

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514697

基于超声尾波干涉的螺栓轴向应力测量方法^{*}

刘俊磊, 陈 平, 孟令辰, 龙 潜, 尹爱军
(重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400030)

摘 要:针对高强度短螺栓轴向应力超声测量技术中存在的声程受限、声时差提取精度不足等问题,提出了一种基于超声尾波干涉的螺栓轴向应力测量方法。构建了基于尾波声时差的螺栓轴向应力测量模型,通过延长等效声程提高声时差对应力的敏感性。为有效抑制尾波干涉导致的声时差测量误差,基于线性插值误差模型,提出了一种以最小化最大误差为目标的自适应阈值提取算法,从而有效提高声时差测量精度。通过有限元仿真验证了螺栓内部尾波的形成机理及其传播规律,仿真结果与理论分析一致,为尾波干涉测量模型提供了可靠的机理支撑。搭建了螺栓轴向应力超声测量试验平台,使用所提方法与传统超声波测量法对多组不同材料和规格的螺栓进行了对比标定与测量试验。结果表明,所提出的尾波自适应阈值法在全应力区间均可表现出更优的线性拟合精度,低应力段阶梯畸变基本消除,测量稳定性显著提升。应用于高强度短螺栓应力测量时,该方法的平均测量误差在 5% 以内,相较于传统方法(平均测量误差约为 8%~10%)精度提升明显。该方法仅需采用单接触式纵波探头即可实现螺栓轴向应力的高精度测量,避免了额外传感器配置与复杂实验条件,具有良好的工程应用价值。

关键词: 超声尾波干涉;螺栓应力;高强度短螺栓;自适应阈值;声时差提取算法

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.15

Bolt axial stress measurement method based on ultrasonic coda wave interferometry

Liu Junlei, Chen Ping, Meng Lingchen, Long Qian, Yin Aijun

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the issues of limited acoustic path and insufficient accuracy in acoustic time-difference extraction in ultrasonic measurement of axial stress for high-strength short bolts, this paper proposes a bolt axial stress measurement method based on ultrasonic coda wave interferometry. An axial stress measurement model for bolts based on coda wave acoustic time difference is established, which enhances the stress sensitivity of the time difference by extending the equivalent acoustic path length. To effectively suppress measurement errors induced by coda wave interferometry, an adaptive threshold extraction algorithm was proposed based on a linear interpolation error model. With the objective of minimizing the maximum error and thereby substantially improving the accuracy of acoustic time difference estimation. The formation and propagation of internal coda waves in bolts are investigated via finite element simulations, and the results agree well with the theoretical analysis, thereby supporting the coda wave interferometry-based measurement model. An ultrasonic experimental platform for bolt axial stress measurement was constructed, and comparative calibration tests were performed on multiple sets of bolts with different materials and specifications using both the proposed method and the conventional ultrasonic measurement method. The results show that the proposed coda wave adaptive threshold method exhibits better linear fitting accuracy in the entire stress range, with step-like distortion in the low stress regime essentially eliminated and measurement stability significantly improved. When applied to high-strength short bolts, the proposed method achieves an average measurement error within 5%, representing a clear improvement compared with traditional methods (with an average error of approximately 8% to 10%). This method enables high-accuracy measurement of bolt axial stress using only a single contact longitudinal wave transducer, avoiding additional sensor configurations and complex experimental conditions, and thus offering strong engineering applicability.

收稿日期: 2025-11-20 Received Date: 2025-11-20

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(52275518)项目资助

Keywords: ultrasonic coda wave interferometry; bolt stress; high-strength short bolts; adaptive threshold; acoustic time difference extraction algorithm

0 引言

螺栓因其制造工艺简便、连接性能可靠且便于拆装,广泛应用于各种工程结构^[1]。例如,在大型发动机法兰盘结构中,高强度短螺栓承担着密封与承载的双重功能。在振动环境下,螺栓连接易产生松动与断裂,进而可能导致法兰盘泄漏,甚至引发动机故障乃至灾难性事故^[2]。因此,实现对高强度短螺栓轴向应力的精确监测,对保障发动机运行可靠性和人员安全具有重要意义。目前常见的螺栓应力测量方法包括扭矩扳手法^[3]、电阻应变片法^[4]、X射线衍射法^[5]、光纤传感器法^[6]与超声检测法^[7-11]。超声检测法因其测量精度高、检测速度快、操作便捷,成为目前应用最为广泛的通用型无损检测方法。然而,在高强度短螺栓应用场景下,现有超声检测技术在检测精度与鲁棒性方面仍存在不足,需进一步提升以满足工程应用需求。

传统超声应力测量技术的原理是基于声弹性效应,利用应力引起的渡越时间(time of flight, TOF)变化推算螺栓轴向应力。Pan等^[12]推导了超声底面回波声时差与轴向应力之间的线性关系,该方法在长螺栓应力测量中可表现出较高精度,但对于高强度短螺栓的测量,测量精度明显下降。当螺栓长度短、强度高时,由应力引起的轴向伸长量极小,相应的TOF变化也十分微弱,限制了传统声时差法的适用性。为此,Hu等^[13]针对高强度短螺栓的应力测量,基于超声散射衰减理论,推导了超声能量衰减与螺栓轴向应力之间的线性关系,所提出的超声衰减法可以有效规避螺栓长度的影响,但其对换能器耦合状态与系统稳定性较为敏感,目前相关研究仍停留在实验室加载试验与原型验证阶段,在工程实际应用中仍受较大限制。Chen等^[14]提出了一种用于小尺寸短螺栓应力测量的压电超声共振方法,该方法可有效降低小尺寸螺栓测量误差,但其依赖扫频激励与共振条件,标定流程复杂,在设备成本和通用性方面仍存在一定局限。

超声尾波干涉法作为一种对介质微小变化高度敏感的测量方法,在应力检测中展现出重要的应用潜力。直达波在介质中的传播路径较短,难以在声程受限条件下检测出应力的微弱变化,而多次干涉后的尾波经重复采样与放大,对应力的变化具有更高的敏感性。王剑波等^[15]引入超声尾波干涉应用于应力敏感性评估,在短量程内采用尾波建立标定,可获得更高分辨率的应力相关性。Diewald等^[16]探究了混凝土中尾波声速与轴向力的关系,相较于直达波,尾波时移能更有效表征混凝土结构

中的应力变化。Chen等^[17]基于尾波干涉理论,结合声弹性效应与尾波干涉路径叠加,建立了尾波时移与预紧力变化之间的线性关系,利用单片压电陶瓷即可实现超早期螺栓松动的高精度监测。以上研究表明,相较于直达波,尾波对应力变化更为敏感,其特有的高灵敏度特性对于高强度短螺栓应力检测非常有利。

为此,基于尾波干涉理论与超声波模式转换,构建了“尾波声时差—应力”的线性模型,并提出了一种基于自适应阈值的尾波声时差提取算法,可有效降低尾波声时差的测量误差。该方法仅需采用单接触式压电纵波探头,无需额外传感器与复杂实验条件,在保持测试流程简洁的同时,可显著提升声时差的应力敏感性。实验结果表明,应用于高强度短螺栓应力测量时,相较于传统超声波测量方法,该方法在全应力区间精度更高,且在低应力段优化效果显著,测量精度可满足实际工程需求,具有较好的工程应用价值。

1 理论模型

在超声检测中,圆柱波导内的横波(S波)以一定倾角入射至固体边界时,除了会产生反射的横波,还会激发出纵波(L波),入射纵波同理,这一现象被称为超声波模式转换^[18],其示意图如图1所示。

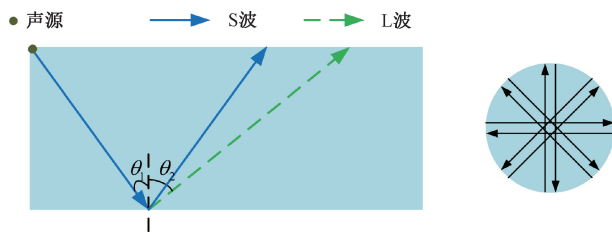


图1 斜入射波超声波反射及模式转换示意图

Fig. 1 Diagram of ultrasonic reflection and mode conversion of obliquely incident waves

如图1左侧图所示,反射波与入射波的传播角度满足Snell定律,即:

$$\frac{\sin \theta_1}{c_s} = \frac{\sin \theta_2}{c_L} \quad (1)$$

式中: c_s 和 c_L 分别为材料中S、L波相速度; θ_1 为S波相对于边界法线的入射角; θ_2 为模式转换后L波相对于边界法线的传播角。

当 θ_1 接近S→L模式转换临界角 θ_{sl} 时,可激发近似轴向传播的模式转换波,即:

$$\theta_{SL} = \arcsin\left(\frac{c_S}{c_L}\right) \quad (2)$$

在螺栓中,超声波在沿轴向传播时不断与杆体侧壁相互作用,产生多次反射波与模式转换波,由于圆截面的轴对称特性,这些反射波和模式转换波会相互干涉并形成规律性的相长干涉效应^[19],如图1右侧图所示。

为更清晰地展示螺栓中尾波的形成机理,在图2中,将螺栓简化为直径为 d 、长度为 l 的类圆柱波导,并将声波的扩散传播路径理想化为线状表示。

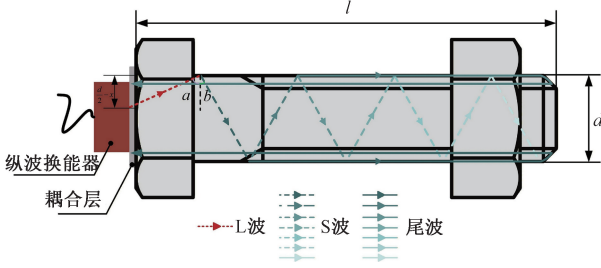


图2 螺栓内部尾波传播路径示意图

Fig. 2 Diagram of the propagation path of the internal coda wave of the bolt

换能器经耦合层激发入射纵波,其与端面法线的夹角记为 a 。经过模式转换后,S波以与侧壁法线夹角为 b 的方向在两侧壁间发生多次反射传播。当夹角 b 接近 $S \rightarrow L$ 模式转换的临界角时,所激发的纵波相对于侧壁法线的传播角度趋近于 90° ,可近似认为其沿构件轴向传播。由此,在每一轮侧壁反射处,都会周期性地产生近轴向传播的纵波分量。这些分量在传播过程中相互干涉叠加,形成位于主回波之后且与其同向传播的尾波。如图3所示,螺栓的超声回波时域信号中除主回波外,还存在明显的尾波成分,并呈现出一定的周期性特征。

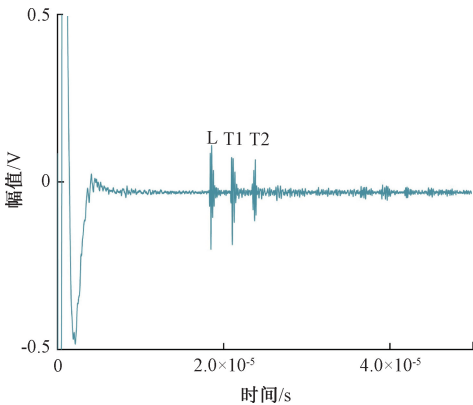


图3 螺栓超声回波时域信号

Fig. 3 Time-domain ultrasonic echo signal of the bolt

根据尾波传播路径,该方法的 TOF 表达式为:

$$t_{Tn} = \frac{\frac{d}{2} - x}{V_L \cos a} - \frac{\left(\frac{d}{2} - x\right) \tan a}{V_L} + n \frac{d}{V_S \cos b} - n \frac{d \tan b}{V_L} + \frac{2l}{V_L} \quad (3)$$

式中: t_{Tn} 为第 n 阶尾波渡越时间($n=0,1,2,\dots$); V_L 和 V_S 分别为材料中纵波与横波相速度; d 和 l 分别为螺栓直径与总长度; x 为换能器偏心量; a 为端面法线与入射L波夹角; b 为侧壁法线与侧壁反射S波夹角。

当螺栓轴向应力为 σ 时,材料中纵横波声速为:

$$\begin{cases} V_L(\sigma) = (1 - K_L \sigma) V_L(0) \\ V_S(\sigma) = (1 - K_S \sigma) V_S(0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:螺栓受到轴向拉应力作用时, σ 为正值; $V_L(\sigma)$ 和 $V_S(\sigma)$ 分别表示所受应力为 σ 时材料中纵波与横波的相速度; $V_L(0)$ 和 $V_S(0)$ 分别表示无应力时材料中纵波与横波的相速度; K_L 为纵波声弹性系数; K_S 横波声弹性系数。

螺栓在实际工况下内部应力沿轴向呈非均匀性分布^[20]。因此,需对模型参数进行修正,将螺栓的轴向有效受力长度定义^[21]为:

$$L_e = L_c + \frac{1}{2} D_t + \frac{1}{3} D_r \quad (5)$$

式中: L_e 为螺栓轴向有效受力长度; L_c 为螺母和螺栓头之间的实际夹紧距离; D_t 和 D_r 分别为螺栓杆螺纹部分等效直径和无螺纹螺栓杆直径。为书写简洁,记

$$\left(\frac{d}{2} - x\right) = Lx, d = Ld。$$

第 n 阶尾波在无应力状态下的 TOF 为:

$$t_{Tn}(0) = \frac{Lx(0)}{V_L(0) \cos a} - \frac{Lx(0) \tan a}{V_L(0)} + n \frac{Ld(0)}{V_S(0) \cos b} - n \frac{Ld(0) \tan b}{V_L(0)} + \frac{2Le(0)}{V_L(0)} \quad (6)$$

式中:符号后缀(0)表示该参数在无应力状态下的取值。根据胡克定律,在螺栓的屈服极限内,螺栓所承受的应力 σ 与螺栓长度变化量成正比关系,可得:

$$Le(\sigma) = \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) Le(0) \quad (7)$$

式中: $Le(\sigma)$ 为所受应力为 σ 时螺栓轴向有效受力长度; E 为螺栓的杨氏模量。

当螺栓轴向应力为 σ 时,第 n 阶尾波的 TOF 表达式为:

$$t_{Tn}(\sigma) = \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) Lx(0)}{(1 - K_L \sigma) V_L(0) \cos a} - \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) Lx(0) \tan a}{(1 - K_L \sigma) V_L(0)} + n \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) Ld(0)}{(1 - K_S \sigma) V_S(0) \cos b} - n \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) Ld(0) \tan b}{(1 - K_S \sigma) V_S(0)}$$

$$n \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) L_d(0) \tan b}{(1 - K_L \sigma) V_L(0)} + \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) 2Le(0)}{(1 - K_L \sigma) V_L(0)} \quad (8)$$

式中: $t_{Tn}(\sigma)$ 为第 n 阶尾波在所受应力为 σ 时的渡越时间。通常, K_L 和 K_S 的数量级为 10^{-11} , σ 的数量级为 10^8 , $K_L \sigma \ll 1$, $K_S \sigma \ll 1$ 。因此, 根据现有原理模型, 尾波声时差 Δt_{Tn} 与螺栓中轴向应力的关系为:

$$\begin{aligned} \Delta t_{Tn} &= t_{Tn}(\sigma) - t_{Tn}(0) = \\ &\left(L_s(0) \frac{\left(K_L + \frac{1}{E} \right) \left(\frac{1}{\cos a} + \tan a \right)}{V_L(0)} + \right. \\ &\left. nL_d(0) \left(\frac{\left(K_S + \frac{1}{E} \right)}{V_s(0) \cos b} - \frac{\left(K_L + \frac{1}{E} \right) \tan b}{V_L(0)} \right) + \right. \\ &\left. Le(0) \frac{2 \left(K_L + \frac{1}{E} \right)}{V_L(0)} \right) \sigma = K_{Tn} \sigma \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可知, 尾波声时差与螺栓轴向应力近似呈线性关系, 通过标定应力系数 K_{Tn} 即可由时间漂移直接求得螺栓轴向应力。

2 基于自适应阈值的声时差计算方法

在尾波法螺栓轴向应力测量过程中, 声时差的精确提取是确保测量结果可靠性的关键。为延长等效声程, 增强应力敏感性, 在满足时间域可分离的前提下, 选取可检出的最高阶尾波作为测量载体。随着尾波阶次升高, 传播路径中的多次反射、散射与衰减会降低该阶分量的信噪比, 致使依赖固定阈值的传统声时差提取方法, 易受信号失真与噪声影响而产生较大误差^[22]。为此, 提出了一种基于自适应阈值的声时差提取方法。该方法利用信号周期性特征, 在单周期内搜索与波形唯一对应的最优阈值特征点, 实现对不同应力条件下尾波声时差的高精度提取^[23]。

为减小采样离散引起的量化误差, 常对回波序列进行插值以细化时间刻度。然而, 插值仅改变数值分辨率而不增加真实信息, 且其模型逼近误差与噪声传播效应会在 TOF 提取中引入偏差, 称为 TOF 误差。由于声弹性效应引起的 TOF 变化通常处于纳秒量级, TOF 误差一旦与真实应力响应处于同一量级, 将直接降低 TOF 的提取精度, 甚至掩盖应力引起的微小时延变化。因此, 明确并抑制 TOF 误差对于提高应力检测提取精度具有重要意义, 如图 4 所示为 TOF 误差计算原理。

当对超声信号进行线性插值时, 在第 i 个插值区间内的插值表达式为:

$$f_e = f(t_i) + \frac{f(t_{i+1}) - f(t_i)}{t_{i+1} - t_i} (t_n - t_i) \quad (10)$$

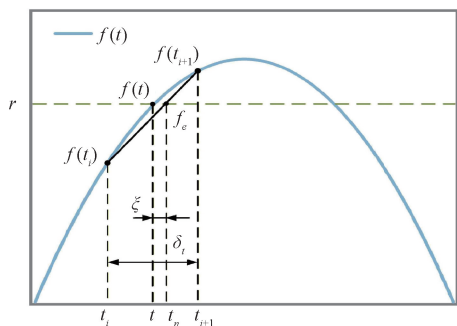


图4 TOF 误差计算原理

Fig. 4 The calculation principle of TOF error

式中: f_e 为线性插值函数在 t_n 处的值; t_i 和 t_{i+1} 分别为插值区间的左端点和右端点; $f(t_i)$ 和 $f(t_{i+1})$ 分别是超声信号在 t_i 和 t_{i+1} 处的值; t_n 为阈值 r 与第 i 个插值区间内线性信号段的交点; $t_{r,i+1}$ 为阈值 r 与第 i 个插值区间内原始超声信号的交点。那么, 可以计算插值区间内的 TOF 误差, 即:

$$\frac{t_{i+1} - t_i}{t_n - t_i} = \frac{f(t_{i+1}) - f(t_i)}{f(t) - f(t_i)} \quad (11)$$

式中: $f(t)$ 为超声信号在 t 处的值。

由插值步长 $\delta_i = t_{i+1} - t_i$, 式(11)可变形为:

$$t_n = \frac{\delta_i (r - f(t_i))}{f(t_i + \delta_i) - f(t_i)} + t_i \quad (12)$$

则上述 TOF 误差 ξ 可表示为:

$$\xi = t_n - t = \frac{(r - f(t_i)) \delta_i}{f(t_i + \delta_i) - f(t_i)} + t_i - t \quad (13)$$

由于 ξ 是连续可微函数, 根据拉格朗日中值定理, 在区间 (t_i, t_{i+1}) 内存在极值, 则阈值 r 满足:

$$\frac{d\xi}{dr} = \frac{\delta_i}{f(t_i + \delta_i) - f(t_i)} - \frac{1}{\sqrt{1 - r^2}} = 0 \quad (14)$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{(f(t_i + \delta_i) - f(t_i))^2}{\delta_i^2}} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)可以得到区间 (t_i, t_{i+1}) 内的 TOF 误差最大值 $\xi_{\max}$ 为:

$$\begin{aligned} \xi_{\max} &= \frac{\left(\sqrt{1 - \frac{(f(t_i + \delta_i) - f(t_i))^2}{\delta_i^2}} - f(t_i) \right) \delta_i}{f(t_i + \delta_i) - f(t_i)} + \\ &t_i - \sqrt{1 - \frac{(f(t_i + \delta_i) - f(t_i))^2}{\delta_i^2}} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)表明, 不同插值区间的最大误差是不同的。当插值步长 δ_i 值固定时, TOF 误差与插值区间的左端点 t_i 有关。对于周期为 2π 的正弦信号, 插值区间的左端点 t_i 从 0 变化到 2π , 插值步长 δ_i 为 $2\pi/n$ (n 为单周期内的插值点数)。通过对采样信号的全局优化分析, 将 $\min(\xi_{\max})$ 作为收敛目标。当 $\xi_{\max}$ 最小时, $t_i = t_{\min}$, 对应的

最优阈值 r 为:

$$r = \sqrt{1 - \frac{(f(t_{\min} + 2\pi/n) - f(t_{\min}))^2}{(2\pi/n)^2}}$$

(17)

式中: $r \in [\min(f(t_i), f(t_{i+1})), \max(f(t_i), f(t_{i+1}))]$, 以确保阈值交点存在于插值区间 (t_i, t_{i+1}) 内。

鉴于不同应力工况下的回波波形存在差异,该方法在各应力工况下分别求解其对应的最优阈值,使阈值随应力状态逐工况自适应调整^[24]。基于各应力状态下对应的自适应阈值,分别提取该应力状态下的 TOF,最终通过计算有应力与无应力状态下的 TOF 之差,即可获得对应的声时差。具体实现过程如下:针对每一应力状态下截取的尾波信号,首先进行预处理与归一化,并设定插值步长 δ_i 。自初始采样点起,对相邻采样点构成的各插值区间逐段遍历。对于第 i 个插值区间,依据该区间两端采样幅值构建线性插值误差模型,计算该区间在候选阈值条件下引入的 TOF 误差最大值,并取其绝对值作为误差评价指标。随后在全区间范围内对该指标进行全局搜索,确定使误差评价指标达到最小的区间位置 $t_{\min}$,并据此确定该应力状态所对应的自适应阈值,用于该应力工况下的 TOF 提取与声时差计算。

3 仿真与实验验证

3.1 尾波传播仿真与声场特性分析

为进一步验证所提出方法的有效性,并揭示超声尾波在螺栓内部的传播规律,采用 COMSOL 仿真软件模拟了螺栓中尾波的产生和传播。为表征压电换能器的发射与接收过程,采用“压电—声—固”三域耦合。考虑到 3D 模型的计算需求较高,采用 2D 轴对称模型以降低计算成本,网格化有限元模型如图 5 所示。压电换能器置于螺栓的头部,模型主要参数见表 1。螺杆长度设置满足清

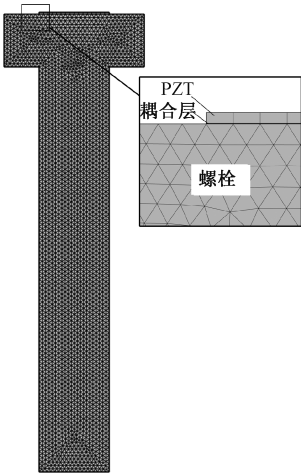


图 5 网格化有限元模型

Fig. 5 The meshed finite element model

晰展示尾波的产生和传播的要求。为确保波动传播计算的精度与收敛性,在耦合模型中,采用以最短波长为依据的网格控制与时间步进策略。为准确描述波动传播路径并避免数值色散,螺栓区域网格最大单元尺寸被设置为不超过剪切波波长的 1/10,且在几何不连续处进一步加密处理^[25]。

表 1 有限元模型仿真参数
Table 1 FE model simulation parameters

变量	值	变量	值
激励中心频率	5 MHz	激励波形	高斯调制正弦
螺栓直径	4 mm	螺栓长度	25 mm
螺栓材料	结构钢	材料泊松比	0.3
螺栓材料密度	7 800 kg/m ³	材料弹性模量	200 GPa
纵波声速	5 743.8 m/s	横波声速	3 126.5 m/s
耦合层材料	甘油	耦合层厚度	0.01 mm
换能器材料	PZT-5H	换能器直径	4 mm

图 6 显示了 $t=9.54 \mu\text{s}$ 时刻螺栓试件中的即时声场云图。首个端面回波为 L 波,其后在螺栓杆部可观测到两道时序稳定且伴随主回波一同传播的尾波信号,根据被换能器接收的顺序依次标记为 T_1 、 T_2 。此时, T_2 波传播至螺栓底部, L 波和 T_1 波已从底部反射。此后虽仍可见微弱的尾波序列,但其在多次反射与散射作用下迅速衰减、信噪比较低,在时间域内分离难度较大,将进一步放大 TOF 估计不确定度。因此,后续分析仅选取时间域可分离识别的尾波特征分量。

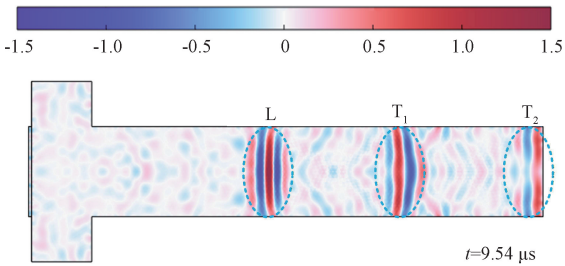


图 6 9.54 μs 时刻有限元模型声场云图

Fig. 6 The acoustic field calculated from the FE model at 9.54 μs

理论上,相邻各级波之间的渡越时间间隔 Δt 可以使用式(18)计算,即:

$$\Delta t = \frac{d}{V_s \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{V_s}{V_L} \right) \right]} - \frac{d}{V_L / \tan \left[\sin^{-1} \left(\frac{V_s}{V_L} \right) \right]}$$

(18)

式中: d 为螺栓直径; V_L 和 V_s 分别为材料中纵波与横波的相速度。

图 7 为有限元模型中换能器接收的时域信号,对应于图 6 所示传播过程。根据仿真设置参数,通过数值计算可得相邻尾波时间间隔为 $1.34\text{ }\mu\text{s}$,仿真结果与理论值偏差不超过 1%。此外,瞬态声场云图所显示的“端面反射—侧壁贴近传播—再耦合”路径与机理分析一致,从空间传播特征角度对尾波传播提供了直观验证。上述结果表明,仿真结果能够准确复现尾波的形成与传播过程,为基于尾波路径的“声时差—应力”分析提供了可靠的数值依据与验证支撑。

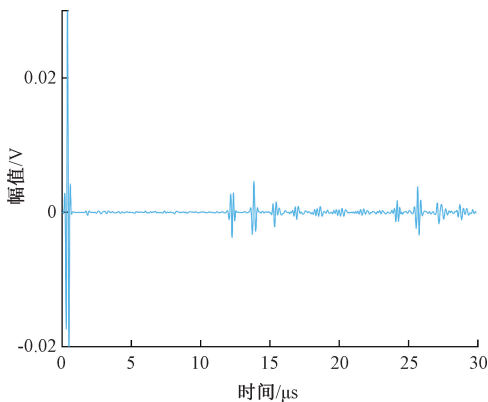


图 7 仿真回波信号
Fig.7 Simulated echo signal

3.2 实验系统及螺栓试件制备

图 8 为螺栓轴向应力超声测量系统示意图,主要由一体化便携式数据采集系统和机械系统两部分组成。数据采集系统包括:超声波发射和接收卡 JSRPRC50(增益范围为 $-14\sim 60\text{ dB}$)、AD-linkPCIe-9852 数据采集卡(采样频率为 200 MHz)、Olympus A112R-SM 纵波接触探头(中心频率为 10 MHz ,直径为 6 mm),以及一台拉伸试验机工控机用于控制拉伸试验机和一台便携工控机用于控制发射和接收卡。机械系统包括:万能拉伸试验机和经过特殊设计的固定支架。

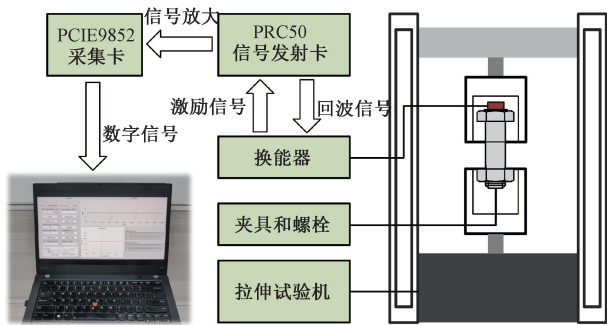


图 8 螺栓轴向应力测量实验系统
Fig.8 Diagram of the experimental system for bolt axial stress measurement

选取不同规格的螺栓作为试验对象,其详细参数如表 2 所示。螺栓的两端端面都进行压平处理以保证稳定接触,螺栓试样如图 9 所示。

表 2 试件参数
Table 2 Parameters of the samples

试件	材料	直径/mm	长度/mm	类型
A	C45	10	53.35	半螺纹
B	C45	8	54.40	半螺纹
C	Q235	10	114.50	半螺纹

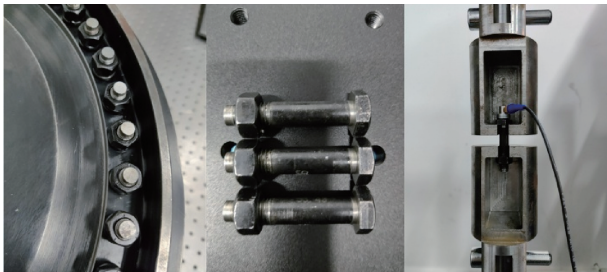


图 9 用于拉伸测试和 TOF 测量的螺栓试样
Fig.9 Bolt specimen for tension test and TOF measurement

为评估不同测量方法在螺栓轴向应力测量中的有效性,在恒温条件($26\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)下开展实验,并采用磁环夹具对换能器进行固定以实现稳定耦合^[26]。在各夹紧长度下,以 $0\sim 200\text{ MPa}$ 、 10 MPa 步长逐级加载并采集回波。为保证方法间可比性,所有数据采用统一预处理流程。鉴于峰值法在高频窄带、近似周期的回波数据上实现简洁、参数稳定,且与当前研究信号预处理方式自然匹配^[27],因此将阈值法中的峰值法明确为传统声时差法基线。

3.3 实验结果

目前,针对高强度短螺栓的轴向应力测量,基于单纵波探头的方法主要包括声时差法以及能量衰减系数法。为系统性验证尾波自适应阈值法的优越性,选取螺栓试件 A、B、C,分别采用各声时差法与能量衰减系数法进行试验与对比评估。在多组夹紧长度下分别开展标定试验,获得声时差应力系数 K_{tn} 与夹紧长度的标定曲线。随后,在目标夹紧长度下确定应力系数,据此建立统一的应力反演关系,可实现不同夹紧长度条件下的应力求解,声时差法标定结果如表 3 所示。传统声时差的拟合结果如图 10 所示。

随后对能量衰减系数与尾波自适应阈值法的测量结果进行对比。图 11 给出了不同夹紧长度条件下试件的能量衰减系数与应力的拟合结果,衰减系数定义为前两次往返底面回波在目标频带内频谱能量的对数比,并按螺栓夹紧长度进行归一化处理^[28]。

表 3 声时差法参数标定结果

Table 3 Parameter calibration results of acoustic time difference method

试件	LC/ mm	传统声时差法		尾波声时差法		尾波自适应阈值法	
		R^2	K_{Tn}	R^2	K_{Tn}	R^2	K_{Tn}
A	31.57	0.968	2.39×10^{-10}	0.985	3.39×10^{-10}	0.996	3.16×10^{-10}
	32.80	0.962	2.68×10^{-10}	0.989	3.44×10^{-10}	0.995	3.35×10^{-10}
	33.58	0.971	2.77×10^{-10}	0.984	3.49×10^{-10}	0.996	3.37×10^{-10}
B	33.37	0.983	2.69×10^{-10}	0.986	3.16×10^{-10}	0.994	3.02×10^{-10}
	37.10	0.964	2.49×10^{-10}	0.984	3.24×10^{-10}	0.996	3.25×10^{-10}
	40.47	0.981	2.84×10^{-10}	0.983	3.32×10^{-10}	0.998	3.51×10^{-10}
C	87.54	0.981	6.43×10^{-10}	0.992	8.19×10^{-10}	0.997	7.74×10^{-10}
	89.25	0.978	6.70×10^{-10}	0.993	8.22×10^{-10}	0.998	7.93×10^{-10}
	94.68	0.986	6.88×10^{-10}	0.992	8.68×10^{-10}	0.997	8.36×10^{-10}

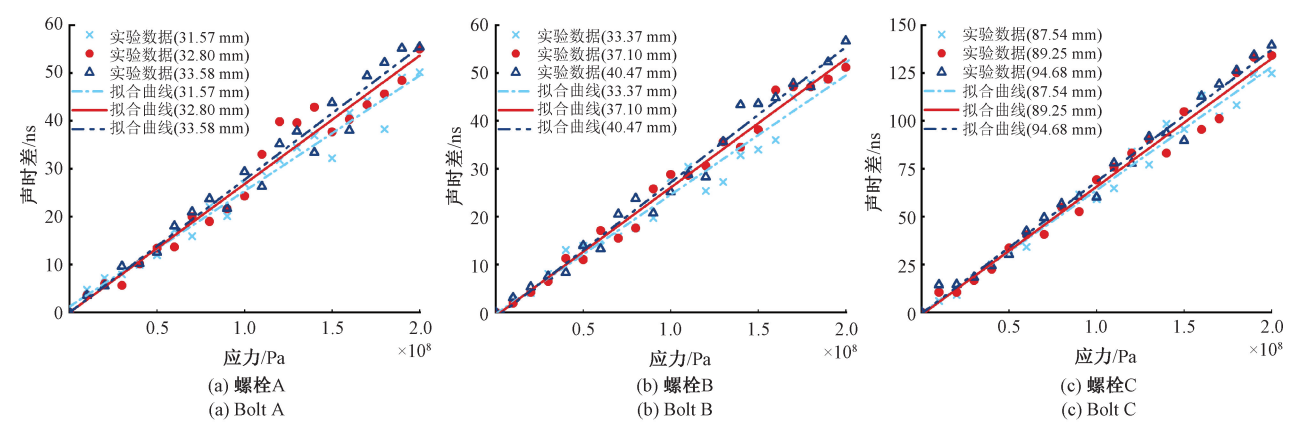


图 10 传统声时差法拟合结果

Fig. 10 Fitting results of traditional acoustic time difference method

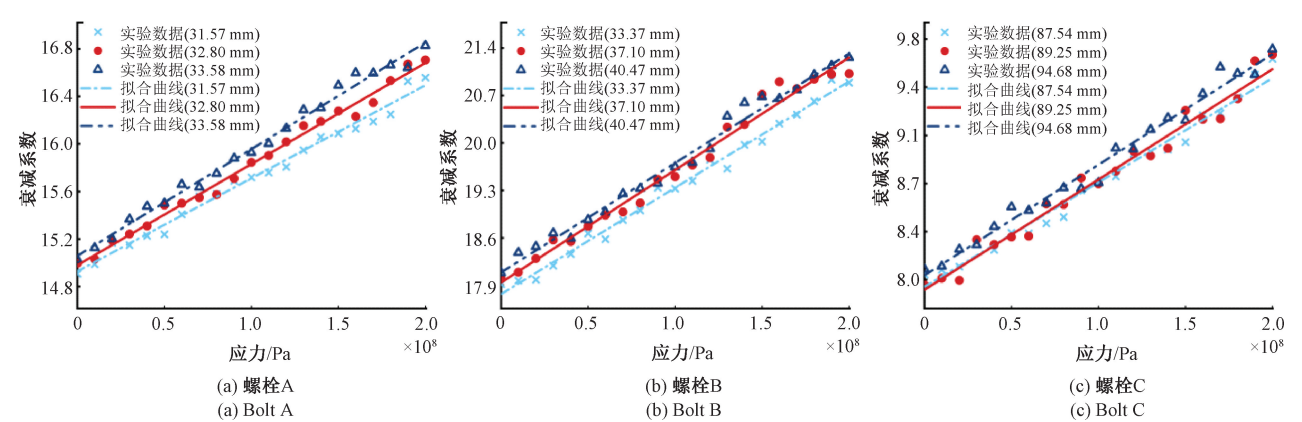


图 11 能量衰减系数法拟合结果

Fig. 11 Fitting results of energy attenuation coefficient method

基于各向异性多晶体的应力相关衰减效应,在低应力范围(0~200 MPa)内,能量衰减系数与应力呈线性关系,且曲线斜率随夹紧长度的增大而增大。为此,采用线性模型($\bar{\alpha}_L(\sigma)=B_L\sigma+C_L$)对实验数据进行拟合,其标定结果如表 4 所示。尾波自适应阈值法拟合结果如图 12 所示。

表 4 能量衰减系数法参数标定结果

Table 4 Parameter calibration results of energy attenuation coefficient method

试件	LC/mm	B_L	C_L	R^2
A	31.57	7.827×10^{-9}	14.93	0.991
	32.80	8.507×10^{-9}	14.98	0.982
	33.58	8.962×10^{-9}	15.06	0.988
B	33.37	1.198×10^{-8}	17.85	0.986
	37.10	1.471×10^{-8}	18.06	0.984
	40.47	1.757×10^{-8}	18.17	0.983
C	87.54	7.584×10^{-9}	8.002	0.985
	89.25	8.021×10^{-9}	7.973	0.987
	94.68	8.045×10^{-9}	8.084	0.989

由对比结果可知,能量衰减系数法的测量精度明显低于尾波自适应阈值法。此外,由于能量衰减系数法依赖频带内能量特征提取,其结果不仅受材料应力相关衰减影响,还对接触状态变化等系统性误差高度敏感,其测量重复性和跨工况迁移性相对较弱。

由图 10 与 12 结果可以看出,当螺栓长度较短时,传统声时差法的测量结果中应力与声时差之间的线性关系较差,数据波动明显,造成较大的拟合误差。其主要原因在于螺栓长度较短时,等效声程受限,应力变化引起的 TOF 变化相当微弱,无法精确提取。而尾波干涉可延长等效声程,放大声时差的应力响应幅度,可见尾波声时差法实验结果表现出更优的拟合精度与测量稳定性。但因其阈值选取固定于包络或幅值门限,拟合结果阶梯畸变仍存在。为此,在尾波模型框架下进一步提出了尾波

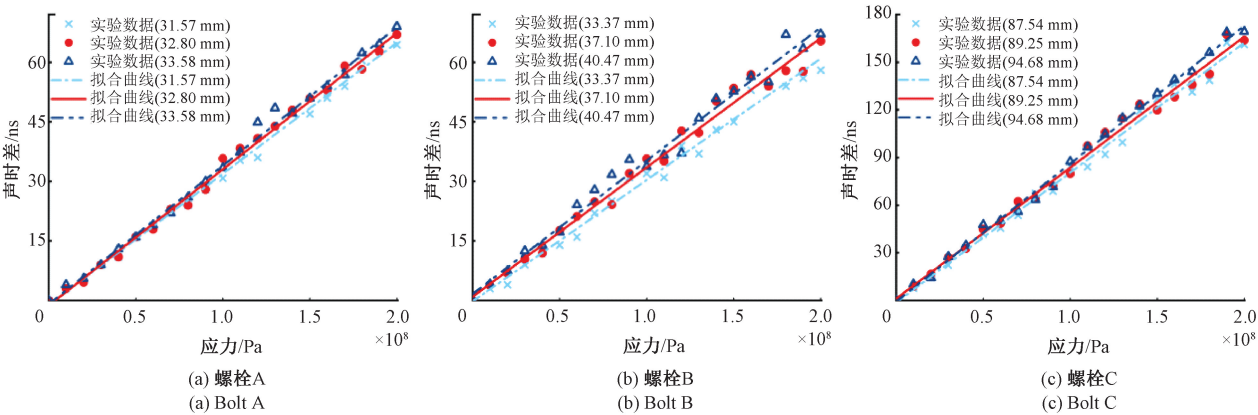


图 12 尾波声时差法拟合结果

Fig. 12 Fitting results of coda wave acoustic time difference method

自适应阈值法,该方法基于线性插值误差模型,以最小化最大误差为目标,确保不同应力条件下声时差提取始终对应最优阈值点,从机制上抑制跨周期跳变。由图 13 结

果可以看出,相较于其他方法,该方法的拟合精度显著提升,低应力段阶梯畸变基本消除。不同方法的测量结果如表 5 所示。

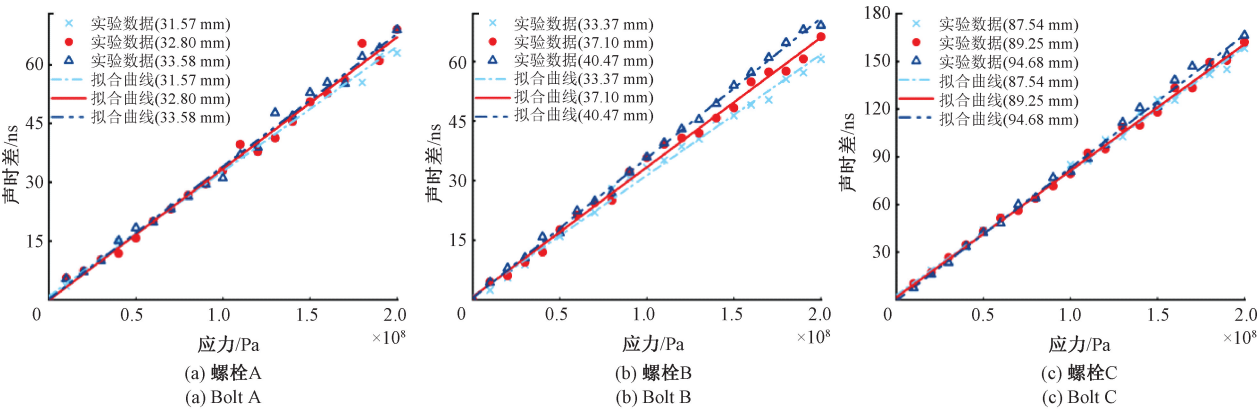


图 13 尾波自适应阈值法拟合结果

Fig. 13 Fitting results of coda wave adaptive threshold method

表 5 不同方法的应力测量结果

Table 5 The stress measurement results by different methods (MPa)

实际值	传统声时差法			能量衰减系数法			尾波声时差法			尾波自适应阈值法		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
10	16.25	12.14	12.73	12.34	14.39	12.51	12.31	12.75	12.64	11.16	11.57	11.08
20	25.95	16.84	14.22	16.74	22.73	19.43	13.33	21.32	17.92	22.98	18.65	19.23
30	31.88	25.74	26.97	22.89	27.65	23.68	26.08	32.17	27.38	32.08	29.46	28.04
40	40.97	45.22	39.29	41.88	41.64	42.05	31.87	36.79	43.66	45.79	40.29	41.85
50	50.05	44.08	50.64	47.65	47.95	47.50	46.36	54.411	51.19	49.77	52.48	50.50
60	66.81	68.48	53.07	62.82	62.46	63.43	52.17	65.30	55.77	62.66	65.59	57.65
70	67.99	62.00	73.47	66.71	72.87	66.53	66.67	76.62	65.28	72.52	72.26	71.69
80	87.17	70.64	84.89	83.76	76.72	84.78	69.56	74.45	82.17	83.80	90.43	76.84
90	86.44	103.45	95.73	85.77	93.69	85.55	81.16	98.69	84.12	92.84	99.51	94.61
100	107.20	115.58	91.98	104.76	95.95	105.98	103.78	110.12	103.21	103.75	108.52	96.63
110	117.59	114.73	100.78	104.83	114.51	104.54	111.24	108.30	102.58	122.84	115.27	106.35
120	127.58	122.84	130.33	125.64	115.08	126.87	118.44	131.72	112.42	119.69	122.30	116.70
130	138.27	142.86	120.02	123.89	135.33	123.54	127.41	132.96	121.40	130.39	133.23	138.68
140	148.44	138.37	153.19	146.58	134.26	147.21	139.02	154.75	145.47	143.06	148.15	144.51
150	140.87	152.99	148.70	142.95	156.15	142.25	147.83	164.98	154.82	158.00	152.72	145.49
160	168.32	186.00	175.88	167.52	153.44	168.21	153.70	175.45	166.25	165.30	161.89	165.38
170	178.74	188.88	158.80	162.01	176.97	161.75	171.28	166.51	160.12	174.46	166.99	175.54
180	168.19	188.73	168.23	188.46	187.38	189.02	168.87	178.38	169.17	176.00	182.91	174.52
190	198.72	195.23	193.42	181.07	182.21	180.50	181.71	177.96	197.92	194.98	189.21	184.10
200	205.72	204.97	194.04	211.20	209.63	211.17	194.32	203.51	205.36	199.10	201.93	203.02
平均相对误差	9.57%	10.06%	8.46%	7.21%	6.79%	6.91%	8.31%	7.90%	6.63%	4.95%	4.87%	3.94%

尾波自适应阈值法在 3 种不同螺栓样品全应力段的平均误差分别为 4.95%、4.87%、3.94%，测量误差在 5% 以内，测量精度明显优于传统声时差法与能量衰减系数法，且在低应力段精度提升效果显著。上述结果表明，在 高强度短螺栓应力测量中，尾波自适应阈值法能够在不增加硬件复杂度的条件下有效提高测量精度，满足工程应用的精度需求。

4 结 论

针对传统超声波测量法在 高强度短螺栓应用场景下的局限性，提出了一种基于超声尾波干涉的螺栓轴向应力测量方法。首先，阐述了尾波干涉法的测量原理，推导了尾波声时差与螺栓轴向应力之间的线性关系，并进行了仿真验证。在此基础上，为进一步提升声时差测量精度，提出了一种基于自适应阈值的声时差提取算法。最后，进行了螺栓轴向应力测量实验与超声标定。实验结果表明，该方法应用于 高强度短螺栓应力测量时，测量误

差可稳定控制在 5% 以内，能够满足大多数工程应用对测量精度的要求。该方法仅需采用单接触式压电纵波探头即可实现高精度测量，在不增加硬件复杂度的前提下，兼顾测量精度与工程可实施性，为 高强度短螺栓应力的现场测量提供了一种可实施、可推广的测量方案。

参考文献

[1] LUO L J, FAN J J, MA J M, et al. A nonlinear ultrasonic wave mixing method for looseness detection of bolted joints[J]. Ultrasonics, 2024, 142: 107402.

[2] CLOOSTERMANS B, PRONK D, BRUCKENBURG B, et al. Bolted flange connection leakage: A systematic review of monitoring challenges and technologies [J]. IEEE Sensors Reviews, 2025, 2: 1-16.

[3] MENG ZH H, ZHANG P, ZHANG H L, et al. New concepts in the design of an IoT electric torque wrench-based on a smart meter chip[J]. Engineering Reports, 2024, 6(12): 12941.

- [4] 余航,舒安庆,丁克勤. 电阻应变片敏感栅栅丝尺寸对测量精度影响的研究[J]. 中国仪器仪表, 2021(4): 71-75.
YU H, SHU AN Q, DING K Q, et al. Study on the influence of strain-gauge grid wire size on measurement accuracy[J]. China Instrumentation, 2021(4): 71-75.
- [5] TURAN M E, AYDIN F, SUN Y, et al. Residual stress measurement by strain gauge and X-ray diffraction method in different shaped rails [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96: 525-529.
- [6] MATVEENKO V, FEDOROV A, SEROVAEV G, et al. Flange joint monitoring based on strain measurement with fiber optic sensors embedded in gaskets [J]. Sensors International, 2025, 6: 100306.
- [7] 何星亮, 陈平. 基于高频柱面超声导波的螺栓轴向应力测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 179-186.
HE X L, CHEN P. Bolt axial stress measurement based on high-frequency cylindrical ultrasonic guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 179-186.
- [8] HE X L, DUAN Y X, FAN Q W, et al. Correction of coupling error in contact-type ultrasonic evaluation of bolt axial stress[J]. Ultrasonics, 2022, 124: 106763.
- [9] 陈平, 叶霞, 刘华强, 等. 基于超声能量衰减的螺栓轴向应力测量[J]. 航空学报, 2023, 44(7): 145-153.
CHEN P, YE X, LIU H Q, et al. Axial stress measurement of bolts based on ultrasonic energy attenuation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(7): 145-153.
- [10] 陈平, 商秋仙, 余鑫, 等. 基于 ELM 的超声多特征融合螺栓应力测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 46-56.
CHEN P, SHANG Q X, YU X, et al. ELM-based ultrasonic multi-feature fusion method for bolt stress measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 46-56.
- [11] 徐晓, 姜涛, 靳超, 等. 基于超声波的高强螺栓轴力检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(12): 163-172.
XU X, JIANG T, JIN CH, et al. Research on ultrasonic-based axial force detection technology for high-strength bolts[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 163-172.
- [12] PAN Q X, PAN R P, CHANG M L, et al. A shape factor based ultrasonic measurement method for determination of bolt preload [J]. NDT & E International, 2020, 111: 102210.
- [13] HU Y L, CHEN P, PENG X M, et al. Measurement of axial stress in high-strength short bolts using ultrasonic attenuation[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(8): 085013.
- [14] CHEN B, LUO CH L, XIA L, et al. Research on the measurement technology for pretension stress on small-sized bolts based on the piezoelectric ultrasonic resonance method[J]. Materials, 2024, 17(23): 5802.
- [15] 王剑波, 葛洪魁, 王小琼, 等. 利用超声尾波干涉评价页岩应力敏感性[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3299-3308, 3346.
WANG J B, GE H K, WANG X Q, et al. Evaluation of shale stress sensitivity using ultrasonic coda wave interferometry [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3299-3308, 3346.
- [16] DIEWALD F, EPPLE N, KRAENKEL T, et al. Impact of external mechanical loads on coda waves in concrete[J]. Materials, 2022, 15(16): 5482.
- [17] CHEN D D, SHEN ZH H, FU R L, et al. Coda wave interferometry-based very early stage bolt looseness monitoring using a single piezoceramic transducer [J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(3): 035030.
- [18] LIU Y M, LIU EN X, CHEN Y L, et al. Study on propagation depth of ultrasonic longitudinal critically refracted (LCR) wave [J]. Sensors, 2020, 20(19): 5724.
- [19] FOUZDI F M, IHARA I. Development of polygonal buffer rods for ultrasonic pulse-echo measurements [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 520(1): 012025.
- [20] 余鑫, 陈平, 胡义亮, 等. 基于超声多尺度衰减的螺栓轴向应力评价[J]. 振动与冲击, 2024, 43(2): 226-233.
YU X, CHEN P, HU Y L, et al. Evaluation of bolt axial stress based on ultrasonic multi-scale attenuation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(2): 226-233.
- [21] LIU Y M, ZHI J J, LIU EN X, et al. Influence of different ultrasonic transducers on the precision of fastening force measurement [J]. Applied Acoustics, 2022, 185: 108357.
- [22] GONG W Q, WANG X Z, YANG ZH Y, et al. Ultrasonic thickness measurement method and system implementation based on sampling reconstruction and phase feature extraction [J]. Sensors, 2023, 23(22): 9072.
- [23] YAN X L, XU X SH. Method for accurately measuring of

- acoustic time difference based on optimal threshold[J]. Measurement, 2021, 171: 108769.
- [24] 聂兴毅, 黄华, 李旭东, 等. 基于改进小波包能量熵和阈值自适应的切削颤振在线监测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 227-238.
- NIE X Y, HUANG H, LI X D, et al. Research on online monitoring of milling chatter based on improved wavelet packet energy entropy and threshold adaptation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 227-238.
- [25] 陈洪磊, 刘增华, 李子明, 等. 有限单元法在超声导波检测技术中的应用[J]. 力学进展, 2020, 50: 310-357.
- CHEN H L, LIU Z H, LI Z M, et al. Application of finite element method in ultrasonic guided wave testing technology[J]. Advances in Mechanics, 2020, 50: 310-357.
- [26] 庞松, 王雪梅, 倪文波. 嵌入式风电机组多螺栓应力监测系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(4): 166-171.
- PANG S, WANG X M, NI W B. Design of embedded multi-bolts stress monitoring system for wind turbines[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(4): 166-171.
- [27] BÜHLING B, MAACK S. Improving onset picking in ultrasonic testing by using a spectral entropy criterion[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2024, 155(1): 544-554.
- [28] FU T, CHEN P, YIN AI J. A new axial stress measurement method for high-strength short bolts based on stress-dependent scattering effect and energy attenuation coefficient [J]. Sensors, 2022, 22(13): 4692.

作者简介



刘俊磊, 2024 年于湘潭大学获得学士学位, 现为重庆大学机械与运载工程学院硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测。

E-mail: jjliucqu@163.com

Liu Junlei received his B.Sc. degree from Xiangtan University in 2024. He is currently a master's student in College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University. His main research interest includes ultrasonic non-destructive testing.



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无损检测, 设备状态监测与故障诊断, 机器人视觉控制, 机电一体化技术。

E-mail: chempion@126.com

Chen Ping (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Chongqing University in 2007. He is currently an associate professor in College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing, equipment condition monitoring and fault diagnosis, robot vision control and mechatronics technology.