文章编号：1003-1421(2026)11-0128-10
引用格式：晁宇宏，徐闯闯，崔泽毅. 面向时变需求的中低运量城市轨道交通列车开行方案优化[J]. 铁道运输与经济，2026，48(11)：128-137，148.
CHAO Yuhong，XU Chuangchuang，CUI Zeyi. Optimization of Train Line Planning for Medium and Low Volume Urban Rail Transit Based on Time-Varying Demand[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：128-137，148.

面向时变需求的中低运量城市轨道交通列车开行方案优化

晁宇宏，徐闯闯，崔泽毅

(中车城市交通规划设计研究院有限公司 线路规划处，江苏 南京 211899)

摘 要：以中低运量城轨旅客时变需求为导向，对列车开行方案与客流分配方案集成优化，通过引入列车运行方案图，有效刻画旅客列车选择行为并避免大规模计算。此外，基于列车候选集概念，以企业运营成本、旅客出行时间及列车运行时间加权和最小为优化目标，综合考虑列车运行时间、运输能力、旅客上下车等约束，构建列车开行与客流分配协同优化模型。基于模拟退火算法框架，设计包含初始解生成、客流分配及邻域解搜索策略(以调整列车开行对数、停站次数、编组辆数及始发时刻为核心)的启发式算法。以武汉光谷空轨为例进行算例分析，求解时间为124 s，所得方案与客流需求耦合度极高，列车平均满载率达75%，且无旅客滞留。相较于传统方案，列车运营成本降低700元，平均单程旅行时间减少2.3 min。本研究为中低运量城轨列车灵活运营组织提供借鉴，助力其广泛应用与推广。

关键词：中低运量；列车开行方案；客流分配方案；模拟退火算法；邻域解搜索
中图分类号：U291.6^{+}2 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250701001

Optimization of Train Line Planning for Medium and Low Volume Urban Rail Transit Based on Time-Varying Demand

CHAO Yuhong，XU Chuangchuang，CUI Zeyi

(Line Planning Department, CRRC Urban Transportation Planning & Design Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211899, Jiangsu, China)

Abstract: Guided by the time-varying passenger demand of medium and low volume urban rail transit, this paper optimized the train line planning and passenger flow assignment schemes in an integrated manner. By introducing the train working diagram, the passenger train choice behavior was effectively characterized, and large-scale calculations were avoided. In addition, based on the concept of train candidate set, a collaborative optimization model for train line planning and passenger flow assignment was constructed, taking the minimum weighted sum of enterprise operating cost, passenger travel time, and train running time as the optimization objective, and comprehensively considering constraints such as train running time, transport capacity, and passenger boarding and alighting. Based on the simulated annealing algorithm framework, a heuristic algorithm including initial solution generation, passenger flow assignment, and neighborhood solution search strategies

收稿日期：2025-07-01
基金项目：甘肃省科技厅计划项目(22JR5RA379)；甘肃省教育厅项目(2023A-037)

(centering on adjusting the number of train pairs, the number of stops, the train formation size, and the departure time) was designed. Taking the Wuhan Optics Valley suspended monorail as an example for case analysis, the solution time was 124 s. The obtained scheme had a very high degree of coupling with the passenger flow demand; the average train load factor reached 75%, and there were no stranded passengers. Compared with the traditional scheme, the train operating cost was reduced by 700 CNY, and the average one-way travel time was reduced by 2.3 min. This paper provides a reference for the flexible operation organization of medium and low volume urban rail transit trains and helps their wide application and promotion.

Keywords: Medium and Low Volume; Train Operation Planning; Passenger Flow Assignment Scheme; Simulated Annealing Algorithm; Neighborhood Solution Search

0　引言

列车开行方案作为中低运量城市轨道交通运输组织计划的基础，详细决定了列车开行数量、运行区段、编组数量及停站方案等内容，高质量的列车开行方案对于提升旅客服务满意度及企业运营效益意义重大。然而，既有中低运量城市轨道交通(以下简称“城轨”)研究大多聚焦于发展规划[1]、制式选型[2]及适用性分析[3]等宏观层面，基于行车组织优化角度的研究仍有待深入。

既有列车开行方案优化研究大多以固定日客流量为研究对象，采用“按流开车”思想进行设计优化，如晁宇宏等[4]基于列车候选集思想构建列车开行方案与配装方案协同优化模型，并采用模拟退火算法求解；Fu 等[5]根据列车停站方案设计分层次列车开行方案优化方法，并设计贪婪算法进行模型求解；任艾等[6]基于市域铁路与城轨线路终点对接的衔接形式，通过路径客流分配，对贯通运营条件下列车开行方案进行优化。然而，由于上述研究未涉及列车在站到发时刻信息，客流需求与列车开行方案耦合性较差，故 Kaspi 等[7]、Shi 等[8]及 Zhang 等[9]以时变客流需求为研究对象，分别以乘客平均旅行时间、车厢拥挤度及在站滞留时间最优为导向，构建了列车开行方案与时刻表协同优化 MILP 模型，并采用启发式算法求解。鉴于协同优化模型变量及不相容约束规模巨大，导致难以在多项式时间内求得最优解。因此，苏焕银等[10]提出了列车运行方案图概念，在开行方案的基础上引入列车运行时刻属性，且鉴于其不考虑列车在站到发安全间隔等约束，故有效简化了问题复杂度。在此基础上，周文梁等[11]、张琴等[12]、Zhou 等[13]分别以弹性客流、到发线运用计划及灵活周期为切入点，有效拓展列车运行方案图研究热点。此外，鉴于客流运输计划作为城轨运输组织优化的核心，其通常以列车开行方案及时刻表为基础，如贾斌等[14]以缓解大客流集聚效应为导向，采用大小交路与客流控制协同策略，设计基于机会约束的随机场景算法进行模型求解。杨安玉[15]以多交路列车共线运营为背景，构建了多交路共线运营服务网络客流分配模型，并提出麻雀优化算法。既有研究表明，在客流时空分布高度不均衡的旅游专线或通勤走廊中，灵活停站策略可有效降低城轨运营成本并提升旅客服务效率[16]。然而，鲜有学者以中低运量城轨为研究对象考虑时变客流需求下的列车开行方案优化，且对列车开行方案、到发时刻及旅客运输方案缺乏系统性研究。故借鉴此类场景，探索时变需求情形下中低运量城轨列车开行方案与客流分配协同优化方案。

值得说明的是，城轨线路通常采用站站停运营模式，以满足通勤客流对准时性、快速性、规律性及可达性的需求。然而，对于客流以单向断面不均衡系数高、时段集聚效应强及 OD 矩阵层级化为特征的中低运量城轨线路而言，跳停模式可有效降低旅客全程旅行时间、运用车数量及企业运营成本，提升旅客出行效率及运营组织灵活性与针对性。因此，以中低运量城轨为研究背景，基于列车运行方案图及列车候选集等概念，在列车开行方案的基础上引入列车运行时刻属性，将原问题核心转化为如何针对时变客流需求设计耦合度较高的列车开行方案与客流分配方案，从而提升其有效性及匹配性。

1　问题描述

1.1　列车候选集的确定

基于中低运量城轨线路功能定位、线路条件及客流特征等，采用列车候选集思想进行研究。首

先，根据可用中低运量列车配属车数及区段最大通过能力确定候选列车数量($K=\psi\cdot T$，为单位小时区段通过能力，T为研究时长)。其次，根据断面客流空间分布特征确定列车可选编组数量及运行区段，且考虑到中低运量城轨车型制式统一而固定，故将编组数量作为已知参数输入。此外，以提升客流时空耦合性为导向，采用灵活停站方案，故候选集不预设停站方案，但通过约束条件限定其生成范围，具体停站策略根据时变客流需求动态调整。最后，考虑到传统列车开行方案优化策略无法解决时变客流需求耦合问题，故在此基础上引入列车运行方案图概念，增添列车在其运行区段内各站到发时刻属性。列车运行方案图能够动态响应客流需求的时变性，实时生成客流分配方案，同时避免传统时刻表协同优化中复杂的安全间隔约束，简化模型复杂度。鉴于其未考虑列车越行约束，故所得列车运行线可能存在冲突。结合既有中低运量城轨线路大多不具备越行工程条件，且核心研究内容为时变需求下的列车运行方案图优化，故本研究暂不考虑列车间的越行情形，与常规中低运量城轨系统实际运营相契合。

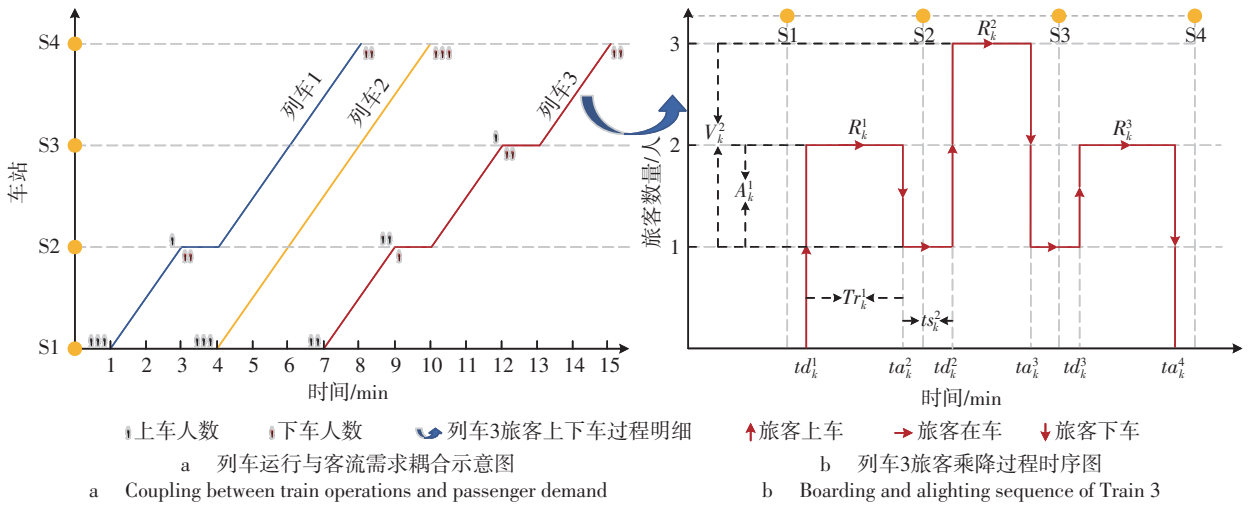
综上所述，将传统列车开行方案优化概念拓展至列车运行方案图优化，给定候选集列车最大开行对数为$|K|$，对于任意候选列车$k\in K$，其属性集合可表示为$K=\{(O_k,\ D_k),\ (Te_k,\ Tl_k),\ C_k\}$，其中$(O_k,\ D_k)$分别表示列车$k$起始车站和终到车站，$(Te_k,\ Tl_k)$分别表示列车$k$最早与最晚始发时刻(引入柔性发车时间窗概念，各列车时间窗距离均为1 h，增强可行解搜索范围)，C_k表示列车k定员数量。因此，列车开行方案优化问题可表示为对$\Omega=\{k=(O_k,\ D_k),\ C_k,\ (ta_k^u,\ td_k^u),\ s_k^u,\ ts_k^u\}$的约束、评价和调整优化，其中$(ta_k^u,\ td_k^u)$表示列车$k$在车站$u$到达与出发时刻，$s_k^u$表示列车$k$停站方案，$ts_k^u$表示列车$k$在车站$u$停站时间。

列车运行方案图与旅客需求耦合关系示意图如图1所示。

1.2　研究问题

鉴于中低运量城轨具备运能灵活、制式多样、经济适用及建设门槛低等特性，其可适用于大中型城轨骨干线、辅助线、中小型城轨骨干线及景区旅游线等多种场景，其客流需求特征及时空分布特性区别于传统大运量城市轨道。因此，以提升中低运量城轨列车开行方案与时变客流需求耦合度为导向，结合中低运量城轨实际服务流程，以3 h为一个阶段，将全天划分为多个运营阶段，各阶段内列车开行方案及客流分配方案优化方法均相同。

以单条中低运量城轨线路下行方向为研究背景，以阶段q内客流数量及时空分布特征为基础，实时生成阶段q+1各站点旅客出行需求量，综合决策阶段q+1内列车运行方案图及客流运输方案。值得说明的是，候选列车集的引入可有效将列车开行对数整数变量转化为0−1变量，有效提升算法求解效率，且列车运行方案图的引入有效赋予列车在站到发时刻属性，提升时变客流需求与列车开行方案的匹配性。中低运量城轨列车开行方案优化流程如图2所示。



a　列车运行与客流需求耦合示意图
a　Coupling between train operations and passenger demand

b　列车3旅客乘降过程时序图
b　Boarding and alighting sequence of Train 3

图1　列车运行方案图与旅客需求耦合关系示意图

Fig.1　Schematic diagram of coupling relationship between train working diagram and passenger demand

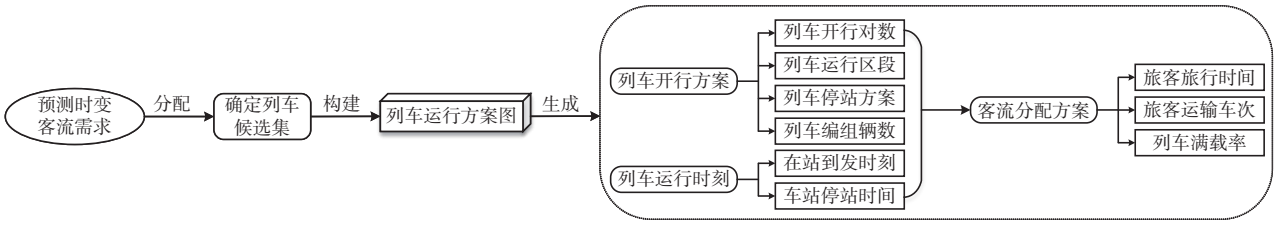


图2　中低运量城轨列车开行方案优化流程

Fig.2　Optimization process of train line planning for medium and low volume urban rail transit

2　模型构建

2.1　符号说明

为方便模型构建，将使用的集合、索引、参数、决策变量具体含义进行如下说明。

（1）集合。P为乘客集合；K为列车集合；U为车站集合；U_k为列车k运行区段集合。

（2）索引。p为乘客索引，$p \in P$；k为列车索引，$k \in K$；u，v为车站索引，u，$v \in U$。

（3）参数。Cg为列车开行固定成本，元；Cy为单公里列车可变成本，元/km；Cs为列车单次停站成本，元/次；P为足够大的正整数；$N_k^{\min}$，$N_k^{\max}$分别为列车k最小及最大停站次数，次，$k \in K$；$NR_u^{\min}$，$NR_u^{\max}$分别为车站u规定的最小和最大服务列车数，列，$u \in U$；C_k为列车k最大装载能力，人/列，$k \in K$；ω_k为列车k运营里程，km，$k \in K$；L为线路最大通过能力，列；O_p为旅客p起始站，$p \in P$；D_p为旅客p终到站，$p \in P$；T_p为旅客p到站时刻，$p \in P$；$[O_k, D_k]$为列车k的运行区段，$k \in K$；$[Te_k, Tl_k]$为列车k的始发时间窗，$k \in K$；Tr_k^u为列车k在区间$[u, u+1]$纯运行时间，min，$u \in U_k \backslash \{D_k\}$；$\Re$为启停车附加时分，min；$\mu_1$，$\mu_2$，$\mu_3$为权重系数。

（4）决策变量。x_k^p，其值为1表示旅客p由列车k服务，否则，其值为0；s_k^u，其值为1表示列车k在车站u停站，否则，其值为0；z_k，其值为1表示列车k开行，否则，其值为0；ta_k^u，td_k^u，ts_k^u分别为列车k在u站的到达时刻、出发时刻及停站时间，min，$k \in K$，$u \in U_k$；V_k^u为在车站u乘坐列车k的旅客数量，人；A_k^u为在车站u从列车k下车的旅客数量，人；R_k^u为列车k在车站u出发时在车旅客人数，人。

2.2　目标函数

$$\min Z_1 = \sum_{k \in K}(Cg + Cy \cdot \omega_k) \cdot z_k + \sum_{k \in K}\sum_{u \in U_k} Cs \cdot s_k^u \tag{1}$$

$$\min Z_2 = \sum_{k \in K}(ta_k^{D_k} - td_k^{O_k}) \cdot z_k \tag{2}$$

$$\min Z_3 = \sum_{k \in K}\sum_{p \in P}(ta_k^{D_p} - T_p) \cdot x_k^p + \sum_{p \in P}(1 - \sum_{k \in K} x_k^p) \cdot M \tag{3}$$

$$\min Z = \mu_1 \cdot Z_1 + \mu_2 \cdot Z_2 + \mu_3 \cdot Z_3 \tag{4}$$

本模型以协同优化企业运营成本及旅客服务满意度为导向，目标函数式(1)表示企业运营成本最小化，主要包括列车开行固定成本(如人员配置及设备折旧等)、可变成本(如运营里程及电力损耗等，表示为列车k单公里可变成本Cy与列车k运营里程ω_k的乘积)、停站附加成本(如加减速能耗及站点服务费等)3部分构成；目标函数式(2)表示列车全程运行时间最小化；目标函数式(3)表示旅客全程旅行时间最小化，旅客全程旅行时间由在站等待时间及在车旅行时间2部分构成，即可由列车在其目的站D_p到站时刻$ta_k^{D_p}$减旅客到达起始站O_p时刻T_p表示。值得说明的是，模型以提升旅客服务满意度为导向，故添加乘客滞留惩罚因子M，保障研究时段内旅客均可被服务，有效避免乘客滞留。

2.3　约束条件

2.3.1　候选列车运行区段约束

$$N_k^{\min} \cdot z_k \leqslant \sum_{u \in U_k} s_k^u \leqslant N_k^{\max} \cdot z_k \qquad \forall k \in K \tag{5}$$

$$NR_u^{\min} \leqslant \sum_{k \in K} s_k^u \leqslant NR_u^{\max} \qquad \forall u \in U \tag{6}$$

$$\sum_{u \notin U_k} s_k^u = 0 \qquad \forall k \in K \tag{7}$$

当候选列车k开行时，需对其运行区段内停站方案进行优化。式(5)表示当且仅当列车k开行时，其可在运行区段$[O_k, D_k]$内停站，且列车k停站次数应介于给定区间$[N_k^{\min}, N_k^{\max}]$；式(6)为所研究中低运量城轨线路全线各车站停站次数限制，即各车站服务水平约束，均应介于给定区间$[NR_u^{\min}, NR_u^{\max}]$；式(7)为列车$k$运行区段约束，其仅可在其运行区段

内停站。

2.3.2　候选列车运行时间约束

$$Te_k \leqslant td_k^{O_k} \leqslant Tl_k \qquad \forall k \in K \tag{8}$$

$$ta_k^u = td_k^{u-1} + Tr_k^{u-1} + \mathfrak{R}\cdot(s_k^{u-1} + s_k^u) \quad \forall k \in K,\ u \in U_k \backslash \{O_k\} \tag{9}$$

$$td_k^u = ta_k^u + ts_k^u \cdot s_k^u \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \backslash \{D_k\} \tag{10}$$

$$Ts_u^{\min} \leqslant ts_k^u \leqslant Ts_u^{\max} \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \backslash \{O_k,\ D_k\} \tag{11}$$

对于任意候选列车$k \in K$而言，式(8)表示给定各列车k始发时间窗$[Te_k,\ Tl_k]$，限制其最早及最晚发车时刻，从而有效缩小可行解空间；式(9)表示列车在各站到达时刻为其前站出发时刻与区间运行时分及起停车附加时分之和；式(10)表示列车在各站发车时刻为到站时刻与停站时间之和；式(11)表示列车在各站停站时间均介于给定区间$[Ts_u^{\min},\ Ts_u^{\max}]$。

2.3.3　旅客上车约束

$$td_k^{O_p} - T_p > (x_k^p - 1)\cdot M \qquad \forall k \in K,\ p \in P \tag{12}$$

$$s_k^{O_p}\cdot s_k^{D_p} \geqslant x_k^p \qquad \forall k \in K,\ p \in P \tag{13}$$

对于研究时段内任意旅客$p \in P$而言，式(12)表示当且仅当列车k在旅客p起始站O_p的发车时刻$td_k^{O_p}$晚于乘客到达时刻T_p，旅客p有可能被列车k服务，即$x_k^p = 1$；式(13)表示当且仅当列车k在旅客p的起始站O_p与终到站D_p均停站，旅客p可能被列车k服务，即$x_k^p = 1$。

2.3.4　列车装载能力约束

$$V_k^u = \sum_{p:\ O_p = u} x_k^p \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \backslash \{D_k\} \tag{14}$$

$$A_k^u = \sum_{p:\ D_p = u} x_k^p \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \backslash \{O_k\} \tag{15}$$

$$R_k^u = R_k^{u-1} - A_k^u + V_k^u \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \backslash \{O_k,\ D_k\} \tag{16}$$

$$R_k^u = V_k^u \qquad \forall k \in K,\ u \in O_k \tag{17}$$

$$R_k^u \leqslant C_k \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \backslash \{D_k\} \tag{18}$$

式(14)—(18)为列车装载状态中间变量约束；式(14)与(15)分别记录研究时段内列车在各车站上车与下车的旅客数量；式(16)表示列车k在u站出发时在车人数R_k^u为在$u-1$站出发时人数R_k^{u-1}减去在u站下车人数A_k^u并加上在u站上车人数V_k^u；式(17)表示列车k在其起点站O_k出发时的在车人数$R_k^{O_k}$等于列车k在其起点站O_k的上车人数$V_k^{O_k}$；式(18)表示列车k在u站出发时在车旅客数量R_k^u不得大于列车最大装载能力C_k。

2.3.5　区段通过能力约束

$$\sum_{k \in K:\ [Te_k,\ Tl_k] \in t} z_k \leqslant L_t \tag{19}$$

式(19)保证了研究时段内各个时段的列车实际开行数量不得大于各时段t中低运量线路最大通过能力L_t。

2.3.6　列车到发安全间隔约束

$$ta_{k'}^u - ta_k^u \geqslant H^a \qquad \forall k,\ k' \in K,\ u \in U_k \cup U_{k'} \backslash \{O_k,\ O_{k'}\} \tag{20}$$

$$td_{k'}^u - td_k^u \geqslant H^d \qquad \forall k,\ k' \in K,\ u \in U_k \cup U_{k'} \backslash \{D_k,\ D_{k'}\} \tag{21}$$

式(20)—(21)为列车间到站安全时间间隔约束，后车k'列车与前车k列车在u站到达时刻与出发时刻均需满足最小到达安全时间间隔H^a与发车安全时间间隔H^d，避免后续列车运行图阶段调整困难。此外，对于特殊旅游线路，为提升列车开行方案的灵活性，不设置最大发车间隔约束。

2.3.7　变量域约束

$$x_k^p,\ s_k^u,\ z_k \in \{0,\ 1\} \qquad \forall k \in K,\ p \in P,\ u \in U_k \tag{22}$$

$$ta_k^u,\ td_k^u \in Z^+ \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \tag{23}$$

$$ts_k^u \in Z^+ \qquad \forall k \in K,\ u \in U_k \tag{24}$$

3　模拟退火算法

鉴于面向时变需求的列车开行方案优化模型涉及变量众多，包含多个非线性目标函数及约束条件，为典型的混合整数非线性规划(MINLP)模型，难以在多项式时间内求得最优解，故无法采用商业求解器及精确算法求解。考虑到以模拟退火为代表的启发式算法具备并行处理、全局搜索能力及强适应性等特性，其常用于求解大规模、强耦合及非线性NP-hard问题。因此，结合列车运行方案图优化问题特性，基于模拟退火算法框架，设计以初始解生成、客流分配及邻域解搜索策略为核心的启发式算法，模拟退火算法流程如图3所示。

步骤1：关键参数初始化。输入初始温度T_0，设置温度下降比例α，终止温度T_{end}，马尔科夫链长度L_m。

步骤2：生成初始解。根据3.1初始解的生成策略，生成初始方案Ω_{initial}，得到初始目标函数值Z_{initial}。

步骤3：更新最优解。令最优方案$\Omega_{\text{best}} = \Omega_{\text{initial}}$，

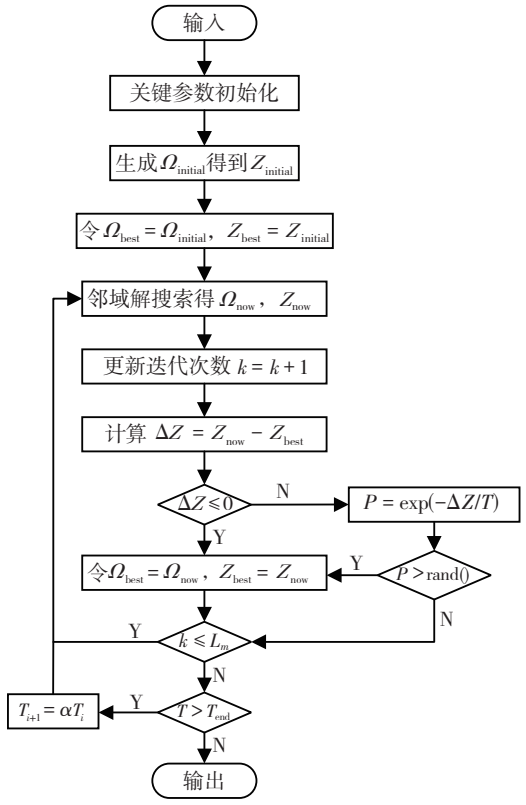


图3　模拟退火算法流程

Fig.3　The flow char of the simulated annealing algorithm

最优目标函数值为$Z_{best}=Z_{initial}$。

步骤4：生成邻域解。令当前温度下迭代次数$k=1$，根据3.3邻域解搜索策略生成邻域解Ω_{now}，并计算邻域解对应目标函数值Z_{now}。

步骤5：更新并比较。更新迭代次数$k=k+1$，计算差值$\Delta Z=Z_{now}-Z_{best}$，若$\Delta Z\leqslant 0$或者$\exp(-\Delta Z/T)>\mathrm{rand}()$，更新当前最优解为$\Omega_{best}=\Omega_{now}$，并更新最优目标值$Z_{best}<Z_{now}$，式中rand()表示随机概率值。

步骤6：内循环终止判断。若当前迭代次数$k>L_m$，则重置迭代次数$k=1$，且根据公式$T_{i+1}=\alpha T_i$降低当前温度，否则，返回步骤4。

步骤7：外循环终止判断。若当前温度$T\leqslant T_{end}$，则算法终止，输出最优目标函数值Z_{best}及最优方案Ω_{best}，否则，返回步骤4。

3.1　初始解的生成

将决策变量分为客流分配变量x_k^p、列车开行变量z_k、列车停站变量s_k^u，ts_k^u及列车在站到发时刻变量ta_k^u，td_k^u4类，则初始解可表示为$\Omega_{initial}=\{x_k^p,\ z_k,\ s_k^u,\ ta_k^u,\ td_k^u,\ ts_k^u\}$。初始解生成步骤如下。

步骤1：令候选集内所有列车均开行，即$z_k=1$，$\forall k\in K$，其停站方案均采用站站停模式，即$s_k^u=1$，$\forall k\in K$，$u\in U$，根据给定停站时间窗随机生成停站时间ts_k^u，$\forall k\in K$，$u\in U_k$。

步骤2：根据列车始发时间窗，随机生成各列车始发站发车时刻$td_k^{O_k}$，$\forall k\in K$，根据列车停站方案、停站时间及运行时间约束式(9)—(10)，生成列车各站到发时刻ta_k^u，td_k^u，$\forall k\in K$，$u\in U_k$。

步骤3：根据3.2节客流分配策略生成客流分配变量初始解x_k^p，$k\in K$，$p\in P$，为研究时段内各乘客选择服务列车，即令$x_k^p=1$，$\forall p\in P$，$k\in K$。至此，生成初始解$\Omega_{initial}=\{x_k^p,\ z_k,\ s_k^u,\ ta_k^u,\ td_k^u,\ ts_k^u\}$。

3.2　客流分配策略

步骤1：参数输入。输入研究时段内各站点客流需求集合P(包含其OD属性及到站时刻属性)及列车运行方案图$\Omega_{initial}=\{x_k^p,\ z_k,\ s_k^u,\ ta_k^u,\ td_k^u,\ ts_k^u\}$。

步骤2：客流分配。对于研究时段内旅客$p\in P$，遍历列车$k\in K$，若其满足约束式(12)—(13)，则令$x_k^p=1$，否则令$x_k^p=0$，更新旅客$p=p+1$。

步骤3：时间费用矩阵生成。根据生成的可行旅客分配方案x_k^p，求解旅客$p\in P$可分配列车$k\in K$的总旅行时间$Tsum(p,\ k)$，根据$\sum_{k\in K}\sum_{p\in P}(ta_k^{D_p}-T_p)\times x_k^p$，生成运输时间费用矩阵。

步骤4：客流分配方案生成。根据旅客“先到先服务”原则及服务唯一性约束，采用最小化函数$\min(Tsum(p,\ k))$，为研究时段内各旅客决策最佳服务列车，生成初始最优解$x_best_k^p$。

步骤5：客流分配方案可行化。鉴于初始最优解$x_best_k^p$并未考虑列车能力约束式(18)，故客流分配方案可能不可行，即列车在其经停站出发时服务的旅客数量可能大于其最大装载能力，因而需设计可行化算法消解冲突。

步骤5.1：根据约束式(14)—(18)计算列车k在u站出发时装载的旅客数量，统计违背能力约束式(18)的列车k及其对应车站u。

步骤5.2：根据统计得到的列车列表k_list及车站列表u_list，遍历研究时段内旅客$p\in P$，若其由列车$k\in k_list$服务且运行区段途经车站$u\in u_list$，

则令 $x_best_k^p = 0$，$Tsum(p, k) = +\infty$，根据最小化函数 $\min(Tsum(p, k))$，重新生成最优解 $x_best_k^p$，否则令 $p = p + 1$。

步骤5.3：遍历列车列表 k_list 及车站列表 u_list，若满足 $R_k^u \leqslant C_k$，$\forall k \in k_list$，$u \in u_list$，则输出最优可行解 $x_final_k^p$，否则返回步骤5.1。

步骤6：输出最优可行客流分配方案 $x_final_k^p$。

3.3　邻域解搜索策略

步骤1：增开/减少列车开行数量。对于研究时段内任意开行列车，即 $z_k = 1$，计算各列车满载率 R_k，令其最大值为 $R_k^{\max}$，若存在列车 k 满足 $1/(R_k^{\max} - R_k + 1) < \text{rand}()$，则予以停开，即令 $z_k = 0$，此外给定最大满载率阈值 $r^{\max}$，若所有已开行列车均满足 $R_k > r^{\max}$，则随机选择候选集内未开行列车予以增开。

步骤2：增加/减少列车停站次数。遍历已开行列车及客流需求集合，若存在旅客 p 未被服务，即 $x_k^p = 0$，$\forall k \in K$，且存在已开行列车 k 满足 $(td_k^{O_p} > T_p) \cap (s_k^{O_p} \times s_k^{D_p} = 0) \cap ((O_p, D_p) \subset (O_k, D_k))$，则令列车 k 增加停站，即令 $y_k^u = y_k^v = 1$，此外对于任意站点 $u \in U$，若存在已开行列车满足 $y_k^u = y_k^v = 1$，$\forall k \in K$，$u, v \in U$ 且 $s_k^u = 1$，$\forall u \in U_k \backslash \{O_k, D_k\}$，则取消列车 k 在 u 站停站，令 $s_k^u = 0$。

步骤3：增加/减少列车编组辆数。对于任意已开行列车 $k \in K$，计算其平均旅客满载率 R^{avg}，若列车 k 满载率 $R_k > R^{\text{avg}}$ 且其为小编组 N，则以随机概率将其编组数量扩展至大编组 $2N$，同理若列车 k 满载率 $R_k \leqslant R^{\text{avg}}$ 且其为大编组 $2N$，则以随机概率将其编组数量缩减至小编组 N。

步骤4：提前/延迟列车始发时刻。对于任意已开行列车 $k \in K$，若其停站满足未被服务旅客出行区段，即 $y_k^{O_p} = y_k^{D_p} = 1$ 且列车 k 在旅客 p 发车时刻早于其到站时刻 T_p，即 $td_k^{O_p} < T_p$，则延迟列车 k 始发时刻，此外，以随机概率提前列车 k 始发时刻，从而缩短旅客在站等待时间。

4　算例分析

鉴于悬挂式单轨系统具备安全可靠、适应能力强、占地面积小、建设周期短及全生命周期低成本等优良特性，其可适用于城轨接驳线、中小城市交通骨干线及旅游景区专线等。以武汉光谷悬挂式单轨系统为研究对象，其作为重要旅游配套设施沿南北向生态大走廊布设，有效串联沿线山、水、文化等特色区域，为典型的集“轨道+旅游+文化”于一体的中低运量观光旅游线，全长10.5 km，设站6座。武汉光谷空轨线路示意图如图4所示。

4.1　参数设定

选取武汉光谷空轨时变客流为研究对象，列车起动附加时分为15 s，停车附加时分为20 s，各站停站时间为30 s或45 s，龙泉山站→综保区站→高新四路站→高新二路站→高新大道站→九峰山站区间纯运行时间分别为6.6 min，3.8 min，4.2 min，2.0 min及1.7 min。其运营时间为8:00—20:00，选取第1阶段(8:00—11:00)上行客流数据为研究对象，研究时段内客流合计为5 000人次，8:00—11:00旅客出行分布特征示意图如图5所示，其中客流出行OD及时刻分布如图5a所示，客流出行时段及起讫点分布特征如图5b所示，研究时段内客流时空分布呈时段集中度高、OD分布极化显著及断面不均衡性强等特性(本研究基于历史客流数据构建算例，实际运营中可通过实时客流监测与短期预测技术动态更新需求输入，提升模型对未知客流的适应能力)。

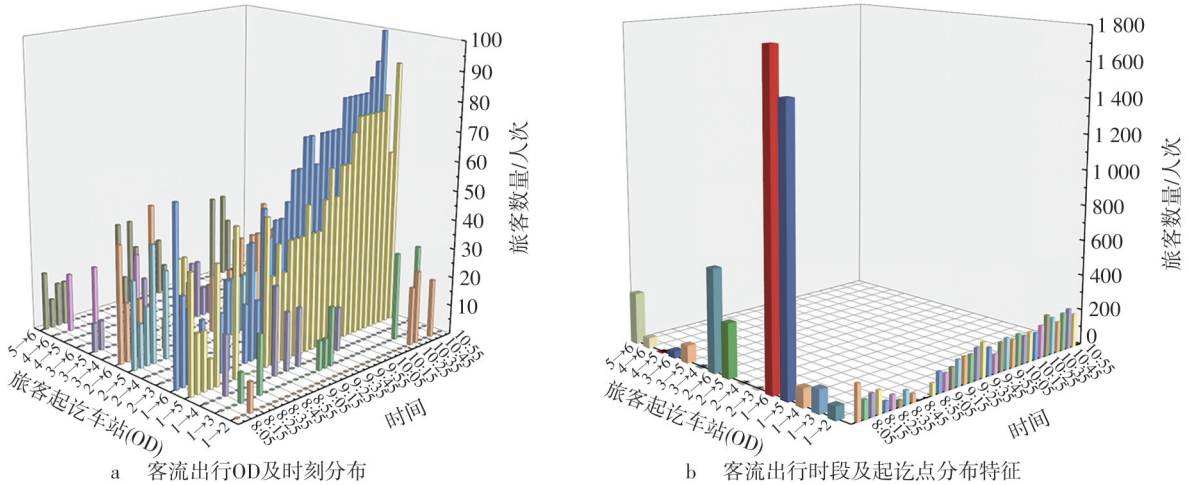
图5a聚焦单一OD对，将客流拆解为上下车2个时序序列，揭示各时刻乘降规律，服务于停站方案和车门通过能力核算；图5b汇总全线所有OD对出行量，按起讫点分类呈现时段分布结构与OD规模对比，服务于发车频率和运力配置决策。两者维度互补，共同支撑运营方案精细化设计。

设置初始温度 T_0 为1 000 ℃，温度下降系数 α 为0.95，终止温度 T_{end} 为0.01 ℃，固定马尔科夫链长度 L_m 为100，目标函数若迭代50次无改变，则算



图4　武汉光谷空轨线路示意图

Fig.4　Schematic diagram of Wuhan Optics Valley suspended monorail line



a　客流出行OD及时刻分布
a　Passenger OD and temporal distribution

b　客流出行时段及起讫点分布特征
b　Travel time and OD distribution characteristics

图5　8:00—11:00旅客出行分布特征示意图

Fig.5　Schematic diagram of passenger travel distribution characteristics during 8:00—11:00

法终止。此外，综合考虑旅客服务满意度及列车运行成本间的相互依赖与彼此制约性，经敏感度测试后，令$\mu_1 = 0.2$，$\mu_2 = 0.3$，$\mu_3 = 0.5$，求解所需其他参数。参数取值表如表1所示。

表1　参数取值表

Tab.1　Parameter values

参数描述	符号	取值
固定成本/(元/列)	Cg	200
可变成本/(元/车公里)	Cy	8
停站成本/(元/(列车·次))	Cs	5
车站最小、最大停站次数/次	$NR_u^{\min}$，$NR_u^{\max}$	1，30
列车最小、最大停站次数/次	$N_k^{\min}$，$N_k^{\max}$	1，6
列车k的运营里程/km	ω_k	10.5
列车k的最大装载能力/(人次/列)	C_k	220
目标函数权重系数	μ_1，μ_2，μ_3	0.2，0.3，0.5
各时段区段最大通过能力/(列/h)	L_t	10，15，20
候选列车发车时间窗	$[Te_k, Tl_k]$	$[t \times 60, (t+1) \times 60]$

4.2　算例结果分析

采用编程软件实现所建中低运量城轨列车开行方案优化模型与模拟退火算法，求解时间为124 s，分别求得研究时段内列车运营成本为5 280元，列车全程运行时间为505 min，旅客全程旅行时间合计为125 929 min，总目标函数值为64 172，无乘客滞留。

4.2.1　列车运行方案图分析

研究时段内，列车停站方案示意图如图6所示，列车共开行24列，运行区段内停站次数合计为96次。其中，8:00—9:00客流需求量为940人次，开行列车4列，平均发车间隔为15 min；9:00—10:00客流需求量为1 795人次，开行列车8列，平均发车间隔为7.5 min；10:00—11:00客流需求量为2 265人次，开行列车12列，平均发车间隔为5 min。此外，由图5可知，客流需求起讫点龙泉山站→高新大道站、龙泉山站→九峰山站的客流占比高达66%，列车在龙泉山站、高新大道站、九峰山站停站次数分别为24次、17次、24次。由此可见，研究所生成列车运行方案图与研究时段内客流出行时空分布耦合性极强。

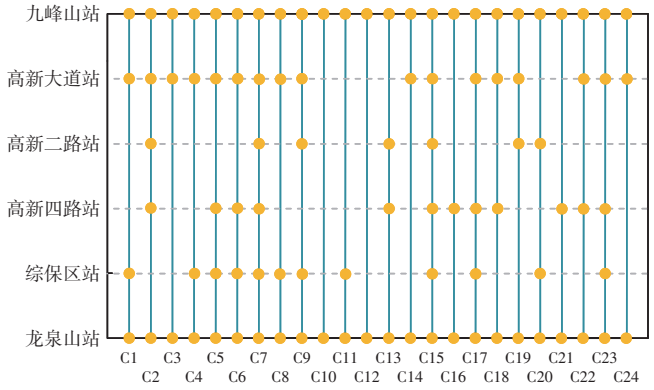


图6　列车停站方案示意图

Fig.6　Schematic diagram of train stop plan

4.2.2　列车装载能力分析

根据列车运行方案图，同步生成客流分配方案，列车发车时载客情况示意图如图7所示，研究时段内开行的24列车均满足列车载客能力约束式(14)—(18)，各站出发时在车人数均小于载客能力

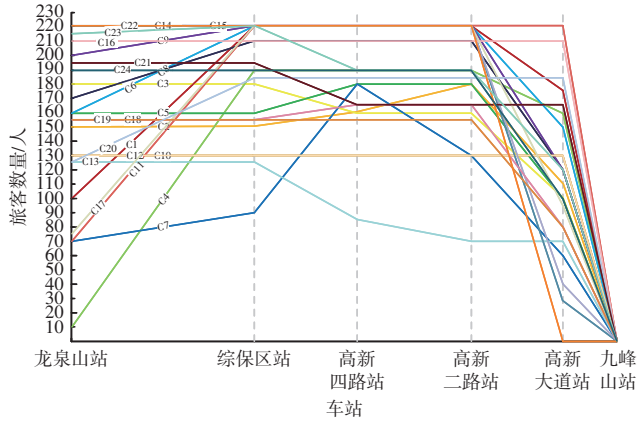


图7　列车发车时载客情况示意图

Fig.7　Schematic diagram of passenger load situation at train departure

220人次/列。此外，客流分配方案满足旅客上车约束式(12)—(13)，以列车C2为例，其在综保区站未停站，故乘客在该站不上下车，表明方案的正确性。

研究所建模型与算法得到的列车开行方案效果良好，平均列车满载率达75%，有效拟合研究时段内客流出行需求，符合旅客对舒适度的要求。列车满载率如表2所示。

表2　列车满载率　%

Tab.2　Train load factor

列车	满载率	列车	满载率	列车	满载率	列车	满载率
C1	85.00	C7	48.18	C13	43.18	C19	63.64
C2	68.18	C8	83.64	C14	82.73	C20	78.64
C3	70.91	C9	89.09	C15	83.64	C21	80.45
C4	67.27	C10	59.09	C16	95.45	C22	80.00
C5	70.91	C11	86.36	C17	75.45	C23	84.55
C6	88.18	C12	59.09	C18	65.45	C24	78.18

4.2.3　方案对比分析

（1）既有实际方案对比分析。根据既有资料，武汉光谷空轨平峰期发车间隔为10 min，高峰期发车间隔为6 min，故结合客流分布情况，8:00—9:00线路上行方向开行列车6列，9:00—11:00上下行各开行列车10列，合计26列，列车均采用站站停方案，生成列车运行方案图。在此基础上，以优化目标(1)—(4)为基准，采用上述客流分配策略生成客流分配方案，对比优化方案，指标对比如表3所示。

由表3可知，相较于传统固定列车开行方案，研究所建模型与算法可根据客流时空分布特征实时生成强耦合性的列车开行方案与客流分配方案。相较于传统方案，优化方案开行列车数减少2列，停站次数减少60次，从而节约运营成本700元，且优化方案与研究时段内客流需求匹配程度较高，无乘客滞留，列车平均满载率高达75%。

表3　指标对比

Tab.3　Comparison of indicators

指标	既有方案	优化方案
开行列车数/列	26	24
停站次数/次	156	96
旅客滞留数量/人	100	0
运营成本/元	5 980	5 280
列车旅行时间/min	607	505
列车平均满载率/%	67	75

（2）算法效率对比分析。基于既有案例背景，采用遗传算法与粒子群算法，对目标函数值、求解时间及迭代次数进行对比分析，算法对比如表4所示。结果表明，改进的模拟退火算法可在多项式时间内快速求得最优列车开行方案与客流分配方案。

表4　算法对比

Tab.4　Comparison of algorithms

算法	求解时间/s	目标函数值	收敛迭代次数/次
模拟退火(SA)	124	64 172	150
遗传算法(GA)	298	65 840	200
粒子群(PSO)	185	64 920	180

5　结论

综合优化中低运量城轨列车服务方案，核心在于决策中低运量城轨列车开行方案、运行时刻以及客流分配方案的最优协调匹配关系。以城轨企业运营成本最小为优化目标，兼顾旅客服务满意度，综合考虑候选列车运行区段、运行时间、旅客上车、列车装载能力及区段通过能力等约束，构建了中低运量城轨列车开行方案综合优化模型。在此基础上，构建以初始解生成、客流分配及邻域解搜索策略为核心的模拟退火启发式算法，并以武汉光谷空轨为例进行算例分析，主要研究结论如下。

（1）引入列车运行方案图概念，增添列车在站到发时刻属性，实现时变需求与列车开行方案的动态匹配，在保证解质量的前提下显著提升求解效率。

（2）设计基于列车运行方案图的客流分配策略，并针对客流分配方案不可行情形设计专门的可行化算法，在多项式时间内快速求得最优客流分配方案。

（3）相较于传统列车开行方案，研究所得列车

运行方案图与研究时段内客流时空分布耦合性更强，在运营成本更低的情形下列车平均满载率高达75%，且无乘客滞留。

值得说明的是，研究暂未考虑不同列车开行方案情形下旅客分担率及吸引力问题，从而易导致跳停模式优化结果高于实际效益。因此，未来将引入客流反馈机制，考虑客流分担率、站点吸引量等动态变量，以增强列车开行方案的现实适应性及客流匹配性。

参考文献：

[1] 赵小文. 我国中低运量城市轨道交通发展的几点思考[J]. 城市轨道交通研究，2019，22(10)：1-5.
ZHAO Xiaowen. Research on the Development of Medium and Low Traffic Volume Rail Transit in China[J]. Urban Mass Transit，2019，22(10)：1-5.

[2] 李岩辉，沈增涛，田　飞，等. 都市区轨道交通多层次各制式量化选择方法研究[J]. 铁道标准设计，2020，64(6)：9-16.
LI Yanhui，SHEN Zengtao，TIAN Fei，et al. Research on the Quantitative Method of Multi-Level and Multi-Mode Rail Transit System Selection in Metropolitan Areas[J]. Railway Standard Design，2020，64(6)：9-16.

[3] 彭　飞，杨柳燕. 我国中低运量城市轨道交通发展现状分析及可持续发展建议[J]. 现代城市轨道交通，2023(5)：14-17.
PENG Fei，YANG Liuyan. Analysis on the Development Status of Medium and Low Traffic Volume Urban Rail Transit in China and Suggestions for Sustainable Development[J]. Modern Urban Transit，2023(5)：14-17.

[4] 晁宇宏，高如虎，牛惠民. 基于备选集的高铁快运专列开行方案优化[J]. 铁道科学与工程学报，2022，19(12)：3505-3514.
CHAO Yuhong，GAO Ruhu，NIU Huimin. Optimization of Train Plan on High Speed Railway Immediate Delivery Based on Candidate Train Set[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2022，19(12)：3505-3514.

[5] FU H L，NIE L，MENG L Y，et al. A Hierarchical Line Planning Approach for a Large-Scale High Speed Rail Network：The China Case[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2015，75：61-83.

[6] 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)：153-163.
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)：153-163.

[7] KASPI M，RAVIV T. Service-Oriented Line Planning and Timetabling for Passenger Trains[J]. Transportation Science，2012，47(3)：295-311.

[8] SHI J G，YANG J，YANG L X，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] ZHANG C T，QI J G，GAO Y，et al. Integrated Optimization of Line Planning and Train Timetabling in Railway Corridors with Passengers' Expected Departure Time Interval[J]. Computers & Industrial Engineering，2021，162：107680.

[10] 苏焕银，史　峰，邓连波，等. 面向时变需求的高速铁路列车开行方案优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息，2016，16(5)：110-116，135.
SU Huanyin，SHI Feng，DENG Lianbo，et al. Time-Dependent Demand Oriented Line Planning Optimization for the High Speed Railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2016，16(5)：110-116，135.

[11] 周文梁，刘晓航，姜　敏，等. 基于候选列车集与弹性需求的城际铁路列车开行方案优化[J]. 铁道学报，2020，42(3)：1-10.
ZHOU Wenliang，LIU Xiaohang，JIANG Min，et al. Optimization of Train Plan on Intercity Railway Based on Candidate Train Set and Elastic Demand[J]. Journal of the China Railway Society，2020，42(3)：1-10.

[12] 张　琴，朱晓宁，王　力，等. 高铁列车运行图和到发线分配的协同编制方法[J]. 北京交通大学学报，2021，45(1)：16-22.
ZHANG Qin，ZHU Xiaoning，WANG Li，et al. Integrated Generation Method of Train Timetabling and Arrival-Departure Track Allocation in High Speed Railway Network[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2021，45(1)：16-22.

[13] ZHOU W L，HUANG Y，HU X L，et al. A Line Planning

（下转第148页）