

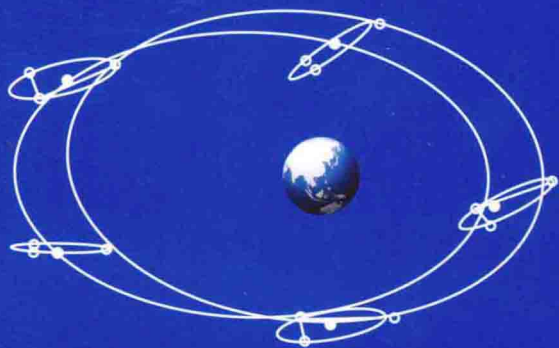


空天科学与工程系列教材·飞行动力学与控制

航天器 编队飞行导论

Introduction to Spacecraft
Formation Flying

孟云鹤 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航天器编队飞行导论

Introduction to Spacecraft Formation Flying

孟云鹤 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

航天器编队飞行是20世纪90年代中后期随着小卫星技术的发展而出现的、研究多航天器临近飞行并协同工作的一门新技术,是一种代表未来航天器发展趋势的技术。

本书主要内容分为基础篇与前沿篇。基础篇以运行于二体轨道且相互间不存在力作用的航天器编队为对象,介绍编队飞行的动力学方程、构形设计方法与摄动分析、相对测量原理、多冲量的相对运动控制方法,以及应用于InSAR系统的优化设计与协同控制方法;前沿篇介绍一些“拓展的”编队概念,如限制性三体轨道区域的航天器编队、航天器间相互存在力作用的航天器编队(包括绳系卫星、电磁力编队、库仑力编队等)、环境作用力形成的编队(如洛伦兹力编队),以及多种作用力的复合编队概念(如光子绳系编队、库仑力-洛伦兹力编队)等。

本书可作为高等院校相关专业高年级本科生及研究生的教学参考书,亦可供航天器研究、设计专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航天器编队飞行导论/孟云鹤编著. —北京:国防工业出版社,2014.4

空天科学与工程系列教材. 飞行动力学与控制

ISBN 978-7-118-09381-0

I. ①航... II. ①孟... III. ①航天器—编队飞行—教材 IV. ①V47

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第066595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 18 $\frac{1}{4}$ 字数 353 千字

2014年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 65.00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

总 序

经过五十余年的发展,航空航天技术在经济建设、武器装备、科学研究、日常生活中发挥的作用日益彰显。航天技术的研究具有系统复杂、技术尖端、应用性强、辐射面广等特点,是一个国家综合国力的重要标志,同时也能对国家的科学研究与工业技术发展产生巨大的牵引作用。

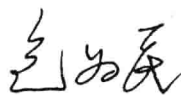
飞行动力学与控制是飞行器设计的核心技术之一。它以经典力学和自动控制理论为基础,研究飞行器在力和力矩作用下的运动与控制规律,以满足飞行任务的要求,与飞行器的工程设计和实际应用有着紧密的关系。飞行器的总体论证与设计、控制系统设计、结构设计、飞行试验与评定、任务规划、运行管理、效能评估等都与飞行动力学与控制密切相关。因此,航空航天领域不仅需要掌握飞行动力学与控制原理的专门人才,相关专业人员掌握一些飞行力学知识也是非常必要。

国防科技大学航天科学与工程学院是我国飞行动力学与控制方面科学研究和知识传承的一个重要基地,早在上世纪五十年代“哈军工”时期就创办了相关专业。程国采、张金槐、任萱、赵汉元、贾沛然、黄圳圭等老一辈学者,积极参与我国重大航天工程领域的研究,学术造诣深厚。为提高学校办学水平,他们注重从科研实践中系统总结,精心提炼,著书立说,惠及后人。20世纪80年代开始,先后出版了《远程火箭弹道学》、《弹道导弹制导方法与最优控制》、《飞行器再入动力学与制导》、《远程火箭精度分析与评估》、《人造地球卫星轨道力学》、《大型航天器动力学与控制》等一系列高水平教材。这些书注重理论联系实际,突出用飞行动力学与控制理论解决工程实际问题,不仅在我国航天教育领域得到广泛应用,而且成为航天部门科研人员的案头参考书。

进入新世纪以来,运载火箭、弹道导弹、近地航天器等传统飞行器的设计与应用逐步成熟,而高超声速飞行器、智能化航天系统、先进深空探测航天器的研究初露端倪。国防科技大学的研究力量一直紧跟这一技术发展趋势,参与和推动着我

国飞行动力学与控制技术的进步。通过对原有教材经典内容的继承和对新科研成果的提炼,推出了这套飞行动力学与控制系列教材。教材涵盖了弹道学、轨道力学、姿态动力学、导航技术、精度分析与评估等飞行动力学与控制的主要内容,在知识的经典性与先进性、理论性与实践性方面做到了较好的统一。

经过几代人的艰苦努力,我国的航天事业已逐渐缩小了与先进国家的差距。未来的发展离不开一大批掌握先进知识与理念的人才,我希望也相信这套教材能在我国航天人才培养和航天工程实践中发挥重要作用。作为我国航天队伍中的一员,我期待看到本系列教材的出版,并乐意为之作序。



2013年8月

前 言

航天器编队飞行技术是 20 世纪 90 年代中后期随着小卫星技术的发展而出现的、研究多航天器临近飞行并协同工作的一门新技术,历经十几年的发展一直是国际研究热点领域,到现在航天器编队飞行概念的内涵与外延仍在不断拓展,可见其生命力之旺盛。

十年前,作者开始接触这一领域的研究工作,初步认识了这一领域的特点与发展潜力;近年间,有幸参与了一些相关的课题研究与课程教学任务,可以从更宽泛的角度来了解和认识这一领域的发展概貌。航天器编队飞行技术是一种代表了航天器未来发展趋势的技术,也是一种正在日新月异发展创新的技术。作者认为该学科领域的研究者若能在“应用基础”与“前沿概念”层面对该技术有一个相对全面的认识,对于以后的学习与研究将大有裨益,因此本书侧重于介绍“应用基础”与“前沿概念”两方面内容。作为“基础”部分,主要以二体轨道且星间不存在相互作用的航天器编队为对象,介绍编队飞行的动力学方程、构形设计方法、摄动分析、相对测量原理、多冲量的相对运动控制方法,以及应用于 InSAR 系统的优化设计与协同控制方法;作为“前沿”部分,作者试图介绍一些“非常规的”航天器编队概念,如参考轨道拓展到限制性三体轨道区域的航天器编队,航天器间存在相互力作用的编队(包括绳系卫星、电磁力编队、库仑力编队等),环境作用力形成的编队(如洛伦兹力编队),以及多种作用力的复合编队概念(如光子绳系编队、库仑力-洛伦兹力编队等)。

本书第 2、3、6~8 章内容主要来自作者与合作者的一些研究工作,第 4 章内容参考了张玉锷、安雪滢两位研究者的研究成果,其余章节内容来自作者对国内外文献资料调研分析的积累,2009~2012 年的选课学生也为此提供了素材。在此,对于相关研究的研究者、合作者,以及参与文献整理的学生一并表示衷心感谢!

本书在撰写过程中得到了国防科学技术大学航天科学与工程学院、空间技术研究所以及研究室各级领导的关心与支持,空天科学与工程系列课程教学团队为本书的编写和出版提供了支持,郑伟教授、闫野教授、黄奕勇教授、安雪滢副教授、

张洪波博士都对本书的修改与提升提出了真知灼见,作者导师戴金海教授年近七旬,冒长沙酷暑通读了全文,并给出了指导性建议,在此一并表示崇高的敬意和诚挚的感谢!另外,还要感谢国防工业出版社各位编辑的辛勤劳动。

航天器编队飞行技术所涉及的理论、技术问题众多,概念拓展迅速,尚处于开放研究阶段,远非一本教材所能涵盖。限于作者的学识水平,不妥之处,敬请读者批评指正!

作者

2013年9月于长沙

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天器编队飞行特点与应用方向	1
1.1.1 航天器的集群化发展趋势	1
1.1.2 航天器编队飞行的特点	2
1.1.3 航天器编队飞行的应用方向	3
1.2 航天器编队飞行的技术基础与概念拓展	4
1.2.1 航天器编队飞行的动力学与控制基础	4
1.2.2 航天器编队飞行的概念拓展	6
1.3 本书内容安排	7
参考文献	8
第 2 章 航天器编队飞行的动力学方程	10
2.1 Clohessy - Wiltshire 方程	10
2.1.1 相对运动动力学方程的建立基础	10
2.1.2 相对运动动力学方程的建立	11
2.1.3 相对运动动力学方程的简化	13
2.1.4 C - W 方程的解集分析	14
2.1.5 基于 C - W 方程的构形设计方法	16
2.1.6 C - W 方程的误差分析	19
2.2 Lawden 与 Tschauner - Hempel 方程	20
2.2.1 T - H 方程的推导	21
2.2.2 Lawden 的推导与分析	23
2.2.3 Lawden 方程的求解	24
2.2.4 Lawden 方程解的周期性条件	25
参考文献	27
第 3 章 近圆轨道航天器编队构形设计与摄动分析	28
3.1 相对运动与构形设计	28
3.1.1 变量定义与前提条件	28

3.1.2	运动学方程的建立	29
3.1.3	运动学方程的一阶近似	29
3.1.4	用轨道根数表达相对运动	30
3.1.5	近圆轨道编队构形的设计步骤	32
3.2	编队构形稳定性分析	32
3.2.1	编队构形稳定性仿真分析	32
3.2.2	编队构形破坏机理分析	36
3.3	三轴振动同步的构形设计方法	38
3.3.1	三轴振动同步的条件	38
3.3.2	基于三轴振动同步的编队构形设计步骤	39
3.3.3	三轴振动同步的构形仿真	39
3.4	J_2 摄动作用下编队构形的表达	42
3.4.1	构形表达式的重新推导	42
3.4.2	J_2 摄动作用下编队构形表达式	43
3.4.3	仿真结果分析	48
	参考文献	49
第 4 章	椭圆轨道航天器编队的相对运动分析与构形设计	51
4.1	椭圆轨道的相对运动表达与摄动分析	51
4.1.1	椭圆轨道编队相对运动的真近点角表达形式	51
4.1.2	椭圆轨道编队相对运动的平近点角表达形式	53
4.1.3	摄动分析以及考虑摄动的编队设计	55
4.1.4	椭圆轨道相对运动的仿真分析	58
4.2	椭圆轨道的编队构形设计	60
4.2.1	椭圆轨道相对运动的基本轨迹	60
4.2.2	椭圆轨道相对运动轨迹的特性分析	65
4.2.3	椭圆轨道相对运动构形设计	68
4.3	椭圆轨道编队飞行的应用简介	76
4.3.1	椭圆轨道编队飞行试验计划	76
4.3.2	地磁场测量的任务阶段	77
4.3.3	椭圆轨道编队飞行的优势	78
	参考文献	78
第 5 章	基于 GNSS 的相对运动测量原理	80
5.1	GNSS 相对测量原理与应用	80
5.1.1	GNSS 相对测量原理	80

5.1.2	GNSS 在卫星相对测量中的工程应用	84
5.2	相对运动测量中的滤波技术	85
5.2.1	EKF 滤波	85
5.2.2	UKF 滤波	87
	参考文献	91
第 6 章	基于多冲量的相对运动构形控制方法	92
6.1	编队构形的冲量捕获策略	92
6.1.1	相对运动与冲量的关系	92
6.1.2	简单多冲量与构形生成	95
6.1.3	编队捕获策略与仿真	98
6.2	构形重构的冲量控制策略	101
6.2.1	推力模式的能控性分析	101
6.2.2	相对运动构形的多冲量控制	102
6.2.3	基于简单四冲量的构形重构仿真	105
6.3	基于多冲量的构形保持控制方法	107
6.3.1	长期伴飞保持控制思路	108
6.3.2	基于相对运动测量的构形确定方法	109
6.3.3	基于多冲量的构形保持控制仿真	110
6.4	不同发动机推力模型的构形控制效果分析	113
6.4.1	三种推力模型	113
6.4.2	相对运动状态转移矩阵	114
6.4.3	基于不同推力模型的构形控制效果	115
6.4.4	连续变化小推力模型的工程实现方法	118
	参考文献	120
第 7 章	InSAR 航天器编队的设计与控制	122
7.1	InSAR 航天器编队的优化设计	122
7.1.1	主星带伴随编队模式的 InSAR 系统概念	122
7.1.2	面向 DEMs 测量的主星带伴随编队 InSAR 系统约束 分析	124
7.1.3	主星带伴随编队 InSAR 系统优化设计	131
7.2	InSAR 航天器编队的协同控制	137
7.2.1	SAR 卫星的多普勒频移与偏航导引补偿	137
7.2.2	InSAR 编队的协同控制问题与解决思路	140
7.2.3	协同规划与控制方法	141

7.2.4 构形与姿态协同控制仿真	144
参考文献	148
第8章 平动点轨道航天器编队飞行	150
8.1 DARWIN 与 TPF 计划	150
8.1.1 DARWIN 计划	150
8.1.2 TPF 计划	151
8.2 三体轨道概念简介	153
8.2.1 限制性三体轨道动力学	153
8.2.2 雅可比积分与力场特性	154
8.2.3 平动点概念	156
8.2.4 平动点附近的周期轨道	157
8.3 平动点轨道编队构形的设计与控制	164
8.3.1 平动点轨道编队飞行的动力学模型	164
8.3.2 基于 Floquet 模态的平动点轨道编队构形设计	170
8.3.3 基于 Floquet 模态的平动点轨道编队构形控制	177
参考文献	185
第9章 绳系卫星系统	187
9.1 绳系卫星的研究概况	187
9.1.1 概念起源	187
9.1.2 工程实践	188
9.2 非导电绳系卫星的动力学	190
9.2.1 重力梯度效应	190
9.2.2 动量交换原理	192
9.2.3 绳系系统的动力学建模	194
9.3 导电绳系卫星的电动力学	196
9.3.1 电动作用原理	196
9.3.2 电子发射与电流采集技术	197
9.4 面向应用的绳系系统设计	201
9.4.1 系统概念与发展	201
9.4.2 系统结构与组成	202
9.4.3 系统的空间操作	209
9.5 光子绳系编队飞行的概念	211
9.5.1 光子绳系编队的原理	212
9.5.2 光子绳系编队的结构与组成	213

9.5.3 光子推进和绳系编队的应用设想	217
参考文献	218
第 10 章 电磁力编队飞行	222
10.1 电磁力编队飞行的基本原理	222
10.1.1 电磁力编队飞行的基本概念与优势	222
10.1.2 电磁力编队飞行的未来应用设想	223
10.2 电磁力编队飞行的动力学建模	225
10.2.1 电磁力/力矩	225
10.2.2 环路电流的磁场	225
10.2.3 电磁力编队飞行的数学建模	231
10.3 电磁力编队的关键技术问题	232
10.3.1 高温超导技术	232
10.3.2 电磁系统总体与实验设计技术	234
10.3.3 电磁力/力矩计算与测量技术	237
10.3.4 非线性控制技术	237
参考文献	238
第 11 章 库仑力编队飞行	239
11.1 库仑力编队的基本原理	239
11.1.1 航天器的空间充电现象	239
11.1.2 库仑力形成的物理机理	241
11.1.3 Debye 效应与静电力的计算	243
11.2 库仑力编队的动力学建模与虚拟结构	245
11.2.1 库仑力编队的 Hill 方程	245
11.2.2 库仑编队静态稳定构形	246
11.2.3 库仑力的虚拟空间结构	250
11.3 库仑力编队的新进展	253
11.3.1 平动点库仑力编队	253
11.3.2 库仑绳系编队	254
参考文献	256
第 12 章 洛伦兹力编队飞行	258
12.1 洛伦兹力航天器的基本概念	258
12.1.1 带电物体在磁场中受到的洛伦兹力	258
12.1.2 洛伦兹力航天器系统结构设想	258

12.1.3	洛伦兹力在两类典型地心轨道上的应用	259
12.1.4	简单构形重构仿真分析	261
12.2	洛伦兹力航天器编队的动力学方程与分析	265
12.2.1	考虑洛伦兹力的相对运动方程	265
12.2.2	圆参考轨道线性方程的运动稳定性分析	266
12.2.3	基于线性方程的可控性分析	266
12.3	库仑力-洛伦兹力航天器编队飞行介绍	269
12.3.1	洛伦兹力与库仑力的比较分析	269
12.3.2	库仑力-洛伦兹力航天器编队概念	271
12.4	洛伦兹力的扩展应用	274
12.4.1	洛伦兹力作用下的拉格朗日行星运动方程	274
12.4.2	利用洛伦兹力增强引力辅助变轨技术	276
	参考文献	279

第1章 绪论

航天器编队飞行是20世纪90年代中后期随着计算机技术、新材料、新能源技术发展而出现的一种新航天器空间运行模式。在有心力场中多颗轨道周期相同的航天器近距离飞行,彼此之间可形成特定的相对运动轨道,航天器之间互相协同,密切联系,以分布方式构成一颗大的“虚拟航天器”(或称“分布式航天器系统”、“分布式卫星系统”),从而产生系统理论中所谓的“涌现”现象,性能上超越传统的单航天器系统。航天器编队飞行凭借突出的技术优势、广阔的应用前景,从诞生之初就获得了世界各航天大国的青睐,被称为代表未来航天器发展趋势的技术,成为当今一大热点研究领域。

1.1 航天器编队飞行特点与应用方向

1.1.1 航天器的集群化发展趋势

世纪之交的2000年,美国国防部制定了《空间技术指南》^[1],为美国空间科学的投资、空间技术的演示验证和空间技术系统的设计与研制提出了详细的规划,其目的是通过这些必需的技术和演示验证项目确立美国在空间领域的技术优势,从而维护其空间霸主地位^[1]。《空间技术指南》多次提到了航天器编队飞行、分布式航天器系统、卫星小型化、虚拟孔径、自治、自主、协同等新概念,充分地论述了航天器编队飞行(或分布式航天器系统)在空间应用、空间安全中的重大意义,并指出了自主、协同、集群化的实现途径。这引领了航天器技术在21世纪初的发展方向^[2]。

航天器编队飞行的突出特征是航天器的“空间分布”与“集群化”,大的空间分布区域使得编队系统具有传统航天器所不具备的“长观测基线”、“大空间视角”,从而带来功能的提升;而“集群化”一方面通过多冗余性提高了航天器系统的空间生存能力,另一方面通过大量航天器分布,提高了整个航天器系统信息支援与保障的广阔性、连续性与稳定性^[3]。航天器编队飞行的另一个重要特征是工作的“协同性”,只有形成集群的多航天器密切协同、互相配合才能构成统一的系统,从而大幅度提升系统整体性能,超越传统的单航天器。没有相互间密切的协同,就没有整体性能的提升,而若不能构建出功能突出的系统,编队飞行概念也就失去了存在的理由。编队飞行中各航天器协同的基础在于:其一,多颗航天器能够实现通畅的信息

交互;其二,每个航天器都能都迅速地实现对于信息的处理和反应。由于航天器本身的复杂性、多航天器之间的紧密联系以及运行环境的未知性和不确定性,同时多航天器编队面临着相对导航、构形保持与重构、分布式控制以及多航天器协同等诸多挑战,而且针对意外事件还需具备应急处理能力,这是靠地面测控系统无法满足的。因此,编队航天器系统须具备一定的自主运行能力,这一方面是指整个编队表现为整体的自主运行,另一方面是指编队中的航天器能够在系统协调指挥下实现自身的自主控制与运行。

综上,具有“集群化”、“多航天器协同”与“自主运行”特征的航天器编队飞行代表了航天器技术的重要发展方向。

1.1.2 航天器编队飞行的特点

1.1.2.1 技术特点

航天器编队飞行是一种新兴事物,不同于以往的单航天器系统与星座系统,不仅有着特殊的动力学特征,而且在应用方面也独具特色^[3,11,12]。

从动力学角度而言,具有以下特点:

(1) 对于一般意义上的编队,各航天器之间不存在相互作用力,其编队运动构形为地心绝对轨道运动的“附属物”,对编队构形的控制与保持归根到底作用于编队航天器的绝对轨道运动,即编队相对运动是一种基于轨道动力学的视运动,但其相对运动却很关键。

(2) 航天器编队飞行与单航天器在轨运行的最大区别在于“群”特征,即编队多航天器应保持临近运动,不能远离或漂移。

(3) 航天器编队飞行与卫星星座的区别在于:①几何特性,星座星间距较大,与半长轴处于同一量级,而编队星间距较小,相比轨道半长轴可以忽略;②覆盖特性,星座的覆盖区域是各星覆盖区域的并集(一重覆盖),而编队的覆盖区域是各星覆盖的交集(多重覆盖);③任务特性,星座中每颗星是一个任务单元,而编队整体常常是一个任务单元;④力学基础,星座的动力学基础是经典的航天器轨道动力学,而编队的动力学基础是相对运动轨道动力学^[38]。

(4) 航天器编队飞行强调“编队”与“协同”,因而“构形”(即相对运动轨道)的概念非常重要,它成为研究航天器编队飞行动力学与控制问题的关键。

(5) 航天器编队的“群”特征和编队航天器间的密切协同对编队控制提出要求:应综合考虑多航天器的运动状态而进行系统协调,各航天器在各自自主控制的同时保证系统整体的有效运行。

从应用角度来看,具有如下特点:

(1) 航天器编队飞行系统类似于一个巨大的虚拟传感器,由编队中各航天器的有效载荷组成,具有很大的空间结构。系统中的各航天器可以用不同方式或从不同角度收集同一目标的各种信息,这是真正意义上的“多维”观测。

(2) 航天器载荷可能具有不兼容性,有些载荷不能同时工作,放在同一航天器上会带来设计的复杂性和兼容性冲突,也会相应地引起整体成本增加,而应用编队飞行技术可以形成分布式的科学载荷,不必增加设计和操作的复杂性,风险也被分布在不同的航天器上,从而提高系统的灵活性和可靠性。

(3) 各航天器上的信号(射频信号或光信号)通过无线方式传输、分配与组合,形成整个编队系统协同完成任务的基础。

(4) 改变编队几何构形会起到重构虚拟传感器的作用,可以实现航天器编队组网的多目的性和多任务性。

1.1.2.2 技术优势

航天器编队飞行以其特有的动力学特征与应用特征带来了显著的应用优势,这些优势进一步拓宽了编队飞行技术的应用领域,使其应用模式多样化。

其优势主要体现在如下几个方面^[3]:

1. 提升应用系统整体性能

编队飞行使单航天器不易实现的空间探测任务变得简单,可以极大地增加干涉测量的雷达孔径,可以在较大的离散空间对任务目标进行多角度同步观测,也可实现多任务组合,这对于对地观测而言是非常重要的。

2. 提高应用系统可靠性

编队飞行系统一般由许多航天器组成,在系统设计阶段考虑冗余度可以使系统在遭受破坏时更具鲁棒性。如果系统中有一颗航天器失效,只会影响与之关联的链路,而不会导致整个系统崩溃,可以及时地将失效个体清除出系统,通过构形重构或补充新航天器的方式使系统恢复正常工作状态。

3. 增强系统适应性

航天器编队构形大小、编队中航天器数目甚至航天器所携带的载荷都可根据任务要求而进行调整,使航天器编队系统具有新功能或更高性能,从而以较短周期、较低成本和较高可靠性来完成任务的切换。

4. 降低单生命周期成本消耗

编队飞行采用多航天器来完成任务,必将促进航天器的设计与制造采用标准化工艺流程,单航天器成本自然可以降低,从而使整个系统成本降低。随着航天器模块化技术与天基平台理论的发展、执行任务次数的增加及生命周期的相对延长,航天器编队可使单生命周期内的航天器成本不断降低。

1.1.3 航天器编队飞行的应用方向

目前,航天器编队飞行的应用仍处于研究与探索阶段。从对技术文献的分析与研究来看,其应用主要有如下四个领域:

1. 深空探测

深空探测主要指对于外层宇宙空间的探测。由于航天器编队飞行的系统可靠

性高并可采用冗余设计,国际上出现了许多采用航天器编队飞行来实施深空探测的任务计划。美国国家航空航天局(NASA)、欧洲空间局(ESA),以及加拿大和日本的研究开发机构等纷纷提出了编队的深空探测计划。代表性的研究有 NASA 的类地行星探测器(Terrestrial Planet Finder, TPF)计划等^[5]。

2. 空间科学实验

空间科学实验主要指对空间、大气和环境的探测实验。这类应用具有重要的现实意义,如通过实验可揭示地球变暖的原因。在利用单航天器进行测量时,无法区分变化是由于探测对象随时间变化造成的,还是由于空间分布不均匀造成的,即存在时间和空间的不可分辨性;而应用航天器编队飞行技术,该问题迎刃而解。目前国际上已经有为数不少的空间科学实验任务采用航天器编队飞行来实现,比较典型的有美国 NASA 的 A-Train 计划^[6]、MMS 计划^[7]等。

3. 对地勘测

对地勘测主要指利用航天器系统对地球进行如水文、地理、气象、海洋等勘测任务和环、灾害等监测任务,方式有雷达测量、光学测量、红外遥感等。编队飞行的多航天器协同工作,构成一个巨大的虚拟传感器,能够以不同方式或从不同角度收集同一场景的各类数据信息,并为科学实验提供单颗航天器难以得到的各种实验数据,因此有大量对地勘测任务需要借助航天器编队飞行来实现^[8-10]。

4. 军事应用

任何新型科学技术一旦出现就将考虑其军事应用的可能性,航天器编队飞行技术也不例外,况且其未来军事应用价值非常大。航天器编队飞行技术将极大地改变未来空间作战的样式与形式,并成为影响一个国家未来空间安全的重要角色^[3]。

1.2 航天器编队飞行的技术基础与概念拓展

1.2.1 航天器编队飞行的动力学与控制基础

航天器编队飞行是根植于航天器技术发展起来的新兴技术,但同时又有自身的特殊性,一般概念上的航天器编队飞行首先涉及到相对运动动力学、相对导航、制导、控制以及构形优化设计等方面的问题,这是研究航天器编队飞行技术的必备基础。

航天器编队飞行是一种新兴事物,具有不同于以往的单航天器系统与星座系统的特殊的动力学特征,这就涉及到相对运动动力学^[38]与编队构形的设计问题。对于一般的航天器编队而言,多颗航天器具有共同的引力中心,相互间不存在力的作用,其相对运动是邻近飞行的视运动,需要建立适当的坐标系进行研究。构形设计是航天器编队飞行的最基本问题,其实质就是由相对运动轨道的约束求解编队航天器的绝对轨道运动(直角坐标形式或轨道根数形式),它是航天器编队相对运