件，用作电子封装材料一般为低膨胀铁镍合金 Kovar 或其它类似材料，而铝或镁合金中加入碳化物、氮化物或氧化物可以达到高电导、低膨胀的目的，而比重只有其 1/3。

### 3. 陶瓷基复合材料

陶瓷复合增强主要是为了提高韧性，当然也是提高强度的一种手段。通

过纤维复合，断裂韧性确实大为提高，而且纤维增强陶瓷基复合材料抗疲劳能力强，几乎不存在缺口敏感性，这和传统观念很不相同。

#### 4. C/C 复合材料

碳 - 碳复合材料是由碳纤维增强的碳基体组成，由于大块碳抗热震性差，且各向异性，很难作为高温材料使用，虽然碳的强度一直到 3000 而不上升。因此，早在 50 年代末就开始研制碳纤维编织物再粘结碳化而成为碳碳复合材料。现已发展到多向编织。由于这种材料热导好、膨胀系数小、比热容大、辐射系数大，因而它有很好的抗热震性能及抗烧蚀能力，为导弹弹头及火箭喷管的理想材料，也是航天飞机鼻锥帽和机翼前缘材料。由于 C/C 材料质轻、耐高温、热容量大、摩擦性好，可用作客机及军用机刹车材料。21 世纪航空发动机涡轮叶片的工作温度要求 1760，C/C 复合材料是叶片的重要候选材料，但需要解决抗氧化问题。在民用方面，可作生物材料、模具材料等。

#### 5. 表面涂层与表面改性

装备的破坏多自表面开始，诸如腐蚀、氧化、磨损、磨蚀以及疲劳断裂的发生。因此，对表面实行保护和强化表面都可使部件寿命大幅度延长，这比采用整体材料既经济、安全又灵活。表面涂层和表面改性都可视为复合材料的另一类型。这是量大面广、效果显著的一种措施，应引起高度重视。

油漆、电镀、表面渗碳、渗氮或氮碳共渗、表面喷丸等是已普遍应用的方法。电子束、等离子与激光处理是近二三十年才发展起来的新技术：通过能量的控制，可使部件发生相变、改变应力分布而不熔化；也可使表面熔化而产生表面合金化，消减表面缺陷或进行表面加工；如能量更高时也可实现气相沉积。离子注入是将离子在 10 到 500keV 的电压下使离子注入材料表面，既不受材料种类的限制，也不改变材料表面的形貌，但注入层太浅，10nm 到 100nm (0.1 μm)。最近开发的陶瓷热障涂层，用陶瓷代替渗 Al 或 FeCrAlY 可提高使用温度 150 以上，用于航空发动机可提高热效 1%。总之，涂层材料变化无穷，改性工艺多种多样，可以根据不同要求进行选择，是节约原材料、提高工作效率最有效的途径之一。

### 四、能源材料是一个广阔的领域

常规能源的关键在于减少环境污染与有效利用。因为我国一直到下世纪，一次能源主要来自煤的燃烧 (75%)，因而污染成为十分重要问题。我国能源浪费也很突出，每百万元产值所消耗的能量，如果日本为 1 的话，美国则为 2.6，欧共体 1.9，中国则在 10 以上。从几个耗能大的行业 (钢铁、造纸、水泥与玻璃) 来说，能耗比日本都高出一倍以上。可见在节能方面，很有潜力可挖。为了解决能源需求：一要研究与开发煤的清洁燃烧；二要结合国情开发新能源；三要大力开展节能技术的应用。现将上述几方面的关键问题简述如下。

#### 1. 新能源材料

##### (1) 快中子增殖堆

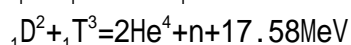
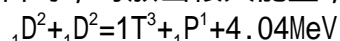
世界核电容量在 3 亿千瓦以上，占总发电量 16% 左右。所用燃料为  $^{235}\text{U}$ ，而其含量在铀中仅为 0.72%， $^{238}\text{U}$  为 99.275%，所以 U 的利用率极低。快中子增殖堆就是用  $^{238}\text{U}$  作燃料，虽然快中子增殖堆已试验成功，但没有大规模投产，原因之一是其冷却靠液态金属，在高温下其腐蚀性很强，材料没过关。

## (2) 燃煤磁流体发电

磁流体发电是利用法拉第电磁感应定律，使高温下导电的等离子气流经强磁场而产生电流。煤粉在燃烧器内会产生高达 2500 导电气流，输出电流，排出气温度为 2000 左右，可用来发电，其综合效率可达 55% ~ 60%，且能减少硫的污染，是当前符合我国国情的一种燃煤发电技术，但是由于电极材料、通道材料寿命不过关，超导磁体、种子回收难度也不小，尚未达到实用化程度。

## (3) 受控热核聚变堆

当同位素氢原子核结合时，可放出很大能量，如



一吨海水含有氘(D)、氚(T)相当于 300 吨的石油，可以说可控热核聚变是永久能源。但是引起聚变反应的点火温度要 1 亿度左右，而有一定持续时间和尺寸，目前等离子体与激光都有可能。在如此高的温度下和大量氦的释放，无疑也存在不少材料问题。

## (4) 太阳能的利用

地球表面一年从太阳接收的能量约为 60 亿亿 kWh ( $6 \times 10^{17}$ )，是全世界用总能量的一万倍，而且没有任何污染。但是分散、密度低 ( $1\text{KW}/\text{m}^2$ )，且受自然条件影响很大。太阳能的利用一是热的直接利用，一是光转换为电，这就要求价廉、长寿命、转换效率高的材料。但目前的光电转换材料都不太理想，不是效率太低，就是价格太贵，如多晶硅为 17.7%，单晶硅 13 - 20%，非晶硅虽只有 12.7% (理论 24%)，但光吸收系数高，所用材料为微米级薄膜，只有单晶硅的二万分之一，有发展前途。CdTe 膜为 15.8%，GaAs 为 28.7%，是转换率最高的，如果采用不同材料和多层结构，吸收光的不同波段，其效率可达 40%。太阳能的利用在我国有特殊重要的意义，因为我国西部日照时间长，作为家庭用分散能源，很有发展前途。在国际上也曾有过庞大计划，但是总的来看，太阳能在总能量中不会超过 5%。

## (5) 风能、潮汐、地热和海水温差能源

这些都受到地域影响，除利用海水温差以外，在其它三方面都已不同程度地得到发展，对材料问题不言自明。

### 2. 节能材料

节能材料多种多样，如保温材料、建筑材料等不胜枚举。现仅列举以下几种：

#### (1) 金属玻璃

美国损于变压器的能量为年 6000MW，相当于  $3 \times 10^9$  美元。金属玻璃用作变压器材料颇有前途，因为铁损只有冷轧硅钢片的 1/6 到 1/3 (如表 2)，由于有良好的高频性能，作电焊机，除了节能以外，体积可缩到 1/10。由于液态成型，较硅钢片建设成本低，但生产率低，其价格为硅钢 1.5 ~ 3 倍。非晶材料既耐磨又抗腐蚀，可用作磁头，也可代部分不锈钢。

表2 金属玻璃与硅钢片对比

材 料	铁损 ( W/kg )
$Fe_{81}B_{13} \cdot 5Si_{3} \cdot 5C_2$	0.31
$Fe_{80}B_{15} \cdot 9Si_{2} \cdot 4C_{0.9}$	0.15
Fe - 3 · 2Si ( 冷轧硅钢片 )	1.00

### (2) 超导材料

1911 年发现超导现象以后，一直到 1986 年，超导的工作温度区在液氮范围内，大面积推广受到了限制。1986 年在不同氧化物体系发现能在液氮（77K）工作的超导体以后，人们致力于向实用化方向迈进，作为薄膜已达到实用化，如作成量子干涉仪（SQUID），可测量微小磁场强度的变化（分辨率  $10^{-11}$  高斯）。这种高灵敏度磁强计可用于科学研究和生物磁场的测量。人们更关心的是用于强电的超导材料，因为长距离输电有很大经济效益，也可用于储能，效率可达 95% 以上。用于强磁场，有很大优越性，如一个 5 特斯拉的中型超导磁体只有几公斤，而同容量的常规磁体可达 20 吨；30 特拉克常规电磁体要耗电 7 兆瓦，而超导磁体只有 15 千瓦，所以对磁分离、磁悬浮列车、加速器以及可控核聚变都有应用前景，用于高功率马达可使电损降低 50%，体积减少 40%。目前氧化物超导材料（ $YBa_2Cu_3O_{7.3}$ ）的临界电流已达到  $10^5 \sim 10^6 / cm^2$ ，并做出成公里长的带材，接近实用状态，估计本世纪内可望得到应用。

### (3) 高性能磁性材料

磁性材料主要用于信息产业，如信息存储、控制元件等，这里只介绍目前最热门的  $Fe_{14}Nd_2B$ ，它在制造永磁电极、磁性轴承等方面有广泛的用途。 $Fe - Nd - B$  的特点是磁能积高，而不含 Co，但其内禀矫顽力和居里点不够高，抗氧化也有问题。近年来又出现一种稀土永磁合金  $Fe_{17}Sm_2N_{3.8}$ ，它有较高的居里点（470 ），但偏析严重，距工业化程度还很远。

### (4) 分离膜

有机化合物或多孔陶瓷可以用来分离不同物质，如氨尾中氢，可以通过有机分离膜而有 5% 左右再回到流程，达到节能的目的。膜分离也是海水淡化的一个重要途径。正在发展中的氮氧分离，使氧富集到 40%，提高燃效 30%。目前还在研究分离膜兼有催化功能，从而可以实现化学合成与组分分离同时实现。

## 3. 储能材料与燃料电池

### (1) 高密度蓄电池

不管是太阳能的利用，还是电动汽车的发展都需要高密度蓄电池，而目前常用的仍然是铅酸电池，密度太低（30Wh / kg），作为电动汽车太重，而且造成污染。电动汽车势在必行，因除了减少污染外，能量的利用率也大为提高。表 3 为目前正在发展中的几种电池，但目前还没有一个达到商业化程度， $Na_2S$  电池虽有几十年的历史，也未达到成熟的程度；镍氢电池发展很快，小电池已充斥市场，而大电池还正在开发。



表3 几种高比密度电池（美国 Argonne 国家实验室测量结果）

电池	比能量 ( Whkg <sup>-1</sup> )	能量密度 ( WhL <sup>-1</sup> )	比功率 ( Wkg <sup>-1</sup> )	能量效率 ( % )	可充电次数 ( n )
Na - S	81	83	152	91	502
Li - 硫化物	66	133	64	81	103
Zn - Br	79	56	40	75	34
Ni - Zn	67	142	105	77	114
Ni - MH	54	186	158	80	333
Ni - Fe	51	118	99	58	918

### (2) 储氢材料

储氢材料除了作为镍氢电池的电极以外，也可作为未来燃料氢的储存载体，单位重量氢的能量 2.7 倍于汽油，又无污染，有发展前途，表 4 为几种含氢化合物，可见许多氢化物比同体积液氢的储氢量都要大。

表4 单晶硅晶片发展趋势及其要求

化合物	每 m <sup>3</sup> 氢原子数 ( × 10 <sup>28</sup> )
液氢	4.2
MgH <sub>2</sub>	5.9
TiH <sub>2</sub>	9.2
VH <sub>2</sub>	10.4
PdH <sub>0.8</sub>	4.7
LaH <sub>5</sub> H <sub>6.7</sub>	6.1
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	5.6

### (3) 燃料电池

电也可通过电化学对燃料的氧化而产生称为燃料电池，目前正在开发的燃料电池有四种。燃料电池污染小、效率高，有可能成为未来的汽车能源。

## 五、材料科学技术几个活跃领域

除前述各类材料发展趋势以外，材料科学技术有以下几个方面也十分活跃。

### 1. 生物材料和器件

随着人类文明的进步，人造生物材料愈来愈重要。人造生物材料包括三种类型：生物医用材料、仿生材料和生物体系模拟材料。

#### (1) 生物医用材料

除了神经系统以外，几乎人体所有器官都可用人造材料所代替。用于人体的材料要求很高，除了力学性能相匹配以外，更重要的是相容性，无害、无毒、无血凝，而且要有足够长的寿命。

#### (2) 仿生材料

生物体是千百万年演化而来的，其结构应该是最合理的。解剖生物体可以给人以启示，使材料科学工作者在设计材料时有所遵循，如蚌壳，不但强度高，也有很好的韧性，因为碳酸钙薄层中间夹有机物；竹子加强筋的分布外密内疏，可保持最佳强韧性，如此种种，这些在设计新材料时可作为参考。

### (3) 生物体系模拟

生物体系有超乎寻常的功能，如脊椎动物的能量效率接近 100%，而最好的发动机也超不过 50%；人的副肾只有 6 克，而生物碱达百种以上，可随生物体情况而释放不同物质以保持人体平衡；耳目口鼻的感度是人工传感器（一次感度）的千百万倍，诸如此类。如何用人造材料或器件以达到生物体系功能，使工业反应器在室温条件进行合成，信息处理达到人脑的功能，是人们正在追求的目标。

总的来说，生物医用材料已得到广泛应用，仿生材料正在开始，而生物体系模拟仍处于酝酿阶段。

#### 2. 机敏材料与智能系统

机敏材料就是能感知环境的变化并能作出相应反应的材料，如压电陶瓷 ( $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ ) 和形状记忆合金 ( $\text{NiTi}$ )。反应的讯号通过传输系统(光纤)传到执行系统(如驱动器、显示或报警)，进而对其进行控制，从而形成智能系统。这种智能系统已得到广泛应用，如卫星太阳能帆板、机翼的调整，以及桥梁和高层建筑都可通过智能系统进行控制，以减少重量，提高可靠性，减少灾害。

#### 3. 环境材料

所谓环境材料 (Ecomaterials, Environmental conscious materials) 就是指与环境相适应的材料。首先是节约资源和能源，因为地球资源日益枯竭；其次是减少污染，减少温室效应与臭氧层的破坏；第三是容易回收和再利用。环境材料的提出为 70 年代，随着对环保的高度重视，环境材料也就提到议事日程上来了。工业发达国家的大企业都给以足够的重视，如日立公司从 1990 年到 2000 年的产品再减少能耗 35%，减少废物 60%；理光复印机所用材料可全部进行再循环，节约材料 40%，提高效益 20%。所以今后的产品必需要考虑与环境的适应问题，否则产品便没有竞争能力，甚至受到抵制。

#### 4. 纳米材料

当物质颗粒小到纳米 (1~100nm) 量级时，在催化、吸光、医药、磁性等方面出现很多特点，利用这些特点可有很多用途。如颗粒小到 10nm 时，表面原子占 20%，4nm 时，40%，2nm 时则有 80% 在表面，原子扩散快，烧结温度低，有利于陶瓷成形，由纳米制成的陶瓷可得到超塑性。当 Fe-Co 合金或  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的尺寸为单磁畴时，矫顽力很高，成为最好的磁性材料(作磁卡等)。磁性纳米粒子表面涂覆高分子药物注入体内，在外加磁场作用下，使药物移向病变部位，达到治疗的目的。这里最重要的是选择一种生物活性剂，它仅与癌细胞有亲和力，而对正常细胞不敏感。这种治疗方面尚处于实验阶段。由于光的性质改变，有可能成为很好的隐身材料。

纳米材料的研究目前是一个广阔的领域，不管在纳米微粒的制备，或是应用都需开展深入系统的研究，使之价廉又具有广阔的用途。

#### 5. 碳纤维、石墨、金刚石与 $\text{C}_{60}$

碳的同素异构体为无定形、石墨与金刚石。1985 年又发现  $\text{C}_{60}$  (乙烯球)。

碳(石墨)纤维有特殊的力学性能。石墨的用途也是多种多样：如定向石墨有很显著的各向异性；夹层石墨(合成金属)导电率为铜的 1.5 倍；膨胀石墨是很好的密封材料，如此等等。

金刚石有明显的特点，近年来兴起的金刚石薄膜研究，更引起人们的重

视，因为它除了高硬度以外，还具有导热不导电（半导体封装）、透光（紫外线）、低摩擦系数（轴承、磁头、磁盘、刀具）、高模量（音响、不变形）等特点，用途十分广泛。

$C_{60}$  的发现，为原子簇化学又开辟了一个新途径，它有很多潜在的用途：半导体、催化剂、润滑剂、超导体（有人认为当其结构为  $C_{540}$  时，有可能实现室温超导）。 $C_{60}$  的缺点一是易氧化，二是太贵，纯  $C_{60}$ ，1993 年为每克 1000 美元，混合物（ $C_{60}$ 、 $C_{70}$ 、 $C_{76}$ 、 $C_{80}$ ）为 200 美元，将来可望做到每公斤 100 美元。

#### 6. 有机功能材料

有机功能材料受到愈来愈多的重视，目前有机导体已接近铜的电导率；磁性可与铁族金属相媲美；发光有机高分子、高分子形状记忆、高分子电解质、高分子压电、有机非线性光学材料及高分子液晶等有广阔的应用前途。在农用方面，吸水性高分子与可降解农用薄膜对节水农业和环境保护等方面都是亟待解决的问题。

#### 7. 计算机模拟与材料设计

随着材料研究的深入与计算机的发展，许多现象可以通过计算机模拟来预测材料的结构、性能及其间的关系，从而达到材料设计。如从量子 and 原子尺度出发来预测各种物性，从宏观热力学可划出相图，甚至与制造工艺相结合，得出最后产品的使用性能。因此，形成了一门“计算材料科学”。当然，计算材料科学必须与实验相配合，否则，难以达到实用的目的。

### 六、传统材料是我国经济高速发展的一个重要制约因素，必须引起重视

国民经济的发展、科学技术与国防的现代化，人们生活的提高固然离不开新材料，必须受到高度重视，但传统材料也不能忽视，因为传统材料量大（占材料 95% 以上）面广，影响很大，如易拉罐全世界每年消耗  $120 \times 10^9$  只，每只降低 1 分钱的话，就可取得收益 12 亿元。当前我国传统材料与国际差距比新材料还要大，主要表现在能耗高、高污染、低质量、品种规格不全、各类材料的比例不尽合理等，必须引起我们的重视，否则在国际上没有竞争能力，使我们永远处于落后状态。例如汽车工业主要用的是传统材料，而先进新材料占很小比例，传统材料不过关，无法造出先进的汽车来。其实，世界有些发展很快的国家，也都是从传统工业抓起，如日本和韩国，先从钢铁工业开始，而后汽车、造船和电子工业。在我国情况下，新材料与传统材料可以齐头并进，但切不可忽视传统材料。事实上，传统材料也在不断发展，如水泥是典型的传统材料，已有 1000 多年的历史。但近年来，国际上研究工作非常活跃，主要在减少孔隙度、抗腐蚀、加入不同添加剂以提高强度、延长寿命。传统材料性能与生产工艺的改进往往需要新材料，因此，传统材料的发展也为新材料和其它高新技术提供了用武之地。

## 自动控制所面临的挑战

冯纯伯

东南大学

冯纯伯 自动控制专家。1928年4月16日出生于江苏金坛。1953年于哈尔滨工业大学电机系研究生毕业。1958年在列宁格勒工业大学获技术科学副博士学位。历任东南大学自动化研究所所长，研究生院副院长。1994年获俄罗斯联邦自然科学院外籍院士称号，1995年当选为中国科学院院士。主要从事自动控制领域研究。

自动控制学科自建立以来一直就是一门很活跃的学科。二战期间由于军工技术的需要，以伺服系统为主要内容的反馈控制得到了迅速发展。二战之后的冷战期间军工技术竞争剧烈，特别是各类飞行器对控制系统提出了很高的要求。在此形势的推动下以状态变量为基础的所谓现代控制理论得以建立，它的一个主要特点是依赖于精确的数学分析计算。随着时间的推移，自动控制应用的领域愈来愈扩大，无论国防、工农业生产、社会经济、环保等等，凡是存在系统的地方都宜用系统学的观点加以分析，都可用控制理论方法加以适当的人为改造和处理。在这种日益扩大的应用过程中，人们发现原有的所谓现代控制理论有很大的局限性。这就提出了新的更高的要求，当前计算机科学和技术的高度发展也为更复杂更高层次的控制理论的发展提供了物质条件，因此，国际上普遍认为当前控制理论面临新的挑战，酝酿着新的发展。

概括地说，当前控制理论所要解决的主要问题是研究复杂系统的有效控制。所谓复杂系统可认为是具有以下一些主要特征的系统：

1. 系统具有很强的时变和非线性。几乎任何真实系统都具有非线性，只是强弱不同而已。为了实现深层次、高性能的控制，就不能不充分考虑系统特性的时变性和非线性。举例来说，我国引进的SU-27战斗机可实现超机动飞行，其攻角可在极短时间内达到接近 $90^\circ$ 的程度，在此情况下它的气动特性全变了，用常规的线性化处理方法无法设计这样的控制系统。在民用方面，许多化工过程都有很强的非线性，其特性常随工况改变而改变，有时环境变了，特性起根本性的变化，即使仍然回到原来的环境和条件，原来的工况也无法恢复，造成灾难性后果，对于这类对象常规的PID调节常常不能满足要求。

众所周知，由于时变非线性动态方程没有通用的解法，因此和线性定常动态系统不同，远远未能建立起有效的控制系统设计方法，近年来由于微分几何、微分代数等数学工具的引进，非线性控制系统理论取得了一些突破性的进展，但仍然是很初步的，非线性控制系统性质复杂，许多特殊的性质，例如分岔、混沌等现象都可能在非线性控制系统中出现，对这些深层次问题的了解，有待于对一般非线性动力学系统的深入研究，这正是当前数学界的一个重要课题。我们不能完全依靠数学家提供现成的果实，事实上也并非一定要对非线性动力学有了较完好的分析，才能对它作出有效合理的综合，然而对时变非线性动态系统提出一般化的有效设计方法毕竟是一件非常艰巨和困难的任务。

2. 系统具有复杂的不确定性和各种无法预料的干扰, 这种不确定性包括参数不确定性和结构上的不确定性。许多复杂的被控动态系统的维数是很高的, 因此在分析处理时只能用低阶动态模型去逼近它, 这就不可避免地存在未建模动态和不确定参数。为解决这类系统的控制, 近年来鲁棒控制器的设计以及适应对象变化范围宽的一些控制方法等得到了深入的研究。对于线性系统这方面的成果相当丰富, 但对时变非线性系统的研究仅只开始而已。

目前提出一些鲁棒控制方法, 包括一些自适应控制等都不可避免地要依赖于对系统数学模型的精确数学分析, 所以对线性系统取得的成果较多, 而对时变非线性系统则成果不多, 因为后者很难精确数学描述。而鲁棒控制设计又离不开以一定精确的数学模型为依据, 这就是矛盾, 这个矛盾若没有好的方法加以克服, 鲁棒性强的控制将难以得到。这点对时变非线性系统尤其突出。在这方面需要在概念上和方法上有新的创造。

3. 系统结构复杂、规模大。由于自动化技术应用的领域不断扩大, 受控的系统愈来愈复杂, 从控制系统的纵向看它包含了许多功能不同的层次, 从横向看它分成了许多互联的子系统, 例如 CIMS 技术就涉及全厂的综合自动化。如果说对较简单的单一动态系统可以仅用微分方程来描述的话, 对这种复杂大系统就不可能仅用微分方程来描述, 它的特性中至少要包括一些相互关系, 逻辑制约等等, 在时序上也不都是连续的。一些社会经济系统中还包括人在内, 人的个人意识也在起作用, 这类系统更是难以用数学方程来描述了, 更有本质不同的特征。

60 年代国际自控界发起推动“大系统理论”的研究。然而多年来这方面的成就不多, 一些主要成果基本上是线性系统理论在具有复杂结构下的推广, 远不能满足上述复杂系统的控制问题的需要。为解决问题需要完全新的途径和理论。现在迫切需要建立复杂系统的理论。在钱学森先生的倡导下, 多年来我国学者在这方面积极地开展了研究。

应如何解决上述复杂系统的控制问题? 同内外学者普遍意识到要走智能化的道路。实现控制要向人的智能学习。何为智能控制? 众说纷纭, 很难有确切定义。智能的程度是没有底的。由于目前认知科学发展水平有限, 短期内很难建立真正的高智能的控制理论体系, 但努力有的放矢地提高控制系统的智能化程度, 以求达到更好的效果无疑是当前重要的研究课题, 为此提出以下几点看法:

#### 1. 反馈概念的丰富和扩展

负反馈是控制的基本方法。常规的反馈是利用误差经过某种函数运算进行反馈, 这种函数关系由控制指标所决定。对于一个能控能观的系统, 控制指标和反馈方式有一一对应的关系。然而真正灵活有效的控制并不总是由一个单一的指标函数所决定的。一个有经验的驾驶员会根据被驾驶对象的状况、环境的变化等等随时改变驾驶策略, 为了快速机动有时甚至采用正反馈, 使系统不稳, 有时又要使系统快速稳定, 有时不用反馈而只用前馈, 等等。这就是说反馈的过程中要有实时的决策, 不能只用一种指标函数。当然理论上可以将各种指标函数组成一个综合的指标, 但要描述这样的指标函数将是十分困难的, 甚至是不可能的, 即使有了这样的复杂的指标函数, 也给统一的综合分析和设计带来了难以克服的困难。以上所述表明, 如何将反馈控制和实时动态决策融合在一起是一个很有研究价值的课题, 为此实现仿人智能的控制将是值得探讨的, 仿人控制将会提供给我们很多有益启示。

## 2. 系统建模以及建模和控制的结合问题

为实现有效的控制离不开对系统建模，现在人们研究在设计控制系统时如何能淡化系统模型，然而系统模型还是必要的，若模型可靠则必能实现有效的控制，在控制中加深对模型特性的了解，也必能改进控制，此二者有对偶性。对于线性系统建模方法已经研究得相当充分了。对于时变、非线性、不确定动态系统，建模方法的研究成果依然不多。近年来神经网络和模糊系统在系统建模和控制中的应用引起了极大的兴趣。理论证明两者都能逼近任意非线性函数。这符合 Weierstrass 函数逼近论的定理。但并未提出工程上令人满意的实现方法，要害之处在于尚缺乏真正快速的又不陷入局部最优的学习算法。人们的思维有两种，一种是数字的 (Numeracy)，一种是文字的 (Literacy)，后者常常含有更多的智能信息。目前现有的建模和控制基本上都是建立在数字式分析的基础之上的。事实上人在控制时并不一定需要知道精确的数字，而常只需要某些动态特征，例如系统是否会振荡、稳定度大不大，等等。因此在线定性建模、特征提取、行为分析就显得很重要了，它是实现智能化控制所需要的。事实上也并不需要完全建模之后才能进行控制，例如在慢信号作用下系统的高频部分不被激励起来，因此不必考虑。总之，在智能控制的范畴内，建模、控制和两者的相互关系要有新的考虑。

## 3. Metasynthesis 方法的研究

在研讨复杂巨系统的过程中，我国学者钱学森先生和戴汝为先生等提出 Metasynthesis 的概念，这是一个有很高研究价值的课题。前面已经提到，目前有必要建立真正的大系统理论，而 Metasynthesis 应是主攻领域。这里有待研究的问题很多，例如：各种方法的协调配合问题、合成稳定 (resultant stability) 和综合性能的分析、如何实现可操作的定性和定量分析的结合、控制系统的稳态结构设计、人的因素在系统中作用的分析，等等。可列举的问题非常多，大都还是些未被开垦的处女地。

# 现代信息技术与信息高速公路

母国光

南开大学

母国光 应用光学家,1931年1月22日出生于辽宁省锦西市。1952年南开大学物理系毕业,后留校任教,曾任南开大学校长、研究生院院长、博士生导师、中国科学院应用光学国家重点实验室主任。1991年当选为中国科学院院士(学部委员)。主要从事光学和应用光学的科研和教学。在白光光学图像处理、光学模式识别、机器视觉、退色胶片的彩色恢复、彩色胶片的档案存贮、黑白片作彩色投影和显示,菲涅尔全息和串码滤波的三维目标的识别等方面取得多项重要成果。

## 一、信息时代

本世纪40年代到50年代,由于原子弹的爆炸,随后不久又产生了氢弹,许多人都说,人类进入了原子能时期,叫原子时代。随后50年代末期到60年代,苏联人造地球卫星上天了,人类的宇航事业有了很快的发展,这时,又有人说现在是卫星时代,或者说是宇航的时代。无疑,这些重要的科学成就,在人类社会上都产生了特殊的和突出的影响。举个有趣的例子,当年赫鲁晓夫访问美国,送给美国总统的礼物是苏联第一颗人造地球卫星模型,艾森豪威尔总统回赠的礼物是一套彩色电视。那个时候,从一般人来看,人造卫星是了不起的成就,而对美国的礼物,却是彩色电视一套,不大理解是什么意思。现在看来,那份回礼还是很有意义,值得深思。70年代末和80年代以来,半导体技术和电子计算机技术的发展使信息处理技术长足发展,特别是近20多年来的光纤、激光和光通讯的发展更加速了现代信息技术的发展。现在,从对人类科技整体的引导、对经济社会的推动、应用的广泛程度和层次以及对人民生活方式所起的变化等方面来讲,信息技术已具有显著的时代特征。不妨说,人类今天真正开始的是信息时代。

那么什么是信息?信息是科技体系的三基本要素之一。物质、能量和信息三者为科技的三基本要素。科技是第一生产力,信息加入生产实践,自然就成为重要的经济资源。

信息这个资源,它不像金银铜铁和山川湖海那样有形,也不像能量那样是依赖于物质的状态变化得来的。它是无形的资源,是科学规律,是外界事物在人的主观中的反映,是主观所联系的客观的情报,是数据库,是工程计划,是管理规律,是不同主体的相互依存关系和运行规律的情报等等。

例如,一户农家,化耕耘为收获,土地是他的有形的经济资源;一户商家,行销于市场,市场的行情是他的无形的经济资源。土地是经济资源,信息也是经济资源。

再如,蒸汽机的发明和后来的发展引起工业革命,电机的发明和后来的发展带来了电气化时代,就其科技体系来看,这两个革命都是把人从体力劳动里解放出来。

今天的信息技术用于现代大工业生产中,提高了生产效率,提高产品质量和效益,加速了生产过程,起到用信息技术代替人的脑力劳动,或者增加

智能的作用。它与物质、能量在生产中综合作用形成产品产出，它的经济资源的特性是明显的。

信息使人的主观世界与客观的外界事物联系起来，使不同的主体之间进行交流和联系。占有信息在经济上与占有空间和时间具有同等效益。而信息量是可以随人的创造而无穷尽。因而，今天信息已成为一个国家重要的经济资源。信息技术发展的程度将是 21 世纪国力和企业竞争力的重要尺度。

## 二、现代信息技术

现代信息技术包括对信息流的获取、传输、存储、处理、检测、显示以及应用等的一系列技术，是一门范围广阔、内容高度综合的科技领域。信息虽然是无形的，但是从其所应用的技术手段来讲，主要是以光电形式进行的，所以现代信息技术也可视为光电信息技术。下面提出一个要目，作为一个轮廓，从中可以了解信息技术的基本内涵：

### 1. 光电信息获取技术

- (1) 望远镜：天文，陆地，空间。
- (2) 照相机：摄像机，固体摄像机。
- (3) X - 光透视，层析 (CT, Computed Tomography)，衍射仪，NMR 技术。

(4) 显微镜：电子显微镜，隧道显微镜。

(5) 光谱仪器：发射，吸收，荧光，拉曼，红外，紫外，傅里叶光谱术。

(6) 综合孔径雷达，航天航空摄影，多光谱成像，遥感。

(7) 高速摄影。

(8) 立体摄影。

(9) 全息照相。(10) 内窥成像。

(11) 夜视仪器，红外成像。

(12) 编码彩色照相。

### 2. 光电信息传输技术

(1) 电子通讯：无线电，有线电，固定式，移动式。

(2) 光通讯：光纤，光缆，激光器。

(3) 光纤通讯技术及光电子器件。

(4) 光波通讯中的多参量复用技术。

(5) 通讯网络。

(6) 图文传真。

(7) 卫星通讯。

### 3. 光电信息存储技术

(1) 胶片信息存储。

(2) 磁带存储。

(3) 光盘存储技术 (音频、视频)。

(4) 光学全息存储术。

### 4. 光学信息处理技术

(1) 光学模拟计算机 (相干，非相干)。

(2) 光计算与光互联。

(3) 模式识别。

(4) 人工神经网络。



## 5. 光电信息显示技术

- (1) CRT 与彩色电视技术。
- (2) 液晶显示与微型电视。
- (3) 液晶大屏幕彩色投影电视。
- (4) 高清晰度电视。
- (5) 激光扫描电视。
- (6) 激光彩色复印机及印刷机。
- (7) 电影技术。

以现代信息技术支持的信息产业，已形成现代社会经济的主要支柱产业，其规模之巨，史无前例。

### 三、信息高速公路

NII - National Information Infrastructure 直译为：国家信息基础设施，俗称：信息高速公路。

#### 第一，信息高速公路的由来及内涵

##### 1. 美国首先提出建设信息高速公路

50 年代，美国把建造“州际公路系统”当作国家重点任务，所建成的州际高速公路（连接起来成系统）对每个美国居民的生活都产生了明显的效果，也使得美国国家整个经济和社会形式发生了巨大的变化，是一个成功的计划。所以高速公路在美国是一个吉祥的词儿。把 NII 称作国家信息高速公路一方面表示希望像当初州际公路那样成功，取得美满效果的愿望，同时也是一个很好的俗称，容易被广大群众理解。

信息高速公路浪潮。不论发达国家还是发展中国家，现在都致力于“信息高速公路”的建设，努力向人民提供基本的电话服务，并把政府、商业和个人使用的计算机通讯系统联系起来，用这样庞大的现代化的通信系统来促进本国经济的增长，并用这种系统来管理经济，以进一步提高人民生活质量和整个社会的文化水平。

美国历届总统素有提出一战略计划以振兴产业和发展经济的作法，如美国前总统里根 80 年代中叶提出战略防御计划（SDI），俗称星球大战。目的既是针对当时苏联的导弹的防御，又是以加强高新科技为国防服务来刺激经济增长，一举两得。1992 年，戈尔作为克林顿挑选的副总统候选人，在经济施政纲领中首先提出建设“信息高速公路”的设想。他把原有的用光纤连接超级计算机的概念扩大到连接每家每户，深入到社会生活的几乎每个角落的大范围。戈尔的设想被克林顿拿来作为竞选总统的口号。

克林顿认为，当前推动先进技术的动力来自民间工业，而不是军事工业（不言而喻这是指不能靠像里根的星球大战那样的计划）。只有加强美国的民用技术基础，才能一箭双雕地解决美国的国际经济地位上升和国家安全的问题。他还认为，进入 90 年代乃至 21 世纪，最有价值的资源是“信息”，若能建设一条沟通全美的信息高速公路，加速信息的交流，必将再次繁荣美国的经济。

——1993 年，克林顿和戈尔出任美国总统和副总统，不久成立了“信息基础设施特别小组”。

——1994 年 9 月，正式提出建立全球信息基础设施 NII 的倡议，1995 年联合国举行会议探讨由世界银行帮助发展中国家解决资金困难，美国可为

他们培训专业人员。

NII 在美国政府报告中有明确定义：国家信息基础设施是一个由“通信网，数据库计算机以及日用电子产品组成的完备网络”。通信网、信息源、终端设备和人是其四大要素。NII 中的通信网平台必须作到无缝连接，即：统一标准、互相开放、互连互通、互操作。

## 2. 美国信息高速公路浪潮的背景

社会经济上的原因。大型科技发展计划可改造传统产业，触发新技术革命，派生新兴产业，促进民间企业投资，从而达到刺激经济增长，增加就业机会的目的。同时，已领先于世界的美国半导体和集成电路工业可持续在国际领先。实施 NII 将为美国的工业部门创造新销售额估计可达 3000 多亿美元，至 2007 年的 GNP 可增加到 3210 多亿美元，劳动生产率增加 20% ~ 30%。

政治军事背景。美国提出信息高速公路计划除克林顿竞选总统时作为诱惑选民的口号外，还有通过发展信息科技以加强军事装备水平，进一步提高作战的快速反应能力和应变能力，进一步加强其世界超级大国领先地位的国际政治目的和其它方面的意图。

信息产业发展趋势。目前，发达国家的电信业务中，电话业务已日趋饱和。但是，由于数据库，计算机网络，有线电视以及多媒体终端的迅速普及与实用化，一些非话业务，如数据通信、图像传输等业务量逐年增加，这使信息高速公路诞生成为必然。

此外，计算机技术与通信技术的结合，特别是光纤传输与 ATM 交换技术的迅速发展，促使高速信息网的实现成为可能。

## 3. 美国发展信息高速公路的预期效益

任何新技术的发展极有可能产生原先预测不到的结果。如 19 世纪的电话，20 世纪的汽车，20 世纪中期的计算机，当时谁也无从预测这些发明如何实际应用和产生今日这样的社会效果。对于今天的 NII，我们相信也会有同样的情况。今天，我们比较明确知道的是美国如果建成这样的庞杂系统，将使美国人能够相互之间以及与世界上的人在任何时候和任何地方共享各种形式的信息。

美国政府预期的效益大致有：

(1) 巨大的经济效益。每年创造 3000 亿美元的经济效益，数以万计的工作机会，仅在通讯服务行业，10 ~ 15 年间可创造 30 万个新的工作岗位。将使现有办公方式由集中走向分散，使现存交通流量减少 30% ~ 40%，并大大减缓能源、医疗、交通、保健、全民教育和环境方面的社会问题。

(2) NII 被视为新技术的推动力。如半导体、高速网络软件及人机界面等方面，这些科技将会产生新的产品和服务，可以巩固美国在电子及信息科技方面的领先地位。

(3) 将带动信息技术及相关高新科技的发展。而信息技术设备的庞大需求市场，将成为经济发展的推动力。

(4) 促进电子商务的发展。即电子付款、多媒体邮件、中介服务、合作发展等业务，加强制造商、供应商和开发者之间的联系。

(5) 协助解决医疗问题，降低医疗费用。如远程诊断电子医疗保险和建立个人健康信息记录，提高医疗质量，降低成本。

(6) 每人都可享用信息，人人均有平等发展机会。不管你是处在什么地理位置，只要与信息高速公路相连，你就既是“信箱”又是“信源”。

(7) 科学家间远程共用科学仪器进行研究合作。

(8) 促进教育事业的发展。通过信息系统可以扫盲，进行职业教育、成人教育及义务教育。

(9) 提高政府工作效率和降低办公费用。充分利用信息高速公路的技术，形成面向群众的高水平、高效率的“电子政府”。

总之，NII 的建设有助于创造工作岗位，刺激经济增长，保持美国科技领先，将从各方面改变美国人的生活、工作和相互沟通的方式，深刻改变未来社会的结构。

#### 4. 信息高速公路建设中的技术问题

从“NII”的四要素出发：

(1) 信息设备 (Information Appliances)。就是提供信息并允许人们通过网络进行通讯的设备，如电话、电视机、传真机、个人计算机，以及将来可能产生的多媒体设备等。

(2) 信息资源 (Information Resources)。许多用户通过信息网进行电子存储并能使用的所有信息，如：广播、有线电视节目、有线资源及用户与商业数据库。

(3) 通讯网络 (Communication Networks)。包括本地和远距离电信网络 (话务、视频、数据、图像)。其它如：广播电视和无线网络、有线电视网络、卫星和无线网络以及计算机网络系统 (如 Internet)。

(4) 人的资源 (Human Resources)。人是 NII 最重要的一部分。由人来创建和使用信息资源，通过使用来发展应用，通过应用进一步发展信息技术。

关于 NII 的技术，尚有它自身的特点：

(1) 信息高速公路并不是一项从无到有的全新建设工程，而是大部分已存在于已有的光缆、同轴电缆、无线电波、卫星和普通电话线路的组成之中。首要的工程是将这些已有的网络系统组织到一起，并提供新的设备和新的软件。

(2) 光纤远距离网络传输宽带信息是信息高速公路的技术基础。如一对细玻璃纤维可容 53000 个电话传输，而光缆系统可容 1000000 个电话传输，也可容纳交互视频。

(3) 电缆电话的改造 (交互式的改造)。

(4) 最后一英里问题 (The last mile problem)。光缆线路装到节点，再由节点到用户。

(5) 宽带信号的压缩技术。

(6) ADSL (非对称数字用户线路)，用于最后一英里。

(7) 投资问题。政府有限介入，宏观引导，以立法的手段，主要靠企业出力。

上面是美国的信息高速公路的概况。在他们之后，国际上不同国家根据自己的情况，都提出了自己的建设信息高速公路的计划或设想。

#### 第二，世界各国建设信息高速公路的态势

英国：计划今后十年投资 380 亿英镑建设 NII。1994 年 2 月 23 日，英国电信局宣布今后投资 100 亿英镑建立光纤通讯网络，向人们提供新闻、教育、商业、金融及娱乐等方面的服务。同一天，英国贸易和工业大臣表示，政府将建立 120 个新的数字式电视站，为把传真、电话、计算机和电视结合在一起

的装置开辟道路。

英国民间公司积极参与 NII 的建设。墨丘利公司同英电信局竞争，开设自己的全国通信网络。英国光纤公司计划利用英国现有的 2000 多英里长的运河铺设光纤网络。英国 1994 年初，2300 万个家庭中已有 60 万家装上了有线电视系统，英国电信局已在苏福克郡为 70 多家安装多媒体服务系统，如果这一试验成功，英电信就有可能把它的电话网络全部改成一个巨大的多媒体服务系统。

法国：1994 年 2 月，召开有关部长会议研究分析了称为“电子高速公路”的多媒体信息传输系统的发展前景。会议认为，在今后几十年里，电视、电信和信息将朝着一体化方向发展。随着数据信息压缩、光纤等科技的进步，图像、声音和信息数据可以通过大流量的交互网络同时处理和传输。这种多媒体高速信息传输系统，就是人们所说的信息高速公路。它的发展相当迅速，预计到 2000 年它的产值可占欧洲生产总值的 10%。

法国总理希望尽快制定一个措施，确定一个长远目标。要求法国的电信、电视、计算机信息和多媒体等行业，在这一场国际竞争中通力合作，在未来的三年内动员私营企业集资几十亿法郎参与建设，同时要发挥国营企业的主体作用。

加拿大：计算机网络已具有相当规模。约 240 万个家庭每家至少有一台计算机，其中，50 万台已配有调制解调器。这意味着这些家庭已能与计算机网络相连。计算机网络的广泛应用所建立起来的基础，已大大增加加拿大发展和建设信息高速公路成功的机会。

日本：早些年日本政府已提出了 Mandara 高速信息网计划。建设北起北海道南至冲绳的 10 个巨型计算中心，并将采用传输速率 3Gbit/s 的高速通信线路把这些中心连接起来，排成一个庞大的高性能计算网，同时加紧软件的研究。1993、1994 年准备，1995 年开设正式实施，为期 5 年。耗资 300 亿到 30000 亿日元。

日本邮政大臣说，日本未来经济发展的关键在于通信和信息。

建设日本“信息高速公路”的总体设想中，日本政府特别重视多媒体信息技术。计划从 1995 年起向全社会提供多媒体服务。（东京，1996 年春，利用光纤数字交互式有线电视网进行电视节目点播、电视购物、电视健康诊断等远距离医疗服务以及办公室电视信息通信服务的大规模公开试验。）

日本 NII 的特点：首先进行低成本技术的开发，争取产品超前实现商品化，用户重点先单位后家庭，同时建成 240 万人的“信息流通新干线”科技队伍（约占全国劳动人口的 3.6%）。

韩国：政府方面建设 NII 分两个部分：（1）公共机关，科研机构，大学和企业；（2）全国每个家庭，全国都能利用 NII。投资为 553 亿美元，其中，33 亿美元由政府提供，其余从民间筹集：1994~1997 年，20 亿美元（图纸传送，民事诉讼，音像会议）；1998~2002 年，53 亿美元（教育，医疗，电子图书馆，地理信息）；2003~2015 年，480 亿美元（传送数据，声音和图像的通信网）。

韩国通信公司：计划在 1997 年以前，在汉城当汝岛建立信息高速公路试验区，分两阶段：（1）1996 年 11 月以前用光缆联结 200 至 300 个家庭、企业和行政机构，配备多媒体信息终端，提供未来型的信息通信服务，如计算机购物，遥控医疗，电子图书馆，遥控教育等。（2）提供多边电视会议和电

子博物馆服务。到 1997 年将提供家庭和办公室之间的高速传送动态图像和数据的多媒体通信服务，人们可以在家里办公。

新加坡（智能岛）：政府与企业相结合，制定以信息技术供求两方面为重点的发展计划，加强信息技术与本土信息技术产业的开发，促进经济的高速发展。优先开发信息技术和发展信息产业，国家以优惠政策予以扶持，以期超前发展。

新加坡 1994 年 1 月 8 日提出使全境真正成为一个“智能岛”的国家技术计划。根据这个 IT 计划，他们将组成通讯网络、计算机数据库和用户电子设备的大联网，从而改变人们的生活方式、工作方式和相互间的交流方式。届时，不仅使世界各地的距离缩短，而且使新加坡在海外的企业网络可以紧密配合起来。新加坡将不因其国土小而限制了它的国际企业的发展。

欧盟：欧盟提出建立欧洲信息社会的倡议——“振兴经济，提高竞争力和创造就业机会”。他们认为，当前首要的是实现四大关键要素的统一：

- 网络统一（光纤或卫星高流量传输网络）；
- 设备统一（多媒体工作站，手提式数据储存与处理设备）；
- 服务统一（电子邮政，数据存取）；
- 特殊的硬件和软件统一（平台，软件）；

欧盟还有几个计划：

一是，西欧公路运输管理信息化：建立自动化公路信息管理系统。使车辆与智能基础设施，车辆与驾驶者之间的信息自动变换系统，使其能相互自动交换各种实时信息，如行车位置、交通状况、事故警报、疏通导向、气象预告以及如旅馆、旅游、娱乐等各种服务信息。这样，未来 15 年可创造约 2000 亿埃居的市场。

二是，建立医疗卫生信息服务系统：解决医疗保险费居高不下，又要更新医疗设备的问题，寻求有效的医疗手段和药物。储存病人全部信息病历档案，建立病人与医疗卫生有关单位（医生、实验室、医院、血库、器官库、急救中心、康复中心及社会安全机构等）的信息传输网络，实现“无纸”电子数据交换，进行远距离诊断及设立信息化家庭病床。从而确保卫生系统的高效、安全，避免浪费和反复诊断，促进大幅度降低医疗费用。

未来 10 年 350 亿埃居的投资，可创造 1000 亿埃居的市场。

三是，建立信息教育培训系统：未来 5 年中投资 50 亿埃居。从上述三个计划可以看出，欧盟是把高速信息公路建设，看作是社会发展建设与发展经济建设的重要实施。

综观上述情况，可以看出，国情不同，所要解决的问题也不同，同是叫信息高速公路计划，而内容却有区别，每一国家都是结合自己国家的实际，提出设立的高速信息公路的建设计划。我们怎么办？要吸取世界先进的技术、经验与历史教训。

### 第三，我们应该采取的对策

首先，我们应该把国家信息基础设施的建设置于国家大事的地位来看待，因为它所涉及的问题绝不仅是技术和经济问题，而会牵动整个社会的经济发展、科技进步以及人们的工作和生活方式的变化。特别是，它是在世纪末和 21 世纪初所能遇到的最大的系统工程和最大的产业，无论发达的国家还是发展中的国家都面临着这种既是机遇又是挑战的形势。不同国家根据自己的情况都做出或正在做出自己对策，我们应该认真调查研究，弄清信息技术

和信息高速公路的内涵，以及有关的问题，然后结合国情和实际需要与可能做出自己的建设计划，发展自己国家特色的NII。美国人创建信息高速公路，固然是要使美国的通讯现代化，提高社会的科技水平和工作效率，但他们一刻也没有忘记发展信息产业，增加就业岗位，提高经济效益，克林顿总统所说的要“一箭双雕”才是真正的核心所在。

其次，要从中国实际出发。什么是我国的实际？那就是一方面，我们同发达国家同样急需建设高速度、高效率的与国际接通的现代通讯系统，以促进我们的工、农、国防科学、教育和商业诸方面的发展。没有它，就要落后挨打，就会更加失利。所以要抓住发展机遇，不失时机地把NII建设起来。另一方面，要考虑到我们是发展中国家，我们的信息产业还相当落后，我们还不能用自己的信息产业的产品来建设所需的信息高速公路。这是不能回避的一个矛盾。但是，建设NII不能专靠外国的设备和技术。如果我们不是用自己的技术和产品来建设如此庞大的中国的信息高速公路而拱手于国际，让外人的产品和技术来占有，那将是最大的失策。

我们应该发扬自强不息的光荣传统，像当年造原子弹、导弹、卫星那样，集全国之力，全国一盘棋，统筹安排。一手抓信息高速公路的建设，一手抓现代信息技术和信息产业的发展。弘扬中华民族的无坚不克、无战不胜的精神，在这场跨世纪的信息高速公路的建设竞争中显示出中国人民的力量与智慧，为人类社会的进步做出新贡献。

# 中国的水利建设

严恺

河海大学

严恺 水利专家和海岸工程专家。生于 1912 年 8 月 10 日，福建省闽侯县人。1933 年毕业于交通大学唐山工学院。1938 年获荷兰德尔夫特科技大学工程师学位。河海大学教授、名誉校长。1955 年当选为中国科学院院士（学部委员）。主要从事水利工程，特别是海岸工程方面工作。

我今天要讲的题目是：中国的水利建设。我们都知道，水是人类生活和生产不可缺少和不可替代的基本物质和自然资源。水资源的开发利用是人类赖以生存和发展的重大课题。广义的讲，水利建设就是开发利用和保护管理好水资源，达到兴水之利，除水之患的目的。中国人民同水打交道，同水作斗争有着十分悠久的历史，传说中的古代大禹治水，13 年三过家门而不入，就是发生在 4000 多年以前，人们所经常乐道的事。翻开中国历史，凡是在昌盛时期，没有不把水利作为安邦定国的大事来抓的，而社会动乱又往往是从严重的水旱灾害所引发的。可见水利在中国所处的重要地位。新中国成立以后，党和政府就对水利建设十分重视，特别是近几年来，水利在国民经济建设中的地位更得到进一步的确认。水利已被列为国民经济和社会发展的基础产业和基础设施。水利不仅是农业的命脉，而且还关系到人民生命财产的安全和社会的安定，成为国民经济的命脉。

水利建设的范围十分广阔，凡是水资源的开发利用和保护管理的事业都属于水利的范畴。主要包括：防洪、农田水利（灌溉、排涝、水利土壤改良）、水力发电、航运（内河航运和海港建设）、城乡供水、海岸防护、围海工程和海涂利用，以及环境水利等。发展水利事业不仅限于陆地，而且百川归海，还跨越海岸线到沿海地带，包括海岸带的开发利用。

下面想讲四方面的问题：

- 一、中国水资源的特点和开发利用中应重视的问题
- 二、中国水资源的开发利用现状
- 三、当前几项重大的水利建设工程
- 四、中国水利建设的展望

## 一、中国水资源的特点

陆地上的水资源来自降水，全球年平均降水量为 800mm，我国为 630mm，较全球的平均约少 20%。降水量中约有 56% 被蒸发蒸散，只有 44% 形成径流。全国河川平均径流量为 2.71 万亿  $m^3$ ，为全球 47 万亿  $m^3$  的 5.8%。虽然我国河川年径流量在世界上仅次于巴西、原苏联、加拿大、美国和印尼居世界第六位，但由于国土辽阔，人口众多，人均所占有的水资源只有 2300 $m^3$ ，还不到全世界人均占有量 10800 $m^3$  的 1/4，可见我国水资源是十分紧张的。但我们却能以较少的水资源在全球 7% 的耕地面积上养育了全球 22% 的人口，这确实是很不简单的。

除了水资源量偏低外，我国水资源另一突出特点是：在地区和季节分布上很不均衡，并且与人口、耕地的分布不相适应。我国南方雨量充沛，而北

方，尤其是西部地区，雨量稀少，有的地方甚至终年无雨，干旱严重。全国水资源约 80% 集中分布在长江及其以南地区，而这一地区的人口占全国的 55%，耕地只占全国的 35%。长江以北广大地区人口占全国的 35%，耕地占全国的 65%，而水资源却只占全国的 20%。其中黄、淮、海、辽四个流域耕地占全国 42%，而水资源只占全国的 9%。这就形成了南方水多耕地少，北方水少人多耕地多的局面，水资源的分布十分不均衡。

在时间分布上，我国的雨季在南方大致是 3 月到 6 月，或 4 月到 7 月，在这期间的降水量约占全年的 50%~60%；在北方，不仅降水量小于南方，而且分布更不均匀，一般在 6 月到 9 月的降水量达到全年的 70%~80%，有时甚至集中在两个月内。

从河流多年径流量的变化来看，南方河流比较均匀、稳定，北方变化较大，最大年径流量和最小年径流量的比值，长江为 2.1，钱塘江为 4，淮河支流为 11~23，海河南面各支流（子牙河、南运河）为 12~76，越向北变化越大。

由于以上所述的降水量和径流量在时间上和空间上的剧烈变化，就造成了水旱灾害频繁，农业生产不稳定，以及水资源供需的尖锐矛盾。

以上是从水量上评价我国的水资源，如果从水能资源来看，中国河川的水能资源还是很丰富的。全国水能资源的理论蕴藏量总计达 6.76 亿 kw，约占全世界的 1/6，其中可以开发的水电装机总容量为 3.78 亿 kw，居世界首位。如果全都开发，就相当于全国现有水火电总装机的将近一倍。

水能资源在全国各地的分布也很不均匀。长江流域的水能蕴藏量占全国的 40%，可开发的占全国的 53%，其次是西南地区一些河流。海河、滦河及淮河流域最小，还不到全国的 0.5%。

百川归海，沿我国大陆 18000km 海岸线，有众多的河流，挟带着大量的泥沙、丰富的溶解矿物和有机营养成分流到海里，对我国沿海地区的开发起着重要的作用。河流泥沙是形成沿海广阔滩涂的主要物质来源，不断为国家增添新的土地资源。例如江苏省的海岸线在 2000 多年前还在盐城、东台和南通一带，距现在的海岸线 20~40km 到 50~60km 不等。古长江口那时还在扬州、镇江一带。河流带入海里的营养成分为发展沿海渔业和水产养殖提供了丰富的饵料。漫长的海岸线和众多的河口为建设海港提供了有利的条件。沿海还蕴藏着大量的海洋能资源，据不完全统计，沿海 200kw 以上可开发的潮汐电站总装机可达 2173 万 kw。所以海岸带的开发利用对发展国民经济具有重要意义。

针对我国水资源的特点，在开发利用中我们应重视以下几方面问题。

1. 西北地区干旱少雨，东南沿海和广大平原地区低洼易涝，有些年份西北、华北地区春季干旱，夏季又洪涝成灾，因此防洪治涝，灌溉抗旱，历代都是关系到国治民安的重大问题。据不完全统计，从公元前 206 年汉代初到 1949 年建国前 2155 年间，全国共发生较大洪水 1092 次，较大旱灾 1056 次，大约平均每两年就有一次水灾、一次旱灾。建国以来国家投入很大财力物力和人力进行水利建设，但全国平均每年仍有 2~3 亿亩农田受到不同程度的水旱灾害。因此防洪抗旱仍是我国今后水利建设的主要课题。

2. 北方普遍缺水，华北平原由于地表水不足，许多地方开采地下水过量，导致地下水位显著下降，大量机井失效，并造成地面呈漏斗状的沉陷。天津市因海河水源不足，一度不得不从黄河引水，后来又进行了引滦工程；北京



市也严重缺水。所以开辟新的水源，进行南水北调，势在必行。

3. 江河湖海污染严重。大量未经处理的工业废水、生活污水和含有农药、化肥的田间排水直接流入江河湖海。随着经济建设的发展，情况将越来越严重，特别是一些主要城市尤为突出。以上海为例，黄浦江一直是上海的主要水源，近年来，由于污染而发生黑臭，1978~1980年，每年有100天发生黑臭，1981年增加到150天，1990年已增加到200天，引起了上海市领导的高度重视，采取积极措施加以防治，并开辟新的水源，从长江引水。北京市每年排放7~8亿 $m^3$ 的污水，造成环境的严重污染。所以保护水资源已是刻不容缓。一些大江大河的污染也十分严重。例如1994年7月在淮河就发生了重大污染事故。当时由于淮河上游河南境内突降暴雨，颍上闸上水位暴涨，超过了防洪水位，不得不开闸泄洪，致使闸上累积下来的2亿 $m^3$ 污水一下放了下来，等于一颗重磅炸弹，顺河而下，使下游深受其害。另外太湖的污染也日趋严重，必须及早采取有力措施加以防治。

4. 工农业用水普遍存在严重浪费现象。在灌溉方面，由于工程老化，不配套和管理不善造成水的严重浪费。绝大部分渠道没有防渗措施，渗漏损失一般达到引水量的30%~40%。我们灌溉水量也偏高，有的地方达到每亩年用水量1000 $m^3$ 之多，喷灌、滴灌和管道等节水灌溉技术还未得到推广。在工业用水上，也存在严重浪费现象。例如一些工业先进国家每炼一吨钢用水3~5吨，而我国多在10吨以上，水的重复利用率也很低。因此节约用水实属当务之急。

5. 为了缓解大陆资源日益短缺和人口负载不断加剧，向海洋进军，开发利用丰富的海洋资源已越来越引起人们的重视。预计21世纪将进入全面开发海洋的新时期，而海岸带作为向海洋进军和对外开放的前沿阵地和桥头堡更具有特殊的战略地位，应引起我们足够的重视。

## 二、中国水资源的开发利用现状

新中国成立以来，水资源的开发利用已取得了很大的成就。

1. 防洪建设。全国共修建和加固堤防25万 $km$ ，保护耕地5亿多亩，人口3.4亿。全国修建大中小型水库86000多座，总库容达4700亿 $m^3$ ，在防洪上发挥重要作用。还在主要江河上开辟了行洪、分蓄洪区100多处，分蓄洪容量达1200亿 $m^3$ ，用以容蓄超标准洪水。例如长江的荆江分洪，在1954年的长江大洪水中发挥了作用。主要江河上都建立了水情预报，防汛通讯和调度指挥系统。我们还大力推行了水土保持工作，这对减少水土流失和河道淤积有明显的效果。

有了上述这些工程设施使我国主要江河初步形成了防洪体系，并初步控制了10~20年一遇的洪水，提高了主要河段和大中城市的防洪标准，防洪效益显著。

2. 农田水利建设。经过40多年的大规模农田水利建设，全国的灌溉面积已从1949年的2.4亿亩发展到目前的7.5亿亩，增长了两倍，约占全国耕地面积的一半。全国有3/4低洼易涝农田，2/3盐碱地和1/3以上的渍害低产田得到不同程度的治理，这些都对保证农业生产，特别是粮食稳定增产起了十分重要的作用。

3. 水电建设。1949年全国水电装机只有16万 $kw$ ，1995年已达到4000万 $kw$ ，居世界第四位。我国小水电发展较快，考虑到农村电气化是亿万农民

的大事，国家早在 70 年代就十分重视发展小水电，并在全国中选定 100 个试点县，实现农村电气化试点。中国小水电建设在国际上享有较高的声誉，在杭州设有亚太地区小水电站研究培训中心。

4. 港口航道建设。50 年代初全国沿海只有 6 个主要港口，总泊位 233 个，其中万吨级深水泊位 61 个，年吞吐能力只有 1000 多万吨，到 1995 年底深水泊位已超过 400 个，总吞吐能力已达 7.4 亿吨，并建成了一批 5~10 万吨级的深水码头，宁波北仑港的 20 万吨级深水泊位已经投入使用。

在内河航运方面，我国河流众多，流域面积在 100km<sup>2</sup> 以上的河流有 5 万多条，其中可以通航的有 5600 多条，此外还有大小湖泊 900 多个，为发展水运事业提供了有利条件。水运具有运输能力大，运输成本低等优点，是交通运输系统的重要组成部分。新中国成立时全国内河航道里程为 7 万余 km。现已达到 10.9km，发展速度不及其它运输方式。

5. 海岸带的开发利用。中国有 18000km 海岸线和 6500 多个沿海岛屿，沿海一带蕴藏着十分丰富的自然资源。如果再从海岸向外伸展，还有广阔的大陆架和专属经济区，再向外还有国际共有的大洋，那么资源就更丰富了。特别是大洋里，有些资源，如水产资源、矿产资源等更是陆地上所不能比的。例如矿产资源中的多金属结核资源，又称锰结核，分布在水深 3000~6000m 的海底表层，是一种含有锰、铜、钴、镍等 30 多种金属元素的结核状矿产，总储量达 3 万亿吨，太平洋占有一半，这些资源我国都较贫乏，不能满足工业生产的需要，所以向海洋索宝具有重要意义。

沿海除前面所提到的港口资源外，还有大面积的土地资源。这主要是指潮间带的沿海滩涂，估计约有 3300 万亩，是位于大潮高潮位和大潮低潮位之间的土地，而且还在不断淤涨，速度每年大约为 45 万亩。40 多年来，全国沿海共围涂近 1800 万亩。围海造地不仅为我国沿海地区发展农业、盐业、养殖业提供了大量用地而且也为沿海港口建设、工业及生活设施等提供了急需用地，它已成为解决我国沿海地区人多地少，经济和社会发展与土地不足之间矛盾的重要途径。

### 三、当前几项重大水利建设工程

近几年来水利事业越来越受到党和政府的重视和为广大群众所关心，水利建设蓬勃发展，许多大型工程陆续上马或加紧进行前期准备工作。这里不能一一介绍，只能就大家所关心的，对国民经济建设影响深远的几项大工程作简单介绍。

1. 首先是长江三峡 这是举世瞩目、史无前例、影响深远的超大型工程。从这项工程最初提出到终于上马曾经历了长时期的复杂过程，系统地介绍花的时间太多，现在只择要讲一下。

暂不提以前做过的一些工作，三峡工程从 50 年代开始就进行了大量的勘测、试验研究和规划设计工作。由于工程规模大、牵涉的问题多，虽经反复研究论证，仍长期难以定下来。为了最终解决这一复杂问题，国务院于 1986 年责成水利部在广泛组织与工程有关的各方面专家参加的基础上，对三峡工程重新进行论证。有 412 位专家参加了这项论证工作，最后于 1989 年提出了《三峡水利枢纽可行性研究报告》，上报国务院。国务院对此十分慎重，又于 1990 年 7 月召开了有各部委和各方面（包括反对这项工程的）专家参加的“三峡工程汇报会”，听取各方面的意见，最后经党中央和国务院讨论后，

报请全国人大审查。在七届全国人大第五次会议上经过认真讨论，于 1992 年 4 月 30 日通过了兴建三峡工程的议案。此后又经过两年多的准备工作，三峡工程终于在 1994 年 12 月 14 日正式开工。坝址在湖北宜昌上游约 40km 的三斗坪。最后确定的工程规模为：正常蓄水位 175m，坝顶高程 185m，水库总库容 393 亿  $m^3$ ，其中防洪库容为 220 亿  $m^3$ ，移民数量将超过 100 万人，工期 17 年，按 1993 年 5 月物价水平估算，静态总投资为 900.5 亿元（枢纽工程 500.5 亿元，移民 400 亿元）。

三峡工程效益主要是在防洪、发电和航运三方面：

（1）防洪 长江中下游平原受洪水威胁十分严重，而且这里的工农业生产发达，沿江有许多重要城市和铁路，一旦发生水灾损失就非常大。例如 1931 年洪水就淹没农田 5000 万亩，灾民 3000 多万人，淹死 14 万多人，汉口被淹 3 个月之久，损失惨重。三峡水库位于长江上游的末端各主要支流（金沙江、岷江、赤水河和乌江）汇入长江后的河段，紧挨川东暴雨区，而且靠近中下游的防洪重点荆江地区，所以在防洪上位置十分优越。水库有 220 亿  $m^3$  的防洪库容，对各种不同来源的洪水通过水库调度都能发挥不同程度的重要作用，效果显著。

（2）发电 我国虽然煤矿储量和水力资源都十分丰富，但在地理上分布很不均匀。华北有大量煤矿，西南有丰富的水力资源，而华东二者都很贫乏。三峡水电站以它的有利地理位置和巨大的装机容量将大大缓和华东、华中和川东地区的电力短缺，而且三峡水电站恰处在“南水、北煤”的分界线上，因此可以对水火电发挥补偿调节和配合运行的重要作用，可以改善我国的能源结构。采用 175m 正常蓄水位方案，三峡水电站总装机容量将达 1820 万 kw（26 台 70 万 kw 水轮发电机组），相当于目前水火电总装机的 9%，水电总装机的将近一倍；年发电量 847 亿 kw·h，将来还可以扩大装机。

（3）航运 长江是我国的一条大动脉，号称黄金水道。从四川宜宾到河口长 2800km，终年可通轮船。但这段河的上半段，从宜宾到宜昌 1030km，称为川江，航运条件较差。特别是从重庆到宜昌的 660km，对出川货运十分重要，但这一河段地处丘陵和高山峡谷之间，水流急、险滩多，航运条件更差，有不少地方只能单线航行。这一河段的下段就是三峡河段，长 200km，河槽宽度只有 150~250m，最窄 110m，在洪水季节每日水位变幅可达 10m 或更大，一年变幅达 50m，对航运极为不利，以往经常发生翻船事故。在整个川江每匹马力推轮只能推 0.9~1.2 吨货物，而长江下游则可达 7~10 吨。

三峡工程建成后航运条件将大为改善。175m 正常蓄水位方案，回水可到重庆九龙坡，长 600 多 km，几乎淹没了所有 139 处险滩，46 处单线航道都可以改为双线，为万吨级船队自长江中下游直达重庆港创造了条件。所谓万吨级船队是指一艘推轮顶推若干支 1000~3000 吨的驳船，如 1+9×1000 吨，1+6×2000 吨，1+4×3000 吨。对于三峡水库下游来讲，由于工程建成后枯水季节下泄，流量增加，对航运也是有利的。

除了上述防洪、发电和航运效益外，三峡工程还有其它方面的效益，如对沿江城镇的供水，南水北调（中线），以及水产养殖、发展旅游业等。当然三峡工程也带来一些不利影响，主要是对生态与环境的影响，但在采取一定的措施后是可以消除或减轻的。另外还有移民太多，难度很大等等。也有人担心，一旦发生战争，敌人导弹落在大坝上，大坝溃决，水库水大量下泄，后果将不堪设想。其实关于三峡人防问题，早在 50 年代就进行过研究。三峡

工程的人防要两条腿走路，一条是积极防空，争取在核弹头未到目标上空就消灭它；一条是消极防空，即从工程技术上采取防护措施来减少损失。30多年来做了大量的化学爆炸模拟试验和防护方案研究，同时还进行了溃坝的水工模型试验。

大量试验表明，在正常运行情况下，汛期水位 145m，流量  $56700\text{m}^3/\text{s}$  时大坝全溃，库水下泄，最大流量可达一百几十万  $\text{m}^3/\text{s}$ ，确实是很吓人的。但由于地理位置好，三峡水库以下从莲沱到南津关三峡的出口有 20km 的峡谷，还转了三个  $90^\circ$  的大弯，可以把溃坝下来的流量大大削减，达到 20~30 万  $\text{m}^3/\text{s}$ 。等到洪水出了峡口通过荆江分洪到达荆江大堤时，沙市水位也还不超过保证水位 45m。即使在非汛期库水位 175m，入库流量  $10000\text{m}^3/\text{s}$  时垮坝，沙市的最高水位也只有 45.75m，不致于漫顶。当然为了使荆江大堤更安全，减少损失，最好在非汛期或汛期都降低水位运行。实际上战争打起来，事先总有个预警时间，而且也会有些迹象，只要有几天给三峡水库放水就够了。还有人认为三峡工程将导致坝上游泥沙淤积，影响水库寿命，这将对航运很不利。为了弄清这些问题，曾进行了大量的物理模型试验和数学模型计算，结果表明水库采取“蓄清排浑”的运行方式，100 年后水库仍将保持 86% 的防洪库容和 92% 的调节库容。对局部泥沙淤积造成的障航，可以通过航道整治、疏浚、调度得到改善。

2. 南水北调工程 这是解决北方水资源短缺的重大战略措施，共有三条调水线路，各有其供水范围。

(1) 东线调水工程，就是从长江下游江都抽长江水，沿京杭大运河逐级提水北送，经洪泽湖、骆马湖、南四湖和东平湖，在位山附近穿过黄河后，就可以自流，经过卫运河、南运河到天津，全线长 1150km。全线最高处东平湖蓄水位与江都抽水站的水位高差 40m，总扬程 65m，共建 13 个梯级泵站，供水范围是黄淮海平原东部地区，包括淮河蚌埠以下和沂沭河下游平原，南四湖周边、山东梁济运河沿线和鲁北部分地区、河北黑龙港和运东地区、天津市等，还包括山东胶东地区部分城市。主要任务是向这些地区供水，适当扩大灌溉面积，结合输水，恢复和提高京杭运河的通航能力。结合调水工程还可以提高沿线的排涝能力，维护和改善生态与环境等综合效益。

近 40 年来，江苏省为了解决苏北地区排涝和缺水地区的灌溉需求，一直持续地进行着江水北调工程建设。正在兴建的还有泰州引江工程和世行贷款的三庄泵站工程，调水工程已有了较好的基础，便于扩大规模，并向北延伸，向河北、天津供水。这项工程可以分步实施。东线工程的优点是可以主要利用现有河道扩大，向北调水，可以利用洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖和黄河以北的一些洼地调蓄水量。据估计总调蓄库容可达 90 多亿  $\text{m}^3$ ，不仅可以缓解远距离调水中的供需时差和地区间的矛盾，还可以提高供水的可靠性。同时线路工程相对简单，技术成熟，风险小，工程具有输水、灌溉、航运、排涝等综合效益。大家所担心的是调水的水质问题，主要是沿线城镇排入的污废水和卫运河上游卫河水系污废水的污染。

(2) 中线调水工程，从汉江丹江口水库引水，经河南、河北到北京、天津，供沿线城市生活和工业用水，输水总干渠全长 1246km，沿伏牛山南麓向北，穿过黄河后再沿太行山东麓北上到北京。共研究了两组调水方案，一组是汉江丹江口水库大坝暂不加高，不移民，另一组是大坝加高移民。经对各种不同组合的方案进行比较，1996 年 1 月 22~24 日召开了“南水北调工程

论证工作第二次会议”进行讨论，认为近期以实施加高大坝，调水 145 亿  $m^3$  的方案为宜。如国家财力有限，资金筹措困难，可再分期实施，暂不加高大坝，调水 75 亿  $m^3$ 。最终目标，远期调水 220 亿  $m^3$ 。

中线调水工程引起不少争议，持怀疑态度者认为在 1246km 的总干梁中有 500 多 km 为填方渠道，渠水位高出原地面的渠道占全长的一半，形成悬河；沿线与 700 多条河沟交叉，其中较大河流 219 条，工程失事造成灾害的机遇较高，风险很大，等等。同时投资很高，145 亿  $m^3$  方案的静态投资达 518 亿元。

(3) 西线调水工程，从长江上游干支流调水入黄河上游，引水路线拟定从通天河、雅砻江、大渡河上游筑坝建库，采取引水隧洞穿过长江与黄河分水岭巴颜喀拉山引水入黄河，年平均调水量 145~195 亿  $m^3$ 。西线调水主要是提供黄河上游青海、甘肃、宁夏、内蒙、陕西、山西等六个省、区城市生活用水和工业用水，补充农林牧业的水源。西线工程处在海拔 3000~4000m 地区。由于长江上游各引水河段水位低于入黄河的水位，因此需要修建高坝和开挖超长隧洞，坝高在 150~350m 之间，隧洞长度达 30~160km。因海拔高，严寒缺氧，气压低，施工条件十分困难。对于这些问题都必须进行深入细致的调查和科学研究，组织各方面力量联合攻关，才能促进西线工程早日实现。

3. 黄河小浪底水利枢纽工程 这是在开发治理黄河中具有重要战略地位的工程，位于河南省洛阳市以北 40km 的黄河干流上，是黄河三门峡以下唯一能够取得较大库容的控制工程。它是以“防洪、防凌、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，蓄清排浑”的综合利用水利工程。建成后可以使黄河下游防洪标准从现在的不到百年一遇提高到千年一遇，基本上解除黄河下游洪水和冰凌的威胁，减缓下游河道的淤积。

小浪底水库正常蓄水位 275m，总库容 126.5 亿  $m^3$ ，它控制了黄河流域面积的 92.2%，即 69.4 万  $km^2$ ，装机 6 台 30 万 kW 水轮发电机组，总装机 180 万 kW，年发电 51 亿 kW·h，总工期 8 年，预计 2001 年底可全部建成。小浪底移民数量也比较大，有 18.1 万人。

以上三项大型工程李鹏总理在 1996 年 3 月 5 日八届人大第四次会议上所作《关于国民经济和社会发展“九五”计划和 2010 年远景目标纲要》的报告中都提到了。除此以外还有一项也想在这里谈一下，就是长江口整治工程。

4. 长江口整治工程党的十四大提出了：“以上海浦东开发开放为龙头，进一步开放长江沿岸城市，尽快把上海建成国际经济、金融、贸易中心之一，带动长江三角洲和整个长江流域地区经济的新飞跃”重大战略决策。最近李鹏总理在视察浙江、江苏和上海时又提出，应把上海建成国际航运中心，这是一项十分重要的指示，因为这是使上海成为国际经济、金融、贸易中心之支持条件，是带动长江三角洲和整个长江流域地区经济新飞跃战略决策的关键性举措。目前使上海成为国际航运中心的主要障碍是长江口的入海航道水深不足。

长江口长期处于天然状态。河口拦门沙自然水深只有 -6m，每年通过挖泥 1000 多万  $m^3$ ，也只能维持 -7m 水深，万吨级海轮要趁潮进出。随着国际海上运输的发展，船舶的吨位也不断增长。作为国际航运中心必须使 5 万吨级、10 万吨级的海轮以及第三第四代集装箱船能进出港口。因此整治长江口，开辟入海深水航道实属当务之急。

对于长江口的整治研究，自 1958 年以来已持续地进行了大量工作。为了实现开辟入海深水航道，近几年来经南科院、河海大学、上海航道局等单位的通力合作，于 1994 年提出了开辟南支北槽深水航道的方案，这个方案已于这年四月通过国家计委组织的鉴定和验收。这项工程采用双导堤，和束水丁坝为主，辅以疏浚，将现有北槽航道分期增深，最终达到 - 12.5m，使第三、第四代集装箱船和 5 万吨级散货海轮可以全天候进出长江口，并且可以直驶南京。10 万吨级海船可趁潮进出长江口。

以上谈了四项比较重大的水利工程项目，其他还有许多重要工程，如大型水电站建设，沿海深水港口建设等因时间关系就不讲了。

#### 四、中国水利建设的展望

水利是经济和社会发展的重要基础产业，是国民经济的命脉，还关系到人民生命财产的安全和社会稳定，所以加快水利建设是我国今后长期的重要任务。

1. 首先要加快大江大河的治理，特别是大江大河洪水威胁始终是中华民族心腹之患。李鹏总理曾指出必须下最大决心，使大江大河在近几年中尽快达到能防御建国以来发生过的最大洪水的标准，并在以后不断提高防洪标准。要加快城市的防洪建设，目前我国 600 多个城市中有 470 多个都有防洪任务，一定要引起足够的重视。

2. 其次，由于我国水资源并不丰富，所以要千方百计节约水，我国还有 300 多个城市缺水，其中 108 个严重缺水。必须开源与节流并重，对水资源进行综合开发、综合利用、综合治理，发挥水资源最大综合效益，要依法治水，依法管理好水资源。

3. 在水电建设方面，现在全国水电装机 4000 万 kw，要求在本世纪末翻一番，达到 8000 万 kw，2010 年再翻一番。为了充分利用水能，要建设一批抽水蓄能电站。

4. 在内河航运建设方面，虽然全国航道里程已达 10.9 万 km 但能通行 300 吨以上船舶和驳船船队航道只有 1.3 万 km，要在“九五”期间增加至 2.3 万 km 任务还很艰巨。

5. 在沿海港口建设方面，今后要建设一批沿海深水泊位，以适应世界海运事业发展的需要，要进行全面规划，也不能每县市都修建深水港口，要大中小型港口相结合，合理分工，协调发展，建成若干港口群。

6. 此外在沿海潮汐电站建设、围海和海上人工岛建设上也将有所发展。

在大力发展水利建设的同时，还必须重视水质污染和减少水土流失，遏制水环境日益恶化的趋势，这仍是今后长期而艰巨的任务。

# 空间技术的成就与发展趋势

闵桂荣

## 中国空间技术研究院

闵桂荣 工程热物理学及空间技术专家。1933年6月2日出生于福建莆田。1956年南京工学院毕业。1963年在前苏联科学院动力研究所获副博士学位。中国空间技术研究院研究员。担任过卫星总设计师、中国空间技术研究院院长、国家“863”计划航天领域首席科学家等职。1992年当选为国际宇航科学院院士。1991年当选为中国科学院院士。1994年当选为中国工程院院士。在航天器热控制、卫星总体设计等方面做出了突出贡献。

### 一、空间技术及其意义

宇宙空间蕴藏着取之不尽的物质财富，期待人类去开发利用。空间技术就是探索、开发和利用宇宙空间的技术，又称太空技术和航天技术。讨论航天，那么什么是天？有两种定义。一种定义认为，天是指地球大气层以外无限遥远的空间。另一种定义认为，天是指地球大气层以外至太阳系内的空间。我赞同后一种定义。据此，大气层以外太阳系以内的航行活动则称之为航天，而太阳系以外的航行活动称之为航宇。相当长的历史阶段内，人类只能实现航天活动。因为任何一种航行活动都是与其推进技术密切联系的，只有当推进技术进步到一定程度，使运动物体速度提高到一定水平，才具有某种特定的航行活动。当飞行器达到第一宇宙速度（7.9公里/秒）才能克服地球引力而环绕地球飞行，不落回地球表面；提高到第二宇宙速度（11.2公里/秒）可以脱离地球飞向太阳系的其它行星；提高到第三宇宙速度（16.7公里/秒）就可以飞离太阳系。虽然第三宇宙速度理论上可以实现太阳系以外的航行活动，但是太阳系太大，假如太阳系半径以十万个天文单位计算，现代航天器以第三宇宙速度（16.7公里/秒）来飞行，需飞2~3万年才能离开太阳系。进行太阳系之外的通讯，信号来回一次需要一年以上时间。所以讨论太阳系以外的航行活动，为时尚早，当今技术远远做不到。尽管美国“旅行者号”将飞离太阳系去寻找地外文明，那也将是几万年以后的事情。所以，把航天定义为地球大气层以外至太阳系之内的航行活动更为确切。当代研究的空间技术所涉及的范围也是指太阳系之内。

相当长的时期内，人类主要开展以地球为中心的航天活动。要实现一次航天活动，要建立庞大的以航天器为核心的航天系统。它由特定的航天器（卫星、空间站、探测器），运载工具（火箭、航天飞机），航天发射场，地面测控网（地面站、船），地面应用站网及其它有关系统组成，它是一个大系统工程。航天器是航天系统的核心，它是多种多样的，有不同的分类方法。按用途分类，有军用卫星、民用卫星；有通信卫星、遥感卫星、导航定位卫星、科学卫星等。按技术分类，有地球同步卫星、太阳同步卫星、深空探测器；返回式卫星、不回收卫星；还有按是否载人分飞船、空间站与无人航天器等。不同类型的航天器，其配套系统也有所不同。

空间技术属于高技术，至今才有40多年历史，它技术进步快，所以也是一门新技术。那么空间技术有什么特点？

近 40 年来,空间技术发展很快,它有许多特点,这里强调三个突出特点。其一,空间技术是高度综合的现代科学技术,它是许多科技最新成就的集成,其中包括喷气技术、电子技术、自动化技术、遥感技术、材料科学、计算科学、数学、物理、化学等等。其二,空间技术是对国家现代化、社会进步具有宏观作用的科学技术。由于航天器飞行速度快,运行高度高,所以可快速地大范围覆盖地球表面。例如,通过卫星使电视网络覆盖全国及至全球;气象卫星可以进行全球天气预报,包括长期天气预报;侦察卫星可以及时发现世界各个地区的军事活动等。这许多都是常规手段无法做到的。其三,空间活动是高投入、高效益、高风险的事业。尽管风险很大,但是空间技术的发展对人类的贡献是巨大的。

发展空间技术具有重要意义。其意义概括说有四个方面:在经济上,太空活动具有很高的经济和社会效益。多种应用卫星在通信广播、资源调查、环境监视、气象预报、导航定位等方面,已为人类作出了巨大的贡献。根据一些国家研究分析,应用卫星投资效益比达 1:10 以上。在军事上,许多军事专家认为谁占有空间优势,谁就具有军事战略优势。多年来,大国都在发展战略核武器,为选择打击目标,提高命中精度及了解敌方军事部署,竞相发展侦察卫星,它是洲际导弹的耳目,并已成为战略核武器的配套项目。通讯、导航等卫星的发展,同样大大增强了国家的军事力量。在科学技术上,空间活动带动和促进了众多学科的发展。首先,空间活动带动了技术科学的发展,如电子技术,遥感技术,喷气技术,自动控制技术等;其次,对基础科学将有很大推动,包括对生命科学、宇宙的形成和发展等都将有重要的新发现;第三是形成了许多边缘学科,如空间工艺学、空间材料学、空间生物学、卫星测地学、卫星气象学、卫星海洋学等等。在政治上,空间技术极大地提高了国家的综合国力及其在国际活动中的地位,现在国际上讨论的许多重大问题都与空间有关,世界大国首脑会谈也离不开这个问题。由于空间技术有如此重要的意义,当今参加开发空间的国家越来越多,已达 60 多个;而应用空间技术成果的国家几乎遍及世界各个角落。

## 二、40 年航天主要成就

由于空间技术具有重要意义,近 40 年来发展极为迅速。继 1957 年苏联发射第一颗卫星之后,美国于 1958 年,法国于 1965 年,日本、中国于 1970 年先后发射了自己的第一颗人造卫星,引起世界轰动。世界上航天投资最多的是前苏联和美国,至今发射的四千多个航天器中,前苏联、美国占绝大多数。此外,欧盟、中国、日本、印度、加拿大等也都有一定的规模。中国依靠自力更生,至今共成功研制和发射不同的人造卫星 35 颗,为国家建设和社会进步作出了重要贡献。世界航天的主要成就表现在以下两方面。

### 1. 空间技术进步

航天运载工具的发展是 40 年最重要成就之一。至今作为空间飞行器的运输工具主要还是一次性的运载火箭,这方面最发达的是前苏联、美国,此外是法国、中国、日本和印度。世界上典型的大型火箭,有前苏联的质子号,美国的大力神号,法国的阿里雅娜号,中国长征号,日本的 H<sub>2</sub> 火箭,它们可以把重型卫星送到远地点 36000 公里的地球同步转移轨道。中国长征系列火箭不仅发射国内卫星,而且已经提供国际发射服务。另一种运载工具是航天飞机,航天飞机可以多次使用,但造价高,风险大。美国最早发展航天飞机,



运载能力 30 吨，载乘 3~7 名宇航员，飞行轨道高度 200~400 公里，倾角大约 28 度。

人造地球卫星对军事和经济建设具有重要价值，因此卫星技术发展极快。世界上除美国、前苏联外，欧盟、中国、日本和印度等都具有研制卫星的能力，并发射了多种应用卫星。国际通信卫星已经发展到第八代，一颗卫星的通信能力可达几万条话路，可以同时转发几十路电视节目。卫星发射功率的增大及点波束技术的进步，使得地面站小型化成为现实。卫星技术的迅速进步，使卫星的在轨寿命长达 12~15 年。资源卫星的典型代表是美国陆地卫星和法国斯波特卫星，它们具有高分辨率和多谱段的遥感能力，对陆地资源调查具有重要价值。气象卫星有极地轨道和静止轨道两种。极地轨道气象卫星可飞经地球所有地区，可提供长期天气预报资料，世界上只有美国、前苏联、中国研制和发射了这种气象卫星。静止轨道气象卫星相对地球表面固定不变，可实时连续观察本地区的云层分布和变化。导航定位方面的代表是美国 GPS 卫星，它由 18 颗卫星组成，可在全球导航与定位，精度达到米级。可返回式卫星具有重要的经济、军事和科学价值，至今世界上只有前苏联、美国、中国具有回收卫星的能力。中国的返回式卫星具有极高的成功率，其水平之高为国际所公认。

载人航天是 40 年来航天成就的重要组成部分。苏美在发射本国第一颗人造卫星后就竞相发射载人飞船，主要是要争夺世界第一。苏联是世界第一个宇航员上天，而美国宇航员首先登上月球。载人航天的经济效益一直在争论，但在政治上影响很大。至今已有 400 多人次进入太空，前苏联略为领先，进入太空人数和停留时间均超过美国。美苏两国发展道路有所不同，前苏联发展的顺序是飞船——轨道站——空间站；而美国是飞船——航天飞机。载人航天技术进步较快，不仅宇航员可出舱活动，还可以修复出故障的大型航天器，以及操作航天器交汇对接等。

深空探测主要是对太阳系各大行星及其环境进行探测。世界上已发射了 100 多个深空探测器，有许多重大发现，包括对地球环境的调查，发现内外辐射带，了解了地磁场分布，调查了太阳系行星、月球及其周围情况，如小卫星和大气环等。

近 40 年来空间技术的发展是迅速的。概括说，运载火箭的运送航天器的能力从几十公斤增到 100 吨；卫星获取和传递信息能力大幅度提高，一颗通信卫星的话路由几十路增至几万路；卫星寿命从几十天增到几年至十几年；人在空间停留时间从几个小时增到一年以上。总之，主要指标都提高了 2~3 个数量级，而价格大幅度下降。

## 2. 空间应用成就

40 年来空间技术的成就是巨大的。它已迅速并广泛应用于众多的领域。当代航天技术的应用不仅在军事和经济建设方面，而且已深入到每个家庭、个人生活之中。

卫星通信、广播。通信卫星的技术进步，使它在通信和广播领域迅速推广应用，世界上跨洋通信几乎全被通信卫星所代替。许多交通不便，通信干线不到之处，以及海上、空中、灾区通信卫星更显出优越性。目前卫星通信可提供有关信息传递的 100 多种业务。以国际通信系统为例，其业务活动效益每年达 100 亿美元。

卫星电视广播的应用已众所周知，不仅丰富了人民的新闻文化生活，而

且为教育事业作出了重要贡献，以我国开通的卫星电视教育频道为例，目前已有 5000 多个卫星电视教育接收台，接受各种教育人数达 2000 万以上，效果很好。

**卫星导航定位。**卫星导航定位系统由于范围大、时效好、精度高等特点已广泛应用于海上舰船、空中飞机、陆上车辆的行驶导航，以及各种工程建设和业务活动中的定位。美国 GPS 系统的定位精度可达到米级。高精度的卫星导航定位为各种交通工具提高运输效率及安全保障做出重要贡献。

**资源调查和测绘。**依据卫星照片调查陆地和海洋资源已广泛应用，并被证实是有效的方法，不仅节约人力物力，而且速度快。我国已利用国内外卫星照片对全国的主要经济区的资源和环境进行勘测和调查。同时，还利用卫星照片绘制了地形图和各种专业图。

**气象与灾害预报。**气象卫星不仅提高了天气预报的准确率，同时对台风、暴风雨等的预测以及海面温度的监测和海洋渔业的发展都起着积极有效的作用。自从有了气象卫星以来，台风天气预报几乎准确无误。我国利用气象卫星资料，对森林火灾、洪水等多种灾害进行监测发挥了积极的作用。

**军事应用。**应用卫星中军事卫星约占 70%，包括军事侦察、导弹预警、军事通信指挥、导航和气象保障等。侦察卫星不仅可以实时大范围监视敌方的军事行动，而且可以对重要军事目标进行详查，其分辨率可达 0.3 米。各种军事卫星不仅提供平时部队各种需要，而且在战时发挥重要作用。典型应用是 1991 年海湾战争中美国利用卫星参战情况，当时美国动用了 10 多种 40 多颗军事卫星参加了作战，发挥了极为重要的作用。

此外，空间技术在科学研究等方面也发挥了积极的作用。例如，中国在空间环境探测、微重力科学实验和太空植物育种等方面都取得了可喜的成绩。

### 三、世界空间技术发展趋势

未来 30 年，世界航天技术将持续快速发展，航天大国的投资主要将集中在下列几个方面。

1. 航天运输系统。降低航天器发射价格是主要努力方向。现有的低轨道运输价格大约为每公斤 1 万美元，距离每公斤 1000 美元的奋斗目标相差甚远。因此，航天大国都在研究发展新的天地运输系统。近年来提出了多种新的航天运输方案，其主要的一点是研制可多次重复使用的运输工具。按其起降方式，大致分为三类：

**垂直起飞、垂直降落。**美国麦道公司正在研究的三角快帆是一种典型的代表。它是单级火箭，共有 8 台主发动机，起飞时 8 台全部工作，返回降落时利用其中的 4 台工作减速，回收再用。起飞重量 463 吨，载荷重量 4.5 吨，箭体总高度 38.7 米。

**垂直起飞、水平降落。**典型的代表是美国现有的航天飞机。但航天飞机由于维修等费用高昂，所以每公斤运载费用仍然大于 1 万美元，比设计的 350 美元超出很多。为了降低运价，美国马丁公司正在研究试验新方案。

**水平起飞、水平降落。**典型代表是国外正在研究的空天飞机。采用吸气式发动机，利用大气层中的氧气与自带的液氢作为推进剂。分单级（美国 NASP 计划）和两级（德国 Sanger 计划）入轨两种。空天飞机可以多次使用，把卫星送入空间后，像飞机一样返回地面，以备再用。由于技术难度大，要

求投资多，目前尚处于研究阶段。

虽然多种可重复使用的运输系统都在开展研究，但相当一段时间内航天发射仍然离不开一次性的运载火箭，因此高能无污染、大推力、低成本的新型运载火箭的研制仍是航天大国努力的方向。我国“863”高技术计划中，对先进的天地往返运输系统和新一代大型运载火箭，均安排了跟踪研究、概念研究和部分关键技术先期预研。

2. 人造卫星。应用卫星由于具有很高的经济效益，将更多地进入商业化。因此开发航天技术的国家，首先把资金集中于研制各种人造卫星。各种应用卫星将继续提高水平，降低造价，扩大应用范围。在遥感方面除发展陆地、海洋资源卫星外，将加强对地球环境监测、减灾活动内容；在通信卫星技术方面，除了研制发射大容量、多频段、大功率、长寿命的大型通信卫星外，研制和发射几十至几百公斤的小型卫星是新的方向。值得注意的趋势是应用卫星系统研究正在从局部地域向全球发展，它可使地球任何地区进行实时定位、通信及获取各种主要信息。例如，美国摩托罗拉公司开发的小卫星群通信系统，它由66颗卫星组成全球网络，可在全球范围内进行个人电话直接通讯。美国地球使命计划以及日本不久前提出WEDOS计划都是全球系统，旨在对全球的环境进行监测和对各种灾害作出预报。而全球实时导航定位系统GPS早已提供应用。空间能源利用方面，未来30年有可能建成卫星式太阳能电站，在轨道上利用太阳能发电，再以微波形式传送到地球用户。

预测未来10年航天商业市场。运载工具发射服务约100亿美元，主要竞争对手是美国、法国、俄国、中国和日本；通讯卫星市场大约120亿美元，主要是通信卫星本身（硬件），不包括地面服务，后者市场更大；卫星导航定位50~100亿美元，世界上许多国家都重视积极开发相应的地面系统；遥感卫星主要是社会效益，资源卫星、气象卫星的遥感图片以及部分军事侦察卫星解密转向民用，对各国的经济建设意义极大，社会效益很高；

微重力资源的开发已引起发达国家的重视。在空间失重环境及其它空间环境作用下，制造半导体材料、特种合金、药品、光学材料和植物育种等，其产品性能要比地面生产的质量好得多，价值很高。但未来10年内，微重力材料加工的市场估值变动很大尚无确切的数字。

在未来15年内，中国的应用卫星将跨上一个大的台阶。正在研制的大型通信卫星不仅容量大、寿命长，而且将有多种频段以适应不同用途。计划中的不同遥感卫星包括资源、气象、海洋、环境与灾害多种用途，它不仅提供国内服务，还将为全世界做出贡献。关于微重力科学研究，中国已在世界先进行列之中，充分利用地面及太空有利条件，在有关方面共同支持下，发展前景极好，有可能在微生物、植物育种、半导体材料等方面取得重大进展。

3. 大型空间站。载人航天是人类开发宇宙太空的必然发展，与60年代不同，当今世界载人航天计划的核心，是在靠近地球的轨道上建立长寿命大型空间站。空间站主要有如下功能：遥感及微重力等科学研究；停靠、维修并为人造卫星补充燃料；在空间站进行部件或整机组装工作；物资、宇航员及航天器转运基地。80年代，美国决定研制自由号永久性空间站。该空间站为框架式，长170米，重200吨，轨道高度400公里，倾角为28.5度，承载6~8名宇航员，发电能力50~75千瓦，总建造投资约300亿美元。欧洲、加拿大和日本等参加了这个计划。前苏联于80年代后期建成和平1号空间站后，决定90年代建造和平2号空间站。它由8个舱段组成，重115

吨，有 6 名宇航员。但是近年来美、俄两国都由于投资太大，进展缓慢，并一再修改缩小原定规模。苏联解体后，冷战结束。两国探讨合作联建大型空间站的计划（国际空间站），以节约经费，包括欧洲、日本、加拿大等共有 13 个国家参加。国际空间站的重量为 377 吨，电功率为 110 千瓦，长宽为 110 × 87 米，实验舱 6 个，宇航员 6 名，原计划 2002 年建成。

为了适应我国 21 世纪航天事业的发展，国家“863”计划中安排了我国未来空间站的研究课题，除空间站概念研究外，还支持开展空间站系统的关键技术预先研究工作。

应该提及的是，为使空间站更有效的应用，正研究发展空间机器人及虚拟现实技术。这样，科学家、工程师就可以在地面工作，以完成人在天上进行的各种动作，这是一个极为重要的领域，世界不少国家都在开展研究。

4. 深空探测。过去 30 多年在深空探测方面虽已做出了比较大的成绩，但还只是初步的。未来美、俄、欧、日都将对深空进行深入探测。主要有两大方面，一是太阳系行星探测，二是天文观察。至于建造月球基地和载人火星 90 年代还只处在研究阶段，要实现这个计划将是 21 世纪的事。由于月球上有氦 3 等各种重要资源，世界上不少专家倡议各大国联合开发月球。日本不久前公布了雄心勃勃的探月和登月计划。行星探测包括对金星、木星、火星、水星等及其周围环境的探测。已经发射的伽利略木星探测器，其主要任务就是对木星进行探测研究。研究木星具有重要的科学意义，因为太阳系内木星有自己的小卫星，有自己的运行轨道，其模型与太阳系相类似。科学家认为通过对木星及其周围环境考察研究，有助于了解太阳系的起源以及地球在太阳系中的地位。至于天文观察，预计今后将有数座轨道天文台在太空工作。美、欧的哈勃望远镜未来计划，有望解开银河系奥秘，将使天文观察进入一个新纪元。还有将发射的红外天文台、宇宙背景辐射探测器等都是本世纪末有重要意义的项目。

5. 空间军事系统。由于空间技术对军事有重要价值，故本文单列一段。虽然公众反对空间军事化，但是超级大国仍积极发展壮大自己的空间军事力量。军事力量的快速反应需要适时和准确的侦察、可靠的气象预报、精确的导航和地图测绘以及足够的通信线路。为此，必须进一步加强和完善现有的各类军用卫星系统。再者，未来的中心内容是建立导弹防御系统。80 年代美国曾有星球大战计划，其目的在于摧毁对方的洲际导弹进攻能力，从而使自己的进攻能力充分发挥。星球大战计划的系统由三部分组成：监视和跟踪系统、多层次拦截武器，以及指挥和控制系统，该计划需要巨额投资。苏联解体后，加上美国财力困难以及海湾战争的经验，美国决定缩小该系统的规模，首要任务是研制战略弹道导弹防御系统。星球大战计划的科研成果，不仅在军事航天应用有重要价值，而且在促进科技进步和经济建设，以及防止小行星撞击地球都具有潜在意义。

未来的 30 年世界上将形成比较复杂的国际航天关系，空间由两个超级大国垄断的时代将变为多极集团竞争开发。继美苏之后，欧洲将逐步形成一个比较大的空间体系；其次，日本已加快成为世界空间大国步伐，其空间投资年增幅很大；还有不少发展中国家也将积极参与空间活动。未来国际航天关系可概括为六个字：合作、竞争、对抗。合作是有限的，在某几个方面如深空探测，地球环境监视，建造国际空间站等有共同利益的项目，可能促成合作。但空间领域不会有全面的合作。对运载火箭的发射服务，多种应用卫星

具有商业利益的项目，将存在激烈的竞争，竞争也不可能有公平的商业竞争，必然出现政治干预。而由于空间军事需求的存在，大国竞相开发空间军事系统，所以国与国之间潜伏着对抗。

中国的航天事业将持续不断地向前发展。我国是一个发展中国家，财力有限，比起世界航天大国，我们属于航天低投入国家。因此，我国只能在部分航天领域做出贡献。同时，中国提倡各国联合和平开发和利用宇宙空间，平等互利，共同为全人类的利益做出应有的贡献。

# 石油化工装备研究的展望

时铭显

石油大学

时铭显 化学工程与设备专家。1933年4月26日出生于江苏省常熟市。1956年北京石油学院研究生毕业。现任石油大学(北京)流田分离研究室主任、教授。1995年当选为中国工程院院士。主要从事高效气固分离设备和成套技术开发等方面的研究。

石油化学工业是我国国民经济支柱产业之一,它以石油和天然气为原料,生产汽油、煤油、柴油、润滑油等石油产品和合成树脂、合成橡胶、合成纤维、尿素以及基本有机原料等石油化工产品,都是关系到国防、工农业生产 and 人民生活的主要必需品。到1994年底,我国原油加工能力在世界上排第四位;作为石油化工产品的最主要的原料的乙烯生产能力在世界上排第八位。由于我国国民经济的持续高速增长及人口众多、市场需求量庞大,所以在一个相当长的时期内,石化工业必需要有更大的发展,在技术上要达到世界先进水平,在产品品种和质量上都要有国际竞争力。

石油化学工业作为一种最主要的有机化工生产过程,必然也是:原料化学反应 分离提纯 产品。因此,从技术上说,以催化剂为核心的化工生产工艺方法和以反应与分离为核心的化学工程及其装备,就成为支撑石化工业的两大类主干技术,再配以全过程的计算综合集成优化控制,就构成了现代化的石化工业。

针对我国石化工业的“大型、先进、系列、集约”的发展方向,展望21世纪初,仅就石油化工装备研究开发中的几个方向性问题,做一些初步探讨。

## 一、装置的大型化及设备的高负荷化

世界上最大的原油蒸馏装置能力已达1600万吨/年,一般也在1000万吨/年左右。千万吨级以上炼油厂已超过100座,最大炼油厂规模已达3000万吨/年。我国500万吨/年以上规模的炼油厂虽已有17个,但单套装置能力达500万吨/年的只有1个,平均大多在250万吨/年上下。由于装置规模小,原油加工损失和能耗物耗都比国外的高出不少,再加上人员高出几倍甚至十多倍,致使成本偏高,劳动生产率偏低,缺乏国际市场竞争力。因此,解决装置经济规模及装备大型化所面临的各种技术问题便是当前需要研究的课题。例如原油蒸馏装置的10米以上直径的大型塔,如何保持塔盘上气液两相的均匀接触与分离,如何使大型填料塔内液相均匀分布,如何进一步提高塔内真空度,如何使每层塔盘的气液负荷都处于该种塔盘的适宜操作区等,都是值得研究的课题。又如发展200万吨/年大型连续重整装置,需要解决单片尺寸达 $2 \times 5\text{m}^2$ 的大型逆流板式换热器的设计与制造问题。高压加氢反应器,国外可制造直径6米、壁厚450mm、重1200吨的大型热壁高压容器。我国目前最大的壁厚只有200mm,重560吨,进一步大型化必须解决好抗氢材料及一系列制造技术问题。为了发展 $8 \times 10^7$ 大卡/时以上的大型管式加热炉,需要研制大型低 $\text{NO}_x$ 燃烧器及高效耐露点腐蚀的空气预热器等。再如高压加氢装置所需的新氢压缩机,国外已有最大活塞力80吨的活塞式压缩机,

国内最大只有 50 吨，而且气阀、填料、活塞环等的寿命均不如国外。加氢进料泵，国外用双壳体多级离心泵的参数为  $1020\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 3050m，可在 427 下长期工作。国内最大只有  $600\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 2600m，只能在 210 以下工作，差距甚大。

从目前国内实际情况看，可能更迫切需要的是设备的高负荷化。燕山石化公司成功地将 30 万吨/年乙烯装置扩建成 45 万吨/年，其中丙烯塔尺寸不变，只改变了塔板型式及参数就解决了问题，便是一个典型的例子。

## 二、针对节能降耗，开发新型高效设备

我国人口占世界总人口的 22%，而我国的石油储量只占世界的 2%，煤炭储量只占世界的 11%，可见人均占有能源量大大低于世界平均值，但是能耗却普遍高于国外，所以能源不足的矛盾将日益尖锐化，解决不好将成为制约我国国民经济增长的主要瓶颈。试以技术较为先进的炼油企业为例，我国炼油厂平均综合能耗大约是国外的 1.3~1.5 倍左右。乙烯装置的平均能耗大约是国外的 1.6 倍左右。从炼油厂综合商品率看，国外一般 92.5%，日本可达 95.2%，我国只有 90.68%，这意味着每加工 1.0 亿吨原油，比国外少生产 186 万吨成品油，损失十几亿元。所以开发一系列的节能降耗的新技术与新装备是长期的十分重要的研究方向。现分成如下几个方面来举例说明。

### 1. 系统优化匹配与优化运行节能

从全厂系统上考虑，主要是提高能源利用效率和回收各种能量这两方面。在提高能源利用效率方面的一个典型例子是石化企业的汽电联产技术。采用炼油厂的过剩可燃干气或高硫焦或硬沥青等驱动燃气轮机发电，用燃气轮机高温排气作为热源去生产热力或工艺用蒸汽，最终实现能源品位梯度逐级利用的技术路线，使全厂能源利用率大为提高。但这里就要开发高温气体净化设备及适用于含尘气的燃气轮机等新装备。在回收各种能量方面，大致可以分为四种：（1）高温位热能回收——典型例子是炼油厂催化裂化装置内的催化剂生焦后用空气烧焦再生所产生的 650 ~ 720 烟气能量回收系统具有巨大的节能效果。70 年代以前只用废热锅炉回收热能，该装置能耗为 66~75 万大卡/吨油；若先用烟气轮机发电，再将其高温排气进入废锅回收余热，则装置能耗可降为 61 万大卡/吨油。（2）低温位热能的回收——石化企业内 300 以下的低温位可用热源很多，最简单的回收办法是用来加热锅炉进水或民用采暖或管道伴热等。但要降低温热升级利用，即通过能量转换以提高品位，再加以利用，虽可有效提高全厂的能源利用率，但技术上经济上还有许多难题未解决好。例如在分馏塔上采用热泵系统，升高塔顶热源的温位，加热塔底物料，节省大量蒸汽，关键在于要开发低温差高效换热器，降低全系统设备造价。余热发电是值得开发的新技术，它可以采用朗肯循环，但要开发性能优良的有机工质和造价低的高效膨胀机。近来美、日等国先后开发以汽液两相流体为工质的透平发电系统，可用分馏塔的排热加热热水，而不必用价格昂贵的有机工质，很有发展前景。（3）化学能的回收——如炼油催化裂化装置内高温烟气含有 CO 及  $\text{O}_2$ ，可用 CO 锅炉回收其化学能。（4）压力能的回收——在加氢装置内高压液体的压力常常用液力透平来回收，也有很好的节能效果。

在装置运行优化节能方面，举几个例子：（1）石化装置大量采用离心泵与离心压缩机，由于原料的多变或目的产品的多变，许多泵与压缩机往往采

用能耗高的节流办法来调节运行，致使它们不在最高效率点附近运行，白白增加了能耗。若广泛采用变频调速装置，就可以解决此矛盾。例如一个 100 万吨 / 年延迟焦化装置，它的稳定吸收压缩机采用了 6000V，1600KW 的变频调速装置，一年可节电 160 万度。(2) 石化企业是用水大户，国外每吨油的耗水只有 0.5 吨，我国耗水却都在 2 吨以上，差距太大，必须开发污水净化与循环回用的新技术。(3) 石化设备与管道的保温不可轻视。据测算，仅一个装置的主风管道的良好保温，就可降低该装置的能耗 0.93 万大卡 / 吨油；仅一个大型高温法兰没有保温，每年就会损失 4 吨左右蒸汽，可见这方面潜力还很大。(4) 每个石化装置都有大量的换热设备，若能用窄点技术将热网进一步优化，将可获得更大的节能效果。石化厂的加热炉是用能大户，采用计算机优化管理与控制，使排出烟气内过剩氧尽量减少，尽可能不要有 CO，将可进一步提高炉子的热效率。这些方面的节能潜力还是相当大的。

## 2. 开发高效节能设备

石化设备繁多，只能举几个量大面广对节能影响较大的设备加以探讨。

(1) 换热设备的高效强化——以应用面最广的间壁式换热设备为例，强化传热要从两方面入手。第一方面是使作为传热推动力的冷、热两流体沿程各处温差尽可能地大，从这个意义上说，非常接近纯逆流流动的螺旋板式换热器要优于板片式换热器，更优于管束式换热器。可惜前二者由于密封问题而大大地限制了它们的使用温度与压力范围，处理量也不能太大。第二方面是尽量减小各种热阻，例如传热表面采用螺纹（单面或两面凹凸槽），可提高传热系数 1.2~1.3 倍；形成多孔表面，可以提高沸腾给热系数 4~10 倍；管外用纵槽，管内为多孔烧结表面，可提高冷凝给热系数 4~5 倍。又如在管内用丝状花内插物，使流体在低速下产生径向位移和螺旋流相叠加的三维复杂流动，可提前诱发湍流和增强温度梯度方向上的流体扰动，从而在不增加阻力的条件下大大提高传热系数。由于传热表面结垢后，热阻将大大增加，所以同时还要采用各种防垢、阻垢措施，管内装一个弹簧状内插物就是一个实例，它的除垢率可达 70%，传热效率可提高 30%。

管壳式换热器的壳程往往是薄弱环节，近来采用折流杆栅代替传统的折流板，不仅可提高壳程给热系数约 20%，压降降低 50%，而且还可防止发生流体诱致振动。

近来日本开发了一种 Hybrid 换热器 综合了板式与管壳式换热器两者的优点，克服了板式换热器因密封问题而受到限制的弱点，很有发展前途。

(2) 管式加热炉的节能途径很多。采用空气预热器尽量降低排烟温度是目前应用最广的有效手段，这里一方面要开发高效紧凑型换热器，目前较好的是以水为工质的热管换热器；另一方面要改进材质以解决露点腐蚀问题。在炉内传热面上涂以 0.3~0.5mm 厚的碳化硅高辐射物质涂料 强化红外辐射传热，使炉效率可提高 2~5 个百分点。开发高效低 NO<sub>x</sub> 燃烧器又是一个重要节能途径，又可符合环保要求。例如美国 Alzeta 公司近来开发了一种热棒型陶瓷纤维燃烧器，可以根据炉型规定火焰形状，强化火焰的均匀辐射，噪声低，NO<sub>x</sub> 低于 20ppm，应用效果很好。炉管表面积灰会严重降低传热效率，现有高压蒸汽吹灰器的应用效果不理想，要采用次声波技术除灰，目前正在发展中。综合这些措施就可使加热炉热效率从普遍的 80% 多提高到 90% 以上，节约能量是相当可观的。

(3) 机泵的节能也大有可为，例如前述的变频调速技术使机泵处于最高



效率点附近运行，用计算机进行优化控制，有重大节能效果。又如采用可调静叶的轴流风机可比常规的离心式风机有更高的效率。如采用三元流动理论设计叶轮可使现在采用常规叶轮的离心泵与离心压缩机有效地提高效率。这些新技术已在国内有了长足的发展。

(4) 从石化企业的许多分馏塔来看，在同样传质效果下，采用规整填料代替板式塔，可减少压降达 3 倍左右；对一个常减压装置，仅此一项便可降低能耗 3.4 万大卡 / 吨油。国外采用最新开发的孔板波纹填料已在直径 13.4m 减压塔上应用成功。但填料的价格要高于板式塔不少，所以还要综合考虑，并不是说板式塔就无前途了。

### 三、从装备上保证石化装置的长周期安全生产

石化企业都是大型化的连续生产，停产一天就会损失几十万甚至几百万人民币。国外已可做到三年一修，而国内大多还停留在三年二修的水平上。究其原因，有管理问题，有人员素质问题，也有装备技术问题。现只从后者来作些分析，要重视如下几方面的技术：

1. 要持续地发展密封防漏技术——离心泵上 98% 用的是机械密封，近来机械密封又有新的进展，例如将干气密封的螺旋槽技术用于湿式密封上，形成了新的“上游泵送机械密封”，大大延长了使用寿命和提高了密封效果。近年来，无密封泵发展较快，例如磁力传动泵，最大的流量已达  $6000\text{m}^3/\text{h}$ ，排压 25Mpa，1900 马力。大型离心压缩机以用浮环密封为主。目前国外正在大力推广螺旋槽式泵送干气密封技术，摩擦损失小，气体泄漏非常少，而且对转子振动不敏感，是离心压缩机较为理想的密封技术。离心压缩机另一突破性技术是应用磁力悬浮轴承，没有摩擦面及润滑油系统，寿命长，损耗小，实应大力发展。

2. 要大力推进防腐蚀技术——我国每年要进口一些中东原油，它们都是高含硫原油，对设备腐蚀严重，必须从脱硫、材质及工艺等各方面采用综合防腐措施。要大力发展以金属表面改性及喷涂技术为主的表面工程技术。要发展新型防腐复合金属。要开发新的非金属防腐衬里技术。高温设备及管道内的结焦结垢也是影响长周期运行的问题，近来已研制了各种抗垢阻垢剂，应用效果不错，值得推广。

3. 要重视高温设备的隔热耐磨衬里技术——以催化裂化装置为例，大直径再生器在 700 以上高温下运行，万一隔热耐磨衬里脱落，将产生危险的后果而常常被迫停工，损失巨大。所以要重视如下三个问题：不断提高衬里材料的隔热耐磨性能（采用颗粒度更细且分布更合理的材质）；改进施工技术（整体浇铸是正在发展的一种方法）；加强监测（红外成像监测技术已应用成功）。此外，颗粒流体系统的高温蝶阀还没有很好过关，在高温下既要耐磨，又要快速灵活关闭与开启，要重视研制。

4. 要针对性地开展设备寿命监测及故障诊断新技术——大型回转机械的振动监测与故障诊断已逐渐从传统的快速傅里叶变换的功率谱分析法发展为最新的全息谱分析，可获得每阶频率分量上的振动形态，诊断更全面更准确。最近又建立了基于模糊神经网络的 HL 故障检测系统，效果更好。装置越大，对机组稳定性的要求越高，随着计算技术和控制理论、电子技术等的发展，转子系统振动的主动控制技术取得了实质性进展，应用日广。昂贵的高温炉管、临氢管道系统、大型高压球罐、厚壁高压加氢反应器等的使用寿命预测

和延寿技术更是十分重要的问题，许多新技术如定量全相技术、声发射技术、概率断裂力学评定技术、模糊综合评判与决策技术以及人工神经网络、专家系统等的引入，将大大推进这方面的工作。

#### 四、重视开发新型三废处理装备技术

石化工业的三废治理是个量大面广的重大问题，展望 21 世纪，必须重视开发一系列高效而造价低的环境友好工艺与装备。

1. 大气治理方面主要是三个方面：减少  $\text{NO}_x$  的排放（采用新型低  $\text{NO}_x$  燃烧器，开发封闭式的地面火炬系统）；减少  $\text{SO}_2$  排放（采用高效低压降的湿式洗涤器，采用干法吸附等）；减少颗粒物的排放（开发更高效旋风分离器、过滤器及电除尘器等使气中含尘浓度降到  $30 \sim 35\text{mg} / \text{Nm}^3$ ）。

2. 污水治理是个严重问题，工艺用水的循环回用又是个重大的节能问题，必须大力开发一系列新的高效水处理装备与技术，如采用高效旋流器去除污水中油滴及其它杂质，采用微孔气泡环流器将水中污物浮选除去，采用各种膜过滤器，开发生物处理系统等。

3. 废渣处理也应及早提到议事日程上来。如废塑料与废轮胎的处理，废催化剂的再生或做成建筑材料，用气化工艺处理油泥等，都需要开发一批新的装备。

#### 五、新的化工过程技术

化工过程技术是石化装备的基础，两者不可分割，所以新的化工过程技术的开发必将创造出新的高效装备，展望 21 世纪初，试举几个例子加以说明：

1. 膜分离过程——膜分离技术是正在大力发展中的新技术。它能有选择地透过或输送特定的物质，使复杂系物质群的分离变得操作简便、流程短、耗能少、无污染，所以受到人们极大的重视。典型的如国内新近开发成的中空纤维膜分离器，可将气体混合物中的氢有选择地分离出来，改变了传统的变压吸附或深冷分离等庞大复杂的装备，大大节约了能源消耗。这样，高炉气中含有的氢、合成氨弛放气中含的氢和催化裂化干气与催化重整排放气中含氢等等均可有效地回收，经济效益是十分可观的。又如具有聚二甲基硅氧烷结构的膜可将空气中 20% 氧浓集成含氧高达 33% 的富氧空气，用来再生催化剂，可大大减少石化装置的能耗。当然，要大量推广应用这种新技术，还有许多问题急待解决，其中主要一个就是通过膜的气体（或液体）负荷要能达到经济规模。

2. 生物化工过程——在生物作用下进行化学反应以代替传统技术，可大幅度降低生产投资与成本，甚至可将一些在高温高压条件下才能进行的化学反应变为在常温常压下也能进行。典型的如最近美国能源生物系统公司推出生物脱硫技术，在中温常压下，用酶从石油中脱硫，据称可比传统的加氢脱硫可节省总费用达 50%。用生化技术脱除水中油污及其它污染物的废水治理新技术也正在大力发展中。当然，这里要解决好特种菌种和低浓产品的提纯问题。同时，生化反应器内两相流动形态与接触形态是至关重要的，也需专门做深入的研究。

3. 动态过程——大工业生产往往力求采用稳态操作过程，这是传统做法。但实际上有时动态过程操作可获得更好的效益，如气液环流反应器，若

使气体流向与流速按脉动方式操作，反可使传质系数提高 10~20%。许多传热过程若以流体脉动方式进行操作，可有效提高其传热效率，防止结垢。当然，这里要解决好产生流体脉动的技术与装备，还要研究脉动过程强化机理以形成新的设计方法。

4. 多个过程的集成化技术——最典型的例子是反应过程与蒸馏过程在一个设备内集成，利用反应过程的放热提供给蒸馏过程的需热，使之节能，提高过程效率。已工业化成功的是异丁烯与甲醇合成 MTBE，是一种提高汽油品质的添加物。再如氧化反应过程用膜反应器，可将反应与分离过程结合在一起，用膜优先通过氧的特性来加快反应，简化产品分离。这类多个单元过程的集成技术正在大大开阔人们视野，不断推出新的化工过程及相应的新装备。

5. 计算化学工程技术的发展——计算机技术的发展使传统的化学工程将从目前宏观或亚宏观水平，逐步提高到分子水平再综合为大系统水平，如发展分子水平的过程预估，分子设计技术，复杂大系统模拟放大及优化技术等。这意味着将来可将实验室结果一步直接放大到工业生产，而不需经过层层中间放大试验，大大缩短科研成果转化为生产力的周期，大大节约投资，前景不可估量。

以上只是从五个不同的方面概述了今后石化工业发展对装备技术所提出的要求，由此可看到研究石化装备技术的重要性和它的艰巨性。在大力推进新型高效装备开发的同时，必须重视有关化学工程与装备的基础性研究工作和重视用高新技术来改造传统单元过程的开拓性研究工作。这好比是两个轮子，只有这两个轮子运转得协调，新型高效装备开发这个主体才能得到飞速地甚至是跳跃地前进。当然，从石油化工生产的总体上看，装备技术的研究开发必须密切配合以催化剂为核心的新工艺方法的开发，工艺是装备开发的推动力，往往为新装备提出要求，而新装备又为先进工艺的实施提供必需的条件，两者相辅相成，密不可分。我们应正确处理好这几方面的关系，统筹协调，针对国情，争取开发成功若干个中国独特的石油化工成套技术，21 世纪初在世界上占有一席之地，强我国家之综合实力，扬我中华民族之雄风。

## 银盐照相和电子成像体系的新进展

邹竞

化学工业部中国乐凯胶片公司

邹竞 女，感光材料专家。1936年2月9日出生于上海市。1960年毕业于前苏联列宁格勒电影工程学院，获工艺工程师称号。现任中国乐凯胶片公司高级工程师。1994年被选聘为中国工程院院士。主要从事我国乐凯彩色胶卷的研制。

100多年来，照相术一直是以卤化银感光材料为基础发展起来。今天，照相术不仅是文化娱乐生活中不可缺少的组成部分，而且已被广泛应用于人类生产、科技和社会活动的各个领域。经过一个多世纪以来，特别是近20年来的不断改进完善，卤化银感光材料已成为一种具有灵敏度高、记录频谱范围广、信息容量大和影像质量优异的信息记录材料。现代卤化银感光材料以彩色照相感光材料为代表，取得了巨大的进步。彩色胶卷已初步实现“高感微粒”的目标，形成了感光度为ISO25、100、200、400、800、1600、3200的系列配套产品。彩色胶卷的分辨率已可达到160线/毫米，还出现了以柯达EKTAR25彩卷为代表的“无颗粒”彩色胶卷。彩色相纸已实现高温快速无水洗加工，整个湿加工过程从8分半缩短到了3分钟，并取消了通常必须的最后水洗工序，使加工过程对环境的污染减少到最低程度。与此同时，随着电子技术、数字化技术和计算机技术在影像领域应用的迅速发展，形成了新的电子数字成像体系，从而对传统的卤化银照相体系提出了严峻的挑战。成像技术正处于大发展和大变革时期。新的成像方法和记录介质正不断涌现，从而构成了化学成像和电子成像互相融合的多媒体成像体系。

### 一、电子成像技术的兴起

80年代初日本索尼公司率先开发成功第一台电子相机，在电子行业和照相业界引起了巨大的轰动。随后松下、卡西欧、佳能、奥林巴斯、富士等公司也都推出了各自开发的同类产品。Mavica相机是磁性录像技术在照相领域中的应用，因此后来统称为静态视频相机。其基本过程就是将光信号转换为电信号、电信号再转换为磁信号，然后记录在特制的软磁盘上。在这一过程中，以光电耦合器件（CCD）作为影像传感器，以软磁盘作为影像记录载体，取代了普通光——化学照相过程中所必须的银盐感光材料，从根本上省却了银盐感光材料曝光后所必须进行的复杂繁琐的化学加工。由于静态视频照相具有简便、即时和易于实现远距离传输等特点，因此首先在新闻报导中得到了应用。

电子成像的质量主要取决成像器 CCD 的结构特性，CCD 的像素愈多，所记录影像的分辨率就愈高。80年代电子相机中所采用 CCD 的像素尚只能达到40万，其影像质量远远达不到普通银盐照片的质量。进入90年代以来，随着 CCD 结构特性的不断改进以及影像数字化技术的发展，电子照相由模拟记录向数字记录发展，数字相机应运而生。

数字相机可由普通单反 SLR 相机的机身配上特殊的数字机背组成，数字机背中包含有 CCD 成像器和影像数据存储器。例如柯达 DCS420 数字相机就是

采用了尼康 N90 相机的机身，配上 1.5M 像素 CCD 的数字机背，带可卸硬盘，最多可存储 50 幅彩色数字影像，每幅影像可达 154 万像素。1995 年柯达公司投放市场的 DCS465 数字相机，仍采用尼康 N90 相机的机身，但配上柯达公司开发的性能最优的 6M 像素的 CCD，使每幅影像可达 600 万像素。DCS465 数字相机的成像质量已很接近银盐彩色感光材料，但其每台售价高达 3 万美元，这就限制了其推广应用。

化学成像与电子成像的特性比较如下表所示。

化 学 成 像	电 子 成 像
1 . 卤化银晶体具有集传感器、存储介质和影像再现于一体的功能。拍摄后需经繁琐的化学加工过程才能获得影像。对环境有污染。	1 . 传感器与贮存器分离的，影像信息贮存介质可多样化。即时获得影像并可迅速进行远距离传送。尤其是数字影像在传送或复制过程中不会失真。易于对影像进行修改、优化、剪裁、叠加校色等加工处理。
2 . 影像耐久性好，可作永久性保存。	2 . 磁盘与光盘均不能作永久性保存。
3 . 量子效率低 1 %	3 . 量子效率高 20%
4 . 灵敏度 ISO1000	4 . 灵敏度 ISO100
5 . 分辨率 $20 \times 10^6$ pixel/frame	5 . 分辨率 $1.0 \times 10^6$ pixel/frame
6 . 价格低	6 . 价格昂贵

从以上特性对比来看，两种成像体系各有所长，因此将它们合二为一，各扬其长，互为补充，组成兼有这两种成像体系优点的新体系是势在必行，也是未来 21 世纪影像技术发展的方向。

## 二、传统照相与电子成像的结合

近年来，照相 (Photo - graphy - 以光作画) 一词已远不能包含电子成像的概念，而被成像 (Imaging) 一词所替代。传统的化学成像与新兴的电子成像的相互结合，进行转换、处理、输出，形成了崭新的多媒体成像体系。

多媒体成像体系的核心是包括计算机硬件和软件在内的影像处理系统 (也被称作电子暗房)。它具有对多种原始影像载体，如银盐底片、照片、磁带、磁盘、光盘、半导体存贮卡等进行相互转换、修复、校色、合成创新以及进一步扩展的功能。通过计算机加工处理的影像既可以在屏幕上显示，称之为软拷贝，也可输出到各类打印设备，以得到可供观赏的实物图像，即称之为硬拷贝。在多媒体成像体系中，实现最终影像输出的彩色硬拷贝设备是十分重要的组成部分，而且已在全球拥有销售额达几十亿美元的不小的专业市场。除银盐彩色扩印机外，目前应用最广的彩色硬拷贝设备是喷墨打印机、激光打印机、染料热转移打印机以及热显像拷贝机等。

彩色喷墨打印机是把彩墨液滴通过微小的喷嘴直接向专门的接受纸上喷射成像。

由计算机加工处理后的图像信号源施加于喷墨控制电极，从而使带电荷的墨滴喷射到记录纸上 (不带电荷的墨滴回流后再予使用) 完成图像记录。喷墨打印的优点是属于非接触打印，易于实现高速、大尺寸、多种材料 (纸、薄膜、织物等) 的影像打印而且成本低。缺点是喷墨易受彩墨质量、环境影响而不够稳定，彩色表现尚不够鲜艳。

染料升华转移拷贝机的工作原理，是利用感热作为记录手段，使受热色带上的升华染料转移到受像层上，固定下来形成影像。

计算机加工处理后的信号源控制感热头的通电量，即其发热量，以控制染料的升华转移量，从而实现影像的阶调变化。为实现彩色化，根据减色法原理必须依次将黄、品、青三色精确重叠转移到同一部位。染料升华型热转移记录所得到的图像，清晰度高、彩色鲜艳饱和。缺点是拷贝尺寸受到限制，而且染料专用色带及专用接受纸的成本较高，因此主要适合对高画质要求的图像制作。

由于多媒体成像体系具有多种功能，不仅在专业摄影，而且已开始工业设计、广告宣传以及印刷出版等行业得到愈来愈广泛的应用。当然，这一体系本身还在继续完善和发展。

### 三、卤化银照相体系的新进展

面对电子照相迅速发展的严峻挑战，卤化银照相技术本身也在大力进行技术创新，以便在未来的成像体系中继续保持其应有的地位。目前卤化银照相体系正向两极化方向发展：一方面是向结构简单、操作方便、价格低廉的一次性相机，又称带镜头胶卷发展；另一方面又在向自动化、智能化程度更高、功能更多的新型高级照相系统发展。

#### 1. 一次性相机脱颖而出

自 1987 年日本富士公司率先推出一一次性相机以来，这种结构简单、携带方便、价格便宜而质量又不错的新机种已脱颖而出，风靡全球。据统计，1995 年全球销售的一次性相机约为 1.5 亿架（其中日本 7000 万架，美国 5000 万架）。以每架平均 10 美元计，销售金额可达 15 亿美元！这对近年来不太景气的全球照相市场，可是个不小的震动。

一次性相机看似简单，实际上它是高科技发展的综合成果。据称，当初富士公司组织了包括光学、照相机、工业设计、胶卷制造和市场销售等方面的 10 名专家组成产品开发小组，经过长达 10 多年的潜心研究，才完成了这一产品的定型设计并推向市场。一次性相机的技术关键是高质量的光学塑料镜头、简易精确的拍摄快门、高感微粒彩色胶卷，还有精密的模具设计和注塑工艺。

90 年代以来，一次性相机继续向微型化、系列化、多品种化方向发展。除常见的带闪光灯和不带闪光灯的简易型外，还有远摄型、近摄型、全景型、防水型以及立体照相专用型等多种型号，以适应不同摄影使用要求。另外，向小型化、薄型化方面也取得了很大成功。1993 年底柯尼卡推出的 Mini 型一次性相机的外形尺寸为  $91 \times 54 \times 23\text{mm}$ ，不带闪光灯简易型的重量只有 63 克（带闪光灯型的重量为 106 克）。

为适应一次性相机镜头孔径小（一般为 F10）及快门速度固定（一般为  $1/100$  秒）的特定条件，要获得高质量的照片，必须选用感光度为 ISO400 的高速彩色胶卷。而近年来富士公司已推出内装感光度为 ISO800 超高速彩色胶卷的新型一次性相机。这种相机还采用了含非球面 2 组 2 片的塑料镜头，以减少畸变像差和倍率色差，进一步提高了成像的质量。为了适应环境保护和资源再生利用的要求，一次性相机的结构、选材也做了相应的改进，一次性相机机身的回收利用率现可达 98% 以上。

目前，一次性相机的销售主要集中在美国和日本，随着时间的推移，必

将在其它国家和地区得到推广。人们有理由相信，一次性相机有着良好的发展前景。

## 2. 高级照相系统 (APS) 问世

近几年来，一直被宣传得沸沸扬扬的高级照相系统终于在 1996 年 2 月份于美国拉斯维加斯市举办的第 72 届美国照相贸易展览会上正式登场亮相，从而揭开了其神秘的面纱。

APS 突破了从本世纪初就确定的 35mm 宽度的胶片规格，摒弃了使用已有 60 年历史的 135 胶卷暗盒，而采用了新的 24mm 宽度胶片和小规格的塑料暗盒。这样为设计更小巧灵便的相机提供了有利条件。新暗盒是无牵引片头外露的全封闭特殊结构。暗盒内有胶片送出机构，一旦暗盒装入相机或冲洗机，胶片就会自动输出到位。这种结构设计省却了装卷程序，可以完全避免因装卷不慎而带来的拍摄失误。拍摄结束后或冲洗结束后，胶片仍返回原暗盒中保存，以防底片的损坏、丢失。暗盒上有明显的标志，标明暗盒内的胶片是未曝光、部分曝光、还是已拍完但未加工或已冲洗加工等不同状态，以防止不应有的误操作。

APS 拍摄画幅有三种尺寸规格：标准 (C) 型为 16.7mm × 23.4mm (面积为 135 规格 24mm × 36mm 的 45%，纵横比相同为 2:3)；加宽 (H) 型为 16.7mm × 30.2mm (纵横比为 9:16 与 HDTV 相接近)；全景 (P) 型为 9.5mm × 30.2mm (纵横比为 1:3)。胶卷长度有 15 张——780mm、25 张——1090mm 和 40 张——1570mm 三种规格。APS 胶卷应用了聚对苯二甲酸乙二酯 (PEN) 作为片基材料，较目前所采用的三醋酸纤维素酯、聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 有更好的物理机械性能，以减薄胶卷厚度，增加暗盒的容纳量并确保胶卷有良好的卷绕，传输和展平等特性。

APS 胶卷与常规彩色胶卷的最大区别，在于其背面涂有透明的磁性记录层，这是卤化银信息记录材料和磁信息记录材料相结合的新尝试。这样，摄影者可以通过 APS 相机上的磁记录系统对每幅画面的拍摄条件在胶卷的磁层上作出记录。这些信息数据可以对自动冲扩机发出相应的指令，指导扩印加工。通过磁性记录层可以实现拍摄者和胶卷，胶卷和洗印加工之间的信息交流 (IX)，使胶卷从拍摄到洗印加工始终都处于受控状态，从而保证最终获得高质量的照片。磁记录层的功能有待进一步扩展，例如记录声音，以及其它特定信息，使 APS 与多媒体成像系统实现直接对接等。

APS 的革新包括胶卷、相机、冲扩设备整个体系，是一项系统工程。据柯达公司称，为了开发 APS 新产品。曾经历了 10 年的时间，向 22000 多名专业和业余摄影者进行了调查询问，并投入了近 10 亿美元经费。柯达公司接受过去独自开发圆盘照相系统并不成功的教训，为了减少开发风险，柯达公司最后决定与日本最著名的胶片和相机制造公司，即富士、尼康、佳能、美能达联手共同成为 APS 的五家倡导者，统一制定技术标准，统一开发进度和上市销售日期。随后，爱克发、柯尼卡胶片公司和全世界几十家相机厂和扩印机制造厂也都获得了 APS 产品的生产许可，以便在世界范围共同推动 APS 的市场发展。

由于 135 传统照相已有 60 多年的历史，目前有 3 亿多台 135 相机在使用中，人们自然十分关心 APS 的发展前景。柯达公司对 APS 的市场前景是十分乐观的，认为 APS 产品在美国上市后，其销售量将会在一年内达到美国照相市场销售量的 10%。阿克发公司预测，到 2000 年全世界胶卷的需用量约为

34 亿卷（1995 年为 28 亿卷），APS 将占到 20%。因此，认为 APS 很快会完全取代传统的 135 照相体系，也是不符合实际的。APS 的命运究竟如何，最终将由市场来裁断。

#### 四、结束语

当今成像技术正处于大变革中，新技术、新产品不断涌现，推动着世界照相市场的持续稳步发展。传统的光 - 化学照相体系和新兴的电子数字成像体系各有自身的不可替代的特点。以一种体系完全淘汰另一种体系是难以实现的，使两者紧密结合取长补短的多媒体成像体系是今后发展的必然趋势。多种成像技术手段的竞争，优胜劣汰，必将大大促进成像质量的提高和成本的降低，进而推动成像技术应用领域的扩大。根据不同的应用要求，必然要求图像记录材料的多样化。国外已开发成功的许多有市场前景的新产品，在国内尚属空白，有待我们去探索、去开发。

照相成像材料是高科技产品，必须要有大的技术和资金的投入。全面出击，什么都搞，显然力不从心。我们应根据国情和实力，量力而行。当前集中必要力量，加速一次性相机（包括 ISO400、ISO800 彩色胶卷和相机）、喷墨打印材料、热转移成像材料等的开发是必要的也是可行的。

总之，随着成像技术的发展，银盐照相材料和新型电子成像材料定将相应地得到发展并且有着广阔的市场前景。



# 面临国际市场挑战的 我国钢铁工业

张寿荣

武汉钢铁集团公司

张寿荣 钢铁冶金专家。1928年2月17日出生于河北省定县。1949年毕业于天津北洋大学。曾任武汉钢铁集团公司总工程师、副经理，现任该公司科协主席、高级工程师、兼职教授。并曾任中国质量管理协会副理事长，现任中国材料研究学会副理事长、国际继续工程教育协会副主席。1995年当选为中国工程院院士。主要从事冶金高炉建设等方面的研究。

迄今为止，我国钢铁工业一直是依靠国家政策的保护发展起来的。就是国家实行进口许可证制度和用征收关税的办法，控制国外廉价的钢铁产品进入国内市场，从而保护了发展中的我国钢铁工业，使之在少受外来干扰的环境中依托国内市场需求的的增长而迅速发展起来。但是，在国际贸易中，要讲对等互惠原则，限制别国的产品进口，自己的产品出口别国也将受到限制。随着我国经济发展到现在的水平，继续设置贸易壁垒已经弊大于利，加入世界贸易组织已成大势所趋。参加世贸组织就意味着国外产品要享受国内待遇，就是和本国产品一样的待遇，所有进口商品的关税国际上一般只是3%~5%，而且像许可证等非关税壁垒都要取消，就是说要搞自由买卖。到那时候，中国的钢铁工业就要真正面对国际市场。从受到贸易保护到参与国际市场竞争，这对于我国钢铁工业来说是一个重大的转变。面对国际市场，中国钢铁工业怎么办？

## 一、80年代以来，我国钢铁工业发展速度举世瞩目

我国钢产量由1980年的3712万吨增到1994年的9220万吨，进入世界第二位，花了14年时间，平均每年增产钢392万吨，是这一期间世界上钢铁工业发展最快的国家。就世界范围来讲，自70年代后期以来，全世界钢的总产量徘徊在7~7.8亿吨之间。就是说世界钢的需求量保持在这一范围内，最低7亿吨，最高还没有超过8亿吨。

但是，不同国家和地区状况不同，工业发达国家钢产量下降或基本稳定，前苏联和东欧国家下降，新兴工业区及第三世界增加。

实际上从80年代到90年代，西方资本主义国家钢产量已经从最高水平上掉下来：日本最高产量是1.2亿吨，可现在是0.9~1亿吨这个范围；美国最高产量曾达到过1.2亿吨，可现在是0.9到1亿吨之间，有时还不到9000万吨；欧洲共同体1985年是1.35亿吨，1994年是1.38亿吨，变化不大。下降最多的是前苏联和东欧国家，而增长快的是中国、韩国、亚洲和中东地区。80年代以后，前苏联和东欧由于政治不稳定，解体以后工业受到严重影响，生产下降很厉害，钢的需求量减少，所以产量大幅度下降。发展中国家钢产量增长快，是由于这些国家有一个共同点，它们的工业基础差，公共基础设施都不行，要建铁路、高速公路、修机场，要搞很多工业和民用基本建设，这都需要钢材，所以这些国家钢的需求量是增长的。而发达国家，它们已做了这些基础工作，它们现在的消耗主要是生产性消耗，所以对钢材的需

求量基本保持稳定。从世界范围来看，由于不同国家、不同地区政治经济情况千差万别，钢产量有的衰减、有的稳定、有的增长，但全世界总体波动不大。

那么，钢铁工业发展的前景到底怎样呢？人类社会发展到今天，经历了新石器时代、青铜时代和铁器时代。到今天为止，钢铁仍然是人类制造生产、生活工具的主要材料。美国未来学家托夫勒写了一本书，叫做《第三次浪潮》。书上说，人类社会的发展，经历了三次浪潮的冲击，第一次浪潮是农业革命，第二次浪潮是工业革命，现在迎来了第三次浪潮，叫做信息革命。关于信息革命的观点是对的，但是信息不能代替材料。尽管近年来开发出了许多种性能优良的新材料，但到现在为止，在所有的新材料中，还没有哪一种新材料在用途、价格等方面能同钢竞争。而且由于受地球资源的限制，选其它的材料非常困难，可是，铁是地球上蕴藏最丰富、最容易得到的物质，且可以回收。所以到 21 世纪主要的材料还将是钢铁。过去一段时间，曾经说钢铁工业是夕阳工业，正在走向衰退。这种说法主要是受了未来学派的影响。在这方面，美国人是吃了亏的。他们曾经认为钢铁工业是夕阳工业，舍不得花钱去更新设备、开发新技术，光搞新兴产业，结果钢铁工业技术落后，在同日本的竞争中就失败了，弄得所有的钢铁厂、汽车厂全亏本。最后他们终于头脑清醒了，赶快抓基础产业、抓制造业，所以这几年美国的汽车、钢铁又都上来了。美国的汽车产量去年又超过了日本。就是说，花了 20 年的时间才在这方面翻了身。所以，一个错误的观点往往会影响整个工业，它的后遗症是很厉害的，造成的损失很大。这是说钢铁仍然是现代工业的主要材料。据专家估计，到 2000 年，全世界钢材需求量大概是 8 亿吨。2000 年以后，有几个估计，一个是每年增长 0.9%，还有的估计是 1.9%、2.0%。21 世纪，由于发展中国家的经济都将不断发展，全世界对钢材的需求量仍将是增长的。如果按 0.9% 的增长率来计算，那么到 2001 年，全世界钢材需求量大概是 8 亿 1 千万吨，所以，钢铁工业还是很有作为的。但像近年来我国钢铁工业发展之快，的确令世界瞩目。

## 二、我国已是钢铁大国，但不是钢铁强国

1994 年我国产钢 9220 万吨，仅次于日本而居世界第 2 位，而生铁产量则居世界第 1 位。钢铁生产达到这样的规模，堪称世界钢铁大国。但大国并不意味着是强国。为什么这么说呢？有下面一些理由。

### 1. 产品结构（品种、质量）不能满足本国经济发展的需要

80 年代，前苏联粗钢产量是 1.6 亿吨，居世界第一位，但有些东西它不能生产。苏联位于寒带地区，西伯利亚用的超低温用钢材，像高压油管、天然气输送管和桥梁、车辆用钢等，它都不能生产，每年都得进口。产钢 1.6 亿吨的世界第一个钢铁大国苏联，还得向当时产钢 2000 万吨的法国、4000 万吨的西德和 1 亿吨的日本买钢材。不买还不行，自己满足不了。这说明什么问题呢？就是说虽然是大国，但不是强国，所以还是离不开别国的钢材产品。现在我国产钢是 9000 多万吨，我们也有很多东西不能生产，特别是某些关键的钢材品种不能生产，或质量、数量不能满足要求。比如，井深 3000m 以上的石油管可以自给，但 3000m 以下的不行，得靠进口；高压锅炉管也靠进口；汽车用钢我们现在能自给自足的是卡车、载重汽车用钢，国产小轿车用钢板质量、品种都不行；发电站锅炉用钢，我们自己不能满足需求。我们

建原子能电站，它的高压锅炉的管道是 80~100mm 厚的不锈钢管，这种钢管国内生产不了，要从法国进口。大变压器、大电机用硅钢国内只有武钢生产，根本不能满足需求。宝钢现在仅满足桑塔纳汽车用钢就有相当大的困难，更不用说提供新一代的汽车板了。还有某些家电用钢、舰船用钢，我们也不能生产。所以，我国产钢 9000 万吨，还要进口钢材，这种情况，和前苏联是相类似的，主要是产品结构还不完备，品种、质量不能满足要求。1996 年上半年是中国的钢铁厂日子最不好过的时候，产品销售很困难，都希望能出口，能生产的坚决不进口，可 1~7 月份还是进口了 700 多万吨钢材。主要是进口棒材（不是建筑用的棒材，是机械工业用的棒材，即低合金钢或合金钢棒材）、特殊要求的型材、板材，还有异型材，这些非进口不可，自己满足不了。在国内钢材已经滞销的情况下，7 个月进口 700 多万吨，一年就是 1000 多万吨，所以我们的钢材进口比例也不算小，自给率不高。

## 2. 技术经济指标落后

(1) 能耗。我国钢铁生产能耗高，不管是炼铁焦比和其它工序能耗都远高于国际先进水平，结果我国产 1 吨钢的综合能耗达到 1.5 吨标准煤，而在日本，生产 1 吨钢的综合能耗还不到 700kg 标准煤，就是说中国产 1 吨钢所用的能源相当于日本的 2 倍多，所以这项指标相当落后。

(2) 物耗。我国钢铁生产各工序材料消耗高、钢的成材率低。像日本，由于推进了全连铸新工艺，全国平均成材率已经达到 95%，而我国，武钢算比较好的，才 86.7%，全国重点企业平均计算大概是 82%~83%，和日本比差距很大。日本 1973 年最高产钢 1.2 亿吨，当时钢的成材率是 80% 以上，那时候日本生产的钢材还没有它现在产钢 9000 万吨时多。现在多生产的钢材都是靠提高成材率得来的。可见，提高成材率对增产钢材是有很大的潜力的。

(3) 劳动生产率。80 年代末，日本的钢铁厂全员劳动生产率一般是 500 吨钢/人·年，欧洲很多厂也是 400~500 吨钢/人·年，中国平均是 20 多吨钢/人·年。武钢 12 万人，产钢 500 万吨，人均劳动生产率是 40 多吨钢/人·年，比全国平均水平高。宝钢全员是 3 万多人，去年年产钢 600 多万吨，人均 200 多吨钢，是全国最高的。实际上，劳动生产率的差距是我们和西方国家差距之中最大的。

(4) 设备寿命、作业率。我们现在的设备寿命、作业率也比别人低。以高炉为例，我国高炉一般每 2~3 年就要停炉中修，而国际上高炉炉役的标准水平是 80 年代连续生产 8~10 年，现在是 15~20 年。日本一座高炉已连续生产了 17 年，现在还在继续生产。我们在这方面的差距也是很明显的。

## 3. 环境污染严重

不仅指标落后，环保方面的差距也大。烟尘、废气、废渣、废水严重污染环境。尤其是我国还有大量的小焦炉、小高炉，是以环境污染作代价来取得铁的。西方国家对环境污染控制得很严，而我们在有些地方对这个问题还没有引起足够重视。

## 4. 我国钢铁工业的特点是多层次并存

我们炼铁的高炉是大中小并存，炼钢是平炉和转炉并存，在转炉中也是大中小并存。平均炉容 952m<sup>3</sup> 的较大高炉产铁量仅占全国生铁总产量的 56.5%，而 >120t 转炉的能力还占不到 50%。

这种大中小并存的状况，实际上是不同技术层次的反映。目前，在我国真正代表 80、90 年代水平的大型高炉、大型转炉还为数不多，大多数中小型

高炉和转炉只达到国际上 60、70 年代水平，有的甚至还基本上停留在 40、50 年代水平。

轧钢技术装备也是多层次并存。我国有热宽带轧机 89 套，但真正具有 60 年代末、70 年代初以上水平的只有 5 套。线材轧机 106 套，属于 70 年代以后水平的只有 13 套。在无缝钢管轧机中，真正的连轧机组只有 3 套。

由于各层次技术、装备水平不同，生产指标也不一样。我国三个层次高炉生产指标除利用系数一项不相上下以外，其余指标都是第一层次优于第二、三层次，尤其是其中最重要的一项——焦比，大高炉比中小高炉要优越得多。我国钢铁生产技术经济指标落后，在很大程度上是同这种三个层次并存的局面分不开的。

出现多层次并存的原因在于我国钢铁工业实行大中小并举，以老厂改造为主的方针。在过去的 14 年间，我国钢产量增长了 5438 万吨，相当于 8 个宝钢的产量。如果建新厂，则需投资 2597 亿元。而实际上从 1976 年到 1992 年为止，整个钢铁工业的基建总投资为 829.24 亿元，更新改造总投资 722.43 亿元，共计 1551.67 亿元，约为全部建新厂投资的 60%。而且即使全部建新厂，我国钢铁工业也只能有 60% 的能力的是现代化的。用一分为二的观点看，要高速发展钢铁工业，只能走老厂改造的路。但必须看到其不足之处，认真对待。也就是说，第一步只能达到钢铁大国，要真正变成一个钢铁强国，我们下一步的技术改造任务还很重。

### 三、我国钢铁工业面临的挑战

我国钢铁工业总体上能耗高、消耗大、产品质量差、劳动生产率低。可是，我们虽然有这些弱点，这些年为什么还能发展呢？主要原因有 4 个：一是国内经济发展快，需求量大，这对钢铁工业是一个很大的推动力；二是原燃料价格低，比如煤，我国原来是 100 多元一吨，而国际上的炼焦煤一般是 60 多美元一吨，这是发展钢铁工业的一个很有利的因素；三是劳动力成本低（工资低），例如在 80 年代以前，武钢的成本中，劳动力成本不到 4%，而工业发达国家，像日本、欧洲、美国，炼一吨钢的工资成本是 100 多美元，占 20%~30%，现在武钢职工工资增加了，大概占总成本的 8%~10%，和国际上比，工资还是低水平；四是国家政策保护，主要是实行进口许可证制度和提高关税。今后，这四个方面的因素将发生变化：

1. 国内市场对钢材的需求将向高档化发展。我国原来的工业比较落后，机电设备不需要用高档的钢材制造。像武钢硅钢厂，在投产的初期，生产出来的冷轧硅钢片销售量很少。因为当时我国所有的电机厂都是按热轧硅钢组织生产的，如用同样的模具用冷轧硅钢制造电机，成本就会高很多，而它的产品不需要用这么好的材料做。要使用冷轧硅钢，必须减小电机体积，要改设计和模具。可现在就不同了，我国许多制造厂引进了新的生产线，按国际标准生产产品，需要高性能的硅钢，所以武钢冷轧硅钢厂产品成了全国最俏销的钢材之一。现在冷轧硅钢与热轧硅钢价格拉得很大，去年冷轧取向硅钢出厂价不过 1 万元/吨，但在市场上炒到 1.7~1.8 万元/吨。就是说，国内市场也是会发生变化的，因技术进步与增加出口的需要，质量达到国际水平的高档钢材将大幅度增加，而低档钢材的需求量将减少，出现高档钢材紧缺与低档钢材滞销并存的局面。所以，今后并不需要普遍增产各类钢材，而是紧缺的增产，滞销的减产。

2. 原、燃料价格便宜的局面目前已部分消失，能源价格低的局面也将不复存在。因为我国贫矿多、富矿少，开 3 吨矿石才选一吨精矿，而其它国家，像澳大利亚、巴西，矿石品位高，露天矿开采出来就能用，不需要选矿，所以，我国矿山的劳动生产率比有些国家低得多。例如巴西的一个矿山公司，年产 1200 多万吨矿，人员一共只有 1400 人（包括生产、销售、各地办事处人员），生产人员不到 1100 人，1 人 1 年生产 1 万多吨矿石，劳动生产率非常高，而武钢矿山总人数是 2.8 万人，一年开采出来的矿石能生产精矿 300 万吨，按巴西的标准，矿山最多只需 400 人。这个比例悬殊太大，所以，我们的矿石成本非升高不可，下一步原、燃料便宜的局面就要消失。

3. 劳动力成本低的情况也将逐步消失。现在，我国职工的工资在逐年提高，而我国劳动生产率低，所以随着工资的增长，劳动力费用在产品成本中的比重将会逐步升高。

4. 国家政策保护的劣势即将消失。从我国经济发展与改革开放的形势看，参加世界贸易组织是大势所趋。到那时，许可证制度和关税壁垒将逐步取消。尽管参加世贸组织以后，对幼稚的民族工业还可以有一定年限的保护期，但我国年产钢 9000 多万吨，就不是幼稚工业了。所以，到那时，我国钢铁工业将直接参与国际市场竞争，如不采取有力措施，将有部分工厂面临倒闭，弄不好甚至可能部分行业全线崩溃，现在必须充分认识到形势的严峻性。

从总体上看，我国钢铁工业将面临以下几个方面的挑战。

#### 1. 新的工艺技术革命的挑战

自从 20 世纪初世界上出现钢铁联合企业以来，钢铁工业的发展就世界范围讲已经经历了两个阶段，目前正在走向第三个阶段。

本世纪早期的钢铁联合企业，即 30、40 以及 50 年代初钢铁联合企业的基本工艺流程：高炉（小）——平炉——铸锭——初轧开坯——轧钢。到二战结束后，世界经济开始复苏，各钢铁企业不断进行着技术开发，力图以增加设备能力、连续生产、提高速度为手段，达到大批量生产的目的。50 年代以后，世界钢铁工业出现了两个革命性的变化：一是氧气转炉的出现，它使炼钢工艺无论是生产率还是产品质量都上了一个大的台阶；另一个就是连续铸造的出现，使钢铁工业成材率提高了 10% 以上。这两项技术革命使世界钢铁工业的发展进入了第二阶段，出现了现代化的大型钢铁联合企业。其特点是设备大型化、连续化、高速化、氧气转炉代替了平炉，连铸代替了铸锭——初轧开坯，同时使用了计算机。60 年代以后，世界钢铁工业发展很快，也是和这套新工艺的形成分不开的。最明显的例子是日本。日本在第二次世界大战以前年产钢量才 700 多万吨，二战后钢铁厂遭到破坏，50 年代钢铁工业正处在恢复中，起步低，技术水平也不高。奥地利开发的氧气转炉技术实际上在 50 年代就已经成熟，开始向外出售这项新技术。他们首先到中国推销他们的专利，当时我国正在学苏联的平炉，没买这项技术。到日本，日本人就买了，并且很快在全国推广。连铸技术前苏联在 50 年代就进行了研究，但真正工业化搞得最早的是前西德。后来日本人也引进了连铸技术。所以，氧气转炉和连铸技术是使日本钢铁工业很快发展起来的两个关键技术。

下一步的趋势，除了继续进行技术改进，使工艺过程进一步完善化以外，正在酝酿着两个革命性的技术进步：一个是将高炉、烧结和焦化综合为一个工序，即熔融还原；另一个是把连铸和热轧合在一起，形成一种叫做“近终形铸造”的工艺。这是当前钢铁工业新工艺技术革命的两大热点，下面分别

进行说明。

### (1) 熔融还原和直接还原工艺

对于炼钢以前部分，将烧结、焦化、高炉综合为一个工序——熔融还原。

目前，世界各国正在进行试验研究的熔融还原方法很多，较出名的有十几种，国际上认为比较重要的有6种：

**COREX 法。**这是奥地利的专利，是在德国人研究的基础上搞成的。1980年完成方案研究，1985年前后建立了一套年产6万吨的试验装置，1990年在南非建成一套年产30万吨的工业生产设备，现在建的是为韩国浦项公司设计的一套年产80万吨的生产装置。

**Hismelt 法，又叫 CRA - Midrex 法。**于1982年建立了一个10吨的试验装置，1990年建立了一套年产10万吨的试验装置。

**DIOS 法。**1987年前由日本一家公司发起研究，以后参加研究的共有8家钢铁公司，并得到日本政府的资助。1988年建立了一个5吨的反应器，进行试验研究，1993年进行了日产500万吨规模的半工业试验。

**CCF 法。**这是目前在欧洲由意大利、荷兰、英国等国家合作研究的项目之一，参加的公司有埃尔瓦公司、霍戈文公司、英国钢铁公司等。现已完成方案研究，计划于1995~1997年建立两套每小时生产5吨熔融还原铁的试验装置。

**JUPITER 法。**也是目前在欧洲研究的一种方法，由德国蒂森公司和法国索拉克公司联合进行研究。现已完成方案研究，计划于1997年建立一套年产30万吨的示范装置。

**美国的 AISI - DOE 法。**这是一种直接炼钢法，是由美国钢铁学会与美国能源部合作投资1亿美元进行开发的。于1986~1990年确定方案，从1990年起用每小时生产5~10吨的试验装置进行试验，计划在1995年以后进行进一步的研究。

在各种熔融还原方法中，进展最快的是 COREX 法，目前在南非建立的一套年产30万吨装置已经用于工业生产，其它熔融还原法还没有达到工业生产的程度，而且生产的铁水含硫高，炼钢前必须进行脱硫处理。

COREX 法生产的产品——铁水的成分和温度都和高炉差不多。但是，COREX 法生产1吨铁水需耗煤1180kg，耗氧气609m<sup>3</sup>，消耗太高。而高炉，现在炼1吨铁的燃料消耗，一般是500kg左右，而且高炉生产能力大，一座大型高炉日产量可达到1万吨，这些是 COREX 法目前无法比拟的。以往认为，COREX 法与高炉法相比，最大的优点就是不需要焦炭，只用煤。但也不是什么样的煤都行，它对煤的品种、质量有要求。而且要求用好的块矿，哪有那么多好的块矿？天然块矿不够用，到最后只能用人造块矿，所以造块（球团）工艺还是省不了。

此外，同样是为了达到缩短工艺流程的目的，还在对各种直接还原工艺进行着研究开发。直接还原工艺实际上很早就有了。现行的直接还原工艺有煤基直接还原和气体直接还原两类。目前世界上应用直接还原法最成功，生产规模最大的是 Midrex 法用天然气还原的工艺。其它还有回转窑法、竖炉法、热压团块法等。用这些方法生产的海绵铁或金属化球团。再一个就是美国纽柯公司计划在特利尼达建立的生产 Fe<sub>3</sub>C 的工厂，也是属于直接还原一类的。它的产品含 C 大概是 6%~7%。他们准备用这种 Fe<sub>3</sub>C 来代替废钢。

尽管到目前为止，还没有任何一种方法能够取代高炉，但熔融还原、直

接还原工艺仍然是很有吸引力的，国际钢铁界都把它看作应付面临挑战的手段，花大力气进行着广泛、深入的研究开发。将来的目标是用直接还原或熔融还原工艺取代高炉炼铁，缩短钢铁生产流程。这一目标的实现将是钢铁生产中一次革命性的飞跃，现在这个技术革命的苗头毕竟已经出现了。

今后，熔融还原或直接还原工艺能否取代高炉，实现以煤（或还原气）和矿石直接炼铁，达到取消焦炉和烧结机、球团设备，缩短工艺流程的目的，还有待于对这些新工艺的进一步开发。熔融还原、直接还原工艺要取代高炉，燃料消耗必须降低、产品质量和产量必须提高，而要到这点，在今后必须有新技术突破。另一方面，高炉工艺本身也还在进一步完善化。总之，在面临挑战的形势下，炼铁方面存在着寻找一条可替代高炉的工艺路线和使高炉工艺本身进一步完善化两条工艺路线的竞争，竞争的结果将取决于这两条工艺路线今后各自的技术进步。

## （2）近终形铸造

炼钢以后的部分，下一步的革新是要把铸锭——初轧开坯——热轧粗轧——热轧精轧这些工序综合为一个工序，叫做“近终形铸造”。

现在，连铸已在世界范围内得到推广。薄板坯连铸在美国的纽柯取得了很大的成功，并在北美得到迅速发展。近终形铸造还处在试验研究阶段。

薄板连铸现在推行的有两套工艺。一个是 CSP 流程，铸出来的是 50mm 厚的薄板坯，经过均热炉，进精轧机，直接轧制成钢卷；另一个是 ISP 流程，铸出来的板坯先经过热轧机

（HRM），然后经过感应加热炉、钢卷箱，再进连轧机轧制成钢卷。实际上，现在发展最快的是 CSP，美国纽柯公司就是采用的这套工艺。

还有一个工艺，叫带钢铸造（Strip Casting），通过连铸直接获得带钢。不过，仍处于开发阶段。

带钢连铸的生产成本是很高。从建设投资费用方面看，按每吨产品计算，带钢连铸也并不比现在的常规连铸工艺便宜，只有薄板坯连铸单位产品基建投资最低，只是常规钢厂的 45% ~ 55%。就生产周期和管理费用来讲，薄板坯连铸和带钢连铸都比常规工艺强。但带钢连铸今后能否推广，还要看以后进一步的技术开发。

总的说来，在上述连铸连轧新工艺中，目前发展最快的是薄板坯连铸连轧新工艺（CSP）。美国纽柯公司按这套新工艺建立的两个薄板坯连铸连轧工厂已在正常生产，并且年产热轧板突破 400 万吨规模。由于缩短了工艺流程，与常规工艺相比，这种新工艺显示出巨大的优越性：投资省、建设速度快、劳动生产率高、成本低。

上面着重讲了世界钢铁工业发展的三个阶段。就世界范围而言，目前已进入第二阶段，并出现了新的技术革命的苗头，正在酝酿着向第三阶段过渡。我国钢铁工业是多层次并存的局面，除少数大型骨干企业已进入第二阶段以外，大多数企业实际上还处在第一阶段向第二阶段过渡的时期。为什么我国钢铁工业技术经济指标落后？为什么有的企业日子难过？根本原因就在于技术落后。在当今国际市场竞争中，是技术进步决定一切，人员素质决定一切，不加速对先进、成熟工艺的采用、掌握，不加速对新工艺的开发，将来我国钢铁工业在国际市场上就没有竞争力。

## 2. 资源不足的挑战

我国钢铁工业已达到年产钢 1 亿吨左右的规模，要支持这样庞大的钢铁

工业，我国自然资源的蕴藏量相对说来是不足的。下面对与发展钢铁工业密切相关的几项主要资源的状况进行分析。

#### (1) 铁矿石资源

同前苏联、澳大利亚、巴西、加拿大、印度、南非、美国等国家相比，中国的铁矿石资源相对贫乏，但目前我国钢铁产量却超过了这些国家，所以进口铁矿石是不可避免的。要进口矿石，就要花费大量外汇，要有外汇，就必须有一部分钢铁产品出口，而我国钢铁产品要打入国际市场，不依靠技术进步是不行的。

#### (2) 能源资源

中国主要能源资源的情况是：煤炭地质储量为 986.3 万亿吨，其中相当于世界能源委员会定义的探明储量约占 30%，探明可采储量为 114.5 万亿吨；石油资源量为 615~940 亿吨，天然气资源为 38~60 万亿  $m^3$ ，世界能源委员会估计分别为 32.6 亿吨及 1.127 万亿  $m^3$ 。

到 2000 年，我国煤的需求量是 14 亿吨，这有可能达到；油是 2 亿吨，这不可能达到。实际上，到 2000 年除了煤有可能满足需求外，其它的像油、气等都不够。所以，能源不足将是我国钢铁工业发展的限制性环节。

#### (3) 水资源

根据多年的统计资料，我国年平均降雨量指数为 648mm，比全球平均低 20%。年绝对降雨量为 6190 $km^3$ ，其中 56% 蒸发。河川年平均径流量为 2710 $km^3$ ，其中包括地下水补给量约 730 $km^3$ 。地下水资源约 830 $km^3$ 。我国年水资源总量约 2810 $km^3$ ，流入海洋和出国界约 2310 $km^3$ ，陆地水资源为 500 $km^3$ ，人均占有水资源 2730 $m^3$ ，仅为世界平均水平的 25%，居世界第 108 位，实际上属于缺水国家。而且我国水资源分布不均匀，南方多，北方少，北方为 14.4%，南方为 81.0%。在北方广大地区，人民生活用水都感到困难。随着人口的增加，水资源将更趋紧张。这也是发展钢铁工业的一个不利因素。

#### (4) 其它资源

在土地、耕地、森林、草原面积和淡水资源等关系到国计民生的几项主要自然资源的人均占有量方面，我国都远远低于世界平均水平。因此，如何最有效地开发利用和保护我国有限的自然资源，是摆在我们面前的迫切任务。长期以来，我们靠高投入、高消耗、多污染来换取经济发展的高速度，现在这种粗放型的发展方式再也不能继续下去了，必须转变到集约化的发展方式上来。

### 3. 市场经济对传统的计划经济管理方法、管理思想的挑战

市场经济要以市场需要为导向，要求生产的产品适销、对路，以加速资金周转，提高经济运行效率，而计划经济则是按政府主管部门制定的计划组织生产，不管市场是否需要。由于供求脱节，造成盲目上规模，片面追求产值、速度等弊端，结果产值、速度实现了，但产品卖不出去，库存增加，资金周转困难。我国工业企业产品质量差、技术进步缓慢、效率低下、人浮于事、机构臃肿等现象，都是与计划经济体制有关的。这种经济体制，完全不能适应今后参与国际市场竞争的需要。长期以来，我国学习前苏联的计划经济，已经形成一套完整的体系，现在要建立社会主义市场经济，由于牵涉到管理体制和思想观念的转变，所以决不可能很顺利，也决非短时期内可以完成的，必须花力气、花时间。

科学技术是第一生产力，要发挥第一生产力的作用，管理体制、管理方



法、管理人员的素质必须与生产力相适应，否则就会成为障碍。建立与社会主义市场经济和现代生产力相适应的新的管理体制，采用新的管理方法和提高管理人员的素质，是我们今后必须长期奋斗的目标。

#### 四、我们的对策

从总的情况看，自从党的十一届三中全会以来，我们国家经济增长特别快，钢铁工业的发展举世瞩目，这些成绩是伟大的。但是，我们同时也应看到不足之处，特别是在怎样和国际市场相适应的问题上。要改变现状，迎接挑战，最根本的是把我国的钢铁工业由粗放型（高投入、高消耗、低质量）追求规模、速度的发展方式，转移到集约型（低投入、低消耗、高质量）的追求质量效益的发展道路上来，把钢铁工业的经济增长转移到依靠科学技术进步和提高全员素质的轨道上来。我国钢铁工业发展的资源不足，但并不是不能发展。日本地方小、人口多、资源贫乏，但它能成为资本主义世界第二经济大国，靠的是先进技术和先进的管理。在现代经济的发展中，科学技术和人员素质是决定一切的。为了实现这一转移，我认为应重点抓好以下几个方面：

##### 1. 抓好现有钢铁企业的技术改造，实行企业改组和产品结构的调整

对企业产品结构的调整要从市场需求出发，使产品结构与市场结构相适应。考虑到我国国民经济的层次性，产品质量可以分成不同档次，分别满足不同的市场需求。但是，其中一部分企业的产品结构和实物质量必须达到国际先进水平，能够参与国际市场竞争，出口创汇；另一方面，满足国内市场对高档产品的需求。在国内市场上，钢铁产品（包括高档产品在内）的自给率要达到95%以上，我国钢铁工业才算真正强大起来了。只有国内需求量不大的产品才可以不生产，靠进口作为必要的补充。其它企业的产品结构也必须适应国内市场需求。国内市场也是在不断调整变化的，随着工业化的进展，对高档产品的需求将越来越多，所以一切企业都要不断改善产品结构，提高产品质量。根据目前情况要调整产品结构，就要对企业进行改组和技术改造。要根据产品结构要求，对工艺流程进行分析，找出薄弱环节，确定改造内容，据此制定切实可行的技术改造计划。

##### 2. 大力采用新技术，加速技术进步

对国内外成熟的新技术、新工艺，要大力推广、引进，并在此基础上进一步开发、创新，以提高产品质量，降低消耗，改善技术经济指标。如矿石处理技术、精料技术、高炉喷煤技术、长寿技术、炼钢工艺优化技术、高纯净钢冶炼技术、全连铸技术、轧钢工艺连续化技术等，应优先采用。这些先进技术的普遍推广，将使我国钢铁工业向现代化迈进一大步。

##### 3. 加强企业管理

重点抓好质量管理和设备管理。质量管理是企业管理的核心，因为企业是商品生产者，只有给用户提供优质的产品和服务，才能占领市场，取得较大的经济效益。设备管理也很重要，不使设备经常处于完好状态，企业就不能维持正常生产。现代化、自动化的设备对管理的要求更高。要建立有效的产品质量保证体系和设备管理体系，使设备处于完好，充分保证质量要求的状态。

##### 4. 增大科技投入，加强科研开发

科学技术是第一生产力，科技投资是最有效的投资。工业发达国家，如

日本，每年用于研究开发的投资占销售收入的 3% 以上，大钢铁企业都设有完善的研究开发体系。随着企业经济实力的增长，我国企业要逐步加大对科技开发的人力、物力、财力投入，建立健全研究开发体系，使企业真正成为应用研究和开发的主体。

#### 5. 加强职工教育，提高人员素质

要加强对企业职工的培训和工程技术人员的继续工程教育，建立企业内的终身教育体系，把提高全员素质作为迎接市场挑战的第一位措施。市场竞争是产品的竞争，而产品的竞争又是科学技术的竞争，科学技术的竞争归根到底是人才的竞争，企业以人为本。抓好了人员素质的提高，就是抓住了根本，就能够在今后的市场竞争中立于不败之地。

## 过程的放大与优化

袁渭康

华东理工大学

袁渭康 化学工程专家。1935年7月1日出生于上海市。1962年华东化工学院研究生毕业。现任华东理工大学反应工程国家重点实验室主任、教授。1995年当选为中国工程院院士。主要从事化学反应工程和化学反应器等方面的研究和开发。

“过程”是制造业普遍应用的一种加工方式。如果将制造业按所采用的主要加工方式加以大略区分，则主要为过程工业和加工工业两个大类。前者通过各类加工过程实现，如冶金和材料工业，化学工业，食品工业等，后者则以各类加工工序为主，如机械工业，电子工业等。

对于加工过程为主的工业，统称为过程工业，其相应技术，则为过程工程，如冶金工程，化学工程等等的统称。

过程工业与加工工业相比有下列特点：

1. 过程工业主要通过加工过程来实现工业生产，而不是通过加工工序来实现。如炼铁过程是通过高炉中的反应过程来实现的；石油化学工业中的石油裂解也是通过裂解炉中的反应过程来实现的。与此不同，加工工业则是以机床、焊机等工具的加工工序来实现生产。

2. 与之相应，过程工业的大型化主要依靠设备大型化，而主要不是依靠增加设备数来实现。例如大型钢铁厂主要依靠个数极少的大型高炉来体现效益，而绝不能依靠众多的小高炉；同样石油化工厂也往往是依靠一个大型裂解炉。而加工工业的设备除了采用先进技术（如程控技术）外，大型化十分重要的手段是增加设备数，当然也包括同一设备同时进行若干种加工工序的能力。

3. 过程工业的产品往往以重量或体积计，如以吨、立方米等以计量钢铁、水泥和各种化工产品，而不是如加工工业的产品往往以件数计，小到螺钉，大至汽车、飞机等。

因此，过程工业与加工工业不同，存在一个设备放大问题。现代过程工业的标志之一是设备的大型化，即用一套大型设备实现大规模生产。大型化的合理性十分易于理解，因为大型化可以省投资，省原材料，省能耗，省人力。随着技术的进步，这种符合经济合理性的工业规模还有不断增大的趋势。例如合理规模的单套乙烯装置生产能力从30万吨/年提高到45万吨/年，又提高到60万吨/年，并有进一步提高的趋势。当然，设备放大以后还必须保证经济上的合理性和各项指标的先进性。但是往往由于放大，有一些指标趋于合理，如能耗一般可以降低。但另一些指标，如反应产物的收率等，由于在大型化以后，操作温度等条件不易控制而往往有所降低，这就是通常所说的“放大效应”。放大效应被认为是一种弊端，似乎总是与大型化伴生的。我们的一个重要任务就是尽可能使这些指标在过程放大后仍保持一个较高水平。另一个现实是，一个实际过程，通常不能处在最优的操作状态下。这是因为过程的复杂性和人们的认识能力限制所决定的，何况过程的一些参数会随时间变化（如催化剂的失活）。即使今天找到了最优条件，明天还可能发

生变化。因此存在一个寻找最优的操作条件使过程不断优化的问题。这一想法是有可能实现的，因为一般来说，过程的操作条件（如温度、压力、浓度、流量、pH等）允许在一定范围内调节以便寻优。这是过程工业的又一个特性——可调性。

### 一、过程普遍存在

过程是普遍存在，广为应用的。例如，旧日上海居民使用的煤球炉中所进行的是一个燃烧过程，属于气固化学反应过程；煤球炉实际上是一种移动床反应器，结构上与高炉有相仿之处。生物发酵罐中进行微生物发酵过程。大型生物工程生产显然不能依靠增加发酵罐数，而应使发酵罐大型化。上述两类过程虽然表现得完全不同，但从本质上来说，在两种设备中进行的不外乎下面两类过程：

1. 传递过程，包括流体流动过程，传热过程和传质过程，属于没有物系组成变化的物理过程。

2. 化学反应过程，属于有组成变化的化学过程。

很多过程都是这两类过程的不同组合：小至观察尺度为分子级的薄膜镀层（如CVD方法GaAs薄膜制备），大至大气中SO<sub>2</sub>的传递。此外还有一些过程，如处理矿物原料的粉碎过程，浮选过程等，以及颗粒状物料的输送过程和分离过程等，这些都属于机械过程。当然现代工业很少是以单个过程来实现生产的，而是由多个过程组合构成过程群，或系统来实现。

化学工业是一种典型的过程工业。化工过程也完全是由上述几个过程组成。化学工业中常见的是将原料预热到一定温度（传热过程），然后在反应器中进行化学反应（化学反应过程），经过反应的产品中必然有所需要的目的产物，以及并非主要目的的副产物，以及未反应的原料。这类混合物需要经过一个分离器，如精馏塔，吸收塔等进行分离（分离过程，或传质过程）。由于分离过程还不能获得纯净的目的产物，有时尚需进一步提纯（又一个分离过程）。与此相似的是，冶金工业也往往是以这类传热、分离和反应过程为主体组成的：高炉可看作是个相当典型的化学反应器。以化学工业为背景，发展了化学工程学科，其主要内容为传热、传质和动量传递（传动）以及化学反应。实际上化学工程的应用范围已远远超越了化学工业，而是成为过程工程的核心。例如火力发电厂排出的大量含SO<sub>2</sub>废气，对大气产生污染。将SO<sub>2</sub>从排气中脱除，甚至予以回收利用，也是通过这些化工过程来实现的。然而这些过程有一个共同点，即在实验室中，这些过程的实施多少是比较容易的，或在实验室的理想条件下，可以获得比较理想的指标。另外，实验室的规模和条件，可以使很多过程在间歇条件下实现。但是在工业生产中，这些过程可以比实验室中进行的同一性质过程大数万倍，甚至数十万倍。在小型设备中可不予考虑的温度和浓度不均匀性在大型设备中存在并且影响指标。并且大型过程多数是连续的。因此，将在实验室中所获得的结果在工业规模实施就成了一个完全不同的问题。因此，用最廉价的方法，在最短的时间内，最高质量地将过程大型化，就成为过程工程师的任务。

### 二、过程的开发和放大

本文所指的放大实际上有两重意义：设备的选型和放大。这一过程也可称作开发。

实验室中的过程通常是在尽可能简单的条件下进行，并尽可能地排除对过程产生不利影响的因素。例如，一个催化反应需在一定温度下进行。在实验室条件下加热到这一温度是毫无问题的。将催化剂破碎到一定粒度，可消除反应物在催化剂内的扩散阻力以利传质。将催化剂装入一个细小的反应管内，使其维持等温条件，也毫无困难。这样化学反应就可在所寻找到的优化条件下操作以期得到最好的结果。实验室化学家的任务是制备催化剂，筛选出最好的催化剂，并实验获得反应物浓度，流速和反应温度之间的适宜关系。在化学家的工作基础上，过程工程师的任务是：

1. 选择最适宜的工业反应器型式，或称选型。

选型过程包括对多种因素的综合考虑。例如，所能达到的指标，设备投资，能耗和操作费用，设备制造和材料，环保和安全性，操作和控制以及人员素质，等等。在权衡了种种得失以后作出的选择反映了工程师本人的知识、经验和思维能力。

2. 根据所选定的反应器型式，通过实验、计算、或其它可以利用的一切手段，在最短的时间内，用最少的投资，进行设备的放大，最后提供工业反应器的设计，供设备制造工程师用。此谓放大。

当然这两者是交叉的。最初的选型可以在放大过程中被认为不合适而被放弃，并考虑另一种选型。如此反复，直到获得最好的方案。

放大的方法可以归纳为：

(1) 逐级经验放大

在确定选型以后，一种最为传统的方法是通过从小型试验，稍大规模的试验，中间试验，扩大中间试验，逐级地实现大型工业生产。这种通过多个试验层次的放大过程必然是耗时费资的。并且，虽然这一过程也可以凝聚着过程工程师的知识和积累，但毕竟由于放大完全是以经验为基础的，必然带有不同程度的盲目性。在过程工业发展的早期，经验放大几乎成了唯一的方法。随着过程工程技术的发展，在今天经验放大显然是并不可取的。但对于一些过于复杂的、人们认识甚少的过程，有时还不得不求助于经验放大。

(2) 数学模拟法放大

一种近年来被大为提倡的放大方法是建立数学模型（一组数学方程）对过程进行描述，并通过不同规模的实验以确定模型的参数，然后通过计算机模拟过程大型化后的各种行为，以确定放大的准则。这种放大理应是合理的。然而事实表明，单纯地用数学模拟法放大的成功例子甚为罕见。其原因是：

由于实际过程通常极为复杂，而人们对它们的认识往往还不够系统和全面，因而为数学模型的建立带来困难。

即使对复杂的实际过程已完全了解，数学模型的建立必须作出不少简化假定；因而为了便于描述，很可能得到了过度简化的模型。

实验测定的模型参数的可靠性往往受实验手段的限制和实验过程中噪音的干扰，因此模型参数存在或多或少的不确定性。

由于数学模拟法放大只能适用于人们对过程的认识已相当透彻，参数的测定相当可靠的场合，因而即使是在工业发达国家，完全依靠数学模拟法放大的案例也比较罕见。比较现实的方法是，利用数学模型，但也需依靠一些实验或经验结果以实现放大。

(3) 以“实验方法论”为基础的放大

以上两种放大方法是就两类极端的类型而论的。经验法主要是用于异常

复杂，人们知之甚少的过程；数学模拟则主要用于人们已相当透彻了解的过程。实际情况是，大量的过程介于这两类极端情况之间。对于这种为数众多的中间类型过程，应充分利用已有的理论，并根据实验方法论的原则组织实验，据此进行放大。

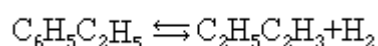
实际过程种类繁多，性质各异，难以归纳出可以适用于各种不同过程的通用步骤。实验方法论提供了一些考虑问题的原则和基点。它们包括过程的简化、分解和综合，过程的敏感性分析，工程问题特殊性的分析和利用，冷模实验的组织，预实验和系统实验的组织等。实验方法论包括了利用尽可能简单实验方法进行预实验（包括认识实验，析因实验和鉴别实验），以获得对过程的初步认识，并以此为据作出采用哪一类放大方法的决策。这里所谓的主要方法包括两大类：以寻找放大判据为主的实验方法，以及以敏感性分析和简化模型为主的简化模型方法。根据不同过程的特殊性以及放大中对过程中了解的深化以决定是否需要经过中试以检验放大方法的可靠性，最终再进行放大。这一工作程序可见图 1。

### 三、两个过程放大的案例

这里简述两个由华东理工大学反应工程国家重点实验室 (REL) 进行放大的案例。在放大中已初步考虑到优化条件确定，因为这两者是不可分离的。

#### 1. 案例之一：乙苯脱氢反应器的放大

在铁系催化剂存在下，乙苯可以在 550 上下脱氢生成苯乙烯，这是一种重要的合成材料原料。其主反应为：



其它尚有一些副反应，产生一定量的副产物。一个成功的放大应该获得高的产物收率和选择性，能耗应尽可能低。由于这是一个可逆的吸热反应，反应过程中体积增大。为了利用反应混合物自身供热，用高热容的水蒸气稀释反应气体，以维持比较适宜的温度。考虑到反应过程中气体体积增大，操作压力应是一个敏感的条件，负压操作是有利的。

遵循教科书上的方法，则必定先测定反应动力学，建立动力学模型，然后建立反应器模型（微分方程型），通过计算机模拟进行放大。但是这样的方法除了耗资费时外，结果尚不可靠。如果妥善组织实验就可以在很短的时间内成功地完成开发，获得满意的指标：

(1) 工业中最简单的实现这类反应过程的反应器是绝热反应器。对绝热反应器，反应结果将唯一地由进口条件决定：

$$Y = F(T_0, SV, R, P)$$

这里 Y 表示反应结果，如转化率、选择性等， $T_0$  为进口温度，SV 为空速，R 为浓度（水烃比），P 为压力。这样就可以免去先测定动力学，然后进行积分。上述关系可简单写作代数型。

(2) 从本问题的工程约束来看， $T_0$  不能过高，一般在 630 以下，R 不能太大，一般在 1.5 上下，转化率至少应在 50% 以上，选择性应在 92% 以上。由于这些工程上的约束，这一系统的操作只能在一个相对狭窄的范围内。因而一个原来是非线性的问题可简化为一线性问题。上述关系可简化为一线性代数型方程。通过最普通的实验设计（如正交设计）即可获取优化条件。

(3) 大型装置的实现需保证气体均布。本案例为实现负压低压降操作，采用径向反应器，通过大型冷模研究气体的均布方法以完成反应器的放大。

放大后的工业规模反应器，完全实现了小试的指标。这体现了一个通过工程特征分析建立简化模型进行放大的实例。

## 2. 案例之二：丙烯氯醇化过程的放大

丙烯和氯在水中反应生成氯丙醇是环氧丙烷生产中的一个反应过程。其大致的反应步骤为：氯溶于水生成次氯酸，丙烯与次氯酸反应生成氯丙醇（简称醇）。主要副反应是丙烯直接与氯反应生成二氯丙烷（简称烷），另一个副反应是氯丙醇与丙烯继续反应生成二氯异丙基醚（简称醚）。合理的反应器应有高的醇选择性，低的烷和醚的选择性。

(1) 小试发现，气相丙烯和气相氯极易产生烷。因此大装置应避免丙烯和氯直接接触。溶氯应与反应分离。

(2) 溶氯是一个快速过程，因而其速率取决于气—液接触界面积。醚的生成是一个相对缓慢的反应，生成量与反应器体积有关。因而溶氯器应具有大的气液接触面积，小的体积。

(3) 为避免过量醚的生成，应保持醇的低浓度，因而多级反应器应是理想的选择。

通过实验寻找放大判据，主要是实验获得一个合理的喷射式溶氯器的放大依据，成功地实现了放大。这体现了一个通过寻找放大判据进行放大的实例。

## 四、过程优化

优化显然指对一定的目标函数的优化。这些目标函数一般是指过程的某项重要经济指标，或经简化后得到的一些关键操作指标，如产品产量，纯度，产物收率，能耗等。过程的优化包括两类：离线优化和在线优化。前者一般可理解为先验优化，绝大多数为定态优化，即在实现过程以前已先验地设计好优化条件，然后在过程实施中予以实现。在线优化是在过程进行之中，通过对过程行为的观察和了解，然后逐步地进行优化。在线优化是目前公认的一种先进的动态优化方法，即利用计算机在线地采集动态操作数据，进行系统的状态和参数的辨识，作为优化的依据。离线优化是一种比较早期的方法，它的效果对于大系统和大型过程甚为明显。主要原因是，对于大型过程，即使是一个相当小的百分比的优化，对于降低原料消耗和能耗意义却是巨大的。另外，现代过程通常都不是单一的，而是由多个过程所组成的系统或大系统。系统有如下特性：

1. 对于大系统（大量的单元过程，性质相同的和性质不同的过程的组合），通常是难以通过人们的经验和知识判断如何进行优化组合的。用计算机进行组合过程的模拟（或称流程模拟），是一种很有效的定量方法。目前已有各类商业化的流程模拟系统，如 ASPEN PLUS 和 PROCESS 等，可以提供离线优化的基础。

2. 组成系统的各类单元过程有各自的优化问题。但是单个过程的优化往往以系统优化为前提，即系统的优化并不意味着每一个单元过程都处于优化状态。因此单元过程的优化应受到系统优化的制约；在单元过程的优化时不能脱离系统优化的前提。

3. 系统和单元过程的优化都是以模型为基础的，以一个单元过程构成一

个“模块”，每一模块可以包含为数众多的方程。如一个精馏塔模块就包含数十以至数百个代数方程，用以描述精馏塔的定态行为。单元过程优化以模块为基础。

4. 以模块为基础的单元过程优化，构成了系统优化的序贯法和联立模块法。但系统优化是以系统为基础的，重点并不在于单元过程的优化，当然大量的系统优化问题并不与单元过程优化相矛盾。因此，理想的系统优化方法是联立方程法。联立方程法可以跨越单元化的局限。

离线优化需要单元过程模型和大量的计算，从已有的软件和现有的计算机水平来说，这已不是什么困难。但现有的通用商业软件一般并不提供一些特殊或专用过程的模块。有关这些模块需使用者自行开发。

尽管离线定态优化有其非常可观的实用价值，但是也存在一些比较明显的不足之处，这通常是由于一些过程的不确定性质引起的：

(1) 先验的优化是以模型为基础的。由于对过程了解存在或多或少的不足，先验的优化往往不能反映出真实的优化状态。这主要由于用于先验优化的模型往往只是实际过程的过度简化。由于过度简化，模型对实际过程的描述能力显然受到限制。这是模型不确定性的结果。

(2) 模型中必然包括一些参数，或由文献和数据库获得，或需由实验测定，或由现场采集的数据关联而得。这些参数包含了测定中的误差和噪音干扰。这是参数的不确定性。利用这些参数进行优化也必然带来一些不确定的结果。

(3) 有些过程有时变性。因此过程虽为连续，但随时间会产生一些或快或慢的变化。例如化学反应器中催化剂的失活和粉化，传热装置中传热面的结垢，原料和产品的价格变化等，都会使已完全实现离线优化的过程偏离已设定优化条件。

此外，还有一些大家都已知道的时变因素，如生产负荷的变化，操作的变化等。实现了离线定态优化的系统显然并不能适应这些时变因素，因此理想的优化方法应是在线优化。在线优化也有不同的含义：

(1) 以在线辨识所得的动态模型为基础，对动态模型的定态形式实现优化，此为在线定态优化，对慢时变过程相当有效。

(2) 在线辨识得到包括过程时变性的模型，以此动态模型为基础实现长时间范围内的优化。此类优化对间歇过程（如发酵）尤为适用。

在线优化显然比离线优化合理，但也远为复杂和困难。在线优化需要实时地决定优化策略，因此需要快速的计算机模拟，甚至像 CRAY 那样的公司也参与了过程的在线优化工作。但是目前看来比较现实的和有效的仍是单元过程的在线优化。单元过程的作用虽然是局部的，但对于一些关键的单元过程，对全系统有至关重要的影响，特别是一些反应过程（如裂解、冶炼、发酵等），其作用直接影响到全局。这些过程的优化是支配性的；其它过程的优化可以作为优化的第二层次。

图 2 为 REL 正在进行研究的在线优化方法示意图。这种在线优化属于先进过程控制的范围。将在线优化过程分为两个相：优化相和控制相。控制设定值由优化相根据过程动态模型的定态形式优化获得。控制相的一个关键部分是预测模型状态估计和在线参数辨识，并通过这一模型实现优化。这一预测模型可以是机理性的，也可以是经验性的，主要视其是否具备在动态操作



中的学习能力。

图 3 表示一个正在 REL 开发的新颖的预测模型的结构，其特点是利用 Karhunen - Loeve (K - L) 展开法压缩动态数据求取过程的特征函数以改造传统的神经网络模型，使后者反映出过程的动态特征。所开发的软件通过采集动态数据（为了在工业上实施方便，测量点数应尽可能少）进行学习，实时地提供优化设定，并进行在线优化。整个优化工作通过一个微机进行，可以与已有的 DCS 系统兼容。

我们的初步研究结果表明，通过在线优化，已可以使一个催化反应过程的收率比通过常规方法优化的结果高 1% ~ 3%。

## 五、结束语

过程的特殊性决定了过程工程的方法。可以看到放大和优化都在相当程度上考虑到过程的可调性，即过程的操作变量允许在一定的范围内波动。

过程放大最重要是分析和利用过程的特殊性，这种特殊性可通过简单实验定性（或半定量）地获得。实验揭示操作变量范围对结果的敏感性影响常可获得放大的依据。但是不论某一过程的放大的依据是否可靠，在放大中应充分考虑到放大以后进行优化（经验的调优或动态的优化）的余地。

# 敏捷制造企业

蒋新松

中国科学院沈阳自动化研究所

蒋新松 自动化专家。1931 年出生于江苏江阴。1956 年 9 月毕业于上海交通大学。曾任中国科学院沈阳自动化所所长，国家“863”计划自动化领域首席科学家。现任该所学术委员会主任、研究员，中国自动化学会副理事长。1994 年被选聘为中国工程院院士。我国机器人事业的开拓者之一。

## 一、前言

一场新的工业革命正在波澜壮阔地展开，这场革命的原动力是科学与技术，而推动这场革命的直接动力是世界市场的竞争。

随着科学与技术的进步，生产得到了巨大发展。生产是为了销售，就必然要寻找市场，加上通信及航空事业的发展，给企业促销提供了强有力的手段。这一切大大加速了一个统一的世界市场的形成与发展。随着世界市场的发展，市场竞争变得愈来愈激烈。竞争推动着整个社会飞速前进，同时给企业造成严酷的生存环境，如何去适应快速变化的世界市场的需求，不断以高质量、低成本、快速开发新产品等手段，在竞争中求生存和发展，已成为企业共同追求的目标。市场竞争遵循着三条基本原则，即：一是用户选择原则；二是性能价格比为唯一选择准则；三是“优胜劣败，适者生存”。正是这样给企业造成严酷的生存环境，推动着企业以至整个社会前进。竞争是推动着历史前进的动力。

在今天，谁能把握住市场竞争的动向，谁就能了解与把握住当前世界经济发展的动向，从社会需求把握科学技术发展总方向，取得经济发展的主动权。对一个国家、一个地区、一个城市、一个企业都是这样。

市场竞争经历着不同阶段。在相当长一个历史时期内，一个产品一旦上市，它的设计或式样就是公开的，当时的技术水平也无法保密；稍后，随着技术的进步，产品变得稍复杂些了，但由于一个产品的生命周期很长，设计及开发费用也不占成本的主要份额。一般说一个适销对路的产品往往很多厂相继都能生产，因此市场竞争主要围绕如何降低成本，特别是降低劳动力成本而展开的。刚性大规模生产线就应运而生，工人束缚于以一定节奏运行的生产线旁，把人变成系统的一部分，变成了生产线的奴隶。这是产品部件化、部件标准化和泰勒的生产的科学管理思想相结合的结果，极大地提高了劳动生产率，大幅度地降低了成本。以汽车为例，它的价格不到 10 年几乎降低了 8 倍，在美国使汽车进入家庭，把美国社会变成建筑在四个轮子上的社会，由于汽车工业的兴起，带动了一大批工业的发展，推动了近代史上的一场新的工业革命。

进入 70 年代后，随着电子信息技术的发展，特别是超大规模集成电路的出现，各种工艺技术及装备的进步，自动化技术的发展，产品成本组成的因素发生了根本的变化，一方面劳动力的降低已达到某种限度，而另一方面劳动力消耗已不是成本的主要因素。降低成本的焦点开始转到如何提高企业整体效率及效益，如：采用准时生产制（JIT），压缩在制品，压缩库存，减少

流动资金，提高资金周转率，进行均衡生产；采用精良产生原则，去掉一切不产生价值的环节；引进自动化装备及系统，进一步提高劳动生产率、管理及生产水平；实现全面质量管理（TQM），提高质量等；另外，增强新产品开发能力，也开始为人们所注意。

进入 80 年代后，用户对产品要求不断地提高，加上技术进步及竞争对手不断的增加，工厂的一切活动开始转到以满足用户要求为核心的竞争，改进 TQCS 成为企业赢得竞争的主要手段，这里 T：指按合同及时交货或新产品上市时间；Q：指质量；C：指成本；S：指售前咨询服务及售后维护、升值服务。

在这一时期内，相应的各种计算机辅助工具、各种高效的柔性生产设备发展得非常快。计算机辅助工具，如：OE / SA - 客户定单管理及销售分析，MPS - 主生产计划编排，MRP1 - 材料需求规划，MRP2 - 材料资源规划，PM - 维修规划，TQC - 全面质量控制，CAD - 计算机辅助设计，CAE - 计算机辅助工程，CAPP - 计算机辅助工艺规划，CAM - 计算机辅助加工等等。各种柔性高效的生产设备，如：DNC - 直接数控，CNC - 数控加工中心，FMC - 柔性加工单元，FMS - 柔性加工系统，AMH - 自动材料运输系统，FAS - 柔性装配系统等等。此外，如何去全面提高企业经营生产的效率及效益的计算机集成制造系统（CIMS）也得到了全面推广，成为了赢得竞争的主要手段。80 年代和 70 年代相比，80 年代有了有力、可靠的工具——计算机，可以更有效地实现系统集成与优化。

进入 90 年代以来，我们进入了信息时代。信息时代更确切地说是知识的时代，知识大量的产生，而知识到应用之间的间隔越来越短，技术的发展越来越快。如何利用这些技术提供的可能性，抓住用户心理、愿望、及要求，加速新产品的构思及概念的形成，并以最短时间开发出高质量及用户所能接受的价格的“新”产品，已成为市场竞争的新焦点。为什么新产品会成为竞争的焦点？价值法则告诉我们，一个由于具有独占性技术的新产品，它的价格总是高于其价值，通过竞争价格才逐渐接近其价值。在今天当一个产品失去其独占期，就意味着这个产品生命周期的结束。因此依靠一项或几项独占性技术构成的新产品，就能获取高额利润。这反映了我们这个时代的一个基本特征，即独占性技术（知识）构成了产品的主要价值及价格。因此快速开发新产品，成为了赢得竞争的最主要的手段，而这新焦点中核心是上市时间，上市时间往往直接决定了开发的成败。围绕着加速新产品开发，新的工具软件，随着廉价高性能工作站的普及而发展得很快，已从计算机辅助“什么”（CAX）发展到“为什么性”而设计（DF - Xility），如：可加工性设计、可测试性设计、成本可计算性设计，可维护性设计等等，并在这基础上进一步发展“什么的”设计自动化（X - DA）。建筑的建模、仿真、及临境技术基础上，以减少或取消做原型机或原型系统的拟实制造（Virtual Manufacturing）也发展得很快，波音 777 就是第一架无图纸、无样机上天的飞机。这是制造技术史上划时代的成就。与此同时，加工技术及装备，诸如：精密成形技术、快速原型系统、快速制模技术、少无切削、激光加工、高压水切割等等先进制造技术及装备，也进入了一个快速发展时期。作为综合加速新产品开发过程的系统集成技术 - 并行工程（Concurrent Engineering）迅速获得了推广。并行工程已成为 90 年代企业要在竞争中赢得生存和发展的重要手段。

21 世纪即将来临，毫无疑问，技术的发展及世界市场的竞争，将沿着 20

世界 90 年代展开的道路前进，危机与机遇并存，竞争将更加激烈。所有企业将处于一个连续改变及不可预见的市场环境中，如何对现有企业进行改造与结构性调整，使之能在这样的环境中赢得竞争，求得生存和发展，成为全世界企业界所关心的问题。核心是能否抓住机遇，快速响应开发出新产品，如何使企业具有这个能力，下一世纪企业应该是怎样的模式？这种新模式我们称之为敏捷制造企业。敏捷制造企业将成为 21 世纪企业的主要模式，一个国家，一个企业能否从现有模式跳跃到敏捷制造企业，将直接决定他在未来世界中的经济地位。

## 二、敏捷制造

“敏捷制造”是 1991 年美国 Iacocca 研究所主持的 21 世纪发展战略讨论会历时半年形成的一份著名报告中总结经济发展现状，展视将来而提出来的，参加这次讨论会核心组的有美国 13 家大企业的行政首脑，参加讨论的有 100 多家企业及著名的咨询公司。

### 提出的背景

1. 前面已经说过，信息时代在某种意义上来说就是知识时代。知识到技术，技术到产品的时间越来越短。反应在产品的价值上，独占性技术（知识）构成了产品的主要价值，而一项技术的独占期也越来越短。因此，只有不断地抓住机遇（指市场及技术的机遇），快速开发新产品，才能获取高额利润，在多变的 market 环境中求得生存和发展；

2. 随着人民生活水平的提高，对产品的性能和质量的要求越来越高。如何去适应用户日益不断变化的要求，以致发展他们定制的“个性化”产品，在某种意义上来说，已经是企业产品未来发展的一种方向，例如：时装业，在今天以一种式样只生产一件的承诺来吸引顾客，已经相当多；汽车制造商们也正在竞相开发顾客自行设计的系统，及基于灵境技术（Virtual Reality）的仿真实验环境，使顾客能按照自己的愿望“设计”新车，并马上就能体会新车的各种性能。企业正逐渐把满足顾客的需求看成“质量”的新内容，而把顾客的满意程度作为它的度量；

3. 由于竞争的激烈，加上新产品设计和开发的软件工具日新月异，各种新的生产工具及装备的发展，使得新产品的开发周期越来越短。加上竞争的加剧，从而使得产品的生命周期越来越短，市场也变得越来越“零碎”；

4. 随着人民生活水平不断地提高，人们对环保意识也日益增强，而政府对环保的要求也日益严厉。如何在新的要求下，设计符合环保要求的产品，成为了企业的新课题；

5. 环太平洋地区的兴起，使得有可能参与竞争的对手日益增多。

这就是在未来世纪中，企业将临的周围环境的概略描述。对一个企业来说：“一方面面临极大的机遇，另一方面又面临极大的危机”。因此如何在这样的环境中求生存和发展，对任何一个企业、地区和国家都是严重的挑战。敏捷制造就是为了适应这样的环境而总结出来的。所谓“敏捷”就是指在不可预见的多变的环境中的生存能力。

### 敏捷制造业的基本特点

根据上述对未来企业所面临的环境的描述，一个敏捷制造企业应具备那些特点呢，概括的来说应具备下列几点：

1. 具有能抓住瞬息即逝的机遇，快速推出高性能、高可靠性及顾客能接

受的价格的新产品的能力。这里一旦抓住了机遇，快速是带决定性意义的，因为失去了第一个投放市场，往往就意味着整个开发工作的失败。因此，要求一切工作尽可能并行进行；

2. 大批量生产系统是依靠大量生产同一产品来降低成本，由于生产批量越来越少，生产的需求和生产装备的矛盾就日益突出。敏捷制造应发展一种通过编程可重组的、模块化的加工单元，以实现快速生产新产品及各种各样的变形产品，从而使生产小批量、高性能产品能达到大批量生产同样的效益，以期达到同一类产品的价格和生产批量无关。要达到这一点，就必须研究如何把日前的大规模生产线，改造成具有高度柔性，可重组的生产装备及相应的软件；

3. 能按订单生产，以合适的价格生产顾客的定制产品或顾客个性化产品；

4. 敏捷制造不应强调全能，而强调企业间的动态合作。这是因为产品越来越复杂，任何一个企业都不可能快速地和经济地设计、开发和制造一个产品的全部。只有依靠企业间的合作才能快速投放市场；

5. 创新是企业的灵魂，而持续创新能力将是一个企业具有竞争能力的体现。但创新是不可预见的，因此创造一种企业文化，最大限度调动员工的积极性，来控制创新的不可预见性，将是敏捷制造企业的个重要标志。为此改变过去建筑在奖惩基础上的人事管理制度，建立一种能充分调动员工积极性的人事管理制度也将是敏捷制造企业的标志；

6. 敏捷制造企业中，由于组织和设备都是可重组的，借助企业间的动态联盟，生产设备及生产能力几乎可以不受限制，而受限制的因素主要是人。因此，在未来的敏捷制造企业中，将把具有创新能力和经验的员工看成是企业的主要财富，而把对员工的培养和再教育作为企业的长期投资行为。

7. 敏捷制造要求和用户建立一种完全崭新的“战略”依存关系。随着产品的生命周期越来越短，而从用户来说总希望已购买的产品使用时间越长越好，这是一对矛盾。如何解决这一对矛盾，因此不仅要保持售后产品的档案，提供周到的售后服务，保持在整个生命周期内用户对产品的信任，更重要的要为用户提供适当费用的升级、升档服务，以至以旧换新，例如：“美国 Mentor Graphics 软件公司软件的升级、升档服务 1993 年已占公司的总销售额的 40%。市场在某种意义上来说是用户，因此用这样一种和用户相互依存的关系，来确保已有的市场，并在这基础上进一步扩大市场。

为了适应未来的环境，敏捷制造企业应具备的特点还很多，这七点是主要的。

#### 敏捷制造对社会的影响

1. 竞争是推动社会前进的动力，但过度竞争造成人力与资源的极大浪费。当今竞争的前期合作，已成为各大公司解决某项关键技术时常用的手段。随着产品越来越复杂，在抢先进入市场的竞争下，任何一个企业再也没有可能在较短的时间内，制造一个产品的全部，甚至独立完成一个产品的全部设计，因此敏捷制造将从根本上改变工业竞争的内容和意义。为了达到快速响应市场的机遇，在敏捷制造企业间竞争对手、合作方、供货方、买方的关系是随着项目经常变化的，将使得竞争和合作二者变得兼容。

2. 敏捷制造企业除了抓住市场机遇外，重要的是如何千方百计加大科研开发的投入，增强创新能力，扩大创新队伍，例如：AT&T 每年科研开发的

投入为总产值的 17%，1994 年该公司的总产值超过 1000 亿美元；IBM 公司多年来，科研开发的投入保持在总产值的 10%；日立公司也基本保持在 10%，这样为了竞争大大加大科技的投入，必将大大推动科技的发展，加速社会各方面的进步。

3. 未来敏捷制造企业对员工素质的要求将大大推动教育的发展。由于未来对科技和教育的投入将大幅度地、不断地增大，这一切将把人类的文明以空前的速度推向新的高潮。

4. 但近几年的实践证明，作为提供给最终用户的产品变化快，但作为构成产品的部件相对变化较慢，以小轿车为例，外形年年变，但发动机则若干年才变，而且变化往往是改进性的渐变。因此，当前社会的生产结构正在进行重大的改组，即部件厂和整机厂的分工，部件厂的专业化程度越来越高，部件厂和整机厂，在风险和利润中取得某种平衡，即部件厂风险低，利润小；而整机厂风险大，利润高。这种专业化的再分工，在统一的标准和规范下越来越细，例如：电子计算机就是一例，从显示器、芯片、CPU 板、电子元器件、插接件、软盘、光驱等都是由专业厂生产的；ABB 的工业机器人生产厂，已经沒有一台加工机床，只有较大的设计开发部门、及遍布全世界的总装厂和销售服务中心，所有电子及机械部件都以合同方式由外协厂进行；这样的例子不胜枚举。显然全能型的企业今后将逐渐在竞争中被这些高效的整机厂和部件厂所替代。

#### 敏捷制造企业的现状

敏捷制造企业自 1991 年 12 月提出后，这几年来美国各个公司自觉应用敏捷制造与动态联盟的思想进展得很快，已成为世界制造业的热点。现代企业向敏捷制造企业的发展是历史发展的必然。人们认识了这规律，就从必然王国中解放出来，向自由王国迈进，极大地推动生产向前发展。由于经济发展有共同的规律，在我国高新技术的新兴产业群中，有不少不自觉、而自发地运用这基本规律取得了很大的成功的，例如：深圳的华为公司、北大的方正公司、神龙通信工程公司等等。中国企业家总结为“两头在内，中间在外”（两头指研究开发及市场开拓，中间指制造），这实质上是一种敏捷制造的雏形。

敏捷制造企业为高新技术的产业化开拓了一条生产规模和开拓生产规模同步增长的可行道路，提供了一条充分利用社会存量资金发展新兴产业的道路，把高新技术的产业化风险大大降低，有利于高新技术产业的形成。

### 三、实施敏捷制造的基本方法

实施敏捷制造的基本方法，涉及生产技术、管理、信息基础设施、法律、财会制度、知识产权、社会保障等等。这里着重讨论三个方面：

#### 生产技术

综上所述，为了适应能敏捷地改变生产，对离散生产过程，必须发展由柔性可编程组成的、可重组的、模块化单元；对连续生产过程，发展智能型的过程控制器和过程检测器，及能和实际生产过程并行运行的复杂过程的仿真系统，以测定不可测的中变量，进一步对其实现有效的控制。

#### 集成技术

从运行的集成技术来说，必须发展一种高鲁棒性的集成技术，可以在不中断系统的运行情况，进行修改的软件系统。对企业外，发展建筑在网络基

础上的集成技术，包括异地组建动态联合公司、异地设计、异地制造等等有关的集成技术。

### 产品的设计和开发过程的设计——并行工程

设计开发工作尽可能并行进行，发展适宜于群体作业，特别是异地作业的软件——群件。加速实施并行工程的环境建设，并不断将其完善。上图为实施并行工程的自动化环境的发展。建设自动化的并行工程环境，以提高作业效率。环境帮助每一个开发组成员能不断地了解整个开发过程的进行，当某一个成员做出某项决策后，立刻通知有关成员，看是否有矛盾和冲突，协调解决；某一数据一旦改变，系统能立刻把所有存放的这些数据进行修改，告诉所有使用这些数据的人员；并进一步做到自动化决策支持：1. 保存产品开发周期内所发生的变化，并考核其对过程的影响；2. 进行过程管理，能精确地指出什么要求已被满足，以保证在提交下一步时，全部要求被满足；3. 帮助开发组成员在不同方案中作出抉择；4. 提供一个快速原型环境，以供开发组全面考核每阶段的设计等。

### 工厂网的建立

在信息高速公路中建立工厂子网，以至全球工厂子网，作为动态集成的主要工具。要做到这一点，必须研究制定企业间各种信息交换的标准、规范及协议，使各企业相互变成插入兼容式企业。当然各个工厂还必须把自己工厂的特点、资源，设备能力、经营情况等等，都上网，以便供其他企业利用；同时当一旦抓住机遇时，也可利用这网及时地、最佳地组织起动态联合公司 / 动态联盟的参加者，甚至利用这网实现异地设计和异地制造。目前实现此网将遇到的主要障碍是企业是否愿意把工厂上述真实情况公布于众；另一问题是统一标准、协议及规范制定基础工作量很大。但随着竞争进一步加剧，敏捷制造企业逐步实现和推广，一个企业如不能把真实情况上网，它就失去和其它企业合作的机遇与可能。

如何利用工厂网上的资源，对一个机遇优化的组织起动态联盟，这实质上就是计算机集成制造系统的新发展——企业间的动态集成。目前从决策到方法都是一个有待研究的新问题。另外，在法律上、会计制度上、知识产权问题上也提出了很多新问题，有待解决。

前面说过，我们这个时代的基本特征之一是独占性技术构成了产品的主要价值。一般说设计开发阶段决定了产品价值的 80%，产品的直接成本的 20%；而制造阶段决定了产品价值的 20%，直接成本的 80%。因此仅依靠改进产品的制造过程，并不能赢得竞争，因为直接成本只占产品售价的很小一部分。因此，要赢得竞争，一定要在信息的高速获取上下功夫，要善于和他人合作。一方面利用其他信息资源来满足自己开发新产品的需要，一方面通过向社会提供信息来获取和其他企业合作的机遇。其实创新也只有掌握突飞猛进、日新月异的技术发展及瞬息万变的市场变化的基础上才有可能。

### 管理上

对内来说，打破传统的多级递阶组织管理体系，建立多专业项目组，实行可视管理，下放权力，形成两级管理。这里所谓可视管理，指一切管理是透明的，上级布置任务时，把任务的目的、完成的时间、可动用的资源（人、财、物）及其他限制条件都作明确的规定，然后把决策权下放，以便及时作出决策。

在人事管理上，如何创造一种企业文化及管理制度，最大限度地调动员工的积极性，把不可预见的创新活动，变成可预见；在把员工的再教育作为企业长期投资及把有创新能力的员工看成企业的宝贵财富的情形下，如何为企业招聘和造就一批有创新能力的员工，将成为人事部门的一项长期重要任务。

对企业外部来说，组织动态联盟或动态联合公司，将是敏捷制造的最高形式，这将在下面来讨论。

#### 四、动态联盟和动态联合公司

##### 动态联盟和动态联合公司的基本概念

前面已经说了很多。由于竞争环境的快速变化，要求企业有迅速响应变化的能力；产品越来越复杂，任何一个企业已不可能快速、经济地独立开发和生产一个产品的全部，因此采用各种方式的合作是快速、经济地独立开发和生产一个产品的有效措施，也是实现“敏捷性”的重要方法；新产品生命周期的缩短要求企业有很高的风险承担能力，因此组织动态联盟或动态联合公司将敏捷制造企业的最高形式。

##### 实现动态联盟的优点

1. 可以解决生产规模和市场开拓规模的矛盾和同步问题，把风险降到最低。因为，一个新产品上市，即使性能价格比很好，也不一定立刻能有很大市场，市场有待开拓，而市场的开拓又是一个逐步的过程，其快慢取决于一个企业的营销能力及顾客的认识过程；另一方面一个产品形成生产规模又要巨额的投资，在市场还有待于开拓的情况下，这样做势必风险很大，组织动态联合公司可以从根本上解决这一矛盾，实现随着定单的增多，同步扩大生产规模。

2. 实现动态联盟可以解决如何充分利用社会现有存量资金，发展新产业，特别是高新技术产业。

3. 实行动态联合，而不是刚性联盟，使得企业间竞争和合作两者变得兼容，可以保存竞争的活力，又可避免过度的竞争，造成宏观上的社会浪费。

4. 由于动态联盟的组织者是根据新产品的方方面面来组织联盟的，而联盟是建筑在集成各方面的优势的基础上的，因此能做出快速响应市场机遇，推出价格合适的高性能产品。

##### 谁为盟主

这是动态联盟的一个核心问题。其实经过上面的很多论述，这一问题已是不言而喻的了，能抓住市场机遇的开发者为盟主，这盟主可能是企业、大学、研究所、以至从这些机构中分离出来的个体开发者。纵观当今世界高技术企业中众多耀眼的明星，几乎无一不是技术创新开发者创造的。我国北大方正、神龙通信工程公司就是最好不过的范例。他们提出的两头在内，中间在外的模式，就是敏捷制造企业的雏形，一种形式的动态联盟。他们以自己的创新技术为基础，在国家没有或很少的投资下，迅速形成了几十亿产值的规模经济。

#### 五、结论

21世纪即将来临，从一个企业面临的内外环境来分析，企业将处于激烈的市场竞争的旋涡中，一方面面临巨大的机遇，一方面面临极大的危机。21



世纪将给千万个创业者提供空前的机会，也将给千万个原有企业提出严峻的挑战。

21 世纪企业的主要模式将是敏捷制造企业，显然我们能否将原有企业迅速地转变成敏捷制造企业，将决定一个企业，一个地区，以至一个国家的前途和命运。从原有企业转变成敏捷制造企业，决不是一个企业在自己范围内努力就能完成的，需要社会各方面的努力，需要政府从法律、知识产权保护、金融制度、会计结算制度等方面来立法，创造一个有利于企业动态集成的环境。

我们掌握了敏捷制造的基本概念，就能从必然王国进入自由王国，有力地指导新企业的建立及原有企业的改造和升级。

一个完整的企业应包括设计开发、加工制造和市场开拓等三大块，一个现代化企业是两头大，中间小；而目前我国大中型企业是中间大，两头小，呈橄榄型。因此，我国当前“庄园”式的大企业，必然会解体，而大中型企业的出路，一是变成具有三大块的完整企业，能提供用户最终产品；一是变成高效的部件厂。

