

# 基于 MEMS 传感器的无线传感网络 节点的硬件设计

吴 艳, 董林玺\*

(杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为了解决对建筑物的结构健康安全监测进行在线监测的问题,采用微机电系统(MEMS)技术和无线传感器网络技术相结合的方法,提出了一种基于磁驱动增大检测电流的新型电容式加速度传感器结构,介绍了其工作原理,并设计了该传感器的电容检测电路,在 ANSYS 仿真软件上对传感器性能进行了评价,在 Multisim 上对检测电路进行了模拟仿真;仿真结果表明,该传感器可以检测三维加速度信号,静态灵敏度可达  $0.558 \mu\text{m/g}$ ,动态测量范围为  $10 \text{ g}$ ,电路实际输出与仿真结果相符,符合要求;在节点整体方案设计中以低功耗的 MSP430F1611 作为控制 MCU,以 CC2430 芯片实现无线收发,配合周围接口电路实现了位移信号的监测功能;采用片内温度传感器对节点进行了测试。测试结果表明,该节点能够完成监测,满足设计要求。

**关键词:** 电容式加速度传感器;无线传感网络节点;MSP430F1611;CC2430;微机电系统

中图分类号:TP212.9;TN929

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)03-0343-04

## Hardware design of WSN node based on MEMS sensors

WU Yan, DONG Lin-xi

(College of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of monitoring the healthy and safety of the buildings, the micro-electro-mechanical system (MEMS) technology and wireless sensor network technology were investigated. The structure and working principle of the accelerometer with the actuators droved by Lorentz force for increasing the initial sensing capacitance were introduced. Then the capacitance detection circuit was designed. ANSYS simulation software was used to evaluate the performance and Multisim was used to simulate the detecting circuit. The results show that the sensor could detect the three-dimensional acceleration signal; its static sensitivity can be  $0.558 \mu\text{m/g}$ ; the dynamic measurement range is  $10 \text{ g}$ ; and the output is in accord with the simulation result. The hardware of the wireless sensor network node was designed which was constructed by MSP430F1611 as MCU, chip CC2430 was used to realize the wireless transceiver and some interface circuits around to monitor the displacement signal. With the inner temperature sensor to test, the results show that the nodes can realize the monitoring and meet the system design requirements.

**Key words:** capacitive accelerometer; wireless sensor network node (WSN); MSP430F1611; CC2430; micro-electro-mechanical system (MEMS)

## 0 引 言

近年来,微机电系统(MEMS)技术、无线通信技术和数字电路技术的快速发展,促进了微体积、低成本、低能耗、多功能传感器节点的发展<sup>[1]</sup>。目前基于MEMS技术的建筑物结构安全健康监测的无线传感器网络是世界范围内土木工程领域研究的前沿方向,该技术

把MEMS传感器体积小、成本低、功耗低、多功能、易于集成的优点和无线传感器网络的节点密度高、网络动态性强、自组织网络、数据获取方式多样等特点结合起来,应用于建筑物结构安全监测<sup>[2-3]</sup>。该技术由国外研究机构提出,在发达国家正处于从实验室研究走向应用推广的阶段,主要集中在大学、研究所等科研单位,主要应用于桥梁、铁路、高速公路等大型重要基础

收稿日期:2011-10-14

作者简介:吴 艳(1985-),女,河南南阳人,主要从事射频/微波电路设计与应用方面的研究。E-mail:kuaille2008nian@126.com

通信联系人:董林玺,男,副教授,硕士生导师。E-mail:donglinxi@hdu.edu.cn

设施的健康安全监测。

本研究针对建筑物健康安全监测,介绍一种基于自主研发的新型的三维MEMS加速度传感器的无线传感网络,该传感器采用新型的带有电磁驱动的结构,可以达到较高的测量精度,节点以MSP430F1611和CC2430芯片为核心。

## 1 三维电容式微加速度传感器

应用于结构健康监测的无线传感节点,在设计时要考虑该应用对节点设计的特殊要求。结构健康监测<sup>[4]</sup>以传感器作为神经系统,对结构的内部缺陷和损伤进行感知和预报,实现在线监测“健康”状况,在以下方面对节点提出了特殊要求<sup>[5]</sup>:

(1) 功耗低,以实现长期稳定的监测并减少后期更换电池带来的成本和工作量;

(2) 体积小,尽量不影响监测结构原来的特性;

(3) 成本低,可以在监测区域内放置更多的节点,从而增加系统的精度和稳定性;

(4) 可以实现远程监控;

(5) 精度高,该设计用于监测振动信号(如地震、风力等)对建筑物内部结构的影响,要求传感器具有较高的测量精度。

### 1.1 传感器结构

文献[6]介绍了一种电磁驱动增大检测电容的加速度传感器,但用人为方式将3只单维加速度传感器正交放置实现对加速度信号的三维测量时没有考虑Z

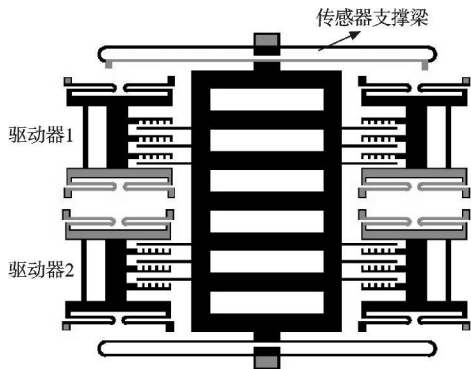


图1 传感器结构

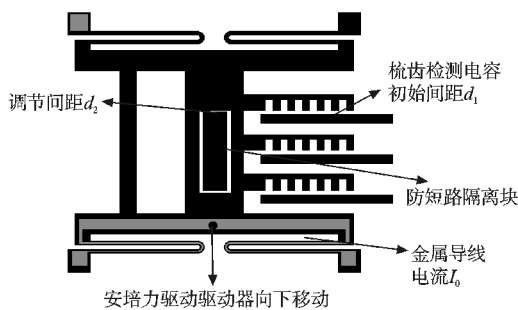


图2 驱动器工作原理

方向上重力对传感器的影响,故本研究对传感器结构做出改进,使得改进后的传感器不仅体积小、精度高,能够和接口电路、部分信号调理电路集成封装在一起,更有效地降低了功耗并减少噪声干扰,满足结构健康监测对节点的特殊要求。改进后的传感器结构如图1所示,传感器驱动器工作原理如图2所示。

驱动器处于均匀磁场中,磁场方向与电流 $I_0$ 方向垂直,根据右手定则,调整金属导线上电流 $I_0$ 的大小和方向,使得在驱动导线上产生的安培力方向向下并且足够大,使驱动器向下运动并吸合在隔离块上,此时梳齿检测电容间距由 $d_1$ 减小到 $d_1-d_2$  ( $d_1 > d_2$ ),初始梳齿检测电容由 $C_0 = \epsilon A / d_1$ 增大到 $C_0 = \epsilon A / (d_1 - d_2)$ ,其中, $\epsilon$ 为介电常数, $A$ 为电容两极板覆盖的面积。

对Z方向上的传感器,在重力作用下,梳齿检测电容间距 $d_1$ 变大,检测电容 $C_0$ 减小,从而影响传感器检测精度。因此,改进的传感器结构通过在传感器支撑梁上金属导线上的电流 $I$ 产生一个安培力以抵消重力的影响。电流 $I$ 方向与磁场方向垂直,根据右手法则,本研究调整电流 $I$ 的大小和方向,使得支撑梁上产生的安培力与重力方向相反,大小相等,即 $F = B \times I \times L = mg$ 。

均匀磁场通常由永磁铁提供,令 $B = 0.06 \text{ T}$ ,传感器质量 $4.715 \text{ mg}$ ,金属导线长 $4\ 866 \mu\text{m}$ ,支撑梁上电流 $I$ 为 $0.15 \text{ A}$ 时,安培力大小基本与重力相等。通过ANSYS仿真,该传感器结构在敏感方向上的静态灵敏度达到 $0.558 \mu\text{m/g}$ ,动态测量范围在 $\pm 10 \text{ g}$ ,在敏感方向上的工作带宽可达 $1\ 000 \text{ Hz}$ 。相比其他的三维加速度传感器,该传感器精度高,可测量的动态范围较大,对后续的检测电路及调理电路的要求相对较低,可以有效减少电路部分能耗,从而使传感器满足低功耗的要求,很适合该系统设计。

### 1.2 传感器电容检测电路

对不同的传感器,传感器的质量不可能都相等,因此需要调整电流 $I$ 的大小才能使 $F$ 能够完全抵消重力的影响。驱动器1的梳齿电容 $C_1$ 在重力作用下变大,驱动器2的梳齿电容 $C_2$ 相应地变小,令电容改变量为 $\Delta C$ ,则 $C_1 = C_0 + \Delta C$ , $C_2 = C_0 - \Delta C$ 。

电容检测方案如图3所示,本研究首先将电容改变量转化为直流电压输出 $V_{c1}$ 和 $V_{c2}$ ,当 $V_{c1} = V_{c2}$ 时输出1,不相等时输出0;累加器初始设为0,当输出高电平时 $V_{c1} = V_{c2}$ ,累加器的输出 $I_c$ 为控制信号,控制电流 $I$ 的变化。当 $I_c = 1$ 时电流 $I$ 不变,此时 $BIL = mg$ 。

## 2 无线传感器网络节点硬件设计

### 2.1 无线传感器网络节点系统结构

传感器节点的设计对整个无线传感器网络系统

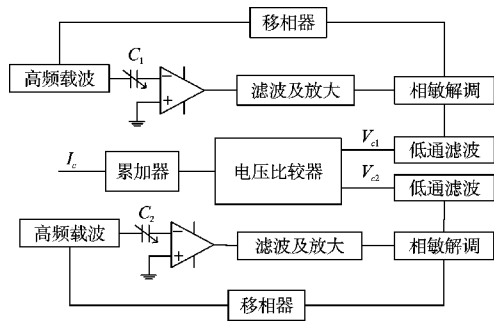


图3 电容检测电路方案

至关重要,由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和电源管理模块4个部分组成<sup>[7]</sup>。传感器模块将监测区域内的信息进行采集并将环境参数变成电压、电流、电阻等电量,传送给处理器模块完成数据融合、任务调度、能量计算、通信协议、数据转储程序等,最后由无线通信模块进行数据的收发并负责与其他无线传感节点的通信、交换消息。在这一过程中,各节点的能量由电源管理模块提供。

传感器节点在功能上分为采集节点和网关节点,其硬件结构如图4所示。

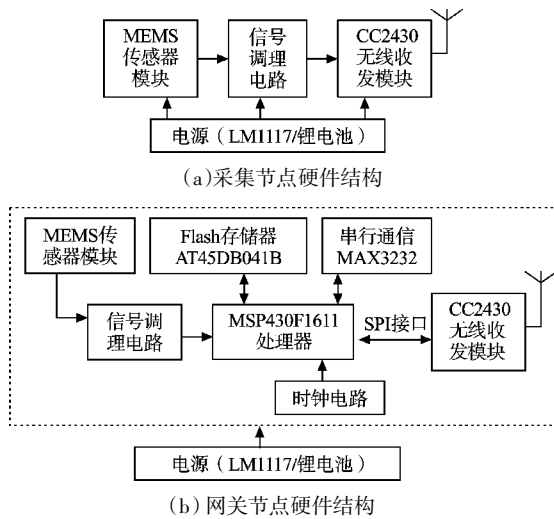


图4 节点硬件结构图

## 2.2 CC2430无线收发模块

本研究设计采用了蜂舞ZigBee的无线收发模块FW2430-M02。

CC2430是Chipcon公司生产的首款符合ZigBee技术的2.4 GHz射频系统单芯片。该芯片内部集成了增强型8051内核MCU、闪存Flash及IEEE802.15.4所需要的全部硬件。因此,CC2430芯片在使用时,不需要太多的外围器件配合,仅用有限的外围部件就可以实现信号的收发功能。

CC2430的功耗非常低,处于休眠模式时几乎不耗电,能够在极短的时间内转换到主动模式,并且芯片的体积小、集成度高,这些都非常适用于能量有限的

无线传感器网络节点的设计。

CC2430无线收发芯片的核心部件是一个CC2420射频收发器<sup>[8]</sup>。CC2430的无线接收器是一个低、中频的接收器,接收到的射频信号通过低噪声放大器放大,并且将接收到的同相信号和正交相位信号降频转换为中频信号。在中频,经过滤波、放大后经由模数转换变为数字信号,同时也把接收信号强度指标(RSSI)、链路质量控制(LQI)和相关值添加到帧中。CC2430的无线发送器基于上变频器,接收数据存放在一个接收先进先出的数据缓冲区(FIFO)内,发送数据帧的前导符和开始符由硬件生成,并通过数模转换把数字信号转换成模拟信号发送出去<sup>[9]</sup>。

## 2.3 处理器模块

处理器模块是整个节点的计算核心,节点的能量消耗主要集中在无线通信模块,因此,考虑无线通信模块的工作模式和收发能耗对于降低单个传感器节点的能耗及延长网络寿命十分关键。

### 2.3.1 MSP430F1611芯片介绍

本研究在设计中采用TI公司的MSP430系列16位RISC超低功耗混合型微控制器MSP430F1611作为汇聚节点的微处理器,它具有48 KB的Flash和10 KB的RAM。其主要特点有<sup>[10-11]</sup>:超低功耗;丰富的片内外围功能模块;强大的处理能力。它有1种活动模式(AM)和5种低功耗模式(LPM0~LPM4),电源电压1.8 V~3.6 V,在1 MHz的时钟条件下运行时,芯片的电流最低在165  $\mu$ A左右,保持模式(AM)下的最低功耗只有0.1  $\mu$ A。

### 2.3.2 MSP430外围电路

MSP430F1611内部48 KB的Flash无法满足大量存储的需求,选择功耗较低的AT45DB041Flash芯片作为扩展存储器,节点调试时使用串口与上位机相连。

## 2.4 电源管理模块

节点共有外部供电和电池供电两种模式,当无线数据没有处于发送、接收及转发状态时,无线传感器网络节点为休眠状态。在该系统模块供电设计时,节点实验室调试时采用外部供电,独立工作时使用锂电池供电。

考虑到节点低功耗的要求,并且系统电源还要具有纹波小、稳压的功能,本研究选择用DC-DC线性电源转换器LM1117-3.3实现将5 V输入电压转换为3.3 V,供CC2430模块及MAP430F1611使用。为减小纹波,本研究在输入和输出部分均放置电容,以减小干扰。

### 2.5 MSP430与CC2430模块的连接和控制

MSP430与CC2430的接口配置较简单,每部分各由一块电路板组成,两者用插针连接。MSP430通过通信接口和状态引脚就可以进行对CC2430配置信息的

写入或读取,实现数据的主动发送和通过中断接收数据。MSP430F1611通过SPI接口访问CC2430模块,CC2430是从设备,处于从模式,MSP430处于主模式。SPI接口由CSn、SI、SO和SCLK引脚组成,在访问过程中,CC2430接收来自MSP430的时钟和片选信号,并在MSP430的控制下执行输入和输出操作。

PCB设计采用二层板的设计,布线时电源线和地线应尽量粗,以减小环路电阻。该设计取电源线、地线为20 mil,信号线10 mil,同时使电源线、地线的走向和数据传递的方向尽量一致。尽量把器件位置放置紧凑,并采用大面积的栅格敷铜以减小电磁干扰。

### 3 软件程序流程

软件开发环境选取IAR Embedded Workbench for MSP430,本研究采用C语言作为编程语言。系统启动后,MSP430首先对SPI端口和CC2430连接引脚初始化,使能SPI端口,由于需要与上位机传输,还需要使能UART串口和ADC,并对CC2430芯片初始化。为了降低功耗,系统即进入休眠状态,当有外部中断时被唤醒。系统发送数据时发送的数据通过SPI接口首先在CC2430的缓冲区存储,然后按IEEE 802.15.4协议帧格式发送,并根据ACK帧信息位来判断发送成功与否。接收数据时,也是数据先接收到接收缓冲区,MSP430通过查询FIFO和FIFOP引脚状态来读取数据报。当FIFOP引脚在接收缓冲区的数据超过设定的临界值时,CC2430输出高电平。

### 4 电路仿真及实验结果

本研究通过Multisim10.0对电容检测电路进行仿真,设置 $C_1$ 、 $C_2$ 的值分别为3 pF、5 pF,载波电压幅值为1 V,频率为20 kHz,经过放大和滤波后的信号为1.26 V的正弦波,经相敏检波后的输出信号包含了624 mV的直流成分和频率为40 kHz、幅值为624 mV的交流成分,经低通滤波后输出直流电压信号1.219 V。实验搭接的检测电路实测值为1.13 V,与这一结果相差不大,符合要求。

本研究用CC2430的片内温度传感器作为监测对象对节点进行测试,并通过串口将数据发送至PC机,其界面如图5所示,测试结果证明硬件电路设计合理,符合要求。

### 5 结束语

本研究将一种基于磁驱动增大检测电流的新型电容式加速度传感器应用于无线传感网络节点的设计中,并设计了该传感器的电容检测电路,用Multisim10.0对其进行了仿真,实测结果和仿真结果基本一

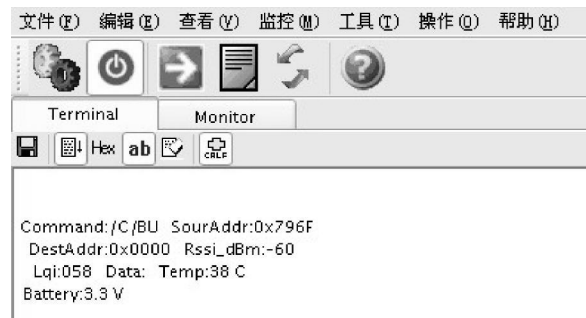


图5 PC机接收的串口数据

致,并构建了一个完整的无线传感器网络节点,实现了信号采集、处理、传输的功能,能够对建筑物结构实现监测,为后续组建一定规模的无线传感器网络,以及实现无线通信做好了准备。

### 参考文献(References):

- [1] 王双庆,李宏生,王寿荣. MEMS与建筑结构健康监测[J]. 工业控制计算机,2009,22(7):8-12.
- [2] KRUGER M,GROSSE C U,KURZ J H. Acoustic Emission Analysis Techniques for Wireless Sensor Networks used for Structural Health Monitoring[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance,Safety and Management,Life-Cycle Performance and Cost. Condon:[s. n.],2006:873-874.
- [3] GLASER S D,LI Hui. Sensor technology innovation for the advancement of structural health monitoring:a strategic program of US-China research for the next decade[J]. *Smart Structures and Systems*,2007,3(2):221-244.
- [4] 纪航宇. 用于实时结构健康监测的无线传感器网络研究[D]. 北京:北京邮电大学自动化学院,2008.
- [5] AKYILDIZ I F,SU W L,CAYIRCI S Y. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*,2002,40(8):102-114.
- [6] 李寿洛. 三维电容式微加速度传感器的设计与相关研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学电子信息学院,2010.
- [7] 曾湘林,胡培平,姜从群,等. 基于JN5139-Z01-M00的无线传感器网络节点设计[J]. 机电工程,2010,27(6):124-126.
- [8] JIANG Xiang-dong,TANG Yu-liang,LEI Ying. Wireless Sensor Networks in Structural Health Monitoring Based on ZigBee Technology[C]// Anti-counterfeiting,Security and Identification in Communication,2009. ASID 2009. 3rd International Conference. Guangzhou:[s. n.],2009:449-452.
- [9] Texas Instruments Incorporated. CC2430 Datasheet[EB/OL]. [s. a.]. <http://www.ti.com/product/cc2430>.
- [10] Texas Instruments Incorporated. Msp430lxx Family User's Guide [EB/OL]. [s. a.]. <http://www.ti.com/sc/docs/psheets/abstract/apps/slau012a.htm>.
- [11] 沈建华,杨艳琴,翟晓曙,等. MSP430系列16位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[编辑:李辉]