



无人机安全控制系统技术: 进展与展望

郭雷^{1*}, 余翔¹, 张霄¹, 张友民²

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191, 中国

2. Department of Mechanical, Industrial, and Aerospace Engineering, Concordia University, Montreal H3G 1M8, Canada

* 通信作者. E-mail: lguo@buaa.edu.cn

收稿日期: 2019-05-15; 接受日期: 2019-07-23; 网络出版日期: 2020-02-10

国家自然科学基金 (批准号: 61627810, 61833013) 资助项目

摘要 无人机是人工智能的重要载体, 在国民安全和国民经济建设领域发挥着十分重要的作用. 随着无人机任务复杂程度不断提升、反无人机技术不断发展, 无人机事故日益增多, 其安全问题凸显, 解决无人机安全问题已经刻不容缓. 本文结合国家科技发展需求, 总结了干扰估计与故障诊断、抗干扰控制、容错控制、任务重构等关键技术领域的研究现状与难题, 并提出可能的解决思路. 从控制学科的角度初步探讨了无人机安全控制系统构架, 重点强调了干扰、对抗和故障等复杂极端环境下无人机的动态行为表征、因果与溯源分析、能力量化与评估、“小回路”智能检测、“全回路”优化控制、“任务-控制”一体化设计等. 建议未来重点逐步从控制理论和算法的研究拓展到无人机安全控制软件、芯片, 以及系统的研制, 服务于国家重大需求和工程实践.

关键词 无人机安全控制, 干扰估计, 故障诊断, 抗干扰控制, 容错控制, 高可靠自动驾驶仪, 任务重构

1 引言

无人机是执行抵近隐蔽侦查、长航时监测打击、全天候电子对抗、精准物流运输、快速森林火灾与环境监测、紧急灾后搜索救援、远距电网巡线等军民领域复杂任务的重要手段, 飞行终端智能化是未来无人机发展的一个重要趋势^[1]. 随着无人机应用需求的爆发式增长, 预计 2023 年我国无人机产业规模可突破 1300 亿元, 未来 15 年我国无人机市场需求超 3300 亿元. 无人机导航与控制技术的主要任务是获取三维空间运动信息, 并根据任务需求及已知的运动信息计算控制信号, 通过驱动执行机构实现稳定飞行或跟踪制导指令. 高精度、强自主、高可靠的导航与控制系统是无人机等各类飞行器的关键组成部分, 也是对国民安全和国民经济有重要应用前景的核心技术^[2].

引用格式: 郭雷, 余翔, 张霄, 等. 无人机安全控制系统技术: 进展与展望. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 184–194, doi: 10.1360/SSI-2019-0101

Guo L, Yu X, Zhang X, et al. Safety control system technologies for UAVs: review and prospect (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 184–194, doi: 10.1360/SSI-2019-0101

随着无人机任务复杂程度不断提升,反无人机技术、干扰对抗技术不断发展,无人机适应复杂任务环境,应对各类干扰、对抗和故障情形的能力亟待提高。目前,多源干扰和各类故障是导致无人机安全事故的主要因素,极大地限制了无人机的应用环境、应用对象和应用领域。近年来无人机事故不胜枚举,损失触目惊心,无人机对复杂环境适应性不足的难题凸显,解决其安全性问题刻不容缓。例如,2018年11月,伊朗通过干扰、诱骗技术成功捕获美军MQ-9死神无人机;2018年5月,由于GPS部件受到通信干扰,西安1374架无人机编队表演时发生大面积坠落事故;2017年8月,执行器故障致使两架美军MQ-1捕食者无人机在4天之内相继坠毁。

面向复杂环境的无人机自主安全性的要求也迫切需要人工智能技术的应用与体现。美国国防高级研究计划局(DARPA)于2015年启动无人机自主安全相关的战略重点项目CODE(拒止环境协同作战),旨在研发先进控制技术和软件提高美军无人机的安全性能。美国国防部发布的《2018人工智能战略总结》指出高质量的算法和软件是智能无人系统发展的核心驱动力^[3]。我国也将无人机自主安全控制视为国家科技发展战略的重要一环:国务院2017年印发的《新一代人工智能发展规划》将具有复杂环境适应性的无人机自主控制列为重点突破领域¹⁾。此外,无人机控制系统技术属于欧美出口管制技术,无人机安全控制已成为制约无人机发展的“卡脖子”技术。

目前,传统的无人机控制理论方法和系统技术遇到巨大的挑战,无人机难以快速适应复杂环境,无论是干扰还是故障都是影响无人机安全的重要因素。无人机元器件较多、工况复杂多变、系统动态跨域较大,在复杂高对抗环境中极易出现无人机结构受损、航电设备受扰(信号屏蔽、信道堵塞、信息欺骗)和失稳等状况,造成无人机控制性能退化甚至失稳,给无人机带来灾难性后果。因此,在干扰环境和故障条件下,研究并应用新型控制理论和算法软件针对干扰/故障进行快速精细估计并自主进行任务重构和控制重构,恢复无人机的理想状态或保证无人机具备可接受的性能降级状态,即实现无人机对干扰免疫和对故障自愈功能,已经成为进一步提升无人机智能化程度、环境适应性和任务应用能力的核心关键。

本文结合近年来国家重大需求,从控制学科的视角总结了无人机安全控制关键技术和国内外研究现状,初步探讨了无人机安全控制系统框架、挑战性难题,以及可能的解决思路,以推动无人机安全控制基础理论及系统技术的快速发展,满足国家安全和国民经济建设的迫切需求。

2 无人机多源干扰和复合故障表征与分析

无人机的载荷运动及燃料消耗,通常会引起无人机转动惯量的实时变化;来自机载传感器的噪声、执行器偏差和时滞等也是对姿态控制性能造成影响的重要因素。另一方面,随着反无人机技术的快速发展,无人机在复杂高对抗环境中极易受到攻击、欺骗等外部干扰,严重影响其控制性能和安全。概括而言,无人机除了含有运动学和动力学模型中的不确定动态、耦合,以及其他未建模动态等建模误差之外,还会受到内部不同传感器的测量噪声、执行机构偏差和时滞、结构振动的影响,以及外部攻击、电子对抗、欺骗信号的作用。这些来自无人机系统建模误差和内、外部干扰,形成了多源异质的干扰因素,严重影响无人机控制的精度和稳定度。

无人机在复杂环境中执行任务时易由外界攻击导致结构损伤、导航定姿系统和驱动系统复合故障等。施加于无人机的典型故障成因各异且具有不同的数学表征。无人机结构性故障(如控制翼面损伤)不仅影响控制输入效率还将严重影响系统气动特性;而无人机机载设备复合故障主要表现为无人机反馈控制回路信息不完备以及控制输入效率退化。

1) http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.

为实现无人机高自主和高安全地完成任任务, 急需揭示元器件误差分布特性、测量质量、精度退化机理和各类典型故障的机理特性. 针对复杂高对抗环境下无人机受到的多源干扰, 采用不确定范数有界变量、谐波变量、阶跃变量、Gauss/非 Gauss 随机变量、中立稳定系统输出变量等多元数学表征方式完成干扰的精细表征与量化. 针对故障而言, 从单个部件的物理机理出发, 细分核心元器件故障模式 (如执行器偏置、效率损失、完全失效等), 系统性分析各类故障特性、发生概率和影响, 建立故障的数学表征, 依据实测数据确定故障模型的参数. 对于无人机结构性故障 (如控制翼面损伤), 研究损伤面积与无人机动力学方程之间的映射关系; 对于航电设备故障, 研究导航定姿系统/执行机构模型和典型故障特性, 并分析其交联耦合特征.

3 无人机干扰估计与故障诊断技术

无人机在复杂高对抗环境中执行任务时受干扰/故障的影响, 要针对性地抑制或抵消其不利影响, 实现无人机控制系统抗扰和自愈功能, 必须先对干扰/故障进行估计.

目前无人机的干扰估计研究主要集中在针对外界风干扰的估计策略. 文献 [4] 在四旋翼无人机动力学建模中考虑外界风干扰的影响, 并利用加速度计数据和扩展 Kalman 滤波算法估计风速. 作者研究团队提出了一种新型干扰观测器, 用于同时估计小型旋翼无人机的外界未知扰动和系统状态 [5]. 文献 [6] 利用干扰观测器技术估计四旋翼无人机的外界干扰和量测时滞. 美国 Texas Tech University 的 Parameswaran 教授团队 [7] 在设计四旋翼无人机自主着舰系统中, 将未知建模动态、地效、状态耦合, 以及外界干扰等因素看成“集总干扰”, 并利用滤波算法进行估计. 西班牙 Polytechnic University of Catalonia 的 Puig 教授团队 [8] 设计了二次型有界观测器, 保证了无人机干扰估计速度和估计精度.

文献 [9] 针对多架四旋翼无人机执行器故障问题设计了诊断系统, 该系统由一组连续时间残差生成器和离散事件故障诊断机制组成. Technical University of Denmark 研究团队针对空速管故障和无人机舵面故障, 提出了基于随机过程的故障诊断框架, 并通过飞行实验验证了所提方法的有效性 [10]. Zhong 教授团队 [11] 研究了基于扩展 Kalman 滤波和概率评价函数的无人机故障检测机制, 该方法具备良好的工程实用性. 该团队还利用无人机中的多源异构传感器信息融合技术, 制定了一种新型的无人机空速管故障检测方案 [12]. 文献 [13] 针对固定翼无人机设计了基于线性变参数的未知输入观测器, 用于检测无人机执行机构故障. 针对无人机组合导航系统, 文献 [14] 利用 Kalman 滤波技术计算不同传感器故障阈值, 然后基于模糊系统和神经网络方法提出了一种无模型的故障诊断策略.

目前的无人机控制系统缺乏对多源干扰和复杂故障的快速精细估计能力, 亟需突破针对干扰/故障的精细表征与建模、快速估计与预测等关键技术. 文献 [15] 利用以往扰动信息基于曲线拟合技术提出了干扰预测器, 并根据干扰不同动态特性进行在线调参. 文献 [16] 将多项式拟合和线性回归技术用于干扰预测, 并设计了预测补偿控制环节. 针对无人机这一对象, 可借鉴上述文献中的干扰预测方法.

4 无人机抗干扰控制方法与技术

被控对象和任务环境的复杂程度越来越高, 同时对系统精度和可靠性的要求也越来越高, 因此对于干扰的抑制和抵消一直是控制领域的研究热点 [17~27]. 例如, 文献 [22, 23] 是抗干扰控制领域代表性论文, 理论研究成果受到美国 NASA 科学家、美国雷神公司高级科学家、IFAC Fellow、IEEE Fellow 等多位知名学者高度评价, 并在航空航天、工业过程、风力发电等领域得到成功应用, 证明了抗干扰控制理论极强的生命力和广泛的应用价值.

现有无人机抗干扰控制方法可分为 3 类: (1) 鲁棒控制方法; (2) 自抗扰控制方法; (3) 基于干扰观测器的控制方法. 美国 University of Florida 团队提出输出反馈动态逆控制策略, 保证无人机在建模误差和外部有界加性干扰条件下的全局渐进跟踪性能. 其中, 跟踪控制可抑制外部有界干扰的影响, 自适应控制用于抑制模型不确定性的影响^[28]. 北京航空航天大学 and 英国 Loughborough University 研究团队针对小型无人直升机, 基于干扰观测器和反步法设计了复合分层抗干扰控制系统, 并得到了美国、法国等多位学者的关注和跟进^[5]. 受文献 [5] 启发, 英国 Brunel University 和西北工业大学研究团队将复合抗干扰控制应用于无人机系统^[29], 研究工作将外部干扰和内部干扰当成“集总干扰”并用非线性扩张状态观测器进行估计, 并设计了位置和姿态控制器. 文献 [30] 设计了非线性鲁棒自适应控制器以保证旋翼无人机在外界连续风干扰的条件下仍然能跟踪参考信号. 加拿大 University of Ottawa 和美国 University of Washington 联合研究团队^[31] 针对旋翼无人机设计了一种鲁棒自适应控制器保证其渐进稳定性和姿态跟踪性能, 其中自适应律用于补偿建模误差和外部干扰不确定性. 北京理工大学研究团队将旋翼无人机的外界风干扰和模型参数不确定性当成“集总干扰”, 设计了基于扩张状态观测器的预测控制系统估计和补偿干扰, 实现了旋翼无人机的稳定飞行^[32]. 香港科技大学团队针对风干扰条件下的垂直起降无人机控制问题, 设计了基于干扰观测器的 H_∞ 控制系统, 该控制系统对外界风干扰和模型不确定性具有良好的鲁棒特性^[33]. 虽然无人机抗干扰控制技术近年来取得了长足的发展, 但是提高无人机在卫星拒止、欺骗、对抗、强电磁干扰等环境下的适应性、鲁棒性和可靠性, 仍然是一项亟待开展深入研究的工作.

5 无人机容错控制方法与技术

容错控制技术最初的发展动力源自航空航天领域, 美国空军在 20 世纪 80 年代提出了“自修复飞行控制系统”等概念, 以保证飞行器在故障情况下能安全着陆^[34]. 容错控制器设计一般可分为被动容错方法和主动容错方法^[35,36]. 前者的思路是在设计之初就考虑各种可能发生的故障, 对于每一类故障求得一组可行解, 最后综合各组可行解找到一个共同解. 主动容错控制器通常由故障诊断和重构控制器构成: 主动容错控制器通过诊断模块获取故障信息后, 进行控制重构求得针对该类故障的最优解, 并替换标称控制器. 与被动容错设计方法相比, 主动容错设计具有更小的保守性、更强的针对性和更好的性能.

目前无人机容错控制设计方法主要集中于“自适应 + X”方法 (如: 自适应 + 鲁棒、自适应 + 动态逆、自适应 + 滑模) 和控制重分配方法等. 美国 California Institute of Technology 讨论了 T-33 无人机通讯故障情况, 利用基于优化的控制策略和逻辑程序设置避免该故障无人机与编队中其他无人机发生碰撞^[37]. 文献 [38] 基于自适应神经网络进行无人机气动模型参数辨识, 利用鲁棒控制方法设计了容错控制器. 加拿大国防部研究中心考虑了多源异构传感器性能和故障条件下的编队无人机覆盖控制问题, 设计了一种自适应决策方法可根据无人机健康状态自动调整无人机覆盖范围^[39]. 为解决无人机空中加油时执行器突发故障的问题, 美国 Texas A&M University 的 Valasek 教授团队^[40] 设计了基于自适应动态逆的容错控制器, 保证了无人机的跟踪性能. 美国 Wright State University 的 Zhang 教授团队分别针对四旋翼无人机单个执行器失效故障^[41] 和多个执行器失效故障^[42], 设计了非线性自适应估计器和非线性自适应控制器. 文献 [43] 提出了包括径向基神经网络模块、模糊逻辑模块和滑模控制器的自适应容错控制系统, 可有效地抑制四旋翼无人机执行器故障和建模误差的影响. 文献 [44] 将外界风干扰、执行器故障和传感器量测噪声当成“集总干扰”, 基于自抗扰控制技术设计了旋翼无人机鲁棒容错控制系统. Concordia University 和北京航空航天大学研究团队针对旋翼无人机中的执行器故障、

参数不确定性、外界干扰等问题, 利用干扰观测器估计外界干扰, 并利用自适应滑模控制方法抑制执行器故障和参数不确定性的影响^[45].

基于控制重分配的容错控制系统具有结构相对简单、故障发生时无需改变控制器架构等优点. 文献 [46] 设计了基于自适应滑模控制分配的多旋翼无人机容错控制器, 其中自适应滑模控制方法用于设计虚拟控制, 二次型优化策略用于控制重分配. 文献 [47] 基于 PID 控制方法设计了标称控制器, 然后利用控制重分配技术保证在电机故障、建模误差和传感器噪声等条件下旋翼无人机的安全. 最新发表的研究论文讨论了无人机的容错控制问题, 利用 PI 控制器实现了单个升降副翼卡死条件下的安全着陆^[48].

国外无人机厂商将基于切换的容错控制技术集成于自动驾驶仪. 例如通用航空领域著名厂家 GARMIN 公司, 在新型 GFC700 自动驾驶仪中, 采用了安全增强型的飞行控制解决方案. 通过对飞行状态的实时监控, 可在安全隐患发生后启动安全操作程序, 防止飞机失控和潜在的结构损坏²⁾. Honeywell Primus 系列飞行控制系统, 具备了诊断机载设备故障并进行自动控制切换操作、风切变干扰检测等功能³⁾.

随着无人机机载设备集成化程度、任务品质需求和环境复杂程度的不断提升, 无人机发生故障的概率剧增. 虽然在无人机容错控制系统技术领域取得了一系列研究成果, 但是针对无人机的结构性故障和航电设备复合故障的容错控制技术仍需开展系统性的研究工作.

6 无人机任务重构与优化技术

无人机在复杂高对抗环境中执行任务时受干扰/故障的影响, 造成其能力下降, 难以满足既定任务需求. 为保障无人机执行降级后的任务或安全返回基地, 必须依据干扰/故障的估计信息、系统能力量化评估指标、机载传感器的实时环境态势感知信息等, 研究可动态调整兼具实时性的威胁规避航迹重规划技术. 在无人机航迹重规划技术中, 无人机气动约束、航迹重构实时性, 以及任务环境 (如动态威胁) 是必须考虑的 3 项因素^[49].

美国 Massachusetts Institute of Technology 团队将无人机安全航迹规划问题纳入 Markov 决策过程框架, 规划出规避多架空中威胁的航迹^[50]. 进一步, 他们考虑到无人机动态特性和环境不确定性等条件, 基于随机树搜索提出了无人机的航迹自主规划技术^[51]. 文献 [52] 所提出的航迹规划系统可分为 3 个部分: 全局航迹规划、局部航迹规划和实时反应航迹规划. 其中, 全局路径规划根据先验信息为无人机生成一条初始航迹; 局部航迹规划依据视觉传感器检测的威胁对航迹进行局部调整; 而实时反应航迹规划模块根据突然出现的空中威胁进行航迹重构, 保证无人机安全. 加拿大 Concordia University 研究团队利用微分平坦技术平滑初始规划的安全航迹, 使得航迹满足无人机物理约束条件并可规避多个无人机^[53]. 文献 [54] 考虑了无人机编队飞行中的碰撞问题, 设置了无人机的安全区域. 当突破安全区域时, 无人机航迹进行重构从而调整无人机的方向角指令信号, 保证了无人机编队的安全性. 值得指出的是, 文献 [52, 54] 对突然出现的空中威胁进行航迹重构, 可为干扰/故障条件下的航迹重构提供解决思路和技术支撑. 文献 [55] 利用 Markov 决策过程和变栅格方法提出了无人机航迹重构技术, 将无人机的物理约束等条件集成至变栅格算法中, 具有更大的灵活性.

虽然国内外研究人员在无人机安全航迹规划领域取得了一定的进展, 然而对于信息不完备条件下的柔性任务重构技术有待系统性的探索.

2) <https://www.garmin.com/en-US/>.

3) <https://aerospace.honeywell.com/en/products/cockpit-systems/flight-controls-and-autopilots>.

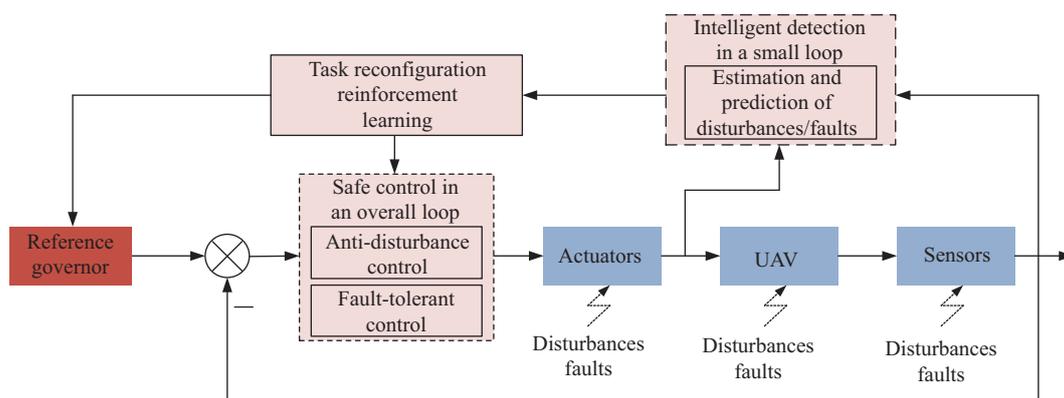


图 1 (网络版彩图) 无人机安全控制系统功能与构成示意图

Figure 1 (Color online) Illustration of UAV safe control system

7 无人机安全控制系统框架

2007 年美国宇航局 (NASA) 启动了“自愈飞行控制 (integrated resilient aircraft control)”的研究计划, 保证飞行控制系统在有害行为情况下仍然恢复理想性能, 即增强飞行控制系统的“自愈”能力。2012 年, 美国国家基金委启动了“故障自愈系统 (failure-resistant systems)”的研究计划, 旨在扩大自愈控制技术中的应用范围。从保证无人机安全性的角度而言, 本文焦点在于干扰/故障导致的大幅度动力学特性、参数和结构变化的情况下, 通过自主调节进而恢复理想的控制系统特性或保证可接受的性能降级状态, 从而具有抗扰与自愈功能。为此, 本文提出如图 1 所示的无人机安全控制系统构架, 以提高无人机在干扰、故障等极端条件下的环境适应性和自主安全性。

如图 1 所示, 为实现干扰、故障等复杂极端条件下的抗扰功能和自愈功能, 所提出的控制系统包括估计模块、任务重构模块、安全控制模块 (抗干扰控制和容错控制) 等。当干扰/故障发生时, 估计模块应快速有效地对干扰/故障进行估计与诊断; 获取估计信息后结合无人机实际能力进行任务重规划, 在线规划无人机继续执行任务或返回基地的安全航迹; 抗干扰控制和容错控制模块则依据实时估计信息、无人机当前物理约束以及需重构的航迹, 抑制或抵消干扰/故障的影响, 保证无人机安全。随着无人机的广泛应用, 无人机的安全性已成为亟待突破的瓶颈问题, 无人机安全控制系统可望成为解决无人机产品安全性与实用性的有效途径。

8 总结与展望

无人机控制技术属于基础性、战略性和前沿性的军民两用高新技术, 其发展一直受到国家安全和国民经济建设重大需求的牵引, 得到了世界各国的高度关注和重视。另一方面, 该技术受到高度封锁, 2018 年 11 月美国商务部工业与安全局将无人机相关技术和算法软件列入出口管制清单, 无人机等运动体的超精密运动控制技术也是制约我国科技发展的“卡脖子”技术之一, 亟需自主创新突破国外技术壁垒。本文结合无人机发展趋势, 从控制学科的角度初步探讨了无人机安全控制系统概念与框架, 通过重点梳理国内外已有的研究成果并围绕国内外无人机高安全性需求, 总结出以下关键技术领域及难题。

(1) 强微循环“小回路”智能检测与预测技术。目前无人机干扰估计研究集中于对外界干扰的估计方法, 而处理未建模动态等多类干扰时常见处理方法是将多类干扰看成“集总干扰”进行估计, 其保

守性较大, 亟待针对无人机多源干扰的表征与建模、估计与预测等领域开展系统性的研究工作. 在无人机故障诊断方面, 大部分已有研究成果基于自适应控制策略实现无人机执行器失效故障调节, 而针对结构性故障和航电设备复合故障的快速精细化诊断研究尚不多见. 为此, 亟需突破针对干扰/故障的强微循环“小回路”智能检测与预测技术.

(2) **复合抗干扰控制技术.** 从控制的角度, 需要解决无人机多源干扰的可估计性、可补偿性, 以及可抑制度的闭环量化分析问题, 提出具有可剪裁性的复合抗干扰控制算法^[23,27]; 从智能的角度, 需提高控制算法的“以软补硬”能力, 实现算法对干扰的适应性到机制对干扰的隔离性的有机结合, 提高无人机控制的自主性; 从系统设计的角度, 要重视从信息获取、融合、控制到执行的全回路优化, 研究具有强微循环“小回路”干扰估计方法、干扰抑制和补偿方法, 完成全回路闭环因果和溯源分析; 从技术实现的角度, 需要探讨/实现无人机多源干扰的可估计性、可补偿性, 以及可抑制度量分析、微循环“小回路”的干扰估计、干扰抑制与补偿等技术集成在无人机自动驾驶系统, 并完成无人机高可靠的抗干扰控制功能; 从仿真与系统优化的角度, 需研究多源干扰和传感器、执行器、机构和结构故障的精细表征和建模方法, 完成全回路的闭环精细量化, 实现在不同干扰和对抗模式下的性能精细评估^[56~58].

(3) **“感知 – 控制 – 执行”全回路安全控制技术.** 在无人机全回路控制系统中, 反馈控制作用会使传感器和执行机构故障在整个系统中传播, 对系统状态和输出产生累积影响, 使一个故障源在系统中表现出多个异常征兆, 给故障诊断带来极大的挑战. 此外, 已有的无人机容错控制往往局限于仅含有故障的系统, 未考虑多源干扰的影响. 无人机系统中持续存在的干扰变量往往会污染残差信号, 降低故障诊断和自愈性能. 为此, 亟需有机融合抗干扰控制和容错控制, 突破无人机“感知 – 控制 – 执行”全回路的安全控制技术.

(4) **柔性任务重构与安全控制一体化技术.** 典型干扰和故障的发生导致无人机控制系统能力退化, 严重影响既定任务的执行和无人机的安全. 已有成果中对干扰和故障条件下无人机能力量化分析以及信息不完备条件下的柔性任务重构研究尚不多见, 亟需突破柔性任务重构与安全控制一体化技术.

该领域的研究应重视干扰、对抗和故障等复杂极端环境下无人机系统的动态行为表征、因果溯源分析、能力量化与评估、“小回路”智能检测、“全回路”优化控制和“任务 – 控制”一体化设计, 将基础理论研究、测试分析技术与实际工程应用有机结合. 在取得无人机安全控制系统相关关键技术突破以后, 亟需将相关算法在无人机自动驾驶仪中实现, 最终达到保证无人机安全性的目的. 因此, 未来的重点建议逐步从控制理论和算法的研究拓展到研制无人机抗扰与自愈控制软件、系统, 服务于国家重大需求和工程实践.

参考文献

- 1 Fan B K, Zhang R Y. Unmanned aircraft system and artificial intelligence. *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2017, 42: 1523–1529 [樊邦奎, 张瑞雨. 无人机系统与人工智能. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2017, 42: 1523–1529]
- 2 Guo L, Fang J C. Recent prospects on some problems of navigation guidance and sensing technology. *Sci Sin Inform*, 2017, 47: 1198–1208 [郭雷, 房建成. 导航制导与传感技术研究领域若干问题的思考与展望. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47: 1198–1208]
- 3 Summary of the 2018 department of defense artificial intelligence strategy. 2018. <https://media.defense.gov/2019/Feb/12/2002088963/-1/-1/1/SUMMARY-OF-DOD-AI-STRATEGY.PDF>
- 4 Waslander L S, Wang C. Wind disturbance estimation and rejection for quadrotor position control. In: *Proceedings of AIAA SciTech Forum-Infotech@Aerospace*, Seattle, 2009. 1–14
- 5 Lu H, Liu C J, Guo L, et al. Flight control design for small-scale helicopter using disturbance-observer-based backstepping. *J Guid Control Dyn*, 2015, 38: 2235–2240

- 6 Zhang J Q, Zhou L H, Li C X, et al. Binary observers based control for quadrotor unmanned aerial vehicle with disturbances and measurement delay. *Proc Inst Mech Eng Part G-J Aerospace Eng*, 2018, 232: 2807–2820
- 7 Lu Q, Ren B B, Parameswaran S. Shipboard landing control enabled by an uncertainty and disturbance estimator. *J Guid Control Dyn*, 2018, 41: 1502–1520
- 8 Cayero J, Rotondo D, Morcego B, et al. Optimal state observation using quadratic boundedness: application to UAV disturbance estimation. *Int J Appl Math Comput Sci*, 2019, 29: 99–109
- 9 Meskin N, Khorasani K, Rabbath C A. A hybrid fault detection and isolation strategy for a network of unmanned vehicles in presence of large environmental disturbances. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2010, 18: 1422–1429
- 10 Hansen S, Blanke M, Adrian J. A framework for diagnosis of critical faults in unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of the 19th World Congress the International Federation of Automatic Control*, Cape Town, 2014. 10555–10561
- 11 Zhong M Y, Zhang L G, Ding S X, et al. A probabilistic approach to robust fault detection for a class of nonlinear systems. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 3930–3939
- 12 Guo D F, Zhong M Y, Zhou D H. Multisensor data-fusion-based approach to airspeed measurement fault detection for unmanned aerial vehicles. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2018, 67: 317–327
- 13 Rotondo D, Cristofaro A, Johansen T A, et al. Robust fault and icing diagnosis in unmanned aerial vehicles using LPV interval observers. *Int J Robust Nonlin Control*, 2018. doi: 10.1002/rnc.4381
- 14 Zhang Q, Wang X Y, Xiao X, et al. Design of a fault detection and diagnose system for intelligent unmanned aerial vehicle navigation system. *Proc Inst Mech Eng Part C-J Mech Eng Sci*, 2019, 233: 2170–2176
- 15 Zhao F T, Gupta Y P. A simplified predictive control algorithm for disturbance rejection. *ISA Trans*, 2005, 44: 187–198
- 16 Li X, Wang Q G, Li X C, et al. Feedforward control with disturbance prediction for linear discrete-time systems. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2018. doi: 10.1109/TCST.2018.2859911
- 17 Feng C B, Zhang K J. *Robust Control of Nonlinear Systems*. Beijing: Science Press, 2004 [冯纯伯, 张侃健. 非线性系统鲁棒控制. 北京: 科学出版社, 2004]
- 18 Guo L, Cheng D Z. *Control Theory Introduction: From Basic Concepts to Research Frontier*. Beijing: Science Press, 2005 [郭雷, 程代展. 控制理论导论: 从基本概念到研究前沿. 北京: 科学出版社, 2005]
- 19 Zhou K, Doyle J C. *Essentials of Robust Control*. New Jersey: Prentice Hall, 1998
- 20 Davison E. The robust control of a servomechanism problem for linear time-invariant multivariable systems. *IEEE Trans Autom Control*, 1976, 21: 25–34
- 21 Huang L. *Theory Fundamentals of Stability and Robustness*. Beijing: Science Press, 2002 [黄琳. 稳定性与鲁棒性的理论基础. 北京: 科学出版社, 2002]
- 22 Han J Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Trans Ind Electron*, 2009, 56: 900–906
- 23 Guo L, Chen W H. Disturbance attenuation and rejection for systems with nonlinearity via DOBC approach. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2005, 15: 109–125
- 24 Guo L, Wang H. *Stochastic Distribution Control System Design: A Convex Optimization Approach*. London: Springer, 2009
- 25 Wen X Y, Guo L, Yan P. Composite hierarchical anti-disturbance control for robotic systems with multiple disturbances. *Int J Control Autom Syst*, 2014, 12: 541–551
- 26 Guo L, Cao S Y. *Anti-Disturbance Control for Systems with Multiple Disturbances*. Florida: CRC Press, 2014
- 27 Guo L, Cao S Y. Anti-disturbance control theory for systems with multiple disturbances: a survey. *ISA Trans*, 2014, 53: 846–849
- 28 MacKunis W, Wilcox Z D, Kaiser M K, et al. Global adaptive output feedback tracking control of an unmanned aerial vehicle. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2010, 18: 1390–1397
- 29 Yuan Y, Cheng L, Wang Z D, et al. Position tracking and attitude control for quadrotors via active disturbance rejection control method. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62: 010201

- 30 Cabecinhas D, Cunha R, Silvestre C. A globally stabilizing path following controller for rotorcraft with wind disturbance rejection. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2015, 23: 708–714
- 31 Islam S, Liu P X, Saddik A E. Robust control of four-rotor unmanned aerial vehicle with disturbance uncertainty. *IEEE Trans Ind Electron*, 2015, 62: 1563–1571
- 32 Ma D L, Xia Y Q, Li T Y, et al. Active disturbance rejection and predictive control strategy for a quadrotor helicopter. *IET Control Theory Appl*, 2016, 29: 2213–2222
- 33 Lyu X M, Zhou J N, Gu H W, et al. Disturbance observer based hovering control of quadrotor tail-sitter VTOL UAVs using H_∞ synthesis. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3: 2910–2917
- 34 Eslinger C A, Chandler P R. Self-repairing flight control system program overview. In: *Proceedings of IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, Dayton, 1988. 504–511
- 35 Zhang Y M, Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annu Rev Control*, 2008, 32: 229–252
- 36 Yu X, Jiang J. A survey of fault-tolerant controllers based on safety-related issues. *Annu Rev Control*, 2015, 39: 46–57
- 37 Waydo S, Hauser J, Bailey R, et al. UAV as a reliable wingman: a flight demonstration. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2007, 15: 680–688
- 38 Garcia G, Keshmiri S. Adaptive and resilient flight control system for a small unmanned aerial system. *Int J Aerosp Eng*, 2013, 2013: 1–25
- 39 Marier J S, Rabbath C A, Lechevin N. Health-aware coverage control with application to a team of small UAVs. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2013, 21: 1719–1730
- 40 Valasek J, Famularo D, Marwaha M. Fault-tolerant adaptive model inversion control for vision-based autonomous air refueling. *J Guid Control Dyn*, 2017, 40: 1336–1347
- 41 Avram R C, Zhang X D, Muse J. Quadrotor actuator fault diagnosis and accommodation using nonlinear adaptive estimators. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2017, 25: 2219–2226
- 42 Avram R C, Zhang X D, Muse J. Nonlinear adaptive fault-tolerant quadrotor altitude and attitude tracking with multiple actuator faults. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2018, 26: 701–707
- 43 Zeghlache S, Mekki H, Bouguerra A, et al. Actuator fault tolerant control using adaptive RBFNN fuzzy sliding mode controller for coaxial octorotor UAV. *ISA Trans*, 2018, 80: 267–278
- 44 Guo Y Y, Jiang B, Zhang Y M. A novel robust attitude control for quadrotor aircraft subject to actuator faults and wind gusts. *IEEE/CAA J Autom Sin*, 2018, 5: 292–300
- 45 Wang B, Yu X, Mu L X, et al. Disturbance observer-based adaptive fault-tolerant control for a quadrotor helicopter subject to parametric uncertainties and external disturbances. *Mech Syst Signal Process*, 2019, 120: 727–743
- 46 Wang B, Zhang Y M. An adaptive fault-tolerant sliding mode control allocation scheme for multicopter helicopter subject to simultaneous actuator faults. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, 65: 4227–4236
- 47 Merheb A R, Noura H, Bateman F. Emergency control of AR drone quadrotor UAV suffering a total loss of one rotor. *IEEE/ASME Trans Mech*, 2017, 22: 961–971
- 48 Venkataraman R, Seiler P. Fault-tolerant flight control using one aerodynamic control surface. *J Guid Control Dyn*, 2019, 42: 570–584
- 49 Yu X, Zhang Y M. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: review and prospects. *Prog Aerosp Sci*, 2015, 74: 152–166
- 50 Temizer S, Kochenderfer M J, Kaelbling L P, et al. Collision avoidance for unmanned aircraft using Markov decision processes. In: *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Toronto, 2010
- 51 Aoude G S, Luders B D, Joseph J M, et al. Probabilistically safe motion planning to avoid dynamic obstacles with uncertain motion patterns. *Auton Robot*, 2013, 35: 51–76
- 52 Yu H, Beard R, Byrne J. Vision-based navigation frame mapping and planning for collision avoidance for miniature

- air vehicles. *Control Eng Pract*, 2010, 18: 824–836
- 53 Chamseddine A, Zhang Y M, Rabbath C A, et al. Flatness-based trajectory planning/replanning for a quadrotor unmanned aerial vehicle. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2012, 48: 2832–2848
- 54 Karimoddini A, Lin H, Chen B M, et al. Hybrid three-dimensional formation control for unmanned helicopters. *Automatica*, 2013, 49: 424–433
- 55 Zhou X, Yu X, Peng X. UAV collision avoidance based on varying cells strategy. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2019, 55: 1743–1755
- 56 Zhu Y K, Qiao J Z, Zhang Y M, et al. High-precision trajectory tracking control for space manipulator with neutral uncertainty and deadzone nonlinearity. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2019, 27: 2254–2262
- 57 Zhu Y K, Qiao J Z, Guo L. Adaptive sliding mode disturbance observer-based composite control with prescribed performance of space manipulators for target capturing. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 1973–1983
- 58 Zhu Y K, Guo L, Qiao J Z, et al. An enhanced anti-disturbance attitude control law for flexible spacecrafts subject to multiple disturbances. *Control Eng Pract*, 2019, 84: 274–283

Safety control system technologies for UAVs: review and prospect

Lei GUO^{1*}, Xiang YU¹, Xiao ZHANG¹ & Youmin ZHANG²

1. *School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

2. *Department of Mechanical, Industrial, and Aerospace Engineering, Concordia University, Montreal H3G 1M8, Canada*

* Corresponding author. E-mail: lguo@buaa.edu.cn

Abstract Unmanned aerial vehicles (UAVs), considered as platforms for AI technology, play an important role in national security and economic development. With the growing degree of task complexity and the development of anti-UAV technologies, the UAV-incident rate is increasing significantly. Therefore, it is highly desirable to improve UAV safety through anti-disturbance and resilience control. This paper reviews existing studies upon disturbance estimation and fault diagnosis, anti-disturbance control, fault-tolerant control, and task reconfiguration. In addition, technical challenges and potential solutions are presented, including an overall architecture of a UAV safety-control system. In terms of research focus, particular attention must be paid to UAV-characteristics recognition, causality and trace-to-the-source analysis, quantitative analysis of ability, intelligent detection in a local loop, safety control in an overall loop, and task-control-optimization design. In the future, advanced control algorithms must be transferred to the software, chips, and systems of safety control, allowing the proposed control scheme to satisfy major practical needs and applications.

Keywords UAV safety control, disturbance estimation, fault diagnosis, anti-disturbance control, fault-tolerant control, highly reliable autopilot, task reconfiguration



Lei GUO was born in Qufu, China, in 1966. He received B.S. and M.S. degrees in mathematics from Qufu Normal University, China, in 1988 and 1991, respectively, and Ph.D. in control engineering from Southeast University, China, in 1997. From 1999 to 2000, he was a research fellow with IRCCyN, Nantes, France. From 2000 to 2003, he was a research fellow with the University of Glasgow, Glasgow, UK; Loughborough University, Loughborough, UK; and the

University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, UK. He is currently a professor at the School of Automation Science and Electronic Engineering of Beihang University, China. His research interests include anti-disturbance control and filtering, stochastic control, and fault detection with their applications to aerospace systems.



Xiang YU received his B.S., M.S., and Ph.D. in automatic control from Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, in 2003, 2004, and 2008, respectively. He was a postdoctoral research fellow in the Department of Electrical and Computer Engineering at the University of Western Ontario, Canada and a research associate in the Department of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering, Concordia University, Canada. He was given an award

by the Recruitment Program for Young Professionals. He is currently a professor with the School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. His research interests include fault diagnosis and fault-tolerant control of safety-critical systems, guidance, navigation, and control (GNC) of aircraft.



Xiao ZHANG received a B.Eng. degree in automation from Shandong University, Jinan, China, in 2003, and a Ph.D. in instrumentation science and technology from Beihang University, Beijing, China, in 2010. He is currently a lecturer at the School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. His research interests include GNC of aircraft and embedded-system design.



Youmin ZHANG (M'99-SM'07) received his B.S., M.S., and Ph.D. in automatic control from Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, in 1983, 1986, and 1995, respectively. Dr. Zhang is currently a professor with the Department of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering, Concordia University. His current research interests include fault diagnosis and fault-tolerant (flight) control systems, and cooperative GNC of un-

manned aerial/space/ground/surface vehicles.