

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.018

基于MEMS传感器的高精度地震波采集系统

施 湛,董林玺*

(杭州电子科技大学 射频电路与系统教育部重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对地震波微弱信号的采集问题,将MEMS传感技术应用于地震波采集中,设计了采集系统。提出了基于MEMS加速度传感器和24位高精度ADC芯片的地震波数据采集系统设计方案;采用精密仪表放大器对传感器信号进行了差分处理,由于系统为混合信号系统,在PCB设计时采用了数字模拟隔离方案以抑制相互之间的干扰,使用磁耦隔离芯片隔离ADC芯片与微控制芯片的通信接口,该采集系统接收LabVIEW上位机软件的命令,实时显示地震波波形,将地震波数据存储于SD卡内;分析了系统的硬件电路设计和软件流程;利用函数信号发生器对系统采集精度和频率响应进行了测定,并在模拟真实应用的环境下对系统进行了采集试验。实验结果表明:系统可达10 μV 量级的采集精度,加速度信号重建质量较好,能够满足地震波数据采集的要求。

关键词: 微机电系统; 加速度传感器; 地震波数据采集; 24位A/D; 混合信号PCB; 实时数据存储; LabVIEW

中图分类号: TH7; P315.62 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1524-04

High precision seismic signal acquisition system based on MEMS accelerometer

SHI Zhan, DONG Lin-xi

(Key Lab of RF Circuit and System Ministry of Education, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at collecting faint seismic data, MEMS sensor technology was applied to design a seismic data acquisition system. The system design based on MEMS accelerometer and 24-bit ADC convertor was presented. Precision instrumentation amplifier was used to deal with the differential signal from MEMS sensor. In this mix-signal system, isolation scheme was adopted when design PCB to isolate the digital and analog circuit to suppress interference from each other. The magnetic coupling isolator was used to isolate the communication interface between ADC convertor and micro controller. According to the command transmitted from upper system by LabVIEW, real-time seismic data could be displayed in the form of waveform and stored in SD card. The software process and hardware design of the system was analyzed. The signal generator was used to measure the accuracy and frequency response of the system, the process of data acquisition was tested under a simulated environment. The experimental results indicate that system accuracy reaches the magnitude of 10 μV , the quality of acceleration signal reconstruction is good and the designed system meets requirements of seismic data acquisition.

Key words: micro-electro-mechanical systems (MEMS); accelerometer; seismic data acquisition; 24-bit A/D; mixed-signal PCB; real-time data storage; LabVIEW

0 引 言

地震波数据采集在生产实践中有诸多应用,包括地震预警、建筑物抗震测试^[1]、管道安全及振动源的监

测识别^[2]等。例如地震预警中,工作人员在震中安放地震波监测仪器对震中地下的振动信号进行采集,一旦确认地震发生,立即将地震预警信号以电波形式向其周围地区发送,电波比地震波传播速度快,这为震中周围地区避险提供宝贵时间^[3]。传统地震采集系统

收稿日期: 2013-08-23

作者简介: 施 湛(1989-),男,浙江金华人,主要从事电子系统集成方面的研究. E-mail: wierdcash@163.com

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

采用基于电磁原理的动圈式传感器,该传感器为无源传感器,无需供电,但其体积大,信号响应带宽小,动态范围小^[4]。该传感器自检繁琐,需配合地震波检波器测试仪使用^[5]。地震波能量主要集中于100 Hz及以下频段^[6],地震波信号很微弱,利用高灵敏度、高精度的采集系统才能准确地获取其数据,以供实际应用中分析。

MEMS传感器体积小、灵敏度高、动态范围大,在加速度信号采集领域有取代动圈式传感器的趋势。本研究利用国产MEMS加速度传感器设计地震波采集系统,实现地震波数据的采集、显示和存储,最后通过实验对该系统的精度、响应速度以及模拟采集效果进行验证。

1 总体设计

系统主要对MEMS加速度传感器输出的电压波形进行采集、实时显示,并实时存储于SD卡中,系统硬件框图如图1所示。

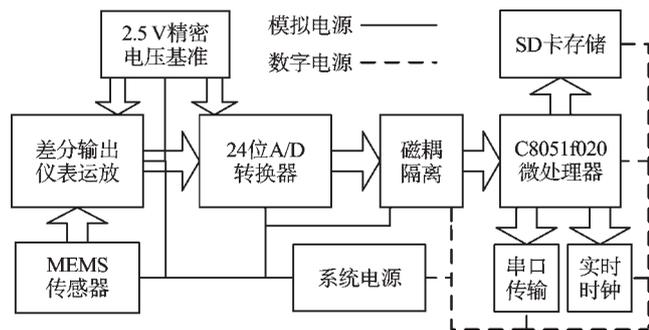


图1 系统框图

MEMS加速度传感器产生的差分电压信号,经由仪表放大器AD8221和低噪声精密运放OP27组成的差分信号处理电路进行放大。系统采用24位高精度A/D转换器ADS1255,通过SPI接口输出数字信号。A/D转换器的参考电压由精密电压基准芯片REF5025提供,REF5025还为仪表运放提供差分信号的共模电压参考点。

PCB版图设计采用数字模拟地隔离的方案。为避免数模信号相互交叠,采用ADum1402磁耦隔离芯片对A/D芯片的SPI接口进行隔离。控制芯片使用美国Silabs公司出的CIP-51内核8位混合信号控制器C8051f020,该芯片成本低,开发方便,运行速度满足系统要求。地震波数据通过串口上传给PC机,通过LabVIEW软件实时显示加速度波形,也可将数据实时存储于SD卡中,以备分析。为减少模拟部分和数字部分相互干扰,系统电源分为模拟和数字两部分。

2 硬件电路设计

2.1 MEMS加速度传感器

本研究采用中科院上海微系统与信息技术研究所研制的地震勘探MEMS加速度传感器MSCA3002,传感器具有大动态范围(120 DB)、优异的频响带宽(DC~500 Hz)、高检测灵敏度(1.5 V/g)、较大加速度测量范围(± 2 V)、抗高冲击性等特点,非常适于低频率加速度信号的高精度检测场合。

2.2 精密差分输出电路

传感器的输出为两路差分信号,为提高加速度信号的抗干扰性,保持信号的差分形式,本研究采用仪表运放AD8221和低噪声运放OP27对传感器输出信号进行处理,AD8221为低噪声精密仪表放大器,具有低补偿电压(小于 $25 \mu\text{V}$)、低输入补偿漂移(小于 $0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$)、低输入偏置电流(小于 0.4 nA),可通过外置不同阻值的电阻改变其放大倍数(1~1 000)。实际电路如图2所示。

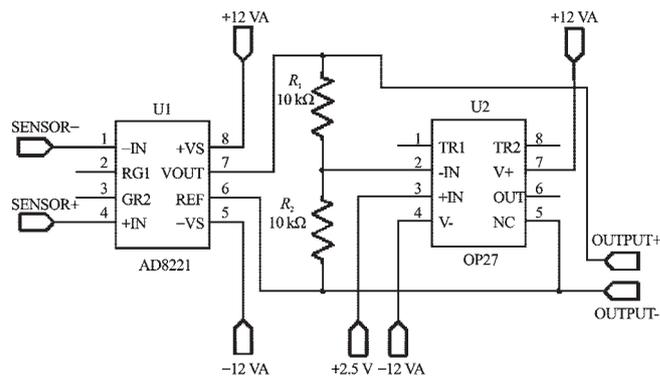


图2 AD8221 OP27电路

电路的硬件连接保持信号的差分形式。仪器运放后端加上低噪声精密运放OP27,搭成增益为-1的反相器形式,该电路连接的主要优点包括:OP27同相输入端输入+2.5 V电压用以设置差分信号的共模输出电压,使输出信号幅度符合后端A/D转换器芯片输入引脚的电压输入范围,该+2.5 V电压由精密电压基准REF5025提供;其次OP27的接入可加速模拟信号在精密差分电路输出端的稳定,缩短模拟信号传输到A/D转换器的延时;同时电路中电阻 R_1 和 R_2 引起的噪声以及OP27所引入的误差(诸如失调电压、增益误差等)对于两个输出端的影响是同向的,因此它们仅对差分输出的共模部分有影响,最终可被差分输入的A/D芯片所抑制^[7]。

2.3 24位A/D转换器ADS1255

低噪声、24位A/D转换芯片ADS1255支持最高23

位的分辨率,24位数字信号以补码的形式输出,适于地震波这种双极性高精度信号的采集系统。

A/D转换电路的硬件连接中,最为重要的是参考电压和信号输入部分,两部分电路都要给足够的滤波电容以减小干扰,系统中主要使用钽电容和瓷片电容的组合进行滤波,模拟信号经过无源RC低通滤波器以差分形式输入ADS1255,起到抗混叠作用。A/D电路的参考电压(+2.5 V)由REF5025提供,经电容滤波后输入。同时应注意ADS1255的模拟地和数字地需要短接,确保芯片正常工作。为隔离系统数字、模拟部分,本研究使用磁耦隔离芯片ADum1402隔离ADS1255与微控制器C8051f020的SPI接口。

2.4 PCB版图设计

系统电路为混合信号电路,为减小电路数字部分对模拟部分的干扰,本研究在设计版图时注意将数字部分和模拟部分电路分隔放置,数、模两部分的地平面只在系统电源处单点连接。模拟部分电路主要包括传感器、精密差分电路、精密电压基准、A/D转换芯片;数字部分电路主要包括主控芯片、SD卡、串口转换、时钟芯片等。应避免A/D转换芯片的SPI接口跨越数模分隔间隙布线,跨间隙布置信号线易与其自身的回路路径组成较大的环流面积对系统模拟部分产生干扰,该系统使用ADum1402磁耦隔离芯片对ADS1255的SPI接口与控制芯片的SPI接口进行隔离^[8-9]。

模拟部分信号主要为低频信号,模拟地实行严格的单点接地,以确保A/D转换器芯片ADS1255与参考电压基准REF5025的地电位严格一致^[10]。数字部分可采取普遍的大面积铺地的方式以减小各元件对地阻抗。

3 软件设计

系统使用C8051f020微控制器,集成开发环境Keil uVision3,采用C语言编写程序。程序部分首先进行系统初始化,然后系统等待串口发送的命令操作,可工作于实时上传数据、实时存储和读取存储值3种模式下。软件流程图如图3所示。

外部模块的初始化包括ADS1255和SD卡的配置。ADS1255利用SPI接口与控制芯片通信,其过程主要对A/D转换器内各寄存器配置。芯片上电后需进行系统自校准,更新偏置校准寄存器(OFC)和满量程校准寄存器(FSC)的值。微控制器发送RDATAC命令连续读取A/D转换值,根据DRDY引脚输出脉冲来判断数据转换是否完成,当需退出连续转换状态,必须发送STOPC或者RESRT命令以结束连续转换模式。

系统采用容量为1 Gbit的SD卡,SD卡成本低,容

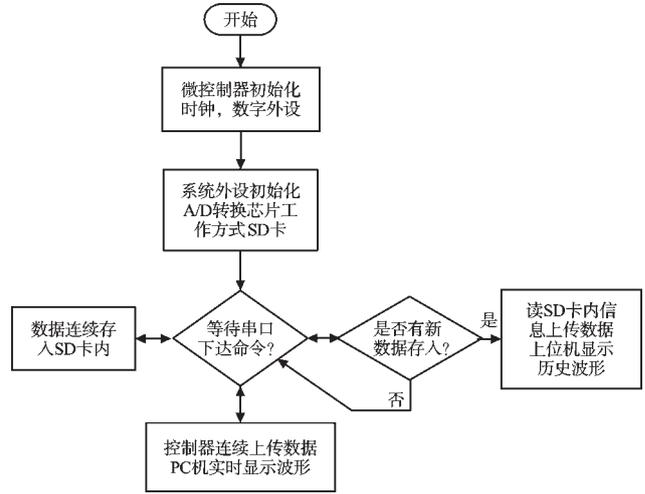


图3 软件流程

量大,易于便携。SD卡写入速度无法满足3 750 sps采样率采集数据的要求,可通过软件的方法协调存储数据过程达到实时存储不丢失数据的目的,具体软件执行方案为将数据写入SD卡程序分为若干步分步执行(包括传输命令,传输数据,等待SD卡写入过程),中间穿插执行读A/D转换器数据,在微控制器内部建立双缓冲块数组,写SD卡和读A/D转换器数据分别操作不同缓冲块数组,通过协调每一步的执行时间,实现实时存储的目的。

4 系统测试

系统通过串口与PC机相连,本研究使用LabVIEW软件VISA串口通讯子VI开发上位机波形显示软件^[11],读取加速度信号转化为波形,根据采集数据测试系统。LabVIEW软件前面板及测试效果如图6所示。

4.1 精度测试

测试仪器:fluke 287 真有效值电子记录万用表。

测试方法:输入0.100 3 V电平,系统连续采集数据。

测试结果:采集到数据如图4所示。由图4可知,系统所测数据有±30 μV的波动。系统达到10 μV量级的采集精度。

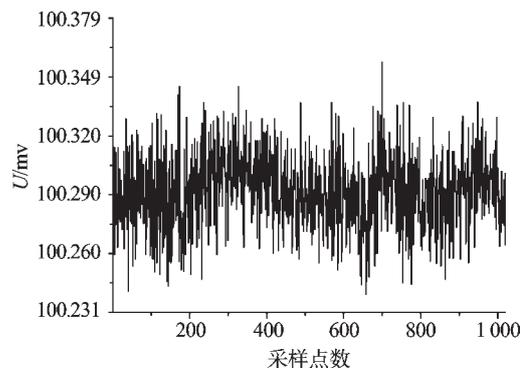


图4 直流偏置电压测试

4.2 动态性能测试

测试仪器: Tektronix AFG3022B 函数信号发生器。

测试方法: 信号发生器发出 25 Hz 和 100 Hz, 峰峰值为 500 mV 的正弦波, 系统连续采集数据。

测试结果: 正弦波数据如图 5 所示, 25 Hz 和 100 Hz 正弦波重建质量较好, 可清晰分辨。

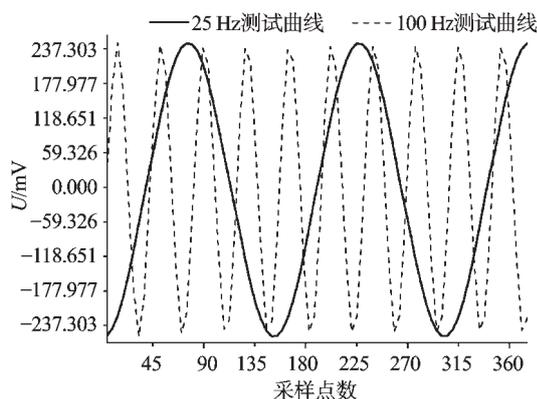


图5 正弦波电压信号测试曲线

4.3 应用效果测试

测试方法: 将传感器固定于地面, 在传感器周围人工敲击地面, 模拟振动源和野外实际采集环境, 得出采集数据。

测试结果: 人工单次敲击数据局部放大图如图 6 所示。由图 6 可得, 模拟应用环境下系统工作稳定, 响应灵敏, 信号重建质量较好。

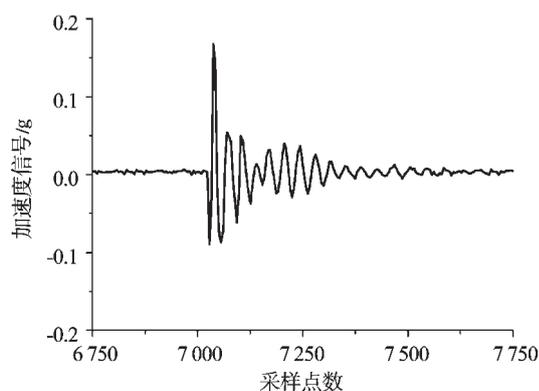


图6 人工振源局部放大数据

5 结束语

本研究利用 MEMS 加速度传感器, 从差分信号处理、24 位 A/D 转换、数据存储、混合信号 PCB 设计等方面给出了系统设计方案。测试结果显示, 系统可达 $10 \mu\text{V}$ 量级的精度, 低频信号重建质量良好, 在模拟采集环境下采集效果基本符合地震波数据采集的性能要求。

但是, 由于目前系统还处于实验阶段, 实际野外地震波采集环境中可能存在未知干扰因素, 有待后续测试改进。另外, 系统采集到的数据目前缺乏地震波数据处理算法支持, 有待后续的研究。总之, 该系统为地震波数据采集系统搭建提供了一种可行的方案。

参考文献 (References):

- [1] 马丹丹. 基于 ZigBee 技术的建筑物抗震性检测系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院, 2008.
- [2] 汪向阳. 基于地震波检测的管道安全预警系统[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2008.
- [3] 浙江新闻网. 浙大校友研究成果 420 地震在成都提前 28 秒预警[EB/OL]. [2013-04-25]. <http://news.zj.com/detail/1452360.shtml>.
- [4] 唐晓刚, 颜永安, 赵冰, 等. 石油勘探 MEMS 加速度传感器在煤田勘探的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2006(6): 50-51.
- [5] 周子安, 任家富, 张敬伦. 基于 STM32 的手持式地震波检波器测试仪研制[J]. 仪器仪表用户, 2011, 22(5): 31.
- [6] 王春田. MEMS 数字检波器采集系统技术研究[D]. 北京: 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 2011.
- [7] GERSTENHABER M, LEE S. 设计精密差分输出仪表放大器的应用电路[J]. 今日电子, 2006(8): 53.
- [8] 金忠, 章国宝. 基于 ADS1255 的地震信息采集模块设计[J]. 电子设计工程, 2009, 17(10): 99.
- [9] 王建平, 焦国太, 秦拒泽, 等. 基于 LabVIEW 的地震动信号采集系统[J]. 机械, 2013, 40(4): 71-74.
- [10] 戈强, 刘鑫. 混合信号 PCB 设计中单电接点技术的研究[J]. 工业控制计算机, 2006, 19(7): 29-30.
- [11] 郑雁阶, 黄惟公, 张丹. 基于 LabVIEW 与 USB 接口的实时数据采集系统[J]. 电子技术, 2009(12): 7.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

施 湛, 董林玺. 基于 MEMS 传感器的高精度地震波采集系统[J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1524-1527.

SHI Zhan, DONG Lin-xi. High precision seismic signal acquisition system based on MEMS accelerometer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1524-1527.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>