

轨道交通封站条件下应急疏散车辆路径优化

张仪果, 屈云超*, 尹浩东, 吴建军

(北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

摘要:针对轨道交通封站条件下站外滞留乘客需要应急疏散的现实需求,设计了一种疏散服务模式,在保证滞留旅客有效疏散的前提下,允许线路沿途旅客搭乘以提高车辆的利用效率。以车辆运营成本和乘客时间成本之和最小为优化目标,建立应急疏散车辆路径优化模型,根据问题特点改进自适应大邻域搜索算法进行模型求解。最后,结合北京市城市交通数据,对应急疏散车辆进行路线设计并进行灵敏度分析,用算例验证了模型与算法的有效性。结果表明,相较于最短路径疏散方案,模型的优化结果节省了15.02%的乘客乘车时间,能够在保证乘客出行体验的前提下实现对站点滞留乘客的快速疏散,提升封站事件下轨道交通应急管理的精细化水平。

关键词:城市轨道交通; 应急疏散; 车辆路径问题; 轨道交通封站; 自适应大邻域搜索算法

中图分类号: U491.12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4026(2023)04-0080-09

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Route optimization for emergency evacuation vehicles in case of rail station closure

ZHANG Yiguo, QU Yunchao*, YIN Haodong, WU Jianjun

(State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To address the problem of emergency evacuation of stranded passengers outside a rail station in case of its closure, this paper designs an evacuation route map, which allows passengers along the line to avail the emergency evacuation vehicles and facilitates the overall evacuation process. To minimize the total cost of vehicle operation and passenger time, this work proposes a route optimization model for emergency evacuation vehicles and improves the adaptive large neighborhood search algorithm to implement the model based on the characteristics of the problem. Finally, based on the urban traffic data of Beijing, we designed routes for emergency evacuation vehicles, analyzed their sensitivity, and verified the model and algorithm with specific examples. The results show that compared with the shortest route algorithm, the optimization results of the proposed model can reduce passengers' travelling time by 15.02%, allowing them to evacuate rapidly while ensuring their experience and improving emergency management systems in case of rail station closure.

收稿日期: 2022-09-29

基金项目: 北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金(L221006)

作者简介: 张仪果(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通接驳。E-mail: 9289636022qq.com

* 通信作者, 屈云超(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为城市交通复杂性建模分析。E-mail: ycqu@bjtu.edu.cn

Key words : urban rail transit; emergency evacuation; vehicle routing problem; rail station closure; adaptive large neighborhood search algorithm

城市轨道交通以其安全、节能、运量大、速度快等优点,逐步发展为我国城市居民出行的主要方式之一。封站作为城市轨道交通应急管理措施,分为偶发事件导致的临时封站和提前通知的计划封站两种类型。当车站封站时,相关线路列车将跳站运营,原计划从该站点出行的乘客无法进站,大量滞留在站外的乘客会持续影响城市地面交通。此时,选择地面公交作为应急疏散车辆可以在一定程度上恢复滞留乘客的行程,避免乘客集聚造成的交通秩序混乱。

既有的公交接驳路径优化研究集中在给定客流需求下设计线路结构和运营频率^[1]两个方面。从OD需求的角度,接驳路径优化可分为多对一、多对多两种场景。多对一的需求考虑将乘客从多个起点运送至同一终点^[2],多对多的需求考虑将乘客从多个起点运送至多个终点^[3-5]。从应用场景的角度,又可分为常规条件和轨道交通中断条件下的路径设计。其中,Yin等^[6]建立了三层离散选择行为模型,分析车站中断情况下的动态客流需求。Liang等^[7]考虑公交车行程时间的不确定性,采用一种基于路径的多商品流公式用于轨道交通中断下公交车接驳服务设计。Jin等^[8]将公交线路的生成以及车辆调车问题分成两个阶段进行求解,建立了轨道交通故障情况下接驳公交网络优化的数学规划模型。魏超等^[9]从公交线路布局以及开行频率的角度对接驳公交线路进行优化。针对疏散需求超过单辆公交运能的特点,何胜学^[10]引入了虚拟路段和节点的时空网络以处理车辆的载客上限。胡华等^[11]采用车辆循环调度的方法设计公交桥接疏运服务。陈治亚等^[12]提出“虚拟疏运目的地”的新概念,允许公交车辆跨线运行,建立疏散调度模型。

目前轨道交通中断条件下的接驳路径优化研究主要关注区间中断情况,即根据城市轨道交通线路结构,开行接驳车辆将受影响线路区间与临近折返站进行衔接,从发车频率和车辆调度的角度进行优化。这种服务模式可能导致乘客出行的换乘次数增多、候车时间增长。

为了减少乘客换乘次数,提供快速疏散服务,本文建立车辆运营成本和乘客时间成本之和最小的应急疏散车辆路径优化模型,将待疏散乘客总乘车时间最小作为优化目标,增加停靠次数约束,避免多数乘客随疏散车辆绕行。对于出行人数超过单辆车运力的车站,采用虚拟节点的方法拆分需求。最后结合北京市城市交通数据,以轨道交通朝阳门站封站为例进行应急疏散路径设计。结果表明,模型可以实现封站条件下滞留乘客的快速疏散,降低乘客的总乘车时间。

1 模型建立

封站发生时,出行乘客无法从该站点进入轨道交通系统,以该站点为目的地的乘客由于列车跳站运营无法出站。基于此,本文考虑开行应急疏散车辆以满足上述两类乘客的出行需求。

本文建立的应急疏散车辆路径优化模型中,疏散车辆从封站车站出发,将滞留乘客疏散至周边正常运营的换乘站,疏散乘客可由换乘站重新进入轨道交通系统前往出行目的地。同时,沿途站点有出行需求的乘客可搭乘车辆返回封站站点。

1.1 模型假设

本文研究的应急疏散路径优化问题基于以下假设:

- (1) 选择封站站点周围正常运营的换乘站作为疏散目的地,便于滞留乘客后续通过轨道交通网络前往目的地;
- (2) 车辆只服务于封站站点与上述正常运营站点间的出行,乘客的出行需求已知;
- (3) 允许上下车人数超过单辆车运力的站点接受多辆车的服务;
- (4) 用于疏散服务的车辆规格相同,有相同的最大载客数和行驶速度;
- (5) 任意两个轨道交通站点之间距离已知,为站点间城市道路的最短路距离。

1.2 参数及变量意义

轨道交通站点集合记作 N_0 , 由正常运营站点集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 和运营中断站点(即起点站, 记为 0) 组成。备选车辆集合 $K = \{1, 2, \dots, k\}$ 。应急疏散路径优化问题中涉及的参数和决策变量如表 1、表 2 所示。

表 1 模型参数定义

Table 1 Definition of parameters

参数符号	参数定义
n	正常运营的轨道交通站点数
d_{ij}	站点 i 和 j 间最短距离; $i, j = 0, 1, \dots, n$, 其中 0 为封站站点
t_{ij}	站点 i 和 j 间行驶时间; $i, j = 0, 1, \dots, n$, 其中 0 为封站站点
Q	疏散车辆最大载客数
θ	发车时车辆最低满载率
T	乘客接受的最长乘车时间
t_i	站点 i 停靠时间
d_i	i 站点下车总人数; $i = 1, 2, \dots, n$
p_i	i 站点上车总人数; $i = 1, 2, \dots, n$
F_c	疏散车辆固定成本
C_d	疏散车辆可变成本
C_t	乘客单位时间成本
v	疏散车辆速度
P_{\max}	单条路径最大停靠次数

表 2 决策变量定义

Table 2 Definition of decision variables

决策变量	变量定义
x_{ijk}	0, 1 变量, $x_{ijk} = 1$ 表示弧 (i, j) 在车辆 k 的路径上, 否则为 0
y_{ijk}	车辆 k 在弧 (i, j) 上时, 车内累计上车总人数(包括站点 i)
z_{ijk}	车辆 k 在弧 (i, j) 上时, 车内将要下车总人数(站点 i 之后)
n_k	第 k 辆车停靠车站数

1.3 应急疏散车辆路径优化模型

模型的目标函数由乘客时间成本 Z_1 和车辆运营成本 Z_2 两部分组成:

$$\min Z = Z_1 + Z_2, \quad (1)$$

其中, 乘客乘车时间包括站点停靠时间和站间行驶时间两部分。根据疏散问题特点, 模型只考虑最小化离站乘客的乘车时间 Z_1 :

$$Z_1 = C_t \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} z_{ijk} (t_{ij} + t_j). \quad (2)$$

车辆运营成本 Z_2 包括固定成本和可变成本两部分, 其中固定成本与开行的疏散车辆数成正比, 可变成本与车辆运行总距离成正比:

$$Z_2 = F_c \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0jk} + C_d \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} x_{ijk} d_{ij}. \quad (3)$$

针对部分站点客流需求可能超过单辆车运能的问题, 采用站点拆分^[12]的方法对交通出行量大的站点事先划分需求, 同一车站拆分出的虚拟站点有相同的位置坐标。约束(4)保证分割后各站点有且仅有一条路径与之连接:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_0} x_{ijk} = 1, \forall j \in N. \quad (4)$$

约束(5)保证若站点 j 被某辆车服务,站点 j 前后必有与之相邻的站点由此路径连接:

$$\sum_{i \in N_0} x_{ijk} - \sum_{j \in N_0} x_{jik} = 0, \forall j \in N_0, \forall k \in K. \quad (5)$$

约束(6)表示一辆车最多调用一次,约束(7)限制疏散车辆的停靠次数,约束(8)表示停靠次数相关的决策变量间关系:

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} \leq 1, \forall k \in K, \quad (6)$$

$$n_k \leq P_{\max}, \forall k \in K, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} x_{ijk} - 1 = n_k, \forall k \in K. \quad (8)$$

约束(9)限制乘客乘车时间在可接受范围内,避免车辆过度绕行:

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} x_{ijk} (t_{ij} + t_j) \leq T, \forall k \in K. \quad (9)$$

约束(10)表示疏散过程中车内人数不超过车辆最大载客数:

$$y_{ijk} + z_{ijk} \leq Q \cdot x_{ijk}, \forall i \in N_0, \forall j \in N_0, \forall k \in K. \quad (10)$$

约束(11)和(12)表示每个站点的上下车人数关系:

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{k \in K} y_{jik} - \sum_{i \in N_0} \sum_{k \in K} y_{ijk} = p_j, \forall j \in N, \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{k \in K} z_{ijk} - \sum_{i \in N_0} \sum_{k \in K} z_{jik} = d_j, \forall j \in N. \quad (12)$$

约束(13)保证车辆出发时车上仅有待疏散乘客,约束(14)保证车辆返回时疏散乘客已全部下车:

$$y_{0ik} = 0, \forall i \in N, \forall k \in K, \quad (13)$$

$$z_{i0k} = 0, \forall i \in N, \forall k \in K. \quad (14)$$

约束(15)和(16)保证所有站点的上下车总人数守恒,约束(17)定义了所有的决策变量:

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} y_{i0k} = \sum_{i \in N} P_i, \quad (15)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} z_{0ik} = \sum_{i \in N} d_i, \quad (16)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, y_{ijk} \geq 0, z_{ijk} \geq 0, n_k > 0, \forall i \in N_0, \forall j \in N_0, \forall k \in K. \quad (17)$$

2 模型求解

2.1 自适应大邻域搜索算法流程

本文研究的轨道交通封站背景下应急疏散路径优化问题为同时上下车车辆路径问题(vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, VRPSPD)的变种,属于 NP 难问题。自适应大邻域搜索(adaptive large neighborhood search, ALNS)算法^[13]可对大规模实例快速求解。根据问题特点,本文对算法迭代过程中新解划分路径的方式进行改进,算法具体流程见图 1。

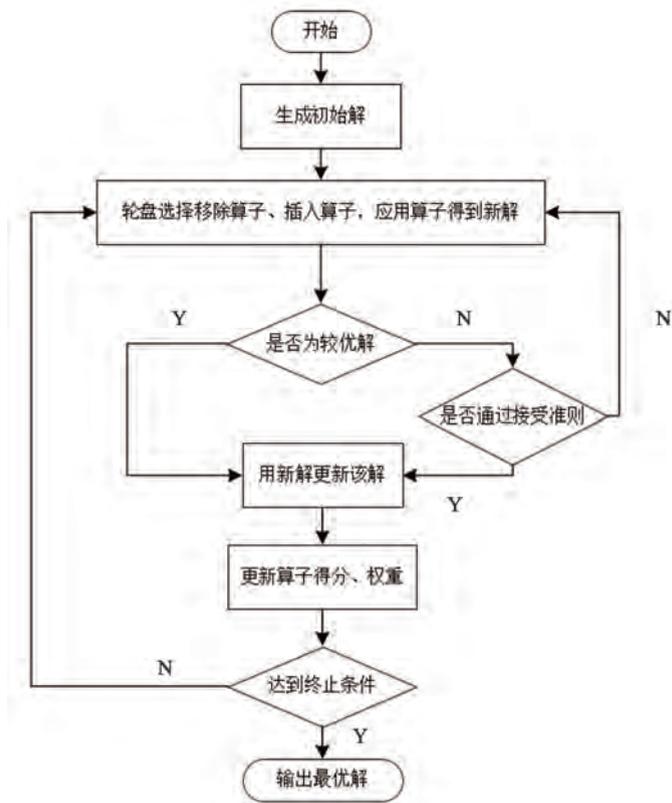


图1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flowchart

2.2 初始解生成

按照贪婪算法的思想,在满足车辆载客约束的条件下初始化车辆服务路径。例如问题中包含10个轨道交通站点,编号0代表封站站点,编号1~9代表正常运营的轨道交通站点。假设按照初始解生成规则可产生一个可行解为 $[1,5,4,8][9,3,2][7,6]$ 。

2.3 Destroy 和 Repair 方法

本文使用随机移除、最差移除两种移除算子。其中,最差移除指从当前解中移除引起目标函数值增幅最大的站点。

本文使用随机插入、贪婪插入、后悔插入等3种修复算子。其中,后悔插入指优先选择后悔值最大的站点将其插回。后悔值定义如下:记每一次插入过程中站点 i 插入当前解 S 第 k 优位置所带来的成本变化值为 $\Delta f_{i,k}$,即当 $k \leq k'$ 时,满足 $\Delta f_{i,k} \leq \Delta f_{i,k'}$ 。 $r = \Delta f_{i,2} - \Delta f_{i,1}$ 表示将站点 i 插回当前解 S 最优位置和次优位置之间的后悔值。

2.4 新解生成

考虑到疏散问题特点,算法对迭代过程中划分路径的方式进行改进。区别于初始解路径划分时的贪婪插入策略,对迭代产生的新序列进行路径划分时,即使车辆未达到容量约束也会以一定概率结束装载,调用下一辆车。这样可以增大解空间的搜索范围,保证不同疏散路径上乘客数量的均衡分布。

2.5 权重更新

根据迭代过程中产生新解的效果对算子进行打分。如果新解是目前为止搜索到的最优解,算子得分为 r_1 ;如果新解不是最优解但优于当前解,算子得分为 r_2 ;如果新解不优于当前解但被接受,算子得分为 r_3 ,有 $r_1 > r_2 > r_3$ 。新解产生后,根据公式(18)对各destroy和repair算子的权重 $w(h)$ 进行更新, $w(h)$ 为下一次轮盘赌选择中算子的权重。

$$w(h) = \begin{cases} (1 - \rho)w(h) + \rho \frac{s(h)}{u(h)}, & \text{if } u(h) > 0 \\ (1 - \rho)w(h), & \text{if } u(h) = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

其中, $w(h)$ 为算子权重, ρ 为衰减系数, $s(h)$ 为算子总得分, $u(h)$ 为算子选择次数。

2.6 接受准则和终止准则

搜索过程中,按照 Metropolis 准则^[14]接受新解:如果产生的新解 x' 优于当前解 x 则接受新解。如果新解劣于当前解,则以一定概率 p 接受, p 的计算如公式(19)所示。算法的终止准则是达到最大迭代次数。

$$p = e^{-\frac{f(x') - f(x)}{T}}。 \quad (19)$$

3 案例分析

3.1 案例背景

依托北京市城市道路数据和轨道交通数据,以朝阳门站临时封站为例,选择周围正常运营的换乘站作为疏散目的地,进行应急疏散路径设计。如图 2 所示,换乘站前往封站站点的人数为该站上车人数,从封站站点疏散至周边换乘站的人数为该站下车人数。站点的经纬度、站间距离通过百度地图 API(application programming interface)获取,站点间行驶的时间矩阵由车辆行驶速度和站间距离矩阵计算得出。案例中,灯市口站和东单站下车人数超过车辆最大载客数,采用虚拟节点的方法对需求进行等分处理。

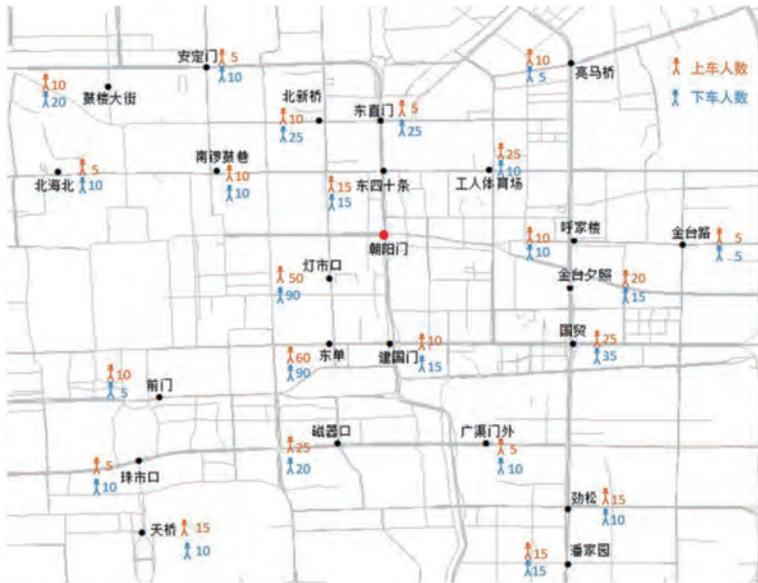


图 2 各站点上下车出行人数示意图

Fig.2 Schematic map of the number of passengers getting on and off at each stop

模型参数取值如下,疏散车辆固定成本 200 元/车,可变成本 5 元/km,最大载客量 80 人/车,平均运营速度为 20 km/h,单条路径最大停靠次数 5 次,乘客时间成本系数 0.3 元/(人·h)^[15],站点停靠时间 0.05 h,乘客接受的最长乘车时间为 1 h。

本文参考利用 ALNS 算法求解 VRP 问题的研究结果^[16],对算法的参数进行设置,参数取值见表 3。

表3 算法参数设置

Table 3 Algorithm parameter settings

参数	意义	取值
τ	初始温度控制参数	0.05
c	冷却速率	0.95
φ	权重更新迭代次数	5
n	次优位置个数	5
σ_1	全局最优解评分	30
σ_2	当前最优解评分	20
σ_3	接受较差解评分	10
ρ	权重衰减系数	0.4
$\bar{\theta}$	随机破坏程度上限	0.1
θ	随机破坏程度下限	0.4
$i_{\text{iteration}}$	算法迭代总次数	400

3.2 优化结果

本文使用 Python3.7 在 Anaconda 环境下编写算法,在 i5-7200uCPU 2.5 GHz,内存 8 GB 的 PC 平台下运行。单次求解过程共计进行 400 次迭代,算法运行结果如图 3 所示,解对应的路线开行方案见表 4。

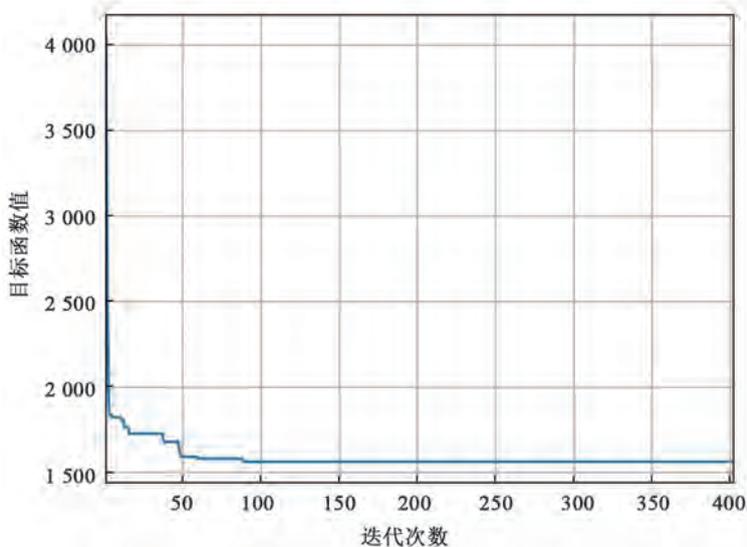


图3 算法运行结果

Fig.3 Result of the algorithm

表4 最优解结果

Table 4 Optimal result of the model

车辆序号	车辆行驶路由	车辆行驶距离/km	车辆行驶时间/h
1 号车	3-7-11-12-8	14.7	0.90
2 号车	4-0-2-18	18.1	0.92
3 号车	10-1-6	15.2	0.63
4 号车	5-16-22-23	19.1	0.94
5 号车	9-13-15-14	21.0	0.85
6 号车	21-20-24-19-17	15.8	0.95

注:车辆行驶中的站点编号所对应的站点详见 OSID。

6条疏散路径分别为:路径1,朝阳门—北新桥—安定门—鼓楼大街—北海北—南锣鼓巷—朝阳门;路径2,朝阳门—灯市口—东四十条—东直门—亮马桥—朝阳门;路径3,朝阳门—东单—建国门—磁器口—朝阳门;路径4,朝阳门—东单—广渠门外—劲松—潘家园—朝阳门;路径5,朝阳门—灯市口—前门—天桥—珠市口—朝阳门;路径6,朝阳门—国贸—金台夕照—金台路—呼家楼—工人体育场—朝阳门。

生成的6条疏散路径中,单条路径最长行驶时间0.95 h,最短行驶时间0.63 h,所有待疏散乘客总乘车时间为99.02 h,相比于只考虑车辆运营成本方案的116.5 h,节省了15.02%的乘客乘车时间。

3.3 对比分析

为了进一步验证本文ALNS算法的有效性,采用文献[17]中的实例进行对比试验。

文献[17]中实例的问题规模在50~199个节点,每个问题都包括CMT-X型和CMT-Y型两组数据。对于每一个节点 i , x_i 和 y_i 表示节点的横纵坐标,节点间距离为节点 x_i 和节点 y_i 间的欧氏距离。其中X系列问题按以下方法构造:定义比例值 $r_i = \min\{(x_i/y_i), (y_i/x_i)\}$,上车人数为 $r_i n_i$,下车人数为 $(1 - r_i) n_i$,其中 n_i 为原始CVRP问题中节点 i 的需求值。交换产生的上车和下车人数即生成Y系列问题。

表5中列出了10个算例的已知最优解和用ALNS求解所获得的最优解,从中可以看出,ALNS的计算结果中有8个算例的最优解优于文献[17]中的已知最优解,且求解的时间平均缩短18.29%,证明了本文改进的ALNS算法的求解速度与精度。

表5 算法比较

Table 5 Comparison of algorithms

算例编号	节点数量	文献[17]结果			ALNS的最优解		
		总距离/km	车辆数	时间/s	总距离/km	车辆数	时间/s
CMT1X	50	478.6	3	7.74	470.4	3	6.59
CMT1Y	50	480.8	3	7.81	470.4	3	6.66
CMT2X	75	688.5	6	24.86	664.8	6	18.32
CMT2Y	75	679.4	6	22.02	667.2	6	17.59
CMT3X	100	744.8	5	94.06	722.0	5	78.35
CMT3Y	100	723.9	5	120.66	731.3	5	85.24
CMT4X	150	887.0	7	501.95	856.2	7	416.45
CMT4Y	150	852.4	7	406.32	880.0	7	412.59
CMT5X	199	1 089.2	10	1 055.83	1 033.6	10	776.32
CMT5Y	199	1 084.3	10	771.71	1 012.1	10	628.46

3.4 灵敏度分析

本文选取车辆最大载客量进行灵敏度分析,研究模型参数变化对路径优化结果的影响。根据表6中的结果,随着最大载客量的增加,需求的疏散车辆数减少,总行驶距离减少,单辆车服务的站点数增多,乘客总乘车时间显著增加。例如最大载客量从60增至100,车辆数减少了3辆,乘客总乘车时间增加了32.51 h。由于最大停靠次数的约束,单辆车服务的站点数有限,选用载客量过大的会降低车辆满载率,造成运力浪费。

表6 最大载客量灵敏度分析

Table 6 Maximum capacity sensitivity analysis

最大载客量/人	乘客总乘车时间/h	行驶距离/km	车辆数/辆
60	86.67	105.9	8
70	93.85	89.8	7
80	99.02	85.1	6
90	99.63	94.3	6
100	119.18	88.0	5

4 结论

(1) 本文针对轨道交通封站背景下应急疏散的现实问题,建立疏散公交路径优化模型,以轨道交通朝阳门站临时封站为例进行实例分析,设计6条应急疏散线路,优化结果缩减乘客15.02%的乘车时间。

(2) 本文建立的轨道交通封站应急疏散路径优化模型仅适用于单站点封站且疏散需求固定的情况。事实上,封站事件会对乘客出行行为产生影响,因此乘客疏散需求往往具有动态不确定性。如何刻画封站对乘客行为的影响,考虑不确定需求下应急疏散路线优化是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] GUIHAIRE V, HAO J K. Transit network design and scheduling: A global review[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008, 42(10): 1251-1273. DOI: 10.1016/j.tra.2008.03.011.
- [2] KUAH G K, PERL J. The feeder-bus network-design problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1989, 40(8): 751-767. DOI: 10.1057/jors.1989.127.
- [3] KUAN S N, ONG H L, NG K M. Applying metaheuristics to feeder bus network design problem[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2004, 21(4): 543-560. DOI: 10.1142/s0217595904000382.
- [4] XIONG J, HE Z B, GUAN W, et al. Optimal timetable development for community shuttle network with metro stations[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 60: 540-565. DOI: 10.1016/j.trc.2015.10.007.
- [5] 柳伍生, 潘自翔, 魏隽君, 等. 地铁站点运营中断下周边乘客的出行行为研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(11): 2953-2961. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200035.
- [6] YIN H D, WU J J, SUN H J, et al. Optimal bus-bridging service under a metro station disruption[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 2018: 1-16. DOI: 10.1155/2018/2758652.
- [7] LIANG J P, WU J J, QU Y C, et al. Robust bus bridging service design under rail transit system disruptions[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 132: 97-116. DOI: 10.1016/j.tre.2019.10.008.
- [8] JIN J G, TEO K M, ODONI A R. Optimizing bus bridging services in response to disruptions of urban transit rail networks[J]. *Transportation Science*, 2016, 50(3): 790-804. DOI: 10.1287/trsc.2014.0577.
- [9] 魏超, 龙建成. 城市轨道交通接驳公交线路优化设计[J]. *山东科学*, 2015, 28(3): 65-73. DOI: 10.3976/j.issn.1002-4026.2015.03.013.
- [10] 何胜学. 无预警紧急疏散中公交车路径的确定方法[J]. *运筹学学报*, 2014, 18(3): 47-59. DOI: 10.15960/j.cnki.issn.1007-6093.2014.03.016.
- [11] 胡华, 高云峰, 刘志钢, 等. 地铁运营中断下公交桥接疏运车辆应急调度模型及算法[J]. *铁道学报*, 2018, 40(5): 31-37. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2018.05.005.
- [12] 陈治亚, 谭斐, 冯芬玲. 地铁突发运营中断下应急公交调度研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(9): 2360-2367. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2019.09.031.
- [13] DETHLOFF J. Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up[J]. *OR-Spektrum*, 2001, 23(1): 79-96. DOI: 10.1007/PL00013346.
- [14] STEINBRUNN M, MOERKOTTE G, KEMPER A. Heuristic and randomized optimization for the join ordering problem[J]. *The VLDB Journal*, 1997, 6(3): 191-208. DOI: 10.1007/s007780050040.
- [15] 彭巍, 周和平, 高攀. 面向城际轨道交通的定制化接驳公交线路优化[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 14(4): 49-54. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.008.
- [16] ROPKE S, PISINGER D. A unified heuristic for a large class of Vehicle Routing Problems with Backhauls[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(3): 750-775. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.09.004.
- [17] CHEN J F, WU T H. Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2006, 57(5): 579-587. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2602028.