

桥梁应变数据采集系统

郭晓澎 刘志英 周晓旭

(山西省交通科学研究院 信息机电技术研究所 太原 030006)

摘要: 本文介绍了桥梁应变数据采集系统的基本组成和工程应用研究现状,从硬件电路和软件程序两方面描述应变数据采集系统的设计方案,主要研究了系统硬件设计部分的关键技术。提出以芯片 TP4065 和 STC12C2052AD 为核心的电源管理系统;设计了基于惠斯通电桥的全新桥路接线方法,实现桥梁重要节点处应变量的检测;并针对应变最大时实际输出电压较小而降低系统测量精度的问题设计了信号调理电路。系统在桥梁上进行了实验,结果表明,本系统能够提高测量精度,且运行稳定,验证了本文所提方法的可行性与正确性。

关键词: ADUC845; WIFI; 以太网; 惠斯通电桥

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Bridge strain data acquisition system

Guo Xiaopeng Liu Zhiying Zhou Xiaoxu

(Shanxi Transportation Research Institute, Institute of Information and Electrical Technology, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This paper introduces the basic constitution and the engineering application research status of the bridge strain data acquisition system, from two aspects of hardware circuit and software program to describe the design scheme of the strain data acquisition system, the key technologies of the hardware design of the system is mainly studied. The power management system based on TP4056 and STC12C2052AD is proposed. A new bridge circuit wiring method based on the Wheatstone bridge is designed to detect the strain capacity in significant nodes of the bridge. Aiming at the problem that the system measurement accuracy is reduced when the strain capacity is to maximum but the actual output voltage is very small, signal processing circuit is designed. Experimental tests conducted on bridge show that the proposed system can improve the measurement accuracy and operate steady, verified the correctness and feasibility of the proposed method.

Keywords: ADUC845; WIFI; Ethernet; Wheatstone bridge

1 引言

近年来,随着桥梁的日渐增加,桥梁健康检测系统越来越受到路桥管理部门的重视,桥梁重要节点受力时发生形变而产生的应变数据是桥梁健康检测的重要指标^[1-2]。传统的桥梁应变数据采集仪基于 485 通讯协议的有线测量方式,但现场接线量大且复杂性高,需要标记大量导线,导致采集数据的效率非常低,采集误差也非常大,严重影响了应变数据采集系统的可靠性^[3]。目前采用无线通讯方式的应变采集仪由于无线信号受环境影响较大,现场测试信号连接不稳定,易造成数据漏采^[4-6]。根据现场不同的测试要求,应变采集设备应实现四分之一桥、半桥以及全桥间的自由切换,而传统设备存在切换不方便或者完全不能切换的问题,给实际应用带来不便^[7-8]。

因此,研发结构简单、信号稳定性高、桥路切换方便、测量精度高、携带方便等特性的桥梁健康检测系统具有十分重要的意义。

鉴于此,本文设计了基于惠斯通电桥的桥梁健康检测系统,提出了可自由切换 3 种桥路接线方式的新方法,根据桥路电压变化量和应变量的对应关系得到所测量桥梁节点处应变大小,依据应变量的值判断桥梁是否在健康范围内^[9]。同时针对应变最大时实际输出电压很小而降低系统测量精度这一问题设计了信号调理电路。此外,本系统采用有线无线双通讯的方式,同时考虑到检测单位现场使用设备时,不具备电源接入条件,增加了锂电池供电系统和电源管理系统,设备充满电后全速运行一天以上,满足了现场应用要求。本系统增加了未来桥梁健康检测系统的可靠性与稳定性,并在桥梁上进行了实验。

2 系统概况

本文所设计的桥梁应变数据采集系统,依靠集成有 24 位 AD 采集功能的单片机 ADUC845 搭建基于惠斯通电桥的应变采集电路。利用单片机控制 WIFI 和以太网模块构成数据收发器可以自由地实现有线和无线通讯方式的切换,其切换是通过 AT 指令设置。由此构成一套节点测量装置。每套测量设备包含 4 路采集口,可以同时测量 4 个点的应变。通过使用路由器将这些无线应变数据采集节点以及上位机连入同一个局域网中以实现数据的传输。这里将上位机设置成服务器,而将下位机各数据采集节点设置成客户端,上位机通过监听端口的数据流,判断数据的来源。系统的总体结构图如图 1 所示。

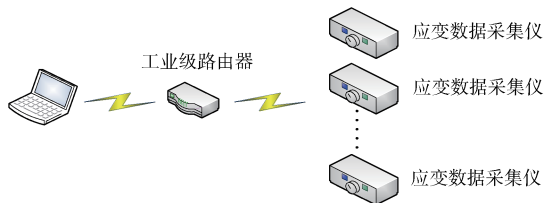


图 1 总体结构图

本文所研究的桥梁应变测量节点主要由 6 个部分组成:电源管理系统、数据通信系统、桥路数据采集系统、存储系统、主芯片系统以及上位机监控管理系统。其中通信系统采用基于 TTL 电平的串行通信方式实现以太网模块与主芯片通信,存储系统则使用具有 I²C 接口的 EEPROM 芯片 AT24C02,该模块用于存储不同节点的设备 ID,初始化设备 IP、远程 IP 地址以及服务器端口号等信息。节点设备的组成如图 2 所示。

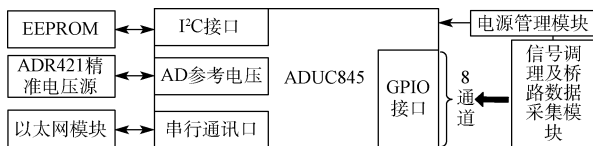


图 2 采集节点框图

3 硬件设计

本文所研究的应变数据采集设备,通过 EEPROM 芯片存储的相关设备信息以及上位机信息,建立基于 TCP/IP 的通讯链路。利用主芯片 ADUC845 自带的 AD 采集接口外接应变信号采集电路,信号调理电路从而实现应变数据的采集以及数据的处理。本文重点研究了应变仪设备的电源管理系统、桥路方案以及桥路信号调理电路的设计思想。

3.1 电源管理系统

为了使系统能够在无外部电源供电情况下正常使用,本文所研究的应变仪设计了一套电源管理模块,对锂电池

的充放电进行管理,并通过电源调理电路产生后级设备所需要的供电电压以及负电压。

本系统使用芯片 TP4056 构成一个锂电池充放电管理电路,其电路如图 3 所示。该电路实现电池过充保护和过流保护。通过预冲、恒流充电、恒压充电 3 个阶段最大限度的保护锂电池,延长设备供电模块的使用寿命。

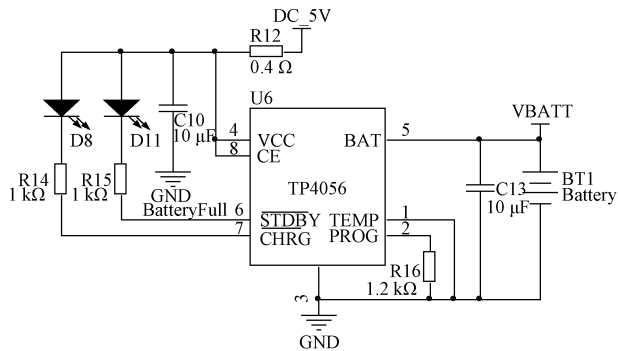


图 3 锂电池充电管理电路

除此之外,电源管理模块还使用了一片 STC12C2052AD 单片机用于电池电量的检测以及电量显示模块的控制。这样使用者可以及时的发现设备的电量情况,进行充电等相关操作。

单片机的供电采用双电源设计,利用芯片 LTC4411 实现有直流充电电源状态时供电电源自动从电池切换为直流电源。

3.2 电桥设计

本文研究的应变采集仪是基于惠斯通电桥的应变测量设备,根据不同的工程场合,可以将应变仪接成四分之一桥、半桥和全桥。桥路设计如图 4 所示。为了实现 3 种桥路测量的自由切换,采用了一种新的桥路设计方式:即在电路板上设计一个惠斯通电桥主电路和桥路切换辅助电路。

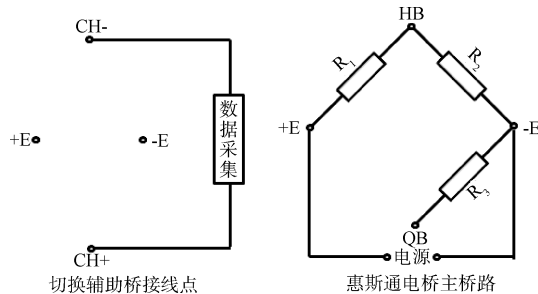


图 4 桥路接线方式

由图 4 可以看出在电桥设计时采用的是 6 线制,分别是桥压供电端 +E、-E,桥路测量端,CH+、CH-,桥路切换端 HB、QB。图 4 中 R1、R2、R3 为 3 个精度 0.1%,阻值 120 Ω 的标准电阻,这样两个桥路总共引出了 6 个互异的接入点。将测量用的六芯线一端接在应变仪的航空插头上,另外一端引出至桥梁测试点附近即可。

四分之一电桥的接线方式是将六芯线的测试点一端的对应接线端相接,即 CH+接 QB,CH-接 HB,这时在 +E 与 HB 间接入一个 120 Ω 的标准应变片,此时两个桥路便形成了一个完整的惠斯通电桥,因为只有一个桥臂使用了应变片,所以构成了四分之一桥测量电路。

半桥接线方式是六芯线测试点一端将 CH-与 HB 相接,但是 CH+与 QB 不连接,另外在 +E 与 CH+,CH+与 -E 间分别接入各一个 120 Ω 的标准应变片。这样主桥路部分 QB 与 -E 间的标准电阻就被剥离到了电路之外,主桥路与辅助切换桥路就构成了一个新的完整的惠斯通电桥,因为有两个桥臂使用了应变片,所以称之为半桥测量电路。

全桥接线方式将六芯线测试点一端,CH-与 HB,CH+与 QB 全部断开,此时主桥路将不再使用,3 个标准电阻将全部被隔离出新的桥路,在辅助切换桥路的 4 个接线端上,+E 和 CH+,-E 和 CH-,-E 和 CH+, -E 和 CH-上各接入一个 120 Ω 的标准应变片,这样就形成了一个完整的惠斯通电桥,由于 4 个测量桥臂均是由应变片构成,所以称之为全桥测量电路。

不同桥路之间的随意切换弥补了其它设备只能进行单一桥路测量的不足,无需更换设备,在测试现场接应变片时将相应接线端短接或断开就形成了现场测量方式随时可调的惠斯通电桥测量电路。

采用惠斯通电桥测量的理论依据如下:

应变片电阻变化与应变关系如式(1),其中 K 为灵敏度系数,是应变片的一个标称值。

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (1)$$

根据桥路可以得出桥路输出电压与输入电压之间的关系式是:

$$U_0 = \frac{E}{R_1 + R_2} R_2 - \frac{E}{R_3 + R_4} R_3 = \frac{(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \quad (2)$$

由于所用的标准电阻以及应变片标称电阻均为 120 Ω,当不出现桥梁形变的前提下即 $R_2 R_4 - R_1 R_3 = 0$ 时,输出电压测量端所得电压为零,即桥路平衡^[10]。

考虑到实际测量时的精度误差,初始阶段不可能达到完全的平衡,但是由式(3)可以看出:测量电压变化量与电阻变化量呈近似线性关系,意味着此时硬件电路上可以忽略此误差,设备可以通过软件部分调零,即使用单片机内部计算来抵消先前硬件电路中精度带来的误差^[11]。

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial U}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial U}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial U}{\partial R_4} \Delta R_4 \quad (3)$$

当桥面发生形变导致应变片被拉伸时,其电阻就会发生变化,此时电桥不再平衡,输出测量点的电压与电阻变化量间的关系如式(4):

$$\Delta U = \frac{ER_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) +$$

$$\frac{ER_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时,把 R 代入式(4)得到电压变化量与应变量的关系,如式(5)所示。

$$\Delta U = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{KE}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5)$$

通过上式可知,根据桥路电压变化量和应变量的对应关系得到所测量桥梁节点处应变大小,验证了本文所采用惠斯通电桥连接方法的电阻式应变采集仪的可行性与正确性。

3.3 信号调理电路

根据桥梁监管部门提供的数据,通常桥路应变在正负 3000 微应变。本文以应变片标准电阻 120,灵敏度系数 $K=2$,桥路供电电压 3.5 V 为例,预留一部分测试余量,将应变仪最大应变值以 5000 微应变为参考。通过式(5)计算可知,当应变最大时实际输出电压约为 8.75 mV。电压 ± 8.75 mV 在主芯片 ADUC845 的 AD 测量区间内占比非常小,这样在 AD 采集时会引起较大的误差。针对这一问题,本设计将采集到的电压信号放大 100 倍,增大所测信号在整个测量区间的占比从而减小误差,其放大电路如图 5 所示。

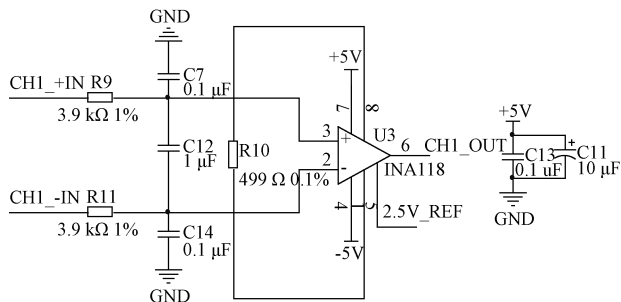


图 5 信号放大电路

考虑到 INA118 在不同供电电压模式下对输入信号的共模电压有着不同的要求,把桥路供电电压做成可调节的形式。通过精准电压源芯片 ADR425 提供一个标准的 5 V 电压,利用滑动变阻器和固定电阻构成分压电路为桥路供电。在调试时,通过改变滑动变阻器的电阻调节桥路电压,使得桥路输出共模电压满足放大器芯片 INA118 的需求。

INA118 的参考电压引脚和主芯片部分 AD 采集均采用了精准电压源芯片 ADR421 来提供 2.5 V 的参考电压,同时考虑到桥路采集信号经过放大芯片 INA118 后,在该芯片的放大区域内,其输出电压必须是一个正电压,而实际上应变测量采集到的数据是有正有负的,所以在 INA118 的 Ref 引脚接 2.5 V 电压来抬升输出管脚对地电压。主芯片 ADUC845 的 AD 采集范围在 ± 2.56 V 之间,所以主芯片一侧则同样接入 2.5 V 参考电压用来抵消 INA118 抬升

的电压,将采集电压调节至可测量范围内。

4 软件设计

应变采集软件部分包括上位机软件监控界面和下位机单片机程序两个部分。两者利用 TCP/IP 协议采用问答的形式进行通信。通过上位机的操作来控制下位机的动作^[12]。

整个系统采用 CS 架构编写程序,服务器端主要提供应变数据管理、应变数据显示、实时测量曲线绘制、远程设备监控管理等,客户端程序主要完成具体的硬件控制操作,包括 AD 采集、I²C 通讯、WIFI 通讯等。

上位机作为服务器监听端口号上是否有数据接收,通过判断接收到的数据帧中设备编号字节来判断数据来自哪个设备。下位机在接收到上位机发来的命令帧时,要先读取设备编号与自己存在 EEPROM 中的设备编号相对应,即只有编号相同的设备,才会接收该帧数据,其他设备则会将该帧丢弃。

主芯片 ADUC845 程序采用顺序执行模式,程序的流程图如图 6 所示。

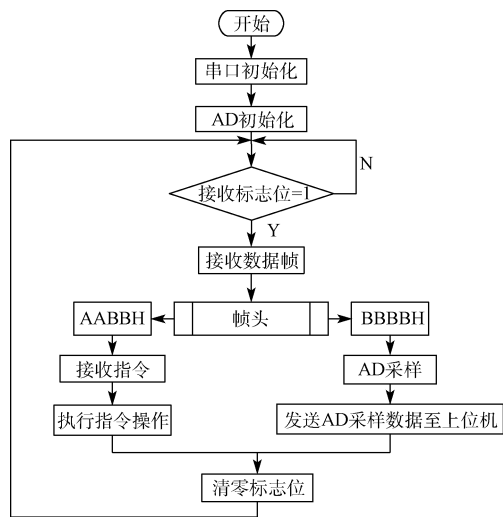


图6 单片机流程图

初始化完成之后,系统进入循环判断标志位,上位机的操作将会发送命令帧至单片机,触发中断并在中断处理函数中改变相应的标志位,单片机根据标志位的变化即可判断是读指令,写指令还是传输数据。

5 结 论

本文所研究的无线桥梁应变数据采集系统可以灵活地在四分之一桥、半桥、全桥之间切换以适应不同的测量条件。经过实际测试,该系统可以很好地完成静态和动态测量的任务。使用标准应变源对比测试部分结果如表 1 所示。

表 1 应变数据测试对照表

| 测试量 $\mu\epsilon$ | 5 | 15 | 215 | 415 | 615 | 915 |
|-------------------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 测试值 $\mu\epsilon$ | 5.01 | 15.02 | 215.21 | 415.11 | 614.28 | 915.21 |
| 误差值 % | 0.21 | 0.15 | 0.09 | 0.02 | -0.27 | -0.02 |

利用标准应变仪测试证明仪器的测量误差低于 2%,达到工程应用所需标准。在现场测试时,WIFI 的通信距离达到 230 m 以上,数据传输速率以及准确性也是有保障的。

参考文献

- [1] 任美龙,王旭,梁鹏. 桥梁健康监测传感器系统的现状及发展趋势[J]. 公路,2013(11):93-99.
- [2] 蒋新花,丁德宝,沈庆宏. 应用于桥梁结构健康监测的低噪声振动测量系统的实现[J]. 电子测量技术,2014,37(2):116-119.
- [3] 王巧琴,顾金良,罗红娥. 动态应变微光信号检测系统的设计[J]. 电子测量技术,2015,38(7):71-74.
- [4] 邓菲,颜运强,张道. 基于振弦传感器的应变无线测量系统设计[J]. 传感器与微系统,2015,34(2):103-105.
- [5] 段成丽,蒋亚东,魏鸿雁,等. 光栅式大应变传感器结构设计及特性研究[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(6):504-508.
- [6] 屈蓓,付小龙,何俊武,等. 非接触式光学应变测量技术研究进展[J]. 计测技术,2013,33(5):10-15.
- [7] 苑晓明,王端胜,徐向立. 电阻式应变仪在桥梁监测中的技术研究[J]. 黑龙江交通科技,2015(2):119-121.
- [8] 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.
- [9] 葛航宇,李浩,陈跃良,等. 一种基于微带天线的应变测量技术[J]. 中国科学,2014,44(9):973-978.
- [10] 张佳明,王文瑞,聂帅. 高温电阻应变片特性参数标定实验研究[J]. 中国测试,2014,40(5):25-28.
- [11] 李红,祝连庆,刘锋,等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8):1744-1750.
- [12] 苏连成,马磊,赵云. 基于 LabVIEW 的应变测量与报警系统设计[J]. 四川兵工学报,2010,31(5):77-80.

作者简介

郭晓澎(通讯作者),1988 年出生,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为嵌入式设备开发。

E-mail:790953623@qq.com.

刘志英,1988 年出生,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为嵌入式设备开发。

周晓旭,1988 年出生,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为嵌入式设备开发。