

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.102

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 钢结构桥梁疲劳 2019 年度研究进展

张清华, 崔闯, 卜一之, 李乔, 夏嵩

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 钢结构桥梁具有轻质、高强、跨越能力大、易工厂化制造和便于装配化施工等突出优点, 是未来一段时期中国桥梁工程的重要发展方向。但由于服役环境、荷载条件和交通需求、结构体系和构造细节设计等诸多因素的影响, 其疲劳问题突出, 已成为制约钢结构桥梁可持续发展的世界性难题。作为桥梁工程的热点研究课题, 学者们在钢结构桥梁疲劳领域进行了卓有成效的研究, 现聚焦钢结构桥梁疲劳损伤演化与服役性能劣化机理、钢结构桥梁疲劳抗力评估与预测、钢结构桥梁疲劳裂纹监测与检测方法、疲劳开裂加固与维护技术等方面, 对 2019 年度的研究进展和下阶段的研究重点进行扼要的梳理和总结。分析了钢结构桥梁疲劳关键问题研究方面的挑战, 具体讨论了在钢结构桥梁疲劳失效机制、疲劳抗力评估新理论新方法、疲劳损伤智能监测与检测和疲劳开裂加固关键技术等方面开展深入研究的迫切需求和主要问题。

**关键词:** 桥梁工程; 钢结构桥梁; 疲劳; 服役性能

**中图分类号:** U448.36      **文献标志码:** R      **文章编号:** 2096-6717(2020)05-0147-12

## State-of-the-art review of fatigue of steel bridge in 2019

Zhang Qinghua, Cui Chuang, Bu Yizhi, Li Qiao, Xia Song

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

**Abstract:** Steel bridge has outstanding advantages, such as high ratio of strength to weight, large spanning ability, easy to factory manufacturing and assembly construction, which is an important direction of future development in bridge engineering in China. However, due to the effects of multiple factors such as service environment, load conditions, traffic demand, structural system and structural detail design, fatigue is a critical issue and has become a worldwide problem restricting the sustainable development of steel bridge. As a hot research topic of bridge engineering, considerable efforts from the field of steel bridge fatigue have been done. This paper focuses on reviewing the latest research progress in the aspects of fatigue damage evolution, service performance degradation mechanism, fatigue resistance assessment and prediction, fatigue crack monitoring and detection methods, fatigue crack reinforcement and maintenance technology of steel bridge made by the domestic and foreign scholars, and briefly summarizes the research progress in

**收稿日期:** 2020-03-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(51978579, 51878561, 51778533); 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题重点项目(BHSLK19-06-KF, BHSLK18-01-KF); 广东省重点领域研发计划项目(2019B111106002)

**作者简介:** 张清华(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能钢与组合结构桥梁研究, E-mail: swjtuzqh@126.com.

**Received:** 2020-03-31

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51978579, 51878561, 51778533); The Open Key Fund Sponsored Program of State Key Laboratory for Bridge Health and Safety (No. BHSLK19-06-KF, BHSLK18-01-KF); Research and Development Projects in Key Areas of Guangdong Province (No. 2019B111106002)

**Author brief:** Zhang Qinghua (1975-), professor, doctoral supervisor, main research interests: high-performance steel and composite structure bridge, E-mail: swjtuzqh@126.com.

2019 and research focus of the next stage of the steel bridge. The paper analyzes the challenges of research on the key fatigue problems of steel bridge, and discusses in detail the urgent needs and major problems for further development in the aspects of steel bridge fatigue failure mechanism, the new evaluation theory and method for fatigue resistance, the steel bridge fatigue damage of the intelligent monitoring and detecting, and the key technology for steel bridge fatigue cracking reinforcement.

**Keywords:** bridge engineering; steel bridge; fatigue; service performance

钢结构桥梁以其轻质高强、跨越能力大、易工厂化制造和便于装配化施工等突出优点,在现代桥梁工程中得到了广泛应用,但中国钢结构桥梁的发展和应用长期滞后于欧美和日本等发达国家。在交通强国战略深入推进的时代背景下,中国将大力推广钢结构桥梁建设,推动钢结构桥梁向“绿色、环保、可持续”方向发展:国务院政府工作报告中明确提出积极推广绿色建筑和建材,大力发展钢结构;交通部在“十三五”规划中指出加快推进钢结构桥梁的发展应用。钢结构桥梁是未来一段时期中国桥梁工程的重要发展方向。

但由于服役环境、荷载条件和交通需求、结构体系和构造细节设计等诸多因素耦合影响,钢结构桥梁疲劳开裂并导致结构服役性能显著恶化甚至直接导致灾难性事故的案例,在全球范围内频发且呈逐年上升态势,已成为制约钢结构桥梁服役安全和服役质量的世界难题。疲劳问题作为钢结构桥梁的基本问题之一,一直是桥梁工程界的热点研究课题<sup>[1-7]</sup>。高速、重载的发展方向对在役和新建钢结构桥梁的实际抗疲劳性能提出了更高的要求,大量在役钢结构桥梁的实际性能随服役时间的延长而不断劣化,如何通过理论研究、模型试验和实桥监测深化对于钢结构桥梁疲劳问题基本属性和失效机理的认识,引入先进的抗疲劳设计理念、制造技术和疲劳损伤监测与检测技术,发展高疲劳抗力新结构,建立钢结构桥梁服役过程性能劣化控制方法与智能监测系统,解决新建和在役钢结构桥梁的疲劳性能不足与性能需求不断提高之间的突出矛盾,是桥梁工程界亟需解决的关键问题。学者们围绕钢结构桥梁疲劳损伤演化与服役性能劣化机理、钢结构桥梁疲劳抗力评估与预测、钢结构桥梁疲劳裂纹监测与检测方法、疲劳开裂加固与维护技术等诸多方面开展了卓有成效的研究,主要对 2019 年学者们在上述方面所取得的研究进展进行梳理和总结,明确当前的研究现状、待解决的关键问题以及下阶段的研究重点和发展方向。

## 1 疲劳损伤演化与服役性能劣化机理

学者们对钢结构桥梁疲劳损伤演化与服役性能劣化机理开展了卓有成效的研究,研究内容涵盖构造细节疲劳失效机理与疲劳抗力提升机制、钢结构桥梁疲劳可靠度、钢结构桥梁疲劳裂纹扩展特性和服役性能劣化机理等方面。

### 1.1 疲劳失效机理与提升设计疲劳抗力

在钢结构桥梁构造细节疲劳失效机理与疲劳抗力提升机制方面,周绪红等<sup>[2-3]</sup>和张清华等<sup>[8]</sup>针对纵肋与顶板构造细节和纵肋与横隔板交叉构造细节开展了试验和理论研究,明确了其受力特性和实际疲劳抗力。为了提升钢结构桥梁构造细节的疲劳性能,提出了增大焊缝熔透率和镡边纵肋等方法,但试验和理论研究均表明<sup>[8-10]</sup>:虽然引入镡边纵肋能够提高顶板焊趾开裂模式的疲劳抗力,但无法改善顶板焊根这一疲劳易损部位的疲劳抗力。为了提升纵肋与横隔板交叉构造细节的疲劳性能,提出了优化横隔板开孔形式和设置内隔板等方法,研究表明<sup>[3,11]</sup>:优化横隔板开孔形式可以有效改善弧形开孔的局部应力集中问题,提高横隔板弧形开孔位置的疲劳抗力;设置内隔板虽能够提高纵肋腹板焊趾开裂模式的疲劳抗力,但施工困难且可能引发纵肋内焊机器人不能进入纵肋进行内侧焊缝施焊等问题。聂建国<sup>[1]</sup>和张喜刚等<sup>[5]</sup>明确指出发展高性能结构是实现中国工程结构可持续发展的必由之路。深化钢结构桥梁疲劳损伤机理的认识,并据此发展高性能新型构造细节和高性能结构,有效提升结构体系的疲劳抗力,是解决钢结构桥梁疲劳开裂问题的有效途径和当前的研究重点。

张清华等<sup>[8]</sup>在钢结构桥梁结构体系失效机理与主导疲劳开裂模式确定方面的研究表明:钢结构桥梁的疲劳失效过程由各疲劳开裂模式的疲劳致损效应与其疲劳抗力的对比关系所决定,疲劳开裂首先在疲劳致损效应超过对应疲劳抗力的重要疲劳开裂模式出现,该疲劳开裂模式即为结构体系的主导疲

劳开裂模式,对应的失效路径为结构体系的主导疲劳失效路径。以正交异性钢桥面板为例,其疲劳抗力由具有多疲劳开裂模式特性且疲劳抗力存在显著差异的多个构造细节共同决定;其中,纵肋与顶板焊接细节和纵肋与横隔板交叉构造细节的疲劳开裂占统计的大量疲劳开裂案例的 91.2%,是决定正交异性钢桥面板疲劳性能的关键构造细节。针对上述两关键构造细节疲劳抗力不足的问题,从有效改善钢桥面板结构体系疲劳抗力的角度出发,主要完成了两方面的研究工作:1)通过同时引入纵肋与顶板新型双面焊构造细节和多种纵肋与横隔板新型交叉细节,发展了高性能新型正交异性钢桥面板结构体系。研究表明,实现结构体系主导疲劳开裂模式的迁移,是显著提高结构体系疲劳抗力的有效途径。高性能新型正交异性钢桥面板结构及其典型疲劳开裂模式如图 1 所示;2)通过引入高性能混凝土结构层提高钢桥面板局部刚度、降低 U 肋的面外变形,提出了大纵肋正交异性钢-高性能混凝土组合桥面板结构体系,完成了普通混凝土(NC)、工程用水泥基复合材料(ECC)和超高性能混凝土(UHPC)3 类结构层条件下结构体系的力学行为和优化设计、关键传力构件的静力和疲劳性能、结构体系的疲劳失效机理等一系列的理论分析和试验研究工作,阐明了其疲劳损伤演化全过程及其疲劳失效机制,提出了考虑混凝土劣化效应的组合桥面板结构体系疲劳抗力评估方法。

展特性等方面,李杰<sup>[12]</sup>在对工程结构整体可靠性研究的基础上,建立了工程结构可靠性理论分析的新体系。李传习等<sup>[13]</sup>和李爱群等<sup>[14]</sup>基于可靠度理论对随机车辆荷载作用下钢桥面板的疲劳可靠度进行了评估,确定了运营荷载和构造细节设计等因素对钢桥面板疲劳可靠度的影响规律。卜一之等<sup>[15]</sup>和张清华等<sup>[16]</sup>建立了三维疲劳裂纹扩展模拟方法,对钢桥面板的疲劳裂纹扩展特性进行了系统研究,得到了其疲劳裂纹扩展规律。

### 1.2 疲劳抗力劣化机理与服役性能劣化

黄云等<sup>[17]</sup>针对表面缺陷对构造细节疲劳抗力劣化效应的影响问题开展了探索性研究,结果表明,初始制造缺陷是决定构造细节疲劳抗力的控制性影响因素。但当前关于初始制造缺陷对钢结构桥梁疲劳抗力劣化问题研究仍较为欠缺,亟需开展深化研究。在钢结构桥梁的加工制造过程与疲劳抗力的相关关系方面,黄云等<sup>[17]</sup>和 Cui 等<sup>[18]</sup>对于制造过程中产生的初始制造缺陷和初始残余应力所致的钢结构桥梁疲劳抗力劣化与失效机理问题进行了深入研究。由建造技术和方法所决定,钢结构桥梁焊接节点不可避免地存在初始制造缺陷和焊接残余应力。初始制造缺陷在细观尺度上所导致的几何不连续、应力集中和局部塑化,是显著降低疲劳裂纹萌生寿命并导致构造细节过早发生疲劳失效的关键。Cui 等<sup>[18]</sup>从初始制造缺陷的细观尺度形态特性和微观金相组织形态特征出发,建立了从疲劳微裂纹成核、萌生到宏观裂纹扩展失效的大跨度钢结构桥梁焊接节点跨尺度疲劳损伤评估模型,揭示了初始制造缺陷对钢结构桥梁焊接节点疲劳抗力的劣化机理,结果表明:对于裂纹萌生寿命占绝对主导的钢结构桥梁,初始制造缺陷可导致疲劳抗力降低高达 80% 以上,典型分析结果如图 2 所示。对于焊接残余应力,研究表明,在外部车辆等交变荷载的作用下,焊接残余应力将逐步消散,消散过程由外部循环荷载幅值、应力比等参数所决定,如图 3 所示。总体而言,该因素对钢结构桥梁疲劳抗力的劣化效应显著小于初始制造缺陷所致劣化效应。

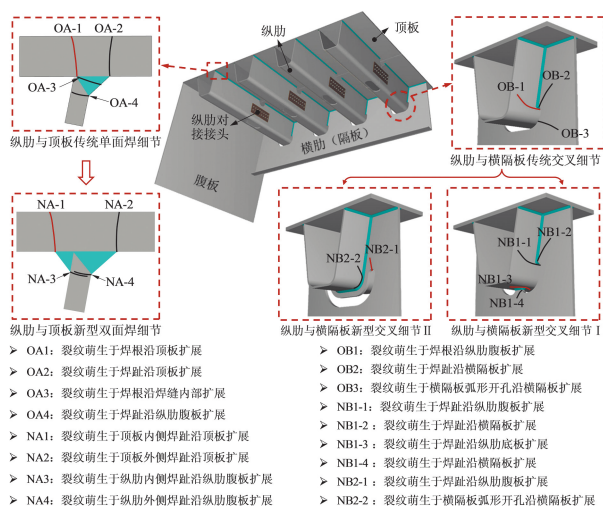


图 1 高性能新型正交异性钢桥面板结构及其疲劳开裂模式

Fig. 1 High performance new orthotropic steel bridge panel structure and its fatigue cracking mode

另外,在钢结构桥梁疲劳可靠度和疲劳裂纹扩

在外部腐蚀环境特性对钢结构桥梁疲劳损伤与服役性能劣化的效应机制方面,卫星等<sup>[19]</sup>、Jie 等<sup>[20]</sup>、Macho 等<sup>[21]</sup>研究了人工预腐蚀和复杂应力场交互作用下构件连接部位的疲劳性能问题,就腐蚀对于疲劳损伤的效应机制和复合型疲劳裂纹的扩展

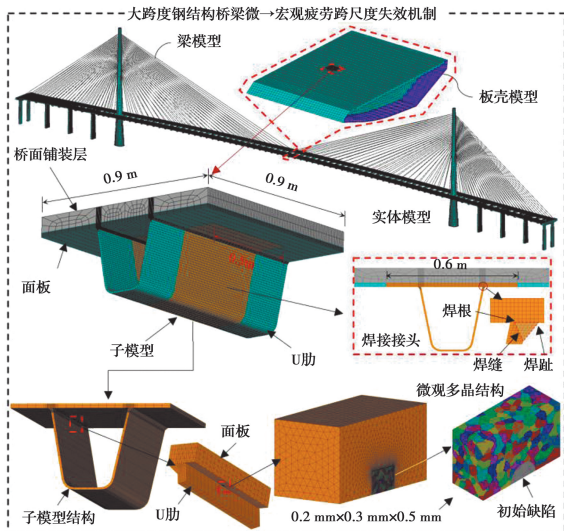


图 2 大跨度钢结构桥梁跨尺度疲劳失效机理  
Fig. 2 Multiscale fatigue failure mechanism of long-span steel bridges

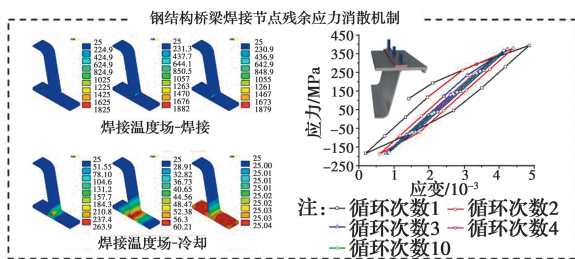


图 3 初始焊接残余应力在外荷载作用下的耗散机制  
Fig. 3 Dissipation mechanism of initial welding residual stress under external load

准则进行了深入系统的实验和理论研究,结果表明:腐蚀将显著加速疲劳损伤的演化过程,进行疲劳抗力评估时必须充分考虑腐蚀的劣化效应问题。高宗余等<sup>[4]</sup>指出,在海洋桥梁工程结构中,车辆荷载与复杂海洋荷载对于结构疲劳抗力的耦合劣化机理、海水腐蚀与结构疲劳损伤的交互作用机制等问题仍有待进一步研究。贾东林针对在役铆接钢结构桥梁进行的大量研究表明,在受腐蚀和反复车辆荷载的共同作用下,铆接钢桁梁桥构件和节点的疲劳抗力随服役过程的延长而不断劣化,进而导致结构体系的疲劳性能退化和剩余寿命降低,其疲劳问题本质上属于多尺度经时演化问题;腐蚀和疲劳累积损伤两种经时效应的交互作用,共同决定铆接钢桁梁桥疲劳性能的演化过程<sup>[22-23]</sup>。随着服役时间的延长,构件和节点的腐蚀与疲劳损伤相互促进,二者的交互作用将在构件和节点层面导致其疲劳开裂模式迁移,并加速疲劳抗力劣化,进而导致结构体系层面的

主导疲劳失效路径迁移,疲劳性能发生经时演化,如图 4 所示。关于经时演化过程、关键影响因素及其效应机制等方面的研究当前正在进行中。

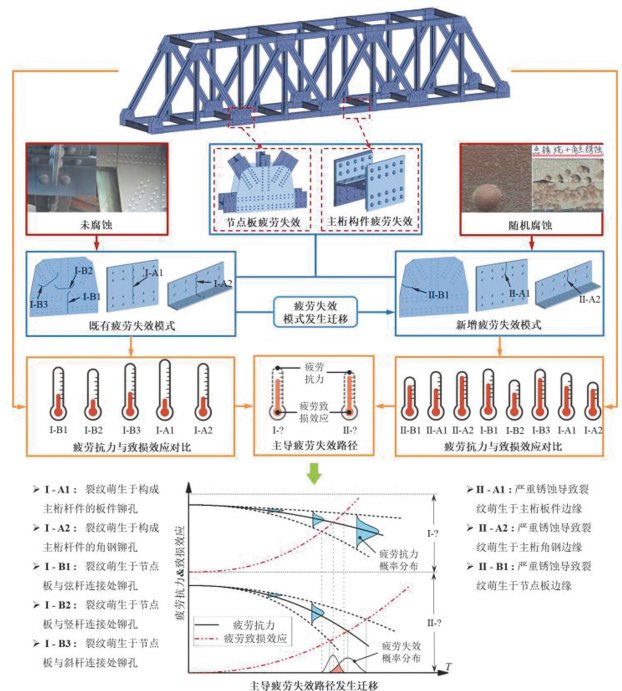


图 4 典型在役铆接钢桁梁桥疲劳性能的经时演化过程  
Fig. 4 Time-dependent evolution process of typical fatigue performance of riveted steel truss bridges in service

## 2 钢结构桥梁疲劳性能评估

### 2.1 疲劳性能评估方法

当前广泛采用的钢结构桥梁疲劳性能评估方法主要包括两类:基于应力幅与疲劳寿命相关关系的疲劳性能评估方法和断裂力学方法<sup>[24-35]</sup>。其中,基于线性累积损伤理论的名义应力法、热点应力法、结构应力法和切口应力法等钢结构桥梁疲劳性能评估中得到了广泛使用<sup>[24-35]</sup>。Huang 等<sup>[24]</sup>考虑钢桥面板纵肋与横肋交叉焊缝的多开裂模式和主导失效路径问题,基于热点应力法对该细节进行了寿命评估。祝志文等<sup>[25]</sup>基于实桥监测数据对钢桥面板横肋弧形开孔位置的疲劳裂纹扩展特性和失效机理进行了研究,并基于名义应力法和热点应力法对该部位的疲劳性能进行了评估,基于热点应力法确定了弧形开孔母材的疲劳强度等级(FAT125)。热点应力法能够考虑焊接结构焊趾处的应力集中效应,但计算结果易受模型有限元网格的尺寸影响。Luo 等<sup>[26]</sup>采用切口应力法对钢桥面板顶板与纵肋连接构造细节的疲劳抗力评估问题进行了研究,确定了

铆边纵肋与顶板焊接构造细节的疲劳抗力。Wang 等<sup>[27]</sup>对钢桥面板顶板与纵肋构造细节的疲劳裂纹扩展机理进行了探究,在此基础上采用切口应力法对该构造细节的疲劳性能进行了评估。由于切口应力对焊缝部位的几何特征参数极为敏感,而在焊接过程中,焊缝的尺寸在一定的范围内波动且随机性较大,实际上难以准确确定实际焊趾部位的准确几何参数,在一定程度上限制了切口应力法的应用。Li 等<sup>[28]</sup>针对钢桥面板关键构造细节多开裂模式条件下的焊接节点主导疲劳开裂模式和疲劳性能问题进行了研究。在断裂力学方法方面,陈艾荣等<sup>[29-30]</sup>和 Cui 等<sup>[18]</sup>基于断裂力学,通过非线性疲劳累积损伤理论考虑多因素的耦合致损效应,对实际交通荷载作用下的钢结构桥梁的疲劳寿命评估问题进行了研究。Sun 等<sup>[31-32]</sup>基于钢材金相组织微观损伤力学理论,提出了自适应的大跨度钢结构桥梁跨尺度疲劳损伤评估方法,考虑了车辆的动态应对实桥进行寿命评估。传统断裂力学方法用于疲劳寿命评估结果的关键问题在于评估的准确性高度依赖评估模型中参数的取值,而相关参数受外界环境和结构材料基本属性的影响而具有较大的变异性,加剧了疲劳寿命评估结果的离散性。基于断裂力学和损伤力学的疲劳性能评估方法仍有待进一步研究。

在钢结构桥梁疲劳性能评估方法研究方面,黄云<sup>[33]</sup>对于随机荷载作用下因荷载相互作用而导致的裂纹扩展加速或迟滞效应问题进行了研究,引入弹塑性断裂力学理论考虑裂纹尖端塑性区的相互作用和裂纹扩展特性,建立了基于微小时间尺度的变幅疲劳裂纹扩展理论模型,提出了基于可靠度的钢桥面板构件疲劳抗力评估方法。当前的疲劳性能和评估方法研究主要聚焦于钢结构桥梁关键构造细节的单一开裂模式,通常不考虑结构体系的多疲劳开裂模式特性,因此无法确定结构体系的主导疲劳开裂模式和结构体系的实际疲劳抗力。为此,张清华等<sup>[8]</sup>基于钢结构桥梁疲劳问题的基本属性,以正交异性钢桥面板为研究对象,提出了基于主导疲劳开裂模式的结构体系疲劳抗力评估方法,并对其在钢结构桥梁疲劳抗力评估中应用的关键问题进行了系统深入的研究,证明了其适用性、先进性和优越性<sup>[8,28]</sup>,如图 5 所示。

### 2.2 疲劳损伤状态预后

在既有钢结构桥梁疲劳损伤状态预后方面,Cui

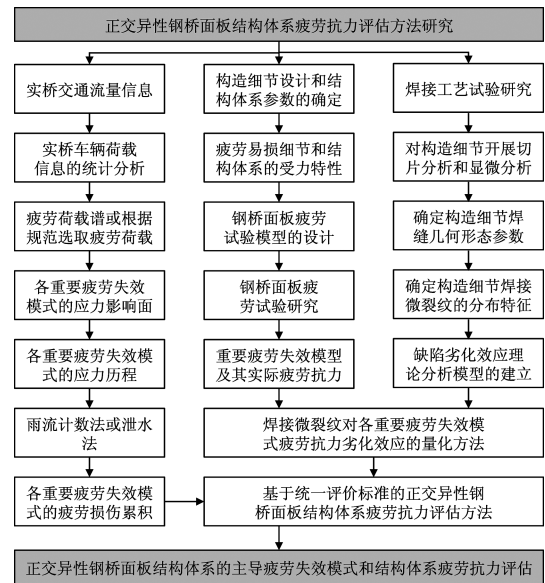


图 5 基于主导疲劳开裂模式的结构体系疲劳抗力评估方法

Fig. 5 Fatigue resistance assessment method for structural systems based on the dominant fatigue cracking mode

等<sup>[34]</sup>结合动态称重系统(WIM)的车辆实测数据,建立了车辆预测随机模型,考虑日均随机车流和焊接残余应力,建立了基于可靠度理论的钢结构桥梁疲劳损伤概率预测方法。研究表明:对直接承受轮载作用的钢桥面板而言,直接承受轮载作用区域的疲劳损伤远大于非轮载作用区;不考虑焊接残余应力将导致钢结构桥梁疲劳损伤评估结果偏于不安全。在此基础上,针对以往随机车流模拟中未考虑不同时段早晚高峰与日夜车辆比重差异的问题,结合实时监测交通荷载数据建立了贝叶斯综合自回归移动平均(ARIMA)模型<sup>[34]</sup>。基于该模型可考虑车桥耦合振动、铺装层温度、车速、车辆横向分布等关键影响因素的效应,实现未来一段时间内钢结构桥梁的疲劳损伤预后。在此基础上,通过集成数据处理,特征值提取、故障诊断和损伤预后等模块,初步建立了钢结构桥梁疲劳损伤智能监测与评估系统。相关研究成果在深中通道、武汉青山长江大桥、宜昌伍家岗长江大桥、济南长清黄河大桥、西江特大悬索桥、军山长江大桥等重大工程项目中得到了成功应用。

### 3 钢结构桥梁疲劳裂纹监测与检测

人工巡检仍是当前实桥的主要检测手段,通过目视辅以磁粉或渗透检测进行<sup>[35]</sup>;通过结构响应监测信息识别结构损伤是另一类常用方法<sup>[46-39]</sup>。Wei

等<sup>[37]</sup>、李宏男等<sup>[38]</sup>和伊廷华等<sup>[39]</sup>通过桥梁结构健康监测数据所获取的结构响应数据反演结构的损伤状态并识别损伤。该类方法的损伤识别结果与传感器的类型和布设位置有关,在高冗余度结构的局部微小损伤监测与识别方面仍面临困难和挑战<sup>[40-41]</sup>。在桥梁健康监测领域,为降低桥梁结构的运维成本、提高桥梁结构损伤检测的时效性与鲁棒性,深度融合新一代信息技术,发展新一代桥梁损伤监测与检测技术是未来的重要发展方向<sup>[42-43]</sup>。李宏男等<sup>[44]</sup>和朱宏平等<sup>[45-46]</sup>分别构建了不同的神经网络模型,建立了监测数据与结构损伤状态之间复杂的映射关系,达到了快速识别结构状态的目的。鲍跃全等<sup>[47]</sup>和 Xu 等<sup>[48-49]</sup>提出了基于计算机视觉和人工智能的结构裂纹识别方法,实现了结构表面浅层疲劳裂纹的远程智能化监测。钟新谷等<sup>[50]</sup>发展了以无人飞机为工作平台的桥梁结构表面裂缝形状与宽度识别的检测系统。为检测结构内部或隐蔽裂纹,基于声发射技术的无损检测方法在桥梁结构得到了广泛应用<sup>[51]</sup>。王介修等<sup>[52]</sup>基于超声波在裂纹面处的反射与衍射原理,提出了钢结构桥梁疲劳裂纹特征参数的定量检测方法,该方法可有效检测浅层或隐蔽性裂纹的深度与扩展方向。Nowak 等<sup>[53]</sup>研究了声发射传感器位置和数量等参数对疲劳裂纹回波的影响问题,通过铁路钢结构桥梁疲劳裂纹的实桥监测,阐明了声发射信号与裂纹扩展之间的内在关联机制。何燕等<sup>[54]</sup>通过试验确定钢绞线损伤过程的声发射特征,以声发射特征参数作为损伤程度指标,建立了基于声发射技术的桥梁钢绞线损伤演化过程监测系统。由于大多数基于声发射技术的检测方法易受人为操作经验、服役环境等不稳定因素干扰,且检测仅限于传感器安装位置的局部范围内。为满足大跨度钢结构桥梁长距离检测的需要,马宏伟等<sup>[55]</sup>基于混沌振子检测系统,阐明了超长距离检测条件下超声导波关键特征参数对裂纹检测结果的影响规律。上述方法适用于宏观裂纹检测,对于疲劳开裂早期微小裂纹的检测有效性仍有待进一步验证。

目前,疲劳裂纹的非人工检测方法主要包括三大类:基于应变的光纤应变传感器和薄膜传感器检测的间接损伤识别方法<sup>[56]</sup>、基于声发射技术的裂纹直接检测方法<sup>[57]</sup>以及基于计算机视觉的裂纹图像智能识别非接触式检测方法<sup>[42,58-59]</sup>。崔闯等<sup>[60]</sup>结合智能检测技术的最新发展和钢结构桥梁疲劳问题

的基本属性,初步探索了钢结构桥梁疲劳裂纹定位与识别的智能化方法:1)对超声导波钢结构疲劳裂纹检测问题进行了全过程数值模拟和试验研究,结果表明,超声导波在桥梁构件裂纹缺陷定位检测方面具有良好的适用性;2)对基于纳米涂层智能传感器的裂纹监测方法进行了理论与数值模拟,结果表明,纳米涂层对于微小裂纹敏感度较高;3)基于计算机视觉技术的裂纹识别理论,提取了实际裂纹图像中的形态特征,与实测值的对比结果表明,计算机视觉技术在应用于疲劳裂纹测量时有较高的可靠性;4)将深度学习引入结构损伤状态的模式识别中,用于识别和挖掘时域信号、图像信号中的损伤信息,结果表明,以监测数据为基础、以模损伤模式识别为目标的神经网络系统在实际工程中有广阔的应用前景。其在当前钢结构桥梁疲劳裂纹智能定位与识别方法的主要研究内容如图 6 所示。

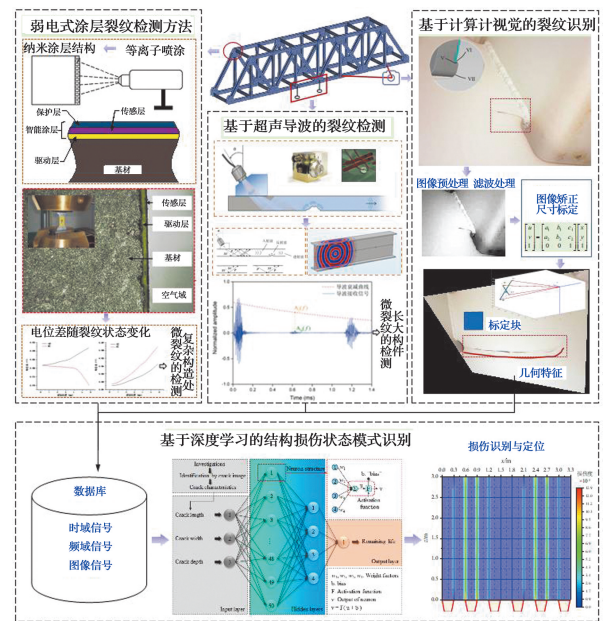


图 6 钢结构桥梁疲劳裂纹智能定位与识别方法

Fig. 6 Intelligent fatigue crack location and identification method of steel bridge

## 4 钢结构桥梁疲劳加固与维护

学者们针对钢结构桥梁在服役期出现的疲劳开裂加固与维护问题进行了理论和试验研究,提出了多种加固和维护方法,主要包括:止裂孔法<sup>[61]</sup>、裂纹闭合冲击改进技术(Impact Crack-closure Retrofit, ICR)<sup>[62-63]</sup>、装配式加固法(CFRP、FRP 和钢构件等)<sup>[64-72]</sup>和组合结构体系方法<sup>[73-75]</sup>。吉伯海等<sup>[61]</sup>针

对止裂孔的孔径和空间位置对钢桥疲劳开裂加固效果的影响问题进行了研究,并根据试验与理论分析确定了加固效果较优的止裂孔孔径等;Kinoshita等<sup>[63]</sup>和吉伯海等<sup>[62]</sup>通过模型试验研究了ICR加固方法在钢桥疲劳开裂加固中的适用性问题,对于采用ICR法加固时疲劳裂纹与冲击区域的合理距离给出了建议值;童乐为<sup>[64]</sup>、王春生等<sup>[65]</sup>、Liu等<sup>[66]</sup>、李传习等<sup>[67]</sup>和Al-Azzawi等<sup>[68-69]</sup>通过粘贴、栓接或粘-栓混合连接等装配式连接方式与既有结构连接,提出了对既有结构微损伤或零损伤的冷维护方法;Lzadi等<sup>[70]</sup>提出了采用铁基形状记忆合金(Fe-SMA)对钢桁梁桥的疲劳开裂进行加固的方法,并通过疲劳试验验证了其适用性和可行性;邵旭东、田启贤和吴冲等<sup>[71-72]</sup>采用UHPC作为结构层,对正交异性钢板面板的轻型组合桥面结构加固方法进行了深入研究;Kolstein等<sup>[73]</sup>提出了采用夹层钢板加固纵肋与顶板焊接细节疲劳裂纹的加固方法。Kinoshita等<sup>[74]</sup>采用超声冲击方法对钢桥进行了加固,结果表明,超声冲击可有效改善焊接接头的应力集中问题,降低焊趾局部微观缺陷和焊接残余应力的不良效应,显著提高钢桥焊接接头的疲劳抗力。卜一之等<sup>[75]</sup>对钢结构桥梁疲劳开裂的加固方法进行了试验和理论研究,围绕止裂孔、激光熔敷等加固方法对加固效果的关键影响因素开展相关研究。张清华<sup>[76]</sup>等发展了钢桥面板栓接钢构件的装配式加固方法并通过试验与理论分析验证了其加固效果,并提出了一种基于新型智能材料——形状记忆合金(SMA)的钢结构桥梁主动加固方法,研究了主动加固方法对钢结构桥梁疲劳开裂的加固效果,阐明了SMA加固件对钢结构桥梁疲劳裂纹扩展的抑制机理,如图7所示。

## 5 结论与展望

总体而言,通过学者们长期艰苦卓绝的不懈努力,在钢桥疲劳研究领域取得了可喜进展。在当前的时代背景下,站在巨人的肩膀上,紧紧抓住交通强国战略和中国大力推广钢结构桥梁的历史机遇,引入数学、力学、理论分析、试验检测技术、加工制造技术和人工智能等领域的最新成果,在基础理论和重大工程应用两方面继续努力,进一步深化对于钢结构桥梁疲劳失效机制的认识,发展新的理论与方法,根据实际需求拓展新的研究领域,通过创新性成果

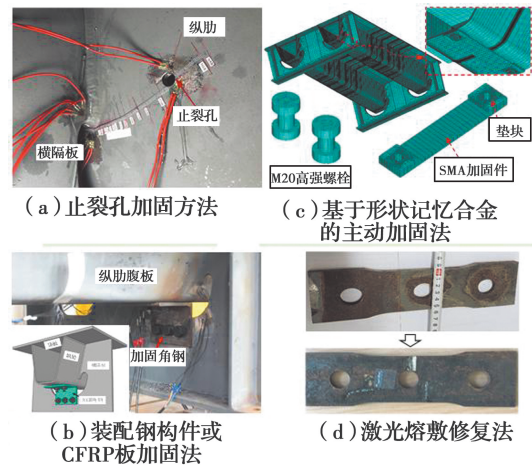


图7 钢结构桥梁疲劳开裂加固与维护方法

Fig. 7 Reinforcement and maintenance methods of fatigue cracking of steel bridge

为钢结构桥梁的可持续发展建立更为完备的保障体系,前景光明,但仍然任重道远。笔者认为以下几个方面的研究对于深化钢结构桥梁疲劳开裂问题本质属性的认识、提高结构体系的疲劳性能具有重要的推动作用,是下一阶段的研究重点:

1)在高性能材料应用方面,耐候钢在中国的钢结构桥梁中逐步得到推广应用,在非氯离子腐蚀环境,如极寒、高海拔地区具有广阔应用前景。近年来,中国在耐候钢制造技术方面取得了快速发展和进步,但耐候钢结构桥梁技术还处于起步阶段。亟需探究外部腐蚀环境下多物理场作用对于耐候钢结构桥梁的耦合疲劳致损机理;提高钢材的强度等级并发展高强度耐候钢,进一步推进桥梁工程的轻质、高强、大跨和耐久等多个维度的协同发展;结合高性能材料基础理论研究成果和实际需求,发展适用的自动化、智能化焊接技术,推动耐候钢结构桥梁产业化进程。

2)对于钢结构桥梁疲劳失效机理等基础科学问题的研究,下一阶段可从如下几个方面开展研究工作:①引入先进的试验检测技术,阐明疲劳裂纹萌生和扩展过程的微观和介观机制,明确关键影响因素对于疲劳性能的效应机理;②进一步发展评估方法,将当前的宏观尺度唯象学评估方法向介观和微观尺度拓展,研究并发展适用的疲劳抗力评估新理论、新指标和新方法;③将研究对象和评估方法由特定的构造细节和特定的疲劳开裂模式拓展至结构体系,进一步完善结构体系的疲劳抗力评估方法;④揭示腐蚀等环境因素的疲劳性能效应机制,阐明服

役过程构造细节和结构体系的主导疲劳开裂模式迁移机理;⑤充分考虑制造和服役全过程的疲劳性能影响因素并量化其实际效应,构建面向疲劳性能的钢结构桥梁全寿命过程全息模拟和预测理论与方法。

3)在钢结构桥梁疲劳损伤监测与检测方面,当前仍主要以人工巡检的方式对在役钢结构桥梁疲劳裂纹进行定期检测,工作强度大、效率低且局限性突出问题突出,难以取得较好的检测效果。为克服人工巡检的弊端、保障钢结构桥梁的服役安全和服役质量,亟需发展桥梁检测新技术,实现钢结构桥梁损伤状态的实时智能监测和检测。由于钢结构桥梁的疲劳行为属于典型的局部微小区域刚度退化行为,对高冗余度钢结构桥梁整体刚度的影响极小,传统的监测或检测技术难以实现对于疲劳开裂早期微小裂纹的准确检测。发展针对钢结构桥梁疲劳微裂纹的智能化监测与检测方法,研究并建立钢结构桥梁疲劳损伤的智能监测与检测系统,是下阶段的关键研究课题。

4)在钢结构桥梁疲劳加固与维护方面,当前关于加固方法及加固体系疲劳性能的研究仍极为欠缺:①当前的研究对象主要是非贯穿型疲劳裂纹,对于实桥中大量存在的贯穿型长大疲劳裂纹加固方法的研究仍较为欠缺;②钢结构桥梁的疲劳开裂加固属于含裂纹加固体系的多路径、多模式体系疲劳问题,其疲劳破坏过程属于协同受力性能劣化与疲劳累积损伤演化的耦合过程,只有阐明关键疲劳易损部位疲劳开裂与加固体系协同受力性能劣化的耦合机理,才能够实现对装配式加固体系疲劳问题的深刻认识,揭示加固方法的疲劳性能强化机理;③当前亟需对加固体系进行由构造细节到结构体系的多维度研究,确定加固体系的控制疲劳易损部位及其主导疲劳破坏模式,阐明疲劳损伤演化与协同受力性能劣化的耦合过程,提出基于协同受力性能劣化的剩余疲劳寿命评估方法,准确评估加固体系的剩余疲劳寿命;④关于加固技术产业化的研究严重滞后于实际需求。亟需根据钢结构桥梁典型疲劳裂纹的扩展特性,对已提出的多种钢结构桥梁疲劳开裂加固方法进行深入研究,确定不同加固方法的适用范围,在此基础上,研发相应的装配化、规格化加固结构产品并发展钢结构桥梁疲劳开裂快速加固成套体系。

## 参考文献:

- [1] 聂建国. 我国结构工程的未来: 高性能结构工程[J]. 土木工程学报, 2016, 49(9): 1-8.  
NIE J G. The future of structural engineering in China: High-performance structural engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(9): 1-8. (in Chinese)
- [2] 周绪红, 朋茜, 秦凤江, 等. 钢桥面板顶板与纵肋连接焊根位置疲劳损伤特征[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 1-12.  
ZHOU X H, PENG X, QIN F J, et al. Fatigue damage characteristics of rib-to-deck weld root on orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 1-12. (in Chinese)
- [3] 朋茜, 周绪红, 狄谨, 等. 钢桥面板纵肋与横隔板连接位置疲劳损伤特征[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 78-90.  
PENG X, ZHOU X H, DI J, et al. Fatigue damage characteristics of rib-to-diaphragm joints in orthotropic steel deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 78-90. (in Chinese)
- [4] 高宗余, 阮怀圣, 秦顺全, 等. 我国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 1-4.  
GAO Z Y, RUAN H S, QIN S Q, et al. Technical status, challenges, and solutions of marine bridge engineering [J]. Engineering Science, 2019, 21(3): 1-4. (in Chinese)
- [5] 张喜刚, 田雨, 陈艾荣. 多灾害作用下桥梁设计方法研究综述[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 7-19.  
ZHANG X G, TIAN Y, CHEN A R. Review of bridge design method for multiple hazards [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 7-19. (in Chinese)
- [6] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30, 39.  
ZHANG Q H, BU Y Z, LI Q. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30, 39. (in Chinese)
- [7] 王春生, 张静雯, 段兰, 等. 长寿命高性能耐候钢桥研究进展与工程应用[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 1-26.  
WANG C S, ZHANG J W, DUAN L, et al. Research



- progress and engineering application of long lasting high performance weathering steel bridges [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(1): 1-26. (in Chinese)
- [8] 张清华, 李俊, 郭亚文, 等. 正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(1): 71-81.  
ZHANG Q H, LI J, GUO Y W, et al. Fatigue failure modes and resistance evaluation of orthotropic steel bridge deck structural system [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(1): 71-81. (in Chinese)
- [9] LEONETTI D, MALJAARS J, SNIJDER H H. Probabilistic fatigue resistance model for steel welded details under variable amplitude loading - Inference and uncertainty estimation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 135: 105515.
- [10] 郑凯锋, 衡俊霖, 何小军, 等. 厚边 U 肋正交异性钢桥面的疲劳性能[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(4): 694-700.  
ZHENG K F, HENG J L, HE X J, et al. Fatigue performance of orthotropic steel decks with thickened edge U-ribs [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(4): 694-700. (in Chinese)
- [11] LI D T, ZHANG C G, LU P M. Fatigue property and improvement of a rounded welding region between the diaphragm plate and closed rib of an orthotropic steel bridge deck [J]. *Metals*, 2020, 10(2): 161.
- [12] 李杰. 工程结构整体可靠性分析研究进展[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(8): 1-10.  
LI J. Advances in global reliability analysis of engineering structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(8): 1-10. (in Chinese)
- [13] 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.  
LI Y, LI C X, CHEN Z Y, et al. Fatigue reliability analysis of U-rib detail of steel box girder based on monitoring data [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(2): 111-123. (in Chinese)
- [14] 邓扬, 李爱群. 基于断裂力学和长期监测数据的钢箱梁桥顶板 U 肋焊缝疲劳可靠度分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(1): 68-75.  
DENG Y, LI A Q. Fatigue reliability analysis for welds of U ribs in steel box girders based on fracture mechanics and long-term monitoring data [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(1): 68-75. (in Chinese)
- [15] 卜一之, 金正凯, 黄云, 等. 钢桥面板纵肋顶板焊缝疲劳裂纹扩展的关键影响因素[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(9): 61-70.  
BU Y Z, JIN Z K, HUANG Y, et al. Key influencing factors of fatigue crack propagation in rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(9): 61-70. (in Chinese)
- [16] 张清华, 郭亚文, 李俊, 等. 钢桥面板纵肋双面焊构造疲劳裂纹扩展特性研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(7): 49-56, 110.  
ZHANG Q H, GUO Y W, LI J, et al. Fatigue crack propagation characteristics of double-sided welded joints between steel bridge decks and longitudinal ribs [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(7): 49-56, 110. (in Chinese)
- [17] 黄云, 张清华, 郭亚文, 等. 钢桥面板纵肋与横隔板焊接细节表面缺陷及疲劳效应研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(3): 203-213, 223.  
HUANG Y, ZHANG Q H, GUO Y W, et al. Research on surface defects and fatigue effects at rib-to-crossbeam welded joints of orthotropic steel bridge decks [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(3): 203-213, 223. (in Chinese)
- [18] CUI C, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue life evaluation of welded joints in steel bridge considering residual stress [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 153: 509-518.
- [19] 卫星, 揭志羽, 廖晓璇, 等. 钢结构桥梁焊接节点腐蚀疲劳研究进展[J]. *钢结构*, 2019, 34(1): 108-112.  
WEI X, JIE Z Y, LIAO X X, et al. Review and considerations on corrosion fatigue of welded joints of steel bridge [J]. *Steel Construction*, 2019, 34(1): 108-112. (in Chinese)
- [20] JIE Z Y, LI Y D, WEI X, et al. Fatigue life prediction of welded joints with artificial corrosion pits based on continuum damage mechanics [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 148: 542-550.
- [21] MACHO M, RYJAČEK P, MATOS J. Fatigue life analysis of steel riveted rail bridges affected by corrosion [J]. *Structural Engineering International*, 2019, 29(4): 551-562.
- [22] RASOLI Z, NAGATA K, MIYAWAKI Y, et al. Study on evaluation of corrosion environment on steel bridges using inverse distance weighting method [J].

- Journal of Structural Engineering, 2019, 65: 479-491.
- [23] 郑凯锋, 张宇, 衡俊霖, 等. 高强度耐候钢及其在桥梁中的应用与前景[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 1-10.  
ZHENG K F, ZHANG Y, HENG J L. High strength weathering steel and its application and prospect in bridge engineering [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3): 1-10. (in Chinese)
- [24] HUANG Y, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue assessment of longitudinal rib-to-crossbeam welded joints in orthotropic steel bridge decks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 159: 53-66.
- [25] ZHU Z W, XIANG Z. Fatigue cracking investigation on diaphragm cutout in a self-anchored suspension bridge with orthotropic steel deck [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(10): 1279-1291.
- [26] LUO P J, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue performance of welded joint between thickened-edge U-rib and deck in orthotropic steel deck [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 699-710.
- [27] WANG Q D, JI B H, FU Z Q, et al. Evaluation of crack propagation and fatigue strength of rib-to-deck welds based on effective notch stress method [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 51-61.
- [28] LI J, ZHANG Q H, BAO Y, et al. An equivalent structural stress-based fatigue evaluation framework for rib-to-deck welded joints in orthotropic steel deck [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109304.
- [29] 王本劲, DE BACKER H, 陈艾荣. 正交异性钢桥面板裂纹扩展的均质化方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 113-120, 158.  
WANG B J, DE BACKER H, CHEN A R. A homogenization method on crack growth on orthotropic steel decks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 113-120, 158. (in Chinese)
- [30] WANG B J, ZHOU X Y, DE BACKER H, et al. Macro-crack initiation life for orthotropic steel decks considering weld heterogeneity and random traffic loading [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(12): 1639-1652.
- [31] SUN B, XU Y L, ZHU Q, et al. Auto-adaptive multiblock cycle jump algorithm for fatigue damage simulation of long-span steel bridges [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, 42(4): 919-928
- [32] SUN B, XU Y L, WANG F Y, et al. Multi-scale fatigue damage prognosis for long-span steel bridges under vehicle loading [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(4): 524-538.
- [33] 黄云. 基于概率断裂力学的钢桥面板构造细节疲劳可靠度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
HUANG Y. Research on fatigue reliability of structural details in orthotropic steel decks based on probabilistic fracture mechanics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [34] CUI C, XU Y L, ZHANG Q H, et al. Vehicle-induced fatigue damage prognosis of orthotropic steel decks of cable-stayed bridges [J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110509.
- [35] 贺拴海, 赵祥模, 马建, 等. 公路桥梁检测及评价技术综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 63-80.  
HE S H, ZHAO X M, MA J, et al. Review of highway bridge inspection and condition assessment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11): 63-80. (in Chinese)
- [36] RAGEH A, EFTEKHAR AZAM S, LINZELL D G. Steel railway bridge fatigue damage detection using numerical models and machine learning: Mitigating influence of modeling uncertainty [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105458.
- [37] WEI S Y, ZHANG Z H, LI S L, et al. Strain features and condition assessment of orthotropic steel deck cable-supported bridges subjected to vehicle loads by using dense FBG strain sensors [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(10): 104007.
- [38] LI H N, YUAN C L, REN L, et al. Structural health-monitoring system for roof structure of the Dalian gymnasium [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(7): 1579-1590.
- [39] PEI X Y, YI T H, LI H N. Dual-type sensor placement optimization by fully utilizing structural modal information: [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(3): 737-750.
- [40] 孙利民, 尚志强, 夏焯. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 1-20.  
SUN L M, SHANG Z Q, XIA Y. Development and prospect of bridge structural health monitoring in the context of big data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 1-20. (in Chinese)
- [41] SUN L M, SHANG Z Q, XIA Y, et al. Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to

- damage detection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(5): 04020073.
- [42] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 1-11.
- BAO Y Q, LI H. Artificial intelligence for civil engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(5): 1-11. (in Chinese)
- [43] 朱宏平, 翁顺, 王丹生, 等. 大型复杂结构健康精准体检方法[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(2): 215-226.
- ZHU H P, WENG S, WANG D S, et al. Precise structural health diagnosis of large-scale complex structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(2): 215-226. (in Chinese)
- [44] XU J, DONG J H, LI H N, et al. Looseness monitoring of bolted spherical joint connection using electro-mechanical impedance technique and BP neural networks [J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1906.
- [45] YIN T, ZHU H P. An efficient algorithm for architecture design of Bayesian neural network in structural model updating [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2020, 35(4): 354-372
- [46] YIN T, ZHU H P, FU S J. Model selection for dynamic reduction-based structural health monitoring following the Bayesian evidence approach [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 127: 306-327.
- [47] BAO Y Q, TANG Z Y, LI H, et al. Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring [J]. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 2019, 18(2): 401-421.
- [48] XU Y, LI S L, ZHANG D Y, et al. Identification framework for cracks on a steel structure surface by a restricted boltzmann machines algorithm based on consumer-grade camera images [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(2): e2075.
- [49] XU Y, BAO Y Q, CHEN J H, et al. Surface fatigue crack identification in steel box girder of bridges by a deep fusion convolutional neural network based on consumer-grade camera images [J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(3): 653-674.
- [50] 钟新谷, 彭雄, 沈明燕. 基于无人机成像的桥梁裂缝宽度识别可行性研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(4): 52-61.
- ZHONG X G, PENG X, SHEN M Y. Study on the feasibility of identifying concrete crack width with images acquired by unmanned aerial vehicles [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(4): 52-61. (in Chinese)
- [51] 李子兵, 孙祥涛, 汪国华. 钢结构桥梁检测方法简述[J]. *工程与建设*, 2018, 32(5): 735-740.
- LI Z B, SUN X T, WANG G H. Description of detection methods in steel bridges [J]. *Engineering and Construction*, 2018, 32(5): 735-740. (in Chinese)
- [52] 王介修, 吉伯海, 袁周致远, 等. 基于穿透法的钢桥面板疲劳裂纹超声波检测方法研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2017, 41(6): 1022-1026.
- WANG J X, JI B H, YUANZHOU Z Y, et al. Ultrasonic testing method research on fatigue cracks in steel bridge decks based on penetration method [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2017, 41(6): 1022-1026. (in Chinese)
- [53] NOWAK M, LYASOTA I, KISAŁA D. Testing the node of a railway steel bridge using an acoustic emission method [J]. *Advances in Acoustic Emission Technology*, 2017: 265-275. DOI:10.1007/978-3-319-29052-2\_23.
- [54] 何燕, 周楚淮, 罗杰. 桥梁钢绞线断丝声发射监测应用研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2019, 15(2): 236-237.
- HE Y, ZHOU C H, LUO J. Application of acoustic emission monitoring for broken wires of bridge steel strand [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technical Edition)*, 2019, 15(2): 236-237. (in Chinese)
- [55] 温宇立, 武静, 林荣, 等. 基于 Lorenz 系统 Lyapunov 指数的管道超声导波检测[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(11): 264-270.
- WEN Y L, WU J, LIN R, et al. Ultrasonic guided wave detection in a pipeline based on Lyapunov exponent of Lorenz system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(11): 264-270. (in Chinese)
- [56] BAO Y Q, CHEN Z C, WEI S Y, et al. The state of the art of data science and engineering in structural health monitoring [J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 234-242.
- [57] MEGID W A, CHAINEY M A, LEBRUN P, et al. Monitoring fatigue cracks on eyebars of steel bridges using acoustic emission: A case study [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 211: 198-208.
- [58] AL-SALIH H, JUNO M, COLLINS W, et al. Evaluation of a digital image correlation bridge inspection methodology on complex distortion-induced

- fatigue cracking [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2019, 17: 682-689.
- [59] 钟继卫, 王波, 王翔, 等. 桥梁智能检测技术研究与应用[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(Sup1): 1-6.  
ZHONG J W, WANG B, WANG X, et al. Research of bridge intelligent inspection technology and application [J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(Sup1): 1-6. (in Chinese)
- [60] 张清华, 崔闯, 魏川, 等. 钢桥面板疲劳损伤智能监测与评估系统研究[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 66-77, 112.  
ZHANG Q H, CUI C, WEI C, et al. Research on intelligent monitoring and assessment system for fatigue damage of orthotropic steel deck structural system [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(11): 66-77, 112. (in Chinese)
- [61] YAO Y, JI B H, FU Z Q, et al. Optimization of stop-hole parameters for cracks at diaphragm-to-rib weld in steel bridges [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 162: 105747.
- [62] YUANZHOU Z Y, JI B H, FU Z Q, et al. Fatigue crack retrofitting by closing crack surface [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 119: 229-237.
- [63] KINOSHITA K, BANNO Y, ONO Y, et al. Fatigue strength improvement and fatigue crack closure by portable pneumatic needle-peening treatment on welded joints [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2019, 19(3): 693-703.
- [64] TONG L W, YU Q T, ZHAO X L. Experimental study on fatigue behavior of butt-welded thin-walled steel plates strengthened using CFRP sheets [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 147: 106471.
- [65] WANG C S, WANG Y Z, DUAN L, et al. Fatigue performance evaluation and cold reinforcement for old steel bridges [J]. *Structural Engineering International*, 2019, 29(4): 563-569.
- [66] LIU J, GUO T, FENG D M, et al. Fatigue performance of rib-to-deck joints strengthened with FRP angles [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(9): 04018060.
- [67] 陈卓异, 李传习, 柯璐, 等. 某悬索桥钢箱梁疲劳病害及处治方法研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(3): 91-100.  
CHEN Z Y, LI C X, KE L, et al. Study on fatigue damages and retrofit methods of steel box girder in a suspension bridge [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(3): 91-100. (in Chinese)
- [68] AL-AZZAWI Z, STRATFORD T, ROTTER M, et al. FRP strengthening of web panels of steel plate girders against shear buckling Part-I: Static series of tests [J]. *Composite Structures*, 2018, 206: 722-738.
- [69] AL-AZZAWI Z, STRATFORD T, ROTTER M, et al. FRP strengthening of web panels of steel plate girders against shear buckling. Part-II: Fatigue study and cyclic series of tests [J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 82-95.
- [70] IZADI M, MOTAVALLI M, GHAFORI E. Iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) for fatigue strengthening of cracked steel bridge connections [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116800.
- [71] YUAN Y, WU C, JIANG X. Experimental study on the fatigue behavior of the orthotropic steel deck rehabilitated by UHPC overlay [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 157: 1-9.
- [72] WANG S L, KE Z T, GAO Y, et al. Long-term in situ performance investigation of orthotropic steel bridge deck strengthened by SPS and RPC solutions [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(6): 04019054.
- [73] TEIXEIRA DE FREITAS S, KOLSTEIN H, BIJLAARD F. Fatigue assessment of full-scale retrofitted orthotropic bridge decks [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(11): 04017092.
- [74] KINOSHITA K, BANNO Y, ONO Y, et al. Fatigue strength improvement of welded joints of existing steel bridges by shot-peening [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2019, 19(2): 495-503.
- [75] 卜一之, 金通, 李俊, 等. 纵肋与横隔板交叉构造细节穿透型疲劳裂纹扩展特性及其加固方法研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(6): 211-218.  
BU Y Z, JIN T, LI J, et al. Research on propagation characteristics and reinforcement method of penetrating crack at rib-to-diaphragm welded joints in steel bridge deck [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(6): 211-218. (in Chinese)
- [76] 张清华, 李俊, 卜一之, 等. 正交异性钢桥面板纵肋与横隔板交叉构造细节疲劳开裂快速加固方法[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(12): 124-133.  
ZHANG Q H, LI J, BU Y Z, et al. Rapid reinforcement approach for the fatigue cracking of longitudinal rib-to-diaphragm detail in orthotropic steel bridge deck [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(12): 124-133. (in Chinese)