

美国航天技术

SPACE TECHNOLOGY IN THE U.S.

林来兴

概 述

1957年苏联成功发射世界第一颗人造地球卫星，使当时处在世界一流科技水平的美国大为震惊。危机感和力争继续保持科技领先地位，促使美国加紧发展航天技术。30年来美国在发展航天技术方面对人类作出了很多贡献：50年代，美国发射卫星的数量居世界第一位；60年代（1969年）美国首先把两名字航员送上月球，并安全返回；1972年发射“先驱者”-10号，经过14年飞行，于1986年越过冥王星的轨道，成为第一个飞出太阳系的航天器；1975年发射“海盗”探测器在火星软着陆；1978年发射“旅行者”行星际探测器，其中“旅行者”-2号已于今年8月24日在距海王星4827公里处掠过，之后将飞出太阳系去探测恒星（关于“旅行者”号探测行星的一些成果请参阅本刊1987年第1期《“旅行者”号飞船和行星探测》一文）；80年代研制成功人类第一架可重复使用的航天飞机，尽管目前还存在不少问题，但是从技术来说，航天飞机是一项划时代的成就。

空间技术发展的初期，美国就重视发展应用卫星，特别是军事应用卫星。例如1959年开始发射侦察卫星（“发现者”-1号），1960年发射第一颗气象卫星（“太罗斯”号），1961年发射实用导航卫星（“子午仪”号），1963年成功发射了世界第一颗地球同步轨道卫星（“辛康”-2号），这种卫星成为当今全世界通信卫星的主要型式。

美苏两国是世界发展航天技术的主要力量。全

世界到1988年底共发射了3812颗航天器，其中苏美两国占总数的93%，近十几年来苏联每年发射量平均为美国的4~5倍（见图1）。到1988年底，美国共发射1082颗航天器（苏联共发射2461颗航天器），占世界总数28.4%，居世界第二位，但在技术水平和质量方面美国仍然超过苏联。

“阿波罗”飞船和天空实验室

1961~1972年，美国组织实施“阿波罗”计划，目的是实现载人登月飞行和人对月球的实地考察，为载人行星飞行和探测进行技术准备。1969年“阿波罗”-11号飞船首次把两名字航员送上月球。整个“阿波罗”计划实现了6次，共12名字航员登上了月球，在月球表面设置了各种探测仪器，带回了总重382公斤的月球岩石和土壤标本，拍摄了月球背面和各主要行星的清晰照片。

“阿波罗”计划是一项非常复杂的工程。美国成功地应用系统科学和系统工程方法，组织2万多家企业、200多所大学和80多个科研机构，总人数达30多万人参加这项工程，历时11年，耗资300亿美元。“阿波罗”登月计划的成功，有力地推动了系统科学和系统工程的发展。

“阿波罗”计划包括下列三个主要部分：

1. 辅助计划，共有4项。(1)“徘徊者”月球探测器，共发射4个；(2)“勘测者”月球自动着陆探测器，共发射5个；(3)“月球轨道环行探测器”，共发射3个；(4)“双子座”载人飞船，共发射10艘，每艘载人2名，进行操作训练和交会对接实验。全

部辅助计划在1961年至1966年之间完成。

2. “阿波罗”飞船和“土星”运载火箭。“阿波罗”飞船由指挥舱、服务舱和登月舱三个部分组成。指挥舱为圆锥形,高3.2米,重6吨,是宇航员生活和工作的座舱,也是全飞船的控制中心。服务舱为

圆筒形,高6.7米,直径4米,重25吨。内装各种发动机和控制设备。登月舱由下降级和上升级组成。上升级为登月舱主体。宇航员完成月面活动后驾驶上升级返回环月轨道与指挥舱会合对接。

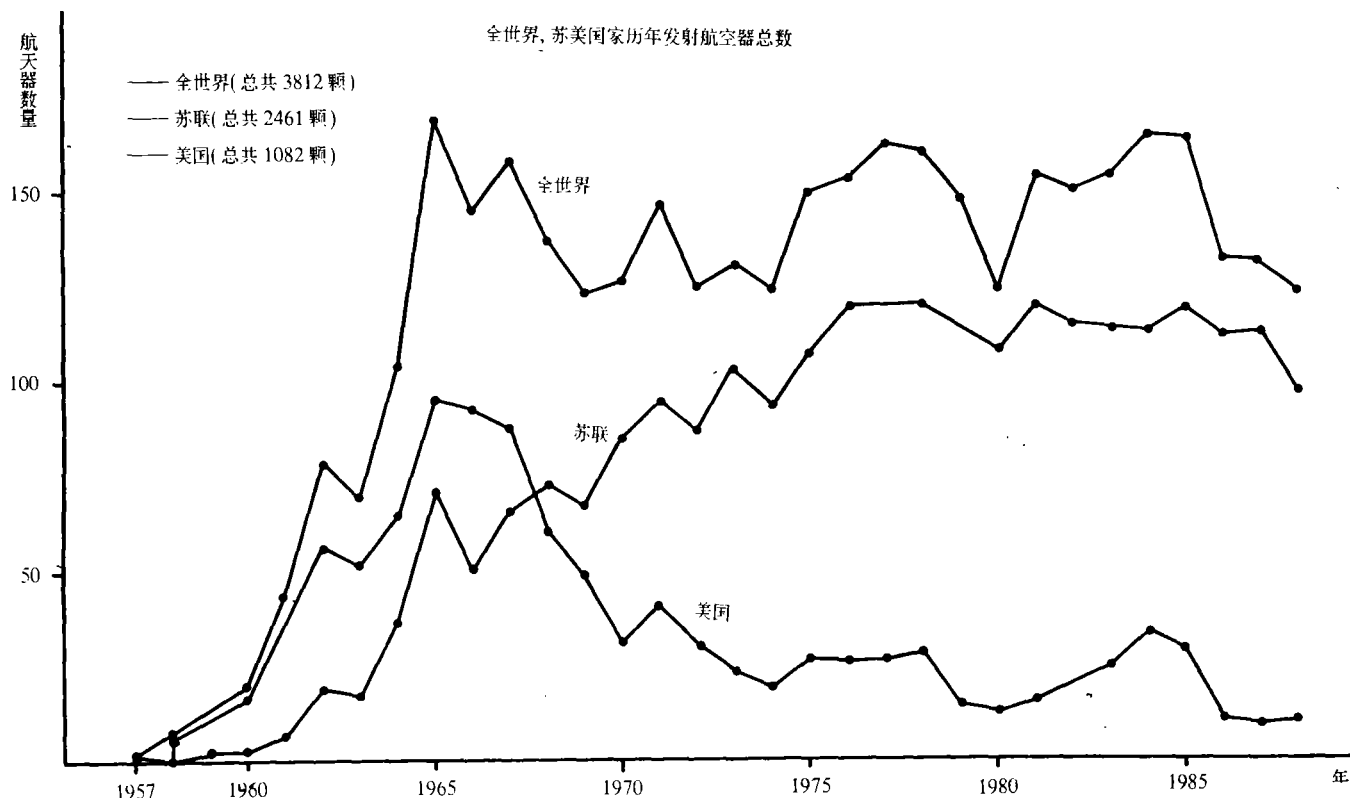


图1 全世界和苏美两国每年发射航天器总数

“土星”5号运载火箭是专为发射“阿波罗”飞船研制的,为巨型三级液体火箭,有效载荷在185公里圆轨道为120吨,静止轨道为30吨。1967~1973年共发射12次,成功10次。

3. 飞行实验和登月飞行:飞行实验包括两方面。(1)1966~1968年进行了6次不载人飞行实验,在近地轨道通过飞行考验飞船性能。(2)1968~1969年进行了4次载人“阿波罗”飞船飞行实验,按登月所需时间进行了持续11天的飞行,检验飞船的可靠性。最后一次飞行实验为“阿波罗”-10号飞船,进行了登月全过程的演练飞行,绕月飞行31圈,宇航员乘登月舱下降到离月面15.2公里的高度。所有上述飞行实验都成功以后,方正式进行“阿波罗”飞船登月飞行。

“阿波罗”登月飞行采用月球轨道交会方式。由“土星”5号火箭运载“阿波罗”飞船升空。第三级火箭熄火时将飞船送至绕地球停泊轨道运行。当第三

级火箭第二次点火时,将飞船加速送入地-月过渡轨道。飞船在过渡轨道飞行两天半,当接近月球时,用服务舱的主发动机减速,使飞船进入环月轨道,此时飞船绕月球飞行。由宇航员驾驶登月舱与母船分离,下降至月面实现软着陆。登月宇航员在月面完成登月活动后,驾驶登月舱上升级返回环月轨道,然后与母船交会对接。抛去登月舱后,起动服务舱主发动机使飞船重新进入月-地过渡轨道,在接近地球轨道时,再次点燃主发动机,使飞船进入再入走廊,抛掉服务舱,使指挥舱在强大的气动力作用下减速进入低空,指挥舱弹出降落伞,使它缓慢溅落在海面上回收。这样复杂漫长的飞行过程,飞船回收的落点与指定地点仅差1.5公里,可见制导和控制技术的准确性是很高的。

1973年,美国又成功发射了第一个试验性空间站——天空实验室。这个空间站由轨道舱(用“土星”5号第三级火箭改装而成)、过渡舱、多用途对

接舱（两个对接口相互垂直）、太阳望远镜和“阿波罗”飞船（仅有指挥舱和服务舱）5个部分组成，全长36米，直径6.7米，重80吨。

天空实验室共接待了三批宇航员，每批三人，乘坐“阿波罗”飞船上天和返回。这三批宇航员在空间站工作和生活分别为28天，59天和84天。在空间站采用58种仪器进行了270多项有关空间活动和实验研究工作。

加上从1981年开始的历次航天飞机载人飞行，美国载人飞行累计时间大约为4万小时左右，仅为苏联的1/3。

应用卫星

应用卫星（包括军事卫星）在美国发展最早，技术水平较高，经济效益和军事价值都很大。应用卫星大致有以下几类。

1. 侦察卫星 美国侦察卫星分为4种，照相、电子干扰、海洋监视和早期预警，其中以照相侦察卫星应用最为广泛。美国照相侦察卫星目前已经发展到第六代，如1988年12月2日由航天飞机送入轨道的“锁眼-12”（KH-12）。这颗卫星重14.5吨，价值5亿美元，内装有高性能望远镜头的照相机和新添的雷达照相装置，分辨率可达到0.1米。由于该卫星可整星回收到航天飞机货舱内加注燃料，从而把其使用寿命提高到8年。这样高的分辨率和这样长的寿命可称为目前世界照相侦察卫星的最高水平。苏联照相侦察卫星寿命短（几十天），分辨率只能达到0.2~0.3米。由此可见，一颗美国照相侦察卫星可以相当十几颗苏联侦察卫星。

2. 通信卫星 美国从1960年起经过6年实验和研究，到1965年通信卫星进入实用阶段。目前已经发展到第五代。这代通信卫星的特点是：星上设有40~50个转发器，具有几万话路通信容量；使用寿命12年以上；采用多波束天线控制；装有大面积太阳能帆板，可提供几千瓦功率。卫星控制指向精度优于0.05°。一颗这样的卫星相当于十几颗第一代通信卫星。美国目前国内和国际都采用卫星通信。十多年美国通信话路成本降低到了原来的1%，预计今后10年可能再降低1~2个数量级。

美国还有专门的军用通信卫星。目前美国80%以上的军事通信依靠卫星来完成。美国军事通信卫星目前已发展到第三代，称为国防通信卫星-III（DSCS-III）。这种卫星具有很高的抗干扰能力和防核加固，保证在核战争环境中仍能顺利通信。

美国从80年代开始发射地球同步轨道中继卫星，从而实现了全球实时连续通信和地面站卫星化。今后可减少或不再兴建各种地面站。

3. 导航卫星 美国“子午仪”导航卫星从1963年开始，至今已发射40多颗。二维定位，精度达50米，至今还在使用。1977年，美国开始发射全球定位系统（GPS），该系统共发射了18颗导航卫星，分布在6个轨道平面，每个平面相隔60°，轨道周期12小时，高度2万公里，目前正在进行实验运行，预定90年代初期正式投入使用。GPS可进行全球全天候连续三维导航，定位精度高于10米，速度精度高于0.06米/秒，初始定位时间不超过1分钟。该系统将对民用和军用导航产生巨大影响。

4. 气象和资源卫星 美国气象卫星从1964年开始发射至今已发展到第4代——全球气象卫星系统。它由5颗地球同步卫星和两颗极地轨道卫星组成。美国地球资源卫星已经从1972年发射的“陆地卫星”-1号，发展到现在的“陆地卫星”-6号，15年连续不断地进行地球资源探测。“陆地卫星”可进行大面积连续探测地球资源，其分辨率可达15米以内。

运载火箭

运载火箭是开展空间活动的基本保证。美国到1981年底（航天飞机发射前），研制成功10来种一次性使用运载火箭，其中有些是由弹道导弹发展过来的，例如“雷神”、“宇宙神”和“大力神”等。如果加上可重复使用的航天飞机，美国研制成功的运载工具种类是不少的，所花费用也很大，但在航天发展史上，美国却因运载工具问题几次遇到困境。

美国的人造地球卫星，在50年代之所以落后于苏联，主要原因出在运载火箭。虽然美国很早就开始研究卫星，并且在1955年宣布要发射卫星，但当时美国研制的火箭种类过多，力量分散，缺乏统一组织，运载火箭实验屡遭失败，导致第一颗卫星迟迟不能发射。

美国第二次遇到困境是在“挑战者”号航天飞机失事以后。美国第一架航天飞机发射成功后不久，就宣布停止一次性使用运载火箭的生产，由航天飞机承担全部发射任务。当“挑战者”号失事后，美国又被迫再次使用一次性运载火箭。就在这关键时刻，连续发生3次一次性使用运载火箭发射失败。这次困境造成美国将近3年时间没有运载工具可用，而且推迟了许多重要的发射任务，迫使美国不得不利用其他国家的运载火箭，其中包括中国“长

征”2号E和“长征”3号运载火箭。

今后一段时期，美国将采用一次性使用火箭和航天飞机相结合的方针，并恢复一次性运载火箭的生产和对航天飞机进行改进。预计90年代，美国每年将发射400吨左右的有效载荷。航天飞机每年最大发射次数为10次，有相当一部分有效载荷的发射任务需要由一次性使用火箭承担。

虽然美国有多种运载工具，但每公斤有效载荷的发射费用却比苏联高，甚至高几倍。其中一个重要原因是，美国的运载工具不象苏联那样可以进行批生产。

航天飞机

美国从1972年开始研制航天飞机，历经8年时间，耗资百亿美元，于1981年4月12日首次发射成功，至今共发射28次。1986年因“挑战者”号失事，中断了2.5年，1988年9月航天飞机又成功复飞。航天飞机已成为人类第一个可多次重复使用的空间运输工具。

航天飞机可以象火箭那样垂直起飞，象载人飞船那样在轨道运行，象飞机那样滑翔，在地面水平着陆。它把飞机—火箭—卫星三者的功能有机地结合起来，这是美国在航天史上继“阿波罗”登月后又

一次划时代的技术突破，同时也标志着空间技术已经从研制阶段成功地走向广泛应用时代。

航天飞机除了运载和部署卫星以外，还可以检修、回收卫星，或进行空间营救。在军事方面，除了发射军用卫星以外，还可以执行载人近地轨道实时侦察，拦截卫星，战略轰炸等任务。在空间科学研究方面应用也非常广泛，如发射空间站和运载空间实验室等。

航天飞机包括一个轨道器，一个外贮箱和两台固体助推器。其中最庞大的是外贮箱，可以把它看作是一个基本结构，轨道器驮在它的背上，两台助推器则平行地挂在它的两侧，外形结构如图2所示。航天飞机总重量约2000吨，长约56米。整个系统的总起飞推力3100吨。飞行结束后，携带有效载荷着陆的轨道器重量约85吨。

轨道器可以重复使用100次，助推器可以重复使用20次，外贮箱仅使用一次。目前的航天飞机是两级式部分重复使用的第一代空间运输工具。轨道器是航天飞机的核心部分。它的外形和飞机极为相似。轨道器全长37.24米，最大翼展宽度23.8米，地面停放高度为17.27米。轨道器净重68吨，最多可带有效载荷29.5吨，而可携带回地面的有效载荷（例如回收卫星）为14.5吨。

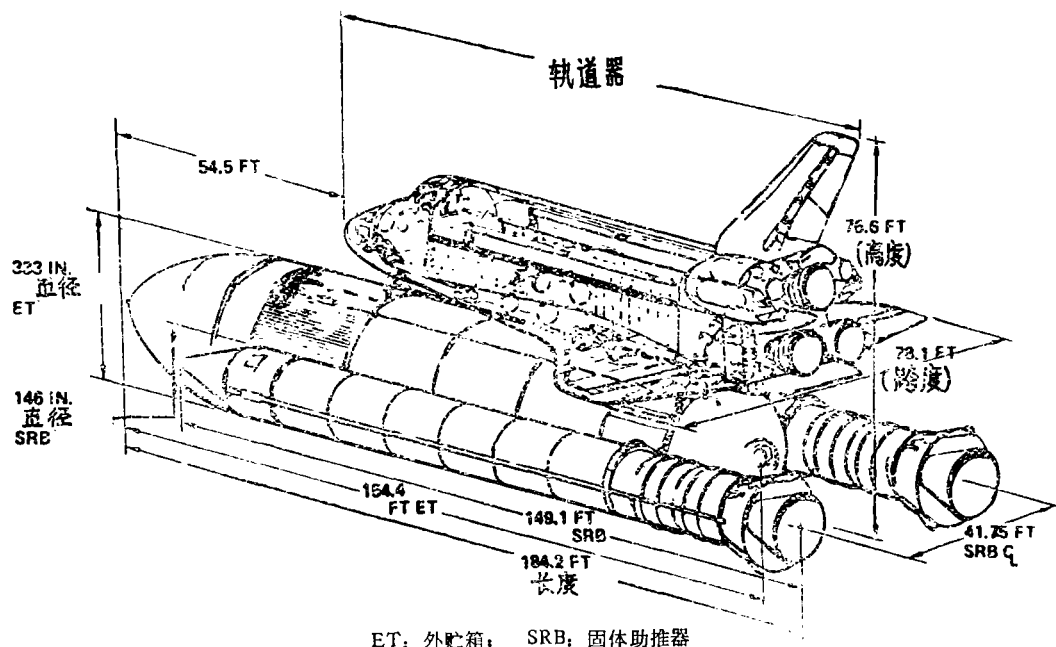


图2 美国第一代航天飞机

美国共研制了5架航天飞机，除了提供飞行实验以外，从1981年起正式投入使用的共有4架。经过这几年飞行实践和“挑战者”号航天飞机失事的教训，人们对美国航天飞机有了新的评价。首先，美

国的航天飞机无论送人或送货（发射航天器）上天都需要宇航员，载人飞行和发射无人航天器又不能分开进行，这是一种缺陷。因为载人飞行需要极高的可靠性和昂贵的生命保障系统，而送货并无此要

求。其次，既然航天飞机任何时候飞行都要载人，但是在航天飞机上却没有宇航员救生系统，从而导致像“挑战者”号那样惨重的悲剧，说明这种航天飞机有很多方面急需改进。第三，原以为航天飞机多次重复使用可降低发射费用，但是目前航天飞机的发射费用与一次性使用火箭基本相同，甚至还要高一些。据 NASA 估算，每次飞行费用为 3.1 亿美元，但是有关分析家断定，每次实际费用为 5 亿美元。航天飞机一次只能发射 3~4 颗卫星，这样就可能比一次性火箭贵。

“自由”号永久性空间站

美国从 1983 年开始研制永久性载人空间站。1984 年 1 月美国总统正式批准 10 年内建成空间站的计划。这是一个由美国、欧洲空间局、日本和加拿大参加的国际空间站计划，命名为“自由”号。空间站总重 204 吨，压力容积为 866 立方米，可产生 75 千瓦电能，全站共有 20 个对接口，每年需要对空间站进行轨道服务 5 次。空间站可容纳 8 个人工作和生活，微重力可达到 $10^{-5}g$ 。设计寿命 30 年。

过去空间站都是由各舱段组成的整体，不包括与空间站脱离的其他单独飞行器。由于宇航员的走动，以及生活和工作引起的扰动和污染，致使空间站本身不能提供很低的微重力和非常高的净化空间环境。为此，希望有脱离空间站而单独存在的自由飞行器，即空间平台。空间平台有共轨和极轨两种。空间站的宇航员为了维修，更换或取回空间平台上的资料，还需要有空间站与平台之间的交通工具，称为轨道机动飞行器 (OMV) 和轨道转移飞行器 (OTV)。把上述这些飞行器包括在内，空间站就发展成为一个空间站系统。

“自由”号空间站总设计和工程总负责由美国承担。空间站系统分为两期工程进行。

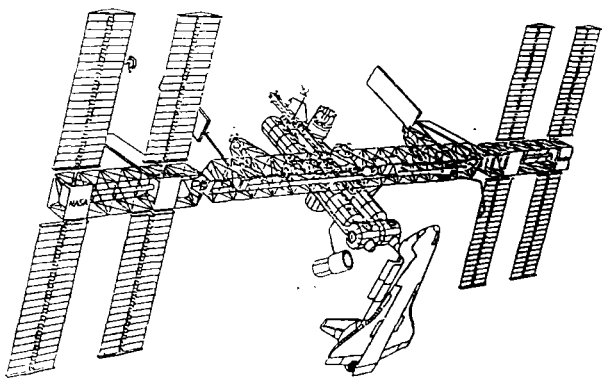


图 3 第一期工程“自由号”空间站结构

第一期工程称为可修改阶段，开始是有人照料的，然后是永久性载人的。主要舱段有 4 个：美国两个（一个实验舱，一个居住舱），欧洲和日本实验舱各一个。空间站系统还包括两个极轨平台（美国和欧洲空间局各一个）和一个轨道移动服务中心。中心由宇航员舱外活动工作站、机械臂和空间站遥控操作系统三部分组成（前两部分由加拿大负责，后一部分由美国负责），主要用于空间站的组装和维修。此外，还有一个共轨的有人照料自由飞行器（欧洲空间局提供）和后勤保障部件。第一期工程为“单龙”骨架结构，见图 3。

第二期工程将增加 3 套有效载荷设施，一个共轨平台，轨道移动服务中心第二期设备，地基轨道机动飞行器 (OMV) 和完成“双龙”骨架配置及框架等。第二期工程空间站结构见图 4。

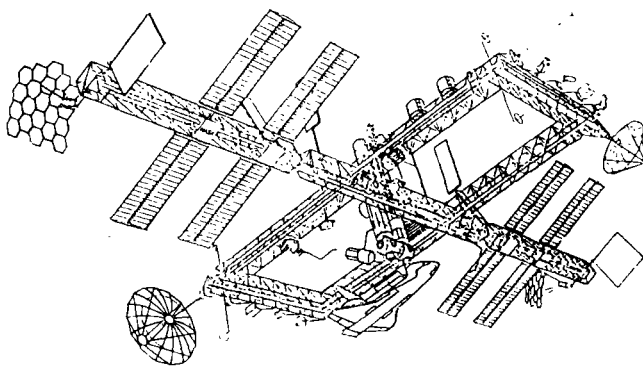


图 4 第二期工程“自由”号空间站结构

回顾与展望

回顾美国 30 年来航天技术的成就，可以归纳下列三个特点：

1. 美国在航天发展史上建立了两个里程碑，一个是载人“阿波罗”登月，另一个是多次重复使用的航天飞机。这两个里程碑也反映出美国航天技术发展的两个转折点。在“阿波罗”时代，美国航天技术发展可以说是以技术为主，只要技术上的需要，只要空间竞争的需要，基本上不考虑经济因素。在航天飞机时代，美国航天技术发展转为以经济为主。也就是说，人们在航天方面每花一美元都需要问一句为什么？将来有什么经济效益？

2. 美国在载人飞行和空间站方面基本上采用一种争先跳跃式发展方针，而不象苏联采用稳步、循序渐进的发展道路。为此出现发展速度波动起伏，不连贯，甚至发生决策上的失误。

(下转第 13 页)

竞争对手的炼油和供油公司，以及本国的石油、天然气生产公司则担心输出国公司会利用其设施，以掠夺性的削减价格来夺取市场。

在另一方面，只要这种做法能建立供需之间的更持久的经济联系，那它就能增强能源保障。讨论和估计能源保障中的不确定因素，不是为了避开这些问题，而是要面对这些问题。判明和认识关键的不确定因素对能源政策的决策十分重要，无论是政府方还是私方。在目前形势下，美国的能源保障政策的目标应该是：

放慢进口石油 美国石油进口量迅速增长是一个不安定的因素，应努力防止。马上可以采取的政策措施有：对汽油征税，征收石油进口费，改善国内石油和天然气探测和生产的财政环境，鼓励运输部门减少对石油的依赖。

加强国内石油和天然气工业 保持一个强大的国内石油和天然气工业十分重要，尽管其规模仍较70年代后期和80年代初期时为小。同样也应加强通常总是被忽视的石油服务系统，使其技能和技术能够得到保持，并进一步发展。

增加对天然气的利用 在许多方面，天然气可以代替石油。扩大天然气的应用将激励国内石油和天然气工业的生机，并增大依赖本国石油和天然气工业的范围。从长远来看，阿拉斯加北坡是一个大型天然气产地，现由于缺乏运输手段而被封闭，但它是一个重要的能源储藏。

提高能源效率 节能过去往往受到嘲弄，最好的情况下也是非常不受重视，现在情况变了，受到普遍的高度重视。1986年后的趋势是，环境的考虑，对电力供应可能的压力，以及技术向发展中国家的扩散，这些都是促使强调提高能源效率的重要因素。

加强研究与开发 在高效能源技术、煤的干净燃烧、天然气的应用，替换技术和新型核反应堆的设计等方面，都应有大规模的研究和开发计划，支持那些旨在判明预测技术进展的各种近期和远期的研究活动。环境意识的增强势将进一步推动这些研究工作。

保持竞争性市场 自由而灵活的能源市场应受到鼓励。70年代美国对石油价格的控制可能受到有力的政治支持，耗油者在油价上涨中受到部分保护，但都是以削减石油产品供应者的利益为代价，例如，排队定量配给。许多在70年代主张控制价格的人现在回过头来认识到，支持提高能源效率和试图控制价格两者之间存在着合理的一致性。

80年代初期，世界能源市场，以及市场的经济和政治秩序，总是在危机和调整之间摆动。今天在80年末期，很明显，虽然第一次石油冲击的影响尚未结束，又来了第二次石油冲击，但调整已令人信服地比通常所预料的速度快得多地完成。现在，消费者们正在获利，今天的能源供应和价格水平都不会限制经济的增长。

在经济活动中，能源具有特殊的重要意义。它是工业社会的基础。由于石油在能源中的中心作用、其战略性质、其地理分布，以及供应上的周期性危机，使其显得尤其重要，并且带有特殊的风险。目前的环境使我们可以冷静地对石油舞台进行一番反思，并看清它的变化到底有多大。到90年代末，如果能源保障还不经受政治或技术危机的考验，那才怪呢。有幸的是现在能源保障具有相当的裕度，我们在考虑90年代能源保障问题时，感到的不是恐慌，而是要持某种谨慎的态度。

(吴永智译，一丁校)

~~~~~  
(上接第22页)

3. 美国的应用卫星，包括军事卫星在空间技术发展初期就被重视，而且得到连续不断的发展。美国主要的应用卫星至今都已经发展了好几代，一般3~5年时间就更新换代。美国在应用卫星方面，无论技术水平，使用寿命和效益等都居于世界领先地位。

今后50年美国航天技术主要发展规划大致有下列内容：

1. 90年代中期到本世纪末建成“自由”号永久性载人空间站，并投入正常运行。

2. 改进现有航天飞机和研制新型航天飞机——

空天飞机，可水平起飞，水平着陆。

3. 重新登上月球，建立永久性月球基地，开发月球，实现人从地球居住到其他星球的愿望。

4. 建造太阳能发电卫星，利用微波从空间传输电能到地面。

5. 实现火星载人飞行。

本文作者林来兴 (Lin Laixing) 系中国空间技术研究院北京控制工程研究所研究员，国防科技大学教授。