

文章编号: 1005-0523(2024)02-0072-07



## 地铁运营中断下应急接驳公交调度方案研究

谢贤亮, 查伟雄, 王宇晴, 严利鑫

(华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**【目的】针对传统应急调度模式单一、疏散效率低的特征,研究了多种调度模式组合应急公交调度方法。【方法】考虑应急停车场派车能力、车辆运力、车辆救援时间特性,构建以应急公交车辆疏散成本最小和乘客平均延误最小为目标的多目标组合调度优化模型。根据该模型的特点提出使用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解,为提高种群的多样性和算法的性能对该算法进行了相应的改进,最终得到 Pareto 分布优化解集,并采用隶属函数从中选取最优折衷解。最后,以南昌轨道交通1号线作为算例,对应急公交组合调度方案和单一调度方案分别进行求解。【结果】结果表明:文章提出的组合调度方案相比传统单一调度方案的乘客平均延误时间降低了20.48%,疏散成本降低了16.96%,改进后的NSGA-II算法相比较标准的NSGA-II算法进行求解时,乘客平均延误时间降低了6.72%,疏散成本降低了3.59%。【结论】通过灵敏度分析发现:在确定滞留乘客疏散需求的情况下,滞留乘客的平均延误时间和车队规模呈负相关,应急公交的疏散成本和车队规模成正相关。

**关键词:**城市轨道交通;应急公交;组合调度;多目标;改进NSGA-II算法

中图分类号:U491

文献标志码:A

**本文引用格式:**谢贤亮,查伟雄,王宇晴,等.地铁运营中断下应急接驳公交调度方案研究[J].华东交通大学学报,2024,41(2):72-78.

## Study on Emergency Bus Dispatching Scheme for Subway Service Interruption

Xie Xianliang, Zha Weixiong, Wang Yuqing, Yan Lixin

(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** 【Purpose】 In order to optimize the emergency response and address the inefficiencies observed in traditional dispatch models, this study tries to develop a scheduling method, which considers a range of emergency dispatch modes. 【Method】 Considering the characteristics of emergency parking lot dispatching capacity, vehicle transportation capacity, and vehicle rescue time, a multi-objective combination scheduling optimization model is constructed with the goal of minimizing the evacuation cost of emergency public transportation vehicles and minimizing the average passenger delay. Based on the characteristics of the model, a fast non dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was proposed to solve the problem. In order to improve the diversity of the population and the performance of the algorithm, corresponding improvements were made to the algorithm. The Pareto distribution optimization solution set was obtained, and the optimal compromise solution was selected from it using a membership function. Finally, the Nanchang Rail Transit Line 1 was used as an example to separately evaluate the emergency bus combination dispatch plan and the single scheduling scheme. 【Result】 Results

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805169)

show that the proposed combination dispatch plan reduced passenger delay time by 20.48% and transportation costs by 16.96% compared to traditional single dispatch plans. Additionally, the improved NSGA- II algorithm further reduced passenger delay time and transportation costs by 6.72% and 3.59%, respectively. **【Conclusion】**Sensitivity analysis shows that, with clear demands of stranded passengers, fleet size negatively correlated with the average delay time of stranded passengers and positively correlated with emergency bus transportation costs.

**Key words:** urban rail transit; emergency bus; combination scheduling; multi-objective; improved NSGA- II algorithm

**Citation format:** XIE X L, ZHA W X, WANG Y Q, et al. Study on emergency bus dispatching scheme for subway service interruption[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(2): 72-78.

**【研究意义】**现如今,居民出行越来越依赖城市轨道交通。若其发生运营中断,乘客无法准时到达目的地,不仅仅会造成恶劣的社会影响,还将影响整个交通网络的正常运行。因此建立高效的应急公交调度方案疏散滞留乘客显得尤为重要。

**【研究进展】**应急公交调度问题已成为国内外诸多专家学者的研究热点,Gu等<sup>[1]</sup>构建二阶段模型,以优化架桥计划及其对公交车的分配,并运用加权最短处理时间优先(WSPT)规则的启发式算法来求解该模型;Yang等<sup>[2]</sup>建立混合整数线性规划模型,共同优化时变需求下的公交桥接路线和时刻表;黄家骏等<sup>[3]</sup>提出基于Agent的疏散行为动态切换模型求解突发事件下的地铁乘客应急疏散问题;刘莎莎等<sup>[4]</sup>根据受影响的乘客出行选择偏好,建立基于非集计理论下的出行选择行为模型,并对中断站间的客流重分布进行预测;张勇等<sup>[5]</sup>通过分析灾害情况下的地铁救援车辆排队过程,建立了救援车辆的应急联合排队模型;刘欣萌<sup>[6]</sup>将定性和定量分析相结合,对轨道交通与常规公交的衔接进行了优化研究。王宇晴等<sup>[7]</sup>结合了车辆调度和选址方案,对应急公交驻车点选址问题进行研究。查伟雄等<sup>[8-9]</sup>、冯涛等<sup>[10]</sup>从作业模式、接驳线路、公交车型等方面考虑,分别对地铁中断下应急公交疏散问题进行建模分析。Yin等<sup>[11]</sup>建立了一个三层离散选择行为模型,来管理和控制车站中断危机的公交桥接服务。

**【创新特色】**上述研究主要是在轨道交通发生中断时从单一的调度角度出发,对站内滞留乘客进行疏散。由于传统调度方案疏散效率低、不能有效地利用应急车辆资源。**【关键问题】**本文为了提高应急车辆的疏散效率,构建城市轨道交通运营中断下

的多目标应急公交组合调度模型,针对该模型特点提出采用改进的遗传算法(NSGA- II)进行求解。

## 1 问题描述

因突发事件的发生具有随机性、临时性和紧急性的特征,因此轨道交通应急管理部门必须制定相应的应急预案来降低突发事件对轨道交通系统产生的负面影响。通常轨道交通线路的某一车站或区段暂时中断或全线停运,导致列车不能通过中断区间则启动应急预案。本文采用如下应急预案:沿着轨道交通线路从中断区间向两端搜索,直至遇到折返站,借助折返站开行应急临时公交,以中断区间开展短驳。由于轨道交通中断区段内部的疏运需求一般相对较小,可借助常规公交、出租车、网约车、共享单车、步行等完成出行。因此,本文仅研究轨道交通折返站与中间站以及折返站间的待疏运客流需求<sup>[12-13]</sup>。

城市轨道交通运营中断下应急公交调度问题可表示为:已知轨道交通中断站集合为 $I$ 、折返站集合为 $J$ ,OD对之间的待疏运乘客需求为 $Q_{ij}$ ,且停车场集合为 $P$ ,每个停车场有 $Y_p$ 辆应急公交车,每辆车从停车场出发后前往轨道中断站点搭载一批乘客进行服务,服务的方式有两种:①空驶返回该站点进行下一次疏运或停止服务;②继续搭载折返站的乘客进行服务,服务完成后空驶返回原中断站点进行下一次疏运或停止服务。本文旨在将所有滞留在中断车站的乘客利用应急公交进行疏散,并将应急公交的临时站点设置在中断区段站点。建立以应急公交的疏运成本以及乘客的平均延误最小为目标的多目标模型,从而得到最佳的调度方案。应急公交调度模式如图1所示。

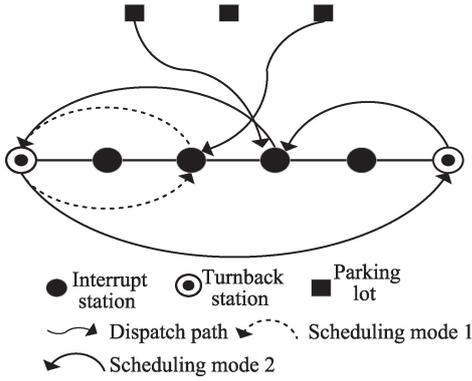


图1 调度模式

Fig. 1 Scheduling mode

## 2 优化模型

### 2.1 模型假设

① 轨道交通中断站的乘客待疏散需求是确定的;② 应急公交车型相同,且最大载客量为定值;③ 每辆应急公交车只能选用一种调度模式服务;④ 由历史平均路况确定应急公交的平均空驶速度和运营速度;⑤ 应急公交在行驶过程中不会受到突发事件的干扰。

### 2.2 参数和变量定义

参数和变量定义见表1和表2。

表1 模型参数定义

Tab.1 Definition of parameters

Parameter	Definition
$I$	Interrupt station collection, $I=[1,2,\dots,n]$ , and interrupt the station $i \in I$
$J$	Collection of turn back stations, and turn back stations $j \in J$
$P$	Emergency bus parking lot assembly, and parking lot $p \in P$
$Y_p$	The maximum number of vehicles dispatched to point $p$
$\eta$	Maximum load capacity of emergency bus vehicles
$D_{pi}$	Distance of emergency bus from parking lot $p$ to station $i$
$D_{ij}$	Distance from interruption station $i$ to turnaround station $j$
$Q_{ij}$	Demand for passenger waiting for evacuation from interruption station $i$ to turnaround station $j$
$W$	Rated passenger capacity of emergency bus vehicles
$V$	Average operating speed of emergency bus carrying passengers
$V_0$	Empty speed of emergency buses
$\alpha$	Unit vehicle operating time cost
$\beta$	Unit vehicle dispatch cost

表2 模型决策变量定义

Tab.2 Definition of decision variables

Decision variable	Definition
$Y_{ij}^{p_1}$	Parking lot $p$ is dispatched to stop $i$ and drives to number of vehicles at turnaround station $j$
$Y_{ij}^{p_2}$	The number of vehicles dispatched by parking lot $p$ to stop $i$ and then return to stop $i$ at turn back station $j$
$L_{ij}^{p_1}$	Number of round-trip trips of vehicles dispatched from parking lot $p$ to interruption station $i$ to turnaround station $j$
$L_{ij}^{p_2}$	The number of round-trip trips of vehicles sent from parking lot $p$ to interruption station $i$ to turnaround station $j$ before returning to interruption station $i$

## 3 模型

本文旨在将所有滞留在中断车站的乘客利用应急公交进行疏散,为提高其疏散效率,构建以应急公交车辆疏散成本最小  $Z_1$  和乘客平均延误时间最小  $Z_2$  的多目标组合调度优化模型。其中乘客延误时间包括应急公交预案启动时起至所有滞留乘客疏散完毕时止所花费的时间。优化模型为

$$\min Z_1 = \alpha(T_1 + T_2) + \beta \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (X_{ij}^{p_1} + X_{ij}^{p_2}) \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \frac{T_3 + T_4}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij}} \quad (2)$$

约束条件为

$$T_1 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij}^{p_1} \left( \frac{D_{pi}}{V_0} + D_{ij} \left( \frac{L_{ij}^{p_1}}{V} + \frac{L_{ij}^{p_1} - 1}{V_0} \right) \right) \quad (3)$$

$$T_2 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij}^{p_2} \left( \frac{D_{pi} + (D - D_{ij})(L_{ij}^{p_2} - 1)}{V_0} + \frac{L_{ij}^{p_2}(D_{ij} + D)}{V} \right) \quad (4)$$

$$T_3 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} \left( \frac{S_{ij} \frac{X_{ij}^{p_1} L_{ij}^{p_1} D_{pi}}{V_0} + \frac{X_{ij}^{p_1} D_{ij}}{S_{ij}} \times \left( \frac{L_{ij}^{p_1}(L_{ij}^{p_1} + 1)}{2V} + \frac{L_{ij}^{p_1}(L_{ij}^{p_1} - 1)}{2V_0} \right) \right) \quad (5)$$

$$T_4 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[ \frac{X_{ij}^{p_2} L_{ij}^{p_2} D_{pi} \left( \frac{Q_{ij}}{S_{ij}} + \frac{Q_{ij'}}{S_{ij'}} \right) + \frac{X_{ij}^{p_2} Q_{ij}}{S_{ij}} \left[ \frac{D_{ij} L_{ij}^{p_2} (L_{ij}^{p_2} + 1)}{2V} + \frac{DL_{ij}^{p_2} (L_{ij}^{p_2} - 1)}{2V} \right] + \frac{X_{ij}^{p_2} Q_{ij'}}{S_{ij'}} \left[ \frac{(D_{ij} + D) L_{ij}^{p_2} (L_{ij}^{p_2} + 1)}{2V} + \frac{(D - D_{ij}) L_{ij}^{p_2} (L_{ij}^{p_2} - 1)}{V_0} \right]}{V_0} \right] \quad (6)$$

$$B_{ij} = \sum_{p \in P} (Y_{ij}^{p_1} L_{ij}^{p_1} + Y_{ij}^{p_2} L_{ij}^{p_2}) \quad (7)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} 0, & 1 < i < n \\ \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij}^{p_2} L_{ij}^{p_2}, & i = 1 \text{ 或 } i = n \end{cases} \quad (8)$$

$$S_{ij} = B_{ij} + C_{ij} \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P} X_{pi} \geq 1 \quad (10)$$

$$Q_{ij} \leq S_{ij} W \eta \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (Y_{ij}^{p_1} + Y_{ij}^{p_2}) \leq Y_p \quad (12)$$

$$\left( \frac{L_{ij}^{p_1} D_{ij}}{V} + \frac{(L_{ij}^{p_1} - 1) D_{ij}}{V_0} \right) + \frac{D_{pi}}{V_0} \leq T_* \quad (13)$$

$$\frac{D_{pi} + (D - D_{ij})(L_{ij}^{p_2} - 1)}{V_0} + \frac{L_{ij}^{p_2} (D_{ij} + D)}{V} \leq T_* \quad (14)$$

式中:  $T_1$ ,  $T_2$  分别对应模式1和模式2应急公交疏散旅客时间;  $T_3$ ,  $T_4$  分别对应模式1和模式2乘客延误时间。式(1)为应急公交疏运最小成本;式(2)为滞留乘客平均延误最小时间;式(3)~式(4)为计算应急公交疏散旅客时间;式(5)~式(6)为计算乘客延误;式(7)~式(9)为计算服务应急公交站点总车次;式(10)为停车场必须派遣车辆至中断站点进行乘客疏运;式(11)表示对应急公交站点的公交车运输能力进行约束;式(12)表示对应急公交车站指派车辆能力约束;式(13)~式(14)表示对应急公交疏散乘客时间约束。

## 4 优化算法

应急接驳公交组合调度方案优化问题包含应急公交疏运成本和滞留乘客平均延误时间两个相互博弈的目标。在决策者没有任何决策倾向时,通

常很难找到一个解能使两个目标函数均达到最优解。而在求解多目标优化问题时,通过计算能够得到一个解集,其中的解是不能度量目标好坏的,若想一个目标进一步优化,只能通过劣化其他目标的值,这样的解被称为 Pareto 最优解。由于该多目标组合调度优化模型是非线性整数规划问题中的 NP-hard 问题,传统优化算法通常将多目标转化为单目标进行求解,往往存在算法早熟、局部最优以及权重不好确定等缺点。因此本文选用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)得到互不支配的 Pareto 解集。同时为提高种群的多样性和算法的性能对该算法进行了相应的改进。

### 4.1 改进的NSGA-II算法

#### 4.1.1 正态分布交叉算子

为了提升NSGA-II算法空间搜索能力,引入正态分布交叉算子优化NSGA-II算法的交叉过程<sup>[13]</sup>,令  $p_1$ ,  $p_2$  为父代,通过正态分布算子使  $x_1$ ,  $x_2$  子代形成,其中,  $|N(0,1)|$  是正态分布随机变量,  $t$  是  $t \in (0,1)$  内的随机数。

1) 若  $t \leq 0.5$ ,

$$\begin{cases} x_{1i} = \frac{p_{1i} + p_{2i}}{2} + \frac{1.481(p_{1i} - p_{2i})N(0,1)}{2} \\ x_{2i} = \frac{p_{1i} + p_{2i}}{2} - \frac{1.481(p_{1i} - p_{2i})N(0,1)}{2} \end{cases} \quad (15)$$

2) 若  $t > 0.5$ ,

$$\begin{cases} x_{1i} = \frac{p_{1i} + p_{2i}}{2} - \frac{1.481(p_{1i} - p_{2i})N(0,1)}{2} \\ x_{2i} = \frac{p_{1i} + p_{2i}}{2} + \frac{1.481(p_{1i} - p_{2i})N(0,1)}{2} \end{cases} \quad (16)$$

#### 4.1.2 差分局部搜索策略

择取差分变异策略干预个体的进化过程,并引入差分算法中的差分向量作为变异的算子,来增强算法的局部搜索能力<sup>[8]</sup>。对于种群  $p$ ,同一层级中相邻的父代个体  $\{p_a, p_b\} \in p$ ,临时子代个体  $p_i'$  可利用变异算子求得,其中  $r$  表示为相邻个体对变异方向的影响程度  $r \in [0,1]$ ,  $r$  值越接近1表示影响程度也越大。

$$p_i' = r p_a + (1 - r) p_b \quad (17)$$

### 4.2 算法步骤

Step 1 初始化,输入模型及算法相关参数;

Step 2 初始化种群,并且利用整数编码的方式,随机产生初代种群  $p_0$ ;

Step 3 对初始种群使用上述方法进行交叉变异操作,产生新的子代个体  $Q_0$ ;

Step 4 从父代和子代个体  $Q_0$  中根据拥挤程度选择产生新个体。并运用快速非支配排序以及计算拥挤度的方式,形成新的种群  $P_i$ ;

Step 5 若算法达到 Step 1 设置的迭代次数,停止计算,输出最终结果,否则转回 Step 3~Step 5。

## 5 案例分析

### 5.1 案例背景

南昌地铁一号线全长 28.84 km,该线路共有 24 个站点。连接了南昌市南昌县、青山湖区、东湖区、西湖区、红谷滩区,是南昌市市民出行的重要交通方式。如果丁公路北-师大南路区段发生供电故障,导致万寿宫站(S1)、八一馆站(S2)、八一广场站(S3)、丁公路北站(S4)、师大南路站(S5)、彭家桥站(S6)6个车站非正常运营。择取下正街(D1)、省体育馆(D2)、文教路(D3)、老福山立交桥(D4)4个公交停车场开展车辆调配。在出现轨道交通中断事件时,滞留乘客通常择取其他方式出行。参考文献[4]的方法得到中断站待疏运乘客数量如表3所示,应急公交车站可以调配疏运车辆数量均为10辆,轨道交通中断车站至应急公交站点距离如表4所示。

表3 中断站点的乘客需求

Direction	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Upgoing	1 564	752	672	532	476	-
Downgoing	-	482	545	642	726	1 628

应急公交的空驶速度设置为 25 km/h、载客时平均运行速度设置为 21 km/h、载客量为 70 人/车,单位疏运时间成本为 300 元/h,单位车辆调度成本为 200 元/辆。

### 5.2 优化结果分析

首先利用优化后的 NSGA- II 算法对应急公交

表4 停车场的配车信息

Station	S1	S2	S3	S4	S5	S6
D1	4.20	4.78	5.88	7.08	8.08	8.99
D2	5.38	4.80	3.70	4.90	5.90	6.79
D3	9.27	8.69	7.59	6.39	5.39	4.50
D4	5.88	5.30	4.20	4.00	5.00	5.89

组合调度方案和单一调度方案分别进行求解,然后利用隶属度函数从 Pareto 前沿解中挑选最优折中解,并将两种调度方案的优化结果进行对比分析,表5为组合调度配车方案,表6为不同调度方案的优化结果对比。

根据表6可知,当地铁发生突发事件导致中断时,采取单一调度配车方案乘客平均延误为 0.786 h/人,而采取组合调度配车方案乘客的平均延误为 0.625 h/人,降低了 20.48%。采取单一调度配车方案所花费的疏运成本为 19 468 元,而采取组合调度配车方案所花费的疏运成本为 16 167 元,降低了 16.96%。

### 5.3 算法分析

为比较 NSGA- II 算法和普通 NSGA- II 算法对于多目标调度模型的求解效果,本文进行了大量的实验,其结果对比如表7和图2所示。

从表7可知:改进后的 NSGA- II 算法相比较标准的 NSGA- II 算法拥有更强的搜索能力。同时得到的结果更加精确,乘客平均延误时间从 0.670 h/人减少至 0.625 h/人,降低了 6.72%。疏解乘客花费的成本由 16 769 元减少至 16 167 元,降低了 3.59%。从图2散点的分布我们也容易发现,改进后的 NSGA- II 算法有着更为均匀的 Pareto 最优解集。

### 5.4 灵敏度分析

为了验证应急公交车队规模的大小对应急公交调度优化方案的影响程度,本文最后对车队规模进行灵敏度分析。图3、图4分别为乘客平均延误时间与应急公交疏运成本随车队规模的变化情况,

表5 组合调度配车方案

Scheduling mode	Direction	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Number of vehicles in mode 1 (round trips)	Upgoing	2 (1)	1 (3)	2 (2)	3 (2)	1 (7)	-
	Downgoing	-	1 (6)	2 (3)	1 (4)	2 (4)	-
Number of vehicles in mode 2 (round trips)	Upgoing	-	4 (3)	3 (2)	1 (2)	-	-
	Downgoing	-	1 (1)	1 (2)	3 (2)	2 (2)	4 (2)

表6 优化结果对比

**Tab.6 Comparison of optimized results**

Item	Single scheduling	Combined scheduling	Change rate/%
Average passenger delay (h/person)	0.786	0.625	-20.48
Transportation cost/yuan	19 468	16 167	-16.96

表7 NSGA-II 算法求解效果对比

**Tab.7 Comparison of NSGA-II algorithm solution effect**

Item	Ordinary	Improved	Change rate/%
Average passenger delay (h/person)	0.670	0.625	-6.72
Transportation cost/yuan	16 769	16 167	-3.59

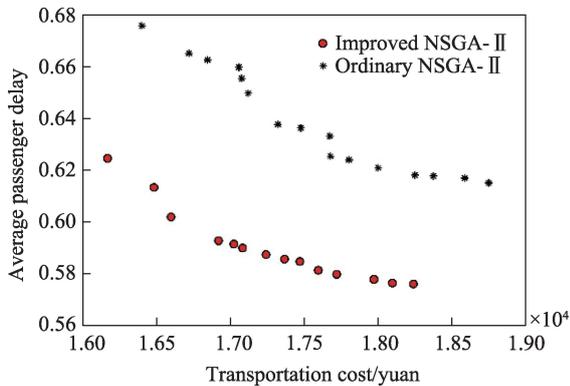


图2 算法效果对比图

Fig. 2 Contrast map of algorithm effect

研究表明:在乘客疏散需求确定的条件下,乘客的平均延误时间随车队规模的增加而下降,应急公交疏散成本随车队规模的增加而上升。

## 6 结论

1) 针对传统调度模式单一、疏散效率低的问题,建立了城市轨道交通运营中断环境下的多目标应急公交组合调度模型。在此基础上,利用改进后的NSGA-II 算法对模型进行求解,并取得了一定的成效。

2) 通过实例验证发现组合调度模型相比单一调度模型更具优势:组合调度相比单一调度乘客平均延误时间降低了20.48%、应急公交所花费的疏散成本降低了16.96%;在一定范围内,乘客平均延误随车队规模的增加而下降,疏散成本随车队规模的增加而上升;同时,改进后的NSGA-II 算法相比较

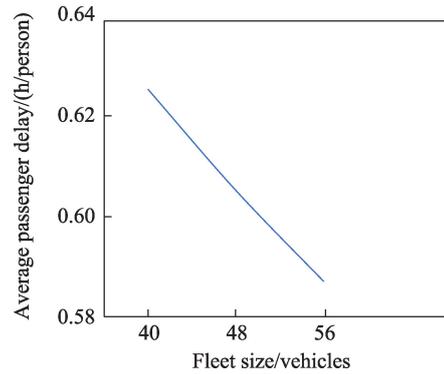


图3 车队规模-乘客平均延误

Fig. 3 Fleet size-average delay of passengers

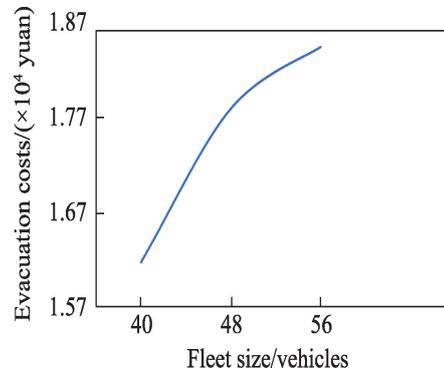


图4 车队规模-疏散成本

Fig. 4 Fleet size-evacuation costs

标准的NSGA-II 算法进行求解时,乘客平均延误时间降低了6.72%,应急公交疏散成本降低了3.59%。

### 参考文献:

- [1] GU W, YU J, JI Y X, et al. Plan-based flexible bus bridging operation strategy[J]. Transportation Research Part C, 2018, 91(2): 9-22.
- [2] YANG Z J, CHEN X. Compensation decisions on disruption recovery service in urban rail transit[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2019(4): 367-375.
- [3] 黄家骏, 徐瑞华, 洪玲, 等. 动态不确定性环境下的地铁站应急疏散仿真建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2): 164-170.
- [4] HUANG J J, XU R H, HONG L, et al. Simulation model of evacuation process in metro station under dynamic and uncertain environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 164-170.
- [5] 刘莎莎, 姚恩建, 李斌斌, 等. 基于行为分析的突发事件下城轨站间客流分布预测[J]. 铁道学报, 2018, 40(9):

- 22-29.  
LIU S S, YAO E J, LI B B, et al. Forecasting passenger flow distribution between urban rail transit stations based on behavior analysis under emergent events[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 22-29.
- [5] 张勇, 伏紫妍. 地铁应急救援车辆配置绩效评估模型[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 156-166.  
ZHANG Y, FU Z Y. Evaluating model of development performance of metro emergency rescue vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(2): 156-166.
- [6] 刘欣萌. 基于ISM-Fuzzy AHP模型的轨道交通与常规公交衔接优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(3): 66-72.  
LIU X M. Rail transit and bus interface optimization based on ISM-Fuzzy AHP Model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(3): 66-72.
- [7] 王宇晴, 查伟雄, 万平, 等. 轨道交通网络化的应急公交驻车点选址研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(9): 235-242.  
WANG Y Q, ZHA W X, WAN P, et al. Research on the location model of emergency bus parking point based on metro network[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(9): 235-242.
- [8] 查伟雄, 冯涛, 严利鑫. 地铁运营中断下多目标应急公交调度模型研究[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(3): 8-14.  
ZHA W X, FENG T, YAN L X. Study of multi-objective emergency bus dispatching model under metro operation interruption[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(3): 8-14.
- [9] 查伟雄, 冯涛, 严利鑫. 考虑车辆到达时间窗的应急公交调度优化模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(8): 57-62.  
ZHA W X, FENG T, YAN L X. Optimization model of emergency bus dispatching considering vehicle arrival time window[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(8): 57-62.
- [10] 冯涛, 查伟雄, 严利鑫. 地铁运营中断下应急公交线路开行方案研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(12): 152-158.  
FENG T, ZHA W X, YAN L X. Study on scheme of emergency bus line operation under subway operation interruption[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(12): 152-158.
- [11] 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: 2758652.
- [12] 王佳冬, 袁振洲, 宁尚彬. 城轨运营中断下应急公交车调度模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(4): 149-154.  
WANG J D, YUAN Z Z, NING S B. 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.
- [13] 傅生辉, 李臻, 杜岳峰, 等. 基于改进NSGA-II算法的拖拉机传动系统匹配优化[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 349-357.  
FU S H, LI Z, DU Y F, et al. Matching optimization for tractor powertrain based on improved NSGA-II algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 349-357.



第一作者: 谢贤亮(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通运输系统优化。E-mail: 925136766@qq.com。



通信作者: 查伟雄(1963—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为交通运输系统优化建模分析及算法设计。1985年本科毕业于武汉大学, 1991年硕士毕业于中南大学, 1998年博士毕业于北京交通大学。E-mail: 1033723954@qq.com。

(责任编辑: 吴海燕)