

基于多智能体系统的多航天器编队 分布式姿态协同控制

刘向东¹, 刘海阔², 杜长坤^{2,3}, 田野¹, 路平立¹, 陈振¹

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081;
3. 北京理工大学智能机器人与系统高精尖创新中心, 北京 100081)

摘要: 多航天器编队飞行在深空探测及协同对地观测等领域有着重要应用, 而多航天器的姿态跟踪及协同控制技术作为其关键技术之一也引起了极大的关注。近年来, 随着分布式人工智能技术的发展, 多智能体系统(MASs)受到了航天器控制领域学者的关注并将其应用到多航天器编队控制中。本文回顾了多智能体系统协同控制及其在多航天器编队姿态协同控制中应用的研究进展。首先, 从多航天器编队不同控制需求出发, 分别从一致性跟踪控制、有限时间控制、事件驱动控制方面, 回顾了多智能体系统协同控制问题的进展; 其次, 回顾了多航天器姿态协同控制在上述需求方面的研究进展, 并基于多智能体系统的协同控制理论, 提出了相应的分布式姿态协同控制策略。

关键词: 多航天器编队; 多智能体系统; 姿态控制; 分布式协同控制

中图分类号: TN 911.73; TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.04.009

Distributed Attitude Cooperative Control for Multi-spacecraft Formation Based on Multi-agent Systems

LIU Xiangdong¹, LIU Haikuo², DU Changkun^{2,3}, TIAN Ye¹, LU Pingli¹, CHEN Zhen¹

(1.School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2.School of Mechatrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3.Beijing Advanced Innovation Center for Intelligent Robots and Systems, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Multi-spacecraft formation plays a key role in the fields such as deep space exploration and cooperative earth observation. As one of the key technologies, the attitude tracking and cooperative control of multi-spacecrafts has attracted great attention. In recent years, with the development of distributed artificial intelligence, multi-agent systems (MASs) have attracted scholars in the field of spacecraft control and been applied to multi-spacecraft formation control. In this paper, the research progress of the cooperative control of MASs and its applications in the attitude cooperative control of multi-spacecraft formation are reviewed. First, the progress of the cooperative control of MASs is reviewed in terms of different control requirements of multi-spacecraft formation from three aspects, i. e., consistent tracking control, finite time control, and event-triggered control. Then, the research progress of attitude cooperative control of multi-spacecraft formation in view of the above requirements is reviewed, and the corresponding distributed attitude cooperative control strategies are proposed based on the cooperative control theory for MASs.

Key words: multi-spacecraft formation; multi-agent systems; attitude control; distributed cooperative control

0 引言

多航天器编队飞行因其在深空探测和新一代

太空望远镜等任务中的应用而引起了广泛关注。同时, 伴随着分布式人工智能技术的发展, 基于多

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(11972078)

作者简介: 刘向东(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为航天器动力学与控制、多智能体系统和分布式协同控制等。

通信作者: 刘海阔(1989—), 男, 博士, 主要研究方向为多智能体系统分布式控制、多航天器编队控制和姿态协同控制等。

智能体系统(Multi-Agent Systems, MASs)的分布式多航天器编队控制技术被提出,并取得了长足发展,有效地弥补了集中式控制策略对全局信息依赖、鲁棒性差以及容错性低的缺点。MASs是利用智能体间信息交互组成的网络化系统,其主要利用互联协调的多个小型系统替代大型复杂系统,从而降低系统的复杂度,易于管理和控制。基于此,分布式多航天器编队任务被定义为一组物理上分离的航天器,通过局部的信息交互,实现整体的协同并呈现出群体智能,这种体系结构与单个航天器执行任务相比具备多方面的优势。从系统灵活性来看,由于多航天器编队的成员是独立且互联的,具有快速、动态地重新设计和配置的可能性,并将其用于各种任务;从系统鲁棒性来看,在单个元件或航天器发生故障的情况下,具有多个元件或航天器的系统通常能够实现全部或部分功能,拥有分布式体系结构还意味着可以在不需要同时更换整个系统的情况下,对现有系统进行部分升级或更换;从系统泛用性来看,多航天器编队系统可完成比单个航天器更多且更高难度、更高要求的任务,因为许多现代的航天任务要求系统里的各个单元必须协同、合作;从成本效益来看,由更小的部件组成的体系结构的固有好处之一是成本低廉,因为模块化小型卫星的制造成本往往比系统级的大型卫星更低。

本文将多航天器编队问题纳入 MASs 一致性控制理论框架中,进行基于局部信息交互的分布式协同控制。在这套理论框架中,一个基本的假设是由于物理距离、硬件条件、外部干扰等限制,编队中的每个个体很难与其他所有个体都保持良好的通信,因此每个个体仅能利用局部信息去完成整体的协同。基于上述设计思想,本文系统地介绍了 MASs 一致性控制及其在多航天器编队姿态协同控制中的研究和应用。

1 多智能体系统一致性控制

MASs 是分布式人工智能的重要分支,而协同控制是实现 MASs 协调合作的关键,其主要包括一致性、编队、包含、聚合等协同控制任务,其中一致性控制是 MASs 的一类基础性协同问题,是解决其他协同问题的关键。MASs 的一致性指在分布式控制协议的作用下,智能体之间通过信息交互,实现相关状态量趋同。一致性算法最早被 BERTSEKAS 等^[1]

提出并用于解决分布式计算等问题,之后随着 Vicsek 模型^[2]的提出,学者们进一步揭示了一致性算法的作用机理和实现条件^[3-4],并引起了广泛的关注。针对不同领域的应用需求,许多不同类型的多智能体一致性协议被提出,本文将选取航天器协同控制中常考虑的控制性能、资源受限、控制结构等因素分别从有限时间控制、事件驱动通信以及一致性跟踪控制三个方面对多智能体一致性控制问题展开讨论。

1.1 多智能体系统有限时间一致性控制

系统收敛速度、收敛精度都是实际工程应用中评价算法性能的核心指标,按照收敛速度可以将一致性问题划分为渐近一致性和有限时间一致性两类。相较于渐近一致性,有限时间一致性具有快速收敛性、强鲁棒性以及高控制精度等特点,其目的是在限定时间内使得系统状态达到同步,更快实现一致。基于不同类型的滑模控制技术,文献[12-15]针对积分器类型 MASs 提出了有限时间一致性控制策略;考虑到滑模控制器的非连续性,文献[16-20]基于加幂积分技术设计了连续的有限时间一致性控制策略;考虑到实际工程应用中智能体动力学差异带来的控制问题,DU 等^[21]在基于势函数方法和加幂积分技术设计了分层控制器实现了异构 MASs 的有限时间一致性控制。然而,上述策略对系统收敛时间的估计依赖于初始信息,当系统初始信息难以获取时将直接影响收敛时间估计精度,从而影响系统整体任务的进行。针对此问题,固定时间能够避免收敛时间估计对系统初始信息的依赖具有良好的灵活性,可提高控制策略在实际工程的应用范围。

1.2 基于事件驱动策略的一致性控制

信息交互是 MASs 协同的基础,在实现一致的过程中局部相邻的智能体间将进行频繁的信息交互,而不同的信息交互方式对智能体的通信资源和网络带宽需求不同,并且会直接影响整体控制性能。事件驱动策略^[22]作为一种按需采样的通信方式,能够根据智能体的需求进行通信,从而避免错过重要通信节点且减少不必要的通信交互,能够更好地符合实际工程需求。YANG 等^[23]提出了基于时间函数的事件驱动触发机制,为触发误差设计了

随时间指数收敛的触发上界以调节智能体间的通信,只有当智能体的触发误差累计并超过其触发上界时才进行通信,从而减少了智能体间的通信频次;综合考虑智能体的状态演变对信息交互的影响,LIU等^[24-26]设计了状态相关的事件驱动触发机制,能够根据智能体间的一致情况调整通信频次,从而提高整体控制性能,进一步研究了有向图下的有限时间一致性问题^[20];考虑智能体间动力学的差异,LUI等^[27]分别针对固定拓扑和切换拓扑的情况,结合内模原理研究了异构MASs的分布式输出一致控制策略;此外,为了更好地平衡控制性能和通信频次,LI等^[28]通过引入新的动态变量设计了动态事件驱动策略,在静态策略的基础上进一步减少了通信冗余。

1.3 多智能体系统一致性跟踪控制

一致性跟踪控制采用主从式控制结构,将MASs划分为领导者(核心智能体或参考信号)和跟随者,其目的是通过智能体间的协同衍化在实现状态一致的同时实现对领导者期望状态的跟踪。考虑通信拓扑对控制性能的影响,NI等^[23]分别研究了无向拓扑、有向拓扑以及切换拓扑下线性MASs的一致性跟踪问题;进一步考虑非线性、外部扰动、参数不确定性以及通信延迟等因素的影响,文献[24-27]分别研究了不同情况下的鲁棒一致性跟踪策略使得MASs在实现控制目标的同时抑制干扰因素带来的影响。然而,上述文献仅考虑领导者无外部控制输入的情况。值得注意的是,对于一致性跟踪控制而言,领导者的动态起到了至关重要的作用,它决定了系统整体的最终一致动态,因此领导者动态的灵活性和可调节性是实际工程应用中实现多样化任务所不可忽略的。针对该需求,考虑具有非零动态输入的领导者,LI等^[28]分别提出了非连续和连续的一致性跟踪控制器,实现了MASs对期望信号的跟踪,其中对于连续形式控制器仅能实现有界一致控制;WEN等^[29]研究拓扑切换对此类一致性跟踪控制的影响,并给出拓扑驻留时间。

上述3类算法分别从收敛性能提升、通信能源节约以及系统动态灵活性等方面提高了多智能体协同控制在实际工程中的应用范围,且在一定程度上符合航天器编队的实际控制需求。首先,在多航天器编队对姿态的稳定速度和指向精度等控制性

能有着较高的要求时,尤其是面对高精度和高时效性的空间任务时,有限/固定时间姿态协同控制的研究就显得尤为重要;其次,由于多航天器编队系统多采用小型航天器,其搭载的计算和通信资源有限,因此资源节约型的事件驱动策略能够更好地平衡有限的星载资源与频繁的信息交互之间的矛盾,更能满足实际需求;最后,利用分布式一致性跟踪控制能够更好地对MASs整体的动态进行引导,这一控制结构能够完美地匹配多航天器编队相对姿态的保持以及对期望姿态信号的同步跟踪等控制任务。因此,MASs的一致性算法可为多航天器编队控制中的不同需求提供支持,并为提高多航天器编队系统的自主性、可靠性以及可维护性奠定一定理论基础。

2 基于多智能体系统的多航天器编队姿态协同控制

多航天器协同被广泛应用于实际的任务场景,例如编队飞行、协同围捕、协同观测等。在执行一些具有复杂操作的任务时,如分布式合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)和三维立体成像等,编队中每个航天器都需要精准指向地球或其他星球上的某个位置来实现成像,这就必须确保每个航天器姿态都能快速到达预定的轨道位置并跟踪上期望的姿态轨迹。满足上述工程需求的其中一个难点在于,太空中的环境并非一成不变的,航天器也在沿着自身的轨道不断运动,因此,在进行航天器姿态控制时会受到各种来自外部环境的干扰。例如,来自稀薄大气的气动力矩干扰,太阳产生的太阳光压力矩干扰、微重力环境下的重力梯度力矩干扰等。这些干扰不仅会影响姿态跟踪控制的精度,也会影响控制的收敛时间。虽然外部干扰造成的影响可能未必是负面的,但却并不人为可控。而另一个难点在于,航天器之间相互通信带来的一些衍生问题,比如通信带宽受限等,使得每个航天器未必能获得预期的邻居信息以达成协同。此外,在一些要求高精度和时效性的空间任务中,需要研究抗干扰性强、具有鲁棒性的航天器编队高精度姿态协同控制算法,以满足工程需要。基于前期在多智能体一致性控制方面的工作积累,针对多航天器的姿态协同跟踪问题研究分布式协同控制策略。

考虑由 N 个航天器组成的航天器编队,分别编

号为 $1 \sim N$, 若航天器编队系统中存在领导者, 则将领导者编号为 0。每个航天器姿态采用修正的罗德里格斯参数 σ_i 来表示, 第 i 个航天器姿态运动学方程为

$$\begin{aligned} J_i \dot{\omega}_i &= -\omega_i \cdot J_i \omega_i + u_i + d_i, i = (1, 2, \dots, N) \\ \dot{\sigma}_i &= G_i(\sigma_i) \omega_i = \\ & \frac{1}{4} \left[(1 - \sigma_i^\top \sigma_i) I_3 + 2\sigma_i + 2\sigma_i^\top \sigma_i \right] \omega_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ω_i 为第 i 个航天器的姿态角速度; J_i 为转动惯量矩阵; u_i 为控制力矩输入; d_i 为航天器受到的外部扰动; I_3 为三阶单位矩阵。

2.1 分布式鲁棒姿态协同跟踪控制

实际工程中, 航天器控制系统会受到许多因素的影响, 例如未知干扰力矩、模型不确定性、通信延迟等, 这些因素将对控制精度和收敛速度造成不良影响, 进而阻碍航天器编队的协同。考虑到上述因素的影响, 文献[30-32]在自适应机制的基础上分别研究了无向拓扑和有向拓扑情况下的多航天器编队的鲁棒姿态协同控制问题; 针对有向切换拓扑的情况, 文献[33-34]基于滑模控制设计了鲁棒姿态协同控制器, 其中文献[33]在考虑上述干扰的同时还考虑了控制输入饱和的影响; 考虑具有非零输入的参考姿态信号, YANG 等^[35]研究了多航天器编队的姿态协同跟踪问题, 结合自适应控制机制设计了分布式非连续一致跟踪控制器, 实现了航天器编队的姿态对动态可调节期望姿态信号的协同跟踪, 并结合边界层理论和 σ 修正技术进一步设计了连续自适应控制策略, 不仅确保了控制器的连续性, 而且减弱抖振现象。

在本节, 考虑受到外部干扰和未建模动力学等因素对航天器姿态动力学的影响, 我们将研究多航天器编队的分布式鲁棒姿态协同控制问题。首先, 考虑跟随者之间的通信拓扑是无向连通的, 且至少有一个跟随者可以获得领导者状态的情况, $A_0 = \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{N0})$ 为跟随者与领导者间的连接关系, $a_{i0} > 0$ 为航天器 i 可以获得领导者信息, 航天器编队拓扑网络的邻接矩阵 $\mathcal{A} = [a_{ij}]_{N \times N}$, Laplacian 矩阵 $\mathcal{L} = [l_{ij}]_{N \times N} (l_{ij} = -a_{ij}, l_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij})$; 此外考虑外部干扰和未建模动态综合项 d_i 的影响, 其前两阶导数均有界。基于上述条件, 提出一种独立的动态

变量 \hat{f}_i 用以补偿综合项 d_i , 并设计分布式鲁棒姿态控制器:

$$\begin{aligned} u_i &= J_i (-\hat{f}_i + J_i^{-1} \omega_i \times J_i \omega_i + a_{i0} \dot{\omega}_0 - k_c e_i - \alpha G_i \omega_i) \\ \dot{\hat{f}}_i &= k_1 \dot{e}_i + k_2 \text{sign}(e_i) + k_3 e_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\alpha, k_1, k_2, k_3, k_c$ 为控制器增益; $\dot{\omega}_0$ 为领导者的角加速度; $e_i = e_{\omega_i} + \alpha e_{\sigma_i}$ 为聚合误差项, $e_{\omega_i} = \sum_{j=1}^N a_{ij} (\omega_i - \omega_j) + a_{i0} (\omega_i - \omega_0)$, $e_{\sigma_i} = \sum_{j=1}^N a_{ij} (\sigma_i - \sigma_j) + a_{i0} (\sigma_i - \sigma_0)$ 。因此, 基于上述条件和控制器设计, 可以得到如下定理。

定理 1^[36] 考虑存在外部干扰和未建模动态的多航天器编队系统, 针对姿态动力学系统(1), 若控制器(2)和动态变量 \hat{f}_i 的参数满足如下条件, 则可实现多航天器的鲁棒姿态跟踪控制, $\alpha > 0, k_1 > 0, k_2 > \|m\| + k_c \|\dot{m}\|, k_3 = \frac{k_1}{k_c} + 1, m = ((\mathcal{L} + A_0) \otimes I_3)^{-1} \ddot{e} + \hat{f}_i + k_c \dot{e}$ 。

值得注意的是, 分布式姿态协同控制式(2)基于多智能体一致性控制协议的思想, 充分利用航天器的相对姿态和相对角速度, 实现跟随者对领导者姿态的跟踪, 且弱化了外部扰动和未建模动态对控制性能的影响, 具有一定的鲁棒性。

2.2 分布式有限/固定时间姿态协同跟踪控制

有限时间控制方法在控制精度和收敛速度上均优于传统的渐近时间控制, 因此, 在一些要求高精度和时效性的空间任务中, 多航天器编队的有限时间姿态协同控制将是研究的重点。近年来, 有较多的文献研究了航天器编队的有限时间姿态协同问题。考虑通信拓扑为无向图的情况, 文献[37-39]研究了有限时间姿态协同控制问题, 通过分布式观测器实现了角速度的估计从而解决了无角速度反馈的控制问题, 并且分别基于加幂积分方法和齐次方法设计了有限时间姿态协同控制策略; 考虑通信拓扑为有向图的情况, 文献[40-41]分别基于快速非奇异终端滑模和齐次方法设计了有限时间姿态协同控制策略, 其中文献[40]利用自适应技术抑制外部扰动、模型不确定性等不确定性因素对系统稳定性的影响, 文献[41]利用分布式观测器实现了角速度和期望姿态信号的估计; LU 等^[42]针对存在模型不确定性和外部扰动的航天器编队姿态协同问题, 提出了一种基

于改进的快速终端滑模的分布式协同姿态跟踪控制律,在加快收敛速度避免奇异性的同时保证了系统的有限时间稳定性,并且基于改进快速终端滑模和切比雪夫神经网络的设计了分布式有限时间姿态协同跟踪控制器,避免了控制器对精确模型的依赖且实现了有限时间稳定。固定时间控制作为有限时间控制的一种,其不仅具有快速收敛性、强鲁棒性和高控制精度外还避免了收敛时间估计对航天器初始状态的依赖,算法具有更好的灵活性和实用性。近年来,固定时间收敛的航天器姿态协同控制方法陆续受到学者们的关注^[43-47]。考虑无向图通信拓扑的情况,文献[43-46]设计了固定时间姿态协同控制策略,实现了航天器姿态的快速协同;考虑有向生成树拓扑的情况,文献[47]研究了固定时间姿态协同控制问题,在无角速度反馈的情况下实现了固定时间姿态协同跟踪控制,得出了最终有界的结论。

在本节,考虑航天器间的通信拓扑为有向的且包含一棵有向生成树,将基于势函数设计一种固定时间分布式观测器以实现在有限时间内完成对领导者状态的精确估计,并设计一种改进的非奇异固定时间滑模姿态跟踪控制器,以实现多航天器编队的有限时间姿态协同跟踪,且避免系统收敛时间估计对航天器初值的依赖。

首先,为便于控制器设计,将系统(1)转化为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= -M_i^{-1}(\sigma_i)C_i(\sigma_i, \dot{\sigma}_i)\dot{\sigma}_i + M_i^{-1}(\sigma_i)G_i^{-1}u_i + \\ & M_i^{-1}(\sigma_i)G_i^{-1}d_i \\ M_i(\sigma_i) &= G_i^{-T}(\sigma_i)J_i G_i^{-1}(\sigma_i) \\ C_i(\sigma_i, \dot{\sigma}_i) &= G_i^{-T}(\sigma_i)J_i G_i^{-1}(\sigma_i)\dot{G}_i(\sigma_i) \cdot \\ & (J_i G_i^{-1}(\sigma_i)\dot{\sigma}_i)^\times G_i^{-1}(\sigma_i) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \times 为向量的叉乘矩阵。

其次,针对虚拟领导者动态向量^[48] $\dot{x}_0 = Ax_0$, $x_0 \triangleq [\sigma_0^T, v_0^T]^T$, $A = \begin{bmatrix} 0 & I_3 \\ A_1 & A_2 \end{bmatrix}$,基于势函数方法设计如下分布式观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) &= A\hat{x}_i - k\phi(\|Ky_i\|) \cdot \\ & (c_1 K^2 y_i + c_2 K f^p(Ky_i)) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\hat{x}_i \triangleq [\hat{\sigma}_i^T, \hat{v}_i^T]^T$ 为观测器状态; K 为增益矩阵,满足 $K^2 A^T + AK^2 - 2I < 0$; k, c_1, c_2 为观测器增益

系数,满足文献[49]的条件; $y_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + a_{i0}(\hat{x}_i - x_0)$; $0 < p < 1$;对于函数 $f^p(x)$,当 $\|x\| \neq 0$ 时有 $f^p(x) = \|x\|^{p-1}x$,否则 $f^p(x) = 0$; $\phi(\|Ky_i\|)$ 为势函数,有

$$\phi(\|Ky_i\|) = \begin{cases} 1, & \|Ky_i\| \in [0, \frac{\tau}{2}) \\ \frac{\tau^2}{4(\tau - \|Ky_i\|)^2}, & \|Ky_i\| \in [\frac{\tau}{2}, \tau) \end{cases} \quad (5)$$

可以看到势函数满足以下3个条件:1)在 $[0, \tau)$ 上是连续且非减的;2)当 $\|Ky_i\| \in [0, \bar{\delta})$ 时, $\phi(\|Ky_i\|) = \delta$,其中, $\delta > 0$, $\bar{\delta} \in [0, \tau)$;3) $\lim_{\|Ky_i\| \rightarrow \tau} \int_0^{\|Ky_i\|} \phi(\xi)(c_1 \xi + c_2 \xi^p) d\xi = +\infty$ 。非线性项特性 $f^p(Ky_i)$ 和 $\phi(\|Ky_i\|)$ 的引入使得该观测器在有限时间内完成领导者状态的精确估计。然后,为规避传统终端滑模的奇异性问题,并使每个航天器姿态可在有限时间内跟踪上领导者估计值,设计如下固定时间滑模 s (为了便于讨论,本节后续将省略表示航天器编号的下标 i ,该下标仅用于表示向量的第 i 个元素):

$$s = e_2 + \beta_1 \text{sig}^{\frac{1}{2}}(e_1) + \beta_2 \text{sig}^{k_1}(e_1) \quad (6)$$

式中: $\beta_1, \beta_2 > 0$; $k_1 > 1$; $e_1 = \sigma - \hat{\sigma}$; $e_2 = v - \hat{v}$;
 $\text{sig}^p(x) = [|x_1|^p \text{sign}(x_1), |x_2|^p \text{sign}(x_2), \dots, |x_n|^p \text{sign}(x_n)]$ 。

将相平面划分为非奇异区域 S_1 和奇异区域 S_2 ,

$$\begin{aligned} S_1 &= \left\{ (e_{1i}, e_{2i}) \left| \frac{\beta_1}{2} \left\| e_{1i}^{\frac{1}{2}} \right\| \left\| e_{2i} \right\| \leq u_s + \frac{\beta_1 \beta_2}{2} |e_{1i}|^{k_1 - \frac{1}{2}} \right. \right\} \\ S_2 &= \bar{S}_1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $u_s > \frac{\beta_1^2}{2}$ 。为了解决滑模的奇异性问题,控制器的设计需要满足当系统状态处于区域 S_1 时,将正常收敛至滑模面 $s = 0$,而当系统处于区域 S_2 时,使系统状态在有限时间内转移至区域 S_1 。因此,设计如下非奇异固定时间姿态跟踪控制器:

$$\begin{aligned} u &= G(u_0 + u_1) \\ u_0 &= M^{-1}(\sigma)C(\sigma, \dot{\sigma})\dot{\sigma} + \dot{v} \\ u_1 &= \text{Sat}(e_1, e_2) - l_d \text{sign}(s) - \Gamma(e_1, e_2) \text{sign}(s) - \\ & \beta_3 \text{sig}^{p_1}(s) - \beta_4 \text{sig}^{k_2}(s), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{Sat}(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \begin{cases} -\frac{\beta_1}{2} \text{diag}\left(|\mathbf{e}_1|^{\frac{1}{2}}\right) \mathbf{e}_2 - \\ \beta_2 k_1 \text{diag}\left(|\mathbf{e}_1|^{k_1-1}\right) \mathbf{e}_2, & (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \in S_1 \\ -u_b \text{sign}(\mathbf{e}_2), & (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) \in S_2 \end{cases}$$

$$\Gamma(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \text{diag}(\gamma(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2))$$

$$\gamma(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \left| -\beta_2 \text{sig}^{p_1}(\mathbf{s}) + \beta_2 \text{sig}^{p_2}(\mathbf{e}_2) \right|$$

$$\beta_3, \beta_4, u_b > 0, 0 < p_1 < 1, 0 < p_2 < 1$$

式中: u_b 为常数。

最终,各个航天器在姿态跟踪控制器的作用将快速收敛至领导者的状态,从而完成整个编队的姿态协同,并得到如下结论。

定理 2^[49] 考虑具有姿态动力(1)的多航天器编队系统,在固定时间滑模(3)和姿态跟踪控制器(4)的作用下,滑模面 $\mathbf{s} = 0$ 将在有限时间内收敛至 0 且系统状态将沿着滑模面在有限时间内收敛至原点,且从初始状态收敛至原点的时间 T , 满足 $T \leq T_1 + T_2 + T_3$, 其中,

$$T_1 = \frac{1}{\beta_1(1-p_1)} + \frac{1}{\beta_2(k_1-1)}$$

$$T_2 = \frac{1}{2^{\frac{1+p_2}{2}} \beta_3 \left(\frac{1-p_1}{2}\right)} + \frac{1}{3^{\frac{1-k_2}{2}} 2^{\frac{1+k_2}{2}} \beta_4 \left(\frac{k_2-1}{2}\right)}$$

$$T_3 = \frac{2}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2(k_1-1)} \quad (9)$$

本节以代数图论和多智能体一致性理论为框架,设计了一种分布式固定时间观测器,避免了跟随者对领导者信息的依赖,降低了通信拓扑的复杂度。同时设计了固定时间跟踪控制器,实现每个航天器对本地姿态观测值的跟踪控制,最终在有限时间内与领导者形成协同。

2.3 基于动态事件驱动的分布式姿态协同控制

航天器间的信息交互是实现协同控制的基础,考虑有限的星载资源和空间通信环境的不确定性,通过改进航天器间通信机制,可以实现通信资源节约提高信息利用率,并保证协同任务的有效执行以及航天器在轨任务周期。事件驱动通信机制可根据航天器间的需求进行通信,通过设置通信触发条件调整通信频次,航天器仅在满足触发条件时与对应的邻居进行一次信息交互,极大地节省了通信资源,经过适当设计的触发机制也将不影响最终的控

制效果,因此基于事件驱动策略的多航天器姿态协同控制近年来引起了学者们的关注^[50-58]。LIU 等^[50]针对具有 Lagrangian 模型的航天器动力学系统,研究了事件驱动姿态一致性控制策略,设计了状态相关的事件驱动策略,实现了航天器间的完全间歇式通信,即控制器的更新和事件触发条件的检测均不依赖连续的邻居信息;文献[51]研究了多航天器的事件驱动-固定时间协同控制策略,分别针对固定和切换通信拓扑的情况设计了事件驱动策略和固定时间姿态协同控制策略,利用间歇的信息交互实现了快速姿态协同;考虑外部干扰力矩、系统不确定性、执行机构故障等因素的影响,文献[52-56]分别研究了基于事件驱动的鲁棒姿态协同控制器和容错姿态协同控制器;文献[57]设计了基于事件驱动的非线性分布式观测器来解决航天器姿态协同问题;文献[58]针对航天器惯性参数未知的情况,基于自适应控制方法和事件驱动机制,分别设计了状态反馈和输出反馈控制策略,实现了航天器姿态协同。

在本节,我们将基于前期在动态事件驱动策略方面的基础,研究基于动态事件驱动策略的多航天器姿态协同控制策略。考虑航天器间的通信拓扑为强连通有向拓扑的情况,其拉普拉斯矩阵 \mathcal{L} 的左特征向量为 $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N]^T, r_i > 0$, 且 $\sum_{i=1}^N r_i = 1$,

那么得到拓扑的代数联通度 $\alpha(\mathcal{L}) = \min_{\mathbf{r}^T \mathbf{r} = 0, \mathbf{r} \neq 0} \frac{(\mathbf{r}^T \mathcal{L} \mathbf{r})}{(\mathbf{r}^T \mathbf{R} \mathbf{r})}, \mathbf{R} = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_N)$ 。首先,为

了便于控制器设计,我们将修正罗德里格斯参数转化为具有欧拉-拉格朗日形式的航天器姿态动力学方程^[30]:

$$\mathbf{M}_i(\boldsymbol{\sigma}_i) \ddot{\boldsymbol{\sigma}}_i + \mathbf{C}_i(\boldsymbol{\sigma}_i, \dot{\boldsymbol{\sigma}}_i) \dot{\boldsymbol{\sigma}}_i = \mathbf{G}_i^{-1}(\boldsymbol{\sigma}_i) \mathbf{u}_i$$

$$\mathbf{M}_i(\boldsymbol{\sigma}_i) = \mathbf{G}_i^{-T}(\boldsymbol{\sigma}_i) \mathbf{J}_i \mathbf{G}_i^{-1}(\boldsymbol{\sigma}_i)$$

$$\mathbf{C}_i(\boldsymbol{\sigma}_i, \dot{\boldsymbol{\sigma}}_i) = \mathbf{G}_i^{-T}(\boldsymbol{\sigma}_i) \mathbf{J}_i \mathbf{G}_i^{-1}(\boldsymbol{\sigma}_i) \dot{\mathbf{G}}_i(\boldsymbol{\sigma}_i) + (\mathbf{J}_i \mathbf{G}_i^{-1}(\boldsymbol{\sigma}_i) \dot{\boldsymbol{\sigma}}_i) \times \mathbf{G}_i^{-1}(\boldsymbol{\sigma}_i) \quad (10)$$

其次,利用中间变量 $\mathbf{o}_i = \dot{\boldsymbol{\sigma}}_i + \gamma \boldsymbol{\sigma}_i$ 实现模型的降阶,并引入动态上层 $\boldsymbol{\eta}_i$ 设计基于事件触发状态的双层结构控制器:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{G}_i^T \mathbf{M}_i(\dot{\boldsymbol{\eta}}_i - \gamma \dot{\boldsymbol{\sigma}}_i + \mathbf{C}_i(\boldsymbol{\eta}_i - \gamma \boldsymbol{\sigma}_i + \alpha \mathbf{v}_i))$$

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{o}_i - \boldsymbol{\eta}_i$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_i = -\kappa \sum_{j=1}^N (\boldsymbol{\eta}_i(t_k^i) - \boldsymbol{\eta}_j(t_k^j)) \quad (11)$$

式中: t_k^i 为航天器 i 的最近一次触发时刻, 且 $t_{k+1}^i = \inf \{ t > t_k^i, g_i > 0 \}$, g 为事件触发函数, $\inf \{ \}$ 为满足集合条件的下确界。

最后, 引入动态变量 ζ_i , 并基于触发误差 $e_i = \eta_i(t_k^i) - \eta_i$ 为每个航天器设计动态事件触发函数:

$$g_i = \|e_i\|^2 - \frac{\zeta_i}{\varepsilon_i} - \frac{2\rho_i\delta_i}{\omega\vartheta} \left\| \sum_{j=1}^N (\eta_i(t_k^i) - \eta_j(t_k^j)) \right\|^2$$

$$\dot{\zeta}_i = -\beta_i\zeta_i + \theta_i \left(\frac{2\rho_i\delta_i}{\omega\vartheta} \left\| \sum_{j=1}^N (\eta_i(t_k^i) - \eta_j(t_k^j)) \right\|^2 - \|e_i\|^2 \right) \quad (12)$$

式中: $\zeta_i(0) > 0$; $\vartheta, \rho_i, \delta_i$ 为待定参数, 具体范围见定理 3。基于上述设计, 得出以下定理。

定理 3 考虑具有姿态动力学(1)的多航天器编队系统, 在分布式姿态协同控制器(5)和动态事件驱动策略(6)的作用下, 若其参数满足以下条件, 则能够使得多航天器在完全间歇的通信方式下实现姿态协同:

$$\gamma > 0, \alpha_i > 0, \kappa > 0, \vartheta > \|\mathcal{L}\|^2, \beta_i > 0 \quad (13)$$

$$0 < \rho_i < 2\alpha(\mathcal{L}) \min_{i=1,2,\dots,N} \{r_i\} \quad (14)$$

$$\omega \geq \|(I_N - \mathbf{1}_N \mathbf{r}^T) R \mathcal{L}\| \quad (15)$$

$$\varepsilon_i > \frac{\kappa \|(I_N - \mathbf{1}_N \mathbf{r}^T)^T R \mathcal{L}\|^2 - 2\rho_i\theta_i}{(2\rho_i\beta_i)} \quad (16)$$

$$0 < \delta_i < \min \left\{ 2\alpha(\mathcal{L}) \min_{i=1,2,\dots,N} \{r_i\} - \frac{\rho_i}{2}, \frac{\omega}{4\rho_i} \right\} \quad (17)$$

$$0 < \theta_i < \frac{\kappa \|(I_N - \mathbf{1}_N \mathbf{r}^T)^T R \mathcal{L}\|^2}{2\rho_i} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{1}_N$ 为 N 维全 1 列向量; I_N 为 N 阶单位矩阵。

本节通过引入动态事件驱动机制调整航天器间的通信频次, 实现了全间歇式通信, 即姿态协同控制器更新和事件触发函数检测均不依赖于连续的邻居信息, 并在此通信模式下设计了双层结构的分布式姿态协同控制策略, 实现了通信资源节约型的多航天器姿态协同控制, 提高了系统整体控制效能。

3 发展与展望

基于 MASs 的多航天器编队协同控制是目前航天器智能控制领域的重要研究方向之一。随着航天技术的发展, 航天器编队规模势必会随

着任务需求而不断扩大, 多航天器编队将呈现集群态势并拥有群体智能, 且具有更高的灵活性、可靠性以及自组织性。航天器集群作为一个庞大且复杂的分布式空间系统, 拥有更加复杂的信息网络且要求网络具有较高的自组织性, 同时也对协同控制技术提出了更高的要求。MASs 将为航天器集群智系统的协同感知、群体行为自学习、自主管理等技术提供更好的协同基础, 因此, 如何将基于 MASs 的多航天器编队协同控制技术进一步应用到更加复杂的航天器集群系统是未来航天器智能控制的一个重要研究方向, 其主要面临的问题包括 3 个方面。

3.1 航天器集群网络的复杂性与不确定性问题

航天器运行环境复杂, 其通信网络易受环境干扰导致系统出现通信能力下降、信息不对称等问题, 由此, 难免会出现网络时滞、信息丢包以及网络拓扑结构变化等现象, 且各航天器受到的影响也有一定差异。研究如何更好地处理不对称时滞、拓扑切换等问题将会是非常有意义的。

3.2 网络通信与控制器性能量化均衡分析

在协同控制问题中, 控制系统的性能依赖于网络通信, 也与控制器有关。面对星载资源有限的航天器系统, 兼顾考虑系统通信网络和控制器设计, 研究通信效率与系统性能间的关系, 并实现网络通信与控制性能的量化分析, 具有重要理论和实际意义。此外, 对于网络通信方式而言, 设计合理的事件驱动通信策略在实现降低系统通信频次的同时保持一定控制性能, 可有效提高系统整体效率; 因此, 如何综合设计通信网络、通信方式和控制器的问题还需进一步的研究。

3.3 基于多智能体强化学习的分布式姿态协同控制策略

多智能体强化学习具有不依赖模型、自学习、数据驱动等特点, 基于多智能体强化学习的控制策略可根据控制效果的反馈信息自主学习并优化策略知识, 为实现未知环境下的多航天器协同决策控制提供了一种内涵式的解决方法。因此, 如何量化分析多智能体强化学习算法的在多航天器编队控制的适用性, 并进一步分析强化学习数据模型参数

对控制算法的影响,将有效提高多航天器编队系统的智能化、自主化。

4 结束语

本文综述了 MASs 一致性控制及其在多航天器编队系统中的应用,重点分析了多航天器鲁棒姿态协同控制、固定时间协同姿态跟踪控制以及事件驱动姿态协同控制三类控制策略,并给出了相应的控制算法设计,讨论了各个算法的优点和不足。最后讨论了算法的应用并对算法的未来发展进行了展望。

参考文献

- [1] BERTSEKAS D, TSITSIKLIS J. Parallel and distributed computation: numerical methods [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1989.
- [2] VICSEK T, CZIROK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6):1226-1229.
- [3] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001.
- [4] OLFATI-SABER R, FAX J, MURRAY R. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [5] YU S, LONG X. Finite-time consensus for second-order multi-agent systems with disturbances by integral sliding mode[J]. Automatica, 2015, 54: 158-165.
- [6] FU J, WANG J. Robust finite-time containment control for high-order multi-agent systems with matched uncertainties under directed communication graphs [J]. International Journal of Control, 2016, 89(6): 1137-1151.
- [7] WANG X, LI S, YU X, et al. Distributed active anti-disturbance consensus for leader-follower higher-order multi-agent systems with mismatched disturbances [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(11): 5795-5801.
- [8] YU D, JI X. Finite-time containment control of perturbed multi-agent systems based on sliding-mode control [J]. International Journal of Systems Science, 2018, 49(2): 299-311.
- [9] HUANG J, WEN C, WANG W, et al. Adaptive finite-time consensus control of a group of uncertain nonlinear mechanical systems [J]. Automatica, 2015, 51: 292-301.
- [10] DU H, WEN G, CHEN G, et al. A distributed finite-time consensus algorithm for higher-order leaderless and leader-following multiagent systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(7): 1625-1634.
- [11] LI G, WANG X, LI S. Finite-time output consensus of higher-order multiagent systems with mismatched disturbances and unknown state elements [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12): 2571-2581.
- [12] SHI S, FENG H, LIU W, et al. Finite-time consensus of high-order heterogeneous multi-agent systems with mismatched disturbances and nonlinear dynamics [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 96(2): 1317-1333.
- [13] DU C, LIU X, REN W, et al. Finite-time consensus for linear multiagent systems via event-triggered strategy without continuous communication [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2020, 7(1): 19-29.
- [14] DU C, BIAN Y, LIU H, et al. Cooperative startup control for heterogeneous vehicle platoons: a finite-time output tracking-based approach [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021, 8(4): 1767-1777.
- [15] DIMAROGONAS D, FRAZZOLI E, JOHANSSON K. Distributed event-triggered control for multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(5):1291-1297.
- [16] YANG D, REN W, LIU X, et al. Decentralized event-triggered consensus for linear multi-agent systems under general directed graphs [J]. Automatica, 2016, 69: 242-249.
- [17] LIU X, DU C, LU P, et al. Distributed event-triggered feedback consensus control with state-dependent threshold for general linear multi-agent systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2017, 27(15): 2589-2609.
- [18] LIU X, DU C, LIU H, et al. Distributed event-triggered consensus control with fully continuous communication free for general linear multiagent systems under directed graph [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(1): 132-143.
- [19] LIU X, LIU H, DU C, et al. Distributed event-

- triggered consensus control for multiple Lur'e nonlinear systems under directed graph[J]. *International Journal of Control*, 2019, 92(2): 431-444.
- [20] LIU X, LIU H, DU C, et al. Distributed event-triggered output consensus control for heterogeneous multi-agent system with general linear dynamics [J]. *International Journal of Systems Science*, 2017, 48(11):2415-2427.
- [21] LIU X, LIU H, DU C, et al. Event-triggered output consensus for heterogeneous multi-agent systems with fixed and switching topologies[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2019, 29(14):4681-4699.
- [22] LI Y, LIU X, LIU H, et al. Distributed dynamic event-triggered consensus control for multi-agent systems under fixed and switching topologies [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(8), 4348-4372.
- [23] NI W, CHENG D. Leader-following consensus of multiagent systems under fixed and switching topologies [J]. *Systems and Control Letters*, 2010, 59(3): 209-217.
- [24] WANG W, WEN C, HUANG J. Distributed adaptive asymptotically consensus tracking control of nonlinear multi-agent systems with unknown parameters and uncertain disturbances [J]. *Automatica*, 2017, 77: 133-142.
- [25] AI X, YU J, JIA Z, et al. Adaptive robust consensus tracking for nonlinear second-order multi-agent systems with heterogeneous uncertainties [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2017, 27(18): 5082-5096.
- [26] SUBRAMANIAN K, MUTHUKUMAR P, JOO Y H. Leader-following consensus of nonlinear multiagent systems via reliable control with time-varying communication delay [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17(2): 298-306.
- [27] LUI D, PETRILLO A, SANTINI S. Leader tracking control for heterogeneous uncertain nonlinear multi-agent systems via a distributed robust adaptive PID strategy[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 108: 363-378.
- [28] LI Z, LIU X, REN W, et al. Distributed tracking control for linear multiagent systems with a leader of bounded unknown input [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(2):518-523.
- [29] WEN G, WANG P, YU X, et al. Pinning synchronization of complex switching networks with a leader of nonzero control inputs[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2019, 66(8): 3100-3112.
- [30] MIN H, SUN F, GAO Z, et al. Decentralized adaptive attitude synchronization of spacecraft formation [J]. *Systems and Control Letters*, 2012, 61(1): 238-246.
- [31] WU B, WANG D. Decentralized robust adaptive control for attitude synchronization under directed communication topology [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2011, 34(4):1275-1282.
- [32] WU B, WANG D, POH E. Decentralized sliding-mode control for attitude synchronization in spacecraft formation [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2013, 23(11): 1183-1197.
- [33] YE D, ZHAO Y, LIU J, et al. A simple structure robust attitude synchronization with input saturation[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, 354(14): 6062-6077.
- [34] SOFYALI A, JAFAROV E. Robust stabilization of spacecraft attitude motion under magnetic control through time-varying integral sliding mode [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2019, 29(11): 3446-3468.
- [35] YANG D, CHEN Z, LIU X. Distributed adaptive attitude tracking of multiple spacecraft with a leader of bounded unknown input [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2013, 11(5):1-9.
- [36] YANG D, LIU X. Distributed robust attitude tracking of multiple spacecraft with disturbances and unmodelled dynamics [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 9: 941697.
- [37] ZOU A, DE RUITER A, KUMAR K. Distributed finite time velocity free attitude coordination control for spacecraft formations [J]. *Automatica*, 2016, 67: 46-53.
- [38] HU Q, ZHANG J, ZHANG Y. Velocity free attitude coordinated tracking control for spacecraft formation flying[J]. *ISA Transactions*, 2018, 73: 54-65.
- [39] HUANG Y, MENG Z. Global finite-time distributed attitude synchronization and tracking control of multiple rigid bodies without velocity measurements [J]. *Automatica*, 2021, 132: 109796.
- [40] ZHANG C, WANG J, ZHANG D, et al. Fault tolerant adaptive finite time attitude synchronization and tracking control for multi-spacecraft formation [J].

- Aerospace Science and Technology, 2018, 73: 197-209.
- [41] LI H. Global finite time attitude consensus tracking control for a group of rigid spacecraft [J]. International Journal of Systems Science, 2017, 48(13): 2703-2712.
- [42] LU P, GAN C, LIU X. Finite-time distributed cooperative attitude control for multiple spacecraft with actuator saturation [J]. IET Control Theory and Applications, 2014, 8(18): 2186-2198.
- [43] SUI W, DUAN G, HOU M, et al. Distributed fixed-time attitude synchronization control for multiple rigid spacecraft [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17: 1117-1130.
- [44] SUI W, DUAN G, HOU M, et al. Distributed fixed-time attitude coordinated tracking for multiple rigid spacecraft via a novel integral sliding mode approach [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357: 9399-9422.
- [45] XU C, WU B, ZHANG Y. Distributed prescribed-time attitude cooperative control for multiple spacecraft [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 113: 106699.
- [46] XU C, WU B, WANG D, et al. Distributed fixed-time output-feedback attitude consensus control for multiple spacecraft [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(6): 4779-4795.
- [47] HU D, ZHANG S, ZOU A. Velocity-free fixed-time attitude cooperative control for spacecraft formations under directed graphs [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2021, 31(8): 2905-2927.
- [48] CAI H, HUANG J. Leader-following attitude consensus of multiple rigid body systems by attitude feedback control [J]. Automatica, 2016, 69: 87-92.
- [49] YE T, DU C K, LU P L, et al. Nonsingular fixed-time attitude coordinated tracking control for multiple rigid spacecraft [J]. ISA Transactions, 2022. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.02.024.
- [50] LIU X, DU C K, LU P L, et al. Decentralised consensus for multiple Lagrangian systems based on event-triggered strategy [J]. International Journal of Control, 2016, 89(6): 1111-1124.
- [51] JIN X, SHI Y, TANG Y, et al. Event-triggered fixed-time attitude consensus with fixed and switching topologies [EB/OL]. (2021-08-30) [2022-05-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9525305>.
- [52] YI H, LIU M, LI M. Event-triggered fault tolerant control for spacecraft formation attitude synchronization with limited data communication [J]. European Journal of Control, 2019, 48: 97-103.
- [53] DI F, LI A, GUO Y, et al. Event-triggered sliding mode attitude coordinated control for spacecraft formation flying system with disturbances [J]. Acta Astronautica, 2021, 188: 121-129.
- [54] WANG C, GUO L, WEN C, et al. Attitude coordination control for spacecraft with disturbances and event-triggered communication [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(1): 586-596.
- [55] XIE X, SHENG T, HE L. Distributed event-triggered attitude consensus control for spacecraft formation flying with unknown disturbances and uncertainties [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 58(3): 1721-1732.
- [56] ZHANG C, DAI M, DONG P, et al. Fault-tolerant attitude stabilization for spacecraft with low-frequency actuator updates: an integral-type event-triggered approach [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(1): 729-737.
- [57] WANG S, SHU Z, CHEN T. Event-triggered attitude synchronization of multiple rigid-body systems [J]. Systems and Control Letters, 2021, 149: 104879.
- [58] LONG J, WANG W, LIU K, et al. Distributed adaptive attitude synchronization of multiple spacecraft with event-triggered communication [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(1): 262-274.