

《海纳百川·藏书博览》

简装书库·自然科学总论

（理论、现状及发展）

百名院士科技
系列报告集
（下）

01

上海市黄浦区教育信息中心

中国科学的传统与未来

席泽宗

中国科学院自然科学史研究所

席泽宗 天文史学家。1927年6月9日生于山西垣曲，1951年毕业于中山大学。曾任中科院自然科学史研究所所长，现任该所研究员、中国科技史学会理事长。1991年当选为中国科学院院士（学部委员）。国际科学史研究院院士。国际欧亚科学院院士。主要从事天文学史研究。

一、中国古代有没有科学？

中国最早的一份科学刊物，即今天周光召任主编、在上海出版的《科学》。它于1915年创刊时，创办人任鸿隽即在创刊号上发表了《说中国无科学的原因》，1922年哲学家冯友兰又在《国际伦理学杂志》上用英文发表《为什么中国没有科学？——对中国哲学的历史及其后果的一种解释》。在他们的影响下，外国人戴孝骞（H.H.Dubs，1929）等开始研究这一问题；1944年吴藻溪将德籍犹太历史学家魏特夫（Karl A.Wittfogel）的《中国为什么没有产生自然科学》译成中文之后，又引起了国人的讨论，此年竺可桢发表的文章题为：《中国古代为什么没有产生自然科学》，仍然认为中国古代没有自然科学。但这时陈立和钱宝琮的文章，观点已经开始变化，认为中国古代不是没有自然科学，而是不发达。其后，英国学者李约瑟开始研究中国科技史，他发现，中国古代科学不是不发达，而是很发达，从公元前1世纪到公元15世纪，在许多领域，远比西方领先，问题是：“为什么以伽利略为代表的近代科学——连同它对先进技术的一切影响，产生在欧洲，而不发生在中国？”这就是现在大家所谓的李约瑟难题。李约瑟认为，近代科学从方法上有别于古代的是将数学与实验结合起来。他分析伽利略方法的特点是：

1. 从所讨论的现象中，选择出几个可用数量表示的特点来；
2. 提出一个包括所观察各量之间的数学关系式在内的假说（模型）；
3. 从这个假说推出某些能够实际验证的结果；
4. 观察，然后改变条件，再观察——即进行实验（反复实验），尽可能把测量结果用数值表示出来；
5. 接受或否定第二步所作的假说；
6. 用已接受的假说作新的假说的起点，并让新的假说接受考验。

如果说，只有有意识地按照这样完整的六步进行的工作，才是科学研究的话，不但中国古代没有，西方也没有，就连文艺复兴时期的巨人列奥纳多·达·芬奇（1452—1519年）也还没有做到这一步。科学史这门学科的奠基者乔治·萨顿（G.Sarton）说：“直到14世纪末，东方人和西方人是在企图解决同样性质的问题时共同工作的。从16世纪开始，他们走上不同的道路。分歧的基本原因，是西方科学家领悟了实验的方法并加以应用，而东方的科学家却未领悟它”。任鸿隽、冯友兰、竺可桢说中国古代没有自然科学，实际上都是指的没有这套实验方法，并不是说中国古代没有科学成就。我们

今天理解，科学应该包括科学方法、科学成就和科学精神。

科学对社会的作用，是随着时间的前进，逐渐显露出来的。西方到了与伽利略同时代的弗兰西斯·培根（F. Bacon, 1561—1626）才预感到科学的发展将导致“一系列的发明，而它们将在一定程度上征服人类所感到的贫困和苦恼”，“知识即力量”就是他的著名格言。“科学是一种在历史上起推动作用的革命的力量”，这句话只有到了19世纪恩格斯才能说出来。在中国古代，科学的社会地位，并不像我们想象的那么坏。秦汉以来，那些稍微稳定和长久的朝代，都为科学的发展多多少少尽过力。就是焚书坑儒的秦始皇，也不烧“医药、卜筮、种树”之书，还组织300多人进行天文、气象观测。任何一位统治者，想要长治久安，想要持续发展，都不能不关心科学，秦始皇的迅速灭亡，并不是因为不重视科学，而是其他的问题。

说中国古代只有技术，没有科学，这是一种错觉。弗朗西斯·培根和马克思、恩格斯对造纸、印刷、火药和指南针的推崇，只是因为这几样东西适应了文艺复兴和资产阶级走上政治舞台的需要，并不是说中国只有四大发明。李约瑟为了证明中国传到西方的不只这四件东西，在他的《中国科学技术史》第一卷中用a, b, c, d, 排列，一口气写到“(z) 瓷器”。他说：“我写到这里用了句点，因为26个字母都已用完了，但还有许多例子，甚至重要的例子可以列举。”李约瑟在这一节里讲的是“技术的西传”，而且只是“少数有关机械和其他技术提前来叙述”，更不包括科学在内。

中国人是不是只讲求实用，而忽略了基础研究，事实上也并非如此。在数学方面，祖冲之（429年—500年）关于圆周率的计算，准确到小数点后七位，在世界上领先了1000年。他从圆内接正六边形开始，依次将边数加倍，求各正多边形的边长和面积，边数越多，正多边形的面积和圆的面积也就越接近，求得圆周率也越准确。他一直算到圆内接正24756边形。 $24756 = 6 \times 2^{12}$ ，也就是说，要把同一运算程序反复进行12次，每一运算程序又包含有对9位数进行加、减、乘、除和开方等11个步骤。就是今天，用笔来进行计算，也不是一件容易的事，更何况当时是用算筹摆来摆去呢，而这项研究并没有什么实用意义！

《墨经》中的光学部分，虽然只有8条，仅300余字，但次序安排合理，逻辑严密，堪称为世界上最早的几何光学著作。前5条，首论影的成因，次述光和影的关系，第三以针孔成像论证光的直线进行，接着又说明光的反射，最后讨论光、物、影三者的关系，这样，光学中的影论部分已基本具备了。后3条分别论述平面镜、凹面镜、凸面镜的成像规律，正是光学中像论部分的基本内容，8条合起来即为几何光学的基础，没有做过实验是写不出来，没有对实验的忠实纪录也是写不出来的。

在化学方面，西汉时的《淮南万毕术》中即发现了金属置换反应，将铁放在硫酸铜即胆矾溶液中，使胆矾中的铜离子被金属铁置换而成为单质铜沉淀下来的产铜方法，到宋代曾广泛应用于生产，是水法冶金技术的起源。东汉末年的《周易参同契》认识到了物质进行化学反应时的配方比例关系。东晋时的《抱朴子·内篇》发现了化学反应的可逆性。不少事实说明，中国的炼丹术比阿拉伯人更早地为原始形态的化学作出了贡献。

谈到生物学，不能不想起达尔文（1809年—1882年）。达尔文在《物种起源》里说：“如果以为选择原理是近代的发现，那就未免和事实相差太远，……在一部古代的中国百科全书中已经有关于选择原理的明确记述”。

其后，在他的《动物和植物在家养下的变异》（1868年）一书中，又引用了大量中国资料，作为他的学说的例证，我们的祖先不仅认识到变异的普遍性和它同环境、条件的关系，而且认识到可以利用变异为材料，通过人工选择来培育新品种。宋代王观在《扬州芍药谱》中说：“今洛阳之牡丹，维扬之芍药，受天地之气以生。而大小深浅，一随人力之工拙而移其天地所生之性，故异容异色间出于人间”。又说“花之颜色之深浅与叶蕊之繁盛，皆出于培壅剥削之力。”这把遗传和变异的关系，以及人工在变异中的作用说得一清二楚。所谓“天地所生之性”即遗传性。人工选择的方法，中国也有多种多样。在公元前1世纪的《汜胜之书》中就提出小麦的穗选法，说：“取麦种，候熟可获，择穗大强者，收割下来成束晒干，收藏好，顺时种之，则收常倍。”到了公元6世纪的《齐民要术》，关于人工选择的记载就更多了，在猪、羊、鸡、蚕和禾、粟、稌、秫等家养动物和栽培作物中，普遍地应用了人工选择的方法来选育新品种。

通过人工杂交形成的新品种，可以把两个或两个以上亲本的优良性能结合起来，成为一个具有更高生产性能和更能抵抗不良环境的新的生物类型。杂交分有性杂交和无性杂交两种，这两种在中国古代都有相当突出的例子。马和驴杂交产生的骡子是个典型的例子。骡结合了马和驴的特点，而胜于马和驴。它从马那里得到体大、力大、活泼等优点，又从驴那里得到稳健、不易激动、忍耐力强的优点。到目前为止，像骡子这样有用的种间杂交，也还是少见的。至于无性杂交的嫁接技术，在我国更是普遍。《齐民要术》就有利用不同种的树木进行嫁接，来提早果树结实和改良品质的记载。1688年陈扶摇在《花镜》中说：“凡木之必须接换，实有至理存焉。花小者可大，瓣单者可重，色红者可紫，实小者可巨，酸苦者可甜，臭恶者可馥，是人力可以回天，惟在接换之得其传耳。”正因为我国有丰富的关于遗传种的知识，才培育了许多动植物优良品种，创造了大量物质财富，以世界上7%的耕地面积，养活了世界上22%的人口，对世界文明做出了重要贡献。

中国人在天文学、地学和医药学方面的成就，那是有口皆碑，谁也抹杀不了的，就不用再说了。

二、中国古代科学是否只是辉煌的去？

中国古老深厚的传统文化对当代科技发展有着重要的促进作用，可以归纳为四个方面。

一是中国系统思维在当代科技综合趋向中的启发作用。近代科学发展400年，建立了庞大的分析型学科体系，在很多方面较精确地研究了自然界。但它也有不足之处，发展综合、非线性、复杂性、开放系统的研究，已成为当代改变观念、推动科学发展的时代强音，而这类研究正是中国传统文化的优势，可以有启发作用。耗散结构理论的创建者，比利时科学家普里戈津（I. Prigogine）1979年说：“我们正向新的综合前进，向新的自然主义前进。这个新的自然主义将把西方传统连同它对实验的强调和定量的表述，同以自发的自组织世界的观点为中心的中国传统结合起来”。1986年他又在《探索复杂性》一书中说：“中国文化具有一种远非消极的整体和谐。这种整体和谐是各种对抗过程间的复杂平衡造成的”。四川水利工程都江堰历经2000年而不衰，渠首工程的鱼咀、飞沙堰、宝瓶口三者巧妙结合，分水、分沙的

合理性，工程维修的科学性和简单性，充满了中国古人治水的整体性和复杂性思想，对当今的水利工程建设有着丰富的启示。协同学（synergtics）的建立者，德国物理学家哈肯（H.Haken）说：“我认为协同学和中国古代思想在整体性观念上有很深的联系”。“虽然亚里斯多德也说过整体大于部分，但在西方，一到对具体问题进行分析研究时，就忘了这一点，而中医却成功地应用了整体性思维来研究人体和防治疾病，从这个意义上说中医比西医优越得多”。他说，西方的分析式思维和东方的整体性思维都是他建立协同学的基础。

二是古代的天人合一思想，强调人与自然的和谐关系，对当代的环境科学、区域开发和持续发展有明显的积极意义。《旧约全书》里说，上帝给人的训喻是：“你们要生养众多，遍满大地。凡地上的走兽和飞鸟，都必须惊恐，惧怕你们；地上的一切昆虫并海里一切鱼类，都交付你们的手。凡活着的动物都可以作你们的食物，这一切我都赐给你们，如同蔬菜一样。”和这种主张无限发展人口和无限掠夺自然的思想相反，中国在周朝就颁布了《野禁》和《四时之禁》，不准违背时令砍伐木材，割草烧灰，捕捉鸟兽鱼虾，设立了管理山林川泽的官员。战国时的韩非就认识到了人口膨胀带来的社会问题，他说：“今人有五子不为多，子又有五子，大父未死而有二十五孙，是以人民众而货财寡，事力劳而供养薄，故民争，虽倍赏累罚而不免于乱”（《韩非子·五蠹》）。这比马尔萨斯的人口论（1798年）早2000多年。除了保护生态和节制生育外，更主要是发展生产。要持续发展，首先得解决农业问题，《吕氏春秋·审时》篇说：“夫稼，为之者人也，生之者地也，养之者天也”，把农业生产中天、地、人三者之间的关系看作彼此联结的一个有机的整体，主张顺天时，量地利（根据地区和土壤等条件进行种植），尽人力（精耕细作、间作套种等），这一套完整的农业思想，在现代的农业生产中，仍然闪闪发光。在防治水灾方面，也有人与自然的双重关系，古代即有“非河犯人，人自犯之”一句名言，现在高坝、大库修得很多，但水灾越来越严重，问题就是忘记这条教训，有的地方把开发区设在河滩内，水来了当然损失很大。搞系统工程的，只考虑对物 and 技术的重视是不够的，还要考虑“事”和人的因素，顾基发教授根据天人合一思想，最近提出了WSR系统工程方法论。此方法认为处理复杂问题时，即要知物理，又要明事理（考虑这些物如何更好地被运用的事的方面），最后还要通人理。

三是自然史料在现代科学研究中的应用。我国地域广大，历史悠久，对许多自然现象的观察时间之长，纪录之详，堪称世界之最。首先注意到中国天文纪录重要性的是法国大天文学家，大数学家拉普拉斯，1796年他在《宇宙体系论》里说：“法国图书馆所藏许多手稿里，有不少是还没有经人整理的观测，它们对于天文学可能有所阐发，特别是对于天体运行上的长期差。这一工作应引起熟悉东方语文的学者们的注意，因为认识宇宙体系里的大变化，并不比法国大革命（1789—1794年）更少趣味”。他是看了在华传授士宋君荣（A.Gaubil）写回的手稿说这番话的。宋君荣提供的中国关于黄赤交角的观测，为他的天体力学理论提供了佐证。二次世界大战以后，射电天文学的出现，使对超新星遗迹的认证工作显得重要起来，而在这方面中国纪录更能发挥作用，担任过美国原子能委员会主席的麻省理工学院教授韦斯科夫（V.F.Wisskopf）甚至这样说：“在人类历史上有两个7月4日，值得永远纪念。一个是1776年7月4日，成立了美利坚合众国。一个是1054年7月

4 日，中国天文学家纪录了金牛座超新星的爆发，这次爆发产生了蟹状星云。”蟹状星云是当今天文学的前沿阵地，担任过美国国立基特峰天文台台长的伯比奇（G.Burbidge）说，当今天文学的研究可以分为两部分：蟹状星云的研究和其他天体的研究。东方天文纪录的现代应用，现在已成为一个很受注意的课题，许多国家有人在做。

历史资料在地球科学研究工作中也很重要。竺可桢先生关于气候变迁的研究就是一例。从 1952 年开始，他不断地从经、史、子、集，以及笔记、小说、日记、地方志中收集有关天气变化、动植物分布、冰川进退、雪线升降、河流湖泊冻结等资料，加以整理，临终前于 1972 年发表《中国近五千年来气候的变迁的初步研究》，重建 5000 年气温变化史，受到全世界的关注。文章发表后立即被译成英、德、法、日和阿拉伯诸种文字，英国《自然》杂志发表评论说：“竺可桢的论点是特别有说服力的，着重说明了研究气候变迁的途径，西方气象学家无疑将为能获得这篇综合性研究文章感到高兴。”现在，研究全球性的气候变化，已成为一个重要课题，各国都在大量投资，计算机模拟等手段均用上，而竺可桢开创的历史方法仍不失为一条途径。

建国初期中国科学院组织的《中国地震资料年表》的编制及有关的研究工作，既是基础研究，又具有现实意义。地震预报十分困难，世界各国地震学家长期努力至今尚未研究出有效方法。我国地震台站解放前只有北京和南京两处，解放以后，虽逐年增设，但为数也不多，而为时又短，远远不能满足第 1 个五年计划建设的需要。第 1 个五年计划的主要任务是发展重工业。按照建厂的程序，在选择厂址时，首先需要知道建厂地点的地震烈度。地震烈度若会达到 7 度以上，基本建设就要加防固设备；地震烈度若会达到 10 度以上，则根本不能建厂，其他条件再好，也得放弃。在这种情况下，只有发挥我国历史纪录的优势，组织大量人员收集各地各代资料，总结选厂地点的地震状况。他们列出了 500 多个地点的地震烈度，绘出等震线，作出中国地震区域图，满足了当时经济建设的需要。此项工作在 1976 年唐山大地震以后更显得重要，中国社会科学院、中国科学院和国家地震局又联合起来，重新组织力量，再做更细致的工作，历时 5 年，完成《中国地震历史资料汇编》5 大卷。

类似于地震烈度研究对工程建设所起作用的史料工作最近还有水利科学院水利史研究室关于“三峡地区大型岩崩和滑坡历史及现状的考察研究”，这是为跨世纪的三峡工程所做的准备工作不可少的一部分。他们查阅了 1800 年的有关历史文献和地质勘测资料，先后 3 次去现场考察，在此基础上形成了相应的历史模型，进而提出了可行性方案。报告指出了过去近 2000 年间，大型岩崩滑坡集中在某几个河段；集中发生的周期和季节规律；最大规模只是短时间堵江，未形成经年的拦江堆石坝。报告还指出秭归、巴东境内的黄腊石和新滩两地岩崩规模最大，危害严重，应先期整治和预防，但不致制约三峡工程建设。从而，对三峡地区今后可能出现的类似地质灾害在地理分布，发生诱因、可能的规模和频率等方面，提供了一个实在的参考，成为预测它们对工程施工、今后的运行以及城镇和航运安全影响的依据。在这里，“历史模型”取得了地质理论分析和计算都难以做出的结果。

四是把传统科学作为目的基因转入现代科学中，使现代化科学得以有新的发展。在这方面最成功的一个例子便是吴文俊院士从事的几何定理的机器证明及其应用。

数学定理的机器证明是吴文俊院士继承我国古代数学传统开创的数学机械化工作的一部分。“机械化”是相对“公理化”而言的。公理化思想起源于古希腊，欧几里得《几何原本》就是这方面的代表作，它创造了一套用定义、公理、定理构成的逻辑演绎体系。我国的数学著作，自汉代的《九章算术》起则创造了另一种表达方式，它将 246 个应用问题，区分为 9 大部分（章），在每个部分的若干同类型的具体问题之后，总结出一般的算法。这种算法比较机械（刻板），每前进一步，都有有限多个确定的可供选择的下一步，这样沿着一条有规律的刻板的道路一直往前走就可以达到结论。而这种以算为主的刻板的做法正符合计算机的程序化。吴文俊先生利用我国宋元时期发展起来的增乘开方法与正负开方法，在 HP25 型袖珍计算器上，利用仅有的 8 个储存单位，编制一小程序，竟可以解高达 5 次的方程，而且可以达到任意预定的精度。

我国宋元时期数学发展的另一个特点，是把许多几何问题转化为代数方程与方程组的求解问题（后来 17 世纪法国的笛卡尔发明的解析几何也是这样做的）。与这相伴而生，又引进了相当于现代多项式的概念，建立了多项式的运算法则和消元法的有关代数工具。吴文俊先生以其深厚的几何学和拓朴学功底，吸收了宋元时期数学的这两大特点之后，将几何问题用代数方程表达，接着对代数方程组的求解提出一套完整可行的算法，用之于计算机。1977 年先在平面几何定理的机器证明方面取得成功；1978 年推广到微分几何；1983 年我国留美青年学者周咸青在全美定理机器证明学术会议上介绍了吴方法，并自编软件，一鼓作气证明了 500 多条难度颇高的几何定理，轰动了国际学术界。穆尔（J.S.Moore）认为，在吴文俊之前，机械化的几何定理证明处于黑暗时期，而吴文俊的工作给整个领域带来光明，一个突出的应用是由开普勒行星运动 3 定律自动推导出牛顿万有引力定律，这在任何意义下讲都应该说是一件了不起的事。然而吴文俊并未就此满足，他说：“继续发扬中国古代传统数学的机械化特色，对数学各个不同领域探索实现机械化的途径，建立机械化的数学，则是本世纪以至绵亘整个 21 世纪才能大体趋于完善的事。”

我于今年 8 月 26 日在汉城召开的第八届东亚科学史会议上将以上 4 点做了介绍以后，大家很受鼓舞，8 月 28 日《韩国经济新闻》以通栏大标题做了报道。有人觉得英国历史学家汤因比（A.J.Toynbee）临终前于 1973 年对池田大作说的话可能是对的。他说：

“我所预见的和平统一，一定是以地理和文化主轴为中心，不断结晶扩大起来的。我预感到这个主轴不是在美国、欧洲和苏联，而是在东亚。”

“中国人和东亚各民族合作，在被人们认为是不可缺少和不可避免的人类统一过程中，可能要发挥主要作用。”

三、中国传统文化的科学精神

什么是科学精神？有各种不同的说法，但又大同小异，这里采用竺可桢的说法。竺可桢于 1941 年在《科学之方法与精神》一文中分析了近代科学的前驱哥白尼、布鲁诺、伽利略、开普勒、牛顿和波义耳等 6 人的生平事迹，从他们身上总结出了 3 个特点，认为这即是文艺复兴以后的欧洲近代科学精神。这 3 点是：（1）不盲从，不附和，一切依理智为依归，如遇横逆之境，

则不屈不挠，只是问是非，不畏强暴，不计利害；（2）虚怀若谷，不武断，不专横；（3）专心一致，实事求是。后来，他在浙江大学的一次演讲中，又把这3点归纳成为两个字，即“求是”。他认为求是精神，就是追求真理，不盲从，不附和，不武断，不专横。而求是的途径则在儒家经典《中庸》中已说得很明白，曰：

“博学之，审问之，慎思之，明辨之，笃行之。”

即单靠读书和做实验是不够的，必须多审查研究，多提疑问，深思熟虑，明辨是非，把是非弄清楚了，认为是的就尽力实行，不计个人得失，不达目的不罢休。

在这里，竺可桢已把现代科学精神和中国传统文化联系起来了，但没有更多的展开。事实上，科学精神属于精神文明的范围，它在追求真理和坚持真理这一点上，和人文精神是一致的。而人文精神在中国传统文化中有着丰富的遗产，仅以《论语》为例，我就觉得有许多论点和竺可桢所谈科学精神是一致的。

《论语·子罕》篇有：“子绝四：毋意，毋必，毋固，毋我”。这就是说，孔子在讨论问题的时候不主观、不武断、不固执、不唯我独尊。这不就是“无偏见性”和“虚怀若谷”吗？孔子主张“学而不思则罔，思而不学则怠”（《论语·为政》），这里的“思”是思考的意思，就是说，光读书不思考，不怀疑，就罔然无所解，光思考不学习，就殆然无所得，这又和“怀疑性”与“不盲从”是一致的。孔子反对附和，反对盲从，颜回虽是他的得意门生，但对“吾与回言终日，不违如愚”是不满意的，他说“回也，非助我者也，于吾言所不悦”（《论语·先进》）。相反，他却提倡“当仁不让于师”（《论语·卫灵公》）。对孔子来说，“仁”是人之所以为人的性质，即人道的最高真理，一旦掌握了这个真理，就是老师也不让，而且提倡“志士仁人，无求生以害仁，有杀身以成仁”（《论语·卫灵公》），也就是说，在真理与生命之间进行比较，真理更重要。布鲁诺为坚持日心说，被烧死在罗马鲜花广场上，宁死不屈，不正是这种精神的体现吗？

孔子这种坚持真理的精神，为中国历代的优秀知识分子所继承，孟子高扬“富贵不能淫，贫贱不能移，威武不能屈，（《孟子·滕文公》下）；陶渊明“不为五斗米折腰”；文天祥大义凛然，临刑前写下了气壮山河的《正气歌》。这些动人的事迹不但鼓舞了中国人民一百年来反帝反封建的英勇斗争，也成为中国科学家求实、献身精神的思想源泉，正如1989年3月王绶琯院士在中国天文学会第六次代表大会上的《祝辞》中所说：“我们中国的天文工作者，远溯张衡、祖冲之，近及张钰哲、戴文赛，虽然时代不同，成就不同，但始终贯串着一股‘富贵不能淫，贫贱不能移’的献身、求实精神。今天，让我们继承我们民族的优良传统，在社会主义建设的号角中，团结、奋斗、前进吧！”

任何传统都有精华和糟粕两个方面。问题是我们要善于保持和发扬精华，敢于淘汰那些糟粕。杨振宁最近在《近代科学进入中国的回顾与前瞻》一文中说：“儒家文化的保守性是中国三个世纪中抗拒西方科学思想的最大原因。但是这种抗拒在今天已完全消失了。取而代之的是对科技重要性的全民共识。”“儒家文化注重忠诚，注重家庭人伦关系，注重个人勤奋忍耐，重视子女教育。这些文化特征曾经而且将继续培养出一代又一代勤奋而有纪律的青年。与此相反，西方文化，尤其是当代美国文化，不幸太不看重纪律，

影响了青年教育，产生了严重的社会与经济问题。”

竺可桢、王绶琯和杨振宁，他们都是受过西方教育的有成就的科学家，他们深感中国传统文化中的科学精神对他们的培养之恩。那些轻视中国传统文化，认为中国传统文化妨碍科学发展的说法是站不住脚的。

四、中国科学的未来

杨振宁《近代科学进入中国的回顾与前瞻》一文的最后说：“到了 21 世纪中叶，中国极可能成为一个世界级的科技强国。”我同意他的这个结论。

中国人有没有能力从事近代科学？这个回答是肯定的。英国李约瑟本来是一位生物化学家，与中国毫无关系。1937 年在他的实验室里来了 3 位中国留学生（王应睐、鲁桂珍和沈诗章），其聪明才智使他大为震惊，他觉得能培养出这样学者的国度必然有高度的文化，于是他在 37 岁这年开始学中文，后来改行研究中国科学史。抗战末期，他在英国驻华大使馆担任科学参赞，并组建中英科学合作馆，后来把他记述抗战时期中国科学家工作的一本书取名《科学前哨》（Science Outpost）。他在序中说：“书名似乎应当稍加解释。并不是我们中英科学合作馆的英籍同事在中国，而以科学前哨自居。我所指的是我们全体，不论英国人或中国人，构成中国西部的前哨”。“这本书如有任何永久性的价值，一定是因为它提供一类纪录（虽然不甚充分），……看到中国这一代科学家们所具有的创造力、牺牲精神、坚韧、忠诚和希望。我们同他们深以为荣，今天的前哨就将成为明天的中心和司令部”。你看他对中国科学的未来是多么充满信心！这本书很值得一看，可惜目前还没有完整的中译本。

到 1995 年 7 月为止，美国国家科学院在世的 1672 名院士中，华人科学家有 30 位，占 0.18%；美国工程院 1348 名院士中，华人有 43 位，占 0.32%。这个比例虽然不高，但可以证明，在当代世界科技最强国的评估中，华人还是占有一席之地的。而且还要考虑到，1949 年以后，中国科学家有许多杰出的成就是保密的，如原子弹和导弹的研制等，外界很少知道，国际学术交流也中断了许多年，美国评选外籍院士，很少会考虑到这一部分中国学者。事实上，他们选举大陆学者为外籍院士，是从 1982 年才开始的，至今只有 6 人：华罗庚（1982 年，已故）、夏鼐（1984 年，已故）、谈家桢（1985 年）、冯德培（1986 年，已故）、周光召（1987 年）、贾兰坡（1994 年）。被选为工程院外籍院士的是王淦昌（1990 年）和郑哲敏（1993 年）。因此这只能是一个参考指标。

最能说明中国人能够自力更生、独立自主搞科学的是杨振宁搜集的 10 项产品的年代比照表，现在把这个表转录如下：

第一次制成	年份					
	美国	前苏联	英国	法国	日本	中国
反应堆	1942	1946	1947	1948	-	1956
原子弹	1945	1949	1952	1960	-	1964
氢弹	1952	1953	1957	1968	-	1967
人造卫星	1958	1957	-	1965	1970	1970
喷气机	1942	1945	1941	1946	-	1958
M2 飞机	1957	1957	1958	1959	-	1965
试制计算机	1946	1953	1949	-	1957	1958
计算机(商品)	1951	1958	1952	-	1959	1966
半导体原件	1952	1956	1953	-	1954	1960
集成电路	1958	1968	1957	-	1960	1969

从上表可以看出，我们的速度是很快的。从原子弹到氢弹，我们所花费的时间最少，法国 8 年，美国 7 年，英国 5 年，苏联 4 年，中国只有 3 年，爆炸在法国之前。还要注意一点，别的国家的科学家，是全力以赴搞科学，中国科学家要政治学习、劳动锻炼、下乡“四清”，至于文化大革命那样的干扰就不用提了。过去在时间很少的情况下，能做出如此巨大成绩，今后政治形势稳定，不再以阶级斗争为纲，不再搞运动，科学家用足够的时间钻研业务，肯定能出更多更好的成果。

发展科学要有人，这个人得有时间，还得有钱。再伟大的科学家也不能赤手空拳站在自然界面前，他要生活，他要获取别人的信息（图书、资料），他要有观测和实验的设备，这些都要钱。今天，我们科研经费仍然紧张，仍然需要加大投入，但和解放以前相比已有本质的不同。今天，政府择优支持，攀登计划等都属于这一类。以天文学来说，太阳物理经费相对来说就比较充足，原因是他们 80 年代研制出的太阳磁场望远镜，其功能比美国同样类型的两台仪器之和还大，能观测光球、色球两层中矢量磁场和速度场；90 年代发明的太阳九通道望远镜，使世界太阳界为之倾倒，日本、美国和欧洲等许多国家和地区，有的要买他们的仪器，有的正在积极采用他们的思路发展大型空间和地基太阳磁场和速度场系统。他们雄心勃勃，又准备立即将直径 80 厘米的望远镜用 20 万立方米的气球送入太空，并计划在 2002 年将直径 1 米的望远镜送入太空，进行观测。

“九五”期间那将要上马的国家大型工程“大天区面积多目标光纤光谱望远镜”，简称 LAMOST，又是一例。这项天文界经过 10 年酝酿，多次讨论，三易蓝图，到 1994 年才定型的计划，终于得到国家支持，拿出 1.7 亿元的经费来，给我们是多么大的鼓舞！

“工欲善其事，必先利其器”，回想 1912 年中央观象台成立时一架望远镜也没有；30 年代紫金山天文台建成，有了 60 厘米反射望远镜，但抗战军兴，几经搬迁，什么也没有做成。90 年代初我们有了上海天文台的 1.56 米望远镜，北京天文台的 2.16 米望远镜和 1.26 米红外望远镜，青海的 13.7 米毫米波射电望远镜……各项工作蒸蒸日上。我国现在每年发表的天文学论文都在 1,200 篇以上，1994 年高达 1464 篇，而 1911 年到 1948 年总共才 944 篇，只是这一年的 65%，可见其进步之大。今年 8 月 1—4 日，在香港举行

了 21 世纪中华天文学研讨会，到会 180 多人，其中来自内地的占 $1/2$ ，来自港台的占 $1/4$ ，来自海外的占有 $1/4$ 。大家满怀信心展望 21 世纪，一致认为：“中华民族有着悠久的天文观测传统，对世界天文学的发展曾经做出了独特而重要的贡献。现在，中国天文又在蓬勃兴起，进入 21 世纪，中华天文学家和天体物理学家将会有更辉煌的成就。”炎黄子孙遍布 7 大洲，振兴中华同此心。

在当代的各门自然科学中，天文学是花钱很多而经济效益又最少的一门小学科，就能有如此大的发展，其他学科的前景就更光明了。所以我是满怀信心地进入 21 世纪，21 世纪中国将成为科技强国。当然，这样说不是看不到问题，在前进的道路上总是会有困难和错误的，但根据 20 世纪发展的经验，困难总是会被克服的，错误总是会得到改正的。

从科学发展过程及研究规律看什么是真科学、伪科学

苗永瑞

中国科学院陕西天文台 中国科学院上海天文台

苗永瑞 天体测量及时间频率专家。1930年12月3日生于山东济南。1951年齐鲁大学毕业，中国科学院陕西天文台名誉台长、上海天文台研究员；国际天文协会会员，国际天文协会时间组织委员。1991年当选为中国科学院院士。主要从事天体测量和时间频率的研究。

一、前言

科学一词拉丁语是学问或知识的意思，英语是 natural science 的简称，对应的德文是包括一切有系统学问的意思，在汉语词典中说“科学”是反映自然、社会、思维等的客观规律的分科的知识体系，如物理学、数学、生物学、化学等等，是社会实践经验的总结，并在社会实践中得到检验和发展，是揭示事物发展的客观规律探求客观真理，成为人们改造世界的指南。恩格斯说：“科学是一种在历史上起推动作用的革命力量”，科学可以转化为直接生产力。离开了科学就不可能有现代化的生产，也不可能有社会的现代化。技术科学是根据科学原理和法则，创造实用技术方法，科学实验过程，设计研制仪器及器休；创造新的产品和技术路线等。小平同志说：“科学技术是第一生产力，这是十分正确的；党中央最近又提出科教兴国的战备方针，是非常英明和及时的。”

最近一些时期来，各地发生了各种迷信活动，相信命运，用易经算命，用特异功能预测未来事件，甚至水变油等伪科学甚嚣尘上不一而足，科学就是科学，伪科学不可成为科学，不可混淆是非。本文仅就科学发展过程及科学研究规律，从正面谈谈这方面的看法。本人非科学学专家，以下看法不一定正确，算是一孔之见吧。

二、科学发展的历史过程

科学技术的发展大致经历了三个历史过程，即古代科学，文艺复兴时代后的科学及近代科学（18世纪后的科学）。科学经过这三个时期的发展才臻于完善。

第一个时期，由于生产及生活的需要，发明了一些器具及测量方法，开始了科学技术的朦胧；在非直观的科学方面存在着很多假设和猜想，那时这些假设无异也受到迷信和神学色彩的影响，但假设和推理方法的建立打下了初步基础。在这一时期，特别对以后的科技发展产生奠基作用的是古希腊三位伟大科学家，即亚里士多德、欧几里德和阿几米德，这三人分别建立了归纳、演绎法及逻辑学，提出了定义、公理、公设，然后到定理，最后一位创立了实验科学。在那一时期古希腊的亚历山大里亚城出了很多科学家，后人称为亚历山大里亚学派。

第二个时期是从 16 世纪开始到 17 世纪，称为文艺复兴时代。从第一个时期到第二个时期经历了 1000 余年，科学技术发展非常缓慢。这主要是在公元前后世界上创立了三大宗教，虽然宗教对人类的精神文明建设有重要意义，有时对科学技术发展也有一定作用，但到中世纪，特别是在欧洲的天主教掌握了国家行政大权，教皇可以任免国王，自称是上帝的长子，教皇的教律严重阻碍了科技发展，很多大科学家甚至被教皇处死。一千余年的科技停顿不能说与宗教没有关系。

打破宗教枷锁把科学推向前进，在历史上应归功三大伟人。一位是开创这一时期的波兰人哥白尼（1473—1543），他建立了日心说，成为自然科学的独立宣言；另一位是英国人威廉·哈维（1578—1657），他的“论动物的产生”及万物皆来自“卵”的理论对生命科学产生了革命性变化，最后一位是 18 世纪英国人查理·达尔文（1809—1882）了，他的物种起源建立了进化论，恩格斯称赞这是“首先发现了我们星球上有机界的发展规律”。以上三位伟人不仅是伟大科学家，而且是人类进入科学时代开拓者和奠基人。自此以后，科学进入飞跃发展时期，从而产生了欧洲的工业革命，使物质生产一日千里，逐步进入高度发达的社会。

第三个时期是从 18 世纪开始的。这时的科学已进入系统化，即从理论到实践，然后到大量的采用这些理论与实验发展出大量的生产工具和产品。科学已进入学科阶段，出现大量的著名科学家及工程师。物理学从力学和机械学中产生了电磁学、电动力学等；化学从无机化学到有机化学，大分子化学等；生物学从分类学到生物化学、生物物理学等；天文学从天体测量天体力学到天体物理等；数学从几何代数到微分几何等……各种学科不断出现，分工愈来愈细，发展愈来愈快，水平愈来愈高。到本世纪初，又出现相对论和原子核物理及量子物理，在实践中产生了半导体，激光和高速计算机，以及原子能的应用。从而把科学又推向一个新阶段。估计量子力学及核物理的应用，目前还在初级阶段，到下世纪才能发挥出它的巨大功能。

上述科技发展过程是从西方科技方面论述的，中国的发展不太相同，因中国是非宗教国家，在公元前与西方大致相同，但我国在人文学方面发展比较突出，而科技理论没有出现像古希腊那样的大科学家。不过在宋朝以前，我国的科技水平还是比较高的，是稳步发展的，没有明显的起伏。但总的来讲发展比较缓慢。这主要是当权者重视人文学，而对科技认为是雕虫小技不予重视。自清朝起，中国已逐步沦为半殖民地，其科技水平就不言而喻了。

三、科学技术的规律

1. 科学实验的三条基本原则，真实的实验应不以人的意志为转移，其检验标准就要符合三性，即重复性、再现性和可比性。在一定条件下，这种实验总可以重复做，不能是一时可做，过一时就不能进行；而实验中根据客观规律，必定出现某种现象，不管做多少次，这种现象总会发生，称为再现性；现象的发生可以直接观察或间接观察，而且可以进行量化测量，此称为可比性。符合三性的实验称为真科学试验，否则就是不真实的，不是虚假的就是偶然的不能称谓规律。伪科学均不具备此三原则。

2. 科学研究的连续性和不断深入性。从历史上看科技发展过程是连续的和不断深入的。从物理中的力学研究来说明此问题。牛顿定律的创建不是牛

顿一个人的功劳，而是牛顿总结了伽利略、开普勒和胡克等人对力学的大量观察和实验加以概括和推理而得到的。伽利略在做斜板试验时，发现物体下滑速度愈来愈快，产生加速度，若把物体由下向上推一下，则情况正相反。因此他大胆认为把斜板放平，若板子没有磨擦力的话，将维持速度不变，这不就是牛顿第一定律吗？不过牛顿把惯性概念加进去就进入到高层次。牛顿的万有引力的发现，应当说来源于开普勒的行星运动三定律启发与概括。因此科研的重大成果是多人多年众多科学家研究的总合力的结果。是一个连续渐进的过程（包括推理过程是连续的），累积到一定程度，将产生出飞跃性的成果。就是量变到质变的规律。而伪科学则是另外一种样子。

3. 科学研究要有参考体或参考系。现就参考体在天文学研究的作用加以说明。用在地球上物质的光谱图与宇宙中天体的光谱进行比较就可知天体的元素成份，若没有地面上实验的标准光谱图（即参考体），说天体上有什么物质不就是伪科学了吗？

测定天体距离的方法有十余种，不同情况就用不同的方法，不管哪一种方法，均是与距离有关的关系式求得。关系式的得到还是用已知的天体的物理性质求得的。那么已知天体的距离是用地球公转时测量的视差而得。因此可以把视差法测得的天体距离的那些天体称为参考体。

在科学实验中，均需要测量仪器或工具，古人云：工欲善其事，必先利其器。所有的测量仪器，均需定标才能实用。这种定标工作也可以称谓参考体。总之科学实验是离不开参考体的。伪科学就没有像样的参考体。

总之科学发展是渐进地、连续地，有严格的推理及实验过程，是放之四海而皆准的。科学研究可以飞跃，但应是有基础的飞跃，有大量实践来验证的。而伪科学是似是而非的，真假混淆跨大其辞的。当今世界科技有巨大的魔力，有些不可能直观就能了解。在此情况下，我们一定要有清醒的头脑，千万要分清是非，走科学技术发展之路。

世界科技、经济中心的转移及留给我们的思考

程耿东

大连理工大学

程耿东 工程力学家。1941 年 9 月 22 日生于江苏苏州。1964 年毕业于北京大学。1968 年大连工学院研究生毕业。1980 年获丹麦技术大学博士学位。1995 年任大连理工大学校长。1995 年当选为中国科学院院士。主要从事工程力学和计算力学研究。

翻开世界科技成果发现、发明、创造和应用的历史史册，我们可以看到，在人类历史的发展进程中，世界的科技中心发生过多次转移，从古代的中国到意大利、英国、法国、德国，直到今天的美国。对科学中心转移现象进行系统的定量化研究的第一位学者，是日本的科学史家汤浅光朝，他得出的结论是，“从意大利到美国，科学中心已经发生了四次转移，每个国家的平均兴隆时期约为 100 年”。“科学兴隆时期比起每一个国家的历史要短得多”，每次科技中心的转移都引起世界经济中心的转移，每一次转移都有深刻的历史背景，反映了科教和社会和政治、经济、文化的密切关系，反映了科技是生产力的论断。分析世界科技中心转移的历程，可以看到很多规律性的现象，从中得到十分有益的启示。也可以看到，改革开放后的中国的政治经济条件，有可能使中国成为 21 世纪世界科技发展的新中心之一，进一步使中国成为世界经济的中心之一。同时，我们也可以看到摆在我们政府、科教界和企业家面前的一系列的迫切课题。只有切实解决这些问题，才能落实科技是第一生产力和科教兴国的战略方针，才能使这种可能转化为现实。

一、世界科技和经济中心的五次转移

1. 古老的中国曾经是古代世界科技和经济的中心

中国、巴比伦、埃及和印度被人们称为世界四大文明古国，其中中国是唯一保持完整文化传统的国家。如果说奴隶社会的科学文化高峰在古希腊罗马时期，那么封建时代的科学技术高峰则在中国。由于中国以农业为中心的科学技术取得世界领先地位，使得从公元前 3 世纪，即秦汉开始，古代世界的科教中心在相当长的一个时期是在中国；从秦汉直到中世纪，中国封建社会有过一段科教得到迅速发展的时期，在唐宋时期发展到一个顶峰，四大发明（火药、造纸、印刷、指南针）中的三大发明是在唐宋。中国“农、医、天、算”四大实用科学成就为我国古代农业社会和中华民族的繁荣发挥了巨大作用。古代的中国出现了一批优秀的科学家。如研究预报地震、发明地动仪的张衡；研究历法和圆周率的祖冲之；著有《梦溪笔谈》，对天文、律历和医药都有很多研究的北宋政治家、科学家沈括；著有《水经注》，研究治水的郦道元和对天文观测和编制新历很有成就的一行和尚。科技的发达，促进了经济的繁荣和社会的发展，历史上有名的“贞观之治”除了有政治因素外，也有当时的生产力和科教水平作为基础，而且政治因素在相当程度上也是适应了当时的生产力和科教水平。唐朝时中国的科学文化和经济繁荣的壮

观景象吸引了许多国家的学者来华，仅留学长安的日本留学生，唐代就多达五六百人，西方望尘莫及。从元代以来，中国多数封建朝廷对知识和知识分子不重视。例如，元代流传的说法是人分十等：一官、二吏、三僧、四道、五医、六工、七猎、八民、九儒、十丐。知识分子排在第九，只比要饭的高一等。历史上的中国封建统治者，从未给予科技足够的重视，从事科技活动的工匠和技师一直处于社会的最低层。长期实行的科举制度客观上影响了知识分子对自然科学和技术科学的重视，严重地束缚了人们的思想。儒家的一些道德观念，如中庸之道，影响人们的探索和创新。在这样的政治和社会舆论环境下，科学技术的发展速度慢慢地降下来，明清时期，虽然也出现过徐霞客、李时珍、宋应星等一些科学家，但总体来说科技和经济逐步衰落下来，并且很快被欧洲超过。

2. 意大利曾经是世界近代科技和经济的第一个中心

从公元5世纪到15世纪，欧洲上空弥漫着乌云，教会和骑士横行，人们愚昧无知，社会停滞不前，科学家被禁锢在牢笼里，科学的发现被说成是对上帝的诬蔑，史书上把这漫长的近1000年的历史称为黑暗时代。从13世纪开始，中国四大发明陆续传入欧洲，对欧洲的文艺复兴运动乃至资本主义社会的发展起了催生作用。马克思说：“火药、指南针、印刷术——这是预告资产阶级到来的三大发明。火药把骑士阶层炸得粉碎，指南针打开了世界市场并建立了殖民地，而印刷术则变成新教的工具，总的来说变成科学复兴的手段，变成对精神发展创造必要前提的最强大的杠杆。”在这一段时期中，资本主义在欧洲地中海沿岸开始萌芽，西方以意大利为代表，新兴资产阶级掀起文艺复兴运动，反封建、反神学，出现思想解放高潮，并出现了一批号召人们从中世纪的精神桎梏中解放出来的思想家，如《神曲》的作者但丁。也出现了一批著名的科学家，他们强调通过实验和观察来认识自然、认识世界，反对片面地依靠逻辑推理来认识事物。例如，反对把地球看成是宇宙中心的哥白尼，开创实验科学的伽利略。东方的科技成果产生了西方近代科学，近代科技的第一个中心在意大利形成。科技的大发展推动了意大利的经济发展，当时意大利的商业和航运业都得到了迅速的发展，也成为世界经济的中心。

3. 英国成为近代世界科技的第二个中心

近代第二次科技中心的转移发生在17世纪初到1830年，世界科技中心从意大利转移到英国。这相当于我国明朝末年到清朝道光年间。16世纪末，先进的德国爆发内战，先进的意大利分裂为许多小国，为英国的发展创造了外部条件。16世纪末、17世纪初的英国思想家、哲学家弗兰西斯·培根在《伟大的复兴》中重点论述了知识的价值，提倡科学实验，提倡研究自然科学，在英国乃至欧洲产生了深远的影响。当时的英国政府重视科学技术，批准成立了皇家学会等学术活动中心。17世纪，出现了著名科学家牛顿，他作为一个“跨世纪人才”，发表了《自然哲学的数学原理》巨著（1687年），他的这部著作以科学实验和观察事实作基础，但明显受欧氏几何体系的影响。牛顿的科学思想成为英国科学革命理论的顶峰。牛顿发现的三大定律，使天体和地上物体的运动规律被统一在一个经典力学的框架中，上帝和天堂无容身之地。科学上的最新成就成为技术革命的先导，出现了专业化的和大机器生产，纺织业的发展要求纺织业的机械化，纺织业的机械化也带动了所有工业部门的机械化。英国政府鼓励人们从事工具机的发明和改进工作，出现了许

多发明，其中，特别是推动了蒸汽机的出现，瓦特在前人发明的基础上发明完善了高效蒸汽机，解决了一系列工艺问题和配套设备问题，将蒸汽机推进市场。纺织机械技术和蒸汽机技术引起了第一次工业革命，改变了整个生产和社会生活的面貌。英国的资本主义得到极大程度的发展，英国的经济进入了极度繁荣的时期，科学技术的发展也为英国的海外扩张创造了条件，开始了所谓的大英帝国“日不落”的历史。然而从19世纪末开始，英国的工业优势不断衰退，导致英国在科研开发的投入相对下降，再加上英国的学术界过分重视理论轻视应用、重视科学轻视技术的传统，英国在国际经济、科技等方面的地位不断下滑。

4. 近代科技的第三个中心是在法国

这个中心的形成开始在18世纪初，19世纪初进入高峰。这一阶段，英国的经济仍然处于繁荣的状态，法国则由于其特殊的政治情况成为激烈的大革命场所，以狄德罗为首的一批启蒙运动的哲学家形成了法国百科全书派，他们宣传自由平等和人道主义，提倡民主和科学，出现了一次思想大解放，彻底反封建。另一方面，在牛顿的学说的影响下，出现了一批科学家和科研成果，例如著名数学家及力学家拉格朗日，数学家和天文学家拉普拉斯，开创定量分析、创立燃烧氧化学说、推翻支配化学发展长达百年之久的燃素说的现代化学之父拉瓦锡，在这段时期还产生了公制度量衡、科学教学制度和公立中学。但是，法国的研究工作过分地学院式，教育制度培养的人才相当部分是科学家-数学家-哲学家类型，不善于将科学转化为生产力，再加上社会又过于动荡，影响了法国的经济发展。

5. 近代科技的第四个中心是在德国

在19世纪后期，1875年—1895年的20年间，世界科技中心转移到德国，世界的经济中心随之也转移到了德国。在1830年英国产业革命达到高潮时，德国仍然是个落后的农业国。德国人不甘落后，大批德国人去英国和法国留学并且学成回国。由于德国人重视理性、重视应用，德国政府重视知识，整顿教育制度，创办专科学院和大学，科教结合，聘请著名科学家和教育家主持柏林大学，开创教学、科研相统一的高教体系。1839年后，涌现了一大批著名的科学家，如世界著名的数学家雅可比、高斯，发现电学中的欧姆定律的物理学家欧姆，发展了农业急需的肥料技术和有机化学的科学家李比希，在柏林大学成立规模较大的有机化学实验室后在英国人W.H. 柏金发明合成颜料的基础上，对香料、颜料和医药合成做出重要工作的李比希的学生霍夫曼。德国特别注意科学技术和工业的结合，出现一批善于应用科技成果于生产的企业家。例如，克虏伯将英国的炼钢法用来发展德国的钢铁和武器工业，还有西门子，既是发明家又是企业家。德国的煤和煤化学工业、钢铁工业、化学工业，特别是有机合成工业在世界上遥遥领先。德国还特别注意综合利用，出现了联合企业，成立了康采恩式的生产体制，当时德国的一些企业已经是世界上最大的企业，德国只用了40年就完成了英国100年才完成的工业化过程，德国的经济发展势头保持了相当长的一个时期。德国工业化的进程，充分地证明了科学技术是第一生产力的论断。一次和二次大战使德国的经济基础受到重创，人才和资金也受到严重的损失。

19世纪的欧洲大陆，法德两个中心带动了欧洲经济的普遍繁荣，在这一段时期，出现了很多重大的科研成果。英国的著名物理学家、化学家和物理化学家法拉第（1791—1867）发现了电磁感应现象，制成了世界上第一台电

动机，麦克斯韦创立了完整的电磁理论并预言电磁波的存在，出现了第二次物理学理论的大综合，但是由英国科学家们浇灌的第二次科学革命之花，却在德国结出第二科技革命之果。这主要是德国发明家应用电磁理论，发明实用型的发电机，其意义和作用相当于瓦特的蒸汽机，由此导致以电气化为特征的第二次技术革命。德国科技和经济这时迅速超过英法，在一定程度上得益于德国造就了一批克虏伯、西门子、詹斯这样集科学家、工程师、企业家于一身的人才。19 世纪还出现了三大发现，即生物进化论、细胞理论和能量守恒，科学已经走向成熟，基础科学的研究明显地走到了生产前面。

6. 世界科技的第五个中心在美国（20 世纪）

美国在独立战争后的宪法中，明确了对科学技术的方针。美国的领袖人物和历任首脑人物都重视科学技术，有的人本身就是科学家，如本杰明·富兰克林和第三任总统杰弗逊。美国政府很早就明确以教育带动科研，对教育采取特殊优惠政策，赠予美国一批大学土地，每州至少建立一所传统农业和机械院校。在这样的环境下，出现了大发明家爱迪生，爱迪生在西门子发明电机、贝尔发明电话之后，发明了电灯，建立了世界上第一个发电厂，引起了世界乃至全世界的一场电力技术革命。一次大战和二次大战期间，美国又得到一个非常好的发展机会。美国采取拿来主义，采用移民政策大批吸收人才，一批著名科学家被吸引到美国，如提出相对论的爱因斯坦，著名物理学家费米。40 年代末，美国留下了不少来自中国的科技人才，如杨振宁、李政道，钱学森经过很多努力才得以回国。人们曾经将美苏在二次大战后的做法归结成美国抢人，苏联抢机器，可见美国对人才的高度重视。美国政府利用战争中获得资金大幅度地增加对科技的投入，研究开发经费投入每四年翻一番，二次大战期间，从 1939 年的一亿多美元增长到 15 亿美元。这一系列的措施导致了美国完成和完善了欧洲的钢铁、化工和电力三大技术，发展了汽车、飞机和无线电技术这三大文明，进一步领先进行了第三次技术革命，包括原子能（1942 年）、计算机（1940 年）、空间技术（1957 年）、微电子技术（1970 年）。高新技术的研究成果导致了高新技术产业群的形成和发展，美国 1929—1969 年的 40 年间技术进步对经济增长的贡献率达 60% 以上，表明战后科学技术越来越成为第一生产力。自 70 年代以来，以微电子技术和基因重组技术为特征，可以说，美国领导了一场世界范围的技术革命，形成了一个以信息技术为先导、生产技术为主导的包括新材料、新能源技术、航天技术和海洋技术为内容的高技术体系，并在 80 年代后期迅速地商业化和产业化，为美国赢得大量的利润。尽管 70 年代以来美国经济地位相对日本、西欧有所下降，但近几年信息技术的发展提供了产业结构调整的一个机会，推行“信息高速公路”带来了新的全球市场的形成和发展，推动了经济复苏，应该说，至今美国的经济仍是全世界经济活动中心之一。这种状况还将维持一个相当长的时间。

二、世界科技中心转移的规律和中国的机会

上面我们简要地回顾了科技和经济中心转移的历史，从中一是可以看到转移的规律，二是可以看出今天中国的机会和我们急需考虑和解决的问题。

1. 科技中心转移的条件和规律

对上述世界科技这些转移现象的分析，已经得到了定量统计结果的支持。从世界科技中心转移的前因后果，我们可以得到许多有益的启示。分析

世界上科技中心转移的情况，可以看出，科技中心转移的开始往往是，这个地区或国家由于战争或革命得到特殊的条件，人们的思想得到一个前所未有的解放，然后出现了大规模的先进科学技术和智力的引进，充分利用先进地区和国家科技成果推动这个地区生产力的飞速发展，从而使整个社会和政府积累了大量的资金，能够对科教这一比较长远才能有效益的领域进行大规模的投资，能够为科学家创造一个宽松的政治和研究环境。在这种情况下，如果政府和社会能重视科教，重视人才，摆正应用和基础研究的关系，政府的政策和社会的观念推动科技人员和生产的结合，就有可能接着出现教育发展高潮和人才涌现高潮，本地区或本国的科教队伍和成果大批涌现，包括出现杰出的人才和划时代的重大科学发现，自身的科技成为自身的第一生产力，在这些重大的科技成果的基础上发展起被这一地区或国家垄断的产业，获取巨额利润，推动经济文化的全面腾飞，实现了世界科技中心的转移。在很多情况下，随之而来的是世界经济中心的转移。经济中心和科技中心的形成相互促进。

在分析这些中心的转移时，我们还可以看到，每一个成功的中心都在注意科教和经济结合的过程中，涌现出一批科学家-发明家-企业家集成或转化型的优秀人才，他们善于在“科学-技术-生产”转化链条中进行成果的转化工作。他们提出一项或多项重要的、有突破性的科学研究成果，这些科学研究成果转化为一批先进的、垄断的技术，进而转化为畅销的商品占领市场，这一技术或产品成为世界范围这个时期的特征，技术的发展导致经济的发展。

总之，要使一个地区或国家发展成为世界科技中心，除了外部条件，还要有政府和社会的支持和重视，全民的思想舆论的准备，优秀人才的聚集，充分的资金注入，宽松的政治和研究环境，正确的引导科技、教育和生产的结合的政策。

由于各种各样的内部外部因素，包括其它国家和地区得到了更好的机会或国际环境，本地区条件的缺乏，其中还有一个重要的可能是，为了长期保持科技的领先地位，需要长期投入大量的资金用来研究探索性的问题，而这是一件风险很大的投资，很可能维持不下去。历史说明，这些一度成为科技中心的地区的科技的发展会迟缓下来，经济又衰退下去，中心转移到新的地方。

2. 下一个世界科技中心在何处？

近代世界科技中心从 16 世纪下半叶以来，差不多平均 80 年左右就转移一个地区，美国自 1920 年成为世界科技中心到 2000 年正好 80 年，按照一般的规律，在本世纪末下世纪初应该发生中心的转移。但是，根据目前的情况来看，由于整个世界处于和平发展时期，短时期内不会发生战争，也由于科学发展存在着越来越大的惯性作用，再加上美国利用最近的国际形势的变化，获得了一大批的优秀人才和巨额利润，加强了科技力量的积累，美国还不可能马上退出科技中心的位置。但另一方面，根据欧洲、俄罗斯及亚太地区经济政治和科技的发展形势和过去的基础来看，在未来的 21 世纪，美国不再可能成为世界科技的唯一中心，德国、日本、欧洲和俄罗斯都有一定的基础和技术资金的储备，亚太地区的国家发展势头很好，21 世纪的科技中心和经济政治形势一样，可能呈现多中心或多极化的局面。

3. 中国成为世界科技中心之一的可能性和几个问题

改革开放使得我们的思想得到一次前所未有的大解放，我们敞开国门从国外引进一大批科学技术、发明、生产线和设备，极大地提高了生产力；改革开放使得我们有机会送出去一大批留学生，请进了一大批专家，中国的高等教育在提高自身的同时，为改革开放培养了一批优秀的人才，投身我国的经济建设和社会发展之中。我们的党和政府对教育科技的重视在中国历史上是空前的，在邓小平提出的科技是第一生产力的基础上，最近，党中央又提出了科教兴国的战略，“九五”开始，在高等教育战线上又提出了“211工程”，政府对科教投入也在逐步地增长，在最近10年中先后成立了自然科学基金会，支持基础和应用基础的研究，建立了一批国家重点实验室，为科技人员提供了科研基地，为了跟踪世界高新技术的发展，实施了“863计划”。政府吸取先进国家在科技和经济结合方面的经验，科技体制正在向适应社会主义市场经济体制和科技自身发展规律的新体制转变，很多地方和部门实施了依靠科技振兴经济的发展战略，例如，辽宁省和大连市都确定了科教兴省、兴市的战略并正在实施。整个社会正在形成尊师重教的良好风尚。从总体上来看，我国已初步具备了支撑经济和社会发展参与国际竞争的科技实力，为加速全社会进步奠定了坚实的基础。这样的一个过程、环境及条件和很多新的世界科技中心的形成过程中的情况是非常相似的。应该说，迄今为止的中国改革开放的成果一方面充分证明了我们的一系列措施的成功，证明了科学技术是第一生产力，另一方面，也为我国科技和经济的进一步发展创造了条件，中国面临着成为世界科技中心的前所未有的机会。除此之外，华人的智力素质是世界公认的，现在在美国大学和科研院所中，高层的教授专家中，华人的比例很高；美国人流传一些说法，例如，金钱装在犹太人的口袋里，知识装在华人的脑袋里；再如，如果一个研究单位里没有华人学者工作，这个单位的水平就可想而知。

在我们看到有利的一面的同时，我们也应该看到存在的很多问题。我们总结了战后世界经济科技发展趋势，提出了科学技术是第一生产力的论断，但科学技术在我国还没有普遍变为现实的第一生产力。西方发达国家科技对经济增长的贡献已达到60%—70%，韩国也达到57%，而中国科技进步的贡献只有30%左右，如何创造条件使中国的科教得到较快的发展，并且以较快的速度转化为生产力，在中国加速产生效益，这是政府、企业和科学家面临的共同任务。

世界发展到今天，各国在发展自己的科技文化经济的过程中，都在不断地总结自身和他国成功的经验，随着历史经验的积累，近代科技中心的形成是一种更有目的、有组织、充满了竞争的政府行为。如果说，意大利成为世界科技中心完全是时势造英雄，而在21世纪前夕的世界，情况有了很大变化。重视科教，重视人才，争夺高新技术的制高点，争取成为世界科技的中心，进一步争取成为世界经济的中心，已经成为有目的、有组织的政府行为，是政府和政府之间的竞争。这种有目的、有组织的政府行为使得新的中心的形成在一定意义上更为困难。下面是几个重要的问题，应该予以研究。

（1）引进问题

历史上科技中心的转移，一个国家一个地方经济建设的腾飞都以引进先进的科学技术为先导，在已有的科技成果的基础上发展自己的经济，当经济发展到一定阶段时，由于自身科技的发展再形成自己特有的、垄断的技术领域，推动经济得到高速的发展。但是，今天引进先进技术的代价是很高的，

这是我们的老祖宗把四大发明传播到欧洲时，帮助意大利形成世界第一个近代科技中心时并未想到的。这就使得依靠购买国外的科学技术来发展生产并积累资金的路和以前相比，困难得多。长期购买国外技术对我们这样一个大国来说，代价是很高的，是中国经济持续发展不可能承受的；而最核心最先进的技术可能是根本买不到的，买到时实质上已是落后的。如果说在改革开放的初期，大量引进是十分必要的措施，在改革开放 18 年后的今天，我们必须更加强调依靠中国自己的科技和开发成果。中国的科教应该成为中国的第一生产力。令人遗憾的是，迄今为止，在相当的一些领域和行业，中国自己的科学技术没有充分地发挥作用。

（2）人才问题

历史上科技中心的转移都要依靠一批优秀人才，这些人才或靠自己培养或靠从国外引进，但在人才激烈的争夺战中，我国的大学、研究所和西方资本主义国家的大学、研究所相比，能为优秀人才提供的生活和工作条件有较大差距。更为严重的是我们在和香港、台湾地区、新加坡的大学研究所相比时也明显有差距。这些国家和地区现在有目的地和我们争夺在高新技术领域工作的高水平人才。由于 10 年文化大革命中我们几乎中断了高等教育，在文化大革命之后，又有接近 10 年的出国浪潮，我国优秀科学家和科技人才的接班是一个十分突出的问题；现在有的情况使人忧心忡忡，在一些部门一些领域，我们花了大价钱使外国的科学技术成为了中国的第一生产力，而我们花了大力气培养的中国的科教人才反而成了外国的第一生产力。

（3）经费投入问题

科技和经济的结合，科技开放和科技成果转化成为生产力，都需要资金。这个道理是十分明显的。但我国在科教投入上，总的来说还是不够的。在人才培养方面，我国教育经费占国民生产总值目前只略高于 2%，本世纪末，如果我国人均收入达到 1000 美元，则要达 4%；在中央政府财政支出中，教育经费所占比例，韩国达 20%，发达国家 15% 左右，我们国家只达 10%—11%。我国研究开发经费虽然在增长，但在国民生产总值所占比例却徘徊在 0.7% 左右，这两年又降低到 0.6%，韩国这个比例已提高到 2%，日本已达 3% 以上。将科研成果转化为技术乃至产品需要的经费数量比完成科研所需的经费大得多，据上海对科技成果转化的投入比例进行统计，上海的科研-中试-产业化经费投入比例为 1 : 1.01 : 10，而发达国家这个比例一般为 1 : 10 : 100，这一个巨大的差异在我们这儿并没有得到充分的理解。政府、企业和研究开发单位之间并没有取得足够的共识。很多科研成果得不到应用是因为缺乏风险投资，在很多科研单位和高校有一种很普遍的现象，一项新的成果因为没有试制成功的产品就没有用户，没有用户就没有可回收的资金，没有资金就没有办法试制产品。我们可以在发展中国家经常看到这种循环。产生这种现象的原因除了有认识上的问题，例如承担风险的意识，还有一点是我们的中央财政和大中型企业的财政情况。大规模引进外国技术后，得到的效益和巨额利润，应该有更多的部分投入到有风险的科技开发，现在的投入看来是不够的。这可能有多种原由造成，如部门、产业之间分配不平衡；消费与积累，发展和当前的福利之间的关系的处理。企业家、社会和国家都要重视科技开发、新产品开发，要舍得投入并承担风险。应该特别强调的是，企业应该成为科技开发的主体，企业家要舍得投入并承担风险。在这一方面，我们同先进国家差距很大，我国研究开发经费政府投入占 56%，而企业仅占 44%

%，日本、韩国相反，科技投资中企业占 80%，而政府投资在 20% 以下。如果再注意到很多中国企业的科技投入并没有真正用在科技开发上，这个差别还要大。

（4）科技转化为生产力需要时间

科技和经济的结合、科技转化为生产力除了需要资金，需要人才，还必然需要时间，特别是一项重大的科学研究成就，要转化为生产力往往需要一个一批优秀人才组成的长链，长链中需要企业家、科学家、发明家，需要不同专业不同背景的一批人才。典型的例子是电力技术。电磁感应定律是英国实验科学家法拉第在 1831 年发现的，第二年法国人皮尔希使用永久磁铁研制成最早的发动机，但无法实用，德国发明家西门子又经过 10 年探索（1856—1866），发明了自激式直流发电机，宣告了电气化时代的到来，但是，真正的大规模的电力应用是在爱迪生在 19 世纪 80 年代的一系列发明之后，历时近 50 年，为此作出重大贡献的著名科学家就不下几十人。虽然由于科技开发型、转化型人才数量和质量的提高，科技投入强度加大，本世纪以来科技成果转化为生产力的周期缩短，转化速度加快，但科技转化为生产力还是需要一定耐心的。不了解这一规律，急于求成，就可能出现很多伪科学的发明、发现和新产品，就可能指望水变成油，这也是我们社会近年来的一个突出问题。说到底，没有优秀人才，缺少科技投入，指望科技立竿见影，搞无米之炊，恐怕是不成。

上面这几个问题应该说现在已是众所周知，但这里把它们联系在一起分析，可以看出世界科技中心的转移现在已经成为政府间、国家间的竞争，政府的政策、法规、舆论导向、投资决策对这场竞争有决定性的影响。科教兴国不仅是科教界的事。

三、科教工作者的思考

最近召开的全国人大八届四次会议通过了关于国民经济和社会发展“九五”计划和 2010 年远景目标纲要，为了实现今后 15 年我们国家的奋斗目标，关键在于两个转变，这就是经济增长方式和经济体制的根本转变；要从计划经济体制向市场经济体制转变；经济增长方式从粗放型向集约型转变；转变经济增长方式归根到底要靠加快科技进步，提高劳动者素质，科技的重要性和人才的重要性成为大家都在谈的问题。

作为一个科技人员，我们的科研工作要更加自觉地瞄准国家目标；科技人员要把对科技的忧患意识提高到对国家的忧患意识上来，国家的物价问题、中央财政问题、国有大中型企业的困难，紧迫的农业问题，都摆在我们前面。我们要重视基础研究工作，也要加强应用和开发的研究，无论是应用还是基础研究都应该环绕国家目标。

作为一个教育工作者，改革教育体制，教育思想体系和方法，提高办学效益，特别是应该吸取先进国家通过科技推动经济发展的经验，适应科技发展综合化的趋势、适应自然科学和社会科学有更多的交叉的趋势，加强培养复合型转化型人才，培养善于将科技成果转化为生产力的人才，即集企业家-科学家-发明家于一体的人才。为了培养这样的人才，我们的教育需要进一步改革，要把人才的素质教育放在更重要的位置上。

我们广大科技工作者都有事业心和自信心、责任感和使命感。我们面临的问题很多，但是困难和挑战只能激励我们为中华民族重新崛起，屹立于世

界先进民族之林而奋斗。我们坚信，全国人民在中国共产党的领导下，坚持科技兴国的战略方针，按照邓小平同志提出的科技是第一生产力的思想，中国在实现第二步战略目标基础上，下世纪中叶第三步四个现代化目标也能够达到。四个现代化实现之日，就是中国成为科技和经济多极化世界一极之日。

非线性力学及其应用

白以龙

中国科学院力学研究所

白以龙 力学家。1940 年 12 月 22 日生于云南祥云，1963 年毕业于中国科技大学，1966 年在中科院力学所研究生毕业。现任力学所学术委员会主任、非线性连续介质力学开放实验室主任，国家自然科学基金委员会数理科学部主任，《中国科学》与《科学通报》副主编。1991 年当选为中国科学院院士。主要从事非线性连续介质力学的实验研究。

1939 年底，冯·卡门在美国科学促进协会(American Association for the Advancement of Science)和美国数学学会(American Mathematical Society)做了题为“工程师与非线性问题拼搏”的讲演(The Engineer Grapples with Nonlinear Problems)。该文于次年发表于美国数学学会会报上。文中，他写道：“在许多情况下，工程师靠简化假设，就能将他的问题线性化，并且一本数学教材，就能容易地提供他所需的全部工具。但是，如果工程师遇到的是一个真正的非线性问题，也就是说，线性化使其变得毫无意义，此时，往往工程师就不得不靠自己与非线性拼搏了！”

卡门的讲演，真实地反映了当时的情景。

首先，经过 200 年的积累，通过对压杆失稳、非线性振动和三体问题等典型非线性问题的研究，非线性力学已积累了相当的认识和理论。例如，庞加莱从三体问题的研究，已认识到在非线性系统中，一种我们觉察不到的起因可能产生一个显著的、我们决不会看不到的结果。

其次，当时的工业和生产，已提出大量重大问题，迫切希望解决。一是飞行跨越声障的问题，二是航空采用的薄壁构件的行为，三是新材料，如塑料、纤维等的出现和应用。这些需求都提出了大量的非线性力学问题。跨越声障要了解激波，采用薄壁构件要解决大变形屈曲，使用新材料要遇到非线性物性。这些问题，往往与线性化了的问题有根本性质上的不同，因此，不论是处理工具还是基本概念都要靠拼搏，去开拓、创新。

因此，在本世纪上半叶的物理学革命的大潮中，看起来处于旁观地位的力学，一方面开拓了航空等大型新兴工业，另一方面，继承着欧拉、庞加莱等人的传统，率先向非线性领域突进了。当时，大概几乎还没有人意识到，这个突进，在本世纪后半叶竟发展成了超越牛顿开始的机械论、又超越当时的物理学革命家们开创的还原论的一种新的自然观。

当前，社会 and 产业发展面临的迫切问题，或许可以概括为：可持续发展、国家在世界经济中的竞争力、重大工程寿命预测和自然灾害预报等。如何解决这些问题，除了社会因素之外，大家或许会想到先进的信息、材料和生命科学技术。但是，如果稍加注意便会发现，问题主要涉及的是宏观物质世界的运动，特别是它们的运动模式的变化。例如，我们之所以关心可持续发展战略，一个重要原因，是不希望生存环境的负荷超过某个临界状态，以便我们能生存于良性循环之中。又如，构成国家竞争力的要素固然很多，但突破

常规（可比拟为非线性外推）的硬软件工程技术，却依然是竞争力的核心。如在本世纪上半叶构成西方军力、生产力重要部分的航空业，就曾密切依赖于上面引述过的声障、薄壁件、新材料三方面的突破。因此，以宏观物质的多层次运动为主要研究对象的非线性力学及其应用，将会对我们的社会发展和生产起很大的作用。

举一些更具体的典型例子，也许会更形象。如：起飞重量为数百吨，机体尺寸为半个足球场大小的民航机，虽然乘客都能清楚看到机翼的明显颤动和位移，但它却在气体中安全地飞行。反面的例子，如大跨度的桥梁，在风载下坍塌是时有所闻的。1940 年全长 1.6 公里，列为当时世界第三的美国 Tacoma 大桥，在大风下激烈振荡，坍塌。其原因就是设计师不了解风和大桥的非线性相互作用，只按静载设计造成的。不幸的是，这类事故至今仍未能完全消除。最近，美国一座数百米高的电视塔突然倒塌，就是一例。

面对未来，待解决的重要问题更多。重大工程，如水坝、机组运行了多年；或大型武器，如战略武器贮备了多年，它们还能安全可靠运行多久？什么时候到了临界状态，怎么预先测知？再如，空天飞机等新型飞行器，面临燃料在超声速流动状态下的混合和点火，对于流速超过了声速的流动，混合规律是什么呢？还有，对于自然灾害频繁的我国，我们能在多大的可靠程度上预报地震、台风、洪水等重大自然灾害，等等。这类社会和科学发展中的重大的、未解决的问题，不胜枚举。

归纳各种各样、大大小小的应用，典型化的非线性力学问题，或者可以举以下典型问题为例：1. 三体问题。1887 年瑞典国王奥斯卡二世（Oscar II）悬赏 2500 克朗，征求解答：太阳系是否是稳定的？例如某个星球是否会与太阳相撞。众所周知，太阳系有九大行星，问题是十分复杂的。其中所含的基本问题是，三个质点在万有引力作用下的运动，简称三体问题。其困难在于给定初始位置和速度，并不能像机械论判定的那样，确定以后任意瞬时的位置与速度，从而确定是否二个质点会相撞等。

2. 屈曲。1744 年欧拉研究过细杆在轴向力压缩下的变形。该细杆在轴向力较小时保持轴向变形，但当轴向载荷超过某一临界值后，压杆变形倾向于其一侧拱曲。这种现象被称为压杆屈曲或解的分叉。板、壳等一大类构件在受载时，均会发生这种偏离原对称平衡位置的不对称变形。因此，广义上它是弹性系统稳定性的问题。它的特点和难点在于，从一个对称平衡变形态中，怎么会又冒出另一个非对称的屈曲模态，屈曲以后，什么变形模态是最可能的。

3. 非线性振动。振动是极常见的现象。大家都熟悉简谐振动，特别是通过富氏分析，了解了基频振动和高频分量的作用。但到了非线性振动，一系列完全不同的新现象出现了。其中由负阻尼引起的自激振动——系统靠内部维持振动，和次谐波共振（分频）——系统外部强迫激励几分之一频率的振动，最引人注目。不断分频而导致混沌，把确定性动力系统和随机统计结合了起来。

4. 孤立子。上世纪 30 年代，J.R. Russell 在英国一条运河中，骑马追踪观察到一个突起的水峰能长时间维持其形状和运动速度，沿河道持续行进，被称为孤立波。二次大战后，费米等人计算非线性弹性弦，发现类似的现象。到 60 年代，Zabusky 和 Kruskal 才指出这是一类由非线性和色散的强耦合，形成的非常稳定的、即使碰撞也不改变形状的、像粒子一样的波结构，称为

孤立子。它表明在非线性（力学）现象中，除了分叉和不确定性解的另一个侧面，即非常有组织的结构。这个力学理论，在 20 年后，竟成了远距离光纤通讯的核心概念。

5. 激波或叫冲击波。在连续的流动中，当质点运动速度超过物质中的声速时，连续的流动会变成不连续的，也就是压力、速度、密度都会形成一个突跃。然而激波的出现不是预先给定的，它是强非线性造成的一个自由界面，飞行体在这种情况下遇到的麻烦就叫“声障”。二次大战期间，美国洛克希德公司新造的战斗机，当时速为 0.8 声速时，曾机毁人亡。事后检查，局部流速超过声速，激波不仅减弱升力，而且造成整机强烈振动而失去平衡。后来发现在固体中，甚至在交通车辆流中，激波也起着重要作用。

6. 湍流。湍流被称为是经典物理学中的最后的疑难。湍流问题难在哪里？其关键是，它是一个真正的“多体”问题。例如，其自由度可用雷诺数的 $9/4$ 次方估计，即使雷诺数为 10^4 ，其自由度已高达 10^9 ，相当目前计算机能力的上限。在湍流中，各种不同空间和时间尺度的大小旋涡相互嵌套着，能量在其间传输。强非线性相互作用，使得难以将看似有序的大尺度拟序结构与“混乱”的小尺度结构分割开来。湍流既是复杂流动向我们的挑战，也是长期以来，人们窥视复杂运动普遍规律的一个窗口。

7. 破坏。容易想象，固体破坏的物理本质，是从原子键的断开，到宏观固体的分离的全面展示。正因为如此，它跨越了从原子间距（ \AA ）到宏观工件（ $\text{mm} \sim \text{m}$ ）之间 $10^7 \sim 10^{10}$ 的跨度，因此，其间的复杂性，可与湍流相比。以至，钱学森把它列入连基本概念还不清楚的一类问题。有时候，忽略细节的宏观处理，如伽里略开始的强度理论，能提供一些可信的结果。然而，有时，一些微观细枝末节却又牵一发而动全身，造成“蝼蚁之穴，溃堤千里”的惊人效果。多层次的非线性相互作用，在这里布置了一座迷宫，我们尚未找到合适的通道。

上面所列的几个问题，决不是非线性力学的全部，而仅是几个示范例子，它表明的共同特征，目前可以概括为以下几点：

1. 局部之和不等于整体。因此不可能把对整体的认识，简单还原为对若干局部的认识；另一方面，大量单元按某些简单规律的多次重复，可能其总效应并不简单。

2. 不确定性。或者称确定性的随机行为，混沌即是一例。应该讲，在压杆屈曲中所显示的解的分叉，就是这种不确定性的原由之一。湍流则应是这方面一个活的沟通理论与实际的例子。

3. 组织性。强非线性耦合，还会造成与不确定性完全相反的一面，即坚不可摧的有组织的结构，孤立子是这方面的典型范例。

4. 复杂性。由上面几点合起来看，构成了现象谱的复杂性，而且不同特征或模式间的转换，由某种底蕴暗流所控制，表现上有突变性。

这些共性的根源可能来自三方面：非线性、非平衡、多层次。

因此，站在世纪之交的人们，面临着自然观，从机械论，进而到还原论，再进而到非线性演化的发展。周光召在 1995 年的科学大会上讲，我们“看到的将是与牛顿，爱因斯坦创建的确定性的、简单和谐的模式不同，而是一个演化的、开放的、复杂的世界，这是一幅更接近真实的世界图景。”在这样一种观察中，非线性力学，曾起过突进作用。半个世纪以前，冯·卡门的大声疾呼“工程师与非线性问题拼搏！”现在，已成为大批工程师和科学家，

从航空、航天到大型土木和海洋工程，从气象预报、地震预报到污染控制和生态环境保护领域的协同行动。但是，核心困难往往卡在强非线性耦合作用，及其引起的突变性问题上。显然，非线性力学是理论和实践，科学与工程的一个关键交汇点。因此，希望科研领导部门认识到，非线性力学的研究，是推动我国工程和科学发展的一种有长远影响的内在动力，予以重视和支持。

最后，应该强调，在近代史中，中国人只在少数学科，对近代科学有记入史册的贡献，非线性力学就是一个“中国人最有成就的学科”。（见钱伟长引林家翘语，《力学进展》1983.13.P117）。如周培源对一般湍流模式的研究，钱学森的跨声速流相似率和壳体非线性失稳理论，钱伟长的扁球壳跳跃变形理论，郭永怀的奇异摄动法（PLK 法——庞加莱，莱特希尔，郭永怀方法）等。因此，中国的非线性力学研究者，在国家和社会的需要提出如此重大的一些非线性力学问题的时候，在自然科学新观点又滋生于一大类非线性力学问题的时候，理应继承力学界前辈的传统，勇于创新，勇于开拓，做出符合时代要求的贡献。

核武器和核试验

吕敏

国防科工委系统工程研究所

吕敏 核物理学家。1931年4月20日生于江苏丹阳，1952年毕业于浙江大学，后到中科院近代物理所工作并读研究生，1959年至1962年在苏联杜布纳联合原子核所工作。现任国防科工委系统工程研究所研究员、中国核学会副理事长。1991年当选为中国科学院院士。在核试验的物理诊断领域长期从事系统的开创性工作。

一、核武器的作用和地位

自从1945年原子弹问世以来，由于核武器具有巨大威力，得到各国政府高度重视，在国际政治，军事，外交等各个方面起着重要的作用。

1. 军事上的作用 美国1945年原子弹研制成功以后，匆忙将仅有的两颗投向日本本土，炸毁了广岛、长崎两座城市，造成几十万人的伤亡。这是历史上核武器实战使用的唯一例子，它促使了日本提早投降。核武器的杀伤力是其他武器无法相比的，因此美国、苏联两个超级大国大力发展核力量，把它看作军事力量的主要支柱。其他有条件的国家也努力建立自己的核力量。

2. 威慑作用 第二次世界大战结束以来，还没有在实战中使用过核武器。但是美、苏曾多次威胁要使用核武器，企图迫使对方让步，他们实行核威慑战略，企图起到“不战而屈人之兵”的作用。冷战时期美苏双方都拥有庞大的核武库，但因为害怕对方报复而不敢发动战争。美国前国防部长麦克纳马拉曾宣称，只要命中约二百个氢弹就足以摧毁苏联这样的大国，使几千万人伤亡、工业损失二分之一、多数大城市被毁。而美苏各自的核武器数以万计，双方处于“确保相互摧毁”的“恐怖平衡”状态，这种状态持续了几十年。

3. 大国地位的象征 拥有核武器不但说明军事力量的水平，而且说明科学技术和工业水平的发达。现有的五个核国家正是安全理事会的五个常任理事国。拥有核武器已经成为大国地位的象征，它将大大提高一个国家在国际外交斗争中的发言权。

4. 核武器的前途 冷战结束以后，两极对立的军事、政治局面发生变化，核军备控制取得了进展，美俄两国已经开始裁减他们的核武库。美俄英法纷纷重新审查各自的核战略，核武器的战略作用有所下降，但是他们仍然把核武器当作他们军事力量的重要支柱。未来几十年内核武器仍将存在，仍将在国际政治、外交上起重要的作用。

5. 我国核武器的作用 我国发展核武器是被迫而为之，五六十年代我国曾几次受到美苏企图使用核武器的实际威胁。为了打破核垄断、核讹诈，我国发展了少量核武器，完全是为了自卫，纯属防御性质，假如某个大国要用核武器攻击我国，他也将遭到我们的报复。我国一贯主张全面禁止和彻底销毁核武器，承诺不首先使用核武器，不对无核国家和无核地区使用或威胁使用核武器。

我国拥有了核武器，在军事上对核大国起报复威慑的作用，在政治外交上提高了国际地位，大大鼓舞了全国人民的斗志。研制核武器的过程大大促进了我国科学技术的发展。当然，我们为此投入了一定的财力和大量技术力量。

二、核武器的构成与分类

1. 核武器的构成

核武器由两大部分组成：核弹头和运载发射系统。

核弹头由核战斗部和壳体组成。核战斗部包括核爆炸装置和引爆控制系统，核装置是真正起战斗作用的组成部分，引爆后它将发生核反应，释放巨大的能量。核武器的威力决定于核装置的性能。

运载发射系统将核战斗部投射到预定的目标，实施攻击。运载发射系统种类很多，包括飞机、各种导弹。运载发射系统的能力将决定核武器的射程（打击距离）、命中精度、生存能力等许多重要的性能参数。

核武器系统还应该包括指挥控制系统。由于核武器的巨大威力和政治影响，核武器的使用必须非常谨慎，必须由国家最高领导决策，因此必须建立和保持严密的指挥控制系统。

2. 衡量核武器性能的主要参数

- 射程 能够实施打击的最大距离，为实施战略攻击，往往需要达到几千公里，甚至上万公里。

- 威力 核武器的爆炸威力可以从千吨 TNT 当量起直到几百万吨 TNT 当量。比威力，即核弹头的威力与质量之比，是衡量核武器性能的重要参数。

- 命中精度 为了打击加固的目标，需要准确命中，据称美国战略导弹命中的圆偏差 CEP 可达 100 米以内。

- 生存能力 核武器的生存能力，特别是在核攻击下的生存能力是十分重要的性能指标。它决定于核武器的隐蔽性能、机动性能、加固性能等。

- 突防能力 核武器必须突破对方的防御系统才能达到预定目标，突防能力决定于核弹头的隐身性能、机动能力、诱饵性能等。

核武器的性能将从综合以上各种能力获得。

3. 核武器的分类

从作战使用的目的可以划分为两大类：战略核武器和战术核武器。还有一类核武器用于防空和导弹防御。

战略核武器用于攻击对方战略目标，包括军事目标、经济目标或城市。一般需要有较大的威力和射程，由于各国战略地理位置不同，战略核武器并无明确的射程界限。根据运载发射方式的区别，战略核武器又可以分为三种：

- 远程或洲际导弹 核弹头由陆基多级导弹发射，弹头一般在地球引力作用下自由飞行，也称弹道导弹。远程或洲际导弹发射的核武器可以是单弹头，也可以是分导式多弹头。

- 潜射导弹 导弹由潜艇携带，作战时从海洋中发射。潜艇可以隐蔽在海洋中，可以获得较高的生存能力。潜射导弹可以用多弹头。

- 机载核武器 由远程轰炸机携带的核炸弹或核巡航导弹，可以用于攻击对方后方的战略目标。

美俄两个核大国都拥有三种战略核武器，被称为三位一体的战略核力量。

战术核武器用于战场作战，攻击对方的战术目标。战术核武器的威力相对较小，射程较短。战术核武器也有各种不同的发射方式，包括核航空炸弹、核导弹、核炮弹、核鱼雷、核地雷、核深水炸弹等。

三、核武器爆炸装置及其研究制造

核武器爆炸装置简称核装置，是核武器的关键部件。引爆后核装置中发生核反应，释放核能，引起爆炸。

1. 核装置分类及其原理

- 原子弹 原子弹核装置完全利用裂变能量。平时核装置中核材料处于次临界状态，引爆后周围的高能炸药向内聚爆，压缩裂变材料，使它们的密度显著增加，高密度的核材料达到超临界状态，此时注入中子点火，引起核裂变链式反应，发生核爆炸。

- 增强弹 在原子弹裂变材料中心放少量聚变材料氘和氚。当裂变材料发生链式反应，释放能量，利用裂变能量点燃聚变材料，聚变反应产生高能中子，高能中子又增强裂变反应。增强弹释放的主要是裂变能量，但有聚变反应增强，也称助爆弹。因为有聚变增强，高能炸药的用量可以减少，从而使核装置的重量和体积减小。为使少量的聚变材料发生聚变反应，需要创造高温高压的燃烧条件，这是一项很难的科学技术问题，要经过大量复杂、精确的理论计算，要经过多次试验，才能取得成功。

- 氢弹 氢弹由初级和次级组成。初级可以是原子弹或助爆弹，次级则包含裂变材料和氘化锂-6。初级发生核爆炸，释放巨大能量，核材料成为高温等离子体，发出大量 X 射线，X 射线传到次级，对次级进行压缩，此时锂核在中子作用下产生了氚，因此能够发生氘氚聚变反应，产生聚变能量并发出高能中子，而高能中子打在裂变材料上又发生裂变反应，因此氢弹有时也称为裂变-聚变-裂变三相弹。高能中子可以使铀-238 发生裂变反应，因此可以利用铀-238 作为部分氢弹的核材料。氢弹原理曾经是重要的军事机密，近年来，报刊文献中，特别是美国的报刊文献中陆续有所透露，但氢弹的具体构造仍然是保密的。

- 第三代核武器 采用特殊设计的核装置，使核武器爆炸时突出某一种效应，或实现效应定向，如增强中子、电磁脉冲、产生 X 射线激光等。希望把它们用于战略防御、战术应用等特殊场合。对第三代核武器的作用始终存在着分歧看法，在技术上又遇到很大困难，现在美国政府已经放弃了研制计划。

2. 核武器爆炸装置的研制

从核武器的工作原理可以看出，核武器的研制是一件极其复杂的科学技术任务。它涉及许多的物理学科：如裂变物理、聚变物理、高温高密度等离子体物理、中子物理、辐射输运、中子输运、爆轰物理、高压状态方程等等。在解决上述问题时不可避免要进行大量的数值计算，为解决复杂的高精度二维数值计算，必须使用最高速度、最大容量的计算机。由于问题极其复杂，理论计算和实验研究必须密切配合进行，需要进行实验室的各种分解实验；需要进行不发生核反应的外场爆轰实验，并进行爆轰时的闪光 X 射线照相，也称冷试验；最后在核试验场进行真实的国家试验，也称热试验。

除上述各种原理性问题需要解决以外，还有大量的工程技术问题需要解决。最重要的是需要各种高性能的材料，仅核材料就包括武器级钚、高浓铀、锂-6、氘、氚等，生产这些关键的核材料就将牵动整个的核工业系统。其他

像特种高能炸药，特种金属等的研究生产也要牵动许多工业部门。

上面我们只涉及到核装置本身有关的问题，除此外，核武器的战斗部还应该包括引爆控制系统，中子源等，它们将涉及许多重要的电子行业。

我们只讨论了核武器战斗部的研制工作，没有讨论有关核武器运载和发射设备的研制，它们将牵动另外一大批学科专业。

3. 我国核武器研制成功是全国上下齐心协力，大力协同的成果

我国许许多多的科研院所和工业厂矿参与了核武器研制的事业。许多有名望的科学家和众多的科学技术人员为此贡献了全部的聪明才智，甚至毕生的精力。

目前核试验虽然已经停止，但为使我国的核武器更加安全可靠、更具有威慑实力，还有很多的事情要做，还有很多科学技术的难关需要攻克。

四、核爆炸与核爆效应

1. 核爆炸分类

按爆炸的目的区分，有作战使用，核武器试验，和平利用等核爆炸。按爆炸方式区分，有大气层、地下、高空、水下等核爆炸。大气层爆炸包括空中爆炸和地面爆炸。不同方式的核爆炸其爆炸效应很不相同。作战使用时要根据不同的作战目的来选择爆炸方式。

2. 核爆炸效应

(1) 大气层核爆炸的效应 一旦发生核战争，对生命财产造成最大规模毁伤的是大气层核爆炸，它的毁伤因素主要有：冲击波、光辐射、早期核辐射、放射性沾染和电磁脉冲。

核爆炸瞬间释放出巨大的能量，使核装置物质变成高温高压等离子体，温度可达数千万度，压力可达 10^{15} 帕，它向外发射热辐射并猛烈地向外膨胀压缩周围空气，形成火球。火球压缩空气形成冲击波，向外辐射能量形成光辐射。火球膨胀、上升、冷却、成为烟云，烟云飘过时造成地面放射性沾染。伴随着核反应过程，产生大量的中子和 射线， 射线与空气作用，激励出很强的电磁脉冲。

- 冲击波 冲击波是造成人员，房屋，装备，工程设施破坏的主要因素。楼房的破坏阈值约 18 千帕，一个百万吨当量的氢弹爆炸，可以造成 7—8 公里范围内的楼房破坏

- 光辐射 光辐射可以烧伤人员的皮肤；可以引燃干燥的易燃物质，其阈值约 13—21 焦耳/厘米²。一个百万吨当量的氢弹爆炸可以使十几公里的易燃材料燃烧。

- 核辐射 核辐射可以造成人员伤亡和电子线路和器件的破坏。由于中子和 射线在空气中传播距离较短，核辐射的破坏效应限于近距离。

- 放射性沾染 放射性沾染可以直接或间接对人员造成伤害，受到较大剂量时可引起放射病。爆炸高度较小，特别是地面爆炸时，会造成很大面积的放射性沾染，并且将存在很长时期。

- 电磁脉冲 电磁脉冲可以使未采取防护措施的电子、电力、通信系统受到破坏或干扰。

(2) 高空核爆炸效应 距地面几十公里以上的高空已接近为真空，核爆炸不再形成大气层那样的火球和冲击波，核爆炸的能量以 X 射线和核辐射的形式发出。在爆炸点附近，射线很强，可用于破坏近距离的目标。美俄都曾

研制成功以高空核爆炸效应为基础的反弹道导弹防御系统，现在莫斯科仍然部署着以核反核的弹道导弹防御系统。

高空核爆炸对地面的主要效应是核电磁脉冲。高空爆炸的射线射向地面时，在 20—30 公里高空的空气中打出电子流，激励出很强的、大范围的电磁脉冲。外国专家认为，在核战争初期，先实施高空核爆炸，可以造成对方几百甚至几千公里范围内的通信、指挥、控制系统失灵。

(3) 地下核爆炸效应 地下核爆炸主要用于核武器试验，它的主要效应是地震波。

(4) 水下核爆炸效应 水下核爆炸主要用于摧毁港口设施和水面、水下舰艇，它的效应主要是水中冲击波和巨浪。

五、核武器试验

1. 核试验的目的和试验方式

核试验的目的主要有两个方面：改进武器和研究它的破坏效应。为了改进武器，核试验中要安排较多的诊断测量项目，以便获取更多的实测数据，用于检验和改进理论设计。为了研究破坏效应，则需要安排许多效应物体，暴露在核爆炸破坏作用之下，研究各种破坏的阈值，为核战争中使用核武器及防护核攻击服务。另外还有一种核试验，其目的是研究和平利用核爆炸的可能性。

有大气层试验和地下试验两种主要核试验方式。大气层核试验又包括地面、塔上、空中等爆炸方式。核国家早期都采用大气层核试验，它有利于研究核武器的破坏效应，也可以进行某些诊断测量。后来各国先后转而进行地下核试验，它可以避免放射性污染，又有利于诊断测量，可以把测量用的探测器对准核装置、布置在很靠近的地方。地下核试验可以采用竖井和平硐两种方式，平硐试验更有利于进行辐照效应实验。

2. 核武器试验中的诊断测量

为了改进核装置的设计，了解核装置的实际性能，需要通过核试验实际测量核装置爆炸的工作过程。在核试验中要进行两大类的诊断测量：实时物理诊断及放射化学分析诊断。

(1) 实时物理诊断 实时物理诊断主要测量核装置的核反应过程，例如：测量核反应的时间过程，包括核链式反应的增长速率，各种核反应发生和发展的时间关系等；测量聚变反应的温度；测量核反应活性区大小和形状；测量核反应产生的中子能谱等等。整个核装置爆炸过程仅持续微秒量级，因此实时物理诊断测量系统都应该具备纳秒、甚至亚纳秒的时间响应，需要使用最现代化的快速核电子学设备和技术。为了测量数据和测量设备安全，记录设备必须放在距爆心较远的地方，因此在物理诊断测量中还要解决快信号的远距离传输，核爆炸强电磁脉冲的干扰等问题，为此要研究高性能电缆和光缆等等。

核装置爆炸是一个瞬息即逝、不可重复的过程。物理诊断要在十分恶劣的环境条件中，精确测量中子、射线、X 射线的强度和它们随时间、空间的变化，并且测量要在无人操作、自动控制的条件下进行。瞬时诊断测量必须保证万无一失、一次成功，稍有疏忽就没有补救的余地。这是一项十分艰巨，而又充满吸引力的科学技术任务。

(2) 放射化学分析诊断 采取核爆炸后产生的有代表性的样品,用放化分析的方法分析测量,获取核装置爆炸过程中核材料发生变化的各种参数。爆炸后剩余的各种核材料、裂变产物、结构材料和大量的岩石混合在一起,要进行放化分析,首先要进行微量样品的精确定量化学分离和纯化,然后进行准确的物理测量,并扣除各种本底干扰。

通过放化分析可以获得许多重要的参数:如裂变当量,聚变当量,铀、钚、锂、氚的燃耗,铀和钚的同位素生成等等。在核装置的特定位置布置指示剂,通过放化分析可以获得该处的中子通量。测量氙和气体裂变产物也可以获得裂变和聚变的重要信息。

获取有代表性的样品是进行放化分析的先决条件,地下核试验中采用钻孔取样的方法获得爆后玻璃体样品。利用预先适当埋设的增强胶管可以获得爆后气体样品。

3. 核试验的试验技术

核试验是国家级的大型试验,实施核试验是一项巨大的系统工程。为了圆满完成一次核试验,除了核装置的设计制造、各种诊断测试的准备以外,还要做好核试验技术的准备。核试验技术,是指保证安全可靠地进行核试验所需要的技术。

为了保证试验安全,要进行安全设计和论证,包括试验场地的选择、爆心埋设深度的确定、竖井井筒或平硐坑道的堵塞方案、管道、电缆的密封措施等。要进行长期和短期的风速、风向、降水天气预报。地下核试验以后要监测放射性泄漏情况。

核试验控制要保证核装置解除保险、点火引爆、测试仪器等都按预定的时间顺序准确启动和关闭,核试验控制技术的特点是要求绝对可靠。

为了做好工程保障,必须提前做好地质勘探分析工作。为了获得满足核试验要求的井筒,要设计制造大断面深井硬岩钻机,断面要达到几个平方米,深度达几百米。要设计制造安放核装置的深水密封容器,要设计制造吊装塔架和吊装杆,要设计制造用于安放诊断探测器的测试钢架和安装调试塔,要掌握深井打筑混凝土塞和井筒回填技术,要掌握硬岩中定向钻孔取样技术等。

六、和平利用核爆炸

自世界上发生第一次核爆炸以后,就有许多科学家提出要将核爆炸用于非军事目的,并且进行了多方面的探索。几十年来,美国进行了 48 次和平利用核爆炸的核试验,苏联进行了 115 次和平利用的核爆炸,其中一部分已经有实际应用价值。

1. 几种和平利用核爆炸的途径

· 工业应用核爆炸 例如:大型挖掘工程,探索是否能利用核爆炸开挖运河等;刺激石油天然气生产;利用核爆炸产生的压力封闭油气井喷;建造地下洞库,如苏联已建成若干个天然气贮存库;利用核爆炸产生的地震波进行大范围地质研究。

科学研究方面的应用 利用核爆炸产生的强中子流和高温高压条件下进行(在实验室无法进行的)科学研究。已经进行过短寿命同位素的许多能级的中子截面测量;多重中子俘获后产生的超重元素的性质研究;特殊材料的高压状态方程测量等。

· 某些新概念设想 国内外学者还不断提出一些新的设想，如利用核爆炸发电、用核爆炸拦截向地球飞来的小行星、用核爆炸建筑拦江水坝、在喜马拉雅山用核爆炸凿洞引水等。但仅仅停留在概念设想上，都还没有达到进行可行性讨论的程度。

2. 和平利用核爆炸的前景

过去的研究和试验表明和平利用核爆炸有其优越性，70 年代还举行过几次和平利用核爆炸的国际讨论会，但是和平利用核爆炸的前景并不乐观。主要有两方面的阻力：其一是公众对放射性的惧怕心理，使工业上的应用难于实际推广；另一方面是军备控制，为防止有的国家可能利用和平核爆炸进行核武器试验，最近通过的全面禁止核试验的条约中就把和平核爆炸也列为暂时禁止。

七、全面禁止核试验和核军备控制

1. 禁止核试验的谈判

早在 50 年代，美苏等国已经就限制和禁止核试验的问题展开讨论，并且签订了部分禁止核试验条约（LTBT）、限制核试验当量条约（TTBT）。他们没有就全面禁止核试验达成协议，因为他们都在努力改进各自的核武器，不能停止核试验。当他们的战略核武器已经发展到很高水平，改进的余地不大时，美国才主张全面禁试，开始积极推动全面禁止核试验条约（CTBT）的谈判。希望通过签订条约，防止出现新的核国家，并且限制其他国家（包括中国在内）继续改进核武器，以达到巩固自己的核优势的目的。目前 CTBT 的谈判已经告一段落，已经在联合国大会通过，我国已经签字。但是由于印度的反对，条约未能生效。虽然尚未生效，估计在若干年内几个核国家都不会再进行核试验。停止核试验意味着很难再发展新型号的核爆炸装置。但是核武器战斗部的非核部分仍然可以不断地发展改进，至于核武器的运载和发射部分的研究发展，则不会受到限制。

2. 核军备控制和发展与前景

随着冷战结束、苏联解体，核军备控制进展较快。美苏间的军备竞赛得到遏制，美俄之间签订了裁减核力量的条约 START 和 START ，开始裁减各自的核武器。1995 年核不扩散条约得到无限期延长。CTBT 也已有 90 多个国家签署。不久将就禁止核武器用的裂变材料的生产开始谈判。一旦达成协议，将有利于防止核扩散，也将对核国家增加核武器数量带来困难，但美俄等国已经积累了大量剩余的核材料，这项协议对它们将不会发生任何影响。

俄国尚未批准核裁军协议 START ，一旦得到批准并开始执行以后，美俄可能会推动包括我国在内的多边核裁军。美俄拥有最大量的核武器，即使在执行 START 以后，它们各自的核武器数量也将超过其他三个核国家拥有核武器之和。因此在美俄进一步裁减核力量以前，我们认为进行多边核裁军的谈判是不现实的。

虽然核不扩散条约已经无限期延长，核不扩散的危险仍然存在，印度等国仍不愿意放弃其核选择。

声学在现代科学技术中的作用

张淑仪

南京大学声学研究所

张淑仪（女）声学家。1935年12月7日生于浙江温州，1956年毕业于南京大学，1960年该校研究生毕业。现任南京大学声学研究所所长、中国声学学会常务理事、国际电气电子工程学会高级会员等职。1991年当选为中国科学院院士。对凝聚态物质（液体和固体）中多种模式的超声波传播规律进行了较深入仔细的实验与理论研究。

声学是一门研究声音的发生、传播、接收以及声波与物质相互作用的科学。随着科学技术的发展，声学进入了各个应用技术领域。在现代工业、国民经济、国防建设、科学研究和日常生活的各个领域，无不和声学发生联系。因此声学是一门渗透性很强的学科。

声学技术的广泛应用，首先要归功于声波的物理特性。声波是机械振动在物质（气体、液体和固体）中传播的结果，声波能穿透电磁波和光波所不能透过的介质。声波的振动频率范围很广，从1/1000赫到100万亿赫（ $10^{-4} \sim 10^{14}$ Hz）。频率在20赫到20千赫范围内的声波为人耳所能所见，属音频范围。20千赫至100兆赫为超声，100兆赫至100千兆赫为特超声，100千兆赫以上为热声子运动范围，20赫以下为次声。不同频率的声波有不同的激发和接收方式以及不同的应用领域。

下面就几个主要的领域加以简单介绍：

一、声学 and 物理学

声学是物理学的一个重要分支，也是物理学中最古老的分支之一。在物理学的发展中，声学有着卓越的贡献。首先，声学所研究的机械振动及其在各种物质中传播的属性是物理学的本质之一。Rayleigh于19世纪末最早提出声波理论，对后来的各种波动传播理论的发展有重要作用。

在声与物质相互作用的研究过程中，到目前为止，虽然主要是研究物质的声速、声衰减及密度、弹性系数（粘滞系数）等宏观量，但通过宏观量的测量，可以揭示物质微观世界的本质。如分子声学从超声传播速度和衰减及其弛豫效应的测定，可以研究气体中分子的各种运动之间的能量转移以及分子间的能量转移、液体中的各种分子结构有关的动力学过程，以及固体物质的相变、缺陷、晶粒尺寸乃至微观的分子结构、半导体和超导体中的能隙及能级分布情况等。

当声波强度较强时，除了线性效应之外，还有非线性效应出现。早在本世纪二三十年代，就已发现高强声波在液体中产生空泡（因液体耐压而不耐拉），在空泡内聚能可达 10^{11} 巴（相当于 10^8 大气压），温度可升至 10^4 °K（即10000度）以上，因而导致发光等特殊现象，亦称“声致发光”。空泡中的超高温和超高压引起物理学家和化学家的重视，希望有可能引起核聚变等重要的物理和化学效应。近年来，发现非线性参量对不均匀结构及相变的响应比线性物理量更为敏感。此外，固体物质的非线性性质引起声波的非简

谐共振、混频、高次谐波产生等等，其机理均可归结为原子之间相互作用势的存在以及分子内平衡位置的改变等等。总之，高频声波的传播与声子-声子、声子-电子以及声子与其他激子间的相互作用相联系的。

至于非线性声学所研究的孤子、分岔与混沌的问题是自然界普遍存在并有重要应用前景的现象，是目前非线性动力学的一个重要主题之一。通过水波孤子和混沌的研究，可以直接观察到孤子的形成，多孤子相互作用及孤子和混沌之间的相互转化过程等，显示了物理现象的统一性，从而对揭示自然界的普遍规律有积极的意义。

在超低温条件下研究 He 超流的意义上来看，从第一声（即通常声波）到第五声的研究，可以探求在超低温下液氦的各种热力学参量，从而对超流相微观结构的研究具有特殊的意义。

二、超声在工业上的应用

超声的工业应用是超声技术的重要应用领域之一，应用范围非常广泛，归纳起来主要有两大类：一是超声加工处理；二是超声检测。

1. 大功率超声的工业应用

利用大功率超声波作用于物质，可改变物质的性质和状态。例如，在含有烟雾粒子和灰尘的气体中发射大功率超声，不同尺度的粒子振动速度不同，则互相碰撞，从而可加速粒子的凝聚；在液体中发射大功率超声，会在液体中产生“空化现象”，即波动引起的稀疏过程使液体产生空泡，压缩过程使空泡破碎而在周围产生机械冲力。从而可实现清洗、乳化、脱气以及使固体粒子悬浮、或使高分子分解和聚合，促进化学反应等；在固体中发射大功率超声，可用于粉碎、研磨，切割、加工和焊接等等。

此外，利用固体中超声波的特殊波形，研制成超声马达，具有体积小、响应快、精度高和无电磁感应等特殊性能，适用于传真机、打印机等现代化办公设备中传送纸张。

2. 超声检测和无损评价

在当前高科技发展中，先进的材料及各种器件、设备的研究和发展越来越引起重视。相应地对无损评价技术的要求也越来越高。超声无损评价（或超声检测）与电磁波、X 光及粒子探测技术并列为探索物质的四大技术。

超声波由于能穿透电磁波、光波等无法穿透的物质，同时又能在两种物质（两者的密度和声速显著不同）的界面上反射。如果某种物质内部存在不均匀性，如气泡、裂痕、夹杂、疏松、位错或脱粘等缺陷，就会引起超声波的反射。因此，利用超声波能探测物质内部的结构（缺陷和不均匀分布）等。目前，利用各种超声探伤仪可以对各种机械零部件，包括航空、航天飞机机壳及发动机零部件等进行无损检测，也可用于对装载核反应物质的容器、输油和输气管道以及锅炉等压力容器进行无损检测等。

另一方面，超声显微镜可用于微米量级的微观结构或缺陷的研究和探查，可以研究材料和微型器件的介观特性和结构。近年来，在电子显微镜、隧道显微镜及原子力显微镜基础上发展的电子声显微镜、隧道声显微镜及调制力显微镜等新型显微镜成像系统，更将声成像分辨率提高到纳米量级，从而有可能在原子尺度的量级上研究材料的表面和亚表面结构。

超声技术还可用于测量流体的流速、流量、粘度、温度及液位等。因此也是一种重要的测量技术。

近年来，由于激光技术的飞速发展，利用激光脉冲激发超声波成为当前的研究热点之一。激光脉冲可以非接触式地在凝聚态物质中激发超声波，从而可以实现遥感遥测的任务。同时，由于激光束可以聚焦，因而可以对小尺寸材料进行激光超声研究。

三、光声学与激光超声

当强度调制的激光束照射于物质（包括气体、液体和固体）时，物质吸收光能而产生热，周期性热流使周围的介质热胀冷缩而激发声波，这种将光能转化为声能的现象称为光声效应。其中间过程为热能的转换和传递的过程，因此亦称热波。

由于光声效应与物质的光学、热学、力学等性质以及几何结构有关，因此测定光声信号可以检测物质的宏观、介观乃至微观特性和结构等。利用光声效应研究、分析和检测物质的方法即为光声热波技术。通常有光声谱仪用于成分和能级结构分析，以及光声显微镜用于空间结构分布的检测。

另一方面，有关材料的光学、电学等性质的研究已有大量的工作，但有关热学性质的研究则为数甚少，原因主要是缺乏有效的测试手段。新型的热波技术正是有效地解决了这个问题，并且适合于测量小尺寸样品的热学性质，如热扩散系数、热传导等。对于某些利用其散热或抗热性能的材料，检测其热学性质是极为重要的。近十年来，随着近代光学（激光）技术、电子技术及声学技术的发展，光声技术（或称热波技术）也以不同的测试方法和多种形式发展起来。与红外照相（热像）技术相结合发展的热脉冲回波成像技术，适合于对航空、航天飞机、输气、输油管道等大型机件的非接触式大面积的无损检测，国外已在许多部门发挥作用。

随着脉冲激光技术的发展，利用脉冲激光激发超声波，便成为非接触式激发超声波的有效手段。为此相应地发展了多种非接触式检测振动和位移的新方法，其中最主要的要属光干涉法。将光激发和光检测相结合形成非接触式激发和检测声波的全光学方法，适用于在极端环境下（高温、高压、腐蚀及放射性等）对材料和设备进行分析和测试。近年来利用皮秒（ 10^{-12} 秒）或飞秒（ 10^{-15} 秒）量级的超短激光脉冲在凝聚态物质中激发 10^{11} 赫以上频段的特高频声子。即在固体中激发接近固体的晶格振动频率的特超声，可以直接研究固体中热声子、电子及其有关的量子力学意义上的效应。在液体中激发特超声，可以研究液体分子受激振荡及超快弛豫过程等。

由于光声效应反映的是物质吸收光能后产生热能及声能，因此与传统的光学方法相比，具有更高的灵敏度，并且对测试的样品没有特殊的要求，因此更为实用，成为传统光学技术的有力补充。

利用激光脉冲在水中激发声脉冲，可用于江、湖、河、海的水下目标及海洋地层结构探测或水下通信，也是当今水声学的研究课题之一。

四、声电子技术

声波历来是人类实现信息传递的主要媒介。随着现代科学技术的进步，信息交流日益频繁，并且逐渐发展为远距离通讯。因此对信息的优质传递提出更高的要求。最常用的信息传递载体是无线电波，近年来还利用光缆，即利用光波。但是，以声波为载体，并对信号进行加工处理有其特殊的优越性，因此是很重要的一个方面。声电子学就是研究以声波作为信息载体，在声波

的产生、传播和接收过程中，对信息进行加工处理的一个学科分支。

在 60 至 70 年代，曾经利用声波在固体内激发和传播的过程制作固体声波器件，有滤波器、延迟线等等，以代替常用电阻、电容和电感组合的滤波器或用电缆实现信号延迟。因电磁波在电缆内的传播速度比固体中超声波的传播速度快 10^5 倍，如要实现相同的延迟时间，声波器件是 1 厘米时，电缆长度要 1 公里左右。因此利用声电子器件，可使无线电元器件小型化、固定化，并且性能稳定、制作方便。

70 年代初期，声表面波器件问世，它的优点是对换能器的形状可以任意设计，因此为器件的性能改进提供了极为方便的途径。其次是器件的制作只是利用与半导体集成电路工艺极为类似的生产程序，因此重复性好，性能稳定，体积更小型化，并可实现批量生产，为声电子器件开拓了广阔的应用领域，发展迅速。声表面波器件可对信号完成传递、延迟、滤波、展宽、压缩、移频、调制、解调、开关、放大、编码、解码、卷积相关、频谱分析、富氏变换及其他数学变换等信号处理功能。声表面波器件广泛应用于通讯、雷达、电子对抗、电视广播、光电子学以及传感控制等领域。目前主要是几十兆赫至几百兆赫频段。

随着移动电话的发展，声电子器件将向更高频、更精确、更小型化发展。向高频发展方面，目前工艺上可接受的声表面波器件高频限是 1GHz 左右。

另一方面，为超声电子技术进一步发展的需要，推动相应的理论基础同时发展起来。除有关声表面波的基础理论迅速发展之外，也推动声与半导体的载流子、声与声、声与光等相互作用的机理的研究和发展。作为声波的激发、传播和检测的基础，晶体物理与技术也相应地进一步向纵深发展起来。

五、生物医学超声

自第二次世界大战以来，先进的工程技术与生物医学相结合，逐步发展形成了一个新的科学技术分支，称为生物医学工程。20 世纪后半期，生物医学发展很快，将超声技术与生物医学相结合，即形成生物医学超声分支学科。

近年来，超声诊断在医院中已普遍推广，许多疾病都可由超声诊断仪器（如 A 型扫描仪，B 型超声断面显像仪，多普勒血流图等）早期发现。超声多普勒成像系统可以对颅脑内血管及血流情况以彩色图形进行实时显示。甚至发展到对全身各部位的血流进行多普勒彩色图形显示。超声与 X 光、核磁共振成为医学三大诊断手段。

为了能更准确地诊断早期病灶，了解声波参量与生物组织的生理和病理状态之间的关系是至关重要的。因此，声波在生物器官和组织内的传播规律的研究引起很大重视，超声诊断仪器设备也在不断发展之中。最近，利用非线性参量成像，有别于上述的根据声速和衰减等线性参量成像的传统设备，对生物组织的病理现象更为敏感。

此外，还将多媒体技术用于超声诊断，建立图形档案与通讯系统，其特点是可以存储管理大量病人超声诊断图像信息，并进行三维组合形成立体信息。

大功率超声还可使人体局部加热，并且超声波的振动可进入人体，因此，热效应、振动效应以及由强振动引起的空化效应均可以用于治疗疾病，促进药物的扩散。甚至用于外科手术，如眼科手术、骨骼修复，肿瘤消除等等。

六、声化学和声空化

本世纪 20 年代,首次发现超声波有加速二甲基硫酸酯的水解和亚硫酸还原碘酸钾反应的作用,由于当时的超声技术处于较低水平,研究和应用都受到一定的限制,未引起化学家足够的重视。

近 20 年来,利用超声来加速化学反应,增加反应产率和引发新的化学反应等声化学研究有了突破性的结果,正在国际范围内引起声学 and 化学学术界的重视。声化学技术在生产上可望首先为合成塑料、洗涤剂、制药和化肥等化工工业方面带来重大变革,因此受到化工生产行业的极大关注。

近年来的研究表明,高功率超声在液体中产生的非线性现象引起声空化是声化学主要的物理过程。因为声空化是集中声场能量迅即释放的过程,在空化泡崩溃时,短时间内产生的高温、高压、强冲击波和射流,为一般条件下难以实现或不可能实现的化学反应提供了一种非常特殊的物理环境,开辟了新的化学反应通道。

为了进一步提高声化学反应的效率,声学界和化学界的科学家们对声化学产额与声学参数之间的关系进行了较系统深入的研究,如声化学反应器和换能器的结构、声场形式、辐照声强与声功率、辐照时间、频率效应及信号波形等,对产额的影响进行了大量的研究。

由于“声化学”与其相联系的“声致发光”同是令人感兴趣的两个过程,要求化学家和声学家密切合作,用空泡中微观物理本质来解释观察到的宏观现象。当前国际声化学界认为,化学研究应优先注意的尖端项目之一就是物质在超高温和超高压的极端条件下的化学行为,因其有助于了解化学效应,开辟新途径。可以肯定,声化学科学的发展必将有新的贡献。

七、语言信息处理

语言历来是信息传递的要素。研究语言的特征、识别和合成一直是声学工作者的重要任务,由此近 20 年来已形成了声学新分支——语言声学。语言声学主要研究语言特征谱,从而实现自动识别、人工合成和压缩编码等,对人民生活、国民经济和国防建设都是密切相关的。

随着信息科学的发展,信息技术的应用已深入到人类社会的各个方面,对社会进步产生重大的影响。语言声学的研究也由于信息技术和计算机科学的发展而取得了很大进展,并在某些方面有所突破。

1. 语言识别:

国际上,特定说话人和任意说话人的连续语言识别系统已经达到很高的识别率,这使语言识别系统朝实际应用方向迈进了一大步。因而旅行信息查询、飞机订票、城市查勘以及办公室管理等特殊应用场合的语言识别和语言理解系统都取得了较好的效果。国内在孤立音节和孤立词识别方面也已取得相当大的进展,识别率一般可达到 90%。相继研制中、小字表的声控电话查号系统、汉字语音输入系统、命令识别系统、电话数字语音识别系统等。汉语连续语音识别的研究也已起步。

但要使语音人机交互系统达到实际商用水平还有许多重要的科学问题需要解决,如处理背景噪声、信道噪声、应付陌生词、陌生用户和非预期的输入,系统必须具备多种层次的鲁棒性。

2. 语言合成:

由于计算机语言输入、输出可实现最为友好的语言合成，所以近年来得到了新的发展。当前语言合成系统可分为两大类：一类是利用数字化技术预先存储语言数据；另一类则是利用语言参数和发音规则产生语言，从而还可以实现文语转换系统。

这种人机交互语言应用前景很广泛。在国外许多电话公司已开始试用，如机场、车站等交通和其他商业部门也是重要的使用场合。此外，为残疾人提供朗读或助讲等等。

通常，语言和听觉常常是联系在一起的，而听觉研究的一大特点是心理-物理实验的成功。改变物理量听取受试者的反映，以估计出生理和心理的变化。20年来，已证明耳蜗结构模型的正确，近年来，更以现代通信系统的观点来分析人耳的结构，相当成功。但神经系统和大脑如何处理这些信息还在研究之中。听觉的研究也可能是研究大脑功能的重要途径，人们对此期望很大。

八、水声信号处理技术

海洋覆盖着地球表面的四分之三，蕴藏着丰富的能源、矿产和蛋白质资源，海洋和大气间的热交换，又在极大程度上影响着地球的气象和环境。因此，海洋的研究与开发利用，日益受到世界上各国科学界与政府部门的重视。

声波是唯一能在海水中有效地进行远距离信息传递的载体。蓝绿光在海水中衰减 123dB/Km。100Hz 超长电磁波在海水中衰减为 345dB/Km，但 100Hz 声波在海水中的衰减则仅为 0.0015dB/Km。声波能在水下传播很远距离，而光波和电磁波则在很短距离内就会被完全吸收。因此，所有的水下探测、通讯、导航、遥控等活动都离不开声学。但海水中声速低，高频声波在海水中的衰减增长迅速，海洋信道又属于不平整双界面随机不均匀介质信道，因而水声信号信息量小，传递过程中时变、空变及多途效应严重。要满足不同实际工作要求，需采用多种措施。应该说，水声技术是广泛领域的现代科学技术的高度结合。

至今，人类就多种海洋环境因素对声波传播的影响已有较系统深入的研究。美、俄等国水声考察范围遍及全球各大海域，并建立了较为完整的数据库。此外，全球海域气候的声监测计划是精确地测量全球范围内海洋的温度以提供全球气候变化的直接证据。

为了水声研究，水声换能器的研制成为重要的课题。因此也促进了研制水声换能器的压电材料和磁致伸缩材料的研究与制造。研制新型换能器的多元压电复合材料、高分子合成材料、光纤材料等也引起极大的重视，并出现换能器材料和换能器设计的专家系统。

水声信号处理是当前水声研究中十分活跃的领域。大规模高速芯片的发展和并行算法的开发，提供了十分有力的工具。我国在这一方面的工作也有着可喜的成就。

九、环境声学

环境科学是当今研究的前沿热点之一，其中环境声学由于人类生存条件的变化，也已引起很大的重视。

由于人类生活在充满声音的世界上，语言用于交流思想、表达感情，音乐丰富了人们的精神生活，给人以美的享受。但各种噪声却干扰了人们的工

作和生活环境。如何使需要听的声音听得清晰悦耳，而将不需要的噪声抑制，是近百年来声学 research 的一个重要方向。

本世纪前半期，主要研究建筑物（如报告厅、音乐厅、剧院、体育馆等）内的声学效果。自 Sabine 提出混响的概念及混响时间的计算，开辟了建筑声学的研究领域，先后发展了室内声场理论及混响时间的测量方法。为了改善厅堂内音质及隔绝室外噪声，对吸声材料和隔声材料进行了理论和实验研究。在评价厅堂音质方面，有客观评价和主观评价两个方面，客观评价主要是从厅堂的物理特性来考虑，而主观评价则是以人的主观感受为准则，牵涉到人的生理和心理状态。因此主观评价和客观评价往往不一致。实际上对于传播语言为主的厅堂和以演奏音乐为主的厅堂要求也是不一样的。这就是建筑声学方面的复杂问题。

在本世纪中期，现代工业和交通飞速发展。伴随着出现大量的噪声问题，机器噪声（如纺织厂，机械厂，锯木厂等），交通噪声等等。噪声妨碍人的健康，影响人们的工作和生活，干扰精密仪器的运转。高强度噪声还会造成人们听力丧失，甚至损坏房屋建筑。因此在 60 年代前后，“噪声控制”作为一门独特的学科从建筑声学中分离出来，得到迅速发展。不少建筑声学家把研究方向转为研究噪声及其控制。包括噪声源的分析，噪声对人类的影响，噪声的治理等等。一般采取隔绝的方式，近年来则发展有源消噪和减振的方式，即人为地有目的地产生次级声振动信号去抵消原有噪声，从而达到消噪和除噪的目的。其特点是体积小，成本低，降噪效果好，特别适合于军事和国防方面的应用。

十、电声系统及其应用

近年来，由于高科技发展和人民生活水平的不断提高，对于电声系统提出了更高的要求。首先，由于通讯系统的飞速发展，作为通讯系统的关键元器件的传声器（话筒）和扬声器（喇叭），除音质好之外，对外形（如小型化）等也有特殊要求。此外，随着立体声技术的发展以及人们欣赏能力的提高，对扬声器和组合音响设备也有更高要求，特别是脉冲编码调制录音技术和数字音频唱片的出现，要求扬声器同时承受功率大、动态范围大、频响宽广平坦、失真小和瞬态响应良好等特性。

相应的电声系统的计算机辅助设计和测试的技术和理论以及电声系统的测试方法等均有很大的发展。

除上述有关方面之外，还有声光相互作用及其在系统控制和信号处理中的应用，超声在农业上的应用，音乐和乐器的研究，生理和心理声学，以及大气和地球中传播次声研究等等，都是直接对人类文明生活和生产有重要作用，由于篇幅所限，不能一一详细介绍。

总之，声学是一门与人类的生活、文明和生产息息相关的学科，必将在今后的科技发展中发挥更大的作用。

展望 21 世纪的 高分子化学与工业

冯新德

北京大学化学系

冯新德 高分子化学家。1915 年 10 月 12 日出生于江苏吴江。1937 年毕业于清华大学。1942 ~ 1945 年浙江大学化工系研究生。1948 年获美国诺脱丹大学博士学位。曾任清华大学化学系教授，兼辅仁大学教授。北京大学化学系教授、高分子化学教研室主任，兼任中国科学院化学研究所及感光化学研究所研究员。1980 年当选为中国科学院院士（学部委员）。长期从事高分子化学的教学与科研。

所谓高分子，可以粗略地分为天然高分子与合成（人工）高分子。自古以来天然高分子对于人类的生活始终是密切相关的。无论是作为食物的蛋白质与淀粉还是作为织物的棉、毛与蚕丝都是天然高分子，此外，利用竹、棉、麻等纤维造纸是我国古代的天然高分子加工技术，再如，利用桐油与大漆作为油漆、涂料乃至漆制品又是我国古代的传统技术。

19 世纪中叶开始了对天然高分子的化学改性与应用，而后又发展到高分子的人工合成，笼统地说主要包括塑料、橡胶、纤维与油漆涂料等，可分述为下：

一是天然橡胶的利用开发与改性。在中美洲与南美洲，15 世纪左右当地人用天然橡胶球做游戏与生活用品如容器与雨具等，18 世纪法国人发现南美洲亚马孙河有野生橡胶树，橡胶一词当地印地安语即“木头流泪”的意思，割开橡树皮即流出乳液，后来叫天然橡胶乳，19 世纪中叶，英国人取种子种植在锡兰（斯里兰卡）成功，逐渐扩大到马来西亚与印尼等地，但是天然胶乳制成固体生胶后如何溶解与加工是一大问题。直到 19 世纪 40 年代美国人发现用松节油、硫黄与碳酸铅共热后得到不粘而有弹性制品即所谓硫化技术，因此，到 1920 年左右，亚洲地区天然橡胶出口量达 70 多万吨，与当时巴西的野生橡胶出口量相同。

二是天然纤维素的改性。19 世纪，德国人开始用硝酸溶解棉纤维结果可以纺丝或成膜，但易燃烧，最后制成所谓无烟炸药，如果加入樟脑，可以加工成塑料叫赛璐珞又能制作照相底片或电影胶片，但要着火，此外也用在汽车车身的喷漆工艺。稍后，英国人用氢氧化钠处理棉纤维得到丝光纤维，再用 CS_2 溶后纺丝成粘胶纤维，也可用木浆做帘子线与玻璃纸及人造丝等。但 80 年代后期因 CS_2 有污染问题故当另找它法，而工厂多半停产。此外，另有德国人用醋酐进行纤维素酯化成醋酸纤维，由于不易燃烧故多用于照相底片与电影胶片，以及飞机机身涂料或者重新纺丝制成人造丝织物。

三是最早的塑料。在 20 世纪初，美国人用苯酚与甲醛反应可得到用作电绝缘器材的酚醛树脂，这是最早的合成高分子，与此同时，俄国人用酒精制丁二烯，再用钠使之聚合成橡胶，二次大战后德国人与美国人又发展成一类十分重要的合成橡胶即丁二烯与苯乙烯共聚而得的丁苯橡胶。

尽管有以上几方面的重要成果并建立了工业，但当时对天然高分子与合成高分子的结构并不清楚，因此，对聚合反应历程也还不了解。

一、高分子化学的建立与发展

虽然当时已经确认淀粉具有 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 通式，水解后得葡萄糖，由于不知道它们之间如何连接，所以认为是葡萄糖或它的环状二聚体的缔合体。同样，天然橡胶裂解可得异戊二烯 (C_5H_8) ，也是不知它们之间为何连接以及它的末端结构，因此，也认为是二聚环状结构的缔合体。当时德国化学家 Staudinger（施陶西格）首先提出淀粉与橡胶的大分子概念，并不是缔合，认为它们具有胶体状不等于它们是胶体，他进一步阐明它们的稀溶液粘度与分子量的定量关系，并在 1932 年出版了一部关于高分子有机化合物的论著，后来公认为这是高分子化学作为一门新兴学科的建立。

对大分子概念的一个有力证实就是 1935 年美国杜邦公司发表以己二胺与己二酸缩聚而成高分子聚酰胺，即尼龙 6-6，并于 1938 年工业化，即大家所熟知的尼龙袜，但是却不知当时二次大战后期美军使用的降落伞就是这尼龙 6—6 做的。

40 年代乙烯类单体的自由基引发聚合发展很快，实现工业化的包括聚氯乙烯（PVC），聚苯乙烯（PS）和有机玻璃（PM-MA）等，这是合成高分子蓬勃发展的时期。进入 50 年代，从石油裂解而得的 α -烯烃主要包括乙烯与丙烯，分别由德国人 Ziegler（齐格勒）与意大利人 Natta（纳塔）发明用金属络合催化剂聚合而成聚乙烯即低压聚乙烯与聚丙烯，前者 1952 年工业化，后者 1957 年工业化，这是高分子化学的历史性发展，因为可以由石油为原料而且又能建立年产 10 万吨的大厂，为此他们二人后来都获得了诺贝尔奖金。试问，这是只有 30 年历史的一门新兴学科如何能如此快速发展成一个大工业？这是其它化学工业所没有过的，理由何在？

理由之一是高分子学科特征，广义的高分子化学包括高分子合成化学与高分子结构与性能的高分子物理两个方面，它们与高分子的加工应用共三个方面始终是互相交叉，互相配合，相辅相成。如果合成上有所突破，通过结构与性能研究就能较快地考虑加工应用，所以 1972 年获诺贝尔奖金的美国高分子科学家 Flory（费洛里）说过，高分子化学是一门迅速发展的科学，它既是一门基础科学又是一门应用科学。显然这是高分子品种能较快地进入工业化的很有力的论证。

理由之二是高分子合成也就是聚合方法的特征，先以缩聚反应为例，它是来源于有机合成中的缩合反应，所不同的是前者为单功能团后者为双功能团：

缩合反应： $A-X + Y-B \rightleftharpoons A-B + X-Y$ 这是平衡反应，要使反应向右必需有一反应物 $A-X$ 或 $B-Y$ 大大过量，一般产量在 70 - 80% 已经不错了。

反应： $X-A + X + Y-B-Y \rightleftharpoons (AB)_n + nXY$ 也是平衡反应，要形成高分子即 $n \gg 1$ ，二个反应物的配比最好是 1 : 1，如果 2 : 1 根本不能成高分子只能如 $2X-A + X + Y-B-Y \rightleftharpoons X-A-B-A-X + 2XY$ ，以涤纶 PET 为例，配比与分子量的关系如下：

1 : 1.01 PET 分子量 ~ 10000

1 : 1.001 PET 分子量 ~ 20000

有应用价值的 PET 树脂，分子量要在 1-2 万之间，因此它们的配比差不

能 $> 1\%$ 只能在 $0.1-1.0\%$ 之间。可见与缩合反应大不相同，而且转化率还必需 $> 99.5\%$ ，说明高分子合成中缩聚反应的技术要求远远高于一般的有机合成。

再以聚合反应为例，乙烯类单体的引发剂一般用过氧化物，由此产生自由基而引发聚合。但过氧化物极易爆炸，一般有机合成很少用它。再如乙烯或丙烯的络合催化聚合，所用催化剂（Ziegler - Natta 催化剂）都是金属有机化合物，例如 AlR_3 与 TiCl_3 怕水又怕氧与热，容易冒烟起火。但却要用作大工业生产的催化剂，这就要求高精技术。因此有人说做高分子合成中聚合反应必需有勇有谋，颇有道理。

60 年代，由于要飞往月球而出现耐高温高分子的研究热。耐高温的定义是在 N_2 中，500 能使用一个月，在空气中，300 能使用一个月。其结果主要分为两大类，一类是芳香聚酰胺例如间苯二胺与间苯二酰氯缩聚得到的高分子叫 Nomex，当时作为太空服原料。以如对苯二胺与对苯二酰氯缩聚得到高分子又叫 Kevlar，属于耐高温的高分子液晶，现在用于超音速飞机的复合材料中。另一类是杂环高分子，例如聚芳亚酰胺（PI）和作为高温粘合剂的聚苯并咪唑（Polybenzimidazole PBI）为现在的宇航飞行所需材料打下了基础。

二、80 年代以来的时代特征

这一二十年以来的特征有三：一是能源，由于石油资源的逐渐减少，人们在积极考虑其它能源，例如太阳能、氢能与原子能的开发，但也必需看到石油的主要用途是作为燃料，用于化学工业的仅占 7% ，其中作为高分子原料的只有 5% ，因此一般认为即使下世纪，高分子的主要原料仍可来自石油。另一方面，特种油田高分子用于二次或三次采油颇有成效，可见，很有助于石油能源开发。二是材料，高分子在材料领域中有它特殊的地位，特别是交通工具，可以替代比重较大的金属与陶瓷，以及木材及其它天然材料。例如汽车车身与车壳结构材料中已经有 50% 用高分子材料，下世纪将增至 $70\%-100\%$ 。再如宇航与航空机身与机翼，减轻重量可以大大省油，因此都用高分子复合材料，从 80 年代的 $30-40\%$ 总重量，至 90 年代的 $50-60\%$ ，估计 21 世纪可达 $70-80\%$ 。三是环保与保健，其中包括医用高分子，利用保健及环保的耐火、耐辐射、耐老化的高分子材料以及高分子包装材料的二次利用与自动降解。可以看到高分子对于这三个时代特征有不可忽视的关系。

三、80 年代以来的高分子工业

一是通用高分子及其发展：所谓高分子材料主要包括塑料、橡胶与纤维三大合成材料，其中塑料占总量的 80% 。在塑料中占 80% 的量面宽的叫做通用高分子，包括高压聚乙烯、低压聚乙烯、聚丙烯（PP）以及聚氯乙烯（PVC）与聚苯乙烯（PS）。在 1985 年的总产量为 6500 万吨到 1995 年为 1.2 亿吨，10 年间长了一倍，可见发展迅速，为人民生活所需要。同时值得注意的还有工程塑料与复合材料。

工程塑料的建立与发展，例如能耐高温 $100-160$ 的尼龙，聚碳酸酯（PC），聚酯（PET 与 PBT）及聚苯醚（PPO）。到了 90 年代又发展更高耐热 $200-240$ 的聚醚砜（PES），聚苯硫醚（PPS），聚醚醚酮（PEEK）及聚酰亚胺（PAI）的所谓耐高温工程塑料。与此同时还有复合材料的建立与发展，

例如开始用玻璃纤维的复合材料发展至用碳纤维甚至 Kevlar 液晶纤维的耐高温复合材料。

二是非结构高分子材料与功能高分子 :80 年代以来高分子粘合剂与油漆涂料也都向耐高温方向发展，也就是高分子从结构材料向非结构材料方面发展。还有更重要的是功能高分子的多方面发展，例如利用吸附性能作为海水淡化及其它如离子交换树脂与分离膜的属于化学功能高分子；应用于光导纤维与光刻胶的属于光功能高分子；具有导电性能的电功能高分子及作为人工脏器与药物控释的医学功能高分子。因此功能高分子的兴起是 80 年代以来的十分重要的发展。

四、现代高分子工业的特征

一是精细高分子 (Fine Polymer) 或称高价 (附加) 高分子 (High Value Polymer) ，指的是产量小，价格高的品种。兹将各大类高分子和价格与产量列下：

	价格 (美元/公斤)	产量 (相对)
通用高分子	~ 1	+ + + + +
工程塑料	2	+ + +
有机玻璃	4	+ + +
精细高分子	> 10-100	+

精细高分子是包括功能高分子与含氟高分子及耐高温高分子的总称。

二是工业利润来源：从上表可见精细高分子的利润远远高于通用高分子，为此各国各大工业公司在 80 年代后竞相开发精细高分子。工业公司的利润有如下的变化，精细高分子的利润占公司总利润的百分率如下：

1986 年	美国 ~ 50 %	德国 ~ 53 %	日本 ~ 55 %
1990 年	美国 ~ > 50 %	德国 ~ 60 %	日本 ~ 60 %

可见，同样来自石油原料，加工不同的产品利润不同，总的如下：油品 < 化工品 < 一般高分子产品 < 精细高分子产品。因此工业部门安排精细高分子的 R/D (研究/发展) 对公司的兴旺发展十分重要。

三是精细高分子的 R/D 问题。首先必须要有远见，要从基础应用研究入手，例如日本东丽 (Toray) 公司为了开发医用高分子，在 70 年代先建立了基础研究所，主要是研究新产品的试制以及专利的申请，随后建立了工程研究所，对较有希望的项目进行放大及中试，因此，到 70、80 年代开始生产人工肾与血管导管，可见精细高分子必需要有自己的创新才能立足。例如日本三家最大的高分子纤维公司都生产人工肾，但每家的原料却不同，包括醋酸纤维、聚乙烯醇与聚甲基丙烯酸甲酯，这点是十分重要的。

四是工业公司研究部门的战略安排，无论是认为 R/D 或 R/D · M (M = Market) 为高分子现代工业的中心问题，但关键都在于人才，因此东丽公司明确告诉大家，“先要有优秀人才才能有优秀的产品”。产品要有特色，有竞争能力，有市场。一般而论他们招聘人才主要渠道是通过大学或研究院教授的推荐，然后面试。他们重视科学素质并不太考虑业务的专业对口，要有创造性，能出专利，这就必需有创造性的科学训练，而学校的基础研究往往

就是训练学生创造性的最好方式，因此可以说工业研究最需要的还是有创造性才能的有基础研究水平的应用研究人员，由此才能理解所谓应用研究的水平往往取决于基础研究的水平。那么工业研究部门与高等院校及科学院方面的合作研究又是如何，以美国 40 年代为例，当时工业部门研究能力较弱，高分子研究主要靠大学有关教授带研究生做，50 年代改为学校做基础研究，工业部门分做应用研究，由大学教授每月去公司一二次指导，可以保证保密问题。因此，学校对工业部门主要输送人才及技术，工业部门对学校教授主要提供科研经费。80 年代以来又一种合作方式是在学校开设属于公司的研究室，经费与人员都出自公司，这样有关教授可经常去学校的公司研究室指导工作，既有利研究进行又保证保密问题。目前，这种方式在美国与日本都有，总起来看，工业部门与学校的合作在于一方提供科研经费，另一方提供优秀人才，这是合理的渠道。学校本身仍然是进行基础研究和培养有创造能力人才的场所。

五、80 年代以来的高分子化学的特征

高分子化学中一个至关重要的环节是从低分子合成高分子的聚合反应，也就是单体与单体通过价键形成而得聚合物也就是高分子。

特征之一是聚合反应的优化，首先是反应控制，包括提高聚合速度和催化剂效率，例如聚丙烯用的高效催化剂，但是近年来还要求立构控制，要求聚合物具有一定立构，以及分子量与分子量分布的控制，由此才能做到高分子的分子设计。再以第四代聚丙烯高效催化剂而言，生成聚合物的等规度很高，达 96—98%，所以不需要去掉无定形部分，也不需要去掉催化剂，同时还不需要造粒，这是一大进步。最近 Himont 公司又提出柔性工程，意思是一个反应釜可以生产共聚、共混或高分子合金等，不同品种甚至不同立规的嵌段共聚物，例如：ipp - b-mpp，这是聚丙烯，而具有橡胶弹性，最近又发现用稀土催化剂聚合烯烃可以得到分子量分布很窄 $MWD \approx 1$ 的均匀聚合物。因此看来，烯烃的络合催化聚合还是能活性聚合，但不是用 Ziegler - Natta 催化剂，这的确打开一个新局面。

特征之二是聚合物的优质化，也就是结构改性与功能化，包括接枝共聚，嵌段共聚与共混及复合技术，也包括有机/无机杂交技术。

六、21 世纪高分子化学新时代

活性聚合是促使高分子化学走向新时代的基础。要进行活性聚合，引发速度要快，没有链转移与链终止，实验室测定活性聚合从三个方面下手，一是转化率与单体浓度 $[M]$ 成正比与催化剂浓度 $[C]$ 成反比，也就是 % 与 $[M]/[C]$ 作图可得一直线；二是高分子分子量与转化率或时间成正比；三是分子量分布要窄，约为 1.2 左右。目前，正离子活性聚合与负离子活性聚合都已展开，络合催化聚烯烃的活性聚合所用稀土催化剂已有端倪，只有自由活性聚合还未达到应用程度，估计成功亦在不远。总的说来通过上列的控制聚合 (Controlled Polymerization) 可以得到均匀高分子 (Uniform Polymer)。

有人说高分子化学是一门排队化学，排头要很快站出来，队员迅速排队，面向都一样，所有队员必需都排上队，结果是每排长短都一样，也就是分子量分布 1，转化率 100%。这就是高分子新时代的出现，有下列三个方面：

一是高分子的分子量概念将彻底改变，因为原来的高分子分子量都是各式各样的平均值，主要原因是因为长短不齐。

二是高分子概念也将彻底改变。高分子决不是不易控制的长短不齐的分子所组成，而是均匀高分子所组成。

三是高分子性能以及加工应用，都将因为是精密高分子而出现全新的数据、全新的性能与加工方法与用途。

这三个方面的突破就将是 21 世纪高分子化学发展成为一门新科学的新时代。

中国石化工业的现状与展望

侯祥麟

中国石油天然气总公司

侯祥麟 化学工程专家。1912 年 4 月 4 日出生于广东汕头。1935 年毕业于燕京大学，1948 年获美国卡乃基理工学院博士学位。曾任石油工业部技术司副司长、石油科学研究院院长、石油工业部副部长，现任中国石油天然气总公司顾问、高级工程师。1955 年被选聘为中国科学院院士（学部委员），1994 年被选聘为中国工程院院士。主要从事炼油新技术的研究和开发。

一、概况

石油化学工业是技术密集、资金密集的行业。在世界上发展最早的是美国，他们从 30—40 年代起步；其他发达国家，如德国、英国、法国、意大利和日本大都是在 60—70 年代蓬勃发展起来的。在这些国家中，石油化学工业在其国民经济中都占有重要地位。战后，美国的经济繁荣，西欧的经济复兴，日本的经济崛起，以及近年来韩国的经济起飞，都曾把石油化学工业作为支柱产业之一，其发展速度要高于同期国民生产总值增长速度。

我国的石油化学工业在 50 年代已经开始建设，但一直没有什么发展。70 年代，北京燕山和上海金山两个石化企业的建设，才开始了我国石油化学工业的发展。

60 年代大庆油田开发以后，我国石油炼制工业有了大规模的发展，到 80 年代初，原油加工能力已接近 1 亿吨。但炼油企业属于石油部，因无任务故不发展石油化学工业。需要塑料、橡胶和有机原料的化工部和需要合成纤维的纺织部为了解决所需，申请并建立了石化企业。他们没有炼油厂，所以原油不能很好综合利用。为了加快石油化学工业的发展，合理使用、综合利用好石油资源，党中央、国务院于 1983 年决定成立中国石油化工总公司，对重要的炼油、石油化工、化纤企业和部分化肥企业“集中领导、统筹规划、统一管理”。党中央、国务院把成立中国石化总公司作为国家经济体制改革的一件大事，并大力加以支持。此后十几年，石化工业有了很大的发展，生产能力和产品产量都持续稳定增长。1995 年全国原油一次加工能力达到 2 亿吨，比 1983 年翻了一番。汽油、煤油、柴油、润滑油的总产量，从 1983 年的 3658 万吨增加到 1995 年的 7140 万吨，也增加了近一倍。乙烯生产能力从 1983 年的 72 万吨/年增加到 1995 年的 300 万吨/年，增加了 3.2 倍。塑料、合成橡胶和合成纤维单体的总产量，从 1983 年的 156 万吨增长到 1995 年的 570 万吨，增加了 2.7 倍。

在原油加工和乙烯生产能力、石油产品和乙烯产量等方面占有全国 85 % 以上比重的中国石化总公司，1995 年工业企业的销售总额为 2000 亿元，实现利税 330 亿元，其中利润 105 亿元。作为国有大中型企业的集团公司能取得这些成就说明国有企业可以大有作为。

二、技术进步

中国石化总公司成立以来能有较快的发展，同时保持着一定的经济效益，因素很多，重要的一个是依靠技术进步。这表现在技术的国产化和创新两个方面所取得的进展。

1. 国产化方面

我国炼油工业除在 50 年代得到前苏联援建兰州炼油厂外，60—70 年代依靠自己的技术力量，研究开发了流化催化裂化、铂重整、延迟焦化、尿素脱蜡以及有关催化剂、添加剂等炼油新技术，并在此后建设的炼油厂中普遍使用，因此炼油工业基本上是依靠自己的技术力量建设起来的。80 年代以来，虽也引进了一些技术，但没有改变这种基本的局面。引进的渣油催化裂化技术由于国内研究开发同步进行，也开发了我国的技术。

石油化学工业从 70 年代开始发展以来，一直大量引进国外先进装置和技术，同时，也开展了对引进技术的消化、吸收和创新。通过多年的努力，从催化剂开始，逐步使一些重大工艺技术实现了国产化，包括高压加氢裂化、蒸汽裂解制乙烯、丙烯腈和聚丙烯等，技术指标一般和引进的装置相当。这些技术已经逐步在企业中应用，不但能大幅度节约投资，有的还提高了产品收率，在经济效益上成效显著。

（1）渣油催化裂化技术

催化裂化是我国重质油深度加工的主要手段，它把减压馏分油转化成汽油、柴油和液化气。它所生产的汽油占我国汽油总量的三分之二，柴油约占三分之一。渣油催化裂化是以部分或全部渣油作为原料，把廉价的渣油转化成轻质油品，提高经济效益，当前掺炼一吨渣油，约可提高经济效益 650 元。70 年代，我国即进行了这项工艺技术和催化剂的研究开发。为了加速工业化进程，采取引进和自己开发并进的方针，成功地开发出自己的渣油催化裂化成套技术，包括工艺技术、催化剂和设备等。开发了再生器的内、外取热技术和渣油雾化技术、提升管出口快速分离技术以及适用于渣油裂化的新型催化剂与相应的旋风分离器等高效设备。整体技术水平和国际的相当。用自己开发的技术建设装置较成套引进可节约投资 1/3 以上。

（2）蒸汽裂解制乙烯的裂解炉

乙烯是石化工业中的基本原料，而乙烯裂解炉则是生产装置的“龙头”。乙烯装置的技术水平在很大程度上取决于裂解技术水平。我国乙烯装置所采用的裂解炉过去基本依赖进口。多年来，科研、设计单位对裂解技术持续进行攻关，在消化引进技术的基础上进行创新，开发出自己的技术，1988 年，在辽阳化纤公司和上海高桥石化公司建成了工业试验炉。在试验成功后，又先后建成了齐鲁 4.5 万吨/年和吉化 3 万吨/年 CBL—I 炉。这些炉型符合当前高温、短停留时间和低烃分压发展趋势。齐鲁 CBL—I 炉经过改进完善已成为齐鲁乙烯装置生产的主力炉之一。吉化 CBL—I 炉一直运转正常，各项技术经济指标均比较先进，投资仅为引进装置的 70%。经改进的 4 万吨/年 CBL—II 型炉，在辽化的已于 1995 年 11 月 8 日建成投产，在抚顺的将于今年建成投产。目前，为适应我国石化工业发展的需要，正在开发规模更大、技术更为先进的 6 万吨/年 CBL—III 型炉。

2. 技术创新方面

我国石油化工科技队伍在国产化取得成效的基础上进行创新，开发成功了一批独具特色的先进技术，包括工艺流程、催化剂和工艺技术。

在工艺流程上，根据我国原油偏重和社会对轻质石油产品需求量大的特

点，合理地组合利用现有的生产装置，发展了一系列炼油组合工艺，包括催化裂化芳烃抽提组合工艺、催化裂化溶剂脱沥青组合工艺以及渣油热转化溶剂脱沥青组合工艺以提高轻质油收率。炼油厂根据其装置情况及产品需求，可采用适宜的组合工艺。如安庆石化厂采用催化裂化芳烃抽提组合工艺，没有增加设备，即可提高汽油和液化气收率各 2 个百分点，装置按 110 万吨/年加工能力计算，年增效 6000 万元。

在催化剂上经过科研人员的努力，在实现了立足于国内的基础上，近年来又开发出一些性能优异的催化剂，其中 RN—1 加氢脱氮催化剂已出口意大利并得到应用，MB—86 丙烯腈催化剂也与台湾签订了供货合同，首批催化剂已运往台湾。丙烯腈、环氧乙烷等催化剂，收率比进口的催化剂高几个百分点，经济效益十分显著。

在工艺技术上得到了一些创新成果，较为突出的是催化裂解及其衍生的一些技术，以及催化裂化干气制乙苯技术等。

（1）干气制乙苯技术

乙烯与苯经烷基化制取乙苯的工业方法，国内外几乎都采用聚合级乙烯为原料。近年来，国外研究开发了利用炼油厂催化裂化干气中的乙烯作为制取乙苯原料的技术。但因为需要对干气进行脱硫及其它杂质，经济上不很有利。中科院大连化物所研究出一种干气不用脱硫即可进行烷基化的催化剂。为此中国石化总公司组织本系统的科研、设计、生产单位协同该所对此技术在抚顺石化公司进行开发。成功后，1993 年在该公司建成 3 万吨/年乙苯工业装置，制得的乙苯完全达到国家优级产品标准，催化剂再生周期达 110 天，年经济效益数千万元。

利用催化裂化干气中的乙烯制乙苯技术目前在国际上只有两套工业化的装置。国内这套装置原料干气不需深度精制，因而装置投资和能耗比原料需要深度精制的工艺低 1/3—2/3。已和国外公司签订了在世界范围内合作推广这项技术的协议。

（2）催化裂解技术

石化工业发展需要大量的乙烯、丙烯等低碳烯烃，这些低碳烯烃国内外一般都是以轻质石油馏分为原料采用蒸汽裂解的方法来制取的。由于我国的原油馏分偏重，轻质石油馏分较少，需要开发能用重质油为原料来生产乙烯、丙烯和丁烯的新工艺。我们研究开发的催化裂解制取低碳烯烃技术（DCC）是通过有选择的催化反应，把重质原料裂解为丙烯等低碳烯烃的技术。这项技术的主要特点是：可适用于加工重质原料（减压馏分油），在催化剂作用下，可使用较低的裂解温度（550 - 580℃），所生产的烯烃主产品是丙烯，产率达 20%，同时副产丁烯和乙烯，是一项我国独创的以重质石油馏分为原料制取气体烯烃的新技术。

这项技术获多项国内外专利，已经实现了工业化。济南炼油厂加工能力 15 万吨/年、安庆石化总厂 40 万吨/年和大庆油田化学助剂厂 12 万吨/年三套装置已分别于 1994 年和 1995 年顺利投产，每年经济效益上亿元。

催化裂解技术已于 1994 年出口泰国，正在建设一套 75 万吨/年的生产装置。目前，还有一些著名的外国公司对该技术表现出兴趣，派人来我国了解情况。

这些国产化和创新技术的推广面逐年得到扩大，因之，经济效益也不断得到提高。

三、展望

我国国民经济的持续、快速、健康发展，对石化产品的需求日益增加。可以预计，石化工业在本世纪以至 2010 年前，都将保持较快发展速度。国家已经确定，要把石化工业建设成为国民经济的支柱产业。预计到 2000 年，原油年加工能力比现有的 2 亿吨只略有增加，而乙烯年生产能力则要达到 500 万吨左右。设想到 2010 年，原油年加工能力将达到 3—3.5 亿吨，乙烯年生产能力达到 800—1000 万吨，使石化工业有一个更大的发展。但这个速度，应该是在实现两个根本性转变基础上，在保证高质量高效益基础上的速度。

随着社会主义市场经济的建立和对外开放的扩大，加入世贸组织的临近和商品价格与国际逐渐接轨，石化工业正面临着国内外市场的激烈竞争，特别是国外一些大型石化公司，近年来在产品上、技术上都加紧进入中国市场，抢占地盘。因此，要实现上述目标，除要深化改革，加强经营管理外，必须有更大幅度的技术进步。特别在下列 5 个方面更应取得较大的进展。

1. 扩大已掌握的新技术的推广应用

石化工业有许多新技术已在工业生产上应用，并取得良好的经济效益。但还有许多新技术尚未被企业所采用。推广新技术是提高经济效益，增强市场竞争能力的捷径。

采用高效催化剂，一般不需要基建投资，最易见效。我国的丙烯腈、二甲苯异构化、甲苯歧化等催化剂，其质量优于进口催化剂，价格也比较低，扩大其应用可大大提高经济效益。

炼油的组合工艺，也是一般不用基建即可实现的。广州、安庆等炼油厂采用的结果，年增加效益都有几千万元。科研、设计单位应协助其它企业，结合具体情况，研究采用最优的组合工艺。

已经国产化的先进成套技术，如聚丙烯、丙烯腈和乙烯裂解炉等在基建中应要求节约投资。自己开发的先进技术，如干气制乙苯、催化裂解、中压加氢改质等，经济效益很高，应加速推广应用。

石油化工厂在原料的精制和优化选用方面有较大潜力。如齐鲁石化公司的乙烯装置，按原设计用胜利柴油作原料，乙烯收率只有 22% 左右。用胜利减压馏分油经过中压加氢改质，除获得轻质油外，60% 的尾油用作乙烯原料，乙烯收率可达 26%。可见推广中压加氢改质技术能取得很大的经济效益。

2. 通过技术改造扩大装置规模

为了实现 2000 年和 2010 年原油加工能力和乙烯生产能力的目标，必须拥有一批千万吨级能加工含硫原油的炼油装置、百万吨级乙烯生产及相应的下游装置。

建设加工能力 1000 万吨的炼油厂和年生产 100 万吨的乙烯装置面临着技术和投资两个难关。已有的生产装置，经过技术改造以扩大生产能力并提高技术经济指标，是节约投资的途径。燕山石化公司 30 万吨乙烯改造成 45 万吨。加上下游配套，只花 28 亿元，是一个好例子。最近中国石化总公司组织科研、设计、生产等方面的技术人员，审查镇海炼油厂制订的把炼油扩大到 1200 万吨/年的方案时，在“两个根本性转变”指引下，提出许多技术改造的可能性建议，增加老装置扩大规模的数目，减少需要新建的装置，比原方案可节约投资近 30%。这是多快好省的道路，中国石化总公司把这作为典型加以推广，号召各个企业学习，使“九五”投资能大幅度节省，以利于解决

资金问题。但要实现这个方案，必须在较短时间内解决若干技术问题。如改进常压蒸馏流程，采用和开发高效塔盘，提高重整催化剂和加氢裂化催化剂性能并改造关键设备，优化延迟焦化流程及参数，如温度、反应时间等。这对科研和设计部门无疑是个促进。

3. 研制开发高性能新产品

在市场竞争中，除价格外，主要是产品的品种和质量。没有优良的质量和适合需要的品种是很难站稳脚跟的。

在石油产品方面，除提高汽油辛烷值，普及 90 号以上汽油并加速其无铅化外，重点是提高润滑油的质量。国外汽油机油已普及 SG 级，柴油机油已普遍使用 CD、CE 级。相比之下，我国内燃机润滑油牌号落后了 2—4 档次。要大幅度提高质量水平，需从三个方面入手：一是改进现有工艺并开发高效新工艺，以提高润滑油基础油的质量；二是采用和开发高效添加剂，研究新的复合配方；三是加强马达评价手段，及时提出指导性意见。同时还必须密切结合国内汽车工业和机械工业发展，并跟踪国际发展趋势，掌握润滑油发展方向。

在石化产品方面，同样是大路货多，高性能、高附加值产品少，影响经济效益，如一吨洗衣机内筒用的聚丙烯，价格比普通聚丙烯要高 300—400 美元，我们不生产，而大量进口。近期，合成树脂要加快专用料的发展，在农用薄膜、家用电器、电线电缆、工业管道等方面有新突破。合成纤维在发展涤纶、腈纶的同时，适当发展锦纶和丙纶。在品种牌号上，要突出差别化、功能化和非服用纤维等新产品的开发。

研制开发高质量的专用料，应在交流、总结国内研究工作基础上，集中力量开发、推广有水平的成果，并确定进一步攻关的任务。应从基础性研究入手，搞清提高质量的关键所在，并结合塑料加工、纤维抽丝等应用研究，推动树脂质量的提高。只有研制出高质量的塑料制品、差别化等高质量纤维，才能推动合成技术、抽丝技术的提高。

在石油产品中的润滑油，石化产品中的塑料、合成纤维、合成橡胶等，必须选择销路较广、我国有一定优势的若干重要品种，集中有关科技力量，进行研制、开发，坚持不懈，不断提高，以创我国的名牌产品。

工程塑料和功能性高分子材料是有发展前途，并将是迫切需要的产品，急需大力支持其研究工作。

4. 研究开发新工艺技术及催化剂

催化剂是我国较有优势的技术领域，面临国际的激烈竞争，必须对应用面广的催化剂加强研究开发工作，不断提高催化剂的质量，同时还必须改进催化剂生产工艺，采用先进设备，大力降低成本，以保证在国际竞争中的优势。在提高现有催化剂水平的同时，还必须研究开发新型的烯烃聚合催化剂，如金属茂等；能代替硫酸、氟氢酸的高效无污染催化剂，如固体酸等；以及减少副产物的择形催化剂，以用于氧化、合成、裂化等反应过程。

在工艺技术方面，除已经掌握的工艺技术应不断改进提高和保持其水平之外，对尚未国产化的渣油加氢、连续重整、两步法腈纶等应进行研究开发，以求立足于国内。同时还应针对生产中的重大问题，如提高柴油的比例和提高催化裂化汽油的辛烷值问题、重质原油的轻质化问题等，研究开发在经济上有利的先进新技术。

(1) 在提高柴油与汽油生产的比例方面，1996 年国内需求要达到 1.5，

而现在只有 1.3。解决的途径主要依靠二次加工量最大的催化裂化技术的改进和新催化剂的开发。要因地制宜，根据不同的原油性质和装置的具体情况，在技术上有灵活的调节手段。还要研究开发低加工成本的新加氢裂化技术。

（2）在重质原油轻质化方面，除了采用已有技术之外，应研究开发适度的渣油脱硫、脱氮和脱重金属技术，为催化裂化提供优质原料；改进焦化技术、优化工艺组合，提高轻质液体产品收率。

（3）为了提高轻油收率和产品质量，须要通过脱碳或加氢以提高产品的氢碳比例。因此，生产廉价氢气，如从炼油干气制氢和氢提纯或提浓等技术，也是重要的配套技术，必须大力进行研究开发。

（4）广泛采用计算机技术。与国际上发达国家相比，我国在计算机的应用与开发方面还存在很大的差距。在研究工作中，用计算机积累和整理数据，建立数据库，找出关联模型，开发工艺模拟软件，并与生产和设计相结合，逐步开发操作优化模拟软件。

5. 加强基础和探索性研究

基础性研究是新技术的源泉和后盾，但因不起直接作用，易被忽视。因此，必须强调企业给基础研究加大投入。探索性研究风险性大、成功率低，但总的经济效益是大的，因此企业必须舍得冒这个风险，以取得创新的技术。一些世界性的课题，如重质、超重质原油新的先进加工技术，以廉价原料如烷烃代替烯烃等高价原料，定向反应、定向合成，新的分离过程和反应工程，高性能催化材料以及质量好于纺织布和植物纤维纸的无纺布和塑料纸的新生产技术等，都是探索性的大课题。这类课题的突破有赖于打破旧框框，创出新途径。因此，应当提倡鼓励科技工作者解放思想，跳出传统概念，提出各种新构想，这样才能实现技术创新。

不久前有人提出“清洁生产”的口号，要求把生产末端的环保治理转移到生产的全过程每个环节，以实现三废的“零排放”，得到很好的反响，引发了许多科研工作者从多个角度进行探索。

还有人提出“分子管理”（Molecular Management）的口号。所谓分子管理，就是要对原油加工从观念上产生根本性的变化，即实行分子水平上的转移、重排和分离，转化的重点是使大分子定向断裂成气体烯烃和各种高质量的石油产品。这类新概念的提出对推动创新都是有益的。

全国人大八届四次会议通过的“九五”计划和 2010 年远景目标纲要对振兴我国石化工业提出了更加具体的要求。为实现我国石化工业的发展目标，还必须与有关各方面共同努力，提高技术水平，缩小同国外的差距，使我国的石化工业跻身于世界先进行列。

洁净煤技术

姚福生

机械工业部

姚福生 动力机械、汽轮机专家。1932 年 4 月 26 日出生于上海。1955 年毕业于上海交通大学，1962 年毕业于波兰格但斯克工业大学并获博士学位。曾任机械工业部总工程师。现任机械工业部高级工程师、我国 10 所著名高校的兼职教授。兼任中国动力工程学会副理事长。1994 年被选聘为中国工程院院士。主要从事汽轮机叶片（首创 CAD 软件）、叶栅以及汽轮机的旁路系统等工程技术工作。

国民经济的持续发展，离不开能源的支持。无论过去、现在，还是将来，能源的主角是煤炭。中国是当今世界上最大的产煤国和消费国，已探明的储量为 9183 亿吨，折合标准煤计算，占已探明的煤炭、石油、天然气及水电资源总储量的 90%，1993 年产煤 11.5 亿吨。在一次能源总消费中，煤炭占 76%。煤产量的 80%是直接用于燃烧，其中发电厂用煤量大于总产量的 30%。由于今后相当长时期内煤炭作为主要的一次能源地位不会改变，预计 2000 年、2020 年煤炭产量将分别达到 14 亿吨和 21 亿吨。

煤炭作为能源在国民经济发展中作出巨大贡献的同时，在其开发与利用过程中也带来了一系列环境污染问题，危及生态平衡与人类的生存。煤炭在开采中排放的甲烷（又称煤层瓦斯或煤层气）与 CO_2 ，氯氟烷烃等气体在大气层中形成一层类似“温室玻璃”的气体层，阻碍地球有效散热，使地球气温升高，人称温室效应。甲烷虽是仅次于 CO_2 占第 2 位的重要温室气体，但其效能比 CO_2 大 20—60 倍。目前我国每年由煤炭生产而释放的甲烷达 47 亿立方米，其中通过抽放利用的仅 3 亿立方米，而煤层甲烷的储量约 30—50 万亿立方米。甲烷是一种短寿命的气体，在大气中滞留的时间只有 8 - 12 年，而 CO_2 则超过 200 年，所以与甲烷有关的气候变暖是在其散发后几十年内完成，而 CO_2 则在几百年内逐渐实现。大气中甲烷浓度的增加，导致平流层中臭氧（ O_3 ）的减少。平流层 O_3 对地球的主要作用是防止有害的紫外线辐射到达地面。甲烷浓度的增加，通过与大气圈反应抑制对流层的 OH，消耗大气圈的氧化势，削弱大气清除氢化含氯氟烃及有毒大气污染物的能力，从而破坏平流层的 O_3 。此外，甲烷到达平流层后被 OH 氧化，生成水汽，这种水汽是平流层中一种重要的温室气体。平流层中的水汽还有助于形成有极性的冰晶体，这也会消耗平流层中的 O_3 。平流层 O_3 的减少，使辐射到地球上的紫外线增加，诱发皮肤癌，使皮肤晒黑而老化、引起眼疾、雪盲等，危害人类身体健康。煤矿在开采过程中，还遗弃矸石，目前我国已积存矸石达 16 亿多吨，而且每年还以 1 亿多吨递增。矸石山占地 4000ha，其中约有 145 座矸石山在自燃，对大气和环境造成严重污染，矸石淋水溶水对周围地表水、地下水也造成污染。煤矿开采时每年排出矿井水（分别为高矿化度、酸性、高悬浮物，有的还有放射元素）约 17 亿吨，年排放煤泥水 2800 多万吨，都对环境造成

了污染。

从煤炭中获取能量，主要是通过燃烧。与煤伴生的常见有害元素有硫、磷、氟、氯、汞、砷、钡、镉、硒、铅、铬、锰、铀、镍等，有的对工业生产有害，更多则是对生态环境保护方面有害。煤在燃烧时将不同的元素释放到大气中，计有未燃烧的碳、硫磺和氧化氮、二氧化碳、一氧化碳、微量部分燃烧了的碳氢化合物和其它微量元素。煤的无机部分在燃烧后成为灰保留下来，其中部分进入大气。

煤燃烧后进入大气的悬浮粒子总量包括灰粒子、微量金属和碳氢化合物、烟等，它是我国大气中最严重的空气污染物，对人的健康威胁最大。微粒的排放量是取决于煤的灰分含量、燃烧温度和锅炉烟道气压力。微粒浓度高会引起或促成慢性哮喘和其他呼吸道疾病的发生。粉尘和特细粉尘状悬浮粒子总量对健康的影响最大，它更易被吸入肺内，特细粉尘（ $< 10^{-5}$ 米）含有最多与煤燃烧有关的有毒元素或致癌元素，如氢离子、微量金属和有机化合物，目前的污染控制设备尚很难去除特细粉尘微粒，属世界性难题。据 1992 年环境公报公布，我国年排放烟尘达 1414 万吨，预测 2000 年将达 2392 万吨。

煤燃烧时排放的 SO_2 是大气污染的元凶，1993 年全国向空排放 SO_2 约达 1800 万吨，预测在 2000 年将达 2160 万吨。燃煤时排放的 SO_2 是由煤炭中的硫析出并氧化而成，排放量取决于煤的含硫量，煤在燃烧过程中大约有 90—95% 的硫被氧化成 SO_2 ，多数进入烟道，只有 5% 的硫与煤炭中含有少量碱土金属氧化物（ CaO ）反应生成硫酸盐进入灰渣。 SO_2 污染属于低浓度、长期污染的性质，对生态环境一般是一种慢性、叠加性的长期危害，对人体健康的影响主要是通过呼吸道系统进入人体，与呼吸器官作用，引起或加重呼吸器官的疾病，如鼻炎、咽喉炎、支气管炎、支气管哮喘、肺气肿、肺癌等。此外，植物对 SO_2 特别敏感，主要通过叶面气孔进入植物体，在细胞或细胞液中生成 SO_3^{2-} 或 HSO_3^- 和 H^+ 。如果其浓度和持续时间超过了本身自解机能（即阈值浓度）时，就会破坏植物正常生理机能，使光合作用降低，影响体内物质代谢和酶的活性，从而使叶细胞发生质壁分离，收缩或崩溃，叶绿素分解等。从表面看，叶片出现伤斑、发黄、枯卷、落叶、落果或生长缓慢，严重时则枯死，同时会使植物对病虫害的抵抗力降低，造成间接危害。

SO_2 的转化物硫酸雾对大气能见度的影响最大。当大气相对湿度大于 70% 时，对能见度的影响就比较突出。根据记载，1989 年在新疆乌鲁木齐市和陕西省西安市都出现过持续时间在 16 天以上的弥天烟雾天气。烟雾笼罩市区上空，严重影响空中和陆地交通运输。

SO_2 在大气中经催化氧化等过程形成酸雨，对森林、湖泊、农业生产、建筑及材料造成危害也极大。酸雨是跨界的污染问题，煤燃烧过程中排放出氧化硫和氧化氮主要是 SO_2 和 NO_2 。随着 SO_2 、 NO_2 在大气中滞留的时间增长，这些氧化物与氧结合形成硫酸盐和硝酸盐离子，如遇水雾就会形成酸雨和酸雾，酸化的程度用氢离子浓度指数 pH 值来表示，我国用天然降水的本底 pH 值 5.65 来表征，一般将 pH 值小于 5.6 的降水叫酸雨，小于 4 则表示严重酸化。酸雨被称为“空中死神”，在 1990—1995 年联合国系统中期环境方案中，酸雨被列为最重大的环保问题。

我国是一个典型的煤烟型污染国家，除 SO_2 和烟尘外，还有 NO_x 、 CO_2 及苯并（a）芘等，这些物质达到一定浓度就会对人体健康构成威胁和危害。

洁净煤技术是旨在使煤作为一种能源使其达到最大限度潜能的利用同时，实现释放污染物最少的目的。

洁净煤技术（Clean Coal Technology-CCT）一词来源于美国，1980 年列入了能源词汇。它是针对使用煤炭对环境造成污染所提出的技术对策。因此，洁净煤技术应包括煤炭使用各环节的净化和防治污染的技术，从以上分析可知，污染来自煤炭的废渣、废气（燃烧所生的烟气）及废水等诸方面。防治这种污染的洁净煤技术可分为：煤炭燃烧前的净化技术、燃烧中的净化技术、燃烧后的净化技术、煤炭的转换技术。

1. 煤炭燃烧前的净化技术的主要内容是“选煤”。选煤是合理利用煤炭资源、保护环境的最经济和有效的技术。选煤是应用物理、物理化学、化学或微生物等方法将原煤脱灰、降硫并加工成质量均匀、用途不同的各品种煤的加工技术；是使电站和工业燃煤大大减少烟尘和 SO_2 排放量的最经济和有效的途径；是煤炭深加工的前提；是国际公认的洁净煤技术重点。它直接关系到煤炭的合理利用、深加工、环保、节能、节运，以及产煤和用煤企业的经济效益、社会效益和环境效益。据统计每入洗 1 亿吨原煤，脱除其中大部分的黄铁矿硫，就可减少 SO_2 排放量 100 - 150 万吨，而其成本仅为洗涤烟气脱硫的 1/10，尚可回收和利用煤中有益的共伴生矿物。煤中共伴生的微量元素有铜、铍、锶、钡、氟、锰、硼、镓、锗、锡、铅、锌、铬、砷、镍、钴、钛、锆等。对于炼焦煤，如将选后精煤的灰份降低 1%，则焦炭灰份可降低 1.33%，燃料比可降低 2.66%，生铁产量可提高 3% 左右，焦炭硫份如降低 0.1%，燃料比可降低 1.5%，生铁产量可提高 2%，同时石灰石耗量和排渣量也随之降低，环境将随之改善。对于动力用煤（指除去炼焦、造气用的原料煤外，用于直接燃烧生产动力和热能的燃烧煤）选煤除灰也是十分迫切要解决的问题，我国动力煤的平均灰份高达 20%，有些资料估计我国动力煤实际灰份大致在 27% 左右，这就说明动力煤如不加洗选，要提高动力煤质量（降低灰份，硫份）是困难和没有保证的。高灰份的动力煤不但使电厂制粉电耗的增加，锅炉燃烧效率的降低，还造成排灰量增加，环境污染加剧。通过选煤还能排除大量矸石，是减少无效运输的重要措施。我国煤炭储量的 80% 集中在华北和西北，而 74% 的煤炭消耗在东南及沿海一带，因而有近 60% 的煤炭需要运输，占铁路货运量的 40%，公路货运量的 25% 和水运量的 20%，由于未经洗选的煤炭中含有大量矸石（15% 左右），在运输中造成大量的人力和物力的浪费。通过选煤如排除其中 10% 的矸石，以现有煤产量和平均运距 500 公里计算，则每年可节约运力 575 亿吨公里。

选煤技术可分为 4 类：筛分、物理选煤、化学选煤、细菌脱硫。筛分是把煤分成不同粒度。物理选煤方法有跳汰、重介质和浮选 3 种。跳汰选煤是在上下波动的变速脉动水流中，使相对密度不同的煤和矸石分开。重介质选煤是利用磁铁矿粉等配制的重介质悬浮液（其相对密度介于煤和矸石之间）将煤与矸石等杂质分开。浮选是利用煤和矸石表面湿润性的差异，洗选粒度小于 0.5 毫米的煤泥。物理选煤可除去 60% 以上的灰份和 50% 的黄铁矿硫。化学法和微生物脱硫可以脱除煤中 99% 的矿物硫及 90% 的全硫（包括有机硫）。化学法脱硫多数针对脱煤中有机硫，主要利用不同的化学反应，包

括生物化学反应将煤中的硫转变为不同形态而使之分离，化学法脱硫有 10 几种不同方法，计有碱水液法、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 氧化法、 O_2 /空气氧化法、PETC 空气氧化法、 NO_2 选择氧化法、氯解法、微波法、超临界醇抽提法、熔融碱法、全氯乙烷重力浮沉与抽提法、高能辐射法、快速热解法、生物氧化还原反应法、重力法与碱熔相结合的碱液浮沉浸溶法等。相对而言，化学选煤法脱硫效率最高，而且还能去除有机硫，但其致命的弱点，一是多数化学法是在高温高压下进行，有的使用不同的氧化剂，操作费用和设备投资费用高昂，二是反应条件较为强烈，可能使煤质发生变化，使煤的发热量、结焦性和膨胀性遭到破坏，使净化后的产品用途受到限制。细菌脱硫技术的难度在于生物化学过程往往反应太慢，微生物要求温度又过于敏感，加上煤不溶于水，迫使煤粒直径要求非常细，增加能耗，否则界面反应很困难。

工业发达国家需要洗选的原煤早已全部入选。而我国原煤入选比例约为 20.5%。入选率低的主要原因是缺乏烧煤设备污染排放的环保和标准，煤炭品种比价不合理，动力煤洗选回收率低。

型煤加工也是煤炭燃前的洁净技术内容，型煤加工是用粉煤制成具有一定强度和形状的煤制品。可分为民用型煤和工业型煤两种。型煤加工一般需加粘结剂。寻求适应性强的廉价粘结剂是发展型煤的关键。年轻褐煤干燥后可直接冷压成型，不用粘结剂。高硫煤成型时加入适量的固硫剂，可大大减少 SO_2 排放。作为我国民用型煤主体的蜂窝煤，配以先进炉具，热效率比烧散煤高一倍，一般可节煤 20 - 30%；烟尘和 SO_2 减少 40 - 60%， CO_2 减少 80%。工业炉窑和蒸汽机车烧型煤与烧原煤相比，可节煤 15%，烟尘减少 50—60%， SO_2 减少 40—50%，民用型煤的节能率是所有洁净煤技术中最高的，相对环境效益也很高。

将煤制成水煤浆，也能使燃烧时烟尘和 SO_2 排放远低于烧原煤，由于水煤浆在燃烧时火焰中心温度比烧煤和烧油低，故 NO_x 生成量也较少。此外，水煤浆储运过程对环境的影响也比煤炭小得多。所以燃煤前制作水煤浆也是洁净煤技术的内容之一。水煤浆是 70 年代发展起来的一种以煤代油的新型燃料，它是将灰份小于 8%，硫份小于 0.5% 的挥发份高的原料煤，研磨成 250—300 微米的细煤粉，按煤 70%，水 30% 的比例，再加入 0.5—0.1% 的分散剂（保证其流动性）和 0.02—0.1% 的稳定剂，配制而成，水煤浆可以像燃料油一样运输、贮存和燃烧。燃烧时，水煤浆从喷嘴高速喷出，雾化成 50—70 微米的雾滴，在预热到 600—700 的炉膛内迅速蒸发，并伴随微爆，煤中挥发份析出而着火，其着火温度比干粉还低 100 。

2. 煤炭燃烧中的净化技术：采用先进的燃烧器是燃烧中净化技术的重要课题。先进燃烧器是通过改进电站锅炉、工业锅炉和炉窑的设计和燃烧技术，减少污染物排放，并提高效率。

国外除大力开发循环流化床锅炉和先进层燃工业锅炉外，还积极研制低 NO_x 燃烧器，其燃烧过程是燃料和空气逐渐混合，以降低火焰温度，从而减少 NO_x 生成，或者调节燃料与空气的混合比，提供只够燃料燃烧的氧，而不足以和氮结合生成 NO_x ，结合炉内喷钙（石灰石）降低 SO_2 排放量。研究比较成功的是美国 TRW 公司推出的排渣式多级煤燃烧器，它具有低 NO_x 排放、脱硫效率高、液态排渣、排烟含灰量小、燃烧器的容积热负荷高、负荷调节比大、

炭燃尽率高（达 99% 以上）等特点。

我国正在开发的先进的层燃工业锅炉，热效率可提高 10%，原始排尘浓度降低 60%， SO_2 减排 40%。

流化床燃烧技术是燃烧中洁净煤技术的更为注目的课题。流化床燃烧是把煤和吸附剂（石灰石）加入燃烧室的床层中，从炉底鼓风使床层悬浮，进行流化燃烧。流化形成湍流混合条件，从而提高燃烧效率，石灰石固硫减少 SO_2 排放，较低的燃烧温度（830 - 900）使 NO_x 生成量大大减少。流化床分为鼓泡床和循环床两类，鼓泡床使煤保持在燃烧器中心，流化燃烧主要在床内进行。而循环床则通过高速空气夹带固体颗粒进入并返回燃烧器，进行辅助燃烧，促使煤粒沸腾燃尽。流化床燃烧又分为常压流化床燃烧和加压流化床燃烧两种，前者是在常压或接近常压的空气中流化燃烧，后者是在炉内增压至 8—16bar 条件下燃烧。

流化床燃烧与采用煤粉炉加烟道气净化装置的电站相比， SO_2 和 NO_x 可减少 50% 以上，无需烟气脱硫装置。当钙硫比为 2 时，鼓泡床脱硫率为 80%，循环流化床超过 90%； NO_x 排放浓度小于 200mg/m³。

煤的洁净燃烧技术方面，燃煤的燃气——蒸汽联合循环技术的发展是最令人瞩目，它有可能较大幅度地提高燃煤电厂的热效率，并使污染问题获得解决。它是高效的联合循环和洁净的燃煤技术相结合的一种先进发电系统。目前世界各国正在开发的先进燃煤联合循环发电系统有：整体煤气化联合循环（IGCC），流化床燃煤联合循环（PFBC—CC 和 AFBC—CC），外燃式燃煤联合循环（IFC），直接烧煤粉（或水煤浆）联合循环，整体煤气化燃料电池联合循环（IGFC）以及磁流体发电联合循环（MHD）等。从理论上分析，IGFC 和 MHD 是最先进的系统。燃料电池是通过氢氧之间的电化学反应发电；MHD 则是由高温离子化气体高速通过磁场获取电子而发电。两者热效率都可能超过 60%，而污染物排放量接近于零，但是其中付诸经济实用的技术尚要许多年后才能兑现。直接烧煤粉（或水煤浆）的联合循环系统简单、效率高，但高温除尘、透平叶片结垢、腐蚀与磨损等问题尚待解决，路程尚还长久。IFC 和 AFBC—CC 比较相似，都采用常压空气锅炉，前者为新型高温炉，后者采用常压流化床，它们已达到实用阶段，效率也可以，但大型化较难。最引人瞩目的是 IGCC 和 PFBC—CC。PFBC—CC 是采用增压流化床和燃气轮机代替煤粉锅炉，煤在高压条件下燃烧产生高温燃气，经除尘后，推动燃气轮机作功，锅炉内产生的蒸汽推动蒸汽轮机作功。它烧劣质煤的优势明显，即使烧含 7% 硫量和 30%—40% 灰份的煤，也能达到 97%—98% 的燃烧效率和 85% 以上的固硫率。与 AF—BC 相比，PFBC 的燃烧效率和固硫率更高、系统更紧凑。IGCC 是先将煤气化和净化处理后的可燃气体供燃气轮机燃用作功发电。一般，它是由煤气发生系统及净化系统、燃气轮机、汽轮机、发电机以及有关附属系统组成。IGCC 的关键是先进的气化工艺，目前煤的气化装置有三类：喷流床、流化床和固定床。早期只把气化炉、空分装置和联合循环等简单叠加（称为 GCC），效率较低，后来发展成为 IGCC，热效率已达 40%—46%，正在研究效率为 50—60% 的系统（如 IGHAT），据美国资料，烧硫份为 3.5% 的高硫煤的 IGCC 电站 SO_2 排放量比煤粉炉加烟气脱硫装置少 70%，比 AFBC（常压循环流化床）少 50%； NO_x 分别减少 60% 和 25%，固体废物分别减少 60% 和 75%。IGCC 在国外已建、在建和拟建的电站有 24 个，我国也将与美国

政府合作在国内建一 IGCC 示范电站。IGCC 十分有可能是下一世纪的主要的发电方式。

3. 煤炭燃烧后的净化技术：已有的常规煤粉炉发电厂，可用烟气净化技术，减少 SO_2 和 NO_x 的排量。烟道气净化包括 SO_2 、 NO_x 和颗粒物控制。烟气脱硫 (FGD) 有干式和湿式两种方法。干法是用浆状石灰石喷雾，与烟气中的 SO_2 反应，生成硫酸钙，水份被蒸发，干燥颗粒用集尘器收集。湿法是用石灰水淋洗烟气， SO_2 变成亚硫酸钙或硫酸钙的浆状物。烟气脱氮有多种方法，日本等国已采用干式氨选择性催化剂还原法 (SCR)，烟气通过催化剂，在 300—400℃ 下加入氨，使 NO_x 分解成无害的氨和蒸汽。烟气除尘，目前已广泛采用静电除尘器，除尘效率已达 99% 以上。

湿式和干式 FGD，除硫率可达 90% 以上，采用 SCR， NO_x 排放量可减少 80% 以上。但装置的投资费用和运用费用都较昂贵。

4. 煤炭的转换技术：主要内容是煤炭气化和煤炭液化。煤炭气化是把经过适当处理的煤送入反应器，在一定温度和压力下，通过气化剂 (空气、氧、蒸汽) 以一定的流动方式 (移动床、流化床或携带床) 转化成气体。煤炭气化主要产生 CO 和 H_2 ，灰份形成废渣排出。其优点是在燃烧前脱除硫组份。

粗煤气中的硫化氢可在气体冷却后通过化学吸收或物理吸附脱除，高温下也可用金属氧化物吸附。这些工艺可脱硫 99%。还可在气化器中加石灰石固硫，这样也可脱硫 90%。煤炭液化分直接液化和间接液化两类。直接液化是把煤直接转化成液体产品。有氢溶剂法 (EDS)、氢-煤法，SRC 法。EDS 法是煤浆在循环的供氢溶剂中与氢混合，溶剂首先通过催化器，拾取氢原子，然后通过液化反应器，供出氢，使煤分解。氢煤法是直接加氢转化成液体燃料的工艺，采用流化床反应器。SRC 是将高灰份、高硫份的煤转化成接近无灰的低硫燃料的工艺，溶剂与煤粉制成煤浆，煤浆与氢混合后送入反应器。

间接液化是煤先气化生成原料气，经净化后进行调质反应，调整 H_2 与 CO 的比例。

直接液化，煤经加氢反应，所有异质原子 (N、S、O) 基本被脱除，也无颗粒物，回收的硫可制成元素硫，氮经过水处理变成氨。

间接液化，催化合成过程排放物也不多。未反应的尾气 (主要是 CO) 可在燃烧器中燃烧，排出的废气中 NO_x 和硫很少，无颗粒物。

洁净煤技术是一项多层次、多学科的技术，其中有常规技术、高新技术和某些尖端技术。洁净煤技术的开发也是一项跨部门的系统工程。洁净煤技术难度大，投入也要多，开发周期长；只有全面规划，通力合作才能取得进展。