

《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

（中）

06

上海市黄浦区教育信息中心

微型机的新发展

倪光南

联想集团

倪光南 计算机专家。1939年8月出生于浙江镇海。1961年毕业于东南大学。联想集团首任总工程师，中科院计算所研究员、博士生导师。1994年被选聘为中国工程院院士。我国汉字信息处理领域的开拓者之一，是“联想”输入技术的发明人和实现人。

进入1996年以来，我们看到PC机的发展出现了新的分支，这就是现在受到人们关注的网络计算机（NC）和交互计算机（SIPC）。这种局面的出现可以认为是PC机技术趋向成熟的一个标志。大家知道，成熟的工业产品如汽车和飞机等等，在发展中都形成了一些适合于特定应用领域的分支，例如汽车发展成为小轿车、吉普、大卡车、赛车、客车……所以PC机发展出了NC和SIPC也是必然的趋势。如从技术上加以观察，这进一步表明了计算机、通信和消费电子这三大领域的互相渗透和紧密结合。今后，PC机的厂商如果不能在自己的产品中，把这些相关领域的技术综合起来，就很难保持产品的竞争力。

一、网络计算机

网络计算机以下简称为NC，是指与网络相联的低价格计算机，它含有紧凑的操作系统并能执行与硬件平台无关的解释语言（如Java），NC的应用程序由一些所谓“小应用程序”（Applet）组成，它们仅在执行时从网络下载。NC又被称作：环球网PC（Web PC），Java终端，互联网络设备（Internet appliance），浏览盒（Browser box）等等。

这是1996年初才在市场上出现的一种计算机，它与传统的PC相比，除了价格低、具有联网功能和一般不带硬盘以外，还具有以下两个特点：

1. NC的操作系统必须小而快，能在资源少、价格低的NC上运行，它应有丰富的API，采用CORBA这类面向对象的技术，能从网络上动态加载分布的对象。

2. NC的应用程序由分解成可动态下载的小部件（Applet）组成，部件大小一般为数十KB，如果用28.8Kbps的Modem，它们下载所需的时间和一般PC机从硬盘装入一个大应用程序所需的时间相仿。

NC不仅是作为一种供初学者使用的低档机，它也是为了满足大公司工作的需要，它们已建有高速网络，用NC后可以大大减少管理费用和使系统免受误操作的影响，并可降低对硬件和软件不断更新的要求。此外，学校也是NC的一个大市场，最后，NC还将进入消费者市场。

实际上，低档PC和NC的价格是很接近的，它们之间并没有非常明显的界线，NC的主要考虑应当是易用。如果它遍布公用场所可随时提供人们使用时，它也将部分地取代便携机。

NC今后的发展主要取决于以下四个方面：

1. 网络。NC的发展密切依赖于互联网、环球网的发展。要满意地使用NC需要有足够的联网带宽，至少是28.8Kbps的Modem。当前，对带宽的要求推动了ISDN和电缆（Cable）Modem的发展，最终有可能发展到采用ATM交换

技术。与这些高速接入技术相适应，网络还需要具有对大量高速用户提供服务的功能。

2. 芯片。运用现代的设计工具和标准模块，可在短时间内设计出专用于 NC 的芯片，即在一个芯片上集成高性能的 RISC 处理器及其他专用处理部件，只要再附上 RAM 和 ROM，几乎不需要加别的元件就可以做成一个 NC。这是降低价格的重要途径。

3. 软件。NC 将在很大程度上依靠 Java 语言开发应用程序。Java 是一种解释语言，它屏蔽了构成 NC 的硬件和操作系统。由于解释执行比编译执行的速度慢，为了提高速度，可以在下载 Java 对象的同时将它编译为机器码，或者在服务器上存储预编译好的对象，也可用 Cache 技术来提高速度。

4. 与其他类似设备的竞争。我们知道，低档 PC 和 NC 的差别并不很大，而且，把 PC 上的标准应用软件（例如 MS Office）的全部功能用一组 Java 部件实现，以便在 NC 上运行，将是一个繁重的工作。可能将来 NC 会着重于某些面向网络的应用。此外，NC 和交互游戏机、TV 机顶盒等的差别也是不明确的，这些类似的设备都会和 NC 一起分享市场份额，这是计算机发展多样化的必然趋势。

最终，NC 的推广前景取决于需求。例如从网络上购物等等应用的发展，会使人们愈来愈多地依赖信息高速公路，从而推动 NC 的发展。

二、交互计算机

简易交互计算机（Simply Interactive PC）以下将简称为交互 PC 或 SIPC，是指那种简单易用、面向娱乐、作为消费电子设备使用的计算机，它应具有很好的多媒体功能（例如具有三维图形、高质量音响、视频播放、DVD 播放等功能）；能很方便地与其他电子设备相联（通过 USB、IEEE 1394 等总线或以无线方式联接）；它的外形更接近于一般的家用电器，操作方式和界面也比一般 PC 更加简单易用。SIPC 是最近由 Microsoft、Intel 和 Toshiba America 等公司提出的，并得到了很多厂商的支持，它将成为 PC 的一个重要分支，成为家庭的娱乐中心、通信中心和各种活动的控制中心。

今天人们已拥有很多电子设备，例如电话、电视、录像机、VCD、音响、游戏机等等，但是 SIPC 有它的特点，例如它有优越的交互作用，可以与 Internet 相联，在网络上通信或通话甚至进行会议电视，它可以比一般电器更易使用、更智能化，它也可以提供目前电器所达不到的、相当于影剧院水平的声音和图像，所以它的前途是广阔的。

大家知道，网络计算机（NC）也是今年刚在市场上出现的一类计算机，那么，SIPC 和 NC 有什么区别呢？应当说两者是面向不同的应用领域：前者主要是为了联网应用，而后者则主要是为了娱乐。它们都是 PC 的分支，也都可以认为是专用的 PC。

下面叙述 SIPC 的一些主要特点。

1. “即开”（OnNow）功能。一般的家用电器一打开就能使用，而一般 PC 机则需要等一二分钟时间才能正式运行，为了克服这个缺点，SIPC 需要有特殊的电源管理，做到随时可用，立即可用。也就是说，系统不用时处在抑制状态，一旦要用时（或者收到某种激励）就能立即进入工作状态。所谓“即开”就是指它始终处在开的状态，但是外表看起来却是关着的，而且它能即

时地对用户和其他信息作出响应。由上述 Intel 等三家公司提出的先进配置和电源接口 (ACPI) 规范草案就是为此制定出来的, 它使操作系统可以对各类 PC (包括服务器、事务处理 PC 和家用 PC 等等) 进行电源管理。它将是一个跨平台的接口, 可支持 Win95、Windows NT 或其他操作系统。通过这一接口, 系统能随时开关外部设备, 另一方面, 外部设备也能随时激活 SIPC 和其他有关设备。这样, 就能使 SIPC 达到“即开”的要求。

2. 总线。SIPC 需要有容易扩展的总线, 其中包括低速的 USB 总线、高速的 IEEE 1394 总线、采用红外或射频技术的无线接口以及设备口 (Device Bay) 等等。SIPC 通过这些手段将可与电视、录像机、摄像机、VCD 或 DVD、音响、数字卫星电视等等设备联接, 并对它们实行控制。

USB 总线是一种低速串行总线, 它能提供 12Mbps 的数据传输速率, 各种外部设备可以很方便地联到同一条 USB 总线上, 这比通常用多条并行口和串行口电缆联接设备要方便得多。目前 Intel 在最新的 Pentium 支持芯片组 (Triton) 上已集成了 USB 控制端口, 另外, 与 USB 相联的外部设备也在陆续推出, 预计它将会很快成为 PC 机的标准配置。

IEEE 1394 总线是一种数据传输率可达 400Mbps 的高速串行总线, 将来还会提升到 1Gbps。在这种速率下甚至可以传送不加压缩的视频信息。该总线用包含二对信号线和一对电源线的细电缆传输, 既经济又方便。在 IEEE 1394 上各个设备可以采用链式联接, 也可以用多条总线和桥路构成树形结构, 使多个设备并行工作或彼此通信, IEEE 1394 还允许带电接入或卸下设备等等, 所以它非常适合于联接高性能的视频或音频设备。

无线接口也是 SIPC 的一项重要技术。由于红外技术的成本低, 已得到较多的应用, 它可提供 1.152Mbps 和 4Mbps 的传输速率, 目前已建立了 IrDA1.0 和 2.0 标准。它可以用来联接打印机、遥控器、操纵杆等等设备或者构成局域网。射频无线技术在目前比红外技术的成本高, 但是随着技术的发展, 它的成本将迅速降低。在 SIPC 的应用中, 主要是低功率、短程的射频无线技术。在某些国家里, 可用的频段已有 46-49MHz, 902-928MHz, 2.4GHz, 5.7GHz 和 60GHz 等等, 在这些频段中可采用狭带技术也可采用扩展频谱技术。将来, 无线接口的数据传输率在高频段可达 10Mbps 甚至达到 100Mbps。

3. 显示。对 SIPC 的一个需求是能与电视屏幕联接, 这是很多娱乐活动的要求, 同时, 电视的大屏幕也可以使很多应用取得更好的效果。因此 SIPC 的显示设备应能将 VGA 信号转换为 NTSC 或 PAL 制电视信号, 并能作放大、缩小、剪裁、长宽比变化处理等等。这里在技术上的难点是需要解决电视隔行扫描引起的闪烁问题, 这种现象对单线对象 (例如字符) 特别严重。为此, 需运用滤波技术, 并以软件进行辅助, 区分需要滤波和不需滤波的对象作不同处理。在很多应用情况下, SIPC 需要同时接电视大屏幕和 VGA 屏幕, 两者各自显示适合自己显示的不同内容 (如分别显示游戏图像和显示游戏规则、记分)。

4. 音响。将来的 SIPC 将提供高质量的音响, 例如三维增强声、环绕声和三维定位声。以属于环绕声的、Dolby 实验室开发的 AC-3 为例, 它采用了五个全频率带的扬声器和一个频响 120Hz 以下的超低音扬声器 (也称为 5.1 系统)。这个系统有六个压缩声音通道, 数据率为 384Kbps。为了对这六个通道的信息解码, 目前需要用专门的硬件来实现。将来, 系统的音频放大器、扬声器以至进行处理的 DSP 等等部件都可以通过 USB 或 IEEE 1394 总线与

SIPC 相联,Microsoft 规定的 Win32 驱动程序模型 (WDM) 采用了分层的、面向对象的结构,具有即时响应功能,这一切技术的综合将使 SIPC 能提供很高质量的音响,构成名副其实的家庭剧院。

5.外表。常规 PC 的外表和家用电器有很大的差别,SIPC 则应有和一般电器相似的外观。由于通过 USB 这类总线可以很方便地在机外挂接各种各样的外部设备,所以 SIPC 在扩展时将不需要打开机箱,它可以做成整体密封的结构,没有需要进行维护的部件。

6.软件。在软件开发方面,SIPC 的推广需要开发大量交互作用的游戏,用 MPEG 压缩的光盘软件和其他高质量的多媒体或联网使用的软件,Microsoft 已提供的开发工具包括 ActiveX 和 DirectX 还有上述的 WDM 等等都有助于这些软件的开发。

总之,SIPC 将会在今后迅速进入家庭,它将同一般 PC、网络 PC、游戏机等产品进行竞争,分享市场。

展望航空技术的发展

顾诵芬

航空研究院

顾诵芬 飞机空气动力学家。1930 年 2 月 4 日出生于江苏苏州。1951 年上海交通大学航空工程系毕业。航空工业总公司科学技术委员会副主任，航空研究院副院长、研究员。1991 年当选为中国科学院院士，1994 年当选为中国工程院院士。直接组织领导和参与了低、中、高三代飞机中的十余种飞机气动布局 and 全机的设计。把飞机的各专业系统技术融合在一个总体优化的机型内。取得多项重要成果。

一、发展航空是国防建设和国民经济和社会发展的需要

空中力量在现代战争中的重要地位已为世界公认。1991 年 42 天的海湾战争，多国部队在 38 天的空中袭击，摧毁了伊拉克 1/3 左右的坦克和大炮，瓦解了 10 多万精锐部队，多国地面部队，仅用 4 天，只付出阵亡 79 人的代价，迫使伊拉克无条件投降，这是历来战争所没有过的。因此战后各国都十分重视加强军事航空力量的建设。美国在军费大量削减的情况下，为了保持空中优势还在继续实施费用高达 588 亿美元的先进隐身战斗机 F-22 的研制计划。

为了提高人民生活质量和加快经济发展，航空已成为现代生活所必须。航空运输的特点是快捷、舒适、安全、经济。虽然铁路运输也在提高速度，但其经济性仍不如航空。据西方估计路程在 650 公里以远，甚至于先进的悬浮高速列车也不如航空运输经济。

美国估计（不包括前苏联），1990 年世界的运输量为 16000 亿人·公里，到 2010 年达 48000 亿人·公里，每年以 10% 左右增长。俄罗斯估计俄本国航空运输量年增长率 7% - 9%，到 2010 年达 3000 亿人·公里。我国从 1985 年到 1994 年平均年增长率达 20%，1994 年达 552 亿人·公里。为实现第三步目标，达到现在发达国家水平，我国民用航空运输量还会保持这样的高速度增长，这就需要大量的民用飞机。

要获得民用飞机市场，必须有高的安全性、经济性、舒适性和低的成本，这就需要采用各专业的高新技术，因此必须国家投资。美国在海湾战争后重申航空技术为国家关键技术，除国防需要外，千亿美元的民机市场也是它的着眼点，欧洲四国政府不惜投资 260 亿美元，终于使空中客车飞机获得了 25% 的民机市场。现在发展中国家也都纷纷起来创办航空工业，也都看到了航空产品的高技术、高附加值，另外发展航空的高技术也还能推动各工业部门的发展。为此，我国也要开展民机的研制。

二、未来民用飞机的发展趋势

今后民用飞机的发展：一是大型亚音速运输机；二是先进的超音速客机；三是偏转旋翼式垂直起落支线客机。

1. 关于大型亚音速客机

估计到 2020 年航空运输主要靠亚音速客机，预计从 1991 年到 2005 年 100 座以上亚音速运输机需要 9000 架。要求到 2020 年飞机的运营总费用要比现在降 25%，即要求单位座公里油耗降 40%（其中 25% 靠发动机改进，15% 靠提高飞机气动效率和减少飞机空重）。要求飞机的客座量提高到 1000，但飞机轮廊尺寸仍应在现有机场允许使用的条件内。

要提高飞机的全天候起降能力。提高可靠性，降低事故率包括人的差错和自动系统的可靠，降低噪音和发动机排放污染。

2. 关于超音速客机

虽然 70 年代已研制了“协和”和“图-144”超音速客机，但由于不经济和对环境污染，得不到发展。展望 2000 年越洋飞行的运输量要大大增加，因此超音速客机还要发展，到 2015 年可能要 600-1500 架。

将来的超音速客机将能乘 250-300 人，巡航 M 数在 1.6-2.5，航程在 10000-12000 公里。

为使用经济要求超音速升阻比大于 9，发动机油耗在 1.2-1.3 公斤/公斤推力·小时。

为减少环境影响，要降低音爆强度，使之控制在小于 0.0005 大气压，主要靠改进飞机的气动外形。

关于排放污染问题主要控制发动机燃烧后的氧化物（ NO_x ）的排量。 NO_x 在高空要破坏自然臭氧层，在低空则与阳光作用产生大量臭氧和其他强氧化物。所以需要研究不影响自然臭氧层的 NO_x 排放标准，以便选择合理的巡航高度。对于控制 NO_x 量，则还应改进发动机的燃烧器，这涉及基本化学及大气动力学。

3. 偏转旋翼式支线客机

为解决中心机场的拥挤，需要垂直起降飞机实施疏散客流，并进行市区对市区的运输。利用可偏转旋翼的支线客机是可能的。这种飞机有直升机的机场利用优点，但又能克服直升机气动效率低、振动噪音大的缺点。现在已有军用型 V-22。将来应进一步降低空机重量，提高气动效率，特别是垂直飞行时旋翼对机翼载荷的影响，还有就是降低研制费用。

三、发展航空需要的相关技术

发展下一代民用飞机要能在国际市场上占一席之地，必须采用先进科学技术，下面介绍对主要学科专业的要求。

1. 空气动力学

空气动力学研究着眼于如何提高将来飞机的性能上。

提高飞机的巡航升阻比，最有潜力的是翼面流动的层流化。如能将亚音速客机上翼面保持全弦长层流，则可提高巡航升阻比 10-12%。要得到实用的层流化机翼的设计方法，要弄清附面层转捩的机理，以便建立模型，通过 CFD（计算流体力学）方法和精确的实验验证。对于超音速客机同样也要在超音速巡航时得到层流。

对于机身等不易获得层流的气动部件，要研究实用的紊流减阻措施。

对于超音速客机要减少波阻，包括升致阻力和体积波阻，要利用波的有

利干扰，要研究新的气动布局方案。

进一步提高飞机起降性能要研究新的高效增升装置。

研究发动机安装和飞机机体的一体化设计以获得高推进效率，并利用发动机推力转向的增升作用。

CFD 要作为设计手段，可以算任意形状物体的气动力，要有足够精度，程序使用要方便，快速，要利用并行计算技术。

关于空气动力实验要有高 R 数，低扰动的风洞，要研制高分辨率高精度的非接触测量装置。

总之发展飞机空气动力学必须是理论、精致的实验和 CFD 的结合。

2. 推进技术

今后 20 年的发展目标仍是提高热机和推进效率、降低油耗、提高推力级、减轻重量、减少排放、降低噪声、增加可靠性、提高寿命和减少维护工作量。

对亚音速客机用发动机，要较大幅度提高压比和涡轮进口温度。风扇函道比要比现在提高 3-5 倍，甚至采用无函道桨扇。

提高部件效率主要用 CFD 设计风扇、压气机和涡轮。

燃烧室要作大幅度改进，将 NO_x 的排放量降低约 8 倍。

发动机也要采用主动控制技术，以提高压气机效率和喘振余度。采用磁悬浮轴承以减轻重量。广泛采用计算机监控技术以保证发动机的安全可靠运行。

3. 材料和结构

下一代民用飞机的机体材料仍然是金属为主，要发展铝锂合金，在不降寿命条件下，提高刚度，减少密度，提高韧性和抗腐蚀能力。采用快速凝固技术以获得耐高温的、新的、价格低的铝基合金。要开展对序列合金 TiAl ， Fe_3Al 及 Ni_3Al 等的研究，以获得新的更高的强度/重量比航空用材料。

要发展复合材料结构实用的设计、分析制造、检验和修复方法。要研究复合材料结构的损伤容限机理和实用有效的无损探伤技术。

要研究超音速客机结构用耐高温的树脂复合材料。陶瓷基复合材料将用于不需冷却的发动机涡轮部件，要提高抗氧化能力和韧性。

利用复合材料特点开展“灵巧结构”研究，要研制埋入式传感器、处理器和作动器的综合。利用光纤、压电材料和记忆材料实现颤振和载荷的主动控制。

要积累民机和适航使用数据，研究制定高效率的适航要求和鉴定方法。进一步开展先进结构寿命预测方法和结构分析软件的研究。

4. 航空电子和控制

为提高航空系统的输送能力，充分利用各种来源的导航信息，实施航迹的四维管理。

要实现全天候起降，建立可靠的防撞系统。要研制新的风切变探测装置及其回避系统。

为便于视线很差的环境下，飞行员仍能操纵飞机着陆，需要在飞行员的视景上叠加各种传感器提供的视景数据，增强视景画面，进一步研究灵境技术的应用。还要研究语音控制，以提高飞行员操作的正确性。

新一代民用飞机也要采用主动控制技术，实现放宽静稳定，突风减缓和载荷降低。要开展飞行和发动机的一体化控制。

要研究新的机上能源系统及相应的作动器。

5. 认知工程

要将信息科学、认知科学和人素工程的知识结合在一起，使飞行员、飞机和空中交通管制这个大系统能更好的运行，这就是航空上的认知工程。认知工程在航空上应用要研究增进航空运输系统的安全，保证系统的正确和可靠的工作，对信息有效管理和传播。

四、结束语

我国航空工业 45 年来主要为国防建设服务，有了一定基础，现在正在开展民用飞机的研制。要研制出在国际市场上能占一席之地的民用飞机，必须采用先进技术，需要依靠我国自己的科学研究和工业技术的支持。

世纪之交的钢铁工业

殷瑞钰

冶金工业部钢铁研究总院

殷瑞钰 钢铁冶金专家。1935 年 7 月 28 日出生于江苏苏州。1957 年毕业于北京科技大学。曾任唐山钢铁公司副经理兼总工程师、河北省冶金厅厅长、冶金工业部副部长兼总工程师，现任钢铁研究总院院长、教授级高级工程师、国家重大科研项目“熔融还原”首席科学家、兼职教授。兼任中国金属学会副理事长。1994 年被选聘为中国工程院院士。主要从事钢铁冶金等方面的科技和管理工作。

20 世纪钢铁工业得到了蓬勃的发展，成为全球经济和社会文明进步的重要物质基础。

特别值得注意的是第二次世界大战后，世界钢产量的增长，大体上可分为三个阶段：1947-1974 年间以年均 6.3% 的速度快速增长；1974-1986 年，由于发生石油危机、国际货币汇率变化以及西方国家经济不景气等原因，世界粗钢产量起伏波动，徘徊不前；1986 年以后，又在起伏波动中逐步回升，1990 年产量已高达 7.7 亿吨，预计 1986 年-2000 年有可能以年均 0.9% 的速度起伏波动地增长，到 2000 年全球粗钢产量有可能接近 8 亿吨左右。90 年代以来，世界格局发生了重大变化，我国国内经济格局在建设有中国特色的社会主义的过程中，也发生了深刻的变化，这就是随着改革的深化，经济体制由原来的计划经济向社会主义市场经济转变，经济增长方式从粗放经营向集约经营转变。面对这些重大的变革，面对国际上科学技术的迅猛发展，面对国际上钢铁产品市场的激烈竞争，很有必要对世纪之交的钢铁工业进行分析判断。

一、钢铁在材料中的地位

世纪之交钢铁作为一个重要的结构材料、功能材料的位置会不会发生重大变化，这是人们不断进行讨论分析的问题。

强度、变形、断裂、热特性以及综合性能仍是对材料性能的主要要求。价格低、容易回收、对环境影响相对好、节能、节料等因素成为评价材料的主要指标。在这些评价因素上，钢铁材料都表现出相应的优势。

20 年间钢材价格起伏不大，水泥、塑料的价格明显上升，铝的价格有较大的起伏，但升幅高于钢材。

20 年来钢制民用品、汽车、机械设备等价格的升幅均明显高于钢材。

材料的循环使用对节能以及对环境的影响，也是一个重要的考虑因素。钢铁材料的回收率已达到 55%，明显高于其它材料。

钢铁材料的综合优异性能在世界主要基础工业和基础设施中仍是不可替代的。从成本上看，钢铁材料的竞争性也是显而易见的，从结构材料的成本比较可知，若按材料的单位强度计，钢的成本仅为铝、陶瓷、碳素材料的 1/4-1/5。1990 年世界钢产量约为其它金属材料产量的近 14 倍。

另外，用于制钢的铁矿石原料储量高，易开采，易加工，加之良好的可

再生利用性等原因，在可以预见的未来时间内，钢铁材料仍将是全球性的主要基础原材料，钢铁将继续对全球经济发展和文明进步起到积极的支撑作用。

二、世界及中国钢铁工业的发展情况

近 20 年来，世界钢铁工业的布局发生了明显的变化。西方工业发达国家占全球钢产量的比例由 1970 年的 67%，下降到 51%，发展中国家则由 1970 年的 7% 上升到 23%。从地域分布上看，环太平洋地区的粗钢产量不断上升，而大西洋地区的粗钢产量在起伏波动中逐年下降。前苏联、东欧地区的粗钢产量则明显下降。

1990 年全世界人均钢占有量为 149kg/人·年。其中西方工业国家平均为 416kg/人·年，东欧为 487kg/人·年，发展中国家为 49kg/人·年。

我国自 1978 年实行改革开放政策以来，钢铁工业得到空前的发展，1994 年粗钢产量达 9261 万吨，占全球粗钢产量的 12.65%，列世界第 2 位。在 1994 年全世界 20 家大型钢铁公司中，中国有三家，其中首钢排第 15，鞍钢排第 16，宝钢排第 20。

随着全球钢铁生产的发展，全世界钢材出口的比例不断增长。1950 年全球产钢 1.9 亿吨，钢材出口比例为 11%；1970 年产钢 5.94 亿吨，钢材出口比例为 20%；1990 年世界产钢 7.70 亿吨，钢材出口比例为 25%。可见钢材的国际贸易量愈来愈大，随着钢材出口量的增加，钢材在价格、质量方面的国际竞争日益激烈。

三、优化结构是当今乃至世纪之交世界钢铁工业发展的共同趋势

第二次世界大战以后至今，钢铁工业发展的轨迹是随着经济发展和科技进步而演变的。自从 1952 年氧气顶吹转炉发明以后，直至本世纪末钢铁工业的发展大体上经历了三个阶段：

第一阶段是 1952-1973 年间：由于氧气顶吹转炉的发明及其逐步大型化、完善化，推动着钢铁工业飞速发展，使得钢厂获得了巨大的经济效益，并且带动着高炉向大型化发展，尤其是日本的高炉大型化发展具有世界导向性。日本 1961-1965 年间新建高炉的容积为 1350-2047m³，1966-1970 年间新建高炉容积为 2004-2843m³，1971-1980 年间新建高炉容积为 3159-4052m³。与之相应，转炉的最大吨位达到了 300-350 吨。联合企业最主要的轧钢设备——热轧带钢轧机，也向着“大型化、连续化、高速化、处动化”方向发展，70 年代初，热连轧宽带钢轧机的最高轧制速度已达到 1500m/min 以上。

人们知道：一座 2500m³ 的高炉年产铁约 170-180 万吨，一座 3200m³ 高炉年产铁约为 220-240 万吨，而一座 4000m³ 的高炉年产铁可达 300-320 万吨。一个炼钢车间三座 300 吨转炉的年产量可达 650-800 万吨，而一部热连轧宽带钢轧机的年产能力可达 350-500 万吨。同时，由于在这个时期内巴西、澳大利亚等国的大型富铁矿得到开发，国际铁矿资源供给充裕，价格经济。这样，人们就构思以两台初轧机为核心建设沿海、沿河型的 1000 万吨级大型钢铁联合企业。日本、法国、荷兰、德国、意大利等几乎都有这样的投资举

动。当然，这是由于当时对钢铁产品市场十分乐观的形势下的想法。1970 年世界钢产量约为 6 亿吨，当时在日本东京举行的国际钢铁冶金会议上曾预测 80 年代钢产量可达 12 亿吨。然而，后来的市场形势与当时估计的情况有明显的差别，因此，不少进行 1000 万吨级钢厂投资的企业或是开工率不足，或是半途改变投资决策，维持年产 500-600 万吨的生产水平。此后，除韩国浦项、光阳钢厂以外，全球已经没有出现新的单个钢厂年产 1000 万吨钢的，但中国还会有个别年产 1000 万吨以上的钢厂出现。

第二阶段是 1974-1989 年间：由于发生石油危机，能源价格急剧上涨，国际货币汇率变化以及西方国家经济不景气等原因，1974 年以后国际钢材消费量起伏波动，徘徊不前，促使各国钢厂修改发展战略，积极采用节能、节材技术，削减没有竞争力的产品，采用适应市场需求的生产规模，认真进行企业结构的调整。在这一阶段，技术发展最快、投资最为集中的当推连续铸锭。其中日本仍然是一路领先，特别是新日铁的大分厂在世界上率先实现全连铸生产，彻底淘汰了模铸-初轧、开坯生产工艺，对于以后国际钢铁企业的产品结构调整，工艺流程的优化，装备控制水平的提高以及企业经营效益的提高，起到了样板性的作用。连铸工艺对钢厂结构调整、优化和提高市场竞争力的作用不能低估。仅就提高钢材成材率而言，日本 90 年代全国的钢材成材比 1960 年提高 12%-14%。德国 Thyssen 公司由于采用全连铸，金属收得率提高 14%。与此同时，连铸工艺在全世界得到迅速发展，钢厂竞相投资，连铸技术也不断进步，日益完善。1994 年全世界连铸比已达 72.6%，全球连铸坯产量已达 5 亿吨以上。由于连铸工艺的发展，特别是全连铸生产体制需要提供“定时、定温、定品质”的钢水，促进了钢的二次冶金和铁水预处理工艺的发展，使之成为现代炼钢厂不可缺少的工序。钢的二次冶金工序的功能从原来提高质量、开发品种的意义上，进而发展到作为钢水在炼钢-连铸之间在温度、成分、时间节奏上的缓冲调节器作用，确保了连铸机多炉连浇的需要。钢的二次精炼还对炼钢厂的增产和降低成本起了相当有益的作用。

现代转炉炼钢厂已向这样的水平发展：铁水 100%预处理，转炉 100%的炉次分渣处理，钢水 100%通过二次冶金装置，进而 100%连续铸锭。

在这一时间内还使得一系列的节能、节材技术和装备在钢厂结构优化的过程中得到组合运用。

由于模铸-初轧/开坯体制被全连铸生产体制所彻底淘汰，钢厂结构得到了彻底的调整。其产品结构已从万能化转向专业化、系列化生产。一般而言，大型联合企业主要生产扁平材（尤其是薄板类），有的兼生产焊管或高级大、中口径无缝钢管或大型轨梁；其它棒、线、型钢等长材，一般已不由大型联合企业生产。与此同时，从全球角度上看，单个钢厂的生产规模，已不将年产 1000 万吨级作为主要努力方向。

80 年代以来，以废钢为铁源的电炉短流程“小钢厂”得到非常显著的发展，以生产长材为主要方向。由于大型超高功率电炉在工艺技术上的不断开发，单座电炉的生产效率不断提高，已经发展到每一公称吨的电炉容量可以年产 5000 吨钢的水平，这使得生产长材为主的电炉钢厂生产规模不断得到发展，并且在工艺和装备上逐步形成了“四个一”的模式，即一条生产作业线由一台 60 吨以上的大型超高功率电炉、一台与之相适应的二次精炼装置、一部连续铸锭机和一套热连轧组成。

在 80 年代，世界钢铁工业已经形成高炉-转炉流程和电炉流程两种工艺

路线共同发展的格局（而平炉则大量被淘汰，并将继续在全球范围内加速淘汰）。而且，已形成一定的分工，高炉-转炉大型联合企业，主要生产扁平材，有的厂兼营大型型钢、重轨、高级无缝钢管。电炉钢厂则一般主要生产小型型材或优质钢、特殊钢。

值得一提的是 80 年代中国的 300 - 350m³ 级高炉， 30 - 50 吨级转炉， 120² - 150² 小方坯铸得到了较多的发展，用这一系列技术可以组成年产 60-120 万吨规模的钢厂，用以生产棒、线材、中小型钢和普通级别的中板。这类实用技术对某些缺乏资金、缺乏废钢而又有一定数量煤、铁资源的发展中国家迅速发展钢铁工业是有参考价值的。

第三阶段是 1989 年以来，以美国 NUCOR 公司的第一套薄板坯铸-连轧作业线投入生产开始，使得新一代“紧凑型”钢厂的模式得以正式在工业生产上应用。这种作业流程不仅使电炉可以生产薄板，而且更重要的意义在于在全连铸生产体制的基础上进一步省去热连轧带钢机组中的粗轧机组，进一步节能、进一步降低了制造热轧薄板的投资强度和启动资金额。这种“紧凑型”的流程不仅通过薄板坯连铸机来实现，而且在“H”形钢的异形坯铸机和方坯、小方坯连铸机上也在逐步实现。工艺流程不断紧凑化、产品方向专业化、系列化将是世纪之交钢厂结构优化的主要方向。当然，这种“紧凑化”的工艺流程也可以在高-转炉流程后得到延伸，特别是当废钢价格上升到一定程度后，利用原有高炉-转炉存量资产，以“紧凑化”工艺流程改造原有老设备、老工艺，在某些情况下具有良好的经济效益。

四、当代钢铁产品在质量、品种、深加工方面的进展

第二次世界大战以后，特别是 80 年代以来，钢铁产品的质量水平取得了长足的进步。通过转炉复合吹炼，钢的二次精炼装置的不断发展和广泛“在线化”作业，铁水预处理技术的不断进步和推广使用以及连铸过程中保护浇注技术的开发和应用等等，使得钢水的冶金纯净度和成分准确度不断提高。

就化学冶金纯净度的进展而言，现在已能生产最低含量分别为 10ppm [C]、10ppm[N]、1ppm[H]、5ppm[S]、10ppm[P]、5ppm[O] 的钢。

作为现代转炉钢质量水平重要标志之一，深冲钢中伴随元素 C、S、P、O、N、H 的总含量 80 年代以来逐步降低，现在已降到 100ppm 以下。

作为特殊钢质量水平的代表钢种——轴承钢的冶金纯净度也取得了明显的进展，尤其是降低钢中含氧量被作为提高冶金纯净度的重点，在大生产中已可以控制在 10ppm [O] 水平。

随着连铸技术的发展，钢的铸坯质量也得到了提高，首先是由于连铸坯的元素偏析状况比钢锭明显改善，提高了铸坯的均匀度。与此同时，由于连铸的快速凝固，铸坯柱状晶晶轴间距明显小于钢锭，提高了铸坯组织的细密化程度。

由于连铸过程中钢液的二次氧化得到有效控制、结晶器内钢液得到较好的保护以及连铸过程凝固机制的改善，使得连铸坯的表面质量得到保证，常规连铸机生产无缺陷铸坯工艺日臻完善；近终型连铸的表面质量正在不断改进。

上述过程都为随后的物理冶金过程中减少压力加工过程的压缩比、“在线”充分利用温度（热量）和工艺流程的“紧凑”创造了前提条件。

对于合金钢而言，经过几十年的实践和研究，其提高性能的方法途径也发生了重大转折，这就是：

——从单纯地依靠提高合金元素含量进行合金化和采用复杂的“离线”热处理工艺发展到主要依靠改善化学冶金过程的工艺和装备，取得高度纯净的、化学成分准确的并为控制夹杂物形态和所要求晶粒度作好准备的钢液；

——高度注意凝固过程的控制，严格阻断钢液与大气的接触，不断改进工艺和装备，以得到组织高度细密、均匀化、表面质量好的铸坯；

——在充分利用化学冶金和凝固过程科技成就的基础上，合理地降低压力加工过程中的压缩比，缩短工艺流程，充分利用并安排好温度-时间-形变的关系，合理、有效地进行所需的物理冶金过程。

近二十多年来，国际上对钢中微合金元素（V、Ti、Nb、B等）的作用进行了大量的研究和开发应用，在原来低合金钢的基础上，发展起来了一系列微合金钢，其质量和性能相当优越，在成本/价格上具有良好的市场竞争力。

在钢材板型、尺寸精度、表面质量方面取得了长足的进展。热轧宽带钢的凸度在大生产过程已可控制在 15-30 μ 之间，高速线材直径的尺寸精度已可控制在 0.1mm 以内，合金钢棒材直径的尺寸精度已可控制在 0.1mm 以内。

在钢材的表面处理方面也取得很大的进步，汽车用薄板中涂层板所占的比例 90 年代以来发展很快。1990 年德国梯森钢铁公司生产的汽车用板中涂层板占 56%，1994 年占 78%。

在钢材深加工方面值得一提的是薄板产品的“裁缝”坯料技术。所谓“裁缝”坯料技术就是将不同板厚、不同钢种、不同表面处理方式的薄板，通过剪切成不同形状要求的坯料，再用激光焊或滚压电阻对缝焊制作成可供汽车工业直接冲压成型的零部件坯料。这样，可以降低汽车重量，材料使用更为合理，该有强度的部位有足够的强度，该有良好抗冲击、变形性能的部位有足够的性能与之相适应，该厚的部位有足够的厚度，该薄的部位可以减薄，降低了汽车厂购买钢材的成本，降低了汽车制造的成本，也降低了汽车使用过程中的能源消耗。

五、若干工艺技术进步的方向

1. 高炉炼铁

在可以预见的时间范围内，高炉仍将是主要炼铁设备。当然高炉也面临着系列严峻的挑战。今后高炉技术进步将以精料、喷煤降焦和延长一代炉龄的寿命为主要方向。

——精料：在世界范围内，高炉精料将以入炉矿含 Fe58%-61% 为目标，焦炭灰分则应控制在 7%-10% 以下。炉料结构则以烧结矿+球团在 90% 以上（球团矿为 10%-30%）。这样，大型高炉的利用系数有可能达到 3 左右，而高炉渣量将可控制在 250-300kg/吨铁以内，热效率很高。

——喷煤降焦：喷煤降焦是 80 年代以来高炉世界性技术进步方向，也是高炉炼铁部分地摆脱对优质焦煤的依赖程度，降低焦炉投资、折旧费用，减少焦化系统对环境污染的影响，降低生铁成本等方面的重要措施。在目前中国的情况下向高炉内每喷入一吨煤粉，约可以节约 80-100 元。如果考虑到焦炉的投资和折旧，将节约更多的成本。现在的技术水平，向高炉内喷吹 100kg 煤粉/吨铁不需要富氧，喷煤量超过 100kg/吨铁时，要求富氧量迅速增加，

目前喷吹 200-250kg/吨铁煤粉已经在工业生产上实现。有人报道,当高炉喷煤量大于 160kg/吨铁时,供氧量低于理论所需值,这表示煤不能得到充分燃烧,因此推算出富氧量只能达到 $53\text{m}^3/\text{吨铁}$,再进一步增加富氧量不能得到相应的经济效果。当然,提高喷煤量的措施很多,尤其是热风温度提高到 1200-1250℃、混合配煤喷吹以及改进喷吹装置等。

——延长一代高炉的寿命:提高一代高炉的寿命,对充分发挥大型联合企业的生产效率和投资效益十分重要。现在一代高炉的寿命已可以达到 12-15 年,进一步的发展方向是一代高炉寿命为 20 年以上。

2. 转炉炼钢

转炉炼钢已经相当完善,今后的方向是:

——延长转炉炉龄。长期以来延长转炉炉龄的目的在于增产和降低吨钢耐火材料消耗。自从实现全连铸生产体制以后,转炉延长寿命的目标已经进一步转向确保全连铸条件下的多炉连浇,并且力争与连铸机同步检修,而补炉时间则与铸机浇次结束时换引锭杆同步进行。转炉炉龄的延长,将进一步考虑与制氧机、热轧车间的检修时间适当同步。这种技术上的优化,对企业管理和企业效益很有意义。从现有的技术水平看,一个炉役转炉炉龄达到 1 年左右甚至 2 年以上已在一些工厂得到实现。

——大力发展分渣出钢技术,逐步做到 100%的炉次实现分渣。由于现代化转炉钢厂内钢的二次冶金装置是 100%“在线”作业的,为了进一步发挥二次冶金装置的功能和效率,必须严格控制转炉炉渣进入钢包。因此,转炉出钢过程的分渣技术的重要性日益突出,尤其是对于[S]、[P]、[O]有极严格要求的钢种⁸ 乔绪恕*

——进一步加强熔池搅拌,进一步降低熔池的含碳量并降低钢中含氧量、含氮量和渣中含铁量,促进提高质量。

3. 钢的二次冶金

——功能的综合化。

——冶金纯净度的极限值进一步改善,并使钢中多个有害元素的总量进一步降低。

——化学成分准确度进一步提高。

——进一步提高控制钢液温度的准确性。

——若干新型专用精炼装置的开发。

——进一步提高钢的二次冶金装置在转炉-连铸之间时间节奏方面的协调能力。

4. 连续铸钢

连铸仍是钢铁制造流程中发展最为活跃的环节:

——全连铸体制的全面普及,并且以生产无缺陷铸坯为基础,逐步实现铸坯热送、铸坯直接装炉,甚至铸坯直接轧制。

——发展高拉速连铸:小方坯连铸向 3.4-4.2m/min 的拉速发展,传统板坯连铸向 2.2-3m/min 的拉速发展。

——发展近终型连铸:

· 薄板坯连铸:第一代 4.0-5.5m/min 拉速的铸机已经比较成熟,进一步开发第二代连铸机,其每流产量将达 120-150 万吨/年。

· 薄带连铸:已有多种试验机型,主要集中在不锈钢、硅钢等钢种上,带厚一般在 3mm 以下,宽度大多在 800-1000mm。估计在 2000 年前会有工业

性的突破，其工业规模将在年产 30 万-50 万吨水平上，也有人在展望这种工艺适应年产 200 万吨规模的可能性。

- 异型坯连铸：主要适应“H”型钢等大、中型材，目前世界上已有二十多套装置进行工业生产，将进一步发展。我国马钢将在国内率先投入生产。

- 线材连铸：由钢水直接铸成线材的技术已有初步开发，但投入工业规模生产估计将在 2000 年以后。这种技术在引起人们的注意，特别是不锈钢以及各类高级合金钢焊丝等。

- 空心圆坯连铸：这一技术可能在 2000 年以后获得成功。

——提高铸坯表面和边角部质量：这将是各类连铸机包括所有近终型连铸机在内的关键性技术。铸坯表面质量的提高，将有力地促进钢厂流程的“紧凑化”和生产规模的灵活性；在投资和成本方面具有相当重要的价值。

5. 电炉

——进一步提高生产率：

- 进一步扩大吨位，开发 180t-220t 级的大型电炉。这类电炉将主要应用在生产扁平材的钢厂。

- 化学能的利用：吨钢 ~ 50m³ 氧气的利用，天然气、煤粉的利用，30% -50% 热铁水的利用等。当然，利用热铁水尚有利用显热、提高钢液纯净度等作用。

- 冶炼节奏的“转炉化”：从 90 分钟一炉钢，缩短到 60 分钟一炉钢，现在已可缩短到 45-50 分钟一炉钢，如果再进一步缩短装料等工序的时间，有可能缩短到 40 分钟左右一炉钢，实现日产 36 炉钢的生产体制。——关于炉料质量问题：· 直接还原铁、热压铁块、碳化铁的制造工艺和使用工艺。· 废钢收集、处理、选别技术。· 废钢预热技术的开发和综合评价。——冶炼低氮钢的困难性。装入 40% 左右铁水的超高功率吹氧电炉可以明显降低钢水含氮量。

6. 轧钢——各类与连铸工序进行高温热连接的缓冲系统和工艺软件。——高效连续轧制技术和装备开发。——高精度轧制的系统技术和装备。——进一步开发控制轧制和控制冷却的工艺装备。——设备故障诊断系统的开发、完善。——进一步开发各类表面处理技术。

7. 熔融还原——COREX 装置大型化，进一步降低能耗（面向富块矿为主）。——COREX 煤气可能的利用方案及其技术-经济评价。——熔池过程的熔融还原工艺系统和装置的开发（面向粉矿为主）。

8. 投资、经营、组织生产的 CIMS 系统开发——企业投资的分析、判断和决策系统。——针对市场的产品推销、开发系统。——基于多维物流管制基础上的生产计划的制定和智能生产调度系统。——企业资金运行的优化分析系统。

9. 21 世纪钢铁流程的展望有人预测了日本 2020 年不同工艺流程以及各冶金工序装置的发展和所占比例，认为届时日本钢铁工业的铁资源 55% 来自铁矿石，45% 来自废钢。转炉钢将占 55%，电炉钢将占 30%，其余 15% 的钢则由多能源炉生产。所有钢水都要通过各类多功能的二次冶金装置。50% 的钢水将通过薄板坯和异型坯连铸机成坯，40% 的钢水仍通过传统连铸机成坯，10% 的钢水将通过最新开发出来的薄带和棒材连铸机生产。可见，以废钢为铁源的流程和以矿石为铁源的流程将有更新的组合形式出现。

从全球角度上看，环境保护问题越来越重要、越来越紧迫。钢铁工业作为一个主要的基础原材料工业，其特点之一是资源密集、能源消耗大，大钢厂对环境的影响越来越引起社会的关注。钢厂生产过程中的排放物、废弃物、

泄漏物主要以废气、废水、固体废弃物（炉渣、废钢、废砖等）和粉尘等形式出现。当然也还有其它形式的污染影响如噪声、震动、电网的冲击闪烁等。

从全球看，当前最为突出问题是全球性的“温室效应”。引起“温室效应”的原因主要是三原子及三原子以上气体的排入量过多，从数量上看特别是CO₂。现在全球每年CO₂的总排放量已达57亿吨碳，其中工业排放量占21%，交通业的排放量占19%，家庭的排放量占20%，电厂的排放量占40%。中国CO₂的总排放量约占全球的1/10，人均排放0.58吨碳/年左右。

中国由能源消费引起的CO₂的排放量中，不同行业的排序是电力、建材、钢铁、化工以及二次能源生产本身。其中钢铁行业占13%左右。在欧洲今后要定出标准，征收CO₂排放税。从目前能源消耗看，中国钢厂、钢铁工业吨钢排放的CO₂明显高于西方发达国家的吨钢CO₂排放量，其中尤其是高炉炼铁系统。钢厂排放的CO₂主要来自高炉炼铁、炼钢和各种加热过程，因此加强节能工作十分重要，应该在企业技术改造过程中突出各个环节的节能、节材工作，为此要进行合理的投资。

焦化过程也是一个特别引人注目的污染重点，焦化过程中SO₂、碳氢化合物及其废水中的氨、酚的排放对大气、水系的污染已经引起社会的高度警惕。因此，一方面要降低高炉炼铁系统焦炭的使用量和降低热轧过程中焦炉煤气的消耗量，从理论与实践角度看，每吨生铁消耗250-300kg焦炭是可能的；另一方面则要加强焦化过程污染的治理。

西方发达国家高炉渣量已由二次世界大战后的700-800kg/吨铁降到250-300kg/吨铁。一般而言，高炉炉渣都得到较好的利用，可以说接近100%的回收。所以，高炉渣已不是大问题。

炼钢炉渣的利用，虽说有很多技术开发出来，但总的来看，回收利用率不如高炉渣。在我国炼钢渣的回收和综合利用潜力很大，应该更多地对钢渣加以综合利用，否则作为固体废弃物排放占地（渣山）和对环境的影响会日益突出。

各类粉尘排放也是钢厂对环境的一大污染。50年代以后，世界各国钢厂加强了综合治理，排出废气中粉尘含量逐步降低。

随着环保问题越来越突出地列入各国政府议事日程，环保技术也得到不断的发展。就钢铁企业的环保而言，环保要解决的问题往往是在解决污染的同时，要求做到资源综合利用和能源的节约，是环境效益、社会效益和经济效益的统一，从工程上看环保技术实际是工艺技术、环保专业技术和程序控制技术的综合。

从国际钢铁工业的发展趋势看，用于环保的费用日益增加，德国钢铁业已达到50马克/吨钢，进一步将达到70马克/吨钢。有报道说，新建钢厂环保方面的支出为利息支出的15%，将来还会增加。有人估计，钢铁联合企业用于环保方面的支出为20美元/吨钢，电炉钢厂约为10美元/吨钢。

加强环保工作，无疑需要投资，但是钢厂抓环保不能就环保抓环保，应该和整个工厂的技术改造、技术进步结合起来，和资源综合利用、节约能源消耗等结合起来，统一投资，事半功倍，达到环境效益、社会效益和企业经济效益的统一。

六、关于钢铁企业的多元化经营

钢铁工业是资源密集、资金密集、知识密集、运输密集型的产业，因此在这些方面具有相应的管理优势和技术优势，随着市场变化以及其它新兴产业的发展，世界主要产钢国的钢厂，自 80 年代以来，纷纷利用自身的优势开展多元化的经营，几乎成为一种国际趋势。

据德国钢铁协会介绍，德国钢铁企业已开展了大量的多元化经营活动，已经达到 70-75% 的销售收入来自非钢铁业，25-30% 的销售收入来自钢铁业的程度。

综合分析钢铁企业多元化经营，大体有三类趋势：

1. 相关产业型：例如造船、机械制造、工程与咨询、发展新材料或有关贸易等。

2. 不相关产业型：例如向能源、通讯、电子等产业投资。

3. 能源、环境综合优化、集约经营型：这是构思中的多元化经营模式，追求在一个地区内单位产值的资源、能源消耗的最佳化和对环境的不良影响最小化的集约经营，同时实现经济效益的最佳化。

需要指出，钢厂的多元经营是一种战略，是为了充分发挥自身的资金优势、管理优势和技术优势求得更好的经济效益。因而不同于简单的人员分流。一般而言，当钢厂自身的经济实力还没有达到一定水平时，首先应致力于自身的结构优化和人员的合理分流；当经济实力超过某一水平时，再因地制宜适时展开战略型的多元化经营。

七、归纳与展望

在可以预见的时间范围内，钢铁仍然是世界上非常重要的材料，从全球角度看钢铁工业不是“夕阳工业”。世界（尤其是中国）钢铁消费量仍将进一步增加。世界产钢国分布已经发生了重大变化；环太平洋地区以及发展中国家转变为未来的主要产钢区，21 世纪初中国将是世界第一产钢国。但无论发达国家还是发展中国家，钢铁工业都在以不同的方式进一步发展。第一次石油危机以来（1973-1974 年），国际钢铁工业的发展方向已从原来的数量扩大为主转变为调整、优化结构为主。

从世界角度看，平炉钢厂已属彻底淘汰的对象。以矿石为铁源的高炉、转炉流程和以废钢为主的电炉流程是当前以及 21 世纪初生产钢铁的主要流程。这两种流程之间的关系是既竞争又互补的关系，也是某种程度上的平衡关系。从国家、地区角度来看，这种“平衡关系”的前提条件是资源、能源、运输、资金和市场等因素。

作为钢厂结构优化的逻辑顺序应是从市场需求出发，确定产品系列，由产品系列选择工艺流程，由工艺流程和产品质量要求出发选择装备能力和功能，并在上述基础上确定钢厂的合理规模。

从工程上看，钢铁生产流程的实质是物性转变、物性控制和物流管制在工程上的合理组合。由于市场的变化和科学技术进步的推动，钢厂结构的模式发生了深刻的变化。从总体上看，在石油危机发生以前，钢厂在设计上的特征是以模铸-初轧机为中心前后展开的，其工程逻辑的实质可以用“叠加-蔓延-万能化”来概括。石油危机以后，由于全连铸体制钢厂的出现，初轧（开坯）工序被彻底取代，大力发展连铸是现代化钢厂工艺流程结构优化的重大

突破口。特别是以薄板坯连铸-连轧为代表的近终型连铸技术在工业生产上的突破，钢厂结构发生了重大变化。从工程逻辑上分析，可以概括为“临界-紧凑-系列化、专业化”。从工程本质上看，“紧凑化”是世纪之交和 21 世纪初钢厂发展的核心问题。这种“紧凑化”趋势的支撑条件是一系列化学冶金和物理冶金过程的科技进步。从物理本质角度上看，是不断提高化学冶金过程中的钢液纯净度和成分准确性，并为后续的物理冶金过程的要求作好必要的遗传准备；不断改善凝固过程中铸坯组织的细密化、均匀性和实现表面无缺陷化；以此来达到压力加工过程中的压缩比的合理降低以及温度（热量）合理利用的目的。从技术进步角度上看，发展并完善各类近终型连铸、开发熔融还原是两大重点。然而，在目前情况下这两者之间似乎以近终型连铸较为成熟。今后，在开发熔融还原的同时，高炉仍将继续存在、发展。炼铁系统中的高炉大量喷吹煤粉，长寿以及精料等方面仍有潜力，将继续是技术进步的投资重点之一。转炉炼钢厂将向 100% 铁水预处理、100% 的炉次分渣出钢、100% 炉外精炼、100% 连续铸钢的方向发展。连铸机-连轧机之间高温热联接将是进一步“紧凑化”的重点。热轧机以后各类产品的深加工，是高附加值化和提高钢铁产品的市场竞争力的重要措施。大型高效率电炉、各类炉外精炼装置以及各类控制完善的高效轧机也是进一步发展的重要方向。对新建或重新改造的以生产长材为目标的电炉流程而言，其工厂格局都在向着“四个一”的模式发展，这就是由一台大型电炉、一套炉外精炼装置、一部连铸机和一套主力热连轧机组成一条高效率、高质量的作业线。

钢铁产品的质量在不断地提高，综合机械性能、专用性能、加工性能、使用性能不断地向着适应用户新的需求发展。产品的深加工程度也不断延伸发展，无论是扁平材、棒/线材、管材都有不少新的深加工、高附加值产品领域。

环保对钢铁企业的要求越来越严。这种趋势，既是压力又是机遇（钢的可再生利用性将改善钢铁工业在公众心目中的形象和提高在材料中的竞争力）。从工程技术上看，环保问题不仅是一个专业环保技术问题，而是工艺技术加环保专业技术和程序控制技术的有效结合，这些都需要投资。钢厂抓环保不能就环保抓环保，最好是和整个工厂的技术改造、技术进步结合起来，统一投资，这将事半功倍，投资效益好。

多元化经营是世纪之交国际钢铁界的一个值得重视的发展趋势。多元化经营是一种重要的战略，而不仅仅是人员分流的问题，多元化经营战略的主要目标是为了适应市场、资产增值和提高经济效益。

面临世纪之交，国际钢铁产品市场充满着激烈的竞争，从根本上看，这是立足在新一代生产力基础上的竞争，而新一代生产力的获得取决于正确的市场判断和在此判断下的新一轮投资决策；当然，也包括新工艺、新技术的研究、开发、投资决策。中国钢铁工业已经具备生产 1 亿吨钢的实力，21 世纪中国钢铁工业如何持续、健康发展，应该在科学地预测市场、优化选择新一代生产力的前提下，形成适合中国国情、各厂厂情的战略，以老厂改造为重点，以正确的投资方向、投资顺序、合理的投资强度和恰当的投资时机为支撑手段，形成有竞争力的、布局合理的钢厂群，去适应国际、国内市场的竞争并获得良好的效益。

现代设计与知识获取

谢友柏

西安交通大学

谢友柏 机械学、摩擦学专家。1933年9月23日出生于上海市。1955年毕业于交通大学，现任西安交通大学润滑理论及轴承研究所所长、教授。兼任中国机械工程学会摩擦学分会理事长。1994年被选聘为中国工程院院士。主要从事润滑理论及轴承等工作。

一、现代设计技术及其在先进制造技术中的作用

产品设计是制造业的灵魂。如果说“管理”是制造业的大脑，那么“管理”的最重要的任务之一就是为企业铸造好这个灵魂。当前“先进制造技术”在国家的各个层次和各个方面受到了极大的关注，而其中的“现代设计技术”又往往被列在“先进制造技术”诸子项之首。因为不管如何，产品的结构、性能、质量（全面满足用户要求）、成本（全成本）、交货时间（含新产品开发时间）以及可制造性、可维修性（含产品升级）以及人、机、环境关系等等，原则上都是在产品的设计阶段确定的。而制造业之得以生存和发展，则取决于其一代一代的产品在激烈的市场竞争中，能否为用户所选中和接受，也就是说，这是一个买方市场。所以我们说，设计是制造业的灵魂。

“先进制造技术”是美国人在他们国民经济发展进程中提出来的。当然，我国制造业问题更多，但是我们在先进制造技术方面所面临的问题，是否就是美国先进制造技术所要解决的问题？我们在现代设计技术方面所面临的问题，是否就是美国现代设计技术所要解决的问题？在“有所为，有所不为”原则下，以及对“有所为”的部分，应如何“为”之，是必须首先弄清楚。否则，基础研究的命题浩如瀚海，我们向什么方向去突破才能对国家目标有所贡献，就不得而知了。美国的制造业和我们的制造业有很大不同，这是谁都不能否认的。至少可以列举以下与讨论“现代设计技术”有关的几点：

1. 美国的制造业是经过二战和二战后空前的发展阶段，由于战争需要及战后在全球范围中占有市场（例如马歇尔计划等），在刚性生产的模式下，某些制造业（例如轿车）曾经经历过极度的发展，他们是在这种发展之后谈“夕阳工业”的。我国的制造业从来没有经历过这种发展：解放前，我们是一个半殖民地国家，工业十分落后，几乎谈不上自己的制造业；解放后，虽然工业得到一定程度的发展，但发展是不完整的，一是始终依赖苏联技术，二是没有市场经济环境。在一个封闭的、贫穷的经济条件下，又频繁地受到政治因素的干扰，这种发展先天不足，后天失调，根本谈不上夕阳不夕阳的问题。

2. 美国的制造业经历长期发展过程之后，在企业中都形成了强大的研究开发力量。这种研究开发力量是它不断推出一代又一代产品到市场上去竞争的支柱。例如据说贝尔实验室曾平均每天产生一个专利。美国的企业对大学和研究单位的要求往往只是出论文，而由论文至技术到产品的任务则是在大企业的研究开发中心内进行。在这种模式下，企业的研究开发部门不仅积累

了大量经验知识，而且形成一整套的管理体制。我国则不然，研究开发力量比基础研究力量还要弱，在某些领域中几乎等于零。除了上述在技术发展方面的先天不足以外，由于计划经济体制，设计和开发任务长期以来是放在设计院、研究所中，工厂只负责按图纸制造；又由于条块分割，一个行业只管自己行业的产品，而于其它方面从不问津。一旦计划经济体制改变，工厂变成独立经营的企业，这种研究开发力量绝不是一朝一夕所能建立起来的。即使强制将一些设计院、研究所并入某个工厂，也绝非很快就能运行自如。尤其是要使产品多样化以适应市场，例如生产大电机的工厂要生产家用烤箱，生产轧钢机的工厂要生产集成电路芯片，则更是难上加难。从我国企业对于高等教育人才培养规格的要求上，也可以看出强烈的反差，当然这只能在其它地方讨论。另一方面，美国在大谈“夕阳工业”并把制造业向国外转移的时候，转出去的主要是企业产品制造部分，而其研究开发部门则仍牢牢地控制在国内。可见，产品研究和开发是制造业中执牛耳的部分。

3. 美国的基础研究是当今世界上最领先的，任何其他国家都无法与之相比拟。基础研究为制造业提供了丰富的元知识和领域知识。美国还集中了全世界由他国出资培养的、携带着在他国积累的丰富经验的优秀研究人才，他们不断为美国制造业输送新的思想和研究成果。我国则不然，我们基础研究经费少得可怜，由于技术开发对基础研究需求疲软，研究成果的利用率十分低，而且基本上处于一种无组织状态。另一方面我国培养的许多人才，把他们在国内得到的经验连同他们在国内的研究成果，在毫无知识产权保护的情况下，随着他们到美国去学习或工作无偿地带到美国，为美国制造业做贡献。所以，在反差这样大的情况下，我们必须非常认真地选择我们的“先进制造技术”的研究领域，解决我们自己的问题，不能跟着美国学者漫无边际地去探索。

因此，在制定我国发展“先进制造技术”策略的时候，必须从我国国情出发，走自己的路。配置先进的制造设备，固然需要，但是解决自行设计能在市场上有竞争力的产品（另一种说法是能够不断产生出有自己知识产权的设计），就不得不被放到优先考虑的位置上了。有几个问题还需要进一步说明一下：

有人说：“先引进、后自立”。这句话并不错，但如果不解决如何走向自立之路的许多问题，那么过 100 年，也许这仍然是一句口号。我们解放后学苏联 30 年，开放后学西方 20 年，所得到的教训难道还不够吗？

有人说：“引进技术，先解决有无问题”。这是封闭社会的观点。过去外国产品不能进入，物资匮乏，外转内销（出口不合格）的就是好东西，大家排队去买。现在国内外市场是统一的市场。技术引进，人家卖给我们的是即将淘汰的东西，等你结结巴巴地投产之后，他新设计的一代产品又如潮水般涌来。要强调一个观点，我们必须用最先进的技术，而不是人家已经投入市场、成为产品的技术去支持我们企业的产品开发工作。

先进制造设备固然重要，但有能卖得出去的东西生产更加重要。生产的东西卖不出去积压在仓库里，生产越多，亏损越大。生产别人设计的产品，甚至落得个来料加工的地位，始终不能翻身。产品与设备虽不必一一对应，但也有密切关系。不考虑如何搞产品，先把设备建起来，搁置在那儿让它们老化，许多浪费都是由此而来。

“制造需要设备，设计是软件，容易解决”。不对！设计需要的设备也

许更贵，例如为轿车试验建一个试车场，要多少钱？国际上软件比硬件贵，从成本上也有他的道理，软件更是由大量投资积累起来的。我们因为很少自己搞开发性的设计，不明白这个道理，以为只要给技术人员发发工资就行了。

所以，在研究发展“先进制造技术”的战略时，不应当把关于发展“现代设计技术”、包括它的理论和方法的研究放在架空中的地位，也不应当泛泛地讨论一些无所不包的算法。我们应当探讨制约我国制造业迅速发展自己研究开发能力的众多因素，以及如何通过安排基础研究支持他们解决这些问题。这里面包括如何利用现有国内外的有利条件和我国国情特点，尽量不重复工业发达国家走过的轨迹，直接达到世界现代设计技术的前沿。而是否达到前沿的标准不应当看我们的算法如何地无所不包，而是看产品的综合竞争能力究竟增加了多少。当然我们要与国际接轨，必须研究人家的东西，但这种研究要为我们自己的目标服务。

现代产品的设计是基于知识的设计，有别于过去的基于经验（一般意义上）的设计。设计是否成功，取决于其中现代知识的含量，所以知识获取就成为问题关键。如果把知识作一个粗略的划分：把已有知识的总和划为“经验”，把开发一个新产品所需要获取的知识划为“新知识”；那么是否可以说新产品在市场中的竞争能力是与它的新知识含量直接有关？知识获取是知识工程中的一个难题，是专家系统建设中的瓶颈问题。但是在任何时候、任何场合也没有像我国制造业在发展现代设计技术时那么迫切需要它。如上所说，中国制造业发展到今天形成的诸多特点，都需要依赖它来解决问题。所以它应当成为我们研究“现代设计技术”中的基础问题、共性问题的核心。关于这一点，我们将在下一节作详尽的讨论。

顺便说一句，CAD中的“D”绝不能理解为“制图”。在以引进技术和仿制为主的制造业中，“设计”的主要工作当然只剩下制图了。现代产品设计是大规模知识获取和运用的过程，制图只不过是这个过程的最最终表达罢了。而且也不是一切都能由图形表达的，大量非图形的特征只能用其它方法表达。

二、设计知识获取的研究

设计知识获取有两方面内容：技术方面的和管理方面的。这里主要讨论技术方面的问题。如果把包括设计过去一代产品的知识都归入“经验”范畴的话，那么其它都是为设计新一代产品所需要获取的新知识。信息科学发展到今天，制造业已不单讲“竞争”这一面，而是竞争与合作并存的局面。在这种局面下，设计知识的拥有，也分为独有和共享两部分。知识产权当然是指独有的那部分，共享部分主要是经验范畴中的内容。经验并不都能共享，许多经验是绝对保密的。但是，产品所赖以发展和竞争的，则主要是上面所说的新知识。无论如何，所有知识在一个企业内部，即使有授权等级的区别，总是高度共享的。

设计一个产品的知识，通常来自以下方面：

1. 已有经验；
2. 市场信息；
3. 数字仿真或虚拟现实；
4. 物理模型试验；
5. 样机试验；
6. 已有产品运行中的表现（用户反映）。

在这里没有把灵感创作列为知识来源，因为这在设计知识产生的任何方面、任何阶段都不可或缺，但灵感创作一般需经上述任一方面的检验和认同

之后，才能成为知识。现就以上六方面分别讨论如下。

已有经验

“经验”包括设计过去一代产品的全部知识，这样划分便于新知识获取的研究。经验当然既包括元知识，也包括领域知识。对于制造业来说，即使是一个行业，这也是一个浩瀚的知识领域，既不能仅由书籍、手册作为载体，也不能仅以文献作为载体。因为书籍所记载的大约为 10 年前的知识，文献则大约为 5 年前的知识。产品设计的经验知识，有的可能是昨天才得到的。当然更不能靠个人记忆或设计师把它们抄录在自己的小本子上来存贮和使用。前面已经说过，我们国家的基础研究和开发研究，比起美国来薄弱得多。但改革开放以来，国家也尽很大努力建立了许多国家级的重点实验室、工程研究中心、部委级的开放实验室；从“六五”、“七五”、“八五”以至“九五”下达了不少研究项目（基金、攻关、攀登、火炬……），投入经费与工业发达国家相比虽然不多，但对我们说来已经是不小的数目。如何组织和用好这部分研究和开发资源以及成果对中国的制造业具有特别重要意义。要靠企业积累资金来建设自己的研究开发中心，时间会十分漫长。而利用好已有的资源，则是一条捷径。上海市市长徐匡迪在上海汽车工业科技发展基金成立大会上的讲话，就表达了这个意愿。但是有一个问题：通常企业的研究开发部门是企业的一部分，承上启下关系十分明确。而现在企业外的这些研究单位，大都归国家某行政部门领导，这些行政部门不是研究成果的直接使用者。上述设想能否成功，关键在于能否把这些研究部门的有关工作组织成如同企业内部各部门的工作那样。从历史上看，这种研究成果向企业转移的情况是很不理想的。通常企业要花很大的力量接受和理解它们。至于把分散的研究成果组织起来成为可供产品设计的知识，则更是费时无度，困难重重。所以过去的研究成果是利用不多，流失不少。在管理上，这可以通过研究所所谓的虚拟公司的形式来解决。在技术上，要研究的问题就是我们这个战略研究报告所应当回答的。这里面应当包括设计某一类产品的问题的分解，所需要的知识的知识结构，不同类型知识的统一表达，知识的存贮、增删、修改、调用权限设定、加密、并行作业等等。所有参与研究开发的单位都要遵守相同的约定。虽然对后面五方面来源的知识同样存在这些问题，但只要把经验知识的建模问题解决好，以后的新知识就可以按照同样原则处理。由于研究开发是在不同实验室中做的，还要解决信息传输的网络问题。总的说来，就是要研究一个能以知识支持并行设计的环境，包括一个大的知识库和信息传输网络，并将当前所有知识经过处理后都存贮进去。

是否各实验室做出来的结果就直接成为设计所能依据的知识，那要看委托方与受委托方是如何约定的。不过大多数情况下不是如此。而且不同目的的研究，其结果有可能相互冲突，例如汽轮机设计中，通流部分设计对轴颈尺寸的要求与转子轴承系统设计对轴颈尺寸的要求可能发生矛盾。如何处理这种不完备或矛盾，提出解决办法或更进一步研究的课题，这通常是由人来完成的。为了减少人力消耗，特别是避免约定不严密，需要研究设计知识形成的过程，也就是说要设法赋予上述环境以一定的智能，以融合各方面来的信息。

市场信息

设计所需的市场信息至少有 3 方面内容：

（1）需求信息。当然这种信息应当是由经营管理人员或某种智能系统处

理过的，以确定的或模糊的形式给出，使设计人员便于应用。

(2) 成本信息。不仅是企业内部为设计、制造、售后服务所需要的成本，而且在合作生产中，部分或大部分组件是由配件制造企业提供的。现在已可以用多媒体产品目录来准备和处理供货信息。

(3) 竞争信息。其它企业投入或即将投入市场的同类产品性能、价格等方面的信息。

数字仿真或虚拟现实

数字仿真或更高级的虚拟现实，都是建立在一系列数学模型基础上的。根据给定的系统结构和对系统的输入，预测系统的性能和行为。它是获得关于一种新构想或新设计的知识的有效工具。因为主要是在计算机上操作，通常不制作专用的模型或实物，在软件和硬件的配置上具有很大柔性，因而能节省时间和资金，可以为设计人员在考察其设计构想时大规模地运用。这种关于新设计或新构想的知识，和经验相比，就属于新知识范畴。

不要认为需要仿真的只有造型和力学问题，更不能认为设计当中一切问题的数学模型都已经具备了。如果真正要把数字仿真和虚拟现实当作设计知识获取的一个全面的有力的工具，而不是仅仅作为某些狭窄目标知识获取的工具，那就必须面对如下事实：随着对产品性能要求不断提高和对自然规律认识不断深化，我们总是处在没有数学模型和有数学模型，旧数学模型和新数学模型的不断交替的过程之中。所有新发现的现象或新构想从一开始都没有数学模型或没有准确的数学模型。这里可以说一说“摩擦学设计”。由于一个机械系统的摩擦学性态及行为有强烈的系统依赖性和时间依赖性，同时它们又是分属于许多不同学科研究的过程综合影响的结果，所以摩擦学问题的数学建模问题十分复杂。例如即使是一副简单的试样，在一种系统条件（例如 Timken 机）下获得的结果，往往不同于另一系统条件（例如 SRV 机）下的结果，当然也不同于待设计的目标系统系统条件下的结果；另外，对于新系统、跑合系统、磨损系统的结果也不一样。这样为了仿真的需要，我们不仅要有系统行为本身的数学模型（这个模型涉及到许多不同学科研究的问题），还要有系统条件转化的模型和时变规律（为全寿命周期设计服务）的模型。否则仿真所做的预测就是不准确的。这个事实一方面告诉我们，在讨论建立一个无所不包的模型，也包括讨论建立在数学模型基础上的各种优化研究时，要持慎重态度；另一方面也为我们提供了现代设计技术基础研究几乎是无限的领域，因为产品设计总是要求提供的设计知识越来越逼近真知，给出的预测越来越精确。

要对大系统和复杂过程进行数字仿真和虚拟现实，不仅仅是数学模型和计算机运算的问题，还涉及到多媒体技术、传感器技术、伺服技术等等。某些虚拟现实系统具有非常复杂和庞大的结构，而且是十分昂贵的。有的并带有部分物理模拟的特点，可以说是一种混合模拟，例如模拟宇宙载人舱。当然与发射一个真的载人舱到空间去相比，花费的时间和资金已小得多了。这些都是用数字仿真和虚拟现实获取知识所要研究的问题。

优化问题，首先是模型问题，其后才是算法问题。而模型则是人们对所优化的问题的已有知识的集中表现。知识不断更新，模型也不断发展，没有一成不变的模型。所以优化研究归根结底也离不开对所研究问题的各种来源的知识获取。

物理模型试验

正如前节关于数学模型发展和更新讨论中所涉及的问题那样，许多过程没有令人满意的数学模型。此外，所有数学模型都是建立在假设的基础上的。为了建立尚不具备的数学模型和对一些由仿真得来的知识在重要应用中要求从别的方面检验的需要，必须做物理模型的试验。没有对物理现象的精确观察就能获得知识是不能想象的。这对研究开发基础薄弱，设计知识贫乏的我国制造业尤为重要。由于没有充分掌握必要准确的设计知识而造成重大经济损失的教训，早年有过，现在还有。

物理模型试验不是实物试验，它是在不同系统条件下进行的。物理模型设计是基于系统条件转换的理论。对于可由微分方程组描述的过程，通常由相似理论作为系统条件转换的准则。但不是所有过程都能找到合适的微分方程组。所以仍有许多工作亟待研究。

物理模型试验的计算机控制和试验结果的处理是需要研究的另一类课题。

对于同一设计任务，无论是经验知识，或是由仿真及虚拟现实得来的知识或是由物理模型试验得来的知识，各自包含某些正确的信息（信息）和某些不正确信息（噪声），这往往表现在它们的一致方面和矛盾方面。试验结果处理研究包含要研究一种信息融合技术，使其中的信息得到增强，噪声得到抑制，从而获得更接近真知的知识。采用计算机控制试验过程、采集、传输和存贮数据，是提高试验精度和速度的重要措施。

样机试验

在设计物理模型试验时所做的系统条件转换是否正确，要由样机试验来回答。现在大家都在谈论波音 777 飞机的设计。但我们并不了解他们设计的内部过程，例如他们的知识库中究竟装了一些什么东西，以及他们究竟是如何利用在设计其它飞机时所积累起来的经验的。另外有相反的例子：日本日产株式会社已经有 3 个试车场，还在计划建新的试车场；国外某厂正计划出车、出仪器、雇人在中国的各种道路上跑车，记录中国的道路谱；目的是用这个记录在他们国内建一个适合中国道路情况的试车场。

样机试验的投资巨大，样机试验所得到的信息的采集、传输、存贮、整理，特别是由此得到的知识，如何与上述其它方面得到的设计知识融合，使获得的新知识服务于新一代产品的迅速投产，决定了投资的回报率，是需要研究的重要的知识工程问题。

所有上述五方面都包括制造产品各个部分以至整体的制造工艺过程的知识。

已有产品运行中的表现（用户反映）

面向用户的制造业把用户反映当成是对设计和制造质量的最终检验。要做全寿命周期的设计，包括考虑售后服务（含安装、调试、维修升级、废料处理等等）以及人、机、环境关系，我国的制造业是不熟悉的。出了问题要处理，这一点能够接受，于是就有了“下现场”的任务。现在下现场主要是解决问题，解决了就回来，没有形成一条设计知识反馈的正规渠道。这里面也有两方面问题，一是管理，二是技术。技术方面是要建立一网络，使这条渠道能够畅通。首先是所设计的产品要有必要的状态监测子系统，我们说这个子系统的有无和工作好坏是衡量一个产品设计的现代化水平的尺度，特别是从全寿命周期设计角度考虑，你不仅要自己知道你设计的产品性能退化规律，你还要让你的用户知道你的产品运行的当前状态和对未来状态变化的预

测。更理想的设计是产品具有自动控制和退化自动补偿的子系统。这些都是摩擦学设计最近的研究成果。因为摩擦学系统是时变的，摩擦学行为使系统中有一大批所谓的“易损件”，更换易损件和处理有关问题常常是维修的主要内容。现在回到网络问题上，对于重要的为数不多的固定式产品，其状态监测子系统所测得的信息可以通过各种通讯网络直接传送到企业的设计部门，现在国内外都已有这种尝试。企业可以长期地记录和观察它的产品的运行、退化、恢复、再退化——直到报废的全过程。这种用途应当成为信息高速公路今后的重要用户。对于移动式产品，例如船舰，在非紧急情况下状态信息可以存贮在计算机中相应的数据库中，到达基地后用某种载体将它们送入网络。而对于紧急情况，只好依赖无线通讯了。对于大批量产品，例如汽车，还要研究别的方法。

除此之外，当然也有一个融合的问题，不过这时由于系统条件的复杂性，带来噪声的复杂性。

以上初步讨论了我国制造业为设计自己一代一代在市场上有竞争力的产品如何获取知识的问题。关于经验知识，主要是积累和科学管理。关于设计新一代产品的新知识，则是如何最快速地形成所需要的正确的认识。在企业内部，要建立这样一个知识获取的系统，当然是没有问题的。但面对我国国情，却需要在更广泛的社会范围中形成这样一个系统以争取时间。也许这在以后经济发达了也仍不失为一个长期努力的方向。这里面有硬件的研究，也有软件的研究，包含大量的高技术问题，也包含丰富的基础理论和应用基础理论问题。它是制造技术，也是机械工程科学发展到今天摆在我们面前的任务，如何能设计出更好的机器（广义）？既为用户所欢迎，又便于制造，既有很高的质量，又便宜。

当然设计时所用的知识，不能都由制造业自己来解决。但当设计师把所有的要素都放在一个系统中变成产品时，责任就不得不由制造业自己来负了。通常材料的性能和工艺过程质量是比较难控制的，但放到一个系统中以后，正如摩擦学界有一句名言：“摩擦副的特性不是构成摩擦副表面的材料的特性，而是系统特性的表现”。这就足以说明设计知识获取的复杂性和重要性了。

以上讨论了现代设计技术中的知识获取问题，这个问题虽然以各种不同形式在不同的项目中被分散地讨论过，但是从来没有作为产品设计的关键与“先进制造技术”联系在一起加以研究。现在在这里提出这个问题，希望有更多的同志参与到这项讨论中来，为我国的制造业及其产品迅速获得市场竞争能力从技术上做出应有的贡献。

光纤通信给人类通信带来革命性的变化

简水生

北方交通大学

简水生 光纤通信和电磁兼容专家。1929 年 10 月 25 日生于江西萍乡。1953 年毕业于北京铁道学院。现任北方交通大学光波技术研究所所长、教授。1995 年当选为中国科学院院士。主要从事光纤通信和电磁兼容方面的研究。

光通信技术发展十分迅速，过去常讲科学技术大约二三年是一个半衰期，就近年光通信技术的发展而言，大约一年就是一个半衰期。

下面从 11 个方面进行阐述。

1. 历史发展的进程
2. 光纤的损耗、色散、非线性、强度和寿命
3. 传统的光纤通信系统
4. 光纤放大器 EDFA
5. 光波分复用 WDM
6. 光时分复用 OTDM
7. 光纤非线性的冲击
8. 色散补偿及非线性的抑制
9. 光纤通信正向 Tb/s 进军
10. 光孤子通信
11. 光纤技术——人类信息社会的重要支柱

首先回顾一下光纤通信发展的历史进程。在 40 年的时间里，传输经历了从架空明线到波导再到光纤的变化。从这些变化中可以清楚地看到，光纤通信事实上给人类的通信带来了革命性的变化。很难设想如果今天仍停留在同轴电缆的时代，那么今天的通信是否还能有如此高速的发展。

进入到信息社会，在使用光纤之前，世界上使用的是中同轴电缆，单管每公里重 200 多公斤，北京到广州使用的八管同轴，每公里重高达 1.6 吨，再加上金属护套等，每公里重达 4 吨多，以现在的价格，则每公里八管同轴的价格高于 20 万人民币。而它的性能对于传输 1800 路尚不能完全保证。人类社会如果仍是以同轴电缆作为主要通信干线，那么今日的通信事业就不会有如此迅速的发展。

光纤与同轴电缆相比，具有明显的优势，1 公里光纤的重量为 27 克，二者具有天壤之别。此外光纤还具有其它优点，其最大优点就是它的载频高，达到 10^{14} Hz。我们光波所一直就在进行着从低频到高频发展的研究，从厘米波进入到微米波提高了三个数量级，通信容量亦提高了三个数量级。这个发展可以说是一个大的飞跃。由于光纤具有重量轻，载频高，通信容量大的优点，人们最初设想光纤可以传输上亿话路，但这需要走过一个艰难的历程，目前传输的话路可以达到千万话路级，由此可见光纤的推广和使用对人类通信具有极其深远的意义。

作为光纤通信的主体，它的原理并不复杂，两个折射率有微小差别的媒质，根据斯涅尔定理，一束光射入另一媒质时产生折射，入射角大到一定程

度时，就会产生全反射。光纤通信就是根据这一原理，使光在媒质中进行全反射传输，所以光纤由两个部分组成，即芯子和包层。现在所用单模光纤的芯径只有 $8 - 9\mu\text{m}$ ，包层为 $125\mu\text{m}$ ，这一标准由高锟博士提出，并已经得到了国际上的公认。

光纤通信的重要指标有三个，即损耗、色散和非线性。在光通信发展的历史过程中，人们首先遇到的问题就是光纤的损耗。随着制造工艺的改进，光纤的损耗很快由 70 年代的 20dB/km ($1.55\mu\text{m}$ 处) 降至 80 年代中期的 0.2dB/km ，但是这并不是损耗的理论极限，真正极限应当是 $1.55\mu\text{m}$ 处，损耗为 0.11dB/km 。通过进一步的工作，最小损耗有可能接近这一理论极限。由于损耗问题的解决，光纤开始走向实用化，随着通信容量的增加，通信速率的提高，人们愈来愈认识到色散的重要性。关于非线性，人们的认识则比较晚，只是在最近两年人们才意识到非线性的重要性。下面将就这一问题作专门说明。

强度和寿命是人们从光纤通信一开始就十分关注的问题，但直到目前仍未从根本上解决光纤的强度和寿命问题。光纤的强度和寿命之所以紧密相关，核心问题就在于光纤制造时，其表面存在微裂纹。应力的集中点位于口子的尖端，若不及时补救，则口子会越裂越大，最终报废。对光纤上这一问题，就是要将这些裂纹补起来。

生产过程中，人们一直考虑如何将这些裂纹修补好，并未从根本上将微裂纹消除掉。目前光纤的使用寿命为 25—30 年，其核心问题就是表面微裂纹的问题。这一问题，也是目前世界上大家所关心的近期攻关课题之一。有人建议可在光纤表面涂覆金刚石粉，但这仍未从根本上解决问题。如何从根本上消除掉微裂纹，我们正在发展这方面的工作。

人们往往会误以为光纤强度就决定了光纤的抗拉强度，实际上并非如此，光缆设计过程中的根本原则就是任何时候无论施工还是正常运行时，光纤都不允许受力。它有足够的余长和空间，使其在低温时不产生微变。

下面看一下损耗，色散和非线性。损耗使光纤中传输的脉冲幅度由大变小，色散使通过光纤传输的脉冲变形，甚至交错在一起，非线性则使脉冲由一个频率变为众多的频率。

光纤的损耗有两个窗口，一个是 $1.3\mu\text{m}$ ，它的损耗目前约为 0.35dB/km 左右，另一个为 $1.55\mu\text{m}$ ，目前其损耗的平均值为 0.2dB/km 。 $1.55\mu\text{m}$ 外损耗小，窗口大，它可供使用的带宽约为 25Tb/s ，即 25000 千兆比每秒，近乎天文数字，现在我们使用的多为 $1.3\mu\text{m}$ 波长，正在开发 $1.55\mu\text{m}$ 波长。

事实上如果能将 OH 根去除，那么光纤的损耗会进一步降低，在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处约为 0.11dB/km 。

光纤的色散，对常规光纤而言在零色散点 $1.31\mu\text{m}$ 处没有色散，但该窗口损耗较大，对 $1.55\mu\text{m}$ 窗口损耗小，但色散较大，约为 17ps/km.nm 。在光通信发展初期，人们一直在寻求将零色散窗口移至 $1.55\mu\text{m}$ 处，即研制色散位移光纤 (dispersion shifted fiber)，随着光通信的进一步发展，人们发现如果色散绝对为零，亦会带来一系列问题，这就是下面重点讲到的非线性问题。AT & T 为此又研制出一种光纤，将零色散点由 $1.55\mu\text{m}$ 移至 $1.531\mu\text{m}$ ，保证在 $1.55\mu\text{m}$ 处有大约 2ps/km.nm 的色散，它取名为 truewave，邮电部在京九线上已铺设了部分这种光纤，其价格比普通光纤贵得多。

有了光纤当然还要有光源，光源主要分两大类，激光器和发光二极管。

二者光谱特性和发散角的差别较大，如今量子阱激光器在我国已经过关，寿命可超过百万小时，即量子阱的阈值可到 1—2mA，将来进一步做量子点激光器，可以到零点几毫安，甚至其电流只有微安级，这就可以做到寿命长，效率高，不用致冷。这是目前光通信发展方面一个很大的进展。

光纤和激光器进一步组成了光纤通信系统。传统的光纤通信系统中都加有再生中继 (Repeat)，而再生中继本身需要进行光/电变化。每一个中继器都需要经过检测、放大、均衡，再放大，然后再进行电/光转化，十分复杂，且造价昂贵。我国目前铺设的系统基本上都是传统的光纤传输系统。

传统的光纤通信系统近年来也经历了一个由 PDH 向 SDH 发展的过程。随着通信的发展，世界范围内建立一个光的直接接口就势在必行。以往存在有多种制式，如日本和美国的制式，1.5Mb/s，6.3Mb/s，32Mb/s，45Mb/s，欧洲和我国有 2Mb/s，8Mb/s，34Mb/s，140Mb/s……这些系统互相联系不起来。而全球通信则必须具有一个统一的时钟，互相兼容，这正是 SDH 产生的一个重要因素。

除此之外，现有的 PDH 系统，如 140Mb/s 要下到 2Mb/s，需要经过 34Mb/s 到 8Mb/s，再解复用才得到 2Mb/s。反之也需经一个个台阶才能得到高速率，十分复杂。SDH 则十分简单，可直接由 155Mb/s 下到 2Mb/s，且其组网非常方便，网管系统非常好，可实现在线检测。我国邮电部毅然决定从 PDH 直接进入 SDH，是一个非常正确的决策，这使得我们可以很快与世界接轨。

目前国际传输系统的发展，1995 年达到 2.4886Mb/s，估计明年会出现 10Gb/s 的系统。长途干线的增长速度放慢，地方网直线上升，而发展最快的是 CATV 网，其发展非常迅速。在我国如何实现 CATV 网与电话网的兼容和协调发展是一个十分重要的问题。

美国总统克林顿提出“信息高速公路”这一行动纲领和政府计划以来，在世界上引起了强烈反响，这可以从光纤铺设上体现出来，1994 年 1 月的统计，全世界范围铺设的光纤总量达到了 5470 万公里，1994 年底，增到了 7600 万公里，净增 2100 万公里。到目前为止，世界光纤铺设总量早已超过 1 亿公里。我国的光纤铺设总量亦在不断增加，去年铺设光纤数在 130 万公里以上，远超过以往每年 30 万—40 万公里的铺设量，发展十分迅速。但是我国的光纤通信产业并未建立，130 万公里光纤大多从国外购买。我们要实现通信光纤到路边，到家庭，这对光纤的需求量将是近乎天文数字，所以我国必须建立起我们自己的光纤产业。

下面介绍掺铒光纤放大器 (EDFA)，光纤放大器是首先由南安普顿大学研制，包含有掺铒光纤，泵浦源耦合器。其增益带宽可达 35nm，即 4.2THz，最大增益可到 40dB，输出功率大于 100mW，并且噪声很低，仅 4dB。这种光纤放大器的出现和日趋成熟就带来了新一代光纤通信系统的产生，无需再经过再生中继，即发射光经过一个放大器传输即可。再进一步多通道传输，亦可以合波后经放大，然后再解复用。这就是 EDFA 在波分复用中的应用，无再生中继传输目前的最高记录是 10Gb/s 传输 9000km，共用了 274 个 EDFA。因此对下一代的光纤通信传输系统，应是多波长的，即采用波分复用系统 (WDM)，WDM 系统的进展十分迅速，去年美国 OFC 会议上最高记录为 17 个通道，每通道 20Gb/s，可传输 100 多公里。

在 WDM 系统发展的同时，引来了时分复用系统的发展 (OTDM)，在前几年 OTDM 的发展十分缓慢，去年 OFC 会议上日本 NTT 公司首先提出了 200Gb/s

传输 100km 的 OTDM 系统。首先是 16 个 6.3Gb/s 再次复用后变为 200Gb/s，脉冲宽度最初为 3.5ps，然后经光纤压缩成为 2.1ps，经过一个 40km 与 20km 的传输，到系统完成脉冲宽度展宽为 2.6ps，随着传输距离的增加，它的功率代价很大。由 0 公里到 100 公里，它付出了 8dB 的代价。

在 1996 年的 OFC 上，仍是日本的 NTT 向 OTDM 的极限发起了最后冲击，它做出了 400Gb/s 的传输系统。与去年的 OT-DM 系统相比较，基本部分大致相同，只是在后面的复用部分采用 4 个通道，采用 4 个时分复用，将传输容量提高至 400G/s，它实际上传输了 40km。然而仅传输这 40km 的距离已发现了许多问题，因为要传输 400b/s，光脉冲的宽度是 0.98ps，就已到了 ps 级，甚至亚 ps 级。经过 40km 的传输，光脉冲发生严重的畸变和扩展。起始的光脉冲，其半宽为 0.98ps，传输 40km 后的光脉冲，其半宽已达 2.3ps，增加了一倍多。为此他们采取了一些相应的措施。去年他们在传输时发现 2.1ps 在零色散波长上传输 100km 距离后展宽为 2.8ps。我们光波在这方面做了一些分析工作，所得到理论分析的结果与他们的结果是基本一致的。脉冲的展宽基本上是由于它的高阶色散所造成的，即由色散的斜率所造成的。因此他们这次采取了斜率的补偿，传输 40km 后的脉冲宽度由 2.3ps 最低降到了 1.6ps。NTT 作者认为这是由于高阶色散未完全补偿所造成的。我们的分析并非如此，我们分析认为光脉冲半宽由 0.98ps 展宽到 1.6ps 的中心问题是由于偏振模色散 (PMD Polarization Mode Dispersion) 所造成的。

下面还要专门谈到偏振模色散的问题，可以说偏振模色散是光纤通信容量的最后极限，是光纤通信容量要进一步扩大的致命的杀手。

由于 WDM 的推广使用已经到了实用化阶段，而其实验室的研究又在不断地向新的高度进军，再加上 OTDM 的出现，非常窄脉冲的出现，因此光纤色散和非线性的影响就成为目前光纤通信的一个非常重要的主题。

下面先介绍一下光纤非线性的冲击。光纤的非线性基本上分为两个部分，一个是由于传输的强度很高，产生了受激散射，它包括受激布里渊散射 (SBS Stimulated Brillouin Scattering) 和受激喇曼散射 (SRS Stimulation Raman Scattering)。这在下面会做一个分析。再就是光纤本身芯子的折射率随着光所通过的功率在发生变化，即折射率并非定值，而是非线性的。光纤芯子折射率的非线性造成了光信号在光纤中传输的自相位调制 (Self Phase Modulation)，以及交叉相位调制 (Cross Phase Modulation)。最重要的是产生了四波混频，又称四光子混频 (Four - photon Mixing)。电通信中非线性产生混频现象在光通信中重现了。

如果采用 WDM，它本身是有很多波长同时在光纤中传输，这就很容易产生四波混频的作用。下面分别讨论一下这几种非线性影响哪些是严重的，哪些是可以忽略不计的。

首先产生布里渊散射的阈值。对于普通单模光纤而言，它的零色散点在 $1.31\mu\text{m}$ 波长处，这是目前大量使用的光纤，对于这种光纤，它的非线性的有效面积大约为 $80\mu\text{m}^2$ ，如果我们光的调制的非相干宽度为 100MHz，那么产生受激布里渊散射 (SBS) 的阈值是 42mW，如果我们的调制信号更宽，脉冲更窄，则受激布里渊散射的阈值就愈越高，这是一个非常有意思的事情。它是速率越高，布里渊散射的阈值越高，所以可以说布里渊散射对于限制光通信的最终容量的贡献不大，一般来说，可以暂时不予考虑。

下面来看受激喇曼散射的阈值。计算结果表明，如果是色散位移光纤，

即将零色点由 $1.31\ \mu\text{m}$ 移到 $1.55\ \mu\text{m}$ 处，由于光的波导结构发生了变化，它的有效的非线性截面积大约只有 $50\ \mu\text{m}^2$ ，产生受激喇曼散射（SRS）的阈值是 1.1W ，这在一般的波分复用情况下是不能够达到。一般的普通光纤可以达到 1.8W ，由此可见，普通光纤对于非线性的承受能力要优于色散位移光纤和 truewave 光纤。

由此可见，喇曼散射对一般的波分复用是不会产生的，只有一种情况例外。现在有人想在光纤中实现码分多址，如果采用码分多址则通道数很多，不是几十个，而可能是几百个同时在光纤中传输，那个时候光纤的喇曼散射现象就会产生。还有一个现象也会出现非线性效应，人们现在正在研究光的交换，人们在研究光交换时仅仅是局限于讨论如何实现交换，尚未考虑到光纤非线性，因为光纤要交换，所有用户要到交换机的光纤上去，这样的功率是很大的，所以非线性在将来的光交换过程中成为不可逾越的一个障碍。喇曼散射使得光脉冲的能量发生转移。解决喇曼散射的方法主要有两种，一个是采用滤波器，另一个是均衡。

理论和实践证明，非线性中影响最严重的是四光子混频。

两个不同频率的光信号 W_1, W_2 在光纤中传输，经过混频后产生两个新的频率 $2W_1 - W_2, 2W_2 - W_1$ 。如果在光纤中传输三个波长 W_1, W_2, W_3 信号时。情况就更为复杂，根据公式 $W_{\text{新}} = W_i + W_j - W_k$ ，依次为 1, 2, 3，特例： $i = j$ 即两个波长的情况，则会产生九个新频率，其中一些新频率就落入原信号频率间隔中，从而产生了干扰，这个现象就是我们目前最关注的一个问题。

人们自然会问，产生四波混频与哪些因素有关。我们做了一个计算分析，表明四波混频同光纤的色散密切相关，色散越大，四波混频愈不容易产生，如果色散为零，则四波混频现象就愈容易出现。信道间隔愈大，则产生四波混频愈不容易， $D = 0$ 为零色散光纤，四波混频现象严重， $D = 17\text{ps/nm} \cdot \text{Km}$ 为普通光纤，可以看到普通光纤可以很有效的消除四波混频。

在 $1.55\ \mu\text{m}$ 上，我们希望有足够多的通道。要开设足够多的通道，而我们又把零色散点移至 $1.55\ \mu\text{m}$ 处，造成严重的混频现象，这岂不是自己找麻烦吗？大家也许会说，若不将 $D = 0$ 挪至 $1.55\ \mu\text{m}$ 处，那么色散大，又必然会造成脉冲的展宽，如何处理这样的问题呢？这就是我们目前所研究的问题。

近两年来我们一直在研究如何正确利用光纤本身的色散，从前面的分析可以看出光纤色散既是坏事，又是好事，把脉冲展宽是坏事，可与此同时它又能够有效的抑制四波混频，这是好事。人们想到可以做出两种光纤，一种光纤具有正色散，另一种光纤具有负色散。为此我们做了一些相关的工作。

在光纤通信系统中做一个 A 光纤，再做一个 B 光纤，A 纤的色散为正，B 光纤的色散为负，这两段光纤均工作于 $1.55\ \mu\text{m}$ 窗口，具有相反的非零色散值，由于波导结构的特殊设计，工作波长内两段光纤的正负色散叠加相消，总连接色散在较宽的波长范围里接近零色散，同时，由于每一根光纤的非零色散，非线性效应能够被抑制，由于低的色散坡度，更多和更高速率的 WDM 信道能够使用，又由于传输线是由两种光纤组成，每一根光纤的长度都能够灵活调整，以获得最佳的一阶色散效果。对 A、B 段光纤及 A、B 链接后光纤的色散分别进行测量，结果可看到链接后的光纤在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长 40nm 范围内光纤的色散只剩下零点几个 ps。色散被很好的抵消。

最初人们的设想是用一段普通光纤（conventional fiber），加上一段

深角色散光纤来实现色散的抵消，刚开始不成功，基本上 50km 一个中继距离，需增加一段 20 多公里长的负色散光纤来抵消色散，色散抵消的同时，却带来了损耗的增大，又需要加入 EDFA 来进行补偿放大，因此人们并未看中这一方案。随着这两年人们对负色散，深负色散光纤的研究，出现了一些可喜的变化。

最近关于深负色散光纤，提出一个参数，品质因数。即每一个 dB 可以得到多少负色散，康宁公司所做的这种光纤最高可做到 400ps/km.nm 的色散。以普通光纤为例，50 公里传输带来的色散大约有 800ps/km.nm，采用福建省康宁公司的这种光纤，只需要 2dB 的代价就可以将 50 公里传输所带来的色散全部补偿。这带来的好处是对于常规光纤而言，其色散为十几个 ps/km.nm，对四波混频现象起到很好的抑制作用，而深负色散光纤中，四波混频现象更不易发生，那么所付出的代价仅仅是几个 dB 的损耗。因此在中继的两个放大器之间加入这样一段深负色散光纤，就可以做到既抵消色散，又有效地抑制四波混频，由此看来未来的发展趋势已经基本上可以明确。我们光波所在深负色散光纤方面也开展了一系列的研究工作，其中的一个实验结果，是在 1.55 μm 处这种光纤的负色散可以达到 200ps/km.nm。

除了加入深负色散光纤来进行色散补偿外，是否还有其它色散补偿的方法呢？现在看来比较有效的办法就是采用不均匀光栅，大约使用十几厘米的光栅就可以补偿几百公里光纤的色散。1995 年的 OFC 上，人们就已经实现了 270 公里，在 10Gb/s，采用 120mm 的啁啾光栅的色散补偿。

在 1996 年 2 月份的 OFC 上，同样是采用光栅来补偿色散，实现了 10cm 光栅对 700 公里光纤传输的色散补偿。这种光栅的反射率在光脉冲的传输过程中接近于百分之百，它的延时随着波长增加而减少，它的结构是这样的，刚开始栅很疏，随后越来越密。那么这种光栅是如何实现对色散的补偿呢？普通光栅在 1.55 μm 波长处色散上升，即波长愈长，色散愈大，延时愈长，所以波长愈长，走的速度越慢，结果一个高斯脉冲传过去时，短波长在前，长波长在后。当光脉冲碰到光栅后，长波长先反射，短波长后反射，这样就实现了对脉冲的复原，完成了色散补偿。

就已经铺设的光纤而言，世界上可能已超过了一亿多公里，我们国家铺设的光纤也已有 1000 万公里左右，那么对已铺设的光纤又如何来对其提高速度呢？很简单，如果只需要 10Gb/s 的系统传输，那么无需加入色散补偿光纤，只需每传输 100 公里加入一个光栅即可。所以说这项研究对于我国已经铺设的光纤和准备铺设的光纤而言是一项意义十分重大的科研成果。

我们光波所也开展了这方面的工作，即用紫外光在光纤中写入光栅，初次测量的一个实验结果它的反射率已达到了 98.5%，估计进一步达到 99.9% 不成问题，这一技术在近年内定会在我们国家内过关。

光栅要达到实用化，还有许多问题需进行深入的研究，比如光栅的温度稳定性问题。如果稳定性很差，随着温度的漂移使得波长来回移动，这显然是不可行的，所以对于刻光栅的光纤也需要采用一种特殊结构。目前我们正在开展这方面的工作，估计在二三年内可达到实用化。

由此可以得出结论，我们国家事实上只需铺设普通光纤而无需引入价格昂贵的 truewave 光纤和色散位移光纤。将来要发展 10Gb/s 的通信，只要加入光栅就可以解决几百公里光纤的色散补偿。采用 truewave 光纤和色散位移光纤一方面价格比普通光纤昂贵，另一方面又不能适用于将来的波分复用系

统，使得发展高速光通信成为不可能。1996 年 OFC 上光栅对色散补偿的成功的演示系统也有力地证明了上述结论。

现在人们在向光纤通信的最后容量冲刺，已经达到了 Tb/s 的数量级，1000 兆比特的通信容量大约为 12000 话路，1000 千兆比特的通信容量就是 1200 万话路。在 OFC ' 96 上日本富士通就展示了用普通单模光纤（即零色散波长在 $1.31\mu\text{m}$ 的光纤）传输了 55 个通道，每通道 20Gb/s，总传输量为 1.1Tb/s 的通信系统，因此它所传输的话路就可以达到 1300 万话路。具体而言，这个系统是将 55 路 20Gb/s 的信号每传输 50 公里加入 EDFA，并同时加入一段色散为 -103ps/km.nm ，品质因数为 200ps/dB 的色散补偿光纤，传输距离为 150km。

美国 AT & T 公司也给出了一个达到 Tb/s 量级的通信系统，采用 25 个波长经过光纤的偏振复用形成 50 个通道，共传输了 55km。

日本 NTT 采用 10 个通道，每个通道采用时分复用 OTDM 到 100G/s，这样也达了 Tb/s 的传输容量，传输距离为 40km。

可以说目前已从三个方面冲向了 Tb/s 的传输量级，这是目前的最新水平，1995 年在圣地亚哥举行的 OFC 会议上，最高记录为 200Gb/s，仅仅相隔一年就已经达到了 1000Gb/s，光纤通信发展是十分迅速的。

下面介绍一下 90 年代初期至今一直被人们所津津乐道的光孤子传输问题。光孤子传输是利用光纤非线性的自相位调制来压缩光谱，抵消色散的影响。其中存在很多问题，首先，它传输的能量必须要很大，光孤子的传输需满足一个功率的阈值条件，该阈值与色散成正比。所以要求传输孤子的光纤必须是色散只有零点几个 ps 的特殊光纤。而另一方面孤子除一阶外具有一个周期。

孤子周期是限制孤子发展的一个最大因素，它要求两个光纤放大器之间的距离必须要远小于孤子周期，孤子传输才有可能实现。而孤子周期又同光脉冲宽度的平方成正比，而速率越高，这个平方值就愈小，孤子周期就愈小，ps 量级孤子周期不到 1 公里，这就要求小于 1 公里就放置一个放大器，显然是不可能的。再加上光纤放大器的自发辐射噪声也会影响光孤子的传输容量。而最主要的还是孤子周期的限制，如果放大器的距离超过了孤子周期就要产生混沌现象，就会使光脉冲相互吸收、分叉。因此，以我个人看法，光孤子已经被线性系统所淘汰，光孤子通信已不再是未来的发展方向。

事实上，现在要引起人们足够重视的是光纤通信容量的杀手——PMD，即光纤的偏振模色散。任何工艺做出的光纤都不可能是一个理想的圆。光纤发展至今，其制造工艺的重要性日益显著，由于 PMD 的限制，使得人们追求在光纤中传输 ps 级脉冲的梦想彻底破裂了。

对于传输 10Gb/s 的系统，几十个 ps 级，如果传输距离很长，那么 PMD 仍然是一个制约因素。PMD 产生的原因就在于光纤芯的椭圆度使之长短轴上光的传播速度不同，这样就使得一个模式成为了两个模式，从而影响到光纤的传输。

德国西康公司测出 PMD 平均值分别为 $0.083\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 、 $0.075\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 属于比较好的光纤。

世界上正在讨论生产规范，PMD 将成为光纤的一个重要指标。我所的博士生也在这方面开展了一些相应的工作，因为目前国内尚无测 PMD 的仪器，国外仪器的价格又十分昂贵，所以我们自己搭了一个系统，经过几个标准样

品鉴定，与康宁公司给出的数值基本相同，大约为 $0.3\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。另外拿国内武邮生产的色散位移光纤进行了测量，发现我国对这一问题没有引起重视，大的达到 $3\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ，小的则为 $0.2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ，非常不均匀。

现在已经明确，对于海底光缆传输，PMD 必须小于 $0.15\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ，即使如此，传输一万公里，产生的色散也有 15ps ，显然不行。如何消除 PMD 呢，是个很关键的问题。因此在 863 会议上，我对这个问题大声疾呼，希望能够引起大家的共鸣。我们在很恶劣的实验条件下，一直在考虑如何解决这一问题，如果能够解决，那将会是世界性的一大突破。可以说光纤通信容量与 PMD 问题的解决密切相关。

从人类社会发展的长河来看，把光纤的潜力挖掘出来全部为人类服务，就是光通信工作者的任务。也许有人会问，氟光纤，理想损耗值为 10^{-2}dB/km 的光纤现在是否要继续研制？氟光纤性能上脆弱，不易焊接，价格昂贵，而且目前的损耗还与理想值相差 50 倍以上，何况光的损耗不是影响光纤容量的重大因素，有光纤放大器就可以抵消掉足够长距离的损耗。现在的关键问题是光纤的色散，光纤的非线性，光通信容量的最终杀手就是 PMD，即光纤的偏振模色散问题。所以我个人认为，其它光纤的研究已经没有任何意义。

光纤不仅给人类的信息社会带来一个美妙的前景，人们经过多媒体的传输可以在家里上班，可以在任何一个地方上班，在任何地方得到世界上最有名的医生的会诊，在任何一个教室听到世界上最有名教授的讲课，也还可以在家里看到世界上的美景。而且光纤还渗透到了工业的各个部门，即光纤的传感。目前最成功的就是光纤陀螺，美国的波音 777 飞机上已经用其来导航了，机器人的定向系统也是利用了光纤陀螺，此外，光纤的灵巧结构，光纤光栅可用于任何需测量场合，如飞机外壳，长、大隧道的应变，重要桥梁的应力情况，据说目前美国急待检测的危险桥梁就有 96000 多座。光纤在医疗上也给人们带来好处，人们可以不用手术刀，而仅采用两根光纤就可以实施心脏手术，可以说光纤技术给人类社会带来了光辉美好的前景，为人类做了巨大的贡献。

长江口深水航道工程及其战略意义

窦国仁

南京水利科学研究院

窦国仁 泥沙及河流动力学专家。1932年11月16日出生于辽宁北镇。1956年苏联列宁格勒水运学院毕业后继续在该校读研究生。历任水利部、交通部、能源部南京水利科学研究院院长。高级工程师。兼水利部大坝安全监测中心主任，交通部技术顾问，国际泥沙研究培训中心管委会副主任，国务院学位委员会水利学科评议组召集人。1991年当选为中国科学院院士。主要从事泥沙基本理论研究。

一、前言

长江是我国第一大河，世界第三大河，全长6300多公里，素有黄金水道之称，目前总的可通航里程为3638.5公里。长江横跨我国东西，流经九省一市，在长江口注入东海。长江口自徐六泾以下江面迅速展宽，呈喇叭型，徐六泾江面宽度5.8公里，到达与东海交汇处的苏北启东咀和上海南汇咀间的江面宽度已达90公里。崇明岛将长江口分为南、北二支；长兴岛和横沙岛又将南支分为南、北二港；九段沙又将南港分为南、北二槽。长江在长江口地区呈三级分汊、四口入海之势，但口门均有拦门沙，水深较浅。目前南港北槽为主航道，自然水深为6米，依靠疏浚维护到7米水深；南港南槽和北港的自然水深为5.5米至6.0米，只走万吨级以下船舶；北支因泥沙淤积日趋消亡，只能通行小船。虽然长江口拦门沙以内河道，直至南京，水深一般均在10米以上，但由于受拦门沙河段水深较小的限制，万吨以上船舶均需候潮才能进出长江口，2万吨以上船舶均需减载通过。

改革开放以来，上海和长江三角洲及长江沿线的经济，呈现出快速、持续发展的局面，长江口航道已远远不能适应长江沿线经济发展的需要。特别是在党的十四大提出了“以上海浦东开发开放为龙头，进一步开放长江沿岸城市，尽快把上海建成国际经济、金融、贸易中心之一，带动长江三角洲和整个长江流域地区经济新飞跃”的重大战略决策之后，开发长江口深水航道已成为当务之急。因此，国家计委将“长江口拦门沙航道演变规律与深水航道整治技术研究”列入了国家“八五”科技攻关计划。在交通部直接组织、领导下，在以严恺院士为组长、我为副组长的专家顾问组指导下，有关单位近百名科技人员通力合作，在以前30多年长期系统研究的基础上，于1994年提出了长江口深水航道加深到12.5米的整治方案，可使第三代、第四代集装箱船和5万吨散货轮全天候进出长江口，10万吨级散货船可乘潮进出。这项成果得到了专家们的高度赞同，《人民日报》等各大报刊均在头版显著位置进行了报道。1995年国家计委在向全国人大八届三次会议的报告中，将这项研究成果列为我国科技领域取得的重大突破。现在长江口深水航道整治工程已被列入1996年召开的全国人大八届四次会议确定的“国民经济和社会发展‘九五’计划和2010年远景目标纲要”中。这项工程是继长江三峡工程之后长江上的又一项重大工程，对实现党的以浦东为龙头，把上海建成三个国

际中心，带动长江三角洲和整个长江流域经济新飞跃的战略决策，将发挥不可替代的关键作用。

二、国际航运发展及其对航道水深的要求

近 10 年来，世界海运发展很快，从 1985 年的 29.9 亿吨增加到 1991 年 40 亿吨，1991 年以后，世界海运量以每年 2% 的速度递增，到 2010 年世界海运量将突破 50 亿吨。为适应巨大的货运量以及降低运输成本，提高竞争能力，油船、散货船和集装箱船均已或者正向大型化发展，特别是集装箱船大型化的趋向更为明显。现在一般远洋运输原油的油船都在 20 万吨以上，成品油船为 4 - 6 万吨级，运输铁矿石的散货船为 10 万吨以上，运输煤炭的散货船为 10 - 15 万吨和 6 - 8 万吨级，运输谷物的船为 3 - 5 万吨级。在运输杂件货时，以前一般采用装载 1000 - 2000TEU（标准箱）的集装箱船，现洲际主航线的集装箱运输一般以装载 2500TEU 以上的第三代集装箱船（3.5 万吨级）为主，装载 4000 多 TEU 的第四代集装箱船（5 万吨级）已投入使用。世界集装箱装运量大幅度增长，集装箱率接近 60%，集装箱已成为杂件货运输的主要方式。

随着船舶的大型化，其吃水深度也在增大。目前世界上拥有 2500TEU 以上的船舶约 260 艘，箱位数达 80 万 TEU，占全集装箱箱位数的 40% 以上。这些集装箱的吃水深度一般都在 11.0 - 13.0 米，70% 以上吃水小于 12 米，最大吃水 13.5 米（参见表 1）。目前仍以巴拿马型为主，超巴拿马型（装箱数多而吃水浅）将逐步增多，21 世纪初将会出现载箱量为 5000 ~ 6000TEU 以上的第五代集装箱船，吃水一般不超过 15 米。

表 1 集装箱船的吃水深度

吨 级	载重量 (吨)	标准箱数	总长 × 型宽 × 型深 (米)	吃水 (米)	备 注
3.5 万	33340	2696	201 × 28.4 × 15.5	10.73	
4.0 万	40189	2761	236 × 32 × 19	11.0 — 12.0	巴拿马型
4.5 万	42800	3761	275 × 32 × 21	11.5 — 12.5	巴拿马型
5.0 万	48385	4340	275 × 39.4 × 23.6	11.0 — 12.0	超巴拿马型
6.0 万	66480	4400	294 × 32 × 21.5	12.0 — 13.5	巴拿马型

我国的集装箱运输起步较晚，但近些年来发展很快，集装箱船是我国运输船舶中发展最快的船型。目前还以载箱量为 1000TEU - 2000TEU 的第一代和第二代集装箱船为主体，只有少量载箱量为 2500TEU 以上的第三代大型集装箱船。据预测，到 2000 年我国港口国际集装箱吞吐量将突破 800 万 TEU。为适应这一货运要求，我国的船队中 2500TEU 以上的大型集装箱船会有较大增长，载箱量为 4000TEU 以上的第四代集装箱船也将投入营运。上海港的集装箱吞吐量增长迅速，1990 年不到 50 万 TEU，1992 年突破 73 万 TEU，1995 年已达 153 万 TEU，发展速度之快，远远超过原规划设想 1995 年为 110 万 TEU 的数字。然而目前进出上海港的长江口航道水深只有 7 米，只能使用第一、二代集装箱船候潮进出，与上海港的发展，特别是集装箱运输的发展极不适应。国际集装箱运输是定线、定港、定时的班轮运输方式，要求集装箱船能

全天候进出港口。现在世界主要大港和国际集装箱枢纽港的航道水深均在 12 米以上（见表 2）。由表 2 可见，上海港的航道水深远远小于世界各大港的航道水深，与上海港作为世界大港的地位极不相称。

表 2 世界各大港的航道水深

港名	航道水深（米）	港名	航道水深（米）
鹿特丹	24.5	釜山	13.4
新加坡	19.0	汉堡	12.5
洛杉矶	15.5	魁北克	12.5
温哥华	15.0	神户	12—14.2
高雄	14.0	香港	12.5
新奥尔良	13.7	东京	12.0
安特卫普	13.5	横滨	12.0
纽约	13.5	上海	7.0

回顾世界大港航道发展的历史，许多河口港的航道都经历了增深过程，通过整治与疏浚相结合的工程措施，航道水深逐步加大。在表 3 中列述了欧美几个河口的航道增深情况。由表 3 可以看出，整治前航道自然水深在 6.0 米以下，未达到万吨级航道；1930 年以后，航道水深增至 9 米以上，成为万吨级以上航道；60 年代以后航道水深增至 12.5 米以上，成为 5 万吨级航道。目前少数河口已建成 10 万吨级航道。长江口航道，自然水深为 6 米，1983 年以后通过疏浚使航道增深至 7.0 米，只能使万吨以下船舶全天通航，1—1.5 万吨级船舶仍需候潮进出，2 万吨以上船舶都要减载才能通过，远远不能适应国际运输的需要。表 2 中所列世界各大港的航道水深均在 12 米以上。表 3 中所列各国河口港口的航道自然水深都不大，等于或小于长江口航道的自然水深，但经过整治与疏浚，航道水深均已增加至 12.5 米以上。如将长江口航道也增深至 12.5 米，则第三、四代集装箱船和 5 万吨散货轮就可以全天候进出长江口。在潮位保证率 70% 前提下，可利用潮位约 3 米，此时航道水深即可达到 15.5 米。这样，10 万吨级散货船和油轮可以乘潮满载进出长江口，从而改变目前大宗散货在长江口外过驳的局面。

表 3 国外河口拦门沙航道增深过程

河口	整治前水深（米）	各年整治后水深（米）		
		1930	1960	1993
美国密西西比	2.7	10.6	12.2	13.7
美国哥伦比亚	6.1	12.2	14.6	14.6
英国默塞	3.6	9.0	13.6	13.6
加拿大圣劳伦斯	4.9	9.1	10.7	12.5
法国纪龙德	6.0	10.0	10.0	13.5

三、加深长江口拦门沙航道的工程措施

长江的水量很大，沙量也多。平均每年通过长江口入海的水量为 9755 亿立方米，沙量为 4.86 亿吨。这些由上游来的水量和沙量进入长江口四条入海汉道后，又遇到潮汐、波浪和盐水的作用，使得泥沙输移规律和河床变化规律非常复杂。不进行深入研究，是无法对其进行治理的。所幸的是，1958 年就开始了长江口航道治理的研究，特别是“八五”期间国家将长江口深水航道整治技术的研究，列入了科技攻关计划。30 多年来，我国一大批著名专家、学者在统一的研究计划下，各自从不同的学科、专业角度出发，采用各种分析研究手段，进行了多学科的长期联合研究，取得了丰硕成果，基本上掌握了长江口的潮流和波浪等动力作用规律、泥沙运动和沉降规律、河床演变规律以及拦门沙形成机理及变化规律等根本性问题，为制定长江口深水航道的治理方案，提供了科学依据。

多年来对开通长江口深水航道提出过不少方案，基本上可以分成两大类，第一类方案是避开拦门沙航道，采用人工运河的方式，两头建船闸，挡住航道内的泥沙淤积。这类方案主要有三个，一是北支方案，二是南边滩运河方案，三是北岸运河方案。这三个方案的共同缺点是耗资巨大；建船闸后难以适应船型发展的需要；船闸下游口外淤积严重。此外，北支方案和北岸运河方案，航道远离上海，航路极为不顺。因此这类方案不可取。第二类方案是加深拦门沙航道。这类方案主要也有三个，即南港南槽方案、南港北槽方案和北港方案。南港南槽方案除离上海浦东近、区位条件较好外，其它方面均不及北槽方案和北港方案。南槽是长江口排沙的主要通道，泥沙淤积严重，加深这里的拦门沙航道，不仅工程量大，维护也非常困难。从沉积条件、工程条件和风浪对航槽回淤的影响等因素看，北港方案比南港北槽方案略好，但北港方案存在两大问题，一是区位条件不利，与上海港的发展及浦东开发区沿江岸线的开发利用不相适应；二是北港上口通道不稳定，在整治拦门沙航道之前就需整治南支下段，工程涉及面广，工程量大大增加，工程周期也大大延长，不能满足当前经济建设的需要。南港北槽方案不存在这些根本性问题。南支下段的变化不会影响南港上口航道，对北槽的影响也非常小，这已为多年的历史资料和物理模型试验所证实。所以不需整治南支河段就可以开发北槽深水航道，将工程局限于拦门沙航道本身。这不仅不与长江口综合治理规划发生矛盾，而且可以作为综合治理的起步工程。它不仅有利于上海龙头地位的确立，也有利于带动长江三角洲的开发、开放。综上所述，南港北槽方案综合优势最大，故选择南港北槽作为长江口的出海深水航道。

在制定北槽深水航道的工程方案时，遵循的原则是：（1）有利于今后长江口的综合开发；（2）维持现有的分汊河型，不影响或有利于上游河段和邻汊河段河势的稳定；（3）整治与疏浚相结合，疏浚与围滩造地相结合；（4）体现高强、快速、连续施工要求，有利于分期实施、分期取得经济效益。

根据上述原则，参考国外河口港航道的治理经验，通过河床演变分析，根据多方案的物理模型试验和数学模型计算的科研成果，确定了治理措施的主体工程有 5 项，即总长为 49.2 公里长的北导堤，总长为 48.0 公里的南导堤，分流口导堤和相连的潜坝，南北导堤间的束水丁坝以及 79.5 公里长的人工开挖航槽。南、北导堤的作用是规顺涨、落潮流和阻挡横沙东滩和九段沙上的泥沙进入航道，丁坝起束水攻沙、加深航槽的作用，分流口工程的作用是稳定进入北槽的水量和减少进入北槽的沙量，疏浚工程是促使航槽尽快达到要求深度。这项工程规模较大，按 1994 年价格，工程静态总投资为 98.62

亿元，总工期需要 8 年到 10 年。为了在工程实施过程中逐步取得效益，按一次规划、一次设计、连续施工、分期实施的原则进行。一期以整治工程建设为主，分两个阶段。第一阶段为起步工程，南、北导堤修建约一半长度，使航道底标高达到 - 8.5 米，以满足三万吨级海轮乘潮通航的需要；第二阶段将南、北导堤建完，使航道底标高达到 - 10.0 米，使第三、四代集装箱船和 5 万吨级海轮能乘潮通航。第二期以疏浚工程为主，根据需要适当增补丁坝和调整丁坝长度，使航道底标高达到 - 12.5 米，保证第三、四代集装箱船和 5 万吨级散货船全天候通航，10 万吨级散货船乘潮通航。物理模型试验和数学模型计算表明，上述分阶段治理目标是可以达到的。目前对上述整治方案正在进行优化研究，并研究使航道水深加大到 15 米的可能性，以便全天候通航 10 万吨散货轮和第五代、第六代集装箱船。

四、开发长江口深水航道的重大意义

最近国务院指出，长江口深水航道的治理意义重大，属跨世纪的国家级大型项目。这项跨世纪工程的实施，对我国的经济发展具有重要的战略意义。

1. 长江口深水航道的开发将使上海成为国际航运中心，为上海经济发展，创造良好环境。

在 20 世纪初叶，由于长江口和黄浦江的航道水深均为 6 米，适合当时国际航运的要求水深，使上海得以跻身于国际经济、金融、贸易中心的行列，使上海港 1930 年的吞吐量达到 3700 万吨，确立了当时的国际航运中心的地位。但在 30 年代以后，随着船舶大型化，对航道水深的要求不断提高，而长江口的航道水深一直没有改善，从而丧失了国际航运中心的地位。

前已提到，现在世界上国际航运中心的航道水深都在 12 米以上，例如神户为 12 米，香港为 12.5 米，纽约为 13.5 米。上海濒海临江，位于黄金水道和黄金海岸的交汇处，是全国最大的城市和最大的交通枢纽，所欠缺的就是深水航道。长江口深水航道建成后，上海港和江苏四港（南京港、镇江港、张家港、南通港）可以保证国际集装箱环球航线上的第三代、第四代集装箱船和 5 万吨级散货船随时靠泊，为建设以上海港为主体的国际航运中心创造了必要条件。

从国内外港口城市发展的历史看，都是“以港兴城”，国际经济、金融、贸易中心的形成都与国际航运中心的形成密切相关。在上海建成国际航运中心之后，浦东将充分发挥其“龙头”作用，上海将很快建成国际经济、金融、贸易中心。由此可见，长江口深水航道的开发对推动上海的经济发展将起到巨大作用。

2. 长江口深水航道的开发将完善我国港口布局，促进江苏和整个长江三角洲经济的新飞跃。

我国沿海已经形成了环渤海地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区等三大经济圈。科技、经济实力呈“南北低中部高”的形势，但从港口情况看北有大连等深水港群，南有香港、深圳等深水港群，唯独经济、科技力量最强的中部上海和江苏，因没有深水航道而没有深水港群，形成明显反差。长江具有良好的航道水深，关键是卡在长江口拦门沙河段。在长江口深水航道建成后，长江两岸的深水岸线将充分发挥作用。只江苏境内的深水岸线，南岸有 122 公里，北岸有 143 公里，南北岸线总长达 265 公里。目前利用的仅

51 公里。如将未用的深水岸线都用于建港，可建 3.5 - 5.0 万吨级以上的深水泊位 700 - 800 个，这是非常巨大的深水岸线资源。现在上海和南京以下的江苏四港已有 110 多个万吨级以上的海轮泊位。长江口深水航道开通后，必将出现以上海港为主、江苏四港为辅的中部深水港群，使我国的港口布局得到完善。江苏深水岸线的开发利用和江苏四港成为深水港，对江苏的经济发展具有重大和深远意义，也必将带动整个长江三角洲经济的新飞跃。

3. 长江口深水航道的开发将扩大长江口物资运输的能力，推动整个长江流域经济的快速发展。

长江流域有丰富的物产资源和得天独厚的黄金水道。现已在长江沿线 31 个城市形成了冶金、电力、石油化工、建材、机械、纺织等行业的产业密集带。长江流域的国民生产总值和工业总产值都占全国的 $\frac{1}{3}$ ，农业总产值、粮食产量和钢产量都占全国的 $\frac{2}{5}$ ，外贸出口总额占全国的 $\frac{1}{5}$ 强，内河通航里程占全国的 70% 多。这些优势为长江流域经济的迅速发展，提供了条件，通过长江口货运量也将迅速增大。

根据预测，上海港及江苏四港通过长江口的货运量 2000 年将达到 2.1 亿吨，2010 年将达到 2.8 亿吨，2020 年将达到 3.2 亿吨，其中集装箱、煤炭、金属矿石、原油需要以大型集装箱船和散货船运输。上海港集装箱吞吐量 2000 年将达到 250 万 TEU，2010 年将达到 450 万 TEU，2020 年将达到 800 万 TEU。然而当前长江口航道水深仅 7.0 米，只有万吨级以下船舶才能够全天候通航，1 - 1.5 万吨级的船舶需要乘潮进出。按乘潮两小时计，全年只能进港 5500 艘，平均每天 15 艘，不能满足运量的需要，这将严重制约长江流域经济的发展。长江口深水航道建成后，这一制约因素就将排除，长江流域，特别是沿江产业密集带的原材料和产品就可直接通过长江口进出。这将大大促进长江沿线乃至整个长江流域经济的快速发展。

综上所述，开发长江口深水航道是保证上海、江苏乃至长江流域经济持续、稳定、快速发展的必要条件，是实现党的十四大提出的“以上海浦东开发开放为龙头，进一步开放长江沿岸城市，尽快把上海建成国际经济、金融、贸易中心之一，带动长江三角洲和整个长江流域地区经济新飞跃”战略决策的重大举措，其意义十分重大而深远。我有幸参加了长江三峡工程论证的全过程，可以说，开发长江口深水航道的重要性和迫切性并不亚于长江三峡工程。

中国的能源问题和出路

潘家铮

中国工程院

潘家铮 水工结构和水电建设专家。1927 年 11 月生，浙江绍兴人。1950 年毕业于浙江大学。历任水利电力部总工程师、能源部水电总工程师等职。现任中国工程院副院长、电力工业部技术顾问和中国长江三峡工程开发总公司技术委员会主任。1980 年当选为中国科学院院士，1990 年被授予国家设计大师称号，1994 年被选聘为中国工程院院士。兼任中国大坝委员会主席、中国岩石力学与工程学会名誉理事长和清华大学教授、博士生导师，全国政协委员。长期从事水电站设计、建设和科研工作。

一、李鹏总理担心什么问题

李鹏总理曾经讲过，他担心两个问题，一个是粮食问题，一个是能源问题。总理简单的一句话，就抓住关键，点中要害。中国面临的最大的问题，就是粮食和能源。

中国有 12 亿人口，据专家测算，即使抓紧计划生育，下世纪人口高峰也要超过 16 亿，最后稳定在 16 亿左右，十五六亿人要吃饭，而且要吃得好，中国能养活自己吗？养不活自己，无非两个后果，一是永久贫困下去，成为动乱之源；一是有钱在世界市场上大量购粮，搅乱粮食市场，总之，都成为祸害。一些西方人士已在宣传“谁来养活中国”了，当然，已遭到我们的驳斥，我们相信中国能养活自己，而且能吃得很好，但这是件艰巨的任务，要经过努力才能做到。

能源是同样性质的问题，而且还有它的特点，因为只要有耕地，粮食总能生产，人均耗粮也不会无限增长，能源情况就有些不同。中国的经济要腾飞，十五六亿人民要过富裕的日子，中国的经济总规模将高居世界首位，而这一切都需要大量的能源，总之，中国的现代化需要惊人的能源供应，中国如果不能解决好能源问题，不仅经济不能高速健康发展，国家的战略目标无法实现，还会给世界能源市场和全球环境带来严重问题。

这样看来，能源确实对今后国家民族的命运起着关键性的作用，它是一个战略问题，一个我们应该重视、研究和解决的问题，我们绝不能掉以轻心，墨守成规，不图改革，只求满足近期需求，不作长久考虑，那将是十分有害的。

二、中国的能源究竟存在什么问题

建国 46 年，我国能源工业取得了举世瞩目的成就，这是有目共睹的事实。在建国时，我国能源开发极端落后。1949 年全国原煤产量 3200 万吨、原油 12 万吨、发电量 43 亿千瓦时，以 5 亿人口计，人均均为原煤 0.064 吨，原油 0.00024 吨，电量 8.6 千瓦时，几乎可以说是从零开始。经过 46 年奋斗，1995 年一次能源总产量达 12.4 亿吨标煤，其中原煤达 12.98 亿吨，居世界

首位，原油产量 1.49 亿吨，从贫油、无油国变成产油大国。全国发电装机 2.17 亿千瓦，年发电量 1 万亿千瓦时，居世界第三四位。与此相应，在设备制造、勘测设计、科学研究、施工管理、人才培养……各条战线上都取得巨大进步。中国已成为能源大国。强大的能源供应是我国经济腾飞、人民生活水平和综合国力迅速提高的保障和基础，是稳定社会的因素。不看到这一点是错误的。

但是，用一分为二的观点来看问题，从可持续发展的要求来衡量问题，我国能源供应前景存在巨大隐患。不清醒地看到存在问题的严重性和复杂性，是危险的。我个人认为，在当前，把问题的严重性说得透一点，对我们较为有利。

那么，我国能源供需前景究竟怎样？存在什么问题呢？我认为存在三方面的问题：

1. 资源短缺。这是自然界给我们造成的问题。我国的能源资源究竟有多少家底？答案是无情的：从总量上看并不少，按人均计算就非常低了。即使是较丰富的煤，目前探明储量约 1100 亿吨，人均值仅为世界平均值的一半。而作为重要战略物资的石油、天然气尤其不足。石油探明可采储量仅 32.6 亿吨，人均 2.9 吨，仅为世界平均值的 1/10 左右。另一战略能源的铀矿储量也极有限，目前查明的储量只能供 4000 万千瓦的核电站运行 30 年之需。可开发的水能约 3.7 亿千瓦（年电量 19000 亿千瓦时），占世界首位，但用 10 多亿人口一除也就很有限了。而且这些资源的分布极不均匀，煤集中在晋陕蒙，水能集中在西南，开发、输送都很困难。再者，我国一次能源以煤为主，这在世界上也是少见的，从而引起一系列的问题，如污染、运输等等。因此，我们应清醒地认识到我国能源蕴藏量并不丰富，条件是不利的，家底是薄的，并不是什么地大物博得天独厚。我们必须在承认人均资源严重短缺的基础上考虑问题。

2. 利用效率低、浪费大。由于我国技术水平和管理水平低，能源从开采、运输加工到终端利用的效率很低。据调查研究，开采上的效率为 32%，加工运输上 70%，终端利用上 41%，总效率低到 9%。有 91% 的能源都未得到利用。主要产品单耗比先进水平要高 30%-80%。效率远远低于发达国家水平，甚至比一些发展中国家都低。加上思想教育上的放松和政策上的失误，存在许多令人痛心的浪费：长明灯、长流水、煤老虎、电老虎、乱开乱采、跑冒滴漏，毫不心痛。如此紧缺和宝贵的能源被如此无情地浪费着，长此以往，将何以堪！

3. 体制、管理、政策上的问题。体制混乱，政企难分、部门分割、地区封锁、能源工业资金短缺，难以自我优化自我发展，有的连维持简单再生产也困难。国家缺乏正确、全面、有力的能源政策来促进能源工业的良性循环，多是出了问题头痛医头、脚痛医脚，被迫在老路上挣扎，难以跨出新的步伐。

这三方面的问题交错在一起，相互影响制约，不容易解决，长此下去，后果主要两条：一是能源供需缺口愈来愈大，不能满足经济发展和人民生活水平提高的要求，使我国发展的战略目标和民族振兴大业难以实现；另一条是能源开发和环境保护难以协调，污染日趋严重，危害我国人民生活和发展的基地，也成为国际上指责和制裁的对象。

这些后果是我们不能承受的，是必须避免的。

三、必须走上良性循环的路

经济发展、能源供应和环境保护三者构成一个相互联系、相互制约的系统，好像一个连环套。我们想强调说明的一点是，在这个连环套里我们必须走一条良性循环的发展道路，万不可走上恶性循环道路。

什么叫良性循环？就是一个国家有强大和充足的能源供应，保障国家经济能稳定地发展，国家的经济实力能不断提高，而国家经济实力充沛，就可以采取各种措施来发展科技、改造企业、提高效率、保护环境、开发新能源，能源也就能够更稳定的发展了，这就是良性循环。

反过来的情况就是恶性循环，那就是能源供应严重不足，拉闸限电，停三开四，限制了国家经济的腾飞，国家的经济实力上不去，资金短缺，就无力更新设备提高效率，无力优化能源结构，无力考虑环境保护，无力加大科技投入，研究开发新能源、新技术，无力应付今后的挑战，当然也就进一步扩大了能源供需的缺口，这就形成了一个恶性循环。

我不敢说中国的能源工业已经陷入了恶性循环无法自拔了，但如果说，中国的能源工业有陷入恶性循环的危险，现在正在为摆脱困境而作努力，今后能否转入良性循环就看国家在这几年下什么决心，采取什么措施，这样说也许比较符合实际情况。因为我们确实有许多事想做而由于经济实力不足不能做：多修水电核电优化能源结构，大力推行清洁煤（CCT）技术改善环境，全面改造旧设备提高能源利用效率、大力增加科技投入开发新能源等等，而这些事不能抓紧办，使能源供应和环境污染问题进一步严重化了，经济发展进一步受到制约，事情难道不是如此吗？反过来看美国，它的能源供应充足，保障了国家经济实力强大，它就能采取各种措施来发展科技、提高效率、保护环境、准备应付以后的挑战。在这方面美国无疑比我国主动得多。

总之，我国的能源工业如果满足于现在的情况，照现在的老路走下去：在现有的水平上开新矿办新厂，来满足日益增加的能源需求，再应付几年是可以的，日子还能过下去，年年总有些增长，但是路将愈走愈窄，愈走愈难，总会走到难以为继的地步，到那时再后悔不应在世纪之交无所作为可能就晚了，将要被迫付出更沉重的代价。

四、中国要不要和美国比

美国是目前世界上的唯一超级大国，经济实力强大，人民生活也达到富裕程度，常常成为一些人羡慕和追求的目标。我们今后的发展包括能源发展，要不要拿它做标准去对比呢？对这个问题有两种不同的见解。

一种见解是，不要去比，也不能去比。美国地大人少，资源丰富，依靠掠夺、侵略、当然也包括美国人民的劳动发了家。现在不到世界总人口 5% 的美国人消耗着全球 1/3 的总能源消耗量，过着奢侈、挥霍、糟蹋资源的生活。中国根本不应该也不可能走这条路。我认为在这种见解中有个正确的核心，即中美国情不同，中国的能源发展受资源、人口、经济实力、污染和运输以及历史条件等多种因素的制约，现在不能、将来也不能达到美国的水平。例如，美国在 1993 年底全国装机已超过 8 亿千瓦，人均 3 千瓦以上，年发电 3.2 万亿千瓦时，人均年用电 13000 千瓦时。美国平均 2 人拥有一辆汽车，全国达 1.3 亿辆。我们到去年底人均装机才达到 0.179 千瓦，年用电 840 千

瓦时，只占美国的 6~5%。如果要求中国在下世纪中达到目前美国的水平，全国应装机 50 亿千瓦，年发电 21 万亿千瓦时，全国应有 8 亿辆小车，年消耗 50 亿吨原油.....在座的每位同志大概都想象不出从哪里去生产这么多能源来满足这样的要求，所以问题很清楚，我国必须在有限的能源供应下完成四化大业，我们只能走勤俭节约适度消费的道路，决不能盲目和不切实际地鼓吹和追求高消费。美国到处推销它的社会制度和生活方式，但决不会愿意中国人也像他们一样消费。

另一种见解认为应该和美国及一切发达国家比，只有比，才能看清问题、找出差距，想办法、赶上去。从统计资料和历史经验看，一个国家的经济发展和能源供应是有明确的比例关系的，没有充足的能源供应，经济不可能腾飞，所以我们不但在生产总量上要超过美国，而且在人均指标、质量指标上也要追赶上去。否则，没有物质基础，什么从小康走向富裕，下世纪中达到比较富裕发达水平，什么振兴民族，完成四化，都只能是一句空话。这种见解中也有个正确核心，即：发展是硬道理，我们要在今后数十年内振兴国家，需要较高的发展速度，需要解决能源问题。在今天，我们不可能闭关锁国、自搞一套。所以我们不但要从纵的方向（历史上）比，也必须在横的方向上同发达国家比，和它们进行竞争。

这两种见解各有道理，并不互相排斥，总的讲，一是从可能性和现实性上考虑，二是从必要性和紧迫性上考虑。作为国家的最高决策层，正是应该在两者间做到最优的平衡。过去，我们在制定规划时，比较偏重于从必要性出发，较忽视合理性、持续性和现实性问题。在建国初期，这样做是必要的，而且那时的基数很低，这样做也不引起大的矛盾。但时至今日，物质基础已达到一定规模，而各种深层次问题已严重暴露，就需要将两者紧密结合考虑了。现实性和必要性必须兼顾，而目前尤其要重视前者。

五、能源供需缺口究竟有多大

有的同志可能要问：我国能源在需要和可能之间究竟有多大缺口，又如何来“兼顾”和“协调”呢。要具体研究这个问题，就不能只考虑 5 年 10 年间的情况，而要考虑较长时段，譬如说设想一下 55 年后即公元 2050 年的情况，55 年时间说短不短，说长也不长，正是我国实现三步战略目标的时段。人无远虑，必有近忧，如果对这段关键性的时期存在的重大问题不作些深入研究，将是十分危险的。

但是，要估计 55 年后的情况，难度很大。我们的依据，一是分三步走的战略目标，这是明确的，必须达到的。再次就是分析研究世界各国的发展经验，匡算达到这一目标的物质基础和能源供应，从而做一定的预测。这样做还是有根据和可信的。有很多部门和专家对此做过详尽的探索，开发了很多数学模型进行计算预测。例如，有的根据各行各业为达到战略目标应有的发展速度，并考虑技术水平提高的因素，计算各部门的耗能量加以汇总修正。有的根据人民在那时的消费情况和需要，分析直接间接所需能量进行计算，等等。这些都有一定依据和实践经验，当然这都是从需要出发的，我们不能做详细介绍。我们只给出一些典型成果供参考。我们采用 60 多个单位耗时 4 年完成的《中国能源战略研究（2000-2050）总报告》二稿中的数据。据预测，我国 2050 年一次能源总需求量为 35 亿吨标煤至 44 亿吨标煤（低方案至高方

案)。其中原煤年需 26-33 亿吨，原油 5.2-7.4 亿吨，天然气 1500-1900 亿 m^3 ，水电 9100 万-1 亿零 600 万千瓦时，核电 1.3 万亿千瓦时，以及其它新能源和生物能源。在二次能源的电力方面，预测全国装机 15 亿千瓦，年发电量 7.5 万亿千瓦时。专家们在预测中已经尽量偏于“先进”。如假定那时我国的能源技术已达很先进水平，能源利用效率已大幅度提高、各种节能措施得到采用，还根据国情考虑人民的生活方式和消费结构，像小汽车就谈不上进入家家户户。否则的话，预测的数值远大于此，就更不现实了。专家们希望用这种方式，使得在较低的能源供应水平下，人民生活水平大体上达到日本在 90 年代初的水平。

按这组预测值，以 15.6 亿人口计，2050 年人均能耗（2243-2666）公斤标煤，只稍稍高于目前世界人均水平。人均拥有装机不到 1 千瓦，人均年用电 4800 千瓦时，这些数字远远低于目前美国的水平，约只占其 1/3 左右。从发展速度看，55 年内一次能源总量增长了 2.82-3.55 倍，平均年增长率为 1.9-2.3%，电力增长稍快，为 7.5 倍，平均年增长率为 3.73%。我国近年来经济增长率超过 10%，预测在 90 年代的年平均增长率为 9.4%，2000-2010 年为 8.2%，2010-2020 年为 6.0%，2020-2050 年为 3.5%，总的年平均增长率为 6%。两者相比，显得极不协调。总之，从需要的角度来看，很难批评专家们提出的预测值太高了。

但是，从可能性上分析，对这个不高的要求，仍然难以满足，首先是石油和天然气，去年我国产油 1.49 亿吨，但很多油田产量已开始衰退，依靠高科技投入、二次采油、三次采油来维持产量。中国现在已成为石油的净进口国。今后，除非在油藏勘探上有重大突破，下世纪我国石油产量在缓慢增长到一定程度后将急剧下降。从我国已探明的可采储量和对今后可能的探明储量估计，专家们认为到 2050 年我国只能产石油 8000 万吨，悲观的认为仅能产 4000 万吨，离开预测所需的 7.4 亿吨差上六七亿吨。如要依赖进口解决，且不说我国有无实力进口六七亿吨原油，那时的国际市场能提供多少也是个疑问。一些发达国家都在竭尽全力研究石油供应问题，我国在这方面的进展是十分缓慢的。再如核电，预测中要求在 2050 年核电装机 2 亿千瓦（有的方案要求装 3 亿千瓦），发电 13000 亿千瓦时，像大亚湾那样的核电站得修建 110 座（或 170 座），姑且不谈我国已探明的铀矿资源仅够三四千万千瓦的核电站运行 30 年之需，我国的经济实力能否在 50 多年中兴建 110-170 座核电站，也是个大疑问。

主要的希望寄托在煤炭上。尽管我国的煤炭资源丰富，但从资源条件、开采技术、可能达到的生产能力和运输、环境等条件的制约，用动态模拟分析，有关专家认为到 2050 年我国煤炭的极限供应能力只能是 26-30 亿吨，预测数已达到或超过极限供应能力了，何况有些专家认为要实现这一极限供应，困难极大。只有开发 1 万亿千瓦时的水电比较落实，条件具备时尚可多开发一点，但较优越的资源也开发将尽，而水电在一次能源中所占比重也不可能太大（只约占 10%左右）。

根据我的看法，从现实条件看，不仅预测中的高方案是不现实的，就是低方案恐怕也实现不了（至于更高的方案更是不值得研究），可能我国实际能提供的一次能源比低方案还要折减 15%，其中石油、天然气更要大规模削减。我们不能在很大的风险度上做规划和战略考虑（例如假定油气勘探有惊人突破，或寄希望于核聚变等），只能在现实可能上做文章，如何用这点有

限能源来达到战略目标，就是摆在我们面前最现实的问题。所以我们要一再呼吁，希望大家认清我国在现代化过程中面临的能源供应困难，是世界上独一无二的，供需缺口巨大，而且将愈来愈大。

六、出路何在——几帖药方

上面我们分析了我国能源工业存在的许多深层次问题和巨大的供需差距，那么出路何在？有了病就得服药，药方又是什么呢？

只要了解病情，开药方其实不难。问题是病人要决心服药，而且要有钱买药，或者想什么方法弄到药。事实上，国家综合部门和有关专业部门，以及大量专家学者都对中国的能源问题做过深入的调查研究，从不同角度提出过多种方案和建议，这就是药方。很显然，没有什么简单的特效药，只能是综合治理，也就是说服一副复杂的中药。这副中药里含有很多味药料，君臣相配，祛邪扶正，长期服用，坚持不断，就能逐渐收效。大体上讲，药中含有四大成分，分述如下：

1. 切切实实实现两个转变、改变经济增长方式、厉行节约、反对浪费，千方百计最大可能地提高能源效率

能源对国家、民族前途既如此重要，我国的能源家底又如此薄弱，理应千方百计节约每一克煤、每一滴油、每一度电，使每一焦耳的能源能发挥最大效益。不幸事实恰恰相反，愈贫穷、愈挥霍，愈困难、愈浪费，这实在令人痛心。当然，我国也在抓节能，有机构、有指标，年年都取得一定效果，但总不够令人满意，挥霍浪费依然，主要产品能耗距先进水平差距仍达30%-90%，这是因为政策软弱无力、效果水分较多，节能、既无动力又无压力，更没有形成全国全民的自觉风气，没有上升到为全国全民一致重视的首要选择。据测算，如果不抓节能，按目前的耗能水平，达到2010年《纲要》提出的经济发展目标，就需37亿吨标煤。我希望利用这个机会再次大声疾呼：中国的能源再也禁不起这样挥霍浪费和低效利用下去了！希望从国家领导到每个企业事业单位、每个公民都来认真思考一下这个问题。

首先要像抓计划生育那样把节能作为基本国策之一，大力宣传，反复教育，务使深入人心，使各行各业全国全民都充分认识到节能光荣，浪费可耻，既要抓直接节能，更要抓全社会的节约——间接节能。因为任何产品，那怕是一滴水，都含有能源成分。要强调合理适度消费、强调勤俭节约是永恒的美德、反对一些不切实际的误导。要制定政策、规划、措施、指标办法，投入资金，重奖重惩，从技术上、结构上、政策上全面下手，务使节能落到实处，开展全民全社会的节能运动。在节能上，尤以节约和替代油气资源为重中之重。

在具体措施上，国民经济的增长速度必须是合理和收实效的。各行业制定发展规划时必须联系能源供应，坚决反对盲目攀比、不切实际、大起大落、产不对销，从而严重浪费能源。要有所为有所不为，有所发展有所限制，调整国民经济结构，一些大量耗能又非我国必需自搞的产业，应予限制。要决心改造旧企业、旧设备，关停并转不必要的、不合理的高耗能且不能改造的小旧企业，淘汰落伍设备，要开发推广节能产品。据说如全国用上节能灯，效益超过一座三峡水电站。可是产品既不过关，政策也不支持，更无人去抓。三峡枢纽当然应建，但是我们既能用上千亿资金建三峡，为什么不能花其

1/10 资金来抓节能产品呢？如果花一块钱修新的能源企业和花一块钱搞节能能起到同样效果的话，国家首先应投资搞后者。

在我国还存在许多极不合理的现象。例如一座优良的煤矿，被无数小煤窑进行盲目开采，搞得遍体鳞伤，采出 1/10，浪费 9/10，这是不是犯罪啊！中国今后所需的煤炭生产，主要应由现代化的大型煤矿来提供，小煤窑必须按改造、整顿、联合、提高的方针向集约化改造转变，不能让目前的无秩序状态发展下去。又如，我国的终端能源中优质能源比重很低，大量的还是直接燃煤，所采的煤仅 30% 转化为电能，而美国高达 80%，这又是个极大的浪费，必须尽快地改变这种局面。

我国目前能源系统的总效率只有 9%，仅为发达国家的 1/2，只要认真采取措施，尽一切力量赶上发达国家目前的水平，一吨煤资源就能顶两吨用。节能不仅是为了满足经济增长之需，在环境保护上尤为迫切。所以我们说，开发和节能应该并举，但更要把节能放在优先的地位。今后的能源需求中，只能一小半靠开发，一大半靠节约，舍此并无他途可循。

2. 因地、因时制宜，开发利用多种能源，大力优化能源结构，保障可靠的能源供给

我国是世界上少数以煤为主要能源的国家，这给我们带来很大困难。但我国疆域辽阔情况各异，完全可以因地因时制宜，分区优化能源结构，以最大程度地缓解煤的压力，使其比重尽可能下降到 50% 左右。

我国有丰富而相对集中的煤炭资源，当然应利用优势建设现代化的巨型能源基地，尤其是晋陕蒙基地，尽量修建坑口电站，输煤输电并举，支援全国。这一能源是可靠的。建坑口电站要解决水的问题，并不是有煤就可建。所以巨型的煤和电基地建设必须在国家的统一规划下进行，不能乱来。

西南地区有得天独厚的水力资源，国家无论如何困难必须抓紧大力开发，在今后二三十年内把条件最好的部分先开发出来，在 2050 年前大部分技术及经济上可利用的水能应都得到开发。按电量计，开发率应达到 60% 甚或更高，形成世界上最宏伟的水电基地，除满足本地区要求外，输电华中、华东、华南，并促成全国联网，实现跨地区跨流域水火联调，取得最大效益。我国水力资源世界第一，水电开发风险最小，效益最全面，是又一个可靠的再生的能源，不幸由于各种因素制约，发展很困难。水电占全国电力的比重，由 80 年代的 32% 一直递减到 1995 年的 24%（按电量只占 18%），今后还将进一步下降。李鹏总理曾特别撰文，要求在 2010 年水电比重能达到 30%，邹家华副总理为水电开发问题无数次地进行研究和协调，都没有起色。现在每年开工建设的电站都在 1000 万千瓦左右，而 1995 年开工的大中型水电站仅 24 万千瓦，今年干脆是 0，许多条件具备包括资金落实的水电都不批准开工，有的实际上已开工三年还是个黑户口。不管你愿意不愿意，“九五”期间水电建设的马鞍形已经形成，因为大水电是不可能在一二年内建成的。这是国家层次的失误。今天不是专谈水电问题，所以我也不作展开。我们高兴的是，现在从国家领导、综合部门、电力主管部门到有关同志都在注意研究这个问题了。

东部、沿海地区经济最为发达而能源资源十分短缺，除大力投资开发华北西南的煤矿和水能外，利用有利时机，积极加快核电建设和兴建部分燃油燃气电站也是必须的，以争取时机，赢得主动。但是要注意依赖进口燃料应在适当范围之内，不能完全受控于人，更不能离开全国一盘棋的立场，忽视

甚至放弃对煤和水能的开发，形成“独立王国”，因为这对于国家来讲是十分不利的。中央政府对此要行使指导和干预权。

在核电方面，我国已实现了零的突破，在 2000 年将拥有 4 座核电站，但发展速度和模式满足不了要求。要使核电在我国真正形成气候，分担重任，必须走定型化、国产化、批量化的道路。不能靠进口。据专家分析，下世纪初正是核电更新换代的关键时机，我国如何把握时机，做好准备，与国际接轨，加速核能利用，是一个大问题。总之，核电能否成为我国能源中的重要支柱，取决于国家的决心和采取的措施。

对于石油和天然气（包括非常规资源）当然应当继续积极勘探、扩大保有的可采储量，合理开发，争取在下世纪初叶仍能稳定增长，并努力开发利用外国资源，开发利用各种替代能源。凡是可以不用油的一概不用，把它用到最必需部门。

我国除开发常规能源外，还要致力于研究各种新能源和再生能源（风能、太阳能、燃料电池等等），虽在 2010-2020 年前不会形成大的气候，但可作好技术准备，争取在以后的三四十年中取得突破，这个问题在下面还要谈到。在我国广大农村地区，仍然在很大程度上依靠生物质能源，所以对此绝不可掉以轻心，要像抓商品能源一样，使它得到健康的、最大限度的利用。

通过艰苦努力，争取在我国建设起国家统一规划控制下的能源生产供应体系，包括若干现代化的能源基地，通过国家电网和交通运输网有机地联成一体，相互补充、相互配合，切实保障我国必要的能源供应。

3. 依靠科技进步、开发应用新能源，控制环境污染

这一剂药中的主要成分是高科技。确实，要解决我国的能源问题，离开科技发展是不可能的：要降低能源开发的成本和缩短工期、要提高能源利用的效率、要开发新能源新产品、要控制能源利用造成的环境污染……件件离不开科技发展。我国如果因为目前的日子尚能过得去而忽视对科技的投入和抓科技开发，将是最大的失误，将落入恶性循环道路不能自拔。

我们在这里只讲两个问题，一个是新能源和可再生能源，一个是 CCT 技术。

地球上的化石资源终究要枯竭，因此先进发达国家莫不在竭尽全力找出路，即开发新能源和可再生能源。我国必须急起直追。水能和生能外要选择希望最大的有限目标集中攻关，不能认为“远水解不了近火”而放松努力。据专家们分析，最有希望的是太阳能、燃料电池、风能等，加速研究，虽在 2010 年前不能有很大贡献，但在其后数十年将起重要作用。

第二个问题是煤的清洁利用。中国是以煤为主要一次能源的大国，燃煤引起的污染问题是制约中国发展的重大因素。千方百计减轻燃煤污染、开展清洁煤技术（CCT）是必走之路。这不仅是为了应付国际上的压力，也是给子孙后代留下一块干净的生活空间。

要减少燃煤污染，首先是尽量开发清洁、再生能源和提高效率减少燃煤量，这在前面已经提到。其次是坚定不移走 CCT 道路。现在的矛盾是：要进行煤的清洁利用，需大量资金投入和科技开发，这必然会影响发展的速度。怎么办？我们不能走“先污染后治理”的错路，但又不可能一步登天解决矛盾。因此，可行之途是明确方向，制定规划，综合治理，从简到繁，步步前进，务求必成。减少燃煤污染的措施很多，首先应从煤源着手，对原煤进行洗选、对口供应和采用型煤，就可以大大减轻污染，提高效率，这在技术上

是过关的，也不需太多的投资，完全可以在全国全面实行。遗憾的是，这个措施在我国就是推不动，已建的洗煤厂也停着不用，原因据说是“没有经济效益”。相反，还有些煤矿专门组织队伍在原煤中掺矸石和废碴，来“提高经济效益”，让千万吨废料在铁路上作几千公里的运输，再送入电厂和锅炉中燃烧来加剧污染环境。在社会主义的中国上演这种悲剧是否令人痛心？

第二步，就是要尽量多地将煤转化为电能，在大电厂中燃烧，即使不实行烟气净化脱硫，其污染量也比分散燃烧原煤要少得多。所以发达国家开采的原煤 80% 或 85% 以上都用以发电，而我国仅 30%。我们必须把燃煤的小锅炉、民用炉等等转为电气化，使 80% 以上的原煤都发电，并在新建的电厂中脱硫，使污染得到进一步控制。

更深层次的洁净煤技术就是进行更高效和清洁的燃烧，如 CFBC，PFBC，IGCC 等，以及煤的液化、气化等。这些需要较高技术和较多投入，但这样做不仅可控制污染而且可大大提高燃烧效率。我国既然是燃煤大国，这条路非走不可，比任何其他国家更为急迫。国家有关部门对此也正在抓紧研究试点。问题是各部门间协调不够、力度不大、进展缓慢，还需要大大加劲。

实事求是地讲，在今后一段时期内，我国燃煤引起的污染问题恐怕还会有所增长，但只要我们在以上各个方面、各个层次上进行努力，坚定不移按预定目标走下去，在不太长的时间内控制污染的加剧速度直至下降到容许范围内，是做得到的。在这场战斗中，加强管理和科技进步是两条主要措施。

4. 深化改革开放，利用有利的国际环境，缓解我国能源问题

我们一再提到，中国是有十多亿人口的大国，能源像粮食一样，要立足于国内解决，这是无疑义的。但立足国内绝非闭关锁国。相反，我们要抓住有利的国际环境，尽可能利用外国的资源、资金和技术，为我所用。我们可以扩大能源贸易，有进有出，适当增加石油、LNG、核燃料以及高能耗产品的进口，作为平衡供需的辅助手段。当然必须在国家宏观控制下进行，要有利可图而不受制于人。我们可以采取多种方式大量引进外资和技术，开发能源、改造企业。我们还可以进入国际市场，利用我们的优势去开发外国的能源。总之，我们应该坚持改革和开放政策，认真研究日本、韩国等成功的经验，尽可能多地利用外国资源、资金和技术作为解决我国能源问题的一个辅助手段。

以上四帖药方，都能针对我国能源供需存在巨大缺口以及环境污染日趋严重这两大问题起到祛邪扶正的作用，而且四者之间也是相互影响、相互促进的，能共同使能源供需向良性循环道路发展。

七、买药的钱从哪里来——政策保障体系

上面讲的一些措施，实际上并无新意。有关部门、行业和人士都已从不同角度出发反复呼吁和建议过。例如：加快开发水电、核电以优化能源结构，大力节能、抓紧推行清洁煤技术、增加科技投入开发新能源等等，都曾为专家们研究论证和提出过建议，也确实引起国家的重视和得到一些改进。但总的讲来，进展不理想，因此依靠个别行业、专家进行研究和呼吁是解决不了问题的，需要在更高层次上作综合研究并制定有效的政策保障体系。世界各国对能源这样一个战略问题也都是由国家来控制 and 保证的。

这一政策保障体系应该由国家集中力量进行研究制定，是个长期、完整

和可行的体系，不是针对某个行业某一时期出现的问题作头痛医头脚痛医脚式的应急处理。这一体系应由中央决策，人大立法，国务院负责实施，具有严肃的法律约束性，不是某一地方某一部门可以违反抵制的，也不是随领导人员变动而改变的。

国家需要制定一个向能源倾斜，能保证能源健康发展可靠供应的总政策，还应有一系列的具体政策，包括：经济政策、节能政策、环保政策、科技政策乃至更具体的水电开发政策、核电国产化政策、新能源开发政策等等，和相应的法律、法规、条例。有关地方部门、行业、企业都应制定贯彻国家能源政策的具体措施，我们在这里只提一下经济政策问题，例如融资政策、还贷政策、税收政策、价格政策、利用外资政策等等。经验告诉我们，如果要在现在的模式上跨出一步，开拓一些新的局面，都首先遇到资金上的障碍。搞节能要钱、搞设备改造要钱、开发水电要钱、搞核电要钱、搞 CCT 要钱、加速科技开发要钱……药方再好，没有钱抓也是空的。过去许多好的建议，不是道理没有说透，而是无钱付诸实施。

怎么解决问题？一要钞票，二要粮票。就是说，一要能弄到钱，二要国家允许你去弄钱花钱。关于粮票问题，只能随着国家经济实力的增强，把“蛋糕”做大些，而且依靠国家的倾斜导向政策，在蛋糕中多切一些给能源行业，至于具体的钞票来源，一是广开渠道，引导更多的资金投入能源行业，包括尽量多地利用有利的外资；一是增加能源行业自身的活力，使它具有更强的自我积累、自我发展、自我优化（也包括自我约束）的能力。研究制定有关政策时，有一个问题必须搞清，即能源是基础产业，和其他下游产业不同。开发能源的目的主要不是为赚钱，是为发展经济提供动力，促进经济腾飞。能源企业要讲究经济效益，也是为了加快能源开发。所以国家对能源行业应该给予优惠政策扶植它健康高速发展，再从它所产生的经济腾飞效果上来取得利税，把这个问题弄清，经费问题是可以解决的。

例如，目前我国有大量水能难以开发，资源白白流失。我们是否可以就把在今后几十年要流失的资源送给愿意来开发的人（包括外商），以优惠条件让他开发、让他经营、让他得益（只要电有市场），若干年后电站归我。这样做，于我无损，我虽不能从建电站得到效益，但得到了能源，经济得到了发展，最后得到了一座电站。这一类可以探讨的问题很多。例如在排污方面，将来各国的排污量可能要受限制。如果有哪个国家愿意投资和投入技术帮助我们解决某电厂的污染问题，但要把成绩记在它的名下，我认为这是合理的，对我国对世界都有利，并不存在丧权辱国的问题。不知这个看法对不对？

说到提高能源行业自身的活力，就要允许企业把现有的资产盘活，使死资产变成能下蛋的老母鸡。只要国家加以规范和控制，不存在私有化失控和改变企业性质的问题，而这将是一笔多么巨大的资金。另外要合理调整能源价格。在计划经济时期，能源价格完全是扭曲的，谈不到能源行业的自我发展，也对节能十分不利。改革开放以来，能源价格曾作过多次调整。目前有些价格已接近国际价格，已没有多大调价余地。但是，还是要作调价考虑。目前在能源价格上存在问题：一是价格体系非常混乱复杂，实有必要予以改革和规范化。二是部分能源价格不合理，应该调整。例如，在计划经济时期修建的水电站，因无还贷付息要求，上网电价就只有几分钱。既然实行市场经济，作为一种商品，就应调整为正常价格。每年增收的数十亿元还给

国家作为再投入。三是目前在能源的开发利用中，有大量经济效益流入流通领域，开发生产单位难以为继，终端用户负担不轻，形成“两头叫、中间笑”的局面，应予合理纠正。凡此，都需合理改革调整，使有更多资金投入能源领域。

能源价格的合理调整，其总体水平必然会提高。换句话说，开发能源的资金最终还是要由用户承担。如果说，这样做会影响物价，那么这正和调整粮价一样，从国家的长期和全国利益考虑是不可避免的，人民能理解的。这样做也有利于增强节能意识，推行节能措施。总之，能源是垄断性基础产业，能源价格须由国家控制，这是各国的通例，但控制价格必须规范、合理、符合市场机制，能够促使能源工业向良性循环发展，否则是短期行为，是难以为继的。

我们认为只要有正确合理的政策，增加能源领域的投入，开拓一点新局面是可能的。当然不能百废俱兴，应该分清轻重缓急，有计划地逐步启动。先选择一些最重要最有把握的事干起来。例如选择若干条件最优越的河流加速水电开发、抓紧核电的国产化过程、修建现代化的煤电基地、推行煤源的清洁处理和某些 CCT 技术、推行某些节能技术和产品、看准目标开发一些新能源技术等等。

归纳起来讲，我们认为：（1）我国在现代化过程中，面临十分复杂困难的能源问题，所面临的挑战是世界上独一无二的，千万不可为暂时、表面现象所迷惑而掉以轻心；（2）存在的问题主要是人均资源不足、资源条件不利，能源利用效率和科技水平很低，体制、政策上不完善，以致能源供需缺口大，难以满足国家经济增长的需要，而且引起生态环境的破坏与污染；（3）我们的出路是切实实现两个根本性转变，改变经济增长模式，厉行节约提高效率，使在有限的能源供应下实现现代化；要因地制宜开发多种能源，优化能源结构，降低煤的比重和节约油气资源，以保障能源的最低需求；要增加科技投入，解决能源生产利用中的重大问题，特别是环境保护和新能源开发问题；要利用有利条件，使国外的资源、技术、资金能为我所用，作为辅助手段；（4）要实现上述各点，必须在国家的统一研究安排下，制定长期、全面、可行的倾斜政策，并通过立法手续，坚决贯彻，特别是经济政策最为重要。并应抓住一些重点，进行启动和突破，务使我国的能源开发利用逐步走上良性循环道路，实现可持续发展，最终做到能源、经济发展和环境保护真正协调发展，立于不败之地。