

# 基于无线网络的构筑物强震监测仪器设计\*

唐巍, 滕云田, 王喜珍, 周鹤鸣, 张炼, 胡星星

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 设计了基于 MEMS 加速度传感器和无线网络传输的构筑物强震监测仪器, 仪器由 MEMS 传感器、数据采集器、无线网络传输模块及存储模块组成。该强震监测仪器具有体积小、质量轻、功耗低、价格低的优点。测试证明, 其性能可以满足强震观测的需要。

**关键词:** 构筑物; 强震监测; MEMS; 无线网络

**中图分类号:** TH762.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2009)02-0204-05

## 0 引言

我国是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一。为了减轻地震引起的工程结构灾害, 必须科学地了解强烈地震动的特征。强震观测是解决这个问题的重要手段(高光伊等, 2001)。随着我国国民经济的快速发展, 高层构筑物的不断耸立, 人口密集度的急剧增加, 构筑物的强震监测显得尤为重要。

构筑物强震监测是采用强震计来记录在强地震动作用下构筑物的反应情况。这些记录为工程设计、建筑实践以及建筑物抗震设防标准的制定提供基础数据(高光伊等, 2001)。同时, 构筑物强震监测网络也对震后快速、准确的救援有很重要的作用。因此, 研制性价比高且实用的构筑物强震监测仪器并进行密集监测是十分必要的。

1930 年日本著名地震学家末广恭二提出了强震观测的必要性, 1932 年美国研制出 USCGS-STANDARD 强震观测计, 强震计经历了 70 多年的发展历程。从 20 世纪 70 年代末开始, 数字技术进入了强震观测的各个方面, 使强震观测发生了深刻的变革。目前, 全世界强震计近 2 万台(李山有等, 2003), 具有代表性的强震计包括: 美国 Kinemetrics 公司生产的 K2 加速度仪, 美国 Tele-dyne 公司出产的 A900 型强震加速度仪, 日本东京测震公司生产的 CV-574 强震加速度仪(许建华, 2006)及国内港震公司生产的 BBVS-2 型三分量加速度仪。

基于构筑物强震监测的重要性和数字化强震计的发展方向, 本文使用体积小、价格低廉的微机电(MEMS)加速度传感器芯片, 将采集、模数转换、存储与无线网络传输进行集成来设计构筑物强震监测仪器。传输模块采用 Crossbow 公司的新型低功耗、远距离传输模块——IRIS, 能够快速形成可靠的多跳无线传感器网络, 使强震观测更易于实现网络化。经过性能测试和实际架设, 我们设计开发的强震仪能够实现监测、报警功能。

## 1 硬件设计

MEMS 构筑物强震监测仪的硬件设计如图 1。此仪器将模拟信号的采集、模数转换、数据存储及传输集成到一个系统。其基本原理为: MEMS 加速度芯片将采集到的三分量地震加速度转化为可测量电信号, 然后通过低通滤波电路滤出小于 10 Hz(刘小弟, 王亚勇, 1988)、对构筑物有破坏作用的地震信号, 此信号通过 AD 模数转换将模

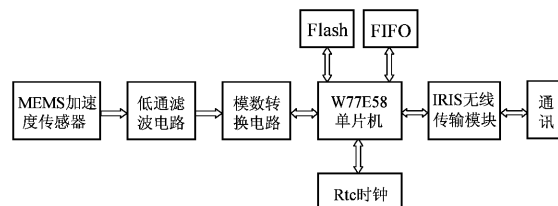


图 1 构筑物强震监测硬件结构

Fig. 1 hardware frame of structural strong-motion monitor

拟电信号转化为数字信号,最后由单片机判断进行存储(FIFO 缓冲存储,FLASH 固定存储)、实时传输(无线,串口)或报警。

### 1.1 MEMS 加速度芯片

随着微电子技术和微机械加工技术的发展,传感器正向微型化、多功能化、智能化方向发展,微型化传感器利用微机械的加工技术将微米级的敏感元件、信号调理器、数据处理装置集成封装在一块芯片上。它们有着体积小、质量轻、成本低、功耗低、可靠性高等优点,而且因为其加工工艺一定程度上与传统的集成电路工艺兼容,易于实现数字化、智能化以及批量生产,因而从问世起就引起了广泛关注(张海涛,阎贵平,2003)。基于以上优点,我们选择 MEMS 加速度芯片作为地震加速度监测仪器的传感器。

#### 1.1.1 硅电容式加速度计原理(刘俊等,2005)

硅电容式加速度计最简单的结构为平板式电容加速度计,其典型结构如图2所示。芯片中央是一个被悬置的敏感质量块,上、下电极与中间质量块的间隙相等。

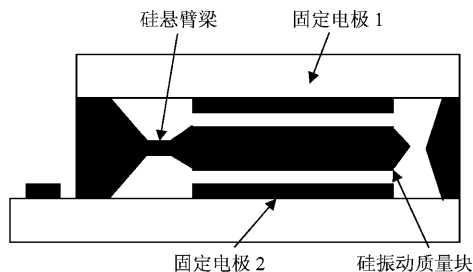


图2 电容式传感器结构原理图

Fig. 2 Structure scheme of capacitive sensor

当没有加速度输入时,质量块处于力平衡状态,两边差动电容相等,即

$$C_{s1} = C_{s2} = C_{s0} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{d_0}. \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$ 为真空介电常数, $\varepsilon_0$ 为介质相对介电常数, $A$ 为电容极板有效面积, $d_0$ 为电容极板间距。当外界输入一个加速度 $a$ 时,检测质量受到一个与加速度相反的惯性力 $F$ 作用。这一惯性力使质量块偏离平衡位置,两差动电容的间隙发生变化。此时的电容量也随之发生变化,分别为

$$C_{s1} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{d_0 + \Delta d}, \quad C_{s2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{d_0 - \Delta d} \quad (2)$$

由于有静电反馈,检测质量偏离平衡位置的位移很小, $\Delta d \ll d_0$ 。当 $C_{s1}$ 与 $C_{s2}$ 差接时,电容变化量为

$$\Delta C = C_{s2} - C_{s1} \approx 2C_0 \frac{\Delta d}{d_0}. \quad (3)$$

由于加速度 $a$ 的输入,质量块受惯性力和梁的变形产生的弹性力平衡

$$F = ma = k\Delta d. \quad (4)$$

式中, $a$ 为输入加速度, $k$ 为四根弹簧梁的刚度, $m$ 为质量块质量。因此可得

$$\Delta C_1 = \frac{2mC_0}{kd_0}a. \quad (5)$$

通过电容检测电路将差动电容的变化量转化成可以测量的电压值,就可以根据输出电压值来测量加速度值的大小。

#### 1.1.2 芯片选择

ST公司于2005年推出了3轴加速度芯片 LIS3L02AQ3,其量程为 $\pm 2g/\pm 6g$ (可设置),灵敏度为 $(0.66 \pm 10\%) V/g$ ,线性度为 $\pm 0.3/\pm 0.6\%$ ,频率范围从dc到1.5 kHz,噪声为 $50 \mu g/(Hz)^{-1}$ ,横向效应为 $\pm 2\%$ ,在0.1 ms时抗冲击力为10 000 g,正常工作的温度范围为 $-40^\circ C$ 到 $85^\circ C$ ,其性能可以满足强震计的性能要求。

### 1.2 无线传输模块

#### 1.2.1 无线传感器网络原理

无线传感器网络(WSN)是一种由传感器节点构成的网络,能够实时、协作地检测、感知和采集网络分布区域内的各种检测对象信息,提供海量的详细测量数据,并对这些数据进行处理,发布给用户,是一种特殊的Ad Hoc网络。它具有低功耗、自组织、响应快、鲁棒性强等特点,在军事、环境检测、医疗、工业控制等方面有着广泛的应用(孙利民等,2005)。

WSN虽然与现有无线网络有相似之处,但也存在很大差别(赵刚,何寨华,2004)。主要表现在:节点数目更为庞大(上千甚至上万),节点分布更为密集;环境影响大,对低功耗要求较高;节点通常是固定不动的。传统网络首要考虑通信质量、带宽问题,而WSN首要考虑环境、能量问题。本设计中仪器要架设在构筑物上,监测对构筑物有破坏作用的地震动,根据其最大加速度进行相应报警。因此,要考虑的因素包括:(1)环

境影响；(2) 功耗问题；(3) 组网可靠性问题。因此我们选择无线传感器网络进行传输、组网。

### 1.2.2 IRIS 无线传输模块

无线发送模块采用 crossbow 公司开发的无线传输模块 IRIS。IRIS 基于 ATmega1281 处理芯片，工作在 2.4 GHz，支持 IEEE 802.15.4/Zigbee 协议，用于低功耗无线传感器网络。IRIS 的主要性能特点如下 (Crossbow, 2007)：

- (1) 250 kbps 数据传输率；
- (2) 户外测试在不加放大器的情况下，节点间视距离可达 500 m；
- (3) 基于 IEEE802.15.4/ZigBee 协议 RF 发送器；
- (4) 2.4 ~ 2.4835 GHz，全球兼容的 ISM 波段；
- (5) 直接序列扩频技术，抗 RF 干扰、数据隐蔽性好；
- (6) 可组成大规模传感器网络 (1 000 多节点)；
- (7) 可运行 TinyOS 1.1.7 或更高版本，包括 Crossbow 可靠的 Mesh 网络软件操作平台；
- (8) 即插即用。

另外，IRIS 51 针扩展接口可连接模拟输入、数字 I/O、I<sup>2</sup>C、SPI 和 UART 接口。这一功能使其易于与其它外设连接。本设计使用其 UART0 接口与强震监测仪器相连，来实现监测数据的无线发送等。

### 1.3 存储模块

强震监测仪的存储模块分为 2 部分：数据暂时存储和触发文件存储。

数据暂时存储是指仪器处于触发工作状态时，暂时存储 AD 采集到的数据。本存储模块采用先进先出 (FIFO) 芯片 IDT7208，它是一种具有存储功能的高速逻辑芯片，在高速数字系统中常用作数据缓存。

触发文件存储是指仪器处于触发工作状态时，如果达到触发条件则将触发数据从暂时存储存入固态、非易失存储中。基于本设计为触发采集、容量需求不大的特点，选用闪存 (flash) 芯片作为固态存储器。目前市场上主要有 NAND Flash 和 NOR Flash 两种非易失闪存芯片，与 NOR Flash 相比，NAND Flash 在容量、功耗、使用寿命等方面的优势使其成为高数据存储密度的理想解决方案。NOR Flash 的传输效率很高，但写入和擦除速度较低；而 NAND Flash 以容量大、写速度快、芯片面积小、单

元密度高、擦除速度快、成本低等特点，在非易失性类存储设备中显现出强劲的市场竞争力。因此，我们选择韩国三星生产的 64 MB 容量 K9F1208U0B 芯片作为固态存储器，存储地震数据。

## 2 软件设计

记录仪部分程序使用 C51 语言编写，主要实现两种工作方式：实时采集和触发采集。实时采集可由串口或无线传输实现。触发采集时可设置阈值 (0.01 g 的整数倍)，其中最主要的程序是判断触发程序。由于单片机的计算能力有限，我们采用多通道阈值触发方式触发，为避免脉冲干扰，选择判断触发时间为 0.3 s。触发采集时，根据设定的触发值判断是否为地震事件，若非地震事件，则将存入 FIFO 的数据每隔一段时间刷新一次；若为地震事件，则将 FIFO 中的数据读出并写入 flash 中存储，通过无线报警。存入 FLASH 中的地震文件为触发前 20 s、触发状态中 (0.3 s) 和触发后 10 s 数据，避免了“丢头”现象。图 3 是其具体实现流程图。

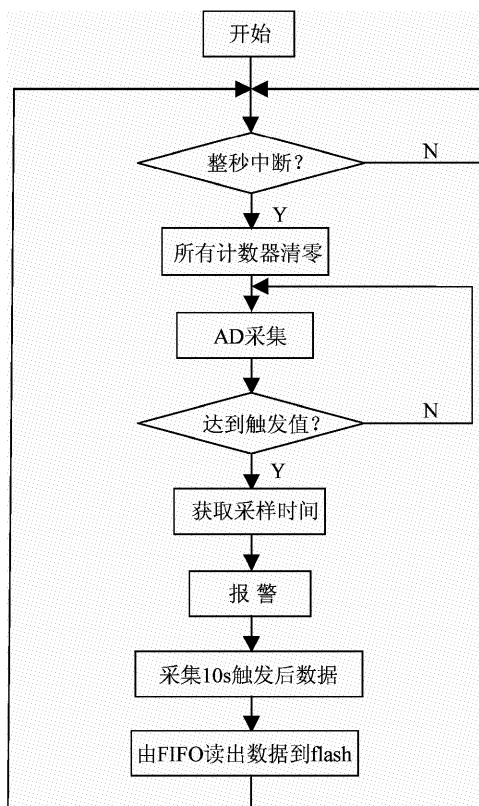


图 3 判触发程序流程图

Fig. 3 Trigger judgement program flow

3 性能指标及试验数据

3.1 性能指标

我们主要测试了单独的记录仪的性能和仪器的整体性能。

根据《地震数据采集器质量检测技术规程》，我们在实验室中进行了记录仪的性能测试，包括零输入噪声、前放增益、最大允许输出误差、总谐波失真度、线性度、路际串扰、幅频特性、阶跃响应、输入电阻、短路噪声、功耗等。测试采用了 SG1010A 10 MHz 数字合成信号发生器，在室温条件下进行。所得主要性能参数如表 1。

表 1 记录仪性能表  
Tab. 1 capability of recorder

性能	X 通道	Y 通道	Z 通道
前放增益误差（%）	-0.73	-0.72	-0.72
总谐波失真度（%）	2.35021	4.18138	2.35297
线性度（%）	0.34498	0.31345	0.269
路际串扰比/dB	-139.9024	-138.9075	-158.9822
短路噪声/mV	2.2	2.6	2.6
仪器功耗/W	1.17		

在振动台上测试了仪器的整体性能，其主要性能见表 2。

表 2 强震仪整体性能表  
Tab. 2 capability of strong-motion instrument

性能	值
线性度	2.69%
灵敏度	0.756 V/g
动态范围/10 Hz	70 dB
频带宽度	DC-10Hz

3.2 试验数据

仪器架设在中国地震局地球物理研究所科研楼，设置参数为：触发采集，触发阈值 0.05 g，采样率 200 Hz。由于其测试为对楼层有破坏作用的地震信号，因此没有触发记录。实时采集时其记录的噪声波形如图 4 所示。

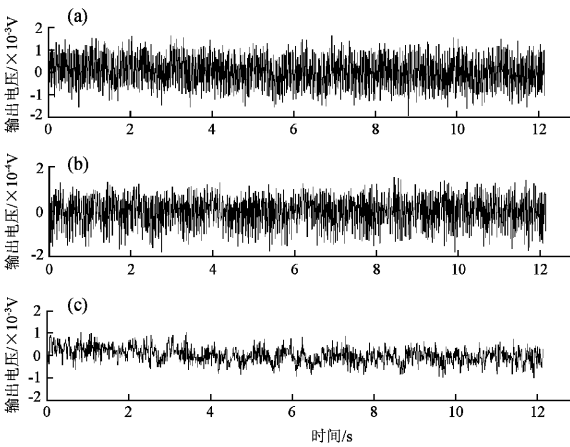


图 4 噪声波形  
Fig. 4 noise wave

(a) X 方向噪声；(b) Y 方向噪声；(c) Z 方向噪声

4 结论

我们选用 MEMS 加速度芯片、 $\Sigma$ - $\Delta$  型 24 位 AD 转换器、IRIS 无线传输模块，设计了无线传输的构筑物强震监测仪。试验测试结果表明，强震监测仪器基本可以满足系统设计的各项技术指标，而且体积小、质量轻、功耗低、价格低。目前存在的主要问题是廉价 MEMS 加速度芯片灵敏度与传统加速度计还有一定差距。但是随着 MEMS 技术的不断进步，现在所用的地震传感器可能在将来被高度可靠、经济的 MEMS 传感器所取代（哈夫斯科夫，2007）。因此，此构筑物强震监测仪有广泛的研究、应用前景。

参考文献：  
Crossbow. 2007. Wireless sensor networks product reference guide [K].  
高光伊，于海英，李山有. 2001. 中国大陆强震观测 [J]. 世界地震工程，17（4）：13-18.  
哈夫斯科夫著. 2007. 地震观测技术与仪器 [M]. 赵仲和，赵建和译. 北京：地震出版社.  
李山有，金星，刘启方，等. 2003. 中国强震动观测展望 [J]. 地震工程与工程，23（2）：1-7.  
刘俊，石云波，李杰. 2005. 微惯性技术 [M]. 北京：电子工业出版社.  
刘小弟，王亚勇. 1988. 强震地面运动频谱特性的统计分析 [J]. 地震研究，11（4）：377-356.  
孙利民，李建中，陈渝，等. 2005. 无线传感器网络 [M]. 北京：清华大学出版社  
许建华. 2006. 基于微型传感器的地震加速度监测系统技术研究 [D]. 北京：中国地震局地球物理研究所.

张海涛, 阎贵平. 2003. MEMS 加速度传感器的原理及分析 [J].  
电子工艺技术, 24 (6): 260–265.

赵刚, 何案华. 2004. GPRS 技术在地震前北台网中的应用研究  
[J]. 地震研究, 27 (3): 265–270.

## The Design of Strong Motion Monitoring Instrument for Structure Based on Wireless Network

TANG Wei, TENG Yun-tian, WANG Xi-zhen, ZHOU He-ming, ZHANG Lian, HU Xing-xing  
(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

### Abstract

Strong motion monitoring instrument of structure is designed adopting MEMS accelerometer and wireless network module. The instrument is composed of MEMS accelerometer, data accumulating module, wireless network module and storage module. It has the characteristics of small cubage, light weight, low power consuming and low cost. Its performance can satisfy the need of strong motion monitoring.

**Key words:** structure; strong motion monitoring; MEMS; wireless network