

基于小波尺度-能量的钢绞线张拉力识别研究

钱 骥^{1,2}, 卢小明¹, 应晓波¹, 李长春¹

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学山区桥梁结构与材料
教育部工程研究中心, 重庆 400074)

摘 要 目的 研究预应力钢绞线长期服役后剩余应力水平, 开展无损检测方法评估剩余应力. 方法 以工程中常用的钢绞线为研究对象, 进行钢绞线逐级加载实验与超声导波实验, 对端面传感器与侧面传感器采集到的导波信号进行小波分析与多尺度分析; 定义不同拉力状况下能量特征向量 E_j 之间的差值为 L_{WE} , 能量 Shannon 熵特征向量 S_j 之间的差值为 L_{WES} , 并以该值作为钢绞线张拉力识别指标. 结果 随着张拉力的增大, 实测导波信号幅值降低, 其频谱图幅值也降低, 能量分布发生了改变; 不同张拉力下, 小波能量在尺度上分布有相似的规律, 其峰值随张拉力的增大而下降; 识别指标 L_{WE} 和 L_{WES} 随张拉力变化显著, 线性规律强, 可靠性系数 R^2 均在 0.94 以上, 传感器布置策略对其影响较小. 结论 构建的识别指标均能识别出钢绞线张拉力的变化, 与小波尺度-能量 Shannon 熵图相比, 小波尺度-能量图更能清晰地观察到能量随张拉力的变化趋势, 基于小波能量的识别指标 L_{WE} 敏感系数 K 值更大, 可靠性越高, 识别效果更佳.

关键词 钢绞线; 张拉力; 尺度-能量; 小波变换; 识别指标

中图分类号 TU378.1; U443.38

文献标志码 A

Research on Tension Identification of Steel Strand Based on Wavelet Scale-Energy

QIAN Ji^{1,2}, LU Xiaoming¹, YING Xiaobo¹, LI Changchun¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China, 400074 2. Engineering Research Center of Mountain Bridge Structure and Material of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China, 400074)

Abstract: The purpose of this paper is to study the nondestructive testing method of estimating the remained stress in steel strands in the long term lifecycle. The steel strand that commonly used in engineering was taken as the research object, and the stepwise loading experiments and ultrasonic guided wave experiments were carried out conjointly. Through adopting the multi-dimensioned wavelet analysis to processing the waveguide signals collected at the end and side sensors. The

收稿日期: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478347); 山区桥梁结构与材料教育部工程研究中心项目(QLGC-ZX-JJ2017-3); 重庆交通大学研究生科研创新项目(2018S0122)

作者简介: 钱骥(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁健康监测方面研究.

difference between the energy eigenvectors E_j and energy Shannon entropy eigenvectors S_j under different tension conditions is defined as L_{WE} and L_{WES} , and the value is taken as the tension identification index of steel strand. The results illustrate that the amplitudes in time domain and frequency domain decline with the increase of tensile force, and the energy distribution changes as well; the energy distribution has similar law on scale in different tensile forces, and its peak value decreases with the increasing of tensile force; the identification indexes L_{WE} and L_{WES} change significantly in the variation of tensile force, which have a linear regularity and the reliability coefficient R^2 are all above 0.94. The diverse sensors arrangement have a little influence on the results. In conclusion, the constructed identification indexes can well identify the variation of tensions in steel strands, and the scale-wavelet energy graph can more clearly observe the change trend of energy, of which the recognition index L_{WE} has a higher sensitivity coefficient and better recognition effects.

Key words: steel strand; tension; scale-energy; wavelet transform; identification index

钢绞线作为核心受力构件广泛应用于土木工程结构中,如预应力混凝土桥梁、斜拉桥拉索、拱桥吊杆。一方面,长期服役状态下锚固钢绞线发生蠕变、松弛致使钢绞线应力水平严重退化^[1]。另一方面,预应力混凝土结构的温升温降、收缩徐变均会导致预应力发生变化。长期运营后预应力钢绞线一定程度上遭受腐蚀,剩余拉力下降,致使预应力混凝土桥梁跨中下挠过大,严重时威胁桥梁安全,容易导致安全事故^[2]。为了有效评估、检测预应力钢绞线剩余应力水平,寻求一种高效的无损检测方法对于确保结构的安全性、耐久性具有重要意义。

导波技术在结构缺陷损伤检测方面得到了广泛的应用,近年来运用声弹性效应在应力识别方面也开展了深入详细的研究。现有的技术方法能应用于应力识别的主要有应变法、光纤检测法^[3]、磁弹法^[4]、漏磁法^[5]和射线法^[6],但是针对服役桥梁中钢绞线的剩余应力水平,这些方法适用性较差,无法有效检测出混凝土包裹下预应力钢绞线的有效应力。超声导波在无损检测领域具有明显的优势,传播距离远,可操作性强,通过导波信号在钢绞线中的传播,分析传感器所测信号声学特征参数即可实现钢绞线张拉力的检测。H. Kwun 等^[7]通过钢绞线超声导波传播实验,发现了拉力造成的纵向导波频带缺失现

象,将缺失频带的中心频率定义为陷频频率,并研究了陷频频率与拉力的变化规律。P. Rizzo 等^[8-9]通过在短钢绞线两端施加不同大小的拉力并激励出激光超声以此来研究不同拉力下超声导波的传播特性,结果表明导波传输能量变化对拉力较为敏感。S. Chaki 等^[10]基于声弹性理论研究了导波波速与钢绞线拉力的关系,并提出了最佳激励模式及频率。刘秀成,吴斌等^[11-12]研究了拉力作用下导波信号经傅里叶变换后的陷频特性,得到不同拉力下陷频旁侧峰值比,并将该比值用于拉力测试,由此得到一种钢绞线拉力识别方法。

在工程结构中小波变换广泛应用于结构响应信号的处理,小波变换是一种数字信号处理技术,能够对连续信号和瞬时信号进行处理分析,并且能识别信号的微小变化^[13]。众多研究表明小波变换^[14]或小波包变换^[15]可以广泛应用于结构损伤识别中,孙增寿等^[16]运用小波变换对桥梁结构损伤识别进行研究,提出了以小波包样本熵和小波熵为损伤识别指标的评价方法。基于此,笔者以工程中常用的7芯钢绞线为研究对象,采用超声导波进行钢绞线张拉力识别研究。通过实验研究,对端面传感器与侧面传感器所测信号进行小波分析与多尺度分析,得到不同拉力状态下小波能量与小波能量 Shannon 熵在

尺度上的分布情况,并以此为特征向量构建识别指标进行钢绞线拉力识别,并分析了传感器布置策略的影响.得出构建的识别指标随张拉力变化具有良好的线性关系,传感器布置策略对识别指标影响较小.

1 小波理论

1.1 连续小波变换

小波分析广泛应用于工程振动信号的处理分析^[17],与短时傅立叶变换相比,小波变换在低频段具有较高的频率分辨率,在高频段具有较高的时间分辨率,能有效区分信号中的微小变化.

小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 是由母小波函数 $\psi(t)$ 经过伸缩平移得到的.

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi(\frac{t-b}{a}). \tag{1}$$

式中: $a, b \in R, a \neq 0, a$ 为伸缩因子, b 为平移因子, t 为时间. 对于给定任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 小波变换表示成:

$$(W_{\psi}f)(a,b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi(\frac{t-b}{a}) dt = \langle f, \Psi(a,b) \rangle. \tag{2}$$

对于 $\psi(t)$ 、 a 和 b 选择有, $a_j = 2^{-j}, b_{j,k} = 2^{-j}k (j, k \in Z)$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), j, k \in Z. \tag{3}$$

假设时域信号采样值 $f(t) = \{f_0(n), n = 0, 1, \dots, M\}$, 单位采样时间作为采样时间 t_s , 即采样率为 1. 如果分解执行所有分辨率级别, $N = \log_2 M$, 小波逆变换可以写成式(4)所示, $C_j(k)$ 为小波系数.

$$f(t) = \sum_{j=1}^n \sum_k C_j(k) \psi_{j,k}(t) = \sum_{j=1}^n \gamma_j(t). \tag{4}$$

1.2 小波能量,小波能量 Shannon 熵

能量的概念源于傅里叶理论,导波时域信号经小波变换后得到小波系数 $C_j(k)$, 信号在尺度 $j = 1, 2, \dots, n$ 上的小波能量可以表示为式(5)所示, 信号在每一采样时间点上的小波能量可以表示为各尺度能量之和, 即

式(6), 信号的总能量可以表示为式(7)所示.

$$E_j = \|\gamma_j\|^2 = \sum_k |C_j(k)|^2. \tag{5}$$

$$E(k) = \sum_{j=1}^n |C_j(k)|^2. \tag{6}$$

$$E_{\text{tol}} = \|f\|^2 = \sum_{j=1}^n \sum_k |C_j(k)|^2 = \sum_{j=1}^n E_j. \tag{7}$$

在第 j 尺度上,小波能量比 p_j 可以定义为 E_j 与 E_{tol} 的比值,小波能量比特征向量 \boldsymbol{P} 可以表示能量在时间-尺度上的分布.

熵是一个广义的概念,主要用来度量信息的规律性,运用这种规律可以检测信号在时频域上的异常. Shannon 熵是最常用的一种信息熵,根据 Shannon 熵的定义,小波能量 Shannon 熵可以定义为式(8)所示,各尺度下小波能量 Shannon 熵可以定义为式(9)所示.

$$S = S(p) = - \sum_{j=1}^n p_j \cdot \ln p_j. \tag{8}$$

$$S_j = - p_j \cdot \ln p_j. \tag{9}$$

从某种程度上说,小波能量和小波能量 Shannon 熵在频域上反映出能量的分布,通过能量分布的变化来识别出信号的微小变化,从而对信号的动态变化反应更加敏感. 钢绞线不同张拉力下导波信号的基本特征发生了改变,不同拉力状态下,熵值大小也会发生相应的改变.

1.3 张拉力识别指标构造

钢绞线在不同张拉力下导波能量传递会发生变化,为了更为细致地描述能量变化的程度,需要构建识别指标. 以各尺度下小波能量为特征向量 \boldsymbol{E}_j , 小波能量 Shannon 熵为特征向量 \boldsymbol{S}_j , 不同拉力状态程度下特征向量表现出不同的特征. 当以无拉力状态下特征量作为基准值时,不同拉力状态下特征量与基准值之间的差异则反映了张拉力偏离该基准值的程度. 各拉力状态下的尺度小波能量和小波能量 Shannon 熵作为特征向量,定义 L_{WE} 为小波能量特征向量 \boldsymbol{E}_j 在各不同拉力工况下的

距离, L_{WES} 为小波能量 Shannon 熵特征向量 S_j 在各不同拉力工况下的距离, 并以该值作为识别指标, 计算如式(10)和式(11)所示.

$$L_{\text{WE}} = \sum_{j=0}^n |E_j^a - E_j^b|. \tag{10}$$

$$L_{\text{WES}} = \sum_{j=1}^n |S_j^a - S_j^b|. \tag{11}$$

式中: E_j^a 和 E_j^b 、 S_j^a 和 S_j^b 分别为拉力状态为 a 和 b 时的特征向量. 为避免特征向量与基准值之间的距离变化究竟是由拉力大小增加还是减小所引的, 基准值应选取拉力较小或较大状态下的特征向量, 笔者选取无拉力状态下的特征向量为基准值.

2 实 验

2.1 钢绞线加载实验

钢绞线加载系统由反力墙、液压千斤顶、锚具、夹片以及压力传感器组成. 实验所用钢绞线为七芯钢绞线, 公称直径 $D = 15.2 \text{ mm}$, 长度 $L = 5.5 \text{ m}$, 极限抗拉强度 (UTS) 为 $1\,860 \text{ MPa}$, 对应施加的张拉力 $T = 256 \text{ kN}$. 钢绞线一端用锚具固定, 另一端采用液压千斤顶控制张拉, 施加的最大拉力为 179.2 kN . 张拉过程中每个工况增加 25.6 kN ($10\% \text{ UTS}$ 对应的拉力) 进行加载, 通过设置在液压千斤顶与反力墙间之间的压力传感器可以准确识别钢绞线中施加的拉力大小. 图 1 所示为实验布置示意图.

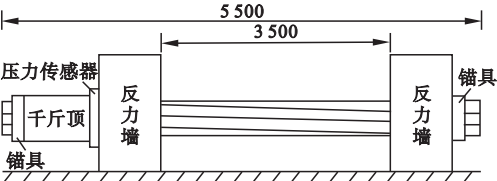


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Layout of experiment equipment

2.2 超声导波实验

PCI-2 声发射系统可以实现对导波信号的激励与采集, 该系统能有效识别低频和高频导波信号, 采用系统配置的压电式换能器, 可识别 $0 \sim 1\,000 \text{ kHz}$ 频带, 采样率设置为

2 MHz . 激励源由一系列中心频率为 $0 \sim 1\,000 \text{ kHz}$ 的正弦激励脉冲组成, 式(12)所示为激励源函数.

$$f(t) = \sum_{i=0}^{f-f_0/\Delta f} V_i \cdot \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t). \tag{12}$$

式中: V_i 为矩形窗函数; f_0 为起始频率; f 为终止频率; $\Delta f = 2 \text{ kHz}$ 为步径频率; 矩形窗窗长 $T_i = 1/f_0 + i \cdot \Delta f$.

传感器布置如图 2 所示. 通过设置于端面的传感器激励导波信号, 布置在另一端面和钢绞线外侧的传感器来接收远距离传播后的导波信号, 采用凡士林耦合剂使传感器与钢绞线充分接触. 在加载时, 传感器与钢绞线保持相对静止状态, 当加载至预设工况拉力时, 通过计算机控制系统使激励传感器产生激励信号, 在接收端得到导波时域波形.

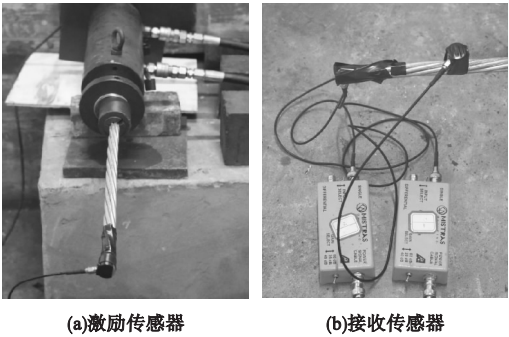


图 2 传感器的布置

Fig. 2 Layout of sensors

2.3 实验结果分析

不同张拉力下端面传感器实测导波波形如图 3 所示. 可以看出随着张拉力的增大, 信号幅值在降低, 但直观上还不是很明显. 对信号进行傅里叶变换进行频谱分析, 得到图 4 所示结果. 从图 4 可以明显观察到, 在施加 165.7 kN 拉力后, 导波信号频谱图在频率 100 kHz 附近幅值明显降低, 在频率 200 kHz 附近幅值有小幅的上升, 说明能量在频率分布上发生了显著变化.

小波变换的多分辨率分析的特点使得其更能有效提取信号中的微小变化, 在动态系统故障检测与诊断中得到了广泛运用^[18].

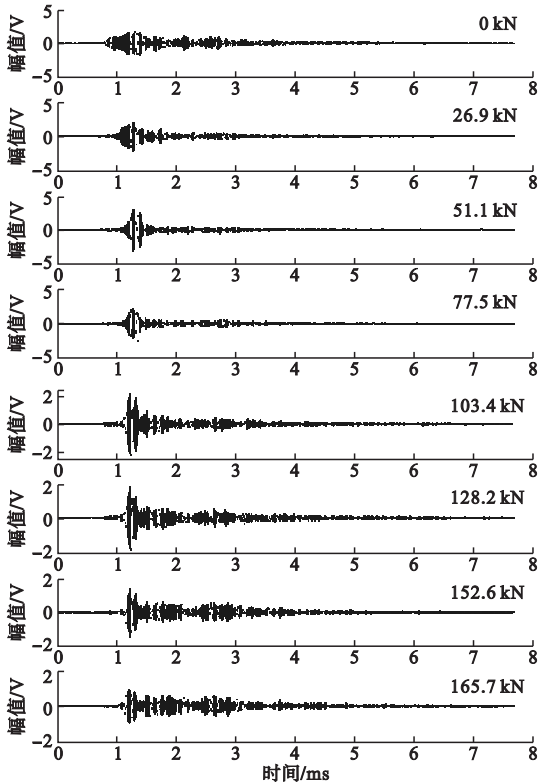


图3 端面接收传感器信号

Fig. 3 Signals received from the terminal sensor

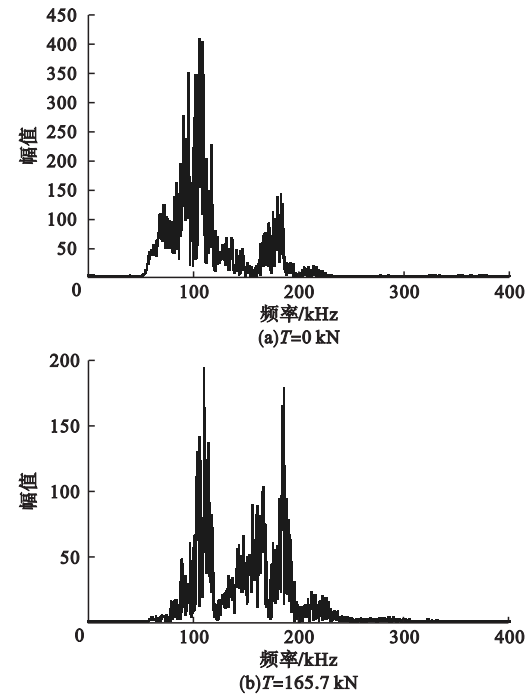


图4 导波信号频谱图

Fig. 4 Spectrum of waveguide signal

为了更加细致的分析不同张力下能量的变化,对导波信号进行一维连续小波变换,母小波选取 Daubechies 小波系中的 db8 小波函数,分解层次尺度为 48,按式(5)和式(9)分别计算各尺度下小波能量与小波能量 Shannon 熵得到图 5 和图 6 所示结果。

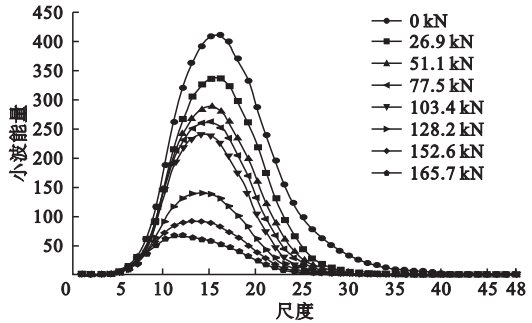


图5 尺度-能量图

Fig. 5 Scale-energy diagram

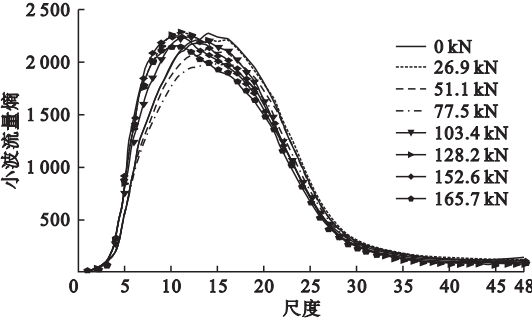


图6 尺度-能量 Shannon 熵图

Fig. 6 Scale-energy diagram of Shannon entropy

由图 5 可知:不同张力下实测导波信号小波能量在尺度上的分布较为相似,能量主要分布在尺度 10~25 内,随着张拉力的增大,小波能量峰值减少。由图 6 可知:不同张力下实测导波信号小波能量 Shannon 熵在尺度上的分布较为相似,张拉力小于 77.5 kN 时,随着张拉力的增大,小波能量 Shannon 熵峰值减少,而在拉力大于 77.5 kN 时,小波能量 Shannon 熵分布发生了变化。

取无张力状态下导波时域信号各尺度小波能量和小波能量 Shannon 熵为基准值,进行归一化处理,按式(10)和式(11)计算识别指标,得到图 7、图 8 所示结果。实验结果呈现出明显的规律性,对实验结果进行直线拟合, K 为斜率, R^2 为调整系数。斜率 K 值大

小表明直线的变化速度,变化速度越大则指标越敏感, R^2 值反映了在进行钢绞线拉力识别时,识别指标的可靠性, R^2 值越趋近于 1,实验结果与拟合直线吻合效果越好。

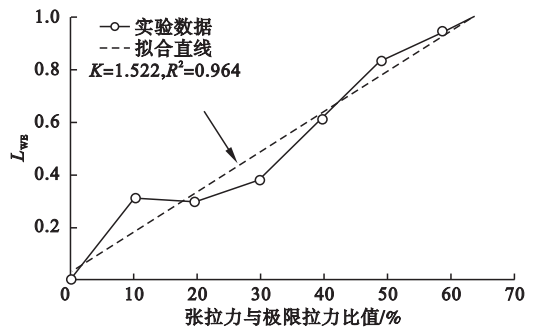


图 7 L_{WE} 指标随拉力变化曲线

Fig. 7 L_{WE} index changes with tension

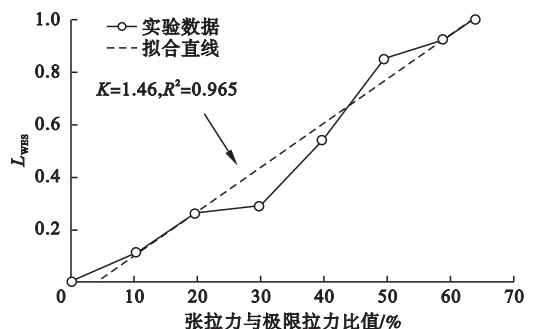


图 8 L_{WES} 指标随拉力变化曲线

Fig. 8 L_{WES} index changes with tension

在图 7 中 L_{WE} 值随拉力的增加呈单调上升趋势,指标值变化明显,线性变化规律显著, K 和 R^2 分别到达 1.522 和 0.964。在图 8 中 L_{WES} 值随拉力的增加单调上升,指标值变化明显,线性变化规律显著, K 和 R^2 分别到达 1.46 和 0.965。结果证实所构建的指标能够反映钢绞线应力水平的变化。

3 传感器布置策略的影响

传感器的布置策略对于导波信号的接收有着不可忽视的影响,为了研究传感器布置在侧面对导波波形基本特征的影响,将传感器布置在距端面接收传感器 20 cm 处钢绞线侧面。获得图 9 所示导波时域信号和图 10 所示导波频谱图。

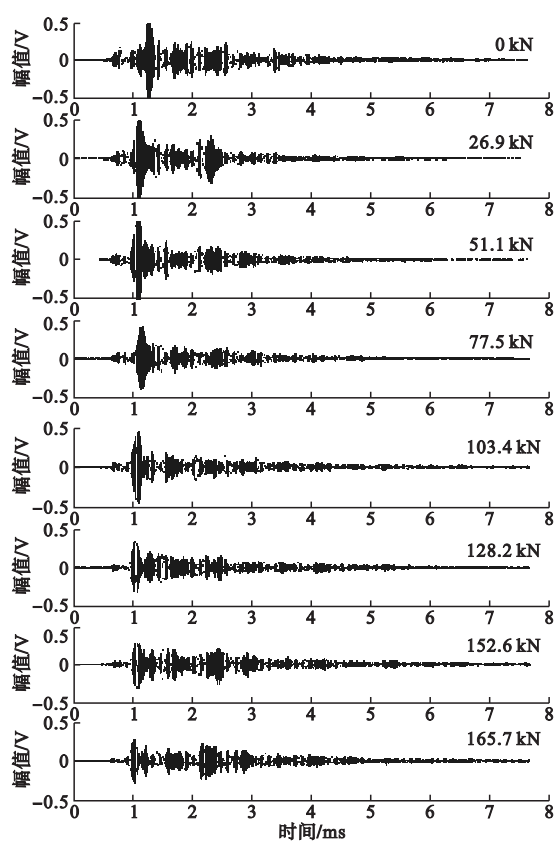


图 9 侧面接收传感器导波信号

Fig. 9 Waveguide signal received from the side sensor

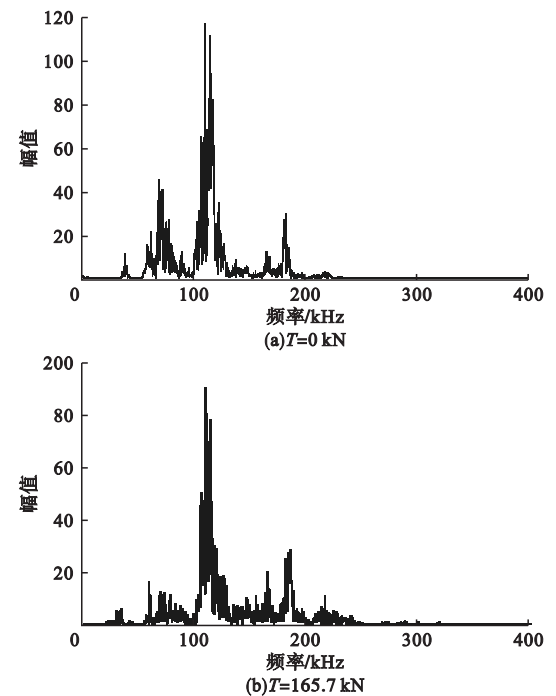


图 10 导波信号频谱图

Fig. 10 Spectrum of waveguide signal

比较分析图 3 和图 9 可知:布置在端面的传感器所测信号幅值远远大于侧面传感器所测信号,这是因为钢绞线侧面为螺旋钢丝,传感器与钢丝间的接触面积远远小于端面.对比信号频谱图,侧面传感器所测信号幅值远远低于端面所测信号,随着张拉力的增大,频谱图中幅值有所下降,能量在频率分布上明显发生了变化.对导波信号进行一维连续小波变换,按式(5)和式(9)分别计算各尺度下小波能量与小波能量 Shannon 熵得到图 11 和图 12 所示结果.

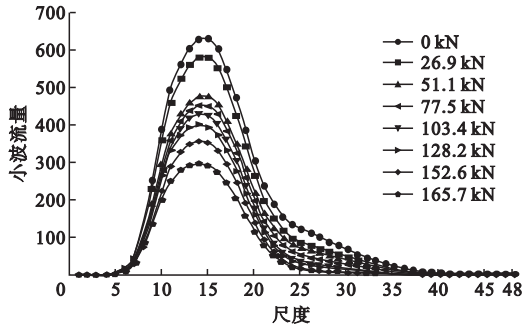


图 11 尺度-能量图

Fig. 11 Scale-energy diagram

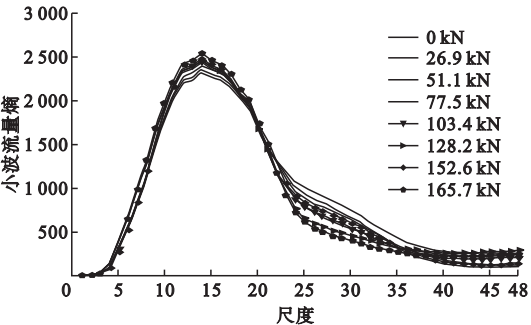


图 12 尺度-能量 Shannon 熵图

Fig. 12 Scale-energy diagram of Shannon entropy

由图 5 和图 11 可知:端面传感器所测导波信号和侧面传感器所测导波信号小波能量在尺度分布上一致,能量主要分布在尺度 10~25 内,随着张拉力的增大,二者小波能量峰值均下降,侧面传感器小波能量远远低于端面传感器.对比尺度-能量 Shannon 熵图,相比端面传感器,侧面传感器所测信号小波能量 Shannon 熵在尺度分布上规律较好,小波能量 Shannon 熵峰值随着张拉力的增大

而上升.
按式(10)和式(11)计算评价指标,得到图 13、图 14 所示结果.对比图 7 和图 13、图 8 和图 14,端面传感器与侧面传感器所测信号基于小波能量的拉力识别指标 L_{WE} 和基于小波能量 Shannon 熵的拉力识别指标 L_{WES} 都有相似的规律,随拉力的增加单调上升,指标值变化明显,线性变化规律显著.相比端面传感器,侧面传感器所得 L_{WE} 指标可靠性系数更高,拟合效果更优, L_{WES} 指标可靠性系数较低,拟合效果较差.整体而言,侧面传感器所测信号其能量值远远低于端面传感器,但其识别指标 L_{WE} 和 L_{WES} 均能识别出钢绞线张拉力的变化,其变化曲线拟合效果较好,可靠性系数均达到 0.94 以上.

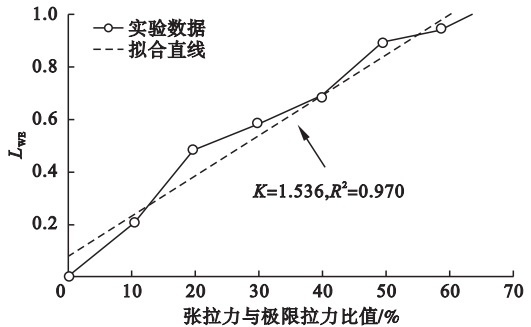


图 13 L_{WE} 指标随张拉力变化曲线

Fig. 13 L_{WE} index changes with tension

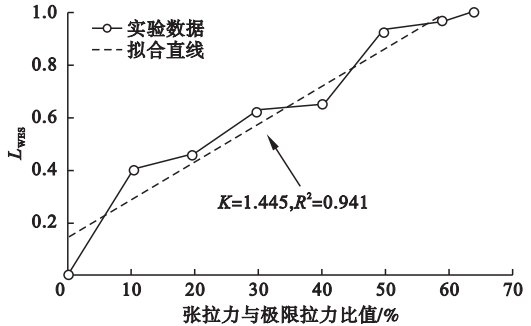


图 14 L_{WES} 指标随张拉力变化曲线

Fig. 14 L_{WES} index changes with tension

4 结 论

(1)随着张拉力的增大,端面传感器与侧面传感器所测导波信号幅值逐渐降低,其频谱

图幅值也逐渐降低,表明张拉力的作用使能量分布发生了改变,端面传感器所测导波信号幅值远远高于侧面传感器所测导波信号。

(2)端面传感器与侧面传感器所测导波信号虽然幅值不同,但其小波能量在尺度分布上有相似的规律,两者计算得到的识别指标 L_{WE} 和 L_{WES} 随张拉力变化显著,线性规律强,传感器布置策略对识别指标影响较小。

(3)与尺度-能量熵 Shannon 图相比,尺度-能量图更能清楚地观察到能量随张拉力的变化趋势,基于小波能量的识别指标 L_{WE} 的 K 值更大,可靠性越高,识别效果更佳。

参考文献

- [1] IVANCO V, KMET S, FEDORKO G. Finite element simulation of creep of spiral strands [J]. *Engineering structures*, 2016, 117: 220 – 238.
- [2] BAŽANT Z P, ASCE H M, YU Q, et al. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: record-span bridge in palau and other paradigms [J]. *Journal of structural engineering*, 2012, 138(6): 687 – 696.
- [3] 邓年春, 欧进萍, 周智, 等. 光纤光栅在预应力钢绞线应力监测中的应用 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(10): 1550 – 1553.
(DENG Nianchun, OU Jinping, ZHOU Zhi, et al. Application of fiber bragg grating sensor to monitor tensile stress in a seven-wire prestressed steel strand [J]. *Journal of Harbin institute of technology*, 2007, 39(10): 1550 – 1553.)
- [4] WANG G D, WANG M L, ZHAO Y, et al. Application of EM stress sensors in large steel cables [C]// *Smart structures and materials*. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2005: 145 – 154.
- [5] KRAUSE T W, LITTLE R W, BAMES R, et al. Effect of stress concentration on magnetic flux leakage signals from blind-hole defects in stressed pipeline steel [J]. *Research in nondestructive evaluation*, 1996, 8(2): 83 – 100.
- [6] OGILVIE R E. A different approach to X-ray stress analysis [J]. *Spectrochimica acta part b atomic spectroscopy*, 2007, 62(6/7): 529 – 532.
- [7] KWUN H, BARTELS K A, HANLEY J J. Effects of tensile loading on the properties of elastic-wave propagation in a strand [J]. *Journal of the acoustical society of America*, 1998, 103(6): 3370 – 3375.
- [8] RIZZO P, SCALEA F L D. Wave propagation in multi-wire strands by wavelet-based laser ultrasound [J]. *Experimental mechanics*, 2004, 44(4): 407 – 415.
- [9] RIZZO P. Ultrasonic wave propagation in progressively loaded multi-wire strands [J]. *Experimental mechanics*, 2006, 46(3): 297 – 306.
- [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] LIU Xiucheng, WU Bin, QIN Fei, et al. Observation of ultrasonic guided wave propagation behaviours in pre-stressed multi-wire structures [J]. *Ultrasonics*, 2017, 73: 196 – 205.
- [12] 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 study on acoustic elastic effect of ultrasonic guided wave in prestressed steel strand [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2010, 46(2): 22 – 27.)
- [13] TAHA M M R. Wavelet transform for structural health monitoring: a compendium of uses and features [J]. *Structural health monitoring*, 2006, 5(3): 267 – 295.
- [14] RAVANFAR S A, RAZAK H A, ISMAIL Z, et al. A two-step damage identification approach for beam structures based on wavelet transform and genetic algorithm [J]. *Meccanica*, 2016, 51(3): 635 – 653.
- [15] SUN Z, CHANG C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform [J]. *Journal of structural engineering*, 2002, 128(10): 1354 – 1361.
- [16] 孙增寿, 李晓鹏, 韩培琰, 等. 基于小波包样本熵的连续梁桥损伤识别 [J]. *振动·测试与诊断*, 2018, 38(5): 916 – 921.
(SUN Zengshou, LI Xiaopeng, HAN Peiyan, et al. Damage identification of continuous beambridges based on wavelet packet sample entropy [J]. *Journal of vibration, measurement & diagnosis*, 2018, 38(5): 916 – 921.)
- [17] 孔玲军. MATLAB 小波分析超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
(KONG Lingjun. MATLAB super learning manual for wavelet analysis [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014.)
- [18] TAO Shunxing, ZHOU Xiaojun, ZHANG Zhi-gang. On fault feature extraction of a gear by complex morlet wavelet transform and coefficient correlation [J]. *Mechanical science and technology for aerospace engineering*, 2010, 29(5): 642 – 645.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)