

直流集中供电技术在地铁车辆段照明中的应用

杨树松 朱晋文 盛锦江 董 琴 王 侃

(宁波轨道交通集团有限公司运营分公司, 315100, 宁波//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的:为解决目前地铁车辆段天棚照明灯具由于安装高度高、下有接触网,存在维修困难、施工复杂的问题,同时为解决普通交流 LED(发光二极管)灯具不具备调光节能能力而存在电能浪费的问题,以及为解决交流 LED 灯具小功率分布式整流回路上电能质量较差的问题和解决交流 LED 灯具智能化管控通信管线布置麻烦、调试困难等问题,故将智能化直流集中供电照明技术应用在车辆段照明中。
方法:传统交流配电箱变换为智能化直流集中供电柜,集成了集中整流、回路配电、照明智能化控制等功能。通过前端大功率集中整流,代替了传统交流 LED 小功率分布式整流方式;同时采用直流电力载波作为供电柜至灯具的通信控制方案,减少了通信控制线的布置;通过整流模块输出电压耦合纹波信号,下发控制指令,以实现直流电力载波的通信。
结果及结论:通过采用智能化直流集中供电照明方案,减免了灯具通信线的布置,实现了稳定可靠的智能化调光控制,直流柜的电能质量得到提高,使交流供电侧功率因数上升、三相电流不平衡度减小、电网谐波含量下降,照明系统用电综合效率得以提升。实际运行数据表明,智能化直流集中供电应用于地铁车辆段照明后解决了天棚照明中存在的问题,使设备成本小幅下降、维修率显著降低、节能效果明显、电能利用改善,故具有较好的推广意义。

关键词 地铁;车辆段照明;直流集中供电;照明节能

中图分类号 U231+.91:U279.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.051

Application of Centralized DC Power Supply Technology to Metro Vehicle Depot Lighting

YANG Shusong, ZHU Jinwen, SHENG Jinjiang, DONG Qin, WANG Kan

Abstract Objective: Metro vehicle depot lighting system currently faces problems of difficult maintenance and complex construction caused by the ceiling installation height and the OCS (overhead catenary system) below. Additionally, there are problems including energy waste caused by the lack of dimming capabilities of common AC LED (light emitting diode) lighting fixtures, the poor power quality of small-power distributed rectifier circuits and difficult communication pipeline layout and debugging of common AC LED lighting fixtures. Thus

intelligent DC centralized power supply lighting technology is applied to vehicle depot lighting. **Method:** The conventional AC distribution box is replaced by an intelligent DC centralized power supply cabinet, which integrates centralized rectification, circuit distribution, and intelligent lighting control functionalities. The large-power centralized rectification is used instead of the conventional AC LED small-power distributed rectification. At the same time, DC power carrier is used as the communication control scheme from the power supply cabinet to the lighting fixtures, reducing the need for communication control lines. The rectification module outputs voltage-coupled ripple signals to issue control commands, thereby achieving DC power carrier communication. **Result & Conclusion:** By adopting the intelligent DC centralized power supply lighting solution, the need for lighting communication lines is reduced, stable and reliable intelligent dimming control is achieved, the power quality of the DC cabinet is improved, the power factor of the AC power supply side is increased, together with the decrease of the three-phase current imbalance and the harmonic content of the power grid, the comprehensive efficiency of the lighting system is improved. **Conclusion:** Actual operation data show that the application of intelligent DC centralized power supply to metro vehicle depot lighting has solved the problems of ceiling lighting, slightly reduced equipment costs, significantly reduced maintenance rates, achieved obvious energy-saving effects, and improved the utilization of electric energy, demonstrating good promotion significance.

Key words metro; vehicle depot lighting; centralized DC power supply; lighting energy saving

Author's address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Operation Branch, 315100, Ningbo, China

0 引言

地铁车辆段是地铁车辆停放、整备的管理中心所在地,是地铁行车系统的重要单位^[1]。照明供电系统承担地铁车辆段日常照明任务,由于车辆段工作时间长、自然照明状态较差的现实环境状态,对

照明提出了更高的要求。当前地铁车辆段照明存在的主要痛点为^[2-5]:①数据表明,照明用电占一般地铁车辆段用电量的 30% 左右,照明灯具的亮度固定不变,在非必要照明时段的全功率照明工作状态造成了大量的电能浪费。②传统的照明供电系统将交流电源通过电缆供给到每个灯具的 AC/DC (交流电/直流电)驱动后转换为直流电供灯具照明用,属于分布式交流供电;然而由于 AC/DC 驱动损坏率高,导致单灯维修率居高不下。据统计 80% 以上的灯具故障实际是灯具驱动故障,又由于车辆段建筑层高往往达到 10 m 以上,安装在车辆段建筑层顶的灯具及配套驱动损坏后的维修非常困难。③目前,为解决灯具光照调节研发的智慧化照明系统^[6-7],如 DALI、C-BUS 等,普遍需要独立的弱电通

信电缆,与电源电缆一同敷设到光源处,增加了施工成本与施工难度。④对于传统的分布式交流照明供电,单个灯具的配套驱动电源额定功率小,电能质量标准缺乏有效监管,汇集成大功率照明电流时,低功率因数、谐波含量超标等电能质量问题不容忽视。

表 1 是国内外电力照明研究机构和厂家使用的新型照明控制系统的技术对比。其中,我国的上海欧切斯实业有限公司和 ABB(中国)有限公司,以 DALI 控制器或 DALI + KNX 控制器作为照明控制系统的核心,采用交流供电的方式为灯具提供电力。这种照明系统的主要问题在于在轨道交通客运站的适用性较差,并且无法摆脱交流电力照明的效率、供电安全和电能质量问题。

表 1 国内外厂家新型照明控制系统的技术对比

Tab. 1 Comparison of new lighting control systems technologies between domestic and foreign manufacturers										
厂家名称	厂家面向区域	应用场景	照明供电方式	控制系统	控制回路	单路功率/kW	调光方式	调光技术	调色温	配套驱动电源功率/W
深圳市英可瑞科技股份有限公司	国内	轨道交通	直流供电	自研照明控制系统	最大 16 路	5.0	直流水载波	信号耦合设备调光	3 原色	5 ~ 300
台达照明台达电子企业管理(上海)有限公司	港澳台	隧道	直流供电	自研照明控制系统	最大 12 路	3.0	直流水载波	整流器载波	不可调	40 ~ 200
上海欧切斯实业有限公司	国内	商业物业	交流供电	DALI	单灯控制	2.4	调光电缆	0 ~ 10 V 电压信号	冷/暖色	13 ~ 240
ABB(中国)有限公司	国内	智能家居	交流供电	KNX + DALI	单灯控制	2.4	调光电缆	0 ~ 10 V 电压信号	冷/暖色	

以深圳市英可瑞科技股份有限公司和台达电子企业管理(上海)有限公司为主导的直流电力照明系统,各自具备独特的自研照明控制系统。台达直流照明系统主要用于隧道直流照明供电,系统需求相对简单;而英可瑞直流照明系统主要应用于轨道交通领域,尤其是客运站的直流电力照明,需求相对复杂。其中深圳英可瑞科技有限公司的直流照明系统在受控直流回路数、单路功率等方面具备明显优势,并且从较为原始的电压调光方式、整流器载波方式等,升级为信号耦合设备载波调光方式,避免了因整流器载波产生的诸多技术问题,是一种更加先进的智能化直流电力照明系统。

针对以上地铁车辆段照明供电广泛存在的行业痛点,现提出一种“智能化直流集中照明供电技术^[8]”及解决方案,通过将传统分布式交流供电电源改为集中式的交直流转换供电,并结合创新的电

力载波自动调光技术,实现地铁车辆段照明的智能化、节能和低维修率。

目前,以智能化直流集中照明供电技术为核心的照明解决方案(见图 1),率先在浙江宁波轨道交通 2 号线黄隘车辆段实施了商业应用。其运营数据表明,该照明供电方案实际运行状态佳,达到了智能化调光、降低维护率、节能环保的效果,具有良好的推广意义与价值。

1 系统方案

图 1 a)为传统交流供电照明方案,交流电源经交流配电柜,由电缆配送至交流灯具组,其中开关设备为传统微断,不能实现自动控制。传统交流供电照明方案的每个 LED(发光二极管)灯具都需要配备一个 AC/DC 驱动电源以点亮光源,这个分布式的驱动集成了整流模块、降压稳压和恒流输出功

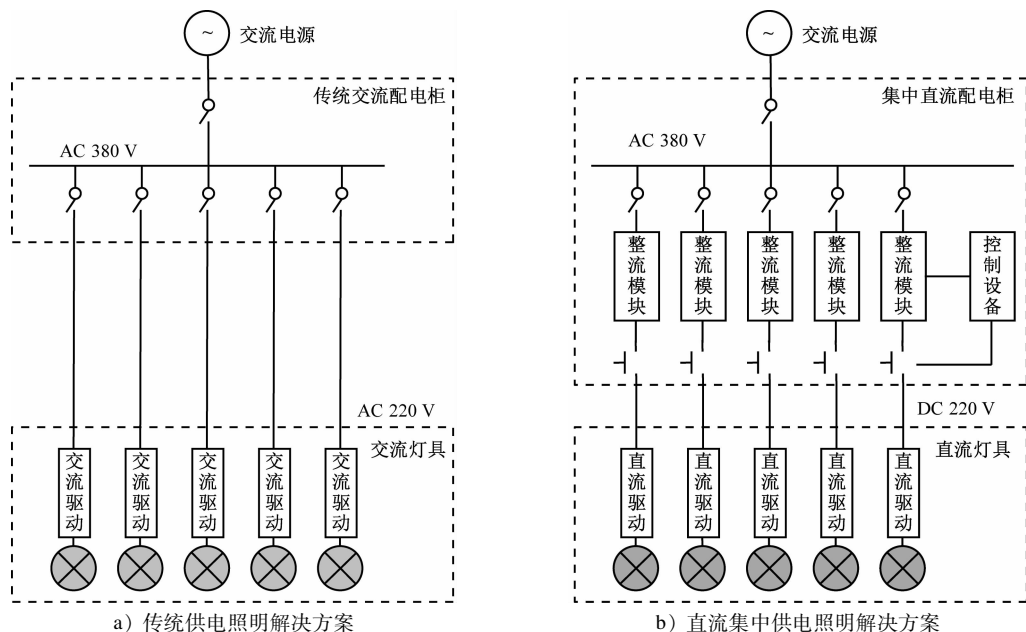


图 1 传统交流供电照明解决方案及直流集中供电照明解决方案对比

Fig. 1 Comparison between conventional AC power supply lighting and DC centralized power supply lighting solutions

能。由于驱动广泛使用电解电容,该电源通常的设计寿命仅为 1 万 h,而配套光源的寿命长达 5 万 h 以上,又由于这种分布式电源的数量众多,导致维修时长居高不下。

图 1 b) 为直流集中供电照明方案,系统集成了智能化网络通信技术、电力电子技术和智能化照明控制技术,整合并集成到相应的功能模块等硬件设备内,交流电源经集中直流配电柜转换为直流电,经电缆输送到直流灯具组。与传统灯具驱动不同,集中直流供电的驱动分为两部分,将易损的 AC/DC 转换部分以并联整流模块的形式集中配置于地面配电柜内,通过直流电驱动灯具点亮。其中并联整流模块采用 1 或多备份的供电方式,在某个模块受损时可在线更换,系统无需断电。

灯具驱动电源的 DC-DC 部分,采用无电解电容设计方案,仍保留在灯具中,实现直流降压供电,使得供电电压仍维持在与交流 220 V 峰值 310 V 同电压水平的直流 $250\text{ V} \pm 50\text{ V}$,这样做的优势在于①维持较高的线路电压以保持较低的电网线路损耗;②保持与分布式交流供电同型号的电缆选材,不额外增加电缆成本。

图 2 所示为直流集中供电系统照明控制方案。通过照明控制器,对 LED 灯具及相关设备设施状态进行实时检测、统计、分析、控制,同时通过移动通信网络与上位系统连接以实现远程互动控制,对各

个环节实施安全、可靠、经济、高效、简捷的智能化

管理。

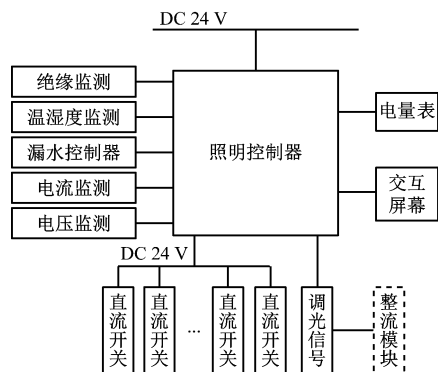


图 2 直流集中供电系统照明控制方案

Fig. 2 Control solution of DC centralized power supply system

照明控制器采用独立的低压直流 24 V 供电;通过实时采集直流配电柜内的温湿度、绝缘水平、漏水情况和交/直流侧的电压、电流数据,综合控制逻辑对直流开关进行自动控制,或通过发送调光信号对整流模块进行输出电压调整,以调整灯具亮度。

另外,对于车辆段本身工作时间较长、场所类型多、照明回路分散的取光特点,集中供电照明的综合控制逻辑需在照明配电时充分考虑满足以下要求:

1) 分时段控制,包括车辆段工作准备阶段、工作低谷时段、工作高峰时段、值班工作时段等,给予不同的灯光亮度策略;

- 2) 分区域控制,对库房、办公室、道路、道岔等照明要求有区别的区域实施不同的灯光控制策略;
- 3) 按需照明控制,对不定时产生的照明、突发状态下的照明,需即时提供相应的照明。

灯具调光方面,标准柜采用直流母线电压调压与母线电压载波两种调光技术,无需附加调光通信线缆或在灯具上加装电力载波调光模块,即可实现母线电压统一调光;也可兼容智慧化灯具实现灯具分组调光。如图 3 所示为两种的调光技术的实现方法。

图 3 a) 所示为母线电压统一调光,调光指令通过直流母线电压的变化,调整挂载在直流母线上的

全部灯具驱动的输入电压,灯具驱动通过测量输入电压实时调整驱动输出电流,实现全部灯具的同步亮暗。这种调光方式的优势在于可以按需快速调整车辆段所有灯具的亮度,便于照明的整体管理。

图 3 b) 所示为智能化驱动调光,将灯具驱动做智能化改造,可接收并读取母线电压的快速变化,通过信息解耦的形式读取调光指令,以灯具地址响应的方式调整驱动输出电流,从而实现单个灯具的调光。也可将所处位置相同或功能相同的多个灯具设置为同一地址,通过发送单个指令对多个灯具进行调光,从而实现灯具的分组调光。

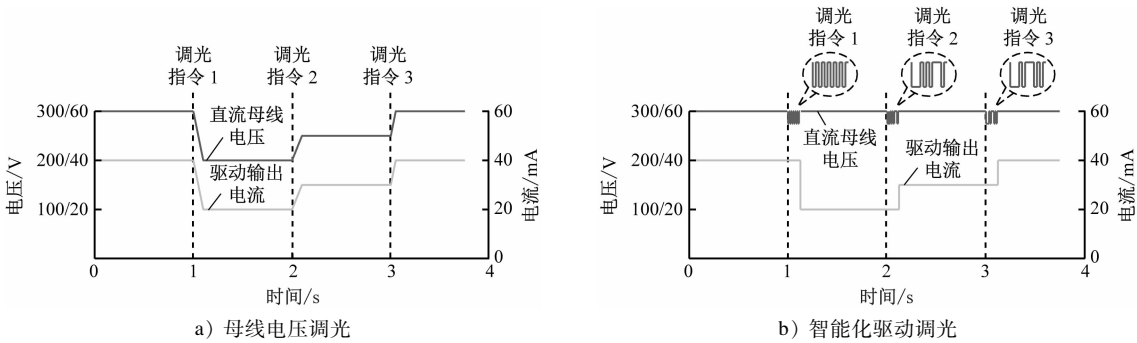


图 3 两种调光技术的实现方法
Fig. 3 Implementation methods of two dimming technologies

2 工程案例

以宁波市轨道交通集团黄隘车辆段停车列检库扩建工程为例,如图 4 所示为其直流照明方案电气原理图。该实际案例引入集中直流供电解决方案作为验证对象,目的是提高 LED 照明回路的可靠性,减少维修、维护工作量,研究直流电源直供下 LED 照明模式。

研究适合车辆段高大空间直流智慧化照明系统控制及运营模式;从车辆段高大空间直流智慧化照明系统优化配置、智能化联动调光控制、实时运行监控、故障识别,维修指引等几方面进行研究。车辆段照明最大功率为 50 kW,取 2 倍冗余裕量,共计安装 10 台照明柜;每个照明柜的额定功率为 10 kW,在直流母线排上分 15 个出线回路,每回可提供最大 1 kW 照明功率。采用智能化控制模块分别对交流总开关、并联整流模块和直流回路接触器进行控制。图 5 为车辆段直流集中供电照明实际安装效果图。图 6 为直流集中照明供电系统的人机交互界面。

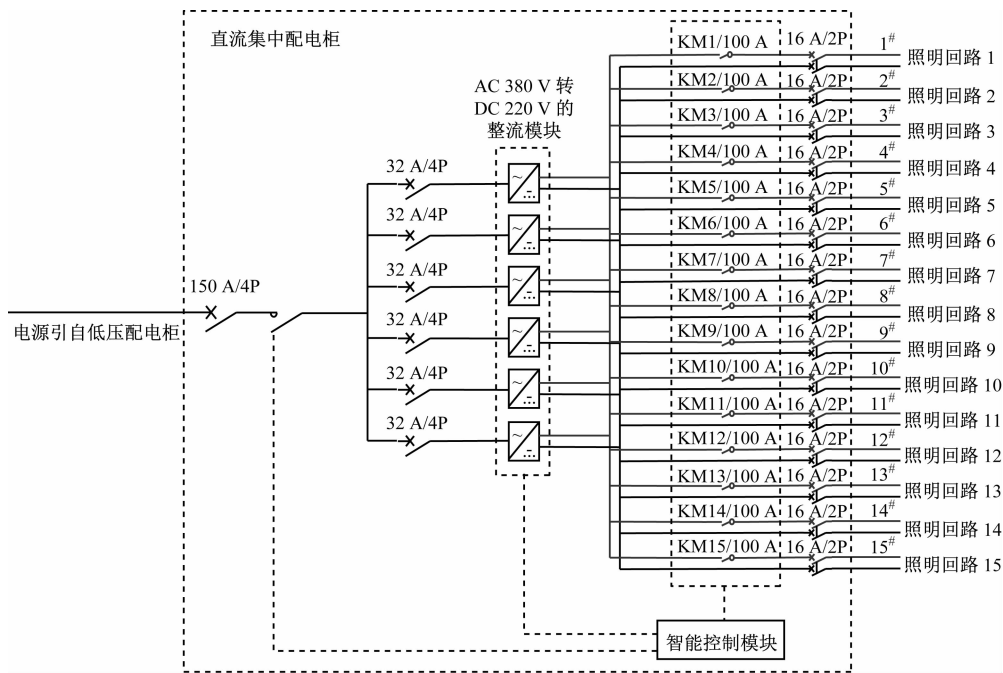
采用屏幕集成式 PLC(可编程逻辑控制器)作为控制核心和人机交互界面,可实时显示输入的电压电流、有功/无功、功率因数、累计用电量、历史故障记录、直流输出单回路电流、可单独选择某个照明回路的开关以及设置凌晨照明关闭模式等。

车辆段改造前后对照明供电状态进行了电气与照明数据的实测。表 2 为改造前后的有关用电数据。

表 2 改造前后车辆段电气与照明的有关数据							
Tab. 2 Electrical and lighting related data of the depot before and after reconstruction							
改造前后	有功功率/kW	功率因数	谐波含量/%	电网频率/Hz	电流不平衡度/%	平均照度/lx	综合效率/%
改造前	27.30	0.82	38.50	50.00	19.50	154.30	86.00
改造后	25.50	0.95	8.30	50.00	3.90	175.80	93.00

注:综合效率指直流照明系统的电能综合转换效率。

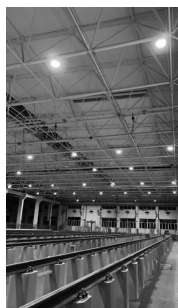
由表 2 知:车辆段电气照明进行直流集中照明供电改造后的平均照度由 154.3 lx 提升到 175.8 lx,但有功功率从改造前的 27.3 kW 下降到改造后



注:4P—4 位的三相交流断路器;2P—2 位的直流断路器;KM—信号耦合设备。

图 4 直流照明方案电气原理图

Fig. 4 Electrical principal scheme of DC centralized lighting solution



a) 实景图 1



b) 实景图 2

图 5 车辆段直流集中供电照明实际安装效果实景图

Fig. 5 Pictures of the actual installation effect of DC centralized power supply lighting in metro depot

的 25.5 kW,功率因数由 0.82 上升到 0.95,在照度提升了 14% 的同时视在功率下降 19%,有功功耗下降 6.6%;三相电流不平衡度由改造前的 19.5% 下降为 3.9%,注入电网的谐波含量由 38.5% 大幅下降为 8.3%,照明综合效率提升 7%。以上数据表明,经改造后的车辆段照明电力供应在电能效率、电能质量等方面较改造前有本质性的进步。

车辆段照明工程改造最初造价为 35 万元,实际改造花费为 32 万元。改造后投运至今,平均每天故障维修次数由改造前的 0.32 次/d 大幅下降为 0.03 次/d,显示了直流集中照明供电在故障维修方面的优势。另外从全寿命的角度出发,对 30 年全寿命周期内,采用直流集中供电照明方案与传统交流供电照明方案的车辆段供电照明方案进行了对比,如表 3 所示。

由表 3 可知:采用直流集中供电照明方案,在初期建设阶段,因采用了 AC/DC 变换的整流模块,投入成本较交流方案高约 10 万元,并且在 30 年的车辆段全寿命周期内,需 2 次更换寿命终结的整流模块,由此又带来了 20 万元的整流模块的额外费用。但在全寿命过程中,由于直流灯具寿命较长,并且较为省电,灯具维护成本下降 30 万元,累积可节省电费 47 万元;另外,由于直流照明可靠性高、维护次数少,可充分节省维护成本。最后 30 年全寿命周期



图 6 直流集中照明供电系统的人机交互界面截图

Fig. 6 Screenshot of human-machine interface of DC centralized lighting power supply system

下,直流集中供电照明方案可节省全寿命成本 227 万元,成本下降约 21%。

表 3 直流集中供电照明方案与传统交流供电照明方案的经济性对比

Tab. 3 Economic feasibility comparison of DC centralized power supply lighting and conventional AC power supply lighting solutions

比较项目	直流集中供电照明方案	传统交流供电照明方案
初次建设成本/万元	35	25
整流模块成本/万元	10	
整流模块寿命/年	10	
整流模块总成本/万元	30	
30 年灯具维护成本/万元	30	60
30 年累积电费/万元	670	717
30 年维护成本/万元	90	270
30 年全寿命成本/万元	845	1 072

3 总结

为解决目前地铁车辆段照明供电存在维修困难、施工复杂、电能浪费和电能质量较差的问题,将直流集中供电技术在车辆段照明中进行应用。以黄隘车辆段照明改造工程为案例,实际运行数据表明,直流集中供电应用于地铁车辆段照明后,设备成本小幅下降、维修率显著降低、节能效果明显、电能质量良好,具有较好的推广价值。

参考文献

[1] 毕湘利,柳献,李文勇,等. 盾构法地铁隧道管片新型连接件技术应用研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 1.
BI Xiangli, LIU Xian, LI Wenyong, et al. Research on the application of new connecting segment technology in metro shield tunnel [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 1.

[2] 张雄. 论地铁车辆段总平面设计的特点及其优化[J]. 铁道工程学报, 1999, 16(3): 91.

ZHANG Xiong. Design features of general layout for subway car depot and its optimization[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999, 16(3): 91.

[3] 董一龙. 地铁车辆段施工要点分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(33):739.
DONG Yilong. Analysis of key points of construction of metro depot [J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2017 (33):739.

[4] 袁环宇,张萌. 地铁车辆段过渡照明设计探讨[J]. 建筑电气, 2018, 37(3): 38.
YUAN Huanyu, ZHANG Meng. Discussion about transitional lighting design for metro vehicle depot [J]. Building Electricity, 2018, 37(3): 38.

[5] 王哲. 智能照明控制系统在杭州地铁七堡车辆段中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(6): 117.
WANG Zhe. Application of intelligent lighting control system at Qibao Vehicle Depot of Hangzhou Metro [J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(6): 117.

[6] 武春. 广州地铁嘉禾车辆段低压配电及照明设计研究与探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(4): 348.
WU Chun. Research and discussion on low-voltage power distribution and lighting design of Jiahe Depot of Guangzhou Metro [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(4): 348.

[7] 廖慧. 一种基于 DALI 总线的智能 LED 照明系统的设计[J]. 计算技术与自动化, 2018, 37(3): 73.
LIAO Hui. Design of LED intelligent lighting system based on DALI bus [J]. Computing Technology and Automation, 2018, 37 (3): 73.

[8] 刘琦,朱兆优,蓝贤桂. 基于 ZigBee 的船舶智能照明系统设计[J]. 现代电子技术, 2019, 42(22): 137.
LIU Qi, ZHU Zhaoyou, LAN Xiangui. Design of ship intelligent illumination system based on ZigBee [J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(22): 137.

[9] 商洪亮,王国荣,王华. 一种具有调光功能的 LED 驱动电源: CN110708815A[P]. 2020-01-17.
SHANG Hongliang, WANG Guoqiu, WANG Hua. LED driving power supply with dimming function: CN110708815A[P]. 2020-01-17.

(收稿日期:2022-08-20)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》
投稿网址:tougao. umt1998. com