

《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）

06

上海市黄浦区教育信息中心

信息高速公路与现代社会

张景中

中国科学院成都计算机应用研究所

张景中 理论计算机科学家。1936 年 12 月 30 日生于河南汝南。1959 年毕业于北京大学。现任中国科学院成都计算机应用研究所研究员。1995 年当选为中国科学院院士。主要从事计算机科学领域的研究工作和教学工作。

一、信息高速公路计划的提出

什么叫高速公路？大家已经很熟悉了，我们成都到重庆就有高速公路，原来坐火车要 8 个小时，现在高速公路 4 个小时就到了。信息也不是什么新名词，这些年各种媒介，如报刊、科普书籍都提到信息。信息在现代社会当然非常重要。信息高速公路是什么意思呢？高速公路跑汽车，信息高速公路是传信息的，这个路就是线。原来是电话线、电报线，多是金属的，现在走信息的通道主要是光缆。

信息高速公路这个说法，是 1993 年美国总统克林顿在一份向美国国会提交的报告中提出来的。它的意思是指一套四通八达的能向人们提供丰富多彩的信息的电子通讯网络。什么是网络？大家知道电话线路组成一个网络，把全世界联系在一起。网络把信息传递变得更快，更方便，内容更丰富，服务的对象更广泛。信息高速公路计划，提出要在 90 年代中增加 20 亿美元的经费，确保美国在 1997 年建成信息高速公路。它正式的名称叫做国家信息基础设施。克林顿报告中说，信息高速公路一旦建成，由通讯线路、计算机、数据库及日用电子产品组成的完备的网络，它能使所有美国人享用信息，并在任何的时间和地点通过声音、图像、文表相互传递信息。这个计划提出后，在全世界引起很大反响。

二、信息高速公路对社会生活的影响

最近几年，计算机技术有了更快的发展。又便宜、功能又强的 586 级芯片问世了，容量超过 1000 张普通软盘的只读光盘和驱动器的价格大大下降了，硬盘、内存条这些关键设备的性能提高而价格在降低。这些发展使计算机更便宜，功能更强大，能够更好地支持多媒体技术和网络通讯技术。信息高速公路计划，就在这技术背景下应运而生。

那么，有了信息高速公路，生活会是什么样子呢？

下面讲的是信息高速公路在几个方面应用的例子。

1. 电子通讯，也叫电子信箱。在地球上转一圈是 8 万里，送一封快信到美国也要好几天。打电话虽快，花钱就多了。但只要计算机联了网，世界上任何一个地方，只要你知道对方的电子信箱地址，按一下按钮，这封信几秒钟就收到了，费用比电话便宜得多。这种服务我国许多城市都有，不新鲜。信息高速公路建成后，电子信箱会更普及，不仅能传信，还能传声音，传图像。现在其实也能传，只是传的人一多线路就拥挤。价格也贵。

2. 家庭娱乐，是多选择的，交互式的。多选择的，是按自己的喜爱来选

择，发送信息然后就可享受自己选择的节目；交互式的，是既可听可看，又可表演，能传送给别人看。

3.很多科学家认为，信息高速公路建成后，给人类带来最大的好处，是远程教育、开放式的电子大学。我国现在青年人上大学的比例只有百分之几，普及高等教育看来是遥远的事。利用信息高速公路办电子大学，学生可在家里计算机前听课、做作业和参加模拟考试。这样还可选最好的老师来讲课。计算机多媒体声情并茂，学生如身临其境。将书籍写入光盘，放在网络上，形成电子图书馆，你在新疆就能阅读北京图书馆的书。一张小小的光盘能存上千册书，便于旅行时翻看，而且电子图书能发出声音，上面的图像能活动。利用计算机虚拟现实的技术，可在计算机上做实验。利用信息高速公路办教育，有人估计可节省 40%的时间，花的钱节省 30%，学生学习的內容至少提高 30%，从而使更多的人能够享受高等教育。

4.有了信息高速公路，科学家、艺术家、各种专业技术人员可以和世界各国的同行随时联系交流，讨论问题，查询文献资料，复制软件。这对科学文化的发展有很大的促进作用。

5.信息高速公路在医疗卫生方面也有很大用处。在计算机前就可以挂号求医，作健康咨询，办医疗保险，买药。最近在报刊上看到，北京有个大学生得了一种怪病，医生束手无策。他的一位同学就通过计算机在国际电子网络上说明症状，向世界的医生们求助。很快有了回音，说这可能是铊中毒，应如何如何处理。医生如法治疗，结果就好了。将来有了信息高速公路，这类事会很多，不再是新闻。

6.电子商业，就是通过计算机订货、买货，能减少差错，不用那么多采购员、推销员到处跑，也不用那么多广告、定单和文件，可节约大量的开支。香港统计，如果实行计算机贸易，可加快进度 80%，文件成本降低 44%，竞争力提高 34%。美国通用器材公司运用电子网络，一年的经济效益就有 312.5 亿美元。东芝公司运用此网络，文件处理费用节省了 1/4。新加坡海关过关量很大，运用网络，每年节省 6 亿美元。

7.电子金融，即是信用卡的大量使用，不用或少用现金。不但方便，也比较安全。印钞票、点钞票的费用大大减少，还解决了假钞票的问题。

8.有了信息高速公路，很多单位可实行或部分实行居家办公。很多会议可在网络上开。这可以节约办公场地开支，缓解交通拥挤，减少空气污染。

9.美国还提出电子政府的概念。例如：政府公开的文件大家都很容易在网络上查阅。政府可通过计算机在网络上收税或办理其它公务。公安部门利用网络和违法分子斗争。

10.各国人民之间的信息交流，有助于增强相互的了解和友谊，有利于和平与发展。

总之，信息高速公路的实现，会引起社会生活巨大的变革，能产生巨大的经济、社会效益。

三、一些国家和地区的信息高速公路计划

美国在 1992 年 12 月提出高性能计算机通讯计划，是为信息高速公路作准备的。到 1993 年，基本实现了科技、教育、企业的联网。1994 年白宫进入了信息网。下一步实现家庭的联网。

欧共体 1993 年 12 月提出，今后 5 年投入 330 亿法郎，在已经建立了科

学教育网的基础上，准备在今后 10 年内建成信息高速公路。法国总统 1994 年 2 月提出了信息高速公路计划；1994 年 2 月英国电信局宣布投资 100 亿英镑，今后 10 年投资 380 亿英镑建设信息高速公路。

日本从 1993 年 6 月开始提出有关信息高速公路的一系列计划。

加拿大 1994 年设立了信息高速公路顾问委员会，政府计划到 2000 年投资 8 亿美元。

新加坡则更早，在 1980 年就提出建立信息化的社会，1992 年开始实施信息高速公路计划，国家已经铺设了 16000 公里的光缆，可能是世界上第一批建成信息高速公路的国家之一。

韩国 1994 年 3 月决定要建设超高速信息通讯网，准备到 2015 年建成，总投资 550 亿美元。

中国的台湾省 1994 年 3—5 月成立了通讯建设研究计划小组，当局准备每年投 1000 亿台币，合 30 多亿美元，把信息高速公路作为经济建设的重点。

俄国准备在 10 年之内在 50 个城市之间铺设 50000 公里的光缆，总投资 400 亿美元，它是和美、法、德合作搞的。

德国人认为，他们已经建成了信息高速公路。德国电信局已经给所有的用户提供了光缆服务，在世界上名列前茅。

你可以看到，这是个全球的浪潮。发达国家都参加了，谁也不肯落后。

四、与信息高速公路有关的科学技术

信息高速公路都涉及到什么技术呢？

信息高速公路的特点，是要对多样化的信息进行高速度的传输，大容量的储存和智能化的管理。这涉及多种高技术，涉及多门科学。

先谈谈高速度地传送信息。打电话，一秒钟也就说十几个字。把电话线通过调制解调器和计算机连起来，一秒钟能传送 14K，即 14000 比特的信息，差不多 2000 个字。用一种特殊的 T—1 电话线，一秒能传到一张普通软盘，即 100 多万比特，一二十万字的信息。高速的光缆能达到一秒钟 100 万张软盘的信息。而且是很多路信息在一条光缆上传送。这不仅对光缆的材料和制造工艺有很高的要求，传送和接收都是高技术。公路上的汽车，随路形和车的多少不同，时快时慢。用线路传送文件，时快时慢不要紧。传送音乐和电影，时快时慢就要失真。为解决多媒体信息的快速传送中的问题，发展了多种新技术：DSVD（数字同时声音数据）、ISDN（集成服务数字网络）、ATM（异步传输）等。

汽车和货物不能光在公路上跑，在发车和停车的地方必须有停车场和仓库。信息高速公路上的信息，也要有储存的地方。人类最早储存信息，是记在脑子里，一代一代口传下去。后来会用文字和图画，刻在石头、竹片、甲骨、泥版、金属上。中国人发明了造纸、印刷，是信息储存技术的大进步。近代发明了留声机，录音机，录像机，能储存声音和活动的图像。把文字、声音和图像都转换成数字存在磁带、磁盘或光盘上，是现代科技的一大成就。信息的储存可不简单，要在同一块地方尽可能多存，要保证迅速地查找到并能提取出所要的信息，还要能长期保存不失真，这里不但有材料、工艺问题，还有数学、理化的理论问题。

计算机科技的发展，现在有两大特点。就是多媒体化和智能化。媒体指的是传播信息的媒介。只用文字传播，是一种媒体，可以说是单媒体，不过

大家不这么说。用文字、声音、图像甚至活动的影像等多种媒介来传播信息就叫多媒体。这多种多样的大量信息在信息高速公路上跑，有来有往，又存又取，同时满足成千上万人的需要，管理起来很不简单。这就要靠计算机，进行智能化的管理。比如，你想看电视，计算机可以帮你选择，它会了解你的需要，替你安排你爱看的节目。还要把各种功能统一在一起管理，如电话、计算机、电视、传真机就全管了，这个并不需新发明，现在的计算机就能全管。现在成都有了光纤电视，以后这光纤可以通电话、传数据、取软件等，一条线路多用。你可以收信息也可以传信息，这叫交互。我们现在的电视都是由电视台管理，你有什么要求要另外打电话，将来可以是用户驱动的，你从节目单上调就是了。信息、软件、硬件、管理人员组成了复杂的信息高速公路系统，为用户服务的业务是系统的最低层，中间是线路，中心是管理机构。涉及的技术有各个方面的，计算机科学、光纤通讯、数字通讯、个人通讯、信号处理、光电子、半导体技术、存储、网络技术、多媒体技术、信息安全，等等。使用起来非常方便，做起来却需非常复杂的高技术。就是这样，你用得越方便，做的人就越要动脑筋。举个简单的例子，你在信息高速公路上发布一则广告，人家怎么确定是你发的，不是冒名顶替呢？有人见了广告要和你做生意，通过信息高速公路和你联系买卖，这是商业秘密，怎么才能保密，不让别人抢你的生意呢？这就是密码学的问题，是数学问题。数学家早已有了解决这个问题的办法。在技术上的实现，则是精益求精，无止境。

信息高速公路涉及到很多门高科技，这是很好的机遇。哪个企业看准了，干得好，会有很大的收益。我们成都有个“鼎天”公司，看准了光盘要流行，就早走一步，生产VCD卡，销路好，这个公司就发了。前几年在报上看到，成都电子科大发明了一种可写可擦的新型磁光盘，这个技术估价为几千万元，在深圳成立了公司来生产。我不知道后来成功没有。但这个方向是对的。光盘、VCD卡是硬件。信息高速公路发展了，对软件的需求更大。有了路不能老是跑空车，要有货。就像有了电影技术，还要有写剧本的，有好的导演和演员，才有好片子。就拿中国的教育软件来说，刚刚起步。我国有上亿的学生，还有大量的业余培训班，参加自学高考的成年人，有了计算机却买不到好的教育软件。从小学、初中到大学，各科连教学带复习，据估计需要1000多种教育软件。真是大有可为。教育只是一方面，各行各业用起计算机来都需要软件，这个市场很大，很多外国公司要进来，我们不能不管。这不但是发展民族产业的问题，也涉及发扬民族文化的问题。

五、中国怎么办？

搞信息高速公路用很多钱。中国还穷，干不干呢？看来，干比不干好，早干比晚干好。尽管我们钱少，还是要拿出一部分钱来干这件事，就像成都，光纤还是装起来了，启动了。

为什么要干？

第一，这是国际竞争的需要，在这方面，谁落后、赶不上潮流，就要吃大亏。我国在50—70年代20年间，没赶上计算机科技的第一次发展浪潮，吃了大亏。50年代计算机刚出来不久，大学里没有计算机系。用的是手摇计算机，袖珍计算器还没有。我们起步晚，但那时国外也差不多，差距不大。但我们搞反右、大跃进，接着就是文化大革命，一直没有把这事摆到议事日程，就大大落后了。当然，计算机科学技术有今天这样子，当初许多科学家

也想不到。开始，为了造原子弹，美国就做了一台计算机。那时的科学家说运算得这么快，全世界有几台就够用了。没想到后来有这么大的需求。过了十几年，计算机做得小了，可放在桌上了，有的科学家还预计，计算机不会进入家庭。现在不同，大家都说，计算机要进入每一个家庭。在五六十年代，看出了这个趋势的公司就投资，找人研究，发展起来。美国的比尔·盖茨，当时上大二，看到这个趋势，他就休学，办软件公司，搞软件，后来成了大公司。现在是各大企业、很多国家的政府都看出来了，信息高速公路一定会发展起来。这竞争就更激烈，不能再耽误了。发展信息科技，信息产业，不但是经济的需要，和政治、文化、军事都有密切关系。这是提高综合国力的需要。

第二个原因：是科教兴国的需要。科技是第一生产力。经济由粗放到效益型，离不开科技。而信息科学技术是现代科学技术的龙头。同样的产值，我们的能耗比发达国家要多 3—5 倍，能源利用率只有 30%，全员劳动生产率只有发达国家的 5%。为什么我们的工资比发达国家低，主要因为我们生产率低，没有生产那么多东西。要提高工业产品的质量，降低成本；要搞集约化的农业，改良品种，提高单位面积产量，都要科技，有的还是高科技。信息公路有关的技术和高科技有密切的联系，这方面的发展对高科技有很大的促进。如果国家有意识地来扶持，就能推动产业的发展，推动高科技产业的积累。我国现在的高科技市场，电视机市场日本占得多，计算机美国占得多，中国只占了百分之几。信息高速公路的启动，一方面为科技发展提供资金，一方面又是为发展教育，提高全民族文化水平提供先进的工具和手段。

第三，这也是社会发展的需要。我们是社会主义国家，宏观调控很重要。要宏观调控，首先必须掌握信息。所以我们国家搞“金桥工程”，就是用电子网络把全国各大企业、地方、中央有关机构联系在一起，掌握信息，才能搞好宏观调控。社会主义要使大家共同富裕，一方有难，八方支援。有了信息高速公路，有关方面就能更及时、准确地了解灾情，组织救助。信息高速公路还有助于下情上达，上情下达，健全社会主义法制，发扬社会主义民主，建设社会主义的精神文明。

改革开放 15 年来，我国的通讯事业有大发展。全国长途电话线路增加了 15 倍，电信业务翻了 5 番。技术也提高了。现在我知道的，中国已有了两个电子通讯网。还搞了个四金工程，就是金桥、金关、金卡、金税这 4 个项目。“金桥”就是搞国家经济信息网络；“金关”是海关贸易信息网；“金卡”是银行的联网，像牡丹、长城卡等，不建网就不能很好保证资金的安全；“金税”就是用网络技术管理国家的税务。我们有优越的社会主义制度，有国家的统筹安排，有改革开放以来经济发展所形成的基础，广大科技人员和各有关部门、企业的积极性都很高。我国计划在 2000 年前建成主干网，把发达地区联起来，到 2020 年，建成全国高速网。西方发达国家，大部分要在 15 年内建起信息高速公路，我们要晚一点，25 年。中国的这个计划，许多外国企业都想往里挤，从中抢一块。那就要看我们自己能保住多少生意。我国有几个公司干得不错，联想、长城、北大方正，这些民族企业在成长起来。虽然资金不能与国外公司比，但我们也有优势，人多，基础教育质量高，有人才。只要充分发挥社会制度的优越性和人力优势，后来居上并非不可能。印度是软件出口大国，就是靠人的优势。中国今后在软件领域应当会超过印度。硬件方面中国有一个优势，国家可以集中力量攀登高科技的高峰，再来推广。

所以对我国的信息高速公路的前景应当有信心。

但是，与发达国家比，我们毕竟底子差，规模小，技术较落后，差距大。我们在前进，人家进步更快。国家搞了“863工程”，是要缩短高技术领域我们和国际先进水平的差距。技术还只是一方面。另一方面的问题是，我国社会信息资源质低量少，还有假信息。在报上看到，一个地方号召种苹果，有些区乡干部就多报，种15亩报20亩，到后来根据这个数收税，一亩收1200元，到农民那儿就2400元了。农民不服，告上去，只好再报受灾要求减税。这样一来，信息又错了。有了信息高速公路，里面传什么信息很重要。假信息还不如没信息。信息资源的开发和管理与信息高速公路的建设是相互促进的。

任何新技术的出现和发展，总会有点反面的效果。一是用得不好就变成坏事。青霉素能治病，也会有过敏，弄不好要死人。汽车带来方便，但也会出交通事故。一是坏人也可以用新技术干坏事。武器在公安人员手里是保护人民的，在犯罪分子手里就用来作案。信息高速公路也是一样的。比如银行用上计算机、电子网络，工作效率提高了，差错少了，是好事。但有的营业部计算机一出故障就不办公了，甚至把账丢了，这时还不如手工。在一些发达国家，信息高速公路已经带来一些问题。像黄色信息在电子网络上的流传，影响少年儿童身心健康，引起教师、家长广泛的抗议；计算机病毒的传播，计算机经济犯罪，造成巨大的财产损失；美国国防部的一个数据库的密码，被新西兰的一个少年计算机迷破译了，说明计算机数据安全问题是很严重的；有人在电子网络上教人制作炸弹、从事犯罪；不少中小学生学习电子游戏入了迷，影响学习和健康，等等。对信息高速公路带来的好处，也不能估计过高。目前用电子网络的人还少，用起来速度较快，很方便。如果用户迅速增多，线路拥挤，就会很慢。就是在发达国家，现在的信息高速公路系统，也远不能达到有些书上（如流行的《未来之路》，比尔·盖茨著）所描写的那样美好。

我们既要充分重视信息高速公路的建设，重视它的积极的方面，又要尽可能防止它的消极影响。电子网络上的种种不健康的東西，只靠技术手段是堵不住的。只有提高人的素质，加强精神文明建设，才能从根本上解决问题。科技总是要往前发展的，不能因为有飞机失事而把飞机都停了。高科技是给大家带来方便和好处，但并不是每时每刻都带来好处。有次大数学家陈省身教授在北京讲学，他说高科技有时带来不方便，我在美国，如果没有高科技我就不来中国讲学，坐在家裡舒舒服服的，有了高科技，买张飞机票就能来，不好不来。总的来说，高科技提高了生产力，给大家带来了便利，但在局部上有些缺点和问题，关键是我们怎么来减少消极因素。这个问题与成都也有密切关系，成都订了“九五”规划、2010年远景规划，都提到了信息建设，而且成都在全国比较起来，发展还是快的，走在前面。在成都实行科教兴市，建立了公众信息网，960服务，只要用计算机拨960，就能得到网上服务。有一台386，一部市内电话就行了，没有入网不入网的问题。这和我们每个人都有关系，并且每个人也都会在今后的信息高速公路中发挥作用。

研制先进的液氧/煤油火箭
发动机是提高我国航天技术
水平、加速运载火箭产业
化进程的有效途径

张贵田

中国航天工业总公司

张贵田 液体火箭发动机专家。1931年12月20日出生于河北藁城。1961年毕业于原苏联莫斯科航空学院并获工程师职称。曾任中国航天工业总公司067基地主任。现任该基地科技委主任、研究员。兼任中国宇航学会常务理事。1995年当选中国工程院院士。他在我国液体火箭推进技术方面作出较为系统的、创造性的成就和重要贡献。

航天技术是现代科学技术中发展最快的尖端技术之一，是一个国家科学技术水平和国民经济实力的综合反映，是一个国家科学技术水平的重要标志，亦是综合国力的象征。航天技术高度综合集中了许多基础科学和新技术，如数学、近代力学、自动控制、电子计算机、真空与低温技术等，它的发展促进了一大批基础科学和现代技术的发展，如新材料、空间物理、航天医学、生命科学等。航天技术的发展、宇宙环境的应用导致了一系列出乎意料的技术革新。当今，一些发达国家正在以大空间概念设计国民经济未来发展的蓝图，把航天技术产业作为未来发展的一个战略重点，认为它是发展各类高新技术产业的领头技术，它能带动一大批高新技术产业及其它基础产业的发展，推动和促进新工艺、新材料、新能源等技术的进步，航天技术对国民经济的发展将起到“加速器”和“倍增器”的作用。

航天科技工业的发展对推动解决我国面临的人口与资源、环境与灾害、通信与交通、教育与文化等重大社会问题起到了其它任何技术和产品不可替代的作用。同时，航天技术对国家的国防建设具有极其重要的意义，这一点已得到共识。目前战略战术导弹、卫星导航定位、军事测绘侦察、作战指挥和通信等方面广泛应用于国家建设，并取得了显著效果。宇宙空间是现代军事竞争的制高点，航天技术与防御技术已很难分开，这在战略威慑和现代化战争中表现得尤为显著。

航天技术能够产生巨大社会效益和经济效益的主要途径是通过应用卫星来实现的，而运载火箭扮演着极其重要的角色。在近40年的发展中，我国航天科技工业依靠自己的力量，研制成功了长征系列运载火箭，达到了全型谱的运载能力，并已成功将我国自行研制的通信卫星、返回式遥感卫星、气象卫星等应用卫星送到静止轨道、近地轨道和太阳同步轨道等不同的轨道，而且先后成功地为西德、法国、澳大利亚、瑞典、法国、美国等国家发射卫星或其它有效载荷。我国的长征火箭成为世界发射市场的主要运载工具之一，昂首阔步地进行国际商业发射市场，使中国航天在国际航天界占有一席之地，并享有较高声誉，显示了社会主义中国的综合实力。

虽然我国航天技术取得了巨大成就，引起了世人的瞩目，但是应该清醒

地认识到我们的不足。目前，我国现有的长征系列运载火箭是在战略武器的基础上演变延用而来的，其推进剂（偏二甲肼/四氧化二氮）毒性大、污染严重、价格高、性能低，其不足是很明显的。美国、法国、前苏联等航天大国对于推进剂的毒性和污染问题高度重视。美国从 1970 年就禁止在本土上生产偏二甲肼，法国阿里安火箭所用的偏二甲肼一直从前苏联购买，而且不在本土上发射（在法属圭亚那库鲁航天发射中心发射）；原苏联解体之前曾下令禁止使用偏二甲肼。随着全世界对环境保护的日益重视，很可能在不久的将来全世界禁止生产使用偏二甲肼作为火箭推进剂。因为偏二甲肼毒性较大，损害人体的肝脏。尤其是四氧化二氮/偏二甲肼的燃烧产物，对人体损害更大，并较为严重地污染环境。从事使用该种推进剂发动机试验的工作人员中 60% 有不同程度的肝病，普遍转氨酶高。在组织火箭发射时，由于 N_2O_4 泄漏已引起几次伤亡事故，后果比较严重。长征运载火箭是当今世界可靠性、技术稳定性最好的运载火箭之一，但是近几年来，长征火箭发射时有失利，并造成了不同程度的人员伤亡，其推进剂毒性大和污染严重问题已引起了我国各级领导的高度重视，也增加了参试人员的恐惧感。虽然发射失利未引起十分严重后果，但参试人员“死里逃生”、“后怕”的感觉仍然十分强烈。这给组织发射带来了一定的困难。同时，由于推进剂价格偏高，增加发射成本，进而使得长征火箭在国际发射市场中价格竞争力不甚明显，也是一个比较突出的问题。如何提高运载火箭可靠性，降低发射成本，增强竞争力，是加速我国运载火箭产业化进程的关键所在。

要想有先进的运载火箭，首先必须要有先进的动力系统-火箭发动机。火箭发动机是运载火箭的心脏，它的先进性突出表现在低成本、无污染、高可靠、高性能、使用安全、操作方便。液氧/煤油火箭发动机作为运载动力装置的优越性在于：一是煤油作为常温推进剂，使用极为方便，安全性好，而甲烷、丙烷、液氢为低温推进剂，不好贮存，运输、加注和操作都不方便，泄漏后易起火爆炸，特别是液氢很容易泄漏。二是煤油价格便宜，每千克煤油的价格只有液氢的 1/100 和偏二甲肼的 1/30，可以较大幅度地降低发动机的研制成本和运载火箭的发射费用。发射一颗 20T 低轨道的有效载荷，如用液氢/液氧和四氧化二氮/偏二甲肼组成的二级半方案推进剂费需 3000 万元，而用全液氧/煤油方案只需推剂费 100 万元。三是液氧/煤油组合密度比冲高，是理想的下面级（助推级和芯一级）发动机，稍作改进之后亦可作为比较理想的上面级发动机。四是我国煤油资源丰富，贮量极大，可满足长远的需要。我国克拉玛依油田开采的煤油是低凝点环烷基中质原油，完全符合火箭推进剂用煤油标准，现已查明贮量在 5 亿吨以上，按每年 200 万吨开采量计算，可连续开采 50 年以上，同时我国黑虎山、辽河、胜利等油田符合要求的原油贮量也是丰富的。经各种研究试验和两次液氧/煤油发动机热试车的成功，充分说明了国产煤油能完全满足使用要求。五是使用液氧/煤油发动机可完全消除四氧化二氮/偏二甲肼有毒且污染环境的严重不足。六是液氧/煤油发动机可实现运载火箭模块化积木式设计，可用不同组合完成不同载荷的发射任务，能形成我国新一代运载火箭系列。上述诸优点体现了先进动力系统的要求和研制方向。

经过近 10 年关于大型运载火箭和天地往返运输系统动力系统的技术论证、研究及关键技术攻关，国家决定研制液氧/煤油高压补燃发动机，并已列入“863”计划。这无疑是提高我国航天技术水平的重大举措，更是加速我国


运载火箭产业化进程的英明之举。

近几年，我一直参加并负责大型运载火箭和天地往返运输系统动力系统的论证工作，以及“863”液氧/煤油发动机的预行研究和关键技术攻关工作。从近几年的工作进展情况来看，液氧/煤油高压补燃发动机在技术上十分先进，代表当今液体火箭发动机领域的最高水平，其先进性体现在以下几个方面：

1. 先进的闭式循环系统。该系统能充分利用燃料的化学潜能。补燃发动机也称为分级燃烧发动机，该系统先把推进剂的一组元在预燃室中进行富氧（或富燃）燃烧，生成低温大流量的燃气驱动涡轮，然后将工作过的燃气引入燃烧室进行完全燃烧。它避免了开式循环系统涡轮排气的能量损失。闭式循环发动机可较大幅度提高燃烧室压力，进而提高燃烧效率，仅采用闭式循环系统就能提高比冲 6% 以上。对二级半火箭来说，当起飞质量相同时，有效载荷能提高 30% 以上；假若有效载荷相同，运载火箭起飞重量可降低 20%。使发射 1Kg 有效载荷的全寿命周期费用降低约 16%。用这种发动机的试验机，于 1995 年 12 月～1996 年 1 月进行两次全系统高压补燃发动机试车，其真空推力为 85T，真空比冲为 3500m/s，混合比 K 在 2.34——2.6 之间。

2. 先进的燃烧室混合喷注器。在补燃循环系统中，氧化剂全部在预燃烧室气化后，再进入燃烧室进行燃烧，这样就实现了气液两组燃烧，气液燃烧大大改善了发动机的燃烧稳定性。为了进一步提高燃烧稳定性，用不同长度的喷咀把喷注器分隔成数个区域，气液喷咀为同轴内混合式，其长度为 $1/4$ 波长，形成几百个小声腔，能够有效地衰减振荡；另外在燃烧室上游设置了整流装置，把不规则的涡轮排气进行整流后引入燃烧室。高压补燃循环系统不仅有利于解决技术关键不稳定燃烧问题，而且还较大幅度地提高了燃烧效率。我们对喷注器进行了混合雾化试验，并对发动机进行了热试车，试验结果表明：高压补燃循环系统的燃烧效率高达 0.98。

3. 先进而巧妙的燃烧室冷却措施。几十年来争论不休的用煤油作为冷却剂问题，以过大量的传热试验及计算分析后表明：采取适当的措施是完全可以解决的。用克拉玛依煤油作燃料进行了工作时间分别为 10 秒、50 秒的两次试车后燃烧室完好无损，光洁如初，说明用煤油作发动机冷却剂是完全可行的，效果是相当理想的。在燃烧室的冷却结构设计上采取了一系列措施：一是在喉部以前设置了三条冷却带，其流量为推进剂总流量的 2~3%，煤油进入燃烧室是贴壁向上旋转式；二是燃烧室喷管从膨胀比为 8 的截面至圆柱段，用螺旋式冷却槽，并且喉部附近的冷却槽加工成波浪形，以便提高其冷却效果，这样可使内壁温度降低 40℃ 左右；三是低温煤油从收敛段进入冷却槽，首先冷却热流最大的喉部区域，这一举措可得到 40℃ 温差的好处。除上述措施外，还在内壁上镀镍铬防热层可使气壁温降低 30~40℃，以及选取热传导性能好的内壁材料等。上述措施经过热试车，证明非常有效。

4. 可靠的多样密封。发动机各部件要承受 -200~3500℃ 高温环境，压力为 150~500 个大气压，在强烈的振动环境下，发动机的密封问题是一个致命问题。必须因地制宜地设计相应的密封结构。过去我们采用的是法兰盘间加不同材料的垫片或“O”型圈结构，对于中、小直径的管路接头大多用球头喇叭口结构。这种落后的密封结构远远不能满足高可靠、高性能先进发动机的要求。为此，我们进行了多种密封结构的研究、试验。低温液氧的密封用“K”和“”型环，高温燃气密封采用了碟型垫，高压的液体和气体密封采

用球头加导向，并在球头上开槽，加不同材料的“O”型圈，还有适用于低温的碟型垫的密封，其密封压力达到 600 个大气压也不泄漏。涡轮泵的密封更重要，为适应发动机多次工作，防止磨擦生热减少磨损而采用了脱开式密封。涡轮不转动时，为静密封，当涡轮泵转速达到预定值时，控制压力使密封处脱开，这种先进的密封形式大大地提高了可靠性及其寿命。

5. 先进的预压涡轮泵。要使主涡轮正常工作，避免发生气蚀，必须保证泵的入口有一定的压力。如果泵入口压力要求高，则火箭贮箱压力必须提高，这样就会增加运载火箭的贮箱结构重量。为了降低火箭结构重量、提高运载能力，必须尽量降低泵入口压力。为此在主泵前设置了一套预压涡轮泵。从主涡轮后抽取一股富氧燃气作为氧化剂的预压涡轮泵工质驱动涡轮，然后排入氧化剂主流中，从主煤油泵后引出的一股高压煤油作为煤油预压涡轮泵的工质吹动涡轮，然后排入预压泵后的主流中。这种预压涡轮泵系统设计思路新颖、结构巧妙，尤其是富氧的燃气工作后又进入液氧的主流中，这种设计构思非常大胆，也十分巧妙。目前，预压涡轮泵已经进行了大量液流冷试，并且成功地进行了发动机的热试车，采用预压泵结构可提高主泵前压力 6 个大气压，而箱压仅为 2 个大气压。

6. 先进的弹性支承。发动机是整个运载火箭的主要振源。工作时发动机各零部件都承受着强烈的振动，有高频，也有低频，有些部位加速度高达几十个 g 甚至几百个 g。因此，各零部件的连接和固定形式是一个十分关键的问题。如一个质量较大的阀门与直径几毫米或十几毫米的导管连接，要承受激烈的振动，在设计上必须要有科学的方法。用完全紧固定支承的办法防振效果不好，而采用适当的弹性支承，不仅降低了振动量级，而且还有利于解决零部件和发动机的共振问题。另外，为抗振防松，在拧紧各紧固件时，要涂胶。尤其在天地往返运输系统及载人运载器上，由于运载器可靠性要求极高，抗振防松问题事关重大，必须确保万无一失。为此，我们已进行了大量研究试验。

为什么选用煤油作为运载火箭推进剂？在 50 年代，苏联、美国、英国就开始研究以煤油作推进剂。虽然美国也研制了一些以煤油作为燃料的开式循环火箭发动机，如宇宙神用的 MA—2 发动机，土星 I、IB 用的 H—1 发动机，土星 V 用的 F—1 发动机等，但由于采取的措施欠缺，不好解决煤油作为冷却剂带来的一系列问题，加之解决不稳定燃烧问题困难和低混合比燃气驱动涡轮积碳严重等原因，该类型火箭发动机没有得到充分的利用。随着航天事业的发展和各航天大国对空间资源开发利用的愿望不断增强，各国都在积极研制低成本、无毒、无污染、高可靠、性能好、安全可靠的运载火箭。前苏联首先以高压补燃循环系统和先进的冷却措施解决了煤油使用中的技术关键，并在 70 年代到 80 年代期间研制成功了高性能的 RD—170、RD—120 及 RD—8 等型号高压补燃液氧/煤油发动机。这些型号是代表世界最高水平的液氧/煤油发动机，已用于天顶号、能源号/暴风雪号等型号运载器。俄罗斯打算在液氧/煤油高压补燃发动机的基础上研制一台液氧/煤油/液氢三组元发动机，与原先研制成功的发动机一起组成新一代运载火箭系列。苏联解体后，美国、法国都在积极引进俄国有关技术，美国已购买了俄罗斯的 RD—120、RD—170、RD—171 和 NK—33 发动机，并且已进行了点火试验。我国已从 1989 年起与独联体国家就此项技术进行学术技术交流，目前已在许多重要领域取得实质性的进展。世界航天大国都在努力寻求突破液氧/煤油高压补燃发动机技

术的途径，并对此表示出了极其浓厚的兴趣，都试图尽快占领航天技术发展的制高点，最大程度建立自己在宇宙空间的无形国界，以适应国家的战略需要和现实需求。

我国液氧/煤油高压补燃发动机研究工作已获批准并已列入国家“863”计划。近几年来重点进行了技术方案论证和关键技术研究，并于1995年12月~1996年1月用试验型发动机进行了两次热试车，进一步研究并初步掌握了该种发动机的起动、关机程序、预冷、吹除及试车后的中和清洗技术。独联体国家把液氧/煤油发动机热试车后中和清洗技术视作“Know How”（技术诀窍），要买此项技术需上百万美元。我们经多次研究、论证、试验，摸索出一套适合我们实际情况的中和清洗程序，经两次发动机热试车验证，证明我们的方法是完全正确的。随着工作的深入，试验技术及试验设施也都有了不同程度的掌握。总之，几年来的关键技术研究，为今后研制高压补燃液氧/煤油发动机打下了一个良好的基础。这种发动机的研制成功，将使我国液体火箭发动机技术登上一个新台阶，将为我国大型运载火箭和天地往返运输系统，载人航天提供先进的动力系统。在此基础上，进而可研制更先进的液氧/煤油/液氢三组元火箭发动机，实现单级入轨，赶上世界先进水平。研制成功先进的液氧/煤油火箭发动机，可提高我国航天技术水平，进一步扩大卫星发射市场，为加速运载火箭产业化进程提供强有力的支撑。

能源新技术

陈学俊

西安交通大学

陈学俊 热能动力工程学家。1919年3月5日生于安徽滁县。1939年毕业于前中央大学机械系。1946年毕业于美国普渡大学研究生院，获机械工程硕士学位。曾任西安交通大学副校长。现任西安交大工程热物理研究所所长，动力工程多相流国家重点实验室主任。1980年当选为中国科学院院士(学部委员)。长期从事热能动力工程方面的教学、科研及培养研究生工作。

能源是经济和社会发展的重要的物质基础，也是实现四个现代化以提高我国人民生活水平的先决条件。现代社会生产的不断发展，随着机械化、电气化、自动化程度的不断提高，生产上对能源的需求量也就越来越大。一般说来，一个国家的国民生产总值和它的能源消费量大致是成正比的。在现代化生产中，能源是主要动力来源，一些发达国家之所以能够在短短几十年的时间里实现现代化，其中一个重要原因，就是它们都致力于大规模地开发和利用能源。能源的消费量越大，产品的产量就越多，整个社会也就越富裕。例如，美国、苏联、日本、西德、英国、法国、意大利等工业发达国家的人口总和只占世界人口的 $1/5$ ，而能源消费量却占了世界能源总消费量的 $2/3$ 。

能源和人民的衣、食、住、行等密切相关。为了解决吃、穿问题，要大力发展农业生产，实现农业的机械化、电气化、水利化和化学化，这些都需要消耗大量的能源。在一定程度上可以说粮食和棉花是用能源换来的。现在市场上已出现了许多色彩鲜艳的合成纤维制品，这些也都是用能源（煤炭、石油、天然气）作为原料和动力制造出来的。至于居住方面，房屋用的木材本身，就是一种能源，其他砖瓦、玻璃、钢材和水泥等建筑材料，在生产过程中都要用掉不少能源。为了保持适宜的室内温度，冬季需要取暖，夏季需要降温；为了学习和工作，室内需要照明，这些都需要消耗能源。至于现代化的家庭设备，如空调、电冰箱、洗衣机、电灶、微波炉等更离不开能源。此外，为了活跃人们的文化娱乐生活，如看电视、电影、收听广播、录像、音响等，无一不需要能源。关于行的问题，除了步行以外，都离不开能源。汽车、电车、火车、轮船、飞机等等，一旦没有能源，则将寸步难行。

能源与国防的关系至为密切，不仅在生产各种武器上需用大量能源，而且在使用各种武器时也离不开能源，如空中飞机、陆地坦克、海上舰船、海下潜艇以及中远程导弹、原子弹等。如能源不足，国家安全将得不到可靠保障，经济建设也不能正常进行。

总之，能源问题直接关系到国民经济的发展、社会的进步和人民生活水平的提高。社会总是不断前进，生产也总是要继续增长，人们则需要更高的物质文明和精神文明，因此，对于我国正在致力于四个现代化建设来说，能源就显得格外重要，必须把解决好能源问题当作发展国民经济、提高人民生活水平、稳定社会秩序和保障国家安全等方面的头等大事。为了实现“九五”计划和2010年跨世纪宏伟纲领，实现两个根本转变，建设有中国特色的社会

主义，更要充分认识到能源的开发、利用与发展的重要性。

从能源系统角度来看，能源新技术包括系统所涉及的各种能源资源从开采到最终使用各个环节的先进技术。

1. 洁净煤技术

煤炭是我国分布最广、储量最多的能源资源，预计到下个世纪中叶，我国的能源消费结构中煤炭仍将占主要地位。

但是，煤炭直接燃烧造成严重的环境污染。全国二氧化硫（ SO_2 ）排放量及烟尘排放量中烧煤排放估计分别占 90% 和 70%，还有 NO_x 的污染问题。西南和华南已出现大面积酸雨区，并有扩大趋势。作为世界最大的煤炭消费国，烧煤排放的二氧化碳（ CO_2 ）可能导致全球变暖的问题更是国际社会普遍关注的一个热点。因此，发展洁净煤技术，减少污染物排放，提高煤炭利用效率已成为我国，也是世界的一项重要战略任务。

（1）先进燃烧和污染处理技术

洁净煤技术可用于燃烧前、中、后的任一阶段。

燃烧前的处理和净化技术

1) 洗选处理。这是除去或减少原煤中所含的灰粉、矸石、硫等杂质，并按不同煤种、灰分、热值和粒度分成不同品种等级，以满足不同用户需要的方法。

1991 年我国原煤洗选仅 18.1%，洗选效率为 85%，而发达国家原煤已全部洗选，洗选效率 95% 以上。

2) 型煤加工。这是用机械方法将粉煤和低品位煤制成具有一定粒度和形状的煤制品。高硫煤成型时可加入适量固硫剂，大大减少 SO_2 排放。我国民用型煤比烧散煤热效率可提高一倍，一般可节煤 20 - 30%，烟尘和 SO_2 减少 40—60%， CO 减少 80%。在工业炉窑中使用可节煤 15%，烟尘减少 50—60%， SO_2 减少 40 - 50%， NO_x 减少 20—30%。

3) 水煤浆。这是 70 年代发展起来的一种以煤代油的新燃料。它是把灰分很低而挥发成分高的煤，研磨成 250—300 微米的微细煤粉，按煤约 70%、水约 30% 的比例，加入 0.5—1.0% 的分散剂和 0.02—0.1% 的稳定剂配制而成的，水煤浆可以像燃料油一样运输、储存和燃烧。我国制浆工艺已达国际水平，并已建成商业性示范工程。

燃烧中净化

1) 先进的燃烧器。先进的燃烧器是通过改进电站锅炉以及工业锅炉和窑炉的设计和燃烧技术，以减少污染物排放，并提高燃烧效率。

国外已商业应用的有低 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，而不足以和氮结合成 NO_x 。

我国已开发出新型小容量（热功率 1 兆瓦以上）煤粉燃烧器，燃烧效率达 95% 以上，在 50% 负荷条件下仍能稳定燃烧，且煤种适应性广，脱硫装置正在进一步开发。2) 流化床（沸腾炉）燃烧。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，进入流化燃烧。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。

流化床有鼓泡床和循环床两类。鼓泡床使煤保持在燃烧中心，流化燃烧主要在床内进行。循环床通过高速空气夹带固体颗粒进入并返回燃烧室，进行辅助燃烧，促使煤粒沸腾燃尽。我国已出口巴基斯坦 5 万千瓦机组的沸腾炉。煤含硫 6%，正在引进配 12.5 万千瓦机组的循环流化床。

燃烧后净化-烟气净化，包括 SO_2 、 NO_x 和颗粒物的控制。

烟气脱硫有湿式和干式两种方法。湿法一般是用石灰水淋洗烟尘， SO_2 变成亚硫酸钙浆状物。干法是用浆状脱硫剂（石灰石）喷雾，与烟气中的 SO_2 反应，生成硫酸钙，水分被蒸发，干燥颗粒用集尘器收集。这两种方法脱硫效率达 90%。

烟气除尘，目前大型电站一般采用静电除尘器，除尘效率可达 99% 以上。

国外目前正在研究开发先进的脱硫工艺，以及可以同时脱除 90% 以上 SO_2 和 NO_x 的烟气净化新技术。

我国电站烟气净化尚处于初级阶段。90% 的火电站装了除尘器，平均除尘效率 90%，其中静电除尘仅占总数的 12%，除尘效率 96%。新建大型电站靠高烟囱（210 米以上）扩散，扩散效果虽不差，可减轻城市空气污染，但不能解决地区的污染问题。

（2）煤的气化与液化

1) 煤炭气化。煤炭气化是把经过适当处理的煤送入反应器，在一定的温度和压力下通过气化剂（空气或氧和蒸汽），以一定的流动方式转化成气体。气化技术可将各类煤转化成各种气体产品，包括城市民用和工业用燃料气、发电燃料气、化工燃料气等。

煤的气化主要产生 CO 与 H_2 ，灰分形成废渣排出。煤气化的好处是可在燃烧前脱除气态硫和氮组分。

1990 年，我国煤制气消费量为 235.9 亿立方米。目前采用常压水煤气工艺、常压固体床——段气化工工艺等。正在开发常压循环流化床和常压固体床两段气化工工艺。

国外正开发多种煤气化新工艺，目的是扩大气化煤种，提高处理能力和转换效率，减少污染物排放。还有地下煤层气化技术已引起各国重视，也有发展前途，值得研究。

2) 燃气——蒸汽联合循环发电。以煤气化生产燃料气，驱动燃气轮机发电，余气再用来烧锅炉，生产蒸汽驱动汽轮机发电。煤气经净化处理，可在燃烧前脱除硫和氮；联合循环可提高系统热效率。新一代煤气化联合循环发电的供电效率可达 43—46%。

目前，国外已进入示范阶段的煤气化联合循环发电主要有三个方案：整体煤气化联合循环发电方案；增压流化床联合循环方案；第二代增压流化床煤气化联合循环发电方案。目前，在建和拟建的煤气化联合循环发电示范厂共 24 个。单套容量已达 250—600 兆瓦。

我国引进几套燃油联合循环机组，可供开发煤气化联合循环发电的借鉴。另正在引进和开发高精煤燃气蒸汽联合循环发电技术。关于增压流化床燃气——蒸汽联合循环发电技术，我国已研究开发，取得了阶段性成果。

3) 燃煤磁流体发电技术。亦称等离子体发电。是使极高温并高度电离的气体高速流经强磁场直接发电的新型发电厂。当燃煤得到的 2600K 以上的

高温等离子气体以高速流过强磁场时，气体中的电子受磁力作用和气化中活化金属粒子（钾、铯）的相互碰撞，沿着与磁力线成垂直的方位流向电极而发出直流电，经交、直流交换装置可送入电网。从磁流体出来的气体可送往常规锅炉，加热水产出蒸汽，驱动汽轮机发电，组成高效率的联合循环，总的热效率可达 50—60%。由于磁流体发电所用的钾盐可有效地脱硫和可以用控制燃烧的方法来有效控制 NO_x 的产生，故它又是一种低污染燃烧发电技术。

4) 煤炭液化。煤炭液化分间接液化和直接液化两类。间接液化是煤先气化，生产原料气，经净化后再进行调质反应，调整 H_2 与 CO 的比例。

直接液化是把煤直接转化成液体产品。已完成中试的工艺主要有供氢溶剂法（EDS），氢-煤法，SRC 法。

80 年代开发出第三代两段催化加氢液化新工艺和煤-油共炼工艺，提高了煤液化的经济性。

我国 1980 年重新开展煤炭直接液化研究，从国外引进了小型试验装置，迄今已对多种煤进行了液化性能和工艺条件试验，以及直接液化和煤-油共炼试验。

在间接液化方面，我国对煤制甲醇做了大量工作。甲醇是用含 H_2 和 CO 的原料气制造的，可用作化工原料、溶剂和燃料。甲醇用作汽车燃料，可在汽油中掺入 5%，15%，25%（M-15，M-25），或用纯甲醇（M-100）；甲醇和异丁烯合成甲基叔丁基醚（MTBE），用作无铅汽油辛烷值添加剂；或直接合成低碳混合醇（甲醇 70%，低碳醇 30%），用作汽油辛烷值添加剂。甲醇还可制取合成汽油。目前，我国甲醇年生产能力超过 60 万吨，其中约 20% 用作燃料。煤制燃料甲醇已有成熟技术。

2. 核能新技术

（1）新一代压水堆核电站

具有固有安全性的核电站反应堆。核反应堆在任何事故条件下都能自动停止运行，而且在最严重的假想事故条件下，停堆后的堆芯剩余热能依靠自然循环机理，导出堆外，保持堆内芯部和燃料元件的完整，从根本上排除堆芯深地、放射性逸出的可能，这种特性称为固有安全性，如改进压水堆、模块式高温气冷堆等。

（2）核燃料的增殖-快中子增殖反应堆。热中子反应堆主要是利用天然铀内的少量铀-235，以及在反应堆内生成少量钚-239。因此热中子堆仅利用天然铀中 2% 左右的铀，世界上探明的铀资源难以保证核能的长期大规模利用。由快中子来产生和维持链式裂变反应的反应堆——快中子堆，才有可能实现核燃料的增殖。快中子堆以钚-239 为裂变燃料，由铀-238 为增殖原料，铀-238 俘获快中子后又可生成钚-239。由于一个钚-239 原子核裂变放出的中子数平均值比一个铀-235 核裂变放出的中子数为多，而且新生的钚-239 有可能比消耗的钚-239 还多，这样就可以实现核燃料的增殖。1951 年，美国建成世界上第一座按上述原理工作的新型核反应堆-快中子增殖堆。到 70 年代末，快中子堆示范电站输出电功率已达 3 万千瓦，开始进入实用阶段。我国“863”计划已计划建造快中子实验堆。快中子堆在理论上可以利用全部铀资源，但实际上由于各种损失，约可利用铀资源达到 60% 以上。

（3）新的供热资源——低温核供热堆和高温气冷堆

低温核供热堆是压水堆型的热中子堆，但它的参数远低于核电站用的压水堆，其压力约为 15 巴，温度 200℃ 左右。由于参数低，设备造价低，在经济上有竞争力，世界上如原苏联、加拿大、德国、瑞典、瑞士、法国等国都有发展低温核供热的计划。我国开展低温核供热堆已有多多年，第一个 5000 千瓦的低温核供热试验堆已于 1990 年投入运行。

高温气冷堆是采用石墨作慢化剂和惰性气体氦气作冷却剂的热中子堆。由于石墨耐高温，所以反应堆出口的氦气温度可以高达 950℃。远远高于核电站压水堆的出口水温 300-350℃。现在设计的模块型高温气冷堆不仅可以高温供热，高效发电，而且有很好的固有安全性能。德国和美国在 60 年代就有实验堆和示范堆运行，目前日本正在建造 3 万千瓦热功率的高温气冷实验堆，我国“863”计划也决定在本世纪内建造 1 万千瓦热功率的实验堆。

(4) 受控热核聚变能

1) 聚变反应。核聚变是两个或两个以上的较轻原子核【如氢(H)的两种同位素：氘(D)和氚(T)】，在超高温等特定条件下聚合成一个较重的原子核，同时释放出巨大能量。因为这种反应必须在极高的温度(1-5 亿℃)下进行，所以叫热核反应。据计算，1 公斤热核聚变燃料放出的能量为核裂变的 4 倍。

2) 核聚变原料主要是氢、氘和氚。氘也称重氢，氚也称超重氢，1 公斤海水中含有 0.034 克氘，故地球上汪洋大海里有 23.4 万亿吨氘，足够人类使用几十亿年，是一项无穷无尽的持久能源。

聚变能目前尚处于研究阶段，离实用还有相当差距。但基于其取之不尽的资源和优越的性能，能量大，且没有像裂变堆那样产生大量放射性废物，故其远景是很好的。预计在下世纪中叶可望能商用。目前也有人考虑在其商用以前开展聚变-裂变混合堆的研究，其原理是用聚变反应产生的中子来增殖裂变燃料，充分利用裂变铀、钍核资源。我国也正在研究中。

3. 新能源技术

(1) 太阳能新技术

太阳能是一种巨大且对环境无污染的能源。

太阳能的转换和利用方式有：光-热转换、光-电转换和光-化学转换。

1) 太阳能热利用和热发电技术。太阳能热利用是太阳辐射能量通过各种集热部件转变成热能后被直接利用，它可分低温(100—300℃)：工业用热、制冷、空调、烹调等；高温(300℃以上)：热发电、材料高温处理等。

太阳能节能建筑分主动式或被动式两种。前者与常规能源采暖系统基本相同，仅以太阳能集热器作为热源代替传统锅炉。后者是利用建筑本身的结构，吸收和储存太阳能，达到取暖的目的。

太阳能热发电技术是利用太阳能产生热能，再转换成机械能的发电过程。发电系统主要由集热系统、热传输系统、蓄热器、热交换器以及汽轮发电机系统等组成。美国 Luz 公司已建了 9 个电站，总装机容量为 35 万千瓦，平均效率达 14%，电价约 8 美分/千瓦时。太阳能热发电技术涉及光学、传热学、材料科学、自动化等学科，是一门综合性交叉性很强的高新技术，也是太阳能开发和研究领域的难点。太阳能热发电技术的关键问题是太阳能的光辐射吸收和高效传热技术。

2) 太阳能光电转换技术。太阳电池类型很多，如单晶硅电池、多晶硅电池、非晶硅电池、硫化镉电池、砷化镉电池等。美国、德国、日本都将太阳

能光电技术列为新能源首位，制造和发电成本已在特殊应用场合有一定竞争能力。当前发展的主要障碍是光电池成本高。我国已能生产，年产达 1000 千瓦，能量转换率达 14%。多晶硅电池采用熔化浇铸，定向凝固方法制造，有可能在现有基础上降低成本 30%，向实用化推进一步，但要使呈数量级下降，需改变制造工艺，制造硅膜太阳能电池和发电系统，需大力加强基础研究。

3) 光化学转换技术。光化学是研究光和物质相互作用引起的化学反应的一个化学分支。光化学电池是利用光照射半导体和电解液界面，发生化学反应，在电解液内形成电流，并使水电离直接产生氢的电池。

我国据 1991 年不完全统计，已推广太阳能热水器 180 万平方米，被动太阳能节能房 30 万平方米，太阳能农用温室 33 万公顷，太阳灶 12 万台。我国光伏电池已有 4.5 兆瓦生产能力。高效电池、非晶硅电池的实验室水平与国外相差不大，但在向生产力转化和应用领域方面差距很大，有待开拓。

(2) 风能技术

我国风能总储量估计为 1.6×10^9 千瓦，在世界各国排列第三，可开发利用的约为 2/10，即约 3 亿千瓦。可以有效利用的风速范围为 3—20 米/秒。

目前全世界风力机用于发电的超过总量的 2/3。

风力机可分为微型(1 千瓦以下)、小型(1—10 千瓦)、中型(10—100 千瓦)、大型(100 千瓦以上)。目前世界上最大的风力发电机在美国夏威夷，为 3200 千瓦。

到 1992 年，全世界风力发电装机达 2700 万千瓦。主导产品是 150—250 千瓦机组，300—500 千瓦机组开始小批量生产。

我国风力发电装机容量为 20 万千瓦左右，有小型风力发电机 12 万台，中、小型风力发电厂 9 个。小型风力机年产 3 万台，55 千瓦、120 千瓦、200 千瓦风力发电机的研制和生产正在进行中。风力发电技术关键是大型风力机的叶片设计、制造和安全性技术，二是优化运行控制方案与控制系统。

美国目前每千瓦时风电价约 6—7 美分，到 2000 年可能降至 4 美分。

(3) 生物质能利用新技术

生物质能是绿色植物通过叶绿素将太阳能转化为化学能而储存在生物质内部的能量。生物质能通常包括木材和森林工业废弃物、农业废弃物、水生植物、油料植物、城市与工业有机废弃物和动物粪便等。目前发展的生物质能利用技术有：

1) 热化学转化技术。是将固体生物质转换成可燃气体、焦油、木炭等品位高的能源产品。

2) 生物化学转换技术。主要指生物质在微生物的发酵作用下生成沼气、酒精等能源产品。沼气是有机物质在一定温度、湿度、酸碱度和厌氧条件下经各种微生物发酵及分解作用而产生的一种混合可燃气体。

3) 生物质压块细密成型技术。是把粉碎烘干的生物质加入成型挤压机，在一定温度和压力下，形成较高密度的固体燃料，密度约为 1.2—1.3 克/厘米³，热值在 20 兆焦/公斤左右。

4) 化学转换技术。

1990 年，我国消费生物质能约 2.64 亿吨标准煤，大部分是直接燃烧的。目前，我国已研制成功小型气化炉，气化率达 70% 以上。高效生物质燃烧炉，热效率达 85%。

（4）波浪能和潮汐能

这两项海洋能源我国约有 4-5 亿千瓦,已建成 1280 千瓦时平潭幸福洋潮汐电站。我国波力发电极有特色,在基础研究方面已进入世界前沿,在实用上已有 10 千瓦级的岸式或漂浮式波力发电装置,并装备了航标灯。海洋能的开发应着重两个方面,其一是基础研究,如海洋能的收集与聚能,最佳转换方式和转换机械,随机、间断、不稳定转换技术等;其二是多能互补,与海湾、海岛、入海口其他新能源多能并举多能互补。

（5）氢能利用技术

从 70 年代初开始将氢应用于发电以及各种机动车和飞行器的燃料,已有不少试验装置在运行。氢作为能源使用时,无污染物产生,燃烧产物是水,而生产氢的原料也是水。氢的热值高,每克液氢可达 120 千焦,是汽油的 2.8 倍。

1) 氢气制备。可以用电解法、热化学法、光电化学法或等离子体化学法制氢。

2) 氢的储存。氢的储存可以用压缩、低温液化和贮氢金属吸存。

3) 氢的利用。可作燃料,用于导航、机动车等;可用氢燃料电池通过电化学反应直接转换成电能;可用作各种能源的转换介质或中间载体。

作为人类长远的战略能源,氢可与其他一次能源结合发展各种氢能系统,特别是太阳能-氢能综合能源系统有很好发展前途。国际上认为氢能将是 21 世纪中后期最理想的能源。

4. 节能新技术

我国的一些高耗能产品的能耗水平与国际水平比较,差距仍很大,除一般节能方法和采取的节能措施外,尚须采取节能新措施,新方法。

（1）余热回收利用技术

对于低品位余热利用,需研究强化传热的机理,研制包括热管在内的各种高效换热元件和紧凑换热器,是低品位热动力开发和发展热泵技术的重要储备;换热器小型化和降低成本是低品位余热动力回收装置提高经济上竞争性的主要技术关键。

1) 热泵技术。是以消耗一部分高质能(机械能、电能)为补偿,使热量从低温热源向高温热源传递。热泵可以用消耗少量高质能,获得较多的热能。

2) 热管技术。热管是一种具有很高传热性能的元件。它利用封闭在管壳内的工作液体的相变(沸腾、凝结)来传递热量。当蒸汽流向冷凝段,冷凝段由于受到冷却使蒸汽凝结成液体,液体再沿多孔材料借助毛细管的作用流回蒸发段,如此循环不已。作为一种传热新技术,广泛用于电子工业、空间技术和工业余热回收等方面。

（2）电子电力技术

电子电力技术在工业、交通运输、通信、家用电器等领域有广泛的前途。电子电力技术是节能的利器,例如:风机、水泵的阀门调节改为交流调速控制,可节电 30—40%;直流传动改为可关断晶体管变频传动,可节电 1/3 以上;采用电子变频器和新型荧光粉的高效荧光灯,节电率可达 80%。

据估计,全国推广应用电子电力技术,每年可节电 400 亿千瓦时,应用电子电力技术的各种节能产品,节材率达 40—90%。

（3）高效电动机

采用新材料、改进设计、具有低损耗、高功率因素的电动机。电动机占

我国总用电量的 60%，高效电动机的效率比一般标准电动机高 2—7%，永磁电动机可提高效率 4—10%。

（4）高效节能照明技术

采用高频整流器降低灯的耗电率，采用稀土荧光粉吸收紫外线并变为可见光，提高发光效率。例如用节能灯代替白炽灯可提高效率 50—80%。

（5）远红外线加热技术

是利用远红外辐射元件发出的远红外线，使被加热物体吸收，直接转变成热能的一种加热方式。远红外辐射电暖器就是一例。

（6）电热膜加热技术

是将电子电热膜直接制作在被加热体的表面上，当通电加热时，热量会很快传给被加热体。因此，电热膜加热效率达 85%，而普通电热丝加热效率仅 40%。电热膜是一种导电薄膜，它可用于电热杯、电淋浴器、电吹风、电暖气等电热器具。电热膜加热功率在 100—2000 瓦范围内，使用寿命高于 2000 小时。

当前世界各国都十分重视节能，国际能源界也有将节能称为第五能源，与煤、石油及天然气、水电、核电四大能源并列。鉴于节能对合理利用自然资源和保护环境的重要意义，各国对推动节能新技术都采取了各种政策措施，例如，采取补贴的政策等。我国已公布淘汰和停止生产高耗能产品，优先发展高效节能设备的政策。

总之，能源的开发利用与发展是直接关系到国民经济发展、社会进步和人民生活的大事。要坚持开发利用与节约并举，要重视发展清洁与可再生能源，保护环境；要依靠科技进步，加大技术改造力度，合理配置，提高能源利用效率；要加强能源开发与环境保护的基础与应用研究，使能源工业与经济、社会、环境协调发展，促进国民经济持续、快速、健康发展和社会全面进步。

未来电力技术的发展趋势浅析

郑健超

电力科学研究院

郑健超 电力专家。1939 年 10 月 6 日生，广东中山人。1963 年 2 月清华大学毕业，1965 年 9 月该校研究生毕业，历任电力科学研究院高电压研究所所长、副院长、院长，现任名誉院长，中国电机工程学会常务理事，中国仪器仪表学会常务理事，《电机工程学报》总编，1995 年 5 月当选为中国工程院院士，长期从事高电压技术的科研工作。

一、前言

在跨入 21 世纪之际，人类面临着实现经济和社会可持续发展（sustainable development）的重大挑战。在有限资源和环保严格要求的制约下发展经济已成为全球最重要的话题。所谓“可持续发展”是指当代的发展应以不损害子孙后代的环境权益和生活质量为前提。由于人类的活动造成的全球气候变化便是当今世界关注的焦点。根据大量的研究和观测，由于化石燃料利用产生的二氧化碳等温室效应气体引起的全球变暖的趋势还在发展。近年来自然灾害大幅度增加、地表平均气温升高、冰川溶化便是证据。另一方面，人口增长和工业发展使能源需求不断增加。据国际能源协会（IEA）统计，1971～1991 年期间全世界一次能源需求量每年平均增长 2.4%，电力年平均增长 4.1%。预计，1991-2010 年间，全球一次能源需求量年平均增长 2.1%，发展中国家由于人口快速增长，工业化进程和城市化进程等因素，对能源需求的增长更快。目前发展中国家有 70% 人口（20 亿）缺电，今后这些地区的能源短缺将更严重。为了维持当代的发展，化石燃料利用的势头不减。

我国人口众多，又处在经济高速增长阶段，能源供需矛盾突出。此外，化石燃料在一次能源中占很大比例。为实现可持续发展，必须实施新的能源发展战略，采用新技术。舍此别无他途。

本文将分析 21 世纪我国电力工业面临的挑战，实现可持续发展需要的新技术，下世纪可能出现的技术突破，在此基础上，介绍几项电力新技术的发展现状和前景。

二、我国电力工业面临的挑战

1. 电力供需矛盾难以根本缓解

按照统计分析，每个国家的人均 GDP（国民生产总值）与人均的能耗有十分密切的相关关系。我国要在下世纪中叶达到中等发达国家的水平，人均用电水平的增长是不可避免的。人口增长和现代化进程使我国对电力需求不断增加。按照规划，2050 年我国发电装机应超过 15 亿千瓦，比现有的装机净增 13 亿千瓦以上。按常规的发展模式几乎不可能达到这个目标。除非寻求新的发展途径。

2. 有限资源的制约日趋严重

我国去年已成为石油进口国，不能指望靠石油发电。水电可开发容量不

足 3.7 亿千瓦，在相当长的时期内煤炭仍是主要的一次能源。但燃煤产生的环境污染的治理是一个极为困难的问题。此外，煤炭基地水资源短缺是我国发展火电的又一重要制约因素。

3. 治理环境的任务艰巨

更为严峻的问题是环境保护。我国是煤炭生产和消费大国，电力的构成中约有 80% 是煤电。一座 240 万千瓦的火电站，如不加以控制，每小时排放的 SO_2 达 7—12 吨，灰达 70—80 吨，渣为 150 吨，各类废水 100 吨，数字相当可观。中国许多城市的酸雨已成为关注的焦点。中国大气 SO_2 的平均浓度为 0.03ppm，比日本高 3 倍，个别地区达到 15ppm。酸雨引起森林和农作物破坏、水变质、土壤退化，已成为十分严重的问题。

以燃煤发电为主的发电构成短期内不可能改变，因此，治理燃煤产生的污染已成为电力工业所面临的极重要的任务。电力部已将发展洁净煤发电技术列为下世纪电力科技发展的战略目标之一。

4. 对电网可靠性和电能质量要求不断提高

20 世纪电力系统发展的特征常以“大机组、大电网、高电压”来描述。近一二十年的世界各国的经验表明，在下世纪，这个趋势不会再继续下去。研究表明，机组的单机容量和交流输电电压等级的发展已出现饱和趋势，单机容量 1200MW 和电压等级 800KV 似已达到由电网可靠性决定的极限。尽管现代电网的设计运行技术近年取得了长足发展，但仍不能完全避免大电网的瓦解事故发生。近几年内，世界上的大电网事故仍时有发生，有时还造成了灾难性的后果。1996 年发生的美国西部大停电、马来西亚全国大停电就是例子。另一方面，随着社会现代化的进程，对电力供应的可靠性要求日益提高。因此，输电和配电系统的可靠性已成为规划、设计、运行应考虑的首要因素。

电网发展的另一个重要趋势是：独立发电者（IPP）日益增多，在电力管理体制上进行重大改革，在发电环节引入竞争机制，实施所谓“放松规制”（Deregulation），在电网管理方面实行所谓第三方介入（Third Part Access）和电力托送（PowerWheeling）等等。这似已成为一些国家的潮流。这就要求电网变得更加开放和灵活。

综上所述，对现代电网的要求可以概括为“可靠、高效、灵活、开放”。用它描述未来电网的特征似更恰当。

过去，由于我国对电网的投资强度偏低，电网结构相对薄弱，建设电网的任务更加艰巨。今后一段时间靠外延发展电网仍是主要的，发展电网的策略与西方发达国家不尽相同。但是，在确定网架结构、输电方式、电压等级以及制订电网技术发展战略时都必须考虑这一总的发展趋势。

根据我国“九五”规划和 2010 年发展目标，我国电力工业还会有很大的发展，将继续维持较高的增长速度。但从长远看，要实现可持续发展，继续按常规模式将难以为继。根本出路在于进一步依靠科技进步，大幅度增加可再生能源发电的比例，实现能源的高效利用，发展与环境兼容的能源利用技术，发展新型输配电技术及电能质量控制技术。

三、电力技术发展趋势预测

1. 新型发电技术预计会有重大突破

21 世纪被称为可再生能源的世纪，预计可再生能源利用技术、新型发电技术将会有重大突破，其工业应用规模将有大幅度提高。据权威专家估计，

到下世纪中叶，如果实施强化可再生能源的发展战略，可再生能源可占世界电力市场的 3/5，燃料市场的 2/5。据预测，太阳能发电，特别是光伏发电（PV）、风力发电、生物质能发电和燃料电池（Fuel Cell）发电技术，最有希望成为大规模应用的新型发电方式。

2. 核电可能东山再起并占据重要份额

由于公众对核泄漏的担心等原因，全球核电的发展目前处于低潮。规划和在建的核电站都已大幅度下降，在运行核电站的数量不再增加。但是，核电是一种清洁的发电方式，只要提高安全性，还是有很大吸引力。据规划预计，1991 年至 2010 年全球核电仍将以 1.3% 的年平均增长率增加。随着新型反应堆，即固有安全堆的实用化和造价降低，以及快中子增殖堆的商业化，核电技术在下世纪有可能东山再起。可控热核聚变在 2050 年以后，有可能取得突破。到那时可能最终解决人类能源供应问题。

3. 能源的高效利用技术将广泛应用

据统计，全世界有 66% 的能源被白白浪费掉。节能技术将是下世纪的重要技术。这些技术包括：联合循环，热电联产，热泵（Heat Pump），高效节能灯，建筑节能技术，电力电子学（Power Electronics）应用于节能技术，需求侧管理（DSM）技术，能源效益审计（Energy Auditing and Accounting）等等。这些技术的广泛应用对节约资源和能源会产生巨大作用。

4. 蓄能技术会有长足进展

由于大量分布式的电源（燃料电池，太阳能电池）的应用以及提高电网可靠性和调峰的需要，分散的蓄能系统的重要性日益增加。这种分散的蓄能系统由于近年来电动汽车（EV）的大规模研究而得到飞速发展。最有希望的是电池蓄能系统（BESS）、飞轮蓄能系统（FWESS）和超导蓄能系统（SMES）。

5. 与环境兼容的能源利用技术日显重要

洁净煤技术（CCT），作为 21 世纪能源领域最关键技术之一将会得到长足发展。洁净煤技术可分为洁净煤处理技术（如煤的洗、选，预脱灰处理，型煤，煤的气化、液化，水煤浆）和洁净煤燃烧（发电）技术（如烟净化技术，循环流化床，增压循环流化床，整体煤气化联合循环，电子束、短脉冲脱硫脱硝技术等）。

此外，温室效应气体液化及储存利用技术，降低高压输电线路环境影响的技术，核废料的分离处理及储存技术也会有重要发展。

6. 电网新技术的应用将引起电网的重要变革

电网运行管理体制近年发生的重要变革和现代社会对电网可靠性的高要求，迫切需要发展新的电网技术。随着电力电子器件（即大功率的电子器件）的开断能力大幅度提高，这些器件用于电力系统已成为现实。电力电子技术和现代控制理论在电力系统中的应用将导致下世纪电力系统的重大变革。

未来的电网新技术包括：灵活的交流输电技术（FACTS）和新一代直流输电技术，更加有效的电网状态测定和控制技术，现代化大都市供电新技术等等。

四、若干关键技术简介

1. 太阳能发电技术

太阳能是取之不尽的可再生能源，可利用量巨大。一年的太阳辐射能，依纬度的不同，可达 870—3400KWh/m²。按转换效率 0.20 计算，在一般地区，

10 平方米的面积的太阳能电池全年可提供 3000 - 5000KWh 的电能，足够一般家庭使用。太阳能发电技术主要包括光伏发电（PV）技术和太阳热发电技术。

光伏发电（PV）技术，即用太阳能电池将太阳光能直接转变为电能的技术，被认为是下世纪最有希望达到工业规模应用的可再生能源利用技术之一。目前，全球光伏发电规模尚小。但太阳能电池的产量增长很快，约每 3—4 年翻一番。到下世纪中叶，光伏发电装置容量将很可观。光伏发电技术大规模应用的关键是其价格。由于近年光伏电池研究的进展，光伏发电的价格预计到 2000 年左右便可与常规发电技术竞争。

2. 燃料电池发电技术

燃料电池（FC）是直接将燃料的化学能转变为电能的装置。燃料电池发电效率极高，可达 60% 以上，如果高温燃料电池配合联合循环，效率可达 85%。而且，效率受燃料电池规模和负荷大小影响不大。燃料电池发电出力能快速跟踪负荷变化，速度可达每秒变化全负荷的 50%，调峰能力极强。

FC 发电的重要优点是对环境污染很小，由于没有燃烧过程，可以实现实际上的零排放。燃料电池另一大优点是省水。这对水资源缺乏的我国而言极为重要。此外，燃料电池发电尚有适合分布式供电，节省输电投资，模块结构，便于扩建等等优点。

早期的燃料电池是碱性燃料电池，曾用于宇航。现在商用的多为磷酸燃料电池（PAFC）。正在开发研究熔融碳酸盐燃料电池（MCFC），固体氧化物燃料电池（SOFC）和质子交换薄膜燃料电池，被认为是最有希望取得大规模应用的新型燃料电池。固体氧化物燃料电池是高温燃料电池，燃料的重组过程就在电池内进行，不需外加燃料重组器。煤的气化装置与固体氧化物燃料电池组合将构成未来以煤为燃料的清洁高效的新型发电设备。

现在全球已有 100 座以上的 FC 发电厂在运行，主要是磷酸燃料电池。容量最大为 11MW，装在东京。美国西屋公司正在设计一座 20MW 的固体氧化物燃料电池，占地仅 0.135 公顷，造价可低到 1100 美元/KW。预计到 2010 年全球燃料电池总容量可达 60000MW。

3. 灵活的交流输电技术

灵活的交流输电系统（FACTS）是 80 年代后期出现的新技术，近年来在世界上发展迅速。专家们预计，未来这项技术将在电力输送和分配方面将引起重大变革，对于充分利用现有电网资源和实现电能的高效利用，将会发挥重要作用。

所谓“灵活的交流输电技术”是指：采用大功率电子器件作为大功率高压开关，与其他电力设备组成 FACTS 设备，以实现电力系统参数，如线路阻抗、相位角、功率潮流的连续调节控制，从而大幅度提高输电线路输送能力和提高电力系统稳定水平，降低输电损耗。

世界上第一台 500KV 的全可控的串联补偿装置（TCSC）已于 1994 年 12 月在美国开始商业化运行。

目前，美国以及中国、法国、日本、德国、巴西、印度等国的电业部门均在积极研究在超高压输电工程中应用 TCSC 及其他 FACTS 技术的可行性和具体实施方案。

4. 电能储存技术

电能储存是实现电能高效利用的重要途径。除了抽水蓄能方式以外，实用的储能系统要数电池储能系统（BESS）。它的核心部件是蓄电池和 GTO —

类的器件组成的交直流变换器。电池蓄能系统既可作为旋转备用，也可作为调峰和调频电源，或直接安装在重要用户内，作为大型的不间断电源。同时，BESS 还具有无功调节的功能。目前，全世界已有近 20 个 BESS 在系统中运行。例如，美国加州 Chino 变电站安装有 10MW 的 BESS，在洛杉矶的 Vernon 安装有 5MW 的 BESS。最近在波多黎各各有一座 20MW 的 BESS 投运，用于旋转备用和调频。BESS 在电力系统中大规模应用的主要技术关键是提高蓄电池的储能密度，降低价格以及延长寿命。目前的蓄电池储能密度达到 100 - 200Wh/kg，寿命为 8 ~ 10 年，BESS 的总体造价约为 1000 美元/KW。镍- 锌电池、钠- 硫电池、聚合物薄膜电池、锌 - 空气电池等等新型电池正在研究之中，倘若研究取得重大突破，则不仅对电动汽车的实用化有重大意义，对于电能的高效利用来说也将产生重要的影响。

此外，超导储能 (SMES)，飞轮储能 (FWES) 也在积极研究和试验之中。

5. 电能质量控制技术

电能的高效利用的一个重要内容是向用户提供可靠的、优质的电能供应。现代社会的发展对提高供电的可靠性，改善电能质量提出了越来越高的要求。在现代企业中，由于变频调速驱动器、机器人、自动生产线、精密的加工工具的采用，由于可编程控制器、计算机信息系统的日益广泛使用，对电能质量的控制提出了严格的要求。这些设备对电源的波动和各种干扰十分敏感，任何供电质量的恶化可能会造成产品质量的下降，从而产生重大损失。

电网的扰动和污染主要包括：

电压降落 (Voltage Sag)，闪变 (Flicker)、脉冲 (Impulse)、暂态升高 (Swell)、谐波 (Harmonics) 以及断电 (Outage)。标准化部门已经制定了适用于不同用户的电能质量的标准。例如，对计算机用户而言，持续时间为 0.1 秒的 40% 的电压降落是不允许的。

随着电力电子技术的发展，电力电子设备已开始进入配电系统并为解决电能质量控制提供了技术手段。近年来，国外提出了“用户电力技术”(Custom Power Technology) 的概念，即使用电力电子技术提高供电可靠性和实现电能质量严格控制。目前，已经开发出用于配电网的电力电子装置，例如固态高压开关 (Solid - State Circuit Breaker)。与常规的机械开关相比，固态开关能在一个工频半波以内完成由故障供电线路向健全的供电线路的切换。这是一般机械开关无法比拟的。

另一关键设备是动态电压恢复器 (Dynamic Voltage Restorer)，它由直流储能电路、变换器和级次串联在供电线路中的变压器构成。变换器的控制系统，根据检测到的线路的电压波形，产生补偿电压，使合成的电压动态保持恒定。无论是短时的电压低落或过电压，通过 DVR 均可以使负载上的电压保持动态恒定。

6. 现代化大都市供电技术

现代化的社会要求更高的供电可靠性和电能质量。由于现代化大都市供电负荷密度大，供电方式复杂，可靠性要求高，还要求考虑更大的发展灵活性，以适应供电负荷不断增加和供电网升格的需要，建设现代的供电网需要更加复杂的技术。例如：配电网紧凑化技术，包括新型 GIS 设备，配电设备的集成技术，配电网保护监控设备的集成技术；配电线路地下化技术，如新型电缆的研制和应用、火灾不蔓延设备、新型的地理图形及设备管理系统；高压直流配电技术 (HVDC Distribution)，即以高压直流电缆为骨干网架，

采用自变流技术 (Self-commudated Conver-sion) , 以高频、工频或直流向最终用户供电的新技术。

五、结束语

1.我国由于人口众多、工业化进程和城市化等因素,对能源需求的增长很快。在相当长的时期内,电力供需矛盾难以根本缓解。为实现可持续发展,必须依靠科技进步,实施新的能源发展战略,尽快实现电力新技术规模应用,大幅度增加可再生能源发电的比例,实现能源的高效利用,发展与环境兼容的能源利用技术,发展新型输配电技术及电能质量控制技术;

2.在可再生能源发电和清洁发电领域,光伏发电、燃料电池发电、生物质能发电、风力发电等可望取得重大技术突破和大规模应用。核电作为一种清洁的发电方式仍有很大吸引力。随着固有安全堆实用化和造价降低,以及快中子增殖堆的商业化,核电技术在下世纪有可能重新占据重要位置。我国应不失时机地开展这些新技术的研究并实现其规模应用和设备的国产化;

3.我国一次能源构成中,煤炭为主的格局难以改变,因此,研究并应用适合我国国情的各种清洁煤发电技术将成为实现可持续发展能源战略的关键组成部分;

4.电网在电能的输送和全局优化配置中起着举足轻重的作用。我们应吸取过去的经验教训,大力加强电网建设,采用电网新技术,建设一个可靠、高效、灵活、开放的全国互联电网;

5.可靠、优质的供电是现代化大都市的重要标志。为此目的,需要采用相当复杂的技术。其难度往往不亚于超高压输电技术。过去,对配电系统的发展未给以应有的重视,欠帐甚多。研究采用配电新技术,提高供电的可靠性和电能质量已是十分紧迫的任务。

中国表面工程的发展

徐滨士

中国人民解放军装甲兵工程学院

徐滨士 维修工程、表面工程专家。1931年3月12日生于黑龙江哈尔滨。1954年毕业于哈尔滨工业大学。曾任中国人民解放军装甲兵工程学院副院长。现任该学院教授。兼任中国设备管理协会副会长。1995年当选为中国工程院院士。他在倡导和建立维修工程和表面工程新学科，推动设备维修工程技术的发展方面作出了重要贡献。

一、表面工程的发展日新月异

表面工程，是经表面预处理后，通过表面涂覆、表面改性或多种表面技术复合处理，改变固体金属表面或非金属表面的形态、化学成分和组织结构，以获得所需要表面性能的系统工程。表面工程学科发展的重要标志是1983年英国伯明翰大学沃福森表面工程研究所的建立和1985《表面工程》国际刊物的发行。鉴于此，国际热处理联合会也改名为国际热处理及表面工程联合会。中国机械工程学会1987年建立了学会性质的表面工程研究所，1988年出版了第一本《表面工程》杂志，已出版了30期，1989年召开了第一届全国表面工程学术交流会，1991年召开了第二届全国表面工程学术会，同时举办了首届中日表面工程学术研讨会，1993年在日本召开第二届中日表面工程学术会议，1993年成立了中国机械工程学会表面工程分会，1995年在北京召开了国际表面科学与工程学术会议，1996年7月在厦门召开了第三届全国表面工程学术会，同年8月在秦皇岛召开了'96全国表面科学与工程研讨会。近年来，表面工程发展异常迅速，作为体现表面工程学科重要组成部分的表面技术，已成为当今世界的关键技术之一。

工业现代化的发展，对各种设备零部件表面性能的要求越来越高，特别是在高速度、高温、高压、重载、腐蚀介质等条件下工作的零件，其材料的破坏往往自表面开始，诸如磨损、腐蚀、高温氧化等，表面的局部损坏又往往造成整个零件失效，最终导致设备停产。因此，改善材料的表面性能，会有效地延长其使用寿命，节约资源，提高生产力、减少环境污染。表面工程的最大优势是能够以多种方法制备出优于本体材料性能的表面功能薄层，其厚度一般为几微米到几毫米，仅为结构尺寸的几百分之一到几十分之一，却使零件具有了比本体材料更高的耐磨性、抗腐蚀性和耐高温等能力，采用表面工程技术的平均效益高达5—20倍以上。表面工程能直接针对许多贵重零部件的失效原因，实行局部表面强化、修复、预保护以达到延长使用寿命或重新恢复使用价值的目的。若再考虑在能源、原材料和停机等方面的节约费用，其经济效益和社会效益是显而易见的。我国自第六个五年计划以来，通过在设备维修领域和制造领域推广应用表面工程已取得了几百亿元的经济效益。表面工程具备了先进制造技术最基本的特征，即：优质、高效、低耗。因此它本身不仅属于先进制造技术，而且其研究、推广和应用将为先进制造技术的发展提供必要的工艺支持。在国家的节能节材“九五”规划中拟建议

将发展表面工程作为重大措施之一，并列为节能、节材示范项目。国家计委拟建立国家表面工程研究中心。材料表面改性作为传统材料性能优化的基础研究也被列入国家自然科学基金“九五”优先资助领域。

二、表面工程学科体系与特色

1. 表面工程的形成与发展

根据英国与德国的统计资料，目前，表面工程研究在摩擦学各个领域中的地位已上升到第一、二位。

表面工程的形成和发展，是与其在生产中的作用分不开的。可以概括为以下五个方面：首先，它是发展生产，提高产品质量和经济效益的需要。第二，它为高新技术提供了特殊的材料。第三，它是设备技术改造与维修的有效手段。第四，它是节约能源和资源的重要途径。第五，它还是装饰与美化人民生活的得力措施。正是由于这些重要作用，使表面工程已被许多传统学科（如材料学、摩擦学、冶金学、固体力学等）列为重要研究方向，成为学科的组成部分，一些大专院校的相关专业已把表面工程列为本科生、研究生的教学内容，表面工程的教材和学术专著不断问世，以表面工程为主题的学术活动得到各行各业专家及工程技术人员的支持与参与，一个独立的表面工程学科体系正在逐步形成，表面工程学科成为令人瞩目的新领域。

2. 表面工程的学科特色

表面工程是由多个学科交叉、综合、发展起来的新兴学科，它以“表面”为研究核心，在有关的学科理论的基础上，根据零件表面的失效机制，以应用各种表面技术及其复合为特色，逐步形成了与其它学科密切相关的表面工程基础理论，主要是：表面层失效分析理论、表面摩擦与磨损理论；表面腐蚀与防护理论；表面（界面）结合与复合理论等。表面工程的发展不仅在学术上丰富了材料科学、冶金学、机械学、电子学等学科，而且开辟了新的研究领域，如高能束冶金学、等离子体物理学、动态金属学、摩擦化学、微观摩擦学等。表面工程的学科体系概括为图 1。

3. 表面工程的技术特色

表面工程是多种表面技术的复合所形成的表面高新技术。由于固有局限性，应用单一的表面技术所获得的材料表面性能往往不能满足日益苛刻的工况条件的要求。随着科学技术和设备的进步，发展出了综合运用两种或多种表面技术的复合表面技术，或称为第二代的表面技术。实践证明，这种复合表面技术通过最佳协同效应解决了一系列高新技术发展中特殊的工程技术问题。

表面技术分为表面改性技术、表面涂层技术及复合表面技术。

常用的表面技术有：堆焊技术、熔结技术（低真空熔结、激光熔敷等）、电镀、电刷镀及化学镀技术、非金属镀技术、热喷涂技术（火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂、爆炸喷涂、超音速喷涂、低压等离子喷涂等）、塑料喷涂技术、粘涂技术、涂装技术、物理与化学气相沉积（真空蒸镀、离子溅射、离子镀等）、化学热处理、激光相变硬化、激光非晶化、激光合金化、电子束相变硬化、离子注入等。

目前，表面复合技术的研究和应用已取得了重大进展，如热喷涂与激光重熔的复合、热喷涂与刷镀的复合、化学热处理与电镀的复合、表面强化与固体润滑层的复合、多层薄膜技术的复合、金属材料基体与非金属材料涂层

的复合等等，复合技术使本体材料的表面薄层具有了更加卓越的性能。

4. 表面工程的技术设计

为了更有效地发挥表面工程的潜力，在采用某种表面技术之前，必须进行必要的“表面工程技术设计”，这包括表面技术与涂层材料的合理选用，表面层成分、组织结构及机械性能的确定，工艺参数的确定，以及各种表面层的性能检测方法。表面工程人员要能进行零件失效分析以及熟悉各种表面技术与材料的磨损、腐蚀与断裂性能。表面工程的技术设计体系可由图 2 所示。

三、表面工程与维修表面技术

随着先进制造技术及设备工程学的不断发展，制造与维修将越来越趋于统一。未来的制造与维修工程将是一个考虑设备和零部件的设计、制造和运行的全过程，以优质、高效、节能、节材为目标的系统工程。制造技术将统筹考虑整个设备寿命周期内的维修策略，而维修技术也将渗透到产品的制造工艺中。“维修”已被赋予了更广泛的含义，1984 年美国“技术评论”提倡旧品翻新或再生，并称为“重新制造”。在重新制造中大量采用各种维修技术，它把因损坏、磨损或腐蚀等而失效的可维修的机械零件翻新如初，从而大量地节省了因购置新品、库存备件和管理以及停机等所造成的对能源、原材料和经费的浪费，并极大地减少了环境污染及废物的处理。为此，在日本已提出了“再生工厂技术”的概念。重新制造所需能源约为制造新品的 20%—60%，而价格却只有旧品的 40%—60%。许多采用表面技术处理过的旧零部件，其性能要优于新品。比如，1994 年美国的 Mid-Atlantic 联合有限公司曾对一个变速箱的输出法兰盘采用超音速火焰喷涂（HVOF）维修的情况进行了调查，结果表明，经 HVOF 修复过的零件的使用寿命是新零件使用寿命的 2.26 倍。在国内采用表面工程解决设备零部件失效难题并取得重大经济效益的实例也不胜枚举。如中国设备管理协会技术委员会应用电弧喷涂技术成功地修复了长江三峡工程中挖泥船的发动机曲轴，当时如从日本购买新轴，加上运费和进口关税等需人民币 120 万元，从订购到交货需三个月以上，其停产损失更为可观，而采用电弧喷涂技术修复，总费用仅 3.5 万元，不足曲轴价格的 3%，其经济效益是十分明显的。装甲兵工程学院采用电刷镀技术修复或改造大型、重型、精密设备，尤其是进口设备，取得了十分突出的成效。北京首钢从比利时引进的二手连铸设备，以废钢价格廉价购进，其中有三百多件大轴承座和轧辊，经刷镀修复或改造已正常投入使用。唐山水泥机械厂由德国进口的 6.3 米立式车床、天津石油化纤公司由日本进口的 5.7 米连续缩聚搅拌釜主轴、齐鲁石化公司由日本进口的 328 块汇流铜排、燕山石化公司由日本进口的聚丙烯造粒机主减速箱、平圩电厂由美国进口的 60 万千瓦汽轮机等大型进口设备的修复或技术改造都是采用刷镀技术完成的，不仅解决了国家重点工程的急需，而且节约了大量的外汇。1994—1995 年期间，全军装备维修表面工程研究中心为铁道部大桥工程局施工的汕头海湾大桥和西陵长江大桥悬索鞍座进行了防腐和减摩表面处理，解决了施工中的关键问题，具有国际先进水平。在对军队装备的维修方面，该中心已采用电弧喷涂技术对多艘主战舰进行了防腐综合治理，预计防腐寿命均在 15 年以上，大大

提高了舰艇的在航率和战备机动性。1995 年该中心在海军新建造的油污水监测处理船上采用电弧喷涂技术进行了防腐综合治理，将热喷涂工艺直接运用于新船建造上，这在我国造船史上尚属首次。另外，清华大学和北京机电研究院采用激光固态相变硬化技术成功地对邮票打孔器进行了表面强化处理，过去用进口打孔器印刷 150 万张，用国产打孔器印刷 50 万张后就需要磨刃或报废，现在经激光处理后的打孔器印刷邮票 1000 万张仍可使用。

表面工程在节能、节材、降耗和提高经济效益上的作用是巨大的，仅国家重点推广的热喷涂和刷镀两项表面技术在“六五”和“七五”期间已创经济效益 32 亿元以上。

四、表面工程与高新技术

表面工程是随着高新技术的出现而发展起来的一项工程技术，不仅被用于一般设备零部件的防护、强化和修复，而且还为高新技术的发展提供了工艺及材料支持。在电子信息技术中表面工程可为其提供关键的薄膜材料及功能器件。如在大规模集成电路中以 SiO_2 为基的绝缘衬底上生长 Si 的薄膜技术。制作超大规模集成电路中最理想的功能材料是采用化学气相沉积的金刚石薄膜，它具有极为优异的导热性、高介电性和半导体性能。表面工程在制备新型材料方面具有特殊的效应。非晶态金属或合金具有优异的耐蚀性、耐磨性、高导磁性、高强韧性、低膨胀性等。采用气相沉积、电镀、刷镀、激光等表面技术可以获得非晶态薄膜或涂层。作为太阳能转换材料，非晶硅薄膜具有优良的光吸收能力，而且可以大面积涂敷，成本也比较低，是理想的光电转换材料。在超导材料研究方面，日本已开发了用激光制备高性能超导材料的技术，可制成超导带材料。国外已采用热喷涂技术制备超导层。另外，在生物医疗方面已采用等离子喷涂技术在不锈钢人工骨骼表面喷涂氧化物陶瓷层制造人工骨骼，解决了陶瓷层与人体肌肉生物相容性的难题。已采用在 Co-Cr-Mo 合金上喷涂羟基磷灰石涂层制备人造关节。用等离子喷涂法制造人工齿根的技术也已得到了应用。

五、开拓表面工程 发展先进制造技术

目前，许多发达国家都在研究和应用各种提高零件表面性能的新技术、新工艺，使得诸多表面技术不仅成为了现代制造技术中的重要工艺方法，而且在设备的技术改造和维修方面发挥了重要作用。我国的表面工程在过去的十几年中，已获得了重大的发展，在国民经济中发挥了重要作用，在研究水平与规模方面，可与国际水平相比，并有自己的独创和特色，在重大工程中的部分应用已达到国际先进水平。为了发展表面工程，推动先进制造技术发展，现提出如下建议：

加强表面工程学科的建设，深入开展表面工程基础理论的研究。

重点研究和发展复合表面技术，充分发挥各种工艺和材料的综合优势。

大力开展维修表面技术的应用及研究，为其在设计新设备和制造新产品过程中的应用积累经验。

加强表面工程在设备制造和新产品过程中的应用与研究，特别在提高产品的质量、品种、性能、效益等方面发挥作用。

逐步建立表面工程技术设计，全面、系统、综合应用、优化各种表面

技术，以提高产品质量和效益为中心，进行产品的表面工程技术设计。

重视表面工程设备的研制工作，不断提高表面工程的装备水平。

建立国家表面工程研究中心、产学研中心，以加强表面工程的研究开发与推广应用，加速实验室技术向工业应用的转化，为企业提供表面工程方面的技术、设备及建议等。

努力办好中国的《表面工程》杂志，开展表面工程的学术交流，积极开拓表面工程的国际交流。

表面工程在制造业中的应用及发展方兴未艾、前景广阔。相信在我国表面工程专家及工程技术人员共同努力下，随着表面工程学科及技术的发展及其向现实生产力的转化，各种表面技术将促进我国先进制造技术的发展，并有力地推动产品制造和设备维修技术的进步，从而全面提高我国经济增长质量和我国产品在国际市场上的竞争能力，并建立起具有我国特色的表面工程学科体系。

21 世纪高等工程教育的展望

翁史烈

上海交通大学

翁史烈 热力涡轮机专家。1932 年 5 月 21 日生于浙江宁波。1952 年毕业于上海交通大学。1962 年前苏联列宁格勒造船学院研究生毕业获科学技术副博士学位。先后获日本横滨国立大学名誉博士学位，日本昭和女子大学、日本拓殖大学名誉博士学位，俄罗斯圣彼得堡国家海洋技术大学名誉博士学位，乌克兰工程控制科学院院士称号。历任上海交通大学动力机械工程系教授、博士生导师，上海交通大学校长。国务院学位委员会委员、国家发明奖评审委员会特邀审查员。1995 年当选为中国工程院院士。主要从事大型航空涡轮风扇发动机的多用途改型研制工作，燃气轮机设计工作。

临近世纪之交，高等工程教育界都在以高度的使命感、紧迫感和跨世纪意识，预测着下个世纪科技、经济、社会的变化，以及它们对工程教育的影响，以便采取相应的对策。

一、对工程教育影响最大的五个趋势及对策

根据目前已经显示的迹象和人们的预测，对工程教育影响最大的有五个趋势，相应地需要考虑五个方向的对策。

（一）工程教育与科学研究、工业生产的一体化趋势及对策

在相当长的历史时期内，教育、科研、生产作为知识传播、知识发现、知识物化的三大社会活动是相互独立的。然而，到了现代，三者又出现了向一体化回归的势头，现代化大企业无一不是产学研紧密结合的综合体。一体化趋势的原因是：

第一，现代科学转化为技术、技术物化为产品的周期大大缩短（例如，从电动原理的发现到电动机的应用，隔了 56 年；而太阳能电池从原理到应用只用了 2 年时间），使生产技术和产品的更新空前加快，从而增强了生产对于科技研究和工程教育的依赖。

第二，古代的生产是人类对于自然物的浅层利用和变革，是凭借工匠们的直觉和经验来进行的。即使是 18 世纪问世的蒸汽机，它的原理也是来自工匠们对自然的直观，它的改进（如加密封圈以减少漏气；注润滑油以减少摩擦）也可以凭工匠的直觉和经验来实现。那时的生产技艺是同科学不相干的。到了 19 世纪，电机、内燃机的广泛应用，使科学进入了生产，科学与技术逐渐结合成一个整体。特别是本世纪 40 年代后崛起的高技术产业群，标志着人类对于自然界的深层采掘和深度加工。以四大技术为例，信息技术的发展迅猛，有人称之为信息“爆炸”。信息的物质载体——大规模集成电路和各种存贮器，从材料制备到微细加工，都离不开固体物理和表面物理所揭示的有关晶体结构和电子层运动的原理。核能作为新能源的代表，从铀和氦气的纯化，到裂变聚变反应的进行，应用的则是原子核内部亚核粒子作用的原理，各种新材料的出现标志着人类不再依赖自然界的恩赐，进入了在分子和电子

水平上设计与制备新材料的时代，生物工程的问世有可能突破自然物种的局限，通过细胞融合和基因重组，使人类成为创造新生命的“造物主”。上述种种，无一不是直接应用了分子、原子乃至亚原子层次物质运动的原理。所有这些在 $10^{-13} \sim 10^{-6}$ 米微观空间中进行的深层变革只能在科学研究、工程教育和工业生产三者的紧密结合中实现，从而使科学研究和工程教育不再外在于生产，而是成了现代生产过程中的必要环节。

科、教、产一体化的趋势，必然要在政治、经济、文化诸方面反映出来。对教育来说，工程教育与科研、生产既然不可分割，那么工科院校，特别是研究型理工大学的社会职能就必须扩展，除培养人才、发展科技外，还应成为高新技术的孵化器和辐射源，介入新产品的开发和新产业的形成。相应地，在学校内部则要建立起从基础科学、技术科学到工程技术的学科体系和从基础研究、应用研究到技术开发的成果转化通道。在学校外部则要大力发展同企业界的联合办学和产学研联合体，并力争成为新兴的科学工业园区的智力依托。

（二）科学技术的综合化趋势及对策

客观世界是个整体，仅仅因为人类认识能力的局限，才把它支解为不同学科的对象，从物理的、化学的、生理的不同角度来把握，而且越分越细，仅自然科学就形成了 4162 门学科。本世纪 40 年代后，分化为主趋势逐渐为综合为主趋势所取代，反映了“分则深、深则通、通则合”的规律。现在已经可以看到：先进的物质变革和能量转换过程中，生产人员不再直接面对机器操作，而是利用一切可能的技术手段：机械的、电子的、化学的乃至生物的手段，自动化地、智能化地、远程化地驾驭着过程的优化发展，生产过程和产品的技术集成度大大提高。下个世纪，科技的综合化会愈益明显。科学技术综合化的趋势要求大大拓宽工程教育的专业面，发展通用的综合技术教育。当前淡化专业，按系甚至按一级学科招生，设置第二学科或第二学位，培养复合型人才等措施，就顺应了这一趋势。相应地，在学科建设上，不仅仅要拓宽学校学科的覆盖面，而且要建立矩阵式的学科结构：不仅有按分化序列分级的学科体系，还要有按工程领域和对象综合的学科群（或工程研究中心），后者应跟随工程领域和对象的变化，有重组的活力。10 年前，上海交大鉴于科学技术整体化集成化的趋势，撤销教研室，建立学科组，允许跨系聘教师，促进了学科的分化和重组，形成了一批以支柱产业为服务对象的工程中心和研究院，其中国家模具 CAD 工程中心和上海市先进制造技术中心，就是十几门技术的集成。国外研究型大学如麻省理工学院等，这类跨学科机构有几十个之多。

（三）社会理性化发展趋势及对策

以自然物为对象的工程技术，不能不考虑人类对自然的关系。

人类对自然的关系，已经历过两个历史阶段：先是“恐惧与崇拜”的阶段，石油文明后进入“掠夺与征服”的阶段，把地球看成是可以无限制地索取的对象，把 GNP 的增长当成现代化的唯一指标，用高能耗高物耗高污染的方式从事生产，导致土壤退化、江河污染、天降酸雨、森林破坏、物种灭绝、矿藏锐减。不仅殃及子孙后代，连当代人自身的健康也受到损害。从这个意义上讲，20 世纪仍然可以看成是人类不够文明的“史前期”。新的世纪中，人类与自然的关系将按照理性化原则来处理。工程技术人员将从人类与自然和睦相处的角度规范自己的行为，采取高效低耗少污染以至无污染的生产技

术，包括生物方法和绿色技术来满足人们的需要，从根本上实现经济增长方式的转变和可持续发展的目标，使地球成了资源及能源可以再生、生态环境宜人的居所，即所谓用“生态文明”来取代“石油文明”。

为了社会的理性化发展，工程技术在生态、资源等领域深深地介入了社会，从而“工程”一词也从原有的“数学和自然科学方法在工、农业生产中应用”经典定义向社会领域外延，增强了工程教育的人文性和社会性。

处在这种背景下的工程院校，将不仅是物质文明的建设者，还将是具有高度精神文明的理性社会的塑造者。处在这样一种背景下的理工大学，将越来越多地参与国家和地区的决策，在发展经济、推动社会进步上成为高层领导的思想库和智囊团。相应地，工程教育的培养目标，也将由单纯的“技术工作者”变为“技术人文主义者”。他们有对全人类负责的高度责任心，有足够的人文社会科学素质，有把工程问题置于整个社会系统中，进行政治的、经济的、法律的、生态的、心理的以至于伦理的综合考虑的能力。其中一部分毕业生经过工程和社会两方面的锻炼，将成为地区乃至国家的领导人。

（四）国际化趋势及对策

交通和通信工具的发展，使地球成了一个村落（Global Village）。国际交往空前频繁，资源、能源、信息共享，国与国之间既互相竞争，又互相依存。这就要求高等教育在培养人才、发展科技和提供社会服务上有明确的“全球意识”，关注全球问题，大大发展跨国界的合作教育与科研，培养“世界上通用的人才”，融东西方文化于一体，集各国文明之所长。

（五）工程教育的终身化趋势及对策

生活条件的改善和医疗技术的进步，使人的寿命和就业期限不断延长。“人生七十古来稀”，现在成了“八十、九十不稀奇”。日本人在中年与老年之间加一个“实年”，意思是55—65岁这个年龄段还可以收获到果实，作出成就。另一方面，科学技术的加速发展使工程技术人员在他们的就业期内要面对越来越频繁的知识老化和技术更新。这样，到了下个世纪，在职工程技术人员继续教育在规模上将接近甚至超过学龄期的工程教育，从而出现两种工程教育体系并存的局面。在这种情况下，工科高校必然要拿出相当大的一部分力量来承担继续教育的任务。与此同时，学龄期工程教育的内容将进一步基础化，着眼于给工学士以获取知识、更新知识、适应生产技术和生活方式变化的能力和素质。

科学技术的发展既使终身教育成为必要，又为终身教育提供了可能。一是随着劳动生产率的提高，从事第一、第二产业的人数进一步减少，用于学习的闲暇时间有可能超过生产劳动的时间；二是随着信息技术在教学中的普及，继续教育将以更加灵活方便的方式而为广大在职工程技术人员所接受。21世纪必将成为名副其实的“学习的社会”，学习、休闲和创造性劳动的和谐结合，将使人类生活得更加美好。

二、21世纪高等工程教育发展战略的几个要点

以上分析了社会发展中的五大趋势，并一般地讨论对策，如果把这些对策集中起来，是不是能勾画出21世纪工程教育的概貌？概貌的形成，不仅要考虑科技和社会发展的趋势，而且还要研究教育自身，包括历史使命、社会功能和发展规律。当然，正如牛顿未能预见登月，达尔文未能预见基因工程一样，我们也难以对几十年后的事情有着清晰的勾画，但是在上述对策和教

育自身规律结合的基础上还是可以作大体的预测，在它的上面建立起我们工程教育的发展战略，其中几个要点值得强调指出：

（一）高等教育的历史使命

在社会发展中高等教育起什么作用？笼统地说，那就是百年大计，教育为本。但具体地说二者的联系如何体现？1990 年哈佛大学校长 Bok 在他的“Universities and the Future of America”一书中指出了美国社会存在的许多问题，包括中小学的问题、政府的低效率、贫穷现象的持续存在、失业、文盲、犯罪、家庭离异等等。不解决这些问题，经济即使一时好转，也不可能取得长时期的、稳定的繁荣，更为重要的是社会不可能变为真正有人情的文明社会。表面看来，高等教育对这些问题解决没有直接作用，但是分析了管理、工程、法律、公共行政等教育领域后，他有力地指出：高等教育对这些问题的解决，从而对经济的繁荣、社会的进步会产生意义巨大的作用。事实上，他还没有考虑到“生态文明”中工程教育的重大作用。所以许多有识之士都强调：对国家来说它要做的最重要的事情是增强研究和教育的投入以保持它在知识的前沿，从而确保经济的持续繁荣。

中国经济的迅猛发展，中外人士有口皆碑，但是在社会主义市场经济体制形成的过程中，无论是社会生活、经济发展还是生态环境中都存在着大量的性质严重的问题。对于这些与经济持续发展有关的问题的解决，中国高等教育有着不可推卸的历史责任。高等教育工作者必须有崇高的历史责任感，否则我们将不可能高屋建瓴地规划我们 21 世纪的教育发展。

（二）青年一代的素质

中国的青年一代朝气蓬勃，对未来充满着信心和希望。青年人的种种优点使我们深受鼓舞，激发了我们广大教师辛勤耕耘的积极性。然而，如何使青年了解社会、懂得生活、热爱事业、不怕艰难困苦、乐于无私奉献等方面我们还需要做大量的工作。综合国内外在 20 世纪所积累的经验，有两个方面的工作应该在 21 世纪的教育规划中继承发扬。

1. 加强教师与学生之间的沟通，言传身教。

世界著名大学不仅有很加强的研究力量，有开创性的科研成果，而且他们都非常重视教育，尤其是本科生教育。麻省理工学院有一年级的研讨会（Freshman seminar），斯坦福大学有二年级的研讨会（sophomore seminar），都是由资深教授出面组织，倡导学生与著名教授直接接触，启发学生对科学技术的兴趣，帮助学生处理学习（如选课、选系）和生活上的问题。三年级之后每 30—40 名学生也有相应的指导教师，实际上，这是一个言传身教的过程，教授们的学风、思路、道德风貌将对学生的成长起深刻的影响。我国大学在教书育人上也有许多好的经验。

2. 加强人文科学教育

在大学知识的传授中，强调通过人文科学的学习来促进学生尤其是工程学生的世界观、人生观、价值观的形成。

麻省理工学院在四个不同的历史时期成功地实现了四个转折，使自己不仅紧紧地跟上时代的步伐，而且还领导着工程教育发展的新潮流。其中第 10 任校长詹姆士·雷恩·基里安的贡献就是倡导在工程技术教育中，卓有成效地实施人文科学和社会科学教育，使成功的工程教育为创造更合理更美好的社会服务。事实上，加强工科学生的人文素质也有利于他们迎接社会化、综合化、一体化等发展趋势的挑战。

（三）工程教育的产学研结合

从国际范围看产学研结合的方向未必得到共识，有些外国大学校长认为：产学结合是 mixed blessing。一方面它导致学校的专利成倍增长，另一方面它使基础研究的学术气氛面临破坏的危机。他认为：现在要说清楚产学结合的净效益，为时过早！当然迄今为止的报告还未证实学术气氛面临破坏的担心。但是，学校经常被迫接受与企业之间的有问题的安排，这是难以承受的。

另一方面，从 80 年代以来，美国工程教育界在美国国家科学基金会、美国教育部、美国工程师学会等支持下，根据经济发展的状况，对高等工程教育进行了长期的调查、研究和讨论，提出了许多改革建议，其中一个重要的动向是所谓的回归工程，如果说在 40~50 年代尤其是苏联人造卫星上天后，美国工程教育的改革经历着由工程实践向工程科学过渡的话，那么在 90 年代许多著名大学都提出了工程教育要从工程科学回归到工程实践。例如，MIT 工学院院长乔尔·莫西斯提出了该学院 1994—1998 年长期规划《大工程观与工程集成教育》，并解释说“大工程观的术语是对为工程实际服务的工程教育的一种回归。而与研究导向的工程科学观相对立”。为了实现回归工程，许多学校采取了有力的措施，其中最重要的措施之一，就是产、学、研结合。以哈维·马德学院为例，在学生在校期间，安排一年时间跨度的真刀真枪的毕业设计，设计项目完全是直接为公司解决实际问题（每个公司提供 3.4 万美元的经费，最后得到的知识产权可能价值几百万元。三年级学生开始做四年级学生的助手，到四年级就正式进入课题组参与研究设计），都有产学联合的五年一贯制的学士硕士学位混合计划。尽管国际上对产学结合的观点未必统一，但是从三大社会实践一体化发展趋势以及我们本身的实际体会来看，21 世纪产、学、研更紧密的结合是毫无疑问的。从现在起要创造条件促进结合，发展办学的新模式。当然由此产生的负面效应，要引进足够的注意。

（四）学校管理体制改革

国家范围的办学体制改革，包括中央与地方的关系，教委与其它部委的关系，已在北京、上海、四川、杭州等地逐步推开，总体上看其方向是符合上述五大趋势的需要的。至于学校内部的管理体制改革好像已经是老生常谈，不足挂齿了。其实并非如此！与过去相比学校的情况已经发生了极其明显的变化，而且还要继续变化。现有的已经改革的管理体制远远不能满足新情况的需要！学校已经从一个封闭体系中解脱出来，成为一个与社会各界有着千丝万缕联系的开放式的办学实体。从上海交大的情况来看：

1. 与国内外的企业、研究单位、政府部门、高等学校建立起合作、合资办学的关系（例如欧共体的中欧国际工商学院，电力部的电力学院，安泰保险公司的交大安泰管理学院，GM 公司的发动机研究所，有数十个校外单位参加的董事会组织，IBM 公司的网络显示中心，Sun 公司的制造业仿真实验中心，德国巴符州的先进制造工程技术培训中心，与上海汽车总公司的合作，上海市先进制造工程技术研究中心等等）；

2. 校办产业与国内外著名企业建立的合资关系，社会股民们更以直接投资参与了学校控股的股份有限公司的经营活动和权益分配；

3. 基础研究、应用研究的成果到生产前沿开始有了新的转化通道（例如国家工程研究中心，上海市的工程研究中心，企业合建的工程研究中心）；

4. 一体化、综合化、社会化的发展趋势已经引进学科重组，系所重组；

5.学校内部的信息流、能量流、资金流、数据流、指令流，无论从数量上，还是从性质上都起了重大的变化。

在这样的情况下，学校已有的管理体系要驾驭、调控，处处显得力不从心，非常被动，如不进一步改革，后果会是非常严重！

下一步管理体制改革的重点将是信息管理、资金筹措、公共关系、系科重组等。

21 世纪的中国高等教育有着宽阔的前景，但是需要集思广益，全面规划，希望上述一孔之见能引起讨论，得到大家批评指正！

关于先进制造技术

路甬祥

中国科学院

路甬祥 流体传动及控制专家。1942 年 4 月 28 日生于浙江慈溪。1964 年毕业于浙江大学，1981 年在德国亚琛大学获博士学位。曾任浙江大学校长。现任中国科学院常务副院长、教授。1991 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。主要从事流体传动与控制领域的工作。

“创新是一个民族进步的灵魂，是国家兴旺发达不竭的动力。”“一个没有创新能力的民族，难以屹立于世界民族之林。”江泽民主席在科学大会上对于“创新”意义的高度概括，振聋发聩。

创新（Innovation）与发现（Discover）不同，它主要不是对自然现象新的发现和认识，而是人们有目的的一种创造行为。包括文化艺术创新，科学思想、方法的创新，技术与工业创新，经营与管理创新，政治、军事与经济战略创新等等。

迄今为止，人类所拥有的物质和精神文明都是人类创新成果的历史沉淀和发展。在世界范围内，永不止息的创新活动正创造着人类现代文明和更加灿烂的明天。

本文着重讨论与当代经济发展关系最为直接，影响也最为广泛和深远的现代技术与工业创新之典范——先进制造技术。

先进制造技术（Advanced Manufacturing Technology）这一概念是美国于 80 年代后期首先提出的。然而其概念的进化和创新技术要素的形成、集成和发展是渐进的。

对历史作一简要回顾将有助于我们对先进制造技术本质和特点的理解，有助于对其发展趋势和基本要素的把握，有助于制订和实施符合实际的发展战略和策略。

一、历史的回顾

制造技术为满足社会需求服务，而又依赖于社会需求和生产力发展的水平，依赖于科学技术发展的整体水平。

在石器时代，人类利用天然石料和动植物骨骼、纤维、枝杆制作简单工具，生产方式以采集和利用自然为主。到了青铜器和铁器时代，人们开始采矿、冶金、铸锻工具、纺织成衣，打造工具与车船，采取作坊式手工生产方式，满足以农业为主的自然经济。

1765 年瓦特发明蒸汽机，为机器大生产提供了动力，纺织业、机器制造业取得革命性的变化——引发了一场工业革命。由于航海业的发展，市场也扩大了，需求刺激了工业创新的浪潮。英国成了当时世界纺织、造纸和印刷、煤炭和钢铁生产的中心。制造业也得到了发展，焦煤炼铁、蒸汽锻锯、切削机床相继问世。近代制造业初步形成。

19 世纪电磁效应的发现，法拉第电磁感应定律和麦克斯韦尔电磁场理论的建立，为电机的发明奠定了科学基础。1866 年德国的维尔纳-西门子发明了自激发电机，1878 年爱迪生发明白炽灯，1882 年在纽约建立了世界上第一座商业性发电站，电气化的时代来到了。电力与电机改变了机器结构，开拓了机电制造业的新时代。

19 世纪末，20 世纪初内燃机发明（1876 年德国工程师奥托发明四冲程煤气内燃机，1883 年戴姆勒发明了汽油机），汽车开始进入欧美家庭，引起了制造业新的革命，自动机床、自动线相继问世，工业制造泰勒制管理理论应运而生，并为二次大战期间的大规模军工生产制造准备了技术条件和管理经验。二战后人类很快迎来了电子和信息时代。通讯的普及，电子技术的发展，计算机的发展和应用，半导体集成电路的出现，市场需求的多元化和商业竞争的激烈，引起了产品结构和产品制造的一场革命，机电一体化（Mechatronics），NC，CAD/CAM 的时代到来了。适应多品种生产的柔性制造系统（FMS）出现了。日本汽车制造业就是依靠小型化、省油设计及能灵活满足用户多样化需求的 FMS 制造技术超越了汽车大国美国。

借助计算机为核心实现信息、物流、工艺集成为特点的计算机辅助集成制造系统（CIMS）技术出现了，进而又出现了平行工程（Concurrent Engineering）、敏捷制造系统（Agile Manufacturing）、清洁生产（Clean Production）等概念。

如果我们将制造技术发展阶段和社会经济发展阶段互相对照，便可发现：

在资源经济时代，社会需求主流为温饱型，产品粗放，品质单一，生产技术相对落后，手工生产辅以简单机械化设备，以机械替代繁重体力的近代工业制造方式。

在能源经济时代，社会需求主流转为小康型，产品质量要求提高，数量激增，但在款式、造型等方面的要求尚处次要，采取电气机械自动化，刚性生产线为特征，机器不但替代繁重体力劳动，提高生产效率，而且在保证质量一致性方面发挥着重要作用。制造业进入现代工业生产方式。市场仍是卖方主导方式。

社会进入信息时代，社会需求主流转向富裕型，商品需求多样化要求上升，质量、款式、交货期、品质价格比成为市场竞争的决定性因素，产品和制造过程的环保、物耗、能耗要求更加严苛。制造技术进入后现代化方式。生产过程要求以灵捷、清洁、高效、优质、廉价以赢得市场。社会已转为买方市场。

对应三个经济时代的制造技术，对于全世界而言，按发达国家的状态可比较清晰地分辨出转换期，但对不同国家和地区而言，其过渡和重叠期可延续相当长的历史时期。

我国从整体上看，尚处在相应能源时代的制造水平，但在某些行业和先进企业恰已采用了适应信息时代的先进制造技术。国际化的剧烈经济竞争，要求我们尽早采用具有中国特点和行业特点的先进制造技术。

二、先进制造技术的特征和技术要素

制造业是国民经济的基础产业，凡是制造物质产品的行业均可称为制造业。制造业不仅生产消费类产品满足市场需求，为产业部门提供生产设备，

为农业与公共工程提供工程设施，为第三产业提供技术装备与服务设施，为交通运输部门提供汽车、船舶和飞机及相关的道路、机场、港口设备，为科学研究部门提供科研设备和仪器，为医疗、环保部门提供诊断、治疗、检查和治理设备，为国防提供武器和装备。制造技术的水平和制造业的实力反映一个国家的生产力水平、国防能力，决定着国家的经济竞争力和综合国力的强弱。决定一个国家的产品质量、竞争能力，决定人民的生活水平、质量。

表 1 近代世界的经济特征和制造技术特点

| | | |
|---------------------------------|-------------------|--------------------------|
| 资源经济时代 1760 年- 手工及机械化制造方式 | 能源经济时代 1950 年- | 信息经济时代 1980- |
| 温饱型需求 | 小康型需求 | 富裕型需求 |
| 满足功能、耐用、价廉 | 品质、价廉，充分供应 | 款式、品质、交货期、价格比 |
| 物料、能耗较大 | 节能、省料 | 节能、节料、清洁生产 |
| 手工式 + 机械化 | 电气自动化 | 机电一体化、智能化、集成化 |
| 多品种、少量、定制 | 少品种、大批量、规格化 | 多品种单件、小批量、定制、商品寿命短 周期 |
| 产品 + 维修服务 | 产品 + 易损件更换 | 产品-售后软件服务 |
| 劳动力、原料成本大 | 制造设备折旧和原料成本 | 商品开发成本、技术设备成本、行销成本 |
| | 卖方主宰市场 | 买方主宰市场 |

*先进制造技术是制造技术的最新发展，其概念超越了传统的制造技术和工厂和车间的边界。包容了从市场需求、创新设计、工艺技术、生产过程组织与监控、市场信息反馈在内的工程系统。是以先进制造工艺技术、计算机应用技术为核心的信息、设计方法、工艺技术、物流工程及相应的管理工程集成的现代制造工程，是不断更新发展的高技术体系。

*先进制造技术依托迄今为止的材料、器件、设计理论与方法、制造工艺、企业管理、市场行销、计算机技术、讯息技术等技术进展，是先进技术的工程集成。

*先进制造技术通过技术和管理的优化组合，期望通过产品品质、成本、交货期、性能价格比的优化，取得最佳市场竞争力。

*先进制造技术既面向市场，又面向产品和行业的生产特点。如对于汽车工业、电子工业、纺织工业、食品工业等显然既有共性又各有特点的产业。

先进制造技术是不断吸取机械设计、工艺技术、电子、信息、材料、能源及现代化管理等方面的科技成果，系统地应用于市场分析、产品设计、制造工程、检测监控，生产管理和质量保证、售后服务等设计制造的全过程，实现优质、高效、低耗、清洁、灵捷生产，取得具有市场竞争能力的经济技术综合效果的现代制造技术。

其本质是：信息 + 制造工艺技术 + 物流技术 + 现代管理技术之集合。

近 30 年来先进制造技术大体经历了 4 个发展阶段：

1) 以数控机床、加工中心和工业机器人为代表的柔性制造单元阶段（CAM）（60—70 年代）。

2) 以柔性制造单元加自动或半自动物流输送组合而成的柔性制造系统（FMS），仍以分布式生产过程控制为特点。（70-80 年代）。

3) 信息、工艺、物流、计算机集成控制为特点的集成阶段 (CIMS) (80—90 年代)。

4) 以设计智能化、单元加工过程智能化和系统整体管理智能化为特征的智能集成制造系统阶段。

在发达国家第一、第二阶段, 技术已经成熟并实现了产业化, 第三阶段也尚在开发完善阶段, 智能化集成制造技术尚在研究探索中。有人将计算机智能集成制造技术称为 21 世纪的先进制造技术。

先进制造技术要素与前沿:

——现代设计理论与方法

先进的设计是决定产品品质、环境相容性、经济性、适应需求的基础, 设计的水平、质量和效率是决定产品自主开发能力和市场竞争能力的首要环节。现代设计理论与方法表现为功能结构和价格、安全性、环境相容性、工业造型等的综合优化设计; 表现为设计过程、开发过程与生产过程的紧密结合趋势; 表现为计算机辅助设计工具和包容丰富的数据库支持体系在内的 CAD 技术。出现了:

*并行工程 (CE) 概念

即将产品的市场分析、设计、工艺设计、生产计划与加工、质量保证和检测等同步规划, 实现产品设计开发过程的并行实施, 缩短产品开发周期。

*虚拟制造技术 (Virtual Manufacturing)

以计算机三维虚拟现实和多媒体技术实现建模、仿真, 虚拟产品造型、结构、功能及工艺过程, 从而压缩或甚至取消制作原型机的过程或原型机的制造系统, 从而缩短设计-制造周期, 降低投资和开发成本。

——先进制造工艺

先进制造工艺与设备是先进制造系统的装备与工艺基础, 是实现优质、高效、低耗、清洁生产的基础, 是保证产品质量和市场竞争的基础。因此, 先进的制造工艺和设备是计算机集成制造技术的另一根支柱。

*少无余量精密成型技术

金属超塑性的发现, 金属精密铸锻冲压工艺的进步, 已可实现不经切削加工或极少加工余量即可成形装配, 这是实现高效清洁生产的关键技术。涉及合金材料、模具、成型工艺及设备等技术。

*精密、超精密加工技术

大致可分 3 个层次, 一是用于汽车、飞机、精密机械的微米级 (μm) 精密加工; 二是用于磁盘磁鼓制造的亚微米级 ($0.01\mu\text{m}$) 精密加工; 三是用于超精密光电子器件的毫微米级 ($0.001\mu\text{m}$) 精密加工。

*新型材料的成型与加工技术

如高分子材料、复合材料、工程陶瓷、超硬材料的成型和加工。新型材料的采用, 不仅改变产品结构和性能, 而且使工艺发生了革命, 成本显著下降。

*构件或材料之间的联接技术

在复合材料式精密零件之间的粘接、精密焊接、铆接等联接技术。

*表面新技术

表面的改性、修饰、涂层技术 (外延、溅射、原子沉积、离子注入、光刻等)。

——自动控制技术

***传感及控制技术**

工业用传感器、反馈执行单元，无损、非接触在线检测技术。

***测量及检验技术**

数字化接触及非接触式精密尺寸、轮廓测量仪、检验软件。

***焊接、搬运、装配机器人**

有视觉或传感功能的焊接装配机器人，及快速、准确定位的气动、液动、电动搬运系统。

***环保技术**

清洁生产，废弃物控制与回收。

——信息技术和综合自动化

在数据库技术，接口与通讯，集成框架软件工程，人工智能专家系统和神经网络，决策支持系统，系统监督与诊断等基础信息技术的基础上，实现将企业内外市场、技术、生产、经营有机集成，实行统一控制与协调的 CIMS。并在此基础上引入智能技术，使 CIMS 具有自动监测、补偿、优化、保护等功能，进一步提高系统的质量、效率和可靠性，即智能制造系统（IMS）。

——管理技术

包括数据标准、工艺标准、质量标准、生产计划与控制、质量管理、市场分析、用户与员工培训等先进管理基础要素。

最终形成

***精益生产或敏捷制造技术**

前者以准时生产（JIT）、成组技术（GT）和全面质量管理（TQM）为支柱，并引入并行工程和整体优化概念。在空间上和时间上合理配置和利用生产要素，发挥以人为核心的整体制造系统效益。后者以柔性生产技术和动态组织结构为特点以高素质协同良好的工作人员为核心，实行企业间网络集成，形成快速响应市场的社会化制造体系。

表 2、3 分别列出美国的先进制造技术计划（AMT），韩国高级先进技术国家计划（G—7）和日本的智能制造技术计划（IMS）。

（1）美国的先进制造技术（AMT）计划

AMT 计划是美国联邦政府科学、工程和技术协调委员会（SCCSET）的六大科研和开发计划之一，于 1992 年 6 月获批准实施。其目的是加速先进制造技术的发展与应用，提高制造业的能力，以满足国家的需要。

AMT 计划 1994 年度财政预算为 13.85 亿美元，有商业部、国防部、能源部、内务部、农业部、环保局、宇航局及国家科学基金会等 8 个联邦政府机构介入，各机构结合本部门的情况制定了具体的专项计划。1995 年教育部、劳动部、运输部等 5 个机构加入了该计划。

（2）韩国 G7 计划中的先进制造系统专项计划

韩国于 1991 年 8 月正式提出实施“高级先进技术国家计划”，即著名的 G7 计划。

G7 制成品技术开发计划中的“先进制造系统”项目是一个将市场需求、设计、车间制造和分销集成在一起的系统，旨在改进产品质量，提高生产率，增强国际竞争力，使韩国的制造技术达到世界一流水平。

该项目由韩国工商部主管，投资总额为 5.95 亿美元，其中政府资助 2.77 亿美元，企业筹集 3.18 亿美元。

（3）日本的智能制造系统（IMS）计划

日本在优先发展先进制造技术的三个“振兴法”的基础上，于 1990 年提出了智能制造系统（IMS）计划，其目的是要把日本的制造技术同美国软件技术和西欧的精密仪表等特长结合起来，创造出先进的智能制造系统，1993 年 3 月，日、美等国家在东京建立了一个世界级的制造中心，并对全功能通用控制系统、加工过程的无污染制造、全球集成制造、全局并行工程、设计制造知识库、快速成型技术等 6 个项目开发研究，投资 10 亿美元。这 6 个项目共有来自各参加国的 73 个企业和 67 个大学、研究机构参加，经过近两年的实施，均获得了成功。该计划经过 5 年调研和可行性试验，决定于 1995 年 1 月正式启动，为期 10 年，总投资为 40 亿美元。

综观各国先进制造技术计划的制定和实施情况，可以看到，先进制造技术发展有其深刻的国际经济竞争的背景，与其它技术计划不同之处在于，它提出时即以提高国际竞争力、促进经济增长和提高国家综合实力为目标，既注重技术的超前性、创新性但更注重来自产业界的实际需求，尤其是汽车工业、电子工业等支柱产业的发展需求；在技术选择上注重系统集成技术与工艺装备研究开发并重，通过信息技术和自动化技术的引入使传统工艺装备升级，并将现代化管理放在应有的位置上；同时，也可看到各国在发展先进制造技术的过程中，政府通过若干计划的实施起到了关键的引导和调控作用，并形成了一套有效的研究开发及推广应用的管理机制。

表 2 美国 AMT 计划项目分类

| | | |
|--|--|---|
| 设计技术 | · 连接和装配 连接（焊接、铆接等） 装配（机械的、电子的） 电子封装 | · 机器与工具技术 机器技术 工具技术 自动材料搬运技术 机械手 计量技术 |
| · 产品、工艺过程和工厂设计 计算机辅助设计（CAD） 适于加工和装配的设计 工艺过程建模和仿真 工艺规程设计 系统工程和集成 工作环境设计 | · 测量及检验技术 测量技术 检验规程编制 | · 传感器及控制技术 单机、加工单元及过程控制 执行机构 传感器与传感器组合 生产作业计划 |
| · 快速原型制造 | · 环保技术 减少废弃物 闭环回收 能量转换 | · 其他辅助技术 |
| · 并行工程 | · 维修技术 | |
| · 其他技术 | · 其他技术 设施和设备 设备维护 喷涂及表面精整 包装技术（非电子的） | 制造基础设施 |
| 制造工艺 | 辅助设计 · 信息技术 接口和通信 数据库技术 集成框架 软件工程 人工智能、专家系统和神经网络 | · 质量管理 全面质量管理 持续改善 用户满意方面 |
| · 材料生产工艺 金属 电子材料 陶瓷 聚合物 化学材料（无机、药用材料等） 食品、纤维及农用材料 生物材料 多相/混合物 | | · 用户/供应商交互作用 |
| · 加工工艺 切削加工 铸造、锻造、制模 | | · 劳动力培训与教育 技术培训 继续教育 大学生的教育 培训技术 |
| 成型加工 热处理 表面涂层及改性 电子工业工艺（制版印刷、 光刻/淀积、离子注入） 复合材料工艺（预浸修理、 纤维卷绕、树脂转换模 塑、纤维束置放等） | 决策支持系统 · 标准和框架 数据标准 产品定义标准 工艺标准 检验标准 接口框架 | · 全局监督和基准评测 战略全局监控 基准评测及性能评价 技术获取及应用 · 其他基础设施 |

表 3 韩国 G7 计划先进制造系统项目分类

| 系统 | 领域 | 项目 |
|------------------|---------|---|
| 系统 1： 共性基础技术 | 开放式集成系统 | 关键单元软件 设计自动化 并行工程 网络系统 物料搬运系统 系统仿真 管理软件 系统开发 系统集成 |
| | 标准和性能评价 | 关于 IMS 战略（智能制造系统） 标准化 性能评价 产出评价和运营战略 |
| 系统 2： 下一代加工系统 | 加工设备开发 | 5 轴加工中心 高精度、高生产率加工中心 超精非球面加工中心 CNC 磨削中心 CNC 滚球丝杠磨床 |
| | 机械技术 | 高精度加工和测量 高性能主轴 柔性外围设备 主轴和伺服电机及驱动器 CNC 控制器 |
| | 运营技术 | 智能生产计划和控制 数据库和技术信息管理 系统监督和诊断 |
| | 集成技术 | CAD/CAM/CAE 智能 CAPP 物料搬运系统 系统集成 |

| 系统 | 领域 | 项目 |
|---------------------------|-----------------------|--|
| 系统 3： 电子产品的装配 和检验系统 | 下一代印刷线路版装配 和检验系统 | 电子元件插装表面安装 COBTABB 附件 印刷线路版 高速精密线路测量 |
| | 用于装配和制造系统的 高性能机械机构 | 柔性装配的外围设备 装配用高性能机器人技术 图像检测系统 |
| | 先进装配用的基本技术 | 高密度印刷线路版的设计和制造 高精密装配 无纤料的组合 清洁技术 |
| | 系统运行和集成 | 自动诊断和运行控制 自动装载和卸载 生产计划和控制 生产信息和动作的数据库 系统集成 |

三、我国先进制造技术发展之管见

*市场经济发展为先进制造技术的发展提供了广阔的市场，提出了前所未有的需求。市场竞争对产品质量、成本、款式和交货期提出了越来越高的要求。经济的发展使中国经济迅速增长，人民生活水平不断提高，社会需求和人民消费呈前所未有的多样化并迅速发展的趋势。至本世纪末，下世纪初，中国将成为世界上最大的经济实体之一。12 亿人口的巨大国内市场呼唤中国的先进制造技术，也为其发展提供了前所未有的环境和条件。

*我国对外贸易不断增长，中国复关已势在必行，我国经济已逐步融入世界经济合作与竞争环境之中。至下世纪中叶，中国将完成小平同志为我国设计的第三步目标——达到中等国家的水平，并在此基础上继续前进。剧烈的国际竞争，更要求我国制造业迅速地接近和达到国际上先进制造技术的水平。否则，中国的产品很难在国际市场上竞争，甚至我国的国内市场也可能在国际竞争中被挤占和瓜分。

面对剧烈的国际竞争，我国先进制造技术的发展已刻不容缓。

*现代科学技术为先进制造技术的发展提供了技术基础。

70 年代以后由于微电子、计算机技术的发展，为设计、制造、行销过程的信息管理与计算机辅助设计制造创造了前所未有的条件；近代制造技术及其自动化的发展，为先进制造技术积累了现代工艺和管理文明；运筹学、专家系统、仿真技术、人工智能等发展为制造技术走向智能化创造了技术前提；先进的工艺如精密成型、超精密加工、精细焊接、表面技术、在线检测等技术的发展为制造技术提供了新的工艺基础。至 80 年代世界先进制造技术，已走过了起步、发展与成熟期，进入了以人机一体智能化为特征的后发展时期。

*我国虽然是一个发展中国家，但经过四十多年的发展，制造技术有相当基础。尤其是近 16 年来，实行开放政策，经引进技术、攻关、“863”等科技计划研究开发，在现代制造技术的核心技术（NC、CAD、CAM、CAT、MIS）

等已有相当基础，并建立了 CIMS 工程技术研究中心、机器人国家研究中心，建立了一批 CIMS 工厂示范工程。大学已普遍改进机器制造教育课程，引入了现代制造技术的有关内容，为现代制造技术人才培养作了一定准备。

我国是一个后发展国家，我们应该正视机遇和挑战，制定正确战略，走自主、开放、吸收、创新，迎头赶上之路。

我国是一个人口众多，而人均资源相对短缺的国家。实现第三阶段战略目标达到中等发达国家水平，必须建设起优质高效、低消耗、清洁的能灵活适应和满足社会需求和国际竞争需要的先进制造业。但我国，技改投入相对不足，原有技术基础和研究开发能力还比较薄弱，技术设备和生产管理和市场经营还相对落后。我们应该在自力更生的基础上，广泛吸收世界各国的经验，走一条具有自身特色，适合我国国情的道路：

*扎扎实实发展机械制造共性基础技术，提高整个机器制造工业的素质与水平。不断更新和提高机械设计理论和方法，推广普及 CAD 技术，更新设计规范 and 准则，建立和完善现代机械设计数据库和设计工作平台和开发工具。提高制造工艺技术水平，尤其是高效、节能、精细、清洁的加工工艺，如金刚石切削精密加工、激光加工、精密切削刀具、精密模具、精密铸锻、自动保护焊接技术、在线测量技术、伺服传动、工业控制等。

*踏踏实实提高制造业现代化管理水平。

现代制造技术是建筑在制造业现代化管理基础之上，又接受其保证的。因此必须踏踏实实地提高我国制造业管理水平。现代管理的核心是信息管理和物流管理、质量管理、生产过程和市场信息管理，其宗旨在于保证生产和流通过程和品质、效率。应踏踏实实建立符合现代要求，与国际接轨的科学管理模式和计算机辅助管理体系，不但是提高制造业水平和效益的有效措施，也是实施现代先进制造技术的基础。为此，应着力抓好生产模式和生产组织体制的改革和管理软件的研究开发，加强企业管理人才的教育培养与训练。全面提高我国制造业的现代文明水平，实现优质、高效、低耗、清洁、柔性生产。为先进制造技术的发展奠定良好与坚实的基础。

*政府、企业与社会积极鼓励创新精神，促进设计、制造工艺管理经营、市场行销等方面的创新意识和工业创新行为。

*集中力量有计划、有重点、有选择地组织引进、消化、吸收、开发和创新，建立发展起自主的现代制造自动化单元技术，发展符合我国国情特点的以人为核心的人机一体化制造自动化系统技术。

应集中力量增加投入，建立与发展我国自主的 CAD、NC、CAM、CAT、MIS、加工中心、工业机器人、数字测量仪等制造自动化单元技术。引进并行工程、敏捷制造、精益（LP）生产等概念，发展经济有效的以人为核心的人机一体型 FMS、CIMS 系统技术。不盲目地追求所谓“全盘自动化”，重视人的智慧劳动，致力发展以人为核心，人机协调，优势互补，智能高效的现代制造系统。

*选择部署若干制造业的基础、共性技术和关键技术的研究发展中心，选择建设若干具有行业制造特点的先进制造技术示范型工厂。采用国家扶持，面向市场，自主开发，滚动发展模式。

当前特别需要打破行业界线，择优选择研究开发基地、示范工厂，选一批产品市场大、效益好、管理水平较高又具有行业特点的厂家试点，例如：汽车、轻工、家电、建筑机械、电子、纺织、通讯行业等，并适当考虑地区

布局以求带动一片。

***完善并实施有效政策**

政府应在促进制造业现代化方面起主导作用，引导扶持激励技术进步的主体——企业的自觉行为。在市场经济条件下，国家仍应制订科学的制造产业发展规划和制造技术进步总体规划和相应政策。

对于基础共性技术和关键性技术的引进消化创新，国家要增加支持强度，实行择优支持政策；对技术转移和推广应尊重和保护知识产权，实行激励技术进步、鼓励技术创新政策。即使在市场经济条件下，一些先进技术推广和技术改造仍需国家扶持，日本、德国、韩国都有过成功的先例。应采取税收优惠、快速折旧、信贷、融资、风险投资等有效经济和法规手段推动和鼓励。当前正值发达国家制造业加速向第三世界转移的时期，我们应抓住机遇，在开放中求发展，但对引进外资，建立合资企业和国际合作，应进行有利于我国制造技术进步，有利行业整体布局，有利于提高我国制造业在国际市场的竞争能力为目标的政策引导，提高我国制造业国际合作的水平、层次和整体效益。

***建立和完善国内和国际市场及技术信息网与数据库。**

先进制造技术是以市场为面向，又以社会为生产依托的，它是一开放的生产体系。我们应建立国内和国际市场的技术信息网和数据库。为先进制造技术的产品设计创意、生产组织经营、技术选优集成、行销服务、反馈提供必要的信息环境和发展平台。建议在北京、上海等中心城市，或选机械、电子、轻工等典型行业建立信息中心，并实行信息共享。

***强化教育与培训**

发展和推广先进制造技术关键在人才，不仅需要设计研究开发人才，需要工艺和设备工程师、经营管理人才，还需要大批高素质的技师和技工。

应在全国依托若干高校或制造技术工程技术研究与发展中心，更新教育内容与方法，加强高级人才的培养和继续工程教育，培养一支高素质的了解和掌握制造技术发展前沿的工程技术、经营管理和研究开发骨干队伍，提高我国制造技术创新能力和加速制造新技术推广传播的速率。同时应通过职业教育培训一大批有较高职业素养的技师和技工，使先进制造技术的发展建筑在人才保证之上。

差分 GPS 与广域 GPS 增强

魏子卿

总参谋部测绘研究所

魏子卿 测绘专家。1937 年 4 月 15 日生于河南睢县。1960 年毕业于中国人民解放军测绘学院。现任中国人民解放军总参谋部测绘研究员。1995 年当选为中国工程院院士。先后主持和参与了海上大气折光修正、长测程气体激光测距仪研制、卫星摄影定位、卫星多普勒定位系统 (GPS) 等研究项目。

一、背景

大约 6000 年以前,人类已经创造了到远地航行的导航方法,古代波里尼西亚人 (Polynesians) 和近代海员导航使用自然恒星的角度测量。近代随着无线电的发展,诞生了无线电导航,开始用地基发射机,如无线电信标、VOL、Loran 和 Omega 等,后来又发展到使用人造卫星技术,即用更精确的视线无线电导航。卫星导航出现在 60 年代,美国海军导航卫星系统(称为 Transit)是第一个运行的导航卫星系统,接着又有前苏联的 Ci-cada 系统。这两个系统的概念类似,均基于多普勒原理。Transit 卫星为圆极轨道,高度为 1075 公里,绕地球一周 107 分钟。每个卫星是一个自主的导航信标,发射 150 和 400MHz 信号、时标和导航电文。卫星过地平线以上时,用户有机会得到他的水平坐标,两次定位之间的平均时间间隔,从 35 到 100 分钟,依纬度和星座的卫星数而定。Transit 卫星系统不具备连续导航的能力。

全球定位系统 (GPS) 美国国防部主持研制的第二代卫星导航系统,1973 年开始研制,1994 年正式投入运行。系统星座由 24 颗卫星组成。GPS 卫星用两个频率发射单向测距信号,即 L1 频率 1575.42MHz 和 L2 频率 1227.6MHz,还广播卫星的估计位置。用户同时测量到 4 颗卫星的距离,即可解出四个未知数,它们通常是纬度、经度、高程和用户钟的改正数。如果高程或时间已知,用的卫星数可以减少。GPS 提供两种定位服务,即基于精码 (P 码) 的精密定位服务 (PPS) 和基于粗码 (C/A) 的标准定位服务 (SPS)。PPS 信号被加密,非授权用户不能使用,大部分民间用户只能依赖 C/A 码或 SPS。

尽管 GPS 是一个较好的导航定位系统,但是它为民间用户提供的标准定位服务 (SPS) 不能完全满足导航在精度、可用性和完好性方面的要求。首先说精度。美国实行选择可用性 (Selective Availability) 措施,引入卫星钟抖动和广播星历误差人为地降低了 C/A 信号的精度。测距误差典型地为 20 米,导致水平位置精度达 100 米 (2drms),垂直位置精度达 156 米 (2drms),这种精度仅满足飞机航路导航和非精密进近以及在海洋船只导航的要求,而不能满足诸如飞机 I 类精密进近、舰船进港靠泊、海图测量以及许多陆地应用的需要。船只进港和靠泊要求水平精度 8—20 米 (2drms),I 类精密进近要求水平精度 17.1 米 (2drms),垂直精度 4.1 米 (2drms),而 II 类精密进近着陆要求水平精度 4.1 米 (2drms),垂直精度 0.6 米 (2drms)。海图测量要求的定位精度好于 10 米 (2drms)。

再说可用性。可用性为以百分数表示的系统服务为导航者提供的可用时

间。高速公路行驶的汽车时间可用性要求为 99.7%，某些铁路应用可用性要求达 100%。飞机非精密进近可用性要求为 99.999%，I 类精密进近要求为 99.75%。用 25 颗卫星的 GPS 星座的模拟计算表明，在航路可用性为 98.58%，不可用（outage）时间为 35 分钟，在终端可用性为 96.53%，不可用时间达 70 分钟，非精密进近可用性为 67.26%，不可用时间达 295 分钟。单纯 GPS 不能满足许多应用的可用性要求，看来 GPS 和 GLONASS 组合是必要的。

完好性是导航性能的另一项重要指标。完好性指示当系统不能用时系统向用户提供实时而有效的报警之能力。完好性的风险是未检测出导致丧失规定精度的故障的概率。航空用户组和某些陆地用户组对完好性有很高的要求。系统故障到通知给用户的时间（告警时间），对于飞机航路和非精密进近阶段要求分别为 30 秒和 10 秒；对于精密进近要求 6 秒，完好性风险要求为 $1-3.3 \times 10^{-7}$ 。对于某些陆地运输应用，告警时间要求则高达 1 秒。

GPS 系统结构违反了实现高完好性要求的两个原则：第一、没有在线的独立的系统性能监测器。当前仅有的监测器是地面跟踪站和控制站，当系统存在超差状态时系统没有任何自动反应。卫星未受到监测的时间达到 1 小时以上。甚至主控站检测出问题之后，在采取改正措施之前可能有 30 分钟之久。也就是说，卫星发生故障到地面控制站采取校正动作可能达到 1~1.5 小时。第二、同一个主控站系统既用来监测卫星的健康状况又用来发射改正数，在主控站还可能发生不可检测的共同性故障。

综上所述，GPS 系统本身的导航性能有明显的缺陷。为了改善其导航性能，通过地面监测系统和一定形式的数据链对 GPS 进行增强是十分必要的，因此随着 GPS 技术的产生和发展，不同的 GPS 增强技术也应运而生。最基本的技术是差分 GPS（DGPS），它又分局部差分 GPS（LADGPS）和广域差分 GPS（WADGPS）。近年在广域差分基础上又发展起来一种广域增强技术。这些增强技术各有一定的最佳应用场合。由于不同应用的要求差异很大，单一系统不可能满足所有应用的需要。不同应用可能要求多少不同的增强技术。一部分应用（如舰船进港）可能仅要求中等精度的局部差分 GPS，而另一部分应用（如飞机、I 类精密进场）则可能要求高精度局部差分 GPS（通常要求动态 OTF 算法）。为了满足大范围多种应用要求，必定需要多种形式的增强系统的组合。一个广域系统尽管不可代替大范围各种局部系统，但它确实可以覆盖诸如舰船进港、飞机空中航行直至 I 类精密进近和陆地车辆交通管理等相当大一部分应用。因此建立广域增强系统对一个地区甚至一个国家确实具有重要意义。

二、差分 GPS

差分 GPS 是伴随 GPS 产生而产生的用于局部区域改进导航精度的一种技术。一个在已知测量位置的 GPS 接收机，将其 GPS 测量导出的解与其测量位置比较，得到改正项，将改正项发送至用户，使用户改进他自己的位置解。一般说来，存在两种差分 GPS 概念：

1. 一接收机置于已知位置，测量由 GPS 导出的位置解误差（ x ， y ， z ），这一信息然后发射到携带主接收机的载体，加到用户估计的坐标中。用这种技术，位置改正数仅当两个接收机使用同一组卫星时才是有效的。

2. 一接收机置于已知位置，确定到所有可见卫星的伪距的误差，并发射至用户。用户在确定其民航解之前从其测量的伪距中减去此项误差改正。用

这种技术，用户和地面接收机不一定使用一组卫星。

还有一种伪卫星概念。地面站起着伪卫星的作用，计算所有卫星的伪距偏差，将其与导航数据电文一起发射给用户。用户采集这些信息，作为正常导航电文的一部分，来改正他的位置解。

DGPS 可以将用户的三维定位精度改进至 5 米水平。DGPS 所以能够提高用户定位精度是基于用户与参考点所蒙受的误差相关这一假设。事实上，用户星历误差、电离层和对流层延迟影响不能被差分改正完全抵销。随着用户至参考站距离的增加，误差相关退化，以致用户定位精度降低。

DGPS 的部分误差是由于下述事实引起的，即星历误差在用户-卫星视线上的投影不再与参考站-卫星的视线上的投影相同。另外，如果两个接收机相距很远，穿过电离层的视线也很不同，导致所观测的电离层延迟不同。对流层延迟的情况类似，但影响较小。

超过 100 公里，距离误差改正就不足以精确至实现 DGPS 的全部潜力。因而 DGPS 仅限于局部应用。覆盖像我国这样大的国家需要几百个参考站才能实现单站差分 GPS。

差分技术需要在地面参考点和用户之间的数据链，常用的通信链路有视线（例如 VHF，L 波段，微波）；地波（例如 LF，MF，无线电信标）；FM 副载波。由于其视线和传播问题，数据链也成为 DGPS 的作用范围的限制因素。

DGPS 的典型例子是美国海岸警卫队（USCG）在沿美国海岸和内河建立 DGPS 系统，该系统主要用于港口靠泊和进港引导，水文测量，监测和控制港口交通等，包括一个由 61 个点组成的广播点网和两个控制站。每一广播实际上是一个局部差分系统（LADGPS），包括两个参考站、两个完好性监测站和无线电信标机组成，整个系统由参考站、广播发射机、控制站、监测站和船上设备组成。参考站为其覆盖区域的用户产生伪距改正，它装备有高质量的 GPS 接收机，具有产生 RTCM 广播电文和同远方控制系统通信的能力。它进行 GPS 卫星的完好性检查，也接收完好性监测站来的警戒信号，还准备在失去监测时或者受完好性监测站命令广播完好性警告。广播发射机包括一个海上无线电信标，实时 DGPS 改正数据被输入到 RTCMSC—104 格式，广播至所有的用户。由两个计算机控制的控制站，一个位于东海岸，一个位于西海岸，每一个用数据通信网连接到在其区域所有的监测站和所有的参考/广播站。控制站进行系统监测、数据通信网和各地设备的控制。在紧急情况下，每一站能够处理整个网的事务。完好性监测站包括一个 MSK 接收机，一个 DGPS 接收机和计算机。计算机检核 GPS 广播，DGPS 改正数据和 MSK 广播信号。每一个参考/广播点将有一个完好性监测站。完好性监测站用实时数据链连到 GPS 参考接收机，将连续地把在其覆盖地区看到的广播状态通知参考接收机。船上装备必须有 MSK/无线电信标接收机，一个 DGPS 接收机和电子图显示器。整个 DGPS 计划包括 DGPS 参考站、发射机、监测站和控制站的设计、制作、安装、运作和维持。系统组建计划投资 1700 万美元，运作和维持每年 500 万美元。

USCG 的 DGPS 系统覆盖海岸和主要河流，在内陆留下一些空隙，特别是西部。美国工程兵部队也计划用 USCG 的标准和频率建立一些无线电台。另外，为了使这一系统用于铁路交通控制，联邦铁路局（FRA）计划将 LADGPS 扩展到 48 州的全国覆盖，需要增加 20 到 25 个站。

加拿大海岸警卫队也正在其沿岸和港口地区与大湖区执行 DGPS 计划，计划到 1998 年提供 25 个站信标 DGPS 服务。

三、广域差分 GPS

与局部差分不同，广域差分概念基于由多参考站导出的改正数确定 DPGS 位置。现在有一类广域差分系统，概念类似于局部差分，主要不同点是增设多个参考站，利用多参考站得到差分改正，用这些数据连同用户的 GPS 接收机的原始距离数据计算用户位置。所有计算在用户位置完成，包括电离层和对流层影响模型化。Accqpoint/Cue、DCI、Fugro Starfix、JECA Omnistar 和 Racal SkyFix 等公司建立的地区或全球 WADGPS 系统为这类系统的代表，其中 Omnistar 的虚拟基站概念似乎别具特色。它的输出好像一个随用户系统移动的基站，为得到精确的差分改正不必测量基站的位置，在差分改正数中顾及了每个基站每个卫星的对流层和电离层误差，减小了 GPS 误差空间去相关的影响和参考站的噪声和残余多路径影响。在计算加到参考站的改正数的权时使用了至卫星的高度角和方位角，从每站的外插改正数加权平均得到最后最佳改正数，权为到参考站的距离和用户端或参考站到卫星的高度角的函数。最佳化的改正数供给任何能够接收标准 RTCM 格式的 GPS 接收机。

商业性的广域系统的差分改正以 RTCM—104 格式播发，最常用的广播媒介为地球同步卫星和 FM 副载波。接收天线为高增益、方向天线或低增益、全方向天线，在用高增益的碟式天线时（大多为沿海、海洋应用），改正数从静态天线通过无线电遥测设备向本地用户广播。接收机通常为传呼接收机或专门研制的接收机（如 OMNISTAR 6300/7000 接收机）。私人公司的广域系统未见有系统故障报警能力，着重于改进定位精度（一般卫星轨道误差改正有限），主要用于沿岸或陆地实时定位。

在另一类比较规范的 WADGPS 中，主要误差源被向量化，即分解为卫星星历误差，卫星钟误差和电离层误差，它们被分别加以模型化。向大范围用户提供误差改正，不再是像 DGPS 那样为每一卫星的标量距离改正，而是包括卫星星历误差改正、含 SA 影响的卫星钟误差改正以及电离层时间延迟改正的向量。差分改正的精度在所监测的区域内大致是一致的，在其边缘地带精度可能略有降低。广域差分的优点是可以较少数目的参考站向广大地区的用户提供几米的导航和定位精度。

这类 WADGPS 由一个地面监测网和一个通信链组成。监测网包括一个（或两个）主站和若干参考站。每一参考站配备一个高质量的时钟，一台可以跟踪视野内所有卫星的双频 GPS 接收机。在每一参考站所得到的 GPS 测量被发送到主站。主站根据从参考站采集的信息作出 GPS 系统完好性判断，并结合已知的参考站位置计算误差改正向量，包括卫星星历误差，卫星钟误差（包含 SA 影响），以及电离层延迟误差。完好性告警信息和计算的误差改正经过任何方便的通信链发射给用户。WADGPS 的数据流程可以归结为：

- 1) 在已知位置的参考站采集视野内所有卫星的 GPS 伪距和载波相位。
- 2) 在参考站所得到的所有测量被送到主站。
- 3) 主站计算误差改正向量和判断系统完好性。
- 4) 误差改正向量和完好性信息被发射到用户。
- 5) 用户接收完好性告警信息，用误差改正数改进导航精度。

四、广域增强系统

通常的广域差分 GPS 系统，改进了 GPS 系统的精度和完好性，并未改进

其可用性。增强型的广域系统，则可以改善 GPS 的所有三个缺陷。增强型的广域系统，通常称为广域增强系统 (WAAS)。在 WAAS 中，携带有导航转发器的地球静止卫星为数据链的一部分，它除了广播完好性信息和矢量改正数以外，还广播类似 GPS 信号的测距信号，测距信号能够被稍微修改的 GPS 接收机所接收。类似 GPS 信号改善了卫星导航的可用性。

导航转发器工作在 GPS 的 L1 频率 (1575.42MHz)，并被调制以完好性数据，差分改正数，以及伪随机码测距信号。发射测距码的作用是使地球静止卫星被当作一个 GPS 卫星用，测距码能使 GPS 用户可测量至同步卫星的伪距，因而改善了 GPS 导航的几何，提高了导航的精度。并以此增强 GPS 的通用性和服务的连续性。

INMARSAT—3 卫星是第一个携带 WAAS 导航转发器的卫星。它们按下式广播 WAAS 信号： $s(t) = \sqrt{2C}X(t)D(t)\cos(2\pi f_{L1}t + \phi)$ 式中 C 为信号的功率， ϕ 为载波相位， $f_{L1} = 1575.42 \times 10^6 \text{Hz}$ 为载波频率，与 GPS L1 一样。WAAS 信号用数据 D(t) 调制，D(t) 携带完好性警告和矢量改正数。另外，每一信号还调制扩频码 X(t)。像 GPS C/A 码一样，这个码是码元率为 1.023MHz 的 ± 1 伪随机码序列。

扩频调制对于 WAAS 的作用与其对于 GPS 的作用相同。它能够在即使有噪声、反射信号和干扰信号时进行精密测距。它也许可 WAAS 同 GPS 信号共享 GPS L1 频率。WAAS 信号不会干扰现有 GPS 接收机或不是设计为接收 WAAS 信号的其他 GPS 接收机接收 GPS 信号。接收机用分离 GPS 信号同样的扩频机制，能够将 WAAS 信号与 GPS 信号区分开来。事实上，WAAS 码是从 GPS C/A 码同一码族中选出来的。在 1025 个可能性的这一码族中 GPS 仅用 36 个码，所以为 WAAS 剩余很多码。另外，WAAS (C) 接收的功率将比 GPS 信号的规定接收功率稍微弱些。

WAAS 的码和载波与 GPS 同步，所以 WAAS 提供附加的距离测量。这一距离测量将改进航空的卫星导航的连续性和时间可用性。

WAAS 信号将不会引起 GPS 接收机的设计有大的变化。信号工作在 GPS L1 频率，用同样的扩频码，用二进制相移键控携带数据。所以，对接收机的最重要变化是对于施加在 WAAS 电文所载的数据。

为了为所有飞行阶段的导航服务提供对基本 GPS SPS 所必要的增强，美国联邦航空局 (FAA) 正在发展 WAAS 系统。该系统覆盖美国、加拿大、波多黎各和太平洋、大西洋沿岸。项目的目标是支持在直到 类精密进近的所有飞行阶段用作主要导航手段的航空要求。项目从 1992 年开始执行，分四期完成，1997 年将实现初步运行能力，2001 年实现最终运行能力。1992 年开始建立试验网阶段 () 期，截至 1994 年，一个包括 8 个参考站的 WAAS 样网已通过可行性试验。100 多次精密进近的飞行试验结果表明，在 95% 的时间，垂直精度好于 6.9 米，告警时间为 5.9 秒。1996 年进入 期，建立职能验证系统，此时该系统将包括 2 个主站，5 个参考站，2 个地面地球站，一个对地静止卫星导航转发器。该期的任务是试验和验证执行与布设程序，以及验证实际执行和布设前的 WAAS 硬件和软件。1997 年执行 期，即初始 WAAS 期，届时系统将包括 2 个主站，24 个参考站，3 个对地静止卫星和 6 个地面地球站。 期结束将能提供直至非精密进近的所有飞行阶段的 WAAS 服务。1998 年进入 期，即终态 WAAS，在这一期，将执行 WAAS 合同的选项，足够的附加主站，参考站，对地静止卫星和地面地球站使得能够在服务范围的任何地

方都可提供 类精密进近服务。WAAS 系统兼有增强 GPS 和 GLONASS 的双重功能。

欧盟、欧洲空间局和欧洲安全航行组织正在执行一个基于 INMARST-3 导航转发器的旨在增强 GPS 和 GLONASS 的欧洲地对静止卫星导航重叠服务 (EGNOS) 项目, EGNOS 将同在邻近地区正在执行的类似系统衔接以使得可得到一个无缝的世界范围的服务。EGNOS 计划 1999 年达到初步运行能力(IOC), 2002 年达到全站运行能力(FOC)。在其初步运行能力阶段, 包括一个主控站, 13 个测距和完好性监测站, 2 个导航地面地球站加至少一个热备份, 2 个对地静止导航转发器, 4 个对地静止测距站(每个转发器 2 个)。这样一个结构主要限于航空上的补充手段应用。在全部运行能力阶段, 还加下列成分: 1 个地球静止导航转发器, 为每个转发器提供一个多余的导航地面地球站, 1 个主控站, 7 个测距和完好性监测站, 2 个地球静止测距站。这一扩展的系统在技术上能够作为到 类精密进近的唯一手段使用。

国际海事卫星组织在通向民用的全球导航卫星系统(GNSS)的努力中, 计划在 1997 年发射的卫星 Inmarsat—3 上将携带 L 波段导航转发器, 它将向用户转发地面导出的 GPS 和 GLONASS 完善性信息, 提供附加的测距信号增加 GPS 在世界范围的可用性, 帮助用户进行他们自己的完好性监测, 通过转发广域电离层校正和对 GPS 和 GLONASS 的差分改正提高定位精度(从非增强的 100 米水平到 20 米)

五、建立我国的广域增强系统

建立我国广域增强系统的目的在于增强基本 GPS 信号的导航和定位能力, 以便为我国 GPS 用户提供更好的陆、海、空导航定位服务。

我国广域增强系统的主要应用范围包括陆地交通运输和交通管理, 资源调查; 海岸探油作业, 海道测量, 舰船进港; 飞机至 类精密进近所有飞行阶段的导航等。

建立我国广域增强系统应与推行新航行系统的要求相协调, 应考虑国际接轨和国际兼容的可能, 应最大限度地利用商用差分接收机。我国广域系统的长远目标应当是 GPS/GLONASS 的广域增强系统。

我国广域增强系统将包括地面部分和空中部分。地面部分包括参考站网、主站、地面地球站和用户站。空中部分包括载有导航转发器的地球静止卫星。各成分的主要职能和配置如下:

参考站(约 20 个): 每一站装备 GPS 双频接收机, 铯钟, 微机, 气象仪器, 通信设备。参考站网集 GPS 数据和当地气象数据。这些数据通过地面通信网或地球静止卫星传递给主站。

主站(1 或 2 个): 装备工作站, 微机, 通信设备。主站接收参考站传来的数据, 计算 GPS 卫星轨道误差改正, 卫星钟差(包括 SA 抖动)改正和电离层延迟参数, 判断系统的完好性。并将这些信息传递给地面地球站。

地面地球站: 装备卫星通信设备。接收主站传来的差分改正参数和完好性信息, 并将它们上行装入地球静止卫星。

地球静止卫星(3 个): 建议在近期发射的地球静止卫星上搭载导航转发器, 该导航转发器以 L 波段频率发射类似 GPS 测距信号, 广播差分改正信息, 完好性信息。电文格式采用 RTCASC—159 和 RTCM SC—104。

用户机: 尽可能利用现有商用差分接收机。根据需要研制专用接收终端,

进行数据格式标准化，输出至商用差分接收机，以便最后给出导航定位结果。

建立广域增强系统，是一项复杂的科学工程，也是一项重大的科研课题。涉及导航、定位、自动化、电子、通信和空间技术等诸多领域。建立广域增强系统，需要统一规划协调，发挥部门间的协作优势。系统的长期维持和运行也需要备加重视。编 后 记

在开始举办百名院士科技系列报告活动一周年之际，《共同走向科学——百名院士科技系列报告集》正式与广大读者见面了。在此，编委会向两院院士和对本书出版给予支持的部门及同志们致以诚挚的谢意！

为贯彻党中央、国务院关于加速科技进步的决定和加强科普工作若干意见的精神，实施“科教兴国”战略和可持续发展战略，努力完成全国科技大会和全国科普工作会议提出的提高全民族科技意识和科技素质的任务，一年前，中国科协、中国科学院和中国工程院联合发起，会同中央、国务院有关部委和十几个省市共同组织了面向社会，主要是面向各级领导干部的百名院士科技系列报告活动。一年来，据不完全统计有 140 多名院士作了近 200 场报告，听众达 10 余万人次。我们深深感到有责任使院士们的报告产生更久远的广泛影响，使没有直接听到院士们报告的广大干部和群众也能受益。为此，我们将收集到的报告文稿汇集成册，以奉献社会。

由于时间所限等原因，尽管我们未能将院士们的全部报告收录在书中，全书业已达到 140 万字，内容极其丰富。为了报告集的完整性，有些院士的报告文稿虽然在正式出版物上已公开发表，我们仍然收在本书中，希望有关出版社予以理解。在编辑本书时，是以收到稿件的时间为序，分为上、中、下三册。每册中均含综合性报告及自然科学、技术科学、工程技术各学科领域的报告。在每一册中，学科相近的文章略为集中，并以作者姓氏笔画为序编排。本书属科普性报告集，并非研究论文，又因文字量较大，故未要求作者列出参考文献、插图及索引，编辑部在此代表本书的各位作者一并向有关学者、专家和读者致歉，并请谅解。

在本书编辑过程中，得到广大院士和新华出版社等出版部门的热情支持，每篇稿件都经过了院士本人和编辑、出版部门的多次审核，尽了最大努力。但是，由于我们的科学知识和编辑水平所限，又为了使本书早日与读者见面，从报告文稿的收集到正式出版时间极为紧张，书中定会有不够规范或错误之处，我们诚挚地欢迎批评指正，提出宝贵意见！

参加本书编辑工作的还有：艾新元、申倚敏、刘卫卫、刘鲁生、孙卫国、李仁涵、林宏侠、胡筠、袁牧红、钱莹洁、高中琪、唐海英、梁晓捷、谢冰玉，特此表示感谢。

本书编委会
1997 年 3 月