

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1226

钢绞线损伤状态下超声导波检测及数值模拟研究

陈铭刚, 布占宇*

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为准确检测桥梁缆索等结构内部的钢绞线损伤状况, 采用超声导波检测技术对钢绞线不同损伤程度、位置和断丝根数的工况进行试验. 首先建立损伤程度与导波特征关系, 通过反射系数 C 定量分析损伤程度, 并结合超声导波传播路径确定损伤位置; 其次基于傅里叶变换的频谱分析确定损伤类型; 最后通过有限元模拟验证超声导波传播路径以及判断损伤程度与位置. 结果表明: 随着损伤程度的增加, 反射系数 C 呈非线性增长趋势, 且损伤位置在中点对称下靠近接收端的左侧反射系数更大; 通过频谱分析发现磨损损伤的相对系数 γ 高于 70%, 而断丝损伤则低于 55%; 有限元模拟与试验得到的导波规律基本一致.

关键词: 超声导波; 钢绞线; 频谱分析; 数值模拟

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 01-0027-10

钢绞线作为承受拉力的关键构件, 在预应力混凝土、桥梁缆索等土木结构中得到了广泛应用^[1]. 由于环境侵蚀和疲劳应力作用会造成钢绞线结构内部磨损、断丝损伤等伤害, 因此有必要对钢绞线结构内部的损伤情况进行检测, 以了解钢绞线具体的损伤状态. 与传统无损检测方法相比, 超声导波检测技术具有检测距离长、效率高、范围广等优点, 已成为目前无损检测领域的研究热点之一^[2-3]. 超声导波检测技术将超声波换能器作为发射端, 使超声导波在构件内部传播, 对接收端换能器接收到的导波信号进行分析. 当构件存在缺陷损伤时, 发射端发出的导波信号经过损伤界面后会产生一些改变, 如幅值衰减、模态变化及波速改变等, 在与未损伤时的导波信号进行对比分析后, 就能得出构件的具体损伤情况.

超声导波检测技术目前在土木工程领域应用广泛. 在理论方面, 周方俊等^[4]通过建立螺旋坐标系下的弹性力学方程推导出螺旋结构的频散曲线; 王乐^[5]研究了钢绞线不同应力水平下导波传播特性及中心频率与应力水平的对应关系; 文献^[6-8]

研究了钢绞线张拉力识别方法. 在试验方面, Feng 等^[9]通过超声导波对钢绞线缺陷损伤进行研究, 设计了超声导波探伤仪; Farhidzadeh 等^[10]通过搭建钢绞线腐蚀损伤的超声导波检测系统, 提出了一种预应力钢绞线截面积损失的量化方法; 周琛等^[11]通过超声导波检测方法对损伤管道和焊接弯管进行检测; 徐阳等^[12]对埋地管道缺陷检测进行研究; 张清华等^[13]将超声导波用于检测纵肋对接焊缝疲劳裂纹. 在模拟方面, Baltazar 等^[14]利用短时傅里叶方法测定出类似于钢索结构电缆中的频散曲线; Yan 等^[15]通过有限元方法分析了导波在灌浆锚杆中的频散特性; Bartoli 等^[16-17]通过有限元钢轨模型研究了低阶纵波模态分离问题; 钱骥等^[18-21]通过有限元模拟对不同腐蚀程度的钢丝进行小波包时频变换分析, 同时基于二维傅里叶变换获得了圆杆结构中导波波数—频率图. 但目前超声导波研究应用大部分针对管道、钢轨等结构的频散曲线与导波传播机理, 对钢绞线不同损伤状态下超声导波的检测研究较少.

本文基于超声导波技术对钢绞线损伤状态进

收稿日期: 2023-12-18.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市交通运输科技项目(202207); 浙江省基础公益研究计划(LGG22E080007); 国家自然科学基金(51878606).

第一作者: 陈铭刚, 硕士研究生, 主要研究方向: 超声导波检测技术. E-mail: 1319280286@qq.com

*通信作者: 布占宇, 博士/教授, 主要研究方向: 预制拼装桥梁、桥梁检测. E-mail: buzhanYu@nbu.edu.cn

行检测研究. 从超声导波损伤试验与有限元模拟两方面入手, 建立损伤状态与超声导波特征的对对应关系, 并基于傅里叶变换的频谱分析方法判断钢绞线不同类型的损伤状态, 以期对超声导波检测钢绞线具体损伤程度、位置和类型提供参考.

1 理论分析

1.1 钢绞线的超声导波纵向模态

对于 7 芯钢绞线, 无论是外围钢丝还是中心钢丝均可看作细杆. 当超声导波沿 z 轴方向传播时存在 3 种模态: 纵向模态 $L(0, m)$ 、扭转模态 $T(0, m)$ 和弯曲模态 $F(n, m)$, 其中, n 为模态的周向阶次; m 为模数.

纵向模态的导波在传播过程中具有径向位移分量 u_r 和轴向位移分量 u_z , 没有环向位移分量 u_θ , 因此在试验中, 纵向模态比弯曲模态和扭转模态更容易激发. 纵向模态传播如图 1 所示, 其频散方程见式(1), 在已知钢绞线参数下可求出频散方程的解.

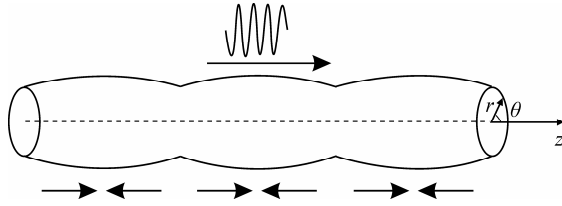


图 1 实心圆柱杆纵向模态示意图

$$\frac{2\alpha}{a}(\beta^2 + k^2)J_1(\alpha a)J_1(\beta a) - (\beta^2 - k^2)^2 \times$$

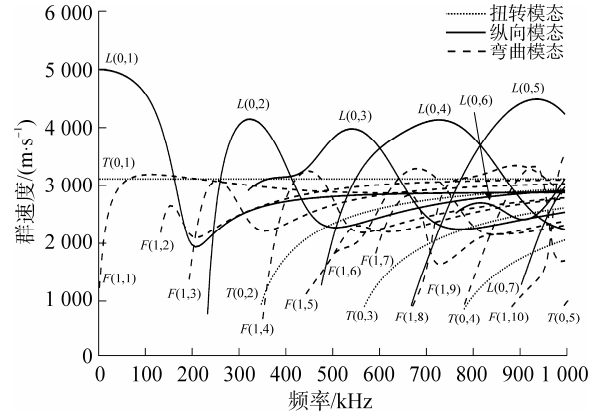
$$J_0(\alpha a)J_1(\beta a) - 4k^2\alpha\beta J_1(\alpha a)J_0(\beta a) = 0, (1)$$

式中: a 为圆杆半径; α 和 β 为根据 v_L' 和 v_T' 假定的值; v_L' 和 v_T' 为杆中传播时的纵波波速和横波波速; $v_L'^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$, $v_T'^2 = \mu / \rho$, $\alpha^2 = \omega^2 / v_L'^2 - k^2$, $\beta^2 = \omega^2 / v_T'^2 - k^2$; λ 为拉梅常数; μ 为泊松比; ρ 为密度; ω 为圆频率; k 为波数; J_0 和 J_1 为 0 阶和 1 阶 Bessel 函数.

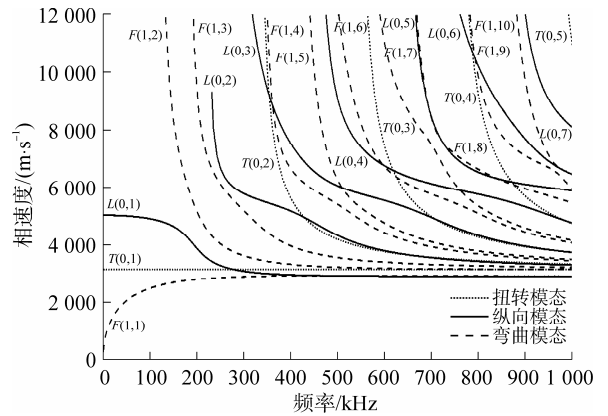
1.2 钢绞线超声导波频散曲线

钢绞线直径 15.2 mm, 弹性模量 195 GPa, 泊松比 0.3, 密度 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 采用 MATLAB 求解频散方程的数值解, 得到各模态频散曲线(图 2). 从图 2 可知, 超声导波模态数量随频率的增加而增加, 所以选择合适激励频率可减少频散现象的发生, 有利于导波信号分析. 因此本文选取模态数相对较

少且模态之间群速度差距大的 100 kHz 频率作为检测信号. 根据 $L(0, 1)$ 模态的导波变化判断钢绞线损伤情况, 考虑到试验中钢绞线两端的换能器不能完全对称布置, 因此会产生 $F(1, 1)$ 弯曲模态. 下文简称 $L(0, 1)$ 模态导波为 L 波, $F(1, 1)$ 模态导波为 F 波.



(a) 群速度各模态频散曲线



(b) 相速度各模态频散曲线

图 2 钢绞线的频散曲线

1.3 反射系数

当导波传播到杆状构件的缺陷损伤处时, 会发生反射、折射等现象, 为准确表征损伤程度对损伤回波幅值的影响, 用反射系数 C 来反映钢绞线损伤程度:

$$C = A_1 / A_2, (2)$$

式中: A_1 为损伤反射回波信号峰值; A_2 为首波信号峰值.

2 钢绞线损伤检测

2.1 试验平台

试验平台由函数信号发生器(RIGOL-DG1022 Z)、数字示波器(RIGOL-DS2102A)、压电超声换能

器(DYZ-300-01A)组成. 试验选择直径 15.2 mm 镀锌钢绞线, 长度 1 m, 钢绞线两端截面用角磨机打磨平整, 使用 AB 胶作为耦合剂, 将钢绞线与压电换能器固定. 压电换能器原理是由发射端换能器将信号发生器产生的电信号转换成机械振动, 再由接收端换能器将机械振动转换为电信号, 最后在示波器上显示波形. 采用 Rigol Ultra Station 软件, 利用汉明窗函数调制 5 个周期正弦波作为激励信号, 中心频率 100 kHz, 最大幅值 ± 5 V, 波形总时长 50 μs , 采样点 3 000 个. 激励信号 u 表达式为:

$$u = U \sin(2\pi ft) \left[0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi ft}{n}\right) \right], \quad (3)$$

式中: U 为激励信号最大幅值; f 为中心频率; t 为采样时间; n 为周期数, 取 $n = 5$. 根据奈奎斯特定理, 采样频率比信号最高频率高 10 倍及以上时, 采集信号基本能还原原始信号, 综合考虑示波器中可选择参数, 确定采样率 10^7 s^{-1} , 采样时间 1 400 μs .

2.2 磨损损伤深度检测

距离钢绞线发射端 50 cm 处用角磨机切割竖向损伤深度 1、3、5、7 mm, 宽 2 mm 的磨损损伤, 具体工况见表 1(包含无损伤状态的钢绞线).

表 1 磨损损伤深度试验分组

编号	损伤位置/cm	损伤深度/mm	损伤宽度/mm
A1	50	0	0
A2	50	1	2
A3	50	3	2
A4	50	5	2
A5	50	7	2

使用 MATLAB 中 Signal Analyzer 程序的 band-pass 函数对信号进行带通滤波处理. 选择 150 kHz 的上通带频率和 30 kHz 的下通带频率, 阻带衰减 60 dB, 陡度 0.85, 经带通滤波处理后的数据既解决了基线偏移现象问题, 同时也去除了干扰信号.

根据各模态频散曲线(图 2)可知, 在 100 kHz 下除 $L(0,1)$ 模态外还存在 $F(1,1)$ 模态, 由于 $L(0,1)$ 波速明显比 $F(1,1)$ 快, 因此在时域图中 L 波比 F 波先出现. 选取各工况前 900 μs 的时域图, 依次对图中出现的 L 首波、F 首波、L 损伤回波、F 损伤回波、L 端面回波进行标注, 具体如图 3 所示.

同时统计各波幅值随损伤深度的变化. 由图 4 可知, 随着损伤深度的增加, 超声导波在受损伤界

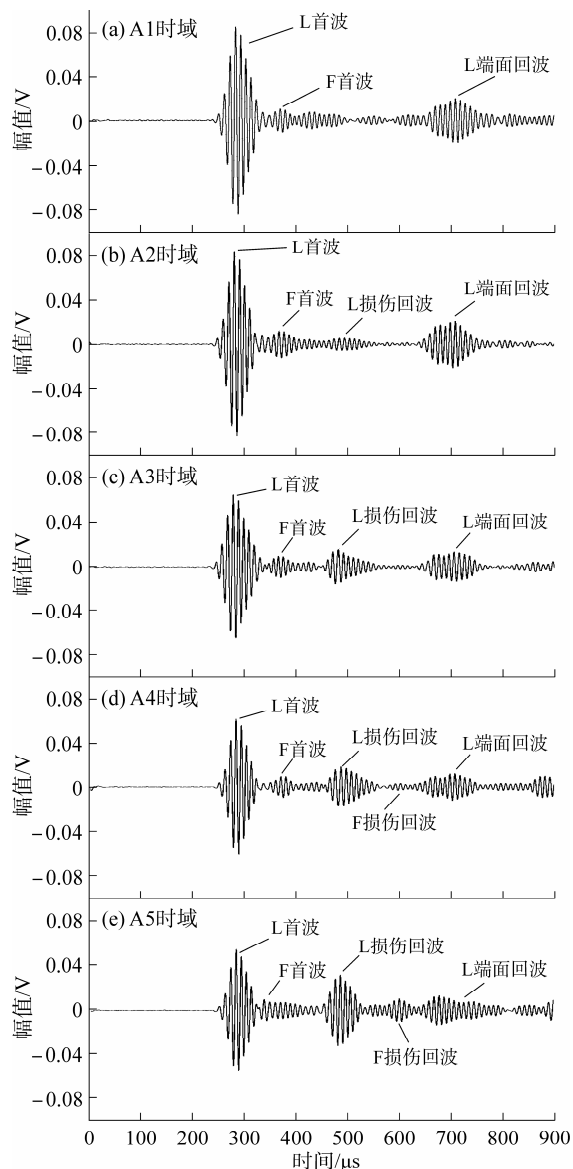


图 3 钢绞线不同损伤深度时域图

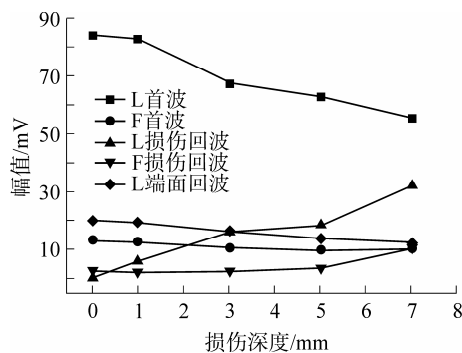


图 4 钢绞线不同损伤深度下的信号幅值变化

面的阻挡下不断发生反射、折射等, 使 L 首波、F 首波和 L 端面回波的幅值均逐渐减小, L 损伤回波与 F 损伤回波的幅值不断增大.

由各模态频散曲线(图 2)可知, 100 kHz 下 L 波理论波速为 $4\,560.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 为进一步研究不同磨损损伤深度对导波波速的影响, 采用飞行时间法计算出导波实际传播速度, 并与理论波速进行对比. 导波实际波速(v_L)公式如下:

$$v_L = 2l / (t_1 - t_0), \quad (4)$$

式中: l 为钢绞线长度, m; t_0 为 L 首波峰值对应的时间, μs ; t_1 为 L 端面回波峰值对应的时间, μs .

不同磨损损伤深度工况下 L 波实际波速及误差见表 2. 由表可见, L 波实际波速随损伤深度增加基本无变化, 且与理论波速误差均在 3% 左右, 表明损伤深度变化对钢绞线中导波传播速度几乎无影响.

表 2 不同损伤深度下 L 波实际波速及误差

编号	$t_0/\mu\text{s}$	$t_1/\mu\text{s}$	$v_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	误差/%
A1	282.8	708.5	4 698.1	3.02
A2	282.9	709.3	4 690.4	2.85
A3	280.3	706.4	4 693.7	2.93
A4	283.2	707.9	4 709.2	3.27
A5	283.6	707.2	4 721.4	3.53

同时计算不同磨损损伤深度下 L 损伤回波的反射系数, 采用 MATLAB 软件对得到的反射系数进行数值拟合, 得到反射系数 C 与损伤深度 x 呈非线性关系, 具体如图 5 所示. 此后可通过反射系数与损伤深度的非线性关系对钢绞线损伤程度进行定量分析.

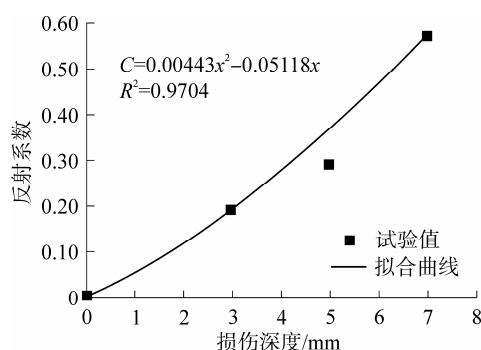


图 5 不同损伤深度下的 L 反射回波反射系数

2.3 磨损损伤位置检测

距离钢绞线发射端 30、40、50、60、70 cm 处用角磨机切割竖向损伤深度为 5 mm、宽 2 mm 的磨损损伤, 具体工况见表 3. 由于构件中损伤位置的不同, 时域图中出现的损伤反射回波位置也会出现变化, 因此需进一步对超声导波的传播路径进

行研究. 主要存在 2 条传播路径: (1) 超声导波从发射端传播至缺陷损伤处, 部分导波被反射回发射端, 继续反射后到达接收端被换能器接收, 称为损伤前反射回波(损伤回波 1); (2) 其余未受缺陷损伤影响的超声导波则直接到达接收端, 再回到缺陷损伤处后, 经反射回到接收端面被换能器接收, 称为损伤后反射回波(损伤回波 2). 超声导波在钢绞线缺陷损伤状态下的传播路径如图 6 所示.

表 3 磨损损伤位置试验分组

编号	损伤位置/cm	损伤深度/mm	损伤宽度/mm
B1	30	5	2
B2	40	5	2
B3	50	5	2
B4	60	5	2
B5	70	5	2

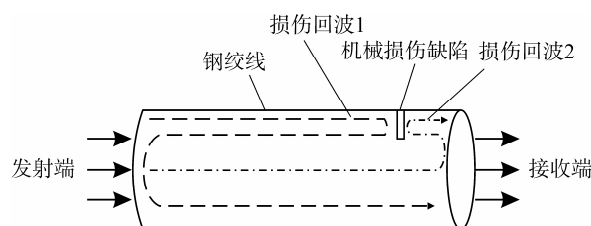


图 6 钢绞线缺陷损伤下的超声波传播路径

对各工况的时域图进行分析, 结果如图 7 所示. 通过超声导波传播路径的研究可以发现损伤位置在中心对称情况下, 各波波形相似, 且损伤前反射回波与损伤后反射回波在时域图中出现的位置会发生对调. 以 B1 与 B5 工况为例, B1 工况下损伤回波 1 和 2 的理论传播距离分别为 160 cm 与 240 cm, 而 B5 工况下损伤回波 1 和 2 的理论传播距离分别为 240 cm 与 160 cm.

为研究不同损伤位置下导波传播距离的变化, 通过导波实际波速计算导波实际传播距离, 并与理论传播路径 L_t (图 6) 进行对比. 计算方法如下:

$$L_s = v_L (t_3 - t_0) + l, \quad (5)$$

式中: L_s 为实际传播距离, cm; t_3 为损伤回波出现的时间, μs .

考虑到左侧最先出现的损伤反射回波受其他波的影响最小, 按照式(5)对不同损伤位置工况的左侧反射回波的实际传播路径进行计算, 结果见表 4. 由表 4 数据可见, 损伤反射回波的实际传播距离与理论传播距离基本吻合, 误差在 4.5% 以内.

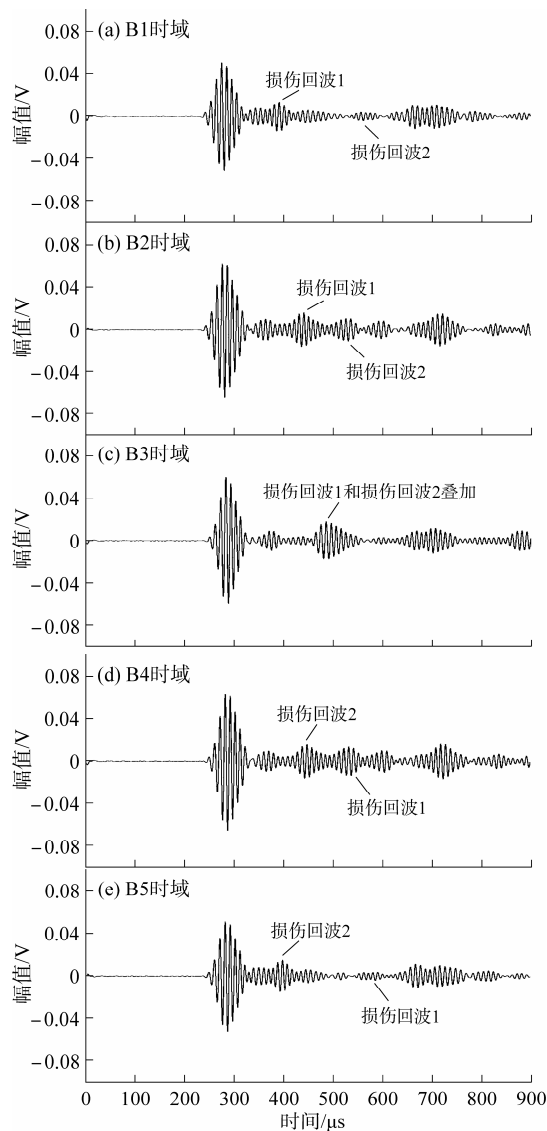


图 7 不同损伤位置下的时域图

表 4 不同损伤位置下左侧损伤回波传播状态

编号	$t_0/\mu\text{s}$	$t_3/\mu\text{s}$	$v_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	L_l/cm	L_s/cm	误差/%
B1	274.9	391.2	4 585.1	160	153.32	4.18
B2	275.6	441.3	4 578.8	180	175.87	2.29
B3	283.2	487.0	4 693.7	200	195.66	2.17
B4	282.4	448.0	4 577.7	180	175.81	2.33
B5	280.9	396.7	4 586.0	160	153.11	4.31

考虑到损伤位置在钢绞线中点对称情况下的损伤回波 1 和 2 波形相似, 因此无法准确判断损伤位置靠近哪端. 所以选择时域图中左侧 L 损伤反射回波进行分析, 计算得到其反射系数(图 8). 由图 8 可知, 对称情况下损伤位置距离接收端较近的反射系数比距离接收端较远的更大. 因此实际在判

断钢绞线损伤位置时, 当测量 1 次信号后, 需将发射端与接收端对调后再测 1 次, 通过比较左侧 L 损伤回波的反射系数大小并结合超声导波传播距离来判断具体的损伤位置, 计算公式如下:

$$S = \begin{cases} (L_s - l) / 2, & C_1 > C_2, \\ l - (L_s - l) / 2, & C_1 < C_2, \end{cases} \quad (6)$$

式中: S 为钢绞线损伤位置距离信号发射端的距离; C_1 为第 1 次测得的左侧 L 损伤回波对应反射系数; C_2 为对调接收端与发射端后测得的左侧 L 损伤回波对应反射系数.

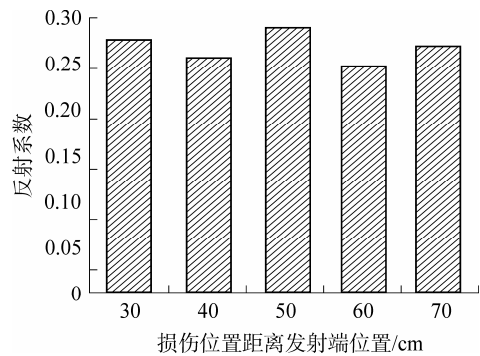


图 8 钢绞线中点对称下左侧损伤反射系数

2.4 断丝损伤根数检测

对距离钢绞线发射端 50 cm 处的外围钢丝用角磨机进行切断处理, 对不同断丝数的钢绞线进行编号, 具体工况见表 5.

表 5 断丝损伤根数试验分组

编号	断丝数/根	损伤位置/cm	损伤宽度/mm
C1	1	50	2
C2	2	50	2
C3	3	50	2
C4	4	50	2
C5	5	50	2
C6	6	50	2

选取有代表性的断丝损伤工况 C1、C3、C6, 得到相应时域图如图 9 所示. 对各工况的 L 首波与 L 损伤回波幅值进行统计, 结果如图 10 所示. 由于断丝根数的增加导致一部分导波按照损伤回波传播路径传播, 而另一部分则继续在断丝中来回传播. 因此由图 10 可见, 随着断丝数的增加, L 首波幅值不断减少, 下降幅度非常明显, 且与损伤深度规律一致; L 损伤回波的幅值同样呈不断下降趋势, 而与磨损损伤深度试验中呈上升趋势相反.

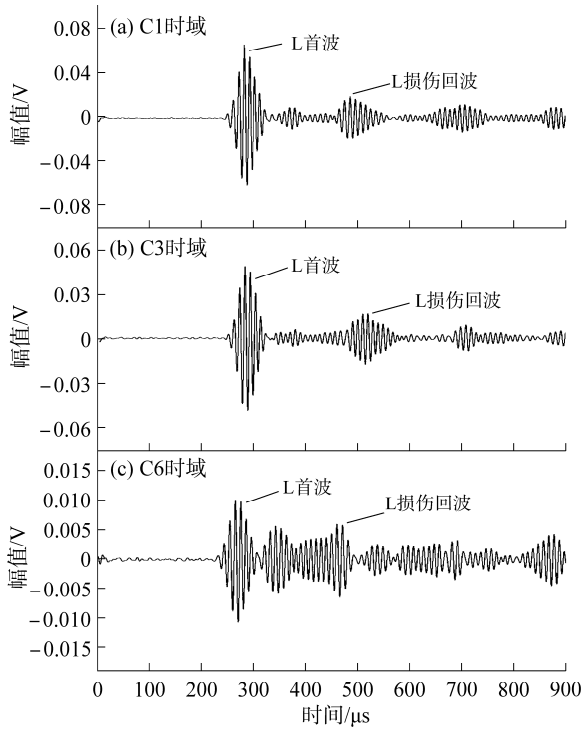


图9 钢绞线不同断丝数下时域图

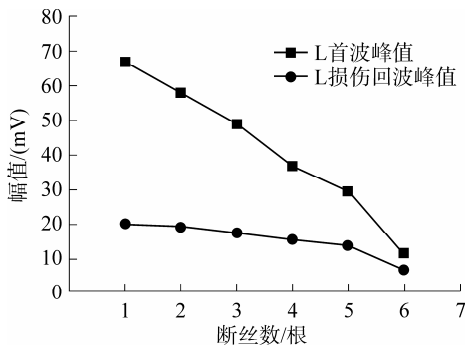


图10 钢绞线不同断丝数下各波幅值变化

同样计算不同断丝损伤根数下 L 损伤回波的反射系数, 采用 MATLAB 软件对反射系数进行数值拟合, 得到反射系数 C 与损伤深度 x 呈非线性关系, 具体如图 11 所示。

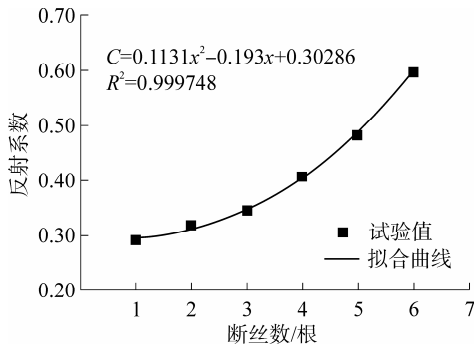
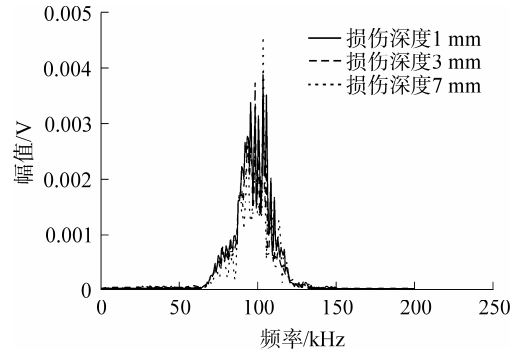


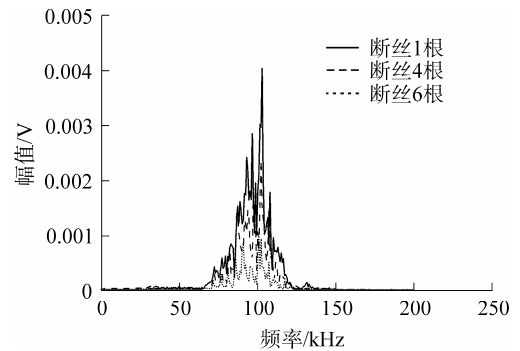
图11 钢绞线不同断丝数下的反射系数

2.5 基于傅里叶变换的频谱分析

取上述磨损损伤与断丝损伤试验工况的原始时域信号进行傅里叶变换, 得到对应的频域图, 对钢绞线不同磨损损伤深度与断丝损伤根数下频域图中信号频率的幅值变化进行分析, 进一步区分不同类型的损伤. 选取部分工况的频域图进行分析, 具体如图 12 所示。



(a) 钢绞线不同磨损损伤深度频域图



(b) 钢绞线不同断丝损伤根数频域图

图12 钢绞线不同损伤类型工况下频域图

由图 12 可知, 各工况的超声波信号主要频域大致分布在 70~125 kHz. 在不同磨损损伤深度下, 整体频率的幅值衰减不明显, 且 100 kHz 主频率的幅值都高于 1 mV. 在不同断丝损伤根数下, 整体频率的幅值衰减十分明显, 且 100 kHz 主频率的幅值一直处于 1 mV 以下. 针对 100 kHz 和 95~105 kHz 频率段内幅值的异常变化, 提出相对系数 γ 作为识别磨损与断丝损伤类型的方式, 定义如下:

$$\gamma = A / \bar{A}, \quad (7)$$

式中: A 为导波信号中心频率 100 kHz 的幅值; $\bar{A}$ 为 95~105 kHz 频率段内的平均幅值。

对磨损损伤与断丝损伤工况的相对系数进行计算, 结果见表 6. 通过计算发现磨损工况下的相对系数一直大于 70%, 而断丝损伤工况的相对系

数一直小于 55%. 因此根据以上特点, 依据傅里叶变换的频谱分析可以简单区分钢绞线不同损伤类型, 再通过各自损伤类型的反射系数能更精准地判断钢绞线的损伤状态.

表 6 各损伤工况的相对系数

编号	$\bar{A}/\text{mV}$	A/mV	相对系数/%
A1	2.46	1.92	78.05
A2	2.41	1.74	72.20
A3	2.16	1.68	77.78
A4	1.84	1.54	83.70
A5	1.64	1.35	82.32
C1	1.92	0.99	51.56
C2	1.80	0.94	52.22
C3	1.46	0.75	51.37
C4	1.17	0.35	29.91
C5	0.92	0.28	30.43
C6	0.41	0.10	24.40

3 超声导波传播机理的数值模拟研究

3.1 有限元建模

采用 ABAQUS 瞬态动力学分析模块建立钢绞线有限元模型, 将钢绞线简化为圆直杆进行建模, 模型长 1 m, 直径 15.2 mm. 将钢绞线设为弹性材料, 钢绞线本构模型弹性杨氏模量取 195 GPa, 泊松比取 0.3, 密度取 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

损伤缺陷选择竖向切割方式, 采用 8 节点固态六面体单元 C3D8R 对整体模型采用 SWEEP 扫略方式进行网格划分; 划分网格时, 由于一个波长内包含 10~20 个节点时, 有限元模拟结果才能够保证较高精度, 因此单元长度设定为 $i/20\sim i/10$, 通过波速与频率关系计算导波波长 $i=4560\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ kHz}=0.0456\text{ m}=45.6\text{ mm}$. 故选择每 2.5 mm 划分 1 个单元. 结构有限元模型及网格划分如图 13 所示.

加载分 2 个步骤进行: (1)选择与试验相同的激励信号作为瞬时位移载荷, 幅值为 $\pm 1\text{ V}$, 对钢绞线左端面所有节点施加 z 方向(轴向)的瞬时位移载荷; (2)考虑到导波主要沿 z 方向运动, 将模型中心轴向节点的 3 个旋转自由度和 x 、 y 轴的自由度进行限制作为边界条件, 位移载荷仅沿 z 轴的轴向方向左右移动, 具体如图 14 所示.

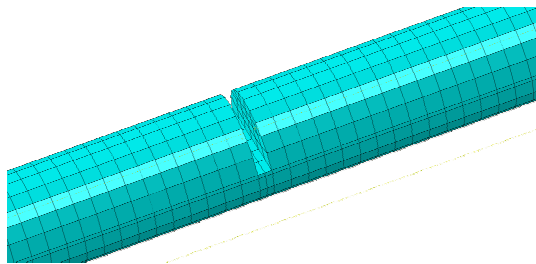


图 13 有限元模型(局部损伤)

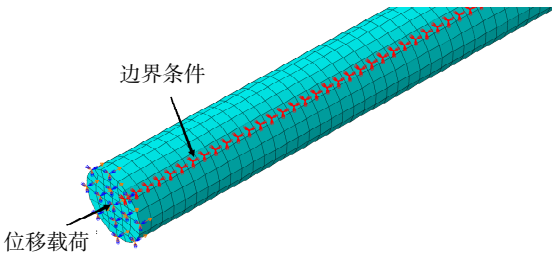


图 14 施加载荷与边界条件

为研究超声导波在钢绞线中的能量传播机制, 以及验证判断损伤位置与损伤程度的方法, 选择不同深度与位置的磨损损伤试验工况进行数值模拟研究, 具体工况见表 7.

表 7 有限元模拟损伤工况分组

编号	损伤位置/cm	损伤深度/mm	损伤宽度/mm
D1	50	0	2
D2	50	1	2
D3	50	3	2
D4	50	5	2
D5	50	7	2
E1	30	5	2
E2	40	5	2
E3	50	5	2
E4	60	5	2
E5	70	5	2

3.2 钢绞线中超声导波能量传播机制

将激励信号从钢绞线左端截面发出, 设置右端截面作为接收端. 以 D4 工况的数值模拟为例, 在 $100\text{ }\mu\text{s}$ 时, 超声导波还未到达损伤位置, 能量分布未出现变化; 在 $150\text{ }\mu\text{s}$ 时, 超声导波传播至损伤位置, 能量分布开始出现变化; 在 $200\text{ }\mu\text{s}$ 时, 能明显观察到由缺陷损伤界面反射产生了传向发射端的导波信号, 而未被损伤界面阻挡的导波信号则直接传至接收端.

因此选取 D1、D3、D5 不同深度损伤下 $200\text{ }\mu\text{s}$

时的导波传播路径云图进行分析. 无损状态下导波直接传至接收端, 但随着损伤深度的增加, 直接传至接收端的导波能量减少, 损伤位置处反射回发射端的能量增大. 直接传至接收端的能量减少, 对应试验中 L 首波随损伤深度的增加而不断减小, 而损伤位置处反射回发射端的能量增大对应试验中 L 损伤回波随损伤深度的增加而增大, 其能量传播路径与图 6 的超声导波传播路径相一致.

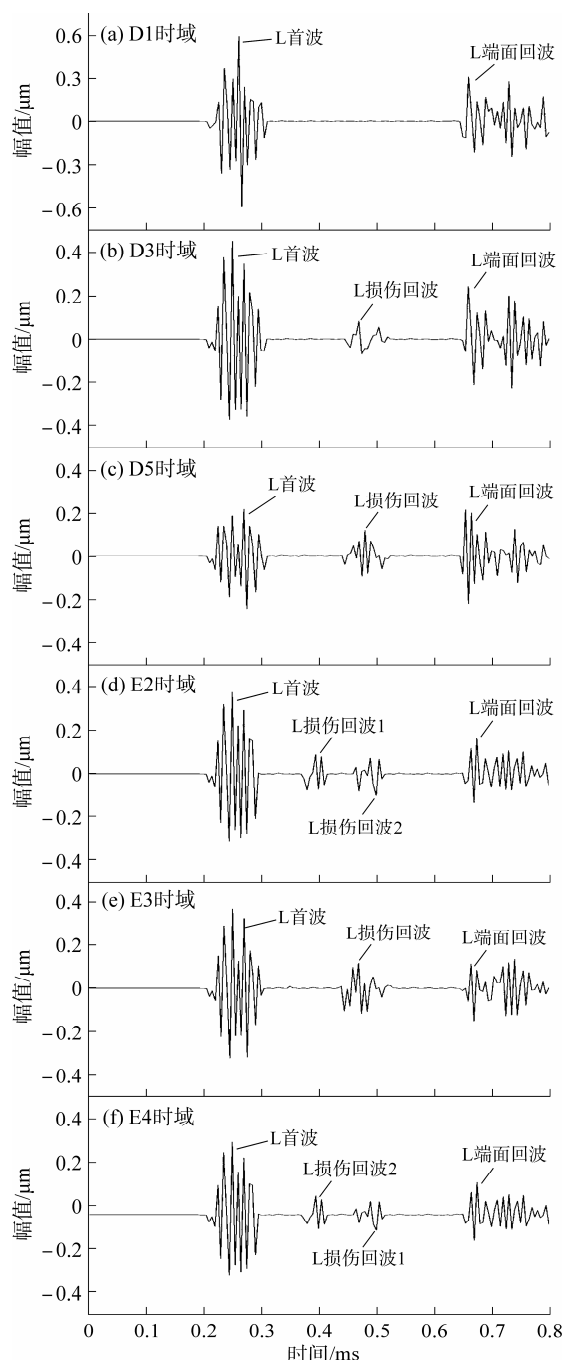


图 15 钢绞线不同损伤深度与位置的时域图

3.3 钢绞线数值模拟结果及分析

将激励信号从钢绞线左端截面发出, 在右侧截面设置感兴趣的节点, 从中提取信号的位移曲线, 并以时间历程输出得到导波信号. 选取部分损伤深度与损伤位置的模拟数据进行处理, 具体如图 15 所示. 从图中可知, 模拟情况下的发射端与接收端完全对称, 避免了 F 波的影响, 图中只存在 L 波. 同时由于模拟比试验少了仪器间导线的传播距离, 因此首波出现时间更早. 但由于 L 端面回波经过来回传播后, 受频散影响会造成 L 端面回波产生一定变形, 因此可主要讨论 L 首波与 L 损伤回波的变化.

3.3.1 钢绞线损伤深度分析

L 首波信号起始接收时间 $t = 214 \mu\text{s}$, 杆长度 $l = 1 \text{ m}$, 根据 $v_L = l/t$ 得到 L 首波的导波传播速度为 $4673 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与理论波速误差为 2.47%, 数据较吻合, 验证了仿真模拟的有效性. 随着缺陷损伤深度增大, 在 $440 \mu\text{s}$ 处出现损伤回波. 根据式(5)得到损伤回波实际传播距离为 205.61 cm, 与理论传播距离 200 cm 的误差为 2.81%, 验证了时域图损伤回波波形数据的准确性.

进一步统计各波响应幅值与钢绞线损伤深度的关系. 由图 16 可见, 模拟结果与试验具有相似的规律, 随着损伤深度的增加, L 首波幅值不断减小, 而 L 损伤回波幅值不断增大.

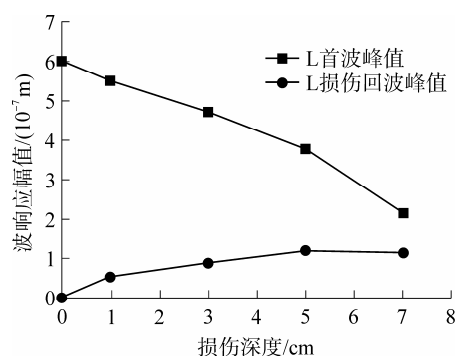


图 16 不同损伤深度下信号幅值变化

同时计算不同损伤深度下反射系数的变化. 由图 17 可见, 当与试验得到的损伤反射系数进行对比后, 可发现模拟值与试验值基本吻合, 验证了通过反射系数判断钢绞线损伤程度的方法.

3.3.2 钢绞线损伤位置分析

经过模拟试验后, 发现 40、60 cm 处的时域图

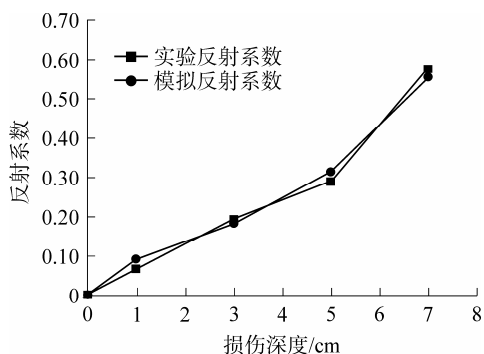


图17 不同损伤深度下反射系数对比图

中损伤回波均出现了2次,与试验现象一致.通过式(5)计算各不同损伤位置工况下左侧损伤回波的实际传播路径,由表8可见,理论传播距离与实际传播距离误差在3%以内,验证了超声导波传播路径理论的正确性.同时不同损伤位置下的左侧损伤回波的反射系数如图18所示,由图可见,模拟结果与损伤位置试验所得到的规律一致,验证了对调发射端与接收端后,通过比较左侧反射系数大小判断具体损伤位置的方法.

表8 数值模拟下左侧损伤回波传播路径

编号	理论距离/cm	实际距离/cm	误差/%
E1	160	164.61	2.88
E2	180	174.77	2.91
E3	200	205.61	2.81
E4	180	175.71	2.38
E5	160	162.15	1.34

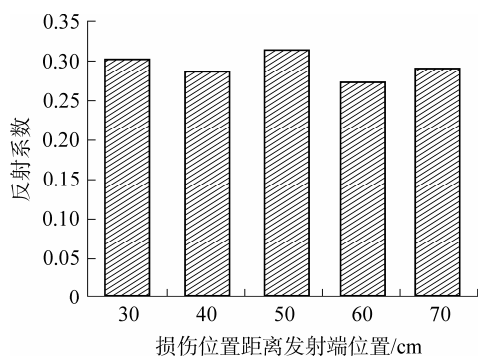


图18 不同损伤位置模拟下左侧损伤反射系数

4 结论

通过试验、频域分析和有限元分析建立钢绞线损伤状态下导波特征与损伤状态间的关系.试验分为磨损损伤深度、位置以及断丝损伤等工况,有

限元模拟损伤深度与位置的工况,得到如下结论:

(1)试验中随着损伤程度的增加,磨损损伤的L损伤回波幅值呈不断上升趋势,而断丝损伤则相反,且通过计算反射系数 C 与损伤程度之间的非线性拟合曲线可对损伤程度进行定量分析;通过对调发射与接收端后对比左侧L损伤回波的反射系数大小,并根据L损伤回波出现的时间与波速可以得到具体损伤位置.

(2)基于傅里叶变换得到频域图,根据图中各频率的信号幅值计算相对系数 γ ,通过 γ 可以准确判断钢绞线的损伤类型.

(3)通过动力有限元分析发现超声导波在钢绞线缺陷损伤下的能量传播机制与超声导波理论传播路径一致,并验证了试验中得到的判断钢绞线损伤程度与位置方法的准确性.

参考文献:

- [1] 陈鑫. 超声导波在钢绞线中传播的时频能量分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [2] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8):1713-1735.
- [3] ZHENG Y X, WANG S Q, ZHANG P, et al. Application of nondestructive testing technology in quality evaluation of plain concrete and RC structures in bridge engineering: a review[J]. Buildings, 2022, 12(6):843.
- [4] 周方俊, 王悦民, 申传俊, 等. 螺旋杆结构中弹性导波频散特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013(1):112-116.
- [5] 王乐. 钢绞线超声频散特性的半解析算法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [6] 李长春. 基于ARX辨识模型的钢绞线张力识别研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [7] 杨金川. 基于支持向量回归的钢绞线应力识别方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [8] 钱骥, 杨金川, 李健斌, 等. 基于导波奇异值向量的钢绞线应力检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 27-35.
- [9] FENG H, LIU X C, WU B, et al. Design of a miniaturised ultrasonic guided wave inspection instrument for steel strand flaw detection[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2017, 59(1):17-23.
- [10] FARHIDZADEH A, SALAMONE S. Reference-free corrosion damage diagnosis in steel strands using guide ultrasonic waves[J]. Ultrasonics, 2015, 57:198-208.

- [11] 周琛, 何建, 胡暮平, 等. 基于 L(0,2)超声导波的管段结构损伤定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 181-191.
- [12] 徐阳, 罗明璋, 杜国锋. 基于压电陶瓷换能器的埋地管道缺陷监测研究[J]. 石油机械, 2022, 50(5):127-133.
- [13] 张清华, 张登科, 崔闯, 等. 基于超声导波的钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹检测方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6):101-112.
- [14] BALTAZAR A, HERNANDEZ-SALAZAR C D, MANZANARES-MARTINEZ B. Study of wave propagation in a multiwire cable to determine structural damage[J]. NDT & E International, 2010, 43(8):726-732.
- [15] YAN Z X, CAI H C, WANG Q M, et al. Finite difference numerical simulation of guided wave propagation in the full grouted rock bolt[J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 54(5):1292-1299.
- [16] BARTOLI I, CASTELLAZZI G, MARZANI A, et al. Prediction of stress waves propagation in progressively loaded seven wire strands[J]. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8345:834505.
- [17] BARTOLI I, MARZANI A, SCALEA F L D, et al. SAFE modeling of waves for the structural health monitoring of prestressing tendons[C]//SPIE Proceedings, Health Monitoring of Structural and Biological Systems. San Diego, California. SPIE, 2007:65320.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] QIAN J, CHEN X, SUN L M, et al. Numerical and experimental identification of seven-wire strand tensions using scale energy entropy spectra of ultrasonic guided waves[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018:6905073.
- [21] 陈鑫, 朱劲松, 钱骥, 等. 基于导波多尺度能量熵的钢绞线张力识别[J]. 振动.测试与诊断, 2020, 40(4): 745-750, 826.

Ultrasonic guided wave detection and numerical simulation of steel strand under damage condition

CHEN Minggang, BU Zhanyu

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to accurately detect the damage condition of steel strand inside bridge cables and other structures, ultrasonic guided wave detection technology is used to test the working conditions of the strand with different damage degree, location and number of broken wires. Firstly, the relationship between damage degree and guided wave characteristics is established, the damage degree is quantitatively analyzed by reflection coefficient C , and the damage location is determined by combining it with the ultrasonic guided wave propagation path. Secondly, the damage type is determined by spectral analysis based on Fourier transform. Finally, the ultrasonic guided wave propagation path and the method of determining damage degree and location are verified by finite element simulation. The results show that, with the increasing of damage degree, the reflection coefficient C shows a nonlinear growth trend, and it is more reflective when the damage location is at the left side near the receiving end under the midpoint symmetry; the relative coefficient γ of the abrasion damage is found to be higher than 70% through the spectral analysis, whereas that of the broken filament damage is lower than 55%; the finite element simulation result basically agrees with the guided wave law obtained from the experiment.

Key words: ultrasonic guided wave; steel strand; spectrum analysis; numerical simulation

(责任编辑 章践立)