DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.079
开放科学(资源服务)标识码 OSID:

多尺度视角下桥梁损伤检测与服役性能评估研究综述

李泽伟[1a,1b],杨永清[1a,1b],谢明志[1a,1b],黄胜前[1a],郑小刚[2],余华丽[2],邹凌晨[3]
(1.西南交通大学 a.土木工程学院;b.桥梁智能与绿色建造全国重点实验室,成都 610031;
2.四川交大工程检测咨询有限公司,成都 610031;3.中北大学 经济与管理学院,太原 030051)

摘　要:桥梁检测与服役性能评估是保障桥梁安全运营的核心。基于多尺度视角,系统梳理桥梁损伤检测与评估领域的研究进展及未来趋势,并从宏观、中观及亚微观尺度展开探讨。在宏观尺度上,深入剖析桥梁特征检测方法的演变,揭示其向基于车辆响应的快速检测技术转型的趋势;在中观及亚微观尺度上,鉴于桥梁表观损伤的复杂性,现有研究重点聚焦基计算机视觉的识别方法。在服役性能评估方面,归纳了现有桥梁短期状态评估与长期状态预测的方法。综合分析表明,当前桥梁检测技术在识别桥梁损伤特征上已具成效,但未来仍需聚焦基车辆响应的宏观损伤识别与基于计算机视觉的中观及亚微观损伤识别,这两大方向均展现出巨大的应用潜力。未来的研究应进一步优化车-桥耦合响应模型,提升其在不同宏观尺度损伤形式下的适用性;深入研究中观及亚微观损伤图像与桥梁力学特征的映射关系;加强多尺度损伤相关性研究,以提高检测准确性;从工程实际出发,探索更具实用性的桥梁服役性能评估方法。

关键词:桥梁检测;服役性能评估;多尺度损伤;车桥耦合;计算机视觉
中图分类号:U446.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2026)04-0154-16

Multi-scale perspective on bridge damage detection and service performance evaluation research: a review

LI Zewei[1a,1b], *YANG Yongqing*[1a,1b], *XIE Mingzhi*[1a,1b], *HUANG Shengqian*[1a], *ZHENG Xiaogang*[2], *YU Huali*[2], *ZOU Lingchen*[3]
(1a. School of Civil Engineering; 1b. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Sichuan Jiaoda Engineering Testing Consulting Co. Ltd., Chengdu 610031, P. R. China; 3. School of Economic and Management, North University of China, Taiyuan 030051, P. R. China)

Abstract: Bridge inspection and service performance evaluation are critical technologies for ensuring the safe operation of bridges. Utilising a multi-scale perspective, the paper systematically reviews the academic progress

收稿日期:2024-07-12
基金项目:国家自然科学基金(52322811);四川省科技计划(2020YJ0081);四川交大工程检测咨询有限公司科研项目(KYL202305-0143)
作者简介:李泽伟(1998-),男,博士,主要从事桥梁检测及损伤评估研究,E-mail:lizw0616@163.com。
谢明志(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:mzxie@home.swjtu.edu.cn。
Received: 2024-07-12
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52322811); Sichuan Science and Technology Program (No. 2020YJ0081); Scientific Program of Sichuan Jiaoda Engineering Testing Consulting Co., Ltd. (No. KYL202305-0143)
Author brief: LI Zewei (1998-), PhD, main research interests: bridge inspection and damage evaluation, E-mail: lizw0616@163.com.
XIE Mingzhi (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: mzxie@home.swjtu.edu.cn.

and future trends in the field of bridge damage detection and assessment. The research is explored from three different scales: macro, meso, and sub-micro. A thorough analysis of the evolution of bridge feature detection methods is presented at the macro level, illuminating the trend of transformation toward rapid detection technologies based on vehicle responses. At the meso- and sub-micro scales, the complexity of bridge surface damage has resulted in research focusing on recognition methods based on computer vision. In terms of service performance evaluation, the extant methods for short-term bridge condition assessment and long-term condition prediction are summarized. The comprehensive analysis shows that the current bridge inspection technology has been effective in identifying bridge damage features. However, future research should still focus on two directions: macro damage identification based on vehicle response and meso- and sub-micro damage identification based on computer vision. Both directions have shown great application potential. Future research should further optimize vehicle-bridge coupled response models and improve their applicability to different forms of macro-scale damage; Study the mapping relationships between meso- and sub-micro-scale damage images and bridge mechanical characteristics; conduct research on multi-scale damage correlation to improve detection accuracy; and explore more practical evaluation methods for bridge service performance based on engineering practice.

Keywords: bridge inspection; service performance assessment; multi-scale damage; vehicle-bridge coupling; computer vision

在长期服役过程中，桥梁历经交通荷载、温度变化、冻融、电化学和应力腐蚀等作用，遭遇地震、洪水、台风等自然环境作用，材料性能退化，同时桥梁本身不可避免存在设计、施工缺陷和运营维护等问题，这些都会导致桥梁材料及其构造体系发生累积损伤，形成结构抗力损失，对桥梁长期安全性和耐久性造成不利影响。

2020年12月，交通运输部印发的《交通运输部关于进一步提升公路桥梁安全耐久水平的意见》提出，要着力提升公路桥梁预防性管养水平，贯彻全生命周期理念，建立桥梁运营期预防性养护机制，加强桥梁结构健康监测与分级分类处治，推进其数字化、信息化、智能化。桥梁检测是保障桥梁安全运营的重要手段，通过对桥梁整体结构、局部结构以及材料的检测，获取桥梁状态参数、缺损状况、材质状况等关键性指标，并以此评估桥梁的性能状态。桥梁整体结构检测主要聚焦桥梁的几何特征与力学特征，如桥梁的线形与倾斜度[1-2]、桥梁的频率与阻尼比[3-4]等；桥梁局部结构检测重点关注桥梁构件的变形[5]及缺损状况；桥梁的材料检测通常包括钢筋锈胀[6-9]、混凝土碳化检测[10-12]等。近年来，桥梁损伤检测技术加速向快速检测与人工智能方向发展，如基于车辆响应的桥梁模态参数识别技术，基于计算机视觉的桥梁表观损伤检测技术等。此外，桥梁损伤具有多尺度特性，可分为宏观、中观和亚微观3个尺度。学者从单一尺度出发，结合计算力学与人工智能，逐步实现了桥梁检测从“治已病”向“治未病”的转变。由于桥梁损伤的多尺度耦合关系错综复杂，单一尺度损伤检测难以准确反映桥梁的整体健康状况，从而影响维修决策的准确性。从桥梁多尺度损伤耦合关系出发，利用桥梁历史多尺度检测信息进行建模，可以为不同尺度的损伤制定更有针对性的维修加固方案，实现对桥梁状态的精准评估与管理。

笔者从多尺度视角梳理了近年来桥梁检测技术的研究成果及其实践应用。首先，依据桥梁损伤特征的不同，将其分为宏观、中观及亚微观3个尺度，梳理相应尺度的研究现状；随后，从桥梁短期状态评估与长期状态预测两方面对现有基于多尺度检测方法的桥梁评估研究进行综述；最后，总结现有方法的优势与不足，并对桥梁检测与评估方法的未来发展趋势进行分析与展望。

1　桥梁多尺度损伤

桥梁结构的损伤可分为宏观尺度、中观尺度和亚微观尺度3个层次，如图1所示。

宏观尺度的损伤主要针对桥梁的整体结构，通常表现为裂缝、位移、弯曲、变形等整体结构的塑性变形。例如，如果桥梁的主梁出现严重弯曲和扭曲，或者桥墩出现明显倾斜和移位，这些都是宏观尺度的损伤。从力学角度看，宏观尺度的损伤通常涉及桥梁整体的塑性变形和承载能力下降等问题；从结构的角度看，宏观尺度的损伤可能会导致桥梁整体失去平衡和稳定性；从维护角度看，宏观尺度的损伤通常需要采用大规模的修复和加固措施。宏观尺度的损伤可以通过全局位移、挠度、应力和

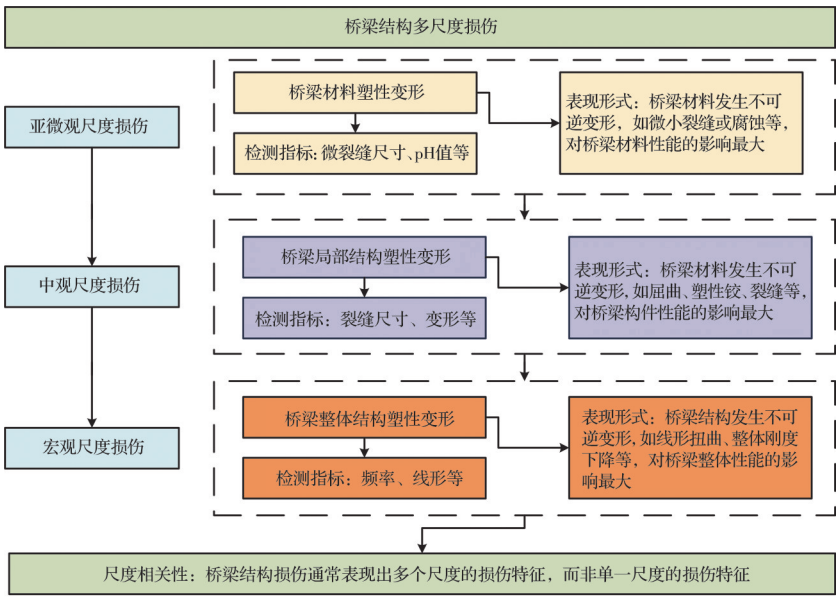


图 1　桥梁多尺度损伤关系

Fig. 1　Multi-scale damage relationships of bridges

应变等指标来测量。例如，可以使用位移传感器、倾斜计、振动传感器等测量设备来监测桥梁的挠度和位移。这些指标可以帮助评估桥梁整体稳定性和承载能力[13-14]。

中观尺度的损伤主要针对桥梁局部结构，通常表现为裂缝、剥落、腐蚀等。例如，桥梁的横梁与腹板出现贯穿裂缝和变形，或者桥面铺装出现龟裂和磨损，这些都是中观尺度的损伤。从力学角度看，中观尺度的损伤通常涉及局部应变集中、裂缝和破坏等问题；从结构角度看，中观尺度的损伤可能会导致局部结构失去稳定性；从维护的角度来看，中观尺度的损伤通常需要局部修复和维护。中观尺度的损伤可以通过表面裂缝、剥落、变形等指标来测量。例如，可以使用高清晰度相机、激光扫描仪等设备来检测桥梁表面的裂缝和剥落以及变形等问题。这些指标可以帮助评估桥梁局部结构的稳定性和可靠性[15-16]。

亚微观尺度的损伤主要针对桥梁材料，通常表现为材料的塑性变形，如微裂缝、疲劳损伤等。桥梁钢材的应力腐蚀与疲劳断裂或者由于钢筋锈胀导致的混凝土裂缝等都属于亚微观尺度的损伤。从力学角度来，亚微观尺度的损伤通常涉及材料内部的变形、裂缝和断裂等问题；从结构角度看，亚微观尺度的损伤可能会导致材料内部的结构破坏和失效；从维护角度看，亚微观尺度的损伤通常需要预防和保养。亚微观尺度的损伤可以通过材料结构的变化和局部裂缝来测量，如使用显微镜、高像素相机来观察材料内部的微观结构与局部裂缝，以评估材料的损伤程度和耐久性。这些指标可以用于预测材料的失效时间和寿命[17-18]。

桥梁检测主要通过捕捉桥梁在各个尺度上的特征变化，进而准确识别其损伤情况。桥梁的多尺度特征具体表现如下：

1)宏观尺度：桥梁的几何特征，如倾斜度、线形等；桥梁的静力特征，如承载力、刚度等；桥梁的动力特征，如固有频率、阻尼、模态振型及频响函数等。

2)中观尺度：桥梁构件的变形、断裂及长裂缝等。

3)亚微观尺度：混凝土局部裂缝、钢筋滑移等。

4)尺度相关性：桥梁的结构损伤不是孤立地存在于某一个尺度，而是表现出多个尺度的损伤特征，如桥梁的裂缝就具有跨尺度特性，其宽度通常小于 1 cm，属于亚微观尺度，但其长度能达到数米，属于宏观尺度。

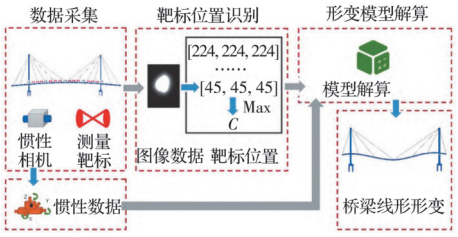
2　宏观尺度下的桥梁损伤识别

宏观尺度下的桥梁损伤识别往往通过对桥梁几何特征与力学特征进行提取，几何特征包括桥梁的线形、倾斜度等；静力特征包括承载力、刚度等；动力特征包括桥梁的频率、阻尼比、模态振型、频响函数等。对比桥梁损伤前后的特征指标，确定损伤位置，进而对桥梁的服役状态进行评估。

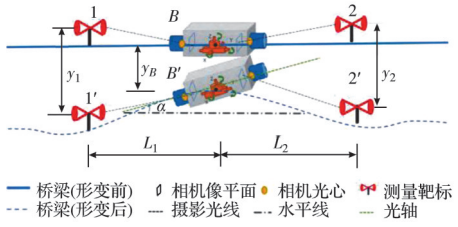
2.1　桥梁几何特征与静力特征的检测

桥梁的线形、倾斜度、承载能力等特征是评估桥梁服役性能的基本信息。何聪等[19]设计了一种高精度倾角测量系统，以满足桥梁健康监测中的桥梁纵断面线形测量需求。石雪飞等[20]通过优化标记点布置方式与无人机航线规划，实现了对桥梁线形的毫米级测量。李清泉等[1]基于惯性相机实现了对桥

梁线形形变的实时测量（图 2）。利用数字图像对结构形态的全场描述能力，楚玺等[2]提出了一种基于桥梁图像边缘特征点的连续线形监测方法。彭晶蓉等[21]、贺拴海等[22]、黄晓彬[23]研究表明，通过荷载试验可以确定测试桥梁的实际受力状况，检验桥梁的设计、施工质量，验证其承载能力。亓兴军等[24]将模态测试技术与静力加卸载试验相结合，快速检测评估了不同损伤状态现役混凝土桥梁的承载能力。de Angelis 等[25]通过荷载试验与动力试验交叉验证了桥梁的承载能力。目前关于桥梁几何特征与静力特征的研究已经能够较为准确地识别桥梁的线形、承载能力等基础信息。



（a）桥梁线形形变实时测量原理图



（b）相机和靶标的变化

图 2　基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变测量方法[1]

Fig. 2　Alignment deformation measurement method of long-span bridge with inertial camera[1]

2.2　桥梁的动力特征识别

在长期服役过程中，桥梁可能会因结构损伤而出现模态参数变化。准确识别桥梁模态参数是结构损伤识别与性能评估的前提。桥梁的模态参数包含频率、阻尼和振型，通常通过桥梁的动力响应测得。然而，桥梁在运营过程中由于受到车流量和环境激励的影响，其动力响应信号往往非平稳，难以满足平稳性假设。针对非平稳信号，经验模态分解法和希尔伯特-黄变换可以有效地将其分解为一系列平稳的本征模态分量，从而提取出桥梁的模态参数。以限制带宽的经验模态分解和随机子空间识别为基础，秦世强等[26]对环境随机激励下某高墩大跨桥梁的频率进行识别。单德山等[3]采用带通滤波和扩展随机减量法对希尔伯特-黄变换进行改进，能够有效地在时域内识别桥梁结构的模态参数而不受模态混叠等现象的影响。Mahato 等[27]将连续小波变换与希尔伯特-黄变换相结合，识别了三跨简支梁桥的频率。

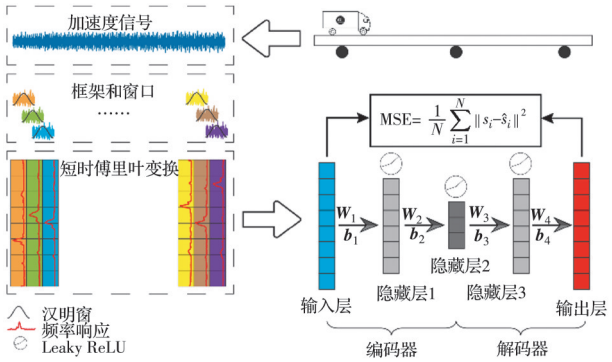
在车桥耦合系统中，车辆响应包含了丰富的桥梁结构信息，可以反演出桥梁的模态参数。Yang 等[28-29]、Lin 等[30]提出了利用车辆响应来识别桥梁基频的方法，无需专用激励设备和大量布置传感器，大幅简化了桥梁检测的难度。Siringoringo 等[31]利用双自由度弹簧质量块模拟车辆，通过实车测试验证了该方法的可行性。结果表明，当车辆以恒定速度行驶时，可以更准确地估计出桥梁的基频。Sitton 等[32]推导了车辆通过两跨连续梁桥时的封闭解，提供了一种从车辆响应中提取连续梁桥频率的方法。Chang 等[33]研究路面粗糙度对通过车辆的响应，间接提取到桥梁频率的影响，发现路面粗糙度会影响结果的准确性。Yang 等[34-35]建立了两车相连的车-桥耦合模型，克服了路面粗糙度的影响，但在实际应用中难以找到参数完全相同的两辆车。Nagayama 等[36]利用两辆参数不同的车辆过桥时的加速度交叉功率谱提取桥梁频率，有效减弱了路面粗糙度的影响。此外，车辆响应中还包含桥梁的阻尼信息[37]，并且基于前后传感器的响应相位差可以有效减弱路面粗糙度对阻尼测量结果的影响[38-39]。

桥梁模态参数的变化往往反映了桥梁刚度的改变，因此可以利用模态参数识别桥梁损伤。Kim 等[40-41]提出了一种基于频率扰动的裂缝尺寸估计方法，并建立了温度和桥梁频率的关系，借此对试验结构的损伤程度进行定位和估计。Cao 等[42]利用停靠车辆-桥梁系统的频率变化来量化桥梁损伤，定义了频率变化率和频率-参数变化率两个指标，克服了基于频率的损伤检测方法中频率阶数有限的问题。曲春绪等[43]总结了不同模态参数的损伤指标（如频率、振型、模态柔度曲率等）对空心板梁桥铰缝损伤的识别效果。从目前关于桥梁模态参数的研究看，桥梁的固有频率易测量，具有高测试精度和低成本的优点，但难以实现损伤定位，对局部损伤敏感度低。部分老旧桥梁缺乏设计和检测信息，难以获取完好状态下的频率信息，对于缺乏基准信息桥梁的损伤识别研究还鲜有报道。

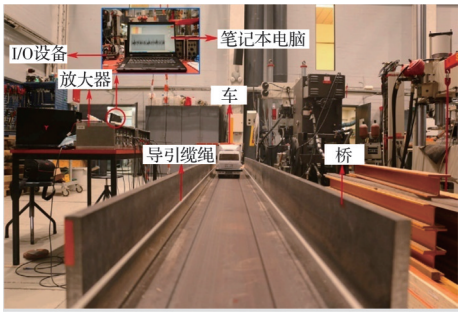
2.3　基于桥梁动力特征的损伤识别

相较于频率，振型、模态曲率、模态应变能等动力特征更能反映桥梁的局部损伤。Abdel-Wahab 等[44]基于模态曲率的变化来检测预应力混凝土桥的损伤，并引入曲率损伤因子来衡量曲率模态的形状差异，成功应用于 Z24 桥的损伤检测。Cao 等[45]利用小波变换和 Teager 能量算子协同改善模态曲率，增强其抗噪声能力和对梁结构多位置损伤的敏感性。Nick 等[46]提出基于模态应变能损伤指数和人工神经网络的两阶段损伤识别技术，用于定位和估计钢梁桥的损伤。基于模态应变能和谱有限元法，Vahidi 等[47]对变截面梁桥中的微小损伤进行了识

别。相较于直接从桥梁响应中获取桥梁的损伤信息,基于车辆响应的间接检测方法更吸引研究者的关注。Zhang 等[48]通过全局滤波算法从车辆响应中提取桥梁工作挠度形状曲率,构建了桥梁局部损伤的模态曲率检测模型。Obrien 等[49-50]利用装备两个位移传感器的车辆提取桥梁的路面轮廓,结合短时傅里叶变换构建了简支桥梁的振型,并引入模态振型平方指数来识别桥梁损伤。Yang 等[51]、Zhang 等[52]提出利用车辆和桥梁接触点的动力响应构建桥梁模态振型的方法,并将其推广到桥梁损伤检测中。Zhang 等[53]利用装有激振器的车辆在固定位置激励桥梁,另一辆车沿行驶路径移动,通过其加速度响应提取桥梁的振型并识别装配式空心板桥的损伤。基于双通道质量相加技术,Zhan 等[54]利用装有传感器的试验车辆获得接触点响应差,得到桥梁的模态振型,有效削弱了表面粗糙度的不利影响,进而识别桥梁多个位置的损伤。基于 GoogLeNet 和贝叶斯优化,Hajializadeh[55]通过车辆的加速度信号提取了桥梁的损伤特征。Yin 等[56]利用桥梁损伤与加速度的物理关系,引入深度神经网络对移动车辆荷载作用下的简支梁桥的损伤进行识别。Sarwar 等[57]利用深度自编码架构,并使用基于 Kullback-Leibler 散度的损伤指数对车辆与桥梁相互作用数据进行分析,进而识别桥梁的损伤状况。Li 等[58]利用车辆的短时振动数据训练深度自编码器模型,提取损伤指标,并据此判断桥梁的健康状态(图 3)。



(a) 方法概述



(b) 试验模型部署

图 3 实时桥梁损伤自动检测方法[58]

Fig. 3 Real-time automatic detection method of bridge damage[58]

从相关文献看,桥梁的模态曲率、模态应变能等动力特征对局部损伤更敏感,但过于依赖测试数据的准确性,需要较高密度的测点布置,易受测量误差和环境噪声的影响,且主要将损失考虑为刚度损失,难以反映损伤的形式,如表 1 所示。现有的基于车辆响应的桥梁损伤识别方法尚不成熟,大多处于理论研究阶段。

表 1 桥梁动力特征检测对比

Table 1 Comparison of bridge dynamic characteristic detection

桥梁动力特征识别	检测程度	优点	缺点
频率	损伤存在	简单、车速范围广	频率变化不总是与损伤相关、较高车速会使频率失真
阻尼	损伤存在	损伤敏感性高	较为复杂
模态振型	损伤存在、损伤定位	局部损伤信息敏感	对噪声敏感
小波变换	损伤存在、损伤定位、损伤程度	适用范围广	车速低、依赖局部异常信号

3 中观及亚微观尺度下的桥梁损伤识别

中观及亚微观尺度下的桥梁损伤识别通常通过识别桥梁构件的变形、裂缝、剥落等中观尺度特征以及钢筋锈胀及混凝土碳化等亚微观尺度特征来实现。在中观尺度下,光纤变形传感器可以实现对桥梁构件短期和长期监测[59];激光扫描仪可三维扫描桥梁结构,获取其几何形状和变形情况,进而评估桥梁变形[5];在桥梁结构中安装多个传感器节点,可以实现对整个桥梁结构的实时监测,获取桥梁构件变形、温度等参数[60]。在亚微观尺度下,常采用无损检测技术对钢筋锈胀进行检测,如电化学阻抗谱分析、电化学腐蚀监测等方法[6-9];混凝土碳化主要关注酸碱环境对混凝土结构的侵蚀,一般通过 pH 试纸法、酚酞试剂法、氯离子含量测试法等[10-12]进行检测。此外,桥梁裂缝也属于亚微观尺度损伤,但其长度常处于中观尺度,因此,检测时需综合考虑不同尺度的特征。目前关于桥梁构件变形、钢筋锈胀及混凝土碳化的研究已取得显著进展。然而,因跨尺度特性和与复杂表观环境的耦合关系,桥梁表观损伤识别难度较大,仍然是研究的热点。

3.1 桥梁表观损伤的采集

桥梁表观损伤的识别首先面临的是采集问题,现有研究聚焦机器人采集,如图 4 所示。贺钿[61]设计了一种多足爬壁机器人,可替代人工进行桥梁表观损伤检测,有效提高了工作效率。Ho 等[62]通过爬缆机器人获取斜拉桥拉索的图像,并将图像增强技

术与主成分分析算法相结合，实现了对拉索表面损伤和内部缺陷的检测。Kim 等[63]提出利用商用无人机和高分辨率视觉传感器识别老化混凝土桥梁裂缝的方法：在无人机的初步飞行中生成基于点云的背景模型，利用深度学习算法检测结构表面的裂缝，并计算裂缝的长度和宽度。Hada 等[64]设计开发了基于两轮多旋翼机的桥梁检测机器人，用以收集桥梁底部与支柱的裂缝图像。基于两轮多旋翼机和 3D 建模技术，Nakao 等[65]开发了一种桥梁裂缝检测系统。Li 等[66]开发了履带式吸盘爬行机器人，用于检测板状混凝土结构缺陷、结构劣化程度和厚度。奚韵哲[67]利用吸附式爬壁机器人对桥墩上的裂缝进行采集，并通过阈值分割与分形算法获取裂缝的特征信息。通过改装四翼无人机，使其能近距离贴近桥面，Sanchez-Cuevas 等[68]检测了桥梁的裂缝。综上所述，研制机器人采集桥梁表观损伤已经成为共识。然而，桥梁常跨越山河幽谷，所处环境复杂，对机器人工作稳定性提出了挑战。现有研究较少关注桥梁损伤诊断机器人的工作稳定性问题，这将制约其在实际应用中的推广。

3.2　桥梁表观损伤识别的定位

针对已获取的桥梁图像，识别其中的损伤是一个复杂的过程，涉及定位、分割、量化等多个关键环节。通常利用基于深度学习的图像目标检测算法对桥梁的表观损伤进行精确定位，这一算法能够同时识别出物体的种类及其具体位置，并以边界框的形式清晰展示。图像目标检测算法主要分为两种类型，一种是基于区域的两阶段算法，另一种是基于回归的单阶段算法。两阶段算法首先通过区域提议网络生成候选框，随后利用分类器和回归器对每个候选框进行细致的分类和精确调整。而单阶段算法则直接通过全卷积网络对图像中的每个位置和尺度进行分类和回归，实现高效检测。在两阶段算法中，常见的方法有 R-CNN、Fast R-CNN、Faster R-CNN 和 Mask R-CNN，其中 Faster R-CNN 与 Mask R-CNN 因其高效性而备受青睐。Xu 等[69]通过改进 Faster R-CNN 模型来识别图像中钢筋混凝土柱的多类型地震损伤，如混凝土开裂、混凝土剥落、钢筋暴露和钢筋屈曲等（图 5）。Li 等[70]结合 DJI M210-RTK 无人机与 Faster R-CNN 算法对桥

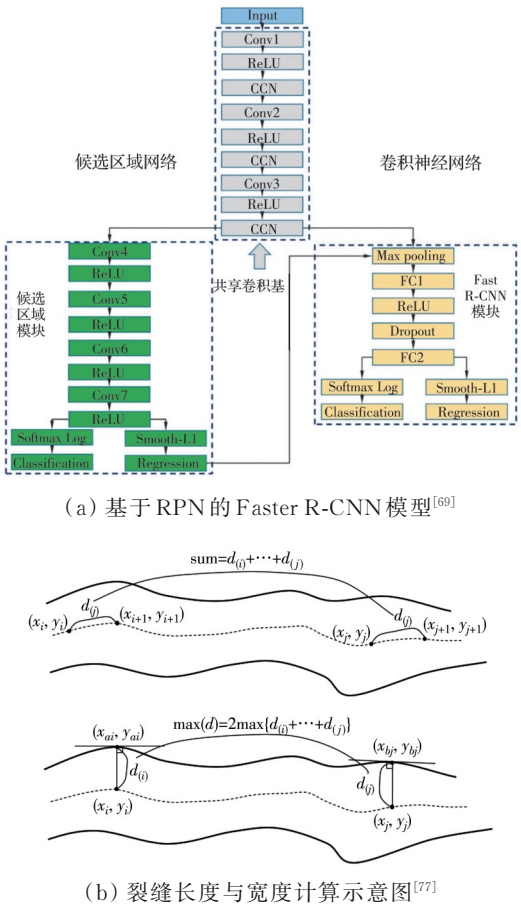
（a）多足爬壁机器人[61]　（b）爬缆机器人[62]

（c）两轮多旋翼机器人[64]　（d）履带式吸盘爬行机器人[66]

（e）吸附式爬壁机器人[67]　（f）改装后的四翼无人机[68]

图 4　桥梁表观损伤识别机器人

Fig. 4　Bridge surface damage identification robots



（a）基于 RPN 的 Faster R-CNN 模型[69]

（b）裂缝长度与宽度计算示意图[77]

图 5　桥梁表观损伤识别与量化算法

Fig. 5　Algorithm for identification and quantification of bridge surface damage

梁裂缝进行检测,并通过试验确定了在考虑光照和拍摄角度因素下无人机的最大拍摄距离。基于Faster R-CNN和BIM,Gan等[71]利用无人机近距离航拍,实现了桥梁结构表面裂缝检测的自动化与可视化。黄彩萍等[72]通过改进Mask R-CNN算法,有效识别了桥梁的裂缝、露筋、剥落、白皙和空洞等多种损伤。尽管两阶段目标检测算法具有较高的准确率,但其运行速度通常较单阶段算法稍慢。在单阶段算法方面,Zhang等[73]基于YOLOv3对包含4种混凝土损伤类型的现场检查图像数据集进行了训练和测试,结果显示,改进后的YOLOv3具有较高的精度。余加勇等[74]运用YOLOv5技术成功对无人机采集的桥梁图像进行了裂缝检测。Liu等[75]通过引入旋转函数改进了YOLOv5网络目标检测框,实现了更精细的混凝土桥梁裂缝检测。Xiong等[76]利用全局注意力模块对YOLOv8网络进行改造,增强其泛化能力,减少了训练和推理过程的计算成本,使其可以运用到桥梁裂缝检测中。

3.3 桥梁表观损伤的分割量化

现有桥梁表观损伤目标检测模型具有较高的准确率,如表2所示。在成功定位桥梁的表观损伤后,后续关键步骤是对损伤图像进行分割与量化,以便提取出损伤的特征信息。图像分割算法主要分为传统方法与基于深度学习的语义分割算法两大类。在传统方法领域,结合相位对称性的裂缝增强滤波和样条曲线的边缘点确定技术,Nguyen等[78]创新性地提出了利用裂缝二维几何特征自动检测裂缝边缘的方法。Tang等[79]则先利用基于直方图的阈值法确定裂缝的初步位置,再通过形态学方法和b样条snake模型细化裂缝位置,从而避免了全局处理对图像特征的潜在干扰。Wei等[80]通过对道路图像进行增强处理,并利用分割阈值有效地提取了线性特征。然而,相比传统方法,基于深度学习的语义分割算法展现出更强的泛化能力和更高的准确性。这种算法能够将图像中的每个像素精确分配到预定义的类别中,实现像素级别的标签表示。其典型的编码器-解码器结构使得算法能够先提取图像特征,再恢复图像的空间分辨率,并输出每个像素的类别。近年来,研究者们在这一领域取得了显著进展。基于空间通道层次网络,Pan等[81]成功地对噪声干扰下的混凝土裂缝进行了像素级分割。Kang等[82]使用改进的管状流场算法从检测到的裂缝区域中分割出裂缝像素,并采用改进的距离变换方法对其进行精确测量。基于特征金字塔深度学习网络,舒江鹏等[83]实现了复杂背景下桥钢箱梁表面裂缝的语义分割。Zhao等[84]提出了基于深度学习的新型裂缝特征金字塔网络,该网络能够从混凝土结构图像中准确提取出裂缝位置、宽度和深度等像素级的详细信息。Su等[77]在UNet网络中引入注意机制,有效提升了桥梁裂缝图像分割的精度,并成功提取了裂缝的长宽信息(图5)。梁栋等[85]利用深度可分离卷积对UNet网络进行优化,实现了对桥梁裂缝图片快速且高效的处理。结合轻量级MobileNetV2主干和转置卷积,Xu等[86]建立了改进的DeepLabv3+模型。该模型不仅增强了对局部微小损伤的识别能力,还能准确识别并分割混凝土裂缝、剥落、钢筋暴露和电缆腐蚀等多种损伤类型。整理部分桥梁表观损伤语义分割模型的网络架构及IoU(表3),发现其精度能够初步满足桥梁检测需求。Hsieh等[87]回顾了68种基于机器学习的裂缝检测方法,指出当前像素级裂缝分割的发展趋势,并对8种基于机器学习的裂缝分割模型进行了性能评估。邓露等[88]从深度学习框架、算法、数据集合评价指标4个方面对当前基于深度学习的裂缝检测方法进行了系统梳理。从目前关于桥梁表观损伤检测的研究看,多数研究聚焦于损伤图像的目标检测与语义分割,较少涉及外部环境对桥梁图像质量干扰的优化以及桥梁表观损伤对桥梁性能影响的研究。

表2 桥梁表观损伤目标检测总结

Table 2 Summary of surface damage object detection in bridges

文献	损伤类型	网络架构	检测精度/%
[69]	混凝土裂缝、剥落、钢筋暴露等	Faster R-CNN	94.4
[70]	混凝土裂缝	Faster R-CNN	92.1
[72]	混凝土裂缝、剥落、空洞、白皙等	Mask-RCNN	90.3
[73]	混凝土裂缝、剥落等	YOLOv3	80.4
[74]	混凝土裂缝	YOLOv5	91.6
[75]	混凝土裂缝	R-YOLOv5	94.1
[76]	混凝土裂缝	YOLOv8	97.4

表3 桥梁表观损伤语义分割总结

Table 3 Summary of surface damage semantic segmentation in bridges

文献	网络架构	特征提取网络	IoU/%
[77]	CBAM-UNet		89.5
[81]	SCHNet	VGG19	85.3
[84]	Crack-FPN	ResNet	86.1
[86]	DeepLabv3+	MobileNetV2	77.6

4 桥梁的服役性能评估

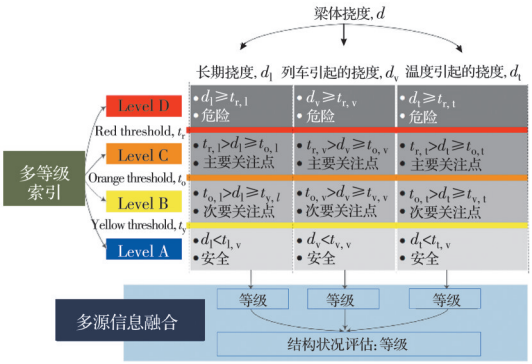
桥梁的服役性能评估通常指对桥梁的结构安全性、耐久性和功能完整性进行评估,以确定桥梁

是否满足设计要求和运营需求。桥梁评估可分为短期和长期两种。短期状态评估侧重于满足桥梁日常养护的及时决策需求，关注桥梁当前状态和短期变化趋势；长期状态预测则考虑桥梁劣化因素的影响，预测桥梁未来状态和服役寿命，为桥梁的长期管理和规划提供依据。

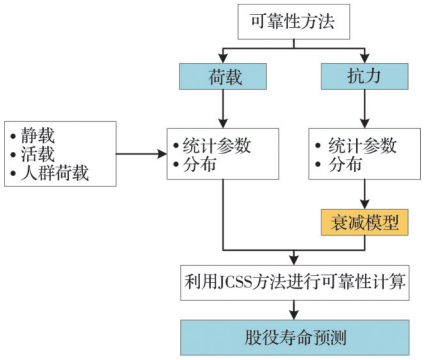
4.1　桥梁短期状态评估

桥梁的短期状态评估需要综合考虑多种病害信息，以准确判断桥梁的健康状况。D-S 证据理论是一种经典的信息融合方法，已被广泛应用于桥梁状态评估领域。Bolar 等[89]通过改良分层证据推理框架，结合了 D-S 证据理论与 Yager 组合规则，从而有效融合了桥梁的各种病害信息。陈科桦等[90]将 D-S 证据理论引入桥梁技术状态评估方法中，为现有的桥梁养护工作提供了新思路。简正坤等[91]根据 D-S 证据理论融合应变标准差与平均伪比能指标，实现了简支梁桥的损伤识别。梁力等[92]基于变权重和 D-S 证据理论对桥梁受环境侵蚀、材料老化、外部荷载的多因素进行融合，实现了桥梁安全的实时评估。叶鑫泉[93]采用 D-S 证据理论对结构的动力参数进行融合，通过比较结构损伤前后的特征变化，无需结构分析模型即可实现损伤识别。基于 D-S 证据理论，王博宇[94]提出了两阶段数据融合损伤识别方法，对简支梁与三跨连续梁模型进行了损伤识别。基于挠度的多级评估方法，Zhou 等[95]利用 D-S 证据理论对交通引起的、温度引起的和长期的挠度分量进行融合，得到桥梁的综合评估结果（图 6）。秦劲东等[96]提出 3A 指标法，对既有桥梁幅值偏移量、异常度和均值波动进行权重组合，实现了斜拉桥上部结构的状态评估。此外，贝叶斯推理[97-98]、马尔科夫模型[99-100]、支持向量机[101]等方法也常被用于桥梁多源数据融合。随着智能化的发展，基于深度学习的多源数据融合方法也逐步应用于桥梁短期评估中。基于长短期记忆深度学习回归网络，Zhao 等[102]建立了温度、车辆、桥梁应变、桥梁位移等多源监测数据之间的非线性映射模型，解决了荷载效应变异性和结构不均匀劣化的问题。通过长短时记忆网络融合桥梁应变和加速度数据，张立奎等[103]实现了桥梁变形的实时重构。通过结合 SENet 和随机融合矩阵，Wang 等[104]建立了桥梁信息融合网络，实现了多种数据类型的深度融合，通过有效提取和统一关键特征，解决了稀疏、不平衡和数据丢失问题，提高了桥梁状况评估的可靠性。

桥梁所处环境复杂，结构层次丰富，不确定性也更强。模糊分析是一种有效处理不确定性问题的数学工具，已被广泛应用于桥梁状态评估领域。



（a）多级评估框架[95]



（b）可靠性分析方法[125]

图 6　桥梁服役性能评估方法

Fig. 6　Bridge service performance evaluation method

基于模糊优选的桥梁结构体系方案决策模型，孙策等[105]对桥梁设计实现了决策优化。运用模糊综合评价方法，考虑桥梁在概念设计中相互冲突的标准，Malekly 等[106]完成了桥梁设计在各阶段的评价。基于火灾分析理论和场景分析，结合层次分析与模糊综合评价法，孙博等[107]建立了各指标的权重体系，通过多层次综合评判，确定了桥梁的火灾风险水平，并提出了相应的风险控制准则。在施工阶段，陈龙等[108]采用模糊综合决策方法对山区高速公路桥梁施工现场的安全等级进行了客观评价。基于改进的模糊集理论，结合车辆荷载和人群荷载下的桥梁结构响应信号，Yan 等[109]验证了多指标联动、多时段动态识别用于桥梁结构损伤评估的可行性。为准确评估大跨度钢管混凝土拱桥的状态，郭晓等[110]提出了层次分析法和模糊理论相结合的模糊综合评估方法。基于综合层次分析法和模糊逼近理想解排序技术，Khan 等[111]对桥梁缺陷危害性进行了排序。通过改进的模糊评价方法，Gokasar 等[112]深入研究了桥梁养护优先级对二氧化碳排放对环境的影响。模糊分析通常采用模糊数或模糊集合来描述不确定性。针对不同的需求，基于概率统计推断[113-114]可以得到置信区间和概率值，基于区间模型修正[115-116]则能得到参数的区间范围，这些方法各有优势，但都能在一定程度上有效处理桥梁的

不确定性问题,如表4所示。从目前关于桥梁短期状态评估研究看,能够通过模糊分析等方法实现对桥梁各类病害信息的融合与评价,但主要依赖于桥梁的直接监测数据。相较之下,基于车辆响应的桥梁动力特征识别以及基于计算机视觉的桥梁表观损伤识别等方法能够更快速地提供低成本的检测信息,但其融合评估研究尚处于起步阶段,有待进一步深入探索与实践。

表4 桥梁检测数据处理方法总结

Table 4 Summary of processing methods for bridge inspection data

方法	内容	优点	缺点
D-S证据理论	结合不同来源的证据计算概率	处理不确定和冲突信息效果好	高冲突证据融合稳定性不足
贝叶斯推理	随着新证据的获取,更新假设的概率估计	结合先验知识并随新数据更新	需要先验分布,这可能是主观的
马尔科夫模型	对系统从一种状态到另一种状态的转变进行概率建模	适用于时间和序列数据	对于复杂系统需要大的状态空间
支持向量机	用于分类和回归分析的监督学习模型	适用于高维空间和非线性边界	需要仔细调整参数和选择核函数
模糊分析	处理近似而非固定和精确的推理	有效处理不精确和模糊性	确定隶属函数时可能是主观的
基于概率统计推断	使用概率分布对参数或假设进行推断	提供在不确定性下推断的严格框架	可能需要大量数据以进行准确推断
基于区间模型修正	在指定区间内调整模型,以考虑不确定性	明确考虑模型参数的不确定性	如果区间过宽,可能会过于保守

4.2 桥梁的长期状态评估

桥梁的长期状态预测需要考虑服役时间对其性能的影响。可靠性分析是一种有效预测桥梁长期状态的方法,可以评估桥梁在未来服役期内发生失效的可能性。通过建立桥梁结构的可靠性模型,计算桥梁在不同服役时间下的失效概率或可靠度指数,从而预测桥梁的长期状态。El Hassan等[117]建立了钢筋混凝土腐蚀过程的可靠性模型,以确定腐蚀开始时间和钢筋混凝土构件在氯离子侵蚀下失效时间的概率分布,并以此预测桥梁正常使用状态的剩余寿命。彭文韬等[118]根据桥梁结构可靠度的时变规律,对现役桥梁结构的剩余寿命进行预测。赵国旺[119]采用时变可靠度理论对钢筋混凝土简支T梁桥的寿命进行了预测。梁胜蔚[120]在考虑各种材料性能劣化的基础上,基于可靠度方法对桥梁主梁的抗裂性及V型腿的裂缝宽度限值进行了预测。基于车载挠度局部极值识别方法,曾国良等[121]结合多截面挠度极值分布模型,建立了大跨度桥梁可靠度评估方法。基于混凝土结构耐久性理论和城市的限载政策,黄海云等[122]分析桥梁结构的时变抗力和荷载效应变化规律,推算桥梁控制截面抗弯承载能力可靠性功能函数的失效概率。Jin等[123]考虑相关荷载的非平稳特性和抗力随时间的退化,基于蒙特卡罗模拟和Copula理论的可靠性模型,实现了在役桥梁的安全性能评估。Liu等[124]使用高斯过程回归开发了剩余容量因子模型和承载能力预测模型,实现了对承载能力下降的预应力混凝土梁的快速筛选与可靠性评估。根据桥梁的结构承载能力和设计荷载,Zhuang等[125]采用可靠性分析方法对桥梁的剩余使用寿命进行了评估(图6)。在评估铆接铁路桥的疲劳可靠性时,Wang等[126]充分考虑了疲劳细节间的空间相关性,使评估结果更加准确可靠。

桥梁监测数据可以反映桥梁结构的实际状况,为桥梁可靠性分析提供重要依据。雷秀强[127]基于长期监测数据得到了桥梁的时变可靠度曲线,实现了对大跨度连续刚构桥正常使用状态的剩余寿命预测。樊学平等[128]利用多过程贝叶斯动态线性模型对监测到的极值应力进行预测与分析,从而预测桥梁构件的时变可靠性。Ni等[129]基于参数贝叶斯混合模型,结合悬索桥一年来的应变监测数据对其可靠性进行了评估。基于长期监测数据,Luo等[130]构建了随机交通模型,并推导了综合考虑交通增长和腐蚀影响的疲劳极限状态函数,为评估PC桥梁的疲劳可靠性提供了有力支持。从相关文献看,桥梁的长期状态主要基于劣化模型或监测数据,再结合可靠性方法进行预测,较少涉及桥梁历史评估结果的利用,特别是基于车辆响应和计算机视觉的桥梁历史检测结果的应用鲜有报道。

5 结论

从桥梁检测领域的现状看,桥梁检测正逐步向高效化、智能化方向发展。在宏观尺度上,桥梁损伤检测的研究方向主要是利用车辆响应对桥梁性能参数进行精确识别;在中观及亚微观尺度上,检测焦点则落在运用损伤诊断机器人与深度学习图像识别技术上,可精准识别桥梁表观损伤。然而,随着桥梁数量的持续增长以及服役年限的不断延长,对其进行精细化检测的需求愈发迫切,单一尺度的检测方法已难以满足实际应用中的多元化需求。因此,构建一套多尺度的桥梁检测体系,以实现更全面、细致的桥梁检测评估,无疑是未来发展的必然趋势。基于当前桥梁检测评估方法的发展

状况，未来研究可从以下几方面展开：

1）桥梁宏观尺度的损伤检测。当前研究往往局限于将桥梁损伤视为单一的刚度损伤，而忽视了宏观尺度损伤形式的多样性。实际上，宏观尺度的损伤是多种损伤形式累积的结果，难以直接与中观及亚微观尺度的损伤相对应，这往往导致对桥梁系统整体性能评估的偏差。因此，构建多类型宏观尺度损伤的车-桥耦合系统多模态响应模型，揭示不同类型损伤对结构响应的差异化影响，将成为提高桥梁宏观尺度损伤识别效率与准确性的关键。

2）桥梁中观及亚微观尺度的损伤检测。尽管无人机技术已广泛应用于桥梁表观损伤的数字化采集，但关于无人机工作稳定性对成像质量影响的研究仍显不足。同时，计算机视觉技术虽然能够获取损伤信息，但这些信息与桥梁力学模型之间的联系却较薄弱，导致分析结果的可解释性和鲁棒性受限。因此，未来研究需重点关注桥梁图像采集质量的提升，并探索构建损伤图像与桥梁力学特征之间的有效映射关系。

3）桥梁多尺度损伤的相关性。桥梁损伤具有鲜明的多尺度特征，宏观、中观及亚微观尺度的损伤相互关联、相互影响，而非孤立存在。当前研究大多聚焦于单一尺度的损伤检测，无法全面反映桥梁的整体损伤状态。因此，未来研究需致力于提出能够整合各尺度检测信息的力学指标，使不同尺度的检测数据能够相互校正、相互优化，从而更准确地评估桥梁的整体性能。

4）桥梁服役性能评估。现有基于车辆响应的桥梁动力特征识别以及基于计算机视觉的桥梁表观损伤识别方法虽然能够快速、低成本地提供损伤检测信息，但缺乏对这些信息的有效整合。为了更准确地评估桥梁的短期状态并预测其长期性能，未来的研究需探索能够融合宏观尺度与中观及亚微观尺度检测信息的新方法，为桥梁服役性能评估提供更全面、更准确的依据。

5）桥梁检测软硬件的协同发展。聚焦桥梁检测设备的智能化升级，发展高效、高精度的数据采集技术与算法。此外，桥梁检测技术应统筹经济性、识别精度和性能评估之间的平衡，满足实际检测需求，并具备大规模推广应用潜力。持续提升软硬件协同性能，显著提高桥梁检测效率和准确性。

参考文献

[1] 李清泉，陈睿哲，涂伟，等. 基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变实时测量方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2023，48(11)：1834-1843.
Li Q Q，Chen R Z，Tu W，et al. Real-time vision-based deformation measurement of long-span bridge with inertial sensors[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University，2023，48(11)：1834-1843. (in Chinese)

[2] 楚玺，周志祥，段鑫，等. 桥梁结构连续线形监测方法[J]. 公路交通科技，2023，40(11)：157-163，171.
Chu X，Zhou Z X，Duan X，et al. A monitoring method for continuous line-shape of bridge structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2023，40(11)：157-163，171. (in Chinese)

[3] 单德山，李乔. 桥梁结构模态参数的时频域识别[J]. 桥梁建设，2015，45(2)：26-31.
Shan D S，Li Q. Modal parameter identification of bridge structure in time-frequency domain[J]. Bridge Construction，2015，45(2)：26-31. (in Chinese)

[4] 陈彦江，钱亚运，李洪泉，等. 基于阻尼特性的RC简支梁桥损伤识别分析及试验研究[J]. 振动与冲击，2017，36(13)：208-213，257.
Chen Y J，Qian Y Y，Li H Q，et al. Damage detection and tests for a RC simply supported girder bridge based on its damping characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock，2017，36(13)：208-213，257. (in Chinese)

[5] Chen S E. Laser scanning technology for bridge monitoring[M]//Laser Scanner Technology. InTech，2012.

[6] 何谋杰，叶跃忠，李福海. 预埋式阳极梯监测系统研究[J]. 材料导报，2010，24(24)：79-82.
He M J，Ye Y Z，Li F H. Research on the anode-ladder monitoring system[J]. Materials Review，2010，24(24)：79-82. (in Chinese)

[7] Qiao G F，Sun G D，Hong Y，et al. Remote corrosion monitoring of the RC structures using the electrochemical wireless energy-harvesting sensors and networks[J]. NDT & E International，2011，44(7)：583-588.

[8] 孙宗光，郭亚唯，范颖芳. 梯形阳极系统监测混凝土耐久性的试验研究[J]. 结构工程师，2019，35(6)：148-153.
Sun Z G，Guo Y W，Fan Y F. Experimental study of concrete structure durability monitoring using anodenleiter[J]. Structural Engineers，2019，35(6)：148-153. (in Chinese)

[9] Lu Y Y，Zhang J R，Li Z J，et al. Corrosion monitoring of reinforced concrete beam using embedded cement-based piezoelectric sensor[J]. Magazine of Concrete Research，2013，65(21)：1265-1276.

[10] 王青，刘星，徐港，等. 混凝土碳化深度酚酞与pH测试值的相关性研究[J]. 混凝土，2016(4)：13-16.
Wang Q，Liu X，Xu G，et al. Correlation study of concrete carbonation depth values tested by phenolphthalein and pH value[J]. Concrete，2016(4)：13-16. (in Chinese)

[11] 成立，余其俊，殷素红，等. 混凝土碳化及氯离子渗透试验[J]. 铁道建筑，2007，47(6)：104-106.

Cheng L, Yu Q J, Yin S H, et al. Test on carbonization and penetration of chlorous ion in concrete[J]. Railway Engineering, 2007, 47(6): 104-106. (in Chinese)

[12] Kim G, In C W, Kim J Y, et al. Nondestructive detection and characterization of carbonation in concrete[C]// AIP Conference Proceedings. Baltimore, Maryland, USA. AIP Publishing LLC, 2014: 805-813.

[13] Moughty J J, Casas J R. A state of the art review of modal-based damage detection in bridges: development, challenges, and solutions[J]. Applied Sciences, 2017, 7(5): 510.

[14] Wang L, Chan T. Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring[C]//Proceedings of the Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking Sustainable Development-Planning, Infrastructure Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure, Queensland University of Technology, 2009: 35-47.

[15] Lee S, Kalos N, Shin D H. Non-destructive testing methods in the U.S. for bridge inspection and maintenance[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(5): 1322-1331.

[16] Mohan A, Poobal S. Crack detection using image processing: a critical review and analysis[J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(2): 787-798.

[17] Zhang Q Y, Barri K, Babanajad S K, et al. Real-time detection of cracks on concrete bridge decks using deep learning in the frequency domain[J]. Engineering, 2021, 7(12): 1786-1796.

[18] Cui C, Xu Y L, Zhang Q H. Multiscale fatigue damage evolution in orthotropic steel deck of cable-stayed bridges [J]. Engineering Structures, 2021, 237: 112144.

[19] 何聪, 钱国明, 韩晓健. 桥梁线形测量系统研究与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2016(5): 64-67.
He C, Qian G M, Han X J. Research and implementation of bridge alignment measurement[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(5): 64-67. (in Chinese)

[20] 石雪飞, 许琪, 马海英. 桥梁施工线形无人机测量方法与参数优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 32-41.
Shi X F, Xu Q, Ma H Y. Parametrical study and optimization using unmanned aerial vehicle measurement in bridge construction alignment[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(1): 32-41. (in Chinese)

[21] 彭晶蓉, 贺拴海, 王凌波. 曲线部分斜拉桥成桥阶段模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 1004-1010.
Peng J R, He S H, Wang L B. Model test on curved extra-dosed bridge under live loading[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5): 1004-1010. (in Chinese)

[22] 贺拴海, 陈杰, 朱钊, 等. 无湿接缝高强混凝土工字组合梁桥荷载横向分配试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 83-91.
He S H, Chen J, Zhu Z, et al. Experiment on load transversal distribution of high strength concrete I-beams without wet joints[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 83-91. (in Chinese)

[23] 黄晓彬. 超龄服役鱼腹式钢桁梁桥大修后成桥试验分析[J]. 公路, 2021, 66(6): 122-126.
Huang X B. Test analysis of over age service fish-bellied steel truss bridge after major repair[J]. Highway, 2021, 66(6): 122-126. (in Chinese)

[24] 亓兴军, 孙绪法, 周广利, 等. 损伤状态下预应力混凝土简支梁的模态挠度和模态刚度试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(21): 227-236, 262.
Qi X J, Sun X F, Zhou G L, et al. Test study on modal deflection and modal stiffness of prestressed concrete simply supported beams under damage state[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(21): 227-236, 262. (in Chinese)

[25] de Angelis A, Pecce M R. Model assessment of a bridge by load and dynamic tests[J]. Engineering Structures, 2023, 275: 115282.

[26] 秦世强, 蒲黔辉, 施洲. 环境激励下大型桥梁模态参数识别的一种方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 95-100.
Qin S Q, Pu Q H, Shi Z. A method of modal parameters identification using ambient vibration measurements for a large-scale bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 95-100. (in Chinese)

[27] Mahato S, Teja M V, Chakraborty A. Combined wavelet-Hilbert transform-based modal identification of road bridge using vehicular excitation[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2017, 7(1): 29-44.

[28] Yang Y B, Lin C W, Yau J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3/4/5): 471-493.

[29] Yang Y B, Lin C W. Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 284(1/2): 205-226.

[30] Lin C W, Yang Y B. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: an experimental verification[J]. Engineering Structures, 2005, 27(13): 1865-1878.

[31] Siringoringo D M, Fujino Y. Estimating bridge fundamental frequency from vibration response of instrumented passing vehicle: Analytical and experimental study[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(3): 417-433.

[32] Sitton J D, Zeinali Y, Rajan D, et al. Frequency estimation on two-span continuous bridges using dynamic responses of passing vehicles[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(1): 04019115.

[33] Chang K C, Wu F B, Yang Y B. Effect of road surface roughness on indirect approach for measuring bridge frequencies from a passing vehicle[J]. Interaction and Multiscale Mechanics, 2010, 3(4): 299-308.

[34] Yang Y B, Li Y C, Chang K C. Effect of road surface roughness on the response of a moving vehicle for identification of bridge frequencies[J]. Interaction and Multiscale Mechanics, 2012, 5(4): 347-368.

[35] Yang Y B, Li Y C, Chang K C. Using two connected vehicles to measure the frequencies of bridges with rough surface: a theoretical study[J]. Acta Mechanica, 2012, 223(8): 1851-1861.

[36] Nagayama T, Reksowardojo A P, Su D, et al. Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration component from the responses of two vehicles [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 821-829.

[37] González A, Obrien E J, Mcgetrick P J. Identification of damping in a bridge using a moving instrumented vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(18): 4115-4131.

[38] Keenahan J, Obrien E J, Mcgetrick P J, et al. The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping[J]. Structural Health Monitoring, 2014, 13(2): 143-157.

[39] Yang Y B, Zhang B, Chen Y N, et al. Bridge damping identification by vehicle scanning method[J]. Engineering Structures, 2019, 183: 637-645.

[40] Kim J T, Ryu Y S, Cho H M, et al. Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method[J]. Engineering Structures, 2003, 25(1): 57-67.

[41] Kim J T, Yun C B, Park J H. Thermal affects on modal properties and frequency-based damage detection in plate-girder bridges[C]//Smart Structures and Materials 2004: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. San Diego, CA. SPIE, 2004.

[42] Cao L, He W Y, Ren W X. Damage localization and quantification for beam bridges based on frequency variation of parked vehicle-bridge systems[J]. Structures, 2021, 31: 357-368.

[43] 曲春绪，宫亚超，李宏男，等. 基于模态参数指标的空心板梁桥铰缝损伤对比研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(1): 167-177.
Qu C X, Gong Y C, Li H N, et al. Comparative study of hinge joint damage of hollow slab bridge based on modal parameter index[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(1): 167-177. (in Chinese)

[44] Abdel-Wahab M M, de Roeck G. Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario[J]. Journal of Sound Vibration, 1999, 226 (2): 217-235.

[45] Cao M S, Radzieński M, Xu W, et al. Identification of multiple damage in beams based on robust curvature mode shapes[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 46(2): 468-480.

[46] Nick H, Aziminejad A, Hamid-Hosseini M, et al. Damage identification in steel girder bridges using modal strain energy-based damage index method and artificial neural network [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 119: 105010.

[47] Vahidi M, Aziminejad A, Firoozi-Nezamabadi M, et al. Conflation of modal strain energy, spectral finite element, and machine learning techniques for damage detection in multi-span steel girder bridges with variable sections[J]. Structures, 2023, 57: 105086.

[48] Zhang Y, Lie S T, Xiang Z H. Damage detection method based on operating deflection shape curvature extracted from dynamic response of a passing vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2): 238-254.

[49] Obrien E J, Keenahan J. Drive-by damage detection in bridges using the apparent profile[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(5): 813-825.

[50] Obrien E J, Malekjafarian A. A mode shape-based damage detection approach using laser measurement from a vehicle crossing a simply supported bridge[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(10): 1273-1286.

[51] Yang Y B, Zhang B, Qian Y, et al. Contact-point response for modal identification of bridges by a moving test vehicle[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(5): 1850073.

[52] Zhang B, Qian Y, Wu Y T, et al. An effective means for damage detection of bridges using the contact-point response of a moving test vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 158-172.

[53] Zhang J, Yi T H, Qu C X, et al. Detecting hinge joint damage in hollow slab bridges using mode shapes extracted from vehicle response[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2022, 36(1): 04021109.

[54] Zhan Y, Au F T K, Zhang J. Bridge identification and damage detection using contact point response difference of moving vehicle[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(12): e2837.

[55] Hajializadeh D. Deep learning-based indirect bridge damage identification system [J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(2): 897-912.

[56] Yin X F, Huang Z, Liu Y. Bridge damage identification under the moving vehicle loads based on the method of physics-guided deep neural networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 190: 110123.

[57] Sarwar M Z, Cantero D. Deep autoencoder architecture for bridge damage assessment using responses from several vehicles[J]. Engineering Structures, 2021, 246: 113064.

[58] Li Z K, Lin W W, Zhang Y Q. Real-time drive-by bridge damage detection using deep auto-encoder[J]. Structures, 2023, 47: 1167-1181.

[59] Inaudi D, Casanova N, Vurpillot S. Bridge deformation monitoring with fiber optic sensors[C]//IABSE Symposium-Rio de Janeiro-August, 1999: 25-27.

[60] Yu Y, Liu H, Li D S, et al. Bridge deflection measurement using wireless mems inclination sensor systems[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2013, 6(1): 38-57.

[61] 贺钿. 多足爬壁机器人建模、运动控制及在桥梁检测中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
He D. Modeling, motion control and application of multi-legged wall climbing robot in bridge detection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)

[62] Ho H N, Kim K D, Park Y S, et al. An efficient image-based damage detection for cable surface in cable-stayed bridges[J]. NDT & E International, 2013, 58: 18-23.

[63] Kim I H, Jeon H, Baek S C, et al. Application of crack identification techniques for an aging concrete bridge inspection using an unmanned aerial vehicle[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1881.

[64] Hada Y, Nakao M, Yamada M, et al. Development of a bridge inspection support system using two-wheeled multicopter and 3D modeling technology[J]. Journal of Disaster Research, 2017, 12(3): 593-606.

[65] Nakao M, Hasegawa E, Kudo T, et al. Development of a bridge inspection support robot system using two-wheeled multicopters[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2019, 31(6): 837-844.

[66] Li B, Ushiroda K, Yang L, et al. Wall-climbing robot for non-destructive evaluation using impact-echo and metric learning SVM[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2017, 1(3): 255-270.

[67] 奚韵哲. 桥用爬壁机器人检测高墩裂缝技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
Xi Y Z. Study on the technology of detecting cracks in high piers with wall-climbing robot for bridges[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

[68] Sanchez-Cuevas P J, Ramon-Soria P, Arrue B, et al. Robotic system for inspection by contact of bridge beams using UAVs[J]. Sensors, 2019, 19(2): 305.

[69] 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.

[70] Li R X, Yu J Y, Li F, et al. Automatic bridge crack detection using Unmanned aerial vehicle and Faster R-CNN[J]. Construction and Building Materials, 2023, 362: 129659.

[71] Gan L F, Liu H, Yan Y, et al. Bridge bottom crack detection and modeling based on faster R-CNN and BIM [J]. IET Image Processing, 2024, 18(3): 664-677.

[72] 黄彩萍, 谢鑫, 周永康, 等. 基于改进掩码-区域卷积神经网络的混凝土病害实例分割[J]. 桥梁建设, 2023, 53(6): 63-70.
Huang C P, Xie X, Zhou Y K, et al. Instance segmentation of concrete defects based on improved mask-RCNN [J]. Bridge Construction, 2023, 53(6): 63-70. (in Chinese)

[73] Zhang C B, Chang C C, Jamshidi M. Concrete bridge surface damage detection using a single-stage detector[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(4): 389-409.

[74] 余加勇, 刘宝麟, 尹东, 等. 基于YOLOv5和U-Net3+的桥梁裂缝智能识别与测量[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 65-73.
Yu J Y, Liu B L, Yin D, et al. Intelligent identification and measurement of bridge cracks based on YOLOv5 and U-Net3+ [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(5): 65-73. (in Chinese)

[75] Liu Y, Zhou T, Xu J Y, et al. Rotating target detection method of concrete bridge crack based on YOLO v5[J]. Applied Sciences, 2023, 13(20): 11118.

[76] Xiong C Q, Zayed T, Abdelkader E M. A novel YOLOv8-GAM-Wise-IoU model for automated detection of bridge surface cracks[J]. Construction and Building Materials, 2024, 414: 135025.

[77] Su H F, Wang X, Han T, et al. Research on a U-net bridge crack identification and feature-calculation methods based on a CBAM attention mechanism[J]. Buildings, 2022, 12(10): 1561.

[78] Nguyen H N, Kam T Y, Cheng P Y. An automatic approach for accurate edge detection of concrete crack utilizing 2D geometric features of crack[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2014, 77(3): 221-240.

[79] Tang J S, Gu Y L. Automatic crack detection and segmentation using a hybrid algorithm for road distress analysis[C]//2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. October 13-16, 2013. Manchester. IEEE, 2013: 3026-3030.

[80] Wei W, Liu B Y, Bai P. Automatic road crack image preprocessing for detection and identification[C]//2009 Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. November 1-3, 2009. Tianjian, China. IEEE, 2009: 319-322.

[81] Pan Y, Zhang G W, Zhang L M. A spatial-channel hierarchical deep learning network for pixel-level automated crack detection[J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103357.

[82] Kang D, Benipal S S, Gopal D L, et al. Hybrid pixel-level concrete crack segmentation and quantification across complex backgrounds using deep learning[J]. Automation in Construction, 2020, 118: 103291.

[83] 舒江鹏，李俊，马亥波，等. 基于特征金字塔网络的超大尺寸图像裂缝识别检测方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文)，2022，44(3): 29-36.
Shu J P, Li J, Ma H B, et al. Crack detection method based on feature pyramid network for super large-scale images[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 29-36. (in Chinese)

[84] Zhao W J, Liu Y Y, Zhang J W, et al. Automatic pixel-level crack detection and evaluation of concrete structures using deep learning[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(8): e2981.

[85] 梁栋，张伟，于洋. 基于MU-net的混凝土桥裂缝识别方法[J]. 北京交通大学学报，2022，46(4): 105-112.
Liang D, Zhang W, Yu Y. Crack identification method of concrete bridge based on MU-net[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(4): 105-112. (in Chinese)

[86] Xu Y, Fan Y L, Li H. Lightweight semantic segmentation of complex structural damage recognition for actual bridges[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(5): 3250-3269.

[87] Hsieh Y A, Tsai Y J. Machine learning for crack detection: review and model performance comparison[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, 34(5): 04020038.

[88] 邓露，褚鸿鹄，龙砺芝，等. 基于深度学习的土木基础设施裂缝检测综述[J]. 中国公路学报，2023，36(2): 1-21.
Deng L, Chu H H, Long L Z, et al. Review of deep learning-based crack detection for civil infrastructures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 1-21. (in Chinese)

[89] Bolar A, Tesfamariam S, Sadiq R. Condition assessment for bridges: a hierarchical evidential reasoning (HER) framework[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9(7): 648-666.

[90] 陈科桦，季云峰. 基于D-S证据理论的公路桥梁技术状况评估方法改进[J]. 城市道桥与防洪，2016(11): 71-74.
Chen K H, Ji Y F. Improvement of technical condition assessment methods for highway bridge based on D-S evidence theory[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(11): 71-74. (in Chinese)

[91] 简正坤，刘习军，张素侠. 基于应变指标和D-S证据理论的简支梁桥损伤识别[J]. 实验力学，2019，34(5): 791-799.
Jian Z K, Liu X J, Zhang S X. Damage identification in simply supported beam bridge based on strain index and D-S evidence theory[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5): 791-799. (in Chinese)

[92] 梁力，孙爽，李明，等. 基于变权重和D-S证据理论的桥梁安全评估[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2019，40(1): 99-103.
Liang L, Sun S, Li M, et al. Safety assessment of bridges based on variable weight and D-S evidence theory [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(1): 99-103. (in Chinese)

[93] 叶鑫泉. 基于振动响应协方差参数和D-S证据理论的损伤识别[D]. 广州：暨南大学，2020.
Ye X Q. Damage identification based on covariance parameters of vibration response and D-S evidence theory [D]. Guangzhou: Jinan University, 2020. (in Chinese)

[94] 王博宇. 基于动力指纹和D-S证据理论数据融合的桥梁损伤识别研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2023.
Wang B Y. Research on bridge damage identification based on dynamic fingerprint and D-S evidence theory data fusion[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023. (in Chinese)

[95] Zhou J Y, Sun Z, Wei B, et al. Deflection-based multilevel structural condition assessment of long-span prestressed concrete girder bridges using a connected pipe system[J]. Measurement, 2021, 169: 108352.

[96] 秦劲东，方圣恩，张玮，等. 基于3A指标的斜拉桥上部结构状态评估[J]. 土木与环境工程学报(中英文)，2022，44(3): 71-78.
Qin J D, Fang S E, Zhang W, et al. Superstructure state evaluation of cable-stayed bridge using 3A indicators[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 71-78. (in Chinese)

[97] Arangio S, Beck J L. Bayesian neural networks for bridge integrity assessment[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2012, 19(1): 3-21.

[98] Li M, Jia G F. Bayesian updating of bridge condition deterioration models using complete and incomplete inspection data[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(3): 04020007.

[99] Thomas O, Sobanjo J. Semi-Markov models for the deterioration of bridge elements[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2016, 22(3): 04016010.

[100] Shang Z Q, Hu Y R, Chen X Y, et al. Technical deg-

radation prediction of bridge components based on semi-Markov degradation model[M]//Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 16-27.

[101] Yang J X, Yang F, Zhang L K, et al. Bridge health anomaly detection using deep support vector data description[J]. Neurocomputing, 2021, 444: 170-178.

[102] 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.

[103] 张立奎, 段大猷, 王佐才. 基于LSTM神经网络的多源数据融合桥梁变形重构方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3): 37-43.
Zhang L K, Duan D Y, Wang Z C. A multi-source data fusion method for bridge displacement reconstruction based on LSTM neural network[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 37-43. (in Chinese)

[104] Wang Y C, Cai C S, Han B, et al. A deep learning-based approach for assessment of bridge condition through fusion of multi-type inspection data[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 128: 107468.

[105] 孙策, 郝龙, 张翼, 等. 基于模糊优选的桥梁结构体系方案决策研究[J]. 中外公路, 2021, 41(增刊2): 130-134.
Sun C, Hao L, Zhang Y, et al. Research on scheme decision of bridge structure system based on fuzzy optimization[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(S2): 130-134. (in Chinese)

[106] Malekly H, Meysam-Mousavi S, Hashemi H. A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(7): 4910-4920.

[107] 孙博, 肖汝诚. 基于层次分析-模糊综合评价法的桥梁火灾风险评估体系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1619-1625.
Sun B, Xiao R C. Bridge fire risk assessment system based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1619-1625. (in Chinese)

[108] 陈龙, 高荣, 伍培. 山区高速公路桥梁施工现场安全等级的模糊综合评价[J]. 山东交通科技, 2018(1): 21-25.
Chen L, Gao R, Wu P. Fuzzy comprehensive evaluation of safety grades of highway bridge construction site in mountainous areas[J]. Shandong Traffic Science and Technology, 2018(1): 21-25. (in Chinese)

[109] Yan Y, Wu X T, Wu Z Y. Bridge safety monitoring and evaluation based on hesitant fuzzy set[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(2): 1183-1200.

[110] 郭晓, 王红伟, 谢开仲, 等. 基于模糊理论的钢管混凝土拱桥状态评估方法[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 58-63.
Guo X, Wang H W, Xie K Z, et al. An evaluation method for state of concrete-filled steel tube arch bridge based on fuzzy theory[J]. Bridge Construction, 2019, 49(4): 58-63. (in Chinese)

[111] Khan S D, Datta A K, Topdar P, et al. A cause-based defect ranking approach for existing concrete bridges using Analytic Hierarchy Process and fuzzy-TOPSIS[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(11): 1555-1567.

[112] Gokasar I, Deveci M, Kalan O. CO_2 Emission based prioritization of bridge maintenance projects using neutrosophic fuzzy sets based decision making approach[J]. Research in Transportation Economics, 2022, 91: 101029.

[113] Moreira V N, Matos J C, Oliveira D V. Probabilistic-based assessment of a masonry arch bridge considering inferential procedures[J]. Engineering Structures, 2017, 134: 61-73.

[114] Alam J, Neves L A C, Zhang H, et al. Assessment of remaining service life of deteriorated concrete bridges under imprecise probabilistic information[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108565.

[115] Liu H, Zhang Y F. Bridge condition rating data modeling using deep learning algorithm[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(10): 1447-1460.

[116] Zhou H F, Zong Z H, Niu J, et al. Model verification and validation of a cable-stayed bridge: interval-based uncertainty quantification of the model parameters[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(8): 04022066.

[117] El-Hassan J, Bressolette P, Chateauneuf A, et al. Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress[J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3279-3287.

[118] 彭文韬, 邓志勇, 佘乐卿, 等. 基于时变可靠度理论的桥梁评估和剩余寿命预测[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(5): 95-97.
Peng W T, Deng Z Y, She L Q, et al. Existing bridges evaluation and service life prediction based on time-dependent reliability theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(5): 95-97. (in Chinese)

[119] 赵国旺. 基于可靠度理论的桥梁寿命预测研究[J]. 公路, 2015, 60(12): 122-125.
Zhao G W. Research on bridge life prediction based on reliability theory[J]. Highway, 2015, 60(12): 122-125. (in Chinese)

[120] 梁胜蔚. V型腿预应力混凝土连续梁桥空间效应分析及状态预测[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Liang S W. Spatial effect analysis and state prediction of V-leg prestressed concrete continuous beam bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)

[121] 曾国良, 邓扬, 马斌, 等. 基于监测数据的在役大跨度桥梁竖向挠度可靠性评估[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(10): 3636-3646.
Zeng G L, Deng Y, Ma B, et al. Monitoring-based reliability assessment of vertical deflection for in-service long-span bridges[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(10): 3636-3646. (in Chinese)

[122] 黄海云, 张俊平, 吕金浩. 基于耐久性理论和限载政策的某城市桥梁可靠性评估[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊1): 58-63.
Huang H Y, Zhang J P, Lv J H. Reliability evaluation of an urban bridge based on durability theory and load limit policy[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(S1): 58-63. (in Chinese)

[123] Jin C H, Huang J H, Qian Y J, et al. Time-dependent reliability analysis for in-service bridge considering correlated non-stationary stochastic process[C]//2021 4th International Symposium on Traffic Transportation and Civil Architecture (ISTTCA). November 12-14, 2021, Suzhou, China. IEEE, 2021: 246-254.

[124] Liu J, Alexander J, Gu Q, et al. Gaussian process regression-based load-carrying capacity models of corroded prestressed concrete bridge girders for fast-screening and reliability-based evaluation[J]. Engineering Structures, 2023, 285: 116040.

[125] Zhuang Y Z, Easa S, Lu P Z. Reliability analysis of residual service life of restored concrete bridge[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2023, 176(1): 13-26.

[126] Wang R Q, Leander J, Karoumi R. Fatigue reliability assessment of steel bridges considering spatial correlation in system evaluation[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(2): 254-268.

[127] 雷秀强. 基于桥梁长期健康监测数据的时变可靠度分析与寿命预测[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
Lei X Q. Time-varying reliability analysis and life prediction based on long-term health monitoring data of bridges[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)

[128] 樊学平, 周衡, 刘月飞. 桥梁时变可靠性的多过程贝叶斯动态混合预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(8): 2332-2338.
Fan X P, Zhou H, Liu Y F. Multi-process Bayesian dynamic combinatorial prediction of time-variant reliability for bridges[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(8): 2332-2338. (in Chinese)

[129] Ni Y Q, Chen R. Strain monitoring based bridge reliability assessment using parametric Bayesian mixture model[J]. Engineering Structures, 2021, 226: 111406.

[130] Luo Y, Zheng H, Zhang H P, et al. Fatigue reliability evaluation of aging prestressed concrete bridge accounting for stochastic traffic loading and resistance degradation[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(13): 3021-3029.

（编辑　王秀玲）