

基于信号系统延寿需求的设备健康度 综合评估方法与实践

季庆华¹ 赵 辉²

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200072, 上海; 2. 北京地铁科技发展有限公司, 101309, 北京)

摘 要 [目的] 常规的设备健康度评估方法存在片面性和局限性, 需要研究一种适用安全苛求的信号系统的设备健康度评估方法, 旨在控制全生命周期成本, 延长系统使用寿命, 并解决目前大部分城市地铁建设资金紧张的痛点问题。

[方法] 从几种常规设备健康度评估方法入手, 构建了一种综合评估模型(从年均返修率数据角度评估设备历史状态表现, 设备设计理论寿命与实际在线服役时间评估使用年限, 现场调研实际工况和实验室抽样检测结果评估设备当前状态等多维度); 综合以上多维度信息, 制定了针对信号系统安全设备的综合评估方法。[结果及结论] 通过将该评估方法进行实践应用, 经过数据统计和分析, 形成实际评估结论和对应的维护建议, 验证了该设备健康度综合评估方法的可行性, 同时实现了基于延寿需求对信号系统的深度体检, 并有针对性地制定了预防性维护措施; 提出了后续在数字化、智能化技术方面的改进计划。

关键词 城市轨道交通; 信息系统; 设备健康度; 综合评估; 预防性维护; 延寿需求

中图分类号 U231.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.10.054

Comprehensive Evaluation Method and Practice of Equipment Health Grade on Signaling System Service Life Prolonging Requirements

Ji Qinghua¹, Zhao Hui²

(1. CASCO Signal Ltd., 200072, Shanghai, China; 2. Beijing Subway Technology Development Co., Ltd., 101309, Beijing, China)

Abstract [Objective] Evaluation methods for conventional equipment health grade tend to be one-sided and limited in scope. There is a need to develop an evaluation method tailored to the stringent safety demands of signaling systems. The goal is to control the full lifecycle costs, extend the system longevity, and address the general pain point of financial constraints faced by most urban metro constructions at present. [Method] Starting with several conventional equipment health grade evaluation methods, a comprehensive evaluation model is constructed. The equipment historical performance is evaluated by an-

nual average repair rate data, the equipment service life is evaluated by comparing the equipment designed theoretical lifespan with actual online service time, and current equipment conditions by field survey of actual working conditions and laboratory sampling test results. By integrating these multi-dimensional data points, a comprehensive evaluation method for signaling system safety equipment is developed. [Result & Conclusion] The practical application of this evaluation method, supported by data statistics and analysis, produces concrete evaluation conclusions and corresponding maintenance recommendations. This validates the feasibility of the comprehensive equipment health grade evaluation method. At the same time, the application of this method enables an in-depth inspection of signaling systems based on service life prolonging requirements, facilitates the formulation of targeted preventive maintenance measures, and proposes plans for future improvements in digitalization and intelligent technology.

Key words urban rail transit; information system; equipment health grade; comprehensive evaluation; preventive maintenance; longevity demand

截至 2023 年底,我国共有 10 个城市拥有运营了 15 年以上的城市轨道交通系统,这些系统共涉及 21 条运营线路。预计在接下来的 5~10 年内,将有更多城市和线路进入信号系统改造周期。然而,受新型冠状病毒肺炎、规划政策等多种因素影响,各地在改造线路时主要以成本控制为主,同时系统延寿及分阶段改造的需求也在增加^[1-2]。

目前,我国尚缺乏特别完备的信号系统安全苛求设备的健康度评价标准和体系。长期以来,城市轨道交通运营维护从故障修转向状态修的迫切需求并未得到很好的满足。基于这些实际需求,有必要提出一种基于延寿需求的、适合信号系统的设备健康度评价模型,以提供精准的设备健康度及性能评估方法,从而有效保障地铁运营的安全与稳定。

1 传统设备健康度评估方法

常规的设备健康度评估方法有基于动力学的方法、基于传统故障诊断的方法、基于统计分布的方法、基于机器学习的方法等。

基于动力学的方法:通过量化设备工作时的环境因素和受力情况,建立设备振动与系统参数之间的关系,进而研究状态机理、确定设备状态的一种评估方法。

基于传统故障诊断的方法:通过信号处理手段对设备振动信号进行处理,提取表征设备状态的有效信息,判断设备是否发生故障的一种评估方法。

基于统计分布的方法:寻找在不同状态下设备振动信号数据分布的数学模型,然后,利用此模型计算设备当前数据与设备历史健康状态数据之间的差异性 or 相似性来估算设备状态的健康程度。

基于机器学习的方法:将事先组织好的统计数据 and 试验数据直接作为学习系统的输入,然后对其归纳推导而得出评估设备健康度并给出维护指导的方法。

以上几种常规的评估方法都有其片面和局限性,通过摸索和实践总结,本文提出了适用于安全苛求的信号系统设备的健康度综合评估方法^[3]。

2 设备健康度综合评估方法

设备健康度综合评估方法是数据统计与抽样检验结合、设计理论分析与现场实际调研结合的多维度评估方法。其分为以下几个方面。

2.1 设备状况历史表现

通过维修台账,采用近 3~5 年的历史数据,统计出信号系统关键设备的故障率。以年均返修率指标为依据,对设备历史表现进行评估^[4],并将此评分记为 P_1 (见表 1)。

排除检测无故障的无效返修数据,再对故障率高的设备做进一步分析。

2.2 设备使用年限

参考产品设计寿命、行业标准定义的主要设备寿命以及设备实际已使用的时间,对设备使用年限进行了评价^[5],并将此评分记为 P_2 (见表 2)。

安全等级高的产品,如 SIL4 (安全完整性等级 4) 的列车控制产品,设计寿命为 20 年以上;一般通用产品如计算机、服务器等,其设计寿命为 8~10 年^[6-7]。

表 1 设备历史表现评分表

Tab. 1 Equipment historical performance evaluation scores

历史表现等级	P_1 取值范围	年均返修率指标值/%	说明
等级 1	[90,100]	≤ 1	健康度良好,无使用风险
等级 2	(80,90]	(1,2]	健康度较好,低使用风险且无须控制措施
等级 3	(70,80]	(2,5]	健康度中等,存在应用风险,应予以风险预警
等级 4	(60,70]	(5,15]	健康度较差,须要制定控制措施和控制计划
等级 5	(50,60]	(15,25]	健康度差,应在限定时间内完成控制措施导入
等级 6	(0,50]	> 25	高应用风险,不建议继续使用

表 2 设备使用年限评分表

Tab. 2 Equipment service life evaluation scores

使用年限级别	P_2 取值范围	使用年限指标取值范围	说明
等级 1	[90,100]	$Y < 0.160T$	使用年限指标良好,无使用风险
等级 2	[75,90]	$0.160T \leq Y < 0.625T$	低使用风险且无须控制措施
等级 3	[60,75]	$0.625T \leq Y < T$	存在应用风险,应予以风险预警
等级 4	[0,60]	$Y \geq T$	超期服役

注:Y 为设备使用年限;T 为设备设计寿命。

2.3 现场调研

通过实地勘查,本研究深入了解了实际设备的使用工况及环境,并进行了抽样检查以评估设备的运行状态。设备的实际使用工况涵盖了设备日检、月检、年检的具体内容及发现的问题,同时考虑了实际运行中的设备数量,如非高峰时间段的列车数量,以及设备的日均运行时间和动作次数等关键指标。在设备使用环境的调研方面,本研究重点关注了环境温度、湿度、积灰情况、电磁干扰水平以及振动状况等因素。

抽样检查过程中,本研究选取了典型站点的主要设备,并重点检查了其关键元器件,以确认是否存在异常报警,外观是否保持完整,连接是否牢固无松动等。随后,本研究对每项勘查内容进行了详细记录,并根据检查结果进行了综合评分,记为 P_3 。为便于说明,以下仅截取评分表的部分内容,如表 3 所示。

表 3 现场检查评分表
Tab.3 Site inspection evaluation scores

检查项目	P_3 取值范围			
	[90,100]	[70,90)	[50,70)	[0,50)
机械件、板卡、元器件、连接器完整性	机械件、板卡、元器件、连接器等设备完整	机械件安装不牢靠,板卡松动,连接器松动	把手损坏,或连接器外壳破损,或螺钉松脱、元器件损坏	存在零部件及元器件缺失
灰尘	目视无灰尘和异物堆积	存在少量灰尘,放大镜下器件引脚间可见灰尘	灰尘充满芯片引脚间隙,贴片器件引脚可见灰尘堆积	灰尘多,小器件被灰尘覆盖;有证据表明灰尘中包含金属颗粒
三防漆完整性	三防漆完整,无开裂和起皮	有三防漆脱落,有起皮、脱落、开裂等的倾向	三防漆存在起皮、脱落,出现器件引脚等个别位置裸露	脱落点位置面积较大,或器件三防漆破损开裂超过 2 处
板卡、机械件等表面凝露	无水痕	元器件区域有少量白色水痕	元器件区域有白色水痕,有水痕和污渍的结合物	大面积有白色水痕存在,有多处水痕和污渍的结合物
正线运行环境情况	不存在化工厂类的环境,全地下站点	存在化工厂类的环境,高架站点 1~10 座	存在化工厂类的环境,高架站点 10~20 座	存在化工厂类的环境,高架站点大于 20 座
现场的日常维护方式	有规范的维护方式,且执行记录完好	无规范的维护方式,每年自行维护	无维护方式,偶尔自行维护	无维护方式,无定期维护保养

2.4 实验室检测

本研究将现场采集的样本带回实验室进行进一步检测,主要对关键元器件进行参数测量,以评估其退化水平。同时,还分析了灰尘的成分、腐蚀的程度等因素,以此为基础对设备在现场长期服役后可能面临的寿命瓶颈及其元器件的退化情况进行定性评估。

2.5 评估总结及维护建议

根据以上设备历史表现、使用年限、现场工况调研等三方面的定量评估,得出综合加权评分:

$$P = 30\% P_1 + 30\% P_2 + 40\% P_3 \quad (1)$$

式中:

P ——设备最终健康度评分。

结合现场调研及实验室检测情况,针对健康度等级为 Level 5 (即健康度差,高应用风险)的设备,进一步给出维护使用建议,如改善工作环境,实施预防性更换、轮修等维修策略。综合健康度评分及维护等级对应表,具体见表 4。

3 应用实践与案例分析

以某条具体线路中运行时间超过 10 年的车载控制器板卡为例,运用设备健康度综合评估方法进行了深入实践与分析。通过利用维修系统中详细记录的硬件故障维修数据,并结合设备的运行年限、现场调研的实际情况,本研究对该信号系统中

表 4 综合健康度评分及维护等级对应表

Tab.4 Comprehensive health scores and corresponding maintenance levels

综合健康度等级	P 取值范围	设备健康度情况说明及维护策略
等级 1	[91,100]	健康度良好,无使用风险
等级 2	[81,91)	健康度较好,低使用风险且无须控制措施
等级 3	[71,81)	健康度中等,存在应用风险,应予以风险预警
等级 4	[61,71)	健康度较差,需要制定控制措施和控制计划
等级 5	[0,61)	健康度差,高应用风险,应在限定时间内完成控制措施导入

车载控制器板卡的 8 个关键类别进行了详尽的案例

3.1 设备状况历史表现

综合近 5 年平均返修率、近 1 年返修率及维修类型情况计算加权评分,其中近 5 年平均返修率评分占权重 25%,近 1 年返修率评分占权重 30%,维修类型评分占比权重 45%,形成车载板卡的历史表现评估表,如表 5 所示。依据表 1 设备历史表现评分表的等级定义,对于评估为等级 3 及以下的板卡 8、板卡 7 和板卡 6 予以风险警示。

3.2 使用年限评估

结合板卡设计寿命和已使用年限,形成了板卡使用年限评估表,如表 6 所示。

表 5 板卡历史表现评估示例表

Tab. 5 Historical performance evaluation samples of circuit boards

板卡序号	近 5 年平均返修率得分	近 1 年返修率得分	维修类型得分	P_1
板卡 1	75.37	100.0	88.20	88.53
板卡 2	60.42	100.0	88.68	85.01
板卡 3	65.36	100.0	82.93	83.66
板卡 4	66.90	86.7	89.74	83.12
板卡 5	50.34	95.9	86.58	80.32
板卡 6	41.39	100.0	81.20	76.89
板卡 7	50.43	93.8	80.14	76.81
板卡 8	55.48	93.8	68.63	72.89

3.3 现场调研工况评估

现场调研一列车载设备,观察其运营时段的环境温度、湿度、振动等条件,并在检修时检查机笼内积灰情况、板卡腐蚀状况、三防漆的完整性以及连接器的状态,形成现场调研工况评估表,如表 7

表 7 板卡现场调研工况评估示例表^[8]

Tab. 7 Field survey working condition evaluation examples of circuit boards^[8]

板卡序号	完整性	灰尘	腐蚀	三防漆	连接器	凝露	防静电措施	运行环境情况	日常维护方式	P_3
板卡 1	8	12	5	12	8	4	6	5	8	68
板卡 2	8	10	5	11	7	3	7	5	8	64
板卡 3	8	12	5	12	8	4	8	5	8	70
板卡 4	8	11	5	11	8	3	6	5	8	65
板卡 5	8	10	5	11	6	3	6	5	8	62
板卡 6	8	10	5	11	8	4	6	5	8	65
板卡 7	8	10	5	12	7	4	7	5	8	66
板卡 8	8	10	5	11	6	4	6	5	8	63

针对板卡 BOM(物料清单)组成和元器件特定情况,选取板卡 8、板卡 5 进行测试,测试发现印制板部分未见明显 CAF(电导阳极现象),未见明显影响设备寿命的裂纹和表面异物;少部分电解电容存在明显变化,大部分元器件未见明显退化。

3.5 评估总结及维护建议

对上文 3.1、3.2、3.3 部分进行总体评估,如表 8 所示。

根据 3.4 实验室检测结果进一步给出维护建议。该线路车载控制器板卡总体表现稳定,故障率趋势平稳,只有板卡 8 的板卡健康度为 4 级(较

所示。

表 6 板卡使用年限评估示例表

Tab. 6 Service life evaluation samples of circuit boards

板卡序号	设备设计寿命/年	设备使用年限/年	P_2
板卡 3	20	13	74
板卡 1	20	13	74
板卡 4	20	13	74
板卡 2	20	13	74
板卡 6	20	13	74
板卡 7	20	13	74
板卡 5	20	13	74
板卡 8	10	13	48

3.4 实验室检测评估

对现场提取的灰尘样本进行实验室检测,发现现场灰尘相对干燥,金属成分的质量浓度较低,板卡表面短路风险较低;硫和氯的质量浓度较高,这也使得现场板卡呈现一定腐蚀。

表 8 板卡综合评估示例表

Tab. 8 Comprehensive evaluation samples of circuit boards

板卡序号	P_1	P_2	P_3	P
板卡 1	88.53	74	68	75.96
板卡 3	83.66	74	70	75.30
板卡 2	85.01	74	64	73.30
板卡 4	83.12	74	65	73.14
板卡 7	76.81	74	66	71.64
板卡 6	76.89	74	65	71.27
板卡 5	80.32	74	62	71.10
板卡 8	72.89	48	63	61.47

差),且已超期服役,须要制定控制措施和改进计划。考虑设备返修数据收集可能不完整,且信号系统已接近中修周期,为确保运营安全,针对板卡 8,建议备品备件不低于在线设备数量的 10%,同时建议在半年内完成超期服役板卡的更换工作。其余板卡,建议备品备件数量不低于在线设备数量的 2%,并定期清灰,以减缓三防漆的老化,进而延长板卡的使用寿命。

4 结语

本次研究,在服役超过 10 年的运行线路上,对安全苛求的硬件设备开展了深度体检,对制定针对性强、精准有效的维护措施进行了探索和实践,回应了用户对信号系统延寿及分阶段改造的需求。目前,该综合评估方法已在上海、深圳等多条城市轨道交通线路上进行试点,但存在数据收集手段尚不够智能化,且时间跨度大导致收集数据不全面的问题。后续需要打通数据渠道,建立大数据模型,利用 PHM(故障预测与健康)技术等手段实现数字化、智能化的健康度评估,并提供可视化的健康度评估报告,为城市轨道交通信号系统的延寿需求制定方案提供有力参考。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告解读[J]. 城市轨道交通, 2024(4): 15.
China Association of Metros. Interpretation of the annual statistical and analysis reports on urban rail transit in 2023[J]. China Metros, 2024(4): 15.
- [2] 佚名. “十四五”规划:加快市域(郊)铁路建设,有序推进城市轨道交通发展[J]. 城市轨道交通, 2021(3): 6.
Anon. 14th Five-Year Plan: accelerate the construction of city (suburban) railways and orderly promote the development of urban rail transit [J]. China Metros, 2021(3): 6.
- [3] 赵丽琴, 刘昶, 邓丞君. 样本不均衡条件下设备健康度评估

方法[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(9): 272.

ZHAO Liqin, LIU Chang, DENG Chengjun. Method for evaluating equipment health under unbalanced conditions[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(9): 272.

- [4] 肖晓, 付哲, 赵静毅, 等. 基于故障分析表的信号系统健康度评估方法及装置: 202211067152. 4[P]. 2022-12-06.

XIAO Xiao, FU Zhe, ZHAO Jingyi, et al. Signaling system health evaluation method and device based on fault analysis table: 202211067152. 4[P]. 2022-12-06.

- [5] 祁豆豆. 基于剩余寿命预测的 AFC 终端设备健康度评估方案探讨[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(4): 136.

QI Doudou. Discussion on health evaluation scheme of AFC terminal equipment based on residual life prediction[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(4): 136.

- [6] 中国国家铁路集团有限公司. 铁路列车调度指挥系统(TDCS)调度集中系统(CTC)维护管理办法: TG/XH 211—2014[S]. 北京: 中国国家铁路集团有限公司, 2014.

China Railway Group Co., Ltd. Maintenance and management measures for railway train dispatch command system (TDCS) centralized traffic control system (CTC): TG/XH 211—2014[S]. Beijing: China Railway Group Co., Ltd., 2014.

- [7] 中国国家铁路集团有限公司. 车站联锁设备维护管理办法: TG/XH 213—2019[S]. 北京: 中国国家铁路集团有限公司, 2019.

China Railway Group Co., Ltd. Maintenance and management measures for station interlocking equipment: TG/XH 213—2019[S]. Beijing: China Railway Group Co., Ltd., 2019.

- [8] 祖天培, 王泽, 康锐, 等. 基于同类产品的板卡级电子产品可靠性评估方法及系统: 202310478126[P]. 2023-07-28.

ZU Tianpei, WANG Ze, KANG Rui, et al. Reliability evaluation method and system of board-level electronic products based on similar products: 202310478126[P]. 2023-07-28.

· 收稿日期: 2024-06-03 修回日期: 2024-06-21 出版日期: 2024-10-10

Received: 2024-06-03 Revised: 2024-06-21 Published: 2024-10-10

· 通信作者: 季庆华, 高级工程师, jiqinghua@casco.com.cn

· ©《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

(上接第 297 页)

JIANG An. Application of EPB for conduct rail power supply of rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2010, 23(2): 99.

- [3] 段博韬. 基于灵活编组模式的轨道交通列车通过能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 118.

DUAN Botao. Analysis of train passing capacity of urban rail transit based on flexible marshalling mode[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 118.

· 收稿日期: 2024-04-23 修回日期: 2024-05-29 出版日期: 2024-10-10

Received: 2024-04-23 Revised: 2024-05-29 Published: 2024-10-10

· 通信作者: 陈祥, 高级工程师, chenxiang@casco.com.cn

· ©《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