



星群内外态势认知与安全控制的体系架构及理论方法

李文博 刘鹏 刘萍 刘成瑞 刘文静 马亚杰 薛文超 党庆庆

System Architecture and Theoretical Methods for Internal and External Situation Awareness and Security Control of Satellite Swarm

LI Wen-Bo, LIU Peng, LIU Ping, LIU Cheng-Rui, LIU Wen-Jing, MA Ya-Jie, XUE Wen-Chao, DANG Qing-Qing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250326>

您可能感兴趣的其他文章

无人飞行器集群自主控制: 预设性能驱动的安全编队控制

Autonomous Control of Unmanned Aerial Vehicle Swarms: Prescribed Performance Driven Safety Formation Control

自动化学报. 2025, 51(5): 931–941 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240603>

外部干扰和随机DoS攻击下的网联车安全 H_∞ 队列控制

Secure H_∞ Platooning Control for Connected Vehicles Subject to External Disturbance and Random DoS Attacks

自动化学报. 2024, 50(2): 348–355 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c230327>

非线性系统的安全分析与控制: 障碍函数方法

Safety Analysis and Safety-critical Control of Nonlinear Systems: Barrier Function Approach

自动化学报. 2023, 49(3): 567–579 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220888>

无线化工业控制系统: 架构、关键技术及应用

Wireless Industrial Control System: Architecture, Key Technologies and Applications

自动化学报. 2023, 49(3): 540–549 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220571>

基于滤波控制障碍函数的严格反馈系统安全控制

Safe Control of Strict-feedback Systems Using Filtered Control Barrier Functions

自动化学报. 2024, 50(12): 2474–2486 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240003>

隐蔽攻击下信息物理系统的安全输出反馈控制

Secure Output-feedback Control for Cyber-physical Systems Under Stealthy Attacks

自动化学报. 2024, 50(7): 1363–1372 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220893>

星群内外态势认知与安全控制的体系架构及理论方法

李文博^{1,2} 刘鹏³ 刘萍⁴ 刘成瑞^{1,2} 刘文静² 马亚杰¹ 薛文超^{5,6} 党庆庆³

摘要 围绕下一代空间基础设施体系建设的重大战略需求, 针对复杂任务下卫星集群的态势认知与安全控制技术展开探讨. 首先, 分析国内外卫星集群的发展现状与面临挑战, 指出当前研究在理论体系完备性、感知信息全面性、评估可信度、决策合理性及执行精准性等方面存在不足. 其次, 重点阐述星群 OODA 体系架构, 分别探讨感知、评估、决策与执行各环节的关键技术与研究进展. 最后, 对星群态势认知与安全控制技术的未来发展进行展望, 提出需构建能力量化表征模型, 发展多源信息交互与融合的态势全面感知、内外因素耦合影响下的可信评估以及动态场景下的快速合理决策和多目标跨尺度任务的精准执行, 以提升星群自主安全运行能力, 为下一代空间基础设施建设提供理论和技术基础.

关键词 卫星集群; 内外态势; 感知评估; 决策执行; 安全控制; 体系架构

引用格式 李文博, 刘鹏, 刘萍, 刘成瑞, 刘文静, 马亚杰, 薛文超, 党庆庆. 星群内外态势认知与安全控制的体系架构及理论方法. 自动化学报, 2026, 52(3): 363–380

DOI 10.16383/j.aas.c250326 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250326

System Architecture and Theoretical Methods for Internal and External Situation Awareness and Security Control of Satellite Swarm

LI Wen-Bo^{1,2} LIU Peng³ LIU Ping⁴ LIU Cheng-Rui^{1,2} LIU Wen-Jing²
MA Ya-Jie¹ XUE Wen-Chao^{5,6} DANG Qing-Qing³

Abstract This paper focuses on the critical strategic demands of next-generation space infrastructure system construction, exploring situational cognition and security control technologies for satellite swarm under complex mission scenarios. It analyzes the developmental status and challenges of domestic and international satellite swarm, identifying current research deficiencies in completeness of theoretical frameworks, comprehensiveness of perceptual information, assessment credibility, decision-making rationality, and execution precision. The study emphasizes the OODA architecture system for satellite swarm, including perception and evaluation in situational cognition, as well as decision-making and collaborative execution in security control. Key technologies and research advancements in each operational phase are systematically discussed. Finally, prospects for future development in satellite swarm situational cognition and security control technologies are proposed: Establishing capability quantification models to achieve comprehensive situational awareness through multi-source information interaction and fusion, enabling credible assessment under coupled internal/external influencing factors, realizing rapid and rational decision-making in dynamic scenarios, and accomplishing precise execution of multi-objective cross-scale tasks. These advancements aim to enhance the autonomous operational safety capabilities of satellite swarm, providing theoretical and technical foundations for next-generation space infrastructure construction.

Keywords satellite swarm; internal and external situation; perception assessment; decision execution; security control; system architecture

Citation Li Wen-Bo, Liu Peng, Liu Ping, Liu Cheng-Rui, Liu Wen-Jing, Ma Ya-Jie, Xue Wen-Chao, Dang Qing-Qing. System architecture and theoretical methods for internal and external situation awareness and security control of satellite swarm. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(3): 363–380

收稿日期 2025-07-15 录用日期 2025-10-27

Manuscript received July 15, 2025; accepted October 27, 2025
国家自然科学基金 (62022013), 姑苏创新创业领军人才计划 (ZXL2023177), 思源联盟基金 (HTKJ2024SY502002) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62022013), Suzhou Municipal Science and Technology Bureau (ZXL2023177), and Siyuan Alliance Fund (HTKJ2024SY502002)
本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106 2. 北京控制工程研究所 北京 100094 3. 西北工业大学民航学院 西安 710072 4. 电子科技大学 (深圳) 高等研究院 深圳 518110 5. 中国科学院

数学与系统科学研究院 北京 100190 6. 中国科学院大学数学科学学院 北京 100049

1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094 3. College of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072 4. Shenzhen Institute for Advanced Study, University of Electronic Science and Technology of China, Shenzhen 518110 5. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 6. School of Mathematical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

卫星集群 (星群) 是指由多颗卫星构成的分布式航天器系统, 通过协同工作执行单一卫星难以完成的复杂任务, 如多目标持续跟踪、全球互联网通信、在轨制造与组装等, 需要具备长期的安全可靠自主运行能力 (低轨卫星 5 年以上, 高轨卫星 15 年以上). 作为提升国家航天能力、拓展商业航天市场、完善空间基础设施的关键技术, 卫星集群相关技术已被正式写入《国家空间科学中长期发展规划 (2024—2050 年)》和《中国航天科技活动蓝皮书 (2023 年)》. 该技术不仅是国家重大战略需求的重要组成部分, 也是当前空间科学与技术研究的前沿热点与关键难题.

近年来, 国际卫星集群发展迅速, 呈现出多元化和规模化的趋势, 国内外代表性星座任务如图 1 所示. 2018 年, 美国 SpaceX 公司启动星链 (Starlink) 计划, 旨在提供全球互联网服务^[1]. 2019 年, 英国 OneWeb 公司部署低轨卫星互联网星座, 构建覆盖全球的高速宽带通信网络^[2]. 2021 年, 美国“黑杰克 (Blackjack)”项目利用商业卫星技术, 构建小型、安全、低成本的近地轨道 (low earth orbit, LEO) 军事卫星星座^[3]. 2022 年, 俄罗斯 Sfera (球体) 星座项目启动, 构建多用途低轨卫星星座, 服务于地球观测、通信和导航等任务^[4]. 2023 年, 美国柯伊伯 (Kuiper) 计划获批, 致力于提供全球高速互联网服务. 2026 年, 加拿大 Lightspeed 计划构建低轨卫星互联网星座, 实现高速、低延迟的通信服务. 我国在卫星集群领域同样取得了重要进展. 2015 年, 中国吉林一号商业遥感卫星星座开始部署, 广泛应用于国土资源调查、环境监测和灾害预警等领域^[5]. 2018 年, 鸿雁星座启动建设, 具备全天候、全时段

及复杂地形条件下的实时双向通信能力^[6]. 同年, “天启”物联网星座开始部署, 专注于提供低轨窄带物联网通信服务^[7]. 2024 年, 我国启动 G60 星链计划 (千帆星座), 构建大规模低轨卫星通信网络; 同期, 星算计划启动, 旨在构建天地一体化算力网络; 此外, 国网星座启动建设, 计划形成覆盖全球的互联网卫星星座^[8]. 2030 年, 觅音计划预计将通过多颗卫星协同工作, 开展地外文明搜索研究.

上述星群任务不仅推动了航天技术的持续进步, 还为通信遥感、导航定位、空间科学等领域提供了重要支撑. 在当前全球航天事业蓬勃发展的背景下, 我国航天强国战略不断深入推进, 2024—2025 年“商业航天”连续被写入政府工作报告, 为卫星集群发展按下加速键.

态势认知与安全控制是星群完成复杂任务以及自主安全运行的两个关键核心. 星群态势认知是星群实时获取、理解并预测自身及其所处空间环境动态变化的技术, 旨在为星群安全控制提供全面且可信的输入信息, 其核心包括态势感知与态势评估两部分. 星群安全控制是星群通过合理决策与协同执行, 动态调整自身运行状态和安全策略的技术, 旨在确保星群稳定运行、防范潜在威胁、优化整体性能和任务执行效率, 其核心包括快速决策和协同执行两部分. “态势感知、态势评估、快速决策、协同执行”四个紧密相连的环节构成了一个完整的闭环回路, 共同组成 OODA (observation-orientation-decision-action) 体系架构.

鉴于此, 本文从星群 OODA 体系架构的定义与内涵出发, 指出当前研究在理论体系完备性、感



图 1 国内外代表性星座任务

Fig.1 Domestic and international representative constellation tasks

知信息全面性、评估可信度、决策合理性及执行精准性等方面面临的挑战, 同时从态势认知与安全控制能力的量化表征、多源信息交互融合的态势感知、内外态势耦合影响的态势评估、动态场景下的任务快速决策和面向多目标跨尺度的协同控制五个方面, 分析国内外卫星集群的发展现状与存在的不足, 最后对星群态势认知与安全控制技术的未来发展进行展望.

1 星群 OODA 体系架构

1.1 星群 OODA 架构的定义与内涵

星群在处理简单任务时, 通常采用以地面站控制中心指挥为核心, 集中管理通信任务的体系架构. 然而, 当面对复杂任务时, 传统简单任务体系架构的弊端逐渐显现: 一方面, 地面站集中控制难以快速响应复杂任务中多变的实时需求; 另一方面, 卫星自主性有限, 难以灵活处理多任务并发和任务间的复杂关联. 因此, 星群引入 OODA 体系架构, 该体系架构将一个复杂任务过程分解为一个包含“感知-评估-决策-执行”四个环节的闭环回路, 可以清晰地阐明一个具体任务过程的关键技术逻辑链条, 从而有效弥补了传统简单任务架构在复杂任务中的不足, 其结构解析如图 2 所示.

态势感知是系统通过多源信息采集、融合与动态推理, 实时认知自身状态与外部环境态势的过程. 其核心包含内感知与外感知两个维度: 内感知聚焦系统内部状态监测, 通过传感器网络、闭环反馈及多源协同观测技术, 实时获取卫星集群的姿轨误差、能源消耗等关键参数; 外感知则关注外部环境威胁识别, 利用光学相机、激光雷达、红外传感器等设备,

采集空间目标位姿、碎片分布、辐射强度等数据.

态势评估是对感知信息的深度分析与综合量化, 旨在动态诊断系统风险并预测威胁演化趋势, 包含内评估与外评估两个层面: 内评估通过故障诊断、健康管理与寿命预测技术, 量化卫星集群的性能退化与可靠性; 外评估则聚焦外部威胁的等级判定, 结合目标特性与环境数据, 计算碰撞风险指数或敌对目标威胁度.

快速决策是系统基于精准态势感知与评估结果, 迅速生成并选择最优行动方案的过程. 其核心在于利用智能算法与预设策略库, 结合实时态势信息, 快速分析当前状况, 综合考虑风险、资源消耗等多维度因素, 实时生成多种应对策略, 并从中筛选出最优方案, 确保星群在复杂多变环境中高效、精准响应.

协同控制是系统基于快速决策结果, 通过任务分配优化与精准执行控制, 确保星群高效有序运行的技术. 其关键在于依据各卫星的性能与状态, 实现任务的智能分配与协同执行, 同时通过分布式协同控制, 实现多星的协同变轨、编队保持及联合观测等复杂动作, 保障星群整体性能最优化, 维持集群的稳定与高效运作.

因此, 态势认知与安全控制技术作为支撑卫星集群协同自主完成复杂任务的关键“使能技术”, 是未来空间科学技术、商业航天等领域的“减负技术”, 对提升星群的安全可靠水平与自主协同能力具有重要意义.

1.2 面临的挑战

复杂任务环境下, 卫星集群的态势认知与安全控制面临诸多挑战. 当前研究尚未建立态势认知和

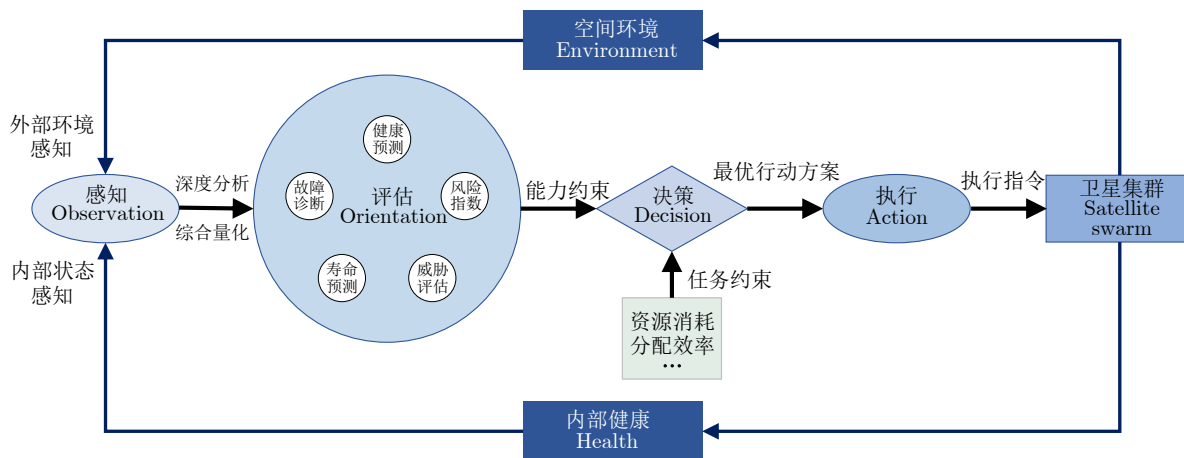


图 2 星群 OODA 环架构解析

Fig. 2 Analysis of satellite swarm OODA loop architecture

安全控制能力量化表征理论, 缺乏系统性的理论指导体系, 限制了对星群执行复杂任务相关技术的深入研究. 传统单一感知方法信息获取不全面, 难以满足复杂环境下的星群态势感知需求; 感知信息与星群内外环境的耦合映射关系尚不清晰, 导致态势评估的可信度不足; 面对动态任务场景, 决策链路响应速度受限, 难以及时做出合理决策; 星群个体的自适应重构触发机制不科学, 集群协同执行精度不高, 进一步制约了星群的自主运行与任务执行能力. 具体包括:

1) 星群态势认知与安全控制能力量化表征问题

在高动态、强干扰的复杂未知空间环境中, 星群执行复杂任务时, 既要应对内部健康状态退化与外部威胁等多维耦合挑战, 还受限于星载资源、任务需求及环境约束. 因此如何表征、判定及量化卫星集群的态势认知与安全控制能力, 是保障星群实现态势认知与安全控制的基础性科学问题, 也是当前理论研究的关键难点.

2) 多源信息交互下星群态势感知问题

在轨资源严重受限、维修难度大以及信息获取不及时、不完备等现实问题, 影响态势感知的准确性和时效性, 还可能导致对星群运行状态的误判, 进而危及星群的安全. 因此如何在资源受限条件下使星群具备内外态势全面感知的能力, 是实现卫星集群在复杂空间环境中运行状态与潜在风险评估的重要挑战.

3) 内外耦合影响下星群协同量化评估问题

在复杂多变的太空环境中, 往往存在内外态势体系孤立、评估不准确的问题, 而考虑内外耦合影响的星群协同量化评估方法能够有效解决这些困难, 但其核心在于如何构建从态势感知信息到态势量化指标的复杂映射关系, 因此目前的挑战为如何构建考虑内外耦合影响的卫星集群协同量化评估方法.

4) 适应动态场景的星群任务快速决策问题

面对场景变化、突发任务冲击及内部资源受限等多重挑战, 亟须精准解析任务需求与星群资源之间的映射关系, 构建高效的动态任务理解与分配模型, 这是提升星群适应能力的关键. 针对星群星载资源有限、多目标多约束的任务决策难题, 如何研发轻量化在线优化算法, 实现多目标优化问题的高效求解, 这是保障整体任务完成效率的核心.

5) 面向多目标与跨尺度的任务精准执行问题

在复杂不确定空间环境中, 内外不确定信息的精确估计和个体-集群的高效分布式协同, 是制约

星群任务执行精度提升的核心问题. 目前存在资源受限条件下单星容错控制难题以及变化态势环境下星群分布式协同难题. 因此如何设计高效的自主重构控制策略, 研发融合高精度估计和分布式控制的方法, 是实现星群构型的动态维护与重构、确保任务高精度执行的关键.

2 关键技术与研究进展

2.1 态势认知与安全控制能力的量化表征

设计阶段态势认知与安全控制能力的量化表征理论, 是星群实现在轨自主安全运行的首要前提. 目前国内外学者的研究主要集中于单星诊断, 重构能力的表征、判定、量化, 诊断重构综合优化这三大方面.

在表征诊断重构能力方面, 系统模型的准确建立是研究的前提和基础. 在机理模型构建方面, Marshall 等^[9]提出一种针对超轻柔性空间飞行器的降阶建模方法, 采用本征正交分解法、节能采样加权法以及浮动参考系等技术手段, 在简化超轻型航天器复杂动力学特性的同时, 仍能保持较高的计算精度; Hearn 等^[10]提出一种空间飞行器推进系统模型, 应用流体力学与热力学原理, 推动了推进系统的研制与验证; Dai 等^[11]则构建空间飞行器电源系统模型, 采用多信号流程图技术进行电源系统的测试性分析. 该方法通过引入正负依赖性描述故障与测试之间的关系, 简化了分析过程, 并通过简单的航天器电源系统验证方法的有效性, 显著提升了测试设计的效率和准确性; Xu 等^[12]构建基于扩展卡尔曼滤波的电池剩余使用寿命预测状态空间模型, 实现对电池状态、参数的精准评估以及有效追踪退化过程. 在数据驱动模型构建方面, Goebel 等^[13]提出基于相关向量机-粒子滤波构建高功率锂电池退化模型的方法, 以提升精度; Kamruzzaman 等^[14]提出一种基于神经网络的建模方法, 通过构建电池充放电功率与荷电状态间的非线性动态关联模型, 实现了电池系统复杂特性的高精度表征; 叶正宇等^[15]提出一种基于神经网络和支持向量机结合的故障诊断方法用于检测并定位故障, 实现未知动态特性建模. 数据驱动模型具有实时性强、可动态更新等优势, 但现有的数据驱动模型具有较弱的可解释性, 且不适用于某些复杂系统.

在诊断能力判定方面, Kóscielyny 等^[16]提出基于二值诊断矩阵的故障可隔离性评价法, 提升诊断算法准确性与可靠性, 且优化了诊断流程. Ji 等^[17]提出基于滑动窗口贡献的诊断算法及故障可检测与

可隔离理论分析方法, 提升了故障的隔离性能和估计准确性. Liu 等^[18] 则提出一种基于特征矩阵的残差多值评价方法, 结合符号有向图和故障动态信息, 实现了典型故障特征与诊断能力的定性评估. 该方法通过引入时间序列信息和多值评估机制, 显著提高了故障诊断的准确性和可区分性, 尤其在处理航天器推进系统故障诊断时, 验证了其有效性和优越性.

在重构能力判定方面, Gehin 等^[19] 提出基于系统功能分析的灵活模型, 该模型能够在系统在线故障时自主更新, 从而实现可重构性的在线判定; 屠园园等^[20] 提出基于鲁棒稳定性的受扰系统可重构性评价手段, 使用可重构级等量化指标, 实现对系统重构能力的精准度量; Wang 等^[21] 提出基于功能目标模型的可重构性判定方法, 运用最小割集分析故障模式下系统能否重构, 用最小路集挖掘系统薄弱环节, 助力系统优化和故障预防; Loureiro 等^[22] 提出基于键图模型的可重构性判定方法, 利用键图工具特性分析故障时的变化, 验证系统可重构条件; Abdesselam 等^[23] 提出基于超图的可重构性评价方法, 将系统方程表示为超边, 依据故障时超边间路径判断可重构性.

在诊断能力量化方面, 刘文静等^[24] 提出定量与定性相结合的可诊断性评价方法, 利用动量轮闭环系统模型和故障征兆关联矩阵进行综合评估. 该方法通过动量轮各故障模式的定量分析与定性判断的结合, 显著提高了故障的可检测性与可分离性的评估精度, 为动量轮的故障诊断设计提供了有力支持, 能够有效识别系统中的故障集合并评估其可诊断性. Eriksson 等^[25] 提出基于滑动窗口建模的解析冗余分析方法, 通过将系统状态空间模型重构为时域滑动窗口模型, 将故障可诊断性量化问题转化为多元分布相似度对比问题, 并利用 K-L 散度量故障特征分布差异, 建立了动态系统的可诊断性量化评价框架. Zhong 等^[26] 基于最小误差极小极大概率机理论, 构建了面向空间飞行器姿态控制系统的可诊断性量化评价模型, 通过概率分类边界优化提升了诊断敏感度. Wang 等^[27] 提出面向工程应用的系统诊断能力综合评价方法, 综合多重实际因素, 建立了分层可诊断性量化指标体系. 符方舟等^[28] 提出卫星编队故障检测能力量化评价指标构建方法, 采用黎曼距离设计了卫星编队检测能力度量指标.

在重构能力量化方面, Richter 等^[29] 基于稳定性分析视角研究分段仿射系统重构能力, 利用线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 工具建立重构能力量化判据; Tu 等^[30] 面向干扰抑制系统提

出鲁棒性导向的重构能力评价策略, 通过执行机构构型优化实现重构效能最大化设计; Staroswiecki^[31] 从能控性分析角度提出基于能控性 Gramian 矩阵的能量表征方法, 通过建立能控性矩阵与重构目标的映射关系, 分别针对三类典型重构目标设计量化评价指标, 开创了线性定常系统重构能力分析的能控性理论框架; Wu 等^[32] 采用能控-能观双 Gramian 矩阵联合分析方法, 通过求解系统最小二阶模态表征冗余水平, 构建同时考虑执行器与传感器故障的线性系统重构能力量化模型, 实现了含虚轴外极点系统的冗余资源量化评估. 目前国内外关于诊断重构能力的判定与量化的研究虽然取得了一定的进展, 但大部分工作均只考虑了单一系统内部的健康情况, 且只面向单星, 对卫星集群的认知与重构能力量化表征还未开展相关的研究.

在诊断重构综合优化方面, 国内外研究关注以状态估计值作为故障诊断与系统重构之间的关键传递信息, 设计故障诊断与系统重构算法. Jiang 等^[33] 提出离散 T-S 模糊系统故障诊断与容错控制协同设计框架, 实现故障信息闭环补偿. Lan 等^[34] 提出自适应滑模增广状态未知输入观测器, 实现对系统状态、执行器故障及扰动的估计. Liu 等^[35] 提出故障估计与容错控制集成设计方法, 实现分布式故障估计及容错控制. 目前诊断重构协同优化并未考虑故障诊断与系统重构对故障处理时间的需求冲突, 面对星群的感知与重构的综合优化研究尚未开展.

国内外关于单星能力量化评估的研究虽已取得显著进展, 但其主要聚焦于航天器内部健康状态诊断, 面向星群的态势认知与安全控制能力量化表征理论研究尚未开展. 构建星群的能力量化表征体系, 仍存在以下几方面的难点: 1) 如何完整表征星群态势认知与安全控制能力; 2) 如何实现对星群态势认知与安全控制能力的严格判定与量化评估; 3) 如何基于构建能力量化指标实现星群软硬件资源的一体化优化配置.

2.2 多源信息交互与融合的星群态势感知

星群态势感知是指星群利用星间信息交互和多源信息融合等技术, 动态捕获星群内部状态 (如卫星位置、姿态、健康状况等) 以及外部威胁 (如非合作目标、空间环境干扰等) 等信息; 当前星群态势感知研究主要围绕高品质全向态势信息提取、多元异构数据交互融合和智能自适应感知机制三大方向展开.

高品质全向态势信息提取是构建可信态势认知的基础, 直接决定了状态估计与异常识别的准确性

与完备性,目前研究主要致力于在有限测量条件下实现目标相对状态与故障的高精度估计. Morbidi 等^[36]提出领航-跟随编队控制方法,通过角度与距离信息估计相对位置,解决了无全局定位下的机器人协同问题. Wang 等^[37]设计超扭滑模观测器,在无角速度测量的条件下实现航天器姿态估计,为资源受限的微纳卫星提供了高效感知方案. Ghasemi 等^[38]设计集中式扩展卡尔曼滤波器 (extended Kalman filter, EKF) 架构,通过残差生成与阈值选择技术,显著提升了航天器编队的故障检测准确率. Benninghoff 等^[39]提出一种估计一个未知目标的惯性矩阵和质心的原始方法. 该方法假设目标是一个刚体,不受任何外部力矩的影响,将惯性矩估计到一个比例因子,通过使用单目相机或有源激光雷达来确定. 符方舟等^[40]通过开发卡尔曼滤波器组,利用结构化残差实现多重加性故障的检测与隔离,为传感器冗余不足的卫星集群提供了新思路. 然而,当前态势信息提取过程中仍存在诸多问题,如信息不全面、数据质量不高等. 当前研究仍普遍依赖较强的模型假设和环境约束,对初始状态误差、系统非线性及空间扰动等因素的鲁棒性较差,在面对高动态、强不确定的实际在轨环境时,估计精度与泛化能力仍有待提高.

为打通不同来源、不同模态信息之间的壁垒,实现信息互补与协同推理,提升星群整体感知精度与鲁棒性,目前研究聚焦于通过多源信息整合与协同处理从而提升系统对复杂环境的认知能力. 在数据同步方面,阮仁桂等^[41]提出联合卫星与锚固站之间、卫星与卫星之间的 Ka 频段伪距,采用分段一次多项式对钟差建模并构建联合观测方程,实现北斗三号卫星一体化定轨和时间同步,同时可解算锚固站硬件时延,且在有无预报钟速修正的情况下均能达成较高精度的同步效果. Tang 等^[42]通过星间链路 (inter-satellite link, ISL) 时分多址 (time division multiple access, TDMA) 双向单程伪距测量分离出卫星钟差与几何距离,其中钟差用于星间时间同步,同时引入地面锚固站参与定轨以辅助星地数据同步相关的误差修正. 孔祥磊等^[43]提出一种基于 P2P (peer-to-peer) 通信与动态网络拆分的分布式星间数据同步方法,通过星间链路交互与辅助信息比对,实现高动态星座全局状态信息的自主协同与快速一致更新. 在多源数据整合与协同处理方面,郭雷等^[44]提出动态闭环不确定性量化 (dynamic closed-loop uncertainty quantification, DC-UQ) 理论,通过小回路动态检测与闭环反馈机制,实现对多源异质干扰的实时感知与控制优化. 王兆龙等^[45]

提出多航天器协同观测方法,利用多视角图像配准技术解决空间非合作目标的姿态估计问题,显著提升了三维形态重构精度. 高墨等^[46]构建卫星分布式集群管理平台,通过动态监控 CPU、内存等资源状态,结合链路仿真模块实现资源调度的实时反馈,为卫星集群的自主运维提供了技术支撑. 隋维舜等^[47]设计分布式固定时间输出反馈控制方法,结合滑模估计器解决了无角速度测量下的航天器姿态协同问题并促进了局部感知与全局协同的融合. 在处理多源异构数据冲突方面, Auer 等^[48]提出一种以数字表面模型 (digital surface model, DSM) 为几何先验、结合射线追踪技术的 SimGeoI 框架,处理光学图像与 SAR (synthetic aperture radar) 图像因成像原理差异导致的辐射特征不同、几何投影错位的异构冲突数据. Liu 等^[49]针对遥感数据与社交媒体数据融合时存在的概率密度函数差异和地理定位错位问题,通过构建含欧氏距离与遥感特征 (NDVI (normalized difference vegetation index) 差值、NDWI (normalized difference water index) 差值) 的地理最优传输方法,同时实现特征表示对齐与地理定位对齐. 项新建等^[50]针对异构多传感器数据易冲突、传统 D-S 证据理论融合结果易失真的问题,提出一种结合支持度与确定度的异构数据融合方法,在处理冲突证据和正常证据时,均具有更高的聚焦性能与收敛性能,能有效提升数据融合准确率,为多传感器数据融合提供了可靠参考. 然而,现有融合方法多基于理想通信假设,对星间链路延迟、带宽约束及异构网络协议等实际因素的适应性不足,尚未建立起能够支撑高动态拓扑与资源波动的高效、鲁棒融合框架.

使星群具备环境理解与自主决策能力、能够根据任务需求和环境变化实时调整感知策略是实现真正自主化运行的必要途径,该方向研究重点是利用人工智能技术提升系统在复杂环境中的自主感知与决策水平. 朱文山等^[51]提出基于深度学习的航天器位姿估计模型,通过域适应方法增强模型在不同任务场景下的泛化能力,在一定程度上解决了传统视觉传感器在复杂光照条件下的鲁棒性问题. Schmitzer^[52]将基于扩展卡尔曼滤波器的 SLAM (simultaneous localization and mapping) 滤波器与基于 RANSAC (random sample consensus) 的表面重建算法相结合,生成未知非合作目标的模型,用于姿态的进一步优化估计. Pourtakdoust 等^[53]提出基于深度神经网络 (deep neural networks, DNN) 的太阳传感器误差校正方法,利用数据驱动技术消除地球反照干扰. Khorasgani 等^[54]开发神经网络驱动传感器故

障诊断框架,通过残差分析实现非线性系统的实时监测,克服了传统方法对完整状态测量的依赖. Li 等^[55]采用循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 构建反作用轮故障检测模型,通过残差生成突破传统模型依赖的局限. Augenstein 等^[56]提出一种基于纯单目视觉的 SLAM 算法,结合贝叶斯滤波和测量反演方法来处理相对旋转和平移动力学. Li 等^[57]提出一种新的航天器卷积神经网络 (spacecraft convolutional neural network, SCNN-lite) 精简模型,采用 Darknet 骨干网络,进一步提高非合作空间目标感知效率. 然而,当前智能自适应感知机制的研究面临着动态调整策略复杂性和实时性要求高等挑战,还需要进一步优化算法和模型结构.

目前态势感知研究主要关注单星内部健康管理或依赖于地面告警系统的单星外部空间碎片监测. 然而要实现多源信息交互与融合的星群内外态势感知,仍存在以下几方面的难点: 1) 在复杂数据环境下,如何实现面向星群态势全面性感知的信息特征提取与质量提升; 2) 如何在考虑通信条件多变性的前提下,实现多源数据的快速交互与协同融合,解决异构信息融合机制单一问题; 3) 如何针对场景适应能力严重受限的问题,设计适用于不同任务场景的态势感知机制与自主在线调整策略.

2.3 内外因素耦合影响下的星群态势评估

星群态势评估是在态势感知的基础上,通过模型推理和威胁量化,综合评估星群当前运行状态并预测未来演化趋势(如内部健康水平、外部威胁程度以及任务完成情况等). 当前星群态势评估研究围绕内外态势复杂因素影响机理、多维度评估指标量化、数据与模型融合的动态评估机制三大方向展开.

内外态势复杂因素影响机理为星群态势评估的理论基础,旨在揭示多源耦合因素对系统状态的综合影响路径与作用机制. Yang 等^[58]基于模糊理论构建卫星电源系统状态评估模型,通过变权重与无量纲化处理实现健康量化. 杨爱武等^[59]提出一种基于粗糙集 (rough set, RS) 理论和指标重要性相关法 (criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC) 的空战目标威胁评估模型,通过 CRITIC 法确定目标威胁值,并利用数据挖掘启发式算法求解最佳分割集合,仿真结果表明该模型能够有效处理信息缺失情况下的目标威胁评估问题,减少主观因素和先验知识带来的影响. Sun 等^[60]提出一种基于离散动态贝叶斯网络 (discrete dynamic Bayesian networks, DDBN) 和效用理论的

威胁评估方法,通过构建两级动态贝叶斯网络结构,将连续变量转化为离散变量,有效处理了观测数据缺失和动态变化信息下的威胁评估问题. 然而,现有方法在解析耦合关系时,往往忽略了某些次要因素的潜在影响,导致对整体性能影响路径的解析不够全面和精准.

建立能够全面反映系统态势的指标体系并实现有效的量化建模,是实现客观精准评估的前提. Nasrolahi 等^[61]设计基于 MRP (modified Rodriguez parameters) 的传感器故障恢复方案,结合 Lyapunov 稳定性准则,实现了姿态传感器故障下的系统稳定运行. 周弘波等^[62]提出一种基于组合权重的灰色目标威胁评估模型,通过主客观组合赋权的方式,综合考虑客观信息和主观经验,利用灰色理想关联法计算目标的威胁度排序,提高威胁评估的准确性和可靠性. 汪伟等^[63]提出一种基于层次分析法的低空慢速小目标威胁评估方法,通过分析距离、时间、高度、航向、目标识别和群目标等六个主要因素,构建了适用于低空慢速小目标的威胁评估模型. Gao 等^[64]提出一种基于模糊理论的三路决策新型目标威胁评估方法,通过直觉模糊法估计每个目标的条件概率,并构造每个目标的决策阈值,可以有效地处理动态不确定情况下的信息. 但目前的多维度评估指标体系在实际应用中,对于一些突发的、未被纳入指标体系的新威胁,往往难以及时准确地评估和响应.

为提升星群态势评估的实时性与准确性,目前的研究重点是依托物理模型与数据驱动方法的有效融合以及智能优化算法. Xiong 等^[65]利用 SVM (support vector machine) 与云模型结合算法,实现电源系统关键设备健康状态的在线评估,弥补了传统方法在不确定性映射中的不足,同时通过云模型多次生成隶属度向量并统计投票的方法,为健康评估结果提供了明确的可信度指标. 于牧野等^[66]提出 SCSO-BP (sand cat swarm optimization-back propagation) 神经网络故障预测方法,通过沙猫群优化算法提升 BP 神经网络的初始化性能,显著降低了卫星姿态控制系统的预测误差. Liao 等^[67]为解决单一模型态势评估往往受限于其固有假设、数据质量或模型偏差,从而导致评估不确定性高、可信度不足的问题,提出混合预测方法. 该方法融合物理模型与数据驱动技术,显著提升了电池剩余寿命 (remaining useful life, RUL) 预测的鲁棒性,为卫星能源系统的健康管理提供了新范式. Zhang^[68]开发了自适应卡尔曼滤波器,通过联合状态与参数估计提升执行器故障诊断精度,但多重故障隔离能力

不足. 徐西蒙等^[69]提出一种基于自适应推进极限学习机 (extreme learning machine-adaptive boosting, ELM-AdaBoost) 强预测器的目标威胁评估方法, 通过改进 ELM 算法并结合 AdaBoost 分类算法, 在保证较高评估精度的同时减少了评估时间, 同时采用空战训练测量仪中的空战数据并结合威胁指数法构建高质量样本, 增强了评估结果的可信度. Yue 等^[70]提出一种基于改进飞蛾扑火优化算法 (improved moth-flame optimization, IMFO) 优化的灰色神经网络模型 (grey neural network model, GNNM) 的空中目标威胁评估新方法, 将 IMFO 的优异优化性能与 GNNM 的强大学习能力充分结合. 王芳等^[71]提出一种基于回归型支持向量机的空中目标威胁值评估方法, 通过确定基于粗糙集理论的威胁因素, 建立数据离散化和归一化的标准, 并应用四种常见核函数结合网格法和遗传算法进行参数寻优. 此方法通过由专家统一给定威胁因素值与威胁等级, 并标准化处理数据, 保证了评估数据的可靠性与一致性. 尽管如此, 现有的数据与模型融合机制仍存在数据处理效率低下、模型更新不及时等问题, 而且现有方法虽通过云模型、混合建模等方式提升了内部健康或外部威胁评估结果的局部可信度, 但因未能打破内外态势评估体系间的孤立性, 制约了整体可靠性的提升.

当前星群态势评估研究虽已取得显著进展, 但主要聚焦于内外孤立的单星定性评估. 实现内外协同的星群整体态势定量评估, 仍存在几方面难点: 1) 如何克服异构信息融合机制单一、异源异构信息缺乏统一表征模型的问题及揭示内部健康状况与外部威胁之间的耦合影响机理; 2) 如何构建内外态势评估多层级耦合模型, 解决因时空配准精度不足且缺乏特征尺度归一化方法, 克服进行内外态势统一量化的困难; 3) 如何设计数据与模型融合的星群态势可信评估方法, 构建内外协同的智能动态机制.

2.4 适用于动态场景的星群任务快速决策

星群任务快速决策是指通过综合分析内部状态与外部环境, 制定最优安全控制方案 (如星群健康管理、拓扑结构调整等). 随着航天任务的日益复杂和多样化, 大规模分布式异构星群的快速决策能力成为确保任务成功的关键. 目前国内外学者主要从知识获取与任务理解、任务目标分解与动态分配、自主协调决策与协同规划这三大方面开展了研究.

知识获取与任务理解是构建大规模分布式异构星群自主任务执行体系的基础, 为任务分解、资源匹配和动态决策提供核心需求解析与语义理解支

撑. 在应急任务调度方面, Wang 等^[72]提出预调度与重调度结合的分布式调度方法, 解决了动态应急任务插入与资源冲突问题. 朱光熙等^[73]提出一种基于多模态观测需求信息的遥感星群任务智能规划机制, 显著提升了响应速度和资源利用率. 在卫星任务规划方面, Chang 等^[74]提出一种基于启发式知识的贪婪算法, 实现了复杂任务场景下可行解的生成. Cui 等^[75]建立以任务优先级为约束的优化模型, 实现了多星对地协同观测的优化. 在信息关联与决策方面, Kluegl 等^[76]采用自然语言处理技术, 提升了对地观测资源的利用率和服务响应速度. 彭双等^[77]提出一种基于卷积注意力神经网络的方法, 利用卷积神经网络和注意力机制实现了任务的实时决策, 增强了复杂场景下的任务理解能力. 然而, 现有研究在大规模分布式异构星群的知识获取与任务理解方面仍存在不足, 如知识库资源有限、信息处理标准不统一、多模态数据融合鲁棒性不足等问题, 限制其在复杂任务场景中的实用性和适应性, 需进一步深化技术研究以完善体系构建.

任务目标分解与动态分配是构建大规模分布式异构星群协同控制体系的核心, 为资源部署、效能优化和动态调整提供多目标优化与实时决策支撑. 在集中式任务分配方法方面, 尚希杰等^[78]提出结合遗传算法与贪心算法优点的混合规划方法, 提升了任务分配的效率. 靳鹏等^[79]提出一种分布式加权负载均衡合同网任务分配方法, 提高了系统的整体性能. 在分布式任务分配方法方面, 陈书剑等^[80]提出一种平台调相策略和贪婪搜索方法, 有效提高了任务规划的效率和适应性. 在基于人工智能的任务分配方法方面, 赵鹏乾等^[81]采用深度强化学习方法, 解决了多智能体间任务决策问题; Lu 等^[82]提出一种基于卷积注意力神经网络的观测任务序贯算法, 实现了对观测任务的实时决策. 虽然目前的研究在任务分配算法的多样性和实用性方面取得了显著进展, 但大规模分布式异构星群的预测性任务分配决策仍存在挑战.

在自主协调决策与协同规划技术方面, 国内外研究重点关注以多维度参数建模和优化框架为基础, 融合传统优化算法、智能算法以及集群协同控制等方法, 实现任务序列生成、资源分配和系统鲁棒性的全面提升. Pi 等^[83]采用基于深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 的方法, 完成了星地测控链路的规划. 王俊等^[84]提出一种基于多 agent 的方法, 支持星座中各卫星通过协商自适应地生成任务执行序列. 乔熔岩等^[85]提出基于多阶段决策的任务分配模型, 通过任务分级、分解以及层

次分析法确定卫星完成任务的效能权重, 并利用 0-1 整数规划和图上作业法进行任务分配, 解决了侦察卫星任务规划中的任务分配问题. Feng 等^[86]提出一种基于改进合同网协议的方法, 通过设计双层规划模型和并发机制, 优化了任务分配过程, 提高了系统的整体性能. Gazi 等^[87]提出一种结合人工势能函数和滑模控制的去中心化控制策略, 用于多代理系统的编队和跟踪. Yao 等^[88]提出一种基于势函数法的自适应协同控制方法, 用于解决编队飞行卫星在模型不确定性下的碰撞避免和速度一致性问题. 在大规模语言模型 (large language models, LLMs) 与任务规划结合方面, LLMs 在信息处理和逻辑推理方面表现出色, 能够学习用户意图并生成相应的决策方案^[89]. 现有研究在自主协调决策与协同规划技术方面虽有进展, 但在大规模任务规划的实时性、灵活性、动态适应性以及多智能体协同的负载均衡和大规模语言模型的应用成熟度等方面仍存在不足, 限制了其在复杂任务场景中的应用.

尽管分布式异构星群的自主决策技术已取得进展, 但是目前的研究尚未关注耦合变化的内外态势对决策的影响机理. 面向动态场景构建快速决策系统, 仍存在以下几方面的难点: 1) 如何提升复杂动态环境下决策环节的适应性; 2) 面向多任务多目标的协同优化, 如何提升任务规划快速性的.

2.5 面向多目标与跨尺度的星群任务执行

星群任务协同执行依托于分布式协同控制, 实现卫星集群对安全控制策略的快速响应和动态调整 (如智能容错、协同防御等). 目前, 国内外研究主要聚焦于卫星自主重构技术、分布式协同控制及局部模块化仿真验证三个方面.

为应对卫星集群中执行器故障、传感器异常及参数不确定性导致任务执行精准度不高的问题, 故障检测与隔离技术、容错控制及可重构策略的研究持续深化. Jing 等^[90]针对执行器效能损失故障, 提出一种新型迭代学习观测器以估计执行器效能因子, 通过将执行器动力学而非被控对象动力学作为故障重构模型, 设计包含状态估计和效能因子更新的观测器, 可更快速准确地估计时变和恒定故障, 提升了故障重构效率. Santos 等^[91]针对航天器编队推进器永久故障提出一种可重构制导策略, 该策略包含编队级和卫星级恢复功能: 编队级功能通过实时重新定义航天器的参考相对位置, 以维持等边三角形等期望的编队拓扑; 卫星级功能则通过调整故障航天器的指令姿态, 重新建立执行器的驱动能力, 补偿故障推进器的影响.

容错控制技术是确保航天器在极端环境下维持

稳定运行的核心手段. Hasan 等^[92]系统评估了故障容错姿态控制技术的发展现状, 指出航天器在轨不可维修特性, 对控制系统的实时响应能力提出严苛要求. 柳明军^[93]提出一种被动容错控制设计, 该控制器可以实现对预先定义的故障类型进行容错控制, 而无需获取任何在线故障信息. 在实际工程应用中, 被动容错控制方法表现出较好的容错能力. 例如, 陈雪芹等^[94]提出一种卫星姿态容错控制器, 通过增强对执行机构故障和模型不确定性的鲁棒性, 提升了姿态控制系统的可靠性. Jiang 等^[95]研究了柔性卫星姿态跟踪容错控制器的设计, 采用自适应反步变结构技术实现对执行机构故障的被动容错控制. 耿云海等^[96]针对反作用飞轮故障, 设计了一种基于线性变参数系统的鲁棒变增益 PID 容错控制方法. 在容错控制方法创新方面, Chiniforoushan 等^[97]基于子空间预测方法开发非线性时变容错控制算法, 通过故障时间序列的预判机制实现了故障自诊断与补偿的协同优化. Mei 等^[98]提出基于 SE(3) 流形的模糊自适应滑模容错控制方法, 攻克了耦合航天器故障估计与固定时间收敛控制的难题. Zhao 等^[99]创新性地融合模型预测控制与线性微分包含理论, 构建了具备执行器饱和和补偿能力的 6 自由度容错控制系统, 有效应对了微纳卫星质量特性不确定性与外部干扰耦合挑战. Shao 等^[100]突破了传统方法对不确定性和执行器故障可微性的假设限制, 提出全状态误差约束下的自适应鲁棒控制框架, 为高可靠航天器控制提供了新范式.

在多星协同执行领域, 构建高精度、强实时、低通信的控制架构是突破星群自主控制瓶颈的核心问题. 当前研究主要沿着传统分散式控制、仿生学策略优化和分布式预测控制创新三个维度展开: 传统分散式控制方法虽通过滑模、自适应等策略实现构型保持, 但普遍存在控制参数隐式化缺陷, 关键参数 (如收敛时间常数) 未能显式融入控制律设计, 制约性能优化理论发展; 仿生学策略优化中, 蜂拥控制凭借分布式特性为星群重构提供新路径, 但其全连接假设忽略星间通信链路限制与时滞效应, 亟须构建有限连接下的拓扑优化机制; 在分布式预测控制创新方面, 模型预测控制 (model predictive control, MPC) 技术通过显式处理非线性约束成为复杂场景首选方案. Morgan 等^[101]提出一种分散的模型预测控制方法, 用于实现由数百到数千个航天器群的最优制导和重构控制, 能够在避免碰撞和最小化燃料消耗的情况下实现成员卫星在两个不同的不变轨道之间的切换. Hu 等^[102]提出一种基于逐次线性化的分布式模型预测控制方法, 用于解决空间站伴随卫星在多障碍物条件下的轨迹优化问题, 通过

优化轨迹规划,提高系统的适应性和鲁棒性,能够有效规避障碍物并实现目标轨迹跟踪. Ma 等^[103]利用伪谱法设计卫星编队重构的时间最优轨迹规划,该方法通过优化轨迹规划,显著提高了重构效率,但在处理多空间障碍时,终端约束集和终端控制律的设计难度较大. 赵双等^[104]应用非支配排序遗传算法 II 求解受损后的导航星座重构问题,得到星座性能与重构时间的 Pareto 最优解,但并没有考虑星间避碰问题. 李思远^[105]提出一种基于 Tube 的分布式鲁棒模型预测控制方法,使得卫星集群实际系统能够同时实现目标跟踪与碰撞规避,完成空间障碍条件下的卫星集群自主重构. Wang 等^[106]提出一种基于连续凸优化的分布式滚动时域控制方法,用于解决大规模卫星集群重构问题. 该方法通过轨迹冻结和并行计算,将复杂优化问题分解为独立子问题,并在滚动时域框架下不断更新优化命令,显著降低了计算复杂度,提高了系统的实时性和可扩展性. Cui 等^[107]则在分布式基于李雅普诺夫模型预测控制器 (Lyapunov-based model predictive control, DLMPCC) 的成本函数中引入人工势场法碰撞避免项,当卫星间距离接近安全阈值时产生排斥力,确保无碰撞的同时实现姿态一致性与轨迹跟踪.

星群控制算法仿真验证研究面临系统性建模工具匮乏与全链路验证能力不足的双重挑战. 当前多数研究聚焦于单星控制模块的局部仿真,鲜有工作构建覆盖星群协同决策、动态拓扑交互与分布式执行的系统级仿真环境,导致算法在复杂任务场景下的适应性验证存在显著欠缺. 石子君等^[108]构建了分层模块化星群仿真系统,通过将卫星节点抽象为兼具自洽性、反应性和主动性的智能体,实现了从单星自主推演到集群协同控制的完整闭环仿真. 白雪等^[109]通过对大量航天器进行动力学建模,构建态势环境,设计智能指挥与决策策略,从指挥决策、协同飞行到末端制导进行全过程仿真,实现对小卫星集群真实任务场景的高可信度推演.

国内外关于星群控制的研究虽已取得显著进展,但现有控制方法分别对单星、星群开展孤立研究,也未考虑内外多源扰动耦合的影响. 星群的协同控制仍存在以下几方面的难点: 1) 如何设计有效的抗扰策略,提升对内外扰动的鲁棒性; 2) 如何开展横跨个体-集群的分布式抗扰控制算法的研究; 3) 如何构建覆盖 OODA 全环节的仿真系统,以验证系统能力.

3 未来发展趋势

综上所述,从技术发展上看,星群态势认知与

安全控制是实现星群任务高效完成的关键技术,具备良好的发展和应用前景. 国内外学者从多种角度进行了探索和研究,取得了一定进展. 然而,当前研究成果还很有限,仍存在理论体系不完备、感知信息不全面、评估可信度不够、决策合理性欠缺及执行精准度不高等问题,从而制约了星群自主安全运行能力的进一步提升. 因此,如图 3 所示,未来星群态势认知与安全控制主要存在五个方面的发展趋势. 首先,构建星群态势认知与安全控制能力完备量化表征的理论体系,量化表征星群态势认知与安全控制能力,揭示其量化表征机理,在设计阶段实现有限资源的全面开发与利用;然后,以该理论为指导,开展多源信息交互与融合的星群态势全面感知和内外因素耦合影响下的星群态势可信评估的研究,构建多源信息交互与融合的星群态势感知评估机制,提升星群内外态势认知的全面性和可信度;最后,根据态势认知结果,开展适用于动态场景的星群任务快速合理决策和面向多目标与跨尺度的星群任务精准执行的研究,探索动态场景下星群快速合理决策与协同控制方法,提升星群安全控制的合理性和精准度.

3.1 星群态势认知与安全控制能力的完备量化

在系统顶层分析设计层面构建星群态势认知与安全控制能力的量化表征模型,从而为面向复杂任务的 OODA 架构设计提供支持. 主要包含三个方面的研究:

1) 统一框架下星群态势认知与安全控制能力的完整表征

为解决星群态势认知与安全控制能力难以表征的难题,需要建立星群数据机理双驱动模型,实现系统输入输出特性及内外状态变化的准确描述. 同时通过挖掘内外态势到测量输出、资源配置包络到控制目标的关系,研究星群态势认知与安全控制能力完备量化表征方法,实现不同任务剖面下星群态势认知与安全控制能力基线在统一框架下的完整表征.

2) 星群态势认知与安全控制能力的准确判定与完备量化

针对星群态势认知与安全控制能力严格判定与量化评估,需要研究态势认知和安全控制能力完备量化方法,构建星群态势认知与安全控制能力的量化指标树,通过深度挖掘内外态势、资源配置等关键要素对能力大小的影响程度,形成覆盖感知覆盖率、评估置信度、决策最优率、控制鲁棒性等多维指标全链条的完备量化方法.

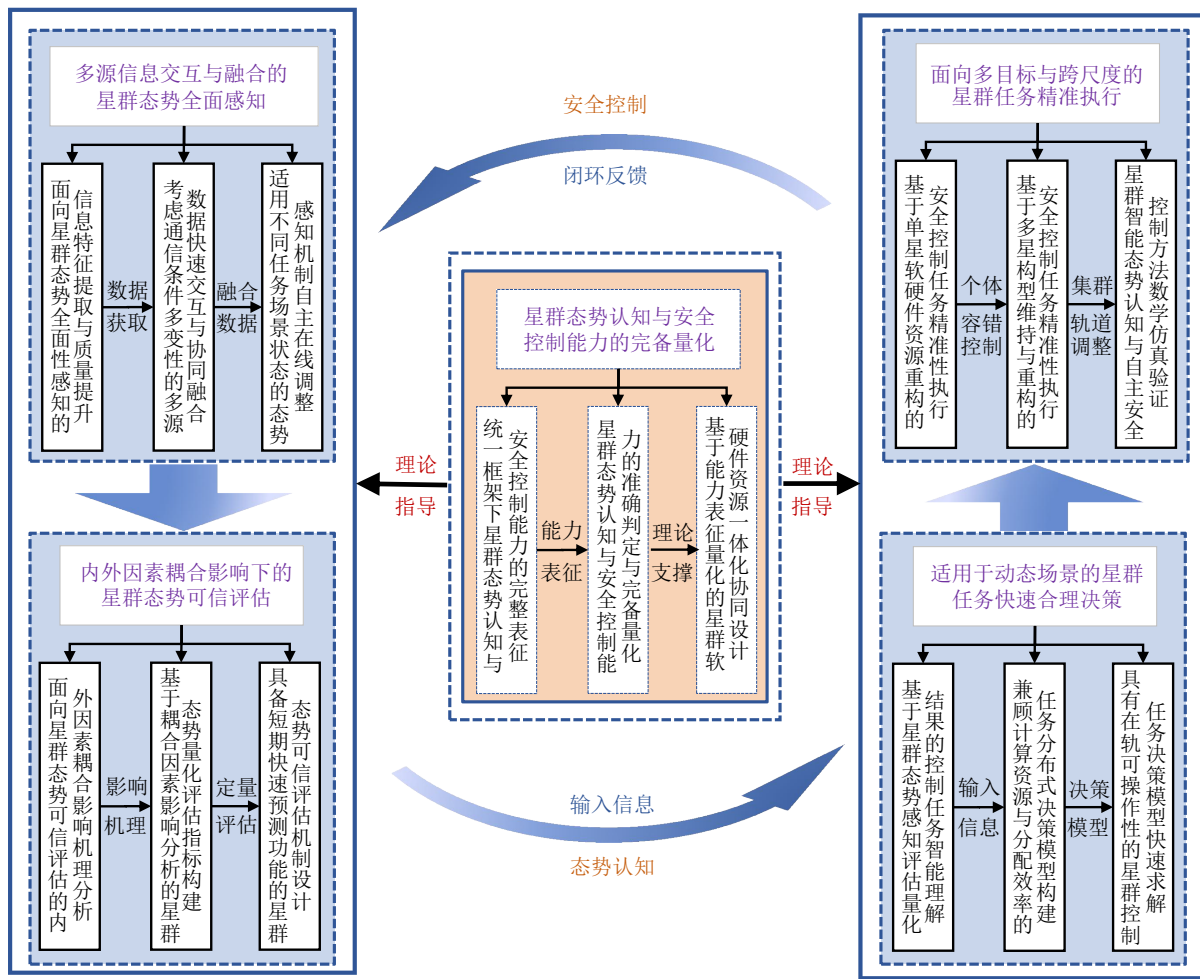


图 3 星群态势感知与安全控制发展趋势

Fig.3 Development trend of satellite swarm situation awareness and security control

3) 基于能力表征量化的星群软硬件资源一体化协同设计

基于能力量化指标实现星群软硬件资源的一体化优化配置, 需要以星群认知和控制能力量化表征为依据, 研究软硬件资源协同优化的目标函数和约束条件构建方法, 构建优化目标空间和自变量空间. 同时研究星群软硬件配置协同优化求解方法, 形成星群自主认知和安全控制的完备设计方案.

3.2 多源信息交互与融合的星群态势全面感知

通过整合来自不同源头的异构信息, 实现了卫星集群内外部态势的全面感知, 为评估提供全面的数据支持. 主要包含三个方面的研究:

1) 面向星群态势全面感知的信息特征提取与质量提升

星群的全面态势感知需突破“单一域拟合”的局限, 因此需要综合星群内部健康状态与外部威胁信息, 基于人工智能技术研究内外态势感知信息的隐

性特征提取方法, 并通过多源域协同学习、分布差异量化、动态特征融合等技术, 提升对高动态、强不确定性在轨环境的泛化能力. 同时研究数据对齐、异常筛选、特征增强等数据质量提升技术, 提高数据的可靠性.

2) 考虑通信条件多变性的多源数据快速交互与协同融合

针对星群通信带宽受限、延迟抖动、链路中断等不理想的通信环境, 为实现高效、可靠、及时的信息融合以及融合结果的准确性和一致性, 需要从传统的“集中式数据回传”范式转向“分布式在轨智能融合”新范式. 通过借鉴分布式存储、多级融合与自适应挖掘思想, 在星上实现边缘计算与特征提取, 通过事件触发机制和轻量化 AI 模型, 优先交换高价值的“信息知识”而非原始数据, 从而极大降低对不稳定星间链路的依赖, 提升星群自主协同、快速响应与抗干扰的能力, 最终实现通信约束下的高效感知.

3) 适用不同任务场景状态的态势感知机制自主在线调整

为解决场景适应能力严重受限问题, 需要研究复杂任务环境下的态势感知动态自适应机制, 依据任务优先级、星群冗余度、资源以及风险等多维属性, 动态建立并优化传感器配置、资源分配与感知策略间的映射关系, 通过基于策略的调整、平滑自主切换以及多维自主分配等方法, 构建一套灵活的感知系统自主调整策略, 全面提升星群在不同任务场景下的态势感知适应性与整体任务效能。

3.3 内外因素耦合影响下的星群态势可信评估

通过构建定量评估体系, 对卫星集群的内外态势进行协同评估, 为决策环节提供科学输入. 主要包含三个方面的研究:

1) 面向星群态势可信评估的内外因素耦合影响机理分析

为克服异构信息融合机制单一、异源异构信息缺乏统一表征模型的问题, 通过结合星群外部环境因素与内部健康信息, 揭示内部健康状况与外部威胁之间的耦合影响机理, 推导内部故障及外部威胁的动态演化过程, 厘清内部健康状况与外部威胁之间复杂的传播机理, 为星群态势可信评估指标构建提供理论支撑。

2) 基于耦合因素影响分析的星群态势量化评估指标构建

针对内外态势难以统一量化的困难, 需要构建多维度、多层次的耦合态势评估指标体系, 通过综合考量外部威胁环境与内部健康状态之间的动态交互关系, 形成内外一体的综合评价框架. 星群内部健康状态综合考虑单星健康评估、星间通信链路健康评估、星群协同运行态势评估的多层次评估子体系; 外部威胁考虑空间环境扰动、对抗性威胁、轨道资源竞争等要素. 将外部态势的影响量化、嵌入至内部健康状态评估中, 通过权重分配、可靠性修正与融合等算法, 实现内外态势的动态耦合指标构建。

3) 具备短期快速预测功能的星群态势可信评估机制设计

为构建内外协同的智能动态机制, 需要研究数据与模型融合星群态势可信评估方法, 构建内外协同的智能动态机制以评估星群的整体态势. 通过多源异构数据与动态预测模型的深度融合, 依托数字孪生、时空序列预测模型等方法, 实现星群内外部状态的一体化感知与协同推理, 进一步突破轻量化演化建模、不确定性量化评估及在线学习增强等关键技术, 显著提升了星群在动态任务场景下的短期

快速预测能力与可信水平。

3.4 适用于动态场景的星群任务快速合理决策

面向变化场景, 综合考虑任务需求、有限资源等约束, 设计能快速响应、动态适应的决策方法, 实现可在轨应用的任务决策策略. 主要包含三个方面的研究:

1) 基于星群态势感知评估量化结果的控制任务智能理解

为提升复杂动态环境下决策环节的适应性, 需要基于态势认知结果和任务需求, 结合星群能力评估, 构建初始决策模型, 将态势量化数据转化为决策模型的“感知依据”. 并研究任务理解的触发机制, 明确态势异常下的触发条件与优先级, 运用任务推理技术, 构建多步链式推理框架, 从总体效能、性能指标和技术指标三个维度构建星群任务指标, 实现任务需求到卫星集群映射关系的数学表征。

2) 兼顾计算资源与分配效率的任务分布式决策模型构建

为提升系统整体资源利用率和分配效率, 需要研究任务分配动态约束建模方法, 将星群任务分配中的动态约束转化为可量化的约束条件, 构建任务从星群到单星映射关系的数学表征. 引入任务-单星适配权重系数, 量化星群级任务拆解后各子任务与单星资源的匹配度, 确保模型适配复杂任务下的动态场景需求. 研究任务分配中激励机制设计方法与优化方法, 采用注意力机制增强特征关联的设计思路, 加入任务-单星注意力层, 从任务、行为、结构和参数四个维度提取关键特征并计算关联权重, 使模型能优先将任务分配给资源适配度高、历史执行效率优的单星, 同时对高效完成任务的单星赋予额外奖励值, 反向优化模型参数, 实现星群任务的快速精准分配, 推动模型在资源利用率与分配效率上的协同优化。

3) 具有在轨可操作性的星群控制任务决策模型快速求解

为提升任务规划的快速性, 需要研究多目标优化的简化方法, 采用“全局演化 + 局部搜索 + 数据驱动”的架构, 将星群控制任务解耦为单星元任务形式, 分布式决策模型以邻域搜索算法为主体, 并采用演化算法进行改进, 在保证求解质量的同时提升速度, 结合数据驱动挖掘在轨历史调度数据中的优良策略, 优化决策效率; 研究优化算法的动态调整策略, 通过引入面向资源的任务排序与面向任务的资源分配双模型从不同角度探索解空间, 协同演化增强全局探索能力, 且迭代中可相互转换, 避免

单一模型陷入局部最优, 此外动态多阶段快速插入策略可直接用于应对在轨突发任务, 快速调整调度方案。

3.5 面向多目标与跨尺度的星群任务精准执行

通过个体卫星自主精准重构, 并构建个体-集群抗扰分布式控制策略, 以保障整个星群任务的精准运行。主要包含三个方面的研究:

1) 基于单星软硬件资源重构的安全控制任务精准性执行

为提升对内外扰动的鲁棒性, 需要研究基于前端决策结果的单星自主重构的触发机制, 可通过深度强化学习联合优化重构决策与触发时机, 在无需精确动力学模型的前提下, 依据前端感知数据自主决定何时启动重构, 从而在保证姿态或任务性能的同时, 显著降低星地、星间通信频次与计算开销; 研究单星自主容错-重构控制策略, 随着空间任务复杂度提升, 容错控制从被动向集成实时故障检测与重构机制的主动模式演进, 通过构建嵌入轻量化深度学习模块的星上智能处理单元, 实现从数据到控制策略的端到端映射, 显著提升了系统对未知故障与动态环境的适应能力。此外, 结合数字孪生与在线学习技术, 可在仿真环境中预训练控制策略并实现在轨更新, 进一步增强系统的容错性和重构成功率, 提升单星的安全控制执行精准性。

2) 基于多星构型维持与重构的安全控制任务精准性执行

为设计横跨个体-集群的分布式抗扰控制算法, 需要研究星群对外部威胁的协同估计方法。该方法可以将外部威胁估计转化为对内部成员异常行为的检测, 通过分析星群中各单星对同一目标的威胁感知结果是否存在显著偏差, 来判定是否存在卫星正受到外部干扰。构建感知数据从星群到单星映射关系的数学表征, 并引入基于扩散模型的逆向推理引擎, 实现对异常数据源的精准定位, 进而实现对外部威胁存在、方向甚至类型的推断。研究分布式观测器和分布式控制的融合方法, 通过构建分区分布式观测器, 按卫星物理耦合关系划分集群, 让每个卫星的局部观测器仅估计分区内关联卫星状态, 无需重构全集群状态, 显著降低星上计算与存储压力, 同时采用分布式容错策略避免故障扩散, 融合人工智能技术处理复杂故障场景, 以低冗余依赖设计适配星上资源有限、网络拓扑动态变化的特点, 保障星群稳定、高效运行。

3) 星群智能态势认知与自主安全控制方法数学仿真验证

为实现 OODA 全环节的仿真验证, 需要研究

空间环境、内外态势变化的模拟方法, 解决星群运行环境模拟问题。并研究集成环境、任务需求和资源配置的仿真部署问题, 构建包含星群智能态势认知与自主安全控制方法的仿真系统, 实现星群“感知-评估-决策-执行”全闭环验证。

4 结束语

本文面向下一代空间基础设施体系建设重大战略需求, 立足全球工程前沿, 开展复杂任务下卫星集群智能态势认知与自主安全控制的关键技术讨论。针对当前研究中理论体系不完备、感知信息不全面、评估可信度不够、决策合理性欠缺及执行精准度不高等问题, 本文讨论以卫星集群态势认知与安全控制的能力量化表征理论为基础, 构建多源异构信息交互与融合的智能感知方法, 研究内外因素耦合作用下的星群态势可信评估, 探索适用于动态环境的星群任务快速决策方法, 并提出面向多目标与跨尺度任务的星群精准执行策略等多方面星群内外态势认知与安全控制的发展框架。分析指出开展深入探索星群态势认知与安全控制能力的量化表征、多源异构信息交互与融合的态势感知评估、动态场景下的任务合理决策与协同控制等关键科学问题的研究, 是以星群为代表的下一代空间基础设施体系建设的必要手段。

参考文献

- Chen Zhan-Sheng. Key science problems and intelligent architecture of large scale distributed heterogeneous satellite clusters. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2024, 41(S1): 1-12
(陈占胜. 大规模分布式异构星群关键科学问题与智能化架构. 上海航天 (中英文), 2024, 41(S1): 1-12)
- Yu Hua-Gang, Fang Zi-Xi. LEO satellite internet: Development, application and new technology prospects. *Radio Engineering*, 2023, 53(11): 2699-2707
(禹华钢, 方子希. 低轨卫星互联网: 发展、应用及新技术展望. 无线电工程, 2023, 53(11): 2699-2707)
- Tang Liang, Liu Hong-Peng, He Hui-Dong. Status and development of global small satellites. *Space International*, 2019(6): 36-41
(唐亮, 刘鸿鹏, 何慧东. 全球小卫星现状及发展. 国际太空, 2019(6): 36-41)
- Qin Zi-Hao, Fang Jin-Yong. Study on the effects from large constellations on space debris environment. *Space Electronic Technology*, 2021, 18(1): 87-92
(秦子浩, 方进勇. 巨型小卫星星座对空间碎片环境的影响研究. 空间电子技术, 2021, 18(1): 87-92)
- Kang Li-Hong, Tian Jing, Jiang Bi-Tao. Challenges and research on remote sensing satellite application technology in the giant constellation era. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(7): 1658-1666
(康利鸿, 田菁, 江碧涛. 巨星座时代遥感卫星应用技术挑战与思考. 遥感学报, 2024, 28(7): 1658-1666)
- Shen Da-Hai, Meng Yan-Song, Bian Lang, Lei Wen-Ying, Wang Ying, Yan Tao, et al. A global navigation augmentation system based on LEO communication constellation. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(2): 209-215

- (沈大海, 蒙艳松, 边朗, 雷文英, 王瑛, 严涛, 等. 基于低轨通信星座的全球导航增强系统. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, **17**(2): 209–215)
- 7 Gao Zi-He, Yao Hai-Peng, Zhang Lei, Shi Yu-Lin, Wang Fu, Tao Ying. Architecture design and key technologies analysis of LEO satellite mega-constellations. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, **5**(2): 43–52
(高梓贺, 姚海鹏, 张磊, 石钰林, 王富, 陶滢. 低轨巨型星座体系架构设计与关键技术分析. 天地一体化信息网络, 2024, **5**(2): 43–52)
 - 8 Sun Yao-Hua, Feng Xin-Ao, Peng Mu-Gen. Mega LEO satellite constellations networking: Challenges and key technologies. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2024, **5**(4): 57–74
(孙耀华, 冯昕澳, 彭木根. 低轨巨型星座组网: 挑战与关键技术. 天地一体化信息网络, 2024, **5**(4): 57–74)
 - 9 Marshall M, Pellegrino S. Reduced-order modeling for flexible spacecraft deployment and dynamics. In: Proceedings of the AIAA Scitech 2021 Forum. Nashville, USA: AIAA, 2021. Article No. 1385
 - 10 Hearn H C. Development and validation of fluid/thermodynamic models for spacecraft propulsion systems. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, **17**(3): 527–533
 - 11 Dai Z H, Wang L, Yang S S, Zhao J W. Multi-signal model in application of spacecraft power system testability. In: Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Washington, USA: AIAA, 2016. Article No. 4138
 - 12 Xu X, Chen N. A state-space-based prognostics model for lithium-ion battery degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, **159**: 47–57
 - 13 Goebel K, Saha B, Saxena A, Celaya J R, Christophersen J P. Prognostics in battery health management. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2008, **11**(4): 33–40
 - 14 Kamruzzaman M, Zhang X H, Abdelmalak M, Shi D, Benidris M. A data-driven accurate battery model to use in probabilistic analyses of power systems. *Journal of Energy Storage*, 2021, **44**: Article No. 103292
 - 15 Ye Zheng-Yu, Cheng Yue-Hua, Han Xiao-Dong, Jiang Bin. Fault location for attitude control systems of deep space exploration satellites. *Control Theory & Applications*, 2019, **36**(12): 2093–2099
(叶正宇, 程月华, 韩笑冬, 姜斌. 深空探测航天器姿态控制系统故障定位. 控制理论与应用, 2019, **36**(12): 2093–2099)
 - 16 Kóscielny J M, Syfert M, Rostek K, Szyber A. Fault isolability with different forms of the faults-symptoms relation. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2016, **26**(4): 815–826
 - 17 Ji H Q, He X, Shang J, Zhou D H. Incipient sensor fault diagnosis using moving window reconstruction-based contribution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, **55**(10): 2746–2759
 - 18 Liu J, Hua Y Z, Li Q D, Ren Z. Fault diagnosability qualitative analysis of spacecraft based on temporal fault signature matrix. In: Proceedings of the IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Nanjing, China: IEEE, 2016. 1496–1500
 - 19 Gehin A L, Hu H X, Bayart M. A self-updating model for analysing system reconfigurability. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, **25**(1): 20–30
 - 20 Tu Yuan-Yuan, Wang Da-Yi, Zhang Xiang-Yan, Li Jia-Xing, Huang Xiao-Feng. Reconfigurability and autonomous reconfiguration methods of spacecraft. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, **44**(23): Article No. 628855
(屠园园, 王大轶, 张香燕, 李嘉兴, 黄晓峰. 航天器的可重构性与自主重构方法. 航空学报, 2023, **44**(23): Article No. 628855)
 - 21 Wang D Y, Liu C R. Reconfigurability analysis method for spacecraft autonomous control. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, **2014**(1): Article No. 724235
 - 22 Loureiro R, Merzouki R, Bouamama B O. Bond graph model based on structural diagnosability and recoverability analysis: Application to intelligent autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(3): 986–997
 - 23 Abdesselam I, Haffaf H. Hypergraph reconfigurability analysis. *IERI Procedia*, 2014, **6**: 22–32
 - 24 Liu Wen-Jing, Liu Cheng-Rui, Wang Nan-Hua, Wang Da-Yi. Quantitative and qualitative model based fault diagnosability evaluation of momentum wheel. *Chinese Space Science and Technology*, 2011, **31**(4): 54–63
(刘文静, 刘成瑞, 王南华, 王大轶. 定量与定性相结合的动量轮故障可诊断性评价. 中国空间科学技术, 2011, **31**(4): 54–63)
 - 25 Eriksson D, Frisk E, Krysander M. A method for quantitative fault diagnosability analysis of stochastic linear descriptor models. *Automatica*, 2013, **49**(6): 1591–1600
 - 26 Zhong M Y, Song Y, Xue T, Yang R, Li W B. Parity space-based fault detection by minimum error minimax probability machine. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, **51**(24): 1292–1297
 - 27 Wang D Y, Fu F Z, Li W B, Tu Y Y, Liu C R, Liu W J. A review of the diagnosability of control systems with applications to spacecraft. *Annual Reviews in Control*, 2020, **49**: 212–229
 - 28 Fu Fang-Zhou, Li Jia-Xing, Zhang Xiang-Yan, Yang Sheng-Qing, Wang Wen-Yan, Zheng Han-Qing. An inter-satellite link design method of satellite formations under thruster fault detection. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2022, **39**(6): 66–74
(符方舟, 李嘉兴, 张香燕, 杨盛庆, 王文妍, 郑翰清. 面向推力器故障检测的卫星编队星间链路设计. 上海航天 (中英文), 2022, **39**(6): 66–74)
 - 29 Richter J H, Heemels W P M H, van de Wouw N, Lunze J. Reconfigurable control of piecewise affine systems with actuator and sensor faults: Stability and tracking. *Automatica*, 2011, **47**(4): 678–691
 - 30 Tu Y Y, Wang D Y, Fu F Z, Li W B. Reconfigurability evaluation for disturbance rejection control systems under actuator outages. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, **358**(8): 4239–4256
 - 31 Staroswiecki M. On reconfigurability with respect to actuator failures. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, **35**(1): 257–262
 - 32 Wu N E, Zhou K M, Salomon G. Control reconfigurability of linear time-invariant systems. *Automatica*, 2000, **36**(11): 1767–1771
 - 33 Jiang B, Zhang K, Shi P. Integrated fault estimation and accommodation design for discrete-time Takagi–Sugeno fuzzy systems with actuator faults. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, **19**(2): 291–304
 - 34 Lan J L, Patton R J. A decoupling approach to integrated fault-tolerant control for linear systems with unmatched non-differentiable faults. *Automatica*, 2018, **89**: 290–299
 - 35 Liu Y, Yang G H. Integrated design of fault estimation and fault-tolerant control for linear multi-agent systems using relative outputs. *Neurocomputing*, 2019, **329**: 468–475
 - 36 Morbidi F, Mariottini G L, Prattichizzo D. Observer design via Immersion and Invariance for vision-based leader–follower formation control. *Automatica*, 2010, **46**(1): 148–154
 - 37 Wang X H, Tan C P, Wu F, Wang J D. Fault-tolerant attitude control for rigid spacecraft without angular velocity measurements. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, **51**(3): 1216–1229
 - 38 Ghasemi S, Khorasani K. Fault detection and isolation of the attitude control subsystem of spacecraft formation flying using extended Kalman filters. *International Journal of Control*, 2015, **88**(10): 2154–2179
 - 39 Benninghoff H, Boge T. Rendezvous involving a non-cooperative, tumbling target-estimation of moments of inertia and center of mass of an unknown target. In: Proceedings of the 25th International Symposium on Space Flight Dynamics. Munich, Germany: 2015.
 - 40 Fu Fang-Zhou, Wang Da-Yi, Li Wen-Bo. Multiple fault detec-

- tion and isolation based on Kalman filters. *Control Theory & Applications*, 2017, **34**(5): 586–593
(符方舟, 王大轶, 李文博. 基于卡尔曼滤波器组的多重故障诊断方法研究. 控制理论与应用, 2017, **34**(5): 586–593)
- 41 Ruan Ren-Gui, Jia Xiao-Lin, Zhu Jun, Huyan Zong-Bo, Feng Lai-Ping, Li Jie. Integrated orbit determination and time synchronization for BDS-3 satellites with satellite-ground and inter-satellite one-way Ka-pseudoranges. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, **49**(3): 292–299
(阮仁桂, 贾小林, 朱俊, 呼延宗泊, 冯来平, 李杰. 联合星地与星间 Ka 伪距的北斗三号卫星一体化定轨和时间同步. 测绘学报, 2020, **49**(3): 292–299)
- 42 Tang C P, Hu X G, Zhou S S, Liu L, Pan J Y, Chen L C, et al. Initial results of centralized autonomous orbit determination of the new-generation BDS satellites with inter-satellite link measurements. *Journal of Geodesy*, 2018, **92**(10): 1155–1169
- 43 Kong Xiang-Lei, Sun Yi-Shu, Wu Xue-You, Gao Jian-Wei, Tian Zhi-Xin. Information synchronization method for large scale and high dynamic constellation network. *Chinese Space Science and Technology*, 2025, **45**(1): 135–142
(孔祥磊, 孙弋舒, 吴学友, 高建威, 田志新. 大规模高动态星座网络信息同步方法. 中国空间科学技术 (中英文), 2025, **45**(1): 135–142)
- 44 Guo Lei, Li Wen-Shuo, Cui Yang-Yang, Zhu Yu-Kai, Zhang Jian-Chun, Yu Xiang, et al. Dynamic closed-loop uncertainty quantification theory with intelligent unmanned systems applications. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2025, **55**(1): 1–13
(郭雷, 李文硕, 崔洋洋, 朱玉凯, 章健淳, 余翔, 等. 动态闭环不确定性量化理论与智能无人系统应用. 中国科学: 技术科学, 2025, **55**(1): 1–13)
- 45 Wang Zhao-Long, Zhu Wen-Shan, Mu Jin-Zhen, Han Fei, Jing Zhong-Liang. An overview of the state estimation for space non-cooperative target with multi-spacecraft cooperative observation. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2025, **55**(2): 23–43
(王兆龙, 朱文山, 牟金震, 韩飞, 敬忠良. 多航天器协同观测的空间目标状态估计研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, **55**(2): 23–43)
- 46 Gao Zhao, Gao Yang, Gao Zi-He, Tao Ying. Design and implementation of satellite distributed cluster management platform using dynamic perception. *Spacecraft Engineering*, 2024, **33**(2): 125–132
(高颢, 高杨, 高梓贺, 陶滢. 应用动态感知的卫星分布式集群管理平台设计与实现. 航天器工程, 2024, **33**(2): 125–132)
- 47 Sui Wei-Shun, Duan Guang-Ren, Zhang Mao-Rui. Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft. *Control and Decision*, 2021, **36**(5): 1049–1058
(隋维舜, 段广仁, 张卯瑞. 多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制. 控制与决策, 2021, **36**(5): 1049–1058)
- 48 Auer S, Reinartz P, Schmitt M. Object-related alignment of heterogeneous image data in remote sensing. In: Proceedings of the 21st International Conference on Information Fusion. Cambridge, UK: IEEE, 2018. 1608–1615
- 49 Liu Z J, Qiu Q, Li J, Wang L Z, Plaza A. Geographic optimal transport for heterogeneous data: Fusing remote sensing and social media. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(8): 6935–6945
- 50 Xiang Xin-Jian, Li Ke-Han, Cao Ying, Huang Bing-Qiang, Zheng Yong-Ping. Heterogeneous data fusion method based on support and certainty. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, **36**(8): 1243–1249
(项新建, 李可晗, 曹楹, 黄炳强, 郑永平. 基于支持度和确定度的异构数据融合方法. 传感技术学报, 2023, **36**(8): 1243–1249)
- 51 Zhu Wen-Shan, Mu Jin-Zhen, Li Shuang, Han Fei. Review and prospect of spacecraft pose estimation based on deep learning. *Journal of Astronautics*, 2023, **44**(11): 1633–1644
(朱文山, 牟金震, 李爽, 韩飞. 基于深度学习的航天器位姿估计研究进展. 宇航学报, 2023, **44**(11): 1633–1644)
- 52 Schnitzer F, Janschek K, Willich G. Experimental results for image-based geometrical reconstruction for spacecraft rendezvous navigation with unknown and uncooperative target spacecraft. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, 2012. 5040–5045
- 53 Pourtakdoust S H, Mehrjardi M F, Hajkarim M H, Gourabi F N. Advanced fault detection and diagnosis in spacecraft attitude control systems: Current state and challenges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2023, **237**(12): 2679–2699
- 54 Khorasani H G, Menhaj M B, Talebi H A, Bakhtiari-Nejad F. Neural-network-based sensor fault detection & isolation for nonlinear hybrid systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, **45**(20): 1029–1034
- 55 Li Z Q, Ma L, Khorasani K. Fault diagnosis of an actuator in the attitude control subsystem of a satellite using neural networks. In: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Orlando, USA: IEEE, 2007. 2658–2663
- 56 Augenstein S, Rock S M. Improved frame-to-frame pose tracking during vision-only SLAM/SFM with a tumbling target. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011. 3131–3138
- 57 Li Y X, Huo J, Ma P, Jiang R Y. Target localization method of non-cooperative spacecraft on on-orbit service. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, **35**(11): 336–348
- 58 Yang D, Zhu L Y, Liu Z G, Wang J. A condition quantitative assessment method of spacecraft electrical power subsystem with fuzzy theory. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO). Beijing, China: IEEE, 2021. 1–6
- 59 Yang Ai-Wu, Li Zhan-Wu, Xu An, Lv Yue, Xi Zhi-Fei. Threat assessment of air combat target based on RS-CRITIC. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, **46**(12): 2357–2365
(杨爱武, 李战武, 徐安, 吕跃, 奚之飞. 基于 RS-CRITIC 的空战目标威胁评估. 北京航空航天大学学报, 2020, **46**(12): 2357–2365)
- 60 Sun H W, Xie X F, Sun T, Wang C C. Dynamic Bayesian network threat assessment for warship formation: A data analysis method. *International Journal of High Performance Systems Architecture*, 2018, **8**(1–2): 71–81
- 61 Nasrolahi S S, Abdollahi F. Sensor fault detection and recovery in satellite attitude control. *Acta Astronautica*, 2018, **145**: 275–283
- 62 Zhou Hong-Bo, Zhang Jin-Cheng. Evaluation of target threat based on combinational weigh and grey correlation. *Fire Control & Command Control*, 2018, **43**(10): 143–147
(周弘波, 张金成. 基于组合权重的灰色目标威胁评估. 火力与指挥控制, 2018, **43**(10): 143–147)
- 63 Wang Wei, Gu Zhu-Xin, Li Hai-Bo. Threat evaluation for small target at low latitude and low speed based on analytic hierarchy process. *Informatization Research*, 2019, **45**(4): 20–24
(汪伟, 顾竹鑫, 李海波. 基于层次分析法的低空慢速小目标威胁评估方法. 信息化研究, 2019, **45**(4): 20–24)
- 64 Gao Y, Li D S, Zhong H. A novel target threat assessment method based on three-way decisions under intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making environment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, **87**: Article No. 103276
- 65 Xiong Y, Jiang Z D, Fang H Z, Fan H Z. Research on health condition assessment method for spacecraft power control system based on SVM and cloud model. In: Proceedings of the Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris). Paris, France: IEEE, 2019. 143–149
- 66 Yu Mu-Ye, Chu Wei-Meng, Fu Fang-Zhou, Wu Zhi-Gang, Chen Wei, Wang Wei. Satellite attitude control system fault prediction based on SCSO-BP neural network. *Flight Control & Detection*, 2024, **7**(1): 37–46
(于牧野, 初未萌, 符方舟, 吴志刚, 陈巍, 王巍. 基于 SCSO-BP 神经网络的卫星姿态控制系统故障预测. 飞控与探测, 2024, **7**(1): 37–46)
- 67 Liao L X, Kottig F. Review of hybrid prognostics approaches

- for remaining useful life prediction of engineered systems, and an application to battery life prediction. *IEEE Transactions on Reliability*, 2014, **63**(1): 191–207
- 68 Zhang Q H. Adaptive Kalman filter for actuator fault diagnosis. *Automatica*, 2018, **93**: 333–342
- 69 Xu Xi-Meng, Yang Ren-Nong, Fu Ying, Zhao Yu. Target threat assessment in air combat based on ELM_AdaBoost strong predictor. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, **40**(8): 1760–1768
(徐西蒙, 杨任农, 符颖, 赵雨. 基于 ELM_AdaBoost 强预测器的空战目标威胁评估. 系统工程与电子技术, 2018, **40**(8): 1760–1768)
- 70 Yue L F, Yang R N, Zuo J L, Luo H, Li Q L. Air target threat assessment based on improved moth flame optimization-gray neural network model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, **2019**: Article No. 4203538
- 71 Wang Fang, Wu Zhi-Quan, Shi Hong-Quan. Research on anti-air threat assessment based on SVM. *Fire Control & Command Control*, 2017, **42**(9): 30–33
(王芳, 吴志泉, 史红权. SVM 在空中目标威胁值评估中的应用. 火力与指挥控制, 2017, **42**(9): 30–33)
- 72 Wang C, Li J, Jing N, Wang J, Chen H. A distributed cooperative dynamic task planning algorithm for multiple satellites based on multi-agent hybrid learning. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, **24**(4): 493–505
- 73 Zhu Guang-Xi, Wang Gang, Zhang Chao, Chai Ying-Te, Fu Wei, Guo Zheng-Qiang. Intelligent planning framework for star-walk mission based on multimodal observation requirements information. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022, **3**(3): 23–29
(朱光熙, 王港, 张群, 柴英特, 付伟, 郭争强. 基于多模态观测需求信息的遥感星群任务智能规划机制. 天地一体化信息网络, 2022, **3**(3): 23–29)
- 74 Chang Z X, Chen Y N, Yang W Y, Zhou Z B. Mission planning problem for optical video satellite imaging with variable image duration: A greedy algorithm based on heuristic knowledge. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(11): 2597–2609
- 75 Cui J T, Zhang X. Application of a multi-satellite dynamic mission scheduling model based on mission priority in emergency response. *Sensors*, 2019, **19**(6): Article No. 1430
- 76 Kluegl P, Toepfer M, Beck P D, Fette G, Puppe F. UIMA Ruta: Rapid development of rule-based information extraction applications. *Natural Language Engineering*, 2016, **22**(1): 1–40
- 77 Peng Shuang, Wu Jiang-Jiang, Chen Hao, Du Chun, Li Jun. Satellite observation task sequential decision-making method based on convolutional attention neural network. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2023, **55**(5): 47–52
(彭双, 伍江江, 陈浩, 杜春, 李军. 基于卷积注意力网络的卫星观测任务序贯决策方法. 郑州大学学报(理学版), 2023, **55**(5): 47–52)
- 78 Shang Xi-Jie, Feng Yang, Lin Xiao-Yong, Zhang Chao, Zhao Chao. Exploration of group task planning method for imaging satellite networking. *Digital Technology & Application*, 2023, **41**(11): 87–90
(尚希杰, 冯阳, 林晓勇, 张超, 赵超. 面向成像卫星组网的群任务规划方法探讨. 数字技术与应用, 2023, **41**(11): 87–90)
- 79 Jin Peng, Li Kang. Distributed satellite resource scheduling based on improved contract network protocol. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, **44**(10): 3164–3173
(靳鹏, 李康. 基于改进合同网协议的分布式卫星资源调度. 系统工程与电子技术, 2022, **44**(10): 3164–3173)
- 80 Chen Shu-Jian, Li Zhi, Hu Min, Zhang Ya-Sheng. Multi satellite imaging planning method with optimal response time for emergency tasks. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, **40**(2): 17–28
(陈书剑, 李智, 胡敏, 张雅声. 应急任务响应时间最优的多星成像规划方法. 中国空间科学技术, 2020, **40**(2): 17–28)
- 81 Zhao Peng-Qian. Research on Key Technologies of Multi-Agent Cooperation Problems Based on Reinforcement Learning [Ph.D. dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, China, 2023.
(赵鹏乾. 基于强化学习的多智能体协作问题的关键技术研究 [博士学位论文], 北京邮电大学, 中国, 2023.)
- 82 Lu J, Chen Y N, He R J. A learning-based approach for agile satellite onboard scheduling. *IEEE Access*, 2020, **8**: 16941–16952
- 83 Pi Y, Zhang W, Zhang Y, Huang H R, Rao B Q, Ding Y L, et al. Applications of multi-agent deep reinforcement learning communication in network management: A survey. arXiv preprint arXiv: 2407.17030, 2024.
- 84 Wang Jun, Xia Wei, Hu Xiao-Xuan, Zhang Ren-Chi. Autonomous cooperative mission planning for remote sensing constellation based on multi-agent. *Journal of Command and Control*, 2021, **7**(3): 287–294
(王俊, 夏维, 胡笑旋, 张任驰. 基于多 Agent 的遥感星座自主协同任务规划. 指挥与控制学报, 2021, **7**(3): 287–294)
- 85 Qiao Rong-Yan, Zhao Xin-Guo. Research on mission planning for reconnaissance satellite based on multi-stage decision. *Aerospace Electronic Warfare*, 2014, **30**(6): 30–34
(乔榕岩, 赵新国. 基于多阶段决策的侦察卫星任务规划研究. 航天电子对抗, 2014, **30**(6): 30–34)
- 86 Feng P, Chen H, Peng S, Chen L, Li L M. A method of distributed multi-satellite mission scheduling based on improved contract net protocol. In: Proceedings of the 11th International Conference on Natural Computation (ICNC). Zhangjiajie, China: IEEE, 2015. 1062–1068
- 87 Gazi V. Swarm aggregations using artificial potentials and sliding-mode control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(6): 1208–1214
- 88 Yao J Y, Ordóñez R, Gazi V. Swarm tracking using artificial potentials and sliding mode control. In: Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, USA: IEEE, 2006. 749–754
- 89 Kocmi T, Federmann C. Large language models are state-of-the-art evaluators of translation quality. In: Proceedings of the 24th Annual Conference of the European Association for Machine Translation. Tampere, Finland: EAMT, 2023.
- 90 Jing H Y, Ma K M. Novel iterative-learning-observer-based fault detection for dynamic actuators. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2024, **47**(11): 2453–2459
- 91 Santos W G, Mason P, Stoneking E T, Sarli B V. Reconfigurable guidance strategy for compensating actuator faults in spacecraft formation flying. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2025, **48**(2): 282–296
- 92 Hasan M N, Haris M, Qin S Y. Fault-tolerant spacecraft attitude control: A critical assessment. *Progress in Aerospace Sciences*, 2022, **130**: Article No. 100806
- 93 Liu Ming-Jun. Attitude Fault Tolerant Control for Satellite with Actuator and Sensor Faults [Master thesis], Bohai University, China, 2022.
(柳明军. 执行器与传感器故障的卫星姿态容错控制 [硕士学位论文], 渤海大学, 中国, 2022.)
- 94 Chen Xue-Qin, Geng Yun-Hai, Zhang Ying-Chun, Wang Feng. Robust fault-tolerant H-infinity control based on LMI approach and application in satellite attitude control system. *Control Theory & Applications*, 2008, **25**(1): 95–99
(陈雪芹, 耿云海, 张迎春, 王峰. 基于 LMI 的鲁棒容错控制及其在卫星姿态控制中的应用. 控制理论与应用, 2008, **25**(1): 95–99)
- 95 Jiang Y, Hu Q L, Ma G F. Adaptive backstepping fault-tolerant control for flexible spacecraft with unknown bounded disturbances and actuator failures. *ISA Transactions*, 2010, **49**(1): 57–69
- 96 Geng Yun-Hai, Jin Rong-Yu, Chen Xue-Qin, Li Dong-Bai. Spacecraft attitude fault tolerant control with actuator fault. *Journal of Astronautics*, 2017, **38**(11): 1186–1194
(耿云海, 金荣玉, 陈雪芹, 李冬柏. 执行机构故障的航天器姿态容错控制. 宇航学报, 2017, **38**(11): 1186–1194)
- 97 Chiniforoushan M, Mortazavi M, Raissi K. Data-driven solu-

tions to spacecraft relative attitude-position fault-tolerant control. *Advances in Space Research*, 2023, **71**(12): 5337–5359

- 98 Mei Y F, Liao Y, Gong K J, Luo D. Fuzzy adaptive sliding mode fault estimation and fixed-time fault-tolerant control for coupled spacecraft based on SE(3). *Aerospace Science and Technology*, 2022, **126**: Article No. 107673
- 99 Zhao L, Lu Z L, Liao W H, Liu T T, Ling K V, Zheng K. Fault-tolerant control for satellite autonomous rendezvous with quality characteristics and actuator uncertainties. *Aerospace Science and Technology*, 2024, **150**: Article No. 109182
- 100 Shao X D, Hu Q L, Shi Y, Zhang Y M. Fault-tolerant control for full-state error constrained attitude tracking of uncertain spacecraft. *Automatica*, 2023, **151**: Article No. 110907
- 101 Morgan D, Chung S J, Hadaegh F Y. Model predictive control of swarms of spacecraft using sequential convex programming. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, **37**(6): 1725–1740
- 102 Hu Q L, Xie J J, Liu X F. Trajectory optimization for accompanying satellite obstacle avoidance. *Aerospace Science and Technology*, 2018, **82–83**: 220–233
- 103 Ma G F, Huang H B, Zhuang Y F. Time optimal trajectory planning for reconfiguration of satellite formation with collision avoidance. In: Proceedings of the IEEE ICCA. Xiamen, China: IEEE, 2010. 476–479
- 104 Zhao Shuang, Zhang Ya-Sheng, Dai Hua-Yu. Configuration design of navigation constellation reconfiguration based on quick response. *Aerospace Control and Application*, 2018, **44**(4): 26–33
(赵双, 张雅声, 戴桦宇. 基于快速响应的导航星座重构构型设计. 空间控制技术与应用, 2018, **44**(4): 26–33)
- 105 Li Si-Yuan. Research on Autonomous Reconfigurable Control of Satellite Cluster Under Space Disturbance [Ph.D. dissertation], Harbin Institute of Technology, China, 2022.
(李思远. 空间扰动条件下的卫星集群自主重构控制研究 [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2022.)
- 106 Wang L X, Ye D, Kong X R, Liu M, Xiao Y. Decentralized receding horizon control for satellite cluster reconfigurations with successive convexification method. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, **60**(5): 5920–5936
- 107 Cui Y K, Chen Y Q, Yang D, Shu Z, Huang T W, Gong X. Resilient formation tracking of spacecraft swarm against actuation attacks: A distributed Lyapunov-based model predictive approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, **53**(11): 7053–7065
- 108 Shi Zi-Jun. Study on Multi-Satellite Simulation System Based on Multi-Agent Methods [Master thesis], Harbin Institute of Technology, China, 2020.
(石子君. 基于多 Agent 的星群仿真系统研究 [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2020.)
- 109 Bai Xue, Zuo Xiao-Yu, Chen Tian-Ji, Xu Ming. Space mission planning and control method of small satellite swarm system. *Aerospace Control*, 2022, **40**(4): 61–68
(白雪, 左小玉, 陈天冀, 徐明. 小卫星集群系统任务规划与控制方法. 航天控制, 2022, **40**(4): 61–68)



李文博 南京航空航天大学教授, 北京控制工程研究所研究员. 2012 年获得哈尔滨工业大学博士学位. 主要研究方向为航天器态势感知与安全控制. E-mail: liwenbo_bice@163.com

(LI Wen-Bo Professor at the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, researcher at Beijing Institute of Control Engineering. He received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2012. His re-

search interests include spacecraft situation awareness and security control.)



刘鹏 西北工业大学民航学院硕士研究生. 主要研究方向为飞行器导航、制导与控制.

E-mail: liu_peng@mail.nwpu.edu.cn
(LIU Peng Master student at the College of Civil Aviation, North-western Polytechnical University.

His research interests include aircraft navigation, guidance and control.)



刘萍 电子科技大学(深圳)高等研究院副研究员. 2015 年获得华南理工大学博士学位. 主要研究方向为航天器控制系统设计和故障诊断.

E-mail: liup89@mail.sysu.edu.cn
(LIU Ping Associate researcher at Shenzhen Institute for Advanced

Study, University of Electronic Science and Technology of China. She received her Ph.D. degree from South China University of Technology in 2015. Her research interests include spacecraft control system design and fault diagnosis.)



刘成瑞 南京航空航天大学教授, 北京控制工程研究所研究员. 2006 年获得北京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为航天器的故障诊断与容错控制.

E-mail: liuchengrui@gmail.com
(LIU Cheng-Rui Professor at the

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, researcher at Beijing Institute of Control Engineering. He received his Ph.D. degree from Beihang University in 2006. His research interests include fault diagnosis and fault-tolerant control for spacecrafts.)



刘文静 北京控制工程研究所研究员. 2009 年获得天津大学博士学位. 主要研究方向为故障诊断与容错控制, 卫星控制系统的可诊断性评价与设计.

E-mail: lwjingbice@163.com
(LIU Wen-Jing Researcher at

Beijing Institute of Control Engineering. She received her Ph.D. degree from Tianjin University in 2009. Her research interests include fault diagnosis and fault-tolerant, diagnosability evaluation and design for satellite control systems.)



马亚杰 南京航空航天大学自动化学院教授. 主要研究方向为自适应故障诊断与容错控制及应用.

E-mail: yajiem@nuaa.edu.cn

(**MA Ya-Jie** Professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics

and Astronautics. His research interests include adaptive fault diagnosis and fault-tolerant control and their applications.)



薛文超 中国科学院数学与系统科学研究院研究员. 2007 年获得南开大学学士学位, 2012 年获得中国科学院大学博士学位. 主要研究方向为非线性不确定系统控制与滤波, 智能集群协同感知与控制.

E-mail: wenchaoxue@amss.ac.cn

(**XUE Wen-Chao** Researcher at the Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy

of Sciences. He received his bachelor degree from Nankai University in 2007 and his Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2012, respectively. His research interests include nonlinear uncertain systems control and filter, intelligent swarm cooperative perception and control.)



党庆庆 西北工业大学民航学院助理教授. 2019 年获得北京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为飞行器动力学与安全控制, 空间态势感知与评估, 任务规划. 本文通信作者.

E-mail: dangqingqing@nwpu.edu.cn

(**DANG Qing-Qing** Assistant pro-

fessor at the College of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University. He received his Ph.D. degree from Beihang University in 2019. His research interests include aircraft dynamics and safety control, space situation awareness and assessment, and mission planning. Corresponding author of this paper.)

作者勘误

本刊 2025 年第 51 卷第 2 期 243–244 页“面向智能网联汽车的车路协同感知技术及发展趋势”一文中部分描述有误, 现更正如下:

1. “在这类场景下部署路端智能感知设备成本高昂并且收益较低, 因此不建议在此类场景下研究协同感知”改为“在这类场景下部署路端智能感知设备收益较低”;
2. “一些诸如高速公路、快速路等驾驶场景不适合部署车路协同系统”改为“一些诸如高速公路、快速路等驾驶场景部署车路协同系统”;
3. “延迟后的感知结果将不再可靠. 再而高速公路、快速路等路段属长距离直线路段, 在此场景下部署路端设备成本高昂, 不符合实际需求”改为“需要考虑通信时延下的感知结果可靠性. 同时, 当前车路协同系统的规模化发展还受限于不同城市路侧设备接口规范和通信协议的碎片化问题, 导致设备兼容性不足和跨区域协同存在困难, 还需要建立统一的路侧基础设施分级规范、接口协议标准与技术验证体系”.