doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.017

基于大小交路与客流控制的城轨列车时刻表优化研究

姬颖文，刘兰芬，姚佳莹，赵鸿运
（兰州交通大学交通运输学院，兰州 730070）

摘 要：部分大城市轨道交通车站高峰期拥堵严重，亟需从大小交路方案与客流控制策略等方面对列车时刻表进行研究。以早高峰时期城市轨道交通线路为研究对象，将乘客出行成本、企业运营成本作为目标函数，考虑发车间隔、列车容量、客流控制、大小交路方案等约束条件建立列车时刻表优化模型。采用线性加权法兼顾乘客出行及企业运营成本，并设计模型求解的遗传算法，以杭州地铁 4 号线为例进行验证，结果表明：对列车时刻表进行优化可以降低乘客出行的成本，同时大小交路的方案有助于企业降低运营成本；同步考虑客流控制，可进一步缓解站内拥挤程度。基于大小交路及客流控制研究时刻表优化问题，可对轨道交通企业高峰期调度策略的制定提供支持。

关键词：城市轨道交通；列车时刻表；客流控制；大小交路；遗传算法
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0125-09

Optimization of Urban Rail Transit Timetable Based on Long-Short Routes and Passenger Flow Control

JI Yingwen, LIU Lanfen, YAO Jiaying, ZHAO Hongyun
(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070)

Abstract: In major metropolitan areas, the severe congestion during peak hours at urban rail transit stations necessitates comprehensive research on train timetable, particularly focusing on the implementation of short-turn and full-length routing strategies coupled with passenger flow control measures. This study takes the morning peak period of urban rail transit lines as its research subject, establishing an optimization model for train timetables by considering passenger travel costs and enterprise operational expenses as the objective functions, while incorporating constraints such as train departure intervals, vehicle capacity, passenger flow control, and routing strategies. Utilizing a linear weighting method to balance both passenger and operational costs, the research develops a genetic algorithm for model solution, with Hangzhou Metro Line 4 serving as a case study. The findings demonstrate that optimized train schedules effectively reduce passenger travel costs, while the implementation of short-turn and full-length routing strategies contributes to lowering operational expenses for enterprises. Furthermore, the integration of passenger flow control measures significantly alleviates station congestion levels. This research on timetable optimization, based on routing strategies and passenger flow control, provides valuable insights for rail transit enterprises in formulating effective peak-hour dispatching strategies.

Keywords: urban rail transit; timetable; passenger flow control; large and small traffic routes; genetic algorithm

随着城市轨道交通运营的不断增加以及新线路的开通，线网空间覆盖范围日益扩大。由于线路沿线土地利用情况的差异，居民出行分布更加分散，高峰时段内的客流需求呈现出明显的时空分布不均衡特征，

收稿日期：2024-11-06　修回日期：2025-05-21
第一作者：姬颖文，女，硕士研究生，从事轨道运输组织与优化研究，1793307253@qq.com
通信作者：刘兰芬，女，博士，副教授，主要从事轨道交通运输组织方面研究，liulanfen@mail.lzjtu.cn
基金项目：甘肃省教育厅高校教师创新基金项目(2024B-062)
引用格式：姬颖文，刘兰芬，姚佳莹，等. 基于大小交路与客流控制的城轨列车时刻表优化研究[J]. 都市快轨交通，2025，38(4)：125-133.
JI Yingwen, LIU Lanfen, YAO Jiaying, et al. Optimization of urban rail transit timetable based on long-short routes and passenger flow control[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 125-133.

这导致客流潮汐现象时常发生。交通也面临着巨大的客流压力，由于高峰时段客流量导致大量乘客滞留于站台，后续客流持续到达，造成站台客流拥挤现象严重，给乘客出行和城市轨道运营带来风险，线路运输能力与客流需求间的矛盾日益突出。因此，对于客流集中且时空分布不均衡的线路，提高运输能力与客流需求之间的匹配性是提升城市轨道交通运营效率的关键。

大小交路开行方案和客流控制都是改善线路运行效率的重要方法，对列车时刻表的编制至关重要。ZHU 等[1]考虑动态客流需求，通过整合大小交路策略和列车周转计划，研究了鲁棒协同列车时刻表优化问题，以平衡列车利用率和滞留乘客。YUAN 等[2]对双向地铁线路上的列车时刻表、列车周转计划及大小交路方案进行协同优化，以减少乘客在站台上的总等待时间。张海等[3]基于客流时空分布规律，构建城市轨道交通高峰时段基于非均匀发车间隔的大小交路时刻表优化模型，对乘客平均旅行时间及列车发车间隔平均偏离值进行协同优化。在客流控制方面，LI 等[4]针对市郊地铁线路的过饱和问题，提出了包含小交路方案和非周期性服务的进站客流控制与列车服务计划的集成优化方法，旨在减少站台滞留乘客的最大数量、站外候车乘客总数及列车运行公里。LIANG 等[5]探讨城市轨道交通中乘客需求与地铁运力之间的不匹配问题，构建随机混合整数规划模型，以最小化系统总成本。王殿元等[6]提出一种基于深度强化学习的城市轨道交通协同限流控制方法，通过多轮强化学习训练产生最优的限流方案。MENG 等[7]将客流控制转化为乘客出发时刻选择，以优化运输效率。ZHANG 等[8]提出一种高效的地铁列车时刻表和列车跳停客流控制策略的非线性动态规划模型，以缓解乘客拥堵、提高列车服务水平和降低能耗。LIU 等[9]构建了列车流和客流需求的耦合约束，考虑列车周转计划，协同优化客流控制策略，以均衡乘客满意度以及列车资源利用率。

列车时刻表的优化主要考虑列车间隔、运行速度、换乘时间等，多数文献仅考虑大小交路计划、客流控制等单一策略对时刻表进行优化，以缓解高峰时段客流拥挤的问题。采用大小交路计划进行时刻表优化，能够使企业通过有限的车次、有限的运行成本最大限度地匹配时空非均匀分布的客流，但面对近年来不断增长的城市规模和客流量时略显乏力，只能通过增加列车数量或开行频次进行缓解；采用客流控制策略进行时刻表优化可从客流源头为线路运营压力进行分担，但无法从线路运营根本上解决客流需求与运行方案不匹配、运力资源浪费的问题。实际上，在高需求区段开行小交路列车可以加速疏散站台聚集乘客，在高需求站点采用客流控制策略可以减少进入站台人数，从而降低站台拥挤情况，协同提升线路运行效率，但协同优化研究还不够深入。因此，本文以单条城市轨道线路为研究对象，针对高峰时期大客流对城市轨道交通系统的冲击现象，协同考虑客流控制与大小交路方案对列车时刻表的影响，以乘客等待时间和企业运营成本作为优化目标，对列车时刻表进行优化，旨在有限的运力资源下，最大限度满足乘客需求，提高列车时刻表的科学性与合理性。

1 问题描述

本文的研究对象为早高峰时期大客流冲击下的单条城市轨道交通线路。早高峰客流通常具备非均匀分布的时间特征，乘客到达率随时间分布曲线通常为近似正态分布曲线，从地铁开始运行至早高峰结束，乘客到达率先增后减；同时，早高峰时期的客流具有明显的空间分布特征，主要为居住区前往企业、工业园区等地。针对客流的时间分布不均匀特征，一般通过调整列车发车时刻表解决；针对客流的空间分布不均匀特征，可以采取大小交路方案进行解决。对于高峰时期大客流情况，地铁运营企业会在部分车站采取常态化客流控制措施，以缓解站内拥挤，但也会导致乘客出行不便、运力使用率下降、运营成本增加等问题。因此，在考虑客流控制策略的前提下，编制合理的列车时刻表、制定合理的大小交路开行方案成为了提升线路运行效率的关键。

在城市轨道交通列车高峰时段运营状态下，考虑 1 条具有 N 座车站的城市轨道交通线路，其中车站 1 到车站 N 为大交路运行区间，车站 S_0 到 S_1 为小交路运行区间。车站集合为 S、列车集合为 K；研究时段集合为 T；k 为列车编号；i 为车站编号。

2 模型建立

2.1 模型假设及参数定义

根据城市轨道交通线路实际运营情况，本文提出如下假设：

①乘客采取“先到先服务”原则，所有乘客有序排队候车，先下后上；

②由于本文所研究的线路包含大交路与小交路，所有乘客不进行同线换乘；

③大交路与小交路中所有列车车型、列车编组等均相同，列车运营过程中站站停、不越行；

④本文仅研究一种大小交路运营模式，且不同交路的列车发车频率之间存在倍数关系；

⑤本文客流控制策略为进站限流策略，将其简化为仅控制进站内等待的乘客。

为便于描述，本文模型所选取参数及决策变量定义分别见表 1。

表 1　参数及定义

Table 1　Parameters and definitions

符号	单位	定义
i	—	车站编号，$i\in S$，$S=\{1,2,\cdots,S_0,\cdots,S_1,\cdots,N\}$，其中$(S_0,S_1)$小交路运行区间
k	—	列车编号，$k\in K$，$K=\{1,2,\cdots,M\}$，M 为调度时段的列车数量
T	—	研究时段，$t=\{1,2,\cdots,T/\Delta t\}$，$t$ 为时刻，Δt 为时间粒度
$P_{i,k}^{\mathrm{a}}(t)$	人次	时刻 t 时，i 车站到达的累计客流量
$P_{i,k}^{\mathrm{on}}$	人次	列车 k 到达车站 i 时上车的乘客人数
$P_{i,k}^{\mathrm{o}}$	人次	列车 k 到达车站 i 时下车的乘客人数
$P_{i,k}^{\mathrm{in}}$	人次	列车 k 离开车站 i 时的车载人数
$\varphi_i(t)$	人/min	车站 i 的乘客到达率
$C_{i,k}^{\mathrm{inC}}$	人	列车 k 到达车站 i 时允许进站等待列车 k 的人数
$C_{i,k}^{\mathrm{in}}$	人	列车 k 到达车站 i 时实际进站等待列车 k 的人数
$C_{i,\max}$	人	车站 i 站内的最大安全容量
$C_{\max}$	人	列车的最大安全容量
$W_{i,k}^{\mathrm{in}}$	人	在 i 站内等待列车 k 的人数
$W_{i,k}^{\mathrm{out}}$	人	在 i 站外等待列车 k 的人数
$h_{\min}$，$h_{\max}$	s	最小、最大追踪间隔
$\beta_{j,i}$	—	j 站上车在 i 站下车的比例
$A_{i,k}$	—	列车 k 在车站 i 的到站时刻
e_i	s	列车在 i 站的停站时间
L_1	km	小交路运行的线路长度
L_2	km	大交路运行的线路长度
v	m/s	列车的运行速度
α	元/min	单位时间列车运行成本
β	元/min	单位时间人力成本
C_{ut}	元	单位时间成本(在单位时间内乘客愿意为减少等待时间所支付的成本)
$\lambda_{i,k}$	—	0-1 变量，若列车 k 服务于车站 i，则 $\lambda_{i,k}=1$；否则，$\lambda_{i,k}=0$
Z	元	总目标成本
Z_1	元	乘客出行成本
Z_2	元	企业运营成本
Z_1'	min	乘客总等待时间
B_1	元	车辆运行成本
B_2	元	人力成本
ω_1	—	乘客出行成本权重系数
ω_2	—	企业运营成本权重系数
$p_{i,k}$	—	客流控制系数，$p_{i,k}=[0.8,1]$
$D_{i,k}$	—	列车 k 在车站 i 的离站时刻
γ_k	—	0–1 变量，若列车 k 运行区段为小交路，则 $\gamma_k=1$；若列车 k 运行区段为大交路，则 $\gamma_k=0$

2.2　目标函数

城市轨道交通的主要目的是方便乘客出行，故优化列车时刻表需紧贴乘客需求，以出行时间为首要考虑因素，同时兼顾企业运营成本和效益。本文基于高峰期客流集中且分布不均的城轨交通线路，以最小化乘客出行成本和企业运营成本为目标，协同考虑大小交路方案及客流控制策略，对列车时刻表进行优化。

1) 乘客出行成本。本文的乘客出行成本主要考虑研究线路上所有车站滞留乘客的等待时间。滞留乘客是指因客流控制和列车容量限制，未能乘坐研究时段内第 1 列到达列车而需在车站内外进行二次等待的乘客，其人数为各列车到站时，等待乘客与成功上车乘客之间的差值，即

$$Z_1'=\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{k=1}^{M}\left(W_{i,k}^{\mathrm{in}}+W_{i,k}^{\mathrm{out}}-P_{i,k}^{\mathrm{on}}\right)\times\left(A_{i,k+1}-A_{i,k}\right)\tag{1}$$

当第 1 辆列车到达车站时，车站内等待乘客数量为实际进入站内等待列车 k 的乘客数量；后续列车到达时，车站内等待乘客数量为累计进入车站内等待列车 k 的乘客数量与累计允许进入列车 k–1 的乘客数量之差，s 为 1～k 之间的列车序号指针变量，即

$$W_{i,k}^{\mathrm{in}}=\begin{cases}C_{i,k}^{\mathrm{in}} & k=1\\ \sum\limits_{s=1}^{k}C_{i,s}^{\mathrm{in}}-\sum\limits_{s=1}^{k-1}P_{i,s}^{\mathrm{on}} & \text{其他}\end{cases}\tag{2}$$

累计进入车站 i 内等待列车 k 的乘客数量由乘客在 i 站的到达率可求得，即

$$C_{i,k}^{\mathrm{in}}=\int_{D_{i,1}}^{D_{i,k}}\varphi_i(t)\mathrm{d}t\tag{3}$$

当第 1 列车到达车站时，站外等待乘客数量为累积到达客流量与允许进入站内乘客数量之差；后续列车到达时，站外等待客流量为累积到达客流量与累积允许进站等待的客流量之间的差值，即

$$W_{i,k}^{\mathrm{out}}=\begin{cases}\max\left\{\sum\limits_{t\in[1,D_{i,k})}P_{i,k}^{\mathrm{a}}(t)-C_{i,\max}^{\mathrm{h}},0\right\} & k=1\\ \sum\limits_{t\in[1,D_{i,k})}P_{i,k}^{\mathrm{a}}(t)-\sum\limits_{s=1}^{k}C_{i,s}^{\mathrm{in}} & \text{其他}\end{cases}\tag{4}$$

列车 k 到达车站 i 时上车人数可根据列车离开 i–1 站时车载人数及车站等待人数等变量确定，即

$$P_{i,k}^{\text{on}}=\begin{cases}\min\left\{C_{\max},W_{i,k}^{\text{in}}\right\} & i=1\\ \min\left\{\left(C_{\max}+P_{i,k}^{\text{o}}-P_{i-1,k}^{\text{in}}\right)\cdot\\ \lambda_{i.k}\cdot\lambda_{i-1,k},W_{i,k}^{\text{in}}\end{cases}\right\} \quad \text{其他} \tag{5}$$

引入单位时间成本，将乘客等待时间转化为乘客出行成本，即

$$\min Z_1=Z_1'\cdot C_{ut} \tag{6}$$

2) 企业运营成本。本文企业运营成本从车辆运行和人力成本两方面考虑。车辆运行成本基于车辆走行公里进行计算，式中 k_{m1} 及之前列车在研究时段结束前运行完了小交路全程，k_{m1} 之后的列车未运行完全程；k_{m2} 及之前列车在研究时段结束前运行完了大交路全程，k_{m2} 之后的列车未运行完全程；人力成本则由人力成本构成，依据列车运营时间进行计算，即

$$B_1=\alpha\left(\sum_{k=1}^{k=k_{m1}}L_1\cdot k+\sum_{k=k_{m1}+1}^{k=M_1}(T-D_{1,k})\cdot V_1+\sum_{k=1}^{k=k_{m2}}L_2\cdot k+\sum_{k=k_{m2}+1}^{k=M_2}(T-D_{1,k})\cdot V_2\right) \tag{7}$$

$$B_2=\beta\cdot\sum_{k=1}^{k=M}(D_{N,k}-D_{1,k}) \tag{8}$$

综上，企业运营成本最小化的目标函数表示为

$$\min Z_2=B_1+B_2 \tag{9}$$

对上述目标函数进行线性加权处理，其权重值分别为 ω_1 和 ω_2，且 $\omega_1+\omega_2=1$。因研究时段为高峰时期，减少乘客等待时间为首要解决问题，ω_1 的权重应大于 ω_2。设 $\omega_1=0.6$，$\omega_2=0.4$ 即认为乘客权重略大于企业权重，最终目标函数表示为

$$\min Z=\omega_1Z_1+\omega_2Z_2 \tag{10}$$

2.3 约束条件

1) 客流控制约束。在 i 车站实际进站等待列车 k 的乘客数量小于等于在 i 车站允许进站等待列车 k 的乘客数量；在 i 车站允许进站等待列车 k 的乘客数量小于等于站内最大安全容量，即

$$\begin{cases}0\leqslant C_{i,k}^{\text{in}}\leqslant C_{i,k}^{\text{inC}}\\ 0\leqslant C_{i,k}^{\text{inC}}\leqslant C_{i,\max}\end{cases} \tag{11}$$

$$C_{i,k}^{\text{inC}}=p_{i,k}\cdot C_{i,\max} \tag{12}$$

2) 乘客上下车约束。下车客流量为以该站为目的地的上车乘客总量。即

$$P_{i,k}^{\text{o}}=\sum_{j=1}^{i-1}P_{j,k}^{\text{on}}\cdot\beta_{j,i}\cdot\lambda_{i,k}\cdot\lambda_{j,k} \tag{13}$$

当第 1 列车到达车站时，列车 k 离开车站 i 时的车载人数为其到达车站 i 时上车的乘客人数；后续列车到达时，列车车载人数为其离开车站 i–1 时的车载人数与其在车站 i 下车的乘客数量之差，即列车 k 离开车站 i 时的车载人数为

$$P_{i,k}^{\text{in}}=\begin{cases}P_{i,k}^{\text{on}} & i=1\\ P_{i,k-1}^{\text{in}}-P_{i,k}^{\text{o}}+P_{i,k}^{\text{on}} & \text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

列车 k 离开车站 i 时的车载人数小于等于列车的最大安全容量，即

$$0\leqslant P_{i,k}^{\text{in}}\leqslant C_{\max} \tag{15}$$

3) 列车运行时间约束。列车发车间隔应满足最小追踪间隔要求且不大于最大发车间隔，即

$$h_{\min}\leqslant D_{i,k}-D_{i,k-1}\leqslant h_{\max} \tag{16}$$

车站服务约束要求对于整条线路上的所有车站，为避免某些车站的乘客站台等待时间过长，因此要求相邻车次之间，必须有 1 个车次在该站为乘客提供服务，即

$$\lambda_{i,k-1}+\lambda_{i,k}\geqslant 1,\forall k-1,k\in K \tag{17}$$

4) 大小交路约束。通过引入变量 γ_k 确定列车运行区间，即

$$h_{\min}\leqslant D_{i,k}-D_{i,k-1}\leqslant h_{\max} \tag{18}$$

$$\begin{cases}h_{\min 1}\leqslant D_{i,k}-D_{i,k-1}\leqslant h_{\max 1} & i\in(S_0,S_1)\text{且}\gamma_k=1,\gamma_{k-1}=1\\ h_{\min 2}\leqslant D_{i,k}-D_{i,k-1}\leqslant h_{\max 2} & i\in(1,N)\text{且}\gamma_k=0,\gamma_{k-1}=0\end{cases} \tag{19}$$

3 算法设计与案例分析

3.1 算法设计

本文采用遗传算法进行模型求解。编码以每列车首站发车时刻作为基因。

编码规则：研究时段内，以决策变量 $D_{i,k}$–e_i(首站发车时刻，其中 i=1)定义为染色体基因，单位为 min，其含义为自当天 0 时刻起所经过的分钟总和。由 m 个基因串联构成染色体，染色体即为列车组的发车时刻表(全组共 M 列)，其形式及决策变量 γ_k 如图 1 所示。以图中基因“390”为例，390 代表自当天 0 点起第 390 min，

$D_{i,k}$:	390	395	398	…	428	432	434	437	…	507	510
γ_k:	0	0	0	…	0	0	0	0	…	0	0

M

图 1 染色体示例

Figure 1 Example of chromosome coding

即 60×6+30，可转换为 6:30；同理得 434 min 为 60×7+14，可转换为 7:14。

当实行大小交路开行方案时，根据大小交路约束随机选取 n 个基因作为大交路列车发车时刻，其余 M–n 个基因为小交路列车发车时刻，选择时确保大交路列车间隔开行。染色体分为 2 段进行编码，将 n 个大交路列车发车时刻作为染色体前 n 项基因，M–n 个小交路列车发车时刻作为染色体后 M–n 项基因，染色体形式及决策变量 γ_k 值如图 2 所示。大交路首班发车时刻为 390 min(6:30)，研究时段内末班发车时刻为 494 min(8:14)；小交路列车首班发车时刻为 397 min(6:37)，末班发车时刻为 510 min(8:30)。

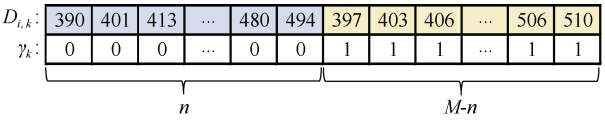


图 2　大小交路方案染色体示例

Figure 2　Example of chromosome coding for long-short routing scheme

客流控制染色体由 N 个客流控制系数构成，代表限流车站在列车 k 到达时允许进站人数与站内最大安全容量的比值，如图 3 所示。

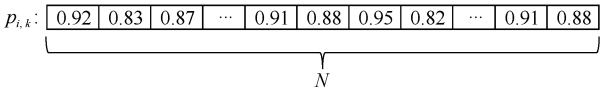


图 3　客流控制染色体示例

Figure 3　Example of chromosome coding for passenger flow control

遗传算子：本文算法程序主要包含单点交叉算子、双点交叉算子、变异算子，其过程分别如图 4～6 所示。单点交叉算子应用于无大小交路方案的时刻表中，双点交叉算子应用于大小交路方案时刻表中，其中大交路段染色体、小交路段染色体分别含有 1 个断点。变异算子应用于所有类型的时刻表中。

算法步骤如图 7 所示。

当无客流控制策略时，算法通过选择算子、交叉算子、变异算子不断迭代得出最优时刻表；考虑客流控制策略时，针对每条生成的发车时刻表染色体，对其引入客流控制系数 $p_{i,k} \in [0.8,1]$ 使每个控制站点的进站人数 $C_{i,k}^{\mathrm{inC}}$ 限制在最大安全容量的 0.8～1 倍范围内，生成客流控制系数染色体及种群，通过选择算子、交叉算子、变异算子迭代运算，求得最优客流控制策略；在其基础上，继续对发车时刻染色体进行交叉、变异、选择，求解得到考虑客流控制的最优发车时刻表。

3.2　基础数据

以杭州地铁 4 号线为例，该城市轨道交通线路全长 20.8 km，共设车站 18 座，车站分布情况如图 8

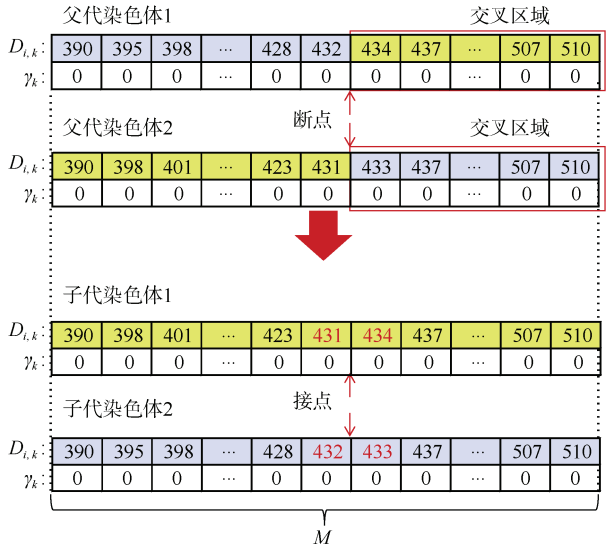


图 4　无大小交路方案——单点交叉法

Figure 4　Single-point crossover without long-short routing scheme

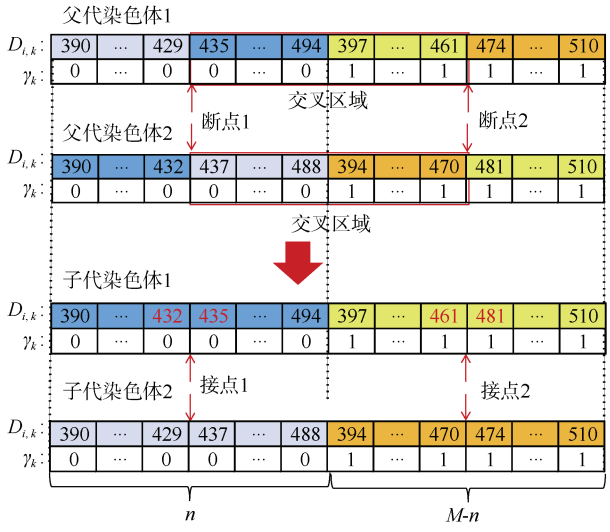


图 5　考虑大小交路方案——双点交叉法

Figure 5　Double-point crossover with long-short routing scheme

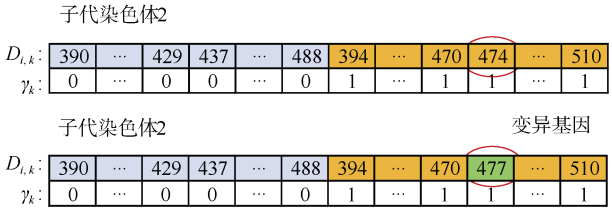


图 6　变异运算

Figure 6　Mutation operator

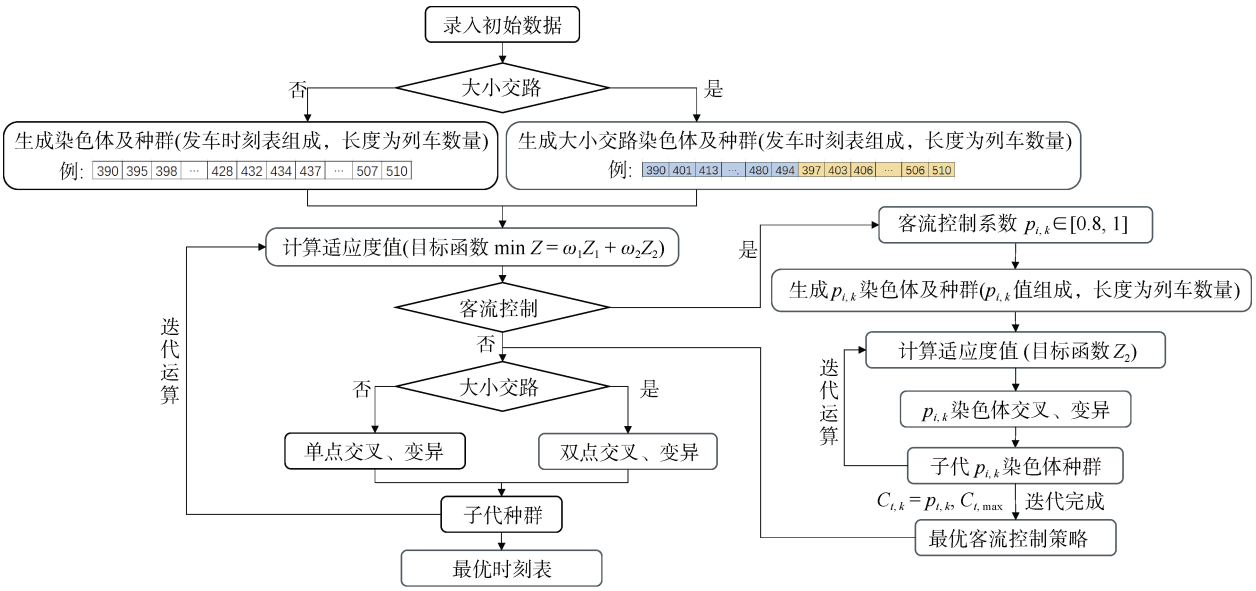


图 7　算法流程

Figure 7　Algorithm flowchart

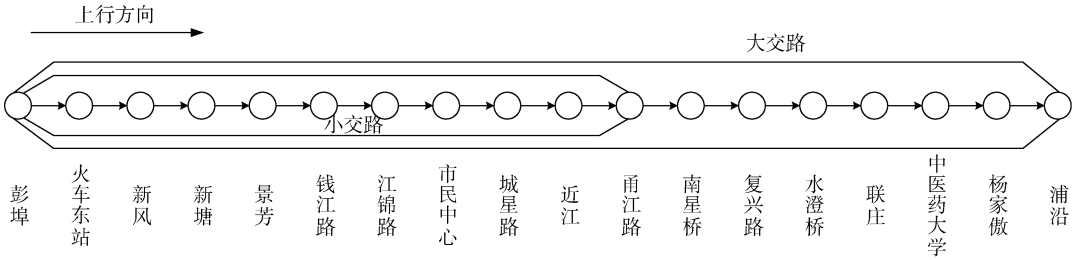


图 8　杭州地铁 4 号线车站分布示意

Figure 8　Station layout of Hangzhou Metro Line 4

所示。本文以杭州地铁 2019 年某工作日的 AFC 数据作为基础数据，针对大小交路方案、客流控制策略与列车时刻表三者进行协同优化研究。以早高峰为例进行验算。

本文所选取的早高峰研究时段为 6:30-8:30，将单位时间粒度设置为 1 min，总研究时段被离散为 120 个单位时间区段，6:30 为第 1 个时间区段，8:30 为第 120 个时间区段。该线路运行区段为车站 1—车站 18(彭埠站—浦沿站)，列车停站时间及各站内最大安全容量分别见表 3 和表 4，模型参数取值见表 5。

表 3　列车停站时间表

Table 3　Station dwell time schedule

车站序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
停站时间/s	45	45	35	35	45	35	35	35	45
车站序号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
停站时间/s	45	35	35	35	35	35	35	35	35

表 4　各站内最大安全容量 C_{max}

Table 4　Maximum safe capacity (C_{max}) of station platforms

车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C_{max}/人	540	540	360	360	360	540	360	360	360
车站	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C_{max}/人	540	360	360	360	360	360	360	360	360

表 5　模型参数取值

Table 5　Model parameter values

参数	取值
C_{max}	1 436 人
h_{min}	2 min
h_{max}	6 min
α	30 元/km[10]
β	15 元/min[10]
C_{ut}	1.085 元/min[11]

彭埠站和火车东站的乘客到达率-时间曲线如图 9 所示。因其余车站到达率远低于彭埠站和火车东站，

并非主要的客流来源，因此近似认为其余各站到达率为恒定不变的常数。根据高峰时期 6:30-8:30 各站总客流量可得出各站到达率见表 6。

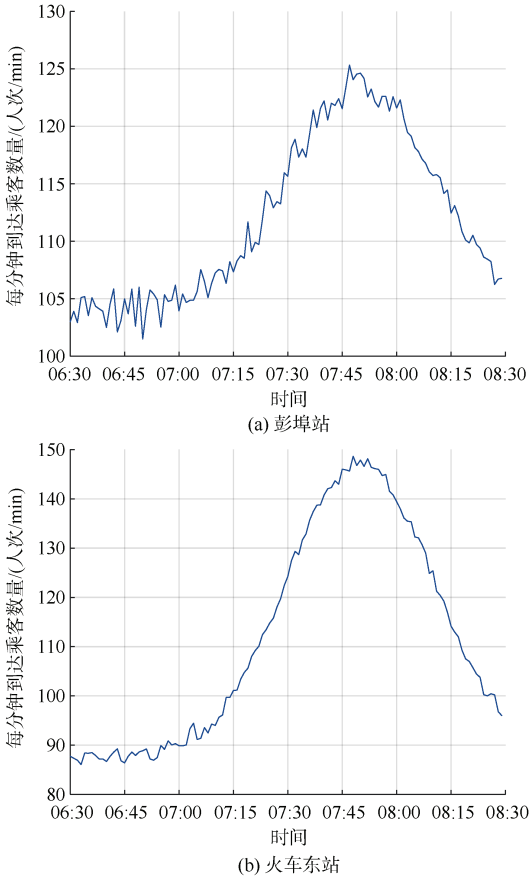


图 9　到达率时间曲线

Figure 9　Arrival rate-time curve

表 6　各站的到达率 φ_i

Table 6　Station arrival rates (φ_i)

车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9
φ_i/(人/min)			16	9	19	26	1	1	2
车站	10	11	12	13	14	15	16	17	18
φ_i/(人/min)	6	1	2	1	1	1	1	1	1

设置遗传算法基本参数：种群数量为 20，交叉概率为 30%，变异概率为 5%；确定染色体长度为 29，表示研究期间共发车 29 次。考虑大小交路方案时，从染色体中随机选取 9 个基因作为大交路的发车时刻，按顺序从头排列并根据约束条件调整，其余 20 个基因作为小交路的发车时刻继续排列，即前段为大交路发车时刻表，后段为小交路发车时刻表。

3.3　结果分析

为进行方案对比，本文将杭州地铁 4 号线数据分别按照无优化方案、仅大小交路、大小交路+客流控制 3 种方案进行迭代求解，分别对应表中序号 1、2、3。设定初始发车时刻表为等间距时刻表；存在大小交路方案的时刻表，全体列车等间隔发车且大交路车辆等间隔穿插其中。经过迭代优化，优化时刻表对应的客流控制人数、乘客出行成本以及企业运营成本见表 7。表中①为客流控制，②为大小交路。

表 7　不同列车时刻表优化方案的计算结果

Table 7　Optimization results of different train timetable schemes

序号	优化方案	客流控制总人数/人		乘客出行成本/元		企业运营成本/元	
		优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
1	无	0	0	195 472	123 449	27 390	28 578
3	②	0	0	803 548	591 937	19 338	20 922
4	①②	98 434	42 608	847 630	604 439	19 338	20 922

3.3.1　大小交路+客流控制的初始与优化方案对比

1) 时刻表优化后的方案较优化前乘客出行成本降低 28.7%。主要原因为均匀的列车时刻表经优化后变为与到达率曲线相匹配的非均匀时刻表，更加贴合乘客出行需求，运力利用更加充分。

2) 企业运营成本增加 8.2%。这是由非均匀列车时刻表造成，部分列车发车提前，在研究时段截止时列车运行时间及路程有所增加，故在目标函数保持下降趋势的同时，出现了企业运营成本小幅上升的现象。当研究时段扩大后，列车数量增加，发车提前的列车与发车延后的列车数量近似抵消，优化前后企业运营成本的差异近乎消失，故分析时该差异可忽略不计。

3) 限流人数经过时刻表优化后降低 56.7%。非均匀时刻表大幅降低了站外等待乘客的人数，地铁运输效率大幅提高。

协同优化前的列车运行图、协同优化后的列车运行图如图 10 所示。

经过迭代运算，列车的发车间隔从原先的均匀间隔优化为更为灵活的非均匀间隔时刻表，限流人数、乘客总等待时间有着显著的降低，即非均匀时刻表降低了列车的空载率，地铁运输效率大幅提高。图 11～13 分别为初始时刻表及优化时刻表所分别对应的站内等待人数、站外等待人数、总等待人数(站内+站外)随车站序号、列车序号的分布情况，该组图更能直观地反馈优化结果。

3.3.2　3 种措施(无方案、大小交路、大小交路+客流控制)优化后的时刻表方案纵向对比

1) 企业运营成本。实行大小交路方案，企业运营

成本较无大小交路方案降低约 23.6%；在其基础上实施客流控制策略，企业运营成本无变化。本文在实行大小交路优化方案时，保证了列车编组总数量不变，即在有限的列车数量以及相应的发车间隔约束下，对列车运力实现了更加精准的分配，在乘客到达率较小的站增大发车间隔(仅通过大交路列车)，在乘客到达率较高的站增加列车开行频次(通过大交路列车+小交路列车)，总体上减少了部分列车的低效运行时间和运行距离，降低了企业运营成本。

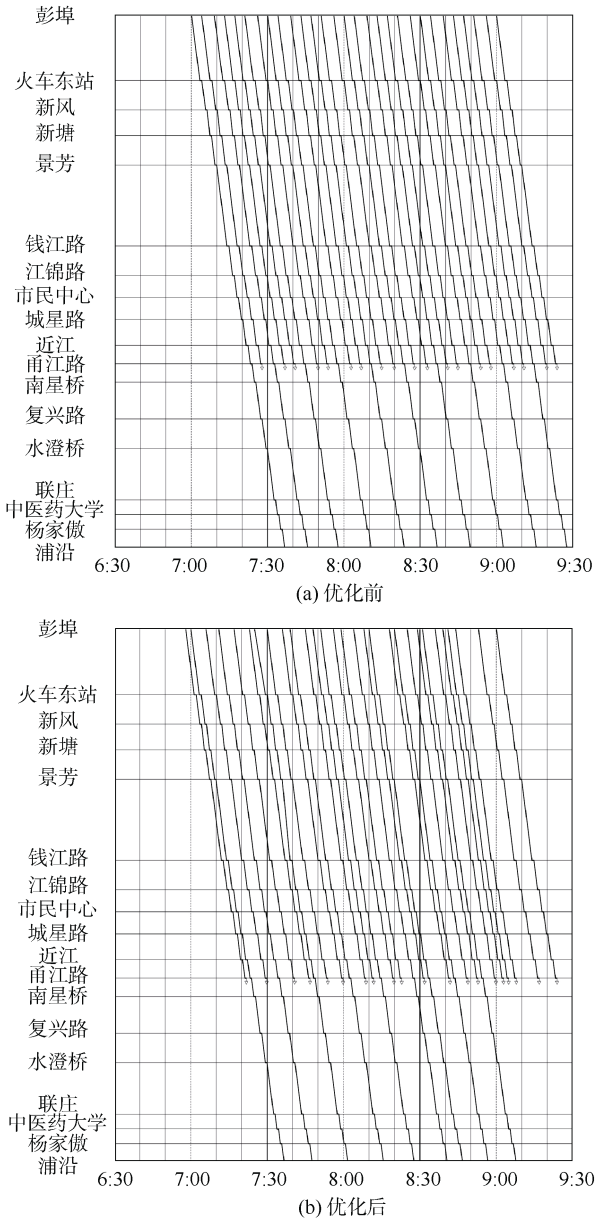


图 10　协同优化前后列车运行图

Figure 10　Train operation diagrams before and after coordination optimization

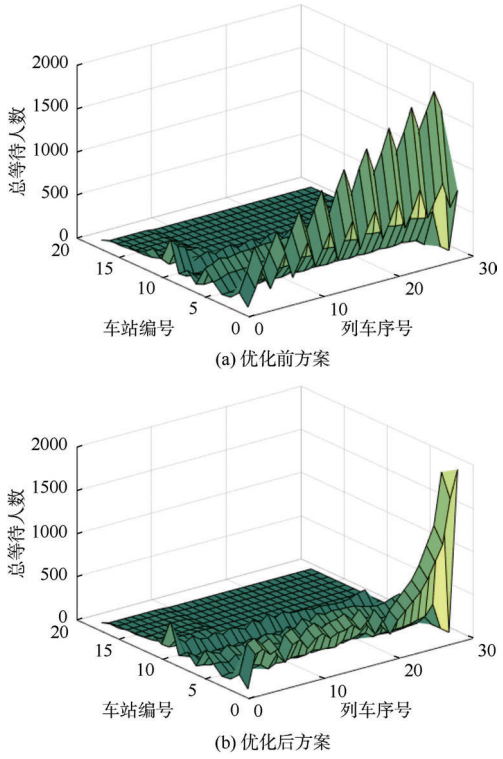


图 11　优化前后各车站等待总人数分布情况

Figure 11　Total passenger waiting distribution at stations before and after optimization

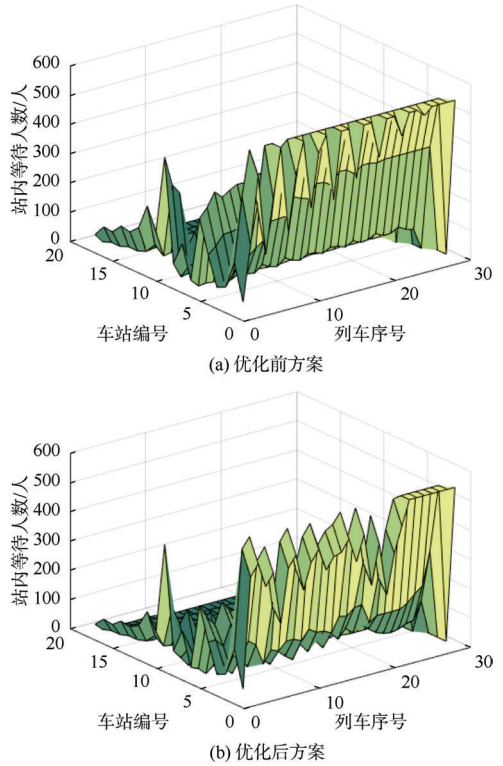


图 12　优化前后各车站站内等待人数分布情况

Figure 12　In-station passenger waiting distribution before and after optimization

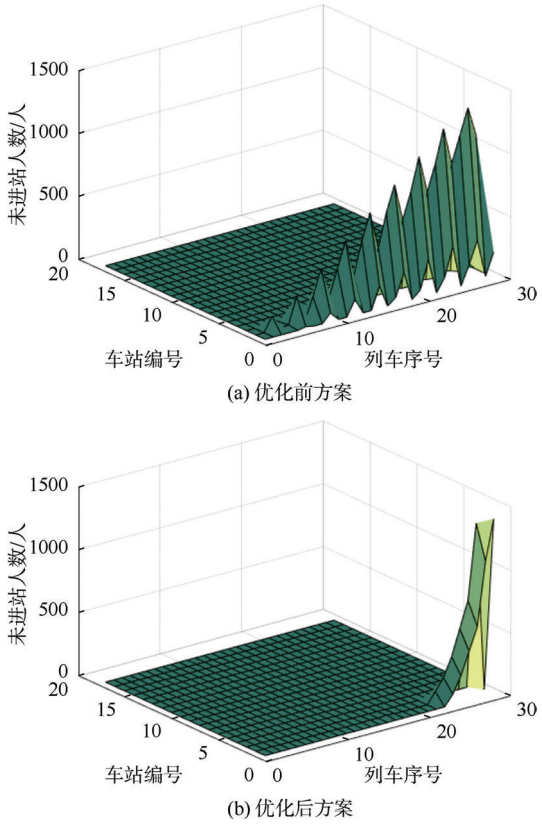


图 13　优化前后各车站站外等待人数分布情况

Figure 13　Out-of-station passenger waiting distribution before and after optimization

2) 乘客出行成本。客流控制方案与无方案近似相等，实行大小交路方案，乘客出行成本较无方案增加202.8%；在其基础上实施客流控制策略，乘客出行成本增加 2.1%。因本文研究过程中保证了列车编组总数量不变，因此在实行大小交路开行方案减小企业运营成本的同时，不可避免地会增加部分大交路区段进站乘客的等待时间，因此乘客出行成本在实行大小交路方案后会有较大幅度的增长。采用客流控制策略后乘客出行成本变化非常小，即客流控制策略对企业运营成本以及乘客出行成本影响较小。

经上述分析可知，大小交路方案大幅降低了企业运营成本，但乘客出行成本上升较多，其本质为以乘客等待时间增多换取了列车运行成本、人力资源成本的减小。在其基础上增加客流控制策略，可保证乘客出行成本不过多增加的情况下优化车站内部的管理，提高车站安全及乘客上车效率，故大小交路+客流控制+非均匀发车时刻表 3 种优化方案相结合，可兼顾乘客出行成本、企业运营成本及车站内部乘客的安全有序性，达到本文的优化目标，实现企业与社会的双赢。

4　结论

本文以城市轨道交通单线路为研究对象，构建了列车时刻表优化的数学模型。以早高峰时期杭州地铁 4 号线实际运行数据作为案例分析，通过客流控制、大小交路开行方案的实施，结合遗传算法的迭代运算，实现了列车时刻表的优化目标。

1) 在高峰期站内人数激增情况下，非均匀发车时刻表，将列车的运力与“先增后减”的乘客到达率相匹配，增强了线路运行效率。

2) 在时刻表优化的基础上实行大小交路开行方案，在解决乘客到达率-时间分布不均匀问题的同时，解决了空间分布不均的问题，实现企业运营成本降低23.6%，可节约成本以换取更多车次投入运行，进一步缓解高峰期压力。

3) 客流控制策略对乘客出行成本、企业运营成本的影响较小。在线路遭遇大客流冲击时，适当限制进站人数，可在不过多影响线路运行效率的前提下方便站内乘客上下车组织，提高上车效率，减小站内拥堵，保证乘客安全。

参考文献

[1] ZHU Ling, LI Shukai, HU Yuting, et al. Robust collaborative optimization for train timetabling and short-turning strategy in urban rail transit systems[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2023, 11(1): 147-173.

[2] YUAN Jiawei, GAO Yuan, LI Shukai, et al. Integrated optimization of train timetable, rolling stock assignment and short-turning strategy for a metro line[J]. European journal of operational research, 2022, 301(3): 855-874.

[3] 张海, 吕苗苗, 倪少权. 基于非均匀发车间隔的大小交路时刻表优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 224-233.
ZHANG Hai, LV Miaomiao, NI Shaoquan. Train timetable optimization model for full-length and short-turn routings with irregular departure intervals[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2022, 22(6): 224-233.

[4] LI Jiajie, BAI Yun, HO T K, et al. Integrated optimization of train services plan and passenger flow control on an over-saturated suburban metro line[J]. Journal of central south university, 2023, 30(2): 625-641.

[5] LIANG Jinpeng, REN Mengxue, HUANG Kang, et al. Data-driven timetable design and passenger flow control optimization in metro lines[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2024, 166: 104761.

（下转第 159 页）

和习惯等多方面布局轨道交通停运后的过渡措施。

7 结论

1) 新建轨道交通应强化财务可持续分析。日本实践表明，随着城镇化增速放缓、人口迁移和出行方式变化等因素叠加，低客流轨道交通停运现象会逐步增加。新时期，新建轨道交通应更加谨慎评估预测客流量和财务分析，合理布局新建轨道交通的线位和站点。

2) 既有低客流轨道交通应强化客流提升和成本控制。对于客流偏低且财务不具有可持续性的轨道交通，研判未来沿线人口和出行分担变化，分析客流培育和非运营业务收入提升的可能性，并通过成本控制保持轨道交通运营的财务可持续性。

3) 低客流轨道交通停运应做好过渡。对于确实无力运营的低客流轨道交通，则需要通过完善替代交通方案，保障有序过渡，让停运的影响尽量减小，从而保障区域居民的基本出行。

本文通过对这一现象的深入分析，可以为我国城市轨道交通在运营和改造方面应对类似问题时提供参考，以实现城市轨道交通可持续发展。

参考文献

[1] 廖向晨辰，向红. 低运量城市轨道交通建设的困境与对策[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 11-15.
LIAO Xiangchenchen, XIANG Hong. Challenges and opportunities for low-volume urban rail transit construction[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 11-15.

[2] 曹庆锋，常文军. 日本轨道交通发展历程及经验启示[J]. 交通运输研究, 2019, 5(3): 10-17.
CAO Qingfeng, CHANG Wenjun. Development history and experience enlightenment of Japanese rail transit[J]. Transport research, 2019, 5(3): 10-17.

[3] 永東功嗣，中川大，松中亮治，等. 地方鉄道の存廃が駅勢圏人口の経年的変化に及ぼす影響に関する研究[EB/OL].(2011-12-19)[2024-12-23]. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201111_no44/pdf/130.pdf.

[4] JR 北海道.「持続可能な交通体系のあり方」について[EB/OL].(2016-07-29)[2024-12-23]. https://www.jrhokkaido.co.jp/pdf/161215-7.pdf.

[5] 侯秀芳，冯晨，燕汉民，等. 2024 年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J]. 都市快轨交通, 2025, 38(1): 13-19.
HOU Xiufang, FENG Chen, YAN Hanmin, et al. Overview of urban rail transit operations in Chinese China's mainland in 2024[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(1): 13-19.

[6] 魏运，楚柏青，光志瑞. 我国城市轨道交通既有线改造路径探讨[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 17-21.
WEI Yun, CHU Baiqing, GUANG Zhirui. Exploration of the path of refurbishment of urban rail transit lines[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 17-21.

（编辑：傅依萱）

（上接第 133 页）

[6] 王殿元，赵兴东，豆飞，等. 基于深度 Q 网络的城市轨道交通协同限流方法[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(3): 97-102.
WANG Dianyuan, ZHAO Xingdong, DOU Fei, et al. Cooperative passenger flow control method for urban rail transit utilizing deep Q-network[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(3): 97-102.

[7] MENG Fanting, YANG Lixing, WEI Yun, et al. Collaborative passenger flow control on an oversaturated metro line: a path choice approach[J]. Transportmetrica B: transport dynamics, 2020, 8(1): 376-404.

[8] ZHANG Yunfeng, LI Shukai, YUAN Yin, et al. Approximate dynamic programming approach to efficient metro train timetabling and passenger flow control strategy with stop-skipping[J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2024, 127: 107393.

[9] LIU Renming, LI Shukai, YANG Lixing. Collaborative optimization for metro train scheduling and train connections combined with passenger flow control strategy[J]. Omega, 2020, 90: 101990.

[10] 汤莲花，徐行方. 基于双层规划的市郊轨道交通多交路快慢车开行方案优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 152-159.
TANG Lianhua, XU Xingfang. Optimizing train plan with multi-routing and express-local modes for suburban rail transit based on bi-level programming[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2018, 18(3): 152-159.

[11] 喻雯瑶，朱志国. 城市轨道交通交路方案选择方法[J]. 综合运输, 2020, 42(9): 54-59.
YU Wenyao, ZHU Zhiguo. The selection method of urban rail transit routing scheme[J]. China transportation review, 2020, 42(9): 54-59.

（编辑：傅依萱）