

中国高速列车健康监测与管理：进展及展望

王军^{1*}, 丁荣军²

(1. 中国中车集团有限公司, 北京 100039; 2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南株洲 412001)

摘要: 随着列车运营速度不断提升、配属规模及车辆种类不断扩展, 加之受长交路、多物理场耦合等复杂服役环境的影响, 高速列车安全保障及经济运维的要求持续提高; 高速列车健康监测与管理技术的研究与应用, 为中国高速铁路的长距离、大规模、高密度运营提供了关键支撑。本文阐述了健康监测与管理对高速列车的重要价值, 回顾了近20年中国高速列车健康监测与管理的发展历程: 从安全监控到关键系统健康监测, 再到一体化、全寿命周期的运维管理; 总结了列车全方位状态监测、精准评估与诊断预测、车辆远程运维服务、智能运维决策支持等方面的重大技术突破。进一步展望了广域全过程适应性、列车数据/计算资源一体化管理与应用、基于健康监测与管理的列车设计、车-线-站一体化智能运维等未来发展方向, 以期应对中国高速铁路面临的高效安全运维、深度降本降耗等发展挑战, 推动中国高速列车技术持续领先。

关键词: 高速列车; 健康监测与管理; 故障诊断预测; 智能运维; 车-线-站一体化

中图分类号: U270.2 文献标识码: A

Prognostics and Health Management of High-Speed Trains in China: Progress and Prospect

Wang Jun^{1*}, Ding Rongjun²

(1. CRRC Co., Ltd., Beijing 100039, China; 2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: Higher requirements have been imposed for the safety and economical operation and maintenance (O&M) of high-speed trains as a result of increasing operating speed, number of train sets in service, and vehicle types as well as complex service conditions such as long routing and multi-physics coupling. The research and application of prognostics and health management (PHM) technology in the field of high-speed trains provides important technical support for the steady operation of China's high-speed trains over long distance, on large scale, and in high density. This study presents the significance of PHM for high-speed trains and reviews the development process of high-speed train PHM in China, which has evolved from the initial safety monitoring to breakthroughs in health monitoring technologies of key systems and then the current integrated lifecycle O&M management in the past two decades. It further summarizes the major technical breakthroughs in four aspects, namely, comprehensive train condition monitoring, accurate assessment and diagnosis prediction, vehicle remote O&M services, and intelligent O&M decision support. In the face of the future challenges of efficient and safe O&M, substantial cost reduction, and consumption reduction of China's high-speed trains, suggestions are proposed in the following aspects: wide-area and entire-process adaptability, centralized management and application of train data and computing resources, train design based on PHM, and train-line-station integrated intelligent O&M, so as to promote China's high-speed train technology to maintain a lead.

Keywords: high-speed train; prognostics and health management; fault diagnosis and prediction; intelligent operation and management; train-line-station integration

收稿日期: 2023-01-27; 修回日期: 2023-03-23

通讯作者: *王军, 中国中车集团有限公司正高级工程师, 研究方向为高速列车技术; E-mail: wangjun20220101@126.com

资助项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1708001, 2021YFB3203205)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

经过近20年的发展,中国高速铁路(高铁)成为世界上规模最大、运营区域最广、服役环境最复杂的轨道交通系统;截至2021年年底,高铁营业里程为 4×10^4 km,高速列车共有4153标准组,高铁通达93%的城市(50万人以上)。速度提升和规模扩大对动车组持续保持安全、可靠、高效运营提出了重大挑战。发展高速列车健康监测与管理(PHM)技术,对车辆服役状态的全面感知、精准评估、快速响应,中国高铁长距离、大体量、高密度的安全高效运营具有重大意义。

PHM理念源于直升机的机械系统监控,随后在航空、航天、船舶等领域的装备上获得广泛应用^[1,2]。随着轨道交通装备行业发展重心由规模化制造转向全寿命周期内的运营维护保养,运用先进的PHM技术来提升高速列车的安全性及可靠性,受到广泛关注^[3]。欧盟Shift2Rail项目支持轨道交通综合监测系统、信息技术服务解决方案的创新研究,目标是将轨道交通系统服务的可靠性和正点率提高50%。法国阿尔斯通公司应用Health Hub、Train Tracer等健康监测系统,实现从车辆到基础设施的远程监测与智能管理。近年来,轨道交通装备国际知名企业针对列车关键系统的健康监测需求推出系列解决方案,如日立铁路公司正在更新运营车辆的无线数字系统,可实时监测转向架和轮对的运行状态,预计将列车因转向架和轮对检修而停运的时间减少50%。

高速列车是机械、电气、电子信息等技术高度集成的复杂大系统,包含众多关键技术和配套技术。在高速移动条件下,列车与周围环境的相互作用机制复杂,车-线-网-气流耦合效应强烈,增加了列车运营问题分析的复杂性以及预防处置的挑战性。高速列车PHM是集成力学、机械、电子、可靠性等多学科知识并具有多学科紧耦合特性的综合性技术。需从气动、强度、动力学、电磁、控制等基础理论及工程技术出发,综合采用仿真、试验等方法,研究系统部件失效机理,采用与之相匹配的感知技术,获取系统及部件实时运行的状态数据;融合设计制造数据、历史数据、环境数据,借助大数据、云计算、机器学习、人工智能(AI)等信息处理手段,开展高速列车的实时状态监测、故

障诊断与预测、健康评估;结合可协调的检修维护资源,提供精准的维修决策支持,保障高速列车的安全运行和视情维修。

中国高铁建设规模大、服役环境复杂、分布区域广,实施高速列车PHM面临重大技术挑战。经历了从先期技术探索到逐渐深化应用的发展历程,建立了较完善的高速铁路安全技术体系(见图1),提升了车辆的安全性、可用度、完好性并降低了维修保障成本。本文立足高铁运营的可靠性与安全性需求,回顾中国高速列车PHM的发展历程,总结关键技术突破、展望未来发展方向,以期为高速列车技术体系构建、高速铁路高质量发展等研究提供基础参考。

二、中国高速列车健康监测与管理发展历程

中国高速列车PHM始终伴随高铁行业创新、列车运维需求、科学技术进步而发展,经历了列车运营安全监控模式,关键系统PHM技术,一体化、全寿命周期的智能运维管理体系3个主要阶段。

(一) 列车运行安全监控模式

在高速列车投入运营初期,PHM探索主要以列车运行安全监控为主,由车载监控、轨旁检测两部分组成。①在车载监控方面,通过列车网络系统进行车辆运行状态监控,但监测项点有限、参数较少、频次较低,列车状态及诊断结果的数据无法实时落地^[4]。②在轨旁检测方面,延续铁路客货车和机车的成熟应用经验,沿用了铁路车辆运行安全监控(5T)系统模式(针对客货车运行安全进行动态检测和联网监控)^[5,6];发展了高速列车轨旁安全检测系统并在干线大节点上进行部署,在列车中低速通过的时间段进行轴箱轴承、车体底部与侧面零部件松脱或异常(见图2)、车轮多边形、踏面损伤等方面的安全检测;与动车组管理信息系统(EMIS)、动车组车载信息无线传输系统(WTDS)联动,实现高速列车故障预警与应急处置功能。

在检修方面,建立了包括运用修(一、二级修)和高级修(三、四、五级修)在内的五级修业务体系。在缺少高速列车运维服务经验及可借鉴成熟模式的情况下,逐步形成了高速列车检修规程、售后包保服务模式^[7]。

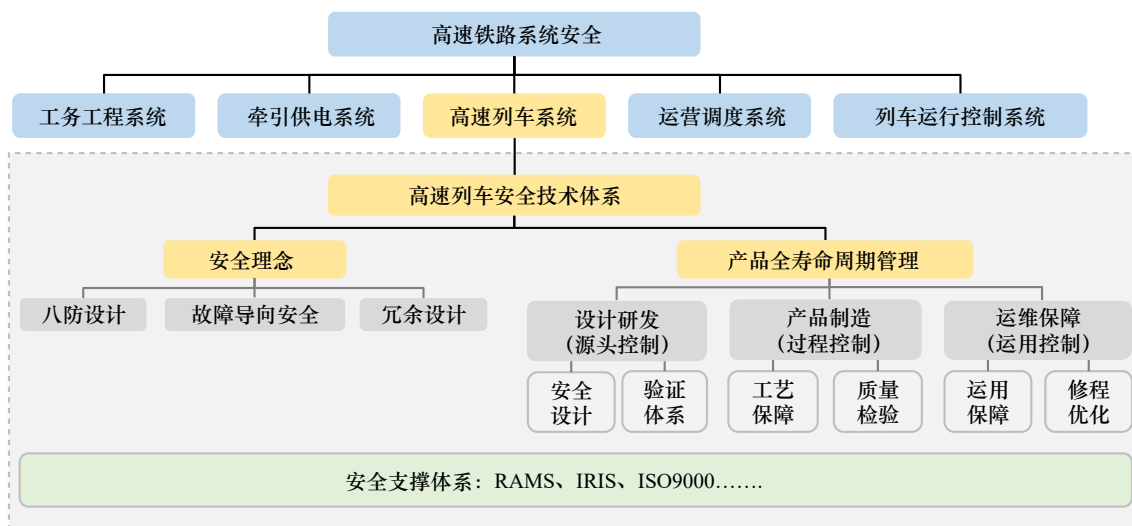


图1 高速列车安全技术体系
注：RAMS表示可靠性、可用性、维修性、安全性；IRIS表示国际铁路行业标准。

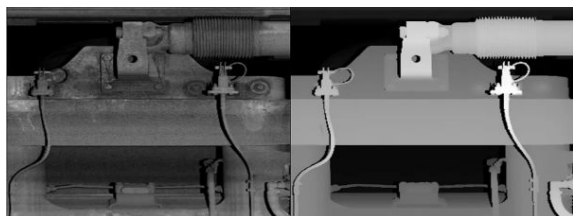


图2 车底轨外扫描灰度及三维扫描深度图
(基于动车组运行故障动态检测系统)

(二) 列车关键系统PHM技术

在京沪高铁开通（2011年）、自主研发的CRH380系列高速列车大规模上线运用后，中国高速列车运营数量及配属范围不断扩大，车辆运行速度提升至300~350 km/h，对高速列车的安全保障与运维管理提出了新要求。高速列车PHM研究进一步深化，重点针对车载端，就影响列车运营安全的关键系统PHM实施技术攻关。研制了高速列车关键系统车载在线监测系统，扩充了列车部件状态监测参数（如CRH380AL传感器数量超过1000个）并提高了数据获取的实时性，增强了诊断预警功能。

关于车载监测，在列车网络系统状态监控的基础上增加了走行部监测系统（见图3）、供电安全监测系统（见图4）^[8-11]，与轨旁检测系统互补以形成高速列车运行安全双重保障。在走行部监测方面，研制了实时轴温检测、失稳检测等装置，实现了基于温度阈值判断轴承严重故障、基于构架横向加速

度评价列车运行稳定性并实时预警的能力。在牵引供电监测方面，研制了接触网安全巡检、运行状态检测等装置，实现了接触网运行、悬挂状态等参数的异常检测能力。此外，动车组车载远程数据传输设备^[12]实现了列车状态监控数据和故障数据的小容量、低密度、定时发送，以车辆状态及故障信息的实时落地支撑了运营列车的故障排除与应急处置。

在检修方面，持续推进修程修制优化、检修技术创新，有效降低了高速列车百万千米故障率。各铁路局、主机厂共同参与高速列车检修规程、检修技术条件、检修工艺等的优化，切实提升了检修质量并降低了维修成本。主机厂建立了标准化售后服务模式，涵盖售后服务体系、专业化检修团队、三级应急支持体系。依托国家“十二五”科技支撑计划支持，完成了“智能高速列车系统关键技术研究及样车研制”项目，深化了高速列车全息化感知技术研究，构建了智能高速列车系统应用平台。

(三) 一体化、全寿命周期的智能运维体系

随着“复兴号”系列高速列车投入运营，基于“本构安全+智能运维”理念，积极运用大数据、AI、第四代/第五代移动通信（4G/5G）技术，建立了覆盖高速列车全寿命周期的管理运维体系、车-地一体化PHM平台^[13-16]。

在车载端，针对高速列车在感知点分布广（“复兴号”的监测点超过2500项）、数据类型多样、状态交错关联条件下的高速实时监测问题，构

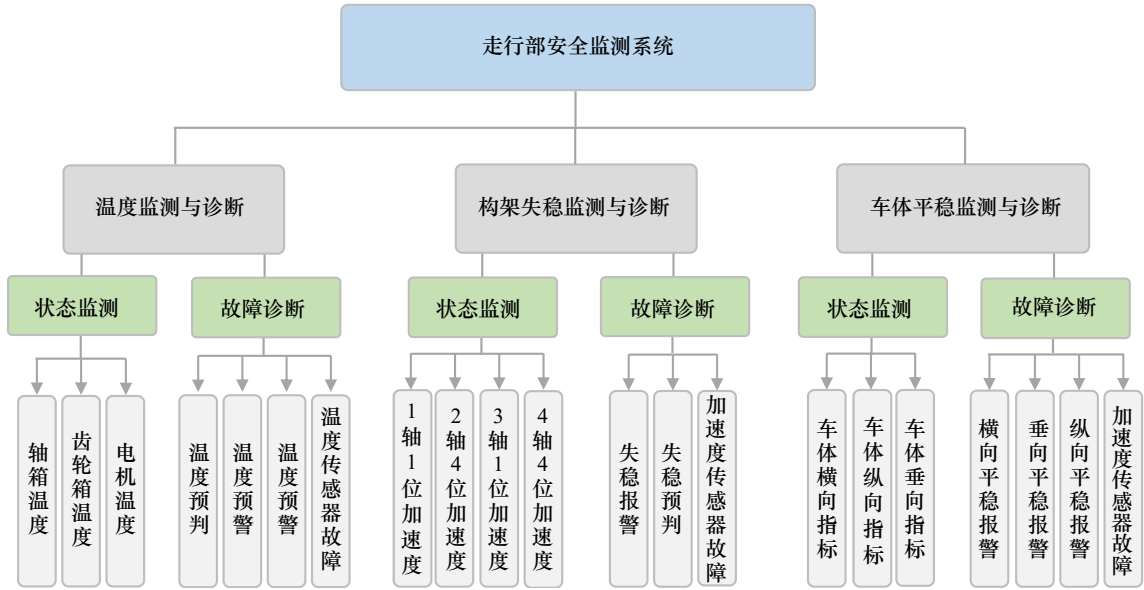


图3 走行部监测系统

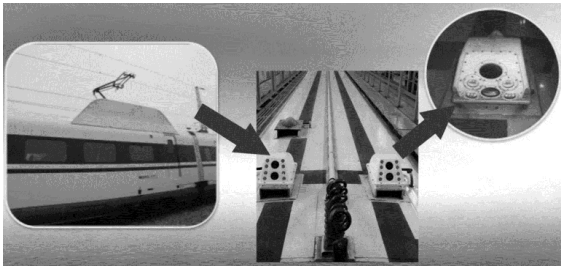


图4 车载接触网运行状态检测装置

采用千兆以太网进行车辆网络信息高效传输，可兼容CRH380、CR300/400等车型，车-地远程实时传输间隔由之前的30 s缩短至5 s。

在地面端，构建了高速列车健康监测与专家支持系统，可接收列车实时监测数据；挖掘实时监测及历史数据，开发了列车关键部件的故障诊断预测模型超过100个。实现在营动车组服役状态的实时监测、诊断预警、远程技术支持、维修决策，向各铁路局推送预判、预警、报警信息，支持对列车故障的高效分析和快速处置。

建了列车三级状态监测系统，集成牵引、制动、走行部等各子系统的健康管理功能，基于分布式架构实现一体化的采集、计算、存储、通信（见图5）。

在运维体系方面，构建了以可靠性为中心、覆

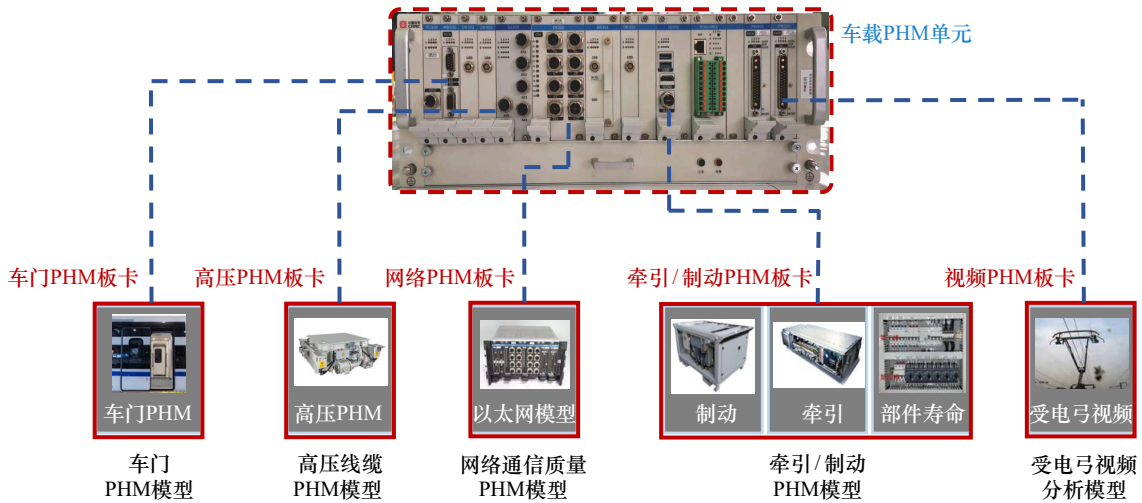


图5 车载PHM系统架构

盖全寿命周期的运维管理体系（见图6），提高了运维经济性；以维护/维修/运行（MRO）系统为支撑，建立了高速列车故障字典及运维数据库，统计和分析系统及部件的失效规律，科学优化检修修程。

围绕高速列车PHM技术，在国家、中国国家铁路集团有限公司、中国中车集团有限公司等层级项目的支持下完成了系列重点研发任务。2015—2016年，中国国家铁路集团有限公司实施了“动车组故障预测与健康研究”等项目。2016年，中国中车集团有限公司启动了“轨道交通装备故障预测与健康研究技术及应用”项目，旨在建立车组运维数据库，依托大数据分析实现故障诊断、预测及维修决策。2016年，“先进轨道交通”国家重点研发计划项目中的“轨道交通系统安全保障技术”项目^[17]启动，以高速铁路系统运营安全感知与预警的基础理论及关键技术为研究重点。2017年，工业和信息化部智能制造新模式应用项目“基于大数据云平台的轨道交通装备远程运维服务新模式应用”启动，构建远程运维服务技术与支撑平台，涵盖状态监测、故障诊断与预测。此外，积极开展国际合作，共建国际联合研究中心，举办轨道交通结构健康监测方向的国际会议。

三、中国高速列车健康监测与管理关键技术突破

基于新型传感、通信、AI、边缘计算、大数据等技术的发展，中国高速列车PHM研究在包括数据获取、诊断预测、决策支持在内的全流程上取得技术突破，形成了高速列车全寿命周期内（研发、设计、制造、检修维护）的数据采集及建模分析能力，构建了组件成套、场景可定制的支撑技术与工具化系统，切实提升了高速列车的运维安全性和经济性。

（一）大跨度、全天候工况下列车运行状态多维监测技术

高速列车的系统构成、系统间相互作用关系均较复杂，关键系统及核心部件的失效机理、数据表征特性各异。集成并融合视频图像、振动温度、光纤传感、声发射等传感技术，辅以配套的数据采集仪和解调软件，实现列车结构件、走行部、车顶高压、车门等关键子系统的状态监测和数据获取（见图7）。

在高速列车运行过程中，车体底架、转向架构架等关键承载结构部件受交变载荷、异常冲击、环境腐蚀等长期作用，可能出现疲劳、腐蚀、裂纹等

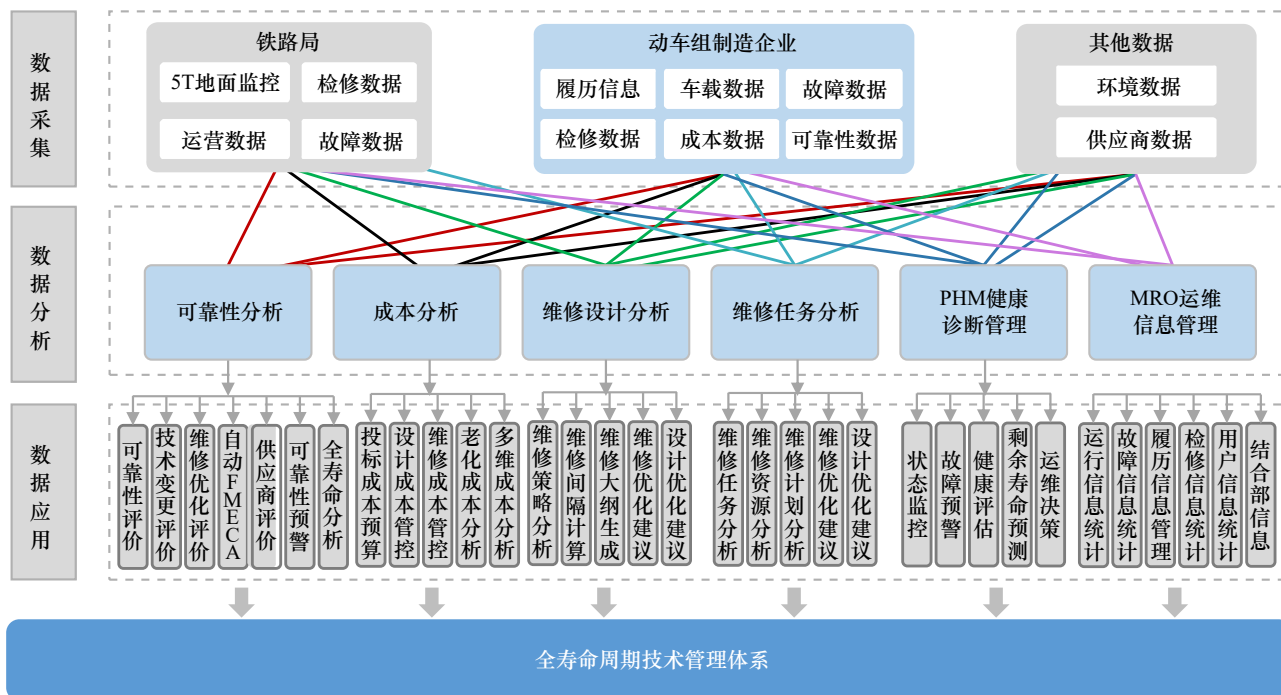


图6 高速列车检修运用大数据布局
注：FMECA表示失效模式影响及危害度分析。

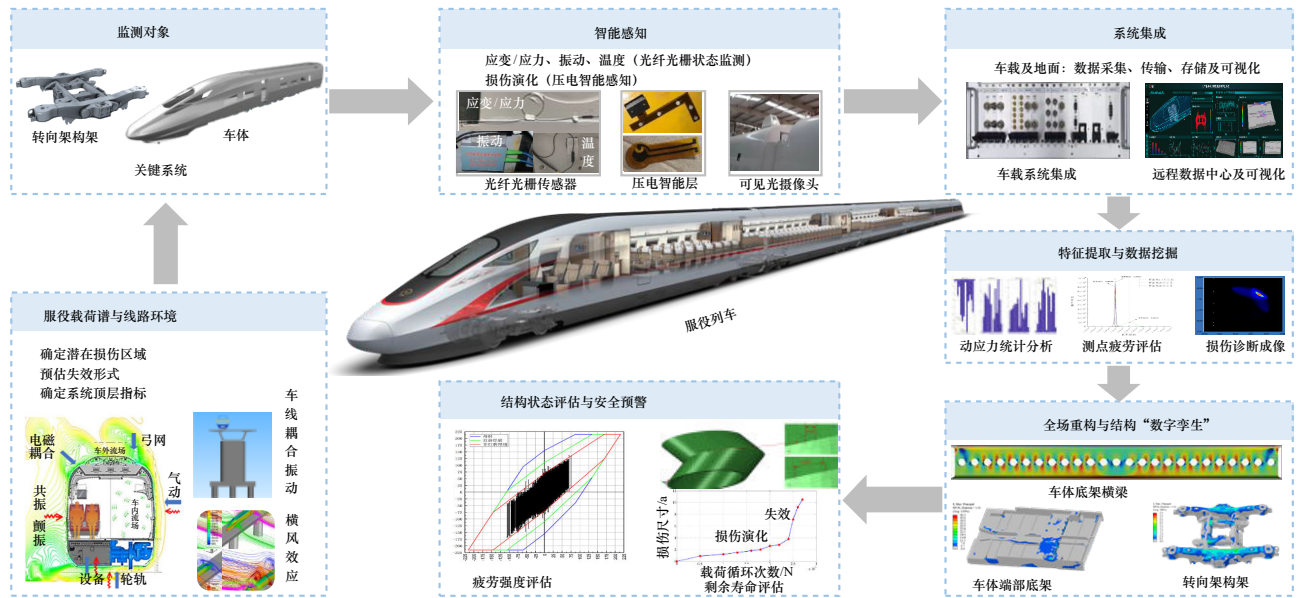


图7 高速列车关键系统健康监测技术

潜在损伤。为了保障列车结构的长期服役安全，率先开展了高速列车结构健康监测技术研究及应用。研制了集成光纤光栅^[18]和智能压电传感器^[19]的柔性化、高性能感知网络，能够与结构共形匹配。开发了满足车载设计标准、适应车辆服役环境的集成化、模块化、低功耗监测系统，实现结构从疲劳累积到损伤萌发、再到损伤演化的全过程实时监测。

车载结构健康监测系统的应变检测范围为 $\pm 5000 \mu\epsilon$ 、损伤检出尺寸小于3 mm。在结构感知网络设计中，采用贪心算法^[20]确定光纤光栅串连测点的最优路径，解决了车体结构测点多、范围广、走线难的问题。转向架的构架结构多为厚板，为此通过分析压电导波传播在关注区域的可达性以匹配压电换能器的阵列密度，提高了损伤检测效率和定位精度。在传感网络、车载系统的环境适应性方面，通过台架试验和线路跟踪测试，持续优化设计、制造、防护等工艺，满足振动冲击、交变湿热、电磁干扰等服役环境对系统安全性和可靠性的要求。

走行部事关列车运行平稳性和乘坐舒适性，包含车轮、齿轮箱、轴承等高速旋转部件；受轮轨高速作用、异常振动、曲线通过等影响，可能出现磨损异常、踏面损伤、润滑不良、轴承损伤等潜在故障，甚至触发列车降速运行或停车等严重影响运营秩序的应急处置措施。新研的走行部监测系统实现轴温、轴承振动冲击、失稳性能、平稳性能的“四

合一”实时监测，全面覆盖走行部动力学性能异常、旋转件运转异常等监测预警要素；具有集约、高效、可靠融合的应用特征，节省监测成本约20%，节约安装空间约40%。

(二) 列车关键系统状态精准评估与诊断预测技术

中国高速列车性能优异且可靠性高。然而高速列车运营的故障样本稀缺，成为开展状态评估、故障诊断与预测的难题^[4-6]。针对列车关键子系统数据特征的差异性，融合列车关键设备机理、机器学习、图像处理等数据分析方法，提出了相应的解决方案。

对于列车车顶高压系统的受电弓，主要监测运行过程中的火花、结构异常、附着异物等。针对列车广域高速运动的特征，提出了一种融入行业专家经验信息，带有异常样本增广、多尺度感受野卷积神经网络增强、预训练特征提取器的异常检测方法，突破了小样本、复杂且瞬变背景条件下基于视频的深度学习工程应用技术^[21-25]，革新了基于视频的受电弓状态实时评估及模型轻量化技术。受电弓的火花、异物、结构异常等检测模型，单帧检测时间小于40 ms（见图8），检测精准度由传统图像处理方法的75%提升至95%以上，已在新造智能高速列车上获得部署应用。

列车牵引系统部件众多、结构复杂，是列车

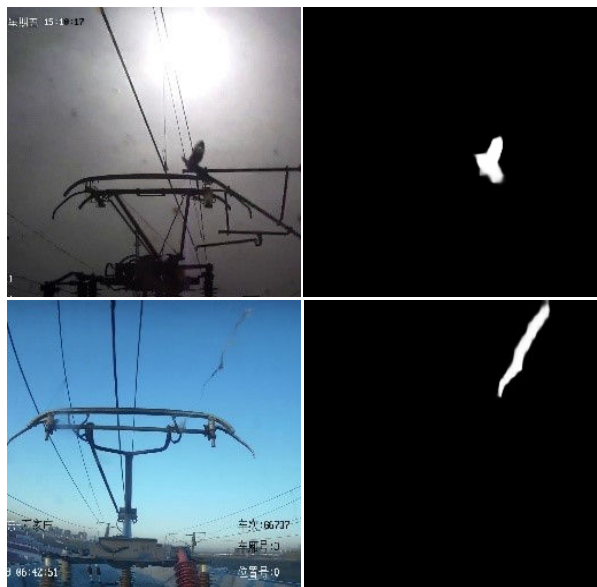


图8 受电弓弓头异物检测

PHM的重点对象。针对牵引系统多数设备（正常运行）数据信息量小、故障样本稀缺的问题，采用数据增强和小样本学习方法（如弱标签学习、多维数据特征聚合、度量学习）^[26,27]，实现了牵引变流器/变压器/电机的滤网堵塞故障诊断与预测。某型高速列车牵引变流器滤网堵塞模型的运行结果（见表1）与实际滤网脏堵情况一致（或比清洗记录提前一天），可据此优化滤网清洗时间，预防由滤网脏堵引起的变流器故障。

针对车体底架、转向架构架等关键承载结构，采用概率成像方法^[19,28,29]进行安全评估，损伤成像的定位精度优于5%。采用载荷-应变线性叠加方法^[30,31]重构结构全场应力，实现铝合金结构疲劳可靠性的动态评估。

针对走行部旋转部件（如联轴节、轴箱轴承），采用卷积神经网络、共振解调、阶次跟踪算法进行故障诊断，联轴节的故障诊断准确率达到99%。集合经验模态分解、流行学习、深度置信网络、最小二乘支持向量机、长短时记忆网络、迁移学习等算法^[32-34]，在走行部旋转部件故障诊断中也获得广泛应用。

（三）集成化、综合性的列车远程运维服务平台

中国高速列车数量多、型号多、运营里程多，产生了大量的数据资源。为有效利用列车运营的实时监测及历史数据，将大数据、云计算、AI等信息

表1 滤网堵塞检测模型运用结果

列号	时间	模型预测结果	滤网脏堵情况	变流器故障报警信息	与清洗记录时间对比
0452	2022-03-12	脏堵	脏堵	无	早一天
0457	2022-03-18	脏堵	脏堵	无	一致
0459	2022-04-23	脏堵	脏堵	无	一致
0460	2022-03-12	脏堵	脏堵	故障	早一天
	2022-04-11	脏堵	脏堵	无	一致

技术与列车运维服务相结合，充分挖掘车辆全生命周期数据蕴含的价值；在车载PHM的基础上，构建了集成化、综合性的远程运维服务平台，集状态监测、故障诊断与预测等功能于一体，为动车组检修提供决策支持，推动计划性预防修向状态修的转变。目前，运维服务平台部署的列车关键设备故障诊断预警模型超过240个，支持约1600列在线运营高速列车的服役状态实时监测和预警。

以中车青岛四方机车车辆股份有限公司为例，与高速列车运维相关的设计、制造、运用、检修、环境等数据两年内即达到2 PB。在列车全寿命周期数据管理方面，建立了车辆一体化数据传输系统，贯通了设计、制造、检修、运维的全链条，实现端到端的数据采集。搭建了基于Hadoop+Spark混合架构的大数据运维平台（见图9）^[35]，利用实时传输+Kafka+Spark的数据接收与解析技术，实现高通量连续性数据的快速处理。建立了松耦合、互操作、可重用、可重组的架构，数据集成接入及发布方法，提供数据的路由、转换、服务组合、服务管理、安全访问能力。实现全路在线运营高速列车数据的实时物联接入，形成高速列车全寿命周期的数据资源池并可即用即取，其中传感器超过100种，数据测点超过 2×10^7 个。

在运维数据的分析挖掘方面，突破了面向高速列车的分布式系统及异构数据融合与治理技术。以列车构型为类别，融合相应的动态和静态数据，有效整合同类型号车辆的运行状态、故障情况、运用信息、检修信息、历史装车信息、运行工况信息等数据。运用机器学习、深度学习等AI算法挖掘高速列车运营数据、企业运营数据、用户产品运维数据，据此预测和预判列车关键部件故障；提出故障处理建议方案，规避影响车辆运行安全的潜在问

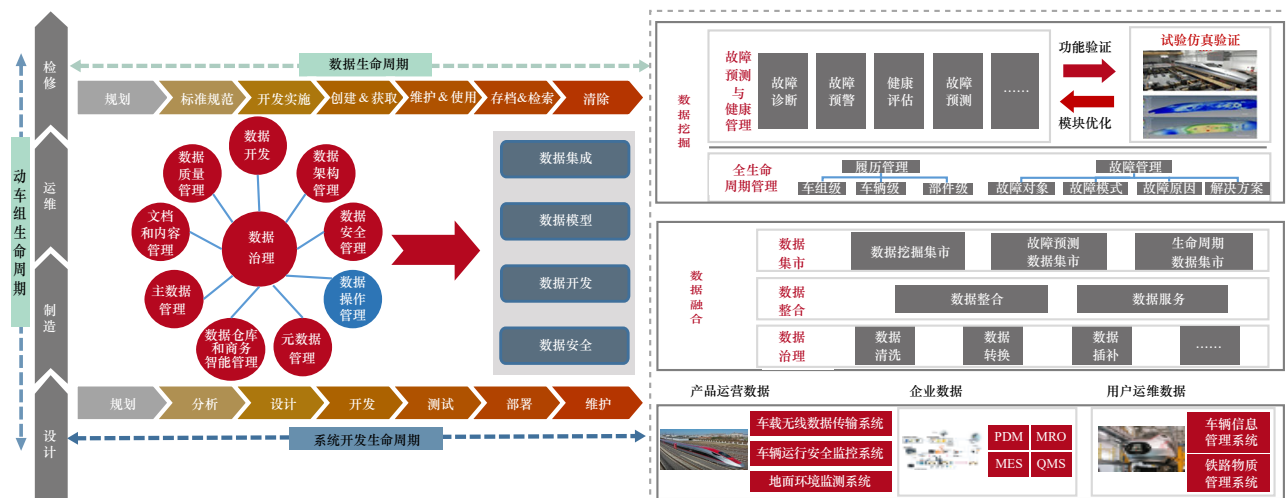


图9 高速列车多源异构数据融合技术框架

注：PDM表示产品数据管理；MES表示制造执行系统；QMS表示质量管理体系。

题，增强安全运营保障能力。

(四) 基于PHM的高速列车检修和智能运维服务体系

随着中国高速列车配属数量的快速增长，车辆的运用可靠性、运用检修效率、检修成本效益等问题愈发突出。运维需求发生转变，经济性指标进一步增强，需要以较低的运维成本确保列车安全并可靠运行。高速列车PHM技术的发展为优化车辆检修和运维服务提供了关键支撑。

在检修方面，采用以可靠性为中心的维修理念以及PHM技术，推动高速列车检修由预防性维修转向基于状态的检修及预测性维修。根据列车故障诊断与预测结果，构建以RCM（以可靠性为中心的维修）为核心的检修体系；分析全寿命周期内的可靠性变化趋势，提出合理的全寿命周期检修要求，为修程修制的制定及优化提供科学且标准的方法。

在运维服务方面，融合云计算、虚拟可视化技术，构建了组件成套、场景可定制、功能可配置的远程运维服务技术与工具系统；突破距离、时间、设备的限制，形成了联网化、数据化、可视化、主动化的高速列车智能运维服务模式（见图10）。配件管理是运维服务的重要内容，基于长短期记忆网络、差分整合移动平均自回归等需求预测方法实现配件库存的精准预测；构建了基于全国库存统一调度的列车配件库存管理模式，实现配件库存的分级管理、统一调度，平均供应周期由30天缩短至15天

以内，备品备件的成本降低超过40%。远程运维支持中心以PHM为内核，借助MRO系统、视频会议系统等信息化手段，形成了故障监控、应急响应、处置分析等能力；显著减少了技术人员现场支持次数，使高速列车应急运维故障处理效率提升50%以上。

四、中国高速列车健康监测与管理技术展望

(一) 范围更广、过程更全、融合更紧密的PHM

2022年11月，中国参与建设的印度尼西亚雅万高铁成功试验运行，对推动中国高铁“走出去”起到示范效应。随着中国高速列车应用覆盖更多的国家和地区，列车在运营过程中将经历严寒、酷暑、干燥、湿热、盐雾、风沙等更加复杂的服役环境，这对列车各子系统设备的可靠性提出了新要求。对于确保列车高安全性、高可用性的PHM系统，需进一步深化研究工作以适应更为广域复杂的服役环境：① 集成先进传感技术和网络，开展列车关键系统与核心部件运行状态的全范围、全寿命周期、全过程实时动态监测；② 研制高可靠性、高性能PHM系统平台设备，为各子系统设备状态监测、预测模型运行等提供坚实基础；③ 通过线路试验，阐明设备失效机理并丰富样本数据库，克服传统失效机理难以准确表征列车在复杂服役环境下运行状态的不足；④ 将AI、大数据技术与失效机理、专家经验深度结合，开发复杂服役环境下列车关键设

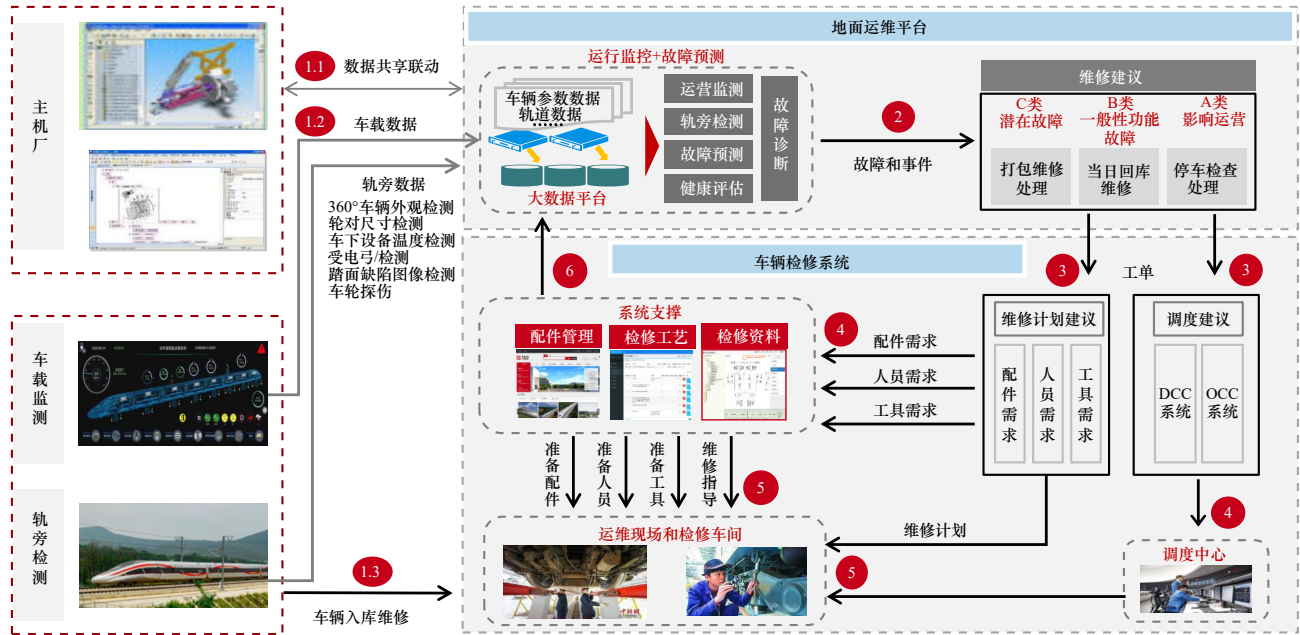


图10 基于数据驱动的高速列车智能运维平台
注：DCC表示车辆基地控制中心；OCC表示线路运营控制中心。

备状态的准确表征方法，提升PHM的精准度。

(二) 列车数据 / 计算资源一体化管理与应用

高速列车设备众多、布局分散，目前采用分布式网络控制系统以自行采集和处理相应设备的状态监控数据，再将处理结果上传列车网络。这类数据处理方式，丢失了可反映设备性能变化的丰富暂态信息。高速列车的新型车载设备具有显著增强的数据处理及计算能力，在此背景下针对列车各主要设备的数据资源进行统一管理和调度具备技术可行性。全面采集并充分挖掘相关设备在性能劣化过程中出现的丰富暂态信息，构成开发性能优异的预测/诊断模型、实现列车精准的PHM等增强能力的坚实基础。

(三) 基于PHM的列车关键子系统设计

高速列车PHM是在传统列车安全监控基础上发展而来的。传统设计以防止车辆设备发生严重故障、能够阻止故障进一步发展为准则，这种方式难以对设备运行状态（反映设备是否出现性能劣化以及劣化程度的一组显式或隐式特征参数）进行持续监测，不足以支持列车PHM的深化研究。在新型高速列车的设计阶段即规划列车PHM的功能分布，在设计流程中融入数据采集、诊断模型运行等

PHM需求；从车辆总体方案“源头”实施列车PHM，革新高速列车PHM技术的应用水平。

(四) 车-线-站一体化智能运维

高铁是包括动车组、通信信号、牵引供电、工务工程、运营调度、客运服务六大子系统在内的系统工程。当前的主流方式是各子系统在专有领域展开智能运维研究，但具体业务及数据相对独立，“数据孤岛”现象突出，高质量开展数据共享难度较大。实现高铁跨系统、跨功能、整合联动的智能运维管控，是中国高速列车智能运维的未来发展方向，需探索并构建车-线-站一体化智能运维模式，深化多专业设备综合联动监视、跨专业数据联动分析等技术研究。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 27, 2023; Revised date: March 23, 2023

Corresponding author: Wang Jun is a professor-level senior engineer from the CRRC Co., Ltd. His major research field is high-speed train technology. E-mail: wangjun20220101@126.com

Funding project: National Key R&D Program Project (2020YFB17080 01, 2021YFB3203205)

参考文献

[1] Ezhilarasu C M, Skaf Z, Jennions I K. The application of reason-

- ing to aerospace integrated vehicle health management(IVHM): Challenges and opportunities [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019; 105(2): 60–73.
- [2] 裴大茗, 王建峰, 周鹏太, 等. 船舶 PHM 技术综述 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(9): 1289–1297.
Pei D M, Wang J F, Zhou P T, et al. Survey on PHM technology in marine system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(9): 1289–1297.
- [3] 王军. 面向 PHM 的高速列车谱系化产品技术平台开发和实践 [J]. *中国铁道科学*, 2021, 42(1): 80–86.
Wang J. Development and practice of PHM oriented high-speed train pedigree product technology platform [J]. *China Railway Science*, 2021;42(1): 80–86.
- [4] 黄学文, 刘春明, 冯璨, 等. CRH3 高速动车组故障诊断系统 [J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10): 2311–2318.
Huang X W, Liu C M, Feng C, et al. Failure diagnosis system for CRH3 electrical multiple unit [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(10): 2311–2318.
- [5] 王后阁, 曾陆洋, 郝国梁, 等. 铁路客车故障预测与健康管理系统(PHM)系统 [J]. *铁道机车车辆*, 2022, 42(2): 94–98.
Wang H C, Zeng L Y, Hao G L, et al. Prognostics health management system and malfunction prediction for railway passenger cars [J]. *Railway Locomotive & Car*, 2022, 42(2): 94–98.
- [6] 刘彬, 邵军, 陆航, 等. 动车组故障预测与健康管理系统(PHM)体系架构研究思考 [J]. *中国铁路*, 2022 (3): 1–9.
Liu B, Shao J, Lu H, et al. Research on prognostics and health management(PHM) architecture for EMUs [J]. *China Railway*, 2022 (3): 1–9.
- [7] 王军, 马云双. 中国高速动车组发展模式探索与实践 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
Wang J, Ma Y S. Exploration and practice of China's high-speed EMU development model [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2020.
- [8] 申瑞源. 机车车载安全防护系统(6A 系统)总体方案研究 [J]. *中国铁路*, 2012 (12): 1–6.
Shen R Y. Research on overall plan of on-board safety protection system(6A system) for locomotive [J]. *China Railway*, 2012 (12): 1–6.
- [9] 刘峰, 申宇燕, 张瑞芳, 等. 机车车载安全防护系统应用研究 [J]. *铁路技术创新*, 2015 (2): 17–21.
Liu F, Shen Y Y, Zhang R F, et al. Application research of locomotive on-board safety protection system [J]. *Railway Technical Innovation*, 2015 (2): 17–21.
- [10] 张志波, 张振先, 冯永华, 等. 高速动车组转向架综合智能检测技术研究 [J]. *铁道车辆*, 2021, 59(6): 40–44.
Zhang Z B, Zhang Z X, Feng Y H, et al. Research on the comprehensive intelligent detection technology of high speed EMU bogies [J]. *Rolling Stock*, 2021, 59(6): 40–44.
- [11] 高速铁路供电安全检测监测系统(6C 系统)总体技术规范 [EB/OL]. (2022-04-06)[2023-02-15]. <http://www.nra.gov.cn/jglz/fgzd/gfwj/bm/qtbm/202204/P020220406014464258880.pdf>.
General technical specification for high-speed railway power supply safety detection and monitoring system(6C system) [EB/OL]. (2022-04-06)[2023-02-15]. <http://www.nra.gov.cn/jglz/fgzd/gfwj/bm/qtbm/202204/P020220406014464258880.pdf>.
- [12] 彭文静. 车载远程数据传输设备在高速动车组上的应用 [J]. *铁道车辆*, 2013, 51(10): 29–30.
Peng W J. Application of on-board remote data transmission equipment on high-speed EMUs [J]. *Rolling Stock*, 2013, 51(10): 29–30.
- [13] 朱彦, 尹振坤, 张国芹, 等. 复兴号动车组智能技术创新应用及展望 [J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(2): 1–4.
Zhu Y, Yin Z K, Zhang G Q, et al. Innovative application and prospect of Fuxing EMU intelligent technology [J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(2): 1–4.
- [14] 王同军. 智能铁路总体架构与发展展望 [J]. *铁路计算机应用*, 2018, 27(7): 1–8.
Wang T J. Overall framework and development prospect of intelligent railway [J]. *Railway Computer Application*, 2018, 27(7): 1–8.
- [15] 王同军. 中国铁路大数据应用顶层设计与实践 [J]. *中国铁路*, 2017 (1): 8–16.
Wang T J. On top-level design for China railway's big data application & case study [J]. *China Railway*, 2017 (1): 8–16.
- [16] 常振臣, 逯骁, 张海峰. 轨道交通车辆大数据管理平台建设与实施 [J]. *城市轨道交通研究*, 2019, 22(2): 1–4.
Chang Z C, Lu X, Zhang H F. Construction and implementation of big data management platform for rail transit vehicle industry [J]. *Urban Mass Transit*, 2019, 22(2): 1–4.
- [17] 秦勇, 马慧, 贾利民. 先进轨道交通系统发展趋势与主动安全保障技术 [J]. *中国铁路*, 2015 (12): 77–81.
Qin Y, Ma H, Jia L M. Development trend of advanced rail transit system and active safety guarantee technology [J]. *China Railway*, 2015 (12): 77–81.
- [18] Milojevic A, Tomic M, Pavlović N T. Application of FBG sensors in smart railway [C]. Niš: XV International Scientific-expert Conference on Railways, 2012.
- [19] Ju Z Y, Wang Z Z, Ma L. The damage diagnostic techniques and experimental research of high-speed EMU aluminum car-body bolster based on lamb guided waves [EB/OL]. (2018-01-15)[2023-02-15]. <https://www.dpi-proceedings.com/index.php/shm2017>.
- [20] Cerrone C, Cerulli C, Golden B. Carousel greedy: A generalized greedy algorithm with applications in optimization [J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 85(9): 97–112.
- [21] Ren M Y, Triantafyllou E, Ravi S, et al. Meta-learning for semi-supervised few-shot classification [EB/OL]. (2018-03-02)[2023-02-15]. <https://arxiv.org/abs/1803.00676>.
- [22] Zhou Z H. A brief introduction to weakly supervised learning [J]. *National Science Review*, 2018, 5(1): 44–53.
- [23] Zhang Z, Saligrama V. Zero-shot learning semantic similarity embedding [C]. Washington DC: 2015 Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015.
- [24] Ren S Q, He K M, Girshick R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137–1149.
- [25] 彭云聪, 秦小林, 张力戈, 等. 面向图像分类的小样本学习算法综述 [J]. *计算机科学*, 2022, 49(5): 1–9.
Peng Y C, Qin X L, Zhang L G, et al. Survey on few-shot learning algorithms for image classification [J]. *Computer Science*, 2022, 49 (5): 1–9.

- [26] van Dyk D A, Meng X L. The art of data augmentation [J]. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2001, 10(1): 1–50.
- [27] Song C, Zhao J J, Wang K, et al. A survey of few shot learning based on intelligent perception [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41 (S1): 723756.
- [28] Zhao G, Gao H D, Zhang G F, et al. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(4): 1208–1217.
- [29] 郑跃滨, 武湛君, 雷振坤, 等. 基于超声导波的航空航天结构损伤诊断成像技术研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2020, 63(18): 24–43.
Zheng Y B, Wu Z J, Lei Z K, et al. Research progress in damage diagnostic imaging of aerospace structures based on ultrasonic guided waves [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(18): 24–43.
- [30] Li Z H, Cheng Y Y, Zhang L, et al. Strain field reconstruction of high-speed train crossbeam based on FBG sensing network and load-strain linear superposition algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 3228–3235.
- [31] Cheng Y Y, Li Z H, Wang G J, et al. Strain field reconstruction of crossbeam structure based on load-strain linear superposition method [J]. *Smart Materials & Structures*, 2021, 30(7): 1–12.
- [32] Feng Z P, Zuo M J, Hao R J, et al. Ensemble empirical mode decomposition-based teager energy spectrum for bearing fault diagnosis [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2013, 135(3): 031013.
- [33] 于萍, 金炜东, 秦娜. 基于EEMD降噪和流形学习的高速列车走行部故障特征提取 [J]. *铁道学报*, 2016, 38(4): 16–21.
Yu P, Jin W D, Qin N. High-speed train running gear fault feature extraction based on EEMD denoising and manifold learning [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(4): 16–21.
- [34] 贺德强, 陈二恒, 李笑梅, 等. 基于RS-LSSVM的高速列车走行部滚动轴承故障诊断研究 [J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(2): 403–408.
He D Q, Chen E H, Li X M, et al. Research on fault diagnosis method of high-speed train running gear rolling bearing based on RS and LSSVM [J]. *Journal of Guangxi University(Natural Science Edition)*, 2017, 42(2): 403–408.
- [35] 梁建英, 邓学寿, 刘韶庆, 等. 基于大数据技术的动车组数字化智能运维平台 [R]. 青岛: 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 2020.
Liang J Y, Deng X S, Liu S Q, et al. Digital intelligent EMU O&M platform based on big data technology [R]. Qingdao: CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 2020.