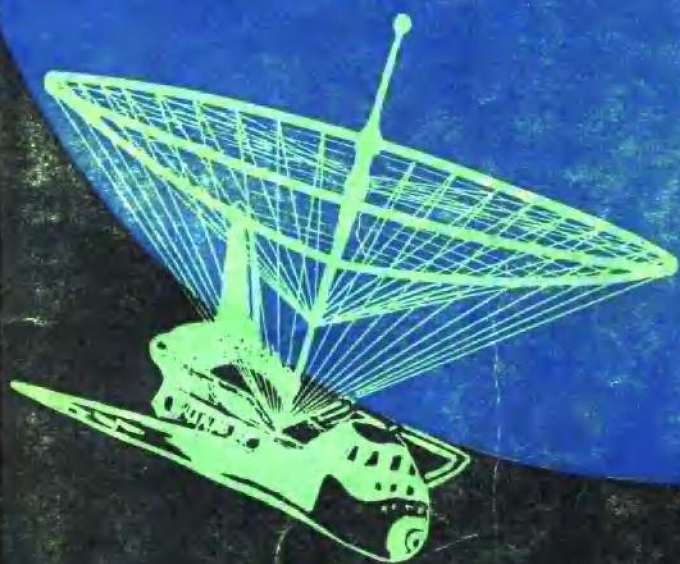


载人飞船工程学概论

李 思 强 编著



科学出版社

载人飞船工程学概论

李思强 编著

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书系统地论述了载人飞船工程学的各个方面，着重介绍了飞船总体及主要系统的基本概念、工作原理与设计方法，同时还包括大量有参考价值的实例。

全书共分十章：绪论，飞船运行理论基础，航天员安全与应急救援，飞船结构与布局，飞船环境控制，飞船的电源，飞船制导与控制，飞船推进装置，飞船通信问题，飞船返回与着陆。

本书可供从事航空与航天技术工作的科技人员以及大专院校有关专业的师生参考。

载人飞船工程学概论

李思强 编著

责任编辑 宋义荣

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985年4月第一版 开本：787×1092 1/32

1985年4月第一次印刷 印张：16%

印数：0001—1,500 字数：380,000

统一书号：15031·643

本社书号：4035·15—6

定价：3.90 元

前 言

载人飞船工程是整个载人航天技术领域中的一个主要组成部分，也是载人航天的一个重要发展阶段；它为继续发展载人航天奠定了技术基础，在航天发展史上起到了巨大作用，并对今后航天技术的发展将产生深远的影响。

本书较全面地论述了载人飞船工程学的各个方面，着重介绍飞船总体及主要系统的基本概念、工作原理与设计方法，同时还提供了许多有参考价值的实例。经过载人航天的实践证明，书中的主要内容在工程应用中是可行的，而且对今后的载人航天工程仍具有实用价值。

在本书的写作过程中，曾得到中国空间技术研究院钱骥教授的支持和帮助，特在此表示衷心的感谢。由于水平所限，书中不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

编著者

1982年12月

目 录

前 言	v
第一章 绪论	1
§ 1 载人航天技术发展简况	1
§ 2 空间环境及地面模拟试验	9
第二章 飞船运行理论基础	22
§ 1 坐标系及其变换	22
§ 2 二体问题	30
§ 3 飞船轨道摄动	47
§ 4 轨道机动问题	71
§ 5 飞船轨道设计考虑	81
第三章 航天员安全与应急救援	85
§ 1 航天员安全性考虑	85
§ 2 危险性分析与故障检测	86
§ 3 应急救援的几种方式	94
§ 4 发射脱险装置	102
§ 5 飞船应急救援方案	119
第四章 飞船结构与布局	129
§ 1 飞船的结构型式	129
§ 2 飞船座舱的密封结构	148
§ 3 飞船的防热结构	156
§ 4 舱段的连接与分离	176
§ 5 驾驶室设计问题	185
第五章 飞船环境控制	192

§ 1	系统功能与设计考虑	192
§ 2	座舱供氧	195
§ 3	座舱温控	209
§ 4	湿度控制与水分离器	222
§ 5	废物处理	230
§ 6	水的处理	242
§ 7	典型的飞船环境控制系统	248
第六章	飞船的电源	251
§ 1	飞船对电源的要求	251
§ 2	燃料电池	256
§ 3	太阳能电池	274
§ 4	空间核电源	281
§ 5	功率分配和控制	292
第七章	飞船制导与控制	299
§ 1	系统的任务和要求	299
§ 2	飞船的导航与制导	303
§ 3	飞船的稳定与控制	324
§ 4	国外飞船制导与控制系统	338
第八章	飞船推进装置	349
§ 1	一般要求与设计考虑	349
§ 2	火箭发动机的基本关系式	354
§ 3	飞船主推进系统	371
§ 4	反作用控制系统	380
§ 5	固体火箭发动机及其应用	394
第九章	飞船通信问题	401
§ 1	通信概念与飞船通信要求	401
§ 2	通信理论基础	406
§ 3	飞船通信信道	423
§ 4	飞船通信系统的方法	436

§ 5 再入通信问题	443
§ 6 国外飞船通信系统	450
第十章 返回与着陆	458
§ 1 飞船返回过程	458
§ 2 飞船返回运动方程	465
§ 3 飞船着陆系统的基本组成	475
§ 4 降落伞有关问题	487
§ 5 国外飞船的着陆系统	493
参考文献	510

第一章 绪 论

§ 1 载人航天技术发展简况

载人航天是现代科学技术发展的一个显著标志。

自1961年4月世界上第一艘载人飞船——“东方1号”上天以来，已有二十多年的历史了。在此期间，美、苏两国为发展载人航天技术，投入了巨大的人力和物力，搞了一个又一个载人航天计划，展开了一场激烈的“空间竞争”。发展载人航天技术，不仅是它们政治上的需要，而且也是经济、科学与军事上的需要。

二十多年来，美国先后完成了“水星”计划、“双子座”计划、“阿波罗”计划和“天空实验室”计划。目前正在大力执行“航天飞机”计划，准备在天上建立航天飞机-航天站-轨道间飞船三者结合的航天体系。

“水星”计划是美国第一个载人航天计划，也是美国研制第一代载人飞船的计划。这个计划的目的是：（1）把一艘载人飞船发射到地球轨道上；（2）研究人在空间环境中的生活能力和工作能力；（3）安全地把人和飞船回收下来。

“水星”计划从1958年10月开始，前后经过四年零九个月，于1963年6月结束。其间进行过十七次飞行试验，两次动物飞行试验，两次载人亚轨道飞行和四次载人轨道飞行。

“水星”计划的经验表明，航天员在严酷的空间环境中，不仅能够生存，而且在飞行操作中能够发挥重要的作用。

“双子星座”计划是美国第二个载人航天计划，也是美国研制第二代载人飞船的计划。它是“水星”计划和“阿波罗”计划之间的一个过渡计划，为“阿波罗”计划积累飞行经验、准备技术条件、提供经过训练并富有实际飞行经验的航天员。

“双子星座”计划的具体目标是：（1）研究长达二周时间的轨道飞行，这是“阿波罗”登月飞行所需的时间；（2）发展在空间跟另一艘飞船会合与对接的技术，以及机动飞行的能力；（3）发展和练习操纵飞船准确再入、溅落和回收等技术；（4）发展航天员在空间进行舱外活动的 ability；（5）进行科学、医学和军事技术实验；（6）给航天员和地面工作人员提供实际的飞行训练机会，使他们掌握“阿波罗”登月所必需的技术。

“双子星座”计划从1961年11月开始，到1966年11月结束，其间进行过两次无人飞行和十次载人飞行。

“阿波罗”计划是美国在六十年代最大的一个航天计划，也是美国第三代载人飞船的研制计划。其目的就是要把人送到月球上进行科学探险，并保证他们安全返回地球。

“阿波罗”计划的技术途径是采取月球轨道会合的方式登月。具体地说，就是首先把一艘载三个人的飞船发射到月球轨道上，然后让其中的两个人驾驶登月舱降落到月球上，在月球上进行探险，另外一个人驾驶指挥舱仍留在月球轨道上；月球探险后，两个在月球上的人返回月球轨道，然后三人一起返回地球。

“阿波罗”计划于1961年5月25日由当时的美国总统肯尼迪正式宣布。同年11月28日，美国航天局跟北美航空公司签订合同，开始研制“阿波罗”飞船。经过十六次飞行试验，于1968年10月“阿波罗7号”进行了第一次载人地球轨

道飞行，于1969年7月“阿波罗11号”完成了第一次登月飞行。1972年12月，“阿波罗17号”完成第七次登月飞行后，整个登月飞行计划就此结束。成功地进行6次，13次失败。

在执行“阿波罗”计划的过程中，曾发生过两次较大的事故。1967年1月，“阿波罗4号”飞船在地面试验中发生火灾，三名航天员被烧死。事后检查发生火灾的原因，是由于飞船内的导线短路，引起电火花所致。事故发生后，对飞船的设计、结构和生产程序都作了很大修改，特别是在材料的选用，座舱门的设计，通讯、生保、电子等系统都有很多改进，提高了飞船的防火性能，增加了许多安全措施。1970年4月“阿波罗13号”飞船在进行第三次登月飞行中，供氧系统发生故障，三名航天员险些丧命。但由于登月舱还完好，航天员把登月舱作为一个临时救生筏，依靠登月舱的氧气、水和电的供应，才安全返回地球。

在“阿波罗”计划之后，美国在载人航天方面又进行了“天空实验室”计划。“天空实验室”是美国第一个试验性航天站。它的任务，除了主要从事军事侦察外，还要了解地球周围某些区域的自然规律，包括对太阳进行观测，以进一步弄清太阳对地球的影响，在失重条件下进行物理学、化学和生物学的实验，希望从这些科学研究中能够发现新的能源，改进医疗技术，以及制造在地球重力作用下不能制造的合金及其它产品。

“天空实验室”计划共进行过四次发射工作。第一次是在1973年5月14日，用“土星5号”火箭第一、第二级将无人“天空实验室”送入435公里高的地球轨道，倾角为50度，周期约为93分钟。当发射后63秒，处于最大气动压力时，轨道工作舱涂有隔热层的微流星防护罩提前打开，被强大的高速气流撕毁，并带走一块翼形太阳能电池板，剩下的一块又被

防护罩碎片缠住，无法打开。结果丧失了一半的电力，也失去了太阳直射的防护能力，使舱内温度升高至55℃左右，航天局被迫推迟第二次的发射，并赶制了一顶6.1米见方的遮阳篷和一顶遮阳伞。

5月25日进行了第二次发射。它用“土星-IB”火箭将载有三名航天员的“阿波罗”飞船送到“天空实验室”，工作28天，至6月22日返回地面。“阿波罗”飞船只有指挥舱和服务舱二部分，没有登月舱，它是用作运送航天员和其它物资的简易渡船。

航天员从轨道工作舱科学舱口把遮阳伞伸到舱外，伞自动打开遮住阳光，后来又铺设了一顶遮阳篷，解决了高温问题。然后用切割工具，切除了缠绕在翼形电池板上的防护罩碎片，使仅剩的一块翼形电池板打开，恢复了部分能源的供应。

7月28日进行了第三次发射，将第二批三名航天员送到“天空实验室”，工作59天，至9月25日返回。最后一次是在11月16日发射，将第三批三名航天员送到“天空实验室”，工作84天，至1974年2月8日返回地面。于是“天空实验室”计划结束。

1981年4月12日，美国航天飞机“哥伦比亚”号从卡纳维尔角首次起飞。飞行54.5小时，绕地球36圈，于4月14日在美国加利福尼亚州爱德空军基地安全着陆。两名航天员在轨道飞行过程中，对航天飞机各系统的性能进行了广泛的试验，返回时，由航天员手控操纵，象驾驶一架巨型滑翔机那样，在预定地点降落。

航天飞机计划于1972年初开始执行，原计划1978年底进行首次轨道试验飞行，八十年代初投入使用，由于经费和技术等方面的原因，发射日期几经推迟。

航天飞机是一种能够在地球和地球轨道之间多次往返飞行的空间运载工具。航天飞机是载人飞船技术、运载火箭技术和航空技术综合发展的产物。

航天飞机的发射成功标志着航天技术进入了一个崭新的发展时期，为未来的空间活动开辟了广阔的场所，对今后的空间应用也将产生深远的影响。航天飞机首次发射成功后，美国仍在继续大力执行航天飞机的发射计划。

苏联载人航天事业比美国发展得早。在第一个人造地球卫星上天后不久，苏联就开始了生物卫星的试验工作。1957年11月，苏联把一颗载有小狗“莱依卡”的人造地球卫星发射到轨道上。从1960年5月至1961年3月，在将近一年的时间内苏联先后发射了五艘卫星式飞船，作为载人飞船的先驱，进行了大量的航天医学和航天生物学试验，为载人上天作技术准备。1961年4月12日，苏联把“东方1号”载人飞船发射到地球轨道上，在轨道上绕了一圈，飞行了1小时48分钟，成为第一个进行载人航天的国家。从第一个人上天到今天，苏联先后制订并执行过四个载人航天计划，其中三个载人飞船计划——“东方号”、“上升号”和“联盟号”一个“礼炮号”轨道站计划。整个历史发展过程一般可分为三个阶段。

第一阶段是执行“东方号”计划和“上升号”计划。主要是为了与美国争夺空间霸权，抢先把载一人和载多人的飞船送入轨道，争夺“空间第一”；其次是为了试验人在空间环境中的适应能力，验证飞船和运载火箭各系统的性能。

“东方号”是苏联第一个载人航天计划；从1961年4月到1963年6月，“东方号”共进行过六次飞行，其中四次为编队飞行，第一队为“东方3号”和“东方4号”飞船，两者相隔一天被发射到轨道上，分别在轨道上飞行3天和4天，

两艘飞船之间最近的距离为6.4公里。第二队为“东方5号”和“东方6号”，“东方6号”比“东方5号”晚两天发射，但是在同一天返回。“东方6号”飞船上是一名女航天员。两艘飞船在轨道上的最近距离为4.8公里。

“上升号”计划只发射过两艘飞船：“上升1号”和“上升2号”。“上升1号”有三名航天员，其中有一名是医生，目的是为了对航天员的健康状况进行直接观察，以及有目的的自我观察。“上升2号”载两名航天员，其中一名在飞行中出舱活动20分钟。

“上升号”飞船实际上是“东方号”飞船的改型。由于航天员人数增加带来的限制，取消了原有的弹射座椅。此外，它装有改进了的姿态控制系统，并采用另一种主降落伞上附加着陆动力装置的着陆方法。它还设有空气闸，通过闸门，航天员可爬到宇宙空间。

第二阶段是从1967年开始，以“联盟号”的首次飞行为标志，到发射“联盟9号”结束。除政治上的需要，主要是为在近地空间建立航天站作技术准备。也就是试验和探索人在近地空间究竟能做些什么，有何实际的军事和科学价值；继续研究人对空间环境的长期适应能力。在这一阶段中，苏联进行了“联盟号”飞船的会合、对接、机动变轨以及三艘飞船的编队飞行。其中于1967年4月23日发射的“联盟1号”飞船，在下降过程中，由于伞绳缠绕，飞船高速落地坠毁，航天员丧生。

第三阶段是从1971年的“联盟10号”开始，以“礼炮号”的飞行为标志。任务与目的和第二阶段大致相同，但重点放在试验和探索建立近地航天站的技术途径，继续研究人在航天站内有何军事、经济和科学价值等，为建立未来大型航天站准备条件。

1971年4月19日，苏联发射了第一艘地球轨道科学站“礼炮1号”，紧接着于4月23日发射“联盟10号”，和轨道站对接，一起飞行5.5小时，然后“联盟10号”脱离轨道站返回地球。6月6日又发射“联盟11号”。“联盟11号”的三名航天员进入轨道站内生活和工作24天。6月29日“联盟11号”与“礼炮1号”脱离，并按正常程序返回地面。在返回过程中，由于座舱密封性不严，造成舱内气压迅速下降，因此到着陆后发现三名航天员全部死亡。

1973年4月至1976年6月，苏联相继把四艘“礼炮号”轨道站送上天，除“礼炮2号”入轨后出现故障而失败外，其它三艘都在轨道上停留了一定时间，并依次与“联盟号”系列飞船进行过对接。

1977年9月21日，苏联成功地发射了“礼炮6号”轨道站。从入轨后至1981年5月27日苏联宣布停止接待航天员的三年零八个月时间内，曾分别与“联盟号”及其改型“联盟T号”系列飞船和“进步号”无人货运飞船进行过对接，先后接待过16批共33名来自苏联及其盟国的航天员，累计载人飞行676天，创造了185天载人飞行的世界纪录，完成了一百二十多项科学试验，取得了大量可应用于科学和国民经济各部门的重要资料。

1982年4月19日，苏联又成功地发射了一艘新的轨道站——“礼炮7号”。发射的目的主要是继续苏联在科学和国民经济领域感兴趣的科学技术研究与实验活动，同时在飞行期间继续试验和演练轨道站上经过改进的各分系统和设备。“礼炮7号”轨道站上天以后，苏联继续发射“联盟T号”系列载人飞船和“进步号”无人货运飞船，在空间与轨道站进行对接，组成联合飞行体，执行各种飞行任务。两名航天员阿·别列扎沃伊和瓦·列别杰在“礼炮7号”上创造了

211天载人飞行的又一世界新纪录，于12月10日安全返回地面。

美苏两国除了独立发展自己的载人航天技术外，于1975年7月进行了美苏“阿波罗-联盟”载人飞船联合对接飞行。

除美苏两国外，目前世界上还有许多国家也正在考虑或积极开展载人航天方面的工作。例如欧洲的“空间实验室”计划，参加的成员国有德意志联邦共和国、意大利、法国、英国、比利时、丹麦、西班牙、荷兰、瑞士和奥地利等国。

二十多年来，载人航天技术的发展非常迅速，为发挥人在空间的作用创造了一个良好的条件。人具有观察、感受、操作、判断与研究的能力。人直接参与空间飞行能增加系统的可靠性；人能运用仪表、置换与维修设备，排除故障，处理未能预计到的现象。至今，人仍然是执行许多工作的最有效的、最有才干和最方便的计算器与操作手。基于这个前提，载人航天活动一般有如下几个方面：

1. 了解人如何克服在空间环境中长期飞行的影响；
2. 利用航天医学的成就，来减轻载人操作上的困难；
3. 利用人来执行复杂的试验、进行观察和解决空间工艺中的问题；
4. 在复杂的飞行任务中，驾驶飞行器进入轨道和执行与其它航天器的会合工作；
5. 利用人来指导和执行许多类型的大型空间结构的组装工作；
6. 最终导致人居住在空间，执行空间工业化及地球外的采矿工作。

载人航天的发展是十分广阔的，但是，近地空间在科学、经济和军事上都具有特殊的重要意义，这是今后相当长的时期内载人航天发展的主要场所。

§ 2 空间环境及地面模拟试验

2.1 载人飞船所处的空间环境

载人飞船在发射和运行中，它所处的空间环境分为自然环境与派生环境两大类。自然环境是没有飞船飞行就存在的空间环境；派生环境是以飞船的存在为条件的。

从自然环境变化来看，主要有以下几个方面：

(1) 真空

随着离开地球表面高度的增加，空气逐渐变得稀薄，大气压强不断下降。例如：在离地球表面 100 公里处，大气压强约为 10^{-4} 托左右（1托 = 1 毫米水银柱压力）；在 200 公里的空间，大气压强约为 10^{-6} 托至 10^{-7} 托；在 1000 公里的空间，大气压强更低，约为 10^{-10} 托至 10^{-11} 托。一般飞船都是在 一百五十多公里以上的空间运行，因此是处在真空环境中。

大气的最重要参数是压力、密度和粒子浓度。压力 p 作为高度 h 的函数，一般可以表示为：

$$p = p_0 \exp \left[- \int_0^h \frac{mg}{kT} dh \right]$$

这里 m 是平均粒子质量， h 是高度， g 是重力加速度， k 是玻耳兹曼常数， T 是高度 h 处的温度， p_0 是地表面 ($h = 0$) 的压力。

然后，密度可表示为：

$$\rho = \rho_0 \frac{m}{m_0} \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0}$$

以及粒子浓度为：

$$n = n_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0}$$

式中 n_0 , m_0 , T_0 及 p_0 分别为地表面($h=0$)上的粒子浓度、平均粒子质量、温度及压力。

大气密度除了基本上是按指数律随高度增加而递减外,也随时间、纬度、季节及太阳活动情况的变化而变化。

大气密度还随着地磁活动而变化,在磁暴期间,密度在几小时以内猛增好几倍甚至几十倍,但磁暴过后,密度又迅速下降复原。

(2) 空间热环境

围绕地球运行的飞船首先受到太阳的直接照射,照射的平均强度约为 1.353千瓦/米^2 。太阳光谱中的极大部分能量处在 $0.3\sim 4.0$ 微米波长之间,约90%以上的能量集中在可见光和红外光谱内,影响飞船的热平衡和能量转换。此外,还有地球对太阳光反射的辐照,以及地球本身的红外辐射。这两部分对飞船的照射强度随着飞船对太阳和地球的相对位置有很大变化。

同时,宇宙空间可以认为是一个无限的热吸收体,来自恒星的辐射能相当于 $3\sim 4\text{ K}$ 黑体的辐射,实际的热能量可忽略不计,飞船靠辐射而放出能量。

(3) 紫外辐射

紫外辐射主要来自太阳。太阳除了放射出大量的热,还放射出强烈的紫外线。太阳紫外辐射按波长划分为三个区域:近紫外($3800\sim 3100$ 埃)、中紫外($3100\sim 1700$ 埃)和远紫外(1700 埃以下)。太阳紫外辐射能所占太阳总辐射能的比例虽少,但对飞船材料的影响不可忽视。

(4) 粒子辐射