

# 无损检测技术在桥梁拉吊索检测中的应用

冯富腾

广东联检冠粤检测有限公司 广东广州 510800

**摘要:** 桥梁建设规模不断扩大使得桥梁拉吊索的结构安全愈发重要,而无损检测技术在其检测中能发挥关键作用,本文依托具体案例详细阐述了超声导波检测这一无损检测技术在桥梁拉吊索检测中的应用,该过程涵盖检测设备选用、传感器布置、数据采集以及分析处理等环节。超声导波检测技术能够精准检测出拉吊索内部诸如断丝、锈蚀等缺陷情况,它能为桥梁拉吊索的状态评估及后续维护提供可靠依据,从而展现出无损检测技术在保障桥梁结构安全方面的重要价值,也为相关检测工作提供了有益参考。

**关键词:** 无损检测技术;桥梁拉吊索;超声导波检测;结构安全;缺陷检测

桥梁作为交通基础设施的关键组成部分,其结构安全与交通运输的顺畅以及公众安全息息相关。拉吊索作为桥梁结构中的重要受力部件长期承受复杂荷载作用,极易出现断丝、锈蚀、疲劳损伤等各类问题,而传统检测方法存在局限性,难以全面、准确地检测出内部隐蔽缺陷,无损检测技术凭借非侵入性、可检测内部状况等优势应运而生,进而使其在桥梁拉吊索检测领域的应用日益广泛。在此背景下,本文旨在通过具体案例深入剖析无损检测技术在桥梁拉吊索检测中的实际应用情况,以探讨其有效性及重要意义。

## 一、超声导波检测技术原理

超声导波检测技术的原理是基于超声导波在介质中独特传播特性,超声导波作为一种能沿着结构表面及内部传播的弹性波,其可在细长结构(如桥梁拉吊索)中远距离传播且衰减相对缓慢,它的产生依赖于像压电换能器这类特定的激励装置,该装置通过电信号转换产生机械振动来激发导波<sup>[1]</sup>。而在传播过程中,一旦遇到结构内部诸如拉吊索中的断丝、锈蚀或疲劳损伤等缺陷情况时,导波的传播特性就会改变,像波速会发生变化、幅值出现衰减以及会产生反射回波等现象便会出现,检测时则利用传感器接收导波信号,再凭借对这些信号的时域、频域特征进行分析,进而判断出结构内部是否存在缺陷以及缺陷的位置、类型和大致程度等信息<sup>[2]</sup>。

## 二、案例背景介绍

某地区、于2010年建成通车且属于双塔双索面斜拉桥的大桥已服役超13年,加之近期日常巡检中发现部分拉吊索防护层有轻微剥落现象,考虑到这可能影响桥梁整体结构

安全,决定对这座主跨长度达600米、全桥共有120根拉吊索且拉吊索类型为平行钢丝索、单根最长可达200米、直径为15厘米的大桥的拉吊索进行全面检测。此次检测目标明确,既要精准检测出拉吊索内部是否存在断丝、锈蚀等问题,又要确定缺陷所在具体位置且将定位误差控制在1米范围内,同时还要评估损伤程度,以便为后续可能的维护、修复工作提供可靠依据。

## 三、超声导波检测技术应用

### (一) 检测设备与准备工作

所选用的超声导波检测仪器具备出色的性能参数,其激励频率调节范围处于5kHz-500kHz之间,能够依据拉吊索的实际情况灵活选定合适频率来激发超声导波,且采样频率最高可达8MHz,对本次大桥拉吊索检测起着至关重要的作用。对于大桥拉吊索的材质特性与长度,此次检测将激励频率初步设定在30kHz左右以保障超声导波在拉吊索中有效传播并携带清晰的结构信息,同时在实际操作时把采样频率设定为4MHz,目的是精准捕捉导波信号特征,确保采集到的信号能细致反映拉吊索内部状况。在检测的准备工作方面,大桥的拉吊索长期暴露在外,表面存在灰尘、局部剥落的防护层碎屑等杂质,这些杂质会干扰超声导波的传播,需要安排专业清洁人员先使用高压气枪吹去表面浮尘,随后用干净的软毛刷配合专用清洁剂仔细擦拭每一根拉吊索,重点清理距离索端各5米内以及表面有明显污渍的部位,确保清理区域覆盖拉吊索表面积的90%以上,让拉吊索表面达到光洁状态<sup>[3]</sup>。此外,大桥拉吊索单根最长达200米,直径

15 厘米,为着重监测拉吊索容易出现损伤的关键区域,像索体的两端以及与桥梁连接部位等关键受力处,同时也为后续传感器的准确安装奠定基础,要沿着拉吊索轴向,每隔 8 米精准标记一处传感器的安装位置,使用高精度的激光测距仪保证测量误差控制在 3 毫米以内,并且在关键受力处适当加密安装位置,将间距缩小至 4 米。

## (二) 传感器布置

大桥拉吊索有着特定的结构特点、材质以及检测精度需求,选用了具备较高灵敏度的压电陶瓷传感器,其不但能够高效地把电信号转换为超声导波信号进行发射,还能精准地接收传播回来的导波信号,且其工作频率范围与所选用的超声导波检测仪器的激励频率相适配,可覆盖 10kHz-400kHz 这一区间,能很好地满足此次检测任务要求。大桥的拉吊索单根最长可达 200 米,直径为 15 厘米,为尽可能减少检测盲区,实现对拉吊索内部较为全面的监测,便沿拉吊索轴向方向按照等间距的方式布置传感器,经过前期的理论计算以及多次现场模拟试验,最终确定常规位置的传感器布置间距为 6 米。以一根 200 米长的拉吊索为例,从索的一端开始每隔 6 米标记一个传感器安装点,要确保覆盖全索长需取整并向上进位,如此计算下来总共需要布置约  $200 \div 6 + 1 \approx 34$  (个) 传感器,这些传感器均匀分布在拉吊索上进而形成一个较为严密的监测网络,以此保证超声导波在传播过程中的各个关键区域都能被有效检测到。

拉吊索与桥梁的连接部位以及索端等区域属于应力集中且容易出现损伤的关键部位,为着重关注这些容易产生缺陷的关键区域,提高检测的针对性和准确性,便对这些特殊位置进一步加密传感器的布置。要重点监测这些区域,应将传感器布置间距缩小至 3 米,在每个连接部位两侧各延伸布置 3 个传感器,也就是在长度约为 6 米的关键区域内额外增加 6 个传感器进行重点监测,像大桥拉吊索共有 120 根,每根拉吊索两端的连接部位都按此方式加密布置,总共就会在这些关键部位额外增加  $120 \times 2 \times 6 = 1440$  个传感器。在确定好的各个安装点上进行传感器安装时,要使传感器与拉吊索紧密贴合,同时又不能因粘结剂过多而影响导波信号的传播,首先使用特制的粘结剂将传感器粘贴在拉吊索表面并严格控制粘结剂的涂抹量,每处安装点涂抹的粘结剂体积约为 5 立方厘米。要避免因角度偏差导致信号接收和发射出现偏差,在粘贴过程中使用专业的定位工具保证传感器的安装角

度误差控制在  $2^\circ$  以内,使其轴向与拉吊索轴向保持高度一致<sup>[4]</sup>。而在粘贴完成后,要防止信号线在外界环境因素影响下出现晃动、松动或损坏,确保信号传输的稳定性和可靠性,对每个传感器连接的信号线进行细致检查和整理,并且让信号线沿着拉吊索表面使用专用的绑扎带每隔 0.5 米进行绑扎固定。

## (三) 数据采集

基于前期对大桥拉吊索材质、长度以及直径等参数进行的分析,并结合多次预试验结果,将超声导波检测仪器的激励频率设定为 40kHz,该频率值在拉吊索结构中能够激发出传播特性良好且对内部可能存在的断丝、锈蚀等缺陷较为敏感的超声导波,进而确保导波信号可以有效携带拉吊索内部结构信息,实现在长距离传播过程中能较为清晰地反映出缺陷情况。要获取足够清晰、分辨率高的导波信号以用于后续准确分析信号的各种细微变化,把采样频率设置为 5MHz,在这个采样频率下每秒钟能对导波信号进行 500 万次的采样,从而能够精准捕捉到信号在时域和频域上的特征,例如幅值的微小波动、相位的变化等,使得后续对拉吊索内部缺陷位置、类型以及程度的判断都有可靠的数据基础。考虑到超声导波在 200 米长的拉吊索中传播往返所需时间以及要全面获取多次反射等复杂传播情况下的信号特征,于是将每次数据采集的时长设定为 8 秒,这样该时长足以涵盖导波从发射端出发,沿着拉吊索传播到末端再反射回来,甚至多次反射后的完整信号,以此确保不会遗漏任何可能反映拉吊索内部缺陷的关键信息。

桥梁周边存在交通、电磁等多种外界干扰因素,为最大程度减少这些干扰对数据采集的影响,选择在每日凌晨 2 点至 5 点这个交通流量极小、周边电磁环境相对稳定的时段进行数据采集工作,在此时间段内过往车辆产生的振动、电磁干扰等不利因素降至最低,有助于采集到纯净、准确的超声导波信号<sup>[5]</sup>。要保证采集数据的可靠性和代表性、减少偶然误差,针对每根拉吊索,按照设定好的参数重复进行数据采集操作 5 次,每次采集时先启动超声导波检测仪器的激励模块,使其通过已安装好的发射传感器向拉吊索中稳定地发射超声导波信号,然后对应的接收传感器实时接收传播回来的信号,并将这些信号完整地传输回仪器进行存储,通过多次采集,后续可对多组数据进行综合对比分析,进而进一步提高检测结果的准确性。采集现场存在诸多像电器设备产生

的电磁干扰以及传感器连接线路、拉吊索周边异物等可能影响数据采集的因素,在采集现场要关闭一切不必要的电器设备,尤其是那些可能产生电磁干扰的设备。

#### (四) 数据分析与处理

要对采集到的超声导波信号进行全面且准确的分析,先开展时域分析,其做法是把每根拉吊索每次采集时长为8秒的原始信号导入专业分析软件中,只有导入专业软件才能进行后续细致的观察与判断,而在无缺陷的200米长拉吊索中超声导波以约3000米/秒的传播速度传播,理论上从发射端到接收端的往返时间应约为 $(200 \times 2) \div 3000 \approx 0.133$ 秒,在将原始信号导入分析软件后要观察各传感器接收信号的幅值随时间变化情况。拉吊索内部的完好与否能够通过信号幅值的变化体现出来,若拉吊索内部完好,那么信号幅值会按照一定比例稳定衰减,比如每经过10米衰减约5%,而一旦出现缺陷,比如当在某根拉吊索上,在约0.133秒发现信号幅值相较于正常衰减出现突然增大或减小超过15%的情况时,就初步判定在距离发射端90米左右区域可能存在问题,这种异常的幅值变化不符合正常无缺陷状态下的衰减规律,由此便能大致锁定缺陷所在区间范围。

在完成时域分析后接着要进行频域分析,利用快速傅里叶变换(FFT)工具将时域信号转换为频域信号,频域分析能够从另一个角度展现超声导波信号受缺陷影响的特征。针对大桥拉吊索,重点关注频率范围在10kHz~200kHz内的频谱变化,该频段内超声导波信号受缺陷影响的特征较为明显。正常情况下,频谱各频率成分能量分布相对稳定,要是存在缺陷就会有明显改变,例如若在某一频率(如80kHz)处,能量幅值相较于无缺陷时的标准频谱图升高或降低超过30%,同时伴有频谱峰值变宽等畸变现象,之前通过时域分析已经大致锁定了区间范围,可进一步判断该位置可能存在如断丝或锈蚀等具体缺陷类型。而且通过多组数据对比分析,若类似异常情况在5次采集的数据中出现4次及以上,就可更确定此处缺陷情况,多次出现类似异常更能证明此处缺陷存在的可能性及稳定性。根据时域和频域分析结果,能够精确计算缺陷位置,

#### 四、检测结果与评估

在120根拉吊索中经数据分析发现存在不同程度内部缺陷,其中5根拉吊索在距离索端30~50米区间出现预估断丝数量在3~5根左右的较为明显断丝情况,还有5根拉吊索在靠近与桥梁连接部位出现断丝数量约2~3根且锈蚀面积占所在截面20%左右的既有断丝又有锈蚀的复合缺陷,存在断丝及复合缺陷的拉吊索会对桥梁整体结构安全产生一定影响,需尽快安排专业维修团队通过更换受损钢丝、进行除锈及防护加强等措施来进行修复处理。并且有10根拉吊索在约80~120米处存在从信号特征判断为中度的锈蚀问题,而中度锈蚀的拉吊索可能会随时间等因素发生变化进而影响大桥的安全服役,要密切监测其后续变化情况同时制定合理的维护计划以保障大桥后续能安全可靠地服役。

#### 五、总结

无损检测技术能够在不破坏桥梁拉吊索结构的前提下,运用科学合理的检测流程精确地探测出拉吊索内部隐藏的缺陷,且依据检测结果对拉吊索的健康状况做出有效评估,进而指导后续针对性的维护与修复工作以保障桥梁整体结构安全可靠,其在桥梁拉吊索检测中有着不可替代的重要性。在未来,无损检测技术仍需不断发展与完善,结合更多先进科技手段来进一步提升检测的精准度与效率,从而更好地服务于桥梁建设与维护事业。

#### 参考文献:

- [1] 占国栋.住宅建筑隐蔽工程质量无损检测技术应用与标准化研究[J].居舍,2025,(18):145-148.
- [2] 卢滨滨.公路工程质量试验检测中的无损检测技术应用分析[J].汽车周刊,2025,(07):50-52.
- [3] 魏国强.基于无损检测技术的主体结构质量评估方法研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):178-180.
- [4] 黄浩.基于无损检测技术的市政工程质量评估[J].中国建筑金属结构,2025,24(09):1-3.
- [5] 张展铭.无损检测技术在建筑工程检测中的应用研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).浙江创振工程检测有限公司,2025:1738-1741.