

悬索桥缆索钢丝损伤超声导波检测数值模拟

张东波^{1,2}, 王波^{1,2}, 汪正兴^{1,2}, 王梓宇^{1,2}

(1. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北武汉 430034;
2. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北武汉 430034)

摘要: 为了实现对大跨悬索桥缆索钢丝损伤的有效检测, 采用理论分析和数值模拟相结合的方法, 对超声导波无损检测技术进行研究。通过理论求解钢丝中导波的频散曲线, 分析频散特性和波结构, 选取中心频率为 200 kHz 的 L(0,1) 模态进行钢丝断丝损伤检测; 利用有限元软件, 研究了钢丝中导波的频散特性和波结构, 通过二维傅里叶变换技术对钢丝中的低阶导波模态进行识别, 进一步分析了缺陷尺寸和角度对 L(0,1) 模态缺陷反射系数的影响; 最后, 对 L(0,1) 模态在两根钢丝和七根钢丝的断丝处的缺陷回波进行了数值模拟。数值模拟与理论分析结果相吻合, 说明低频 L(0,1) 模态可以有效地对缆索钢丝断丝损伤进行远距离检测。

关键字: 悬索桥; 缆索体系; 超声导波; 频散特性; 数值模拟; 损伤检测

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-04-0395-08

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.007

Numerical simulation of ultrasonic guided wave detection for cable steel wire damage of suspension bridge

ZHANG Dong-bo^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, WANG Zheng-xing^{1,2}, WANG Zi-yu^{1,2}

(1. China Railway Bridge Science Research Institute, Ltd., Wuhan 430034, Hubei, China;
2. State Key Laboratory for Health and Safety of Bridge Structures, Wuhan 430034, Hubei, China)

Abstract: In order to effectively detect cable steel wire damage of long span suspension bridge, the ultrasonic guided wave nondestructive testing technique is investigated by combing theoretical analysis and numerical simulation in this paper. Guided wave dispersion curves in steel wires are obtained by theory to analyze the dispersion characteristics. The L(0, 1) model of the central frequency at 200kHz is selected for the damage detection of steel wires, and the finite element software is used for the comprehensive study of dispersion curves and wave structure. The low order guided wave modes in steel wire are identified by two dimensional Fourier transform technique. Meanwhile, the influence of defect size and angle on the defect reflection coefficient of L(0, 1) mode is analyzed. Finally, the defect signals at the broken positions of two and seven cable steel wires are simulated. The results of the numerical simulation are in good agreement with that of theoretical analysis, which indicates that the low frequency L(0, 1) mode can effectively detect the wire broken damage of cable wires over a long distance.

Key words: suspension bridge; cable wire system; ultrasonic guided wave; dispersion characteristics; numerical simulation; damage detection

0 引言

缆索体系作为大跨度桥梁的主要承载结构, 是悬索桥的生命索, 直接关系到桥梁的安全和使用寿命。由于缆索体系长期承受交变载荷并暴露于自然环境中, 索内钢丝极易发生疲劳、腐蚀、断丝损伤^[1-3]。钢丝损伤使得缆索有效金属承载面积减小, 将严重降低结构的安全性和耐久性, 造成桥梁结构发生灾难性的突发事件, 例如波因特普莱森特

(Point Pleasant)悬索桥倒塌、库尔勒孔雀河大桥垮塌、武夷山桥梁坍塌等事故均与缆索体系失效有关。为了保障大跨度桥梁的安全性与耐久性, 针对缆索钢丝损伤, 特别是缆索内部钢丝损伤, 急需一种有效的无损检测方式。常用的缆索检测技术主要有: 声发射法、射线检测法、漏磁检测法和超声导波法等^[4]。声发射技术可以实现动态实时监测, 但检测精度低; 射线技术可检测缆索自由部分和锚固区钢丝的缺陷, 但检测效率低、成本高、存在辐射污染; 漏磁技术可检测缆索自由部分的外围钢丝缺陷, 但无法检测缆索内部钢丝的缺陷。超声导波在波导中传播时, 横截面全部质点均参与振动, 可以远距离检测缆索的内、外部缺陷, 在大跨悬索桥缆

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-12

作者简介: 张东波(1985-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 研究方向为超声无损检测。

通讯作者: 张东波, E-mail: chinamath@163.com

索钢丝损伤检测方面具有广阔的应用前景。

细长圆杆中超声导波的传播规律是研究拉索损伤检测的基础, ROSE 等^[5]首先对圆杆中导波的各种模态进行了理论推导, 求解了频散方程。圆杆中的超声导波在损伤检测方面具有广泛应用。MIJAREZ 等^[6]研究了输电线中超声导波的传播特性, 利用低阶模态对输电线铝丝人工刻槽进行了检测。BENMEDDOUR 等^[7]将有限元和半解析有限元方法相结合, 提出了一种三维混合方法, 分析了钢柱中纵向、扭转和弯曲模态导波在不同深度裂纹缺陷处的反射波和散射波, 为裂纹检测和表征提供了指导。BARTOLI 等^[8]利用半解析有限元法计算了钢丝中导波的频散曲线, 利用三维有限元法研究了低频导波在钢绞线中的传播特性。元军会等^[9]利用有限元方法模拟了低阶纵向导波在钢筋中的传播规律, 对缺陷进行了准确识别与定位。XU 等^[10]通过电磁超声在钢丝中激发 L(0, 1)模态对缆索断丝损伤进行了检测。刘增华等^[11]利用 L(0, 2)模态对钢绞线人工缺陷进行了有效检测, 并通过缺陷回波幅值对缺陷大小进行表征。潘永东等^[12]利用有限元方法研究了 L(0, 6)模态在钢丝中的传播速度, 通过实验对拉索锚固区损伤进行了有效检测。超声导波在钢丝中的传播规律对于大跨悬索桥缆索检测损伤具有重要的指导意义, 但目前关于导波在多根钢丝中传播特性的数值模拟研究的报道还较为少见。

本文通过理论分析和数值模拟相结合的方法研究钢丝中导波模态的传播特性, 分析导波的频散特性和波结构, 旨在选取合适的导波模态进行大跨悬索桥缆索钢丝断丝损伤检测, 并进一步讨论断丝缺陷尺寸和角度对缺陷反射系数的影响。

1 理论分析

大跨悬索桥缆索中弹性波传播特性十分复杂, 其研究基础为单根钢丝中导波的传播特性。单根钢丝可视为细长圆杆, 基于柱坐标系对钢丝中声传播问题进行描述, 如图 1 所示, 其中 z 方向与杆的轴向重合。

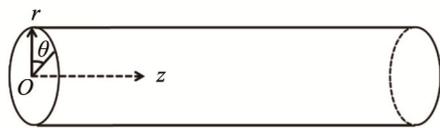


图 1 柱坐标系下实心圆杆模型

Fig.1 Solid circular rod model under cylindrical coordinates

在超声导波检测中, 由于频散效应, 波包随传播距离的增加而逐渐变宽, 幅值逐渐变小, 不利于

缺陷的定位和判断。为了减小频散的影响, 一般采用窄带信号, 并选取频散曲线上较为平坦的部分进行激励。因此, 导波检测中需要解决的关键问题是选取单模态和非频散区域的模态频率。

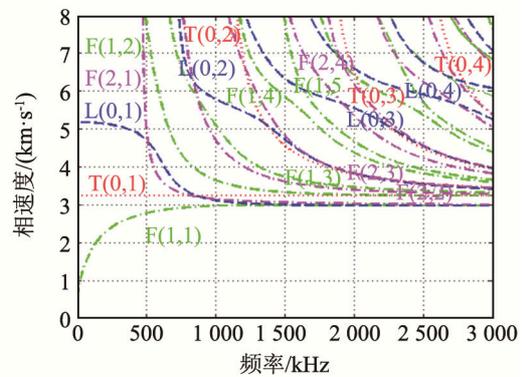
1.1 频散曲线

根据弹性波理论, 杆状结构中存在 3 种模态的导波: 纵向、扭转和弯曲模态。基于柱坐标系下的 Navier 方程, 利用势函数及边界条件, 可以推导出导波的频散方程^[5]。通过迭代算法求解频散方程, 可以计算出杆状结构中不同导波模态的相速度和群速度频散曲线。

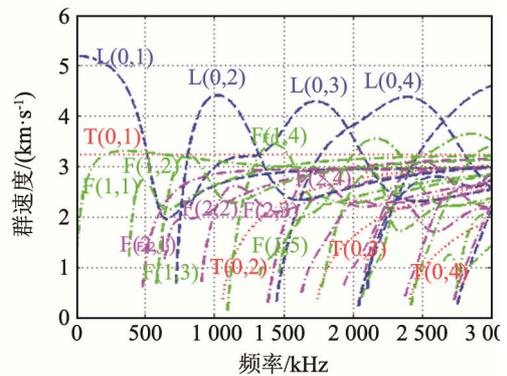
假定钢丝的几何尺寸和材料参数如表 1 所示, 钢丝中导波的相速度和群速度频散曲线分别如图 2(a)和 2(b)所示, 其中蓝色、红色和绿(紫)色曲线分别表示纵向、扭转和弯曲模态。观察图 2 可知, 钢丝中除了 T(0, 1)模态是非频散的, 其他模态均存在频散现象; 不同的导波模态, 频散程度不同; 同一

表 1 钢丝的半径和材料参数
Table 1 The radius and material parameters of steel wire

半径/ mm	密度/ (kg·m ⁻³)	纵波速度 /(m·s ⁻¹)	横波速度 /(m·s ⁻¹)	弹性模 量/MPa	泊松比
2.5	7 800	5 905	3 230	2.09×10 ⁵	0.286



(a) 相速度



(b) 群速度

图 2 钢丝中超声导波频散曲线

Fig.2 Dispersion curves of ultrasonic guided wave in steel wire

导波模态在不同的频率范围，频散程度亦不同。在相当宽的频率范围 20~400 kHz 内，L(0, 1)模态的群速度大于其他模态，也就是说该模态在钢丝中传播时，最先被接收到，易与其他导波模态相分离。同时，L(0, 1)模态在频率范围 20~250 kHz 内，频散效应弱，有利于其波形信号的识别与分析，可用于钢丝周向缺陷的检测。T(0, 1)模态在低频范围 20 kHz~1 MHz 内，回波信号能量集中，可用于钢丝轴向缺陷的检测。

1.2 波结构

杆状结构中导波各模态轴向位移 u_z 的大小与检测周向缺陷的灵敏度成正比。同时，各模态在传播过程中的能量泄漏与杆表面的径向位移 u_r 成反比，因此，研究导波的波结构对于选取合适的导波模态进行损伤检测至关重要。

通过理论计算钢丝中 L(0, 1)模态在不同频率下的波结构，计算结果如图 3 所示。由图 3 可见，轴向位移 u_z 占主导，说明 L(0, 1)模态在钢丝中心位置处的能量集中，对于断丝这类周向缺陷检测灵敏度高。与图 3(b)中 400 kHz 的波结构相比，200 kHz 的轴向位移 u_z 更大，径向位移 u_r 在钢丝表面更小，说明 200 kHz 的 L(0, 1)模态对于周向缺陷更加敏感，且在钢丝中传播时，能量衰减少，传播距离远，因而适合于大跨度悬索桥缆索断丝的远距离检测。

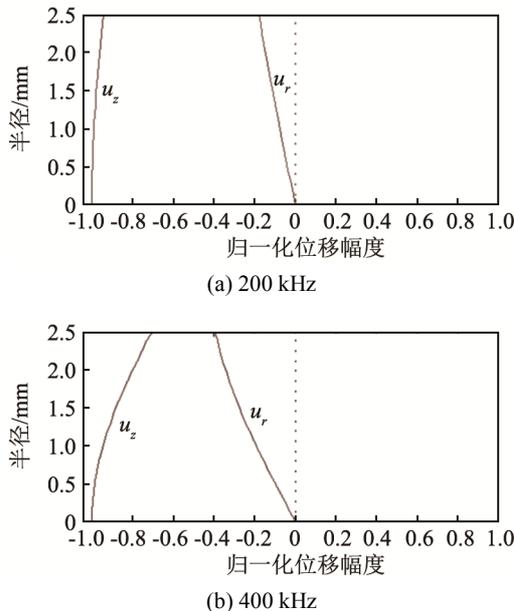


图 3 L(0, 1)模态波结构的理论计算结果
Fig.3 Theoretical calculation results of the wave structure of L(0,1) mode

1.3 激发信号

选用汉宁窗调制的正弦脉冲信号模拟激励源，表达式为

$$g(t)=[1-\cos(\frac{2\pi ft}{n})]\sin(2\pi ft)R(t) \tag{1}$$

其中， f 为激励源的中心频率， n 为周期数， t 为时间， $R(t)$ 是矩形窗函数。为了提高检测能力，避免漏检现象，本文选取周期数 $n=10$ 。

1.4 导波衰减

导波在波导中传播的衰减值计算表达式为

$$\alpha_a = -\frac{20}{L} \lg(\frac{M}{M_0}) \tag{2}$$

其中， M_0 为参考波形的峰峰值， M 为导波在波导中传播一定距离 L 后的峰峰值。

1.5 导波信号

为便于分析，本文忽略钢丝中由材料本身的阻尼效应引起的导波衰减和频散现象，假设钢丝的长度为 2 000 mm。选择中心频率为 200 kHz 和 400 kHz 的信号作为激励源，沿轴向 z 施加在钢丝端部，L(0, 1)模态信号分别如图 4(a)和 4(b)所示，其中 A 是激励信号，C 是 2 000 mm 处导波信号。从图 4 中可以看出，与原始信号 A 相比，200 kHz 的 L(0,1)模态波包 C 的宽度和幅度均无明显变化，而 400 kHz 的波包 C 在 2 000 mm 处的宽度增加，幅值降低，说明 L(0,1)模态在 400 kHz 附近存在严重的频散现象，与频散曲线的结论一致。通过式(2)计算可知，200 kHz 的 L(0,1)模态信号的衰减是 0.13 dB·m⁻¹，400 kHz 信号的衰减是 7.67 dB·m⁻¹。通过互相关声时计算方法^[13]，可得 200 kHz 的 L(0,1)模态的传播速度是 5 042.5 m·s⁻¹，与频散曲线中群速度值 5 048.4 m·s⁻¹ 比较一致。

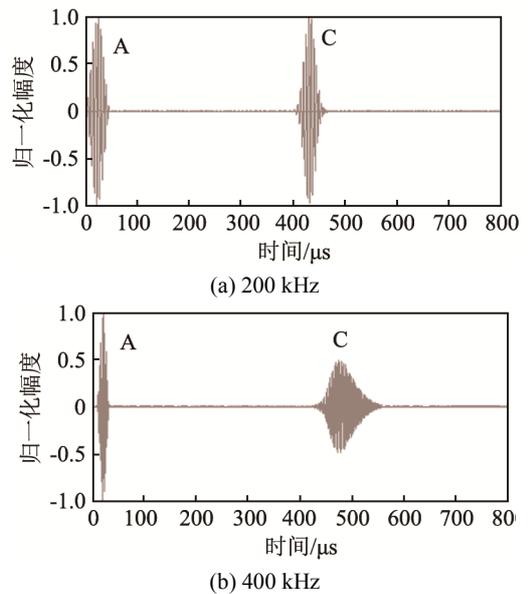


图 4 L(0, 1)模态激发和接收波形的理论计算结果
Fig.4 Theoretical calculation results of the excited and received waveforms of L(0, 1) mode

2 三维数值模拟

三维有限元模型考虑了声场分布的三维特性，可以完整地预测弹性波在计算区域中的传播过程，具有较高的计算精度。

2.1 数值模型

本文在数值模拟中采用三角网格划分计算区域，网格尺寸满足 $\Delta e \leq C_p / 20 f_{max}$ ，其中 C_p 为钢丝中导波的相速度， f_{max} 为激发源的最大频率，同时，在时域中进行数值求解，时间步长满足 $\Delta t \leq 1/20 f_{max}$ ，根据钢丝的长度选择求解的时间域。激励源信号形式如式(1)所示，按不同的方式施加在钢丝端面，可以激发出不同的导波模式。导波信号与接收区域中质点的振动有关，可以通过对相应区域内的位移进行积分来模拟。

2.2 L(0, 1)模态频散特性分析

根据杆状结构的声传播理论，在钢丝的端面沿轴向 z 施加激励可以激发出纵向模态，通过在时域中进行数值模拟，可以计算钢丝中的位移场。

在数值模拟中钢丝的几何尺寸和材料参数如表 1 所示，其中钢丝长度为 1 000 mm。当中心频率为 200 kHz 和 400 kHz 的激励源沿钢丝轴向 z 施加于端面上时，钢丝端面的轴向位移 u_z 随时间的变化关系分别如图 5(a)和 5(c)所示，对应的频谱分别如图 5(b)和 5(d)所示，其中 A 为激励信号，C 为导波信号。图 5(a)中导波信号 C 在钢丝中传播时，与激励信号 A 相比，幅值和宽度均没有明显变化，说明导波信号 C 在 200 kHz 附近频散效应弱，计算可得导波的传播速度为 $5\ 046.7\ m \cdot s^{-1}$ ，与 L(0, 1)模态理论群速度 $5\ 048.5\ m \cdot s^{-1}$ 的相对误差为 0.04%。观察频谱图 5(b)可知，频率成分主要分布在 200 kHz 左右，带宽范围是 [183.7 213.4] kHz，与公式(1)中 200 kHz 激励源的频率范围一致。观察图 5(c)可知，400 kHz 的导波信号 C 在钢丝中传播时，与原始信号 A 相比，其幅值下降，宽度变宽，说明导波信号 C 在 400 kHz 附近频散效应强。通过式(2)计算可知 200 kHz 的 L(0, 1)模态的幅度衰减是 $0.25\ dB \cdot m^{-1}$ ，400 kHz 的 L(0, 1)模态的衰减是 $6.64\ dB \cdot m^{-1}$ ，与图 4 中的理论结果相吻合。

为了对导波模态进行识别，针对不同的激励源施加方式，采用二维傅里叶变换技术对钢丝中沿轴向不同位置处的轴向位移 u_z 进行后处理，得到如图 6 所示的波数-频率图，其中蓝色曲线表示 L(0, 1)

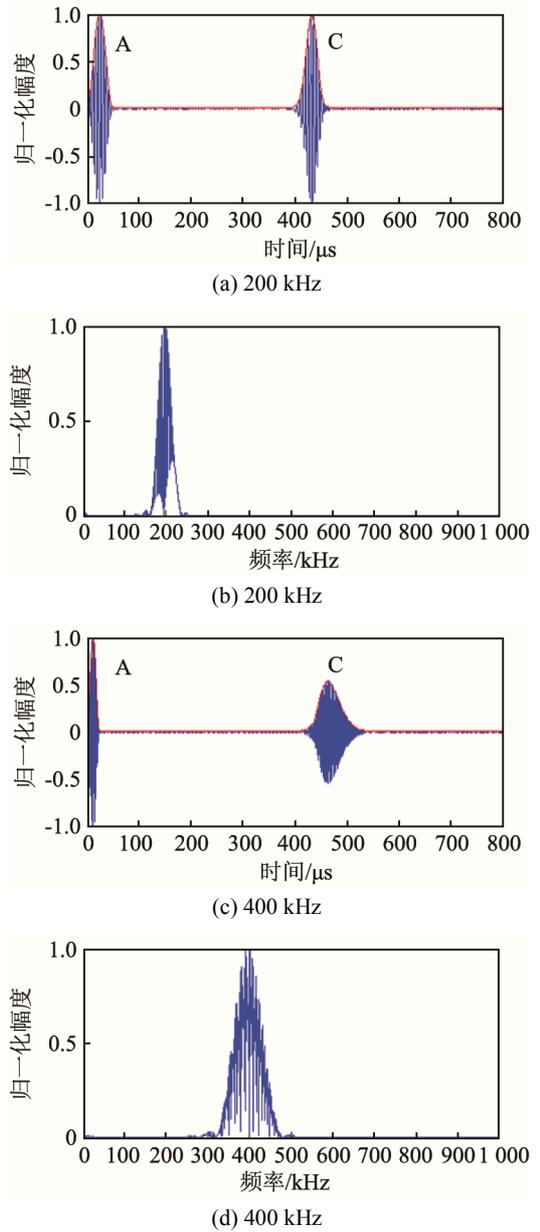


图 5 L(0, 1)模态激发和接收波形的数值模拟结果
Fig.5 Numerical simulation results of the excited and received waveforms of L(0, 1) mode

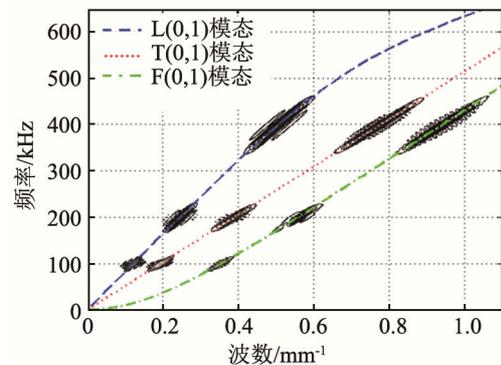


图 6 钢丝中超声导波的波数-频率图
Fig.6 Wavenumber-frequency diagram of ultrasonic guided waves in steel wire

模态的理论频散曲线，黑色区域表示轴向位移 u_z 的二维傅里叶变换结果。观察图 6 中的蓝色曲线可知，100、200 和 400 kHz 导波信号的二维傅里叶变换系数的较大值，即对应的能量，沿 L(0, 1) 模态的频散曲线分布，说明此时钢丝中传播的导波模态为 L(0, 1)。观察图 6 中的红色和绿色曲线可知，钢丝中传播的 T(0, 1) 和 F(1, 1) 模态二维傅里叶变换系数的较大值沿各自的频散曲线分布，验证了所建立导波数值模型的合理性和准确性。

3 单根钢丝损伤检测

当超声导波在钢丝中传播时，遇到缺陷会发生波的反射、透射和模态转换等现象，产生携带缺陷信息的反射波。通过对反射信号的波形、幅值、波包等指标进行分析，可以判断钢丝中是否存在缺陷，以及缺陷存在的位置和大小。

3.1 缺陷定位

本文在数值模拟中利用凹槽来模拟钢丝中的断丝缺陷。图 7(a) 和 7(b) 分别为无缺陷和有缺陷时，L(0, 1) 模态在钢丝中传播时某一时刻的轴向位移场快照，从图中可以观察到，当 L(0, 1) 模态传播至缺陷时，产生了明显的反射波。

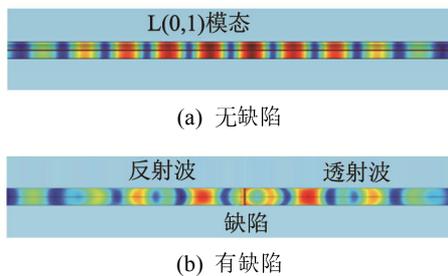


图 7 钢丝中某一时刻 z 方向的位移场 u_z
Fig.7 The displacement field u_z along the z direction at a certain time in steel wire

通过图 8 所示的自发自收方式，利用飞行时间法对钢丝缺陷进行检测。假设钢丝长为 l ，缺陷位置距接收端长 l_1 ，完好钢丝底端一次回波时间为 t ，

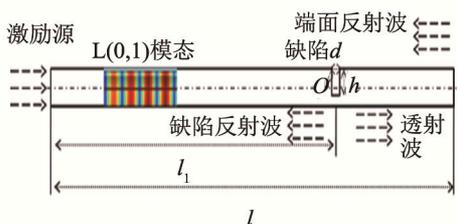


图 8 L(0, 1) 模态在缺陷钢丝中的传播示意图
Fig.8 Schematic diagram of the propagation of L(0, 1) mode in steel wire with defects

则根据 $v=2l/t$ 可计算出导波传播波速 v 。假设有缺陷钢丝中一次缺陷回波时间为 t_1 ，则根据 $l_1=vt_1/2$ 可定位缺陷的位置。

数值模拟中取钢丝半径 $r=2.5$ mm，长度 $l=1000$ mm，缺陷径向深度 $h=1$ mm，轴向宽度 $d=1$ mm，缺陷位于钢丝的中间 $l_1=500$ mm 处，激励源的中心频率为 200 kHz。图 9(a) 是 L(0, 1) 模态在钢丝激励端面的轴向位移响应，其中 A 为激励，C 为导波信号，B 为缺陷反射波，根据其到达时间约为 200.80 μ s 和 L(0, 1) 模态的传播速度，可以定位缺陷所在位置为 502.88 mm，与实际缺陷位置 $l_1=500$ mm 的误差为 0.58%。图 9(b) 和 9(c) 分别是缺陷径向深度 $h=2.5$ 、4 mm 时，L(0, 1) 模态在钢丝激励端面的轴向位移响应，缺陷回波 B 的传播时间、定位的缺陷位置及其与实际位置的误差如表 2 所示。

表 2 基于 L(0, 1) 模态定位钢丝断丝缺陷数值模拟结果
Table 2 Numerical simulation of defect location in steel wire based on L(0, 1) mode

频率/Hz	h/mm	l_1/mm	$t/\mu s$	位置/mm	误差/%
200	1.0	500	200.80	502.88	0.58
	2.5	500	199.70	501.62	0.36
	4.0	500	198.50	501.50	0.30

观察图 9 可知，随着缺陷深度 h 的增加，缺陷反射波 B 的幅值逐渐增加，导波信号 C 的幅值逐渐减小，说明了 L(0, 1) 模态对于缺陷深度较敏感。同时，观察表 2 可知，随着缺陷深度 h 的增加，缺陷位置的测量误差逐渐减小。

3.2 缺陷尺寸识别

定义钢丝中导波的反射系数为 $C_r=A_r/A_0$ ，透射系数为 $C_t=A_t/A_0$ ，其中 A_r 为缺陷回波幅值， A_t 为缺陷处透射波幅值， A_0 为导波的激励波幅值。在不考虑能量耗散的情况下，导波的反射系数和透射系数应满足等式 $C_r^2+C_t^2=1$ ，可以通过反射系数 C_r 的大小判断钢丝中缺陷尺寸，反射系数 C_r 越大，缺陷越明显。

为了分析缺陷轴向宽度 d 与径向深度 h 对反射回波的影响，通过数值模拟计算 200 kHz 时的 L(0, 1) 模态反射系数 C_r 随不同宽度和深度缺陷的变化曲线，结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出，随着缺陷宽度的增加，反射系数先变大后变小；随着缺陷深度的增加，反射系数逐渐增大，并且缺陷越深，反射回波幅值越大。通过对比反射系数随缺陷宽度和深度的变化关系可知，L(0, 1) 模态对缺陷深度更加敏感。

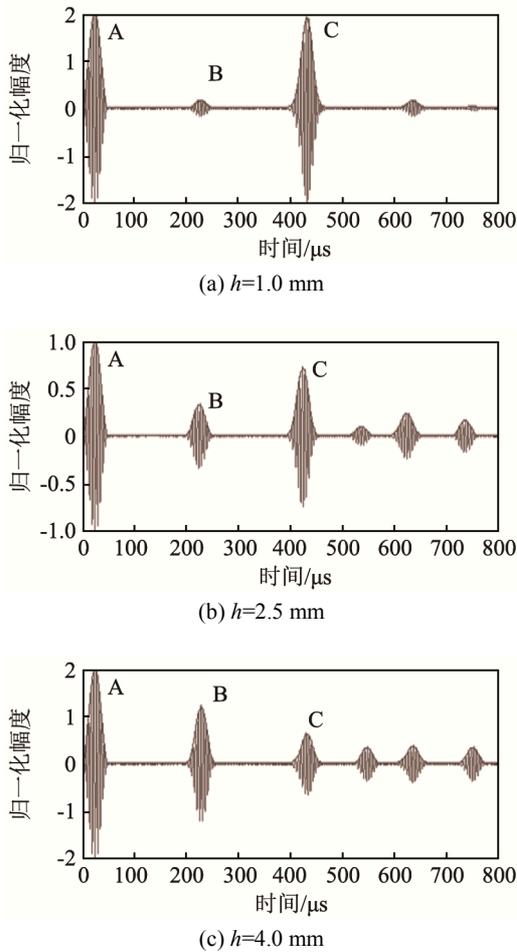


图9 不同缺陷径向深度的L(0,1)模式轴向位移响应
 Fig.9 The axial displacement response of L(0,1) mode for different defect radial depths

从图 10 可以看出,当缺陷轴向宽度 d 为 6 mm 或 7 mm 时,反射系数 C_r 开始衰减,这是由于当 L(0,1)模式传播至缺陷时,缺陷的前后端面将产生不同的导波同时向接收端传播。两列导波传播的路程差为缺陷长度的 2 倍,即与 200 kHz 的 L(0,1)模式的半波长 12.7 mm 相等时,将产生波的干涉现象,使得钢丝质点的振动减弱,反射系数 C_r 减小。

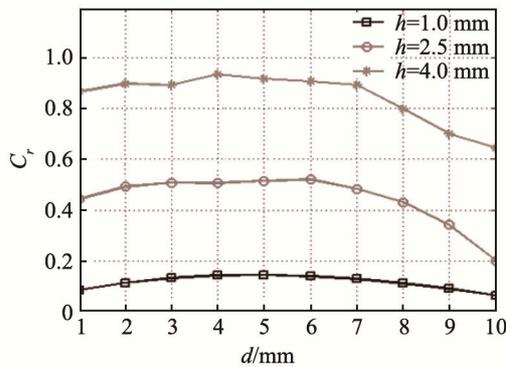


图 10 反射系数 C_r 随缺陷轴向宽度 d 和径向深度 h 变化曲线
 Fig.10 The variation curve of the reflection coefficient C_r with the axial width d and the radial depth h of the defect

3.3 缺陷信号随缺陷角度的变化关系

为了分析缺陷深度 h 与偏转角 θ 对反射回波的影响,通过数值模拟计算 200 kHz 的 L(0,1)模式反射系数 C_r 随不同深度和偏转角缺陷的变化曲线,如图 11 所示,其中缺陷的轴向长度 d 为 1 mm。观察图 11 可知,随着缺陷偏转角从 -30° 增加到 30° ,反射系数先变大后变小;对于同一偏转角,随着缺陷深度的增加,反射系数逐渐增大,并且缺陷越深,反射回波的幅值越大。通过对比反射系数随缺陷深度和偏转角的变化关系可知,L(0,1)模式对于缺陷深度更加敏感。

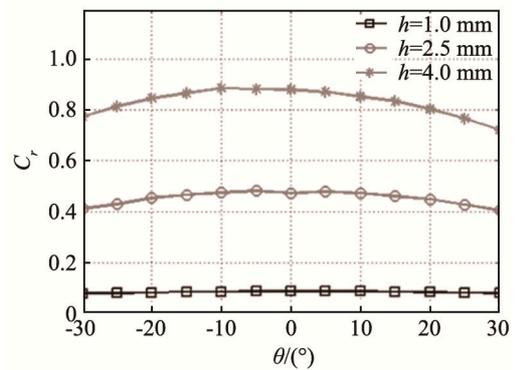


图 11 反射系数 C_r 随缺陷径向深度 h 和偏转角度 θ 变化曲线
 Fig.11 The variation curve of the reflection coefficient C_r with the radial depth h and the deflection angle θ of the defect

4 多根钢丝损伤检测

4.1 两根钢丝

数值模拟中取两根平行钢丝,如图 12(a)所示,其中钢丝半径 r 为 2.5 mm,长度 l 为 500 mm,激励源的中心频率为 200 kHz。在两根钢丝端部沿轴向均施加激励源,在时域中对钢丝位移场进行求解。图 12(a)是导波模式在钢丝激励端面的轴向位移 u_z 响应,其中 A 为激励波,C 为导波信号,根据 C 的到达时间 204.72 μs ,可以计算导波模式的传播速度为 4 884.72 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

取缺陷径向深度 $h=2.5$ mm,轴向宽度 $d=1.0$ mm,缺陷位于一根钢丝的 $l_1=300$ mm 处。图 12(b)是 L(0,1)模式在钢丝激励端面的轴向位移 u_z 随时间的变化关系,其中 B 为缺陷反射波。根据 B 的到达时间 124.38 μs 和 L(0,1)模式的传播速度,可以定位缺陷所在位置为 303.46 mm,与实际缺陷位置 $l_1=300$ mm 的误差为 0.69%。

基于二维傅里叶变换技术对两根钢丝中传播的导波模式进行识别,得到的波数-频率图如图 13 所示,其中蓝色曲线表示单根钢丝中 L(0,1)模式的理

论频散曲线，黑色区域表示两根钢丝中轴向位移 u_z 的二维傅里叶变换结果。观察图 13 可知，二维傅里叶变换系数的较大值，沿 $L(0, 1)$ 模态的频散曲线分布，说明了此时钢丝中传播的导波为 $L(0, 1)$ 模态。

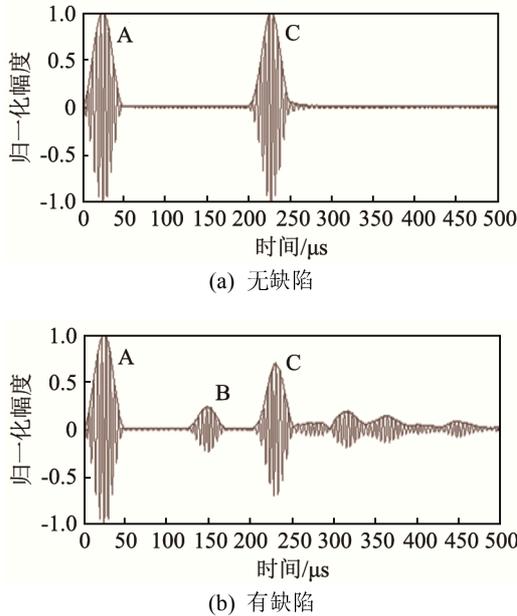


图 12 两根钢丝中有或没有缺陷时的 $L(0, 1)$ 模态轴向位移响应
Fig.12 The axial displacement responses of $L(0, 1)$ mode in the two steel wires with or without defect

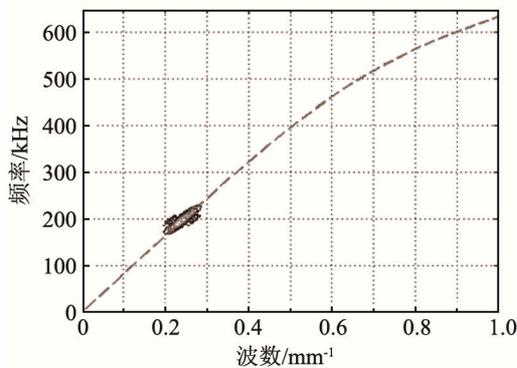


图 13 两根钢丝中 $L(0, 1)$ 模态的波数-频率图
Fig.13 Wavenumber-frequency diagram of $L(0, 1)$ mode in two steel wires

4.2 7 根钢丝

数值模拟中取 7 根平行钢丝，半径 r 为 2.5 mm，长度 l 为 500 mm，激励源的中心频率为 200 kHz。在 7 根钢丝端部沿轴向均施加式(1)所示的激励源，在时域中对钢丝位移场进行求解。图 14(a)是导波模态在钢丝激励端面的轴向位移响应，其中 A 为激励波，C 为导波信号，根据 C 的到达时间 215.68 μs ，可以计算导波模态的传播速度为 $4\,636.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，小于单根钢丝中 $L(0, 1)$ 模态的理论群速度。

取缺陷径向深度 $h=2.5\text{ mm}$ ，轴向宽度 $d=1.0\text{ mm}$ ，缺陷位于中心钢丝 $l_1=300\text{ mm}$ 处。图

14(b)是 $L(0, 1)$ 模态在钢丝激励端面的轴向位移响应，其中 B 为缺陷波。根据 B 的到达时间 130.82 μs 和导波模态的传播速度 $4\,636.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，可以定位缺陷所在位置为 303.27 mm，与实际缺陷位置 $l_1=300\text{ mm}$ 的误差为 1.09%。

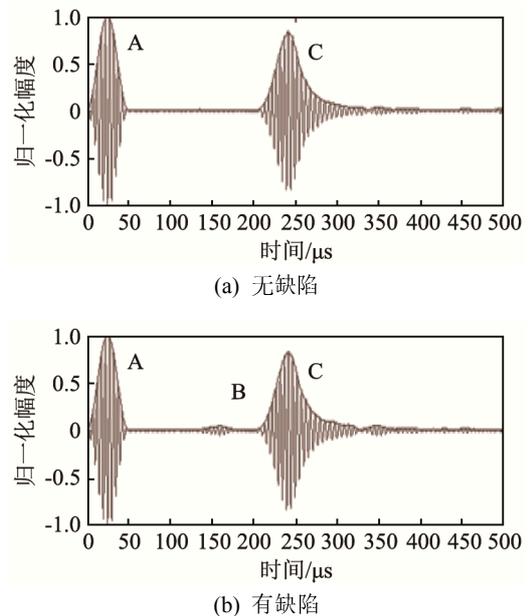


图 14 7 根钢丝中有或没有缺陷时的 $L(0, 1)$ 模态轴向位移响应
Fig.14 The axial displacement response of $L(0, 1)$ mode in the seven steel wires with or without defect

基于二维傅里叶变换技术对 7 根钢丝中传播的导波模态进行模式识别，得到的波数-频率图如图 15 所示，其中蓝色曲线表示单根钢丝中 $L(0, 1)$ 模态的理论频散曲线，黑色区域表示 7 根钢丝中轴向位移 u_z 的二维傅里叶变换结果。观察图 15 可知，二维傅里叶变换系数的较大值，沿 $L(0, 1)$ 模态的频散曲线分布，说明了此时钢丝中传播的导波为 $L(0, 1)$ 模态。

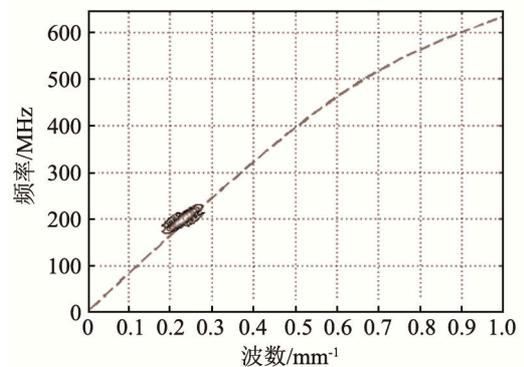


图 15 7 根钢丝中 $L(0, 1)$ 模态的波数-频率图
Fig.15 Wavenumber-frequency diagram of $L(0, 1)$ mode in seven steel wires

取缺陷径向深度 $h=4\text{ mm}$ ，轴向宽度 $d=1\text{ mm}$ ，当缺陷分别位于中心和外围钢丝 $l_1=300\text{ mm}$ 处时，

$L(0, 1)$ 模态在钢丝激励端面的轴向位移响应分别如图 16(a)和 16(b)所示。图 16(a)和 16(b)中 B 到达时间分别为 $130.45 \mu\text{s}$ 和 $131.63 \mu\text{s}$ ，可以定位缺陷所在位置为 302.42 mm 和 305.61 mm ，与实际缺陷位置 $l_1=300 \text{ mm}$ 的误差分别为 0.81% 和 1.67% 。

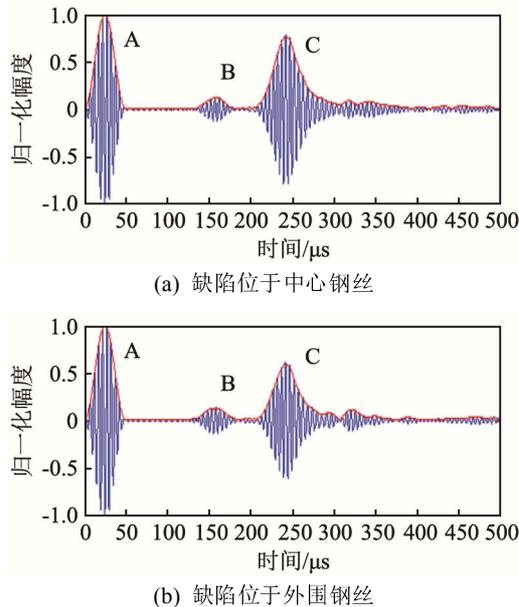


图 16 7 根钢丝中不同缺陷位置的 $L(0, 1)$ 模态轴向位移响应
Fig.16 The axial displacement responses of $L(0, 1)$ mode to different defect positions in seven steel wires

5 结 论

本文利用理论分析和数值模拟研究了钢丝中纵向模态的传播特性和波结构，并选择 $L(0, 1)$ 模态对单根和多根钢丝中的断丝缺陷进行了检测，得出了以下结论：

(1) 通过理论分析和数值模拟求解了单根钢丝中导波的频散曲线和波结构，分析了不同频率 $L(0, 1)$ 模态的传播规律，说明了 200 kHz 的 $L(0, 1)$ 模态的频散效应弱且对周向缺陷敏感，适合用于钢丝断丝损伤的远距离检测。

(2) 利用三维数值模拟研究了单根钢丝中 $L(0, 1)$ 模态与断丝缺陷的作用规律，通过二维傅里叶变换对 $L(0, 1)$ 模态进行了识别，分析了缺陷反射系数随缺陷尺寸和角度的变化规律，说明了缺陷深度对于反射系数的主导作用。

(3) 通过对两根和 7 根钢丝中断丝损伤的精确定位，说明了低频纵向模态可用于大跨悬索桥缆索损伤的远距离检测。

参 考 文 献

[1] 温文峰, 张宇峰, 马爱斌, 等. 悬索桥主缆的腐蚀与防护[J]. 腐蚀

与防护, 2007, **28**(11): 598-601.

WEN Wenfeng, ZHANG Yufeng, MA Aibin, et al. Corrosion and protection of main cables of suspension bridges[J]. Corrosion & Protection, 2007, **28**(11): 598-601.

[2] 叶觉明, 李荣庆. 现代悬索桥主缆防护现状与展望[J]. 桥梁建设, 2009, **5**(6): 67-71.

YE Jueming, LI Rongqing. State-of-the-art and prospecting of main cable protection of modern suspension bridges[J]. Bridge Construction, 2009, **5**(6): 67-71.

[3] 白山云, 陈开利, 陈杰, 等. 公路悬索桥预防性养护技术[J]. 桥梁建设, 2014, **44**(2): 101-106.

BAI Shanyun, CHEN Kaili, CHEN Jie, et al. Preventive maintenance techniques for highway suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2014, **44**(2): 101-106.

[4] 武新军, 贲安然, 徐江. 桥梁缆索金属损伤无损检测方法[J]. 无损检测, 2012, **34**(4): 12.

WU Xinjun, BEN Anran, XU Jiang. Nondestructive testing method for metallic flaws of bridge cables[J]. Nondestructive Testing, 2012, **34**(4): 12.

[5] ROSE J L, 何存富, 吴斌, 等. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

ROSE J L, HE Cunfu, WU Bin, et al. Ultrasonic waves in solid media[M]. Beijing: The Science Press, 2004.

[6] MIJAREZ R, BALTAZAR A. Guided wave propagation study in an ACSR cable with artificial damage[C]//AIP Conference Proceedings, 2013, **1511**(1): 1417-1424.

[7] BENMEDDOUR F, TREYSSÈDE F, LAGUERRE L. Numerical modeling of guided wave interaction with non-axisymmetric cracks in elastic cylinders[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, **48**(5): 764-774.

[8] BARTOLI I, CASTELLAZZI G, MARZANI A, et al. Prediction of stress waves propagation in progressively loaded seven wire strands[J]. The International Society for Optical Engineering, 2012, **8345**(5): 5-12.

[9] 元军会. 钢筋腐蚀损伤超声导波检测技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

YUN Junhui. The steel rebar defect detection by using ultrasonic guided waves[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[10] XU J, WU X, WANG L, et al. Detecting the flaws in prestressing strands using guided waves based on the magnetostrictive effect[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2007, **49**(11): 647-650.

[11] 刘增华, 赵继辰, 吴斌, 等. 高阶纵向超声导波在钢绞线缺陷检测中的应用研究[J]. 工程力学, 2011, **28**(4): 214-220.

LIU Zenghua, ZHAO Jichen, WU Bin, et al. Application study on defect detection in steel strands by using high-order ultrasonic longitudinal guided waves[J]. Engineering Mechanics, 2011, **28**(4): 214-220.

[12] 潘永东, 杨锋, 张东波, 等. 斜拉索锚固区损伤的高阶纵向导波检测研究[J]. 桥梁建设, 2015, **45**(4): 52-57.

PAN Yongdong, YANG Feng, ZHANG Dongbo, et al. Research of technique of high-order longitudinal guided wave detection of damage in stay cable anchorage zone[J]. Bridge Construction, 2015, **45**(4): 52-57.

[13] 颜华, 彭珍. 基于互相关和插值运算的声波飞行时间测量[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, **30**(6): 662-666.

YAN Hua, PENG Zhen. Acoustic travel-time measurement based on cross-correlation and interpolation[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, **30**(6): 662-666.