

智能微纳卫星集群自主协同控制技术研究

肖金平, 王颖, 罗孙梅, 谢毅, 刘富强

南昌航空大学通航(民航)学院, 江西 南昌

收稿日期: 2023年7月27日; 录用日期: 2023年8月14日; 发布日期: 2023年8月22日

摘要

随着人们对空间领域的不断探究及应用, 航天器在轨资源受限、单星作业能力受限、空间环境复杂等问题日益显著, 研究智能微纳卫星集群自主协同控制技术成为解决这些问题的有效途径。该研究将突破自主协同完成复杂任务、学习经验数据提升系统性能、自主认知应对复杂环境等关键技术, 促进微纳卫星集群的整体效能最大化, 使卫星集群具备自主感知、推理、执行、演化等类人行为属性。为此, 必须在梳理国内外对智能微纳卫星相关研究的基础上, 整理出智能微纳卫星集群自主协同控制的概念内涵, 分析出集群智能信息交互与通信、集群自主协同任务规划与决策、集群构型建立维持与重构技术、智能健康预测与管理四大关键技术的研究现状及发展趋势, 以期智能微纳卫星在轨应用的相关技术突破带来一定的借鉴作用。

关键词

智能微纳卫星, 自主协同控制, 智能信息交互与通信, 自主认知与决策, 集群构型建立维持与重构技术, 智能健康预测与管理

Research on Autonomous Collaborative Control Technology of Intelligent Micro-Nano Satellite Cluster

Jinping Xiao, Ying Wang, Sunmei Luo, Yi Xie, Fuqiang Liu

School of General Aviation (Civil Aviation), Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Received: Jul. 27th, 2023; accepted: Aug. 14th, 2023; published: Aug. 22nd, 2023

Abstract

With the continuous exploration and application of the space field, the problems of limited space-

文章引用: 肖金平, 王颖, 罗孙梅, 谢毅, 刘富强. 智能微纳卫星集群自主协同控制技术研究[J]. 人工智能与机器人研究, 2023, 12(3): 226-235. DOI: 10.12677/airr.2023.123026

craft in orbit, limited single-satellite operation capacity, and complex space environment have become increasingly obvious, and the study of intelligent micro-nano satellite cluster autonomous collaborative control technology has become an effective way to solve these problems. This research will break through key technologies such as autonomous collaborative completion of complex tasks, learning experience data to improve system performance, and autonomous cognition to cope with complex environments, promote the overall efficiency of micro-nano satellite clusters, and make satellite clusters have human-like behavioral attributes such as autonomous perception, reasoning, execution, and evolution. To this end, on the basis of combing the relevant research on intelligent micro-nano satellites at home and abroad, it is necessary to sort out the conceptual connotation of autonomous collaborative control of intelligent micro-nano satellite clusters, and analyze the research status and development trend of four key technologies: cluster intelligent information interaction and communication, cluster autonomous collaborative task planning and decision-making, cluster configuration establishment, maintenance and reconstruction technology, and intelligent health prediction and management, in order to bring certain reference to the related technological breakthroughs of intelligent micro-nano satellites in orbit.

Keywords

Intelligent Micro-Nano Satellites, Autonomous Collaborative Control, Intelligent Information Interaction and Communication, Autonomous Cognition and Decision-Making, Cluster Configuration Establishment, Maintenance and Reconstruction Technology, Intelligent Health Prediction and Management

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微纳卫星是指体积小、质量轻的卫星，通常尺寸为几十毫米至几十厘米、质量为几百克至几十千克的小卫星，因其研制成本低、周期短、灵活性高等优点而被广泛应用[1] [2]。近年来，借鉴自然界生物集群自组织特性，航天器集群项目逐渐发展起来，通过星群成员之间共同运动与共同合作控制[3] [4]，取代发射与研制成本高昂的单颗大型卫星，完成整体任务。在遥感领域，微纳卫星集群协同控制技术可有效解决单星观测覆盖能力有限，无法满足灵活观测需求的问题，而高效能地完成观测任务，同时还可应用于通信与卫星互联网、导航与定位等多种领域，提高空天作业效能。

随着空天领域的不断深入探究，大规模商业微纳卫星的投入运行，传统的采用“分而治之”的卫星集群管控模式，因地面压力过大而难以被有效应用，无法满足当前的功能需求和应对日益复杂的空间环境，且集群智能协同控制技术已经成为新一代人工智能的核心研究领域，使得集群协同控制技术不断向智能化方向推进，智能微纳卫星集群自主协同控制技术也因此成为研究热点[5] [6] [7]。智能微纳卫星集群必须具备极强的自主协同控制能力，其存在卫星成员数量众多、空间分布关系复杂时变、协同作业模式复杂多样等特点[8]，由此带来大规模动态星群控制系统的集群智能信息交互与通信、集群自主协同任务规划与决策、集群构型建立维持与重构技术、智能健康预测与管理等众多关键技术难题，为此，本文对智能微纳卫星集群自主协同控制技术的国内外研究现状进行梳理，分析了其四大关键技术难题的研究现状及未来展望，整理出了智能微纳卫星集群自主控制组织框架和协商机制及基于群体智能的微纳卫星集群自主控制系统的概念内涵，总结出相关研究进展及未来展望，以期对日后的智能微纳卫星集群自主

协同控制技术的相关研究带来一定的技术支持。

2. 智能微纳卫星集群自主协同控制技术总体研究现状

国内外对集群协同控制技术有着不少的研究,文献[9]对国外无人机集群协同控制技术新发展进行了重要论述,着重梳理了集群协同控制在无人机集群中的应用和发展,文献中总结了集群协同控制的三大分类,即集中式、分散式和分布式。在卫星领域研究更多的是集中式和分布式,但是对于成百上千颗微纳卫星组成的群体来说,采用常规的集中式的航天器管理模式来管理数量巨大的集群系统显然是不现实的[10][11],而分布式控制系统没有系统控制的中心点,通过相邻个体之间的相互协调完成信息互换,最终完成整体的编队行为,由于没有控制中心,分布式控制系统又具有较高的灵活性,可以动态的改变控制网络的结构。所以对比集中式控制,采用分布式控制策略使得集群系统具有可扩展性、鲁棒性、适应性等优点,随着后来国内外学者从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队的概念研究[12]出现后,人们开始研究基于仿生的微纳卫星集群协同控制[13],通过模拟生物群落的群体行为,借鉴生物个体的信息传递方式,构成卫星群体智能系统[14][15],结合分布式控制策略,又提出了基于群体智能的自主协同控制技术。基于分布式控制策略下,群体智能系统将微纳卫星星群的每颗卫星看作是一个智能体,具有自主感知、决策和通信交互能力;然后建立基于多智能卫星集群控制组织架构和协商机制,以适应分布式动态场景下星群任务对快速响应能力和资源优化性能要求,满足星群自主认知和自主决策框架的高要求,构建基于群体智能的微纳卫星集群自主协同控制系统。

3. 智能微纳卫星集群自主协同控制技术概述

现有的智能微纳卫星集群自主控制技术中,智能微纳卫星集群控制组织架构采用分布式控制星群集群策略,如图1所示,该架构依赖着局部信息交流,产生一种耦合自身状态与相邻成员状态的控制指令,实现对各成员卫星的控制,具有全局的优化性能,同时系统中星群成员增减不会改变运行模式,能够实现对整个星群集群灵活自主控制。

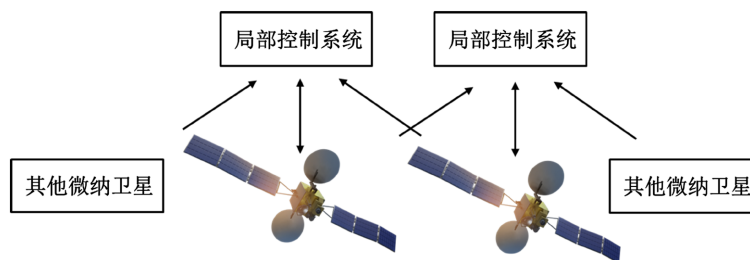


Figure 1. Distributed control of satellite swarm

图1. 分布式控制星群集群策略

智能微纳卫星集群合同网协商机制如图2所示,当某单个智能微纳卫星资源不足以完成任务时,此智能微纳卫星作为招标者通过任务发布、标书收集、中标通知和合同建立等流程,完成星群集群合同网协商机制[16]。

该微纳卫星集群自主控制系统,基于多智能微纳卫星集群控制组织架构和协商机制,在集群成员卫星具有自主协同任务规划、决策和自身健康状态监测、管理基础上,通过星间智能信息交互和通信与协同决策,驱动整个集群系统在宏观上呈现协同一致的行为,即智能微纳卫星集群自主控制的成员特征组成群特征,星群的决策通过成员来实现,如图3所示。

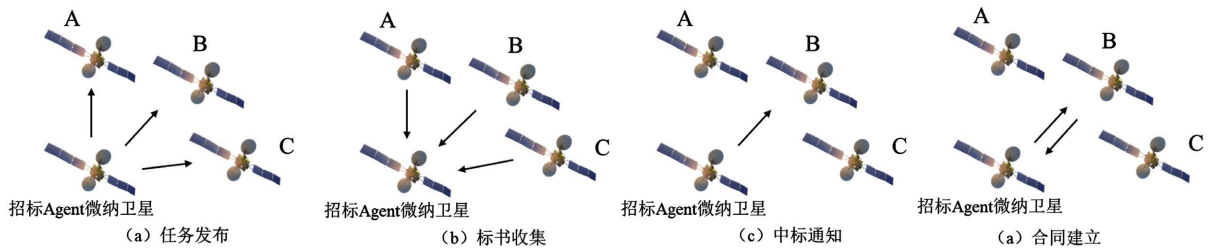


Figure 2. Contract network protocol of satellite swarm
图 2. 星群集群合同网协议

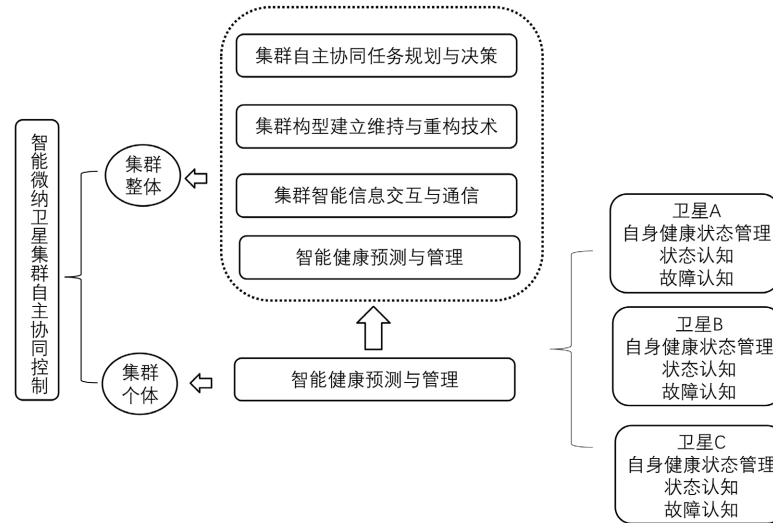


Figure 3. Framework diagram of the autonomous control system for the satellite cluster
图 3. 卫星集群自主控制系统框架图

针对图 3，基于最新组织架构与协商机制的相关研究，本章将对智能微纳卫星集群自主控制中的集群智能信息交互与通信、集群自主协同任务规划与决策、集群构型建立维持与重构技术、智能健康预测与管理四大关键技术作为主要研究内容(见图 4)，对各技术分解剖析，构建基础知识体系，以便后期能够更加系统地深入理解和研究智能微纳卫星集群自主控制技术。

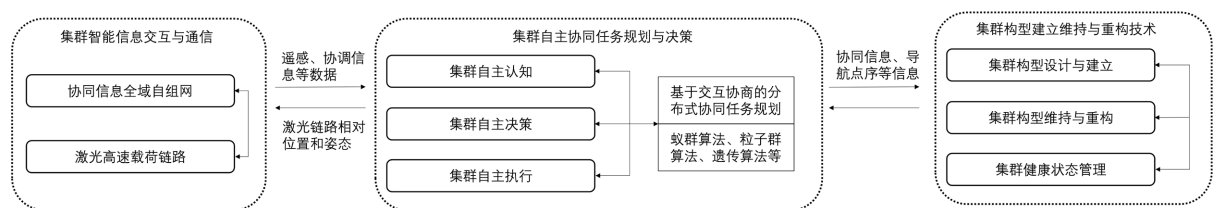


Figure 4. Autonomous control information flow of cluster clusters
图 4. 星群集群自主控制信息流

4. 智能微纳卫星集群自主协同控制技术四大关键技术

4.1. 集群智能信息交互与通信

4.1.1. 发展现状分析

目前，卫星集群信息交互与通信具有很大的发展潜力，但也存在着一些关键的具有挑战性的问题：

1) 微纳卫星集群是一种成员数量众多、结构复杂的多样化集群，集群中涉及卫星间协同任务时的自主信息交互及通信，其高速信息交互及通信能力将极大影响各卫星协同任务的执行速度，如何利用卫星集群网络形成一个完整的自适应智能信息交互及通信体系，实时准确地自主获取、处理和分发空间信息，提高频谱分配效率，保证通信安全及能量供给等任务成为了值得深入研究的问题。

2) 各个国家为了利用和占领太空资源，已经发射了很多的卫星和航天器，这些异构节点之间如何组网，相互配合协同通信也成为了当前研究的主要问题[17]。

3) 卫星通信系统中一般有两种通信链路。传统的卫星通信系统是采用空间-地球链路，由于无线电波要穿过大气层，加之雨衰因素，大容量通信不容易实现。

为解决这些问题，国外最早开始引入星间链路(ISL)，目前已经得到了较为广泛的应用，涵盖了通信、中继、导航、预警等多种卫星系统，其工作频段也涵盖了 UHF、S、Ku、Ka、V 等频段和激光频段，且在同一星座中存在多种频段兼容共用的特点。

到目前为止，无线电 ISL 已经在几个主要的 GNSS 系统中应用或实验。GPS Block IIF [18]使用 UHF 波段 ISL，并在 6 天的自主操作中提供 ≤ 180 米的用户范围误差(URE)。欧洲航天局(ESA)已经启动了两个伽利略探索项目，“GNSS+”和“ADVISE”，其中轨道和时钟估计的准确性在 ISL 的支持下达到几厘米的水平[19]。

与射频相比，激光器具有更大的带宽、更高的数据速率和更好的信噪比[20]，为 ISL 提供了另一种可能性。将激光通信和激光测距相结合的技术已经在空间任务和地面实验中进行了测试。尘埃环境探测器(LADEE)卫星[21]实现了 622 Mbps 的下行链路和 20 Mbps 的上行链路通信，与地面终端以及小于 1 厘米的距离误差。在 Liu 等人[22]进行的地面实验中，激光链路的数据速率达到 1 Gbps，测距精度优于 0.9 mm。

随着国内学者对星间链路(ISL)的深入研究，卫星移动通信系统的依赖于地面网络的程度得以降低，这使得路由选择和网络管理更为灵活方便。同时，地面信关的数量也得以减少，从而显著降低了地面段的复杂度和投资[23][24]。利用星间链路可以将多颗卫星互联，结合人工智能的应用，建立完全独立于地面系统的智能卫星网络，在扩大系统通信容量的同时，还可以提升整个系统的抗毁性、自主性、机动性和灵活性。现有的星间高低速网协同通信工作流程如图 5 所示。

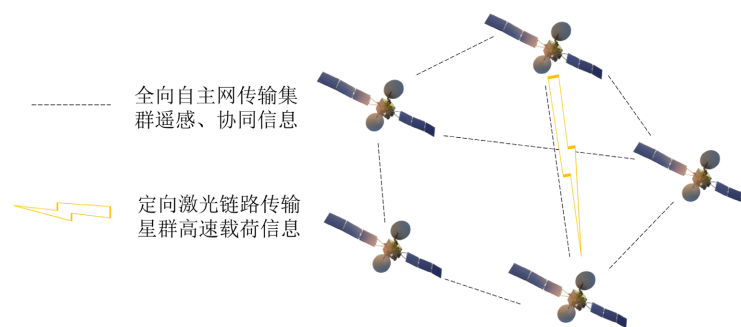


Figure 5. Workflow of cooperative communication for cluster high and low speed networks

图 5. 星群高低速网协同通信工作流程

对比线电 ISL 和激光 ISL 两者的优劣后，结合星间自组网的特点，人们又提出了星间高低速协同通信网络的概念，该网络采用了微纳卫星间自组网和高速激光链路相结合的方式，实现信息共享协同工作。智能微纳卫星集群任务过程中，首先通过自组网实现星间协同信息引导激光器的跟瞄和对准，达到高低

速协同通信的目的。

其中, 图中的全向星间自组网包括物理层、数据链路层、网络层和应用层[25], 具备服务质量(QoS)功能, 保证了信息的高可靠的传输, 主要完成低速遥测、遥控、协同信息的全向传输; 星群配置的小型化、高带宽的星间激光链路则完成点对点定向的大数据量载荷数据传输。

4.1.2. 趋势与展望

智能微纳卫星信息交互与通信, 在单体卫星作业的空间-地球链路信息交互通信上已经有了多年的研究积累, 而智能微纳卫星集群通信网络的研究还处于起步阶段。现有的星座自主信息交互及通信研究是从长期信息交互效率维持、集群星座通信拓扑设计、数据处理等角度出发, 为现有规模星座提出了解决方案。但伴随着星座卫星小型化、星座规模化发展趋势, 星座呈现成员卫星数量庞大、多轨道平面密集分布、单星解算能力受限等新的特点, 为信息交互及通信能力提出了新的挑战[26]。因此, 未来大规模智能微纳卫星自主信息交互及通信将朝着高度自主、分布式、智能化方向发展, 并聚焦星座整网长期漂移误差修正、大规模节点复杂星间测量拓扑结构优化、高效率数据处理等具体问题展开研究[27] [28]。

4.2. 集群自主协同任务规划与决策

4.2.1. 发展现状分析

集群自主协同任务规划与决策可理解为智能控制技术与平台控制技术的高度综合, 涉及了自动控制理论、人工智能理论、系统论、运筹学、信息论等众多学科领域[29]。微纳卫星任务多样化的趋势下, 本身能量受限的微纳卫星将会受到更严峻的资源不足的挑战, 其协同任务规划与决策能力将对多样化任务长时间作业产生重要影响。微纳卫星集群成员众多且相对密集, 实时性要求较高, 需要微纳卫星集群具备自主认知和自主任务规划和决策能力。微纳星群自主认知和自主决策中面临目标非合作特性、任务规划时效性强、星上计算资源受限、规划要素多样且复杂等难点, 对星群自主认知和自主决策框架提出较高的要求。

目前, 各领域的国内外学者正在不断针对不同的问题, 进行着众多研究, 如针对卫星网络中的数量众多而复杂的问题, 文献[30]提出一种基于 Agent 的集群网络框架, 既可以提高卫星的效率, 又可以保证网络的稳定性和可扩展性。为解决自主无人机在目标覆盖问题中的路径规划问题, 文献[31]充分了利用遗传算法(GA)、蚁群优化器(ACO)、Voronoi 图和聚类方法等人工智能方法, 提出 GA 中的初始种群增强方法, 从而加速收敛过程。

针对智能卫星集群总体的任务规划及决策框架研究尚少的现状, 为构建基于群体智能的分布式协同框架, 国内学者段海滨及邱华鑫提出了基于合同网的任务协商与分配方式, 以适应分布式动态场景下集群任务对快速响应能力和资源优化性能要求。如图 6 为最新研究提出的集群自主认知和自主决策研究框架, 其集群任务可调度性预测将充分利用集群任务规划的历史经验数据, 将历史规划结果作为训练数据, 通过构建合适的机器学习模型, 准确预测当前的规划方案, 完成对集群任务规划; 任务协商与分配则采用基于市场机制设计的合同网协议, 将蚁群算法[32]、粒子群算法[33]、遗传算法[34]等智能优化技术引入到合同网中进行招标、投标和评标等过程, 同时利用历史任务分配结果加速集群协商效率; 成员卫星方案优化则是在单星的资源和任务等约束条件下对分配的任务进行优化调整, 包括卫星姿态优化、轨迹优化、载荷执行优化等方面[14]。

4.2.2. 趋势与展望

未来, 随着人工智能的不断发展, 自主自适应协同任务规划将是一个重要研究方向[35]。自主协同任务规划系统中的卫星将能够根据实时的环境和任务需求进行灵活的任务规划和决策, 适应多变的工作场

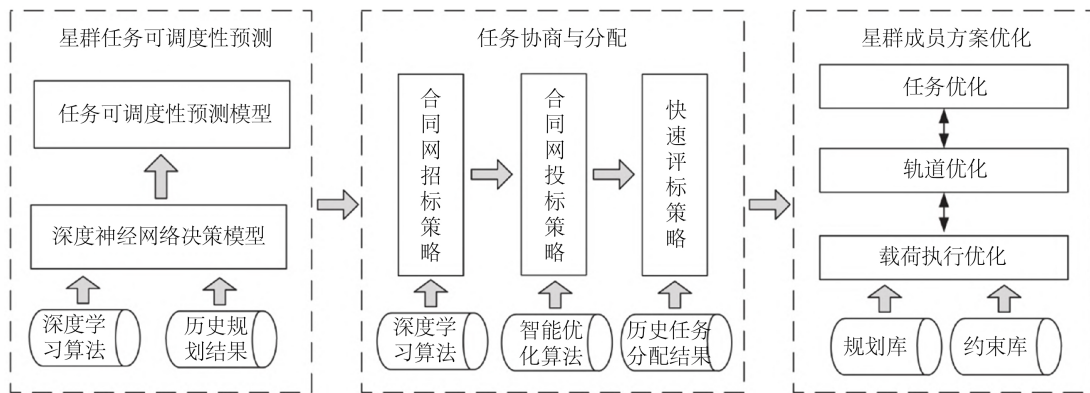


Figure 6. Research framework for autonomous cognition and autonomous decision making in clusters
图 6. 集群自主认知和自主决策研究框架

景。深度学习技术在决策中的应用也将得到进一步发展，其在图像处理、目标识别和路径规划等方面已经显示出了强大的能力，将深度学习应用于集群自主协同任务规划与决策中，让集群自主协同规划系统拥有学习泛化能力，不断提高决策的准确性和效率。

4.3. 集群构型建立维持与重构技术

4.3.1. 发展现状分析

卫星集群发展的初期，研究内容主要是针对星座的轨道设计，设计目标包括星座构型的最优化[36][37]、星座覆盖特性的最优化等[38][39]，在星座构型确定的基础上进行星座构型建立维持，首先需要解明微纳卫星在自然摄动状态下的相对运动特征，这包括了微纳卫星之间的相对位置、相对速度以及相对加速度等信息。而通过分析和理解这些相对运动特征，可以确定保持星座构型所需的控制策略和算法。文献[40]研究了地球非球形引力摄动下，各航天器初值偏差引起的星座构型演化问题。由于燃料消耗巨大，传统的集中控制方法难以应用于卫星集群，并且很少有研究涉及卫星集群的数学表征，由高万英带领的团队首先提出一种卫星团的数学表征方法，该数学表征方法可以准确地描述卫星团的整体状态和卫星之间的关系，为后续的编队控制算法提供了基础。该团队还使用了 50 颗卫星的集群进行了仿真，验证该方法是否能够实现卫星团簇编组的动态迁移和快速重构的功能，为卫星团编队重构提供了一种新的解决方案，在实际应用中具有极大潜力[41]。

随后为实现微纳星群的均衡构型和最优性能指标，人们提出了一种基于合作博弈优化的方法，通过控制微纳星群的各成员卫星，完成构型建立、维持和重构，并防止碰撞的发生。为了实现构型最优的性能指标，使用合作博弈优化的理论，使星群内各成员卫星的资源消耗达到均衡，避免某颗成员卫星过度消耗资源。合作博弈优化是一种利用严谨的数学模型解决现实世界利益冲突的理论，在该理论中各方通过采取各自最佳策略达到力量均衡。

这种基于合作博弈优化的方法为微纳星群构型的优化提供了一种新的思路，通过研究博弈理论和资源分配，可以实现微纳星群的最优构型和性能指标，进一步推动微纳卫星技术的发展，而具体的实施方法和算法需要进一步研究和探索[42]。

4.3.2. 趋势与展望

微纳卫星集群构型建立、维持与重构是一个复杂的多体运动控制问题，需要设计合理高效的轨道控制策略。在构型保持方面，相对构型的差异主要涉及平均半长轴差异和相位差漂移，这是由于星座中不同卫星的质量差异引起的。而在轨道面外相对构型保持方面，需要处理地球非球形引力、大气阻力以及

日月引力摄动等因素导致的轨道面长期变化。

未来,智能微纳集群构型建立、维持与重构技术将进一步深入研究这些问题,并处于快速发展阶段。通过引入智能化的算法和决策系统,集群可以自主进行构型建立、维持和重构,为集群的整体性能和任务执行能力提供更好的支持。这将带来令人振奋的前景,推动微纳卫星技术的进一步发展和应用[43]。

4.4. 智能健康预测与管理

4.4.1. 发展现状分析

预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)技术是一种基于系统的历史状态和环境因素,评估当前的健康状态,确定未来的故障发生时间,并计算系统有效寿命的通用技术[44]。PHM 系统一般需要完成故障检测、故障鉴定与隔离、故障预测、健康评估和决策建议等功能,以降低系统故障风险并确保系统的可靠性[45]。针对卫星制导、导航与控制(Guidance-Navigation-Control, GNC)分系统的故障预测与健康管理工作近年来被推广应用到航天器安全运行管理中,发挥越来越重要的作用[46]。作为航天大国,美国在航天器健康管理领域处于领先地位,早期便开发了众多针对航天器整体及其各个分系统的健康管理工具,用于有效管理卫星在轨期间的安全数据。早期,美国 NASA 健康管理主要通过归纳式监测系统(Inductive Monitoring System, IMS) [47]实现,自 2007 年起,基于 IMS 的系统就被用于监测控制力矩陀螺,经过不断的扩展,现已能应用于航天器控制子系统。这个系统的可靠性高,具有良好的通用性,且不需要大量的计算资源,已在“国际空间站”的多个航天器上进行了初步应用。但这个系统只用于监测,且虚警率较高,监测数据仍需要地面进行分析和决策。2010 年, NASA 开发了下一代卫星运行管理系统(Integrated Vehicle Health Management, IVHM) [48]。这个系统已经拥有了一定的自主性,能够为多个子系统(包括控制系统)提供实时的健康管理,包括数据监测和分析诊断。这些功能包括实时故障检测、故障判断、决策制定和结果评估。所有的数据和结果都会被传输到地面,根据故障的严重性,决定是否需要进行进一步分析。

相比而言,我国尽管也在开展星上自主健康管理系统的建设,但目前控制系统健康管理系统的自主性较差,仅能保证部分单机产品的数据测量和分析,如控制力矩陀螺和动量轮。高分三号卫星[49]在设计时就对健康管理考虑较为充分,可以实现在非地面干预情况下,自主对健康状态进行实时测量与数据分析管理。实践十号卫星[50]作为一个短期在轨飞行的低轨航天器,在轨飞行期间对飞轮等关键零部件进行了自主健康状态监控。卫星 GNC 分系统的健康管理极其复杂,且必须与实际工程应用紧密相连。美国在这个领域处于领先地位,已经拥有了在多个型号领域应用的理论方法和管理体系。尽管国内也有一些型号开始探索健康管理,但其应用方向相对单一,自主级别较低,与国外的先进理论还有较大的差距。

4.4.2. 趋势与展望

随着微纳卫星集群系统的复杂需求和特点,卫星控制系统健康管理技术的发展变得越来越重要。人工智能技术的快速发展为卫星健康管理技术带来了新的机遇,向基于数据驱动的智能管理方向发展,其中集群健康管理技术主要存在以下 2 个发展方向:

1) 单星健康管理的发展:从简单的功能检查/监视转向更综合的健康管理系统,包括检测、诊断和预警功能。同时,从单个卫星产品向整个系统的健康管理方向发展,从单一系统架构向开放系统架构、通用化方向发展。总体而言,健康管理技术将更加智能化、综合化、实时化和通用化。

2) 集群智能健康管理系统的建立:建立分布式协同观测的集群,在单星的单机、系统、整星 3 个层级之上,引入星簇及星座 2 个层级,形成集群网络多层级的健康管理状态评估模型。在进行集群健康管理时,需要发展星群动态拓扑分析、星间数据交互式智能健康诊断和群体决策等应用。

5. 结束语

本文根据智能微纳卫星高时效、高效能,高自主性的需求,针对最新的基于群体智能的微纳卫星集群自主控制系统的相关研究,对智能微纳卫星集群自主协同控制技术进行了总体研究和分析,并对集群智能信息交互与通信、集群自主协同任务规划与决策、集群构型建立维持与重构技术、智能健康预测与管理四大关键技术逐一进行了分析,为推动智能微纳卫星集群的在轨应用提供了一定的技术支撑。未来,各同行可以该研究为基础,进一步发展智能微纳卫星集群在轨应用功能开发及技术创新,不断突破相关技术,结合人工智能,大力开展基于天地学习泛化的集群自主协同控制的研究,拓展微纳卫星在轨应用创新,力求满足日益增长的任务复杂的航天需求,为提升我国智能微纳卫星应用与技术开发创造更多价值。

参考文献

- [1] 虞业冻, 郑倩云, 杨善强, 等. 导航类微纳集群系统构建技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 246-251.
- [2] Levchenko, I., Keidar, M., Cantrell, J., *et al.* (2018) Explore Space Using Swarms of Tiny Satellites. *Nature*, **562**, 185-187. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06957-2>
- [3] 闻新. 太空探索正在进入航天器集群时代[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(5): 19-26.
- [4] 白雪, 左小玉, 陈天冀, 等. 小卫星集群系统任务规划与控制方法[J]. 航天控制, 2022, 40(4): 61-68.
- [5] 德国将人工智能用于卫星间自主协调运行[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(3): 315.
- [6] 刘付成. 人工智能在航天器控制中的应用[J]. 飞控与探测, 2018, 1(1): 16-25.
- [7] 黄旭星, 李爽, 杨彬, 等. 人工智能在航天器制导与控制中的应用综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 106-121.
- [8] 刘付成, 韩飞, 韩宇, 等. 分布式协同微纳遥感集群的智能控制系统关键技术[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(4): 1-24.
- [9] 刘树光, 刘荣华, 王欢, 等. 国外无人机集群协同控制技术新进展[J]. 飞航导弹, 2021, 440(8): 24-31.
- [10] Sun, C., Wang, X., Qiu, H., *et al.* (2021) Game Theoretic Self-Organization in Multi-Satellite Distributed Task Allocation. *Aerospace Science and Technology*, **112**, Article ID: 106650. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106650>
- [11] 夏克伟, 卫强, 邹尧. 航天器集群协同目标伴飞分布式控制[J]. 控制工程, 2021, 28(11): 2101-2107.
- [12] 邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队[J]. 工程科学学报, 2017, 39(3): 317-322.
- [13] 郭玉洁. 基于仿生的微纳卫星集群协同控制研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [14] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [15] 吴明曦. 智能化战争[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [16] 付伟达, 汪忠辉, 苏晨光, 等. 基于群体智能的微纳卫星集群自主控制系统研究[J]. 航天器工程, 2023, 32(2): 23-30.
- [17] 刘思力. 卫星编队星间自组网关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 国防科技大学, 2019.
- [18] Ore, O. (1957) Graphs and Subgraphs. *Transactions of the American Mathematical Society*, **84**, 109-136. <https://doi.org/10.1090/S0002-9947-1957-0083725-9>
- [19] Fernández, F.A. (2011) Inter-Satellite Ranging and Inter-Satellite Communication Links for Enhancing GNSS Satellite Broadcast Navigation Data. *Advances in Space Research*, **47**, 786-801. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.10.002>
- [20] Harathi, K., Krishna, P., Newman-Wolfe, R.E., *et al.* (1993) A Fast Link Assignment Algorithm for Satellite Communication Networks. *Proceedings of Phoenix Conference on Computers and Communications IEEE*, Tempe, 23-26 March 1993, 401-408.
- [21] Liu, S., Yang, J., Guo, X., *et al.* (2020) Inter-Satellite Link Assignment for the Laser/Radio Hybrid Network in Navigation Satellite Systems. *GPS Solutions*, **24**, Article No. 49. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-0961-9>
- [22] 刘向南, 李英飞, 向程勇, 等. 激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 147-153+167.
- [23] 刘向南, 赵卓, 李晓亮, 等. 星间链路技术研究现状及关键技术分析[J]. 遥测遥控, 2019, 40(4): 1-9.

- [24] 李龙龙, 耿国桐, 李作虎. 国外卫星导航系统星间链路发展研究[J]. 测绘科学技术学报, 2016, 33(2): 133-138.
- [25] 陈浩澜, 张艺, 章小宁, 等. 分布式集群网络组网技术研究[J]. 通信技术, 2021, 54(7): 1647-1657.
- [26] 章可钦, 林宝军, 刘迎春, 等. 基于激光微波混合星间链路的导航星座网络优化方法[J]. 光通信技术, 2023, 47(4): 62-66.
- [27] Zhang, B., Wu, Y., Zhao, B., et al. (2022) Progress and Challenges in Intelligent Remote Sensing Satellite Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **15**, 1814-1822. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3148139>
- [28] Fourati, F. and Alouini, M.S. (2021) Artificial Intelligence for Satellite Communication: A Review. *Intelligent and Converged Networks*, **2**, 213-243. <https://doi.org/10.23919/ICN.2021.0015>
- [29] 马培蓓, 纪军, 单岳春. UAV 集群自主协同决策控制的研究现状与分析[J]. 飞航导弹, 2017, 387(3): 47-52.
- [30] Geng, S., Liu, S., Fang, Z., et al. (2021) An Agent-Based Clustering Framework for Reliable Satellite Networks. *Reliability Engineering & System Safety*, **212**, Article ID: 107630. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107630>
- [31] Pehlivanoglu, Y.V. and Pehlivanoglu, P. (2021) An Enhanced Genetic Algorithm for Path Planning of Autonomous UAV in Target Coverage Problems. *Applied Soft Computing*, **112**, Article ID: 107796. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107796>
- [32] 吴庆洪, 张纪会, 徐心和. 具有变异特征的蚁群算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(10): 1240-1245.
- [33] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
- [34] 席裕庚, 柴天佑, 恽为民. 遗传算法综述[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 697-708.
- [35] 苏菲. 动态环境下多UCAV分布式在线协同任务规划技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 国防科学技术大学, 2013.
- [36] Hanson, J.M. and Linden, A.N. (1989) Improved Low-Altitude Constellation Design Methods. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **12**, 228-236. <https://doi.org/10.2514/3.20395>
- [37] 王瑞, 向开恒, 马兴瑞. 平均轨道要素及其在卫星星座设计中的应用[J]. 中国空间科学技术, 2002, 22(5): 14-20.
- [38] 王瑞, 马兴瑞, 李明. 采用遗传算法进行区域覆盖卫星星座优化设计[J]. 宇航学报, 2002, 23(3): 24-28.
- [39] 王海丽, 陈磊, 任萱. 卫星星座全球连续覆盖的仿真分析与优化[J]. 中国空间科学技术, 2001, 21(1): 16-22.
- [40] 胡松杰, 陈力, 刘林. 卫星星座的结构演化[J]. 天文学报, 2003, 44(1): 46-54.
- [41] Gao, W., Li, K. and Wei, C. (2022) Satellite Cluster Formation Reconfiguration Based on the Bifurcating Potential Field. *Aerospace*, **9**, 137. <https://doi.org/10.3390/aerospace9030137>
- [42] 杨盛庆, 吴敬玉, 朱文山, 等. 基于星间链路的星座相对构型保持方法[J]. 航空学报, 2023, 44(6): 242-253.
- [43] 彭祺攀, 武新峰, 王北超, 等. 航天器构型重构技术研究进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(2): 16-31.
- [44] Pecht, M.G., et al. (2009) Prognostics and Health Management of Electronics. In: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, 85-191. <https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm118>
- [45] Malin, J. and Oliver, P. (2007) Making Technology Ready: Integrated Systems Health Management. *AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, Rohnert Park, 7-10 May 2007, 2833. <https://doi.org/10.2514/6.2007-2833>
- [46] Yin, S., Xiao, B., Ding, S.X., et al. (2016) A Review on Recent Development of Spacecraft Attitude Fault Tolerant Control System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63**, 3311-3320. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2530789>
- [47] Iverson, D.J. (2016) System and Method for Outlier Detection via Estimating Clusters. U.S. 9,336,484. 2016-5-10.
- [48] Tafazoli, M. (2009) A Study of On-Orbit Spacecraft Failures. *Acta Astronautica*, **64**, 195-205. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.07.019>
- [49] 王文平, 王向晖, 徐浩, 等. 高分三号卫星自主健康管理系统设计及实现[J]. 航天器工程, 2017, 26(6): 40-46.
- [50] 康琦, 胡文瑞. 微重力科学实验卫星——“实践十号”[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(5): 574-580.