



Theory and Practices of
**Manned
Space**
Flight Control

**载人航天飞行控制
理论与实践**

王忠贵 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

载人航天飞行控制 理论与实践

王忠贵 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

载人航天飞行控制理论与实践/王忠贵著. —北京:国防工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-118-10098-3

I. ①载... II. ①王... III. ①载人航天飞行—飞行控制 IV. ①V529

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 053597 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 22½ 字数 400 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

1992 年中央决策实施载人航天工程,经过 20 多年的不懈努力,我国已突破了载人天地往返、出舱活动和空间交会对接三大载人航天关键技术,为后续空间站建设和载人深空探测奠定了坚实基础。

载人航天飞行控制贯穿了自航天器发射、入轨、运行,到空间交会对接、组合体运行、分离撤离,再到载人飞船返回预定着陆场等整个飞行过程,是实现载人飞行任务目标和保证航天员安全的关键之一。载人航天飞行控制是在卫星等航天器飞行控制基础上发展起来的,它与卫星飞行控制有相同之处,如轨道确定和姿态、轨道控制等,也有不同之处,如载人航天飞行控制要考虑过载和环境等因素以保证人的生命安全,要考虑与航天员通话以及与航天员协同控制等。自我我国载人航天工程实施以来,载人航天飞行控制团队圆满完成了历次飞行任务,突破了载人飞船返回控制、航天员空间出舱活动飞行控制、空间交会对接飞行控制等关键技术,形成了具有中国特色的飞行控制协同工作机制和决策模式,积累了许多宝贵的经验和教训,这些技术、组织管理和经验对后续载人航天发展和飞行控制具有重要的价值。

本书系统地介绍了载人航天飞行控制涉及的基础理论以及飞行控制总体设计和工程实践。全书共 10 章,可分为三大部分:第一部分包括绪论和载人航天飞行控制任务分析,共 2 章,概述了载人航天的工程组成、发展载人航天的重要意义、国内外载人航天发展历程,以及载人航天飞行控制的基本概念、作用、意义、基本要素和任务需求;第二部分包括航天器轨道动力学、制导导航与控制技术、测控通信技术、轨道控制与维护技术、空间交会对接技术、返回控制技术,共 6 章,系统阐述了载人航天所使用的轨道动力学基础理论、制导导航与控制任务及姿态控制方法、测控通信技术及基本原理、轨道控制及轨道维护技术、空间交会对接技术及任务规划、返回控制方法与模型;第三部分包括载人航天飞行控制总体设计、系统联试与验证,共 2 章,面向工程应用,系统总结了我国载人航天飞行控制总体设计、系统间试验设计及联试验证情况。李英良、丁溯泉、王瑞军、刘世勇、张志方、杨科化、李九人等同志参加了有关章节的编写。

本书主要面向从事航天及相关领域的科技工作者,也可供高等院校相关专

业的教师和学生参考。我国空间站工程已进入研制阶段,后续的飞行控制任务更繁重、更复杂,希望本书的出版能对从事载人航天后续工作的科研人员和管理人员有所帮助。

载人航天飞行控制涉及诸多领域的知识,理论性和实践性都很强,技术发展也很快,本书尽可能全面介绍载人航天飞行控制相关知识,但由于篇幅所限,不可能面面俱到地深入论述,书中难免有不足和疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 载人航天工程概述	1
1.1.1 载人航天的概念	1
1.1.2 载人航天工程组成	1
1.1.3 发展载人航天的意义	1
1.2 载人航天的发展	3
1.2.1 国外发展历程	3
1.2.2 中国发展历程	11
1.2.3 未来发展	12
1.3 载人航天飞行控制概述	15
1.3.1 载人航天飞行控制概念	15
1.3.2 载人航天飞行控制的作用和意义	16
1.3.3 载人航天飞行控制的基本要素	16
第2章 载人航天飞行控制任务分析	18
2.1 飞行控制对象	18
2.2 飞行控制任务	18
2.2.1 发射上升段任务	19
2.2.2 入轨段任务	19
2.2.3 自主飞行段任务	19
2.2.4 交会对接段任务	20
2.2.5 组合体飞行段任务	20
2.2.6 撤离段任务	20
2.2.7 返回段任务	20
2.3 飞行控制任务需求分析	21
2.3.1 上升段需求分析	21
2.3.2 入轨段需求分析	25
2.3.3 自主飞行段需求分析	27

2.3.4	交会对接段需求分析	28
2.3.5	组合体飞行段需求分析	31
2.3.6	撤离段需求分析	32
2.3.7	返回段需求分析	32
2.3.8	长期运营管理需求分析	33
第3章	航天器轨道动力学	35
3.1	时间、坐标系统	35
3.1.1	基本概念	35
3.1.2	时间系统	40
3.1.3	坐标系统	44
3.2	轨道动力学基础	49
3.2.1	二体问题和轨道要素	49
3.2.2	航天器轨道摄动	54
3.2.3	摄动运动方程及其数值解法	63
3.2.4	有摄运动的一些特点	68
3.3	轨道确定和预报	71
3.3.1	初始轨道确定	71
3.3.2	轨道改进	76
3.3.3	轨道预报	79
3.4	相对运动方程	87
3.4.1	相对运动动力学方程的建立	87
3.4.2	相对运动动力学方程的求解	89
3.5	返回运动方程	91
第4章	载人航天器制导、导航与控制技术	96
4.1	基本概念	96
4.2	任务与组成	99
4.2.1	制导、导航与控制系统的任务	99
4.2.2	制导、导航与控制系统的组成	100
4.3	姿态运动方程	104
4.3.1	姿态动力学方程	104
4.3.2	姿态运动学方程	106
4.4	姿态确定方法	108
4.4.1	姿态测量与姿态确定方法概述	108
4.4.2	基于陀螺、地球敏感器和太阳敏感器的	

航天器姿态确定	111
4.4.3 基于陀螺和星敏感器的航天器姿态确定	114
4.5 姿态控制方法	117
4.5.1 概述	117
4.5.2 喷气姿态控制技术	118
4.5.3 力矩陀螺姿态控制技术	121
4.5.4 大角度姿态机动控制	125
4.6 返回再入姿态控制	127
4.6.1 返回再入段动力学方程	127
4.6.2 返回再入制导、导航与控制	130
第5章 载人航天测控通信技术	133
5.1 USB 测控技术	133
5.1.1 概述	133
5.1.2 USB 测控技术原理	134
5.1.3 USB 测控系统工作流程	145
5.2 中继卫星测控技术	148
5.2.1 概述	148
5.2.2 中继卫星系统组成	148
5.2.3 中继卫星系统技术原理及功能	151
5.3 空间信息传输协议体系	159
5.3.1 协议体系设计	160
5.3.2 协议体系应用	163
5.4 轨道测量方法与模型	163
5.4.1 统一 S 波段测量	164
5.4.2 中继卫星测量	165
5.4.3 导航卫星测量	166
5.5 陆海天基测控网	168
5.5.1 测控站	168
5.5.2 测量船	169
5.5.3 中继卫星系统	170
5.5.4 飞行控制中心	171
5.5.5 地面通信网	172

第6章 载人航天器轨道控制与维护技术	174
6.1 基本概念	174
6.1.1 轨道控制的含义及分类	174
6.1.2 轨道控制的主要任务	174
6.1.3 推力模型	176
6.2 轨道修正模型与方法	177
6.2.1 轨道周期的修正	177
6.2.2 轨道半长轴与偏心率的修正	178
6.2.3 轨道倾角与升交点赤经的修正	182
6.2.4 轨道相位的调整	183
6.3 轨道机动模型与方法	184
6.3.1 共面圆轨道转移机动	184
6.3.2 共面椭圆轨道转移机动	188
6.3.3 非共面圆轨道转移机动	190
6.4 轨道控制规划方法	191
6.4.1 交会对接变轨任务规划模型	192
6.4.2 远距离导引轨道控制策略	193
6.4.3 近距离多脉冲轨道控制策略	197
6.5 轨道维护技术	201
6.5.1 目标飞行器轨道维持与调相模型	201
6.5.2 载人飞船返回轨道维持	205
6.5.3 空间目标碰撞预警方法概述	206
第7章 空间交会对接飞行控制技术	209
7.1 概述	209
7.1.1 交会对接基本概念	209
7.1.2 交会对接发展概况	211
7.2 交会对接过程	215
7.2.1 发射及入轨段	216
7.2.2 远距离导引段	216
7.2.3 近距离导引段	216
7.2.4 最后逼近段	216

7.2.5	对接段和组合体飞行阶段	217
7.2.6	撤离段	217
7.3	远距离导引控制	217
7.3.1	控制系统结构	217
7.3.2	轨道控制策略	217
7.3.3	变轨任务实时规划	220
7.4	自主交会相对导航与控制	222
7.4.1	控制系统结构	222
7.4.2	相对导航技术	222
7.4.3	自主交会制导与控制方法	225
7.4.4	自主交会段的轨迹安全	227
7.5	手动交会控制	230
7.5.1	功能与系统组成	230
7.5.2	手动交会对接策略	233
7.6	撤离控制	237
7.6.1	撤离过程与约束	238
7.6.2	撤离制导控制策略	241
7.6.3	撤离安全轨迹设计	245
7.7	快速交会对接	247
7.7.1	国外快速交会对接情况概述	247
7.7.2	快速交会对接方案设计	249
第8章	返回控制	253
8.1	概述	253
8.1.1	返回控制技术的发展	253
8.1.2	返回过程	254
8.1.3	返回控制一般方法及作用	255
8.2	坐标系及坐标转换	257
8.2.1	坐标系	257
8.2.2	坐标转换	259
8.3	弹道式返回控制技术	263
8.3.1	弹道式返回轨道设计	263

8.3.2	弹道式返回控制计算模型	264
8.4	弹道—升力式返回控制技术	265
8.4.1	弹道—升力式返回轨道设计	265
8.4.2	弹道—升力式返回制导与控制	266
8.5	升力式返回控制技术	275
8.5.1	升力式返回轨道设计	275
8.5.2	升力式返回制导与控制	276
8.6	返回控制参数计算与特征点参数计算	278
8.6.1	返回控制参数计算	278
8.6.2	返回轨道特征点参数计算	282
第9章	载人航天飞行控制总体设计	284
9.1	概述	284
9.2	基本原则	284
9.3	系统组成	285
9.4	飞行轨道设计	285
9.4.1	设计目标	285
9.4.2	主要内容	285
9.4.3	运行轨道设计	286
9.4.4	发射窗口设计的约束条件	288
9.4.5	返回轨道设计	289
9.5	载人飞行系统控制体系设计	291
9.5.1	基本概念	291
9.5.2	各中心的任务	291
9.5.3	飞行控制回路	292
9.5.4	各控制回路的特点和作用	293
9.5.5	协同关系	293
9.6	天地飞行控制信道设计	294
9.6.1	概念	294
9.6.2	测控通信体制	294
9.6.3	信道设计	295
9.7	载人航天器飞行控制相关系统	298

9.7.1	概念	298
9.7.2	航天器载人环境控制	298
9.7.3	航天器热控	299
9.7.4	制导、导航与控制	300
9.7.5	航天器信息管理	301
9.7.6	航天器测控通信分系统	301
9.8	航天员手动控制	302
9.8.1	航天员手动控制的作用和意义	302
9.8.2	航天员手动控制的主要功能	302
9.8.3	航天员手动控制回路构成	303
9.9	飞行控制中心	303
9.9.1	任务	303
9.9.2	组成	304
9.9.3	主要功能	305
9.10	测控网	307
9.10.1	概念	307
9.10.2	任务	307
9.10.3	测控网构建	307
9.10.4	各飞行段测控资源配置	308
9.11	安全性、可靠性设计	310
9.11.1	概念	310
9.11.2	安全性设计要求	310
9.11.3	安全性分析	312
9.11.4	可靠性要求	314
9.11.5	可靠性设计项目与准则	314
9.11.6	可靠性模型、可靠性分配与可靠性预计	315
9.11.7	可靠性定性设计	320
9.11.8	软件可靠性设计	321
第 10 章	联试与验证	324
10.1	联试与验证的必要性	324
10.2	联试验证的主要内容和方法	324

10.2.1	联试验证的主要内容	324
10.2.2	联试和验证方法	325
10.3	航天器和测控通信系统设备级联试验证	326
10.3.1	对接的目的	326
10.3.2	对接的主要内容	326
10.3.3	对接验证的方法	327
10.4	测控网联调	327
10.4.1	联调目的	328
10.4.2	联调的主要内容	328
10.4.3	联调方法	328
10.5	航天器电测试	330
10.5.1	测试目的	330
10.5.2	测试项目	330
10.5.3	测试方法	331
10.5.4	地面测试支持系统	332
10.6	系统间联试	333
10.6.1	人船(器)联试	334
10.6.2	船器联试	334
10.6.3	船(器)地联试	335
10.6.4	人船地联试	336
10.6.5	人船器地联试	337
10.7	工程总体全系统仿真	339
10.7.1	仿真目的	340
10.7.2	系统组成	340
10.7.3	仿真内容	340
10.7.4	仿真过程及结果分析	342
参考文献		344

第1章 绪 论

1.1 载人航天工程概述

1.1.1 载人航天的概念

载人航天是指由人驾驶和乘坐航天器(载人飞船、空间站、航天飞机)在太空从事各种探测、试验、研究、军事和生产的往返飞行活动。1961年4月12日,苏联航天员加加林乘坐“东方”号飞船绕地球轨道飞行一圈,实现了世界上首次载人航天。

1.1.2 载人航天工程组成

载人航天工程一般由航天员、载人航天器、运载器、发射场、测控通信、回收着陆和应用等系统组成。

航天员系统的主要任务:选拔训练航天员;在选拔训练和飞行试验过程中,实施对航天员的医学监督和医疗保障;研制舱内外航天服、航天食品及其他个人装备等。

载人航天器系统的主要任务:为航天员和有效载荷提供必要的生活和工作条件,保障航天员在太空飞行和返回的安全。

运载火箭系统的主要任务:将载人航天器安全可靠地送入预定轨道。

发射场系统的主要任务:完成载人航天器和运载火箭的测试、推进剂加注和发射等工作。

测控通信系统的主要任务:完成运载火箭、载人航天器的遥测参数接收处理、轨道测量、遥控和建立与航天员的通话。

着陆场系统的主要任务:为载人航天器提供合适的着陆场地;搜救航天员,回收返回舱和有效载荷。

应用系统的主要任务:研制空间科学试验和应用设备,并开展科学研究和应用。

1.1.3 发展载人航天的意义

载人航天是人类寻求对地球以外空间的认知、利用和拓展生存空间的需要。

载人航天工程是国家综合国力和科技水平的重要体现,其重要性体现在以下几个方面。

1. 维护空间环境资源利用的安全

太空是人类继陆地、海洋、大气层之后的第四活动领域,太空资源的利用和开发对一个国家的生存和发展举足轻重,谁先进入和抢占这一制高点,谁就赢得了未来发展的先机。有人的存在和参与是开发、利用和维护空间的有效手段。

2. 提高国际地位、增强民族凝聚力

载人航天的发展水平全面体现了一个国家在科技、经济和管理等方面的水平和实力,是国家综合国力的象征。世界各国均把提高国际地位、增强民族凝聚力作为发展载人航天的主要目的。当加加林完成人类第一次太空飞行后,世界为之沸腾,苏联人民的自豪感和凝聚力油然而生。当阿姆斯特朗踏上月球的那一刻,全球为之振奋,人类向宇宙迈出了一大步,美国的国际领先地位得到确立,民族自信心和综合国力得到极大的增强。我国载人航天取得的成就,特别是5次载人航天飞行的圆满成功,实现了中华民族的千年梦想,极大地增强了炎黄子孙的民族自豪感和凝聚力,在国际上产生了重大影响,使我国成为在太空有影响力的大国。

3. 推动科技进步和经济发展

载人航天是在许多新兴科学的基础和支撑下发展起来的,它一方面吸纳了现代科学技术众多领域的最新成就,如系统工程、自动控制、计算机、推进动力、通信、遥感、测试、新能源、新材料、新工艺、激光、微电子、光电子等技术以及近代力学、天文学、地球科学、空间科学等,同时又对现代科学技术的各个领域提出了更新的发展需求,从而推动了整个科学技术的进步。另外,它也带动和创建了如空间天文学、空间物理学、空间化学、空间材料学、空间生命科学、空间医学等多个新兴学科和交叉学科。

载人航天在突破技术和实施过程中,必将催生一批新兴产业,促进一些产业的升级改造,创造新的经济增长并持续拉动经济增长。

4. 开发军事应用的潜力

美、俄载人航天活动的实践证明,人在空间确有自动化设备代替不了的独特作用。人和自动化设备或机器相互结合,取长补短,可使系统的性能更加灵活和可靠,从而提高军事应用的及时性、准确性和有效性。军用航天器的下一步发展可能是多用途的综合性平台,它能用于侦察和监视、指挥、控制和通信等活动,从而起到支援和加强地面防御力量的作用。载人航天系统可承担军用航天器的管理和检测、维修和组装以及其他各种空间勤务。尽管上述军事应用的大部分功能还要进行大量的探索性试验,但肯定存在着巨大潜力。

1.2 载人航天的发展

1961年4月12日,前苏联将人类第一位航天员尤里·加加林送入太空,并成功返回地面,人类开始了迈向太空的步伐。在几十年的载人航天发展中,发展了载人飞船、空间实验室、航天飞机、空间站和“阿波罗”载人登月飞船等,创造了一个又一个辉煌。在载人航天这一领域,俄、美起步较早,一直引领着载人航天的发展。自国际空间站开始建设以来,国际上参加或开展载人航天活动的国家越来越多。

1.2.1 国外发展历程

1. 载人飞船

载人飞船是指小升阻比的载人航天器,它必须用火箭发射,在轨运行后经过制动,沿弹道式或半弹道式(升阻比一般小于0.5)弹道穿过大气层,用降落伞和着陆缓冲系统实现软着陆。从20世纪50年代开始至今,前苏联(俄罗斯)、美国、中国等研制了多种型号的飞船,用于不同的试验任务或应用任务。

1) “东方”号飞船

“东方”号飞船是世界上第一位航天员加加林乘坐的飞船,也是世界上第一位女航天员捷列什科娃乘坐的飞船,由俄罗斯研制,从1961年4月到1963年6月共发射了6艘。“东方”号飞船可载一名航天员,质量4.73t,全长7.35m,它由乘员舱和设备舱两部分组成,乘员舱直径2.3m,设备舱最大直径2.4m,乘员舱的大气压与地面相同,座舱内有可供飞行10天的生命保障系统,“东方”号飞船既可自动控制,也可由航天员手动控制。飞船飞行轨道的近地点高度约180km,远地点高度为222~327km,倾角约 65° ,周期约89min。飞船制动降落至距地面7km高度时,航天员连同座椅以弹射方式弹出座舱,用降落伞实现着陆。

2) “上升”号飞船

“上升”号飞船是俄罗斯在“东方”号基础上研制的可乘坐3人的飞船,“上升”号飞船也是世界上航天员第一次出舱活动的载人航天器。“上升”号飞船质量约5.34t,长5m,它由乘员舱和设备舱组成,乘员舱直径2.3m,设备舱最大直径2.4m,“上升”号飞船用普通座椅代替了弹射座椅,增加了着陆反推火箭。运行在周期为90min、倾角为 63° 的轨道上。

3) “联盟”号 TM 飞船

俄罗斯在成功研制了“东方”号飞船和“上升”号飞船后,开始了“联盟”号系列飞船的研制,从“联盟”号到“联盟”T号再到“联盟”TM号飞船,不断改进形

成了功能完备、性能可靠的“联盟”TM 飞船。“联盟”TM 号飞船成为和平号空间站和国际空间站的主要天地往返运输器。“联盟”TM 号飞船由生活舱、返回舱和仪器设备舱 3 个主要舱段组成,生活舱在前,返回舱居中,仪器设备舱置后,生活舱的前端安装有对接机构。“联盟”TM 号飞船起飞质量 7.07t,全长 7.5m,可乘坐 3 名航天员,具备与在轨航天器对接的功能。

4) “进步”号货运飞船

“进步”号货运飞船是由“联盟”号飞船改造而成,即将“联盟”号飞船的返回舱改为装载货物的货舱,形成不载人的货运飞船。“进步”号货运飞船承担向空间站运送推进剂、生活用品、设备和维修用品等货物的任务,上行运送能力为 2t,在结束运货任务后,货运飞船装运空间站垃圾及其他废弃物,返回大气层烧毁。

5) “水星”号飞船

“水星”号飞船是美国第一个载人飞船。1962 年 2 月 20 日,美国航天员约翰·H·格伦中校,乘坐“水星”6 号绕地球飞行 3 圈,历时 4h55min23s,在大西洋海面安全降落,格伦成为美国第一个进入地球轨道的人。“水星”号飞船为单舱结构,乘员一人,质量 1.9t,全长 2.9m,底部最大直径 1.86m,由圆台形座舱和圆柱形伞舱两部分构成,返回时溅落在海面上。

6) “双子座”号飞船

“双子座”号飞船是美国研制的又一个飞船型号,它可乘坐两人,由乘员舱和设备舱两部分组成,质量 3.2~3.8t,长 5.74m。底部最大直径 3m。乘员舱分密封舱和非密封舱两部分,密封舱是航天员的座舱,非密封部分安装有无线电设备、生命保障系统和降落伞等。设备舱安装有发动机、燃料、电源、通信等设备,飞船采用降落伞在海面上降落。“双子座”号飞船实现了美国航天员出舱活动、机动飞行和两个航天器在空间的交会对接。

7) “龙”飞船和“天鹅座”飞船

为解决航天飞机退役后美国在近地轨道运输中的能力空缺,NASA 于 2005 年制定了“商业乘员与货物运输”计划(C3P),并在计划下发起了“商业轨道运输服务”(COTS)计划和“商业载人航天发展”(CCDev)计划,以鼓励私营公司研发高消费比的商业航天运输系统。在此背景下,SpaceX 公司的“龙”飞船/“猎鹰”9 火箭系统与轨道科学公司的“天鹅座”飞船/“安塔瑞斯”火箭系统应运而生,获得了 NASA 的合同,为国际空间站运输货物和人员(系统成熟可靠后)。

“龙”飞船/“猎鹰”9 火箭系统于 2012 年 5 月 22 日首次发射,5 月 25 日与国际空间站成功对接,5 月 31 日,成功溅落在太平洋上,圆满完成了验证试验,成为世界上第一艘与国际空间站成功对接的商业飞船。2012 年 10 月 8 日,