

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.103

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



桥梁信息化及智能桥梁 2019 年度研究进展

勾红叶, 杨彪, 华辉, 谢蕊, 刘畅, 刘雨, 蒲黔辉

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:伴随全球科技创新呈现出的信息化、智能化发展趋势,传统桥梁工程的革新也迎来新的机遇,打造日趋智能化、高精度化的桥梁结构势必成为未来的发展方向,深刻变革桥梁设计、建造和养护的全生命周期。为掌握该领域研究动态和发展趋势,从桥梁信息化、智能检测、高性能智能材料以及智能防灾减灾等方面,综述了2019年该领域研究现状,并对后续发展方向及研究重点进行展望。分析表明:BIM技术可以显著提高桥梁的生产效率、性能水平和建养管一体化水平,数字孪生概念随着5G技术的发展也逐渐引入桥梁管养领域;无人机、机器人等智能检测技术与计算机视觉、大数据、深度学习等智能算法使得桥梁检测手段不断丰富,检测精度和效率不断提高;高性能智能材料的研发应用为桥梁智能化发展提供了强大助力,人工智能技术的发展也为结构防灾和行车防灾带来新的思路。未来应围绕“桥梁信息化及智能桥梁”这个主题开展核心理论创新、技术装备攻关和工程示范应用,以更好地支撑国家重大发展战略、保障桥梁安全长寿。

关键词:人工智能;桥梁信息化;建筑信息模型;深度学习;智能检测

中图分类号:U442.5 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0014-14

State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2019

Gou Hongye, Yang Biao, Hua Hui, Xie Rui, Liu Chang, Liu Yu, Pu Qianhui

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: With the global trend of informationization and intelligence in development of scientific and technological innovation, bridge engineering faces new opportunities for innovation. There is a trend of developing intelligent and high-precision bridges, which may profoundly transform the whole life cycle of bridge design, construction and maintenance. To reveal the progress and trend in this field, this paper reviews related research worldwide in 2019, with regard to bridge informatization, intelligent inspection, high-performance intelligent materials, and intelligent disaster prevention/mitigation, and proposes prospects of future research opportunities. According to the review, BIM technologies can significantly improve the productivity, performance, and integration of construction, maintenance and management of

收稿日期:2020-04-01

基金项目:国家自然科学基金(51878563)

作者简介:勾红叶(1983-),女,教授,博士生导师,主要从事桥梁动力学行为及安全评定研究,E-mail:gouhongye@swjtu.edu.cn.

刘雨(通信作者),男,博士生,E-mail:liuy@my.swjtu.edu.cn.

Received:2020-04-01

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51878563)

Author brief:Gou Hongye (1983-), professor, doctoral supervisor, main research interests: dynamic behavior and safety assessment of bridges, E-mail: gouhongye@swjtu.edu.cn.

Liu Yu (corresponding author), PhD candidate, E-mail: liuy@my.swjtu.edu.cn.

bridges. With the development of 5G technology, digital twinning has been introduced into the field of bridge management and maintenance. Intelligent inspection technologies (e. g. UAV and robots) and intelligent algorithms (e. g. computer vision, big data, and deep learning) continuously enrich bridge monitoring methods and improve the accuracy and efficiency. Development and applications of high-performance intelligent construction materials have provided strong thrusts to the development of intelligent bridges. Development of artificial intelligence (AI) technologies bring new approaches for disaster prevention of structures and transportation. To support national development strategies and ensure safety and durability of bridges, future research should focus on the theme of "bridge informatization and intelligence" to carry out theoretical innovation, technical research and engineering applications.

Keywords: artificial intelligence (AI); bridge informatization; building information model (BIM); deep learning; intelligent detection

桥梁是跨越江河湖海、深沟峡谷等障碍的人工构筑物,是交通工程关键节点和枢纽工程,是国民经济发展和人民生活安全的重要保障^[1]。随着新一轮科技革命和产业变革的孕育兴起,“5G”技术、“互联网+”技术、新型传感器、机器人、成像系统、智能材料、人工智能等现代科技将成为桥梁工程精细化设计、施工和运维的关键技术。周绪红等^[1]指出,基于信息化技术的智能化科技将为桥梁工程的革新带来新的机遇。鲍跃全等^[2]也指出,人工智能技术将深度融入土木工程基础设施的全生命周期,深刻变革土木工程科学、技术与工程的发展。

以战略需求为背景,伴随全球科技创新呈现出的信息化、智能化新发展趋势,传统桥梁工程必将迎来深刻变革。面向技术现状及未来需求,将桥梁全生命周期与现代信息技术深度融合,打造日趋智能化、高精度化的桥梁结构将是未来发展方向。这也意味着除了桥梁本身的性能得到提升外,智能化、立体化、信息化的桥梁建造和安全运维体系将会越来越完善和普及。信息化是智能化的基础,实现智能化需要建立大规模、自上而下、有组织的信息网络系统。因此,桥梁的智能化离不开信息渠道的支撑。一个科学、一体化的信息系统可以为智能桥梁提供可靠的数据支持,为桥梁的智能化奠定基础^[1]。当前,技术革命日新月异,众多新技术被应用于桥梁工程领域,为了及时学习和把握桥梁信息化和智能化发展现状的必要性,笔者归纳总结了 2019 年桥梁信息化与智能化的研究,展示当前在桥梁信息化、智能检测、高性能智能材料以及智能防灾减灾方面的前沿技术和重要成果,指出当前研究在实现桥梁信息化和智能化中存在的问题,并分析本方向研究热点和进行前景展望。

1 桥梁信息化

桥梁工程的信息化研究正在蓬勃发展,通过信息化技术可以显著提高桥梁的生产效率、性能水平和建养一体化水平,推动桥梁智能化、工业化水平的提升^[1],实现桥梁全寿命周期内各项数据的管理和桥梁状态的实时评估并保障交通安全。BIM 技术作为提高桥梁信息化水平的有效手段,已得到国家各层面的高度重视^[3-4],同时,随着 5G 技术的发展 Michael Grieves 提出的 Digital Twin(数字孪生)概念也逐渐被引入桥梁管养领域。

在桥梁信息化设计方面,BIM 等技术为设计提供了一个三维数字化平台,可直接用于复杂形体的创意表达和结构优化,其参数化设计手段可以将桥梁的复杂形态通过关键参数控制,有效地提高设计质量。中国作为桥梁大国,新建桥梁规模远超其他国家,因而在桥梁信息化设计方面的研究应用较广,众多研究成果已被广泛应用。

孙建诚等^[5]构建了基于 BIM 的桥梁设计和施工管理三维参数化标准建模方法,利用 IFC 标准规范了 BIM 桥梁设计具体思路及施工管理标准化技术路线,此研究给 BIM 设计的标准化建设提供了重要参考。杜一丛等^[6]对桥梁设计中“一类应用”、“正向应用”两种 BIM 技术模式的应用概况、应用价值等进行了分析,得出“正向应用”模式不仅保证了信息传递的顺畅、完整,而且携带信息的模型可以继续应用于施工和运维阶段,使得 BIM 不仅可作为设计阶段的工具,更可作为整个建造周期的工具,这拓展了 BIM 的应用场景,增强了应用价值。张秋信等^[7]将 BIM 技术用于平塘特大桥的三维建模设计和碰撞检查,发现了桥塔及组合桥面中剪力钉、普通钢筋及预应力筋之间的碰撞问题,这对桥梁结构前期检

查非常有帮助,能够及时发现问题,避免损失。

在桥梁信息化施工方面,BIM 等技术能实现信息共享、多方协同作业、全局仿真、降低安全隐患^[8]等,推动桥梁施工的可视化和精准化发展,能够有效提高施工管理水平、保障施工安全性、提升施工质量和降低施工成本,积极推进施工单位的改革创新,提升自身竞争力。

马白虎等^[9]基于 BIM 技术和“互联网+”等新一代信息化技术,将现代施工管理 4D 理论引入到桥梁施工期信息管理中,以桥梁的 BIM 模型为载体,研发了桥梁主梁钢预制构件施工过程信息化管理技术,实现了钢梁、预制板等关键构件施工过程信息共享和施工管控。张文胜等^[10]研发了基于 BIM 与 3D GIS(三维地理信息系统)集成的铁路桥梁数值化建设系统,解决了设计、施工与管理不同阶段之间的数据共享与挖掘利用的难题,实现从 3D GIS 可视化、漫游和三维空间分析到 BIM 施工管理、施工动态模拟和施工进度总览的全过程信息化管理,这不仅降低了管理难度,减少了管理成本,还打通了各环节间的连接,使管理更便捷。Markiz 等^[11]将 BrIM 技术与 Navisworks 技术和概率模糊逻辑策略方法相结合,实现了施工中的材料管理及成本估算,有效地减少了构件在施工前的碰撞,既保证了材料的质量,也降低了成本。Lu 等^[12]将智能施工技术应用到铁路工程领域,分析了铁路工程智能化施工建造的内涵、功能和特点,基于 BIM 和 PHM(预测和健康管理),从生命周期、管理层次、智能化功能 3 个维度构建了 ICRE(铁路工程智能化施工建设体系结构,图 1),进一步从技术和功能两方面建立了“知觉、替代、智能”3 个发展阶段的评价指标体系。尤其是中国高铁正在如火如荼的建设中,该技术的应用,更加提升了中国企业的管理水平、施工水平以及国际地位。

在桥梁信息化管养方面,引入现代化信息技术将升级桥梁养护管理技术、提高管理效率与能力。基于 BIM 等技术搭建的建管养一体化平台,可以有效促进桥梁管养过程中的标准化、可视化、自动化和智能化发展^[13],为桥梁的日常检查、工程养护和计划性维护等提供决策参考,实现桥梁全生命周期内各项数据的智能管理和桥梁状态的实时评估,并保障交通安全。

张贵忠等^[14]针对大跨径铁路桥梁现代化运维和管养需求,提出基于 BIM 的多源信息获取及管

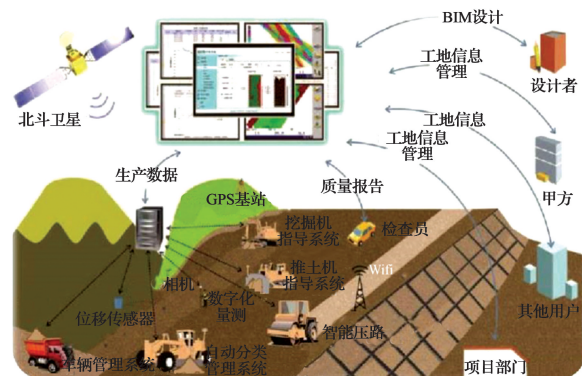


图 1 基于 BIM 和 PHM 的铁路工程智能化施工建设体系^[12]

Fig. 1 Digital construction of intelligent construction of railway engineering based on BIM and PHM^[12]

理、结构智能分析与状态评估、智能养修管理的数字化大桥管养平台设计方案,明确了平台的基本功能和物理架构。Wan 等^[15]基于 BIM 技术对 IFC(行业基础类)和 IFD(国际词典框架)标准进行了研究和扩展,针对中国桥梁行业定义的编码规则,提出了一种快速建立桥梁 BIM 模型的标准结构建模方法。潘永杰等^[16]将信息化技术与检-养-修深度融合,构建了基于 BIM 的铁路桥梁病害库、管养知识库和运营养护系统,实现了智能巡检、桥梁病害的统计分析和桥梁状态的定量评价,为铁路桥梁全生命周期信息反馈和预防性维修提供了基础。Zou 等^[17]将桥梁结构的实时风险分解处理系统集成到 3D/4D BIM 中,并在风险数据和 BIM 之间建立联系,提出了基于 BIM 的风险可视化和信息管理方法;实现了在 3D BIM 中识别和记录桥梁运营活动相关的潜在风险,并在 4D BIM 中可视化已识别的潜在风险,有效提高了桥梁管养质量和效率。Shim^[18]建立了 3D 维护信息管理和图像处理的数字检查系统,对桥梁全生命周期中所有相关信息进行不断交换和更新;并定义数字孪生(Digital Twin)模型(图 2),实现了预应力混凝土桥梁的预防性维护及维修。长久以来,实现桥梁管养的信息化与智能化一直是桥梁管养人员的不懈追求。BIM 技术实现了协同管理、可视化管理及一体化管理,数字孪生技术的兴起将会推动管养朝智能辅助决策管理方向发展和前进。

BIM 技术已成为桥梁设计、施工和管养实现信息化的有效手段并得到大量研究和应用,数字孪生技术的兴起为桥梁信息化管理、智能辅助决策管理提供了更多的可能性。但当前研究也存在一些不足:1)以 BIM 技术为代表的信息技术在桥梁设计应用中未能形成统一且完善的标准。BIM 技术在近

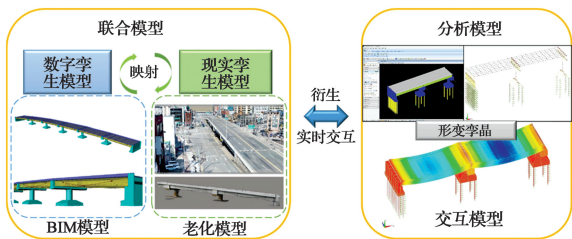


图2 桥梁预防性维修的DTM(数字孪生模型)概念^[18]

Fig. 2 DTM (Digital Twin Model) concept for bridge maintenance^[18]

几年得到了快速发展,但由于其引进时间晚,技术要求高,不同研究人员对该技术的理解和应用见仁见智,以至于不同企业、从业者间的交流存在各种困难,希望相关部门能尽快组织出台相关的BIM技术规范,促进BIM技术的可持续发展;2)既有老旧桥梁难以实现融合现代信息化技术的智能管养。对于老旧桥梁,应在人工检测基础上,尽可能多地结合现代管养技术,使桥梁得到最科学的管养维护;3)桥梁信息化养护管理系统主要集中应用于特大型复杂桥梁,覆盖范围有限。针对中小型桥梁,在今后的建造过程中,也应该建立相应的管养维护系统,以便更好地监管、检测桥梁健康状况;4)更加真实、精确的Digital Twin模型在桥梁工程中的应用还处于初步探索阶段。该技术首次出现是在航天航空领域,近几年才将其引入智能工程领域,学者们应该及时跟进,掌握关键技术,抢占制高点。

2 桥梁智能检测

与传统桥梁相比,智能桥梁具有3个基本特征:工业化、信息化和智能化^[1]。其中,工业化为桥梁建造和养护提供了完整的工业体系,实现了设计、施工、养护全过程的管理规范化;信息化为桥梁建造和养护全过程建立了信息通道,实现桥梁全生命周期的信息标准化和数字化;智能化为桥梁建造和养护全过程提供了智能决策,减少对人力的依赖,最终实现无人建造和养护^[1]。

智能桥梁的核心是桥梁建造和养护技术的智能化,实现桥梁智能检测是其中关键的一环。随着深度学习的快速成熟发展,人工智能技术融入桥梁检(监)测的研究已成为发展趋势和热点,具有广阔的应用和发展前景。桥梁混凝土无损检测、钢桥疲劳裂纹探测、水下桩基础检测、高清摄像损伤识别、桥梁动静载试验检测等技术,无人机、缆索检查机器人、桥梁检测机器人等一系列智能检测装备与技术

以及数据挖掘、计算机视觉、深度学习等众多大数据智能算法不仅使得桥梁检测手段不断丰富,而且有效提高了检测精度和效率。

2.1 智能检测装备与技术

为促进桥梁检测向更智能、更高效、更精确的方向发展,中国中铁大桥科学研究院、国内外高校等自主研发了一系列桥梁智能检测装备和技术,利用智能机器人、无人机等替代传统的人工检测方式,实现了对桥梁各类复杂、隐蔽、高空部位的检测^[19]。有效解决了由于人工原因造成的检测效率低、检测不到位、检测范围小等问题,最大程度保证了检测数据及结果的可靠性。

目前,装备摄像头的无人机(UAV)在桥梁、建筑和其他民用基础设施系统的视觉监控建设和运行方面的应用呈指数级增长^[2]。无人机可搭载多种类型传感器,其中,相机、红外热成像和激光雷达等高分辨率装置能对桥梁结构整体及局部进行多角度成像拍摄^[2]。Xu等^[20]为桥梁检测和管理开发了一个新颖的系统框架,即通过搭载相机的无人机系统采集图像,基于计算机视觉算法收集和检测数据,采用桥梁信息模型(BrIM)来存储和管理所有相关信息。Morgenthal等^[21]采用配备相机的无人机采集桥梁结构高清图像数据,其飞行路径通过3D模型自动计算,并基于机器学习实现典型损坏模式的识别,实现了对大型基础设施的智能安全评估。钟新谷等^[22]采用无人机和三点激光测距仪对桥梁结构进行图像采集,构建基于支持向量机(SVM)的裂缝形态智能提取训练模型,实现桥梁裂缝宽度的智能识别,如图3所示。梁亚斌等^[23]根据桥梁结构特点和桥索分布形式设计了利用无人机搭载高清云台相机的方案,批量密集地采集桥索的表观图像,通过图像处理提取有效信息,并依照相关规范对桥索的健康状况作出全面综合评价。Lin等^[24]设计了一种结合实时综合图像处理法的桥梁裂缝自动检测系统,将该系统装配在无人机上,可实现实时数据采集和处理;与其他检测方法相比,该系统能够以较高的精度和速度有效地检测桥梁裂纹。

将无人机与3D建模等技术相结合不仅能实现桥梁信息从二维到三维的重构,还能直观地将桥梁病害程度呈现出来,再利用图像处理、识别及人工智能的方法可实现基于采集图像信息的智能提取、处理和分析,最后根据相关规范开展桥梁结构性能的智能评估^[25-30]。

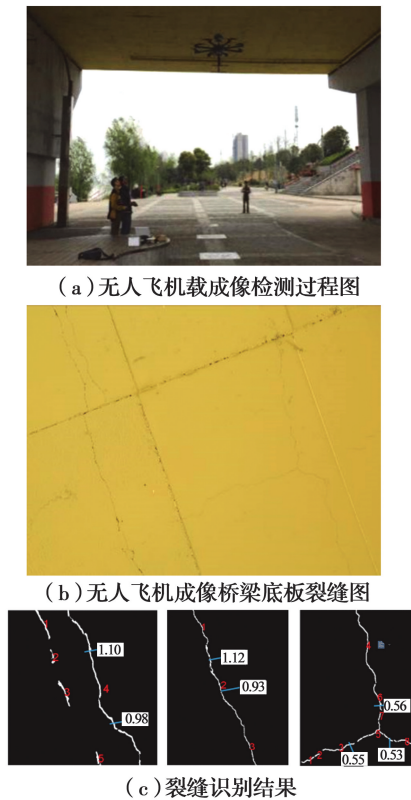


图 3 基于无人机成像的桥梁裂缝宽度识别^[22]

Fig. 3 Identifying concrete crack width with images acquired by unmanned aerial vehicles^[22]

除了无人机外,对各种检测机器人的研究也是一大热点,检测机器人的研发同样有力地推动了智能桥梁的发展,使得检测手段更全面,检测范围更广。检测机器人能弥补无人机检测的不足,实现对桥梁结构近距离甚至结构内部健康状况的检测评估,在工作空间狭窄的环境中更方便。勾红叶等^[31-32]正在研发携带超声波探头的正交异性钢桥面板(OSD)疲劳裂纹智能检测机器人,基于超声波相控阵成像技术和神经网络技术,可实现裂纹缺陷的定位和智能识别,该机器人能在狭窄的箱梁内部对结构进行不间断全覆盖检测,检测范围广、操作灵活、检测结果可靠。Phillips 等^[33]研发了地面机器人来配合移动检测机器人的使用,该地面机器人解决了传统的数据搜集平台需要人工操作的弊端,实现了数据采集与传输的全自动化。与无人机技术相比,地面机器人近距离无线传输信号更稳定,信息更及时更精确。Xu 等^[34]分别通过静动力分析和拉格朗日力学分析研究了攀爬机器人主动轮和从动轮的动态障碍物攀爬过程,设计了一种双侧爬电缆机器人,提高了传统攀爬机器人的障碍物超越能力,对复杂结构的检测能够减少人工参与,提高检测效率。

Hirai 等^[35]开发了一种水下检测机器人,该机器人具备视频捕捉、激光间接测距、稳定保持深度和航向等功能,已在实际桥梁、大坝巡检中验证了其有效性,为中国众多深水大跨桥梁的水下结构检测提供了保障。

在军事领域,雷达技术(GPR)已很成熟,但其在桥梁工程领域的应用还有待进一步开发,由于电磁波的空间分辨率高,因而能够实现高精度检测,过去一年已披露的研究成果主要集中在利用雷达发射的电波对拉索或桥跨结构的变形和振动进行测量。王翔等^[36]提出了一种基于雷达的非接触式检测技术,利用雷达发射的无线电波可以实现对斜拉索振幅的高精度检测,解决了斜拉索索力检测时传感器效率较低且信号不稳定等问题。邵泽龙等^[37]设计了一个用于解决大跨度悬索桥振动检测困难的监测雷达。该监测雷达应用了调频连续波技术和干涉测量技术,能够实现对桥梁复杂振动的高精度检测及振动的模态分析,如图 4 所示。王鹏等^[38]将雷达技术引入到桥跨结构的振动变形测量与模态分析中,实现了对在役桥梁动静载试验时的连续变形监测与模态分析。

除此之外,声发射、红外线热成像等先进的桥梁智能检测技术也大幅提高了桥梁检测的精度及效率。虽然它们适用范围有限,应用较少,但给特殊结构及环境下的检测提供了很好的思路,且有良好的检测效果。

袁明等^[39]采用声发射技术对混凝土梁的损伤过程进行动态监测,提出了一种改进的损伤模型,实现了使用声发射技术对混凝土梁损伤的定量评估。周建庭等^[40]结合金属磁记忆理论在铁磁性材料早期缺陷无损检测方面的优势,提出了基于金属磁记忆技术的镀锌钢绞线拉索腐蚀检测新技术,成功解决了常规技术难以检测镀锌钢绞线拉索内部腐蚀的问题。孙杰等^[41]采用主动式红外热成像技术对桥梁钢结构涂装进行检测的方法,能够准确判断出缺陷的形式及位置。Wang 等^[42]提出了基于无基线技术的实际影响线检测损伤方法,解决了在没有健康状态的先验信息情况下的结构损伤检测问题。Liu 等^[43]提出了一种跨海钢结构桥梁承载面积的危险检测方法,建立了建筑结构的承载力模型,采用屈曲分析法对跨海钢结构桥梁的力学性能和承载力进行评估。Oskoui 等^[44]提出了一种用于多跨连续桥梁长度方向的分布式损伤检测技术,可准确识别微裂

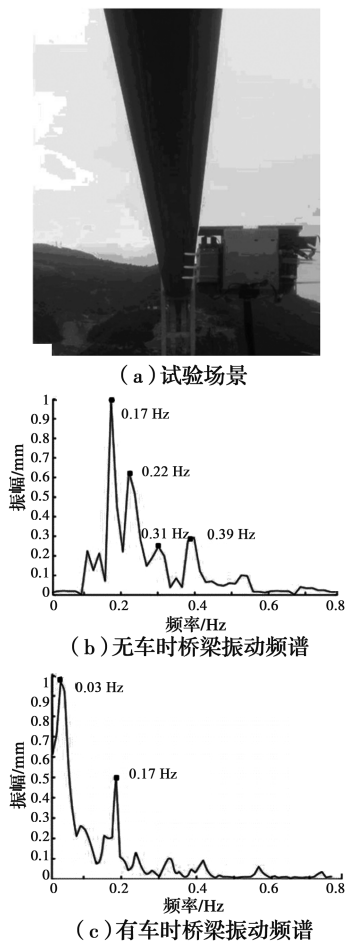


图 4 基于微波干涉雷达的悬索桥振动监测^[37]

Fig. 4 Suspension bridge vibration monitoring based on microwave coherent radar^[37]

纹位置。中铁大桥科学研究所^[19]将桥梁/路基竖向位移高精度自动监测技术、便携式无线智能索力检测技术、超声螺栓轴力测试技术、长大桥梁线形快速检测技术和结构外观病害及变形图像识别技术进行整合,并在此基础上研发了包括拉索检测机器人、智能巡检无人机、梁底检测机器人等一系列智能检测设备。此外,长安大学结构智能检测技术研究所研发的基于数字图像技术的结构变形检测新技术、桥梁应变测试新技术、桥梁体内/体外预应力测试新技术以及结构外部缺陷检测新技术,在桥梁道路及建筑结构外观检测、静动力荷载试验等方面都具有广阔应用前景。

2.2 智能识别与数据分析

针对无人机或机器人采集后的图像和数据,开展图像处理、智能识别及数据分析同样是学者们研究的重点。通过这一过程,能获得更多的有效信息对桥梁健康进行综合评判,结果更客观更高效。

将机器人作为平台,结合图像识别技术,实时分

析检测数据,能实现更智能的检测设备的研发。La 等^[45]开发了使用攀爬机器人对钢结构和桥梁进行视觉和 3D 结构检查的方法;着重采用钢表面图像拼接和 3D 重建技术展现结构的当前条件,再基于计算机视觉检测拼接图像上的表面缺陷,实现对钢结构裂纹的自动识别及性能评估(图 5)。Li 等^[46]开发了由攀爬机器人、图像处理平台和 4 个固定摄像机组成的视觉检查系统;该系统基于尺度不变特征变换(SIFT)算法,实现了在不同缺陷图像中具有部分重叠区域的多图像镶嵌,并采用图像处理技术实现缺陷智能识别。

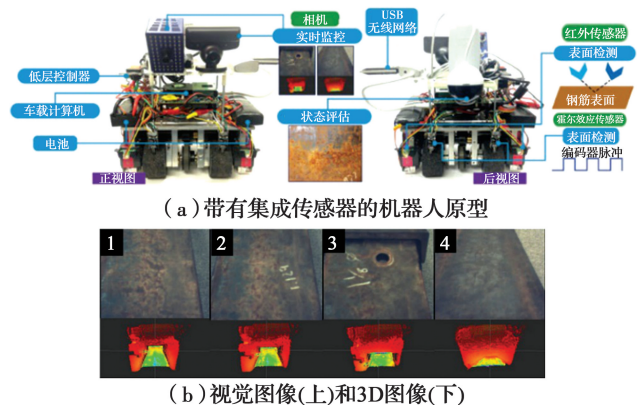


图 5 结合机器人与 3D 重建技术的桥梁智能检测^[45]

Fig. 5 Intelligent detection of bridge based on the combination of robot and 3D building^[45]

计算机视觉技术是图像处理分析和识别的主要方法之一,其在各领域都得到了广泛应用,但在桥梁健康维护方面还处于起步阶段,其强大的信息处理能力及分辨能力会极大地帮助掌握桥梁服役性能,提高服役寿命。Zhu 等^[47]采用转移学习和卷积神经网络对大量桥梁检测图像进行自动分析和识别,解决了人工检测时主观或经验因素的影响,提高了检测识别的准确度和效率。Dan 等^[48]提出一种基于信息融合的桥梁荷载识别方法,可以实现同时识别全桥面的横向荷载和纵向荷载,并通过多视点三维仿真视频数据和现场实测数据,验证了该方法的可靠性和准确性。Liang 等^[49]提出了基于贝叶斯优化的大数据深度学习的方法,对钢筋混凝土桥梁系统灾后检测图像进行了分析,采用不同卷积神经网络,实现了从系统故障分类、组合桥梁检测和局部损伤定位 3 个层次的桥梁性能智能评估。Jian 等^[50]提出一种基于大数据深度学习的计算机视觉技术与影响线理论相结合的交通感知方法,能够自动识别车辆荷载和速度。Xiao 等^[51]利用三维扫描技术对已腐

蚀的高性能钢(HPS)试件的几何特征进行量化,探究了腐蚀后 HPS 试样的力学性能。Dung 等^[52]提出采用深度卷积神经网络进行传递学习的方法,该方法既提高了裂纹识别的准确性,又提高了神经网络的鲁棒性(图 6)。

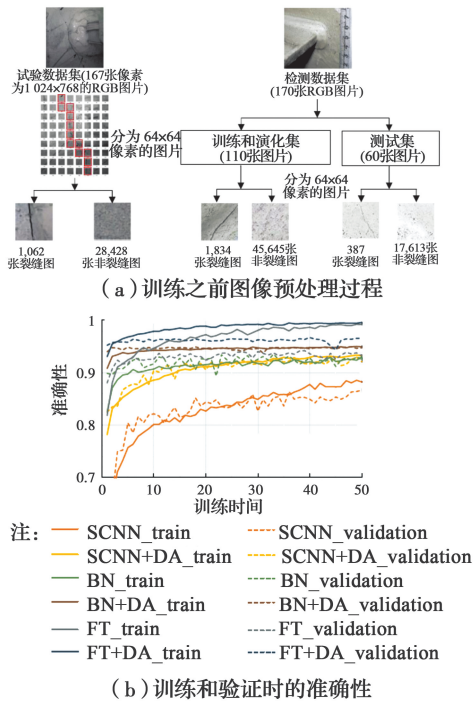


图 6 基于计算机视觉处理技术的裂纹识别^[52]

Fig. 6 Crack recognition based on computer vision processing technology^[52]

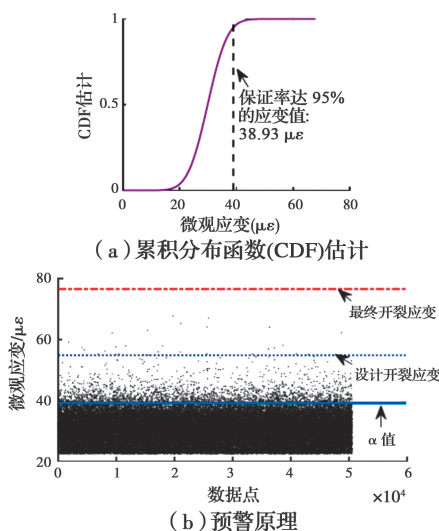


图 7 桥梁开裂的可靠性分析和预警^[56]

Fig. 7 Reliability analysis and early warning of bridge cracking^[56]

为了克服人工智能技术在桥梁工程领域应用的局限性,众多学者从实际情况出发,对数据处理方法、智能算法进行改进,提高了模型的分析能力,推

动了人工智能在桥梁检测应用中的提高。Hüthwohl 等^[53]基于大数据集对 3 个单独的深度神经网络进行训练,得到 1 个三阶段的混凝土缺陷分类器,可将潜在不健康的桥梁区域分为特定的缺陷类型。Xin 等^[54]提出一种基于均匀设计的逐步回归模型和基于混沌搜索的智能优化算法相结合的结构损伤识别新方法,能较准确地识别结构的损伤位置和损伤程度。Cheng 等^[55]开发了一种新的大数据智能计算系统,可以确定桥梁维护的最佳时机和预算。Zhao 等^[56]提出了基于大数据深度学习和长短期记忆网络分类的综合状态评估方法,可实现对预应力混凝土箱梁桥的开裂预警,如图 7 所示。夏焯等^[57]针对区域内既有桥梁,系统地提出了基于多源信息的桥梁网级评估与预测方法。王克海等^[58]基于机器学习实现了对中国公路中小跨径桥梁的抗震设计和评价。晏班夫等^[59]针对采集的结构形变视频图像,引入数字图像相关(DIC)技术,基于傅里叶变换的互相关整像素匹配算法与反向组合高斯-牛顿迭代亚像素匹配算法,实现了结构多点动位移时程的快速测试。Qu 等^[60]提出了一种基于特征系统实现算法和虚拟频响函数的创新方法,可识别出更精确的模态参数。Ni 等^[61]提出一种新颖的支持深度学习的数据压缩和重构框架,可实现对数据压缩后异常数据的高精度检测。

通过对上述研究的总结不难发现,无人机、机器人、雷达、红外线热成像等桥梁智能检测技术不断提高了检测工作的数据搜集能力以及计算机视觉、大数据深度学习等人工智能技术,实现了对信息处理分析能力的极大提升。随着它们的大量研究和工程应用,逐渐丰富了桥梁维护过程中检测、分析和评价的手段,提高了结果的准确性和可靠性,促进了桥梁智能化的进一步提升,但还存在一些不足:1)单个智能检测设备的功能较少,难以满足多种需求的检测任务。对于一座桥梁的检测,目前还需多种检测设备和分析技术的配合使用,虽然提高了检测结果的精度,但浪费了时间,降低了效率;2)尚未充分挖掘已获数据的潜在科学价值,难以为基于数据的科学决策提供有效支撑。桥梁检测数据种类多、数量大、复杂程度高,目前的分析技术尚不能完全适应桥梁检测的需求,只能对较规整数据进行处理分析,方法也还难以推广,这对于数据本身以及数据所包含的信息价值是一种浪费;3)智能识别评估理论体系尚未完全适用于新智能检测技术。当前的评估理论体系比较单一,不具有统一性,尚不能基于大数据信息从多维度进行客观的综合评价,建议国家有关部门

建立健全相关制度规范,更好地服务桥梁结构管养维护。

3 其他桥梁智能化技术

3.1 高性能智能材料

桥梁向大跨度、轻型化、智能化发展,必须对传统的建筑材料进行革命性突破,研发高性能智能材料。不同行业对高性能智能材料定义有别,但大家普遍认为高性能智能材料就是指其具备环境变化感知能力,并对之进行分析和判断,然后发生形状、结构甚至性质上的变换,达到自适应环境的目的。当前对于智能材料的应用主要体现在无损检测、健康监测以及减振控制等方面,研发应用的智能材料主要有形状记忆合金、光导纤维、碳纤维等。

形状记忆合金(SMA)是同时具有感知和驱动功能的金属材料,主要有形状记忆效应、超弹性效应、阻尼效应、电阻特性等特殊物理性能,被广泛应用于桥梁减隔震等方面^[62-63]。当地震发生时,SMA能快速做出反应,降低地震动对桥梁的损伤。

曹飒飒等^[64]提出了一种由三级形状记忆金属索和铅芯橡胶支座并联组成的多级设防减震装置,其具有较好的自复位、限位和耗能能力,兼具多级设防的优点。Xiang等^[65]对比分析了屈服钢缆(YSCs)、粘滞阻尼器(VDs)、摩擦阻尼器(FDs)和超弹性形状记忆合金钢缆(SMA_s)的易损性,验证了形状记忆合金在减隔震方面的优势。Zheng等^[66]研发了一种基于SMA缆索的自适应镍钛形状记忆合金摩擦滑动轴承(SMAFSB),探究并发现了间隙为30 mm的固定式SMAFSB,其具有最好的减隔震效果(图8),且易于更换。同时,也有学者研究了形状记忆合金在抑制钢桥疲劳裂纹产生方面的应用,Izadi等^[67]采用智能铁基形状记忆合金(Fe-SMA_s)对钢桥疲劳开裂铆接节点进行了改进,使得施加预应力后的Fe-SMA带显著提高了材料的疲劳寿命,抑制了疲劳裂纹的产生。

光纤主要用于光纤传感器,相较于传统的传感器,具有灵敏度高、结构简单、体积小、便于远调等优势,被广泛应用于桥梁检测和监测中^[68]。光纤传感器可用于测量桥梁结构应力-应变、变形、裂纹等微小变量,使用方便,价格低廉。

Bonopera等^[69]将光纤光栅差分沉降量测(DSM)传感器用于预应力混凝土工字梁位移的监测,解决了监测受环境影响和需要外部参考的问题,其实测位移与线位移传感器(LVDTs)记录的实验

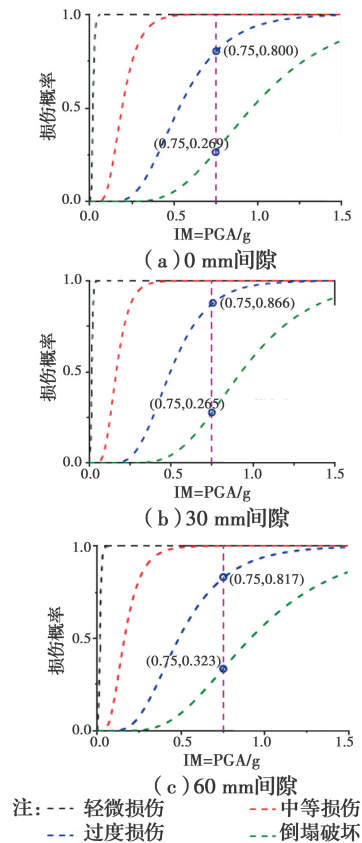


图8 SMAFSB脆性曲线^[66]

Fig. 8 Fragility curves of the SMAFSB^[66]

值吻合良好。Ding等^[70]通过在钢箱梁中连续铺设分布式光纤传感线路,监测了结构在脚手架拆除过程中的应变变化情况,并基于布里渊光时域分析(BOTDA)的分布式光纤传感技术构建了完整的桥梁健康监测系统。Zhang等^[71]设计了一种基于光纤布拉格光栅(FBR)的倾角传感器(图9),通过倾角的变化来测量挠度,解决了大跨悬臂梁桥施工中挠度监测存在工序过多、接线困难、数据无法实时采集的问题。王珍珍等^[72]将光纤光栅传感器(OFBG)内置于碳纤维复材板(CFRP),成功监测了后张预应力CFRP板加固施工阶段的实时应力状态,并预测了放张后锚具变形导致的短期预应力损失值。Rufai等^[73]提出了一种结构健康监测的光纤新技术,通过对光纤进行微编织来改善其机械性能。Wu等^[74]通过建立光损耗与裂缝宽度的定量关系,设计并制作了微弯敏感光纤传感器,提出了一种基于微弯敏感光纤传感器的裂缝监测技术,成功实现在裂缝方向未知的情况下准确定位和测量混凝土裂缝的目的。

碳纤维是指含碳量在90%以上的高强度高模量纤维,主要用途是作为增强材料与其他材料一起

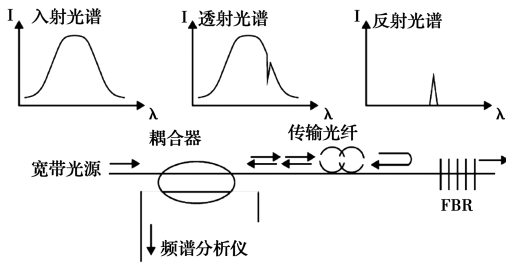


图 9 FBR 感应原理

Fig. 9 FBR sensing principle [71]

制成先进的复合材料,在桥梁工程中得到了广泛应用。将碳纤维加入桥梁结构材料中,可制成性能更好、更优的复合材料,提高桥梁的承载能力,抗震能力及抗冲击能力。

Farzad 等^[75]将超高性能纤维混凝土(UHPFRC)应用于桥梁快速施工(ABC)项目,采用的钢-混凝土-钢夹芯结构(SCSS)体系具有先进的结构性能以及高效的施工速度。Cheng 等^[76]采用预应力 CFRP 纺织品加固桥梁结构后,有效地降低了桥梁的地震响应,提高了结构的抗震性能。Fan 等^[77]开发了一种基于 UHPFRC 的增强方法,提高了墩柱的抗冲击性能。

由此可见,高性能智能材料主要有七大功能:传感功能、反馈功能、信息识别与积累功能、响应功能、自诊断能力、自修复能力以及自适应能力。智能材料在桥梁工程领域的研制和应用,有力地推动了桥梁智能化的发展。高性能材料不仅能够改善桥梁结构的抗力和变形能力,还能用于桥梁维护中的检测、信息传递等环节。

3.2 智能防灾减灾

面向国家重大科技需求,为保障复杂自然环境下重大基础设施服役安全,使用人工智能技术将为结构防灾和行车防灾带来新的思路。

李惠等^[2]提出了结构智能风险管控的强化学习框架,基于监测或检测的结构状态大数据信息,通过深度强化学习算法(图 10),建立了考虑结构状态和服役年限的结构维修价值网络,并输出某服役年内的维修动作,实现了在花费最小的情况下维护结构安全的优化控制。Mahmood 等^[78]在地理信息系统(GIS)环境下,结合水文工程中心河流分析系统(HEC-RAS)和水文工程中心地理河流分析系统(HEC-RAS),提出了一种综合水文概率分析方法,实施了针对具体地点的有效洪水风险降低战略。勾红叶等^[79-80]研发了具有工程实用性的高速铁路桥上

行车安全智能化评价系统,系统基于提出的列车-轨道-桥梁系统空间映射理论和多水准桥上行车安全评价准则,能考虑不同桥梁附加变形模式的时空效应和基础结构服役过程中性能演变的时序性和规律性。蒲黔辉等^[79]基于高速铁路海量自然灾害监测数据,搭建了灾害大数据分析平台(图 11),系统阐述了人工智能算法在风、雨、雪、地震及滑坡等高速铁路灾害监测预测、预警中的应用。

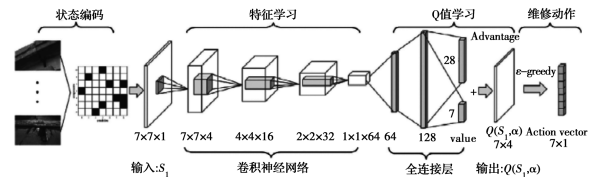
图 10 基于深度强化学习的结构维护智能决策方法^[2]

Fig. 10 Intelligent decision method of structure maintenance based on deep reinforcement learning [2]

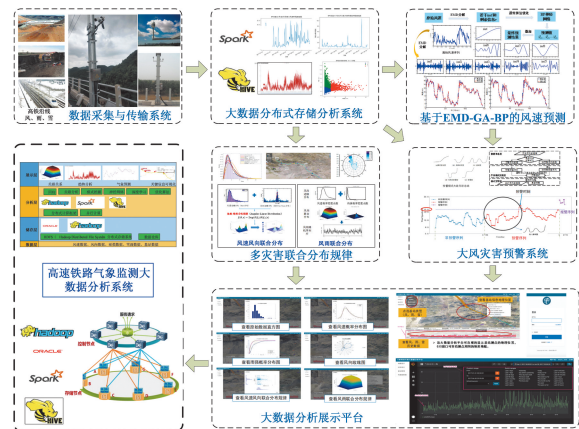
图 11 高速铁路气象监测大数据分析系统^[79]

Fig. 11 Big data analysis system of high speed railway meteorological monitoring [79]

针对其他灾害情况, Xu 等^[81]提出一种改进的基于区域快速卷积神经网络(R-CNN),用于损伤钢筋的多类型地震损伤识别和定位(即开裂、混凝土剥落、钢筋屈曲),测试结果表明,训练有素的 R-CNN 可以自动识别和定位多类型地震破坏,总体平均精度达到 80%。Ann 等^[82]以火灾造成的人员伤亡、交通堵塞和经济损失等为事件,基于火灾动力学仿真(FDS)方法对 144 座桥梁开展了基于时间的表面温度模拟,根据温度对桥梁表面损伤状态的影响程度,建立了基于风险等级的桥梁火灾防灾策略。

总体来说,关于智能防灾减灾的研究还比较缺乏。中国是一个灾害多发的国家,桥梁结构随时面临着来自落石、洪水、泥石流等自然灾害的威胁,有

效利用科技手段实现防灾减灾的智能化,既符合国家战略需求,也适应未来防灾减灾的发展趋势。

4 结论与展望

桥梁信息化及智能桥梁的研究热点主要集中在“BIM+”技术、无人机、检测机器人、计算机视觉、大数据深度学习等。声波、雷达、电磁、图像、激光等先进传感技术也越来越多地应用于智能桥梁检测中,物联网、云计算等信息化技术的引入将显著提升桥梁检测及监测的效率和效果,机器将更多地替代人工开展传统的桥梁结构检测及长期监测工作。

为促进桥梁向安全、长寿、绿色、高效、智能的前瞻性可持续方向发展,笔者认为以下几个方面研究是下一阶段的研究重点:

1)桥梁信息化方面,应深度融合“BIM”+“资产管理”,逐渐实现由设施管理向资产化养护管理的转变和发展,发展桥梁预防性养护技术,完善基于BIM养护、健康度评估和资产管理的一体化信息化管理系统。数字孪生(Digital Twin)模型将大量引入桥梁养维护领域,用于实现物理资产优化、智能运维决策和预防性维修加固。

2)桥梁智能化方面,应研发更先进的桥梁智能检测装备以及轻型化、快速化的试验检测技术,建立基于多源数据的更精准、更科学的智能诊断评估理论,构建立体化、信息化、智能化的桥梁检测、评估、加固一体化的桥梁维护体系。同时,智能工程装备,基于网络的桥梁智能化、信息化施工控制技术,以及轻质高强材料和面向智能建造的数字化控制技术也是目前的研究热点。

3)面向重大自然灾害应急救援和交通设施抢通、保通与恢复重建的国家重大战略需求方面,应开展重大自然灾害下大型桥梁灾后性能快速检测与评估技术研究,提出灾后性能指标体系及快速检测方法,研发与集成灾后性能快速检测的智能化装备,建立灾后性能智能化评估技术体系,提高中国自然灾害应急管理的科学化、专业化、智能化、精细化水平。

未来10~20年是中国桥梁工程创新、转型、升级的重要战略机遇期,应紧紧围绕“桥梁信息化及智能桥梁”这个主题开展核心理论创新、技术装备攻关和工程示范应用,培养更多的专业人才,以更好地支撑国家重大发展战略、保障桥梁安全长寿。

参考文献:

- [1] ZHOU X H, ZHANG X G. Thoughts on the development of bridge technology in China [J]. Engineering, 2019, 5(6): 1120-1130.
- [2] 鲍跃全,李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 1-11.
BAO Y Q, LI H. Artificial intelligence for civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 1-11. (in Chinese)
- [3] 张泽,刘军. BIM技术在景观桥梁设计中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2019(12): 181-183, 20.
ZHANG Z, LIU J. Application of BIM technology in design of landscape bridge [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(12): 181-183, 20. (in Chinese)
- [4] 赵艳峰,王雷. 基于BIM的桥梁工程设计与施工优化[J]. 工程技术研究, 2019(24): 223-224.
ZHAO Y F, WANG L. Design and construction of bridge engineering optimization based on BIM [J]. Engineering and Technological Research, 2019(24): 223-224. (in Chinese)
- [5] 孙建诚,蒋浩鹏,杨文伟,等. 基于BIM的三维参数化桥梁标准建模方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(10): 19-24.
SUN J C, JIANG H P, YANG W W, et al. Method of three-dimensional parametric bridge standard modeling based on BIM technology [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(10): 19-24. (in Chinese)
- [6] 杜一丛,王亮. 基于BIM参数化在桥梁工程设计阶段应用初探[J]. 建筑结构, 2019, 49(Sup2): 972-978.
DU Y C, WANG L. Preliminary exploration on the application of BIM parameterization in bridge engineering design stage [J]. Building Structure, 2019, 49(Sup2): 972-978. (in Chinese)
- [7] 张秋信,刘天成. BIM技术在平塘特大桥设计中的应用[J]. 公路, 2019, 64(9): 27-31.
ZHANG Q X, LIU T C. Application of BIM technology in the design of Pingtang major bridge [J]. Highway, 2019, 64(9): 27-31. (in Chinese)
- [8] 蒋赣猷,罗伟,孙辉,等. BIM技术在特钢管拱桥施工中的应用[J]. 中外公路, 2019, 39(4): 176-180.
JIANG G Y, LUO W, SUN H. Application of BIM technology to construction of extra-large steel pipe arch bridges [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(4): 176-180. (in Chinese)
- [9] 马白虎,钟荣炼,刘天成,等. 平塘特大桥施工BIM信息管理系统研发及应用[J]. 公路, 2019, 64(9):

- 31-35.
- MA B H, ZHONG R L, LIU T C, et al. Development and application of BIM management system for construction of Pingtang major bridge [J]. Highway, 2019, 64(9): 31-35. (in Chinese)
- [10] 张文胜, 吴强, 祁平利, 等. BIM 与 3D GIS 的集成技术及在铁路桥梁施工中的应用 [J]. 中国铁道科学, 2019, 40(6): 45-51.
- ZHANG W S, WU Q, QI P L, et al. Integration technology of BIM and 3D GIS and its application in railway bridge construction [J]. China Railway Science, 2019, 40(6): 45-51. (in Chinese)
- [11] MARKIZ N, JRADE A. Integrating an expert system with BrIMS, cost estimation, and linear scheduling at conceptual design stage of bridge projects [J]. International Journal of Construction Management, 2019: 1-16.
- [12] LU C F, LIU J F, LIU Y H, et al. Intelligent construction technology of railway engineering in China [J]. Frontiers of Engineering Management, 2019, 6(4): 503-516.
- [13] 裴岷山, 陈艾荣. 桥梁管养信息化的发展与展望 [J]. 公路, 2019, 64(10): 209-215.
- PEI M S, CHEN A R. Development and prospect of bridge management and maintenance informatization [J]. Highway, 2019, 64(10): 209-215. (in Chinese)
- [14] 张贵忠, 赵维刚, 张浩. 沪通长江大桥数字化运维系统的设计研发 [J]. 铁道学报, 2019, 41(5): 16-26.
- ZHANG G Z, ZHAO W G, ZHANG H. Design and development of digital operation and maintenance system for hutong Yangtze River bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(5): 16-26. (in Chinese)
- [15] WAN C F, ZHOU Z W, LI S Y, et al. Development of a bridge management system based on the building information modeling technology [J]. Sustainability, 2019, 11(17): 4583.
- [16] 潘永杰, 魏乾坤, 赵欣欣, 等. 铁路桥梁病害库和管养知识库的构建及应用研究 [J]. 铁道建筑, 2019, 59(1): 23-27.
- PAN Y J, WEI Q K, ZHAO X X, et al. Research on establishment and application of knowledge bases about railway bridge defects and management-maintenance [J]. Railway Engineering, 2019, 59(1): 23-27. (in Chinese)
- [17] ZOU Y, KIVINIEMI A, JONES S W, et al. Risk information management for bridges by integrating risk breakdown structure into 3D/4D BIM [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 467-480.
- [18] SHIM C, DANG N, LON S, et al. Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(10): 1319-1332.
- [19] 钟继卫, 王波, 王翔, 等. 桥梁智能检测技术研究与应用 [J]. 桥梁建设, 2019, 49(Sup1): 1-6.
- ZHONG J W, WANG B, WANG X, et al. Research of bridge intelligent inspection technology and application [J]. Bridge Construction, 2019, 49(Sup1): 1-6. (in Chinese)
- [20] XU Y Y, TURKAN Y. BrIM and UAS for bridge inspections and management [J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2019, 27(3): 785-807.
- [21] MORGENTHAL G, HALLERMANN N, KERSTEN J, et al. Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges [J]. Automation in Construction, 2019, 97: 77-95.
- [22] 钟新谷, 彭雄, 沈明燕. 基于无人机成像的桥梁裂缝宽度识别可行性研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 52-61.
- ZHONG X G, PENG X, SHEN M Y. Study on the feasibility of identifying concrete crack width with images acquired by unmanned aerial vehicles [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(4): 52-61. (in Chinese)
- [23] 梁亚斌, 蔡思佳, 冯谦, 等. 基于无人机航拍的武汉天兴洲长江大桥桥索 PE 外观检测技术 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(11): 1207-1210.
- LIANG Y B, CAI S J, FENG Q, et al. Cable PE appearance inspection in the Tianxingzhou River bridge using unmanned aerial vehicle based aerial photo technique [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(11): 1207-1210. (in Chinese)
- [24] LIN W G, SUN Y C, YANG Q N, et al. Real-time comprehensive image processing system for detecting concrete bridges crack [J]. Computers and Concrete, 2019, 23(6): 445-457.
- [25] CHEN S Y, LAEFER D F, MANGINA E, et al. UAV bridge inspection through evaluated 3D reconstructions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4): 05019001.
- [26] JUNG H, LEE J, YOON S, et al. Bridge Inspection and condition assessment using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Major challenges and solutions from a practical perspective [J]. Smart Structures and Systems, 2019, 24(5): 669-681.

- [27] LIU Y F, NIE X, FAN J S, et al. Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2020, 35(5): 511-529
- [28] LEE K W, PARK J K. Modeling and management of bridge structures using unmanned aerial vehicle in Korea [J]. *Sensors and Materials*, 2019, 31(11): 3765-3772.
- [29] PAN Y, DONG Y Q, WANG D L, et al. Three-dimensional reconstruction of structural surface model of heritage bridges using UAV-based photogrammetric point clouds [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1204.
- [30] 方留杨, 陈华斌, 吴晓南, 等. 基于无人机三维建模技术的桥梁检测方法研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(1): 109-113.
FANG L Y, CHEN H B, WU X N, et al. Research on the bridge inspection method based on UAV 3D modeling technology [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(1): 109-113. (in Chinese)
- [31] 勾红叶, 韩冰, 王海波, 等. 一种正交异性钢桥面板疲劳裂纹智能识别方法: 201911164585. X [P]. 2019-11-25.
GOU H Y, HAN B, WANG H B, et al. An intelligent identification method for fatigue crack of orthotropic steel deck; 201911164585. X [P]. 2019-11-25. (in Chinese)
- [32] 王海波, 勾红叶, 韩冰, 等. 用于正交异性面板疲劳裂纹检测的装置及其使用方法: CN110824011A [P]. 2020-02-21.
WANG H B, GOU H Y, HAN B, et al. Device for detecting fatigue cracks of orthotropic panel and use method thereof; CN110824011A [P]. 2020-02-21 (in Chinese).
- [33] PHILLIPS S, NARASIMHAN S. Automating data collection for robotic bridge inspections [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(8): 04019075.
- [34] XU F Y, JIANG Q S. Dynamic obstacle-surmounting analysis of a bilateral-wheeled cable-climbing robot for cable-stayed bridges [J]. *Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application*, 2019, 46(3): 431-443.
- [35] HIRAI H, ISHII K. Development of dam inspection underwater robot [J]. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, 2019, 6(1): 18-22.
- [36] 王翔, 潘中明, 王波. 基于雷达的斜拉索索力非接触遥测技术研究[J]. *世界桥梁*, 2019, 47(3): 49-53.
WANG X, PAN Z M, WANG B. Study of non-contact remote cable force testing techniques based on radar [J]. *World Bridges*, 2019, 47(3): 49-53. (in Chinese)
- [37] 邵泽龙, 张祥坤, 李迎松, 等. 基于微波干涉雷达的悬索桥振动监测[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(16): 140-143, 148.
SHAO Z L, ZHANG X K, LI Y S, et al. Suspension bridge vibration monitoring based on microwave coherent radar [J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(16): 140-143, 148. (in Chinese)
- [38] 王鹏, 邢诚, 项霞. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥跨结构振动变形测量与模态分析[J]. *测绘通报*, 2019(10): 35-39.
WANG P, XING C, XINAG X. Vibration deformation measurement and modal analysis for large bridge span using ground-based interferometric radar IBIS-S [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(10): 35-39. (in Chinese)
- [39] 袁明, 黄练, 彭卓, 等. 基于声发射技术的混凝土梁桥弯剪受力状态下损伤试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(2): 73-81.
YUAN M, HUANG L, PENG Z, et al. Experimental investigation of static damage of concrete beam under bending-shear based on acoustic emission technology [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(2): 73-81. (in Chinese)
- [40] 周建庭, 赵亚宇, 何沁, 等. 基于磁记忆的镀锌钢绞线腐蚀检测试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(1): 81-89.
ZHOU J T, ZHAO Y Y, HE Q, et al. Experimental of corrosion detection of galvanized steel strands based on magnetic memory [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(1): 81-89. (in Chinese)
- [41] 孙杰, 甄宗标. 红外热成像技术在桥梁钢结构涂装检测中的应用[J]. *世界桥梁*, 2019, 47(5): 69-73.
SUN J, ZHEN Z B. Application of infrared thermal imaging technology to steel structure coating inspection for bridges [J]. *World Bridges*, 2019, 47(5): 69-73. (in Chinese)
- [42] WANG N B, REN W X, HUANG T L. Baseline-free damage detection method for beam structures based on an actual influence line [J]. *Smart Structures and Systems*, 2019, 24(4): 475-490.
- [43] LIU Q X, LI C A. Hazard detection method for the bearing pressure area of steel structure bridge across the sea [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 93: 969-974.
- [44] OSKOU E A, TAYLOR T, ANSARI F. Method and

- monitoring approach for distributed detection of damage in multi-span continuous bridges [J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 385-395.
- [45] LA H M, DINH T H, PHAM N H, et al. Automated robotic monitoring and inspection of steel structures and bridges [J]. *Robotica*, 2019, 37(5): 947-967.
- [46] LI X K, GAO C, GUO Y C, et al. Cable surface damage detection in cable-stayed bridges using optical techniques and image mosaicking [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 110: 36-43.
- [47] ZHU J S, ZHANG C, QI H D, et al. Vision-based defects detection for bridges using transfer learning and convolutional neural networks [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(7): 1037-1049.
- [48] DAN D H, GE L F, YAN X F. Identification of moving loads based on the information fusion of weigh-in-motion system and multiple camera machine vision [J]. *Measurement*, 2019, 144: 155-166.
- [49] LIANG X. Image-based post-disaster inspection of reinforced concrete bridge systems using deep learning with Bayesian optimization [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019, 34(5): 415-430.
- [50] JIAN X D, XIA Y, LOZANO-GALANT J A, et al. Traffic sensing methodology combining influence line theory and computer vision techniques for girder bridges [J]. *Journal of Sensors*, 2019, 2019: 1-15.
- [51] XIAO L F, PENG J X, ZHANG J R, et al. Mechanical properties of corroded high performance steel specimens based on 3D scanning [J]. *Advanced Steel Construction*, 2019, 15(2): 129-136.
- [52] DUNG C V, SEKIYA H, HIRANO S, et al. A vision-based method for crack detection in gusset plate welded joints of steel bridges using deep convolutional neural networks [J]. *Automation in Construction*, 2019, 102: 217-229.
- [53] HÜTHWOHL P, LU R D, BRILAKIS I. Multi-classifier for reinforced concrete bridge defects [J]. *Automation in Construction*, 2019, 105: 102824.
- [54] XIN J Z, ZHANG H, ZHOU J T, et al. Damage identification of bridge system based on a hybrid algorithm [J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2019, 34(2): 104-111.
- [55] CHENG M Y, CHIU Y F, CHIU C K, et al. Risk-based maintenance strategy for deteriorating bridges using a hybrid computational intelligence technique: a case study [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, 15(3): 334-350.
- [56] ZHAO H W, DING Y L, LI A Q, et al. Live-load strain evaluation of the prestressed concrete box-girder bridge using deep learning and clustering [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(4): 1051-1063.
- [57] 夏焯, 王鹏, 孙利民. 基于多源信息的桥梁网级评估方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 1574-1584.
- XIA Y, WANG P, SUN L M. A condition assessment method for bridges at network level based on multi-source information [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1574-1584. (in Chinese)
- [58] 王克海, 鲁冠亚, 张盼盼. 基于机器学习的中小跨径公路梁桥抗震设计评价方法研究[J]. *公路交通科技*, 2019, 15(2): 74-84.
- WANG K H, LU G Y, ZHANG P P. Study on seismic design evaluation methods for highway medium-span and small-span girder bridges based on machine learning [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 15(2): 74-84. (in Chinese)
- [59] 晏班夫, 李得睿, 徐观亚, 等. 基于快速 DIC 与正则化平滑技术的结构形变测试[J/OL]. *中国公路学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20200214.1529.004.html>.
- YAN B F, LI D R, XU G Y, et al. Structural Deformation Test Based on Fast Digital Image Correlation and Regularization Smoothing Techniques [J/OL]. *China Journal of Highway and Transport*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20200214.1529.004.html>. (in Chinese)
- [60] QU C X, YI T H, LI H N. Mode identification by eigensystem realization algorithm through virtual frequency response function [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(10): e2429.
- [61] NI F T, ZHANG J, NOORI M N. Deep learning for data anomaly detection and data compression of a long-span suspension bridge [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019, 35(7): 685-700.
- [62] ZHENG W Z, WANG H, LI J, et al. Performance evaluation of bridges isolated with SMA-based friction pendulum system at low temperatures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 125: 105734.
- [63] WANG J Q, LI S, HEDAYATI DEZFULI F, et al. Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges [J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 509-522.
- [64] 曹飒飒, 伍隋文, 孙卓, 等. 梁桥多级设防 SMA 减震装置[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(24): 209-217.

- CAO S S, WU S W, SUN Z, et al. A multi-level performance SMA-based isolation system in girder bridges [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38 (24): 209-217. (in Chinese)
- [65] XIANG N L, ALAM M S. Comparative seismic fragility assessment of an existing isolated continuous bridge retrofitted with different energy dissipation devices [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24 (8): 04019070.
- [66] ZHENG Y, DONG Y, CHEN B, et al. Seismic damage mitigation of bridges with self-adaptive SMA-cable-based bearings [J]. *Smart Structures and Systems*, 2019, 24(1): 127-139.
- [67] IZADI M, MOTAVALLI M, GHAFORI E. Iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) for fatigue strengthening of cracked steel bridge connections [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116800.
- [68] NAIR A, CAI C, KONG X, et al. Bridge retrofitting using FRP-wrapped balsa wood deck: experimental study and field evaluation [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(5): 04019065.
- [69] BONOPERA M, CHANG K C, CHEN C, et al. Fiber Bragg grating-differential settlement measurement system for bridge displacement monitoring: case study [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24 (10): 05019011.
- [70] DING Y, XIAO F, ZHU W W, et al. Structural health monitoring of the scaffolding dismantling process of a long-span steel box girder viaduct based on BOTDA technology [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1-7.
- [71] ZHANG C R, GE Y X, HU Z C, et al. Research on deflection monitoring for long span cantilever bridge based on optical fiber sensing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102035.
- [72] 王珍珍, 周智, 王佳钰. 预应力碳纤维复材板加固桥梁短期预应力损失监测[J]. *工业建筑*, 2019, 49(4): 180-186.
- WANG Z Z, ZHOU Z, WANG J Y. Short-term prestress loss monitoring for post-tensioned cfrp laminate strengthened bridge [J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(4): 180-186. (in Chinese)
- [73] RUFAI O, GAUTAM M, POTLURI P, et al. Optimisation of optical fibre using micro-braiding for structural health monitoring [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30 (2): 171-185.
- [74] WU C F, SUN K K, XU Y M, et al. Concrete crack detection method based on optical fiber sensing network and microbending principle [J]. *Safety Science*, 2019, 117: 299-304.
- [75] FARZAD M, SHAFIEIFAR M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on an innovative sandwich system utilizing UPFRC in bridge applications [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 349-356.
- [76] CHENG X S, LI X S, KANG T F, et al. Seismic response of a box bridge after reinforcement with prestressed CFRP textile [J]. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2020, 18(1): 29-45.
- [77] FAN W, SHEN D J, YANG T, et al. Experimental and numerical study on low-velocity lateral impact behaviors of RC, UHPFRC and UHPFRC-strengthened columns [J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 509-525.
- [78] MAHMOOD S, RAHMAN A U, SHAW R. Spatial appraisal of flood risk assessment and evaluation using integrated hydro-probabilistic approach in Panjkora River Basin, Pakistan [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(9): 1-15.
- [79] 蒲黔辉, 杨长卫, 勾红叶, 等. 高速铁路防灾减灾——大数据智能化技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- PU Q H, YANG C W, GOU H Y, et al. Disaster prevention and mitigation of high speed railway-big data intelligent technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [80] 勾红叶, 蒲黔辉, 严猛, 等. 高速铁路桥上行车安全智能化评价与预警系统: 2019V1. 0SR1009461 [CP]. 2019-07-04.
- GOU H Y, PU Q H, YAN M, et al. Intelligent evaluation and early warning system of traffic safety on high speed railway bridge: 2019V1. 0SR1009461 [CP]. 2019-07-04. (in Chinese)
- [81] XU Y, WEI S Y, BAO Y Q, et al. Automatic seismic damage identification of reinforced concrete columns from images by a region-based deep convolutional neural network [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(3): e2313.
- [82] ANN H, CHOI Y J, LEE J H, et al. Semiquantitative fire risk grade model and response plans on a national highway bridge [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 5154309.