

基于磁致超声的卢浦大桥水平索内部钢丝锈蚀检测研究

张磊¹, 陈洪兵², 孔财发², 王江²

¹上海市政养护管理有限公司 上海

²北京科技大学 北京

【摘要】本文基于磁致超声导波测量技术,对卢浦大桥水平索内部钢丝的锈蚀状态进行检测与评估。提出磁致超声检测方法,利用磁致伸缩效应产生超声波,对水平拉索内部进行无损检测。为验证检测精度,采用开窗验证方法,通过对不同位置的钢丝样本进行多次检测,并与实际开窗状态进行对比分析。实验结果表明,该方法能够有效识别钢丝内部的锈蚀缺陷,并通过波形信号的特征分析实现锈蚀程度的定量评估。研究成果为大跨度桥梁拉索的锈蚀检测提供了一种新型、高效且经过验证的技术手段,具有重要的工程应用价值。

【关键词】磁致超声; 导波测量; 评估方法; 水平拉索; 锈蚀检测

【基金项目】国家自然科学基金项目(52192662)

【收稿日期】2024 年 12 月 16 日

【出刊日期】2025 年 1 月 18 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250005

A study on the detection of corrosion in internal wires of horizontal cables on the Lupu bridge based on magnetostrictive ultrasonics

Lei Zhang¹, Hongbing Chen², Caifa Kong², Jiang Wang²

¹Shanghai Municipal Maintenance Management Co., Ltd, Shanghai

²University of Science and Technology Beijing, Beijing

【Abstract】 This paper presents a study on the detection and assessment of corrosion in the internal wires of horizontal cables on the Lupu Bridge using magnetostrictive ultrasonic guided wave measurement technology. A magnetostrictive ultrasonic detection method is proposed, which utilizes the magnetostrictive effect to generate ultrasonic waves for non-destructive testing of the internal structure of the horizontal cables. To verify the accuracy of the detection, a windowed validation approach is employed, involving multiple tests on wire samples from different locations and comparative analysis with the actual windowed conditions. Experimental results demonstrate that this method effectively identifies corrosion defects within the wires and enables quantitative assessment of the corrosion degree through characteristic analysis of waveform signals. The findings provide a novel, efficient, and validated technological approach for corrosion detection in the cables of large-span bridges, offering significant value for engineering applications.

【Keywords】 Magnetostrictive Ultrasonics; Guided Wave Measurement; Evaluation Method; Horizontal Cable; Corrosion Detection

引言

卢浦大桥是上海的一座标志性大跨度桥梁,其结构安全性和耐久性对城市交通具有至关重要的意义。随着服役时间的增长,桥梁拉索内部钢丝的锈蚀问题逐渐成为影响桥梁结构安全的重要因素之一

[1]。传统的拉索检测方法,如目视检查和表面涂层检测,往往只能发现外部的损伤,难以对拉索内部钢丝的锈蚀状态进行有效评估[2,3]。这种局限性使得桥梁拉索的健康监测面临巨大挑战。

近年来,磁致超声技术作为一种新型的无损检

第一作者简介:张磊,出生于1984年,男,学士,中级工程师,主要从事桥梁健康监测的研究。

测方法, 在结构健康监测领域引起了广泛关注^[4]。磁致超声技术利用磁致伸缩效应产生超声波, 通过检测波形信号的传播特性来识别材料内部的缺陷和损伤^[5]。与传统超声检测相比, 磁致超声具有检测深度大、灵敏度高、适应性强等优点, 特别适用于检测复杂结构中的深层缺陷。

本研究旨在探索基于磁致超声技术的卢浦大桥水平索内部钢丝锈蚀状态检测方法。通过对卢浦大桥水平索的磁致超声检测系统的开发与应用, 结合开窗验证技术, 本研究对不同锈蚀程度的钢丝样本进行了详细的实验分析。研究的主要目标是实现对拉索内部锈蚀缺陷的准确识别与定量评估, 为桥梁的长期安全运营提供可靠的技术支持。

1 测量方法

1.1 磁致超声测量原理

磁致超声是利用导波来对水平拉索进行测量。导波指在有界介质(如管、板、杆等)中平行于介质边界并以超声或者声频率传播的机械波(或弹性波), 导波传播介质称为导波。

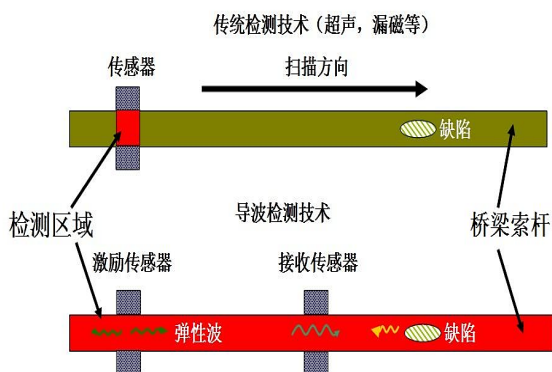


图1 导波技术相对传统检测方法的优点

导波在传播过程中遇到缺陷或边界突变等时会发生发射, 从而可以应用于检测。由于能量被限制

在波导内部, 导波能够传播很长距离, 例如, 在状况良好的拉水平索中导波一般可传播数十甚至上百米的距离, 因而使用导波技术可以从总体上提高检测效率和降低检测成本。

导波的传播需要对象横截面上全部质点的参与, 因而能够检测拉水平索整个端面。不同于传统自发自收的测量方式, 本文提出的单发单收的导波测量技术如图1所示。

1.2 测点设计

卢浦大桥主桥路段呈东南至西北方向布置, 本次检测桥面箱梁上由上游至下第三根水平拉索。水平拉索按相同距离分为5个节段, 测试4个点, 测试点传感器间距均布置为2米。

测试点均由浦东侧至浦西侧移动, 依次为测试点1、测试点2、测试点3、测试点4。测试点分布位置示意如图2所示。

1.3 评价方法

索杆导波波速 v 应按《城市桥梁索杆检测与监测技术标准》(DBJ/T 15-260-2023) 中 5.2.4 要求, 如公式(1)所示。

$$v = \frac{\Delta l}{t - t_0} \quad (1)$$

式中: Δl 为激励线圈和接收线圈之间的距离; t_0 代表通过空气传播最先到检测线圈的电磁脉冲信号声时初读数; t 是导波通过信号声时。

索杆导波波速代表值宜取 3 次测量波速的平均值, 并按 (DBJ/T 15-260-2023) 中 5.2.5 要求, 式(2)计算:

$$v = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_{0i}} \quad (2)$$

式中: l_i 表示第 i 次测试的导波传播的距离, 宜为 1000mm、1200mm、1500mm 等标准间距。

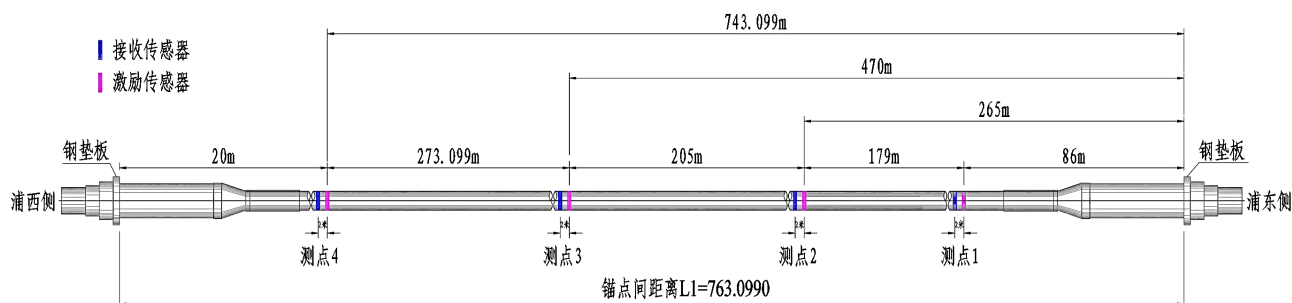


图2 卢浦大桥水平索磁致伸缩导波无损探伤测试点分布位置示意

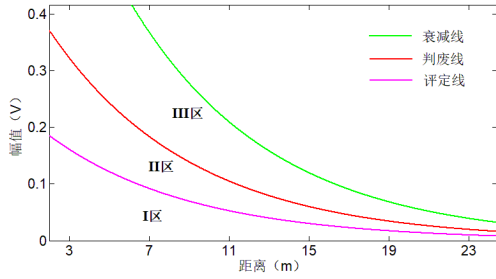


图3 评价方法示意

检测信号图中共有红、黄、绿三条线，其中绿色线为信号衰减线，而红色线为参考判废线，洋红色线为参考评定线，如图3所示。衰减线结合《桥梁拉索磁致伸缩导波检测标准》(T/CECS G:J55-01-2023)中6.1.3及《城市桥梁索杆检测与监测技术标准》(DBJ/T 15-260-2023)中5.2.8要求，根据待测索杆通过信号、锚头回波绘制。

2 现场试验

在现场试验过程中，首先检查设备状况，确保电源供电稳定，并确保噪声不会影响检测效果。随后，将激励传感器和接收传感器安装在待测桥梁的拉(吊)索上，根据现场实际情况，分别安装4-8个磁化单元模块，并连接屏蔽地线。接着，测量并记录传感器的安装位置，输入索号等相关信息，调整参数设置，然后利用便携计算机控制信号发生单元产生激励信号。检测信息通过信号采集端口进入数据采集单元，经A/D转换器转换后进入计算机，并通过计算机处理得到桥梁拉(吊)索的检测数据及对

应波速。根据检测数据结合波速，初步判断并分析桥梁拉(吊)索的损伤位置和程度。如果发现异常，根据现场情况调整激励传感器和接收传感器的安装位置，以进一步判断和分析损伤的位置和程度。



图4 水平拉索现场测试

3 检测结果

图5-8为水平拉索所有测点的测量信号及分析。水平索(测试点1)检测波形中，浦东侧锚头反射回波信号幅值偏低；(测试点3和测试点4)检测波形中，分别距浦东侧锚头约585.113m、588.250m处各存在1处未超过评定线的结构噪声信号，两处结构噪声信号所处位置大体一致。可能是由于水平索构造差异、索内钢丝材料差异、结构约束、钢丝初始应力等原因引起，鉴于索内钢丝进水、镀锌层劣化、均匀锈蚀等也是引起拉索端部反射回波信号幅值偏低、较高幅值结构噪声信号的原因之一；建议水平索加强监测，必要时可结合以往PE护套外观检测情况。在距浦东侧锚头580m~590m区域段索体选择测点1将水平索PE护套开窗验证，如图9所示，开窗未见明显锈蚀，与信号识别结果一致。

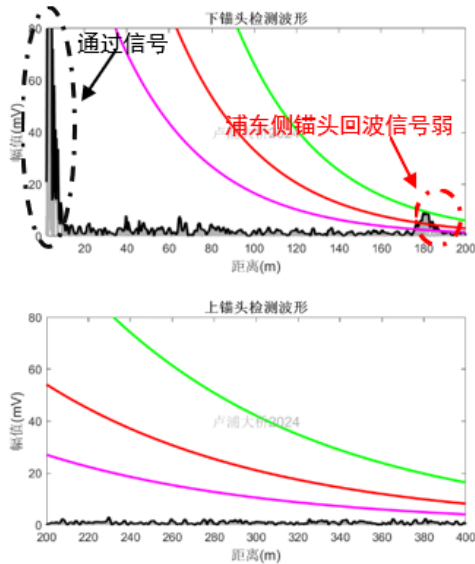


图5 测点1导波检测波形

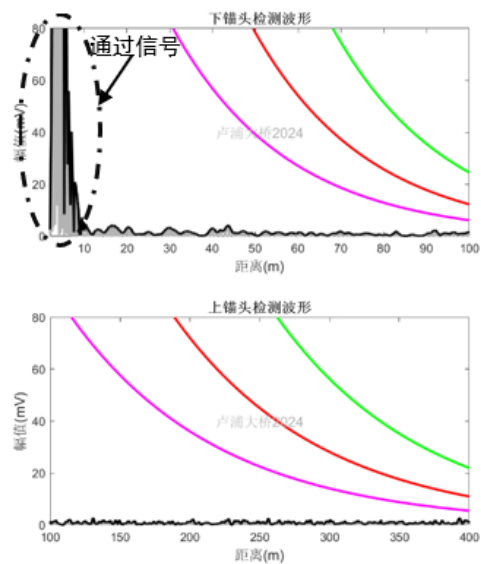


图6 测点2导波检测波形

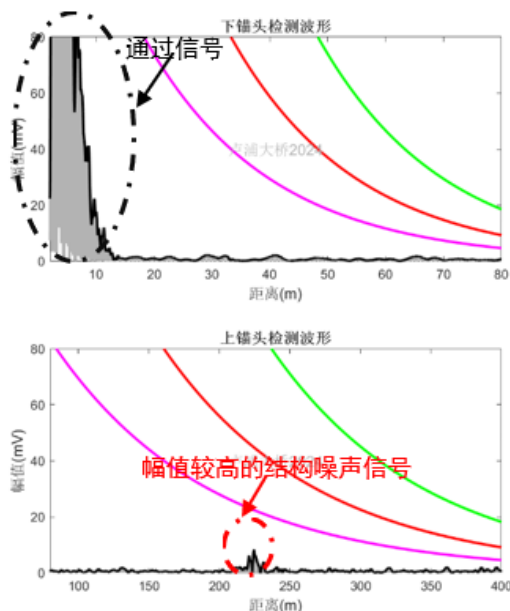


图7 测点3导波检测波形

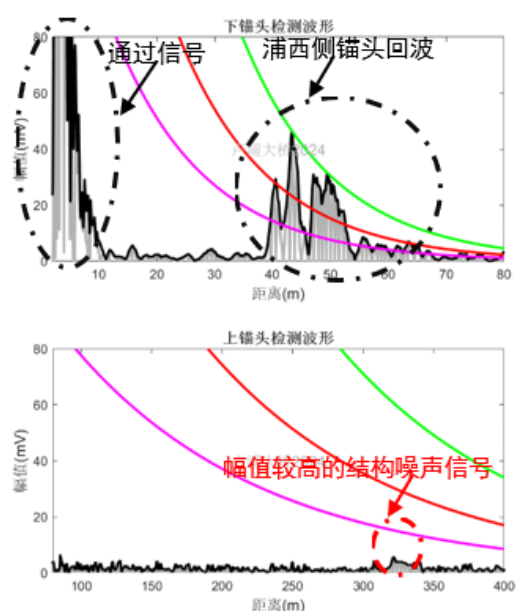


图8 测点4导波检测波形

综上所述, 水平索检测波形中, 通过信号和浦东、浦西侧锚头反射回波信号可见, 均未见反射波幅超过评定线的局部严重锈蚀或断丝信号, 根据《无损检测 磁致伸缩超声导波检测方法》(GB/T 28704-2012), 该水平索评定标度为 I, 水平索局部未见严重损伤。

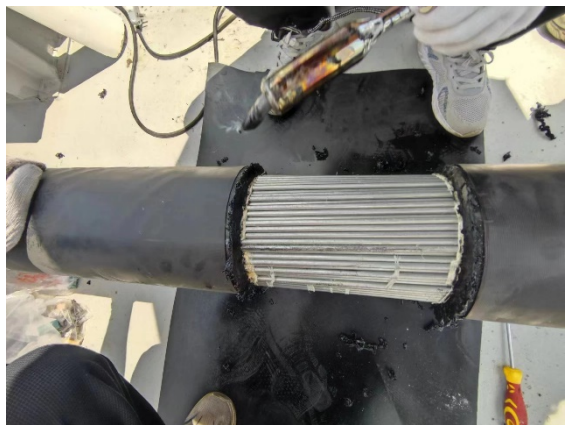


图9 测点1开窗验证

4 结论

本研究采用磁致伸缩导波检测系统对卢浦大桥桥面箱梁上方的3号水平拉索进行了内部钢丝腐蚀及断丝的无损探伤试验。依据《无损检测磁致伸缩超声导波检测方法》(GB/T 28704-2012), 检测结果显示, 通过信号及锚头回波的分析未发现反射波

幅超过评定线的局部严重锈蚀或断丝信号, 所有评定标度均为 I, 表明水平索未见严重损伤。

桥梁索杆作为主要承重构件, 自安装以来不可避免地受到腐蚀退化、振动疲劳等多种不利因素的影响。内部钢丝的锈蚀和断丝等完整性缺陷, 直接关系到桥梁的安全性。因此, 建议在桥梁运营过程中加强对桥梁索杆的定期检测和日常养护。基于本次试验结果, 提出以下结论:

(1) 定期检测: 对卢浦大桥水平索进行定期的导波无损探伤检测。及时进行索杆锈蚀和断丝的导波无损检测可作为桥梁索杆的基准数据, 通过后续检测将实测数据与基准数据进行比较, 能够更准确地判断桥梁索杆的损伤程度和状态。

(2) 定期检查护套及密封装置: 加强对桥梁水平索 PE 护套管、锚头及其密封防护装置的定期检查。如发现水汽侵入, 应及时进行维修和更换, 以确保其有效防护功能。

综上所述, 建议依据《公路桥涵养护规范》(JTG 5120-2021)、《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》(JTG/T 5122-2021)、《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99-2017) 以及《交通运输部关于进一步加强公路桥梁养护管理若干意见的通知》(交公路发[2013]321号) 中相关规定, 制定并实施桥梁的养护管理措施, 以维持桥梁水平索的良好工作状态。

参考文献

- [1] 王天鹏,张建仁,王磊,等.模糊失效准则下桥梁拉索锈蚀时变可靠性分析[J].公路交通科技,2021,38(08):59-66.
- [2] 辛荣亚,张启伟,李元兵.桥梁拉索金属面积损失的磁通检测信号特征[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(10): 1326-1333+1347.
- [3] 江胜华,刘晓春,王浩,等.基于磁场梯度张量的斜拉桥拉索钢丝锈蚀损伤监测[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(06):571-576.
- [4] 刘明远,姚恩涛,王平,等.基于磁致伸缩电磁超声导波的钢板焊缝缺陷检测[J].测控技术,2023,42(06):63-69+91.
- [5] 吴彬林,何岩,王敏.超声导波检测系统在桥梁缆索检测中的应用[J].金属制品,2023,49(06):48-51.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

