

# 基于 ZigBee 的便携式无线桥梁健康状况监测技术的研究

孙 弋, 孙媛媛, 孙崇零, 卢 皓

(西安科技大学, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对目前国内桥梁健康状况监测系统存在结构复杂、成本过高、难以长期监测等一系列问题, 提出一种基于 ZigBee 技术的桥梁健康状况监测系统; 该系统由前端采集和远程监控两模块组成, 前端模块采用动态电阻应变仪采集桥梁结构应变等参数, 远程模块利用 ZigBee 技术与前端模块建立无线通信链路并获得前端采集的数据进行后期处理, 分析监测桥梁健康状况; 本方案中两模块均采用 ARM9 处理器, 嵌入式 Linux 操作系统及 ZigBee 传输技术, 结构简单, 易实现。

**关键词:** 桥梁; 监测; ZigBee; ARM9

## Research of Bridge Healthy Monitoring System Based on ZigBee Technology

Sun Yi, Sun Yuanyuan, Sun Qiling, Lu Hao

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In view of the existing shortcomings of the existing Monitoring system for State of Bridge Health, such as complicated structure, expensive cost and etc., a monitoring method based on ZigBee was presented in this paper. The system consists of the front end module and remote monitoring module. The front module collects the data such as the deformation of the bridge. The wireless communication link of modules is established based on ZigBee by the remote monitoring module. The parameters of the bridge detected by the front module could be got easily by the remote monitoring module in the system. The system helps to monitor the bridge structure in long-term and real-time. The CPU of the front end module and remote monitoring module is ARM9 processor and the operating system is embedded Linux. The structure of the system is simple and the system is easily implemented.

**Key words:** bridge; monitor; ZigBee; ARM9

## 0 引言

“5·12”汶川特大地震给四川省境内部分地区交通造成严重损害, 全省公路和桥梁等设施均受到严重破坏, 受损桥梁也达上千座。桥梁是投资巨大且使用期长的重要基础设施, 桥梁使用的安全性对国民经济有着举足轻重的影响, 因此对灾后桥梁健康状况的监测意义重大。<sup>[1]</sup> 桥梁健康状况检测是指运用现代传感与通信技术, 适时地(定期地或突发事件后特别地)采集桥梁的工作参数, 由计算机对工作参数进行识别、加工和分析, 给出桥梁健康状况报告, 为桥梁的维护与管理提供依据和指导, 并为桥梁设计理论的发展提供真实构件、真实环境的长期设计验证。

国外的桥梁健康监测系统始于 20 世纪 80 年代中后期, 国内的桥梁监测和评估系统起步较晚, 近年来一些大型重要桥梁上也建立了不同规模的结构监测系统<sup>[2]</sup>。我国现有的桥梁安全监测手段中, 最传统的方式是人工进行数据的测量记录及经验判断, 数据在现场处理过程中易引入人为误差, 且采集数据耗时较长, 难以保证各监测数据工作状态的一致性, 另外桥梁地域分散, 多为高空作业, 桥梁施工和运营期间人工测量数据工作难度大。较为先进的光缆有线桥梁监测方式利用专用光缆连接前端采集设备和监测设备, 该方法成本高, 维护难度大, 且监测设备固定不灵活。现有的无线监测系统一般使用 GSM 或

CDMA 网络连接到因特网, 再通过路由连接到监测设备, 该方法系统实现较复杂, 且远距离无线发射设备功率大, 难以实现桥梁健康状况的长期监测。针对灾后桥梁的安全状况, 需要进行长期的实时监测, 为达到这种要求, 本文提出了一种采用 ZigBee 技术的桥梁健康状况监测系统, 可满足对桥梁安全状况长期实时监测的要求。

## 1 关键技术

### 1.1 ZigBee 技术

ZigBee 是一种用于短距离范围内, 低传输数据速率下的各种电子设备之间的无线通信技术<sup>[3-4]</sup>。ZigBee 工作于无需注册的 ISM 频段, 传输速率为 10~250kbps, 传输距离大于 100m。

ZigBee 技术特点如下:

(1) 低功耗: 在低功耗待机模式下, 两节 5 号干电池可支持一个节点工作 6~24 个月。

(2) 数据传输可靠: ZigBee 的 MAC 层采用碰撞避免机制, 发送的每个数据包都必须等待接收方的确认信息, 这种方法保证了系统信息传输的可靠性。

(3) 网络功能强大: ZigBee 标准基于 802.15.4 协议栈而建立, 具备了强大的设备联网功能, 支持星型结构、网状结构和簇状结构, 其中网状结构具有很强的网络健壮性和系统可靠性。一个 ZigBee 网络最多包括 255 个 ZigBee 网络节点。如果通过网络协调器, 整个网络最多可以支持超过 64000 个 ZigBee 网络节点。

(4) 实现成本低: 目前, 低速低功率的 UWB 芯片组的价格

收稿日期: 2009-06-15; 修回日期: 2009-07-20。

作者简介: 孙 弋(1972-), 男, 陕西西安人, 教授, 博上, 主要从事嵌入式系统及短距离无线通信方向的研究。

格至少为 20 美元, 而 ZigBee 协议免专利费用, ZigBee 芯片组的价格目标仅为几美分。

低功耗特点使 ZigBee 技术满足对桥梁健康状况长期实时监测的要求, 而成本低与网络容量大这些优点使 ZigBee 适用于数据传输实时或连续更新要求不高的场合。图 1 所示的是一个完整的 ZigBee 协议栈模型, 它由高层应用规范、应用会聚层、网络层、数据链路层和物理层组成, 物理层和数据链路层由 IEEE802.15.4 工作组负责制订, ZigBee 定义了应用层和安全方面的规范, 使得来自不同厂商的设备可以相互对话。

物理层: 物理层是协议的最底层, 承载着和外界直接作用的任务。IEEE802.15.4 定义了两个物理层标准, 分别是 2.4GHz 物理层和 868/915MHz 物理层。数据链路层: 数据链路层分为逻辑链路控制子层和媒体接入控制子层。IEEE802.15.4 制订的 LLC 子层与 IEEE802.2 的相同, 其功能包括传输可靠性保障、数据包的分段与重组和数据包的顺序传输。MAC 层主要负责设备间无线数据链路的建立、维护和拆除。网络层: 网络层采用基于 ad hoc 技术的网络协议。主要功能包括建立新的网络、处理节点的进入和离开网络、根据网络类型设置节点的协议堆栈、使网络协调器对节点分配地址、保证节点之间的同步、提供网络路由和保证数据完整性等。应用会聚层: 应用会聚层主要定义 ZigBee 网络应用功能, 包括安全属性设置和多个业务数据流的汇聚等。高层应用规范: 高层应用规范定义了各种类型的应用业务, 是协议栈的最上层用户。

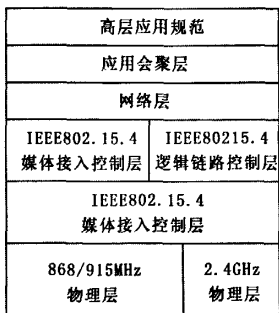


图 1 ZigBee 协议架构

## 1.2 传感器

本系统传感器采用动态电阻应变仪, 是一种具有自动平衡功能的动态电阻应变仪, 它主要用于实验应力分析, 以及在动力强度研究中测量结构和材料任意部位变形。在桥梁应变系数监测系统中, 主要关心的振动参量是结构的应变, 本系统以测量结构应变为目标。通过传感器可以直接测量桥梁结构中某变量的时程曲线, 进行分析后可以得到其冲击系数等动力参数。

电阻应变仪是用极细的金属电阻丝绕成或用金属箔片印刷腐蚀而成, 用粘剂将应变计牢固地贴在试件上, 当被测试件受外力作用时, 长度发生相对变化  $\Delta e/e$ , 粘贴在试件上的电阻应变计也相应变化, 应变计的电阻值相对变化  $\Delta R/R$ , 这样就把机械量(形变)转换电量(电阻值)的变化。用灵敏的电阻测量仪器—电桥, 测出平衡阻值的变化  $\Delta R/R$ , 就可以换算出相应变  $\epsilon$  (即形变  $\frac{\Delta e}{e}$ )。动态电阻应变仪原理图如下:

电阻应变计的“应变效应”是指机械量与电量的转换关

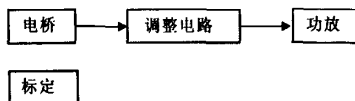


图 2 动态电路应变仪原理图

系, 用“灵敏系数” $K$  来表征:  $K = \frac{\Delta R/R}{\Delta e/e} = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon$ 。当试件受力变形时, 由“应变效应”引起桥臂阻值变化  $\Delta R/R$ , 破坏了电桥的平衡, 输出端有一个  $\Delta U$  的电压输出。  $\Delta U \approx \frac{1}{4} E \frac{\Delta R}{R} \approx \frac{1}{4} K e E$ , 其中  $E$  为电桥供电电压 (2V)。由测得的电压值即可得出桥梁的相应变  $\epsilon$ 。

传感器的布置要根据结构形式而定, 一般要根据动力特性的理论分析结果, 按照理论计算得出的振型大致形状, 在变位较大的部位布置传感器, 以能测得桥梁结构最大反应为宜。

## 2 系统设计

桥梁健康状况监测系统主要由前端采集装置和远程接收装置二部分组成。前端采集部分固定于桥梁应力控制截面(如主跨跨中截面、边跨跨中截面)处, 每隔一段时间, 采集装置中的传感器测量一次桥梁变形的应变电压, 该值经处理器换算后得到相应的应变参数并储存。当监测人员靠近桥梁开启手持的远程接收终端后, 前端采集部分的 Zigbee 模块被唤醒并与手持终端的 Zigbee 模块建立连接而后进行采集数据的传输, 手持终端接收数据后存储并分析, 系统框架如图 3 所示。

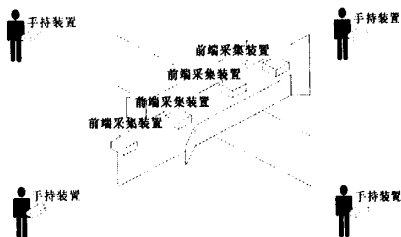


图 3 系统框架

## 2.1 硬件系统设计

### (1) 前端采集部分

前端采集部分的硬件设备主要包括前端传感器、ARM9 处理器和 ZigBee 无线传输模块, 另外还有 SDRAM, Flash 存储器和电源等。传感器选用华东仪器厂 YD-28 型动态电阻应变仪, ARM9 处理器选用 Samsung 公司的 S3C2410, ZigBee 模块选用的是 Helicomm 公司的 IP-Link1221-2163 型 ZigBee 无线通信模块。

YD-28 型动态电阻应变仪是一种常用动态电阻应变仪, 它具有直流电桥, 自动平衡, 内设低通滤波器等特点<sup>[5]</sup>。灵敏系数  $K=2.00$ , 输出特性在负载  $5k\Omega$  时为  $0 \sim \pm 10V$ 。S3C2410 是 Samsung 公司推出的 16/32 位 16/32 位 RISC 体系结构, 使用 ARM920T CPU 核的强大指令集; ARM 带 MMU 的先进的体系结构支持 WINCE、EPOC32、LINUX; 0.25um 工艺的 CMOS 标准宏单元和存储编译器。S3C2410 提供了丰富的内置部件, 降低了系统的成本, 为手持设备和一般类型应用提供了高性能

比和高性能的微控制器解决方案。IP-Link1221-216 型 ZigBee 无线通信模块集成了符合 IEEE802.15.4 标准的射频收发器 (2.4GHz 或 915MHz) 和 Silicon Lab 的 8051 微处理器, 同时支持赫立讯自主知识产权的 ZigBee1.0 协议栈和 ZigBee-Ready IP-Net 网络软件。该模块可以帮助用户快速搭建出包括星状, 树状或者网状网络的模型。用户可根据模块开放的 API, 对模块的 ADC、GPIO 进行个性化的控制和使用, 此功能特别适用于工业控制以及传感器网络。

硬件框图如下:

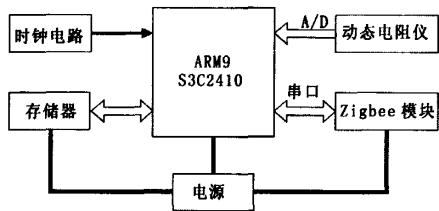


图 4 前端采集部分

系统的硬件框图如图 4 所示。S3C2410 是系统的核心, 对系统进行处理和控制。存储器包括 SDRAM 和 Flash 两部分, SDRAM 是一种易失性存储器, 掉电后其存储的数据会丢失, 将其作为程序的运行空间; Flash 是非易失性存储器, 掉电后数据不丢失, 将其作为程序和数据的存储空间。动态电阻仪获取应变电压值后输入核心处理器的 A/D 接口。处理器将应变电压换算为相应应变系数后存储到 Flash。ZigBee 模块主要负责与接收设备通信, 完成数据的发送, 它通过串口与处理器相连接。

(2) 远程接收部分

远程接收部分的硬件设备主要包括 ARM9 处理器、存储器、ZigBee 无线传输模块和 LCD 屏, 另外还有 SDRAM, Flash 存储器和电源等。其中处理器、存储器以及 ZigBee 传输模块均与前端采集部分相同。LCD 屏选用三星公司 3.5 寸 TFT 屏 LTV350QV-F04, 硬件框图如下:

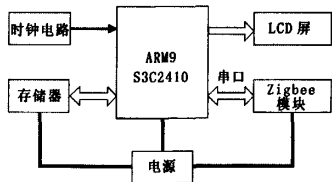


图 5 远程接收部分

ZigBee 模块主要负责与前端采集设备通信, 完成数据的接收, 它通过串口与处理器相连接。S3C2410 处理器接收到前端采集到的应变系数后, 对其分析得到桥梁的健康状况, 这一过程由系统内嵌的桥梁健康状况分析软件完成, 数据结果存储在 Flash 中, 并显示在 LCD 屏上。

2.2 软件系统设计

本系统中两模块均采用嵌入式 Linux 操作系统, 选择 arm-libc-gcc 作为开发平台。Linux 系统优势强大, 如支持多种体系结构, 支持 TCP/IP 协议, 支持多文件系统等, 专门针对微控制系统设计, 目前它广泛应用于嵌入式领域<sup>[6]</sup>。arm-libc-gcc 是 Linux 系统下针对 ARM9 的交叉编译环境, 主要将高级

编程语言转换成机器语言指令的集合。整个编译环境包括编译器、汇编器、连接器、装载器、预处理器和调试器等。

前端采集模块软件主程序包括两个线程: 数据处理线程和数据发送线程。上电后, 系统首先完成初始化, 然后创建数据处理线程和数据发送线程。数据处理线程包括数据处理任务和数据存储任务, 首先进入数据处理任务, 进入该任务后, 系统等待定点时间触发, 一旦定点时间到来立即接收并处理传感器得到的应变信号, 即将接收到的电压信号转换成应力数值。数据处理完成后, 启动数据存储任务, 将数据存储到 Flash 中预先设置好的数据存储区。数据存储后, 返回数据处理任务, 继续等待定时时间的到来。数据发送线程即当系统接收到发送命令时, 启动数据发送任务, 向接收设备发送数据。当数据全部发送完成后, 返回数据发送任务, 继续等待发送命令。软件流程如图 6 所示。

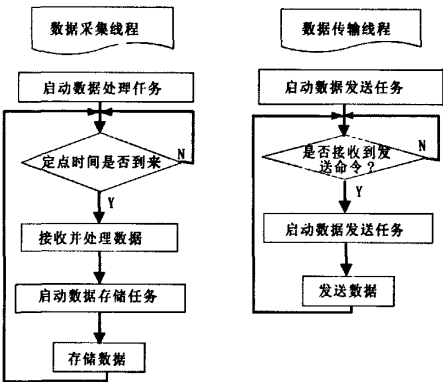


图 6 前端采集模块软件图

远程接收模块的软件包括 3 个任务: 数据接收任务、数据处理任务以及数据存储任务和显示任务<sup>[7]</sup>。系统初始化后, 首先启动 ZigBee 模块与前端采集模块建立无线通信链路, 即启动数据接收任务向前端采集模块发送数据发送命令, 链路建立接收数据后启动数据存储任务, 即启动内嵌的桥梁应力参数分析软件对数据进行处理分析, 得出结果后启动数据存储任务, 将数据存储到 Flash 中预先设置好的数据存储区, 最后启动显示任务, 将数据信息显示在 LCD 屏上。软件流程图如图 7 所示。

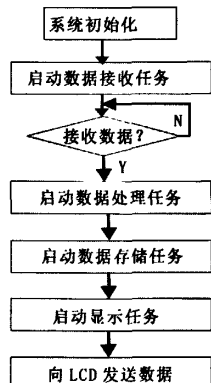


图 7 远程接收模块软件图

(下转第 19 页)

以将采集到的数据进行存储。系统软件设计的关键:(1)要有好的人机交互界面,方便用户对整套系统进行控制,能把用户想看到的检测结果清晰的表现出来。(2)信号处理算法是软件的核心,算法的好坏直接影响到检测的精度,而算法的复杂程度又影响着计算机处理的速度。所以本软件系统采用以下简洁而又实用的信号处理方法。

(1) 平移数据:由于3个探头发射到钻铤的超声波并不在钻铤的同一横切面上,所以要想最终通过软件精确的显示出缺陷位置首先要将3个通道的数据进行平移处理,使得3个通道的数据对齐。

(2) 二值化高度滤波:首先将采到的数据进行二值化处理,即在程序中设置相应的门高,将采集到的数据和所设置的门高进行比较,将高于这个门的数据置为1,低于这个门的数据置为0。

(3) 宽度滤波:由于在整个自动超声检测过程中,不可避免的存在各种干扰,如电机的转动、检测工件的光洁度和水的流动速度等,所以不能将所有为“1”的值都认为是缺陷,有效的办法是记录高于门限高度值的个数,程序中再设置一个门限宽度值,只有当所记录“1”的个数大于我们所设定的门限宽度值,才认为是缺陷,小于设定的门限宽度值的都认为是干扰波。由此可以看出,门高值和门宽值的选择非常重要,同时他们也是一对矛盾体。如果门高值过低,门宽值过窄,会导致误判;如果门高值过高,门宽值过宽又会导致漏检。所以要想定出一个合适的门,需要对各种检测工件进行反复的检测。

(4) 均值滤波:由于受工厂其它机电设备和钻铤光洁度的影响,进行超声检测时会引入大量的杂波,所以可以在程序中先对采集到的数据进行5点均值滤波,这样可以将采集到的数据做平滑处理及剔除毛刺,这对缺陷位置和类型的识别是非常有帮助的。

#### 4 结论

通过对钻铤外径为124mm,壁厚为70mm,长度为9m。缺陷长度为20mm,宽度为1mm,深度分别为2mm和1.5mm的人工内外壁标准伤样,以及对直径为1.5mm内部标准孔进行检测,长度和深度度量准确,线性较好,如图6所示。为了检查系统的重复性、缺陷深度的度量 and 是否有漏检,分

别对其余6种型号的钻铤标准样件进行重复测试。利用标准样件确定判定灵敏度,对产品进行批量检测,以测定系统误判率。通过小批量连续检测,测定单件检测时间,测试结果如下:(1)对A、B、C、D、E、F6种型号的标准样件反复检测无漏检且重复性一致;(2)对A型钻铤100件,D型钻铤100件,B、C、E、F型钻铤各150件进行检测,漏检率为0,误判率小于1%;(3)钻铤检测时间为193s,满足在线生产节拍。

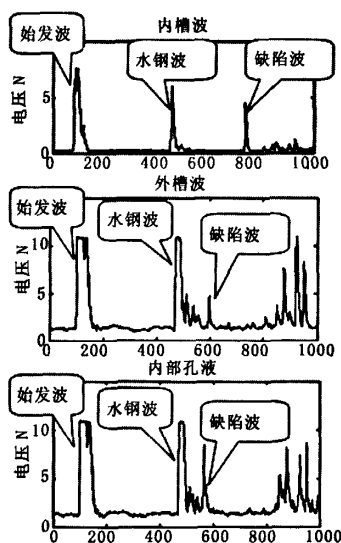


图6 检测波形

#### 参考文献:

- [1] 刘传东. 钻铤的超声波探伤 [J]. 无损检测, 2003, 25 (5): 272 - 273.
- [2] Beck K H. Ultrasonic refraction angles for inspection throughout the total wall thickness of tubes and pipes [J]. Materials Evaluation, 1993, 51 (5): 875 - 882.
- [3] Toth T M, Ross B J. The involute search unit-a new concept in the ultrasonic inspection of pipe [J]. Materials Evaluation, 1981, 39 (8): 828 - 833.

(上接第13页)

#### 3 结语

桥梁健康状况监测系统的设计涉及传感设备、计算机和无线通信等多个学科,主要目的是通过对桥梁关键部位及重要状态参数的监测与分析实现对桥梁结构的监测与健康状况的评估。本文提出一种采用基于 ZigBee 技术的便携式无线桥梁健康状况监测技术,便携式监测终端可以方便的实现实时监测, ZigBee 技术可以确保两节 5 号电池支持长达 6 个月~2 年的使用时间,为长期的桥梁监测提供了保证。

#### 参考文献:

- [1] 刘江. 桥梁安全检测与加固维修 [J]. 科技信息, 2007, (30): 165.
- [2] 韩之江, 杨建红. 桥梁健康监测技术的研究与实施 [J]. 公路, 2008, 3: 52 - 53.
- [3] 顾端红, 张宏科. 基于 ZigBee 的无线网络技术及其应用 [J]. 电子技术应用, 2005, 6: 1 - 3.
- [4] 穆乃刚. ZigBee 技术简介 [J]. 电信技术, 2006, 3: 84 - 86.
- [5] YD-28 型动态电阻仪使用手册 [Z].
- [6] 孙弋. ARM-Linux 嵌入式系统开发基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [7] 孙弋. 短距离无线通信及组网技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.