

空间站和空间平台

【美】戈登·伍德科克 著
褚桂柏 等译

空间站

中国科学技术出版社

30396904

V476
02

空间站和空间平台

[美]戈登·伍德科克 著

褚桂柏 杨照德 叶永华 译
陈德顺 李 明

朱毅麟 褚桂柏 校

1/k34108



中国科学技术出版社



C0287166

内 容 提 要

本书全面介绍了空间站的背景、空间站和空间平台的工程设计原理,重点论述了各学科的相互关系及其对设计决策的影响,并对有关学科的技术问题都作了一定深度的论述,是一部空间站工程系统设计原理方面的重要著作,具有一定的理论意义。书中附有大量图表和数据,资料翔实,内容丰富,有一定的实用价值。

本书既可作教材,又可用作参考书和工具书,适合广大航天科技工作者、大专院校有关专业师生及研究生阅读。

空间站和空间平台

著 者:〔美〕戈登·伍德科克

译 者:褚桂柏 等

责任编辑:屈惠英

封面设计:王庭福

技术设计:郑爱华

*

中国科学技术出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京燕山联营印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:15 字数:359千字

1990年11月第1版 1990年11月第1次印刷

印数:1-200册 定价:7.80元

ISBN 7-5046-0189-6/V·4

中文版前言

人类航天活动的实际成就起始于20世纪50年代,30多年来,航天活动为什么取得了如此迅速的发展?除了美苏搞空间军备竞赛发射了大量的军事应用卫星之外,主要是人类一开始就非常重视航天技术的应用。航天活动扩大了人类的物质资源和知识宝库,对人类日常生活产生了重大的影响,并带来了巨大的经济效益、社会效益和军事效益。航天活动大大推动了现代科学技术和现代工农业的发展,在许多国家和地区已成为国民经济和军事部门重要的组成部分。

在30多年的国际航天活动中,大致经历了两个阶段。一是空间技术研究、应用阶段,即信息获取和传输阶段,约经过了10多年。重点是在航天器上利用遥感手段,观测和研究地球表面,记录气象和海洋情况,勘查农业、水力和森林资源,发现有利用矿藏,预报自然灾害,揭示环境污染源;利用无线电传输技术,进行卫星通信、导航,使地面通信、广播、导航技术有了质的飞跃;利用探测器进入太阳系空间,进行科学探测,揭开太空和天体的奥秘。二是空间环境研究利用阶段,约用了20多年时间,在载人轨道飞行期间,研究利用空间高真空、高洁净、微重力、强辐射等独特的环境效应,进行材料加工、生物药品提取试验等。因此,此阶段除信息获取传输外,不断扩大空间资源开发利用探索,目的是获得空间物质产品。

空间站和空间平台是应用卫星技术和载人飞行技术发展相结合的必然产物,是航天技术发展的新台阶。空间站和空间平台可用于对地进行综合观测;对太阳和恒星进行无大气折射的全谱段天文观测;研究微重力环境对材料和生物的影响;试验和生产空间产品(材料、药品)。空间平台可以做到有人照料飞行,也可以自主地独立飞行,可以和空间站共轨飞行,也可以在极轨道上飞行。完成上述飞行任务,空间平台可以提供无乘员干扰和无污染的良好微重力环境;能满足特殊的和高精度的定向要求。空间平台的有效载荷比和经费比比空间站优越得多;然而,空间站的用途比空间平台要广泛得多。它既可用于空间站自身和其他空间设施的装配、部署、维修、更换、补充、试验和检测,又可用于月球基地和飞往太阳系其他行星的中转站。所以,空间站和空间平台都是未来天基系统的基本组成部分。

《空间站和空间平台》一书全面介绍了空间站的背景、空间站和空间平台的工程系统设计原理。不仅对结构设计,而且对许多有关学科的技术问题都作了一定深度的论述,并附有大量的图表和数据,资料内容丰富。书中重点论述了各学科之间的相互关系及其对设计决策的影响。由于作者直接参加了空间站设计工作,故对空间站的技术问题有许多独到见解。本书是一部空间站工程系统设计原理方面的重要著作。

随着我国航天技术的发展,我们需要掌握空间站和空间平台工程系统设计原理和大量

的设计数据，翻译出版这本书就是为适应我国这方面的需要而作出的一种努力。书中涉及的技术学科也适用于其他大多数航天器工程系统，因此，本书是一部对广大航天科技工作者有重要理论意义和实用价值的参考书。

在翻译过程中删去了一定数量的插图和个别节、段，这些并不影响全书的内容、系统性和完整性。书中发现的错误之处作了更正。限于译者水平，不当之处，恳请读者批评指正。朱毅麟同志校阅了书稿，顺致谢意。

褚桂柏

1990年4月10日

序

时机已经来临。探险者们，飞吧，飞向更深远的宇宙。空间移民已开始踏上征途。

就象16世纪初叶开发新英格兰一样，人类已经探测和考察了靠近地球的空间边界。它笼罩在我们居住的世界的外围，阻碍人类向外部扩张。但是，人类总是一天要到这个“新大陆”去永久居住，这个日子已为期不远了。

人类长久地到长久性空间设施中去居住，其意义不亚于当时向新英格兰的移民。人类真正开始到空间居住需要多大规模的设施，运输这些设施需要达到多大的效费比，这些都是建立长久性空间设施的决定性因素。永久性地占领“新大陆”必然同永久性地占领新英格兰一样，带来蓬勃的发展。

“天空实验室”是美国第一个（但只是临时性的）空间站。我们业已证明，人类要在空间真正取得进展，必须遵循同地球上一样的法则。我们必须住在能适应空间环境挑战的设施中日复一日地工作。我们必须能观察、学习和提出新问题，发展新技术，制造新硬件。我们必须在其能力、性质和规模都将不断发展的永久性空间设施中工作。

本书是一部关于空间站——我们在“新大陆”中的第一个长久性住宅一的著作，一部出色的、激动人心的著作。

打算到“新大陆”居住的人中，有些是科学家和工程师。他们是为了寻求知识。“新大陆”给他们提供了诱人的机会：向下，可以对地球进行综合观察；向外，可以对太阳和恒星进行不失真、全谱段的观测；此外，还能研究零重力对材料和人体的影响。

另一些愿意到“新大陆”去的是商人。他们是为了追求利润。珍稀药品和新颖的工程材料深深地吸引着他们，这些药品和材料的价值有的高达每磅数百万美元。这些空间产品在初期将缓慢而稳步地发展。但随着商业的发展和市场的形成，其步伐将会加快。在一种或多种的商业发展过程中发现“加利福尼亚黄金”，从而推动空间的开发，这种可能性总是存在的。

空间站具备的为空间硬件服务的能力将赋予它本身和“新大陆”一定程度的自主性。空间站将对本身和其它空间设施进行装配、部署、修理、维护、试验和检测。利用舱外活动为空间设备服务早已成为现实，这些技术还将得到进一步的发展和利用。

空间站将由一个载人站和若干不载人自由飞行平台组成。平台将在两种轨道——空间站轨道和极轨道上飞行。平台可以提供干扰和污染都很小的环境，并能满足特殊的定向要求。平台的分系统和部件均可与空间站通用，从而大大简化了服务和后勤的补给工作。空间站的所有操作都需要开发自动化和机器人技术，采用人和机器配合的工作方式，这不仅将提高在空间的工作效能，而且可促进地球上技术的发展。

同新英格兰的移民区一样，空间站不仅将提供一个在新世界的立足点，而且为进一步

探险提供了一个出发点。此外，空间站还将为延续时间长达许多年的任务开发长寿命的系统和提高航天员的能力，这些任务包括：重返月球，飞向火星，飞向其它行星、卫星和更遥远的星球。

三亿年来，人类的天性就是不断开发新领域。人类总是在适当的时候翻过下座山，越过下条河，跨过大海，进入天空，而现在，则是进入宇宙空间。永久性空间站是人类向外部世界发展历程中必然要迈的一步。人类每前进一步，如果都要在到“未开垦的处女地”去定居之前说清它的全部优点，这是不可能的。一旦第一步行动完成了，它的好处自然会被人们承认，于是人们便转向对下一步的辩论。

人类永久性占领空间的活动正在进行中。我们只能影响它的进展速度、性质和空间活动支配权一如叫“新大陆”还是“新俄罗斯”。20年来，空间站问题早已不是技术上是否可行，而是国家是否有这个愿望。现在，加拿大、欧洲和日本也参加了空间站计划，它又增加了一个国际合作的好处。

在本书中，戈登·伍德科克(Gordon Woodcock)清楚、全面地介绍了空间站的背景和设计特点，并对操作和保障工作进行了分析。他提供了一种系统地解决建立空间站的基本问题的途径。此外，几年来，他直接参加了空间站的设计工作，因此，他对空间站的技术问题具有独到的见解。今后，这部著作将成为关于空间站的经典参考书。对于那些迫切希望了解、评价我们在“新大陆”的第一个永久性住宅，以及愿意为此作出贡献的人，这是一部参考价值很高的著作。

爱德华G·吉布森
(Edward G. Gibson)

前 言

在本书中，笔者打算从工程的规模对空间站和平台的工程系统作一广泛的介绍。空间站和平台虽然都是巨大、复杂的结构，但本书仍对许多学科的技术问题做了有足够深度的论述，以便合理地进行系统分析和结构设计。书中重点论述了各学科间的相互关系及其对设计决策的影响。由于书中涉及的技术学科也适用于大多数其它空间系统，因此，预计本书将成为教授当代空间系统设计原理的一部工具书。

善于从系统角度思考问题的人常常成为系统设计师和系统工程师。依靠专家们的最新知识和具体技术，系统设计师从概念上把整个系统联系在一起。象研制空间站这样的大型计划，可能要雇用成千上万名工程师，但重要的系统结构决策（如应采用什么样的外形？应当怎样工作？）却是由极少几个人制订的。当然，涉及到的其他人还很多，但他们并不在重要岗位。

空间领域不但需要擅长某种工程专业的人（如传热和数字设计等），而且需要他们充分熟悉系统思想和许多工程学科的主要原理，以便了解他们的专业如何与整个工程相适应。为了使每个工程师能高效率地工作，并对自己的职业有兴趣，这种综合性知识是必不可少的。即使是在更大的工程中只担任具体设计工作的工程师，也应了解他们的工作怎样才符合整体的要求，否则，许多工作就会白做和返工。

航天界的人经常发现，新毕业的工程师尽管许多专业学得不错，但仍需经过在职训练。其原因之一是，我们的大型工程所花费的总劳动要比新毕业生曾经遇到过的多成千上万倍。“阿波罗”工程花费的人·时达10亿量级。一个典型的高级工程约需花一万人时，而许多毕业生甚至连一小时也没有干过。另一个也许更有说服力的原因是，大多数毕业生太缺乏设计空间系统的知识。此外，大多数设计工程课没有合适的教材，只能无教材授课。本书打算为填补这一空白起到抛砖引玉的作用。

关于空间系统设计和分析的英文教材极少。相反，苏联的技术著作中却有大量这类的教材。这表明苏联人把航天成就和优势看作是国家政策的一种重要工具。苏联的技术教科书也反映出这一点。

航天是个正在发展中的工程领域。航空局的计划是建立一个由运输系统、空间站和平台组成的空间基础设施，其目的是为下个世纪鼓舞人心的空间开发任务服务。空间在国防上的作用正在增长，空间的商业应用正开始显示出同其它政府计划一样的经济和技术上的重要性。例如，商用卫星通信已发展成一种成熟的工业，遥感正在向私人商业化发展。虽然空间材料加工的第一个真正商业上的成功尚未出现，但在这一领域投资的公司却每年都在成倍增多。尽管目前商业材料加工未来前景的预测变化无常，但只要少数几个项目取得成功，那么，到本世纪末，这一领域中的投资就可能超过政府在空间的投入。

大约在30年前，航天技术是作为一个高度实验性和探索性的领域开始发展的。空间一直被人称为“无限的疆域”，这是很贴切的，因而探索工作永远不会完结；但是，尽管航天技术还很年轻，它已经建立了自己的基本原理，达到了一定的工程成熟度。这些基本原理，特别是这些原理在航天技术工程实践中的应用方式，则是航天领域所特有的。这些原理是以众所周知的科学和工程原理为基础的，而且随着航天技术的不断成熟，它们也只是逐渐地发生变化。考虑到这一因素，但愿《空间站和空间平台》一书能对广大学生、大学毕业的工程师以及航天技术人员有所裨益。

作 者

目 录

中文版前言

序

前言

第一章 空间站——合乎逻辑的下一步

航天发展史	1
长期存在于空间的意义	8
人在空间	12
空间站和空间平台的任务	13
空间科学和应用类任务	14
商业类任务	16
操作类任务	21
技术开发类任务	23
国家安全类任务	24
目前的空间平台活动	26
空间平台的任务	27
空间站任务的保证条件	27

第二章 空间站运行

空间基础设施中的飞行器	29
发射系统：航天飞机	29
发射系统：航天飞机派生的运载器	31
轨道系统：轨道机动飞行器	32
轨道系统：轨道转移飞行器	34
飞行器性能估算	37
在航天飞机中飞行	38
质量和体积的限制	38
载荷	38
重心	40
热、电和数据设备	41
安全	41
空间站的综合操作	41

上面级的操作	42
科学任务的操作	43
空间建造操作	43
航天员的操作	45
后勤操作	47
操作相容性	50

第三章 轨道力学

开普勒运动	51
轨道条件	51
圆轨道	51
椭圆轨道	52
轨道转移	53
轨道几何学	55
轨道摄动	55
地球扁率影响	55
重复轨道	56
太阳同步轨道	58
大气阻力	58
阻力差	59
接近操作	61
相对运动	61
对接和停靠	63
发射和捕获操作	63
重力梯度影响	64
重力梯度力矩	64
系缆	68
飞行模式	69
小结	70

第四章 空间环境

太阳	71
电离辐射	72
俘获辐射	72
航天器充电	72
太阳辐射	73
宇宙线	74
航天员的辐射照射量和屏蔽	75
地球大气层	78
大气密度和天气模型	78
原子氧	80

固体物质	81
流媒体	81
人造碎片	82
碰撞的预估、损伤和防护	83

第五章 空间站和空间平台分系统

结构和机构	84
典型的空间站结构	84
结构动力学	86
机构	87
电源	88
负载预算	88
发电	90
能量贮存系统	94
电源调节	95
系统原理图和系统尺寸	96
环境控制和生命保障系统	98
压力舱通风和温度控制	99
空气更新	99
饮用水	101
冲洗水	102
环境控制和生命保障系统分析	103
热控制	105
热量输入和输出	105
筒易辐射器和选择性涂层	106
热输送环路	108
液滴辐射器	109
温差辐射器	109
系统	111
制导、导航和控制	112
轨道导航和制导	112
姿态控制	113
控制装置	114
控制律	114
控制和结构动力学	114
推进	115
推进要求	116
推进系统	117
数据管理	119
分布式系统	121
软件和语言	123
自动化、自主和机器人	124

自动化	124
自主	125
机器人	124
遥控操纵装置	126
通信	126
波段和通信线路	126
空间站通信要求	127
线路性能和天线尺寸	128
天线形式	130
调制和信号	131

第六章 乘员系统及其居住设施

乘员作为一个分系统	132
乘员	132
乘员居室设备和居住设施	132
健康保养	133
淋浴和洗手	135
厨房和食品供应	135
乘员床位	136
人-机界面	137
零重力设计	139
航天员舱外活动装备	140
航天服的发展史和现状	140
舱外机动飞行装置的设计考虑	143
舱外活动的机动性	144
工具和设备	144

第七章 质量特性分析

质量特性估算方法	149
质量估算方法	147
标准工作分解结构	147
结构部件的质量估算和形状	148
结构外壳	150
空间桁架	150
分系统因素	151
使用实例	151
重心和惯性特性	152
重心	152
惯性特性	152
质量增长趋势和预测	162
质量增长的原因	162

质量增长余量和设计余量	183
-------------------	-----

第八章 构形与设计综合

构形发展	186
限制条件	186
任务要求	189
构形方案与设计过程	172
总体布局	174
舱体组合形式	176
内部布局	179
创造过程	179
设计综合——系统工程过程	181
综合设计——技术相关分析	184

第九章 成本和成本估算

与成本有关的因素	187
分析方法	188
参数模型	188
特性曲线	192
编制项目成本	194
全寿命成本与贴现	196
不确定性分析	197
未来展望	202
谬论与神话	202
自我实现的预言	204
心理与文化	204
计算机辅助工程	206

附录A 矢量运算	207
附录B 轨道计算举例	208
附录C 环境控制和生命保障的平衡计算	211
附录D 不确定性分析 举例	218
缩写词汇	221

第一章 空间站——合乎逻辑的下一步

航天发展史

“（科学革命）速度并不快，除了后期阶段外，谈不上有迅猛之势。此外，它开始于很久以前，实际上直到十七世纪末期才完成。但是，科学革命却给人类熟悉的世界带来了一个也许是最深刻的变化。人类惊讶地发现，他们并不是宇宙的主宰，而是被束缚在太阳系中一个小小的行星上。”

——帕特里克·摩尔(Patrick Moore)《天空哨兵》

空间飞行设想是科学革命的成果之一。约翰斯·凯普勒(Johannes Kepler)曾撰写过一部早期的描述登月旅行的小说，但他的登月手段全凭魔怪的法力，几乎没有现代的科学性。第一部关于空间旅行的科学幻想小说也许是凡尔纳(Verne)1865年发表的《飞向月球》。大体在同一时期，E·E·赫尔(E.E.Hale)的短篇小说《砖砌的月亮》介绍了一个围绕地球运行的载人空间站的概念。

大约本世纪初，俄国物理学家齐奥尔科夫斯基(Tsiolkovskii)的著作首次提出了真正具有科学性的空间站设想。但他的著作是用俄文写的，因此在当时很少引起人们的注意。

本世纪20年代，赫尔曼·奥伯特(Hermann Oberth)及其他许多人的著作使空间飞行的设想风靡欧洲，并迅速传播到大西洋彼岸。人们成立了火箭和空间飞行协会；有些协会还开始做火箭推进实验。罗伯特·休钦斯·戈达德博士(Robert Hutchins Goddard)与他的几个助手于1926年在美国实现了第一枚液体推进剂火箭的飞行。30年代末，他们几乎对现代火箭推进系统的所有基本特性都已做了开拓性研究。

通过这些热心者的辛勤劳动，早期的航天工程基本理论逐渐形成，于是产生了许多关于飞向其它星球的科学设想。当时流行着火是生命的种种推测。巴克·罗杰斯(Back Rogers)和弗莱希·戈登(Flash Gordon)的空间探险科学幻想小说反映出当时技术界跃跃欲试的心态。但对于绕地球运行的空间站却很少有人问津。

1939年，世界工业化国家卷入第二次世界大战。火箭试验者们突然不再被讥笑为想入非非的疯子。例如，德国的研究小组在佩内明德成为V-2火箭工程研制队伍的核心。战后，对空间飞行在技术上的可行性已不再有疑问。剩下的问题只是：什么时候和哪个国家将首先实现空间飞行。

40年代末期，空间飞行的技术论著已逐渐形成严肃的工程和科学文献，尽管实施方案还有点离奇的味道。1952年，魏尔纳·冯·布劳恩（Wernher Von Braun）提出了一个极其雄心勃勃（甚至用今天的标准来衡量也是这样）的空间站方案，它使空间站的设想重新获得生机。冯·布劳恩设计的是一个可以容纳多达数十人的轮胎形自旋空间站。它利用一队可重复使用的大型火箭飞船供应物资。

在冯·布劳恩设计的空间站中，轮胎形结构可以旋转，目的是为居住者提供人造重力环境。1952年，人们对于零重力环境下人的工作能力甚至能否生存都还一无所知。因此，为保险起见，明确提出需要人造重力。当时比较流行的推测之一是：人在零重力环境中无法入睡，因为刚一打瞌睡，一种“坠落感”就会把人惊醒。虽然还没有一种可行的方法使人在进出空间站的至少几小时的过渡时间中回避失重环境，但布劳恩的设计至少已解决了长时间内防止失重的问题。

布劳恩的设计已对空间站的工程结构做了详细的描述，但对空间站需要执行的任务却相当含糊。布劳恩正式建议美国投资实施这项空间计划。但是，这项计划耗资甚巨，有人开始提出疑问：“为什么要搞这种空间站？”

第二次世界大战期间，由于电子技术迅猛发展，人们已有可能设想出自动化的航天器，这是本世纪二三十年代的幻想家们没有预见到的。布劳恩的空间站方案中也没有完全明确地肯定人必须进入太空。于是便产生了“人与机器人对比”的问题。

在公众为这些问题争论不休之际，国家制订了一些略带保密性的空间计划。美国的空间计划只有很有限的目标：发射几个绕地球运行的科学卫星。而苏联却制订了全面的规划：首先以自动化的和载人的空间飞行作为开端；继而坚持不懈地发展，发射空间站和平台；最终到达其它星球。

美国的看法是航天技术应为特定的科学目标服务；而苏联人则把航天技术看作是他们社会主义理想的合乎逻辑的发展，是为了把他们的意识形态和文明不仅扩展到整个世界，而且扩展到宇宙。

1957年10月4日，苏联的人造卫星1号上天，从而开创了航天时代，苏联人在空间探索的头几年一直居于领先地位。1961年4月12日，尤里·加加林（Yuri Gagarin）绕地球飞行一圈，首次实现了载人航天。（20年后的同一天，约翰·杨（John Young）和鲍布·克里平（Bob Crippen）驾驶第一架航天飞机进入地球轨道。）

作为对苏联早期的空间领先地位的反应，美国提出了一项难度大得吓人的任务：把人送上月球并安全送回地面，这一切都要在不到10年内完成。国家航空与航天局（简称NASA——航宇局）和航空航天工业界都为实现这一目标而动员起来，出色地完成了任务。肯尼迪总统发布这一命令的八年后，首次实现了人类登月。整个任务期间共登月六次，有12名美国航天员在月球上留下了足迹。美国在全世界的心目中确立了最高技术权威的地位。本世纪20年代的梦想——登上其它星球，已经成为现实！

在阿波罗飞船登月的年代里，航宇局一直在进行长远规划的研究，探索了许多未来空间技术、空间开发和应用的候选方案。早在1959年，航宇局内部就进行了空间站的研究。从1963年开始，航宇局委托外部公司进行“载人轨道实验室”（MORL）的研究。“载人轨道实验室”打算作为一个地球轨道上的科学实验室，可以比较舒适地容纳6名航天员（见图1.1）。

“载人轨道实验室”是个零重力环境空间站。在设计这个空间站时，人们已经多次飞入地球轨道，因而已不再担心失重环境。

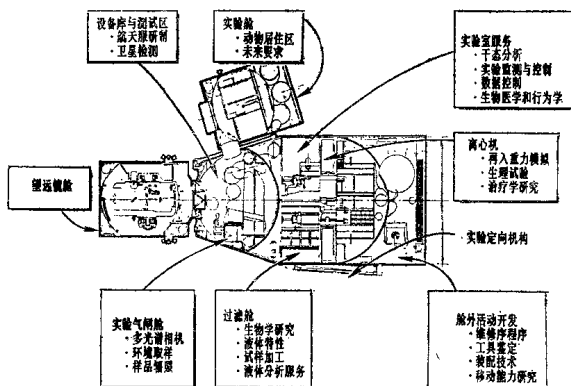


图 1.1 载人轨道实验室(MORL)空间站方案

此后，航宇局还研究了许多未来的航天任务，如：可重复使用的运载器，月球基地，载人金星、火星飞行，以及用自动航天器探测所有行星。在这些任务中，多数都提出过某种形式的空间站。土星5号登月火箭研制成功后，出现了利用土星5号的巨大推力建造大型空间站的设计。图1.2为这种大型空间站方案之一，它竟可容纳60人！这种空间站的核心舱是零重力环境，而位于旋转臂端的乘员舱则有人造重力。

1968年，阿波罗登月计划将要接近它的最终目标时，航宇局制订了一个空间开发综合规划，其内容包括：一个空间站，一个长久性载人月球基地，以及载人火星探险。该规划内还将发展一系列标准化的运载器，其中包括一种从地球上发射的可重复使用运载器，以及常规火箭推进的天基运载器和核火箭推进的天基运载器。

由于国家财政拮据，这个规划中除了运载器和空间站外，其它项目都被取消。1970年，一种航天飞机和一种空间站的B阶段（初步设计研究）已经开始（在航宇局的采购体制中，B阶段是在工程被批准并签订硬件研制合同之前的最后研究阶段）。但“经费争夺战”和越南战争造成的财政限制，迫使航宇局只能在这两项计划中选择一个。航宇局认为方便地把人送入空间是最终实现人在空间长期居住的必要前提，于是便选择了航天飞机。

在上述事件发生之时，航宇局利用阿波罗登月计划的剩余设备发射了一个周期性住人的临时空间站——“天空实验室”。1973至1974年期间，三组航天员（每组三人）进入“天空实验室”，分别在空间站中居住了28、54和84天。