

空间系统基础

(第二版)

Fundamentals of Space Systems
Second Edition

[美] Vincent L. Pisacane 编著

张育林 王兆魁 刘红卫 译



科学出版社

空间系统基础

(第二版)

Fundamentals of Space Systems

Second Edition

[美] Vincent L. Pisacane 编著

张育林 王兆魁 刘红卫 译



科学出版社

北京

图字:01-2015-4012 号

内 容 简 介

本书全面介绍了空间系统的基础知识,包括空间工程管理、空间环境、轨道与姿态动力学、推进系统、电源系统、热控系统、航天器结构、空间通信、遥测遥控、星载计算机、软件系统、航天器集成测试、空间操作、纳星设计等,体系完整,理论与实践并重,使读者理解空间系统开发、研制与运行的基本原理,提高空间系统分析与设计能力。

本书可以作为高校宇航科学与技术专业的教材,也可供航天研究院所、航天工业部门的技术人员参考。

Copyright . 2005 by Oxford University Press, Inc.

"FUNDAMENTALS OF SPACE SYSTEMS, SECOND EDITION "

was originally published in English in 2005. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

图书在版编目(CIP)数据

空间系统基础 / (美)文森特 L. 皮萨卡内(Vincent L. Pisacane)编著;
张育林,王兆魁,刘红卫译. —2 版. —北京:科学出版社,2016

书名原文:Fundamentals of Space Systems

ISBN 978-7-03-049054-4

I. ①空… II. ①文…②张…③王…④刘… III. ①航天系统工程-基本知识 IV. ①V57

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143927 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:桂伟利 郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正图文

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:52

字数:1 015 000

定价:258.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译 者 序

空间系统是涉及众多学科领域的复杂系统,又是科学理论与工程实践结合最为紧密的前沿领域。要从总体上把握空间系统的设计、建造与运行,不仅需要掌握空间系统各领域的基本知识,而且需要对宇航科学的基本原理有深入透彻的理解。

已经有很多著作试图对空间系统的各领域进行系统论述,也不乏涉及宇航科学基本原理的众多著作,但很少有科学著作像本书一样,能把空间系统所涉及各个学科领域的科学原理和工程实践紧密结合在一起。本书由众多既有宇航科学理论造诣又有空间系统工程实践的学者合力完成,很好地体现了宇航科学基本原理与空间系统工程实践的密切结合。

本书共 16 章,内容涉及空间环境与航天动力学等宇航科学的主要领域,也包括空间系统设计相关的电源、热控、结构、通信、遥测与遥控、计算机与软件等专业知识。本书的空间系统工程与管理、可靠性与质量保证、航天器集成与测试、空间任务运行和纳星概念设计等章节安排,进一步突出了空间系统的系统工程特色。

本书适合作为宇航科学与技术学科的研究生教材,也适合航天领域的工程技术人员和系统工程管理人员作为学习参考。

限于译者水平,不足之处在所难免,望读者批评指正。

译 者

2015 年 10 月

前 言

与第1版相比,《空间系统基础》第2版在两方面做了修订。首先,增加了自第1版出版以来空间系统科学研究和工程技术的最新进展。其次,努力使本书更适合作为高级项目班的预修教材,用于开展航天器或航天仪器的设计以及可能的研制、发射。最后,根据作者学生及同事的评估意见,对部分内容进行了修改。另外,第2版提供了更多的实例,这些实例可能是某些工程问题的解决方案,同时增加了有关简单航天器设计概念的内容。由于大多数作者也讲授这些内容,本书为他们提供了重要的参考文档。作为学术成果,本书可作为相关工程学科的高级或初级研究生课程教材。

本书的主要目的是使读者在一定程度上理解空间系统的基础知识,从而可以进行概念设计。本书所有章节的作者均参与了书中提出的空间系统或子系统的开发,具有丰富的工程经验,并且负责在学术计划中讲授这些系统是如何开发的。因此,他们会忽略可能具有深奥学术价值、但不适合用于实际空间系统开发的内容。本书可以帮助航天领域的科学家和系统工程师理清工程问题,获取解决方案,用于开发满足各种需求的空间系统或子系统。随着航天工业技术的成熟,实践人员很有必要广泛地理解相关学科及其问题,从而提高空间系统设计性能,简化设计流程,降低成本和风险。

本书内容来自约翰·霍普金斯大学工程学院应用物理计划和美国海军学院航空航天工程系的课程讲义。建议本书用于两学期或一学期的课程教学,安排如表0-1所示。每学期有42学时的面授时间,其中包含3学时的期末考试。

表 0-1 课时安排

	学时(两学期)	学时(一学期)
空间系统工程与管理	3	2
空间环境	6	2
航天动力学	9	6
航天器推进、发射系统和发射力学	6	3
航天器姿态确定与控制	6	4
航天器电源系统	6	4
航天器热控	6	3

续表

	学时(两学时)	学时(一学时)
航天器结构设计	6	4
空间通信	4.5	4
航天器遥控与遥测	3	1
星载计算机	4.5	1
航天器可靠性、质量保证和辐射效应	6	2
航天器集成与测试	3	1
航天器管理	3	1
考试	12	4
合计	84	42

为了达到进行概念设计的教学目的,建议此教材分两学期使用。当然,通过删除一些内容并将其余内容限制在特定概念设计程度,可以使本书作为一学期概论课程的教材。例如,可以删除第 3 章航天动力学中的星际轨道,第 5 章航天器电源系统中的核能,在推进系统章节中仅保留液体或气体轨道推进系统。为增强本教材的使用效果,建议将教学班分成一定数量的小组,并提供一系列任务需求,要求每个小组设计不同的或相似的空间系统。

由于 Moore 女士正在从事航空航天项目研究,不能全身心地投入本书编写工作,因而全书由 Pisacane 独立编写。作者非常感谢妻子 Lois E. Wehren 在完成全书内容中给予的鼓励和支持。

最后,对于有经验的实践者、教师还是学生,作者希望本书能够为他们带来愉快且有收获的体验。

原书编写人员简介

下面介绍原书编写人员的教育和工作经历,他们在航天系统设计、开发、测试与运行中担任重要的领导角色。

Brian J. Anderson 从事空间物理研究,是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室(APL)的主要工作人员。在该实验室,他是美国国家航空航天局(NASA)的近地小行星交会探测器尼尔(NEAR)和信使号航天器(MESSENGER)任务的磁强计专家。他获得位于明尼阿波利斯的奥格斯堡大学物理、数学和宗教领域的学士学位,并获得明尼苏达大学的物理学博士学位,他的研究兴趣包括地球磁层中的超低频波、磁层中的波粒交互作用以及磁层的太阳风、磁鞘的磁重联、磁层与等离子体耦合、磁强计研制等。最近,他根据铱星的磁场测量结果,得到磁层及等离子体层之间的电流耦合分布。他是美国地理物理学会会员,在 2001~2003 年期间担任 *Geophysical Research Letters* 期刊的空间物理学和高层大气物理学编辑。

George Dakermanji 获得叙利亚阿勒颇大学的电子工程学士学位,以及北卡罗来纳州达拉谟杜克大学的电子工程硕士和博士学位。他是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的空间系统部门主管,并且是 MESSENGER 及大气观测卫星(TIMED)的电源系统工程师。在 1993 年加入应用物理实验室之前,他领导 Fairchild Space 公司的电源系统小组,并且也是 NASA 戈达德航天飞行中心(NASA/GSFC)的 Explorer/SAMPLEX 航天器电源系统和 X 射线定时探险者(XTE)电源系统的主要工程师。他在航天器电源系统及电源控制器领域具有丰富的经验。

Wayne F. Dellinger 获得田纳西理工大学电气工程专业学士、硕士和博士学位,在马丁玛丽埃塔丹佛航空航天及斯韦尔斯航空航天的导航与控制小组工作。1997 年,他加入了约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的航空航天部门,成为主要的技术人员,并管理任务设计、导航与控制部门。他在控制系统及其评估领域具有丰富的经验,并且担任 TIMED 和彗核旅行号(CONTOUR)的导航与控制工程师。

Eric J. Hoffman 获得美国麻省理工学院和美国莱斯大学的电气工程学位,并且于 1964 年加入约翰·霍普金斯大学应用物理实验室。他负责应用物理实验室空间通信与导航系统设计,管理航天器系统工程,并领导卫星概念设计。作为航天部门首席工程师,他为航天计划提供技术指导,推动系统工程,并且为工程设计、设计评审、配置管理及测试制定标准。他在美国海军学院、约翰·霍普金斯大学和台

湾大学教授航天系统公共课,并且在 NSA 和 NASA 中心现场讲课。他撰写了 60 篇论文,是英国星际协会会员和美国航空航天学会的通信会士。

Mark E. Holdridge 是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室 GEOSAT、NEAR 和 CONTOUR 等任务的运营主管和主要专业技术人员,负责监管任务运营部门。他获得乔治华盛顿大学航空航天专业硕士学位和马里兰大学航空航天工程学士学位。Holdridge 发展并改进了面向低成本行星任务的模型。他负责将近地航天器送到小行星 Eros 附近轨道的概念规划,使航天器可以在 Eros 表面软着陆,然后进行地面操作。从 1983 年开始到进入应用物理实验室之前,他为 NASA、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与美国海军的各种航天器任务及商业航天任务提供任务分析、控制中心软件开发和运行管理支持。目前,Holdridge 是 NASA 第一个飞向冥王星/卡戎星任务的副主管,该任务是 Horizons 计划的新任务。

Richard H. Maurer 是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的主要专业技术人员,获得长岛大学和匹兹堡大学的物理学硕士、博士学位。他曾担任 AMPTE、MSX、GEOSAT、TOPEX、NEAR 和 MESSENGER 等多个航天计划的首席工程师或专家,研究空间辐射对航天器电子产品的影响。他利用地球辐射环境的标准模型预测这些航天任务中的总剂量辐照和单粒子翻转比率,并在改进高能太阳粒子事件模型方面作出了贡献。最近,国家航天生物医学研究所(NSBRI)基金(1997~2004)支持 Maurer 及其同事的中子能谱仪研制和集成工作。2003 年 10 月,他指导了高空气球飞行工作,并担任项目经理。在加速器合作研究中,已经实现了在由航天器及其屏幕材料组成的厚靶内生成中子。他的其他研究兴趣包括电子电路组装、砷化镓装置、激光及激光二极管、一次性锂电池等,以及实验的统计设计与分析、系统可靠性、加速环境中的压力测试、故障物理等相关技术,如 NEAR 和 STEREO 任务的性能维持。

Douglas S. Mehoke 分别获得位于圣巴巴拉的加利福尼亚大学和斯坦福大学机械工程学士、硕士学位。他是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的高级专业技术人员,负责管理热设计部门。他在加利福尼亚州森尼韦尔市工作过。在此期间,他负责多个卫星任务的热控子系统。他对很多航天器热控子系统作出了贡献,包括中段空间实验任务和彗星之旅任务。他也从事过先进热控方法研究,特别是自动调节热量开关、复合散热器及高级散热器涂层等。

Donald G. Mitchell 从事空间物理研究,是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的主要工作人员。他是 IMAGE MidEx 空间任务中 HENA 仪器的首席科学家,也是卡西尼号土星任务磁层成像仪的科学家。分别获得密歇根大学和新汉普郡大学的物理学硕士、博士学位。他的研究工作集中在:①分析解释地球磁层、外行星磁层以及行星际太空中的带电和中性高能粒子、等离子体和磁场的观测结果;②飞

行能量分析仪中超小、超低高能粒子的时间设计;③高能中性原子群中的磁层成像仪设计。他是美国地球物理学会的会员。

Robert C. Moore 研究面向嵌入式空间飞行应用的微处理器硬件及软件系统设计,获得拉斐特大学电气工程学士学位和约翰·霍普金斯大学电气工程硕士学位。他担任过 MESSENGER 安全与故障保护首席工程师、FUSE 仪器数据系统的首席工程师、NEAR 激光测距仪中的数字信号处理器首席工程师、GPS 遥测发射器中的数字基带信号处理器首席工程师、火星观测器中雷达高度计的数字信号处理器首席工程师,以及 GALILEO 任务中的高能粒子探测器数据系统首席工程师。

Max R. Peterson 从约翰·霍普金斯大学应用物理实验室退休。他于 1961 年获得堪萨斯州立大学电气工程学士学位,于 1968 年获得约翰·霍普金斯大学工程硕士学位。1961 年,他加入应用物理实验室,并在北极星潜射弹道导弹计划中从事研究工作。在 1969~1975 年期间, Peterson 担任空间通信组织(Space Telecommunication Group)的数据系统设计部门主管,参与多个近地航天器的数据处理系统设计与测试。他还担任过 AMPTE/CCE 航天器的助理项目主管。Peterson 是中段空间实验(MSX)的项目主管,同时也是 NASA 支持的、飞向水星的信使号任务项目主管。他曾经在美国海军学院和怀廷工程学院做过关于航天器集成、测试和航天通信的演讲。

Vincent L. Pisacane 获得德雷塞尔大学机械工程学士学位、密歇根州立大学应用力学与数学硕士学位和应用力学与物理学博士学位,并在约翰·霍普金斯大学电气工程专业担任博士后。目前,他担任美国海军学院航天工程系的 Robert A. Heinlein 教授。在约翰·霍普金斯大学应用物理实验室,他是航天部门主管、研发部门助理主管以及高等医学科学与技术部主管。他曾经从事的领域包括系统工程、航天动力学、控制系统、航天器推进系统、航天生理学。他曾经担任过国家航天生物医学研究所的技术小组组长,并在 NASA 的多个评审委员会工作过。他是美国航空航天学会(AIAA)会员,发表论文 60 多篇。

Elliot H. Rodberg 是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的主要专业技术人员,在航天部门的集成、测试和任务运行小组工作。他获得马里兰大学物理学学士学位和约翰·霍普金斯大学计算机科学硕士学位。他设计了用于支持航天器测试及任务运行的软硬件系统。他曾经参与 AMPTE、TOPEX、ACE、TIMED 和 MESSENGER 等 NASA 的多个航天器集成、测试与发射任务,以及弹道导弹防御组织的 Delta 180 任务。他是 TOPEX 雷达测高仪、高级成分探测器(ACE)航天器和 TIMED 航天器的地面系统首席工程师。他担任过飞向水星的信使号任务集成与测试项目主管。

Malcolm D. Shuster 曾在麻省理工学院和马里兰大学学习,写了多篇关于航

天器姿态确定的重要论文。他提出了 QUEST 姿态确定算法,该算法是当前所有行星飞行任务的组成部分,并且是近地航天任务极为重要的部分。Shuster 的研究成果已经支持了超过 12 个航天任务,涉及任务分析与规划、硬件配置、软件开发及发射和早期任务支持。Shuster 是约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的高级航天动力学专家,是佛罗里达大学航空航天工程系教授。2000 年,Shuster 获得美国宇航学会德克·布劳威尔奖(Dirk Brouwer)。除了在航天方面的工作,他有 10 年时间担任理论核物理专家,并有大约 10 年的时间从事防御系统研究。目前,Shuster 是 Acme 航天公司的研发部门主管。

William E. Skullney 获得宾夕法尼亚州立大学工程力学学士学位和硕士学位,具有 25 年以上的专业经验。在对海军潜艇舰队管理进行三年巡逻分析之后,Skullney 开始针对航天任务进行结构分析。在结构分析领域,他担任过美国核防御局(Defense Nuclear Agency, DNA)的 HILAT 航天器计划首席工程师,以及主动战略防御组织(目前称为美国导弹防御局)的 Delta 180、181、183 传感器模块和中段空间实验项目的首席工程师,同时在约翰·霍普金斯大学担任霍普金斯紫外望远镜的结构工程师。1990 年,他被提升为结构分析部门主管,并于 1991 年担任应用物理实验室航天部门机械系统组组长至今。自 1993 年起,他成为 AIAA 会员,自 1990 年、1993 年开始,分别在约翰·霍普金斯大学怀廷工程学院和应用技术研究所担任结构设计与分析方面的教员。

Ralph M. Sullivan 获得波士顿大学物理学学士学位和乔治华盛顿大学应用科学硕士学位。他已经参与过许多 APL 和 NASA 航天器电源系统设计,并且是 NASA 的 SAS-A、SAS-B、SAS-C、AMPTEICCE 航天器和 SDIO 的 Delta 180、181 航天器电源系统首席工程师。从 1982 年到 1991 年,他主管约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的航天电源系统部门,成为主要专业人员,并且在 APL 夜大和 NASA 的各种中心教学。他也从事过航天电源系统设计、太阳能电池辐射评估以及太阳电池板温度和动力平衡分析。从 1991~1998 年,他担任斯韦尔斯航天有限公司的电源系统工程师,并成为公司顾问。

Harry K. Utterback 获得盖茨堡大学数学学士学位和约翰·霍普金斯大学计算机科学硕士学位。1999 年,他从约翰·霍普金斯大学应用物理实验室退休,结束了 30 年的职业生涯。他主要从事各种航天器和地面控制系统的实时嵌入软件系统设计与实现。最近,他专注于软件质量保证领域研究。1997~1999 年,Utterback 在怀廷工程学院的工程进修专业计划中讲授各种计算机科学与软件工程课程。

目 录

译者序

前言

原书编写人员简介

第 1 章 空间系统工程与管理	1
1.1 引言	1
1.2 系统工程基础	1
1.3 系统工程中的概念	4
1.3.1 功能分析	4
1.3.2 验证与确认	4
1.3.3 技术成熟度	5
1.3.4 质量裕量	5
1.3.5 收益分析	6
1.4 项目开发流程	7
1.5 航天系统开发管理	12
1.5.1 系统工程管理计划	13
1.5.2 项目评审	14
1.5.3 接口控制文档	17
1.5.4 配置管理	19
1.5.5 工作定义和工作分解结构	20
1.5.6 任务调度	24
1.5.7 成本估计	31
1.5.8 挣值管理	33
1.5.9 风险管理	34
1.6 组织	36
1.7 习题	38
参考文献	42
第 2 章 空间环境	43
2.1 地球空间环境	43
2.2 引力	44

2.3 大气层	46
2.3.1 高度特性	46
2.3.2 热成层和外大气层的变化	50
2.4 电离层	53
2.4.1 电离	54
2.4.2 等离子体频率	59
2.4.3 德拜长度	61
2.4.4 航天器带电	64
2.4.5 撞击-尾流效应	65
2.5 磁层	65
2.5.1 地球内部磁场	65
2.5.2 太阳风的影响	68
2.5.3 带电粒子在偶极子磁场的运动	69
2.5.4 磁层的分区	78
2.5.5 磁暴和亚磁暴	84
2.6 辐射	85
2.7 行星际介质	87
2.8 习题	87
参考文献	89
第3章 航天动力学	92
3.1 引言	92
3.2 动力学原理	93
3.3 中心引力作用下的二体运动	98
3.3.1 运动方程	98
3.3.2 二体中心引力问题的解	100
3.3.3 圆轨道	104
3.3.4 椭圆轨道	105
3.3.5 抛物线轨道	108
3.3.6 双曲线轨道	109
3.4 参考坐标系	110
3.4.1 基本原理	110
3.4.2 国际天球参考系	112
3.4.3 国际地球参考系统	113
3.4.4 IERS 地球指向参数	113

3.4.5 轨道根数	115
3.5 时间系统	116
3.5.1 儒略历	117
3.5.2 格利高里日历	118
3.5.3 国际原子时	118
3.5.4 力学时	118
3.5.5 坐标时	119
3.5.6 恒星时	119
3.5.7 世界时	120
3.5.8 世界协调时	122
3.5.9 全球定位系统时间	122
3.6 轨道摄动理论基础	123
3.6.1 拉格朗日行星方程	124
3.6.2 Euler-Hill 方程	125
3.7 轨道摄动	126
3.7.1 质量非均匀分布	126
3.7.2 太阳和月球	129
3.7.3 地球固体潮	129
3.7.4 大气阻力	130
3.7.5 辐射压力	135
3.8 定轨	135
3.8.1 两行轨道根数	137
3.8.2 全球定位系统	138
3.9 航天器覆盖率	139
3.9.1 覆盖公式	139
3.9.2 仰角和方位角指向	140
3.9.3 多普勒频移	141
3.9.4 典型轨道特性	141
3.10 行星际轨道	143
3.10.1 引力助推	143
3.10.2 圆锥曲线拼接	144
3.10.3 气动制动	145
3.10.4 拉格朗日平动点	146
3.11 习题	147

参考文献	151
第4章 航天器推进、发射系统和发射力学	154
4.1 简介	154
4.2 火箭推进的基本方程	154
4.3 热力学关系	158
4.4 喷管	166
4.5 无外力作用下的火箭运动	167
4.6 重力作用下的火箭运动	172
4.7 发射飞行力学	175
4.7.1 简介	175
4.7.2 重力转向轨迹	176
4.7.3 上升进入轨道	179
4.7.4 发射场	179
4.7.5 发射窗口	181
4.8 轨道转移	181
4.8.1 简介	181
4.8.2 拉格朗日行星方程	182
4.8.3 霍曼转移	183
4.8.4 双椭圆轨道转移	185
4.8.5 选择性轨道变换	185
4.9 固体推进系统	186
4.9.1 简介	186
4.9.2 发动机壳体	187
4.9.3 绝热层	187
4.9.4 推进剂	188
4.9.5 点火器	191
4.9.6 喷管	191
4.9.7 推力矢量控制	192
4.10 液体推进系统	194
4.10.1 简介	194
4.10.2 推进剂	195
4.10.3 推进剂流量控制	198
4.10.4 喷注器	198
4.10.5 点火器	199

4.10.6 推力室	199
4.10.7 推力控制	200
4.10.8 举例	200
4.11 冷气系统	204
4.12 固液混合火箭	204
4.13 电推进系统	205
4.13.1 简述	205
4.13.2 电热推进	206
4.13.3 静电推进(离子推进)	207
4.13.4 电磁推力器	208
4.14 其他推进系统	209
4.14.1 核能	209
4.14.2 太阳帆	210
4.15 推进系统估算	210
4.16 习题	212
第5章 航天器姿态确定与控制	216
5.1 简介	216
5.2 姿态描述	217
5.2.1 右手正交坐标系	218
5.2.2 正交变换	220
5.2.3 旋转矩阵	223
5.2.4 欧拉角	225
5.2.5 四元数	228
5.2.6 更多参考资料	230
5.3 姿态运动学	230
5.3.1 运动坐标系的变化率	230
5.3.2 方向余弦矩阵的运动学公式	232
5.3.3 欧拉角描述的运动学公式	233
5.3.4 运动学公式(四元数)	234
5.3.5 更多参考资料	234
5.4 姿态测量	235
5.4.1 磁强计	235
5.4.2 太阳敏感器	236
5.4.3 地球地平线敏感器(地平仪)	238

5.4.4	星敏感器	241
5.4.5	陀螺仪	242
5.4.6	航天器敏感器配置	243
5.4.7	更多参考资料	244
5.5	姿态估计	245
5.5.1	确定性三轴姿态确定	245
5.5.2	最优三轴姿态确定	246
5.5.3	Newton-Raphson 方法	247
5.5.4	旋转轴的姿态确定	248
5.5.5	卡尔曼滤波	249
5.5.6	更多参考资料	250
5.6	姿态动力学	250
5.6.1	角动量和欧拉方程	250
5.6.2	刚体的无力矩运动	253
5.6.3	对称航天器的详细姿态运动	254
5.6.4	航天器力矩	256
5.6.5	磁力矩	256
5.6.6	重力梯度力矩	257
5.6.7	气动力矩	258
5.6.8	太阳辐射力矩	260
5.6.9	姿态仿真	261
5.6.10	更多参考资料	262
5.7	姿态执行器	262
5.7.1	动量轮和反作用飞轮	262
5.7.2	磁力矩器	263
5.7.3	推力器	263
5.7.4	章动阻尼器	264
5.7.5	溜溜球消旋	265
5.7.6	更多参考资料	266
5.8	姿态控制	266
5.8.1	反作用控制	266
5.8.2	磁力控制	270
5.8.3	自旋稳定	272
5.8.4	重力梯度稳定	273

5.8.5 重力梯度稳定和自旋稳定的组合	276
5.8.6 章动阻尼	276
5.8.7 标准姿态控制系统	276
5.8.8 振动	277
5.8.9 更多参考资料	277
5.9 实际航天器任务	278
5.9.1 磁场卫星(Magsat)	278
5.9.2 TIMED 航天器	284
5.9.3 彗核之旅航天器	286
5.9.4 更多参考文献	288
5.10 习题	289
参考文献	293
第6章 航天器电源系统	297
6.1 简介	297
6.2 空间环境	297
6.2.1 太阳能	297
6.2.2 地球的辐射环境	298
6.3 轨道因素	298
6.3.1 地心赤道坐标系	298
6.3.2 航天器位置	299
6.3.3 太阳位置	300
6.3.4 轨道、地影区和光照周期	300
6.3.5 太阳能电池阵分析	302
6.4 能源	304
6.4.1 能源类型	304
6.4.2 放射性同位素温差发电器	306
6.4.3 太阳能电池	309
6.5 太阳电池阵	327
6.5.1 阵列结构	327
6.5.2 串并联效应	329
6.5.3 磁场的相关注意事项	332
6.6 储能装置	333
6.6.1 电化学电池	333
6.6.2 航天器电池组	336