

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105675

# 嵌入式风电机组多螺栓应力监测系统设计

庞松 王雪梅 倪文波

(西南交通大学 机械工程学院 成都 610031)

**摘要:** 针对风电机组高强度螺栓在复杂的载荷作用下轴向应力监测的需求,基于声弹性效应和嵌入式技术,设计并实现了一种适用于风电机组螺栓轴向应力在线监测的系统。系统由超声波换能器、基于 ZYNQ 的嵌入式设备和远程监控计算机等 3 部分构成。采用电平比较法和最大峰值过零点法相结合的方法求取超声波渡越时间,并基于 TCP/IP 协议建立稳定可靠的网络通信协议,保证监测数据安全、可靠的传输至远程监控计算机。试验结果表明,系统能够实现多螺栓超声波渡越时间和应力的实时监测,并发现螺栓松动的问题,对于保障风电机组的安全运行、防范于未然具有重要作用和意义。

**关键词:** 风电机组;声弹性;螺栓应力;嵌入式;最大峰值过零点法

**中图分类号:** TH823;TP274+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Design of embedded multi-bolts stress monitoring system for wind turbines

Pang Song Wang Xuemei Ni Wenbo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to meet the demand of monitoring for axial stress in high-strength bolts of wind turbine under complex loads, an on-line monitoring system for axial stress in bolts of wind turbine was designed and implemented based on acoustic elastic effect and embedded technology. The system consists of ultrasonic transducers, embedded devices based on ZYNQ and remote monitoring computer. The level comparison method and the maximum peak-zero cross point method are used to calculate the ultrasonic time-of-flight in the bolt. And a stable and reliable network communication protocol was established based on TCP/IP protocol to ensure the safe and reliable transmission of monitoring data to the remote monitoring computer. Experiments show that the system can realize monitoring of ultrasonic time-of-flight and stress of multi-bolts in real time, and found the problem of loose bolts, which provides technical support for remote fatigue monitoring of wind turbine bolts.

**Keywords:** wind turbine; acoustic elasticity; bolt stress; embedded; maximum peak-zero cross point method

## 0 引言

大型风电机组高强螺栓的应力状态是判断其是否会发疲劳断裂的重要指标之一<sup>[1-3]</sup>。目前风电行业采取的策略是定期检修,即每隔半年或者一年通过人工的方式对螺栓进行现场检修。大型风电机组通常建立在海上、沙漠等无人区,环境相对比较恶劣,且塔基高度一般大于 100 m,叶片转子直径超过 80 m,通过人工的方式对风电机组高强度螺栓的应力进行现场检测是十分困难的。因此,实现风电机组运行中螺栓应力的在线监测,对于保障风电机组的安全运行,减轻人员的劳动强度,避免重大安全事故的发生,具有十分重要的作用和意义。

目前常规的螺栓应力测量方法主要有扭矩扳手法、电

阻应变片法、光测力学法和磁敏电阻传感器测量法等<sup>[4-5]</sup>。但这些方法由于受测量精度或者测量条件的限制,均不适用于风电机组高强度螺栓应力的在线监测。

超声波应力检测法是基于超声波在材料中传播时,其波速随材料所受应力大小改变而变化的声弹性效应,可用超声波在螺栓中的渡越时间来间接表征螺栓所受轴向应力大小<sup>[6-8]</sup>。只要确保超声探头与螺栓耦合良好,超声波在螺栓中的渡越时间测量可以达到很高的测量精度,从而实现螺栓轴向应力状态的精确测量。并且超声波应力检测法具有较好的环境适应性。因此,在工程应用中得到越来越多的关注。

当前已有的超声波应力测量系统<sup>[9]</sup>通常由现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)和 PC

收稿日期:2021-01-07

• 166 •

机构成,由FPGA控制超声波信号的激励和采集,然后将完整的超声回波信号传输至监控计算机,在上位PC机中对超声回波信号进行分析处理,得到渡越时间。测量系统一方面需将大量超声回波数据通过UDP协议传输至上位PC机,UDP协议是一种无连接协议,不可靠,易丢包,会造成大量测试数据失去可用性。另一方面,风电机组远程监控计算机需要监测的螺栓数量较多,若将所有螺栓的超声回波原始信号都发送至远程监控计算机,再进行处理和计算,这将对网络系统和监控计算机造成很大的负担,系统稳定性下降。现有的超声波应力测量系统无法满足风电机组高强度螺栓的应力在线监测需要。

ZYNQ嵌入式技术采用ARM+FPGA SOC技术,把FPGA设计灵活、可扩展性好和ARM在控制处理领域的强大功能、开发简单等优点完美结合起来。因此,本文基于ZYNQ嵌入式技术将超声回波数据处理和渡越时间计算部分的功能移至嵌入式前端,只将计算得到的超声波渡越时间通过可靠的TCP/IP网络协议传输至远程监控计算机,从而解决了超大量数据的传输负荷和上位监控计算机的存储、处理负担等问题,保证了整个螺栓应力监测系统的高效性和可靠性。

### 1 基于声弹性效应的螺栓轴向应力测量原理

声弹性效应是指超声波在各向同性固体材料中传播时,由于材料受到应力的作用,超声波波速不再是恒定不变,而是会随着材料所受应力状态的变化而发生相应的改变<sup>[10]</sup>。如图1所示,将超声纵波探头置于待测螺栓头端面,确保二者耦合良好,探头向螺栓发射超声纵波信号,超声纵波信号沿着螺栓轴向往复传播,其相邻两次反射回波之间的时间差即为超声波沿螺栓轴向传播的渡越时间,该渡越时间反映了螺栓轴向所受应力大小。

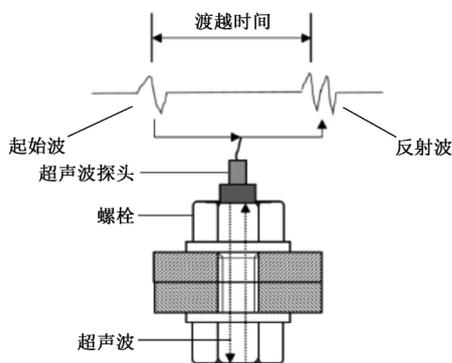


图1 纵波法测量原理起始波

温度的变化对超声波波速也会有较大的影响。研究表明<sup>[11]</sup>,在温度和应力同时作用下,超声波渡越时间可表示为:

$$F = K[t_{(\sigma,T)} - t_0 - t_{(\sigma,T)}\alpha \cdot \Delta T] \quad (1)$$

式中: $t_{(\sigma,T)}$ 为同时受温度和应力影响的渡越时间,s; $t_0$ 为

初始应力状态下的渡越时间,s; $\alpha$ 为温度影响系数; $F$ 为螺栓所受应力,MPa; $K$ 为标定系数。

在温度不变的环境下,即温度差值 $\Delta T = 0$ 时,此时超声波渡越时间只受螺栓在超声波传播方向的应力状态的影响。因此,只要从标定试验中得到标定系数 $K$ 的值,即可通过测量渡越时间的方法间接测量螺栓的应力状态。

## 2 系统总体方案设计及硬件设计

### 2.1 总体方案设计

兆瓦级风电机组的螺栓失效事故主要发生于变桨连接系统的轴承内圈与叶根法兰连接处。每个风机有3个叶根法兰,每个法兰由54颗10.9级M33高强度螺栓均匀分布联接。联接螺栓在工作中所受载荷十分复杂,螺栓疲劳损坏现象时有发生。考虑到法兰周向不同位置螺栓受力不同,但相邻螺栓的受力情况是比较相似的,因此,监测系统分别在3个法兰盘的周向间隔 $45^\circ$ 均匀安装8个超声探头,每个超声探头用粘接剂稳固的粘贴在高强度螺栓六角头端面,从而检测法兰不同位置的螺栓受力状态。监测系统整体结构如图2所示,每个风电机组配置一台嵌入式设备,该嵌入式设备负责周期性激励和采集24个超声波探头的回波信号,并根据超声回波信号计算超声波在螺栓中的渡越时间,以此渡越时间间接表征螺栓轴向应力大小,并将结果通过以太网传输至远程监控计算机。远程监控计算机通过以太网实现对整个监管区域内的各个风电机组螺栓应力的集中监测和管理。

本监测系统具有以下几个优点:1)超声波应力检测是一种无损检测方法,检测结果可靠度较高,且不会对高强螺栓的性能产生影响,适用于轴向应力的长期在线监测。2)嵌入式设备和超声波探头体积比较小,能够方便的安装在风电机组变桨连接系统狭小的空间内。3)本监测系统基于风电场的以太网络实现数据通信,无需另外架设通信线路,成本较低,具有很大的可行性和经济性。

### 2.2 硬件设计

风电机组多螺栓应力监测系统硬件主要由超声波换能器、基于ZYNQ的嵌入式设备和远程监控计算机3部分构成。其中嵌入式设备是整个监测系统的关键,嵌入式设备主要包括多路超声波信号激励及采集模块和基于ZYNQ的嵌入式核心模块两部分,如图3所示。基于ZYNQ的嵌入式核心模块主要功能是对超声波激励电路、多路模拟通道切换电路和A/D采集电路进行控制,通过DMA方式对数据进行高速存储,并对超声波测试信号进行处理和渡越时间计算,最后将结果通过以太网传输给远程监控计算机。

#### 1)基于ZYNQ的嵌入式核心模块

嵌入式系统作为核心模块,系统构架的选择对于系统的实用性、稳定性和可靠性起着重要作用。本系统选用Xilinx公司的AX7021 ZYNQ开发平台作为系统的主控模块,该平台集成了ARM Cortex-A9和FPAG,省掉ARM

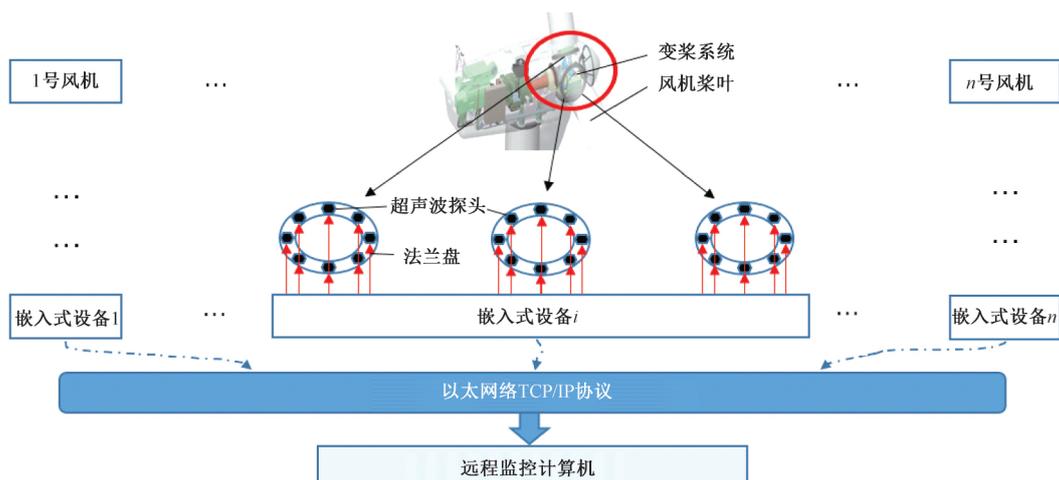


图 2 监测系统整体结构

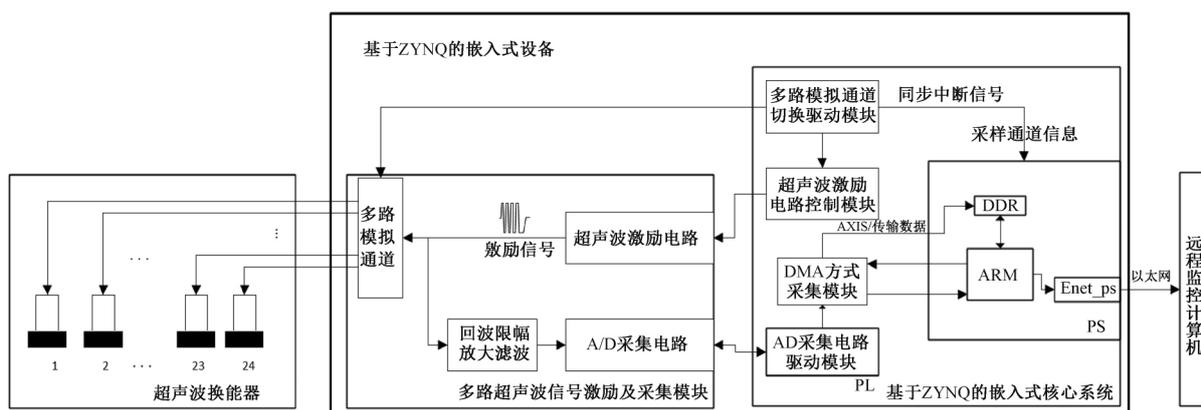


图 3 系统硬件结构

与 FPGA 之间的通信总线,相比传统的 FPGA 外加 ARM 或者单片机的配置,具有通信速度更快,信息传递结构更加简单等优势。

核心板主要由 ZYNQ7020、2 个 DDR3、eMMC 和 QSPI FLASH 的最小系统构成,总线位宽为 32 位,DDR3 容量为 1 GB。ZYNQ7020 采用 XC7Z020-2CLG484I 型号芯片,芯片可分成处理器系统部分(processor system, PS)和可编程逻辑部分(programmable logic, PL)。其中,PS 系统集成了一个高性能双核 ARM Cortex-A9 处理器,主频可达 765 MHz,能够满足对外部模块的控制以及超声波渡越时间的计算、存储和千兆以太网传输等功能要求。PL 系统具有丰富逻辑资源,可根据功能需求进行灵活设计,实现对多路超声波信号激励及采集模块的控制和驱动。

2) 多路超声波信号激励及采集模块

多路超声波信号激励及采集模块包括超声波激励电路、多路模拟通道、回波限幅及滤波放大电路和 A/D 采集电路等 4 部分。

超声波激励电路能够灵活产生匹配不同中心频率超声波换能器的高压窄脉冲信号。回波限幅及放大滤波电

路不仅能够将高压回波信号限幅至后续放大电路安全电压范围内,确保电路的安全性,而且能够对高强度螺栓反射的微弱超声回波信号进行放大和滤波,提高信号的信噪比,这对后续的超声信号采集和分析处理起着至关重要的作用。A/D 采集电路采用 ADI 公司的 AD9238 芯片,该芯片实现 12 位模数转换,采样速率最高可达 65 MSPS,模拟信号输入电压范围为 ±5 V。多路模拟通道由 3 个八通道高压模拟开关 HZ20220 和带钳位二极管的高压保护 T/R 开关组成,能够对 24 路超声信号进行周期性轮流激励和采集。

3 系统软件设计

监测系统软件设计主要包括两部分:一是对多路超声波信号进行激励和采集的驱动和控制程序,二是嵌入式 ARM 的核心程序,其中渡越时间计算程序和基于 TCP/IP 的传输协议最为关键。

3.1 激励及采集模块的驱动控制程序设计

外部电路驱动控制程序在 ZYNQ 的 PL 端(FPGA)实现,采用 Verilog 语言进行硬件电路行为描述,从而实现对

相关模块的控制或驱动。FPGA 模块程序设计主要分为 A/D 采集电路驱动模块、DMA 方式采集模块和超声波激励电路及多路模拟通道切换驱动模块。

### 3.2 螺栓渡越时间计算程序

超声波回波一般具有周期重复性，相邻两次回波之间的时间差是相同的。因此，系统以第一次回波距离起始波的时间间隔计算渡越时间。目前常用的超声波渡越时间计算方法主要有电平比较法、时间互相关法、DFT 频谱分析和最大峰值过零点法等。

电平比较法又叫阈值法简单易实现，可以用于起始波起点的确定，但若用于检测回波位置，容易受到信号峰值变化的影响，使得检测不准确，导致较大的测量误差。时间互相关法<sup>[12]</sup>是基于随机过程互相关理论发展起来的一种处理方法，能够较好地抑制噪声的影响，所以可以较精确地确定渡越时间，但容易受到二次回波信号的干扰，且计算量较大，植入嵌入式系统比较困难。DFT 频谱分析法<sup>[13-14]</sup>能够有效抑制谐波和随机噪声干扰，且利用 FFT 快速算法，有较高运算效率，但该方法针对频率很高的信号其测量范围有很大限制。最大峰值过零点法是指通过判断回波最大峰值点后，在下一个信号上升沿过零点时，判断此时一次回波到达，此法能够更精确得到回波到达位置，具有原理简单、计算量小的特点，非常适合用于嵌入式系统的计算程序。因此本系统选择电平比较法来得到起始波第一个点位置，通过最大峰值过零点法来确定回波位置，两点之间的时间间隔即为所求超声波的渡越时间，如图 4 所示。

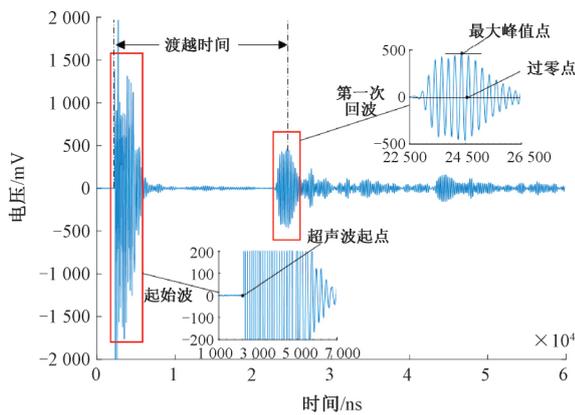
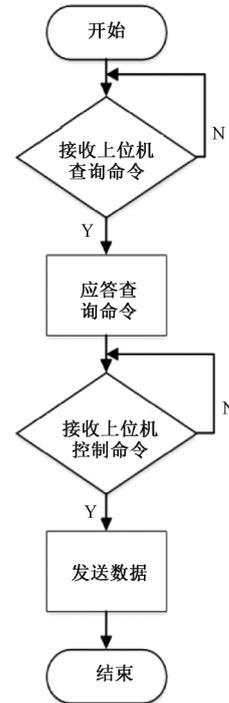


图 4 测量得到的超声回波信号

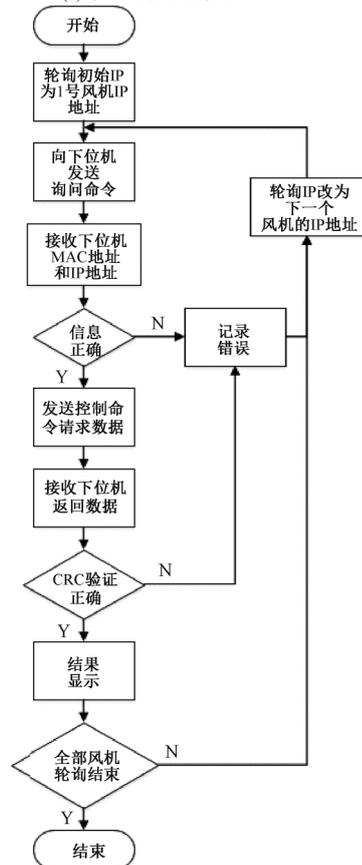
### 3.3 基于 TCP/IP 的传输协议

位于远程监控室的监控计算机需同时管理数百个嵌入式设备，因此监控计算机与嵌入式设备之间的传输协议至关重要。为了保证渡越时间监测数据的可靠传输，本系统基于 TCP/IP 协议建立了网络通信协议。TCP 协议是一种面向连接的网络通信协议，提供了可信赖的字节流通道，能够检测和恢复设备之间的通信中可能发生的报文丢失、重复及其他错误。

本系统基于 TCP 传输，通信协议流程如图 5 所示。监控计算机根据嵌入式设备的 IP 地址进行定时轮询，首先发



(a) 嵌入式设备通信程序流程



(b) 监控计算机通信程序流程

图 5 监控计算机与嵌入式设备通信流程

送询问命令,嵌入式设备应答询问命令,返回设备 MAC 地址和 IP 地址,监控计算机验证信息是否正确,确保风机与监测信息相符合,若正确则发送请求数据控制命令,嵌入式设备应答返回渡越时间数据和 CRC 校验码,确保传输过程中渡越时间数据的正确性。基于此传输协议,系统能够保证螺栓应力监测数据安全、可靠的传输至远程监控室。

#### 4 系统测试试验

##### 4.1 试验设计

为了验证本系统是否能够监测法兰多颗螺栓的轴向应力变化,参照 1.5 MW 风机变桨法兰的参数以 10:1 的比例,并依据实际受力情况,建立了法兰盘螺栓联接应力试验台,对风电机组多螺栓应力监测系统的监测性能进行测试。试验台由法兰盘、加载板和固定底座等组成,上下法兰之间通过 12 颗或者 24 颗螺栓固定连接,螺栓规格为 8.8 级 M10×50。本次试验在试验台法兰盘四周均匀装上 12 颗正常螺栓,并对每颗螺栓进行标号,如图 6 所示。由于试验台具有轴对称的特点,两侧对称位置的螺栓其受力状态基本一致。因此,选择一侧 1~5 号共 5 颗螺栓进行应力测试研究。试验保证在同一温度下进行,对加载板单侧或两侧下部使用液压泵向上推力加载,模拟风机叶根法兰受到的弯矩载荷,法兰盘周向联接螺栓会受到不同的轴向载荷。利用本文设计的多螺栓应力监测系统,在不同的加载大小下,对法兰盘上 5 个不同位置的螺栓进行应力监测。



图 6 试验台实物

本次试验制定了以下试验方案:

- 1) 安装螺栓前,利用超声波螺栓应力自动标定试验系统<sup>[15]</sup>,对每一颗螺栓进行应力标定,得到每颗螺栓各自对应的标定参数以及螺栓在未受力时的渡越时间值。已知螺栓应力的标定参数,试验时只需测得螺栓受力状态下的渡越时间,即可得到螺栓在受力和未受力两种状态下的渡越时间差,求得螺栓所受的轴向应力大小。
- 2) 在试验台法兰盘四周均匀装上 12 颗正常螺栓,并对每一个螺栓都施加约 10 kN 的预紧力,确保螺栓均处于紧固状态。
- 3) 利用加载系统千斤顶对试验台加载板单侧(左侧)施加连续的加载和卸载,加载力大小与时间的变化关系如图 7 所示,通过机械结构力的传递,不同位置的螺栓都会受到不同的轴向载荷作用。利用监测系统实时地检测 1~5 号螺栓的轴向应力。

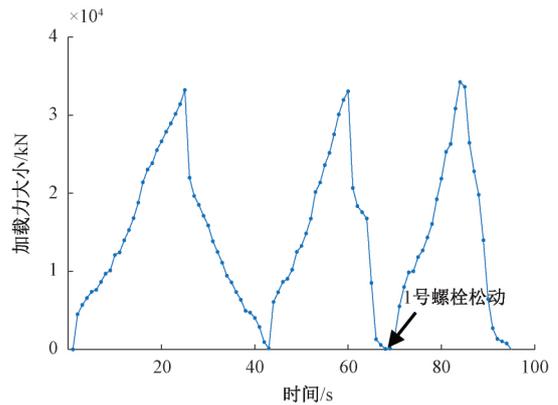


图 7 试验加载力变化曲线

4) 将 1 号螺栓预紧力减小,使它处于松动状态,其他螺栓预紧力不变,保持紧固状态,同时实时监测 1~5 号螺栓的轴向应力变化情况。

##### 4.2 试验结果分析

监测结果如图 8 所示,纵坐标表示当前受力状态螺栓轴向应力值,单位为 MPa,横坐标为时间,单位为 s。从图 8 中可以看出,加载力随时间变化,5 颗螺栓的轴向应力值也会发生相应变化。由局部放大图可知,由于机械结构力的传递,单侧加载的载荷对不同位置的螺栓影响不同,1 号螺栓受到的拉力最大,测量得到的螺栓轴向应力变化相对其他位置螺栓更大。2 号和 3 号螺栓受到的力较小,因此应力测量值变化较小。当加载力较大时,由于弯矩的作用,法兰右侧(未加载侧)受到压力,导致 4 号和 5 号位置的螺栓被压缩,测量得到的螺栓轴向应力下降。在 69 s 时,1 号螺栓发生松动,此时系统监测到 1 号螺栓轴向应力呈现出断崖式下降的现象,2 号螺栓应力值有增大现象。在 69 s 之后,1 号螺栓松动后的轴向应力虽然随着加载力的增加也呈现出近似线性增加的趋势,但都远小于处于紧固状态时的应力,其他 4 颗螺栓应力变化与 69 s 之前没有明显差别。图 9 所示为监控计算机上位机界面。试验表明,本文所设计的多螺栓应力监测系统能够对不同载荷下

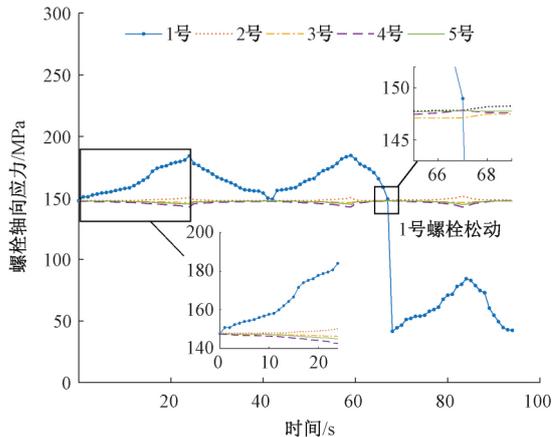


图 8 不同位置螺栓应力监测结果

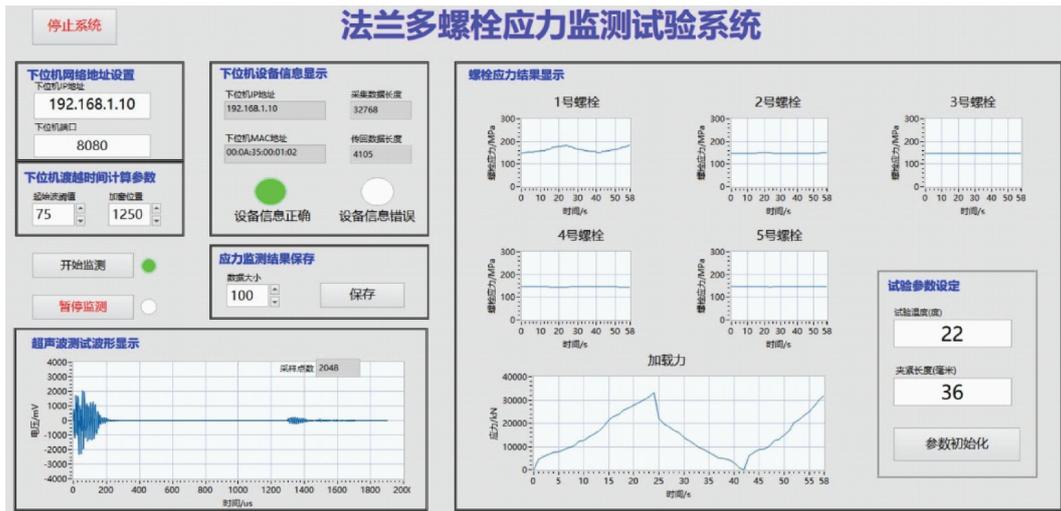


图9 PC机监控界面

的多颗螺栓轴向应力进行有效的监测,系统工作稳定,且能够检测出螺栓松动现象。

### 5 结 论

本文基于声弹性效应和嵌入式技术,研制了一种适用于风电机组多颗螺栓轴向应力在线监测的系统。该系统采用 ARM+FPGA SOC 技术,能够实现多通道超声信号的激励、放大、滤波和采集等功能,利用电平比较法和最大峰值过零点法相结合的方法计算超声波渡越时间,并基于 TCP/IP 协议建立了嵌入式设备与监控计算机之间的网络通信协议。通过在实验室建立试验系统,对法兰盘的多颗螺栓的联结应力进行测试试验,试验结果表明,本文所设计的多螺栓应力监测系统成功地对不同载荷下的多颗螺栓进行有效的应力监测,系统工作稳定、可靠,且能够检测出螺栓松动现象。该研究成果对风电机组螺栓的疲劳监测提供了重要技术支持,对于保障风电机组的安全运行,避免重大安全事故的发生,具有十分重要的作用和意义。

### 参考文献

[1] 高培昱,程珩,赖成,等. 风力发电机变桨连接螺栓断裂故障诊断研究[J]. 机械设计与制造,2018(7):134-136.  
 [2] 周新坪. 风力发电机叶片叶根的受力性能综述[J]. 科技风,2016(16):159.  
 [3] HUANG ZH P, GAO L H, WANG Y W, et al. Determination of the johnson-cook constitutive model parameters of materials by cluster global optimization algorithm [J]. Journal of Materials Engineering and Erformance, 2016, 9(25): 4099-4107.  
 [4] 葛川,李朋志,徐立松,等. 电阻应变式位移传感器电路设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6):58-61.  
 [5] 王涛,刘绍鹏,李川,等. 基于压电时间反演法的螺栓松动检测研究[J]. 传感技术学报,2015,28(12):1795-1799.

[6] 徐春广,宋文涛,潘勤学,等. 残余应力的超声检测方法[J]. 无损检测,2014,36(7):25-31.  
 [7] BOMPAN K F, HAACH V G. Ultrasonic tests in the evaluation of the stress level in concrete prisms based on the acoustoelasticity[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162:740-750.  
 [8] CASTELLANO A, FRADDOSIO A, MARZANO S, et al. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect[J]. Procedia Engineering, 2017, 199:1519-1526.  
 [9] 甘文成,王雪梅,倪文波,等. 基于 FPGA 和 LabVIEW 的超声波螺栓应力测量系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2019(12):82-86.  
 [10] 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.  
 [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.  
 [12] 鲁克华. 基于分段包络互相关算法的气体超声波流量计研究[D]. 浙江:浙江大学,2019.  
 [13] 方汉方. 基于 FFT 超声波传输时间高精度测量的研究[D]. 成都:西华大学,2012.  
 [14] 徐从裕,胡宗久,杨雅茹,等. 基于 FFT 及 IFFT 的超声波相位差检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(5):180-186.  
 [15] 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.

### 作者简介

庞松,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式信号检测、处理计算,现代测控技术。  
 E-mail:379887416@qq.com  
 王雪梅(通信作者),工学博士,副教授,主要研究方向为现代测控技术及其在轨道交通中的应用研究。  
 E-mail:xmwang2012@home.swjtu.edu.cn