

交流供电制式下地铁牵引变电所地回流组成分析*

李鲲鹏¹ 刘力² 赵云云¹ 王凌霄² 何竹君¹ 曹晓斌²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都)

摘要 [目的] 为了提高城市间的通勤能力, 新建市域快速轨道交通采用了 27.5 kV 的交流牵引供电制式, 其运行时速更快。交流牵引供电在增强列车运输能力的同时, 对外泄漏电流增大, 出现地回流偏大等现象, 需对交流供电制式的地铁线路主变电所中地回流的组成进行深入研究。[方法] 以广州市某条采用交流牵引供电制式的市域快速轨道交通线路为研究对象, 分析了该线同时给车站和停车场供电的牵引变电所回流系统的组成及其地回流路径。为了得到地回流电流在总回流电流中的占比关系, 在线路开通前的联调联试阶段, 对该牵引变电所的回流电流进行测试, 对现场接线进行勘测, 并进行了铜覆钢接地体电流测试。在此基础上进行了大地土壤回流电流测试, 提出了地回流的改善方案。[结果及结论] 主变电所地回流电流偏大的主要原因是存在铜覆钢回流电流。除当前所知的车站和停车场电缆回流、大地土壤回流外, 还存在 1 条通过电缆沟支架的路径, 有 25% 以上的牵引电流通过该路径流回牵引变电所的接地网, 进而导致地回流电流测量结果偏大。采用改善方案后, 实际通过大地土壤回流的电流占总回流的 30% 左右, 达到地回流质量的优良水平。

关键词 地铁; 交流供电; 牵引变电所; 回流电流

中图分类号 U231+.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245885

Analysis of Ground Current Return Composition at Metro Traction Substations under AC Power Supply System

LI Kunpeng¹, LIU Li², ZHAO Yunyun¹, WANG Lingxiao², HE Zhujun¹, CAO Xiaobin²

(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China)

Abstract [Objective] To enhance the intercity commuting capacity, newly built city rapid transit lines adopt a 27.5 kV AC (alternating current) traction power supply system, enabling higher operating speed. While improving train transport capacity, AC traction power supply also increases external

leakage currents, resulting in excessive ground return currents. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth research on ground return current composition in metro line main substations using AC power supply system. [Method] Focusing on a city rapid rail transit line in Guangzhou that adopts AC traction power supply system, the composition and ground return path of current return system at the traction substations that supply power to both stations and depots is studied. To determine the proportion of ground return current within the total return current, tests on return current are conducted during the joint commissioning and testing phase before the line opened. The return current of traction substation is tested, the wiring layouts are investigated on-site, and current measurements of the copper-clad steel grounding body are performed. On this basis, tests on earth soil return currents are conducted, and improvement measures for ground return are proposed. [Result & Conclusion] The primary reason for excessive ground return current at the main substation is the presence of return current through copper-clad steel structures. In addition to the known station and depot cable returns and earth soil returns, there exists an additional return path through cable trench supports, accounting for more than 25% of the traction current flowing back to the traction substation grounding grid via this path, thereby leading to larger results from ground return current measurements. After implementing the proposed improvement measures, the proportion of current returning through earth soil decreased to approximately 30% of the total return current, achieving an excellent level of ground return quality.

Key words metro; AC power supply; traction substation; return current

为了提高城市轨道交通的线路运输能力和列车运行速度, 我国开始建设 27.5 kV 交流供电制式的城市轨道交通线路, 广州等超大城市已有交流供电制式的市域快速轨道交通投入运行^[1-3]。

回流系统是牵引供电系统的重要组成部分, 回流不畅将导致牵引供电系统一、二次设备损坏, 近

* 国家自然科学基金项目(51777175)

年来发生过多起高速铁路供电系统回流不畅引起的事故^[4-6]。牵引回流中有一部分电流通过大地流回牵引变电所,这一部分称之为地回流。交流供电制式地铁会出现因牵引回流不畅导致变电所地回流电流过大等回流异常问题^[7-8]。高速铁路的运行经验表明,变电所地回流过大时,接地网的引上线存在过热烧损的危险,还可能造成沿线钢轨电位过高,接触电压和跨步电压增大^[9-11],并对轨旁信号设备的安全运行产生威胁。在牵引回流和轨道电路信息均以钢轨作为传输通道时,牵引回流不畅还容易对轨道电路信息产生干扰,严重时可导致轨道电路出现红光带故障^[12-13]。

回流比例是联调联试的 1 个检测指标,回流比例中地回流占比过高的情况最为常见,会引起线路轨道电路电位过高、地网腐蚀、架空地线烧损等问题,因此,对于回流比例是否过高的判定非常重要。有学者提出适合我国高速铁路的牵引变电所地回流质量的指标判据,即地回流电流在牵引回流中占比 10.0% ~ 35.0% (含 35.0%) 为优良,35.0% ~

50.0% (含 50.0%) 为合格,超出 50.0% 为超标^[14]。

为掌握牵引变电所中接地回流的组成规律,本文对广州市某市域快速轨道交通的地回流开展调查研究与现场实测,根据测量数据分析了地回流的形成路径,以及不同路径的电流在地回流中的占比,最终探讨了交流供电制式地铁回流系统的设计方案。

1 回流系统基本情况分析

1.1 电缆回流组成

广州市某市域快速轨道交通的牵引变电所同时给线路的车站和停车场供电,车站和停车场的各回流点处的回流线和钢轨通过铜芯软电缆接入牵引变电所的集中回流接地箱。地回流则由主变电所(以下简称“主所”)下方接地网引出,同样接入集中回流接地箱^[14]。

该牵引变电所牵引供电系统的回流、接地系统如图 1 所示。回流路径分为车站电缆回流、停车场电缆回流和地回流 3 大部分。

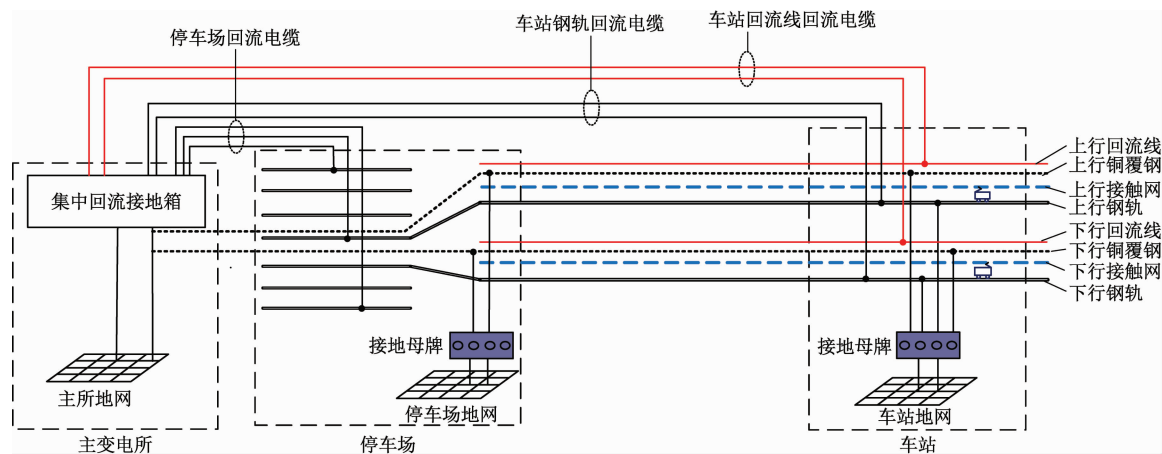


图 1 回流和接地系统简化图

Fig. 1 Simplified diagram of return and grounding systems

电缆回流部分包括车站钢轨回流、车站回流线回流和停车场回流 3 种,共有 15 根回流电缆,具体布置方式如下:车站上下行线的钢轨均接有回流电缆。每根钢轨接有两根回流电缆,共计 8 根。车站上下行线的回流线上各有 1 根回流电缆,共计 2 根。停车场由于股道较多,因此设有多处轨回流点。本次测量的停车场设有 3 处回流点,其中 2 处各设有 2 根回流电缆,另 1 处设有 1 根回流电缆,共计 5 根回流电缆。

1.2 地回流路径分析

地回流路径相对较为复杂,变电所接地网有 2 根接地引上线,通过 2 根电缆与集中回流接地箱的综合回流接地母排相连^[15]。但从外部到接地网的路径较为复杂,本部分将分析可能存在的地回流路径。

第 1 条地回流路径为钢轨到大地的泄漏电流,由于钢轨到大地之间的绝缘并不良好,从而使部分牵引电流通过泄漏电阻流入大地,并通过大地流回

牵引变电所的接地网,这是地回流的重要组成部分,现有的轨道交通文献中对这部分开展了大量研究,本文不再赘述。

在交流牵引制式的地铁中,根据设计资料,发现为了降低车站站台与列车之间的电压,每个车站的站台两端钢轨都通过接地电缆与车站的强电综合接地母排相连(见图1),因此存在从车站接地网到大地,再通过大地流回牵引变电所接地网的回流路径。这是第2条地回流路径。

2 地回流测试与分析

2.1 集中回流接地箱地回流电流比例测试

为了得到地回流电流在总回流中的占比关系,在线路开通前的联调联试阶段对主牵引变电所回流情况进行测量。测点位于主所的集中回流接地箱处,采用电缆电流互感器从回流电缆取得信号,同时采集停车场回流电缆、车站回流线回流电缆、车站钢轨回流电缆、地回流电缆等所有支路电缆的电流。

地回流在总回流中的占比如图2所示。由图2可知,绝大部分时间地回流电流占比稳定在55%左右,最大占比可达63%,此时电流约为733 A,占比最小时也在49%左右。

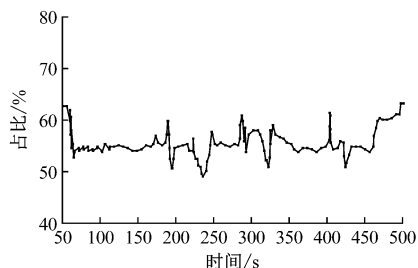


图2 地回流在总回流中的占比

Fig. 2 Proportion of ground return current in total return current

为了进一步分析地回流电流在不同时间段中所占总回流的比例,提取本文所研究地铁线路在2022年6月某个测试日,从12:21至18:45的4个时段数据进行分析,其中15:40左右为非高峰时段,18:30左右为高峰时段。这4个时段的各回流占比如表1所示,均超过50%,稳定在55%左右,波动幅度小于2%。

2.2 关于地回流占比过大的分析

为了找出地回流电流占比超过50%的原因,对

表1 不同时间段各回流占比

Tab. 1 Proportion of ground return current in different time periods

时间段	平均地回流占比/%	车站电缆回流占比/%	停车场电缆回流占比/%
12:21—12:29	56.61	27.36	16.03
15:34—15:42	55.22	26.00	18.78
18:17—18:25	55.95	26.97	17.08
18:37—18:45	54.12	26.48	19.40

现场进行勘测,得出牵引变电所电缆夹层的回流结构。主所地网线路如图3所示。

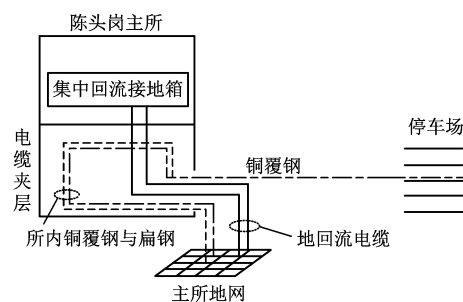


图3 主所地网线路

Fig. 3 Main substation grounding grid line

从主所的集中回流接地箱所接的地回流电缆向接地网方向查线勘探。在主所的电缆夹层发现共有2根地回流电缆,从回流箱向下接到回流电缆进所入口处,但在电缆夹层中发现,主所的地网同时还与电缆支架上的接地铜覆钢相连接。在主所电缆夹层查线过程中,使用钳型电流表测试发现,铜覆钢以及扁钢上都存在电流。考虑到扁钢仅存在于电缆夹层中,与外界仅通过铜覆钢连接,可以认为扁钢上的电流来自铜覆钢上的分流。

铜覆钢在各种变电工程施工中作为接地材料,本身具有非常优良的导电性能,有作为回流路径的可能性。根据现场勘测,发现实际情况如下:

1) 从车站上下行线的隧道至停车场,再从停车场到牵引变电所,电缆支架上的铜覆钢一直与钢轨和回流线并行,使得沿线车站、停车场、牵引变电所的地网都相连,形成1个全线贯通的金属性接地体。

2) 一部分回流电流从钢轨流到车站或停车场的接地网,通过综合接地母排流到铜覆钢接地体,再从车站或者停车场流向牵引变电所,在变电所电缆夹层处将一部分电流分配给接地扁钢,通过接地扁钢流到变电所接地网,再通过接地网的引上线流回集中回流接地箱,从而导致地回流电流过大。

2.3 铜覆钢接地体电流测试

为了检验上述勘测结果,综合考虑测量时的人员与设备安全,最终选取牵引变电所电缆夹层入所处为测点,此处的铜覆钢有一部分转变为支架接地扁钢,需要同时测量铜覆钢和接地扁钢上的电流。

不同时间段铜覆钢与扁钢上的平均电流如表 2 所示,通过铜覆钢和扁钢流向主所接地网的总平均电流约为 90 A 以上,最大时可以达到 270 A,其中铜覆钢电流和扁钢电流大小接近,比值约为 5:4。

表 2 不同时间段铜覆钢与扁钢平均电流

Tab.2 Average current of copper-clad steel and flat steel in different time periods

时间段	铜覆钢平均 电流/A	扁钢平均 电流/A	总平均 电流/A
12:21—12:29	58.96	43.86	102.82
15:34—15:42	50.45	39.12	89.57
18:17—18:25	54.63	41.64	96.27
18:37—18:45	54.96	41.90	96.86

铜覆钢与扁钢实时总电流如图 4 所示。由图 4 可知通过铜覆钢和扁钢流向接地网的总电流实时变化情况。

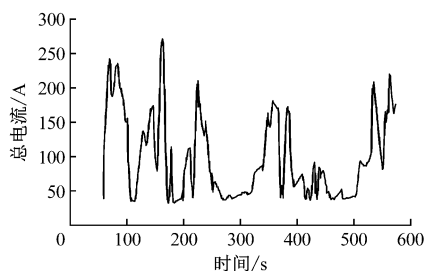


图 4 铜覆钢与扁钢实时总电流

Fig. 4 Real-time total current of copper-clad steel and flat steel

为确定经过铜覆钢和扁钢上的电流为回流电流,将二者电流与 2 根地回流电缆电流波形进行对比(见图 5,因 2 根地回流电缆电流数据高度相似、几乎重合,故图 5 中仅展示地回流电缆 1 的数据),呈现波形吻合,由此可以确定,部分回流电流以铜覆钢为回流路径从车站流向主所地网。

综上所述,实际线路中存在 1 条隐藏的金属性回流路线,其结构为:地铁正线上下行隧道内分别设置有强弱电区间贯通接地铜覆钢,强弱电的铜覆钢接地线不仅与车站的电缆支架连通,连接到车站接地网,还与变电所内电缆支架的铜覆钢连通,从

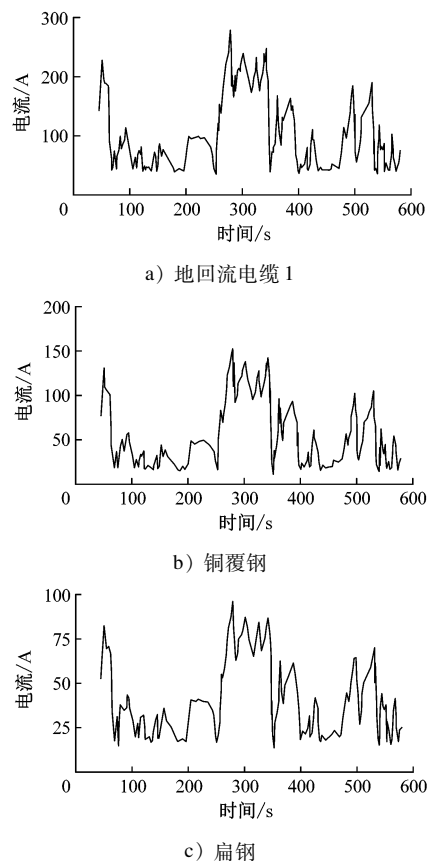


图 5 铜覆钢、扁钢与地回流电缆电流的波形对比

Fig. 5 Waveform comparison of copper-clad steel, flat steel and ground return current cable current

而形成 1 个将全地铁线路所有接地网电气连通的综合接地系统。部分牵引电流可以通过该系统流到牵引变电所的接地网,再通过接地回流,从而形成第 3 条地回流路径。

因此,牵引变电所的地回流电缆电流的来源包括两部分,一是大地土壤回流,二是铜覆钢流向主所地网的电流。

3 大地土壤回流测试

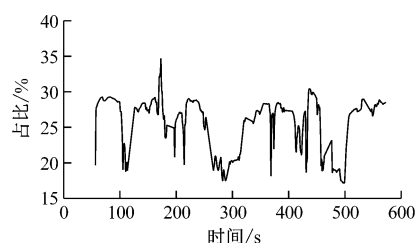
考虑到牵引变电所的铜覆钢和扁钢上的回流电流均来自电缆沟的铜覆钢,将之统一称为贯通接地体回流;将真正从大地土壤回流的电流称为土壤回流。在多个时间段内测得的不同路径回流电流平均占比关系如表 3 所示。

从表 3 可知,实际的大地土壤回流电流平均占比不到 30%,而贯通接地体回流的平均占比达到 27% 左右。选取 12:21—12:29 的具体测试分段,该分段实时各回流电流在总回流中的占比如图 6 所示,从图 6 可以看出,大地土壤回流基本稳定在

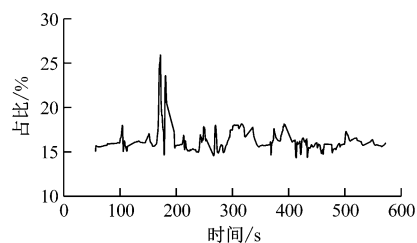
表 3 不同路径回流电流平均占比

Tab.3 Average return current proportion of different paths

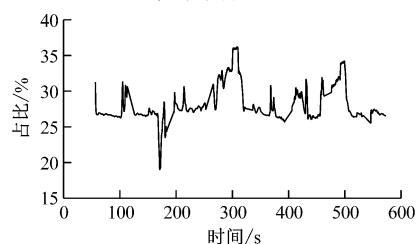
运行时间段	车站电缆 回流平均 占比/%	停车场电缆 回流平均 占比/%	土壤回流 平均占 比/%	贯通接地体 回流平均 占比/%
12:21—12:29	27.36	16.04	29.28	27.32
15:34—15:42	26.00	18.79	28.24	26.97
18:17—18:25	26.97	17.08	29.14	26.81
18:37—18:45	26.48	19.40	27.96	26.16



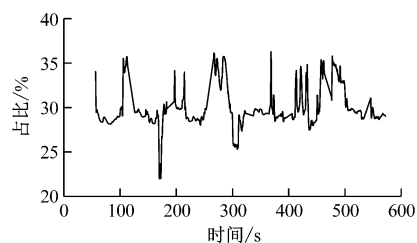
a) 车站回流



b) 停车场回流



c) 贯通接地体回流



d) 土壤回流

图 6 各回流电流在总回流中的占比

Fig. 6 Proportion of each return current in total return current

29% 左右, 全程有少许波动, 占比波幅不大, 其中占比最大时可达 35%, 最小时为 21%。若用地回流的回流质量判据对大地土壤回流占比进行分析, 可得该主所的实际地回流比例都在优良范围内波动, 无

回流不畅等问题。

4 地回流改善方案

根据实际的回流情况, 贯通接地体的回流比例大于从车站或停车场通过电缆流回集中回流接地箱的电流。由此得出, 贯通接地体已成为 1 条主要回流路径。该路径为“车站钢轨→车站地网→电缆沟铜覆钢→牵引变电所地网”, 或是“停车场钢轨→停车场地网→电缆沟铜覆钢→牵引变电所地网”。去除贯通接地体的回流电流后, 实际的牵引变电所的地回流电流处于优良范围。

根据研究结果, 针对牵引变电所地回流电流过大问题, 可以从以下两方面进行整治:

1) 在外部电缆沟与牵引变电所电缆夹层相连的位置, 将电缆沟电缆支架与牵引变电所电缆支架的铜覆钢断开, 在电缆沟的铜覆钢上专门加设 1 根回流电缆直接接到回流箱, 使得所外铜覆钢上的电流不再经过主所接地网。

2) 不建议将车站与停车场、停车场与主所之间的铜覆钢部分断开, 或增加绝缘隔断, 该方法可能会导致铜覆钢与电缆支架及接地网上存在较高的电压差。

5 结语

交流供电制式下的城市轨道交通中, 电缆支架上铜覆钢将沿线车站、停车场、牵引变电所的地网连成 1 个整体, 形成 1 个全线贯通的金属性接地系统。现场实测结果表明, 通过该路径电流与车站、停车场电缆电流具有一致的波动趋势, 从而明确该贯通的金属性接地系统为回流的重要路径。

测试铜覆钢接地系统回流电流在回流系统中的占比后发现, 无论是高峰时段还是非高峰时段, 该部分的回流电流占总回流的 25% 左右。针对这一情况, 本文提出将铜覆钢单独通过接地电缆与集中回流接地箱相连的整治方案, 在去除铜覆钢的回流电流后, 实际经土壤回流的地回流电流仅占总回流的 30% 左右, 达到地回流质量的优良范围。

参考文献

- [1] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 199.
- LI Qunzhan. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 199.
- [2] 李群湛. 论干线铁路与城市轨道交通统一牵引供电方式[J]. 中

- 国科学:技术科学, 2018, 48(11): 1179.
- LI Qunzhan. Unified traction power supply mode for trunk railway and urban rail transit[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(11): 1179.
- [3] 冯超. 广州市轨道交通十八号线及二十二号线供电系统制式选型研究[J]. 电气技术, 2020, 21(10): 137.
- FENG Chao. Research on type of power supply system for Guangzhou Metro Line 18 and Line 22[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(10): 137.
- [4] 曹晓斌, 王满想, 朱传林, 等. 重载铁路直接供电方式下牵引回流分配及影响因素[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 137.
- CAO Xiaobin, WANG Manxiang, ZHU Chuanlin, et al. Traction return current distribution and influencing factors under direct power supply mode of heavy haul railway[J]. China Railway Science, 2021, 42(4): 137.
- [5] BI X, LIU J, LIU Y, et al. Analysis of ground wire fault in the section of incoming lines of electrified railway traction station[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing: IEEE, 2018: 1.
- [6] 曹晓斌, 何方方. 铁路站场牵引回流系统的回流特性研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(12): 43.
- CAO Xiaobin, HE Fangfang. Research on return current characteristics of traction return current system in station yard[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(12): 43.
- [7] 黄文勋. 高速铁路典型牵引变电所回流异常分析与抑制方案研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 143.
- HUANG Wenxun. Study on abnormal analysis and inhibition of return current in typical traction substation of high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(3): 143.
- [8] 陈盼, 魏晓斌, 高国强, 等. 动车组接地回流分配机理试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 119.
- CHEN Pan, WEI Xiaobin, GAO Guoqiang, et al. Experimental study on the characteristics of grounding-return current for high-speed electric multiple units[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 119.
- [9] 于国旺, 张俊骐, 吴命利. 牵引变电所地回流影响因素仿真分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(7): 73.
- YU Guowang, ZHANG Junqi, WU Mingli. Impact factors analysis of earth return current for traction substations[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(7): 73.
- [10] 赵云云, 桑国阳, 龙意仁, 等. 广州地铁 22 号线交流牵引供电系统电磁干扰问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 124.
- ZHAO Yunyun, SANG Guoyang, LONG Yiren, et al. Analysis of electromagnetic interference problems in AC traction power supply system of Guangzhou Metro Line 22[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(2): 124.
- [11] 刘家军, 杜智亮, 李娟绒, 等. 铁路 10 kV 电力电缆头发热分析与安全监测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 131.
- LIU Jiajun, DU Zhiliang, LI Juanrong, et al. Thermal analysis and safety monitoring of railway 10 kV power cable joints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 131.
- [12] 唐伟, 史籍. 牵引回流对 ZPW-2000A 轨道电路的影响及解决措施[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(增刊 1): 122.
- TANG Wei, SHI Ji. Impact of traction return current on ZPW-2000A track circuit and its solutions[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(S1): 122.
- [13] LI W, ZHOU L, CHEN T, et al. Analysis of traction reflux characteristics of EMU and improvement of its protective grounding system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2): 2736.
- [14] 李天石. 铁路综合接地系统回流指标研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- LI Tianshi. Study on reflux index of railway integrated grounding system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2017.
- [15] 李鲲鹏, 靳守杰, 李俊豪, 等. 交流供电制式下矿山法地铁隧道的牵引回流分布特征分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 102.
- LI Kunpeng, JIN Shoujie, LI Junhao, et al. Distribution characteristics of traction backflow under AC power supply system in mined metro tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 102.
- [16] 裴丽君, 章达, 蔡彬彬, 等. 城市轨道交通牵引变电所健康状态综合评估[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 17.
- PEI Lijun, ZHANG Da, CAI Binbin, et al. Comprehensive evaluation of urban rail transit traction substation health status[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 17.
- [17] 王沛沛. 直流牵引供电系统新型钢轨回流方案及钢轨绝缘检测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 72.
- WANG Peipei. New rail return scheme and rail insulation test method for DC traction power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 72.
- [18] 唐兆军, 王颖, 朱松涛, 等. 城市轨道交通走行轨回流系统钢轨电位抑制技术综述[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 253.
- TANG Zhaojun, WANG Ying, ZHU Songtao, et al. Overview of rail potential suppression technology in urban rail transit running rail circuit return system[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 253.
- [19] 曹建设. 基于 CDEGS 软件的高土壤电阻率地区主变电所接地网设计[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 328.
- CAO Jianshe. Design of grounding grid for main substations in high soil resistivity areas based on CDEGS software[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 328.
- 收稿日期:2024-08-08 修回日期:2024-12-08 出版日期:2025-07-10
Received:2024-08-08 Revised:2024-12-08 Published:2025-07-10
· 第一作者:李鲲鹏,正高级工程师,leo-likunpeng@qq.com
通信作者:刘力,硕士研究生,liuliaixuexi@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