

航天器姿态容错控制技术研究现状与发展*

秦海斌^{1,2}, 张艳红³, 梁 祯², 席建祥¹, 李安梁²
(1 火箭军工程大学 西安 710025
2 西安卫星测控中心 西安 710043
3 北京清河大楼 7 号楼 北京 100085)

摘要: 更远、更复杂的人类空间探测任务要求航天器具有更高的可靠性, 因此航天器的容错控制技术受到了广泛关注。对航天器姿态系统的容错控制技术发展现状进行了分析, 总结了国内外近年来航天器姿态容错控制的成果, 重点分析了利用自适应控制、滑模控制、模糊控制、神经网络控制等理论开展容错控制的进展, 并分别阐述了采用不同技术途径发展容错控制的优缺点。最后, 展望了航天器姿态容错控制技术未来的发展。

关键词: 航天器; 自适应控制; 滑模控制; 模糊控制; 容错控制

中图分类号: V448.2 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)06-0047-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220308001

引用格式: 秦海斌, 张艳红, 梁祯, 等. 航天器姿态容错控制技术研究现状与发展[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 47-55.

Current status and development of spacecraft attitude fault-tolerant control technology

QIN Haibin^{1,2}, ZHANG Yanhong³, LIANG Zhen², XI Jianxiang¹, LI Anliang²
(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;
2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China;
3. Beijing Qinghe Buliding, Beijing 100085, China)

Abstract: As human being go further in space and the space exploration become more complex, higher reliability of spacecraft is required. Thus, the fault-tolerant control technology of spacecraft has received extensive attention. The article studies the current status of fault-tolerant control technology of spacecraft attitude system, and summarizes the recent achievements in fault-tolerant control of spacecraft attitude at home and abroad. Furthermore, the article pays much attention to the progress of fault-tolerant control technology based on the theories of adaptive control, sliding mode control, fuzzy control, neural network control, etc., and the advantages and disadvantages of each technical approach are analyzed. Finally, the article looks forward to the future development of fault-tolerant control technology of spacecraft attitude.

Key words: Spacecraft; Adaptive control; Sliding mode control; Fuzzy control; Fault-tolerant control

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220308001

Citation: QIN Haibin, ZHANG Yanhong, LIANG Zhen, et al. Current status and development of spacecraft attitude fault-tolerant control technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 47-55.

引 言

随着空间探测任务的多样化以及航天器操控的精细化, 对航天器的性能与可靠性的要求越来越高。然而, 在轨航天器工作在真空、温度剧变与强辐射这样的恶劣空间环境中, 导致星载敏感器、执行机构及控制器等出现故障的可能性增加。在轨航天器一旦发生故障, 不仅会导致航天器系统鲁棒性下降, 甚至会使既定的任务失败。2016 年 2 月, 日本天体观测卫星“瞳”发生姿态控制装置故障, 星体加速旋转

*基金项目: 国家自然科学基金(62003363); 中国博士后科学基金(271004); 陕西省杰出青年科学基金(2021JC-35); 陕西省青年科学基金(2021JQ-375)

收稿日期: 2022-03-08 收修改稿日期: 2022-04-16

导致解体, 其外观效果图如图 1 所示。2019 年 9 月, 印度“月船 2 号”着陆器在落月过程中, 由于姿态失稳导致在距离月球表面 2.1 km 的高度上偏离预定轨迹, 之后彻底失去联系, 探测任务失败, 其实物照片如图 2 所示。



图 1 天体观测卫星“瞳”

Fig. 1 Celestial observation satellite“HITOMI”



图 2 印度“月船二号”

Fig. 2 India Chandrayaan-2

近年来在各国的航天任务中, 航天器出现不同等级的异常仍时有发生, 如太阳能帆板无法正常展开、动量轮故障、星载柔性部件打开异常等。根据文献[1]和文献[2]对国内外航天器在轨故障的统计, 控制系统发生故障的占比分别高达 28%和 37.2%, 其中发生严重和致命故障分别达到 38%、46%。在工程应用中, 航天器故障处理一般采用地面控制中心为主、在轨自主管理为辅的方式, 即航天器控制系统针对故障情形设置“安全模式”。若地面故障诊断系统检测到航天器已经发生异常, 则地面控制航天器转“安全模式”, 航天器转自旋稳定并实现对日定向, 太阳能帆板位置归零, 保证航天器的能源安全, 为故障处理创造必要的条件。地面控制中心应用专家系统对故障进行分析定位, 制定处置方案并进行必要的地面仿真实验, 然后再具体实施。因此, 实践中故障处理方法本质上是构建一个天地大闭环控制系统, 从而实现对异常的干预处理。

传统的故障处理机制尽管能够实现对航天器有效干预与故障修复, 但存在着时效性差、依赖地面观测条件等限制, 对于一些紧急重大故障, 有可能错失最佳的干预时机, 造成性能下降或失效。随着对航天器在轨故障问题经验的积累, 为增强航天器应对故障的能力, 提高航天器的自主性, 学者利用各种现代控制方法开展了大量的航天器姿态容错控制系统设计。现有的容错控制技术根据故障处理方式可以分为两种方式: 被动容错控制和主动容错控制。最先发展的是被动容错控制技术, 通过预判可能发生的故障进行控制器设计, 实现手段有硬件冗余、可靠性设计等方式。在轨运行期间无论故障是否发生, 都采用同样的控制策略。被动容错控制本质特点是不敏感具体的故障, 靠控制器自身的鲁棒性来削减故障的影响。但冗余设计带来系统复杂度的提高, 出现故障的可能性也在加大, 仅仅依靠预想的故障情况设计控制器的方法已不能满足日益增长的系统性能需求, 由此发展了主动容错控制技术。主动容错控制需要感知并采集故障信息反馈至控制器, 通过控制器重构的方法达到容错控制的目的。文献[3]和文献[4]研究了卫星执行机构部分失效情况下的姿态容错控制。文献[5]研究了一种干扰影响下基于终端滑模控制理论的航天器主动容错控制方法, 实现了故障与干扰的解耦分离估计, 提高了控制系统性能。

容错控制技术的发展对航天器在轨稳定运行具有重大意义。然而对于在轨航天器来说, 空间任务的复杂性、系统内部不确定性、液体晃动等内外因素给容错控制器设计带来一系列挑战。

① 转动惯量矩阵不确定。航天器在轨期间, 姿轨控系统长期不间断运行, 尤其是大范围轨道机动, 造成推进剂的不断消耗, 致使质量发生变化, 引起转动惯量矩阵参数变化, 造成控制器存在参数不确定性, 从而影响控制精度。

② 外部干扰及敏感器测量噪声。航天器在轨运行期间, 持续受到太阳辐射、重力梯度等多种空间

力矩的影响,同时传感器测量信息不可避免引入测量噪声,为保证高精度的姿态控制,外部干扰与测量噪声是容错控制器设计不可忽略的因素。

③ 执行器饱和与故障。在工程实践中,执行器的输出力矩不可能是无限的,并且,执行器长期工作会出现老化、输出力矩偏差等现象,甚至出现严重故障,因此,容错控制设计必须考虑执行器饱和与故障等因素。

④ 空间任务具有时间敏感性。通常空间任务要求控制系统在一定时间内实现理想的目标指向,因此容错控制器的设计必须满足有限时间收敛的需求,具有良好的稳态、动态性能。

⑤ 刚挠耦合导致模型参数不准确。部分航天器携带有柔性天线、机械臂等挠性部件,致使利用航天器刚体模型在分析问题存在缺陷,不能反映航天器的真实状态,因此研究建立刚挠结合的航天器模型是容错控制设计的一个挑战。

针对以上容错控制设计面临的挑战,学者利用不同理论进行了研究。考虑外界干扰的影响,研究了采用自适应控制、自抗扰控制、滑模控制、基于估计器的控制或模糊控制等理论方法;考虑传感器测量误差,研究了滑模观测器、自适应观测器等处理方法;考虑执行器输入受限或饱和问题时,研究了利用饱和函数、双曲正切函数等来处理;考虑执行器故障,基于自适应控制、滑模控制和控制分配等理论设计容错控制方案。控制分配理论有关研究情况可参考文献[6];自抗扰控制是一种典型的主动抗扰控制技术,以扩张状态观测器为手段,对总扰动进行估计,经常与其他控制理论结合使用。文献[7]针对带有挠性部件和液体晃动的深空探测航天器姿态控制问题,设计了自抗扰控制律,实现了大范围扰动和不确定性的有效抑制。本文针对航天器姿态控制中学者研究较多的自适应控制、滑模控制、模糊控制等容错控制方法进行综合分析,并对后续发展面临的问题及发展趋势进行了论述。

1 基于自适应理论姿态容错控制技术

任何实际控制系统都存在一定程度的不确定性,从系统内部来讲,设计者不一定能够预先准确知道所描述被控对象模型的结构与参数;从外部环境对系统的作用来讲,存在着各种扰动,并且通常情况下是难以预测的。如何处理客观存在各种类型的不确定性,给控制器的设计造成了困扰,自适应控制理论通过设计自适应调节律在线估计不确定参数为解决不确定性提供了一种方法。自适应技术由于能够提供未知参数的估计,并且具有控制增益可快速响应测量参数变化的特点,广泛应用于航天器容错控制中^[8]。

1.1 模型参考自适应控制

模型参考是建立一个理想参考模型,将发生的故障当作未知的因素去考虑,将实际发生的故障转化为跟踪过程中出现的偏差,令实际卫星姿控系统跟踪理想参考模型,通过在线设计故障补偿项或者在线调节控制器的结构参数的方式完成姿态控制。根据原理分析可知,其不需要识别实际的故障类型,因此可以适应多种类型的故障。文献[9]建立了一种高超声速飞行器的参考模型,姿态控制器跟踪参考模型和实际系统输出的误差及其变化率,通过调节控制器的在线参数实现自适应控制,解决了大跨度飞行条件下高超声速飞行器的俯仰通道姿态控制问题。针对执行机构发生故障的航天器,Han等^[10]设计了模型参考自适应容错控制器,实现了对故障信息的估计与容错控制,通过仿真比较显著地改善了系统故障情况下的性能。Hu等^[11]考虑航天器在轨质心变化,建立了时变惯性矩阵的显式动力学模型,基于该模型,设计了一种考虑外部干扰和执行器故障的自适应容错控制算法,实现对姿态的高精度跟踪。文献[12]利用参考模型输出、实际对象输出对BP神经网络进行权重更新,从而自主调节控制参数,实现自适应姿态控制。Deng等^[13]结合大幅液体晃动动力学和柔性附件振动特性,提出了挠性航天器非线性系统模型,并基于此设计了控制器。

可以发现,模型参考自适应控制的控制性能跟理论参考模型有很大的相关性。而现代航天器刚挠结合,建立精确的数学模型较为困难,应用中多采用简化数学模型,导致控制存在一定的误差。

1.2 参数估计自适应控制

随着自适应控制在工程实践中的应用,产生了一种采用参数更新律和控制律相结合的方法来设计自

适应控制器,前者也被称为参数估计器。针对外部干扰和执行器故障,文献[14]设计了一种间断自适应故障补偿控制器,解决了卫星姿态容错控制问题;文献[15]通过设计参数估计器对故障信息、外界扰动进行估计,以完成控制器重构实现容错控制;文献[16]设计了一种自适应增益有限时间观测器用于故障诊断,构建了一种基于非线性积分滑模控制的容错控制器。文献[17]针对存在惯性参数不确定和空间扰动的航天器姿态控制问题,提出了一种基于扰观测器补偿动态不确定性的自适应控制策略。文献[18]设计了一种自适应学习观测器来估计集中扰动,创新性地提出了允许增益矩阵按照估计误差值波动的观测器,从而使得估计故障在有限时间内收敛到与自适应增益矩阵无关的预定义领域。文献[19]针对具有惯性不确定性、Lipschitz 非线性、外部扰动和多类型执行器故障的刚性航天器,提出了一种自适应滑模观测器估计故障信息和不确定性,在此基础上,利用分数阶滑模控制和反步控制相结合设计了容错控制器。

随着其他控制理论的发展,针对自适应容错控制存在的不足,发展了多种融合控制方法。针对执行器故障发生的不确定性,文献[20]提出了一种基于给定性能界的控制器设计方案,通过定义一个范围有界的单调递增平滑函数,无论执行器故障是否发生,跟踪误差都能保证在规定的误差范围内。该方案通过调整设计参数,可以提高系统暂态性能,同时在执行器存在不确定故障时能保证稳定性和渐近跟踪,且稳态误差为零。文献[21]考虑控制器设计无角速度信息时,基于自适应反步控制技术,提出了一种充液航天器自适应反步控制算法,增强了控制器的鲁棒性。

此外,自适应控制在航天器编队姿态控制中也有应用。文献[22]考虑惯性参数未知、外部干扰力矩和未建模等不确定性因素,提出了预设性能的航天器编队领航跟随姿态控制新方法,设计了基于学习的自适应分布式控制器,增强了两层性能控制器在没有先验惯性信息情况下的自适应性。文献[23]针对定向通信拓扑下的航天器编队同步控制问题,采用扩张状态观测器方法,实现了编队同步的自适应姿态控制。

可以发现,自适应容错控制技术良好的特性使得其发展逐步完善,并与其他控制理论不断结合融合,衍生出多种容错控制方法,解决了一定的工程技术问题,但还没有一种方法能完美解决容错控制面临的转动惯性参数、空间干扰、模型误差等不确定性因素和执行机构受限问题。

2 基于滑模控制理论姿态容错控制技术

滑模控制是一种非线性系统控制,滑动模态设计与对象参数及扰动无关,可以灵活设计,这使得滑模控制具有响应快速、对象参数变化及扰动不灵敏等优势,对先验故障具有很强的鲁棒性,这与航天器在空间中运行面临的复杂因素相吻合,因此在航天器姿态控制系统中得到应用广泛^[24,25]。航天器在轨机动具有一定的时效要求,故在控制设计中考虑时间因素就成为必然。

2.1 有限时间滑模控制

有限时间控制方法多种多样,在容错控制领域应用广泛的一种是终端滑模控制技术。终端滑模控制是一种有限时间控制策略,其可以估算收敛时间上界,并且具有能分析系统鲁棒性、设计过程简单等优势,经常在航天器容错控制设计中应用。针对执行器故障问题,文献[26]设计了一种不需要在线对执行器故障进行检测与分离的姿态容错控制器,该控制器基于指数形式的非奇异快速滑模面,解决了刚体航天器冗余执行器的故障与受限的姿态跟踪问题;赵琳等^[27]采用自适应算法在线估计故障信息,据此设计了快速终端滑模姿态跟踪容错控制器,实现对故障和干扰的抑制;文献[28]基于滑模观测器进行故障观测,并运用在线调整控制律增益的方法,实现了对抖振现象的抑制。考虑执行器安装存在偏差和转动惯量参数不确定,文献[29]提出一种有限时间姿态补偿控制策略,并设计了自适应滑模控制器,保证了对系统内外不确定性的鲁棒控制。文献[30]构造了一个包含姿态角及角速度误差的非奇异终端滑模面,设计了一种自适应控制律估计滑模面导数中未知函数的上界,消除了现有大多成果中关于不确定的前提假设,使得控制器的使用约束小,更具有工程实用性。

考虑挠性航天器固有特性,文献[31]首先建立了航天器的动力学方程和挠性振动方程,通过设计一个非线性非奇异终端滑模面,实现对挠性航天器的稳定姿态控制。考虑执行器输出饱和的柔性关节机械

臂控制问题,文献[32]将机械臂模型按时间尺度划分为刚柔两个子系统,分别利用基于速度差的反馈控制和一类非线性积分滑模控制的理论设计控制律,实现了系统控制准确性和快速性。

研究发现:通过有限时间滑模控制可以约束控制系统的收敛时间,但收敛时间与系统的初始状态密切相关,很难精确估计系统的收敛时间上限。系统虽然最终能够到达稳定状态,但动态过程所用时间不易控制。对于航天器姿态控制过程,一般要求姿控系统在指定时间内到达稳定状态,因此学者在有限时间滑模控制的基础上,进一步研究发展了固定时间滑模控制。

2.2 固定时间滑模控制

运用固定时间控制的系统,系统收敛时间的上限由控制参数确定,与初始状态无关。文献[33]利用粘性球摆构造了等效力学模型,模拟航天器储箱液体的在轨晃动情况,推导出液体晃动耦合动力学模型,据此设计了固定时间自适应滑模控制器,用以解决充液航天器液体燃料晃动等对姿态精准控制的影响问题。文献[34]利用固定时间理论,设计了六自由度位姿终端滑模控制器,解决了近距离交会段位姿耦合控制问题,实现了空间飞行器交会对接时位姿的协同控制,并能够有效抑制干扰。针对航天器姿态容错控制问题,Jiang等^[35]针对四元数描述的飞行器,提出了固定时间饱和容错姿态稳定控制。考虑外部干扰和传感器测量噪声,文献[36]通过一种固定时间干扰观测器估计不确定信息,并基于估计信息设计了滑模控制器,保证姿态系统是指数稳定的,同时能够抑制外部扰动和抖振。梅亚飞等^[37]考虑执行器受限和输入饱和的多种因素,在李群SE(3)的框架下建立航天器姿轨耦合一体化模型,设计了一种模糊自适应终端滑模固定时间控制器,实现对相对运动航天器姿轨一体的快速高精度控制。Shi等^[38]研究了航天器存在外部干扰、惯性不确定性、执行器输入饱和与故障等约束下的固定时间姿态控制,设计了自适应与滑模控制的组合控制方案,通过自适应理论估计不确定性上界,利用一种新颖的非奇异固定时间滑模面构建控制律,并通过数值仿真进行了验证。文献[39]将外界干扰与参数的不确定作为系统的新状态进行实时估计,设计了一种自抗扰终端滑模控制方法,解决了高速滑翔飞行器的姿态控制问题。

可以发现:对滑模变结构控制而言,抖振现象始终是进行控制器设计不得不面对的问题。该现象不仅增加系统额外的能源消耗,降低系统的控制精度,甚至还可能激发系统中的高频动态因子,导致系统失稳震荡甚至损坏系统部件。此外,通过对国内外有关文献研究发现:目前在固定时间容错控制方面的成果还不多,设计的大多控制律仅能使系统收敛在平衡点附近的邻域,邻域范围不易确定、存在奇异值等问题,但固定时间容错控制具有收敛速度快、抗干扰和容错性能强的特点,具有广阔的应用前景。

3 基于智能控制理论姿态容错控制技术

智能控制是控制理论发展的高级阶段^[40],在生产实践中,人们发现:一些复杂控制问题可通过熟练操作者的经验和控制理论相结合的方法去解决,智能控制借鉴了这种控制的思路,利用人的思维方式建立逻辑模型,使用类脑的控制方法。智能控制具有自学习、自适应等优势,能够解决复杂系统的控制问题,使其成为当前的研究热点。在航天器姿态容错控制方面,智能控制的主要研究方向是模糊控制和神经网络控制,下面分别进行阐述。

3.1 模糊控制

自然界中大多数系统是无法用经典理论建立明确的数学模型的,经典控制论与现代控制论的使用受到限制,但生产实践中发现:利用人工控制或经验控制却能够获得较好的控制效果。受此启发,模糊控制从人工操作经验中归纳抽象出一组或数组定性表达式的控制规则,设计仿人工模糊控制器进行控制。目前,模糊控制正逐步在航空航天领域得到应用。Xu等^[41]研究了非线性柔性航天器受执行器饱和与故障的控制问题,基于T-S模糊模型设计了一种容错控制器,以保证柔性航天器在外部扰动和弹性振动存在下所需的姿态操控。利用模糊控制的强非线性逼近能力,有学者将其与自适应控制、滑模控制等理论结合进行控制器设计,Huo等^[42]设计了一种有限时间自适应模糊控制器,实现了时间约束下的航天器推进系统故障的容错控制以及高精度姿态跟踪。文献[43]在自适应控制律设计中考虑扰动力矩,利用模糊算法实现对不确定性、非线性等情况的处理,实现了对航天器姿态的快速精准控制。Ran等^[44]采用自适

应学习算法和模糊逻辑系统来估计姿态动力学变化, 设计了终端滑模控制方案, 实现了有限时间的姿态容错控制。文献[45]针对挠性航天器姿态机动问题首先设计了滑模控制器, 利用模糊控制理论对控制器进行改进, 建立了模糊滑模控制律, 实现对滑模控制存在的航天器姿态角速度和振动模态较大的抑制。

通过文献调研可知: 在航天器姿态容错控制应用方面, 模糊控制理论更多是用于对系统的非线性描述, 再结合自适应、滑模、反步等其他控制理论设计容错控制器, 达到对姿态的鲁棒控制。可以发现: 模糊控制与其他控制理论的结合还处于探索发展阶段, 相关研究成果较少, 并且没有航天工程化的应用案例。

3.2 神经网络控制

神经网络控制是通过模拟人脑的生理结构进行控制, 具备模式识别、自学习能力和并行机制的特征, 对非线性的不确定性系统的适应性好, 鲁棒容错控制能力强。因此, 学者将其应用于航天器的姿态容错控制领域, 为容错控制器设计提供了一种新的思想。

文献[46]提出了一种基于深度神经网络的姿控系统故障诊断与容错控制方法, 设计了多个训练完备的深度神经网络实现传统容错控制器的状态诊断、姿态控制和力矩分配等功能。文献[47]基于 RBF 神经网络建立了自适应姿态容错控制器, 解决了执行机构死区现象和不确定扰动给控制系统造成的干扰。Ma 等^[48]设计了基于 Chebyshev 神经网络的自适应姿态控制器, 解决了存在干扰、不确定性且无角速度测量信息的卫星姿态跟踪问题。文献[49]则针对空间服务非合作目标时质量和姿态参数突然变化, 易造成控制系统不稳定的问题, 建立了能够输出离散化控制力矩的自学习神经网络模型, 将连续控制力矩离散化, 并采用强化学习算法对其进行训练, 仿真表明: 神经网络模型能够完成对组合体参数的在线识别, 控制组合体姿态实现重新稳定。

根据研究可知: 神经网络在容错控制系统应用中主要是从以下几方面考虑, 对姿态控制系统中的未知故障模型进行近似处理。首先对整个未知系统模型进行整体学习, 当发生故障时, 神经网络再自适应地重新学习并修改权值, 实现相应的容错控制。然后建立与不同故障模型一一对应的多个神经网络, 利用相应的神经网络补偿器实现容错控制。但基于神经网络设计的控制器结构庞大, 计算量大, 限制了工程的应用。

4 航天器姿态容错控制发展展望

现代航天器执行任务复杂, 姿控频繁, 并且深空探测时延较大, 为提高航天器的可靠性, 要求航天器具备更高的自主控制能力。当前, 航天器的姿态容错控制虽已取得长足的发展, 但仍需针对一些不足之处做进一步的研究和拓展。

① 无角速度测量信息的容错控制

现有的航天器姿态容错方案, 基本上假定航天器的姿态角和角速度信息是可用的。然而, 并不是航天器的所有信号都能被高精度地测量。例如, 在实践中, 由于成本限制或实现约束, 微型卫星或纳米卫星在发射时没有安装任何角速度传感器。此外, 由于速率传感器的故障, 在一定程度上可能会导致角速度测量的错误和不精确。目前, 虽然部分容错控制器具备无需角速度测量信息进行控制的能力, 但容错控制能力有限^[50], 高效、可靠的无角速度信息的容错控制系统仍需进一步研究。

② 航天器容错控制能耗优化

能耗优化问题包含两方面的情形: 一是航天器自身携带的推进剂。在轨航天器的寿命在很大程度上是由其携带多少推进剂确定的, 以较小的代价实现利益的最大化是容错控制的应有之义; 二是星载计算能力的优化。由于功耗、空间等的限制, 星载计算机一般不具有较强的运算能力, 容错控制算法设计必须考虑对计算资源的占用情况。因此, 能耗优化能力的提升是亟需解决的一个问题。

③ 智能控制的工程化

智能控制当前工程实践应用还较少, 设计的智能控制器还存在结构复杂、计算量大的缺点。由于星

载计算机的能力限制,导致智能控制距离工程应用还存在一定的差距,但智能控制的巨大潜力依然值得深入研究。针对航天器自身参数、运行条件的变化以及空间环境的影响,利用深度学习、神经网络控制等智能控制技术,优化智能控制器的结构及算法,提高航天器的自主容错能力,也是未来的重要研究方向之一。

④ 星群编队的容错控制

随着互联网星群的发展,编队构型保持和星间通信要求各航天器间建立相对稳定的姿态关系。目前,针对编队故障的容错控制研究还较少,未来可以从编队构型、编队整体任务规划、编队姿态协同等方面考虑,就编队飞行中的避障、通信、协同和故障处理等方面进行容错控制设计。

参考文献

- [1] 谭春林, 胡太彬, 王大鹏, 等. 国外航天器在轨故障统计与分析[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 130–136.
TAN Chunlin, HU Taibin, WANG Dapeng, et al. Analysion foreign spacecraft In-orbit failures[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 130–136.
- [2] 张华, 沈嵘康, 宗益燕, 等. 遥感卫星在轨故障统计与分析[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(3): 324–329.
ZHANG Hua, SHEN Rongkang, ZONG Yiyan, et al. On-orbit fault statistical analysis for remote sensing satellite[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(3): 324–329.
- [3] ZHAO D, YANG H, JIANG B, et al. Attitude stabilization of a flexible spacecraft under actuator complete failure[J]. Acta Astronautica, 2016, 123: 129–136.
- [4] 刘聪, 钱坤, 李颖晖, 等. 一体化执行器饱和和线性矩阵不等式跟踪容错控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 79–86.
LIU Cong, QIAN Kun, LI Yinghui, et al. The integrated tracking fault tolerant controller design under actuator saturation with linear matrix inequality algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 79–86.
- [5] 宗群, 杨希成, 张秀云, 等. 一种故障干扰解耦的航天器主动容错控制方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(9): 107–115.
ZONG Qun, YANG Xicheng, ZHANG Xiuyun, et al. An active fault tolerant control method for spacecraft with fault and disturbance decoupling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 107–115.
- [6] 张爱华. 过驱动航天器执行机构姿态容错控制分配研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] 钟声, 黄一, 胡锦涛. 深空探测航天器姿态的自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(12): 2028–2034.
ZHONG Sheng, HUANG Yi, HU Jinchang. Active disturbance rejection control for attitude control of deep space explorer[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(12): 2028–2034.
- [8] CHEN Z, HUANG J. Attitude tracking and disturbance rejection of rigid spacecraft by adaptive control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(3): 600–605.
- [9] 程仙垒, 刘鲁华, 汤国建. 高超声速飞行器模糊模型参考自适应控制方法[J]. 航天控制, 2014, 32(4): 13–18.
CHENG Xianlei, LIU Luhua, TANG Guojian. The research on fuzzy model reference adaptive control for hypersonic vehicle[J]. Aerospace Control, 2014, 32(4): 13–18.
- [10] AN Y, BIGGS J D, CUI N. Adaptive fault-tolerant control of spacecraft attitude dynamics with actuator failures[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 38(10): 2033–2042.
- [11] HU Q, XIAO L, WANG C. Adaptive fault-tolerant attitude tracking control for spacecraft with time-varying inertia uncertainties[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(3): 674–687.
- [12] 刘晓东, 马飞, 张玉, 等. 基于BP神经网络的模型参考自适应姿态控制[J]. 航天控制, 2019, 37(6): 3–7.
LIU Xiaodong, MA Fei, ZHANG Yu, et al. Model reference adaptive attitude control technology based on BP natural network[J]. Aerospace Control, 2019, 37(6): 3–7.
- [13] DENG M, YUE B. Nonlinear model and attitude dynamics of flexible spacecraft with large amplitude slosh[J]. Acta Astronautica, 2017, 133: 111–120.
- [14] MA Y, JIANG B, TAO G, et al. Actuator failure compensation and attitude control for rigid satellite by adaptive control using quaternion feedback[J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351(1): 296–314.

- [15] 张嘉芮, 陈弈澄, 董新蕾, 等. 基于事件触发的航天器姿态自适应容错控制[J]. 飞控与探测, 2020, 3(2): 17–25.
ZHANG Jiarui, CHEN Yicheng, DONG Xinlei, et al. Event-triggered adaptive fault-tolerant control of spacecraft attitude[J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(2): 17–25.
- [16] HU H, LIU L, WANG Y, et al. Active fault-tolerant attitude tracking control with adaptive gain for spacecrafts[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98: 1–13.
- [17] XIA K, EUN Y, LEE T, et al. Integrated adaptive control for spacecraft attitude and orbit tracking using disturbance observer[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021. <https://doi.org/10.1007/S42405-021-00359-X>.
- [18] ZHU X, CHEN J, ZHU Z H. Adaptive learning observer for spacecraft attitude control with actuator fault[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106389>.
- [19] QIAN M, SHI Y, GAO Z, et al. Integrated fault tolerant tracking control for rigid spacecraft using fractional order sliding mode technique[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(15): 10557–10583.
- [20] WANG W, WEN C. Adaptive actuator failure compensation control of uncertain nonlinear systems with guaranteed transient performance[J]. *Automatica*, 2010, 46(12): 2082–2091.
- [21] JUAN S X, WEI W H, FENG L S. Adaptive backstepping attitude control for liquid-filled spacecraft without angular velocity measurement[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001254](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001254).
- [22] WEI C, LUO J, DAI H, et al. Learning-based adaptive attitude control of spacecraft formation with guaranteed prescribed performance[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(11): 4004–4016.
- [23] YANG H, YOU X, XIA Y, et al. Adaptive control for attitude synchronisation of spacecraft formation via extended state observer[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2014, 8(18): 2171–2185.
- [24] HU Q, XIAO B. Fault-tolerant sliding mode attitude control for flexible spacecraft under loss of actuator effectiveness[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2011, 64(1-2): 13–23.
- [25] VARMA S, KUMAR K D. Fault tolerant satellite attitude control using solar radiation pressure based on nonlinear adaptive sliding mode[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 66(3): 486–500.
- [26] 胡庆雷, 姜博严, 石忠. 基于新型终端滑模的航天器执行器故障容错姿态控制[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 249–258.
HU Qinglei, JIANG Boyan, SHI Zhong. Novel terminal sliding mode based fault tolerant attitude control for spacecraft under actuator faults[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 249–258.
- [27] 赵琳, 闫鑫, 郝勇, 等. 基于快速终端滑模的航天器自适应容错控制[J]. 宇航学报, 2012, 33(4): 426–435.
ZHAO Lin, YAN Xin, HAO Yong, et al. Adaptive fault tolerant control for spacecraft based on fast terminal sliding mode[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(4): 426–435.
- [28] 程月华, 姜斌, 孙俊, 等. 基于滑模观测器的卫星姿态控制系统滑模容错控制[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(2): 190–194.
CHENG Yuehua, JIANG Bin, SUN Jun, et al. Sliding mode fault tolerant control for satellite attitude systems based on sliding mode observer[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(2): 190–194.
- [29] 张爱华, 胡庆雷, 霍星. 飞轮安装偏差的过驱动航天器有限时间姿态控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 27–32.
ZHANG Aihua, HU Qinglei, HUO Xing. Finite time attitude control for over-activated spacecraft with reaction wheel misalignment[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(1): 27–32.
- [30] GAO S, JING Y, LIU X, et al. Finite - time adaptive fault - tolerant control for rigid spacecraft attitude tracking[J]. *Asian Journal of Control*, 2021, 23(2): 1003–1024.
- [31] GU C, QU W. Nonsingular terminal sliding mode control for flexible spacecraft attitude control[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1828(1): 012176.
- [32] CHEN H, DONG X, YANG Y, et al. Backstepping sliding mode control of uncertainty flexible joint manipulator with actuator saturation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1828(1): 012165.
- [33] 王宏伟, 宋晓娟, 吕书锋. 充液航天器的鲁棒固定时间终端滑模容错控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 38(2): 235–244.
WANG Hongwei, SONG Xiaojuan, LYU Shufeng. Robust fixed-time terminal sliding mode fault tolerant control for liquid-filled spacecraft[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 38(2): 235–244.
- [34] 袁利, 马广富, 董经纬, 等. 航天器近距离交会的固定时间终端滑模控制[J]. 宇航学报, 2018, 39(2): 195–205.
YUAN Li, MA Guangfu, DONG Jingwei, et al. Fixed-time terminal sliding mode control for close-range rendezvous[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(2): 195–205.

- [35] JIANG B, HU Q, FRISWELL M I. Fixed-time attitude control for rigid spacecraft with actuator saturation and faults[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1892–1898.
- [36] WU C, YAN J, LIN H, et al. Fixed-time disturbance observer-based chattering-free sliding mode attitude tracking control of aircraft with sensor noises[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 111(4): 106565.
- [37] 梅亚飞, 廖瑛, 龚轲杰, 等. SE(3)上航天器姿轨耦合固定时间容错控制[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 354–367.
MEI Yafei, LIAO Ying, GONG Kejie, et al. Fixed-time fault-tolerant control for coupled spacecraft on SE(3) [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(11): 354–367.
- [38] SHI X N, ZHOU Z G, ZHOU D. Adaptive fault tolerant attitude tracking control of rigid spacecraft on lie group with fixed time convergence[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(1): 423–435.
- [39] 安炳合, 王永骥, 刘磊, 等. 基于自抗扰终端滑模的高速滑翔飞行器姿态控制[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(6): 164–170.
AN Binghe, WANG Yongji, LIU Lei, et al. Attitude control of high speed gliding aircraft based on active disturbance rejection terminal sliding mode[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(6): 164–170.
- [40] 刘金琨. 智能控制: 理论基础、算法设计与应用[M]. 第1版. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [41] XU S, SUN G, SUN W. Fuzzy logic based fault-tolerant attitude control for nonlinear flexible spacecraft with sampled-data input[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(5): 2125–2156.
- [42] HUO B, XIA Y, LU K, et al. Adaptive fuzzy finite-time fault-tolerant attitude control of rigid spacecraft[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(10): 4225–4246.
- [43] 周湛杰, 王新生, 王岩. 基于模糊自适应算法的航天器姿态控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(2): 123–128.
ZHOU Zhanjie, WANG Xinsheng, WANG Yan. Spacecraft attitude control based on fuzzy adaptive algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(2): 123–128.
- [44] RAN D R, CHEN X, SHENG T. Adaptive fuzzy fault-tolerant control for rigid spacecraft attitude maneuver with finite-time convergence[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(5): 779–792.
- [45] 支敬德, 戈新生. 基于模糊滑模控制的挠性航天器姿态机动及抖振抑制研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 1972–1979.
ZHI Jingde, GE Xinsheng. Attitude maneuver and buffeting suppression of flexible spacecraft based on fuzzy sliding mode control[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(5): 1972–1979.
- [46] 耿飞龙, 李爽, 黄旭星, 等. 基于深度神经网络的航天器姿态控制系统故障诊断与容错控制研究[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(6): 1–12.
GENG Feilong, LI Shuang, Huang Xuxing, et al. Fault diagnosis and tolerant control of spacecraft attitude control system via deep neural network[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(6): 1–12.
- [47] MOU C, GANG T. Adaptive fault-tolerant control of uncertain nonlinear large-scale systems with unknown dead zone[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(8): 1851–1862.
- [48] MA Z, WU Y, DONG X. RBF adaptive sliding control for five-axis flexible satellite[C]// Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, Hangzhou, 2015.
- [49] MA Z, WANG Y, YANG Y, et al. Reinforcement learning based satellite attitude stabilization method for non-cooperative target capturing[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4331–4341.
- [50] XIAO B, HU Q L, ZHANG Y M, et al. Fault tolerant tracking control of spacecraft with attitude only measurement under actuator failures[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37: 838–849.

[作者简介]

秦海斌 1984年生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为飞行器姿态容错控制。

张艳红 1982年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为多智能体协同制导与控制。

梁 祯 1981年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为测控资源调度和设备一体化管控技术。

席建祥 1981年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统控制、切换系统控制、群系统控制与反集群技术。

李安梁 1986年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为飞行器姿态确定与控制。