

# 跨海大桥混凝土服役挑战及检测方法综述

王 鹏<sup>1,✉</sup>,徐时贤<sup>1</sup>,李国红<sup>2</sup>,刘娟红<sup>3</sup>,刘 嘉<sup>1</sup>,魏绍斌<sup>1</sup>,陆 峰<sup>1</sup>,戴圣龙<sup>1</sup>

1 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095

2 港珠澳大桥管理局,广东 珠海 519060

3 北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083

跨海大桥除了承受车辆荷载、风荷载以及潜在的船舶撞击等,还面临潮汐、海浪、海上盐雾、氯盐、硫酸盐等复杂环境的侵蚀风险,服役环境恶劣。作为跨海大桥的主要建造材料——钢筋混凝土,其耐久性直接影响大桥的服役寿命。本文对跨海大桥混凝土服役挑战及检测方法进行了综述,阐述了近 40 年来跨海大桥的发展、混凝土的服役现状、跨海大桥混凝土常见损伤类型及成因分析;分析了在海洋环境下影响混凝土耐久性的因素并归纳了跨海大桥桥墩基础受力损伤的类型。根据跨海大桥不同部位混凝土的劣化原因和检测难点,对现阶段跨海大桥混凝土的检测技术进行总结;分析以水下成像、多波束测探、三维成像声呐、声波、雷达、无人机、基于动力响应和动态实时检测技术等为代表的检测手段在跨海大桥混凝土检测方面的技术路线和优缺点,并总结了未来跨海大桥在检测和运维过程中的发展方向。

关键词 跨海大桥 混凝土 腐蚀 智能检测

中图分类号:TU528 文献标识码:A

## Service Challenges and Detection Methods of Sea-crossing Bridge Concrete

WANG Peng<sup>1,✉</sup>, XU Shixian<sup>1</sup>, LI Guohong<sup>2</sup>, LIU Juanhong<sup>3</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, WEI Shaobin<sup>1</sup>, LU Feng<sup>1</sup>, DAI Shenglong<sup>1</sup>

1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

2 Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai 519060, Guangdong, China

3 School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

In addition to bearing vehicle load, wind load and potential ship collision, the sea-crossing bridges also face the risk of erosion under the complex environment of tide, waves, sea salt fog, chlorine salt, sulfate and so on, and the service environment is harsh. The durability of reinforced concrete, which is the main construction material of the bridge, directly affects the service life of the sea-crossing bridges. At present, the corrosion for reinforced concrete of sea-crossing bridges affects their service safety seriously. In this paper, the current situation and detection methods of concrete service of sea-crossing bridges were reviewed, and the development of sea-crossing bridges, the service status of concrete, and the common types and causes of damage to sea-crossing bridge concrete were elaborated in the past 40 years. The factors affecting durability of concrete in Marine environment and the types of stress damage of pier foundation of sea-crossing bridges were analyzed. And according to the difference of the bridge concrete deterioration reasons and detection difficulties, the present stage of sea-crossing bridges concrete detection technology was summarized. The technical routes and advantages and disadvantages of these detection methods represented by underwater imaging, multi-beam sounding, 3D imaging sonar, sound wave, radar, UAVs, dynamic response and real-time monitoring in the concrete detection of sea-crossing bridges were analyzed and the development direction and key ideas for detection and operation of sea-crossing bridges in the future were concluded.

Key words sea-crossing bridge, concrete, corrosion, intelligent detection

## 0 引言

截至 2020 年底,我国特大桥梁总数为 6 444 座,累计公路桥梁总数超过 91.28 万座,总里程达 6 628.55 万延米。“十三五”期间,我国桥梁建设更是创下多个世界第一的纪录,全球十大跨海大桥我国占据五座。鉴于桥梁在交通领域具有特殊纽带作用,《城市桥梁设计规范》(CJJ11—2011)规范规定:中型桥梁和大型桥梁的设计寿命分别为 50 年和 100 年。对于跨海大桥,因造价高,施工难度大,社会关注度极高,对其服役安全的要求远高于普通内河桥梁,其中杭州湾跨海大桥和青岛胶州湾跨海大桥的设计使用年限均达到 100 年,港珠澳大桥的设计使用年限更是达到 120 年。

跨海大桥大多面临复杂严酷的服役环境,除了要承受车辆荷载、风荷载以及潜在的船舶撞击等<sup>[1]</sup>,还要面临潮汐、海浪、海上盐雾、氯盐、硫酸盐等复杂环境下的侵蚀风险。目前,跨海大桥钢筋混凝土受腐蚀而影响其安全服役等问题相当突出。“二战”结束后,西方国家大规模建设的海上设施建

成后仅约 20 年,大部分已出现损坏<sup>[2-4]</sup>。20 世纪 80 年代,全球每年与海工混凝土相关的修复费用高达 2 500 亿美元<sup>[5]</sup>,现如今总额更是达到 6 000 亿~12 000 亿美元。我国跨海大桥每年因腐蚀造成的直接经济损失可达 5 000 亿元,仅钢筋锈蚀造成的混凝土结构损坏就达到 1 000 亿元<sup>[2]</sup>。严苛的服役环境和昂贵的维修费用是对跨海大桥混凝土材料的巨大考验。鉴于这些问题,我国近十几年建造的杭州湾跨海大桥、港珠澳大桥在混凝土耐久性方面采取了相应的对策,提出了限定 Cl<sup>-</sup>扩散系数和设置合理的保护层厚度等措施。

近年来,结构健康监测 (Structural health monitoring, SHM) 被认为是一种很有前景的基础设施服役状态评估方案<sup>[6-7]</sup>。SHM 通常包括三个主要步骤,即利用传感器采集的信息对结构进行实时检测、提取损伤特征、分析损伤特征来评估被监测结构的状态<sup>[8]</sup>。随着大型桥梁建设的快速发展,越来越多的桥梁积极引入 SHM 系统<sup>[9-10]</sup>。集成的 SHM 系统通过对桥梁工作状态进行持续检测和评估,改进了桥梁的维护、管理和决策过程。随着信息技术的迅猛发展,桥梁 SHM

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB1600700)

This work was financially supported by the National Key Research and Development Project of China (2019YFB1600700).

E-mail sduwps@163.com

22060300-1

技术有望向远程监控和过程自动化方向发展<sup>[11-12]</sup>。智能传感技术能够准确获取被检测对象的状态信息,是桥梁 SHM 系统不可或缺的一部分,光纤传感器、压电传感器、全球导航卫星系统和磁致伸缩传感器四类传感技术得到广泛使用<sup>[13]</sup>。此外,无线传感也被运用于桥梁 SHM,其安装可分为表面安装及内部嵌入<sup>[14-15]</sup>。竣工后安装时,无线传感器及其对应的发射机安装在桥梁结构表面。对于正在建设的桥梁,传感器及其相应的变送器可以在桥梁施工完成之前集成到内部结构中,以消除对桥梁完整性的影响<sup>[16]</sup>。此外,非接触式传感器已被提出用于桥梁 SHM 系统。例如,激光多普勒振动计、热传感器、干涉仪雷达系统、全球定位系统(GPS)传感器和视频录制设备等<sup>[17-21]</sup>。当地震、飓风、洪水、火灾、海啸和爆炸等极端事件发生后,需要对桥梁结构的全局状况进行快速评估时,非接触的 SHM 则可以作为评估受损桥梁的有力工具。

本文阐述了跨海大桥混凝土的服役挑战和劣化机理,针对跨海大桥不同部位混凝土的劣化原因和检测难点,对现阶段跨海大桥混凝土的检测技术进行总结。分析了以水下成像、多波束测探、三维成像声呐、声波技术、雷达、动力响应和动态实时检测等为代表的检测手段在跨海大桥混凝土检测方面的技术路线和优缺点,并总结了未来跨海大桥在检测和运维过程中的发展方向和关键思路。

## 1 跨海大桥混凝土的服役挑战

近 40 年我国跨海大桥总数量已经超过 20 余座<sup>[22]</sup>,跨海大桥的建设难度也在不断增加,随之而来的服役安全问题也面临较大考验。跨海大桥损伤破坏成因主要有两类:一类是钢筋混凝土结构受环境的影响而引发的耐久性损伤,如盐类或者微生物造成的钢筋腐蚀和混凝土剥落;另一类是受力损伤,如船舶撞击<sup>[23-24]</sup>、风浪冲击、地震等因素,造成结构受力过大,导致混凝土开裂以及局部破损和内部损伤,使得承载力迅速降低,相关挑战如图 1 所示。



图 1 桥梁 SHM 系统的若干挑战<sup>[13]</sup>

Fig.1 Several challenges in bridge SHM<sup>[13]</sup>

### 1.1 耐久性损伤

Mehta 等<sup>[25]</sup>提出,混凝土耐久性的影响因素按照重要性划分依次为:钢筋锈蚀、冻融循环、侵蚀破坏等物理化学作用。跨海大桥混凝土发生破坏的主要因素包括混凝土化学

腐蚀(如氯盐和硫酸盐腐蚀)、中性化腐蚀、冻融循环破坏等。

(1) 化学腐蚀。海工钢筋混凝土结构面临的首要问题就是  $\text{Cl}^-$  引起的钢筋锈蚀,由于海洋环境的特殊性,  $\text{Cl}^-$  对桥梁混凝土的侵蚀作用更为明显。跨海大桥水面以下部分的损坏,通常是由  $\text{Cl}^-$  在混凝土中迁移导致钢筋锈蚀造成的。海洋环境中,海水、海风、盐雾等均可携带  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  通过在混凝土表面富集,形成混凝土表面和内部  $\text{Cl}^-$  的浓度差<sup>[26-27]</sup>。 $\text{Cl}^-$  是钢筋钝化膜破坏最主要的因素,钢筋锈蚀造成混凝土剥落,威胁到设施的服役安全。同时,  $\text{Cl}^-$  容易在钢筋表面富集,在有氧气和水分的情况下与钢筋产生电化学腐蚀,多为孔蚀状,且短期腐蚀状况明显。 $\text{Cl}^-$  可以与混凝土中的物质反应生成含有大量结晶水的  $\text{CaCl}_2$ ,造成混凝土开裂膨胀。大气区混凝土的  $\text{Cl}^-$  浓度基本在 0.4% 以下(以混凝土质量计),浪溅区和水位变动区的  $\text{Cl}^-$  浓度可达 0.6% ~ 0.9%,钢筋锈蚀的危险性与  $\text{Cl}^-$  浓度呈正相关<sup>[28]</sup>。微生物腐蚀一般发生在潮差区,主要通过微生物附着对跨海大桥桥墩混凝土产生腐蚀作用。硫酸盐还原菌广泛分布于几乎所有海域,硫酸盐还原菌产生的  $\text{H}_2\text{S}$  气体是造成钢筋腐蚀的主要原因<sup>[29-31]</sup>。此外,海水中含有的泥沙会对混凝土表面反复摩擦,随着水流冲击时间的延长,跨海大桥海底桩基埋深变浅,桥墩和基础部分混凝土保护层厚度逐渐减小<sup>[32]</sup>。

(2) 中性化腐蚀。水泥水化生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,造成混凝土内部呈碱性,在钢筋表面产生了一层稳定的钝化膜。一定湿度环境下,空气中的  $\text{CO}_2$  会与混凝土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成  $\text{CaCO}_3$ ,降低了混凝土内部的 pH 值,使钝化膜处于不稳定状态<sup>[33-35]</sup>,环境中的氧气和水会通过混凝土的微裂缝进入钢筋表面,使钢筋生锈,造成混凝土膨胀开裂。

(3) 冻融循环破坏。冻融循环破坏与混凝土的多孔特性有关,水分会沿着连通孔隙通过毛细作用进入混凝土内部。温度低于冰点时,水凝结成冰并伴随着体积膨胀,孔隙壁受挤压产生微裂缝。反复冻融循环,会出现裂缝增大、混凝土表层脱落、强度降低等现象,冻融若干个循环后,最终造成混凝土结构的破坏<sup>[36]</sup>,处于浪溅区和水位变动区的跨海大桥桥墩混凝土极易受冻融破坏影响。

### 1.2 受力损伤

跨海大桥受力损伤主要包括:(1)风、浪对桥梁混凝土结构的损伤。文献[37-38]通过对飓风 Katrina 过后桥梁的损毁原因进行调查,认为飓风引起的风荷载及波浪荷载超过桥梁上部的侧向承载力,是桥梁结构损毁的主要原因。

(2) 船舶撞击对桥梁基础的损伤。海上邮轮吨位较大,跨海大桥的主墩一般位于主航道部位,容易造成船舶撞击。船舶撞击会对桥梁基础和桥墩产生严重影响<sup>[39-40]</sup>,甚至倒塌<sup>[41]</sup>。目前,跨海大桥桥墩防撞设计依然存在考虑不足的问题<sup>[42]</sup>。

## 2 跨海大桥混凝土检测技术

### 2.1 桥墩、墩台和基础检测

跨海大桥水下部分主要涉及桥墩、墩台和基础。跨海大桥除了少数采用沉井基础外,其余大部分为钻孔灌注桩。水下结构混凝土的损伤主要来源于两方面:一为海水冲刷、离

子腐蚀和冻融破坏,其表现形式主要为混凝土的剥落和麻面,造成混凝土保护层厚度的减小;另一类为船舶撞击、地震、超载等造成结构受力过大,引起混凝土开裂。该部分由于处于海平面以下,海水涌动携带大量泥沙,且靠近桥墩处易形成急流和漩涡,给传统检测方法(人工探摸、水下成像等)带来极大的不便。目前主要的检测手段包括水下成像、多波束测探和三维成像声呐。

### 2.1.1 水下成像检测

水下成像检测一般以水下机器人(ROV)为载体,检测跨海大桥水下桩基混凝土状态时,首先由 ROV 携带水下摄像机下水,操作人员利用计算机控制好 ROV 下潜的深度和速度,一直调试到合适的摄像机与待检测部位之间的距离。当发现病害时,ROV 立即悬停,并对病害进行详细拍摄,进而提供实时的水下图像。这种直接摄像的检测结果受水下能见度的影响较大,且对不规则检测面的全覆盖检测效果不理想。针对这一问题,研究人员进一步开发了水下声成像、微光成像和激光成像等技术。声成像通过向水介质中发射带有声音信息的声信号,测试声信号遇到障碍物时反射的回波信号,利用声学透镜压缩和会聚声波进而形成窄波束,提升图像信息的清晰程度。并通过声透镜控制角度,调整声纳图像大小<sup>[43]</sup>。海面以下检测过程中,ROV 需要解决精准定位问题,否则无法将检测结果与桥梁实际位置相对应,且不利于意外情况下 ROV 的快速回收。目前,水下定位导航技术包括声学导航(APS)、惯性导航(INS)、视觉导航(Visual navigation)与地球物理导航(Geophysical navigation)。上述几种导航方法各有优势,可结合使用,以提高 ROV 水下导航的准确性和稳定性<sup>[44-46]</sup>。水下成像一般适用于目标位置明确的水下桥墩和基础部位缺陷检测,精准定位是前提,提升图像质量是水下成像检测精度的保证。

### 2.1.2 多波束测探

多波束测探利用发射换能器阵列向水下发射宽扇区覆盖的声波,利用接收换能器阵列对声波进行窄波束接收。通过发射、接收扇区指向的正交性形成对水下地形的照射脚印。通过对脚印的处理,可绘制出高精度、高分辨率的数字成果图<sup>[47]</sup>。多波束测探可用于跨海大桥水下岸坡地形和基础掏蚀情况的检测,相比于单波束测探,多波束可以实现检测范围从点线状扩展到面状,甚至实现立体测图,获得全覆盖的高分辨率扫测精度。多波束测探既可与海洋测绘新技术结合,制作反映水下结构的三维立体模型,直观展示水下工程的全貌<sup>[48]</sup>,又能与侧扫声呐等设备协同作用(见图 2),进一步提高对复杂海面以下物体的检测精度<sup>[49]</sup>。

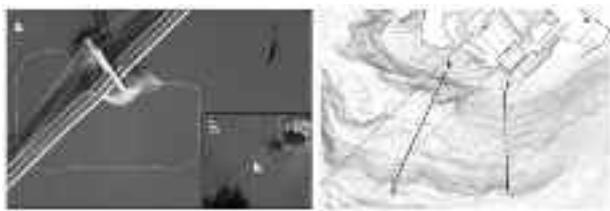


图 2 多波束测探范围及某桥梁基础水下地形图<sup>[49]</sup>

**Fig.2** Multi-beam sounding range and underwater topographic map of a bridge foundation<sup>[49]</sup>

### 2.1.3 三维成像声呐检测

三维成像声呐通过发射固定频率声波波束,在触及目标物后接收到反射声波,从而获得目标物的外形轮廓坐标数据,最后生成点云图像,能够直观准确地识别桩基水下及泥面以上部分的结构病害情况,如图 3、图 4 所示<sup>[50]</sup>。但原始点云图像存在较多的噪点,须通过数据处理才能有效去除噪点。吉同元等<sup>[51]</sup>利用模型试验,对点云原始数据进行大面积噪点人工删减后再经滤波处理,通过现场测试得出三维成像声呐对桥梁桩基水下部分的外观完整性检测效果较好,能够识别桩基混凝土剥落,并进行剥落厚度测量,误差在 3 cm 内。来记桃等<sup>[52]</sup>为了克服复杂的工程边界对检测精度的影响,将实时三维成像声呐扫描普查和光学摄像局部详查相结合,于锦屏二级水电站引水隧洞成功实现了大直径、长引水隧洞表观全覆盖、高精度水下检测。

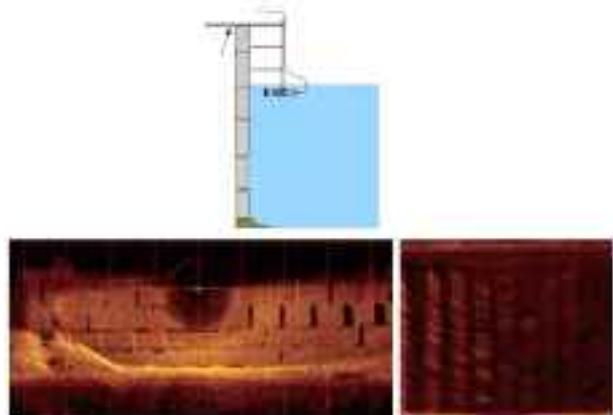


图 3 水下墩墙正对垂直扫描<sup>[50]</sup>

**Fig.3** Vertical scanning of underwater foundations<sup>[50]</sup>

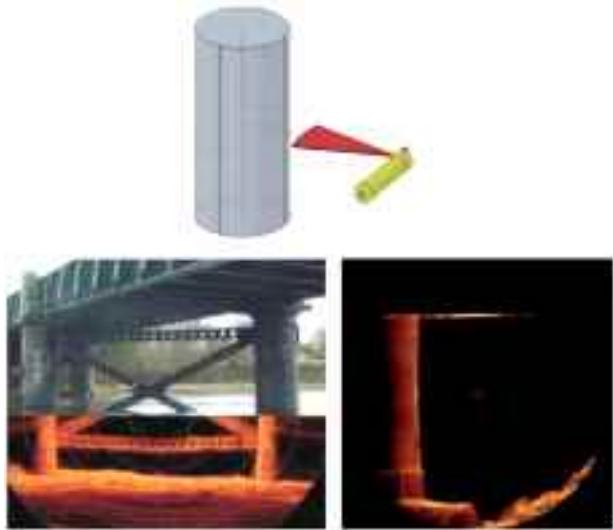


图 4 水下结构横对侧向扫描<sup>[50]</sup>

**Fig.4** Transverse scanning of underwater foundations<sup>[50]</sup>

在对水下桩墩进行检测时,得到的声波图像等可能包含剥落、蜂窝、麻面、裂缝等多类型病害信息。这些信息在获得之前多少受到环境噪声和自噪声等的影响,增加了缺陷识别的难度。同时,对于跨海大桥而言,需要检测的部位多且数据量巨大。然而,由于计算能力和数据分析方法的限制,大量数据中的信息并没有得到很好的解释。文献[10]阐述了

BD 技术和 AI 技术在桥梁自组装中的应用。BD 技术可以分为两类,即计算技术和数据分析方法。将计算技术应用于桥梁 SHM 中,构建面向 BD 的 SHM 框架,可解决计算问题。同时介绍了深度学习在 SHM 中的应用现状,并以 AI 应用为例,分析了用于视觉检测的非结构化数据处理和用于结构损伤检测的时间序列处理。因此,跨海大桥水下部位结构检测需要进一步结合大数据挖掘、深度学习等 AI 技术,优化声呐技术在图像识别与损伤检测中的应用。

## 2.2 桥跨等水上结构检测

海上复杂的风向以及车辆-桥梁系统耦合振动引起的桥体稳定性问题是跨海大桥面临的一大考验<sup>[53-54]</sup>。桥塔、箱梁、桥墩水上部分既要承受车辆和海上横风等荷载作用,也要遭受盐雾等腐蚀破坏,该部位混凝土易产生剥落和开裂。关于桥跨部位混凝土服役状态的检测,常用的设备包括检测车、声波、雷达等,对于特殊部位的检测,也可借助无人机和爬壁机器人。此外,考虑到跨海大桥结构的特殊性,基于动力响应的检测技术和实时动态检测技术也逐渐成为桥梁检测的发展方向。

### 2.2.1 人工外观检测

人工外观监测除了人工巡视之外,一般需要借助桥梁检测车。桥梁检测车主要包括折叠臂式和桁架式两种,能通过升降机和工作平台,方便检测人员对箱梁的隐蔽部位进行检测。桥检车可通过自身装备的各种检测设备,对混凝土强度、钢筋锈蚀程度、混凝土保护层厚度、表观位置缺陷等进行观测。考虑到跨海大桥里程较长,人工外观检测的模式效率低,一般只适用于部分特殊路段的检测。

### 2.2.2 声波检测

声发射(AE)和超声技术(UT),均基于应力波传播原理。AE 能够在相对较少的传感器数量下覆盖广泛的测量区域,UT 可以使用超声波速度作为评价指标来可视化和量化桥体内部损伤。AE 属于被动应力波技术,起源于任何与结构缺陷或损伤相关的活动。当研究桥梁结构的损伤状态时,可以检测到由于损伤发展和演化而产生的声发射信号。在应力变化或载荷无法产生声发射活动的情况下,可以采用 UT 等主动应力波技术来检测内部缺陷。AE 和 UT 技术可以相互补充,实现更有效的结构损伤评估。然而,以前对于这两种方法的应用很大程度上基于经验或定性评价。文献[55]针对混凝土桥面的疲劳损伤,利用弹性波层析成像和 AE 技术,实现了交通荷载作用下混凝土面板疲劳损伤过程的可视化。结果表明,利用稀疏排列的声发射传感器进行测量,提取声发射频率特征,可以对桥面完整性进行全面研究。通过声发射数据的分析,一旦确定了检测的区域,就可以通过超声检测和层析重建程序可视化截面损伤等详细信息<sup>[55]</sup>。

CT 检测属于声波检测的一种,该技术能较好地反映混凝土内部均匀性、密实性和强度分布,可用于箱梁和桥塔混凝土内部缺陷检测。Morgan 等<sup>[56]</sup>首次在混凝土中利用 CT 切片扫描得出孔隙、骨料和砂浆等在混凝土内部的分布形态和规律。之后 CT 扫描的精度持续提高,目前可达纳米级,已被广泛用于混凝土水化进程,内部损伤和盐类侵蚀等微观层面检测。CT 技术前期多集中于混凝土试件尺寸维度的研

究,后期在宏观混凝土设施缺陷检测领域也有广泛的应用,如图 5 所示。CT 检测利用对声波走时和幅值衰减的观测,对所有的激发数据联合进行计算处理,得到穿透混凝土时的声波波速。一般波速越快,混凝土内部越密实。通过对波速和衰减系数进行成像,提取混凝土结构的内部缺陷<sup>[58-60]</sup>。

声波技术具有的最大优点是可以实现无损检测,且检测结果的可重复性较好。但检测过程中对影响检测结果的因素需要进行严格控制,例如测试面的平整度、混凝土结构中钢筋的影响、钢筋混凝土结构的含水状态等均会对测试结果产生影响。消除这些因素的影响,对于提升声波检测技术的精度具有重要意义。

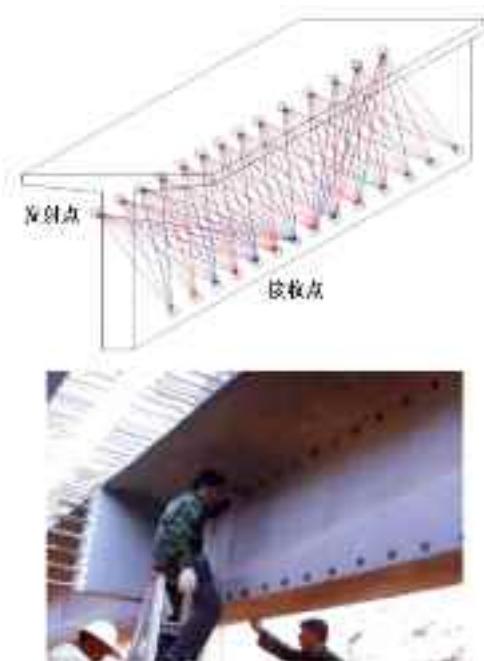


图 5 超声 CT 透射排列图和现场检测安装图<sup>[57]</sup>

**Fig.5** Schematic diagram and field monitoring installation of ultrasonic CT<sup>[57]</sup>

### 2.2.3 雷达检测

雷达检测通过混频本振信号和回波信号,得到固定中频的差频信号,并通过滤波放大和 AD 变换得出数字信号。利用计算机进行数字正交解调,最终得出复数信号,形变量可通过复数信号进行相位差分干涉反演得出<sup>[61-65]</sup>。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术是一种可以在全天候条件下快速获取大面积结构变形的测量技术,有利于解决传统常规人工检测(目测、找平等)和自动传感器检测(加速计、应变计等)在桥梁变形检测中操作效率低、观测次数少和空间采样密度低等缺点<sup>[66]</sup>。基于 InSAR 技术可以探测毫米尺度的变形,在跨海桥梁安全检测中显示出独特的优势。现有的 InSAR 技术仅基于相干指数组提取类点目标(PTs),而忽略了对多个非相干信息的分析以及桥梁的前景-背景散射特性差异,造成跨海桥梁 PTs 密度低、精度低,且没有充分考虑不同结构构件的各种安全变形范围,导致跨海桥梁结构风险识别的误报和漏检率高等缺点。文献[67]提出了一种结构知识-InSAR 集成方法,可用于跨海桥梁高精度变形检测和可靠的风险识别。通过分析 SAR 非相干信息和桥梁结构的前景-背

景散射特性,提高可提取 PTs 的密度,消除不正确的噪声信号。将桥梁结构力学模型与 InSAR 时间序列位移相结合,分析不同桥梁构件的力学性能退化规律,提高了基于 InSAR 的结构风险识别的可靠性。

探地雷达(GPR)是一种特殊类型的超宽带雷达,广泛用于桥面检测<sup>[68-69]</sup>。与其他无损检测技术相比,GPR 在表征腐蚀损伤方面具有良好的前景<sup>[70]</sup>,它通过测量钢筋反射振幅的衰减来量化腐蚀程度<sup>[71-72]</sup>。GPR 利用各种介质的电磁(EM)参数的差异,通过分析传播时间、振幅、波形,可以推断出介质的特征信息(如渗透率、介电常数、电导率)及电磁波回声的频率。对于腐蚀环境的检测,最常用的方法是通过测量钢筋反射振幅的衰减来表征桥面的腐蚀程度<sup>[73-74]</sup>。要实现腐蚀环境的自动检测,必须先完成自动拾取钢筋。文献[75]提出了一种基于单弹多箱探测器(SSD)模型的 GPR 数据对桥面腐蚀环境的自动检测方法。该方法可分为三个步骤:数据预处理、自动拾取钢筋、腐蚀环境映射。首先,对 GPR 数据进行预处理,增强 GPR 扫描双曲线特征的对比度;然后由训练好的 SSD 模型自动提取扫描图像中的钢筋。最后,利用深度修正后的钢筋反射幅值生成桥面腐蚀环境等值线图。结果表明,腐蚀环境自动检测方法的准确率可达 98%。该方法也存在一些缺点,例如双曲线过于模糊的钢筋无法定位。因此,虽然 GPR 扫描双曲线模糊程度可以在一定程度上表征腐蚀程度,但双曲线过于模糊的识别需要进一步研究。

#### 2.2.4 无人机和爬壁机器人

针对跨海大桥桥塔、箱梁、桥墩水上部分等难以接触或比较隐蔽的部位,普通检测设备无法触及。无人机(UAVs)和爬壁机器人可以有效解决这一问题同时降低工作事故风险。当无人机或爬壁机器人抵近待检测部位时,通过搭载的相机等设备对待检测部位进行多角度拍摄,并将画面传送至地面接收设备进行储存,以备后期进行分辨处理<sup>[76-78]</sup>。

无人机或爬壁机器人进行跨海大桥桥塔混凝土缺陷检测时,需要解决两个方面的问题:一是预先对相关缺陷进行识别。解决该问题,首先需要进行大量的样本训练,例如对裂缝进行图像识别时,一般需要经历图像增强、图像降噪、图像分割、裂缝特征描述等环节<sup>[79]</sup>。神经网络的发展,加速了图像识别技术的应用<sup>[80-81]</sup>。此外,VGG 网络<sup>[82]</sup>、ResNet 网络<sup>[83]</sup>、DenseNet 网络<sup>[84]</sup>等相继被提出,旨在实现裂缝等缺陷的快速识别。混凝土缺陷识别可进一步结合机器学习<sup>[85]</sup>和支持向量机(SVM)<sup>[86]</sup>等对典型损坏模式进行智能识别,以便更好地解决跨海大桥复杂、隐蔽和高空部位的检测难题<sup>[87]</sup>。二是如何解决缺陷几何尺寸的测量。该问题可通过引入像素比例尺,利用缺陷延伸方向像素点的个数和像素尺寸计算缺陷的大小<sup>[88]</sup>。但当缺陷表面附着和填充结晶盐类物质时,图像识别的结果易受影响,所测缺陷尺寸大于实际缺陷尺寸<sup>[89]</sup>。

目前,各种图像处理技术已经证明了它们比传统统计方法具有更高的效率。但是,由于自然光线不均匀、无人机硬件噪声、路面斑点、无人机抖动等环境干扰,无人机采集到的图像往往比较模糊,对比度较低。在对采集到的图像进行处理时,传统的边缘检测算法如 Canny 算法、Prewitt 算法、Sobel

算法等存在抗噪能力较差、检测精度较低的问题<sup>[90-91]</sup>。 $k$  均值聚类方法是一种无监督学习方法,可利用基于  $k$  均值聚类的方法,通过加权欧氏距离对彩色图像进行快速、准确的分割,以衡量样本之间的相关性<sup>[91]</sup>。但在图像数量较少的情况下,无法从采集到的图像中实现对裂纹的准确识别。文献[92]提出了一种基于裂纹中心点的裂纹检测方法,即裂纹中心点法(CCPM)。该方法能在少量图像的情况下快速准确地识别出采集到的图像裂纹。与传统的边缘检测方法和  $k$  均值聚类方法相比,CCPM 方法具有更好的适应性和鲁棒性。此外,Cha 等<sup>[17]</sup>使用了一种深度学习方法,不仅能从混凝土表面图像中确定裂缝的存在,还能进一步应用边缘检测算法对裂缝进行局部定位,从而估计裂缝宽度。但这种基于深度学习的方法需要大量的图像来训练稳定的人工神经网络模型。

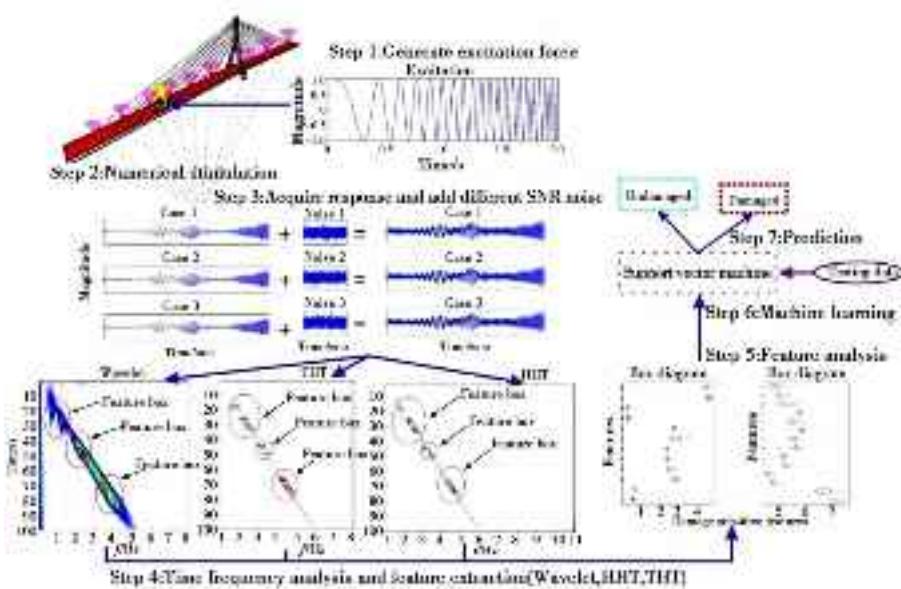
#### 2.2.5 基于动力响应的检测方法

损伤会引起桥跨结构动力特性的变化,可以通过分析其动力响应来感知损伤的发生和位置。在桥梁结构的正常工作期间,通过提取和归档其格式模态,以标准化其健康状态信息。这些健康信息之后可以与结构受损时收集的响应信息进行比较,以便进一步确认和评估后期损伤<sup>[93]</sup>。为了有效检测跨海大桥的异常动力特性,避免灾难性事故,各种传感器被广泛应用于桥梁 SHM。特别是无线传感器网络的使用可以克服传统传感器系统的局限性,以方便 SHM 和检测潜在的损害<sup>[94-97]</sup>。无线传感器具有无线数据传输、高可靠性和易于操作等优点。然而,传感器数据的复杂性和异质性也给 SHM 和损伤检测的大数据分析带来了巨大的挑战<sup>[98]</sup>。

文献[99]等使用支持向量机(SVM)和增强特征提取技术,开发了一个用于显示从大量采集数据到敏感特征提取的数据驱动工作流的框架,原理如图 6 所示。该框架包括数据融合、损伤特征提取与分析、机器学习、损伤检测等七个步骤,可用于大型斜拉桥的快速状态评估。选取小波变换、Hilbert-Huang 变换(HHT)和 Teager-Huang 变换(THT)作为三种具有代表性的特征提取方法,基于核函数的支持向量机用于识别受损和未受损情况。结果表明,数据驱动方法可以有效地绘制桥梁的损伤特征,显著提高了数据分类的有效性和准确性,为斜拉桥现场评估和管理提供了极大的帮助。桥梁连续 SHM 和损伤检测的一个难点是温度变化对测量数据的影响,这可能对振动响应产生比损伤本身更大的影响<sup>[100-102]</sup>。Kostić B 等<sup>[103]</sup>采用基于传感器聚类的时间序列分析方法,结合 ANN 进行温度变化下的损伤检测,得出了基于时间序列的损伤检测算法获得的损伤特征对损伤评估非常有效;但当存在温度变化时,它们会产生假阳性和假阴性现象。因此,应该利用 ANN 对时间序列分析所得的温度效应进行补偿,并利用反向传播算法训练的 ANN 来补偿这些温度效应。结果表明,即使在存在温度变化的情况下,该方法也能成功地利用输出的振动和温度数据确定损伤的存在、位置和相对严重程度。

#### 2.2.6 实时动态检测技术

桥跨结构会受到交通荷载、海风、地震等因素的影响产生动态变形<sup>[104]</sup>。传统方法观测周期长,工作量大,且受检测频率限制,无法跟踪检测点的连续变化。此外,检测点不能

图 6 SHM 和损伤检测数据驱动挖掘过程构架<sup>[99]</sup>Fig.6 Framework of data-driven data mining process for SHM and damage detection<sup>[99]</sup>

严格同步观测,难以将时间异步和环境因素的影响从检测结果中分离出来。目前,国内外许多大跨度桥梁健康检测与诊断系统普遍在桥梁关键部位设置 GNSS 检测点,利用实时动态定位(RTK)技术实现全年连续的三维位移检测<sup>[105]</sup>。RTK 定位精度一般在 1~2 cm,高度精度在 3~5 cm。RTK 模型在实时反映突发密集荷载、台风、地震等桥梁大尺度变形方面具有显著优势。针对跨海大桥的徐变幅值变化较小,传统的常规技术定位精度有限,无法保证大跨径桥梁变形识别和安全检测的准确性。文献[106]提出了一种基于 GPS 和 BDS 观测数据的连续准静态模型来识别和检测大跨度桥梁,结果表明,该方法具有较好的有效性,与现有的 GNSS-RTK 检测模型相比,该模型考虑了大跨度桥梁结构在常规运行下的慢蠕变特征,检测精度可达到毫米级。它的自动数据处理模块可以嵌入现有的桥梁健康检测系统中,作为 GNSS-RTK 系统的有效补充。此外,在获得长期连续准静态检测结果的时间序列后,进一步结合温度、风速和交通荷载的观测数据,建立桥梁关键部位位移与环境因素的数学关联模型,研究其动态变形范围及其发展趋势,为构件疲劳损伤预警检测和桥梁健康状态评估提供数据支持。

### 3 展望

混凝土结构的服役状态对跨海大桥的安全运营至关重要。由于环境和荷载等作用因素的差异,跨海大桥不同结构部位的损伤劣化特征并不一致。因此,跨海大桥安全性检测本质上是极其复杂的系统工程,需要根据桥梁不同部位的服役环境,采用针对性技术进行检测。同时,单一技术不可避免地存在局限性,如何有效协调各项技术的运用,综合分析各项技术反馈的实时数据,对于连续化、动态化检测跨海大桥的安全性至关重要,这也是当下和未来跨海大桥检测需要克服的难点和实现的目标。

### 4 结语

跨海大桥的服役环境对桥梁安全和正常运行提出了巨

大挑战,但也为一些新技术、新设备提供了广阔的应用前景。本文在对跨海大桥混凝土劣化原因进行分析的基础上,针对跨海大桥不同部位的特点,总结了相应的检测技术和手段。认为未来跨海大桥的建设、检测和运维的发展趋势可以归纳为以下三个方面:

(1) 在桥梁设计建造初期,要优化结构设计和原材料配比。所用混凝土在配制过程中,需要优化复合矿物掺合料组成,使用专用水泥。设计过程中,需要增加混凝土保护层的厚度。使用过程中,可通过在混凝土表面刷防护涂料等措施,延缓混凝土的腐蚀。

(2) 加强桥梁的检测,桥梁检测将逐步由人工化转变为智能化。充分利用人工智能、机器学习等先进技术,从以往周期性人工检测转变为常态化智能检测,综合利用各种技术和大数据分析等手段全面评估桥梁的服役状态。

(3) 跨海大桥的运维工作要遵循勤检测-早发现-早处理的原则。尽快发现问题产生的源头,并采取针对性措施,避免病害问题的进一步恶化,达到降本、延寿的目的。

### 参考文献

- 1 姜朝, 孙守旺, 任亚磊. 上海海事大学学报, 2017, 38(3), 36.
- 2 许星鑫. 海工混凝土表面渗透型有机硅防护涂料耐久性研究. 硕士学位论文, 武汉理工大学, 2012.
- 3 曹健. 轴压荷载下干湿循环—硫酸盐侵蚀耦合作用混凝土长期性能. 博士学位论文, 北京交通大学, 2013.
- 4 卢木. 工业建筑, 1997, 27(5), 1.
- 5 焦运攀, 秦明强, 屠柳青, 等. 施工技术, 2011, 40(4), 94.
- 6 Alavi A H, Jiao P, Buttlar W G, et al. Measurement, 2018, 129, 589.
- 7 Jiao P C, Wang J J, Chen X W, et al. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42 (14), 5277.
- 8 Han Z C, Jiao P C, Zhu Z Y. Micromachines, 2021, 12(7), 813.
- 9 Carrión F J, Quintana J A, Crespo S E. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2017, 7(2), 139.
- 10 Sun L M, Shang Z Q, Xia Y, et al. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(5), 4020073.
- 11 Wang N, Chen X M, Song G B, et al. IEEE Transactions on Industrial E-

- electronics, 2016, 64(3), 2382.
- 12 Wang N, Chen X M, Song G B, et al. *International Journal of Online Engineering*, 2015, 11(2), 60.
- 13 He Z, Li W, Salehi H, et al. *Automation in Construction*, 2022, 136, 104168.
- 14 Chen Z, Casciati F. *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, 21(7), 1118.
- 15 Wang D H, Liao W H. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(3), 972.
- 16 Hasni H, Jiao P, Lajnef N, et al. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(6), e2158.
- 17 Cha Y J, Choi W, Büyüköztürk O. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(5), 361.
- 18 Kong X, Li J. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(9), 783.
- 19 Rothberg S J, Allen M S. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 99, 11.
- 20 Yoon H, Elanwar H, Choi H, et al. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(12), 1405.
- 21 Yang Y, Dorn C, Mancini T, et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 85, 567.
- 22 李子蓉, 吴聘奇, 汤建中. 上海经济研究, 2007(9), 76.
- 23 耿波. 桥梁船撞安全评估. 博士学位论文, 同济大学, 2007.
- 24 贺小虎. 中国勘察设计, 2011(9), 34.
- 25 Mehta P K. In: 2nd International Conference on Durability. Montreal, 1991, pp.1.
- 26 杜修力, 金浏, 张仁波. 建筑结构学报, 2016, 37(1), 107.
- 27 姜文镪, 刘清风. 硅酸盐学报, 2020, 48(2), 258.
- 28 施惠生, 王琼. 建筑材料学报, 2004, 7(2), 161.
- 29 Angela B, Ma G, D.Gutierrez P. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(7), 731.
- 30 刘克. 海洋污损生物环境下钢筋混凝土腐蚀行为研究. 硕士学位论文, 中国石油大学(华东), 2019.
- 31 丁汝茜. 海水环境下微生物腐蚀铝酸盐水泥基材料的机制与防护. 硕士学位论文, 石家庄铁道大学, 2018.
- 32 刘吉元, 王振军, 马林, 等. 铁道建筑, 2020, 60(5), 1.
- 33 张君博, 肖薇薇, 陈鹏飞, 等. 混凝土, 2021(11), 58.
- 34 张旭辉, 刘博文, 杨玲, 等. 建筑结构, 2020, 50(24), 110.
- 35 刘明维, 郭庆, 刘耕, 等. 水运工程, 2021, (4), 49.
- 36 杨海涛, 段品佳, 吴瑞东, 等. 材料导报, 2020, 34(16), 16043.
- 37 Okeil A M, El-Tawil S. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9(5), 487.
- 38 Nowak A S, Szerszen M M. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(3), 377.
- 39 张圆, 王惠. 低温建筑技术, 2010, 32(6), 84.
- 40 王君杰, 陈诚, 汪宏, 等. 公路交通技术, 4(2), 66.
- 41 郑华兴. 中国水运(下半月), 2009, 9(8), 36.
- 42 罗浩. 桥梁船撞效应分析方法及其应用研究. 硕士学位论文, 武汉理工大学, 2011.
- 43 张震. 自动化与仪表, 2021, 36(9), 40.
- 44 郭银景, 孔芳, 张曼琳, 等. 导航定位与授时, 2020, 7(5), 107.
- 45 张柏楠, 韩勃, 李宁博, 等. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5), 1245.
- 46 祁翔, 张心光, 邓寅喆, 等. 船舶工程, 2021, 43(5), 111.
- 47 姚文杰, 王华俊, 马玉全. 土工基础, 2020, 34(6), 750.
- 48 沈斌斌. 施工技术, 2020, 49, 596.
- 49 陈超, 祝捍皓, 陈政威, 等. 海洋技术学报, 2020, 39(6), 72.
- 50 骆剑彬, 姜绍飞, 沈圣, 等. 土木工程学报, 2021, 54(7), 90.
- 51 吉同元, 李鹏飞, 张润, 等. 岩土工程学报, 2021, 43(2), 170.
- 52 来记桃. 人民长江, 2020, 51(5), 228.
- 53 刘其卓. 武汉理工大学学报, 2020, 42(10), 43.
- 54 崔圣爱, 刘品, 晏先娇, 等. 铁道学报, 2020, 42(6), 93.
- 55 Shiotani T, Ohtsu H, Momoki S, et al. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(6), 847.
- 56 Morgan I L, Ellinger H, Klinkseik R, et al. *ACI Journal Proceedings*, 1980, 77(1), 23.
- 57 杨江华, 林凤仙, 段继平, 等. 云南大学学报, 2012, 34(S2), 248.
- 58 高远富, 王仲刚, 周凌, 等. 物探化探计算技术, 2015, 37(1), 89.
- 59 王五平, 宋人心, 傅翔, 等. 水利水电技术, 2004, 35(10), 56.
- 60 王战军. 城市道桥与防洪, 2021(7), 305.
- 61 赵永辉, 吴健生, 万明浩. 工程勘察, 2002(1), 64.
- 62 魏超, 肖国强, 王法刚. 工程地球物理学报, 2004, 1(5), 447.
- 63 王翔, 潘中明, 王波. 世界桥梁, 2019, 47(3), 49.
- 64 邵泽龙, 张祥坤, 李迎松, 等. 现代电子技术, 2019, 42(16), 140.
- 65 王鹏, 邢诚, 项霞. 测绘通报, 2019(10), 35.
- 66 Sun L M, Shang Z Q, Xia Y. *China J. Highw. Transp*, 2019, 32(11), 1.
- 67 Qin X, Li Q, Ding X, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103, 102476.
- 68 Dinh K, Zayed T, Romero F, et al. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(6), 4014086.
- 69 Goulias D G, Cafiso S, Di Graziano A, et al. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(5), 4020100.
- 70 Gucunski N, Nazarian S, Imani A, et al. In: Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability. Atlanta, 2014, pp.2436.
- 71 Martino N, Maser K, Birken R, et al. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2016, 27(2), 112.
- 72 Hasan M I, Yazdani N. *Journal of Engineering*, 2016, 2016, 1.
- 73 Tarussov A, Vandry M, De La Haza A. *Construction and Building Materials*, 2013, 38, 1246.
- 74 Dinh K, Gucunski N, Kim J, et al. *NDT & E International*, 2016, 83, 48.
- 75 Zhang Y C, Yi T H, Lin S, et al. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(2), 4022011.
- 76 鲍跃全, 李惠. 土木工程学报, 2019, 52(5), 1.
- 77 Khaloo A, Lattanzi D, Cunningham K, et al. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(1), 124.
- 78 Berthelot M, Nony N, Gugi L, et al. *The Avignon bridge: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, 40(5), 223.
- 79 倪彤元, 张武毅, 杨杨, 等. 城市道桥与防洪, 2019(7), 258.
- 80 廖延娜, 李婉. 计算机工程与设计, 2021, 42(8), 2366.
- 81 王超, 贾贺, 张社荣, 等. 水力发电学报, 2021, 40(3), 134.
- 82 Xu X, Xie M, Miao P, et al. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2019, 27(1), 178.
- 83 Liu S, Tian G, Xu Y. *Neurocomputing*, 2019, 338, 191.
- 84 Lodhi B, Kang J. *Multipath-Dense Net: Information Sciences*, 2019, 482, 63.
- 85 Morgenthal G, Hallermann N, Kersten J, et al. *Automation in Construction*, 2019, 97, 77.
- 86 钟新谷, 彭雄, 沈明燕. 土木工程学报, 2019, 52(4), 52.
- 87 钟继卫, 王波, 王翔, 等. 桥梁建设, 2019, 49(Sup1), 1.
- 88 魏思航, 刘宇飞, 刘家豪. 特种结构, 2020, 37(5), 107.
- 89 李艳伟, 向航, 彭望. 施工技术, 2021, 48(3), 52.
- 90 Nishikawa T, Yoshida J, Sugiyama T, et al. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2012, 27(1), 29.
- 91 Chitade A Z, Katiyar S K. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, 2(10), 5319.
- 92 Lei B, Wang N, Xu P, et al. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 31(5), 4018058.
- 93 Weinstein J C, Sanaye M, Brenner B R. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(11), 4018084.
- 94 Ge R, Pan H, Lin Z, et al. In: 2016 IEEE international conference on electro information technology (EIT). New York, 2016, pp. 547.
- 95 Herrasti Z, Val I, Gabilondo I, et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 247, 604.
- 96 Huang Q, Tang B, Deng L. *Measurement*, 2015, 66, 35.

- 97 Pan H, Ge R, Wang J, et al. *NDE/NDT for Highway and Bridges: Structural Materials Technology*, 2016.
- 98 Gui G, Pan H, Lin Z, et al. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(2), 523.
- 99 Pan H, Azimi M, Yan F, et al. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23 (6), 4018033.
- 100 Koo K Y, Brownjohn J M W, List D I, et al. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(4), 609.
- 101 Cross E J, Koo K Y, Brownjohn J M W, et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 35(1-2), 16.
- 102 Follen C W, Sanaye M, Brenner B R, et al. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(7), 4014022.
- 103 Kostić B, Güll M. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22 (10), 4017065.
- 104 Cunha Á, Caetano E, Magalhães F, et al. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(4), 445.
- 105 Da Silva I A R, da Silva J G S. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2018, 8(4), 585.
- 106 Mao X Y, Jin X, Zhang L. In: 20th COTA International Conference of Transportation. Xi'an, 2020, pp.1650.



王鹏,通信作者,2005年6月、2011年6月分别于山东大学获得理学学士学位和理学博士学位。中国航发北京航空材料研究院副总工程师青年助理、高级工程师。先后发表论文20余篇,译著1部。目前主要研究领域为非金属材料、智能装备、交通基础设施智能运维。