doi:10.11887/j.issn.1001-2486.25060024 http://journal.nudt.edu.cn

软件定义的无人机集群弹性组网架构

甘良棋[1,2],董 超[1,2*],朱小军[3],王 蔚[1]
(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院,江苏 南京 211106;
2. 南京航空航天大学 电磁频谱空间认知动态系统重点实验室,江苏 南京 211106;
3. 南京航空航天大学 计算机科学与技术学院,江苏 南京 211106)

摘 要:为了提升大规模无人机集群在软硬杀伤威胁下的持续任务能力,重点研究了集群的拓扑重构方法。针对节点失效问题,提出集中式-分布式混合控制架构下的控制权动态迁移机制,提升重构效率;并设计基于软件定义网络的弹性组网架构,融合意图驱动实现网络资源智能动态配置。通过仿真对比邻居自主补位和资源池动态调度双模态重构策略:当小规模节点损失时,邻居补位凭借本地决策优势,其平均重构时延较资源池调度缩短38.5%;然而,当失效节点增多时,集中式-分布式控制器组合的重构时间最短;尤其在持续电磁干扰环境下,该组合策略优势显著,较纯分布式方案时延缩短18.03%。研究成果为大规模无人机集群拓扑重构提供了一定的理论支撑和实践参考。

关键词:无人机集群;软硬杀伤;软件定义网络;拓扑重构;意图驱动
中图分类号:TN929.5;V279 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2026)04-089-08

Software-defined resilient networking architecture for UAV swarms

Gan Liangqi[1,2], Dong Chao[1,2*], Zhu Xiaojun[3], Wang Wei[1]
(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 3. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To enhance the sustained mission capability of large-scale UAV(unmanned aerial vehicle) swarms facing both soft and hard-kill threats, this research focused on swarm topology reconstruction methods. Addressing the issue of node failures, a dynamic control authority migration mechanism under a centralized-distributed hybrid control architecture was proposed to improve reconstruction efficiency; concurrently, an SDN(software-defined network)-based elastic networking architecture was designed, integrating intent-driven principles to enable intelligent and dynamic configuration of network resources. Simulation comparisons were conducted between dual-mode reconstruction strategies: neighbor autonomous compensation and resource-pool dynamic scheduling. When facing small-scale node loss, neighbor compensation leverages its advantage in local decision-making, reducing the average reconstruction latency by 38.5% compared to resource-pool scheduling. However, as the number of failed nodes increases, the combined centralized-distributed controller strategy achieves the shortest reconstruction time; notably, under persistent electromagnetic interference environments, this combined strategy demonstrates significant advantages, reducing latency by 18.3% compared to a purely distributed approach. This research provides theoretical support and practical reference for topology reconstruction in large-scale UAV swarms.

Keywords: unmanned aerial vehicle swarms; soft and hard kill; software-defined network; topology reconfiguration; intent-driven

在“分布式杀伤”(distributed lethality)与“马赛克战”(mosaic warfare)等新型作战理念的驱动下,战场态势正加速向分布式、异构化方向演进。无人智能集群系统依托其动态部署能力、多域协同及自主决策等优势,已成为重构未来战场博弈规则的重要技术[1]。然而,现有集群系统在复杂

收稿日期:2025-06-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61931011)
第一作者:甘良棋(1992—),男,湖北咸宁人,博士研究生,E-mail:liangqi-gan@nuaa.edu.cn
***通信作者**:董超(1980—),男,山东滨州人,教授,博士,博士生导师,E-mail:dch@nuaa.edu.cn
引用格式:甘良棋,董超,朱小军,等. 软件定义的无人机集群弹性组网架构[J]. 国防科技大学学报,2026,48(4):89-96.
Citation: Gan Liangqi, Dong Chao, Zhu Xiaojun, et al. Software-defined resilient networking architecture for UAV swarms[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(4): 89-96.

环境下存在抗毁性差和无人机节点易损毁引发集群拓扑结构瓦解的风险,严重威胁任务的连续性与体系稳定性。为此,亟须解决无人机集群在复杂环境下的任务鲁棒性。

当前无人机集群控制架构研究主要围绕集中式与分布式展开理论探索与工程实践。集中式架构依托全局信息感知的中央控制器,通过全局优化算法实现全局优化,但是抗毁性差[2]。分布式控制器基于局部交互实现群体涌现行为,更加符合工程需求[3]。文献[4]指出目前系统多依赖预设的编队规则,在动态环境中面临重构困难等挑战。文献[5]针对多个软件定义网络(software-defined network, SDN)控制器之间信息协调困难,提出一种SDN控制器分级部署方案,将控制器分为全局控制器、区域控制器及协同控制器三级。文献[6]针对SDN控制器采用集中式部署方案,提出一种负载均衡算法,利用OpenFlow协议设计了无线场景下的SDN框架。文献[7]提出一种基于禁忌搜索的无人机定位算法,有效提升了网络吞吐量。文献[8]提出了软件定义无人机网络(software-defined unmanned aerial vehicle network, SD-UAVNet)体系架构,通过考虑无人机位置、运动轨迹和剩余电量等参数,实现实时视频服务和避障。文献[9]提出一种基于集群的控制平面消息管理软件定义飞行自组织网络。在网络中设置一个集中控制器,可以在不需要控制信息下发的情况下对无人机状态信息进行预测。以上都是采用集中控制器实现网络管理,缺点是存在网络规模限制的局限性等挑战。文献[10]提出基于移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)融合软件定义的飞行自组网(software-defined flying ad-hoc network, SD-FANET)架构的云边端模型,该模型分为云服务器层、MEC服务器层及用户终端层。文献[11]提出一种基于SDN的无人机辅助车载计算卸载优化框架,以实现最小化车载计算任务。文献[12]提出一种基于SDN架构和区块链技术的分布式无人机飞行自组网(flying ad-hoc network, FANET)。具体做法是利用抵御拜占庭攻击的算法,有效防止分布式控制平面中部分控制器失效导致网络瘫痪。

文献[13]提出一种SDN控制器和协同控制器的新型分簇飞行自组网(flying ad-hoc sensor network, FASNET)架构。文献[14]强调通过增强情境感知(situation awareness)提升响应速度,避免复杂认知模型的计算开销。文献[15]展示了将模型预测结果整合到决策中,支持异构集群的动态场景适应性。文献[16]提出分层多智能体强化学习(hierarchical multi-agent reinforcement learning, HMARL)框架,将异构无人机集群的协同决策解耦为目标分配中的混合注意力Q网络(hybrid attentive deep Q-network, HADQN)与协同攻击中的独立优势近端策略优化(independent advantage proximal policy optimization, IAPPO)两个子问题,通过动态调整策略实现分布式协作。文献[17]提出异构无人机集群通过深度态势感知与分布式决策机制,有效提升作战效能,并运用SDN构建时敏型战术边缘云架构。文献[18]提出基于链路位置的SDN数据平面故障检测方法,设计了主动式链路故障恢复(link backup and recovery, LBR)方案,通过分治策略设计备份路径,减少恢复时延34%~44%,并优化备份资源利用率。同时提出一种无人机集群智能化指挥控制概念模型,该模型通过集成人工智能技术加速“观察—调整—决策—行动”(observe-orient-decide-act, OODA)环,实现自主决策与动态流量控制。文献[19]基于对象过程方法论(object-process methodology, OPM)的无人机集群智能化指挥控制概念模型提出了一种分层控制架构,将SDN控制器分为顶层概念模型(策略生成)、SD1级放大模型(动态任务分解)和SD2级子过程模型(实时路径优化)。但是,以上都是基于集中控制的方式,存在系统信息上报缓慢,网络拓扑重构困难等缺点。

在“空-天-低空-陆地-海-网”多维协同组网中,无人机作为末端高动态移动设备,对于任务现场的信息收集与指令执行起到关键作用。“空-天-低空-陆地-海-网”多维协同组网架构如图1所示。

陆地域,即城市/城镇通信基站、车载移动节点组成的动态自组网;低空域,即无人机集群、飞艇及热气球构成的弹性中继网络节点层;天基域,即民航飞机、飞艇与战机等高速平台搭载的定向通信模块;太空域,即低轨卫星编队与高轨卫星协同的广域覆盖网络;海域,即各类舰艇组成的编队。该架构通过分布式共识协议与动态拓扑重构算法实现跨域资源调度,面对复杂环境时可构建抗毁性强、低时延的通信“一张网”。当末端无人机节点失效时,集中式控制器和分布式控制器协同处理,快速实现末端无人机集群网络拓扑重构。相较于传统分布式网络,具备以下优势:

1)强鲁棒性:部分节点失效时,可通过邻居智能体的自主任务接管机制快速恢复拓扑。

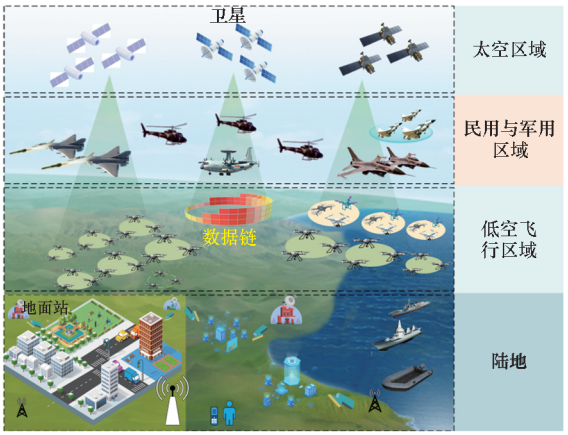


图 1　“空 – 天 – 低空 – 陆地 – 海 – 网”多维协同组网架构

Fig. 1　Multidimensional collaborative networking architecture integrating "air-space-low altitude-land-sea-network domains"

2)高可靠性:基于强化学习的信道分配策略动态优化网络吞吐量。

3)跨域协同:“空 – 天 – 低空 – 陆地 – 海 – 网”多维协同组网,多源数据通过智能体协商实现无缝融合与按需分配。

无人机集群网络中,无人机节点需要同时承担数据转发与动态路由交换任务,然而受限于机载能源与算力资源不足,传统分布式路由协议面临计算开销大、收敛效率低的问题。SDN 通过以下机制可有效突破此限制:

1)控制层 – 转发解耦架构:将复杂路由逻辑抽象至集中式控制器,无人机节点仅需执行轻量化转发代理功能,有效降低本地计算负载。

2)全局资源智能管控:SDN 控制器实时采集全网拓扑状态、链路质量及节点剩余能量等多维数据,基于强化学习算法动态生成最优路由策略,实现跨节点流量调度与路径优化,完成拓扑快速重构。

3)动态适应性增强:通过可编程接口实现流表更新,支持节点损耗环境下的路由快速重构。为无人机集群提供高可靠、低能耗的智能弹性组网能力。

1　无人机集群组网应用

无人机编队飞行(coordinated formation flight, CFF)通过局部动态感知与分布式协同控制,实现编队稳定、动态重构及自适应避障,其典型应用于环境监测、灾害应急响应与精准农业管理等场景,如图 2 所示。异构无人机集群搭载多光谱传感器与气体检测仪,通过对待检测的森林与河流等进行立体化扫描,实时生成植被覆盖率、水质参数及碳排放值等数据,为环境治理提供全域动态监测能力。在灾区通信中断场景下,无人机集群快速构建临时通信中继网络,为保障网络通畅提供有力手段。比如,2023 年北京昌平洪灾时,中国电信陕西无线机动通信局使用系留式无人机搭载 4G 基站,在百米高空悬停 12 h,通信半径覆盖 3 km,支持 200 余名用户语音和数据通信,突破地形限制快速搭建临时网络[20]。同年,河北涿州洪灾时,中国移动启用中型无人机应急通信系统,单机可实现 30 km^2 有效信号覆盖,支持 200 个用户并发业务,为灾区指挥部和热源密集区提供基础通信服务。高效适应洪涝、山地等复杂地形,快速响应通信恢复任务需求[21]。2021 年,河南暴雨灾害时[22],中国航空工业集团“翼龙 – 2H 应急救灾型”无人机在灾区上空盘旋,恢复 50 km^2 内通信覆盖,并构建了 15 000 km^2 的临时网络覆盖区域,为指挥救援和通信提供关键支持。



图 2　软件定义网络的无人机集群组网应用

Fig. 2　Software-defined networking application for UAV swarms

2　网络资源动态智能配置

为了收集无人机集群系统网络的资源信息,提出一种 SDN 与意图驱动网络融合赋能的无人机集群弹性组网架构。通过控制平面与数据平面解耦,将应用层任务意图自动转化为控制层的策略;基于实时收集的全局资源节点位置、链路质量及剩余能量等信息,动态生成拓扑重构方案,实现网络资源动态智能配置。SDN 与意图驱动网络融合赋能的无人机集群弹性组网架构包含三层协同控制体系。

1)控制层对应决策层,采用集中式 - 分布式混合控制模式,由 SDN 控制器动态生成网络策略并优化流量路径,结合全局意图与实时网络状态生成控制指令。其中,关键在于其北向接口接收到的意图,在意图编译器中完成意图解析,包含执行的任务和执行的时间等;之后,进行情景化解码和任务规划,包含网络信道资源分配和航迹规划等;然后动态生成配置,包含各传感器配置和解析任务指令;最后,在子意图解析阶段,部署于无人机节点的智能策略映射引擎与中心意图解析引擎构成协同转译机制,通过融合网络拓扑状态、资源负载及环境传感器数据对子意图语义进行动态适配,生成面向集群动态拓扑重构的网络配置策略与协同编队指令,最终通过轻量化南向接口协议栈实现策略下发,形成“意图感知—决策—执行”的闭环控制链路,支持无人机节点在动态环境下自主完成策略适配与分布式协同。

2)管理平面负责系统的自动化配置、状态监控及维护任务,通过多维度数据采集实现网络健康度评估与异常自愈。

3)数据平面基于可编程转发规则执行物理层流量调度,实现策略响应与自适应报文处理。为应对天气监测、智慧农业、环境监测与救灾救援等场景,无人机集群根据控制层下发的策略,即通过异构无人机集群进行网络路径和编队重构,以持续完成任务。

通过 SDN 与意图驱动的融合,构建“意图感知—决策—执行”的闭环,可充分利用现有网络资源,实时收集节点算力、信道资源及剩余能量等资源信息,结合应用层任务意图动态优化拓扑结构,改进传统静态资源分配瓶颈,实现网络资源利用率最大化,达成资源池的全局动态调度。软件定义的无人机集群弹性组网架构如图 3 所示。

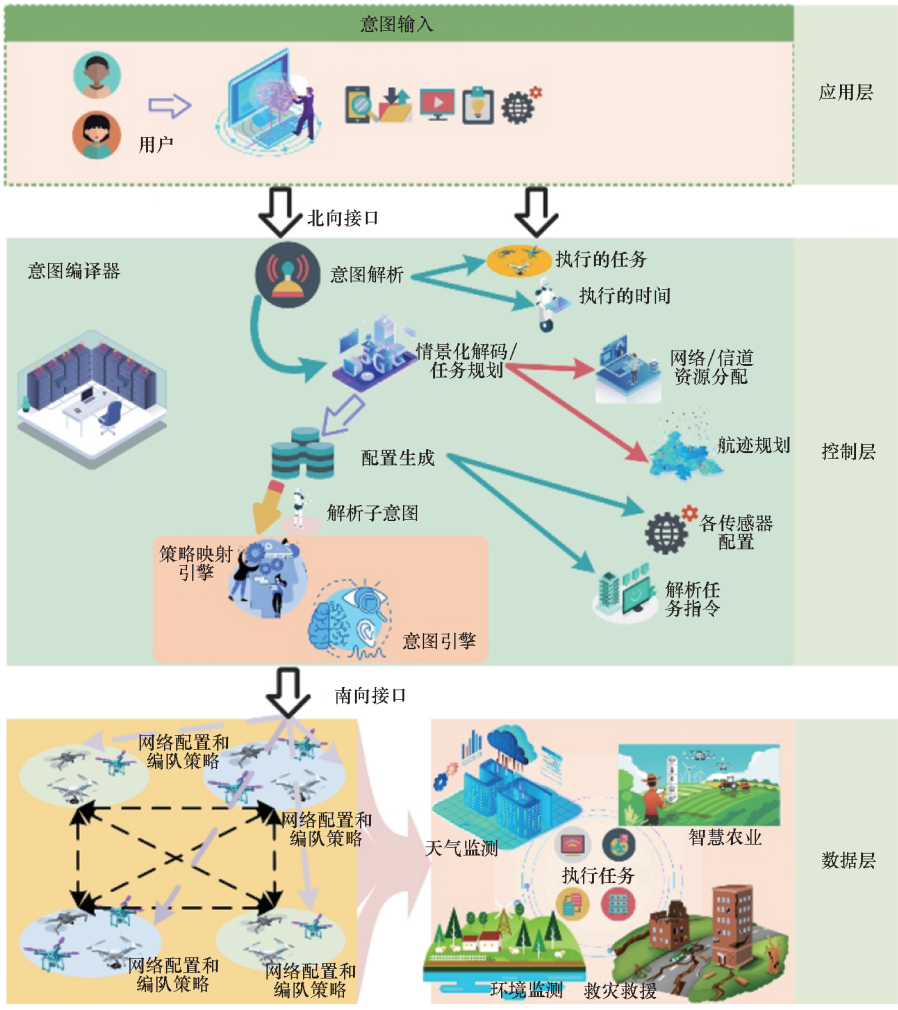


图 3 软件定义的无人机集群弹性组网架构

Fig. 3 Software-defined resilient networking architecture for UAV swarms

系统采用意图驱动技术处理用户的自然语言输入,自然语言指令经过意图编排器进行关键字提取与语义挖掘,解析生成目标网络指令。为提升意图识别精度,设计闭环反馈机制。当下发意图至意图引擎后,通过负载态势感知模块实时监测资源状态,经意图保证流程验证可行性,最终将关键数据反馈回意图编排器。编排器同步与 UAV－1、UAV－2、UAV－3 等集群节点保持实时数据交互,确保网络指令动态适配实际环境。其中,完整意图输入流程如图 4 所示。



图 4　意图输入流程

Fig. 4　Intent input process

用户新任务指令经北向接口接入控制层后,由意图编译器完成双重优化,实施资源分配优化和航迹规划优化,解析输出任务主体、执行时序与配置参数;优化指令由 SDN 控制器分发至传感器网络,并驱动 UAV 集群节点执行任务;同时 SDN 控制器实时采集无人机集群的状态数据,且将节点信息反馈至意图编译器,实现策略实时校准。自然语言输入处理流程如图 5 所示。

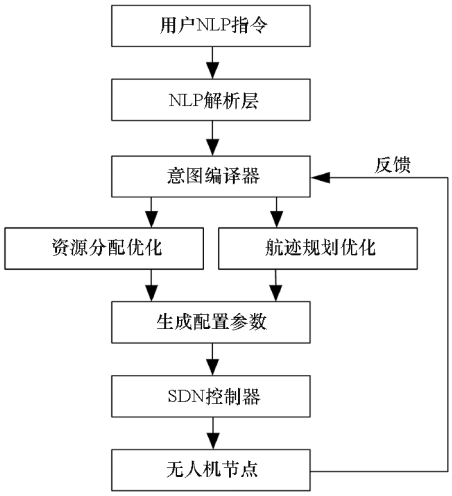


图 5　自然语言输入处理流程

Fig. 5　Natural language input processing flow

为了提升意图识别的准确性,系统设计了一套闭环反馈机制。当意图编译器下发初始意图后,依次经过策略映射引擎进行逻辑转化、负载态势感知模块实时监测资源状态,并由意图保证流程验证可行性;最终处理结果将反馈至意图编排器,形成持续化的意图执行闭环。意图反馈处理机制如图 6 所示。

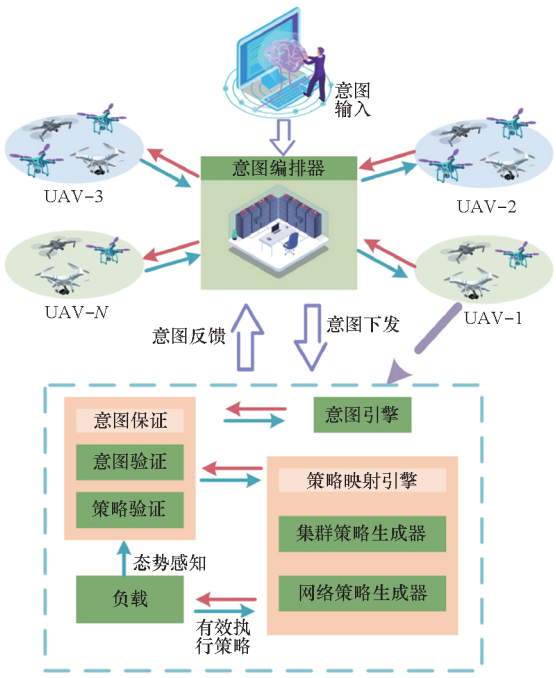


图 6　意图反馈处理机制

Fig. 6　Intent feedback handing mechanism

3　集中式－分布式控制权动态迁移机制

集中式－分布式控制权动态迁移机制是一种结合集中控制全局优化能力与分布式控制灵活性的混合架构,通过 SDN 实现控制平面与数据平面解耦,根据实时任务需求、网络状态或故障场景动态切换控制权归属,实现高效韧性的无人机集群管理。

在“空－天－低空－陆地－海－网”多维协同组网架构中,低空无人机集群作为立体化信息网络的动态末端网络,承担着“端－用户”与“边缘计算中枢”双重使命。无人机集群作为“端”,在遭受到软硬杀伤时,传感器通过电磁频谱监测与链路质量分析实时监测节点失效态势。中心控制器进行网络韧性动态评估,触发基于多目标拓扑重构算法,将应急决策权限分级迁移至存活节点,构成分布式智能体联盟。当传感器检测到部分网络节点失效时,中心控制器基于网络资源评估结果,对整个网络系统进行统一控制,且立即激活资源池备用无人机,进行网络资源全局调度。备用无人机节点接收到执行任务指令后,依次进行航迹规划、根据任务指令及时飞抵目标位置,开展目标指令的任务实施,有效保证网络拓扑的完整性,为任务的可持续性提供有力保障。当传感器检测到大规模网络节点失效时,中心控制器基于实时资源评估结果,动态将局部决策权迁移至邻近无人机边缘计算节点,或者将控制权迁移至

分布式控制器。目标无人机立即激活其搭载的分布式智能控制器，通过融合感知节点状态、信道质量及任务优先级等数据，生成实时态势图谱，快速生成拓扑重构方案，实施动态路由优化与资源重分配，在确保网络连通性的同时维持最低能耗路径，有效维持任务的延续性。

通过软件定义网络实现控制平面与数据平面解耦，末端无人机集群依托空 - 天资源调度指令及地面任务需求等，在集中式 - 分布式混合控制架构下建立控制权动态迁移机制，完成网络拓扑重构以均衡通信效能与机动能耗。针对节点失效，建立分类响应机制：小规模失效时，优先从邻居节点（邻近子群）或混合资源池快速调取无人机进行补位；大规模失效时，中心控制器依据全局资源评估，按功能精准匹配，侦察资源池补位侦察节点、干扰资源池补位干扰节点及打击资源池补位打击节点，实现大规模节点失效后无人机集群拓扑重构。

此外，支持子集群间协同重构。当某个子集群因规模较小或能力不足难以满足当前任务需求时，系统启动“邻居节点补位重构”机制，即依据任务优先级和空间邻近原则，动态调度地理位置最近的相邻子集群中的无人机资源，快速补充至该子集群，以增强其任务执行能力。当子集群 A、子集群 B 及子集群 C 组成的大集群中，子集群 A 和子集群 B 抵近任务边缘，但能力不足时，可调度远处子集群 C 的无人机就近跨集群补位，实现子集群补位重构，提升整体网络的韧性。资源池动态调度模型如图 7 所示。

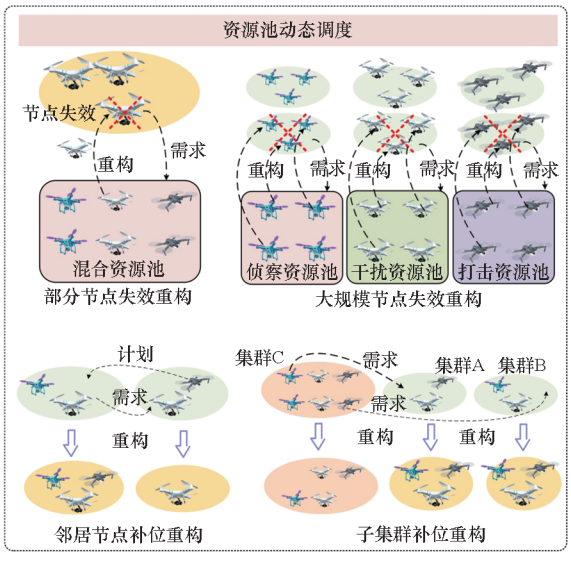


图 7 资源池动态调度

Fig. 7 Resource pool dynamic scheduling

4 复杂任务场景下拓扑重构仿真

仿真环境使用 AirSim 插件构建无人机集群仿真的运行环境，使用 PyCharm 编写程序代码，使用 msgpack-rpc 网络通信协议实现跨语言通信，使用 EXata 网络仿真软件构建网络拓扑。

实验一：在网络拓扑动态重构机制中，当检测到邻近无人机节点失效，如图 8 所示，具备多维度网络参数感知能力的相邻无人机节点将自主触发分布式路由修复算法。通过实时评估链路质量、节点负载及空间位置等参数，系统采用自适应拓扑调整策略。由最优候选节点快速接管失效节点的路由转发职能，同时启动多跳接力机制，在局部区域内完成链路重构。这种基于动态权值评估的分布式决策算法，通过最优路径维持端到端通信可靠性，并在重构过程中同步优化网络负载均衡与冗余路径规划。

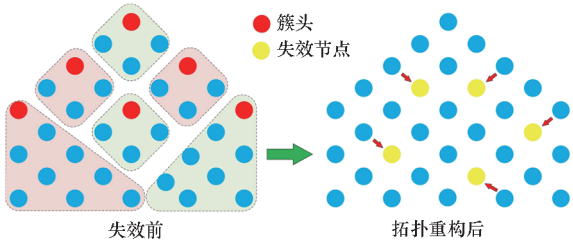


图 8 部分节点失效时拓扑重构

Fig. 8 Topology reconfiguration under partial node failures

实验二：当检测到大规模无人机节点失效，如图 9 所示，预部署的备用资源池无人机将基于动态优先级算法启动弹性资源调度。系统通过多层级故障检测模块同步分析网络连通度、业务优先级及能耗约束，触发协同式拓扑重构策略。由资源池内匹配度最高的冗余节点无人机集群接替失效节点，采用全局 - 局部联动的跨层优化方法，实现快速响应。该过程深度融合分布式决策与集中式调度优势，通过多目标优化算法在拓扑重构中同步完成负载再分配、能耗均衡及多重路径冗余配置，实现动态资源最优配置。

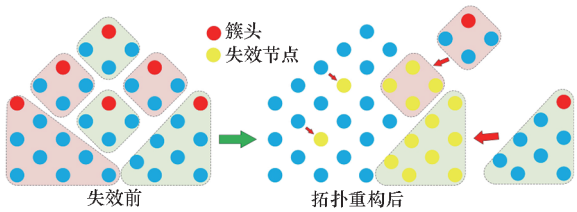


图 9 大规模节点失效时拓扑重构

Fig. 9 Topology reconfiguration under large-scale node failures

在网络拓扑重构时延对比实验中,针对部分节点失效与大规模节点失效两种场景,分别采用邻居无人机自主补位和资源池动态调度两种重构策略进行仿真分析,如图 10 所示。实验结果表明:在损失相同数量节点的条件下,基于本地实时感知的邻居补位机制凭借分布式决策优势,平均重构时延较资源池调度模式缩短了 38.5%。经分析,由于资源池调度需经历全局拓扑感知、资源匹配计算及跨层部署等流程,尤其在三维空间路径规划阶段产生的多维约束求解时时延显著增加。仿真数据揭示了分布式局部重构与全局调度在时间敏感性上的本质差异,为后续优化混合式拓扑控制算法提供了量化依据。

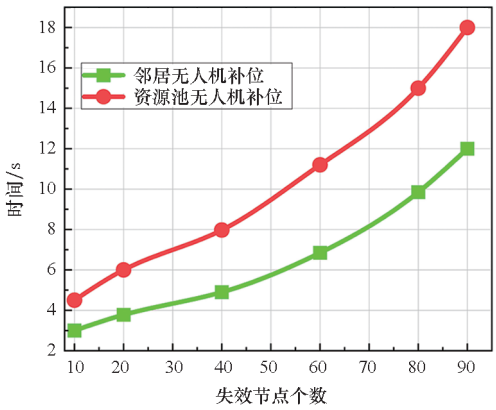


图 10　无人机补位拓扑重构时间

Fig. 10　UAV replacement topology reconstruction time

实验三:理想状态下且无持续电磁干扰时,模拟了节点失效后的控制权动态迁移机制,即轻量级任务由分布式边缘控制器处理,复杂任务迁移至集中式控制器处理,大规模任务则启动集中式 - 分布式控制器组合处理。为统一条件,仿真分别测试了 10、20、40、60 及 80 个节点失效时,三种控制方式的重构耗时对比,如图 11 所示。结果表明,随着失效节点增加,集中式 - 分布式控制器组合的重构时间最短;当失效节点达到 40 个时,三种控制方式的重构时间趋于相近。

实验四:在持续电磁干扰环境下,基于实验三的控制权迁移机制进行仿真,仿真结果如图 12 所示。结果表明,相较于理想状态,持续电磁干扰导致拓扑重构时间整体延长。但是,采用集中式 - 分布式组合控制策略时,拓扑重构时间为 18 s,较纯分布式方案缩短 18.03%,验证了该混合架构在干扰环境下的最优时效性。

5　结论

本文研究无人机集群遭受软硬杀伤引发节点失效场景下的网络拓扑重构机制。针对部分节点失效和大规模节点失效两类问题,在软件定义网络架构基础上,进一步提出了集中式 - 分布式混合控制架构下的控制权动态迁移机制,有效提升拓扑重构效率。仿真实验结果表明:在相同节点损失条件下,基于本地实时感知的邻居补位机制凭借分布式决策优势,平均重构时延较资源池调度模式缩短了 38.5%;在持续电磁干扰环境下,集中式 - 分布式组合控制策略重构耗时较纯分布式方案缩短 18.03%,体现了混合架构抗干扰优势。

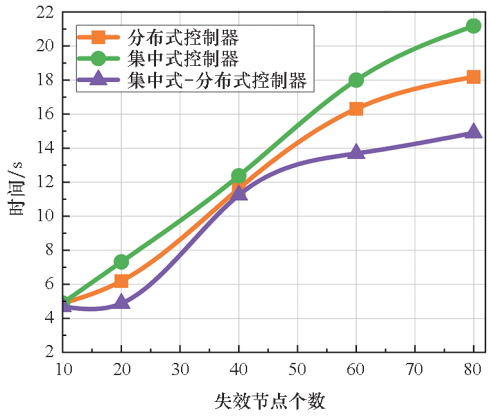


图 11　理想状态下控制权动态迁移拓扑重构时间

Fig. 11　Control handover time for dynamic topology reconstruction under ideal conditions

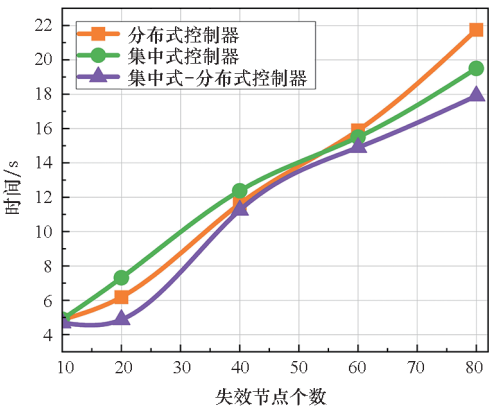


图 12　干扰持续控制权动态迁移拓扑重构时间

Fig. 12　Topology reconstruction time during dynamic control handover under persistent interference

参考文献(References)

[1]　Singh J, Kaur N. A review of swarm intelligence and its applications to cloud computing [C]//2025 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), 2025: 260 - 266.

[2]　费陈, 郑晗, 赵亮. 无人机集群控制技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2023, 43(3): 45 - 55.
Fei Chen, Zheng Han, Zhao Liang. Research on UAV cluster

control technology [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2023, 43(3): 45 – 55. (in Chinese)

[3] Wang Jianan, Wang Chunyan, Xin Ming, et al. Cooperative control of multi-agent systems [M]. London: Academic Press, 2020.

[4] Su Lingfei, Lin Zhi, Hua Yongzhao, et al. Resilient time-varying formation optimal tracking for heterogeneous multi-agent systems with coupled constraints [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 15274 – 15285.

[5] 潘乐炳, 陈炜民, 贾继鹏, 等. SDN 技术在战术 MANET 中的应用[J]. 电讯技术, 2019, 59(5): 532 – 537.
Pan Lebing, Chen Weimin, Jia Jipeng, et al. Application of SDN in tactical MANET [J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(5): 532 – 537. (in Chinese)

[6] Singhal C, Rahul K. Efficient QoS provisioning using SDN for end-to-end data delivery in UAV assisted network[C]//2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), 2019: 1 – 6.

[7] Rahman S U, Kim G-H, Cho Y-Z, et al. Positioning of UAVs for throughput maximization in software-defined disaster area UAV communication networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2018, 20(5): 452 – 463.

[8] Zhao Zhongliang, Cumino P, Souza A, et al. Software-defined unmanned aerial vehicles networking for video dissemination services [J]. Ad Hoc Networks, 2019, 83: 68 – 77.

[9] Cumino P, Maciel K, Tavares T, et al. Cluster-based control plane messages management in software-defined flying ad-hoc network[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(1): 67.

[10] Peng Haixia, Ye Qiang, Shen Xuemin. SDN-based resource management for autonomous vehicular networks: a multi-access edge computing approach [J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(4): 156 – 162.

[11] Zhao Liang, Yang Kaiqi, Tan Zhiyuan, et al. A novel cost optimization strategy for SDN-enabled UAV-assisted vehicular computation offloading[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(6): 3664 – 3674.

[12] Hu Ning, Tian Zhihong, Sun Yanbin, et al. Building agile and resilient UAV networks based on SDN and blockchain[J]. IEEE Network, 2021, 35(1): 57 – 63.

[13] Qi Weijing, Song Qingyang, Kong Xiangjie, et al. A traffic-differentiated routing algorithm in flying ad hoc sensor networks with SDN cluster controllers [J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(2): 766 – 790.

[14] Hepworth A J, Hussein A S M, Reid D J, et al. Contextually aware intelligent control agents for heterogeneous swarms[J]. Swarm Intelligence, 2024, 18(4): 275 – 310.

[15] Gu Yue, Hunt W, Archibald B, et al. Successful swarms: operator situational awareness with modelling and verification at runtime[C]//2023 32nd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2023: 541 – 548.

[16] Yue Longfei, Yang Rennong, Zuo Jialiang, et al. Unmanned aerial vehicle swarm cooperative decision-making for SEAD mission: a hierarchical multiagent reinforcement learning approach[J]. IEEE Access, 2022, 10: 92177 – 92191.

[17] Gao Yang, Li Dongsheng. Unmanned aerial vehicle swarm distributed cooperation method based on situation awareness consensus and its information processing mechanism [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 188: 105034.

[18] 蓝俊伟, 张奇支, 郑伟平, 等. 基于链路位置的 SDN 数据平面故障恢复方法[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2023, 55(5): 111 – 120.
Lan Junwei, Zhang Qizhi, Zheng Weiping, et al. A failure recovery algorithm of SDN data plane based on link location[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2023, 55(5): 111 – 120. (in Chinese)

[19] 周欢欢, 赵国林, 都兴霖. 基于 OPM 的无人机集群智能化指挥控制概念模型[J]. 指挥控制与仿真, 2025, 47(1): 1 – 9.
Zhou Huanhuan, Zhao Guolin, Du Xinglin. Conceptual model of intelligent command and control for UAV cluster based on OPM[J]. Command Control & Simulation, 2025, 47(1): 1 – 9. (in Chinese)

[20] 中国电信陕西无线电机动通信局搭建空中临时基站科技手段助力背景受灾区域复联[EB/OL]. (2023 – 08 – 16)[2025 – 06 – 01]. https://www.ixian.cn/thread – 1826717 – 1 – 1.html.
China telecom Shaanxi radio mobile communications bureau deploys airborne temporary base stations using advanced technology to restore communication connectivity in disaster-affected areas[EB/OL]. (2023 – 08 – 16)[2025 – 06 – 01]. https://www.ixian.cn/thread-1826717 – 1 – 1.html. (in Chinese)

[21] 甘良棋, 董超. 基于多智能体协同的无人机编队控制研究[J]. 计算机科学, 2024, 51(11A): 240100105.
Gan Liangqi, Dong Chao. Study on unmanned aircraft formation control based on multi-agent collaboration [J]. Computer Science, 2024, 51(11A): 240100105. (in Chinese)

[22] 一架无人机就恢复河南灾区 50 km^2 通信:“翼龙”成功助小镇通网 5 小时 [EB/OL]. (2021 – 07 – 22)[2025 – 06 – 01]. https://blog.ytso.com/industrynews/28554.html.
A single drone restores 50 km^2 of communication coverage in Henan disaster zone: "Wing Loong" UAV successfully provides 5-hour internet connectivity to small town. [EB/OL]. (2021 – 07 – 22)[2025 – 06 – 01]. https://blog.ytso.com/industrynews/28554.html. (in Chinese)