

动态复杂环境下无人机群调度的多智能体协同控制挑战与对策

胡 越

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 100070

摘要: 动态复杂环境中无人机群调度的多智能体协同控制极具研究价值。论文深入剖析通信可靠性差、任务分配复杂、航路规划困难、环境适应性弱等挑战, 通信受电磁干扰与地形影响, 任务分配需平衡多因素, 航路规划受环境制约, 环境适应能力不足。针对这些问题, 提出构建多层次通信保障体系、动态任务分配机制、智能化航路规划体系及多维度环境适应优化策略。研究成果对提升无人机群在复杂环境下协同作业能力、推动相关技术发展与应用具有重要意义。

关键词: 动态复杂环境; 无人机群调度; 多智能体协同控制; 挑战; 对策

引言: 无人机群协同控制技术在军事与民用领域应用日益广泛, 然而动态复杂环境为其带来诸多难题。电磁干扰、地形遮挡阻碍通信, 任务多样性与环境不确定性增加调度难度, 传统控制策略难以满足需求^[1]。在此背景下, 深入研究多智能体协同控制挑战与对策十分必要。本文旨在分析当前困境, 提出有效解决策略, 提升无人机群在复杂环境下的协同作业水平, 为该技术的进一步发展与实践应用提供理论支撑。

1 无人机群协同控制的发展驱动与现实困境

无人机群协同控制的发展受多重现实需求驱动。军事领域对集群作战的高效指挥需求, 推动无人机群在侦察、打击等任务中的协同配合研究; 民用领域内, 物流配送、应急救援等场景对快速响应和大规模作业的要求, 促使技术向集群化、协同化方向发展^[2]。同时, 人工智能、通信技术的进步为无人机群协同控制提供了技术支撑, 使得多机协作从理论设想逐步走向实践应用。然而在实际推进过程中, 却陷入发展困境。现有技术难以满足动态复杂环境下的任务需求, 无人机个体性能差异、通信网络不稳定等问题, 导致协同控制难以精准落地。并且, 技术研发与实际应用场景存在脱节, 成本控制、安全性保障等现实因素制约着无人机群协同控制的大规模推广, 使得这项技术在发展进程中面临诸多挑战。

2 动态复杂环境下无人机群调度面临的挑战

2.1 通信可靠性问题

在动态复杂环境下, 无人机群调度的通信可靠性面临严峻考验。环境中的电磁干扰、地形遮挡等因素, 会严重影响无人机之间以及无人机与控制中心的数据传

输。一旦通信链路中断或出现信号衰减, 无人机将无法及时获取任务指令、共享环境信息与自身状态, 导致各无人机动作不协调, 难以实现协同作业。而且, 复杂多变的环境会致使通信网络拓扑结构频繁改变, 进一步增加了通信稳定性的维持难度, 使得无人机群在执行任务过程中存在指令传输延迟、数据丢失等风险, 极大威胁任务的顺利完成和无人机群的安全运行, 实际作业场景中, 无人机群还常遭遇突发通信拥塞状况, 多机同时传输数据易造成信道堵塞, 加剧信息传输不畅。部分偏远地区通信基础设施薄弱, 缺乏有效的中继节点支持, 导致无人机群远距离作业时信号质量严重下降^[3]。这些现实问题交织叠加, 使得保障通信可靠性成为无人机群高效协同作业亟待突破的关键瓶颈。

2.2 任务分配复杂性

动态复杂环境中的无人机群任务分配呈现高度耦合的复杂特性。任务类型的多样性与动态变化的需求, 要求系统在短时间内对侦察、打击、运输等任务进行合理规划, 还需充分考量无人机续航能力、载荷适配性等个体差异。环境不确定性更使任务分配难度加剧, 突发事件出现时, 原有分配方案可能瞬间失效, 需要实时调整任务优先级和执行主体。此外, 多任务间存在资源竞争关系, 如何平衡有限资源, 在满足任务时效性要求的同时, 保障无人机群整体效能最大化, 是任务分配环节必须突破的关键难题。在实际任务执行进程里, 无人机群同样面临任务优先级动态演变的难题。举例来说, 应急救援场景下, 受灾区域状况若发生改变, 原本优先级较低的物资投送任务, 可能因人员伤亡加剧而成为首要任务, 这就要求系统拥有快速响应和重新规划的能力。与

此同时,不同任务对无人机的性能组合需求存在显著差异,部分任务需要无人机具备长续航能力,还有些任务则对传感器精度要求极高,如何将有限的无人机资源与多样化任务需求进行精准适配,成为一道难关。另外,多机协同任务中的任务关联性也不容小觑,一项侦察任务的完成质量,会直接影响后续打击任务的执行效果,这种任务间的强耦合特性,使得任务分配的复杂程度进一步提升。

2.3 航路规划困难

动态复杂环境给无人机群航路规划带来诸多棘手难题。在自然环境层面,多变的气象条件构成首要挑战:强风不仅改变无人机飞行阻力与能耗,还可能致使飞行姿态失控;暴雨环境下,雨水附着于无人机传感器表面,造成数据采集偏差,同时降低电机等关键部件绝缘性能。复杂地形带来的威胁同样显著,山区起伏的山峦与峡谷形成天然屏障,城市中林立的高楼构成密集障碍,无人机既要规避碰撞风险,又需避免航线迂回导致任务延误。高原地区空气稀薄,会降低无人机旋翼升力效率,迫使飞行高度与速度重新规划。

人为划定的禁飞区、临时管制空域进一步压缩航路选择空间,无人机需提前识别并规划绕行路径。空中交通环境日益复杂,民航航线、其他飞行器活动区域都要求无人机群精确避让,避免空中碰撞事故。而实际任务执行过程中,目标位置变更、优先级调整等动态变化频繁发生,例如侦察任务中发现新目标,或打击任务临时调整攻击顺序,都需要航路规划系统迅速响应,在短时间内重新计算出安全且高效的航线。

传统航路规划方法多基于预设静态模型,难以适应环境的动态变化与任务的实时需求。例如遗传算法在大规模解空间搜索时存在计算耗时过长问题,难以满足突发情况的快速响应需求;人工势场法在复杂场景下易陷入局部最优解,导致无人机群在障碍物密集区域无法找到可行路径。这些技术瓶颈使得无人机群在复杂环境下的航路规划,成为制约其高效协同作业的关键障碍^[4]。

2.4 环境适应性挑战

当面临复杂且不断动态变化的局面,多机协同调度系统存在突出的环境适应问题,各类环境因子相互约束关联,使得集群响应机制在时效性和精准度上出现不足,强烈的温差变化会影响无人机框架材料物理参数,甚至导致控制系统信号失真,使系统可靠性下降。而无人机视觉系统在光照变化时易出现识别误差,造成侦察结果与任务实施有偏差,沙尘、含湿量等环境参数,会侵害无人机的机体结构,加快零部件老化的步伐,提升

设备失效的概率,多变环境里未明确的扰动因素与紧急情况,要求无人机集群具备先进的自主学习与快速决策技能,对于未预先编写程序的突发场景,要实时追踪环境参数,智能改变运行配置和行动策略,实现这种高难度、多层面的环境自适应,对现有技术而言仍是棘手挑战。

3 应对动态复杂环境挑战的多智能体协同控制策略

3.1 通信可靠性保障策略

为应对动态复杂环境下无人机群调度通信可靠性难题,可构建多层次通信保障体系。引入软件定义网络(SDN)架构,将网络控制平面与数据转发平面分离,通过集中式控制器实现通信网络资源的灵活调配。当某一频段受电磁干扰时,系统可基于实时监测数据迅速切换至备用信道,使指令与信息传输不被中断。冗余通信链路设计则为无人机群提供多路径数据交互能力,无人机同时与多个节点建立连接,即便部分链路因地形遮挡出现中断,也能自动切换至其他可用路径完成数据交互,大幅降低信号衰减带来的影响。

自组织网络技术赋予无人机群自主适应环境变化的能力,无人机可依据环境变化动态调整通信网络拓扑结构。当网络拓扑频繁改变时,各节点凭借分布式算法自主发现新连接路径,保障网络通信的连续性与稳定性。人工智能算法的深度应用,为通信可靠性提供智能防护。通过对通信数据的实时监测与分析,系统可提前预判链路异常风险,一旦检测到潜在问题,立即采取纠错编码、数据重传等措施,有效减少指令传输延迟与数据丢失,从架构设计、路径规划到智能防护,全方位为无人机群协同作业筑牢通信根基。

3.2 高效任务分配策略

构建动态任务分配机制可有效提升无人机群作业效率。打造集成多要素的评估模型是核心基础,将任务紧急程度、无人机续航里程、载荷适配特性等关键指标纳入考量,对侦察、打击、运输等不同类型任务进行精细化量化分析。通过该模型可快速比对任务需求与无人机个体性能差异,实现执行主体的精准匹配,避免出现“小马拉大车”或资源闲置的情况。

分布式决策算法赋予无人机自主应变能力,任务执行期间每架无人机都能实时感知环境变化与自身状态。当遭遇突发状况,如任务目标转移或新威胁出现,无人机可基于内置算法自动调整任务优先级,并通过通信链路与其他成员重新协商分配方案,这种自主决策模式能有效规避环境不确定性导致的方案失效问题。

针对多任务资源竞争的现实困境,资源动态调配策

略发挥关键作用。依据任务推进过程中的实际资源消耗情况,对无人机携带的能源储备、数据存储空间等资源进行灵活调配。优先保障优先级高且时效性强的任务资源供给,同时兼顾整体资源使用效率,在确保任务按时完成的前提下,最大限度提升无人机群的整体作战效能,最终实现复杂环境下任务分配的高效性与灵活性。

3.3 智能航路规划策略

应对动态复杂环境的航路规划难题,需构建智能化航路规划体系。搭建融合气象条件、地形地貌、禁飞区域等多要素的环境感知模型,为无人机群提供全面准确的航路规划基础数据,让其在规划航线时充分考虑强风、暴雨等气象因素对飞行阻力和能耗的影响,合理规划高山、建筑物等障碍物。采用改进的强化学习算法,使无人机群在规划航路时能综合权衡距离、能耗、安全性等多重因素,生成兼顾时效性与安全性的最优航线方案。同时,赋予无人机群实时动态调整能力,当任务目标发生变化或遭遇突发禁飞区、其他飞行器活动区域时,可基于环境感知信息和自身状态,迅速重新规划航路,在保障飞行安全的前提下,及时调整航线以满足任务需求,突破传统航路规划方法的局限性。

3.4 环境适应优化策略

针对动态复杂环境下的环境适应性难题,可从多维度实施优化策略。材料研发是提升环境适应能力的物质基础,通过研制新型防护材料构建无人机机体防护体系,采用纳米涂层技术对机身进行处理,在沙尘环境中可有效防止颗粒侵入机体内部,在高湿度环境下能隔绝水汽对机身的腐蚀。对电子元件舱进行特殊结构设计,利用相变材料增强散热与隔热性能,确保高温时元件不出现性能衰减,低温下仍能稳定运行。

传感器系统的优化是增强环境感知能力的关键。单一传感器在多变环境下存在性能短板,通过多传感器融合技术整合视觉、激光雷达、红外等多种类型传感器。在光照剧烈变化时,视觉传感器与红外传感器协同工作,避免因明暗差异导致目标识别错误;在烟雾弥漫环境中,激光雷达与超声波传感器互补,保障无人机对障碍物的精准探测,大幅提升环境感知的准确性与可靠性。

智能决策系统给无人机群增添动态适应的特性,系统以完善的历史环境数据和实时反馈信息为依据,运用机器学习模型开展深度训练,要是猛地遇到极端天气或者不明信号干扰,多无人机能够实时分析环境的变化特

征,立刻调整飞行姿态和速度;依据环境风险等级实时调整任务执行方案,自动调节传感采样频率和数据捕获逻辑,达成设备防护与逻辑判断的全流程改善,明显提升无人机群在干扰环境中的整体作业可靠性。

4 多智能体协同控制策略的拓展与展望

伴随人工智能技术的不断演变,多智能体协同控制策略在技术上不断深入、实践上日益多元,采用深度学习途径,能够增强无人机群在复杂工况中自主感知和判定环境的能力,凭借算法模型的迭代改进,提高通信的可靠程度,达成任务调度与航迹规划的智能管理。边缘计算的先进应用实践可让无人机在端侧对数据进行即时处理,减少对远程链路的依靠,提升系统的抗干扰能力,在应用领域上,除已有的行业,无人机群的应用边界正拓展到城市立体交通调度、海洋环境监测等新兴方向,为了适应不同任务的需求,协同控制策略需要不断改进,学科之间的交叉融合和跨域协同趋势将会增强,整合材料学、气象学等跨学科知识能提高无人机群体在恶劣环境下的综合水平,实现多智能体协同控制技术的逐步提升。

结论

此研究聚焦动态复杂场景下无人机集群调度的多智能体协同控制,结合对现实瓶颈的分析,围绕通信协调、任务分配逻辑、航路规划算法以及环境适应策略做优化设计,给出一套完整的协同控制实施办法,该办法可增强无人机编队在动态场景中的信号稳定度、执行效率、航迹规划科学性和环境适应程度,为无人机集群协同控制领域开创了创新之路,为应用场景的多元化和产业价值链的提升注入新活力,也为进一步研究搭建了良好基础。

参考文献

- [1] 万良田,王家帅,孙璐,等.面向复杂环境的集群无人机任务调度方法研究综述[J].信息对抗技术,2024,3(4):17-33.
- [2] 李杰,陈润丰,彭婷.面向网络化无人机集群的计算换通信分布式任务调度方法[J].国防科技大学学报,2023,45(4):45-54.
- [3] 王维平,王涛,李小波,等.一种基于模体的无人机集群智能任务规划方法[J].系统仿真学报,2018,30(4):1211-1220.
- [4] 贾维敏,杨龔,赵建伟,等.无人机蜂群通信感知一体化关键技术[J].国防科技,2023,44(3):88-95.