

双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用

王 毛¹ 郑月宾² 宋 雷¹ 杨雅银¹ 辛红东³ 何俊文⁴ 梅桂芳²

(1. 徐州地铁集团有限公司, 221116, 徐州; 2. 西安许继电力电子有限公司, 710075, 西安;

3. 中铁十二局集团电气化工程有限公司, 030024, 天津; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘 要 [目的]为了解决城市轨道交通供电系统存在的再生能量利用和网压波动大的问题,提出一种基于双向变流供电技术的牵引系统供电方案。[方法]介绍了双向变流器的主电路拓扑及其运行逻辑;提出了独立供电和混合供电两种模式下的双向变流器控制特性,并设计了恒压和下垂相结合的外特性曲线;以徐州地铁 2 号线为例,进行了车辆段试车线单列车 AW0(空载)牵引及制动工况下的独立供电和混合供电试验,以及正线 12 列车正常运行工况下的独立供电和混合供电试验,测试了列车运行性能指标和双向变流器性能指标。[结果及结论]双向变流器可根据线路上的列车运行工况,自动、平滑地切换整流及逆变运行模式,与列车的牵引及制动工况自动适应。采用双向变流供电能够显著改善列车网压的波动,避免网压低于 1 500 V 的工况,改善了列车的牵引运行特性。

关键词 城市轨道交通;供电系统;双向变流器

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.011

Application of Bidirectional Converters in Urban Rail Transit Power Supply Systems

WANG Mao¹, ZHENG Yuebin², SONG Lei¹, YANG Yayin¹, XIN Hongdong³, HE Junwen⁴, MEI Guifang²

(1. Xuzhou Metro Group Co., Ltd., 221116, Xuzhou, China; 2. Xi'an XJ Power Electronics Technology Co., Ltd., 710075, Xi'an, China; 3. China Railway 12th Bureau Group Electrification Engineering Co., Ltd., 030024, Tianjin, China; 4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

Abstract [Objective] To address the challenges about renewable energy utilization and significant grid voltage fluctuations in urban rail transit power supply system, a power supply solution based on bidirectional converter technology for traction system is proposed. [Method] The main circuit topology and operational logic of bidirectional converters are introduced. The control characteristics of bidirectional converters under two operating modes of independent power supply and hybrid power

supply are presented, and the external characteristic curves combining constant voltage and droop are designed. Using the example of Xuzhou Metro Line 2, tests are conducted for both independent power supply and hybrid power supply under traction and braking conditions for a single train AW0 (unloaded) on the depot test track. Same tests are also performed under normal operation conditions with 12 trains on the mainline. Performance indicators for train operation and bidirectional converters are evaluated. [Result & Conclusion] Bidirectional converters can automatically and smoothly switch between rectification and inversion modes based on the train on-line operation conditions, automatically adapting to the train traction/braking conditions. The use of bidirectional converters in power supply significantly ameliorates train grid voltage fluctuation, preventing working conditions below 1 500 V and enhancing train traction characteristics.

Key words urban rail transit; power supply system; bidirectional converter

城市轨道交通线路普遍采用直流牵引供电方式,由二极管整流机组为列车提供供电电源。整流机组在可靠性、价格等方面优势明显,但也存在无法吸收利用列车再生反馈能量、输出直流电压不可控等缺点^[1]。双向变流器采用全控型 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)器件和 PWM(脉冲宽度调制)控制技术,具备逆变和整流双向能量变换的能力,既可在逆变模式下吸收利用列车的再生反馈能量,也可在整流模式下为列车提供牵引能量。此外,双向变流器还具备灵活的直流电压调整性能。

针对二极管整流技术存在的无法吸收利用列车的再生反馈能量、输出电压不可控等技术问题,本文基于双向变流器的牵引供电技术,分析了双向变流器的运行逻辑和控制特性,并在徐州地铁 2 号线车辆段和正线分别开展了单列车运行试验和全线多列车运行试验,测试了双向变流器独立供电、双向变流器与二极管整流机组混合供电工况下的

列车运行性能指标和双向变流器性能指标。本文研究验证了将双向变流供电技术应用于城市轨道交通牵引供电系统的可行性,可为城市轨道交通牵引供电技术的发展提供新的技术指导和解决思路。

1 双向变流器工作原理

1.1 主电路拓扑

双向变流器主要由直流母线电容、逆变桥、滤波器组成。直流母线电容用于维持直流侧电压的稳定,6 个 IGBT 组成三相逆变桥,通过不同的导通时序和脉冲宽度控制输出功率的流向和大小。LCL 型滤波器用于滤除输出电流的谐波。

1.2 运行逻辑

双向变流器通过检测和判断直流电压来决定运行模式:当直流电压低于牵引启动电压时,双向变流器进入整流运行模式;当直流电压高于回馈启动电压时,双向变流器进入逆变运行模式^[2]。

通过控制逆变桥口的电压矢量实现整流模式和逆变模式的切换,同时逆变桥口的电压矢量还可间接控制交流侧电流的幅值和相位。当双向变流器整流运行时,交流电流与电网电压同相位;当双向变流器逆变运行时,交流电流与网压反相位;当双向变流器补充无功功率时,交流电流滞后(感性)或超前(容性)电网电压 90° 。

2 双向变流器控制特性

2.1 变电所主接线

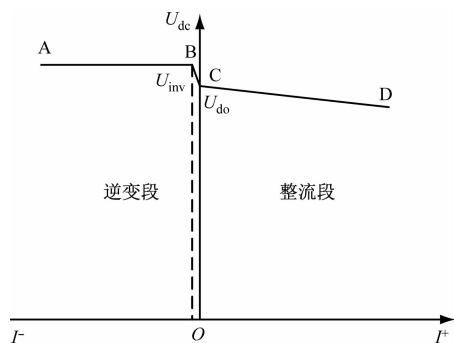
徐州地铁 2 号线全长 24.15 km,全线共设车站 20 座,其中牵混所 10 座。每个牵混所设置 2 套整流机组和 1 套双向变流装置。双向变流装置的交流侧通过 35 kV 中压开关柜连接到整流机组同段 35 kV 母线,直流侧通过 1 500 V 开关柜连接到 1 500 V 母线^[3]。

整流机组的额定容量为 $2 \times 2\ 200\text{ kW}$,具备 150% 过载运行 2 h,300% 过载运行 1 min 的能力;双向变流装置的额定容量为 2 000 kW,具备 150% 过载运行 2 h,250% 过载运行 1 min 的能力。双向变流装置既可以仅作为逆变器运行在回馈模式,也可以作为双向变流器运行在牵引回馈双向模式。根据整流机组的投入和退出情况,双向变流装置可分为独立供电和混合供电两种控制特性。

2.2 独立供电模式下的外特性

当所有牵混所的整流机组退出,双向变流装置

独立供电时,双向变流器的外特性曲线如图 1 所示。整流段采用下垂控制,以实现相邻牵混所之间功率的均衡分配;逆变段采用恒压控制,以实现网压的稳定控制^[4]。外特性曲线 ABC 段:当列车惰行时,双向变流器处于空载状态,其直流电压为 U_{d0} (对应图 1 曲线上的 C 点);当列车制动时,双向变流器的直流电压有所升高,再生反馈能量优先被邻近的列车吸收利用(对应图 1 曲线上的 C→B 段);多余的再生能量使双向变流器的直流电压继续升高,当达到逆变启动电压 U_{inv} 时,双向变流器进入逆变模式,在容量范围内保持直流电压恒定(对应图 1 曲线上的 B→A 段)。特性曲线 CD 段:当列车牵引运行时,双向变流器进入整流模式,整流输出功率越大,直流电压越低(对应图 1 曲线上的 C→D 段)。



注: U_{dc} 为双向变流器直流电压; U_{inv} 为逆变启动电压; U_{d0} 为双向变流器空载电压; I 为变流器输出的直流电流; A、B、C、D 为双向变流器最大逆变电流点、空载至逆变状态切换点、空载至整流状态切换点、最大整流电流点。

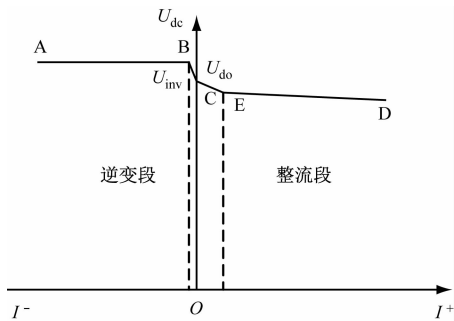
图 1 独立供电模式下的双向变流器外特性曲线

Fig. 1 External characteristic curve of bidirectional converter in independent power supply mode

2.3 混合供电模式下的外特性

当部分牵混所的整流机组退出,双向变流装置与未退出的整流机组构成混合供电时,双向变流器的外特性曲线如图 2 所示。整流段采用分段下垂控制,其下垂斜率与整流机组相同,以使双向变流器承担与原整流机组相同的牵引功率。逆变段采用恒压控制,以实现网压的稳定控制。外特性曲线 ABC 段:ABC 段特性与独立供电模式下的外特性完全相同。外特性曲线 CED 段: CED 段特性的下垂斜率与整流机组相同, CE 段下垂斜率为 15%, ED 段下垂斜率为 3%^[5]。

在独立供电和混合供电两种模式下,双向变流器 U_{d0} 的整定范围为 1 500 ~ 1 650 V,逆变启动电压



注: E 为整流斜率切换点。

图2 混合供电模式下的双向变流器外特性曲线

Fig.2 External characteristic curve of bidirectional converter in hybrid power supply mode

U_{inv} 的整定范围为 1 650 ~ 1 800 V, 逆变电压启动值的整定需要结合列车再生能量被相邻车的吸收比例、列车闸瓦制动情况来综合考虑。当双向变流器独立供电运行时, 其下垂斜率整定范围为 0 ~ 3%, 可根据运行需要进行调整。

3 单列车试验

在徐州地铁 2 号线车辆段试车线进行单列车试验。在 AW0 (空载) 条件下, 分别测试了双向变流器在独立供电、混合供电两种模式下的电气性能。

3.1 列车参数

徐州地铁 2 号线列车采用 6 节编组 (4 动 2 拖, B2 型车), 列车最高运行速度为 80 km/h, 空车质量为 206 t。列车采用轻量化设计, 取消了全部车载电阻配置, 依靠地面双向变流装置吸收多余制动功率。当列车直流电压高于 1 880 V 时, 空气制动系统启动投入。

列车的牵引特性: 当列车运行速度为 0 ~ 57 km/h 时, 列车采用恒转矩控制, 牵引力恒定为 244 kN; 当列车运行速度为 57 ~ 80 km/h 时, 列车采用自然特性控制。列车的制动特性: 当列车运行速度为 80 ~ 5 km/h 时, 列车采用恒转矩控制, 制动力恒定为 232 kN; 当列车运行速度小于 5 km/h 时, 列车采用空气制动。

根据牵引特性计算的列车最大牵引功率为 4 293 kW; 根据制动特性计算的列车最大制动功率为 4 640 kW。牵引传动系统效率取为 0.9。双向变流器的峰值功率为 5 000 kW, 能够满足 AW0 条件下, 单列车运行速度为 80 km/h、100% 牵引及制动工况的试验配合要求。

3.2 独立供电模式

车辆段的 2 套整流机组退出运行, 双向变流装置运行在牵引回馈双向模式, 试车线上仅保留 1 列试验列车。双向变流器的空载电压设为 1 650 V, 下垂斜率设为 0, 逆变启动电压设为 1 720 V, 对运行速度为 80 km/h 的单列车进行 100% 牵引及制动工况试验。

独立供电模式下的列车牵引及制动测试参数如表 1 所示。双向变流器的容量能够满足列车的最大牵引、制动功率要求, 列车最低网压为 1 581 V, 最高网压为 1 771 V。在牵引及制动工况下, 双向变流器的电流谐波分别为 2.2%、1.7%, 功率因数均为 0.99。在试验过程中, 双向变流器的整流/逆变模式能够与列车的牵引/制动工况自动适应, 模式切换平滑稳定, 列车运行平稳。

表 1 独立供电模式下列车牵引及制动测试参数

Tab.1 Test parameters of train traction and braking in independent power supply mode

工况	项目	最大功率/ kW	最低或最 高网压/V	电流 谐波/%	功率 因数
牵引	列车	4 050	1 581	—	—
	牵混所双向 变流器	4 380	1 647	2.2	0.99
制动	列车	4 495	1 771	—	—
	牵混所双向 变流装置	4 200	1 720	1.7	0.99

注: 牵引工况对应最低网压, 制动工况对应最高网压; 余类同。

3.3 混合供电模式

车辆段的 2 套整流机组投入运行, 双向变流器运行在牵引回馈双向模式, 空载电压设为 1 650 V, 逆变启动电压设为 1 720 V, 对运行速度为 80 km/h 的单列车进行 100% 牵引及制动工况试验。

混合供电模式下的列车牵引及制动测试参数如表 2 所示。列车最低网压为 1 505 V, 最高网压为 1 767 V, 双向变流器的最大整流功率为 2 400 kW, 整流机组的最大整流功率为 2 050 kW。在试验过程中, 双向变流器的整流/逆变模式能够与列车的牵引/制动工况自动适应, 模式切换平滑稳定, 列车运行平稳。当列车处于牵引模式时, 双向变流器与整流机组共同向列车供电; 当列车处于制动模式时, 双向变流器自动切换到逆变模式, 切换过程平滑。

3.4 对比分析

分别对比了双向变流装置独立供电、双向变流

表 2 混合供电模式下列车牵引及制动测试参数

Tab.2 Test parameters of train traction and braking in hybrid power supply mode

工况	项目	最大功率/kW	最低或最高网压/V
牵引	列车	4 055	1 505
	牵混所双向变流装置	2 400	1 588
	整流机组	2 050	1 588
制动	列车	4 543	1 767
	牵混所双向变流装置	4 130	1 720
	整流机组	—	—

装置与整流机组混合供电、整流机组供电 3 种模式下的列车网压情况,如图 3 所示。当整流机组供电时,列车最低网压为 1 460 V;当双向变流装置与整流机组混合供电时,列车最低网压为 1 505 V;当双向变流装置独立供电时,列车最低网压为 1 581 V。由此可知,采用双向变流器能够有效提高牵引网的最低电压。

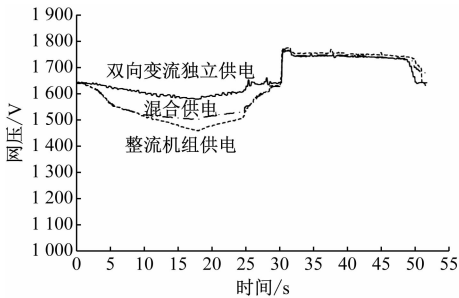


图 3 3 种供电模式下的列车网压对比

Fig.3 Comparison of train grid voltage under three power supply modes

4 全线试验

在徐州地铁 2 号线正线上进行全线试验,上线列车数量为 12 列,行车间隔为 8 min 45 s,在列车正常运行情况下,开展双向变流器独立供电和混合供电两种模式下的试验。

4.1 独立供电模式

全线各牵混所的整流机组退出运行,双向变流器运行在牵引回馈双向模式,空载电压设为 1 650 V。为了提高相邻牵混所之间牵引功率的均衡度,将双向变流器的下垂斜率设为 3%。为了提高再生能量被相邻列车吸收的比例,将逆变启动电压设为 1 750 V。

独立供电模式下徐州地铁 2 号线各牵混所最大牵引功率及最低直流电压如表 3 所示。徐州地铁 2 号线全线各牵混所的牵引功率分布较为均衡,线路北段(客运北站站—科技城站)的最大平均牵引功率为 1 387 kW,线路南段(大龙湖站—新城区东站)的最大平均牵引功率为 3 355 kW。各牵混所的电压控制效果较好,全线牵混所的最低直流电压为 1 572 V。独立供电模式下的列车网压及运行速度曲线如图 4 所示。列车的网压波动较小,最低网压为 1 557 V,最高网压为 1 750 V。

表 3 独立供电模式下徐州地铁 2 号线各牵混所最大牵引功率及最低直流电压

Tab.3 Maximum traction power and minimum DC voltage of each traction substation along Xuzhou Metro Line 2 in independent power supply mode

牵混所名称	最大牵引功率/kW	最低直流电压/V
客运北站站	1 388	1 625
李沃站	1 770	1 616
九龙湖站	794	1 634
彭城广场站	1 332	1 625
中心医院站	1 928	1 617
科技城站	1 110	1 631
百果园站	3 514	1 580
大龙湖站	3 762	1 578
汉源大道站	3 772	1 572
新城区东站	2 532	1 605

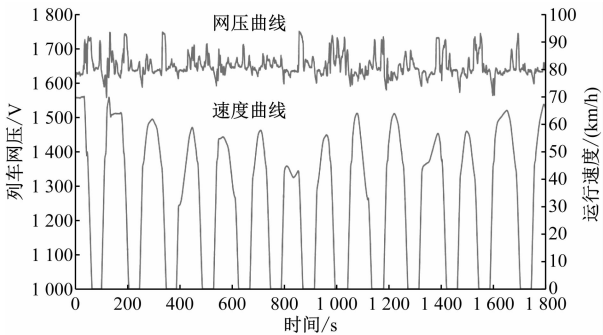


图 4 独立供电模式下的列车网压及运行速度曲线

Fig.4 Train grid voltage and operating speed curves in independent power supply mode

4.2 混合供电模式

客运北站站、九龙湖站、中心医院站、百果园站、汉源大道站 1[#]及 2[#]整流机组退出运行,其余 5 个站 1[#]及 2[#]整流机组投入运行。全线双向变流装置运行在牵引回馈双向模式,空载电压设为 1 650

V。为了提高再生能量被相邻列车吸收的比例,逆变启动电压设为 1 750 V。

混合供电模式下徐州地铁 2 号线各牵混所最大牵引功率及最低直流电压如表 4 所示。徐州地铁 2 号线各牵混所的电压控制效果较好,全线牵混所的最低网压为 1 586 V。混合供电模式下的列车网压及运行速度曲线如图 5 所示。列车的网压波动较小,最低网压为 1 562 V,最高网压为 1 759 V。

表 4 混合供电模式下徐州地铁 2 号线各牵混所最大牵引功率及最低直流电压

Tab.4 Maximum traction power and minimum DC voltage of each traction substation along Xuzhou Metro Line 2 in hybrid power supply mode

车站	最大牵引功率/kW	最低直流电压/V
客运北站站	2 296	1 609
李沃站	1 612	1 618
九龙湖站	658	1 637
彭城广场站	1 334	1 627
中心医院站	2 000	1 610
科技城站	1 282	1 619
百果园站	3 256	1 586
大龙湖站	2 196	1 618
汉源大道站	2 400	1 603
新城区东站	2 040	1 610

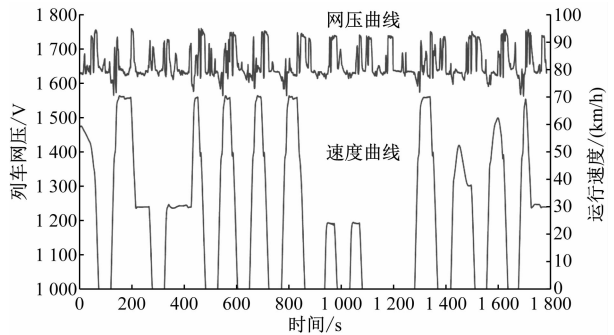


图 5 混合供电模式下的列车网压及运行速度曲线
Fig.5 Train grid voltage and operating speed curves in hybrid power supply mode

4.3 对比分析

为了验证双向变流器稳定网压效果,测试了双向变流器仅逆变运行,整流机组供电时的列车网压,将其结果作为试验对照组。整流机组供电下的列车网压及运行速度曲线如图 6 所示。该模式下,列车的网压波动较大,最低网压为 1 487 V,最高网压为 1 769 V。

综上所述,本文通过正线全线试验,验证了双向变流器在稳定列车网压方面的效果。双向变流器可将列车网压提高至 1 500 V 以上,能够显著改善列车的牵引性能。

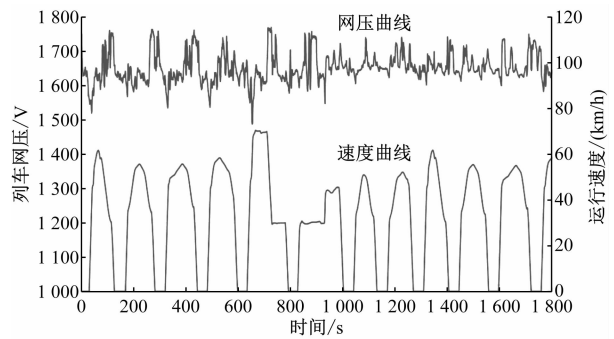


图 6 整流机组供电下的列车网压及运行速度曲线
Fig.6 Train grid voltage and operating speed curves in the power supply of rectifier unit

5 结语

本文基于双向变流器在城市轨道交通供电系统中的应用,介绍了双向变流器的主电路拓扑,分析了其运行逻辑和控制特性,提出了双向变流器独立供电和混合供电两种模式下的控制特性,并通过单列车试验、正线全线试验,验证了双向变流器用于城市轨道交通列车牵引供电和再生电能吸收利用的可行性。

试验结果表明:① 双向变流器可根据线路上的列车运行情况,自动、平滑地切换整流、逆变运行模式,与列车的牵引/制动工况自动适应,列车运行平稳;② 采用双向变流供电显著改善了列车网压的波动,避免了列车网压低于 1 500 V 的情况,能够显著改善列车的牵引特性。

参考文献

[1] 俞益,李辉,郑旺.城市轨道交通混合供电系统工作模式研究[J].城市轨道交通研究,2020,23(1):183.
YU Yi, LI Hui, ZHENG Wang. Working mode of hybrid power supply system for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 183.
[2] 陈琪,孙才勤,严长辉.长沙地铁 1 号线双向变流型再生电能吸收装置[J].电气化铁道,2017,28(3):21.
CHEN Qi, SUN Caiqin, YAN Changhui. Bidirectional converter type regenerated energy absorption device for Line 1 of Changsha Metro[J]. Electric Railway, 2017, 28(3): 21.

(下转第 68 页)

3) 在砂卵石地层中,不均匀系数、特征粒径、刀具刃角影响最大。磨损系数随着不均匀系数和特征粒径的增大而增大,且呈现出前期增大较快、后期增大趋势变缓的特点,砂卵石地层颗粒的不均匀系数、特征粒径与磨损系数之间存在幂函数关系。盾构刀具的磨损量整体随着刀具刃角的减小而减小。

参考文献

- [1] 李雪,周顺华,周俊宏. 复杂地层大直径泥水盾构刀具磨损规律分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 868.
LI Xue, ZHOU Shunhua, ZHOU Junhong. Cutter wearing analysis of large diameter slurry shield in complex stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 868.
- [2] 周建军,宋佳鹏,谭忠盛. 砂卵石地层地铁盾构盘形滚刀磨蚀性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊1): 31.
ZHOU Jianjun, SONG Jiapeng, TAN Zhongsheng. Study on abrasive properties of shielded hob in subway shield of sandy gravel formation[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 31.
- [3] YE F, QIN N, GAO X, et al. Shield equipment optimization and construction control technology in water-rich and sandy cobble stratum; a case study of the first Yellow River metro tunnel undercrossing[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1.
- [4] 晏启祥,郑代靖,何川,等. 富水砂卵石地层地铁盾构施工若干问题及对策[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 713.
YAN Qixiang, ZHENG Daijing, HE Chuan, et al. Problems and countermeasures of metro shield construction in water-soaked sand and cobble stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 713.
- [5] 吴俊,袁大军,李兴高,等. 盾构刀具磨损机理及预测分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 109.
WU Jun, YUAN Dajun, LI Xinggao, et al. Analysis on wear mechanism and prediction of shield cutter[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 109.
- [6] 谭青,孙鑫健,夏毅敏,等. TBM 盘形滚刀磨损预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 54.
TAN Qing, SUN Xinjian, XIA Yimin, et al. A wear prediction model of disc cutter for TBM[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 54.
- [7] 柳培蕾,杨世强,白乐乐,等. 基于磨料磨损的盘形滚刀刀圈磨损模型[J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1782.
LIU Peilei, YANG Shiqiang, BAI Lele, et al. Wear model of disc hob cutter rings based on abrasive wear[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(15): 1782.
- [8] LI Y, DI H, YAO Q, et al. Prediction model for disc cutter wear of tunnel boring machines in sandy cobble strata[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(3): 1010.
- [9] ARCHARD J F. Surface topography and tribology[J]. Tribology, 1974, 7(5): 213.
- [10] 魏英杰. 北京无水砂卵石地层盾构刀具磨损机理及评价方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
WEI Yingjie. Study on mechanism and evaluation method of shield tool wear in Beijing waterless sand-pebble stratum[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [11] MOORE M A, KING F S. Abrasive wear of brittle solids[J]. Wear, 1980, 60(1): 123.
- 收稿日期:2022-02-22 修回日期:2022-04-11 出版日期:2024-02-10
Received:2022-02-22 Revised:2022-04-11 Published:2024-02-10
- 第一作者:李雪,副教授,jialixue521@163.com
通信作者:龚子邦,硕士研究生,gongzibang99@163.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
- 收稿日期:2021-08-04 修回日期:2021-10-08 出版日期:2024-02-10
Received:2021-08-04 Revised:2021-10-08 Published:2024-02-10
- 第一作者:王毛,高级工程师,1103435734@qq.com
通信作者:郑月宾,高级工程师,zhengyuebin0509@163.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
- (上接第 62 页)
- [3] 王靖满,黄书明. 城市轨道交通供电系统技术[M]. 上海:上海科学普及出版社, 2011.
WANG Jingman, HUANG Shuming. Power supply system technology of urban rail transit[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2011.
- [4] 赵正一,俞葆青,孔德卿,等. 城轨超级电容储能的容量配置和控制策略研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1558.
ZHAO Zhengyi, YU Baoqing, KONG Deqing, et al. Research on capacity configuration and control strategy of the super capacitor energy storage device for rail transit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1558.
- [5] 张俊婷. 基于 MATLAB/Simulink 的城市轨道交通交直流供电系统建模仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
ZHANG Junting. Modeling and simulation of AC/DC power supply system for urban rail transit based on MATLAB/Simulink[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.