

# 考虑客流特征的城市轨道交通列车节能运行标尺配置

赵东升, 姚向明<sup>†</sup>, 赵鹏, 张伯男

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

**摘要:** 现行列车运行标尺配置以保障线路通过能力为原则, 不考虑客流分布特征的差异性, 导致列车牵引能耗偏高. 建立考虑客流特征的列车节能运行标尺精细化配置方法, 首先基于高平峰客流分布的差异, 解析列车在车站的“站停时间-客流量”以及在区间的“载客量-运行时间-牵引能耗”耦合关系; 基于该耦合关系构建以列车周转牵引能耗最小化为目标的列车运行标尺配置模型. 最后, 以某地铁线路进行实证研究, 结果显示在不改变原车底周转时间的前提下, 优化后平峰时段列车周转牵引能耗降低 12.71%, 高峰时段列车周转牵引能耗降低 6.69%, 验证了该方法的节能潜力. 研究成果能够为节能运行图编制提供关键参数, 该方法适用于高平峰客流特征差异明显的城市轨道交通线路.

**关键词:** 运行标尺; 多目标优化; 城市轨道交通; 节能; 周转牵引能耗

**中图分类号:** U2-9 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2025.1040

**引用格式:** 赵东升, 姚向明, 赵鹏, 等. 考虑客流特征的城市轨道交通列车节能运行标尺配置 [J]. 控制与决策, xxxx, x(x): xxxx-xxxx.

## Energy-efficient configuration of urban rail train operation time parameters considering passenger flow characteristics

ZHAO Dong-sheng, YAO Xiang-ming<sup>†</sup>, ZHAO Peng, ZHANG Bo-nan

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The prevailing configuration of train operation time parameters prioritizes line capacity utilization without considering variations in passenger flow distribution, leading to high traction energy consumption. To address this issue, this study proposes a refined configuration method for energy-saving train operation time parameters that incorporates passenger flow characteristics. First, the coupling relationships between “dwell time and passenger volume” at stations and among “passenger load, running time, and traction energy consumption” in sections are analyzed, based on passenger flow distribution differences between peak and off-peak hours. Subsequently, a configuration model is formulated with the objective of minimizing traction energy consumption per train cycle. An empirical study on a metro line demonstrates that, without extending the train turnaround time, the proposed method reduces traction energy consumption per cycle by 12.71% during off-peak hours and 6.69% during peak hours. These results confirm the energy-saving potential of the method, and the findings provide key parameters for generating energy-efficient timetables. The proposed approach is applicable to urban rail transit lines with distinct peak/off-peak passenger flow patterns.

**Keywords:** train operation time parameters; multi-objective optimization; urban traffic; energy saving; turnaround traction energy consumption

## 0 引言

列车牵引能耗约占城市轨道交通(简称轨道交通)系统能耗的 50%<sup>[1]</sup>, 降低牵引能耗是轨道交通节能的重要途径. 列车运行标尺是指列车在运行各环节的时间作业标准, 包括停站时间、区间运行时间、

折返作业时间等, 是运行图编制所需核心参数. 科学配置标尺对保障运输能力、降低牵引能耗具有重要意义. 当前运营实践中列车运行标尺配置存在一定不足, 具体体现在: ①现行标尺配置以保障线路通过能力为主要原则, 导致列车技术速度高、牵引能耗大;

收稿日期: xxxx-xx-xx; 录用日期: 2026-03-01.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2024QYBS014); 国家自然科学基金项目(52372299, 52372299).

†通信作者. E-mail: yaoxm@bjtu.edu.cn.

②不考虑高平峰客流的不均衡性以及乘客对旅行速度需求的差异性,不同运营时段采用同一套标尺,虽然便于运行图铺画,但牵引能耗偏高,尤其在平峰时段;③现行标尺设置以运营管理人员经验为主,精细化程度不足.为此,本文以降低牵引能耗为目标,提出考虑客流分布特征的列车运行标尺精细化配置方法.

列车节能运行组织是实现节能的关键途径.既有研究聚焦列车节能操纵优化与节能运行图优化两方面.在列车节能操纵优化领域,既有研究主要基于庞特里亚金极大值原理得到特定线路条件(如平直线路、长下坡道等)推导出最优操纵策略.具体而言,Howlett等<sup>[2]</sup>证明平直线路上列车的最佳工况序列为“最大牵引-巡航-惰行-最大制动”;Milroy等<sup>[3]</sup>针对短平缓区间简化序列为“最大牵引-惰行-最大制动”;柏赞等<sup>[4]</sup>通过改进工况序列得到长下坡道的列车节能操纵策略;高豪等<sup>[5]</sup>则采用区间离散化和动态规划算法,基于最优工况选择求解节能速度曲线;此外,部分学者<sup>[6-8]</sup>将节能与正点指标分离,构建优化模型以生成小时间粒度的速度曲线集.该领域研究成果较为丰富,但受运行控制精度、安全性等因素制约,实际应用效果有限,推广案例较少.

在节能运行图优化领域,现有研究多聚焦于优化区间运行时间降低牵引能耗与利用“车-车”协同提升再生能利用两方面.在牵引能耗优化方面,Su等<sup>[9]</sup>基于区间“时间-能耗”关系,通过合理分配冗余时间实现节能时刻表优化;Zhang等<sup>[10]</sup>在此基础上引入缓冲时间分配策略以降低牵引能耗;张伯男等<sup>[11]</sup>依据高平峰时段特征,差异化配置各时段区间运行时间以降低全日运行图的牵引能耗.上述研究均从区间“时间-能耗”关系出发,通过合理分配运行时间来降低牵引能耗,但普遍未考虑列车载客量对能耗的实际影响,同时也缺乏对停站时间设置的节能性分析与优化.在再生制动能利用方面,Yan等<sup>[12]</sup>以最大化相邻列车牵引和制动时间重叠为目标构建节能运行图优化方法;邓连波等<sup>[13]</sup>综合优化区间运行时间与停站时间以提升再生能利用率;Liu等<sup>[14]</sup>通过调整列车发车间隔与各站点停站时间实现再生能利用最大化;Mo等<sup>[15]</sup>协同优化列车运行图与车底周转计划以提高再生制动能利用率;张惠茹<sup>[16]</sup>和冉昕晨等<sup>[17]</sup>则聚焦于“车-车”间牵引与制动工况的功率重叠特性,在提升再生能利用率的同时,兼顾缩短乘客在车时间.理论上基于再生制动能利用的节能运行图具有较大潜力,但实际应用中效果并不理想,主要原因是城市轨道交通列车加减速时间较短,秒级运行偏差会显著削弱节能效果.综上分析,既有研

究多数从列车操纵策略优化以及优化运行图两方面着手,从标尺优化视角开展尚存在不足;既有研究多以列车“运转”为中心,较少考虑客流时空分布的不均衡性,忽视了列车载客量对牵引能耗的影响,导致标尺配置精细化不足.

为此,本研究拟在运行图编制前通过科学化、精细化配置列车运行标尺来降低牵引能耗,提出考虑客流特征的列车节能运行标尺优化方法.结合不同运营时段的客流时空分布特征,解析“客流量-停站时间”与“载客量-运行时间-牵引能耗”的耦合关系,将运行标尺的配置逻辑从基于固定能力的供给保障转变为面向动态能效的需求适配.以列车周转过程为单元,构建周转牵引能耗最小化为目标的标尺优化模型,在保障运输能力的前提下,协同优化停站时间与区间运行等级.通过案例分析验证方法在高、平峰时段的适应性,揭示客流分布对标尺配置的敏感性,为节能运行图编制提供决策依据.

## 1 问题分析

### 1.1 列车周转牵引能耗

标尺是列车在运行各环节中的时间标准,是运行图铺画前需确定的重要参数.实践中常以单个区间、单个车站为对象,根据基础设施的通过能力以及列车开行测试来确定,该过程具有较强经验性.本研究将视角放在列车(车底)的一个完整周转过程.假设一条轨道交通线路包含 $N$ 个车站,每个车站有上下行两个站台,总站台数为 $2N$ ,按照列车运行方向依次对站台进行编号,定义为 $j$ ,站台集合为 $J$ ,如图1所示.列车从站台1运行至站台 $N$ 折返,再运行至站台 $2N$ 并折返回到站台1的过程为一个完整的车底周转过程.

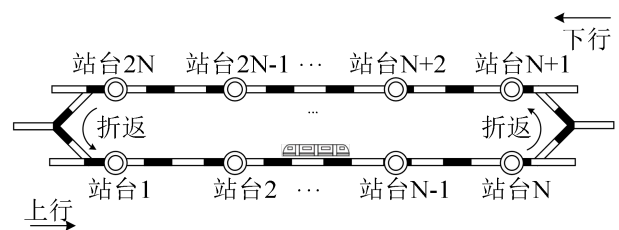


图1 城市轨道交通线路示意图

车底周转时间为列车完成周转运行所需的总时间,包括区间运行时间、停站时间及折返时间,见式(1).列车周转牵引能耗即周转过程中所需牵引能耗之和,见式(2).

$$T = \sum_{j \in J/\{2N\}} t_j + \sum_{j \in J/\{N, 2N\}} t_{j,j+1} + 2t_p, \quad (1)$$

$$E = \sum_{j \in J/\{N, 2N\}} E_{j,j+1} \quad (2)$$

式中:  $T$ 为车底周转时间;  $t_j$ 为站台  $j$  的停站时间;  $t_{j,j+1}$ 为列车在区间  $(j, j+1)$  的运行时间;  $t_p$ 为折返时间;  $E$ 为列车周转牵引能耗;  $E_{j,j+1}$ 为列车在区间  $(j, j+1)$  的牵引能耗。

### 1.2 客流对列车运行标尺的影响

列车运行组织需以满足客运需求为首要目标,且受运力资源和线路通过能力的制约。首先,车站客流量大小直接影响停站时间,满足基本停站要求下客流量越大、停站时间越长。其次,客流量大小影响列车载容量,进而影响列车载重和牵引能耗。

#### (1) 客流对停站时间的直接影响

列车停站时间由固定作业时间和可变作业时间两部分构成。固定作业时间包括开关门时间、信号确认、司机发车作业时间等;可变作业时间主要受上下车客流量影响,上下车客流量越大,可变作业时间越长,停站时间也越长。此外,停站时间对线路通过能力有较大影响,停站时间有上限限制,一般不超过50秒。

运营实践中常根据客流量将车站分为大客流站,小客流站及换乘站,以差异化设置停站时间。虽考虑车站间客流的差异,但未考虑不同运营时段内客流的波动。该方法利于运行图铺画(全日采用同一套标尺参数),但是平峰时段客流明显降低,导致停站时间冗余过大。从牵引能耗角度考虑,平峰时段客流量较小,可将停站时间压缩后分配给区间运行时间,从而降低列车在区间的牵引能耗。

#### (2) 客流对区间运行时间的间接影响

客流对区间运行时间无直接影响,无论列车上载容量多少,列车在区间的运行时间基本固定。从能耗角度考虑,区间“时间-能耗”呈显著负相关关系。区间运行时间越长,列车运行速度越低,牵引能耗随之降低。既有研究基于该负相关关系对列车运行时

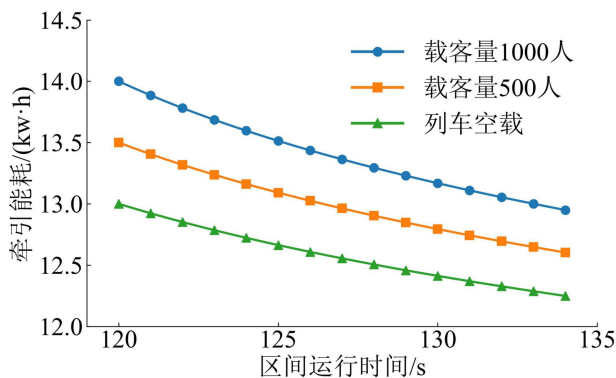


图2 载容量-区间时间-能耗关系

间进行了优化<sup>[11-13]</sup>。图2给出某线路实际区间不同载容量条件下“运行时间-能耗”关系。除运行时间外,列车载重也是影响牵引能耗的重要因素。假设存在两个具有相同物理条件的区间,标尺配置时增加载容量大的区间的运行时间,减少载容量小的区间的运行时间,可保持总运行时间不变且降低牵引能耗。

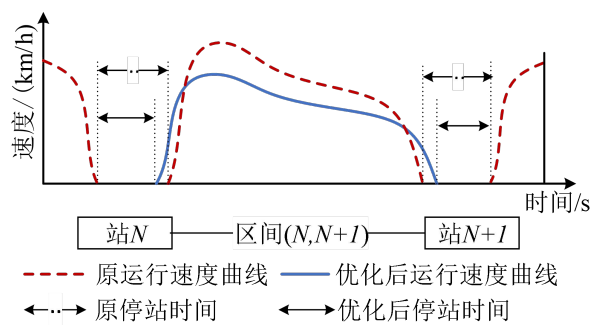
### 1.3 列车运行标尺优化原理

列车运行标尺优化的基本原理是利用车站“客流-停站时间”和区间“载容量-时间-能耗”关系的差异性,从列车周转视角合理配置停站时间及区间运行时间,达到降低周转牵引能耗的目的。运营实践中对车底周转时间有着严格要求。当配属车底数固定时,为满足高峰时段开行小间隔列车需求,需严格限制车底周转时间以保障运力供给需求。运力供给(发车间隔)、运用车数、车底周转时间三者间存在相互影响关系,如式(3)所示。

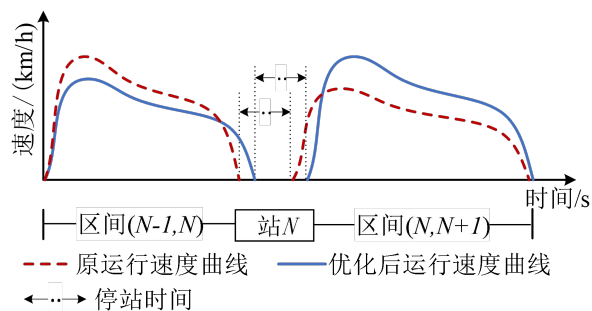
$$C = \lceil \frac{T}{h} \rceil \quad (3)$$

式中:  $C$ 为运用车底数量;  $h$ 为某时段的发车间隔,秒;  $T$ 为车底周转时间,秒;  $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。

列车运行标尺优化应以保障运输能力为前提,在满足客运需求的前提下考虑节能需求。通常线路的车底配属数量、各时段的发车间隔等较为固定,车底周转时间的微调范围有限。优化过程即在确定周转时间约束下依据“客流-停站时间”“载容量-时间-能耗”关系重新分配运行时间,优化措施包含:



(a) 停站时间分配至区间



(b) 区间运行时间重分配

图3 标尺优化原理

(1) 平峰时段将停站冗余时间分配给区间; 如图3(a)中区间 $(N, N+1)$ 所示, 保证必要停站时间的前提下压缩停站时间, 增加区间时间来降低牵引能耗。

(2) 高峰时段重分配列车在各区间的运行时间; 如图3(b)所示, 通过重新分配区间 $(N, N+1)$ 和区间 $(N-1, N)$ 的运行时间, 使总牵引能耗降低, 且保证总的区间运行时间不变。

## 2 模型构建

### 2.1 问题假设

在运营层面, 列车开行方案作为上层规划决策, 确定了线路的配属车底数量与发车间隔, 从而决定车底周转时间。折返站作业流程由信号系统控制, 作业时间相对固定。因此, 将车底周转时间与折返作业时间设为模型中的固定参数, 符合实际运营约束。由于车载辅助能耗与车底周转时间呈线性关系, 而列车的车底周转时间固定, 故模型仅针对周转过程中牵引能耗优化。客流数据处理基于自动售检票系统获取的分时客流起讫点 (Origin-Destination, OD) 数据矩阵。各时段车站上下车人数通过汇总以该站为起点或终点的所有 OD 量得到, 进而结合发车间隔确定区间断面客流量, 为标尺优化提供的客流输入。综合上述描述, 作如下合理性假设:

①为满足特定的运输能力需求, 在配属车底数量和发车间隔均已设定的前提下, 车底周转时间已知且不可调整;

②列车在固定车底周转时间下的辅助能耗波动较小, 将优化目标限定为运行过程中的牵引能耗;

③线路分时起讫点矩阵由自动售检票系统提供。据此可计算各时段站点上下客流量, 结合发车频率单列车区间断面客流;

④列车折返作业由信号系统按标准化流程控制, 其作业时间视为固定参数, 不纳入优化范围。

### 2.2 “客流-停站时间”关系建立

列车在站点的停站过程如图4所示。停站时间由固定作业时间和可变时间两部分组成。固定作业时间主要包括列车开关门、信号确认、司机发车等基本作业环节所需时间; 可变作业时间主要由乘客上

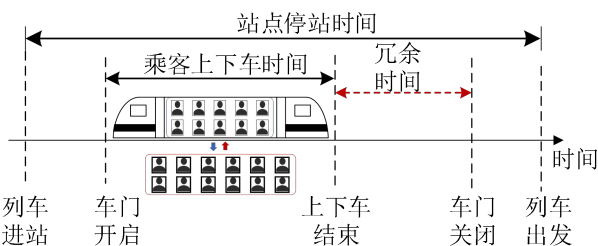


图4 列车站停站过程

下车时间构成, 具体可分解为上车时间、下车时间以及因上下车客流交织和车内拥挤所导致的额外延误时间<sup>[18-20]</sup>。

结合上述描述与分析, 列车在站点的停站时间表示为式(4)所示。式中 $r_a \cdot a_j$ 和 $r_b \cdot b_j$ 分别表示乘客的上车和下车过程所需时间,  $\psi \cdot (a_j + b_j)^3 \cdot a_j$ 表示下车客流交织及车内拥挤所导致的额外延误时间。

$$t_j = \lceil r_a \cdot a_j + r_b \cdot b_j + \psi \cdot (a_j + b_j)^3 \cdot a_j + \tau \rceil. \quad (4)$$
式中:  $t_j$ 表示站台 $j$ 的停站时间, 秒;  $r_a, r_b$ 分别表示乘客上车和下车速率, 秒/人;  $a_j, b_j$ 分别为列车在站台 $j$ 的上车和下车人数;  $\psi$ 为上下车客流干扰系数;  $\tau$ 为固定作业时间, 秒;  $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。

客流不仅表现出明显的单日内分时段变化特征, 在不同日期的同一时段也存在显著波动。为降低客流波动的影响, 利用多日客流标定停站时间范围。

首先, 根据单日分时 OD 矩阵推算各站的分时段上车乘客数, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} u_N^d = u_{2N}^d = 0 \quad \forall d \in D \\ u_j^d = \sum_{i=j+1}^N w_{i,j}^d \quad \forall i, j \in J, j \leq N-1, d \in D \\ u_j^d = \sum_{i=j+1}^{2N} w_{i,j}^d \quad \forall i, j \in J, N+1 \leq j \leq 2N-1, \\ d \in D \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $D$ 为日期集合;  $d$ 为日期索引,  $d \in D$ ;  $i, j$ 为台索引,  $i, j \in J$ ;  $u_j^d$ 为 $d$ 日列车在站台 $j$ 上车的总人数;  $w_{i,j}^d$ 为 $d$ 日由站台 $i$ 去往站台 $j$ 的客流量。

轨道交通采用均匀行车组织模式, 列车的发车间隔固定, 因此单列车在车站的平均上车乘客数为:

$$a_j^d = \frac{u_j^d}{3600} \cdot h, \quad \forall d \in D. \quad (6)$$

式中:  $a_j^d$ 为在 $d$ 日分析时段内列车在站台 $j$ 的平均上车人数,  $h$ 为运营时段内的行车间隔, 秒。

其次, 基于多日数据确定平均上车人数集合 $A_j = \{a_j^1, a_j^2, \dots, a_j^M\}$ , 其分布可近似为高斯分布<sup>[21]</sup>。据此, 采用极大似然估计估算其均值、方差及上 $\alpha$ 分位点 $z_\alpha$ :

$$\hat{\mu}_j^a = \frac{1}{M} \cdot \sum_{d \in D} a_j^d, \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_j^a = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum_{d \in D} (a_j^d - \hat{\mu}_j^a)^2}, \quad \forall j \in J, \quad (8)$$

$$z_\alpha^a = N_\alpha \cdot [\hat{\sigma}_j^a]^2 + \hat{\mu}_j^a. \quad (9)$$

式中:  $\hat{\mu}_j^a, \hat{\sigma}_j^a$ 分别为站台 $j$ 上车人数概率密度函数均

值和标准差的极大似然估计值;  $\alpha$ 为概率参数;  $z_\alpha^a$ 为上车人数估算概率密度函数上 $\alpha$ 分位点;  $N_\alpha$ 为标准正态分布的上 $\alpha$ 分位点;  $M$ 为统计总天数.

同理, 计算下车人数的 $z_\alpha^b$ , 将 $z_\alpha^a$ 、 $z_\alpha^b$ 作为测算停站时间上下限的基准, 以覆盖绝大多数波动情况; 同时为避免过长停站时间导致线路通过能力显著下降, 对停站时间上限进行约束, 具体为:

$$\tilde{t}_j = \min[[r_a \cdot z_\alpha^a + r_b \cdot z_\alpha^b + \omega \cdot (z_\alpha^a + z_\alpha^b)^3 \cdot z_\alpha^a + \tau], t_j^p], \quad (10)$$

$$\hat{t}_j = t_j^p. \quad (11)$$

式中:  $\hat{t}_j$ 为站台 $j$ 停站时间的上限;  $\tilde{t}_j$ 为站台 $j$ 停站时间的下限;  $t_j^p$ 为站台 $j$ 允许的最大停站时间.

## 2.3 “载客量-区间时间-能耗”关系建立

### 2.3.1 列车区间运行过程描述

庞特里亚金极大值原理证明区间内的节能操纵策略包含“最大牵引-巡航-惰行-最大制动”四个阶段<sup>[2,21]</sup>, 见图5. 区间 $(j, j+1)$ 内四阶段工况对应的运行时间为 $t_{j,j+1}^f$ 、 $t_{j,j+1}^{cr}$ 、 $t_{j,j+1}^{co}$ 、 $t_{j,j+1}^b$ , 对应的运行距离为 $s_{j,j+1}^f$ 、 $s_{j,j+1}^{cr}$ 、 $s_{j,j+1}^{co}$ 、 $s_{j,j+1}^b$ .

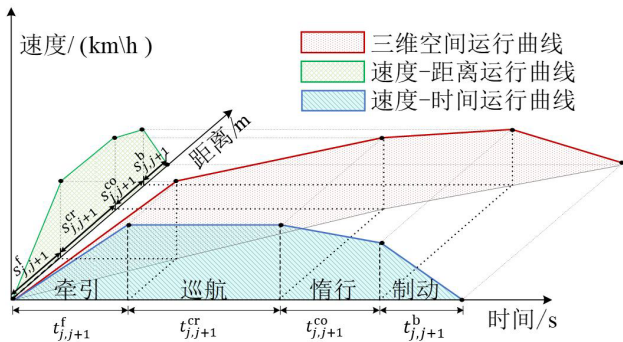


图5 区间 $(j, j+1)$ 内列车运行速度曲线

由于客流时空分布不均衡, 列车在不同区间内的载客量动态变化, 列车载重表示为:

$$m_{j,j+1} = M_0 + q_{j,j+1} \cdot m_0. \quad (12)$$

式中:  $M_0$ 为列车空载质量;  $q_{j,j+1}$ 为区间 $(j, j+1)$ 内载客量;  $m_0$ 为乘客平均质量;  $m_{j,j+1}$ 为区间 $(j, j+1)$ 列车载重.

基于动力学建立列车在区间的运行过程, 如式(13)所示. 列车所受外力 $F$ 见式(14), 其中牵引力、运行阻力和线路阻力如式(15)~式(17)所示.

$$\frac{dv(t, m)}{dt} = \frac{F(s, v, t)}{(1 + \gamma)m_{j,j+1}}, \quad (13)$$

$$F(s, v, t) = \begin{cases} F_f(s, v, t) - r(v) - g(s) & t \in [0, t_{j,j+1}^f) \\ 0 & t \in [t_{j,j+1}^f, t_{j,j+1}^f + t_{j,j+1}^{cr}) \\ -r(v) - g(s) & t \in [t_{j,j+1}^f + t_{j,j+1}^{cr}, t_{j,j+1}^f + t_{j,j+1}^{co}) \\ -F_b(v) - r(v) - g(s) & t \in [t_{j,j+1}^f + t_{j,j+1}^{co}, t_{j,j+1}^f + t_{j,j+1}^b] \end{cases} \quad (14)$$

$$F_f(s, v, t) = \begin{cases} F_f^{\max}(v) & t \in [0, t_{j,j+1}^f) \\ \max[0, r(v) + g(s)] & t \in [t_{j,j+1}^f, t_{j,j+1}^f + t_{j,j+1}^{cr}), \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$r(v) = a + bv + cv^2, \quad (16)$$

$$g(s) = m \cdot g \cdot (\theta_s + 600/R_s) \cdot 10^{-3}. \quad (17)$$

式中:  $s$ 为运行位置;  $v$ 为运行速度;  $t$ 为运行时刻;  $\gamma$ 为质量回转系数;  $F(s, v, t)$ 为列车运行时所受合力;  $F_f(s, v, t)$ 为牵引力;  $F_f^{\max}(v)$ 为列车在速度 $v$ 时的最大牵引力;  $F_b(v)$ 为制动力;  $r(v)$ 为基本运行阻力;  $g(s)$ 为线路阻力;  $a, b, c$ 为阻力戴维斯方程式系数;  $\theta_s$ 为 $s$ 处的线路坡度千分数;  $R_s$ 为 $s$ 处的线路曲线半径.

列车在区间起始和结束位置时速度为零, 区间内需满足限速要求, 如式(18)所示.

$$\begin{cases} 0 \leq v(s) \leq V_1(s) \\ v(0) = 0 \\ v(L_{j,j+1}) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $L_{j,j+1}$ 为区间 $(j, j+1)$ 长度;  $V_1(s)$ 为 $s$ 处的限速.

区间内运行时间和距离应分别等于各阶段运行时间和距离之和, 如式(19)~(20)所示.

$$t_{j,j+1} = t_{j,j+1}^f + t_{j,j+1}^{cr} + t_{j,j+1}^{co} + t_{j,j+1}^b, \quad (19)$$

$$L_{j,j+1} = s_{j,j+1}^f + s_{j,j+1}^{cr} + s_{j,j+1}^{co} + s_{j,j+1}^b. \quad (20)$$

式(13)可知列车载重决定其运行速度随时间改变的速率, 并影响区间牵引能耗. 因此, 列车在区间的牵引能耗、时间、列车载重(含载客量)的关系为:

$$E(t_{j,j+1}, m_{j,j+1}) = \int_0^{t_{j,j+1}} F_f(s, v, t) \cdot v(t, m_{j,j+1}) dt. \quad (21)$$

实践中列车在区间的运行时间并非连续的, 列车运行控制系统常预设不同运行等级(对应不同运行时间)以满足多种运行需求<sup>[22-23]</sup>. 编制运行图时需依据各区间的运行等级信息确定唯一运行时间. 为此, 各运行等级对应的区间牵引能耗表示为:

$$e_{j,j+1}^{m,r} = E(t_{j,j+1}^r, m) = \int_0^{t_{j,j+1}^r} F_i(s, v, t) \cdot v(m, t) dt. \quad (22)$$

式中:  $r$ 为运行等级;  $e_{j,j+1}^{m,r}$ 为列车在区间 $(j, j+1)$ , 载重为 $m$ 的下采用运行等级 $r$ 的牵引能耗;  $t_{j,j+1}^r$ 为列车在区间 $(j, j+1)$ 采用运行等级 $r$ 对应的运行时间.

### 2.3.2 离散仿真求解

以 $\Delta t$ 为仿真步长, 假设在 $\Delta t$ 内列车保持匀加速度运行. 根据动力学方程, 列车在单步长内的速度、距离及运行能耗变化如式(23)~(25)所示.

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{\Delta t \cdot F(s, v, t)}{M_c \cdot (1 + \gamma)}, \quad (23)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{[v^2(t + \Delta t) - v^2(t)] \cdot M_c \cdot (1 + \gamma)}{2F(s, v, t)}, \quad (24)$$

$$E(t + \Delta t) = E(t) + F_i(s, v, t) \cdot v(t) \cdot \Delta t. \quad (25)$$

式中:  $v(t + \Delta t)$ 、 $x(t + \Delta t)$ 、 $E(t + \Delta t)$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的速度、运行距离、牵引能耗;  $M_c$ 为仿真列车载重.

基于二分法求得区间不同运行时间、列车载重下的列车速度曲线, 具体步骤如下:

**Step1:** 初始化. 输入区间运行时间 $t_{set}$ 、断面客流量 $q_{j,j+1}$ 、线路条件及步长 $\Delta t$ . 依据式(12)计算列车载重 $M_c$ . 令 $v(0) = 0$ ,  $x(0) = 0$ ,  $E(0) = 0$ , 牵引时间下界 $t_{min}^f = 0$ . 采用双向迭代法<sup>[7]</sup>计算牵引时间上界 $t_{max}^f$ 、巡航时间上界 $t_{max}^{cr}$ 、最短运行时间 $t_{min}$ 并保留反向制动曲线. 若 $t_{set} > t_{min}$ , 进行步骤2; 否则输出无解.

**Step2:** 计算三阶段速度曲线. 城市轨道交通区间距离较短, 多数区间节能速度曲线由“最大牵引-惰行-最大制动”构成<sup>[16]</sup>, 应优先计算三阶段曲线. 设置巡航时间 $t_{j,j+1}^{co} = 0$ , 令牵引时间 $t_{j,j+1}^f = (t_{max}^f + t_{min}^f)/2$ . 依据式(23)~式(25)正向计算至区间结束. 结合计算速度曲线与保留的反向制动曲线得到三阶段速度曲线及运行时间 $t_{cal}$ , 如图6中 $e_1 \sim e_4$ 所示.

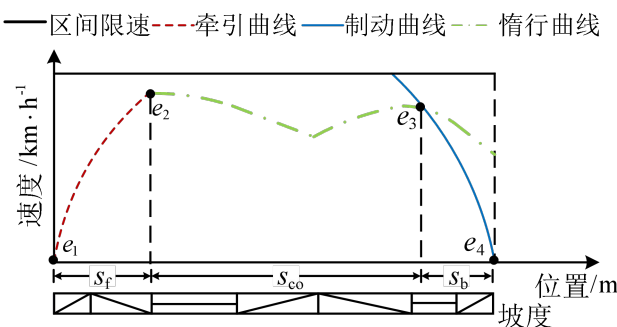


图6 三阶段速度曲线计算示意图

比较 $t_{cal}$ 与 $t_{set}$ 并更新牵引时间范围 $[t_{min}^f, t_{max}^f]$ , 直至 $t_{cal}$ 满足求解精度 $\eta$ , 即 $|t_{set} - t_{cal}| \leq \eta$ , 如式(26)~式(27)所示. 若三阶段速度曲线存在 $v(s) \geq V_l(s)$ , 则进行四阶段速度曲线计算; 否则, 跳转至Step4.

$$\begin{cases} t_{max}^f = t_{j,j+1}^f \\ t_{j,j+1}^f = \lceil (t^f + t_{min}^f)/2 \rceil \end{cases}, t_{cal} < t_{set} \quad (26)$$

$$\begin{cases} t_{min}^f = t_{j,j+1}^f \\ t_{j,j+1}^f = \lceil (t^f + t_{min}^f)/2 \rceil \end{cases}, t_{cal} > t_{set} \quad (27)$$

**Step3:** 计算四阶段速度曲线. 设置 $t_{j,j+1}^f = t_{max}^f$ , 令 $t_{j,j+1}^{cr} = (t_{max}^{cr} + t_{min}^{cr})/2$ . 依据式(23)~式(25)正向计算至区间结束, 结合制动曲线得到四阶段速度曲线及运行时间 $t_{cal}$ . 比较 $t_{cal}$ 与 $t_{set}$ , 并更新时间上下界 $[t_{min}^{cr}, t_{max}^{cr}]$ , 直至满足求解精度.

**Step4:** 输出. 输出计算所得速度曲线、列车运行质量 $M_c$ 和运行能耗 $E(t_{set})$ .

## 2.4 运行图标尺优化模型

基于前述“客流-停站时间”、“载容量-区间时间-能耗”关系构建节能运行标尺优化模型. 首先, 降低列车周转牵引能耗是模型优化的首要目标, 其次考虑到优化方案的可实施性, 优化方案不宜与现行方案差异过大. 现行停站时间综合考虑了线路通过能力、换乘接续等因素, 最小化与现行停站时间的偏离程度可保障运营稳定性, 避免因调整幅度过大而影响行车安全与服务可靠性. 同时, 控制总偏离程度有助于满足实际需求(如单站调整上限), 增强方案的可实施性.

为此, 以列车周转牵引能耗最小化和与现行停站时间总偏差最小化为目标, 目标函数为:

$$\min z_1 = \sum_{j \in J/\{N, 2N\}} \sum_{r \in R} e_{j,j+1}^{m,r} \cdot \beta_{j,j+1}^r, \quad (28)$$

$$\min z_2 = \sum_{j \in J} |t_j^o - t_j|. \quad (29)$$

式中:  $\beta_{j,j+1}^r$ 表示区间 $(j, j+1)$ 是否采用运行等级 $r$ , 采用取1, 否则取0;  $R$ 为列车运行等级集合;  $t_j^o$ 为站点 $j$ 的现行停站时间.

在配置运行标尺时, 列车在区间的运行时间以选定的某一运行等级为准<sup>[11,23]</sup>, 约束为:

$$\sum_{r \in R} \beta_{j,j+1}^r = 1, \forall j \in J/\{N, 2N\}. \quad (30)$$

列车在各站点的停站时间需满足停站时间上下限要求, 如式(31)所示.

$$\tilde{t}_j \leq t_j \leq \hat{t}_j, \forall j \in J. \quad (31)$$

车底周转时间受发车间隔和配属车底数制约,

需满足严格时间限制,如式(32)所示.

$$\sum_{j \in J/\{2N\}} t_j + \sum_{j \in J/\{N, 2N\}} \sum_{r \in R} t_{j,j+1}^r \cdot \beta_{j,j+1}^r + 2t_\rho = T. \quad (32)$$

运营管理部门从客运服务角度对列车速度提出了基本要求.为维持运输效率和乘客体验,避免因节能导致运行速度过低,需引入技术速度约束.该约束要求列车平均技术速度(不含停站时间)不得低于规定下限,具体为:

$$V_c \cdot \sum_{j \in J/\{N, 2N\}} \sum_{r \in R} t_{j,j+1}^r \cdot \beta_{j,j+1}^r \leq L. \quad (33)$$

式中:  $V_c$ 为技术速度要求值;  $L$ 为车底周转里程.

## 2.5 模型求解

标尺优化模型为双目标混合整数线性规划问题,采用 $\varepsilon$ 约束法求解<sup>[24-25]</sup>,具体步骤如下:

Step1: 设置以 $z_1$ 和 $z_2$ 为目标函数的单目标优化模型 $M_1$ 和 $M_2$ ,约束均为式(30)~(33).求解 $M_2$ 获得相应目标函数下界 $z_2^{\text{lb}}$ ;求解 $M_1$ 后依据输出变量值计算 $z_2$ 目标的上界 $z_2^{\text{ub}}$ ,其中 $z_2^{\text{lb}} < z_2^{\text{ub}}$ .

Step2: 在 $[z_2^{\text{lb}}, z_2^{\text{ub}}]$ 变动范围内将目标 $z_2$ 转换为约束(34),将其加入到模型 $M_1$ 中,得到以牵引能耗 $z_1$ 目标的单目标线性整数规划模型.

$$\sum_{j \in J} t_j^p - t_j \leq z_2^{\text{lb}} + [\varepsilon \cdot (z_2^{\text{ub}} - z_2^{\text{lb}})] \quad (34)$$

式中:  $\varepsilon$ 表示对目标函数 $z_2$ 的容忍度,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ;

Step3: 以 $\Delta\varepsilon$ 为迭代步长不断更新 $\varepsilon$ 并求解模型 $M_1$ ,得到不同条件下的牵引能耗,输出帕累托前沿.

求解过程中的模型 $M_1$ 、 $M_2$ 可使用分支定界算法进行精确求解,本文通过Gurobi求解器实现.

## 3 案例分析

### 3.1 基本信息

以某地铁1号线为对象进行案例分析,线路共25座车站,编号为S1~S25.根据运营方提供的数据,车底周转时间 $T$ 为7334s,折返时间 $t_\rho$ 为360s.表1给出现行列车停站时间.表2为列车运行控制系统预设的列车运行等级信息(RL1-RL5),实际中采用RL3对应的区间运行时间.RL5仅在应急情况下采用,优化时仅在RL1-RL4中进行选择.列车空载总重为202t,回转系数 $\gamma$ 为0.1、技术速度 $V_c = 40$  km/h.

表1 现行停站时间

站点	停站时间/s	车站	停站时间/s	车站	停站时间/s
S1	60	S10	40	S19	35
S2	35	S11	40	S20	30
S3	35	S12	35	S21	40
S4	40	S13	35	S22	30
S5	35	S14	35	S23	35
S6	35	S15	30	S24	30
S7	35	S16	35	S25	60
S8	45	S17	30		
S9	50	S18	35		

表2 列车运行等级信息

区间(双向)	运行时间/s					区间(双向)	运行时间/s				
	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5		RL1	RL2	RL3	RL4	RL5
S1-S2	113	108	103	98	95	S12-S13	121	116	106	103	101
S2-S3	109	105	97	95	88	S13-S14	113	107	97	95	92
S3-S4	140	134	126	122	110	S14-S15	87	84	77	76	75
S4-S5	122	117	108	106	95	S15-S16	101	97	91	88	85
S5-S6	84	80	77	75	73	S16-S17	85	81	79	77	75
S6-S7	121	116	109	105	97	S17-S18	101	97	90	88	84
S7-S8	106	101	96	92	85	S19-S20	124	119	113	108	102
S8-S9	95	91	87	83	81	S20-S21	101	97	89	86	84
S9-S10	90	86	83	81	79	S21-S22	117	112	102	100	99
S10-S11	141	135	123	115	107	S22-S23	131	125	111	108	105
S11-S12	139	137	133	126	119	S23-S24	106	101	96	94	92

乘客平均质量 $m_0 = 60$ kg,选择分布概率参数 $\alpha$ 为0.1、站点静态作业时间 $\tau = 21.31$  s、上下车速率 $r_a$ 、 $r_b$ 为0.103、0.083.干扰参数 $\psi$ 为 $2.6 \times 10^{-9}$ ,该参数依据文献[19]中公式(9)确定.由于原公式中的参数与列车车门数相关,而本文研究场景中列车车门数为22个/列,因此直接代入该数值,得到本文模型的干扰参数.

选取高峰时段(8:00-9:00)和平峰时段(15:00-16:00)为分析时段,高平峰时段各区间的列车平均载客量如图7所示.以两个典型区间为例,“载客量-时间-能耗”关系见图8,牵引能耗随载客量变化产生较大差异,不同区间也存在较大差异.高平峰时段列车在各站台的平均上下车人数如图9所示.

### 3.2 结果分析

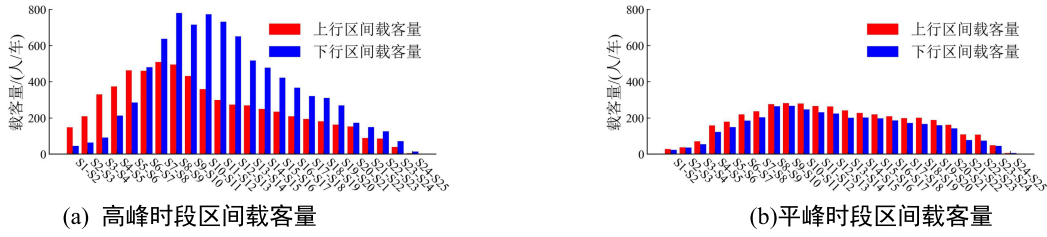


图7 高平峰时段各区间列车平均载客量

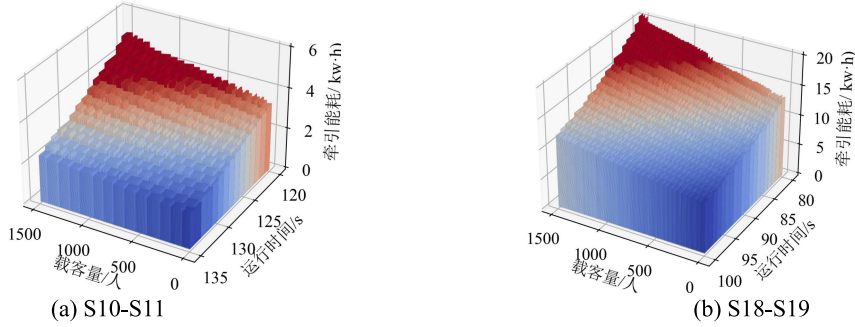


图8 典型区间“载客量-时间-能耗”关系

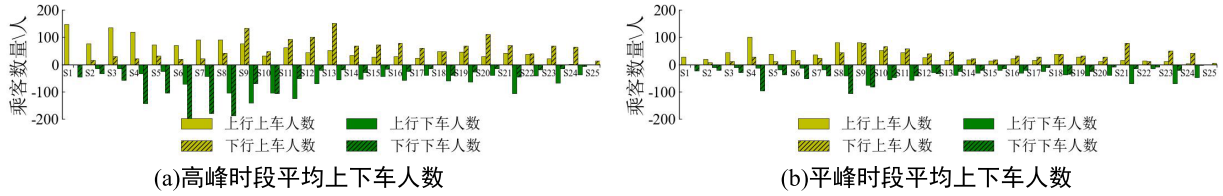


图9 高平峰站点上下车人数

表3 停站时间优化结果

站点	高峰(8:00-9:00)						平峰(15:00-16:00)					
	上行			下行			上行			下行		
	$z_\alpha^a$	$z_\alpha^b$	$\bar{t}_j$	$z_\alpha^a$	$z_\alpha^b$	$\bar{t}_j$	$z_\alpha^a$	$z_\alpha^b$	$\bar{t}_j$	$z_\alpha^a$	$z_\alpha^b$	$\bar{t}_j$
S2	88.7	19.6	33	17.5	40.3	27	35.3	25.9	28	14.1	30.5	26
S3	150.0	21.1	35	35.4	64.7	31	56.4	20.3	29	19.6	38.8	27
S4	133.2	42.9	40	26.1	159.3	38	107.5	22.5	25	35.9	111.2	35
S5	84.7	32.3	34	36.7	118.7	35	49.9	28.5	29	17.9	50.9	28
S6	77.9	81.1	35	23.8	229.5	35	62.8	21.1	30	20.9	61.6	29
S7	98.8	52.4	35	27.3	190.7	35	46.2	31.0	29	29.5	53.7	29
S8	100.8	113.6	44	51.0	199.2	45	97.7	50.6	36	56.2	120.4	38
S9	88.2	154.0	47	147.3	80.7	48	93.9	86.1	40	91.2	93.5	40
S10	44.3	120.1	37	54.5	118.9	38	62.7	66.2	34	77.7	56.0	35
S11	73.3	136.4	40	105.3	58.9	39	57.5	67.2	34	67.5	51.3	33
S12	49.9	78.9	34	110.9	24.4	35	36.5	39.9	29	48.8	42.8	30
S13	61.1	64.9	34	161.2	23.2	35	24.5	49.9	29	56.5	31.1	30
S14	40.6	62.9	31	77.0	34.3	33	27.6	40.0	28	31.0	33.2	28
S15	32.9	50.4	29	79.4	21.7	30	23.5	29.6	27	26.0	22.8	26
S16	39.7	68.0	32	89.8	29.2	34	33.7	39.4	29	44.5	32.7	29
S17	29.4	47.0	29	70.0	18.9	30	23.8	36.0	27	36.8	17.9	27
S18	54.0	69.4	33	59.2	48.3	32	51.3	46.7	31	47.4	41.9	30
S19	54.5	74.6	34	80.2	33.2	33	35.2	51.9	30	43.2	34.5	29
S20	34.6	45.8	29	125.4	18.3	30	19.7	47.2	28	37.9	21.3	28
S21	48.9	119.3	37	86.2	59.4	36	23.2	84.7	31	93.8	23.4	34
S22	45.1	50.1	30	47.8	21.9	29	25.8	22.9	26	18.7	15.91	25
S23	27.2	78.2	31	78.2	18.4	32	21.6	82.6	31	58.2	27.7	30
S24	6.2	45.0	26	72.8	8.4	30	15.2	59.6	28	48.6	8.3	28

注:  $z_\alpha^a, z_\alpha^b$  分别为时段上车人数和下车人数得估算概率密度函数上  $\alpha$  分位点;  $\bar{t}_j$  为各站点停站时间下限。

依据客流数据确定的停站时间范围如表3所示,可以看出:①平峰时段客流量较小,停站时间优化空间大,通过压缩停站时间延长区间运行以降低能耗;②高峰时段如S6等站点客流量大,停站时间优化空间有限,通过重分配区间运行时间实现节能。

基于前述参数对运行标尺进行优化,得到高、平峰时段的帕累托解集如图10所示,能耗优化结果汇总于表4。表中优化前后的周转能耗,均依据对应标尺方案(优化前为现行参数,优化后为模型求解所得

方案),基于式(21)的牵引能耗积分模型,通过离散仿真方法计算。由图表可知:①随着 $\epsilon$ 增大,可分配的冗余停站时间增多,节能效果逐渐提高;② $\epsilon = 0$ 时,无可分配冗余时间,节能仅能通过调整区间运行时间实现。高峰时段因列车载客量大,区间运行时间调整带来的能耗降幅更为显著;③ $\epsilon = 1$ 时,通过分配冗余停站时间至区间实现节能。平峰时段因客流量小,存在更多冗余停站时间可分配至区间,节能效果更加显著。

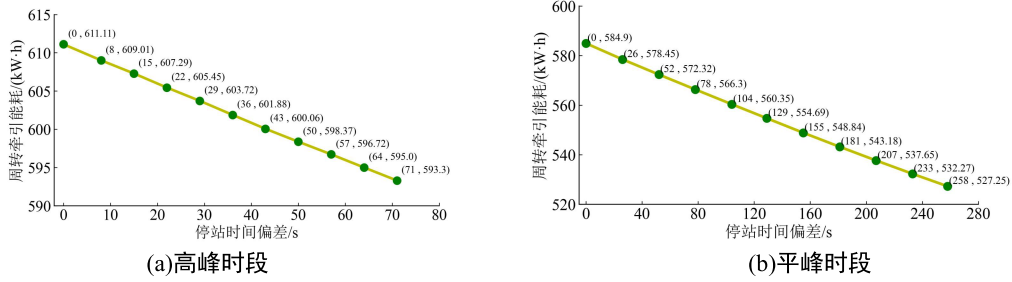


图10 高平峰时段的 Pareto 解集

表4 优化前后能耗对比

时段	优化前周转 能耗/kW·h	优化后		变化量	降幅/%
		$\epsilon$	周转能耗/kW·h		
平峰	603.28	0	584.37	-18.91	-3.13
		0.5	554.14	-49.14	-8.14
		1	526.62	-76.66	-12.71
高峰	632.89	0	611.12	-21.77	-3.43
		0.5	601.88	-31.01	-4.90
		1	593.18	-39.71	-6.69

当 $\epsilon=1$ 时,可最大程度利用冗余停站时间进行标尺优化,故选取该参数进行后续分析。优化前后的

高平峰时段区间运行等级与速度曲线如图11、12所示,分析可知:①平峰时段多数区间采用较低运行等级(对应较长运行时间),以降低牵引能耗;高峰时段依据区间客流量动态调整运行等级,如在S14~S17等大客流区间配置较低等级运行;②对于S3~4等含长大下坡区间,利用惰行阶段重力势能实现加速,牵引能耗对时间敏感性低,故采用较高运行等级;S15~14等上坡区间因牵引能耗对时间变化敏感,优先采用较低等级以减少牵引能耗;③所构建方法能基于区间线路条件和客流分布的能耗敏感性实现精细化标尺配置。

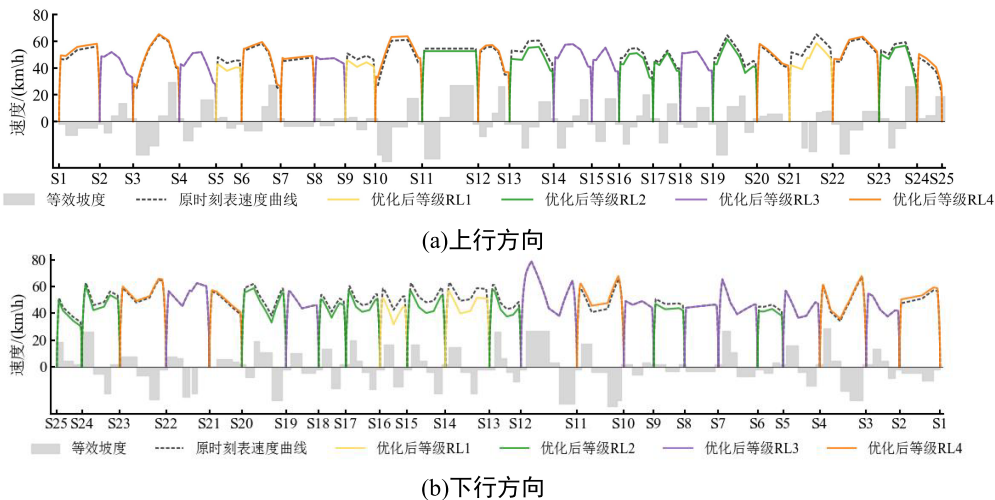


图11 高峰时段区间优化列车运行等级

### 3.3 节能效果评估

为分析客流时空分布特性对运行标尺配置影响,

设置5组对比场景:场景1保持原标尺不变,场景2~4为空载(202t)、定员(289.6t),超员(325.72t)三种

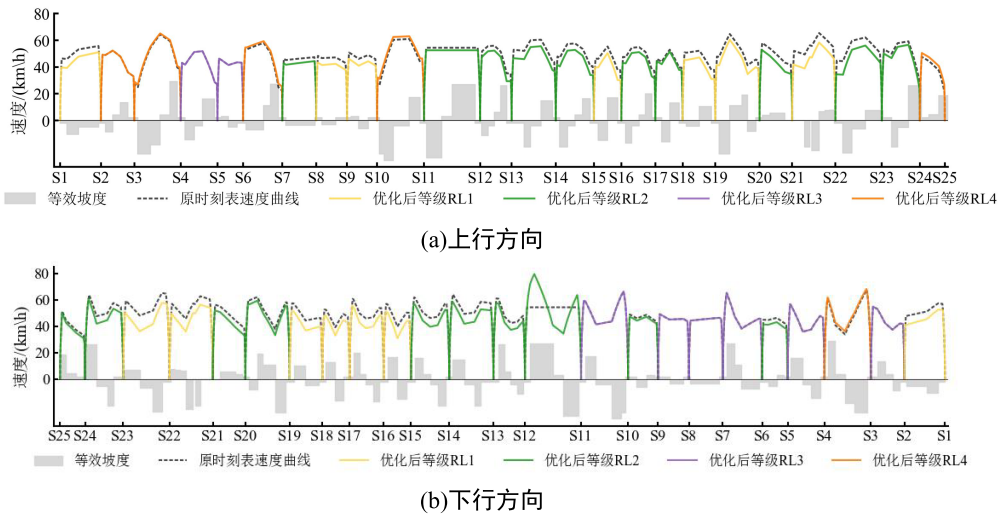


图12 平峰时段区间优列车运行等级

载荷, 场景 5 采用实际载客量. 针对不同场景进行标尺优化, 优化后对应的牵引能耗如表 5 所示 ( $\epsilon=1$ ). 结果表明: ①场景 2~4 受限于静态载荷假设, 节能效果呈现时段差异性. 例如平峰时段下场景 3 的节能效果较场景 2、4 优, 但在高峰时段则比场景 2 的效果差; ②场景 5 优化通过协同调整停站时间与运行等级, 实现精细化标尺配置, 其能耗在高平峰时段较其他场景至少降低 1.01%.

表5 设定场景下节能效果对比

时段	原周转能耗/ kW·h	场景	优化后周转 牵引能耗/kW·h	变化量/kW·h	变化比例/%
平峰	603.28	2	535.58	-67.70	-11.22
		3	532.69	-70.59	-11.70
		4	539.84	-63.44	-10.51
		5	526.62	-76.66	-12.71
		5	526.62	-76.66	-12.71
高峰	632.89	2	600.27	-32.62	-5.15
		3	602.41	-30.48	-4.82
		4	607.74	-25.15	-3.97
		5	593.18	-39.71	-6.69
		5	593.18	-39.71	-6.69

文献 [21] 提出了一种不考虑客流特征的标尺分配策略. 为进一步分析本文提出方法的节能效果, 将其与本文方法以及实践中常用的多余区间运行时间均匀分配法进行对比. 牵引能耗比较需在相同的停站时间压缩的情况下进行调整, 选择本文中  $\epsilon=0$  (仅调整区间运行时间) 和  $\epsilon=1$  (最大限度利用冗余停站时间) 两种停站时间偏差情况进行同优化范围的对比, 具体结果见表 6. 由表可知: ①本文方法在所有对比场景中的节能效果均表现最优, 牵引能耗降低幅度高于其他方法的节能率; ②与均匀分配法相比, 本文方法在所有场景下均能稳定实现节能, 其表现稳定可靠; ③与不考虑客流特征的策略相比, 本文方法通过精细化配置标尺进一步提高节能率, 平均节能

表6 设定场景下节能效果对比

时段	参数	设置方案	优化后周转 牵引能耗/kW·h	变化量/kW·h	变化率/%
平峰	$\epsilon=0$	不考虑客流	591.20	-12.08	-2.01
		均匀分配	605.24	+1.96	+0.32
		本文方法	584.37	-18.91	-3.13
	$\epsilon=1$	不考虑客流	536.73	-66.55	-11.1
		均匀分配	548.41	-54.87	-9.09
		本文方法	526.62	-76.66	-12.7
高峰	$\epsilon=0$	不考虑客流	621.16	-11.73	-1.85
		均匀分配	642.84	9.95	+1.57
		本文方法	611.12	-21.77	-3.43
	$\epsilon=1$	不考虑客流	604.27	-28.62	-4.52
		均匀分配	613.47	-19.42	-3.07
		本文方法	593.18	-39.71	-6.69

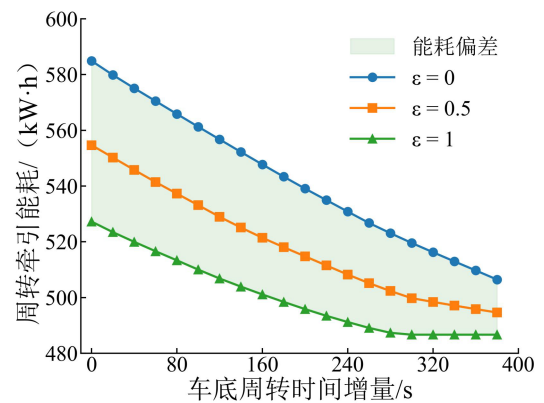


图13 延长周转时间下周转牵引能耗变化趋势

率额外提升 2%~3%, 且由于在高峰时段客流时空特征更为明显, 此方法优势更突出.

### 3.4 灵敏度分析

车底周转时间作为模型的刚性约束, 延长周转时间会使得列车节能潜力进一步提升. 图 13 展示了在参数  $\epsilon$  分别取 0, 0.5 和 1 时, 随着车底周转时间的延长, 平峰时段模型的节能效果变化. 由图可知: ①列

车牵引能耗随车底周转时间的延长显著降低. 三条曲线 ( $\varepsilon=0, 0.5, 1$ ) 均呈下降趋势, 适当延长周转时间为牵引能耗优化提供了更大空间; ②当延长周转时间超过 300 秒时, 再  $\varepsilon = 1$  的参数条件下, 牵引能耗不再继续下降, 因为列车运行速度已最低, 继续延长的周转时间将分配至停站时间. 而在  $\varepsilon=0$  和  $\varepsilon=0.5$  的条件下, 由于未能完全利用冗余的停站时间, 牵引能耗仍具备一定的优化潜力; ③当车底周转时间延长超过 204 秒后, 尽管牵引能耗持续降低, 但根据式 (3) 中车底数、周转时间与发车间隔的关系, 为维持列车服务频率, 需增加上线车底数量. 因此在实际应用中, 需综合权衡车底运用成本与牵引能耗之间的平衡关系.

由于参数  $\alpha$  主要决定停站时间的可压缩范围, 为分析参数  $\alpha$  对方法优化效果的影响, 选取参数  $\varepsilon$  为 1, 以验证高、平峰时段下的参数  $\alpha$  对周转牵引能耗优化效果和客流场景覆盖率的影响, 结果如图 14 所示.

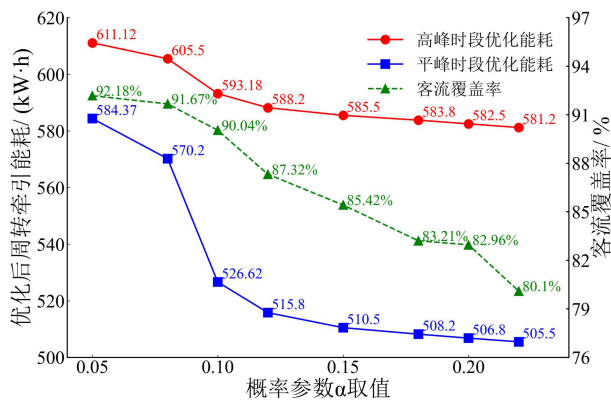


图14 参数  $\alpha$  灵敏度分析

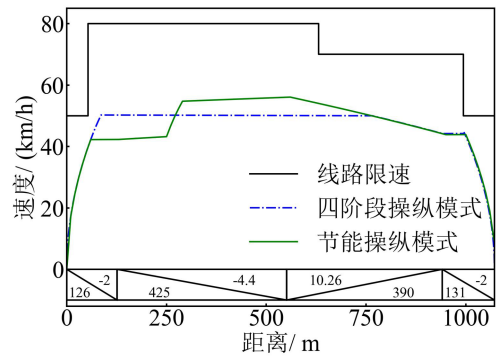
由图 14 可知: ①平峰时段对参数  $\alpha$  的敏感性显著高于高峰时段. 平峰时段下, 覆盖率的下降幅度远超过能耗的降低收益; 而在高峰时段, 能耗降低与覆盖率损失之间则表现出相对均衡的权衡关系; ② $\alpha=0.10$  高、平峰时段在维持较高能耗优化水平的同时, 亦能确保对大量客流场景的有效覆盖. 该取值有助于缓解因客流量大导致停站时间延长, 进而引发的节能方案稳定性不足的问题.

### 3.5 方法扩展性

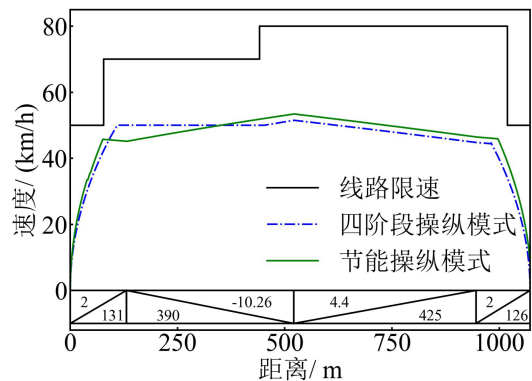
本文构建“载客流量-时间-能耗”关系的方法, 基于列车自动运行 (Automatic Train Operation, ATO) 系统中生成节能速度曲线的四阶段操纵策略. 为验证方法的可扩展性, 在构建过程中将速度曲线生成替换为其他优化控制策略进行对比. 具体借鉴文献 [8] 提出的基于运行时间的节能操纵策略集合优化方法, 通过调整模型中的质量参数, 得到各区间在不

同节能策略下的“载客流量-时间-能耗”关系.

选取 S18-S19 区间的上行与下行方向, 在相同列车载荷和区间运行时间 (运行等级 3 对应时间 90s) 下, 根据两种操纵方法生成的速度曲线如图 15 所示. 上行方向原四阶段策略的运行能耗为 10.23 kW·h, 优化后降至 8.34 kW·h; 下行方向牵引能耗由 9.02 kW·h 降低至 7.64 kW·h. 单区间能耗优化约为 15%.



(a) S2-S3 上行区间



(b) S2-S3 下行区间

图15 两种节能操纵策略对比

基于上述节能操纵模型, 可建立各运行区间的“载客流量-时间-能耗”关系. 以此为基础, 对列车运行标尺进行优化, 不同参数对应的优化结果如表 7 所示. 由表可知: ①在使用节能驾驶操纵策略之后, 列车的周转牵引能耗有较大降幅; ②在采用节能操纵策略后, 标尺优化方案依旧可以带来客观的能耗降幅, 验证了本文方法的可拓展性; ③实践中若 ATO 对列车控制精度足够, 结合运行标尺优化与节能操纵优化可以带来更大的能耗降幅.

表7 节能操纵模型下表此优化前后能耗对比

时段	优化前周转能耗/kW·h	优化后		变化量	降幅/%
		$\varepsilon$	周转能耗/kW·h		
平峰	530.88	0	508.84	-22.03	-4.15
		0.5	490.75	-40.13	-7.56
		1	473.43	-57.44	-10.82
高峰	556.94	0	540.62	-16.31	-2.93

表8 节能操纵模型下不同场景节能效果对比

时段	原周转能耗/ kW·h	场景	优化后周转牵引 能耗/kW·h	变化量/ kW·h	变化比例/%
平峰	530.88	2	481.93	-48.95	-9.22
		3	475.30	-55.58	-10.47
		4	478.48	-52.40	-9.87
		5	473.44	-57.44	-10.82
高峰	556.94	2	524.41	-32.52	-5.84
		3	529.31	-27.62	-4.96
		4	522.91	-34.03	-6.11
		5	521.79	-35.14	-6.31
		0.5	528.31	-28.62	-5.14
		1	521.79	-35.14	-6.31

设定 $\varepsilon=1$ , 在 3.3 节所设定的不同场景下开展进一步分析, 以验证标尺优化方案在不同操纵策略下的适应性, 优化结果见表 8。由表 8 可知, 在采用节能操纵策略优化得到“载容量-时间-能耗”关系的前提下, 场景 5 依旧在高平峰时段均优于其他优化场景。

## 4 结论

(1) 本文以列车周转过程为对象, 在周转时间不变的前提下通过协同优化停站时间与区间运行时间(运行等级)来降低运行牵引能耗, 重点考虑客流时空分布不均衡带来的能耗敏感性差异, 据此对列车运行标尺进行精细化配置。

(2) 构建了牵引能耗最小化和与现行停站时间偏离最小化的双目标优化模型, 通过统筹运营实际需求与节能需求, 提升方案的工程适用性与实施可行性。通过某线路实证研究, 结果表明标尺优化具备良好的节能潜力。

(3) 本研究未考虑再生制动能在车-车间的互馈过程, 未来可从多列车协同视角考虑再生能的利用。此外, 实际运行中列车往往受各类不确定性因素影响而产生计划偏离, 未来可进一步将列车运行标尺与运行等级控制相结合, 通过协同优化提升节能方案在实际干扰下的鲁棒性与稳定性。

## 参考文献 (References)

[1] 张伯男, 姚向明, 赵鹏, 等. 城市轨道交通列车节能运行组织研究综述[J]. 控制与决策, 2026, 41(2): 289-304. (Zhang B N, Yao X M, Zhao P, et al. Research review on energy-efficient train operation organization for urban rail transit system[J]. *Control and Decision*, 2026, 41(2): 289-304.)

[2] Howlett P. An optimal strategy for the control of a train[J]. *The Journal of the Australian Mathematical Society Series B Applied Mathematics*, 1990, 31(4): 454-471.

[3] Milroy I P. Aspects of automatic train control[D]. Leicestershire: Loughborough University, 1980.

[4] 柏赞, 周雨鹤, 邱宇, 等. 长大下坡道区间地铁列车节能操纵方法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1): 108-115. (Bai (B /Y), Zhou Y H, Qiu Y, et al. Energy-efficient control method for subway train in section with long heavy down grade[J]. *China Railway Science*, 2018, 39(1): 108-115.)

[5] 高豪, 张亚东, 郭进, 等. 基于动态规划的列车节能操纵优化方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 76-84. (Gao H, Zhang Y D, Guo J, et al. Optimization of energy-efficient train operation based on dynamic programming approach[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(8): 76-84.)

[6] Dullinger C, Struckl W, Kozek M. Simulation-based multi-objective system optimization of train traction systems[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2017, 72: 104-117.

[7] 张惠茹, 贾利民, 王莉. 基于 Pareto 多目标优化的高速铁路列车节能驾驶曲线集生成[J]. 铁道学报, 2021, 43(3): 85-91. (Zhang H R, Jia L M, Wang L. Study on generation of energy-saving driving curves of high-speed train based on Pareto multi-objective optimization[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(3): 85-91.)

[8] 赵东升, 赵鹏, 姚向明, 等. 基于工况序列寻优的列车节能操纵策略优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(2): 157-165. (Zhao D S, Zhao P, Yao X M, et al. An energy-efficient train driving strategy based on regime sequences optimization[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(2): 157-165.)

[9] Su S, Li X, Tang T, et al. A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(2): 883-893.

[10] Zhang H R, Jia L M, Wang L, et al. Energy consumption optimization of train operation for railway systems: Algorithm development and real-world case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 1024-1037.

[11] 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]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(3): 164-171. (Zhang B N, Yao X M, Zhao P, et al. Energy-efficient timetable optimization for urban rail transit considering difference of peak and off-peak hours[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(3): 164-171.)

[12] Yang X, Chen A, Li X, et al. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 57: 13-29.

[13] 邓连波, 段科屹, 汪晴, 等. 城市轨道交通节能列车时刻表优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(6): 1486-1495. (Deng L B, Duan K Y, Wang Q, et al. Energy-efficient

- optimization method for urban rail transit timetable[J]. *Systems Engineering —Theory & Practice*, 2021, 41(6): 1486-1495.)
- [14] Liu H J, Zhou M C, Guo X W, et al. Timetable optimization for regenerative energy utilization in subway systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(9): 3247-3257.
- [15] Mo P L, Yang L X, D'Ariano A, et al. Energy-efficient train scheduling and rolling stock circulation planning in a metro line: A linear programming approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(9): 3621-3633.
- [16] 张惠茹, 豆飞, 魏运, 等. 考虑列车运行净能耗与载客流量差异的时刻表优化方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(2): 208-216.  
(Zhang H R, Dou F, Wei Y, et al. A timetable optimization method considering train operation net energy consumption and passenger load difference[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(2): 208-216.)
- [17] 冉昕晨, 陈绍宽, 陈磊, 等. 考虑客流空间分布的地铁列车节能时刻表优化方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(3): 103-110.  
(Ran X C, Chen S K, Chen L, et al. An energy-efficient timetable optimization method for metro operation considering spatial distribution of passenger flow[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(3): 103-110.)
- [18] Wang Y H, De Schutter B, van den Boom T J J, et al. Efficient bilevel approach for urban rail transit operation with stop-skipping[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(6): 2658-2670.
- [19] Puong A. Dwell time model and analysis for the MBTA red line[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Research Memo, 2000.
- [20] 曹志超, 袁振洲, 李得伟, 等. 城市轨道交通列车运行图鲁棒性优化模型[J]. *中国铁道科学*, 2017, 38(3): 130-136.  
(Cao Z C, Yuan Z Z, Li D W, et al. Robust optimization model for train working diagram of urban rail transit[J]. *China Railway Science*, 2017, 38(3): 130-136.)
- [21] Su S, Tang T, Xun J, et al. Design of running grades for energy-efficient train regulation: A case study for Beijing yizhuang line[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2021, 13(2): 189-200.
- [22] Wang Y H, Zhu S W, D'Ariano A, et al. Energy-efficient timetabling and rolling stock circulation planning based on automatic train operation levels for metro lines[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 129: 103209.
- [23] Liu P, Schmidt M, Kong Q X, et al. A robust and energy-efficient train timetable for the subway system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 121: 102822.
- [24] 郑斐峰, 陈克政, 刘明. 突发疫情下基于机会约束的应急医疗设施建设选址与公平配置优化[J]. *控制与决策*, 2024, 39(8): 2783-2790.  
(Zheng F F, Chen K Z, Liu M. Optimization of construction site selection and fair allocation of emergency medical facilities based on chance constraint under sudden epidemic situation[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(8): 2783-2790.)
- [25] 司方远, 韩英华, 袁怀通, 等. 计及混合潮流约束的热电互联综合能源系统多目标优化调度[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 97-107.  
(Si F Y, Han Y H, Yuan H T, et al. Multi-objective optimization scheduling for integrated electricity and heating system including hybrid power flow constraints[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1): 97-107.)

## 作者简介

赵东升 (2000-), 男, 博士生, 主要研究方向为城市轨道交通组织优化, E-mail: 22110309@bjtu.edu.cn;

姚向明 (1987-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为轨道交通组织理论与技术, E-mail: yaoxm@bjtu.edu.cn;

赵鹏 (1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为轨道交通组织理论与技术, E-mail: pzha@bjtu.edu.cn;

张伯男 (1999-), 男, 博士生, 主要研究方向为轨道交通组织优化, E-mail: 23111246@bjtu.edu.cn.