

文章编号: 2095-4980(2022)08-0857-06

基于相关运算的声弹性法螺栓预紧力测量

韩玉强, 吴付岗, 李明海, 梅 军

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为了在低压激励条件下, 利用声弹性准确测量螺栓预紧力, 提出采用基于相关运算的信号处理方法。该方法通过比较发射波在接收波中最相似位置获得超声传播时间, 从而测量预紧力; 相关运算对噪声具有抑制能力, 可以实现低信噪比下的传输时间测量, 结合内插可提高时间测量分辨力; 选择线性调频脉冲作为发射波, 开展不同电压激励下的声弹性螺栓预紧力测试。确定了超声传播时间的最大误差不超过 $\pm 2.9\%$ 。测试结果表明: 该方法能够实现低压激励条件下超声传播时间的准确测量, 结合内插法可以提高时间测量的分辨力。

关键词: 声弹性; 传播时间; 相关计算; 低压激励

中图分类号: TB553

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020211

Bolt preload measurement based on acoustic elasticity method with correlation processing

HAN Yuqiang, WU Fugang, LI Minghai, MEI Jun

(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In order to measure the bolt preload with acoustoelasticity accurately under the low voltage excitation, a signal processing method based on correlation operation is utilized to process the echo signal. In this method, the ultrasonic propagation time is obtained by comparing the most similar position of the transmitted wave in the echo, so as to measure the preload. The correlation operation can suppress the noise, which can realize the measurement of transmission time under the condition of low SNR. At the same time, the method combined with interpolation can improve the resolution of time measurement. The Linear Frequency Modulation(LFM) pulse is chosen as the emission wave to test the preload of the bolt using acoustoelasticity under different voltage excitation. The maximum error is below 2.9%. The test results show that the method can realize the accurate measurement of ultrasonic propagation time under the condition of low voltage excitation, and the resolution of time measurement can be improved by combining the interpolation method.

Keywords: acoustoelasticity; propagation time; correlation operation; low voltage excitation

声弹性法是利用固体中超声速度与应力呈线性关系的应力无损检测方法^[1-4], 因其结构简单、便于操作的特点而被广泛关注。因规则的外形, 螺栓预紧力的测量成为声弹性的典型应用^[5]。徐春广等^[6]利用超声纵波测量 4.8 级低碳钢材料螺栓拉应力, 测量误差小于 $\pm 2.93\%$ 。Schramm^[7]等利用超声纵波测量火车轮加工后的残余应力。ZHU Qimeng^[8]等利用临界波(LCR)测量焊接残余应力。由于声速需利用超声路径和传播时间计算获得, 因此在超声路径固定的情况下, 应力可通过超声传播时间转换得到。然而由于应力对声速的改变量非常微弱, 因此传播时间的准确度和分辨力就变得更加重要。

超声传播时间一般用阈值法和相位测量法获得。阈值法以接收超声首次超过设定阈值时刻与超声发射时刻的时间差为传播时间。相位检测法^[9]中发射连续固定频率的超声, 通过测量发射波与接收波相位差并结合频率获得传播时间。上述两种方法均没有抗噪声的考虑, 因此测量时需要保证较高的信噪比。张俊^[10]利用阈值法开展螺栓应力声弹性试验中采用高压激发超声以提高接收超声信噪比。贾雪^[11]利用小波处理降低噪声对超声回波的影响。在有高压限制、长超声路径等不利于提高信噪比的情况下, 需要一种具有抗噪声能力, 测量分辨力高的

传播时间测量方法。

本文为了准确测量超声传播时间，利用接收超声波形与发射超声脉冲相似性，将接收超声视为时延后的发射超声，采用相关运算计算接收超声中与发射超声相似程度最高的时刻为接收超声开始的时刻，结合发射时刻得到超声传播时间，因此该方法较相位检测方法有更强的抗噪声能力。发射超声采用线性调频脉冲组，由于该波形与噪声无相关性，因此对噪声有抑制能力。根据相关运算的特点，对超声回波进行内插，在固定测量采样率条件下，可提高传播时间的分辨力。试验中首先验证方法的测试重复性，验证内插提高该方法时间测量分辨力的效果，然后开展声弹性试验，对比相位检测法与相关法抗噪声能力，以及线性调频脉冲频带选择对测试结果的影响。

1 基于线性调频脉冲的声弹性测量原理

1.1 声弹性应力测量模型

声弹性表明声速与材料所受应力呈线性关系，其关系如式(1)所示：

$$C = C_0 - k\sigma \quad (1)$$

式中： σ 为应力强度； C 为加载拉力后的声速； C_0 为未施加拉力的声速； k 为声弹性系数。由于声速需要传播路径长度和传播时间计算获得，因此建立基于传播时间的声弹性应力模型。将应力引起的材料形变计入模型可提高测量准确性，得到超声延应力方向传播的声弹性测量模型为式(2)。

$$t_\sigma - t_0 = \frac{L}{C_0} \left(\frac{k}{C_0} + \frac{1}{E} \right) \sigma \quad (2)$$

式中： t_0 为无应力传播时间； t_σ 为应力为 σ 时的传播时间； E 为材料弹性模量； L 为路径长度；针对确定的被测试件， σ 与 $t_\sigma - t_0$ 成正比，通过测量超声传播时间实现应力测量。

1.2 相关比较法测量超声传播时间

在 Δt 时间内，发射超声脉冲波为 S_1 ，接收超声为 S_2 ，在频散较弱的情况下， S_1 和 S_2 之间在波形保持一致，两者关系满足公式(3)。

$$S_2 = A * S_1(t - t_\sigma) + n(t) \quad (3)$$

$$S_1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, t > \Delta t \\ S_1 & 0 \leq t \leq \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中： t_σ 为超声传播时间； A 为超声衰减系数； $n(t)$ 为超声散射噪声与测量电噪声。接收超声是延迟了 t_σ 时间的发射超声脉冲，因此相关运算比较接收超声与平移后发射超声脉冲之间相似程度可获得传输时间，传输时间等于使得相似度最高时对应的的时间平移量。由于噪声为随机信号，与超声相似程度低，对相关运算结果的贡献小，使相关运算结果最大值出现的时刻在真实超声传输时间附近作轻微扰动，造成测量误差，因此需合理选择发射波形，提高相关运算结果包络的陡峭程度，降低噪声的影响。超声传输时间如图1所示。

$$Corr(\tau) = \int_{\tau}^{\tau + \Delta t} S_1(t - \tau) S_2(t) dt \quad (5)$$

$$t_\sigma = \tau |_{\text{Max}[Corr(\tau)]} \quad (6)$$

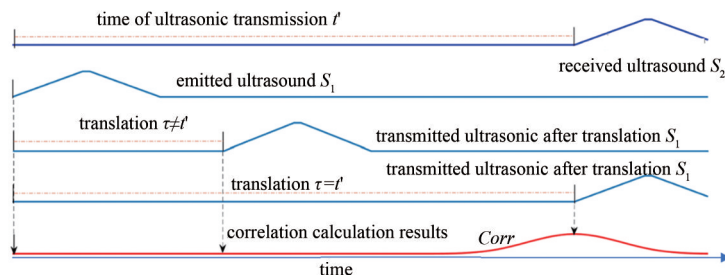


Fig.1 Schematic diagram of calculating ultrasonic transmission time

图1 超声传输时间计算示意图

1.3 发射超声脉冲的选择

根据压电材料的特性，为保证发射超声脉冲与接收超声脉冲的相似程度，发射超声选择连续且可导的波形，正弦脉冲是一种简单且满足要求的波形。该脉冲信号又可分为等幅定频波、线性调幅波、线性调频波 3 种形式，其波形以及相关运算的结果示意图 2。

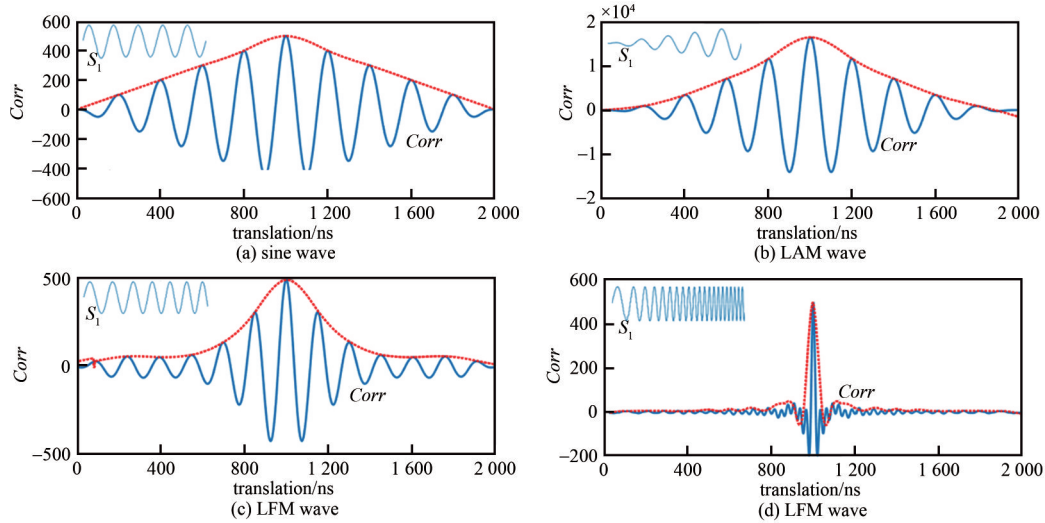


Fig.2 Comparison of correlation results of different types of sinusoidal pulses
图 2 不同类型正弦脉冲相关结果比较

3 种波形中，线性调频脉冲平移相关的包络最陡峭，线性调频波的频带越宽，测量辨识度越高。理论上，线性调频波与线性调幅结合成调幅调频波使得辨识度进一步提高，但考虑到超声激发装置谐振带宽窄的因素，造成宽频调幅调频波激发不理想，因此发射选择线性调频脉冲，见式(7)。

$$S_1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, t > \Delta t \\ \sin((w + at)t) & 0 \leq t \leq \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

1.4 超声传输时间测量适应性

在抑制噪声能力方面，由于选用的线性调频波与噪声不相关，因此该方法可以用于低信噪情况下的超声传输时间测量。在测量分辨率方面，提高采样率可获得更高时间分辨率，更为有效的方法是保证波形不失真的采样率下，通过对数据内插，降低接收波时间间隔。此外，从图 2 可以看出，线性调频脉冲的频带越宽，测量辨识度越高，对起始频率和截止频率没有要求，因此该方法适用于多种频率激发，降低了对超声激发的要求。

2 声弹性测量试验

2.1 试验平台搭建

采用 45# 中碳钢制作直径为 8 mm 的柱状试件，试件两端安装超声传感器，实现超声的发射和接收，调频超声的产生可用锁相环^[12]、信号发生器两种方式。测量系统如图 3 所示(图中①~⑤分别表示 45# 钢材料试件、超声发射传感器、超声接收传感器、信号发生器、示波器。)

利用信号源 Agilent 33220A 产生线性调频脉冲激励超声发射传感器，同时触发示波器 Tektronix MDO 4024C 接收超声信号并记录，采样间隔为 0.4 ns(1 LSB(Least Significant Bit)=0.4 ns)。发射波形和接收波形，发射、接收和相关运算结果见图 4。

发射波形为规则的线性调频波，由于超声发射装置针对高频信号衰减加剧，因此预加重发射波形高频部分。图 4 中，发射波为预加重的调频波，接收波中含有噪声成分，由于压电转换以及传播过程中对不同频率的通过性不同造成波包络畸变，并由于发射、传输、接收中谐振、频散，使得接收波持续时间长于发射波持续时间。而图 4 中相关运算结果中噪声水平较接收波明显降低，证明相关运算能够抑制噪声，且在接收超声时刻保持与理论推导相似的包络结构，符合声弹性理论。

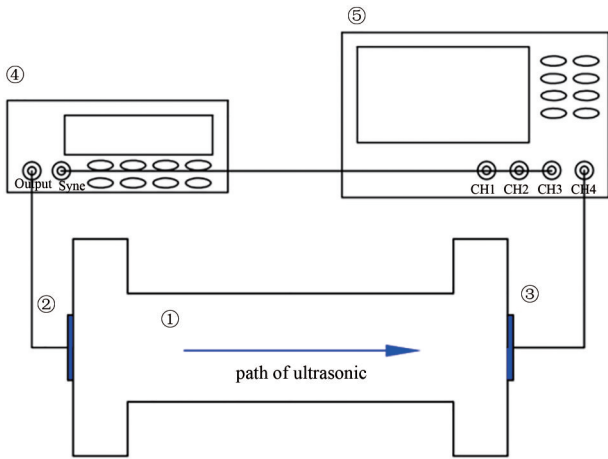


Fig.3 Ultrasonic transmission time measurement system
图3 超声传输时间测量系统

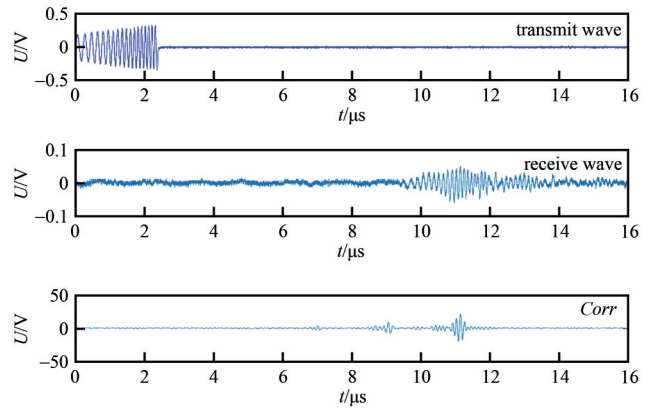


Fig.4 Transmitting wave, receiving wave and correlation results
图4 发射波、接收波、相关运算结果图

2.2 稳定性验证

为保证测试方法的稳定性，选用不同频带的线性调频波，进行多次试验，记录不同激励电压、不同信噪比下传播时间的平均值，测量结果见表 1，不同电压激励的超声波形见图 5。

表 1 不同发射脉冲下的测量结果

Table1 Results under different emission pulses

excitation	1st/ μ s	2nd/ μ s	3rd/ μ s	4th/ μ s	5th/ μ s	repeatability/ns
9 V (10~20) MHz	9.423 6	9.424 0	9.423 2	9.424 0	9.424 4	0.9
6 V (10~20) MHz	9.424 0	9.423 2	9.422 8	9.424 0	9.423 6	1.0
3 V (10~20) MHz	9.424 0	9.424 0	9.424 4	9.423 2	9.422 8	1.3
9 V (5~10) MHz	9.420 0	9.419 6	9.419 2	9.419 6	9.420 0	0.7
6 V (5~10) MHz	9.418 8	9.419 6	9.420 0	9.420 4	9.419 2	1.3
3 V (5~10) MHz	9.420 0	9.420 0	9.420 0	9.419 2	9.418 8	1.1

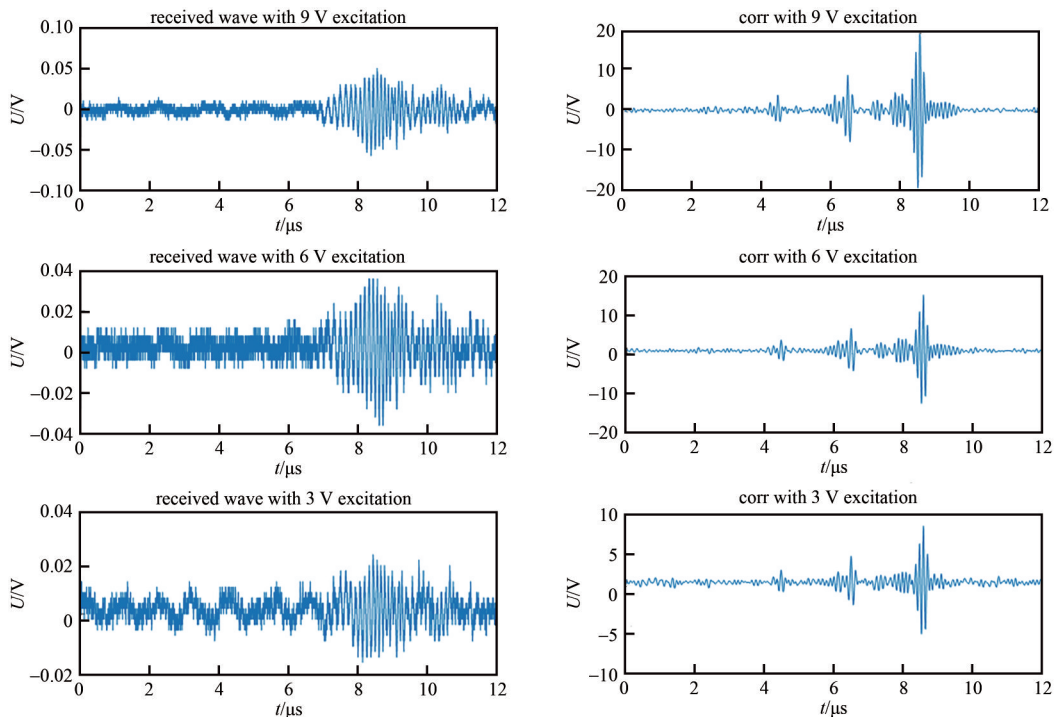


Fig.5 Received waveforms by different voltage excitation and correlation results
图5 不同电压激励的接收波形以及对应的相关运算结果

从表 1 可见，针对两种频带的低压激发超声，可以实现 1.3 ns(3 LSB)左右的超声传播时间的准确测量，随着信噪比的降低测试的结果有细微差异。

在图 5 中，不同激励电压产生的接收超声幅度不同。在 3 V 激励下，接收波的能力与噪声相接近，针对 3 种信号相关运算结果中最大值出现的位置基本相同，但最大值幅度随激励电压降低而变小。因此可以证明，相关运算方法可以在低信噪比实现超声传播时间的有效提取。

2.3 准确性测试

为了验证内插法提高时间测量分辨力的可行性，首先在 0.4 ns 采样间隔下，提取原始数据的传输时间，该时间作为标准传输时间，然后将原始数据 10 倍降采样，获得采样时间间隔为 4 ns 的低采样率信号。将低采样信号进行 10 倍线性内插，再次提取传播时间，并与标准传输时间比较，测试结果见表 2。

表 2 内插法提高时间测试分辨力的验证结果(线性调频波带宽(10~20 MHz))

Table 2 Validation results of interpolation method to improve time measurement resolution

excitation		1st/ μ s	2nd/ μ s	3rd/ μ s	4th/ μ s	5th/ μ s
9 V	standard	9.423 6	9.424 0	9.423 2	9.424 0	9.424 4
	interpolation	9.423 6	9.424 0	9.423 2	9.424 4	9.424 4
6 V	standard	9.424 0	9.423 2	9.422 8	9.424 0	9.423 6
	interpolation	9.424 4	9.423 2	9.422 8	9.423 6	9.423 2
3 V	standard	9.424 0	9.424 0	9.424 4	9.423 2	9.422 8
	interpolation	9.424 0	9.424 0	9.424 0	9.422 8	9.422 8

从表 2 可以看出，内插法提高时间测量分辨力的方法中，引入的测量误差为 0.4 ns(1 LSB)，因此利用内插法可以有效提高时间测量的准确度。

2.4 声弹性预紧力测量准确标定设计

为验证该方法针对声弹性测试的适用性，利用工装将图 3 中的工件安装在拉力机上(图 6 所示)，工件两端面实现超声的发射和接收，由拉力机提供标准拉力，在不同拉力点上分别用相关法和相位检测法测量超声传输时间，改变激励电压幅值获得不同的信噪比，比较抗噪声能力。此外，改变线性调频波的频率，观察频率对时间测量影响。

图 7 为相位检测获得的声弹性测试结果，图 8 为相关法声弹性测试结果。在图 7 中，随着激励电压的降低，相位检测法的线性度不断降低，而且测试一致性也受到激励电压的影响。从图 8 可以看出，不同激励电压下相关法测试应力与传播时间关系曲线均为线性，不同激励电压的测试误差最大为 12 ns。因此，从两种方法的实测结果分析，超声的相位变化、传输时间均与应力呈线性关系，符合声弹性理论，相关法具有更好的抗噪声能力。

图 9 为不同频带的线性调频波声弹性测试结果，激励电压峰值均为 6 V。图 10 为线性拟合后的误差。从图 9 中可以看出，不同激发频率时的测试线性度较为一致，具有较好的稳定性，从图 10 可以看出，误差分布较为随机，且与频率选择的带宽无关，最大非线性误差为 8 ns，相对于最大传输时间差 270 ns，非线性误差为 $\pm 2.9\%$ 。在使用该方法时，可以根据压电换能与测试材料，选择恰当的频带范围。



Fig.6 Force loading device of acoustic elasticity test

图 6 声弹性试验力加载装置

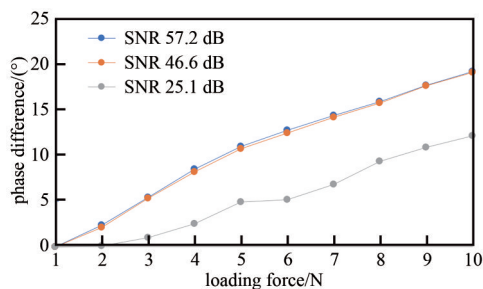


Fig.7 Result of phase detection method
图 7 相位检测法测试结果

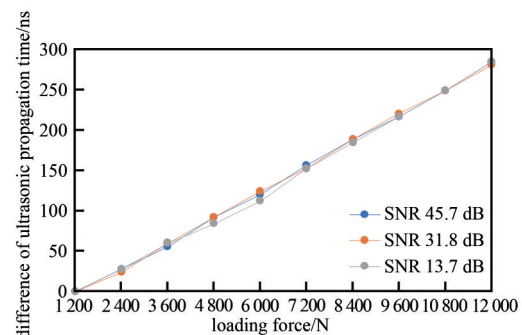


Fig.8 Result of correlation operation
图 8 相关法测试结果

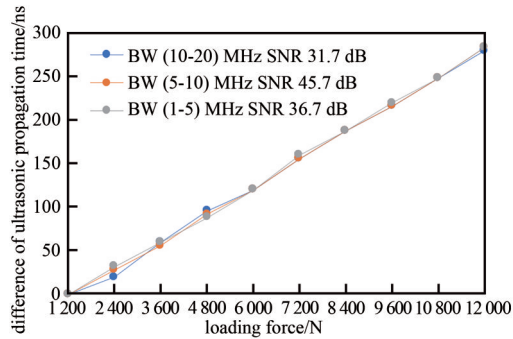


Fig.9 Results of LFM wave in different frequency bands
图9 不同频带的线性调频波测试结果

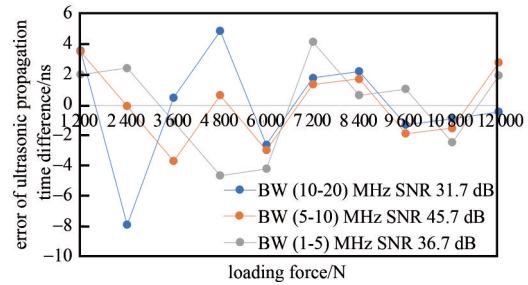


Fig.10 Error of LFM wave in different frequency bands
图10 不同频带的线性调频波误差分布

3 结论

本文设计了基于相关法测量超声传播时间的声弹性实验,准确测量了超声传播时间,实现了对应力的准确测量;通过测试波形内插,提高了测量高分辨力;通过重复性实验,证明了该方法的有效性与正确性。该方法可以实现低压激励条件下螺栓应力的实时在线监测,为螺栓预紧力提供了一种方便、高效、实时、准确的测量途径。

参考文献:

- [1] 魏勤,董师润,徐秉汉,等. 超声双折射法测试铝合金的内部应力[J]. 应用声学, 2008,27(5):401-406. (WEI Qin,DONG Shirun,XU Binghan,et al. Measurement of stress in aluminum alloy by acoustic birefringence[J]. Applied Acoustics, 2008,27(5):401-406.)
- [2] FUCHS P A,CLARK A V,LOZEV M G. Ultrasonic instrumentation for measuring applied stress on bridges[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1998,17(3):141-152.
- [3] DUQUENNOY M,OUAFLOUH M,QIAN M L,et al. Ultrasonic characterization of residual stresses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers[J]. NDT & E International, 2001,34(5):355-362.
- [4] HASEGAWA Masumi,MATSUMURA Junji,KUSANO Ryoichi. Acoustoelastic effect in melia azedarach for nondestructive stress measurement[J]. Construction and Building Materials, 2010,24(9):1713-1717.
- [5] JHANG K Y,QUAN H H,HA J, et al. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement [J]. Ultrasonics, 2006,44(1):1339-1342.
- [6] 徐春广,李骁,潘勤学,等. 螺栓拉应力超声无损检测方法[J]. 应用声学, 2014,33(2):102-106. (XU Chunguang,LI Xiao,PAN Qinxue, et al. Bolt stress measurements by ultrasonic non-destructive methods[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014,33(2):102-106.)
- [7] SCHRAMM R E,RAYMOND E. Ultrasonic measurement of stress in railroad wheels[J]. Review of Scientific Instruments, 1999,70(2):1468-1472.
- [8] ZHU Qimeng,CHEN Jia,GOU Guoqing. Residual stress measurement and calibration for A7N01 aluminum alloy welded joints by using Longitudinal Critically Refracted(LCR) wave transmission method[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016,25(10):4181-4189.
- [9] 张俊,顾临怡,钱筱林,等. 钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J]. 机械工程学报, 2006,42(2):216-220. (ZHANG Jun,GU Linyi,QIAN Xiaolin,et al. Ultrasonic measurement of high strength bolt axial tension in steel construction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(2):216-220.)
- [10] 陈天瑞,项延训,陈虎,等. 基于相位-频率测量的材料残余应力超声表征方法[J]. 机械工程学报, 2016(22):9-14. (CHEN Tianrui,XIANG Yanxun,CHEN Hu,et al. Ultrasonic characterization of residual stress in materials based on phase-frequency relationship[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016(22):9-14.)
- [11] 贾雪,王雪梅,甘文成. 声弹性效应螺栓轴向应力标定试验研究[J]. 中国测试, 2018,44(3):23-27. (JIA Xue,WANG Xuemei, GAN Wencheng. Research on calibration of bolt's axial stress based on acoustoelastic effect[J]. China Measurement & Test, 2018,44(3):23-27.)
- [12] 原艺博,李琳,刘海龙. 一种频率可调超声波发生器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):339-344. (YUAN Yibo, LI Lin,LIU Hailong. Design of an adjustable frequency ultrasound generator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):339-344.)

作者简介:

韩玉强(1984-),男,博士,工程师,主要研究方向为金属材料声弹性应力测量、高准确度超声流量测量等.email:231867903@qq.com.

吴付岗(1972-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为传感器设计.

李明海(1971-),男,博士,研究员,主要研究方向为装备的环境实验.

梅军(1972-),男,博士,研究员,主要研究方向为新型能源材料的设计、制备、性能表征等.