

控制与决策

Control and Decision

考虑高阶拓扑结构的无人蜂群任务协同能力研究

吴鸿乾, 邓宏钟, 李际超, 吴成星

引用本文:

吴鸿乾, 邓宏钟, 李际超, 等. 考虑高阶拓扑结构的无人蜂群任务协同能力研究[J]. *控制与决策*, 2025, 40(5): 1551-1560.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0710>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于深度学习的仿生集群运动智能控制](#)

Intelligent control of bionic collective motion based on deep learning

控制与决策. 2021, 36(9): 2195-2202 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0071>

[基于分解的多目标多因子进化算法](#)

A multiobjective multifactorial evolutionary algorithm based on decomposition

控制与决策. 2021, 36(3): 637-644 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0525>

[天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法](#)

Planning model and parallel competing memetic algorithm for space-near space-air based cooperative earth observation missions

控制与决策. 2021, 36(3): 523-533 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0732>

[带峰值能耗约束流水线调度的协同群智能优化](#)

Cooperative memetic optimization for flowshop scheduling with peak power consumption constraint

控制与决策. 2021, 36(10): 2350-2358 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0429>

[基于知识粒度特征的多目标粗糙集属性约简算法](#)

Multi objective rough set attribute reduction algorithm based on characteristics of knowledge granularity

控制与决策. 2021, 36(1): 196-205 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0490>

考虑高阶拓扑结构的无人蜂群任务协同能力研究

吴鸿乾, 邓宏钟[†], 李际超, 吴成星

(国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073)

摘要: 无人蜂群作战是未来智能化战争的典型作战样式, 鉴于此, 立足于无人蜂群的高阶拓扑结构, 研究蜂群内的信息流和控制流形成的不同拓扑结构的信息网络在面向复杂协同任务时其协同能力的变化. 依据无人蜂群群体智能的关联规则, 将无人蜂群信息网络设计为模块化的社团网络, 搭建最近邻耦合网络、随机网络、小世界网络和无标度网络4种模块内网络模型, 以及随机连接和择优连接两种模块间关联关系, 借助超图构建任务协作组成的协同超边; 结合高阶网络的超度、超度分布、同步指数等拓扑指标综合评估蜂群协同的质量和效率, 并进行仿真实验. 实验结果表明, 择优连接的小世界网络模型在设定任务下能够更好地兼顾协同质量和协同效率, 提高无人蜂群的任务协同能力.

关键词: 无人蜂群; 协同作战; 超图; 拓扑性质; 协同能力; 综合评估

中图分类号: E917; N945.16 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0710

引用格式: 吴鸿乾, 邓宏钟, 李际超, 等. 考虑高阶拓扑结构的无人蜂群任务协同能力研究 [J]. 控制与决策, 2025, 40(5): 1551-1560.

Research on task collaborative capability of unmanned swarms considering higher-order topological structures

WU Hong-qian, DENG Hong-zhong[†], LI Ji-chao, WU Cheng-xing

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Unmanned swarm combat is a typical combat paradigm in future intelligent warfare. We focus on the higher-order topological structure of unmanned swarms and study how the information networks formed by information and control flows within different topological structures change in collaborative capabilities when facing complex collaborative tasks. Based on the association rules of the swarm intelligence of unmanned swarms, we design the unmanned swarm information network as a modular community network, constructing four types of intra-module network models including nearest-neighbor coupled networks, random networks, small-world networks, and scale-free networks, and two types of inter-module relationships, random connections, and preferential connections. By using hypergraphs to construct collaborative hyperedges composed of task collaboration, and combining topological indicators of higher-order networks such as hyper-degree, hyper-degree distribution, and synchronization index, we comprehensively evaluate the quality and efficiency of swarm collaboration. Simulation experiments are conducted, and the results show that the preferential connection small-world network model can better balance collaboration quality and efficiency under the given tasks, enhancing collaborative capabilities.

Keywords: unmanned swarms; collaborative combat; hypergraphs; topological properties; collaborative capability; comprehensive assessment

0 引言

协同作战是指多个个体或组织通过合作、协调、共享信息达到共同目标的一种作战方式, 是智能化、体系化作战的基础组织形式, 也是未来作战形式的发展趋势^[1]. 近年美军提出的“网络中心战”“多域战”“空海一体战”“作战云”“分布式作战”“敏捷

作战”“马赛克作战”“联合全域作战”等网络化的战场样式, 其本质皆为协同作战^[2], 优势在于能够整合各方资源和能力, 提高整体作战效能. 对智能协同网络的协同能力进行科学的评估是度量智能化作战体系宏观涌现性的重要前提, 低成本、低能耗、大数量的无人蜂群可以通过拓扑互联组建高动态、自适

收稿日期: 2024-06-15; 录用日期: 2024-11-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72371244, 72231011, 72301286); 湖南省杰出青年基金项目 (2022JJ20047).

[†]通信作者. E-mail: denghongzhong@nudt.edu.cn.

应的无人机 (UAV) 自组织网络, 协同完成单机不可完成的侦察、预警、攻击、干扰等任务, 具备显著的数量优势、速度优势、成本优势和鲁棒优势^[3-4]. 无人化作战体系将会成为未来战场的典型形态, 集群智能蜂群化将成为除有人/无人协同及小规模集群协同外一个非常重要的发展方向, 因此本文以无人蜂群为应用场景开展作战体系协同能力的评估.

当前 UAV 的自主决策在实践中并未具备形成完全自主集群的能力, 自主决策与协同控制并未实现高效的耦合^[5], UAV 的飞行自组网设计多局限于扩展性不高的虚拟结构和持久拓扑. 虚拟结构将蜂群视为一个刚性的编队, 每个智能体与虚拟结构的一个点对应, 通过定义不同的编队构型可以实现高精度的编队跟踪控制^[6]. 持久拓扑的约束低于刚性编队, 仅依据相互的通信连接组成了持久图, 只保持相对拓扑位置不变, 能够很好地保持队形和编队结构的稳定性^[7]. 在当前无人蜂群的智能化水平下, 无人编队的队形设计成为近年来研究的热点, 拓扑结构的设计对于协同作战的质量和效率是除 UAV 本身物理性能外影响作战效能的关键要素.

面向无人蜂群拓扑结构的建模描述, 无人蜂群节点丰富简单, 关联关系和协同规则定义清晰, 复杂网络理论相对于基于 Agent 建模、Petri 网、系统动力学等理论具有直观化、结构化和建模灵活化的优势^[8]. 王尔申等^[9]将随机空间网络引入到无人机集群协同对抗场景中, 将 UAV 间的协同对抗关系抽象为网络中的边, 边长代表 UAV 间的空间距离; 禹明刚等^[10]针对无人集群的信息网络, 在传统树状网络的基础上融合随机网络和社团网络的特性, 构建了社团集群无人信息网络; Wang 等^[8]采取多层网络的建模方法, 将无人集群划分为相互依赖的通信层、结构层和任务层. 由于 UAV 协同个体增多, 协同的可选项增加, 面向特定任务需要多 UAV 协作参与, 且需要选定合理的建模方法对 UAV 的协同关系进行合理的刻画, 以完善机间协同、群间协同等复杂协同关系的表示. 贾珺等^[11]曾引入高阶网络的概念对作战的协同关系进行科学描述, 本文拟参考该研究, 采取超图理论工具对 UAV 协同建模, 针对 UAV 面向任务的多机协同关系采用超边建模, 构建高阶协同网络, 从高阶拓扑结构的视角展开作战能力的评估.

针对无人蜂群的协同能力评估, 大致可分为微观、中观和宏观 3 个角度^[12]: 微观评估立足于微观个体, 即 UAV 的属性、状态、性能及其行为规则和关联规则, 多采取多智能体建模的技术方法; 中观评估关注于智能体之间的交互, 探索耦合宏观现象与微

观行为之间功能结构; 宏观评估体系群体层面涌现出的协同能力, 多采用指标体系进行综合评估或复杂网络的结构特征度量^[13]. 本文评估无人作战体系宏观的协同能力, 欲从宏观角度设定指标体系评估无人蜂群不同拓扑结构的优劣. 军事应用的无人蜂群不同于民用无人机的最大区别在于强对抗环境下的任务完成能力, 面向复杂的战场环境, 作战任务丰富多变, 无人蜂群的协同能力不止体现在协同的通讯效率和连通程度, 还应与作战任务紧密结合, 能够兼顾作战任务的均匀覆盖和快速响应的拓扑结构才是有效的拓扑结构. 因此, 本文结合信息通连结构和作战任务部署, 兼顾任务完成能力、负载均衡率和自同步能力等指标, 构建对拓扑结构评估的合理框架.

本文结构如下: 第 1 节对超图的概念进行介绍; 第 2 节对无人蜂群作战体系进行建模; 第 3 节解释蜂群任务协同能力评价的指标和方法; 第 4 节对蜂群的任务协同能力进行仿真分析; 第 5 节进行结论的阐述和未来研究的展望.

1 高阶网络相关概念

学术界对高阶网络的定义相对宽泛, 目前并没有统一、权威的定义, 前人曾将结构上多个个体相互作用的高阶交互网络、时序上具有非马尔科夫性的高阶依赖网络以及超网络等具有多重依赖关系形成的高阶关联网络均称之为高阶网络^[14]. 本文研究的高阶网络为高阶交互网络, 网络中节点的相互作用为超越两两相互作用的高阶相互作用.

高阶网络的性质近年来成为网络科学领域的研究热点, 逐渐成为研究复杂系统集群行为建模的权威工具^[15]. 超图是高阶相互作用最一般和无约束的描述, 采用超边连接任意数量的节点, 超边可以交叉和覆盖, 具有极大的灵活性, 适用于多种高阶相互作用的描述, 学者在研究协同网络时多采用超图建模^[16]. 考虑到无人蜂群内部高阶协同关系及组网的灵活性, 本文决定采用超图进行建模和分析.

超图概念于 1967 年被 Berge 首次提出^[17-18]. 从有限集的组合问题出发, 节点集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{N_H}\}$ 是一个有限集, $E = \{E_1, E_2, \dots, E_{M_H}\}$ 是 X 上的一个有限子集簇, 满足: ① $E_i \neq \emptyset$ ($i = 1, 2, \dots, M_H$), ② $\bigcup_{i=1}^{M_H} E_i = X$, 定义 X 为超图的节点集, E 为超图的超边集, 则二元关系 $H = (X, E)$ 即为一个超图.

超图可以用关联矩阵 $C_H = (c_{ij})_{N_H \times M_H}$ 进行表示, C_H 中 M_H 分别对应 H 中 M_H 条超边 E_1, E_2, \dots, E_{M_H} , N_H 行分别对应 H 中 N_H 个节点 x_1, x_2, \dots, x_{N_H} ,

用于刻画节点和超边的包含关系. 当 $x_i \notin E_j$ 时, $c_{ij} = 0$; 当 $x_i \in E_j$ 时, $c_{ij} = 1$.

已知 C_H , 可以对其行求和得到节点所在的超边个数, 即节点的超度 d_i , 由此得到超图的超度矩阵 $D_H = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_{N_H})$.

超图的邻接矩阵 $A_H = (a_{ij})_{N_H \times N_H}$ 与图的邻接矩阵类似, 可以揭示节点与节点之间的邻接关系, 如果节点 x_i, x_j 有 q ($q = 0, 1, \dots$) 条公共超边, 则 $a_{ij} = q$. 已知 C_H 和 D_H 可以计算得到 A_H , 有 $A_H = C_H C_H^T - D_H$.

定义矩阵 A_H 中所有非零元素为 1, 得到简化后的邻接矩阵 A'_H . A'_H 中元素只有 0 和 1, 当 x_i, x_j 邻接时, $a'_{ij} = 1$; 当 x_i, x_j 不邻接时, $a'_{ij} = 0$. 定义超图中 x_i 邻居节点为与 x_i 同处于同一超边的节点, 则超图的节点度 k_i 为节点 x_i 的邻居节点个数, 对 A'_H 行求和即可得到节点的度 k_i , 以此定义超图的度矩阵 $K_H = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_{N_H})$.

2 无人蜂群作战体系建模

蜂群的协同能力受蜂群规模、功能配置及协同方式等共同影响. 蜂群通过动态调整拓扑位置可变换协同对象, 本文侧重于研究在蜂群规模及功能结构不变的情况下, 面向一组作战任务, 蜂群信息网络保持何种拓扑结构具备更好的协同效果, 即研究不同协作方式所构建的关联结构对于协同能力的影响. 本文构想的蜂群网络, 节点是功能异构的 UAV, 考虑每架 UAV 只有一类功能载荷, 连边为 UAV 之间的通信、指控等信息连接. UAV 依靠种类、任务等构成子群, 假定子群内部强耦合、子群之间弱耦合. 基于此类假定, 学者研究无人蜂群时常将其建模为模块化的社团网络, 网络生成机制各具特点, 如基于树状指挥网络进行随机化重连^[19], 基于簇内及簇间不同的连边规则生成社团网络^[10]等.

2.1 集群信息网络建模

因为本文研究重点是 UAV 网络的结构设计, 无人蜂群多由分工不同的集群组成, 所以自定义社团化集群信息网络的建模规则, 用于对比簇内连边机制与簇间连边机制对协同能力的影响.

蜂群内部的信息连接多是基于鸽群、雁群、狼群等仿生学科的集群智能规则进行设计, 群体智能方向的多项研究均揭示了鸽群中的个体对周围个体的感知并非完全基于距离, 而是主要基于拓扑结构^[20-21]. 因为个体的信息处理能力决定了其所能接受的其他个体信息, 本文的簇内连接定义了 4 种网络拓扑结构生成模型, 包含规则的最近邻耦合网络 (NC)、作

为参考项的 Erdős-Rényi 随机网络 (ER)、介于规则网络与随机网络之间的 WattsStrogatz 小世界网络 (WS)、具有枢纽节点的 BarabasiAlbert 无标度网络 (BA) 四类经典的网络生成模型.

NC 网络待定参数为 N_{NC} 和 K_{NC} , 每个节点只与其周围 K_{NC} 个邻居节点相连, 左右各 $K_{NC}/2$ 个邻居点 (假定 K_{NC} 为偶数), 网络共有 N_{NC} 个节点, E_{NC} 条边. NC 可以模拟每个 UAV 仅接受固定数邻居个体传输的信息, 最接近鸽群的信息处理机制, 因此其他网络模型的节点数和连边数皆以 NC 网络为基准. ER 网络按照固定节点数和固定连边数的规则生成, 涉及参数 N_{ER} 和 M_{ER} ^[22], ER 网络常作为参考项, 视作阶数最低的零模型. WS 网络模型涉及 3 个参数 N_{WS} 、 K_{WS} 和 P_{WS} , N_{WS} 为节点数目, K_{WS} 表示网络中的每个节点只与其最接近的 K_{WS} 个邻居存在链接, P_{WS} 表示网络中所有链接的重连概率^[23]. WS 模型是对具有小世界和聚类特征的网络进行的仿真. BA 网络模型涉及参数 m_{BA} , 表示新加入节点附加到现有节点的链接数, 即每加入一个节点新增 m_{BA} 条链接, 这些链接优先附加到现有节点上^[24], 最终节点数达到 N_{BA} 停止增长. BA 模型是在偏好连接的基础上, 对具有幂律度分布特征的网络进行的仿真, 可代表 UAV 通信能力的偏好分配, 更接近于集中式特征.

蜂群模块间的连接为随机连接和择优连接两种模式. 基于此, 信息网络建模的具体步骤如下所示.

step 1: 初始化.

给定无人蜂群总数 N , 模块总数 m , 蜂群模块 M_i ($i = 1, \dots, m$) 内节点数为 Nm_i ($i = 1, \dots, m$), M_i 内连边数为 Nin_i ($i = 1, \dots, m$). 模块间网络节点的属性各不相同, 模块内节点也可设置多种属性, 设 M_i 内功能节点属性具有 c_i ($i = 1, \dots, m$) 类, 每类具有的节点数为 Nmc_{ij} ($i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, c_i$). M_i 与 M_j 间节点间随机连边的概率 $Pout_{ij}$ ($i, j = 1, \dots, m$), 使得 M_i 与 M_j 间的连边数 $Nout_{ij}$ 小于 M_i 和 M_j 中的最小连边数 Nin_{ij} .

step 2: 模块内网络生成.

根据给定的 Nm_i 和 Nin_i , 依据某一类网络生成模型生成各模块子网络, 待选的模块内网络生成模型有 NC 网络、ER 网络、WS 网络和 BA 网络, 各网络模型的参数设置依据仿真环境进行调整.

step 3: 模块间网络连接.

依据某一类连边规则连接各模块网络, 待选的模块间连边规则有随机连接 (random connection, RC)、择优连接 (optimal connection, OC). 随机连接

时, $P_{out_{ij}}$ 为 $N_{m_i} \times N_{m_j}$ 个节点对两两之间存在连边的概率, 得到两两模块间的连边数为 $N_{out_{ij}}$. 择优连接作为随机连接的对照组, 每个模块选择度排名前 $\text{ceil}(N_{out_{ij}}^{0.5})$ 节点, $\text{ceil}(N_{out_{ij}}^{0.5}) \times \text{ceil}(N_{out_{ij}}^{0.5})$ 个节点对之间以 $N_{out_{ij}} / (\text{ceil}(N_{out_{ij}}^{0.5}))^2$ 的概率建立模块间连接.

通过上述 3 个步骤, 可得到功能分簇的模块化无人机集群信息网络, 通过选取不同的模块内连边规则和模块间连边规则, 最终生成 8 类信息网络.

2.2 高阶协同网络建模

由于个体的协同并不限于两两协同, 传统的图论只能构建两两节点间的连边, 并不适用刻画多主体之间的相互作用, 超边可以灵活描述任意数量个体的协同. 因此, 本文面向作战任务, 在信息网络信息交互的基础上, 将可以协作完成某一任务的多个个体建立超边, 由此得到高阶协同网络.

如图 1 所示, 无人蜂群的部署行动是紧紧围绕其需要承担的任务的. 图 1 的任务层仅为示例图, 在真实作战情况下应该是具有时序关系的有向网络, 节点为不同层级的任务, 由总任务逐层分解呈现树状或者网状的关联结构. 由于本文的研究重点是信息网络的拓扑结构, 并不是任务网络的时序或结构等调度关系, 此处淡化对任务层的讨论, 只统计部署的无人蜂群所需承担的所有任务. 任务需要 UAV 之间的协同才可完成, 不同类别的任务所需要的

UAV 种类和数量各不相同.

示例网络中共包含 12 个节点、13 条边, 共有 5 类功能载荷, 分别为光学侦察载荷 S_1 、红外侦察载荷 S_2 、雷达侦察载荷 S_3 、火力打击载荷 I_1 、电子干扰载荷 I_2 . 假定此次无人蜂群行动需要完成的 3 个任务分别是 T_4 (嫌疑目标协同识别)、 T_7 (移动目标协同定位) 和 T_9 (静态目标协同定位及打击), 每类任务对应的支撑载荷分别为 $\{S_1, S_2, S_3\}$ 、 $\{S_1, S_1, S_2, S_2\}$ 、 $\{S_2, S_3, I_1\}$, 则在该信息网络中, 可以挖掘出 2 条超边支持 T_4 、2 条超边支持 T_7 、1 条超边支持 T_9 , 这 5 条超边组成了面向任务 $\{T_4, T_7, T_9\}$ 的高阶协同网络.

3 无人蜂群作战体系任务协同能力评价

评价无人蜂群任务协同能力的指标丰富多样^[25], 指标的合理性和代表性直接影响评估过程的科学性和可靠性, 考虑过多的指标会增加计算的复杂性, 混淆或削弱主要信息. 依赖于局部化通信的无人蜂群相对传统的协同作战模式更具备实时决策的能力、去中心化的自组织能力以及多任务协同的能力. 本节主要讨论信息网络的拓扑结构对高阶协同网络的任务协同能力 (C) 的影响, 能够又“好”又“快”地完成协同作战任务的蜂群可视为协同能力强的蜂群, 因此本文考察协同质量 (C_Q) 和协同效率 (C_E) 两个准则, 建立指标体系. 其中: 协同质量包括装备利用率 (C_{Q1})、任务完成概率 (C_{Q2})、负载均衡率 (C_{Q3}), 协同效率包括局部通信效率 (C_{E1})、全局通讯效率 (C_{E2})、自同步能力 (C_{E3}), 以上 6 类指标分别对应 6 种超图的拓扑结构参数.

3.1 协同质量

3.1.1 装备利用率

装备利用率 (C_{Q1}) 表示部署的 UAV 有机会参与任务的比例. 受限于 UAV 的信号接受能力和 UAV 间的通连关系, 有的个体无法参与协同, 造成冗余. 节点冗余度 (R) 为未参与构建超边的节点占有所有节点的比例, 定义如下:

$$R = 1 - \frac{N_H}{N_G}, \tag{1}$$

$$C_{Q1} = 1 - R. \tag{2}$$

其中: N_H 为构建的高阶协同网络中的节点数目, N_G 为集群信息网络的节点数目, $C_{Q1} \in [0, 1]$. 在部署的 UAV 数量确定的情况下, 装备利用率越高, 节点冗余度越低, 协同质量越高.

3.1.2 任务完成概率

任务完成概率 (C_{Q2}) 表示参与作战的 UAV 完成

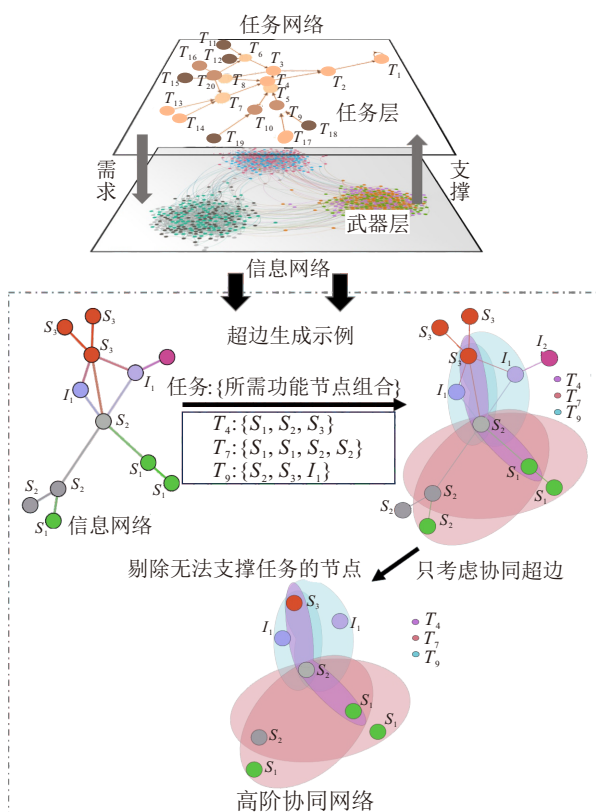


图1 基于任务的高阶协同网络建模示意图

所有任务的概率. 已知 UAV 信息通连的拓扑结构, 每个 UAV 平均能够参与的协作链越多则任务完成概率越大. 节点 i 的超度 d_i 为超图中节点 i 所在的超边数量, 对应的节点超度越大, 则该 UAV 可以参与的任务越多; 平均超度 $\langle d \rangle$ 是超图中所有节点超度的平均值. 已知 $C_H = (c_{ij})_{N_H \times M_H}$, 有

$$d_i = \sum_{j=1}^{M_H} c_{ij}, \quad i=1, \dots, N_H, \quad j=1, \dots, M_H; \quad (3)$$

$$\langle d \rangle = \sum_{i=1}^{N_H} d_i / N_H, \quad i=1, \dots, N_H. \quad (4)$$

其中 M_H 为构建的高阶协同网络中的超边数目.

为便于后期指标融合, 记目前所有待评估网络中 $\langle d \rangle$ 的最大值为 $\langle d \rangle_{\max}$, 将 $\langle d \rangle$ 进行最大值归一化得到的 dM 作为任务完成概率, 使得 $C_{Q2} \in (0, 1]$. 即

$$dM = \langle d \rangle / \langle d \rangle_{\max}, \quad (5)$$

$$C_{Q2} = dM. \quad (6)$$

参与任务的 UAV 所能参与的协作链越多, 任务完成概率越高, 即平均超度越大, 协同质量越高.

3.1.3 负载均衡率

负载均衡率 (C_{Q3}) 用来度量蜂群作战体系中各个 UAV 负载分布的均衡情况. 在任务推进过程中, 由于任务到达的随机性和各 UAV 信息处理能力的差异, 在作战推进到一定阶段, 就会出现有的个体还有很多任务在堆积未完成而能量耗尽、网络结构割裂, 而其他个体尽管具备完成该任务的能力却处于空闲状态. 造成资源利用不均的原因便是 UAV 间预设的信息流致使有的 UAV 参与的协作链过多, 有的 UAV 参与过少. 因此评估高阶协同网络的节点超度的异质性 (HH), 可刻画 UAV 的负载分布均衡率. 评价超度分布的异质程度, 具有多种定义方式^[26], 此处延续早期研究定义 HH^[27] 如下所示:

$$HH = \langle d^2 \rangle / \langle d \rangle^2, \quad (7)$$

$$C_{Q3} = 1/HH. \quad (8)$$

其中: $\langle d \rangle$ 为平均超度, $\langle d^2 \rangle$ 为二阶平均超度. 此类定义的 HH 始终满足 $HH \geq 1$, 超度异质性越高, HH 值越大. 定义负载均衡率为超度异质性的倒数, 则 $C_{Q3} \in (0, 1]$, 负载均衡率越高, 协同质量越高.

3.2 协同效率

3.2.1 局部通信效率

局部通信效率 (C_{E1}) 用来衡量 UAV 在局部范围内信息流转的效率, 若 UAV 邻机之间存在支持协同任务的信息连接, 则该无人蜂群的局部通信效率有

效提高. 在高阶协同网络上, 本文采用超图的全局聚类系数 (CC) 刻画局部通信效率, 此处用网络整体聚类水平代指全局聚类系数, 表示为网络中所有节点的局部聚类系数 (CC_i) 的平均值. 超图的聚类系数是用来衡量超图中节点之间紧密程度的指标, 通过计算节点的邻居节点之间的连接程度衡量, 定义为节点的邻居节点之间实际存在的边数与可能存在的边数之间的比值. 此处节点 i 的邻居为与该节点处于同一超边的节点, 记为 $\text{NeighborsID}[i] = \{\text{node}_i^p, p=1, 2, \dots, k_i\}$, k_i 为节点 i 的度, 即节点 i 的邻居数量, 已知 $A'_H = (a'_{ij})_{N_H \times N_H}$, 有

$$k_i = \sum_{j=1}^{N_H} a'_{ij}. \quad (9)$$

邻居节点之间存在链接的数量 NE_i 为

$$NE_i = \sum_{p=1, \dots, k_i-1, q=p+1, \dots, k_i} a'_{\text{node}_i^p \text{node}_i^q}, \quad (10)$$

$$CC_i = \frac{2NE_i}{k_i \times (k_i - 1)}; \quad (11)$$

$$CC = \sum_{i=1}^{N_H} CC_i / N_H; \quad (12)$$

$$C_{E1} = CC. \quad (13)$$

定义局部通信效率为全局聚类系数, 则 $C_{E1} \in [0, 1]$, 局部通信效率越高, 即节点间紧密程度越高, 协同效率越高.

3.2.2 全局通讯效率

全局通讯效率 (C_{E2}) 用来衡量一个 UAV 发出的信息在整个 UAV 作战体系内流传的效率. 假定同处于一个协同链的 UAV 信息高度共享, 信息更倾向于通过超边传递, 利用 Dijkstra 算法计算高阶协同网络中节点 i 与节点 j 之间信息传播需要经过的超边数为最短路径, 记为 d_{ij} , 所有节点对的平均值即为超图的平均最短路径, 可体现 UAV 之间信息传递的全局通讯效率, 具体如下:

$$d_m = \frac{1}{N_H(N_H - 1)} \sum_{\substack{i \neq j \\ i, j=1, \dots, N_H}} d_{ij}, \quad (14)$$

$$C_{E2} = 1/d_m. \quad (15)$$

若节点 i 与 j 之间不连通, 则 $d_{ij} = \infty$, $d_m = \infty$, 定义全局通讯效率为平均最短路径的倒数, 则 $C_{E2} \in [0, 1]$. 平均最短路径越短, 全局通讯效率越高, 协同效率越高.

3.2.3 自同步能力

在协同作战中, 各作战单元在地理空间上分散

分布,可以通过对战场态势的感知、传输、共享,形成一致的理解(决策同步),进而实现一体化作战行动(行动同步/自同步),这种在时间和空间上达到精确化配合的作战效果,便是网络中心战所追求的作战同步^[28].自同步能力(C_{E3})体现了协同网络中信息优势和结构优势转化为作战优势的效率,是评估协同能力的关键指标.不同的网络结构同步性能存在区别,自同步能力高的 UAV 拓扑网络,协同效率更高.

本文采用 Kuramoto 模型研究 UAV 的相位同步^[29-30],将网络中的每个 UAV 节点视作一个振子,作为一个单独的动力学系统,振子通过边/超边互相耦合,当网络耦合振子的相位趋于一致则达到相位同步.由于高阶协同网络中处于一个超边的节点信息高度共享,引入高阶网络的 Kuramoto 模型^[15,31],采取早期基于高阶拉普拉斯矩阵推导得到的最大非零 Lyapunov 指数 L_m —— $\lambda_2^{(m)}$ 作为高阶网络同步判据^[32]. $\lambda_2^{(m)}$ 决定了系统在扰动后恢复稳定状态的速度,其绝对值越大,同步状态越稳定.

受网络规模及网络拓扑结构影响, $\lambda_2^{(m)}$ 的尺度变化较大,为提高数据的可比较性,方便后续指标融合,将各个网络的 $\lambda_2^{(m)}$ 值标准化,采用 Z-score 标准化后离差标准化的方式将数据值的变化范围分散至 $[0,1]$.假设共有 p 个待评估网络,定义向量 $L\hat{m} = (|Lm_k|, k = 1, 2, \dots, p)$, 其中 $|Lm_k| = |\lambda_{2k}^{(m)}|$. 依据

$$|Lm_k| \text{ 序列的均值 } \mu_{Lm} = \sum_{k=1}^p |Lm_k| / p \text{ 和标准差 } \sigma_{Lm} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (|Lm_k| - \mu_{Lm})^2}, \text{ 得到标准化结果}$$

$$L\hat{z} = (L\hat{m} - \mu_{Lm}) / \sigma_{Lm}. \quad (16)$$

记 $L\hat{z}$ 中最大元素及最小元素为 Lz_{\max} 和 Lz_{\min} , 有

$$LM = (L\hat{z} - Lz_{\min}) / (Lz_{\max} - Lz_{\min}), \quad (17)$$

$$C_{E3} = LM. \quad (18)$$

最终得到同步指数 $C_{E3} \in [0, 1]$. 同步指数值越高,网络自同步能力越高,协同效率越高.

3.3 综合评估

处理后的指标为越大越优型指标.本文将采取加权和法和加权积法构成的混合规则对指标层进行指标融合,以综合评估 UAV 作战体系的协同能力.

协同质量和协同效率对协同能力皆是正相关关系,且协同质量(效率)的高值可显著增强协同效率(质量)对协同能力的影响,即两个准则之间不具备互补关系而是协同关系,因此采用加权积法融合两个准则.将质量与效率对能力的影响视为同等重要,则权重均为 1,是以协同能力为协同质量和协同效率

之积 ($C = C_Q \cdot C_E$).

对于协同质量,装备利用率 (C_{Q1})、任务完成概率 (C_{Q2})、负载均衡率 (C_{Q3}) 之间相互依赖,本文将 3 个指标视为同等重要,采取加权积法融合得到 $C_Q = C_{Q1} \cdot C_{Q2} \cdot C_{Q3}$.

对于协同效率,局部通信效率 (C_{E1})、全局通讯效率 (C_{E2})、自同步能力 (C_{E3}) 相对独立,呈现互补关系,此处认为 3 个指标重要性相当,采取加权平均法融合得到 $C_E = (C_{E1} + C_{E2} + C_{E3}) / 3$.

量化和标准化处理后得到归一化的指标,最终得到无人作战体系协同能力评估的表达式为

$$C = C_Q \cdot C_E = (C_{Q1} \cdot C_{Q2} \cdot C_{Q3}) \cdot (C_{E1} + C_{E2} + C_{E3}) / 3. \quad (19)$$

4 仿真分析

依托于第 2 节构建的无人蜂群体系的网络拓扑结构,基于第 3 节定义的协同作战能力评估体系,仿真分析不同的簇内连边机制和簇间连边机制对体系协同能力的影响.

4.1 场景想定

蜂群的作战规模远高于集群,多为微/小型无人机.以美军进攻性蜂群使能战术 (OFFSET) 项目设计为参照,参考 UAV 系统的组成与分类^[33],实验假定每台 UAV 功能单一, UAV 总数 $N = 900$, 模块数 $m = 3$, 3 个模块依据挂载不同粗略划分为侦察预警无人机群 (S)、通信指控无人机群 (U) 和打击干扰无人机群 (I).简化处理将每个模块的 UAV 数量设为相同值,各模块内 UAV 的类别设定为相同值且各类别 UAV 数量一样,即 $Nm_i = 300, c_i = 3 (i = 1, 2, 3)$, $Nmc_{ij} = 100 (i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3)$, 如此共构建 9 类 UAV, 功能如表 1 所示.此次蜂群行动以对陆目标侦察和攻击为主,面对复杂、高对抗的战场环境,任务逐级分解为 30 个子任务,包括广域监视、目标识别、跟踪定位、通信组网、指挥决策、诱饵欺骗、电子对抗、饱和攻击等.假定各个子任务至少需要 3 台 UAV 协同才能有效完成,构建各任务完成需要的 UAV 组合如表 2 所示.

4.2 参数设置

UAV 的通信和控制能力由系统性能和编程设计共同约束,直接影响 UAV 的邻居数量,本文将蜂群行动类比惊鸟的群体运动模型^[34],依据惊鸟的交互规则将 NC 网络的邻居数量设计为 6.结合 4.1 节的场景想定,对模块内的网络模型和模块间网络连接的参数设置如下.

模块内网络类型设置 4 组模型进行对照,以

表1 UAV 功能属性

符号简记	UAV功能属性	符号简记	UAV功能属性
S_1	可见光侦察UAV	U_3	指挥控制UAV
S_2	红外侦察UAV	I_1	诱饵UAV
S_3	雷达侦察UAV	I_2	火力打击UAV
U_1	空中通信组网UAV	I_3	电子干扰UAV
U_2	空地通信中继UAV		

表2 面向任务的 UAV 协同配置

任务	UAV组合	任务	UAV组合
T_1	S_1, S_1, S_1	T_{16}	U_1, U_3, I_2
T_2	S_1, S_2, S_3	T_{17}	U_1, U_3, I_3
T_3	S_1, S_1, S_2	T_{18}	I_1, U_3, I_2
T_4	S_2, S_2, S_2	T_{19}	I_2, U_3, I_2
T_5	S_2, S_2, S_3	T_{20}	S_1, U_2, I_3
T_6	S_1, S_3, S_3	T_{21}	S_1, U_3, I_3
T_7	I_3, I_3, I_2	T_{22}	S_2, U_2, I_1
T_8	I_3, I_3, I_3	T_{23}	S_1, U_1, I_3
T_9	I_1, I_2, I_2	T_{24}	S_2, U_1, I_1
T_{10}	I_2, I_2, I_2	T_{25}	S_2, U_1, I_3
T_{11}	I_1, I_3, I_3	T_{26}	S_1, U_1, I_1
T_{12}	S_1, S_2, S_3	T_{27}	S_3, U_1, I_3
T_{13}	S_1, S_1, S_2	T_{28}	S_1, U_2, I_2
T_{14}	S_2, S_2, S_2	T_{29}	S_1, U_3, I_2
T_{15}	S_2, S_2, S_3	T_{30}	S_3, U_2, I_2

NC网络的节点数和边数为基准控制变量,有: NC网络 $N_{NC} = 300, K_{NC} = 6$, 可得 M_{NC} 为固定值 900; ER网络 $N_{ER} = N_{NC} = 300; M_{ER} = M_{NC} = 900$; WS网络 $N_{WS} = N_{NC} = 300, K_{WS} = K_{NC} = 6$. 令 $P_{WS} = 0.5$, 取NC和ER的中间情况; BA网络 $N_{BA} = N_{NC} = 300, m_{BA}$ 取 M_{NC}/N_{NC} 的向下取整值为3, 如此生成的网络具有连边891条, 随机添加9条边. 令 $M_{BA} = M_{NC} = 900$, 得到的4类网络模块节点数和边数都相同, 每次实验只取一类网络. 将此类网络模块复制为3份, 分别定义为 S, U, I , 各模块内节点按照id号取 $0 \sim 99$ 为 $S_1/U_1/I_1, 100 \sim 199$ 为 $S_2/U_2/I_2, 200 \sim 299$ 为 $S_3/U_3/I_3$, 由此模块内网络模型构建完备.

模块间网络类型设置2种连边方式进行对照, 分别是随机连接和择优连接. 随机连接定义两两模块间连边概率 $P_{out_{ij}} = 0.0005$, 则两两模块间连边数 $N_{out_{ij}}$ 应是在 $N_{m_i} \times N_{m_j} \times P_{out_{ij}} = 45$ 左右,

整个模块网络模块间连边数在 $45 \times 3 = 145$ 附近. 择优连接取各模块度排名靠前的节点作为模块间连接的枢纽节点, 边数与随机连接一致, 由于 $ceil(N_{out_{ij}}^{0.5}) = 7$, 取各模块度排名前7的节点两两之间以 $45 / (7 \times 7)$ 的概率进行连边, 使得模块间连边条数与随机连接相近.

4.3 超图生成

根据场景想定及参数设置共生成8类社团信息网络, 结合表2想定的任务配置, 共衍生出8类高阶协同网络, 简记规则为“模块内网络模型-模块间连接方式”, 例如“WS-RC”和“WS-OC”. 由于各网络内各超边度皆为3, 高阶协同网络简化最高阶数为2阶的3-均匀超图.

基于4.2节的定义计算各超图的参与节点数 (N_H)、超边数 (M_H)、平均超度 ($\langle d \rangle$)、超度异质性 (HH)、超图全局聚类系数 (CC)、超图平均路径距离 (dm)、最大非零 Lyapunov 指数 (Lm) 等拓扑结构参数如表3所示, 每列指标的最大值和最小值分别用实下划线和虚下划线标注 (下同), 可见每列指标的最值集中在 NC 网络和 BA 网络.

表3 高阶协同网络拓扑结构参数

网络	N_H	M_H	$\langle d \rangle$	HH	CC	dm	Lm
NC-RC	<u>900</u>	<u>5227</u>	<u>19.76</u>	<u>1.22</u>	<u>0.25</u>	3.60	-8.92e-02
ER-RC	896	6857	22.96	1.62	0.31	3.68	-5.24e-02
WS-RC	880	6710	22.88	1.39	0.36	3.67	-7.40e-02
BA-RC	<u>862</u>	13637	47.46	4.82	<u>0.48</u>	3.42	-8.61e-02
NC-OC	<u>900</u>	6079	20.26	1.29	0.26	<u>3.71</u>	-3.13e-13
ER-OC	895	7266	24.36	1.89	0.32	3.23	-1.21
WS-OC	880	6959	23.72	1.53	0.37	3.39	-0.90
BA-OC	863	<u>14174</u>	<u>49.27</u>	<u>5.21</u>	0.48	<u>3.08</u>	<u>-2.56e-13</u>

4.4 协同能力对比分析

结合式(1)~(18)及表3的拓扑结构参数可计算8类无人蜂群拓扑结构的指标评价价值如表4所示.

结合3.3节的定义计算 C_Q, C_E 及 C , 由于混合规则融合后得到的 C 值偏小, 区分度不高, 本文引入能力评估的正负理想解: 定义正理想解 (C^+) 为最优 C_Q 和最优 C_E 的乘积, 值为 0.18; 负理想解 (C^-) 为最劣 C_Q 和最劣 C_E 的乘积, 值为 0.03. 定义各网络与正理想解的贴进度 η 如下所示:

$$\eta = (C - C^-) / (C^+ - C^-). \quad (20)$$

将无人蜂群的协同能力划分为4个等级, 依据 η 值给出对应评估阈值如下: 差 ($0 \leq \eta < 0.25$), 一

表4 无人蜂群作战体系任务协同能力评价指标值

网络	C_{Q1}	C_{Q2}	C_{Q3}	C_{E1}	C_{E2}	C_{E3}
NC-RC	<u>1.00</u>	<u>0.40</u>	<u>0.82</u>	<u>0.25</u>	0.28	0.07
ER-RC	1.00	0.47	0.62	0.31	0.27	0.04
WS-RC	0.98	0.46	0.72	0.36	0.27	0.06
BA-RC	<u>0.96</u>	0.96	0.21	<u>0.48</u>	0.29	0.07
NC-OC	<u>1.00</u>	0.41	0.77	0.26	<u>0.27</u>	0.00
ER-OC	0.99	0.49	0.53	0.32	0.31	<u>1.00</u>
WS-OC	0.98	0.48	0.66	0.37	0.30	0.75
BA-OC	0.96	<u>1.00</u>	<u>0.19</u>	0.48	<u>0.32</u>	<u>0.00</u>

般 ($0.25 \leq \eta < 0.5$), 良好 ($0.5 \leq \eta < 0.75$), 优异 ($0.75 \leq \eta \leq 1$). 得到 8 类拓扑结构的评估等级见表 5.

表5 无人蜂群综合协同能力评估

网络	C_Q	C_E	C	η	等级
NC-RC	<u>0.33</u>	0.20	0.066	0.23	差
ER-RC	0.29	0.21	0.060	0.19	差
WS-RC	0.33	0.23	0.075	0.29	一般
BA-RC	0.19	0.28	0.054	0.15	差
NC-OC	0.32	<u>0.18</u>	0.056	0.16	差
ER-OC	0.26	<u>0.54</u>	0.141	0.74	良好
WS-OC	0.31	0.47	<u>0.145</u>	0.76	优异
BA-OC	<u>0.18</u>	0.27	<u>0.049</u>	0.11	差

考察协同质量可见, 在择优和随机连接中 NC 网络均为最佳; WS 网络作为 NC 网络与 ER 网络的过渡网络, 协同质量次之; BA 网络协同质量最差, 主要是因为负载均衡率太低, 作战资源难以合理配置, 容易造成任务堆积. 对比随机连接和择优连接, 随机连接的协同质量明显优于择优连接, 原因主要在于择优连接模块间枢纽节点的负载过重, 任务流无法高质量协同.

考察协同效率, NC 网络在随机连接和择优连接中效率都是最低的, 虽然其自同步能力不低, 但局部通讯效率及全局通信效率都是最低的, 极大地影响了整体协同效率. BA 网络恰恰相反, 在随机连接和择优连接中局部通讯效率及全局通信效率都是最高的, 在随机连接中自同步能力略低于 NC 网络, 略高于 ER 和 WS 网络, 但是在择优连接中 BA 网络略低于 NC 网络, 远远低于 ER 和 WS 网络, 致使在随机连接中 BA 网络效率最高, 但是在择优连接中 ER 网络及 WS 网络成为更好的拓扑结构.

综合质量和效率, 协同能力优异的拓扑结构为择优连接的 WS 网络, 最差的为择优连接的 BA 网络. WS 网络综合了协同质量和协同效率的优势, 在随机连接或择优连接中都保持了较好的协同能力.

5 结论

面向未来智能化战争无人化的趋势, 本文研究了无人蜂群面向复杂任务时多机紧密协作的高阶关联关系, 借助超图的理论模型, 从网络拓扑角度评估了无人蜂群的任务协同能力. 类比椋鸟的群体智能知识, 本文构建了模块内邻居数为 6 的规则网络, 依据此延伸出其他类型的蜂群组织架构. 结合假定的作战任务, 构建了高阶协同网络, 超图的拓扑结构参数可以揭示协同的质量和效率, 综合负载均衡率、自同步能力等 6 个指标. 仿真实验最终得到了拓扑结构为模块内 WS 网络、模块间择优连接的无人蜂群协同能力最高的结论.

本文构建的无人蜂群协同能力评估体系可以为复杂协同关系下不同拓扑结构协同能力评估提供了研究框架, 为面向作战任务的无人蜂群虚拟结构设计提供研究思路. 该框架在实际应用时可以根据作战规划灵活调整, 且存在改进的空间. 首先, 未来智能化无人蜂群参与的作战过程应为依据战场态势反馈的任务流的协同, 本文分析动态网络快照化处理得到的拓扑结构只能提供一个整体的概括, 在未来研究中可以研究考虑节点负载的任务流的协同, 制定面向高阶动态关联网络的评估框架; 另外, 本文的仿真结果很大程度上依赖于任务的设定, 即超边的生成规则, 所设计的任务尽可能均衡考虑所有类型的功能节点, 研究超边生成规则对底层拓扑结构评估的影响是未来可以拓展的问题; 其次, 本文从群体智能的规律出发, 仿真实验仅对比了一组固定节点数和连边数的网络结构, 后续可以探索网络的平均邻居数的变化、模块间连边概率的变化、模块数量大小及模块规模的均衡程度、功能节点的分布特点等开展实验; 最后, 在协同能力评估的基础上, 可以结合能力评估的指标开展无人蜂群在动态干扰、失效等状态下的鲁棒性及韧性评估等.

参考文献 (References)

- [1] 马平. 联合作战研究[M]. 北京: 国防大学出版社, 2013: 207.
(Ma P. Joint operations research[M]. Beijing: National Defense University Press, 2013: 207.)
- [2] 李杰, 尹栋, 喻煌超, 等. 无人化联合战术跨域协同及规划能力发展[J]. 国防科技, 2023, 44(2): 82-89.
(Li J, Yin D, Yu H C, et al. Discussion on the

- development of tactical level cross-domain synergy and planning capability of Unmanned joint tactics[J]. *National Defense Technology*, 2023, 44(2): 82-89.)
- [3] 张阳, 司光亚, 王艳正. 无人集群作战建模与仿真综述[J]. *电子信息对抗技术*, 2018, 33(3): 30-36.
(Zhang Y, Si G Y, Wang Y Z. Review on modeling and simulation of unmanned swarm operation[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2018, 33(3): 30-36.)
- [4] 向竹, 杨志伟, 杨克巍, 等. 基于双层稳定匹配的异构无人集群“分布式”协同算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(4): 871-880.
(Xiang Z, Yang Z W, Yang K W, et al. “Decentralized” collaborative algorithm for heterogeneous UAV swarm based on bi-level stable matching[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(4): 871-880.)
- [5] 夏元清, 谢超, 高寒, 等. 天空地一体化网络环境下多运动体系统跨域协同控制与智能决策[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1176-1199.
(Xia Y Q, Xie C, Gao H, et al. Cross-domain cooperative control and intelligent decision-making of multi-dynamic agents in space-air-ground integrated network environment: A review[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1176-1199.)
- [6] 梁晓龙, 孙强, 何吕龙. 航空集群构型控制方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2021: 1-20.
(Liang X L, Sun Q, He L L. Configuration control method of aviation cluster[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2021: 1-20.)
- [7] 吴立尧, 韩维, 张勇, 等. 基于领航-跟随的有人/无人机编队队形保持控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(10): 2435-2441.
(Wu L Y, Han W, Zhang Y, et al. Formation keeping control for manned/unmanned aerial vehicle formation based on leader-follower strategy[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(10): 2435-2441.)
- [8] Wang L Z, Lu D W, Zhang Y, et al. A complex network theory-based modeling framework for unmanned aerial vehicle swarms[J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3434.
- [9] 王尔申, 郭靖, 宏晨, 等. 改进目标收益函数的无人集群空地对抗模型[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(6): 888-897.
(Wang E S, Guo J, Hong C, et al. UAV swarm air-ground engagement model with improved payoff[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 53(6): 888-897.)
- [10] 禹明刚, 陈瑾, 何明, 等. 基于演化博弈的社团网络无人集群协同机制[J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(2): 221-242.
(Yu M G, Chen J, He M, et al. Cooperative evolution mechanism of multiclustered unmanned swarm on community networks[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2023, 53(2): 221-242.)
- [11] 贾珺, 吴元立, 贺筱媛, 等. 作战协同关系超图模型[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(3): 185-190.
(Jia J, Wu Y L, He X Y, et al. Operation cooperative relation modeling based on hypergraphs[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(3): 185-190.)
- [12] 宫远强, 张业鹏, 马万鹏, 等. 无人机蜂群中的群体智能涌现机理[J]. *兵工学报*, 2023, 44(9): 2661-2671.
(Gong Y Q, Zhang Y P, Ma W P, et al. Mechanisms of group intelligence emergence in UAV swarms[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(9): 2661-2671.)
- [13] 马钧文, 毕文豪, 张安, 等. 基于模糊动态权重的近距空战态势评估方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(9): 2995-3005.
(Ma J W, Bi W H, Zhang A, et al. Close-range air combat situation assessment based on fuzzy dynamic weight[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(9): 2995-3005.)
- [14] Battiston F, Cencetti G, Iacopini I, et al. Networks beyond pairwise interactions: Structure and dynamics[J]. *Physics Reports*, 2020, 874: 1-92.
- [15] Zhang Y Z, Lucas M, Battiston F. Higher-order interactions shape collective dynamics differently in hypergraphs and simplicial complexes[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1605.
- [16] Ouvrard X, Le Goff J M, Marchand-Maillet S. Networks of collaborations: Hypergraph modeling and visualisation[J/OL]. 2017, arXiv: 1707.00115.
- [17] Berge C. *Graphs and hypergraphs*[M]. New York: American Elsevier Pub. Co., 1973: 389-400.
- [18] Berge C. *Hypergraphs: Combinatorics of finite sets*[M]. Amsterdam: North-Holland, 1989: 1-28.
- [19] 颜骥, 李相民, 刘立佳, 等. 机群多编队作战网络自同步[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(8): 1566-1572.
(Yan J, Li X M, Liu L J, et al. Combat network synchronization of air fleet formation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(8): 1566-1572.)
- [20] Qiu H X, Duan H B. Pigeon interaction mode switch-based UAV distributed flocking control under obstacle environments[J]. *ISA Transactions*, 2017, 71: 93-102.
- [21] Zhang H T, Chen Z Y, Vicsek T, et al. Route-dependent switch between hierarchical and egalitarian strategies in pigeon flocks[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5805.
- [22] Erdős P, Rényi A. On the evolution of random graphs[J]. *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, 1960, 5: 17-61.
- [23] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [24] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [25] 伍力权. 异构集群协同作战系统效能评估问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.

- (Wu L Q. Research on performance evaluation of heterogeneous cluster cooperative combat system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.)
- [26] Hu H B, Wang X F. Unified index to quantifying heterogeneity of complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2008, 387(14): 3769-3780.
- [27] Yan G, Martinez N D, Liu Y Y. Degree heterogeneity and stability of ecological networks[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2017, 14(131): 20170189.
- [28] 王斌. 基于复杂网络的作战同步建模研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
(Wang B. Research on modeling of operational synchronization based on complex network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)
- [29] Gambuzza L V, Di Patti F, Gallo L, et al. Stability of synchronization in simplicial complexes[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1255.
- [30] Pecora L M, Carroll T L. Master stability functions for synchronized coupled systems[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(10): 2109-2112.
- [31] Tang Y, Shi D H, Lü L Y. Optimizing higher-order network topology for synchronization of coupled phase oscillators[J]. *Communications Physics*, 2022, 5: 96.
- [32] Lucas M, Cencetti G, Battiston F. Multiorder Laplacian for synchronization in higher-order networks[J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(3): 033410.
- [33] 聂成龙. 集群无人机可靠性建模与评估[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2022: 13-31.
(Nie C L. Reliability modeling and evaluation of cluster UAV[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2022: 13-31.)
- [34] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 21-63.
(Duan H B, Qiu H X. Unmanned aerial vehicle swarm autonomous control based on swarm intelligence[M]. Beijing: Science Press, 2018: 21-63.)

作者简介

吴鸿乾 (1997-), 女, 博士生, 主要研究方向为智能作战体系建模与分析, E-mail: wuhongqian19@nudt.edu.cn;

邓宏钟 (1974-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为复杂系统建模与分析, E-mail: denghongzhong@nudt.edu.cn;

李际超 (1990-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为复杂系统与复杂网络, E-mail: ljnudt@hotmail.com;

吴成星 (1994-), 男, 博士生, 主要研究方向为复杂演化系统韧性, E-mail: 54704515@qq.com.