

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412386

基于 ELM 的超声多特征融合螺栓应力测量方法*

陈平, 商秋仙, 余鑫, 尹爱军

(重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044)

摘要:针对传统超声波螺栓应力测量中存在的非线性和不适定性问题,提出一种基于极限学习机(ELM)的超声多特征融合螺栓应力测量方法。首先基于声弹性理论和散射理论,根据超声回波信号提取声时差及瑞利散射范围内多晶体材料中纵波的衰减系数等超声波特征参数。然后通过向量降维选择声时差、衰减系数和有效受力长度作为模型输入特征向量,建立了基于 ELM 的超声多特征融合螺栓应力测量模型。搭建螺栓轴向应力超声波测量实验平台,对不同材料和规格的螺栓进行螺栓应力的测量,并对比了使用传统的超声测量方法的测量结果,验证了传统超声检测方法的局限性。对比了 ELM 与其他机器学习方法包括 BP、支持向量回归(SVR)的测量结果和精度。结果表明,提出的方法有效克服了传统超声测量方法的不足,能实现不同材料不同规格的螺栓应力测量,并且测量精度更高(平均相对误差为 3.86%),泛化能力更好。

关键词:螺栓应力;超声波测量;向量降维;ELM;多特征融合

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460

Ultrasonic multi-feature fusion bolt stress measurement method based on ELM

Chen Ping, Shang Qiuxian, Yu Xin, Yin Aijun

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

Abstract: This paper proposes an ultrasonic multi-feature fusion bolt stress measurement method based on extreme learning machine (ELM) to address the non-linearity and ill-posedness issues in traditional ultrasonic bolt stress measurement. Firstly, based on the theory of acoustic elasticity and scattering theory, ultrasonic feature parameters such as the acoustic time difference of ultrasonic waves and the attenuation coefficient of longitudinal waves in polycrystalline materials within the Rayleigh scattering range are extracted from ultrasonic echo signals. Then, by vector dimension reduction, the acoustic time difference, attenuation coefficient and effective load length are selected as the input feature vector to establish an ELM-based ultrasonic multi-feature fusion bolt stress measurement model. A bolt axial stress ultrasonic measurement experimental platform is set up to measure the stresses of bolts of different materials and specifications. The results are compared with those of traditional ultrasonic measurement methods to verify the limitations of traditional ultrasonic detection methods. The measurement results and precision of ELM are compared with other machine learning methods, including back propagation (BP) and support vector regression (SVR). The results show that the method proposed in this paper effectively overcomes the shortcomings of traditional ultrasonic measurement methods, which can measure the stress of bolts of different materials and specifications, and has higher measurement accuracy (with an average relative error of 3.86%) and better generalization ability.

Keywords: bolt stress; ultrasonic measurement; vector dimension reduction; ELM; multi-feature fusion

0 引言

螺栓作为各种机械连接结构中不可或缺的重要紧固

件,当受到反复振动或过载时,螺栓连接容易产生松动现象,导致滑移,影响设备正常运行^[1]。但由于外荷载的影响和工作时间的积累,螺栓连接不可避免地会逐渐失去张力,不易检测。如果没有螺栓安装后的监测系统,松动

螺栓的潜在影响将逐渐恶化,可能导致严重的安全事故。因此,对于使用寿命期间的螺栓,准确地评估和监测其轴向应力对保证连接结构可靠性至关重要^[2-3]。工程中应用较为广泛的螺栓应力测量方法是扭矩扳手法^[4],通过控制扳手的扭矩间接测量螺栓应力,操作方便,成本低,但测量精度较低。电阻应变片法^[5]在实际测量中应变计必须安装在螺栓表面有效受力的地方,安装不便且稳定性较差。随着超声理论不断发展,超声波测量法成为目前应用最为广泛且较为成熟的一种通用型无损检测方法,具有测量精度高、稳定性好、测量过程简单等优势,是未来螺栓轴向应力测量的主要发展方向^[6-11]。

常用的超声测量法是声弹性效应法,通过引入的应力导致相速度和渡越时间(time of flight, TOF)的变化来测量螺栓轴向应力。根据测量原理分为单波法和双波法,单波法是利用单一的超声波(纵波或横波)来测量螺栓轴向应力,双波法是结合两个不同模式的弹性波来测量螺栓的轴向应力,在测量过程中需要安装两个换能器,操作复杂,且重复耦合容易带来较大测量误差。1996年,刘镇清等^[12]采用联合测量纵横波声时及温度的方案制成螺栓轴向应力仪测量各种已紧固螺栓的轴向应力。2009年, Kim等^[13]利用模式转换方法在螺栓中同时产生纵波和横波来避免换能器重复耦合所产生的误差,但该方法容易产生不同模式波的混合和失真,导致较大的测量误差。2021年,何星亮等^[14]提出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,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。在实际测量中,声波传播时间的相对变化相当微弱,特别是对于轻载情况下的高强度短螺栓,由于螺栓弹性模量较大,受载后产生的伸长量很小,应力引起的传播时间的变化很微弱,传播时间差仅为纳秒级,而且高强度短螺栓中声弹性效应并不明显,对TOF的影响也非常小。因此,TOF法并不适用于轻载或高强度短螺栓轴向应力的测量。

近年有研究者发现,超声波的衰减系数也会随着应力状态的改变而改变。2010年,Turner等^[15]推导了多晶体在施加单轴应力下的有效弹性模量的二阶统计量作为施加应力的函数。2016年, Kube等^[16]对该理论进行了扩展和概括,并模拟了单轴应力对多晶材料中弹性波衰减的影响。2019年, Kube等^[17]发现衰减系数与压力之间存在非线性关系,证实了超声散射衰减对应力变化更加敏感。基于散射衰减的螺栓应力测量方法的关键是得到一个可靠的衰减系数。常见的是通过信号频谱峰值来计算衰减系数,但超声回波信号的中心频率可能发生变化,因此难以选择合理的有效带宽范围^[18]。而且峰值频率和峰值只反映了超声回波信号的基频成分,相应的能

量不足以反映超声回波的所有特性。2022年, He等^[19]提出了一种基于谱能比的轴向应力测量方法,引入回波能量比作为应力评估的标准。2023年, Fu等^[10]利用不同频段的能量衰减系数来选择应力相关性最高的最佳频率范围,以特定频带内的能量衰减系数为输入矢量,建立轴向应力测量模型。以上均是使用线性关系进行测量。然而,螺栓头部和螺纹部分存在非线性应力分布,衰减系数和应力之间将呈现出非线性关系,且对长螺栓来说衰减更严重,也会导致衰减系数计算不准确。

超声特征参数如速度、衰减系数、非线性系数和背散射信号参数等,与螺栓应力的测量息息相关。然而,螺栓材料的强度、规格、测量过程中的系统误差、螺栓受力部分的非线性分布,都会导致这些测量特征参数的变化,而引起超声参数对应力测量具有不同的灵敏度。传统的TOF法和衰减系数法均采用简化后的线性关系,各自适应不同规格螺栓的测量,且对不同的螺栓及夹紧长度情况都需要进行单独标定,这就导致测量过程变得复杂,且难以实现不同材料和规格的螺栓轴向应力测量。随着人工智能的不断发展,神经网络、极限学习机(extreme learning machine, ELM)、支持向量回归(support vector regression, SVR)等机器学习算法在处理复杂非线性和不适定问题方面表现出显著的优势^[20-21]。因此,为解决超声检测中存在的非线性和不适定问题,充分利用各方法测量特征的优势,本文提出一种基于ELM的超声多特征融合螺栓应力测量方法,首先对不同材料及规格的螺栓加载应力,提取能充分反映螺栓应力信息的超声参数,然后根据各特征与螺栓应力之间的强相关性以及各特征之间的弱相关性进行筛选,最终选择三个特征作为机器学习模型的输入向量,建立基于ELM的超声多特征融合螺栓应力测量模型。实验结果表明,与传统的超声波测量法以及常用的BP和SVR相比,本文提出的方法在螺栓应力测量方面具有较好的泛化能力和较高的测量精度,能够实现不同材料和规格的螺栓同时融合测量,具有较好实用价值。

1 理论分析

1.1 超声特征参数提取

1) 声时差特征参数

超声波在螺栓内部传播过程如图1所示,其中 L_0 为螺栓全长, L_e 为有效受力长度, L_c 为螺母和螺栓头之间的实际夹紧距离,螺栓的有效受力长度定义为^[22]:

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

式中: 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。根据声弹性理论和胡克定律,零应力及受

$$\chi_{XY} = \frac{Cov(X, Y)}{S_X S_Y} \quad (11)$$

式中: $Cov(X, Y)$ 为样本协方差; S_X, S_Y 分别为 X, Y 的样本标准差, 由式(12) ~ (14) 表示:

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n - 1} \quad (12)$$

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

式中: \bar{X}, \bar{Y} 分别为 X, Y 的样本均值; n 为样本数。

由于本文中采用的超声参数较多, 因此采用上述降维规则进行特征冗余的剔除, 表 2、3 分别为不同夹紧长度下超声参数与螺栓应力之间以及各超声参数之间的平均 Pearson 相关系数。根据降维规则, 综合分析表 2 和 3 可知, 选择声时差和衰减系数两个超声参数作为螺栓应力测量的模型输入向量的元素, 与有效受力长度组成多特征输入向量。

表 2 超声参数与应力的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between ultrasonic parameter and stress

试件	$\Delta t - \sigma$	$\alpha_L - \sigma$	$V - \sigma$
A	0.997	0.902 6	0.996
B	0.980	0.900 2	0.982
C	0.995	0.910 3	0.976

表 3 超声参数之间的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient between ultrasonic parameters

试件	$\Delta t - \alpha_L$	$\alpha_L - V$	$\Delta t - V$
A	0.804	0.863	0.997
B	0.789	0.875	0.986
C	0.792	0.864	0.992

1.3 基于 ELM 的超声多特征融合螺栓应力测量方法

ELM 是由 Huang 等^[25]于 2004 年提出的一种用于单隐层前馈神经网络(single-hidden layer feedforward neural networks, SLFNs)的新学习算法, 随机选择输入权值并通过最小化平方损失函数得到的最小平方解确定 SLFNs 的输出权重。该算法可以提高普通神经网络如 BP、SVR 的学习效率同时简化其学习参数^[26]。与传统的单隐层前

馈神经网络相比, ELM 具有计算速度快、误差小的优点^[27]。ELM 的基本原理如图 3 所示。

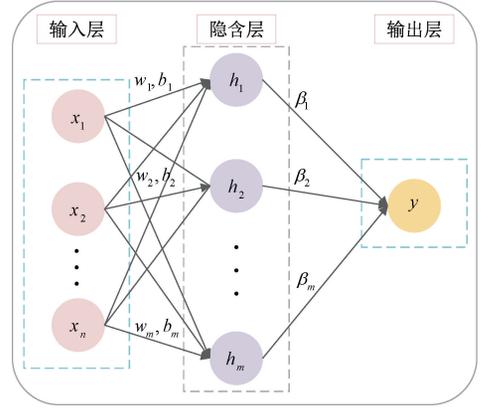


图 3 ELM 原理

Fig. 3 The basic principles of ELM

图 3 中, 针对本文的样本, 输入为多维向量, 输出为一维向量。则假设一组训练样本 $P = \{x_i, y\}$, 其中 x 是 n 维输入向量, y 是一维输出向量, 则以上原理图中具有 m 个节点的 ELM 的数学模型定义为:

$$f_i(x) = \sum_{j=1}^m \beta_j g(w_j x_i + b_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中: w_j 是连接第 j 个隐含层和输入节点的权重; b_j 是第 j 个隐含层节点的偏差; β_j 是隐藏层和输出层之间的权重, $f_i(x)$ 是第 i 个节点的输出值; $w_j x_i$ 为 w_j 和 x_i 的内积, $g(x)$ 表示激活函数。式(15) 改写为:

$$H \cdot \beta = Y \quad (16)$$

式中: β 是 m 维权重矩阵; H 是隐含层输出矩阵; Y 是输出矩阵。

求解 H 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵, 通过随机给定输入权值和隐含层偏差来训练训练集以使用 ELM 网络。最终输出权重 $\hat{\beta}$ 可以表示为:

$$\hat{\beta} = H^+ \cdot Y \quad (17)$$

式中: H^+ 是 H 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵。在得到最终的 $\hat{\beta}$ 之后, 引入本文的实例, 输入向量为 $x = (x_1, x_2, x_3)$, 其元素分别表示声时差、衰减系数和夹紧长度; 输出向量为 $y = \sigma$ 表示应力值。即完成 ELM 模型训练。

基于 ELM 的超声波多特征融合的螺栓应力测量模型建立过程如图 4 所示。螺栓应力测量的多维特征向量由超声参数(声时差、衰减系数、纵波波速)和有效受力长度组成。超声特征参数向量表示为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 当特征参数的维数 $n \geq 3$ 时, 需进行降维处理, 剔除多余的参数, 利用 ELM 对所选择的特征参数进行融合, 建立超声波多特征融合的螺栓应力测量模型。

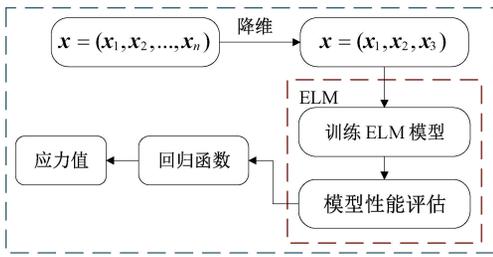


图4 ELM 应力测量模型构建过程

Fig. 4 The construction process of the ELM measurement model of stress

2 实验

2.1 实验系统及螺栓试件制备

实验系统如图5所示,包括集成数据采集系统和拉伸试验机组成。数据采集系统包括超声发射接收板卡采用美国JSR Ultrasonic公司的PRC50板卡,其前端集成增益范围为-14~60 dB的放大器。数据采集使用AD-Link PCIE-9852示波器,其最大采样频率200 MHz,AD转换位数14 bit。将以上硬件集成于工控机中,并使用LabView完成DAQ系统搭建。超声探头采用Olympus公司生产的接触式单晶纵波探头A112S-RM,中心频率分为10 MHz,晶片直径为6 mm,测量时使用纵波探头专用耦合剂B2。同时,为保证实验过程中换能器与螺栓头部的稳定耦合,并使换能器与螺栓两者的中心轴线尽可能重合,设计如图6所示的磁环夹装置,利用强磁环的磁力使换能器准确贴合螺栓端面。拉伸试验机使用中国上海协强仪器制造有限公司生产的CTM2200S,工控机可以通过RS232串口控制拉伸试验机并读取其配套压力传感器数据。选取不同规格的螺栓作为试验对象,如图7所示,参数如表4所示。螺栓的两端都进行压平处理以保证稳定接触。此外,由于在超声波测试中温度影响是不可避免的^[28],因此采用了加热器和由伯尔康有限公司生产的分辨率为0.1℃的JXB312温度计来控制 and 监测环境温度。

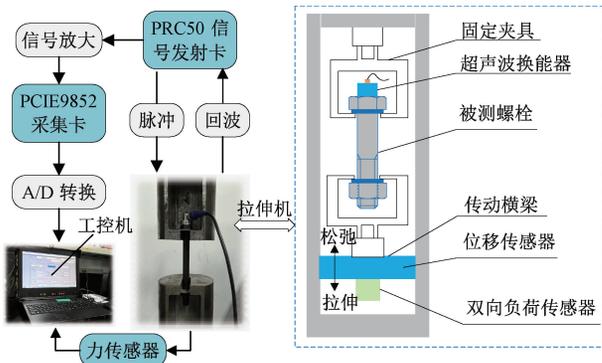


图5 实验系统

Fig. 5 Experimental system

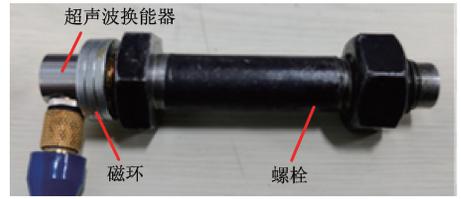


图6 磁环夹装置

Fig. 6 Magnetic ring fixing device



图7 螺栓试件

Fig. 7 Bolt specimens

表4 试件参数

Table 4 Parameters of the samples

试件	材料	直径/mm	长度/mm	螺纹类型
A	45 钢	8	114.5	半螺纹
B	304 钢	8	83.55	全螺纹
C	Q235	10	53.5	半螺纹

2.2 超声特征计算

在超声实验中,超声回波信号因受应力影响而产生的变化比较微弱,但所使用的采集卡的最大采样频率为200 MHz,频率分辨率不够高,导致同一采样间隔内的部分信息损失。因此,使用希尔伯特变换^[29]获得超声回波信号的包络信号,以准确获取信号幅值和过渡时间。经过希尔伯特变换后的超声回波信号如图8所示。

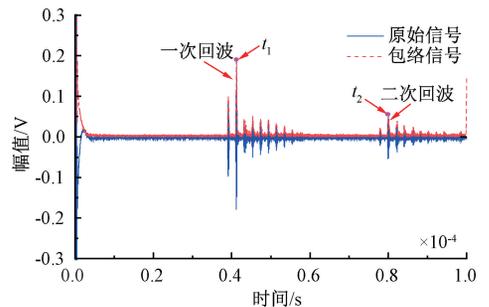


图8 希尔伯特变换信号

Fig. 8 Hilbert transforms of ultrasonic signals

本文利用一次回波和二次回波之间的时间差作为渡越时间:

$$t = t_2 - t_1 \quad (18)$$

与零应力下的渡越时间做差即可得到声时差:

$$\Delta t = t_\sigma - t_0 \quad (19)$$

式中: t_σ 和 t_0 分别表示应力为 σ 和零时的渡越时间。另外,本文有效受力长度由式(1)计算。

根据超声回波特点,采用矩形窗口截取第 1 次底面回波信号 $v_1(t)$ 和第 2 次底面回波信号 $v_2(t)$,将时域回波信号转换为频域,其频域信号 $S_i(f)$ 可表示为:

$$S_i(f) = \int_{t_1}^{t_2} v_i(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (20)$$

式中: i 代表第 i 次由螺栓底面反射的往返回波,这里 $i = 1, 2$ 。第 i 次底面回波信号频谱的能量为:

$$E_i = \int_{f_1}^{f_2} |S_i(f)|^2 df \quad (21)$$

式中: f_1 和 f_2 分别代表每个频段的频率范围下限和上限。则超声频谱能量衰减系数可以表示为^[19]:

$$\alpha_L = \frac{1}{2L_0} \ln \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (22)$$

式中: E_1 表示第 1 次底面回波信号频谱能量; E_2 表示第 2 次底面回波信号频谱能量。

2.3 传统超声测量法的螺栓参数标定

在精确测量螺栓轴向应力之前,需要对模型参数进行拟合标定。首先,为了消除温度变化对材料衰减和声速的影响,在中央空调下进行应力测量试验时,保持温度恒定为 $26 \pm 1^\circ\text{C}$,拉力试验机对试件 A、B、C 的加载步长设置为 20 MPa,加载范围为 0~200 MPa。A、B、C 试件在不同夹紧长度下轴向应力与 TOF、衰减系数的关系如图 9、10 所示。可以看出,TOF 和衰减系数随着轴向应力的增大而增大,且随着夹紧长度的增加,其拟合直线的斜率增大,与理论相一致。螺栓参数的标定结果如表 5、6 所示。由图 9 可以看出,对长螺栓来说,应力与 TOF 之间存在明显的线性关系,对短螺栓来说,总体呈现线性关系,但中间出现明显的梯形畸变,这是因为采样频率不够导致 TOF 变化量极小,不易得到准确的值。由图 10 可以看出,对长、短螺栓来说,应力和衰减系数之间的线性关系都较差,波动较大,拟合优度不够,造成较大的拟合误差,从而导致该方法的测量误差较大。

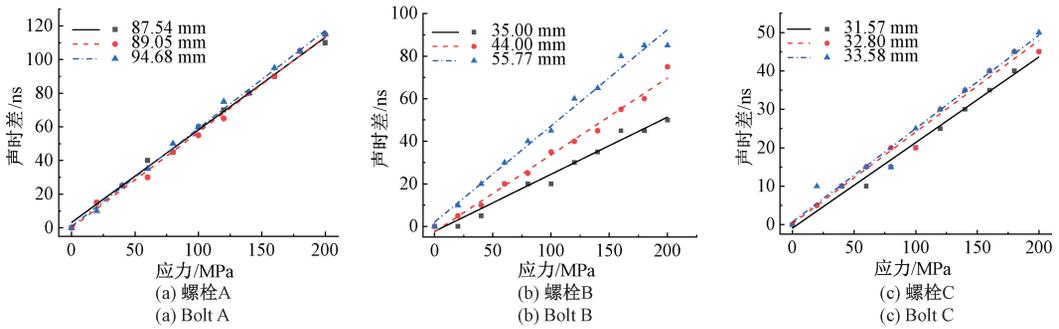


图 9 应力-TOF 拟合曲线

Fig. 9 Stress-TOF fitting relationship curve

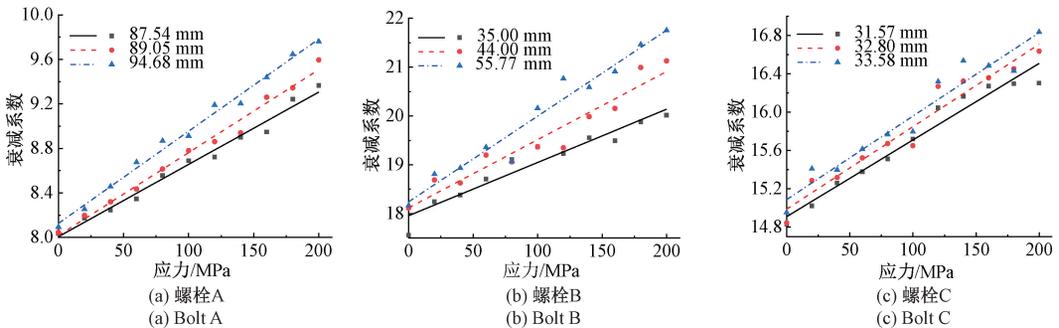


图 10 应力-衰减系数拟合曲线

Fig. 10 Stress-attenuation coefficient fitting relationship curve

表5 TOF法参数标定结果

Table 5 Parameter calibration results of TOF method

螺栓	夹紧长度/mm	拟合斜率	拟合截距	平均斜率	平均截距
A	87.54	0.550 0	3.181 8	0.566 5	1.363 6
	89.05	0.568 2	0		
	94.68	0.581 2	0.909 1		
B	35.00	0.268 2	-2.272 7	0.360 6	0.757 6C
	44.00	0.361 4	2.500 0		
	55.77	0.452 3	2.045 5		
C	31.57	0.222 7	-0.909 1	0.2317	0
	32.80	0.227 3	0.227 3		
	33.58	0.243 2	0.681 8		

表6 衰减系数法参数标定结果

Table 6 Parameter calibration results of attenuation coefficient method

螺栓	夹紧长度/mm	拟合斜率	拟合截距	平均斜率	平均截距
A	87.54	0.006 5	8.006 7	0.007 4	8.049 8
	89.05	0.007 5	8.016 7		
	94.68	0.008 3	8.126 0		
B	35.00	0.010 9	17.957 7	0.014 2	18.106 1
	44.00	0.014 0	18.118 8		
	55.77	0.017 6	18.241 9		
C	31.57	0.008 0	14.908 6	0.008 4	14.993 9
	32.80	0.008 6	14.985 8		
	33.58	0.008 7	15.087 2		

3 结果与讨论

3.1 传统超声法及 ELM 多特征融合法测量结果

首先对与 A、B、C 同材料同规格的螺栓 A_1 、 B_1 、 C_1 进行测试,通过拉伸试验机给螺栓施加载荷,加载范围为 0~200 MPa,加载步长设置为 20 MPa,并使用 2.3 节的标定数据进行测量,传统超声法测量结果如表 7、8 所示。接着利用 ELM 对所提取的特征进行融合,训练模型并测量螺栓应力,其测量结果如表 9 所示。

由表 7、8 可以看出,TOF 法和衰减系数法的测量平均相对误差较大,尤其当螺栓长度较短时,TOF 法测量的平均相对误差相对较大最大达到 14.28%,这是因为螺栓较短时应力变化引起的超声波渡越时间的变化相当微弱,无法精确提取;衰减系数法对短螺栓的测量具有一定优势,但对长螺栓的测量平均相对误差相对较大,这是由于长螺栓衰减大且每次加载应力引起的衰减不同,导

表7 TOF法测量结果

Table 7 Measurement results of TOF method

实际值/MPa	测量结果/MPa		
	A_1	B_1	C_1
20	15.25	16.39	21.58
40	41.75	44.12	21.58
60	59.38	57.98	43.16
80	85.85	71.85	64.74
100	103.51	85.72	86.32
120	129.99	99.58	129.48
140	156.46	127.31	129.48
160	182.94	127.31	151.06
180	200.59	155.04	172.64
200	218.25	182.78	194.24
平均相对误差/%	9.49	12.51	14.28

表8 衰减系数法测量结果

Table 8 Measurement results of attenuation coefficient method

实际值/MPa	测量结果/MPa		
	A_1	B_1	C_1
20	34.10	30.18	15.45
40	25.16	30.37	27.37
60	64.19	53.61	56.44
80	83.90	85.14	64.04
100	101.86	92.23	103.44
120	116.15	125.14	124.36
140	139.20	147.94	128.92
160	157.33	179.11	173.93
180	183.94	182.11	185.94
200	208.72	205.46	193.04
平均相对误差/%	13.33	12.56	11.07

致衰减系数的计算不精确。由表 9 可知,基于 ELM 的超声多特征融合法对长、短螺栓以及不同材料螺栓的应力测量平均相对误差最大为 5.82%,对比表 7 和 8 发现,其测量平均相对误差远小于 TOF 法和衰减系数法。该方法充分利用现有方法的优势,通过不同特征的融合,大大提高了测量精度,弥补了 TOF 法和衰减系数法测量的非线性和泛化能力差等局限性。

3.2 不同机器学习算法测量性能比较

为了说明 ELM 模型的优越性,使用常用的机器学习模型 ELM、BP、SVR 对螺栓应力进行测量,并比较其测量结果。引入统计指标归一化均方根误差 (RMSE) 和决

表 9 ELM 多特征融合法测量结果

Table 9 Measurement results of ELM multi-feature fusion method

实际值/MPa	测量结果/MPa		
	A ₁	B ₁	C ₁
20	18.84	23.13	16.31
40	42.88	36.02	46.21
60	64.98	56.74	54.82
80	81.05	81.27	80.03
100	99.82	99.11	96.75
120	116.42	117.18	114.89
140	136.18	135.42	148.25
160	161.59	158.91	159.25
180	178.52	17.43	180.09
200	192.72	193.45	196.75
平均相对误差/%	3.34	4.45	5.82

定系数 R^2 来评价以上 3 种模型的性能,公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i - \tilde{\sigma}_i)^2} \quad (23)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \bar{\sigma})(\tilde{\sigma}_i - \bar{\tilde{\sigma}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 (\tilde{\sigma}_i - \bar{\tilde{\sigma}})^2}} \quad (24)$$

式中: N 为样本个数; σ_i 为实际值; $\tilde{\sigma}_i$ 为测量值; $\bar{\sigma}$ 为 σ_i 的平均值; $\bar{\tilde{\sigma}}$ 为 $\tilde{\sigma}_i$ 的平均值。归一化误差越小,模型的测量精度越高,决定系数越大,实际值和测量值之间的相关性越高。

利用所采集的信号提取特征,作为模型的多特征输入,输出为不同的应力值。然后对 3 种模型进行训练,最后用训练好的模型对螺栓进行应力测量并对比各模型的测量结果,验证 ELM 模型对螺栓应力测量的有效性。3 种模型对螺栓应力测量结果对比如图 11 所示,可以看出,ELM 的测量结果均集中在 $y=x$ 附近,BP 和 SVR 的测量结果相对离散,表明 ELM 的测量效果较好,精度较高;对于轻载情况的测量也能达到很好的效果。

3 种模型对训练集和测试集的测量相对误差的箱线图如图 12 所示,可直观看出 ELM、BP、SVR 的应力测量效果以及稳定性。总体而言,ELM 的测量误差明显小于 BP 和 SVR,ELM 的测量效果并未受到实际应力过小 (<40 MPa) 的影响。然而,BP 和 SVR 对实际应力过小时的测量精度和稳定性明显降低。因此,使用 ELM 测量螺栓轴向应力的精度和稳定性较 BP 和 SVR 均有提升,具有较好的工程应用价值。表 10 为其平均相对误差,由

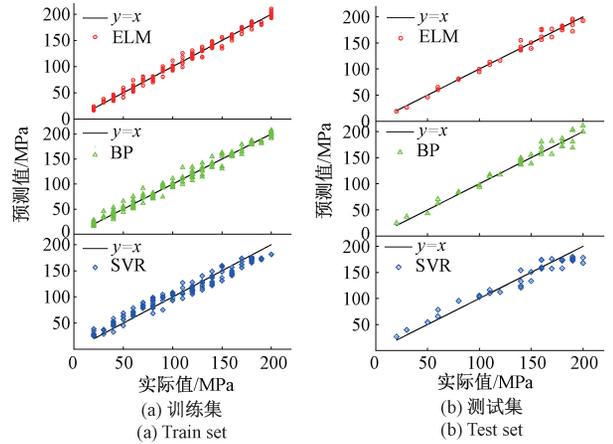


图 11 3 种模型测量结果

Fig. 11 Measurement results of three models

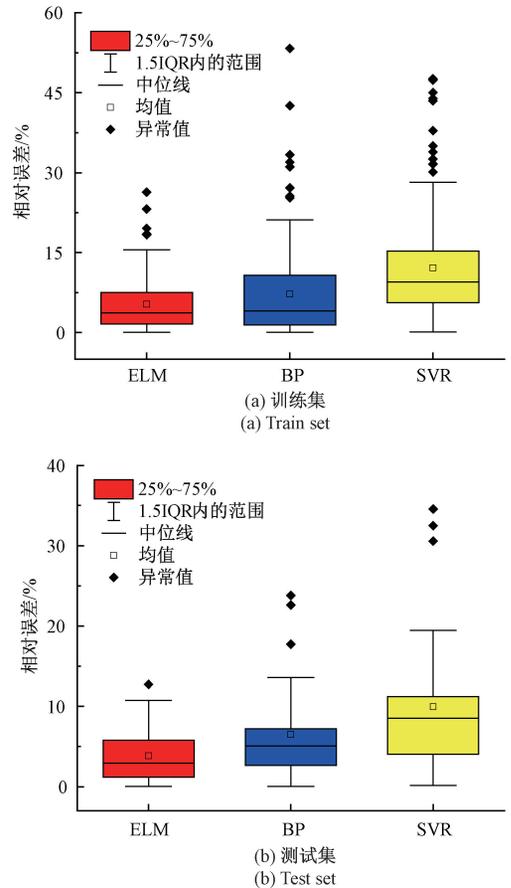


图 12 3 种模型的测量误差分析

Fig. 12 Analysis of measurement errors for three models

表 10 可见,与 BP 和 SVR 相比,ELM 对训练集和测试集的测量平均相对误差均为最小,对测试集的测量平均相对误差仅为 3.86%。

3 种模型测量的归一化均方根误差和决定系数对比结果如图 13 所示。由图 13 可以看出,ELM 的归一化

表 10 3种模型测量平均相对误差

Table 10 Measurement mean-related error of three models

数据集	模型	平均相对误差/%
训练集	ELM	5.33
	BP	7.38
	SVR	13.63
测试集	ELM	3.86
	BP	6.50
	SVR	9.94

均方根误差均小于 BP 和 SVR 的归一化均方根误差,说明 ELM 的测量值和实际值之间的平均偏差程度较小,测量更为准确;另外,ELM 的决定系数均为最大,且接近 1,表明其测量结果和实际值之间的相关性更高。虽然 BP 的决定系数接近于 ELM,但是 BP 测量过程耗费时间较长。综合以上分析,本文提出的基于 ELM 的超声多特征融合的螺栓应力测量模型具有较高的测量精度和较好的泛化性,可实现不同材料及规格的螺栓应力的测量,能满足工程应用精度需求。

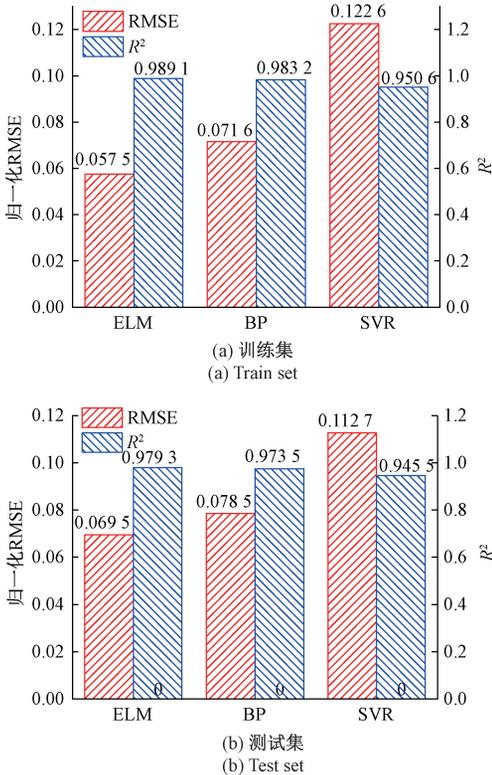


图 13 3种模型测量性能比较

Fig. 13 Measurement performance of three models

为进一步验证 ELM 算法测量的有效性,任取与以上 3种螺栓同规格和材料的未加载过的螺栓各一颗(记为

A₂、B₂、C₂)进行了盲测试验,测量结果如图 14 所示。由图 14 可以看出,ELM 对不同的新试件的测量结果与实际应力值之间的平均绝对误差约为 4 MPa,在 0~200 MPa 范围内的平均相对误差 (MRE) 最大为 5.73%,这进一步说明 ELM 的测量精度较高,泛化能力较好。

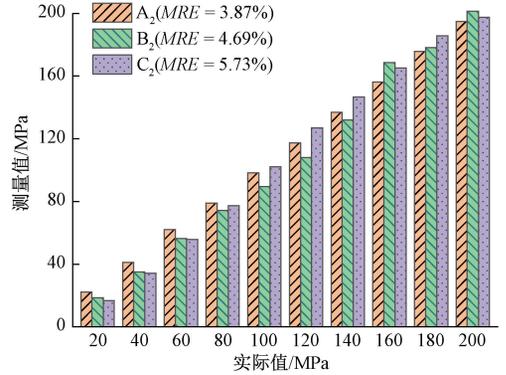


图 14 新试件的 ELM 算法测量结果

Fig. 14 Measurement results of ELM algorithm for new specimens

4 结 论

本文研究了传统超声测量螺栓轴向应力的缺点和局限性,提出了一种基于 ELM 的超声多特征融合螺栓轴向应力测量方法,通过实验和对比验证了该方法的有效性。该方法对不同材料和规格的螺栓同时测量的平均相对误差仅为 3.86%,测量精度高于其他机器学习方法包括 BP 和 SVR,且明显高于传统的渡越时间法和衰减系数法对单一螺栓的测量精度。该方法可以满足工程上大多数场合测量精度需求,测量时只需提取超声特征而无需对每个夹紧长度情况都单独标定,测量过程简便,具有一定的工程应用价值。

参考文献

[1] 宫涛,杨建华,庄絮竹,等. 螺栓松动故障监测实验研究综述[J]. 机械设计与制造, 2023, 61(9): 1-10. GONG T, YANG J H, ZHUANG X ZH, et al. Review of experimental research on bolt looseness monitoring[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023, 61(9): 1-10.

[2] XU K, WU X, WANG D X, et al. Electromechanical coupling modeling and motor current signature analysis of bolt loosening of industrial robot joint[J]. Mech Syst Signal Process, 2023, 184: 1-18.

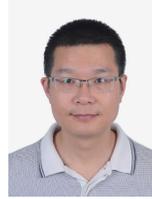
[3] XUE S, LI X, XIE L, et al. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(5):

- 2231-2243.
- [4] WU Z, ZHANG G, DU W, et al. Torque control of bolt tightening process through adaptive-gain second-order sliding mode[J]. *Meas Control*, 2020, 53(7-8): 1131-1143.
- [5] 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, 361(4): 71-75.
- YU H, SHU A Q, DING K Q. Research on the influence of the size of strain gauge sensitive grid wire on measurement accuracy [J]. *China Instrumentation*, 2021, 361(4): 71-75.
- [6] 潘勤学, 邵唱, 肖定国, 等. 基于形状因子的螺栓紧固力超声检测方法研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(4): 880-888.
- PAN Q X, SHAO CH, XIAO D G, et al. Study of ultrasonic measurement method for bolt fastening force based on shape factor [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(4): 880-888.
- [7] LIU E X, LIU Y M, CHEN Y L, et al. Measurement method of bolt hole assembly stress based on the combination of ultrasonic longitudinal and transverse waves[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 189: 108603.
- [8] 潘勤学, 常梅乐, 潘瑞鹏, 等. 螺栓轴向应力的非线性超声检测技术研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(22): 88-95.
- PAN Q X, CHANG M L, PAN R P, et al. Research on nonlinear ultrasonic testing technology of bolt axial stress[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(22): 88-95.
- [9] CHEN P, HE X L, WANG X Y. Ultrasonic measurement of axial stress using high-frequency cylindrical guided wave [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(5): 6691-6697.
- [10] FU T, CHEN P, YIN A J, et al. Axial stress measurement for tightened bolt based on the effect of stress on ultrasonic wave attenuation[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2023, 38(6): 1047-1074.
- [11] 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 the axial stress in bolts based on the ultrasonic multi-scale attenuation method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(2): 226-233.
- [12] 刘镇清, 王路. 一种以超声纵横波声时及温度为参量的螺栓轴向应力测量仪[J]. *仪器仪表学报*, 1996, 17(6): 662-665.
- LIU ZH Q, WANG L. A bolt axial stress measuring instrument with ultrasonic longitudinal and transverse wave sound time and temperature as parameters [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1996, 17(6): 662-665.
- [13] KIM N, HONG M. Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound [J]. *NDT&E International*, 2009, 42(3): 164-169.
- [14] 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.
- [15] TURNER J A, GHOSHAL G. Polycrystals under applied loads; Second-order grain statistics[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(3): 031907.
- [16] KUBE C M, TURNER J A. Stress-dependent ultrasonic scattering in polycrystalline materials[J]. *Journal of The Acoustical Society of America*, 2016, 139(2): 811-824.
- [17] KUBE C M, ARGUELLES A P. Pressure influence on elastic wave attenuation in polycrystalline materials[J]. *Journal of The Acoustical Society of America*, 146(6): 4183-4189.
- [18] ZHANG G D, LI X B, ZHANG S Z, et al. Investigation of frequency-dependent attenuation coefficients for multiple solids using a reliable pulse-echo ultrasonic measurement technique[J]. *Measurement*, 2021, 177: 109270.
- [19] HE X L, CHEN P. Ultrasonic measurement of bolt axial stress using the energy ratio of multiple echoes[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 3928-3936.
- [20] LIU S, DU C, MOU J, et al. Diagnosis of structural cracks using wavelet transform and neural networks[J]. *NDT & E International*, 2013, 54: 9-18.
- [21] LIN L, ZHANG W, MA Z, et al. Porosity estimation of abrasible seal coating with an optimized support vector regression model based on multi-scale ultrasonic attenuation coefficient [J]. *NDT & E International*, 2020, 113: 1-10.

- [22] WANG L. Influence of bolt shape on ultrasonic fastening stress measurement[J]. Measurement Technique, 1999, 4: 23-25.
- [23] 李珊, 李雄兵, 宋永锋, 等. 考虑晶粒分布的多晶体材料超声散射统一理论[J]. 物理学报, 2018, 67(23): 107-118.
- LI SH, LI X B, SONG Y F, et al. Ultrasonic scattering unified theory for polycrystal material with grain sizes distribution[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(23): 107-118.
- [24] CHEN X, WU G, CHEN H, et al. A multi-parameter ultrasonic evaluation of mean grain size using optimization[J]. NDT & E International, 2019, 106: 10-17.
- [25] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: A new learning scheme of feedforward neural networks[C]. IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2004: 985-990.
- [26] WANG J, LU S, WANG SH, et al. A review on extreme learning machine[J]. Multimed Tools Appl, 2022, 81: 41611-41660.
- [27] LUO J H, WONG CH-M, VONG CH-M, et al. Multinomial Bayesian extreme learning machine for sparse and accurate classification model[J]. Neurocomputing, 2021, 423: 24-33.
- [28] 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: 1-10.

- [29] 任晓寰, 冯海泓, 杨震亚. 超声回波参数估计的初值选取方法[J]. 声学学报, 2020, 45(5): 728-738.
- REN X H, FENG H H, YANG ZH Y. Selection of initial values for ultrasonic echo parameter estimation[J]. Acta Acustica, 2020, 45(5): 728-738.

作者简介



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. Now he is an associate professor at Chongqing University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing, equipment condition monitoring and fault diagnosis, robot vision control and mechatronics technology.



商秋仙, 2022年于重庆邮电大学获得学士学位, 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: 3258712607@qq.com

Shang Qiuxian received her B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at Chongqing University. Her main research interest includes ultrasonic non-destructive testing.