

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006868

基于高频柱面超声导波的螺栓轴向应力测量^{*}

何星亮, 陈 平

(重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044)

摘 要:基于金属杆件中高频超声导波的传播特性,提出使用柱面导波高阶不同模态群速度比值的单探头螺栓轴向应力测量方法。使用数值方法求解考虑晶粒散射衰减的 Pochhammer-Chree 方程,得到了导波群速度 & 衰减系数频散曲线,并分析了其在高频区的传播规律。结合非线性声学以及弹性力学理论,推出基于群速度比值的螺栓轴向应力测量方法。搭建超声应力测量平台,讨论了脉冲超声激励下的实测导波信号特点并提出使用经验小波算法对信号进行模态分解,有效获取了信号中特定模态的群速度。使用该方法以及传统的纵横波声时比法进行了螺栓轴向应力对比标定和测量实验,结果表明前者平均测量误差约为 4%,其精度明显高于传统方法(平均测量误差 6%)且具有更简便的测量流程。

关键词: 高频超声导波;声弹性效应;Pochhammer-Chree 方程

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Bolt axial stress measurement based on high-frequency cylindrical ultrasonic guided wave

He Xingliang, Chen Ping

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel single probe bolt axial stress measurement method is put forward using the group speed ratio of different high order modes of cylindrical guided wave based on the propagation characteristics of high-frequency ultrasonic guided wave in metal rod parts. The Pochhammer-Chree equation considering the grain scattering attenuation is solved with numerical method. Then, the dispersion curves of group velocity and attenuation coefficient for guided wave are obtained, and the propagation laws of the guided wave in high-frequency region are analyzed. Next, the bolt axial stress measurement method based on the group speed ratio is derived based on the nonlinear acoustics and elastic mechanics theory. The ultrasonic stress measurement platform was built. The characteristics of the ultrasonic pulse-echo guided wave signals are discussed, the empirical wavelet transform algorithm is proposed to conduct mode decomposition of the signals and acquire the group velocity of a specific mode in the signal. A bolt axial stress calibration/measurement comparison experiment was carried out using the proposed method and the traditional method with the transit time ratio of the longitudinal wave and transverse wave. The results indicate that the average measurement error of the proposed method is only about 4%, which is significantly better than that of the traditional method (average measurement error 6%), and the proposed method has a more concise measurement process.

Keywords: high-frequency ultrasonic guided wave; acousto-elastic effect; Pochhammer-Chree equation

0 引 言

螺栓常用于航空航天、军工及能源等领域中重要设备关键部件的相互连接,例如核反应堆压力壳就使用螺

栓组与机座进行联接。精确测控螺栓轴向应力可有效预防联接失效,避免重大安全事故^[1]。目前常用的应力无损检测方法主要有 X 射线衍射法^[2]、光测力学法^[3]、电阻应变片法^[4]、压电阻抗法^[5]以及超声测量法^[6-16]。相比其他方法,超声法具有高灵敏度、强通用性、使用方便

收稿日期:2020-09-03 Received Date: 2020-09-03

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62071123)项目资助

等优势,非常适合用来测量螺栓轴向应力。

超声测应力的理论基础是声弹性效应,即静态变形结构的体波速度会随其应力状态改变^[7]。Rose 等^[6]使用试件加载前后的纵波渡越声时变化量来测量应力。该方法理论简单,但无法用于已紧固螺栓。因此,Yasui 等^[8]提出一种基于纵横波声时比的应力测量方法,该方法在螺栓端部使用多个探头分别激发横波和纵波并得到其渡越时间比,然后使用该比值评估应力。虽然该方法适用于已紧固螺栓,但测量时需要安装多个探头,易引入耦合随机误差且测量步骤繁琐^[9]。此外,当受载螺栓的直径与换能器声束宽度相当时,超声波在杆件侧壁会发生复杂多重模式转换和散射。此时杆中不仅存在体波,而且存在多模态频散柱面导波,其传播特性可使用 Pochhammer-Chree 方程^[10]描述。Chen 等^[11]结合 Pochhammer-Chree 方程和声弹性效应,提出使用 $L(0,1)$ 导波测量钢杆应力,并发现低频条件下其群速度随应力增大而降低。Scelea 等^[12]研究了基于低频导波的钢缆张力测量方法,并发现应力-群速度相关程度会随应力增大而增大。何文等^[13]使用结合低频纵向模态和弯曲模态导波的方法测量了螺栓预紧力。以上研究均以低频导波为研究对象,这是因为在低频条件下,导波的传播距离相对较长,且此时信号仅有单一模态,可避免模态混叠。然而,何存富等^[14]发现钢杆中特定频率的高频导波具有相对较小的衰减率,可用于无损检测。Brennan 等^[15]发现高阶模态导波对应应力变化更为敏感,说明高频导波适用于应力测量。

高频导波的有效探测距离虽然有限,但其特有的多模态和高灵敏度特性对于螺栓应力检测非常有利。本文基于 Pochhammer-Chree 方程系统分析了高频超声柱面导波的传播特性,并使用数值模拟方法研究了高阶模态导波与应力之间的关系,提出了一种基于高阶模态群速度比值的单探头螺栓轴向应力测量方法。相对于其他方法^[6,8,13],该方法仅使用单纵波探头就可实现螺栓轴向应力的精准测量,消除了耦合误差并显著简化了测量流程。

1 杆中的超声导波

高频超声的波长在尺度上与金属晶粒直径相当,故当其在金属介质中传播时会产生散射,进而造成显著的幅值衰减^[16],所以研究高频导波传播特性必须考虑晶粒散射衰减。定义 α_L 和 α_S 为纵波和横波在均匀各向异性固体介质中的散射衰减系数,当介质为 45 钢时, $\alpha_L = 0.03 \text{ np/wl}$, $\alpha_S = 0.08 \text{ np/wl}$ ^[14]。考虑衰减的超声纵波及横波波数可分别表示为:

$$\begin{cases} k_L^* = \omega/V_L + i\alpha_L \\ k_S^* = \omega/V_S + i\alpha_S \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_L 和 V_S 代表纵波和横波的传播速度; ω 代表中心频率。如图 1 所示为一半径为 R 的杆件,在其中建立柱坐标系。当超声纵波在其端面入射并沿 z 轴传播时,激发出沿 z 和 r 方向传递的纵向模态。当 $r=R$ 时,有 $\sigma_r=0, \sigma_{rz}=0$,根据此边界条件可由 Navier 方程^[17]推导出以下关系:

$$\begin{aligned} & \frac{2A}{R}(B^2 + k^{*2})J_1(BR)J_1(AR) - (B^2 - k^{*2})^2 \\ & J_0(AR)J_1(BR) - 4k^{*2}ABJ_1(BR)J_0(AR) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中,

$$A = k_L^{*2} - k^2, B = k_S^{*2} - k^2$$

式(2)即为纵向模态的 Pochhammer-Chree 方程, J_α 代表第一类贝塞尔函数, α 代表阶数, k 代表当前模态的复波数。其中 $k = \omega/V_p + \alpha_p i$, V_p 和 α_p 分别代表任一模态的相速度和衰减系数。

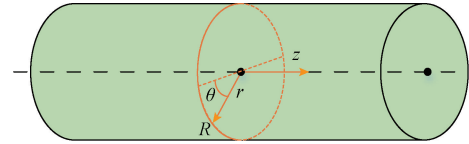


图 1 细长杆件模型

Fig. 1 Model of a slender rod part

图 2(a)、(b) 所示分别为使用数值方法求解式(2)得到的杆中各纵向模态在 8~12 MHz 时的群速度频散曲线(dispersion curves of group velocity, DCGV)和衰减系数频散曲线(dispersion curves of attenuation coefficient, DCAC)。从 DCGV 和 DCAC 可知,此频段一共有 23 个纵向模态(半径 4 mm,材料 45 钢),以 $L(0,n)$ 的形式对各模态进行命名, L 代表该模态为纵向模态, 0 代表该模态为轴对称类型, n 代表阶数。分析 DCGV 可知:各模态均存在唯一的群速度峰值,且在该峰值附近曲线斜率较小,频散相对较弱,定义该值所对应的频率为该模态的特征频率。此外,在 n 阶模态的特征频率 ω_n 附近会取得 $n+k$ 阶($k=1,2,3$)模态的群速度极大值。分析 DCAC 可知:各模态均存在唯一的衰减系数最小值,其出现频率恰好等于该模态的特征频率,且在 n 阶模态的特征频率 ω_n 附近会取得 $n+k$ 阶($k=1,2,3$)模态的衰减系数极小值。例如 $L(0,19)$ 在 9.91 MHz 处取得最大群速度和最小衰减系数,其值分别为 5 784 m/s 和 21.53 dB/m,而 $L(0,20)$ 和 $L(0,21)$ 模态分别在 9.87 和 9.83 MHz 处取得群速度极大值和衰减系数极小值,群速度分别为 5 419 和 4 936 m/s,衰减系数分别为 26.12 和 33.41 dB/m。以上现象可总结为:在高频区, n 阶模态在其特征频率 ω_n 处取得最大群速度以及最小衰减系数,而 $n+1$ 及更高阶模态也会在 ω_n 附近取得群速度极大值和衰减系数极小值。

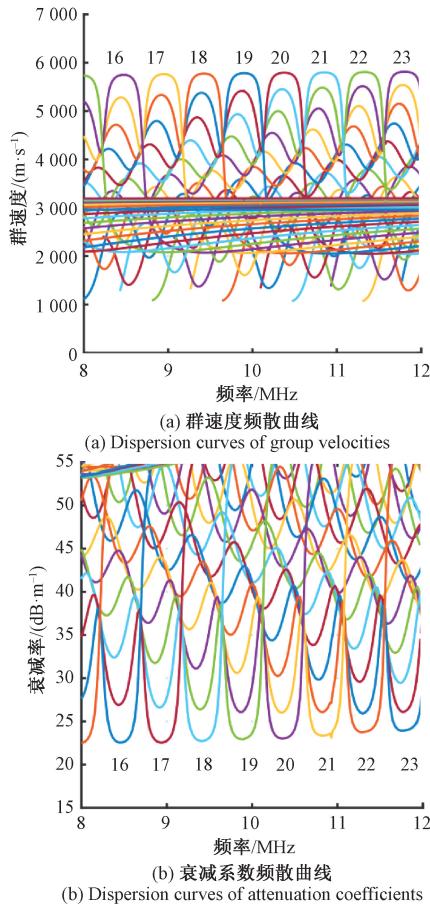


图2 8~12 MHz 群速度和衰减系数频散曲线
(图中16~23代表模式的阶数)

Fig. 2 Dispersion curves of group velocities and attenuation coefficients in 8~12 MHz (16~23 in the figure indicate the orders of the modes)

2 基于高频导波群速度比值的螺栓轴向应力测量

目前大多数导波测螺栓轴向应力研究的理论基础是单模态低频导波的声弹性效应^[11-12,18]。虽然其原理简单,但限制条件较多且测量精度有限,与成熟的体波测量法^[7-9]相比并无明显优势。因此,本文提出一种基于高频导波群速度比值的螺栓轴向应力测量方法,该方法可在试件长度以及初始渡越时间未知的情况下仅使用单个探头实现高精度应力测量。根据弹性力学和非线性声学理论^[7],考虑轴向载荷的 Pochhammer-Chree 方程为:

$$\frac{2A_\sigma}{R}(B_\sigma^2 + k_\sigma^2)J_1(B_\sigma R)J_1(A_\sigma R) - (B_\sigma^2 - k_\sigma^2)^2 \times J_0(A_\sigma R)J_1(B_\sigma R) - 4k_\sigma^2 A_\sigma B_\sigma J_1(B_\sigma R)J_0(A_\sigma R) = 0 \quad (3)$$

其中,

$$A_\sigma = \left(\omega \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho_0} + \frac{\sigma}{(3\lambda+2\mu)}} \left[\frac{\mu+\lambda}{\mu} (4\lambda+10\mu+4m) + \lambda+2l \right] + i\alpha_L \right)^2 - k_\sigma^2$$

$$B_\sigma = \left(\omega \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0} + \frac{\sigma}{(3\lambda+2\mu)}} \left(\frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu + m \right) + i\alpha_s \right)^2 - k_\sigma^2 \quad (4)$$

式中: ρ_0 是材料密度; σ 为当前应力; λ 和 μ 是二阶弹性常数; l, m, n 代表三阶弹性常数; k_σ 代表受载情况下的各模态波数。由于该方程的解析解难以获得,故本文采用数值方法对其进行求解。计算时选择 $R = 4 \text{ mm}$, $\rho_0 = 7980 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 115.9 \text{ GPa}$, $\mu = 79.9 \text{ GPa}$, $l = -248 \text{ GPa}$, $m = -623 \text{ GPa}$, $n = -714 \text{ GPa}$ ^[18]。

图3所示为数值求解式(3)得到的 $L(0,5)$, $L(0,9)$, $L(0,13)$, $L(0,17)$ 和 $L(0,22)$ 模态在不同应力情况下的最大群速度随应力变化曲线。显然, $L(0,22)$ 曲线的斜率最大,其他模态的斜率随其阶数依次减小,故高频导波对应力变化更为敏感,而且不同阶模态对应力变化的敏感程度不同。任意两模态 a, b 的群速度极值随应力变化关系可表示为:

$$\begin{cases} C_\sigma^a = K_\sigma^a \sigma + B^a \\ C_\sigma^b = K_\sigma^b \sigma + B^b \end{cases} \quad (5)$$

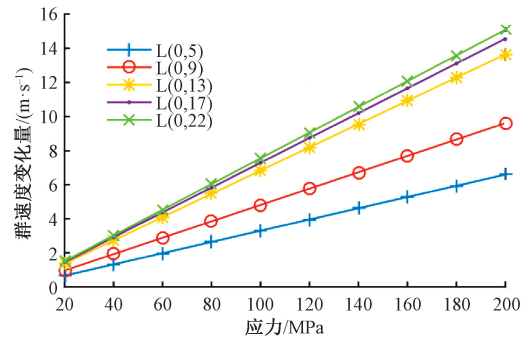


图3 各模态群速度最大值随应力变化曲线

Fig. 3 The variation curves of maximum group velocities vs. stress for various modes

将其上下相除,因式分解并化简可得:

$$\frac{C_\sigma^b}{C_\sigma^a} = \frac{K_\sigma^b}{K_\sigma^a} - \frac{B^b - K_\sigma^b B^a / K_\sigma^a}{K_\sigma^a \sigma + B^b} \quad (6)$$

其中, C_σ^a 和 C_σ^b 代表轴向应力为 σ 的情况下 a 阶模态以及 b 阶模态的群速度极大值。式(5)为一个反比例函数,由图3可知 K_σ^a 的数量级为 $10^{-8}/\text{Pa}$,当 σ 在 $0 \sim 200 \text{ MPa}$ 范围内其图像与一次函数非常接近,即:

$$\sigma = K \left(\frac{C_\sigma^a}{C_\sigma^b} \right) + B = K \left(\frac{T_\sigma^b}{T_\sigma^a} \right) + B \quad (7)$$

标定时只要对应力和群速度比值进行线性拟合即可得到系数 K 和 B 。此外,在实际测量中,声速难以直接得

到,而常用渡越时间 T_o^w 和 T_o^b (声波到达底面并反射回来的时间)代替。

螺栓一般由头部,光杆部分以及螺纹部分组成。其中,只有光杆部分属于标准的圆柱体,而头部和螺纹部分具有较为复杂的几何特征,下面讨论这两部分对高频导波生成和传播的影响。首先,由于普通活塞式超声换能器的声场半径一般随传播距离增长,故声源附近的声场半径与晶片直径相当。其次,为便于安装,靠近声源的螺栓头部的截面积明显大于换能器晶片直径。因此,入射超声在螺栓头部无法与其边界干涉,难以形成导波。根据前文论述,当体波传递至光杆部分形成包含多个模式的柱面导波。当导波继续向前传递至螺纹部分时会在其复杂边界处发生漫反射^[19],但是这一现象不会对本文的结论造成较大影响。图 4 所示为 $L(0,19)$ 模态在 9.2~10.1 MHz 下的截面声强分布。根据 DCGV,该频率范围内包含了 $L(0,19)$ 和 $L(0,18)$ 的特征频率。(9.9 MHz, 9.4 MHz) 图 4 显示在这两个特征频率下, $L(0,19)$ 的声强基本上集中于杆内部,故螺纹对特征频率导波的传播无影响。而本文研究和使用的恰好是处于特征频率处的导波模式,故可以不考虑螺纹的影响。

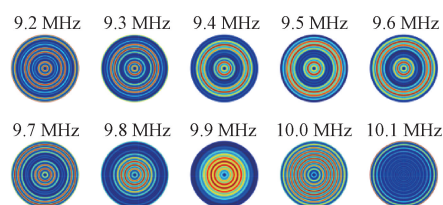


图 4 $L(0,19)$ 在 9.2~10.1 MHz 下的截面声强分布

Fig. 4 Sectional sound intensity distribution of $L(0,19)$ at 9.2~10.1 MHz

3 实验及讨论

3.1 高频脉冲激励下的导波信号分析

因为超声检测中大多采用脉冲激励,所以下面对高频脉冲激励下的实测超声导波信号进行分析。信号源采用美国 JSR Ultrasonic 公司生产的 PRC50 脉冲发射板卡,其最大激励电压 475 V。该发射卡集成了前置放大器增益范围为 -14~60 dB。超声换能器采用 Dakota 公司生产的接触式磁性纵波探头 PT7,其中心频率为 10 MHz,晶片直径为 6 mm。为与纵横波法对比,实验还使用了日本奥林巴斯生产的 V156RM 横波探头,其中心频率为 5 MHz。数据采集使用台湾凌华公司生产的 AD-Link PCIE9852 采集卡,其最大采样频率 200 MHz,AD 转换位数 14 位。将以上硬件集成于便携式工控机中,并基于 LabView 搭建 DAQ 系统。选择不

同材料和规格的螺栓作为实验样件,其详细参数如表 1 所示。为保证良好的耦合效果,各样件的端部均已平整化处理。各样件的直径均与换能器晶片直径相当,测量时可以有效激发出柱面导波。实验时,将超声换能器紧密吸合在涂有耦合剂的螺栓端部上,并通过特制夹具将螺栓安装在 CTM2200S 拉伸试验机上,图 5 为实验装置示意图。

表 1 样件详细参数

Table 1 Detailed parameters of specimens

样件代号	规格	性能等级	截面面积 /mm ²	材料	光杆平均直径/mm	螺栓类型
A	M8×104	8.8	36.6	45 钢	8.12	粗牙六角头半螺纹螺栓
B	M10×92	6.8	58.0	35 钢	9.98	粗牙六角头半螺纹螺栓
C	M8×80	4.8	36.6	Q235	8.05	粗牙六角头半螺纹螺栓

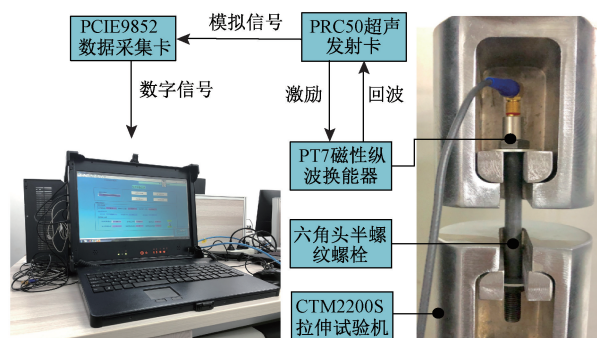


图 5 实验装置

Fig. 5 Experiment set-up

图 6 所示为 A 试件实际得到的超声脉冲回波时域信号及其一次回波频谱。根据杆件 DCGV,当使用具有一定带宽的脉冲超声进行检测时会激发出多个群速度非常接近的相邻模式,故信号应存在明显模式混叠。另外,根据杆件 DCAC 所示,当信号的频率偏离特征频率时,其衰减系数迅速升高,此时信号能量急剧衰减。综合考虑以上特性,脉冲回波信号的频谱组成应为多个离散分布的波峰,各波峰分别对应了不同的模式。图 6 所示的信号频谱确实由多个离散分布的波峰组成,其中包含了大量的噪声成分,非常不利于模式分解。图 7 所示为 DCGV 中群速度极值与时域信号以及幅值谱的对应关系。根据前文论述,应力测量实际上仅需获得任一特征频率下两模式的群速度极值,如图 7 中 DCGV 上标注的点 M1 和 M2。根据图 7 显示:M1 和 M2 在时域信号中的对应部分

为位置靠前的两个脉冲,即时域信号中的 S1 部分。对 S1 做傅里叶变换后得到其幅值谱,其结果显示在图 7 中 DCGV 上方。显然,S1 的幅值谱与图 6 中的一次回波幅值谱形状相似,但基本不包含草状噪声。要得到 M1 和 M2 的值,需对 S1 仅做模态分解,然后提取出其幅值谱中矩形框内共振峰对应的时域分量。

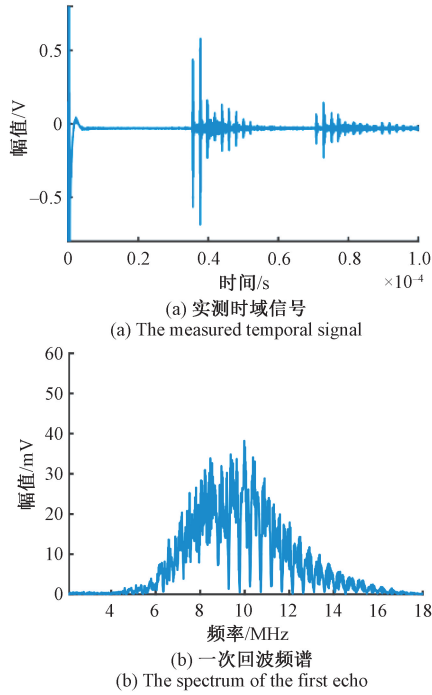


图 6 样件 A 实测时域信号及其一次回波频谱
Fig. 6 The temporal signal measured in A and the spectrum of its first echo

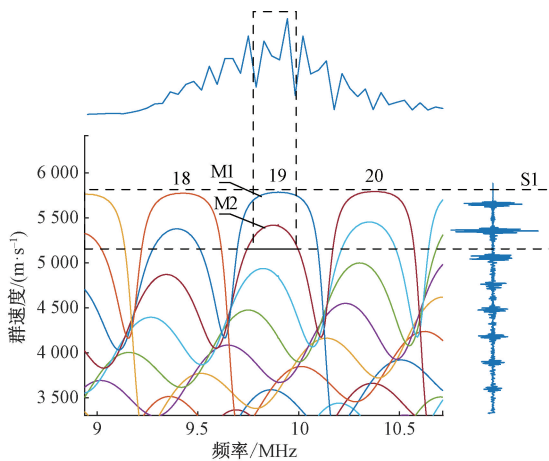


图 7 模态群速度极值及其时频对应关系
Fig. 7 The extremums of group velocities of different modes and their corresponding relationship in both temporal and frequency domains

本文根据高频柱面导波的以上特殊性质,选取经验小波算法^[20](empirical wavelet transform, EWT)对 S1 进行模态分解。EWT 算法的核心思想是根据信号频谱能量分布对其进行自适应分割,并在各分割频段构造小波滤波器,最后获得一系列具有紧支撑的调幅-调频分量,实现信号的模态分解和时频展开。EWT 有效与否关键在于信号频谱是否被合理划分,而 S1 的频谱呈天然分离状态且具有较高的信噪比,故其与 EWT 算法非常匹配。图 6 中信号中的 S1 部分经 EWT 处理后共展开为 31 个分量,每个分量分别对应了 S1 幅值谱中的一个共振峰,前 20 个分量的幅值谱如图 8 所示。幅值最高且最接近探头中心频率的 EWT13 的时域波形及其包络如图 9 所示,EWT13 出现了两个明显的波峰,分别与 M1 和 M2 对应,其渡越时间比为 0.954,与理论群速度极值比基本一致。

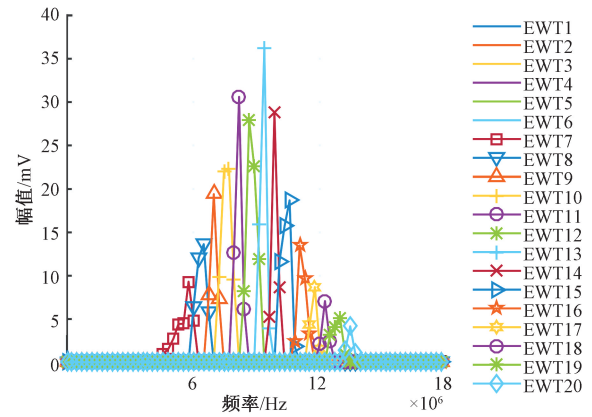


图 8 EWT1-20 的幅值谱
Fig. 8 The amplitude spectrum of EWT1-20

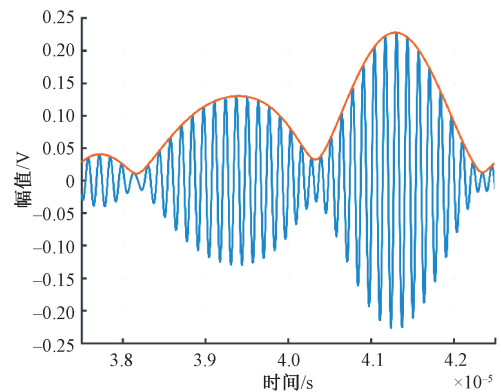


图 9 EWT13 的时域波形及其包络
Fig. 9 The temporal waveform and envelope of EWT13

3.2 螺栓应力标定/测量实验

下面通过螺栓应力标定/测量实验证明以上方法的

有效性。进行应力标定实验时,为排除温度对材料声速的影响,实验室保持恒温 26℃。设定拉伸试验机加载步长 10 MPa,加载范围 0~200 MPa。由于 1 MPa 所引起的声时变换通常为纳秒级别,而本实验采用的采集卡最小采样周期为 5 ns,有一定概率采集不到声时的变化量。因此,采用一维快速傅里叶插值对数据进行 10 倍升采样处理,使时间分辨率达到 0.5 ns。每加载一次采集 100 组数据,取其均值消除随机误差,然后对平均后的信号 S1 使用 EWT 算法进行模态分解,获取不同应力下的 EWT13,试件 A 在 0~200 MPa 下的 EWT13 包络信号如图 10 所示。图 10 标识出了 0 和 200 MPa 所对应的信号,该图显示随着应力增加,EWT13 中的两个波峰的幅值不断衰减且波峰位置向 X 轴正方向均匀移动,且这两个波峰的移动速率不同,这一现象与理论分析部分得出的结果一致。然后,取每个包络信号中前后波峰的横坐标作为渡越时间,得到不同应力下的渡越时间比值,并对其进行拟合。使用本文所提方法得到的试件 A, B, C

拟合结果如图 11 中 a, b, c 所示,而使用纵横波法得到的拟合结果如图 11 中 d, e, f 所示。对试件 A, B, C 使用本文所提方法得到的拟合精度分别为 0.988 6, 0.983 3 和 0.987 5。而对 3 种试件使用纵横波法得到的拟合精度分别为 0.975 6, 0.988 5 和 0.971 4。从标定结果来看,本文所提方法比纵横波声时比法的拟合精度略高。

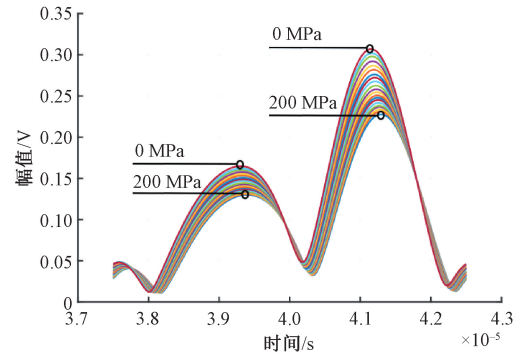


图 10 试件 A 在 0~200 MPa 下的 EWT13 波形

Fig. 10 The EWT13 waveforms of A in 0~200 MPa

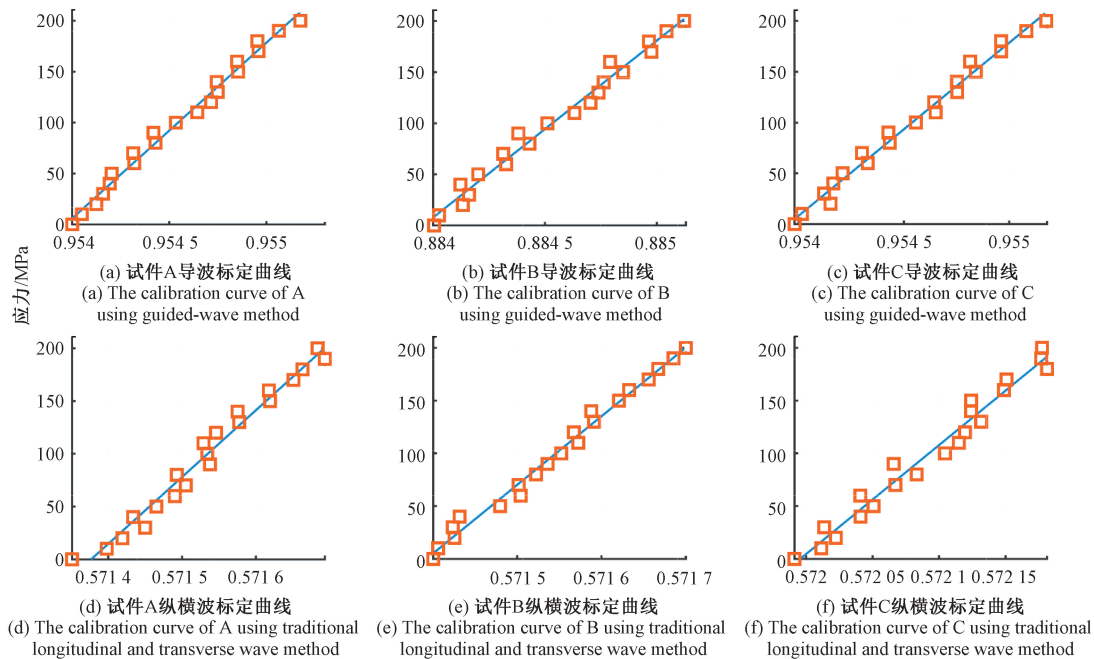


图 11 应力标定结果

Fig. 11 Stress calibration results

完成各类型试件标定后,利用标定结果进行应力测量试验。此时先对试件进行加载(加载范围 0~200 MPa,加载步长 10 MPa),然后得到 EWT13 中两模态渡越时间比值以及轴向应力估计值。图 12 中显示了使用本文提出的导波法以及传统的纵横波法得到的 0~200 MPa 范围内的平均应力测量误差。显然,当

应力较低时,这两种方法的测量误差均较大,但误差会随应力增加而减小。本文方法的平均测量误差大约为 4%,而纵横波法的测量误差达为 6%。本方法仅使用一个探头进行测量,可避免多次耦合带来的误差且简化了测量流程,相对纵横波声时比法应该有更高的精度以及更好的操作性。

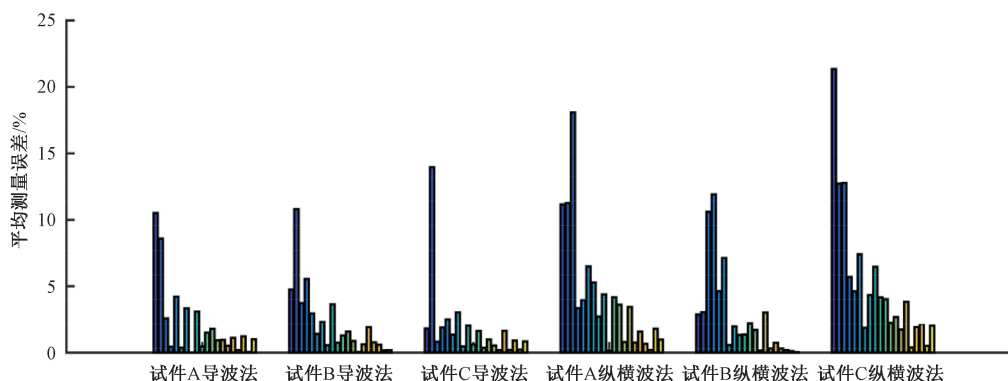


图12 应力测量结果

Fig. 12 Stress measurement results

4 结 论

本文研究了高频超声导波在细长杆中的传播特性,提出了一种基于高阶模态群速度极大值比值的螺栓轴向应力测量方法,并且通过对比应力标定和测量实验证明了该方法的有效性。该方法在应力测量实验中的平均测量误差大约为4%,明显高于传统纵横波声时比法。该方法可满足大多数场合测量要求,同时具有简便的测量流程而且仅需一个最普通的接触式压电纵波换能器即可实现,具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 王小兵, 隆涛, 樊一军, 等. 反应堆压力容器主螺栓预紧工艺优化仿真分析[J]. 核动力工程, 2018, 39(6): 68-72.
WANG X B, LONG T, FAN Y J, et al. Optimization analysis about pre-tightening technology of stud for reactor pressure vessels[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(6): 68-72.
- [2] FUNAMORI N, YAGI T, UCHIDA T. Deviatoric stress measurement under uniaxial compression by a powder x-ray diffraction method[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75(9): 4327-4331.
- [3] LU P, YU L, LIU H, et al. Research on screw bolt's pre-tightening force by coating photoelasticity [J]. Chinese quarterly of mechanics, 2013, 2: 275-278.
- [4] WANG X J, SUN Q, ZHANG F L, et al. Design on static resistance strain gauge of mine roof bolt based on ATMega16L [J]. Journal of Liaoning Technical University (natural science), 2011(2): 288-292.
- [5] GU Z G, SUN Z. Piezoelectric impedance based prestress force monitoring for PSC beam[J]. Advanced materials Research, 2011, 255-260: 742-746.
- [6] JOSHI S G, PATHARE R G. Ultrasonic instrument for measuring bolt stress [J]. Ultrasonics, 1984, 22(6): 261-269.
- [7] ROSE J L, NAGY P B. Ultrasonic waves in solid media [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(4): 1807-1815.
- [8] YASUI H, TANAKA H, FUJII I, et al. Ultrasonic measurement of axial stress in short bolt with consideration of nonlinear deformation [J]. JSME Int J Ser A, 1999, 1: 111-118.
- [9] KIM N, HONG M. Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound [J]. NDT and E International, 2009, 3: 164-169.
- [10] MIKLOWITZ A J, REVIEWER R. The theory of elastic waves and waveguides [M]. Amsterdam: North Holland Pub, 1978.
- [11] CHEN H L, HE Y, GANGARAO H V. Measurement of prestress force in the rods of stressed timber bridges using stress waves [J]. Materials Evaluation, 1998, 56(8): 977-981.
- [12] SCALEA F L D, RIZZO P, FRIEDER S. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3): 219-227.
- [13] 何文, 王成. 基于导波技术的螺栓轴力无损检测[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 604-607.
HE W, WANG CH. Nondestructive testing of stud axial force based on guided wave technology [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(4): 604-607.
- [14] 何存富, 孙雅欣, 吴斌, 等. 高频纵向导波在钢杆中

- 传播特性的研究[J]. 力学学报, 2007, 39(4): 538-544.
- HE C F, SUN Y X, WU B, et al. Research on the propagation characteristics of high frequency longitudinal guided waves in steel rods [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(4): 538-544.
- [15] BRENNAN D, ARVIN E, SALVATORE S. Stress measurement in seven-wire strands using higher order guided ultrasonic wave modes [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2018, DOI:10.1177/0361198118181145.
- [16] PAPADAKIS E P. Grain-size distribution in metals and its influence on ultrasonic attenuation measurements[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1961, 33(11), DOI: 10.1121/1.1908517.
- [17] GALDI. An introduction to the mathematical theory of the navier-stokes equations [M]. New York: Springer New York, 2011.
- [18] 鲁珊珊, 吴英思, 刘飞. 杆中导波声弹性效应分析与数值模拟[J]. 应用声学, 2018(4):469-474.
- LU SH SH, WU Y S, LIU F. Analysis and numerical simulation of acoustoelastic effect of guided wave in rod[J]. Applied Acoustics, 2018(4):469-474.
- [19] 王少纯, 甘芳吉, 张轶茗, 等. 螺纹边界法对圆柱超声缓冲杆尾随脉冲干扰的抑制 [J]. 应用声学, 2018(3):324-329.
- WANG SH CH, GAN F J, ZHANG Y M, et al. Suppression of trailing pulse interference of cylindrical ultrasonic buffer rod by thread boundary method [J]. Applied Acoustics, 2018(3):324-329.
- [20] GILLES J. Empirical wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.

作者简介



何星亮, 2014 年于攀枝花学院获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: 744236130@qq.com

He Xingliang received his B. Sc. degree in 2014 from Panzhihua University; now, he is a master student in Chongqing University. His main research interest includes ultrasonic non-destructive testing technology.



陈平 (通信作者), 2007 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学机械与运载工程学院副教授, 主要研究方向为超声/电磁无损检测、机器人视觉、智能故障诊断。

E-mail: chempion@126.com

Chen Ping (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2007 from Chongqing University; now, he is an associate professor in College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University. His main research interest includes ultrasonic/electromagnetic non-destructive testing, robot vision and intelligent fault diagnosis.