

文章编号: 1005-8451 (2018) 10-0044-05

# 高速动车组大数据PHM系统研究与应用

宋德刚<sup>1</sup>, 牛齐明<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 青岛 266111;

2. 北京交通大学 计算机与信息技术学院, 北京 100044)

**摘要:** 针对延长高速动车组使用寿命和提高使用效率的问题, 在研究了工业大数据、故障预测与健康管理 (PHM) 的定义和应用、PHM相关标准以及国外PHM软件开发平台的基础上, 搭建了基于大数据的车载、地面故障预测与健康管理系统一体化的功能架构并提出技术实现方案, 应用动车牵引电机轴承温度健康状态模型, 以牵引电机轴承温度和环境温度数据为基础, 进行了实例分析。

**关键词:** 高速动车组; 牵引电机轴承; 大数据; 故障预测与健康管理

**中图分类号:** U266.2 : TP39 **文献标识码:** A

## Fault prognostics and health management system of high-speed EMU based on big data

SONG Degang<sup>1</sup>, NIU Qiming<sup>2</sup>

(1. Research and Development Center, CRRC Qingdao Sifang Co. Ltd., Qingdao 266111, China;

2. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China )

**Abstract:** In order to prolong the service life and improve the efficiency of the high-speed EMU, the paper studied on the definition and application of industrial big data, fault prognostics and health management (PHM), PHM related standards and the foreign PHM software development platform, built up an integrated function structure of the ground and onboard fault prognostics and health management system based on big data, and put forward technical implementation plan. Based on the data of traction motor bearing temperature and ambient temperature, an example analysis was made on the temperature health state model of traction motor bearing.

**Keywords:** high-speed EMU; traction motor bearing; big data; fault prognostics and health management

我国动车组目前实行“计划预防修为主、事后维修补充”的维修体制<sup>[1]</sup>, 针对该体制在实际应用过程中存在的不足, 本文提出将故障预测与健康管理 (PHM) 应用于动车组维修体制中。结合动车组大数据的特点, 运用人工智能等方法, 实现故障预测、健康状态评估以及维修策略的决策与优化, 以求延长高速动车组使用寿命、提高使用效率和降低运维成本。

工业大数据是指在工业领域中围绕典型智能制造模式, 整个产品全生命周期各个环节所产生的各类数据及相关技术和应用的总称<sup>[2]</sup>。PHM是一种通过评估产品在实际生命周期条件下的可靠性来判定故障出现和减轻系统风险的技术或方法<sup>[3]</sup>。目前 PHM 的应用非常广泛<sup>[4-9]</sup>, 但在基于动车组大数据 PHM 系统研究和应用上较为缺乏。本文根据工业大数据

和 PHM 的发展现状, 结合已有的 PHM 标准, 提出了动车组 PHM 系统功能架构, 并应用实例验证使用方法。

### 1 PHM相关标准

目前, 还没有一套完善的 PHM 系统标准, 由于 PHM 和故障诊断、状态监控及健康管理的相关性, 可以借鉴一些标准组织的相关标准。与 PHM 相关的主要标准大致分为 5 类: 机内测试 (BIT)、状态维护 (CBM)、故障预测与健康管理 (PHM)、健康和使用寿命监测系统 (HUMS)、飞行器综合健康管理 (IVHM), 如表 1 所示。

#### 1.1 机内测试

机内测试系统设计与应用指南 (ARINC604) 适用于设备早期阶段的设计。PHM 系统设计时可以借鉴机载维护系统设计指南 (ARINC624) 系统完整性

收稿日期: 2018-01-13

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划项目 (2017X001-K)。

作者简介: 宋德刚, 高级工程师; 牛齐明, 副教授。

表1 PHM相关的标准

| 标准组织名称 | 标准              | 类别   |
|--------|-----------------|------|
| ARINC  | ARINC604        | BIT  |
|        | ARINC624        |      |
| ISO    | CM&D系列标准        | CBM  |
| MIMOSA | OSA-CBM,OSA-EAI |      |
| SAE    | 状态监控系列指南        | PHM  |
|        | 使用寿命监控指南        |      |
| IEEE   | AI-ESTATE标准     |      |
|        | SIMICA标准        |      |
|        | P1856标准         |      |
| SAE    | HUMS系列标准        | HUMS |
| FAA    | AC-29C MG-15    |      |
| SAE    | IVHM系列标准        | IVHM |

的判断<sup>[10]</sup>。

1.2 状态维护

机器状态监测与诊断标准（CM&D）中的开放式视情维修体系结构标准（ISO13374）可以为划分PHM整体功能模块提供指导。OSA-CBM是ISO13374的实现。标准指出PHM系统要有6个功能模块：数据采集、数据处理、状态检测、健康评价、预兆评估和提出建议<sup>[11]</sup>。此标准适合具体设备的PHM系统设计。OSA-EAI是面向企业应用集成的标准。该标准有助于提出企业开放的综合解决方案。美国SAE发布了多项关于燃气涡轮发动机监视系统指南，其中有使用寿命监视指南。

1.3 故障预测与健康管理

美国SAE发布了关于燃气涡轮发动机健康管理指南，其中有发动机健康管理指南等。AI-ESTATE标准规范了测试系统和人工智能之间的接口；支持模块化诊断架构。SIMICA标准定义了维修信息模型和提供了一种维护过程的XML方案。IEEE的P1856标准建立了电子系统的PHM框架。

1.4 其它

HUMS标准规范了数据交换标准、评估指标和传感器接口规范。AC-29C MG-15主要针对旋翼机提供HUMS安装、验证和应用指南。ARP6290标准提供了综合车辆健康管理系统体系结构开发指南，其中CBM系统是按ISO13374标准开发的。

通过比较和分析各种标准后，设计高速动车组PHM系统的框架参考OSA-CBM标准和OSA-

EAI标准；数据交换方式参照ISO13374标准和AI-ESTATE标准。

2 动车组PHM系统功能架构

2.1 系统设计

实现高速动车组PHM系统，需建立具有针对性的软硬件平台，研究数据获取、故障预测，分析各模型的适应性，并在某型高速动车组中进行实际验证。

借鉴国外PHM软件开发平台可以提高动车组PHM系统的开发进度，主要的国外PHM软件开发平台如表2所示。

表2 国外PHM软件开发平台

| 平台名称       | 功能                                      | 特点   | 应用                      |
|------------|---|--|-------------------------|
| PHM Design | 设计、开发、评估和发布PHM系统。                       | 按照业务要求的逻辑关系对算法、故障模式等进行组合构成PHM系统；设计模型是采用XML进行存储；采用可视化的方式建模。 | 电子系统、RF、开关电源、GPS等。      |
| SureSense  | 有数据分析、系统建模和建议措施的功能。能设计开发机械、电子等专业的PHM系统。 | 支持OSA体系；诊断和预测精度高；能预测RUL；算法可以自动校对。                          | 航天飞机主引擎、飞机涡轮发动机、电池、电机等。 |
| VSE-PHM    | 有检测、隔离、预测故障、健康评估的功能。                    | 支持推理机的应用；图形化界面；支持层次化模型描述。                                  | 雷达等。                    |
| iTrend     | 支持统计分析、诊断、预测、告警和建议等功能。                  | 支持OSA-CBM。   | 发动机等。                   |
| MADe PHM   | 支持PHM设计、评估、故障检测、隔离等功能。                  | 基于传感器开发PHM系统。可以自动生成传感器集合；支持故障检测精度分析和传感器的优化设计。              | 联合攻击战斗机等。               |

2.2 系统组成

高速动车组PHM系统功能架构主要包括：车载PHM系统、通信系统和地面PHM系统。车载PHM系统主要实现动车组各个子系统（如牵引子系统、制动子系统等）、车厢和整列车健康状态的评估和故障预测。地面PHM系统主要实现关键部件（如受电弓、轴承等）的故障预测、复杂的健康状态的评估和综合维修决策。在地面PHM系统中实现设计、生产、运用和维护等部门数据共享，提供全球在途高速列车的技术支持和远程健康状态监测。通信系统主要有车载PHM系统与其它系统的数据交换系统、车地数据交换系统、地面PHM系统各部分数据交换

系统。

### 2.3 系统功能

动车组大数据 PHM 系统有数据获取、数据处理、故障预测、健康状态评估、维修决策和可视化 6 个主要功能模块。数据获取模块主要是通过各类传感器收集部件、设备的相关数据或获得其它系统的基础、维修、环境数据。数据处理模块的功能是从下一层接收数据并对其进行清洗、特征提取等处理,使数据符合后续模型或算法的使用要求。故障预测模块是基于历史、状态和维修数据等对运行中的部件、设备进行故障或寿命预测。健康状态评估模块对部件、设备和整车结构等的健康状况进行量化,预测其未来状态的趋势。维修决策模块主要负责根据预测结果和健康评估结果结合动车组运行计划在故障发生前提出合理的维修建议。可视化模块的功能是将预测结果或健康趋势以友好的图形方式展示给最终用户。

考虑到数据集成、数据质量、安全和平台的需要,系统还要有数据交换接口、账号管理、资源管理和任务管理功能。数据交换接口模块确保在不同的系统之间可以有效地交换数据。账号管理模块提供账号管理功能,鉴权和授权。资源管理模块负责管理和调度平台的资源,提高整个系统的资源利用率。任务管理是监控和管理不同的计算任务的模块。

### 2.4 技术架构

动车组 PHM 系统的分层技术框架,如图 1 所示。

数据获取层:用数据采集设备分别对走行部、牵引设备、制动设备、高压设备、电气设备以及各类轴承等关键设备和部件,进行温度、振动、图像、视频和力学参数等的采集。

数据处理层:各类传感器采集的数据通过车载网络传输到车载计算机;车载数据通过铁路综合数字移动通信系统或无线网络等方式将数据传到大数据平台;地面监测数据通过网络传输到大数据平台。对于车载计算机中的数据进行在线数据的抽取、转换和加载。对于大数据平台中的集成数据根据部件或设备的特点进行特征提取或根据多元数据的相关性进行数据融合。

故障预测层:结合历史数据和相关数据(天气条件、地理条件、结构特性等)利用基于模型的方法、

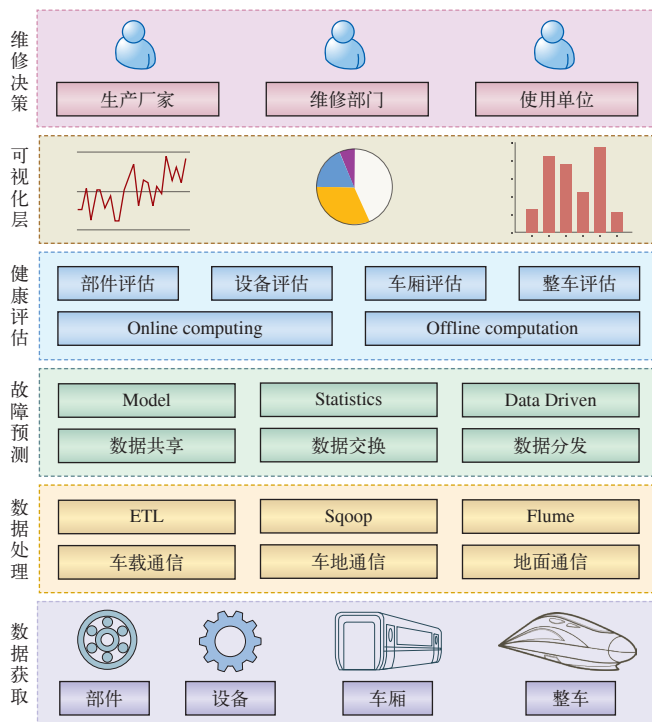


图1 动车组PHM系统框架

基于数据驱动的方法和基于统计的方法来建立故障预测模型,对动车组部件或设备进行故障程度的量化或发展趋势的判断。利用基于失效数据的方法、基于退化数据的方法和多源数据融合的方法进行关键部件剩余使用寿命的预测。

健康状态评估层:通过故障预测或剩余使用寿命预测的结果结合历史数据和天气地理等数据,综合评估部件、设备、车厢和整车结构等的健康状态等级。对于计算量小、重要的评估放在车载 PHM 系统中去评估;对于计算量大、复杂的评估放在地面 PHM 系统中去计算。

可视化层:将所获得的预测结果数据,通过 EChart 等 web 图表控件转换为二维静态或动态图像,使得结果更为直观。

维修决策层:利用维修经验和动车组检修计划、专家经验等对故障预测或剩余使用寿命预测的可视化结果进行联合决策,根据故障预测的程度或健康等级提出合理的维修计划。

## 3 动车组大数据PHM系统中的应用实例

牵引电机是动车组的核心部件之一,由于工作环境恶劣、负载变换频繁以及动力作用大等因素使牵



引电机轴承容易出现故障。当前投入运营的 CRH380 系列动车组上安装了各类温度传感器，如轴温传感器，并通过无线网络实时传输到地面，给关键设备的实时健康评估提供了有利条件<sup>[12]</sup>。

实验数据采集于运行阶段的车载信息地面应用系统和检修阶段的动车组故障管理系统，温度数据内容包括环境温度、动车牵引电机驱动侧轴承温度和非驱动侧轴承温度等。在 Eclipse 集成开发环境 (IDE) 下，用 Java 语言开发相关回归算法，对 hive 中温度数据进行分析，并用 EChart 进行了可视化展示，如图 2 所示。取轴承温度和环境温度的差值以排除环境温度对轴承温度的影响，根据采集的大量数据，通过公式 1 和公式 2 拟合出趋势线（图 2 中绿线），并用公式 3 得出温度过高时的警戒线（图 2 中红线）<sup>[13]</sup>。其中， $p$  为拟合系数， $x$  为速度值， $y$  为温度值， $Y$  为告警温度值， $E$  为温度值的数学期望， $\sigma$  为温度值的标准差。在红绿两条线之间的为牵引电机轴承正常的温度变化范围，超过红色边界线的点为异常工作温度。

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{n+1} & x_1^n & \cdots & 1 \\ x_2^{n+1} & x_2^n & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^{n+1} & x_n^n & \cdots & 1 \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$y=p_1x^n+p_2x^{n-1}+\cdots+p_nx+p_{n+1} \quad (2)$$

$$Y=E+3\sigma \quad (3)$$

通过条形图（图 3a 所示）和折线图（图 3b 所示）等方式可以更加直观地展示轴承温度的变化范围；系统中有多样的可视化方式，可以辅助不同用户对各类轴承的健康状态做出直观地评估和决策。

4 结束语

目前，动车组检修是计划预防维修体制，盲目性维修问题尤为突出，造成人力、物力的浪费，维修成本过高等一系列问题。本文提出基于大数据的高速动车组 PHM 系统的架构方案和应用实例，为建立动车组故障预测与健康管理系统提供参考，希望能更好地保障动车组运行安全，延长动车组使用寿命，降低动车组的维护成本。

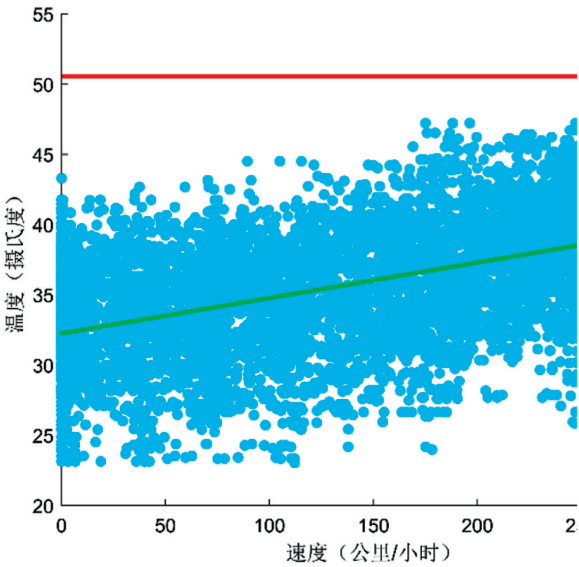
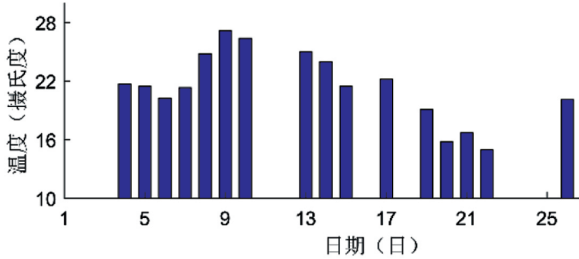
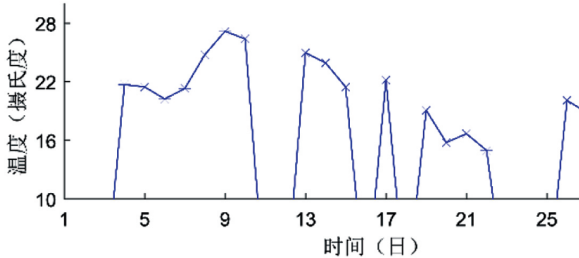


图2 加速过程中1车1牵引电机驱动侧轴承温度与环境温度差值变化



a 条形图



b 折线图

图3 300 km匀速运行1车电机2非驱动侧轴承温度与环境温度差值

参考文献：

[1] 周 斌, 谢名源, 吴克明, 等. 动车组维修体制现状分析及展望 [J]. 机车电传动, 2017, 254 (1) : 17-21.

[2] 卫凤林, 董 建, 张 群. 工业大数据白皮书解读 [J]. 信息技术与标准化, 2017, 388 (4) : 13-17.

[3] Kunche Surya, Chen Chaochao, Pecht Michael. A Review of Phm System' s Architectural Frameworks[C]// The 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Dayton Ohio, 2012 : 2-15.

[4] 黄 磊. 基于 QAR 数据的飞机性能监控 [D]. 天津 : 中国民航大学, 2016.

- [5] 李田科, 于仕财, 余春卫. 导弹发射车综合诊断与健康管理系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31 (4): 11-14.
- [6] 齐渡谦, 付毅飞. 航天科工 PHM 系统正式搭载 C919[N]. 科技日报, 2016-08-05 (001).
- [7] 姚晓山, 张卫东, 周平, 等. 基于油液监测的船舶柴油机故障预测与健康管理系统研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38 (4): 874-877.
- [8] 马剑, 吕琛, 陶来发, 等. 船舶主推进系统故障预测与健康管理系统设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43 (7): 119-124.
- [9] 何正友, 程宏波. 高速铁路牵引供电系统健康管理及故障预警体系研究[J]. 电网技术, 2012, 36 (10): 259-264.
- [10] 蒋觉义, 李璠, 曾照洋. 故障预测与健康管理系统标准体系研究[J]. 测控技术, 2013, 32 (11): 1-5.
- [11] 景博, 汤巍, 黄以铎, 等. 故障预测与健康管理系统相关标准综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28 (12): 1301-1307.
- [12] 崔涛. 基于 Web 的 TADS 实时监控功能设计[J]. 铁路计算机应用, 2011, 20 (7): 23-26.
- [13] 毕汉岗. 第二代红外线热轴判别准则算法的探讨[J]. 铁路计算机应用, 1995, 4 (4): 26-28.

责任编辑 陈蓉

(上接 P43)

- [7] 庞亮, 兰艳艳, 徐君, 等. 深度文本匹配综述[J]. 计算机学报, 2017, 40 (4): 985-1003.
- [8] 李芳, 刘胜宇, 刘峥, 等. 生物医学语义关系抽取方法综述[J]. 图书馆论坛, 2017 (6): 61-69.
- [9] Jindal R, Malhotra R, Jain A. Techniques for text classification: Literature review and current trends[J]. 2015, 12(2): 1-28.
- [10] Zitouni I. Natural Language Processing of Semitic Languages[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 221-245.
- [11] Shetty A, Bajaj R. Auto Text Summarization with Categorization and Sentiment Analysis[J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 130(7): 4053-4060.
- [12] Yogan, Jaya Kumar, et al. A review on automatic text summarization approaches[J]. Journal of Computer Science, 2016, 12(4): 178-190.
- [13] Nickel M, Murphy K, Tresp V, et al. A Review of Relational Machine Learning for Knowledge Graphs[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 104(1):11-33.
- [14] 徐增林, 盛泳潘, 贺丽荣, 等. 知识图谱技术综述[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45 (4): 589-606.
- [15] Andrenucci A, Sneiders E. Automated Question Answering: Review of the Main Approaches[C]//International Conference on Information Technology and Applications. IEEE Computer Society, 2005:514-519.
- [16] Ajitkumar M, Khillare S.A., C Namrata. Question Answering System, Approaches and Techniques: A Review[J]. International Journal of Computer Applications. 2016, 141:34-39.
- [17] Chun A H W, Suen T Y T. Engineering works scheduling for Hong Kong's rail network[C]//Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, 2014: 2890-2897.
- [18] Faiz RB, Edirisinghe EA. Decision making for predictive maintenance in asset information management[J]. Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management. 2009, 4(1): 23-36.
- [19] 马智亮, 蔡诗瑶. 基于 BIM 的建筑施工智能化[J]. 施工技术, 2018, 47 (6): 70-83.

责任编辑 陈蓉