

钢丝缺陷磁致伸缩导波检测信号特性实验研究

邹易清¹ 武新军² 龙跃¹ 谢正元¹ 蒋立军¹
黄永玖¹ 植磊¹ 张怡¹ 梁其捷¹

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006 2 华中科技大学机械学院 武汉 430074)

摘要: 缆索体系作为现代土木建设广泛应用结构之一, 作为主要承载部件对整体结构的安全性和使用寿命至关重要。磁致伸缩导波无损检测技术在缆索损伤和腐蚀检测方面具有检测长度大, 覆盖结构区域广等优势, 逐渐成为应用广泛的缆索新型无损检测方法。磁致伸缩导波无损检测技术在损伤和腐蚀的定性问题上已经比较稳定, 缺陷尺寸和缺陷回波的定量关系与诸多因素有关, 本文对缆索的基本单元高强钢丝的缺口检测信号进行了实验研究, 得到缺陷回波反射系数与钢丝缺陷截面损失率的关系, 发现其与抛物线非常近似; 本研究为钢丝及钢丝拉索的损伤和腐蚀磁致伸缩导波无损检测的定量评价提供了基础。

关键词: 磁致伸缩导波检测 桥梁缆索 人工缺陷 信号特性 高强钢丝

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.02.001

引言

缆索体系具有高强、质轻、防腐耐久性好以及安装方便等优点, 广泛应用于现代土木工程结构领域, 包括悬索桥主缆、吊索, 斜拉桥拉索, 拱桥吊杆和系杆, 大型场馆、展厅悬索及拉索等; 尤其是在桥梁结构领域。随着桥梁结构的不断发展, 国内外建设了越来越多的缆索体系桥梁, 如悬索桥、斜拉桥、吊杆或系杆拱桥^[1]。缆索体系作为结构的主要承载部件, 对整体结构安全性和使用寿命至关重要。当预应力筋发生腐蚀时其静载性能明显下降, 抗疲劳性能严重退化^[2], 将降低结构的安全性和耐久性, 并且可能造成桥梁结构发生灾难性的突发破坏事故, 造成极为恶劣的社会影响和惨重的经济损失; 因此对缆索体系进行定期检测非常必要。

磁致伸缩导波无损检测技术在缆索损伤和腐蚀检测方面具有检测长度大, 覆盖结构区域广, 可检测远离检测仪器难以到达的区域, 可较好的同时进行缆索中多处缺陷的检测并实现损伤定位, 无需开挖或拆除包覆层、防腐层等独特的优势, 逐渐成为应用广泛的缆索新型无损检测方法。该技术已经能够在缆索损伤和腐蚀检测中进

行准确的定性判断, 但是在定量判断方面还不是非常稳定, 仍然需要大量的实验进行研究和验证^[3]。

现代缆索体系绝大部分都采用高强度钢丝或钢绞线制作而成, 若干数量的单根钢丝或钢绞线通过不同的形式集成成缆索; 因此研究单根钢丝或钢绞线的损伤和腐蚀磁致伸缩导波无损检测信号特性是评价缆索整体损伤和腐蚀情况的基础。缺陷尺寸和缺陷回波的定量关系与诸多因素有关: 磁致伸缩导波激励模态及频率的选择、传感器安装的位置、钢丝本身的材料特性和受力状态、测量环境的干扰和信号处理的方法等; 本文采用人工缺口的方式, 通过对单根钢丝磁致伸缩导波检测进行了详细的试验研究和总结分析, 得出了单根钢丝缺陷检测信号的特性和规律, 为钢丝及钢丝拉索的损伤和腐蚀磁致伸缩导波无损检测的定量评价提供了基础。

1 磁致伸缩导波无损检测方法

磁致伸缩导波检测方法是利用磁致伸缩效应在构件中超声导波, 实施检测的一种方法。磁致伸缩导波缆索损伤检测技术相比传统的检测技术主要有以下优势^[4]:

(1) 单点激励即可实现构件的长距离检

测，可检测几十米长的构件，最长可达200m以上；

(2) 可以检测传统检测技术难以到达的区域，如缆索锚固区域；

(3) 能够100%覆盖被检测结构，进行快速、高效、长距离的检测；既可以检测构件的内部缺陷也可以检测构件的表面缺陷；

(4) 无需拆除20mm厚度以下的涂层、防腐层或HDPE护套等包覆层；

(5) 检测时传感器拆装方便，且不影响交通。

2 钢丝缺陷磁致伸缩导波检测信号特性实验

2.1 导波检测激励模态和激励频率选择

导波在介质中传播存在频散和多模态特性，对缺陷检测和信号解释造成干扰。为了尽量减弱频散，通常尽可能选择单一模态的导波在其频散较弱的频率范围内进行激励。在导波检测中，首先要得到被检测对象的频散曲线，然后根据频散曲线选择合适的激励频率^[5-6]。

本文对 $\phi 7\text{mm}$ 高强钢丝进行研究，计算频散曲线材料属性取：声速 5250m/s ，密度 7800kg/m^3 ，泊松比0.28，频散曲线如图1所示，可见 400kHz 以内任意频率下 $L(0,1)$ 、 $T(0,1)$ 和 $F(1,1)$ 非频散区范围较大。本文选用 $70\text{kHz}\sim 110\text{kHz}$ 范围内 $L(0,1)$ 模态的导波对钢丝进行检测，如图1。

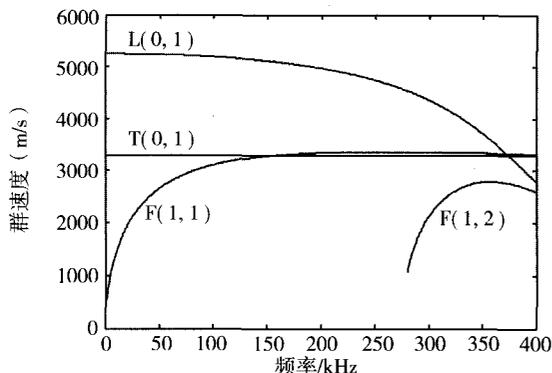


图1 $\phi 7\text{mm}$ 钢丝的群速度频散曲线

2.2 实验装置和试样

本实验装置采用华中科技大学自主研发的磁致伸缩导波检测仪器，按图2布置进行相关检测

实验。激励和接收的信号采用 $L(0,1)$ 模态的导波，激励输入脉冲选用中心频率为 70kHz 、 90kHz 和 110kHz 的3个周期的正弦波信号，脉冲电压幅值设置为 0.75V ，采样频率 2MHz 。为提高信噪比，接收信号连续采集200次进行平均后作为一次测量信号。

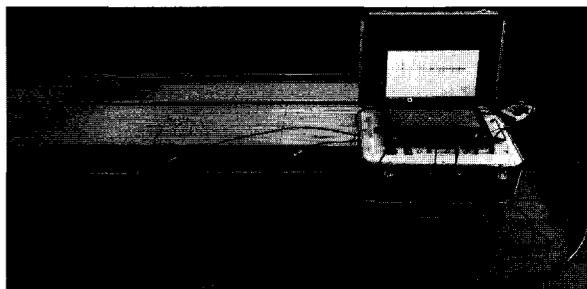


图2 实验装置布置图

高强钢丝按照图3制作不同尺寸的缺陷。钢丝总长为 3000mm ，传感器间距 600mm ，激励传感器距离钢丝左端 1000mm ，缺陷距离接收传感器 400mm 。所有实验数据均在此布置条件下采集。

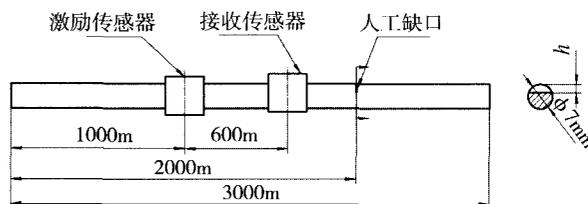


图3 高强钢丝人工缺陷及传感器安装示意图

2.3 磁致伸缩导波钢丝缺陷检测信号分析

(1) 钢丝磁致伸缩导波检测信号图（激励频率 110kHz ）

当缺口深度 $h=1.84\text{mm}$ ，换算横截面面积损失率 $AL=20.9\%$ 时，钢丝缺口磁致伸缩导波检测试验信号如图4所示。可见磁致伸缩导波仪器能够对缺陷进行了很好的反馈和展示；对信号滤波处理后可以进一步消除噪声的干扰。

(2) 缺陷回波反射系数和缺陷横截面面积损失率的关系使用如下方法计算导波反射系数 R ：

$$R = V_f / V_p \quad (1)$$

其中 V_f 为缺陷回波波包的峰峰值， V_p 为通过信号的峰峰值。通过反射系数来研究缺陷回波能量的大小，以此来研究缺陷尺寸对导波反射规律的影响。

响。激励频率70kHz、90kHz和110kHz滤波前后反射系数与钢丝缺口横截面面积损失率关系的实验数据如图5所示。从实验结果可以看出,不同激励频率下的缺陷回波反射系数都与缺陷横截面损失率存在较好的对应关系;随着激励频率的增加,缺陷回波反射系数随之增加,这是因为激励频率越高则导波的波长越短,对小缺陷的识别更敏感。不过当缺陷很小(缺陷面积损失率 $<10\%$)时,缺陷回波受各类因素影响增加,反射系数的详细量化仍然需要进一步的研究。

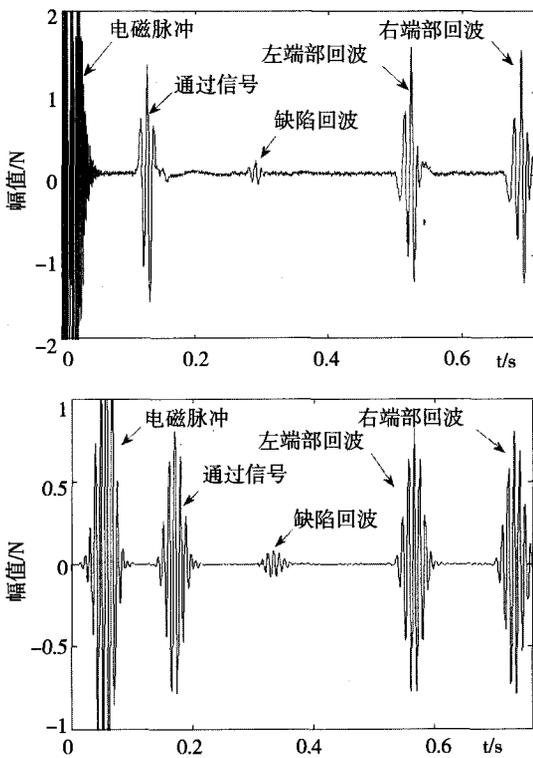
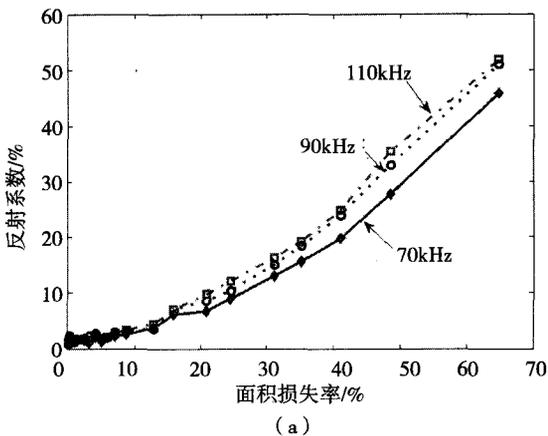
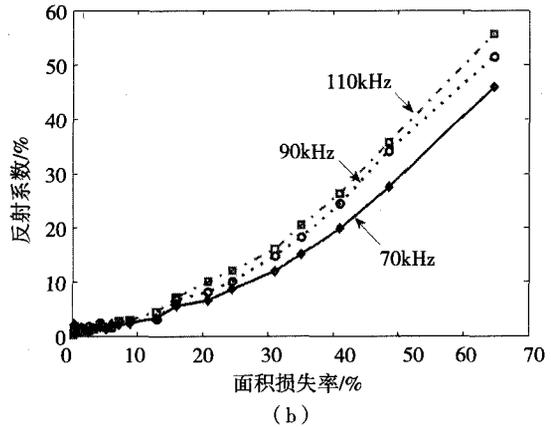


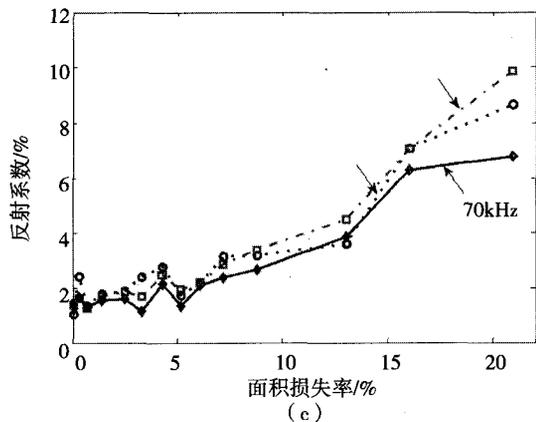
图4 滤波前(上图)和滤波后(下图)检测信号
($h=1.84\text{mm}$, $A_L=20.9\%$)



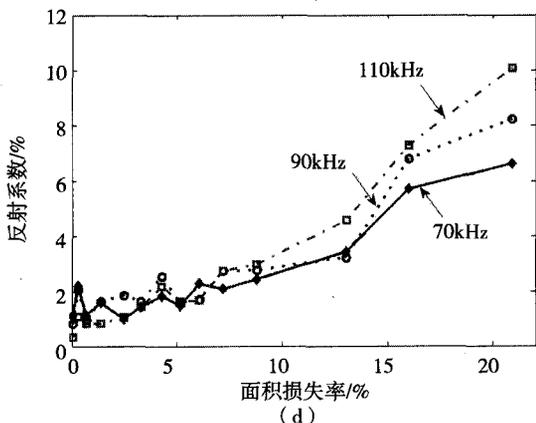
(a)



(b)



(c)



(d)

图5 滤波前(a图)、滤波后(b图)反射系数
面积损失率0~20.9%滤波前(c图)、
滤波后(d图)反射系数

另外当钢丝缺陷截面损失率为零时,即钢丝没有缺陷时,检测信号仍有很小幅值的回波,这钢丝本身的固有属性以及测量时外界的干扰有关,可以定义为本底信号。后期仍然需要对本底信号进行详细研究,从而丰富缺陷的定性判断和定量分析的理论 and 实验数据。

(下转第16页)

5 结论

(1) 当水泥砂浆抗压强度大于40MPa时, 锚索组装件的多根单丝环氧涂层钢绞线与水泥砂浆的平均粘结强度和光面钢绞线与水泥砂浆的平均粘结强度基本一致。锚索组装件的多根钢绞线平均粘结强度较单根钢绞线有所降低, 在保证锚固长度的情况下, 锚索组装件环氧钢绞线与浆体之间仍能稳定握裹, 锚索组装件的整体锚固性能不变。

(2) 锚索波纹管组装件的平均粘结强度不

(上接第5页)

(3) 反射系数和面积损失率实验数据曲线拟合

对激励频率为110kHz, 信号滤波后反射系数与面积损失率关系使用MATLAB进行多项式拟合如图6所示, 拟合曲线表达式(2):

$$y=0.009633x^2+0.2344x+0.4625 \quad (2)$$

可见钢丝缺陷回波反射系数和面积损失率的关系实验值与抛物线存在很好的拟合关系。对激励频率为70kHz和90kHz的反射系数的实验数据进行拟合, 发现其跟不同系数的抛物线表达式(3)同样有很好的拟合关系。系数A, B, C的确定跟磁致伸缩导波激励频率的选择、传感器安装的位置、钢丝本身的材料特性和受力状态、测量环境的干扰和信号处理的方法等多种因素相关, 通过后续多因素的实验研究分析有望实现对钢丝缺陷的定量判断。

$$y=Ax^2+Bx+C \quad (3)$$

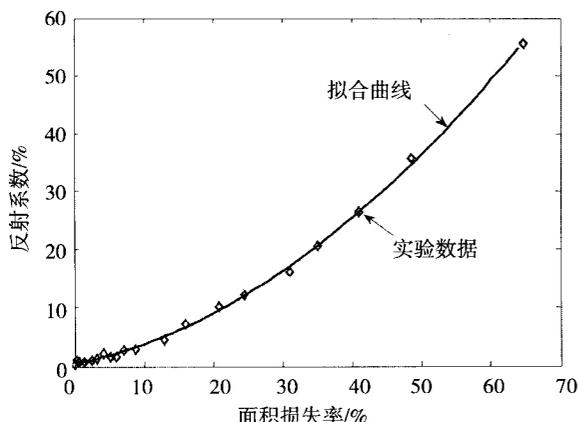


图6 滤波后110kHz反射系数与面积损失率关系拟合曲线和实验数据

超过6.2MPa的情况下, 锚索波纹管组装件不会发生整体拔出破坏。

参考文献

- [1] 环氧涂层钢绞线使用指南, 《国外桥梁》1997.第2期
- [2] 高大水. 三峡永久船闸高边坡预应力锚固技术的研究与应用. 水力发电学报水力发电学.2009.第6期
- [3] 沈小东. 环氧涂层钢绞线的粘结锚固性能试验研究. 第五届全国预应力结构理论与工程应用学术会议论文集, 2008
- [4] 刘宁、高大水等. 《岩土预应力锚固技术应用及研究》. 湖北科学技术出版社, 2002
- [5] GB/T 25823《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》

3 总结

近年来兴起的磁致伸缩导波无损检测技术在缆索损伤和腐蚀检测技术由于其各项优势将逐渐成为应用广泛的缆索新型无损检测方法。本文在钢丝损伤的定性判断基础上, 通过人工缺口的方法对钢丝缺陷的回波信号的反射规律进行了深入的实验研究和分析; 实验得到缺陷回波反射系数与钢丝缺陷截面损失率的关系, 使用二次抛物线对实验结果进行拟合发现其与二次抛物线有着很好的拟合关系, 这对钢丝及钢丝拉索的损伤和腐蚀磁致伸缩导波无损检测的定量评价起到了积极的推动作用。

实验中发现没有缺陷的钢丝也存在小幅值的本底信号, 以及在缺陷截面面积损失率 < 10% 时, 缺陷回波受各因素影响增加, 给缺陷的量化带来一定的难度。另外反射系数二次抛物线系数的确定仍然需要考虑多种因素的影响。为后续钢丝及钢丝拉索的损伤和腐蚀磁致伸缩导波无损检测的定量评价提出了明确的方向。

参考文献

- [1] 李平杰. 多支承索杆振动参数识别研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [2] 吴振, 龙跃, 章陈瀑. 持荷状态下钢绞线腐蚀及性能退化研究[J]. 广西科技大学学报, 2011, 22(1):23-26.
- [3] 邹易清, 武新军, 徐江等. 磁致伸缩导波技术在桥梁缆索腐蚀检测的研究进展[J]. 预应力技术, 2015(4):9-15.
- [4] 徐江. 磁致伸缩导波无损检测理论及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [5] 陈卫东. 杆状构件导波检测的有限元模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [6] 熊红芬. 钢绞线缺陷超声导波检测信号特性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.