

基于导波多尺度能量熵的钢绞线张拉力识别*

陈鑫^{1,2,3}, 朱劲松¹, 钱骥⁴, 叶仲韬^{2,3}

(1. 天津大学建筑工程学院 天津, 300072) (2. 中铁大桥科学研究院有限公司 武汉, 430034)

(3. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室 武汉, 430034) (4. 重庆交通大学土木工程学院 重庆, 400074)

摘要 为了有效评估在役钢绞线中预应力的损失程度, 提出一种识别钢绞线张拉力的导波无损检测方法。在不同张拉力钢绞线上进行了超声导波传播数值模拟及实验, 构建以导波多尺度能量熵为特征向量的识别指标进行钢绞线张拉力识别, 并考虑了导波传播距离及采集方式的影响。结果表明: 不同拉力作用下, 导波多尺度能量熵差异显著, 识别指标与钢绞线张拉力存在明显的线性关系; 识别指标敏感性随导波传播距离的增加而增强, 但其提升幅度随传播距离的增加而减小。与有限元模拟结果相比, 实测识别指标传播距离增加 957.69%, 敏感性系数提高了 20.3%。采用中心钢丝激励、中心钢丝接收导波的采集方式进行张拉力识别, 敏感性更优; 识别指标与张拉力之间的线性变化规律受导波采集方式的影响较小。

关键词 钢绞线; 超声导波; 张拉力识别; 多尺度能量熵

中图分类号 U446

引言

钢绞线作为预应力混凝土及索支承体系桥梁中的主要受力构件, 是保障桥梁结构承载能力的关键因素, 同时也是桥梁安全运营的薄弱环节。在服役过程中, 钢绞线长期受到环境侵蚀及交变荷载耦合作用, 存在不可避免的预应力损失, 造成梁体开裂、下挠, 影响桥梁结构的安全性及耐久性。

近年来, 面向钢绞线拉力识别的无损检测技术得到了广泛关注。导波无损检测方法克服了常规无损检测需要沿待测构件逐点扫描的不足, 极大地提高了检测效率, 在锚杆^[1]、管道^[2]缺陷检测中得到了应用。

相比于管、杆等规则构件, 钢绞线中导波的传播过程更为复杂。Bartoli 等^[3]采用有限元方法, 模拟了导波在钢绞线中的传播过程, 并基于二维傅里叶变换研究了预应力对导波模态特征的影响。文献[4-5]基于赫兹接触理论, 分别采用波动有限元和半解析有限元方法求解了拉力作用下导波在钢绞线中的频散曲线。文献[6-8]分别采用阻尼和弹簧模型描述了钢丝间的相互作用, 建立了接触状态下导波

的能量传递模型。根据声弹性理论, 弹性波在固体中的传播速度与应力大小存在某种对应关系。刘增华等^[9]将声弹性效应应用于钢绞线张拉力识别, 提出钢绞线中应力较高时一阶纵向导波波速与拉力具有明显的线性关系。Chaki 等^[10]对导波激励频率及模态进行优化, 提出了适用于钢绞线张拉力识别的简化声弹性公式。Dubuc 等^[11]分析了声弹性效应对高阶纵向导波相速度的影响。导波波速在一定程度上可以反映钢绞线的应力状态, 但识别结果依赖波速的精确测定, 受测试环境及残余应力等因素影响较大。文献[12-14]分别将导波能量特征、非线性特征及陷频特征应用于钢绞线的张拉力识别, 取得了一定的成果, 但受识别指标敏感性、鲁棒性及识别精度的限制, 其适用范围存在一定的局限性。研究成果表明, 超声导波在钢绞线中传播携带有丰富的张拉力信息, 但提出具有宽泛实用条件的张拉力识别方法仍需要进一步研究。

笔者通过有限元方法模拟导波在钢绞线中的传播过程, 将导波多尺度能量熵作为特征向量构建识别指标进行钢绞线张拉力识别, 并与实验结果进行对比分析, 考虑了导波传播距离及采集方式的影响。

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0108700); 国家自然科学基金资助项目(51578370)

收稿日期: 2019-02-23; 修回日期: 2019-06-07

1 导波多尺度能量熵理论

对导波信号 $f(t) \in L(R)$ 进行连续小波变换^[15]

$$W_f(i, j) = \int_R f(t) \cdot \overline{\psi_{i,j}(t)} dt \quad (1)$$

其中: $\overline{\psi_{i,j}(t)}$ 为基小波 $\psi_{i,j}(t)$ 的复共轭。

基小波 $\psi_{i,j}(t)$ 由母小波 $\psi(t)$ 平移和伸缩得到, 表示为

$$\psi_{i,j}(t) = \frac{1}{\sqrt{|i|}} \cdot \psi\left(\frac{t-j}{i}\right) \quad (2)$$

其中: i, j 分别为尺度参数和时间参数。

母小波 $\psi(t)$ 必须满足容许性条件

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi^*(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3)$$

其中: $\psi^*(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。

导波信号 $f(t)$ 在任意时间-尺度处的能量密度 $\mathbf{M}(i, j)$ 可以表示为

$$\mathbf{M}(i, j) = |W_f(i, j)|^2 \quad (4)$$

将不同尺度下导波能量密度随时间的变化看做随机变量, 计算不同尺度下各随机变量的 Shannon 信息熵^[16], 得到导波多尺度能量熵 $H(m)$ 为

$$H(m) = - \sum_{n=1}^j P(m, n) \ln P(m, n) \quad (5)$$

其中: $P(m, n) = \mathbf{M}(m, n) / \sum_{n=1}^j \mathbf{M}(m, n)$; $m = 1, 2, \dots, i; n = 1, 2, \dots, j$ 。

随着拉力的增加, 钢丝间相互作用增强, 导波能量在钢丝间的耦合传递加强, 其时频分布发生改变。这种由于拉力变化造成的导波时频能量特征差异可以由多尺度能量熵 $H(m)$ 描述。因此, 笔者选取导波多尺度能量熵 $H(m)$ 作为特征向量构建识别指标进行钢绞线拉力识别。

2 有限元模拟

2.1 有限元模型

采用 ABAQUS/Explicit 建立钢绞线三维有限元模型来模拟导波传播过程。钢绞线长 $L=0.52$ m, 几何及材料参数如表 1 所示, 传播过程未考虑材料阻尼的影响。

为精确捕捉波动效应, 每个波长应有 8 个计算节点^[17]。笔者考虑最高频率为 500 kHz 的频率成

$$\text{分, 则单元尺寸} \quad \Delta l \leq \frac{\lambda_{\min}}{n-1} \quad (6)$$

其中: $\lambda_{\min} = \frac{c_T}{f_{\max}}$, $c_T = 3\,130$ m/s 为材料横波波速; $f_{\max} = 500$ kHz 为考虑的最高频率; $n=8$, 为每个波长的计算节点数量。

由式(6)计算可得, 单元尺寸 $\Delta l \leq 0.92$ mm。

表 1 钢绞线几何及材料参数

Tab. 1 Geometry and material parameter of strands

几何参数	数值	材料参数	数值
钢丝直径/mm	5.08	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850
螺旋钢丝捻角/(°)	7.9	泊松比	0.29
螺旋钢丝螺距/mm	260	弹性模量/GPa	196
钢绞线公称直径/mm	15.2	抗拉强度/MPa	1 860

为准确模拟钢丝间的相互作用, 钢丝接触区域网格需要进一步加密。按照单元尺寸 $\Delta l = 1.00$ mm (略大于 0.92mm) 对钢绞线沿轴向进行划分, 接触区域的单元尺寸最小为 0.1 mm。钢绞线有限元模型如图 1 所示。

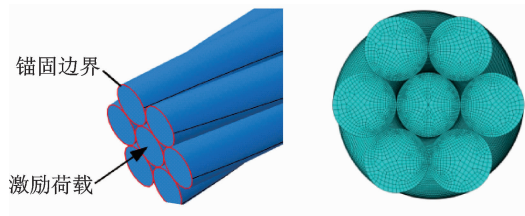


图 1 钢绞线有限元模型

Fig. 1 Finite element model of steel strands

导波传播过程的有限元求解要求时间积分步长小于所关注最高频率的 1/20, 且应同时满足计算稳定性的要求。由于钢绞线模型网格划分复杂, 笔者采用全自动时间积分步长。

采用“硬”接触和摩擦系数为 0.6 的“罚”摩擦模拟钢丝间的法向作用和切向作用。将钢绞线两端分为固定端和张拉端。固定端完全固结, 张拉端约束除轴向之外其他所有方向自由度, 约束区域为钢丝端面边缘。

整个模拟过程分为钢绞线张拉、导波激励及传播 3 个阶段。

阶段 1: 钢绞线张拉。钢绞线张拉为准静态加载过程, 降低张拉过程中产生干扰信号, 加载时间不宜太短, 且张拉过程应尽量平滑。笔者采用光滑幅值曲线在张拉端对钢绞线进行张拉, 时长为 300 μs , 张拉幅值曲线如图 2 所示, 其幅值为无量纲单位。

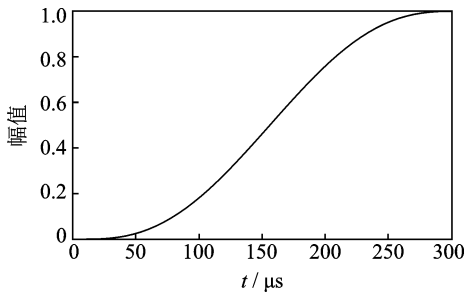


图 2 张拉幅值曲线

Fig. 2 Axial force time-history curve

阶段 2:导波激励。如图 3 所示,采用三角脉冲在张拉端中心钢丝圆心处进行轴向激励,激励时长为 $3 \mu\text{s}$ 。为减小张拉过程引起的扰动,激励源激起的导波信号应远大于张拉过程。

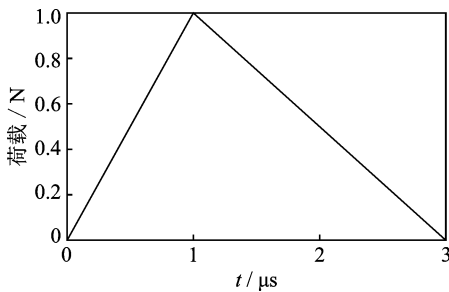


图 3 激励荷载

Fig. 3 Excitation load

阶段 3:导波传播。激励荷载结束后持续一段时间,模拟导波在钢绞线中的传播过程。持续时间应保证激起导波在该时间之前均到达接收点,本研究在激励荷载结束后持续 $697 \mu\text{s}$ 。

2.2 有限元结果分析

在钢绞线无拉力和张拉力 $P=70\%$ 抗拉强度 (ultimate tensile stress, 简称 UTS) 时,采用复值 Morlet 小波对中心钢丝端面中心节点轴向加速度信号进行小波变换,按照式(5)计算多尺度能量熵 $H(m)$ 并进行归一化,导波多尺度能量熵如图 4 所示。

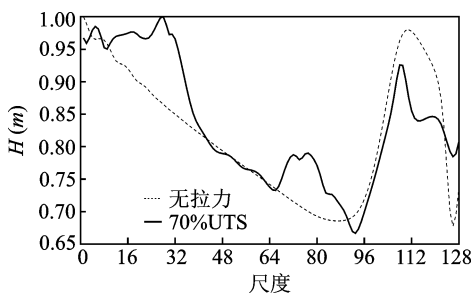


图 4 导波多尺度能量熵

Fig. 4 Scale-guide wave energy entropy

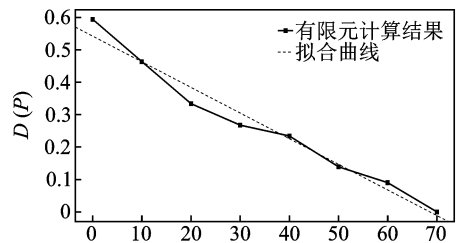
由图 4 可知,不同拉力作用下,导波多尺度能量熵变化显著,但其变化规律复杂,仅从多尺度能量熵的变化无法对拉力大小进行有效评估。

一般而言,不同信号间的差异程度可以由信号特征量表示。令钢绞线在某一张拉力 P_c 作用下的导波信号特征量作为参考值 I_c ,则不同拉力 P 作用下导波信号特征量 I_P 与参考值 I_c 间的差异反映了钢绞线中拉力 P 偏离 P_c 的程度。采用多尺度能量熵作为导波特征向量,则特征向量与参考值间的距离 $D(P)$ 可以准确描述钢绞线中的拉力大小, $D(P)$ 的计算公式为

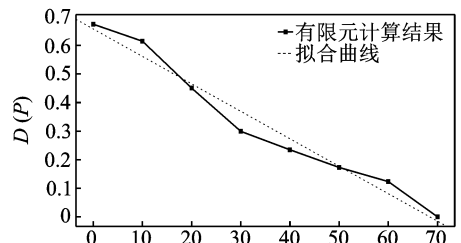
$$D(P) = \|I_P - I_c\| \quad (7)$$

其中: I_c , I_P 分别为参考状态和拉力为 P 时的导波多尺度能量熵。

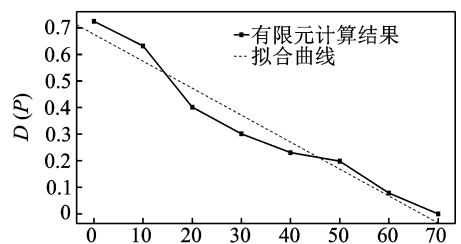
以张拉力 $P=70\%$ UTS 时的导波多尺度能量熵作为参考值,按式(7)分别计算不同拉力状态下特征向量相对于参考值的 $D(P)$ 。为便于剔除钢绞线端面反射回波,将导波信号接收点设置在距声源 $Z=0.12, 0.135, 0.52 \text{ m}$ 处,分别计算不同位置处导波信号的 $D(P)$ 值进行比较分析,如图 5 所示。图



(a) $Z=0.12 \text{ m}$



(b) $Z=0.135 \text{ m}$



(c) $Z=0.52 \text{ m}$

图 5 识别指标随拉力变化曲线

Fig. 5 Identification index vs tension curve

中: K 为拟合直线斜率的绝对值,反映了识别指标 $D(P)$ 对拉力变化的敏感性, K 值越大,钢绞线中的拉力变化在识别指标 $D(P)$ 上反映得越明显; R^2 为拟合直线的确定系数,反映了拟合直线的吻合程度。

由图 5 可知,随着拉力的增加,识别指标 $D(P)$ 线性下降,指标值变化明显,线性关系显著。这表明特征向量距离可以有效反映钢绞线中张拉力的大小。

导波由 $Z=0.12$ m 传播至 $Z=0.135$ m 及 0.52 m 时,敏感性系数 K 值分别增加了 21.46% 和 27.09%。随着传播距离的增加,导波信号中包含更丰富的拉力特征,基于导波多尺度能量熵的识别指标对张拉力变化的敏感性增强,但敏感性系数 K 值的提升幅度随着传播距离的增加而减小。导波传播距离对识别指标与张拉力间的线性变化规律影响较小,在不同传播距离下,识别指标确定系数 R^2 均达到 0.95 以上。

3 实验

波动问题的有限元求解,需要极小的网格尺寸及积分步长。受计算条件的限制,有限元分析结果仅考虑了导波在无阻尼材料中的短距离传播。为研究该张拉力识别方法在长远距离钢绞线拉力识别中的适用性,采用长钢绞线进行导波传播实验。

3.1 钢绞线加载实验

钢绞线长为 5.5 m,几何、材料参数与有限元模型一致。采用反力墙与穿心式液压千斤顶对钢绞线逐级加、卸载,千斤顶与反力墙间设置压力传感器以控制张拉精度。张拉力步径荷载为 25.6 kN(10% UTS),每一级加、卸载完成后将该荷载持续 2 min。实验装置示意图和现场照片如图 6,7 所示。

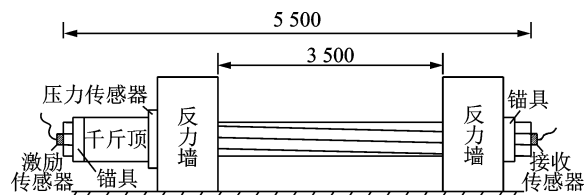


图 6 实验装置示意图(单位:mm)

Fig. 6 Layout of experiment equipment(unit: mm)

3.2 超声导波实验

采用美国 PAC 公司生产的 PCI-2 声发射系统进行导波传播实验,传感器为 WD 宽频压电换能器。采用步径频率 $\Delta f=2$ kHz 的一系列 100 kHz~



(a) 实验整体布置 (b) 千斤顶及压力传感器
(a) Experimental layout (b) Jack and pressure sensor

图 7 实验现场照片

Fig. 7 Experimental site photos

1 000 kHz 单周期正弦脉冲作为激励声源激起钢绞线中的多频率导波,采样频率为 2 MHz。激励声源函数表达式为

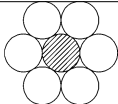
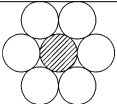
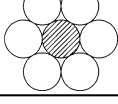
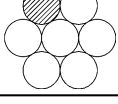
$$f(t) = \sum_{i=0}^{\frac{t-f_0}{\Delta f}} V_i(t) \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)) \quad (8)$$

其中: $f_0=100$ kHz, $f=1$ 000 kHz 分别为起始频率和终止频率; $\Delta f=2$ kHz 为步径频率; $V_i(t)$ 为矩形窗;窗长 $T_i = \frac{1}{f_0 + i\Delta f}$ 。

表 2 为导波采集方式。

表 2 导波采集方式

Tab. 2 Acquisition methods of guided waves

导波采集方式	激励端传感器位置	接收端传感器位置
中心钢丝激励-中心钢丝接收		
中心钢丝激励-外围钢丝接收		

3.3 实验结果分析

不同张拉力作用下,接收端中心钢丝的实测导波信号如图 8 所示。钢丝间的相互作用随张拉力的增加逐渐加强,导波由中心钢丝向外围钢丝的能量

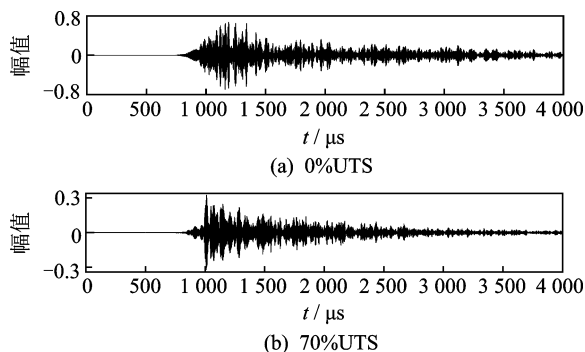


图 8 实测导波信号

Fig. 8 Measured guided wave signal

泄露更为显著。钢绞线中拉力增加到 70% UTS 时,实测导波幅值下降了 53.44%。

实测导波多尺度能量熵相对于参考值的 $D(P)$ 值随张拉力的变化规律如图 9 所示。

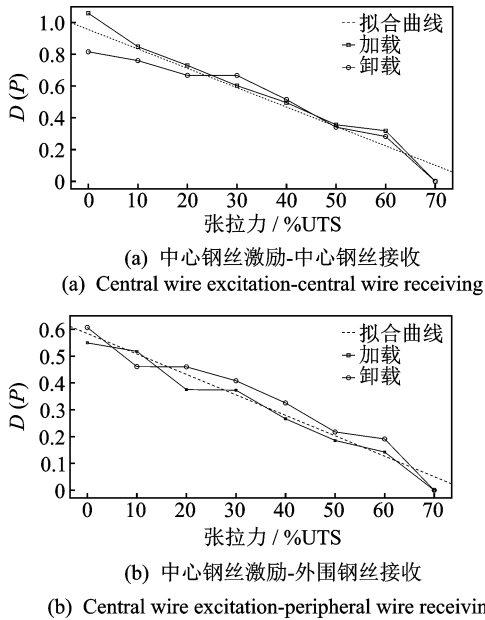


图 9 识别指标随拉力变化曲线

Fig. 9 Identification index vs tension curve

由图 9 可知,随着拉力的增大,实测张拉力识别指标 $D(P)$ 线性下降,加卸载过程对二者线性变化规律的影响较小。

接收传感器位于中心钢丝时,实测识别指标 K 值达到 1.221,与有限元结果相比,传播距离增加 957.69%, K 值提高了 20.3%,验证了有限元分析中传播距离对识别指标敏感性的提升作用。同时,也证明了该张拉力识别方法在长远距离钢绞线拉力识别中的适用性。

接收传感器位于外围钢丝时,识别指标 K 值为 0.762,较中心钢丝相比下降了 37.6%。造成二者 K 值差异的主要原因在于接收传感器位于外围钢丝时,导波由中心钢丝经钢丝间狭小接触区域传播至外围钢丝,过小的接触面积导致导波携带的张拉力信息不完整。当接收传感器位于中心钢丝时,导波携带所有外围钢丝与中心钢丝间的接触信息,其传播特征对钢绞线中拉力的变化更为敏感。

识别指标与钢绞线张拉力间的线性变化规律受采集方式影响较小,采用中心钢丝激励-中心钢丝接收和中心钢丝激励-外围钢丝接收的导波采集方式均能有效反映钢绞线中张拉力的大小。

4 结论

1) 不同拉力作用下,导波多尺能量熵变化显著,识别指标与钢绞线张拉力存在明显的线性关系,有限元与试验结果吻合较好。

2) 传播距离越远,导波信号中的拉力特征更为丰富,识别指标敏感性增强,但是其提升幅度随着传播距离的增加而减小。较有限元结果相比,实测识别指标的传播距离增加 957.69%,敏感性系数提高了 20.3%。

3) 采用中心钢丝激励、中心钢丝接收的导波采集方式进行钢绞线张拉力识别,敏感性更优。接收传感器位于外围钢丝时,识别指标 K 值为 0.762,较中心钢丝相比下降了 37.6%。识别指标与张拉力间的线性变化规律受采集方式的影响较小。

参 考 文 献

- [1] CUI Y, ZOU D H. Assessing the effects of insufficient rebar and missing grout in grouted rock bolts using guided ultrasonic waves[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 79: 64-70.
- [2] 王国锋,李富才,刘志强,等. 超声导波在圆管结构损伤定位中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 440-448.
WANG Guofeng, LI Fucui, LIU Zhiqiang, et al. Research on ultrasonic guided wave-based damage localization for pipeline structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 440-448. (in Chinese)
- [3] BARTOLI I, CASTELLAZZI G, MARZANI A, et al. Prediction of stress waves propagation in progressively loaded seven wire strands[C] // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012. San Diego: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineeris, 2012, 8345: 834501-834512.
- [4] LI C, HAN Q, LIU Y, et al. Investigation of wave propagation in double cylindrical rods considering the effect of prestress[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 353(1):164-180.
- [5] FABIEN T. Dispersion curve veering of longitudinal guided waves propagating inside prestressed seven-wire strands[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016,

- 367;56-68.
- [6] HAAG T, BEADLE B M, SPRENGER H, et al. Wave-based defect detection and interwire friction modeling for overhead transmission lines[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2009, 79(6/7):517-528.
- [7] GAUL L, BISCHOFF S, SPRENGER H, et al. Numerical and experimental investigation of wave propagation in rod-systems with cracks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(18):3532-3540.
- [8] SCHAAL C, BISCHOFF S, GAUL L. Energy-based models for guided ultrasonic wave propagation in multi-wire cables[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015(64/65): 22-29.
- [9] 刘增华, 刘溯, 吴斌, 等. 预应力钢绞线中超声导波声弹性效应的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(2): 22-27.
- LIU Zenghua, LIU Su, WU Bin, et al. Experimental research on acoustoelastic effect of ultrasonic guided waves in prestressing steel strand[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2): 22-27. (in Chinese)
- [10] CHAKI S, BOURSE G. Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands[J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(2): 162-171.
- [11] DUBUC B, EBRAHIMKHANLOU A, SALAMONE S. Higher order longitudinal guided wave modes in axially stressed seven-wire strands [J]. *Ultrasonics*, 2018, 84:382-391.
- [12] RIZZO P. Ultrasonic wave propagation in progressively loaded multi-wire strands [J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(3): 297-306.
- [13] NUCERA C, SCALEA F L D. Monitoring load levels in multi-wire strands by nonlinear ultrasonic waves [J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(6):617-629.
- [14] LIU X, WU B, QIN F, et al. Observation of ultrasonic guided wave propagation behaviours in prestressed multi-wire structures[J]. *Ultrasonics*, 2017, 73: 196-205.
- [15] 钱骥, 陈鑫, 杨金川. 小波时-频变换的高强钢丝弹性波传播模态分析[J]. *应用声学*, 2017, 36(6): 548-554.
- QIAN Ji, CHEN Xin, YANG Jinchuan. Modal analysis of elastic wave propagating in highstrength steel wires based on wavelet time-frequency analysis [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(6): 548-554. (in Chinese)
- [16] 张琛, 赵荣珍, 邓林峰. 基于 EEMD 奇异值熵的滚动轴承故障诊断方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2019, 39(2): 353-358.
- ZHANG Chen, ZHAO Rongzhen, DENG Linfeng. Bearing fault diagnosis method based on EEMD singular value entropy[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(2): 353-358. (in Chinese)
- [17] 钱骥, 陈鑫, 朱汉容. 基于二维傅立叶变换的圆杆弹性波模式识别及分离[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(4): 1-5.
- QIAN Ji, CHEN Xin, ZHU Hanrong. Pattern recognition and separation of elastic wave propagating in circular rod based on two-dimension Fourier transform [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2016, 35(4): 1-5. (in Chinese)



第一作者简介:陈鑫,男,1994年4月生,博士生。主要研究方向为桥梁健康监测及无损检测。曾发表《基于导波能量谱的钢绞线腐蚀损伤识别研究》(《振动与冲击》2018年第30卷第20期)等论文。

E-mail: chenxin_bsri@tju.edu.cn

通信作者简介:朱劲松,男,1975年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁健康监测与损伤识别。

E-mail: jszhu@tju.edu.cn

