

市域快速轨道交通线路快慢车停站方案优化研究^{*}

郭靖凡

(广州地铁集团有限公司, 510310, 广州)

摘要 [目的] 为了最大限度缩短乘客出行时间,降低企业运营成本,需寻求两者博弈的平衡点。应基于乘客出行成本与企业运营成本,对市域快速轨道交通线路快慢车停站方案进行系统性研究。[方法] 基于市域快速轨道交通线路特性,建立了以乘客出行时间最少及企业运营成本最低为目标的市域快速轨道交通线路双目标非线性优化模型。根据遗传算法理论,构建了模型的遗传算法程序并求解模型。以某市域快速轨道交通线路为例,将该线某工作日早高峰小时的OD(起讫点)客流数据作为输入条件,通过遗传算法得到该线优化后的快慢车最佳停站方案。对比分析了停站方案优化前后的企业运营成本及乘客出行成本。[结果及结论] 停站方案结果验证了所建模型和算法的有效性。采用优化后的市域快速轨道交通线路快慢车停站方案,乘客出行成本降低了19.48%,企业运营成本增加了4.23%,总成本降低了4.18%。该算法虽导致企业运营成本小幅增加,但有效降低了乘客出行时间成本,提升了乘客出行的可达性。

关键词 市域快速轨道交通; 快慢车停站方案; 多目标优化模型; 遗传算法

中图分类号 U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245725

Optimization for Express/Local Train Stop Plans on City Rapid Rail Transit Lines

GUO Jingfan

(Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510310, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] To minimize passenger travel time while reducing operational costs for enterprises, it is necessary to identify an optimal balance between these two competing objectives. A systematic study on the stop plan for express/local trains on city rapid rail transit lines should be conducted based on both passenger travel costs and enterprise operational costs.

[Method] Based on the characteristics of city rapid rail transit lines, a bi-objective nonlinear optimization model is developed, aiming to minimize passenger travel time and enterprise operational costs. According to genetic algorithm theory, a corresponding genetic algorithm program is constructed and the

model is solved. Using an actual city rapid rail transit line as a study case, passenger flow OD (origin-destination) data during the morning peaks on a typical working day is used as the input. The optimal express/local train stop plan is obtained after line optimization using genetic algorithm. A comparative analysis is conducted on enterprise operational costs and passenger travel costs before and after the stop plan optimization.

[Result & Conclusion] The stop plan verifies the effectiveness of the proposed model and algorithm. While the optimized stop plan for express/local trains on city rapid rail transit lines reduces passenger travel costs by 19.48%, increases enterprise operational costs by 4.23%, and leads to an overall cost reduction of 4.18%. Although the algorithm slightly increases operational costs for enterprises, it significantly reduces passenger travel time costs and improves overall passenger travel accessibility.

Key words city rapid rail transit; express/local train stop plan; multi-objective optimization model; genetic algorithm

市域快速轨道交通线路主要服务于郊区沿线居住人口在郊区与市区之间的通勤出行,其客运量分布和站点分布存在较强的关联性,各站点之间呈现两极分化现象,且全日客运量较低。因此,较多学者开始探索市域快速轨道交通线路列车的开行方式。

文献[1-11]基于乘客出行成本等不同优化目标,研究了市域快速轨道交通线路快慢车开行模式;文献[12-17]在考虑列车满载率均衡、碳排放降低等不同条件下,分别构建了列车开行方案的各种优化模型;文献[18-21]分析了市域快速轨道交通的线路特点及客流分布。

市域快速轨道交通线路快慢车的研究已取得了较为丰富的成果,但基于乘客出行成本与企业运营成本方面进行的系统性研究较少。由此,本文基于市域快速轨道交通线路客运量及客流分布特点,针对乘客出行时间最短及企业运营成本最低两个

^{*} 国家重点研发计划项目(2022YFC3005200)

目标,系统探究了市域快速轨道交通线路快慢车停站优化方案。

1 市域快速轨道交通线路快慢车停站方案优化模型

1.1 问题描述

相比于市区的城市轨道交通线路,市域快速轨道交通线路的客流分布同站点分布之间有较强的关联性,因此在快慢车开行模式下,不同的停站方案对乘客出行具有较大影响。设1条市域快速轨道交通线路共有 M 个车站,途经的第 i 个车站为 l_i ,车站 l_1, l_M 分别为线路起点站、终点站,车站 $l_{HC,j}$ 为该线的第 j 个换乘站, N 为全线换乘站总数。设往 l_M 方向为上行方向 L_{sx} ,往 l_1 方向为下行方向 L_{xx} 。快慢车发车频率固定的情况下,快慢车的停站方案共有 $2^{M-(2+N)}$ 种。快慢车发车频率不同时,开行比例 K 也不同,由此会产生 $2^{M-(2+N)}K$ 种快慢车停站方案。市域快速轨道交通线路快慢车停站方案的优化问题,即在乘客总出行时间最小及企业成本最低的双目标条件下,从 $2^{M-(2+N)}K$ 种方案中求解出最佳方案。

1.2 模型建立

在市域快速轨道交通线路快慢车停站方案优化中,若仅考虑乘客出行时间最小,无限制地提高交通供给,则会使企业的运营成本急剧增加,同时导致大量的公共资源浪费;若仅考虑企业运营成本控制,则会使乘客出行时间增加,难以满足乘客出行需求。因此,乘客出行成本最小和企业运营成本最低之间具有典型的博弈关系,如何寻找两个目标博弈的最佳平衡点,是本文研究的重点。

1.2.1 乘客总出行时间模型

乘客总出行时间 t_z 是乘客从出行起点车站站台起,至出行终点车站站台所需的所有时间,可分为在起点站台的候车时间和上车后的在途时间两部分。乘客的候车时间则与列车的发车频率有关,上车后的在途时间与列车运行速度、停站时间有关。列车开行模式 n 有两类: $n=1$ 时,列车为大交路慢车; $n=2$ 时,列车为大交路快车。列车在站点的通过方式为 S , S_{n,l_i} 为列车在第 n 种运行模式下在车站 l_i 是否停站的变量, $S_{n,l_i}=1$ 表示停站, $S_{n,l_i}=0$ 表示不停站。 $t_{n,jg}$ 表示列车在第 n 种运行模式下的发车间隔。列车在上行线路开行时,设从乘客出行起点站 l_A 至出行终点站 l_B 区段内,第 n 种运行模式

下的客流比例为 P_{n,l_A,l_B} 。列车在下行线路开行时,设从乘客出行起点站 l_a 至出行终点站 l_b 区段内,第 n 种运行模式下的客流比例为 P_{n,l_a,l_b} 。

由上述分析可知, P_{n,l_A,l_B} 与 P_{n,l_a,l_b} 的取值与 $t_{n,jg}$ 、 S_{n,l_i} 有关。以列车在上行线路开行为例,按照起终点站是否为快车停靠站可有以下两种情况:①若乘客的出行起点站 l_A 和出行终点站 l_B 均为快车停靠站,则大交路慢车、大交路快车两类开行模式列车乘客均可乘坐,不同开行模式下的客流比例可表示为 $P_{1,l_A,l_B} = [(1-\rho)t_{2,jg}] / (t_{1,jg} + t_{2,jg})$, $P_{2,l_A,l_B} = (t_{1,jg} + \rho t_{2,jg}) / (t_{1,jg} + t_{2,jg})$,其中 ρ 为乘客对快车的偏好系数;②若乘客的起点站 l_A 和终点站 l_B 不全为快车停靠站,则乘客仅有大交路慢车1种模式选择,即 $P_{1,l_A,l_B} = 1$ 。

1.2.1.1 乘客在起点站的候车时间模型

本研究假设乘客到达起始站服从均匀分布,那么所有乘客在起始站的平均候车时间均为 $1/2$ 个行车间隔,则两种列车运行模式下乘客的平均候车时间分别为 $t_{1,jg}/2$ 、 $t_{2,jg}/2$ 。本研究主要对同一交路快慢车两种不同开行模式下的停站方案进行优化,乘客在同一路途中进行快慢车换乘的人数较少,此部分乘客的乘坐数据对整体结果影响较低,因此假设乘客在同一路途中均为1次上下车。

基于上述分析,全部上行乘客的站台候车时间 $t_{hc,sx}$ 、全部下行乘客的站台候车时间 $t_{hc,xx}$ 分别为:

$$t_{hc,sx} = \frac{t_{dw}}{2} \sum_{l_A=1}^{l_w-1} \sum_{l_B=l_A+1}^{l_w} \left(Q_{l_A,l_B} \sum_{n=1}^2 P_{n,l_A,l_B} t_{n,jg} \right) \quad (1)$$

$$t_{hc,xx} = \frac{t_{dw}}{2} \sum_{l_a=1}^{l_\eta-1} \sum_{l_b=l_a+1}^{l_\eta} \left(Q_{l_a,l_b} \sum_{n=1}^2 P_{n,l_a,l_b} t_{n,jg} \right) \quad (2)$$

式中:

w ——上行乘客途径的车站总数;

η ——下行乘客途径的车站总数;

Q_{l_A,l_B} ——上行起始站为 l_A 站、终点站为 l_B 站的客流量;

Q_{l_a,l_b} ——下行起始站为 l_a 站、终点站为 l_b 站的客流量;

t_{dw} ——统计期内的单位时间间隔,一般为1h。

上下行所有乘客在站台的总候车时间 $t_{hc} = t_{hc,sx} + t_{hc,xx}$ 。

1.2.1.2 乘客上车后在途时间模型

市域快速轨道交通线路列车正常情况下严格按照时刻表运行,列车在各站点的到达时间基本固

定,因此乘客在途时间的计算与不同开行模式下的客流比例有关。

起点站、终点站全为快车停靠站时,上行全部乘客的总在途时间 $t_{zt,kc,sx}$ 、下行全部乘客的总在途时间 $t_{zt,kc,xx}$ 分别为:

$$t_{zt,kc,sx} = \sum_{l_A=1}^{l_w-1} \sum_{l_B=l_A+1}^{l_w} \left(Q_{l_A,l_B} \sum_{n=1}^2 P_{n,l_A,l_B} t_{n,l_A,l_B} \right) \quad (3)$$

$$t_{zt,kc,xx} = \sum_{l_a=1}^{l_\eta-1} \sum_{l_b=l_a+1}^{l_\eta} \left(Q_{l_a,l_b} \sum_{n=1}^2 P_{n,l_a,l_b} t_{n,l_a,l_b} \right) \quad (4)$$

式中:

t_{n,l_A,l_B} ——第 n 种运行模式下,上行列车从 l_A 至 l_B 的总耗时;

t_{n,l_a,l_b} ——第 n 种运行模式下,下行列车从 l_a 至 l_b 的总耗时。

起点站、终点站不全为快车停靠站时,上行全部乘客的总在途时间 $t_{zt,mc,sx}$ 、下行全部乘客的总在途时间 $t_{zt,mc,xx}$ 分别为:

$$t_{zt,mc,sx} = \sum_{l_A=1}^{l_w-1} \sum_{l_B=l_A+1}^{l_w} \left(Q_{l_A,l_B} P_{1,l_A,l_B} t_{1,l_A,l_B} \right) \quad (5)$$

$$t_{zt,mc,xx} = \sum_{l_a=1}^{l_\eta-1} \sum_{l_b=l_a+1}^{l_\eta} \left(Q_{l_a,l_b} P_{1,l_a,l_b} t_{1,l_a,l_b} \right) \quad (6)$$

式中:

t_{1,l_A,l_B} ——上行慢车从 l_A 至 l_B 的总耗时;

t_{1,l_a,l_b} ——下行慢车从 l_a 至 l_b 的总耗时。

综上所述,起点站、终点站全为快车停靠站时,上下行所有乘客的总在途时间 $t_{zt,kc} = t_{zt,kc,sx} + t_{zt,kc,xx}$;当起点站、终点站不全为快车停靠站时,乘客的总在途时间 $t_{zt,mc} = t_{zt,mc,sx} + t_{zt,mc,xx}$ 。

将 $t_{zt,kc}$ 、 $t_{zt,mc}$ 合称为乘客总在途时间 t_{zt} ,则乘客总出行时间 $t_z = t_{hc} + t_{zt}$ 。

1.2.2 企业运营成本模型

企业成本包括固定成本和可变成本,其中:固定成本主要包括建设成本、车辆购置成本及设备定期维修成本等;可变成本主要为运营成本,主要与运行成本及停站次数有关。固定成本基本为定值,对优化方案结果的影响较小,因此本研究主要考虑可变成本的变化对快慢车停站方案的影响。

不同运营模式下的停站次数不同,相应的可变成本也不同。根据上述分析, t_{dw} 内不同 n 下的上行总停站成本 $C_{n,sx}$ 、下行总停站成本 $C_{n,xx}$ 分别为:

$$C_{n,sx} = C_{dctz,sx} \sum_{n=1}^2 \left(\frac{t_{dw}}{t_{n,jg}} \sum_{l_i=1}^M S_{n,l_i} \right) \quad (7)$$

$$C_{n,xx} = C_{dctz,xx} \sum_{n=1}^2 \left(\frac{t_{dw}}{t_{n,jg}} \sum_{l_i=1}^M S_{n,l_i} \right) \quad (8)$$

式中:

$C_{dctz,sx}$ ——上行单次停站成本;

$C_{dctz,xx}$ ——下行单次停站成本。

$t_{n,jg}$ 不同,运行成本也不同。 t_{dw} 内列车上下行运行成本 C_{tr} 为:

$$C_{tr} = 2t_{dw}\sigma \left(\frac{1}{t_{1,jg}} + \frac{1}{t_{2,jg}} \right) \quad (9)$$

式中:

σ ——列车单程运行一次的成本(拟定上下行的 σ 相同)。

由上述可得: t_{dw} 内企业运营的可变成本 $C_{cb} = C_{n,sx} + C_{n,xx} + C_{tr}$ 。

由于受城市轨道交通企业的列车配属数、运营系统的最小发车间隔,以及线路条件、员工数量等因素限制,列车的发车频率不可能无限增大。设该线的最大发车频率为 f_{max} ,则列车发车频率 f_n 的取值范围为 $0 < f_n \leq f_{max}$ 。列车运营模式的选择,本研究给出两种,因此 n 的取值范围为 $0 < n \leq 2$ 且为整数;企业运营成本应在一定控制范围内,设该线预设的单位时间最大运营可变成本为 $C_{cb,max}$,则有 $0 < C_{cb} \leq C_{cb,max}$ 。综上,市域快速轨道交通线路快慢车停站方案优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \min t_z = \min(t_{hc} + t_{zt}) \\ \min C_{cb} = \min(C_{n,sx} + C_{n,xx} + C_{tr}) \end{cases} \quad (10)$$

s. t.

$$\begin{cases} 0 < f_n \leq f_{max} \\ 0 < n \leq 2 \\ 0 < C_{cb} \leq C_{cb,max} \\ 0 \leq \rho \leq 1 \\ 0 \leq P_{n,l_A,l_B} \leq 1 \\ 0 \leq P_{n,l_a,l_b} \leq 1 \end{cases}$$

式(10)中,两个目标函数之间的量纲不同,求解较为困难,因此本研究根据该线所在城市的人均小时工资,将 t_z 换算为经济成本(乘客总在途时间按人均小时工资的 0.3 倍计算^[22]),进而统一两个目标参数的量纲,将多目标非线性优化模型转变为单目标非线性优化模型:

$$\min C_z = \alpha \Omega \min t_z + \min C_{cb} \quad (11)$$

式中:

C_z ——统一量纲后运营企业单位时间内的总

可变成本;

Ω ——该线所在城市的人均小时工资;

α —— t_z 与 Ω 的换算系数,取 0.3。

2 基于遗传算法的模型算法设计

上述市域快速轨道交通线路快慢车停站方案优化模型为复杂的非线性模型。本文采用遗传算法进行求解,步骤如下:

步骤1 初始化。设定遗传算法中最大进化代数为 G_{\max} ,变异概率为 p_{by} ,交叉概率为 p_{jx} ,变异比率为 γ_{by} ,种群规模为 R_{zq} ,联赛规模为 R_{LS} ,第一代种群数量为 m_{pop} ,变异数量为 m_{by} ,最佳个体数量为 m_{best} 。

步骤2 市域快速轨道交通线路快慢车停站方案优化模型的决策变量均为整数,调用随机函数与取整函数,生成初始种群,随机产生 R_{zq} 个 $|m_{by}|$ 维向量。

步骤3 将式(10)作为遗传算法的适应度函数,针对步骤2随机产生的种群,计算个体适应度值。

步骤4 基于步骤3计算得到的所有个体适应度值,按照升序方式排序,筛选出前 m_{pop} 个个体作为新种群。

步骤5 新种群复制得到 $2m_{pop}$ 个新个体,通过联赛选择方法(联赛规模 $R_{LS} = 3$)随机选择 ζ 个个体($0 < \zeta \leq m_{pop}$),选择 τ 个适应度最高的个体作为新个体保存到下一代($0 < \tau < \zeta$)。反复选择、筛选、保存,直至新个体数达到 m_{pop} 为止。过程中按交叉概率对随机配对个体进行交叉操作,交叉 $m_{pop}p_{jx}$ 次得到 $m_{pop}p_{jx}$ 个新个体。

步骤6 在前 m_{pop} 个个体中随机选择某一个或多个基因座,以变异比率 γ_{by} 进行变异操作,并对其基因值以 p_{by} 做变动,产生 $m_{pop}p_{by}\gamma_{by}$ 个新个体。

步骤7 判断是否达到迭代阈值。若已达到,则适应度函数值按照升序方式进行排序,输出 m_{best} 个最佳个体;若未达到,则转回步骤3。

3 案例分析

3.1 市郊线路分析

某市域快速轨道交通线路共 21 个车站,本研究按上行方向对站点 1 至站点 21 进行编号,其中站点 4、站点 9、站点 14 为中间换乘站。选取某工作日早高峰(08:00—09:00)的 OD(起讫点)客流数据作为输入条件,各区间长度及早高峰小时断面客流量如表 1 所示。

表 1 各区间长度及早高峰小时断面客流量

Tab. 1 Lengths of each section and sectional passenger flow during morning peak hours

区间编号	区间长度/m	早高峰小时断面客流量/(人次/h)		区间编号	区间长度/m	早高峰小时断面客流量/(人次/h)	
		上行	下行			上行	下行
1	1 234	6 786	5 150	11	6 058	2 850	7 232
2	3 333	8 232	7 528	12	6 111	2 858	7 322
3	2 098	10 600	4 686	13	2 213	2 870	7 028
4	1 215	20 706	8 964	14	2 112	1 934	6 266
5	2 108	17 834	7 980	15	3 236	1 384	3 950
6	3 369	15 806	7 506	16	2 866	1 632	4 722
7	1 893	9 780	10 882	17	6 284	1 080	2 376
8	2 509	4 820	12 380	18	4 387	1 244	2 562
9	2 221	2 882	14 316	19	4 958	732	1 710
10	2 955	2 448	11 094	20	2 363	960	1 502

计算过程中:

1) 常量取值分别为: $\alpha = 0.3$, $\Omega = 30$ 元/h, $\rho = 0.25$ 。

2) 遗传算法参数设定如下: $G_{\max} = 100$ 代, $R_{zq} = 100$ 个, $p_{jx} = 0.7$, $\gamma_{by} = 0.1$, $p_{by} = 0.3$, $m_{by} = 21$ 个; $C_{dctz, sx} = C_{dctz, xx} = 220$ 元; $\sigma = 4\ 800$ 元。

3) 运营参数设定如下: $K = 1.4$; $t_{1, jg} = 7.5$ min, $t_{2, jg} = 30.0$ min。

3.2 计算结果分析

在 MATLAB 2012 软件下利用遗传算法求解,同时基于该线自身特点,对其早高峰小时上下行快慢车停站方案优化前后进行对比,其结果如表 2 所示。

表 2 案例市域快速轨道交通线早高峰小时上行快车停站方案优化前后对比

Tab. 2 Comparison of upward express train stop plan during morning peak hours on case city rapid rail transit line before and after optimization

站点编号	优化前方案	优化后方案	站点编号	优化前方案	优化后方案	站点编号	优化前方案	优化后方案
1	✓	✓	8	×	×	15	×	×
2	✓	✓	9	✓	✓	16	×	×
3	✓	✓	10	×	×	17	✓	✓
4	✓	✓	11	×	×	18	×	×
5	✓	×	12	×	×	19	×	×
6	×	✓	13	×	×	20	×	×
7	×	✓	14	✓	✓	21	✓	✓

注:“✓”表示停站,“×”表示不停站;下行的快车停站方案与上行相同。

进一步计算得出该线早高峰小时上下行快车停站方案优化前后成本对比结果,如表 3 所示。

表 3 案例市域快速轨道交通线早高峰小时上下行快车停站方案优化前后成本对比结果

Tab. 3 Cost comparison result of up/down express train stop plans during morning peak hours on case city rapid rail transit line before and after optimization

阶段	C_{cb} /元	乘客出行成本/元	C_z /元
优化前	502 320	276 530	778 850
优化后	523 610	222 670	746 280

由表 3 可知:快车停站方案优化后,早高峰小时 C_{cb} 增加了 4.23%,但乘客出行成本减少了 19.48%, C_z 降低了 4.18%。优化后的停站方案虽小幅度增加了 C_{cb} ,但是有效降低了乘客出行成本,提升了乘客出行的可达性。

4 结语

本研究根据市域快速轨道交通线路特点,以乘客出行成本及企业运营成本最低为目标,建立了市域快速轨道交通线路快慢车停站方案双目标非线性优化模型,并基于遗传算法对模型算法进行了设计,编写了算法程序,求解最佳优化方案。最后选取某案例线路,通过停站方案优化前后的对比,分析验证了本文所建模型及算法的有效性。后续将基于本研究成果,进一步探究市域快速轨道交通线路大小交路与快慢车结合的复杂交路模式下列车的最优开行方案。

参考文献

- [1] 张钊,王伟,石竹,等. 市域(郊)铁路快慢车运行停站策略优化[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 99.
- [2] 黄江阳,李爱东,陈剑,等. 轨道交通市域快线快慢车运营模式方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 126.
- [3] 高国飞,张星臣,陈修全,等. 市域快速轨道交通快慢车运行组织下越行站设置方法及模型研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(12): 8.
- [4] 石修路. 基于行车均匀度的快慢车能力折损研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(5): 94.
- [5] 张鑫,丁小兵,刘志钢,等. 城市轨道交通快慢车模式下乘客出行时间优化方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 65.
- [6] 赵欣苗,向爱兵,刘路. 快慢车运营组织下城市轨道交通车站通过能力研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(6): 200.
- [7] 赵壹,谭小土,陈福贵,等. 城市轨道交通快慢车运营模式综合评价体系研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(9): 65.
- [8] ZHANG Zhao, WANG Wei, SHI Zhu, et al. Optimization of stop strategy suitable for operation of express-local train of suburban railway[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 99.
- [9] HUANG Jiangyang, LI Aidong, CHEN Jian, et al. Study on express/local train operation mode scheme of rail transit commuter express[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 126.
- [10] GAO Guofei, ZHANG Xingchen, CHEN Xiuquan, et al. Method of setting overtaking stations and model under express and local coordinated operation of regional rapid rail transit[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(12): 8.
- [11] SHI Xiulu. Capacity loss in the mode of express/slow urban rail transit based on train evenness[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(5): 94.
- [12] ZHANG Xin, DING Xiaobing, LIU Zhigang, et al. Study of passenger travel time optimization under urban rail transit fast and slow mode[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 65.
- [13] ZHAO Xinmiao, XIANG Aibing, LIU Lu. Carrying capacity of stations under express/local operation of urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(6): 200.
- [14] ZHAO Yi, TAN Xiaotu, CHEN Fugui, et al. On comprehensive evaluation system for mixed express and slow train operation of

- urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(9): 65.
- [8] 姚燕明, 王韬, 宗二凯, 等. 基于快慢车模式的宁波市域铁路象山线配线方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 159.
- YAO Yanming, WANG Tao, ZONG Erkai, et al. Track allocation scheme for Ningbo City Railway Xiangshan Line based on express/local train operation mode[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 159.
- [9] 郑翔, 徐行方, 刘薇, 等. 基于Max-plus代数法的市域铁路快慢车运行特性[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 1.
- ZHENG Xiang, XU Xingfang, LIU Wei, et al. Characteristics of municipal railway express/local train operation based on Max-plus algebra method[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 1.
- [10] 王静梅. 基于乘客选择的市域(郊)铁路快慢车停站方案设计[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(8): 113.
- WANG Jingmei. Stop scheme design of suburban railway express/local trains based on passenger choice[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 113.
- [11] 温芳, 柏赞, 陈垚. 考虑快慢车的城轨跨线运营开行方案与时刻表优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(3): 172.
- WEN Fang, BAI Yun, CHEN Yao. Optimization of operation scheme and timetable for interconnected lines in urban rail transit considering express-local train[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(3): 172.
- [12] 刘雪鹏, 宫振冲, 杨宇航. 北京轨道交通16号线开行方案效果及改善措施研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4): 67.
- LIU Xuepeng, GONG Zhenchong, YANG Yuhang. Research on the effect of Beijing Metro Line 16 operation plan and improvement measures[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(4): 67.
- [13] 罗晋, 朱海燕, 刘志钢, 等. 考虑乘客旅行时间价值的市域轨道交通列车开行方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 13.
- LUO Jin, ZHU Haiyan, LIU Zhigang, et al. Operation scheme for city railway train considering passenger travel time value[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 13.
- [14] 彭其渊, 刘思源, 江山, 等. 贯通运营下市域铁路与地铁列车开行方案协同优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(2): 36.
- PENG Qiyuan, LIU Siyuan, JIANG Shan, et al. Collaborative optimization of suburban railway and metro train operation plans under interconnection operational mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(2): 36.
- [15] 任艾, 孟令云, 王义惠, 等. 面向客流的市域与城轨贯通运营下快慢车开行方案优化[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(4): 153.
- REN Ai, MENG Lingyun, WANG Yihui, et al. Optimization of express/slow train operations in integrated suburban and urban rail systems based on passenger demand[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(4): 153.
- [16] 杨雯雯, 孟学雷, 高如虎, 等. 考虑运能利用和碳排放的绿色城轨开行方案研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(1): 122.
- YANG Wenwen, MENG Xuele, GAO Ruhu, et al. Train operation plan of green urban rail transit considering transportation capacity utilization and carbon emissions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(1): 122.
- [17] 许得杰, 毛保华, 陈绍宽, 等. 考虑开行比例的大小交路列车开行方案优化[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 173.
- XU Dejie, MAO Baohua, CHEN Shaokuan, et al. Optimization of operation scheme for full-length and short-turn routings considering operation proportion[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 173.
- [18] 沙金硕, 高伟君. 市域快速轨道交通的线路设计特点[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(8): 100.
- SHA Jinshuo, GAO Weijun. Design features of urban rapid rail transit line[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 100.
- [19] 朱炜. 基于乘客OD间路径旅行时间的城市轨道交通客流分布计算模型的适用性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 6.
- ZHU Wei. Applicability of passenger flow distribution calculation model in urban rail transit based on passenger OD travel time[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 6.
- [20] 李旭, 程晓明. 南京轨道交通客流时空分布特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(10): 47.
- LI Xu, CHENG Xiaoming. Analysis of Nanjing rail transit passenger flow spatial-temporal distribution characteristics[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 47.
- [21] 张红健, 韩宝明. 轨道交通快慢线平行运营条件下乘客路径选择行为研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(2): 86.
- ZHANG Hongjian, HAN Baoming. Route choice behavior of urban rail transit passengers under express/local line parallel-operation[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(2): 86.
- [22] 楼齐峰, 马晓龙, 叶盈, 等. 基于出行成本的停车收费和供给政策影响分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(2): 257.
- LOU Qifeng, MA Xiaolong, YE Ying, et al. Combined impact of parking charge and supply policy based on travel cost[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(2): 257.

· 收稿日期:2024-12-27 修回日期:2025-04-26 出版日期:2025-07-10

Received:2024-12-27 Revised:2025-04-26 Published:2025-07-10

· 通信作者:郭靖凡,高级工程师,guojingfan@gzmttr.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license