

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.216



## 桥梁评估与加固 2020 年度研究进展

张方, 张开权, 邓捷超, 杨倩, 韦翔, 黄俊豪, 龚婉婷, 徐望喜, 钱永久

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 由于大规模建设时期经济高速发展带来的桥梁建设需求与落后的技术储备之间的矛盾, 今后 10~30 年, 中国将面临日益增长的桥梁检修压力。基于桥梁评估与加固领域的最新研究进展, 介绍了包括桥梁主要病害监测技术的化学方法和物理方法, 以及传感器技术和信号处理技术在内的桥梁健康监测技术及装备; 对比了基于时变可靠度理论和基于历史数据的桥梁健康评估方法, 并论述了结构参数反演相较于人工智能的重要意义; 介绍了针对抗弯、抗剪、抗震的局部加固方法, 附加结构体系的整体加固方法, 及电化学除氯技术等养护方法; 介绍了网络级和项目级的维修加固决策方法。考虑到学科交叉特性, 对一些先进的传感器、信号处理技术及评估理论也进行了着重介绍, 旨在厘清其间内在逻辑, 这或许能够起到一定的灵感和思路启发的作用。

**关键词:** 桥梁健康、评估与加固; 传感器; 结构参数反演

**中图分类号:** U445.72      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0152-15

## State-of-the-art review of bridge assessment and reinforcement in 2020

ZHANG Fang, ZHANG Kaiquan, DENG Jiechao, YANG Qian, WEI Xiang,  
HUANG Junhao, GONG Wanting, XU Wangxi, QIAN Yongjiu

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

**Abstract:** Due to the contradiction between the demand of bridge construction brought by the rapid economic development and the backward technical reserve in the period of large-scale construction, China will face the increasing pressure of bridge maintenance in the next 10-30 years. Based on the latest research progress in the field of bridge evaluation and reinforcement, this paper introduces the chemical and physical methods of the main bridge disease monitoring technology, the bridge health monitoring technology and equipment including sensor technology and signal processing technology; The bridge health evaluation method based on time-varying reliability theory and historical data is compared, and the significance of structural parameter inversion relative to artificial intelligence is discussed; The partial reinforcement methods for bending, shearing and seismic resistance, the integral reinforcement methods for additional structural systems, and the electrochemical chlorine removal technology are introduced. The decision-making methods of maintenance and reinforcement of network level and project level are introduced. Considering the cross-disciplinary characteristics, some advanced sensors, signal processing technology and evaluation theory are also introduced in order to clarify the internal logic, and it may be able to play a certain inspiration and train of thought inspiration.

**Keywords:** bridge health; evaluation and reinforcement; sensor; structural parameter inversion

2020 年度, 中国桥梁建设继续取得世界瞩目的成就。2020 年 12 月 26 日, 中国首座、世界最长的公铁两用跨海大桥——平潭海峡大桥, 继 2020 年 10 月 1 日公路段通车运营后, 又实现了铁路段通车运营。据最新权威统计数据, 截至 2019 年末, 中国公路桥梁数量达 87.83 万座, 里程达 6 063.46

万米<sup>[1]</sup>, 位居世界第一。

但是, 众所周知的多种原因导致桥梁长期安全运营存在诸多隐患。仅 2007 年至 2012 年间, 就有 37 座桥梁垮塌, 致使 180 多人丧生, 其中近 60% 为 1994 年之后所建, 桥龄不到 20 年。而目前, 中国公路网中约有 40% 的桥梁服役超过 20

**收稿日期:** 2019-10-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(51778532)

**作者简介:** 张方(1974-), 男, 博士, 主要从事桥梁检测、评估与加固研究, E-mail: ff.zhang@163.com。

年,图 1 更为细致地展示了 1900—2018 年中国公路网中桥梁总数与危桥数量的变化趋势。虽然危桥数量自 2007 年达到峰值后得到有效抑制,但是同期桥梁建设规模及速度进一步加大加快。即使不考虑加固后的时效性,就目前数据来看,未来 10~30 年,中国仍然需要面对日益增长的桥梁维护加固改造压力。

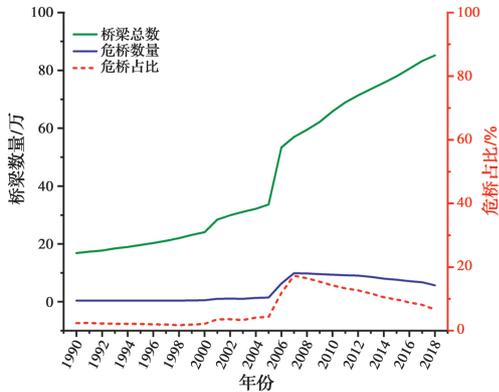


图 1 全国桥梁总数与危桥数量统计

随着研究和实践的深入,“桥梁评估加固”已经成为“桥梁健康管治体系”的有机组成部分,涵盖了桥梁检测与健康监测理论、方法与技术装备、健康评估、养修加固理论和方法、加固决策以及桥梁全生命周期智能管理专家系统等方面,如图 2 所示。笔者重点围绕健康评估、加固和加固决策等相关方面的重要进展,对近年来广大科研工作者的成果进行整理归纳,供今后的研究及工程实践参考。



图 2 桥梁健康管治体系结构

## 1 桥梁健康检/监测研究进展

桥梁检测与健康监测是整个桥梁健康管治体系的首要环节,其目的是利用传感器技术及信号处理分析技术得到桥梁结构状态的理化参数或指标,这些参数或指标主要分为环境指标、荷载等作用、桥梁结构自身响应三大类,为后续评估、加固等环节提供有效且可分析处理的科学参考依据。二者的区别在于:桥梁检测是主动地、具有针对性地通过静力或动力荷载试验对桥梁结构进行检测,主要应用于桥梁验收和对疑似“问题桥梁”进行针对性检查;健康检测则是对各项指标参数进行自动化、常态化的监控,主要以实现实时监控

及预警为目的。桥梁检测所用手段相对传统且成熟,此处着重介绍桥梁健康监测的最新进展。

### 1.1 对桥梁主要病害的监测技术研究进展

钢筋锈蚀是钢筋混凝土结构性能退化的主要原因,研究表明,钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构的抗弯、抗剪承载力有着不同程度的影响<sup>[2]</sup>,最近的研究还证实了不同受拉钢筋上钢筋截面损失的相关性越强,则锈蚀钢筋混凝土梁的承载力变化越大<sup>[3]</sup>。混凝土开裂后,在水氧<sup>[4]</sup>、酸雨<sup>[5]</sup>、除冰盐水<sup>[6]</sup>、海水<sup>[7]</sup>等侵蚀作用下,钢筋锈蚀问题尤为突出,且裂缝宽度越大,钢筋锈蚀越严重<sup>[8-9]</sup>。金祖权等<sup>[10]</sup>利用丝阻电极技术对海洋环境下混凝土中钢筋的锈蚀速率进行了研究,结果表明,在海洋环境中,当钢筋混凝土裂缝宽度达到 0.3 mm 时,海水浪溅区混凝土内钢筋锈蚀速率可达到 0.484 μm/a。对于钢筋锈蚀的监测,后文主要介绍电化学法和电磁法的最新进展,如图 3 所示。

对于钢筋锈蚀,通常利用电化学技术来进行监测,如开路电位、线性极化电阻、电化学阻抗谱等<sup>[11]</sup>,现行检测技术标准也采用了该方法<sup>[12-13]</sup>。对电化学检测方法的研究也有了新的进展:Samson 等<sup>[14]</sup>基于恒电流极化法设计了一种新的探头,用于测量钢筋的腐蚀速率,在数据的处理上,利用迭代算法对混凝土保护层电阻率取用开始测量时的瞬时欧姆降,对钢筋腐蚀速率取用稳态电位计算,结果表明,该方法对 3 个腐蚀参数(腐蚀电位、混凝土保护层电阻率和钢筋腐蚀速率)测定与实际情况较为符合;Hou 等<sup>[15]</sup>采用电化学电流噪声法来测定钢筋的腐蚀情况,然后用光学显微确认和质量损失法分别验证了电化学电流噪声法对腐蚀类型(均匀腐蚀或局部腐蚀)和腐蚀强度测量的可靠性,并在此基础上,通过对信号的特征变量进行递归量化分析,建立了随机森林模型来预测腐蚀类型。孙世栋等<sup>[16]</sup>利用电阻层析成像技术,采用埋入式电极注入电流采集电压的方式获取成像数据,并利用基于共轭梯度法的电阻成像技术进行图像重构,实现了对钢筋锈蚀的无损检测,但该方法仅能定性分析钢筋锈蚀的区域范围;Li 等<sup>[17]</sup>基于能斯特方程和巴特勒-沃尔默方程进行了理论分析,揭示了不同腐蚀状态下腐蚀电位性质及其与腐蚀速率的关系,对比试验结果发现,较负的腐蚀电位和较高的腐蚀电流密度确实是氯化物诱发点蚀的典型特征。但同时,混凝土碳化引起的腐蚀电位和腐蚀电流密度之间却没有明显的关系。目前应用最为广泛的电化学测量方法为自然电位法,它通过测定钢筋电极的相对电位来判断钢筋的锈蚀状况。自然电位法设备简单、成本较低、操作方便,但只能从热力学角度定性判断钢筋锈蚀的可能性,而不能定量地测

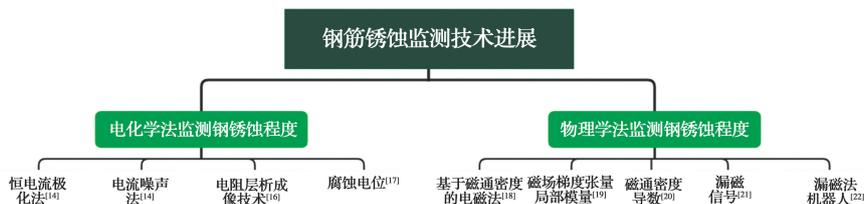


图 3 钢筋锈蚀检测技术进展

量钢筋锈蚀比例。

近来,科研工作者也致力于开发钢筋锈蚀监测的物理方法,其中基于霍尔效应的电磁方法研究较多。Fu 等<sup>[18]</sup>开发了一种可外置于钢筋混凝土结构上的电磁式装置(如图 4 所示)以侦测及监控埋置钢筋的腐蚀,基于有限元方法进行了实验和数值模拟,验证了外电磁传感器的有效性;并采用冲击电流法测定了混凝土试件中钢筋的不同腐蚀程度。实验结果表明,腐蚀钢的质量损失与外部电磁传感器检测到的磁通密度变化呈线性关系,通过与有限元数值模拟结果比较,表明利用磁通密度的变化来估算混凝土中锈蚀钢筋的质量损失具有较高的精度。江胜华等<sup>[19]</sup>测量了 8 根钢筋锈蚀前后的磁感应强度,考虑地球背景磁场和环境干扰磁场的影响,采用磁场梯度张量局部模量为指标建立理论公式来反演钢筋的锈蚀率,试验结果表明,在锈蚀后钢筋磁场梯度绝对值及局部模量的平均值减小,且钢筋自身的磁场梯度及局部模量远远大于环境磁场,环境磁场的梯度及其局部模量可忽略不计,最终计算值与实验值的平均误差为 3.92%。Mosharafi 等<sup>[20]</sup>利用 T 检验、F 检验等统计分析方法对钢腐蚀现场磁记录可靠性进行了研究,结果表明,磁通密度导数的功率、主频分析和数据的标准差这 3 个磁性数据与钢筋的锈蚀状态有着良好的对应关系,其中,基于数据标准差的方法是最可靠的。Zhao 等<sup>[21]</sup>以自发漏磁检测技术为基础,采用分段腐蚀、沿钢筋扫描的方法,研究了钢筋锈蚀后产生的漏磁信号切向分量曲线的线性变化率,结果表明,在钢筋混凝土试件的钢筋锈蚀试验中,随着锈蚀程度的增加,试件表面漏磁信号的切向分量加深,锈蚀区域的极值也越来越大,并提出了“锈磁波动参数”的概念,以准确反映钢筋锈蚀断开引起的漏磁场突变。Azari 等<sup>[22]</sup>基于漏磁法开发了一款桥梁钢筋锈蚀机器人,该机器人系统由两个子系统组成,即用于无损检测的独立漏磁系统和机器人漫游车,漏磁层设计有两个永磁体来磁化嵌入的磁链,多个霍尔效应传感器来检测法向和轴向漏磁,通过对实验室模型梁的测试,对该系统进行了评估。结果表明,该系统能够成功地显示腐蚀区的漏磁信号。尽管其他的物理监测方法也有诸多进展,例如基于涡流热像图的钢筋混凝土腐蚀检测方法<sup>[23]</sup>、基于探地雷达数据的钢筋混凝土腐蚀定量图像处理技术<sup>[24]</sup>、基于压电超声传感器的嵌入式钢筋裂纹与腐蚀监测技术<sup>[25]</sup>等,但笔者认为基于霍尔效应的电磁监测方法有着更为广阔的应用前景,这是因为:1)磁性数据与钢筋锈蚀状态有着更为密切的对应关系;2)量化指标丰富,适用场景更加多元化;3)数据精度高稳定性好(环境影响小);4)灵敏度可控(通过控制驱动电流和线圈匝数);5)非接触式测量,远程可控;6)信息化和自动化空间大;7)成本较低、设备简单等。

对于混凝土的耐久性监测,通常采用电阻率法。21 世纪初,Chung 等<sup>[26-29]</sup>对此做了较为系统的研究,发现电阻率对混凝土的损伤有不同的响应,如动应力和静应力、冻融循环、蠕变和干燥等。在后续的相关研究中,研究人员发现了电阻率与混凝土损伤裂缝宽度<sup>[30]</sup>、裂缝密度<sup>[31]</sup>、荷载循环次

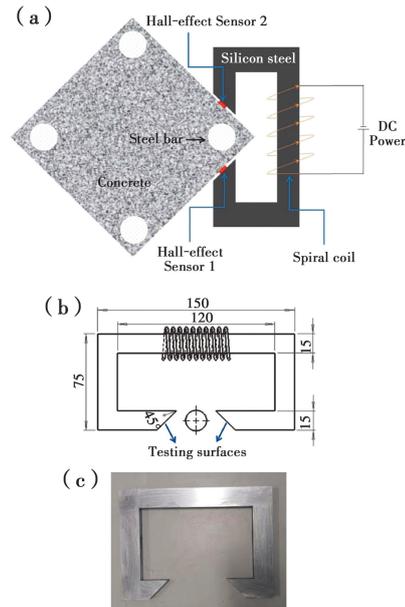


图 4 外部电磁(EM)传感器示意图

数<sup>[32]</sup>之间的关系。最近,柳根金等<sup>[33]</sup>研究了不同导电相对混凝土裂缝监测灵敏度和噪声水平的影响。但到目前为止,这些研究仍然是定性的,且受到诸多不确定因素的影响。究其原因,笔者认为电阻率是描述物体整体的或平均的材料物理性能的参数,它未能将混凝土材料不均匀性、损伤的离散型和随机性等因素纳入考虑范围。

科研工作者也正积极地探索混凝土耐久性监测的其他方法,主要集中在光学传感监测技术。吴桐等<sup>[34-35]</sup>先后利用太赫兹(THz)成像技术和光纤传感技术来对混凝土的裂缝进行监测。结果表明,基于高灵敏度太赫兹成像的方法对混凝土裂缝监测的准确性较高,对混凝土细小裂缝纹理分布的检测精度较好,基于光纤传感监测技术的方法对于混凝土结构深层裂缝监测的物理参数估计精度较高,对裂缝的检测准确性较好。光纤光栅传感器在混凝土耐久性监测中的应用研究也有较大突破,例如吴静红等<sup>[36]</sup>借助混凝土梁模型试验,研究了光频域反射计(OFDI)技术在混凝土结构开裂辨识和发展状况监测上的应用,试验结果表明,OFDI 技术可以实现对混凝土结构 0.002 mm 级别微裂纹的预警;可以定位裂缝位置,空间分辨率达到 1 cm。更多关于光纤光栅传感器的研究进展将在后文中展开介绍。

## 1.2 传感器技术及信号预处理研究进展

在桥梁健康监测领域,各式各样的传感器都已经得到适用性验证,笔者已在前文提及。对于桥梁监测的传感器,总是希望其能够多元化、集成化,以覆盖日益丰富的监测内容。不可否认,传统的传感器在多元集成化方面确实有所突破,例如 Jin 等<sup>[37]</sup>提出了一种由电阻率探针、多个氯离子选择电极和钢铁腐蚀监测系统组成的多元传感器,能够实时、无损地监测混凝土内部电阻率、不同深度混凝土孔隙溶液中游离  $\text{Cl}^-$  ( $\text{Cl}_f$ ) 含量以及钢筋腐蚀参数,但相较于光纤光栅传感器,在多元集成化等方面却难掩其技穷之差。

光纤光栅传感器精度很高,能够达到航空航天器监测的精度要求<sup>[38]</sup>,具有体积小、范围广、传输容量大、损耗小、耐腐蚀、抗电磁感扰、绝缘性好等优点<sup>[39]</sup>,能够直接测量温度、应变等物理量。通过设计相应的敏感元件,能够用于测量应变、温度、位移、加速度等物理参数,从而满足桥梁监测的功能性、耐久性、自动化和信息化要求,其工作原理及搭载形式如图 5 所示。近来,光纤光栅传感器在桥梁监测的各个方面都有突出的进展。在钢筋锈蚀监测方面,Chen 等<sup>[40]</sup>研究了在长周期光纤光栅(LPFG)表面镀上一层银和一层铁碳的腐蚀传感器的机理及其灵敏度,结果表明,在一定范围内,谐振波长的变化与外层 Fe-C 层的质量损失呈线性关系。Tang 等<sup>[41]</sup>利用长周期光纤光栅传感器,实现了对钢筋点蚀钝化、萌生和扩展的监测。田昊等<sup>[42]</sup>利用分布式光纤传感器对钢筋锈胀引起砂浆表面产生的应变进行了监测,从而实现了针对不同直径钢筋锈蚀的体外监测。王浩等<sup>[43]</sup>利用光纤布拉格光栅(FBG)对不同强度等级混凝土内的钢筋腐蚀率进行了检测,其灵敏度达到 0.02%,监测范围超过 1%。在混凝土裂缝监测方面,王莉等<sup>[35]</sup>采用光学传感技术进行混凝土结构深层裂缝的数据采集,并对光纤传感数据的可视化进行了重构,采用统计特征分析的方法提取了混凝土结构深层裂缝的特征分布信息参量,实现了对混凝土结构深层裂缝的相关物理参数估计和结构检测。吴静红等<sup>[36]</sup>通过实验,分析比较了传统应变传感装置、光纤布拉格光栅和基于光频域反射(OFDI)的分布式光纤传感器在混凝土结构开裂的辨识和发展状况监测情况,结果表明,采用基于 OFDR 的分布式光纤传感器得到的裂缝定位结果和对裂缝发展的监测结果更加准确。

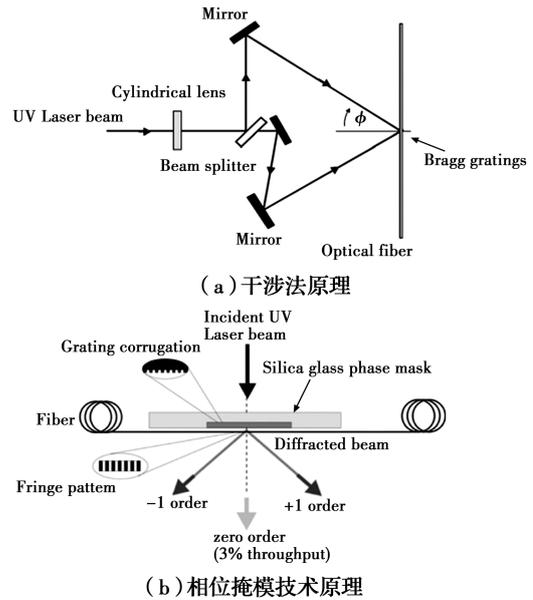


图 5 光纤光栅传感器搭载形式及原理

在荷载监测方面,Al-Tarawneh<sup>[44]</sup>利用光纤光栅传感器,通过测量车辆到达传感器位置的不同时间和通过路面传感器波长变化监测的速度来估计车辆的速度和轴距,实现了对车辆的分类。Chen 等<sup>[45]</sup>仅利用一组长轨距光纤布拉格光栅(FBG)传感器,无需额外的装置即测得车辆的速度、轴距、轴向和总重。Zhang 等<sup>[46]</sup>提出了一种基于分布式光纤和局部 FBG 振动传感器的多尺度载荷识别系统,实现了对结构全尺寸和热点位置的振动荷载的测量,已经达到了能够准确识别落石冲击的水准,其搭载形式及测试结果如图 6 所示。

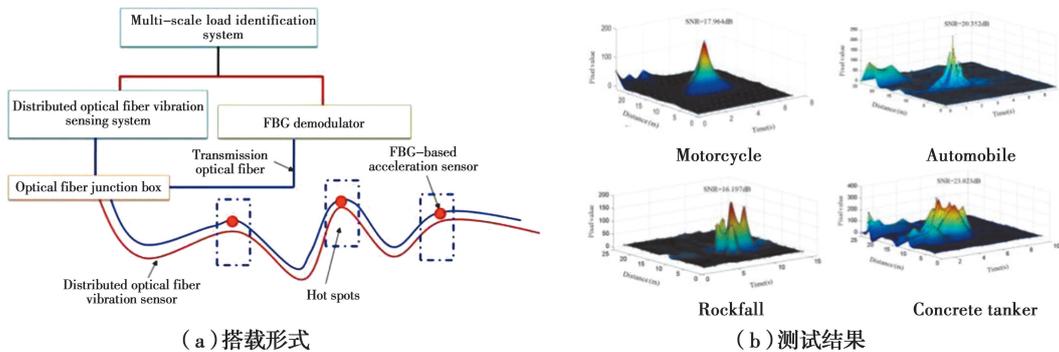


图 6 多尺度荷载识别系统及其测试结果

此外,光纤光栅传感器对于桩顶位移和侧阻力<sup>[47]</sup>、桥墩冲刷<sup>[48]</sup>、地震监测<sup>[49]</sup>等方面的监测也有着诸多优势。

光纤光栅传感器可塑性和可设计性极高,最近 Lee 等<sup>[50]</sup>探索了光纤应力-应变响应条件及噪声控制,建立了光纤光栅传感器的纺织编织制造方法,极大促进了光纤光栅传感器对各种结构的精确测量应用。张冬伟等<sup>[51]</sup>设计了一种 FBG 传感元件结构,当其光栅点应变传递率保持在 90% 以上时,光栅点的重建位置误差将保持在 0.08 mm 内。张煜熔等<sup>[52]</sup>研究了菱形边长、厚度对灵敏度的影响,同时也证明了菱形结构具有温度自补偿性,可设计为边长为 7 mm、厚度为 1 mm 的微型传感器。

光纤光栅传感器性能优异,但需要专用的解调设备将光信号转换为电信号才能进行采集和传输<sup>[53]</sup>。针对现有技术获得的光信号采样点之间欧式距离较大,导致解调后信号还原度不高的问题,潘莹等<sup>[54]</sup>提出了基于数据挖掘算法的光纤光栅传感器复用解调技术,完成对光纤光栅传感器复用信号的解调,并保留了原始基带信号中的细节信息。针对传统的折射率调制方法和回波谱种类较少的问题,Wang 等<sup>[55]</sup>提出了一种基于物联网的索引码调制方法,实现了对光谱形状的控制。关于信号降噪,Liu 等<sup>[56]</sup>提出了一种图像处理领域常用的提高数据信噪比的滤波方法,即双边滤波法,通过对仿真数据和实验数据的处理,比较了中值滤波、小波去噪和双

边滤波的去噪能力,结果表明,双边滤波方法在抑制噪声干扰的同时,能较好地保留有效信号的细节,有效地提高结构损伤检测的数据质量。

最后,在对桥梁结构的长期监测中,传感器自身也有可能发生故障,为确保所得数据的真实性,避免误检、漏检,在进行结构损伤检测与评估之前需要对传感器故障进行预处理以识别和分类。Liu 等<sup>[57]</sup>提出了一种基于深度学习的传

感器故障分类方法,并通过机械和电气仿真,得到了五种传感器常见故障的实验数据,结果表明,该方法能够准确地对传感器故障类型进行识别和分类。Xu 等<sup>[58]</sup>基于改进相关向量机的集成回归实现了传感器系统高精度健康预测,平均相对误差为 0.60%。光纤光栅传感器在桥梁监测上的研究进展如图 7 所示。



图 7 光纤光栅传感器在桥梁监测上的主要研究进展

## 2 桥梁健康评估

桥梁健康评估是整个桥梁健康管理体系中最为关键的一环,其任务是对桥梁结构状态(包括现在及将来的环境作用、荷载效应及结构抗力等)进行评估和预测,这直接影响着后续的加固维修决策。同时,桥梁健康评估可大致分为两类:一类是基于时变可靠度理论的评估方法,它着重于探索“结构状态与一系列变量之间的关系”的逻辑与事实,试图通过严格的理论推导或充分的试验证据,主动地选取合适的可靠度指标并赋予其权重,这在一定程度上是对设计理念的延续;另一类是基于历史测量数据的评估方法,它承认“结构状态与一系列变量之间的关系”的不确定性,并借助其他手段(如人工智能)来达到评估和预测的目的。

此处将其分为上述两类,以便于有逻辑地阐述其最新研究进展及观点,而非认为二者是割裂甚至对立的,相反,笔者认为只有综合运用这些方法,充分发挥二者的优点,并在不同条件下各有侧重,才能够实现对桥梁结构状态的科学评估和预测。关于二者的联合运用也有一些进展<sup>[59-60]</sup>,此处暂不做展开,而重点介绍上述两种方法。

### 2.1 基于时变可靠度理论的评估方法

基于时变可靠度理论的评估方法,实际上是基于已有的理论与实验结果对结构状态在时间上进行概率“扫描”,当一些不利因素被认为会以不能接受的概率同时发生时,则会对它们分别赋予适当的指标及权重并进行组合分析。这种“扫描”的手段通常包括加速试验、有限元建模以及统计分析等。例如:路承功<sup>[61]</sup>在失效机理相似的情况下,利用加速试验获取了钢筋混凝土试件在耦合盐环境中腐蚀劣化的寿命数据,得到了可靠性寿命曲线,并根据样本容量的大小对比了不同指标的准确性和稳定性。Zhuang 等<sup>[62]</sup>利用可靠性分析的综合框架,建立了满足疲劳分析精度的简化有限元模型,采用蒙特卡罗方法计算了有无腐蚀的吊架的疲劳可靠性。Crocce 等<sup>[63]</sup>通过基于高斯混合模型的聚类分析,从实验测试结果

的退化条件以及不同的钢筋和混凝土等级,考察了钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构时间-可靠性曲线的影响。

材料力学性能退化是结构抗力衰变的重要原因,从桥梁结构的全寿命周期来看,较之于泥石流、地震等引起的结构损伤而言,这是一个相对平稳的渐进性随机过程。Yu 等<sup>[64]</sup>对混凝土碳化过程中产生的非均匀腐蚀单元进行了数值模拟,采用有限元电化学模拟方法研究了材料非均匀性条件下宏电池的腐蚀行为,探讨了材料不均匀性对有无结构缺陷腐蚀模型的影响。传统的桥梁可靠性评估方法假设相邻钢梁的抗力或破坏是完全相关或独立的,Gong 等<sup>[65]</sup>利用变量的幂律模型和基于 Gamma 过程的模型来描述腐蚀随时间的不确定性演化,并以钢梁系统为例说明了腐蚀扩展的空间相关性对钢梁桥梁系统可靠性的影响是不可忽略的。必须注意的是,材料的力学性能退化并非一个严格的平稳过程,它同时也具有非平稳特性,文献<sup>[63]</sup>也提到,不同的退化条件下,钢筋和混凝土性能退化表现出一定的差异性,即类聚之后的统计结果都呈现出正态分布的特征,但是各自的统计均值和方差也表现出了一定的随机分布特征。Koteš 等<sup>[66]</sup>的研究也有类似的结果,即在不同的腐蚀条件下,钢筋第一年(所选取的参考时间)的腐蚀速率是不相同的,从而影响次年乃至今后的腐蚀速率,这些影响最终会反映到结构的抗力上。

更多新的研究成果集中在相对非平稳的突发性随机过程对结构的风险评估中。Jin 等<sup>[67]</sup>以典型的桥梁变形作为动力系统的激励,研究了四种简化车辆模型和四种简化轮轨模型的轮轨力及轮轨响应误差,提出的轮轨约束模型与赫兹接触模型具有相似的轮轨响应结果,为概率分析评估车辆在变形桥梁上的运行安全提供了可靠的数据源。邓露等<sup>[68]</sup>针对钢-混凝土组合梁桥,利用所建立的车桥耦合振动程序、S-N 曲线和雨流计数法获得了不同桥面状态下车以不同车速过桥时产生的动力冲击系数、疲劳损伤累积和最大应力,建立了能考虑桥梁全寿命周期内桥面处于不同状态时车辆过桥产生的累积疲劳损伤对钢主梁极限承载能力折减的极限状态方程。Yan 等<sup>[69]</sup>分别用泊松方波过程和泊松脉冲过程来

描述泥石流的浆体冲击和漂石冲击,定义了基于位移的定量损伤指标,采用蒙特卡罗模拟方法,推导了高、低粘度泥石流不同危险度测度下的易损性曲线,该方法能够解决传统经验泥石流脆弱性模型的地理限制问题。姜保宋等<sup>[70]</sup>将概率密度演化方法与桥梁颤振多模态耦合分析方法相结合,以江阴长江大桥作为实例,通过考虑桥梁结构自身的不确定性及气动导数的不确定性,给出了不同模态阻尼比及频率的概率密度演化过程。

这些影响桥梁结构安全服役的随机过程,或将在未来某个时刻以最不利于结构安全的形式同时发生,当这样的可能性不充分小时,应当纳入评估范围。罗辉等<sup>[71]</sup>在串并联模型法的基础上,通过引入 Copula 理论对体系中失效模式的相关性进行衡量,推导了各种串并联体系的联合失效概率计算公式。

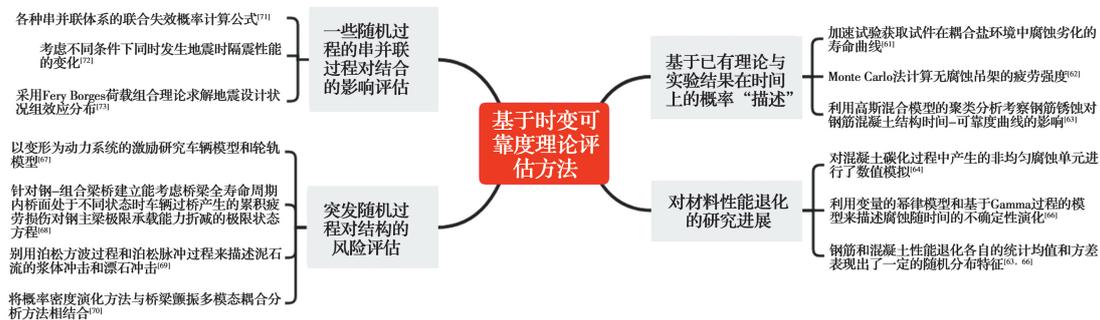


图 8 基于时变可靠度的桥梁健康状态评估本年度的主要研究进展

## 2.2 基于历史测量数据的评估方法

基于历史测量数据的评估方法,实际上是基于已有的测量结果,对结构状态在概率分布上进行时间序列“扫描”,当某种不利因素与结构某种状态的概率分布被“认为”(这种判断可能是人为主观的,也可能是机器的)在时间上具有一定相关性时,则赋予其相应的权重。这种“扫描”的手段包括贝叶斯、人工神经网络等方法。

陈龙等<sup>[76]</sup>以一座钢筋混凝土 T 梁桥 40 年服役期的抗力退化数据,采用贝叶斯分析和期望最大化算法,在四个服役时刻对逆高斯过程抗力退化模型参数进行更新,结果表明,更新后的模型更加准确地预测了桥梁“未来”的可靠度服役状况,估计了桥梁的剩余使用寿命。Chen 等<sup>[77]</sup>在完全遵循贝叶斯框架的前提下,利用参数贝叶斯混合模型,采用一阶可靠性方法导出了条件可靠性指标,其估计值可作为在役桥梁健康状况的定量度量,而且可以随着监测数据的积累而不断更新。Mendoza-Lugo 等<sup>[78]</sup>提出了一种非参数贝叶斯网络,用以评估钢筋混凝土桥柱在同时存在极端活荷载和地震事件的条件下的失效概率,并依检测数据实现失效概率的动态更新。

李游等<sup>[79]</sup>依据实桥动应变监测数据,基于均匀设计-径向基神经网络-重要蒙特卡罗法相结合的算法,运用线弹性断裂力学对 U 肋对接焊缝疲劳可靠性进行了评估,研究了交通量及轴重增长对疲劳可靠度的影响规律。结果表明,当交通量增长系数为 3%,轴重增长系数为 0.6%时,某测点疲劳寿命仅为 74 年。Alsharqawi 等<sup>[80]</sup>基于从目视检查和探地雷

达(GPR)技术收集的数据,利用基于无监督学习算法的 k-means 聚类技术,确定了桥梁状态的评分阈值。Sattar 等<sup>[81]</sup>利用带有缺陷的混凝土-沥青桥面模拟试块的冲击回波测量数据,对卷积神经网络进行了开发和训练,使用 DLMs 生成了缺陷的精确图谱。熊文等<sup>[82]</sup>以模态分析中的低阶模态参数作为样本输入,以冲刷深度与墩位的不同组合作为样本输出,建立了 BP 神经网络,实现了桥梁冲刷深度与墩位的同步评估,并且这种方法仅需要加速度传感器以及数据采集装置,便于融入常规桥梁检测项目中。Khandel 等<sup>[83]</sup>将训练好的深度学习神经网络集成到一个基于仿真的概率框架中,提出了一种考虑气候变化对洪水发生和长期冲刷灾害影响的概率框架,以量化桥梁在洪水灾害下的失效概率并构造桥梁脆弱面。Liu 等<sup>[84]</sup>对比分析了 BP 神经网络与 RBF 神经网络在墩柱抗震性能评估中的预测准确性,结果表明,RBF 网络的预测效果优于 BP 网络。综上,基于历史测量数据的桥梁健康状态评估本年度的主要研究进展如图 9 所示。

此外,还有关于加固<sup>[74]</sup>、加宽<sup>[75]</sup>后桥梁结构的时变可靠度评估研究,此处不做详细阐述。基于时变可靠度的桥梁健康状态评估本年度的主要研究进展如图 8 所示。

达(GPR)技术收集的数据,利用基于无监督学习算法的 k-means 聚类技术,确定了桥梁状态的评分阈值。Sattar 等<sup>[81]</sup>利用带有缺陷的混凝土-沥青桥面模拟试块的冲击回波测量数据,对卷积神经网络进行了开发和训练,使用 DLMs 生成了缺陷的精确图谱。熊文等<sup>[82]</sup>以模态分析中的低阶模态参数作为样本输入,以冲刷深度与墩位的不同组合作为样本输出,建立了 BP 神经网络,实现了桥梁冲刷深度与墩位的同步评估,并且这种方法仅需要加速度传感器以及数据采集装置,便于融入常规桥梁检测项目中。Khandel 等<sup>[83]</sup>将训练好的深度学习神经网络集成到一个基于仿真的概率框架中,提出了一种考虑气候变化对洪水发生和长期冲刷灾害影响的概率框架,以量化桥梁在洪水灾害下的失效概率并构造桥梁脆弱面。Liu 等<sup>[84]</sup>对比分析了 BP 神经网络与 RBF 神经网络在墩柱抗震性能评估中的预测准确性,结果表明,RBF 网络的预测效果优于 BP 网络。综上,基于历史测量数据的桥梁健康状态评估本年度的主要研究进展如图 9 所示。

## 2.3 逐渐被遗忘的核心问题——结构参数反演

关于数理参数的反演问题,中国最早由中国科学院地质与地球物理研究所提出,截至 2019 年 7 月,已举办 5 次“反演问题计算方法及其应用”国际会议,但并未涉及桥梁结构,对于反演问题的阐述及解决方案请参阅相关论文集及专著。李爱群等<sup>[85]</sup>在其 2003 年发表的文章《润扬长江大桥结构健康监测监测系统研究》中总结到:“根据大型结构的监测数据反演其结构健康状态和可能的结构损伤,是一个复杂结构体系在不完善条件下的反问题,结构的状态反演、损伤识别和状态

评估尚有待深入研究。”但这似乎并未引起广泛关注,其中一篇关于采用逆可靠度法估算悬索桥颤振安全系数的文献<sup>[86]</sup>

发表于 2017 年。



图 9 基于历史测量数据的桥梁健康状态评估本年度的主要研究进展

在前述的两类方法中,基于时变可靠度理论的评估方法属于正演问题,即“由因及果”,且不可避免地在一定程度上对“因”进行了简化处理,这种方法系统地与结构参数反演问题对立。这并非否认正演研究的价值,相反地,认为正、反演问题互为条件,彼此促进,当正演问题的研究在量上有了足够的积累,反演问题也将有所突破。就目前而言,二者发展的不平衡性应当引起关注,因为严重滞后的结构参数反演研究使得基于时变可靠度理论的正演评估方法等不能够形成有效闭环,从而用静态的、确定的模型去评估结构的状态。

基于历史测量数据的评估方法是对基于时变可靠度理论的评估方法较好的补充,能够对模型实现测量数据的实时更新,但却回避了结构参数反演问题。其中采用如贝叶斯模型进行统计反演,从先验分布切入,利用后验分布进行预报的方法是较为可取的。而更多的研究则诉诸于人工智能,如人工神经网络。

关于神经网络,人工智能和神经科专家 Gary Marcus 用“overhyped”来评价,他在文献<sup>[87]</sup>中批判性地概述了深度学习的局限性,与本文主题相关的有以下几点:1)测试数据必须与训练数据相似;2)输出结果只能是训练结果的内插与外延,无法做出开放式的推论;3)到目前为止,还没有处理层次结构的自然方法;4)还没有很好地与先验知识相结合,通常被有意地最小化;5)还不能从本质上区分因果关系和相关性;6)神经网络作为一个整体仍然是一个黑匣子(即无法对结果做出合理解释);7)对于复杂的问题,其长期预测评估效果并不一定随数据的积淀而单向趋好。

综上所述,当前由于相关研究的滞后以及技术储备的不足,人工智能或许是一个较为理想的临时替代工具,尤其是对于一些输入与输出相对稳定的问题,但如果对其过度依赖,可以预见的是:它或将是一张技术债务的高息信用卡。

### 3 桥梁养修与加固

桥梁状态评估给出了加固的判断凭据、加固的目标参照,并且在很多时候,加固后仍将是状态监测的参照标准。

而桥梁健康管治系统的另一半内容就是桥梁的养修与加固。为便于查阅和应用,笔者按照加固的针对性进行如下分类进行综述。

#### 3.1 抗弯加固

Gao 等<sup>[88]</sup>采用预应力钢丝绳改性聚氨酯水泥(MPC-PSWR)加固实际工程桥梁,通过数值模拟和荷载试验数据的对比,验证了预应力钢丝绳对改性聚氨酯水泥的加固效果,结果表明,MPC-PSWR 能有效地减小挠度、裂缝宽度和应力,从而显著提高了既有桥梁的抗弯承载力。Tayeh 等<sup>[89]</sup>对自密实混凝土(SCC)和镀锌焊接钢丝网(SWM)加固钢筋混凝土梁的抗弯性能进行了分析与实验验证,结果表明,该技术能够显著提高加固梁的抗弯承载力,并提出了与实验结果较为吻合的简化设计方法。Yuan 等<sup>[90]</sup>提出了一种利用高强度钢丝及高韧性工程水泥基复合材料(ECC)加固既有钢筋混凝土构件的方法,并通过试验分析了加固层基体类型、钢丝配筋率、预损伤的存在对梁受弯性能的影响,结果表明,加固梁的抗弯强度和刚度明显高于未加固控制梁;用 ECC 代替聚合物砂浆不仅改变了加固层的裂缝形态,还延缓了混凝土受拉区的裂缝发展。Guo 等<sup>[91]</sup>采用碳纤维格栅 PCM 加固的钢筋混凝土梁和未加固的钢筋混凝土梁进行了抗弯性能和加固效果试验,研究了 FRP 层数和单位长度 CFRP 格栅配筋量两个主要参数的影响,结果表明,碳纤维格栅复合材料具有良好的抗弯加固效果,且在单位配筋量相近的情况下,双层配筋与单层配筋效果相当,所建立的碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯承载力分析模型与试验实测数据较为吻合。黄俊豪等<sup>[92]</sup>设计了 5 根分别以预裂荷载、CFRP 布层数、配筋率为变量的 CFRP 布加固损伤钢筋混凝土梁进行破坏试验,研究结果表明:加固量相同(同规格纤维布的层数相同)时,加固梁配筋率越低,CFRP 布加固对结构的抗弯强度提升越明显,且对极限荷载的提升幅度大于对屈服荷载的提升幅度;当加固梁的破坏形式为 CFRP 布剥离时,增加 CFRP 布粘帖层数对结构的抗弯承载能力提升效果有限,但有助于提升高荷载水平下加固梁的刚度。

### 3.2 抗剪加固

Abadel 等<sup>[93]</sup>利用角钢和钢筋制成的倒 U 形箍加固钢筋混凝土深梁,使深梁的抗剪承载力比参考梁提高了 40.9%~75.2%,并提出了预测深梁抗剪强度的拉压杆模型,预测结果与试验结果具有很强的相关性。马莹等<sup>[94]</sup>基于室内模型试验,开展了 HB-FRP(增加了螺栓的混合粘贴 FRP)抗剪加固钢筋混凝土 T 梁的受力性能研究,结果表明,HB-FRP 抗剪加固梁的 FRP 应变水平为 EB-FRP(表面粘贴 FRP)抗剪加固梁的 2 倍,表现出了较好的延性,并给出了对抗剪承载能力的影响因素按照重要性的降序排列:混凝土强度、箍筋间距、FRP 间距、FRP 厚度。Cladera 等<sup>[95]</sup>利用铁基形状记忆合金带加固钢筋混凝土 T 形梁,试验表明,加固梁的抗剪强度比对照梁提高了 30%左右,同时有助于延缓裂缝的出现,减小裂缝宽度。Zheng 等<sup>[96]</sup>进行了 FRP/ECC 复合层加固钢筋混凝土梁的试验研究与数值分析,试验结果表明,随着 BFRP 筋网配筋率的增加,加固后钢筋混凝土梁的抗剪承载力有了较大的提高。随着试验梁剪跨比的增大,这种方法的加固效果更加明显。有限元分析结果表明,预测值与试验数据吻合较好,可以有效地预测 BFRP-ECC 复合材料加固钢筋混凝土梁的抗剪承载力。Wei 等<sup>[97]</sup>利用高强应变硬化水泥基复合材料(HS-SHCC)加固钢筋混凝土梁,对试验梁进行了四点弯曲试验,获得其极限抗剪承载力,试验结果表明,加固后钢筋混凝土梁的极限抗剪承载力较对照梁有明显提高。张森等<sup>[98]</sup>以材料强度、界面植筋情况、试件形式为变量,进行了混凝土-石材粘结试件界面剪切力学性能试验,结果表明:在一定范围内,混凝土强度的提高会增强界面的剪切强度,延缓试件的开裂,减小界面同级荷载下的剪切位移;界面植筋可以显著提高试件的剪切性能,提高幅度随着植筋率的增大而增大;相同条件下,套箍型试件的剪切强度大于 Z 型试件,未植筋试件提高约 20%,植筋试件提高约 40%~55%。

### 3.3 抗震加固

Tong 等<sup>[99]</sup>对 W 型和 N 型超高性能混凝土(UHPC)导管架加固低抗弯强度矩形桥墩进行了试验研究及地震易损性评估,从损伤演化、滞回性能、骨架曲线、延性和耗能等方面比较了它们的地震反应,结果表明,W 型和 N 型 UHPC 导管架均减轻了残余位移和混凝土损伤,从而提高了桥墩的抗震能力,相比之下,N-UHPC 导管架提高了桥墩的延性,并减少了混凝土的损伤。最后,通过结构的易损性曲线,对加固后桥墩的地震易损性进行了评估。邓明科等<sup>[100]</sup>对高延性混凝土(HDC)加固钢筋混凝土(RC)梁的抗震性能进行了试验及理论研究,通过低周反复荷载试验探讨了剪跨比、加固方式对其破坏形态、变形和耗能能力等的影响,同时基于桁架-拱模型理论,提出了 HDC 加固梁的抗剪承载力计算方法,计算结果与试验值吻合较好。Jia 等<sup>[101]</sup>通过缩尺试验,研究了碳纤维布加固低水平锈蚀柱的抗震性能和加固效果,结果表明,碳纤维布夹套加固柱可以显著提高柱的位移延性,并在一定程度上减小残余位移。Zhou 等<sup>[102]</sup>以纵筋锈蚀率、轴力

比、LRS-FRP 厚度和边界条件为试验变量,对大断裂应变 FRP 加固锈蚀钢筋混凝土柱的抗震性能进行了试验研究,结果表明,LRS-FRP 加固显著提高了锈蚀钢筋混凝土柱的延性和耗能能力。值得注意的是,当轴压比从 0.2 增加到 0.4 时,未加固锈蚀柱的破坏模式由典型的弯曲破坏转变为剪压破坏,LRS-FRP 加固可防止这种情况的发生,从而使加固锈蚀柱在较大轴压比下最终发生延性弯曲破坏。Wakjira 等<sup>[103]</sup>采用 5%显著性水平的三水平分数析因试验设计,基于纤维的截面离散化方法建立了桥墩的非线性响应模型,研究了混凝土抗压强度、钢筋屈服强度、纵筋几何比、内横筋间距、墩高宽比等关键设计参数对钢筋混凝土(RC)桥墩抗震性能的影响及其交互作用。结果表明,SRP 约束钢筋混凝土桥墩的横向承载力和延性性能受桥墩长宽比、材料性能、横向和纵向配筋量的影响较大,抗屈曲基底剪力和整体延性随着 SRP 层数的增加而增加。Wang 等<sup>[104]</sup>研究了在远场和近场地震动作用下,地震动入射角对屈曲约束支撑加固斜交桥地震反应的影响,结果表明,斜交桥梁的最大响应可通过沿桥梁纵轴及其正交方向(即 0°和 90°)应用标度主 GMs 来估计,而不考虑 GM 特性、斜交角度。Zanini 等<sup>[74]</sup>采用数值方法研究了纤维增强水泥基复合材料(FRCM)体系对老化的多跨钢筋混凝土简支梁桥进行抗震加固的有效性,并量化了实施 FRCM 改造方案在不同时刻可实现的可靠性增益。

### 3.4 附加结构体系加固

Crawford 等<sup>[105]</sup>提出了一种在桥梁上方安装拱形上部结构,通过吊杆提升桥面以替换损坏桥墩的加固方法,采用黑洞和布谷鸟搜索算法来确定正确的吊杆拧紧顺序以及使混凝土与原桥的应力差最小化的应力大小,并以易斯桥为例给出了与各种实际情况相关的结果,并得出黑洞算法为最优的结论。Wang 等<sup>[106]</sup>采用普通混凝土(NC,N 组)和超高性能混凝土(UHPC,U 组)拱圈加固 13 节段拱模型,分析了 UHPC 拱圈加固 PLC 拱桥(指由可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller,PLC)控制液压同步张拉吊杆的拱桥)的破坏模式、应变分布及承载力计算。结果表明,两组均表现出一种或两种破坏模式,即混凝土压碎原有结构和界面破坏,但 UHPC 加固层未出现裂缝,表明其承载潜力较大。Xu 等<sup>[107]</sup>针对采用斜拉体系加固连续箱梁桥在张拉施工过程中主梁局部应力集中较为突出的问题,结合实桥试验,对主梁关键截面的应力和变形进行了研究,斜拉体系对改善主梁挠度效果明显,随着索力的增大,锚固区腹板的主拉应力先增大后减小,主梁最大拉压应力增加出现在根部底板和跨中底板,拉应力作用加强了长索锚固点和短索锚固点至墩顶的压应力,从而释放了部分跨中板的压应力,改善了主梁的受力状态,提高了主梁的抗剪承载能力。

### 3.5 其他养护加固

电化学除氯技术通过在外加阳极和钢筋阴极之间施加电压来排除氯离子使钢筋重新恢复钝化,从而达到保护钢筋混凝土的目的,李树鹏等<sup>[108]</sup>阐述了电化学除氯原理,总结了电化学除氯的影响因素,系统地介绍了电化学除氯对钢筋混

混凝土粘结力、宏观性能和微观结构的影响,分析了目前电化学除氯存在的问题并提出了未来的研究方向。Esmacili 等<sup>[109]</sup>采用轮胎集料底渣加固短跨径混凝土板桥,以改善其动力特性,动力荷载试验结果表明,由于 TDA 层的安装,轨道桥梁的固有频率从 20 Hz 增加到 23 Hz。在 20 km/h 速度下,轨枕的最大加速度和桥面的最大加速度分别降低了 71%、40% 和 58%,而在 50 km/h 速度下则分别降低了 63%、33% 和 58%。此外,还有关于 FRCM 或 SFRM 加固砌体桥梁<sup>[110-111]</sup>、加大截面预应力法<sup>[112]</sup>、HPFRC 套加固钢筋混凝土桥墩<sup>[113]</sup>、粘贴钢板法修复钢箱梁疲劳裂纹<sup>[114]</sup>等方面的最新研究。

### 3.6 加固后评估

Xu 等<sup>[115]</sup>对规范中 FRP 加固钢筋混凝土短柱的抗剪承载力计算公式进行了修正,以预测 CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土短柱的抗剪承载力,并结合实验结果对试件的滞回曲线、破坏模式和荷载-应变关系进行了比较和详细讨论,验证了修正公式的进步性。李趁趁等<sup>[116]</sup>在试验研究的基础上,通过理论分析侵蚀环境下混凝土强度损伤系数和锈蚀钢筋强度退化方程,提出了侵蚀环境下 FRP 复合材料条带加固锈蚀钢筋混凝土圆柱轴心受压承载力的计算方法。Liang 等<sup>[117]</sup>建立了考虑不同服役期材料耐久性损伤修复的桥墩抗震性能分析模型,研究了材料耐久性损伤修复对桥梁结构抗震性能的影响。Chen 等<sup>[118]</sup>利用 ANSYS 对一座 122 m 钢管混凝土拱弦桁架桥进行了有限元分析,得到了该桥加固前后的自振特性,并采用反应谱法和动力时程法对其抗震性能进行了分析比较,结果表明,该桥主桁架横向刚度较低。加固后,桥梁的竖向频率和扭转频率分别显著提高了 24% 和 32%,如图 10 所示。在相同条件下,加固后的桥梁上弦杆固定端轴力减小约 29%,上弦杆跨中横向位移和竖向位移分别减小约 10% 和 20%。Yuan 等<sup>[119]</sup>综合考虑了材料特性、几何参数、载荷模型和时变阻力模型的不确定性,提出了碳纤维布加固钢筋混凝土桥梁的可靠性和剩余寿命估算方法。

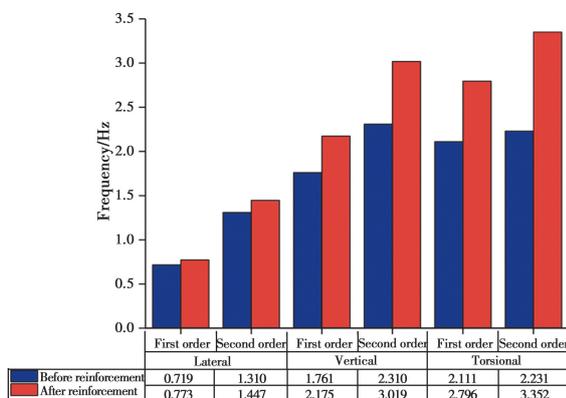


图 10 加固前后的自振频率比较

## 4 维修加固策略

帕累托法则启示人们:事物的因与果、投入与产出之间总是存在着不可避免的不平衡。因而,凡谋之道,极效为宝。

维修加固策略需要解决的是如何以有限的养护资金取得最大的经济社会效益。从区域网络级别来看,需要考虑区域交通安全性、经济合理性、社会响应甚至人民的精神需要来决定维修投入的定量与定向问题;从项目级别来看,需要考虑单桥的重要等级、结构安全性、应急适应性及经济合理性来决定对该桥所需采取的措施,包括维护、加固、拓宽、重建等及其具体方案。

### 4.1 网络级维修加固策略

网络级策略着重于确定网络中需要进行加固的桥梁以及加固措施的分配。Wang 等<sup>[120]</sup>提出了一种基于非参数随机子集优化(NP-SSO)的桥梁重要性排序算法,它首先从一个扩展的失效分布中采用自适应核采样密度的改进接受-拒绝算法(AKSD)有效地生成失效样本,然后通过比较每个桥梁的失效样本数直接建立重要性排序。结果表明,该算法对于重要网桥的识别是高效的,迭代次数只随网桥数量的对数增长,特别适用于具有多个网桥的大规模网络。Peeters 等<sup>[121]</sup>提出了一种确定混凝土桥梁基本加固要求的方法,该方法采用水平频率图并考虑风险矩阵,同时采用风险数,分别对稳定性和耐久性的评估属性进行评估,最终确定网络中哪些桥梁类别需要加固。夏焯等<sup>[122]</sup>通过制订区域内检测、监测、交通量、图纸等多源信息的集成规则,按“路线—桥梁—构件”的逻辑形式进行存储和表达,数据清洗后建立路网数据库,对集成后的数据进行特征挖掘,进而实现对区域桥梁群的综合网级评估。Yang 等<sup>[123]</sup>提出了一种基于退化桥梁网络风险边界的非模拟方法,该方法使用系统可靠性分析来确定网络中各种桥梁失效情况的发生概率,对于每一种故障情况进行流量分配,预测受损网络中的流量和网络级后果。然后给出了网络级风险的上下界,使得只需少量的流量分配操作即可进行高效、准确的风险评估,最后通过元启发式搜索得到最优的全生命周期维修计划,包括维修计划和每次维修的投资。

### 4.2 项目级维修加固策略

项目级维修加固策略侧重于确定拟加固桥梁的目标可靠度。袁阳光等<sup>[124-125]</sup>通过联合时域内的动态广义极值分布模型及蒙特卡洛模拟,实现了对连续非平稳车载过程的极值建模,基于 Gamma 过程建立及更新了在役混凝土桥梁构件抗力非平稳劣化模型,综合考虑边际救生成本准则、个体风险准则及社会风险准则,对运营阶段目标可靠度指标取值进行了讨论。初步建议在役混凝土桥梁构件运营阶段年目标可靠度指标取为 3.98,但具体评估工作中不能忽略基准期对目标可靠度指标的影响,随后分别考虑利用非平稳及平稳概率模型进行荷载效应及抗力评估值确定,基于可靠度理论开展运营阶段评估分项系数校准,并以一座在役桥梁为例进行算例分析,最终建议对于一级、二级、三级延性破坏构件设定评估目标可靠指标分别为 3.37、3.13、2.85。Zhang 等<sup>[126]</sup>提出了基于最优结构参数比的斜拉桥主梁目标可靠指标选择方法,采用有限元法计算了斜拉桥的主索抗弯承载力及其可靠度指标,计算了不同结构参数比下的可靠性指标,并通过

数据拟合得到了可靠性指标与结构参数比的关系式,然后从成本效益的角度计算出最优结构参数比,最后将最优结构参数比代入可靠性指标与结构参数比的关系式中,得到最优可靠性指标。王飞等<sup>[127]</sup>针对系统中各加固方案指标属性的复杂性、区间性与不确定性等特征,借鉴粗糙集理论和博弈决策理论的 Minimax 决策算法优化思路,考虑到应急加固方案与理想方案之间的优势度及其属性的概率测度与各方属性值之间存在一定的等价关系,利用属性优势关系来确定指标权重度量值。

此外,从“管养并重”的角度来看,适当的交通管制也有益于桥梁的长期服役,邓露等<sup>[128]</sup>基于实测车辆动态称重数据和可靠度理论,研究了桥梁可靠度及其年均加固费用与车辆轴限值的关系。

综上,桥梁养修与加固研究 2020 年度主要研究进展如图 11 所示。

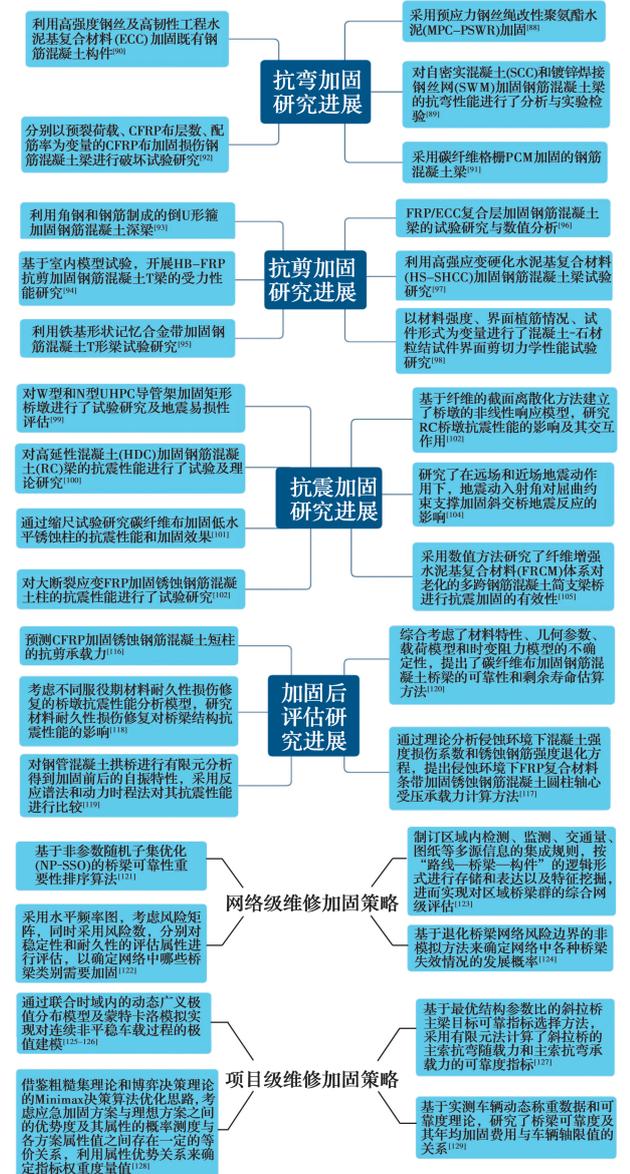


图 11 桥梁养修与加固研究 2020 年度主要研究进展

## 5 结语与建议

根据查阅的 2020 年桥梁评估与加固的相关研究,结合近年来相关领域的研究热点,现将研究进展总结、展望如下:

1)在桥梁健康检测与监测研究方面:所引文献集中在钢筋锈蚀、混凝土耐久性方面。同时,传感器技术和信号预处理(前端计算)的研究热度突显,尤其是在光纤光栅类传感器的研究方面。建议可继续开展有针对性的、如可适应中小跨径桥梁的健康监测方法和设备相关研究,以应对中小跨径桥梁健康监测的巨大需求。

2)在桥梁健康评估方面:除了归纳为基于时变可靠度和基于历史测量数据两类研究热点以外,结构参数反演在大数据背景下可开展进一步的研究。

3)在桥梁养修与加固方面:2020 年度在抗弯、抗剪、抗震加固以及附加结构体系加固等方面围绕新材料的研究较多。加固中考虑智能材料和智能监测连同已有一些进展的加固后评估研究,或许是今后的一个新的热点方向。

4)2020 年度增加了对维修加固策略的单独归纳,因为笔者认为无论是从国家大型基建管理的先进性提升,还是从业主优化节约经费的角度来说,策略的研究和成果应用均具有重要的现实意义。

未来桥梁评估与加固将继续向着成为土木工程(甚至是整个工业工程)的热重点研究领域迈进。随着桥梁老龄化的加剧,更大的工程需求势必会引来更多的资本、技术市场的关注,在大数据、人工智能的“虚”势实化过程中,肯定会带来一些实质性的技术渗“新”,桥梁工程也将推动这场技术革命。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2008 年公路水路交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2009(5): 94-96.

[2] SOLTANI M, SAFIEY A, BRENNAN A. A state-of-the-art review of bending and shear behaviors of corrosion-damaged reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 2019, 116(3): 139-150.

[3] ZHANG M Y, NISHIYA N, AKIYAMA M, et al. Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120678.

[4] 农喻媚, 陈正. 基于第一性原理的水氧相互作用下钢筋锈蚀机理研究[C]//2020 第七届海洋材料与腐蚀防护大会暨 2020 第一届钢筋混凝土耐久性与设施服役安全大会论文集. 无锡, 2020: 86.

[5] ZAFAR F, BANO H, MAHMOOD A, et al. Physicochemical studies of mild steel corrosion and atmospheric corrosivity mapping of Karachi: An important harbor city of modern Maritime Silk Route

- [J]. *Materials and Corrosion*, 2020, 71(9): 1557-1575.
- [6] 李天. 氯盐环境混凝土内部钢筋非均匀腐蚀机理与数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [7] LIU J, JIANG Z L, ZHAO Y L, et al. Chloride distribution and steel corrosion in a concrete bridge after long-term exposure to natural marine environment [J]. *Materials*, 2020, 13(17): 3900.
- [8] HE S Q, CAO Z Y, LIU W J, et al. Experimental study on long-term performance of reinforced concrete beams under a sustained load in a corrosive environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117288.
- [9] CAO J, LIU L F, ZHAO S C. Relationship between corrosion of reinforcement and surface cracking width in concrete [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-14.
- [10] 金祖权, 冯光岩, 姜玉丹. 利用丝束电极技术研究海洋环境下裂缝混凝土中钢筋的锈蚀[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11): 1791-1800.
- [11] BIN X, JING P, LI C H. A review of research on nondestructive testing methods for steel corrosion[J]. *Journal of Simulation*, 2020, 8(3).
- [12] 建筑结构检测技术标准: GB/T 50344—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [13] ASTM International. ASTM C876-15, Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete [S]. West Conshohocken: ASTM, 2015.
- [14] SAMSON G, DEBY F, GARCIAZ J L, et al. An alternative method to measure corrosion rate of reinforced concrete structures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 112: 103672.
- [15] HOU Y, POJTANABUNTOENG T, IANNUZZI M. Use of electrochemical current noise method to monitor carbon steel corrosion under mineral wool insulation [J]. *Npj Materials Degradation*, 2020, 4(1): 1-9.
- [16] 孙世栋, 秦磊, 任宏伟, 等. 基于电阻层析成像的混凝土钢筋锈蚀无损检测[J]. *无损检测*, 2020, 42(1): 37-40.
- [17] LI C, CHEN Q, WANG R L, et al. Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: Theoretical insights and practical data interpretations [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 112: 103652.
- [18] FU C Q, HUANG J H, DONG Z, et al. Experimental and numerical study of an electromagnetic sensor for non-destructive evaluation of steel corrosion in concrete [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 315: 112371.
- [19] 江胜华, 侯建国, 何英明. 基于磁场梯度张量局部模量的钢筋锈蚀损伤监测方法[J/OL]. *西南交通大学学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.u.20200603.1231.008.html>.
- [20] MOSHARAFI M, MAHBAZ S, DUSSEAUULT M B. Statistical methods to assess the reliability of magnetic data recorded over steel corrosion sites [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: 120260.
- [21] ZHAO Q Y, ZHOU J T, XIA Q W, et al. Non-destructive testing of steel corrosion fluctuation parameters based on spontaneous magnetic flux leakage and its relationship with steel bar diameter [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(24): 4116.
- [22] AZARI H, GHORBANPOOR A, SHAMS S. Development of robotic nondestructive testing of steel corrosion of prestressed concrete bridge girders using magnetic flux leakage system [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020, 2674(8): 466-476.
- [23] LIU L, ZHENG D, ZHOU J T, et al. Parameters that influence corrosion detection in reinforced concrete based on eddy current thermography [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-9.
- [24] ZAKI A, JUSMAN Y, JOHARI M M, et al. Image processing for corrosion quantification in concrete slabs using GPR data [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1471: 012049.
- [25] LIU P, HU Y, CHEN Y, et al. Investigation of novel embedded piezoelectric ultrasonic transducers on crack and corrosion monitoring of steel bar [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117495.
- [26] CHUNG D D L. Damage in cement-based materials, studied by electrical resistance measurement [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2003, 42(1): 1-40.
- [27] CAO J Y, CHUNG D D L. Defect dynamics and damage of concrete under repeated compression, studied by electrical resistance measurement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(11): 1639-1642.
- [28] WEN S H, CHUNG D D L. Damage monitoring of cement paste by electrical resistance measurement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(12): 1979-1982.
- [29] LUO X C, CHUNG D D L. Concrete-concrete pressure

- contacts under dynamic loading, studied by contact electrical resistance measurement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(2): 323-326.
- [30] BOULAY C, DAL PONT S, BELIN P. Real-time evolution of electrical resistance in cracking concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(9): 825-831.
- [31] ZHOU C S, LI K F, HAN J G. Characterizing the effect of compressive damage on transport properties of cracked concretes [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(3): 381-392.
- [32] XU Z H, LIU Z T. Fatigue damage sensing in smart carbon fiber concrete by electrical resistivity measurement [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 348/349: 345-348.
- [33] 柳根金, 丁一宁, 衡震. 不同导电相对混凝土裂缝智能化自监测的灵敏度与噪声水平的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10): 2610-2618.
- [34] 吴桐, 王莉. 基于 THz 成像的混凝土裂缝监测技术研究[J]. *激光杂志*, 2020, 41(9): 57-61.
- [35] 王莉, 吴桐. 基于光纤传感技术的混凝土结构深层裂缝监测研究[J]. *激光杂志*, 2020, 41(11): 193-197.
- [36] 吴静红, 刘浩, 杨鹏, 等. 基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 241201.
- [37] JIN M, MA Y F, ZENG H Y, et al. Developing a multi-element sensor to non-destructively monitor several fundamental parameters related to concrete durability [J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5607.
- [38] KWON H, PARK Y, SHIN C, et al. In-flight strain monitoring of aircraft tail boom structure using a fiber Bragg grating sensor based health and usage monitoring system [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22(3): 567-577.
- [39] SAHOTA J K, GUPTA N, DHAWAN D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(6): 060901.
- [40] CHEN Y Z, TANG F J, TANG Y, et al. Mechanism and sensitivity of Fe-C coated long period fiber grating sensors for steel corrosion monitoring of RC structures [J]. *Corrosion Science*, 2017, 127: 70-81.
- [41] TANG F J, LI Z C, LI C, et al. Monitoring passivation, pitting corrosion initiation, and propagation of steel bar with iron-carbon electroplated long period fiber-grating sensor [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(12): 04020373.
- [42] 田昊, 唐福建, 李宏男. 基于 OFDR 分布式光纤的钢筋锈蚀监测技术[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(6): 1524-1530.
- [43] 王浩, 蔡思佳, 张作才. 一种新型光纤光栅锈蚀传感器及其对混凝土结构钢筋锈蚀监测实验研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(8): 877-880.
- [44] AL-TARAWNEH M, HUANG Y, LU P, et al. Vehicle classification system using in-pavement fiber Bragg grating sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2807-2815.
- [45] CHEN S Z, WU G, FENG D C, et al. Development of a bridge weigh-in-motion system based on long-gauge fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(9): 04018063.
- [46] ZHANG S H, HE J P, YU Q F, et al. Multi-scale load identification system based on distributed optical fiber and local FBG-based vibration sensors [J]. *Optik*, 2020, 219: 165159.
- [47] WANG Y H, LIU X Y, ZHANG M Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for pile jacking monitoring in clay soil [J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5239.
- [48] KONG X, CAI C S, HU J X, et al. Field application of an innovative bridge scour monitoring system with fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 30(2): B4016008.
- [49] ZHOU R, GAO H, FENG Z Y, et al. Simulation and hardware implementation of demodulation for fiber optic seismic sensor with linear edge filtering method [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 60: 102384.
- [50] LEE S B, LEE J. Braided fabrication of a fiber Bragg grating sensor [J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5246.
- [51] 张冬伟, 金靖, 朱云鸿, 等. FBG 形状传感器应变传递与传感性能研究[J]. *半导体光电*, 2020, 41(6): 833-838, 844.
- [52] 张煜熔, 廖秋雨, 董昭达, 等. 光纤布拉格光栅菱形结构应变传感器[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 799-805.
- [53] DEEPA S, DAS B. Interrogation techniques for  $\pi$ -phase-shifted fiber Bragg grating sensor: A review [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 315: 112215.
- [54] 潘莹, 王君. 数据挖掘的光纤光栅传感器复用解调技术[J]. *激光杂志*, 2020, 41(10): 187-191.
- [55] WANG J, LIU Z C, YANG J H. Fiber Bragg grating sensor based on refractive index segment code of mobile modulation [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2021, 26(3): 997-1007.
- [56] LIU N, SCHUMACHER T. Improved denoising of structural vibration data employing bilateral filtering

- [J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1423.
- [57] LIU G, LI L L, ZHANG L L, et al. Sensor faults classification for SHM systems using deep learning-based method with Tsfresh features [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(7): 075005.
- [58] XU P, WEI G, SONG K, et al. High-accuracy health prediction of sensor systems using improved relevant vector-machine ensemble regression [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 212: 106555.
- [59] 李松辉, 李灿, 聂瑞锋, 等. 考虑抗力修正系数和静载试验效率的 RC 简支梁桥限载取值[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(10): 99-105.
- [60] MANKAR A, BAYANE I, SØRENSEN J D, et al. Probabilistic reliability framework for assessment of concrete fatigue of existing RC bridge deck slabs using data from monitoring [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109788.
- [61] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 基于 3 参数 Weibull 分布钢筋混凝土盐腐蚀环境中可靠性寿命分析[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(4): 512-520.
- [62] ZHUANG M L, MIAO C Q. RETRACTED: Fatigue reliability assessment for hangers of a special-shaped CFST arch bridge [J]. *Structures*, 2020, 28: 235-250.
- [63] CROCE P, FORMICHI P, LANDI F. Influence of reinforcing steel corrosion on life cycle reliability assessment of existing R. C. buildings [J]. *Buildings*, 2020, 10(6): 99.
- [64] YU Y G, GAO W, CASTEL A, et al. Modelling steel corrosion under concrete non-uniformity and structural defects [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 135: 106109.
- [65] GONG C Q, FRANGOPOL D M. Reliability of steel girder bridges with dependent corrosion growth [J]. *Engineering Structures*, 2020, 224: 111125.
- [66] KOTEŠ P, STRIEŠKA M, BAHLEDA F, et al. Prediction of RC bridge member resistance decreasing in time under various conditions in Slovakia [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(5): 1125.
- [67] JIN Z B, YUAN L G, PEI S L. Efficient evaluation of bridge deformation for running safety of railway vehicles using simplified models [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(3): 454-467.
- [68] 邓露, 褚鸿鹄, 王维, 等. 车致疲劳损伤对钢-混凝土组合梁桥极限承载力可靠度的影响[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(4): 71-79.
- [69] YAN S X, HE S M, DENG Y, et al. A reliability-based approach for the impact vulnerability assessment of bridge piers subjected to debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2020, 269: 105567.
- [70] 姜保宋, 周志勇, 唐峰. 桥梁颤振临界风速的概率密度演化计算[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(3): 59-67.
- [71] 罗辉, 李彤, 熊凯文. 基于 Copula 理论的桥梁可靠度计算[J]. *土木工程与管理学报*, 2020, 37(4): 1-7.
- [72] NASSAR M, GUIZANI L, NOLLET M J, et al. A probability-based reliability assessment approach of seismic base-isolated bridges in cold regions [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109353.
- [73] 周敦, 赵威, 刘阳, 等. 公路桥梁地震设计状况荷载组合分项系数研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 317-330.
- [74] ZANINI M A, TOSKA K, FALESCHINI F, et al. Seismic reliability of reinforced concrete bridges subject to environmental deterioration and strengthened with FRCM composites [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 136: 106224.
- [75] TU B, FANG Z, DONG Y, et al. Time-variant reliability analysis of widened deteriorating prestressed concrete bridges considering shrinkage and creep [J]. *Engineering Structures*, 2017, 153: 1-16.
- [76] 陈龙, 黄天立. 基于贝叶斯更新和逆高斯过程的在役钢筋混凝土桥梁构件可靠度动态预测方法[J]. *工程力学*, 2020, 37(4): 186-195.
- [77] NI Y Q, CHEN R. Strain monitoring based bridge reliability assessment using parametric Bayesian mixture model [J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111406.
- [78] MENDOZA-LUGO M A, DELGADO-HERNÁNDEZ D J, MORALES-NÁPOLES O. Reliability analysis of reinforced concrete vehicle bridges columns using non-parametric Bayesian networks [J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 178-187.
- [79] 李游, 李传习, 陈卓异, 等. 基于监测数据的钢箱梁 U 肋细节疲劳可靠性分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(2): 111-123.
- [80] ALSHARQAWI M, ZAYED T, ABU DABOUS S. Integrated condition-based rating model for sustainable bridge management [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(5): 04020091.
- [81] DORAFSHAN S, AZARI H. Evaluation of bridge decks with overlays using impact echo, a deep learning approach [J]. *Automation in Construction*, 2020, 113: 103133.
- [82] 熊文, 张榆, 李飞泉, 等. 基于时频分析与神经网络的桥梁冲刷动力评估[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(4): 397-404.

- [83] KHANDEL O, SOLIMAN M. Integrated framework for assessment of time-variant flood fragility of bridges using deep learning neural networks [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2021, 27(1): 04020045.
- [84] LIU Q L, SUN P X, FU X Y, et al. Comparative analysis of BP neural network and RBF neural network in seismic performance evaluation of pier columns [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 141: 106707.
- [85] 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江大桥结构健康监测系统研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(5): 544-548.
- [86] CHENG J, XIAO R C. Application of inverse reliability method to estimation of cable safety factors of long span suspension bridges [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2006, 23(2): 195-207.
- [87] MARCUS G. Deep learning: a critical appraisal [EB/OL]. 2018; arXiv: 1801. 00631 [cs. AI]. <https://arxiv.org/abs/1801.00631>.
- [88] GAO H S, SUN Q S. Static field test on flexural behavior of reinforced concrete T-beam bridge strengthened with MPC-PSWR [J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2020, 11(3): 515-531.
- [89] TAYEH B A, ABU MARAQ M A, ZIARA M M. Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with self-compacting concrete jacketing and steel welded wire mesh [J]. *Structures*, 2020, 28: 2146-2162.
- [90] YUAN F, CHEN M C, PAN J L. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with high-strength steel wire and engineered cementitious composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119284.
- [91] GUO R, HU W H, LI M Q, et al. Study on the flexural strengthening effect of RC beams reinforced by FRP grid with PCM shotcrete [J]. *Composite Structures*, 2020, 239: 112000.
- [92] 黄俊豪, 钱永久, 杨华平, 等. CFRP 布加固损伤 RC 梁抗弯性能试验研究[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(5): 17-21.
- [93] ABADEL A A, ALBIDAH A S. Investigation of shear reinforcement schemes for RC deep beams [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(5): 4747-4763.
- [94] 马莹, 高磊, 张峰. 钢筋混凝土 T 梁 HB-FRP 抗剪加固试验和数值模拟[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(5): 1073-1081.
- [95] CLADERA A, MONTOYA-CORONADO L A, RUIZ-PINILLA J G, et al. Shear strengthening of slender reinforced concrete T-shaped beams using iron-based shape memory alloy strips [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111018.
- [96] ZHENG Y Z, WANG W W, MOSALAM K M, et al. Experimental investigation and numerical analysis of RC beams shear strengthened with FRP/ECC composite layer [J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112436.
- [97] WEI J Y, WU C, CHEN Y X, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams with high strength strain-hardening cementitious composites (HS-SHCC)[J]. *Materials and Structures*, 2020, 53(4): 1-15.
- [98] 张森, 钱永久, 张方, 等. 混凝土-石材粘结界面剪切性能试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6): 952-958, 1017.
- [99] TONG T, LEI H P, YUAN S Q, et al. Experimental investigation and seismic vulnerability assessment of low flexural strength rectangular bridge piers retrofitted with ultrahigh-performance concrete jackets [J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110132.
- [100] 邓明科, 郭莉英, 李睿喆, 等. 高延性混凝土加固钢筋混凝土梁抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(11): 47-57.
- [101] JIA J F, ZHAO L Y, WU S W, et al. Experimental investigation on the seismic performance of low-level corroded and retrofitted reinforced concrete bridge columns with CFRP fabric [J]. *Engineering Structures*, 2020, 209: 110225.
- [102] ZHOU Y W, CHEN X, WANG X H, et al. Seismic performance of large rupture strain FRP retrofitted RC columns with corroded steel reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2020, 216: 110744.
- [103] WAKJIRA T G, NEHDI M L, EBEAD U. Fractional factorial design model for seismic performance of RC bridge piers retrofitted with steel-reinforced polymer composites [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111100.
- [104] WANG Y D, IBARRA L, PANTELIDES C. Effect of incidence angle on the seismic performance of skewed bridges retrofitted with buckling-restrained braces [J]. *Engineering Structures*, 2020, 211: 110411.
- [105] CRAWFORD B, SOTO R, LEMUS-ROMANI J, et al. Investigating the efficiency of swarm algorithms for bridge strengthening by conversion to tied-arch: A numerical case study on San Luis bridge [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2020: 1-13.

- [106] WANG Z S, ZHOU J T, YANG J, et al. Experiment on the segment model of a plain concrete arch bridge reinforced with UHPC composite arch circle [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-14.
- [107] XU G N, WANG L Y, DU Y F, et al. Study on mechanical properties of main girder of continuous box girder bridge strengthened by A cable-stayed system [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549: 032102.
- [108] 李树鹏, 金祖权, 熊传胜. 钢筋混凝土电化学除氯技术研究现状[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(1): 25-33, 63.
- [109] ESMAEILI M, ATAEI S, SIAHKOUHI M. A case study of dynamic behaviour of short span concrete slab bridge reinforced by tire-derived aggregates as sub-ballast [J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2020, 8(1): 80-98.
- [110] ZAMPIERI P, SIMONCELLO N, GONZALEZ-LIBREROS J, et al. Evaluation of the vertical load capacity of masonry arch bridges strengthened with FRCM or SFRM by limit analysis [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111135.
- [111] ZAMPIERI P. Horizontal capacity of single-span masonry bridges with intrados FRCM strengthening [J]. *Composite Structures*, 2020, 244: 112238.
- [112] JIA L, TAO L, HONG H, et al. Experimental test on bridge reinforcement by enlarging section-prestress method [J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 165: 04015.
- [113] REGGIA A, MORBI A, PLIZZARI G A. Experimental study of a reinforced concrete bridge pier strengthened with HPFRC jacketing [J]. *Engineering Structures*, 2020, 210: 110355.
- [114] 周家刚, 徐志民. 粘贴钢板技术修复钢箱梁疲劳裂纹[J]. *公路*, 2020, 65(11): 224-230.
- [115] XU Y Y, HUANG J Q. Cyclic performance of corroded reinforced concrete short columns strengthened using carbon fiber-reinforced polymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118548.
- [116] 李趁趁, 于爱民, 高丹盈, 等. 侵蚀环境下FRP条带加固锈蚀钢筋混凝土圆柱轴心受压试验[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(8): 2015-2028.
- [117] LIANG Y, LI L L, MAO R M, et al. Seismic response analysis of pier considering durability damage repair [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-16.
- [118] CHEN D H, WANG W Z, LI Z, et al. Comparative analysis of seismic performance of 122-meter long concrete-filled steel tube arched chord truss bridge before and after reinforcement [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2020, 19(2): 90-102.
- [119] YUAN H Y, HOU W, REN L P, et al. Reliability assessment and residual life estimation of concrete girder bridges strengthened by carbon fiber during the service stage [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-11.
- [120] WANG Z Q, JIA G F. Non-parametric stochastic subset optimization for reliability-based importance ranking of bridges in transportation networks [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 76: 348-361.
- [121] PEETERS M, SCHNELLENBACH-HELD M. Ein Ansatz zur Bewertung des Verstärkungsbedarfs von Massivbrücken [J]. *Beton-Und Stahlbetonbau*, 2020, 115(4): 280-289.
- [122] 夏焯, 雷晓鸣, 王鹏, 等. 针对网级评估的区域桥梁信息集成与数据挖掘[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(3): 66-74.
- [123] YANG D Y, FRANGOPOL D M. Life-cycle management of deteriorating bridge networks with network-level risk bounds and system reliability analysis [J]. *Structural Safety*, 2020, 83: 101911.
- [124] 袁阳光, 韩万水, 谢青, 等. 非平稳车载及抗力劣化进程中混凝土桥梁时变可靠性评估[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(3): 85-96.
- [125] 袁阳光, 韩万水, 李光玲, 等. 考虑非平稳因素的混凝土桥梁概率极限状态评估[J]. *工程力学*, 2020, 37(8): 167-178.
- [126] ZHANG Z H, LI W B, DING Z X, et al. An approach to the selection of target reliability index of Cable-stayed bridge's main girder based on optimal structural parameter ratio from cost-benefit analysis [J]. *Structures*, 2020, 28: 2221-2231.
- [127] 王飞, 李东珺. 震后桥梁应急加固方案优选的区间优势决策算法研究[J]. *计算机应用与软件*, 2020, 37(12): 76-82.
- [128] 邓露, 王涛, 何钰龙, 等. 车辆轴限对钢筋混凝土桥梁可靠度和加固费用的影响[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(5): 92-100.

(编辑 颜永松)