

控制与决策

Control and Decision

城市轨道交通网络列车运行调整与速度曲线选择实时优化

袁音, 李树凯, 陈泽彬, 杨立兴

引用本文:

袁音, 李树凯, 陈泽彬, 等. 城市轨道交通网络列车运行调整与速度曲线选择实时优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(11): 3415-3423.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0297>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化](#)

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm
控制与决策. 2021, 36(7): 1581-1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

[基于FWADE-ELM的短时交通流预测方法](#)

Short-term traffic flow forecasting based on hybrid FWADE-ELM
控制与决策. 2021, 36(4): 925-932 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1103>

[基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法](#)

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system
控制与决策. 2021, 36(4): 815-824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

[铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化](#)

[Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal](#)
控制与决策. 2021, 36(12): 3063-3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

[基于生成对抗网络的大规模路网交通流预测算法](#)

Traffic flow forecasting algorithm for large-scale road network based on GAN
控制与决策. 2021, 36(12): 2937-2945 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0333>

城市轨道交通网络列车运行调整与速度曲线选择实时优化

袁音¹, 李树凯^{1†}, 陈泽彬², 杨立兴¹

(1. 北京交通大学 系统科学学院, 北京 100044; 2. 汕头大学 商学院, 广东 汕头 515800)

摘要: 为提升城市轨道交通网络在运行干扰下的服务质量和能源利用效率, 提出一种兼顾换乘衔接和节能目标的列车运行调整与速度曲线选择实时优化方法. 首先, 通过引入与列车调整和速度曲线选择相关的决策变量, 构建以最小化列车时刻表偏差、乘客总等待时间以及列车运行能耗为目标的混合整数非线性规划模型. 其次, 基于滚动时域优化实现列车时刻表和速度曲线的动态调整, 并设计基于客流估计的高效分解算法求解每个决策阶段的优化问题. 该算法将复杂的网络问题分解为一系列支持并行求解的小规模线路子问题, 可有效克服非凸非线性的求解挑战, 并显著提高计算效率. 最后, 基于北京地铁网络开展多种干扰和客流需求场景下的仿真实验, 验证所提模型和算法在大规模实际应用中的可行性和有效性. 实验结果表明: 与基于启发式规则的列车运行调整方法相比, 所提方法在不同干扰和需求场景下使列车时刻表偏差、乘客等待时间和运行能耗分别降低 14.18%、6.85% 和 2.35%, 能够有效保障城市轨道交通网络在干扰事件下的运营效率和服务水平. 此外, 所提出的分解算法可在 3 s 内获得最优间隙小于 5% 的解, 满足列车运行调整的实时性要求. 研究成果可为列车运行干扰场景下的调整方案选择提供决策支持.

关键词: 城市轨道交通; 列车运行调整; 混合整数非线性规划; 滚动优化; 分解算法

中图分类号: U292.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2025.0297

引用格式: 袁音, 李树凯, 陈泽彬, 等. 城市轨道交通网络列车运行调整与速度曲线选择实时优化 [J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3415-3423.

Real-time optimization for train rescheduling and speed profile selection in urban rail transit networks

YUAN Yin¹, LI Shu-kai^{1†}, CHEN Ze-bin², YANG Li-xing¹

(1. School of Systems Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Business, Shantou University, Shantou 515800, China)

Abstract: To improve service quality and energy efficiency in urban rail transit networks under frequent operational disturbances, this paper proposes a real-time train rescheduling and speed profile selection approach considering transfer coordination and energy saving. First, a mixed-integer nonlinear programming model is developed by introducing decision variables related to train rescheduling and speed profile selection. The model aims to minimize timetable deviations, total passenger waiting time, and train energy consumption. Subsequently, a rolling horizon optimization approach is employed to dynamically adjust train timetables and speed profiles. An efficient decomposition algorithm based on passenger flow estimation is designed to solve the optimization problem for each decision stage. This algorithm decomposes the complex network-level problem into a series of smaller line-level subproblems that can be solved in parallel. It also effectively addresses the computational challenges of nonconvexity and nonlinearity, significantly improving computational efficiency. Finally, simulation experiments are conducted on the Beijing Metro network under various disturbance and passenger demand scenarios. The results validate the feasibility and effectiveness of the proposed model and algorithm in large-scale real-world applications. Compared with heuristic rule-based train rescheduling methods, the proposed method reduces timetable deviations, passenger waiting time, and energy consumption by 14.18%, 6.85%, and 2.35%, respectively, across different disturbance and demand scenarios, effectively improving operational efficiency and service levels. Moreover, the decomposition algorithm

收稿日期: 2025-03-23; 录用日期: 2025-07-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72431002, 72288101); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2024A1515110028).

责任编辑: 周平.

†通信作者. E-mail: shkli@bjtu.edu.cn.

achieves solutions with an optimality gap of less than 5% within 3 seconds, meeting real-time requirements. The proposed approach provides decision-making support for train rescheduling of urban rail transit networks under disturbances.

Keywords: urban rail transit; train rescheduling; mixed-integer nonlinear programming; rolling horizon; decomposition algorithm

0 引言

在城市轨道交通实际运营中,设备故障、客流波动等多种因素经常导致列车运行偏离原定计划,进而引发列车延误和乘客等待时间增加等运营问题。因此,在确保运营安全的前提下,亟需及时调整列车运行计划,以保障轨道交通在干扰事件下的运营可靠性^[1-3]。此外,随着城市轨道交通网络规模的持续扩大,线路间的接驳和换乘愈加频繁,列车运行计划需要从整体网络层面统筹考虑乘客的换乘衔接,以提升系统的服务水平^[4-6]。同时,列车运行能耗是地铁能耗的重要组成部分,随着能源价格的上涨,能耗成本已占据城市轨道交通列车运营总成本约40%^[7-8]。因此,在调整列车运行计划时优化运行曲线以实现节能降耗,对于提高城市轨道交通的运营效益具有重要意义^[9-11]。目前,国内外学者在线路层面针对节能列车运行调整控制开展了诸多研究。例如, Li等^[12]研究了干扰事件下再生能量的即时和延时利用过程,通过滚动优化方法动态生成基于储能装置的列车时刻表调整策略; Chen等^[13]基于分层优化控制框架,研究了干扰事件下列车自动调整 and 最优速度曲线的生成; Zhou等^[11]提出了列车调整与速度曲线的集成优化模型,以减少列车延误和能耗; 李茜等^[14]基于深度学习算法提出了一种列车节能运行控制方法,在保证列车安全准时运行的同时降低了牵引能耗。随着轨道交通网络化的发展,针对网络层面优化换乘衔接的列车运行调整问题也得到了学者们的关注。例如, Wang等^[15]基于量子粒子群算法,研究了末班车时段列车运行调整策略,以减少乘客换乘等待时间并降低换乘失败率; 徐瑞华等^[16]考虑运行延误对相邻线路列车衔接及换乘站客流的影响,提出了基于线路间换乘运力协调的列车运行调整策略; 张翕然等^[17]提出了应对通过能力下降的网络列车运行协同调整优化方法,以减少乘客出行时间并提升换乘效率。

既有研究在以下几方面仍存在不足: 1) 现有列车运行调整研究多聚焦于单线路优化,较少从网络层面同时考虑换乘协调和节能速度曲线选择问题; 2) 在涉及网络层面换乘协调的研究中,很多文献假设换乘人数为给定常数,或未考虑列车容量限制,难

以反映实际运行环境中的客流特征; 3) 当前多数方法依赖集中式优化框架,面向大规模网络列车调整问题时,难以满足实时性的决策需求。

针对上述问题,本文的主要贡献如下: 1) 从网络层面建模列车运行调整问题,协调不同线路列车在换乘站的到发时间,同时引入速度曲线选择并建模能耗,实现换乘协调与节能目标的协同优化。2) 考虑严格的列车容量约束,刻画不同线路间可换乘的客流动态加载过程,并建模乘客滞留时间和换乘等待时间目标函数项,从而提升调整方案的服务质量,进而,构建一个综合考虑列车运行、客流动态、容量限制、运行能耗及换乘衔接的混合整数非线性规划模型,以生成列车运行调整和速度曲线选择策略。3) 在滚动时域优化框架下,设计高效的分解算法,将网络问题分解为可并行求解的各线路子问题,实现秒级响应,满足实际运行中的实时性需求。最后通过仿真实验验证所提出方法在提升系统服务水平和节能降耗方面的有效性。

1 问题描述

考虑一个城市轨道交通网络,其中: 线路集合表示为 \mathbb{L} , 每条线路 $l \in \mathbb{L}$ 运营的列车集合为 \mathbb{J}_l 。线路 l 的站点集合表示为 \mathbb{I}_l , 换乘站集合为 \mathbb{I}'_l 。在换乘站 $i \in \mathbb{I}'_l$, 设 $\mathbb{X}_{l,i}$ 表示在换乘站 i 与线路 l 相交的线路集合。不同线路通过这些换乘站衔接,乘客可实现不同线路间的转乘。

常态运营中,列车按计划时刻表运行。当发生设备故障等干扰时,将引发列车时刻偏离和延误,而客流波动会降低时刻表刚性恢复策略在服务质量方面的有效性。本文研究的干扰事件是指短时、局部、可恢复的运营波动,区别于持续时间较长、影响范围广的重大中断事件。此类干扰可通过运行调整策略加以缓解,无需进行全局时刻表或运力资源的重新调度。为保障列车运营效率和服务质量并实现节能目标,本研究通过优化列车停站时间调整和区间速度曲线动态调整到发时间,从而提高运行准点性和规律性,降低能耗并减少乘客等待。

为便于建模,假设换乘乘客在同一换乘站不同线路间的换乘走行时间为常量,所有列车均采用“站站停”服务模式。

2 模型建立

2.1 约束条件

1) 列车运行约束.

列车运行动态描述为

$$a_{l,i,j} = d_{l,i-1,j} + r_{l,i-1,j}, \quad (1)$$

$$d_{l,i,j} = a_{l,i,j} + s_{l,i,j}, \quad (2)$$

$$s_{l,i,j} = S_{l,i,j} + x_{l,i,j} + w_{l,i,j}, \quad (3)$$

$$x_{\min,l} \leq x_{l,i,j} \leq x_{\max,l}. \quad (4)$$

其中: $a_{l,i,j}$, $d_{l,i,j}$, $s_{l,i,j}$ 分别表示线路 l 的列车 j 在车站 i 的到达、出发及停站时间, $r_{l,i-1,j}$ 表示线路 l 的列车 j 在车站 $i-1$ 与车站 i 之间的区间运行时间, $S_{l,i,j}$ 表示计划停站时间, $x_{l,i,j}$ 表示停站调整时间, $w_{l,i,j}$ 表示列车在该车站停站时的扰动项, $x_{\max,l}$ 和 $x_{\min,l}$ 表示停站调整时间的上、下界. 为保证运行安全, 列车运行需满足最小发车间隔约束

$$d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1} \geq h_{\min,l}, \quad (5)$$

其中: $h_{\min,l}$ 表示线路 l 的列车最小发车间隔.

2) 速度曲线选择约束.

列车在区间运行时需选择一条预置于自动列车驾驶系统中的速度曲线进行追踪. 每条速度曲线具有运行时间和单位能耗两个特征属性. 引入二进制决策变量 $u_{l,i,j,q}$ 表示速度曲线的选择: 当线路 l 的列车 j 在区间 i (从车站 i 到车站 $i+1$) 选择速度曲线 q 时取值为 1, 否则为 0. 设 $Q_{l,i}$ 为线路 l 区间 i 上的速度曲线备选集, $\tilde{r}_{l,i,q}$ 和 $\tilde{c}_{l,i,q}$ 分别表示候选速度曲线 q 对应的运行时间和单位能耗, 则列车 j 在区间 i 的实际运行时间表示如下:

$$r_{l,i,j} = \sum_{q \in Q_{l,i}} \tilde{r}_{l,i,q} u_{l,i,j,q} + v_{l,i,j}, \quad (6)$$

其中: $v_{l,i,j}$ 表示线路 l 的列车 j 在车站 i 到车站 $i+1$ 运行时的区间扰动项. 下式保证了列车在每个区间上运行时所追踪速度曲线的唯一性:

$$\sum_{q \in Q_{l,i}} u_{l,i,j,q} = 1. \quad (7)$$

3) 客流动态约束.

客流动态建模涉及候车、上车、车载、下车及滞留乘客数量的计算, 即

$$n_{l,i,j}^{\text{wt}} = \lambda_{l,i,j} (d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1}) + \sum_{l' \in \mathbb{X}_{l,i}} \sum_{j' \in \mathbb{J}_{l'}} p_{l,i,j}^{l',j'} + n_{l,i,j-1}^{\text{st}}, \quad (8)$$

$$n_{l,i,j}^{\text{bt}} = \min\{n_{l,i,j}^{\text{wt}}, C_{l,j} - (1 - \beta_{l,i,j}) n_{l,i-1,j}^{\text{on}}\}, \quad (9)$$

$$n_{l,i,j}^{\text{on}} = n_{l,i-1,j}^{\text{on}} + n_{l,i,j}^{\text{bt}} - n_{l,i,j}^{\text{al}}, \quad (10)$$

$$n_{l,i,j}^{\text{al}} = \beta_{l,i,j} n_{l,i-1,j}^{\text{on}}, \quad (11)$$

$$n_{l,i,j}^{\text{st}} = n_{l,i,j}^{\text{wt}} - n_{l,i,j}^{\text{bt}}. \quad (12)$$

其中: $n_{l,i,j}^{\text{wt}}$ 表示线路 l 车站 i 站台上等待列车 j 的乘客数量, $\lambda_{l,i,j}$ 表示列车 j 和 $j-1$ 发车间隔内的乘客到达率, $p_{l,i,j}^{l',j'}$ 表示在换乘站 i 从线路 l' 列车 j' 换乘至线路 l 列车 j 的乘客数量, $n_{l,i,j-1}^{\text{st}}$ 表示在车站被列车 $j-1$ 滞留的乘客数量, 上车乘客数量 $n_{l,i,j}^{\text{bt}}$ 表示等待乘客数量与列车剩余容量的较小值, $C_{l,j}$ 表示线路 l 列车 j 的容量, $\beta_{l,i,j}$ 表示线路 l 列车 j 在车站 i 的乘客下车比例, $n_{l,i,j}^{\text{on}}$ 和 $n_{l,i,j}^{\text{al}}$ 分别表示车载乘客和下车乘客的数量. 本文采用的下车比例可由智能监控系统采集的客流信息估算获得. 目前, 大多数地铁系统已部署车厢监控和智能感知设备, 能够获取每列列车在各车站的上车和下车乘客数量. 因此, 可基于历史数据中列车在各站的上、下车人数, 推算下车比例. 这一方法在现有研究中已被广泛应用^[5, 18-19]. 此外, 在滚动时域优化框架下, 随着实时数据的持续输入, 后续阶段中列车的实际载客情况和下车人数可被动态修正, 从而减小误差.

4) 换乘衔接约束.

为了描述不同线路的列车换乘衔接关系, 引入两个 0-1 决策变量: $y_{l,i,j}^{l',j'}$ 表示线路 l 列车 j 从换乘站 i 的出发时间是否晚于线路 l' 列车 j' 的到达时间加换乘走行时间 $b_{l,i}^{l',j'}$; $z_{l,i,j}^{l',j'}$ 表示线路 l 的列车 j 是否为换乘站 i 首个衔接上线路 l' 列车 j' 的列车. 基于这些变量, 列车换乘衔接及换乘乘客数量可建模为

$$d_{l,i,j} - (a_{l',i,j'} + b_{l,i}^{l',j'}) \geq M(y_{l,i,j}^{l',j'} - 1), \quad (13)$$

$$d_{l,i,j} - (a_{l',i,j'} + b_{l,i}^{l',j'}) \leq M y_{l,i,j}^{l',j'}, \quad (14)$$

$$z_{l,i,j}^{l',j'} = y_{l,i,j}^{l',j'} - y_{l,i,j-1}^{l',j'}, \quad (15)$$

$$p_{l,i,j}^{l',j'} = \rho_{l,i}^{l',j'} z_{l,i,j}^{l',j'} n_{l',i,j'}^{\text{al}}. \quad (16)$$

其中: $b_{l,i}^{l',j'}$ 表示乘客在换乘站 i 从线路 l' 站台步行到线路 l 站台所需要的走行时间, M 表示充分大的正数, $\rho_{l,i}^{l',j'}$ 表示从线路 l' 的列车下车的乘客在车站 i 换乘线路 l 上的比例.

5) 能耗相关约束.

列车运行能耗主要由牵引能耗与辅助能耗构成. 其中, 牵引能耗主要用于为列车提供运行动力, 结合速度曲线选择决策, 线路 l 列车 j 在区间 i 运行的牵引能耗可表示为

$$e_{l,i,j}^{\text{tra}} = \sum_{q \in Q_{l,i}} \tilde{e}_{l,i,q} (m_{\text{tr}} + m_{\text{pa}} n_{l,i,j}^{\text{on}}) u_{l,i,j,q}. \quad (17)$$

其中: m_{tr} 和 m_{pa} 分别表示列车和乘客重量, $\tilde{e}_{l,i,q}$ 表示线路 l 区间 i 候选速度曲线 q 所对应的单位质量牵引能耗. 辅助能耗是指用于空调通风、照明和信号等设备的能耗, 表示为

$$e_{l,i,j}^{aux} = (\mu_{lc} + \mu_{ac}n_{l,i-1,j}^{on})(a_{l,i,j} - a_{l,i-1,j}). \quad (18)$$

其中: μ_{ac} 表示每位在车乘客消耗的辅助功率, μ_{lc} 表示其他相关辅助设施消耗的辅助功率.

2.2 目标函数

为了保障干扰事件下地铁系统运营效率和服务质量, 综合考虑列车时刻表偏差、乘客等待和能源消耗3个维度构造目标函数表达式如下:

$$T_{l,i,j} = (d_{l,i,j} - D_{l,i,j})^2 + (d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1} - H_{l,i,j})^2, \quad (19)$$

$$W_{l,i,j} = \frac{1}{2}\lambda_{l,i,j}(d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1})^2 + n_{l,i,j-1}^{st}(d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1}) + \sum_{l' \in \mathbb{X}_{l,i}} \sum_{j' \in \mathbb{J}_{l'}} p_{l',j'}^{l',j'}(d_{l,i,j} - (a_{l',i,j'} + b_{l',i}')), \quad (20)$$

$$E_{l,i,j} = e_{l,i,j}^{tra} + e_{l,i,j}^{aux}, \quad (21)$$

$$F = \sum_{l \in \mathbb{L}} \sum_{i \in \mathbb{I}_l} \sum_{j \in \mathbb{J}_l} (\zeta_1 T_{l,i,j} + \zeta_2 W_{l,i,j} + \zeta_3 E_{l,i,j}). \quad (22)$$

其中: 式(19)表示列车发车时间偏差和发车间隔偏差; 式(20)表示乘客总等待时间; 式(21)表示列车运行能耗; $D_{l,i,j}$ 表示线路 l 的列车 j 从车站 i 的计划出发时间; $H_{l,i,j}$ 表示计划发车间隔; $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ 表示各目标项的权重系数.

2.3 模型构建

基于上述目标函数及约束条件, 本研究将列车运行调整和速度曲线选择问题构建为如下混合整数非线性规划模型:

$$\min F = \sum_{l \in \mathbb{L}} \sum_{i \in \mathbb{I}_l} \sum_{j \in \mathbb{J}_l} (\zeta_1 T_{l,i,j} + \zeta_2 W_{l,i,j} + \zeta_3 E_{l,i,j}).$$

s.t. 式(1) ~ (3), (5) ~ (21);

$$z_{l,i,j}^{l',j'}, y_{l,i,j}^{l',j'} \in \{0, 1\};$$

$$j' \in \mathbb{J}_{l'}, l' \in \mathbb{X}_{l,i}, j \in \mathbb{J}_l, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L};$$

$$u_{l,i,j,q} \in \{0, 1\}, q \in \mathbb{Q}_{l,i}, j \in \mathbb{J}_l, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L};$$

$$x_{l,i,j} \in [x_{\min,l}, x_{\max,l}], j \in \mathbb{J}_l, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L}. \quad (23)$$

该模型包含多个非线性项, 其中: 约束(9)包含min函数, 约束(16)和(17)包含0-1变量与连续变量的乘积项, 约束(18)和目标项(20)涉及连续变量之间的乘积项. 此外, 由于问题涵盖多条线路, 在网络化背景下, 其计算规模随线路数量呈指数级增长, 进一步增加了求解的复杂性.

3 算法设计

考虑到模型(23)中非凸非线性项带来的求解困难、网络化条件下模型计算复杂度高的挑战, 及列车运行调整的实时性需求, 本文提出一种基于滚动时域优化与并行分解的高效算法.

3.1 滚动时域优化

本节提出一种滚动时域优化算法. 该算法将整个研究时域划分为一系列长度为 η 的决策阶段, 每个阶段涉及预测时域和控制时域两个关键要素. 预测时域从当前决策阶段开始时间起, 跨越 $\delta\eta$ ($\delta \geq 1$)长度的时间区间, 用于前瞻性地优化列车运行计划调整方案; 控制时域则为当前阶段实际执行调整的时间区间. 这种设计实现了系统优化前瞻性与执行实时性的结合. 在每个决策阶段 k , 引入集合 $\mathbb{J}_{l,i}^k$ 表示该阶段预测时域内线路 l 在站点 i 需要进行决策的列车集合. 基于实时获取的干扰信息、客流需求以及列车实际到站时间等系统状态, 针对决策阶段 k 的预测时域构建列车运行调整优化模型如下:

$$\min F_k = \sum_{l \in \mathbb{L}} \sum_{i \in \mathbb{I}_l} \sum_{j \in \mathbb{J}_{l,i}^k} (\zeta_1 T_{l,i,j} + \zeta_2 W_{l,i,j} + \zeta_3 E_{l,i,j}).$$

s.t. 式(1) ~ (3), (5) ~ (21);

$$z_{l,i,j}^{l',j'}, y_{l,i,j}^{l',j'} \in \{0, 1\};$$

$$j' \in \hat{\mathbb{J}}_{l',i}^{k,l,j}, l' \in \mathbb{X}_{l,i}, j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L};$$

$$u_{l,i,j,q} \in \{0, 1\}, q \in \mathbb{Q}_{l,i}, j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L};$$

$$x_{l,i,j} \in [x_{\min,l}, x_{\max,l}], j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L}. \quad (24)$$

其中: $\hat{\mathbb{J}}_{l',i}^{k,l,j}$ 表示阶段 k 在换乘站 i 与线路 l 列车 j 可能构成衔接的线路 l' 的列车集合. 通过求解该优化模型获得预测时域内的列车调整策略, 其中仅控制时域内的策略将被实际执行. 在后续决策阶段 $k+1$, 算法基于更新的系统状态和实时信息重新进行优化, 从而保证调整策略对系统动态变化的适应性. 算法的完整流程如算法1所示.

算法1 滚动时域优化.

step 1: 实时信息获取. 在每个阶段 k 开始时刻, 获取干扰和客流实时信息, 测量并反馈列车状态信息.

step 2: 模型构建. 根据当前测量的列车状态信息及更新的干扰和客流信息, 构建当前预测时域内的列车运行计划调整模型.

step 3: 求解优化问题. 利用分解算法求解模型, 得到预测时域内的列车运行调整策略.

step 4: 策略实施. 将当前控制时域内的列车运行调整策略实施到系统中.

step 5: 阶段更新. 进入下一个阶段 $k+1$, 重复 step 1 ~ step 4, 直至覆盖整个研究时域.

3.2 分解算法

针对大规模复杂优化问题,采用分解策略进行求解已被广泛证明是一种高效且可扩展的方法^[20-21].考虑到每个阶段构造的优化问题(24)中存在难求解的非凸非线性项,且涉及多条线路的网络化特征导致计算规模随线路数量呈指数增长,本节设计一种高效分解算法.该算法引入客流估计构造小规模子问题以降低计算复杂度,并基于子问题最优解更新客流估计.具体地,通过引入车载乘客数量、换乘乘客数量和滞留乘客数量的估计 $\bar{n}_{l,i,j}^{\text{on}}$, $\bar{p}_{l,i,j}^{\prime,j'}$ 及 $\bar{n}_{l,i,j}^{\text{st}}$,将原问题转化为列车运行调整子问题,即

$$\begin{aligned} \min F_k^{\text{sub}} = & \sum_{l \in \mathbb{L}} \sum_{i \in \mathbb{I}_l} \sum_{j \in \mathbb{J}_{l,i}^k} (\zeta_1 T_{l,i,j} + \zeta_2 W_{l,i,j} + \zeta_3 E_{l,i,j}). \\ \text{s.t. 式(1) } \sim & \text{(3), (5) } \sim \text{(7), (19), (21);} \\ e_{l,i,j}^{\text{tra}} = & \sum_{q \in \mathbb{Q}_{l,i}} \tilde{e}_{l,i,q} (m_{\text{tr}} + m_{\text{pa}} \bar{n}_{l,i,j}^{\text{on}}) u_{l,i,j,q}; \\ e_{l,i,j}^{\text{aux}} = & (\mu_{\text{lc}} + \mu_{\text{ac}} \bar{n}_{l,i-1,j}^{\text{on}}) (a_{l,i,j} - a_{l,i-1,j}); \\ W_{l,i,j} = & \frac{1}{2} \lambda_{l,i,j} (d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1})^2 + \\ & \bar{n}_{l,i,j-1}^{\text{st}} (d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1}) + \\ & \sum_{l' \in \mathbb{X}_{l,i}} \sum_{j' \in \mathbb{J}_{l',i}^{k,l,j}} \bar{p}_{l',i,j}^{\prime,j'} (d_{l,i,j} - (a_{l',i,j'} + b_{l',i}^{\prime})); \\ z_{l,i,j}^{\prime,j'} = & y_{l,i,j}^{\prime,j'} \in \{0, 1\}; \\ j' \in & \mathbb{J}_{l',i}^{k,l,j}, l' \in \mathbb{X}_{l,i}, j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L}; \\ u_{l,i,j,q} \in & \{0, 1\}, q \in \mathbb{Q}_{l,i}, j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L}; \\ x_{l,i,j} \in & [x_{\min,l}, x_{\max,l}], j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l, l \in \mathbb{L}. \end{aligned} \tag{25}$$

值得注意的是,由于客流估计的引入,原问题约束(9)中的非凸min函数及约束(16)~(18)和(20)中的变量相乘项得以消除.另外,式(25)的约束矩阵呈现出线路独立的特性,这意味着求解问题(25)等价于并行求解各线路子问题.对于线路 l ,其子问题可表述为

$$\begin{aligned} \min F_{k,l}^{\text{sub}} = & \sum_{i \in \mathbb{I}_l} \sum_{j \in \mathbb{J}_{l,i}^k} (\zeta_1 T_{l,i,j} + \zeta_2 W_{l,i,j} + \zeta_3 E_{l,i,j}). \\ \text{s.t. 式(1) } \sim & \text{(3), (5) } \sim \text{(7), (19), (21);} \\ e_{l,i,j}^{\text{tra}} = & \sum_{q \in \mathbb{Q}_{l,i}} \tilde{e}_{l,i,q} (m_{\text{tr}} + m_{\text{pa}} \bar{n}_{l,i,j}^{\text{on}}) u_{l,i,j,q}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{l,i,j}^{\text{aux}} = & (\mu_{\text{lc}} + \mu_{\text{ac}} \bar{n}_{l,i-1,j}^{\text{on}}) (a_{l,i,j} - a_{l,i-1,j}); \\ W_{l,i,j} = & \frac{1}{2} \lambda_{l,i,j} (d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1})^2 + \\ & \bar{n}_{l,i,j-1}^{\text{st}} (d_{l,i,j} - d_{l,i,j-1}) + \\ & \sum_{l' \in \mathbb{X}_{l,i}} \sum_{j' \in \mathbb{J}_{l',i}^{k,l,j}} \bar{p}_{l',i,j}^{\prime,j'} d_{l,i,j} - \\ & \sum_{l' \in \mathbb{X}_{l,i}} \sum_{j' \in \mathbb{J}_{l',i}^k} \bar{p}_{l',i,j'}^{\prime,j'} (a_{l,i,j} + b_{l',i}^{\prime}); \\ u_{l,i,j,q} \in & \{0, 1\}, q \in \mathbb{Q}_{l,i}, j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l; \\ x_{l,i,j} \in & [x_{\min,l}, x_{\max,l}], j \in \mathbb{J}_{l,i}^k, i \in \mathbb{I}_l. \end{aligned} \tag{26}$$

在每次迭代过程中,算法基于求解一系列线路子问题获得列车调整方案,随后使用约束(8)~(16)对估计值进行更新,并通过式(17)~(22)更新目标函数值.通过这种方式,原模型被转化为一系列较小规模的线路子问题和客流加载程序,从而显著降低了求解难度.

鉴于列车运行调整在实际应用中通常要求在有限时间内获得可行的调整方案,将算法的终止条件设定为给定的计算时间限制.算法2对完整的分解求解流程进行了总结.

算法2 分解算法.

step 1: 初始化客流估计. 设置初始的车载乘客数量、换乘乘客数量和滞留乘客数量估计值.

step 2: 并行求解子问题. 基于当前客流估计,并行求解各线路列车运行调整子问题,得到各线路的最优解.

step 3: 更新客流估计. 基于 step 2 中的最优解,通过式(8)~(16)更新客流估计值.

step 4: 更新目标函数. 基于 step 2 中的最优解,根据式(17)~(22)计算目标函数值 $F_k(\tau)$,并通过 $F_k(\tau) = \min\{F_k(\tau), F_k(\tau - 1)\}$ 更新,其中 τ 表示当前迭代次数.

step 5: 迭代优化. 重复 steps 2~step 4,直至达到给定的计算时间限制.

4 算例分析

为了验证所提出列车运行调整方法的有效性,以北京地铁网络中的10条线路为例进行数值实验,所考虑网络共有205座车站,其中包括46座换乘站.模型参数设置如表1所示,地铁网络如图1所示.

表1 模型参数设置

参数	值	参数	值	参数	值
$x_{\max,l}/s$	30	$b_{l,i}^{\prime}/s$	100	ζ_1	1
$x_{\min,l}/s$	-20	m_{tr}/kg	224000	ζ_2	2
$C_{l,j}/\text{pax}$	1700	m_{pa}/kg	60	ζ_3	20
$\mu_{\text{lc}}/\text{kW}$	50	μ_{ac}/W	110	$h_{\min,6}/s$	180
$h_{\min,l}, l = 2, 3, 4, 5, 7, 9/s$	120	$h_{\min,1}/s$	105	$h_{\min,8}/s$	300
$h_{\min,10}/s$	190	$w_{l,i,j}/s$	[0, 30]	$v_{l,i,j}/s$	[0, 90]

减少延误,显著改善列车运行的准时性和规律性. RC 相较 NC 将平均时刻表偏差减少了 33.81 s, 平均乘客等待时间降低了 17.26 s, 运行能耗降低了 2.94%. 尽管 RC 策略在一定程度上贴近原计划时刻表, 但其以偏差为驱动的事件触发机制未能充分考虑客流分布和能耗影响, 导致性能提升有限. 相比之下, 基于优化机制的 PC 策略在每次决策时可以综合考虑时刻表偏差、客流和能耗的影响, 从全局角度制定最佳调整方案. 通过优化列车速度曲线和停站调整策略, PC 进一步提升了干扰事件下的系统性能. 与 RC 相比, PC 将时刻表偏差、乘客等待时间和能耗分别降低了 10.35%、6.41% 和 2.16%. 总体而言, RC 通过主动减少延误显著优于被动调整的 NC, 而 PC 进一步依托优化算法全面权衡时刻表偏差、客流与能耗的关系, 在所有性能指标上均表现最佳, 充分验证了其在复杂干扰场景下的高效性和适用性.

4.3 不同干扰及客流需求场景对比

为了验证所提出方法在不同干扰频率下的适应能力, 设计 4 种不同干扰生成比例 (0.15、0.2、0.25、0.3) 场景. 图 2(a)~图 2(c) 展示了 3 种策略 (NC、RC、PC) 在不同干扰场景下的时刻表偏差、平均乘客等待时间和列车运行能耗的表现. 从图 2(a) 可以看出, NC 策略的时刻表偏差随着干扰强度的增加急剧上升, 表明其无法有效应对干扰, 列车偏离计划时刻表的程度最为显著. 而 RC 策略通过事件触发调整, 在较低干扰场景下能有效降低时刻表偏差, 但在高干扰场景下改善效果有限. 相比之下, PC 策略始终表现出最优的控制效果, 在所有干扰场景下均显著降低了时刻表偏差, 尤其在干扰场景下具有显著优势. 在图 2(b) 和图 2(c) 中, 乘客等待时间和列车运行能耗呈现出与时刻表偏差类似的趋势. PC 策略在优化模型的支持下, 将时刻表偏差、乘客等待时间及运行能耗在所有干扰场景中保持在最低水平, 尤其在干扰场景下表现出显著的优势.

为了进一步验证方法在不同客流需求下的鲁棒

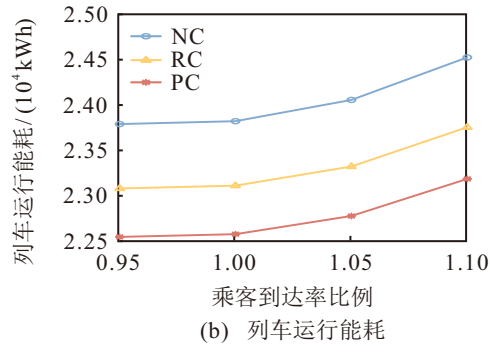
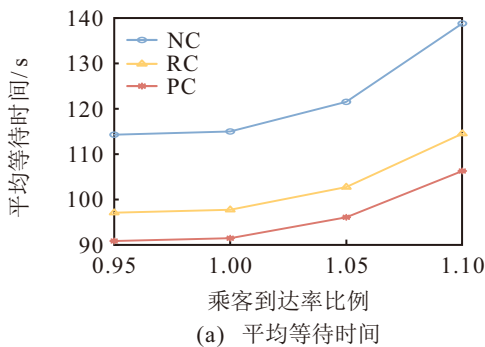


图3 不同客流需求场景下 NC、RC、PC 策略的性能对比

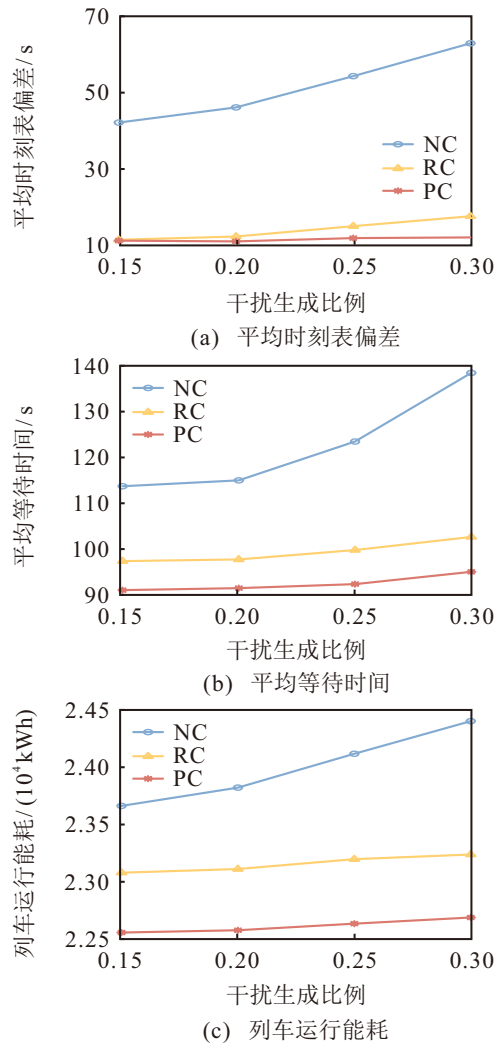


图2 不同干扰场景下 NC、RC、PC 策略的性能对比

性, 基于乘客到达率的变化 (0.95 倍、1 倍、1.05 倍、1.1 倍于 4.1 节采用的乘客到达率) 生成 4 种客流需求场景, 并分析 3 种策略在这些场景下的性能表现, 如图 3 所示. 图 3(a) 展示了不同策略下的平均乘客等待时间随客流需求增加的变化情况. 可以看到, 随着客流需求的增长, 在有限的容量限制下, 所有策略的乘客等待时间均有所增加. NC 策略未能有效缓解高客流情况下的乘客滞留问题, 等待时间增幅最为显著; PC 策略通过在优化模型中充分考虑客流加载和换乘衔接, 在所有场景中始终保持最低的乘客等

待时间. 图 3(b) 中, 不同策略下的运行能耗变化趋势表明, 随着客流需求的增长, 所有策略的运行能耗均有所增加. 其中, PC 策略的节能效果最为显著. 综上所述, 无论是干扰场景还是客流需求场景, PC 策略在时刻表偏差、乘客等待时间和运行能耗 3 个指标上均优于其他两种策略, 相比于 RC, 这些指标分别降低 14.18%、6.85% 和 2.35%, 上述结果展现出所提列车运行调整优化方法优越的综合性能和鲁棒性.

4.4 不同目标函数权重对比

为探究目标函数中权重因子 ζ_1 、 ζ_2 和 ζ_3 对列车运行调整方法的影响, 本研究设计多组权重组合对比实验. 基于表 1 中的基准权重设置 ($\zeta_1 = 1$, $\zeta_2 = 2$, $\zeta_3 = 20$), 依次将各权重因子扩大至 10 倍和 100 倍, 形成 6 组对比实验方案. 各组合下的计算结果汇总如表 2 所示.

表2 不同权重组合下的性能比较

权重设置	平均时刻表偏差/s	平均等待时间/s	运行能耗/(10^4 kWh)
基准	11.06	91.48	2.26
$\zeta_1 \cdot 10$	3.55	93.37	2.27
$\zeta_1 \cdot 100$	2.69	94.02	2.27
$\zeta_2 \cdot 10$	29.66	83.62	2.25
$\zeta_2 \cdot 100$	34.90	82.59	2.25
$\zeta_3 \cdot 10$	11.97	90.40	2.21
$\zeta_3 \cdot 100$	12.20	91.16	2.19

根据计算结果, 当 ζ_1 增加时, 时刻表偏差明显下降. 当时刻表偏差权重 ζ_1 从基准值增加到 10 倍时, 平均时刻表偏差从 11.06 s 显著下降至 3.55 s, 进一步增加到 100 倍时, 时刻表偏差降至 2.69 s. 由此可见, 时刻表偏差对该因子的变化较为敏感, 较高的 ζ_1 设置能够显著改善列车准点性. 当 ζ_2 增大时, 乘客等待时间显著下降. 当 ζ_2 增加到 100 倍时, 平均等待时间从 91.48 s 下降到 82.59 s. 与此同时, 时刻表偏差呈现上升, 反映了模型在乘客等待时间与时刻表偏差之间的权衡. 当 ζ_3 增加, 运行能耗呈现平缓的下降趋势. 这些实验结果表明, 不同的权重组合会在时刻表偏差、乘客等待时间与运行能耗之间产生不同的权衡. 在实际运营中可根据需求调节权重因子的大小.

5 结论

1) 提出了考虑换乘衔接和运行节能的城市轨道交通网络列车运行调整和速度曲线选择优化方法. 基于实时信息动态调整列车停站时间和速度曲线选择, 从而提高运行准点性和规律性, 降低能耗并减少乘客等待时间.

2) 基于滚动时域和分解算法设计了一种高效的动态列车运行调整算法. 该算法将网络问题分解为

一系列支持并行求解的线路子问题, 并有效克服了非凸非线性的求解挑战, 显著提高了计算效率, 满足实时性需求.

3) 基于北京地铁网络的仿真研究结果表明: 与基于启发式规则的列车运行调整方法相比, 本文提出的实时优化方法在不同干扰和需求场景下能使列车时刻表偏差、乘客等待时间和列车运行能耗平均降低 14.18%、6.85% 和 2.35%.

4) 在未来的研究工作中, 将在现有研究的基础上进一步考虑列车跳站运行、大小交路运行等运营策略, 从而更灵活地应对客流波动、突发干扰等复杂运营场景, 提升列车运行调整的适应性和实用性.

参考文献 (References)

- [1] Yin Jiateng, Tang Tao, Yang Lixing, et al. Energy-efficient metro train rescheduling with uncertain time-variant passenger demands: An approximate dynamic programming approach[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 91: 178-210.
- [2] Tessitore M L, Sama M, D'Ariano A, et al. A simulation-optimization framework for traffic disturbance recovery in metro systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 136: 103525.
- [3] 俞胜平, 韩忻辰, 袁志明, 等. 基于策略梯度强化学习的高铁列车动态调度方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2407-2417.
(Yu S P, Han X C, Yuan Z M, et al. Dynamic train scheduling method for high-speed rail based on policy gradient reinforcement learning[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(9): 2407-2417.)
- [4] 陈垚, 柏赞, 冯旭杰, 等. 基于换乘站停站时间延长的城市轨道交通末班车时刻表优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(6): 228-234.
(Chen Y, Bai Y, Feng X J, et al. Optimization of the last train timetable in urban rail transit based on extended stop time at transfer stations[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(6): 228-234.)
- [5] Han Zhenyu, Han Baoming, Li Dewei, et al. Train timetabling in rail transit network under uncertain and dynamic demand using advanced and adaptive NSGA-II[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 154: 65-99.
- [6] 卢亚茜, 杨凯, 杨立兴, 等. 基于分布鲁棒优化的城市轨道交通网络末班车衔接研究[J]. *控制与决策*, 2023, 38(1): 248-256.
(Lu Y H, Yang K, Yang L X, et al. Distributionally robust optimization for the last-train connection planning problem in urban rail transit networks[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(1): 248-256.)
- [7] 周文梁, 黄裕, 邓连波. 考虑运行节能和车底运用的城轨时刻表优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(2): 473-482.

- (Zhou W L, Huang Y, Deng L B. Optimization of urban rail timetables considering operational energy saving and trainset utilization[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(2): 473-482.)
- [8] 张京辉, 陈曦, 李博睿. 考虑车数限制的城市轨道交通非对称时刻表优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2632-2640.
(Zhang J H, Chen X, Li B R. Optimization of asymmetric timetable in urban rail transit considering train quantity restriction[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2632-2640.)
- [9] Ning Bin, Xun Jing, Gao Shigen, et al. An integrated control model for headway regulation and energy saving in urban rail transit[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 16(3): 1469-1478.
- [10] 龙思慧, 孟令云, 王义惠, 等. 高速列车运行调整与运行控制一体化双目标优化模型与算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(6): 163-169.
(Long S H, Meng L Y, Wang Y H, et al. Bi-objective optimization model and algorithm for integrated high-speed train operation adjustment and control[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(6): 163-169.)
- [11] Zhou Min, Hou Zhuopu, Wu Xingtang, et al. Integration of train regulation and speed profile optimization based on feature learning and hybrid search algorithm[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2023, 11(2): 2535-2544.
- [12] Li Shukai, Yuan Yin, Chen Zebin, et al. Real-time train regulation in the metro system with energy storage devices: An efficient decomposition algorithm with bound contraction[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 159: 104493.
- [13] Chen Zebin, Li Shukai, Yang Lixing. Hierarchical optimal control framework to automatic train regulation combined with energy-efficient speed trajectory calculation in metro lines[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 149: 104059.
- [14] 李茜, 李蔚, 曹悦, 等. 基于 DDDQN 的城轨列车节能运行控制方法研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(12): 4960-4970.
(Li X, Li W, Cao Y, et al. Research on energy-saving operation control method for urban rail trains based on DDDQN[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(12): 4960-4970.)
- [15] Wang Yonggang, Chen Junxian, Qin Yong, et al. Timetable rescheduling of metro network during the last train period[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 139: 105226.
- [16] 徐瑞华, 刘峰博, 范围. 基于换乘运力协调的地铁列车运行调整策略[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(6): 164-170.
(Xu R H, Liu F B, Fan W. Metro train operation adjustment strategy based on transfer capacity coordination[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(6): 164-170.)
- [17] 张翕然, 安爱民, 陈绍宽, 等. 应对通过能力下降的地铁列车运行协同调整优化方法[J]. *铁道学报*, 2023, 45(5): 12-20.
(Zhang X R, An A M, Chen S K, et al. Collaborative adjustment and optimization method for metro train operation in response to reduced capacity[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(5): 12-20.)
- [18] Wang Yihui, Tang Tao, Ning Bin, et al. Passenger-demands-oriented train scheduling for an urban rail transit network[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 60: 1-23.
- [19] Li Shukai, Dessouky Maged M, Yang Lixing, et al. Joint optimal train regulation and passenger flow control strategy for high-frequency metro lines[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 99: 113-137.
- [20] 何维, 何世伟, 迟居尚, 等. 集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度协同优化[J]. *控制与决策*, 2025, 40(7): 2175-2184.
(He W, He S W, Chi J S, et al. Collaborative optimization of full-path transportation and drayage truck scheduling in container multimodal transport[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(7): 2175-2184.)
- [21] 翁武燕, 储诚斌, 吴鹏. 极小化加权完工时间的多资源工序的资源分配问题[J]. *控制与决策*, 2024, 39(8): 2765-2772.
(Weng W Y, Chu C B, Wu P. Resource allocation for multi-resource operations to minimize total weighted completion time[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(8): 2765-2772.)

作者简介

袁音 (1998-), 女, 博士生, 主要研究方向为城市轨道交通列车运行组织优化, E-mail: 21114015@bjtu.edu.cn;

李树凯 (1985-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为交通系统建模与优化控制, E-mail: shkli@bjtu.edu.cn;

陈泽彬 (1996-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为列车运行调度优化、列车节能运行控制, E-mail: zebichen@stu.edu.cn;

杨立兴 (1976-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: lxyang@bjtu.edu.cn.