“十三五”国家重点出版物出版规划项目

国家出版基金项目

载人航天出版工程

总 主 编：周建平

总 策 划：邓宁丰

# 载人航天技术［上］

陈善广　主编



中国宇航出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

“十三五”国家重点出版




载人航天出版工程
总 主 编：周建平
总 策 划：邓宁丰

# 载人航天技术（上）

陈善广　主编

中国宇航出版社
·北 京·

版权所有　侵权必究

**图书在版编目(CIP)数据**

载人航天技术 ：全 2 册 / 陈善广主编 . --北京：中国宇航出版社,2018.4

ISBN 978-7-5159-1469-5

Ⅰ.①载… Ⅱ.①陈… Ⅲ.①载人航天飞行 Ⅳ.①V529

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 100272 号

**责任编辑**　侯丽平　　**封面设计**　宇星文化

出　版
发　行　中国宇航出版社

社　址　北京市阜成路 8 号　　邮　编　100830

(010)60286808　　(010)68768548

网　址　www.caphbook.com

经　销　新华书店

发行部　(010)60286888　　(010)68371900

(010)60286887　　(010)60286804(传真)

零售店　读者服务部

(010)68371105

承　印　河北画中画印刷科技有限公司

版　次　2018 年 4 月第 1 版　　2018 年 4 月第 1 次印刷

规　格　880×1230　　开　本　1/32

印　张　48　　字　数　1381 千字

书　号　ISBN 978-7-5159-1469-5

定　价　398.00 元

本书如有印装质量问题，可与发行部联系调换

# 《载人航天技术》
# 编委会


主　　编：陈善广

副 主 编：林西强　唐国金

编写人员　（以姓氏笔画为序）：

王春慧　田立平　刘玉盛　刘迎春

吴　昊　吴　斌　李海阳　陈善广

林西强　郑　剑　姚　志　唐国金

黄海兵　傅　岚

# 《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自1992年立项以来，已经走过了20多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了10艘神舟飞船和1个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

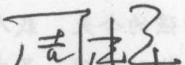
需要全本请访问 www.ertongbook.com

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020 年前后，我国将建造由 20 吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程的各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013 年 10 月

# 前　言

载人航天是当今世界最受广泛关注、最具社会影响力的高科技领域之一。自1961年人类首位航天员加加林成功进入太空以来，世界范围内的载人航天活动从未间断。与其他航天活动相比，载人航天的最显著特点就是人（航天员）参与整个飞行过程。

航天员是乘坐航天器从地球表面起飞，穿过大气层，进入宇宙空间飞行或踏上其他天体表面的。因此，他们必须掌握与此相关的基本科学知识和技术理论，如飞行动力学、空气动力学、地球物理学、宇宙物理学、气象学、天文学和宇宙航行学等；还必须熟悉与航天器相关的理论知识和工程技术基础，包括火箭推进原理，航天器的系统组成和部件结构，空间导航、制导与控制，测控与通信等。为了满足航天员培训的需要，1997年策划出版了《载人航天工程基础》，发挥了重要作用。20年过去了，世界载人航天发展迅猛，中国载人航天在突破近地轨道飞行技术和载人深空探测技术准备方面取得了举世瞩目的辉煌成就，新知识、新技术不断涌现，也加深了人们对宇宙空间与自身的认识。基于此，我们重新编撰此书，试图反映载人航天的新成就、新进展，形成《载人航天技术》这部著作。

本书还可为从事载人航天事业的工程技术人员及管理人员提供技术参考，也可作为航天院校高年级本科生及研究生的教材和教学参考书。本书共24章。

第1章至第9章，主要介绍了载人航天基本理论。第1章概述了载人航天的意义、历史、现状和发展方向，对各种航天器作了简要介绍；第2章至第6章主要介绍有关天文学的基本知识和基本原理，详细叙述了与空间飞行关系密切的近地空间环境，概括了观测

天文学的主要内容，叙述了太阳系有关天体的基本特点，描述了地球、太阳与有关天体的运动特性，讨论了星座的特点及其观测，引出了天球的概念，给出了天球坐标系的定义及其换算关系，说明了引入复杂计时系统的必要性，建立了几种时间系统的换算关系；第7章着重描述航天器在地心引力作用下作轨道运动所遵循的一般性规律，并对轨道摄动问题进行了简要讨论和分析；第8章通过引入“星下点”的概念，详细叙述了在航天器上进行对地观测的理论知识；第9章简要介绍了奔月和行星际飞行的基本知识，包括碰到的问题和可能的飞行方式。

第10章至第18章，主要介绍了载人航天器及其基本组成、功能。第10章对载人飞船、航天飞机和空间站进行了概述；第11章全面介绍了组成载人飞船的各分系统，包括其构成、任务、特点及其工作原理；第12章详细介绍了与整个载人航天相关的运载系统和航天发射场系统；第13章介绍了飞船从发射准备、上升入轨、在轨运行和返回着陆各阶段的应急救生措施、设备和方法；第14章介绍了载人飞船返回过程的控制程序、主要物理现象、飞船着陆系统的构成、地面回收和救援的组织、管理和工作方式；第15章介绍了测控网的任务、功能与组成，给出了测控系统工作流程；第16章介绍了通信网的功能与组成、跟踪测量和遥测指令的信息与数据传输的流程；第17章是关于GNC系统基本任务与基本原理的讨论，包括姿态测量与空间导航的基本原理、姿态控制与轨道控制的基本原理和方法；第18章在简述航天器运动参数测量原理的基础上，对轨道测量与跟踪系统各种功能的实现途径、体制及主要设备作了介绍。

第19章至第24章，主要介绍了载人航天关键技术及发展趋势。第19章围绕航天医学工程学展开讨论，介绍了航天环境医学、重力生理学与失重防护、航天人因工程与工效学、航天员选拔与训练、航天员医学监督与医学保障、航天营养与食品、舱内航天服与个人防护装备、航天环境模拟设备与飞行训练仿真技术等内容；第20章介绍了航天员出舱活动面临的空间威胁、出舱活动窗口与出舱活动

程序设计、气闸舱和舱外航天服的基本原理与组成、航天员出舱活动训练设备；第21章讲述了交会对接系统的任务、组成和功能，给出了交会对接的基本原理、方法及飞行程序。第22章介绍了空间站关键技术以及空间站构型设计、运营管理相关问题，并对和平号空间站和国际空间站作了简要介绍；第23章介绍了深空探测发展历程，探讨了新型轨道设计、新型推进技术、新型能源技术等深空探测关键技术；第24章叙述了空间科学与应用技术的基本概念、地位作用、研究范围，以及支持空间科学与应用的技术体系。

本书是在综合国内外大量有关资料的基础上编写而成的。在编写过程中，得到了载人航天工程办公室、中国航天员科研训练中心和国防科技大学航天与材料工程学院领导、专家的大力支持和帮助；张柏楠、杨宏、胡军、孙宝升、姜晓军等来自中国空间技术研究院、中国科学院、国家天文台、中继卫星控管中心等单位的专家对本书进行了审核，并提出了宝贵的意见和建议；在书稿预审和复审过程中，学术秘书吴昊、王萌、胡勇等做了大量的修改和校对工作，在此一并表示衷心感谢。

由于载人航天技术涉及众多学科领域，因此编写这样一部著作是一项系统工程。尽管在编写过程中组织有关专家进行了多次审查，但由于涉及面广泛，相关技术也在不断发展，加之编者认识水平所限，书中难免有不当和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2018年4月

# 目 录


**第 1 章 概述** …… 1

1.1 载人航天的意义 …… 1

1.2 载人航天发展历程 …… 5

1.2.1 苏联/俄罗斯的载人航天发展历程 …… 6

1.2.2 美国载人航天发展历程 …… 9

1.2.3 中国载人航天发展历程 …… 18

1.2.4 欧洲空间局载人航天历史 …… 24

1.3 载人航天技术体系 …… 25

1.3.1 航天员 …… 25

1.3.2 航天器 …… 27

1.3.3 运载火箭 …… 27

1.3.4 地面系统 …… 29

1.3.5 空间应用 …… 29

1.4 载人航天未来展望 …… 29

**第 2 章 宇宙概述** …… 31

2.1 宇宙 …… 31

2.2 恒星、星云和星系 …… 33

2.2.1 恒星 …… 33

2.2.2 星云 …… 40

2.2.3 星系（河外星系、河外星云） …… 42

2.3 银河系 …… 44

2.4 太阳系 …… 48

2.4.1 太阳系简介 …… 48
2.4.2 太阳系天体及其运动 …… 49
2.5 太阳与月球 …… 61
2.5.1 太阳 …… 61
2.5.2 月球 …… 73

**第 3 章 近地空间环境** …… 80
3.1 地球概述 …… 80
3.2 地球的形状、尺寸、重力 …… 80
3.2.1 地球的形状 …… 80
3.2.2 地球的尺寸 …… 81
3.2.3 地球的重力 …… 81
3.3 地球大气 …… 83
3.3.1 地球大气组成及大气分层 …… 83
3.3.2 地球的大气结构及常用的地球大气模式 …… 87
3.3.3 地球的气候及其特点 …… 92
3.4 太阳电磁辐射和粒子辐射 …… 97
3.4.1 太阳电磁辐射 …… 97
3.4.2 粒子辐射 …… 97
3.5 地球的磁场与磁层 …… 99
3.5.1 地球的磁场 …… 99
3.5.2 磁层 …… 101
3.6 空间碎片 …… 102
3.6.1 空间碎片及其来源 …… 102
3.6.2 空间碎片的危害及防护 …… 104
3.7 微重力环境 …… 106
3.7.1 微重力环境及其来源 …… 106
3.7.2 微重力的应用 …… 109
3.8 空间环境对人与航天器的影响 …… 110
3.8.1 磁层对航天器的影响 …… 111

需要全本请访问 www.ertongbook.com

3.8.2 空间粒子辐射对航天器的影响 …… 111
3.8.3 原子氧环境对航天器的影响 …… 113
3.8.4 空间等离子体环境对航天器的影响 …… 114
3.8.5 微重力对人机体的影响 …… 116
3.8.6 气象、气候对航天器的影响 …… 119

**第 4 章 天体的观测** …… 123
4.1 观察设备 …… 123
4.1.1 观察设备的基本概念 …… 123
4.1.2 观察设备的基本种类 …… 124
4.2 视差与距离 …… 128
4.2.1 视差 …… 128
4.2.2 距离 …… 132
4.3 恒星的测量 …… 133
4.3.1 恒星角径的测量 …… 133
4.3.2 恒星位置的测量 …… 133
4.4 亮度与星等 …… 134
4.4.1 亮度与星等的基本概念 …… 134
4.4.2 亮度与星等的计算方法 …… 134
4.5 行星和月球的观测 …… 135
4.5.1 行星质量与行星自转周期的测量 …… 135
4.5.2 月球的观测 …… 137
4.6 星图辨认 …… 138
4.6.1 星图介绍 …… 138
4.6.2 利用星图辨认星座 …… 142
4.7 天文导航简介 …… 148
4.7.1 天文导航的基本概念 …… 148
4.7.2 天文导航原理和方法 …… 149
4.7.3 天文导航系统简述 …… 152

**第5章 天球坐标系及其变换** …… 154
5.1 天球及其运动 …… 154
5.1.1 天球 …… 154
5.1.2 天球的旋转 …… 156
5.1.3 天球的基本点、线、面 …… 157
5.1.4 天体视运动现象讨论 …… 160
5.2 天球坐标系 …… 165
5.2.1 地平坐标系 …… 166
5.2.2 时角坐标系 …… 167
5.2.3 赤道坐标系 …… 168
5.2.4 黄道坐标系 …… 169
5.2.5 空间坐标系 …… 170
5.3 坐标系变换 …… 172
5.3.1 天球坐标系之间的变换 …… 172
5.3.2 站心天球坐标系与地心天球坐标系的转换 …… 175
5.4 岁差与章动 …… 177
5.4.1 岁差 …… 177
5.4.2 章动 …… 181
5.4.3 岁差与章动影响的处理 …… 182
**第6章 时间与历法** …… 185
6.1 时间计量系统 …… 185
6.1.1 计时系统的产生 …… 185
6.1.2 天文学中计量时间的原则 …… 186
6.1.3 时间间隔和时刻 …… 186
6.1.4 时间计量系统 …… 186
6.2 恒星时 …… 187
6.2.1 恒星时单位 …… 187
6.2.2 恒星时和春分点时角的关系 …… 187
6.2.3 恒星时和赤经的关系 …… 187

6.2.4 恒星时的不均匀性 …… 188
6.3 太阳时 …… 189
6.3.1 太阳的周年视运动 …… 189
6.3.2 真太阳和真太阳时 …… 192
6.3.3 平太阳和平太阳时 …… 193
6.3.4 时差 …… 194
6.3.5 太阳时和恒星时之间的换算关系 …… 194
6.4 地方时和区时 …… 196
6.4.1 地方时 …… 196
6.4.2 地方时差和地理经度差的关系 …… 196
6.4.3 世界时 …… 198
6.4.4 区时 …… 199
6.4.5 日界线 …… 201
6.4.6 地方平时、地方恒星时、区时之间的换算 …… 202
6.5 历书时、原子时 …… 205
6.5.1 历书时 …… 206
6.5.2 原子时 …… 208
6.5.3 协调世界时 UTC (Coordinated Universal Time) …… 208
6.6 历法简介 …… 209
6.6.1 太阴历 …… 210
6.6.2 太阳历 …… 210
6.6.3 阴阳历 …… 213
**第 7 章 轨道原理** …… 217
7.1 天体力学基本定律 …… 217
7.1.1 开普勒三大定律 …… 217
7.1.2 牛顿万有引力定律 …… 218
7.1.3 *N* 体问题 …… 219
7.1.4 二体问题 …… 223

7.1.5 运动常数 …… 224
7.2 轨道方程 …… 227
7.2.1 运动方程的积分 …… 227
7.2.2 圆锥曲线的分类与特性 …… 229
7.2.3 $\varepsilon$ 和 $h$ 与轨道几何参数的关系 …… 233
7.2.4 轨道运动的一般特性 …… 235
7.2.5 正则单位 …… 240
7.3 飞船沿轨道运动条件与规律 …… 242
7.3.1 轨道几何参数与航天器入轨点运动参数的关系 …… 242
7.3.2 入轨点参数应满足的条件 …… 244
7.4 基本轨道要素及其与位置和速度矢量的关系 …… 246
7.4.1 坐标系 …… 246
7.4.2 基本轨道要素 …… 248
7.4.3 轨道要素同位置和速度矢量的关系 …… 250
7.5 位置与时间的函数关系 …… 259
7.5.1 椭圆轨道位置与时间的关系 …… 260
7.5.2 抛物线轨道位置与时间的关系 …… 262
7.5.3 双曲线轨道位置与时间的关系 …… 263
7.5.4 确定位置与时间函数关系的其他方法 …… 265
7.6 轨道确定 …… 270
7.6.1 观测数据与初轨计算方法 …… 271
7.6.2 由单个雷达观测数据确定轨道 …… 272
7.6.3 由三个位置矢量确定轨道 …… 279
7.6.4 由两个位置和飞行时间确定轨道 …… 281
7.6.5 由光学观测结果确定轨道 …… 283
7.6.6 初轨计算的加权单位矢量法 …… 286
7.6.7 轨道改进 …… 290
7.7 轨道调整与轨道转移 …… 292
7.7.1 轨道调整 …… 293

7.7.2 共面轨道转移 …… 303
7.7.3 非共面轨道转移 …… 315
7.8 轨道摄动 …… 316
7.8.1 摄动和摄动因素基本知识 …… 316
7.8.2 变动轨道要素法 …… 321
7.8.3 地球扁率摄动 …… 333
7.8.4 气动力摄动 …… 338
7.8.5 轨道保持 …… 344
7.9 飞船在邻近轨道上的相对运动 …… 345
7.9.1 相对运动的目的 …… 345
7.9.2 相对运动基本方程 …… 346
7.9.3 特解及应用 …… 349
**第8章 星下点与在轨观测** …… 355
8.1 概述 …… 355
8.2 飞船的星下点轨迹 …… 356
8.2.1 星下点定义 …… 356
8.2.2 地图投影 …… 358
8.3 无旋地球上的星下点轨迹 …… 370
8.3.1 球坐标系下位置与速度的定义 …… 371
8.3.2 球坐标系下运动状态与轨道要素的关系 …… 372
8.3.3 无旋地球上的星下点轨迹方程及其性质 …… 375
8.3.4 星下点轨迹的地图投影 …… 377
8.4 旋转地球上的星下点轨迹 …… 379
8.4.1 星下点轨迹方程 …… 379
8.4.2 星下点轨迹方位角的计算 …… 382
8.4.3 回归轨道与准回归轨道 …… 383
8.4.4 考虑摄动影响时的星下点轨迹 …… 385
8.4.5 不计摄动的星下点轨迹图形 …… 388
8.4.6 航天器轨道的分类 …… 392

8.5 飞船对地观测的覆盖区 …… 392
8.5.1 飞船在轨道上任一点时对地面的覆盖 …… 393
8.5.2 飞船沿轨道运动时对无旋地球的覆盖 …… 395
8.5.3 最小宽度覆盖带对旋转地球的覆盖 …… 400
8.5.4 星载测量设备的视角 …… 401
8.6 星下点轨迹的照明 …… 403
8.6.1 星下点的太阳天顶距与轨道要素的关系 …… 404
8.6.2 可见弧段及其纬度范围 …… 406
8.6.3 星下点照明问题的图解方法 …… 409
8.7 飞船受晒与星蚀 …… 411
8.7.1 受晒与星蚀的概念 …… 411
8.7.2 地影 …… 412
8.7.3 受晒因子 …… 413
8.8 飞船上观测到的地面景象 …… 417
**第9章 星际飞行轨道** …… 421
9.1 概述 …… 421
9.2 奔月轨道 …… 423
9.2.1 引力影响球 …… 423
9.2.2 登月飞行引述 …… 425
9.2.3 地-月系统及月球运动的不规则性 …… 430
9.2.4 简单的奔月轨道计算 …… 432
9.2.5 拼接圆锥曲线近似法 …… 436
9.2.6 多圆锥截线法 …… 443
9.3 月球探测器返回轨道 …… 446
9.4 行星际飞行 …… 455
9.4.1 行星际飞行的主要特点 …… 455
9.4.2 拼凑圆锥截线法 …… 462
9.4.3 行星捕获与行星撞击 …… 468
9.5 恒星际飞行轨道 …… 470

需要全本请访问 www.ertongbook.com