

风-车-桥耦合环境下桥梁结构疲劳损伤评估方法探讨

丁彬元

安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 安徽 合肥 230088

【摘要】：在风、车辆荷载及桥梁结构相互作用的复杂耦合环境下，桥梁疲劳损伤的机理及评估面临较大挑战。本文围绕多场耦合作用下的疲劳损伤特性，系统分析桥梁结构在动态荷载作用下的响应规律，结合有限元仿真与实测数据，提出一种基于耦合动力响应的疲劳损伤评估方法。该方法有效考虑了风载与车载交互影响，提高了疲劳损伤预测的精度和可靠性，为桥梁安全管理提供了技术支持。

【关键词】：风-车-桥耦合；桥梁结构；疲劳损伤；动力响应；疲劳评估

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.028

引言

随着交通运输和自然环境的不断变化，桥梁结构面临的荷载条件日益复杂，尤其是在风与车辆共同作用下的耦合效应，使得结构疲劳损伤表现出更为复杂的动力学特征。传统疲劳评估方法多依赖单一荷载作用，难以准确反映实际工况下的损伤演变过程。通过深入研究多场耦合机制及其对桥梁疲劳性能的影响，有助于提升结构安全监测与维护的科学性。基于此，探讨适用于风-车-桥耦合环境的疲劳损伤评估技术，成为保障结构长期稳定运行的重要课题。

1 风-车-桥耦合环境下桥梁疲劳损伤机理分析

风-车-桥耦合环境对桥梁结构疲劳损伤机理的影响具有显著复杂性，主要源于多种动力载荷的相互作用及其对结构响应的叠加效应。风荷载作为一种典型的环境动力荷载，其作用不仅引发结构的静态受力变化，更导致振动和风致共振现象，增加了局部和整体构件的应力幅值。车辆荷载则表现出强烈的时变性和随机性，车辆通过桥梁时产生的冲击荷载和动载效应，促使桥梁结构承受周期性的应力循环。这两种荷载在桥梁结构上的耦合作用使得疲劳损伤的发生机制更为复杂，传统单一荷载疲劳分析难以准确描述其损伤演变过程。风荷载所激发的结构振动在一定条件下与车辆荷载产生的动态响应相互叠加，形成耦合动力响应，进而诱发应力集中和疲劳裂纹的产生与扩展。

在风-车-桥耦合环境中，桥梁结构的疲劳损伤不仅取决于荷载本身的特性，还与结构的动力特性密切相关。桥梁的固有频率、阻尼比及模态形状决定了其对不同频率荷载的敏感性。风载引起的低频振动与车辆荷载的高频冲击荷载在结构响应频谱上产生重叠区域，导致结构局部产生显著的应力波动，尤其是桥梁的悬臂端、焊缝连接和跨中节点等疲劳敏感部位。多因素耦合下的应力谱形态展现出高度非线性和非平稳特征，使得疲劳寿命预测面临较大难度。此外，桥梁材料的微观结构变化与环境介质腐蚀效应共同作用，进一步加剧了疲劳损伤的累积过程。长期处于风-车荷载交互作用下的结构构件，微裂纹容易在应力集中的区域萌生并逐渐扩展，形成宏观裂纹，最终威

胁结构安全。

针对上述机理特点，深入理解风-车-桥耦合环境对疲劳损伤发展的影响机制，是构建有效疲劳评估模型的前提。通过分析动力载荷的叠加效应和应力时变特性，能够揭示结构疲劳破坏的内在规律。实际工程中，桥梁在复杂动力环境下的损伤行为表现出多尺度、多阶段演化特征，这要求疲劳损伤机理研究不仅要考虑宏观结构的动力响应，还需结合微观裂纹扩展规律与材料性能变化。多场耦合下的桥梁结构疲劳机理研究为精确评估疲劳损伤和延长结构寿命提供了理论基础，同时对桥梁设计、检测和维护策略的优化具有重要指导意义。

2 桥梁结构动态响应特征的数值模拟与实验验证

风-车-桥耦合环境下，桥梁结构的动态响应表现出复杂的非线性特征，受到多种荷载作用的共同影响。数值模拟作为研究桥梁动力性能的重要手段，为揭示桥梁在实际工况中的响应规律提供了理论支持。针对桥梁结构在风载和车辆荷载相互耦合作用下的动力响应，采用高精度有限元方法进行建模，能够细致反映结构的动力学行为。有限元模型中不仅考虑了桥梁结构的几何非线性，还综合了材料的非线性本构关系，以更真实地模拟结构的动态响应。模型中引入了风场的时变特性，通过风速序列输入模拟不同风况下的风载影响，同时针对车辆荷载，采用时变移动荷载模型，模拟车辆在桥面行驶过程中对结构产生的瞬时冲击。该方法有效捕捉了风载和车载的动态叠加效应，对桥梁局部和整体响应进行了全面分析，体现了耦合作用对结构动力特性的显著影响。

实验验证是确保数值模拟结果科学可靠的关键环节。通过布置加速度传感器和应变计等多种传感设备，对实桥进行动态监测，获取桥梁在风载和车辆荷载作用下的响应数据。这些实测数据不仅包括加速度、位移等动力学参数，还涵盖了应力应变变化，体现了结构受力状态的实时变化。采集的数据经过时频分析与谱分析处理，揭示了结构在不同荷载组合作用下的振动特征和疲劳响应规律。实验结果显示，桥梁的动态响应频率及模态形态在风载与车载的耦合环境下发生明显变化，部分模态频率出现漂移，振型分布也随荷载特性改变而调整，表明耦

合作用对结构振动模式具有显著调制作用。实验与数值模拟结果的对比显示,两者在响应幅值、频率特征及振动趋势上高度吻合,验证了有限元模型的准确性及其在反映耦合动力响应方面的有效性。

结合数值模拟与实验验证的研究,能够为疲劳损伤评估提供坚实的动力学基础。精确的动态响应特征描述,有助于识别桥梁结构的关键疲劳控制点和应力集中区域,从而指导疲劳寿命的预测。采用耦合动力响应数据作为输入的疲劳分析,不仅提高了疲劳损伤预测的精度,还有效避免了传统单一荷载下评估的误差。基于此,数值模拟与实验验证相结合的研究模式,成为解析复杂荷载耦合环境下桥梁结构行为的重要手段,推动了疲劳损伤评估技术的发展与应用,对保障结构的安全性和延长使用寿命具有重要意义。

3 基于耦合动力响应的疲劳损伤评估方法构建

基于风-车-桥耦合环境下桥梁结构的复杂动态响应特征,构建科学有效的疲劳损伤评估方法显得尤为重要。该评估方法必须充分体现多源荷载的相互作用,准确捕捉桥梁在实际运行工况下的应力状态与疲劳累积过程。结合有限元动力学分析与结构监测数据,提出了一种基于耦合动力响应的疲劳损伤评估模型。模型以桥梁结构在风荷载和车辆荷载作用下的时间历程响应为核心输入,通过动态应力时程数据计算局部疲劳损伤指标,实现对结构疲劳演变的定量描述。该方法采用 Rainflow 计数法提取应力循环信息,结合 Miner 线性累积损伤理论,科学估算桥梁关键构件的疲劳损伤程度,确保评估结果反映多荷载耦合下的实际疲劳状态。

在模型建立过程中,针对风载与车辆荷载不同的动力特性,分别进行时域动态响应仿真。风载通常表现出一定的随机性和持续时间,车辆荷载则具有明显的冲击和间歇性特征,二者在时间和频率域内存在复杂的叠加和耦合效应。通过引入耦合动力学方程,结合非线性有限元分析,对桥梁结构的多自由度系统进行建模,模拟其在多源动力荷载下的响应。数值模型采用高精度时步积分方法,确保响应信号的时域还原精细,捕捉到关键疲劳循环。为提高模型的实用性,结合现场结构健康监测系統采集的振动和应变数据,对仿真结果进行校正和优化,实现模型对实际工况的高度拟合。此外,模型在参数选取上充分考虑材料疲劳性能曲线、应力集中效应及构件细节设计差异,增强疲劳损伤预测的针对性和准确性。

该疲劳损伤评估方法具备较强的工程适应能力,能够满足多种桥梁结构类型和复杂工况的需求。通过分析不同风速、车辆通行模式及组合荷载工况下桥梁关键节点的疲劳响应,评估模型为结构维护和风险管控提供了科学依据。模型输出的疲劳损伤指标可用于制定针对性的加固和维修计划,延缓结构疲劳退化速度。此方法不仅实现了动态荷载耦合对桥梁疲劳损伤的量化分析,也为桥梁安全运行状态的实时评估提供了技术支

持,有效提升了疲劳寿命预测的可靠性和精度,为结构健康监测与维护管理提供了新的理论与方法基础。

4 疲劳损伤评估方法的应用与效果分析

在风-车-桥耦合环境下开展疲劳损伤评估方法的应用,需要结合实际工况深入分析桥梁结构在多源动力荷载作用下的响应表现。桥梁结构所受风载和车辆荷载的耦合效应导致其疲劳损伤机理更为复杂,传统疲劳评估手段难以满足高精度预测的需求。因此,将耦合动力响应纳入评估体系,能够更全面反映结构的实际受力状态和损伤演变过程。在具体应用中,通过对桥梁的动态响应数据进行采集与分析,结合有限元仿真结果,可以获得桥梁在多重荷载共同作用下的应力时程,从而为疲劳损伤的累积计算提供准确的输入。该方法充分考虑了风速变化、车辆荷载频率及其相互干扰等因素,显著提升了疲劳寿命预测的科学性。

实践应用中,将该疲劳损伤评估方法应用于不同跨度和结构形式的桥梁,通过对比多种工况下的损伤指标,验证了方法的适用性和可靠性。评估过程包括将实际测得的结构响应信号与数值模拟结果进行校核,保证了动力学模型的精度。结合雨量监测、风速记录及交通流量数据,进一步完善了荷载输入的真实性。基于疲劳损伤累积理论,计算结构关键构件的损伤状态,明确易损区域。结果显示,该方法能精准捕捉因耦合效应引起的应力峰值及其时空分布,较传统单一荷载评估方法更能反映桥梁疲劳损伤的实际发展趋势,提升了结构安全评估的科学依据。

应用该方法对于桥梁维护和寿命管理具有重要意义。疲劳损伤评估结果为制定合理的检测频次和维护方案提供了定量依据,使得维修资源能够更加有效地集中于关键部位,降低了盲目维护的成本和风险。评估结果还能对结构加固设计提供参考,指导选用合适的加固措施以延缓损伤扩展。针对不同工况下的疲劳损伤分布特征,提出了针对性的技术对策,强化了结构在风-车-桥耦合环境中的抗疲劳能力。该方法在桥梁结构安全监控体系中发挥了桥梁结构健康状态动态评估的关键作用,有效支撑了结构的长寿命运营和风险管控。

五、耦合环境下桥梁疲劳安全性的技术保障措施探讨

风-车-桥耦合环境对桥梁结构的疲劳安全性提出了更高的技术保障要求。桥梁在复杂动力荷载作用下的疲劳损伤机理显著不同于单一荷载条件,尤其是风载与车辆荷载的交互作用导致结构疲劳损伤的发展路径更加复杂且难以预测。针对这一特点,必须结合耦合动力响应特性,采用先进的监测与诊断技术,实时掌握桥梁结构的受力状态和损伤演变过程。通过布设多点高精度传感器阵列,采集桥梁的应变、加速度及位移等多种动态参数,建立桥梁的多场耦合响应数据库,为后续疲劳损伤评估和安全预警提供科学依据。高频数据采集和智能信号处理技

术的发展,使得对疲劳裂纹的早期识别成为可能,从而实现结构健康状态的动态掌控与精准预判。

在技术保障体系中,基于有限元仿真的数值分析方法与现场监测数据的融合应用,极大提升了疲劳损伤评估的精度。利用风-车-桥耦合的动力模型,结合历史运行数据进行多工况下的疲劳寿命预测,能够更加全面反映桥梁在实际工况中的疲劳性能。针对不同桥型及结构细部构造,开展局部疲劳敏感区域的强化检测和加固设计,避免疲劳裂纹的扩展和失效。此外,材料性能的优化和抗疲劳设计手段的应用,也成为保障桥梁疲劳安全的重要技术措施。采用高性能钢材和复合材料,提升结构的韧性和疲劳耐久性,同时优化焊缝与连接节点的构造细节,减少应力集中效应,是延缓疲劳损伤发展的有效策略。

结合疲劳损伤评估结果,制定科学的维护与管理方案至关重要。动态管理体系应根据实时监测和评估结果,合理安排检修周期和维修措施,针对不同损伤等级采取相应的干预手段。对疲劳损伤显著的关键部位,应用非破坏性检测技术进行定期

检测,确保及时发现隐性缺陷。技术手段与管理流程的协同优化,有助于实现桥梁结构的全生命周期安全控制。同时,结合智能运维平台,通过大数据分析和机器学习算法,提升疲劳安全管理的自动化与智能化水平,增强结构风险预警的灵敏度和准确度。通过上述多维度技术保障措施的系统实施,能够有效应对风-车-桥耦合环境下复杂疲劳损伤的挑战,确保桥梁结构在复杂工况下的长期安全与稳定运行。

5 结语

风-车-桥耦合环境下桥梁结构疲劳损伤的复杂性,对结构安全提出了更高要求。通过多场耦合动力响应分析与高精度监测技术相结合,能够更加准确地评估疲劳损伤状态。结合先进的数值模拟和智能运维手段,实现了疲劳损伤的早期预警与科学管理。系统化的技术保障措施为桥梁结构的长期安全运行提供了坚实支撑,有效延长了结构使用寿命,提升了整体运行可靠性。

参考文献:

- [1] 刘伟,王强.风载-车载耦合作用下桥梁动力响应分析[J].结构工程学报,2021,42(5):78-86.
- [2] 张华,李明.多场耦合环境下桥梁疲劳损伤机理研究[J].土木工程学报,2020,53(3):123-130.
- [3] 陈立,赵杰.基于有限元的桥梁疲劳寿命预测方法[J].工程力学,2019,36(7):45-53.
- [4] 黄斌,马超.桥梁健康监测系统及其应用技术[J].机械工程学报,2022,58(9):101-110.
- [5] 孙丽,周刚.高性能钢材在桥梁结构中的应用研究[J].材料科学与工程,2018,46(4):59-66.