

# 动态监测技术在重载铁路桥梁病害整治中的应用

朱鑫

中国神华能源股份有限公司神朔铁路分公司 陕西 榆林 719316

**摘要:** 重载铁路桥梁长期承受列车重载冲击, 易出现混凝土裂缝、钢结构疲劳、基础沉降等病害, 威胁运营安全。本文阐述重载铁路桥梁核心病害类型及动态监测技术原理、分类与要求, 结合工程案例, 分析荷载、应变、位移、裂缝发展等监测技术在病害整治中的具体应用, 验证其应用效果, 剖析当前技术应用中的问题并提出优化建议, 为重载铁路桥梁病害精准整治、安全运维提供数据支撑与实践参考, 推动动态监测技术的推广应用。

**关键词:** 动态监测技术; 重载铁路桥梁; 病害整治; 应用

引言: 重载铁路是货运的核心通道, 桥梁作为关键枢纽, 其结构安全直接关系到运输畅通与人员安全。随着重载列车轴重与运量提升, 桥梁病害发生率显著增加, 传统人工巡检效率低、滞后性强, 难以满足精准监测需求。动态监测技术凭借实时性、高精度、稳定性优势, 可实现病害早期识别与动态追踪。因此, 研究该技术在重载铁路桥梁病害整治中的应用, 破解整治难题, 对保障重载铁路安全高效运营具有重要现实意义。

## 1 重载铁路桥梁常见病害及动态监测技术基础

### 1.1 重载铁路桥梁核心病害类型及成因

(1) 混凝土结构病害: 主要表现为裂缝、表面剥落、混凝土碳化及内部钢筋锈蚀, 是重载铁路桥梁最普遍的病害类型。成因主要包括重载列车长期冲击荷载作用, 导致结构应力集中产生裂缝; 大气、雨水等环境因素侵蚀, 加速混凝土碳化; 材料长期使用后老化, 强度下降, 进而引发钢筋锈蚀、表面剥落。(2) 钢结构病害: 常见形式有焊缝开裂、表面涂层脱落、结构疲劳损伤。主要由焊接工艺存在缺陷, 导致焊缝处强度薄弱; 重载列车反复通行产生的交变荷载, 长期作用于钢结构, 引发疲劳损伤; 外界环境侵蚀使涂层脱落, 钢结构裸露后易生锈, 加剧病害发展。(3) 基础及墩台病害: 主要为基础沉降、墩台倾斜及基底冲刷。受地基土特性差异影响, 重载长期作用下易出现不均匀沉降; 列车荷载的横向冲击力导致墩台倾斜; 河流、雨水等水文环境的冲刷作用, 破坏基底土体, 影响桥梁基础稳定性<sup>[1]</sup>。

### 1.2 动态监测技术核心原理与分类

(1) 核心原理: 以传感器为核心, 实时采集桥梁在重载列车作用下的结构响应数据, 通过数据传输模块将信息送至后台处理系统, 经分析处理后, 实现病害的早期识别、状态追踪及趋势预判, 为桥梁安全运维提供数据支撑。(2) 主要分类: 包括荷载监测技术, 如WIM动

态称重系统, 可实时监测列车轴重、总重, 掌握荷载作用情况; 位移监测技术, 如LVDT图像式裂缝监测技术, 精准捕捉桥梁桥梁裂缝宽度变化; 此外还有应变监测技术、振动监测技术, 分别监测结构劣化动态及振动特性, 全面掌握桥梁状态。

### 1.3 重载铁路桥梁动态监测关键技术要求

(1) 精度要求: 需满足重载复杂环境下各类参数的精准监测, 其中裂缝监测精度需达到0.01mm级, 量程为0~10mm。位移、应变等参数监测误差控制在允许范围内, 确保数据真实反映桥梁病害状态。(2) 稳定性要求: 适应高温、暴雨、强振动等复杂工况, 具备较强的抗干扰能力, 可连续稳定运行, 避免因环境因素导致监测中断、数据丢失, 保障监测工作持续有效。(3) 实时性要求: 实现数据实时采集、传输与分析, 当监测数据超出预警阈值时, 及时发出病害预警, 为病害整治工作争取宝贵时间, 降低安全风险。

## 2 动态监测技术在重载铁路桥梁病害整治中的具体应用

### 2.1 荷载与应变动态监测在病害整治中的应用

(1) WIM动态称重系统应用: 在重载铁路桥梁入口及关键跨段部署WIM动态称重系统, 可实时、连续监测过往列车的轴重、总重及荷载分布情况, 精准识别超重、偏载车辆。重载铁路桥梁的裂缝扩展、钢结构疲劳损伤等病害, 多与长期超载荷载作用相关, 该系统采集的荷载数据的可明确超载行为与病害发展的关联, 为裂缝封闭、结构加固等整治工作提供精准的荷载参数支撑, 避免整治方案脱离实际荷载工况。(2) 应变监测技术应用: 采用光纤光栅、电阻应变片等高精度传感器, 在桥梁主梁、支座、墩台等关键受力部位布设测点, 实时监测结构在重载作用下的应变变化。通过分析应变数据, 可快速定位荷载集中区域, 判断结构应力分布是否

均匀,进而指导施工人员对裂缝开展封闭、灌浆处理,对受力薄弱部位采取粘贴加劲钢板、增设加劲肋等加固措施,从源头遏制病害进一步发展<sup>[2]</sup>。(3)应用效果:通过荷载与应变动态监测,能够精准掌握列车荷载分布规律及桥梁关键部位受力状态,有效规避盲目整治带来的资源浪费,显著提升病害整治的针对性和有效性。同时,通过识别超重车辆并及时管控,减少了超载引发的桥梁二次损伤,延长了桥梁整治后的使用寿命,降低了后期运维成本。

## 2.2 位移与振动动态监测在病害整治中的应用

(1) LVDT裂缝监测技术应用:在桥梁梁体、墩台顶部布设LVDT式裂缝计,结合数据处理算法,实时捕捉裂缝在列车荷载作用及温度变化下的发展情况,监测精度可达毫米级。针对基础沉降、墩台倾斜等病害,可根据监测数据明确沉降、倾斜的速率和幅度,指导施工人员采取地基注浆加固、墩台纠偏、支座更换与调整等整治措施,确保整治后桥梁结构位移控制在规范允许范围内<sup>[3]</sup>。(2) 振动监测技术应用:利用加速度传感器等设备,监测桥梁在列车通行时的自振频率、阻尼比、振动幅值等参数,通过对比健康状态下的基准数据,精准识别结构疲劳损伤及刚度下降等问题。针对振动异常引发的病害,可优化振动防护方案,如增设阻尼器、调整轨道平顺性,同时结合监测数据优化结构加固方案,提升桥梁抗振动能力,减少疲劳损伤的进一步发展。(3)应用效果:位移与振动动态监测实现了桥梁结构变形、振动异常的实时预警,一旦数据超出预警阈值,可及时发出警报并通知相关人员处置,有效避免病害进一步恶化引发的安全隐患。通过针对性整治,显著提升了桥梁结构的稳定性和抗变形能力,确保重载列车通行安全,降低了病害复发概率。

## 2.3 多源动态监测数据融合在病害整治中的应用

(1) 数据融合技术:采用多源数据融合算法,整合荷载、应变、位移、振动等各类监测数据,消除单一监测数据的局限性和误差,实现数据互补。通过对多维度数据的综合分析,可全面、准确评估桥梁健康状态,提高裂缝、疲劳损伤、基础沉降等病害的识别准确率,避免因单一数据误判导致的整治不当问题。(2) 整治方案优化:基于融合后的监测数据,构建科学的桥梁健康状态评估体系,明确病害的严重程度、发展趋势及影响因素,进而优化整治方案。例如,针对裂缝病害,结合应变、位移数据判断裂缝是否处于活跃状态,优化裂缝封闭、加固的工艺和参数;针对基础病害,结合荷载、沉降数据,调整地基加固的范围和深度,确保整治方案更具科学性和可行性<sup>[4]</sup>。

(3) 应用案例:某重载铁路大桥长期受重载列车作用,出现主梁裂缝、墩台轻微沉降等病害,采用多源动态监测系统整合荷载、应变、位移及振动数据,精准识别出裂缝主要由超载和应力集中引发,沉降则与地基不均匀沉降相关。基于融合数据制定了“超载管控+裂缝灌浆封闭+地基注浆加固”的综合整治方案,整治完成后,通过监测数据验证,裂缝不再扩展,墩台沉降稳定在允许范围,实现了病害的精准整治。

## 2.4 动态监测系统的部署与运维

(1) 系统部署:传感器选型需结合重载铁路桥梁的工况特点,优先选用抗振动、抗恶劣环境、精度高、稳定性强的设备,如光纤光栅传感器、LVDT式裂缝计等。测点布置遵循“关键受力部位全覆盖、病害高发区域重点布”的原则,在主梁跨中、支座、墩台基础等关键部位,以及裂缝、疲劳损伤高发区域优化测点密度,确保监测数据能够全面反映桥梁状态,为病害整治提供可靠支撑。(2) 运维管理:建立完善的监测系统运维管理制度,定期对传感器进行校准、检修,及时更换老化、损坏的设备,确保监测精度;做好监测数据的备份与存储,建立数据台账,避免数据丢失;建立故障快速处置机制,针对数据传输中断、传感器故障等问题,及时排查处理,确保监测系统长期稳定运行,为桥梁病害整治及后期运维提供持续的数据支持<sup>[5]</sup>。

## 3 动态监测技术应用效果验证与优化建议

### 3.1 工程案例概况

(1) 案例桥梁基本信息:本次选取某重载铁路简支梁桥为研究对象,该桥梁为预应力混凝土结构,建成于1995年,线路运营车辆有C64K、C70、C80B等车型,长期承担煤炭运输重载任务,桥梁设计荷载为“中-活载”。目前桥梁存在主梁多处细微裂缝、墩台轻微沉降及钢结构焊缝疲劳损伤等病害,影响列车通行安全性,需通过动态监测技术辅助开展整治工作。(2) 监测系统部署:选用荷载监测、应变监测及振动监测相结合的综合动态监测技术,传感器选用抗振动、抗恶劣环境的光纤光栅应变传感器、WIM动态称重传感器、LVDT裂缝传感器及加速度传感器。测点重点布置于主梁跨中、支座、墩台基础及焊缝等关键部位和病害高发区域,数据采集流程为传感器实时采集数据→无线传输至后台处理系统→数据筛选、分析→生成监测报告,为病害整治提供支撑。

### 3.2 应用效果验证与分析

(1) 病害识别效果:经实践验证,该动态监测系统对桥梁裂缝、墩台沉降、焊缝疲劳损伤等各类病害的识别准

确率达95%以上,可在病害初期(如裂缝宽度0.01mm时)及时捕捉异常数据,发出预警,相比传统人工巡检,识别及时性提升60%,有效避免病害隐蔽发展。(2)整治优化效果:对比整治前后监测数据发现,整治后桥梁主梁应变最大值下降30%,墩台沉降速率控制在0.1mm/月以内,振动幅值降低25%,动态监测技术有效指导了整治方案优化,使整治工期缩短15%,整治质量显著提升,病害复发率降至5%以下。(3)经济性分析:传统整治模式需反复人工巡检、盲目加固,单次整治成本约80万元,且后期病害复发率高;动态监测辅助整治模式单次投入约95万元,但可精准定位病害、优化方案,减少无效投入,且后期运维成本每年降低20万元,综合测算,3年内可收回额外投入,体现出显著的技术应用价值。

### 3.3 动态监测技术应用中存在的问题

(1)技术层面:部分监测技术在暴雨、强振动等复杂环境下,监测精度会出现波动,误差增大;多源数据融合过程中,数据处理速度较慢,融合效率有待提升,难以快速输出全面的桥梁健康评估结果。(2)应用层面:监测系统的传感器、传输设备等需定期校准、更换,运维成本较高;监测数据与病害整治工作的联动不够紧密,部分监测结果未能及时转化为整治行动,存在数据浪费现象。(3)管理层面:目前行业内缺乏统一的监测数据标准与桥梁健康状态评估规范,不同监测系统的数据无法互通,评估结果缺乏可比性;相关技术培训不足,一线运维人员专业能力有限,导致技术推广难度较大。

### 3.4 优化建议

(1)技术优化:加大研发投入,研发适配重载、复杂环境的高精度监测设备,提升设备抗干扰能力;完善多源数据融合算法,优化数据处理流程,提高数据融合

效率和准确性,实现桥梁健康状态的快速评估。(2)应用优化:构建“监测-整治-评估”闭环体系,建立监测数据与整治工作的联动机制,确保监测结果及时指导整治实践;优化监测系统运维模式,推行设备集约化管理,降低运维成本,推动“一站式”监测-整治解决方案的推广应用。(3)管理优化:联合行业主管部门、科研机构,制定统一的监测数据标准与桥梁健康状态评估规范,实现数据互通、结果可比;加强技术培训,提升一线运维和整治人员的专业能力,加大技术宣传力度,推动动态监测技术在重载铁路桥梁领域广泛应用。

### 结束语

动态监测技术为重载铁路桥梁病害整治提供了智能化、精准化解决方案,有效弥补了传统整治模式的不足,通过多技术融合应用,大幅提升了病害识别准确率与整治有效性,降低了运维成本。尽管目前该技术在应用中仍存在精度波动、运维成本高、标准不统一等问题,但通过技术、应用与管理层面的优化完善,其应用前景广阔,将为重载铁路桥梁全生命周期安全运维提供更有力的支撑,助力智慧铁路建设。

### 参考文献

- [1]孙明德,臧晓秋,曹志峰,等.重载铁路桥梁支座病害分析及改造技术[J].铁道建筑.2021,(10):137-140.
- [2]万文青.重载铁路桥梁病害综合整治加固技术分析[J].建筑工程技术与设计.2022,(18):221-224.
- [3]尹成斐.重载铁路小跨度桥梁病害综合整治加固技术研究[J].铁道标准设计.2021,(4):61-63.
- [4]许三平.重载铁路桥梁设计的几点思考[J].铁道标准设计.2023,(7):92-95.
- [5]高国良.重载铁路混凝土梁常见病害分析及处理对策研究[J].铁道标准设计.2022,(12):144-146.