

一种预应力监测无线智能螺栓及系统

朱东升¹ 陈得民²

(1 中原油田技术监测中心 河南濮阳 457000 2 北京必创科技有限公司 北京 100085)

摘要:对桥梁、沿土等工程领域的大型结构预应力监测相当重要。大型结构常使用螺栓固定各部件,当大型结构发生倾斜等故障时,用于固定各部件的螺栓所承载的应力将发生变化。本文研究设计一种无线智能螺栓及监测系统,可以实时监测这些螺栓所承载的预应力。该无线智能螺栓不仅可以单独使用,而且可以组网使用,从而灵活地对大型结构的预应力、结构平衡等进行监测。同时,本文论述了两种系统工作模式及其算法,该工作模式只是本系统的典型工作模式,针对具体工程应用,工作模式可以改变。

关键词:智能螺栓 预应力监测 无线

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2014.04.004

1 引言

在船舶工程,电网工程,水利工程,桥梁建筑工程等领域都存在很多如风机、海洋平台、桥梁、输电塔、港机、船舶等大型工程结构设备,由于这些设备使用环境恶劣,造价昂贵,在长期使用过程中,由于拆装、运输、超载、腐蚀或受地基沉降等各种因素的影响,大型结构各部件、部件间连接及整体都会出现不同程度的损伤或形变,常有发生倒塌等恶性事故,造成巨大的经济损失和人员伤亡,所以,对这些大型结构的监测势在必行。目前,大多采用有线方式或巡检方式监测大型结构的相关状态信息,但这种有线的方式很不方便,不适用于一些地处环境比较恶劣的大型结构设备监测,而人工巡检方式,不仅费用高,而且不能及时准确掌握大型结构设备安全状态。

在这些结构中,螺栓是必不可少的部件,它们被大量使用于固定各部件。这些螺栓对整个大型结构起着非常重要的作用,当大型结构发生形变时,这些固定各部件的螺栓所承载的应力将最先发生变化。

鉴于此,本文设计一种能监测预应力的智能螺栓,该螺栓内部集成预应力采集系统,可以实时监测传递在其上的预应力。该智能螺栓已经申请为专利^[1,2]。

该智能螺栓结构独立,可以分布式布置,不仅可以单独监测各位置螺栓的预应力,而且可以通过不同位置、多螺栓组网方式综合判断出大型结构设备的整体平衡状态。同时,该智能螺栓也

可将螺杆设计很长,作为沿土工程或桥梁建筑工程中的预埋设备,用于监测内部预应力。

2 无线智能螺栓

2.1 无线智能螺栓结构

无线智能螺栓结构如图1所示,1代表螺栓,2代表密封盖,用来密封安装在螺栓内的传感器,可以打开更换电池或直接给内部电池充电,3代表传感器节,带电池,4代表导线,应变片和传感器之间连线,5代表应变片,焊接在螺栓内部,6代表螺帽。从智能螺栓结构图上可知,整个电路单元全部密封在螺栓内部,密封盖采用耐腐蚀、高强度的塑料材质,以保证无线通讯顺畅,同时,可以对螺栓内的电路进行完全密封,防护等级可以达到IP67。

在螺栓内部,集成了无线传感器。螺栓内部弹性体上粘贴电阻应变计并和传感器内部电路组成惠斯通电桥,由应变计的变化使电桥发生不平衡,电桥输出与应变呈线性关系的电压信号,传感器通过内部数据处理模块将电信号转化成螺栓对应的应力值。

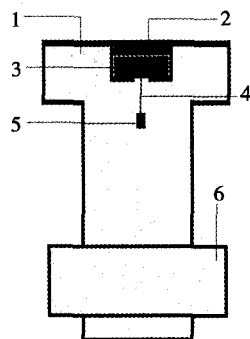


图1 智能螺栓结构

传感器通过无线数字信号传输,将测得的应力值发送到数据显示终端,数据显示终端可以根据螺栓应力值监测螺栓状态。

本无线螺栓内置传感器主要有应变测量电路、数据处理单元、无线通讯单元和电源单元组成,如图2。实线框内是本传感器组成部分,实线框外的应变片是敏感元件,通过引线和无线传感器的应变测量电路连接。

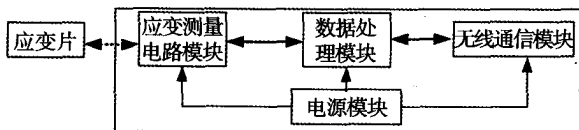


图2 智能螺栓内部电路原理图

2.1 应力测量^[3~8]

2.1.1 应力测量方法

使用应变片测量应力时,将应变片粘贴在弹性体上,当弹性体受力变形时,应变片的敏感栅也随同变形,其电阻值发生相应变化,通过转换电路转换为电压或电流的变化。通过数据采集设备将对应的电流或电压转换成相应的应变值,通过被测件弹性模量等参数,将应变转换成对应的应力。

2.1.1.1 应变测量原理

将应变片贴在被测定物上,使其随着被测定物的应变一起伸缩,这样里面的金属箔材就随着应变伸长或缩短。很多金属在机械性地伸长或缩短时其电阻会随之变化。应变片就是应用这个原理,通过测量电阻的变化而对应变进行测定。一般应变片的敏感栅使用的是铜铬合金,其电阻变化率为常数,与应变成正比例关系。

$$\text{即: } \Delta R/R = K \times \varepsilon$$

式中: R : 应变片原电阻值 Ω (欧姆);

ΔR : 伸长或压缩所引起的电阻变化 Ω (欧姆);

K : 比例常数(应变片常数);

ε : 应变。

不同的金属材料有不同的比例常数 K ,铜铬合金(Advance)的 K 值约为2。这样,应变的测量就通过应变片转换为对电阻变化的测量。但是由于应变是相当微小的变化,所以产生的电阻变

化也是极其微小的。

2.1.1.2 惠斯通电桥

惠斯通电桥适用于检测电阻的微小变化,应变片的电阻变化也可以用这个电路来测量。如图3所示,惠斯通电桥由四个电阻组合而成。如果

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \text{ 或 } 1234 R \times R = R \times R$$

则无论输入多大电压,输出电压 e 总为0,这种状态称为平衡状态。如果平衡被破坏,就会产生与电阻变化相对应的输出电压。

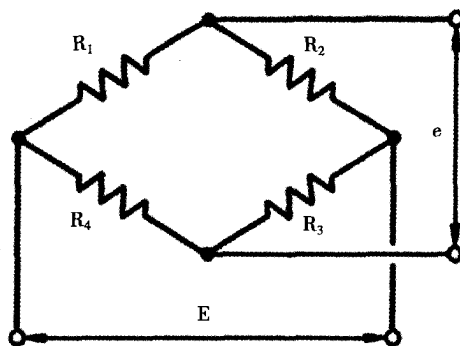


图3 惠斯通电桥

2.2 应变测量电路

在智能螺栓内弹性体上粘贴专用的应片,将应变片连线和传感器连接,组成应变桥路,即为基础无线应力传感器。该应变片稳定性极高。

向应变桥路提供稳压电源,作为激励源,当螺栓发生松动时,应变桥路阻值发生变化,将导致数据采集电路电压变化,数据处理单元将该电压信号采集并转化成应力值,通过无线通讯模块将应力值发送出去。

应变测量电路包括桥路电阻、前置放大电路、滤波电路及A/D转换电路,前端应变片和桥路电阻共同组成应变桥路,其原理结构图如图4所示。

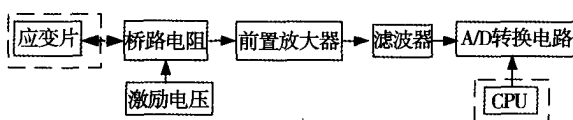


图4 应变测量电路

桥路原理如图5所示, $S+$ 、 $S-$ 是通道的正负信号输入端, $VEXC$ 、 $AGND$ 供桥电压端, R_g 是应变片, R_L 是线电阻。从桥路原理图可知,该应变测量桥路是一个全桥电路,全桥电路全桥是一

种自补偿电路,可以有效的消除因线电阻和温度引起的误差。

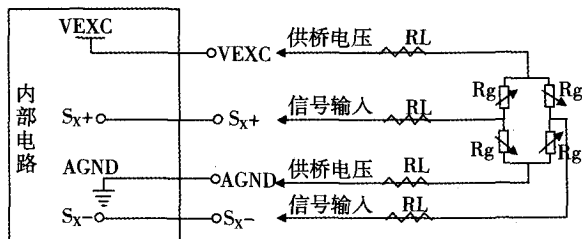


图5 全桥测量电路

2.2.1 无线通信单元

本文使用CC1101作为无线通信单元射频电路,采用BeeLPW无线网络监测系统,支持点对多等网络拓扑结构。将智能螺栓测得的应力值、螺栓编号及螺栓所在的大型结构设备编号通过无线方式发送到上位机监控系统。为满足通信距离需求,无线通信模块可配功率收发模块,以增大通信距离。功率收发模块可细分为功率放大器和发射天线。为增大通信距离,本文通过附加功率放大器解决,包括发送通道上的射频功率放大和接收通道上的低噪声放大器。射频功率放大器实现433MHz发射信号功率放大功能,放大增益最大可达28dB(输出功率最大可达250mW)。低噪声放大器实现433MHz接收信号低噪声放大功能,放大增益可达14dB。

CC1101是低成本1GHz以下的无线收发器^[9],为极低功耗的无线应用而设计。电路主要设计为ISM(工业、科学和医疗)和SRD(短距离设备),频段在315、433、868和915,但是可以很容易的编程,使之工作在其他频率,在300MHz-348MHz,387MHz-464MHz和779MHz-928MHz频段。

2.2.2 数据处理单元

数据处理单元主要是将螺栓的应变值进行处理得到应力值,并设定对应螺栓编号及螺栓所在设备编号,通过无线通讯模块将应力值、螺栓编号及设备编号发送出去,也可以根据主机下发的指令和参数进行开始采集、停止采集、瞬时采集,组号、信道设置,采样率、通道数设置,通道清零,电量查询。

本文使用MSP430F2274作为数据处理单元。

MSP430F2274是MSP4302xx系列控制器(MCU)中的一个16位微控制器^[10,11]。微控制器所需的电源电压范围很宽,可以从1.8V至3.6V,MCU的工作频率可以高达16MHz,它的CPU为16位RISC架构,包含所有51条指令(27条核心的,24条仿真的)。它支持单周期移位和单周期加/减指令。这可以在缺少硬件乘法器的情况下实现高效的乘法^[4]。MCU还具有一个内部的超低功耗低频振荡器(VLO),室温下工作在12KHz。这样就省去了一个设备工作所需的板上外部晶振。MSP430F2274功耗极低,片上资源丰富,同时利用JTAG接口技术,可以对片上闪存方便地编程,便于软件的升级。

2.2.3 电源单元

电源模块用于实现对系统中有源器件的供电,同时还可以对电池进行充放电管理。电源模块对各系统分模块采用独立的电源管理,在其空闲时使其进入休眠状态或关闭其电源。从而使系统总功耗大大降低。数字信号处理器通过IIC或UART接口与电源模块相连,实现对电源部分的电压、电流和温度情况的实时监控,防止电源过充和欠电现象的发生,通知网络主机及时更换电池。

3 预应力监测系统

3.1 系统总体结构

本预应力监测系统主要是通过上文论述的无线智能螺栓感知预应力,感知的预应力通过无线通讯模块发送至GPRS网关,GPRS网关带射频模块,接收各智能螺栓发送来的应力数据,并通过GPRS模块及以太网网络将应力数据转发至监控主机,监控主机安装有监测软件,对接受到的预应力值进行显示、存储,如果超出阈值,将发出报警提示。系统总体结构如图6所示。

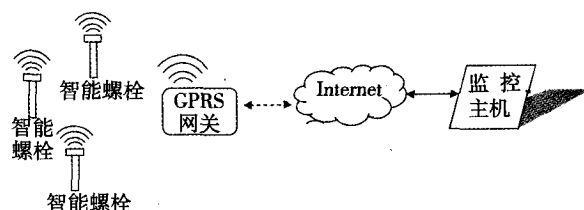


图6 预应力监测系统总体结构

3.2 系统工作模式

3.2.1 单螺栓预应力监测

本文设计的智能螺栓，每个螺栓可以单独工作。由于在长期监测工程应用中，结构发生形变是一个长期的过程，如风吹造成塔顶倾斜等事故。在类似工程应用中，智能螺栓采取休眠唤醒机制，即在每间隔一定的时刻，智能螺栓开始工作，等工作结束后，智能螺栓进入休眠模式，等待下次工作时刻的到来，这种工作模式可以降低智能螺栓功耗，增加电池使用寿命。在正常情况下，每12小时采集一次数据，每24小时发送一次数据给远程监测主机，每次对采集的数据进行判断，判断处理机制大概有以下几种算法：

(1) 如果超过预定值 W ，则立即发送应力值及螺栓编号，并提示监控主机进行报警，设备维护人员听到报警信息后，即可安排技术人员根据螺栓编号，到目的位置进行检查、维修；该预定值是该位置螺栓所能承受应力的报警阈值。

(2) 如果没有超过预定值 W ，则进行数据对比，对比算法如下：设前5次采集的应力值分别为 F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 ，前五次应力值的算数平均值为 F ，设当前采集的应力值为 F_6 ，如果 F_6 没有超过(1)所设置的预定值，则 F_6 与平均值 F 对比，设对比值为 T ，则 $T = (|F_6 - F| / F) \times 100\%$ ，设线性度预定值为 N_i ($i=1, 2, 3$)， $N_1=2\%$ ， $N_2=4\%$ ， $N_3=5\%$ 。当 T 大于等于 N_1 ，小于 N_2 时，智能螺栓内部数据采集系统提高采样周期，即由先前的每12小时采集一次变换为每6小时采集一次，此时更新前五次采集的数据，即前五次数据由 F_2, F_3, F_4, F_5 和 F_6 组成，重新计算对比值，如果 T 值仍然是大于等于 N_1 小于 N_2 ，则采样周期不变，仍为每6小时采集1次；当 T 大于等于 N_2 小于 N_3 时，智能螺栓内部数据采集系统继续提高采样周期，即由先前的每6小时采集一次变换为每3小时采集一次，此时更新前五次采集的数据，即前五次数据由 F_3, F_4, F_5, F_6 和 F_7 组成，重新计算对比值，如果 T 值仍然是大于等于 N_2 小于 N_3 ，则采样周期不变，仍为每3小时采集1次；当 T 大于等于 N_3 时，智能螺栓内部数据采集系统继续提

高采样周期，即由先前的每3小时采集一次变换为每1小时采集一次，此时更新前五次采集的数据，即前五次数据由 F_4, F_5, F_6, F_7 和 F_8 组成，重新计算对比值，如果 T 值仍然是大于等于 N_3 ，则采样周期不变，仍为每1小时采集1次，此时，每采集一次数据，即通过无线通讯模块将监测数据和螺栓编号发送至远程监控主机。当然，通过算法(1)和算法(2)可知，对比值 T 不会一直很大，因为算法(1)中的报警预定值与监测数据有关， T 值的增大是有单次监测数据增大造成，如果单次监测数据过大，将执行算法(1)。

3.2.2 多螺栓预应力平衡监测^[12]

在很多沿土工程或桥梁建筑工程领域，都存在很多大型钢架结构，这些结构长期静态屹立于地面。在正常情况下，处于平衡状态，当地址沉降或钢架结构自身结构变化，造成结构不平衡，长期不平衡将存在很大的危险隐患。而这些大型钢架结构中，对等点都会有螺栓固定。这些螺栓采用本文设计的无线智能螺栓，正常情况下，这些对等位置的智能螺栓应力大小相差不大，整体处于平衡状态，当大型结构发生倾斜时，一侧的螺栓应力势必将增大，相反，另一侧的螺栓应力将会减小，远程监控主机对对等智能螺栓组网，构成一个预应力平衡监测系统，通过对本网络内各智能螺栓应力情况监测，即可及时监测到大型钢架结构的平衡状态。

4 总结

螺栓是固定风机机座、高架铁塔等很多大型设备的必备零件，但由于各种原因，将导致部分螺栓发生松动，最终会使大型设备发生严重的事故，而且，部分大型结构设备由于风吹、腐蚀或受地基沉降等影响，造成结构的自身受力不平衡，而固定这些大型结构部件的螺栓事先会感知到这种不平衡应力的变化。因此，及时对螺栓进行应力监测，对大型设备维护具有非常重要的意义。

(下转第28页)

动作次数可以预先设定,达到试验要求次数,试验自动停止;通过变频器可调节发动机转速,进而调节加载速率。触摸屏程序离线模拟界面及控制面板,见图9、图10。

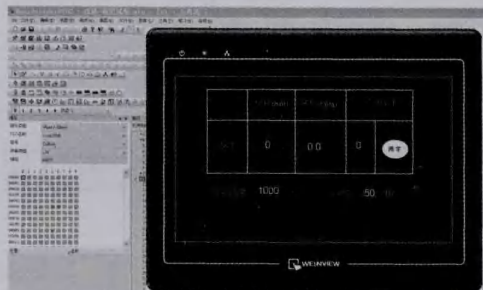


图9 触摸屏程序离线模拟界面

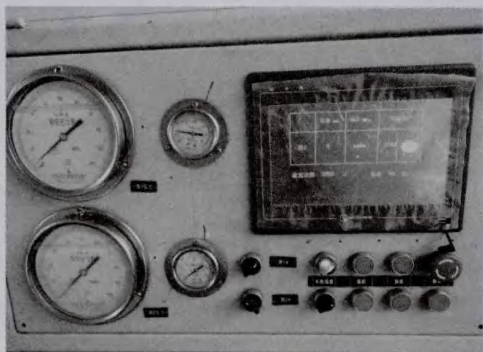


图10 智能泵控制面板

3.9.4 判定方式

参照JG/T321-2011标准要求,千斤顶额定压

(上接第21页)

目前,国内外有相关内置温度等传感器的螺栓,但内置应变传感器,并通过无线传感器网络技术实现螺栓应力在线监测的装置及系统还未发现。本文设计的无线智能螺栓很好地解决了大型结构关键连接点预应力监测,通过预应力监测,可以判断出螺栓的松动、大型结构不平衡等现象,为大型结构的正常工作提供了方便、可靠的监测技术。

本文详细地论述了该无线智能螺栓的结构及电路原理,并给出了两种典型的预应力监测模式,文中设计的智能螺栓,笔者已经申请为专利,并得到授权,基于该设计原理,可以根据具体工程应用要求,设计出更符合实际要求尺寸、外观的智能螺栓。本文系统的研究与设计,为大型结构安全监测提供了一种新的技术手段,也使无线传感器网络的技术在新的领域具体应用。

力大于1200kN时,千斤顶活塞往复动作次数不少于0.3万次,待检测的千斤顶不出现漏油及结构破坏则可判定合格。

4 结语

型式试验是按照安全标准对全项目进行的试验,目的是检验产品的设计在产品的使用寿命期内是否符合标准要求。主要适用于对产品综合定型鉴定和评定企业所有产品质量是否全面地达到标准和设计要求的判定。

该套千斤顶长期运行试验用的整套试验装置系柳州欧维姆机械股份有限公司自主研发,主要包括:智能泵站及其控制系统、控制程序编制,试验台架、ZB4-500电动油泵、球形垫板、接近开关安装组件等。其中,智能泵站的控制系统采用PLC+触摸屏控制模式,具有位移、压力检测、数据显示、参数录入,速度调节等功能。通过程序控制可以实现两台千斤顶自动伸缩缸来回往复运动,自动记录千斤顶活塞的累计往复动作次数。通过变频器可调节发动机转速,进而调节加载速率。该系统高效自动,控制精准,系统稳定,且应用广泛,并已成功运用于FAST工程反射面索网制造与安装工程钢索密封性能试验横向位移千斤顶的往复运动中。

参考文献

- [1] JG/T 321-2011, 预应力用液压千斤顶[S].

参考文献

- [1] 陈得民,沈唯真.一种螺栓中国,中国,CN 103016489 A [P]. 2013.04.03.
- [2] 陈得民,沈唯真.一种螺栓中国,中国,CN 202991775 U[P]. 2013.06.12.
- [3] E.Becker and Paul Poste.Keeping the blades turning: Condition monitoring of wind turbine gears[J]. Refocus, 7(2):26-32, 2006.
- [4] 徐从裕,余晓芬.无补偿式应变片在动、静叠加载荷下的应变参数测量[J].仪器仪表学报, 2005, 26(09): 902-904
- [5] 陈得民.基于无线传感网的风机应力监测系统[J].传感器世界, 2011, 2: 21-23
- [6] 孙利民,李建中.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社, 2005.
- [7] 徐从裕,余晓芬.无补偿式应变片在动、静叠加载荷下的应变参数测量[J].仪器仪表学报, 2005, 26(09): 902-904.
- [8] 夏祁寒.应变片测试原理及在实际工程中的应用[J].山西建筑, 2008,34(28): 99-100.
- [9] CC1101中文数据手册.
- [10] MSP430x2xx 系列用户指南(SLAU144).
- [11] MSP430x22x2, MSP430x22x4数据手册(SLAS504).
- [12] 陈得民,沈唯真,罗银生.机动车载安全监测系统及方法,中国,CN 102566542 A [P]. 2012.07.11.