

文章编号:1671-1637(2026)08-0243-16

面向机场除雪集群作业韧性提升的 车联网拓扑结构优化

孙 恪¹, 钱钟昊², 于 森², 邢志伟^{*2}

(1. 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘 要:针对机场除雪集群作业中因通信节点故障导致协同控制失效及作业效能下降的问题,本文提出了一种基于车联网拓扑结构优化与动态队形重构的韧性提升方法。首先,剖析机场除雪作业的动态交互特征,定义了面向任务过程的性能评价指标,并据此构建了除雪集群作业韧性评估模型;其次,为增强通信网络在受损工况下的抗毁性,引入节点度方差作为结构生存性测度指标;在此基础上,建立了车联网拓扑优化的混合整数半正定规划模型,并利用凸松弛技术将该NP难问题分解为基于整数二次规划的度矩阵优化与基于半正定规划的图可行解问题,实现了复杂约束下的高效求解;进一步,针对节点失效后的覆盖断点问题,设计基于重映射的动态紧缩重构策略,通过逻辑拓扑的快速自愈实现物理作业间隙的及时闭合。仿真试验结果表明:所提方法显著提升了系统的故障容错能力;在6节点随机网络试验中,优化后的拓扑结构在50%节点失效的极端工况下仍能维持基本的编队构型功能,系统作业韧性较优化前提升了13.1%;进一步的蒙特卡洛统计与参数敏感性分析表明,节点度方差能够在统计意义上反映网络连通保持能力,车辆横向间距与最小重叠宽度对有效覆盖宽度具有明显影响。研究验证了拓扑优化设计有助于提高机场网联车辆在恶劣环境下的作业韧性。

关键词:机场工程;机场除雪作业;通信拓扑优化;凸松弛;半正定规划;韧性模型;车联网

中图分类号:V351.392 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.403

Resilience-oriented communication topology optimization for airport snow removal IoV networks

SUN Ke¹, QIAN Zhong-hao², YU Miao², XING Zhi-wei^{*2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In response to the collaborative control failure and operational efficiency degradation caused by communication node failures in airport snow removal cluster operations, a resilience enhancement method was proposed based on the Internet of Vehicles (IoV) topology optimization and dynamic formation reconfiguration. First, the dynamic interaction characteristics of snow

出版历程:2025-12-24 收稿, 2026-04-29 修回, 2026-06-04 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(U2333205);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3122023006)

作者简介:孙 恪(1998-),男,新疆奎屯人,工学博士, E-mail:crayon_sk@outlook.com。

***通信作者:**邢志伟(1970-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,工学博士, E-mail:cauc_xzw@163.com。

引用格式:孙 恪, 钱钟昊, 于 森, 等. 面向机场除雪集群作业韧性提升的车联网拓扑结构优化[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(8): 243-258.

Citation: SUN Ke, QIAN Zhong-hao, YU Miao, et al. Resilience-oriented communication topology optimization for airport snow removal IoV networks[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 243-258.

removal operations were analyzed. A mission process-oriented performance evaluation metric was defined. Based on this, a resilience assessment model was developed for the snow removal cluster operations. Second, to enhance the invulnerability of the communication network under damaged conditions, the node degree variance was introduced as a structural survivability index. On this basis, a mixed integer semi-definite programming model for IoV topology optimization was formulated. Convex relaxation techniques were applied to decompose this NP-hard problem into a degree matrix optimization problem based on integer quadratic programming and a graph feasible solution problem based on semi-definite programming, thus achieving efficient solutions under complex constraints. Furthermore, to address the issue of coverage gaps caused by node failures, a dynamic contractive reconfiguration strategy based on remapping was designed to achieve the timely closure of physical operational gaps through the rapid self-healing of the logical topology. Simulation results demonstrate that the proposed method significantly improves the system's fault tolerance. In a 6-node stochastic network experiment, the optimized topological structure maintains basic formation configuration functions even under an extreme condition of 50% node loss, with the operational resilience improved by 13.1% after optimization. Further Monte Carlo statistics and parameter sensitivity analysis indicate that the node degree variance can reflect the network connectivity retention ability in a statistical sense. The vehicle lateral spacing and minimum overlap width have a significant impact on the effective coverage width. The effectiveness of topology optimization design in enhancing the operational resilience of connected airport vehicles under harsh environmental conditions is validated.

Keywords: airport engineering; airport snow removal operation; communication topology optimization; convex relaxation; semi-definite programming; resilience model; internet of vehicle

Publication history: Received 2025-12-24; Received in revised form 2026-04-29; Accepted 2026-06-04

Funding: National Natural Science Foundation of China (U2333205); Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122023006)

* **Corresponding author:** XING Zhi-wei, professor, PhD, E-mail: cauc_xzw@163.com.

0 引 言

机场场道除冰雪作业是保障冬季机场运行效率与航班起降安全的关键环节。然而,该场景作业环境具有典型的高动态、强耦合特征,涉及多类型特种车辆与多班组的异构协同调度^[1]。加之冬季恶劣气候带来的高度不确定性,给机场的持续稳定运行带来了严峻挑战。随着《中国民航四型机场建设行动纲要(2020-2035年)》的发布,推动飞行区车辆协同技术的智能化发展、提升运行管控自动化水平已成为行业共识^[2-3]。尽管车联网与自动驾驶技术已在多个领域落地应用,但在机场除雪作业中,编队系统常面临通信干扰、单车故障等突发扰动^[4]。在此背景下,如何赋予自主除雪作业集群应对不确定扰动的韧性,确保系统在复杂工况下的安全高效运行,是亟待解决的关键问题。

机场除雪任务要求多台车辆以预设的队形结构

和一致的巡航速度完成道面全覆盖作业^[5]。因此除雪任务可以通过编队控制技术来实现,编队控制的核心在于设计有效的控制输入,以驱动多车系统形成并维持期望的队形配置^[6]。现有研究广泛采用了基于“领导者-追随者”、基于行为及基于虚拟领航者等经典控制范式^[7-10]。近年来,基于一致性协议的编队控制方法因其分布式特性已成为主流策略,并取得了丰硕的研究成果^[11-12]。然而,上述方法主要侧重于理想无冲突环境下的队形保持与机动控制,而实际除雪作业往往处于开放且动态变化的复杂环境中,极易受到外部随机干扰和系统内部不确定性的多重影响。

为应对复杂环境中的扰动,学界在系统鲁棒性与重构控制方面开展了大量探索。例如,Gong等^[13]提出了双层架构以优化系统面对拜占庭攻击时的恢复能力;Guerrero-Bonilla等^[14-15]分别通过格点结构设计和模糊状态估计器,解决了复杂环境下

的分布式协作与未知状态下的编队控制问题;Gong 等^[16]结合数字孪生技术有效提升了多无人机系统在复合攻击下的稳定性。与经典控制范式相比,队形重构优化允许系统自适应调节结构以适应环境变化,相关研究常采用最优控制方法,以能量或时间最优为目标进行重构规划^[17-20],或基于抗干扰控制器解决障碍物规避问题^[21-22]。然而,现有的解决方案多侧重于提升编队控制律对外部扰动或障碍物的适应能力,存在 2 点明显不足:一是往往假设通信网络是理想或静态的,较少考虑节点故障(如除雪车通信模块失效)对全队协作信息流的结构破坏;二是关于队形稳定性的研究多集中于无人机集群,缺乏针对机场除雪这一具有严格时空约束和任务覆盖性要求场景的深入探讨。

韧性作为衡量系统在故障下维持性能及恢复能力的关键指标,已在工程系统设计中得到广泛关注^[23-26]。对于多智能体系统,韧性通常被定义为系统在故障干扰下保持可接受性能水平的能力^[27]。现有研究多通过动态效用函数或面向任务的框架来评估系统的抵抗与恢复能力^[28-30]。在建模方面,图论和复杂网络理论被广泛用于描述智能体间的交互关系^[31-32]。然而,随着无线通信在车联网中的深度应用,通信网络已成为物联网系统的脆弱环节。网络故障或节点失效会导致通信拓扑断裂,进而引发系统性瘫痪。

林柄权等^[33]考虑了无人机在拒绝服务攻击下的通信阻塞问题提出了多无人机安全集群控制策略。赵常啸等^[34]提出了应对无人机指挥链路攻击中断风险下的攻击检测方法。然而这些研究仍属于被动策略,没有从网络配置的角度考虑提升韧性。尽管已有研究尝试从时空特性出发设计韧性指标^[35]或通过启发式算法优化重配置速度^[36],但也未考虑从网络设计角度提升系统韧性。另一方面,Wu 等^[37]考虑网络自组织和重构能力,提出了基于博弈论的无人机重构框架,综合收益矩阵、网络结构和通信范围给出最佳配置;Hu 等^[38]为对无人机群抗毁性进行定量评估,引入渗流理论分析集群的韧性变化过程,除了考虑图的度还考虑了节点间的距离对集群模型实现了精确和现实的描述;Geng 等^[39]开发了一种基于智能体的韧性分析框架,全面考虑了网络的动态性能。这些研究基于通信网络考虑无人机集群的抗毁性,但仍停留在节点度方差等这种通用的拓扑属性,仅能反映网络的静态性能,且其对象大多是无人机,缺乏同时考虑网络抗毁性设计和严

格物理覆盖连续性需求场景的解决方案。

综上所述,本文针对机场除雪作业的任务覆盖特征与高动态时空特性,提出了一种面向韧性提升的车联网通信拓扑优化与动态重构方法。首先,建立除雪作业过程的性能评估指标,引入面向任务场景的韧性度量模型,以定量描述系统的抵抗与恢复能力。其次,针对通信网络抗毁性需求,提出一种基于节点度方差的结构生存性指标,用于指导除雪编队的通信拓扑设计。再次,为解决拓扑设计这一 NP-hard,基于凸松弛方法建立了混合整数半正定规划模型,并将其等效分解为基于整数二次规划的度矩阵优化和基于半正定规划的图可行解问题,获得具备高韧性的最优通信拓扑。最后,针对节点失效后的覆盖断点问题,设计基于重映射的动态紧缩重构策略,通过逻辑拓扑的快速自愈实现物理作业间隙的及时闭合。研究结果为提升机场除雪集群在恶劣环境下的运行安全与作业效能提供理论依据与技术参考。

1 问题描述与作业模型

1.1 机场除雪编队谱图理论

机场除雪车协同编队控制采用分布式通信,仅有部分车辆能够获取到领航车辆的状态信息,且跟随者车辆只能跟相邻的车辆进行通信。车辆编队间的交互拓扑可通过无向图 $G=(V,E)$ 建模,其中 V 为节点的集合, $V=\{1,2,\dots,N\}$, E 为两节点间连线的集合。假设车辆间的通信建立在两车之间的信号覆盖范围之内,其通信作业映射图如图 1 所示。

G 的性质可以通过邻接矩阵 A 进行描述,定义如下

$$A=[a_{ij}]\in\mathbb{R}^{N\times N} \quad (1)$$

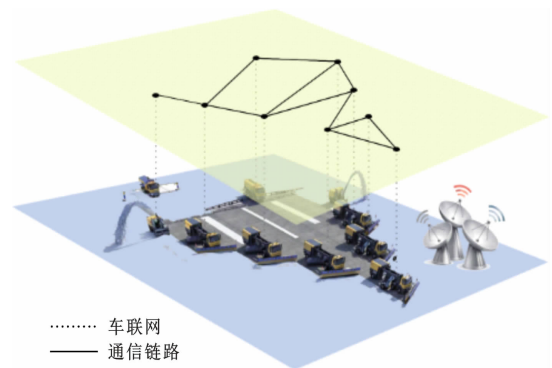


图 1 除雪作业编队及通信映射

Fig. 1 Snow removal operation formation and communication mapping

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \{i, j\} \in E \\ 0 & \{i, j\} \notin E \end{cases}$$

式中: $\mathbf{A}$ 为邻接矩阵; a_{ij} 为邻接矩阵第 i 行、第 j 列元素; N 为通信节点总数; i 和 j 为节点编号; E 为通信边集合; $\{i, j\} \in E$ 表示节点 i 与节点 j 之间存在通信链路。

拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 定义如下

$$\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}\{d_{g1}, d_{g2}, \dots, d_{gN}\}$$

$$d_{gi} = \sum_{j=1}^N a_{ij}$$

式中: $\mathbf{D}$ 为度矩阵; d_{gi} 为所有关于节点 i 的入度。

拉普拉斯矩阵的谱性质即特征值决定了多智能体系统的动态行为^[12]。设其特征值按升序排列为 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N$, 则 $\mathbf{G}$ 是连通的, 当且仅当其第二小特征值 $\lambda_2 > 0$ 。特征值 λ_2 在代数图论中被称为代数连通度, 是衡量网络拓扑韧性的关键量化指标, 其与图顶点连通度 $\kappa(\mathbf{G})$ 存在如下约束关系

$$\lambda_2(\mathbf{G}) \leq \kappa(\mathbf{G}) \leq \delta_{\min}(\mathbf{G})$$

式中: $\lambda_2(\mathbf{G})$ 和 $\delta_{\min}(\mathbf{G})$ 分别为破坏图连通性所需移除的最少节点数量和图中节点的最小度数。

1.2 机场除雪作业编队系统建模

为了实现多辆除雪车沿机场跑道进行编队除雪作业, 将除雪车简化为二阶积分器模型, 假设编队中有 N 辆车, 则第 i 辆车的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{p}_i(t) \in \mathbb{R}^2$ 和 $\mathbf{v}_i(t) \in \mathbb{R}^2$ 分别为车辆的位置坐标 (x_i, y_i) 和车辆的速度向量; $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbb{R}^2$ 为控制输入, 基于一致性的编队控制律具体表达式如下

$$\mathbf{u}_i(t) = -k_p \sum_{j \in N_i} a_{ij} [(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) - \delta_{ij}] - k_v \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) + k_n (\mathbf{v}_{\text{ref}} - \mathbf{v}_i) \quad (4)$$

式中: a_{ij} 和 δ_{ij} 分别为通信权重和期望的相对位置误差, 这是形成期望队形的关键; $\mathbf{v}_{\text{ref}}$ 为除雪作业期望的巡航速度; k_p 、 k_v 、 k_n 分别为相对位置、相对速度和参考速度误差的控制增益; N_i 为与节点 i 相连节点的集合。

2 除雪集群作业韧性建模

2.1 作业性能指标

在机场除雪集群作业中, 作业效能与车队的空间拓扑结构呈现强耦合关系。理想状态下, 多台除雪车保持紧密的斜列编队, 可实现对跑道的 100%

无缝覆盖。然而, 在实际作业中, 若车队受到通信干扰或物理故障影响, 导致编队构型松散或车辆离散分布, 即便所有个体均处于运行状态, 由于作业覆盖面的不连续性, 其实际清理效果将大打折扣。这意味着, 仅依靠车辆数量或个体状态无法准确表征集群的协同作业能力。为了定量描述编队结构对作业质量的影响, 准确反映“紧密协同高效能、松散离散低效能”的作业特性, 本文引入核心性能指标, 即有效横向覆盖宽度, 作为衡量集群作业韧性的关键依据。

设时刻 t 共有 N 台除雪车参与作业, 如图 2 所示。将第 i 台车辆在横向方向 (记为 y 轴) 的有效作业覆盖投影表示为区间

$$I_i(t) = [y_i^-(t), y_i^+(t)]$$

式中: $y_i^-(t)$ 和 $y_i^+(t)$ 分别为该车在横向方向覆盖投影的左右端点。

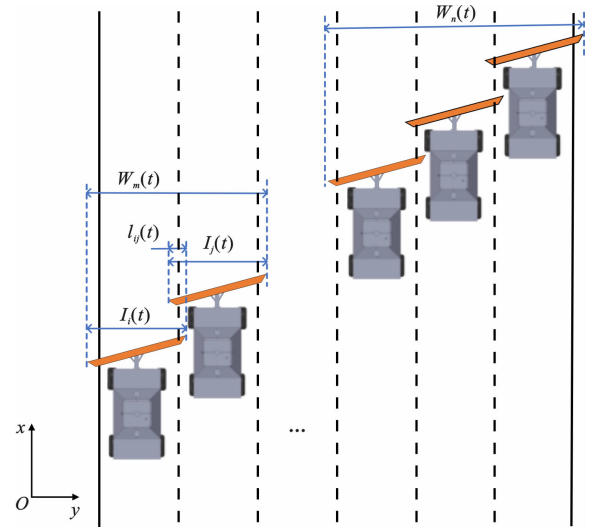


图 2 除雪有效作业覆盖投影示意

Fig. 2 Schematic of effective snow removal coverage projection

为防止车辆间出现空隙造成漏扫, 设相邻车辆在横向方向需满足最小重叠宽度 $\delta_{\min} \geq 0$ 。定义任意 2 个区间 $I_i(t)$ 和 $I_j(t)$ 的重叠长度为

$$I_{ij}(t) = \mu[I_i(t) \cap I_j(t)]$$

式中: $\mu(\cdot)$ 为一维 Lebesgue 测度。

进一步定义车辆间的有效邻接关系 $(i, j) \in E(t)$, 即车辆 i 与 j 满足编队作业的纵向邻近约束且横向覆盖满足连续性要求 ($l_{ij} \geq \delta_{\min}$), 由此构造在 t 时刻的无向图

$$\mathbf{G}(t) = (\mathbf{V}, \mathbf{E}(t))$$

设 $\mathbf{G}(t)$ 的连通分量为 $\{L_z(t)\}_{z=1}^{M(t)}$, 则第 z 个连通分量对应的横向有效覆盖宽度的定义为

$$W_m(t) = \mu\left[\bigcup_{i \in L_z(t)} I_i(t)\right]$$

最后,系统在 t 时刻的有效横向覆盖宽度定义为

$$W_{\text{effect}}(t) = \max_{1 \leq z \leq M(t)} (W_m(t)) = \max_{1 \leq z \leq M(t)} (\mu[\bigcup_{i \in L_z(t)} I_i(t)]) \quad (5)$$

如图 2 所示的车辆 i 和 j 构成了第 z 个连通分量对应的横向覆盖宽度 $W_m(t)$,除雪车 a 、 b 和 c 则构成了第 n 个连通分量 $W_n(t)$,显然 $W_n(t)$ 的宽度是当前时刻的最大作业宽度,则 $W_n(t)$ 构成了系统的有效横向覆盖宽度。需要说明的是,本文将系统有效横向覆盖宽度定义为最大连通分量对应的覆盖宽度,主要是基于机场除雪作业对连续覆盖和作业完整性的要求。在除雪过程中,车辆通常需要以连续队列形式沿跑道方向推进,并将积雪由跑道中部向两侧清除。当故障导致车队分裂为多个连通分量时,虽然各分量仍可能在局部区域内保持一定作业能力,但若分量之间存在未清扫间隙,则简单叠加各分量覆盖宽度可能会高估实际清扫效果。因此,本文采用最大连通分量覆盖宽度刻画当前状态下仍能维持连续协同作业的最大有效作业能力。

为了进一步描述系统在运行过程中的性能变化,引入 $P_i(t)$ 表示单车作业效率

$$P_i(t) = I_i(t) \parallel v(t) \parallel \quad (6)$$

其意义在于当除雪车以越快的速度作业,则其单位时间内扫过的面积越大,但是如果车辆为了重构队形而减速或者转向,则会导致效率的下降。由于单车作业效率无法反映群体作业的效果,进一步引入有效作业因子表示系统集群的作业效果

$$P(t) = \frac{W_{\text{effect}}}{I_i n} [\sum_{i \in N} P_i(t)] \Psi[G(t)] \quad (7)$$

$$\Psi[G(t)] = \begin{cases} 1 & \lambda_2 > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: n 和 I_i 分别为有效作业的除雪车数量和单车有效横向除雪作业宽度; $\Psi[G(t)]$ 为拓扑连通性的惩罚因子。

2.2 韧性模型

除雪作业集群系统韧性是指系统在受到干扰或出现故障个体时的抵抗和恢复能力。韧性作为一个综合性的概念需要考虑系统的脆弱性和可恢复性^[27]。这 2 个性分别对应了系统遭受干扰的抵抗阶段和恢复阶段。除雪作业集群韧性模型如图 3 所示。系统在初始时刻作业效率为 0,当系统开始作业,为了形成稳定的队形,车辆间按预设的通信拓扑进行信息交互并向期望的队形结构收敛,在这一阶段作业效率逐渐上升,并于时刻形成期望的队形

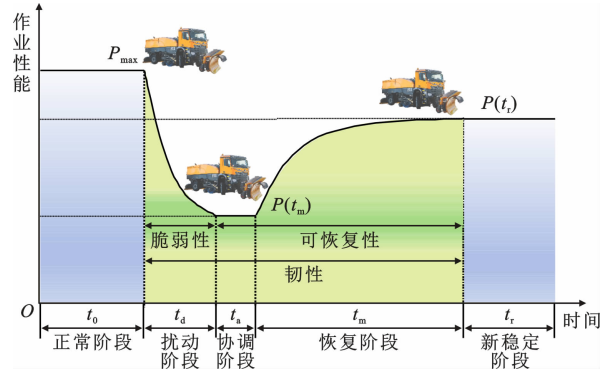


图 3 除雪作业集群韧性模型

Fig. 3 Resilience model of snow removal operation fleets

结构,进入稳定的作业阶段,作业效率达到最高且稳定, $P_{\max}$ 表示除雪作业集群在正常运行期间的整体作业性能。系统在受到扰动后,依靠控制器配置、系统冗余等被动方式抵御状态偏移,系统性能随之开始衰减;衰减幅度由系统的容错能力与鲁棒性设计决定。当系统性能下降至阈值后,将触发主动调控机制:若车辆间通信拓扑仍保持连通,则重新规划编队队形,使剩余除雪车辆以最优作业效能完成除雪任务,系统性能可恢复至 $P(t_r)$ 。但一般 $P(t_r) \leq P_{\max}$,系统往往无法恢复到初始最优性能,主要原因是节点故障会不可逆地削弱系统整体最大作业能力。

基于性能变化,同时考虑中断时间、中断程度、恢复时间和恢复程度的韧性指标如下

$$R(t) = \frac{\int_{t_d}^{t_r} P(t) dt}{\int_{t_d}^{t_r} P_{\max} dt} \quad (8)$$

需要指出的是,主动式调控涉及除雪作业集群上层通信网络的恢复,以及如何快速综合有限的资源最大程度的恢复系统作业性能。不同的控制算法将影响此阶段的作业性能。本研究的系统作业性能分析是基于第 2 节中的一致性控制方法和下一节中提出的队形重构策略。

3 车辆网拓扑优化设计方法及队形重构策略

本文所提出的机场自主除雪作业集群是基于车联网-物理层两阶段优化控制模型,如图 4 所示,在第 1 阶段中优化车联网网络拓扑结构,第 2 阶段基于优化后的网络结构控制除雪车形成期望的队形。由于车联网和物理层是紧密耦合的,一旦网络中某个节点出现断联,物理系统的运行将受到严重影响。因此,在设计车联网的通信拓扑时,需要关注如何提

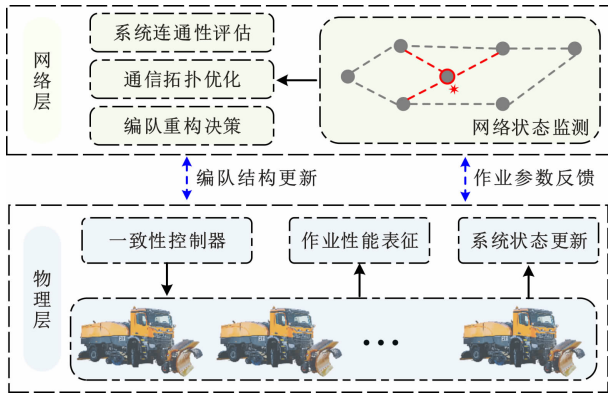


图4 机场除雪作业集群车联网-物理层双层架构

Fig. 4 Airport snowplow fleets vehicle networking-physical layer dual layer architecture

高通信拓扑的结构生存性,这是影响车联网网络安全的关键。此外车联网还承担着作业队形恢复的任务,在除雪、农业或地毯式地搜索作业等任务中,队形的空间连续性至关重要。因此还需对破碎的队形进行重构以恢复作业的连续性。

3.1 车联网拓扑结构指标

假设攻击的通信节点集为 N^* ,则剩余的通信节点组成集合 $S=V-N^*$,网络安全性优化的关键在于确保出现故障后,剩余的通信节点 S 仍能构成一个连通的拓扑。因此,在连续节点故障下,通信网络能够保持连接的能力即为其结构生存能力。节点度数是评估拓扑结构的重要指标,反映了节点在通信网络中的重要性。为了提高通信网络节点损失下的抵抗能力,除雪车之间的度数应尽量均匀分布,以增强网络的鲁棒性。在图论中,度分布的熵通常用于衡量节点度的均匀性,如下所示

$$H_{\text{entropy}} = - \sum_{i=1}^N p(d_i) \ln [p(d_i)] \quad (9)$$

$$p(d_i) = \frac{\theta_i}{N} \quad (10)$$

式中: H_{entropy} 为拓扑的结构熵; d_i 为节点的度; $p(d_i)$ 为网络中度为 d_i 的节点所占的比例; θ_i 为节点度为 d_i 的节点个数,并且 $d_i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ 。

如果直接将 H_{entropy} 作为设计目标则需要引入额外的变量 $p(d_i)$ 和 θ_i ,并且优化模型将会是一个非线性模型。受度分布定义的启发,本文提出了一种基于通信节点间度偏差的新型结构生存性指标 H_1 ,用于通信拓扑优化。与 H_{entropy} 相反,指数 H_1 是决策变量 $\mathbf{D}$ 的二次函数,这大大降低了拓扑设计问题的计算成本。因此,我们使用节点度的方差来衡量节点度的均匀性,即

$$H_1 = \|\mathbf{D} - \bar{\mathbf{D}}\mathbf{I}\|_2^2 \quad (11)$$

式中: $\bar{\mathbf{D}}$ 为网络的平均节点度; $\mathbf{I}$ 为一个 N 阶单位矩阵。

H_1 越小,表明网络节点度分布越均衡,在多次连续节点故障事件下,通信拓扑的结构生存能力越强。需要指出的是,最小化节点度方差 H_1 并非是最优化作业韧性 $R(t)$ 的充分必要条件,因此 H_1 表征的是通信拓扑抗毁性与去中心化程度的结构代理指标。本文研究目标是从网络层面提升作业集群韧性,而非在单一层面实现全局最优韧性控制。从图2可以看出,作业性能演化可划分为扰动前稳态、扰动发生、性能下降、恢复调节和恢复后稳态等阶段。对于积分型韧性指标 $R(t)$ 而言,提高系统在扰动阶段的抵抗能力、减缓性能下降幅度并改善恢复过程,均有助于提高作业性能积分,从而提升系统韧性;本文正是从通信拓扑抗毁性设计这一角度切入,对其中扰动抵抗和恢复支撑环节进行优化。在固定节点数与边数约束下,较小的节点度方差通常对应更均衡的度分布,意味着系统对少数高阶节点的依赖程度较低。当连续节点故障发生时,度分布较均衡的拓扑在统计意义上更有利于延缓网络分裂并维持通信连通性,从而提升重构控制指令的可达性与一致性信息传播效率。该结构层优势将进一步传递至任务层性能演化过程:通信连通保持能力越强,编队车辆在故障后的队形调整、间距协调与覆盖补偿越容易实现,作业性能曲线的跌落幅度通常越小、恢复过程越平稳,最终表现为更高的积分型韧性指标。

3.2 拓扑优化目标与约束

根据车联网拓扑结构指标设计如下的拓扑优化模型

$$F_1(m) = \min_{\mathbf{D}} \|\mathbf{D} - \bar{\mathbf{D}}\mathbf{I}\|_2^2 \quad (12)$$

式中: m 为通信边数; $F_1(m)$ 为目标函数。

优化目标函数 $F_1(m)$ 是为了最小化节点度的方差

$$\bar{\mathbf{D}} = 2m/N \quad (13)$$

约束式(14)是邻接矩阵的性质

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{A}^T \\ A_{ii} = 0 \\ A_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (14)$$

约束式(15)定义了节点度和边之间的关系

$$\mathbf{1}^T \mathbf{D} \cdot \mathbf{1} = 2m \quad (15)$$

式(16)定义了度矩阵和邻接矩阵的关系

$$\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{1}^T \mathbf{A}) \quad (16)$$

式(17)确保拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 的特征值 λ_2 需要大于 σ 以确保图是连通的

$$\lambda_2(\mathbf{L}) \geq \sigma \quad (17)$$

式(18)定义了拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 基于谱图理论的约束项

$$\begin{cases} \mathbf{L}^T = \mathbf{L} \\ \mathbf{L} \geq 0 \\ L_{ii} \geq 0 \\ \mathbf{L} \cdot \mathbf{1} = 0 \\ \mathbf{L} - \text{diag}(\mathbf{L}) \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

然而上述问题是一个混合整数非线性规划问题,这主要是因为式(17)中的特征值 λ_2 无法直接获得解析解,因此对约束条件(17)进行放缩,替换为如下约束

$$\gamma \mathbf{I} \leq \mathbf{L} + \zeta \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T \quad (19)$$

式中: γ 为代数连通度的预设下界; ζ 为零特征方向补偿参数,取 $\zeta = \gamma/N$ 。

由于图拉普拉斯矩阵满足 $\mathbf{L} \cdot \mathbf{1} = 0$,其中全 1 向量方向存在零特征值,因而不能直接要求 $\mathbf{L} \geq \gamma \mathbf{I}$ 。加入 $\zeta \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T$ 后,可以对该零特征方向进行补偿。对于任意与 $\mathbf{1}$ 正交的向量 $\mathbf{x}$,有 $\mathbf{1}^T \mathbf{x} = 0$,因此

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{L} + \zeta \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T) \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{L} \mathbf{x} \quad (20)$$

说明该补偿项不会改变正交子空间上的谱性质。另一方面,在全 1 向量方向上, $\zeta \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T$ 的特征值为 $N\zeta$ 。当 $\zeta = \gamma/N$ 时,该方向上的特征值刚好等于 γ 。因此,约束(19)等价于要求 $\mathbf{L}$ 在与 $\mathbf{1}$ 正交的子空间上满足 $\lambda_2(\mathbf{L}) \geq \gamma$ 。由此可见,该半正定约束在代数连通度约束意义下是紧的;若取 $\zeta > \gamma/N$,则仅在全 1 方向上引入额外冗余,不会放宽对 $\lambda_2(\mathbf{L})$ 的约束。

需要注意的是,式(17)直接对网络连通性的谱性质进行约束,其与拓扑决策变量存在非线性耦合,导致原问题具有明显的非凸性,难以直接求解。为此,本文利用图拉普拉斯矩阵的谱特性,将原约束放缩为半正定约束形式(19),从而将连通性要求转写为可计算的凸约束。其核心思想在于代数连通度 $\lambda_2(\mathbf{L})$ 刻画了网络连通强度,若拉普拉斯矩阵在与全 1 向量正交的子空间上满足下界约束,则可有效保证 $\lambda_2(\mathbf{L})$ 的下界不低于预设阈值。因而,式(19)可作为式(17)的保守替代,用于在优化过程中实现连通性保证到凸化求解的统一。

通过对约束条件的放缩上述问题转化为了一个混合整数半正定规划问题(MISDP),但是该问题求解仍然存在一定的复杂度。因此下一步将对混合整数半正定规划问题进行拆解。再对拆解后的二次规划问题(IQP)进行问题求解,基于可行解 $\mathbf{D}$ 矩阵搜

寻可行的 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{L}$,则可以确定优化后的拓扑结构。

理论 1(潜在连通度序列判断):给定一个连通度序列 $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N)$,若满足 $d_i \geq 1, \sum_{i=1}^N d_i \geq 2(N-1)$,则以该度序列为分布的连通图是潜在连通的。

理论 2(可图度序列判断):给定一个非递增的非负整数序列 $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N)$ 。当且仅当 $\sum_{i=1}^N d_i$ 是偶数,且

$$\sum_{i=1}^k d_i \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^N \min\{k, d_i\} \\ k \in \{1, 2, \dots, N\}$$

则存在以该度序列为分布的具有 N 个节点的图表示。

通过理论 1 和理论 2 可以将问题进一步简化为度优化问题和图表示问题。前者旨在优化度序列(或度矩阵 $\mathbf{D}$),前提是它是潜在连通图的度分布。后者旨在基于给定的度序列找到一个连通图表示。基于此,度矩阵优化问题可以转化为以下 IQP 问题

$$F_1(m) = \min_{\mathbf{D}, \mathbf{A}, \mathbf{d}, \mathbf{v}} \|\mathbf{D} - \overline{\mathbf{D}}\|_2^2$$

当满足式(13)~(16),得

$$\mathbf{d} = \text{diag}(\mathbf{D})$$

$$\mathbf{1}^T \mathbf{d} \geq 2(N-1)$$

$$d_i \geq d_{i-1} \quad \forall i = 2, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^k d_i \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^N v_{k,i} \quad \forall k = 1, \dots, N-1 \\ v_{k,i} \leq k \quad \forall k = 1, \dots, N-1, i = k+1, \dots, N$$

式中: $v_{k,i}$ 为一个松弛变量,表示 k 和 d_i 的最小值。

求解度优化问题可以得到使节点度方差 H_1 最小的度矩阵,但具有相同度矩阵的图结构并不唯一。因此,对于给定的度矩阵 $\mathbf{D}$,将图结构的构造过程表述为连通图可行性判定问题。该问题以邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 和拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 为决策变量,要求邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 满足式(14)所示的结构约束,度矩阵 $\mathbf{D}$ 与邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 满足式(16)所示的度关系约束,拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 满足式(18)所示的定义约束,同时网络满足式(19)所示的连通性半正定约束。若存在同时满足上述约束条件的邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 和拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$,则表明给定度矩阵 $\mathbf{D}$ 存在对应的连通图实现。

上述可行性判定问题仍属于混合整数半正定规划问题,但与原问题相比,其整数变量数量明显减少,因而求解复杂度较低。此外,该问题只需获得任意一组满足约束条件的邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 和拉普拉斯矩

阵 L , 无需求解最优目标值。数值模拟结果进一步验证了该求解方法的有效性。

3.3 基于重映射的动态紧缩重构策略

仅考虑机场除雪编队为斜列队形, 设计一种策略使得车辆能够快速避免覆盖间隙。该策略遵循“后车补前车”的原则, 当系统检测到 f 节点失效后, 编队中 $i > f$ 所有车辆将触发重构机制。通过对逻辑编号的动态重映射, 后续车辆主动更新其在编队中的虚拟位置与跟踪目标, 从而消除投影区间的断点, 快速恢复最大有效横向覆盖宽度 W_{effect} 。该策略无需进行全局规划, 能够最大程度的保留原有的通信拓扑结构, 降低重构计算成本。具体步骤如下:

(1) 步骤 1, 当车辆 i 监测到前序车辆信号丢失超过设定的阈值 τ_{loss} 时, 判定该节点失效。系统将失效节点从通信网络中剔除, 此时编队在物理空间上出现断裂, 有效覆盖横向宽度 W_{effect} 下降。

(2) 步骤 2, 为填补位置空缺, 系统对剩余车辆进行逻辑编号的更新, 对于编号大于失效节点 f 的车辆, 其更新规则如下

$$l'_i = \begin{cases} i & i < f \\ i-1 & i > f \end{cases} \quad (21)$$

通过式 (21) 计算后, 原 $f+1$ 号车在逻辑上接替了第 f 辆车的位置, 原 N 号车变为 $N-1$ 号车, 编队总规模更新为 $N' = N-1$ 。

(3) 步骤 3, 随着车辆编号的变更, 车辆的控制目标同步更新, 车辆 $f+1$ 的控制器将跟踪目标从失效的 f 切换为 $f-1$, 并根据新的逻辑编号 l'_i 计算期望的相对误差。

(4) 步骤 4, 车辆根据更新后的拓扑关系与位置偏差, 利用第 1.2 节中的一致性控制律生成新的速度与航向指令, 故障点之后的车辆加速机动, 填补失效节点留下的作业间隙, 直至有效横向覆盖宽度 W_{effect} 至理论最大值。

4 算例分析

4.1 动态队形重构策略的作业恢复验证

为验证本文所提车联网通信拓扑优化方法与动态队形重构策略的有效性, 构建了基于 Python 的多智能体仿真环境, 对自主除雪车 (Autonomous Snowplow, ASP) 在突发节点故障条件下的作业连续性与恢复能力进行了定量评估。仿真场景中设置 $N=8$ 辆自动除雪车辆组成协同作业编队, 车辆标称巡航速度为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 单车除雪铲有效作业宽度为 4 m 。初始队形采用斜列式编队, 车辆纵向间距

和横向间距均设为 3 m 。作业路径同时包含直线路段与约 45° 转向的弯道路段, 以考察编队在实际作业环境下的稳定性与适应能力。

除雪作业集群的初始通信拓扑如图 5 所示。实验在 $t=15 \text{ s}$ 时刻注入突发故障事件, 设定编队中的节点 ASP3 与 ASP6 同时发生动力系统失效, 其速度瞬间降至零并退出通信网络。围绕该故障场景, 设计了 2 组对比实验以评估不同控制策略对系统作业性能与韧性表现的影响。在场景 1 中, 系统启用本文提出的队形重构紧缩策略。一旦检测到节点失效, 系统立即触发重构机制, 对剩余车辆的逻辑邻接关系进行更新, 并重新规划目标占位。

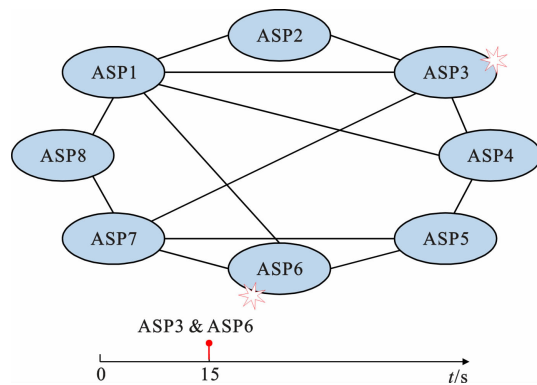


图 5 除雪车集群通信拓扑

Fig. 5 Communication topology of autonomous snowplows

图 6(a) 展示了该场景下的除雪车辆运动轨迹 (故障点如图中红色标记所示)。观察可知, 尽管 ASP3 和 ASP6 退出作业, 但得益于通信拓扑的快速重连与信息交互, 邻近车辆迅速响应, 通过横向与纵向的主动机动有效填补了失效节点留下的作业间隙。最终, 编队在进入弯道前成功重构为由 6 辆车组成的紧密斜列结构, 维持了作业区域的空间连续性。相比之下, 在场景 2 中, 系统未采用主动重构策略。如图 6(b) 所示, 当 ASP3 与 ASP6 停止作业后, 其余车辆仅能维持原定轨迹运行, 无法感知并补偿相邻位置的缺失。这导致作业覆盖面出现显著的断裂带, 并在跑道表面遗留连续的“雪脊”。这种覆盖间断不仅降低了除雪效率, 更对后续航空器的起降安全构成了严重隐患。

为进一步验证所提出方法的优势, 在相同场景下引入了一种基于集中式全局路径重构的对比方法。该方法以虚拟领航者作为统一的跟踪目标, 其余车辆作为跟随者接收由虚拟领航者统一下发的控制指令。当车队中发生车辆故障时, 系统根据剩余可用除雪车的状态信息, 对整体路径进行重新规划与任务重分配, 以实现全局最优的队形结构调整。

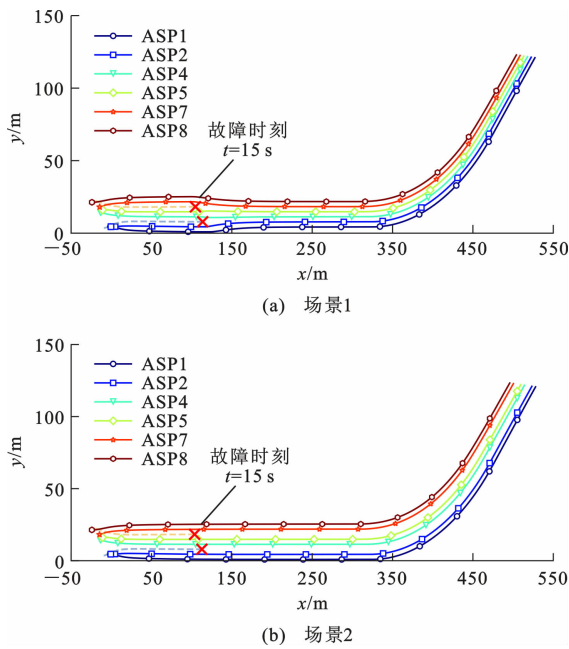


图6 除雪车作业集群运动轨迹

Fig. 6 Trajectories of autonomous snowplows

图7展示了该集中式重构策略下车辆队形重构后的运动轨迹。可以观察到,在故障发生后,由于采用集中式决策机制,跟随车辆并未立即响应,而是在保持原有运动轨迹一段时间后才开始调整路径。这一现象主要源于集中式重构过程中的统一计算与信息汇总机制所带来的决策延迟。尽管该方法能够获得较优的全局分配结果,但其计算复杂度随智能体数量增加而显著上升,导致重构响应时间延长。在机场除雪作业这一对实时性要求较高的应用场景中,较长的反应时间可能影响作业连续性与效率。

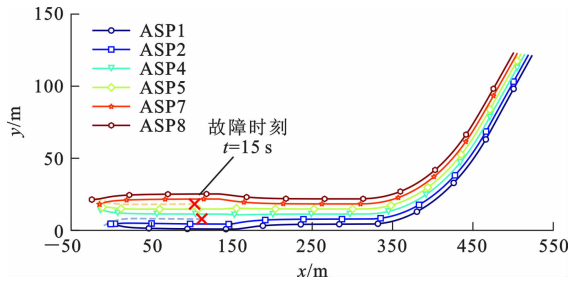


图7 基于集中式重构方法下的除雪车作业集群运动轨迹

Fig. 7 Trajectory evolution of snow removal vehicle fleet under centralized reconfiguration

基于前文提出的除雪作业性能指标 $P(t)$,对3种试验场景下的系统响应过程进行了定量刻画,演化结果如图8所示。初始协同阶段($0 \sim 15$ s),各除雪车辆由离散初始状态逐步调整至期望编队构型,随着有效横向覆盖宽度的累积,作业性能持续攀升,并在队形稳定后收敛至峰值,表明集群单位时间

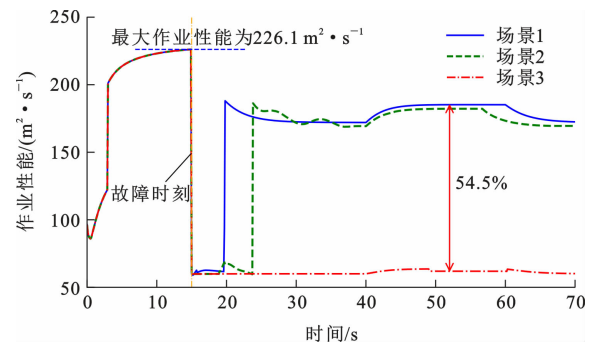


图8 除雪车集群作业性能演化

Fig. 8 Evolution of snow removal operation performance

内的有效作业面积达到最大化。故障扰动阶段($t = 15$ s),随着 ASP3 与 ASP6 节点的瞬时失效,系统物理作业宽度发生突变,导致3种场景下的性能曲线均出现阶跃式跌落。恢复与差异化阶段($t > 15$ s),此后,2种控制策略的性能表现呈现显著分化。在场景1中,得益于队形重构策略的介入,系统经历了短暂的瞬态调整后,作业性能开始稳步回升,最终稳定在由剩余6辆活跃车辆所能达到的理论性能边界附近。这表明队形重构策略有效实现了剩余资源的重新分配,在车辆减损的情况下最大化了集群的作业效能。反观场景2,由于缺乏自适应重构机制,作业集群长期处于松散的非协同状态。尽管剩余车辆仍保持运行,但因物理空间上的作业间隙无法闭合,导致投影区间断裂。根据有效横向覆盖宽度的连通性判定规则,系统的有效作业宽度退化为最大单一连通分量的长度(即仅相当于2辆车的覆盖宽度),而非所有活跃车辆的宽度之和。因此,其性能曲线持续停滞在低水平振荡,无法体现集群协同的规模优势。而在集中式队形重构策略下,系统在故障发生后首先经历了明显的决策与响应延迟,性能曲线在短时间内维持在较低水平。随后,随着全局路径重新规划与任务重分配完成,作业性能逐步回升,并最终接近剩余车辆所能达到的理论上限。然而,与场景1相比,其恢复过程呈现出更长的响应时间与更大的瞬态波动。这主要源于集中式控制需要完成全局信息汇总与统一优化计算,决策复杂度随车辆数量增加而提升,从而带来一定的时间开销。尽管集中式策略能够实现较优的全局分配结果,但在对实时性要求较高的机场除雪场景中,其响应延迟可能对作业连续性产生不利影响。

基于韧性度量模型式(8)对全过程作业数据进行评估,结果如表1所示。统计数据表明,场景1的系统综合韧性指标达到0.768,较场景2的0.355显著提升了116.3%,相比场景3提升了6.1%。该结

表 1 不同场景下的韧性表现

Table 1 Resilience performance in different scenarios

场景	1	2	3
韧性指标	0.768	0.355	0.721

果验证了所提方法在保障作业连续性方面的优越性。

4.2 通信拓扑优化的网络抗毁性验证

为量化评估所提拓扑优化方法在连续节点故障条件下对系统韧性的提升作用,构建了包含多重级联失效的仿真场景。通过对比优化前后的网络拓扑性能,分析了系统在遭遇连续攻击时的动态响应行为,并依据作业性能演化曲线与韧性指标,对除雪集群的抗毁性与自愈能力进行了全流程定量分析。

仿真设置 $N=6$ veh 自动除雪车组成协同作业集群,作业路径包含直线路段与 U 形弯道,以模拟复杂的实际运行工况。基于第 3 节提出的拓扑优化模型,对集群通信网络进行结构设计。对于 6 节点的通信网络,设定通信边数约束范围为 5~15 条。图 9 展示了通过求解 MISDP 模型获得的不同边数条件下的最优结构生存性指标 H_1 最小值。结果显示,当 $H_1=0$ 时,通信拓扑的节点度方差最小,表现出最强的理论结构生存能力。这是因为在此条件下,通信拓扑呈现正则图特性,即所有节点具有相同的度数,消除了网络对个别高度数中心节点的依赖,从而显著降低了系统对关键节点失效的敏感性。

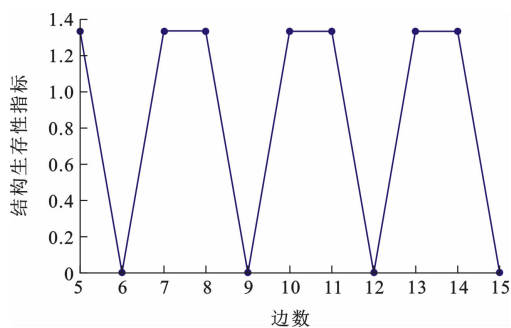
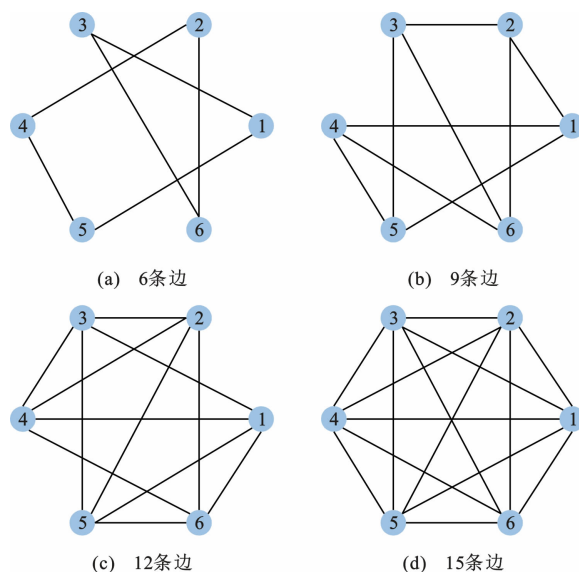
图 9 不同边数下 H_1 最小值Fig. 9 Minimum value of index H_1 under different numbers of edges

图 10 为 $H_1=0$ 下的优化拓扑结构。选取边数为 12 的工况进行具体分析。图 11(a) 展示了随机生成的基准通信拓扑,其节点度分布极不均匀(分别为 5、5、3、3、4、4),存在明显的中心化特征。相比之下,图 11(b) 为优化后的通信拓扑,各节点度分布均衡,形成了高度对称的网状结构,图 11(c) 为环形拓扑,图 11(d) 展示的为全连通拓扑。图中红色节点及其关联虚线表示因故障而中断的通信链路,黑色实线

图 10 满足 $H_1=0$ 的优化拓扑结构Fig. 10 Optimal communication topology satisfying $H_1=0$

表示保持有效的传输链路。时间轴标记了各车辆发生故障的具体时刻,分别为 10、25、40、55 s,用以模拟连续故障事件的时序特征。

图 12 记录了随机拓扑下除雪集群在面对连续故障时的运动轨迹与性能演化。试验显示,当 $t=10$ s,虽然系统遭受扰动,作业性能呈现阶梯式下降,但通信网络仍维持连通,剩余车辆尚能作业。然而,当 $t=25$ s 时第 2 次故障,关键节点 ASP5 失效发生时,通信拓扑发生不可逆的分裂。由于随机拓扑高度依赖中心节点 ASP5,其失效导致剩余网络被切割为以 ASP2、ASP3 和 ASP4 为代表的相互独立的孤岛子群。此时,子群间无法建立有效的一致性协同,导致作业区域出现显著中断,并在路面残留连续的“雪脊”。性能曲线显示,在第 3 次故障后,系统作业性能出现断崖式下跌,表明编队控制彻底失效。

相较于随机拓扑,优化后的网络结构展现出显著的抗毁性优势。图 13 展示了优化拓扑下的系统响应。由图可知,得益于均匀化的度分布设计,优化拓扑在经历第 3 次节点故障 $t=40$ s 后,并未发生网络分裂。尽管作业性能指标出现了瞬时下降,但剩余的 3 辆车仍能保持通信连通。系统利用冗余通信路径迅速完成信息交互与队形重构,使作业性能逐步恢复并趋于新的稳定状态。这表明,通信拓扑优化通过消除结构上的限制,有效抑制了故障的级联扩散,显著增强了系统在极端工况下的恢复能力。

除此之外我们还验证了环形拓扑在 3 次相同故障序列下的作业性能表现,如图 14 所示,相比于随

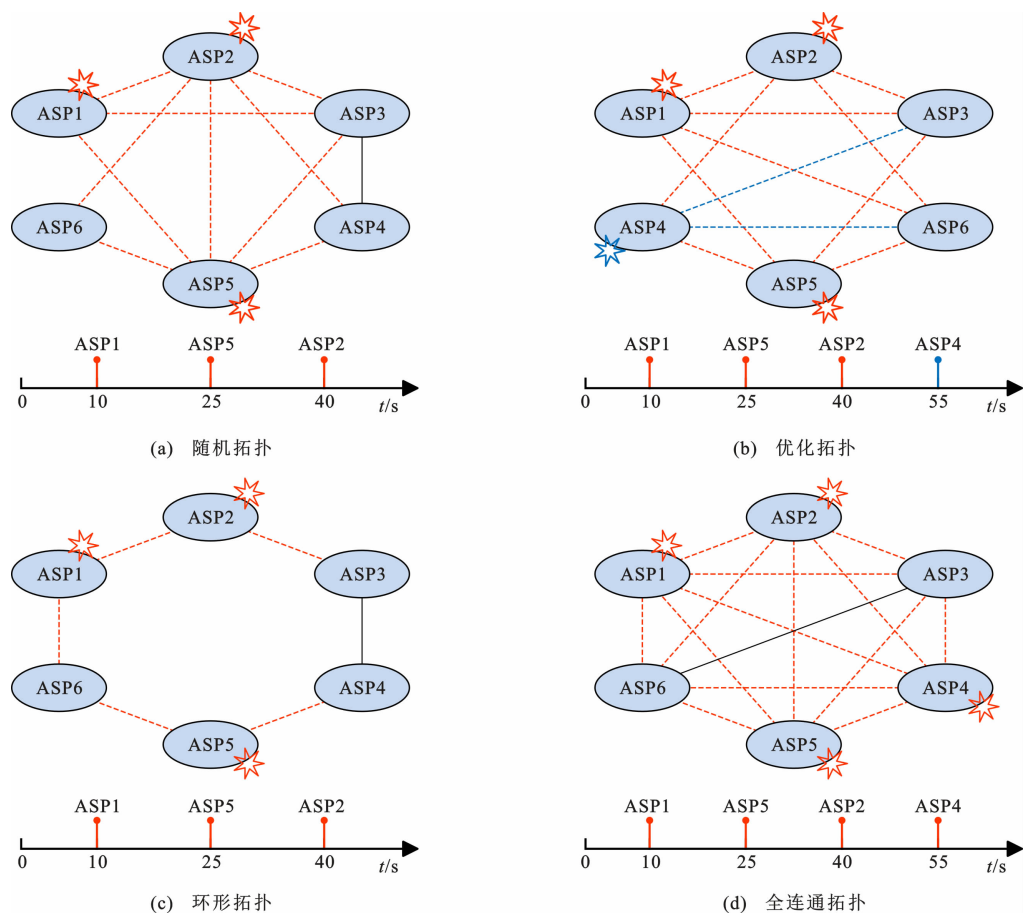


图 11 通信网络拓扑结构设置

Fig. 11 Topological structures of communication network setting

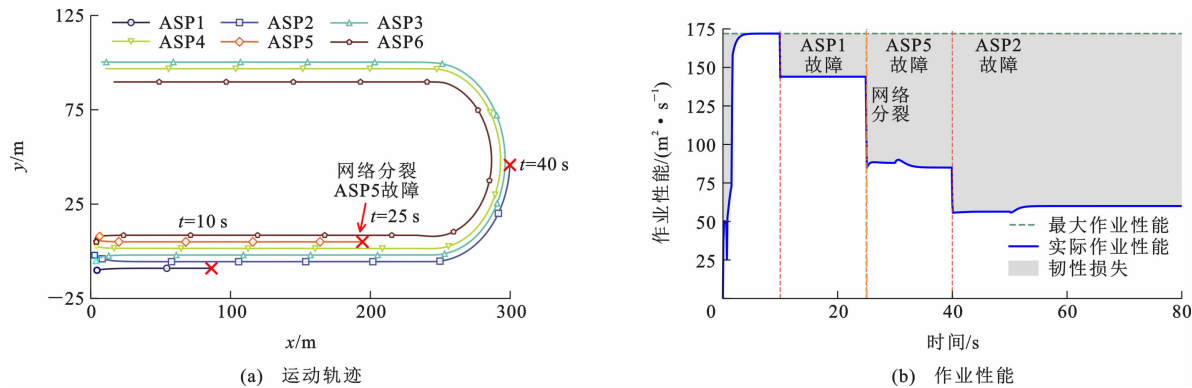


图 12 随机通信拓扑下 3 次节点故障条件下的运动轨迹和作业性能演化曲线

Fig. 12 Trajectories and performance evolution curves under random communication topology with three node failures

机拓扑和优化拓扑,环形拓扑在连通度上并不占优势,其拓扑结构仅有 6 条边,因此其抵抗故障的能力有所下降,在第 25 s 处出现 ASP5 故障后,通信网络发生分裂,作业性能指标出现下降,尽管随机拓扑在性能表现上与环形拓扑类似,这主要是由于故障序列的随机性有限,但这也充分说明了度分布设计均匀性大大提高了拓扑抗毁能力的下限。

表 2 对 3 种拓扑在 3 次故障事件中的综合韧性表现进行了量化对比。统计结果显示,优化拓扑对

表 2 不同拓扑下的韧性表现			
Table 2 Resilience performances in different scenarios			
拓扑结构	随机拓扑	优化拓扑	环形拓扑
韧性	0.572	0.647	0.572

应的韧性指标由随机拓扑和环形拓扑的 0.572 提升至 0.647,相对提升幅度达 13.1%。该数据验证了本文所提基于节点度方差的优化方法能够有效提升通信网络的鲁棒性,使除雪集群在极端受损工况下依然维持核心作业功能。

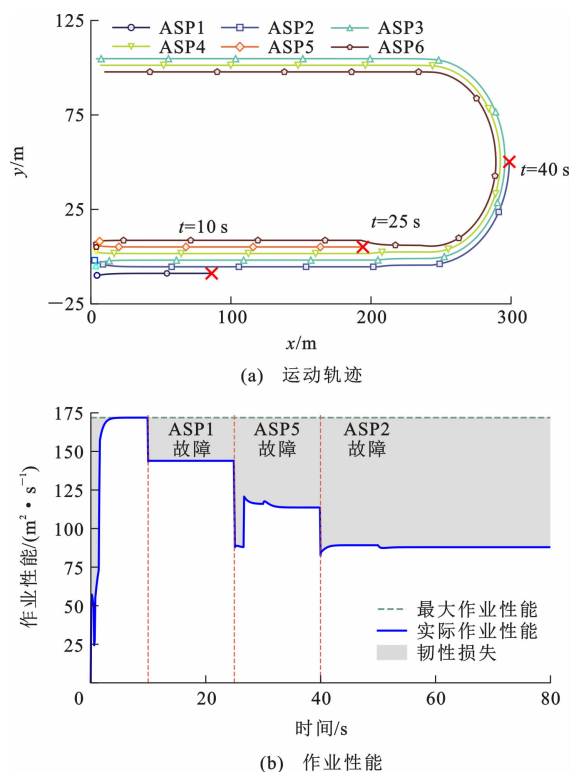


图 13 优化通信拓扑下 3 次节点故障条件下的运动轨迹和作业性能演化曲线

Fig. 13 Trajectories and performance evolution curves under optimized communication topology with three node failures

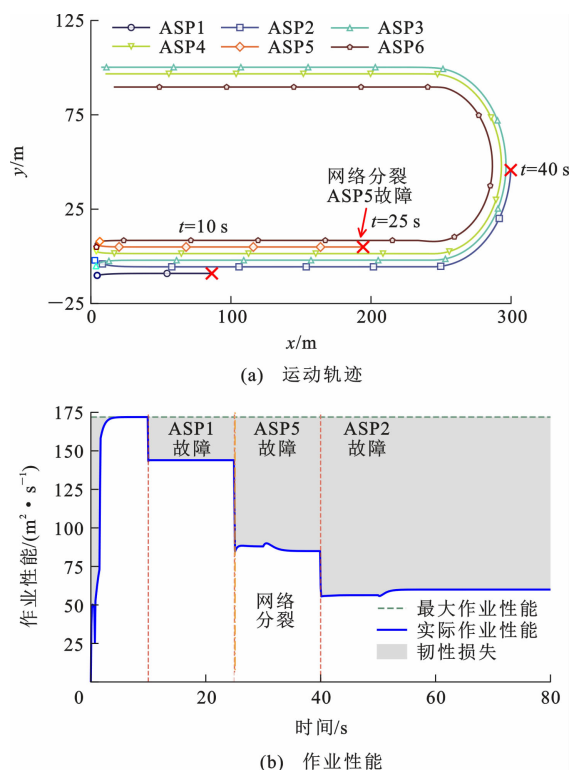


图 14 环形拓扑下 3 次节点故障条件下的运动轨迹和作业性能演化曲线

Fig. 14 Trajectories and performance evolution curves under ring topology with three node failures

为进一步探究优化拓扑的物理承载极限,图 15 展示了在连续发生第 4 次节点故障情形下的系统表现。试验结果表明,在超过 50% 节点失效的情况下,优化后的通信拓扑仍能够维持基本运行能力;仅当第 4 次连续故障发生时,网络连通结构才最终断裂,导致集群协同能力丧失。这表明所提出的拓扑优化方法在多次连续扰动作用下能够显著延缓系统失效过程,提高网络的抗毁能力。

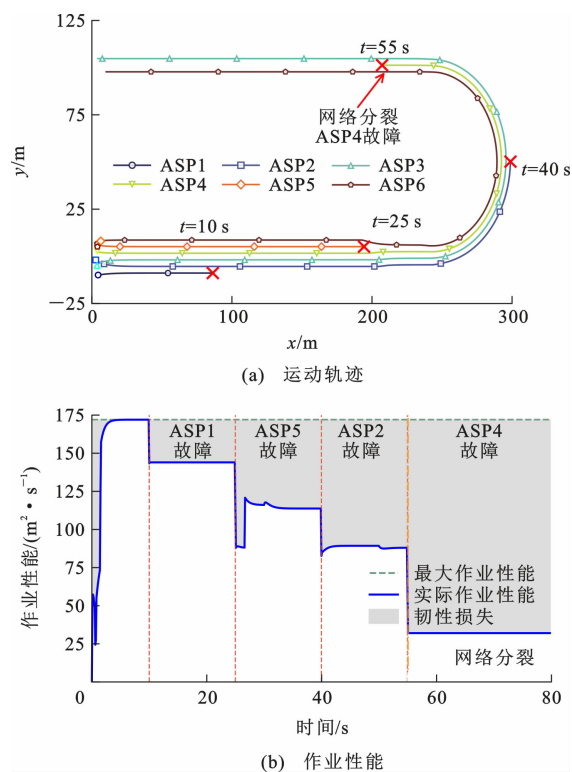


图 15 优化通信拓扑下 4 次节点故障条件下的运动轨迹和作业性能演化曲线

Fig. 15 Trajectories and performance evolution curves under optimized communication topology with four node failures

相比之下,全连通拓扑在每次故障发生后均能够保持通信连通状态,并迅速恢复作业性能。即便在第 4 次故障后,系统仍维持连通性。从图 16 可见,在 55 s 时 ASP4 出现故障后,作业性能仅经历短暂下降便迅速恢复。这主要得益于全连通结构在通信层面所提供的高度冗余,使系统在节点失效情况下仍能保持较强的抗毁能力。然而,全连通拓扑需要更高的通信资源支持,代价较大。相较而言,本文提出的优化方法在有限边数约束下,通过合理的结构设计有效延缓系统崩溃过程,在抵抗阶段展现出较好的性能保持能力,体现出更优的结构效率与工程可行性。

4.3 H_1 指标蒙特卡洛验证与 W_{effect} 参数敏感性分析

为了刻画通信拓扑在随机节点失效后保持连通

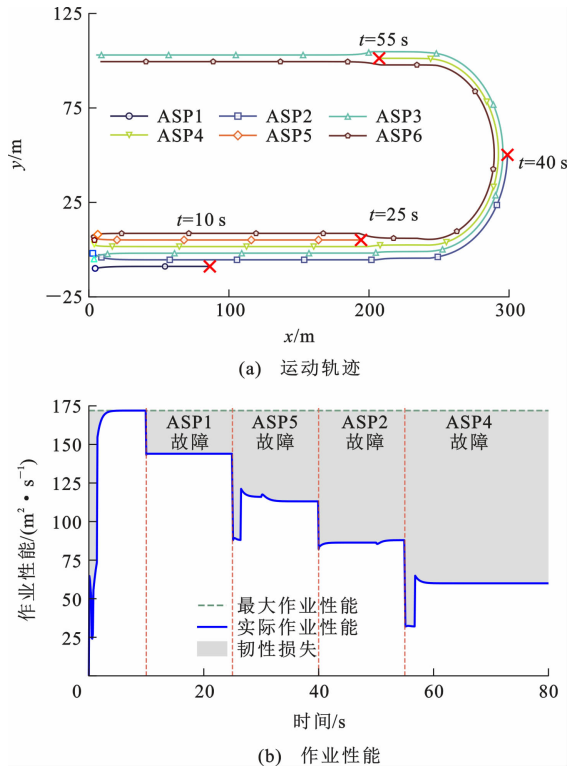


图 16 全连通拓扑下 4 次节点故障条件下的运动轨迹和作业性能演化曲线

Fig. 16 Trajectories and performance evolution curves under fully connected topology with four node failures

的能力,引入故障后连通保持概率 P_{con} 。在蒙特卡洛仿真中,对于给定拓扑,随机删除 q 个节点以模拟 q 次节点故障,并判断剩余通信网络是否保持连通。若第 s 次随机故障试验后剩余网络仍然是连通的,则记 $I_s=1$;否则 $I_s=0$ 。重复进行 M 次随机故障试验后, P_{con} 定义如下

$$P_{\text{con}} = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M I_s$$

式中: M 为随机故障试验次数; P_{con} 的取值范围的数值越大,则表示该拓扑在 q 次节点故障后保持整体连通的概率越大,网络抗毁能力越强。

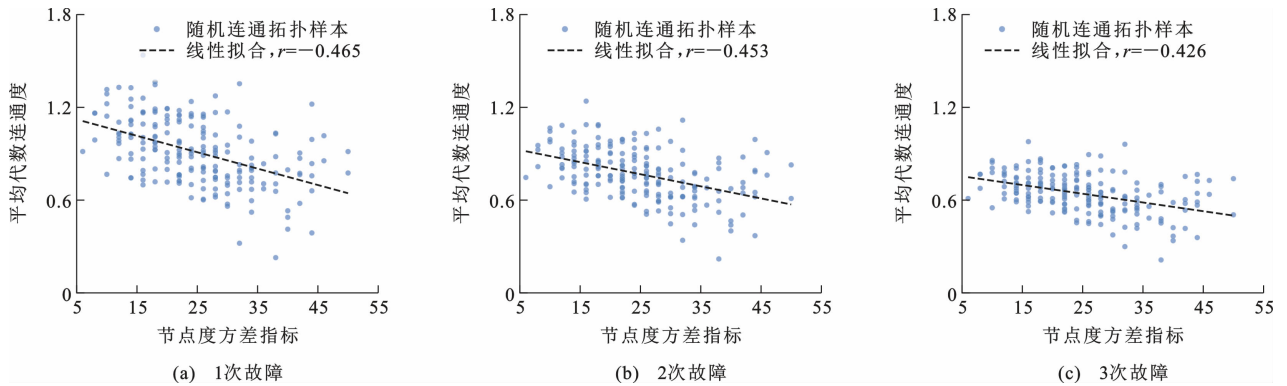


图 18 不同故障次数下 H_1 与故障后平均代数连通度的关系

Fig. 18 Relationship between H_1 and post-failure average algebraic connectivity under different failure numbers

由图 17 可知,节点度方差 H_1 与初始代数连通度 λ_2 呈负相关关系,相关系数为 $r=-0.460$ 。这表明在通信资源规模相同的条件下,节点度分布越均衡,网络的初始连通强度整体越高。进一步分析节点故障后的网络状态可以发现,如图 18 所示,在 1 次、2 次和 3 次节点故障后, H_1 与故障后的平均代数连通度 λ_2 仍然呈稳定负相关关系,相关系数分别为 -0.465 、 -0.453 和 -0.426 。这说明较小的节点度方差有助于提高拓扑结构在节点失效后的连通保持能力。

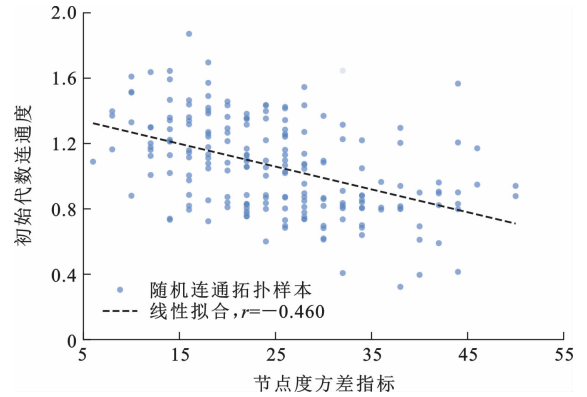
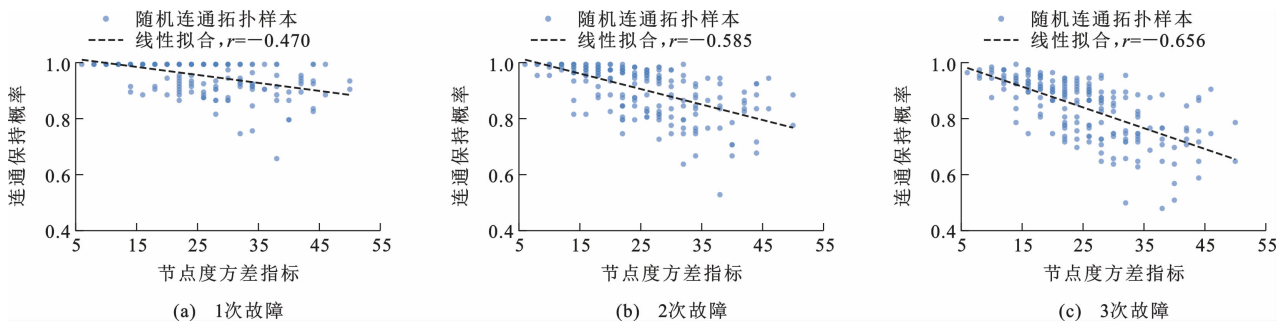


图 17 节点度方差 H_1 与代数连通度 λ_2 的初始关联关系

Fig. 17 Initial correlation between node degree variance H_1 and algebraic connectivity λ_2

同时,图 19 进一步给出了 H_1 与故障后连通保持概率 P_{con} 的关系。结果显示,在 1 次、2 次和 3 次节点故障后,二者的相关系数分别为 -0.470 、 -0.585 和 -0.656 。随着故障次数增加, H_1 与 P_{con} 的负相关程度逐渐增强,说明在多节点连续故障条件下,节点度方差对网络抗毁能力的影响更加显著。较大的 H_1 表明拓扑结构存在较明显的度分布不均衡和局部中心化特征,一旦高度数节点或关键连接节点失效,网络更容易发生分裂;而较小 H_1 的拓扑由于节点连接关系更加均衡,对单个关键节点的依

图 19 不同故障次数下 H_1 与连通保持概率的关系Fig. 19 Relationship between H_1 and connectivity preservation probability under different failure numbers

赖程度较低,因此在随机节点故障后更容易维持通信连通。

上述统计结果验证了节点度方差 H_1 与网络连通性之间的关联关系。结合作业韧性模型,通信连通性是故障后队形重构和作业性能恢复的基础条件。当通信网络能够在节点故障后保持连通时,剩余车辆之间仍可进行一致性信息交互和重构指令传递,从而更有利于完成队形紧缩、覆盖断点闭合和作业性能恢复。反之,若通信拓扑发生分裂,车辆集群难以形成统一协同控制,作业覆盖连续性下降,进而导致系统作业性能 $P(t)$ 降低,并影响积分型韧性指标 $R(t)$ 。因此,蒙特卡洛仿真从统计角度支撑了“ $H_1 \rightarrow$ 网络连通性 $\rightarrow$ 作业性能恢复”的传递逻辑,也说明以最小化 H_1 作为拓扑优化目标具有合理性。

为了进一步说明有效横向覆盖宽度指标对工程参数变化的响应特征,本文对车辆横向间距 d_y 和最小重叠宽度 $\delta_{\min}$ 进行了参数灵敏度分析。设单车有效作业宽度为 w ,相邻车辆横向投影宽度可以表示为 $l_{ij} = w - d_y$ 。当 $l_{ij} \geq \delta_{\min}$ 时,相邻车辆满足连续覆盖要求,其投影区间可合并为同一有效作业连通分量;当 $l_{ij} < \delta_{\min}$ 时,车辆间存在潜在的漏扫风险,覆盖区间发生断裂。

如图 20 所示,当车辆横向间距较小时,相邻车辆直接的重叠较为充分,能够满足不同 $\delta_{\min}$ 条件下的连续覆盖要求,系统保持较稳定的有效覆盖能力。随着 d_y 增大,若仍满足最小重叠条件, W_{effect} 随车辆间距增加而提高,说明适当增大横向间距有利于扩展编队的横向作业覆盖范围。然而当进一步增加横向间距后相邻车辆之间无法满足最小重叠作业要求, W_{effect} 明显下降。图中右上区域对应较大的车辆间距和较高的最小重叠要求,此时连续覆盖条件无法满足,系统有效覆盖宽度退化为局部连通作业分量的宽度。这表明车辆编队作业过程中也并非横向间距越大越好,过大的间距会削弱作业连续性。

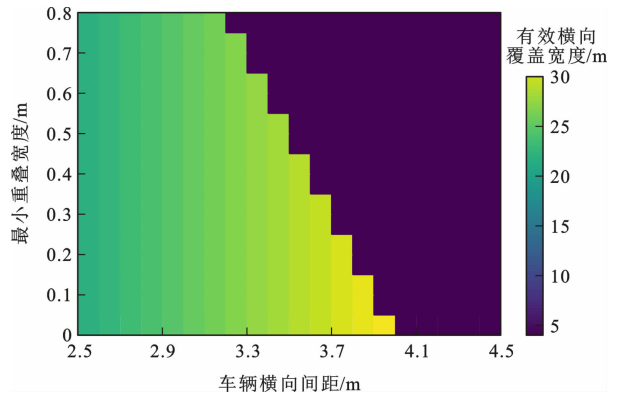


图 20 车辆横向间距与最小重叠宽度对有效覆盖宽度影响热力图

Fig. 20 Heatmap of the influence of vehicle lateral spacing and minimum overlap width on effective coverage width

5 结 语

(1) 构建了适配作业场景的集群韧性评估体系。针对传统指标仅关注个体状态而忽视群体协同的局限,提出了“有效横向覆盖宽度”指标,量化了队形结构变化对除雪作业效率的影响;建立了包含性能衰减幅度与恢复时间的关键维度的韧性模型,实现了对系统全生命周期的定量刻画,为集群作业的可靠性分析提供了科学依据。

(2) 提出了考虑通信网络优化和队形重构的韧性提升方法。引入节点度方差 H_1 作为抗毁性度量,通过混合整数半正定规划及其凸松弛求解策略,设计了高生存性的通信拓扑,有效平衡了优化精度与计算效率;设计了基于重映射的动态紧缩重构策略,实现了节点故障后物理作业间隙的快速闭合与逻辑拓扑的自愈。

(3) 数值模拟与统计验证表明了所提方法的有效性。动态队形重构试验表明,所提方法能够在节点故障后快速闭合作业间隙,提高除雪集群作业连续性;通信拓扑抗毁性实验表明,优化拓扑在连续节点故障工况下仍能维持核心作业功能,系统作业韧

性较随机拓扑提升 13.1%。进一步的蒙特卡洛统计结果表明,节点度方差 H_1 与初始代数连通度、故障后平均代数连通度及连通保持概率整体呈负相关关系,说明较小的 H_1 有助于提高节点故障后的网络连通保持能力,从统计意义上支撑了“ $H_1 \rightarrow$ 网络连通性 $\rightarrow$ 作业性能恢复”的传递逻辑。

(4)尽管本文在除雪集群作业韧性提升方面取得了一定成果,但仍存一定局限性。研究主要从通信拓扑结构抗毁性角度提升系统韧性,尚未对抵抗阶段与恢复阶段的动态过程进行精细化建模,也未充分考虑底层控制器鲁棒性和通信权重动态调整等因素对恢复速度与恢复质量的影响。未来研究将进一步从物理层动态性能出发,结合队形控制、权重自适应调整和恢复过程评价指标,分析不同控制策略对作业集群抵抗能力、恢复能力和作业连续性的影响。

参考文献:

References:

- [1] FAKHFAKH F, TOUNSI M, MOSBAH M. Vehicle platooning systems: Review, classification and validation strategies[J]. International Journal of Networked and Distributed Computing, 2020, 8(4): 203-213.
- [2] 安 鑫,刘 一. 车路自动驾驶技术在民航机场的应用前景[J]. 交通工程, 2020, 20(4): 57-61, 67.
AN Xin, LIU Yi. The application prospect of vehicle-road collaborative autonomous driving technology in civil aviation airport[J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20(4): 57-61, 67.
- [3] SHVETSOV A V. Analysis of accidents resulting from the interaction of air and ground vehicles at airports[J]. Transportation Research Procedia, 2021, 59: 21-28.
- [4] 蒋贤才,张馨月,李梦颖. 城市道路网联自动驾驶汽车编队协同控制方法[J/OL]. 交通运输工程学报, 2025-12-11. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.112>.
JIANG Xian-cai, ZHANG Xin-yue, LI Meng-ying. Cooperative control method for connected and automated vehicle platoons in urban road networks[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025-12-11. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.112>.
- [5] PETERS A A, MIDDLETON R H, MASON O. Leader tracking in homogeneous vehicle platoons with broadcast delays[J]. Automatica, 2014, 50(1): 64-74.
- [6] 姜 霞,曾宪琳,孙 健,等. 多智能体系统分布式优化综述与前瞻[J]. 中国科学(信息科学), 2025, 55(12): 2965-2990.
JIANG Xia, ZENG Xian-lin, SUN Jian, et al. Survey and prospects of distributed optimization in multi-agent systems[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2025, 55(12): 2965-2990.
- [7] AI X L, YU J Q. Flatness-based finite-time leader-follower formation control of multiple quadrotors with external disturbances[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 92: 20-33.
- [8] 文 强,王正武,吴锯强,等. 多队列纵-横向耦合的 DMPC 控制器设计及动态换道控制[J/OL]. 交通运输工程学报, 2025-12-09. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.116>.
WEN Qiang, WANG Zheng-wu, WU Ju-qiang, et al. Design of a multi-platoon longitudinal-lateral coupling DMPC controller and dynamic lane-changing control[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025-12-09. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.116>.
- [9] 张海伦,王建强,付 锐,等. 基于行为模式在线识别的 CAV 信号交叉口生态驾驶协同控制[J/OL]. 交通运输工程学报, 2025-12-10. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.129>.
ZHANG Hai-lun, WANG Jian-qiang, FU Rui, et al. Eco-driving cooperative control for CAVs at signalized intersections based on online recognition of behavioral patterns[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025-12-10. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.129>.
- [10] 焦建芳,郑智慧,包端华. 具有速度约束的多移动机器人固定时间编队[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(11): 125-132.
JIAO Jian-fang, ZHENG Zhi-hui, BAO Duan-hua. Fixed-time formation of multiple mobile robots with velocity constraint[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(11): 125-132.
- [11] 苟进展,梁天骄,陶呈纲,等. 基于一致性理论的无人机编队控制与集结方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(5): 1646-1654.
GOU Jin-zhan, LIANG Tian-jiao, TAO Cheng-gang, et al. Formation control and aggregation method of UAV based on consensus theory [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(5): 1646-1654.
- [12] FANG X, LI X L, XIE L H. Angle-displacement rigidity theory with application to distributed network localization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 66(6): 2574-2587.
- [13] GONG X, LI X X, SHU Z, et al. Resilient output formation-tracking of heterogeneous multiagent systems against general Byzantine attacks: A twin-layer approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2024, 54(4): 2566-2578.
- [14] GUERRERO-BONILLA L, SALDAÑA D, KUMAR V. Design guarantees for resilient robot formations on lattices [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(1): 89-96.
- [15] ZHOU H D, TONG S C. Fuzzy adaptive resilient formation control for nonlinear multiagent systems subject to DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32

- (3): 1446-1454.
- [16] GONG X, BASIN M V, FENG Z G, et al. Resilient time-varying formation-tracking of multi-UAV systems against composite attacks: A two-layered framework[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 969-984.
- [17] CHU J, ZHOU Z, GUO J. Optimal reconfiguration of formation flying using a direct sequential method[J]. IFAC-PapersOn-Line, 2017, 50(1): 9398-9404.
- [18] AJORLOU A, MOEZZI K, AGHDAM A G, et al. Two-stage energy-optimal formation reconfiguration strategy[J]. Automatica, 2012, 48(10): 2587-2591.
- [19] AJORLOU A, MOEZZI K, AGHDAM A G, et al. Two-stage time-optimal formation reconfiguration strategy[J]. Systems & Control Letters, 2013, 62(6): 496-502.
- [20] WANG J N, XIN M. Integrated optimal formation control of multiple unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1731-1744.
- [21] LUI D G, PETRILLO A, SANTINI S. Leader tracking control for heterogeneous uncertain nonlinear multi-agent systems via a distributed robust adaptive PID strategy[J]. Nonlinear Dynamics, 2022, 108(1): 363-378.
- [22] LIAO F, TEO R, WANG J L, et al. Distributed formation and reconfiguration control of VTOL UAVs[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 270-277.
- [23] WANG J, PAMBUDI S, WANG W Y, et al. Resilience of IoT systems against edge-induced cascade-of-failures: A networking perspective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6952-6963.
- [24] LEVITIN G, XING L D, DAI Y S. Optimizing dynamic performance of multistate systems with heterogeneous 1-out-of-N warm standby components[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(6): 920-929.
- [25] YANG Y, HUANG H B, LI G, et al. A systematic review of resilience assessment and enhancement of urban integrated transportation networks[J]. Journal of Transport Geography, 2025, 129: 104420.
- [26] DU Y C, WANG H, GAO Q, et al. Resilience concepts in integrated urban transport: A comprehensive review on multi-mode framework[J]. Smart and Resilient Transportation, 2022, 4(2): 105-133.
- [27] MADNI A M, JACKSON S. Towards a conceptual framework for resilience engineering[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 181-191.
- [28] ORDOUKHANIAN E, MADNI A. Model-based approach to engineering resilience in multi-UAV systems[J]. Systems, 2019, 7(1): 11.
- [29] CHENG C C, BAIG H, ZHANG Y A, et al. Resilience evaluation for UAV swarm performing joint reconnaissance mission[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2019, 29(5): 053132.
- [30] XING L D, JOHNSON B W. Reliability theory and practice for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(4): 3548-3566.
- [31] GU J J, SU T, WANG Q H, et al. Multiple moving targets surveillance based on a cooperative network for multi-UAV[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 82-89.
- [32] WANG X H, ZHANG Y, WANG L Z, et al. Robustness evaluation method for unmanned aerial vehicle swarms based on complex network theory[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(1): 352-364.
- [33] 林柄权, 刘磊, 李华峰, 等. DoS攻击下基于APF和DDPG算法的无人机安全集群控制[J]. 计算机应用, 2025, 45(4): 1241-1248.
- LIN Bing-quan, LIU Lei, LI Hua-feng, et al. Secure cluster control of UAVs under DoS attacks based on APF and DDPG algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2025, 45(4): 1241-1248.
- [34] 赵长啸, 方玉麟, 汪克念. 基于BiTCN的无人机指挥控制链路DoS攻击检测方法[J]. 航空学报, 2026, 47(1): 249-265.
- ZHAO Chang-xiao, FANG Yu-lin, WANG Ke-nian. BiTCN-based DoS attack detection method for UAV command and control link[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2026, 47(1): 249-265.
- [35] FENG Q, LIU M, SUN B, et al. Resilience measure and formation reconfiguration optimization for multi-UAV systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(6): 10616-10626.
- [36] FENG Q, HAI X S, SUN B, et al. Resilience optimization for multi-UAV formation reconfiguration via enhanced pigeon-inspired optimization[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 110-123.
- [37] WU C X, DENG H Z, WU H Q, et al. Enhancing resilience of unmanned autonomous swarms through game theory-based cooperative reconfiguration[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 260: 110951.
- [38] HU T Z, ZONG Y, LU N Y, et al. Toward the resilience of UAV swarms with percolation theory under attacks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 254: 110608.
- [39] GENG S Y, LIU S F. An agent-based framework for resilience analysis of service networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 1: 25.