

基于非线性超声理论的销轴连接承载状态监测*

霍林生, 张晨晨

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 大连, 116024)

摘要 针对传统线性超声方法对于界面接触状态的微小改变不敏感的问题,提出了基于非线性超声理论的销轴连接承载状态监测方法。首先,分别在销轴和耳板上各安装 1 个压电陶瓷片用于发射和接收超声波信号,利用非线性超声理论分析接收信号的 2 次谐波来识别销轴连接的荷载;其次,对超声波在销轴和耳板间的传播机理进行理论研究,基于粗糙界面的接触声学非线性原理建立了线性和非线性特征参数与界面压力之间的关系;最后,通过销轴连接装置的试验研究,对理论分析结果进行验证。结果表明,线性特征参数无法识别出销轴连接状态的微小改变,而基于 2 次谐波的非线性特征参数能有效识别全部试验荷载工况下销轴连接状态的变化。

关键词 销轴;监测;压电陶瓷;非线性超声;2 次谐波

中图分类号 TH707;TU391;TP212.9

引言

销轴连接是土木工程领域中支座、支撑、梁柱及拉索等部位的常用连接方式,被越来越多地使用于大跨度屋盖结构、超高层建筑及桥梁等大型基础设施中^[1]。销轴连接是结构传递内力的重要部位,其过度承载或损坏将直接影响到整体结构的安全性。在结构的全寿命使用过程中,保证销轴连接的可靠使用能有效降低结构的安全事故风险,因此实时监测销轴连接的承载状态对于保证连接的可靠性以及评估整体结构的健康状态至关重要^[2]。由于超声波在界面的传播特性,如反射、透射和波形畸变等现象,使得超声波技术被广泛运用在结构界面的检测和监测中^[3]。例如,通过分析螺栓连接界面超声透射波幅值或能量的改变,可以识别出螺栓预紧力的变化^[4]。在钢轨中利用超声波的反射波幅值可对轮轨的接触状态进行动态监测^[5]。压电陶瓷具有成本低、安装方便和响应频带宽等优点,能同时作为发射和接收超声波的致动器和传感器^[6],因此采用压电陶瓷可以更便于实现基于超声理论的结构健康监测。文献[7-8]利用压电陶瓷提出了桥梁拉索中销轴连接状态的实时监测方法。

上述基于超声波的界面监测方法都是通过分析超声波在界面传播时透射和反射的线性特征来识别界面状态,然而当结构界面状态只发生微小改变时,

线性特征的变化并不显著^[9],这使得线性超声方法存在局限性。与线性超声方法相比,非线性超声方法对结构微小改变更加敏感^[9]。接触界面和超声波的相互作用会使传播信号的波形发生畸变,在频谱上表现出非线性特征,比如高次谐波、亚谐波和边带^[10]。界面产生非线性效应的根源是接触声学非线性(contact acoustic nonlinearity,简称 CAN)^[11],包括粗糙接触界面、裂纹和缺陷等在内的非完整界面中都存在非线性效应。螺栓连接涉及典型的接触界面问题,比如将亚谐波^[12]、高次谐波^[13]和边带^[14]作为非线性特征,利用非线性超声方法实现对螺栓松动的监测。Nucera 等^[15]采用基于 2 次谐波的非线性超声方法监测预应力混凝土结构中钢绞线的载荷水平。此外,基于 2 次谐波的非线性超声方法还被用于疲劳裂纹^[16-17]、腐蚀^[18]等损伤的监测。

笔者提出基于 2 次谐波的非线性超声方法用于监测销轴连接的承载状态。根据超声波在销轴和耳板间的传播机理,基于粗糙界面的接触声学非线性原理建立了线性和非线性特征参数与界面压力之间的关系。试验以销轴连接装置为对象,在销轴和耳板表面分别粘贴压电陶瓷片用于发射和接收超声波。在不同荷载工况下,比较了利用线性和非线性特征参数识别销轴连接荷载的试验结果,验证了非线性超声方法对界面状态(界面压力较大时)的微小改变更加敏感。

* 国家自然科学基金资助项目(52178274)

收稿日期:2021-01-05;修回日期:2021-05-10

1 超声波在销轴连接中的传播

销轴和耳板销孔之间界面接触状态的改变会影响超声波在界面的传播。销轴连接监测原理如图1所示,分别在销轴和耳板上安装1个压电陶瓷片(Pb-Zr-Ti,简称PZT)来实现超声波的发射和接收,通过分析接收到的超声透射波信号的特征参数来识别销轴连接的荷载。

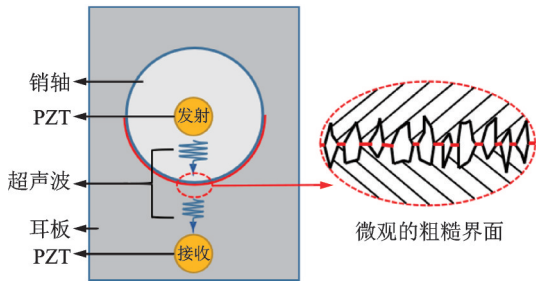


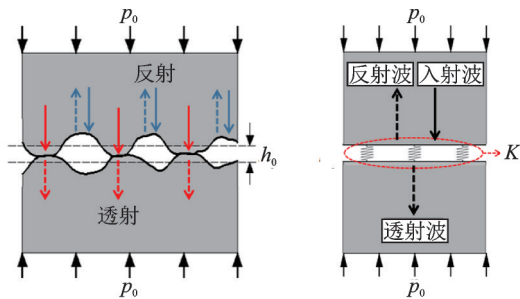
图1 销轴连接监测原理

Fig.1 Monitoring principle of pin connection

1.1 超声波在粗糙接触界面的传播机理

任何表面都不是绝对平坦光滑的,在微观层面上总是存在一定的粗糙度。图1中的局部放大图显示了销轴与销孔之间微观的粗糙界面。在外界压力作用下,粗糙表面上只有凸起物是相互接触的^[5],其真实接触面积随压力增大而增大。

超声波在粗糙接触界面的传播机理及简化模型如图2所示。从微观层面来看,超声波遇到界面的完全接触区时主要发生透射,而遇到气隙时主要发生反射。在外界荷载作用下初始的界面压力为 p_0 ,界面间距为 h_0 (两粗糙表面平均线间的距离)。根据超声波传播机理,当 p_0 变化时,透射波会因界面接触状态的变化而发生变化。为简化分析,当超声波



(a) 超声传播机理 (b) 界面弹簧模型
(a) Ultrasound propagation mechanism (b) Spring model of interface

图2 超声波在粗糙接触界面的传播机理及简化模型

Fig.2 The mechanism and simplified model of ultrasonic propagation at the rough contact interface

波长远大于气隙尺寸时,可将接触界面等效为分布弹簧,此时超声波的透射和反射将取决于界面的接触刚度 K (弹簧刚度),即界面弹簧模型^[19],如图2(b)所示。 K 随界面压力的改变而变化,因此通过分析超声波在界面传播时透射波和反射波的变化可以识别界面的压力。

1.2 接触声学非线性原理

当较高振幅的超声波在粗糙接触界面传播时,会引起界面发生周期性的压缩和拉伸,同时超声波也会因为与界面的相互作用而发生波形畸变,从而导致接触声学的非线性特性。

在超声波扰动下,界面压力为 p ,界面间距为 h ,定义两者存在函数关系 $p = p(h)$ 。假设只受外荷载作用而无超声扰动时的初始界面压力为 p_0 ,初始界面间距为 h_0 ,则 p 的近似值可表示为 $p(h)$ 在 h_0 处的泰勒二阶展开^[20],即

$$p(h) = p_0 - K_1(h - h_0) + K_2(h - h_0)^2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} K_1 = -\left. \frac{dp}{dh} \right|_{h=h_0} \\ K_2 = \left. \frac{1}{2} \frac{d^2p}{dh^2} \right|_{h=h_0} \end{cases} \quad (2)$$

其中: K_1 为线性接触刚度; K_2 为非线性接触刚度。

根据超声波在粗糙界面的传播机理,超声透射波的变化取决于界面的接触刚度。根据界面弹簧模型和接触声学非线性原理建立一维超声波在粗糙接触界面的传播模型,如图3所示。一维纵波在介质中沿 x 轴方向传播, X_- 和 X_+ 代表2个表面的位置。

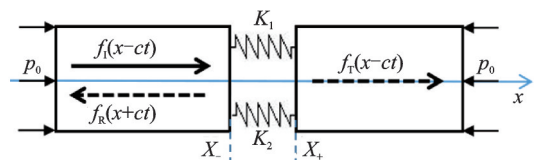


图3 一维超声波在粗糙接触界面的传播

Fig.3 One-dimensional ultrasonic wave propagates at the rough contact interface

一维超声入射波在粗糙接触界面发生反射和透射,以 $f_i(x - ct)$, $f_r(x + ct)$, $f_t(x - ct)$ 分别表示入射波、反射波和透射波,其中: t 为时间; c 为波速。对于单一频率的正弦入射波,有

$$f_i(x - ct) = A \cos\left\{ \frac{\omega}{c} (x - X_- - ct) \right\} \quad (3)$$

其中: ω 为圆频率; A 为入射波幅值。

利用微扰法求解相关波动方程可得到透射波的

解析解^[20]为

$$f_T(x-ct) = K_2 A^2 / \left\{ K_1 \left[1 + 4K_1^2 / (\rho c \omega)^2 \right] \right\} + \frac{2K_1 A / (\rho c \omega)}{\sqrt{1 + 4K_1^2 / (\rho c \omega)^2}} \cos \left\{ \omega t - \frac{\omega}{c} (x - X_+) - \delta_1 \right\} - \frac{K_2 A^2 / (\rho c \omega)}{\left\{ 1 + 4K_1^2 / (\rho c \omega)^2 \right\} \sqrt{1 + K_1^2 / (\rho c \omega)^2}} \times \sin \left\{ 2\omega t - \frac{2\omega}{c} (x - X_+) - 2\delta_1 + \delta_2 \right\} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a = 2K_1 / \rho c \\ \delta_1 = \arctan(\omega / a) \\ \delta_2 = \arctan(a / 2\omega) \end{cases} \quad (5)$$

其中: ρ 为介质密度。

由式(4)可知,透射波中包含了3项:①其值与自变量无关的常数项(直流分量);②主要包含频率为 ω 的正弦函数(基波分量);③主要包含频率为 2ω 的正弦函数(2次谐波分量)。不同于入射波的单一频率,透射波中的2次谐波证明了粗糙接触界面中的非线性效应。分别将基波分量和2次谐波分量的最大幅值作为基波幅值 A_1 和2次谐波幅值 A_2 ,有

$$A_1 = (2K_1 A / (\rho c \omega)) / \sqrt{1 + 4K_1^2 / (\rho c \omega)^2} \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{K_2 A^2 / (\rho c \omega)}{\left\{ 1 + 4K_1^2 / (\rho c \omega)^2 \right\} \sqrt{1 + K_1^2 / (\rho c \omega)^2}} \quad (7)$$

基波幅值 A_1 仅取决于线性接触刚度 K_1 ,是超声波的线性特征;2次谐波幅值 A_2 还取决于非线性接触刚度 K_2 ,是超声波的非线性特征。

1.3 线性特征参数与非线性特征参数

基波幅值 A_1 可以作为线性特征参数。本研究基于2次谐波定义 α 为非线性特征参数,有

$$\alpha = 1/\beta = A_1^2 / A_2 \quad (8)$$

非线性系数 β 在超声界面检测中经常被用于评价结构非线性损伤^[3],为便于分析,定义非线性特征参数 α 取为 β 的倒数。线性接触刚度 K_1 和非线性接触刚度 K_2 与 p_0 存在近似的幂律关系式^[21],即

$$\begin{cases} K_1(p_0) = Cp_0^m \\ K_2(p_0) = 0.5mC^2 p_0^{2m-1} \end{cases} \quad (9)$$

其中: C, m 为常数,取决于界面的接触特性。

将式(9)代入式(6)~(8),可以得到

$$A_1 = \frac{2Cp_0^m A / (\rho c \omega)}{\sqrt{1 + 4C^2 p_0^{2m} / (\rho c \omega)^2}} \quad (10)$$

$$\alpha = 2p_0 \sqrt{1 + C^2 p_0^{2m} / (\rho c \omega)^2} / (mC\rho c \omega) \quad (11)$$

式(10)、式(11)表示了 A_1 和 α 与界面压力 p_0 的关系。压电传感器的工作原理是将介质的变形转换成电压信号,故两者数值并不相等,而是成一定的比例关系,其取决于波的频率、传感器自身性质等因素。因此,采用压电传感器接收的透射波信号满足

$$\begin{cases} \bar{A}_1 = S_1 A_1 \\ \bar{A}_2 = S_2 A_2 \\ \bar{\alpha} = \bar{A}_1^2 / \bar{A}_2 = \alpha S_1^2 / S_2 \end{cases} \quad (12)$$

其中: \bar{A}_1, \bar{A}_2 和 $\bar{\alpha}$ 分别为接收信号的基波幅值、2次谐波幅值和非线性特征参数; S_1 和 S_2 为不同频率的介质变形与电压信号的比例关系。

通过测量接收信号的变化可得到超声波的相对变化,即接收信号的特征可反映出超声透射波的特征。在测量过程中,除界面压力 p_0 外其余参数保持不变。针对式(10)和式(11),令 k_m 为

$$k_m = (\rho c \omega / C)^{1/m} \quad (13)$$

将 k_m 代入式(10)~(12),得到

$$\bar{A}_1 = S_1 A \frac{2(p_0/k_m)^m}{\sqrt{1 + 4(p_0/k_m)^{2m}}} \quad (14)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{S_1^2}{S_2} \frac{2k_m}{mC\rho c \omega} (p_0/k_m) \sqrt{1 + (p_0/k_m)^{2m}} \quad (15)$$

式(14)、式(15)表达了接收信号的线性和非线性特征参数与界面压力 p_0 的关系。为了便于比较,将其进行归一化,对比结果如图4所示。图4中横坐标范围为 $[0.1, 2]$,纵坐标为 \bar{A}_1 和 $\bar{\alpha}$ 的归一化值。

m 值与接触界面的粗糙度相关。由图4可知:无论 m 取何值,随着界面压力 p_0 的增大,线性和非线性特征参数都是单调递增的;当 p_0 大于一定值时(例如

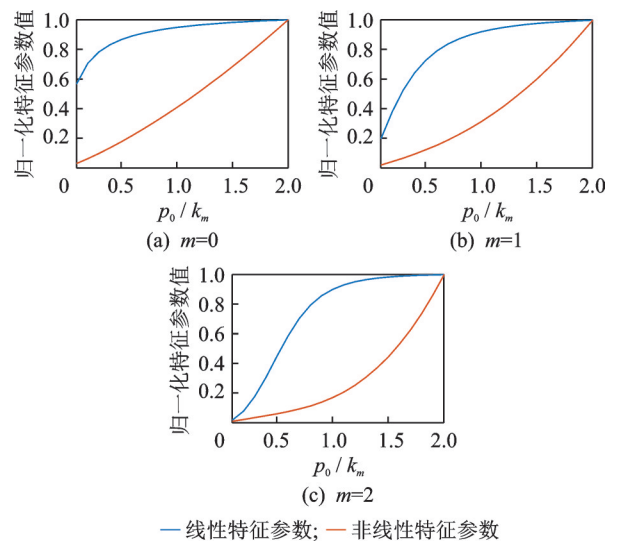


图4 线性和非线性特征参数比较(理论结果)

Fig.4 Comparison of linear and nonlinear characteristic parameters (theoretical results)

($p_0/k_m > 1$), 线性特征参数趋于饱和而对 p_0 的变化不敏感, 且 m 值越小则越快趋于饱和; 非线性特征参数不存在饱和现象, 且在 p_0 较大时递增趋势更加明显; 在界面压力较大时非线性特征参数相比线性特征参数对界面压力的变化更加敏感。

2 试验方案

基于上述分析结果, 进行了销轴连接装置承载状态监测的试验。试验装置如图5所示, 包括计算机、配有示波器(PXIe-5122)的NI PXIe-1078集成机箱、压电功率放大器、任意波形发生器和万能试验机(最大加载为100 kN)。图6为钢制的销轴连接装置和压电陶瓷片, 在销轴和耳板表面粘贴的压电陶瓷片分别为PZT A和PZT B。选用PZT-5H型压电陶瓷圆形片材, 其直径为15 mm, 厚度为0.5 mm, 参数见表1。采用铜壳包裹进行封装, 该封装压电陶瓷片具有灵敏度高、抗干扰性强等优点。

将销轴连接装置放置于钢制基座上, 对其施加竖向荷载来模拟工程中销轴连接承受的荷载。加载过程由万能试验机的控制平台预先设定, 以5 kN为初始荷载, 并以10 kN为间隔逐步加载到95 kN, 每

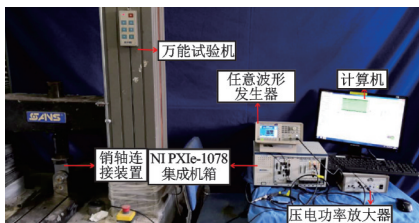


图5 试验装置

Fig.5 Experimental setup



图6 销轴连接装置和压电陶瓷片

Fig.6 Pin connection and PZT sensor

表1 PZT-5H型压电陶瓷参数

Tab.1 Parameters of PZT-5H piezoelectric ceramics

压电常数/ ($\text{pC}\cdot\text{N}^{-1}$)	介电损 耗/%	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比
620	2	7 500	0.36

一步加载结束万能试验机都将保载2 min, 以满足采集数据的需要。利用任意波形发生器发出频率为150 kHz、幅值为10 V的连续正弦信号, 该信号经压电功率放大器放大, 激发PZT A产生超声波。超声波经过销轴连接的接触界面后被PZT B接收并转换成电压信号, 接收的电压信号被NI PXIe-1078集成机箱采集并存储。为了验证试验的可重复性, 在同等环境和操作下, 进行了3次重复试验。最后, 对接收透射波信号进行分析并得到试验结果。

3 试验结果与分析

当荷载分别为5 kN和95 kN时, 其接收信号时频域如图7, 8所示。由图7(a)和图8(a)可看出, 时域信号相对0 V位置发生了固定的偏移(红线标出), 这说明透射波信号中包含了直流分量(0 Hz)。由图7(b)和图8(b)可看出, 信号的频域成分有基频(150 kHz)和2倍频(300 kHz)。由此可见, 接收的透射波信号中包含了基波分量和2次谐波分量, 这与式(4)的描述相吻合。此外, 图7(b)信号频域中还含有3倍频(450 kHz)和4倍频(600 kHz), 其原因是当界面压力较小时, 超声波对粗糙界面的相对扰动较大, 导致粗糙界面出现较强的非线性效应。式(1)仅是函数 $p(h)$ 泰勒二阶展开的近似值, 故得到的透射波解(即式(4))中不含3次谐波和4次谐波分量。从图7(b)和图8(b)的频域图对比看出, 随着

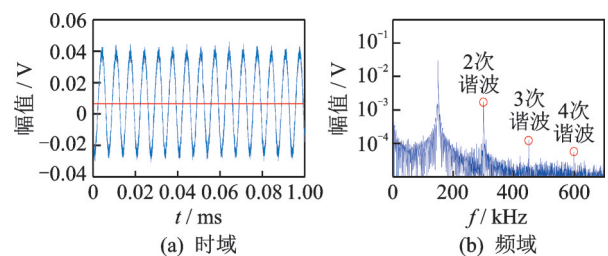


图7 荷载为5 kN时的信号时频域

Fig.7 Signal time-frequency domain with load of 5 kN

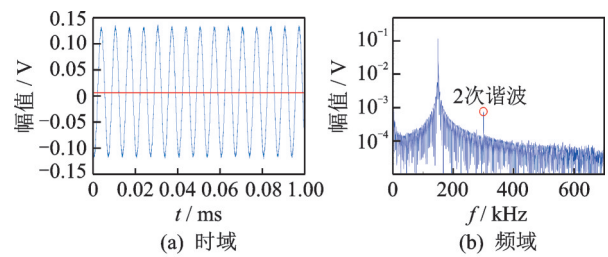


图8 荷载为95 kN时的信号时频域

Fig.8 Signal time-frequency domain with load of 95 kN

荷载的增加,高次谐波的幅值减小甚至消失,表明随着界面压力的增大,界面非线性效应减弱。

线性超声方法通常是将滤波处理后的时域信号幅值作为线性特征对结构进行监测,该值即为频域中的基波幅值。信号频域中包含了基频和2倍频,部分工况下甚至还包含3倍频和4倍频,这些高次谐波的出现是因为超声波通过接触界面时产生了非线性效应。通过对接收信号的频域分析能得到信号的线性特征参数和非线性特征参数。

根据不同工况下接收信号频域中的基波幅值,其与荷载的关系如图9所示。试验结果表明,在一定荷载范围内随着荷载的增加,信号线性特征参数单调增大。当荷载大于75 kN时,线性特征参数变化并不显著,因此当荷载较大时,线性特征参数无法有效识别销轴连接的界面状态(即对界面状态的微小改变不敏感),存在一定的局限性。

信号2次谐波幅值与荷载的关系如图10所示,由图可知,2次谐波幅值随荷载的增加而单调减小,表明界面压力越大,由超声波引起的粗糙界面的非线性效应越弱。接收信号中的非线性特征参数 $\bar{\alpha}$ 由式(19)给出,并得到如图11所示的信号非线性特征参数与荷载的关系。由图可知,信号的非线性特征参数随荷载的增加而单调增大,且在荷载大于45 kN后增大趋势更明显。因此,利用非线性特征参数能有效识别销轴连接在全部试验工况下的荷载。

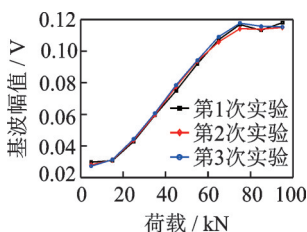


图9 信号基波幅值与荷载的关系

Fig.9 The relationship between the amplitude of the signal fundamental wave and the load

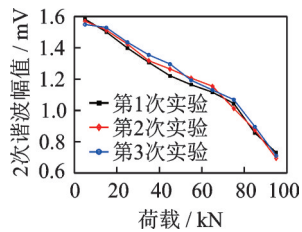


图10 信号2次谐波幅值与荷载的关系

Fig.10 The relationship between the amplitude of the second harmonic of the signal and the load

取3次试验的平均值,将信号的线性特征参数归一化后进行比较,结果如图12所示。线性特征参数在荷载大于75 kN时趋于饱和,无法进一步识别荷载增量,而非线性特征参数不存在这个局限性,这与图4的分析结果是一致的。此外,笔者利用非线性超声理论和室内环境中简单试件的试验,证明了利用基于2次谐波的非线性特征参数来

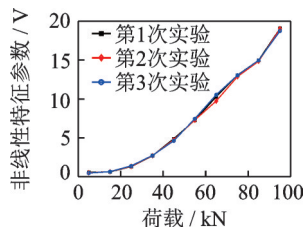


图11 信号非线性特征参数与荷载的关系

Fig.11 The relationship between the nonlinear characteristic parameters of the signal and the load

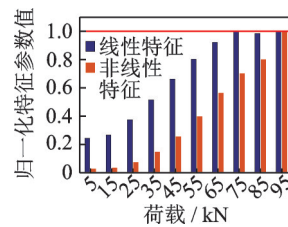


图12 非线性特征参数与线性特征参数比较(试验结果)

Fig.12 Comparison of nonlinear and linear characteristic parameters (experimental results)

识别销轴连接承载状态的可行性。

4 结 论

1) 针对传统线性超声方法对销轴连接界面状态的微小改变不敏感的问题,提出在销轴和耳板上布设压电陶瓷片的监测方法,并结合非线性超声理论给出了基于2次谐波的非线性特征参数,试验结果证明所提监测方法和非线性特征参数是可行的。

2) 研究了超声波在销轴与耳板之间的传播机理,建立了线性特征参数与界面压力的关系。通过对比发现,非线性特征参数对界面压力的变化更加敏感。

3) 在荷载超过一定值(本研究中为75 kN)时,线性特征参数无法进一步识别销轴连接的荷载变化,所提出的基于2次谐波的非线性特征参数则能有效识别销轴连接在全部工况下的荷载数值,更有利于实现对销轴连接承载状态的监测。

参 考 文 献

[1] 令狐珺竹. 钢结构梁柱销轴节点研究[D].北京:清华大学,2017.

[2] 李宏男,高东伟,伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].力学进展,2008,38(2):152-164.
LI Hongnan, GAO Dongwei, YI Tinghua. Research status and progress of structural health monitoring system in civil engineering [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2):152-164. (in Chinese)

[3] 焦敬品,曾宪超,张强,等. 基于微观模型分析的承压粗糙界面接触状态超声评价方法[J].机械工程学报,2011,47(17):78-83.
JIAO Jingpin, ZENG Xianchao, ZHANG Qiang, et al. Micromechanical model of rough surface for evaluation

- ofacoustic properties of pressure interfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(17): 78-83. (in Chinese)
- [4] HUO L S, CHEN D D, KONG Q Z, et al. Smart washer—a piezoceramic-based transducer to monitor looseness of bolted connection [J]. Smart Materials & Structures, 2017, 26(2):025033.
- [5] ZHOU L, BRUNSKILL H P, LEWIS R. Real-time non-invasive measurement and monitoring of wheel-rail contact using ultrasonic reflectometry [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(5/6):1953-1965.
- [6] 郭师峰,李叶海,李振,等. 柔性超声传感结构健康监测技术现状与展望[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3):427-436.
GUO Shifeng, LI Yehai, LI Zhen, et al. The status and prospects of flexible transducers in ultrasonic wave-based structural health monitoring [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3):427-436. (in Chinese).
- [7] LIANG Y B, LI D S, KONG Q Z, et al. Load monitoring of the pin-connected structure using time reversal technique and piezoceramic transducers—a feasibility study [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(22):7958-7966.
- [8] LI D S, LIANG Y B, FENG Q, et al. Load monitoring of the pin-connected structure based on wavelet packet analysis using piezoceramic transducers[J]. Measurement, 2017, 122(2018):638-647.
- [9] ZHANG Z, LIU M L, LIAO Y Z, et al. Contact acoustic nonlinearity (CAN)-based continuous monitoring of bolt loosening: hybrid use of high-order harmonics and spectral sidebands[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 103:280-294.
- [10] 屈文忠,李拯,王芝,等. 基于非线性超声调制方法的损伤识别与定位[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 852-857.
QU Wenzhong, LI Zheng, WANG Zhi, et al. Damage detection and location using nonlinear ultrasonic modulation method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5):852-857. (in Chinese)
- [11] SOLODOV I Y, KROHN N, BUSSE G. CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids [J]. Ultrasonics, 2002, 40:621-625.
- [12] 屈文忠,张梦阳,周俊宇,等. 螺栓松动损伤的亚谐波共振识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(2): 279-283.
QU Wenzhong, ZHANG Mengyang, ZHOU Junyu, et al. Using sub-harmonic resonance to detect bolted joint looseness [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2):279-283. (in Chinese)
- [13] YANG Y, NG C T, KOTOUSOV A. Bolted joint integrity monitoring with second harmonic generated by guided waves[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(1):193-204.
- [14] ZHAO N, HUO L S, SONG G B. A nonlinear ultrasonic method for real-time bolt looseness monitoring using PZT transducer-enabled vibroacoustic modulation [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 31(2):364-376.
- [15] 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.
- [16] 尹昱,陈振华,肖峰,等. 不锈钢疲劳微损伤的非线性超声检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1):68-73.
YIN Yu, CHEN Zhenhua, XIAO Feng, et al. Non-linear ultrasonic testing method for fatigue microdamage of stainless steel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 34(1):68-73. (in Chinese)
- [17] 刘永强,杨世锡,甘春标,等. 基于非线性激光超声的微裂纹检测及定位[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(3): 645-651.
LIU Yongqiang, YANG Shixi, GAN Chunbiao, et al. Detection and location of small crack using nonlinear laser ultrasonic [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(3):645-651. (in Chinese)
- [18] 李萍,陈雷,王腾腾,等. 304 不锈钢点蚀损伤的非线性超声表征[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(2): 375-381.
LI Ping, CHEN Lei, WANG Tengting, et al. Nonlinear ultrasonic characterization of pitting corrosion damage of 304 stainless steel [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2):375-381. (in Chinese)
- [19] DRINKWATER B W, DWYER-JOYCE R S, CAWLEY P. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, 1996, 452(1955):2613-2628.
- [20] BIWA S, NAKAJIMA S, OHNO N. On the acoustic nonlinearity of solid-solid contact with pressure-dependent interface stiffness [J]. Journal of Applied Mechanics, 2004, 71(4):508-515.
- [21] BIWA S, HIRAIWA S, MATSUMOTO E. Experimental and theoretical study of harmonic generation at contacting interface [J]. Ultrasonics, 2006, 44(supp1):e1319-e1322.



第一作者简介:霍林生,男,1975年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构振动控制与健康监测。曾发表《Vibration acoustic modulation for bolt looseness monitoring based on frequency-swept excitation and bispectrum》(《Smart Materials and Structures》2023, Vol.32, No.3)等论文。
E-mail: lshuo@dlut.edu.cn