

【交通物流 / Transportation Logistics】

城市轨道交通不成对开行方案研究

田佩宁^{1,2}, 毛保华^{1,2}, 周琪^{1,2}, 黄俊生^{1,2}, 张皓翔³, 高琦琦^{1,2}

1) 北京交通大学中国综合交通研究中心, 北京 100044; 2) 北京交通大学综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044; 3) 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037

摘要: 针对客流方向不均衡导致的城市轨道交通潮汐线路运输资源浪费问题, 提出在早高峰向午高峰过渡及午高峰向晚高峰过渡时段, 利用线路既有停车线存车的不成对开行方法, 综合考虑运营企业与出行乘客利益, 以不成对开行方案相较成对开行方案所节约的企业运营成本最大和增加的乘客出行成本最小为目标函数, 结合线路客流条件与既有停车线配置条件设置相关约束, 构建城市轨道交通不成对开行方案编制模型。通过算例验证模型有效性, 并分析不成对方案对企业运营成本、乘客出行及线路供需匹配度的影响。结果表明, 利用线路既有停车线开行不成对方案, 可节约企业运营成本0.82~2.16万元/d, 即300~788万元/a, 改善大客流方向后半区段及小客流方向区段的供需匹配度, 输送能力利用率平均可提升3.15%~5.20%; 不成对方案虽然会增加乘客总出行成本, 但对大部分乘客的轨道交通出行时间并不产生影响或影响较小, 平均出行时间最多仅增加16 s, 出行体验可能变差的最大乘客数量仅占早时段客流量的3.39%, 平均出行时间增加3 min。可见, 利用线路既有停车线开行不成对方案能有效节约企业运营成本、提升线路供需匹配度, 且对乘客出行影响较小。研究成果为运营企业开行不成对方案提供理论依据, 有利于优化城市轨道交通的运力资源配置。

关键词: 城市轨道交通; 潮汐客流; 客流方向不均衡; 开行方案; 不成对运行; 运输组织优化

中图分类号: U231+.92

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2023.05521

The unpaired operation of urban rail transit

TIAN Peining^{1,2}, MAO Baohua^{1,2}, ZHOU Qi^{1,2}, HUANG Junsheng^{1,2},
ZHANG Haoxiang³, and GAO Qiqi^{1,2}

1) Integrated Transport Research Center of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China

2) Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China

3) Beijing Urban Construction Design and Development Group Co. Ltd., Beijing 100037, P. R. China

Abstract: In order to solve the problem of waste of transport resources on tidal lines of urban rail transit due to uneven passenger flow, during the transition from morning peak to afternoon peak and from afternoon peak to evening peak, the unpaired operation method using the existing parking lines to store cars is proposed. Taking into account the interests of both operating enterprises and passengers, the objective function is to maximize the savings in enterprise operating costs and minimize the increase in travel costs of passengers in the unpaired operation scheme compared with the paired operation scheme. Combining the passenger flow conditions and the existing parking line configuration conditions, relevant constraints are set and a model is constructed for the unpaired operation of urban rail transit. The validity of the model is verified by presenting an example, and the impact of unpaired scheme on the

Received: 2022-11-23; Accepted: 2023-04-05; Online (CNKI): 2023-06-16

Foundation: National Natural Science Foundation of China (71971021)

Corresponding author: Professor MAO Baohua (bhmao@bjtu.edu.cn)

Citation: TIAN Peining, MAO Baohua, ZHOU Qi, et al. The unpaired operation of urban rail transit [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(5): 521-528. (in Chinese)



operating costs of the company, passenger travel and the matching of supply and demand on the line is analyzed. The results show that by using the existing parking lines to operate the unpaired scheme, the operating company can save 8.2 to 21.6 thousand RMB per day and 3.00 to 7.88 million RMB per year, and can improve the matching of supply and demand in the latter half of the high traffic direction and the low traffic direction, with an average increase in capacity utilization of 3.15% to 5.20%. Although the unpaired scheme would increase the total cost of travel for passengers, it would have no or a small impact on the majority of passengers' travel. The maximum increase in average travel time for passengers is only 16 s. The maximum number of passengers whose travel experience is likely to deteriorate is only 3.39% of the morning traffic and the average travel time only increases by 3 min. It can be seen that the use of existing parking lines to operate unpaired scheme can effectively save operational costs, improve the matching of supply and demand on the line, and have less impact on passenger travel. The study provides a theoretical basis for operating enterprises to operate unpaired scheme, which is conducive to optimizing the allocation of urban rail transport capacity resources.

Key words: urban rail transit; tidal passenger flow; uneven passenger flow; operating scheme; unpaired operation; optimization of transport organization

受到城市轨道交通发展的影响,大城市居民的居住区向远离市中心方向移动,职住分离现象的日益显著^[1],加重了城市轨道交通通勤高峰期客流的时空分布不均衡性^[2-3],造成输送能力利用率低和运输资源浪费等一系列问题。有研究提出大小交路^[4-6]、多编组^[7]及快慢车^[8-10]等运营组织方法,一定程度优化了运力资源配置、节约运营成本。然而,这些方法均为成对方案,难以提升线路单方向的供需匹配度。

不成对运行是指依据单向客流需求配置单向运力,同一时段上、下行开行频率不同的运输组织方法,其开行方法包括:①在原成对开行方案基础上抽疏小客流方向列车;②在原成对开行方案基础上加密大客流方向列车;③加密大客流方向上客流集中区段列车。不成对运行能够针对性解决小客流方向的运力浪费问题^[11],同时减少列车走行公里数,节约运营成本。

针对不成对开行方法,陈福贵等^[12-13]研究不成对运行在实际线路中的应用,具有较强的应用价值。在理论层面,姚宇等^[14]以企业运营成本和乘客出行费用最小为目标,构建列车时刻表与车底运用整合优化模型;陈丽玲^[15]以乘客总出行时间、列车走行公里及列车满载率均衡系数最小为目标,建立不成对开行方案编制模型;明先俊^[16]以车站滞留乘客数最小和列车走行公里数最小为目标,构建列车不成对运行计划优化模型;MO等^[17]从服务水平和运营成本角度,构建集开行方案、运行图、车底运用计划及列车速度曲线优化为一体的不对称运输策略优化模型。但由于以上理论研究中仅考虑1个高

峰时段^[14-15,17],忽略了早晚高峰客流差异和由此带来的车底存放及周转问题^[18],或假设线路两端均有车辆段^[14,16-17],实际上大多线路并不具备这个条件,因此,其研究结果对实际运营线路的适用性有限。

本研究提出在早、晚高峰与平峰过渡时段利用线路停车线开行不成对列车的方法,从运营企业和出行乘客角度出发,综合考虑线路客流条件和停车线配置条件,在不增加上线列车数基础上,构建不成对开行方案编制模型,并进行算例求解。最后分析不成对开行方案对企业运营及乘客出行相关指标的影响。研究对于城市轨道交通不成对开行方案的实际应用具有一定指导作用。

1 问题描述

1.1 不成对方案的开行方法

由于地铁通勤高峰期运力紧张,受运用列车数和列车周转的制约,难以持续开行不成对方案,因此,在分析潮汐客流特征基础上,选择在早高峰向午平峰过渡时段(早时段)以及午平峰向晚高峰过渡时段(晚时段)开行不成对列车,两时段列车的开行为1个不成对方案。具体开行方法为:在早高峰向午平峰过渡时段,抽出大客流方向(上行)的 x 列列车,停放在车站 k 的停车线上;当午平峰向晚高峰过渡时,被抽出的 x 列列车通过折返加入晚高峰大客流方向(下行)的运营,如图1。以上开行方法能够优化运力资源配置,减少小客流方向的运力浪费以及车辆走行公里数。考虑到早高峰大客流方向(上行)与晚高峰大客流方向(下行)相反,本研究不

成对开行方法可行。

为方便描述, 将被抽出的 x 列列车定义为不对称列车, 图1为不成对开行方法示意图, 其中, 虚

线为不对称列车走行路径; 线路的客流方向不平衡系数为 α 、线路长为 l 、车站数为 n , 车站集合为 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。

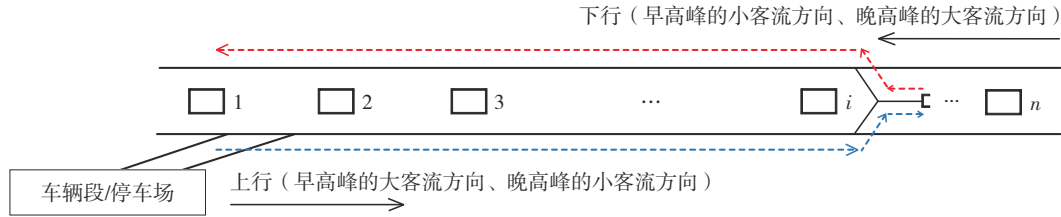


图1 不成对开行方法示意

Fig. 1 Diagram of the unpaired operating method. The blue and red dashed lines indicate the path of asymmetric trains during the transition from the morning peak to afternoon peak and the transition from the afternoon peak to evening peak, respectively.

1.2 不成对方案的开行频率计算

与成对运行不同, 不成对方案的开行频率需分上、下行进行计算^[19]。由于本研究包含了2个时段的2个方向, 为方便描述, 将时段与方向定义为时间。设 S 为时间集合, $S = \{s | s = \text{zup}, \text{zdn}, \text{wup}, \text{wdn}\}$, 分别表示早高峰上行、早高峰下行、晚高峰上行及晚高峰下行, 共4个时间。成对方案以及不成对方案各时间开行频率可计算为

$$f_z = \frac{\max(P_{\text{zup}(i, i+1)}, P_{\text{zdn}(i, i+1)})}{Cm\beta_0}, i \in N, i \neq n \quad (1)$$

$$f_w = \frac{\max(P_{\text{wup}(i, i+1)}, P_{\text{wdn}(i, i+1)})}{Cm\beta_0}, i \in N, i \neq n \quad (2)$$

$$f_s = \frac{\max(P_{s(i, i+1)})}{Cm\beta_0}, i \in N, i \neq n \quad (3)$$

其中, f_z 和 f_w 分别为成对方案早、晚高峰的开行频率, 单位: 对/h; $P_{\text{zup}(i, i+1)}$ 、 $P_{\text{zdn}(i, i+1)}$ 、 $P_{\text{wup}(i, i+1)}$ 及 $P_{\text{wdn}(i, i+1)}$ 分别为各时间 i 车站到 $i+1$ 车站区间的断面客流量, 单位: 人次/h; C 为车辆定员, 单位: 人/veh; m 为列车编组, 单位: veh/列; β_0 为最大满载率; f_s 为 s 时向的开行频率, 单位: 列/h; $P_{s(i, i+1)}$ 为 s 时向 i 车站到 $i+1$ 车站区间的断面客流

量, 单位: 人次/h。

2 模型构建与求解

2.1 基本假设

对模型做以下假设: ① 列车停站方案为站站停, 编组方案固定; ② 乘客均匀到达; ③ 高峰期成对方案的开行频率为线路最大开行频率, 已达到线路通过能力或运用车底数上限; ④ 不对称列车至多停靠1个车站, 以避免过度增加运营组织的复杂度。

2.2 目标函数

不成对方案能够按需匹配各方向的客流需求, 减少车辆走行公里数, 从而节约企业运营成本, 但同时也会增加小客流方向乘客的出行时间, 导致乘客出行时间成本增加。因此, 综合考虑运营企业和出行乘客的利益需求, 设定模型的目标函数1为不成对方案相较成对方案所节约的企业运营成本 C_L 最大, 目标函数2为乘客出行成本增量 C_T 最小, 计算为

$$\max C_L = c_l \left(2(f_z + f_w)l - \left(\sum_{s \in S} f_s l - 2x \sum_{i=k}^{n-1} J_{i, i+1} \right) \right) \quad (4)$$

$$\min C_T = c_l \left(\frac{60}{f_z} \frac{x}{f_z} \sum_{d=k+1}^n \sum_{o=1}^k q_{od}^z + \left(\frac{30}{f_{\text{zdn}}} - \frac{30}{f_z} \right) \sum_{d=o+1}^n \sum_{o=k+1}^n q_{od}^z + \left(\frac{30}{f_{\text{wup}}} - \frac{30}{f_w} \right) \sum_{d=1}^{o-1} \sum_{o=k+1}^n q_{od}^w + \left(\frac{30}{f_{\text{zdn}}} - \frac{30}{f_z} \right) \sum_{d=1}^{o-1} \sum_{o=1}^n q_{od}^z + \left(\frac{30}{f_{\text{wup}}} - \frac{30}{f_w} \right) \sum_{d=o+1}^n \sum_{o=1}^n q_{od}^w \right) \quad (5)$$

其中, k 为不对称列车停靠车站的编号; c_l 为单位车辆的走行公里成本, 单位: 元/(veh·km); $J_{i, i+1}$ 为站 i 与站 $i+1$ 的站间距, 单位: km; c_l 为单位乘

客出行成本, 单位: 元/min; q_{od}^z 和 q_{od}^w 分别为早、晚时段起点站为 o 、终点站为 d 的客流量, 单位: 人次/h。

2.3 约束条件

依据本研究中不成对方案的开行方法及地铁设计规范, 模型需满足以下约束条件.

1) 不对称列车的车底周转约束

为避免列车滞留在车站停车线, 在早高峰向午平峰过渡时段, 下线的不对称列车均应在午平峰向晚高峰过渡时段上线运营, 以保证第2天车底的持续周转, 即早、晚研究时段双向开行频率之差相等, 均为不对称列车数 x ,

$$x = f_{\text{zup}} - f_{\text{zdn}} = f_{\text{wdn}} - f_{\text{wup}} \quad (6)$$

2) 开行频率约束

4个时向的开行频率首先应满足设计规范和线路最大通过能力对于发车间隔和满载率的要求(式(7)至式(10)). 为避免上线列车数增加带来的额外购置车辆费用, 研究时段大客流方向的开行频率应以成对方案为上限(式(11)至式(12)).

$$f_{\min} \leq f_{\text{zup}} = \frac{\max(P_{\text{zup}(i, i+1)})}{Cm\beta_0} \leq f_{\max}, i \in \mathbf{N}, i \neq n \quad (7)$$

$$\max \left[f_{\min}, \frac{\max(P_{\text{zdn}(i, i+1)})}{Cm\beta_0} \right] \leq f_{\text{zdn}} \leq f_{\max}, i \in \mathbf{N}, i \neq n \quad (8)$$

$$\max \left[f_{\min}, \frac{\max(P_{\text{wup}(i, i+1)})}{Cm\beta_0} \right] \leq f_{\text{wup}} \leq f_{\max}, i \in \mathbf{N}, i \neq n \quad (9)$$

$$f_{\min} \leq \frac{\max(P_{\text{wdn}(i, i+1)})}{Cm\beta_0} \leq f_{\text{wdn}} \leq f_{\max}, i \in \mathbf{N}, i \neq n \quad (10)$$

$$f_{\text{zup}} \leq f_z \quad (11)$$

$$f_{\text{wdn}} \leq f_w \quad (12)$$

其中, $f_{\min}$ 为列车最小允许开行频率, 单位: 列/h, 根据地铁运营规范^[20], 列车最大运行间隔不应大于 10 min, 故取 $f_{\min} = 6$ 列/h; $f_{\max}$ 为线路最大通过能力, 与最小发车间隔和最小折返出发间隔时间有关, 一般为 2 min, 故取 $f_{\max} = 30$ 列/h.

大客流方向的不对称列车在中途下线后, 后续车站的开行频率仍需满足发车间隔和满载率要求, 即

$$f_{s,k} \geq \frac{P_{s(k,k+1)}}{Cm\beta_0}, k \in \mathbf{N} \quad (13)$$

其中, $f_{s,k}$ 为 s 时向 k 车站的开行频率, 单位: 列/h.

2.4 模型求解

在实际运营过程中, 1条线路具备停车能力的停车线数量较少, 且停车线一般为—列位和二列

位, 1个车站最多仅能停2列车, 结合本研究不成对开行方案编制模型的约束条件, 模型求解规模较小, 因此, 本研究采用枚举法, 利用 Matlab 求解.

3 算例分析

3.1 算例参数

算例线路有 20 个车站, 站间距均为 1.2 km, 线路全长 $l = 22.8$ km, 采用 B 型车 6 节编组, $C = 240$ 人/veh, $m = 6$ 辆, $\beta_0 = 100\%$, $c_l = 30$ 元/(veh·km)^[21], $c_t = 30$ 元/h.

早时段(09:00—10:00)以及晚时段(16:00—17:00)线路的 OD 客流量及断面客流量如图 2, 早、晚时段的 OD 客流总量分别为 61 428 人次/h 和 59 397 人次/h, 两时段客流方向不平衡系数均为 1.4.

3.2 结果分析

求解共得到 12 个帕累托最优解, 如表 1. 其中, 不对称列车数为 1 列的不成对方案有 5 个; 不对称列车数为 2 列的不成对方案有 7 个. 帕累托最优曲线如图 3.

以下分析不成对方案的企业运营效益和乘客出行效益. 由图 3 可见, 不对称列车数为 2 列的方案整体比 1 列方案节约更多的企业运营成本, 但同时乘客出行成本也会增加; 当不对称列车数相同时, 随着不对称列车停放车站编号的增加, 不成对方案节约的企业运营成本下降, 乘客出行成本增量也下降, 表明不成对方案节约的运营成本越大, 牺牲的乘客利益越多.

进一步分析不成对方案所节约的系统成本. 定义系统成本节约量 C 为企业运营成本节约量 C_L 与乘客出行成本增量 C_T 的差值, 即

$$C = C_L - C_T \quad (4)$$

图 4 为上述 12 个帕累托最优方案的系统成本节约量. 可见, 不对称列车数为 2 列的方案所节约的系统成本更大, 约为不对称列车数为 1 列方案的 2 倍; 当不对称列车数相同时, 随着不对称列车停放车站编号的增加, 系统成本节约量呈增加趋势, 但增量不明显, 这是因为随着不对称列车停放车站编号的增加, 企业运营成本节约量与乘客出行成本增量均呈下降趋势, 且变化量相近.

因此, 建议选择不对称列车数为 2 列的不成对方案, 在基础上运营企业可根据线路条件和实际需

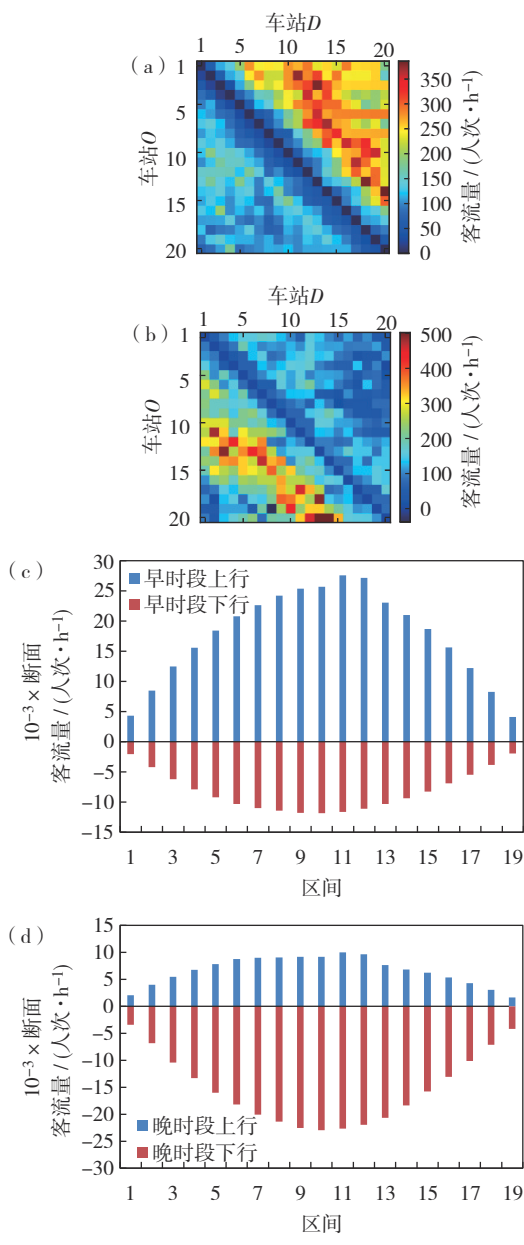


图2 早时段(09:00—10:00)和晚时段(16:00—17:00)的客流数据 (a)、(b)分别为早、晚时段的OD客流量; (c)、(d)分别为早、晚时段的断面客流量

Fig. 2 Passenger flow data for morning (09:00—10:00) and evening (16:00—17:00). (a) and (b) are the OD passenger flows in the morning and evening, respectively. (c) and (d) are the cross-sectional passenger flows in the morning and evening, respectively. The blue and orange square represent upward and downward directions, respectively.

求选择不对称列车的停放车站, 其中, 企业运营成本节约量最大的方案为在 14 站停放 2 列不对称列车.

3.3 不成对方案对乘客出行的影响分析

本研究提出的不成对开行方法会影响末端车站

表1 不成对开行方案求解结果

Table 1 The results of the unpaired operation scheme

方案	4个时向的开行频率/(列·h ⁻¹)	不对称列车数/列	停放位置(车站编号)
成对	20, 20, 16, 16	—	—
不成对	20, 19, 15, 16	1	16, 17, 18, 19, 20
	20, 18, 14, 16	2	14, 15, 16, 17, 18, 19, 20

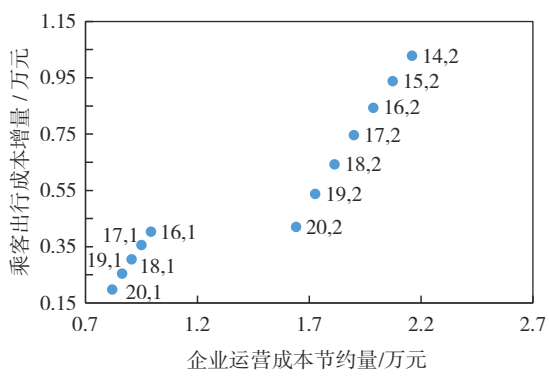


图3 帕累托最优曲线

Fig. 3 Pareto optimal curve.

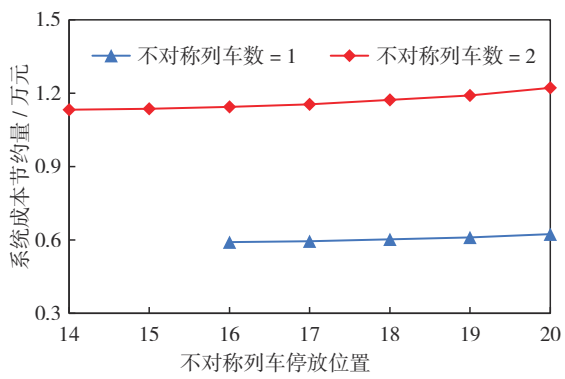


图4 不成对方案的系统成本节约量

Fig. 4 System cost savings of unpaired scheme. The blue and red lines indicate the number of asymmetrical trains is 1 and the number of asymmetrical trains is 2, respectively.

大客流方向乘客及小客流方向乘客的出行. 首先, 对受影响的乘客进行分类, 并分析不对称列车数为 2 列的方案相较成对方案对乘客出行时间和出行体验的影响, 结果如表 2. 可见, 不成对方案对于 ②—⑤类乘客的影响较小, 平均出行时间最大增加 16 s, 对于乘客来说感受不明显, 接受度较高; 而 ①类乘客的平均出行时间增加 3 min, 且需下车换乘, 乘客出行体验变差, 可能会降低乘客满意度^[22], 产生较大的负面影响, 因此, 不成对方案中应尽量减少 ①类乘客占比.

表2 不成对方案对乘客出行的影响

Table 2 Impact of the unpaired scheme on passenger travel

乘客类别	具体描述	对乘客出行的影响
①	早时段大客流方向上,乘坐不对称列车但终点在不对称列车下线后的车站,需下车原地等待下一趟列车的乘客	乘客平均出行时间增加 3 min,出行体验变差
②	早时段大客流方向上,起点位于不对称列车下线后车站的乘客	乘客平均出行时间增加 10 s,出行体验无影响
③	晚时段大客流方向上,起点位于不对称列车上线前车站的乘客	乘客平均出行时间增加 16 s,出行体验无影响
④	早时段小客流方向上的所有乘客	乘客平均出行时间增加 10 s,出行体验无影响
⑤	晚时段小客流方向上的所有乘客	乘客平均出行时间增加 16 s,出行体验无影响

图5为不对称列车停放位置变化时,各类乘客占比的变化。可以看出,①类乘客占比较小,最大为不对称列车停放在14站时占比的3.39%,随着不对称列车停放车站编号的增加,①类乘客占比下降,同样下降的还有②类乘客和③类乘客占比。

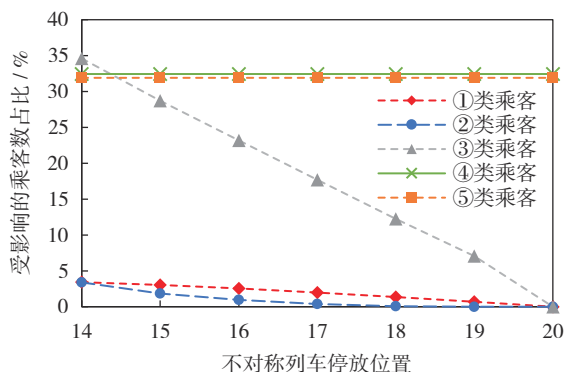


图5 不对称列车停放位置对各类乘客占比的影响

Fig. 5 The effect of asymmetrical train parking locations on the percentage of passengers in each category. The red, blue, grey, green and orange lines indicate category ①, ②, ③, ④ and ⑤ passengers in table 2, respectively.

3.4 不成对方案对线路供需匹配度的提升效果评估

通过输送能力利用率指标评估不成对方案对于线路供需匹配度的改善效果,即

$$\eta_{s,i} = \frac{P_{s(i,i+1)}}{f_s C_m}, i \in N \quad (16)$$

其中, $\eta_{s,i}$ 为 s 时段区间 i 的输送能力利用率. $\eta_{s,i}$ 值越大表明供需匹配度越高,运力资源配置越合理.

以不对称列车数为2列、下线车站为14站的不成对方案为例,其与成对方案各时段、各区间的输送能力利用率如图6.可见,本研究不成对开行方法能够改善2个时段大客流方向末端区间和小客流方向区间的供需匹配度.其中,早、晚时段大客流方向14~19区间输送能力利用率平均提升3.79%、5.20%,最大分别可提升7.20%、9.79%,如图6(a)和(d);小客流方向的区间输送能力利用率平均提升3.15%、4.11%,最大分别可提升4.57%、6.19%,如图6(b)和(c).这是因为本研究不成对开行方法减少了大客流方向后半区间及小客流方向的运力供给.因此,不成对开行方案能够提升线路的供需匹配度,其改善重点为大客流方向上不对称列车下线后的区段及小客流方向区段.

4 结 论

本研究构建了早高峰向午平峰过渡时段、午平峰向晚高峰过渡时段,利用线路停车线存车的不成对开行方案编制模型,通过算例求解验证模型有效,并对不成对方案对于企业运营成本的优化效果及其对于乘客出行、线路供需匹配度的影响进行深入分析,得到以下结论:

1) 利用线路既有停车线开行不成对方案能有效节约企业运营成本,尽管会增加乘客出行成本,但总的来说不成对方案对于乘客出行的影响较小.算例共得到12个帕累托最优解,每天可节约企业运营成本0.82~2.16万元,每年可节约成本300~788万元;方案对于大部分乘客的出行不产生影响或影响较小,乘客平均出行时间最大仅增加16s,乘客感受不明显;仅早时段占比为0~3.39%的乘客受影响较大,乘客平均出行时间增加了3min,出行体验较差,可能会在一定程度上降低乘客满意度.

2) 不成对开行方法减少了大客流方向后半区间及小客流方向的运力供给,因此,不成对开行方案能够改善线路供需匹配度,改善重点为大客流方向上不对称列车下线后的区段及小客流方向区段.以不对称列车数为2列、下线车站为14站的不成对方案为例,早、晚时段大客流方向14~19区间的输送能力利用率平均可提升3.79%、5.20%,小客

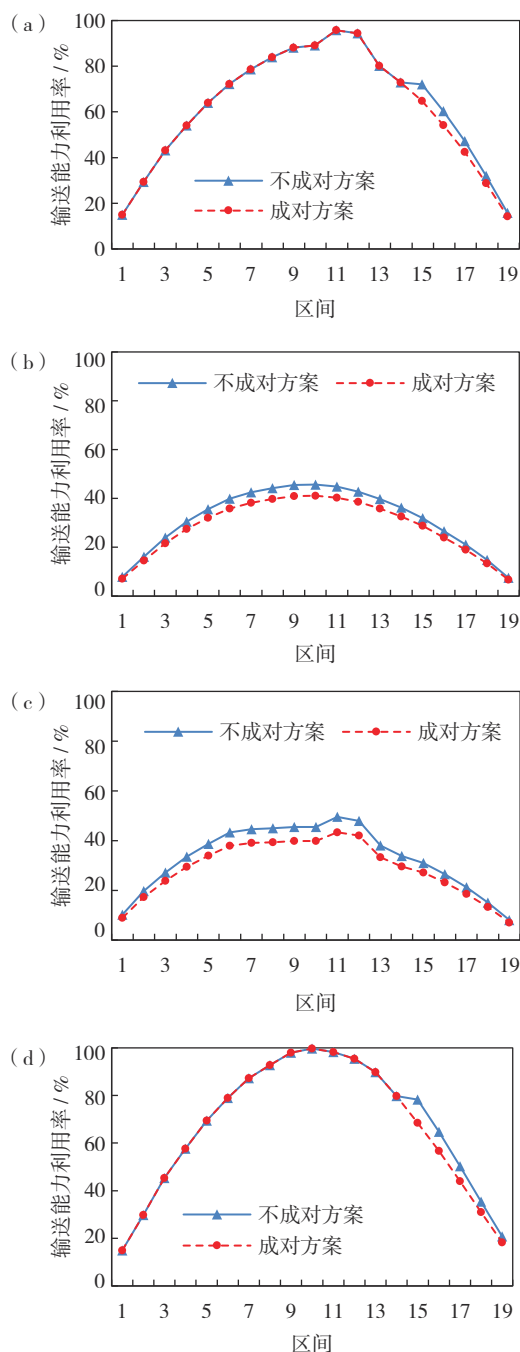


图6 成对方案与不成对方案的区间输送能力利用率
(a)早时段大客流方向(上行); (b)早时段小客流方向(下行); (c)晚时段小客流方向(上行); (d)晚时段大客流方向(下行)

Fig. 6 Capacity utilization between paired and unpaired solutions. (a) is for heavy traffic direction in the morning (upward); (b) is for light traffic direction in the morning (downward); (c) is for light traffic direction in the evening (upward); (d) is for heavy traffic direction in the evening (downward). The blue and red lines indicate unpaired scheme and paired scheme, respectively.

流方向区间的输送能力利用率平均可提升3.15%、4.11%.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71971021)

作者简介: 田佩宁(20120900@bjtu.edu.cn), 北京交通大学博士研究生. 研究方向: 城市轨道交通规划与管理.

引文: 田佩宁, 毛保华, 周琪, 等. 城市轨道交通不成对开行方案研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2023, 40(5): 521-528.

参考文献 / References:

- [1] 田丽君, 于宁, 蔡乌赶. 轨道交通建设对沿线居住区位选择的影响[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 130-139.
TIAN Lijun, YU Ning, CAI Wugan. Impact of rail transit construction on residential location choice [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 130-139. (in Chinese)
- [2] SOHN J. Are commuting patterns a good indicator of urban spatial structure? [J]. Journal of Transport Geography, 2005, 13(4): 306-317.
- [3] 王波. 上海轨道交通早高峰客流拥挤与居民通勤关系分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(7): 75-78.
WANG Bo. Relationship between the rush hour passenger flow congestion and residents commuting in Shanghai rail transit system [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(7): 75-78. (in Chinese)
- [4] SUN Yanshuo, SCHONFELD P M, LU Yi, et al. Redesigning rail transit short-turn operations: case study of line 2 of the Shanghai metro in China [J]. Transportation Research Record, 2016, 2540(1): 46-55.
- [5] CANCA D, BARRENA E, LAPORTE G, et al. A short-turning policy for the management of demand disruptions in rapid transit systems [J]. Annals of Operations Research, 2016, 246(1): 145-166.
- [6] LI Sijie, XU Ruihua, HAN Ke. Demand-oriented train services optimization for a congested urban rail line: integrating short turning and heterogeneous headways [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2019, 15(2): 1459-1486.
- [7] LI Zhengyang, ZHAO Jun, PENG Qiyuan. Train service design in an urban rail transit line incorporating multiple service routes and multiple train compositions [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 123: 102959.
- [8] ALTAZIN E, DAUZÈRE-PÉRÈS S, RAMOND F, et al. Rescheduling through stop-skipping in dense railway systems [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 79: 73-84.

- [9] YANG Anan, WANG Bo, HUANG Jianling, et al. Service replanning in urban rail transit networks: cross-line express trains for reducing the number of passenger transfers and travel time [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102629.
- [10] WU Yinghui, YANG Hai, ZHAO Shuo, et al. Mitigating unfairness in urban rail transit operation: a mixed-integer linear programming approach [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 149: 418-442.
- [11] 王敏, 毛保华, 杨彦强, 等. 考虑均衡性的城市轨道交通线路负荷水平评估研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(1): 98-104, 118.
WANG Min, MAO Baohua, YANG Yanqiang, et al. Line loading evaluation method for urban rail transit considering train loading evenness [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(1): 98-104, 118. (in Chinese)
- [12] 陈福贵. 地铁单向加车小交路方案研究[J]. *都市轨道交通*, 2018, 31(5): 123-129.
CHEN Fugui. On the metro's single direction route scheme [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2018, 31(5): 123-129. (in Chinese)
- [13] 陈雪枫, 郭莉. 城市轨道交通潮汐客流特征及运营策略研究——以深圳地铁3号线为例[C]//品质交通与协同共治——2019年中国城市交通规划年会论文集. 成都, 2019: 1846-1855.
CHEN Xuefeng, GUO Li. Research on the characteristics of tidal passenger flow and operation strategy of urban rail transit: Shenzhen Metro Line 3 as an example [C]// *Quality Transportation and Collaborative Governance - Proceedings of the 2019 China Urban Transportation Planning Annual Conference*. Chengdu: 2019: 1846-1855. (in Chinese)
- [14] 姚宇, 朱晓宁, 康柳江, 等. 城市轨道交通列车时刻表与车底运用整合优化模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(1): 200-206.
YAO Yu, ZHU Xiaoning, KANG Liujiang, et al. An integrated optimization model of train timetabling and rolling stock scheduling for an urban railway line [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(1): 200-206. (in Chinese)
- [15] 陈丽玲. 考虑配线约束的地铁不成对列车开行方案的运行效果研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
CHEN Liling. Impact analysis of metro operations for train routing not in pairs considering storage tracks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [16] 明先俊. 潮汐客流特征下地铁列车不成对运行计划优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
MING Xianjun. Optimization of unpaired timetable of metro trains under asymmetric passenger flow [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [17] MO Pengli, D'ARIANO A, YANG Lixing, et al. An exact method for the integrated optimization of subway lines operation strategies with asymmetric passenger demand and operating costs [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 149: 283-321.
- [18] 王镇波, 沈坚, 李昱澄, 等. 高峰客流方向严重不均衡的城市轨道交通线路扩能方法[J]. *城市轨道交通研究*, 2020, 23(11): 109-113.
WANG Zhenbo, SHEN Jian, LI Yucheng, et al. Transport capacity expansion method of urban rail transit lines with seriously unbalanced directional passenger flow in peak hour [J]. *Urban Mass Transit*, 2020, 23(11): 109-113. (in Chinese)
- [19] 赵兴东. 节能思路在地铁列车运行图编制中的应用[J]. *都市轨道交通*, 2014, 27(6): 36-40.
ZHAO Xingdong. Energy saving ideas for drawing train working diagram [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2014, 27(6): 36-40. (in Chinese)
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通运营指标体系: GB/T 38374—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Operational index system of urban rail transit: GB/T 38374—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [21] 邓连波, 曾强, 高伟, 等. 基于弹性需求的城市轨道交通列车开行方案研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(12): 16-25.
DENG Lianbo, ZENG Qiang, GAO Wei, et al. Research on train plan of urban rail transit with elastic demand [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(12): 16-25. (in Chinese)
- [22] 马羽, 王卓群, 温少表, 等. 基于乘客均衡候车的轨道交通协同限流建模[J]. *深圳大学学报理工版*, 2017, 34(5): 537-543.
MA Yu, WANG Zhuoqun, WEN Shaobiao, et al. Modeling of flow co-control among multi-stations based on passenger equilibrium waiting for urban rail transit [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2017, 34(5): 537-543. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】