

动车组故障预测与健康管理 技术的研究及应用

池毓敢

(中国铁路上海局集团有限公司, 上海 201812)

摘 要: 简述了 PHM 技术的发展现状, 结合动车组的功能结构及运维特点, 提出了适用于动车组列车的 PHM 技术体系和系统架构方案, 阐述了基于 PHM 技术而开发构建的动车组 PHM 系统的功能及技术方案, 并以车轮多边形故障预警预测和牵引电机通风装置视情维修为例, 简述了部分功能模块的阶段性应用成果。

关键词: 动车组; 故障预测; 健康管理; 运维决策; PHM 系统

中图分类号: U269.6; U266.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.05.026

Research and Application for Prognostics and Health Management of EMUs

CHI Yugan

(China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 201812, China)

Abstract: The development of PHM (prognostics and health management) was introduced. The PHM technology system and system architecture for EMUs were put forward based on the research of the functional structure as well as operation and maintenance of EMUs. Based on PHM technology, the EMUs PHM system function and technical solution were expounded. The prognostics of wheel polygonization and traction motor ventilating device on-condition maintenance were introduced as the successful examples of the EMUs PHM system, the application results of some functional modules were briefly described.

Keywords: EMU; prognostics; health management; operation and maintenance decision; PHM system

0 引言

随着我国高速铁路建设及运营的迅速发展, 当前动车组运用管理对于列车及保障系统的安全性、可靠性、运用效率、维修成本等的要求越来越高。为解决运维需求并适应技术发展趋势, 本文对故障预测与健康管理 (PHM, prognostic and health management) 技术和动车组运维现状进行了分析, 并基于该技术建立了动车组健康管理及运维决策系统。该系统可实现对动车组系统及关键部件的监测、诊断、健康评估及对性能演化趋势和剩余寿命的预测, 能够为运用维修保障方案的制定提供合理的决策支持, 以降低动车组装备

运用与维修保障费用, 实现提高装备安全性、可靠性和任务成功性的目的。

1 PHM 技术的概述

随着信息化、自动化、智能化等技术的发展, 各类大型复杂系统装备的集成度、复杂度和综合度越来越高, 随之而来的装备运维成本居高不下且日渐庞大, 传统的装备维护保障技术已难以满足要求, 经济可承受性和投入产出效益成为不容忽视的问题^[1-2]。自 20 世纪 50 年代以来, 由美国军方提出和逐步发展起来的 PHM 技术最早用于降低飞机保障费用, 作为提高飞行安全和飞机可用性的综合性保障技术, 已将其列为大型武器系统采购的必备要求^[3]。据相关统计数据, PHM 技术使美国联合攻击机维修人力减少了

收稿日期: 2017-10-25; 修回日期: 2018-02-12

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (2016J007-B)

20%~40%，后勤规模缩小了 50%，出动架次率提高了 25%，使用寿命提高到 8 000 飞行小时，有效地降低了飞机使用与保障费用，提高了飞机系统安全性、战备完好率和任务成功率^[3]。目前，PHM 技术的研究对象已经从早期战斗机发动机扩展到飞机整机、大型舰船、直升机、地面装甲车辆以及工业领域的各类大型、重要装备中，基于此技术而展开的研究及应用正在复杂装备的维修保障领域内掀起一波新变革^[4]。

PHM 技术是基于故障监测、诊断及预警等技术发展而来的，它们相互之间是一脉相承的演化和依存关系，其主要包括 3 方面内容^[3]：一是增强诊断，即以高故障诊断能力和低虚警率确定部件完成其功能状态的过程；二是预测，依据故障特征和失效机理建模实现故障早期预警与剩余寿命预测；三是健康管理，依据监测、诊断、预测的信息，执行对装备或部件的健康状态、维修和保障活动做出决策活动以致装备或部件能够重新达到要求的健康标准。

动车组列车是高度集成化、信息化、复杂化的大型装备。动车组列车发展至今，各系列车型都安装有众多传感器来采集关键部件的状态信息。国内外很多科研院所和学者对动车组列车的故障监测、故障检测、故障诊断、故障预测、部件服役性能演化、剩余寿命预测、修程修制优化等内容进行了大量的理论研究和实践工作。此外，我国高速列车车载设备感知网络的完善、车地高速通信技术的发展、大数据分析挖掘技术的进步、运用维修数据的积累、部件性能演变规律的研究等有利条件的形成^[5]，为 PHM 技术的应用创造了良好基础。近 2 年，PHM 技术在我国轨道交通领域发展较快，已有部分专家学者开展了动车组列车和地铁车辆等装备相关系统和部件的 PHM 技术研究和应用，但其在我国动车组列车上全面而系统化的应用和实践工作仍处于起步阶段^[5]，成熟的应用案例和实践成果仍然较少。

2 基于 PHM 技术的系统体系结构设计

19 世纪 70 年代以来 PHM 技术迅速发展，美国军方、政府机构、工业界和学术界纷纷开展相关技术的研发工作，其在航空航天、军用装备、电子等不同领域的应用衍生了不同的体系标准和规范。国际标准化组织、电气和电子工程师协会（IEEE）、机械信息管理开放系统联盟、美国汽车工程师学会、美国联邦航空管理局和美国陆军等组织和机构陆续制订了或正在开发一系列 PHM 相关的标准和规范，如 CM&D 系列、OSA-

CBM、IVHM 系列、HUMS 系列、IEEE Std1856 系列等。这些标准从不同层面和不同角度对 PHM 技术的主要内容和架构进行了规范，按照不同类别和侧重点可分为 4 类，即 CBM、IVHM、PHM 及 HUMS^[6]。

这些不同类型的 PHM 系统的基本思想和原理是类似的，其具有一套通用的方法体系，即通过信息分层、模块化和开放式体系的建立，高效地获取复杂设备信息，实现数据处理、故障预测和健康评估等多级 PHM 功能^[7]。

2.1 IEEE 1856 的 PHM 系统标准架构

IEEE 和美国马里兰大学的计算机辅助产品寿命周期工程研究中心多年来一直致力于电子系统和产品的 PHM 技术研究和开发，由马里兰大学和 IEEE 的 PHM 工作组牵头组织和起草制定的 IEEE Std1856—2017^[8]是关于电子系统 PHM 的标准构架。该标准描述了电子系统 PHM 的定义、要求、组成及总体实施过程，给出了包含 PHM 性能分类的标准架构。IEEE Std1856—2017 给出的 PHM 系统体系主要包括感知、获取、分析、建议及实施等 5 个层级，以及感知设备、数据采集、数据操作、状态监测、健康评估、预测评估、提出建议及健康管理等 7 个功能区块，其体系结构和核心操作过程如图 1 所示。相比于 ISO 13374 等系列关于机器状态监测与诊断的标准规范在 PHM 架构和层级上的划分，IEEE Std1856—2017 规范中增加了实施层，即健康管理的功能模块，该层级和功能模块的主要作用是依据其余 6 个模块的功能和最终建议结果，实施对部件或系统的包括故障缓解和恢复等一系列操作在内的执行工作，这也是该 PHM 标准区别于其他规范的主要地方。

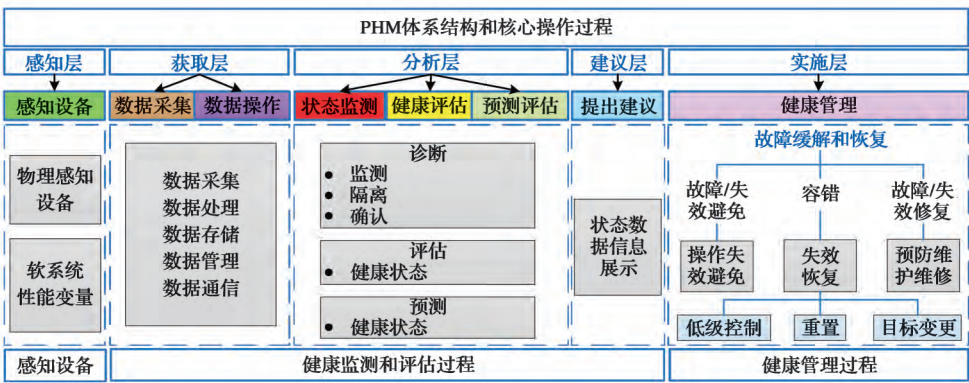


图 1 IEEE Std1856—2017 的 PHM 体系结构和核心操作过程概括

2.2 动车组 PHM 系统体系结构设计

参考 IEEE Std1856—2017 等 PHM 相关标准的体系架构和指导规范，并结合我国动车组列车的运维特点、功能需求和技术现状，本文提出了适用于我国动车组列车的 PHM 系统体系结构，如图 2 所示。部署在地面运维中心的健康管理及运维决策系统负责对车载实时运行状态参数、轨边监测数据、库内检测维修数据等信息进行综合计算处理，可在多个层级上采用多种类型的推理机对部件及系统状态进行监测、诊断、评估、预警及预测，对动车组运行保障、应急处置、

维修活动等提供决策支持。

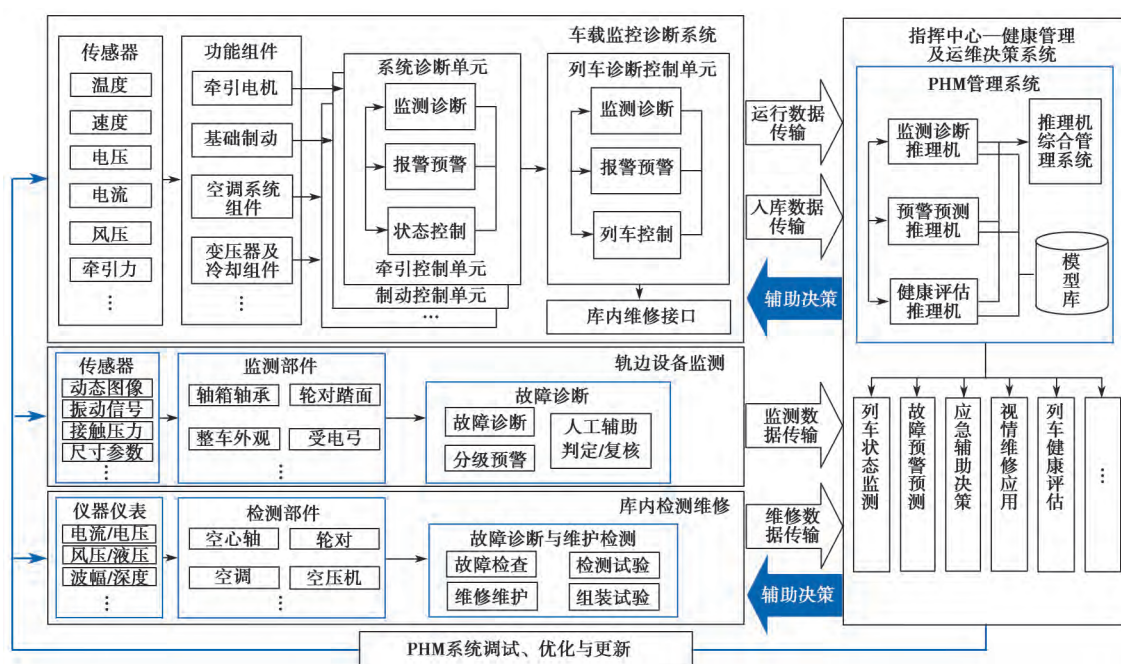


图2 动车组 PHM 系统体系结构

3 动车组 PHM 系统的关键技术

本文在进行动车组 PHM 系统的设计、开发和应用过程中,需要以下几类关键技术的支撑,主要有数据采集与处理、预警预测、健康状态评估和视情维修决策。

3.1 数据采集与处理技术

获取表征系统和部件健康状态的参数信息是开展 PHM 相关工作的前提和基础,状态数据的质量和数量直接影响 PHM 系统的应用效果。动车组 PHM 系统的数据采集与处理技术的研究主要是解决 2 方面的问题:一是需借助车地高速通信技术,实现动车组系统及关键部件的车载状态监测参数稳定而实时地传输至地面数据中心,确保列车状态信息的全面和完整;二是需定义统一的数据处理格式和规范,便于各类诸如振动参数、电量参数及工艺参数数据的结构化、转换及融合,这些信息和数据主要涵盖了车载状态数据、环境数据、制造数据、检测数据、维修数据、履历数据等内容。

3.2 预警预测技术

预警预测技术是 PHM 技术的重点和区别于其他技术的显著特征,也是其核心和难点。故障预警预测就是从部件的失效模式、失效特征和失效机理出发,采用统计可靠性、数据驱动、机理研究等方法,预测部件的故障发生、健康指标劣化趋势、剩余寿命,并进行征兆识别、故障定位及故障隔离等。动车组故障预警预测技术的研究主要包括 2 个方面内容:一是针对动车组状态监测范围不全面的现状,需要开展长期的仿真试验、故障模拟、实车跟踪等工作,利用有限的状态参数研究故障模式及失效机理,并建立相应的预

警模型;二是准确地识别故障特征,合理地制定预警的阈值范围,在保证预警结果准确性的同时严格控制虚警率指标。

3.3 健康状态评估

装备健康状态是指在规定的条件下和规定的时间内,能够保持一定可靠性和维修性水平,并稳定、持续完成预定功能的能力。对动车组系统及部件进行健康状态评估主要包括 2 个方面内容:一是建立装备完善的健康状态评价指标体系,采用定性或定量的方法定义健康状态的细分等级,为满足执行任务时的选车用车、专项质量整治等工作需求,同时可实现对部件、系统及车型的横向比较和评价;二是通过实时、长期的健康状态评价,可为动车组全车和部件长期服役性能及演化规律的研究提供有利的基础信息,实现对部件、系统及车型的全面而精准的评价分析。

3.4 视情维修决策

视情维修是指通过部件当前状态预测其劣化趋势,并决定维修时机、维修方式的预见性维修。在 PHM 系统中,用户可依据建议层和实施层的“提出建议”与“健康管理”2 个功能模块的作用并结合被监测对象的状态,从而提出最优的处置决策建议和措施,包括最佳维修时机、维修措施、检验和评估机制等内容。视情维修的开展对于我国动车组列车现阶段存在的维修不足、过度维修、成本浪费等弊端的解决是一个很好的尝试,对现行修程修制起到有益的补充,对于提高动车组运用效率、节约动车组维修成本及提升动车组安全可靠有着积极的意义。当前,针对动车组开展视情维修的研究,主要需要解决 3 个方面问题:一是通过不断地完善关键部件状态参数的监测范围,选取有效的特

征参数来表征部件的性能状态；二是分析部件特征参数的演变规律，揭示部件性能的劣势趋势；三是结合现行维修体制的现状，确定部件和系统合理的维修时机，达到维修生产组织的最优配比。

4 动车组 PHM 系统的设计与应用

动车组运用维修单位对于提升列车监控预警能力、提高检查诊断精度、增强设备健康管理水平的需求较为迫切，为解决动车组运用维修工作中此类日渐突出的问题和需求，本文基于对前述内容所提出的动车组 PHM 系统体系结构和几类关键技术的研究内容和成果，以动车组列车为研究对象，提出并建立了动车组健康管理及运维决策系统（简称动车组 PHM 系统），并在

中国铁路上海局集团有限公司组织实施了一系列运用实践和验证工作。

4.1 系统的总体设计

动车组 PHM 系统，在功能架构上划分为 5 个主要层级，即数据采集层、数据管理层、数据分析层、应用服务层和用户访问层，如图 3 所示。各类数据经过规定的接口或协议，采集汇总到动车组 PHM 系统平台数据库，并同时完成各类数据的分类、处理和融合。动车组 PHM 再依据可靠性、健康评价等分析指标和用户需求，借由各类算法和模型对指定部件、系统进行分析并形成诊断结果及各类可靠性、健康评价等指标数据，最后将分析结果智能推送到各应用模块，为运维业务提供各类辅助支持。

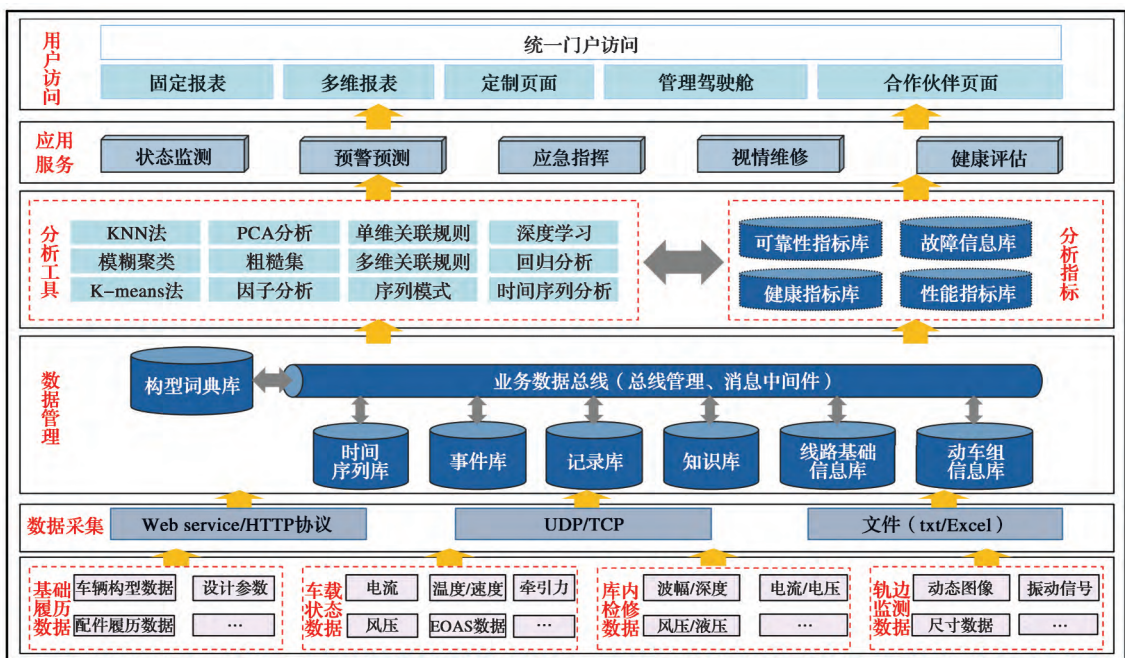


图 3 动车组 PHM 系统总体功能架构

4.2 系统主要功能及应用

动车组 PHM 系统的主要功能模块和应用服务主要由 5 部分组成，包括状态监测、预警预测、应急指挥决策、视情维修决策及健康评估。本文将结合动车组具体的业务和部分实例来简述这几个主要模块的技术思路、功能和应用。

4.2.1 状态监测

状态监测模块主要对动车组的车载状态参数、轨边监测数据、实时故障、历史故障、履历信息、开行计划、检修历史等进行复现。用户可以非常便捷地查询原先分散在各个系统内的碎片数据，从而能够更全面、系统地掌握动车组各个维度的信息。状态监测数据组成如图 4 所示。

4.2.2 预警预测

动车组 PHM 系统中集成了各类预警规则、预测模型和算法，并能根据诊断结果及时、智能地推送包含车组基本信息、部件位置、预警内容、预警级别、预警时间及处置情况等在内的预警信息。现阶段，动车

组 PHM 系统已实现了轴箱轴承、齿轮箱、牵引电机及通风装置、客室空调、蓄电池、车轮以及 WTDS 装置等关键部件部分故障模式的预警。

在此，本文仅以某型动车组列车的车轮多边形故障预测模型为例简述其应用。车轮多边形问题会引起车轮和轨道间的高频振动，严重损坏线路和动车组的部件如钢轨及扣件、垂向减振器、轴箱轴承及紧固螺栓等，车轮多边形产生机理目前尚未得到很好的解释。目前，动车组运用部门主要通过定期测量车轮不圆度的方式来发现车轮多边形问题，但由于测量周期跨度较大导致较多不圆度超标的车轮无法被及时发现。

针对此问题，本文通过对 2016 年以来形成的 26 000 余条车轮不圆度测量数据与列车运行总里程、车轮镟后运行里程、运行速度、运行线路、季节性影响、车轮尺寸参数等因素的相关性分析，在动车组 PHM 系统中建立了基于数据驱动的预测模型，对车轮不圆度超标概率较高的动车组进行预警，再由运用部门对预警车组安排后续维修措施。表 1 为本文 2017 年对随机

挑选的车组进行多边形故障预测及验证的部分结果数据,除 12 号车组外,其余 14 组车的不圆度预测等级皆与测量结果相符。经过大量实践验证及统计数据表

明,运用本文提出的车轮多边形预测模型,其现阶段综合准确率可达 83%,且虚警率低于 6%,并依据历史数据在持续训练和优化中。

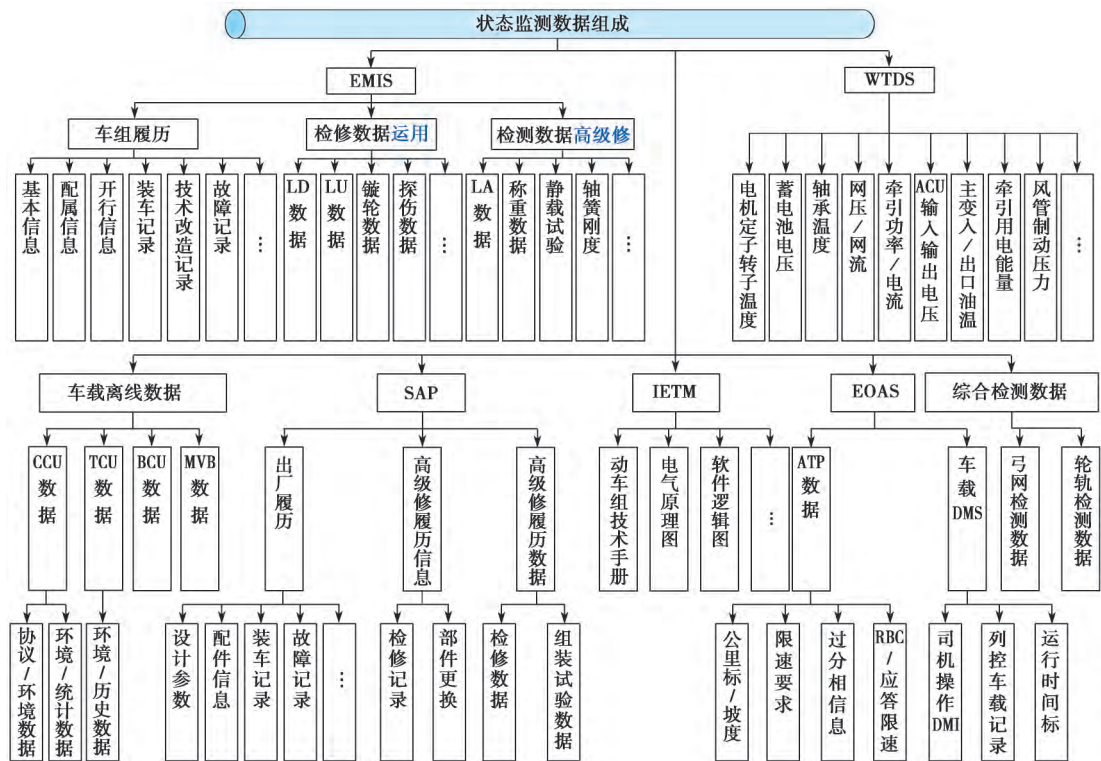


图 4 动车组 PHM 系统状态监测数据组成

表 1 多边形预测的验证结果示例

序号	车组号	总里程 / km	高级修后里程 / km	车轮磨耗 / mm	镟后里程 / km	平均速度因子	线路区间因子	季节因子	预测等级	测量等级	预测结果
1	**19	3 856 867	1 380 417	43.406	163 576	0.648 202	4 641.508	0.048 347	A 级	A 级	准确
2	**52	2 740 740	556 388	50.970	193 953	0.460 492	6 116.646	0.048 347	A 级	A 级	准确
3	**73	2 165 219	2 165 219	36.235	192 675	0.273 958	4 225.415	0.048 347	C 级	C 级	准确
4	**71	2 129 987	2 129 987	43.801	188 691	0.339 762	3 484.967	0.048 347	C 级	C 级	准确
5	**87	1 989 828	1 989 828	34.474	192 320	0.407 346	3 750.340	0.044 818	C 级	C 级	准确
6	**09	1 988 608	1 988 608	34.533	191 956	0.407 248	3 882.591	0.048 347	C 级	C 级	准确
7	**05	1 912 537	1 912 537	9.956	182 919	0.341 314	4 366.008	0.044 818	C 级	C 级	准确
8	**91	1 873 910	1 873 910	33.821	176 917	0.377 280	3 216.890	0.055 167	C 级	C 级	准确
9	**11	1 777 902	1 777 902	31.160	188 955	0.288 524	3 507.690	0.048 347	C 级	C 级	准确
10	**98	1 676 181	1 676 181	28.813	181 663	0.394 504	3 773.344	0.048 347	C 级	C 级	准确
11	**92	1 669 681	1 669 681	26.672	190 013	0.236 760	3 798.457	0.041 112	C 级	C 级	准确
12	**37	1 221 438	1 221 438	16.973	198 442	0.485 359	5 153.252	0.048 347	B 级	C 级	错误
13	**53	875 166	875 166	12.080	160 924	0.278 768	3 664.980	0.055 167	C 级	C 级	准确
14	**75	572 562	572 562	8.929	189 028	0.361 029	5 185.282	0.044 818	C 级	C 级	准确
15	**76	556 027	556 027	6.163	173 549	0.476 551	4 164.693	0.044 818	C 级	C 级	准确

4.2.3 应急辅助决策

随着动车组 PHM 系统中状态监测、预警预测等功能模块的应用,列车途中故障的应急指挥和处置水平也得到了大幅提升。应急指挥的模式逐渐由原先故障发生后等待随车机械师电话求援的被动式响应模式向依据系统预警/告警信息提前干预的主动介入模式转变,交路人员、故障详情、实时状态参数等相关信息的流转由原先的随车机械师口头汇报为主的方式向系统自动收集、智能匹配、实时推送的方式转变。同时,

应急指挥的决策过程由原先主要依赖专家经验的方式向系统智能决策和专家支持相结合的方式转变。基于动车组 PHM 系统的应急处置优化流程与传统模式的对比如图 5 所示。

PHM 系统中应急辅助决策功能模块的应用,一方面降低了原先事后响应延时对故障危害程度和对运输秩序的影响,提高了应急指挥的质量,另一方面,使运维单位缩短了原先地面指挥中心提取故障信息、研究决策处置方案的时间,提升了应急指挥的效率。截

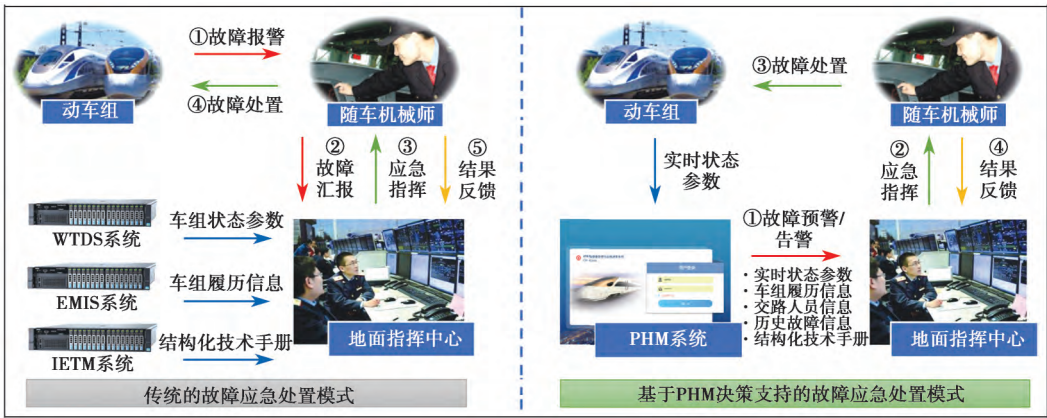


图 5 基于 PHM 的故障应急处置的优化

至当前，动车组 PHM 系统应急辅助决策模块已经实现了对我国动车组列车 996 项故障的应急处置决策进行辅助支持。

4.2.4 视情维修决策

视情维修决策模块是综合运用数据采集、状态监测、预警预测等功能模块的信息数据，通过加强和完善监测监控手段，研究和分析部件性能恶化规律，及时发现问题并采取相应对策。该模块能使维修措施能够更加灵活和精准，实现降低故障率、节约维修成本、缩小维修范围、减少维修工作量及提高设备可用率的一系列目标，并使维修工作变被动为主动，从而具有智能、自主的特点。结合动车组运维实际，本文有条件地、阶段性地开展了部分关键部件的视情维修研究，已在 PHM 系统中部署了诸如牵引变压器散热装置维护、牵引电机通风装置清洁及蓄电池电压测量等关键部件的视情维修应用，随着研究的深入和成熟，将逐

步扩大视情维修及应用的深度和广度。

本文现以某型列车牵引电机通风装置视情维修方案为例，阐述开展视情维修的目标、方法和意义。动车组牵引电机采用强制风冷的方式进行散热，其通风装置进风口前安装有过滤器，当过滤器堵塞时会造成冷却风量吸入不足，引起牵引电机过热故障。现行的作业标准要求定期开展牵引电机通风量的测量及通风装置清洁，但在实际操作中存在带电作业、过度维修等问题，而且在柳絮飞扬季节依然时有因牵引电机通风装置堵塞导致散热不良的故障发生。

针对此情况，本文通过分析通风装置堵塞情况下电机驱动端轴承温度 $T_{驱}$ 及电机驱动端轴承相对温度 $\Delta T_{驱}$ （驱动端轴承温度 - 环境温度）的变化趋势和长大隧道对通风装置散热性能的影响，再结合实际测量的通风量数据与 $\Delta T_{驱}$ 的映射分布，确定了 $\Delta T_{驱}$ 为判定牵引电机通风装置堵塞的特征参数，并以此为基础制定了相应的视情维修方案。通过 2017 年对 330 余组该型列车的试验跟踪，电机通风装置的视情维修决策模块在现场的应用情况表现良好，摘取部分统计结果如表 2 所示。实践表明，本文依托 PHM 系统提出的电机通风装置视情维修方案能够保证通风装置性能恶化故

表 2 电机通风装置视情维修 2017 年应用情况统计

序号	预警日期	配属	车组号	车厢号	位置	维修措施	处理日期	维修措施	风速 / (m·s ⁻¹)
1	05-27	杭州所	**08	8	2 架	通风量测量	05-28	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.5
2	05-27	虹桥所	**25	3	1 架	通风量测量	05-28	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	10.3
3	05-27	虹桥所	**25	6	2 架	通风量测量	05-28	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	10.3
4	06-16	杭州所	**24	8	1 架	通风量测量	06-18	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.5
5	06-16	杭州所	**24	11	1 架	通风量测量	06-18	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.4
6	07-04	杭州所	**08	11	2 架	通风量测量	07-05	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.3
7	07-08	杭州所	**14	16	2 架	积尘槽清洁	07-10	积尘槽清洁	9.2
8	07-08	南京南所	**56	3	1 架	通风量测量	07-09	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.9
9	07-13	虹桥所	**10	16	2 架	积尘槽清洁	07-14	积尘槽清洁	9.1
10	07-13	杭州所	**28	8	2 架	通风量测量	07-14	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.4
11	07-17	杭州所	**28	9	1 架	过滤器清洗	07-29	结合下一次 M1 修进行过滤器清洗	8.1
12	07-17	南京南所	**37	1	2 架	通风量测量	07-19	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.8
13	07-24	杭州所	**01	8	2 架	通风量测量	07-25	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.9
14	07-24	杭州所	**02	6	2 架	通风量测量	07-26	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.6
15	07-24	杭州所	**02	9	1 架	通风量测量	07-26	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.5
16	07-26	杭州所	**01	11	2 架	通风量测量	07-27	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	10.3
17	07-28	杭州所	**28	11	2 架	过滤器清洗	07-29	结合下一次 M1 修进行过滤器清洗	8.0
18	07-28	杭州所	**28	14	1 架	通风量测量	07-28	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	9.8
19	07-29	杭州所	**37	8	2 架	过滤器清洗	08-23	结合下一次 M1 修进行过滤器清洗	8.5
20	08-04	虹桥所	**41	1	2 架	通风量测量	08-05	风速小于 10 m/s 时清洁集尘槽，小于 8 m/s 时清洗过滤器	10.4

障的及时预警，并避免牵引电机过热故障的发生，使得该项维修工作相比以前减少约 81% 的工作量。

4.2.5 健康评估

健康评估模块用于对车组及部件状态进行综合评价，通过动车组部件监测参数、历史故障和部件残余寿命 3 个维度进行综合计算，得到动车组部件的健康状态等级，并逐级向上合成系统及整车的健康状态等级，具体的技术路线和方法如图 6 所示。

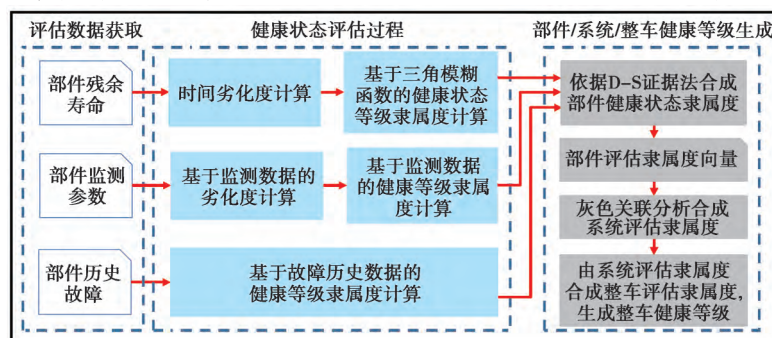


图 6 动车组部件和整车健康状态评估技术路线

动车组 PHM 系统健康评估模块依据算法和评分规则将列车健康状态分为“健康”、“良好”、“注意”、“恶化”及“失格”等 5 个等级，并向动车组运用管理部门推送故障排查、选车用车、整治维修相应的建议措施。同时，研究人员通过对动车组系统和部件长期健康状态数据变化趋势的分析和研究，可为动车组源头质量整治、维修周期优化提供数据支持。

5 结语

本文简述了 PHM 技术的发展现状，结合我国动车组列车的功能结构及运维特点，提出了适用于动车组的 PHM 技术体系结构并介绍了其关键技术、现状及特点，结合部分实例重点阐述了动车组 PHM 系统的功能、

应用以及阶段性效果。

在接下来的工作中，作者所在的团队将进一步推进动车组状态的全面监控，不断优化和完善动车组各车型的系统及部件的故障预警预测模型，提高故障诊断和健康状态评估能力，同时积极推进视情维修体制的研究和应用。

随着动车组信息化、智能化水平的不断提高，动车组 PHM 技术和系统研究的不断深入，我国动车组列车的安全保障能力、成本控制能力、装备使用效率将得到进一步的提升，综合运营管理水平也将更上一个台阶。

参考文献：

- [1] 蒋觉义, 李璠, 曾照洋. 故障预测与健康管理体系研究[J]. 测控技术, 2013, 32(11): 1-5.
- [2] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理体系的发展及应用[J]. 计算机测量控制, 2008, 16(5): 591-594.
- [3] 尉询楷, 杨立, 刘芳, 等. 航空发动机预测与健康管理体系[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [4] 周林, 赵杰, 冯广飞, 等. 装备故障预测与健康管理体系[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [5] 周斌, 谢名源, 吴克明. 动车组维修体制现状分析及展望[J]. 机车电传动, 2017(1): 17-21.
- [6] 景博, 汤巍, 黄以锋, 等. 故障预测与健康管理体系相关标准综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1301-1303.
- [7] 罗荣蒸, 孙波, 张雷, 等. 航天器预测与健康管理体系研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(4): 95-101.
- [8] IEEE Standard Framework for Prognostics and Health Management of Electronic Systems: IEEE Std1856—2017[S]. Piscataway, New Jersey: IEEE Standards Association Press, 2017.

作者简介：池毓敢（1962—），男，硕士，教授级高级工程师，长期从事铁路车辆的运用维修管理与研究工作。

（上接第 107 页）

- [3] 陈哲明, 曾京, 罗仁. 列车空气制动防滑控制及其仿真[J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 25-31.
- [4] PUGI L, MALVEZZI M, TARASCONI A. HIL simulation of WSP systems on MI-6 test rig[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(sup 1): 843-852.
- [5] 鲁进军, 刘寅虎, 杨磊. 轨道车辆制动控制单元的仿真技术研究[J]. 机车电传动, 2016(1): 20-24.

- [6] 汪枫, 马璐, 朱新宇, 等. 高速动车组制动系统中继阀性能仿真研究[J]. 流体机械, 2013, 41(4): 43-46.
- [7] 杨磊, 牛瑞, 马璐. CRH2 型高速动车组制动系统硬件在环仿真平台研究[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(1): 18-21.
- [8] Railway applications-Braking-Wheel slide protection: EN 15595—2009[S].

作者简介：杨俊（1980—），男，本科，高级工程师，现从事轨道车辆制动技术研究。

动态消息

欢迎订阅《机车电传动》

《机车电传动》期刊国内通过邮局发行，欢迎读者到当地邮局订阅。国内定价每册 15 元，全年 90 元。国内邮发代号 42-17，国外发行代号 BM353。