

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2018.01.023

地铁站台门系统 设备健康管理研究与应用

夏景辉, 陈昌进, 曲泽超, 张 振

(郑州市轨道交通有限公司运营分公司, 郑州 450000)

摘 要: 综合研究地铁机电设备运行特性, 实现从被动故障修和计划修向主动智能状态修的跨越。提出一种地铁机电设备健康管理评价方法, 通过失效实验验证机电设备状态量的门槛阈值, 利用数学模型对设备状态进行量化, 并基于状态量健康指标评判设备状态的优劣。在此基础上, 运用 MATLAB 拟合时间与设备健康指数之间的非线性关系模型, 求解并预测设备健康状态及维护时间节点, 对科学规划设备检修周期、提前预判设备状态具有重要的理论及实践指导意义。研制设备状态量智能采集装置, 通过上位机实时计算验证、预判, 并在郑州地铁 1 号线进行充分验证, 达到预期效果。

关键词: 地铁; 站台门; 设备健康管理; 状态智能修; 检修周期; 数学评价模型

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2018)01-0149-05

Equipment Health Management in Subway Platform Door System

XIA Jinghui, CHEN Changjin, QU Zechao, ZHANG Zhen

(Zhengzhou Rail Transit Co., Ltd., Zhengzhou 450000)

Abstract: The operation characteristics of mechanical and electrical equipment for metro are comprehensively studied. The transition is expected to be achieved from the passive fault repair and planned repair to active intelligent state repair. A health management evaluation method for metro electromechanical equipment is put forward, in which the threshold of mechanical and electrical equipment quantity is verified through the failure experiments, the equipment condition was quantified by the mathematical model, and the equipment condition is evaluated based on state health index. On this basis, by using MATLAB to fit the nonlinear relationship model of time and equipment health index, health status and maintenance time node can be predicated, which is of great theoretical and practical significance for predicting and planning equipment maintenance. An intelligent acquisition device for equipment status is developed, which is verified and predicted by the host computer in real time. The research has been fully verified in Zhengzhou Metro Line 1 and achieved the desired results.

Keywords: metro; platform edge door; equipment health management; state intelligent repair; overhaul cycle; mathematical evaluation model

安全、稳定、可靠等关键要素对地铁机电设备重点运营、高质量服务起着决定性作用。地铁设备传统的运维模式以故障修、计划修为主^[1]。计划修易造成过度修, 增加维修成本且提报计划繁琐; 故障修易造成列车晚点, 降低服务质量且应急能力较差。相对于

传统的“故障修、计划修”等被动式为主的维修方式来说, 智能状态修具有一定优越性, 它能够较好地控制成本、提高维修效率、科学规划检修周期等^[2]。

确保设备运行的可靠性和维护水平已成为保证系统正常运行的必要条件。目前, 国内外学者通过大数据联盟和云计算平台, 利用定点或移动感知技术, 借助数据挖掘、机器学习及可靠性等方法, 构建趋势模型预测健康情况^[3]。设备健康管理(equipment health management, EHM), 是以设备的健康管理为核心,

收稿日期: 2017-05-31 修回日期: 2017-06-22

第一作者: 夏景辉, 男, 博士, 总工程师, 主要研究方向: 城市轨道交通运营与管理, xiajinghui@zzmetro.cn.

研究设备状态规律,对设备状态进行健康监测、动态养护等,实现设备健康维修管理的理论与模式相统一,是人机主动与被动结合的前瞻性管理。

实施EHM研究是开展设备健康管理的先行先试,是一次设备维护管理的提升过程,通过分解设备的基本单元,预测分析并评价设备系统的运行状态,提前预判故障,为实现状态修提供智能管理策略,从而节约人力和维护成本,降低设备故障率及晚点率。课题研究对科学规划检修周期、提前预判设备状态具有重要的理论及实践指导意义^[4]。

1 地铁机电设备健康状态评价方法

1.1 设备状态单一模块健康指数量化

对于地铁机电设备,电子元器件(如继电器)、机械结构等容易出现故障点。单一模块设备根据其工作寿命状态或技术参数给予评判。对于单一模块,其寿命趋势如图1所示。

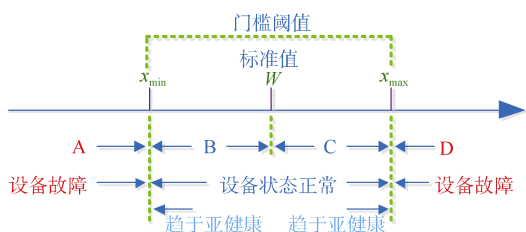


图1 单一模块器件寿命趋势示意

Fig.1 Schematic diagram of single module device life trends

分析图1,存在4种情况。测量值 x 在A、D区域($x < x_{\min}$ 或 $x > x_{\max}$),则器件失效;测量值 x 在B、C区域($x_{\min} < x < W$ 或 $W < x < x_{\max}$),则器件处于正常状态;测量值 x 在B区域($x_{\min} < x < W$), x 在坐标轴正方向越靠近 W ,则器件工作状态越佳;测量值 x 在C区域($W < x < x_{\max}$), x 在坐标轴负方向越靠近 W ,则器件工作状态越佳。

当实际测量值超过阈值范围时,健康指数为0,应当立即检修;当实际测量值与标准值重合时,健康指数为1,此时为设备的最佳状态。根据上述模型建立思路,可用分段函数表达单一模块或元器件的健康指数,见式(1)。

$$h_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{x_{ij}(t) - x_{\min}}{W - x_{\min}}, & x_{ij}(t) \in [x_{\min}, W] \\ \frac{x_{\max} - x_{ij}(t)}{x_{\max} - W}, & x_{ij}(t) \in [W, x_{\max}] \\ 0, & x_{ij}(t) < x_{\min} \text{ 或 } x_{ij}(t) > x_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $h_{ij}(t)$ 为设备基于 i 的特征参数 x_i 的健康指数; $x_{ij}(t)$ 为特征参数 x_i 在 t 时刻的测量值; W 为在 t 时刻该特征参数的标准值。

1.2 设备状态综合健康指数

考虑设备的可靠性、维修经济性及维修的难易程度等因素^[5],运用AHP分层算法对各模块权重进行划分,写出针对各模块的判断矩阵,通过矩阵归一法计算出单行矩阵,得到各因素的权重。设备系统健康评价是在单一模块或元器件(特征参数)计算的基础上综合加权而来。基于多模块(特征参数)的设备系统状态综合健康指数 $HI(t)$ 的表达式见式(2)。

$$HI(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_i \rho_{ij} h_{ij}(t), \quad HI(t) \in [0,1] \quad (2)$$

式中, $HI(t)$ 为设备系统状态的综合健康指数; n 为设备系统中各单一模块单元数量; m 为单一模块中特征参数数量; ω_i 为设备系统中单一模块权重; ρ_{ij} 为单一模块中各特征参数的权重; $h_{ij}(t)$ 为设备基于 i 的特征参数 x_i 的健康指数。

1.3 设备综合健康指数拟合

基于设备系统状态综合健康指数的 $HI(t)$ 表达式,建立时间对系统设备综合健康指数影响的非线性模型,反映时间与系统设备综合健康指数关系,见式(3)。

$$HI(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \beta_5 t^5 \quad (3)$$

其中, β_i 为拟合系数, t 为监测时间(单位:h)。

通过正线测量的多组数据,利用式(2)进行设备的综合健康指数计算,得到多组离散值。利用高斯-牛顿迭代法拟合出式(3)中的系数,并以此公式预测站台门系统设备未来某一时刻的维护策略^[6]。若要计算站台门控制系统达到某一健康状态的时刻,根据表1对式(3)进行赋值,求出 t 值即可。例如,计算设备处于亚健康状态时的临界时间,则只需令式(3)的 $HI(t)=0.65$,求出的 t 值即为设备达到亚健康状态的临界时间。

依据设备管理实际生产经验数据,按设备系统的综合健康指数与运行状况对设备状态进行评价,将设备系统健康状况划分为4个等级,见表1。

2 设备健康状态评价方法在站台门上的应用

2.1 确定系统特征参数及权重

通过梳理地铁设备运营故障台账,结合站台门控制系统的控制原理,确定站台门控制系统关键部件的

特征参数^[7]；运用 AHP 分层算法对各子模块所占比重进行计算，搭建数学模型，建立站台门控制系统的健康状态模型。同时，把站台门控制系统划分为 ATC（安全回路转换装置）板、PEDC（单元控制器）及信号转换电路 3 个模块，见图 2。

表 1 设备系统健康等级评价标准
Tab. 1 Evaluation standards for health levels of equipment system

等级	健康状态	$HI(t)$
一级	健康	$0.65 < HI(t) \leq 1$
二级	亚健康	$0.45 < HI(t) \leq 0.65$
三级	不健康	$0.30 < HI(t) \leq 0.45$
四级	病态（故障）	$0 \leq HI(t) \leq 0.30$

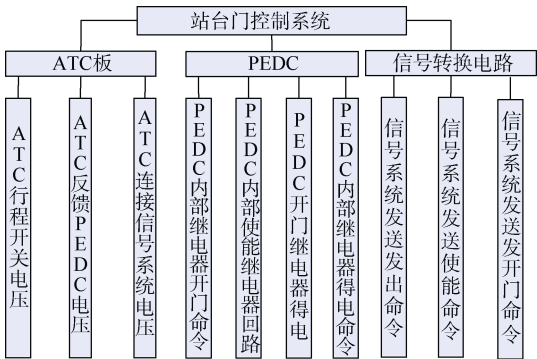


图 2 站台门控制系统模块划分
Fig. 2 Module partition of platform door control system

通过梳理站台门控制系统典型故障，找出影响站台门控制系统各模块部件状态的关键部件。通过分析，确定 14 个状态参数（1 个安全回路电压、12 个继电器、

1 个 ATC 板电源状态），详见表 2。通过失效实验及元器件出厂标定，对 14 组状态参数的阈值、标准值进行确定，具体方法如下：状态参数的额定值就是其标准值（ W ），按其出厂标定进行计算；阈值为电子元器件失效临界值 $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$ ，确定失效状态下限值 $x_{\min}$ 时可通过变压器不断加载（从标准值向下加载），直至继电器不能吸合，此时的测量值即为失效状态的下限值，也可通过出厂标定值查询；同理，确定失效状态上限值 $x_{\max}$ 时，通过变压器不断加载（从标准值向上加载），直至继电器不能吸合，此时的测量值即为失效状态的上限值，也可通过出厂标定值查询。对于各子模块在整个设备中所占比重，通过 AHP 分层算法计算，各权重结果见表 2。

2.2 智能采集装置研制

为实现对正线数据的实时测量，并确保测量的时效性、准确性，提高测量效率，研制状态量正线数据测量装置（下位机），原理见图 3。该装置可同时采集 28 组电压值，采用串口与上位机通信，对采集的数据实时显示，采集频率为 200 ms/次。

2.3 上位机界面

根据方便性、可操作性原则，对该评价系统进行人机界面编写^[8]。界面主要采取分屏显示模式，分为 5 个模块：欢迎界面、站点设备选择界面、参数录入界面、设备状态曲线界面、设备状态评估界面等。整体采用淡蓝色作为背景，可减少操作人员视觉疲劳。图 4 为参数读取界面，图 5 为站台门设备健康管理 EHM 系统。

表 2 特征参数标准值、阈值及权重
Tab. 2 Characteristic parameters, standard values, thresholds and weights

设备	权重	状态参数序号	特征参数	标准值	阈值/V	修正标准值/V	修正阈值/V	特征参数权重
ATC 板	0.3	1	ATC 板发出电压	60Vdc	40~60	0	0~10	0.35
		2	ATC 板接收电压	60Vdc	40~60			
		3	ATC 板反馈电压	60Vdc	40~60	60	40~70	0.3
		4	ATC 接收 SIG 电压	24Vdc	14~30	0	0~10	0.35
		5	ATC 反馈 SIG 电压	24Vdc	14~30			
PEDC	0.4	6	PEDC 开门电压	50Vac	49~51	50	49~51	0.3
		7	PEDC 使能电压	50Vac	49~51	50	49~51	0.25
		8	PEDC 接收电压+	60Vdc	40~60	0	0~10	0.2
		9	PEDC 接收电压-	60Vdc	40~60			
		10	PEDC 关门电压+	60Vdc	57~63			
		11	PEDC 关门电压-	60Vdc	40~60	0	0~10	0.25
信号转换接口电路	0.3	12	SIG 开门电压	24Vdc	14~30	24	14~30	0.4
		13	SIG 使能电压+	24Vdc	14~30	24	14~30	0.3
		14	SIG 使能电压-	24Vdc	14~30	24	14~30	0.3

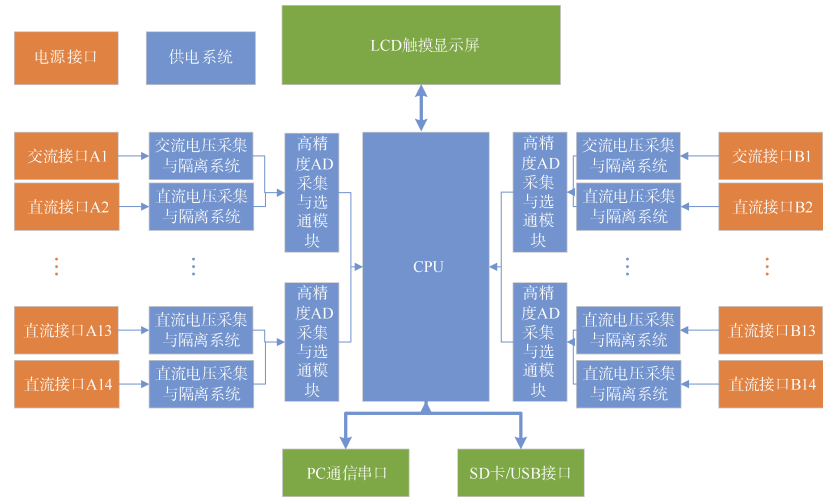


图 3 智能采集装置原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of intelligent acquisition device



图 4 参数录入界面

Fig. 4 Parameter input interface

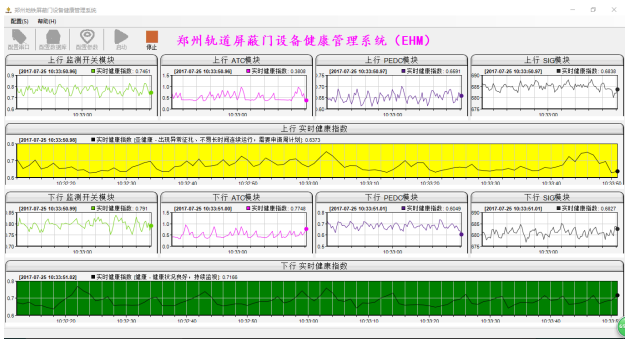


图 5 站台门设备健康管理 EHM 系统

Fig. 5 EHM system of platform door

2.4 正线实验验证

对测得的数据进行计算，得出一系列离散的健康

指数 $HI(t)$ ，见表 3。对离散数据运用 MATLAB 软件工具进行 5 次多项式拟合，得出式 (4)，见图 6~7。

表 3 人民路上行健康指数计算结果（部分）

Tab. 3 Health index of Renmin road station (upstream: A part)

测量时间	...	40	48	56	64	72	80	88	...
健康指数	...	0.798	0.839	0.814	0.831	0.846	0.828	0.829	...

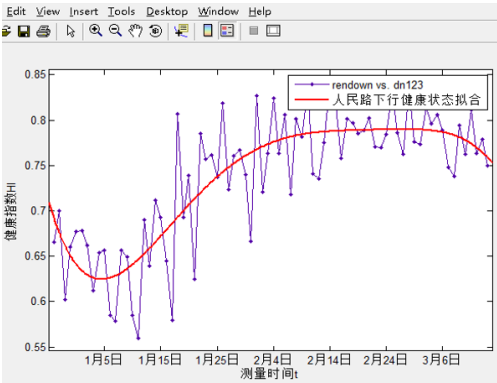


图 6 人民路站下行健康状态拟合

Fig. 6 Health status of Ren min road station (down)

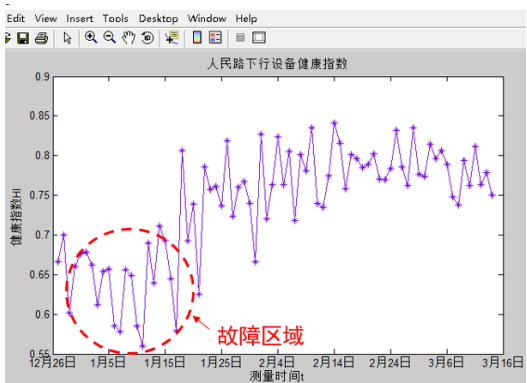


图 7 人民路站下行健康状态预测图

Fig. 7 Health status of Ren min road station (down)

$$HI(t) = -1E - 09x^5 + 3E - 07x^4 - 3E - 05x^3 + 0.0016x^2 - 0.0345x + 1.0292 \quad (4)$$

分析拟合方程, 通过 MATLAB 进行求解, 令 $HI(t)=0.65$ (设备亚健康状态), 得出 $x=174$, 每次测量时间相隔为 12 h, 因此推断出设备处于亚健康时间为 2 088 h。

3 站台门控制健康评价对生产的指导应用

根据四级设备健康状况, 开展不同的检修策略, 见表 4。运用参数模型拟合出设备综合健康指数随时间变化趋势, 预测设备的健康状态, 以便及时制定维护策略, 实现智能修。系统的评价模型是修订检修周期的重要理论参考。如设备状态在一段时间内性能状态指数均为 0.8 以上, 则可相应地延长检修周期, 从而节省人力、物力, 节约成本, 提高维护效率。

表 4 健康状况应对措施

Tab. 4 Measures for equipment health

等级	健康状况及应对措施
一级	健康状况良好, 持续监视, 不需采取措施
二级	出现异常征兆、不宜长时间连续运行, 需要申请计划, 对异常特征量涉及的部件进行分析检查, 必要时进行更换
三级	出现严重异常征兆、应短时间内停机检修, 需要立即申请计划, 对异常特征量涉及的部件进行分析检查, 必要时进行更换
四级	不能运行, 应立即检修, 需要申请抢修计划, 对异常特征量涉及的部件进行分析检查, 及时更换损坏部件

4 结语

本文研究了站台门控制系统的设备综合健康状态, 建立基于特征参数的健康状态评价模型, 实现了站台门控制系统特征状态量的量化表征。结合实际运行数据能够实时评价系统设备的综合健康指数, 从而预判设备健康状态。通过正线的实际验证, 确定了模型的可靠性, 为科学规划设备检修周期奠定科学依据。

参考文献

- [1] 张彦如, 耿梦晓. 基于健康指数的设备运行状态评价与预测[J]. 合肥工业大学学报, 2015, 38(10): 1318-1323.
ZHANG Yanru, GENG Mengxiao. Equipment comprehensive health status evaluation and prediction based on health index[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2015,

38(10): 1318-1323.

- [2] 于宏军, 韩建军, 张华, 等. 航空发动机健康管理系统标准探讨[J]. 航空标准化与质量, 2012(4): 9-11.
YU Hongjun, HAN Jianjun, ZHANG Hua, et al. Discussion on standard of aeroengine health management system[J]. Aeronautic standardization & quality, 2012(4): 9-11.
- [3] 胡舟宇. 复杂成套设备关联建模技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
HU Zhouyu. Study on technologies of modeling correlation within complex equipment sets and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] 周忠宝, 马超群, 周经伦, 等. 基于动态贝叶斯网络的动态故障树分析[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(2): 35-42.
ZHOU Zhongbao, MA Chaoqun, ZHOU Jinglun, et al. Dynamic fault tree analysis based on dynamic Bayesian networks[J]. System engineering theory and practice, 2008, 28(2): 35-42.
- [5] 李强. 民航发动机健康管理技术与方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
LI Qiang. The research on technology and methods for aviation engine health management[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [6] 何正嘉, 曹宏瑞, 訾艳阳, 等. 机械设备运行可靠性评估的发展与思考[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 171-186.
HE Zhengjia, CAO Hongrui, ZI Yanyang, et al. Developments and thoughts on operational reliability assessment of mechanical equipment[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(2): 171-186.
- [7] 宾光富, 周元. 基于 Fuzzy-AHP 的机械设备多特征参数健康状态综合评价研究[J]. 中国机械工程, 2009(20): 2487-2492.
BIN Guangfu, ZHOU Yuan. Multi feature parameters health state evaluation of mechanical equipment based on Fuzzy-AHP methodology[J]. China mechanical engineering, 2009(20): 2487-2492.
- [8] 骆思佳, 廖瑞金, 王有元, 等. 带变权的电力变压器状态模糊综合评判[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 106-110.
LUO Sijia, LIAO Ruijin, WANG Youyuan. Fuzzy synthetic evaluation of power transformer condition with variable weights[J]. High voltage engineering, 2007, 33(8): 106-110.

(编辑: 王艳菊)