

上海轨道交通通信信号系统电子设备多元维修策略

张松杰 顾思渊 戴洋竞

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的] 上海轨道交通电子设备故障率逐渐上升, 传统的自主维修速度慢、返厂维修价格昂贵、周期长, 需要大量的库存备件, 造成了维护资源的严重浪费。对此, 提出一种由快速检测、深度维修、预测维修所组成的电子设备多元维修策略。[方法] 通过搭建综合性电源模块检测平台, 快速检测电源模块, 实现故障的精准定位, 从而提高维修效率。针对老旧的显示单元进行深度维修, 用 LED(发光二极管) 灯条进行改造, 优化功耗性能, 并进一步延长使用寿命。利用深度学习技术, 基于电子设备的基础信息、日常检修数据、运行监测数据、历史故障等信息搭建预测剩余使用寿命的模型, 进行预测维修, 科学、合理地动态调整检修维护周期, 解决传统预防维修模式中采用固定检修周期的问题, 避免了过度维修或欠维修情况的发生。[结果及结论] 在现场实际应用中, 自主设计的综合性电源模块检测平台能够快速精准定位故障点, 维修效率大幅提升了 83%; LED 灯条改造后, TOD(司机驾驶显示单元) 运行功耗下降了 30%, 显示效果提升显著, 并延长了使用寿命。在枪机摄像头的剩余使用寿命预测准确率达到 96.4%。预测维修能够精准调控检修周期, 使运维成本下降了 53%, 使故障率下降了 64%, 成效显著。

关键词 城市轨道交通; 通信信号系统; 电子设备; 多元维修策略

中图分类号 U284.92

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.11.024

Multi-faceted Maintenance Strategy for Electronic Devices in Shanghai Rail Transit Communication and Signaling System

ZHANG Songjie, GU Siyuan, DAI Yangjing

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

Abstract [Objective] As the failure rate of electronic devices in Shanghai rail transit system keeps on increasing, traditional maintenance approaches—characterized by slow speed of self-repair, high costs of factory repair, long repair cycle, and substantial inventory requirements—result in significant waste of maintenance resources. To address these issues, an electronic device based multi-faceted maintenance strategy consisting of rapid detection, in-depth repair, and predictive maintenance is

proposed. [Method] A comprehensive power module testing platform is established to enable rapid detection on power modules and precise fault localization, thereby enhancing repair efficiency. For outdated display units, in-depth repairs are performed, with LED new technology for replacement and upgrade to optimize power consumption and extend service life. Predictive maintenance is carried out using deep learning techniques to build models predicting the remaining service life based on electronic device fundamental information, daily maintenance data, operation monitoring data, and historical fault. Through conducting scientific and reasonable dynamic adjustments of maintenance cycles, the issues of adopting fixed repair cycle in conventional preventive maintenance mode are addressed, avoiding excessive repair or maintenance insufficiency. [Result & Conclusion] In practical applications, the self-designed comprehensive power module testing platform significantly improves fault localization accuracy and increases repair efficiency by 83%. After retrofitting the TOD (train operator display) units with LED light strips, the power consumption is decreased by 30%, significantly improving the display quality and extending the service life. In the remaining service life prediction using bullet camera, the accuracy rate reaches 96.4%. The predictive maintenance enables precise adjustment of maintenance cycles, resulting in a 53% reduction in operation-maintenance costs and a 64% decrease in fault rates, demonstrating substantial effectiveness.

Key words urban rail transit; communication and signaling system; electronic equipment; multi-faceted maintenance strategy

0 引言

目前, 上海轨道交通通信、信号、综合监控等专业的绝大部分设备属于电子设备。上海轨道交通的电子设备维修流程如图 1 所示。对现场的故障电子设备, 有能力维修的送公司内部电子检修室, 没有能力维修的设备返厂维修或者委外维修, 并研究其自主维修的可行性。对影响行车安全的板卡类设备, 和厂家成立联合实验室, 开展联合维修。

对非影响行车安全的电子设备,由电子检修室开展自主维修,修复之后通知现场班组领取修复件。

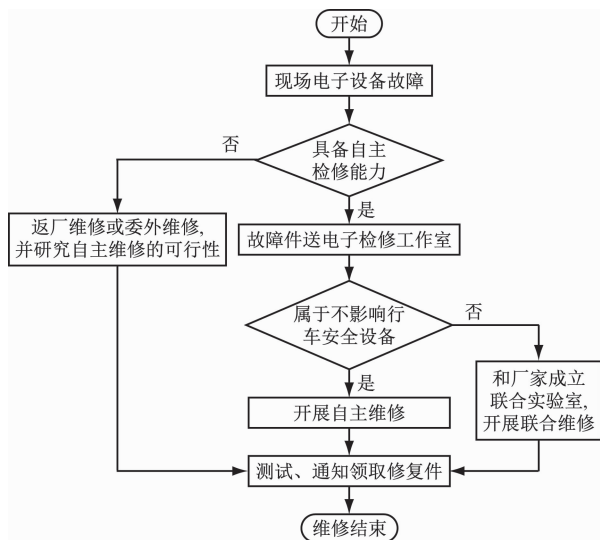


图1 上海轨道交通的电子设备维修流程

Fig. 1 Electronic equipment maintenance process for Shanghai rail transit

电子设备一般由电源模块、主控电路、工作电路和输入输出电路等组成。本文对2023年3月至2024年2月上海轨道交通电子检修室维修的电子设备故障原因进行统计。在所有故障中,电源模块故障占51.2%,显示单元故障占31.1%,主控板故障占7.5%,机械损坏故障占6.8%,其他部件故障及组合故障占3.4%。可见,电源模块和显示单元故障占比最高。

本文以TOD(司机驾驶显示单元)为例,对维修模式进行分析。现场要求TOD故障维修时间不超过2d;无论是何种故障,TOD返厂维修价格均为11000元,且返厂维修时长大多为14~60d;对于TOD主控板故障和软件故障,目前仍无法实现自主维修。TOD自主维修的价格及时长如表1所示。

表1 TOD自主维修价格及时长

Tab. 1 TOD self-repaired maintenance price and time

故障类型	故障占比/%	自主维修时长/d	自主维修价格/元
电源模块故障	36.7	0.4	60
显示单元故障	28.8	0.5	300
主控板故障	14.5		
软件故障	8.9		
其他部件故障及组合故障	11.1	0.3	30

结合表1,从价格及维修时长对返厂维修和自主维修进行对比可知:返厂维修虽能覆盖全部故障类型,但价格昂贵,且维修时间长,需要14~60d,难以满足现场实际需求;为在返厂维修时维持正常运营,现场班组需要大量的库存备件,造成了维护资源的严重浪费;主控板故障和软件故障尚无法实现自主维修;电源模块、显示单元和其他附件故障可采用自主维修,自主维修价格远低于返厂维修费用,维修时间均在1d之内,可满足现场实际需求。

文献[1]针对轨道交通车载电源研发了自动化评测系统,虽适应于现场但并不适用于电源综合检修,功能较局限。文献[2]提出了超薄LED(发光二极管)背光模组优化设计,但未介绍具体的改造流程。文献[3]提出用大数据搭建HMM(健康状态评估模型),基于电子部件的关键性能来评估其健康状态,从而指导电子部件深度维修,但传统模型的搭建难度大,实际应用效果差。

对此,本文提出电子设备多元维修策略,期望能进一步补充、完善、强化现有的自主维修模式。

1 多元维修策略

电子设备多元维修策略是由快速检测、深度维修、预测维修所组成的综合性、多元化维修策略。

1) 快速检测电源模块故障。虽然单个设备的维修用时较短,但随着维修设备数量的逐步增多,维修效率将大幅下降,会出现难以满足现场维修时长需求的情况。对此,可搭建综合性电源检测平台,实现电源模块的批量、快速检测,实现精准定位故障,提升维修效率。

2) 深度维修显示单元。显示单元故障大多由灯管老化,性能显著下降导致。对此,可合理改造显示单元,优化其功耗性能,以延长使用寿命。

3) 基于深度学习的预测维修。基于电子设备的基础信息及故障趋势等搭建电子设备剩余使用寿命的预测模型,可科学、合理地动态调整检修维护周期,能弥补传统维修模式采用固定检修周期的不足,避免发生过度维修或欠维修的情况。

1.1 综合性电源检测平台的搭建

综合性电源检测平台应具有以下性能:①高效性——综合性电源检测平台应采用模块化设计,可根据检测需求灵活配置功能,提高检测效率。②准确性——应定期校验综合性电源检测平台的各类检测功能和标准仪器,以确保测试结果的准确性和

测量精度。③可靠性——综合性电源检测平台电路设计和布局应添加抗干扰措施,减少外部干扰;关键部件应采用冗余设计,以确保该平台能满足日常的检测需求,即使发生故障也不影响运作。④易操作性——综合性电源检测平台应能实现自动化、批量化的电源模块检测,减少人工干预,提高检测效率和准确性。

综合性电源检测平台由主体电源、测试电源分解电路、故障分析区域、内置测量表显示区域、外接仪表区域等部分所组成。综合性电源检测平台实物如图 2 所示。综合性电源检测平台具有 5 路电压、电流采集检测装置,可以同时检测 5 个电源模块,能实现批量化检测,效率高。外接电源分析、负载测试及波形检测等功能,不仅基本涵盖了通信、信号系统电子设备电源模块的检测需求,还具备了软件自主检测故障的功能。

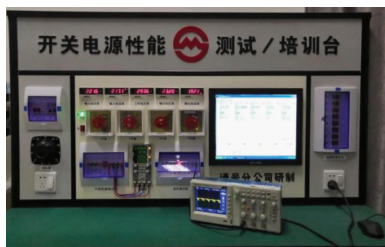


图 2 综合性电源检测平台实物图

Fig. 2 Photo of comprehensive power module testing platform

综合性电源检测平台的软件分析界面如图 3 所示。该平台可根据电压、电流的测量结果,自动进行故障定位,并分析确定故障类型。该平台可确定保险丝、桥式整流、输出滤波电容、振荡芯片、反馈电路 5 类故障。

1.2 显示单元的深度维修

对于运行多年的上海轨道交通线路,很多 TOD、显示器及监视器等显示单元老化严重,故障率较高。此类显示单元内部的背光源大多采用 CCFL(冷阴极荧光灯管)。CCFL 在工作过程中存在寿命短、发光效率低、亮度均匀性差、色彩纯度低、色阶表现差及驱动电压高等问题。目前,新型显示单元背光源采用的 LED 灯条,具有耗电量低、使用寿命长、坚固耐用、体积小、色彩丰富等特点。CCFL 与 LED 灯条的性能对比如表 2 所示。由此,本文提出通过改造老化严重的显示单元来实现深度维修——直接用 LED 灯条代替 CCFL。

LED 灯条由灯珠排列构成,具有不同的型号尺

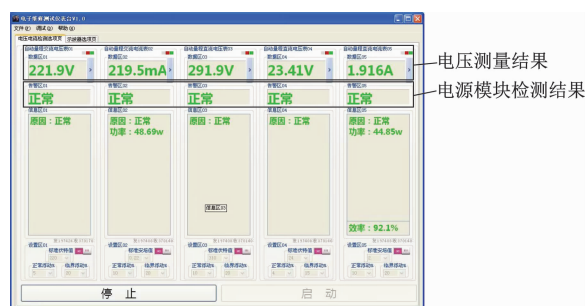


图 3 综合性电源检测平台的软件分析界面

Fig. 3 Software analysis interface of comprehensive power module testing platform

表 2 CCFL 与 LED 灯条的性能对比

Tab. 2 Performance comparison between CCFL tube and LED light strip

性能	CCFL	LED 灯条
材质性能	灯管非常脆,易碎	有一定韧性,不易碎裂,且安装方便
电路功耗	需要较高的电压来启动和维持发光,因此其功耗相对较高	电路设计简单,点灯电压为 9~15 V,功耗更低
可靠性	4 根灯管中只要有 1 根发生故障就无法工作	2 根灯条中,即使有 1 根发生故障也不会影响另一根工作
使用寿命	2 万~4 万 h 左右,且受使用环境和工作电流的影响较大	正常寿命为 4 万~6 万 h 左右。有的高质量 LED 灯管寿命甚至可以超过 10 万 h
通用性	灯管长度有限制,通用性差	灯条长度可以根据需要任意截取

寸,可以按需要任意截取长度。此外,LED 灯条的正常寿命为 4 万~10 万 h,基本与通信设备大修周期同步。为减小 LED 灯条故障的影响,建议采用 LED 双灯条冗余设计,一根灯条发生故障后,另一根灯条仍能正常工作。

LED 灯条的驱动电压仅为 DC 9~15 V。改造时需要将电源板上 CCFL 的高压电路部分隔离,并加装 LED 灯条的双路 DC 12 V 恒压电路模块。恒压电路模块接口名称分别为 VIN1 接口、VIN2 接口、ENA 接口、DIM 接口、GND1 接口、GND2 接口,对应的引脚功能如表 3 所示。将 LED 灯条的双路恒压电路模块的接口分别和电源板接口相连接,即可完成 LED 灯管电源的改造。

1.3 基于深度学习的预测维修

每类电子设备都有其设计使用寿命,而实际的使用寿命均小于其设计使用寿命。这和设备工作

表 3 恒压模块的接口定义与功能

Tab. 3 Interface definition and function of constant voltage module

接口名称	定义与功能
VIN1、VIN2 接口	电源输入端(相应电压为 12~30 V)
ENA 接口	开关控制端(相应电压为 0~5 V)
DIM 接口	亮度调节端(相应电压为 3~5 V)
GND1、GND2 接口	接地端

的环境及人工维护的方式等因素密切相关。为确保设备的稳定工作,需要在实际使用寿命结束前对其进行检修维护,以避免发生故障,影响运行安全。

电子设备的传统维修模式经历了 3 个发展阶段:①故障维修,即在设备发生故障后进行抢修;该维修模式无法满足城市轨道交通高效运营的需求。②预防维修,即按设定的固定检修频次进行维修;但该维修模式无法得知设备的剩余使用寿命,会造成过度维修或欠维修的情况。③状态维修,即通过监测设施对电子设备关键参数实时自动盯控,一旦发生波动就触发预警;此模式理论上监测的点位越多就越能全面管控设备的状态,但监测设备的购置及安全可靠性维护,也需要较高的成本。

对此,本文提出基于深度学习的预测维修模式:利用深度学习神经网络搭建电子设备剩余使用寿命的预测模型(以下简称“寿命预测模型”),根据预测的剩余使用寿命来动态调整检修维护周期,既能避免故障的发生,也能避免因采用固定检修周期而造成的过度维修或欠维修情况,还能为检修维护周期提供科学的依据,并能进一步提高电子设备维修的针对性、有效性和前瞻性。

寿命预测模型采用基于机器学习的前馈神经网络模型。前馈神经网络模型由输入层、隐藏层和输出层组成,通过多层神经元之间的连接来学习和表示数据中的复杂模式,并将输入映射到输出;其隐藏层使得神经网络能够学习到输入数据中的非线性关系,从而提高寿命预测模型的预测能力。寿命预测模型的输入数据包括运行时长、工作环境温湿度、日常检修数据、运行监测数据、历史故障等信息。设备运行时长是影响设备实际使用寿命的最直接因素,维护方式及使用环境等因素也和设计实际使用寿命密切相关。根据相关维修数据,环境温度及湿度较高的电子设备故障率也较高。日常检修数据和运行监测数据能够及时反映电子设备状态的变化趋势。历史故障信息分布存在一定发生

规律,是预测下一次故障发生的重要依据。寿命预测模型的神经网络结构如图 4 所示。

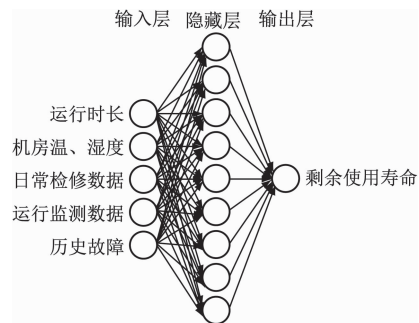


图 4 剩余使用寿命预测模型的神经网络结构

Fig. 4 Neural network structure of remaining service life prediction model

2 多元维修策略的应用效果

2.1 综合性电源检测平台的效果测试

为检验综合性电源检测平台的应用效果,以某台送修的故障功率放大器为例,利用综合性电源检测平台进行负载测试。该功率放大器采用型号为 VC-40W 的开关电源。接通负载后,输出电压急速下降。由此可确定,该功率放大器故障为电源模块故障。经软件自动分析定位故障点,进一步确认为滤波电容故障。测试结果显示,综合性电源检测平台大幅缩短了故障检测的用时,提高了维修效率。

2.2 深度维修显示单元的效果测试

为检验深度维修显示单元的效果,对 1 台现场送修的使用时间长达 5 年的 TOD 做背光改造。送修的 TOD 开机后屏幕图像较暗且色彩泛黄。拆开机器后发现,CCFL 头部发黑严重,故诊断为 CCFL 老化故障。

深度维修时,将 CCFL 更换成双 LED 灯条,将原显示单元供电电路改造成双路恒压直流电路模块,以实现为 LED 灯条供电。

TOD 改造前后的画面显示对比效果如图 5 所示。由图 5 可见,深度维修后,TOD 色彩显示效果显著提升。经测量,与维修前相比,深度维修后 TOD 的运行功耗降低了 30%。由此可见,深度维修不但能解决故障,还能提升设备性能,降低运行功耗,并延长使用寿命。

2.3 基于深度学习的预测维修效果测试

为检验预测维修的效果,对枪机摄像头的剩余使用寿命进行预测。在寿命预测模型前馈神经网

络中的隐藏层设置 12 个神经单元,随机选取 300 组枪机摄像头数据作为训练集,并利用完成训练后的寿命预测模型对 1 组枪机摄像头进行测试。枪机摄像头的预测剩余使用寿命和实际剩余使用寿命如图 6 所示。



a) 改造前

b) 改造后

图 5 司机驾驶显示单元(TOD)改造前后对比

Fig. 5 Comparison of TOD before and after modification

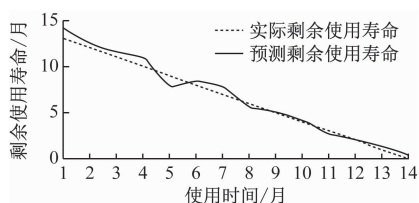


图 6 枪机摄像头的预测剩余使用寿命和实际剩余使用寿命

Fig. 6 Predicted remaining service life and actual remaining service life of bullet camera

由图 6 可知:训练后寿命预测模型的预测准确率高达 96.4%,能满足现场实际使用的需求;剩余使用寿命在 0 附近存在误差,会造成检修维护周期调整滞后,需要设置一定的提前裕量,比如可将预测剩余使用寿命为 5% 设定为检修维修的节点。

2.4 综合应用效果

现场采用多元维修策略后,电子检修室的维修流程进行了优化调整,对电源模块故障和显示单元故障采用了快速检测和深度维修。优化后的电子设备维修流程如图 7 所示。

根据 2024 年 4 月至 6 月电子检修室的电源模块和显示单元维修数据统计,采用多元维修策略后的维修效率比之前大幅提升了 83%,能够满足现场的维修需求。对部分枪机摄像头设备开展试点预测维修,维修模式从预防修 + 状态修,转变为状态修 + 预测修。试点维修结果显示,基于深度学习的预测维修能够精准调控检修周期,使运维成本下降了 53%,使故障率下降了 64%,成效显著。

3 结语

本文通过对上海轨道交通电子设备多元维修

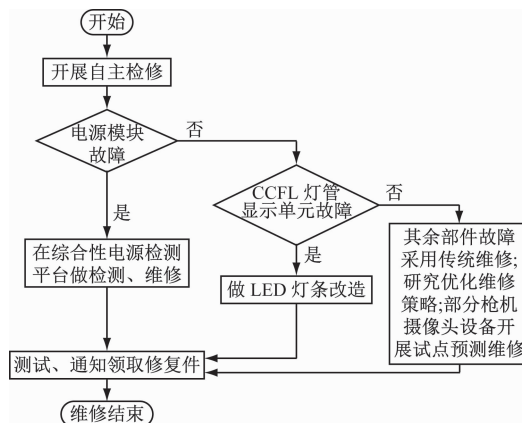


图 7 优化后的电子设备维修流程

Fig. 7 Maintenance process for electronic devices after optimization

的研究及应用进行探讨,揭示了多元维修理念和技术手段在地铁电子设备维修管理中的重要性和优势。实践表明,多元维修策略能够有效提高设备维修效率和质量,降低运营成本,为地铁安全、高效运营提供有力保障。未来,随着技术的不断进步和创新,多元维修理念和技术手段将在地铁电子设备维修管理中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 王文军,郭玉峰,林旭光,等.用于轨道交通车载电源性能自动化评测系统[J].吉林大学学报(信息科学版),2019,37(6):677.
WANG Wenjun, GUO Yufeng, LIN Xuguang, et al. Automatic performance evaluation system for on-board power supply of rail transit[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2019, 37(6): 677.
- [2] 黄开军.关于超薄LED背光模组优化设计的几点探讨[J].今日自动化,2022(6):28.
HUANG Kaijun. Several discussions on optimal design of ultra-thin LED backlight modules [J]. Automation Today, 2022 (6): 28.
- [3] 余磊.用大数据指导电子部件深度维修的探究[J].现代城市轨道交通,2021(6):35.
YU Lei. Research on in-deep maintenance of electronic components guided by big data [J]. Modern Urban Transit, 2021 (6): 35.

· 收稿日期:2024-07-10 修回日期:2024-08-20 出版日期:2024-11-10

Received:2024-07-10 Revised:2024-08-20 Published:2024-11-10

· 通信作者:张松杰,工程师,2473568917@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