

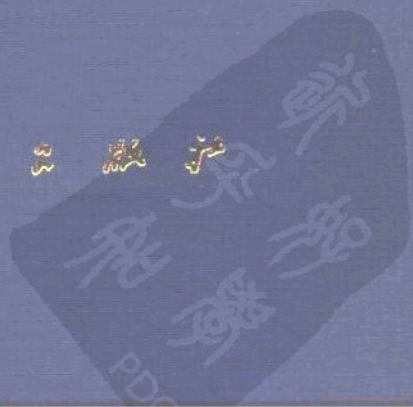
# 载人航天器技术

# Manned Spacecraft Technology

---

主编 戚发轫  
副主编 朱仁寿 李殿豫

国防工业出版社



V476.2

02

00012082



# 载人航天器技术

Manned Spacecraft Technology

主编 戚发轫

副主编 朱仁璋 李颐黎



国防工业出版社



C0488453

图书在版编目(CIP)数据

载人航天器技术/戚发轫主编. —北京:国防工业出版社,1999.11

ISBN 7-118-02177-6

I. 载… II. 戚… III. 载人航天器-技术 N. V476.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 35389 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 38 $\frac{3}{4}$  871 千字

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:62.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 本书编委会

主 编 戚发轫

副主编 朱仁璋 李颐黎

编著者 (以姓氏笔划为序)

孙金鏢 朱仁璋 陈祖贵 李颐黎 李惠康

沈力平 吴国庭 杨为民 余孝昌 张舜英

郑松辉 胡光辉 柯受全 娄汉文 徐济万

黄俊钦 戚发轫

---

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版。随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

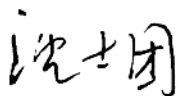
国防科技图书出版基金  
第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模				
主任委员	黄宁				
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎	
秘书长	崔士义				
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成	
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树	
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟	
	何新贵	张立同	张汝果	张均武	
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安	
	侯正明	莫梧生	崔尔杰		

## 序

为更好地培养年轻一代航天工程师和航天技术人员,北京航空航天大学坚持走产学研相结合的道路,与中国空间技术研究院有长期的合作关系。1996年5月,中国空间技术研究院院长徐福祥教授和我与来自中国空间技术研究院、航天医学工程研究所及我校的20余位专家教授会聚在一起,共同商讨航天技术专业的教学问题。根据我校宇航学院的教学要求,与会专家一致同意协助我校在本科生高年级和研究生中开设“载人航天技术”课程,并决定聘请中国空间技术研究院科学技术委员会主任戚发轫教授和我校空间研究中心副主任朱仁璋教授为该课程主持人。共有17位专家教授应聘参加这门课的讲授,其中12位来自空间技术研究院,2位来自航天医学工程研究所,还有3位是本校的教授。由于授课的专家教授均来自航天工程第一线,他们既有深厚的理论基础,又有丰富的工程实践经验,该课程开设以后,在我校本科生、研究生及青年教师中引起了强烈的反响,收到了很好的效果。为使更多有志于从事航天技术专业的学子学习载人航天技术和分享专家教授们丰富的工程实践经验,在“载人航天技术”课程讲稿的基础上,由戚发轫教授任主编,经充实内容和修改后编著成这部书。这是我国第一部全面、系统地阐述载人航天器技术的专著,详细讲述了卫星式载人飞船技术,同时也涉及其它各类载人航天器(登月载人飞船,空间站,航天飞机等),内容包括载人航天技术发展概况,载人航天器总体设计及各个分系统设计,航天动力学,航天员系统,载人航天器电性测试与地面试验以及载人航天器的可靠性等,内容丰富,资料翔实,理论结合实际。本书书稿已供听课的研究生与高年级本科生使用,深受学生喜爱。本书对于航天工程师,特别是对新加入航天队伍的年轻人,也是一部有实用价值的参考书。

本书的出版必将对我国航天工程的教学和科研工作起促进作用,我谨代表北航师生,并以我个人的名义,向参加本书编著的各位专家教授和国防工业出版社的同志致以崇高的敬意和诚挚的谢意。



北京航空航天大学校长

# 前 言

当今航天技术基本可分为相互联系且各有特点的三个领域,即卫星应用技术,载人航天技术以及深空探测技术。载人航天技术包含执行各种载人航天使命所涉及的科学技术,包括载人航天使命的分析与设计以及载人航天系统的研制理论与方法。所谓载人航天系统,系指完成特定载人航天任务的综合性工程系统,通常称为“大系统”。这个大系统由载人航天器,运载火箭,航天员,发射场,着陆场,应用等系统以及地面保障设施组成。本书论述的重点是载人航天器系统,兼论航天员及测控与通信等其它系统。

载人航天器的研制是一项复杂的高技术系统工程,这项工程几乎涉及理工医各门类科学与技术。由于篇幅限制,且航天技术发展很快,要在一本书中全面而深入地论述载人航天技术的方方面面是困难的。因此,在这本书中,我们力求在航天器系统级与分系统级的层次上,以载人飞船为重点,结合航天器工程,阐述载人航天器设计与研制的基本原理与方法,并适当介绍国外有关情况。参加本书编著的作者长期从事空间技术与载人航天研究工作,有较高的理论水平与丰富的工程经验。

本书中,在航天器系统级层次上阐述载人航天器技术的,主要有下列六章(含作者):

- (1) 第一章 载人航天技术发展概况(戚发轫),
- (2) 第二章 载人航天系统与航天器总体设计(李颐黎),
- (3) 第三章 载人航天器轨道动力学(朱仁璋),
- (4) 第十七章 载人航天器地面电测试与故障模拟(郑松辉),
- (5) 第十八章 载人航天器地面试验(柯受全),
- (6) 第十九章 载人航天器的可靠性(杨为民)。

第五章至第十六章基本属于载人航天器系统之下的分系统级层次(这些分系统在本书中均简称为系统):

- (1) 第五章 载人航天器环境控制与生命保障系统(沈力平),
- (2) 第六章 载人航天器结构与机构系统(娄汉文),
- (3) 第七章 载人航天器防热结构(吴国庭),
- (4) 第八章 载人航天器制导、导航与控制系统(陈祖贵),
- (5) 第九章 载人航天器热控制系统(徐济万),
- (6) 第十章 载人航天器电源系统(朱仁璋),
- (7) 第十一章 载人航天器测控与通信系统(余孝昌),
- (8) 第十二章 载人航天器数据管理系统(胡光辉),
- (9) 第十三章 载人航天器推进系统(张舜英),
- (10) 第十四章 载人航天器仪表照明系统(黄俊钦),
- (11) 第十五章 载人航天器应急救生系统(李颐黎),
- (12) 第十六章 载人航天器回收与着陆系统(李惠康)。



此外,第四章航天员(孙金鏢)阐述大系统下的航天员系统。航天员系统虽不属于载人航天器系统,但载人航天器的设计与航天员系统有十分密切的关系,因此,本书包括了这部分内容。

本书的读者对象主要为理工科大学高年级本科生与研究生以及航天科技工作人员。我们希望,这本书能够成为一本大学航天专业适用的教学与科研参考书。对航天工程科技人员,我们相信这本书能够为他们提供有用的知识。对于航天器系统设计师与有效载荷设计师,这本书有助于他们更好地了解载人航天器各系统之间的联系,从系统工程的角度审视与优化本系统的设计。载人航天技术也带动着其它高新技术的发展,对于广大科技工作者,如果这本书能够起到进一步拓宽视野的作用,更是我们所高兴的。限于我们的水平,本书肯定有不足之处,甚至还有个别的错误,恳请读者批评指正。

本书的编著与出版得到沈士团校长、胡海昌院士、闵桂荣院士和林华宝院士等专家以及国防科技图书出版基金与国防工业出版社的支持与帮助,我们谨代表全体作者向他们表示衷心的感谢。

参加本书各章审校工作的专家还有黄祖蔚(第一章),朱仁璋(第二章、第十五章、第十八章),李颐黎(第三章、第十六章),王德汉(第四章),王普秀(第五章),杨长庚(第六章),姜贵庆(第七章),孙承启(第八章),范含林和钟奇(第九章),王鸿芳(第十章),姜昌(第十一章),赵和平(第十二章),李荣贵(第十三章),李行善(第十四章),唐伯超(第十七章),屠庆慈(第十九章)等,特致谢意。

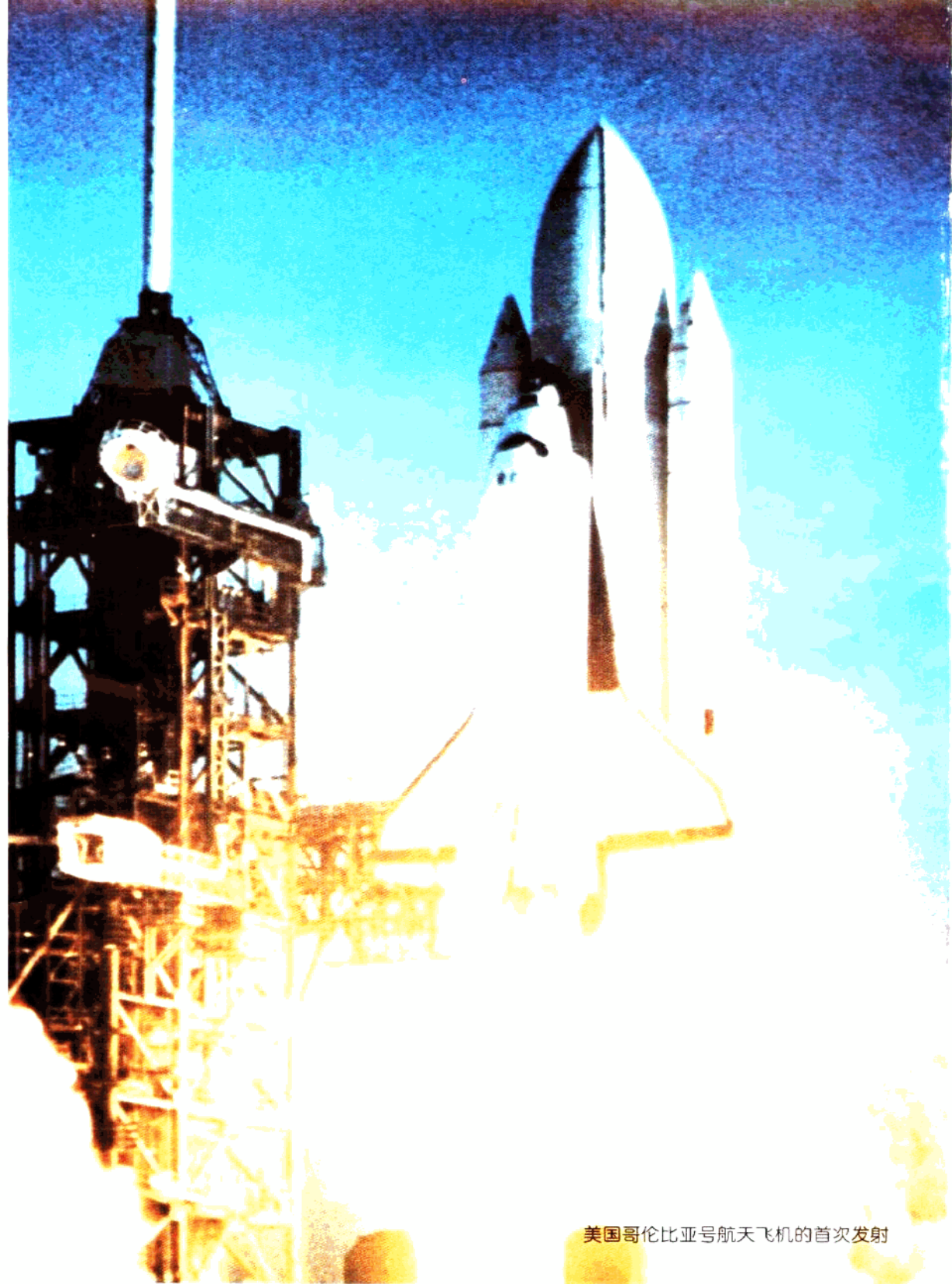
**主 编** 戚发轫(中国空间技术研究院)

**副主编** 朱仁璋(北京航空航天大学)

李颐黎(中国空间技术研究院)



俄罗斯的和平号空间站在轨道上飞行



美国哥伦比亚号航天飞机的首次发射

# 目 录

<b>第一章 载人航天技术发展概况</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.1.1 载人航天技术的含义 .....	1
1.1.2 发展载人航天的意义 .....	1
1.1.3 载人空间站航天系统的内容 .....	2
1.1.4 载人航天器的组成 .....	3
1.2 载人航天发展概况 .....	3
1.2.1 载人航天技术的发展阶段 .....	4
1.2.2 载人航天器的发展 .....	5
1.3 载人航天的未来发展 .....	9
1.3.1 “国际空间站”的建成与运营 .....	9
1.3.2 载人行星探测 .....	11
参考文献 .....	11
<b>第二章 载人航天系统与航天器总体设计</b> .....	12
2.1 概述 .....	12
2.2 载人飞船航天系统 .....	12
2.2.1 载人飞船系统 .....	12
2.2.2 运载火箭系统 .....	12
2.2.3 航天员系统 .....	15
2.2.4 发射场系统 .....	15
2.2.5 着陆场系统 .....	16
2.2.6 测控与通信系统 .....	16
2.2.7 应用系统 .....	18
2.3 载人飞船总体设计 .....	18
2.3.1 载人飞船的设计依据 .....	18
2.3.2 飞船总体设计的一般原则 .....	20
2.3.3 飞船的构型和总体布局及总体参数 .....	21
2.3.4 飞船总体指标的确定与分配 .....	27
2.3.5 飞船的分系统配置 .....	28
2.3.6 飞船的气动力设计 .....	28
2.3.7 飞船的轨道设计和飞行程序 .....	29
参考文献 .....	34
<b>第三章 载人航天器轨道动力学</b> .....	35
3.1 概述 .....	35
3.2 轨道动力学基础 .....	35

3.3	地月转移轨道 .....	37
3.3.1	概述 .....	37
3.3.2	限制性四体问题 .....	37
3.3.3	限制性三体问题 .....	38
3.4	相对运动方程 .....	39
3.4.1	坐标系 .....	39
3.4.2	物理量符号定义 .....	40
3.4.3	绝对空间的相对加速度 .....	41
3.4.4	轨道坐标系角速度及角加速度 .....	41
3.4.5	相对运动方程 .....	42
3.4.6	线性化相对运动方程的解 .....	43
3.4.7	非线性相对运动方程的解 .....	43
3.5	空间交会策略 .....	47
3.5.1	目标航天器轨道 .....	47
3.5.2	脉冲推力轨道交会 .....	48
3.5.3	小推力轨道交会 .....	49
3.6	返回运动方程 .....	51
3.6.1	概述 .....	51
3.6.2	坐标系与气动力分量 .....	51
3.6.3	一般返回运动方程 .....	54
3.6.4	配平攻角飞行的运动方程 .....	58
3.7	绳系系统动力学 .....	59
3.7.1	载人航天器与绳系系统 .....	59
3.7.2	绳系系统动力学特性 .....	59
3.7.3	绳系系统的运动 .....	61
3.7.4	绳系系统的控制 .....	63
3.7.5	绳系系统运动方程 .....	66
	参考文献 .....	69
<b>第四章</b>	<b>航天员 .....</b>	<b>71</b>
4.1	概述 .....	71
4.2	人在航天中的任务和作用 .....	72
4.3	航天员分类 .....	73
4.4	航天员选拔训练 .....	73
4.4.1	航天员选拔 .....	73
4.4.2	航天员训练 .....	75
4.5	航天员医学监督与医学保障 .....	79
4.5.1	航天员医学监督 .....	80
4.5.2	航天员医学保障 .....	80
4.6	航天环境医学 .....	82
4.6.1	失重生理效应与防护 .....	82
4.6.2	空间辐射的医学效应与防护 .....	87

4.6.3 航天器工程设计的医学要求 .....	88
4.7 航天工效学 .....	95
4.7.1 人体测量学数据 .....	95
4.7.2 人在空间的效能 .....	96
4.7.3 航天器结构 .....	98
4.7.4 显示器 .....	99
4.7.5 人控系统 .....	100
4.7.6 照明 .....	100
4.7.7 警告和报警 .....	101
4.8 航天员个人装备 .....	101
4.8.1 航天服 .....	101
4.8.2 个人救生物品 .....	104
4.9 航天员营养与食品 .....	105
4.9.1 航天员营养保障 .....	105
4.9.2 航天食品 .....	106
4.9.3 食品和饮水的卫生保障 .....	108
4.10 航天员选训中心 .....	108
4.10.1 任务 .....	108
4.10.2 主要设施 .....	108
参考文献 .....	111
<b>第五章 载人航天器环境控制与生命保障系统</b> .....	<b>112</b>
5.1 概述 .....	112
5.1.1 环控生保系统在载人航天技术中的地位和意义 .....	112
5.1.2 环控生保系统的功能和基本组成 .....	113
5.1.3 环控生保系统的界面关系和设计约束条件 .....	114
5.1.4 环控生保技术中的微重力问题研究 .....	116
5.1.5 系统的可靠性研究 .....	118
5.1.6 载人航天器环控生保系统的分类 .....	119
5.2 贮存式(非再生式)环控生保系统 .....	120
5.2.1 舱压体制 .....	122
5.2.2 气体贮存 .....	122
5.2.3 供气调压技术 .....	123
5.2.4 座舱大气净化技术 .....	125
5.2.5 座舱温湿度控制技术 .....	127
5.2.6 废物收集处理技术 .....	130
5.2.7 座舱内环境应急及舱内航天服技术 .....	134
5.2.8 水管理技术 .....	135
5.2.9 座舱火烟检测与防火灭火技术 .....	135
5.2.10 测量控制技术 .....	138
5.2.11 航天员居住设施 .....	139
5.3 物理化学再生式环控生保系统 .....	139
5.3.1 物理化学再生式环控生保系统基本概念 .....	139

5.3.2	氧的再生技术 .....	141
5.3.3	水的再生技术 .....	146
5.4	受控生态生保系统 .....	149
5.4.1	受控生态生保系统的基本概念 .....	149
5.4.2	受控生态生保系统研究的主要问题 .....	150
5.5	出舱活动环控生保系统 .....	151
5.5.1	舱外航天服 .....	151
5.5.2	携带式环控生保系统 .....	152
5.5.3	出舱活动的测量、通信、控制及机动能力 .....	153
	参考文献 .....	154
<b>第六章</b>	<b>载人航天器结构与机构系统 .....</b>	<b>155</b>
6.1	概述 .....	155
6.1.1	舱体结构的设计 .....	155
6.1.2	次级结构设计 .....	155
6.1.3	舱段连接设计 .....	155
6.1.4	机构设计 .....	155
6.2	载人航天器结构与机构系统的设计条件 .....	156
6.2.1	总体对结构与机构系统的要求 .....	156
6.2.2	环境与载荷条件 .....	157
6.2.3	其它系统对结构设计的要求 .....	157
6.2.4	总装对结构设计的要求 .....	157
6.3	结构与机构系统的设计过程 .....	158
6.3.1	可行性论证阶段 .....	158
6.3.2	方案设计阶段 .....	158
6.3.3	详细设计阶段 .....	159
6.4	设计思想与准则 .....	159
6.4.1	提高可靠性措施 .....	160
6.4.2	制定结构与机构的设计规范 .....	160
6.5	载荷与强度分析 .....	160
6.5.1	载荷 .....	160
6.5.2	强度条件 .....	163
6.6	舱体结构试验 .....	165
6.6.1	生产试验 .....	166
6.6.2	结构静强度考核试验 .....	166
6.6.3	结构动力学试验 .....	166
6.7	舱段壳体结构的分类与结构形式 .....	167
6.7.1	壳体结构的基本构件 .....	167
6.7.2	壳体结构 .....	172
6.7.3	载人航天器的密封舱 .....	174
6.8	载人航天器的机构和装置 .....	182
6.8.1	连接、解锁与分离装置 .....	182
6.8.2	舱门机构 .....	186

6.8.3 空间对接装置 .....	186
参考文献 .....	187
<b>第七章 载人航天器隔热结构</b> .....	189
7.1 返回时的气动加热 .....	189
7.1.1 再入气动加热的严重性 .....	189
7.1.2 克服气动热的途径 .....	190
7.2 隔热结构及其类型 .....	191
7.2.1 热容吸热式隔热结构 .....	192
7.2.2 辐射隔热结构 .....	195
7.2.3 烧蚀隔热结构 .....	201
7.3 隔热结构试验 .....	205
7.3.1 材料筛选试验 .....	205
7.3.2 热结构匹配试验 .....	207
7.3.3 隔热结构再入气动加热模拟试验 .....	209
参考文献 .....	212
<b>第八章 载人航天器制导、导航与控制(GNC)系统</b> .....	214
8.1 概述 .....	214
8.1.1 基本概念和定义 .....	214
8.1.2 载人飞船 GNC 技术发展概况 .....	215
8.2 载人飞船 GNC 系统的任务、设计原则及组成 .....	216
8.2.1 载人飞船 GNC 系统的任务 .....	216
8.2.2 载人飞船 GNC 系统的设计原则 .....	216
8.2.3 载人飞船 GNC 系统的组成 .....	217
8.3 载人飞船轨道运行段三轴姿态确定和控制 .....	222
8.3.1 飞船姿态运动方程 .....	222
8.3.2 载人飞船姿态确定 .....	227
8.3.3 载人飞船姿态控制律设计 .....	234
8.3.4 载人飞船的全姿态捕获技术 .....	239
8.3.5 建立飞船离轨制动发动机点火姿态 .....	241
8.4 载人飞船的空间导航方法 .....	242
8.4.1 载人飞船空间导航的任务 .....	242
8.4.2 载人飞船捷联式惯性导航方法 .....	242
8.4.3 捷联矩阵的算法 .....	244
8.4.4 导航计算步骤 .....	246
8.4.5 捷联惯性导航的误差 .....	250
8.5 载人飞船再入大气层控制技术 .....	250
8.5.1 概述 .....	250
8.5.2 再入大气层的控制技术 .....	251
参考文献 .....	259
<b>第九章 载人航天器热控制系统</b> .....	261
9.1 航天器空间环境 .....	261



9.1.1	宇宙真空和深黑低温 .....	261
9.1.2	微重力 .....	262
9.1.3	空间外热流 .....	263
9.2	航天器热控系统所应用的基本换热公式 .....	263
9.2.1	导热公式 .....	264
9.2.2	对流公式 .....	264
9.2.3	辐射公式 .....	265
9.3	载人航天器热控系统的任务 .....	265
9.4	总体对热控系统的要求 .....	266
9.5	热控系统的工作内容 .....	266
9.6	载人航天器对热设计的特殊要求 .....	266
9.7	载人航天器的热平衡计算 .....	266
9.8	载人航天器热控系统组成 .....	267
9.8.1	热设计与热计算子系统 .....	268
9.8.2	被动热控子系统 .....	268
9.8.3	液体冷却回路子系统 .....	269
9.8.4	主动热控子系统 .....	271
9.8.5	测控与地面调温子系统 .....	275
9.8.6	真空热试验子系统 .....	276
9.9	载人航天器热试验 .....	277
9.9.1	热平衡试验 .....	277
9.9.2	热真空试验 .....	292
9.9.3	返回着陆升温试验 .....	293
9.9.4	地面调温试验 .....	293
	参考文献 .....	294
<b>第十章</b>	<b>载人航天器电源系统</b> .....	<b>295</b>
10.1	名词术语 .....	295
10.2	一般电源系统描述 .....	295
10.2.1	电源系统的组成 .....	295
10.2.2	电能源与储能装置 .....	296
10.2.3	配电系统 .....	297
10.3	电源系统的职能 .....	298
10.3.1	一般技术要求 .....	298
10.3.2	系统级职能 .....	298
10.4	电源系统的系统级设计 .....	299
10.4.1	电源系统选择与设计原则 .....	299
10.4.2	电源系统系统级设计过程 .....	300
10.4.3	载人航天器电源系统设计特点 .....	301
10.5	太阳光电电源系统 .....	302
10.5.1	概述 .....	302
10.5.2	太阳能电池阵 .....	303