

# 城市轨道交通低碳节能技术下牵引 供电系统仿真分析<sup>\*</sup>

王 忻<sup>1,2</sup> 吉祥雨<sup>1,2</sup> 韩博衍<sup>3</sup> 倪子诗<sup>4</sup> 张 钢<sup>4</sup>

(1. 铁科院(北京)工程咨询有限公司, 100081, 北京; 2. 城轨创新网络中心有限公司, 100071, 北京;

3. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315100, 宁波; 4. 北京交通大学电气工程学院, 100044, 北京//第一作者, 副研究员)

**摘 要** 目的:针对目前多项低碳节能技术同时应用到一条城市轨道交通(以下简称“城轨”)线路上的节能效果尚缺乏评估,无法为最优节能方案的制定与决策提供支撑,因此需要通过多种低碳节能技术下牵引供电系统的仿真分析研究其节能效果。方法:介绍了城轨牵引能耗的构成。从供电设备、牵引电机类型、列车质量及行车组织等多个角度出发,介绍了双向变流技术、永磁同步牵引传动技术、列车轻量化及列车驾驶策略与运行图优化等4种低碳节能技术的原理及特点。搭建了城市轨道交通牵引供电系统仿真平台。以国内某地铁线路为研究背景,对牵引供电系统进行仿真建模,分析了多种低碳节能技术单独应用与综合应用的节能效果。结果及结论:永磁同步牵引电机效率更高,其消耗电能不仅低于异步牵引电机,且其再生能量也高于异步牵引电机;整流装置采用双向变流器的条件下,牵引网损耗减小了7.88 kWh,节能率达16.00%;列车采用铝合金车体后,相同行驶条件下消耗的电能较优化前减少了39.70 kWh,节能率为2.75%;列车运行图优化后,列车消耗电能比优化前减少了48.56 kWh,节能率为3.37%;多种低碳节能技术综合应用的条件下可将牵引供电系统节能率提升至15.79%,节能效果明显。

**关键词** 城市轨道交通;牵引供电系统;低碳节能技术

**中图分类号** TK018;U223.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.10.014

## Simulation Analysis of Traction Power Supply System under Urban Rail Transit Low-carbon Energy-saving Technologies

WANG Xin, JI Xiangyu, HAN Boyan, NI Zishi, ZHANG Gang

**Abstract** Objective: In the context of multiple low-carbon energy-saving technologies being simultaneously applied to an URT (urban rail transit) line without yet an evaluation on their energy-saving effects, and the inability to provide support for

optimal energy-saving scheme formulation and decision-making, it is aimed to analyze the energy-saving effects of traction power supply systems under various low-carbon energy-saving technologies through simulation analysis. **Method:** The composition of URT traction energy consumption is introduced. From the perspectives of power supply equipment, traction motor types, train mass, and operational organization, the principles and features of four low-carbon and energy-saving technologies are discussed: bidirectional converter technology, permanent magnet synchronous traction drive technology, train lightweighting, train driving strategy and timetable optimization. An URT traction power supply system simulation platform is constructed. Using a metro line in China as the research background, the traction power supply system is simulated and modeled to analyze the energy-saving effects of the single application or combined application of the multiple mentioned technologies. **Result and Conclusion:** Permanent magnet synchronous traction motors exhibit higher efficiency and consume less energy compared to asynchronous traction motors, and their regenerative energy is higher. Under the condition of employing bidirectional converters for rectification, traction network loss decreases by 7.88 kWh, achieving a 16.00% energy-saving rate. After adopting aluminum alloy train body, the energy consumption decreases by 39.70 kWh under similar driving conditions compared to pre-optimization, with a 2.75% energy-saving rate. With the train timetable optimization, the energy consumption reduces by 48.56 kWh compared to pre-optimization, achieving a 3.37% energy-saving rate. Under the combined application of multiple low-carbon energy-saving technologies, the energy-saving rate of the traction power supply system can be increased to 15.79%, demonstrating a significant energy-saving effect.

**Key words** urban rail transit; traction power supply system;

<sup>\*</sup> 中国铁道科学院集团有限公司科研开发基金项目(2022YJ039);铁科院(北京)工程咨询有限公司科研开发基金项目(2021ZXJ007)

low-carbon energy-saving technology

**First-author's address** Academy of Railway Sciences (Beijing) Engineering Consult Co., Ltd., 100081, Beijing, China

随着城市轨道交通(以下简称“城轨”)运营线路里程和能耗的不断增长,越来越多的节能新技术被应用到牵引供电系统中。文献[1]统计了2021年西安地铁线网运营车辆和动力照明电能消耗与碳排放量占比,计算了列车轻量化的减重效果和节能潜力。文献[2]对比了青岛地铁11号线应用的永磁同步牵引列车和异步牵引列车在载客运营期间的能耗与再生制动能量数据。文献[3]以宁波地铁线路为例,实施了双向变流器应用于牵引供电系统的功能性验证,完成了牵引网稳压与制动能量回馈功率测试,以及电能质量测试与节能效果分析。然而,当多项节能技术同时应用到一条城市轨道交通线路后,其节能效果目前尚缺乏评估测算,无法为最优节能方案的制定及决策提供支撑。为此,本文从城轨系统建模及仿真推演的角度出发,对牵引供电系统节能降耗低碳技术的综合能效展开研究。

## 1 城轨牵引能耗构成

电能消耗是城轨系统运营过程中能源消耗的主要形式,主要包括车站动力照明设备能耗与列车运行牵引能耗<sup>[4]</sup>。列车运行牵引能耗即列车运行需要消耗的牵引电能,主要包括车辆牵引系统能耗和辅助系统能耗,其中车辆牵引系统能耗占城轨运营能耗的40%~50%<sup>[5]</sup>。根据能量消耗位置及作用,可将车辆牵引系统能耗分为以下几类:

1) 牵引变电损耗:变电站内部变压器、整流装置转换损耗,以及交流侧输电线路产生的损耗。

2) 接触网损耗:电流通流直流接触网产生的损耗,即牵引供电系统的直流传输损耗。

3) 列车能耗:列车正常运行必须消耗的能量,主要由列车内部辅助供电系统能耗、牵引逆变器损耗、牵引电机损耗、齿轮箱损耗及运行阻力损耗组成。

4) 再生制动转换损耗:列车制动时机械能转换为电能过程中的损耗,包括齿轮箱损耗、牵引电机损耗及牵引逆变器损耗。

5) 其余损耗:列车制动能量回馈时在牵引供电

系统中流动过程中产生的损耗。

## 2 牵引供电系统低碳节能技术

### 2.1 双向变流技术

双向变流器的引入为城轨提供了一种新型的柔性牵引供电系统结构。其不仅具有24脉波二极管整流机组+传统中压能馈装置的节能效果,同时因体积小、容量大及稳压效果好,可有效降低因传统中压能馈装置容量不足且需邻站协同吸收引起的跨区供电线路损耗;采用适当的控制策略后,整条线路接触网电压在较小的范围内波动,既可避免长距离越区供电带来的巨大网损,又能最大程度保证再生制动能量吸收率,因此节能效果更为显著。

### 2.2 永磁同步牵引传动技术

在城轨牵引传动系统中,永磁同步牵引电机凭借高效率、高功率密度、低噪声等优点倍受国内外关注<sup>[6]</sup>。图1为永磁同步牵引电机与异步牵引电机在同转矩下全转速范围内的效率对比。由图1可知:永磁同步牵引电机在高效率区(效率>95%的区域)的转速范围更大;其工作于额定点的效率可提高约5%,工作于低转速区的效率可提高甚至超过10%。究其原因主要为地铁线路站间距短,车辆起停相对频繁,永磁同步牵引电机在低效率区(效率<5%的区域)的工作时间更长;而永磁同步牵引电机相对于异步牵引电机工作于低效率区的更窄,且电机效率、再生能量也同样高于异步牵引电机,节能优势明显。

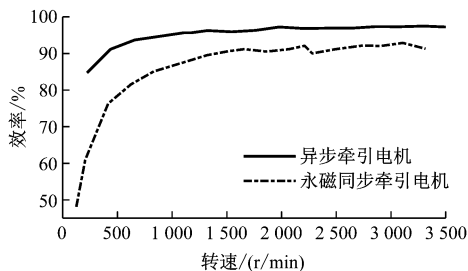


图1 永磁同步牵引电机和异步牵引电机效率对比

Fig. 1 Efficiency comparison between permanent magnet synchronous traction motor and asynchronous traction motor

### 2.3 列车轻量化

在满足车辆各项要求的前提下降低列车质量,可有效降低全寿命周期成本和运营能耗,如车体采用铝合金或碳纤维材料等。文献[7]给出了列车主要轻型材料的减重效果,如表1所示。

表 1 列车主要轻型材料的减重效果

Tab. 1 Weight reduction effect of train major lightweight materials

原材料	轻量化后材料	应用部件	相对减重率/%
铝型材	镁铝合金	纵、横梁	30
玻璃	聚碳酸酯	客室屏风	40
铝板	PMI 夹芯材料	侧墙板	30
铝蜂窝	芳纶蜂窝	端、隔墙	30

注:PMI 为聚甲基丙烯酸酞胺。

2.4 列车驾驶策略及运行图优化

优化后的列车驾驶策略可以降低列车运行过程中的牵引能耗<sup>[8]</sup>。在时刻表已知的前提下,列车从某站到下一站存在多条速度曲线满足同一时间约束,具有一定的优化空间。此外,充分利用再生制动能可以降低运营能耗,节约运营成本<sup>[6]</sup>。合理调整列车发车时刻及停站时间,将列车再生制动能量供同一供电区间列车牵引使用,可大幅提高再生制动能利用率,从而节约牵引能耗。驾驶策略优化前后列车运行图对比见图 2。

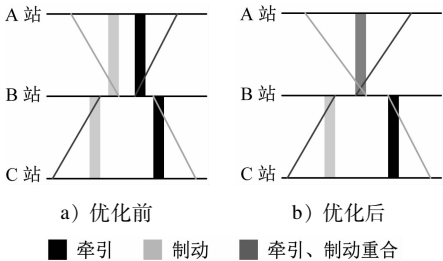


图 2 驾驶策略优化前后列车运行图对比  
Fig. 2 Comparison diagram of train timetables before and after driving strategy optimization

3 牵引供电系统仿真平台简介

本文拟针对城轨系统牵引用能低碳节能技术评估进行研究,建立 1 套包含牵引供电系统、列车、行车组织的全系统潮流及能耗计算模型。以城轨车辆动力学模型及其各部件的主要参数作为计算主体,输入线路、列车基本条件及运行工况等基本信息,输出系统能耗计算结果和各部分能量效率,完成对不同低碳节能技术下系统综合节能效果的评估。城轨牵引供电系统仿真平台架构如图 3 所示。其中,列车牵引计算模块可根据实际线路条件、列车参数及驾驶策略等计算每时刻列车的位置、速度及消耗功率,牵引供电系统潮流计算模块可根据网络模型、电气参数及牵引计算结果,通过

仿真推演得到系统中各点的电压、电流等基础数据,对各部件输入及输出功率进行积分得到各部件的能耗及效率,从而计算不同低碳节能技术下的城轨牵引系统能耗、效率及节能率,完成对牵引供电系统综合节能效果的评估。

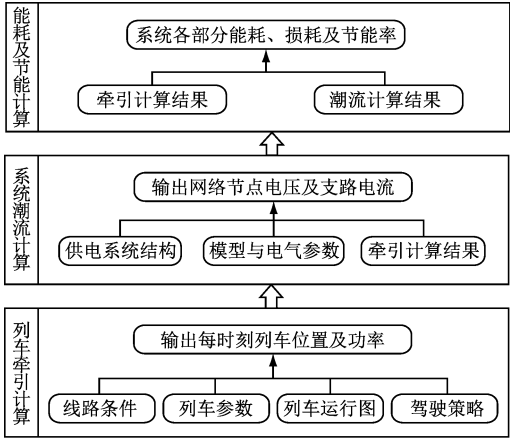


图 3 城轨牵引供电系统仿真平台架构图  
Fig. 3 Architecture diagram of URT traction power supply system simulation platform

为了验证该仿真平台的合理性和可行性,将国内某地铁线路相关信息输入到仿真软件中,对比分析列车单程运行工况下牵引能耗的仿真结果与实测结果,如图 4 所示。由图 4 可知:牵引能耗仿真结果与实测结果变化趋势一致;在列车单程运行工况下,牵引能耗仿真结果为 322.77 kWh,牵引能耗实测结果为 315.96 kWh,仿真结果与实际结果偏差为 2.15%。上述结果证明了本试验所用仿真计算模型的准确性,较好地反映了城轨牵引能耗水平。

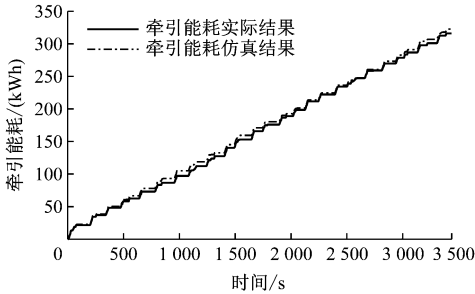


图 4 城轨牵引能耗-时间关系曲线  
Fig. 4 Relation curve of URT traction energy consumption and time

4 牵引供电系统节能仿真验证

4.1 模型参数选取

以国内某地铁线路为研究背景,共设车站 25

座,沿线设置 13 个牵引变电所,每个牵引变电所中均设置变流装置(变流装置分为两种,一种为二级管整流装置+能馈机组,另一种为双向变流器),牵引供电系统交流侧采用 35 kV 集中供电制式,直流侧采用 1 500 V 架空接触网。牵引供电系统仿真模型参数取值如表 2 所示。

表 2 牵引供电系统仿真模型参数取值

Tab.2 Values of traction power supply system simulation model parameters

参数	取值
牵引变电所空载电压/ V	1 650
二极管整流机组等效内阻/ mΩ	50
传统中压能馈装置启动电压/ V	1 700
双向变流器下垂系数	0.015
双向变流器启动电压/ V	1 726
列车额定功率/ MW	3
接触网电阻/( Ω/km)	0.03

4.2 单一技术节能效果仿真分析

4.2.1 永磁同步牵引技术节能效果

在城轨线路与列车运行条件相同,且仅改变列车牵引电机类型的条件下,全线异步牵引电机型列车(以下简称“异步列车”)与永磁同步牵引电机型列车(以下简称“永磁列车”)单车(1 列 6 节编组列车)牵引功率-时间关系曲线如图 5 所示。

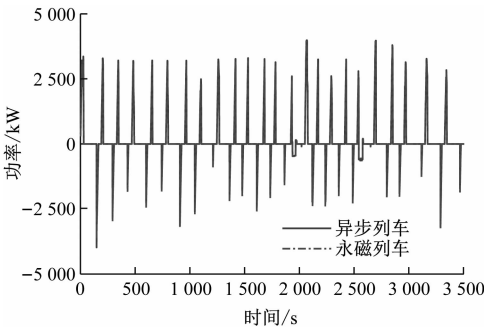


图 5 异步列车与永磁列车单车牵引功率-时间关系曲线

Fig.5 Relation curves of single vehicle traction power and time of asynchronous train and permanent magnet train

列车牵引能耗和制动能量如表 3 所示。由表 3 可知:永磁列车单车在牵引和制动过程中的节能率分别为 4.14% 和 5.47%;列车行驶全过程中,永磁列车单车节约能耗 142.88 kWh,节能率为 9.92%。由上可见,永磁同步牵引电机效率更高,其消耗电能不仅低于异步牵引电机,且其再生能量也高于异

步牵引电机。

表 3 列车牵引能耗和制动能量

Tab.3 Train traction energy consumption and braking energy

类别	牵引能耗/( kWh)	制动能量/( kWh)	总能耗/( kWh)
永磁列车单车	2 212.32	914.20	1 298.12
异步列车单车	2 307.88	866.79	1 441.09

注:总能耗=牵引能耗-制动能量。

4.2.2 双向变流技术节能效果

当列车全部采用异步牵引电机,整流装置采用传统中压能馈装置+二极管整流机组的条件下,牵引供电系统中牵引网损耗为 49.25 kWh;整流装置采用双向变流器的条件下,牵引网损耗为 41.37 kWh。由此可见,后者与前者相比,减小了由于网压降低与跨区供电带来的牵引网损耗,减小值为 7.88 kWh,节能率达 16.00%。

4.2.3 列车轻量化节能效果

当列车全部采用异步牵引电机,整流装置采用传统中压能馈装置+二极管整流机组的条件下,车型设置为一致,采用的铝合金车体较原不锈钢车体减重 1 300 kg/列,得出多列车(多列 6 节编组列车)减重前后列车总能耗与牵引网损耗。列车质量减轻后,相同行驶条件下消耗的电能为 1 401.35 kWh,较优化前的 1 441.05 kWh 减少了 39.70 kWh,节能率为 2.75%。

4.2.4 列车驾驶策略及运行图优化节能效果

本文采用的定时节能运行优化模型如下:

$$\min J = \int_{x_0}^{x_f} u_f(x)f(v)dx \tag{1}$$
$$\text{s. t.} \begin{cases} \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \\ v \frac{dv}{dx} = \frac{u_f(x)f(v) - u_b(x)b(v)}{mg} - \frac{w_0(x) - w_j(x)}{mg} \end{cases} \tag{2}$$

式中:

- $J$ ——列车牵引能耗;
- $u_f$ ——列车在位置  $x$  处的牵引力使用系数;
- $f(v)$ ——列车在速度  $v$  下的最大牵引力;
- $u_b$ ——列车在位置  $x$  处的制动力使用系数;
- $b(v)$ ——列车在速度  $v$  下的最大制动力;
- $x$ ——列车位置;
- $x_0$ ——列车的起始位置;

$x_t$ —— $t$  时刻的列车位置;  
 $w_0$ ——基本阻力;  
 $w_j$ ——附加阻力;  
 $t$ ——时间;  
 $m$ ——列车换算质量;  
 $g$ ——重力加速度。

基于庞特亚金极小值原理,构建 Hamilton 函数  $H$ :

$$H = u_{\text{f}}f + \frac{\lambda_1}{v}\left(\frac{u_{\text{f}}f - u_{\text{b}}b}{mg} - w_0 - w_j\right) + \frac{\lambda_2}{v} + \mu[v - v_{\text{lim}}(x)]$$

(3)

式中:  
 $v_{\text{lim}}(x)$ ——列车在位置  $x$  的限速;  
 $\mu$ ——不为 0 的待定量,满足式(4);  
 $\lambda_1, \lambda_2$ ——伴随状态,满足伴随方程(见式(5))。

$$\mu = \begin{cases} > 0, & v = v_{\text{lim}}(x) \\ = 0, & v < v_{\text{lim}}(x) \end{cases}$$

(4)

$$\begin{cases} \frac{\text{d}\lambda_1}{\text{d}x} = -\frac{\partial H}{\partial v} \\ \frac{\text{d}\lambda_2}{\text{d}x} = -\frac{\partial H}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

(5)

当 Hamilton 函数取最小值时,求解  $u_{\text{f}}, u_{\text{b}}$  的不同取值下,某区间内驾驶策略优化前后列车速度-时间关系曲线,如图 6 所示。列车驾驶策略优化后,行驶相同线路时多列车总消耗电能比优化前的 1 441. 05 kWh 减少 42. 37 kWh,节能率为 2. 94%。

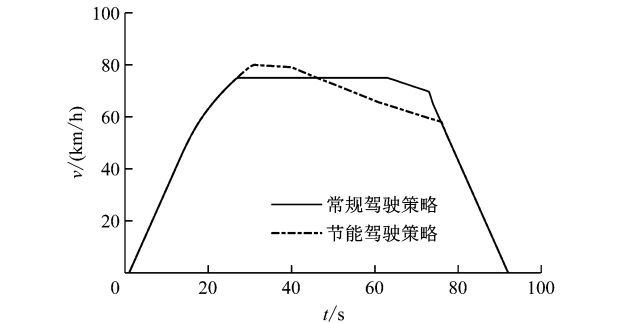


图 6 某区间内驾驶策略优化前后列车速度-时间关系曲线  
Fig. 6 Relation curve of train speed and time before and after optimization of driving strategy for an interval

通过增加同区段列车制动和牵引的重叠时间,对列车停站时间进行 5 s 范围内的调整,使得制动回馈能量被同区段列车牵引使用,生成的列车节能运行图见图 7。由图 7 可见:列车运行图优化后,列

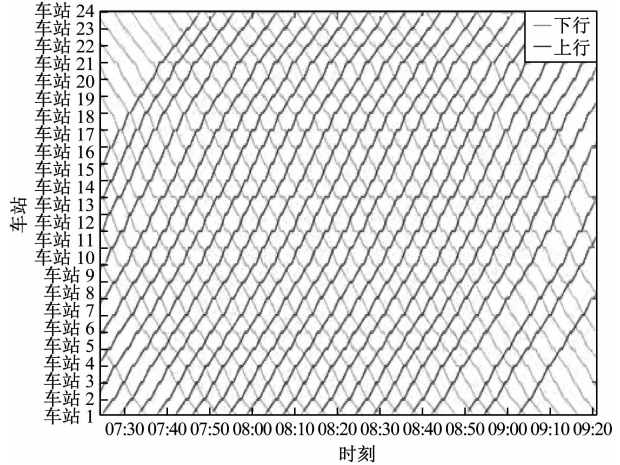


图 7 列车节能运行图  
Fig. 7 Diagram of train energy-saving timetable

车消耗电能为 1 392. 49 kWh,比优化前的 1 441. 05 kWh 减少了 48. 56 kWh,节能率为 3. 37%。

### 4.3 多技术综合节能仿真分析

表 4 为多列车况下,将上述 4 项节能技术单独应用与综合应用的牵引供电系统总能耗与节约能耗对比结果。需要说明的是,在上述单一节能技术效果仿真中,仅侧重分析了各项技术所直接影响的部分系统能耗(例如,列车轻量化节能技术中只计算了列车能耗及节能率,不包括接触网损耗等),而表 8 中各项节能技术应用前后对应的能耗计算均涵盖了牵引供电系统中的各个组成部分(列车、牵引网、变流装置、变压器等),与本文第 4. 2 节所得结果相比,各指标数值略有不同。

表 4 各项节能技术下多列车牵引供电系统的节能率  
Tab. 4 Energy saving rate of various train traction power supply systems using various energy-saving technologies

节能技术	总能耗/ (kWh)	节约能耗/ (kWh)	节能率/ %
未使用节能技术	1 525. 81		
永磁同步牵引传动技术	1 379. 52	146. 30	9. 59
双向变流技术	1 517. 93	7. 88	0. 52
列车轻量化	1 481. 92	43. 89	2. 88
驾驶策略及运行图优化	1 432. 89	92. 92	6. 09
多技术综合节能	1 284. 89	240. 93	15. 79

多项低碳节能技术运用后,牵引供电系统节约能耗为 240. 93 kWh,节能率为 15. 79%。按照 180 列次/d 概算,1 条线路每年节约能耗 3 673. 9 MWh。不同技术的节能效果可叠加,但其节能率小

于各项技术单独应用时的节能率之和。其中,由于列车再生制动能量也可以通过传统中压能馈装置被利用,双向变流器的作用主要体现在节约牵引网损耗方面,对列车再生制动能量利用率的影响相较于传统中压能馈装置差别不大,因此单独使用该技术的节约能耗占牵引供电系统总能耗比例较小。城轨企业在进行多项低碳节能技术应用决策时,应充分结合自身用能实际,从系统整体效能论证单项技术的节能效果,以实现效益最大化。对于双向变流器这类以节约牵引网损耗为主的间接节能技术,按照传统能耗计算方法得到的节能率较低,建议从改善牵引供电系统整体效能的角度出发提出新的评价指标,便于城轨企业进行综合评价。

## 5 结语

本文从供电设备、牵引电机类型、列车质量及行车组织等多个角度出发,介绍了双向变流装置、永磁同步牵引传动技术、列车轻量化及列车运行图节能优化策略等 4 种低碳节能技术的原理及特点,研究了多种技术单独应用与综合应用的节能效果。目前,这些单项技术的节能效果已经得到了验证,多种低碳节能技术综合应用的条件下可将牵引供电系统节能率提升至 15.79%。从改善牵引供电系统整体效能的角度出发,对多种低碳节能技术的应用效果进行评估,有利于实现城市轨道交通效益最大化,从而促进碳达峰、碳中和目标的实现。

## 参考文献

- [1] 禹建伟,邢鹏,王好德,等. 西安轨道交通绿色低碳技术探索与应用[EB/OL]. (2023-02-08) [2023-03-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1745.U.20230207.1555.001.html>.
- [2] 曹虎,董凯,孙丛君,等. 节能技术在城市轨道交通车辆牵引传动系统中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(9): 36.
- [3] 杨树松,李辉,朱纪法. 双向变流器应用于城市轨道交通供电系统的功能性验证[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 187.
- [4] 张英楠. 苏州市轨道交通运营能耗分析及节能措施管控[J]. 现代城市轨道交通, 2022(增刊1): 148.
- [5] 谢汉生,满朝翰,商一帆. 地铁主要能耗影响因素及节能措施分析研究[J]. 现代城市轨道交通, 2013(4): 65.
- [6] 朱伟鹏. 深圳地铁永磁同步牵引系统研究分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(4): 38.
- [7] 李梁,张卓杰,孙瑶,等. 双碳背景下城轨车辆绿色低碳技术应用与研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 27.
- [8] 李蔚,刘高峰,赵思哲,等. 基于不同速度控制模式的列车驾驶策略优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2169.
- [9] 革新,张玉召,黄志鹏. 基于再生制动能利用的高铁列车运行图优化[EB/OL]. (2022-12-15) [2023-03-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1401.N.20221214.1513.006.html>.
- [10] 禹建伟,邢鹏,王好德,等. 西安轨道交通绿色低碳技术探索与应用[EB/OL]. (2023-02-08) [2023-03-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1745.U.20230207.1555.001.html>.
- [11] 曹虎,董凯,孙丛君,等. 节能技术在城市轨道交通车辆牵引传动系统中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(9): 36.
- [12] CAO Hu, DONG Kai, SUN Congjun, et al. Application of energy-saving technology in traction transmission system of urban rail transit vehicles[J]. Modern Urban Transit, 2019(9): 36.
- [13] 杨树松,李辉,朱纪法. 双向变流器应用于城市轨道交通供电系统的功能性验证[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 187.
- [14] 张英楠. 苏州市轨道交通运营能耗分析及节能措施管控[J]. 现代城市轨道交通, 2022(增刊1): 148.
- [15] ZHANG Yingnan. Suzhou rail transit operation energy consumption analysis and energy saving measures[J]. Modern Urban Transit, 2022(S1): 148.
- [16] 谢汉生,满朝翰,商一帆. 地铁主要能耗影响因素及节能措施分析研究[J]. 现代城市轨道交通, 2013(4): 65.
- [17] XIE Hansheng, MAN Chaohan, SHANG Yifan. Analysis on main influencing factors of metro energy consumption and energy saving measures[J]. Modern Urban Transit, 2013(4): 65.
- [18] 朱伟鹏. 深圳地铁永磁同步牵引系统研究分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(4): 38.
- [19] ZHU Weipeng. Research and analysis of permanent magnet synchronous traction system for Shenzhen Metro[J]. Modern Urban Transit, 2021(4): 38.
- [20] 李梁,张卓杰,孙瑶,等. 双碳背景下城轨车辆绿色低碳技术应用与研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 27.
- [21] LI Liang, ZHANG Zhuojie, SUN Yao, et al. Application and research of green and low-carbon technology for urban rail vehicles under the 'dual carbon' background[J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 27.
- [22] 李蔚,刘高峰,赵思哲,等. 基于不同速度控制模式的列车驾驶策略优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2169.
- [23] LI Wei, LIU Gaofeng, ZHAO Sizhe, et al. Research on the optimization of train driving strategy based on different speed control modes[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8): 2169.
- [24] 革新,张玉召,黄志鹏. 基于再生制动能利用的高铁列车运行图优化[EB/OL]. (2022-12-15) [2023-03-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1401.N.20221214.1513.006.html>.
- [25] GE Xin, ZHANG Yuzhao, HUANG Zhipeng. Optimization of high-speed train timetable based on regenerative braking energy utilization[EB/OL]. (2022-12-15) [2023-03-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1401.N.20221214.1513.006.html>.

(收稿日期:2023-03-16)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao.umt1998.com