

# 基于国外经验的城市轨道交通牵引供电系统发展路径研究

胡 姬 凌 晨 苏靖棋 刘 硕

(铁科院(北京)工程咨询有限公司, 100081, 北京)

**摘 要** [目的]在当前城市轨道交通智能智慧化、绿色低碳化的发展背景下,牵引供电系统作为城市轨道交通的“心脏”,其升级换代对于实现城市轨道交通的绿色智慧发展至关重要,有必要对牵引供电系统未来的发展路径展开研究,以推动其技术革新与产业升级。[方法]总结德国、日本、法国等国外典型国家在优化轨道交通牵引供电系统配置、新能源利用、数字信息化等方面的前沿技术和创新成果;从推广牵引供电系统创新成果应用,加大新能源在牵引供电系统中的应用,以及建立智能化牵引供电系统管理平台等3个维度出发,探讨我国城市轨道交通牵引供电系统的创新发展路径。[结果及结论]提出的城市轨道交通牵引供电系统创新发展路径,可推动实现牵引供电系统升级换代,进一步助力城市轨道交通绿色化、智慧化发展。

**关键词** 城市轨道交通;牵引供电系统;发展路径;国外经验

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.024

## Research on the Development Path of Urban Rail Transit Traction Power Supply System Based on Foreign Experience

HU Ji, LING Chen, SU Jingqi, LIU Shuo

(Beijing Engineering Consulting Co., Ltd. of CARS, 100081, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] In the context of the current urban rail transit towards intelligent, green and low-carbon development, upgrading the traction power supply system, the "heart" of urban rail transit, is of crucial importance for realizing the green and smart development of urban rail transit. Therefore, it is necessary to conduct research on the future development path of the traction power supply system so as to promote its technological innovation and industrial upgrading. [Method] The cutting-edge technologies and innovative achievements of typical foreign countries, such as Germany, Japan and France in optimizing the configuration of rail transit traction power supply system and utilizing new energy and digital informatization are summarized. The innovative development path of urban rail

transit traction power supply system in China is explored from three dimensions, namely promoting the application of innovative achievements, increasing the application of new energy, and establishing an intelligent management platform. [Result & Conclusion] The proposed innovative development path for urban rail transit traction power supply system can promote the upgrading of traction power supply system and further contribute to the green and intelligent development of urban rail transit.

**Key words** urban rail transit; traction power supply system; development path; foreign experience

## 0 引言

随着全球城市化的快速发展,城市轨道交通(以下简称“城轨”)作为解决城市交通问题的重要手段,其建设和运营规模不断扩大。截至2023年12月31日,中国内地累计开通城轨的城市达59个,总运营里程达11 232.65 km<sup>[1]</sup>。

与此同时,随着科技的快速进步以及全球对绿色发展的高度关注,城轨的绿智融合时代已经到来。2020年3月12日,中国城市轨道交通协会发布了《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》,旨在推动城轨行业的智能化发展;2020年12月,欧盟出台《可持续和智能交通战略》,提出2050年前要实现交通运输系统减排90%的目标;2021年10月,中国共产党中央委员会、中华人民共和国国务院先后发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030年前碳达峰行动方案》,明确了我国实现“碳达峰、碳中和”的时间表、路线图,同时也对城轨行业绿色低碳发展产生深远影响;2022年8月18日,中国城市轨道交通协会发布了《中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案》,对绿色城轨发展的具体行动提出指导。上述发布文件均表明“绿智融合”是城轨发展的新趋势。

牵引供电系统作为城轨的核心组成部分,其运行效率与能耗水平直接关系到整个行业的可持续发展<sup>[2-4]</sup>。据统计,牵引供电系统的能耗在整个行业的占比高达 50%,这一比例突显了牵引供电系统节能降耗的迫切性和重要性<sup>[5]</sup>。在全球绿色、低碳、可持续发展的大趋势下,牵引供电系统的技术创新和升级换代成为行业的焦点。基于此,本文总结国外典型国家在牵引供电系统领域的前沿技术和创新成果,从推广牵引供电系统创新成果应用,加大新能源在牵引供电系统中的应用,建立智能化牵引供电系统管理平台等多个方面探讨牵引供电系统的创新发展路径,以期为我国牵引供电系统的升级换代和城轨的绿色化、智慧化发展提供有益参考。

## 1 国外典型国家牵引供电技术经验

在轨道交通牵引供电系统领域,国外一些发达国家已经取得了显著的技术成果,本文对德国、日本、法国等 3 个国家轨道交通行业牵引供电系统发展的前沿技术和创新成果进行了总结分析。

### 1.1 德国牵引供电系统技术

1) 优化牵引供电系统配置。德国铁路股份公司(以下简称“德铁”)所有列车都配备了制动能量回收功能,当列车制动时,电动机充当发电机,将动能转换为电能,然后馈送回供电线路。通过不断提高制动能量回收比例,实现制动能量的高效回收利用。

2) 新能源利用。当前,德国轨道交通 30% 以上的电能来自于新能源,在新能源消纳方面已实现规模化。德铁正努力将牵引电流完全转换为可再生能源电力。在德国,长途列车已经 100% 使用绿色电力,短途客运铁路和货运铁路有待进一步进行电气化改造。对于非牵引设备,德铁正进一步扩大使用绿色电力的车站数量。德铁提出:到 2025 年,其将在德国的所有仓库、办公楼和车站使用 100% 可再生能源;到 2030 年,将牵引供电中绿色电力占比提高至 80%;到 2038 年,牵引供电将 100% 来自绿色电力<sup>[6]</sup>。

3) 数字信息化。近年来,德铁针对电气化轨道交通牵引供电监控和运维需求,采用 3D 建模、专家系统、人工智能分析等技术,融合视频监控、智能巡检、环境监测、安全防范等子系统,为牵引供电系统集中监控和运维提供支撑。通过实施数字化技术

减少列车停靠时间,提升运输效率,从而降低能源使用量。

### 1.2 日本牵引供电系统技术

1) 优化牵引供电系统配置。日本轨道交通通过开发电压自补偿技术,引入超导输电系统等创新技术不断提高牵引供电系统的能效、稳定性和可靠性。2022 年,日本铁路东海公司(以下简称“JR 东海公司”)开发了 N700S 型电压自补偿技术,当接触网供电发生电流相位迟滞和电压降现象时,该技术可利用车载设备实现接触网供电的稳压以及车上电压自补偿,从而抑制迟滞现象以及接触网电压降的发生,达到降低能源消耗的目的。此外,铁道综合技术研究所开展了在运营线路上引入超导输电系统的相关研究,其开发的超导输电系统在线缆材料方面使用冷却时电阻为零的超导材料,输电时不产生输电损耗,从而有效提高输电效率<sup>[7]</sup>。

2) 新能源利用。日本轨道交通注重新能源机车的研发。2022 年,JR 东海公司推出了日本首列氢能源测试列车 HYBARI,计划在 2030 年开始投入商业运营;2024 年,日立铁路公司推出新型四模混合动力城际列车,即电力、内燃、内燃和电池混合动力,以及纯电池牵引列车,混合动力驱动模式可在减速和制动过程中进行能量回收,支持再生驱动,与内燃动力列车相比,可减少高达 83% 的碳排放。

3) 数字信息化。日本轨道交通采用先进的数字化监测与控制系统、运行能耗模拟系统等,以提升供电系统的智能化水平。早在 2014 年,日立铁路公司就规划开发了集成车载系统和轨旁设备的轨道交通能量管理系统,通过收集车辆和牵引电网信息,调节线路列车发车时间和运行曲线,从而进一步减少列车能耗。2021 年,日本铁道综合技术研究所开发了一种可模拟和预测大多数类型列车运行能耗的列车运行能耗模拟器,该模拟器可根据指定的区间运行时间绘制接近列车实际运行方式的列车运行曲线,并对相关能耗进行评价,从而达到优化列车运行曲线的目的<sup>[8]</sup>。

### 1.3 法国牵引供电系统技术

1) 优化牵引供电系统配置。SNCF(法国国营铁路公司)推广并广泛实施节能驾驶技术,同时采用具有再生制动以及空气动力学性能的 TGV-M 型高速列车,以实现节能减排。节能驾驶技术充分利用了轨道线路的特性和列车的动力性能,在下坡路段利用动能回收,减少上坡时的动力消耗,可将能

耗降低约 10%。此外,SNCF 计划于 2025 年投入新型 TGV-M 高速列车取代已使用 30 年的高速列车,新型列车改进了电气设备、再生制动及空气动力学性能,可帮助减少能源消耗 20%。

2) 新能源利用。SNCF 通过试验各种替代能源,以减少对传统化石燃料的依赖。2021 年,SNCF 在 15 列 Regiolis 型列车上使用了一种由 100% 产自法国油菜籽制成的生物燃料 B100,其产生的温室气体排放比柴油少 60%;同时,SNCF 正在研究使用 HVO(可再生氢化植物油)作为替代能源,HVO 是一种低碳燃料,通过加工植物油、牛油或使用后的食用油等脂类获得。SNCF 提出,至 2026 年将可再生能源在其牵引能源中的占比提升至 40%~50%<sup>[9]</sup>。

3) 数字信息化。SNCF 一直注重轨道交通数字化和智能化建设。2015 年,SNCF 推出数字化 SNCF 项目,引入智能列车控制系统,该系统与牵引供电系统紧密集成,能够实时获取供电设备的运行状态、能耗状况及性能数据,从而不断调整列车的运行速度、牵引力等参数,以实现最优能耗和性能。

## 2 我国牵引供电系统发展路径

### 2.1 推广牵引供电系统创新成果应用

在我国城轨设备系统中,牵引供电系统最早实现了国产化、自主化。近年来,随着城轨的不断发展,牵引供电系统在永磁牵引电机、双向变流装置、专用轨回流等方面取得创新发展。

1) 永磁牵引电机。永磁牵引电机无须励磁线圈和励磁电流,具有结构简单、效率高、加速能力强、启动特性好、无噪声等优点,从而可实现显著的节能效果。根据测算,采用永磁牵引电机可实现节能 20% 以上。

2) 双向变流装置。双向变流装置在实现整流功能的同时,兼顾实现逆变回馈、无功补偿等功能,具有体积小、容量大、稳压效果好等优点,可实现节能 15% 以上。

3) 专用轨回流技术。专用轨回流技术能够从根本上解决城轨杂散电流泄漏及腐蚀问题,具有减少牵引变电所布点、增大牵引所间距、提高轨道系统施工效率等诸多优势。采用专用轨回流技术,列车车体、车轮及钢轨均被隔离而不带电,进一步增强了列车运行的安全性和稳定性。

当前,这些创新成果总体还处于局部应用阶段,未能实现全面推广。为充分发挥这些创新成果

在推动行业节能减排方面的作用,全面推广十分必要。牵引供电系统创新成果的推广应用需要得到行业内各方的共同推动和重视,具体包括以下几个方面:①运营单位作为系统的使用者,应在选择牵引供电系统时更加重视创新技术的应用;②设计院作为系统的核心,应主动推动牵引供电系统创新成果的应用,并将其纳入设计规范和标准中;③高校作为科研和教学机构,应将牵引供电系统的创新成果纳入教材和课程中,培养相关专业人才;④牵引供电系统的厂家应加大研发力度,不断推出更加先进和可靠的产品和解决方案。只有各方共同努力、密切协作,才能推动牵引供电系统相关创新成果在行业内的全面推广和应用,实现城轨行业的可持续发展。

### 2.2 加大新能源在牵引供电系统中的应用

从德国、日本、法国等国外典型国家关于牵引供电系统的研究方向来看:各国都在积极探索如何将新能源发电技术,如太阳能、风能等,有效地整合到铁路牵引供电系统中;同时,也在重点研发氢能、燃料电池等清洁无污染原料作为机车的动力源。当前,我国光伏、风电资源丰富,截至 2022 年 12 月,全国风电装机容量约 3.65 亿 kW,光伏发电装机容量约 3.93 亿 kW<sup>[10]</sup>,将新能源发电技术应用到轨道交通中具有良好的经济效益和社会效益。

加大新能源在牵引供电系统中的应用包括以下几个关键方面:①加强对太阳能、风能、氢能等新能源发电技术的研发和创新,提升新能源发电的效率和稳定性,使其能够更好地满足城轨的电力需求;②对新能源接入技术、并网控制策略等进行深入研究,确保新能源发电设备能够安全、稳定地接入牵引供电系统,实现电能的可靠供应;③将储能设备集成到牵引供电系统中,在新能源发电不足时提供电力支持,确保城轨的正常运行。

### 2.3 建立智能化牵引供电系统管理平台

由本文分析可知,国外典型国家均在加快技术和产业布局,加大对大数据、能量管理系统、智能变电所、智能运维等的研究。利用现代信息技术和人工智能技术,建立智能化的牵引供电系统管理平台,通过对新能源发电数据、牵引供电数据等进行实时监测和分析,实现新能源发电与牵引供电的智能调度和优化管理。

建立智能化牵引供电系统管理平台需注意以下要点:



1) 采用统一的标准和接口,各系统平台之间若采用不同的数据格式、通信协议和接口标准,会导致信息孤岛现象的出现,严重制约数据的共享与整合,因此,需要建立一套全国统一的标准和接口体系,明确数据的格式、编码、传输方式等,确保不同系统之间的信息能够无缝对接和交互。

2) 加强系统之间的互联互通,包括网络层面和业务层面的互联互通,确保不同系统之间的网络连接稳定可靠以及业务流程的跨系统协同,从而提高整体运行效率。

3) 加强行业内的合作与交流,通过建立行业联盟或合作机制,共同制定标准、研发新技术、推广应用等,推动整个行业智能化信息管理系统的进步和发展。

### 3 结语

牵引供电系统的创新发展是城轨行业可持续发展的关键所在。本文总结德国、日本、法国等国外典型国家在牵引供电系统领域的前沿技术和创新成果,结合我国实际情况进行技术创新和升级换代,从推广牵引供电系统创新成果应用,加大新能源在牵引供电系统中的应用,建立智能化牵引供电系统管理平台等3个维度探讨牵引供电系统的创新发展路径,从而实现城市轨道交通行业的绿色低碳化、智能智慧化及可持续发展。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2023年城市轨道交通运营数据统计分析[EB/OL]. (2023-12-07) [2024-04-01]. [https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/yunlifexi/202312/t20231207\\_3963882.html](https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/yunlifexi/202312/t20231207_3963882.html).  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical analysis of urban rail transit operation data in 2023[EB/OL]. (2023-12-07) [2024-04-01]. [https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/yunlifexi/202312/t20231207\\_3963882.html](https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/yunlifexi/202312/t20231207_3963882.html).
- [2] 王忻, 吉祥雨, 韩博衍, 等. 城市轨道交通低碳节能技术下牵引供电系统仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 79.  
WANG Xin, JI Xiangyu, HAN Boyan, et al. Simulation analysis of traction power supply system under urban rail transit low-carbon energy-saving technologies[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(10): 79.
- [3] 燕振刚, 田广辉, 陈显志. 城市轨道交通牵引供电系统专用轨回流技术综述[J]. 现代城市轨道交通, 2024(1): 52.  
YAN Zhengang, TIAN Guanghui, CHEN Xianzhi. Overview of a dedicated rail return current technology for traction power supply systems in urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2024

- (1): 52.
- [4] 陈昕, 杨立新, 王财华, 等. 双向变流技术在轨道交通牵引供电系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 145.  
CHEN Xin, YANG Lixin, WANG Caihua, et al. Engineering application of bidirectional converter technology in rail transit traction power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(8): 145.
- [5] 丁树奎. 牵引供电系统在绿色城轨建设中关键问题的思考与建议[J]. 城市轨道交通, 2023(10): 42.  
DING Shukui. Thoughts and suggestions on key problems of traction power supply system in green urban rail construction[J]. China Metros, 2023(10): 42.
- [6] 曹孙喆. 德国铁路公司碳中和路径[EB/OL]. (2023-03-08) [2024-04-01]. [https://mp.weixin.qq.com/s/uf3gz\\_ybC-kR68-LAyxKPn8g](https://mp.weixin.qq.com/s/uf3gz_ybC-kR68-LAyxKPn8g).  
CAO Sunzhe. Deutsche bahn's carbon neutrality path[EB/OL]. (2023-03-08) [2024-04-01]. [https://mp.weixin.qq.com/s/uf3gz\\_ybC-kR68-LAyxKPn8g](https://mp.weixin.qq.com/s/uf3gz_ybC-kR68-LAyxKPn8g).
- [7] 佚名. 日本旨在降低铁路供电损耗的超导技术应用[J]. 现代城市轨道交通, 2022(8): 142.  
Anon. Application of superconducting technology in Japan aimed at reducing the power supply loss of railways[J]. Modern Urban Transit, 2022(8): 142.
- [8] 佚名. 日本基于列车运行能耗模拟器的节能技术效果预测[J]. 现代城市轨道交通, 2022(7): 112.  
Anon. Forecasting of power saving technology effect based on train operation power simulator in Japan[J]. Modern Urban Transit, 2022(7): 112.
- [9] 蔚蓝轨迹 Rail. 法国国铁环保能源“PlaneTER”战略持续推动中, 电池列车明年底开始运营[EB/OL]. (2023-02-09) [2024-04-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/8QyLBDECIWFtUT1hXlqTKg>.  
Blue Trail Rail. The French national railway's 'PlaneTER' environmental energy strategy is continuously being promoted, and battery trains will start operating at the end of next year[EB/OL]. (2023-02-09) [2024-04-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/8QyLBDECIWFtUT1hXlqTKg>.
- [10] 国家能源局. 关于2022年度全国可再生能源电力发展监测评价结果的通报[EB/OL]. (2023-09-07) [2024-04-01]. [https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c\\_1310741874.htm](https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c_1310741874.htm).  
National Energy Administration. Notice on the monitoring and evaluation results of national renewable energy power development in 2022 [EB/OL]. (2023-09-07) [2024-04-01]. [https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c\\_1310741874.htm](https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c_1310741874.htm).

• 收稿日期:2024-04-23 修回日期:2024-06-27 出版日期:2025-01-10  
Received:2024-04-23 Revised:2024-06-27 Published:2025-01-10  
• 通信作者:胡姬,工程师,2436286007@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license