

公路桥梁检测无损检测技术应用

毛明辉

苏交科集团检测认证有限公司 江苏南京 211100

摘要: 本文系统阐述了无损检测技术在公路桥梁检测中的应用,分析了桥梁常见病害类型及传统检测方法的局限性,重点探讨了超声波、探地雷达、红外热成像及光纤传感等技术的原理与工程实践。结合智能化、大数据与新型传感器技术发展趋势,提出无损检测技术向自动化、多模态融合方向演进的路径,为桥梁全生命周期健康监测提供技术支持。

关键词: 无损检测;公路桥梁;病害检测;智能化监测;光纤传感

引言

公路桥梁是交通基础设施中最核心的部分,公路桥梁的安全直接影响着社会经济发展和公众生命财产安全。传统的桥梁检测手段,如钻孔取芯和静载试验,存在着较大的破坏性和低效率,这些方法很难满足现代桥梁的快速检测和长期监控的需求。无损检测技术具有非破坏性,高精度和实时性的优点,是桥梁结构健康评估中至关重要的方法。文章从工程实际出发,系统地分析了无损检测技术诊断桥梁病害的现状与发展趋势。

一、无损检测技术概述

(一) 定义

无损检测技术(Non-Destructive Testing, NDT)是一种在不破坏被检测对象结构完整性和使用性能的前提下,利用材料内部缺陷或结构异常对物理场(如声、光、电、磁、热等)的响应特性,通过仪器设备采集并分析相关物理量变化,由此定量或者定性地评价材料或者构件内部缺陷,组织结构,力学性能和状态参数的一种技术手段。其核心在于通过非侵入式方式获取结构内部信息,既可检测宏观缺陷(如裂纹、空洞),也可分析微观损伤(如材料疲劳、腐蚀),对工程结构进行安全性评估和寿命预测提供科学依据是现代工业和基础设施维护领域中的一项关键技术。

(二) 分类

无损检测技术依据检测原理与物理场特性可分为多种类型:超声波检测利用高频声波在介质中的传播与反射特性定位内部缺陷,适用于混凝土、金属等材料的深层检测;探地雷达通过电磁波在地下介质中的衰减与反射差异识别结构分层与空洞,常用于路基、桥台等浅层

病害检测;红外热成像基于热辐射与温度分布的关联性,捕捉结构表面异常热斑以诊断脱空、渗水等隐蔽缺陷;光纤传感则利用光纤对温度、应变、振动等物理量的敏感特性,实现桥梁、隧道等大型结构的分布式实时监测;此外,磁粉检测适用于铁磁性材料表面裂纹识别,涡流检测可快速筛查金属构件的近表面缺陷,而射线检测则通过X射线或 γ 射线穿透成像,精准检测焊缝内部气孔与夹渣。各类技术相互补充,共同构建起工程结构无损检测的技术体系。

(三) 无损检测技术原理

1. 超声波检测(UT)

基于超声波在介质中传播时遇到缺陷界面产生反射的原理,通过分析反射波时间、振幅等参数确定缺陷位置与尺寸。其检测灵敏度可达毫米级,适用于混凝土、钢结构内部缺陷检测。

2. 探地雷达检测(GPR)

利用高频电磁波在地下介质中的传播特性,通过分析反射波的振幅、相位等信息,获取地下结构分布。其分辨率可达厘米级,适用于路基厚度、空洞、裂缝等浅层病害检测。

3. 红外热成像(IRT)

基于物体表面温度分布与热辐射的关系,通过红外热像仪采集温度场数据,识别结构内部缺陷(如脱空、渗水)。其检测深度可达0.5-1.0米,适用于大面积快速筛查。

4. 光纤传感(FOS)

利用光纤对温度、应变、位移等物理量的敏感性,通过光信号变化实现实时监测。其分布式监测能力可达公里级,适用于桥梁长期健康监测。

二、公路桥梁常见病害及检测需求

(一) 桥梁病害类型

1. 混凝土结构病害

混凝土结构病害涉及裂缝扩展、碳化侵蚀、钢筋锈蚀、表层剥落等多种典型的破坏形态。产生的原因比较复杂：氯盐的渗入诱发钢筋的锈蚀和膨胀、冻融循环对混凝土孔隙结构的损伤、车辆的超载加快裂缝的扩展、材料的碳化使保护层的碱性下降等因素综合作用造成结构耐久性和承载力的衰减。

2. 钢结构病害

钢结构病害的主要形式有焊缝裂纹、螺栓松动、局部屈曲、匀速/非匀速腐蚀和涂层失效。在高应力集中区容易萌生疲劳裂纹并在重复荷载作用下引起裂纹的扩展；螺栓的预紧力不够或者震动触发连接失效；环境腐蚀弱化了构件截面并在锈坑处形成应力集中点；温度过高或者撞击都会诱发结构的局部屈曲和变形，防护涂层的恶化会加快腐蚀的过程并对结构的整体稳定性构成威胁。

3. 预应力体系病害

预应力体系病害涉及孔道压浆不密、钢绞线锈蚀断丝、锚具夹片破坏、预应力损失超标等潜在病害。压浆缺陷引起的氯离子渗透会加快钢绞线的锈蚀速度，锈蚀产物的体积膨胀会撑裂混凝土的保护层；锚具疲劳或者施工缺陷诱发夹片滑移导致预应力松弛；长期荷载和环境的耦合作用加剧了预应力筋的徐变，衰减了有效预应力，最终导致结构的抗裂性和承载能力下降，危害桥梁的安全。

(二) 传统检测方法的局限性

传统检测方法在钢结构与混凝土结构病害诊断中暴露出显著局限性：回弹法通过表面硬度推算混凝土强度，但受碳化深度、骨料分布不均影响，测试结果离散性大且无法反映内部缺陷；钻芯取样虽能直接获取混凝土抗压强度，但会对结构造成永久性损伤，且取样数量有限难以全面评估质量；磁粉检测仅能发现铁磁性材料表面裂纹，对埋深缺陷或非铁磁性构件（如铝合金）完全失效；静载试验通过模拟荷载验证结构承载力，但需中断交通、成本高昂，且难以复现复杂工况下的疲劳损伤；目视检查依赖人工经验，对隐蔽部位（如预应力管道、焊缝内部）的微裂纹或锈蚀无能为力，且无法量化缺陷尺寸；传统应变片测量为点式监测，易受电磁干扰且无法覆盖大面积区域，长期稳定性差。这些方法在效率、精度与适用性上的不足，促使无损检测技术成为现代工程结构健康评估的核心手段。

(三) 无损检测技术的适用性分析

无损检测技术以其非破坏性、高灵敏度及多参数分析能力等特点在工程结构病害诊断方面表现出了显著的适用性，即超声波检测能够穿透混凝土和金属基体，利用波速衰减和反射信号辨识内部孔洞，裂纹和脱空缺陷的毫米级分辨率适合预应力管道压浆密实度的评价和焊缝质量的检测；探地雷达通过高频电磁波敏感介质介电常数，对路基和桥面板等浅层结构进行快速扫描，以厘米级精度定位空洞，积水和层间脱粘等病害，特别适合运营期无损筛查桥梁隐蔽病害；红外热成像以捕获结构表面温度异常现象来间接体现内部缺陷导致的热传导差异，具有非接触特性，为大范围快速探测提供了支撑，能够对钢结构锈蚀、混凝土脱空、渗水病害等进行高效鉴定；光纤传感技术的核心优点是分布式监测，该技术通过部署对应变和温度灵敏的光纤网络实时采集结构的应力状态和环境参数，其公里级的监测范围和微应变级的精度能够长时间跟踪桥梁在运营期的性能劣化情况；磁粉和涡流检测对铁磁性材料的表面裂纹有着高灵敏度的特点，前者用磁粉的堆积来直观地展示缺陷形貌，而后者则用电磁感应来定量地描述裂纹的深度，两者相辅相成，达到了对钢结构焊缝及连接部位精细化检测的目的。

三、无损检测技术在公路桥梁中的具体应用

(一) 超声波检测技术 (UT)

超声波检测技术 (UT) 作为无损检测领域的关键工具，通过高频声波与材料之间的交互产生的物理效应，能够实现对桥梁结构内部缺陷的精确定位和定量分析。它的技术实质是建立在声阻抗差异所诱发的反射、折射和散射现象之上：频率达到20kHz~1GHz之间的超声波，在混凝土或者金属中渗透，如果遇到裂缝、孔洞等缺陷界面时，一部分声波能量会反射到接收探头上，对反射波时程曲线、波幅衰减和频谱特征进行分析，可以推断出缺陷空间位置、大小和属性。对于桥梁桩基的检测，这种技术是采用预埋声测管的方式来进行三维扫描的，声波传播到桩身混凝土内部的时候，如果碰到夹泥和离析的缺陷，声速将显著低于正常混凝土（正常声速范围3.5~4.5km/s），波幅衰减超过6dB临界值，结合PSD判据可有效识别缺陷边界。以某大桥的桩基检测为例，使用平测法并以0.25m的距离收集数据，通过声速与深度的关系曲线，发现桩身中央有一个声速异常区域，经过进一步的斜向测试，确认其为蜂窝状的缺陷，其直径范围可达0.8m。这项技术在微裂纹响应上展现出了显著

的灵敏度优势：当裂纹的宽度超出声波波长的1/4时，其反射的信号强度可以超过入射波的50%，但常规目视检测会检测到宽度在0.3mm以上表面裂纹。在钢梁焊缝检测中，超声波可穿透50mm厚钢板，通过调整探头角度（如45°斜探头）识别焊缝根部未熔合缺陷，其定位精度可达 $\pm 2\text{mm}$ 。需要注意的是声波传播特性明显受到材料非均质性的影响，混凝土骨料的分布，钢筋锈蚀产物会引起声速离散性的增加，所以需要结合多参数进行综合准则。例如，通过建立声速-波幅-频率三维模型，可区分缺陷类型（例如气孔缺陷呈现高频成分衰减的特征，裂纹缺陷诱发低频共振）。

（二）探地雷达检测技术（GPR）

探地雷达检测技术（GPR）利用高频电磁波作为其信息传输媒介，通过深入研究电磁波在地下环境中的传播行为和界面反应，达到了对桥梁结构潜在缺陷进行高精度成像的目的。其技术内核是建立在介电常数不同所触发的反射和散射机制之上：中心频率在100MHz到2.5GHz之间时，电磁脉冲射入混凝土中、沥青或岩土层时，不同介质界面（例如钢筋--混凝土，脱空--基体）的电磁阻抗突变将导致部分能量反射回接收天线，记录反射波双程走时，振幅衰减和相位特征可以反演出目标体空间分布和物理属性。在桥面板检测方面，本技术在混凝土保护层和钢筋界面脱粘的情况下捕获了0.1-0.5ns的时间分辨率的层间界面反射信号，反射波振幅较正常界面增强3-5倍，结合介电常数模型（混凝土的介电常数一般在6-9之间）可量化脱空厚度，误差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。如在对其市高架桥进行探测时，使用2GHz屏蔽天线进行0.1m步距的扫描并利用希尔伯特-黄变换进行瞬时振幅属性的提取，观察到桥面板上有多个直径在0.3-0.8m范围内的空洞区域，这些区域与后续的钻孔验证结果高度一致，吻合度高达92%。这项技术在穿透深度和分辨率方面受到介电电性参数的限制：在干燥的混凝土中，1GHz的电磁波能够穿透0.5m的深度，并且分辨率可以达到2cm；在湿润的环境条件下，电导率的增加会导致信号衰减更为严重，从而使有效的探测深度减少到0.2m。对于钢筋密集区采用偏移成像算法可以去除多次波的干扰并重构钢筋的三维骨架模型且定位精度好于 $\pm 1\text{cm}$ 。值得关注的是电磁波在介质中非均匀性对其传播路径有明显影响，粗骨料在混凝土中的分布，裂缝中水汽含量等因素都会诱发散射噪声，所以需要多偏移距采集和全波形反演技术相结合，增强信噪比。比如利用共中心点道集进行叠加处理可以将脱空检测信噪比

提高20dB。

（三）红外热成像检测技术（IRT）

红外热成像检测技术（IRT）利用热辐射的能量分布作为其信息传递手段，通过监测结构表面的温度场不均匀性，来揭示其内部的缺陷和潜在的物理问题。它是建立在热传导和热辐射定律基础上的，即结构内部出现脱空，渗水或者钢筋锈蚀缺陷后，由于缺陷区域和正常基体之间热扩散系数的不同会引起表面温度梯度异常，红外热像仪利用0.02-0.1℃的温度测量精度来量化这种差异，并将其转换为伪彩色的图像。在桥梁箱梁检测领域，这种技术通过昼夜温差效应来激发缺陷的热响应，混凝土脱空层内形成空气隔热层后，夜间辐射冷却阶段的表面温度比正常地区高出2-5℃，通过对热像图的比较分析，可以对脱空边界进行辨识，定位精度可以达到 $\pm 5\text{cm}$ 。以某跨海大桥的检测为例，我们使用中波红外热像仪以0.5m/s的速度对箱梁底板进行扫描，并结合傅里叶热传导模型来估算脱空的深度，观察到多个厚度在0.2-0.6m范围内的脱空区域，这些区域与超声波检测的结果具有高达88%的一致性。这一技术非接触特性为大范围快速筛查提供了支持，但是受到环境辐射和表面发射率的明显影响：强太阳辐射会遮蔽微弱缺陷热信号，而混凝土表面碳化导致的发射率变化（发射率从0.92降至0.85）将引入测温误差。为此，需采用主动加热技术（如卤素灯阵列）增强缺陷热对比度，或通过多光谱发射率校正算法提升定量分析精度。

（四）光纤传感技术（FOS）

光纤传感技术（FOS）利用光波作为其信息传递媒介，通过观察光纤内光信号的强度、相位和波长等关键参数的变动，达到了对桥梁结构的应力、应变、温度和裂缝进行分布式实时监测的目的。该技术的核心原理是基于光与物质之间的互动产生的物理影响：当光纤受到外部力量的微应变（ $\mu\epsilon$ 级）或温度的波动时，光在纤芯内的传播特性会发生变化，例如布里渊散射光频移与应变、温度呈线性关系（应变系数约0.05MHz/ $\mu\epsilon$ ，温度系数约1MHz/℃），通过解调光频变化可反演结构力学状态。在桥梁健康监测方面，本技术在车辆荷载诱发结构振动的情况下，在主梁和索塔的关键位置布置传感光纤，构成公里级的监测网络，光纤传感阵列具备同步捕获全跨径应变分布的能力，其在空间上的分辨率高达0.1m，而在时间上的分辨率为10Hz，这比传统的应变片提高了两个数量级。例如在某一跨斜拉桥的监测过程中，使用了分布式布里渊光纤传感系统来实时跟踪主梁

在运营期间的应变变化,结果显示某一截面的长期应变增量超出了设计值的15%,经过验证是支座沉降引起的,对结构的安全预警起到至关重要的数据支撑作用。该技术的抗电磁干扰与耐久性优势显著:光纤本质绝缘,可穿越强磁场区域(例如,在高压输电线路周围),且石英材质可耐受-40℃至200℃极端环境,使用寿命超30年。得益于相干探测和脉冲编码技术的显著进步,FOS的应变测量精度已经达到了 $\pm 1 \mu \varepsilon$ 的水平,并且通过机器学习算法,能够自动识别裂缝的扩展情况、索力松弛的病害特征为该桥全生命周期性能评估和智能运维提供底层数据支撑。

四、无损检测技术发展趋势

(一) 智能化检测设备

智能化检测设备主要基于多传感器融合和人工智能算法,打破了传统检测手段限制,对桥梁病害进行自动化识别和量化评估。它的技术架构融合激光雷达,高清相机,惯性测量单元和环境传感器等技术,以多模态数据的同步获取来构造结构的三维数字孪生体:激光雷达对桥体表面进行毫米级的精度扫描,产生点云模型,对裂缝和剥落等几何缺陷进行定位;工业相机搭载机器视觉模块,利用深度学习网络(如YOLOv8)从百万像素图像中提取锈蚀、渗水等纹理特征,病害识别准确率超95%;惯性传感器对桥梁振动模态进行实时监测,并结合有限元模型反演出结构的刚度退化。以某智能检测机器人为例,它配备了前述的系统,能够以2km/h的速度独立巡查桥面,并在单日内完成10公里的病害检查,这比传统的人工方法提高了20倍的效率。该装置内置边缘计算单元能够对数据进行现场解译,产生病害热力图并通过5G网络将其实时传送到云平台上,从而实现跨区域桥梁群协同监控。伴随着生成式AI和多物理场耦合仿真的集成,智能化检测设备正由单一病害识别逐渐演变为结构性能预测,从而为桥梁全寿命周期管理奠定决策依据。

(二) 大数据与云计算在桥梁健康监测中的应用

大数据和云计算技术搭建桥梁健康监测数据驱动智能分析框架,打破传统监测中数据孤岛和算力瓶颈。海量监测数据(例如,应变,振动,环境温湿度等)通过物联网终端实时汇聚至云端,云计算平台以分布式存储

与弹性计算能力处理PB级时序数据,它的并行计算架构使得结构响应分析的效率提高了百倍。以一个跨海大桥监测系统为例,该系统每天产生20TB的数据,云平台在Spark框架下实现毫秒级的数据清洗和特征提取,并结合Hadoop生态建立多源数据仓库。大数据分析技术利用关联规则挖掘和异常检测算法从大量数据中抽象出结构性能演化规律,在时序模式识别的基础上找出索力异常波动和温度变化之间的非线性关联并对索体疲劳风险进行预警;通过聚类分析划分裂缝扩展速率等级并确定需要重点处理的病害。在云计算的支持下,数字孪生模型能够实时地模拟桥梁的受力状况,并与机器学习相结合,预测未来30天内的结构安全裕度。与传统方法相比,该模型的预测精度提高了40%,为未来的养护决策提供了量化的依据。

结论

无损检测技术应用于公路桥梁检测,使其由传统的破坏性检测飞跃到非破坏性和智能化监测。未来随着传感器技术、人工智能和大数据等技术的进一步融合,无损检测技术必将朝着多模态融合,实时化和自动化的方向不断发展,对桥梁全生命周期健康管理,提供了更加有力的技术支撑。在工程实际中需要结合桥梁结构特点和病害类型对检测方法进行科学选取,并对技术参数进行优化,以保证检测结果准确可靠。

参考文献

- [1] 宋震.道路桥梁检测无损检测技术应用[J].新商务周刊,2020(22):203-204.
- [2] 王贤智.无损检测技术在道路桥梁工程中的应用[J].科技视界,2015(16):1.
- [3] 谢书建,蒋纤纤.无损检测技术在桥梁道路工程中的应用[J].建材发展导向,2025(6).
- [4] 潘海锋.无损检测技术在道路桥梁检测中的应用价值分析[J].中华建设,2023:117-119.
- [5] 陈富安.道路桥梁检测中无损检测技术的应用分析[J].葡萄酒,2024(9):0139-0141.
- [6] 李保忠.道路桥梁检测中的无损检测技术运用[J].建筑技术开发,2024,51(6):1-3.