

一种结合锂电池管理的城市轨道交通 信号系统电源健康管理方案

浦 伦

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的]为满足城市轨道交通信号系统电源的可靠性、维修性和安全性要求,提高信号系统电源稳定性,需要结合锂电池管理,研究信号系统电源健康管理方案。[方法]介绍了信号系统电源健康管理方案的整体架构。分别介绍了信号系统电源健康管理系统与锂电池管理系统的架构、功能及功能实现,阐述了二者的联动内容。[结果及结论]信号系统电源健康管理系统能实时监测信号电源状态,评估各部分健康度,并预测告警。信号设备功率提升使得对高效备用储能的需求增加。锂电池管理系统监控电池的充放电电压及电流,以及温度,采取保护措施,并利用数学方法估算电池的剩余电量和剩余寿命。二者联动能有效提高信号系统电源的整体稳定性和安全性。

关键词 城市轨道交通; 信号系统电源; 电源健康管理; 电池管理系统

中图分类号 U284.77⁺²

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.021

A Health Management Scheme for Urban Rail Transit Signaling System Power Supply Incorporating Lithium Battery Management

PU Lun

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] To meet the reliability, maintainability, and safety requirements of the power supply for urban rail transit signaling system, and to enhance the stability of the signaling system power supply, it is necessary to incorporate lithium battery management in studying SPHM (signaling system power supply health management) scheme. [Method] With an introduction to the overall architecture of SPHM scheme, the architecture, functions, and functionality implementation of SPHM and lithium battery management systems are described respectively, and the interaction between them is elaborated. [Result & Conclusion] The SPHM system can monitor the real-time signaling power supply status, evaluate the health of various components, and send predictive alarms. The increase of signaling system power will lead to an in-

creased demand for efficient backup energy storage. The lithium battery management system monitors the charging and discharging of voltage, current and temperature of the battery, implements protective measures, and estimates the SOC (state of charge) and lifespan using mathematical methods. The interaction between the two systems can effectively enhance the overall stability and safety of the signaling system power supply.

Key words urban rail transit; signaling system power supply; power health management; battery management system

随着城市化进程的加速和城市轨道交通的蓬勃兴起,具有节能、快捷便利、客运量大等优势的城市轨道交通已成为大城市可持续发展的有力保障。然而随着城市轨道交通线网规模的扩大和客运量的攀升,信号设备设施增加,设备功率增大,后备时间需求延长^[1]。一方面,信号电源系统逐渐转向使用能量密度更高的锂电池,而锂电池的维护和安全要求要高于传统铅酸电池的相应要求,故有必要为锂电池设计专用的电池管理系统;另一方面,随着对信号电源后备能源供应维保管理工作的要求越来越高,有必要在现有信号电源监测系统上增加新的健康管理功能。

为此,本文结合锂电池管理对城市轨道交通信号系统设备电源的健康管理方案(以下简称“电源健康管理方案”)进行研究。

1 电源健康管理方案的整体设计

城市轨道交通信号系统属于国家一级负荷供电,由两路不同的电源同时供电,同时配有不间断电源作为备用电源。不间断电源使用铅酸电池或者锂电池等储能设备,能在输入电源中断时继续维持信号系统供电,确保信号系统安全稳定运行。

电源健康管理方案应能预测电源系统及其部件的功能状态,包括评估部件性能并预测剩余使用寿命等,可为设备维护策略决策提供意见。维护人

员可以根据电源系统的健康诊断结果,在电源系统处于亚健康状态时提前调度相关资源,提前告警并采取措施,以避免或减少事故的发生,提高设备的工作效率^[2]。

锂电池虽具有能量密度高,放电能力强等优势,但其化学活性更强,电压与电池荷电状态存在不确定性,对锂电池管理和安全使用的要求也更高。锂电池由城市轨道交通信号系统设备电源的健康管理子系统(以下简称“电源健康系统”)与BMS(电池管理系统)共同管理。电源健康系统与BMS并不是两个完全独立的个体。二者均与锂电池在充放电过程中的运行状态息息相关,故电源健康管理方案主要包含电源健康系统与BMS的管理方案。

BMS在线检测电池组的电压、充放电电流及温度等外部参数,利用外部参数,结合数学方法,对电池内部的SOC(剩余电量)及SOH(电池健康度)进行评估测算,并均衡控制电池的充放电及保护动作等。这些措施能提高锂电池使用的安全性,并能有效延长锂电池的使用寿命^[3]。

通过通信、告警干接点等多种形式,电源健康系统与BMS实现了联动。电源健康系统可根据实际负荷估算备用电源的剩余可使用时间,为维护及抢修等工作提供指导依据。

2 电源健康系统

2.1 电源健康系统的架构

电源健康系统的监控范围划分如图1所示。电源健康系统的监控按监控范围可划分为站内监控、组网监控及全网监控^[4]。

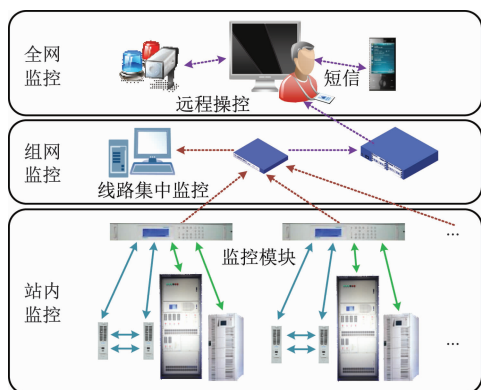


图1 电源健康系统的监控范围划分

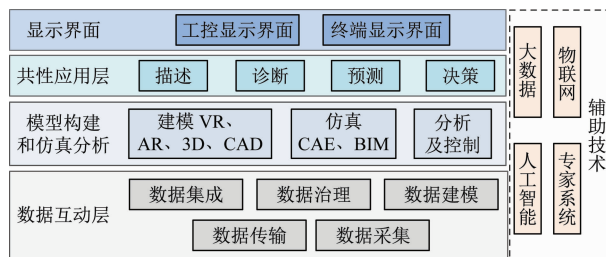
Fig. 1 Classification of power health system monitoring scope

站内监控范围主要包括电源屏监控单元、输入配电、输出端子、连接线及其他功率模块等。站内监控通过监控模块来监测信号电源系统各设备的实时基础信息,实时诊断关键信息,并将实时监控数据、诊断及处理数据传送到数据监控中心^[5]。站内监控是电源健康系统的基础信息来源。

组网监控对象主要包括电源屏监控单元上传的监测数据,一般为对站点内所有信号电源设备的采集信息。由于组网监控可能包括其他系统的设备信息,故用户可在线路集中监测系统中查看站内设备所有信息,有利于整体把握站点设备信息。

全网监控涵盖全部线网的集中监控数据。全网监控可以综合查看线网内各线路及各站点的基础信息,实时远程监控。站点的所有监测信息可以上传至云端。用户可以通过手机或电脑等终端实时把控现场设备信息,有利于及时发现现场告警信息,全面了解设备整体信息。

电源健康系统的软件架构如图2所示。监控设备采集和传输数据后,根据需求完成数据集成、建模和治理,并通过分析与控制、建模与仿真,实现对电源健康状态的描述、诊断、预测和决策等功能,将最终结果显示在工控机显示界面和终端显示界面上。由于电源健康系统功能的实现基于站内各设备监控信息的采集与处理,故需要考虑数据采集的全面性及长时间的大数据积累特性,根据采集信息进行大数据处理,利用信号电源专家故障诊断子系统智能分析,以实现对整个信号系统电源的智能化^[6]。



注:VR—虚拟现实;AR—增强现实;CAD—计算机辅助设计;CAE—计算机辅助工程;BIM—建筑信息模型。

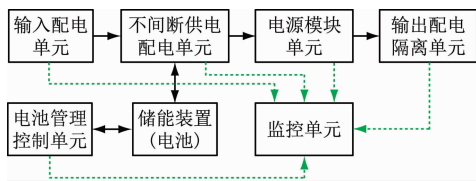
图2 电源健康系统的软件架构

Fig. 2 Software architecture of power health system

2.2 电源健康系统的主要功能

图3为电源健康系统的数据传输示意图^[7]。监控单元采集系统各部分的综合状态,进行健康状态分析及管理。部分输入配电单元、不间断供电电

源及电源模块可进行自主健康管理,其数据直接上传汇总至监控单元处理。

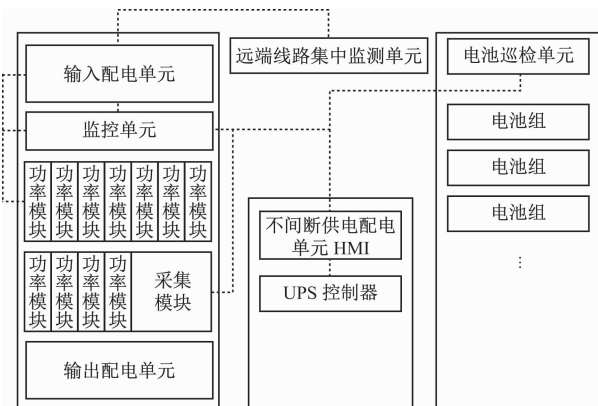


注:→表示电源系统中电能和电信号的传输方向;---→表示电源健康系统的数据传输方向。

图3 电源健康系统的数据传输示意图

Fig.3 Diagram of power health system data transmission

图4为电源健康系统站内监控结构示意图。其中:输入配电单元、不间断供电单元及监控单元可以自动监测模块电压、电流等状态;电池巡检单元实时监测电池数据并上传,当发现异常时,可以进行简单自我诊断,综合监控单元进行健康状态分析。



注:UPS—不间断电源;HMI—人机界面;·····表示设备间存在数据交互关系。

图4 电源健康系统站内监控结构示意图

Fig.4 Structure diagram of power health system station internal monitoring

电源健康系统的功能为:根据所有设备状态,汇总得出健康值;根据各设备的作用赋予不同的权重;根据设备维修记录,分析预测各设备的生命周期;根据日志分析,提前预估可能发生的告警;根据告警监控信息,结合业务拓扑图和历史日志进行故障定位;根据故障发生点,完成自动化故障预警;出现告警时,根据告警信息提供维修建议;根据设备状态,进行维保周期提醒;启动火灾监测;启动传感器监测;启动消防设备。

2.3 电源健康系统的功能实现

1) 智能监测功能的实现。电源健康系统融合了电池管理、能耗及现场设备智能监测等数据,能

实现对数据的智能分析、阈值预警、智能识别,实现故障预测及预警。对于锂电池,主要监测SOC等数据。

2) 寿命管理功能的实现。电源健康系统按最小可维修单元对监控范围内的设备进行编码,记录设备的出厂、安装、试验、送电、运行、维护及部件更换等业务数据,形成设备寿命管控结构树模型,从而实现对每台设备的全生命周期综合管控。锂电池寿命估计主要通过放电深度来估算锂电池与标称容量相比的剩余容量。

3) 信号电源专家故障诊断子系统功能的实现。电源健康系统通过通号专业多源异构的数据,建立专业分析的数据模型和综合评价体系,从数据分析中获取故障解决方案和维护建议,为故障诊断、健康评估、故障预测、维修决策、联动执行提供更智能、更贴近于设备真实状态的管控手段。

4) 智能联动功能的实现。电源健康系统的智能联动主要基于多种传感器的监测信息来实现。例如,发生火灾时,电源健康系统能根据传感器的异常告警信息,及时启动联动保护设备,必要时还能启动消防设备,以减少损失。电源健康系统还会与锂电池管理系统进行充放电控制联动,以防止锂电池的过充、过放。

2.4 电源健康系统的界面显示

电源健康系统监控单元界面能显示整个站点的信号系统电源各设备的综合状态,以及各模块或零部件的健康状态信息并给出建议。

各设备按功能及健康状态分值,结合权重,考虑温湿度等环境因素、设备寿命因素(根据设备出厂时间计算)及维保因素(根据维护、保修记录计算),得到综合评分,并按综合评分显示优秀、良好、警报和高危等健康状态等级,以更直观地反映设备健康状态。

电源健康系统的健康状态总览界面如图5所示。

3 BMS

3.1 BMS的主要功能与架构

BMS主要保证电池系统在安全的电压、电流、温度范围内运行,可识别个别电芯早期损坏,以便在异常情况下采取干预措施;BMS能根据环境温度、电池状态、负载功率需求决定电池的充放电功率,尽可能延长电池的使用寿命,还能提供电池系

统所需的状态信息等。BMS 的主要功能示意图如图 6 所示。

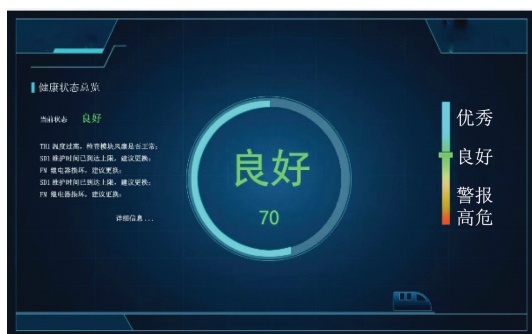


图 5 电源健康系统的健康状态总览界面

Fig. 5 Overview interface of power health system health status

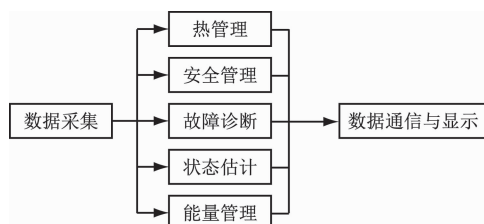
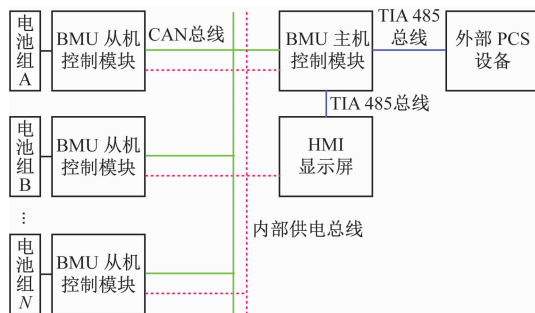


图 6 BMS 主要功能示意图

Fig. 6 Diagram of BMS (battery management system) main functions

BMS 主要由 BMU (电池模组监测单元)、BCMU (电池组管理单元)、HMI 显示屏、外部 PCS (储能变流器) 设备等组成,能完成对整个电池系统的智能化管理和控制。BMS 的结构拓扑图如图 7 所示。



注: CAN—控制器局域网。

图 7 BMS 的结构拓扑图

Fig. 7 Diagram of BMS structural topology

BMS 软件需要具备以下功能:

具备开机自检功能。开机后对电压、电流、温度等参数进行合理化判断;对通信的连通性进行判断,并以日志文件的形式实时保存 BMS 工作状态。

可通过地面分析软件(一般运行于调试用的计算机设备)或者集成于 BMS 的 HMI,设置电压、电流、温度的检测周期等参数。

具备掉电保存或默认恢复功能。每次上电或开机,按上一次设置运行;可通过地面分析软件的操作来恢复默认设置。

具备日志数据保存功能。BMS 通过外部 FLASH(闪存)存储日志数据。日志数据内容主要包括当前时间、单体电池电压和环境温度、BMS 信息(SOC、总电压、总电流)、故障事件(故障类型、故障相关数据)等。所有日志数据均为循环保存,当存储空间满后,新产生的日志数据将会覆盖日期最早的日志数据。当触发故障或解除故障时,BMS 会记录其前后 5 s 内的采样数据(单体电池电压、单体电池内阻、极柱和环境温度、BMS 信息),便于故障分析及定位。

BMS 支持电压、电流及温度等多种故障告警功能,且故障告警阈值根据电池的参数确定。

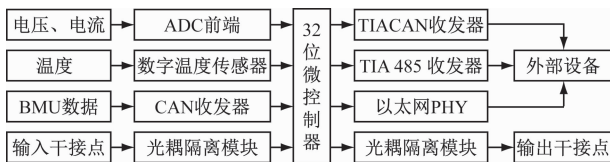
3.2 BMS 系统的硬件功能实现

BMS 硬件上整体采用 1 部主机(BCMU) + 多部从机(BMU)的连接架构。主机控制模块和从机控制模块均使用 32 位 ARM(嵌入式微处理器)为主控制器。32 位 ARM 成本低,性能强,自带 SRAM(静态随机存储器)和 FLASH,能满足 BMS 软件的空间需求,有丰富的外设接口,可实现采样、控制及通信等功能^[8]。

BCMU 主要对储能电池系统中的电池组进行管理,一般放置在电池组高压控制箱内,主要负责电池组的电压采集、电流采集,汇总组内单体电池电压和温度信息,计算电池组 SOC 及 SOH 等,执行均衡策略,实现电池故障诊断功能,根据电池故障信息实现电池组的就地保护和接触器控制等功能。BCMU 具有 CAN 通信接口,可实现同 BMU 的数据通信功能。BCMU 具备绝缘采集功能,具备冗余的 CAN 通信接口和采用 TIA 485 协议为标准的通信接口,用于与外部设备如显示屏、PCS 通信。使用光耦隔离的输入输出干接点,可以在保护内部电路的情况下,操作外部设备,监测外部继电器状态。BCMU 的硬件结构图如图 8 所示。

BMU 从机控制模块是 BMS 中集成被动均衡功能的从机控制模块。该模块能实时监测单节锂电池的电压和温度,还具有热管理和被动均衡能力。通过 CAN 总线,BMU 与 BCMU 组成具有高度

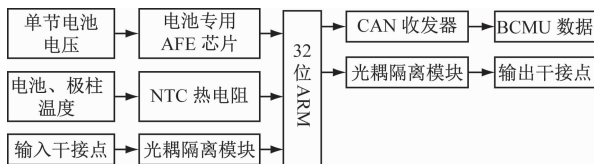
灵活性的 BMS。BMU 的硬件结构如图 9 所示。



注:ADC—模数转换器;以太网 PHY—以太网物理层收发器。

图 8 BCMU 的硬件结构图

Fig. 8 Diagram of BCMU (battery component management unit) hardware structure



注:AFE—电池模拟采集前端芯片,负责电池模拟量(电压、温度)的采集;NTC—热敏电阻。

图 9 BMU 的硬件结构图

Fig. 9 Diagram of BMU (battery module unit) hardware structure

3.3 BMS 系统的软件功能实现

在 BMS 系统的软件中,BMU 软件主要负责 AFE 采样数据的接收与处理,包括电压数据滤波与 NTC 热电阻温度换算;并使用安时积分及卡尔曼滤波等算法计算电池 SOC 及 SOH。BMU 软件还负责存储部分单体数据至持久化的存储中,以在掉电再上电时保持电池状态计算不间断。BCMU 软件主要负责与 BMU 进行通信并获取数据,同时向 BMU 发送命令。BCMU 软件还负责同 PCS、上位机设备,以及组态屏及工控机等监控单元进行通信。BCMU 内置了大容量的 NandFlash 存储芯片,用于存储电池组的重要事件,便于故障回溯。

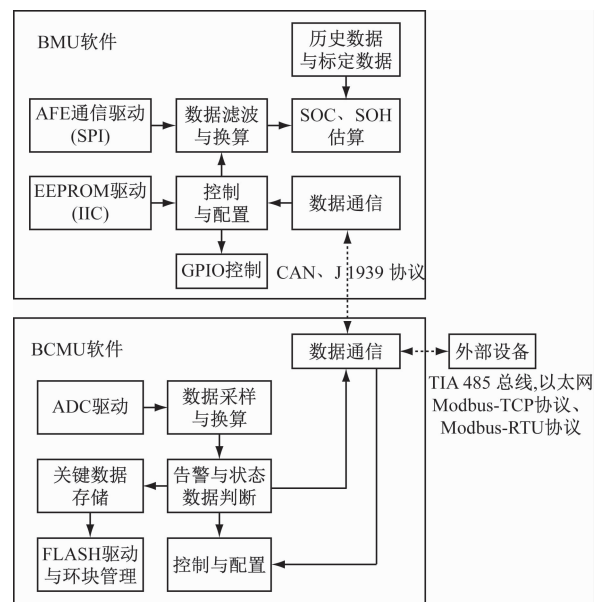
BCMU 同 BMU 及外部设备进行通信时,除了需要物理信道,还需要应用层通信协议的支持。在 BMU 与 BCMU 的通信中,物理信道为 CAN,应用层使用 J 1939 协议,或者 CAN Open 协议等。在 BCMU 与外部设备的通信中,为了标准化,可以视实际物理信道(TIA 485 总线或以太网)来选择 Modbus-RTU 协议和 Modbus-TCP 通信协议,便于对接。

BCMU 的设备接口多,外部设备复杂,具备以太网通信和文件处理等功能。BCMU 软件若使用传统的轮询架构,会使软件开发复杂,代码难以维护。故 BCMU 软件采用嵌入式设备的 RTOS(实时操作系统),如 FreeRTOS、RT-Thread、uC/OS^[9]等实

时操作系统,可以在保证采样、控制实时性的前提下,简化软件的开发。

BMU 需要在线估计电池单体的 SOC 及 SOH。在锂电池中,尤其是磷酸铁锂等类型的锂电池,其电压-SOC 曲线在较大的范围内呈平坦趋势,且锂电池的开路电压往往与实际电压存在一定差距,若使用传统的开路电压曲线进行计算,会产生较大的误差。因此,在 BMS 的软件中,使用开路电压校正法结合安时积分法和卡尔曼滤波器,可以获得更精准的计算结果。开路电压校正法在电池静置较长时间时,使用预先标定的数据对电池 SOC 进行标定,消除非静置状态时产生的累积误差。在电池充放电过程中,利用霍尔传感器或分流器等电流监测设备,采用安时积分法和卡尔曼滤波器在线计算 SOC,卡尔曼滤波器可以在一定程度上预测和校正安时积分法的结果,从而更精确地预测 SOC^[10]。

BCMU 软件与 BMU 软件的架构和关系如图 10 所示。



注:SPI—串行外设接口;EEPROM—电可擦除可编程只读存储;IIC—集成电路总线。

图 10 BCMU 软件与 BMU 软件的架构和关系

Fig. 10 Architectures and relationship of BCMU software and BMU software

4 电源健康系统与 BMS 的联动

电源健康系统与 BMS 的联动关系如图 11 所示。由图 11 可见,二者联动主要有以下几方面:

1) 电源健康系统能收集 BMS 的 SOC、SOH 及

均衡情况等参数,以及告警情况;能识别健康度较低的电池,能提醒维护人员及时更换已老化电池,对当前故障和潜在风险进行警告和预警。

2) 电源健康系统能记录 BMS 相对较长时间的充放电情况。通过充放电情况的分析,电源健康系统可以指导 BMS 在负荷低峰时进行静置校正、均衡等操作,以及辅助 BMS 进行充放电控制,从而最大化锂电池的使用寿命而不影响正常运行。

3) 电源健康系统能记录电芯长期 SOC-电压关系,通过深度学习等离线方式对 BMS 中的在线 SOC 计算模型进行参数校正与辨识,实时更新 BMS 计算模型,以适应电池在生命周期不同阶段中的变化。

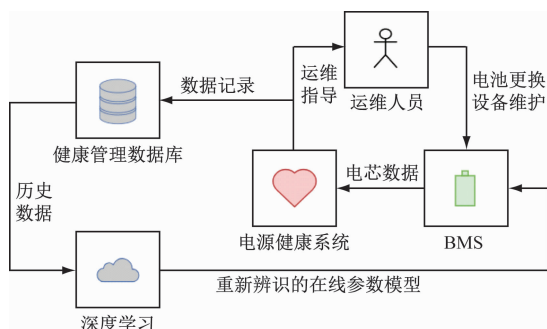


图 11 电源健康系统与 BMS 的关系

Fig. 11 Relationship between power health system and BMS

5 结语

本文基于锂电池的 BMS 和电源健康系统,提出的城市轨道交通信号系统电源设备健康管理方案,详细介绍了 BMS 与电源健康系统的架构、功能及功能的实现,并对二者进行联动整合,提高了信号系统电源的整体稳定性和安全性。

参考文献

- [1] 肖旭慧. 城市轨道交通信号系统新技术发展现状与展望研究[J]. 运输经理世界, 2022(14): 89.
XIAO Xuhui. Research on development status and prospect of urban rail transit signaling system new technology[J]. Transport Business China, 2022(14): 89.
- [2] 李聪. 地铁信号系统智能运维方案设计[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(2): 86.
LI Cong. Design of intelligent operation and maintenance plan of subway signaling system[J]. Railway Signalling & Commu-

tion, 2019, 55(2): 86.

- [3] 雷晶晶, 李秋红, 陈立宝, 等. 动力锂离子电池管理系统的研究进展[J]. 电源技术, 2010, 34(11): 1192.
LEI Jingjing, LI Qiuhong, CHEN Libao, et al. Review on power Li-ion battery management system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(11): 1192.
- [4] 董彦. 城市轨道交通信号电源组网的探讨[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(7): 40.
DONG Yan. Discussion on signal power supply networking for urban rail transit[J]. Railway Quality Control, 2016, 44(7): 40.
- [5] 李传建. 城市轨道交通信号智能运维系统的设计与应用[J]. 设备管理与维修, 2023(8): 10.
LI Chuanjian. Design and application of intelligent operation and maintenance of urban rail transit signal system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(8): 10.
- [6] 马龙. 城市轨道交通信号系统智能维护监测平台研究与应用[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(11): 73.
MA Long. Study and application of intelligent maintenance support platform for signal system in urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(11): 73.
- [7] 邓志翔. 城市轨道交通信号电源系统配置方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(6): 66.
DENG Zhixiang. Signal power configuration proposal on urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(6): 66.
- [8] 周伟光. 基于 STM32 的工业锂电池前端集中监控管理系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
ZHOU Weiguang. A STM32-based centralized front-end industrial lithium-ion battery monitoring and management system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [9] 李倩, 刘森, 刘茂盛, 等. 基于嵌入式操作系统 uC/OS-II 的 BMS 软件设计[J]. 电气应用, 2020, 39(2): 85.
LI Qian, LIU Sen, LIU Maosheng, et al. The design of BMS software based on embedded operating system uC/OS-II[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(2): 85.
- [10] 林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车 SOC 估计方法原理与应用[J]. 电池, 2004, 34(5): 376.
LIN Chengtao, WANG Junping, CHEN Quanshi. Methods for state of charge estimation of EV batteries and their application[J]. Battery Bimonthly, 2004, 34(5): 376.

· 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-04-25 出版日期:2024-11-10

Received:2024-03-18 Revised:2024-04-25 Published:2024-11-10

· 通信作者:浦伦,高级工程师,191125976@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