



城轨列车牵引能耗关键影响因素的 定量分析

唐蕾^{1,2}, 柯伊杭³, 张伟业³, 杨铸³, 庞柳沁⁴
(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所, 北京 100081;
2. 北京纵横机电科技有限公司, 北京 100094;
3. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;
4. 无锡地铁运营有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 针对城市轨道交通牵引能耗受多因素耦合驱动且缺乏统一量化框架的问题, 文章旨在从动力学机理与运行时间配置的角度, 揭示运行时间、列车质量与运行策略对能耗的主导作用与边际特性。为此, 文章构建了列车纵向动力学与能量流模型, 通过控制变量仿真刻画单区间能耗对核心参数的响应规律, 并借助三因素混合水平正交设计量化各因素的相对贡献度; 进一步依据区间能耗-时间 Pareto 曲面, 搭建了全线运行时间分配的边际收益优化模型, 分析不同再生能源利用率下的节能潜力。结果表明, 运行时间对牵引能耗的影响显著高于运行策略与列车质量的影响, 惰行策略整体能效优于恒速策略; 基于区间能耗敏感度的时分重构可显著降低净能耗, 使节能率在再生利用率较低时达到最大值。研究揭示了牵引能耗对时分结构与运行策略的结构性依赖, 并证明了基于边际能耗响应进行资源配置优化的有效性, 为城市轨道交通的能耗调控与运行图优化提供了理论支持。

关键词: 城市轨道交通; 牵引能耗; 运行时间; 惰行策略; 正交设计; 节能优化; 仿真

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0103-08

0 引言

城市轨道交通具有安全、快捷、准时等优点, 是缓解城市道路交通拥堵的重要载体^[1], 但近年来路网规模的快速增长也不可避免地带来了巨大的能源消耗。2024年全国城轨交通总电能耗 270.23 亿 kW·h, 同比增长 6.83%^[2]。其中, 牵引能耗 141.50 亿 kW·h, 同比增长 8.26%, 占总电能耗的 52.36%。在我国“双碳”目标背景下, 降低列车运行能耗是实现城轨系统可持续发展的有效途径, 开展城轨列车运行能耗的影响机理及规律的定量分析, 可为新线系统性优化设计和既有线改造挖潜提供理论依据和决策支持。

列车运行能耗受众多因素影响, 可以从设计和运

营两大层面进行分析。在设计层面, 列车设计参数如列车质量、列车牵引/制动特性、列车辅助装置(空调、照明、通风等设备的运行功率等), 以及线路设计参数如线路限速、线路坡度、线路曲线半径等, 都会对列车运行过程中的受力和运行约束产生影响, 从而间接影响列车的运行能耗。在运营层面, 列车在区间运行的控车策略决定了列车运行过程中的控制力发挥, 能够直接影响列车的运行能耗; 列车日常运营的时刻表排布决定了不同列车在运行过程中交互再生制动能量的多少, 其间接地影响了列车的运行能耗。综上所述, 影响列车运行能耗的因素繁多, 需对其展开综合性的定量分析, 才能够有效开展节能降耗的相关工作。

目前, 已有研究针对列车的节能运行提出了对应

通信作者: 唐蕾, 女, 博士, 副研究员, 主要从事动车、城轨牵引系统方面的研究; E-mail: tanglei@zemt.cn

引用格式: 唐蕾, 柯伊杭, 张伟业, 等. 城轨列车牵引能耗关键影响因素的定量分析[J]. 机车电传动, 2025(6): 103-110.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.203.

Citation: TANG Lei, KE Yihang, ZHANG Weiye, et al. Quantitative analysis of key influencing factors on traction energy consumption of urban rail trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 103-110.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.203.

措施,主要包括操纵策略和时刻表的优化。在操纵策略协同优化方面,文献[3]利用遗传算法对前行列车与追踪列车的操纵策略进行联合优化,在不改变列车运行时刻表的前提下,实现了总能耗的显著降低和能量回收率的提升。文献[4]则提出了一种基于近似动态规划(ADP)的在线速度曲线优化方法,通过动态调整加速列车的运行轨迹,在保证列车准点运行的同时,有效提升再生制动能量的回收效率,进一步降低整体能耗。文献[5]使用了改进NSGA-II算法的非支配排序机制,结合拥挤度计算和精英策略以显著提高解集的多样性与收敛性,使列车运行曲线在能耗和准点性目标之间实现Pareto最优。文献[6]则使用了基于深度强化学习的列车协同节能运行轨迹优化方法,借助强化学习在处理复杂决策问题上的优势,在复杂运行场景下实现了比传统方法更优的能耗降低。在时刻表优化方面,文献[7]采用遗传算法对全天列车时刻表进行离线优化,通过调整发车间隔与停站时间,提高相邻列车牵引与制动阶段的重合程度,从而最大化利用再生制动能量。文献[8]采用基于混合整数的非线性规划(MINLP)方法,联合优化列车时刻表与车辆调度,综合考虑运行时间、停站时间、客流波动及服务均衡等因素。优化结果在高峰与非高峰场景下均表现出良好的能耗控制效果,验证了精确建模在复杂约束下的优越性能。文献[9]则使用基于NSGA-II算法,以列车发车间隔为决策变量,在考虑列车数限制条件下优化时刻表,通过设计非对称时刻表有效提升了列车能效,尤其在潮汐客流场景下效果显著,且揭示了放宽车数限制对降低系统能耗的作用及车辆储备的边际效益递减规律。文献[10]采用定制变邻域搜索算法,联合优化跨线快慢车组合模式下的开行方案与时刻表,显著降低了换乘需求与乘客(尤其是跨线乘客)出行时间,并揭示了换乘站走行时间与跨线频率配置的关联规律。尽管该研究在操纵优化、时刻表调整及储能应用等单一节能措施上取得了显著成果,但其研究视角仍存在一定局限性:多数工作聚焦于特定层面的节能潜力挖掘,并未系统解析列车设计参数与运营策略等多维度影响因素之间的复杂耦合作用机制,缺乏对多因素协同影响路径的量化分析;同时,现有研究虽能实现节能优化,却难以清晰量化各类因素对最终能耗的敏感性程度,致使优化结果难以有效反馈至新线系统性设计或既有线改造实践中。

为此,本文基于无锡地铁1号线实测数据,系统地整合牵引能耗的设计与运营影响因素,对列车质量、区间运行时间及操纵策略等多重因素进行精细化耦合分析,通过单因素控制变量仿真与正交试验设计,定量揭示各因素对能耗的独立影响与交互效应,将为后续精准化列车低碳节能运行策略设计与系统性能管控提供理论支持。

1 城市轨道交通牵引能耗构成与影响因素定性分析

1.1 城市轨道交通牵引能耗构成

在城市轨道交通系统中,主变电所从220 kV城市大电网获取电能,并将220 kV电压降压为110 kV的地铁专用交流电。牵引变电所进一步地将该交流电进行降压并整流为1 500 V直流电,以供列车运行所需的牵引能耗。此外,列车在制动过程中能够产生再生制动能量,这部分能量可反馈至接触网,被附近处于牵引工况的列车吸收利用。因此,列车牵引用能不仅来源于牵引变电所,也来自其他列车产生的再生制动能量。在列车运行过程中,列车内的空调、照明、通风等辅助设备会持续耗能,这一部分能耗被称为辅助能耗。此外,所有的能量在传输和转换的过程中均会因线路的阻抗及系统的转换效率产生能量损耗^[1]。综上,城市轨道交通的能耗构成可以概括为图1所示,各部分能耗的占比亦在图中展示。

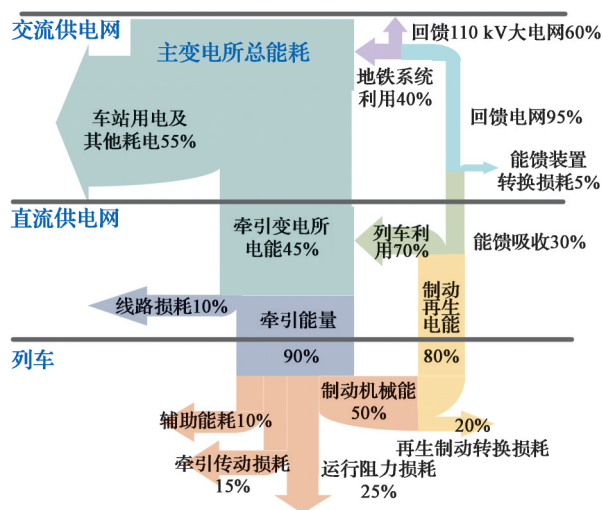


图1 城市轨道交通能耗组成

Fig. 1 Energy consumption components in urban rail transit

从图1中的能耗占比可看出,列车运行所需的牵引用电约占整个城轨系统日常总用电量的一半,因此,分析列车运行能耗的关键影响因素以及对应的影响机理,对整个城轨系统的节能减排具有重大意义。列车运行能耗,除去不可避免的能量损耗外,可以分为三大部分:牵引能耗、再生制动能耗和辅助能耗。轨道交通能耗受多因素耦合影响,既涉及列车与线路参数等设计层面要素,又与列车运行策略、时刻表排布等运营层面因素密切相关。因此,需识别核心影响因素,并对其作用程度与机理开展定量分析。

1.2 列车运行能耗模型及影响因素

列车运行能耗主要由牵引能耗、再生制动回收能量和辅助系统能耗构成^[12],当电能接触网和车轮之间传输时,部分电能会损失在受电弓、逆变器、电机

和齿轮上。地铁列车的全线运行总能耗 E_{total} 可表示为

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{t_i} (E_{\text{traction}}^{i,t} - E_{\text{reg}}^{i,t} + P_{\text{aux}}^i \cdot \Delta t - E_{\text{loss}}^{i,t}) \quad (1)$$

式中: 自变量 i 表示区间号, 由1遍历到区间总数 N ; t_i 表示第 i 个区间的运行时间。

式(1)的含义为, 供电系统的总能耗与各区间各时刻的牵引能耗 $E_{\text{traction}}^{i,t}$ 、再生能量 $E_{\text{reg}}^{i,t}$ 、辅助功率 P_{aux}^i 和电网侧损耗 $E_{\text{loss}}^{i,t}$ 有关。其中电网侧损耗一般为总能耗的2%~4%, 且构成因素较多, 对其进行分析较为复杂, 因此该损耗可以忽略不计。各区间的辅助功率一般为定值, 在全线运行总时间不变的情况下, 该因素的变化量较小, 故在节能优化的角度进行分析时可忽略该因素。

为简化分析, 在计算全线运行能耗时, 只考虑牵引能耗、再生制动回收能量两部分, 设置牵引机电转化效率 η_t 和制动机电转化效率 η_b 以及再生能量利用率 β 为常数, 对式(1)进行简化得到式(2)。

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{total}} &= \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{t_i} (E_{\text{traction}}^{i,t} - E_{\text{reg}}^{i,t}) \\ \sum_{t=0}^{t_i} E_{\text{traction}}^{i,t} &= \int_{X_{\text{start}}}^{X_{\text{end}}} F_t(x) \eta_t dx \\ \sum_{t=0}^{t_i} E_{\text{reg}}^{i,t} &= \beta \int_{X_{\text{start}}}^{X_{\text{end}}} F_b(x) \eta_b dx \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)展示了各区间牵引能耗与再生制动能量的关系, 在节能优化问题中, 一般将列车的能耗计算转换为控制力与行驶步长的积分。 $F_t(x)$ 代表列车在当前位置受到的牵引力; $F_b(x)$ 代表列车在当前位置受到的制动力; X_{start} 、 X_{end} 分别代表各区间的起点和终点位置。

列车运动的动力学模型可以表述为如下的连续位置方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dx} &= \frac{F_t(v) - F_b(v) - F_r(v, x)}{m(1 + \gamma)v} \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{v} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: v 、 m 分别表示列车速度和列车质量; F_r 表示总阻力, F_r 包括基本阻力 F_{basic} 和附加阻力 F_{add} , 具体见式(4)~式(6)。

$$F_r(v, x) = F_{\text{basic}}(v) + F_{\text{add}}(x) \quad (4)$$

$$F_{\text{basic}} = m \cdot g \cdot (a + bv + cv^2) \quad (5)$$

$$F_{\text{add}}(x) = m \cdot g \cdot \sin \theta(x) \quad (6)$$

式中: F_{basic} 、 F_{add} 分别为基本运行阻力与线路附加阻力; F_{basic} 为列车运行阻力, 主要由高速空气阻力、低速轨面摩擦等产生, 通常用式(5)表示, 其参数 a 、 b 、 c 由列车设计特性决定; F_{add} 主要来源于坡道附加阻力; θ 为线路的坡道千分数; g 为重力加速度常数。

列车在区间运行包含牵引、恒速、惰行与制动4种典型工况, 其能耗特性存在显著差异: 牵引工况需输出正功克服阻力, 能耗占比最高, 其占列车区间内牵

引能耗的绝大部分; 恒速工况维持匀速运行, 能耗占比较小; 惰行工况电机零输出, 能耗为零; 制动工况则可通过再生制动能量利用产生负能耗。延长区间运行时间可优化工况占比, 从而降低牵引能耗。具体而言, 运行时间延长使列车在区间内所需的平均速度降低, 进而减小牵引工况占比, 在区间长度不变的情况下, 高能耗的加速牵引阶段相应缩短; 同时, 较低的平均运行速度使得列车所受基本阻力减小。此外, 更长的运行时间为多车协同提供了有利条件, 有助于提升再生制动能量的利用率, 进一步降低牵引能耗。

综上所述, 列车运行能耗受运行策略、区间运行时间以及列车质量等因素的综合影响。通过科学制定列车运行策略、合理安排运行时分、有效控制列车质量, 同时优化列车调度以提高再生能量利用率, 可以在确保列车运行安全与准点的前提下, 显著降低整体能耗水平, 推动城市轨道交通系统的可持续发展。

2 单列车单区间能耗影响因素定量分析

为探究上述分析的核心因素对城轨列车运行能耗的影响机理, 本章在其他因素不变的前提下, 依次对单个因素进行调整, 并进行仿真计算, 以得到对应的列车运行能耗数值。研究团队通过定量仿真分析, 展示能耗随各个因素的变化规律, 从而验证各因素对城轨列车运行能耗的影响程度。本文采用无锡地铁1号线实际线路条件与车辆信息进行仿真, 列车编组为6节编组B型列车, 列车的最高运行速度为80 km/h, 列车的区间运行策略采用恒速和惰行节能运行方式, 以具体区间庄前—民丰为例, 设置列车质量220 t, 区间距离0.992 km。

2.1 列车运行能耗随运行时间变化关系

文献[13]最早提出列车按照四段式惰行节能策略可实现能耗最优, 但在实际系统中, 列车日常运行大多仍采用恒速模式。为验证运行时间对能耗的影响, 保持其他仿真参数不变, 分别采用2种运行策略开展仿真, 运行时间按照运营公司给出的5个速度等级设定, 分别对应81 s、86 s、91 s、96 s和102 s。惰行节能策略与恒速控制策略下的仿真结果分别如图2、图3所示。

从图2和图3可以看出, 运行时间增加, 会使列车最大牵引阶段的用时减少, 从而降低牵引能耗。5条曲线的差异性体现在最大牵引阶段之后的惰行或恒速阶段, 由于惰行阶段不产生牵引能耗, 恒速阶段产生的牵引能耗的能耗量级远远低于最大牵引阶段。因此, 随着运行时间增加, 列车能耗不断下降, 在相同运行时间下, 惰行节能策略的能耗总是低于恒速策略, 如图4所示。

图5给出了运行时间为91 s下2种运行策略的具体工况 (其中恒速策略为“牵引-恒速-制动”的策略, 为便于区分用黑色虚线表示), 列车运行能耗在恒速模式下

为 $8.93 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ，而在惰行节能运行模式下为 $3.84 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。其主要原因有：惰行模式的总牵引时间变短，降低了运行能耗，同时利用坡度地势惰行提速，满足了准点的要求。随着运行时间增加，能耗降幅逐渐减缓，但运行时间增加会导致旅行速度下降，影响运营效率。因此，需要在满足旅行速度约束与降低牵引能耗之间寻求平衡。

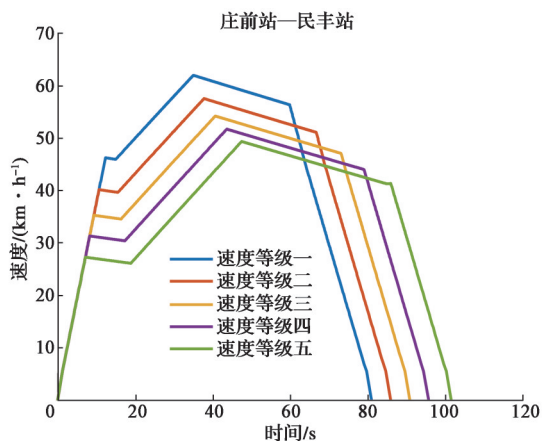


图2 节能策略下运行速度曲线

Fig. 2 Speed profile under the energy-saving train control strategy

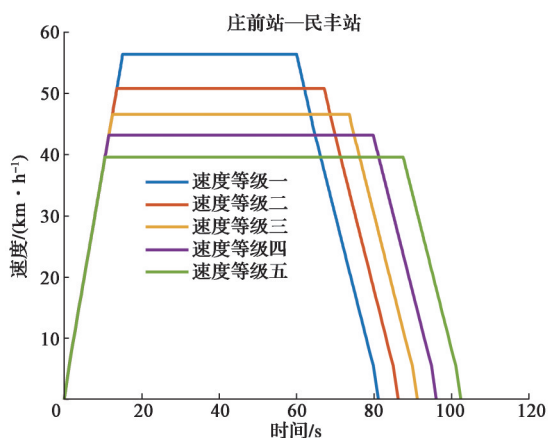


图3 恒速策略下运行速度曲线

Fig. 3 Speed profile under the constant-speed train control strategy

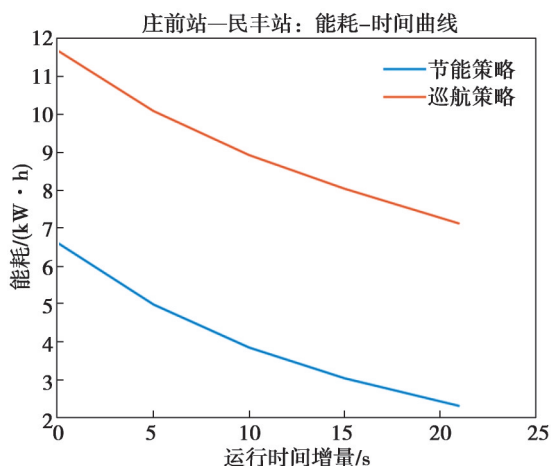


图4 运行时间增加能耗变化

Fig. 4 Energy consumption variation with increasing running time

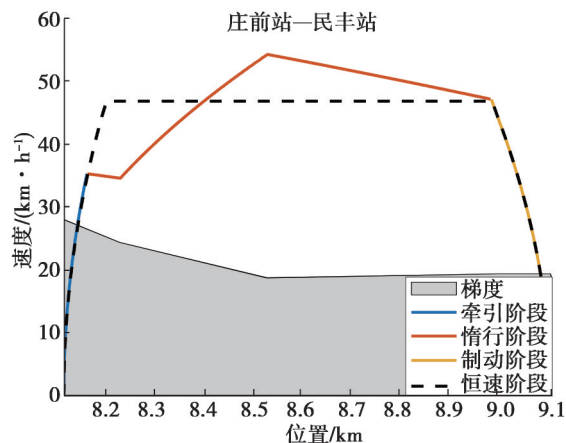


图5 不同控制策略下的速度曲线

Fig. 5 Speed profiles under different train control strategies

2.2 列车运行能耗随列车质量变化关系

为验证不同列车质量对运行能耗的影响，保持其他仿真参数不变，列车质量以空载时 220 t 为初始值，并以 5 t 载重差递增模拟不同载荷，共 5 组不同列车质量下，列车区间运行速度曲线和能耗结果分别如图 6 和图 7 所示。

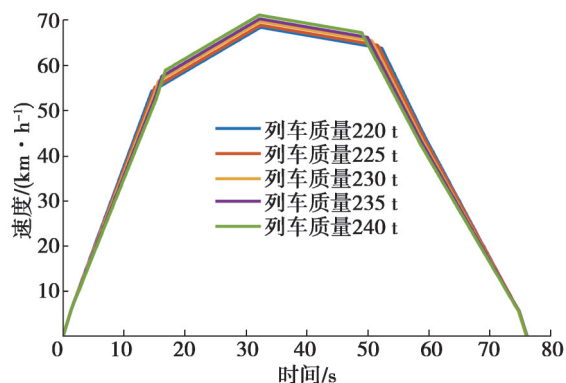


图6 不同列车质量速度曲线

Fig. 6 Speed profiles under different train masses

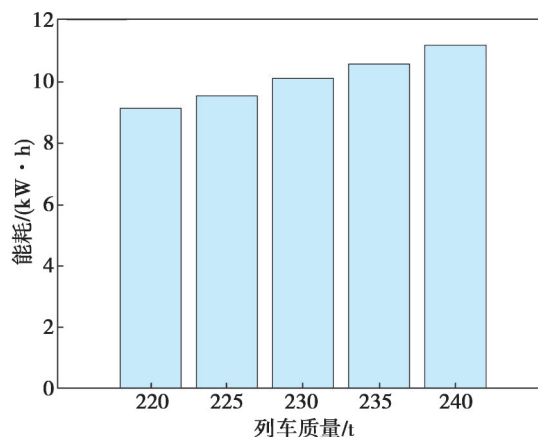


图7 不同列车质量下的能耗变化

Fig. 7 Energy consumption variation under different train masses

从图6可以看出，各曲线在牵引阶段与制动阶段都表现出了差异性，在列车的牵引与制动特性相同的情

况下,列车加速度会随着列车质量的增加而减小,从而导致加速/减速时间更长。从图7可以看出,随着列车质量的不断增加,能耗不断增加。

2.3 列车运行能耗的影响因素分析

为研究列车质量、运行时间和运行策略对列车运行能耗的影响,采用三因素混合水平试验设计,其中列车质量和运行时间均设置4个水平,运行策略设置2个水平,以寻找影响能耗的核心因素。其中基本参数的设置与正交设计表的结果分别如表1和表2所示。

表1 列车基本参数水平设计表

Table 1 Design table of basic train parameters

水平	因素1: 运行时间	因素2: 列车质量	因素3: 运行策略
1	T1 (75 s)	M1 (220 t)	S1 (恒速策略)
2	T2 (80 s)	M2 (235 t)	S2 (惰行策略)
3	T3 (85 s)	M3 (250 t)	S1 (恒速策略)
4	T4 (90 s)	M4 (265 t)	S2 (惰行策略)

表2 列车运行能耗影响因素水平设计表

Table 2 Design table of influencing factors on train traction energy consumption

试验号	运行时间	列车质量	运行策略	运行能耗/(kW·h)
1	T1(1)	M1(1)	S1(1)	14.18
2	T1(1)	M2(2)	S2(2)	11.51
3	T1(1)	M3(3)	S1(3)	17.69
4	T1(1)	M4(4)	S2(4)	17.99
5	T2(2)	M1(1)	S2(2)	7.02
6	T2(2)	M2(2)	S1(1)	12.92
7	T2(2)	M3(3)	S2(4)	9.06
8	T2(2)	M4(4)	S1(3)	15.34
9	T3(3)	M1(1)	S1(3)	10.51
10	T3(3)	M2(2)	S2(4)	5.88
11	T3(3)	M3(3)	S1(1)	12.15
12	T3(3)	M4(4)	S2(2)	7.36
13	T4(4)	M1(1)	S2(4)	4.09
14	T4(4)	M2(2)	S1(3)	9.95
15	T4(4)	M3(3)	S2(2)	4.99
16	T4(4)	M4(4)	S1(1)	11.56

采用极差分析法对仿真试验结果进行处理分析,首先通过式(7)、式(8)分别计算出 K_i 和极差 R 。 K_i 是各列车 i 水平所对应的运行能耗平均值, R 为各列 K_i 的极差。

$$K_i = \left(\sum_{j=1}^A E_{ij} \right) / A \tag{7}$$

式中: A 为 i 水平在因素所在列中重复出现的次数; E_{ij} 为 i 水平下第 j 次试验的能耗。

$$R = \max(K_i) - \min(K_i) \tag{8}$$

根据正交试验结果分析,不同因素的极差比较如

表3所示。分析表明,在试验范围内,运行时间的极差值最大(7.69),其次是运行策略(4.42),列车质量的极差最小(4.11)。极差直接反映了各因素对能耗的影响程度,数值越大表明该因素变化对能耗的影响越显著。因此,三因素对列车运行能耗的影响从大到小排序为:运行时间,运行策略,列车质量。这一结果表明,在能耗控制中,运行时间是最关键的影响因素,其次是运行策略的调整,而列车质量的敏感性相对较低,其中运行时间的影响远大于列车质量和运行策略,同时在本试验的测试数据中运行策略和列车质量对于能耗的影响程度相近。

表3 列车正交试验分析表

Table 3 Analysis of the orthogonal experiment

因素	K_1	K_2	K_3	K_4	R
运行时间	15.34	11.08	8.97	7.65	7.69
列车质量	8.95	10.06	10.97	13.06	4.11
运行策略	12.91	8.49	—	—	4.42

3 单列车全线的能耗影响仿真分析

3.1 区间运行时间分配的理论基础

地铁列车在不同区间的运行时间与净能耗之间呈现典型的 Pareto 曲线关系,其中净能耗为考虑再生能量后的能耗,即运行时间越紧凑,净能耗越高,但能耗随时间的延长呈边际递减趋势下降。由于各区间的线路条件(如梯度、限速、站间距等)存在差异,对应的能耗-时间关系曲线(Pareto 曲线)也各不相同。各区间运行时间与运行净能耗的关系如图8所示。由图8可见,不同区间在相同时间延长条件下,其能耗下降幅度差异明显;不同区间在相同时间分配下的能耗收益具有显著差异。因此,在全线运行总时间固定的约束条件下,需根据各区间对能耗的边际响应特性,进行针对性的运行时间分配,从而最大程度地降低全线净能耗。

3.2 区间运行时间分配的仿真分析

根据3.1节所述的不同区间在相同时间延长条件下能耗变化幅度不同的规律,本节研究在全线总运行时间于单次优化内不变的前提下,通过优化各区间运行时间分配以降低全线净牵引能耗。为此,构建分组背包优化模型:将全线总富余时间视为背包容量,以每个区间分配到的单位富余时间增量作为物品,以此时间增量分配后相对于分配前该区间的能耗降低值作为物品价值。优化目标是将总富余时间合理分配至各区间,最大化降低全线总能耗。

仿真条件基于无锡地铁1号线实际下行线路与车辆参数。列车在单区间仿真中始终采用惰行节能策略运

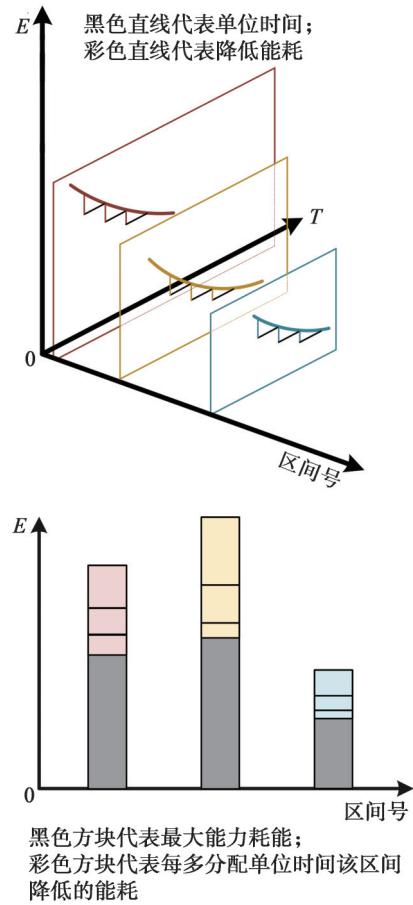


图 8 各区间运行时间与运行净能耗的关系

Fig. 8 Relationship between running time and net traction energy consumption in sections

行，停站时间采用线路既定参数。以最大能力运行时间 2 357 s 为基础，以无锡地铁运营方提供的 3 个速度等级下的各区间运行时间的实测数据与全线相对于最大能力运行时间的富余时间为测试数据，其中速度等级二、等级三、等级四分别对应富余时间 236 s、360 s 与 498 s。再生能量利用率 β 在 0 至 1 间线性变化，对比基准为无锡地铁运营时刻表方案；同时为考虑再生制动能量利用率对区间时间分配的影响，在每个速度等级情况下设置再生能量利用率 β 在 [0,1] 区间以 0.2 为步长均匀取值并分别求解，模拟供电网络特性与时刻表对再生能量吸收能力的差异化影响。求得的结果如表 4~表 6 所示。

由表 4~表 6 可知，优化分配方案在所有场景下均显著降低了全线能耗，且其节能效果呈现鲜明的规律性特征。

在同速度等级情况下，节能率随再生利用率 β 的升高大致呈衰减趋势，在速度等级二场景中， β 为 0 时节能率达 5.3%，而 β 升至 1 时节能率衰减至 1.3%。这源于再生能量利用与牵引能耗优化的动态耦合机制：当再生利用率 β 趋近于 0 时，再生制动能量捕获效率低下，制动工况的负功率贡献有限，此时通过分配富余时间降低牵引工况占比以降低牵引能耗，效果较好；而当再生利用率 β 逐渐提高到 1 时，牵引阶段用于提升列车动能的能耗部分可通过再生制动实现高效回收，通过分配运行时间降低的牵引能耗主要来自低速度下更小的基本阻力做功。

表 4 速度等级二运行时间分配前后净能耗对比表

Table 4 Comparison of net energy consumption before and after running time allocation at speed level II

能耗	再生利用率					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
分配前能耗/ (kW·h)	224.9	195.8	169.1	142.5	115.8	89.2
分配后能耗/ (kW·h)	213.0	186.8	162.2	137.6	113.0	88.0
节能率	5.3%	4.6%	4.1%	3.4%	2.4%	1.3%

表 5 速度等级三运行时间分配前后净能耗对比表

Table 5 Comparison of net energy consumption before and after running time allocation at speed level III

能耗	再生利用率					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
分配前能耗/ (kW·h)	187.6	164.8	143.9	123.1	102.2	81.4
分配后能耗/ (kW·h)	184.4	162.8	142.4	121.9	101.3	80.8
节能率	1.7%	1.2%	1.0%	1.0%	0.9%	0.7%

表 6 速度等级四运行时间分配前后净能耗对比表

Table 6 Comparison of net energy consumption before and after running time allocation at speed level IV

能耗	再生利用率					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
分配前能耗/ (kW·h)	163.6	144.9	127.4	109.9	92.4	74.9
分配后能耗/ (kW·h)	161.9	143.8	126.5	109.1	91.8	74.3
节能率	1.0%	0.8%	0.8%	0.7%	0.6%	0.8%

对不同速度等级下的节能率进行对比, 速度等级二场景的节能效果最为突出, 显著高于速度等级三和等级四。此现象的原因在于富余运行时间的边际收益递减特性, 如前文中图4所示, 随着总富余时间的增加, 单位富余时间增加所产生的能耗降低幅度逐渐减小, 导致高速度等级下的时间分配节能率降低。

4 结论

针对城市轨道交通系统, 从列车运行行为及能量消耗函数角度出发, 梳理并定性地给出牵引能耗的影响因素。重点对单列车单区间驾驶策略、运行时分和列车质量进行量化分析, 并通过控制变量法仿真分析了各因素与能耗的定量关系, 得到了列车运行能耗随核心影响因素的变化规律。引入正交试验分析了各因素的贡献度, 得出对列车能耗的影响程度从大到小排序为运行时间、运行策略、列车质量。基于此, 进一步分析了考虑再生能源利用且全线总运行时间不变的场景下, 各区间运行时间的分配对能耗的影响, 为列车实际运行场景提出了优化建议。

受限于分析手段, 本文仅对城市轨道交通列车牵引能耗的影响因素及变化规律进行了初步探讨。未来将构建覆盖列车设备、线路环境、供电网络与运行计划的全系统仿真平台, 进一步研究车网耦合的供用电内部相互作用、能量流通过程、损耗分布规律, 以及考虑客流分布的车网耦合节能时刻表设计、运输效能与服务质量的综合优化。

参考文献:

- [1] 李学峰, 杨万坤. 我国城市轨道交通车辆技术现状和发展趋势[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(增刊1): 125-126.
LI Xuefeng, YANG Wankun. Current situation and development trends of urban rail vehicles technology[J]. Railway locomotive & car, 2008, 28(Suppl 1): 125-126.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2024年度统计和分析报告[R/OL]. (2025-09-26) [2025-10-21]. <https://www.camet.org.cn/xytj/tjxx/660844283682885.shtml>.
China association of metros. China urban rail transit 2024 annual statistics and analysis report [R/OL]. (2025-09-26) [2025-10-21]. <https://www.camet.org.cn/xytj/tjxx/660844283682885.shtml>.
- [3] 陈志杰, 毛保华, 柏赞, 等. 城市轨道交通追踪列车定时节能操纵优化[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 10-17.
CHEN Zhijie, MAO Baohua, BAI Yun, et al. optimization on energy-efficient operations for trailing train in urban rail system with fixed run-time[J]. Journal of the China railway society, 2017, 39(8): 10-17.
- [4] XUN J, LIU T, NING B, et al. Using approximate dynamic programming to maximize regenerative energy utilization for metro[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2020, 21(9): 3650-3662.
- [5] ZHANG Z Y, CHENG X Q, XING Z Y, et al. Pareto multi-objective optimization of metro train energy-saving operation using improved NSGA-II algorithms[J]. Chaos solitons & fractals, 2023, 176: 114183.
- [6] NIU W G, ZHOU Y H, JIAO X M, et al. Trajectory optimization of train cooperative energy-saving operation using a safe deep reinforcement learning approach[J]. Applied intelligence, 2025, 55(7): 651.
- [7] ZHAO N, TIAN Z B, HILLMANSEN S, et al. Timetable optimization and trial test for regenerative braking energy utilization in rapid transit systems[J]. Energies, 2022, 15 (13): 4879.
- [8] 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.
- [9] 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 Jinghui, CHEN Xi, LI Borui. Optimization of asymmetric timetable in urban rail transit considering train quantity restriction[J]. Control and decision, 2023, 38(9): 2632-2640.
- [10] 温芳, 柏赞, 陈垚. 考虑快慢车的城轨跨线运营开行方案与时刻表优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(3): 172-183.
WEN Fang, BAI Yun, CHEN Yao. Optimization of operation scheme and timetable for interconnected lines in urban rail transit considering express-local train[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2024, 24(3): 172-183.
- [11] 冯晓云, 黄德青, 王青元, 等. 轨道交通列车综合节能研究综述[J]. 铁道学报, 2023, 45(2): 22-34.
FENG Xiaoyun, HUANG Deqing, WANG Qingyuan, et al. Overview on comprehensive energy saving schemes for rail transit train operation system[J]. Journal of the China railway society, 2023, 45(2): 22-34.
- [12] GENG H R, MIYATAKE M, WANG Q Y, et al. A method for optimizing urban rail transit timetable based on accurate power flow[J]. Mechanical engineering journal, 2023, 10 (3): 22. DOI: 10.1299/mej. 22-00360.
- [13] ICHIKAWA K. Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of train[J]. Bulletin of JSME, 1968, 11(47): 857-865.

Quantitative analysis of key influencing factors on traction energy consumption of urban rail trains

TANG Lei^{1,2}, KE Yihang³, ZHANG Weiye³, YANG Zhu³, PANG Liuqin⁴

(1. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 4. Wuxi Metro Operation Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: This study addresses the lack of a unified quantitative framework for analyzing the multi-factor coupled mechanisms underlying traction energy consumption in urban rail transit systems, and aims to elucidate the dominant and marginal effects of running time, train mass, and train control strategy from two perspectives: dynamical mechanisms and running time allocation. A model was first formulated to reflect longitudinal train dynamics and energy flow, and control variable simulations were conducted to characterize how sectional energy consumption responds to key parameters. A three-factor mixed-level orthogonal design was then employed to quantify the relative contributions of each influencing factor. Building on the Pareto relationship between sectional energy consumption and running time, a marginal benefit optimization model for line-wide running time allocation was further developed to evaluate energy-saving potential under varying renewable energy utilization rates. Results show that running time exerts a markedly greater influence on traction energy consumption than train control strategy and train mass, and that a coasting strategy consistently outperforms a constant-speed strategy. Running time reallocation based on section-specific energy sensitivities yields significant reductions in net energy consumption, thus maximizing the energy-saving rate under low renewable energy utilization rates. These findings reveal the structural dependence of traction energy consumption on running time allocation and train control strategy, and demonstrate the effectiveness of resource allocation optimization based on marginal energy consumption response, providing theoretical support for energy consumption regulation and timetable optimization in urban rail transit systems.

Keywords: urban rail transit; traction energy consumption; running time; coasting strategy; orthogonal design; energy-saving optimization; simulation