

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.220



桥梁养护 2020 年度研究进展

李俊, 卫星, 唐朝勇, 张博伦

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥梁养护的目的是保持桥梁正常交通功能,满足载重、速度等要求,防止突发重大灾害。桥梁养护具有长期性、局部性、应急性特点。目前有专门的桥梁养护机构,已经形成桥梁日常检查、定期检测、专项检测、特殊检测、维修加固等制度和规范,养护内容和重点已经明确规定和执行,养护技术能够满足大部分需求。目前面临的突出问题是如何实现快速养护和应急整治。高速铁路和城市轨道交通不间断运营、高密度行车、行车期间禁止施工,只能利用每天凌晨约 0~4 点天窗时间养护维修,每天 4 点后必须开通线路。高速公路也要求不断道的养护维修。突发灾害发生后,需要应急整治和维持通车。铁路系统的养护体制,更容易收集数据和实现数据标准化。桥梁养护正在往快速养护和智慧养护方向发展。笔者从病害及整治、养护策略、养护新技术 3 个方面主要介绍 2020 年桥梁养护研究进展。

关键词:桥梁养护;病害整治;养护策略;养护新技术

中图分类号:U445.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0190-08

State-of-the-art review of bridge maintenance in 2020

LI Jun, WEI Xing, TANG Chaoyong, ZHANG Bolun

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

Abstract: The purpose of bridge maintenance is to maintain the normal traffic function of the bridge, to meet the requirements of load, speed and other factors, and to prevent sudden and serious disasters. Bridge maintenance has the characteristics of long-term, local and emergency. At present, there are special bridge maintenance institutions which have formed systems and specifications for daily inspection, regular inspection, special inspection, special inspection, maintenance and reinforcement of bridges. The maintenance contents and key points have been clearly defined and implemented, and the maintenance technology can meet most of the requirements. At present, the outstanding problem is how to achieve rapid maintenance and emergency treatment. High speed railway and urban rail transit are in uninterrupted operation, high-density traffic, and construction is prohibited during traffic. They can only use the skylight time of 0~4 a. m. every day for maintenance, and the line must be opened after 4 a. m. every day. Highway also requires continuous maintenance. After the occurrence of sudden disasters, it needs emergency treatment and maintenance. The maintenance system of railway system makes it easier to collect data and realize data standardization. Bridge maintenance is developing in the direction of rapid maintenance and intelligent maintenance. This paper mainly introduces the research progress of bridge maintenance in 2020 from three aspects: disease and treatment, maintenance strategy and new maintenance technology.

Keywords: bridge maintenance; disease treatment; maintenance strategy; new maintenance technology

桥梁长期经受自重、设计活载和自然地质作用,必须进行正常养护维修,研究应用养护新策略和养护新技术。桥梁养护历史悠久,积累了丰富的经验。

桥梁的任何构件、任何部位都可能发生病害,只是发生概率大小不同。如混凝土裂纹、钢构件疲劳裂纹属于易发病害,火灾事故属于小概率事件。桥梁在运营过程中,会出现

收稿日期:2021-06-18

作者简介:李俊(1972-),男,博士,副教授,主要从事桥梁养护、钢桥稳定与疲劳、施工监控和临时结构研究,E-mail:tumulijun@163.com。

设计计算没有考虑的作用,如近年高发的落石冲击作用,山区河流高桩承台桩基被冲刷露出后的漂石撞击作用等。由于养护通道缺失,部分构件处于失养状态。

1 病害及整治

申新伟^[1]发现了京广高铁桥梁支座、支座螺栓及防落梁装置无法检查,设备可能存在松动、锈蚀等问题。主要原因是:京广高铁桥梁墩台修建时未考虑设置吊围栏,养护人员无法对其进行检查和维修作业;桥面聚脲防水层起泡、开裂、翘起;桥面声屏障外部底座、螺栓及遮板裂纹无法正常检查。

殷涛^[2]通过在中国铁路哈尔滨局的桥梁冻胀、融沉两大类病害整治大修设计实践,介绍了墩台倾斜变位、冻裂、热融沉降、冻胀拱起、冻融剥蚀以及基础冷拔断裂、梁端伸缩缝顶死、锥体护坡塌陷等病害,认为土、水和温度是产生冻害的 3 个必要因素。其建议处治措施为:对于钻孔灌注桩基础防冻,需在季节融化层内嵌入多年冻土层一定深度,并设永久钢护筒,在钢护筒外涂渣油等;一般冻土地带,应将承台底面以下换填为粗粒土,或设置 PUC 保温隔层材料缓冲层。地基防冻采用换填地基土法、保温覆盖法、土质改良法、规避隔离法、降低温度法、改变截面法。

李瑞^[3]发现了包神铁路 1 座 24 m、4 座 32 m 预应力混凝土 T 梁桥的摇轴支座倾斜角超过 7°,最大 9.8°,而《普速铁路桥隧建筑物修理规则》(TG/GW 103—2018)第 3.4.5 条规定其不应大于 7°。分析原因为施工安装误差和混凝土收缩徐变。整治措施为:封锁线路 240 min,采用 4 台 250 t 千斤顶同步顶升梁体 10 mm,进行支座纠偏。

李强等^[4]研究了北京轨道交通支座病害整治时间紧、精度要求高的特点。支座病害治理必须在每天的运营结束后进行,按照北京轨道交通运营时间表,北京轨道交通的日有效治理时间仅为 3.5 h。每日治理工作后的轨道交通必须满足第二天正常运营要求,治理工作不能对轨道线路、接触轨、波导管、步行板、声屏障等设备设施产生影响,各项参数要以毫米级控制。采取 3 种支座病害整治方法:针对转角超限、位移超限、剪切超限及钢衬板脱空的病害支座,采用桥梁同步顶升法;针对上垫石严重腐蚀破损的病害支座,采用桥梁预顶升+灌浆料修复垫石法;针对下垫石脱空的病害支座,采用垫石局部加固补强法。整治约 150 处桥梁支座病害,效果良好。

中国铁路成都局 2020 年对内六铁路 3 座桥梁落石病害进行了整治。对于受伤梁体,采取换梁、应急加固、永久加固;对于落石,采取清除、拦挡等措施。西南交通大学进行了应急加固桥梁的 24 小时实时安全监测,保证了国铁干线铁路畅通。

许涛^[5]针对大同地区高速公路超载车辆多的特点,分析了该地区公路桥梁的主要病害及其原因,提出了防治措施。比较有特点的病害为:两座空心板桥箱体内有积水、板底有数条胀裂裂缝,有水从裂缝内滴出。采取的整治措施为:先对上部渗水裂缝进行封堵,再对梁底打眼排除梁内积水,随

后对梁体裂缝进行修补或加固。

张建勋等^[6]分析了郑州市某立交 F 匝道桥曲线桥梁横向爬移病害原因并进行整治。2012 年 9 月发现护栏错位严重,随即检测表明:桥墩斜向裂缝较多,最大裂缝宽度为 1.5 mm,发生在 34#墩内侧距地面约 0.25 m 处,向小桩号侧水平延伸 1.2 m;36#桥墩顶支座螺栓剪断且支座横向出现 40 cm 位移,第 10 至 11 联梁体横向发生爬移。采用 ANSYS 有限元软件对 F 匝道第 10 联和第 11 联进行分析,上部结构采用实体单元 solid45 模拟。计算显示,固定支座水平剪切力大于支座允许水平抗剪承载力,支座破坏,破坏后的支座因缺少挡块约束,在制动力和温度作用下,梁体将产生相当程度的横向爬移。采取的加固措施为:桥墩全截面加固;第 10 联、第 11 联桥墩全部增设混凝土抗震挡块,并在抗震挡块侧向安装四氟滑板减震橡胶垫块;在墩顶盆式支座横向两侧各增设一块板式橡胶支座,提高桥梁上部结构抗倾覆能力;主梁的顶升与复位;更换支座,新支座的水平抗剪承载力不小于竖向承载力的 15%。2015 年 8 月加固完成,2015 年 11 月健康监测发现 32#墩活动支座在环境气温急剧变化下,纵向位移始终保持不变,而与之相对应的 36#墩支座发生了 15 mm 的纵向位移,判断 32#墩活动支座异常,12 月更换 32#墩支座。目前桥梁使用状况良好。

李万德^[7]采用了超薄磨耗层技术处理桥面基层病害。该技术具有降噪、抗磨耗、施工期有效缩短、减水雾、几乎对交通不产生扰动、可对桥面结构中存在的不足进行纠正、安全性明显提高等优势,在较大交通荷载、对桥面有较高性能要求等方面较为适用。

吴正安等^[8]针对部分桥梁检查失效(如图 1 所示),特别是山区公路桥梁重要部位解决“可达可检”的问题,对公路桥梁养护通道现状进行了分析,给出了设置爬梯、平台等必要养护通道、扫除养护工作盲区的总体方案。其研究了养护通道设置的总体原则,初步确定了需要设置养护通道的桥梁关键部位,并给出了养护通道相关设计参数、施工验收、运营养护等必须考虑的其他因素。



图 1 泸州长江大桥北岸 2 号墩重大安全险情

唐国林^[9]分析了梁式桥、拱式桥、斜拉桥、悬索桥的检查盲区,建议设置检修通道、缆索开窗检查、无人机检测、高清摄像、缆索机器人进行处理。

李艳^[10]对川藏铁路桥梁运营维护问题进行了研究,建议尽量少维护和免维护。为应对地震后的梁体移位问题,设计

了预留支座调高、垫石平面和高度调整措施。

杨洋等^[11]为提高桥梁养护数据标准化,为公路桥梁养护管理信息化的发展提供数据标准支持,研究了公路桥梁病害分类与编码构建方法,提出以材料相关病害、桥梁构件相关病害、动态病害、附属与设备通用病害为主要划分基准的病害分类方法,同时对各种病害进行了层级编码。

Kim 等^[12]针对桥梁检测记录、画图费时的问题,提出了三维深度学习模式;根据点云数据,采用了点网(PointNet)、点卷积神经网络(PointCNN)、动态图形卷积神经网络(Dynamic Graph Convolutional Neural Network, DGCNN)3种模型分别对桥梁构件进行分类和损伤定位,3种模型交叉验证。

Hasan 等^[13]介绍到美国在 2018 年大约有 9%的病害桥梁,加固费用需要 1 230 亿美元。桥面系直接承受荷载以及自然作用,容易损坏,桥面系维修费用占比最大。由于桥面系评估的主观性和不严密,受人员因素影响大。除去老化因素外,需要模型化研究出最重要的变量。其采用加州的国家桥梁数据库(National Bridge Inventory, NBI),用 4 个模型进行桥面系统统计回归分析,效果令人满意。

肖鑫^[14]建立了以桥梁病害为基础,基于层次分析法的铁路桥梁分层分级评估体系。该方法以桥梁构件为最小单元,结合其劣化等级划分,采用分层分级评定与 4 类单项指标相结合,分别进行部件、结构部位、全桥状况评定。以一混凝土桥梁为例,计算了当前桥梁结构状况。结果表明,当前桥梁结构状况良好,桥梁结构评估与实际情况相符。

秦宪国等^[15]基于灰色系统理论,提出裂缝宽度非等时距 GM(1,1)预测模型,预测了不同时间的裂缝宽度。对神朔铁路牯牛川桥 1# 桥墩 3# 裂缝宽度在 1996—2012 年的发展进行预测,精度较高。其预测裂缝宽度发展到 0.5~1.5 mm 时,采用壁可法修补。

程平等^[16]基于模糊理论,采用隶属函数反映监测数据的评价模糊性,提出了铁路桥梁综合状态评定的模糊综合评判方法。与简单阈值预警相比,受个别数据波动影响更小,更能反映桥梁整体情况。结合某铁路(48.75 m+80 m+48.70 m)混凝土连续梁桥的健康监测与日常巡检数据,上部结构评为 D 级,下部结构评为 C 级,附属结构评为 D 级,全桥综合评分等级为 D 级。

Honfi 等^[17]为避免单一的确定性决策,基于 Bayesian 估计,提出了多个水准的技术状况评估,以指导桥梁养护决策。

Dang 等^[18]采用了数字孪生模型对老龄化的预应力混凝土梁桥进行技术状况评估。同时采用 3 个模型:数字孪生模型(digital twin model, DTM)、现实孪生模型(reality twin model, RTM)、力学孪生模型(mechanical twin model, MTM)。数字孪生模型采用 BIM;现实孪生模型采用三维扫描数据,并考虑全寿命周期的损伤;力学孪生模型根据实际桥梁状况修正 BIM。

周阿伟^[19]以厦门市同安区国道 G324 线双溪大桥为例,介绍了病害快速检测技术。采用多功能道路检测车检测了

桥面铺装病害;探地雷达检测空心板梁的厚度及混凝土内部缺陷;多点动态位移检测仪检测空心板梁铰缝状况;动态裂缝检测仪检测某一时期内的裂缝变化。

Siriwardane^[20]对钢桁架桥剩余疲劳寿命评估进行了研究,重点在桥梁的关键构件和连接,根据现场检查、材料试验、有限元分析和静动载试验结果,确定应力历史,修正疲劳计算模型,然后制定了构件替换计划。

Reitsem 等^[21]提出以后将采用智慧桥梁替换既有桥梁的理念。智慧桥梁将采用高性能水泥基材料(advanced cementitious materials, ACM),结构健康监测(structural health monitoring, SHM),高效率设计(advanced design methods, ADM),快速施工(accelerated bridge construction, ABC)技术。

2 养护策略

卢春房^[22]基于我国高速铁路技术特点,从不间断运营导致维修困难、高密度高速列车影响、桥梁结构服役环境复杂以及维修作业空间受限等方面,总结确保高速铁路桥梁工程使用寿命的难点;梳理我国高速铁路养护维修技术管理体系及其技术标准体系,阐述信息化技术、健康管理系统以及无损检测新技术在我国高速铁路桥梁工程检测中的应用;结合高速铁路桥梁竖向沉降整治技术案例,指出预防式维修是我国高速铁路桥梁工程养护维修的发展趋势。

陈树礼等^[23]介绍了铁路桥梁运营管理养护体制,病害以被动处理为主,养护维修设施缺乏,天窗修时间太短。其重点分析了京沪高铁大胜关长江大桥和郑焦城际铁路郑州黄河大桥两座典型桥梁的运营管理,建议采用现代化管理手段、先进的信息技术、检测技术和数字化技术,通过预防性、数字化管养,实现养护管理的技术升级与管理模式的转变。

白山云等^[24]提出桥梁预防性养护,推迟病害的发生。桥梁在使用寿命达到 75% 时性能下降 40%,如不及时养护,在随后 12% 的使用寿命时间内,性能将再下降 40%。桥梁养护至少必须提前到“使用寿命达到 75%”甚至更早以前,即在还没有出现明显病害之前就进行养护。

王迎军等^[25]通过对桥梁工作者进行问卷调查,以详细了解目前我国桥梁预防性养护所存在的问题,并深入分析了桥梁在实行预防性养护过程中,可能遇到的各种问题以及部分具体的预防性养护内容和养护时机。

纪轩煦等^[26]指出我国预防性养护研究尚处于初级阶段,养护管理信息化标准度不高,智能化严重不足,在役桥梁可靠性评估方面仅有技术状况和承载能力评定两项内容,未完全覆盖安全性、适用性、耐久性的相关内容,与发达国家评估体系相比仍有一定差距,严重制约了我国桥梁基础设施可持续发展。

高楠等^[27]总结了国内外学者在桥梁养护成本预测方面的研究方法,包括线性规划法、单元边际成本模型法、面板数据模型法和回归分析法,归纳了模型的回归方法、过程及结果,介绍了各个模型在实际应用中的优势以及在未来研究过程中还可深入研究的方向,并提出了适用于我国的预测

模型。

齐锡晶等^[28]针对桥梁养护决策效率低、养护资金不足和分配不合理等问题,建立了养护技术数据库以储存养护技术的量化数据,使用基于熵权的理想点(TOPSIS)法和层次分析法(AHP),分别确定了高速公路网络内桥面板养护优先级系数和养护目标的权重,构建以0-1背包问题为基础的多目标决策模型,并将该决策模型应用于辽宁省沈阳市绕城高速公路(G1501)5座桥梁。

黎永福等^[29]分析了高速公路桥梁养护施工作业中存在的安全隐患和车辆行驶安全隐患,建议完善安全施工机制、提升人们安全意识、提升安全驾驶、防止疲劳、提升施工安全性、提升人员专业技能、确保持证上岗,并正确选择和定期保养维修机械设备。

孙娟^[30]建议建立健全以精细化管理为导向的公路桥梁养护管理制度,引入信息化技术,提升公路桥梁精细化养护管理水平,将精细化管理融入公路桥梁设计工作中,借助精细化提高公路桥梁养护管理效果。

朱志远等^[31]指出传统养护工程组织及管理模式存在多等级、多层次、沟通困难、信息传递复杂、数据碎片化、桥梁养管流程不闭合等弊端。桥梁结构信息、检测数据、养护维修数据的内容、格式、类型等不够规范、标准,数据无法交互协同。借鉴先进的动态、精细化管理理念,其进行了公路桥梁养护工程管理系统功能设计,减少人工统计数据的片面性和误差。该系统设计了病害库、项目库、计划库以及决策库。项目库按照滚动方式实施动态调整,每年定期更新。

Arismendi等^[32]针对挪威国家公路局(Norwegian Public Road Administration, NPRA)管理全国18 000座公路桥梁的养护系统存在的周期性检查制定维修计划问题,为防止养护维修延误事故,采用了分段式马尔可夫过程(Piecewise Deterministic Markov Process)涵盖所有的模型假设,蒙特卡洛模拟给出养护方案的概率结果,提出了损伤诊断和养护维修优化方案。

Apriani等^[33]介绍了印度伊尼亚基于澳大利亚规范制定的桥梁管理系统技术状况评估模式,提出采用断裂关键构件(Fracture Critical Member, FCM)方法进行技术状况评估,通过数值计算和现场实测位移,确定桥梁的关键构件,指导维修。

Radovanivić^[34]提出发展基于GIS的黑山共和国桥梁养护管理系统。

Al-Shabbani等^[35]针对养护作业的危险性,在养护作业队伍中引入了安全工具箱谈判。其指定安全红线和作业后的安全知识,对参与者的知识获得、反应进行评估,评估参与者对安全工具箱谈判的态度和反应,以此评估安全工具箱谈判的有效性。

另外,高铁桥梁养护尚在探索,工程师们普遍注意到高铁的重要性、特殊性,存在养护效果不可知的担忧。

3 养护新技术

3.1 信息化监测

杨怀志^[36]针对我国高速铁路桥梁管理养护现状和存在

的问题,提出了应用PHM(Prognostics and Health Management)技术对高速铁路大型桥梁进行服役状态管理。高速铁路大型桥梁PHM系统依托于3S网络架构和BIM(Building Information Modeling)模型,应用先进传感技术对车-线-桥-环境开展一体化实时监测,并通过智能巡检进行桥梁病害定位统计与桥梁服役状态评估。其利用数据融合技术对多源数据开展历史趋势分析与相关性研究,进行故障诊断与预测,以实现高速铁路桥梁RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety)管理。

夏洪峰等^[37]设计了天兴洲长江大桥信息化管养平台,借助现代信息化技术,将多源数据融合,分析挖掘数据特征,建立结构预警体系,实现结构状态评价,指导桥梁实际管理养护。平台包括结构自动检测子系统、异物入侵监测子系统、电子化巡检子系统、存储管理子系统、预警评估子系统及用户界面子系统。异物入侵监测通过视频摄像机及图像识别技术实现。

蒋勉等^[38]提出了结合视觉测振与频响函数的梁类结构裂纹定位方法,搭建了机器视觉测振系统,并通过与基于激光位移传感器的测量结果精度对比,进行验证。其利用视觉测振系统测量得到的激励输入和多位置点振动信号,估计频率响应函数,描述激励点到各位置点之间的振动传递特性。基于裂纹产生前、后频响函数的变化,定义裂纹位置识别指数向量,通过辨识向量中分量最大值位置实现裂纹定位。在悬臂梁测振试验模型中设置不同的裂纹深度、不同的激励频率和不同的裂纹位置,对该裂纹定位方法的效果进行实验验证。

蒋勉等^[39]提出了基于振动信号S变换和互信息值实现梁类结构裂纹的识别与定位。获得梁类结构上分布点的振动信号;利用S变换将振动信号变换到时频域,计算梁结构在裂纹损伤前、后各对应位置点的时频域振动信号的互信息值;通过检索互信息值向量中分量的最小值位置,实现裂纹的准确定位;为了避免引入附加质量的影响,利用机器视觉测振系统采集悬臂梁和小型复合材料叶片上的分布点振动信号;设置不同裂纹位置,对梁类结构裂纹定位方法进行了验证。

马赞等^[40]设计了以云平台为基础、以移动设备为终端的桥梁巡检系统。该系统基于任务驱动模式,能够专业、规范、便捷和高效地实现桥梁经常检查,实现桥梁养护的精细化管理。

黎振源等^[41]为解决传统桥梁检查工作暴露出来的工作效率低、巡检难落实、质量难保证、数据难回溯的问题,考虑到微信小程序相较于传统APP开发具有明显优势,设计了一套基于微信小程序的桥梁巡查工具,并引入人工智能技术辅助桥梁检查。桥梁巡查工具与桥梁管理系统实现数据实时同步,将信息化手段与实际的桥梁养护工作相结合。该软件具有桥梁基础数据查询、检查数据采集、数据统计、地理信息、养护工作流程、桥梁二维码、AI试验室等功能模块。养护人员通过桥梁巡查工具可实现无纸化办公,督促有关人员到位检查。通过手机即可完成桥梁检查工作,实时查询该座桥

梁运营期间的基础信息、结构数据、病害数据、巡检情况、技术状况等,并将现场检查记录实时同步至桥梁管理系统中。桥梁巡查工具还提供语音识别、图像识别、语义判断、字典加速输入等多种快速录入方式,可加快检查数据现场采集速度,将病害记录的时间从原来手写至少需要 3 min 缩短至 10 s。

韩坤林^[42]制定了精确到构件级的分级编码结构和分类代码,基于二维码应用,设计了桥梁构件智能信息标签,采用 APP 扫描信息标签的方式对桥梁构件进行识别,初步建立了一套适用于桥梁构件养护编码与快速识别方法。

郑晨^[43]针对传统检测数据以表格方式录入、以文字描述为主、过于抽象、非专业用户难以理解的问题,借助于图形化手段,采用了数据可视化技术实现桥梁综合数据分析。数据可视化分析工具采用 Microsoft 公司的 Power BI,该工具可以使上百个数据实现可视化效果,内置 AI 功能,紧密与 Excel 集成。相较于 python,Power BI 不需要通过编程来实现。通过 Power Query 对 Excel 表格数据进行必要的清洗,使其能够导入 Power BI 进行数据分析。检测数据成为信息活化的数据资产,检测、设计、运营、养护等业务单位能够协同工作。

张宏伟等^[44]采用线性多叉树编码的 HBase 分布式数据库,对管理养护信息和监测数据进行分布式存储,解决了区域化桥梁管理养护信息存储效率低、查找速度慢等问题,有效提高了桥梁养护管理信息的存储和查询效率。

3.2 BIM

BIM 模型可进行三维可视化展示,把桥梁上的所有构件、附属设施、传感器、病害部位及形态等全部显示。BIM 通过不同的颜色展示病害的严重程度,如绿、黄、红。

简容梅^[45]通过对 BIMServer 进行二次开发,以及对 IFC 和 CityGML 进行数据标准扩展进行 BIM+GIS 技术融合,优化了桥梁信息表达方法,制定了评估决策机制,生成了桥梁养护方案。设计了基于 BIM+GIS 的桥梁管养系统,以实现桥梁管养自动化、信息化、可视化和精细化。

许威等^[46]利用 BIM 技术开发了桥梁养护监测平台,设计传感器部署与数据采集、数据传输与数据处理、信息管理、信息安全评估与预警、监测平台 5 个功能模块。测试结果表明,该平台能够实时采集、统计桥梁各个部位状态信息,生成判断结果和养护指挥命令,可以为桥梁养护监测工作的开展提供可靠性工具。

沈劲松等^[47]以武广客运专线梁家湾大桥为工程背景,结合系杆拱桥特点,搭建系杆拱桥 BIM 模型,实现了结构信息的可视化。在 BIM 模型的基础上,建立大桥运营监测系统平台,达到快速准确了解桥梁实际运营状态的目的。

陆益军等^[48]提出了基于 BIM 技术的桥梁养护管理系统应用成熟度模型和评价体系的主要方法、研究框架和创新之处,为桥梁智能养护系统使用、研发、维护提供了参考。

岳喜娜等^[49]为使桥梁三维可视化,将专家系统与梁式桥参数化建模相结合,设计了梁式桥参数化建模专家系统,包括知识库的分类设计、知识库的数据库表设计、知识表达方

式的选取、组件建模推理机制、全桥建模推理机制以及参数化建模时部件、组件、全桥建模算法,增加了梁桥参数化建模的灵活性及可扩充性。

石会龙等^[50]采用全球唯一标识、面向对象的编程、双缓冲、数据更新等技术和数据通信技术,开发了桥梁养护管理系统 BMS(Bridge Management System)、记录桥梁基本信息的信息库,以及通过桥梁信息系统的 WEB 端配套的手机 APP 端,实现桥梁的巡查。将巡查信息上传到信息系统,在桥梁信息库的基础上实现桥梁自动预警。桥梁信息系统可以对桥梁进行技术状况评定,并给出合理的养护方案。

Dang 等^[51]针对桥梁养护资料记录、使用、评估困难的问题,提出了增强现实技术的 BIM 桥梁养护系统。根据预防性养护策略,将算法内置于可穿戴式检查设备,实时生成技术评估报告和养护方案,并上传桥梁养护系统。该技术试用于韩国的 1 座斜拉桥,效果良好。

3.3 雷达

王翔等^[52]针对高速铁路封闭式运营、桥梁检测安全性及时效性要求较高的特点,认为急需研究发展远离线路外检测的远程非接触测试技术。差分干涉微波雷达具有连续、动态、远距离非接触和全天候、全天时等优点,能对高速铁路桥梁结构参数进行在线监测。在保证铁路正常运营条件下,在线路外对武汉天兴洲长江大桥拉索频率以及铁路层桥面动态挠度进行了监测。雷达对多根拉索的中部动态形变同步进行有效测试,振动信号显著及频率分辨率高,能够提取拉索各阶频谱和桥梁结构整体的模式频率。雷达远距离监测应用效果较好。

戴泉水^[53]针对厦门市某工程预应力混凝土梁式构件相关问题提出,由于装修需要在梁侧打孔以固定螺栓,为了避免冲击钻损伤钢筋和钢绞线,使用钢筋扫描仪进行梁侧腰筋定位,但钢绞线位置超出钢筋扫描仪量程且存在钢筋干扰,使用钢筋扫描仪无法识别定位钢绞线,故使用高频地质雷达探测钢绞线位置。设备采用意大利 IDS 生产的 RIS-K2 型地质雷达,天线选择频率 1 600 MHz 的高频屏蔽天线,波长为 1 cm,探测深度 0.5 m。另外,采用雷达探测预应力管道灌浆密实性已经得到应用,并能指导二次补压浆施工。

3.4 多波束

江淦等^[54]对某黄河特大桥 10 号墩采用了多波束三维图像声呐检测水下基础冲刷,多波束测深侧扫声呐检测河床地形地貌,多波束二维图像声呐检测基础外观。运营 22 年来,10 号墩水下扩大基础迎水面的冲刷最大深度为 1.35 m,背水面的局部淤积最大深度为 0.52 m,符合河流冲刷规律,水下基础状态良好。多波束三维声呐成像技术检测桥梁水下基础,效果较好。

姚文杰等^[55]采用了多波束测深系统实测西堠门大桥桥梁基础水下岸坡地形图。通过三维点云模型的建立,能快速、直观确定水下岸坡的形态、坡度、地势起伏、细部地形特征等信息,判断是否存在冲刷、掏蚀等不利现象,进而对桥梁基础水下岸坡稳定性进行预测。

赵俊^[56]采用多波束测深系统和声学多普勒流速剖面仪

(ADCP)对安庆长江公路大桥水域进行联合监测,对大桥水域地形用 GIS 软件进行冲淤计算,制作桥墩的立体图和大桥区域的水域冲淤变化图,分析了桥墩及附近水下地形与水流的变化。

肖仲凯等^[57]对铜陵长江大桥 3 号桥墩抛护工程进行了监测分析。采用砂垫层+级配碎石层+护面块石层 3 层防护体系,对桥墩附近进行抛护前、后的多波束测深系统三维监测。实测河床抛护厚度大于工程设计抛护厚度,抛护工程量和效果达到抛护加固的设计要求。

中国铁路成都局、西南交通大学等有关单位在 2020 年对某大桥采用多波束测深系统,进行了桩基冲刷深度测试(如图 2 所示)。三维成像清楚显示群桩基础冲刷范围,桩基最长露出 5.24 m,急需整治。上游桥梁施工的废弃混凝土桩头已经冲至该桥,对该桥桩基威胁大。



图 2 某大桥桩基冲刷深度测试结果

3.5 无人机

李丹等^[58]采用能够稳定悬停的无人机,搭载光学摄录和其他检测设备的无人机检测平台,通过惯性导航系统定位,对桥梁病害进行了数据采集、病害识别。

杨扬等^[59]分析了当前无人机桥梁检测技术在桥下定位、复杂环境下巡航能力、避障能力,以及在图像信息扰动下的病害识别能力等方面存在的技术瓶颈问题,建议融合无人机、蛇形机器人、爬壁机器人、水下机器人等多种技术手段,形成多元化桥梁检测系统。

3.6 图像识别

杨晶晶等^[60]基于深度卷积神经网络(CNN)和单步目标识别的 SSD 模型,改进了面向裂纹识别的网络拓扑结构,发展了一种轻量级裂纹图像快速自动识别算法,扩充了模型训练所用的空间分辨率,降低了神经网络拓扑对识别任务图像的压缩要求,使其能够有效捕捉尺度更小的图形细节。在训练样本决断中,其采用了更加适用于裂纹多尺度可分割图形特性的覆盖式重叠率方法。相对于典型多步目标识别方法, faster R-CNN 的图像识别,效率提高了 51.13%,显著降低了模型的硬件需求。

冯毅雄等^[61]提出了一种基于特征与形貌重构的轴件表面缺陷检测方法。其采用工业高速线扫描图像进行预处理,并用改进的阈值迭代算法完成图像分割,通过去除背景、噪点和干扰,提取缺陷图像;建立基于曲线簇包围轮廓的轴件表面缺陷特征模型,结合分割图像各连通域的面积、面积占比、粗短度,训练逻辑回归分类器,对凹坑、裂纹和麻点等轴

件表面典型缺陷进行识别,并结合图像深度信息进行缺陷形貌重构,消除水渍等伪缺陷,提高轴件表面缺陷检测鲁棒性。

李清奇^[62]基于无裂纹图像单类样本的半监督学习方法,设计了基于自编码网络的混凝土裂纹图像识别模型 Crack Net。模型的主干网络由自编码网络 and 对抗网络构成。Crack Net 引入了近邻编码策略。把输入样本的隐向量,用码本中最相近的 k 个隐向量线性编码,编码后的向量经过解码器重构输入。进一步改进为 Crack Net-T 模型,应用 K-Means 聚类算法学习紧凑的码本,引入阈值策略,自动决策输入图像是否进行近邻编码,从而避免无裂纹图像被近邻编码改变在隐空间中的表征。经在公开数据集 CCIC 进行实验,表明 Crack Net-T 性能不仅优于经典的异常检测模型,而且与有监督深度学习模型识别性能相当。

3.7 其他

Morichika 等^[63]针对传统的结构位移反应测试需要采用数个微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)加速度计问题,提出了采用一个 MEMS 加速度计估计钢板梁桥的位移反应。加速度计安装在跨中,采用小波变换进行位移估计。实桥测试表明,与接触式位移计相比,仅有 5% 的误差。

4 认识及展望

1) 确保桥梁不中断行车的病害整治技术,需要进一步研究。

2) 点云数据三维模型逐步应用,非接触式高精度检测技术得到采用,推动了智慧养护研究。

3) 应进行预防性养护,提前预测病害,大大减少后期整治费用。尽快改变被动式整治病害的传统养护模式,如钢桥杆件或节点长期积尘、积水,属于典型的养护不足,必须及时清理,防止锈蚀断裂、疲劳断裂。钢桥的整洁,是所有养护之首。

4) 曲线梁桥新桥设计和病害整治设计必须建立空间板单元或块体单元进行计算,否则曲线梁桥的横向效应、纵向效应计算误差太大。如梁单元模型的支座横向反力计算值与实际值相差甚远,可能导致支座设计选型不当而被破坏。

5) 部分桥梁缺乏公路通行至桥下,病害整治需要的材料等全靠人力搬运,效率低下,费用高。落石灾害的整治更为困难,可结合农村道路修建,通行公路至相关工点。

6) 山区铁路的运营实践表明,简支 T 梁比箱梁抗落石冲击能力差,单片 T 梁容易被砸坏,中断行车。箱梁抗意外荷载能力强,落石冲击后,可能维持运营。在桥梁落石灾害易发地区,附近车站宜备用梁片,以减少运输组织和装运时间。T 梁人行道支架不仅拆卸、重装麻烦,还属于易损构件,增加了养护维修工作量。

参考文献:

- [1] 申新伟. 高铁桥梁的养护维修及存在的问题[J]. 郑铁科技, 2016(2): 44-45.
- [2] 殷涛. 高寒地区铁路桥梁冻害状况分析及其设计探讨

- [C]//第九届桥梁与隧道工程技术论坛论文集. 成都, 2019: 180-186.
- [3] 李瑞. 包神铁路桥梁摇轴支座纠偏施工与养护管理[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017(13): 155-157.
- [4] 李强, 朱力. 运营期轨道交通桥梁支座病害治理方法研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(1): 67-71.
- [5] 许涛. 大同地区高速桥梁病害成因分析及处治[J]. 山西建筑, 2020, 46(19): 136-138.
- [6] 张建勋, 赵谔笛. 曲线桥梁横向爬移病害的加固设计与健康监测[J]. 交通世界, 2020(26): 129-130.
- [7] 李万德. 桥梁养护中超薄磨耗层技术的应用[J]. 科学技术创新, 2020(6): 108-109.
- [8] 吴正安, 曹一山, 张杰. 山区公路桥梁养护通道建养方案研究[J]. 公路, 2020, 65(3): 295-298.
- [9] 唐国林. 桥梁养护中的检查盲区及检查策略研究[J]. 西部交通科技, 2020(7): 121-124.
- [10] 李艳. 川藏铁路桥梁运营维护问题的思考[C]//第九届桥梁与隧道工程技术论坛论文集. 成都, 2019: 247-254.
- [11] 杨洋, 何飞, 李洁. 公路桥梁病害分类与编码构建方法[J]. 北方交通, 2020(11): 28-31, 36.
- [12] KIM H, KIM C. Deep-learning-based classification of point clouds for bridge inspection [J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3757.
- [13] HASAN S, ELWAKIL E. National bridge inventory data-based stochastic modeling for deck condition rating of prestressed concrete bridges [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2020, 25(3): 04020022.
- [14] 肖鑫. 基于层次分析法的铁路桥梁技术状况评估[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 46-50.
- [15] 秦宪国, 马红奎. 基于灰色模型的铁路桥梁裂缝劣化预测研究及应用[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(2): 127-129, 134.
- [16] 程平均, 胡楠, 姚永丁, 等. 基于模糊理论的铁路连续梁桥综合状态评定方法[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(1): 171-175.
- [17] HONFI D, BJÖRNSSON I, IVANOV O L, et al. Informed successive condition assessments in bridge maintenance [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, 10(4): 729-737.
- [18] DANG N, SHIM C. Bridge assessment for PSC girder bridge using digital twins model[M]//Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019: 1241-1246.
- [19] 周阿伟. 桥梁早期重点病害的成因及快速检测技术[J]. 工程技术研究, 2019, 4(24): 106-107.
- [20] SIRIWARDANE S C. Sustainable maintenance of steel truss bridges: A conceptual framework[M]//Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019: 499-509.
- [21] REITSEMA A D, LUKOVIĆ M, GRÜNEWALD S, et al. Future infrastructural replacement through the smart bridge concept [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(2): 405.
- [22] 卢春房. 高速铁路桥隧工程养修模式与关键技术[J]. 中国铁路, 2017(7): 1-8.
- [23] 陈树礼, 赵维刚, 严斌. 大型铁路桥梁运管现状分析及对策研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(4): 53-57, 58.
- [24] 白山云, 陈开利. 大跨径斜拉桥的预防性养护[J]. 中国公路, 2015(21): 96-101.
- [25] 王迎军, 李鹏飞, 张佳念. 公路桥梁预防性养护调查分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(9): 216-218.
- [26] 纪轩煦, 徐剑. 关于桥梁养护管理和安全状态评估的思考[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(10): 262-263.
- [27] 高楠, 邱晨阳, 史小丽. 国内外桥梁养护成本预测方法研究现状[C]//中国公路学会养护与管理分会第十届学术年会论文集. 深圳, 2020: 332-341.
- [28] 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.
- [29] 黎永福, 何小龙. 高速公路桥梁养护施工中安全隐患及措施研究[J]. 中国新技术新产品, 2019(24): 138-139.
- [30] 孙娴. 公路桥梁精细化管理研究[J]. 价值工程, 2020, 39(19): 66-67.
- [31] 朱志远, 王福星, 尹新刚. 基于动态、精细化管理方式的桥梁养护工程管理系统功能设计[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(8): 131-132.
- [32] ARISMENDI R, BARROS A, AHMADI A, et al. Prognostics and maintenance optimization in bridge management [C]//Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL). September 22-26, 2019. Singapore: Research Publishing Services, 2019: 653-660.
- [33] APRIANI W, MEGASARI S W. The comparison of condition evaluation of Siak II steel frame bridge between the FCM method and the bridge management system [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 469: 012049.
- [34] RADOVANIVIĆ Ž. Framework for bridge management system in Montenegro[M]//Trends and Innovations in Information Systems and Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2020: 528-538.
- [35] AL-SHABBANI Z, STURGILL R, DADI G. Evaluating the effectiveness of toolbox talks on safety awareness among highway maintenance crews [C]//

- Construction Research Congress 2020. Tempe, Arizona. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020: 213-221.
- [36] 杨怀志. 高速铁路大型桥梁养护维修 PHM 系统应用初探[J]. 铁道建筑, 2017(6): 12-16, 35.
- [37] 夏洪峰, 刘兴旺, 赵大成. 大跨铁路桥梁信息化管养平台设计研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(23): 192-194.
- [38] 蒋勉, 邝应炜, 王宇华, 等. 结合视觉测振与频响函数的梁裂纹定位方法[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(4): 73-79, 131.
- [39] 蒋勉, 张文安, 伍济钢, 等. 基于 S 变换和互信息的梁类结构裂纹定位方法[J]. 振动测试与诊断, 2020, 40(6): 1128-1134, 1232, 1233.
- [40] 马赞, 于品德, 刘海宽, 等. 公路桥梁检查中存在的问题与巡检系统设计[J]. 河南科技, 2020(14): 91-93.
- [41] 黎振源, 吴秀松, 李瑞焕. 基于微信小程序的桥梁巡查工具设计[J]. 交通世界, 2020(14): 12-13, 16.
- [42] 韩坤林. 桥梁构件养护编码与快速识别方法[J]. 公路交通技术, 2020, 36(1): 95-100.
- [43] 郑晨. 基于数据可视化技术实现桥梁综合数据分析[J]. 山东交通科技, 2020(4): 113-115.
- [44] 张宏伟, 王婧, 冀鹏举, 等. 分布式环境下的桥梁管理养护信息存储策略[J]. 交通世界, 2020(8): 30-31.
- [45] 简容梅. 基于 BIM+GIS 的桥梁管养系统设计[J]. 微型电脑应用, 2020, 36(2): 67-70, 78.
- [46] 许威, 刘洋. 基于 BIM 的桥梁养护监测研究[J]. 四川水泥, 2020(1): 43-44.
- [47] 沈劲松, 陈令康, 鞠晓臣, 等. 基于 BIM 技术的高速铁路系杆拱桥运营监测系统研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(9): 23-26.
- [48] 陆益军, 王晓妮, 孙茜. 基于 BIM 技术的桥梁养护管理系统应用成熟度分析[J]. 福建建材, 2020(3): 1-3.
- [49] 岳喜娜, 吴学毅, 吕明珠. 梁式桥参数化建模专家系统[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(2): 58-67.
- [50] 石会龙, 王杰. 内蒙古地区桥梁养护信息化管理系统研发[J]. 内蒙古公路与运输, 2020(2): 47-50, 53.
- [51] DANG N, SHIM C. BIM-based innovative bridge maintenance system using augmented reality technology [M]//Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019: 1217-1222.
- [52] 王翔, 汪正兴. 高速铁路桥梁雷达非接触测试技术研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(1): 50-54, 84.
- [53] 戴泉水. 基于地质雷达法的钢绞线定位模拟分析与应用[J]. 福建建筑, 2021(1): 101-104.
- [54] 江淦, 吕宏奎, 孙连峰, 等. 某黄河特大桥 10 号墩水下基础检测技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(1): 88-94.
- [55] 姚文杰, 王华俊, 马玉全. 多波束测深系统在跨海大桥桥梁基础水下岸坡稳定性检测中的应用[J]. 土工基础, 2020, 34(6): 750-752, 756.
- [56] 赵俊. 长江大桥桥墩水域监测和分析[J]. 海洋测绘, 2020, 40(6): 74-77.
- [57] 肖仲凯, 杨剑, 郭凯. 安徽铜陵长江大桥 3 号桥墩抛护工程监测分析[J]. 水利水电快报, 2018, 39(10): 42-45.
- [58] 李丹, 王威. 无人机检测系统在桥梁检测中的应用[J]. 交通世界, 2020(17): 6-7, 10.
- [59] 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.
- [60] 杨晶晶, 李鸿宇, 王子睿, 等. 基于单步目标识别架构的轻量级裂纹图像自动识别算法[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(5): 648-653.
- [61] 冯毅雄, 李康杰, 高一聪, 等. 基于特征与形貌重构的轴件表面缺陷检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(3): 427-434.
- [62] 李清奇. 一种基于自编码的混凝土裂纹识别方法[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(2): 98-104.
- [63] MORICHKA S, SEKIYA H, ZHU Y J, et al. Estimation of displacement response in steel plate girder bridge using a single MEMS accelerometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 8204-8208.

(编辑 袁虹)