doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.019

大型活动进场时段城市轨道交通运行计划优化

肖起强[1]，石俊刚[1]，朱　炜[2]，侯　伟[3]
（1. 华东交通大学交通运输工程学院，南昌 330013；2. 同济大学交通运输工程学院，上海 201804；
3. 南昌轨道交通集团有限公司运营分公司，南昌 330038）

摘　要：为缓解大型活动开始前大量乘客集中在活动举办地附近的地铁站出站而产生的站台拥堵问题，采用错开上下行列车的到站时刻和设计列车跳停策略的方法，建立以最小化出站乘客在站台的滞留时间、乘客出站时在站台的拥挤风险和列车跳停次数为目标的数学优化模型，对列车的运行时间和停站方案进行优化。此外，结合地铁运行图和大型活动的客流特点，设计迭代局部搜索算法求解。设计算法包含 2 种搜索可行邻域解的方法：一种是通过调整列车运行和停站时间搜索邻域解，另一种是通过调整停站方案搜索邻域解。以南昌某大型活动的数据为例，对模型和算法的效果进行验证，实例表明：设计的迭代局部搜索算法能快速得到高质量解，优化后站台上的人数最大值由 2 951 人降至 1 006 人，乘客的平均出站时间减少了 94.7 s，减少明显，站台的拥挤风险降低了 94%，错开列车到站时间和使列车跳停的策略能有效减少乘客的出站时间，缓解活动开始前活动现场附近车站的拥挤情况。

关键词：地铁；运行计划优化；拥堵；迭代局部搜索算法；大型活动
中图分类号：U231；U292.4+1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0144-10

Optimization of Urban Rail Transit Operation Plan during the Entry Period of Large-Scale Events

XIAO Qiqiang[1], SHI Jungang[1], ZHU Wei[2], HOU Wei[3]
(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013;
2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804;
3. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Operating Branch, Nanchang 330038)

Abstract: To alleviate platform congestion caused by a large number of passengers exiting metro stations near event venues before the start of large-scale events, this study proposes a method that staggers the arrival times of trains in both directions and incorporates a skip-stop strategy. A mathematical optimization model is developed to minimize the platform dwell time of outbound passengers, the risk of crowding on the platform, and the number of skip-stop operations. Furthermore, an iterated local search algorithm is designed, taking into account the characteristics of passenger flow and the metro timetable during large-scale events. The algorithm explores feasible neighboring solutions in two ways: by adjusting train running and stopping times, and by modifying stop plans. Using data from a major event in Nanchang as a case study, the effectiveness of the model and algorithm is validated. The results show that the proposed iterated local search algorithm can quickly obtain high-quality

收稿日期：2024-08-21　修回日期：2025-05-08
第一作者：肖起强，男，硕士研究生，研究方向为轨道交通运输系统优化，2558658103@qq.com
通信作者：石俊刚，男，博士，副教授，研究方向为交通运输系统优化，jgshi@ecjtu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金项目(72361012)；南昌轨道交通科研计划项目(2021HGKYC005)
引用格式：肖起强，石俊刚，朱炜，等. 大型活动进场时段城市轨道交通运行计划优化[J]. 都市快轨交通，2025，38(4)：144-153.
XIAO Qiqiang, SHI Jungang, ZHU Wei, et al. Optimization of urban rail transit operation plan during the entry period of large-scale events[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 144-153.

solutions. After optimization, the maximum number of passengers on the platform decreased from 2,951 to 1,006, the average platform exit time for passengers was reduced by 94.7 seconds, and the platform crowding risk was reduced by 94%. The strategies of staggering train arrivals and implementing skip-stops can effectively reduce passenger exit times and alleviate congestion at stations near event venues before large-scale events begin.
Keywords: metro; operation plan optimization; congestion; iterated local search; large scale event

大型活动参与人数较多，在大型活动现场附近停车不便，公共交通往往成为大型活动参与者的首选，活动大客流给城市公共交通(包括公交、地铁等)带来巨大的运营压力。在大型活动影响下，大型活动举办地点附近的地铁站点会出现客流激增的情况，尤其是活动开始前一段时间，大量乘客从活动现场附近车站出站，存在较大的拥挤踩踏风险。为降低客流集中到站带来的风险，需通过科学的运输组织策略避免客流过度集中到站，以缓解车站拥堵。

对于大型活动背景下地铁的相关研究，主要集中在对活动客流预测、运能和活动客流匹配问题、散场客流疏散等研究。在活动客流预测方面，基于对大型活动地铁站客流分析，梁强升[1]提出进出站量及客流OD的预测方法，郑俊峰等[2]采用一种基于STL的时间序列分解的进出站客流预测方法。在大型活动背景下运能和活动客流匹配方面，为更好地匹配断面的运力和运输需求，张皓翔[3]采用加开列车并优化加线后的运行图方法，郑博[4]采用基于预测得到的大型活动客流OD优化开行方案的方式。在活动结束后散场客流疏散方面，江志文[5]通过对大型活动散场阶段客流特征和疏散的交通方式分析，以最小化运营成本、乘客出行时间成本和滞留时间为目标对城市轨道交通行车计划和公交的接驳计划进行优化，制定了以城市轨道交通为主、接驳公交为辅的开行计划。在运行图优化方面，学者的优化目标多样。张伯男等[6]以节能和最小化列车到站间隔标准差为目标优化高峰与平峰过渡时段的运行图。为解决城市轨道交通客流方向不均衡情况下列车牵引能耗高和乘客候车时间长的问题，冉昕晨等[7]采用大小交路和列车空驶的策略，构建了最小化牵引能耗和乘客等待时间的运行图优化模型。SHI等[8]以最小化乘客聚集风险、乘客等待时间、乘车时间和票价损失为目标，建立考虑时变和弹性乘客需求的过饱和线路的跳停优化模型，并设计ILS算法进行求解。LIU等[9]以最小化换乘时间和最大化乘客乘坐城际列车的可能性为目标，优化节假日早上各线路第1列列车的时刻表。WANG等[10]以最大化乘客换乘成功的概率和OD间乘车可达性为目标，优化线网最后一趟列车时刻表。WANG 等[11]在不增加运营单位成本的情况下，以最小化乘客换乘失败的期望、乘客的平均换乘时间和随机乘客带来的负面影响为目标，优化调整线网最后1列车的时刻表。

综上，现有针对大型活动的组织研究大都围绕客流预测、运能优化和散场客流运输组织等方面，但活动开始前大量客流涌向活动现场，周边车站的出站客流较为集中，同样容易引起拥堵和人员踩踏等风险，目前缺乏相关研究。在运行图优化方面，学者对高峰时段、高峰和平峰过渡时段、清晨第1列车和深夜最后1列车的运行图优化都有研究，但对大型活动这类特殊场景下的优化研究较少。本研究立足于大型活动开始前乘客在活动附近的进场地铁车站集中到达的拥堵问题，通过错开上下行列车的到站时刻和设计列车跳停策略，以均衡各车站的到达人数，缓解车站拥堵。

1 问题描述及模型假设

1.1 问题描述

大型活动开场前，活动参与者从沿线不同车站上车，经地铁列车运输至活动邻近车站下车，以前往活动现场。为方便描述，将这些活动邻近车站称为活动进场车站，简称“进场站”。为应对大型活动的运输需求，运能方面可通过加开列车的方式来增加运能。但在进场站，乘客集中到达时，由于站台的楼扶梯(出口)能力有限，乘客下到站台的速度远大于乘客经楼扶梯离开站台的速度。若乘客无法及时离开站台，容易造成站台客流过大，存在客流拥挤和踩踏风险，尤其是上下行双方向列车同时到达时，双向乘客同时下车，客流拥堵风险更大。

鉴于此，为缓解大型活动前夕进场站到达客流的压力，本研究通过采用协同优化列车的运行时间和停站方案的方式，错开列车到达同一进场站的时间，均衡各进场站的到达客流人数，避免同一站台客流到达量过大，以减小站台人数峰值，降低客流聚集风险，保障地铁的安全生产。

1.2 模型假设

为方便建模，本文设定如下假设。假设1：活动开始前，已安排足够的车次运输进场客流，乘客都能乘

坐最近的 1 列车。假设 2：参加大型活动的乘客主要从活动临近的几个车站前往活动场所，当列车在乘客的目的车站跳停后，乘客将依据不同车站下车的效益就近选择其他进场站下车。假设 3：站台楼扶梯(出口)的通过能力不随乘客的拥挤程度变化，乘客离开的速率不变。假设 4：假设客流已知，为模型的输入参数，可通过现有的客流预测方法获得。

2 模型构建

为方便理解模型，本研究中数学优化模型所采用的符号含义见表 1。

表 1 参数及含义

Table 1 Parameters and definitions

符号	说明
N^{S}	车站数量
S	车站索引集合，S={0，1，2…，N^{S}–1}
s	车站索引，$s\in S$
γ	列车的运行方向，γ=1 表示下行(车站索引变小的方向)，γ=2 表示上行
S_s^{γ}	顺 γ 方向列车运行方向，在车站 s 前方车站的集合，γ=1 时，$S_s^{\gamma}=\{x\mid s<x\leqslant N^{S}-1, x\in\mathbb{N}\}$，$\gamma$=2 时，$S_s^{\gamma}=\{x\mid 0\leqslant x<s, x\in\mathbb{N}\}$，其中 $\mathbb{N}$ 为自然数集合
J	进场站车站索引集合，$J=\{j_0, j_1, j_2\cdots\}\subseteq S$
$C_s^{安}$	4 min 内可从车站 s 的站台撤离到站厅的人数，$s\in S$
C_s^{plt}	车站 s 的站台设计容量，$s\in S$
C_s^{M}	车站 s 的站台乘客数量阈值
N^{T}	时间粒度数量
T	时间粒度索引集合 T={0，1，2…N^{T}–1}
t	时间粒度索引，$t\in T$
Δt	单位时间粒度所代表的时长，s
N^{γ}	γ 方向的列车数量
K_{γ}	γ 方向车次索引集合，K_{γ}={0，1，2…N^{γ}–1}
k	车次索引，$k\in K_{\gamma}$，γ=1 或 2
$\Gamma_{t,s1,s2}$	时间粒度 t 内产生的从 $s1$ 到 $s2$ 的客流 OD，人
σ_s	车站 s 单位时间粒度内站台乘客通过楼扶梯(出口)离去的人数，人
$\underline{\tau}^{发到}$	最小发到间隔，s
$\underline{\tau}^{连}$	最小连发间隔，s
$\underline{T}_{k,s,\gamma}^{svc}$ / $\overline{T}_{k,s,\gamma}^{svc}$	γ 方向列车 k 在车站 s 最小/大停站时间，s
$\underline{T}_{k,s,\gamma}^{sec}$ / $\overline{T}_{k,s,\gamma}^{sec}$	γ 方向列车 k 在车站 s 前方区间最小/大区间运行时间，s
$T_s^{进}$	乘客在车站 s 从站厅到站台的花费的平均时间，s
$H_{\gamma,s}$	γ 方向乘客经由车站 s 下车前往活动现场的效用，$s\in J$
θ_s	车站 s 的站台通向站厅的出口数量

续表

符号	说明
b_s	车站 s 的站台乘降区宽度，$s\in S$，m
ρ_1	地铁站台设计所规定的最小人流密度，m^2/人
$C^{滞}$	目标函数中出站乘客在站台的滞留时间权重
$C^{险}$	目标函数中站台风险的权重
$C^{跳}$	目标函数中列车在进场站跳停一次的惩罚
M	站台风险函数中站台人数超过 C_s^{plt} 或 $C_s^{安}$ 时的惩罚系数
$t_{k,s,\gamma}^{A}$	γ 方向 k 次列车到达 s 站的时间，s
$t_{k,s,\gamma}^{D}$	γ 方向 k 次列车从 s 站出发的时间，s
$g_{k,s,\gamma}$	0～1 变量，表示 γ 方向 k 车次是否在 s 站停站，0 代表不停站，1 代表停站
$a_{k,s,\gamma}^{t}$	0～1 变量，时间粒度 t 结束前 γ 方向车次 k 是否到达 s 站，0 表示否，1 表示是，故有 $a_{k,s,\gamma}^{t}\leqslant a_{k,s,\gamma}^{t+1}, t\in T/\{\lvert T\rvert\}$
$d_{k,s,\gamma}^{t}$	0～1 变量，时间粒度 t 结束前 γ 方向车次 k 是否从 s 站出发，0 表示否，1 表示是，故有 $d_{k,s,\gamma}^{t}\leqslant d_{k,s,\gamma}^{t+1}, t\in T/\{\lvert T\rvert\}$
$p_{k,s,\gamma}^{B}$	乘 γ 方向 k 车次前往 s 站的乘客数，人
$p_{k,s,\gamma}^{A}$	乘 γ 方向 k 车次并实际在 s 站下车的乘客数，人
$p_{t,s}$	第 t 个时间粒度结束后在 s 站的站台等待离开的人数，人
$t_{k,s,\gamma}^{sec}$	γ 方向车次 k 在车站 s 前方区间的区间运行时间，s
$t_{k,s,\gamma}^{svc}$	γ 方向车次 k 在车站 s 的停站时间，s
$p_{t,s,\gamma}^{w}$	时间粒度 t 内在 s 站等候 γ 方向列车的乘客数量，人
$p_{t,s}^{plt}$	时间粒度 t 内在 s 站台上的人数，人
$r_{t,s}$	车站 s 在时间粒度 t 内的站台风险
W	活动进场站的出站乘客在站台的滞留时间
R	活动进场站的站台风险
Φ	列车在活动进场站的跳停次数

2.1 列车运行约束

2.1.1 停站时间约束

列车在车站的停站时间需满足相应的时间约束，即 γ 方向 k 次列车在 s 站的停站时间不小于最小停站时间，且不大于最大停站时间，列车的停站约束如公式(1)。

$$\underline{T}_{k,s,\gamma}^{svc}g_{k,s,\gamma}\leqslant t_{k,s,\gamma}^{svc}\leqslant\overline{T}_{k,s,\gamma}^{svc}g_{k,s,\gamma},\quad \forall s\in S, k\in K_{\gamma}, \gamma\in\{1,2\} \tag{1}$$

当列车到达车站 s 但未离开车站 s 时即代表列车在 s 站停站，γ 方向 k 次列车在 s 站的停站时间 $t_{k,s,\gamma}^{svc}$ 计算如公式(2)。

$$t^{\mathrm{svc}}_{k,s,\gamma}=\Delta t\sum_{t=0}^{|T|-1}(a^t_{k,s,\gamma}-d^t_{k,s,\gamma}),\forall s\in S,k\in K_\gamma,\gamma\in\{1,2\} \quad (2)$$

2.1.2 区间运行时间约束

γ方向k次列车在s站的前方区间运行时间需不小于相应区间的最小运行时间，且不大于最大区间运行时间，约束条件如公式(3)和公式(4)。

$$\begin{aligned}&\underline{T}^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma}\leqslant t^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma}\leqslant\overline{T}^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma},\\&\forall s\in S\setminus\{N^{\mathrm{S}}-1\},k\in K_\gamma,\gamma=2\end{aligned} \quad (3)$$

$$\underline{T}^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma}\leqslant t^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma}\leqslant\overline{T}^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma},\forall s\in S\setminus\{0\},k\in K_\gamma,\gamma=1 \quad (4)$$

当列车已从车站出发而未到达下一个车站时，代表列车在两个车站之间的区间运行，故γ方向k次车在s站的顺列车运行方向的前方区间运行时间$t^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma}$计算方式如公式(5)和公式(6)。

$$\begin{aligned}&t^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma}=\Delta t\sum_{t=0}^{|T|-1}(a^t_{k,s-1,\gamma}-d^t_{k,s,\gamma}),\\&s\in S\setminus\{N^{\mathrm{S}}-1\},k\in K_\gamma,\gamma=2\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}&t^{\mathrm{sec}}_{k,s,\gamma}=\Delta t\sum_{t=0}^{|T|-1}(a^t_{k,s,\gamma}-d^t_{k,s-1,\gamma}),\\&s\in S\setminus\{0\},k\in K_\gamma,\gamma=1\end{aligned} \quad (6)$$

2.1.3 连发间隔约束

为使同方向前后两列车保持足够的安全间距，前后列车从车站驶向区间的时间差需不小于最小连发间隔。列车的连发间隔约束如公式(7)。

$$\begin{aligned}&\Delta t\sum_{t=0}^{|T|-1}(a^t_{k,s,\gamma}-a^t_{k\text{-}1,s,\gamma})\leqslant\underline{\tau}^{\text{连}},\\&\forall s\in S,k\in K_\gamma\setminus\{0\},\gamma\in\{1,2\}\end{aligned} \quad (7)$$

2.1.4 发到间隔约束

后车进入车站时需确保前车已从车站出清，前后两车需满足最小发到间隔约束，如公式(8)。

$$\begin{aligned}&\Delta t\sum_{t=0}^{|T|-1}(a^t_{k,s,\gamma}-d^t_{k-1,s,\gamma})\leqslant\underline{\tau}^{\text{发到}},\\&\forall s\in S,k\in K_\gamma\setminus\{0\},\gamma\in\{1,2\}\end{aligned} \quad (8)$$

2.2 目标函数

为缓解乘客离开站台时楼扶梯(出口)的拥堵，同时尽可能减少列车跳停给乘客带来的不便，优化模型以最小化出站乘客下车后在站台的滞留时间、站台乘客的拥挤风险和列车跳停次数为目标，目标函数如公式(9)。

$$f=\min\left\{C^{\text{滞}}W+C^{\text{险}}R+C^{\text{跳}}\Phi\right\} \quad (9)$$

2.2.1 乘客出站时在站台的滞留时间

当列车跳站停车时，乘客可能无法在其原定的位置下车，需考虑从其他邻近的车站下车，此时乘客会依据不同路径的效益选择一个合适的车站出站。

依据 logit 模型的 AII 特性[12]，当乘客经由车站s的固定效用表示为效用函数$h(s)$时，乘客选择经由s站出站的概率和效用的关系如公式(10)。

$$p(s)=\frac{e^{h(s)}}{\sum_{j\in J}e^{h(j)}},s\in J \quad (10)$$

依据公式(10)，当列车在某些车站跳停时，乘γ方向列车的乘客选择从s站出站的概率$p_\gamma(s,k)$计算如公式(11)。

$$p_\gamma(s,k)=\frac{g_{k,j,\gamma}e^{\mathrm{H}_{\gamma,s}}}{\sum_{j\in J}(1-g_{k,j,\gamma})e^{\mathrm{H}_{\gamma,s}}},k\in K_\gamma,s\in J,\gamma\in\{1,2\} \quad (11)$$

当列车存在跳停时，乘客乘坐的列车在其原计划的下车地点不停站时，乘客会选择在其他车站下车，γ方向列车k在s站的下车人数计算如公式(12)。

$$\begin{aligned}&p^{\mathrm{A}}_{k,s,\gamma}=g_{k,s,\gamma}\left\{p^{\mathrm{B}}_{k,s,\gamma}+p_\gamma(s,k)\left[\sum_{j\in J\setminus\{s\}}p^{\mathrm{B}}_{k,j,\gamma}(1-g_{k,j,\gamma})\right]\right\},\\&k\in K_\gamma,s\in J,\gamma\in\{1,2\}\end{aligned} \quad (12)$$

在s站乘坐γ方向k次车的乘客为在γ方向的前一列车$(k-1)$离开后至k次车离开前这期间到达站台的乘客，在s站乘坐γ方向车次k的人数$p^{\mathrm{B}}_{k,s,\gamma}$计算如公式(13)。

$$\begin{aligned}&p^{\mathrm{B}}_{k,s,\gamma}=\sum_{s1\in S\setminus J}\sum_{t=t^{\mathrm{D}}_{k-1,s,\gamma}-T^{\text{进}}_s+1}^{t^{\mathrm{D}}_{k,s,\gamma}-T^{\text{进}}_s}g_{k,s,\gamma}\Gamma_{t,s1,s},k\in K_\gamma,\\&s\in J,\gamma\in\{1,2\}\end{aligned} \quad (13)$$

t=0 时站台人数为 0，其余时间粒度t结束后在s站等待离开站台的人数计算如公式(14)。

$$\begin{aligned}&p_{t,s}=p_{t-1,s}-\min\{\sigma_s,p_{t-1,s}\}+\\&p^{\mathrm{A}}_{k,s,\gamma}\sum_{\gamma=1}^{2}\sum_{k\in K_\gamma}\left(a^t_{k,s,\gamma}-a^{t-1}_{k,s,\gamma}\right),s\in J,t>0\end{aligned} \quad (14)$$

乘客出站时在站台的滞留时间W计算方式如公式(15)。

$$W=\Delta t\sum_{s\in J}\sum_{t=0}^{|T|-1}\frac{p_{t,s}+p_{t-1,s}}{2} \quad (15)$$

2.2.2 站台拥挤风险

乘客下车后向站外移动时，出站乘客会在站台通往外界的楼梯口聚集，当客流量较大时，楼梯口的通过能力无法满足乘客短时大量到达情景下的出站需求时，乘客会在站台出口前聚集。乘客在这一区域的高密度聚集，加之站台空间有限，极大增加了拥挤踩踏事件的风险。客流聚集风险与人群的密集程度及其所占据的空间范围直接关联。站台的拥挤情况变化可大致分为 3 个阶段(见图 1)。

阶段 1：出站人数较少，单位乘客的站立面积充裕，此时的拥挤踩踏风险小，可忽略不计。

阶段 2：出口处的乘客密度和聚集范围都在增大，拥挤踩踏风险迅速增加。

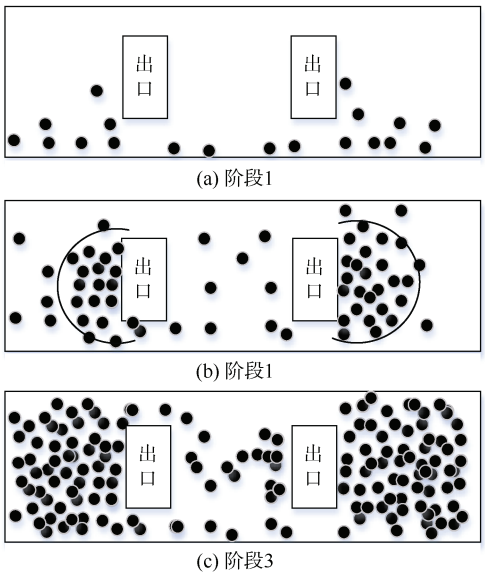


图 1 下车乘客等待出站的 3 个阶段

Figure 1 Illustration of the three stages of passengers waiting to exit the platform after alighting

阶段 3：随着出站乘客的增加，乘客的站立密度增长相对较缓，拥挤的范围以稳定的速度增加，此时对乘客而言，其风险随拥挤范围的扩大而稳定增长。

乘客在活动进场站的拥挤风险 R 值的计算如公式(16)。

$$R=\sum_{t\in T}\sum_{s\in J}r_{t,s} \tag{16}$$

为贴切刻画乘客出站时站台的拥挤风险，本文结合风险变化的趋势构造了单位时间粒度内的站台出站拥挤风险函数如公式(17)。公式(17)中车站 s 的站台乘客数量阈值 C_s^{M} 取值依据公式(18)，取 4 min 内可从车站 s 的站台撤离到站厅的人数和车站 s 的站台设计容量中的较小值，公式(19)为计算 4 min 内可从车站 s 的站台撤离到站厅的人数的公式。

$$r_{t,s}=\begin{cases}0, p_{t,s}^{\mathrm{plt}}\leqslant 0.125\theta_s\pi {b_s}^2\rho_1\\ p_{t,s}^{\mathrm{plt}}\left[\ln\left(\dfrac{16p_{t,s}^{\mathrm{plt}}}{\theta_s\pi {b_s}^2\rho_1}+e-2\right)-1\right], p_{t,s}^{\mathrm{plt}}\leqslant C_s^{\mathrm{M}}\\ \mathrm{M}p_{t,s}^{\mathrm{plt}}, p_{t,s}^{\mathrm{plt}}>C_s^{\mathrm{M}}\end{cases} \tag{17}$$

$$C_s^{\mathrm{M}}=\min\left\{C_s^{\mathrm{plt}},\ C_s^{\text{安}}\right\} \tag{18}$$

$$C_s^{\text{安}}=0.9\left[B^{\text{自}}(N^{\text{自}}-1)\right]+B^{\text{楼}}\Big]T^{\text{疏}} \tag{19}$$

式(17)中 M 为一个足够大常数，使站台风险在站台人数超出 C_s^{M} 时发生突变。公式(19)中 $C_s^{\text{安}}$ 的计算参考《地铁设计规范》(GB 50157—2013)中式(28.2.12)[13]和 NFPA 130—2023 规定的站台安全撤离时间[14]。$N^{\text{自}}$ 为自动扶梯的台数，$B^{\text{自}}$ 为一台自动扶梯的通过能力，人/min；$B^{\text{楼}}$ 为站台上楼梯的通过能力，人/min。$T^{\text{疏}}$ 为站台撤离时间，参考 NFPA 130—2023 中 5.3.3.1，取 $T^{\text{疏}}$=4 min。

车站 s 在时间粒度 t 的站台人数 $p_{t,s}^{\mathrm{plt}}$ 包含等候上车的人数和下车后准备离开的人数两部分，其计算方式如公式(20)。

$$p_{t,s}^{\mathrm{plt}}=p_{t,s}+\sum_{\gamma=1}^{2}p_{t,s,\gamma}^{w}, t\in T_\gamma, s\in J, t\in T\setminus\{0\} \tag{20}$$

候车人数的计算。γ 方向的列车停站期间，γ 方向的乘客能迅速上车，γ 方向的候车乘客数量为 0；其余时间粒度，γ 方向候车乘客数会不断累加，其数量为上一时间粒度的候车乘客数和本时间粒度内到达站台的乘客数之和。故时间粒度 t 内在 s 站等候 γ 方向列车的乘客数计算如公式(21)。

$$p_{t,s,\gamma}^{\mathrm{w}}=\begin{cases}0, t\in\{t_{k,s}^{\mathrm{A}}-t_s^{\text{进}}\leqslant x<t_{k,s}^{\mathrm{D}}-t_s^{\text{进}}\\ \qquad\qquad | k\in K_\gamma\setminus\{0\}, x\in T\}\\ p_{t-1,s,\gamma}^{\mathrm{w}}+\sum\limits_{s2\in S_s^\gamma}\Gamma_{s,s2}^{t}, t\notin\{t_{k,s}^{\mathrm{A}}-t_s^{\text{进}}\leqslant\\ \quad x<t_{k,s}^{\mathrm{D}}-t_s^{\text{进}} | k\in K_\gamma\setminus\{0\}, x\in T\}\end{cases} \tag{21}$$

2.2.3 列车跳停次数

列车跳停时会打乱乘客的出行计划，给乘客的出行带来不便，应尽可能地减少列车跳停，列车跳停次数的计算如公式(22)。

$$\Phi=\sum_{\gamma=1}^{2}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K_\gamma}(1-g_{k,j,\gamma}) \tag{22}$$

3 启发式算法设计

运行图求解问题是一个大规模的 NP 难问题[15]，本研究求解运行图的数学模型是一个非线性整数规划问题，用商业求解器求解困难。为在较短的时间内求得高质量解，本研究采用迭代局部搜索算法求解。

3.1 迭代局部搜索算法总体设计

结合运行图的特点，以现场实际采用的运行图为初始解输入，通过设计迭代局部搜索算法对其进行优化。迭代局部搜索算法以输入的可行解为搜索起点，通过优先调整站台拥堵时段到达的活动进场站的列车运行线的策略搜索邻域解，迭代局部搜索算法的总体设计见图 2。

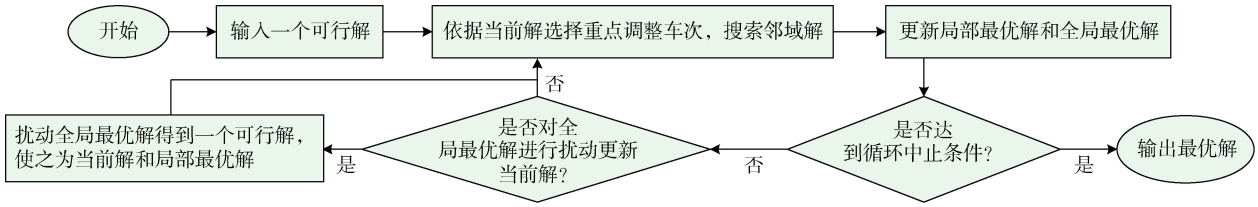


图 2 迭代局部搜索算法总体设计

Figure 2 Overall design of iterated local search algorithm

3.2 邻域解获取

由于站台人数越多，站台风险越大，乘客出站等待时间越长，故需要重点调整的是直接或间接造成站台人数聚集过多的列车和跳站停车的列车(存在惩罚)。在搜索邻域解时随机选择一个活动进场站，并以车站站台人数最多时刻前后到站的几列车作为重点调整列车，通过调整这些列车中 1 列或多列，同时随机调整 1 列或多列非重点列车的方式得到邻域解。

邻域解获取采用 2 种方法，一种是调整列车运行线中某两个事件的持续时间(一个事件的持续时间增加，另一个减少时间)，维持这两个事件之间的运行线形状不变，达到平移两事件之间运行线的效果，将获得的邻域解称之为运行线移动邻域解(见图 3)；另一种是选取列车运行线中的一段串联了所有进场站的运行线，改变这一段运行线中进场站的停站方案，同时维持两端点的时间跨度不变，以此得到停站方案调整邻域解(见图 4)。这两种方式得到运行图相对于调整前的只有少量变化，搜索时能在已找到的高质量附近搜索

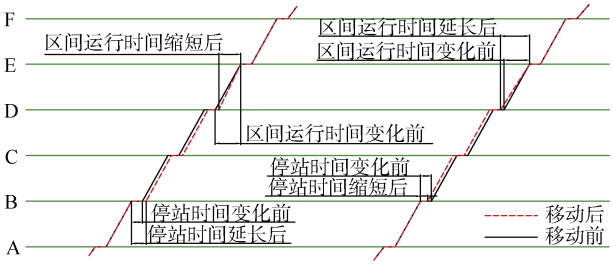


图 3 运行线移动邻域解

Figure 3 Neighbor solution of moving line

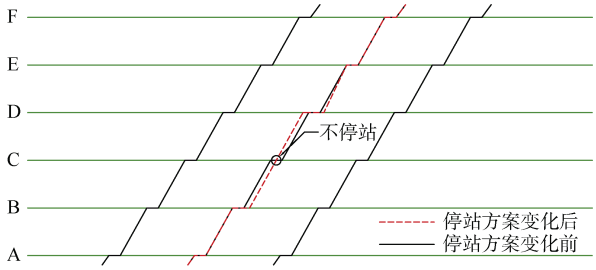


图 4 停站方案调整邻域解

Figure 4 Neighbor solution of stop plan adjustment

可行解，更易得到更优的解，在一定程度避免了盲目搜索，同时对列车的单向运行时间和周转时间影响较小。

3.2.1 方式 1：调整运行时间获取运行线移动邻域解

运行线移动邻域解是通过调整列车的运行时间来错开上下行列车到站时刻，避免乘客集中到站。获取思路是：随机选择运行线中的 2 个点，在运行图中对 2 个点之间的运行线整体向左或向右移动，以此得到新解。主要分成 3 步：①在选定列车后，选择一个不违背列车区间运行时间和停站时间约束的移动范围和移动方向；②依照移动范围和方向移动运行线产生新解；③通过同方向移动和所选列车运行方向相同的邻近列车运行线，以此修复不可行解(见图 5)。运行线移动邻域解获取的步骤如下。

Step1：输入移动的车次索引 k，选择一个移动变化车站范围 S_1 和 S_2。

Step2：S_1 和 S_2 分别向逆列车运行方向和顺列车运行方向搜索一个不违背车次 k 停站时间约束和区间运行时间约束的移动范围：$\left[S^{始},S^{终}\right]$(见图 6)，若不存

在则退出。

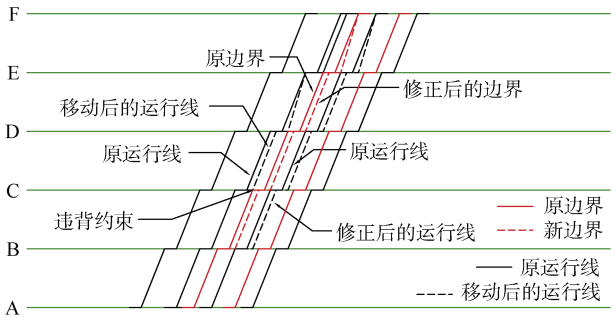


图 5 区间运行冲突的修复

Figure 5 Correction of conflicts in section running



图 6 移动范围搜索图示

Figure 6 Illustration of moving range search

Step3：移动$\left[S^{始},S^{终}\right]$范围内的运行线，检验列车运行线变化可能违背的连发间隔约束和发到间隔约束是否被满足，满足则输出运行线移动后的新解，否则转下一步。

Step4：计$k^{修}$为车次k移动方向同侧相邻的车次，令$k=k^{修}$，转 Step1 搜索一个比当前$\left[S^{始},S^{终}\right]$大的移动范围。

3.2.2 方式 2：调整停站方案获取停站方案调整邻域解

为避免盲目搜索可行邻域解，基于列车运行的事件，设计维持列车在某几个事件的总时间花费不变，重新分配各个事件持续时间的停站方案调整邻域解的搜索算法。分配各事件的持续时间分三步：初次分配，各事件按能完成事件的最小时间分配(满足停站时间和区间运行时间约束)；第二次分配，使事件的发生时间不早于最早发生时间(满足与同向的上一列车最小发到间隔和出发间隔约束)；第三次分配，将未分配的时间分配完，维持各事件的总持续时间不变。详细步骤如下。

Step1：按最小区间运行时间或停站时间给相应事件的持续时间赋予初值，使邻域解满足最小区间运行时间约束和最小停站时间约束。

Step2：在不超过事件的最大允许时间的前提下(不违背最大停站时间和最大区间运行时间约束)，按事件发生顺序逐个事件逐单位增加事件的持续时间，直至和同向的前一列车满足最小发到间隔和出发间隔约束。

Step3：计算剩余未分配的时间

$$t^{剩}=t^{总}-\sum_{V}t_v^{持} \tag{23}$$

Step4：当$t^{剩}<0$时解不可行，退出；当$t^{剩}=0$时转下一步；当$t^{剩}>0$时，在不超过事件的最大允许时间(确保解不违背最大停站时间和最大区间运行时间约束)和不违背列车与后车的最小连发间隔和发到间隔的前提下，按事件发生的逆序逐个事件逐单位增加事件的持续时间，直至$t^{剩}=0$。

Step5：检验解是否可行，可行则输出解。

在调整停站方案获取停站方案调整邻域解的步骤中：U为车站索引集合$U=\{u_1,u_2,u_3\cdots u_n\}$，$J\subseteq U\subseteq S$，且$U$中的元素为连续整数；$t_v^{持}$为事件$v$的持续时间；$t^{总}$为停站方案改变前列车自到$u_1$起到离开$u_n$时止共花费的时间；$V$为列车自到达$u_1$起至离开$u_n$时止所有事件的索引集合，$V=\{v_1,v_2,v_3\cdots v_{2n-1}\}$，$v_1$代表的事件为列车在$u_1$停站，$v_2$代表的事件为列车在$u_1$和$u_2$之间的区间运行…… v_{2n-1}代表列车在u_n停站。

4 实例分析

4.1 案例说明

以南昌地铁 1 号线附近的某大型活动为例，活动位置如图 7 所示。对活动开始前 1.5 h 内经过活动进场站的列车运行图进行优化。1 号线共 24 座站，大型活动的举办对车站 7～10 出站客流影响较大，车站 8(秋水广场站)和车站 9(滕王阁站)尤为严重。4 个活动进场站都为地下岛式站台，长 100 m，站台乘降区宽b_s=12 m，站台乘客密度取 0.5 m^2/人，可站立面积占 80%，C_s^{plt}=1 920，出口数量θ_s=2，$C_s^{M}=C_s^{安}$=1 918，单位时间粒度内站台乘客通过楼扶梯(出口)离去的人数σ_s=59，线路上的列车为 B6 编组。

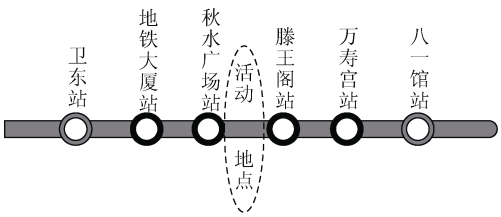


图 7 大型活动举办位置

Figure 7 Happening location of large special event

案例基于活动开始前 1.5 h 内从活动进场站出站

的客流OD数据，共计69 087人，取Δt=10 s，$C^{滞}$=0.1，$C^{险}$=1，$C^{跳}$=10 000，M=10。为尽可能获得高质量求解方案，在实例中将算法的迭代次数设定为20 000次，对运行图上活动开始前1.5 h的列车运行计划进行优化。

4.2 结果分析

依据历史上相似活动的数据可得到上下行方向的乘客选择经由车站7、8、9和10前往活动地点的效用分别满足公式(24)和公式(25)。

$$e^{H_{2,7}}:e^{H_{2,8}}:e^{H_{2,9}}:e^{H_{2,10}}=0.262:0.404:0.204:0.119 \tag{24}$$

$$e^{H_{1,7}}:e^{H_{1,8}}:e^{H_{1,9}}:e^{H_{1,10}}=0.060:0.321:0.483:0.144 \tag{25}$$

迭代过程见图8，优化前后的运行图和活动进场站的站台人数变化情况分别见图9和图10，红色区域代表站台上的人数变化，红色区域高度表示站台人数，高出运行图中车站所在水平线越多代表站台人数越多。

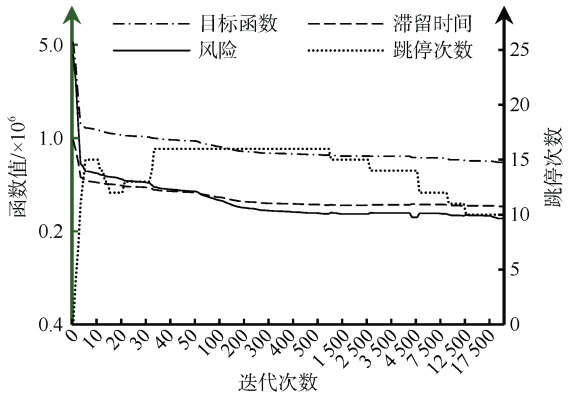


图8 迭代曲线

Figure 8 Iterative curves

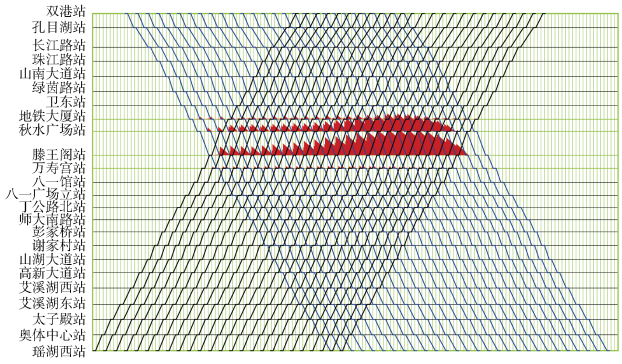


图9 运行图优化前

Figure 9 Diagram before optimization

优化前目标函数为5 186 789，在优化时段内(1.5 h)，乘客下车后在站台的平均滞留时间为139.2 s，列车无跳停，站台最大滞留人数为2 951人，远超站台的设计容量，最大风险达29 510，总风险达4 224 701。

优化后目标函数为656 510，在优化时段内(1.5 h)，乘客下车后在站台的平均滞留时间为44.5 s，滞留时间降低了68%，列车跳停10次，最大滞留人数降低为1 006人，站台最大风险仅为1 658.3。站台上的乘客没有超过站台的设计容量，总风险为249 351，降低了94%。

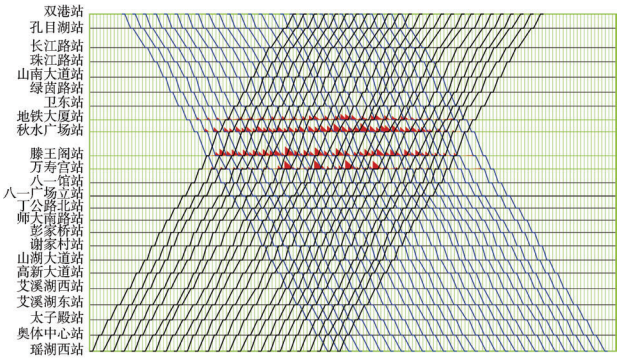


图10 运行图优化后

Figure 10 Diagram after optimization

从图11不同$C^{跳}$取值的迭代曲线中可以发现，总体上，算法在前10次迭代内迅速收敛，1 000次后收敛速度逐渐变缓。与迭代1 000次时的结果比较，迭代至2 000次时，目标函数值平均减少了2.00%。相对于迭代1 000次的结果，迭代2 000～5 000次时，平均每增加1 000次迭代，目标函数减少0.90%，迭代5 000～10 000次时，平均每增加1 000次迭代，目标函数减少0.24%，迭代10 000～20 000次时，平均每增加1 000次迭代，目标函数减少0.19%。

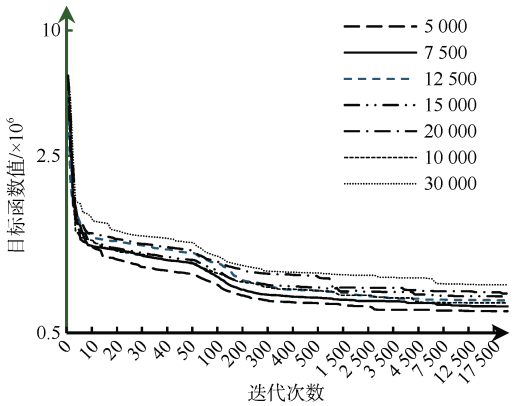


图11 不同$C^{跳}$取值的迭代曲线

Figure 11 Iterative curves for different C^{jump} values

4.3 灵敏度分析

4.3.1 不同$C^{跳}$取值的灵敏度分析

列车跳停给乘客出行带来的影响难以用一个准确的值来评价，对此本研究就不同的$C^{跳}$取值对站台风

险、平均滞留时间和跳停次数的变化进行分析。

从表 2 不同 $C^{跳}$取值灵敏度分析可以看出，跳停次数随着 $C^{跳}$的增加明显减小，站台乘客的平均出站滞留时间、站台最大风险和最大滞留人数逐渐增加。随着 $C^{跳}$增大，模型对列车跳停越来越敏感，跳停次数减少，这是因为列车跳停会将出站客流压力和拥挤风险分摊到其他车站，在 $C^{跳}$变大后会选择牺牲站台的安全来减少跳停，这表现为：出站乘客在站台上平均滞留时间变长和总站台风险变大。在 5 000～30 000 范围内，随着 $C^{跳}$增加，跳停次数减少的速度逐渐减缓，$C^{跳}$平均每增加 5 000，跳停次数约减少 0.8 次，乘客的平均滞留时间约增加 0.116 s，总站台风险平均增加 1 366。通过设置合理的 $C^{跳}$值，可以在跳停次数和客流聚集风险之间做好权衡。

表 2　不同 $C^{跳}$取值灵敏度分析

Table 2　Sensitivity analysis for different C^{jump} values

$C^{跳}$	最大滞留人数/人次	最大风险	总站台风险	平均滞留时间/s	目标函数	跳停次数/次
5 000	941	1 491.60	249 390.09	44.02	608 476.68	11
7 500	1 001	1 645.33	248 895.87	44.02	635 550.42	11
10 000	1 006	1 658.30	249 351.62	44.46	656 510.68	10
12 500	1 009	1 666.10	252 168.84	44.50	672 089.98	9
15 000	1 014	1 679.12	253 787.85	44.51	696 473.66	9
20 000	1 055	1 786.76	249 768.96	44.54	715 353.46	8
30 000	1 070	1 826.54	256 221.53	44.60	774 357.05	7

4.3.2　不同客流倍率灵敏度分析

不同客流情况下车站的客流压力会有区别，列车跳站停车的次数和车站的风险也有差异，故本研究还对不同客流情况下目标函数构成进行了分析。从表 3 不同客流倍率灵敏度分析中可得知，随着客流增加，总站台风险、出站乘客在站台平均的滞留时间和跳停次数都在增加，这是因为站台出口的通过速率小于乘客的到达速率，到达客流的增长会使目标函数的风险值迅速变大，为了降低车站的风险需使列车跳站停车，将乘客转移到其他车站，缓解列车跳停站的客流压力，一定程度上增加了其他车站的出站客流和风险。平均每增加 5%(约 3 454 人)的客流，列车跳停的次数增加 4.5 次，出站乘客在站台的平均滞留时间约增加 0.10 s。出站乘客在站台的平均滞留时间增速较缓，站台总风险增长变快，这是因为站台人数越大(拥堵)，单位乘客的风险越高。虽然随着客流不断增大，客流聚集风险在增大，但通过设置更多的跳停次数，客流聚集风险仍然能够得到有效降低，并极大缓解客流拥堵。

表 3　不同客流倍率灵敏度分析

Table 3　Sensitivity analysis for different passenger flow scales

客流倍率	优化前				优化后			
	总站台风险	平均滞留时间/s	目标函数	跳停次数/次	总站台风险	平均滞留时间/s	目标函数	跳停次数/次
0.9	491 697.32	67.51	911 380.43	0	249 390.09	44.02	394 886.79	2
0.95	1 142 381.98	98.57	1 789 233.61	0	248 895.87	44.02	518 715.31	6
1.0	4 224 701.59	139.28	5 186 789.60	0	249 351.62	44.46	656 510.68	10
1.05	9 460 898.88	190.89	10 845 483.84	0	252 168.84	44.50	801 624.61	15
1.1	15 114 968.14	247.49	16 995 513.43	0	253 787.85	44.51	969 712.83	20

5　结论

为缓解大型活动开始前乘客集中出站的拥挤问题，本研究建立以最小化出站乘客在站台的滞留时间、站台拥挤风险和列车跳停次数为目标的数学优化模型，设计迭代局部搜索算法，并以南昌某大型活动为例，实验研究结论如下。

1) 错开列车到达和使列车跳站停车的 2 种策略能有效缓解大型活动开始前夕乘客集中出站的站台拥堵问题。

2) 建立的数学优化模型能较好地描述大型活动开场前进场站的拥挤情景，求解数学模型得到的运行计划能有效减少乘客的出站时间和降低车站的拥挤风险。

3) 设计采用调整列车运行时间和停站方案的 2 种邻域搜索方法适用于本研究建立的数学优化模型，能有效搜索到可行解，所使用的基于这两种邻域搜索方

法的迭代局部搜索算法能跳出局部最优，并在较短的时间内得到高质量解。

4) 协调列车到达时间和停站方案的方式适用于上下行两个方向到达的客流较为均衡的情况，对于活动地点靠近线路的两端或上下行客流到达不均衡的情景，可以考虑简化数学优化模型，只优化乘客到达活动进场站人数较多方向的列车。此外，模型假设乘客离开站台的速率是一个定值，忽略了站台的拥挤程度和进站客流对乘客离开速率的影响。今后可进一步考虑站台拥挤程度和进站客流对乘客离开站台速率的影响，使站台内乘客的消散速率更贴近实际。

参考文献

[1] 梁强升. 大型活动期间地铁车站客流预测方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 196-199.
LIANG Qiangsheng. Study on metro station passenger flow forecast during big events[J]. Urban mass transit, 2021, 24(10): 196-199.

[2] 郑俊锋, 方旭峰, 王晨阳. 基于时间序列分解方法的城市轨道交通大客流预测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(8): 163-170.
ZHENG Junfeng, FANG Xufeng, WANG Chenyang. Prediction method for urban rail transit large passenger flow based on time series decomposition method[J]. Urban mass transit, 2023, 26(8): 163-170.

[3] 张皓翔. 城市轨道交通可预知大客流场景下临客开行优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
ZHANG Haoxiang. Research on optimization of passenger-oriented operation in predictable large passenger flow scenarios of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

[4] 郑博. 大型活动下城市轨道交通列车开行方案优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHENG Bo. Study on optimization of train operation scheme for urban rail transit under large-scale activities[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[5] 江志文. 面向大型活动散场客流的城市轨道交通行车计划编制与接驳公交衔接研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
JIANG Zhiwen. Study on the preparation of urban rail transit traffic plan for large-scale activities and the connection of connecting buses[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[6] 张伯男, 姚向明, 赵鹏, 等. 考虑高平峰差异的城市轨道交通节能运行图优化研究[J/OL]. 交通运输系统工程与信息, 2024: 1-11. (2024-03-21). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=YSXT20240318001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
ZHANG B N, YAO Xiangming, ZHAO Peng, et al. Study on optimization of energy-saving operation diagram of urban rail transit considering high peak difference[J/OL]. China industrial economics, 2024: 1-11. (2024-03-21). http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=YSXT20240318001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[7] 冉昕晨, 陈绍宽, 柏赟, 等. 应对潮汐客流的城市轨道交通列车节能和乘客节时运行图优化模型[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(1): 171-181.
RAN Xinchen, CHEN Shaokuan, BAI Yun, et al. Train energy-efficient and passenger time-saving timetable optimization model for urban rail transit line with tidal passenger flow[J]. China railway science, 2022, 43(1): 171-181.

[8] SHI Jungang, YANG Jing, YANG Lixing, et al. Safety-oriented train timetabling and stop planning with time-varying and elastic demand on overcrowded commuter metro lines[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2023, 175: 103136.

[9] LIU Yan, ZHANG Quan, LI Xuan, et al. Optimizing multimodal timetable synchronization of intercity railway and metro for the first service period during holidays[J]. International journal of transportation science and technology, 2025, 17: 208-223.

[10] WANG Fangsheng, XU Ruihua, SONG Xuyang, et al. Collaborative optimization of last-train timetables for metro network to increase service time for passengers[J]. Computers & operations research, 2023, 151: 106091.

[11] WANG Yonggang, CHEN Junxian, QIN Yang, et al. Timetable rescheduling of metro network during the last train period[J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 139: 105226.

[12] 邵春福. 交通规划原理[M]. 2 版. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
SHAO Chunfu. Traffic planning[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[14] National Fire Protection Association. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems (NFPA130—2023)[S]. Massachusetts: National Fire Protection Association, 2022.

[15] 牛惠民. 轨道列车时刻表问题研究综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 114-124.
NIU Huimin. Literature review on rail train timetabling problems[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2021, 21(5): 114-124.

（编辑：傅依萱）