

# 基于 ARM 的多通道电荷放大器的设计与测试

彭俊华, 吴义鹏, 裘进浩, 季宏丽, 王玉海

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对基于压电传感器的结构健康监测系统特别设计了一 16 通道的程控电荷放大器板卡, 由嵌入式微控制芯片 STM32F407IGT6 进行板卡的功能和状态控制。程控电荷放大器板卡包含驱动传感选择模块、电荷转换模块、无源滤波模块、二级放大兼微调模块、带通滤波模块及 USB 传输模块等, 满足研制的电荷放大器具备的各项功能, 同时具有体积小及集成度高等优点。板卡与上位机直接通过 USB 串口进行通信, 上位机用户界面基于 LabVIEW 软件进行开发。

**关键词:**电荷放大器; 多通道; 程控; ARM; 结构健康监测

**中图分类号:** TN722; TP36 **文献标识码:** A

## Development and Test of Multi-channel Charge Amplifier Based on ARM

PENG Junhua, WU Yipeng, QIUJinhao, JI Hongli, WANG Yuhai

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A 16-channel programmable charge amplifier board card for the structural health monitoring system based on the piezoelectric sensor was specially designed in this paper. The functions and working states controls of the module were carried out by the embedded microcontroller chip named STM32F407IGT6. The programmable charge amplifier board card includes a drive sensor selection module, a charge conversion module, a passive filter module, a two-stage amplifier and trimming module, a band-pass filter module, a USB transmission module, etc. These modules can satisfy the various functions of the developed charge amplifier and have the advantages of small size, high integration and so on. The board card can communicate with a PC through the USB serial port, while the user interface in the PC was developed based on the LabVIEW software.

**Key words:** charge amplifier; multi-channel; programmable; ARM; structural health monitoring

### 0 引言

基于压电式传感器的主动、被动结构健康监测技术是智能材料与结构技术的一个重要分支, 对延长结构使用寿命, 提高工作可靠性等具有重要的研究意义<sup>[1]</sup>。压电式传感器能直接将物理信号转化为电信号, 但能量十分微弱, 且压电元件为一种电容性材料, 内阻极大。因此, 需要相应的高输入阻抗电压或电荷放大器对压电元件输出的电信号进行放大<sup>[2]</sup>。由于电压放大器的灵敏度随连接电缆的分布电容、压电传感器自身电容而变化, 因此, 采用电荷放大器

技术较多<sup>[3]</sup>。电荷放大器利用密勒效应原理进行工作, 将反馈回路上的反馈电容和反馈电阻等效在输入端, 等效电容与电导远大于其他寄生电容和电导, 使放大器灵敏度基本只受反馈电容和反馈电阻影响。市场上通用型电荷放大器产品(如 YE5852A 型电荷放大器、UV-16 双通道电荷放大器等)可用通道少, 体积大, 难以与系统集成。因此, 周恒保等<sup>[2]</sup>设计了一种插卡式多通道电荷放大器, 用于结构健康的被动监测系统; 侯向红等<sup>[3]</sup>设计了一种快速开关响应式多通道电荷放大器用于无陀螺捷联惯

收稿日期: 2016-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11372133), 航空基金资助项目(2015ZD52), 江苏省青年基金资助项目(BK20130791), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(NE2015001 & NE2015101); 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室自主研究课题资助项目(0515Y02); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 彭俊华(1991-), 男, 江西吉安人, 硕士生, 主要从事结构健康监测的系统集成的研究。通信作者: 吴义鹏(1986-), 男, 讲师, 主要从事无损检测、振动半主动控制与能量回收的研究。导师简介: 裘进浩(1963-), 男, 教授, 主要从事智能材料与结构, 包括压电材料与器件的制备、振动与噪声控制、流动控制、健康监测、能量回收、自适应结构、压电器件的精密传感与驱动技术的研究。

性导航系统。这些电荷放大器的通道数较通用产品略有增加,但工作状态单一,无法满足对不同材料、不同类型结构的主、被动结构健康监测的要求。

本文为实现对不同材料、不同类型的结构进行健康监测,设计研发了基于 ARM Cortex-M4 内核 STM32 微处理器的 16 通道电荷放大器板卡,程控实现了主动监测时压电元件作为驱动或传感的双向选择,压电元件作为传感时多种工作状态的选择等功能。为保持 16 通道的一致性,特别设计了具有信号校准和二级放大两种功能的微调电路。由于导线间的串扰、放大器漂移等问题,加入了一级处理电路,防止由于转换灵敏度过大出现的输出信号失真现象<sup>[4]</sup>。本文还对 16 路电荷放大电路进行了性能测试与标定,同时完成了结构主动健康监测系统的损伤定位实验,实验结果符合设计要求。

### 1 程控多通道电荷放大器原理

图 1 为一典型结构健康主、被动监测系统原理框图。被动监测方法是将结构上的压电元件作为传感器被动接收信号,根据接收到的信号进行冲击定位;主动监测方法是对某一区域中压电元件依次施加激励电压,其他压电元件作为传感器进行信号采集,利用信号处理的方法提取损伤信号。另外,主、被动结合还能对结构进行更精确地监测。

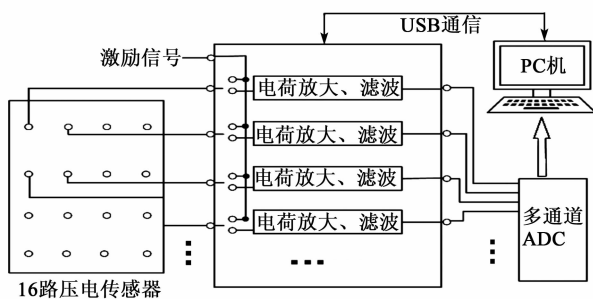


图1 结构健康监测系统原理框图

为有效进行监测,16个压电传感器(或驱动器)按照一定的规律嵌入到结构内部。监测系统基于美国NI公司提供的PXI总线标准平台进行开发。本文主要研究该系统的程控多通道电荷放大器,包含激励传感选择、电荷转换及滤波等模块。各通道组成如图2所示。放大器能实现压电片作为驱动或传感器的程控选择,具有1 mV/pC、10 mV/pC及100 mV/pC 3种灵敏度的切换,9种不同通频带的设置等功能,满足不同材料、结构的监测需求。

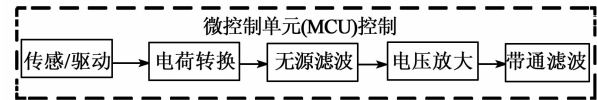


图2 电荷放大器单通道模块组成示意图

## 2 程控多通道电荷放大器硬件

### 2.1 驱动、传感选择模块

考虑到压电元件作为传感器时接入电荷放大电路的导通电阻要特别小,作为驱动器时功率放大器输出的驱动电压很大,这里选择集成化的电磁继电器开关(G5V-1)作为压电片的功能切换开关。

压电元件接入板卡“输入端”接头后,通过微处理器控制继电器开关选择压电元件是否作为驱动器或传感器。若压电元件被选为传感器,则微弱的传感信号通过“输入端”接头进入电荷放大器,经信号调理后由输出端接头输出进入NI-PXI5105板卡,转换为数字量供结构健康监测系统处理;若压电元件被选为驱动器,则该路电荷放大器、带通滤波器不工作,输出端无信号输出,此时系统的驱动信号通过功率放大器经过板卡的伪“输入端”驱动相应的压电元件。

### 2.2 电荷转换模块

电荷 $Q$ 转换电压 $V$ 电路是一个具有深度电容负反馈的高增益放大电路,该设计降低了线缆等电路分布电容对其放大性能的影响<sup>[5]</sup>。转换电路具有阻抗切换功能,采用高输入阻抗、低漂集成运放OPA602将压电元件输出的高阻抗信号转化成低阻抗输出。如图3所示,反馈电容 $C_f$ 用来控制电路转换灵敏度,反馈电阻 $R_f$ 避免OPA602进入饱和和输出状态。转换的电压为

$$V = -\frac{Q}{C_f} \quad (1)$$

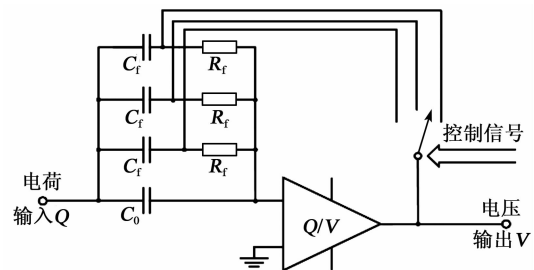


图3 电荷转换电路原理图

由式(1)可看出,电路通过设计不同的 $C_f$ 可实现灵敏度的切换。但通常情况下,后续信号采集模

块的输入电压范围为  $-10 \sim +10 \text{ V}$ ,若只靠转换电路实现,需选取较小  $C_f$ ,而较小  $C_f$  会导致电路信噪比低及运放输出易过载等情况。

### 2.3 二级放大兼微调模块

为解决上述问题,本文设计了兼具信号校准和二级放大功能的后续电路,如图 4 所示。根据电荷转换级电路灵敏度的不同,程控选择相应的电位器接入,控制  $R_0$  与  $R_i$  的比值,从而控制电压放大倍数,最终使电压输出在理想范围内。电位器的微调作用能弥补实际电路中元件容值带来的误差,起到信号标定和校准作用,使得 16 路通道的放大性能一致性良好。

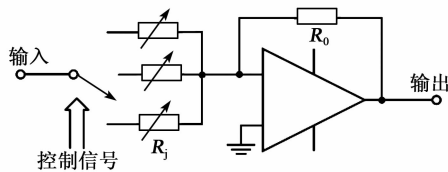


图 4 二级放大兼微调原理图

另外,电路在实际测试过程中放大信号易出现一边失真的现象,因此,在电荷放大与微调电路中间额外设计了一个二阶无源高通滤波电路,截止频率选取为 100 Hz。先期有效地滤除了低频干扰信号,防止由于二级放大电路放大倍数过高,导致原本上、下对称的正交信号出现失真。

### 2.4 带通滤波电路模块

本电路中带通滤波器起到消除信号低频、噪声干扰,抗混叠等功能,由高、低通滤波器级联而成。高通滤波器截止频率分为 100 Hz、500 Hz 和 1 kHz 三档;低通滤波器截止频率分为 50 kHz、100 kHz 和 200 kHz 三档。通过模拟开关选择电路中不同的电阻值,实现不同频带的滤波。由于系统中电路通道多,为提高集成度,设计过程中尽量选取较小的元件数目构成滤波电路,原理图如图 5 所示。

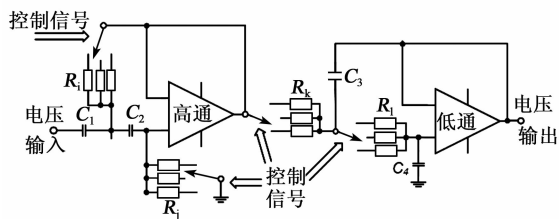


图 5 带通滤波原理图

### 2.5 数字电路部分

STM32F407IGT6 芯片是 ST 公司基于 ARM 公司提供的 Cortex-M4 内核设计生产的嵌入式控

制芯片<sup>[6]</sup>。本文数字电路部分(见图 6)主要由该芯片和 USB 接口组成。其中 STM32F407IGT6 为整个电路的控制部分,一方面通过内部自带的 USB 模块与上位机进行通信,另一方面通过自身丰富的 I/O 口资源控制开关从而控制电荷放大器的功能选择及不同工作状态。

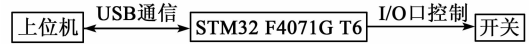


图 6 数字电路部分

### 3 程控电荷放大器软件

整个 16 通道电路通过 STM32 微控制器进行控制。上位机代码由 LabVIEW 软件和 VS2010 软件进行混合编写,LabVIEW 软件使用图形化编程语言,方便开发、便于理解;VS2010 软件编写 C++ 库函数代码,提供给 LabVIEW 程序调用,C++ 代码能方便实现各通道硬件间复杂的逻辑关系。采用混合编程法缩短了软件开发周期。通过 USB 串口通信,将控制命令与芯片进行交互,控制芯片根据上位机发送的命令对硬件作出相应控制。

上位机程序主要作用是识别下位机、根据用户设置的放大增益和通带范围生成控制数字,通过生成的控制数字控制下位机进行相应的电路控制。程序流程如图 7 所示。首先程序开始运行串口查找程序,根据返回结果确定上、下位机设备是否建立了连接;然后程序验证放大倍数及通带范围的设置是否正确,若设置值不在预先设置的范围内,则提示出错,若设置值正确,则调用动态链接库函数生成相应的下位机控制数字;最后将生成的下位机控制数字通过 USB 接口传递给下位机。

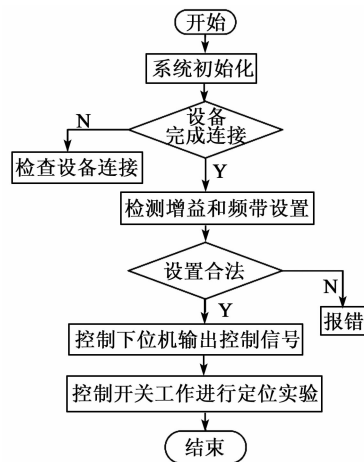


图 7 上位机程序流程图

下位机软件主要作用是接收上位机传递的控制数字,从而控制硬件的工作状态。整个下位机程序的操作流程如图8所示。首先程序运行时进行初始化,包括I/O端口配置、时钟配置及USB初始化等;然后进入循环,等待上位机指令,内部的switch语句使下位机能根据上位机的不同指令而执行不同的操作;若为串口识别指令,则下位机发送事先设置的回应指令,说明系统建立了连接;若为通道增益、频带设置指令,则依据上位机发送的控制字来进行开关的配置,从而使电路获得相应的增益和频带;若指令为通道作为激励或传感指令,则控制相应通道的开关完成配置。

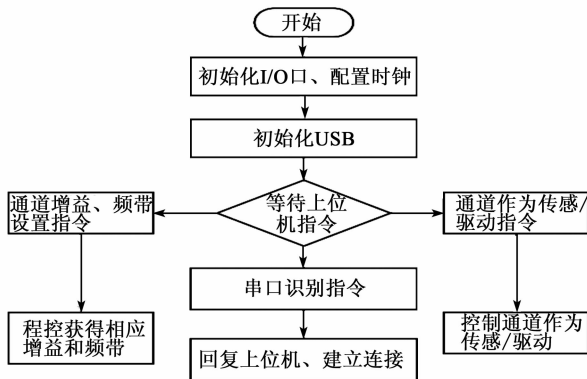


图8 下位机程序流程图

## 4 仿真实验结果及讨论

### 4.1 Multisim 仿真

Multisim 是一款具有丰富的电路仿真分析能力的软件。根据之前电路设计得到的参数,在该软件中进行一路信号仿真。采用文献[7]中提供的方法,将电压源  $e_1$  串联 1 个  $1\ 000\ \text{pF}$  电容  $C$ , 等效输入电荷信号为  $e_1 C$ 。选取不同灵敏度下、不同带宽所对应的参数进行软件仿真,得到不同频率下输出电压与输入电荷的灵敏度及相位差关系,如图9所示。由于不同灵敏度和不同带宽下的结果相似,本文对灵敏度为  $1\ \text{mV/pC}$ 、低频截止频率  $100\ \text{Hz}$ 、高频截止频率  $200\ \text{kHz}$  的仿真结果进行探讨。

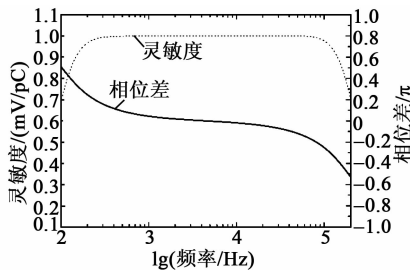


图9 单通道电荷放大器的性能仿真曲线

由图9可看出,在两端截止频率处,灵敏度皆约为  $0.7\ \text{mV/pC}$ , 低频截止频率相位超前  $0.5\pi$ , 高频截止频率处相位滞后  $0.5\pi$ , 在频带中间范围内, 相位差曲线平缓。

### 4.2 实验结果及讨论

图10为本文设计的程控电荷放大器电路板。为对比仿真结果,检验系统性能,本文利用Agilent 33220信号发生器提供电压源,信号幅值为  $5\ \text{V}$ , 串联  $1\ 000\ \text{pF}$  电容, 等效电荷源信号。对16路放大器通道进行性能测试,通过程序控制电路板工作在  $100\ \text{Hz} \sim 200\ \text{kHz}$  范围、灵敏度为  $1\ \text{mV/pC}$  的状态下,利用示波器采集每一通道不同频率下的输出电压信号。处理结果绘制成幅频、相频曲线。最终得到的实验结果如图11所示。

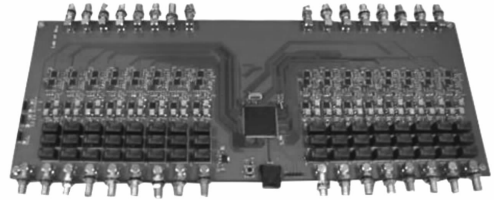


图10 电荷放大器实物图

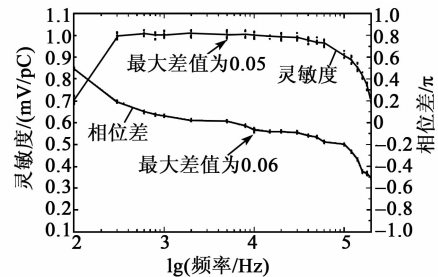


图11 电荷放大器16通道的性能测试结果图

图11中两条曲线分别是由16组灵敏度和相位差数据的平均值构成的曲线。由图可看出,灵敏度在通频带两端的值与仿真结果一致,约为  $0.7\ \text{mV/pC}$ , 在中间频率范围,灵敏度稳定在  $1\ \text{mV/pC}$ , 趋势较平坦,符合仿真结果;在低频处,输出信号相位比输入信号超前约  $0.5\pi$ ;在高频处,相位滞后  $0.5\pi$ ;16通道的实验数据结果幅值分布集中,相差较小,灵敏度最大差值为  $0.05\ \text{mV/pC}$ , 相位差最大差值为  $0.06\pi$ , 这说明了16通道的性能一致性较好。

### 4.3 结构健康监测系统中的应用结果讨论

为验证电荷放大器系统是否能实际应用到结构健康监测系统中,将研制的电荷放大器部分与整个健康监测系统建立连接,并进行损伤多点定位实验。

激励信号由 NI PXIe-5412 波形发生器产生,为中心频率为 50 kHz 的五波峰调制正弦信号,经功率放大器放大后,接入到电荷放大器驱动端。测试结构为一复合材料加筋板,表面按一定规则粘贴 16 个压电片,构成的监测区域为 660 mm×390 mm,16 个压电片与电荷放大器输入端对应连接,电荷放大器的输出端与 NI PXIe-5105 采集卡进行连接。通过在结构表面粘贴质量块改变局部刚度模拟损伤,利用概率成像法定位损伤的位置<sup>[8]</sup>。

在加筋板结构上同时粘贴 6 个 50 g 的质量块。监测系统运行后得到的定位结果如图 12 所示。图中空心圆圈表示实际损伤的位置,6 个亮白色实心区域是监测系统的损伤评估结果。由图可看出,利用电荷放大器构成的结构健康监测系统能够实现对结构损伤的准确定位,验证了所研制的程控电荷放大器的性能,能满足于结构的主、被动监测的实际应用。

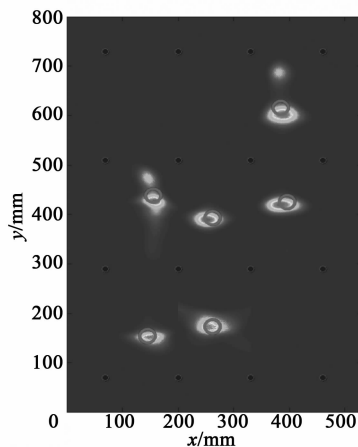


图 12 定位实验设备组成

## 5 结束语

针对结构主、被动健康监测系统的集成需求,本文研制了基于 STM32F407IGT6 芯片控制的 16 通道电荷放大器板卡。该板卡集成了传感、驱动双向选择功能,同时具备了电荷放大器应有的性能,具有集成度高,体积小,灵敏度和带宽选择方便、通道性能一致性好等优点。利用本文研制的电荷放大器能实现对不同材料结构的主、被动健康监测,实现损伤的定位,且定位结果符合检测要求。

## 参考文献:

- [1] 赵霞. 多主体协作结构健康监测系统的键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- [2] 侯向红,王代华,袁刚. 一种快速开关响应式多通道电荷放大器[J]. 压电与声光, 2008, 30(3): 272-275.  
HOU Xianghong, WANG Daihua, YUAN Gang. A multi-channel charge amplifier with rapid on-off response[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(3): 272-275.
- [3] 周恒保,袁慎芳,邱雷. 基于 PXI 总线的多通道程控电荷放大器设计[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 664-666.  
ZHOU Hengbao, YUAN Shenfang, QIU Lei. Design of multi-channel programmable charge amplifier based on PXI bus[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 664-666.
- [4] 侯明亮. 压电式压力传感器信号检测处理电路的研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2008, 25(2): 147-149.  
HOU Mingliang. Study on the signal detecting and processing circuit of the piezoelectricity type pressure sensor[J]. Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2008, 25(2): 147-149.
- [5] 刘俊,刘京诚,李敏. 准静态电荷放大器的研究[J]. 压电与声光, 2007, 29(2): 156-157.  
LIU Jun, LIU Jingcheng, LI Min. Research on the quasi-static charge amplifier[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(2): 156-157.
- [6] 曹圆圆. 基于 STM32 的温度测量系统[J]. 仪器仪表与分析监测, 2010(1): 16-18.  
CAO Yuanyuan. Temperature measurement system based on the STM32 [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2010(1): 16-18.
- [7] 张宁宁,邵新慧,郑爱建,等. 新旧规程中电荷放大器分级方法比较[J]. 计测技术, 2015(Suppl1): 191-192.  
ZHANG Ningning, SHAO Xinhui, ZHEN Ai jian, et al. Comparison of classification methods of charge amplifier with the new and the old regulation[J]. Metrology and Measurement Technology, 2015 (Suppl1): 191-192.
- [8] SHAN Shengbo, QIU Jinhao, ZHANG Chao, et al. Multi-damage localization on large complex structures through an extended delay-and-sum based method[J]. Structural Health Monitoring, 2016, 15(1): 50-64.