

# 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:** 针对传统应急调度模式单一、疏运效率低的特征, 研究了多种调度模式组合应急公交调度方法。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, 为提高其疏运效率, 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运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, 结果验证表明: 本文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 20.48%, 疏运成本降低了 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 4.50%, 疏运成本降低了 3.59%。通过灵敏度分析发现: 在确定滞留乘客疏运需求的情况下, 滞留乘客的平均延误时间和车队规模成负相关, 应急公交的疏运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 文献标识码: A

## 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:** To optimize emergency response and address the inefficiencies observed in traditional dispatch models, a study was conducted to develop a scheduling method that considers a range of emergency dispatch modes. The objective was to evacuate stranded passengers at disrupted stations using emergency buses while improving transportation efficiency. The dispatch model incorporated key factors such as the dispatching capacity of the emergency parking lot, vehicle capacity, and vehicle rescue time. The study developed a multi-objective combination scheduling optimization model utilizing a fast non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) to reduce transportation costs and the average passenger delay. The algorithm was improved to enhance the diversity and performance of the population, and a Pareto distribution optimization solution was ultimately obtained. The Nanchang Rail Transit Line 1 was used as an example to solve both the emergency bus combination dispatch plan and the single dispatch plan separately. Results revealed 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 4.50% and 3.59%, respectively. Sensitivity analysis showed that fleet size negatively correlated with the average delay time of stranded passengers and positively correlated with emergency bus transportation costs, depending on the demand for transporting stranded passengers.

**Keywords:** Urban rail transit; Emergency Bus; combination scheduling; multi-objective; improved NSGA-II Algorithm

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51805169)

## 1 引言

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,还将影响将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。

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,DENG 等<sup>[1]</sup>总结了城市轨道交通始发站与终点站之间的轨道交通中断类型,并基于站场容量限制以及应急车辆资源的限制,以乘客出行延误最小为目标建立了可行路径生成模型;ZHANG 等<sup>[2]</sup>在给地铁中断持续时间的概率分布情况下,通过权衡 SB 服务的启动成本和乘客延误成本来确定其最佳启动时间(OIT),从而最小化系统总成本;SHI 等<sup>[3]</sup>评估了城市轨道交通路网的脆弱性,并进一步从该特性深入研究了城市轨道交通路网的可持续性;GU 等<sup>[4]</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>[5]</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;WANG 等<sup>[6]</sup>以城市轨道交通突发事件为研究对象,提出了一种城市轨道交通与换乘、补充班车服务相结合的线路疏散机制。黄家骏等<sup>[7]</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>[8]</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>[9]</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;胡华<sup>[10]</sup>、陈治亚<sup>[11]</sup>以总疏运时间最短和应急公交总运行时间最短为目标,构建轨道交通中断下应急公交优化调度模型;马昌喜等<sup>[12]</sup>以额定乘客人数和滞留旅客与座位数量相匹配为约束条件,构建紧急突发事件下的应急公交定制线路优化模型。刘欣萌<sup>[13]</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<sup>[14]</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<sup>[15-16]</sup>、冯涛<sup>[17]</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>[18]</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。杨婷等<sup>[19]</sup>构建带时间窗约束条件下的地铁配送路线优化模型。Itani 等<sup>[20]</sup>以最小化地铁和公交乘客的总延

误为目标构建了应急调度方案模型。

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运效率低、不能有效地利用应急车辆资源。因此本文为了提高应急车辆的疏运效率,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。

## 2 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交路,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>[21,22]</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元目标模型,从而得到最佳的调度方案。应急公交调度模式如图 1。

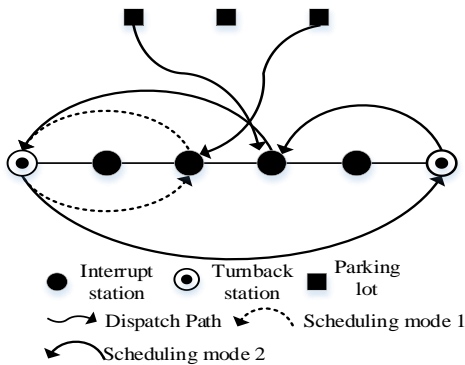


图 1 调度模式

Fig.1 Scheduling mode

### 3 优化模型

#### 3.1 模型假设

- 1) 轨道交通中断站的乘客待疏运需求是确定的;
- 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;

#### 3.2 参数和变量定义

表 1 模型参数定义

Tab.1 Definition of parameters

| character | 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 variables | definition  |
|--------------------|---|
| $Y_{ij}^{p1}$      | Parking lot p is dispatched to stop i and drives to turnaround station j  |
| $Y_{ij}^{p2}$      | The number of vehicles dispatched by parking lot p to stop i and then return to stop i at turn back station j   |
| $L_{ij}^{p1}$      | Number of round-trip trips of vehicles dispatched from parking lot p to interruption station i to turnaround station j  |
| $L_{ij}^{p2}$      | 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 |

### 4 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  $z_2$  最小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。优化模型及约束条件如下:

$$\min Z_1 = \alpha(T_1 + T_2) + \beta \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (X_{ij}^{p1} + X_{ij}^{p2}) \quad (1)$$

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

约束条件:

$$T_1 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij}^{p1} \left( \frac{D_{pi}}{V_0} + D_{ij} \left( \frac{L_{ij}^{p1}}{V} + \frac{L_{ij}^{p1} - 1}{V_0} \right) \right) \quad (3)$$

$$T_2 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij}^{p2} \left[ \frac{D_{pi} + (D - D_{ij})(L_{ij}^{p2} - 1)}{V_0} + \frac{L_{ij}^{p2}(D_{ij} + D)}{V} \right] \quad (4)$$

$$T_3 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_{ij} \left[ S_{ij} \frac{X_{ij}^{p1} L_{ij}^{p1} D_{pi} + X_{ij}^{p1} D_{ij}}{V_0} + \frac{X_{ij}^{p1} D_{ij}}{S_{ij}} \right] \times \left[ \frac{L_{ij}^{p1}(L_{ij}^{p1} + 1)}{2V} + \frac{L_{ij}^{p1}(L_{ij}^{p1} - 1)}{2V_0} \right] \quad (5)$$

$$T_4 = \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[ \frac{X_{ij}^{p2} L_{ij}^{p2} D_{pi} \left( \frac{Q_{ij}}{S_{ij}} + \frac{Q_{ij^-}}{S_{ij^-}} \right)}{V_0} + \frac{X_{ij}^{p2} Q_{ij}}{S_{ij}} \left[ \frac{D_{ij} L_{ij}^{p2} (L_{ij}^{p2} + 1)}{2V} + \frac{D L_{ij}^{p2} (L_{ij}^{p2} - 1)}{2V} + \frac{(D - D_{ij}) L_{ij}^{p2} (L_{ij}^{p2} - 1)}{V_0} \right] + \frac{X_{ij}^{p2} Q_{ij^-}}{S_{ij^-}} \left[ \frac{(D_{ij} + D) L_{ij}^{p2} (L_{ij}^{p2} + 1)}{2V} + \frac{(D - D_{ij}) L_{ij}^{p2} (L_{ij}^{p2} - 1)}{V_0} \right] \right] \quad (6)$$

$$B_{ij} = \sum_{p \in P} \left( Y_{ij}^{p1} L_{ij}^{p1} + Y_{ij}^{p2} L_{ij}^{p2} \right) \quad (7)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} 0 & 1 < i < n \\ \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j=j^-} Y_{ij}^{p2} L_{ij}^{p2} & i = 1 / i = n \end{cases} \quad (8)$$

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

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

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

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left( Y_{ij}^{p1} + Y_{ij}^{p2} \right) \leq Y_p \quad (12)$$

$$\left( \frac{L_{ij}^{p1} D_{ij}}{V} + \frac{(L_{ij}^{p1} - 1) D_{ij}}{V_0} \right) + \frac{D_{pi}}{V_0} \leq T_* \quad (13)$$

$$\frac{D_{pi} + (D - D_{ij})(L_{ij}^{p2} - 1)}{V_0} + \frac{L_{ij}^{p2}(D_{ij} + D)}{V} \leq T_* \quad (14)$$

$T_1, T_2$  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) 为应急公交疏运成本最小; 式 (2)

为滞留乘客平均延误时间最小; 式 (3-4) 为计算应急公交疏散旅客时间的公式; 式 (5-6) 为计算乘客延误的公式; 式 (7-9) 为计算服务应急公交站点总车次公式; 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辆运输能力进行约束; 式 (12) 表示为对应急公交车站指派车辆能力约束; 式 (13-14) 表示对应急公交疏散乘客时间约束。

## 5 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。因此本文特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。

### 5.1 改进的 NSGA-II 算法

#### 5.1.1 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>[23]</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  $t > 0.5$

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

### 5.1.2 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>[23]</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。

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

## 5.2 算法步骤

Step1: 初始化，输入模型及算法相关参数。

Step2: 初始化种群，并且利用整数编码的方式，随机产生初代种群  $p_0$ 。

Step3: 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  $Q_0$ 。

Step4: 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  $P_t$ 。

Step5: 若算法达到 step1 设置的迭代次数，停止计算，输出最终结果，否则转回 Step3-Step5。

## 6 案例分析

### 6.1 案例背景

南昌地铁一号线全长 28.84km，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它方式出行。图 2 为南昌轨道交通 1 号线线路图。参考文献[8]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以及轨道交通中断车站至应急公交站点距离如表 4 所示。

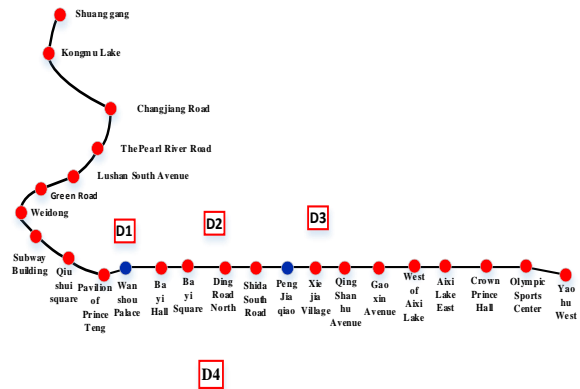


图 2 南昌市轨道交通 1 号线线路图

Fig.2 Route Map of Nanchang Rail Transit Line 1

表 3 中断站点的乘客需求

Tab.3 passenger demand at interrupt stations

| direction | S1   | S2  | S3  | S4  | S5  | S6   |
|-----------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| upgoing   | 1564 | 752 | 672 | 532 | 476 | -    |
| go down   | -    | 482 | 545 | 642 | 726 | 1628 |

表 4 停车场的配车信息

Tab.4 Car Service in the parking lot

| distance | S1   | S2   | S3   | S4   | S5   | S6   | Number of dispatchable vehicles |
|----------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------|
|          | (km) | (km) | (km) | (km) | (km) | (km) | (vehicles)                      |
| D1       | 4.2  | 4.78 | 5.88 | 7.08 | 8.08 | 8.99 | 10                              |
| D2       | 5.38 | 4.8  | 3.7  | 4.9  | 5.9  | 6.79 | 10                              |
| D3       | 9.27 | 8.69 | 7.59 | 6.39 | 5.39 | 4.5  | 10                              |
| D4       | 5.88 | 5.3  | 4.2  | 4    | 5    | 5.89 | 10                              |

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

### 6.2 优化结果分析

首先利用优化后的 NSGA-II 算法对应急公交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衷解，

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。

表 5 组合调度配车方案

**Tab.5 Vehicle allocation scheme for combined dispatching**

| 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) | -     |
|  | go down   | -     | 1 (6) | 2 (3) | 1 (4) | 2 (4) | -     |
| Number of vehicles in mode 2 (round trips) | upgoing   | -     | 4 (3) | 3 (2) | 1 (2) | -     | -     |
|  | go down   | -     | 1 (1) | 1 (2) | 3 (2) | 2 (2) | 4 (2) |

表 6 优化结果对比

**Tab.6 Comparison of optimized results**

| Scheduling plan                    | Single scheduling | Combined scheduling | Change rate(%) |
|------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------|
| Average passenger delay (h/person) | 0.786             | 0.625               | -20.48         |
| Transportation cost (yuan)         | 19468             | 16167               | -16.96         |

根据表 6 可知：当地铁发生突发事件导致中断的时，采取单一调度配车方案乘客平均延误为 0.786h/人，而采取组合调度配车方案乘客的平均延误为 0.625h/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 19468 元，而采取组合调度配车方案所花费的疏运成本为 16167 元，降低了 16.96%。

### 6.3 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 3 所示。

表 7 NSGA-II 算法求解效果对比

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

| scheme                             | common | improve | Change rate (%) |
|------------------------------------|--------|---------|-----------------|
| Average passenger delay (h/person) | 0.670  | 0.625   | -4.50           |
| Transportation cost (yuan)         | 16769  | 16167   | -3.59           |

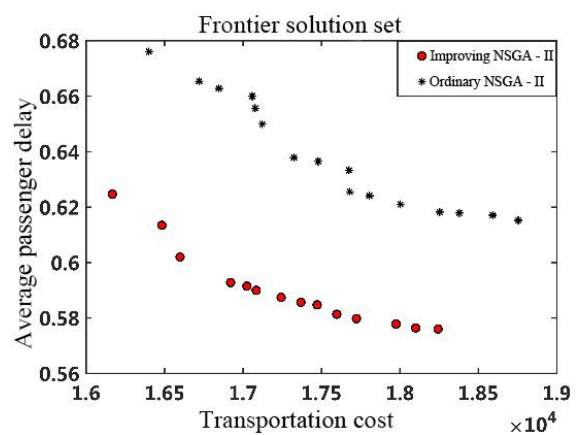


图 3 算法效果对比图

Fig.3 Contrast map of algorithm effect

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 0.670h/人减少至 0.625h/人，降低了 4.50%。疏解乘客花费的成本由 16769 元减少至 16167 元，降低了 3.59%。从图 3 散点的分布我们也容易现，改进后的 NSGA-II 算法有着更为均匀的 Pareto 最优解集。

### 6.4 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 4、图 5 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，研究表明：在乘客疏运需求确定的条件下，乘客的平均延误时间随车队规模的增加而下降、应急公交疏运成本随车队规模的增加而上升。

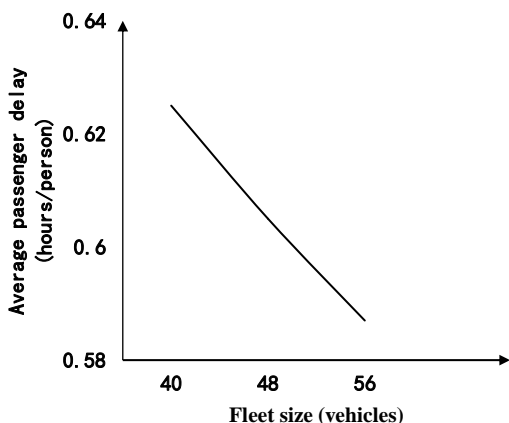


图 4 车队规模-乘客平均延误

Fig.4 Fleet size-average delay of passengers

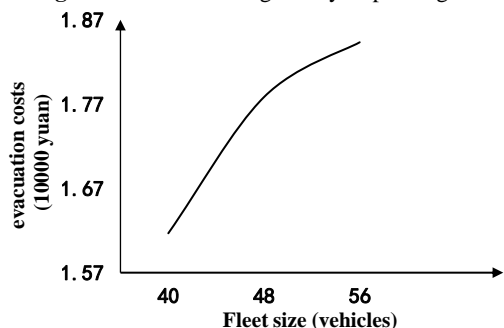


图 5 车队规模-疏散成本

Fig.5 Fleet size-evacuation costs

## 7 结论

1) 针对传统调度模式单一、疏散效率低的问题, 文章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 算法相比较标准的 NSGA-II 算法进行求解时, 乘客平均延误时间降低了 4.50%、应急公交疏散成本降低了 3.59%。

3) 本文只研究了单条地铁线路中断情况下的应急公交调度问题, 而对于城市轨道交通网络中断条件下的应急公交调度方案将是下一步研究的重点。

## 参考文献

[1] DENG YJ, RU XL, DOU ZQ, et al. Design of Bus

Bridging Routes in Response to Disruption of Urban Rail Transit [J]. sustainability, 2018, 84: 31-44.

[2] ZHANG SY, HONG K. Lo. Metro disruption management: Optimal initiation time of substitute bus services under uncertain system recovery time [J]. Transportation Research Part C, 2018, 97: 409-427.

[3] SHI JG, WEN SP, ZHAO XB, et al. Sustainable Development of Urban Rail Transit Networks: A Vulnerability Perspective[J]. Sustainability Science, 2018, 10: 33-90.

[4] GU W, YU J, JI YX, et al. Plan-based flexible bus bridging operation strategy[J]. Transportation Research Part C, 2018, 91(2): 9-22.

[5] YANG ZJ, CHEN X. Compensation Decisions on Disruption Recovery Service in Urban Rail Transit[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2019, 4: 367-375.

[6] WANG Y, YAN XD, ZHOU Y. A straightforward method for shuttle-bus line design under urban rail transit emergencies [J]. Journal of Transportation Safety Security, 2019, 10: 1080.

[7] 黄家骏, 徐瑞华, 洪玲, 等. 动态不确定性环境下的地铁车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.

HUANG Jiajun, XU Ruihua, HONG Ling, 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.

[8] 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 Shasha, YAO Enjian, LI Binbin, et al. Forecasting Passenger Flow Distribution between Urban Rail Transit Stations Based on Behavior Analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 22-29.

[9] 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 Yong, FU Ziyang. Evaluating model of development performance of metro emergency rescue vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(2): 156-166.

[10] 胡华, 高云峰, 刘志钢, 等. 地铁运营中断下公交衔接疏散车辆应急调度模型及算法[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 31-37.

HU Hua, GAO Yunfeng, LIU Zhigang, et al. Model and



- Algorithm for Bridging Bus Emergency Dispatching Problem during Metro Operational Disruptions[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(5): 31-37.
- [11] 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.  
CHEN Zhiya, TAN Fei, FENG Fenling. Study of the bus dispatching under metro emergent operational disruptions[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(09): 2360-2367.
- [12] 马昌喜, 王超, 郝威, 等. 突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化[J]. 交通运输工程学报, 2020, 1(12): 06-27  
MA Changxi, WANG Chao, HAO Wei, et al. Emergency customized bus route optimization under public health emergencies[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 1(12): 06-27.
- [13] 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(03): 66-72.  
Liu Xinmeng. Research on the optimization of the connection between rail transit and conventional public transit based on the ISM-Fuzzy AHP model [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34 (03): 66-72.
- [14] 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 Yuqing, Cha Weixiong, Wan Ping. Research on the location of emergency bus parking points for rail transit networking [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36 (9): 235-242.
- [15] 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 Weixiong, Feng Tao, Yan Lixin. Research on multi-objective emergency bus dispatch model under subway operation interruption [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45 (03): 8-14.
- [16] 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 Weixiong, Feng Tao, Yan Lixin. Emergency bus dispatch optimization model considering vehicle arrival time window [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2021, 40 (8): 57-62
- [17] 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 Tao, Zha Weixiong, Yan Lixin. Research on Emergency Bus Route Operation Plan under Subway Operation Interruption [J]. Highway Transportation Technology, 2021, 38 (12): 152-158
- [18] 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: Article ID: 2758652, 16 pages.
- [19] 杨婷, 郑长江, 马庚华. 基于地铁的带时间窗地下物流路径优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(4): 67-74.  
Yang Ting, Zheng Changjiang, Ma Genghua. Optimization of Underground Logistics Path with Time Windows Based on Subway [J]. Journal of East China Jiao Tong University, 2019, 36 (4): 67-74.
- [20] Itani A., Srikukenthiran S., Shalaby A. Capacity-Constrained Bus Bridging Optimization Framework[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(5): 036119812091739.
- [21] 郑玉靖, 古玮, 暨育雄, 等. 效率与公平视角下的应急公交接驳调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(02): 94-101.  
Zheng Yujing, Gu Wei, Ji Yuxiong, Zhang Hongjun. Optimization of emergency bus transfer scheduling from the perspective of efficiency and fairness [J]. Transportation System Engineering and Information, 2019, 19 (02): 94-101
- [22] 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(04): 149-154+163.  
Wang Jiadong, Yuan Zhenzhou, Ning Shangbin. Emergency bus vehicle scheduling model under urban rail operation interruption [J]. Transportation System Engineering and Information, 2019, 19 (04): 149-154+163.
- [23] 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 Senghui, LI Zhen, DU Yuefeng, 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.



作者简介



第一作者：谢贤亮（1996-），男，硕士研究生，2020 年获得华东交通大学学士学位。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，华东交通大学交通运输与经济研究所所长（江西省人文社科重点研究基地），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