

【交通物流 / Transportation Logistics】

基于时间成本的城轨列车跨线开行方案建模

罗钦¹, 林彬¹, 顾孟琪², 杨良², 张晓春²

- 1) 深圳技术大学城市交通与物流学院, 广东省高校轨道交通智慧运维工程技术开发中心, 广东深圳 518118;
2) 深圳市城市轨道交通规划设计研究中心股份有限公司, 广东深圳 518057

摘要: 城市轨道交通跨线运营不仅可以满足多元化的乘客出行需求, 提升乘客出行效率, 还可以拉近市郊与市区核心地段在时间与空间上的距离. 在考虑跨线乘客的列车选择概率基础上, 分析不同类别的乘客出行时间成本, 构建以乘客总出行时间成本最小为目标的跨线运营优化模型, 并采用遗传算法进行模型求解. 以S市地铁I号线跨入II号线的方案为例, 验证模型的可行性, 求解得到不同列车满载率下的最优行车密度, 为城市轨道交通路网实现跨线运营组织提供参考依据.

关键词: 城市轨道交通; 运营组织; 跨线运营; 行车间隔; 换乘客流; 出行时间; 遗传算法

中图分类号: U292.4; U239.5 文献标志码: A doi: 10.3724/SP.J.1249.2022.05600

Modeling of cross line operation of urban rail transit trains based on passenger travel time

LUO Qin¹, LIN Bin¹, GU Mengqi², YANG Liang², and ZHANG Xiaochun²

- 1) College of Urban Transportation and Logistics, Shenzhen Technology University, Guangdong Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology Development Center, Shenzhen 518118, Guangdong Province, P. R. China
2) Shenzhen Urban Transport Planning Center Co. Ltd., Shenzhen 518057, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Cross line operation mode of urban rail transit can not only meet diversified travel needs of passengers and improve efficiency of passenger travel, but also shorten the time and space distance between suburban and urban core areas. In this paper, the travel time cost of different types of passengers is analyzed on the basis of considering the train selection probability for passengers to choose cross train or transfer. An optimization model of cross line operation organization is established with the objective function of minimizing the total travel time cost of passengers. The model is solved by genetic algorithm. The scheme of metro Line I of city S crossing into Line II is used as an example to verify the feasibility of the model, and the optimal train density under different train load rates is obtained. This study can provide a reference for the cross line operation organization of urban rail transit.

Key words: urban rail transit; operation organization; cross line operation; train interval; transfer ridership; travel time; genetic algorithm

随着中国城市化的不断发展与城市轨道交通的网络化建设运营, 市民的出行需求量较以往有大幅度增长, 城轨交通的客运压力逐渐增大. 从现有运营模式来看, 中国城轨系统普遍采用单线列车运营模式, 包括一些多样化的运营组织方案, 如大小交

路和快慢车等^[1], 各条线路间的关联性较低, 在运营模式多样化层面与东京和纽约等城市尚存在一定差距. 在城市轨道交通发展初期, 线路覆盖范围和运输能力有限, 乘客出行路径较为固定, 现有运营模式尚能满足大多数乘客的出行需求; 随着轨道交

Received: 2021-04-28; Accepted: 2021-10-08; Online (CNKI): 2022-04-13

Foundation: National Social Science Foundation of China (20BGL301)

Corresponding author: Professor ZHANG Xiaochun. E-mail: zxc@sutpc.com

Citation: LUO Qin, LIN Bin, GU Mengqi, et al. Modeling of cross line operation of urban rail transit trains based on passenger travel time [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(5): 600-607. (in Chinese)



通迈入网络化运营阶段后, 现有运营模式已无法满足多样化的客流需求. 如何通过合理及有效的新型运营组织模式, 充分发挥轨道交通线网的潜能, 提高线网的运输能力和运输效率, 成为当前我国城市轨道交通面临的一个重要问题.

跨线运营模式在国家铁路范围内应用广泛, 但是在城市轨道交通领域运用较少. 近年来, 我国一些大城市已经开始对成网条件下的列车跨线运营组织模式进行相关探索和规划建设. 王春^[2]根据中国广州地铁现有的列车资源共享信息, 分析开行跨线运营模式的实际可行性. 徐成永等^[3]提出市域轨道线与中心城轨网贯通运营、向中心城延伸、跨线直通运行与延伸相结合3种衔接模式. 汪波等^[4]分析轨道交通网络跨线运营组织模式的理念、目标及基本条件, 为我国轨道交通采用新运营模式提出重要建议. 在跨线列车开行计划层面, 吕晓东^[5]研究了轨道交通网络化运营后各种列车交路的概念和特征, 建立列车交路优化方案模型. 杨笑^[6]以运营成本和乘客总出行时间最小为优化目标, 构建跨线运营条件下列车开行方案的优化模型. 胡兴丽等^[7]分析跨线运营组织模式下多交路的通过能力, 提出本线列车结合跨线列车的多种列车交路开行方式. 张伟^[8]通过分析国内外互联互通现状, 总结跨线运营组织模式的各项技术标准和要求. YANG等^[9]以减少换乘次数和提高列车运行速度为目标, 在不增加运营成本与投资的前提下, 优化了跨线列车和本线路列车的发车间隔、停车方式及运行交路. NOVALES等^[10-12]介绍城市轨道交通与传统铁路间实行跨线运营组织模式的现状.

目前对城市轨道交通跨线运营组织模式尚没有系统性研究, 且较少考虑乘客在跨线列车和本线列车之间的选择概率问题, 对于城市轨道交通跨线运营组织及开行计划的相关理论和方法需进一步完善. 本研究对城市轨道交通跨线运营组织模式进行讨论分析, 从优化乘客出行时间成本的角度研究跨线运营组织方案.

1 跨线运营组织模式

1.1 跨线运营组织

跨线运营组织是指城市轨道交通线网中将不同线路以联络线进行衔接, 列车可通过联络线从原线进入到其他线路运行的一种运营组织模式^[13]. 跨线

运营组织这一新运营模式不同于单一运营组织, 实施跨线运营组织模式对乘客和运营企业均有利弊. 跨线乘客可以搭乘跨线列车直达出行, 从而减少换乘站的走行时间及额外换乘等待时间, 当发生运营故障时, 通过联络线的跨线列车运营调整可实现更为灵活的临时交路计划, 最大程度减少延误, 降低对乘客的影响. 然而, 非跨线段乘客可能因列车行车密度减少而增加出行时间, 同时, 跨线列车的占比大小决定了配备的车底数量, 并且跨线运营组织的交路复杂, 客流和票款清分难度也将增加.

以典型情况为例, 列车从A线跨入B线的形式属于“十字形”线路(图1), 本研究假设在两条线路间共开行有3种列车交路, 分别为 $S_{A1}-S_{An}$ 、 $S_{B1}-S_{Bn}$ 及 $S_{Ax}-S_{By}$, 前两种交路代表A、B本线列车, 最后一种是跨线列车的行车交路, 每种交路对应的列车开行对数为 n_A 、 n_B 及 n_C (单位: 对/h). 在配备折返线的前提下, 跨线列车可以根据起讫点(origin-destination, OD)客流的实际情况实现部分贯通, 也可以完全贯通. 对于跨线客流, 乘客可自行选择第1列到达列车并在换乘站换乘后续列车, 也可直接等待跨线列车.

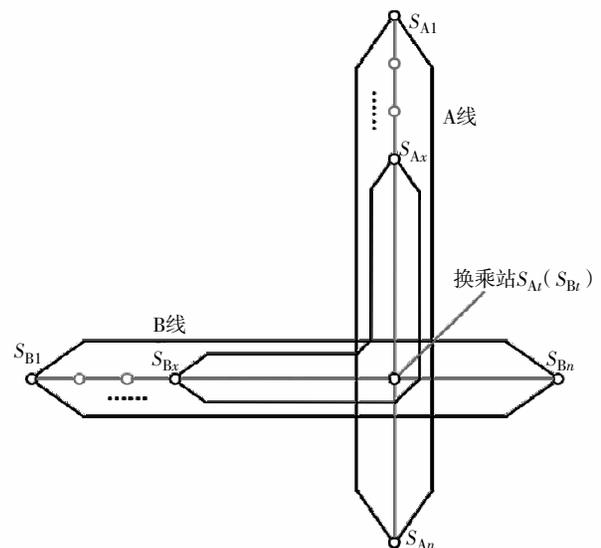


图1 列车在换乘站跨线运营示意

Fig. 1 Schematic diagram of train cross line operation at transfer station.

1.2 跨线运营组织形式

跨线列车进入B线的跨入形式有两种^[14], 一种是替代式, 即在保持跨线区间内每小时列车开行对数不变的条件下, 跨线列车替代原有部分本线列车的运行形式, 由于非跨线区间受跨线运营组织模式

的影响行车密度降低, 本线列车的行车间隔增大, 会造成一定的运能损失, 因此, 可替代的跨线列车对数受到非跨线区间的最大断面客流量和本线列车行车密度的制约; 另一种是插入式, 即在保持跨线区间内每小时本线列车开行对数不变的条件下, 在本线列车之间插入由 A 线驶来的跨线列车. 由于本线列车的行车密度没有受到跨线运营组织模式的干扰, 插入式对非跨线区间内乘客的影响比替代式更小, 且跨线区间内每小时列车开行对数的增加对该区域乘客的出行便利度具有显著提升. 限于篇幅, 本研究主要讨论插入式跨线运营模式.

本线列车中能够插入的跨线列车应不超过其最大值, 即

$$N_{C,max} \leq \left\lfloor \frac{\frac{60}{n_B} - T}{T - t_f} - 1 \right\rfloor n_B \quad (1)$$

其中, $N_{C,max}$ 为能插入的跨线列车最大开行对数(单位: 对/h); t_f 为列车最小追踪间隔(单位: min); T 为插入跨线列车所需的最小行车间隔(单位: min).

2 跨线运营组织方案优化模型

开行跨线运营组织模式的本质是减少跨线乘客的换乘不便, 提高乘客的出行便捷程度, 在讨论跨线运营组织方案中, 以外围组团直达至客流密集集散点为目标, 选取实行跨线运营组织模式的线路.

2.1 目标函数

城轨运营主要以乘客总出行成本之和最小为目标, 总出行成本包括经济成本和时间成本. 考虑到我国城市轨道交通系统中乘客在固定 OD 间的出行票价一般相同, 因此, 可认为时间是乘客出行成本的唯一要素. 地铁列车在同一区间的列车运行标尺基本相同, 即某个时段内列车在区间运行时分基本相同, 则乘客的出行时间成本主要取决于乘客的候车时间成本, 以及乘客在换乘站的换乘时间成本.

令 t_w 表示乘客在换乘站的换乘走行时间成本, 该取值可适当放大, 作为乘客的换乘惩罚. 对于乘客的候车时间成本, 本研究确定的行车间隔满足小时最大断面客流需求, 不考虑该时段内部分车次容量限制导致的留乘额外候车时间. 在列车行车间隔较短的情况下, 乘客的平均等待时间趋于行车间隔的一半. 以下分析各情况下的乘客出行时间成本.

在跨线运营模式中, 除本线客流和跨线客流直

达外, 还存在从其他线路进入、到达其他线路、或途径的客流, 将该类客流归入本线客流和跨线客流中统一分析. 由于本、跨线列车运行于不同的交路, 因此, 在分析 OD 客流时, 根据列车开行交路的不同将线路细化为 6 类车站区间: ① A 线跨线方向非跨线区间, $S_{A1}-S_{A2}$; ② A 线跨线区间, $S_{A3}-S_{A4}$; ③ A 线非跨线方向区间, $S_{A5}-S_{A6}$; ④ B 线跨线方向非跨线区间, $S_{B1}-S_{B2}$; ⑤ B 线跨线区间, $S_{B3}-S_{B4}$; ⑥ B 线非跨线方向区间, $S_{B5}-S_{B6}$. 其中, 区间①—③与④—⑥的内部客流均为本线进出客流, 路径唯一, 其余区间之间的客流则需要换乘到达, 路径可能不唯一. 针对乘客选择不唯一的区间 OD, 如区间②—⑤, 乘客既可选择跨线列车直达, 也可选择在换乘站换乘, 要考虑列车分担率的问题. 该出行模式可通过基于 logit 的选择行为模型分析^[15]. 乘客在网络内出行的列车选择行为实质是乘客对两种列车的选择概率, 而选择决策的依据是每种列车的随机效用值, 乘客出行选择列车方案的随机效用函数为

$$U_k = V_k + \varepsilon_k \quad (2)$$

$$V_k = \alpha t_k + \beta c_k \quad (3)$$

其中, U_k 为第 k 种列车的随机效用函数; V_k 为第 k 种列车的确定效用函数, 即固定效益; ε_k 为第 k 种列车的随机误差项, 其差异性较小对列车选择可忽略; t_k 为第 k 种列车的旅行时间; c_k 为第 k 种列车的费用消耗, 虽然出行路径不唯一, 但区间 OD 及列车里程数相同, 故 c_k 相同, 对列车选择无影响; α 和 β 为参数, 可由客流调查获得.

第 k 种列车的选择概率可用 logit 模型表示, 本研究选取 $k = 2$, 即为跨线直达或中途换乘. 因此, 对于存在不唯一的路径选择, 2 种乘客选择跨线列车直达的分担率分别为 $\theta_1 = \frac{e^{\alpha t_1}}{e^{\alpha t_1} + e^{\alpha t_2}}$ 及 $\theta_2 = \frac{e^{\alpha t_2}}{e^{\alpha t_1} + e^{\alpha t_2}} = 1 - \theta_1$.

由此, 针对 6 类车站区间的乘客出行需求, 可根据各段的列车开行对数 n_A 、 n_B 、 n_C 以及 θ_1 、 θ_2 计算得到各车站区间乘客的出行时间成本, 见表 1.

因此, 跨线运营组织模型的目标是单位时间内使乘客出行时间成本的总和最小, 其目标函数为

$$\min F = \sum_{i,j=1}^6 P_{ij} T_{ij} \quad (4)$$

其中, P_{ij} 为从车站区间 i 到 j 的客流量; T_{ij} 为车站区间 i 到 j 的乘客出行时间成本, 取值见表 1.

表1 各车站区间乘客的出行时间成本

Table 1 Travel time cost of passengers between stations

min

区间	①	②	③	④	⑤	⑥
①	$\frac{60}{n_A} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_A} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_A} \frac{1}{2}$	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\theta_1 \left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_C} \frac{1}{2}\right) + \theta_2 \left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$
②	$\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2}$	$\left(\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\theta_1 \left(\frac{60}{n_C} \frac{1}{2}\right) + \theta_2 \left(\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\theta_1 \left(\frac{60}{n_C} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + \theta_2 \left(\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$
③	$\frac{60}{n_A} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_A} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_A} \frac{1}{2}$	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$
④	$\left(\frac{60}{n_B} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_A} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\left(\frac{60}{n_B} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\left(\frac{60}{n_B} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_A} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\frac{60}{n_B} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_B} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_B} \frac{1}{2}$
⑤	$\theta_1 \left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_C} \frac{1}{2}\right) + \theta_2 \left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\theta_1 \left(\frac{60}{n_C} \frac{1}{2}\right) + \theta_2 \left(\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_B + n_C} \frac{1}{2}$
⑥	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\theta_1 \left(\frac{60}{n_C} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + \theta_2 \left(\frac{60}{n_A + n_C} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\left(\frac{60}{n_A} \frac{1}{2} + \frac{60}{n_B} \frac{1}{2}\right) + t_w$	$\frac{60}{n_B} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_B} \frac{1}{2}$	$\frac{60}{n_B} \frac{1}{2}$

2.2 约束条件

模型的约束条件需要满足列车开行间隔要求、列车满载率、行车密度及线路通过能力要求。

1) 开行间隔要求. 列车从A线跨入B线, 跨线乘客具有中途在换乘站换乘或直接搭乘跨线列车两种换乘方式. 前者的出行时间成本包括等待A线本线列车的时间、换乘站走行时间和等待B线本线列车的时间, 即

$$T_0 = \frac{1}{2} t_A + t_w + \frac{1}{2} t_B \tag{5}$$

其中, T_0 为跨线乘客搭乘本线列车的等车时间(单位: min); t_A 为A线本线列车的行车间隔(单位: min); t_B 为B线本线列车的行车间隔(单位: min);

t_w 为跨线乘客在换乘站的走行时间(单位: min). 直接搭乘跨线列车的出行时间成本包括A线等待跨线列车的时间, 为

$$T_N = \frac{1}{2} t_C \tag{6}$$

其中, T_N 为跨线乘客搭乘跨线列车的等车时间(单位: min); t_C 为跨线列车的行车间隔(单位: min);

乘客选择本线列车或跨线列车出行决策取决于两种方式的等车时间差, 即

$$\Delta T = T_0 - T_N = \frac{1}{2} t_A + t_w + \frac{1}{2} t_B - \frac{1}{2} t_C \tag{7}$$

当 $\Delta T > 0$ 表明乘客等待跨线列车的时间小于等待本线列车的时间, 可以开行跨线运营组织,

ΔT 越大, 开行跨线列车对跨线乘客越有利; 当 $\Delta T < 0$ 时, 乘客选择换乘的出行方式反而节省时间, 则没有必要开行跨线运营组织, ΔT 越小, 开行跨线列车对跨线乘客越不利.

因此, 列车开行间隔要求的约束条件可表示为

$$\Delta T = \frac{1}{2}t_A + t_w + \frac{1}{2}t_B - \frac{1}{2}t_C > 0 \Rightarrow \quad (8)$$

$$\frac{30}{n_A} + t_w + \frac{30}{n_B} - \frac{30}{n_C} > 0$$

2) 列车满载率. 开行跨线运营组织模式后的行车密度须尽可能满足线路最大断面客流的需求, 即

$$\rho_{\min} \leq \frac{P_{s \max}^{(F)}}{n_s G_s C_s} \leq \rho_{\max}, \quad s \in A, B \quad (9)$$

$$\rho_{\min} \leq \frac{P_{s \max}^{(K)}}{n_s G_s C_s + n_c G_c C_c} \leq \rho_{\max}, \quad s \in A, B \quad (10)$$

其中, ρ_{\min} 和 ρ_{\max} 为列车最小和最大满载率; $P_{s \max}^{(F)}$ 为线路非跨线段区间内上下行最大断面客流量; $P_{s \max}^{(K)}$ 为线路跨线段区间内上下行最大断面客流量; G_s 为 s 线列车的编组数, $s \in A, B$; C_s 为 s 线本线列车每节车厢的定员人数; G_c 为跨线段列车的编组数; C_c 为跨线段列车每节车厢的定员数.

3) 行车密度. 跨线运营组织模式本线列车中能够插入的跨线列车应不超过其最大值, 即

$$N_{C \max} \leq \left\lfloor \frac{\frac{60}{n_B} - T}{T - t_f} - 1 \right\rfloor n_B \quad (11)$$

4) 线路通过能力. 列车的行车密度不能大于线路的最大通过能力, 即

$$n_A + n_C \leq N_{A \max} \quad (12)$$

$$n_B + n_C \leq N_{B \max} \quad (13)$$

其中, $N_{A \max}$ 和 $N_{B \max}$ 为 A 线和 B 线的设计最大通过能力.

2.3 算法设计

本研究建立的跨线运营组织模式下基于乘客总出行时间成本最低的列车行车密度目标优化问题, 属于典型的 NP 难 (non-deterministic polynomial-time hard, NP-hard) 问题. 遗传算法具有方便及高效的优点, 且其全局搜索能力强, 不易陷入局部最优解, 因此, 可计算一些非线性目标函数优化问题或组合优化问题. 本研究采用遗传算法对模型进行求解, 具体步骤如下.

步骤 1 设置迭代次数 k , 初始种群 n_0 , 交叉概

率 p_1 及变异概率 p_2 ;

步骤 2 遗传算法中染色体用来表示列车开行对数 n_A 、 n_B 及 n_C , 染色体的编码采用实数编码, 随机产生初始种群 n_0 , 作为算法迭代的开始;

步骤 3 设计适应度函数, 将目标函数作为算法最终的适应度函数;

步骤 4 在当代种群中, 选择 2 个后代个体根据 p_1 进行交叉操作, 然后选择 1 个后代个体根据 p_2 进行变异操作, 并保证种群数量维持 n_0 ;

步骤 5 判断个体最优解是否大于当前最优解, 若个体最优解大于当前最优解则将最优解更新, 并将种群规模更新; 否则保持最优解不变;

步骤 6 重复上述步骤 2 至步骤 5;

步骤 7 当算法迭代次数达到 k 时, 输出最优解, 算法终止.

3 案例分析

3.1 模型输入

本研究以 S 市地铁的两条线路 (简称为 I 号线和 II 号线) 为例进行案例分析, I 号线和 II 号线在换乘站 S_{1i} (S_{1ii}) 实现相交换乘, 且在建设上具备过轨跨线运营条件, 可选做跨线运营模式的研究对象. 假设 I 号线最大断面客流量为 50 130 人/h, 该区间位于跨线列车范围内, 非跨线区间的最大断面客流量为 13 164 人/h; II 号线的最大断面客流量为 46 911 人/h, 该区间位于跨线区间内, 非跨线区间的最大断面客流量为 40 586 人/h. I 号线和 II 号线的定员人数分别为 2 144 和 1 708 人/列, 超员人数分别为 3 005 人/列和 3 770 人/列. 表 2 为 I 号线和 II 号线的早高峰预测换乘客流量.

对于采用跨线运营组织的线路, 首先要满足各线路本线的客流需求, 在此基础上拟定详细的跨线

表 2 I 号线和 II 号线预测早高峰换乘客流量

Table 2 Forecast of passenger in morning rush hour for

Line I and Line II

单位: 人次

跨出	跨入				合计	
	I 号线		II 号线			
	上行	下行	上行	下行		
I 号线	上行	0	0	474	230	704
	下行	0	0	1 293	8 126	9 419
II 号线	上行	1 888	280	0	0	2 168
	下行	305	576	0	0	881
合计	2 193	856	1 767	8 356	13 171	

交路, 满足主要跨线客流的同时控制列车周转时间, 以外围组团快速直达重要枢纽和中心为目标确定跨线交路方案. 因此, 基于车站过轨运营的 I 号线和 II 号线跨线运营组织模式拟开行 3 种列车交路方案(图 2), 可实现外围组团乘客与各交通枢纽等客流集散点乘客的互通直达. 模型参数中设定乘客换乘走行时间 $t_w = 3 \text{ min}$, I 号线和 II 号线的列车设计最大通过能力为 30 对/h, 列车满载率按照最

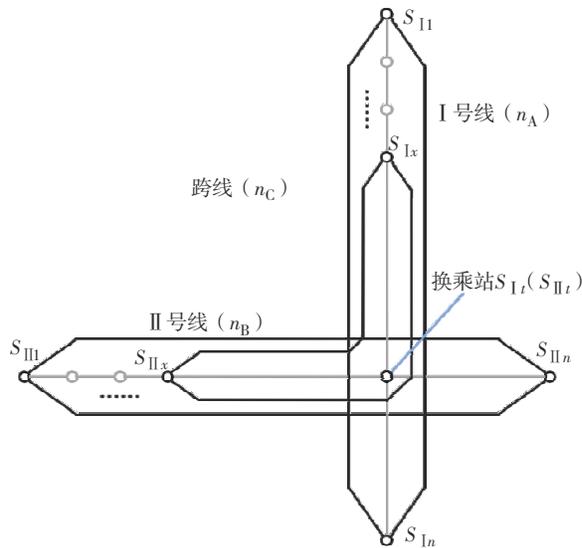


图2 I 号线和 II 号线跨线运营线路示意

Fig. 2 (Color online) Schematic diagram of cross line operation of Line I and Line II.

大(超员荷载)、定员和最小(座客荷载)分别取值为 1.76、1.00 和 0.20, $\alpha = -0.3043$.

3.2 结果分析

设 ρ_1 和 ρ_2 分别 I 号线和 II 号线列车最大满载率, 利用 Matlab 编写遗传算法求解, 结果分析如下.

3.2.1 ρ_1 取不同值, $\rho_2 = 1.0$

当 II 号线列车和跨线列车的最大载客量为定员人数(最大满载率限制为 $\rho_2 = 1.0$)时, 随着 ρ_1 取值不同, 各交路的行车密度优化结果如表 3.

1) 若 II 号线本线列车和跨线列车的最大载客量为定员人数, 当 $\rho_1 \leq 0.7$ 时模型无解. 当所有交路列车的行车密度在最优解范围内时, I 号线本线列车行车密度不低于 18 对/h, II 号线本线列车行车密度均为 24 对/h, 跨线列车行车密度均为 6 对/h, I 号线跨线段内总的行车密度不小于 24 对/h, II 号线跨线段内总的行车密度均为 30 对/h.

2) II 号线本线列车行车密度受 II 号线非跨线段的影响, 列车最小开行对数为 24 对/h, 导致跨线列车的最大开行对数仅为 6 对/h. 同时, II 号线跨线段内总的行车密度达到线路通过能力上限, 当 $\rho_1 = 0.8$ 时, I 号线跨线段内总的行车密度也达到线路最大通过能力, 此时跨线段内的列车行车间隔均压缩至最短时间, 线网内的客运服务作业最繁忙; 当 $\rho_1 \geq 1.1$ 时, 模型优化结果保持不变.

表3 ρ_1 取不同值, $\rho_2 = 1.0$ 时各交路行车密度最优解

Table 3 The optimal solution of traffic density of each route when ρ_1 is different and $\rho_2 = 1.0$

ρ_1	I 号线本线列车 行车密度/(对·h ⁻¹)	II 号线本线列车行 车密度/(对·h ⁻¹)	跨线列车行车密 度/(对·h ⁻¹)	I 号线跨线段内总的行车 密度/(对·h ⁻¹)	II 号线跨线段内总的行车 密度/(对·h ⁻¹)
0.70	—	—	—	—	—
0.80	24	24	6	30	30
0.90	22	24	6	28	30
1.00 ¹⁾	19	24	6	25	30
1.10	18	24	6	24	30
1.76	18	24	6	24	30

¹⁾ 定员载荷.

3.2.2 ρ_2 取不同值, $\rho_1 = 1.0$

当 I 号线列车和跨线列车的最大载客量为定员人数($\rho_1 = 1.0$)时, 随着 ρ_2 的取值不同, 各交路行车密度优化结果表 4.

1) 若 I 号线本线列车和跨线列车的最大载客量为定员人数, 当 $\rho_2 < 1.0$ 时模型无解, 说明 II 号线本线列车在早高峰小时内至少为定员载荷状态.

当所有交路列车的行车密度在最优解范围内时, I 号线本线列车行车密度不低于 18 对/h, II 号线本线列车行车密度不低于 20 对/h, 跨线列车行车密度不低于 6 对/h, I 号线跨线段内总的行车密度不小于 25 对/h, II 号线跨线段内总的行车密度不小于 28 对/h;

2) I 号线和 II 号线本线列车行车密度随 ρ_2 的

表4 ρ_2 取不同值, $\rho_1 = 1.0$ 时各交路行车密度最优解Table 4 The optimal solution of traffic density of each route when ρ_2 is different and $\rho_1 = 1.0$

ρ_2	I 号线本线列车行车密度/(对·h ⁻¹)	II 号线本线列车行车密度/(对·h ⁻¹)	跨线列车行车密度/(对·h ⁻¹)	I 号线跨线段内总的行车密度/(对·h ⁻¹)	II 号线跨线段内总的行车密度/(对·h ⁻¹)
0.90	—	—	—	—	—
1.00 ¹⁾	19	24	6	25	30
1.10	18	22	8	26	30
1.20	18	20	8	26	28
1.76 ²⁾	18	20	8	26	28

1) 定员载荷; 2) 超员载荷.

增大逐渐减少, 跨线列车行车密度增加. 当 $\rho_2 \geq 1.2$ 时, 虽然 II 号线本线列车行车密度在保证约束条件的前提下还可以继续减少, 但此时已经完全能够满足各交路客流需求, 因此, 当 II 号线最大满载率再增加时, 模型优化结果保持不变.

表5 最大满载率相同时的各交路行车密度最优解

Table 5 Optimal solution of traffic density for each route with the same maximum load factor

$\rho_1 = \rho_2$	I 号线本线列车行车密度/(对·h ⁻¹)	II 号线本线列车行车密度/(对·h ⁻¹)	跨线列车行车密度/(对·h ⁻¹)	I 号线跨线段内总的行车密度/(对·h ⁻¹)	II 号线跨线段内总的行车密度/(对·h ⁻¹)
0.20 ¹⁾	—	—	—	—	—
1.00 ²⁾	19	24	6	25	30
1.76 ³⁾	16	20	8	24	28

1) 座客载荷; 2) 定员载荷; 3) 超员载荷.

根据表5计算结果可知, 在列车最大满载率的情况下, 早高峰小时内 I 号线本线列车、II 号线本线列车及跨线列车的行车密度可选取为 16、20 及 8

3.2.3 最大满载率取相同值

当本线列车和跨线列车的最大满载率取相同值, 即列车最大满载率 0.20、1.00 及 1.76 分别对应座客、定员及超员载荷情况下, 目标函数最优解的行车密度见表 5.

表6 早高峰时段列车行车密度和行车间隔

Table 6 Train density and headway in morning rush hours

高峰时段	高峰小时系数	行车密度/(对·h ⁻¹)			行车间隔/min		
		I 号线	II 号线	跨线	I 号线	II 号线	跨线
06:30—07:30	0.60	11	12	5	5.45	5.00	12.00
07:30—08:30	1.00	16	20	8	3.75	3.00	7.50
08:30—09:30	0.83	15	17	7	4.00	3.52	8.57

本例中的计算结果是基于表2假设的客流条件得出的. 当客流发生变化时, 将根据列车满载率约束判断开行跨线运营方案的可行性, 在满足条件的情况下, 可按照案例分析中的步骤重新确定各交路列车的行车密度及间隔.

结 语

跨线运营组织模式已经在国内外众多城市中得到运用, 并已取得良好的社会效益和经济效益, 其一方面可减少乘客在换乘站的走行时间, 提高全网

路直达性, 满足乘客多样化的出行需求; 另一方面能够有效降低列车运输能力的浪费, 并充分发挥中心城区的经济辐射作用, 拉近市区核心地段与市域卫星城镇在时间和空间上的距离. 但跨线运营模式也增加了实际列车运行组织的实施难度. 本研究根据跨线列车开行交路将线路细化为 6 类车站区间, 计算各车站区间对中的乘客出行成本, 并以乘客出行时间成本为目标函数、以列车开行间隔和列车满载率等为约束条件建立跨线运营组织优化模型. 以 S 市地铁 I 号线跨入 II 号线的方案为例, 验证模型的可行性. 但本研究中仅针对单一的跨线运营模式

进行建模分析, 没有结合如快慢车及大小交路等其他运输组织方案, 未来将基于全网协同运行的轨道交通复杂网络, 研究多种列车开行方案相结合的运营组织优化方法和实施问题.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(20BGL301)

作者简介: 罗钦(1982—), 深圳技术大学教授. 研究方向: 轨道交通运营管理. E-mail: luoqin@sztu.edu.cn

引文: 罗钦, 林彬, 顾孟琪, 等. 基于时间成本的城轨列车跨线开行方案建模[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(5): 600-607.

参考文献 / References:

- [1] 杨安安, 汪波, 陈艳艳, 等. 我国城市轨道交通多模式运营研究[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(6): 99-103.
YANG An-an, WANG Bo, CHEN Yanyan, et al. Multi-mode operation for urban rail transit in China [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(6): 99-103. (in Chinese)
- [2] 王春. 广州地铁14号线与21号线跨线运营的信号系统方案[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(增刊1): 36-38.
WANG Chun. Signal system for the cross-line operation of Guangzhou metro line 14 and line 21 [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(Suppl. 1): 36-38. (in Chinese)
- [3] 徐成永, 李刚. 北京市域轨道线与中心城轨网衔接模式研究[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(5): 8-12.
XU Chengyong, LI Gang. The standards for connectivity between Beijing's regional rail lines and central urban rail networks in the city [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 8-12. (in Chinese)
- [4] 汪波, 禹丹丹, 李得伟. 东京地铁运营组织分析[J]. 都市快轨交通, 2012, 25(1): 121-125.
WANG Bo, YU Dandan, LI Dewei. Analysis on operation organization of Tokyo metro [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(1): 121-125. (in Chinese)
- [5] 吕晓东. 城市轨道交通列车运行交路问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 11-36.
LÜ Xiaodong. Study on train routing of urban rail transit [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 11-36. (in Chinese)
- [6] 杨笑. 跨线运营条件下城市轨道交通列车开行方案优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020: 21-60.
YANG Xiao. Study on optimization of train planning of urban rail transit under the through operation mode [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020: 21-60. (in Chinese)
- [7] 胡兴丽, 熊慧茹, 邹雄. 基于多交路运行的同种制式轨道交通跨线组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(1): 111-115.
HU Xingli, XIONG Huiru, ZOU Xiong. A study on the cross-line traffic organization of the same-type rail transit based on multi-route operation [J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(1): 111-115. (in Chinese)
- [8] 张伟. 济南轨道交通互联互通研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
ZHANG Wei. Study on the operation of Jinan urban rail transit [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [9] YANG Yanan, WANG Bo, HUANG Jialing, 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] NOVALES M, ORRO A, BUGARIN M R. Madrid tram-train feasibility study conclusions [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2003, 217(1): 1-10.
- [11] NOVALES M, ORRO A, BUGARIN M R. The tram-train: state of the art [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2002, 216(1): 1-13.
- [12] NOVALES M, ORRO A, BUGARIN M R. The tram-train: Spanish application [M]. Southampton, UK: WIT Press, 2002.
- [13] 陈兴劫, 杨昌休, 李航. 城市轨道交通跨线运营的可行性探讨[J]. 智能城市, 2016, 2(4): 256-257.
CHEN Xingjie, YANG Changxiu, LI Hang. Discussion on feasibility of urban rail transit cross line operation [J]. Intelligent City, 2016, 2(4): 256-257. (in Chinese)
- [14] 邓京维. 城市轨道交通快慢车与跨线运行组织技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
DENG Jingwei. Study on operation organization of the express/local train and joint operation in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [15] 刘建荣, 郝小妮. 基于随机系数Logit模型的市内出行方式选择行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(5): 108-113.
LIU Jianrong, HAO Xiaoni. Travel mode choice in city based on random parameters logit model [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(5): 108-113. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】

<http://journal.szu.edu.cn>