

用于钢绞线的磁弹应力和磁致伸缩导波同步检测技术

吴 斌, 冯 欢, 刘秀成, 赵 娜, 刘 尧, 何存富
(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 为在钢绞线中实现磁弹应力和超声导波的同步检测, 提出了一种高、低频叠加的励磁方法, 并基于2种具有宽频带特性的功率放大器, 构建了专用实验装置. 基于KH7500功放的实验装置中, 一体化传感器检测线圈输出电压的高频成分即为磁致伸缩纵向模式超声导波信号, 低频成分携带了局部磁滞回线信息; 当实验装置采用BMP-360T功放时, 传感器采用2个独立的感应线圈, 可分别检测局部磁滞回线和超声导波信号. 2套实验装置获得的检测结果均表明: 低频感应电压峰值与应力间存在良好线性关系, 真正实现了钢绞线中超声导波、磁弹应力的同步检测.

关键词: 磁弹; 拉力测量; 超声导波; 局部磁滞回线; 磁致伸缩

中图分类号: TH 878

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2019)07-0617-06

doi: 10.11936/bjtxb2018030028

Technology of Simultaneously Conducting Elasto-Magnetic Tensile Stress Measurement and Magnetostrictive-based Ultrasonic Guided Waves Inspection in Steel Strands

WU Bin, FENG Huan, LIU Xiucheng, ZHAO Na, LIU Yao, HE Cunfu

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A magnetization method using superimposed high- and low-frequency magnetic field was proposed to simultaneously achieve elasto-magnetic tensile stress measurement and ultrasonic guided waves inspection in steel strands. Two versions of experimental set-ups were constructed based on two types of amplifiers. In the experimental set-up using KH7500 amplifier, the high frequency component of the output signal of the integrated sensor represented magnetostrictive-based ultrasonic guided waves, and the low frequency component carried the information of minor hysteresis loop. In the experimental set-up using BMP-360T amplifier, the sensor employed two individual sensing coils to detect the signals of minor hysteresis loop and ultrasonic guided waves, respectively. The experimental results obtained from the two versions of experimental set-ups show that there is a good linear relationship between the peak value of the low frequency induced voltage and the tensile stress. The research outcomes provide technique for simultaneously conducting elasto-magnetic tensile stress measurement and ultrasonic guided waves inspection in steel strands.

Key words: elasto-magnetic; tensile stress measurement; ultrasonic guided wave; minor hysteresis loop; magnetostrictive

收稿日期: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11132002)

作者简介: 吴 斌(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事波动力学及无损检测新技术方面的研究, E-mail: wb@bjtu.edu.cn

桥梁建设中,量大面广地使用预应力钢绞线、斜拉索。服役过程中,对钢绞线和斜拉索的应力水平^[1-3]、缺陷状态^[4-6]进行无损检测是桥梁结构健康监测的重要内容和手段。电磁学和声学测量方法具有无损和非接触的特点,是广泛应用在应力^[7-8]和缺陷^[9-10]检测中的主要方法。已有研究表明:磁弹法和超声导波法均具有应力和缺陷检测的双功能^[11-13]。

在传统检测方法中,大部分检测方法只具备单一功能,当针对钢索缺陷和应力检测时,需要利用不同传感器及实验仪器分步进行,检测效率低,操作步骤繁杂。因此发展融合上述2种原理的检测技术,将有助于提升钢绞线和斜拉索应力、缺陷的综合检测水平。要实现这一目标,亟待解决的难题主要是:能够同步实施磁弹应力和超声导波2种检测功能的一体化传感器及其励磁仪器。

基于铁磁性材料中的磁-弹耦合机理,本文作者提供了一种结构一体化传感器,可以分步进行磁弹应力检测和磁致伸缩导波检测^[14-15]。由于磁弹应力和磁致伸缩导波检测所需的励磁信号特征参数(频率、幅值)不同,在文献[14]中采用了2套独立的实验装置进行测试,且在2种检测功能中激励与检测线圈并不一致,也即并未实现双功能一体化检测。

本文创新性地提出高、低频叠加的共源励磁方法,解决了磁致伸缩导波与磁弹检测的一体化激励问题;基于2类功放,分别在不同模式下,真正实现了钢绞线中超声导波、磁弹应力的同步检测。

1 同步检测原理与励磁信号设计

诸多研究已表明,铁磁性材料或结构的磁特性曲线与应力相关^[16-18]。一般地,利用双螺线管线圈式传感器测量钢绞线、钢索等结构的磁特性参数,用于反映结构中的应力变化。依据外层励磁线圈中通入的电流形式不同,可以测得不同类型的磁特性参数,如磁通量^[19]、饱和磁感应强度^[20]、磁场信号的总谐波畸变率^[21]。局部磁滞回线对材料的应力变化敏感,也是磁弹应力检测的重要方式之一。如图1(a)所示,对钢绞线等结构施加沿长度方向的静态偏置磁场 H_s 使材料沿初始磁化曲线到达磁化状态A后,再增加同方向的微小交变磁场 $\pm H_{d1}$,材料将沿局部磁滞回线磁化。局部磁滞回线的形状参数不仅与A点的磁导率相关,也与材料内部的应力相关。

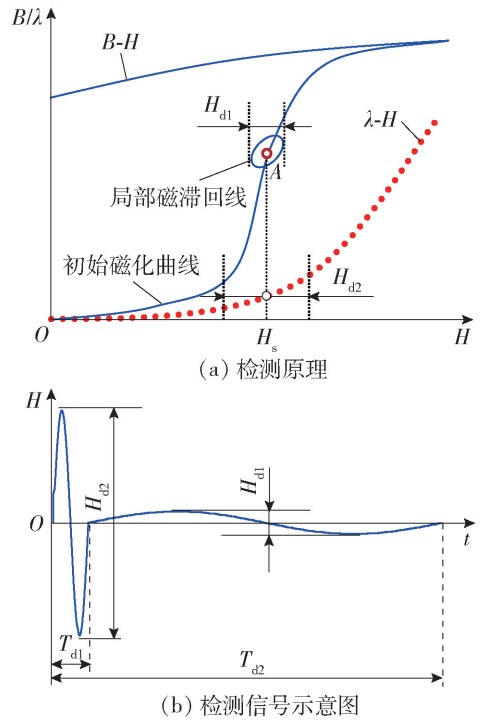


图1 检测原理和一体化检测信号

Fig. 1 Experimental working principle and integrated detection signal

利用文献[14]中的磁致伸缩传感器在钢绞线中激励产生纵向模态导波时,可将磁致伸缩力 F_{ms} 的计算简化为一维问题^[22],其表达式为

$$F_{ms}(t) \propto \frac{d\lambda}{dH_s} \frac{dH_d(t)}{dz} \quad (1)$$

式中: λ 为磁致伸缩系数; $H_d(t)$ 为激励线圈提供的动磁场强度。 λ 与外加磁场 H 的关系如图1(a)中的虚线所示,当激励线圈提供的交变磁场 $\pm H_{d2}$ 不变时,传感器激发的导波能量主要取决于 $d\lambda/dH_s$ 。

综上所述可以看出,不论是测量钢绞线的局部磁滞回线,还是基于磁致伸缩效应激发纵向模态导波,均需要对钢绞线施加静态偏置磁场 H_s 以及动态磁场 H_{d1} (或 H_{d2})。基于这一技术原理,可以发展一体化检测传感器,同步检测局部磁滞回线与纵向模态超声导波。值得注意的是, H_{d1} 的频率一般低于1 kHz,而 H_{d2} 的频率一般高于20 kHz。

在文献[15]提出的结构一体化传感器基础上,为实现真正的一体化检测技术,提出了图1(b)所示的高、低频磁场叠加励磁新方法,其中低频磁场的峰峰值 H_{d1} 小于高频磁场的峰峰值 H_{d2} 。高、低频磁场的周期 T_{d2} 和 T_{d1} 均可以依据实际需求进行调整。

一体化传感器的永磁磁路将使钢绞线偏置磁化,励磁线圈中通入高、低频叠加的励磁电流后,可

提供图 1(b) 所示的磁场对钢绞线进行动态磁化,其中低频磁场将导致钢绞线沿局部磁滞回线磁化,而高频磁场将激发纵向模态超声导波. 利用单一感应线圈可同步检测局部磁滞回线和超声导波信号,利用简单的数字滤波技术即可将上述 2 种信号进行分离. 由此,真正实现钢绞线中超声导波、局部磁滞回线的同步检测.

2 传感器与检测装置

要实现图 1(b) 所提出的高、低频叠加磁场的激励以及参数的调节,需选择合适的功率放大器. 具体要求包括:1) 宽工作频带,同时覆盖局部磁滞回线检测所需的 DC - 1 kHz,以及超声导波激发所需的大于 20 kHz 的频带范围;2) 高信噪比,提高系统对超声导波反射微弱信号的检测能力.

为选取可用于局部磁滞回线和导波同步检测所需的功率放大器,本文对 BMP-360T 音频功放和 KH7500 功放的增益-频率曲线进行测试,结果如图 2(a) 所示. 可以看出,BMP-360T 功放在 0.6 kHz 附近的增益达到最大,约为 42 dB. 当增益下降至 20 dB 时,其对应的频带范围为 70 Hz ~ 32 kHz. 相

比而言,KH7500 功放在很宽频带范围(3 Hz ~ 420 kHz)内,增益均保持在 40 dB 左右.

测试 2 类功放的系统噪声,将功放放大倍数设置为零位,在不接入输入信号时测量功放的输出噪声. 结果如图 2(b) 所示. 可以看出,BMP-360T 功放的系统噪声处于 ± 5 mV 之间,而 KH7500 功放的系统噪声仅仅为 ± 0.8 mV. 本文所选取的 2 类功放的工作带宽均满足一体化检测传感器需求,但基于 KH7500 功放具有更高的增益和信噪比.

基于 2 类功放,构建起实验测试装置,如图 3 所示. AFG 3021B 任意函数发生器输入的高、低频叠加信号通入功放后进行功率放大,再进入励磁线圈,以对钢绞线磁化并在钢绞线中激励产生纵向模态超声导波.

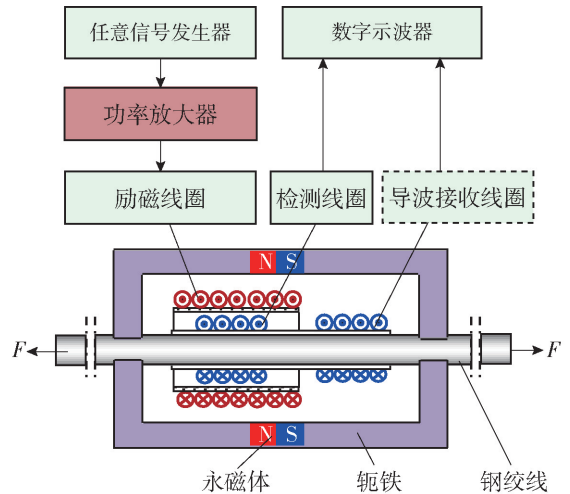


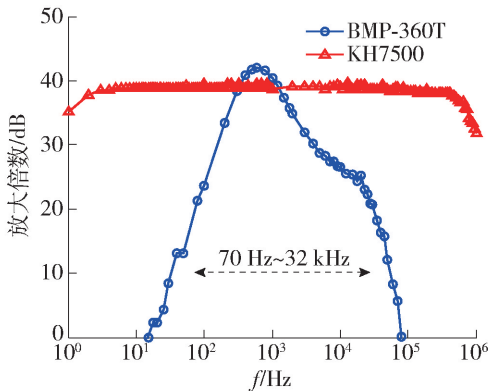
图 3 实验系统设置

Fig. 3 Experimental system set-up

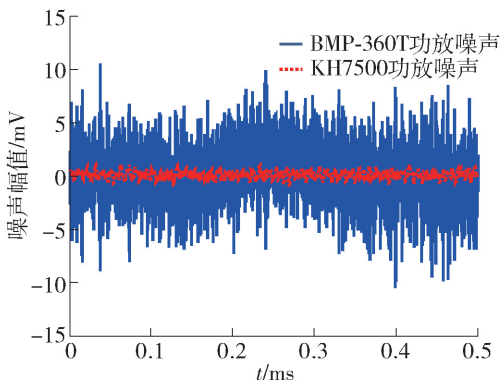
针对不同的功放,设置 2 种检测线圈:1) 对于 KH7500 功放,采用绕制于励磁线圈内部的单一感应线圈同步进行磁弹和导波信号检测;2) 由于 BMP-360T 功放系统噪声过高,如将感应线圈布置于励磁线圈内部,线圈间的强电磁串扰将导致传感器无法接收到微弱的导波信号. 因此除采用励磁线圈内部的感应线圈接收磁弹信号外,在远离励磁线圈处布置另一感应线圈接收超声导波反射信号.

为测量励磁电流,采用 1Ω 的电阻与励磁线圈进行串联. 当采用不同的实验装置进行检测实验时,检测线圈的输出信号以及采样电阻两端的电压均由 TEK 3024 数字示波器进行采集和存储.

高、低频叠加的一体化激励信号进入同一励磁线圈,所得检测信号经解调处理后分别得到导波和磁弹检测结果,实现了 2 种检测方法的同步实施.



(a) 幅频特性



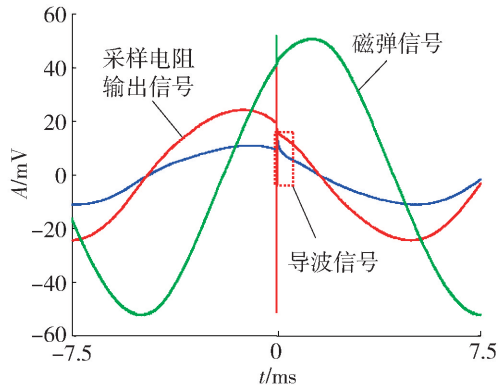
(b) 系统噪声

图 2 功放系统特性

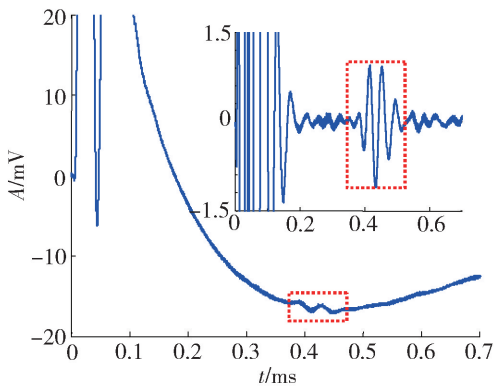
Fig. 2 Characteristics of the power amplifier system

首先,利用基于 BMP-360T 功放的实验装置,在直径 17.8 mm、长 2 m 的七芯钢绞线上进行导波检测实验. 传感器安装于钢绞线一侧端头,设置励磁信号中的高、低频信号的幅值分别为 1 V 和 5 mV,幅值比为 200:1,频率分别为 40 kHz 和 40 Hz. 励磁线圈内径 21 mm、长 50 mm,共绕制 120 匝线圈.

分别利用 2 组参数一致的感应线圈(长 20 mm、内径 19 mm,匝数 60)检测得到的典型波形信号如图 4(a)所示. 设定高频导波信号起始点为时间 0 点,将导波检测线圈的输出信号幅值 A 进行局部放大,如图 4(b)所示,可以看出,在低频振荡信号中叠加有微弱的导波反射信号. 利用四阶巴特沃斯带通(30~50 kHz)滤波器对原始检测信号进行处理,提取时间 t 中 0~0.7 ms 的信号,即可得到图 4(b)插图所示的长为 2 m 的钢绞线端面导波反射信号,其传播时间约为 546 μs ,计算的传播速度约为 5 493 m/s,与理论计算的 $L(0,1)$ 模态波速接近.



(a) 典型接收信号波形



(b) 导波信号局部放大

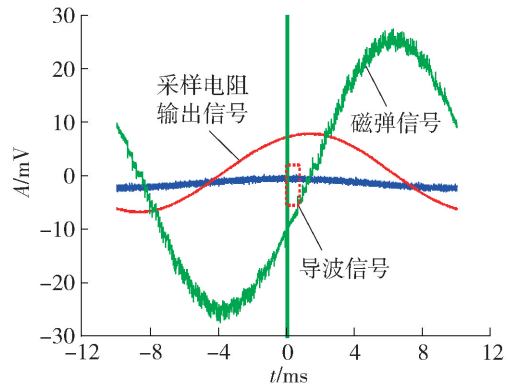
图 4 BMP-360T 功放检测结果

Fig. 4 Test results of BMP-360T amplifier

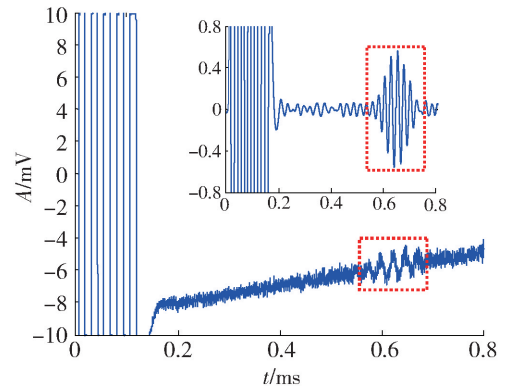
采用基于 KH7500 功放的实验装置进行的实验测试结果如图 5 所示,此时的高、低频信号幅值比为 200:1,频率分别为 40 kHz 和 40 Hz. KH7500 功放

所用传感器励磁线圈为排线,匝数 900,长 80 mm,感应线圈匝数约为 450,长 40 mm.

图 5(a)为感应线圈输出的电压信号,其中包括了高、低频成分. 采用 4 阶巴特沃斯低通(截止频率为 30 Hz)对信号进行处理,即可得到磁弹信号成分;从图 5(a)中截取时间 t 内 0~0.8 ms 的信号,如图 5(b)所示,对其进行四阶巴特沃斯带通(通带频率为 20~30 kHz)滤波处理,即得到图 5(b)中插图所示的导波反射信号.



(a) 典型接收信号波形



(b) 导波回波信号

图 5 KH7500 功放检测结果

Fig. 5 Test results of KH7500 amplifier

由图 4(b)和图 5(b)可知,采用高、低频叠加励磁方法,一体化传感器可以有效激励和接收钢绞线中的纵向模态导波信号.

3 磁弹应力检测结果

从图 4(a)和图 5(a)中接收电压信号中提取低频成分 $U_L(t)$ 其幅值与钢绞线中的磁感应强度变化率呈正比,即

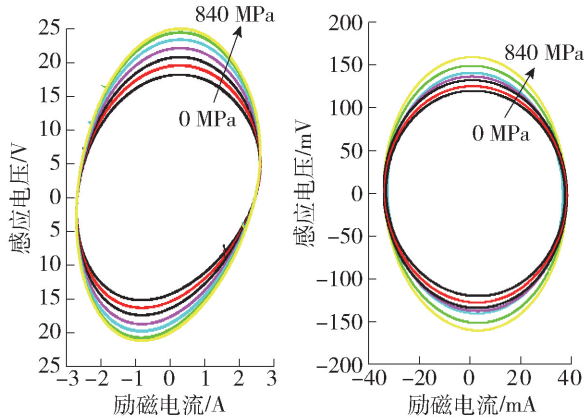
$$U_L(t) \propto \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

而采样电阻中的电流 $I(t)$ 与外加磁场 $H(t)$ 成正比. 因此,利用 $U_L(t)$ 随 $I(t)$ 的变化轨迹,可以反映材料

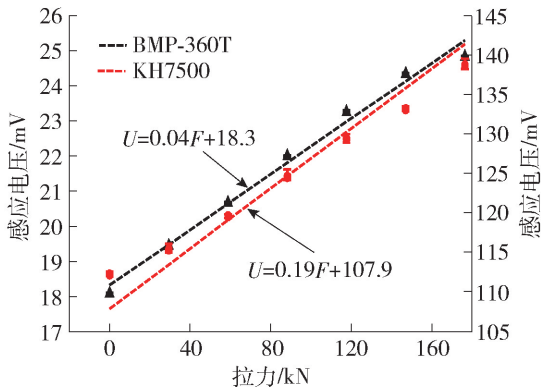
的局部磁滞回线(H 随 B 的变化规律)信息。

利用拉伸装置对钢绞线进行单向拉伸,加载应力范围为 $0 \sim 840$ MPa,步长为 120 MPa。在每个应力值,重复进行 3 次实验,从信号中进行低频成分提取,并绘制出 $U_L(t)$ 与 $I(t)$ 的关系曲线,以表征局部磁滞回线。

利用 2 套实验装置,测试得到的局部磁滞回线结果如图 6 所示。可以看出,随着钢绞线中应力的增加,图 $6(a)$ 和图 $6(b)$ 中椭圆形的局部磁滞回线的长轴均呈现单调递增规律。



(a) 局部磁致曲线及拉力-峰值拟合曲线



(b) 拉力对感应电压的影响

图6 测试结果

Fig.6 Testing results

提取各个拉力下感应电压最大幅值 A_m ,其随应力增加的变化规律如图 $6(b)$ 所示。利用 2 套实验装置测得的结果均表明: A_m 与应力间存在良好的线性关系,两者间的线性拟合确定系数 $R^2 > 0.9862$ 。这表明,本文研制的一体化传感器及实验装置可以基于磁弹原理,检测出钢绞线的应力变化。

4 结论

1) 提出了一种高、低频磁场叠加的共源励磁方法,并依据该方法,构建了一体化传感器和 2 套实验

装置,在钢绞线中实验验证了磁弹应力和超声导波同步检测技术。

2) 基于KH7500功放的实验系统中,一体化传感器只需配置单一检测线圈,线圈输出电压的高频成分即为纵向模态超声导波信号,低频成分携带了局部磁滞回线信息;受限于较高的系统噪声,基于BMP-360T功放的实验系统需采用 2 个独立的感应线圈,分别检测局部磁滞回线和超声导波信号。

3) 导波的激励能量、磁弹应力的检测灵敏度与静态偏置磁场强度,以及励磁信号中高、低频成分的频率比、幅值比均有关,需通过实验进行进一步探究,以指导实验装置的工作参数优化。

参考文献:

- [1] 杨光琦. 斜拉桥拉索损伤以及断索对桥梁的影响[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
YANG G Q. The effect of damaged and broken cables on the stayed-bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [2] 余道华, 李扬. 基于磁通量法的钢索拉力测量实验研究[J]. 电子质量, 2008(11): 25-27.
YU D H, LI Y. Electromagnetism method of stress measurement in steel[J]. Electronics Quality, 2008(11): 25-27. (in Chinese)
- [3] XU F Y, WANG X S, WU H T. Inspection method of cable-stayed bridge using magnetic flux leakage detection: principle, sensor design, and signal processing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(3): 661-669.
- [4] LIU Z, ZHAO J, WU B, et al. Configuration optimization of magnetostrictive transducers for longitudinal guided wave inspection in seven-wire steel strands [J]. NDT & E International, 2010, 43(6): 484-492.
- [5] KIM J T. Field application of elasto-magnetic stress sensors for monitoring of cable tension force in cable-stayed bridges [J]. Smart Structures & Systems, 2013, 12(12): 465-482.
- [6] XIE S, TIAN M, PAN X, et al. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection [J]. NDT & E International, 2017, 86: 153-163.
- [7] WANG M L, WANG G, ZHAO Y. Application of EM stress sensors in large steel cables [J]. Smart Structures and Systems, 2005, 2(2): 395-406.
- [8] SCHAAL C, BISCHOFF S, GAUL L. Energy-based models for guided ultrasonic wave propagation in multi-wire

- cables[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2015, 64/65: 22-29.
- [9] LEONARD K R, MALYARENKO E V, HINDERS M K. Ultrasonic Lamb wave tomography[J]. *Inverse Problems*, 2002, 18(6): 1795-1808.
- [10] WANG L, ZHANG X, HUANG S, et al. Measured frequency for the estimation of cable force by vibration method[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 141(2): 06014020.
- [11] 吴斌, 张瑞芳, 刘秀成, 等. 基于纵向模态超声导波陷频特性的钢绞线拉力测量新方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(12): 9-15.
WU B, ZHANG R F, LIU X C, et al. Innovative method for measuring tensile force based on the notch frequency property of longitudinal guided wave in steel strand[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(12): 9-15. (in Chinese)
- [12] XU J, WU X, SUN P. Detecting broken-wire flaws at multiple locations in the same wire of prestressing strands using guided waves[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(1): 150-156.
- [13] DI-SCALEA F L, RIZZO P, SEIBLE F. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(3): 219-227.
- [14] 刘秀成, 吴斌, 何存富. 磁致伸缩与磁弹一体化传感器的研制[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(22): 46-52.
LIU X C, WU B, HE C F. Novel design of integrated sensor based on magnetostrictive and elastomagnetic effect[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(22): 46-52. (in Chinese)
- [15] 刘秀成. 磁致伸缩与磁弹一体化传感技术及其钢索检测应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
LIU X C. Study on magnetostrictive and elastomagnetic based sensor integration technology for application in steel wire rope inspection[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] ZHANG R, DUAN Y, OR S W, et al. Smart elasto-magneto-electric (EME) sensors for stress monitoring of steel cables: design theory and experimental validation[J]. *Sensors*, 2014, 14(8): 13644-13660.
- [17] DUAN Y F, ZHANG R, DONG C Z, et al. Development of elasto-magneto-electric (EME) sensor for in-service cable force monitoring[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2016, 16(4): 1640016.
- [18] JILES D C. Theory of the magnetomechanical effect[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1998, 28(8): 1537-1546.
- [19] SUMITRO S, KUROKAWA S, SHIMANO K, et al. Monitoring based maintenance utilizing actual stress sensory technology[J]. *Smart Materials & Structures*, 2005, 14(3): S68.
- [20] 吴斌, 李强光, 刘秀成, 等. 基于磁特性曲线的杆件拉力测量及影响因素研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(3): 560-567.
WU B, LI Q G, LIU X C, et al. Tension measurement method for rod-like structure based on magnetic characteristic curve and its influence factor analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(3): 560-567. (in Chinese)
- [21] 吴斌, 苏楠, 刘秀成, 等. 基于谐波分析的磁弹拉力测量改进方法研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(20): 54-60.
WU B, SU N, LIU X C, et al. Improved method for elastomagnetic effect based tension measurement using harmonic analysis techniques[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(20): 54-60. (in Chinese)
- [22] 王悦民, 康宜华, 武新军. 磁致伸缩效应在圆管中激励纵向导波的理论及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(10): 174-179.
WANG Y M, KANG Y H, WU X J. Theoretical and experimental study on generation of longitudinal guided waves in circular pipes based on magnetostrictive effect[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(10): 174-179. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)