

面向地铁运营中断的多模式疏散策略

赖元文, 巫扬帆, 梁健鸿, 蔡元臣, 王书易

(福州大学 土木工程学院, 福州 350116)

摘要: 针对地铁运营中断场景下, 现有研究多仅依靠应急接驳公交开展客流疏散, 较少考虑多模式出行协同疏散的问题, 提出了一种结合应急公交与应急出租车的多模式应急疏散策略。首先, 构建多模式应急接驳模型, 旨在最小化乘客出行延误及应急疏散成本; 然后, 设计遗传算法进行求解; 最后, 以福州市地铁 1 号线早高峰区间双向运营中断为案例, 验证本文模型及算法的有效性。结果表明, 相较于单一的应急公交策略, 多模式疏散策略使综合成本和乘客出行时间成本分别降低了 9.2% 和 22.4%。

关键词: 城市交通; 地铁运营中断; 乘客出行方式选择; 多模式疏散策略; 遗传算法

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)09-2340-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250150

Multi-modal evacuation strategies for metro operational disruptions

LAI Yuan-wen, WU Yang-fan, LIANG Jian-hong, CAI Yuan-chen, WANG Shu-yi

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: A multi-modal emergency evacuation strategy combining emergency buses and emergency cabs is proposed for the problem that existing studies mostly relied only on emergency shuttle buses for passenger flow evacuation under metro operation disruption scenarios, with little consideration given to coordinated evacuation via multi-mode travel. First, a multi-modal emergency access model is constructed to minimize passenger travel delays and reduce emergency evacuation costs. Then, a genetic algorithm is designed to solve the problem. Finally, the two-way operational disruptions in the morning peak interval of metro line 1 in Fuzhou City are used as a case study to verify the effectiveness and practicality of the model and algorithm. The results show that compared with the single bridging bus strategy, the multi-modal evacuation strategy achieves a reduction of 9.2% and 22.4% in the total cost and passenger travel time cost, respectively.

Key words: urban traffic; metro operation disruption; passenger travel mode choices; multi-modal evacuation strategy; genetic algorithm

收稿日期: 2025-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52302406).

作者简介: 赖元文 (1981-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 公共交通运营与管理. E-mail: lai yuanwen@fzu.edu.cn

通信作者: 王书易 (1993-), 男, 副研究员, 博士. 研究方向: 自动驾驶、道路交通安全. E-mail: syw@fzu.edu.cn

0 引言

地铁作为城市公共交通的核心组成部分,其运营中断将带来严重后果。不可预测的突发事件会严重影响城市轨道交通系统的服务水平,甚至造成部分乘客流失。为降低这一负面影响,应急管理部门需要迅速疏散受影响乘客并提供替代交通服务。当前,应急公交已成为地铁系统突发情况下疏散乘客的常用接驳工具,但其在速度和灵活性上仍有局限。鉴于此,研究多模式的应急疏散策略至关重要。出租车速度较快、分布较广,可以及时为乘客提供更舒适的服务,因此考虑应急公交与出租车联合疏散策略,有望成为提升乘客出行效率并降低运营成本的有效手段。

国内外围绕应急公交调度优化问题的研究已取得了较为丰富的成果,主要针对调度优化模型及求解算法开展研究。邓亚娟等^[1]在以最小化乘客等待接驳的总时间延误为目标,构建了一个反向集合覆盖模型。姚加林等^[2]构建了车辆发车频率优化模型,并利用改进遗传算法进行求解。Wang等^[3]提出了一种双层规划模型,旨在最小化接驳公交线路数量,并采用超载弧导向启发式(Overloaded-arc-oriented heuristic, OAH)算法和双向搜索(Bidirectional search, BS)算法求解。王佳冬等^[4]通过结合理想点法和遗传算法,构建了一个在灵活路径模式下的多目标应急公交调度模型,提升了应急公交的疏运效率。上述研究主要集中于对单一接驳工具(即应急公交的调度方案)进行优化,鲜有研究对应急接驳的形式进行优化,而灵活选用多形式、多方式的接驳工具更符合实际应用,可以提高资源利用率和救援效率。

近年来,学者们不再局限于地铁与单一公交类型接驳,转而结合乘客出行心理,探究组合出行方式接驳,满足乘客个性化出行需求。吴炜光^[5]基于RP&SP调查数据,分析了影响乘客组合出行选择的因素。Qiu等^[6]提出常规公交和需求响应型公交组合接驳方式,利用需求响应型公交提供一次性接驳服务,补充地铁运力。Pnevmatikou等^[7]结合乘客的出行体验和感知信息,对地铁服务中断期间滞留乘客的出行方式选择进行建模。Fang等^[8]在平衡环境效应与成本支付间关系的条件下,构建模型用于判断如何进行出租车和公交车两种接驳工具的选择。然而,已有研究大部分只将组合出行方式作为地铁接驳方案的附加考

虑因素并进行宏观策略阐述,并未详细研究其具体联合调度方案。

基于上述问题,本文在研究应急公交与应急出租车联合客流疏散的基础上,提出了一种地铁运营中断情境下的多模式应急疏散策略。首先,通过构建多模式应急接驳模型,最大限度地减少综合疏散成本;然后,采用遗传算法求解模型;最后,以福州市地铁1号线早高峰区间双向运营中断为案例,验证了本文模型及算法的有效性和实用性。

1 模型构建

1.1 问题描述

地铁运营中断事件发生后,如何快速、高效地疏散大量滞留乘客是应急疏散策略的核心问题。滞留于车站内部的乘客会选择原地等待地铁恢复或进行出行方式调整(如乘坐公交车、出租车、共享自行车以及步行等)以继续完成出行任务。但单一的应急接驳方式难以快速、有效地疏散这些乘客,且可能造成资源浪费,因此本文考虑出行方式联合调度,将地铁中断站点的上下行线路分别延伸至最近的地铁折返站点,以此形成的区间视为中断服务区间。考虑在中断服务区间内,合理调配出租车和应急公交资源进行联合接驳,而在服务区间外,采用地铁小交路形式进行二次疏散。综上所述,乘客的出行方案可划分为:原地等待恢复、地铁+应急接驳公交、地铁+应急接驳出租车、常规公交、网约车。由于本次研究对象主体为应急公交与应急出租联合调度,故主要探讨选择“地铁+应急接驳公交”、“地铁+应急接驳出租车”出行的乘客疏散过程。

应急公交凭借其载客量大、成本较低的优势,可以大规模地转移滞留乘客,为确保上下行所有站点的乘客都能得到疏散服务,本文选用“站站停”应急公交运行模式(见图1);而出租车因其灵活性和便捷性,能够迅速响应并疏散乘客至目的地,可作为公交补充运力在特定站点间进行“点对点”直达疏运(见图2),该运行模式一定程度上提升了出行的灵活性,能够满足乘客的个性化出行需求。

乘客总出行成本(包括等待时间、在车时间等)直接关系到乘客的出行体验和满意度;而运营成本则涉及应急公交和出租车的调度、运行等费用,是企业需要重点考虑的经济指标。在疏散服务优化的过程中,缩减乘客出行时间需要增加应

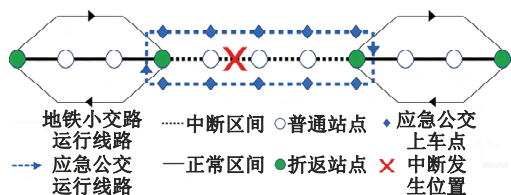


图 1 应急接驳公交疏运示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bridging bus evacuation

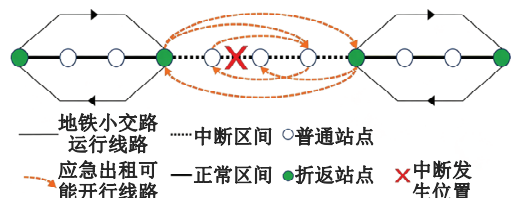


图 2 应急接驳出租疏运示意图

Fig. 2 Schematic diagram of emergency cabs evacuation

急车辆的发车频率及调车数量,而企业出于降低运营成本的目的,倾向于减少车辆调度的频率,两者之间存在明显的供需冲突。因此,以乘客总出行成本和运营成本之和为建模目标,能够综合权衡疏散效率和经济效益,为制定科学、合理的多模式应急疏散策略提供有力支持。

1.2 模型假设

在构建模型之前,进行如下假设:①应急接驳公交、出租车在各站点间均选择最短路径运行,匀速行驶,不考虑道路拥堵对疏散过程的影响;②应急接驳公交和出租车各自的车型统一且额定载客量为定值,上车点均位于地铁中断区间站点附近;③不考虑地铁站点区域对公交和出租车的泊车限制;④仅考虑中断瞬间产生的滞留乘客,即起始站点或目的站点任意一个或两个位于中断服务区间内的乘客,且运营中断事件一经发生,无后续乘客进入地铁系统。

1.3 目标函数

1.3.1 乘客出行方式选择

地铁运营中断突发事件发生后,滞留于车站内部的乘客会原地等待恢复或采取其他方式(如乘坐公交车、出租车、共享自行车以及步行等)继续完成出行任务。为分析乘客对应急公交及出租车的选择偏向以及进一步制定调度方案,需要构建乘客出行方式选择模型,量化乘客方案选择概率。现有研究主要运用随机效用理论和前景理论分析乘客出行选择问题。早期研究侧重于基于随机效用理论的多项 Logit (Multi-nomial Logit, MNL)模型^[9],但因其假设完全理性,难以有效刻

画不确定性情境。为克服此局限,Tversky等^[10]提出基于有限理性的累积前景理论,该理论更适用于不确定性决策情境,与地铁运营中断导致的原计划遭受干扰、信息受限及出行不确定性情景相符合,因此本文采用累积前景理论量化运营中断情境下乘客选择不同出行方案的概率。

本文定义的广义出行费用主要考虑因素为乘客的出行时间、出行费用和舒适度,其表达式为:

$$f_{ij,n}^p = \mu T_{ij,n}^p + C_{ij,n}^p + d_{ij} C_{ij,n}^p \quad (1)$$

$$C_{ij}^c = \frac{d_{ij}}{50 C_{ij}^s} + 1000 \left(\frac{T_{ij}}{60 d_{ij}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $f_{ij,n}^p$ 为从站点*i*到站点*j*间选择出行方案*p*的第*n*种广义出行费用; μ 为乘客出行时间系数,根据福州市全年居民人均可支配收入计算,取0.39元/min; $C_{ij,n}^p$ 为从站点*i*到站点*j*间选择出行方案*p*的第*n*种出行费用,元; $T_{ij,n}^p$ 为从站点*i*到站点*j*间选择出行方案*p*的第*n*种出行时间,min; $C_{ij,n}^p$ 为从站点*i*到站点*j*间选择出行方案*p*的第*n*种舒适度成本,元/km; d_{ij} 为从站点*i*到站点*j*的距离,km。

考虑到乘客落差心理,采用原计划地铁广义出行费用为参考点,具体公式为:

$$f_{ij}^0 = \mu T_{ij}^0 + C_{ij}^0 + d_{ij} C_{ij}^0 \quad (3)$$

式中: f_{ij}^0 、 C_{ij}^0 、 T_{ij}^0 、 C_{ij}^0 作为参考点,分别表示乘客从站点*i*到站点*j*间原计划地铁出行的广义出行费用、出行费用、出行时间以及舒适度成本。

累积前景理论中的价值函数 $v(\Delta f_{ij,n}^p)$ 如下所示:

$$v(\Delta f_{ij,n}^p) = \begin{cases} a(f_{ij}^0 - f_{ij,n}^p)^\alpha, & f_{ij}^0 > f_{ij,n}^p \\ -b(f_{ij,n}^p - f_{ij}^0)^\beta, & f_{ij}^0 < f_{ij,n}^p \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 、 b 分别为收益追求系数和损失规避系数, α 、 β 均为风险敏感系数,取值越大,乘客对风险的敏感程度越高。依据研究标定^[10], $a=1$, $b=2.25$, $\alpha=\beta=0.88$ 。

式(5)~式(7)为累积决策权重函数:

$$\begin{cases} \pi_n^+ = w^+(p_{ij,n}^p + \dots + p_{ij,h}^p) - \\ w^+(p_{ij,n+1}^p + \dots + p_{ij,h}^p), & 0 \leq n < h \\ \pi_h^+ = w^+(p_{ij,h}^p) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \pi_n^- = w^-(p_{ij,-r}^p + \dots + p_{ij,n}^p) - \\ w^-(p_{ij,-r}^p + \dots + p_{ij,n-1}^p), & -r \leq n < 0 \\ \pi_r^- = w^-(p_{ij,-r}^p) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} w^+(p_{ij,n}^p) = \frac{p_{ij,n}^{p\gamma}}{(p_{ij,n}^{p\gamma} + (1 - p_{ij,n}^p)^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}} \\ w^-(p_{ij,n}^p) = \frac{p_{ij,n}^{p\delta}}{(p_{ij,n}^{p\delta} + (1 - p_{ij,n}^p)^\delta)^{\frac{1}{\delta}}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: π_n^+ 、 π_n^- 分别为收益和损失时的累积决策权重函数; $w^+(p_{ij,n}^p)$ 、 $w^-(p_{ij,n}^p)$ 分别为收益和损失时的决策权重函数; γ 为收益时的风险态度系数; δ 为损失时的风险态度系数。依据研究标定^[10], $\gamma=0.61$, $\delta=0.69$ 。

在出行方式选择行为研究中,为科学预测和分析乘客偏好,学者常采用离散选择模型,其中 Logit 模型因其简洁性、实用性和多选择集处理能力而得到广泛应用^[11]。本文为更精确反映乘客实际选择行为并预测各出行方案选择概率,将累积前景值代入改进后的 Logit 模型进行计算,从而得出各出行方案的选择概率:

$$V(f_{ij}^p) = \sum_{n=0}^k \pi_n^+ v(\Delta f_{ij,n}^p) + \sum_{n=-r}^0 \pi_n^- v(\Delta f_{ij,n}^p) \quad (8)$$

$$P_{ij}^p = \frac{\exp(-V(f_{ij}^p)/\bar{V}(f_{ij}^p))}{\sum_{p=1}^P \exp(-V(f_{ij}^p)/\bar{V}(f_{ij}^p))} \quad (9)$$

式中: $V(f_{ij}^p)$ 为从站点 i 到站点 j 选择方案 p 的累积前景值; P_{ij}^p 为从站点 i 到站点 j 选择第 p 种方案的概率; P 为出行方案集合; $\bar{V}(f_{ij}^p)$ 为从站点 i 到站点 j 间 p 种方案累积前景值的均值。

1.3.2 受影响乘客的总出行成本

(1) 应急疏散服务乘客需求划分

由于本文主要关注应急公交和应急出租接驳调度,为简化说明,将这两种接驳方式统称为应急疏散服务。以累计前景理论得到的概率作为输入参数,剔除原地等待恢复以及自主疏散的乘客,再进一步根据应急接驳出租疏散路线的开行情况计算得出选择应急接驳公交和应急接驳出租两种疏散方案的乘客需求:

$$Q_{ij}^s = Q_{ij} \times P_{ij}^s \quad (10)$$

$$P_{ij}^s = P_{ij}^{\text{taxi}} + P_{ij}^{\text{bus}} \quad (11)$$

$$Q_{ij}^{\text{taxi}} = Q_{ij} \times P_{ij}^{\text{taxi}} \times \sigma_{ij} \quad (12)$$

$$Q_{ij}^{\text{bus}} = Q_{ij}^s - Q_{ij}^{\text{taxi}} \quad (13)$$

式中: Q_{ij}^s 为从站点 i 到站点 j 选择应急疏散服务的

客流量,人; P_{ij}^s 为从站点 i 到站点 j 选择应急疏散服务的概率; P_{ij}^{bus} 为从站点 i 到站点 j 的滞留乘客选择应急出租车的概率; P_{ij}^{taxi} 为从站点 i 到站点 j 的滞留乘客选择应急公交的概率; Q_{ij}^{taxi} 为从站点 i 到站点 j 的出租车疏散客流量,人; Q_{ij}^{bus} 为从站点 i 到站点 j 的应急公交疏散客流量,人; σ_{ij} 为决策变量,当站点 i 和站点 j 间开行出租车疏散路径,则 σ_{ij} 为 1,反之为 0。

(2) 应急出租服务的乘客总等待时间成本 c_w^{taxi}

$$c_w^{\text{taxi}} = \alpha_w \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} Q_{ij}^{\text{taxi}} \times t_{i,w}^{\text{taxi}} \quad (14)$$

式中: α_w 为乘客等待时间成本系数,元/min; $t_{i,w}^{\text{taxi}}$ 为站点 i 处乘坐应急出租车疏散的乘客平均等待时间, min。

对每个站点 i 选择应急接驳出租服务的乘客而言,统计以其为中心加上周围两个站点(即 $i-1$ 和 $i+1$ 站点)单位时间内到达这 3 个站点的车辆数之和的倒数,并作为站点 i 处乘客最终的平均等车时间 $t_{i,w}^{\text{taxi}}$ ^[12],计算公式为:

$$t_{i,w}^{\text{taxi}} = \sum_{j=i-1}^{i+1} \left(\frac{60}{d_j^{\text{taxi}}} + t_{ij,t}^{\text{taxi}} \right) \quad (15)$$

式中: $t_{ij,t}^{\text{taxi}}$ 为从站点 i 到站点 j 出租车的平均运行时间, min; d_j^{taxi} 为单位时间内应急调度点 j 附近召集的出租车数量,辆。

(3) 应急出租服务的乘客总在车时间成本 $t_{ij,t}^{\text{taxi}}$

$$c_t^{\text{taxi}} = \alpha_t \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} Q_{ij}^{\text{taxi}} \times t_{ij,t}^{\text{taxi}} \quad (16)$$

$$t_{ij,t}^{\text{taxi}} = L_{ij} / \bar{v}_{\text{taxi}} \quad (17)$$

式中: α_t 为乘客在车时间成本系数,元/min; L_{ij} 为站点 i 、 j 之间的行驶距离, km; $\bar{v}_{\text{taxi}}$ 为出租车平均运行速度, km/min。

(4) 应急公交服务的乘客总等待时间成本 c_w^{bus}

$$c_w^{\text{bus}} = \alpha_w \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} Q_{ij}^{\text{bus}} \times t_w^{\text{bus}} \quad (18)$$

式中: t_w^{bus} 为乘坐应急公交疏散的乘客平均等待时间, min。

假定应急公交到达遵循泊松分布,结合其从驻车点至折返站点的行程时间,计算得出乘客平均等待时间 t_w^{bus} 为:

$$t_w^{\text{bus}} = \frac{1}{2g_b} + \frac{\sum_{i \in D} d_i^{\text{bus}} t_{i,D}^{\text{bus}}}{\sum_{i \in M} \sum_{j \in M} Q_{ij}^{\text{bus}}} \quad (19)$$

式中: d_i^{bus} 为从第 i 个驻车点派出的应急公交车辆数,辆; D 为应急公交驻车点集合; $t_{i,D}^{\text{bus}}$ 为从第 i 个

驻车点派出的应急公交到相应折返站点所需的行程时间, min; g_b 为应急公交发车频率, 辆/min。

(5) 应急公交服务的乘客总在车时间成本 c_t^{bus}

$$c_t^{\text{bus}} = \alpha_t \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} Q_{ij}^{\text{bus}} \times t_{ij,t}^{\text{bus}} \quad (20)$$

式中: $t_{ij,t}^{\text{bus}}$ 为从站点 i 到站点 j 应急公交服务的乘客平均在车时间, min。

应急接驳公交服务的乘客在车时间 $t_{ij,t}^{\text{bus}}$ 由公交运行时间和停站时间两部分组成, 计算公式为:

$$t_{ij,t}^{\text{bus}} = \frac{L_{ij}}{\bar{v}_{\text{bus}}} + (|j-i|-1)t_s, \quad j \neq i \quad (21)$$

式中: $\bar{v}_{\text{bus}}$ 为应急公交平均运行速度, km/min; t_s 为应急公交在每个站点的停站时间, min。

(6) 乘客总出行成本 f_1

假设应急公交与出租车停靠点与地铁中断站点紧邻, 不考虑乘客计步行及上下车时间, 因此乘客总出行成本仅考虑选择应急接驳公交和应急接驳出租进行疏散的乘客总等待时间成本和总在车时间成本。乘客总出行成本 f_1 (元) 为:

$$f_1 = c_w^{\text{taxi}} + c_t^{\text{taxi}} + c_w^{\text{bus}} + c_t^{\text{bus}} \quad (22)$$

1.3.3 应急疏散服务总运营成本

(1) 应急出租总运营成本 c_d^{taxi}

$$c_d^{\text{taxi}} = \beta_d' \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} D_{ij}^{\text{taxi}} \cdot L_{ij} + \beta_t' \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} D_{ij}^{\text{taxi}} \cdot t_{ij,t}^{\text{taxi}} \quad (23)$$

$$D_{ij}^{\text{taxi}} = \frac{Q_{ij}^{\text{taxi}}}{q_{\text{taxi}}} \quad (24)$$

式中: β_d' 为应急出租车运营距离费用系数, 元/km; β_t' 为应急出租车运营时间费用系数, 元/min; D_{ij}^{taxi} 为从站点 i 到站点 j 所需的出租车发车数, 辆; q_{taxi} 为出租车额定载客量, 人。

(2) 应急公交总运营成本 c_d^{bus}

$$c_d^{\text{bus}} = \beta_d^b \cdot T_t \cdot g_b \cdot L_s + \beta_t^b \cdot \left[T_t \cdot g_b \cdot T_c^{\text{bus}} + \sum_{i \in D} d_i^{\text{bus}} t_{i,D}^{\text{bus}} \right] \quad (25)$$

式中: β_d^b 为应急公交运营距离费用系数, 元/km; β_t^b 为应急公交运营时间费用系数, 元/min; L_s 为应急公交服务线路总长度, km; T_t 为应急公交接驳服务总时间, min; T_c^{bus} 为应急公交完成一个线路周期所需的时间, min。

应急公交完成一个线路周期所需的时间主要包括运行时间、停站时间以及在线路首末站的折返时间, 计算公式为:

$$T_c^{\text{bus}} = \frac{L_s}{v_{\text{bus}}} + 2(m-2)t_s + 2t_z \quad (26)$$

式中: m 为中断站点个数; t_z 为应急公交在线路首末站的折返时间, min。

(3) 应急疏散服务总运营成本 f_2

$$f_2 = c_d^{\text{taxi}} + c_d^{\text{bus}} \quad (27)$$

1.3.4 系统总成本

系统总成本(元)综合考虑乘客和运营企业两方面的需求和利益, 由应急公交和出租车联合接驳模式下的乘客总出行成本与应急疏散服务总运营成本共同组成。本文以最小化乘客总出行成本与总运营成本为目标, 即:

$$\min f = f_1 + f_2 \quad (28)$$

1.4 约束条件

约束 1 对每一个应急调度点而言, 其派出的接驳出租车总数不能超过其实际可用的车辆数, 即:

$$\sum_{j \in M} D_{ij}^{\text{taxi}} \leq \bar{d}_i^{\text{taxi}} \times \frac{T_t}{60} \quad (29)$$

$$\bar{d}_i^{\text{taxi}} = \sum_{j=i-1}^{i+1} \left(\frac{60}{\frac{60}{d_j^{\text{taxi}}} + t_{ij,t}^{\text{taxi}}} \right) \quad (30)$$

式中: $\bar{d}_i^{\text{taxi}}$ 为单位时间内到达站点 i 的出租车平均数量, 辆。

约束 2 每个应急调度点附近召集的出租车数量不可超过最大出租车数量 $d_{\text{max}}^{\text{taxi}}$, 即:

$$d_i^{\text{taxi}} \leq d_{\text{max}}^{\text{taxi}} \quad (31)$$

式中: $d_{\text{max}}^{\text{taxi}}$ 为应急调度点召集的最大出租车辆数, 辆。

约束 3 保证选择应急公交进行疏散的乘客需求得到满足, 即:

$$\epsilon_{\min} \cdot q_{\text{bus}} \cdot T_t \cdot g_b \leq \sum_i \sum_j Q_{ij}^{\text{bus}} \quad (32)$$

$$\sum_i \sum_j Q_{ij}^{\text{bus}} \leq \epsilon_{\max} \cdot q_{\text{bus}} \cdot T_t \cdot g_b \quad (33)$$

式中: q_{bus} 为应急公交额定载客量, 人; $\epsilon_{\min}$ 、 $\epsilon_{\max}$ 分别为应急公交满载率的最小值和最大值。

约束 4 应急公交发车频率应在一定范围之内, 即:

$$g_{\min} \leq g_b \leq g_{\max} \quad (34)$$

式中: $g_{\min}$ 、 $g_{\max}$ 分别为应急公交发车频率的最小值和最大值。

约束 5 应急服务时间内发出的出租车数和应急公交数量应为自然数, 即:

$$D_{ij}^{\text{taxi}} \in \mathbf{N} \quad (35)$$

$$T_i \times g_b \in \mathbf{N} \quad (36)$$

$$d_i^{\text{bus}} \in \mathbf{N} \quad (37)$$

目标函数 $\min f$ 与约束条件式(29)~式(37)构成了多模式应急接驳优化模型。

2 遗传算法设计

车辆调度问题常采用启发式算法进行求解^[13]。遗传算法因其全局搜索能力强、不依赖梯度信息以及高效并行化的特点,适合解决复杂的中断接驳问题。基于上述优势,本文采用遗传算法进行模型求解,算法步骤(见图3)如下所示。

步骤1 设置遗传算法编码方式及算法参数。为提升遗传算法的搜索效率、实现便捷性和处理连续优化问题的灵活性,本文采用实数编码方式。算法参数的设置如下^[14]:遗传算法的种群规模 N 设置为50,以确保算法在搜索空间中有足够的多样性,避免过早收敛;交叉概率 P_c 设置为0.7,以保证种群中个体间的信息交换,促进优良基因的传播;变异概率 P_m 设置为0.01,以维持种群的多样性,避免陷入局部最优解;进化代数 $\max_{\text{gen}}$ 设置为200,以确保算法有足够的迭代次数进行全局搜索。

步骤2 初始化种群。初始化种群中每个个体的染色体,自定义适应度函数,计算每个个体的适应度。适应度函数的设计基于本文目标函数,即最小化乘客总出行成本和运营成本。

步骤3 选择初始最优个体。由于本文目标函数是最小化问题,在初始种群中找到适应度最好的个体,即最小的适应度值,记录其适应度和染色体。

步骤4 迭代寻优。依据个体适应度值,采用轮盘赌策略进行个体选择,并通过设定的交叉、变异概率随机对个体进行交叉、变异操作,产生新一代的种群,记录每一代进化中最好的适应度和平均适应度。

步骤5 更新最优个体。比较初始解和新一代进化中最好的个体适应度,判断最优解是否更新,若更新,则记录当前最优解。

步骤6 检验新解是否满足最大进化代数。若满足,则输出结果;否则,继续执行步骤4。

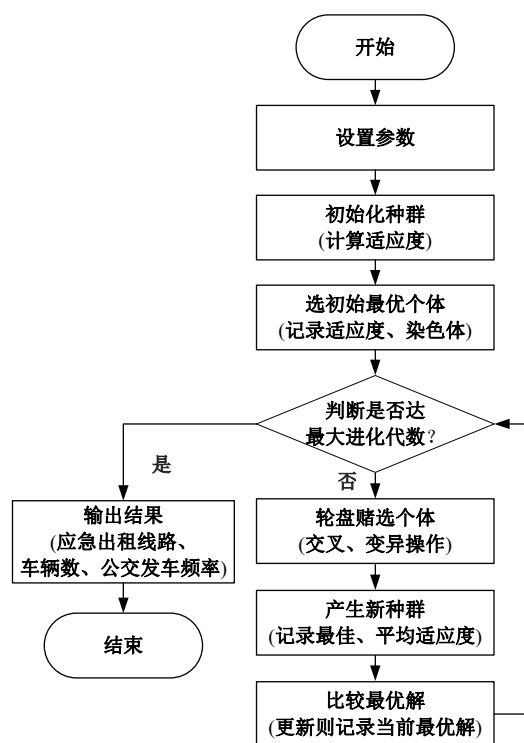


图3 遗传算法流程图

Fig. 3 Schematic diagram of the genetic algorithm process

3 案例分析

3.1 案例说明

以福州市地铁1号线作为研究对象进行案例分析。假设达道站与上藤站之间突发运营事故,致使区间双向线路无法通车,以象峰至三江口方向的列车到站顺序为标准,对1号线25个站点依次进行编号,中断区间如图4所示,发生时间设置为工作日早高峰时段7:30~8:30,中断持续时长预计为60 min,由于南门兜站(S_9)和三叉街站(S_{13})设有折返线路,因此根据应急疏散策略,列车在象峰站(S_1)至南门兜站(S_9)和三叉街站(S_{13})至三江口站(S_{25})两个区间以地铁小交路的形式运行,而南门兜至三叉街这一中断区间位于福州



图4 福州地铁1号线中断区间及应急公交驻车点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of interrupted intervals and bridging bus stops on Fuzhou Metro Line 1

主城区,乘客出行需求较大,因此在开行“站站停”应急接驳公交的基础上联合应急接驳出租疏散滞留乘客,并根据具体乘客需求制定出租车运行线路开行方案。

利用地图软件分析中断区间附近已有公交车资源,以南门兜站和三叉街站为应急公交调派目标点,以车辆调派至相应目标点的行驶时间不超过 15 min 为筛选条件,对周边公交驻车点、线路首末站及枢纽站进行筛选^[15],具体驻车点及其编号如表 1 所示,应急接驳公交和出租车等地面交通在各个地铁站之间的最短行驶距离数据如表 2 所示。

表 1 应急公交驻车点信息

Table 1 Bridging bus stop information

地铁 站点	公交驻车点	驻车点 编号	可用车 辆数/辆	指派时 间/min
南门兜 (S ₉)	道山路口公交站	Z ₁	3	4
	仁德枢纽场站	Z ₂	8	4
	福州高速指挥中心	Z ₃	8	14
三叉街 (S ₁₃)	公交专用停车场	Z ₄	5	10
	公交集团亚峰停车场	Z ₅	6	10
	公交驾校停车场	Z ₆	8	8

表 2 站间最短行驶距离

Table 2 Minimum travel distance between stations

站点编号	最短行驶距 离/km	站点编号	最短行驶距 离/km
S ₁ ~S ₂	1.7	S ₁₃ ~S ₁₄	1.4
S ₂ ~S ₃	1.1	S ₁₄ ~S ₁₅	1.2
S ₃ ~S ₄	2.4	S ₁₅ ~S ₁₆	0.9
S ₄ ~S ₅	1.6	S ₁₆ ~S ₁₇	1.2
S ₅ ~S ₆	0.9	S ₁₇ ~S ₁₈	0.8
S ₆ ~S ₇	1.2	S ₁₈ ~S ₁₉	1.1
S ₇ ~S ₈	1.3	S ₁₉ ~S ₂₀	1.7
S ₈ ~S ₉	0.8	S ₂₀ ~S ₂₁	1.5
S ₉ ~S ₁₀	0.9	S ₂₁ ~S ₂₂	1.0
S ₁₀ ~S ₁₁	1.6	S ₂₂ ~S ₂₃	1.4
S ₁₁ ~S ₁₂	2.5	S ₂₃ ~S ₂₄	3.0
S ₁₂ ~S ₁₃	1.1	S ₂₄ ~S ₂₅	0.7

选取某工作日福州地铁 1 号线的自动售检票 (Automatic fare collection, AFC) 数据、进出站数据进行处理,若乘客的最短路径穿越中断区间,且起讫站点在区间外,客流需求则计入最近区间端点车站;若起讫站均在中断区间内,则客流不变;若起讫站一个在区间内一个在区间外,则将区间外站点的客流计入最近折返站,依据上述受影响乘客划分原则,筛选得到受此次运营中断影响的乘客需求如表 3 所示。

表 3 中断服务区间受影响客流需求

Table 3 Interruption of service intervals affected by passenger demand

D	O				
	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃
S ₉	0	436	404	284	233
S ₁₀	178	0	8	14	104
S ₁₁	223	12	0	9	232
S ₁₂	505	33	2	0	87
S ₁₃	671	353	237	196	0

本文考虑的出行方案包含公交和出租车这两种常见的道路交通出行方式。通过百度地图查询服务,获取不同起讫点对的公交和网约车出行时间和出行费用,同时计算对应的舒适度成本作为累积前景理论输入数据代入式(1)~式(9),计算得到运营中断下乘客选择应急公交或应急出租的出行概率,分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 乘客选择应急公交疏散概率

Table 4 Probability of passengers choosing bridging bus evacuation

D	O				
	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃
S ₉	0	0.243 9	0.217 6	0.226 6	0.240 4
S ₁₀	0.243 9	0	0.206 5	0.208 6	0.207 9
S ₁₁	0.217 6	0.206 5	0	0.222 7	0.218 3
S ₁₂	0.226 6	0.208 6	0.222 7	0	0.232 6
S ₁₃	0.240 4	0.207 9	0.218 3	0.232 6	0

表 5 乘客选择应急出租疏散概率

Table 5 Probability of passengers choosing emergency cabs evacuation

D	O				
	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃
S ₉	0	0.294 1	0.327 5	0.329 6	0.324 2
S ₁₀	0.294 1	0	0.323 7	0.327 7	0.335
S ₁₁	0.327 5	0.323 7	0	0.314 9	0.321 6
S ₁₂	0.329 6	0.327 7	0.314 9	0	0.280 4
S ₁₃	0.324 2	0.335	0.321 6	0.280 4	0

通过查阅各项研究资料并结合实地的调查情况对公式参数进行设定^[16,17]:中断应急时间为 1 h;应急公交额定载客量为 80 人/辆;平均运行速度为 20 km/h;站点停靠时间和线路终点折返时间分别为 1 min 和 4 min;应急公交运营距离费用系数 β_d^b 为 7.21 元/km;时间费用系数 β_t^b 为 1.99 元/min;由于应急公交可适当超载,故 $\epsilon_{\max}$ 取 1.2, $\epsilon_{\min}$ 取 0.6;最大发车频率 $g_{\max}$ 为 1 辆/min;最小发车频率 $g_{\min}$ 为 0.1 辆/min;应急出租额定载客量为 4

人/辆;平均运行速度为 20 km/h;运营距离费用系数 β_d' 为 2.86 元/km;时间费用系数 β_t' 为 0.65 元/min;乘客等待时间成本系数 α_w 为 1.17 元/min;在车时间成本系数 α_i 为 0.39 元/min;考虑运营出租车数量及地铁站点泊车能力,应急调度点召集的最大出租车辆数 $d_{\max}^{\text{taxi}}$ 取 25 辆。

3.2 计算结果

在 Matlab 中进行遗传算法的相关参数设置^[14]。种群规模 N 设置为 50;迭代次数为 200;交叉系数 p_c 取 0.7;变异系数 p_m 取 0.01。求解得到的目标函数值曲线如图 5 所示,最优目标函数值为 31 880 元。

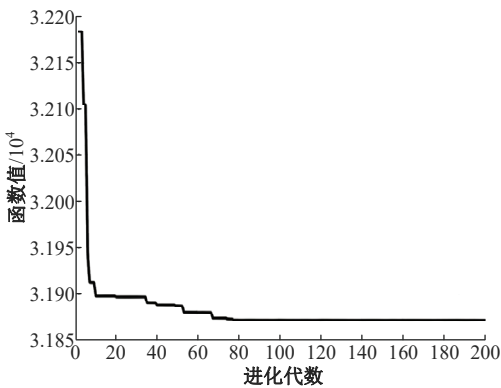


图 5 目标函数值变化曲线
Fig. 5 Change curve of objective function

在基于本案例情况求解得到的应急疏散策略中,应急出租车共开行 9 条运行线路,共召集 122 辆出租车,具体调度方案如表 6 所示,分析可知是否开行出租调度线路取决于客流需求的大小(见表 3),中断区间折返站与中间站间的受影响乘客数量远高于中间站之间的疏散需求,因而疏散策略中 9 条开行线路共有 7 条服务于包含折返站(S_9 、 S_{13})的起讫点对,而仅有 2 条服务于中间站间

表 6 应急出租车调度方案

Table 6 Dispatch program for emergency cabs		
站点编号	召集出租车辆/辆	开行线路
S_9	25	$S_9 \sim S_{10}$
		$S_9 \sim S_{11}$
		$S_9 \sim S_{13}$
S_{10}	24	$S_{10} \sim S_{12}$
S_{11}	24	$S_{11} \sim S_9$
		$S_{11} \sim S_{13}$
S_{12}	25	$S_{12} \sim S_9$
		$S_{12} \sim S_{10}$
S_{13}	24	$S_{13} \sim S_9$
		$S_{13} \sim S_{10}$

的起讫点对,为应急公交补充疏散运力。
在应急公交调度方面,从 6 个预设驻车点中共调度 13 辆应急接驳公交。假设疏散期间车队发车频率保持不变,且应急疏散服务总时间规定为 60 min,经计算,发车频率为 0.664 辆/min,每辆公交平均疏运次数为 3 次,具体调度方案如表 7 所示。

表 7 应急公交调度方案 Table 7 Dispatch program for bridging buses			
公交驻车点 编号	派出车辆数/ 辆	运行模式	发车频率/ (辆·min ⁻¹)
1	2	“站站停”	0.664
2	6		
3	1		
4	1		
5	1		
6	2		

3.3 对比分析

为对比得到多模式接驳模型的优化效果,本文以仅考虑“站站停”运营模式的应急公交疏散作为对比策略,即所有选择应急接驳出租的乘客也由公交进行疏散,得到的乘客出行成本以及运营成本对比如图 6 所示。由图 6 可知,多模式接驳策略的综合成本为 31 880 元,与应急公交接驳策略相比,系统总成本节约了 9.2%。其中,多模式策略运营成本降低了 22.4%,但在乘客出行成本方面相差较少,仅减少了 3.0%。

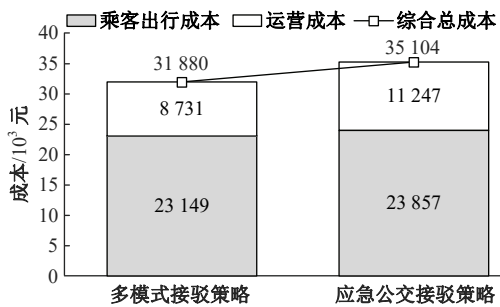


图 6 不同接驳策略下的乘客出行时间及运营成本对比图
Fig. 6 Comparison of passenger travel time and operating costs under different connectivity strategies

3.4 灵敏度分析

为进一步探究各调度点出租车调车数量对多模式应急调度策略产生的影响,对出租车调度规模进行灵敏度分析。图 7 为各调度点出租车可调度数量和总成本与公交发车频率之间的关系。图 8 为出租车调度规模与构成系统总成本的乘客

出行成本及运营成本的关系。出租车调度规模数量以5为增量,从10增至40。研究表明,当出租车调度规模数量由10辆增加至25辆时,乘客出行成本、运营成本以及公交发车频率均快速下降,说明增加出租车调度规模可以有效地降低成本,减少公交调度需求,完成客流疏运任务,然而当调度规模达到25辆以后,公交发车频率与运营成本优化降幅均变缓,乘客出行成本在调度规模从25增至30辆区间优化效果仍较优,但在达到30辆以后优化效果明显下降。因而,运营管理部门可根据实际可调度数量及优化侧重目标确定各调度点出租车的调度数量。

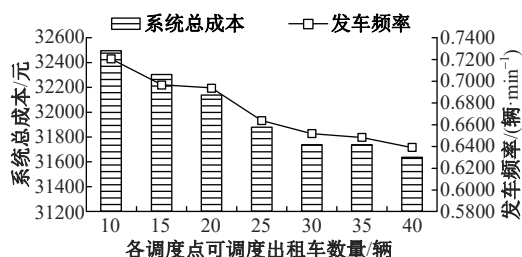


图7 总成本-发车频率与出租车调度规模灵敏度分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of total cost-frequency of dispatch and cab dispatch scale

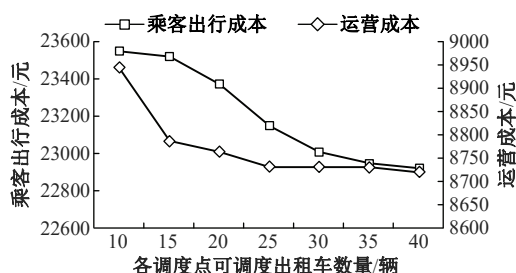


图8 乘客出行成本-运营成本与出租车调度规模灵敏度分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of passenger travel cost-operating cost and cab dispatch scale

4 结论

(1)现有研究主要集中于对单一接驳工具(即应急公交)的调度方案进行优化,鲜有研究对应急接驳工具的形式进行优化,而灵活选用多形式、多方式的接驳工具更符合实际应用。出租车因其速度快、分布广泛的特点可以弥补应急公交在灵活性和舒适性方面的不足,联合应急公交和应急出租进行客流疏散可以提高资源利用率和救援效率。

(2)本文阐述了多模式疏散模型中应急接驳公交与应急接驳出租两种方式的运行模式,并对

驻车点、调度点等服务区域进行了合理假设。通过构建多目标优化模型,综合考虑了乘客出行成本和运营成本,并利用遗传算法求解,输出了应急出租线路开行方案、调度车辆数和公交发车频率,形成了具体的调度方案。案例研究结果表明,优化后的应急出租开行9条补充线路,与单一应急公交接驳策略相比,多模式疏散策略的系统综合成本降低了9.2%,运营成本降低了22.4%。

(3)本文研究结果表明,在一定范围内,系统总成本和公交发车频率均随出租车调度规模的增加而下降。然而,本文模型仍存在一些局限性。例如,模型假设乘客完全按照概率选择疏散方式,未考虑乘客在实际疏散过程中可能出现的二次选择行为(如从公交转乘出租车)。此外,模型未结合实时交通数据进行动态调度优化,未来可以进一步研究如何利用实时数据提升疏散效率。

参考文献:

- [1] 邓亚娟,茹小磊,梁国华,等.城市轨道交通应急接驳公交蓄车点选址[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(4): 143-150.
Deng Ya-juan, Ru Xiao-lei, Liang Guo-hua, et al. Depot locations for emergency bridging buses in urban rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(4): 143-150.
- [2] 姚加林,齐弦.城轨运营中断条件下公交应急线路开行方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(7): 1863-1870.
Yao Jia-lin, Qi Xian. Research on bus emergency route plan in the operation interruption of urban rail transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(7): 1863-1870.
- [3] Wang Y, Huang Y, Tian L, et al. Shuttle bus line planning in response to unexpected disruption in urban rail transit networks[J]. IEEE Access, 2023, 11: 54398-54407.
- [4] 王佳冬,袁振洲,宁尚彬.城轨运营中断下应急公交车辆调度模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 149-154, 163.
Wang Jia-dong, Yuan Zhen-zhou, Ning Shang-bin. Optimization model of emergency bus dispatching in response to operational disruptions of urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(4): 149-154, 163.
- [5] 吴炜光.多模式交通网络环境下典型多方式组合出

- 行效用分析[D]. 南京:东南大学交通学院, 2018.
- Wu Wei-guang. Utility analysis of representative combined travel mode in multi-modal traffic network [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2018.
- [6] Qiu F, Li W, Haghani A. A methodology for choosing between fixed-route and flex-route policies for transit services[J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49(3): 496-509.
- [7] Pnevmatikou A M, Karlaftis M G, Kepaptsoglou K. Metro service disruptions: how do people choose to travel?[J]. Transportation, 2015, 42(6): 933-949.
- [8] Fang Y, Jiang Y. Replacement service decisions for disruption recovery in light rail systems[J]. Management of Environmental Quality, 2019, 30(2): 286-306.
- [9] 刘莎莎, 姚恩建, 张永生. 轨道交通乘客个性化出行路径规划算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 100-104, 132.
- Liu Sha-sha, Yao En-jian, Zhang Yong-sheng. Personalized route planning algorithm for urban rail transit passengers[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(5): 100-104, 132.
- [10] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory-cumulative characterization of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.
- [11] 苏娟. 城市轨道交通客流分配研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2009.
- Su Juan. Research on flow assignment of urban rail transit[D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 2009.
- [12] 鲁鸣鸣, 郑林. 交通大数据驱动的地铁和出租车接驳出行规划[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(15): 262-270.
- Lu Ming-ming, Zheng Lin. Traffic big data based subway and taxi connection travel planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(15): 262-270.
- [13] 潘述亮, 卢小林, 邹难. 灵活型接驳公交线路优化及协同调度模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(6): 1827-1835.
- Pan Shu-liang, Lu Xiao-lin, Zou Nan. Route planning and coordinated scheduling model for flexible feeder transit service[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(6): 1827-1835.
- [14] 钱蕾. 双向中断下城市轨道交通网络列车运行调整研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2021.
- Qian Lei. Research on train operation adjustment of urban rail transit network under bidirectional interruption[D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 2021.
- [15] 何祖勇, 郭茜, 吴刚. 考虑时间容忍度的轨道交通应急接驳公交蓄车点选址研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2022, 20(1): 80-88.
- He Zu-yong, Guo Qian, Wu Gang. Depot locations of emergency bridging buses for urban rail transit considering time tolerance[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2022, 20(1): 80-88.
- [16] 王菁. 基于出租车GPS数据的城市交通时空特征分析及路网关键点段识别建模[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2020.
- Wang Jing. Analysis of temporal and spatial characteristics of urban traffic and identification modeling of key nodes and sections of road network based on taxi GPS data[D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 2020.
- [17] 张擎. 公交车辆应急救援服务点布局研究[D]. 成都: 西南交通大学交通运输与物流学院, 2017.
- Zhang Qing. Research on emergency rescue service site layout of public bus[D]. Chengdu: School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, 2017.