

电压继电器引起变电站失电问题分析*

郭 志

(上海地铁维护保障有限公司供电分公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的] 针对城市轨道交通变电站运行过程中发生的变电站电源失电问题进行分析, 找到引起失电的关键部件, 解决关键部件引起变电站失电的安全隐患。[方法] 通过分析变电站电源失电故障原因, 指出电压继电器是引起变电站失电故障的关键部件。研究 400 V 配电柜内低电压检测继电器内部电路工作原理, 对该内部电路存在问题的部分进行参数计算; 根据计算结果论证关键部件工作异常的原因, 结合原因分析提出内部电路优化方案; 对优化后的内部电路进行分析和检测, 验证该电压继电器的可靠性。[结果及结论] 对电压继电器内部电路进行优化后, 有效地避免了变电站 400 V 开关柜内部二次检测电路故障造成的开关误动作; 对电压继电器检测和逻辑判断电路, 需设计电气隔离, 以提高检测电路在不同运行条件下的可靠性, 确保检测部件对不同运行工况的适应性。

关键词 城市轨道交通; 电压继电器; 电气隔离

中图分类号 U224

DOI:10.16037/j.1007-869x.20250143

Analysis of Substation Outage Caused by Voltage Relays

GUO Zhi

(Power Supply Branch of Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Analysis is carried out targeting the power outage issues occurring during the operation of urban rail transit substations, the key components causing power failure are identified, and the safety hazards leading to substation power outages caused by these critical components are addressed. [Method] By analyzing the causes of power outage in substations, it is pointed out that the voltage relays are the key components leading to substation power failure. The internal circuit working principle of the low voltage detection relay in a 400 V distribution box is examined, and parameters of the internal circuit problematic parts are calculated. The reasons for abnormal operation of key components are argued based on the calculation results. Based on the cause analysis, an internal circuit optimization scheme is proposed. The optimized internal circuit is

then analyzed and tested to verify the reliability of the voltage relay. [Result & Conclusion] After optimizing the voltage relay internal circuit, maloperation caused by secondary detection circuit failures inside the substation 400 V switchgear cabinet is effectively avoided. The detection and logic judgment circuits of the voltage relay should be designed with electrical isolation, aiming to enhance reliability of the detection circuit in various operating scenarios, ensuring the adaptability of detection components to different working conditions.

Key words urban rail transit; voltage relay; electrical isolation

地铁中压配电系统通过变压器提供双路电源为车站机电系统供电, 变电站 400 V 低压配电系统采用单母线分段电气主接线。变电站 400 V 单路电源失电时, 通过电压继电器或者断路器配置的电压传感元件检测和判断 400 V 母线电压, 通过母联开关柜内 PLC (可编程逻辑控制器) 自动装置进行逻辑判断后驱动 400 V 母联开关合闸, 保证变电站两段母线正常供电。变电站内配置交直流电源屏, 为站内开关柜内的保护装置、驱动机构提供交直流电源。本文所研究的电压继电器^[1]用于 400 V 进线电源的电压检测, 电压继电器的工作电源取自变电站直流控制电源母线。

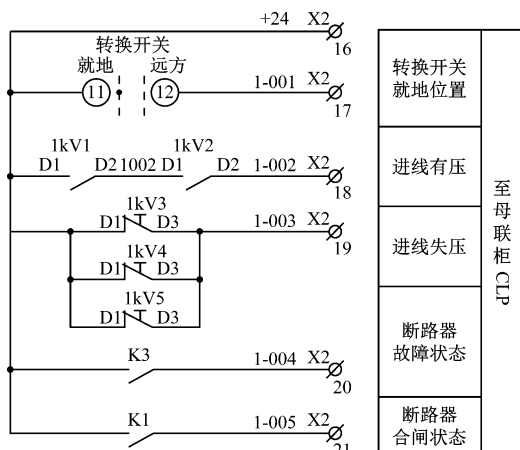
1 电压继电器故障及原因分析

在某变电站夜间对接触网上网开关检修过程中, 出现直流 220 V 控制电源正极接地、直流屏直流电源正电源对地电压为 0 V、负电源对地位-220 V 直流电压的情况, 还出现变电站 400 V 一段和二段保护失压跳闸的情况, 后经检修人员对 220 V 控制电源母线绝缘修复后快速恢复正常供电。

变电站 400 V 开关柜的失压控制回路如图 1 所示。图 1 中 400 V 进线开关柜内采用 1 kV 继电器 1—1 kV 继电器 5 (简为“1 kV1—1 kV5”) 共 5 个电

* 上海申通地铁集团有限公司科研项目 (JS-KY2 R025)

压继电器作为电压判断元件,设定不同的动作值判断进线是否有压,进线有压采用逻辑与关系,进线失压采用逻辑或关系。当三相相电压有一相异常时,将失压信号输入母联开关内的 PLC 控制装置,



注: +24—24 V 正电源;1-001—1-005 代表二次线线号;D1、D2、D3—继电器辅助接点编号;K1、K3—断路器输出辅助接点;X2—端子排编号;⑪、⑫—转换开关的端子号。

图 1 400 V 母线分段开关逻辑图

Fig. 1 400 V bus section switch logic diagram

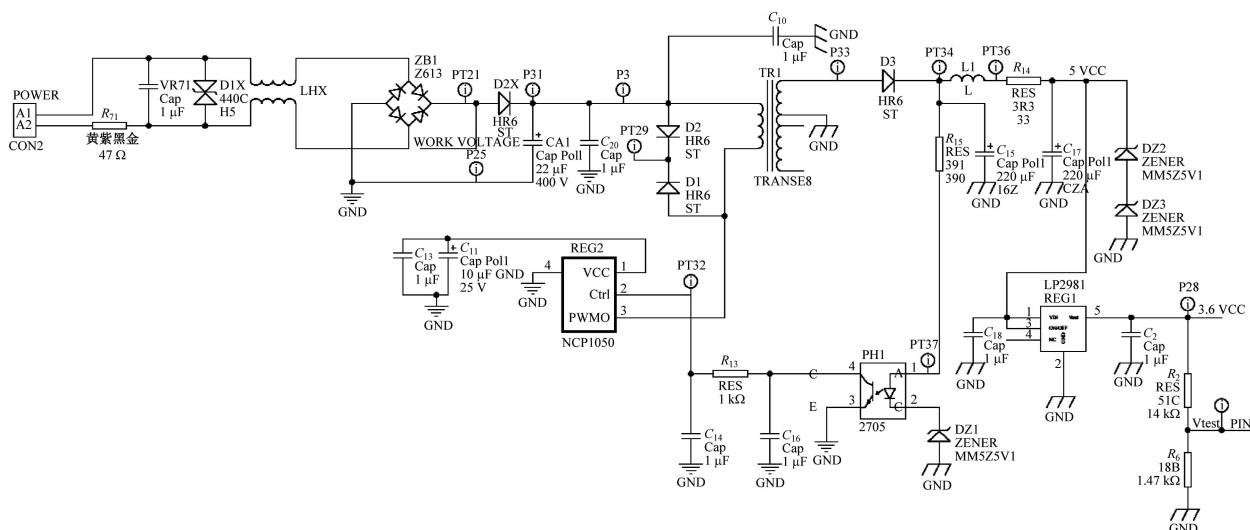
由 PLC 控制装置将进线开关断开。控制电路按照继电保护整定延时驱动 400 V 母联开关闭合,从而保证 400 V 一段和二段的正常供电^[2]。

经过分析,上述变电站失电故障原因为 400 V 电压继电器控制电源在直流 220 V 正电源接地故障时造成继电器信号接点出现变位信号,使得图 1 中电压继电器 1 kV1—1 kV5 发生变位,触发 PLC 驱动开关分闸造成变电站失电故障。

2 电压继电器内部拓扑电路分析

通过夜间多次试验可知,在直流控制电源母线出现绝缘不良的情况下,会引起 400 V 电压继电器工作电源异常,造成工作指示灯无法正常点亮,电压继电器因为工作电源不正常,常开接点自动复位,继电器辅助节点自动复位^[3]。为此,对电压继电器的电压输入、采样和电源工作回路以及控制系统内部电路进行系统分析,研究故障原因。

通过对电压继电器内部电路进行分析,得到其工作电源的电路图,如图 2 所示。



注:WORK_VOLTAGE—工作电源监测取样点;GND-参考地。

图2 电压继电器电源电路(截图)

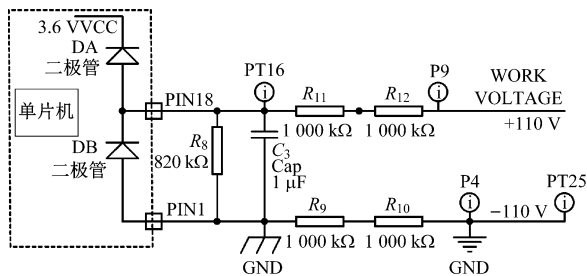
Fig. 2 Power circuit of voltage relay (screenshot)

由图 2 可知,电压继电器工作电源输入为直流 220 V,通过整流桥、滤波和反激变换器的直流电压变换电路,提供隔离二次电源给电压继电器的控制电路^[4],同时将图 2 中电压取样点电压接入电源检测电路。电压继电器电源检测电路拓扑结构如图 3 所示。

在图3电路中,外部输入的直流220 V电压的

正电源为电压取样点电压;测试点 PT25 为整流桥的负电压;在 PT16 测试点,电压通过 5 个功率电阻分压后取样,直接接入单片机控制电路。检测电压的参考地与单片机的工作地为等电位连接方式。电压继电器作为电压检测元件,所测的电压为变电站内 400 V 三相相电压。电压检测回路电路如图 4 所示^[5]。

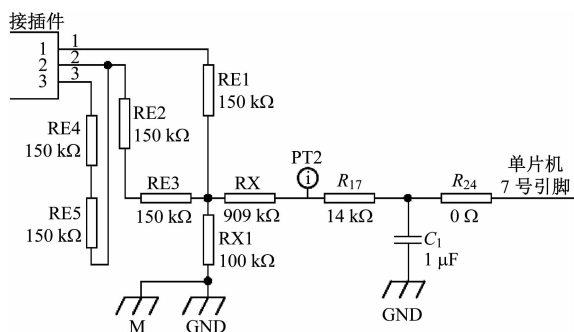
电压继电器通过电阻分压电路,将 220 V 电压转换为 50 mV 电压信号输入至单片机模拟量输入



注:PT16—信号测试点;P9—正电压输入点;R8、R9、R10、R11、R12—电压采样回路分压电阻;PT25—负电压输入点;DA、DB—单片机内部保护二极管;PIN1、PIN18—单片机的引脚编号。

图3 电压继电器电源检测电路(截图)

Fig. 3 Detection circuit on voltage relay power (screenshot)



注:PT2—2号测试点;M—继电器外部输入接地点。

图4 400 V 电压检测回路(截图)

Fig. 4 400 V working voltage detection circuit (screenshot)

端口,通过内部逻辑运算和判断后,控制器根据输入设定阈值驱动输出接点,信号回路的输出电路如图5所示,逻辑控制器通过三极管驱动继电器线圈,输出电压信号给外部电路^[6]。

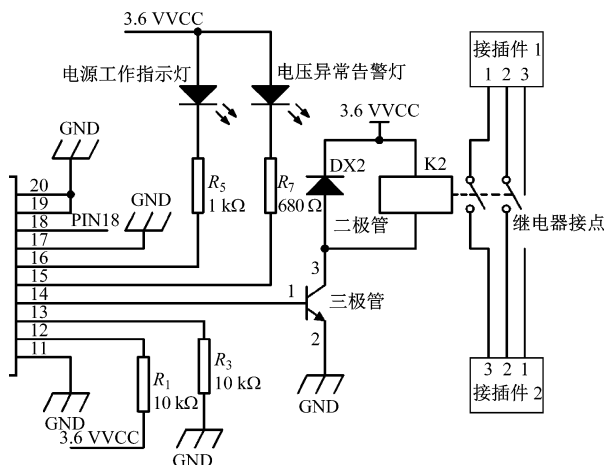


图5 低电压信号指示输出电路(截图)

Fig. 5 Output circuit of low voltage indicator (screenshot)

3 电压继电器内部电路原理分析

电压继电器控制电路如图5所示。在变电站直流 220 V 电源未发生绝缘故障时,直流控制母线正负电源对地电压均为 110 V。按照图3 电路电压分压原理,电压检测模块正常工作电压为直流 24 ~ 240 V,考虑单片机 I/O 口二极管电压限幅电路,单片机输入最大输入电压为 4.2 V,该单片机的输入最大的灌电流为 25 mA,在正常工作电压为 24.6 V 时,测试点 PT16 对 GND 的电压值 U_{PT16} 计算公式为:

$$U_{PT16} = R_8 U / (R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{12}) \quad (1)$$

式中:

U_{PT16} ——PT16 点的电压;

R_8 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 、 R_{12} ——分压电阻;

U ——输入的工作电压值。

式(1)中, U 取值为 24.6 V 时,计算得到 U_{PT16} 电压值为 4.18 V。

在工作电压为最大电压 240 V 直流电压时,受限于单片机 I/O 口的限幅电路, U_{PT16} 电压值为最大输入电压 4.2 V。在辅助工作电源正常情况下,单片机输出高电平表示外部工作电源正常,单片机内部的检测逻辑能正常对输入电压的状态进行判断。此时,用于 400 V 进线外部电压检测的 3 个相电压继电器的常闭接点,根据内部设定的电压值与三相电压检测电压的输入数值进行对比。当电压高于设定值时,内部常闭接点打开,表示外部 400 V 检测电压正常;当检测到外部输入电压低于面板设定值时,则继电器的内部常闭接点闭合,提示外部检测电压低于面板整定工作电压值。电压继电器将判断的电压结果通过输出接点分别接入图1中 1KV3—1KV5 的 400 V 母联自动装置回路^[7]。由于该电压继电器的电路设计未考虑继电器内部工作电源异常时的情况,在变电站直流屏出现正对地电压为 0 V 时,虽然电压继电器工作电源部分的整流桥能正常工作,此时图2 中的 P9 点对工作地的电压为整流桥的管压降 -0.5 V。因单片机限幅二极管未导通,图3 中输入至单片机的检测电压 U_{pin18} (单片机 18 号端口电压)为^[8]:

$$U_{pin18} = R_8 U_{P9} / (R_8 + R_{11} + R_{12}) \quad (2)$$

式中:

U_{P9} ——P9 点电压值。

式(2)中, U_{P9} 取值为 -0.5 V 时,计算得到

U_{pin18} 电压为 -0.145 V 。

此时控制器检测到继电器内部工作电源电压不正常,内部逻辑无法正常工作,图5中电源工作指示灯和电压告警灯都熄灭。此时即使400 V一段和二段电压都正常,但由于400 V一段和二段进线开关内的6个电压检测继电器的常闭接点输出均为闭合状态,造成400 V母联PLC同时收到变电站400 V一段和400 V二段进线开关的失压信号,引起变电站400 V失电故障^[9]。

4 电压继电器电路优化

通过对电压继电器内部电路的分析可知,在外部工作电源出现工作电压异常时,会引起继电器检测输出接点的误动作信号,进而造成变电站失电。为此,通过与产品设计单位沟通,对于辅助电压的监测,采用光耦隔离方式将电压继电器的一次辅助工作电源检测回路与内控控制单片机二次控制部分进行电气隔离,避免因电压继电器的辅助工作电压与二次检测和控制部分未采取电气隔离措施而造成电压继电器无法正常工作。对电压继电器辅助工作电源采样电路进行优化,优化后的电路如图6所示。图6中,电压继电器辅助工作电源通过限流电阻、三极管进行限流,将辅助工作电压状态信号通过光耦器件发送信号给电压继电器二次控制电路,用于实现辅助电压的监测,利用光耦的电气隔离特性,提高电压继电器的安全隔离能力,保证检测部件在不同运行环境下运行的可靠性^[10]。

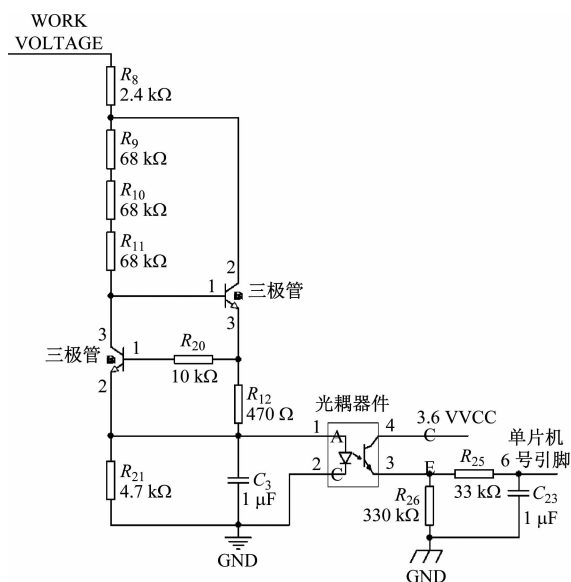


图6 优化后的工作电源检测回路(截图)

Fig. 6 Optimized working power detection circuit (screenshot)

对电路优化后的电压继电器进行检测,模拟变电站直流屏220 V直流电源正极接地的绝缘故障,发现该电压继电器在直流屏的电压出现绝缘不良时,继电器的工作指示灯、电压检测报警灯能正确的检测电压信号,不受变电站直流屏直流电源母线绝缘状态的影响^[11]。将该批次的电压继电器全部更换为优化电路后的电压继电器,通过了现场功能验证,未重复发生变电站失电问题,有效地避免了变电站400 V低压配电系统因变电站直流控制电源母线绝缘不良造成的变电站失电故障^[12]。

5 结语

本文通过对变电站失电故障原因分析,对引起变电站失电的电压继电器内部电路进行测绘和原理分析,对电压继电器内部电路进行优化,有效地避免了变电站400 V开关柜内部二次检测电路故障造成的开关误动作^[13]。在变电站关键检测电路中,应保证检测电路的电气隔离性能,提高检测电路在不同运行条件下的可靠性,确保检测部件对不同运行工况的适应性。

参考文献

- [1] 罗遐,梁营友,许洁璇.电压继电器指示灯闪烁现象的失效机理分析[J].电子产品可靠性与环境试验,2024,42(4):21.
LUO Xia, LIANG Yingyou, XU Jiexuan. Failure mechanism analysis of voltage relay indicator light flashing phenomenon[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2024, 42(4):21.
- [2] 郑天奇,徐迅,杨剑,等.10 kV配电站备自投装置误动问题分析[J].电工技术,2021(3):52.
ZHENG Tianqi, XU Xun, YANG Jian, et al. Analysis on misoperation of backup automatic switching device in 10 kV distribution station[J]. Electric Engineering, 2021(3):52.
- [3] 池云莉.核电厂电压继电器异常动作的原因分析[J].电工电气,2023(3):71.
CHI Yun li. Analysis of the reasons for abnormal operation of voltage relays in nuclear power plants[J]. Electrotechnics Electric (Jiangsu Electrical Apparatus), 2023(3):71.
- [4] 汪萍,李队员,朱广.基于继电器维持电压的低功耗研究[J].电源技术,2024(11):2135.
WANG Ping, LI Duiyuan, ZHU Guang. Low power research of maintaining voltage based on relay[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024(11):2135.
- [5] 谢雅霜,鲍光海.交流继电器电弧动态特性仿真分析[J].电器与能效管理技术,2023(4):28.
XIE Yashuang, BAO Guanghai. Simulation analysis on dynamic

- characteristics of AC relay arc[J]. Low Voltage Apparatus, 2023 (4): 28.
- [6] 唐培伟,李海峰,于森. 电子电气设备中的电路隔离技术分析[J]. 集成电路应用,2022,39(11):58.
TANG Peiwei, LI Haifeng, YU Miao. Analysis of circuit isolation technology in electronic and electrical equipment[J]. Applications of IC, 2022, 39(11): 58.
- [7] 祁鸿芳. 一种高可靠性光电耦合强弱电隔离电路[J]. 仪器仪表用户, 2006, 13(5): 101.
QI Hongfang. A kind of high dependable photoelectric coupled strong and weak optoelectronic isolating circuit [J]. Instrumentation Customer, 2006, 13(5): 101.
- [8] 张轩毅. 电子电气电路的隔离技术分析[J]. 数字化用户, 2019, 25(22): 219.
ZHANG Xuanyi. Analysis on isolation technology of electronic and electrical circuit[J]. Digitization user, 2019, 25(22): 219.
- [9] 杨梅. 继电器与电气工程自动化技术的应用[J]. 科技创新导报, 2022, 19(24): 68.
YANG Mei. Application of relays and electrical engineering automation technology[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2022, 19(24): 68.
- [10] 张雄星,王超,陈超,等. 线性光电隔离电路的设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(24): 189.
ZHANG Xiongxing, WANG Chao, CHEN Chao. Design of linear photoelectric isolated circuit[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(24): 189.
- [11] 薛宏全, 常江龙, 李嘉诚, 等. 基于国产嵌入式芯片的全数字控制轨道交通高压直流 LLC 电源研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 1.
XUE Hongquan, CHANG Jianglong, LI Jiacheng, et al. Research on full digital control high-voltage direct current LLC power supply for rail transit based on domestic embedded chips[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 1.
- [12] 胡姬, 凌晨, 苏靖棋, 等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 134.
HU Ji, LING Chen, SU Jingqi, et al. Research on the development path of urban rail transit traction power supply system based on foreign experience [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 134.
- [13] 叶东,郑杰,代一平,等. 计及指标重要度的地铁供电设备健康状态分级评估方法[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(2): 116.
YE Dong, ZHENG Jie, DAI Yiping, et al. Health status grading evaluation method of subway power supply equipment considering index importance[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(2): 116.
- 收稿日期:2025-02-06 修回日期:2025-03-10 出版日期:2025-06-10
Received:2025-02-06 Revised:2025-03-10 Published:2025-06-10
· 通信作者:郭志,高级工程师, slemen@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
- RUAN Jie. Study on the dynamic performance of overhead contact system and pantograph for high speed rail way[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [16] 赵志, 刘洋. 弓网监测系统中测量接触力硬点的研究[J]. 科学技术创新, 2021(18): 180.
ZHAO Zhi, LIU Yang. Study on hard points for measuring contact force in pantograph-catenary monitoring system[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(18): 180.
- [17] 朱正凯. 弓网监测技术分析[J]. 甘肃科技, 2018, 34(8): 45.
ZHU Zhengkai. Analysis of pantograph-catenary monitoring technology[J]. Gansu Science and Technology, 2018, 34(8): 45.
- [18] 谭德强, 莫继良, 彭金方, 等. 高速接触网零部件失效问题研究现状及展望[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 610.
TAN Deqiang, MO Jiliang, PENG Jinfang, et al. Research and prospect on high-speed catenary component failure[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3): 610.
- [19] 关金发, 吴积钦. 受电弓与接触网动态仿真模型建立及其确认[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2444.
GUAN Jinfa, WU Jiqin. Building and confirmation for dynamic simulation model of pantograph and catenary[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2444.
- [20] 鲁文伟, 周宁, 陈鸿明, 等. 不同型号双弓混合编组时的弓网动力学特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4): 165.
LU Wenwei, ZHOU Ning, CHEN Hongming, et al. Research on pantograph-catenary dynamics characteristics in mixed double pantographs formation of different types[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(4): 165.
- 收稿日期:2024-09-20 修回日期:2024-11-11 出版日期:2025-06-10
Received:2024-09-20 Revised:2024-11-11 Published:2025-06-10
· 通信作者:李泽宇,工程师, 542519743@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