

中文引用格式:刘圆圆,谭泽峰,韩霜,等.有毒气体泄漏场景下的应急疏散公交调度[J].中国安全科学学报,2026,36(3):186-193.
英文引用格式:LIU Yuanyuan,TAN Zefeng,HAN Shuang,et al. Emergency evacuation bus scheduling for toxic gas leakage scenarios[J].
China Safety Science Journal,2026,36(3):186-193.

有毒气体泄漏场景下的应急疏散公交调度^{*}

刘圆圆 副教授,谭泽峰,韩霜^{**} 讲师,徐梦婷
(广东工业大学 土木与交通工程学院,广东 广州 510006)

中图分类号:X928.04;U492.8 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0113
基金项目:国家自然科学基金资助(71801052)。

【摘要】 为提高毒气泄漏事故后大规模人员疏散效率,降低人员伤亡,采用计算流体力学(CFD)模型和风向统计概率模拟毒气质量浓度时空分布,结合疏散点设施及人员情况,提出疏散点动态综合风险度量方法。首先,基于疏散点动态综合风险差异,以疏散时间和总风险期望值最小为目标,构建疏散需求可拆分的多行程应急疏散公交调度模型;然后,采用增广加权切比雪夫方法将多目标模型转化为单目标模型,设计融合自适应大邻域搜索的遗传算法求解,采用破坏和修复算子提高算法搜索能力;最后,通过算例分析验证模型的合理性和算法的有效性。结果表明:以疏散时间和疏散总风险期望值最小为目标的应急疏散公交调度模型能够得到优先疏散高风险疏散点人员的调度方案,提高疏散时效并降低总风险期望值;相比于疏散总风险期望值,疏散时间对疏散点最迟时间窗的变化更敏感,所需公交车数量随疏散时间窗的延长而减少;与传统遗传算法相比,融合自适应大邻域搜索的遗传算法可使目标函数分别下降4.46%和2.44%。

【关键词】 毒气泄漏; 应急疏散; 公交调度; 毒气扩散; 计算流体力学(CFD); 多目标优化

Emergency evacuation bus scheduling for toxic gas leakage scenarios

LIU Yuanyuan, TAN Zefeng, HAN Shuang, XU Mengting

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: To improve the efficiency of large-scale personnel evacuation and reduce casualties after toxic gas leakage accidents, a CFD model and wind direction statistical probability were adopted to simulate the spatiotemporal distribution of toxic gas concentrations. Combined with the facilities and personnel conditions of evacuation sites, a dynamic comprehensive risk measurement method for evacuation sites was proposed. First, based on the differences in dynamic comprehensive risks of evacuation sites, a multi-trip emergency evacuation bus scheduling model with splittable evacuation demand was constructed, with the objectives of minimizing evacuation time and total risk expectation. Then, the augmented weighted Chebyshev method was used to convert the multi-objective model into a single-objective model, and a genetic algorithm integrated with adaptive large neighborhood search was designed for solution, in which

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)03-0186-08; 收稿日期:2025-10-14; 修稿日期:2025-12-20

^{**} 通信作者:韩霜(1981—),女,湖南湘潭人,博士,讲师,主要从事交通系统优化等方面的研究。E-mail: hsh2007@gdut.edu.cn。

destruction and repair operators were adopted to improve the search capability of the algorithm. Finally, the rationality of the model and the effectiveness of the algorithm were verified through numerical example analysis. The results show that the emergency evacuation bus scheduling model with the objectives of minimizing evacuation time and total evacuation risk expectation can generate scheduling schemes that prioritize the evacuation of personnel from high-risk evacuation sites, thereby improving evacuation efficiency and reducing the total risk expectation. Compared with the expected total evacuation risk, evacuation time is more sensitive to changes in the latest time window of evacuation sites, and the number of required buses decreases with the extension of the evacuation time window. In comparison with the traditional genetic algorithm, the genetic algorithm integrated with adaptive large neighborhood search can reduce the objective functions by 4.46% and 2.44%, respectively.

Keywords: toxic gas leaks; emergency evacuation; bus scheduling; toxic gas diffusion; computational fluid dynamics (CFD) model; multi-objective optimization

0 引言

当有毒气体在储存、使用或运输过程中发生事故时,受有毒气体扩散的影响,可能引发事故地及周边地区人员疏散需求。根据中国化工信息网的事故数据,我国在2009—2018年有157起危化品泄漏事故引发了人员疏散需求^[1]。一旦该类事故发生,疏散调度决策就成为减少事故伤害的关键措施。疏散是灾害管理政策中一系列准备、响应和恢复活动的一个阶段^[2]。牛聚粉等^[3]通过文献梳理发现,当前应急疏散研究较多关注人群疏散行为建模、疏散路径规划和疏散模拟仿真。疏散路径规划通常基于网络流或交通分配模型为疏散人群确定适宜的疏散路径^[4]。当涉及大规模人群疏散时,如何调度应急疏散车辆高效地完成疏散任务是一个非常重要的议题。

对此,JIANG Zhoutong 等^[5]提出一种带有后备服务计划的接送点位置和救援车辆路线决策模型。李雅倩等^[6]研究了交通拥堵状态下的应急救援问题,构建了一种疏散与调度协同决策的双层优化模型。龙科军等^[7]针对应急车辆调度中关键节点优先配送与普通节点公平性难以兼顾的难题,提出一种融合需求紧迫度与配送延时均衡的多目标优化模型。许钧等^[8]考虑应急状态的不确定性,引入风险厌恶水平,构建了以总调度成本和风险最小化为目标的应急车辆调度模型。张盈斐等^[9]提出一种动态灾害环境下可同时计算乘法与加法权重的多种类多目标路径优化问题的求解模型。在低行动力人群比重高、应急资源紧张的情况下,公共交通导向的疏散方案具有优势^[10]。ZHAO Xing 等^[11]以减少总时间成本为目标,考虑公交车容量、疏散人员需求、时

间窗口和流量平衡约束,建立了非固定路线的往返公交疏散模型。宋英华等^[12]考虑受灾群众行动能力的异质性,建立以总疏散时间和总损失最小为目标的应急公交疏散调度优化模型。SUN YUJIE 等^[13]以减少总行程时间、总疏散距离和行程时间可靠性为目标,建立了核电站规划限制区公交疏散多目标集成优化模型。现有事故应急处置研究既有针对疏散的单一视角,亦有同时考虑疏散和救援的集成视角,很少关注因毒气泄漏影响区域内的人员疏散问题。

与其他应急疏散场景不同,有毒气体泄漏后,决策者需重点关注毒气质量浓度时空分布差异性 & 疏散点人员转移难易程度,妥善调度车辆有序疏散受影响人群;同时,需控制最大疏散时间,以便降低待疏散人员承受的总风险并防范暴露时间过长导致的严重后果。因此,笔者拟采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)模型和风向统计概率度量疏散点的外部暴露风险期望值,结合表征疏散难易程度的内部风险,提出疏散点综合风险度量方法;并以综合风险和最大疏散时间最小为目标,建立考虑疏散点动态风险差异的多行程、需求可拆分的应急疏散公交调度优化模型,并求解和验证模型分析,以期突发有毒气体泄漏后的疏散公交调度提供决策支持。

1 疏散点综合风险度量

疏散点综合风险度量旨在量化毒气泄漏事故下各疏散点的潜在危险性,其综合考虑毒气扩散导致的外部暴露风险,以及疏散点自身条件形成的内部疏散风险,如图1所示。总体思路为:首先,通过计算CFD模拟毒气扩散过程,获取质量浓度分布,进

而结合风向频率计算外部暴露风险期望值;然后,基于疏散点特征衡量内部疏散风险;最后,将二者相加得到疏散点的综合风险,为应急疏散决策提供依据。

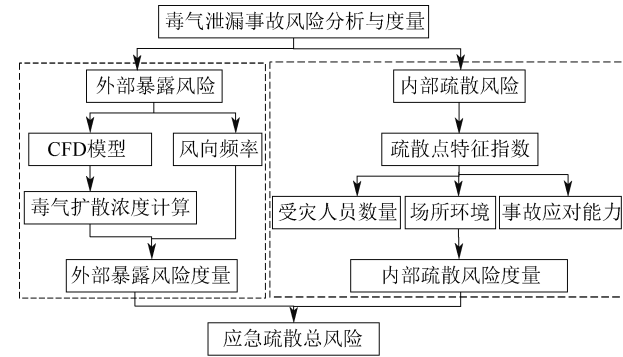


图1 疏散点综合风险计算

Fig. 1 Comprehensive risk assessment for evacuation sites

疏散点综合风险具体计算步骤如下:

1) 毒气泄漏扩散模拟与计算域设置。采用CFD进行毒气扩散模拟,使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型描述扩散过程,模型中湍流常数依据LEE^[14]的方法设定。计算域设置为轴向长度2 km的正方体空间。边界条件为:泄漏源位于计算域底部几何中心;迎风面设为速度入口,背风面设为自由流出边界;顶部、侧壁、地面及泄漏源表面均设置为无滑移壁面。

2) 外部暴露风险期望值。以毒气质量分数作为外部风险量化指标;将CFD模拟得到的毒气质量分数通过换算公式转化为质量分数,分数通过换算公式转化为质量分数;再结合风向概率评估各疏散点的外部暴露风险期望值,如下式:

$$\eta = \frac{\tau}{\rho \theta \sum_{\mu} \frac{Y_{\mu}}{\delta_{\mu}}} \quad (1)$$

$$\Gamma_h(T) = Y_h(T) \times \rho \quad (2)$$

$$\sigma_h = \varepsilon_h \times \Gamma_h \quad (3)$$

式中: η 为混合密度, kg/m^3 ; τ 为工作压力,kPa; ρ 为通用气体常数,取8.314 41; θ 为工作温度, $^{\circ}\text{C}$; Y_{μ} 为组分 μ 的质量分数,%; δ_{μ} 为组分 μ 的气体分子量, g/mol ; $\Gamma_h(T)$ 和 $Y_h(T)$ 分别为 T 时刻疏散点 h 的毒气质量浓度和毒气质量分数; $\sigma_h(T)$ 为 T 时刻疏散点 h 的外部暴露风险期望值; ε_h 为疏散点 h 相对于泄漏源的风向统计概率。

3) 内部疏散风险。考虑疏散点之间的设施条件、滞留人数及组织应对能力差异,量化各疏散点因自身条件导致的疏散难易程度,即内部疏散风险,如下式:

$$\beta_h(T) = \frac{\delta'_h}{\delta_h} \times \ln\left(\frac{\Delta_h^T}{\Delta_{\min}^T + 1}\right) \times \ln\left(\frac{10}{\gamma}\right) \quad (4)$$

式中: δ'_h 为疏散点 h 内高层建筑占地面积, km^2 ; δ_h 为疏散点 h 的面积, km^2 ; Δ_h^T 为疏散点 h 在 T 时刻的待疏散人数; $\Delta_{\min}^T$ 为 T 时刻所有疏散点中待疏散人数的最小值,人; γ 为疏散点等级,其取值为1~4^[15]; $\beta_h(T)$ 为疏散点 h 在 T 时刻的内部疏散风险。

4) 综合风险。疏散点综合风险为内部疏散风险与外部暴露风险期望值之和,如下式:

$$R_h(T) = \beta_h(T) + \sigma_h(T) \quad (5)$$

式中 $R_h(T)$ 为 T 时刻疏散点 h 的综合风险。

2 应急疏散公交调度模型

2.1 应急疏散公交调度模型假设

针对毒气泄漏场景下的应急救援需求,模型假设:①已知公交车和避难所的最大容量及各疏散点的待疏散人数;②已知各车场可供调度的应急公交车数量;③一个公交车行程最多只能经过同一疏散点一次;④已知各疏散点人员受到伤害的时间点以及最晚疏散时间。

2.2 应急疏散公交调度模型建立

1) 目标函数。应急公交疏散调度优化模型以疏散时间最小和总风险期望值最小为目标,如下式:

$$\min Z_1 = \max \{ T_s^{kg} \mid \forall k \in K, g \in G, s \in S \} \quad (6)$$

$$\min Z_2 = \sum_{k \in K} \sum_{g \in G} \sum_{h \in H} F_h^{kg} \times \int_{T=0}^{T_h^{kg}} R_h(T) dt \quad (7)$$

$$T_s^{kg} = \begin{cases} t_0 + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ph}^{kg} t_{ph} + \sum_{h \in H} \sum_{j \in H} x_{hj}^{kg} (t_{hj} + t_h) + \\ \sum_{j \in H} \sum_{s \in S} x_{js}^{kg} t_{js}, \forall k \in K, g = 1 \\ T_s^{k(g-1)} + t_s + \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} x_{sh}^{kg} (t_{sh} + t_h) + \\ \sum_{h \in H} \sum_{j \in H} x_{hj}^{kg} (t_{hj} + t_h) + \sum_{j \in H} \sum_{s \in S} x_{js}^{kg} t_{js}, \\ \forall k \in K, g > 1, \sum_{j \in H} x_{js}^{k(g-1)} = \sum_{h \in H} x_{sh}^{kg} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: H 为疏散点集合; S 为避难所集合; K 为应急疏散公交车集合; G 为车辆行程集合; P 为车场集合; t_0 为事故发生到应急疏散启动的时间间隔,min; t_{ij} 为公交车通过弧 (i,j) 所需的时间,min; t_i 为车辆在节点 i 的服务时间,min; T_i^{kg} 为公交车 k 在第 g 次行程到达节点 i 的时刻; x_{ij}^{kg} 为0-1变量,公交车 k 的第 g 次行程驶过弧 (i,j) ,取1,否则取0; y_{h-1}^{kg} 为0-1变量,公交车 k 在第 g 行程到达疏散点 h 之前,

车上载有疏散人员,取1,否则取0; X_h^{kg} 为0-1变量,公交车 k 在第 g 次行程中前往疏散点 h ,取1,否则取0; T_s^{kg} 为公交车 k 第 g 次行程到达疏散点的时间,

T_h^{kg} 的计算方式与 T_s^{kg} 类似; $\int_{T=0}^{T_h^{kg}} T(T) dT$ 为待疏散人员在疏散点 h 遭受的累计风险期望值,因为计算过程较复杂,故将其离散化,令 $\int_{T=0}^{T_h^{kg}} R(T) dT =$

$$\sum_{T=1}^{T_h^{kg}} R(T).$$

2) 约束条件。①车辆指派约束:

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ph}^{kg} \leq 1, \forall k \in K, g \in G \quad (9)$$

式(9)确保公交车在每个行程中最多被指派一次。

②车辆行程约束。下式表示每辆公交车行程最多经过同一疏散点一次:

$$\sum_{i \in P \cup H \cup S} x_{il}^{kg} \leq 1, \forall k \in K, g \in G, l \in H \quad (10)$$

下式为公交车的首发行程必须从车场出发并驶入避难所:

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ph}^{k1} = \sum_{l \in H} \sum_{s \in S} x_{ls}^{k1}, \forall k \in K, g = 1 \quad (11)$$

下式表示当行程数大于1时,公交必须从上一行程到达的避难所出发,并回到避难所:

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} x_{sh}^{kg} = \sum_{l \in H} \sum_{s \in S} x_{ls}^{kg}, \forall k \in K, g > 1 \quad (12)$$

$$\sum_{h \in H} x_{sh}^{kg} \leq \sum_{l \in H} x_{ls}^{k, g-1}, \forall s \in S, k \in K, g > 1$$

(13)

3) 车辆流量平衡约束。下式表示节点的公交车流量守恒:

$$\sum_{i \in P \cup H} x_{il}^{k1} = \sum_{j \in H \cup S} x_{lj}^{k1}, \forall l \in H, k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{i \in S \cup H} x_{il}^{kg} = \sum_{j \in H \cup S} x_{lj}^{kg}, \forall l \in H, k \in K, g > 1 \quad (15)$$

4) 车辆数量和避难所容量约束。车场派车数量限制如下式:

$$\sum_{k \in K} \sum_{h \in H} x_{ph}^{k1} \leq O_p, \forall p \in P \quad (16)$$

式中 O_p 为车场 p 的应急公交车数量。

下式表示运送至避难所的受灾人员数量不能超过避难所的容量。

$$\sum_{k \in K} \sum_{g \in G} \sum_{h \in H} x_{hs}^{kg} q_h^{kg} \leq Q_s, \forall s \in S \quad (17)$$

式中: q_i^{kg} 为第 g 次行程中公交车 k 经过节点 i 后的在车人数; Q_s 为避难所 s 可容纳人数的最大值。

5) 车辆运载能力约束。下式为公交车容量

限制:

$$q_{h-1}^{kg} + F_h^{kg} \leq V_k, \forall k \in K, g \in G, h \in H \quad (18)$$

式中: V_k 为公交车 k 的最大载客人数; $F_h^{kg} = \min\{V_k - q_{h-1}^{kg}, \Delta_h\}$; Δ_h 为疏散点 h 待疏散人数,在车人数的初始值 $q_p^{k1} = 0$,当 $g > 1$ 时, $q_s^{kg} = 0$ 。下式表示经过疏散点的公交总运能大于该点的待疏散人数:

$$\sum_{i \in P \cup H \cup S} \sum_{g \in G} \sum_{k \in K} x_{ih}^{kg} (V_k - q_{h-1}^{kg}) \geq D_h, \forall h \in H \quad (19)$$

式中 D_h 为疏散点 h 中的待疏散人数。

下式表示待疏散人员总数与车辆总运载能力的关系:

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in P \cup H \cup S} \sum_{g \in G} \sum_{k \in K} x_{ih}^{kg} F_h^{kg} \geq \sum_{h \in H} D_h \quad (20)$$

6) 车辆分配约束。下式表示只有车辆访问了疏散点,才能搭载待疏散人员。

$$\sum_{j \in H \cup S} x_{hj}^{kg} D_h \geq F_h^{kg}, \forall h \in H, k \in K, g \in G \quad (21)$$

下式表示所有待疏散人员均被疏散:

$$\sum_{k \in K} \sum_{g \in G} F_h^{kg} = D_h, \forall h \in H \quad (22)$$

7) 疏散时间约束。下式表示公交车开始和结束疏散作业的时间约束。

$$T_p^{k1} \geq a_p, \forall k \in K, p \in P \quad (23)$$

$$T_s^{kg} \leq b_s, \forall k \in K, g > 1, s \in S \quad (24)$$

式中: a_p 为车场 p 的最早服务时间点; b_s 为避难所 s 的最迟服务时间点。

下式表示公交车从避难所开启后一行程的时间不得早于前一行程的结束时间。

$$T_s^{kg} + M(1 - \sum_{j \in H} x_{sj}^{kg}) \geq T_s^{k, g-1} + t_s, \quad \forall s \in S, k \in K, g > 1 \quad (25)$$

式中 M 为一足够大的正数。

下式表示当依次连续访问节点 i 和 j 时的时间约束:

$$T_i^{k1} + t_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}^{k1}) \leq T_j^{k1}, \quad \forall k \in K, i \in P \cup H, j \in H \cup S, i \neq j \quad (26)$$

$$T_i^{kg} + t_i + t_{ij} - M(1 - x_{ij}^{kg}) \leq T_j^{kg}, \quad \forall k \in K, i, j \in S \cup H, i \neq j, g > 1 \quad (27)$$

下式表示必须在最迟时间窗前完成疏散任务:

$$T_h^{kg} + t_h \leq W_h^e, \forall h \in H, k \in K, g \in G \quad (28)$$

式中 W_h^e 为疏散点 h 的人员必须撤离的最迟时间点。

下式表示若公交车在第 g 行程中已载有疏散人员,则禁止其继续前往毒气质量浓度超过阈值 ω 的

疏散点:

$$1 - y_{h-1}^{kg}(\Gamma_h(T) - \bar{\omega} + \Omega)/\bar{\omega} \geq X_h^{kg},$$

$$\forall h \in H, k \in K, g \in G \quad (29)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为可致严重伤害的毒气质量浓度阈值, mg/m^3 ; Ω 为一充分小的正数。

8) 决策变量取值约束。下式为决策变量取值约束:

$$x_{ij}^{kg} \in \{0,1\}, \forall i, j \in P \cup H \cup S, i \neq j, k \in K, g \in G \quad (30)$$

$$0 \leq F_h^{kg} \leq V_k, \text{integer}, \forall h \in H, k \in K, g \in G \quad (31)$$

$$y_{h-1}^{kg} \in \{0,1\}, \forall h \in H, k \in K, g \in G \quad (32)$$

3 求解算法设计

3.1 多目标优化模型求解策略

采用增广加权切比雪夫法求解上述多目标优化模型,如下式所示:

$$\min Z = \varphi + \delta(\bar{Z}_1(x) + \bar{Z}_2(x)) \quad (33)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} \lambda_i \bar{Z}_i(x) \leq \varphi, \forall i = 1, 2 \\ x \in X \end{cases} \quad (34)$$

$$\bar{Z}_i = \frac{(Z_i(x) - Z_i^{\min})}{(Z_i^{\max} - Z_i^{\min})}, \forall i = 1, 2 \quad (35)$$

式中: φ 为决策变量; δ 为无穷小的正数; $Z_i^{\max}$ 为疏散完成时间 $\bar{Z}_1(x)$ 和总疏散风险期望值 $\bar{Z}_2(x)$ 的最大值; $Z_i^{\min}$ 为相应的最小值。在闭区间 $[0, 1]$ 范围内生成疏散完成时间和总疏散风险期望值的权重, 分别记为 λ_1 和 λ_2 , $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

3.2 融合自适应大邻域搜索的遗传算法设计

提出一种融合自适应大邻域搜索与遗传算法的混合方法,在遗传算法框架中引入多个破坏与修复算子,并动态更新算子权重,以增强局部搜索能力。

1) 种群初始化与解码。采用实数编码生成染色体,每个染色体为所有疏散点编号(0—31)的一个随机排列。解码时从染色体首位疏散点开始判断,若满足时间窗约束,则将该点需求拆分为可装载部分 h_1 剩余部分 h_2 ,并将 h_1 加入当前子路径;否则结束当前子路径,车辆返回最近且有容量的避难所,并记录到达时间与用车数量,随后另调车辆从车场出发继续服务剩余点。若车场无可用车辆,则改由避难所发车继续服务。

2) 选择操作。采用锦标赛选择策略,每次从当前种群中随机选择若干个体作为参赛者,对比参赛

者之间的适应度值,选较优者为获胜者进入子代种群,重复操作直至新种群规模达到原种群规模。

3) 交叉操作。采用部分匹配交叉法(Partially-mapped Crossover, POX),从2个父代染色体中随机选择一个交叉点,再将这个交叉点之后的基因片段从一个父代复制到另一个父代,接着通过检查另一个父代中的相同基因片段,将已经存在于子代中的基因删除;并将剩余的基因按照它们在另一个父代中的顺序插入到子代中。

4) 变异操作。采用逆序变异法进行操作,选择染色体上的2个位置,交换这2个位置之间的基因顺序。

5) 自适应大邻域搜索规则。①破坏操作。采用随机破坏与最差破坏2种算子。随机破坏从当前解中随机移除的部分疏散点,以增强解的多样性;最差破坏则优先移除对目标函数值增加影响较大的疏散点,以优化可行解质量。②修复操作。采用随机修复与贪婪修复算子。随机修复以串行方式,从被移除疏散点中随机选取一点尝试插入某条路径,若违反约束则重新选择,直至所有疏散点均被尝试插入。贪婪修复则基于全局插入成本最小原则,计算各点插入路径所带来的目标函数增量,选择增量最小的节点进行插入。③算子权重更新。算法初始化时,将所有破坏与修复算子的初始权重设为1,确保其被选概率相同,每次使用轮盘赌法选择一组算子执行。算法运行过程中,按下式动态调整各算子权重。

$$\phi^- = \omega \phi^- + (1 - \omega) \Psi \quad (36)$$

$$\phi^+ = \omega \phi^+ + (1 - \omega) \Psi \quad (37)$$

$$\Psi = \begin{cases} \Psi_1, & \text{新解是全局最优解} \\ \Psi_2, & \text{新解优于当前解} \\ \Psi_3, & \text{新解被接受} \\ \Psi_4, & \text{新解被拒绝} \end{cases} \quad (38)$$

式中: ϕ^- 为选择不同移除算子的概率; ϕ^+ 为选择不同修复算子的概率; ω 为权重系数,范围在 $(0, 1)$ 之间; Ψ 为算子评估系数, $\Psi_1 \geq \Psi_2 \geq \Psi_3 \geq \Psi_4$ 。

6) 终止条件。当算法达到最大迭代次数或满足收敛准则时终止运行,并输出最优车辆应急疏散调度方案。

4 应急疏散公交调度结果及分析

4.1 数据准备

数据取自某市政府平台网站,模拟该市石化工

业区液氯储罐发生泄漏的场景。据此遴选出 32 个受灾人群集中、便于集结的疏散点,其疏散需求见表 1。

表 1 部分疏散点的疏散需求

Table 1 Evacuation needs at some evacuation sites			
疏散点	受灾人数	疏散点	受灾人数
h_1	1 192	h_6	346
h_2	694	h_7	256
h_3	396	h_8	420
h_4	420	h_9	263
h_5	323	h_{10}	284

根据受灾区域设施分布,共设置 7 个避难所(容量见表 2)和 6 个停车场。每个车场配备 10 辆公交车,单车载客容量为 80 人,车辆运行速度设为 40 km/h。疏散点与避难所的单次上下车耗时均为 5 min。各节点分布如图 2 所示,其中,圆形(h_1 — h_{32})表示疏散点,三角形(s_1 — s_7)为避难所,正方形(p_1 — p_6)为车场。

表 2 避难所容量参数

Table 2 Shelter capacity parameters 人				
节点	s_1	s_2	s_3	s_4
容量 Q_s	3 676	1 841	1 374	2 252
节点	s_5	s_6	s_7	—
容量 Q_s	1 288	3 354	1 523	—

氯气泄漏源强为 2.84 kg/s,风向设为西风,大气压力 101 kPa,环境温度为当地年平均 25℃,严重伤害质量浓度阈值 $\bar{\omega}$ 取 80 mg/m³。采用数值模拟方法研究氯气扩散过程,其中湍流模型选用重整化群 k - ε 模型(Renormalization Group k - ε , RNG k - ε),压力-速度耦合算法采用半隐式方法(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, SIMPLE),并通过 Fluent 软件进行计算。组分设为空气与氯气混合物,时间步长为 1 s,总模拟时长为 120 min,每 60 s 保存一次数据。

遗传算法的初始种群规模设为 100,最大迭代次数为 500。先通过参数试验评估不同参数组合对算法性能的影响,以目标函数均值为评价指标,通过重复试验,确定最优参数组合如下:交叉概率为 0.9,变异概率为 0.08,算子权重更新比例为 0.3。

4.2 应急疏散公交调度结果

毒气泄漏事故发生后,最小疏散时间为 35.33 min,综合风险值为 7 463.68。与传统遗传算法相比,目标函数分别下降 4.46%和 2.44%,收敛代数减少 90 次,求解时间提升 7.52%,算法求解对比见

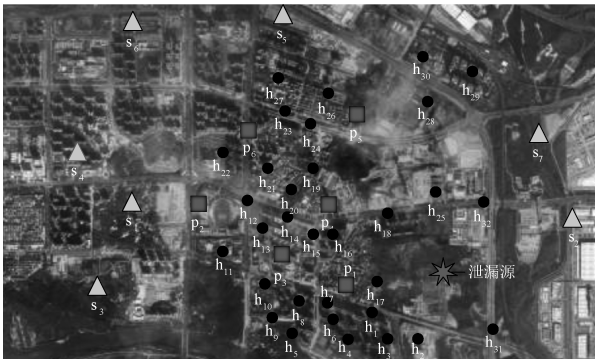


图 2 疏散区域节点分布

Fig. 2 Distribution of nodes in the evacuation zone

表 3。应急疏散公交调度的部分结果见表 4。

表 3 算法求解对比

Table 3 Comparison of algorithmic solutions		
求解策略	标准遗传算法	融合自适应大邻域搜索的遗传算法
疏散时间/min	36.98	35.33
综合风险	7 649.97	7 463.68
收敛代数	322	232
求解时间/s	987.28	913.03

表 4 应急疏散公交调度部分结果

Table 4 Partial results of emergency evacuation bus scheduling			
车辆	路线	车辆	路线
5	p_2 - h_{14} - s_1 - h_6 - h_3 - s_7	23	p_6 - h_9 - s_1 - h_{23} - h_{19} - s_2
8	p_4 - h_{14} - s_1 - h_{12} - s_{22} - s_6 - h_{11} - s_4	31	p_3 - h_{22} - h_{14} - s_3 - h_{10} - h_{11} - s_4
14	p_4 - h_1 - s_3 - h_{21} - h_1 - s_7	33	p_1 - h_{17} - s_3 - h_{22} - s_6
16	p_5 - h_{27} - s_1 - h_{10} - h_{11} - s_4	45	p_3 - h_1 - s_3 - h_9 - s_1
17	p_5 - h_{30} - s_7 - h_{25} - h_{32} - s_2	58	p_4 - h_{17} - s_3 - h_{19} - h_2 - s_7

由表 4 可知:

- 1) 调度优先级策略。方案优先疏散人数多、风险高的疏散点,并将其人员转移至最近避难所。如初期疏散点 1 因人数多、风险大,由线路 14、45 等在首次行程送往最近避难所 s_3 ;而人数较少、风险较低的疏散点 10、11,虽邻近 s_3 ,但优先级较低,故疏散任务被延后,由晚发车的线路 16、31 执行。此时 s_3 容量已接近饱和,相关人员遂被转移至较远的 s_4 。
- 2) 车辆往返与人员分流。受限于车辆数量与疏散点人员规模,公交车需在疏散点与避难所间多次往返。同一疏散点人员可能被分流至不同避难所,如疏散点 19 的人员由线路 23、58 分别送至避难所 s_2 和 s_7 。
- 3) 任务组合优化。前期每车次仅服务一个疏散点;随着待疏散人员减少,为提升效率,单行程可

服务多个疏散点。如线路 8 和 17 在首趟仅服务一个疏散点,后续行程中可同时前往 2 个疏散点进行运输。

4.3 测试分析

1) 优化目标对调度决策的影响。为分析不同优化目标对方案的作用,分别以疏散时间最小和综合风险最小进行单目标优化,结果见表 5,由表 5 可知:①与多目标优化结果相比,仅最小化疏散时间可使疏散完成时间减少 5.15%,但综合风险上升 7.88%。这表明单纯追求时效会忽略各疏散点的风险差异,延误高风险点人员的疏散,从而增大总体风险。②仅最小化综合风险可使风险降低 2.32%,但疏散完成时间延长 10.17%。过长的疏散时间可能引发其他隐性成本,如滞留人员的焦虑情绪等。

表 5 多目标模型与单目标模型对比

Table 5 Comparison of multi-objective and single-objective model			
优化目标	双目标模型	最小化疏散时间模型	最小化综合风险模型
疏散时间	35.33	33.51	39.33
综合风险	7 463.68	8 101.79	7 290.43

2) 最迟疏散时间窗对调度方案的影响。为分析最迟疏散时间窗对调度方案的影响,将疏散点的最迟疏散时间乘以系数 a ($a \in [0.8, 1.2]$) 并进行灵敏度分析。疏散点时间窗对调度结果的影响见表 6。

由表 6 可知:①最迟疏散时间窗减小,虽能降低疏散时间与综合风险,但所需公交车数量增加。

表 6 疏散点时间窗对调度结果的影响
Table 6 Impact of evacuation sites time windows on evacuation outcomes

a	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
疏散时间变动率/%	-14.38	-4.63	0	1.99	8.43
综合风险变动率/%	-0.86	-0.49	0	1.66	2.23
所需公交车数量	68	65	60	56	50

这是由于时间窗收紧对车辆调度时效性要求提高,需投入更多车辆以满足约束。②疏散时间对时间窗变化的敏感度高于综合风险。这是因为毒气扩散至一定程度后风险期望趋于稳定,导致综合风险随时间窗的变化幅度收窄。综上,更紧迫的疏散时间窗虽可提升时效性与安全性,但是以增加车辆资源为代价。

5 结 论

1) 研究表明:针对毒气泄漏构建的公交疏散调度方案,能优先响应高风险节点并拆分疏散需求,以较小的时间代价降低综合暴露风险。

2) 敏感性分析揭示,疏散系统对最迟时间窗的约束高度敏感。虽然紧缩时间窗能提升安全性,但会导致车辆需求增长,在实际救援中需在追求降低风险与有限应急资源约束之间寻求平衡。

3) 融合自适应大邻域搜索的遗传算法通过强化局部寻优能力,有效克服了传统算法易陷入局部最优的缺陷。该方法不仅在求解质量上优于传统算法,在处理多目标、多约束的危化品事故应急调度问题时,引入针对性的破坏与修复算子能提升系统响应速度与方案可靠性。

参 考 文 献

[1] HOU Jie, GAI Wenmei, CHENG Wuyi, et al. Hazardous chemical leakage accidents and emergency evacuation response from 2009 to 2018 in China: a review[J]. Safety Science, 2021, 135: DOI:10.1016/j.ssci.2020.105101.

[2] MEI E T W, LAAVIGNE F, PICQUOUT A, et al. Lessons learned from the 2010 evacuations at Merapi volcano [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2013, 261: 348-365.

[3] 牛聚粉,林雅琳,楚馨悦,等. 国内外应急疏散研究进展综述[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1): 184-195.

NIU Jufen, LIN Yalin, CHU Xinyue, et al. Review of advances in emergency evacuation research[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(1): 184-195.

[4] ALDAHLAWI R Y, AKBARI V, LAWSON G. A systematic review of methodologies for human behavior modeling and routing optimization in large-scale evacuation planning [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 110: DOI:10.1016/j.ijdr.2024.104638.

[5] JIANG Zhoutong, SHEN Shiyu, OUYANG Yanfeng. Planning of reliable targeted evacuation under the threat of disasters [J]. Transportation Research Part C, 2023, 153: DOI:10.1016/j.trc.2023.104197.

[6] 李雅倩,陈西江,班亚,等. 基于双层规划的城市交通疏散与应急车辆调度协同决策[J]. 武汉理工大学学报:信

息与管理工程版, 2024, 46(2): 188-194.

LI Yaqian, CHEN Xijiang, BAN Ya, et al. Collaborative decision making for urban traffic evacuation and emergency vehicle dispatch based on bi-level programming [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2024, 46(2): 188-194.

[7] 龙科军, 刘嘉, 高志波, 等. 考虑配送紧迫度与公平的应急车辆调度模型[J]. 中外公路, 2024, 44(6): 251-258.

LONG Kejun, LIU Jia, GAO Zhibo, et al. Emergency vehicle dispatching model considering demand urgency and delivery fairness [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(6): 251-258.

[8] 许钧, 李筱, 王修来. 考虑不确定性的多情景应急车辆综合调度模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 156-164.

XU Jun, LI Xiao, WANG Xiulai. Multi-scenario integrated scheduling model of emergency vehicles considering uncertainty [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 156-164.

[9] 张盈斐, 李航, 齐玉亮, 等. 城市动态灾害环境下多种类多目标路径优化算法[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 217-224.

ZHANG Yingfei, LI Hang, QI Yuliang, et al. Multi-category multi-objective path optimization algorithm in urban dynamic disaster environments [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 217-224.

[10] 任刚, 朱彤, 华璟怡, 等. 公共交通导向的多模式疏散规划理论框架[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(6): 73-79,94.

REN Gang, ZHU Xing, HUA Jingyi, et al. A theoretical framework of transit-oriented multimodal evacuation planning[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(6): 73- 79,94.

[11] ZHAO Xing, JI Kang, XU Peng, et al. A round-trip bus evacuation model with scheduling and routing planning[J]. Transportation Research Part A, 2020, 137: 285-300.

[12] 宋英华, 汪雅馨, 马亚萍, 等. 考虑灾民类型多模式协同应急疏散调度研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 135-140.

SONG Yinghua, WANG Yaxin, MA Yaping, et al. Research on multi-mode cooperative emergency evacuation scheduling considering types of disaster victims [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 135-140.

[13] SUN Yujie, CHAI Xiang, CHEN Changzhi. Bus based emergency evacuation organization strategy of nuclear power plant planning restricted area [J]. Progress in Nuclear Energy, 2024, 169: DOI:10.1016/j.pnucene.2024.105081.

[14] LEE M, MOSER R D. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau \approx 5\,200$ [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 774: 395-415.

[15] GB/T 44013—2024, 应急避难场所分级及分类[S].

GB/T 44013-2024, Emergency shelter-grading and classification[S].



作者简介： 刘圆圆 （1990—）,女,山东潍坊人,博士,副教授,主要从事低碳交通、交通全寿命周期评估理论、智慧与可持续交通等方面的研究。E-mail: liuyy@gdut.edu.cn。