

青岛地铁车辆辅助变流器异响和充电机欠压故障分析及对策

饶东杰¹ 刘海涛² 赵清良¹ 饶沛南¹ 周 帅¹ 李志杰¹
熊辉明¹ 刘呈宏¹ 罗嗣赓¹ 李泽庶¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 412001, 株洲; 2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 412001, 株洲//第一作者, 工程师)

摘要 对青岛地铁2号线正线运行期间的车辆辅助变流器异响和充电机中间电压欠压故障,通过软件监控、故障数据分析、现场测试、故障件测试分析等手段,确定其发生机理、原因,并给出解决措施,以消除其对正线运营的影响。

关键词 地铁车辆; 辅助变流器; 充电机; 异响故障; 欠压故障

中图分类号 U270.1⁺6; U270.38⁺1; TM46

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.048

Analysis and Countermeasures of Abnormal Sound of Auxiliary Converter and Under-voltage Fault of Charger in Qingdao Metro Vehicle

RAO Dongjie, LIU Haitao, ZHAO Qingliang, RAO Peinan, ZHOU Shuai, LI Zhijie, XIONG Huiming, LIU Chenghong, LUO Siling, LI Zeshu

Abstract Targeting the abnormal sound of auxiliary converter and the under-voltage fault of charger middle voltage of Qingdao Metro Line 2 during main line operation, through software monitoring, fault data analysis, on-site testing, failure component test analysis and other methods, the occurrence mechanism of the fault is identified. Solution measures are proposed to eliminate the influence on main line operation.

Key words metro vehicle; auxiliary converter; charger; abnormal sound fault; under-voltage fault

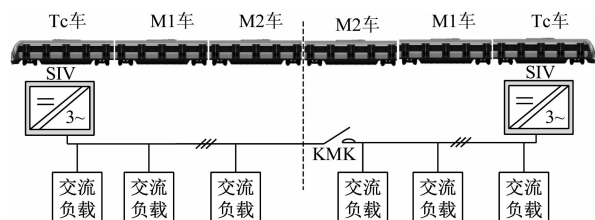
First-author's address Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., 412001, Zhuzhou, China

1 青岛地铁2号线列车辅助变流器的主电路拓扑

辅助变流器作为地铁列车核心装备之一,一般安装于车辆下部。其主要功能是将输入的 DC

1 500 V 或 DC 750 V 高压转换为三相 AC 380 V 电压和 DC 110 V 电压,并给列车交流负载和直流负载供电。其中,交流负载主要包括空调、空气压缩机、电加热和方便插座等;直流负载主要包括蓄电池、门控制系统、牵引辅助制动控制系统、广播、网络系统、直流照明等。

青岛地铁2号线(以下简为“2号线”)为6节编组B型车,采用第三轨受流器供电,供电网压为DC 1 500 V。每列列车共设置2台辅助变流器,采用扩展供电为全列列车交流负载供电。正常时每台辅助变流器为列车的3节车辆供电,若运行中1台辅助变流器故障,网络系统会给故障辅助变流器发送停机指令并断开其交流输出,同时给列车空调发送减载指令,同时控制AC 380 V交流母线上的扩展接触器吸合,并由另外1台辅助变流器将交流输出扩展至故障端的交流负载供电。整个系统扩展供电框图如图1所示。图1中,Tc位于列车车头,且在车下装载辅助变流器;M1和M2均位于列车中部,且在车下装载牵引变流器和牵引电机。Tc、M1和M2组成1个单元,并由1台辅助变流器供电。



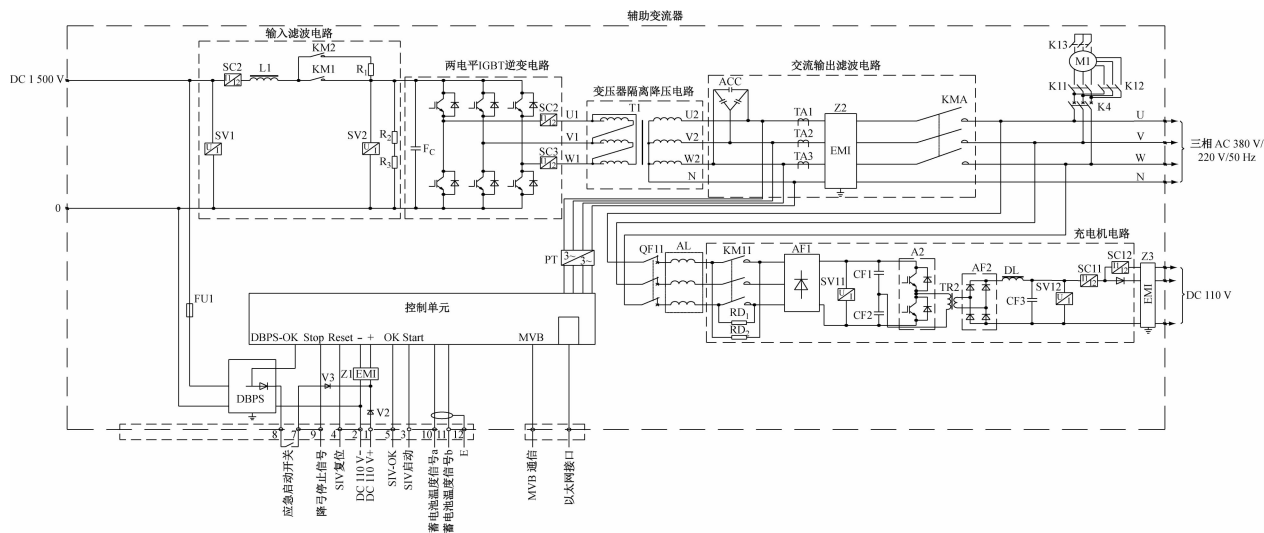
注:Tc为带司机室的拖车;M1和M2为有受流器的动车;SIV为辅助变流器;KMK为扩展接触器。

图1 2号线列车辅助变流器扩展供电的布置形式

Fig. 1 Layout of extended power supply for auxiliary converter of Line 2

2 号线辅助变流器的主电路拓扑如图 2 所示, 主要由输入滤波电路、二电平逆变电路、变压器隔离降压电路、充电机电路等构成。DC 1 500 V 输入高压经直流电抗器和直流电容器组成的 LC 滤波器(无源滤波器)滤波后, 送至两电平 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)逆变器逆变后输出 PWM(脉冲宽度调制)波交流电压, 再送入输出工频变压器进行电压

隔离、降压, 经三相交流滤波器滤波得到低谐波含量的三相正弦电压, 输出三相 AC 380 V(有效值)/50 Hz 电压, 从任何一相输出线与变压器的中性点之间均可得到单相 AC 220 V(有效值)电压。充电机从 AC 380 V 取电, 经过整流后, 再经过高频 DC/DC 隔离变换, 输出 DC 110 V 电压。



注: SV1 为输入网压传感器; L1 为直流电抗器; KM1 为短接接触器; KM2 为预充电接触器; R1 为预充电电阻; SV2 为直流电容电压传感器; R2、R3 为放电电阻; Fc 为直流电容器; SC2、SC3 为桥臂电流传感器; U1、V1、W1 为逆变电路输出的三相电压代号; T1 为工频变压器; U2、V2、W2、N 为变压器次边输出电压代号; ACC 为三相交流滤波电容; TA1、TA2、TA3 为三相交流输出电流互感器; Z2 为交流 EMI(电磁干扰)滤波器; KMA 为交流输出接触器; K4 为风机保护断路器; K11、K13 为风机高速控制接触器; K12 为风机低速控制接触器; M1 为冷却风机; U、V、W、N 为三相交流输出电压代号; PT 为三相交流输出电压互感器; QF11 为充电机保护断路器; AL 为充电机输入三相交流电抗器; KM11 为充电机短接接触器; RD1、RD2 为充电机预充电电阻; AF1 为充电机三相不控整流桥; SV11 为充电机中间电压传感器; CF1、CF2 为充电机中间支撑电容; A2 为充电机逆变半桥; TR2 为充电机高频变压器; AF2 为充电机单相不控整流桥; DL 为充电机输出滤波电抗器; CF3 为充电机输出滤波电容; SV12 为充电机输出电压传感器; SC11 为充电机输出电流传感器; SC12 为充电机蓄电池传感器; Z3 为直流 EMI 滤波器; FU1 为直流熔断器; DBPS 为应急启动电源; V2、V3 为二极管; Z1 为控制 EMI 滤波器; DBPS OK 为应急电源 OK 信号; Stop 为辅助变流器停机信号; Reset 为辅助变流器复位信号; OK 为辅助变流器 OK 信号; Start 为辅助变流器启动信号; MVB 为多功能车辆总线。

图 2 2 号线列车辅助变流器的主电路拓扑

Fig. 2 Main circuit topology of auxiliary converter of Line 2

2 号线从 2017 年底开通运营后, 总体运行良好, 但在 2019 年 6 月开始陆续出现几起辅助变流器异响故障。辅助变流器异响故障的同时会伴随充电机模块报出中间电压欠压故障(故障代号为 BILV), 且库内和正线均有发生。如果该故障发生库内, 影响相对较小, 需要启用备用车辆保障现场运营; 如果该故障发生在正线, 复位无效后就会启动扩展供电使车辆跑完单趟行程而下线。辅助变流器异响故障会给正线运营造成一定的负面影响。

2 辅助变流器异响和充电机欠压故障处理和分析

2.1 现场故障处理

其中 1 起典型故障为 2 号线 0207 车在 2019 年 7 月 23 日出库前发生异响, 同时司机室显示器报出充电机中间电压欠压故障, 对其复位后故障不消失, 之后对充电机模块进行了更换, 但更换后故障并未消除。更换充电机模块后重新启动辅助变流器, 站在辅助变流器所在的地板上能够感受到明显

的振动异响。最后怀疑是风机导致的异响。对风机进行更换,但更换后异响仍然存在。针对该类故障,株洲中车时代电气股份有限公司派技术人员赴现场进行排查。

2.2 故障详细分析

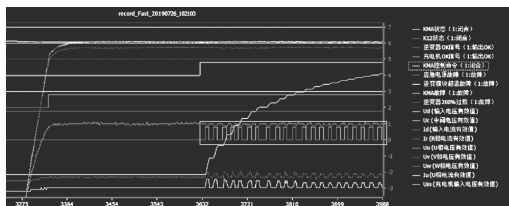
2.2.1 软件监视分析

对故障辅助变流器进行快速波形监测,发现每次异响时辅助变流器交流输出接触器(器件代号为 KMA)状态信号都存在跳变。如图 3 所示的典型波形,初步推测故障辅助变流器异响是由交流输出接触器频繁分合导致的。

重点关注辅助变流器状态信号(代号为 SIVOK)、交流输出接触器控制命令(代号为 KMAC)、交流输出接触状态信号(代号为 KMAS)等 3 个数字信号。交流输出接触器的控制逻辑如下:

当辅助变流器完成正常启动,变流器柜体内部电压变换器检测到交流输出接触器前端的三相输出电压 AC 380 V 正常后(SIVOK 置 1),控制单元会发送交流输出接触器吸合命令(KMAC 置 1)至交流输出接触器,通过其闭合给交流负载(包括充电机)供电,同时交流输出接触器会将其状态信号(KMAS 置 1)反馈至控制单元。如果交流输出接触器控制命令发出 3 s 后,未收到交流输出接触器正常的高电平状态(KMAS 置 1)反馈,控制单元会报出交流输出接触器卡分故障(故障代号为 KMAF)。

由图 3 可见,辅助变流器输出正常后,控制单元发出交流输出接触器吸合命令后,交流输出接触器的状态在 1 和 0 之间频繁跳变,说明交流输出接触器存在反复吸合和分断。因其吸合功率较大(达到 1 000 W),推测其反复吸合和分断导致了辅助变流器的异响,同时导致充电机报出中间电压欠压故障。但由于吸合和释放的时间间隔较短(<3 s),未达到交流输出接触器卡分的触发条件,故控制单元未报出交流输出接触器故障。



注:方框显示故障时刻交流输出接触器状态频繁跳变。

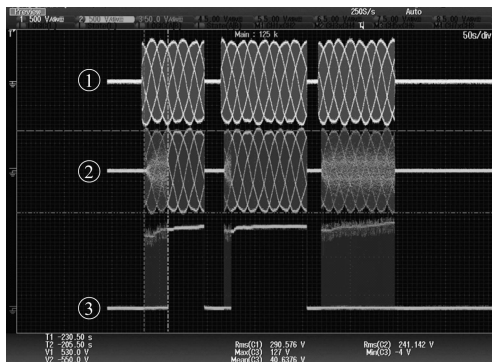
图 3 辅助变流器异响故障时刻波形截图

Fig. 3 Waveform of auxiliary converter at abnormal sound fault time

2.2.2 现场测试分析

2.2.2.1 故障交流输出接触器 KMA 测试分析

采用电压探头分别测试交流输出接触器 KMA 控制线圈电压、接触器前端 VW 两相之间线电压和接触器后端 WV 两相之间线电压,其电压波形如图 4~5 所示。



注:①为前端 VW 之间的线电压;②为后端 WV 之间的线电压;③为接触器 KMA 控制线圈两端电压。

图 4 故障交流输出接触器电压波形截图

Fig. 4 Voltage waveform of faulty AC output contactor

由图 4 可知,辅助变流器升靴给电 3 次,每次故障情况均类似。前 2 次当交流输出接触器 KMA 前端电压正常后,交流输出接触器 KMA 后端电压会由于控制线圈的频繁得失电而导致其后端输入电压需经过一段时间调整才会恢复到和交流输出接触器 KMA 前端电压一致;而第 3 次交流输出接触器 KMA 后端电压一直未恢复到和交流输出接触器 KMA 前端一致。

图 5 为交流输出接触器 KMA 频繁分合前、后两端的电压放大波形。由图 5 可见,交流输出接触器 KMA 前端的电压一直稳定输出 AC 380 V,但由于其直流控制线圈频繁得失电导致后端 AC 380 V 输出断续。在此期间,现场能感受到辅助变流器的异响。

2.2.2.2 故障交流输出接触器 KMA 更换前后对比测试分析

对故障交流输出接触器 KMA 更换后,重新对其进行测试分析,其电压波形如图 6~7 所示。

由图 6 可见,辅助变流器升靴给电 7 次,每次启动波形完全一致。当交流输出接触器 KMA 前端电压正常,且交流输出接触器 KMA 吸合后,交流输出接触器 KMA 后端输出电压和前端完全一致。交流输出接触器 KMA 控制线圈一直稳定在 115 V 左

右,未出现频繁得失电现象。

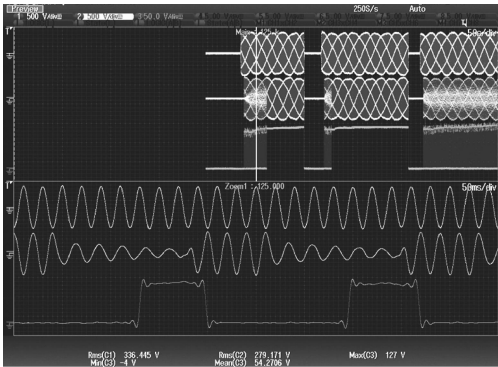


图 5 故障交流输出接触器电压放大波形截图

Fig. 5 Voltage amplification waveform of faulty AC output contactor

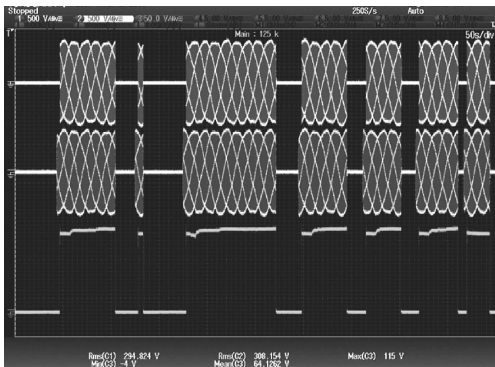


图 6 更换故障交流输出接触器后电压波形截图

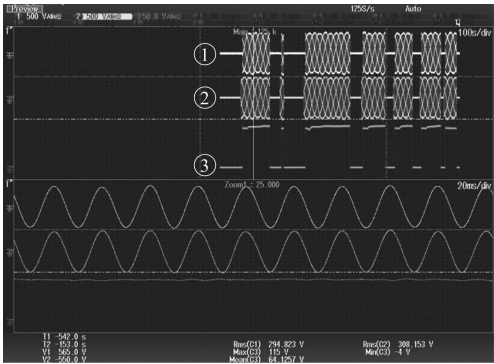
Fig. 6 Voltage waveform after replacing faulty AC output contactor

图 7 为接触器 KMA 正常吸合动作前后两端的电压放大波形。由图 7 可见,接触器 KMA 前、后端的电压波形完全一致,稳定输出 AC 380 V;其控制线圈电压也稳定在 DC 115 V 左右,未出现任何跌落。在此期间,辅助变流器再未出现任何异响。

2.2.3 故障器件返修分析

故障接触器 KMA 返回株洲中车时代电气股份有限公司后,在接触器试验室对其进行了相关测试分析,分析如下:

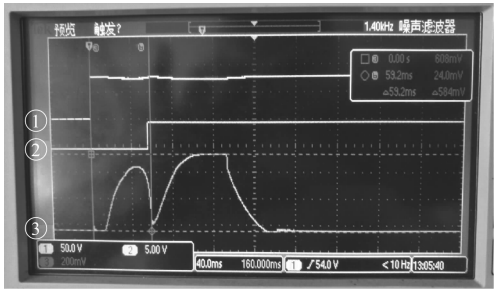
- 1)外观分析。外观检查无损伤,自身紧固件无松动,整体外观未见明显异常。
- 2)接触器动作测试。接触器控制端通过外接 DC 110 V 电源,控制接触器吸合和释放动作,接触器动作正常,其控制电压、电流波形如图 8 所示。
- 3)接触电阻测试。采用毫欧表测量接触器辅助触头接触电阻。通过接触器吸合状态测试,发现



注:①为前端 VW 之间的线电压;②为后端 VW 之间的线电压;③为接触器 KMA 控制线圈的两端电压。

图 7 更换故障交流输出接触器后电压放大波形截图

Fig. 7 Voltage amplification waveform after replacing faulty AC output contactor



注:①为控制线圈电压;②为主触头串入的电阻两端电压;③为接触器 KMA 线圈电流。

图 8 故障交流输出接触器的控制电压、电流及主触头状态测试截图

Fig. 8 Test of control voltage, current and main contact head state of faulty AC output contactor

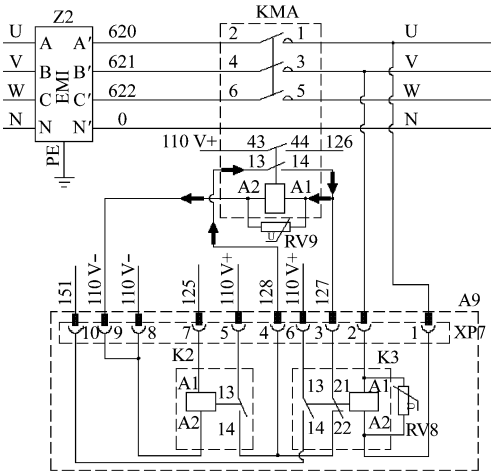
一侧代号为 43-44 的辅助常开触头的接触电阻为 25 mΩ,在正常范围(< 100 mΩ)内。但接触器另一侧代号为 13-14 的辅助常开触头接触电阻为无穷大,通过检查发现,代号为 13-14 的辅助常开触头未动作,存在异常。

4)异常辅助触头拆解分析。拆解代号为 13-14 的辅助触头盒的传动插销脱落。正常情况下,该传动插销应安装在辅助触头圆孔内(紧配合),辅助触头盒安装到接触器侧面后,传动插销伸入接触器本体推板方孔内,接触器吸合/释放动作时通过插销带动辅助触头动作。

3 辅助变流器异响和充电机欠压故障机理分析

通过上述分析,发现 2 号线辅助变流器异响和充电机欠压故障主要由接触器 KMA 失效导致的。

引起接触器工作失效的原因是辅助触头的传动插销脱落,其详细失效机理与接触器 KMA 的控制原理相关。如图 9 所示,接触器 KMA 的详细控制原理为:由于接触器 KMA 的线圈吸合功率较大,无法通过控制单元进行直接控制,控制单元通过中间继电器 K2 对接触器 KMA 进行间接控制;控制单元发出接触器控制命令后,中间继电器 K2 先得电,然后通过中间继电器 K2 的主常开触头闭合来为接触器 KMA 线圈供电,进而控制接触器 KMA 吸合;接触器 KMA 主触头吸合后会通过其代号 43-44 辅助常开触头的闭合将接触器状态反馈至控制单元,同时另一路通过代号 13-14 的辅助常开触头的闭合来实现线圈吸合自锁。



注:A、B、C、N 为 Z2 滤波器的交流输入的代号;A'、B'、C'、N' 为 Z2 滤波器的交流输出代号;A1、A2 为接触器 KMA 的线圈代号;RV9 为过压吸收电阻;A9 为接线端子排代号;K2 为中间继电器;K3 为小的交流接触器;RV8 为过压吸收电阻;XP7 指接线端子排代号。箭头所示为接触器线圈的自锁保持电路。

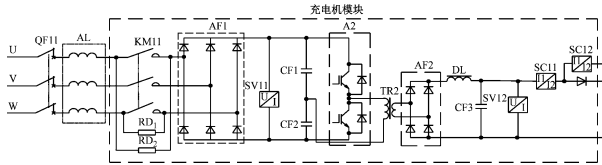
图 9 交流输出接触器 KMA 的控制电路图

Fig. 9 Control circuit diagram of AC output KMA contactor

接触器 KMA 的代号 13-14 辅助常开触头盒推杆上的传动插销脱落,导致代号 13-14 辅助常开触头不能动作闭合。该辅助常开触头在实际电路中串联于接触器 KMA 的线圈控制电路中,实现吸合自锁功能。若代号 13-14 辅助触头不能闭合,则线圈不能持续得电自锁,接触器 KMA 于是失电断开。这样控制单元又重新发送控制指令,造成接触器 KMA 反复吸合又分断,最终导致辅助变流器的异响以及充电机模块报出的中间电压欠压故障。

由图 10 所示的充电机主电路可见,由于充电机

输入连接在辅助变流器的交流输出后端,交流输出电压经过充电机的三相不控整流桥转换为中间直流电压。中间直流电压完全由三相输入电压决定。接触器 KMA 的反复吸合和分断最终导致充电机报出中间电压欠压故障。



注:AF1、AF2 为不控整流桥。

图 10 充电机电路原理图

Fig. 10 Diagram of charger circuit

4 辅助变流器异响和充电机欠压故障解决方案

综上所述,2 号线现场辅助变流器的异响,以及充电机模块报出的中间电压欠压均是由交流输出接触器 KMA 本身器件故障导致的。具体表现为:其代号 13-14 的辅助触头内部传动插销脱落,导致不能与主触头实现动作同步。由此可见,该故障与风机和充电机模块无关。将该故障件反馈接触器厂家,厂家针对该传动插销使用中偶发脱落和接触不良问题,制作了专门的夹具(见图 11)用于对该传动插销进行拉拔力和寿命测试,以筛选出隐患产品。经测试和筛选后的辅助触头未再出现 1 例类似故障。

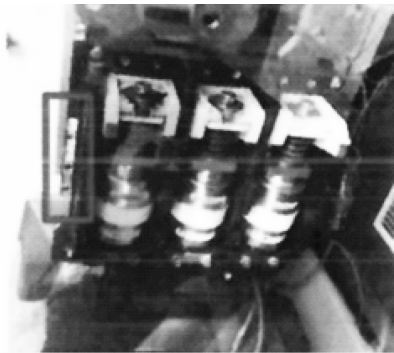


图 11 专用夹具对辅助触头进行拉拔力和寿命测试

Fig. 11 Drawing force and lifespan test of auxiliary contact head by special fixture

5 结语

本文针对 2 号线列车运行期间辅助变流器异响和充电机中间电压欠压故障,通过软件监视、故障

数据分析、现场对比试验、故障件返修测试及拆解分析等手段,结合故障发生机理,确定辅助变流器异响和充电机中间电压欠压故障为交流输出接触器 KMA 辅助触头的传动插销脱落导致。株洲中车时代电气股份有限公司联合厂家制定了相应的改进措施,即通过对交流输出接触器增加寿命测试和拉拔力测试筛选等手段,筛掉极少数不良品。整改措施实施后 2 号线现场再未出现类似故障,彻底消除了故障隐患,保证了轨道交通的正常运营服务。

参考文献

- [1] 赵清良,刘清,曾明高. 城轨地铁车辆辅助电源系统研究与发展[J]. 机车电传动,2012(1):52.
ZHAO Qingliang, LIU Qing, ZENG Minggao. The development and research of auxiliary power supply system of the metro vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(1):52.
- [2] 曾明高,严志勇,张晓,等. 地铁集成式辅助电源研制[J]. 机车电传动,2014(1):69.
ZENG Minggao, YAN Zhiyong, ZHANG Xiao, et al. Design of integrated auxiliary power supply for metro[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(1):69.

- [3] 刘清,王明,魏周艳,等. 地铁车辆辅助变流器平台设计[J]. 大功率变流技术,2015(1):43.
LIU Qing, WANG Ming, WEI Zhouyan, et al. Platform design of auxiliary converter for metro vehicle[J]. High Power Converter Technology, 2015(1):43.
- [4] 魏周艳,颜猛,刘清,等. 强迫风冷式地铁辅助变流器的噪声控制[J]. 大功率变流技术,2016(4):46.
WEI Zhouyan, YAN Meng, LIU Qing, et al. Noise control of forced air-cooled metro auxiliary converter[J]. High Power Converter Technology, 2016(4):46.
- [5] 赵清良,杨浩,谭绍军,等. 地铁车辆电传动系统标准化产品平台研制[J]. 现代城市轨道交通,2019(5):16.
ZHAO Qingliang, YANG Hao, TAN Shaojun, et al. Research and development of standardized product platform for electric drive system of metro vehicles[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(5):16.
- [6] 李志杰,王明,罗嗣棣,等. 城轨车辆辅助逆变器设计研究[J]. 现代城市轨道交通,2020(9):17.
LI Zhijie, WANG Ming, LUO Siling, et al. Design of auxiliary inverter for urban transit vehicles[J]. Modern Urban Rail Transit, 2020(9):17.

(收稿日期:2021-03-26)

(上接第 237 页)

- [2] 汪钱进. 高铁安全风险管控探究[J]. 科技风, 2016(2):272.
WANG Qianjin. Research on safety risk management of high-speed railway[J]. Technology Wind, 2016(2):272.
- [3] 刘毅. 智能视频监控系统在未来国内高铁火车站站区的应用展望[J]. 信息与电脑(理论版), 2019(18):123.
LIU Yi. Application prospect of intelligent video monitoring system in the station area of domestic high-speed railway station in the future[J]. China Computer & Communication, 2019(18):123.
- [4] 李龙营,李金库,马建峰,等. 采用攻击策略图的实时警报综合分析方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2014(5):84.
LI Longying, LI Jinku, MA Jianfeng, et al. Comprehensive analysis of real-time alerts with attack strategy graphs[J]. Journal of Xidian University, 2014(5):84.
- [5] 王维. 电子信息产业发展历程与应用前景[J]. 信息与电脑(理论版), 2017(11):47.
WANG Wei. The development course and application prospect of electronic information technology[J]. China Computer & Communication, 2017(11):47.

- [6] 王莉,张宇. 浅析基于 5G 技术的铁路站房车站安防系统[J]. 智能城市, 2020(14):54.
WANG Li, ZHANG Yu. Analysis of railway station building security system based on 5G Technology[J]. Intelligent City, 2020(14):54.
- [7] 宁文峰,肖慕颖. 铁路站房车站建设工程数字化动态管理研究[J]. 智能建筑电气技术, 2020(6):45.
NING Wenfeng, XIAO Muying. Research on digital dynamic management of railway station building construction project[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2020(6):45.
- [8] 莫维,唐清善,黄涛. 一种多方向感知的高实时性视频融合算法[J]. 计算机与现代化, 2021(10):81.
MO Wei, TANG Qingshan, HUANG Tao. A high real-time video fusion algorithm based on multi direction perception[J]. Computer and Modernization, 2021(10):81.
- [9] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1998,86(11):2278.

(收稿日期:2021-12-21)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com