

# 城市轨道交通牵引供电系统双向变流装置 设计方案及综合效益

康崇皓<sup>1</sup> 周文卫<sup>2</sup> 胡剑强<sup>1</sup>

(1. 常州地铁集团有限公司, 213001, 常州; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

**摘 要** [目的] 目前双向变流装置在我国城市轨道交通(以下简称“城轨”)牵引供电系统中处于推广阶段, 存在多种配置方案且有实际应用, 需综合评估各方案优劣, 统一技术标准, 同时进行全生命周期效益分析, 为工程应用提供决策依据。[方法] 基于双向变流装置在设备功能、直流牵引供电能力、综合节能、电能质量等方面的优势, 从用房面积、设备投资、电能质量、经济效益及可靠性等方面, 对我国现有的 5 种双向变流装置配置方案进行技术经济比选, 给出推荐配置方案。以某城轨正线为例, 分析了双向变流装置在节能、无功补偿、杂散电流防护等方面的全生命周期综合效益。[结果及结论] 经综合比选, 双向变流装置推荐采用 1 套二极整流机组 + 1 套双向变流机组方案, 其全生命周期成本最低。预计该城轨正线 20 年全生命周期总成本减少 256.8 万元/km。

**关键词** 城市轨道交通; 牵引供电系统; 双向变流装置; 设计方案; 综合效益

**中图分类号** U231.8

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.01.049

## Design Scheme of Bidirectional Converter Device in Urban Rail Transit Traction Power Supply System and Comprehensive Benefits

KANG Chonghao<sup>1</sup>, ZHOU Wenwei<sup>2</sup>, HU Jianqiang<sup>1</sup>

(1. Changzhou Metro Group Co., Ltd., 213001, Changzhou, China; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

**Abstract** [Objective] At present, the bidirectional converter device in the traction power supply system of urban rail transit (hereinafter referred to as "urban rail") in China is in the promotion stage, and there exist multiple configuration schemes with practical applications. It is necessary to comprehensively evaluate the pros and cons of each scheme, unify the technical standards, and simultaneously conduct a benefit analysis of the device whole life cycle, so as to provide a basis for decision-making in engineering applications. [Method] Based on the advantages of the bidirectional converter device in terms of equipment function, DC traction power supply capability,

comprehensive energy saving, and power quality, etc., and considering factors such as floor area, equipment investment, power quality, economic benefits, and reliability, a technical and economic comparison and selection of the existing five configuration schemes for the bidirectional converter device in China are carried out, and a recommended configuration scheme is proposed. In the case study of a certain urban rail main line, the comprehensive benefits of the bidirectional converter device in the whole life cycle in terms of energy saving, reactive power compensation, and stray current protection are analyzed. [Result & Conclusion] Through comprehensive comparison and selection, the scheme of one set of diode rectifier unit plus one set of bidirectional converter unit is recommended for the bidirectional converter device, which has the lowest cost in its whole life cycle. Adopting this scheme, it is estimated that the 20-year total life cycle cost of the above-mentioned urban rail main line will be reduced by 2.568 million yuan/km.

**Key words** urban rail transit; traction power supply system; bidirectional converter device; design scheme; comprehensive benefit

传统城市轨道交通(以下简称“城轨”)直流牵引供电系统采用 24 脉波二极管整流技术, 存在牵引网电压波动较大, 再生制动能量无法充分利用, 牵引供电系统内部节能困难等问题<sup>[1]</sup>。

在中压逆变回馈装置大规模应用的基础上, 随着 IGBT(绝缘栅双极晶体管)大功率电力电子器件的技术进步和成本进一步降低, 宁波、无锡、重庆、绍兴等城市自 2016 年开展了双向变流装置的工程应用探索和实践; 中国城市轨道交通协会 2020 年印发的《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》和 2022 年印发的《中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案》均将双向变流技术作为成熟的节能技术全面推广应用。双向变流技术已成为直流牵引供电系统的重要发展趋势<sup>[2]</sup>。

## 1 双向变流装置优缺点分析

双向变流装置是在目前整流机组 + 中压逆变回馈装置的基础上,基于 PWM(脉冲宽度调制)技术,使设备可以分别在整流和逆变两种状态下工作,即采用 1 套具备牵引和再生制动能量吸收两种功能的设备,可实现其与列车牵引、制动特性的完美匹配。

### 1.1 双向变流装置优点分析

#### 1.1.1 设备功能全面,设备种类和用房面积减少

1) 列车牵引时,双向变流机组向列车供电,具备牵引整流功能。

2) 列车制动时,多余的制动能量通过双向变流机组直接反馈至中压网络,供其他负载使用,具备制动能量逆变回馈功能,可以取消车载制动电阻或地面吸收装置,实现能量双向流动。

3) 具备无功补偿功能,提高系统功率因数。双向变流装置具备功率因数任意可调的能力,可有效解决中压网络非高峰时段功率因数偏低的问题,从而取代主变电所专用的无功补偿装置 SVG(静止无功发生器)。

#### 1.1.2 直流牵引供电能力提升

1) 稳定牵引机组出口电压,减少直流网压波动。双向变流装置输出功率较小时,可以采用牵引稳压特性输出,减少直流网压波动;双向变流装置输出功率较大时,可以采用下垂特性输出,由相邻牵引所双向变流装置补充输出不足的能量。

2) 主动抬升直流牵引网电压。双向变流装置可以设定稳压目标值,一般而言可设定至 1 730 V 左右,高于常规二极管整流的直流空载电压 1 650 V。

3) 减少功率穿越,降低钢轨电位。双向变流装置通过稳压功能,基本杜绝越区供电问题,减少牵引电流在接触网和钢轨上越区传输,实现列车就近取流,有效降低钢轨纵向压降,从而降低钢轨对地电位<sup>[3]</sup>。

4) 降低杂散电流泄漏。钢轨对地电位降低后,钢轨对地泄漏的杂散电流相应减小,从而减小杂散电流防护成本。

#### 1.1.3 综合节能提升

1) 再生制动能量回馈节能。双向变流装置具备列车再生制动能量逆变回馈功能,综合全日行车计划,双向变流装置节能预计能达到牵引用电的

11% ~ 14%<sup>[4]</sup>。

2) 双向变流装置通过主动控压功能提高牵引网压,从而减少牵引电流,降低接触网和走行轨的牵引网电能损耗约 15%。

3) 双向变流装置通过降低网压波动,限制变电所越区供电,从而减少牵引电流在接触网和走行轨的穿越,降低接触网和走行轨的牵引网电能损耗<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.4 电能质量提升

双向变流装置采用 IGBT 技术来实现整流和逆变功能,与 24 脉波二极管整流相比从源头上进一步减少了谐波含量。谐波电流主要为 IGBT 开关频率附近的谐波电流,即 60 次以上的高次谐波,因而双向变流装置产生中、低次谐波更少,对系统影响也越小<sup>[6]</sup>。

### 1.2 双向变流装置缺点分析

与传统二极管整流相比,双向变流装置在城轨牵引供电系统的应用,目前尚存在如下缺点:

1) 设备可靠性略低。常规二极管整流的应用及可靠性经过了数十年长期验证。双向变流装置采用 IGBT 电力电子器件,控制回路和辅助回路众多,因而设备可靠性略低于二极管整流机组。双向变流装置的可靠运行还取决于环境温度、湿度、粉尘等条件的良好配合。

2) 设备自身损耗略高。在不考虑牵引变压器效率的前提下,常规二极管整流器在额定功率时的效率为 99.7%,损耗约为 0.3%;双向变流器额定功率时的效率为 98% ~ 99%,损耗约为 1% ~ 2%。

3) 双向变流装置核心技术及产品平台来源于高铁及城轨车辆牵引变流系统,技术较成熟,牵引变流系统在高铁与城轨中得到了广泛应用和验证<sup>[7]</sup>;双向变流装置在城轨牵引供电系统工程中的应用案例略少,尚处于推广应用阶段,因而设备价格高;随着双向变流装置的大规模应用,设备价格将逐步降低。

综上,采用双向变流装置既可以提高城轨牵引供电系统的能力和综合效益,降低运营成本,也可以节省电能资源需求,减少碳排放量,同时对于牵引供电设备的创新发展具有引领作用。该技术的发展和推广应用具有良好的经济效益和社会效益。

## 2 双向变流装置配置方案比选

据调研,目前我国双向变流装置有 5 个配置方

案,如图 1 所示。各配置方案的部分应用情况如表 1 所示。

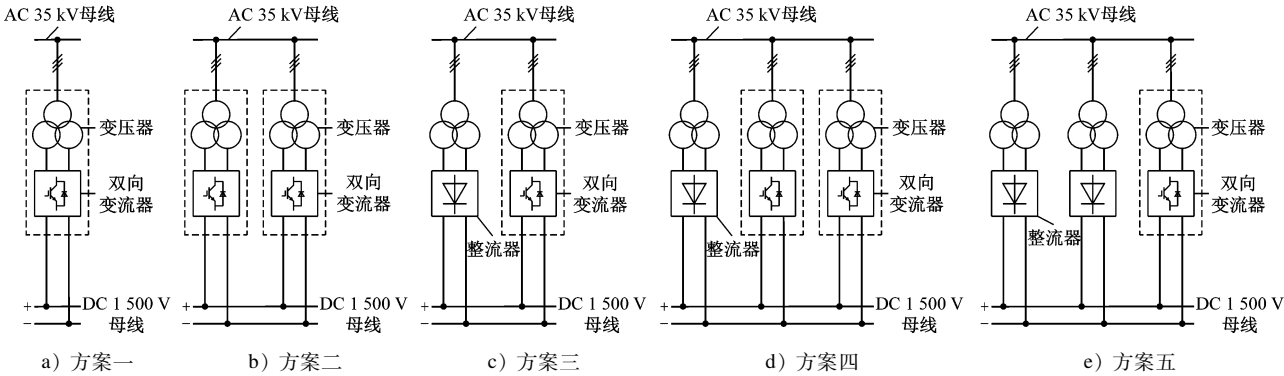


图 1 我国双向变流装置配置方案

Fig.1 Configuration scheme of bidirectional converter device in China

表 1 双向变流装置配置方案的应用

Tab.1 Application of bidirectional converter device configuration scheme

方案	配置方案	应用案例	备注
方案一	0 + 1	重庆轨道交通 4 号线二期工程	线路已运营
方案二	0 + 2	北京地铁 M101 线、南京地铁 9 号线一期工程、南京地铁 11 号线一期工程	在建线路
方案三	1 + 1	无锡地铁 S1 线	线路已运营
方案四	1 + 2	宁波轨道交通 6、7、8 号线	在建线路
方案五	2 + 1	宁波轨道交通 5 号线、杭绍城际铁路	线路已运营

注:配置方案“0 + 1”表示“0 套整流机组 + 1 套双向变流机组”,余同。

方案四和方案五均采用 3 套牵引机组,方案四相对于方案二,方案五相对于方案三各增加 1 套整流机组,这不仅导致设备和土建用房投资增加,还增大了设备发热量,因而从节约工程投资角度考虑,暂不予采用。

考虑到直流牵引供电系统的可靠运行,GB 50157—2013《地铁设计规范》第 15.2.6 条规定:“牵引变电所应设置 2 套牵引整流机组,当 1 套牵引整流机组退出运行,另一套牵引整流机组具备运行条件时宜继续运行。”双向变流装置的设备可靠性略低于常规二极管整流机组,方案一采用 1 套双向变流机组,进一步降低了直流牵引供电系统运行的可靠性。

因而,城轨牵引供电系统双向变流装置配置方案主要针对方案二和方案三进行综合比选,见表 2。

以方案三为基准,方案二初始设备投资大,直流供电质量高,电网侧电能质量好,节约电费能力强,供电可靠性略低;方案二节约电费能力虽有提高,但无法在全生命周期内覆盖增加的设备投资,因而方案二全生命周期成本较高。综上,从全生命

周期成本考虑,推荐采用方案三。

3 双向变流装置综合效益分析

某城轨正线全长为 30.90 km,全为地下线,共设 25 座车站,平均站间距约为 1.25 km,全线速度目标值为 80 km/h;初期采用 4 辆编组 B 型车,近期采用 4/6 辆编组混跑 B 型车,远期采用 6 辆编组 B 型车。牵引供电系统采用直流 1 500 V 接触网供电和走行轨回流方式。全线设 2 座主变电所,其中正线设 13 座牵引降压混合变电所,见图 2。以该工程为例,分析双向变流装置“1 + 1”配置方案的综合效益。

3.1 节能

根据该工程全日行车计划,仿真计算正线各牵引变电所双向变流装置在初、近、远期每日节约用电量,如图 3 所示。

采用双向变流装置时节约用电量估算,如表 3 所示。

按照设备寿命 20 年考虑,预计节约用电量 1.084 亿 kWh,节约电费 7 587 万元;扣除双向变流

表 2 双向变流装置配置方案比选

Tab. 2 Comparison of configuration schemes for bidirectional converter device

项目	方案二	方案三
配置方案	0 + 2	1 + 1
用房面积	基准	略小
牵引所成本	500 万元	320 万元
设备发热量	基准	略低
直流供电质量	直流网压波动小,杂散电流泄漏少,在牵引网接触线上的损耗小	
主变电所侧电能质量	谐波电流主要为 60 次以上的高次谐波,主变电所注入电网的谐波低于 24 脉波整流	当双向变流机组出力不足或退出运行时,二极管整流机组为 12 脉波运行,主变电所注入电网的谐波高于 24 脉波整流;其他工况同方案二
节约电费能力	2 套机组容量一般可满足列车单次制动容量,因而列车制动能量基本能被吸收。1 套机组容量无法满足列车单次制动容量,预计约 10% 制动电能无法被吸收,从而增加闸瓦磨损 <sup>[8]</sup> 。可以将 2 套机组设置于两段中压交流母线,增加牵引用电负荷和动照负荷对牵引制动能量的吸收,减少列车制动能量对电网的返送,使得节约电费能力比方案三高 7% ~ 9% <sup>[4,9]</sup> 。综上,方案二比方案三节约电费能力提高 17% ~ 19%	基准
供电可靠性	略低	基准
全生命周期成本	高	基准

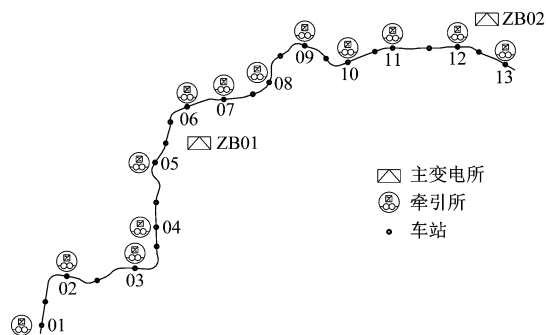


图 2 某城轨正线牵引供电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of traction power supply system of a certain urban rail main line

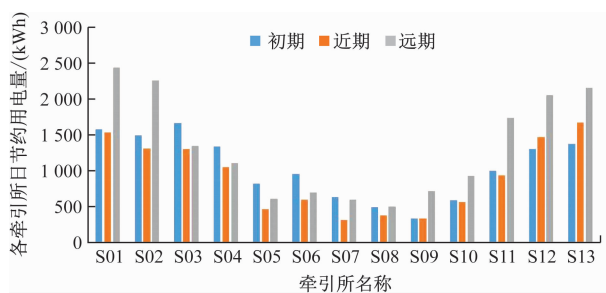


图 3 某城轨正线各牵引变电所每日节约用电量

Fig. 3 Daily electricity savings of each traction substation on a certain urban rail main line

装置增加的设备投资 2 340 万元,全寿命周期预计可节约电费 5 247 万元。

表 3 双向变流装置节约用电量估算

Tab. 3 Estimation of electricity savings by adopting bidirectional converter devices

项目	节约用电量/ (万 kWh/年)	节约电费/ (万元/年)	投资回收 年限/年
初期	497.6	348.3	6.7
近期	437.5	306.2	7.6
远期	628.3	439.8	5.3

### 3.2 无功补偿

我国城轨牵引供电系统通常在主变电所设置 SVG 或 SVG + 并联电抗器等专用无功补偿装置,虽满足了电力局功率因素考核要求,但集中无功补偿方案未实现中压网络无功功率的就地平衡,增加了电压损失和功率损耗<sup>[10]</sup>。

双向变流装置在白天运营期间,城轨牵引供电系统功率因数较高,主要负担牵引整流和逆变回馈功能;在夜间停运期间,系统已不再需要牵引整流和逆变回馈功能,这也正是系统向电网反送无功功率的时间<sup>[11]</sup>。城轨牵引供电系统的容性无功功率主要由中压网络产生,其量值基本固定。利用双向变流装置调节系统无功功率切实可行。双向变流装置补偿容量可在 0 至额定功率中任意调节。

该工程主变电所每段 35 kV 母线设置 1 套 6 Mvar SVG 作为无功补偿;根据双向变流装置配



置情况,其无功补偿容量基本可以覆盖 2 座主变电所的 SVG 安装容量,因而具备取消主变电所 4 套 6 Mvar SVG 的条件,减少设备投资约 800 万元;考虑 SVG 土建面积,合计减少工程投资约 1 100 万元。取消或核减 SVG 安装容量需以电力局意见为准。双向变流装置无功补偿容量见表 4。

表 4 双向变流装置无功补偿容量

Tab. 4 Reactive power compensation capacity of bidirectional converter

主牵引变电所	SVG 安装容量/ Mvar	双向变流装置无功补偿 容量/Mvar
ZB01 I 段	6	4 × 2. 25
ZB01 II 段	6	4 × 2. 25
ZB02 I 段	6	3 × 2. 25
ZB02 II 段	6	2 × 2. 25

注:表中“4 × 2. 25”表示 4 套双向变流装置,每套装置的无功补偿容量为 2. 25 Mvar;余同。

### 3.3 对杂散电流防护的影响

双向变流机组的出口电压抬升,牵引网电压有所提高,供电传输距离增加,全线牵引变电所数量理论上可减少<sup>[12]</sup>。但依据 GB 55033—2022《城市轨道交通工程项目规范》第 2. 3. 6 条:“结构钢筋对地电位高峰小时正向偏移平均值应取 0. 1 V”,此时杂散电流防护成本成为牵引变电所布点的重要制约因素。

当结构钢筋对地电位高峰小时正向偏移平均值大于 0. 1 V 时,一般采取钢轨并联电缆,增大道床杂散电流收集网截面,道床增设铜排等措施。以该工程为例,正线设 13 座牵引变电所,道床杂散电流收集网截面面积取 5 000 mm<sup>2</sup>,钢轨采用并联 1 根/多根截面面积 400 mm<sup>2</sup> 铜芯电力电缆,可满足 GB 55033—2022 对杂散电流的防护要求。在二极管整流机组和双向变流机组的条件下,每行钢轨需并联电力电缆根数对比,见表 5。

杂散电流防护成本对比见表 6。由表 6 可见:与二极管整流机组方案相比,采用双向变流机组方案后,可节约杂散电流防护成本 1 588 万元。

### 3.4 小结

按照双向变流装置“1 + 1”配置方案,该工程抵扣成本后,20 年全生命周期预计可节约电费 5 247 万元,减少主变电所 SVG 设备及土建投资 1 100 万元,减少杂散电流防护投资 1 588 万元,合计减少

表 5 杂散电流防护方案对比

Tab. 5 Comparison of stray current protection schemes

牵引区段名称	牵引间距/m	每行钢轨并联电力电缆根数/根	
		二极管整流机组	双向变流机组
S01—S02	2 805	2	1
S02—S03	3 147	3	2
S03—S04	2 627	2	0
S04—S05	2 929	2	1
S05—S06	2 964	2	1
S06—S07	1 622	0	0
S07—S08	2 180	0	0
S08—S09	2 585	1	0
S09—S10	2 186	0	0
S10—S11	2 026	0	0
S11—S12	2 793	2	1
S12—S13	2 226	0	0

表 6 杂散电流防护成本对比

Tab. 6 Comparison of stray current protection costs

方案	钢轨并联电缆长度/km	工程投资/万元
二极管整流机组	80. 5	3 220
双向变流机组	40. 8	1 632

7 935 万元,即正线减少 256. 8 万元/km。

## 4 结论

1) 双向变流装置功能齐全,具备牵引整流、逆变回馈、无功补偿等功能,可以实现直流牵引供电能力、综合节能及电能质量等方面的提升。

2) 从全生命周期成本考虑,双向变流装置推荐采用“1 + 1”配置方案,即 1 套二极管整流机组 + 1 套双向变流机组方案。

3) 以某城轨正线为例,双向变流装置采用“1 + 1”配置方案,该线路正线 20 年全生命周期总成本减少 256. 8 万元/km。双向变流技术的发展和推广应用具有良好的经济效益和社会效益。

## 参考文献

- [1] 王海,李占赫,白雪莲,等.城市轨道交通柔性直流牵引供电技术应用研究[J].电气化铁道,2023,34(1):64.  
WANG Hai, LI Zhanhe, BAI Xuelian, et al. Study on application of flexible DC traction power supply technology on urban rail transit[J]. Electric Railway, 2023, 34(1): 64.
- [2] 叶润峰,魏应冬,李占赫,等.城市轨道交通柔性直流牵引供电系统钢轨电位快速计算方法[J].中国电机工程学报,

- 2023, 43(14): 5311.
- YE Runfeng, WEI Yingdong, LI Zhanhe, et al. Fast calculation of rail potential of flexible DC traction power supply system for urban rail transit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5311.
- [3] 杜贵府, 张栋梁, 王崇林, 等. 直流牵引供电系统电流跨区间传输对钢轨电位影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 129.
- DU Guifu, ZHANG Dongliang, WANG Chonglin, et al. Effect of traction current transmission among power sections on rail potential in DC mass transit system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 129.
- [4] 卫巍, 韩志伟, 张钢. 再生能馈装置在北京地铁工程中的应用及节能效果分析[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(4): 107.
- WEI Wei, HAN Zhiwei, ZHANG Gang. Application of energy feedback traction power supply device and analysis on energy conservation effect for Beijing subway[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(4): 107.
- [5] 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.
- [6] 史丹. 地铁供电系统中双向变流装置设计方案对比研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 61.
- SHI Dan. Comparative study on design schemes of bidirectional converters in the subway power supply system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(2): 61.
- [7] 刘建, 刘志刚. 新一代智慧型城市轨道交通牵引供电系统的创新理念与实践[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(1): 129.
- LIU Jian, LIU Zhigang. Innovative ideas and practice of new generation intelligent urban rail transit traction power supply system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(1): 129.
- [8] 张海申. 城市轨道交通再生制动能量回馈装置容量选择研究[J]. 现代城市轨道交通, 2017(5): 10.
- ZHANG Haishen. Capacity selection of regenerative braking energy feedback device for transit[J]. Modern Urban Transit, 2017(5): 10.
- [9] 靳佩跃. 基于双向变流器牵引供电系统主接线方案研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(增刊2): 155.
- JIN Peiyue. Research on main wiring scheme of traction power supply system based on bidirectional converter[J]. Electric Railway, 2023, 34(S2): 155.
- [10] 向往, 廖钧. 利用双向变流装置的分布式无功补偿系统方案研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3): 91.
- XIANG Wang, LIAO Jun. On scheme of distributed reactive power compensation system using a bidirectional converter[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 91.
- [11] 周伟志. 城市轨道交通供电系统无功补偿容量分析[J]. 机车电传动, 2015(4): 68.
- ZHOU Weizhi. Analysis of reactive power compensation capacity in urban mass transit power supply system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2015(4): 68.
- [12] 李红波, 丁荣军, 张超, 等. 城市轨道交通智慧牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2021(3): 1.
- LI Hongbo, DING Rongjun, ZHANG Chao, et al. Smart traction power grid of urban rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(3): 1.
- 收稿日期:2024-05-23 修回日期:2024-07-04 出版日期:2025-01-10  
Received:2024-05-23 Revised:2024-07-04 Published:2025-01-10  
· 通信作者:康崇皓,高级工程师,40310206@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

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

