

无线双核应变应力测量装置的研制及应用

陈得民

(北京必创科技股份有限公司 北京 100085)

摘要:本文在基于传统无线应变测试技术基础之上研究设计了一种无线双核应力测试装置,从硬件架构上解决了无线网络的同步性问题。本设备主要由三部分组成:测量电路,数据处理单元和无线射频单元。而无线射频单元采用独立的数据处理模块,和外部的数据处理模块构成一个双核系统,在进行同步数据采集时,直接由射频单元内的时钟发送脉冲信号来控制采集电路,从而大大降低了时间延误,提高了数据的同步精度。本文主要论述了应变测试原理、无线应变采集装置原理、采集电路、双核数据处理电路以及最终产品的具体实现。最后,利用本设备在闸门支臂启闭过程中进行了应力测试,测试结果显示,该设备完全满足工程测试要求,系统性能稳定、测量精度及同步精度较高。

关键词:无线传感器 应变测试 双核

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.04.005

1 引言

应变测量是很多机械工程、水利工程、岩土工程等领域中一项最基本的测试内容。但在这些工程测试领域,其现场环境比较复杂,很多处于高空位置,如果采用传统的有线测量方式,一则工程量巨大,施工难度极高,二则,有线方式易受到外部环境的干扰,三则,对于部分移动的设备,将无法完成测量。

随着无线传感器网络技术的发展,为解决传统有线应力应变数据采集系统所面临的问题提供了契机。无线传感器网络技术是涉及传感器技术、无线网络技术、微机电系统技术以及数据处理技术等诸多技术领域的一门交叉学科。虽然,基于该技术,目前很多企事业单位也研制出很多无线应变应力测试系统,可以解决有线系统所面临的上述诸多问题,但是,在很多特殊的应力应变测试工况中,需要多传感器多测点同步测试,而这些设备要么只能进行静态加载试验,要么只能进行定采样率动态独立测试,其单设备内通道间及设备与设备间同步性都较低。例如,大型起重机械的动载试验,水闸门启闭过程中支臂应力测试等,这些动态过程测试中,需要同时对整个结构上的多个测点进行同步测试,以便掌握设备整体动态受力特性,而市面上常见的这些无线应变检测系统,虽然也可以实现多测点同步测试,但其同步技术都是通过网络协议中同步算法实现,其同步精度不高。

基于上述因素的考虑,本文研究设计一种无线双核应力测试装置,从硬件架构上解决无线网络的同步性问题,同时,本文结合一典型的工程应用实例,对该设备的应用做了详细描述。事实证明,该设备使用方便、功能齐全、性能稳定,不仅可以用于结构静态应变应力测试,亦可用于结构动态多测点同步应变应力测试。

2 无线应变测试系统结构

本文所涉及的无线应变测试系统是一个典型的无线传感器网络^[1],系统采用无线应变传感器采集应变数据,每个无线应变传感器独立工作,分布式布置,将采集的数据发送到无线网关,无线网关接收本网络内多个无线应变传感器的数据,并通过各种有线或无线接口转发至监控主机,监控主机安装有数据采集与处理软件,对接收的数据进行采集、存储、显示和分析等。

3 应变应力测试原理

材料在受外力作用时,将产生机械变形,机械变形会产生阻值变化,这种因形变而使其阻值发生变化的现象称为“应变效应”。用应变片测量受力应变时,将应变片粘贴于被测对象的表面。在外力作用下,被测对象表面产生微小机械变形时,应变片敏感栅也随同变形,其电阻值发生相应变化^[2]。通过转换电路转换为相应的电压或电流变化。其存在如下关系式:

$$\Delta R/R = k \times \varepsilon \quad (1)$$

式中: $\Delta R/R$ 为电阻变化率; k 为灵敏系数; ε 为

应变值。

通过转换电路,把应变计的 $\Delta R/R$ 变化转换成电压或电流变化,然后通过测量电路,直接测量电压或电流信号。通常采用惠斯登电桥电路实现这种转换,如图1。

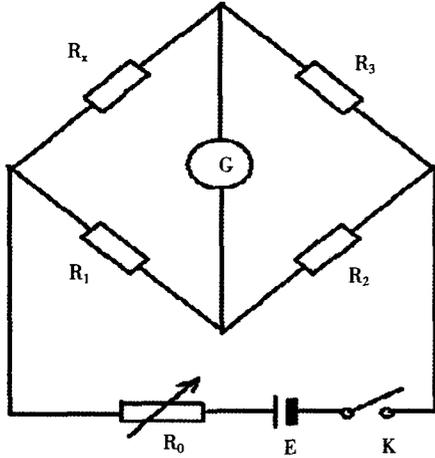


图1 惠斯登电桥

$$\text{平衡条件: } R_1/R_2 = R_x/R_3 = n \quad (2)$$

$$\text{输出电压: } U_0 \approx E \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3)$$

通过测试的应变可以间接计算出应力,其换算公式: $\delta = E \times \varepsilon$, $\Delta R/R = K \times \varepsilon$, 其中 δ 为试件的应力, ε 为试件的应变, E 为试件材料的弹性模量, $\Delta R/R$ 为电阻变化率, K 为灵敏度系数,一般在1.7~3.6之间。

4 无线应变传感器设计

无线应变测量系统主要由数据采集电路、数据处理模块、无线通讯模块及电源管理模块组成。数据采集电路主要是通过激励源给外部应变片提供恒压或恒流源,然后将外部应变片

与内部高精度电阻组成测量桥路,再通过放大、滤波及A/D采集芯片等实现应变信号的采集;数据处理模块主要是控制数据的采集和处理并与无线通讯模块进行数据的传输;无线通讯模块主要是实现数据的无线收发;电池管理模块主要给该设备供电部分提供电源^[3,4]。

4.1 应变采集电路的设计

应变采集电路是该设备最前端信号获取部分,也是本设备最关键电路部分之一,直接关系到采集到的应变数据的稳定性及准确度。该采集电路如图2所示,主要由五部分组成:激励电路、配桥电路、电桥调平电路、放大滤波电路以及A/D采集芯片。激励电路主要是利用运算放大器通过电阻 R_2 和 V_{REF} 的配比计算产生一个恒定电压或电流,为桥路提供工作所需要的恒定的激励源。桥路电路是由4个高精度桥臂电阻($R_5 \sim R_8$)和一个多路开关芯片组成,可通过控制多路开关芯片的通断来切换内部桥臂电阻的连接方式,从而可以灵活的进行传感器在应用时,对不同桥路选择的需求(全桥、半桥、1/4桥等),大大增加了系统架设的灵活性。由于受环境变化、应变片电阻不一致性等因素影响,电桥电路将发生零偏。电桥调平电路是由2个桥路调平辅助电阻 R_9 、 R_{10} 和一个可调电位计构成,通过控制可调电位计的阻值大小完成电桥电路的零偏的校正。放大滤波电路是由仪表放大器和与之匹配电阻($R_{11} \sim R_{15}$)、电容(C_1 、 C_2)组成,用于放大、调理因桥路微小应变产生的应变电压信号,合理的放大倍数和滤波频率,能够最大程度的还

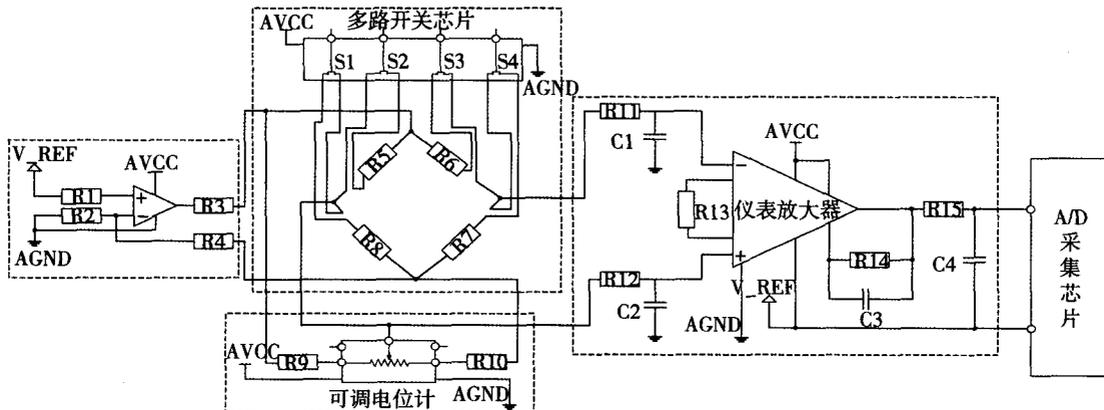


图2 采集电路图

原真实值，反应桥路的变化情况。A/D采集芯片负责将已经放大、滤波后的电压信号转换成数字信号，并通过其他数字接口（spi、串口等）传输给主控芯片（MCU）。

4.2 双核数据处理硬件架构

传统无线数据采集装置如图3所示，包括一个微控制单元（MCU），以及与微控制单元连接的无线射频单元和数据采集单元。其中，数据采集单元用于在微控制单元控制下进行数据采集，微控制单元对采集到的数据进行数据处理，无线射频单元用于在为控制单元控制下降数据处理结果进行发送。但是，由于现有的无线数据采集装置中仅具备单微控制单元，因此，在采集能力、数据处理能力、数据的传输能力以及系统的扩展能力都有限。

本文设计的无线双核数据采集装置，由于分别在无线射频部分和数据处理部分设置了单独的微控制单元，因此可以提高无线数据采集装置的采集能力、数据处理能力、数据的传输能力以及扩展能力；同时，由于无线射频部分的微控制单元中的时钟电路模块向数据处理部分中的采集电路提供时钟信号，由此实现了同步采集。该双核采集装置主要由数据处理部分和无线射频部分组成，其中，无线射频部分由射频芯片和数据处理模块组成，数据处理模块由数据处理电路及时钟电路组成；数据处理部分由数据采集电路、时钟电路及数据处理电路组成。基本结构如图3所

示，其中，无线射频部分包括第一微控制单元和射频芯片，第一微控制单元包括第一时钟电路模块和第一数据处理电路模块；数据处理部分包括第二微控制单元，第二微控制单元包括第二时钟电路模块、第二数据处理电路模块和采集电路模块。第一时钟电路模块用于向第一数据处理电路模块提供第一时钟信号，以及在采集时间点向采集电路提供第一时钟信号；采集电路用于根据所述第一时钟信号在采集时间点进行数据采集，并将得到的采样数据发送至第二数据处理电路模块；第二时钟电路模块用于向第二数据处理电路模块提供第二时钟信号；第二数据处理电路模块用于根据第二时钟信号对所述采样数据进行运算，并将运算结果发送至第一数据处理电路模块；第一数据处理电路模块用于通过所述射频芯片接收包括所述采集时间点的采集指令，并于采集启动时间点控制所述第一时钟电路模块向所述采集电路模块提供所述第一时钟信号；以及用于根据第一时钟信号和预置的网络协议对所述运算结果进行调制形成数据包，并通过所述射频芯片发送所述数据包。

本文所设计的无线应变采集装置中，无线射频部分中的射频芯片采用低功耗射频芯片（MC13192 zigbee芯片），第一微控制单元采用带时钟的低功耗单片机（MC9S08GB60A）；数据处理部分中的第二微控制单元采用是带A/D采集电路及内部时钟的单片机（MSP430）。由于

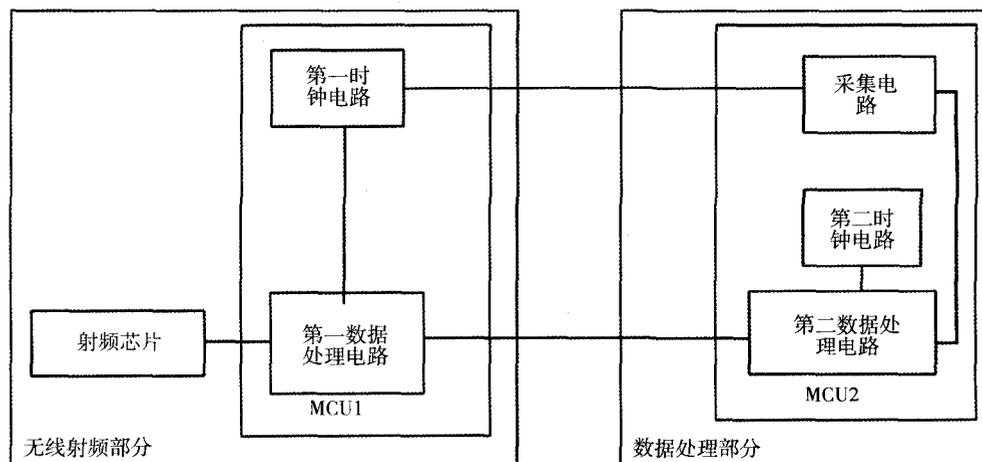


图3 双核硬件原理图

带时钟的低功耗单片机 (MC9S08GB60A) 中的时钟信号提供给带 A/D 采集电路的单片机 (MSP430) 中的 A/D 采集电路, 由此实现了同步采集。

4.3 无线应变采集设备实现

本文设计的无线应变节点是一种基于 802.15.4 协议的新型双核数据采集系统。使用非常简单, 直接将节点用自带的磁铁吸在被测物上即可。每个设备设计 4 路独立采集电路, 其由电源模块、

采集处理模块以及无线通讯模块组成。每个数据采集通道内都有内置独立的高精度桥路电阻和放大调理电路, 支持电压激励。同时, 该设备可以通过上位机软件, 方便的实现 1/4 桥、1/2 桥、全桥测量方式的自动切换, 兼容了各种类型的桥路传感器。其数据采集通道与外接应变片组成的桥路原理图如图 4 所示, S+、S- 是通道的正负信号端, VEXC 是在全桥时和接地端 AGND 组成桥路输入端。

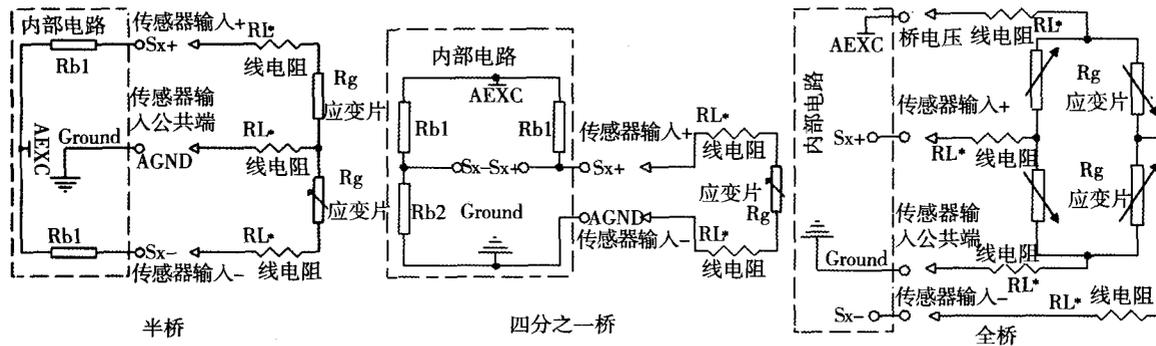


图4 通道桥路电路原理图

该设备采集的数据, 既可以实时存储在节点内, 也可以实时传输到上位机, 保证了采集数据的安全性及准确性。节点的无线传输速率可以达到 250KBPS, 其通讯距离可达到 1 公里。节点内部有电源管理软硬件, 在连续数据传输时, 节点功耗仅几 mA。节点内置可充电电池, 充满一次电, 可连续工作半年以上; 节点支持外部 I/O 触发采集控制模式, 通过外部接口接入高电平信号进行控制; 节点带有 USB 接口, 用户可以通过 USB 接口对节点充电, 同时可以快速地吧节点内存储器的数据下载下来^[5]。

5 工程应用

该设备在江山碗窑水库露顶弧形工作闸门 8m × 10m-10m 的闸门支臂上进行了动态应力测试^[6]。在无水压作用下, 测量启闭闸门过程的动态应力。测试前, 在闸门上支臂选择了 8 个测点, 每个测点粘贴一单片 1/4 桥应变片, 其中 4 个测点在左支臂, 4 个测点在右支臂, 每 4 个测点使用一台 4 通道的无线应变采集装置, 在闸门启闭过程中对支臂动态应力进行实时同步测量。部分

测量结果如图 5 和图 6 所示。

动态应力测试结果显示: 在无水压作用下, 左支臂上测点在启门过程的实测附加动应力一直保持在较高水平, 附加动应力值并没因受力条件改善而降低, 受力状态不正常; 同时, 通过对 8 条数据曲线分析, 通道与通道之间及 2 采集设备之间的数据同步精度极高, 通道之间同步精度在 0.01ms 之内, 设备与设备之间同步精度在 0.1ms 之内。

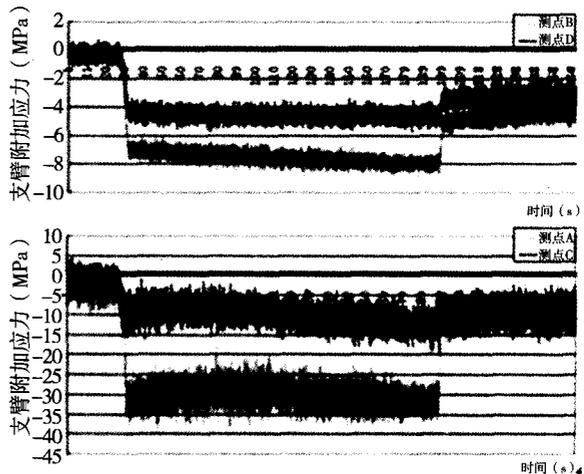


图5 闸门左支臂测点启闭过程应力曲线

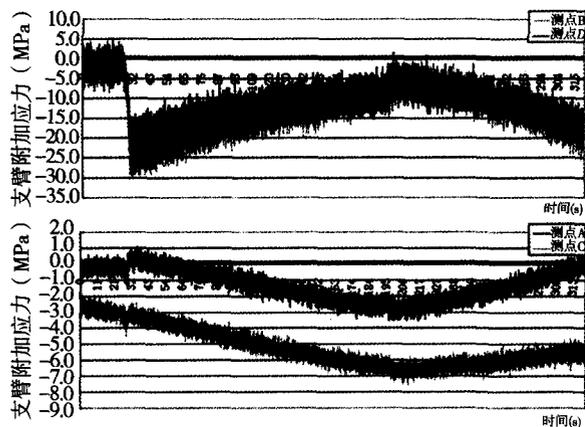


图6 闸门右支臂测点启闭过程应力曲线

6 结论

无线传感器网络技术是涉及传感器技术、无线网络技术、微机电系统技术以及数据处理技术等诸多技术领域的一门交叉学科。基于该技术所研制的无线测试系统解决了传统有线数据采集系统在工程应用方面所面临诸多问题。而同步采集技术是无线传感器网络最关键的技术之一。本文

(上接第25页)

(1) 天津赤峰桥

天津赤峰桥主桥横跨130多米,引桥为互通式立交桥。赤峰桥主塔倾斜达63度、高64.923米,建成后的赤峰桥从外形上看如同一艘巨轮,主塔犹如扬起的帆,被誉为“海河之舟”。最大斜拉索由127根钢绞线组成。

(2) 绵阳会客厅一号桥

绵阳会客厅一号桥是造型独特的一座双塔双层斜拉桥,上层为人行观景步行桥,下层为双向六车道车行桥。该桥全长约1400m,主桥桥长400m,主塔外形似白鹭,全高98m,桥宽28m,双向六车道,最大斜拉索由109根钢绞线组成。

(3) 铜陵长江公铁两用大桥

铜陵长江公铁两用大桥主桥全长1290m,主跨630m,为双塔五跨钢桁梁斜拉桥。该桥上层为设计时速100公里的双向六车道高速公路,下层为设计时速250公里的合福铁路双线和160公里和合庐铜铁路双线,共四条铁路。最大斜拉索由127根钢绞线组成。

(4) 坦桑尼亚KIGAMBONI桥

在基于传统无线传感器网络技术基础上研制了一种双核应变应力采集装置,该装置从硬件技术架构上解决了无线应变采集系统的时间同步问题,是无线传感器网络同步技术的一次革新。同时,本文研制的无线应变测试系统在实际工程中得到应用,结果显示,本系统稳定、可靠,测量精度及时间同步精度极高。

参考文献

- [1] 孙利民,李建中. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [2] 陈得民. 应变传感器的稳定性[M]. 上海计量测试, 2012, 03: 20-22.
- [3] 陈得民, 罗银生, 张俊辉等. 一种应变式无线传感器: CN 102628717 A[P]. 2012.08.08.
- [4] 陈得民, 杨绍普. 一种无线双核数据采集装置及采集方法: 中国, 104298160A[P]. 2015-01-21.
- [5] 陈得民, 张一辉, 李淑娟等. 基于WSNs的吊机应力监测系统机械与自动化[J]. 2012,02:28-30.
- [6] 陈得民, 沈唯真, 代啸宁. 一种无线闸门设备状态监测装置: CN 203642964 U[P]. 2014.06.11.

坦桑尼亚KIGAMBONI桥为双塔单索面混凝土斜拉桥,主跨200m。最大斜拉索由160根钢绞线组成。

6 小结

OVM250超大孔位钢绞线拉索疲劳试验的成功,充分证明了OVM250钢绞线拉索体系优异的安全可靠性,其中OVM250-139拉索组件疲劳试验的应力幅值高达250MPa,高于国际规范要求,这标志着OVM250钢绞线拉索体系的达到国际先进水平,为斜拉桥超大孔位斜拉索设计与应用提供强有力的技术保障。

参考文献

- [1] Recommendations for Stay Cable Design, testing and installation [S]. Post-tensioning institute (PTI), fifth edition, 2007.
- [2] fib bulletin 30, Acceptance of stay cable systems using prestressing steels [S]. International Federation for Structural Concrete, 2005.
- [3] Cable Stays - Recommendations of French interministerial commission on Prestressing[S]. SETRA, France, June 2002.
- [4] 闫云友等. OVM250钢绞线斜拉索锚固系统可靠性研究[C]. 第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会. 论文集, 2013年