

多无人机容错协同控制研究现状与展望

唐胜景¹, 康振亮¹, 李梦婷², 郭杰¹

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 无人机集群系统的故障与环境干扰对多无人机协同控制带来诸多挑战, 对多无人机容错协同控制的研究具有重要意义。基于分层递阶方法, 提出了包含决策层、编队层、本地层的无人机容错协同控制研究框架。分别从故障诊断与容错控制方法两方面综述了本地层容错控制理论研究现状。梳理了包含单机故障、通信拓扑故障、外部因素干扰下的编队层容错控制方法。概述了无人机在对抗环境下任务分配的研究成果。基于现有研究成果对多无人机容错协同控制的难点进行归纳, 并结合智能化健康管理、无人机编队重构、分布式网络安全等技术提出发展建议。

关键词: 容错协同控制; 无人机编队; 拓扑重构; 任务分配; 故障诊断; 人工智能技术

中图分类号: V279; V249.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-1300(2022)04-0098-15

DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.20220004

Research status and prospects of multi-UAV fault-tolerant cooperative control

Tang Shengjing¹, Kang Zhenliang¹, Li Mengting², Guo Jie¹

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100094, China)

Abstract: Interference and failures of the mission environment pose many challenges to the cooperative control of multi-UAV. Therefore, the research on fault-tolerant cooperative control of multi-UAV is of great significance. Based on the hierarchical method, a research framework including decision-making layer, formation layer and local layer is proposed for UAV fault-tolerant cooperative control. The research status of local fault-tolerant control theory is reviewed from two aspects of fault diagnosis detection and fault-tolerant control methods. The formation fault-tolerant control methods including single-machine fault, communication topology fault and external disturbance are sorted out. And the research results of UAV task assignment in adversarial environment are summarized. Based on existing research results, the difficulties of multi-UAV fault-tolerant cooperative control technology are summarized, and development suggestions are put forward in

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-04-10

作者简介: 唐胜景, 教授, 主要研究方向为飞行器总体设计。

通讯作者: 康振亮, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器总体设计。

引用格式: 唐胜景, 康振亮, 李梦婷, 等. 多无人机容错协同控制研究现状与展望[J]. 战术导弹技术, 2022 (4): 98-112. (Tang Shengjing, Kang Zhenliang, Li Mengting, et al. Research status and prospects of multi-UAV fault-tolerant cooperative control [J]. Tactical Missile Technology, 2022 (4): 98-112.)

combination with technologies such as intelligent health management, UAV formation reconstruction, and distributed network security.

Key words: fault-tolerant cooperative control; UAV formation; topology reconstruction; task allocation; fault detection and diagnosis; artificial intelligence technology

1 引言

随着航空任务复杂度的提升与飞行器控制技术、网络通信技术和人工智能技术的发展,无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)集群通过各UAV单元之间的能力互补与行为协调实现系统整体效能的提升,在多UAV的协同目标观测或区域监控、协同分析与决策、协同编队和打击等多种复杂任务和场景中发挥出了巨大的优势^[1]。然而,随着集群单元数量的增加与功能关系的耦合,顶层规划与任务分配的难度^[2]、导航通信的复杂度呈几何数增长^[3],编队飞行任务中队形的构成、保持和重构也面临着更大的挑战^[4]。如果无人机群不能自主应对突发故障、极端气象条件或是对抗性战场环境,则难以发挥出协同作战的优势,甚至会引发集群控制系统成员的矛盾并导致灾难性的后果。因此,对包含任务分配、编队控制与无人机控制的集群系统提出了更高的要求。

随着被控系统规模的扩大与结构的复杂化,需要考虑的故障错综复杂。在单架UAV层面,结构损伤、执行器及传感器的故障往往会引起飞行器性能的损失甚至飞行事故的发生^[5],而在集群系统中单元故障产生的负面影响可能辐射到更广的范围内,引发队形破坏、碰撞等不可逆的严重后果。在通信层面,一方面通讯链路的故障将阻碍通讯节点间信息的传递,另一方面单元故障也会通过拓扑网络进行传播和扩散,影响导航控制的实时性与稳定性^[6]。在任务层面,与物理层面的故障相比,决策故障会造成更大的影响,例如在对抗环境中受到敌方的恶意攻击和干扰,系统中部分单元的决策规则遭到篡改。决策故障的发生使得多UAV系统的决策指挥能力受到限制,失去集群作战优势并导致任务失败^[7]。因此,对多UAV容错协同控制^[8](Fault-Tolerant Cooperative

Control, FTCC)的探索具有重要意义。

目前,容错控制的智能化与研究对象的扩展已经得到了广泛的关注。近年来,相关的研究在理论层面发展迅速并取得了高质量的研究成果。本文第二部分重点介绍了容错协同控制的研究现状与关键技术,分别从无人机单元、无人机编队、无人机任务分配三个层面进行论述,梳理了相关研究路线与脉络。第三部分梳理了无人机容错协同控制研究中存在的技术难点,并展望了无人机容错协同控制研究的发展方向。

2 无人机容错协同控制研究现状与关键技术

采用分层递阶的思想,多UAV协同控制技术可以分为任务分配、航迹规划、编队控制及本地控制4个层级^[9],如图1所示。任务分配(任务层)扮演顶层规划的角色,主要负责将总体的任务分解为若干可由单架或多架UAV完成的任务或任务集合,根据UAV特点及其载荷情况确定各单元所要执行的具体任务。航迹规划(导航层)则需要根据UAV性能、战场环境动态地规划出一条或多条符合任务执行需求的航线,在此过程中UAV通过通信设备共享自身信息达成时间、空间的协同。编队控制(制导层)主要具有航迹跟踪与编队队形协调控制的功能。底层控制则直接将基于质点运动学与质点动力学的制导指令转化为UAV的控制指令。各层级环环相扣,每个环节的正常运作对于UAV协同控制都至关重要。各层级的容错控制是系统安全稳定的保障,决策FTCC的研究对象是多智能体系统安全性问题,需要保证在数据传输、通信协议遭到威胁时,仍然能够完成UAV协同任务分配和调度。编队系统FTCC作用于导航层与制导层,通过通信环节与编队环节的协调最小化故障的影响;而本地FTCC则需要通过故障诊断与相关控制方法尽可能地在故障单元内部消化故障与扰动。

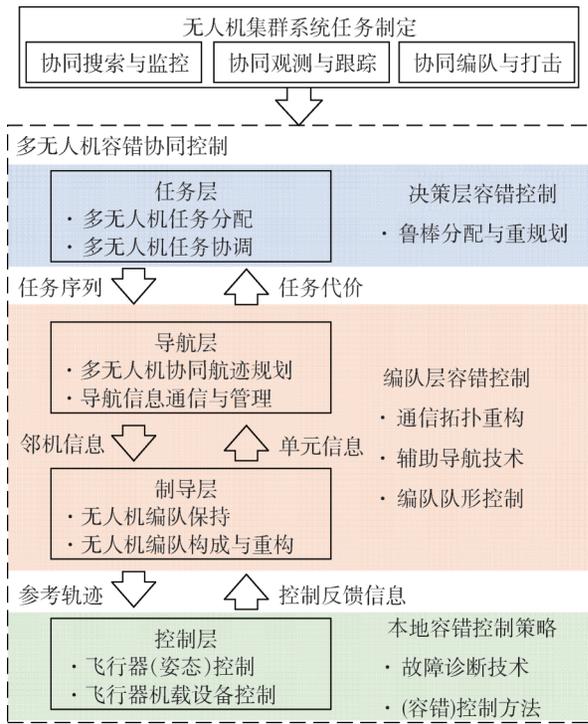


图1 多无人机容错协同控制研究框架

Fig. 1 Research framework for fault-tolerant cooperative control of multiple UAVs

2.1 本地容错控制策略

本地容错控制系统旨在故障飞行器个体层面处理故障，其理论基础是单架飞行器的主动容错控制技术，故障诊断检测（Fault Detection and Diagnosis, FDD）、容错控制器与被控系统单元共同组成本地容错控制闭环结构，如图2所示。图

中FDD模块能够根据单元模型、量测信息、历史数据、辅助信号快速检测故障并实现定位，为容错控制器重构控制系统提供依据^[10]；容错控制器则需要考虑故障信息、邻居单元实时的状态信息与编队指令完成协调控制。对本地容错控制系统关键技术介绍将从FDD技术和容错控制方法两方面展开。

2.1.1 无人机故障诊断技术

FDD是主动容错控制的关键环节，结合现有研究，FDD技术根据是否存在额外辅助信号输入可以分为主动FDD与被动FDD^[11]，主动FDD需要设计输入至系统的辅助信号增强故障的表现，而被动FDD仅利用系统的输入输出对故障进行分析处理。虽然主动FDD有效提高了故障诊断性能，但是会诱导更严重的故障状态，影响系统的安全性，因此，航空对象往往采用被动FDD。以下将从定量分析与定性分析两个方面^[12]总结相关研究现状。

(1) 基于定量分析的故障诊断方法。

定量分析按照实现机理不同可以分为基于解析模型的FDD和基于数据驱动的FDD。基于解析模型诊断的核心思想是在系统模型和先验知识的基础上通过解析冗余检测系统参数的奇异点，进而实现整个系统的异常状态监测；而基于数据的FDD是通过建立系统故障模式和数据特征的关系，

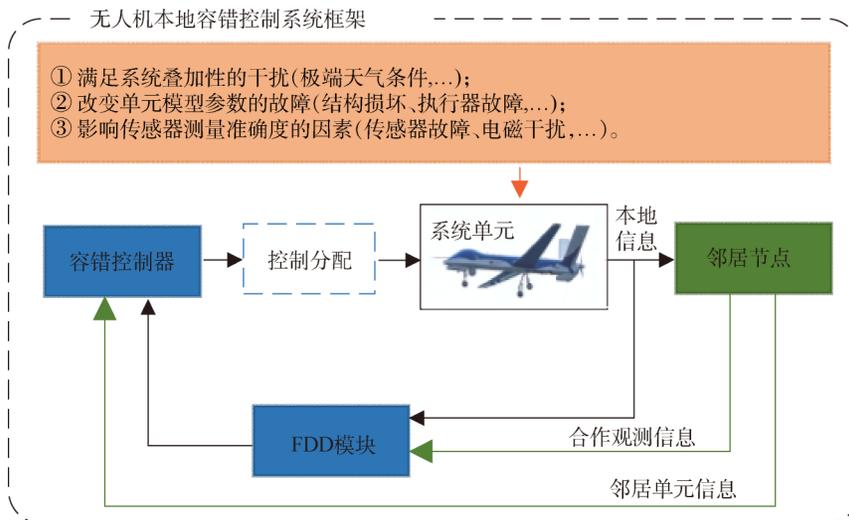


图2 无人机本地容错控制系统框架

Fig. 2 Framework of UAV local fault-tolerant control

进而实现故障诊断。基于定量分析的FDD工作流程主要可以总结归纳为如图3所示的步骤。

基于解析模型的FDD适用于诊断结构损伤、执行器故障、传感器故障等对 UAV 动力学模型产生影响的故障或干扰,该类FDD的核心是残差生成环节,可以根据预处理数据计算系统实际行为与模型预测输出之间的偏差,因此大量的技术和研究主要围绕残差计算展开^[13]。主流的残差计算方法有:基于滤波器、最小二乘估计、最大似然估计的参数估计方法与基于观测器的状态解算方法,等价空间法、残差优化法等其他方法可以参考文献[14]。

卡尔曼滤波等参数估计方法早在20世纪70年代就在FDD技术中得到了应用^[15],近些年又有一些具有代表性的研究成果。文献[16]提出了一种基于多模型自适应估计的故障诊断方法,该方案采用一组并行的卡尔曼滤波器直接估计特定故障下的状态参数,并利用假设检验算法计算对应故障发生的条件概率,具有响应速度快、计算量小的特点。由于可诊断的故障类型直接与滤波器的数量相关,所以该方法的适用范围具有一定局限性。为了提高诊断效率与突发故障的适应能力,文献[17]引入强跟踪滤波器,提出一种基于强跟踪多模型自适应估计器的故障诊断方法,通过引入多重次优渐消因子来修正扩展卡尔曼滤波的预测协方差矩阵,增强算法对系统突变的适应能力与跟踪能力。

扰动观测器 (Disturbance Observer, DO) 和滑模观测器 (Sliding Mode Observer, SMO) 是 FDD 技术的经典研究方法。文献 [18] 针对 UAV 非线性系统的在线故障诊断问题,提出了一种基于 SMO 的故障诊断方法,以实现过程状态量的精确估计,并通过大迎角飞行模型验证了该方法应用于非线性系统的有效性,但是该研究中的故障模型具有一定局限性,只能表征具有叠加性质的外界扰动。文献 [19] 针对多操纵面飞行器舵面损伤的快速诊断问题,将控制输入量,即舵面偏转量增广到状态变量中,基于 DO 设计了一种可以直接估计舵面偏转量的自适应补偿观测器。该方法有效提高了系统对舵面动态响应的跟踪能力,实现了对舵面偏转的精确估计。

卡尔曼滤波、观测器等基于模型 FDD 的广泛应用得益于现代控制理论的发展,对于状态空间方程具有较强的依赖性。模型的精确性、气动参数和扰动的不确定性都会成为影响诊断效果的重要因素,因此在复杂对象的应用中存在一定的局限性。

基于数据的 FDD 具有更广泛的适应性,还可以应用于电子电路故障的检测。相较于基于解析模型的 FDD,该类 FDD 忽略了残差生成环节,通常采用时域、频域分析、小波变换等信号处理方法^[20]与主成分分析、偏最小二乘、聚类分析等统计方法^[21]生成特征数据,通过构造统计检验量从而判定系统的健康状态。根据研究基础的不同,

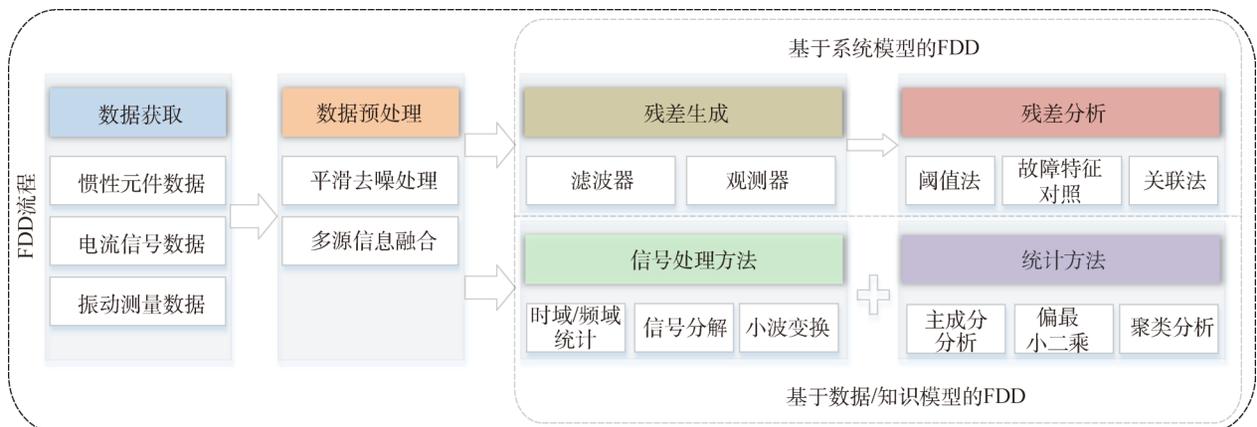


图3 基于定量分析的FDD工作流程图

Fig 3 FDD workflow chart based on quantitative analysis

基于数据FDD的研究成果可以分为两类：基于传统特征处理技术的改进方法和基于人工智能技术的方法。

近年来，学者在特征数据处理技术的基础上发展出了基于多源信息融合的故障识别方法^[22]。文献[23]提出了一种基于D-S证据理论多源信息融合的故障诊断算法，分别从三个层次提取特征信息作为证据，并利用模糊隶属度函数构造三个证据的概率赋值，实现证据之间的协调，有效提升基于数据FDD方法的诊断概率。文献[24]考虑单个传感器本身存在的不确定性，提出了一种基于多层传感器信息融合的FDD方法，构建了传感器信息前向融合与反向校验相结合的分层诊断决策模型，克服了单一传感器易引起的检测不确定性和虚警问题。

随着机器学习技术的发展，人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)^[25-27]、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)^[28-31]等算法在特征数据的归类处理方面展现出强大的泛化能力，广泛地应用在故障诊断技术中。基于深度学习的故障诊断技术是当前的研究热点之一，在复杂非线性系统辨识与高维数据处理方面具有明显的优势。该技术通过建立多隐层网络模型，利用大量的训练数据学习、提取更加有用的故障特征，从而提升故障预警结果的精确度。文献[32]提出了一种用于UAV故障检测、可解释的深度神经网络模型，该模型充分利用标签数据与不含标签的高维时间序列数据，实现对未知异常状态的诊断。文献[33]针对卷积神经网络模型构建成本高的问题，提出了一种适用于多变量过程故障检测的一维卷积自编码器。文献[34]针对飞机结冰及执行器/传感器故障的问题，提出了一种基于深度学习故障诊断方案，并采用迁移学习技术将方法拓展到更广的应用场景。随着机载计算机性能的提高，使得强化学习的在线应用成为了可能。文献[35]提出了一种模糊Q学习故障检测方法，在设计模糊逻辑的基础上引入Q学习方法，根据模糊因子调整输出隶属度函数的形状，提高了模糊推理系统对故障检测的准确度。文献[36]基于鲁棒控制理论设计了故障检测滤波器，并利用

深度强化学习算法，根据当前飞行状态和控制信号自适应调整滤波器参数，提高了故障检测滤波器的性能。

基于数据的FDD正在从传统的信号处理、数据统计向人工智能技术的方向发展。机器学习、深度学习都是值得探索的崭新领域，然而这类智能方法存在数据样本的数量和质量难以保证、方法可解释性差的问题。因此，小样本训练、依赖模型的智能诊断方法可能成为飞行器故障诊断领域研究的热点。

(2) 基于定性分析的故障诊断方法。

典型的定性分析法有图论法、专家系统法、定性仿真法等^[12]，该类算法在过去的半个世纪经受住了工程实践的检验，广泛地应用在飞行器的故障归零、可靠性分析等问题中，并在长期历史数据的积累下建立了诊断规则库。

然而，传统典型的定性分析方法针对不同的对象需要进行具体的分析和设计，具有可移植性差的特点；并且复杂的UAV系统与充满不确定性的环境相互作用，很难建立完备的规则库。因此，以决策树(Decision Tree, DT)为代表的基于模式识别的人工智能诊断方法得到了广泛的关注^[37]。文献[37]通过结合决策树与量测值动态学习模型，提出了一种传感器故障诊断方法。然而，决策树与深度学习的方法都需要大量的学习样本，深度森林是一种基于集成算法和深度结构的非神经网络深度学习的方法，可以有效解决小样本学习问题。文献[38]提出了一种基于改进深度森林的故障诊断方法，实现小训练样本下UAV等航空装备重要部件的高效诊断。通过主成分分析模型与级联森林层级的集成，提高多粒度扫描与级联森林中的数据传递与处理能力，增强模型内的特征代表性，从而提高算法的运行效率和诊断性能。文献[39]针对姿态控制系统闭环回路故障难以辨识的问题，结合动力学模型对数据进行特征选择与提取，借助深度森林算法实现由故障特征参量空间向故障模式空间的映射。

2.1.2 无人机本地容错控制方法

UAV容错控制技术主要包括控制器重构与过驱动系统的控制分配。控制器重构往往通过自适

应控制方法改变控制器参数^[40-41]或根据故障状态更新控制器参考模型^[42-44]来实现,常见的控制重构方法可以归纳为被动容错即鲁棒控制方法、主动容错方法两类,对于前者不做过多讨论。文献[41]针对自适应滑模控制方法在应用中存在的控制抖振和不连续问题,提出了基于扰动观测器的容错控制框架,在保证控制器良好跟踪性能的同时,有效抑制了控制的不连续性与抖振问题。为了提高控制器的性能,充分利用FDD提供的故障及扰动信息,近年来,基于模型的控制方法受到研究者青睐。文献[42]提出了基于人工神经网络和非线性动态逆控制(Nonlinear Dynamic Inversion Control, NDIC)的容错控制系统,可以对执行器故障进行精准的补偿,在无人机副翼、升降舵、方向舵发生间歇性掉电故障或浮动故障时,该方法在故障信号检测的准确性与姿态跟踪补偿的快速性上表现出显著优势。文献[43]基于自适应径向基神经网络和反步滑模控制方法(Backstepping Sliding Mode Control, BSMC)设计了一种针对四旋翼无人机执行器故障的容错控制器,实现了故障的在线估计,并通过BSMC控制缓解了控制切换引起的抖振现象。文献[44]基于带终端约束的模型预测控制方法(Model Predictive Control, MPC)设计了一种针对无人机控制效能损失的容错控制器,通过改变优化问题的约束与预测模型的参数,有效提高了MPC对飞行器故障的适应性,但是该研究没有考虑故障对

适应度函数权值的影响,容错控制效果很可能在时变持续的故障信号下表现不佳。如今制导与控制技术非常成熟,具有可重构特点的控制方法均可应用于主动容错控制中,并且在单一故障的处理中没有应用门槛。然而,在实际工程中,故障模式及程度具有多元性和复杂性,如何将故障信号准确地映射为相关控制器结构、参数的重构策略是一个需要考虑的问题。

面对持续或不可恢复的故障时,需要在飞行器设计环节融入冗余思想,多操纵面飞行器是冗余设计的典型。控制分配是研究含冗余执行器过驱动系统的有效方法,其主要思想是在考虑执行器物理约束的条件下,通过在不同执行器之间协调分配控制指令,提高UAV对故障及损伤的鲁棒性。关于多操纵面飞行器控制分配算法的研究,文献[45]进行了全面的梳理,本文不再详细论述。

2.2 编队层容错控制方法

无人机编队为作战任务执行创造了优势,也为编队控制系统设计带来了挑战,单元或是系统级的故障都有可能成为巨大的安全隐患,使得编队系统内部崩溃。编队系统中存在的故障可以归纳为单元故障、通信故障以及外部影响因素等,如图4所示。单元故障一方面影响UAV自身的稳定性,增加了编队飞行的碰撞风险;另一方面受限的机动能力使得编队系统成员在有限时间不能达成状态一致,影响编队控制系统的性能。通信故障是威胁编队系统安全的重要因素,主要包括

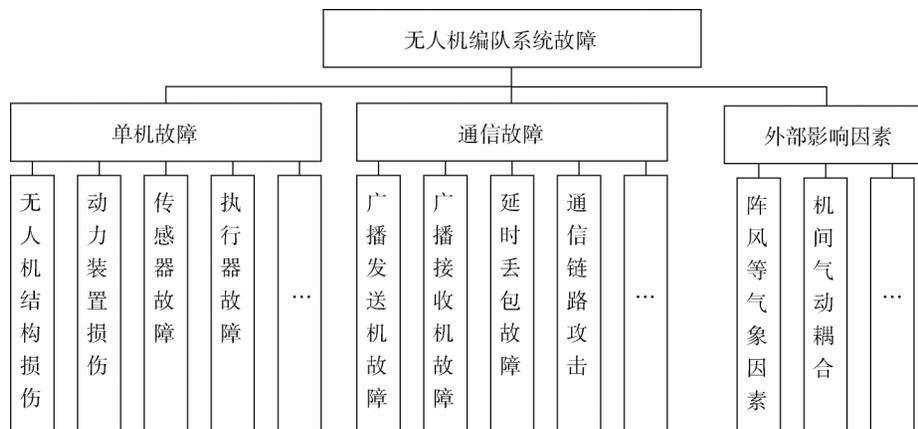


图4 无人机编队系统故障分类

Fig. 4 Classification of UAV formation system fault

广播发送机故障、广播接收机故障、延时丢包故障以及恶意攻击等。随着 UAV 编队单元数量增加, 通信网络链路也会愈发复杂, 对通信网络的鲁棒性提出了更加严苛的要求。气象条件、机间气动耦合对编队飞行的干扰同样不可忽视, 该类外部因素在本质上对无人机的动力学模型和编队模型产生了影响, 故本文将其作为故障的一种形式。目前, 对于多无人机编队容错控制的研究处于初级阶段, 受到了研究者的广泛关注。

2.2.1 单机故障下的编队 FTCC

UAV 单机故障往往会引起飞行器性能的降低, 甚至是飞行事故的发生, 作为集群系统的成员, 故障产生的负面影响可能通过控制协议或是单元碰撞产生扩散, 引发大规模、不可逆的严重后果。因此, UAV 在本地容错控制的基础上还需要在编队层面进行协调控制, 以保证编队系统的稳定性。

多智能体一致性理论广泛应用于编队控制、集群运动、姿态同步等领域, 仅依靠局部信息交互的一致性算法日渐成熟, 其智能化程度高、运算代价低的特点极大地促进了编队控制的发展。文献 [46] 针对领-从编队结构, 在单个或多个 UAV 单元存在执行器故障的情况下, 提出了一种分布式控制重构策略, 在确保编队成员一致性的同时, 在给定优化框架下提升多 UAV 系统的性能。对于没有领机的编队结构, 文献 [47] 提出了一种平均驻留时间法来处理时变通信拓扑, 并进一步提出了一种自适应一致性控制器来补偿执行器故障。文献 [48] 基于分布式自适应技术, 提出了一种适用于故障发生时间和执行器效率因子未知情况下的容错一致性跟踪控制方案。领-从结构下的编队层容错控制在处理故障时更加容易, 只需要根据故障 UAV 的状况限制领机的机动性即可^[8], 但是依赖于领机、从机间的稳定通信; 而在无领机的分布式结构中, 故障信息会优先传递给相邻的无人机, 在局部即可完成故障的处理, 更快地实现编队的一致性。关于传感器故障、结构受损情况下的研究较少, 文献 [49] 和文献 [50] 在处理传感器故障问题中, 提供了一种分布式传感器故障检测方案。在气动外形发生显著变化的结构损伤下, 可以尝试将一致性控制问题转

化为异构多智能体的一致性控制问题进行处理。

本地容错控制结合人工势场方法 (Artificial Potential Field, APF) 是目前解决故障 UAV 碰撞问题的主要思路。APF 通过障碍物的斥力场和目标位置的引力场共同作用形成一个虚拟的人工势场, 再搜索一条势函数下降的方向, 通过这种方式来寻找一条无碰撞的最优路径^[51]。而传统的 APF 应用于 UAV 编队控制时存在一定问题, 如当目标点附近存在障碍物时, 障碍物对无人机产生的斥力可能远大于目标点对无人机产生的吸引力, 因此无人机无法到达目标点; 当无人机位于障碍物密集的区域时, 由于合力为零, 无人机陷入局部最小值等。因此许多研究者考虑将一致性理论加入人工势场法以改进其表现。文献 [52] 将一致性算法应用于编队控制问题, 提出对于任意有向信息流, 只要存在有向生成树就能实现精确的编队控制。文献 [53] 通过有限时间一致性算法处理了有领导者和无领导者编队的防碰撞问题。

2.2.2 通信拓扑故障的 FTCC

多 UAV 系统是空间分布的网络系统, 系统单元可以通过机间通信进行信息共享, 其中所使用的通信链路集称为 UAV 编队的通信拓扑^[54]。UAV 协同控制拓扑结构主要分为集中式和分布式两种^[55], 分布式结构中各 UAV 具有一定的自主控制与决策能力, 可以独立处理通信拓扑中的局域信息并完成任务, 具有较强的灵活性、可扩展性和鲁棒性, 广泛应用于协同控制中。然而, 在实际飞行中, 通信拓扑容易受到数据链性能、电子干扰和节点故障的影响, 引发通信拓扑故障, 导致编队任务失败, 因此对通信拓扑故障下 FTCC 的研究具有重要意义。传统处理通信拓扑故障的研究具有一定的局限性, 只能处理静态的、程度较低的故障, 例如通信时延、数据丢包等。面对更加严重的拓扑故障情况, 可以从以下两方面考虑: 对于通信链路断开或受损的故障可以转化为拓扑重构问题, 对于不可修复的节点故障则可以通过相对导航技术进行处理。

拓扑重构旨在为故障涉及的 UAV 节点选择满足条件的备选链路, 一方面, 在有限资源下提高 UAV 通信网络的可靠性; 另一方面, 可以通过优

化降低编队通信代价。文献 [57] 针对编队拓扑故障提出了一种基于广播通信的故障检测方法, 可以检测到 UAV 损毁、单播发送机故障和单播接收机故障, 并且提出了一种基于 Dijkstra 算法的通信拓扑重构算法, 但是该算法只能实现局部优化, 而不能保证整个编队的通信代价最小。文献 [58] 针对 UAV 编队在出现拓扑故障等情况下的控制问题, 提出了一种基于拓扑重构优化的编队容错控制方法, 实现最小通信代价和队形重构代价的编队拓扑故障重构。文献 [59] 考虑领-从控制框架下 UAV 编队过程中出现的通信故障, 提出一种基于网络最大流算法的通信拓扑重构算法, 实现了通信拓扑与编队队形的统一优化, 在满足通信代价较小的同时恢复并优化 UAV 在编队中的相对位置。文献 [60] 提出了一种基于最小树形图的分级分布式信息交互拓扑生成算法, 在编队规模较大的任务中可以显著缩短拓扑优化的求解时间, 有效遏制拓扑故障在重构空窗期的负面影响。以上大多数有关通信拓扑重构和优化的研究往往将问题转化为最短路径的求解问题, 如果结合无人机编队队形重构的背景重新思考该问题, 或将更具有工程应用价值。

若 UAV 编队中某通信节点遭遇严重故障, 则该 UAV 受到限制而不能与其他成员共享状态信息。为了保证编队系统的稳定性, 需要通过协同导航方法精确测量邻居 UAV 的位置、速度等关键信息。相对导航方式是多 UAV 系统在复杂环境下实现协同导航的重要手段, 按照探测方式不同可以分为无线电辅助导航与视觉辅助导航^[61]。文献 [62] 提出了一种基于超宽带/相对差分的相对导航方法, 方案采用对称双边双向测距算法减小超宽带的晶振偏差, 通过扩展卡尔曼滤波器融合多源信息并精确估计 UAV 相对状态, 可以有效提升仅依赖相对差分的相对导航效果。文献 [63] 针对 UAV 编队相对导航系统中视觉导航传感器量测数据存在随机时延问题, 提出一种能够处理多步随机延迟量测的修正似然容积卡尔曼滤波算法, 通过三阶球面-径向容积准则提高状态预测的稳定性, 通过边缘化延迟变量提高量测精度, 实现 UAV 之间的相对位置、速度和姿态的准确估计。

以上基于额外传感器的相对导航技术在方法层面是多源信息融合技术的应用之一, 其研究基础是卡尔曼滤波, 虽然在理论研究层面缺乏创新性, 但是在解决工程问题上具有显著效果。

2.2.3 外部干扰因素下的 FTCC

飞行空域的气象条件会对编队飞行的稳定性、可控性造成不可低估的影响, 因此 UAV 在特殊气象条件下的编队控制问题受到了越来越多的关注。文献 [64] 提出了一种适用于阵风天气的编队控制器, 通过扩展卡尔曼滤波技术估计领机与从机之间的风速差, 通过反步法实现从机对领机的稳定跟踪, 并通过对干扰的补偿实现编队系统的一致性。文献 [65] 针对风场环境中 UAV 编队队形难以保持的问题, 提出了一种风场扰动下的自适应队形保持控制方法, UAV 可以在 3 个方向抵消风场不确定性所产生的距离误差, 并保证速度的一致性, 最终实现期望队形的保持。文献 [66] 引入了风速的概率分布模型, 并采用控制参数时间离散化方法将风场扰动下的 UAV 队形重构问题转化成了终端状态自由的鲁棒控制问题, 并采用基于协同进化算法的分布式优化方法对该问题进行求解, 有效提高编队队形重构过程的稳定性。

在蜂群回收、空中加油、长航时编队飞行等场景中, UAV 之间的距离需要控制在一定范围内, 在这种密集编队的环境下, 前方的 UAV 飞行过程中产生的尾涡会作用于后方的 UAV, 如图 5 所示, 从而产生额外的横向气动力, 严重威胁编队飞行安全^[67]。文献 [68] 对该现象进行了深入研究, 结果表明: 一方面, 涡旋大幅度减小了后方 UAV 机翼的诱导阻力, 提高了巡航飞行的效率和航程; 另一方面, 由于涡流与外界干扰的共同作用, 使得后方 UAV 的稳定性受到影响。为了尽可能削弱涡流效应的负面影响, 文献 [69] 研究了 UAV 在尾涡影响下的安全控制问题, 针对 UAV 六自由度非线性模型, 提出了一种基于扰动观测器与反步法的容错控制方案, 但是该研究并没有考虑执行器的动力学模型与信号跟踪能力。文献 [70] 针对领-从结构的编队系统, 提出一种适用于密集编队的分布式自适应容错控制框架, 通过结合分布式滑模估计器、神经网络、误差预测的复合观测

器,估计并补偿外部扰动和涡流带来的不确定性,实现飞行轨迹的有效跟踪。文献[71]在固定翼无人机密集编队模型基础上,提出了一种预测从机最优相对位置的算法,并采用基于扩展状态观测器和滑模控制器的容错控制方法,实现从机对最优相对位置的跟踪与编队控制。目前,有关密集编队飞行器控制的研究主要基于文献[68]的成果,通常在领-从编队构型下探讨从机的动力学模型和控制策略,然而实际飞行状态中UAV的编队队形多样且时变,以上研究方法将不再适用。

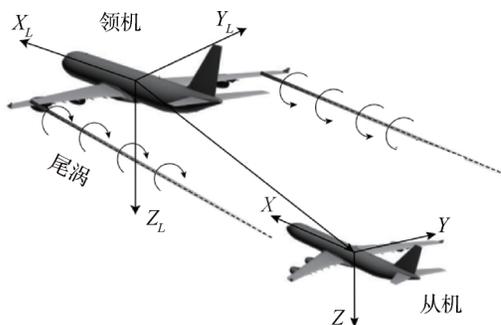


图5 紧密编队气动耦合示意图

Fig. 5 Aerodynamic coupling diagram of tight formation

针对不同类型的故障,2.2节提及的研究工作可以粗略汇总如表1所示。

2.3 决策层容错控制方法

任务分配是任务层的主要功能。多无人机协同任务分配问题是一类复杂的组合优化问题,是多无人机协同控制研究方向的核心技术。当无人机群在对抗环境中执行任务时,会遭受敌方的电子干扰或诱骗,甚至直接劫持无人机单元、篡改决策信息,导致指挥失灵、无人机失控等严重后果^[7]。任务层面的故障所造成的影响较物理层面

更加棘手,决策层FTCC可以有效保证无人机协同作战中自主控制的安全性、有效性,为群决策行为的合理性提供保障。

较为典型的攻击手段有拒绝服务(Deny of Service, DoS)和欺骗攻击。DoS攻击会耗尽多智能体系统的网络系统资源,导致系统服务暂时中断、停止或崩溃,针对该类攻击的处理不属于决策FTCC的范畴,所以不做进一步的介绍,相关研究可以参考文献[73-74]。欺骗攻击指通过恶意篡改决策收益或向目标群系统注入伪造数据,影响单元数据真实性和决策正确性来达到破坏系统稳定性的目的^[75],从而使得无人机群系统整体功能受损,导致任务分配的状态偏离期望的均衡点。

近年来,欺骗攻击检测与安全控制问题成为了分布式系统网络安全领域的研究热点。欺骗攻击检测的基本思想是通过目标参数当前测量状态和历史状态或预测状态生成的残差与检测阈值进行比较,若残差值大于检测阈值,则可以定性为欺骗攻击。所以欺骗攻击检测研究的重点在于状态观测器和滤波器的设计,在此基础上通过检验和评价手段对残差数据进行分析判断^[76-79]。随着人工智能技术与检测技术的发展,相关学者尝试采用深度学习和强化学习技术对欺骗攻击进行检测,并取得了一定的理论成果^[79-81]。但是相关研究成果在飞行器集群系统的应用仍处于初级阶段。

目前面向任务层FTCC的研究较少,可以分为基于传统任务分配的集中式决策方法与基于演化博弈论的分布式决策方法。传统任务分配方法主要包括群智能算法、进化算法等。文献[82]在

表1 编队层容错协同控制方法研究汇总

Table 1 Fault-tolerant cooperative control methods for formation layer

故障类别		参考文献	研究方法
单机故障	执行器故障	[46],[47],[48]	一致性算法
	传感器故障	[49],[50]	分布式故障检测+一致性算法
通信故障	通信链路受损(连接不稳定;链路攻击)	[57],[58],[59],[60]	通信拓扑重构优化
	通信节点故障(广播收、发机故障)	[61],[62],[63]	相对导航技术
外部干扰	风场干扰	[64],[65],[66]	滤波器+控制器;自适应控制
	尾涡干扰	[68],[69],[70],[71]	观测器+控制器

传统任务分配方法的基础上建立了面向任务的FTCC框架,针对无人机群子系统主节点受到攻击而导致集群系统瘫痪的问题,通过选举机制推选备选主节点并实时同步关键数据,该方法的可行性和工程应用价值在物理实验中得到了验证。文献[83]提出了一种协调分配方法,充分考虑故障子系统的局限性,通过子系统间的协作和补偿实现FTCC,研究表明,在给定的容错条件下,可以完成对正常系统分配状态的跟踪。演化博弈理论的核心思想可以总结为在理性不完全、信息不对称、对环境及预期存在偏差的条件下,智能体通过不断的博弈和尝试进行策略更新,最终达到演化稳定^[84]。在任务分配场景中可以表现为UAV单元之间根据不完全的节点信息和环境信息进行任务策略的协调,最终使得群系统收益最大,同时各策略在集群中所占的比例达到稳定。文献[85]研究了基于博弈模型的分布式系统遭遇攻击所受到的影响,在图论模型仿真实验中模拟敌人的伪装和入侵,实验结果表明该类欺骗攻击将影响系统单元的决策规则,破坏任务分配的纳什均衡,进而改变群体行为。文献[86]考虑UAV蜂群行动中某些任务收益遭到恶意削弱的故障,在演化矩阵博弈的框架下,运用多群体复制子动态方程对蜂群系统和故障建模,首先基于李雅普诺夫函数对系统自容错性能进行分析,在无法自容错的情况下设计容错协同博弈控制器,在故障簇内引入激励信号,在故障邻居簇内引入补偿信号,使得蜂群任务分配状态在故障下仍能达到期望的均衡点,获得理想的分工收益。

3 无人机容错协同控制研究难点

过去的几十年里,UAV故障诊断与容错控制理论研究已经取得了巨大的进步,然而,从单架UAV到多UAV系统、从理论研究到工程应用仍然存在一定距离。结合国内外对FTCC的研究现状,下述几个问题还需要进一步深入研究。

(1) 复杂工况下未知故障的检测是单机故障下FTCC的重大挑战^[87]。一方面,气动扰动、机械振动、电磁干扰等因素使得故障诊断变得更加

困难;另一方面,传统的故障诊断是针对预期的故障模式开展的,但以现有技术难以对多UAV等复杂系统的故障和工况进行穷举,使得故障库的完善具有极大的难度。然而,值得注意的是,对于可靠复杂系统而言,已知的预期故障往往发生甚少,而非预期故障是导致任务失败的主要因素。因此,在飞行工况复杂的情况下,如何利用有限的先验知识及时检测未知故障是FTCC从理论研究到工程应用的关键。

(2) 编队层容错控制策略的选择是FTCC的研究重点。UAV在编队层面需要通过相互合作克服个体或是局部的故障从而达成期望目标^[88]。这一目标或是追求全局的表现,或是迁就故障单元的状况。其中,全局表现主要体现在UAV编队在一致性基础上的机动能力、速度保持能力,而UAV个体存在的执行器故障、结构故障及发动机故障将对机动、巡航飞行产生不可忽略的影响,因此需要结合当前的任务背景、飞行条件在两者之间做出权衡。目前,这方面的研究还处于起步状态,是未来的重要研究方向之一。

(3) 通信拓扑重构在编队层容错控制中具有重要地位。以下三点值得进一步思考和研究:

1) UAV大规模编队飞行时,每架UAV在通信网络内与其他邻居UAV交换信息,在该过程中传感器故障产生的错误信息会通过通信拓扑结构扩散,目前,鲜有研究者对错误信息的传播进行建模和分析,虽然从故障发生到完成诊断这一过程十分短暂,也足以对编队控制造成严重影响^[50]。

2) 在拓扑可切换的编队系统中,UAV根据相对位置关系改变通信拓扑结构,从而减小系统的通信代价,保证通信结构的稀疏性。然而,如何统一原有模式和故障模式下的切换策略,实现两种切换条件下的拓扑优化具有一定难度^[89-90]。

3) 通信拓扑结构优化与飞行任务之间具有密切联系,因此动态分布式优化技术在多UAV通信拓扑优化中的应用需要受到重视。分布式优化旨在由多个个体组成的网络系统中,物理隔离的个体由于具有独立的收集、处理和传输数据的能力,

可以通过通信网络以合作的方式,利用局部和邻居信息在本地进行总体优化问题的求解^[91]。因此,在离散条件下,动态拓扑结构下分布式优化问题可以转换成参数优化问题应用于拓扑结构的求解。

虽然FTCC的分层处理简化了各层级之间的联系,降低了多UAV容错协同控制的复杂度,但是一定程度也损失了多UAV系统全局的最优性和各层级变量的可协调性。多层次最优协调控制问题是一道综合性的难题,考虑多层次FTCC的最优控制是一项亟待开展的理论研究课题。

4 无人机容错协同控制发展与展望

目前,容错控制技术的研究已经取得了巨大进展,人工智能技术、协同控制技术发展迅猛,FTCC研究赛道愈发拥挤。学科交叉融合或许是未来FTCC的发展方向,通过结合健康管理技术、编队重构技术、网络安全技术等学科为研究注入活力,全面提升多UAV应对本地层、编队层、任务层等实际复杂故障的能力。

4.1 智能化健康管理技术

容错控制技术作为一种即时有效的手段可以对已经存在的故障做出反馈,但是仅仅做到亡羊补牢还不能满足协同控制系统对快速性和稳定性的要求,需要在故障的潜伏期有所察觉,并评估故障UAV性能与当前任务的适配性。健康管理技术可以通过故障预警技术、寿命评估技术在更长的周期内处理UAV的故障。故障预警技术通过对微小故障隐性特征的分析提前发现征兆,预测可能发生的故障并及时采取干预措施,最大程度地遏制故障的扩散。寿命评估技术则可以通过构建UAV“故障到完全失效”的演化模型来估计UAV的剩余服役时间,从而为群系统的任务分配提供参考依据,充分发挥故障UAV的剩余价值,提高任务分配的合理性^[92]。

故障预警技术需要通过定量或是定性描述来建立UAV失效的数学模型,寿命评估技术则需要通过分析失效机理构建系统级或部件级退化模型。然而,UAV系统包含大量的部件且工况复杂,各部件之间相互作用,存在较强的耦合关系,这对

数学模型的建立带来了巨大的困难。随着人工智能技术与航空产业的融合,数据驱动的健康管理技术必然成为重要的发展方向。结合人工智能技术,充分融合设计、仿真、同类型飞行器飞行数据等多源信息,并挖掘数据之间的隐含关系从而达到故障预警、寿命评估的目的。包含预测、诊断、评估的健康管理技术成为了UAV协同控制最后一道屏障,为控制重构争取到充足的时间,为协同任务的精准分配提供依据,也为飞行器的研制与迭代指引方向。

4.2 基于群智能模型的编队重构技术

目前,编队层FTCC的底层逻辑是一致性算法,对于程度较轻的UAV故障,可以通过补偿或协调控制的手段使得故障单元适应群体的决策与制导策略,但是该种容错方案在故障较严重的情况下具有一定局限性。在自然界中,带有伤病的生物体会遭受群体的抛弃,坏死的细胞会被免疫细胞吞噬,淘汰法则与免疫机制从全局角度做出的判断对群体的延续和发展具有重要的意义。这类启发式的算法具有可迁移性强、适用范围广的特点,可以有效处理严重单元故障造成的群系统隐患。若UAV存在严重故障,需要本地容错控制器与编队容错控制器并行处理,效仿巨噬细胞吞噬病原体,激活临近UAV形成隔离带包围故障UAV,避免造成二次伤害进一步影响该区域的局部稳定性,最后通过队形的变换将该UAV排出编队系统,如图6所示。这类处理严重故障的方案建立在队形重构控制的基础之上,动态环境下的多无人机队形变换问题是目前UAV领域的难点之一。编队需要根据环境信息和故障UAV状态改变编队队形,以实现故障UAV的空间隔离。

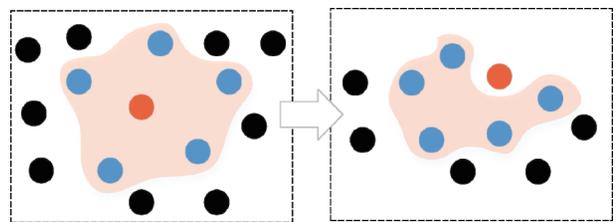


图6 基于群智能模型的容错控制方法

Fig. 6 Fault-tolerant control method based on swarm intelligence model

4.3 分布式网络安全技术

分布式多UAV开放的系统特性使得数据共享存在风险^[93],数据篡改、身份伪造等攻击手段将对任务分配的稳定性与合理性构成威胁。因此解决分布式系统的网络安全问题,将成为多UAV系统在对抗环境中进行合理决策的关键。针对分布式系统的安全问题,可以考虑从鲁棒系统开发与防御机制建立两方面开展研究工作。在系统开发的过程中,往往会遇到安全需求与群系统功能需求冲突的情况,需要合理分析要素的重要性与影响,寻找功能性与安全性之间的平衡点。此外,结合安全软件开发的思路进行系统开发、合理分配子系统的负载是避免网络阻滞或崩溃的有效途径。多智能体的防御技术需要根据系统环节和安全威胁制定,主要分为针对个体的防御技术与针对分布式调控的防御技术^[94]。一方面,在分布式系统中任意节点都可以视作一个集中式的中心节点,可以通过加密技术与历史表单数据来防止伪装或是未经授权的访问攻击;另一方面,可以通过合理设计加密通信协议、访问控制策略、群体身份验证等技术手段实现全局的调控与防御。

5 结束语

目前,国内外在无人机协同控制技术、智能故障诊断技术、容错控制技术领域开展了广泛的研究工作,并已经取得大量的学术成果。然而,FTCC仍然是一片鲜有研究者涉足的研究领域,在理论创新与工程应用中存在巨大的研究价值与潜力。如果能将FTCC技术与智能化健康管理、编队队形重构、分布式网络安全等关键技术充分结合,将可为多无人机协同任务执行提供更加有效的保障。

[参 考 文 献]

- [1] 贾永楠,田似营,李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41 (S1): 4-14.
- [2] Ye F, Chen J, Sun Q, et al. Decentralized task allocation for heterogeneous multi-UAV system with task coupling constraints[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77 (1): 111-132.
- [3] Liu D, Wang J, Xu K, et al. Task-driven relay assignment in distributed UAV communication networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68 (11): 11003-11017.
- [4] Fu X, Pan J, Wang H, et al. A formation maintenance and reconstruction method of UAV swarm based on distributed control [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 104: 105981.
- [5] Bateman F, Noura H, Ouladsine M. Fault diagnosis and fault-tolerant control strategy for the aerosonde UAV [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (3): 2119-2137.
- [6] He X, Wang Z, Zhou D H. Robust fault detection for networked systems with communication delay and data missing[J]. Automatica, 2009, 45 (11): 2634-2639.
- [7] 杨伟. 关于未来战斗机发展的若干讨论[J]. 航空学报, 2020, 41 (6): 8-19.
- [8] Yu Z Q, Zhang Y, Jiang B, et al. A review on fault-tolerant cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35 (1): 1-18.
- [9] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 16.
- [10] 沈毅, 李利亮, 王振华. 航天器故障诊断与容错控制技术综述[J]. 宇航学报, 2020, 41 (6): 647-656.
- [11] 何潇, 郭亚琦, 张召, 等. 动态系统的主动故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2020, 46 (8): 1557-1570.
- [12] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35 (6): 748-758.
- [13] He Q, Zhang W, Lu P, et al. Performance comparison of representative model-based fault reconstruction algorithms for aircraft sensor fault detection and diagnosis [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105649.
- [14] Hwang I, Kim S, Kim Y, et al. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 18 (3): 636-653.
- [15] Mehra R K, Peschon J. An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems [J]. Automatica, 1971, 7 (5): 637-640.
- [16] Maybeck P. Multiple model adaptive algorithms for detecting and compensating sensor and actuator/surface failures in aircraft flight control systems[J]. International Journal of Robust and nonlinear control, 1999, 9

- (14): 1051-1070.
- [17] 柳志娟, 李清, 柳先辉, 等. 基于强跟踪多模型估计器的作动器故障诊断[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(5): 642-647.
- [18] Khooban M H, Siah M, Soltanpour M R. Robust and simple intelligent observer-based fault estimation and reconstruction for a class of non-linear systems: HIRM aircraft [J]. The Aeronautical Journal, 2016, 120(1225): 457-472.
- [19] 王发威, 董新民, 陈勇, 等. 多操纵面飞机舵面损伤的快速故障诊断[J]. 航空学报, 2015, 36(7): 2350-2360.
- [20] Abid A, Khan M T, Iqbal J. A review on fault detection and diagnosis techniques: Basics and beyond [J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(5): 3639-3664.
- [21] 孟晨, 杨华晖, 王成, 等. 数据驱动的武器系统电子元件级故障诊断研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 574-583.
- [22] Liu C, Sun J, Wang F, et al. Bayesian network method for fault diagnosis of civil aircraft environment control system [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2020, 234(5): 662-674.
- [23] Lu C, Wang S, Wang X. A multi-source information fusion fault diagnosis for aviation hydraulic pump based on the new evidence similarity distance [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 392-401.
- [24] 石健, 王少萍, 罗雪松. 基于不确定传感器状态的机载系统多层故障诊断方法[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 26-43.
- [25] Wang Z F, Zarader J L, Argentieri S. Aircraft fault diagnosis and decision system based on improved artificial neural networks [C]. 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE, 2012: 1123-1128.
- [26] Dutta A, McKay M, Kopsaftopoulos F, et al. Fault detection and identification for multicopter aircraft by data-driven and statistical learning methods [C]. 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), IEEE, 2019: 1-18.
- [27] Guo X G, Tian M E, Li Q, et al. Multiple-fault diagnosis for spacecraft attitude control systems using RBFNN based observers [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106195.
- [28] Baskaya E, Bronz M, Delahaye D. Fault detection & diagnosis for small UAV via machine learning [C]. 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, 2017: 1-6.
- [29] Liu G Q, Shi X C, Wang N. Research on UAV intelligent fault diagnosis method based on FS-SVM [C]. 2021 4th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (PRAI), IEEE, 2021: 186-191.
- [30] Bronz M, Baskaya E, Delahaye D, et al. Real-time fault detection on small fixed-wing UAV using machine learning [C]. 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, 2020: 1-10.
- [31] Pourpanah F, Zhang B, Ma R, et al. Anomaly detection and condition monitoring of UAV motors and propellers [C]. 2018 IEEE Sensors, IEEE, 2018: 1-4.
- [32] Memarzadeh M, Matthews B, Templin T. Multi-class anomaly detection in flight data using semi-supervised explainable deep learning model [C]. AIAA Scitech 2021 Forum, 2021: 0774.
- [33] Chen S, Yu J, Wang S. One-dimensional convolutional auto-encoder-based feature learning for fault diagnosis of multivariate processes [J]. Journal of Process Control, 2020, 87: 54-67.
- [34] Dong Y. Implementing deep learning for comprehensive aircraft icing and actuator/sensor fault detection/identification [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 83: 28-44.
- [35] Choi Y C, Son J H, Ahn H S. Fault detection and isolation for a small CMG-based satellite: A fuzzy Q-learning approach [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 47: 340-355.
- [36] Cheng H, Chen P, Shi L, et al. Fault detection and optimization for flight vehicles via deep reinforcement learning [C]. 2020 IEEE 16th International Conference on Control & Automation (ICCA), IEEE, 2020: 1384-1389.
- [37] De Silva B M, Callahan J, Jonker J, et al. Hybrid learning approach to sensor fault detection with flight test data [J]. AIAA Journal, 2021, 9(9): 3490-3503.
- [38] 邵怡韦, 陈嘉宇, 林翠颖, 等. 小训练样本下齿轮箱故障诊断: 一种基于改进深度森林的方法 [J/OL]. 航空学报 (2021-04-30) [2021-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20210429.1135.030.html>.
- [39] 程月华, 江文建, 杨浩, 等. 基于深度森林的卫星ACS执行机构与传感器故障识别 [J]. 航空学报,

- 2020, 41 (S1): 195–205.
- [40] Wang B, Zhang Y. Adaptive sliding mode fault-tolerant control for an unmanned aerial vehicle [J]. *Unmanned Systems*, 2017, 5 (4): 209–221.
- [41] Wang B, Yu X, Mu L, et al. Disturbance observer-based adaptive fault-tolerant control for a quadrotor helicopter subject to parametric uncertainties and external disturbances [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 727–743.
- [42] Abbaspour A, Yen K K, Forouzaneshad P, et al. A neural adaptive approach for active fault-tolerant control design in UAV [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 50 (9): 3401–3411.
- [43] Shi X, Cheng Y, Yin C, et al. Actuator fault tolerant controlling using adaptive radical basis function neural network SMC for quadrotor UAV [C]. 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), IEEE, 2019: 5409–5414.
- [44] Yu B, Zhang Y, Qu Y. MPC-based FTC with FDD against actuator faults of UAV [C]. 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, 2015: 225–230.
- [45] 陈勇, 支健辉. 多操纵面飞机控制分配与容错控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 8–11.
- [46] Gallehdari Z, Meskin N, Khorasani K. Distributed reconfigurable control strategies for switching topology networked multi-agent systems [J]. *ISA Transactions*, 2017, 71 (1): 51–67.
- [47] Wang X, Yang G H. Distributed reliable H_∞ consensus control for a class of multi-agent systems under switching networks: A topology-based average dwell time approach [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26 (13): 2767–2787.
- [48] Wang X, Yang H G. Adaptive reliable coordination control for linear agent networks with intermittent communication constraints [J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2018, 5 (3): 1120–1131.
- [49] Qin L, He X, Yan R, et al. Distributed sensor fault diagnosis for a formation of multi-vehicle systems [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356 (2): 791–818.
- [50] Zhou D, Qin L, He X, et al. Distributed sensor fault diagnosis for a formation system with unknown constant time delays [J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61 (11): 1–16.
- [51] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [C]. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 1985, 2: 500–505.
- [52] Li S, Wang X. Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple UAVs [J]. *Automatica*, 2013, 49 (11): 3359–3367.
- [53] D’Orsogna M R, Chuang Y L, Bertozzi A L, et al. Self-propelled particles with soft-core interactions: Patterns, stability, and collapse [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96 (10): 104302.
- [54] Zhan P, Yu K, Swindlehurst A L. Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: Performance and optimization [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47 (3): 2068–2085.
- [55] 韩亮, 任章, 董希旺, 等. 多无人机协同控制方法及应用研究 [J]. *导航定位与授时*, 2018, 5 (4): 1–7.
- [56] Wang H, Chen M, Fu P. A distributed fault-tolerant mechanism for mission-oriented unmanned aerial vehicle swarms [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2021, 34 (8): e4789.
- [57] Giulietti F, Pollini L, Innocenti M. Autonomous formation flight [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2000, 20 (6): 34–44.
- [58] 马小山, 董文瀚, 李炳乾. 考虑拓扑故障的无人机编队容错控制方法研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38 (5): 1084–1093.
- [59] Wang G, Luo H, Hu X, et al. Fault-tolerant communication topology management based on minimum cost arborescence for leader-follower UAV formation under communication faults [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, 14 (2): 1729881417693965.
- [60] 董文奇, 何锋. 大规模 UAV 编队信息交互拓扑的分级分布式生成 [J]. *航空学报*, 2021, 42 (6): 452–462.
- [61] 许晓伟, 赖际舟, 吕品, 等. 多无人机协同导航技术研究现状及进展 [J]. *导航定位与授时*, 2017, 4 (4): 1–9.
- [62] 熊骏, 熊智, 于永军, 等. 超宽带测距辅助的无人机近距离相对导航方法 [J]. *中国惯性技术学报*, 2018, 26 (3): 346–351.
- [63] 苏炳志, 王磊, 张红伟, 等. 基于修正似然滤波的无人机编队相对导航方法 [J/OL]. *北京航空航天大学学报*: 1–17 (2021-09-16) [2021-11-14]. <https://>

- doi.org/10.13700/j. -bh.10015965.2021.0313.
- [64] Al-Radaideh A, Selje II R, Sun L. Relative dynamics modeling and three-dimensional formation control for leader-follower UAV in the presence of wind[C]. AIAA Scitech 2020 Forum, 2020: 0878.
- [65] 张佳龙, 闫建国, 张普. 基于自适应方法的多无人机编队队形控制[J]. 航空学报, 2020, 41 (1): 234-247.
- [66] Liu H X, Liu F, Zhang X J, et al. Robust optimization in formation reconfiguration problem for multi-UAV[C]. 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), IEEE, 2019: 581-585.
- [67] Pachter M, D' Azzo J J, Proud A W. Tight formation flight control [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24 (2): 246-254.
- [68] Blake W, Multhopp D. Design, performance and modeling considerations for close formation flight[C]. 23rd Atmospheric Flight Mechanics Conference, 1998: 4343.
- [69] Yu Z Q, Qu Y H, Zhang Y M. Safe control of trailing UAV in close formation flight against actuator fault and wake vortex effect [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 77: 189-205.
- [70] Yu Z Q, Zhang Y M, Jiang B, et al. Distributed adaptive fault-tolerant close formation flight control of multiple trailing fixed-wing UAV[J]. ISA Transactions, 2020, 106: 181-199.
- [71] Zhai S, Li C Z, Wang C C, et al. Vertically optimal close formation flight control based on wingtip vortex structure[J]. Journal of Aircraft, 2020, 57 (5): 964-973.
- [72] 李炜, 张伟. 基于粒子群算法的多无人机任务分配方法[J]. 控制与决策, 2010, 25 (9): 1359-1363+1368.
- [73] Feng Z, Hu G Q. Secure cooperative event-triggered control of linear multiagent systems under DoS attacks [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 28 (3): 741-752.
- [74] Zhang D, Feng G. A new switched system approach to leader-follower consensus of heterogeneous linear multiagent systems with DoS attack [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51 (2), 1258-1266.
- [75] 王誉达, 查利娟, 刘金良, 等. 基于事件触发和欺骗攻击的多智能体一致性控制[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2019, 11 (4): 380-389.
- [76] Manandhar K, Cao X, Hu F, et al. Detection of faults and attacks including false data injection attack in smart grid using Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1 (4): 370-379.
- [77] Zhao J B, Zhang G X, Jabr R A. Robust detection of cyber attacks on state estimators using phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32 (3): 2468-2470.
- [78] Ao W, Song Y, Wen C. Adaptive cyber-physical system attack detection and reconstruction with application to power systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10 (12): 1458-1468.
- [79] Ao W, Song Y, Wen C, et al. Finite time attack detection and supervised secure state estimation for CPSs with malicious adversaries [J]. Information Sciences, 2018, 451: 67-82.
- [80] He Y, Mendis G J, Wei J. Real-time detection of false data injection attacks in smart grid: A deep learning-based intelligent mechanism [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8 (5): 2505-2516.
- [81] Kurt M N, Ogundijo O, Li C, et al. Online cyber-attack detection in smart grid: A reinforcement learning approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10 (5): 5174-5185.
- [82] Wang H, Chen M, Fu P. A distributed fault-tolerant mechanism for mission-oriented unmanned aerial vehicle swarms [J/OL]. International Journal of Communication Systems, 2021, 34 (8): e4789.
- [83] Schenk K, Lunze J. Fault-tolerant task allocation in networked control systems[C]. 2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), IEEE, 2020: 313-318.
- [84] 刘学达, 何明, 禹明刚, 等. 基于演化博弈的无人机集群协同应用[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7 (2): 167-173.
- [85] Brown P N, Borowski H P, Marden J R. Security against impersonation attacks in distributed systems [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, 6 (1): 440-450.
- [86] 倪媛, 杨浩, 姜斌. 蜂群对抗决策故障下的容错博弈控制[J]. 航空学报, 2021, 42 (4): 534-545.
- [87] 陈彧赟, 侯博文, 何章鸣, 等. 数据驱动的复杂系统非预期故障诊断通用过程模型[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39 (6): 126-133.
- [88] Ma H J, Yang G H. Adaptive fault tolerant control of cooperative heterogeneous systems with actuator faults and unreliable interconnections [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61 (11): 3240-3255.