

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2026.01.013

基于 ZYNQ 的超声波螺栓紧固力检测系统

徐伟, 陆云洋, 郭翠娟, 白晋军
(天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对目前超声波螺栓紧固力检测中存在的采样率低、测量准确度低的问题, 研制了基于 ZYNQ 的超声波螺栓紧固力检测系统。基于声弹性理论和 Hooke 定律, 推导螺栓紧固力与超声波声时差的对应关系, 并进行温度补偿。在 ZYNQ 芯片上对采集的回波信号采用相关性法进行声时差计算, 利用 FPGA 快速计算信号互相关函数, 并在 ARM 端进行三次样条插值处理, 从而获得准确的声时差估计值。标定试验结果表明: 相较于相关性法的传统实现方式, 该系统运算速度大幅提高, 单次声时差计算耗时仅需不到 50 μ s; 系统超声波渡越时间的测量分辨率达到百皮秒量级; 系统动态标定重复准确度达到 $\pm 0.2\%$, 相较于现有检测系统提升显著。

关键词: 超声波检测; 螺栓紧固力; ZYNQ; 相关性法; 标定试验

中图分类号: TH823 文献标志码: A 文章编号: 1671-024X(2026)01-0094-07

Ultrasonic detection system of bolt fastening force based on ZYNQ

XU Wei, LU Yunyang, GUO Cuijuan, BAI Jinjun

(School of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In view of the defects of low sampling rate and insufficient measurement accuracy in existing ultrasonic detection methods of bolt clamping force, the ultrasonic detection system of bolt fastening force based on ZYNQ was developed. Based on the principles of acoustoelastic effect and Hooke's law, the relationship between the bolt fastening force and ultrasonic transit time difference was deduced, and the temperature compensation was carried out. The correlation method was adopted to calculate the transit time difference for the collected echo signals on ZYNQ. The system calculated the output of the cross-correlation function quickly by FPGA, and carried out cubic spline interpolation on the ARM side to obtain an accurate estimation of the transit time difference. The calibration testing results showed that, compared to traditional correlation methods, the computing speed of this system was greatly improved, and the time consumed for a single calculation of transit time difference was less than 50 μ s. The measurement resolution of ultrasonic transit time of the system was on the order of hundreds of picoseconds. And the repeatability of the system's dynamic calibration results was within $\pm 0.2\%$. Compared to existing detection systems, this system has been significantly improved.

Key words: ultrasonic detection; bolt fastening force; ZYNQ; correlation method; calibration testing

螺栓作为常用的联接件, 具有装配简单、成本低、适应性好等优点, 广泛应用于航空航天、电力发电、道路桥梁、机械制造等领域^[1]。在装配过程中, 螺栓紧固力是衡量联接质量的重要指标, 螺栓紧固力过大或过小, 都会对结构或设备的安全造成影响。因此, 准确、实时地检测螺栓紧固力至关重要^[2]。

目前常用的螺栓紧固力检测方法包括扭矩扳手

法、电阻应变片法、压电阻抗法、振动法以及超声波法^[3]。其中, 超声波法因精度高、实时性好等诸多优点备受国内外研究人员的关注。国外的超声螺栓紧固力检测技术发展较早。1984年, Joshi等^[4]进行了超声波测量螺栓紧固力的理论研究, 通过试验证明了超声波法的可行性。1987年, Steblay^[5]研制了超声波螺栓紧固力测量设备, 并成功应用于煤矿锚杆螺栓紧固力的测

收稿日期: 2024-03-09

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2019M661013); 天津市科技计划项目(20YDTPJC01090, 22YDTPJC00090)

通信作者: 徐伟(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为图像处理、光纤传感器与光谱检测。E-mail: xuwei@tiangong.edu.cn

量。2006年, Jhang等^[6]提出了一种利用相位检测技术精确测量超声波声时差的算法, 并验证了其有效性。近年来国内也取得了不错的研究成果。2005年, 张俊^[7]依据声弹性理论, 推导了螺栓紧固力与超声波声时差的关系, 研制了以单片机为核心的螺栓紧固力检测仪, 其测量准确度达到 $\pm 5\%$ 。2019年, 刘家斌等^[8]基于现场可编程门阵列(FPGA)和美国国家仪器有限公司(NI)数据采集卡研制了螺栓轴向应力-超声波渡越时间标定系统, 其标定重复准确度达到 $\pm 2\%$ 。2022年, 卢秉伦等^[9]将阈值法和极值法相结合, 测量超声波渡越时间, 设计了法兰螺栓紧固力超声测试系统, 其标定重复准确度达到 $\pm 2.4\%$ 。尽管国内外已经取得了一定的研究成果, 但目前超声波螺栓紧固力检测设备的采样速率、测量准确度仍有待提高。

基于此, 本文研制了基于ZYNQ的超声波螺栓紧固力检测系统。该系统采用高速模数转换器(ADC)完成超声回波信号采集, 在ZYNQ芯片上实现了基于相关性法的超声波声时差计算; 系统借助FPGA并行、高速的运算特点, 快速计算信号互相关函数, 并在ARM端进行三次样条插值以提高测量分辨率, 声时差计算结果通过用户数据报协议(UDP)传送至上位机, 相比于传统的超声波螺栓紧固力检测方法, 大幅提高了运算速度和测量准确度。

1 超声波法螺栓紧固力测量原理

1.1 超声波检测法

在受力状态下, 螺栓长度和超声波在螺栓中的传播速率都会发生变化^[10]。因此, 可以通过测量超声波在螺栓内的渡越时间, 从而反演螺栓所受紧固力大小。利用超声波渡越时间检测螺栓紧固力的方法分为单波法和纵横波联合法。单波法就是利用单一纵波, 通过测量超声波在螺栓受力状态和未受力状态下的渡越时间差值, 即超声波声时差, 计算得到螺栓紧固力大小^[11], 其测量原理如图1所示。纵横波联合法是对纵波和横波分别测得的超声波渡越时间进行比值计算, 从而得到螺栓紧固力大小^[12], 该方法无需提前对未受力螺栓标定, 适用于特定场景, 但测量准确度不高^[13]。因此, 本文采用单波法进行系统设计。

1.2 超声波声时差计算方法

根据声弹性理论^[14], 超声纵波在应力螺栓中的传播速度公式为:

$$C_{\sigma} = C_0(1 + K \cdot \sigma) \quad (1)$$

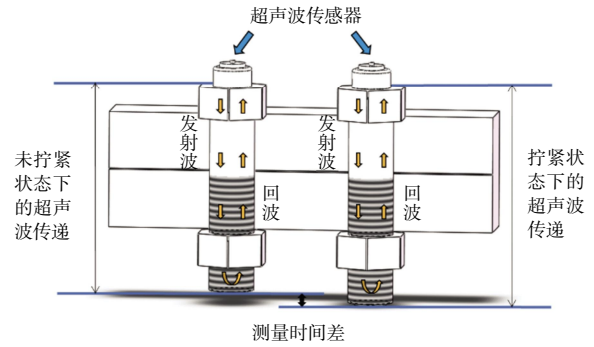


图1 单波法测量原理

Fig.1 Measurement principle of single-wave

式中: C_{σ} 、 C_0 分别为应力 σ 和 $\sigma = 0$ 时超声纵波的传播速度; K 为沿轴向方向的声弹性系数; σ 为螺栓所受应力。

根据 Hooke 定律, 在弹性变形范围内, 材料的应力与应变成正比, 则有:

$$L_{\sigma} = L_0(1 + \frac{\sigma}{E}) \quad (2)$$

式中: L_{σ} 、 L_0 分别为标准温度下应力 σ 和 $\sigma = 0$ 时螺栓的夹持长度; E 为弹性模量。

超声波声速易受温度影响, 需要通过温度补偿系数进行补偿, 在未受力状态下, 设标准温度下超声波声速为 C_0 , 温度补偿后的超声波声速 C_T 可表示为:

$$C_T = C_0(1 - \alpha \cdot \Delta T) \quad (3)$$

式中: α 为超声波声速的温度补偿系数; ΔT 为相对于标准温度的变化量。

螺栓作为一种金属材料, 受热膨胀会产生弹性形变。未受力状态下, 设标准温度下螺栓夹紧部分长度为 L_0 , 温度变化 ΔT 时夹紧部分的长度 L_T 可表示为:

$$L_T = L_0(1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (4)$$

式中: β 为螺栓热膨胀系数。

标准温度条件下, 螺栓在未受力状态下的超声波渡越时间 t_0 可表示为:

$$t_0 = \frac{2L_0}{C_0} \quad (5)$$

由式(3)—式(5)可得, 螺栓在未受力状态下, 超声波渡越时间 t_T 与超声波声速的温度补偿系数 α 的关系式为:

$$t_T = \frac{2L_0(1 + \beta \cdot \Delta T)}{C_T} = t_0 \frac{1 + \beta \cdot \Delta T}{1 - \alpha \cdot \Delta T} \quad (6)$$

温度为 T 时, 螺栓在受力状态下, 超声波渡越时间即为夹紧部分与未夹紧部分的渡越时间总和, 设螺栓总长度为 L_1 , 超声波渡越时间可表示为:

$$t_{(\sigma, T)} = \frac{2L_{(0, T)}(1 + \frac{\sigma}{E})}{C_{(\sigma, T)}} + \frac{2(L_{1(0, T)} - L_{(\sigma, T)})}{C_{(0, T)}} \quad (7)$$

式中： $t_{(\sigma,T)}$ 为在温度 T 下，轴向应力为 σ 时的超声波渡越时间； $L_{(0,T)}$ 和 $L_{(\sigma,T)}$ 分别为温度 T 下，轴向应力为 0 和 σ 时的夹紧长度； $C_{(0,T)}$ 和 $C_{(\sigma,T)}$ 分别为温度 T 下，轴向应力为 0 和 σ 时的超声波声速。由式(1)、式(2)、式(5)、式(7)可得，超声波在温度 T 下的超声波声时差 Δt 可表示为：

$$\Delta t = t_{(\sigma,T)} - t_{(0,T)} = \frac{2L_{(\sigma,T)}(E^{-1} - K)}{C_{(0,T)}} \sigma \cong \frac{1}{A} \sigma \quad (8)$$

式中： A 为螺栓灵敏度系数。

因此，若已知螺栓灵敏度系数 A 和超声波声速的温度补偿系数 α ，则可以通过超声波声时差 Δt ，求得螺栓所受轴向应力 σ ，再通过乘以螺栓截面积获得紧固力。

2 系统设计

2.1 系统整体设计

系统总体方案如图 2 所示，系统主要分为硬件电路和上位机终端两部分。硬件电路包括 ZYNQ 控制模块、温度采集模块、超声脉冲激励模块、高压模块、程控数模转换模块、回波信号调理模块、高速模数转换模块、系统供电模块和以太网模块。上位机终端负责显示超声回波波形和反演螺栓紧固力。

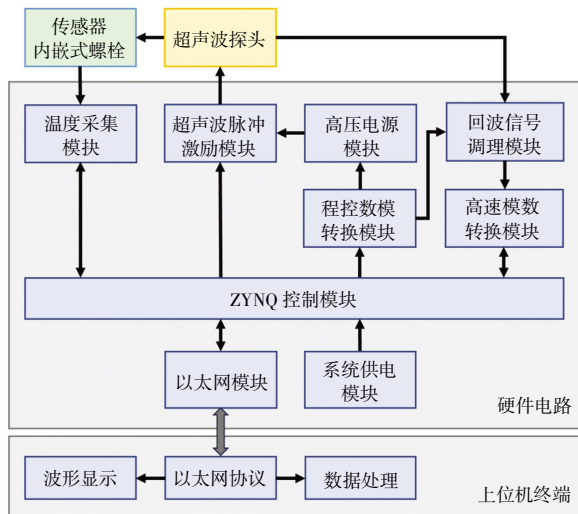


图 2 系统总体方案

Fig.2 Scheme of overall system

本文设计的超声波螺栓紧固力检测系统示意图如图 3 所示。将超声波探头和温度传感器附着于螺栓头部，连续采集超声回波信号和螺栓温度信息。对超声回波信号进行预处理后，采用相关性法计算超声波声时差，将结果通过以太网接口传输至上位机，从而反演出螺栓所受紧固力大小。

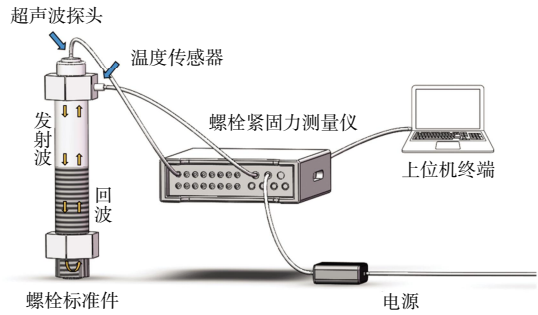


图 3 超声波螺栓紧固力检测系统示意图

Fig.3 Schematic of ultrasonic bolt fastening force detection system

2.2 硬件设计

2.2.1 ZYNQ 控制模块

系统硬件电路采用 ZYNQ 作为核心控制模块，ZYNQ 结合了双核 ARM cortex-A9 处理器强大的驱动能力、高灵活性，以及 Xilinx 7 系列 FPGA 架构并行、高速的特点。ZYNQ 片内集成了定制的 AXI 可扩展接口，加速了各模块间的通信，提高了系统的稳定性。ZYNQ 能够实现对硬件电路各模块的驱动控制、超声波声时差计算、高速数据存储、以太网数据传输等功能。

2.2.2 外部硬件

系统采用收发一体的超声波探头，通过压电陶瓷换能器实现电信号与超声波的相互转换^[5]，其中心频率为 8 MHz。采取将压电陶瓷换能器与螺栓直接粘合的方式制备传感器内嵌式螺栓，以提高装配和测量操作的便利性^[6]。

2.2.3 硬件电路

硬件电路实物如图 4 所示。

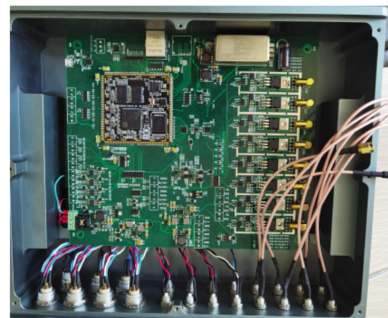


图 4 硬件电路实物

Fig.4 Prototype of hardware circuit

(1) 高压电源模块作为压电换能器的高压信号来源，通过数模转换控制其高压输出，可以实现 0 ~ -200 V 连续调节，将高压脉冲信号通过超声波探头耦合至压电换能器，使其产生压电效应。

(2) 超声波脉冲激励模块作为最主要的信号发生模块，采用单极性信号进行脉冲激励，保证设备稳定

工作的同时,降低负高压电源对设备的影响。

(3) 回波信号调理模块作为信号处理的关键部分,实现回波限幅、带通滤波及动态增益控制等功能,保证系统的鲁棒性和接收信号的高信噪比。

(4) 为实现多个通道同时测量,硬件电路中设计了高速多路复用模块,采用 ADG1406 芯片来实现对指定通道的选通功能。

(5) 为满足更高的采集速率需求,高速模数转换模块采用 ADI 公司的 AD9634,该芯片实现 12 位模数转换,采样速率高达 250 MHz。

(6) 为了精确测量介质温度,温度采集模块采用 PT1000 温度传感器,采用 MAXIM 公司的 MAX31865+ 进行高精度 RTD 温度转换,温度分辨率达到 0.031 25℃。

2.3 ZYNQ 软件设计

2.3.1 ZYNQ 控制程序设计

系统基于 ZYNQ 系列集成了 ARM 处理器的软件可编程和 FPGA 硬件可编程进行交叉编译开发。硬件电路的驱动控制由 ZYNQ 的 FPGA 部分完成,采用 Vivado 开发套件、Verilog 硬件描述语言设计,所有模块均封装为 IP 核来增加代码的灵活性和可移植性。在 ARM 端完成了以太网接口、串口接口、DDR 等功能配置。以太网数据传输采用 UDP 协议,UDP 是一种无连接的传输层协议,相较于 TCP/IP 协议,有着更少的资源消耗、更高的通信速率,更适用于此实时性传输场景。

2.3.2 超声波声时差计算方法

超声波在介质中以机械波的形式传播,多表现为一种周期性的正弦脉冲振荡信号。在超声波检测中,通常以起始波与第一次回波之间的时间间隔作为渡越时间。目前常用的超声波渡越时间计算方法可分为阈值法、最大值寻峰过零点法、相关性法等。阈值法将起始波与第 1 次回波达到阈值点的时间差作为超声波声时差^[17]。然而在螺栓紧固过程中,回波会产生幅值抖动,阈值法难以适应动态变化,容易产生较大误差。最大值寻峰过零点法先找到回波信号的最大峰值点,然后将下一个信号过零点确定为回波到达位置。这种方法易于实现但受噪声影响较大,测量准确度较低^[18]。相关性法通过对螺栓未受力状态下和受力状态下的回波信号进行互相关运算,互相关函数输出的最大峰值点所对应的时间即为超声波声时差^[19]。相关性法对波形的幅值不敏感,且能够有效抑制噪声干扰^[20],稳定性较好且测量准确度高^[21-22]。因此,本文采用相关性法测量超声波声时差。

2.3.3 相关性法实现

相关性法的传统实现方式,需要将采集到的完整

回波信号通过以太网传送至上位机,在上位机中完成互相关运算,从而得到超声波声时差。这种方法不仅对网络和监控计算机造成巨大的负担,且运算速度慢,单次声时差计算至少需要 50 ms^[23],无法满足实际应用中螺栓紧固力实时、准确测量的需求。因此,为提高运算速度和准确性,本文在 ZYNQ 芯片上实现了声时差的相关性法计算,相关性法软件框图如图 5 所示。

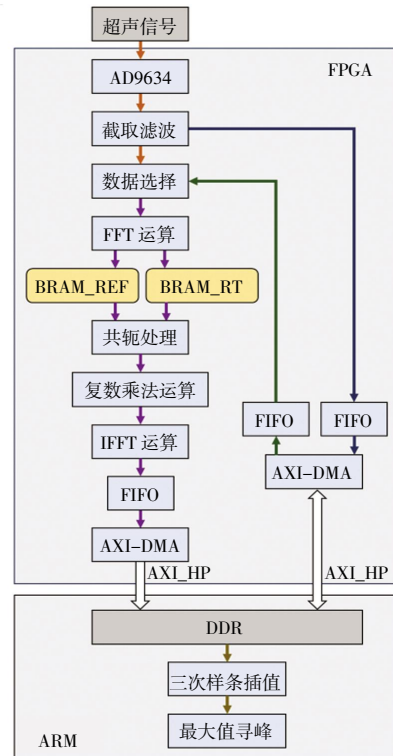


图 5 相关性法软件框图

Fig.5 Software block diagram of correlation method

系统支持先标定后测量和直接测量 2 种测量方法,支持单次测量、单通道连续测量、多通道连续测量 3 种工作模式,满足多种场景下的测量需求。系统首先通过 AD9634 采集螺栓未受力状态和受力状态下的超声回波信号,分别作为参考信号 $x(n)$ 和测试信号 $y(n)$,若采用直接测量模式,系统可以直接从 DDR 中读取已有的参考信号;随后采用 FIR 滤波器进行滤波处理,并对信号进行截取,本系统截取 4 096 个点作为处理信号;对截取得到的信号进行 FFT 运算,得到参考频域信号 Z_x 和测试频域信号 Z_y ;为实现多通道流水线式测量,系统将 Z_x 和 Z_y 的实部和虚部分别放入对应的 BRAM 中进行缓存;对 Z_x 取共轭得到 Z_x^* ,将 Z_x^* 和 Z_y 复数相乘,得到互相关函数频谱 $Z[R(x,y)]$;再通过 IFFT 计算得到互相关函数输出 $R(x,y)$;通过 FIFO 将数据写入 DMA,再经过 AXI_HP 高速接口传送到 ARM 端的 DDR 数据存储中,在 ARM 端进一步采用三次样条插值方法,获得互相关函数连续输出

拟合曲线,求取的拟合曲线最大值点即为声时差计算结果。

3 标定试验

3.1 静态标定试验

为验证本文系统的稳定性与可靠性,在 20 °C 室温环境下,对未受力状态下的 8.8 级 4 种不同长度的碳钢螺栓标准件进行了多次超声波渡越时间测量,以评估系统对于不同长度螺栓的检测性能,结果如表 1 所示。

表 1 静态标定试验数据

Tab.1 Experimental data of static calibration

螺栓长度/mm	超声波渡越时间/ns	螺栓长度/mm	超声波渡越时间/ns
31.74	5 361.354	130.35	22 019.602
	5 361.143		22 019.652
	5 361.241		22 019.598
	5 361.385		22 019.467
	5 361.394		22 019.638
47.20	7 974.351	181.48	30 656.645
	7 974.522		30 656.883
	7 974.648		30 656.744
	7 974.497		30 656.627
	7 974.419		30 656.595

由表 1 数据可知,静态条件下,对于同一长度的螺栓,系统多次测量的超声波渡越时间偏差较小。该系统数据采集的稳定性较高,且基于 ZYNQ 设计的相关性算法的鲁棒性较好,通过在 ARM 端进行三次样条插值处理,有效提高了数据分辨率,对于超声波渡越时间的测量分辨率达到百皮秒量级。

3.2 温度补偿标定试验

为了准确地测定温度对超声波渡越时间的影响,采用恒温加热台对试件螺栓进行加热,选取 20、30、40、50 和 60 °C 等 5 个温度点,对未受力状态下的 4 种不同长度的碳钢螺栓进行多次测量,温度补偿标定试验环境如图 6 所示,测量结果如表 2 所示。为降低瞬时误差,表 2 中超声波渡越时间数据均是经过多次测量取得的平均值。

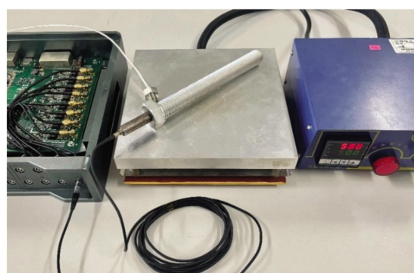


图 6 温度补偿标定试验环境

Fig.6 Experimental environment of temperature compensation calibration

表 2 温度补偿标定试验数据

Tab.2 Experimental data of temperature compensation calibration

螺栓长度/mm	温度/°C	超声波渡越时间/ns
31.74	20.12	5 359.033
	30.16	5 364.679
	39.91	5 370.224
	50.53	5 376.157
	60.03	5 381.522
47.20	20.12	7 974.311
	30.16	7 982.658
	39.91	7 990.811
	50.53	7 999.646
	60.03	8 007.649
130.35	20.12	22 020.317
	30.16	22 043.426
	39.91	22 065.876
	50.53	22 090.253
	60.03	22 112.034
181.48	20.12	30 656.357
	30.16	30 688.534
	39.91	30 719.652
	50.53	30 753.647
	60.03	30 784.345

由表 2 数据可知,超声波渡越时间随温度的升高而增大,通过式(6)计算得到,系统测量 8.8 级碳钢螺栓时,温度补偿系数 $\alpha \approx 9.375 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。使用超声法测量不同规格的螺栓时,需要进行相应的温度补偿系数标定。

3.3 动态标定试验

动态标定试验在 20 °C 室温环境下进行,将螺栓安装在电子拉力机夹持部位,拉力机低速运行,系统将采集并处理的数据连续发送至上位机,动态标定试验环境如图 7 所示。

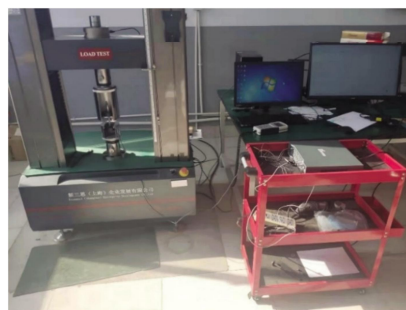


图 7 动态标定试验环境

Fig.7 Experimental environment for dynamic calibration

试验选用 8.8 级长度为 181.48 mm 的碳钢螺栓,首先对未受力状态下的螺栓进行标准值采集,随后通过电子拉力机对螺栓施加从 0 到 50 kN 的应力载荷,获取连续变化过程中的超声波声时差和施加的应力

大小,超声波声时差和应力变化趋势如图8所示。

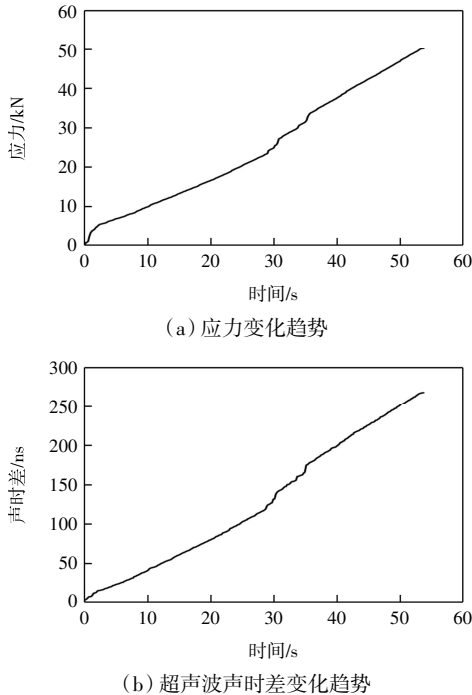


图8 超声波声时差和应力变化趋势

Fig.8 Variation trend of ultrasonic transit time difference and stress

由图8可见,超声波声时差变化趋势与施加于螺栓的应力变换趋势基本一致,系统能够较好地由超声波声时差的角度分析出受力特征。根据试验数据记录,系统单次声时差计算耗时仅需不到50 μs,充分发挥了FPGA并行、高速运算的优势。在螺栓装配紧固过程中,系统能够准确、实时测量螺栓紧固力。系统标定试验的部分数据如表3所示。

表3 动态标定试验数据

Tab.3 Experimental data of dynamic calibration

应力载荷/kN	超声波声时差/ns	灵敏度系数/(MPa·ns ⁻¹)	应力反演值/kN
8.738	46.867	0.969	8.749
17.189	91.948	0.971	17.166
25.749	138.128	0.969	25.787
34.748	185.841	0.971	34.695
43.661	234.182	0.969	43.721
8.405	44.952	0.971	8.392
17.856	95.476	0.972	17.825
24.613	131.576	0.972	24.565
34.913	187.362	0.968	34.979
42.064	224.826	0.972	41.974

根据表3数据,通过式(8)对螺栓灵敏度系数进行拟合计算可得,此试件螺栓的灵敏度系数 $A \approx 0.97 \text{ MPa/ns}$,根据螺栓的灵敏度系数 A 和温度补偿系数 α 反演电子拉力机的应力大小,在进行多次标定试

验后,应力反演的平均相对误差即为系统动态标定重复准确度,其计算公式为:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sum \left(\frac{\sigma_x - \sigma_A}{\sigma_x} \times 100\% \right)}{n} \approx 0.16\% < 0.2\% \quad (9)$$

式中: δ_{σ} 为系统标定重复准确度; σ_x 为同一种螺栓测得的灵敏度系数平均值; σ_A 为同一种螺栓单次测得的灵敏度系数; n 为重复测量次数。

根据试验结果,本文设计的超声波螺栓紧固力检测系统表现出较高的测量准确度,其动态标定重复准确度达到 $\pm 0.2\%$ 。目前已有的超声波螺栓紧固力检测仪器动态标定重复准确度在 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$ 范围内^[8-9],说明本文所设计系统的检测性能相较于以往的研究成果具有显著提升。

4 结论

本文描述了基于ZYNQ的超声波螺栓紧固力检测系统。在ZYNQ芯片上,采用相关性法对采集的回波信号进行声时差计算,利用FPGA快速计算互相关函数,在ARM端进行三次样条插值。标定试验结果表明:

- (1) 本文所设计系统的计算精度高,算法鲁棒性好。
- (2) 系统单次声时差计算耗时仅需不到50 μs,相较于相关性法的传统实现方式,运算速度大幅提升。
- (3) 系统超声波渡越时间的测量分辨率达到了百皮秒量级。
- (4) 系统动态标定的重复准确度达到了 $\pm 0.2\%$,较目前已有的检测仪器有显著提升,为螺栓紧固力的快速、准确检测提供了有力支持。

参考文献:

- [1] 严勇,刘楚达. 风电螺栓轴向应力超声测量标定实验研究[J]. 应用声学, 2021, 40(4): 594-601.
YAN Y, LIU C D. Experimental study on ultrasonic measurement and calibration of axial stress of wind turbine bolt[J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(4): 594-601 (in Chinese).
- [2] 赵新玉,王英华,张佳莹. 高强度发动机螺栓轴向应力的测量[J]. 无损检测, 2021, 43(4): 26-29.
ZHAO X Y, WANG Y H, ZHANG J Y. The measurement of the axial stress in a high strength engine bolt[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(4): 26-29 (in Chinese).
- [3] NIKRAVESH S M Y, GOUDARZI M. A review paper on looseness detection methods in bolted structures[J]. Latin American

- Journal of Solids and Structures, 2017, 14(12): 2153–2176.
- [4] JOSHI S G, PATHARE R G. Ultrasonic instrument for measuring bolt stress[J]. Ultrasonics, 1984, 22(6): 261–269.
- [5] STEBLAY B J. New instrumentation for roof bolt load measurement[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, IA-23(4): 731–735.
- [6] 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: e1339–e1342.
- [7] 张俊. 基于声弹性原理的超声波螺栓紧固力测量技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- ZHANG J. Research on the ultrasonic measurement technology of bolt tension based on the sono-elasticity principle [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005(in Chinese).
- [8] 刘家斌, 王雪梅, 倪文波. 螺栓轴向应力-超声波渡越时间自动标定系统研究[J]. 中国测试, 2020, 46(3): 91–96.
- LIU J B, WANG X M, NI W B. Research on automatic calibration system of bolt axial stress-ultrasonic time of flight[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(3): 91–96(in Chinese).
- [9] 卢秉伦, 章兰珠, 陈威. 法兰螺栓紧固力超声测量研究[J]. 机械设计与制造, 2024(2): 261–265.
- LU B L, ZHANG L Z, CHEN W. Research on ultrasonic measurement of flange bolt tightening force[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(2): 261–265(in Chinese).
- [10] MIAO R S, SHEN R L, ZHANG S H, et al. A review of bolt tightening force measurement and loosening detection[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3165.
- [11] 贾雪, 王雪梅, 甘文成, 等. 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 X, WANG X M, GAN W C, et al. Research on calibration of bolt's axial stress based on acoustoelastic effect [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(3): 23–27(in Chinese).
- [12] 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 C G, LI X, PAN Q X, et al. Bolt stress measurements by ultrasonic non-destructive methods[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(2): 102–106(in Chinese).
- [13] 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.
- [14] 刘镇清, 华剑南, 梁穗, 等. 螺栓材料应力与声速、温度关系的测定[J]. 应用声学, 1997, 16(5): 26–31.
- LIU Z Q, HUA J N, LIANG S, et al. Determination of ultrasonic wave velocity-stress-temperature relations in bolt materials inspection[J]. Journal of Applied Acoustics, 1997, 16(5): 26–31(in Chinese).
- [15] LIU Y M, LIU E X, CHEN Y L, et al. Measurement of fastening force using dry-coupled ultrasonic waves[J]. Ultrasonics, 2020, 108: 106178.
- [16] LIU Y M, ZHI J J, LIU E X, et al. Influence of different ultrasonic transducers on the precision of fastening force measurement[J]. Applied Acoustics, 2022, 185: 108357.
- [17] CARULLO A, PARVIS M. An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(2): 143–147.
- [18] 庞松, 王雪梅, 倪文波. 嵌入式风电机组多螺栓应力监测系统[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(in Chinese).
- [19] 王漫. 基于互相关法超声波流量测量及监控软件设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- WANG M. Ultrasonic flow measurement and monitoring software design based on cross-correlation method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021(in Chinese).
- [20] SO H C. A comparative study of two discrete-time phase delay estimators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(6): 2501–2504.
- [21] 孙秋菊, 韩焱. 信号相关性分析及其在超声检测中的应用[J]. 计量与测试技术, 2005, 32(12): 28–29.
- SUN Q J, HAN Y. An introduction to related analysis of signal and its application in ultrasonic test[J]. Metrology & Measurement Technique, 2005, 32(12): 28–29(in Chinese).
- [22] SUN S H, LI S Y, LIN L, et al. A novel signal processing method based on cross-correlation and interpolation for ToF measurement[C]//2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). Wuxi, China: IEEE, 2019: 664–668.
- [23] 冉毅川, 毛延翩, 姬升阳, 等. 一种用于超声螺栓预紧力测量的时延算法[J]. 无损检测, 2022, 44(10): 60–64.
- RAN Y C, MAO Y P, JI S Y, et al. A time delay algorithm for measuring the pretightening force of ultrasonic bolts[J]. Nondestructive Testing, 2022, 44(10): 60–64(in Chinese).

本文引文格式:

徐伟, 陆云洋, 郭翠娟, 等. 基于 ZYNQ 的超声波螺栓紧固力检测系统[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(1): 94–100.

XU W, LU Y Y, GUO C J, et al. Ultrasonic detection system of bolt fastening force based on ZYNQ [J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(1): 94–100(in Chinese).

(责任编辑: 孙广宇)