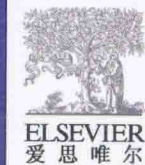




装备科技译著出版基金



张世杰 赵亚飞 王 峰 苏 杭 译

曹喜滨 主审

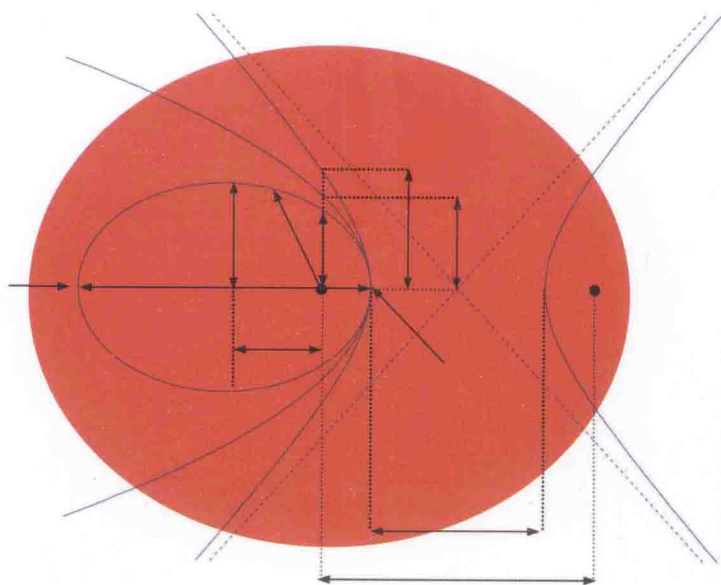
航天器编队飞行： 动力学、控制与导航

Spacecraft Formation Flying:
Dynamics, Control and Navigation

[美] Kyle T. Alfriend Srinivas R. Vadali [以] Pini Gurfil

[美] Jonathan P. How Louis S. Breger

著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

航天器编队飞行： 动力学、控制与导航

**Spacecraft Formation Flying:
Dynamics, Control and Navigation**

[美] Kyle T. Alfriend Srinivas R. Vadali [以] Pini Gurfil

[美] Jonathan P. How Louis S. Breger 著

张世杰 赵亚飞 王峰 苏杭 译

曹喜滨 主审

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2012-098号

图书在版编目(CIP)数据

航天器编队飞行:动力学、控制与导航/(美)阿尔弗林德(Alfriend, K. T.)等著;张世杰等译. —北京:国防工业出版社, 2015. 1

书名原文:Spacecraft formation flying: dynamics, control and navigation

ISBN 978-7-118-09435-0

I. ①航… II. ①阿… ②张… III. ①航天器-编队飞行 IV. ①V448.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第259612号

This edition of Spacecraft Formation Flying: Dynamics, Control and Navigation by Kyle T. Alfriend, Srinivas R. Vadali, Pini Gurfil, Jonathan P. How, Louis S. Breger is published by arrangement with ELSEVIER LIMITED of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK

Original ISBN: 9780750685337

Copyright © 2010 by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Simplified Chinese Edition copyright © 2014 by National Defense Industry Press. All Rights Reserved.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 ELSEVIER LIMITED 授权国防工业出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

版权所有,侵权必究。

※

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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18½ 字数 445 千字

2015年1月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 78.00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

献 辞

谨以此书献给我的妻子及多年挚友——Bonnie Alfriend, 没有她的支持和鼓励, 就没有书中的那些研究工作。同时, 也献给我的两个儿子——Kyle 和 Kim, 四个孙子——Brandon, Travis, Tyler 和 Erick, 是他们让我的生活变得丰富多彩。

Kyle T. Alfriend

向我的妻子 Sharada 致谢, 感谢她始终如一的爱; 向我的父母 Venkat Rao 和 Sita 致敬, 感谢他们的引导; 感谢 Vivek 和 Meera 的鼓励。

Srinivas R. Vadali

感谢我的妻子 Michal 的一路相伴, 感谢我的父母 Arie 和 Sara 的智慧启迪, 感谢我的儿子 Eytam 和 Oshri - Yahel, 使我的生活更有意义。

Pini Gurfil

感谢我的妻子 Carolyn 和女儿 Amelia。

Jonathan P. How

向我的家人、朋友和同事们致谢, 正是你们的支持、建议和耐心使成书的过程如此有趣。

Louis S. Breger

作者简介

Kyle T. Alfriend 博士, 现任得克萨斯农工大学航空航天工程系工程试验站特聘研究讲座教授(曾于1997年至2000年期间担任该部门主管), 美国海军研究生院客座教授, 美国国家工程院院士, 美国天文学会和美国航空航天学会会士, 国际宇航科学院院士, *AAS Journal of the Astronautical Sciences* 杂志编委和 *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics* 杂志主编, 美国空军大学监事会成员。曾获美国天文学会德克·布劳尔奖和美国航空航天学会飞行力学与控制奖, 受邀在2008以色列宇航科学会议上做冯·卡门大会报告, 2005年同其他六位来自美国和俄罗斯的学者共同获得美国科学促进会的国际科学合作奖项。Alfriend 在弗吉尼亚理工大学机械工程获学士与博士学位, 在斯坦福大学应用力学专业获硕士学位, 其主要研究方向包括空间监测、天体动力学、卫星姿态动力学与控制以及航天器设计等。

Srinivas R. Vadali 博士, 自1986年以来一直在得克萨斯农工大学任职, 现为航空航天工程系 S&S 基金荣誉教授, 1983年至1985年期间任职于爱荷华州立大学; Vadali 博士本科毕业于印度桑巴普尔大学机械工程专业, 硕士毕业于印度科学学院航空工程系, 博士毕业于弗吉尼亚理工大机械工程系; 现为美国天文学会会士和美国航空航天学会副会士, *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics* 杂志编委。

Pini Gurfil 博士, 以色列理工学院航空工程系副教授。2000年博士毕业于以色列理工学院航空工程系, 2000年至2003年在普林斯顿力学和航空工程系做访问学者, 2003年9月起开始任职于以色列理工学院航空工程系, 并组建分布式空间系统实验室。Gurfil 博士主要从事天体动力学、分布式空间系统、视觉导航与优化等方向研究工作, 在相关领域发表期刊和会议文章140余篇, 任《爱思唯尔天体动力学系列丛书》主编, 现为 *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics* 等四个学术杂志编委, 美国航空航天学会导航、制导与控制技术委员会和美国天文学会飞行力学技术委员会成员, 美国天文学会副会士, 美国科学研究协会会员, 天文动力学分会联席会员。

Jonathan P. How 博士, 麻省理工学院航空航天工程系教授(2003年获终身教职, 2007年提升为正教授)。1987年本科毕业于多伦多大学, 1990年和1993年分获麻省理工学院航空航天工程系硕士和博士学位, 随后两年在麻省理工学院做博士后, 主要从事舱内主动控制试验(MACE)工作, 该技术于1995年在奋进号航天飞机上进行在轨飞行试验, 在2000年加入麻省理工学院之前曾为斯坦福大学航空航天系助理教授。麻省理工学院和斯坦福大学任教期间, 在GPS导航、多飞行器规划以及鲁棒/混杂控制等方向指导毕业28名博士, 发表期刊论文59篇, 会议文章200余篇。当前, 主要研究方向包括: (1) 动态未知环境下多自主飞行器协同的分布式鲁棒规划算法设计与应用; (2) 航天器导航、控制与自主技术, 包括面向编队飞行航天器的GPS测量技术等; (3) 面向自主敏捷飞行和特技飞行的自适应飞行控制技术。How 教授是麻省理工学院 DARPA 城市挑战赛团队的发起人和领队, 曾带领团队在加利福尼亚维克多维尔举行的比赛中取得第四名。2002年度航海学院博克奖获得者, 2008年度波音特殊发明奖获得者,

麻省理工学院航空航天系雷蒙德·L·比斯普灵霍夫会员,美国航空航天学会副会士,国际电气工程师协会高级会员。

Louis S. Breger 博士,麻省剑桥查理斯·斯塔克·德雷帕实验室航天器控制系统和导航技术工程师,专注于编队飞行和交会操作等技术,在麻省理工学院先后获得学士、硕士与博士学位,本书合作者之一。

译者序

自1957年人类发射第一颗人造地球卫星以来,航天技术经过50余年的快速发展,已广泛应用于国民经济和社会发展的各个领域,给人类日常生活带来了重大影响和巨大经济效益。随着航天器功能和性能的逐步提升,综合型航天器平台尺寸和重量不断增大,研制成本与发射费用巨增,任务风险也随之显著增加。20世纪90年代以来,现代工业技术日新月异,尤其是大规模集成电路、微机电系统等技术的成熟与应用,促进了微小型航天器技术的迅猛发展。由于微小型航天器所具有的低成本、灵活性、快速性等优势,使其日益成为大型航天器的有益补充,广泛应用于新技术验证、科学研究、专业教育等领域。

受体积、重量等限制,微小型航天器功能相对单一,因此需要由多颗微小型航天器通过彼此协同工作以最大限度地扩展空间系统功能,提高其空间利用效率和系统可靠性,降低系统的研制和维护成本。航天器编队是20世纪90年代随着微小型航天器技术发展而提出的一类分布式空间系统,一般是由一组空间分布的微小型航天器相互绕飞组成,编队中各航天器通过信息交互和协同工作构成一颗虚拟航天器。与传统航天器相比,航天器编队在功能和性能上得以显著提升,并且具有系统应用的灵活性和在轨可维护性,甚至能够完成大型航天器难以完成的空间任务,成为微小型航天器最佳的空间应用模式。

近距离协同工作是航天器编队飞行的基本特征,而编队航天器间保持特定的几何构形和相对运动关系是近距离协同的基本条件,但航天器轨道动力学特性决定了其相互关系是时变的,摄动因素的存在又导致了这种变化的不确定性,有必要设计长期自然有界的编队构型以降低在轨运行的燃料消耗。另一方面,航天器编队技术优势的发挥程度,极大地依赖于编队中航天器间相对状态信息确定和控制性能,高精度协同控制是保证整个航天器编队正常工作的必要前提。因此,航天器编队动力学建模与分析、精确相对状态测量和高精度协同控制等是实现航天器编队任务的关键问题之一,自航天器编队概念提出以来,相关问题研究一直是国际航天领域研究的热点和难点,极大地拓展了航天器动力学与控制的研究范畴。

原书作者是最早开始并长期开展航天器编队技术研究的知名学者。书中汇集了作者近20年的研究成果,内容涵盖了航天器编队飞行概念、基本原理、动力学建模与分析,以及相对测量与控制等,是一本理论系统、体系完善且构架清晰的航天专著。同时,作者采用科普方式组织全书,以通俗易懂的语言阐述复杂的理论问题,还给出了大量实例,有助于读者学习与理解。

由于科研和教学的需要,原著出版后不久译者就系统阅读了本书,对航天器编队动力学与控制问题及其技术发展有了更全面的了解。尤其是译者同天体动力学系列图书主编、本书作者之一——Pini Gurfil教授围绕本书核心内容和理论开展了多年的学术交流,还联合培养研究生,对本书有了更深的理解。为方便国内读者使用,我们在装备科技译著出版基金的支持下对本书进行了翻译。本书可作为高校航空航天专业高年级本科生和研究生的教材,也可供相关领域的教师和工程技术人员参考。

在本书的翻译过程中,除署名译者外,邢艳军、施梨、郭海波、唐生勇、张浩成、斯朝铭、邵健、

王雪峰等也参加了部分章节的翻译,曹喜滨教授、孙兆伟教授对全书进行了审核校对,在此一并表示衷心的感谢。

感谢装备科技译著出版基金对本译著的支持,感谢国防工业出版社等单位在本书翻译和出版过程中给予的大力支持。

译者力求忠实于原文,但由于时间仓促及译者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者不吝指正。

译 者

2014年10月于哈尔滨

序 言

本书全面论述了航天器编队动力学与控制领域的相关问题,填补了该领域的空白。本书作者是航天器编队技术领域的权威学者,他们充分发挥在本领域研究的领先优势,总结已有研究成果,完成了这本权威性论著。本书内容包含了编队飞行领域的最新研究成果,对于相关领域学者、政府及工业部门专家等均有重要的参考价值。本书重点针对近地轨道航天器编队,详细讨论了考虑航天器姿态和轨道相对运动的编队动力学建模、控制和导航等相关问题。作为天体力学、导航、制导和控制理论的重要分支,航天器编队相关技术面临诸多特殊问题,亟须有一本书专门对其加以系统阐述。本书很好地满足了上述需求,各章节内容分述如下。

第1章是绪论,定义了多种典型的编队形式:轨道跟踪式、主从式、虚拟结构式以及集群式,同时考虑了造成燃料消耗的几种因素,包括大气阻力与构型保持等。

第2章对天体力学作了详细介绍,分别考虑了无摄动(开普勒)运动以及参数变分法等,摄动源主要考虑地球扁率的带谐项。

第3章介绍了力学、优化理论、控制以及估计理论的基础知识,推导了建立运动方程的广义拉格朗日-哈密顿公式,讨论了李雅普诺夫稳定理论及其在稳定控制律设计中的应用,同时给出了卡尔曼滤波理论的最新研究成果,重点讨论了无迹滤波器的几种可选形式,用于解决协方差矩阵固定的估计算法的关键问题,以考虑测量更新间误差传播的非线性特性。

第4章和第5章推导了航天器相对运动的非线性和线性化动力学模型,着重讨论了合理的坐标系选取与地球扁率摄动。第5章还推导了用于状态估计与控制问题的几类相对运动状态转移矩阵。

第6~8章重点研究了由轨道根数描述的相对运动动力学模型以及如何消除扰动的影响。第6章重点研究了利用时间序列展开的短期运动分析方法,第7章则利用经典摄动理论的一般形式研究了 J_2 摄动相对运动的解,第8章引入了分析 J_2 摄动相对运动的其他方法,包括合理的初始条件选择、最优燃料消耗以及燃料平衡等技术。

第9章讨论了考虑航天器相对姿态与轨道耦合而涉及的问题。

第10章讨论了航天编队控制的几方面问题,包括均值法控制、基于参数变分的脉冲控制以及有助于理解的其他特例。

第11章给出了脉冲控制指令的实现形式。

第12章主要讨论相对状态测量模型及多种导航算法的卡尔曼滤波实现,并给出了几个实例。

第13章研究了航天器编队飞行高精度仿真的实现方法,并给出了示例结果。

第14章是结论和展望。

考虑具有轨道动力学与控制背景的高年级本科生的接受程度,作者对内容深度做了精心安排,使之可有效地应用于任务分析或设计。抽象程度为中等水平,经常用到物理和几何推理以助于理论结果的推导和理解。书中涉及的专业问题,如轨道摄动理论、卡尔曼滤波与控制理论

以及经典力学等,可以阅读相关经典著作以及最近的文献。本书特色在于本领域顶尖专家对航天器编队动力学、导航与控制技术进行了权威而系统的阐述。本人非常荣幸向广大读者推荐此书。

John L. Junkins
得克萨斯农工大学

前 言

本书是《爱思唯尔天体动力学系列丛书》的第Ⅱ卷,重点介绍航天器编队飞行。与第Ⅰ卷《现代天体动力学》不同,本卷更像是一部教材。

航天器编队飞行是一个很宽泛的课题,可以从诸多不同角度对其进行研究。本书从天体力学的角度,重点研究地球轨道上的航天器编队飞行任务的建模、控制与导航的相关理论,其中绝大部分为近地轨道任务。书中不涉及深空轨道或拉格朗日点轨道的编队飞行,该部分内容可独立成书。

本书详细阐述了摄动和非摄动情况下的航天器相对运动,讨论了基于正则化相对卫星动力学模型,采用脉冲和连续推力控制的主要相对控制方法,并给出了相对导航所需的主要技术。本书同时讨论了航天器相对姿态动力学,探讨了相对轨道和姿态动力学之间的耦合影响。

本书可作为相关领域研究生或研究人员的教材,也可供分布式空间系统课程讲师、航天与机械师、数学家、天文学家以及天体物理学家等参考。本书读者需要具备基本的天体力学、姿态动力学和控制理论等知识。为使本书内容更完整,还安排了轨道力学、摄动理论、控制及估计等导论章节。各章后还设有实例,并给出了涉及高精度建模、控制及相对导航等内容的航天器编队任务仿真实例。

常用符号及专业术语

要研究航天器或卫星间的相对运动,需要定义相关的坐标系和常用的符号术语。通常,定义编队中某个航天器为主航天器,其他的称为从航天器。也可将其中一颗定义为领航星,其他的为跟随星。主从式的概念更为宽泛,在此概念下编队航天器运动是相对于某一个潜在的虚拟航天器,也就是相对于某个参考点或某条参考轨道。而领航/跟随星更专门针对于前后跟随运动、特定编队控制或导航问题。在轨道交会情况下,一般称其中一颗为目标航天器,另一颗为追踪航天器。通常情况下主航天器只有一个,而从航天器可以有多个。通常主航天器/领航星/目标航天器表示为 $(\cdot)_0$,而从航天器/跟随星/追踪航天器表示为 $(\cdot)_1$ 。

但也有例外,例如,我们定义初始时刻为 t_0 ,则主航天器在初始时刻的平近点角为 $(M_0)_0$ 。我们时常假设 $t_0=0$,而某些时变向量 $w(t)$ 的初始值表示为 $w(0)$ 。在讨论到单颗航天器的相关问题时,如在第2章中, $(M_0)_0$ 可简化为 M_0 ,但在后续处理多航天器的章节中, M_0 表示主星的平近点角。在某些相对运动变量的公式描述中,这些变量为主星轨道要素的函数,为简化,往往省略下标“0”。另一种例外是摄动变量。例如, \mathcal{H}_0 和 \mathcal{H}_1 分别表示零阶和一阶哈密顿函数。

全书中,若在坐标系 \mathcal{B} 中描述一个向量 w ,则记为 $[w]_{\mathcal{B}}$ 。这种记法只有当同时涉及到几个不同坐标系时才会使用,在没有歧义时,会省略该下标。除非特殊声明,向量都默认为列向量,且向量 w 在坐标系 \mathcal{B} 中的时间导数记为 $d^{\mathcal{B}}w/dt$ 。

用 $\|w\|_p$ 表示向量 w 的 p 范数,且默认 $\|w\| \equiv \|w\|_2$,也就是欧几里得范数。

我们用书法字体来表示与能量相关的量,例如,用 \mathcal{E} 表示能量, \mathcal{H} 表示哈密顿函数。同时

书法字体也用来表示代价函数。对于原点在航天器质心的坐标系,通常用径向、航向和法向来区分位置矢量和分量。

依赖上下文, \bar{x} 表示无量纲化(归一化)的 x , \bar{x}' 表示 \bar{x} 对无量纲变量求微分;另外, $\bar{\alpha}$ 表示轨道根数 α 的平均值,即平均轨道根数,例如, \bar{e} 表示瞬时轨道偏心率 e 的平均值。

下面是书中用到的缩略词:

BL	Baseline	基线
CDGPS	Carrier - Phase Differential GPS	载波相位差分 GPS
CLF	Control Lyapunov Function	控制李雅普诺夫函数
CM	Center - of - Mass	质心
CRD	Cartesian Rectangular Dextral	笛卡儿右旋坐标系
CW	Clohessy - Wiltshire	科洛赫西 - 威尔特方程
DCM	Directional Cosines Matrix	方向余弦矩阵
DLQR	Discrete - Time Linear Quadratic Regulator	离散时间线性二次型调节器
DOF	Degrees - of - Freedom	自由度
ECEF	Earth - Centered, Earth - Fixed	地心固联坐标系
ECI	Earth - Centered Inertial	地球中心惯性的
EKF	Extended Kalman Filter	扩展卡尔曼滤波
GA	Gim - Alfriend	吉姆 - 阿尔弗林德
GCO	General Circular Orbit	一般圆轨道
GM	Geometric Method	几何法
GVE	Gauss' Variational Equations	高斯变分方程
IC	Initial Condition	初始条件
KF	Kalman Filter	卡尔曼滤波
LCJ	Lee - Cochran - Jo	李 - 科克伦 - 赵
LON	Line - of - Nodes	节线
LP	Linear Programming	线性规划
LPE	Lagrange's Planetary Equations	拉格朗日行星方程
LQR	Linear Quadratic Regulator	线性二次型调节器
LTI	Linear Time - Invariant	线性时不变
LVLH	Local - Vertical, Local - Horizontal	当地垂直水平坐标系
MPC	Model Predictive Control	模型预测控制
PCO	Projected Circular Orbit	投影圆轨道
RAAN	Right Ascension of the Ascending Node	升交点赤经
RHS	Right - Hand Side	右端
STM	State Transition Matrix	状态转移矩阵
TH	Tschauner - Hempel	乔纳 - 亨佩尔
UKF	Unscented Kalman Filter	无迹卡尔曼滤波
YA	Yamanaka - Ankersen	山中伸弥 - 安克森

本书的内容安排

本书内容完整、自成体系,适合教学使用。全书共分为 14 章。第 1 章是绪论,主要阐述航天器编队飞行相关的基本问题、观点和方法。第 2 章主要介绍与轨道力学相关的符号和术语,并简要介绍了主要坐标系和开普勒二体问题。第 3 章覆盖了力学、优化、控制和估计等多个不同主题,包括拉格朗日和哈密顿力学、静态优化、反馈控制以及滤波方法。上述内容都是推导航航天器相对控制、测量和导航的必要基础。第 1~3 章均为导论,是本书的第一部分,为后续构建航天器编队飞行分析、设计的方法与工具等奠定基础。

第 4~6 章是本书的第二部分,构建了航天器相对运动动力学模型。其中,第 4 章给出了几种常用的摄动和非摄动相对运动非线性模型;第 5 章给出了二体假下相对运动的线性微分方程,重点讨论了相对运动的物理坐标描述;第 6 章基于轨道根数建立了相对运动模型,并用轨道根数作为运动常量对其进行了改进。第 7 章是第 6 章的延续,用另外的方法建立了考虑轨道摄动的相对运动模型,而第 8 章则主要研究了如何降低摄动对相对运动的影响。第 9 章着重介绍了转动和平动的耦合,并给出了运动学耦合情况下的相对运动方程。

第 10 章和第 11 章是本书的第三部分,重点介绍编队的控制和应用。第 10 章讨论了编队建立、队形保持与队形重构过程中的连续控制和脉冲控制方法。第 11 章介绍了加速度施加误差对航天器编队飞行或交会对接控制性能的影响,并探讨了利用加速度计精确测量实际机动加速度,并据此提升系统性能的可行方法。

第 12 章和第 13 章主要介绍编队过程中的相对导航及高精度仿真。第 12 章讨论了不同的估计算法在相对轨道确定中的应用。第 13 章针对前述的问题,给出了一系列非线性仿真。

第 14 章是展望,提出了一个很关键的问题:既然编队飞行有如此多的优点,为什么目前没有编队的在轨飞行?

致谢

如何在极低的燃料消耗状态下长期保持多颗低轨小卫星的近距离运行,是美国空军研究实验室提出 TechSat-21 项目时面临的重大难题,该问题成为研究编队飞行摄动抑制、控制和相对导航等技术的主要推动力。TechSat-21 项目是首个使处于不同倾角轨道的多颗卫星长期近距离运行的空间任务。在此期间,也产生了大量科技文献,包括百余篇的论文和博士学位论文。提出了很多解决方案,如编队维持、燃料平衡以及相对导航等,直接或间接地用于解决 TechSat-21 任务的技术难题。

本书作者受到美国空军科学研究所、美国空军研究实验室、美国国家航空航天局哥达德航天飞行中心、伽利略系统监管机构、欧洲第六框架项目、以色列科技部、以色列亚瑟空间技术研究院、以色列古特维特科技创新促进基金、罗森塔尔空间研究基金、美国科学基金会研究生奖学金项目、美国航空航天局项目(NAG3-2839, NAG5-10440, NAG5-11349, NCC5-704, NCC5-729),以及由美国工程教育学会和三菱电气公司联合管理的国防科技研究生奖学金项目等机构和项目的资助,在此表示感谢。

感谢阿洛克·戴斯(AFRL)、马克·雅可布(AFOSR)、杰西·莱特纳(GSFC)、罗素·卡本特(GSFC)以及理查德·伯恩斯(GSFC)等人,同时也对以下各人表示感谢:约翰·L·琼金斯、奥利弗·门斯布吕克、塞沙·S·瓦迪、杜赞奇·沙鲁巴、严辉、汉斯佩特·斯查布、达里奥·伊

佐、马克·萨巴蒂尼、金东佑、杰里米·卡斯丁、大卫·米什内、康士坦丁·V·切尔尼赫、薛·西格尔以及艾格曼·克尔蒙等,没有他们的无私帮助就没有本书。

特别感谢马修·杰弗瑞对第 11 章、梅根·米切尔对第 12 章所做的工作,同时感谢刘金为本书整理了附录。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天器编队飞行的概念	1
1.2 协同方法	1
1.2.1 轨道跟踪方法	1
1.2.2 领航跟随法	2
1.2.3 虚拟结构法	2
1.2.4 蜂拥控制方法	2
1.3 燃料消耗因素	2
1.3.1 任务需求	2
1.3.2 初始条件	2
1.3.3 导航不确定性	3
1.3.4 大气阻力	3
1.3.5 推力误差	3
1.3.6 动态过程噪声	3
1.4 编队飞行控制	3
1.5 控制方法综述	4
1.5.1 状态转移逆矩阵	4
1.5.2 脉冲控制	4
1.5.3 连续线性控制	5
1.5.4 非线性控制	5
1.5.5 模型预测控制	5
1.6 空间导航与全球定位系统	5
1.7 编队飞行任务	6
第 2 章 航天器轨道动力学基础	8
2.1 坐标系	8
2.2 开普勒二体问题	10
2.3 惯性运动方程的求解	15
2.4 非奇异轨道要素	17
2.5 非开普勒运动与轨道摄动	18
2.5.1 常数变易法	19
2.5.2 拉格朗日行星方程	20
2.5.3 带谐函数	22
2.5.4 高斯变分方程	23

2.6	均值理论	24
	本章小结	26
第3章	分析力学、优化、控制和估计基础	27
3.1	拉格朗日和哈密顿力学	27
3.2	德洛内根数	28
3.3	正则变换	29
3.4	布劳威尔理论	30
3.4.1	瞬时轨道根数到平均轨道根数的迭代算法	31
3.5	约束静态优化	32
3.6	控制李雅普诺夫函数	33
3.7	线性二次调解	33
3.8	卡尔曼滤波	34
3.9	无迹卡尔曼滤波	36
3.9.1	标准 UKF 滤波方法	36
3.9.2	UKF 方法的加式形式	37
3.9.3	平方根形式的 UKF 算法	38
	本章小结	39
第4章	非线性相对动力学模型	40
4.1	非摄动情况下的相对运动方程	41
4.2	能量匹配条件	44
4.3	脉冲式编队保持	46
4.4	最优编队保持的另一种观点	50
4.5	主星圆形轨道	51
4.6	拉格朗日函数与哈密顿函数	53
4.7	考虑 J_2 摄动的相对运动方程	54
4.7.1	\mathcal{L} 系下的相对运动状态	55
4.7.2	\mathcal{F} 系和 \mathcal{L} 系之间的坐标系转换	56
4.7.3	初始条件	56
	本章小结	56
第5章	线性化相对运动方程	57
5.1	CW 方程	57
5.2	线性双脉冲交会	63
5.3	拉格朗日函数和哈密顿函数形式的 CW 方程	67
5.4	二阶非线性下的轨道运动	68
5.5	曲线坐标系与笛卡儿相对坐标系	69
5.6	椭圆参考轨道	73
5.6.1	以时间作为独立变量: 麦尔登状态转移矩阵	73
5.6.2	劳顿方程和乔纳-亨佩尔方程	74
5.6.3	卡特状态转移矩阵	75
5.6.4	山中-安克森状态转移矩阵	77

5.6.5	布鲁克状态转移矩阵	78
5.6.6	李-科克伦-乔状态转移矩阵	79
5.6.7	纳扎伦科状态转移矩阵	79
5.6.8	长期漂移项消除的初始条件选取方法	80
5.7	相对运动方程的周期解	83
	本章小结	86
第6章	基于轨道根数的相对运动模型	87
6.1	非线性相对运动方程的一般解	87
6.2	相对距离的最大与最小界限	90
6.2.1	轨道角速度不相等的情况	90
6.2.2	轨道角速度相等的情况	91
6.3	圆形—赤道参考轨道时的相对运动近似表达式	91
6.3.1	高阶时域展开式的近似表达式	93
6.3.2	二阶近似	94
6.3.3	一阶近似解:希尔解	95
6.4	投影圆轨道初始约束条件	97
6.5	无摄动圆轨道下具有非线性补偿的混合微分方程	98
	本章小结	101
第7章	基于轨道根数的摄动相对运动模型	102
7.1	单位球法	102
7.2	相对运动的四元数描述	105
7.3	吉姆-阿尔弗兰德几何方法	107
7.3.1	重新考察 J_2 摄动项的影响	107
7.3.2	几何法	109
7.4	平均相对运动	120
7.5	圆形参考轨道 J_2 微分方程的线性化	121
7.5.1	模型的建立	122
7.5.2	短周期项的影响	123
7.5.3	线性模型	123
7.6	吉姆-阿尔弗兰德状态转移矩阵对应的微分方程组	127
7.7	二阶状态递推模型	129
	本章小结	131
第8章	摄动抑制	133
8.1	减小 J_2 摄动的动态约束	133
8.1.1	三个约束条件	135
8.1.2	两个约束条件	136
8.1.3	一个约束条件	139
8.1.4	能量方面的考虑	139
8.1.5	数学仿真结果	140
8.2	一种基于轨道根数的非线性理论	143