

中文引用格式:陈娜,潘士伟,秦向南,等. 考虑转移紧迫度的应急公交疏散方案[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11):228-235.

英文引用格式:CHEN Na, PAN Shiwei, QIN Xiangnan, et al. Emergency bus evacuation planning considering transfer urgency[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(11):228-235.

考虑转移紧迫度的应急公交疏散方案*

陈娜¹副教授,潘士伟¹,秦向南^{**2}副教授,刘军³正高级工程师

(1 郑州大学 力学与安全工程学院,河南 郑州 450001;2 郑州大学 水利与交通学院,河南 郑州 450001;3 中国地震应急搜救中心,北京 100049)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0961

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3004405);河南省科技攻关项目(252102321025);河南省重点研发专项(221111321100);中国职业安全健康协会创新创业项目(CXCXY-2021-01)。

【摘要】 为实现重大自然灾害事件发生后人群科学、高效的灾后转移,针对受灾点的灾情严重程度不同,开展考虑转移紧迫度的应急公交车辆疏散方案研究。首先,建立以疏散完成时间、疏散延迟不满意程度最小化为目标的连续运行应急公交车辆疏散模型;其次,设计并运用基于转移紧迫度编码的和声搜索遗传算法(HS-GA)进行求解,依据不同规模算例验证算法的有效性;最后,基于案例将考虑转移紧迫度与不考虑转移紧迫度的疏散方案进行对比。研究表明:文中设计的HS-GA与遗传算法(GA)和邻域搜索GA(NS-GA)相比效果更好;由HS-GA求解案例得出,相比于不考虑转移紧迫度,考虑转移紧迫度的疏散方案疏散完成时间更短,且疏散延迟不满意程度减少51.4%,I级、II级受灾点的疏散完成时间及到达避难所平均时间均更短,同时,不同应急公交数量下考虑转移紧迫度方案的疏散延迟不满意程度也始终更低。疏散模型考虑灾情严重程度不同下重灾区疏散的优先性,在救援车辆有限的情况下可以进行合理的调度安排,更加客观和符合实际情况。

【关键词】 应急公交; 疏散方案; 转移紧迫度; 和声搜索遗传算法(HS-GA); 疏散延迟不满意程度

Emergency bus evacuation planning considering transfer urgency

CHEN Na¹, PAN Shiwei¹, QIN Xiangnan², LIU Jun³

(1 School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China; 2 School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China; 3 National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to realize scientific and efficient post-disaster transfer of the population after the occurrence of major natural disasters, the emergency bus evacuation planning considering the transfer urgency was studied according to the different severity of the disaster. Firstly, a continuous emergency bus evacuation model was established with the goal of minimizing the evacuation completion time and evacuation delay satisfaction degree. Secondly, a HS-GA based on transfer urgency coding was designed and applied for problem-solving, and the effectiveness of the algorithm was verified using examples of

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0228-08; 收稿日期:2025-06-07; 修稿日期:2025-08-10

** 通信作者:秦向南(1992—),男,湖北襄阳人,博士,副教授,主要从事水利工程安全保障与应急处置方面的研究。Email: qin_xn2105@zzu.edu.cn。

different scales. Finally, the evacuation planning considering the transfer urgency was compared with those without considering the transfer urgency based on the case. The results show that the HS-GA is better than Genetic Algorithm (GA) and Neighborhood Search GA (NS-GA). According to the case solved by HS-GA, a comparison is made with evacuation planning that does not consider transfer urgency. When transfer urgency is considered, the evacuation delay dissatisfaction degree is reduced by 51.4%. Additionally, shorter evacuation completion times are observed at both Class I and Class II disaster sites. The average time taken to arrive at the shelter is also found to be shorter. At the same time, the dissatisfaction degrees of evacuation delay considering the urgency of transfer under different emergency bus quantity are all lower. The evacuation model considers the evacuation priority of the hard-hit areas under different severity of the disaster, and can make reasonable dispatch arrangements under the circumstance of limited rescue vehicles, which is more objective and in line with the actual situation.

Keywords: emergency bus; evacuation planning; transfer urgency; harmonic search genetic algorithm (HS-GA); evacuation delay dissatisfaction degree

0 引言

重大自然灾害事件发生后,规划合理的安置方案,使用应急公交车辆在短时间内大范围、安全地转移疏散密集人群,是减轻灾害后果严重性的重要措施之一^[1]。然而,通常可用的疏散车辆十分有限,如果不对受灾严重地区优先疏散,可能会导致更大的损失。因此,考虑受灾点的转移紧迫度、开展连续运行的应急公交车辆疏散方案研究,对解决重大自然灾害事件下受灾人群的转移安置具有重要意义。

目前,基于应急公交的疏散规划研究主要以最小化疏散完成时间^[2]、最小化总行驶成本^[3]为目标,考虑避难所容量限制^[4]、疏散人员步行或等待时间^[5]等因素建立模型,使用确定性或启发式方法^[6]设计求解。在大多数模型中,疏散问题一般是以忽略应急资源稀缺性的角度展开研究的,但实际救援场景下疏散车辆通常数量有限。为此,部分学者开始研究公交连续运行下多次行程的疏散模型。LAKSHAY 等^[7]考虑需求不确定性,求解最小必须可用车辆数量,建立多班次公交疏散模型;DHINGRA 等^[8]考虑有限资源分配与暴露风险成本,建立封闭疏散网络模型并使用遗传算法 (Genetic Algorithm,GA) 求解;FENG Yuanyuan 等^[9]构建公交聚合网络流模型并转化为线性规划问题进行求解。但上述研究均未考虑不同受灾点转移的紧迫程度,而在有限应急资源情景下考虑不同受灾点需求紧迫度开展应急救援的研究主要集中在救援人员派遣^[10]、应急物资调度^[11]等方面,鲜有考虑到受灾人群的转移安置问题。总体来看,同时考虑到应急资源稀缺性与灾情严重程度差异下受灾人群疏散

优先次序的研究较少。

鉴于此,笔者通过评估不同受灾区域受灾程度,使用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)、指标相关性权重确定法 (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC) 计算主客观权重,基于博弈论组合权重及逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 得到受灾点转移紧迫度系数;接着以疏散完成时间与疏散延迟不满意度最小化为目标,建立考虑转移紧迫度的连续运行应急公交车辆疏散路径模型,并设计基于转移紧迫度编码的和声搜索 GA (Harmony Search-GA, HS-GA) 求解,实现考虑区域受灾程度与整体疏散任务的应急公交疏散方案优化研究。

1 受灾点转移紧迫度评价

重大自然灾害事件如地震、滑坡、泥石流发生后,造成建筑物受损、人员伤亡的同时还有可能继续引发次生灾害,需要衡量多方面因素进行不同受灾点转移紧迫度的评价决策。文献[10-13]分别从灾害造成损伤情况和救援角度出发构建紧迫度评价体系,如受灾点建筑受损情况^[10-12]、死亡受伤失踪人数^[11-12]、人口密度^[11-12]、应急物资需求^[11,13]等。基于已有研究成果,结合应急救援原则和特点,构建转移紧迫度评价指标体系(图 1)。其中,自然灾害危险度^[12]是通过考虑受灾区域历史灾害情况、地质条件状况是否会引发次生灾害,评估得到受灾点的潜在风险度。物资需求重要性^[13]是指所需应急物资不足对生命危害程度及其不可替代的程度,程度越高的地区对应应急救援的需求就越紧迫。

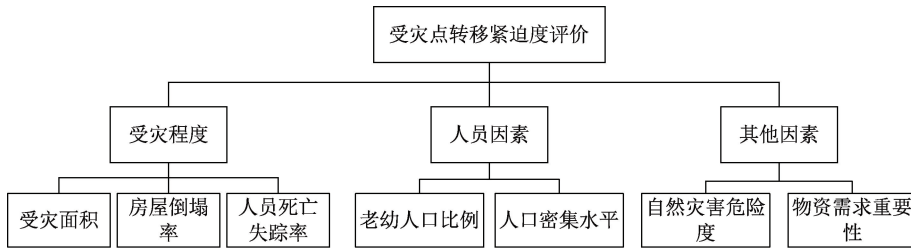


图1 转移紧迫度评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of transfer urgency

1.1 基于博弈论的组合权重的确定

采用 AHP 法^[14]、CRITIC 法^[13] 分别计算主客观权重。AHP 法基于转移紧迫度评价指标体系,对图 1 评价指标体系中的 7 项指标二者间进行重要性比较、并构造判断矩阵,由特征值法得到判断矩阵的特征向量,检查是否通过一致性检验,最终得到评价指标主观权重;CRITIC 法通过计算标准差与相关系数,基于各指标的信息量得到评价指标的客观权重。接着,基于博弈论进行组合权重的确定,博弈论是以 AHP 法和 CRITIC 法求解的权重作为博弈对手,在多次博弈中寻找权重间的利益平衡点,确定最优权重组合。步骤如下:

1) 由矩阵微分性质得到最优化一阶导数条件的线性方程组,如下式:

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: ω_1 、 ω_2 分别为主、客观权重; δ_1 、 δ_2 为主客观权重的组合系数。

2) 依据式(1)得到主客观权重的组合系数,归一化后计算得到最优组合系数 τ_1 、 τ_2 :

$$\tau_1 = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2}, \tau_2 = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \quad (2)$$

则组合权重 ω 为:

$$\omega = \tau_1 \omega_1 + \tau_2 \omega_2 \quad (3)$$

1.2 基于 TOPSIS 法的转移紧迫度的确定

TOPSIS 法的核心思想是计算各个评价对象与理想优劣解的差距来进行优劣排序。步骤如下:

1) 构建规范化的加权决策矩阵。将 g 个受灾点 h 项指标的组合权重与无量纲化后矩阵 Y 相乘得到加权决策矩阵 Z :

$$Z = (z_{pq})_{g \times h} = (\omega_q \cdot y_{pq})_{g \times h} \quad (4)$$

式中: p 为矩阵的第 p 行; q 为矩阵的第 q 列; z_{pq} 为 Y 的第 p 行第 q 列元素; y_{pq} 为 Y 的第 p 行第 q 列元素; ω_q 为 ω 的第 q 列元素; $p = 1, 2, \dots, g; q = 1, 2,$

$\dots, h$ 。

2) 确定正理想解 z_q^+ 和负理想解 z_q^- :

$$z_q^+ = \max(z_{1q}, z_{2q}, \dots, z_{gq}) \quad (5)$$

$$z_q^- = \min(z_{1q}, z_{2q}, \dots, z_{gq}) \quad (6)$$

3) 计算各受灾点与正理想解的欧氏距离 L_p^+ 及与负理想解的欧氏距离 L_p^- :

$$L_p^+ = \sqrt{\sum_{q=1}^h (z_{pq} - z_q^+)^2}, L_p^- = \sqrt{\sum_{q=1}^h (z_{pq} - z_q^-)^2} \quad (7)$$

4) 计算各受灾点与最优值的贴近度 ϕ_p :

$$\phi_p = L_p^- / L_p^+ + L_p^- \quad (8)$$

5) 计算转移紧迫度系数 λ_p :

$$\lambda_p = \frac{\phi_p}{\sum_{p=1}^g \phi_p} \times 100\% \quad (9)$$

受灾点的转移紧迫度系数越大,则该受灾点转移紧迫度就越高,优先级就越高,在疏散救援过程中应被优先满足。

2 连续运行公交疏散方案模型

2.1 连续运行公交疏散方案的模型假设

现有部分研究以无限的车辆资源为前提计算所需公交数量,公交完成 1 次疏散行程后就不再使用。考虑到灾害发生初期应急车辆资源的稀缺性,构建连续运行公交疏散模型。应急公交到达 1 个受灾点接载疏散人员并前往避难所,人员在避难所全部下车后,将继续前往相同或另 1 个受灾点救援。公交可进行多次行程,行程只能为从受灾点接载人员前往避难所或从避难所出发至受灾点。为了简化问题并使疏散计划实际可执行,将每个受灾点的疏散人数转化为公交车容量的数倍(向上取整)^[6,9]进行规划。其他假设如下:

1) 各受灾点疏散人员数量与各避难所容量已知,且避难所可以容纳所有疏散人员。

2) 疏散网络中各受灾点到各避难所的公交车最短行驶距离路线已知。

3) 应急公交数量有限且同时出发,所有受灾点疏散人员均使用应急公交疏散且已提前集合。

4) 应急公交连续运行,考虑人员上、下车时间的随机性,设置动态上车时间和下车时间。

2.2 疏散延迟不满意函数

应急疏散在仅考虑总行程时间最小的情况下,部分受灾严重的地区没有尽快得到疏散,可能会造成更大的延误损失。因此,借鉴文献[15]对于受灾点配送延迟不满意度的设计,参照文献[16]对于应急疏散特点的分析,构建疏散延迟不满意度函数,将最小化受灾点 d 疏散延迟不满意度 U_d 作为应急疏散的第 2 个优化目标,如下式所示:

$$U_d = \lambda_d (\gamma \max(0, T_{F,d} - T_{C,d}) + \theta T_{A,d}), \forall d \in D \quad (10)$$

式中: λ_d 为 d 的转移紧迫度系数; γ, θ 为权重系数; $T_{F,d}$ 为 d 完成疏散的时间; $T_{C,d}$ 为 d 完成疏散的期望时间; $T_{A,d}$ 为 d 所有疏散人员到达避难所的平均时间; D 为 d 的集合, $D = \{1, 2, \dots, d, \dots, n_d\}$; n 为数量; n_d 为受灾点总数量。受灾点的疏散延迟不满意度越小,对于该区域的疏散越迅速。

2.3 连续运行公交疏散方案的模型建立

模型参数包括 S 为避难所 s 的集合, $S = \{1, 2, \dots, s, \dots, n_s\}$, n_s 为避难所总数量; K 为可使用的应急公交车辆 k 的集合, $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, n_k\}$, n_k 为车辆总数量; R 为 k 可能进行的行程 r 的集合, $R = \{1, 2, \dots, r, \dots, n_r\}$, n_r 为行程总数量; N 为 k 允许的行驶路线集合, $N = N_{DS} \cup N_{SD}$; N_{DS} 为从 d 行驶到 s 的路线集合, $N_{DS} = \{(d, s) \mid d \in D, s \in S\}$; N_{SD} 为从 s 行驶到 d 的路线集合, $N_{SD} = \{(s, d) \mid s \in S, d \in D\}$; t_{ij} 为节点 i 到节点 j 的行驶时间, $\forall (i, j) \in N$; T_l 为人员的上车时间、下车时间; Q_d 为受灾点待疏散人数 H_d 基于公交车辆容量 B 转化后的待疏散人数(向上取整), $Q_d = \left\lceil \frac{H_d}{B} \right\rceil, d \in D$; O_s 为避难所容量 E_s 基于 B 转化后的避难所容量(向下取整), $O_s = \left\lfloor \frac{E_s}{B} \right\rfloor, s \in S$; $x_{k,r,ij}$ 为决策变量,当其值为 1 时表示 k 在任一 r 从节点 i 行驶到节点 j 。否则为 0, $\forall (i, j) \in N, k \in K, r \in R$ 。

基于上述问题描述和参数变量,构建数学规划

模型。为实现疏散完成时间最小化、以及受灾点疏散延迟整体不满意度最小,构建目标函数如下式:

$$f = \min(\alpha \cdot \max T_k + \beta \cdot (\sum_{d \in D} U_d)) \quad (11)$$

式中 α, β 为调节 2 个目标项的权重系数。

应急公交车辆的总行程时间计算如下式:

$$T_k = \sum_{(i,j) \in N} \sum_{r \in R} (t_{ij} + T_l \cdot \sigma) \cdot x_{k,r,ij}, \forall k \in K \quad (12)$$

式中 σ 为动态上下车时间的判定速率系数。

在单次行程中,应急公交最多只能前往 1 个受灾点,并将这些疏散人员送到同 1 个避难所:

$$\sum_{(d,s) \in N_{DS}} x_{k,r,ds} \leq 1, \forall k \in K, \forall r \in R \quad (13)$$

所有待疏散人员均被运送至避难所:

$$Q_d \leq \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} x_{k,r,ds}, \forall d \in D \quad (14)$$

每个避难所的容纳人数不超过其容量:

$$O_s \geq \sum_{d \in D} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} x_{k,r,ds}, \forall s \in S \quad (15)$$

决策变量的域:

$$x_{k,r,ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in N, k \in K, r \in \mathbb{Z}_+ \quad (16)$$

式中 $\mathbb{Z}_+$ 为正整数集合。

3 HS-GA 设计

GA 因其灵活的结构设计与良好的解质量被广泛应用于公交疏散规划问题的求解,但容易陷入局部最优,而和声搜索(Harmony Search, HS)能够灵活调整解个体的局部信息且易与其他算法结合。因此,设计 1 种 HS-GA 对模型求解,算法流程如图 2 所示。图 2 中 Gen 为遗传迭代代数, V 为和声创造次数, Rand 为生成的 0 到 1 的随机数, HMCR (Harmony Memory Considering Rate) 为记忆库取值概率, PAR (Pitch Adjusting Rate) 为微调概率。

3.1 基于转移紧迫度编码

考虑应急公交疏散问题的特点,设计 1 种基于转移紧迫度的双层编码方法求解。编码的第一层和第二层分别表示选取避难所及使用车辆,其长度均为基于公交容量转化后的受灾点疏散人员数量总和,示例如图 3 所示。

假设受灾点转移紧迫度大小排序为:2 号、1 号、3 号受灾点,分别对应 280、150、270 人需要撤离,可用的 3 个避难所容量分别为 500、300、300 人,使用 3 辆载座 60 人公交进行疏散,从而生成染色体编码。各受灾点待疏散人员基于车辆运力进行转化,

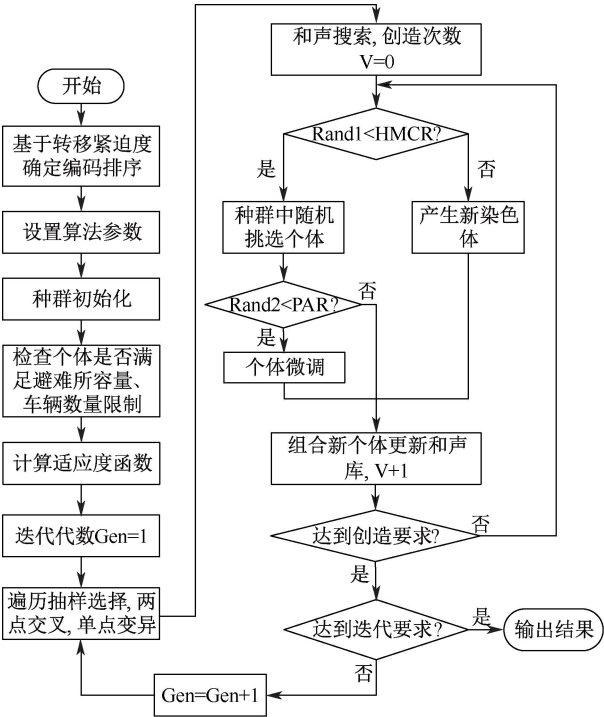


图2 HS-GA 流程

Fig. 2 Flow chart of HS-GA

	2号受灾点					1号受灾点			3号受灾点				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
避难所	2	2	3	1	2	1	1	3	1	1	3	2	1
车辆	2	3	1	2	2	1	3	1	2	3	3	1	1

图3 基于转移紧迫度的染色体编码示例

Fig. 3 Example of chromosome coding based on transfer urgency

得到 $Q_d = \{5, 3, 5\}$ 、 $O_s = \{8, 5, 5\}$, 以转移紧迫度大小排列顺序。车辆基因从左至右连续运行, 如 3 号车辆将 2 号受灾点灾民转移至 2 号避难所后, 继续前往 1 号受灾点将灾民转移至 1 号避难所, 直到完成所有转移任务。

3.2 HS

为了优化 GA 的性能, 引入 HS 方法^[17] 优化迭代后的遗传种群, 流程如图 2 所示。使用随机扰动^[18] 的变换方式取代传统 HS 的量化微调操作, 设置变换部分避难所基因或车辆基因 2 种操作, 搜索时随机选择 1 种进行变换。

4 考虑转移紧迫度的疏散方案实例分析

4.1 HS-GA 性能分析

为了评估本文设计算法的性能, 与 GA 及基于随机扰动操作优化的邻域搜索 GA (Neighborhood Search GA, NS-GA) 进行对比试验。生成不同规模算例, 记录各算法 30 次运行的平均结果, 求解结果见表 1。表 1 中第 1 列为算例序号, T_* 为运行时间, min; b 为目标函数值; δ 为不同算法目标值差距占比, 如下式:

$$\delta = \frac{b_c - b_b}{b_b} \times 100 \tag{17}$$

式中: b_c 为当前算法的目标值; b_b 为 3 种算法中的最佳目标值。

表 1 3 种算法对比

Table 1 Comparison of three algorithms

算例 序号	n_d	n_s	n_k	GA			NS-GA			HS-GA		
				T_*/min	b	$\delta/\%$	T_*/min	b	$\delta/\%$	T_*/min	b	$\delta/\%$
1	3	3	2	0.2	102	0	0.2	102	0	0.2	102	0
2	5	5	3	0.3	175	1.16	0.3	173	0	0.5	173	0
3	7	7	4	0.5	272	4.21	1	261	0	1.1	261	0
4	8	7	5	1.5	193	5.46	1.6	188	2.73	1.6	183	0
5	10	8	8	1.7	147	8.89	1.8	139	2.96	1.8	135	0
6	12	10	10	2.4	152	11.76	2.4	143	5.15	2.5	136	0
7	15	12	12	2.8	211	16.57	3.1	196	8.29	3.8	181	0
8	20	15	15	3.3	251	19.52	3.7	233	10.95	3.8	210	0
9	25	20	20	6.2	248	22.16	6.2	229	12.81	6.2	103	0
10	30	25	25	9.5	268	27.58	10.3	253	19.33	9.6	212	0
均值				2.9	202	11.73	3.1	192	6.22	3.1	180	0

由表 1 可知: 对于各规模问题算例, 提出的 HS-GA 效果比另外 2 种算法表现更好, 相比 GA 和 NS-GA 平

均分别提升 11.73% 和 6.22%。因此, 提出的 HS-GA 相较另外 2 种算法具有更高的稳定性, 求解方案更具优势。

4.2 考虑转移紧迫度的公交疏散案例分析

4.2.1 疏散案例设计

为验证模型及算法的有效性,设计仿真案例进行分析。案例假定青海玉树藏族自治州治多县发生

泥石流灾害,基于历史灾情信息随机设置 10 处受灾点;并基于全国应急避难场所综合信息管理服务系统相关数据,选取 10 个具有应急物资储备的避难所,如图 4 所示。

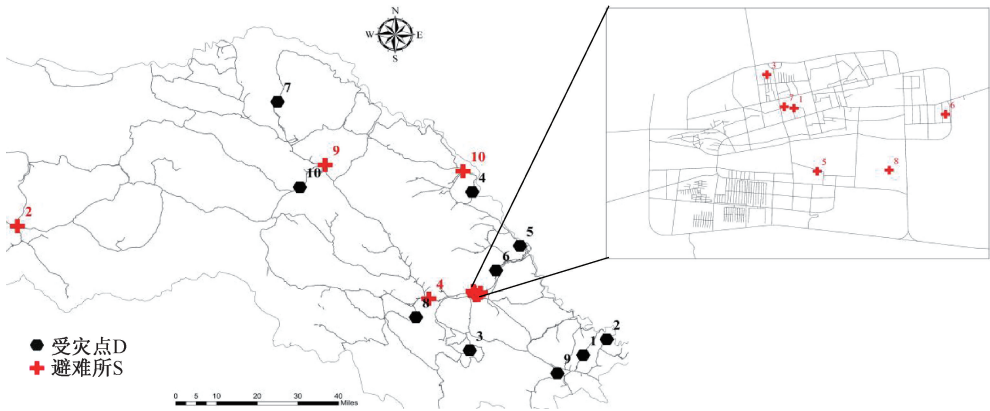


图 4 治多县疏散案例
Fig.4 Evacuation case of Zhiduo county

使用博弈论确定转移紧迫度评价体系各指标组合权重,通过 TOPSIS 法计算得到各灾点转移紧迫度。根据式(9)计算各灾点转移紧迫度系数,参照文

献[19]方法,采用等差分割法将归一化处理后的转移紧迫度系数进行排序与分级(I 级灾情最严重、II 级次之、III 级最小),见表 2,表中 G 为受灾点编号。

表 2 受灾点转移紧迫度系数排序与分级

Table 2 Ranking and grading of transfer urgency coefficient of disaster sites										
受灾点	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
转移紧迫度系数/%	11.97	6.02	7.22	10.92	8.55	20.23	8.24	7.79	11.2	7.85
排序结果	2	10	9	4	5	1	6	8	3	7
灾情分级	II	III	III	II	III	I	III	III	II	III

假设使用 10 辆额定载客量为 60 人的应急公交车进行人员疏散,且 $Q_d = \{6, 4, 3, 5, 4, 4, 3, 3, 5, 3\}$, $O_s = \{5, 3, 33, 2, 3, 5, 13, 33, 5, 5\}$ 。

HS-GA 但不考虑受灾点转移紧迫度的默认排序下求解的疏散方案,结果见表 4。2 种方案下各受灾点的疏散延迟不满意度如图 5 所示。

4.2.2 实例调度方案

运用 Python 3.9 进行方案寻优,其中算法参数为:种群规模为 150,迭代总次数为 500,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.06,创造总次数为 50, $HMCR = 0.9$, $PAR = 0.9$ 。设定 I 级、II 级、III 级受灾点完成疏散的期望时间分别为 60 min、120 min、180 min,权重设定 $\alpha = \beta = 0.5$, $\gamma = 0.7$, $\theta = 0.3$,上车时间、下车时间各为 5 min, σ 的取值范围为 $[0.9-1.1]$ 。对算法染色体解码得到疏散方案见表 3,表中 M 为避难所编号。

表 3 应急公交车辆疏散方案

Table 3 Emergency bus evacuation plan		
车辆编号	路径	时长/min
1	G6-M10-G1-M6-G3-M5	246
2	G6-M9-G6-M9-G7-M9-G7-M9	183
3	G1-M3-G9-M1-G5-M6-G10-M6	249
4	G5-M8-G8-M8-G8-M8-G3-M8	243
5	G6-M9-G7-M1-G2-M8	246
6	G1-M3-G9-M4-G9-M4-G9-M5-G10-M8	248
7	G10-M8-G8-M8-G3-M8	214
8	G4-M10-G4-M10-G4-M10-G5-M6-G2-M8	246
9	G1-M6-G1-M7-G1-M1-G9-M5-G2-M8	246
10	G4-M10-G4-M3-G5-M8-G2-M8	240

4.2.3 考虑及不考虑转移紧迫度的方案对比

设置考虑及不考虑转移紧迫度的 2 种疏散方案进行对比,即方案 1 为使用本文设计的基于转移紧迫度编码的 HS-GA 求解的疏散方案;方案 2 为使用

表 4 考虑、不考虑转移紧迫度的 2 种疏散方案对比

Table 4 Comparison on two evacuation plans with and without consideration of transfer urgency

编号	疏散方案	疏散完成 时间/min	疏散延迟整体 不满意程度	各级受灾点到达避难 所最晚时间/min			各级受灾点到达避难 所平均时间/min		
				I 级	II 级	III 级	I 级	II 级	III 级
方案 1	考虑紧迫度	249	52	111	146	249	67	49	164
方案 2	不考虑紧迫度	261	107	261	260	261	174	97	178

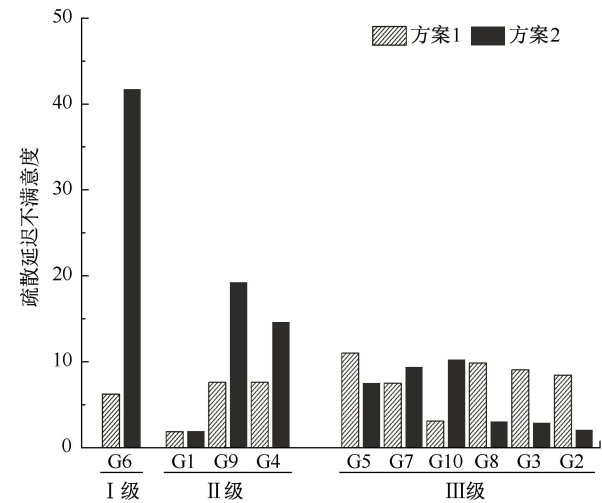


图 5 2 种方案下各受灾点疏散延迟不满意程度
Fig. 5 Dissatisfaction degree of evacuation delay at each disaster site under two plans

由表 4 可知:与方案 2 相比,方案 1 疏散完成时间更短,且疏散延迟整体不满意程度减少了 51.4%,这表明构建的考虑转移紧迫度的疏散方案是可行的。同时方案 1 下 I 级、II 级受灾点疏散完成时间、到达避难所平均时间均更短,说明使用方案 1 可以在短时间内疏散更多转移紧迫度较高的灾民,保证了重灾区疏散转移的优先性。

由图 5 可知:随灾情严重度降低,方案 2 中各受灾点的疏散延迟不满意程度整体趋势下降,尤其是 I、II 级中 6 号、9 号、4 号受灾点的疏散延迟不满足度均较高,这与应该优先疏散重灾区的理念和实际不符,因而该方案与其所对应的灾情等级不一致,在一定程度上丧失了救援的客观性。而考虑转移紧迫度的方案 1 个受灾点的疏散延迟不满意程度大小基本与灾情等级相对应,尤其是受灾严重的 I 级、II 级受灾点整体疏散延迟不满意程度较低,较好地考虑了对重灾区疏散的优先性。

使用不同应急公交数量下 2 种方案的疏散情况如图 6 所示。由图 6 可知:随着可用应急公交数量增加,疏散完成时间与疏散延迟不满意程度逐渐降低。

不同公交数量下 2 种方案疏散完成时间接近,但方案 2 的疏散延迟不满意程度始终高于方案 1 的,原因是根据式(10),当可用公交数量较少时,大多数受灾点都无法在期望时间内完成疏散,而方案 1 可以优先疏散转移紧迫度较高的重灾区,合理调度疏散车辆,从而减少整体疏散延迟不满意程度。

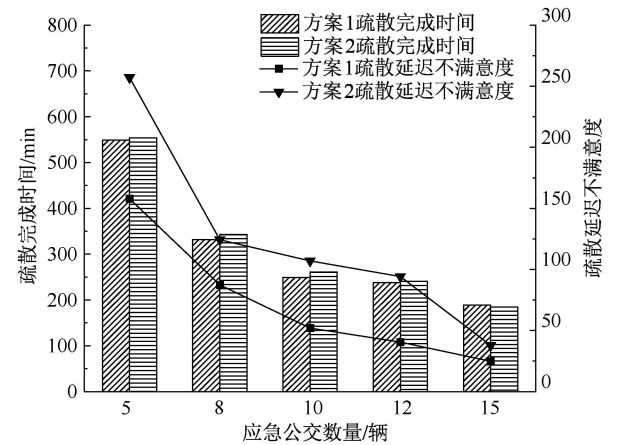


图 6 不同应急公交数量下 2 种方案的疏散情况
Fig. 6 Evacuation condition of two plans under different number of emergency buses

5 结 论

1) 通过多种规模的算例验证,文中设计的 HS-GA 效果比另外 2 种算法表现更好,相比于 GA 和 NS-GA,平均分别提升 11.73%和 6.22%。

2) 由 HS-GA 求解案例得出,相比于不考虑转移紧迫度,考虑转移紧迫度的疏散方案的疏散完成时间更短,且疏散延迟不满意程度减少 51.4%,I 级、II 级受灾点的疏散完成时间及到达避难所平均时间均更短。

3) 由 HS-GA 求解案例得出,考虑、不考虑转移紧迫度的 2 种疏散方案,随着可用应急公交数量的增加,疏散完成时间及疏散延迟不满意程度均逐渐降低;不同应急公交数量下 2 种方案的疏散完成时间接近,但相较于不考虑转移紧迫度的方案,考虑转移紧迫度方案的疏散延迟不满意程度始终更低。

参 考 文 献

[1] YIN Weihao, CORDAHI G, RODEN D, et al. Risk reduction impact of connected vehicle technology on regional hurricane evacuations: a simulation study [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018,31:1 245-1 253.

[2] SAYYADY F, EKSIÖGLU S D. Optimizing the use of public transit system during no-notice evacuation of urban areas [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010,59(4): 488-495.

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

[4] BISH D R. Planning for a bus-based evacuation [J]. OR Spectrum, 2011, 33(3): 629-654.

[5] HEYDAR M, YU Jie, LIU Yue, et al. Strategic evacuation planning with pedestrian guidance and bus routing: a mixed integer programming model and heuristic solution [J]. Journal of Advanced Transportation, 2016,50(7): 1 314-1 335.

[6] GOERICK M, DEGHDAK K, HEBLER P. A comprehensive evacuation planning model and genetic solution algorithm [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014,71: 82-97.

[7] LAKSHAY, BOLIA N B. Operating strategies of buses for mass evacuation [J]. Safety Science, 2019,111:167-178.

[8] DHINGRA V, ROY D. Modeling emergency evacuation with time and resource constraints: a case study from Gujarat [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2015,51: 23-33.

[9] FENG Yuanyuan, CAO Yi, YANG Shuanghua, et al. A two-step sub-optimal algorithm for bus evacuation planning [J]. Operational Research, 2023,23(36):1-35.

[10] 郭茜, 周伊可, 吴刚. 基于三边匹配理论的应急救援分配决策[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 222-229.

GUO Qian, ZHOU Yike, WU Gang. Emergency rescue allocation decision-making based on three sided matching theory [J]. China Safety Science Journal, 2024,34(3):222-229.

[11] 宋英华, 白明轩, 马亚萍, 等. 考虑区域灾情分级的应急物资公平调度优化模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1):172-179.

SONG Yinghua, BAI Mingxuan, MA Yaping, et al. Optimal model for fair dispatch of emergency materials considering regional disaster classification [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 172-179.

[12] 国家减灾委员会-科学技术部抗震救灾专家组. 汶川地震灾害综合分析与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 190-196.

[13] 范志强, 梁宁宁, 罗一帆, 等. 考虑需求紧迫度差异与公平分配的三级应急物资调度研究[J]. 工业工程与管理, 2024,29(2):26-36.

FAN Zhiqiang, LIANG Ningning, LUO Yifan, et al. Research on three-level emergency material scheduling considering demand urgency difference and fair distribution [J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 29(2): 26-36.

[14] 张仰行. 基于 AHP-TOPSIS 法的煤矿机电设备安全评价模型及应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增 1): 179-184.

ZHANG Yanghang. Safety evaluation model of electromechanical equipment in coal mines based on AHP-TOPSIS method and its application [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1): 179-184.

[15] 刘晓燕, 邱华昕, 王杜娟, 等. 考虑优先级和需求可拆分的灾后应急血液多车舱调度[J]. 系统管理学报, 2024, 33(6): 1 447-1 460.

LIU Xiaoyan, QIU Huaxin, WANG Dujuan, et al. Research on multi-compartment emergency blood scheduling considering priority and split demand[J]. Journal of Systems & Management, 2024, 33(6): 1 447-1 460.

[16] 安实, 冯德健, 王健, 等. 多车型多行程需求可拆分的应急疏散车辆调度[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(1): 1-6.

AN Shi, FENG Dejian, WANG Jian, et al. Scheduling of emergency evacuation vehicles with multiple vehicle types and multiple trips and split delivery[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(1): 1-6.

[17] 刘乐. 单机最大延迟重调度的和声变邻域搜索算法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(8): 1 977-1 991.

LIU Le. Harmony variable neighborhood search algorithm for single-machine maximum lateness rescheduling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(8): 1 977-1 991.

[18] 曹光乔, 马斌, 陈聪, 等. 基于遗传变邻域搜索算法的农机跨区调度优化研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 114-123.

CAO Guangqiao, MA Bin, CHEN Cong, et al. Agricultural machinery cross-region scheduling optimization based on genetic algorithm variable neighborhood search [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 114-123.

[19] 张永恒, 张建忠, 温显罡, 等. 台风灾害主要承灾体易损性研究:以浙江为例[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 157-163.

ZHANG Yongheng, ZHANG Jianzhong, WEN Xiangang, et al. Vulnerability of hazard bearing bodies of typhoon disaster: a case study in Zhejiang[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(1): 157-163.

作者简介: 陈娜 (1981—),女,河南南阳人,博士,副教授,主要从事应急管理、安全人机等方面的研究。
E-mail:nchen@zzu.edu.cn。



潘士伟 (1999—),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为应急疏散。E-mail:psw@gs.zzu.edu.cn。