

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.230



桥梁信息化及智能桥梁 2020 年度研究进展

赵天祺, 勾红叶, 陈萱颖, 李文昊, 梁浩, 陈子豪, 周思清

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:以信息化、智能化为特征的数字化时代的到来推动了桥梁工程技术的发展与创新,有必要将云计算、大数据、人工智能、3D 打印、机器人等战略性新兴产业技术与桥梁工程相融合,从智能设计、智能施工、智能运维等多个维度,推进桥梁工业化、数字化、智能化升级。本文从桥梁信息化、智能检测与安全运维、智能防灾减灾、智能材料等方面,综述了 2020 年该领域前沿技术和重要成果,总结了研究热点与前景展望。分析表明: BIM 技术可以提升桥梁正向设计精细化水平、施工过程控制和管理准确化程度; 无人机、机器人等智能检测技术与机器学习、卷积神经网络等人工智能技术提高了桥梁检测的精度和效率; 高性能智能材料的应用促进了桥梁结构的自感知性、自适应性、自调节性和自诊断性; 基于人工智能的自然灾害监测与预警为桥梁智能防灾减灾提供了新的发展思路。未来应将人工智能技术深度融合桥梁设计、建造和养护的全生命周期,顺应信息化、智能化的发展趋势,实现桥梁强国梦。

关键词:桥梁信息化; 智能检测技术; 机器学习; 智能防灾减灾; 智能材料

中图分类号: U442.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0268-12

State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2020

ZHAO Tianqi, GOU Hongye, CHEN Xuanying, LI Wenhao, LIANG Hao,
CHEN Zihao, ZHOU Siqing

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

Abstract: With the advent of digital era characterized by informatization and intelligence, the development and innovation of bridge engineering technology are promoted. It is necessary to integrate cloud computing, big data, artificial intelligence, 3D printing, robot and other strategic emerging industrial technologies with bridge engineering, and promote the industrialization, digitization and intelligent upgrading of bridges from multiple dimensions such as intelligent design, construction, operation and maintenance. This paper reviews related frontier technologies and important achievements worldwide in 2020, with regard to bridge informatization, intelligent inspection, safety operation and maintenance, intelligent disaster prevention/mitigation, intelligent materials, and summarizes the research hotspots and prospects. According to the review, BIM technologies can improve the refinement of bridge forward design, the accuracy of construction process control and management. Intelligent inspection technologies (e. g. UAV and robots) and artificial intelligence technologies (e. g. machine learning and convolution neural network) improve the accuracy and efficiency of bridge inspection and monitoring. Applications of high-performance intelligent materials promotes the self-perception, self-adaptability, self-adjustment and self-diagnosis of bridge. Natural disaster monitoring and early warning based on artificial intelligence (AI) provides new development idea for bridge intelligent disaster prevention. To conform to the development trend of informatization and intelligence, future research should deeply integrate artificial intelligence technology into the whole life cycle of bridge design, construction and maintenance to realize the

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(51878563)

作者简介: 赵天祺(1995-), 男, 博士生, 主要从事复杂环境下桥梁结构安全性研究, E-mail: ztq0426@my.swjtu.edu.cn.
勾红叶(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: gouhongye@swjtu.edu.cn.

dream of bridge power.

Keywords: bridge informatization; intelligent inspection technologies; machine learning; intelligent disaster prevention/mitigation; intelligent materials

21 世纪以来,新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起,工业化与信息化、智能化正深度融合,以信息化、智能化为特征的数字化时代的到来推动了桥梁工程技术与创新,有必要将云计算、大数据、人工智能、3D 打印、机器人等战略性新兴产业技术与桥梁工程相融合,从智能设计、智能施工、智能运维等多个维度,推进桥梁工业化、数字化、智能化升级,助力从“桥梁大国”迈向“桥梁强国”,从“中国建造”迈向“中国创造”。

在此背景下,为进一步掌握和凝练智能桥梁领域的前沿进展、关键技术和瓶颈问题,笔者针对 2020 年学者们在桥梁信息化与智能化领域所取得的进展进行了扼要的梳理和总结,着重分析了桥梁信息化、智能检测与安全运维、智能防灾减灾、智能材料方面的前沿技术和重要成果,并尝试总结本方向研究热点与前景展望。

1 桥梁信息化研究

随着科技的进步和信息化技术的不断发展,桥梁工程对工业化、信息化的要求也越来越高。BIM(Building Information Modeling, 建筑信息模型)技术是以三维(3D)技术为基础,集成了工程建筑项目各种相关信息的工程数据模型,是对工程项目设施实体与功能特性的数字化表达。基于 BIM,可对建设项目进行虚拟设计、建造、维护,实现动态、集成和可视化。本节主要针对 BIM 技术在桥梁工程全寿命周期设计、施工和运维阶段的应用开展了文献调研和动态分析。

在桥梁 BIM 设计方面,中国铁路总公司工程管理中心、中国铁道科学研究院、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司等中国铁路 BIM 联盟单位分别开展了中国铁路 BIM 技术体系、基于 Inventor 的国内常泰长江大桥主塔 BIM 正向设计^[1]、基于 Bentley 平台宁淮铁路桥梁 BIM 正向设计^[2]等方面研究。赵月悦等^[3]运用 Revit 软件完成了一系列桥梁的精细化 BIM 建模和基于 BIM 模型的设计方案优化和结构分析。李红豫等^[4]采用 Revit 平台中构建桥梁构件族的方式对桥梁进行了参数化建模,并与 Midas Civil 软件进行了模型传递与共享。张鹏飞等^[5]和周应华等^[6]基于 Revit 对法国达索设计软件 CATIA 进行了二次开发,建立了高速铁路大跨斜拉桥工程算量系统和复杂钢结构桥梁的工程量统计方法,实现了基于 BIM 的智能化算量。黄成岑^[7]等基于三维倾斜摄影技术和 BIM 技术,实现了复杂地形桥隧相接部位的三维实景建模(如图 1 所示),为桥位选择和施工方案设计提供了指导。戴林发宝等^[8]结合铁路工程特点和当前 BIM 技术水平,提出了一种基于多源数据的铁路工程 BIM 协同设计平台,解决了各软件间数据交互困难等问题。全面应用 BIM 技术,建立地形、地质、桥梁、附属设施等三维信息模型,进行方案优化设计、可视化展示、施工方案模拟等,指导设计人员进行深化设计,可以为施工阶段

提供准确的 BIM 模型。



(a) 桥隧工点地形三维曲面



(b) BIM 三维实景模型

图 1 BIM 三维实景建模技术^[7]

基于设计提供的 BIM 模型,施工管理平台可以解决施工中的控制及管理难题,施工交付 BIM 模型记录施工数据痕迹,作为运维阶段 BIM 模型的初始状态,实现数据的全生命周期流动^[9]。通过对 3D 数字化信息模型赋予时间轴的信息,还可实现 3D 向 4D 的跨越,对施工全过程进行监控和预警,保障桥梁施工阶段和成桥状态结构安全可控。进一步将多种方法融合,如 BIM+VR, BIM+GIS 等,可以对复杂环境下桥梁结构施工进行优化。王宏坤等^[10]基于 BIM 数据信息建立了完整的项目管控体系,将施工安全、进度、质量、投资等管理内容统一起来,使得铁路桥梁施工更加便捷、高效。赵亚宁等^[11]借助 BIM 技术,开展了预应力连续梁桥施工应力监控、安全阈值报警等研究,提升了桥梁施工监控的效率。

在桥梁工程的运营维护阶段,袁宇等^[12]通过分析 BIM 移动端在桥梁养护中的总体架构,建立了基于主成分因子分析法和灰色系统理论的病害预测模型,根据损坏状况指数指标做出最优养护决策,提高了桥梁养护水平。王一等^[13]提出了一种桥梁养护成本模型,结合 BIM 技术的特点,基于多元线性回归模型进行了养护成本预测和方案优选,有效降低了桥梁养护成本。潘永杰等^[14]开展了面向运维的铁路桥梁 BIM 模型及全生命周期信息关联的系统性研究,从标准、数据和业务三个维度阐述了桥梁运维的 BIM 应用需求,探索了运维 BIM 模型的精度,给出了运维模型单元划分原则,明确了运维信息的分类形式,为铁路桥梁基于 BIM 的全生命周期管理提供了参考。

实现全生命周期流动 BIM 模型,可以记录施工中的受力、变形及初始损伤等信息,并基于监控信息实时修正 BIM 模型,解决健康监测模型的准确性问题。基于统一管理平台及运营大数据,还可以实现管养的信息化、智能化。

Fleischhacker 等^[15]基于贝叶斯生存分析预估了公路混凝土桥梁桥面性能与国家桥梁数据之间的关系,提取了导致混凝土桥面板劣化的参数,给出了维修加固策略。Isailović 等^[16]建立了可实时更新桥梁损伤特征的桥梁信息模型(Bridge information model, BrIM)(如图 2 所示),更准确地反映了当前桥梁状况。胡兴意等^[17]提出了一种融合 BIM 与影像建模技术的桥梁检测新方法,建立了桥梁运维管养 BIM 模型数据库,并采用影像建模技术丰富了模型中的病害信息。Colin 等^[18]提供了一个可公开访问的全球大跨度桥梁数据库,该数据库含有 751 个大跨度桥梁信息,可以根据自带的数据分析功能,识别桥梁常见问题,提出维修加固方法。

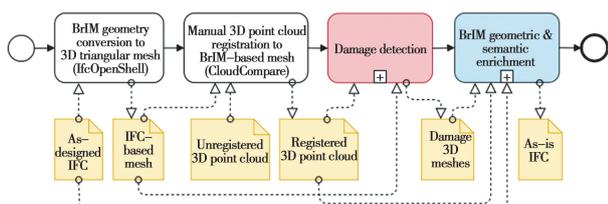


图 2 基于 BrIM 模型的桥梁损伤识别^[16]

综上,BIM 技术正让设计和应用更加深入,设计精细化水平得以提升,施工过程控制和管理准确化程度加强,并在运维管养一体化、多方协同管理方面取得了卓有成效的研究成果。但仍存在以下问题:1)BIM 软件一般不能用于精细化结构计算,建模与设计计算割裂,缺少有效软件接口;2)设计阶段主要利用 BIM 技术进行三维设计,而施工阶段则侧重应用 BIM 的高度可视化特性进行施工控制及管理,导致 BIM 用于结构设计和施工方面存在不衔接的问题;3)设计端与生产端的 BIM 信息未充分融合,需要工厂进行二次深化设计,影响效率;4)BIM 技术的应用发展,尚未达到桥梁全寿命期 BIM 应用,还没有实现数据真正有效传递。

2 桥梁智能检测与安全运维

科学保障桥梁工程的服役安全、行车安全及长寿命是国家重大需求。新技术的兴起为桥梁的智能检测与安全运维提供了新的发展契机,亟需加强桥梁工程运维领域的学科交叉与颠覆性技术突破。随着新型传感、大数据、云计算和人工智能技术的快速发展,基于先进传感和人工智能的桥梁运营管理解决方案,为桥梁的智能检测、诊断识别、评价预测及养护维修提供了新思路。

2.1 桥梁智能检测技术

智能桥梁是一个智能体,具体由数据(血液)、传输(五官和手脚)、连接(躯干)、中枢(大脑)等组成。数据是实现桥梁智能化的核心基础;传输用以连接物理世界和数字世界,让资源、数据、软件、AI 算法在云端自由流动;连接可以无缝覆盖,让万物互联,实现应用协同、数据协同和组织协同;中枢即智能体的大脑和决策系统,基于云基础设施、智能应用,可以支撑全场景智慧应用。

其中,智能检测是获取数据、感知桥梁的首要环节。深度融合无人机、机器人、雷达、新型传感、声发射及红外线热

成像等智能检测技术与机器学习、卷积神经网络等人工智能技术,形成“智能检测-快速识别-智能决策”的一体化智能运维体系,实现高效、精准、全方位的无损检测作业,已成为桥梁发展不可避免的趋势。

随着航拍、遥感技术产业化程度的飞速发展,无人机在桥梁检测中的应用受到了广泛关注^[19]。Karim 等^[20]采用配有移动摄像头的无人机对桥梁结构进行了图像采集,构建了基于深度学习算法的裂缝形态自动提取训练模型,实现了对桥梁裂缝的定位和预测。Perry 等^[21]提出了一个集成先进数据分析工具的智能检测系统,如图 3 所示,通过无人机传回的图像,基于计算机视觉技术和机器学习实现了桥梁典型病害的识别。Saleem 等^[22]采用配备图像捕获和地理标记功能的无人机对桥梁裂纹进行即时检测,基于内置的深度卷积神经网络分析采集的数据,实现对桥梁损伤的实时状态评估。Zollini 等^[23]设计了一种结合对象图像分析法(OBIA)的桥梁病害智能监测系统,并将该系统装配在无人机上,获得了结构的损伤区域及病害情况。同时,在无人机上面增设不同功能的装置或传感设备,如激光雷达扫描仪、红外线摄像机、超声波测距仪以及各种传感器等,可以满足不同检测需求^[19]。Bolourian 等^[24]通过搭载激光雷达(LiDAR)扫描仪和高清摄像头的无人机,实现了桥梁结构的智能检测,并结合机器学习规划的 3D 路径,对桥梁的表面进行了损伤测定。Biscarini 等^[25]采用搭载红外热成像摄像机的无人机和探地雷达(GPR),采集了一座圯工拱桥的热表面图像及地下结构信息,实现了对梁体材料劣化情况的检测。Jung 等^[26]提出了一种基于即时定位与地图构建(SLAM)系统的无人机-桥梁自动监测技术,通过在无人机上安装可倾斜的 3D 激光雷达和单眼摄像机,解决了特殊环境中智能检测无人机 GPS 信号弱的问题,并实现了复杂环境中桥梁结构的智能安全评估。

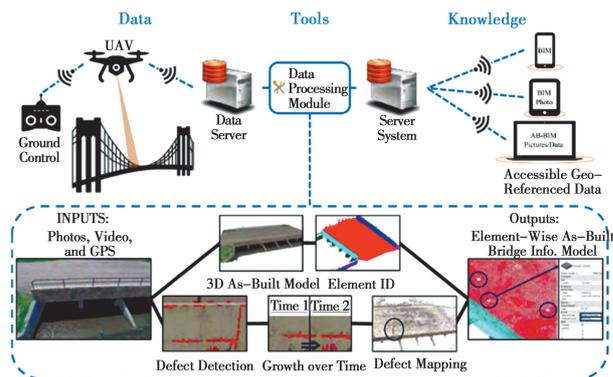


图 3 基于无人机的桥梁智能检测系统^[21]

在桥梁检测机器人方面,Jang 等^[27]研发了一种基于深度学习的环型攀爬机器人,如图 4 所示,可实现桥梁高墩裂缝的自动检测,获取病害区域的数字裂缝图。Boomeri 等^[28]设计了一款自适应力控制的攀爬机器人,根据内置算法规划的最优路径,实现了对桥梁桁架、拉索等结构的高空检测作业。Chen 等^[29]研发了一款具有多运动模式的爬行机器人,可以执行线性、交叉及爬升运动,实现了对桥梁待检测区域的全面覆盖。Baek 等^[30]将扇形扫描声纳技术应用到水下行

走检测机器人上,通过采集水中桥墩下部区段的精确声纳图像,实现了水下桥梁结构检测的三维可视化及高精度化。Dong 等^[31]研发了一款基于结构光的自动无损焊缝检测机器人,结合深度学习算法和平行结构光(PSL)传感技术,实现了对钢桥焊缝状况的智能检测。王海波等^[32]研发了一种基于超声波相控阵检测技术的正交异性钢桥面板(OSD)裂纹智能检测机器人,通过理论分析、模型试验和现场实测,初步探索了 OSD U 肋焊缝疲劳裂纹的智能识别和评估方法。

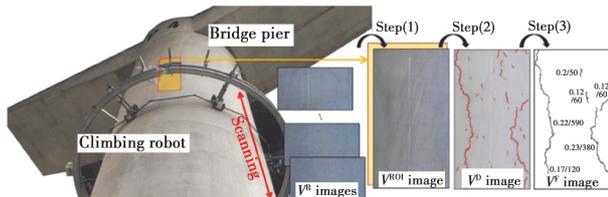


图4 采用环型攀爬机器人对桥墩裂缝进行检测^[27]

在探地雷达(GPR)智能检测技术方面,D'Amico 等^[33]提出了一种将 GPR 和干涉合成孔径雷达(InSAR)集成的无损检测系统,如图 5 所示,实现了对铁路桥梁路桥过渡段基础结构的检测。Alani 等^[34]提出了一种新颖的“综合”整体无损检测系统,将卫星遥感技术植入到 GPR 和 InSAR 集成的检测装置中,实现了对砌体拱桥结构以及结构连接精确位置的测定。Asadi 等^[35]提出了一种融合计算机视觉技术的 GPR 系统,该系统能够自动检测高度恶化混凝土桥面板中的钢筋情况,并标记钢筋病害段在检测区域中的准确位置。

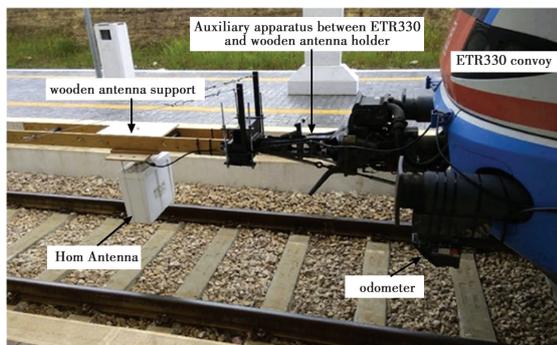


图5 基于 GPR 的铁路路桥过渡段基础结构检测^[33]

在新型传感技术方面,何志文等^[36]将分布式光纤传感器用于混凝土裂缝监测中,并验证了采用分布式光纤监测混凝土多裂缝的有效性。Zhang 等^[37]设计了一个光纤传感-斜拉桥索力检测系统,借助光信号的灵敏性提高了斜拉索索力检测效率。Shao 等^[38]设计了一个全息视觉传感器系统,并将其应用到桥梁结构振动响应和变形的连续监测中,为结构状态评估奠定了基础。

针对基于声发射(AE)技术的动态无损检测方面,刘妙燕等^[39]利用 AE 技术对不同橡胶掺量下的混凝土三点弯曲静载和疲劳断裂过程进行了检测,利用声发射的能量、累积能量和幅值等参数,评估了混凝土的损伤程度。周建庭等^[40-41]采用 AE 与数字散斑(DIC)等技术,对六片钢筋混凝土(RC)梁进行了试验加载,基于声发射参数表征了 RC 梁应力在高度方向上的变化。段兰等^[42]基于 AE 技术,对某公路

斜拉桥正交异性钢桥面板开展了疲劳损伤监测与评估,研究结果表明了 AE 传感器和智能铅钛酸铅压电漆(PZT)传感器的协同应用能实现桥梁疲劳裂纹智能感知。

在其他智能检测技术方面,陈鑫等^[43]提出了一种识别钢绞线张拉力的导波无损检测方法,构建了基于导波多尺度能量熵的钢绞线张力识别方法,有效评估了在役钢绞线中预应力损失程度。Liu 等^[44]提出了一种涡流热成像技术,可用于检测和评估桥梁结构中的钢腐蚀现象。Wang 等^[45]设计了一种搭载计算机视觉系统的桥梁检测车,结合图像拼接技术生成了桥梁底部全景图像,实现了对结构病害的统计和桥梁健康状态的量化评估。许国平等^[46]针对 CRTS II 型板式无砟轨道砂浆层离缝识别的技术难点,提出了基于激光扫描技术的非接触式检测方法,研发了一种高速铁路无砟轨道离缝智能检测小车,实现了对砂浆层离缝的高效率、高精度智能检测。

2.2 智能识别方法

基于智能检测获得的图像及信息数据开展智能识别方法研究,是计算机视觉和人工智能研究领域一项非常有意义且富有挑战性的工作。考虑更大参数空间的新算法为解决图像识别及数据分析中的低效、鲁棒性差等问题提供了新的解决方案^[47]。

在图像处理及识别方面,Mohammed Abdelkader 等^[48]采用了自适应的两层方法,基于飞蛾优化算法设计了混合图像过滤协议,该算法可用于检测噪声和恢复桥梁缺陷图像。Asjad 等^[49]提出了一种基于图像的裂纹宽度和裂纹长度特征的提取方法——弧长法,识别了裂纹宽度、裂纹长度和裂纹模式角度等特征,能有效地跟踪桥梁裂纹的形状。Li 等^[50]提出了一种利用全卷积网络和朴素贝叶斯数据融合(NB-FCN)模型的桥梁裂纹提取算法,实现了对裂纹的骨架和边界的识别。Pham 等^[51]提出了基于图像识别和深度学习的桁架桥螺栓松动智能检测技术,主要基于区域卷积神经网络,通过霍夫变换估计图像中的螺栓角度,以螺栓的旋转自动识别出松动螺栓。樊健生等^[52]提出了多视角几何三维重建法,解决了结构表面裂缝识别、损伤定位和变形识别等问题,该方法精度高、速度快及对设备要求低,可高效识别结构表面缺损与变形,裂缝识别结果如图 6 所示。邵旭东等^[53]针对采集到的桥梁结构形变视频图像,采用基于 Fourier 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,提出了基于数字图像相关(DIC)技术与正则化平滑技术的结构形变测试方法,提升了结构形变计算速度。杨杰文等^[54]提出了一种结合 U-net 和 Haar-like 算法的卷积神经网络深度学习算法,可以对桥梁裂缝的面积、长度和平均宽度进行定量计算。

计算机视觉技术是图像处理、人工智能和模式识别等技术的综合,具有感受环境能力和人类视觉功能的技术^[55]。计算机视觉技术的最新趋势有深度学习、点云物体识别、语义实例分割等^[56]。传统的二维图像检测已不能满足桥梁全空间检测的需求,结合智能识别的三维重构技术得到了更多的

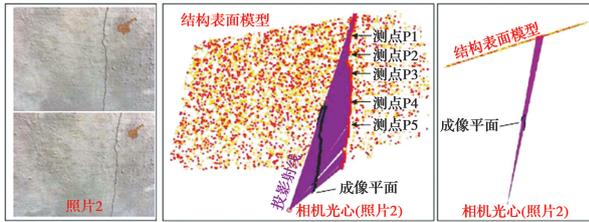


图 6 基于三维重建法的结构裂缝识别^[52]

应用。Kim 等^[55]采用 3D 地面激光扫描仪生成了三维点云,结合深度学习在每个子空间中进行了 3D 点分类来识别桥梁组件。Kalfarisi 等^[57]提出了基于深度学习的裂纹检测和识别方法,将基于区域的快速卷积神经网络(FRCNN)与结构化随机森林边缘检测(SRFED)集成,检测了带有边界框的裂缝并实现了框内裂缝识别。Narazaki 等^[58]基于语义分割算法,提出了利用复杂场景的图像进行基于视觉的桥梁构件自动识别技术,该技术对于实现桥梁在地震后初始响应过程中的视觉自动检测具有重要意义。Bae 等^[59]提出了一种新的深度超分辨率裂缝网络(SrcNet),提高了原始数字图像的像素分辨率,显著提高了基于计算机视觉技术的裂纹检测能力。

针对基于智能检(监)测数据的桥梁损伤识别方面,周建庭等^[60]提出了一种融合 Kalman 滤波与广义自回归条件异方差(GARCH)模型的结构损伤识别方法,提高了损伤识别的精度,弥补了传统模型带来的识别误差,并利用锈蚀损伤的钢筋混凝土梁动力试验获取的监测数据对算法的有效性进行了验证,损伤识别结果如图 7 所示。伊廷华等^[61]提出了一种利用车辆主动激励频率识别混凝土梁桥桥面损伤的方法,并通过对胶合板的损伤识别试验验证了该方法的有效性。Chen 等^[62]提出了一种基于灵敏度分析的层次贝叶斯学习方法来识别具有稀疏特征的结构损伤,结果表明即使在高测量噪声和传感器记录数量有限的情况下,该方法对结构损伤识别仍具有较好的鲁棒性。

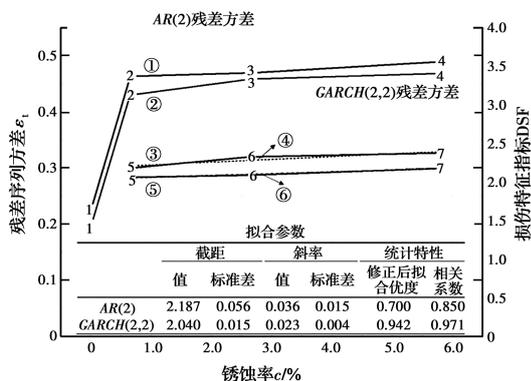


图 7 锈损梁损伤识别结果^[60]

在智能识别算法方面,雷鹰等^[63]提出了一种基于未知输入的广义卡尔曼滤波(GKF-UI)地震激励的广义识别算法,可识别结构状态和未知地震激励。林阳等^[64]提出了一种基于自由振动响应识别桥梁断面颤振导数的人工蜂群算法,开展了理想平板模型仿真和某大桥桥段模型风洞试验,研究结

果表明该人工蜂群算法具有稳定可靠、抗噪声能力强、识别精度高的特点。

2.3 智能评价及预测

随着智能检(监)测和人工智能技术的飞速发展,通过对数据的科学挖掘、统计分析和数学表征,科学提出信息更新条件下高效、精准求解结构响应的智能算法与状态评价及预测模型,也是当前学术界聚焦的研究热点。

在桥梁结构状态与服役安全评价方面,Liu 等^[65]提出了用于桥墩评估的无人机航迹和摄像策略,建立了一种基于无人机和三维场景重建的桥墩裂缝评估方法,如图 8 所示,并通过现场试验研究,验证了该方法的有效性。Zhan 等^[66]提出了一种基于车-桥相互作用分析和模型修正的箱梁桥隐性损伤定位和定量评估的方法,可以准确地识别损伤位置和评估损伤程度。勾红叶等^[67-69]构建了考虑接触非线性和层间联结失效的桥梁-轨道变形映射通用模型,训练了不同桥梁附加变形及基础结构服役性能演变与车辆动力响应的映射关系,研发了具有工程实用性的复杂条件下高速铁路桥梁行车安全智能评价系统。Zhou 等^[70]设计了基于非接触机器视觉技术和深度学习算法的桥梁时空荷载分布车辆重量识别系统,通过对固定摄像机采集的车辆信息进行了实时分析,基于非接触式机器视觉技术和快速视网膜关键点法,直接测量了桥梁的位移,对桥梁状态的快速评价具有重要意义。

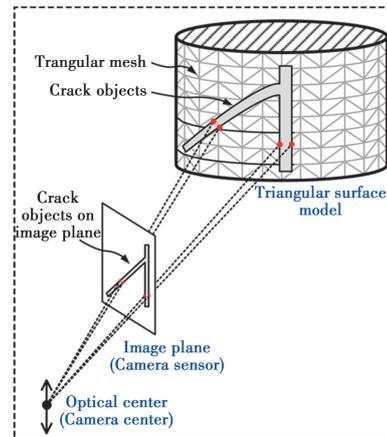


图 8 基于无人机和三维场景重建的桥墩裂缝评估方法^[65]

在钢桥疲劳裂纹智能评价及预测方面,Di 等^[71]针对正交异性钢桥面板容易产生疲劳裂纹的问题,基于局部应变和应力监测数据,研究了桥面-肋连接、肋-膜片连接和膜片切口等典型连接细节在实际交通流作用下的应力特性,对典型结构细部疲劳损伤状态进行了评价,研究成果可为桥梁的维修加固及钢桥面板疲劳寿命预测提供指导。马亚飞等^[72]建立了高强钢丝疲劳寿命预测模型,通过引入关联系数分析吊杆内各钢丝疲劳寿命的相关性,提出了服役桥梁吊杆疲劳寿命评估方法,为大跨度桥梁吊杆的安全性评价和维护提供了参考。Cui 等^[73]提出了一种大跨度斜拉桥桥面疲劳损伤预测的框架,研究了路面粗糙度、沥青温度和车辆横向位置对疲劳损伤累积的影响。管德清等^[74]结合临界距离法和断裂力学理论,提出了一种考虑残余应力影响的焊接结构疲劳总

寿命预测方法,准确地评估了焊接结构的疲劳寿命。

此外,基于数据驱动的结构状态评价及预测方面,国内外相关学者也开展了大量研究。Tang 等^[75]针对结构健康监测系统存在的数据不完善的问题,提出了一种利用卷积神经网络来实现多通道数据同时恢复的方法,实现了在时间和空间上具有随机性的缺失数据的恢复。冯德成等^[76]提出了一种基于机器学习的混凝土结构基本性能预测方法,通过直接挖掘数据的映射关系,利用 SHapley Additive exPlanations (SHAP)方法实现了混凝土结构性能预测。夏烨等^[77]提出了路网桥梁数据库的集成规则和数据结构,建立了数据库并进行了特征参数的分析和挖掘,对区域桥梁群进行了综合网级评估,有效揭示了路网内桥梁群的共性特征和退化规律。伊廷华等^[78]基于桥梁动态监测数据,结合桥梁梁端转角和模态参数,提出了一种估计累积滑动位移的模态转角叠加方法,并将该方法应用于某实际桥梁滑动轴承的寿命预测中。赵瀚玮等^[79]利用回归网络的深度学习方法,建立了温度-温度诱发应变-动位移-车辆诱发应变-动位移-车辆诱发应变非线性映射的数字模型,实现了桥梁结构在役状态的快速评价。倪一清等^[80]提出了一种基于长期海量监测数据的桥梁伸缩缝状态评估与损伤预警的贝叶斯方法,实现了数据更新条件下伸缩缝健康状况的智能评价,并在损伤概率超过一定阈值时自动报警。Zhang 等^[81]提出了一种大跨度桥梁台风动力响应预测的概率贝叶斯优化框架,基于贝叶斯优化的分位数随机森林,从数据驱动的角度进行了实时预测。

2.4 智能养护维修

随着桥梁建设数量和使用年限的不断增长,桥梁逐渐由

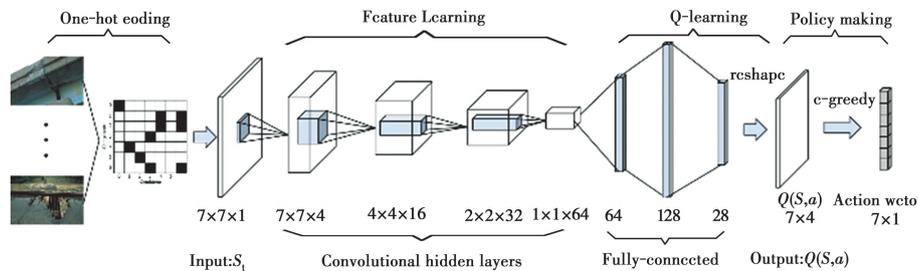


图9 以桥面为例的自动深度强化学习(DRL)框架结构^[82]

综合以上研究发现,2020年专家学者们在桥梁智能检测与安全运维方面取得了诸多进展,未来可在以下几个方面进一步深入研究:1)桥梁内部损伤、水下和灾后等复杂条件下的智能检测装备及技术还有待进一步研发;2)基于神经网络的图像识别算法需要大量的图像样本及时间进行训练,适用性有待提高;3)数据和物理模型融合的全生命周期智能化性能评价与控制模型还有待进一步研究;4)针对人机交互模式更新和激活的桥梁智能养护加固模型方面的研究还较少。

3 智能防灾减灾

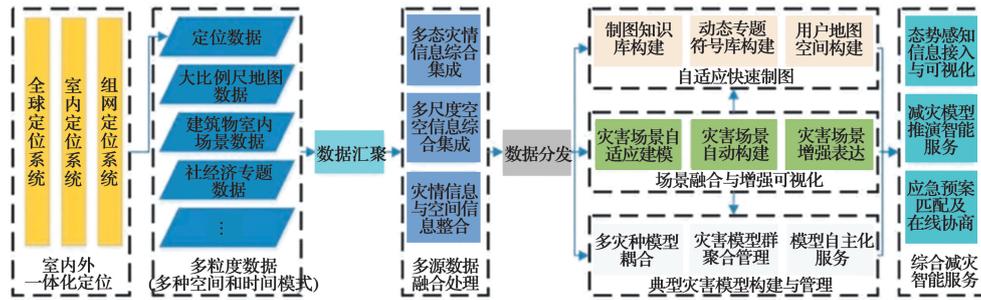
随着智能化的飞速发展,基于人工智能的自然灾害监测与预警为桥梁智能防灾减灾提供了新的思维范式和发展思路^[88]。刘汉龙等^[89]指出基于大数据技术的地质灾害智能防治系统是综合运用雷达测量、卫星遥感、智能无人机、机载激

快速建设阶段向运维管理阶段过渡。基于全生命周期的桥梁智能养维护理论及方法对于科学、合理、经济地确定必要的预防性养护和最少量的修正性养护,并在可接受的有限预算内实现最佳的桥梁养护维修具有重要意义。

在基于智能算法的桥梁智能养护维修方面,Wei 等^[82]提出了一种新的自动深度强化学习(DRL)框架来获取优化的结构维护策略,如图9所示,为不同的结构维护任务提供了通用框架和最优策略。齐锡晶等^[83]提出了一种高速公路桥梁桥面板养护方案多目标决策方法,基于熵权的理想点法和层次分析法分别确定了高速公路网络内桥梁桥面板养护优先级系数和养护目标的权重,研究结果为公路桥梁的养护管理决策提供了基础。杨颖等^[84]提出了机器检测智能化、人工检测智能化、遥感监测智能化三位一体的数据收集智能体系,在模拟退火算法的基础上提出了一种基于BP神经网络算法的新型桥梁安全评估系统,有效提高了养护工作效率,降低了养护成本。段晓晨等^[85]采用粒子群优化算法、BP神经网络等人工智能方法建立了张家庄大桥运营维护成本预测模型,将三维非线性智能控制技术运用到实际工程中,提高了运维管理的时效性、高效性和经济性。毛新华等^[86]通过建立一个多目标非线性规划模型,用模拟退火算法求解,以某公路桥梁网络为例,研究了桥梁网络最优维修调度策略。Mohammad 等^[87]提出了一种考虑管养的空间限制和时间关系的桥梁维修优化框架,将遗传算法和离散事件仿真相结合确定了最优维修计划,提高了高级别调度优化方面的效率和估算管养成本方面的准确性。

光雷达等多种新技术手段提高地质灾害调查评价精度;再利用先进遥感、雷达技术,物联网监测系统以及人工智能、机器学习算法,在研究原理、发现隐患、监测隐患、发布灾害预警上,基于大数据相关技术建立“群测群防”、“专群结合”的监测预警体系。如图10所示,传统的桥梁防灾减灾手段较为单一,不能充分融合相关技术进行一体化指导救灾,而智能防灾减灾可将测绘地理信息关键技术、物联网、互联网系统完全连接和融合,实现灾害全面感知、技术精准融合、宽带泛在互联与高效智能救灾^[90]。

在灾害预测预警方面,张锦等^[91]提出了基于高精度智能传感技术的智能风险预警系统和基于GIS+北斗技术的一体化智能应急响应系统,对高寒艰险复杂山区铁路桥梁的防灾减灾有重要参考意义。朱庆等^[92]针对川藏铁路自然灾害频发的特点,建立了统一的多粒度实体要素分类编码体系,可

图 10 智能防灾减灾技术流程图^[90]

为灾害监测预警、风险定量评估和灾后应急处置等提供智能化的数据-模型-知识服务。Banihabib^[93]在人工智能模型(贝叶斯网络和支持向量回归-粒子群优化)和水文模拟系统混合模型的基础上提出了预测泥石流洪峰流量的新混合模型,可应用于泥石流洪水预警系统。滕飞等^[94]提出了基于序列模式的大风预警方法,深度挖掘了高铁大风预警模式,通过滤除与非预警序列共有的频繁模式,得到了预警序列独有的序列特征,构建了预警模式库。苏延文等^[95]以郑万高铁大宁河大桥为工程背景,建立了复杂山区铁路大跨桥梁施工大风监测预警技术,保障了复杂山区铁路桥梁施工过程中的抗风安全。蒲黔辉等^[96]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,系统阐述了人工智能技术在风、雨、雪、地震及滑坡等灾害监测和行车安全预警中的应用。

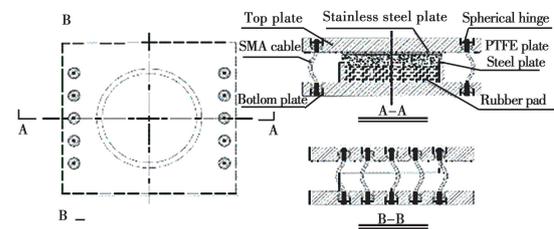
综上所述,人工智能、机器学习、大数据等技术已经在基础设施防灾减灾中得到了应用,但面对复杂的灾害场景,智能感知、智能解析与智能评价、预测及决策理论与方法还有待未来进一步深入研究。

4 智能材料

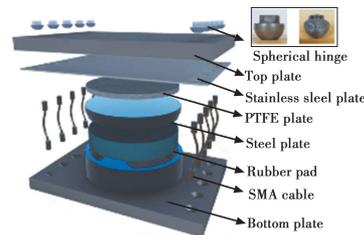
大跨度、轻量化、智能化是未来桥梁的发展趋势,新型智能材料的研发及应用是其中的关键一环。智能材料是一种能感知外部刺激,判断并适当处理且本身可执行的新型功能材料,是现代高技术新材料发展的重要方向之一,将使传统意义下的功能材料和结构材料之间的界线逐渐消失,实现结构功能化、功能多样化。

形状记忆合金(SMA)是以形状记忆与超弹性为主要特性,具有良好的抗疲劳和耐腐蚀性能^[97]。SMA可通过感知形状的变化进行自主性修复,进而保障桥梁结构的稳定性。Liang等^[97]研发了一种采用SMA拉索的新型摩擦滑动支座系统,如图11所示,验证了该支座系统在桥梁上部结构位移控制、提高墩曲率延性等方面的优势。Ruiz-Pinilla等^[98]建立了钢筋混凝土梁外加固铁基形状记忆合金(Fe-SMA)的有限元模型,提出了Fe-SMA的解析应力-应变曲线,研究结果表明这种材料的形状记忆效应可用于引入预应力,改善钢筋混凝土梁的性能。Cao等^[99]提出了一种多层SMA/铅橡胶支座隔震系统,保证了支座在不同等级地震激励下的隔震效果。在桥梁结构加固方面,Shafei等^[100]研究了超弹性SMA纤维与纤维增强聚合物(FRP)复合增强钢筋的性能,表明冲

击作用下SMA-FRP复合筋在耗能、损伤缓解及位移恢复等方面效果显著。Karimipour等^[101]通过比较SMA、玻璃纤维增强聚合物(GFRP)对不同混凝土抗压强度下钢筋混凝土梁抗弯与抗剪性能的影响,验证了SMA在强化梁体抗弯能力方面的优势。



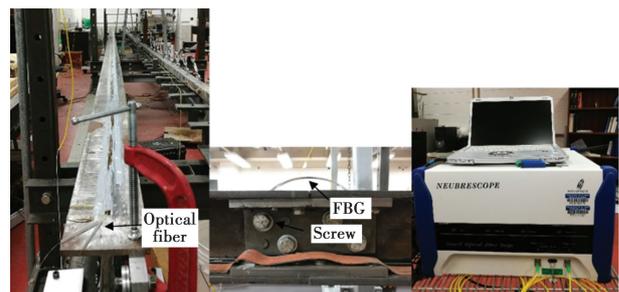
(a) 二维视图



(b) 三维视图

图 11 SMA 新型摩擦滑动支座系统^[97]

光导纤维可应用于分布式光纤传感系统,其具有灵敏度高、结构简单、便于调试等特点,可以检测结构微裂纹,在桥梁领域被广泛应用于桥梁检测与健康监测。Song等^[102]采用基于布里渊散射技术的分布式光纤传感器系统,如图12所示,对微裂纹钢梁进行了分布式应变测量,并引入信号去噪方法,准确检测到了细至 $23\ \mu\text{m}$ 的微裂纹。Rufai等^[103]在复合材料板制造过程中将分布式光纤(DOF)传感器嵌入到玻璃纤维织物层中,用于桥梁结构全生命周期的健康监测。

图 12 分布式光纤传感器系统^[102]

Yan 等^[104]针对 FRP 锚固系统长期性能和安全使用的监测要求,将光纤光栅引入到 FPR 粘结锚中,提出了一种基于智能光纤光栅(FBG)的新型 FRP 锚具。

压电材料在受到外部因素作用时会因为其自身发生变形而产生电势,而对材料再施加一定电压时又会改变材料的尺寸。利用这一压电效应,压电材料可用作传感元件,用于检测元件所在位置桥梁结构的变形量,也可制作驱动元件,改变材料的应力状态,影响材料的结构变形。Hou 等^[105]提出了一种基于压电材料的振动能量收集装置,获取了某连续刚构桥列车-弹簧浮置板轨道-桥梁体系的车辆激振响应,实现了该桥梁的无线健康监测。Kaur 等^[106]利用锆钛酸铅(PZT)制作的压电传感器,对某预应力钢筋混凝土桥的残余预应力进行了压电片监测的实验和统计研究,评估了预应力混凝土桥老化期间的剩余预应力。Zhang 等^[107]利用钛酸铅锆(PZT)制成的压电传感器阵列捕捉了移动荷载作用下梁桥的动力响应,结果表明,该 PZT 压电传感器具有自动传感、响应快、精度高等优点,使无线传感技术成为可能。

综合以上研究发现,智能材料在桥梁检(监)测和加固等方面展现了独特的优越性,但还有以下问题需要解决:1)形状记忆合金的可靠性和耐久性有待进一步研究;2)光导纤维传感器传感原理研究困难,与基体材料互适应性研究较少,且成本较高,长期使用的可靠性不足;3)智能材料系统的微观力学、耦合效应、材料可靠性与耐久性有待深入研究。

5 结论与展望

近年来,学者们通过信息化和智能化技术,在桥梁智能检测和安全运维领域的感知、识别、评价、预测等方面取得了丰硕的研究成果,将由人工为主的机械和电子感知技术向自动化设备为主的信息化和数字化智能感知技术发展;由人工识别判据技术向数据模型、数据分析、数据挖掘、深度学习的智能识别技术发展;由人工评价专家决策技术向数据挖掘(驱动)、深度学习(智能)和量化评定相结合的智能评价及预测技术发展。笔者从以下几方面对下阶段桥梁的信息化和智能化研究重点进行展望:

1)在桥梁信息化方面,进一步提高 BIM 正向设计的精细化水平,提升施工过程控制和管理的准确化程度;提高三维建模效率和 BIM 数据的利用率,实现全专业的集方案、施工图、深化设计于一体的信息化设计;推动 BIM 建模和有限元分析的结合,赋予 BIM 模型最高级的力学属性;深入研究 BIM 技术的标准化和数字化,使整个桥梁工程能够实现数字化表达;在此基础上,积累大量的样本,形成大数据,并通过这些大数据进行智能化的转换,实现数据真正的有效传递,达到桥梁全寿命期 BIM 应用。

2)在桥梁智能化方面,研究多因素作用下工程结构全寿命性能时变演化规律和人机高度协同的全寿命周期智能设计方法与多任务多目标智能优化理论;研发复杂环境下综合性桥梁智能检测装备,提高机器学习的广度、深度和易用性;提高智能算法和识别理论的感知和分析能力,建立面向复杂

环境的桥梁智能感知、智能解析与智能决策理论及方法;研究数据与物理模型融合的基础设施服役性能(安全)智能评价与预测理论及方法;开展基础设施智能防灾和服役性能提升理论及技术研究,实现系统全寿命服役期的结构可靠性和行车安全舒适性。

3)西部艰险山区桥梁的智能化防灾减灾研究还很薄弱,还没有形成有效的工程化技术及应用,未来应进一步聚焦西部山区桥梁安全、智能建造和智能管养三方面,将计算机视觉、迁移学习、强化学习等技术引入到桥梁智能防灾减灾中,研究桥梁智能监测与养护维修、快速工厂化的预制安装和维修、灾后桥梁快速检测诊断与加固修复、灾害远程智能预警方法及协同预警机制等。

4)在智能材料方面,应从宏观与微观的角度透析智能材料的性能和受力机理,研发低能耗、多功能的新型材料及构件,积极开展智能材料用于结构健康监测、降噪自适应控制及安全防灾减灾等方面的研究,实现结构的自感知性、自适应性、自调节性和自诊断性,可为智能桥梁的可持续发展奠定基础。

桥梁的信息化、工业化、智能化发展是大势所趋,人工智能技术深度融合桥梁规划、设计、建造和养护的全生命周期,将推动我国桥梁向安全、长寿、绿色、智能的可持续方向发展,早日实现桥梁强国梦。

参考文献:

- [1] 傅战工,张金涛,张锐.基于 Inventor 的常泰长江大桥主塔 BIM 正向设计[J].铁道标准设计,2020,64(Sup1):190-194.
- [2] 陈洪春,黄武,陈航. BIM 技术在宁淮铁路桥梁设计中的应用[J].铁道标准设计,2020,64(Sup1):187-190.
- [3] 赵月悦,彭灿,张超超,等.福厦高铁桥梁 BIM 技术应用[J].世界桥梁,2020,48(Sup1):106-112.
- [4] 李红豫,李恒,吴悦,等.基于 BIM 的东洲湘江大桥参数化设计应用研究[J].公路,2020,65(11):173-178.
- [5] 张鹏飞,杨福瑞,雷晓燕,等.基于 Revit 平台的高速铁路大跨斜拉桥工程算量系统研发[J].铁道标准设计,2021,65(8):72-76.
- [6] 周应华,瞿浩,景磊.基于精细化 BIM 模型的钢结构桥梁工程量自动统计技术研究[J].公路,2020,65(7):109-112.
- [7] 黄成岑,李洋溢,袁通. BIM 技术在桥隧相接部位方案设计中的应用[J].中外公路,2020,40(5):236-239.
- [8] 戴林发宝,薛光桥,苑俊杰.基于多源数据的铁路工程 BIM 协同设计平台研究[J].铁道标准设计,2021,65(8):96-100.
- [9] 张翔,连飞,王同民,等. BIM+互联网技术在鳊鱼洲长江大桥施工中的应用[J].铁路技术创新,2020(3):70-75.
- [10] 王宏坤,刘锦军,张义桂,等.南京长江大桥维修改造

- BIM智能管理系统[J]. 公路, 2020, 65(11): 361-365.
- [11] 赵亚宁, 王浩, 郜辉, 等. 基于BIM的高铁连续梁施工应力监控方案设计及应用[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(11): 68-73.
- [12] 袁宇, 李坤, 王银广. 基于BIM移动端的桥梁预防性养护研究[J]. 智能城市, 2020, 6(21): 66-67.
- [13] 王一, 李坤, 王银广, 等. 基于BIM的桥梁养护成本控制[J]. 智能城市, 2020, 6(21): 80-81.
- [14] 潘永杰, 刘晓光, 蔡德钧, 等. 面向运维的铁路桥梁BIM模型及全生命周期信息关联研究[J]. 中国铁路, 2020(5): 73-80.
- [15] FLEISCHHACKER A, GHONIMA O, SCHUMACHER T. Bayesian survival analysis for US concrete highway bridge decks [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2020, 26(1): 04020001.
- [16] ISAILOVIĆ D, STOJANOVIC V, TRAPP M, et al. Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization [J]. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103088.
- [17] 胡兴意, 陈波, 刘国强, 等. 融合BIM与影像建模技术的桥梁检测方法及其应用研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 107-112.
- [18] CAPRANI C C, DE MARIA J. Long-span bridges: analysis of trends using a global database [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(1): 219-231.
- [19] 杨扬, 王连发, 张宇峰. 无人机桥梁检测技术进展与瓶颈问题分析[J]. 现代交通技术, 2020, 17(4): 27-32.
- [20] KARIM M M, DAGLI C H, QIN R W. Modeling and simulation of a robotic bridge inspection system [J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 168: 177-185.
- [21] PERRY B J, GUO Y L, ATADERO R, et al. Streamlined bridge inspection system utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs) and machine learning [J]. *Measurement*, 2020, 164: 108048.
- [22] SALEEM M R, PARK J W, LEE J H, et al. Instant bridge visual inspection using an unmanned aerial vehicle by image capturing and geo-tagging system and deep convolutional neural network [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020: 147592172093238.
- [23] ZOLLINI S, ALICANDRO M, DOMINICI D, et al. UAV photogrammetry for concrete bridge inspection using object-based image analysis (OBIA)[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3180.
- [24] BOLOURIAN N, HAMMAD A. LiDAR-equipped UAV path planning considering potential locations of defects for bridge inspection [J]. *Automation in Construction*, 2020, 117: 103250.
- [25] BISCARINI C, CATAPANO I, CAVALAGLI N, et al. UAV photogrammetry, infrared thermography and GPR for enhancing structural and material degradation evaluation of the Roman masonry bridge of Ponte Lucano in Italy [J]. *NDT & E International*, 2020, 115: 102287.
- [26] JUNG S, CHOI D, SONG S, et al. Bridge inspection using unmanned aerial vehicle based on HG-SLAM: hierarchical graph-based SLAM [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3022.
- [27] JANG K, AN Y K, KIM B, et al. Automated crack evaluation of a high-rise bridge pier using a ring-type climbing robot [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2021, 36(1): 14-29.
- [28] BOOMERI V, TOURAJIZADEH H. Design, modeling, and control of a new manipulating climbing robot through infrastructures using adaptive force control method [J]. *Robotica*, 2020, 38(11): 2039-2059.
- [29] CHEN Y X, HU B B, ZOU J K, et al. Design and fabrication of a multi-motion mode soft crawling robot [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, 17(5): 932-943.
- [30] BAEK H, JUN B H, NOH M D. The application of sector-scanning sonar: Strategy for efficient and precise sector-scanning using freedom of underwater walking robot in shallow water [J]. *Sensors*, 2020, 20(13): 3654.
- [31] DONG Z X, MAI Z H, YIN S Q, et al. A weld line detection robot based on structure light for automatic NDT [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(7/8): 1831-1845.
- [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: 201911190522.1 [P]. 2020-11-27.
- [33] D'AMICO F, GAGLIARDI V, BIANCHINI CIAMPOLI L, et al. Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges [J]. *NDT & E International*, 2020, 115: 102291.
- [34] ALANI A M, TOSTI F, CIAMPOLI L B, et al. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies [J]. *NDT & E International*, 2020, 115: 102288.
- [35] ASADI P, GINDY M, ALVAREZ M, et al. A computervision based rebar detection chain for automatic processing of concrete bridge deck GPR data [J]. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103106.

- [36] 何志文, 赵新铭, 叶宇霄, 等. 基于 BOTDA 的混凝土管双裂缝监测试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (7): 43-46.
- [37] ZHANG L X, QIU G Y, CHEN Z S. Structural health monitoring methods of cables in cable-stayed bridge: A review [J]. Measurement, 2021, 168: 108343.
- [38] SHAO S, ZHOU Z X, DENG G J, et al. Experiment of structural geometric morphology monitoring for bridges using holographic visual sensor [J]. Sensors, 2020, 20(4): 1187.
- [39] 刘妙燕, 陆俊, 明攀, 等. 静载和疲劳荷载作用下橡胶混凝土声发射特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(5): 149-155.
- [40] LIU S M, WU C X, ZHOU J T, et al. Relation between the shear stress distribution and the resulting acoustic emission variation in concrete beams [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27 (6): e2528.
- [41] 汪兴源, 周建庭, 刘腾飞, 等. 声发射信号分布与 RC 梁截面应力变化的相关性[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 134-138, 145.
- [42] 段兰, 王春生, 翟慕赛, 等. 基于声发射技术的钢桥面板疲劳损伤监测与评估[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 60-73.
- [43] 陈鑫, 朱劲松, 钱骥, 等. 基于导波多尺度能量熵的钢绞线张拉力识别[J]. 振动. 测试与诊断, 2020, 40(4): 745-750, 826.
- [44] LIU L, ZHENG D, ZHOU J T, et al. Parameters that influence corrosion detection in reinforced concrete based on eddy current thermography [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-9.
- [45] WANG D L, ZHANG Y Q, PAN Y, et al. An automated inspection method for the steel box girder bottom of long-span bridges based on deep learning [J]. IEEE Access, 2020, 8: 94010-94023.
- [46] 许国平, 林超. 基于激光扫描技术的无砟轨道离缝智能检测小车研发[J]. 中国铁路, 2020(7): 95-100.
- [47] SUN L M, SHANG Z Q, XIA Y, et al. Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(5): 04020073.
- [48] MOHAMMED ABDELKADER E, MARZOUK M, ZAYED T. A self-adaptive exhaustive search optimization-based method for restoration of bridge defects images [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2020, 11(8): 1659-1716.
- [49] ASJODI A H, DAEIZADEH M J, HAMIDIA M, et al. Arc Length method for extracting crack pattern characteristics [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(1): e2653.
- [50] LI G, LIU Q W, ZHAO S M, et al. Automatic crack recognition for concrete bridges using a fully convolutional neural network and naive Bayes data fusion based on a visual detection system [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31 (7): 075403.
- [51] PHAM H C, TA Q B, KIM J T, et al. Bolt-loosening monitoring framework using an image-based deep learning and graphical model [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(12): 3382.
- [52] 刘宇飞, 樊健生, 孔思宇, 等. 多视角几何三维重建法识别工程结构缺损与变形[J]. 工程力学, 2020, 37 (9): 103-111.
- [53] 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]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 193-205.
- [54] 杨杰文, 章光, 陈西江, 等. 基于深度学习的较复杂背景下桥梁裂缝检测[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2722-2728.
- [55] KIM H, YOON J, SIM S H. Automated bridge component recognition from point clouds using deep learning [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(9). <https://doi.org/10.1002/stc.2591>.
- [56] XU S Y, WANG J, SHOU W C, et al. Computer vision techniques in construction: a critical review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(5): 3383-3397.
- [57] KALFARISI R, WU Z Y, SOH K. Crack detection and segmentation using deep learning with 3D reality mesh model for quantitative assessment and integrated visualization [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, 34(3): 04020010.
- [58] NARAZAKI Y, HOSKERE V, HOANG T A, et al. Vision-based automated bridge component recognition with high-level scene consistency [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(5): 465-482.
- [59] BAE H, JANG K, AN Y K. Deep super resolution crack network (SrcNet) for improving computer vision-based automated crack detectability in situ bridges [J]. Structural Health Monitoring, 2020: 147592172091722.
- [60] 周建庭, 李晓庆, 辛景舟, 等. 基于 Kalman-GARCH 模型的结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 1-7, 21.

- [61] ZHANG J, QU C X, YI T H, et al. Damage detection for decks of concrete girder bridges using the frequency obtained from an actively excited vehicle [J]. *Smart Structures and Systems*, 2021, 27 (1): 101-114.
- [62] CHEN Z, ZHANG R Y, ZHENG J W, et al. Sparse Bayesian learning for structural damage identification [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106689.
- [63] 饶勇平, 黄金山, 邱昊, 等. 基于部分观测剪切框架结构绝对响应量的地震激励的广义识别方法[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(4): 578-582.
- [64] 林阳, 封周权, 华旭刚, 等. 基于自由振动响应识别桥梁断面颤振导数的人工蜂群算法[J]. *工程力学*, 2020, 37(2): 192-200.
- [65] 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.
- [66] ZHAN J W, ZHANG F, SIAHKOUHI M, et al. A damage identification method for connections of adjacent box-beam bridges using vehicle-bridge interaction analysis and model updating [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111551.
- [67] 勾红叶, 杨彪, 刘雨, 等. 复杂条件下车-轨-桥变形映射关系及行车安全评价[J]. *中国公路学报*, 2021, 34 (4): 162-173.
- [68] GOU H Y, LIU C, HUA H, et al. Mapping relationship between dynamic responses of high-speed trains and additional bridge deformations [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2021, 27(9/10): 1051-1062.
- [69] GOU H Y, XIE R, LIU C, et al. Analytical study on high-speed railway track deformation under long-term bridge deformations and interlayer degradation [J]. *Structures*, 2021, 29: 1005-1015.
- [70] ZHOU Y, PEI Y L, LI Z W, et al. Vehicle weight identification system for spatiotemporal load distribution on bridges based on non-contact machine vision technology and deep learning algorithms [J]. *Measurement*, 2020, 159: 107801.
- [71] DI J, RUAN X Z, ZHOU X H, et al. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks based on strain monitoring data [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111437.
- [72] 马亚飞, 欧阳清波, 汪国栋, 等. 基于等效初始裂纹尺寸的吊杆疲劳寿命预测[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(2): 52-57.
- [73] CUI C, XU Y L, ZHANG Q H, et al. Vehicle-induced fatigue damage prognosis of orthotropic steel decks of cable-stayed bridges [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110509.
- [74] 管德清, 丁湘泽, 潘嫣然. 考虑残余应力影响的焊接结构疲劳总寿命预测方法[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 17(3): 15-21.
- [75] TANG Z Y, BAO Y Q, LI H. Group sparsity-aware convolutional neural network for continuous missing data recovery of structural health monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020: 147592172093174.
- [76] 冯德成, 吴刚. 混凝土结构基本性能的可解释机器学习建模[J/OL]. *建筑结构学报*, <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0491>.
- [77] 夏焯, 雷晓明, 王鹏, 等. 针对网级评估的区域桥梁信息集成与数据挖掘[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(3): 66-74.
- [78] WU G M, YANG D H, YI T H, et al. Sliding life prediction of sliding bearings using dynamic monitoring data of bridges [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(5): e2515.
- [79] ZHAO H W, DING Y L, LI A Q, et al. Digital modeling on the nonlinear mapping between multi-source monitoring data of in-service bridges [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27 (11): e2618.
- [80] NI Y Q, WANG Y W, ZHANG C. A Bayesian approach for condition assessment and damage alarm of bridge expansion joints using long-term structural health monitoring data [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110520.
- [81] ZHANG Y M, WANG H, MAO J X, et al. Probabilistic framework with Bayesian optimization for predicting typhoon-induced dynamic responses of a long-span bridge [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(1): 04020297.
- [82] WEI S Y, BAO Y Q, LI H. Optimal policy for structure maintenance: A deep reinforcement learning framework [J]. *Structural Safety*, 2020, 83: 101906.
- [83] 齐锡晶, 唐梁, 康伟鑫, 等. 高速公路桥梁桥面板养护方案多目标决策方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(7): 1033-1040.
- [84] 杨颖, 李坤, 王银广. 基于模拟退火算法的BP神经网络在桥梁智能养护中的应用[J]. *智能城市*, 2020, 6 (21): 12-13.
- [85] 段晓晨, 喇海霞, 胡天明, 等. 桥梁工程运维成本三维非线性智能控制研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37 (9): 102-107.
- [86] MAO X H, JIANG X D, YUAN C W, et al. Modeling

- the optimal maintenance scheduling strategy for bridge networks [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 498.
- [87] NILI M H, TAGHADDOS H, ZAHRAIE B. Integrating discrete event simulation and genetic algorithm optimization for bridge maintenance planning [J]. *Automation in Construction*, 2021, 122: 103513.
- [88] 张令心, 钟江荣, 林旭川, 等. 区域与城市地震风险评估与监测技术研究项目及研究进展[J]. *地震科学进展*, 2020, 50(3): 1-19.
- [89] 刘汉龙, 马彦彬, 仇文岗, 文海家. 大数据技术在地质灾害防治中的应用综述 [J/OL]. *防灾减灾工程学报*, <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.2021.04.002>.
- [90] 刘纪平, 刘猛猛, 徐胜华, 等. 大数据时代下的一体化综合减灾技术综述[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(8): 1107-1116.
- [91] 张锦, 徐君翔, 郭静妮, 等. 智能川藏铁路系统总体架构设计与研究[J]. *综合运输*, 2020, 42(1): 100-107.
- [92] 朱庆, 李函侃, 曾浩炜, 等. 面向数字孪生川藏铁路的实体要素分类与编码研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(9): 1319-1327.
- [93] BANIHABIB M E, JURIK L, KAZEMI M S, et al. A hybrid intelligence model for the prediction of the peak flow of debris floods [J]. *Water*, 2020, 12(8): 2246.
- [94] 滕飞, 刘鉴竹, 祝锦焯, 等. 高铁大风预警模式挖掘 [J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(2): 55-63.
- [95] 苏延文, 颜永逸, 曾永平, 等. 复杂山区铁路大跨桥梁施工大风监测预警技术[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64 (Sup1): 204-207.
- [96] 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.
- [97] LIANG D, ZHENG Y, FANG C, et al. Shape memory alloy (SMA)-cable-controlled sliding bearings: Development, testing, and system behavior [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(8): 085006.
- [98] RUIZ-PINILLA J G, MONTOYA-CORONADO L A, RIBAS C, et al. Finite element modeling of RC beams externally strengthened with iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strips, including analytical stress-strain curves for Fe-SMA [J]. *Engineering Structures*, 2020, 223: 111152.
- [99] CAO S S, OZBULUT O E, WU S W, et al. Multi-level SMA/lead rubber bearing isolation system for seismic protection of bridges [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(5): 055045.
- [100] SHAFEI E F, KIANOUSH R. Transient analysis of hybrid SMA-FRP reinforced concrete beams under sequential impacts [J]. *Engineering Structures*, 2020, 208: 109915.
- [101] KARIMPOUR A, EDALATI M. Shear and flexural performance of low, normal and high-strength concrete beams reinforced with longitudinal SMA, GFRP and steel rebars [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111086.
- [102] SONG Q S, YAN G P, TANG G W, et al. Robust principal component analysis and support vector machine for detection of microcracks with distributed optical fiber sensors [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 107019.
- [103] RUFAl O, CHANDARANA N, GAUTAM M, et al. Cure monitoring and structural health monitoring of composites using micro-braided distributed optical fibre [J]. *Composite Structures*, 2020, 254: 112861.
- [104] YAN K, YANG J C, ZHANG Y, et al. Safety performance monitoring of smart FBG-based FRP anchors [J]. *Safety Science*, 2020, 128: 104759.
- [105] HOU W Q, ZHENG Y, GUO W, et al. Piezoelectric vibration energy harvesting for rail transit bridge with steel-spring floating slab track system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 291: 125283.
- [106] KAUR N, GOYAL S, ANAND K, et al. A cost-effective approach for assessment of pre-stressing force in bridges using piezoelectric transducers [J]. *Measurement*, 2021, 168: 108324.
- [107] ZHANG H, ZHOU Y H, QUAN L W. Identification of a moving mass on a beam bridge using piezoelectric sensor arrays [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 491: 115754.

(编辑 王森舟)