

故障预测和健康管理技术在地铁车辆运维中的应用

郑文文, 陈志保, 罗心彤, 朱琳, 苏晓珂

中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001

DOI: 10.61369/ERA.12282

摘 要 : 城市轨道交通是缓解城市交通压力的重要交通形式, 为实现交通质量的提升, 地铁车辆作为轨道交通的重要形式, 车辆运行的稳定性极为重要, 这就需要采用先进的技术, 对车辆进行运行维护。故障预测和健康管理技术作为体现先进运维理念的重要技术, 本文将结合故障预测和健康管理技术概念及发展背景, 讨论 PHM 系统架构与功能, 以及 PHM 技术应用于地铁车辆中的案例, 希望有所帮助。

关 键 词 : 故障预测和健康管理技术; 地铁车辆; 系统功能; 车辆运维

Application of Fault Prediction and Health Management Technology in Subway Vehicle Operation and Maintenance

Zheng Wenwen, Chen Zhibao, Luo Xintong, Zhu Lin, Su Xiaoke

CRRCC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd. Zhuzhou, Hunan 412001

Abstract: Urban rail transit is an important form of transportation to alleviate urban traffic pressure. To improve transportation quality, the stability of subway vehicles, which are an important form of rail transit, is extremely important. This requires the use of advanced technology to maintain and operate the vehicles. Fault prediction and health management technology is an important technology that reflects advanced operation and maintenance concepts. This article will combine the concept and development background of fault prediction and health management technology, discuss the PHM system architecture and functions, as well as cases of PHM technology applied to subway vehicles, hoping to be helpful.

Keywords: fault prediction and health management technology; subway vehicles; system functions; vehicle operation and maintenance

一、故障预测和健康管理技术概念及发展背景

故障预测和健康管理技术, 英文简称 PHM 技术, 是当前以城市地铁车辆为主的轨道交通, 重点采用的维护技术。PHM 技术之所以应运而生, 和智能维护技术发展密不可分。随着各项技术的发展, 维护技术的智能化水平也实现了明显提升, 很多城市地铁车辆的常见故障, 包括质量较差、部件损坏、设备停机等, 都可能对车辆运行的稳定性造成影响^[1]。解决上述问题的思路, 不仅应聚焦于问题表象, 还需要聚焦于产生表象的原因, 对此类原因进行系统总结, 往往和各类不可见问题相关。实践中, 零件磨损、油液泄露、表面腐蚀、人为操作失误、运行环境较差等, 都会影响地铁车辆的稳定运行。需要注意的是, 导致地铁车辆故障的成因, 往往不是单一因素, 而是很多因素交叉作用。这就需要人员改变事后控制的思想, 从源头入手, 最大限度防止问题的产生。欲防止这些问题, 就应当时刻对地铁车辆各构件的异常情况进行监控, 并采取正确决策, 帮助解决问题。因此, 为随时监控各类不可见问题, 减少车辆运行风险, 预测的准确性和及时响应至关重要。

PHM 技术的发展并不是一步到位的, 最开始为传统反应式维护, 也就是当设备出现问题之后, 才开展维修工作, 这种维护思想滞后性较强, 可能酿成重大损失。后续发展出高可靠性设备

过维护技术, 该维护技术一般针对高可靠性设备, 也就是基于设备使用时间, 对设备进行适当维修和更换。这种维护技术尽管能保证设备一直处于正常状态, 但是维护工作的开展需要大量人力物力, 而且零部件更换行为相对频繁, 可能导致维护工作难以达到成本控制目的, 导致入不敷出^[2]。后续基于高可靠性设备过维护, 发展出基于状态监测的维护技术。该技术对时间依赖度较低, 更多可对设备运行状态下的物理量进行测定, 进而发现并识别故障, 进而最大程度防止发生严重故障。故障预测和健康管理 (PHM) 技术, 正是基于状态监测技术发展而来, 可对设备使用寿命进行预测。PHM 技术可监测、预测和管理地铁车辆零部件复杂系统健康状态, 能够预测非预期停机事件, 避免成本过高, 同时可避免过度维护现象的出现, 有利于零部件寿命的延长, 令设备可靠性得到明显提升。

二、PHM 系统架构与功能

(一) PHM 系统架构

PHM 可基于智能传感器功能采集数据, 传感器能够收集地铁车辆设备及零部件运行环境信息, 包括电压、光照强度、温度、湿度和振动频率等, 后续将各类信息向电信号转换, 方便后续传输处理。采集数据需要经过信息处理, 包括数据信息融合、数据

特征提取和清晰等，在失效模型与智能推理算法等技术基础上，全面评估车辆系统在不同时段及时间点的运行状态，同时理解和故障位置、持续时间，预测车辆是否能够长期使用^[9]。PHM系统架构总体包括数据源层、数据分析层和数据应用层等，其中，数据源层包括车载数据和轨旁数据，车载数据可区分为状态数据、故障数据，涵盖牵引系统、走行部检测系统、弓网监测系统、空调系统和车门系统等；轨旁数据包括走行部温度检测系统、受电弓智能检测系统、轮对检测系统和走行部红外检测系统等。数据分析层包括算法管理、模型建立、特征提取、数据清洗和数据标签化等模块。数据应用层包括状态监测（车辆状态与线路状态等）、故障预警（阈值预警、趋势预警、模型预警和突变预警等）、统计分析与模型培养（统计分析、模型管理、算法管理和模型训练等）、维修建议与健康评估等模块^[4]。

（二）PHM系统功能

PHM系统本质上可助力地铁车辆智能运行和维护，主要包括以下功能：

第一，状态监测与故障预警功能。前者能够收集并分析车辆运行状态的数据，及时预测故障。

第二，健康评估功能。具体而言，健康等级趋势浏览功能可便于工作人员对健康等级性能指标与系统参数进行浏览；健康等级浏览功能可依照健康等级，为地铁车辆交通系统进行排序，并通过可视化界面呈现；关键部位寿命评估功能可评估地铁车辆系统整体关键部位寿命，辅助判断可采集数据质量。健康评估功能可基于模型与特定算法程序，评估轨道交通设备是否存在异常状态^[5]。

第三，维修建议功能。该功能可判断性能，并为不同性能进行排队，并将维修建议推送至智能维修管理模块，为工作人员维护计划的制定，提供切实参考价值。预测备件需求可在模型预测技术基础上，对车辆的备件需求进行预测，人员可结合预测结果，自行制定后续规划。维修建议功能则能够基于健康评估和性能排队等各类结果，给出具体的维修需求，同时用工单呈现维修需求，使工作人员一目了然，人员结合实际维护需求确认之后，系统可将维修工单继续向业务管理系统推送，方便对后续维修工作进行追踪。

第四，统计分析与模型培养功能。功能总体涵盖统计分析、算法管理、模型管理、模型分类管理、模型训练、模型优化等。统计分析可全面分析地铁车辆故障历史数据，并为之后模型的优化，给出切实有效的参考意见。建模人员可明确特征提取算法，完成特征定义，并完成计算流程，也可明确训练样本，在确定故障的基础上，进一步优化模型^[6]。算法管理功能的实质，指的是系统会发挥各类大数据分析算法的优势，包括模糊综合评判、劣化度分析、隶属度计算、随机森林、神经网络、向量机等功能。模型训练功能可结合维护需求，完成样本的选择，令样本选择符合要求，同时可结合训练模型，提高测试工作的针对性，令模型结构和参数达标。模型分类管理模块可实现较多维度功能，涵盖算法分类、应用场景和模型效果等，通过为模型赋予标签，做好分类等方式加强管理。就算版本不同，模型版本管理功能也能适用

不同场景，建立车辆模型。有资料表明，模型版本管理功能能够实现健康管理、车载中央维护系统模型的建立，整体而言颇为有效。

（三）PHM系统规划

PHM系统规划首个阶段，需要分析系统的需求可行性。这一阶段需要工作人员做好调研工作，了解目标车辆存在的历史故障，以及维护单位的运营需求，后续结合运营要求，识别故障常出现的热区，实现对故障位置的快速定位。在系统故障监测结果的基础上，PHM系统能够对故障预警实现的可行性进行分析，并通过系统平台的搭建，辅助软件和硬件条件的实施。后续需要定义数据层，数据层成功定义之后，可完成建模系统的锁定，然后可进行模型的选择。数据驱动对故障数据和运营数据依赖程度较高，大数据技术会增强数据联系，辅助故障趋势的判断，以及模型的选择^[7]。两种驱动方式优劣势各不相同，其中，数据驱动能够处理海量数据，但是相对挑剔数据质量，而机理驱动可结合逻辑图与系统工作原理，建立故障模型，但机理驱动逻辑性不强，整车故障预测难度较高，准确率也有待提升，因此在一定程度上限制了机理驱动的使用，实践中，通常会以混合驱动模型为主。此外，需要设定各构件的关键参数，包括科学选择传感器，设置故障阈值等，这也是前期故障预警，后期维修工作开展的重要一环。相关建设工作落实之后，即可设计系统方案，针对性开发技术平台，完成系统测试上线工作，并结合系统后续反馈情况，做好优化迭代工作^[8]。

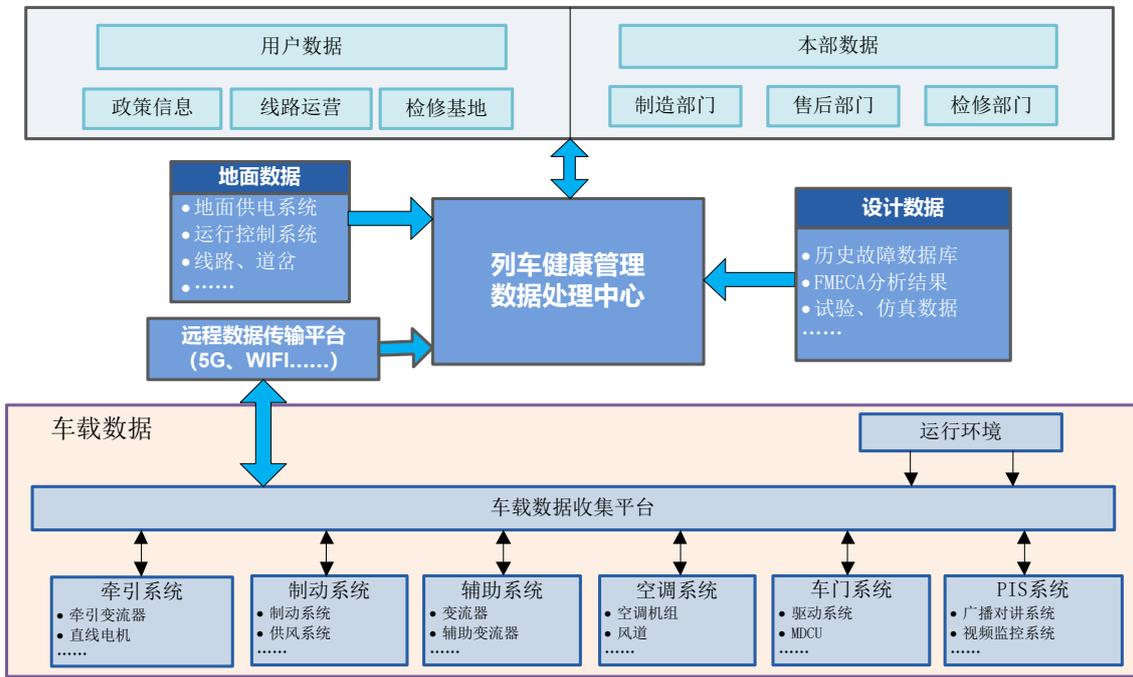
三、PHM技术应用于地铁车辆中的案例

（一）中央维护系统

中央维护系统包括计算机和地面系统等子系统。计算机和MVB网、以太网等连接，借助走行部、弓网等，监测各类运行参数，包括车辆运行状态，车辆网络控制系统运行过程，以及故障状态下的各项数据等。功能方面，MVB网一般可采集通信协议数据，以太网可采集新增信息点数据。物理结构方面，计算机整体以双主机运行方式为主，配备隔离卡，内端机可采集并处理原始数据，且能够通过数据库存储相关数据。外端机则能够向系统报告故障情况，并时刻监测性能^[9]。隔离卡是内外机的分隔构件，可将内端机的数据，结合私有协议向外端机不断摆渡，实现数据交互性的提升。计算机对地铁车辆系统运行状态数据进行监测，并基于模型库与知识库等进行分析，对车辆是否符合安全运行情况给出具体结果。如果车辆存在故障，则会同步给出故障报告，以及针对故障的应急处理办法。数据处理之后，中央维护系统能够完成性能检测模型的构建，一旦性能有变化，或者有退化情况，可以第一时间进行检测，同时结合性能检测结果，提出具体的运维建议^[10]。

（二）车门PHM系统

车门PHM系统系统功能包括以下几点：第一，远程在线监测。这项功能能够对车门工作状态进行实时监测，工作人员仅基于网络，就能对车门运行是否存在异常情况了如指掌。第二，故



障诊断功能。系统可对车门运行状态下的数据信息进行自动采集，基于车门典型故障规则知识库相关功能，诊断车门位置的故障，同步制定检修方案，方便工作人员参考。系统同时可对照历史故障，对常见门系统故障进行预测，包括阻力大小不均、解锁时间过长、开关不到位等，同时可针对性提出检修建议^[11]。第三，故障预测功能。该功能能够采集车门各类相关数据信息，对车门是否有异常工作情况进行判断，并预测如果这一故障如果持续存在，未来会出现哪些故障。为满足上述功能需求，需要对车门以太网架构进行科学调整，将以太网交换机安装在每节车上，令车门都可以和车辆以太网连接，保证网络链路带宽充足，避免影响数据的正常传输。同时应当将开关安装在车门系统中，对车

门是否正常开关到位情况进行检测。最后则需要升级门控制器软件，量化分析车门开关状态是否异常^[12]。

四、结束语

本文介绍了PHM技术的发展背景和历程，PHM系统架构与功能，以及PHM技术应用于地铁车辆中的案例，认为PHM技术对地铁车辆运维可起到积极影响。相关人员应当结合车辆运行要求，选择合适的PHM系统，监测车辆异常运行，从而保证车辆的稳定性。

参考文献

- [1] 张雍华, 王富章, 蒋丽丽, 刘国梁, 刘阳学. 高速铁路智能基础设施发展关键技术研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61(3): 87-91.
- [2] 郭泽阔, 贺莉娜, 王璐. 城市轨道交通车辆智能运维系统的建设方案 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 176-181.
- [3] 缪炳荣, 刘俊利, 张盈, 杨树旺, 彭齐明, 雒耀祥. 轨道交通车辆结构振动损伤识别技术综述 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 338-357.
- [4] 王中尧, 麻竞文, 王连富, 王品一, 刘健宇. 动车组故障预测与健康管理体系架构研究 [J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(2): 20-23.
- [5] 刘彬, 邵军, 陆航, 李燕, 谢名源. 动车组故障预测与健康管理体系架构研究思考 [J]. 中国铁路, 2022(3): 1-9.
- [6] 牛齐明, 刘峰, 张奕黄. 基于PHM的高速铁路牵引电机滚动轴承健康状态预测 [J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 95-101.
- [7] 王瑞峰. 基于智能检测监测与大数据技术的城市轨道交通智能运维管理 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(11): 85-89.
- [8] 徐余明, 黎家靖, 张宁, 石先明, 刘利平, 胡祖翰. 基于云-边-端架构的城市轨道交通智能运维系统 [J]. 都市轨道交通, 2022, 35(6): 145-150.
- [9] 王建文, 赵文龙, 黄国辉. 云边协同的新一代城市轨道交通生产系统融合平台研究 [J]. 都市轨道交通, 2022, 35(5): 146-151.
- [10] 杜纵, 段龙杰, 秦栋, 穆广友, 吴浚豪. 车辆结构边缘计算在线监测技术研究与应用 [J]. 铁路技术创新, 2023(3): 149-156.
- [11] 田葆栓. 科技赋能铁路运输装备, 构建数字化智慧货车——铁路数字货车4.0技术分析 [J]. 智慧轨道交通, 2022, 59(1): 5-15.
- [12] 赵焱, 曾云峰, 陈龙, 张朋, 王蒙蒙, 王嵩松. 基于大数据的城轨车辆PHM智能运维系统的研究与实践 [J]. 铁道车辆, 2022, 60(6): 133-138.