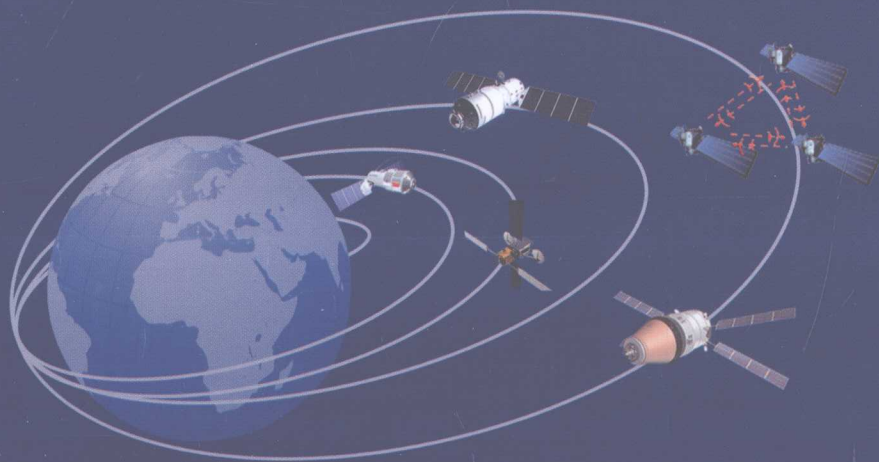




航天科技图书出版基金资助出版

航天器协同飞行 动力学与控制

罗建军 张博 袁建平 著
曹静 宁昕



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

航天器协同飞行动力学与控制

罗建军 张博 袁建平 曹静 宁昕 著



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

航天器协同飞行动力学与控制 / 罗建军等著. -- 北京: 中国宇航出版社, 2016. 3

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0553 - 2

I. ①航… II. ①罗… III. ①航天器-飞行力学-研究②航天器-飞行控制-研究 IV. ①V412. 4②V448

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 247887 号

责任编辑 马 航

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版 中国宇航出版社
发行

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830

(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 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

规 格 787 × 1092 开 本 1/32

印 张 19.625 字 数 529 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0553 - 2

定 价 128.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前 言

从 1957 年苏联发射第一颗人造卫星以来，卫星技术与应用取得了飞速发展：航天器的规模和物理尺度向超大型和微型化两极发展，性能和集成度不断提高，设计理念从追求平台性能向具备能力、快速响应和提高系统的不确定性应对能力转变；航天器系统的结构和存在形式从集中式向分散式空间系统体系结构和分布式卫星系统方向发展；航天器轨道从模仿自然天体的开普勒轨道飞行发展到空间机动飞行和协同飞行；航天器飞行操控与运行模式向自主化和智能化方向发展，航天器应用与任务组织模式从单平台发展到多航天器协同飞行的分布式航天器系统和分布式空间任务。本书的撰写是对现代分布式航天器系统及其技术和应用的进一步发展和总结。

分布式航天器系统是小卫星技术发展与应用的主要方向。20 世纪 80 年代，在计算机与微电子技术、微机电系统与技术、轻型材料等高新技术发展与应用的推动下，现代（微）小卫星成为航天器发展的新方向。美国国家航空航天局在 20 世纪 90 年代末期，规划 2010—2025 年期间地球科学和空间探测研究项目时，提出了分布式航天器系统的概念——它是由物理结构上互不相连的、共同实现同一空间任务的多个航天器构成的空间系统，并提出和规划了 TechSat-21、大学纳星工程、类地行星探路者（TPF）、高精度 X 光成像任务等编队飞行计划和分布式空间任务。欧空局也很早就开展了卫星编队技术和分布式航天器系统的研究工作，并提出了多个技术与任务演示验证项目，典型的有重力场测量卫星（GRACE）、地球磁场

探测卫星 (Cluster II)、空间激光测量天线 (LISA)、Darwin 计划等。根据协同飞行方式、星间距离、星间通信、测量与飞行控制方式以及任务与应用的不同,可以把分布式航天器系统分为卫星星座、航天器编队、航天器集群(簇)与蜂拥卫星、模块化分离式航天器系统,以及它们的混合编队和航天器传感器网络等。在过去的几十年中,分布式航天器系统的概念在空间应用方面取得了有意义的进展,并带来了许多领域一系列的相关创新研究,例如:动力学、协同控制、电子通信、遥感和体系结构等。2000年11月,美国国家航空航天局发射地球观测1号(EO-1)卫星与在轨的地球资源卫星7号(LandSat-7)完成了首次在轨编队飞行实验。近年来,一些依赖于两颗卫星协同的任务的成功完成,如GRACE(重力测量)、PRISMA(新技术验证)以及Tandem-X(搭载合成孔径雷达干涉仪的地球观测任务),代表了空间系统工程的巨大成就,成为促进未来分布式空间任务的先行者。这些工程实践和相关研究达成的共识是:分布式航天器系统将利用合作构架取代现有的单一庞大的整体式系统并完成其不能完成的任务;分布式系统需要新的方式来进行系统设计、开发和操控,并需要不断探索和深化一些的新概念(如:模块化、自主性、标准化、即插即用部件、无线能量传输等),来获得高效的平台和其中新的关键子系统(如:相对轨迹设计、相对导航和控制、星间通信等),以实现需要的新功能和提升系统的整体性能与效能。

多航天器协同作业与协同飞行是分布式航天器系统和分散式空间体系结构的主要特征。20世纪90年代以来,航天器编队飞行、航天器集群和模块化分离航天器系统成为现代分布式航天器系统与技术的发展方向和发展趋势,其主要特征是:任务/功能分解、结构分离、无线连接、协同飞行;通过成员航天器之间星间通信与感知,

以及以动力学、信息和控制融合为基础的自主协同飞行和协调控制，实现自主程度较高的智能化系统运行与管理。这类以多航天器自主协同飞行为主要特征的现代分布式航天器系统，能完成传统航天器系统无法完成的大孔径、长基线任务，并具备快速空间响应能力和空间攻防对抗下的空间任务保护和生存能力。2013年8月，美国空军航天司令部发布《抗毁与分散式空间系统体系结构》白皮书，明确提出要构建分散式空间体系，通过将天基任务、功能或传感器分散部署到多个系统或空间设施上，横跨一个或多个轨道、平台、宿主卫星或作战域，使空间系统在面临故障、环境挑战或对手活动时，能够继续提供所需能力，提升空间系统的生存能力和抗毁性。可以预见，分散式航天器体系架构将成为未来空间系统和航天器应用的重要发展方向，越来越多的多航天器协同飞行将取代整体式或集中式航天器系统，实施分布式空间任务。

航天器自主协同飞行是一种综合利用航天器飞行动力学、现代控制、计算与信息技术，以尽可能降低控制消耗为目的的多航天器自主协作运行模式，其学科特征表现为动力学、信息与控制的交叉与融合。本书面向航天器编队、航天器集群、分离模块化航天器，以及它们的综合等现代分布式航天器系统的发展和应用，以近地航天器协同飞行的动力学、制导与控制为主线，融合航天动力学、信息与控制，重点研究和介绍了航天器自主协同飞行控制的理论和方法。主要内容有：航天器相对运动动力学、非线性相对运动方程的求解与周期性条件，相对运动的参数化与航天器协同飞行的制导方法，协同控制理论与方法和航天器协同飞行的分布式控制，航天器协同飞行的自主运行体系和任务分配等。全书共分为12章：第1章介绍了航天器协同飞行的概念和内涵，以及航天器协同飞行的关键技术及其研究进展；第2章给出了航天器相对轨道和相对姿态动力

学模型，以及轨道和姿态耦合相对运动模型；第3章研究了航天器相对运动非线性模型的周期解及其在编队保持中的应用；第4章研究了航天器相对运动的重构和协同制导，首先以解析的思路研究了基于非线性相对运动模型的最优重构问题及其求解，然后分别研究了多航天器编队飞行构型重构的分层优化协同制导和整体优化协同制导；第5章研究了基于相对 E/I 矢量的航天器编队飞行和集群飞行的轨道设计与制导；第6章研究了航天器协同飞行的一致性控制，建立了基于一致性理论的航天器协同飞行控制框架，提出了基于一致性理论的分布式协同制导和控制的策略和算法；第7章研究了基于循环追踪的航天器协同飞行控制，设计了与自然构型匹配的循环追踪协同控制律，实现多航天器编队构型的初始化、保持、整体机动以及交会等协同操作；第8章研究了航天器集群飞行的蜂拥控制，建立了航天器集群飞行的蜂拥控制模型，提出了基于周期延迟误差同步的航天器协同控制方法；第9章研究了基于多 Lagrangian 系统一致性算法的航天器协同飞行6自由度控制，设计了航天器协同飞行的6自由度控制律；第10章研究了基于动力学分解的多航天器协同飞行动力学建模与控制方法，将多航天器协同飞行动力学分解为整体系统动力学和相对运动队形系统动力学，研究了整体系统和队形系统的控制方法和控制律；第11章和第12章分别研究了多航天器协同飞行的自主运行体系和自主任务分配。

多航天器自主协同飞行是面向未来分布式空间任务与应用的一项高新技术，具有广泛的应用前景，将带来空间科学研究与空间探测、应用卫星与卫星应用、新技术探索与试验、快速响应空间和空间攻防等方面的创新发展，相关理论、方法、技术与应用还处于发展之中，本书是作者及其研究生们对近几年来相关研究的阶段性成果的总结，期望能对研究和应用多航天器协同飞行的科学家和工程

技术人员具有参考价值和使用价值，并引发更深层次的创新研究与应用。

本书适合航空航天科学与技术和控制理论与工程领域的科学研究及工程技术人员，以及高等院校相关专业的研究生和高年级本科生阅读、参考。

本书得到“国家自然科学基金（11072194）、（51577121）、（11572248）、（11402200）”的资助。

作 者

2015年10月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 分布式航天器系统与航天器协同飞行	1
1.2.1 分布式航天器系统概念的提出	1
1.2.2 航天器协同飞行的优势与挑战	5
1.3 航天器协同飞行的典型计划	8
1.3.1 TechSat-21 计划	9
1.3.2 F6 项目与 Pleiades 计划	11
1.3.3 SAMSON 计划	16
1.4 航天器协同飞行动力学与控制研究综述	17
1.4.1 动力学建模	17
1.4.2 轨迹设计与制导	20
1.4.3 分布式协同控制	24
1.4.4 发展趋势	32
1.5 本书内容安排	35
参考文献	39
第 2 章 航天器相对运动模型	53
2.1 引言	53
2.2 相对轨道运动模型	53
2.2.1 坐标系	54
2.2.2 基于 CRSV 变量的参考轨道描述方法	55

2.2.3	考虑 J_2 项摄动的精确相对运动模型	58
2.2.4	相对运动模型的简化	60
2.2.5	其他常用典型线性相对运动模型	65
2.3	相对姿态运动模型	78
2.3.1	姿态运动学与动力学方程	78
2.3.2	相对姿态动力学和运动学模型	85
2.4	轨道和姿态耦合相对运动模型	89
参考文献		95
第3章 非线性相对运动模型的周期解及应用		96
3.1	引言	96
3.2	周期解求解方法	96
3.2.1	解析法	97
3.2.2	数值法	99
3.3	圆参考轨道非线性相对运动模型的周期解	101
3.3.1	相对运动模型的求解	101
3.3.2	周期性条件与周期解	105
3.3.3	周期性条件与周期解的验证	106
3.4	椭圆参考轨道非线性相对运动模型的周期解及应用	117
3.4.1	相对运动模型的求解	117
3.4.2	周期性条件与周期解	123
3.4.3	周期性条件与周期解的验证	126
3.4.4	基于周期解的航天器编队保持	141
3.5	考虑 J_2 项摄动非线性相对运动模型的周期解及应用	145
3.5.1	基于微分修正的周期性条件	145
3.5.2	基于傅里叶分析与多庞加莱截面法求解周期解	147
3.5.3	周期性条件与周期解的验证	149
3.5.4	基于周期解的航天器编队保持	157
附录 A		160
参考文献		166

第 4 章 航天器相对运动最优重构与协同制导	168
4.1 引言	168
4.2 周期相对运动构型的参数化	168
4.2.1 圆参考轨道几何构型的参数化	169
4.2.2 椭圆参考轨道几何构型的参数化	171
4.3 基于非线性相对运动模型的最优重构问题及其求解	177
4.3.1 问题描述	177
4.3.2 不考虑 J_2 项摄动的最优重构求解	179
4.3.3 考虑 J_2 项摄动的最优重构求解	192
4.4 多航天器编队构型重构的分层优化协同制导	200
4.4.1 问题描述	200
4.4.2 基于高斯变分方程的底层路径规划	200
4.4.3 基于 0-1 规划的顶层协同	207
4.4.4 仿真算例与分析	208
4.5 多航天器编队构型重构的整体优化协同制导	211
4.5.1 编队系统的动力学模型	212
4.5.2 编队重构整体优化	213
4.5.3 仿真算例与分析	217
4.6 本章小结	224
附录 B	226
参考文献	228
第 5 章 基于相对 E/I 矢量的航天器协同飞行轨道设计与制导	230
5.1 引言	230
5.2 基于相对 E/I 矢量的相对运动模型	231
5.2.1 相对 E/I 矢量的定义	231
5.2.2 相对 E/I 矢量描述的相对运动	234
5.2.3 J_2 项摄动影响	238

5.3	基于相对 E/I 矢量的编队飞行安全轨道设计与制导	245
5.3.1	碰撞规避分析与安全性要求	245
5.3.2	编队飞行轨道设计与制导	247
5.3.3	仿真分析	251
5.4	基于相对 E/I 矢量的航天器集群飞行轨道优化设计	260
5.4.1	问题描述	260
5.4.2	算例分析	264
参考文献		274
第6章 航天器协同飞行的一致性控制		276
6.1	引言	276
6.2	一致性问题相关理论与应用	277
6.2.1	图论与代数图论基础	277
6.2.2	线性一阶系统的一致性算法	280
6.2.3	线性二阶系统的一致性算法	288
6.2.4	一致性理论在多自主体协同控制中的应用	295
6.3	典型协同控制方法的一致性控制描述	304
6.3.1	主从式控制	304
6.3.2	虚拟结构式控制	308
6.3.3	行为式控制	312
6.4	基于一致性理论的多航天器分布式协同控制	313
6.4.1	问题描述与控制结构	313
6.4.2	参考点一致性估计	316
6.4.3	制导指令计算	317
6.4.4	控制律设计	318
6.4.5	仿真研究	322
参考文献		332
第7章 基于循环追踪的航天器协同飞行控制		335
7.1	引言	335
7.2	循环矩阵和旋转矩阵	335
7.2.1	循环矩阵与块循环矩阵	335

7.2.2 旋转矩阵	337
7.3 循环追踪算法	337
7.3.1 线性一阶系统的循环追踪算法	338
7.3.2 线性二阶系统的循环追踪算法	350
7.4 航天器协同飞行的循环追踪控制与仿真	357
7.4.1 追踪轨迹与航天器协同飞行自然构型的匹配	360
7.4.2 仿真研究	364
参考文献	374
第 8 章 航天器集群飞行的蜂拥控制	375
8.1 引言	375
8.2 蜂拥与航天器集群飞行	375
8.2.1 蜂拥的基本概念	375
8.2.2 航天器集群飞行的特点	377
8.3 蜂拥模型与控制算法	378
8.3.1 Boids 模型	379
8.3.2 蜂拥控制算法的数学基础	380
8.3.3 Oflati-Saber 蜂拥控制的基本算法	382
8.3.4 仿真算例与分析	388
8.4 航天器集群飞行的初始条件与蜂拥控制算法	395
8.4.1 初始条件要求与配置	395
8.4.2 蜂拥控制算法设计与仿真	408
8.5 基于周期延迟误差同步的航天器集群蜂拥控制	419
8.5.1 周期延迟误差状态方程	419
8.5.2 最优协同控制律设计	421
8.5.3 周期延迟误差同步与能量匹配的关系	428
8.5.4 仿真研究	431
8.6 本章小结	444
参考文献	446

第 9 章 基于多 Lagrangian 系统一致性算法的航天器协同飞行 6 自由度控制	449
9.1 引言	449
9.2 航天器 6 自由度相对运动的 Lagrangian 模型	449
9.2.1 Lagrangian 方程	449
9.2.2 航天器相对姿态运动的 Lagrangian 方程	451
9.2.3 航天器相对轨道运动的 Lagrangian 方程	454
9.2.4 姿轨控制推力器配置与控制分配	455
9.2.5 航天器协同飞行的 6 自由度控制方程	458
9.3 多 Lagrangian 系统的分布式一致性算法	459
9.3.1 线性一致性算法	460
9.3.2 非线性一致性算法	463
9.4 多航天器协同飞行 6 自由度控制律设计与仿真	466
9.4.1 交会对接任务的非线性控制律设计与仿真	467
9.4.2 编队飞行任务的非线性控制律设计与仿真	474
9.4.3 编队飞行任务的循环追踪控制律设计与仿真	478
9.5 本章小结	486
参考文献	488
第 10 章 基于动力学分解的多航天器协同飞行 6 自由度控制	489
10.1 引言	489
10.2 多航天器协同飞行动力学建模	491
10.2.1 坐标系定义	491
10.2.2 单航天器动力学模型	492
10.2.3 多航天器协同飞行的动力学分解模型	495
10.3 基于动力学分解模型的控制律设计与分析	507
10.3.1 控制律设计	507
10.3.2 实现方式与性能分析	508

10.4 仿真研究	517
10.4.1 计算流程	517
10.4.2 任务设计和参数设置	518
10.4.3 控制方法的有效性验证与分析	519
10.4.4 控制性能的仿真验证	529
附录 C	534
参考文献	536
第 11 章 航天器协同飞行的自主运行体系	537
11.1 引言	537
11.2 Agent 与多 Agent 系统	538
11.2.1 Agent 的定义	539
11.2.2 MAS 的概念	539
11.2.3 MAS 的体系结构	541
11.3 基于 MAS 的航天器系统自主运行体系	543
11.3.1 航天器的智能程度	543
11.3.2 单航天器自主运行体系	544
11.3.3 多航天器协同飞行自主运行体系	549
11.4 多航天器系统的动态联邦式 MAS 结构建模	555
11.4.1 多航天器系统的动态联邦式 MAS 结构	555
11.4.2 多航天器系统的通信结构	557
11.4.3 多航天器系统的功能 Sub-Agent	559
11.4.4 功能 Sub-Agent 间的信息流模型	561
参考文献	564
第 12 章 航天器协同飞行的自主任务分配	565
12.1 引言	565
12.2 基于合同网协议的自主任务分配方法	565
12.2.1 基于传统合同网协议的任务分配	566
12.2.2 改进的合同网协议	570

第 1 章 概 论

1.1 引言

分布式航天器系统包括卫星星座、航天器编队和航天器集群等之类^[1-6]。分布式航天器系统协同作业的任务组织模式要求多航天器以协同飞行的运动形态满足其应用需求。其中以航天器编队飞行和集群飞行为代表的自主协同飞行的分布式航天器系统,具备在轨自主运行管理与协调能力,对任务和需求变化具有更好的自适应性,能完成传统航天器系统无法完成的大孔径、长基线任务^[2],并具备快速空间响应能力^[3]和空间攻防对抗下的任务保护能力^[4]。因此,这种新型空间系统改变了传统航天器应用模式、应用领域和飞行控制模式,成为现代航天技术与应用发展的重要方向。

自主协同飞行是航天器编队和航天器集群的重要特征,而飞行动力学和控制是多航天器自主协同飞行从概念走向现实的基础和决定性因素。多航天器协同飞行控制系统水平在很大程度上取决于动力学建模和协同控制理论与方法的共同发展。本书面向航天器编队、航天器集群以及它们的综合等自主分布式航天器系统的发展和应用,研究近地航天器协同飞行的动力学、制导与控制。

1.2 分布式航天器系统与航天器协同飞行

1.2.1 分布式航天器系统概念的提出

20 世纪 80 年代,在微机电系统、微电子技术和轻型材料等高新

技术发展的推动下,现代小卫星(简称小卫星)技术成为航天器发展的新方向。小卫星是以功能密集度(即单位质量所提供的卫星分系统性能以及有效载荷与小卫星的质量比)为评价指标进行再定义的新一代小卫星技术^[5-6],通过集成化和模块化的设计,使卫星体积质量减小、容量性能增加、研发成本降低,最终使卫星获得最大的功能密集度。小卫星具有质量轻、成本低、体积小、性能高、研制周期短等技术特点,这为分布式航天器系统的应用和发展提供了物质基础和必要条件^[6]。

分布式航天器系统(或称分布式空间系统,DSS)是小卫星技术发展与应用的主要方向,其最早是美国国家航空航天局在20世纪90年代末期,为地球科学规划2010—2025年期间研究项目中所提出的空间飞行概念^[7],主要是指把系统任务或功能分布到不同航天器上的多航天器系统,并将分布式航天器系统定义为:由物理结构上互不相连的、共同实现同一空间任务的多个航天器构成的空间系统^[7-8]。如图1-1所示,根据协同飞行方式、星间距离、星间通信、测量与飞行控制方式以及任务与应用的不同,分布式航天器系统可分为以下三类。

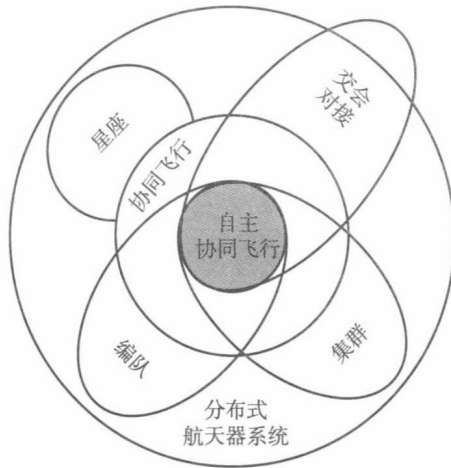


图 1-1 分布式航天器系统的分类