

重载铁路智能维护保障技术框架研究

张 斌¹, 李 飞², 王 朵², 吕歌星¹, 王大龙¹

(1. 国家能源投资集团 朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062350;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 近年来, 随着云计算、大数据、物联网、移动互联、人工智能等系列智能化新技术的出现及普及, 如何综合高效利用资源, 实现铁路重载列车、移动装备、固定基础设施及内外部环境间信息的全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习和科学决策, 为铁路重载组合列车安全稳定运行提供保障, 成为当前一项重要的课题。文章分析重载铁路机车当前运维现状, 设计了以智能感知、智能诊断、智能检测、智能评估、智能维修和智能预控六大板块为框架的重载铁路智能维护保障体系, 并对向“智慧服务”转型过程中需重点突破的“基于车载物联网的多传感融合”及“基于浅知识和深知识模型的故障诊断”等技术进行分析和展望, 对未来智慧铁路系列智能化建设思路提出探讨。

关键词: 大数据; 人工智能; 智能化; 维护保障; 重载铁路

中图分类号: U2

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)05-0033-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.05.006

Research on Technical Framework of Intelligent Maintenance & Support for Heavy-haul Railway

ZHANG Bin¹, LI Fei², WANG Duo², LYU Gexing¹, WANG Dalong¹

(1. Shuohuang Railway Development Co., Ltd., China Energy Investment Co., Ltd., Suning, Hebei 062350, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In recent years, with the emergence and popularization of a series of new intelligent technologies such as cloud computing, big data, IoT, mobile internet and artificial intelligence, how to use resources comprehensively and efficiently to realize comprehensive perception, ubiquitous interconnection, fusion processing, active learning and scientific decision-making of information among railway heavy-haul trains, mobile equipment, fixed infrastructure and internal and external environments, to provide guarantee for the safe and stable operation of heavy haul combined trains on the railway, becomes an important topic at present. This article analyzes the current status of locomotive operation and maintenance of heavy-haul railway, designs an intelligent maintenance and support system for railway based on the six sectors of smart perception, smart diagnosis, smart detection, smart evaluation, smart maintenance and smart security. It analyzes and looks forward to the key breakthrough technologies such as "multi-sensor fusion based on vehicle internet of things" and "fault diagnosis based on shallow knowledge and deep knowledge model" in the transformation to "intelligent service" and puts forward some ideas for the intelligent construction of smart railway series in the future.

Keywords: big data; artificial intelligence; intelligent; maintenance guarantee; heavy-haul railway

0 引言

近年来，依托工业 4.0^[1] 技术引领，重载铁路运输装备现代化迅猛发展，交流传动、实时以太网、长期演进技术（LTE）、无线重联等精尖技术得以深入应用，加之万吨级重载列车的日常开行以及未来超长重载列车的开行，这将对重载组合列车的日常运维、安全保障以及机务专业管理提出更高的要求。

但是，由于历史原因和建设初期技术条件的限制，机车信息化、物联网产品发展滞后，既无法全面、及时、有效地反馈机车各车载设备的运行状态，也无法及时、准确提示设备故障和潜在威胁并提出应急建议；同时，地面虽已初步建立机务数据中心，但由于能接入的列车运维数据较少，大部分铁路系统仍存在数据壁垒严重、信息共享困难的问题，难以进行多业务、多维度信息汇聚分析，而跨领域应用和多部门间协同亟须智能化技术支撑。

在此背景下，本文结合当前重载铁路机车运用维护现状，开展重载铁路智能维护保障技术框架研究，聚焦图像识别、多传感融合、分布式挖掘等智能化技术，构建重载铁路智能维护保障体系。

1 系统概述

重载铁路智能维护保障体系以聚焦智能感知、智能诊断、智能评估、智能检测、智能维修和智能预控六大功能板块为框架，着重开展以“基于车载物联网的多传感融合技术”“基于浅知识和深知识模型的故障诊断技术”等为代表的重载铁路智能化前沿技术应用研究，以全面提升重载铁路组合列车运用、维护、检修、保障全领域智能化水平，打造绿色、安全、高效、智慧重载铁路。总体研究框架如图 1 所示。



图 1 重载铁路智能维护保障技术总体框架
Fig. 1 Overall framework of intelligent maintenance & support technology for heavy-haul railway

重载铁路智能维护保障系统总体研究目标如下：
（1）提升机车关键设备的维护水平及维修效

率。依托完整的机车和关键部件履历、精准的机车故障诊断和定位能力、完整的设备健康评估及修程优化体系、车上 - 车下多环节数据整合及智能备料管理，助力机车关键设备的维护维修水平及效率提升。

（2）降低机车生产运用及检修维护成本。积累机车运用、检修等各环节数据，建立以机车及关键设备实际健康状态为决定因素的修程优化办法，实现维修方式从事后维修、定期维修转变为视情维修、预防性维修，从而降低维修保障费用、降低生产成本。

（3）提升机车数据综合分析及辅助决策能力。实现机车各类型数据采集、融合、分析及应用；实现数据的可视化管理，深度挖掘数据价值；实现关联性分析、趋势性分析，查找事物发展规律，预测事物发展方向，提前预警安全隐患，为机务安全运输生产提供决策依据。

2 系统设计

重载组合列车的智能维护保障以铁路机务“智慧中心”为统一数据平台，实现移动装备、固定设施及内外环境等信息接入，实现海量数据汇集、治理及大数据平台建模分析，支撑六大功能板块智能化应用。整体功能框架如图 2 所示。

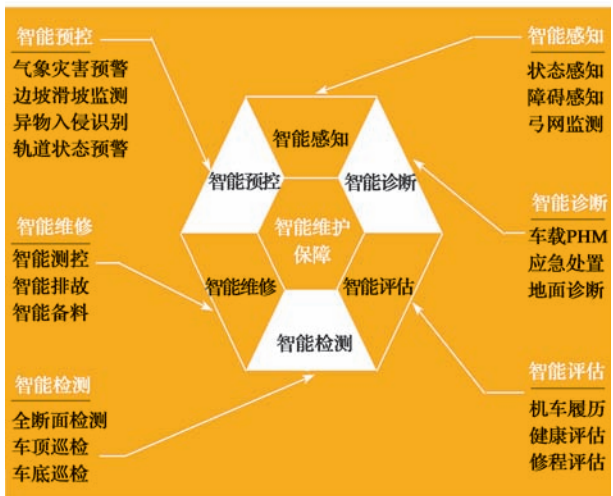


图 2 重载铁路智能维护保障技术功能框架
Fig. 2 Functional framework of intelligent maintenance & support technology for heavy-haul railway

2.1 智能感知

智能感知板块重点研究重载组合列车运行状态感知与预警技术，构建整车系统层面的信息感知与预测系统，自动全面获取机车正线运行状态、设备健康

状态、前方线路状态、列车弓网状态等，为铁路运输系统安全、效率等指标提供源数据支持。

(1) 车辆状态感知。构建车载物联网感知平台，实现车载关键系统、设备的实时数据采集、分析及存储，例如牵引、网络、监控、走行、列尾等；同时，提供基础协议开放统一接口，支持第三方设备实时状态感知与监测，例如风机流量监测等；构建车载安全防火墙，实现数据的安全接入、安全审计、安全管理等，防止非法入侵、网络攻击。

(2) 障碍物感知。基于非接触式障碍物检测技术，采用“摄像机（机器视觉）+ 毫米波雷达 + 激光雷达”方案，实现列车行进过程前方障碍物及异常情况的监测与识别。其中，机器视觉识别汽车、摩托车、三轮车、电动车、行人、隔离栏、防撞条等二十余种常见障碍物；大阵列天线毫米波雷达探测前方行人、动物、车辆以及阻碍行车的固定障碍物等动、静目标；激光雷达实现对列车近程 200 m 范围内障碍物的精确测距。

(3) 弓网监测。通过在车顶部署的红外热像仪及可见光数据采集装置实时采集运行端受电弓、接触线、悬臂管、绝缘子、稳定臂及固定支架等设备的状态数据信息并发送至车载感知中心，实现对接触网动态尺寸（导高、拉出值）、弓网燃弧及温度的监测和视频监视等，进行故障报警及定位查找等操作^[2]。

2.2 智能诊断

智能诊断基于机车在线监测和入段下载的数据，运用浅知识和深知识诊断模型，通过车载与地面、实时与离线相结合的方式，对机车各车载系统故障进行自动诊断并提出应急处置建议，全方位保障机车设备的安全。智能诊断技术框架如图 3 所示。

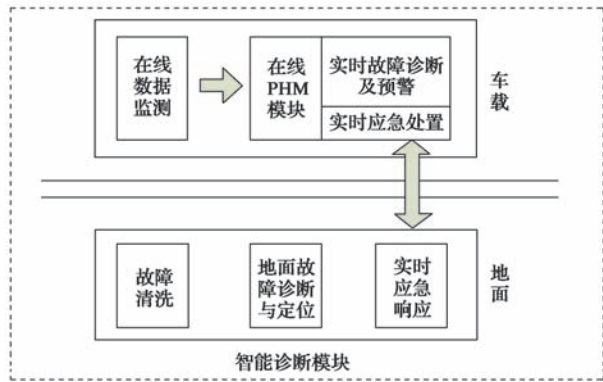


图 3 智能诊断技术框架

Fig. 3 Technical framework of smart diagnosis

(1) 车载故障预测与健康管理（prognostics health management, PHM）。车载 PHM 包含实时故障诊断及故障预警。实时故障诊断是车载 PHM 模块通过车载物联网实时采集关键系统数据，利用基于浅知识的专家经验与数据推理，针对各子系统已报故障进行实时诊断；实时故障预警则是基于深知识的系统原理以及数据分析，针对各子系统的设备进行故障预测，达到对关键设备（如牵引电机、传动机械、传感器、接触器等）的预测性维护目的。

(2) 车载实时应急处置。依据列车车载 PHM 诊断结果和预警信息，可直接对司乘人员提供交互式指导，以排除正线无法动车故障，减少救援频次，降低对司机的记忆要求和培训成本；亦可通过无线传输设备实时回传诊断和预警信息至地面应急处理中心，辅助地面进行应急处置后再反馈给司机进行处理，为机车提供地面 120（信息台）在途故障支持。

(3) 地面故障诊断与定位。机车入段后，首先自动下载机车单趟运行中完整的运行记录和故障记录，然后通过故障清洗规则将大多数的冗余事件记录与衍生故障进行筛选，只余下重点关注故障的信息。地面故障诊断与定位基于清洗后的有效原生故障信息，运用浅知识的专家经验形成知识库，辅助地面检修人员对故障进行精确定位。

2.3 智能评估

利用智能感知系统采集到的故障数据，结合部件修配及检验履历的跟踪与分析结果，采用数据挖掘技术和可靠性分析技术对部件进行全寿命周期健康评估，有效评估机车及各核心部件健康状态，并优化相应修程。

(1) 机车履历管理。基于智能感知及诊断数据，结合部件周转及检修记录，构建机车及核心部件电子档案，记录机车的基本信息、走行里程数、修程和技改信息以及配件的出厂、上车、更换和维修等信息，实现机车整车及核心部件全生命周期履历管理，覆盖牵引、制动、网络及走行及列尾等核心系统及设备。

(2) 健康状态评估。基于机车车载监测故障数据、地面提票故障数据及临修故障数据等，结合走行公里数、电子履历数据，运用数据挖掘方法构建评估模型，对机车及主要部件进行健康状态评估。车载监测及提票故障数据完整覆盖牵引、网络、制动、走行及列尾等核心系统，评分规则兼顾票活回票返分、惯性故障加重扣分。

(3) 修程评估。通过机车及部件健康状态评估

结果,结合电子履历,分析出车载各类型部件合理检修周期,给出部件检修周期建议,将局部检修项工作频率进行疏密调整,并对列车部件进行整体检修日程规划,统计出在一定时间内需要检修的部件数据,为检修人员评估、优化检修计划提供有效数据支持。

2.4 智能检测

通过应用轨旁全断面图像检测装置、车底智能巡检机器人和车顶智能巡检清洗作业机器人,实现对机车入库过程车辆整体外观状态的动态检测,对车底关键部件的外观和尺寸进行多角度、高精度的定位及检测,对车顶受电弓外观、尺寸及压力等的高精度自动化检测及绝缘子的自动化清洗。智能检测技术功能框架如图4所示。

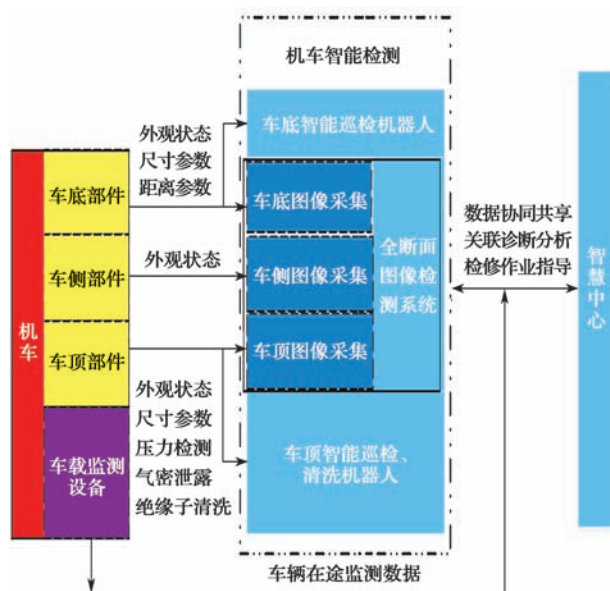


图4 智能检测技术框架

Fig. 4 Technical framework of smart detection

(1) 轨旁全断面图像检测。机车通过设备检测区域时,采用基于2D/3D图像特征识别的全断面检测技术,提取图像特征进行匹配,再采用纹理特征并结合3D深度信息进行识别,从而实现机车车底、车侧、车顶关键零部件的外观状态检测,如裂纹、异物、丢失、漏油、错位及松脱等,同时具备对受电弓、轮对踏面的异常损伤检测功能。检测数据实时通过光纤通信传输至智慧中心大数据分析系统进行存储、分析,并推送至前端进行展示、报警及预警。

(2) 车底巡检。基于自主导航定位、工业机器人控制、图像检测等技术,实现车底关键部件多角度、

高精度定位采集,实现表面状态、尺寸参数及距离参数的高精度检测和异常状态报警^[3]。例如:轮对及闸瓦等磨损件尺寸的测量,以及车底天线、车底底板、转向架等部件表面裂纹、异物、漏油、连接状态、丢失、螺栓松脱等异常状态识别,完成机车运用检修车底系列生产作业。

(3) 车顶检测及部件清洗。通过工业机器人控制技术将智能检测工具、清洗工具送达检测、清洗位置,运用视觉检测、噪声检测、压力采集信号分析技术,对被检受电弓的滑条外观、姿态、压力及气密性进行检测,并对瓷瓶进行自动清洗,完成机车车顶运用检修系列作业。

2.5 智能维修

引入以智能测控和工业机器人技术为基础的检修新型装备、新流程,接入机车及车载配件的智能诊断、智能评估及智能检测体系,实现机车检修过程的数字化测控、机车故障的智能排查以及机车配件的智能备料,建设智能化检修线。

(1) 数字化测控。引进智能安全帽、数字扭力扳手、数字万用表、数字千分尺、数字深度尺及智能眼镜等密集化、小型化及智能化作业工具,并与现场检修信息化系统深度融合,实现机车检修中各类过程数据的自动化采集,提高数据准确性,减轻人工输入工作量。

(2) 智能故障排查。运用基于浅知识的专家经验形成知识库,通过智能诊断系统地面故障诊断与定位功能,辅助地面检修人员进行故障链路精确定位,并提示相应的故障排查验证及故障修复措施,指导快速完成检修;同时,通过进一步验证诊断结果,持续优化检修经验知识库,不断提升故障智能排查准确率。

(3) 智能备料。依据对机车检修作业计划执行结果的统计及分析,得出并不断优化机车检修运用模型。利用该模型,系统提供对物料计划、物料库存及生产计划的仿真推演功能,输出三者之间的匹配关系,优化建议。动态配置检修物料计划,不仅可减少过度备料,降低物料成本,并减小配送压力,对备品备件进行精准预估,定制采购要求时间表。

(4) 智能检修线。建设专业化、自动化、信息化的机车核心部件智能检修作业流水线,覆盖相关部件的专业维修工序,以提高检修质量,降低检修运营成本。通过深入研究检修工艺,制定专业工艺流程,开发专业化检修设备,为操作者提供作业指导;在

检修工序中引入自动化手段,实现检修工作在效率、质量上的提升。

2.6 智能预控

采用光纤传感、激光传感、物联网、卫星定位等多种感知技术对线路周边环境、基础设施结构参数进行监测,实现综合报警、信息处理和轨道养护管理等功能,构建重载铁路自然环境安全感知与智能预防控制系统。

(1) 气象灾害感知与预警。分析超声波式风速风向计在风雨交加条件下误报警的故障模式,研究基于多传感器信息融合技术的大风报警算法,解决气象灾害感知技术中的风雨交叉敏感问题;采用基于激光测距的雪深测量技术,解决超声波雪深测量存在的温漂、异物遮挡问题;结合重载铁路沿线地质情况及灾害敏感参数,实现对重载铁路线路段的地质灾害感知与预警。

(2) 边坡滑坡监测与报警。采用最新滑坡监测技术,通过理论分析、对比分析,建立数学模型,并采用实验仿真的方法开展对滑坡监测方式和预警策略、滑坡监测传感器布设原则的研究^[4];通过现场干扰源数据分析及建模,提出并优化抗干扰算法;通过实测滑坡监测数据积累及仿真,进一步验证滑坡监测的准确性和响应速度,研究滑坡监测系统的架构、软硬件组成方式等,实现重载铁路滑坡自动监测。

(3) 异物入侵监测与识别。研究基于光时域反射仪(optical time-domain reflectometer, OTDR)光纤测试技术、视频监控、红外传感等多传感器的周界安防监控技术,对铁路系统的人员入侵进行监测,实现目标危害等级判断、精确定位、实时报警等功能;基于双电网、光纤光栅、视频监控等多传感器的异物侵限安全感知技术^[5],实现异物危害等级判断、事件地点定位、实时报警功能;研究环境干扰排除手段,避免测量系统受到大风、大雨、小动物、树枝及列车经过时产生的振动等干扰因素的影响。

(4) 轨道状态安全感知与预警。研究轨道的状态安全感知与预警技术,通过光纤传感、激光传感、物联网、卫星定位等技术手段,监测钢轨的温度与应变、钢轨各方向的位移、道床横向位移与纵向位移、路基的沉降、隧道形变^[6]等健康状态变化,建立线路状态数据库,结合周边环境监测的数据,实现轨道路基健康状态的安全感知、故障诊断与寿命预测。

3 关键技术

新一代重载铁路智能维护保障体系的构建得益于云计算、物联网、大数据、人工智能等新兴技术的快速发展和日臻成熟。这些新技术与铁路应用环境融合后形成的智能感知、智能诊断、智能评估、智能检测等成套理论和技术体系将为实现智慧化重载铁路战略提供重要的技术保障。其核心是通过借助新一代的思想、理念和技术,在获取充分信息的数据驱动下,重塑铁路维护保障体系中人、机车、设备和管理系统之间的相互关系,实现从“被动服务”向“主动服务”“智慧服务”的转变。在这一系列新理念、新技术中,需要重点突破以下多种技术。

3.1 基于车载物联网的多传感融合技术

利用装载在列车车载设备上的多感知设备^[7],如数据采集器、温度/速度/压力/流量传感器、电子标签等,通过以太网、物联网等网络通道实现在车载信息网络平台上对所有车载设备的属性信息和各类静、动态信息进行提取、同步和融合利用的目的。将来自多传感器或多源的信息和数据,在一定的准则下加以自动分析和综合运用,通过对信息多级别、多方面组合完成对车载设备的评估及决策,并根据不同的功能需求对所有列车的运行状态进行有效的监管和提供综合服务。

3.2 基于浅知识和深知识模型的故障诊断技术

列车设备与系统的故障诊断预警实际上是一个基于知识(包括浅知识模型和深知识模型)的决策过程。浅知识模型,即根据已知的故障现象,通过故障现象与故障原因之间的因果关系(故障树),根据故障时刻的数据表现进行外延推理,从而定位出最为可能的故障原因。其易于构造与管理,推理效率高,可兼容众多冗余关系影响。深知识模型,即使用需诊断预警对象的结构、性能以及功能的知识,通过深层次的原理与数据分析进行推理,结合海量历史数据运算,实现系统设备的故障诊断与预警^[8]。

3.3 基于多源多态监测数据的分布式挖掘技术

重载铁路系统结构复杂,获取的基础设施状态监测数据具有异构、海量、强非线性以及时变等特点,且诸多隐患或故障模式呈现非认知性,采用“对象模型”的隐患或故障模式难以准确、有效地表征系统实时特性,且难以映射系统动态响应。由此,综合处理数据所反映目标对象健康状态的特性,研究基础设施

在复杂环境下的服役健康状态演化规律模型,结合大数据的分布式挖掘技术,实现基础设施隐患挖掘与健康状态评估^[9]。

3.4 基于光学非接触方法的障碍物检测技术

综合运用雷达模组、路况摄像机模组等检测设备,开展基于高分辨率毫米波雷达、激光雷达和机器视觉的光学非接触检测技术研究,覆盖近($\leq 200\text{ m}$)、中($200\sim 400\text{ m}$)距离目标的探测,可实现非接触式主动障碍物检测^[10]。采用深度学习算法模块,可实现对列车行进过程常见障碍物的识别,包括机动车、摩托车、三轮车、行人及动物等。结合传统线性调频连续波技术、数字波束合成(digital beam forming, DBF)技术及微多普勒目标识别技术,获取列车行进方向的前方静态和动态信息。

3.5 基于2D/3D图像特征识别的全断面检测技术

在机车通过设备检测区时,采用高速、高分辨率线阵相机、3D相机对机车车顶、车底、车侧关键部件进行2D/3D图像采集^[11]。系统根据地面数据中心的车号识别系统提供的机车车号信息,自动选取被检车辆标准图像,并将检测相机采集的图像与标准图像进行2D图像比对和分析;通过图像特征点提取、建立特征点映射关系;采用纹理特征实现两幅图像精确匹配、对比分析,并结合3D图像采集数据进行深度信息识别。

4 结语

重载铁路智能维护保障技术框架的研究,聚焦于机车及其关键装备六大领域的技术研究和成果转化,依托相关智能化感知、融合、挖掘、AI分析技术的提升及相应工程化项目的持续开展,不断提升识别精度、准确度,提高自动化、自主化作业水平,逐步替代人工重复性、高强度劳动,将显著提升机车维护、

保障作业效率,将对以“绿色、安全、高效、智慧”为主旨的重载铁路智慧化建设有着重大指导意义。

参考文献:

- [1] 工业4.0:德国欲掀起第四次工业革命[EB/OL]. (2014-1-13)[2021-4-13]. <http://finance.people.com.cn/n/2014/0113/c348883-24097434.html>.
- [2] 曹蔡旻. 机车受电弓及其车顶状态检测系统[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [3] 尹纪磊. 基于结构光的通过式轮对检测系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2020.
- [4] 熊杰. 光纤传感技术在铁路检测监测中的应用研究[J]. 铁道通信信号,2018,54(8):67-70,73.
- [5] 陈锴迪. 隧道线路异物检测系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [6] 王星. 隧道形变动态检测与分析系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
WANG X. Study on tunnel dynamic deformation detection and analysis system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] 章威, 程学农. 物联网终端硬件发展趋势探讨[J]. 智能物联网技术, 2018,1(3):1-7.
ZHANG W, CHENG X N. Research on the Development Trends of IoT Terminal Device[J]. Technology of IoT&AI, 2018,1(3):1-7.
- [8] 王金娟, 刘胜楠. 基于深知识的故障应急系统模型[J]. 计算机安全, 2008(9):15-18.
WANG J J, LIU S N. Deep knowledge based fault emergency system model[J]. Network and Computer Security, 2008(9):15-18.
- [9] 张谦. 分布式环境下的数据挖掘算法的实现与应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [10] 郑亚宏, 何家玉. 铁路线路障碍监测报警系统研究[J]. 中国铁路, 2019(9):111-117.
ZHENG Y H, HE J Y. Research on obstacle monitoring and alarm system on railway lines[J]. China Railway, 2019(9):111-117.
- [11] 王菁, 郭小玉, 咸伯诚, 等. 集合图像识别及3D技术的轨道车辆底部装备自动检测系统[J]. 新型工业化, 2017, 17(3):83-87.
WANG J, GUO X Y, XIAN B C, et al. Automatic detection system for the bottom equipments of rail vehicles based on image recognition and 3D technology[J]. The Journal of New Industrialization, 2017, 17(3):83-87.