

文章编号: 1671-7449(2024)03-0330-07

压电MEMS振动传感器调理电路设计与实现

武晓慧¹, 张慧毅¹, 耿文平^{1*}, 郭涛², 丑修建¹

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对铌酸锂单晶薄膜的压电MEMS振动传感器输出电荷信号微弱而难以采集的问题, 设计了一种基于集成运放芯片TLE 2064 CDR的信号调理电路。该电路由电荷-电压转换电路(Q-V)、电压放大电路、前置低通滤波电路和后置高通滤波电路构成, 旨在实现微弱信号的采集。此外, 利用ACT 2000振动台进行振动实验, 通过标准电荷放大器和设计的信号调理电路对压电MEMS振动传感器测试。测试结果表明, 所设计的信号调理电路与标准电荷放大器的输出有较好的一致性, 可以满足5~130 pC的宽输入电荷的采集。当加载加速度范围为5~20 g时, 输出电荷和输入加速度之间的线性度好; 在输入加速度5 g, 工作频率范围为50~2 000 Hz时, 输出电荷偏差控制在±1.6 pC内, 具有很好的一致性。综上所述, 该电路具有集成度高, 灵敏度好等特点, 在微弱信号采集方面具有很好的应用前景。

关键词: 压电MEMS振动传感器; 调理电路; 滤波设计; 信号放大; 电荷放大器

中图分类号: TM933.23

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024042

引用格式: 武晓慧, 张慧毅, 耿文平, 等. 压电MEMS振动传感器调理电路设计与实现[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 330-336.

WU Xiaohui, ZHANG Huiyi, GENG Wenping, et al. Design and implementation of conditioning circuit for piezoelectric mems vibration sensor[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(3): 330-336.

Design and Implementation of Conditioning Circuit for Piezoelectric MEMS Vibration Sensor

WU Xiaohui¹, ZHANG Huiyi¹, GENG Wenping^{1*}, GUO Tao², CHOU Xiujian¹

(1. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A signal conditioning circuit based on TLE 2064 CDR is designed to solve the problem of the output charge signal of a piezoelectric MEMS vibration sensor with lithium niobate single crystal film being weak and difficult to collect. The circuit is composed of a charge-voltage conversion circuit (Q-V), a voltage amplification circuit, a pre-low-pass filter circuit and a post-high-pass filter circuit for the acquisition of weak signals. In addition, the piezoelectric MEMS vibration sensor is tested by the standard

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975541, 62171415); 山西省基础研究计划项目(202203021223005); 山西省留学回国人员科学活动基金资助项目(20230015)

作者简介: 武晓慧(1994—), 女, 硕士生, 主要从事压电MEMS传感器电路设计。E-mail: sz202106061@st.nuc.edu.cn。

* **通信作者:** 耿文平(1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事铁电/铁磁畴传感、存储和逻辑等新概念集成器件研究。E-mail: wengpinggeng@nuc.edu.cn。

charge amplifier and the signal conditioning circuit designed in this paper. The test results show that the designed signal conditioning circuit has a good agreement with the output of the standard charge amplifier, and can meet the wide input charge acquisition from 5~130 pC. When the loading acceleration range is 5~20 g, the linearity between the output charge and the input acceleration is good. When the input acceleration is 5 g and the operating frequency range is 50~2 000 Hz, the output charge deviation is controlled within ± 1.6 pC, which has a good consistency. In summary, the circuit has the characteristics of high integration and good sensitivity, and has a good application prospect in weak signal acquisition.

Key words: piezoelectric MEMS vibration sensor; conditioning circuit; filter design; signal amplification; charge amplifier

0 引言

压电式振动传感器^[1]由于具有自供能、体积小、重量轻、抗电磁干扰能力强、灵敏度高、可靠性好和成本低等特点^[2],是目前航空发动机、燃气轮机等振动测量的首选^[3]。压电式振动传感器基于压电效应,将输入的振动信号转换为电信号,诊断发动机是否发生故障或存在故障隐患,从而实现了对发动机的健康监测和故障预测^[4]。

压电式振动传感器由于输出信号微弱、易受环境影响、不便于采集和传输等问题,无法用一般电路来测量。针对上述问题,陈豪^[5]设计了 AD 820 为核心的放大电路,对 1 Hz 以下的低频电荷信号进行放大;张斌婷等^[6]设计了基于 ADA 4817 的电荷灵敏型放大器,实现了对脉冲信号的放大,性能接近 A 250 电荷灵敏型放大器;任勇峰等^[7]设计了以 LMC 6081 为核心的电荷放大器,经试验测试,电路在 2 倍通频带处衰减可以达到 -60 dB,实现了对冲击信号的放大。

相比于传统压电式振动传感器,基于铌酸锂薄膜的压电 MEMS 振动传感器,采用铌酸锂单晶作为压电材料。铌酸锂单晶属于一种无铅且稳定的铁电材料,是一种性能优良的压电传感材料。基于铌酸锂薄膜的压电 MEMS 振动传感器具有输出性能高、灵敏度稳定和频带宽的特点^[8]。而对铌酸锂薄膜压电 MEMS 振动传感器的信号调理电路报道不多。为了对铌酸锂薄膜压电 MEMS 振动传感器输出的微弱电荷信号进行采集,提出了一种基于集成芯片 TLE 2064 CDR 的信号调理电路方案,所设计的信号调理电路与标准电荷放大器的输出有较好的一致性,可以满足 5~130 pC 的宽输入电荷的采集。

1 系统整体设计

信号调理电路^[9]由电荷电压转换电路(TLE 2064 CDR 集成芯片)、前置低通滤波电路(MAX 7400 集成芯片)、电压放大电路、后置高通滤波电路、输出保护电路和电源转换电路(LM 78L05 集成芯片)组成。总体结构的设计框图如图 1 所示。

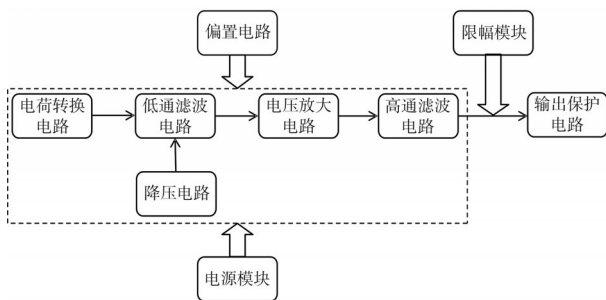


图 1 信号调理电路框图

Fig. 1 The signal conditioning circuit block diagram

2 硬件系统设计

2.1 电荷放大器原理简介

电荷转换电路(Q-V)是整个信号调理电路的核心部分,可以实现电荷到电压的转换,将高阻抗的电荷输入转换成低阻抗的电压输出。图 2 为传统电荷放大器的等效电路^[10]。

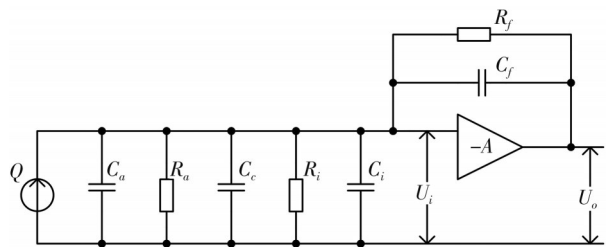


图 2 电荷放大器的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of charge amplifier

压电振动传感器的角频率为 ω , 放大器的输出电压 U_o 为

$$U_o = \frac{-j\omega A Q}{\left(\frac{1}{R_f} + j\omega C_f\right)(1+A) + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_i} + j\omega(C_a + C_c + C_i)} \quad (1)$$

式中: A 为运算放大器的开环增益; Q 为电荷信号输出值; C_f 为反馈电容; R_f 为反馈电阻; C_a, R_a 为压电振动传感器的等效电容和等效电阻; C_c 为电缆电容; R_i, C_i 为运算放大器的输入电阻和输入电容。 R_a, R_i 和 R_f 很大, 则放大器的输出电压可表示为

$$U_o = \frac{-j\omega A Q}{j\omega(1+A)C_f + j\omega(C_a + C_c + C_i)} = \frac{-A Q}{(1+A)C_f + C_a + C_c + C_i} \quad (2)$$

开环增益 A 为 $10^4 \sim 10^8$ 量级。由于 $(1+A) \gg C_a + C_c + C_i$, 所以式(2)可简化为

$$U_o = \frac{-A Q}{(1+A)C_f} = -\frac{Q}{C_i} \quad (3)$$

由式(3)可得, 电荷放大电路的输出电压 U_o 与输入电荷 Q 成正比, 相关系数为反馈电容的倒数, 与输入频率和电缆电容都无关。

2.2 Q-V 设计

硅基钕酸锂压电 MEMS 振动传感器输出电荷量一般为 pC 级, 为了保证电荷信号能够被采集到, 所选择的运算放大器应具备低输入偏置电流、低输入失调电压、高输入阻抗和宽频带等特点。基于以上因素的考虑, 本文选用 JFET 输入式集成运放 TLE 2064 CDR, 其具有 0.9 mV 低输入失调电压、4 pA 极低输入偏置电流、 $10^{12} \Omega$ 以上的输入电阻和 2 MHz 的宽带范围。采用 15 V 双电

源对运放进行供电, 图 3 为 Q-V 转换电路。

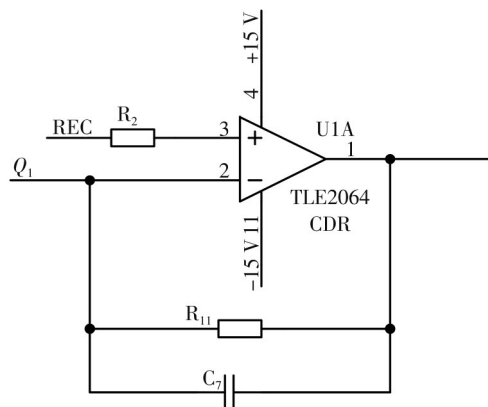


图 3 Q-V 转换电路

Fig. 3 Charge-voltage switching circuit

根据公式 $f_i = 1/(2\pi RC)$, 反馈电容 C_f (C_7) 和反馈电阻 R_f (R_{11}) 决定于电荷放大电路的下限截止频率。增大电阻 R_f 和电容 C_f 都能够改善电路的低频响应。但是增大 R_f , 时间常数越大, 反馈电容的放电速率变慢, 导致电路存在零漂现象; 增大 C_f , 由式(3)可知, 输出电压减小。综合考虑, 反馈电容设置为 200 pF, 反馈电阻 R_2 选择为 G Ω 级, 取 R_{11} 为 2 G Ω 。计算出 Q-V 电路的下限截止频率为 0.4 Hz。参考电压 REC 接入直流电压 +2.5 V。

2.3 滤波和电压放大电路

经过 Q-V 转换的电压信号还需滤除环境中的低频与高频无用信号, 经电压放大后通过示波器来进行数据采集。滤波电路设计如图 4 所示。

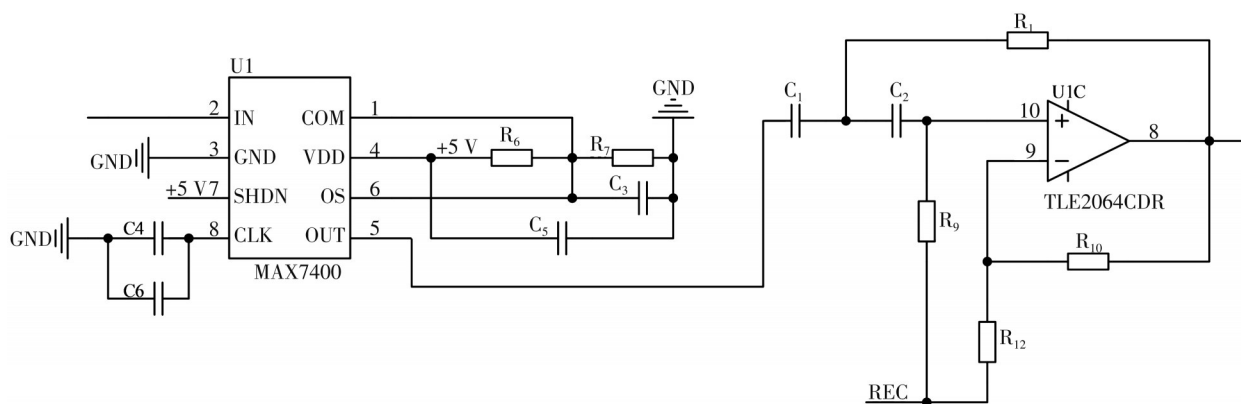


图 4 滤波和电压放大电路

Fig. 4 Filter and voltage amplifier circuit

本文基于 50~2 000 Hz 的工作频带对输出信号进行采集与处理。选用开关电容滤波器

MAX 7400 可以实现八阶低通椭圆型滤波功能。在时钟端 (CLK) 外接一个电容, 通过芯片内部的

时钟振荡电路控制电路的上限截止频率。根据芯片资料, MAX 7400 的振荡频率为

$$f_c = \frac{f_{clk}}{100}, \tag{4}$$

$$f_{osc}(\text{kHz}) = \frac{K \cdot 10^3}{C_{osc}(\text{pF})} \tag{5}$$

因此, CLK 外界电容值应为 180 pF。选取 C_4 为 30 pF, C_6 为 150 pF, 得到截止频率为 2.1 kHz。

通过对电路进行一级放大使转化的电压信号得到采集, 设计了电压放大电路, 本质是反相比例的运算放大电路, 可以得到 10 倍的放大增益。

为了滤除 50 Hz 以下低频信号的干扰, 采用压控电压源高通滤波电路^[11]。滤波电路的下限截止频率由电容 C_1, C_2 和电阻 R_1, R_9 调节^[12]。设计时需要选取大阻值电阻和小容值电容来提高电路的抗干扰能力。最终选取 R_{10} 为 51 Ω , R_1 为 56 k Ω , R_9 为 110 k Ω , R_{12} 为 100 k Ω , C_1, C_2 为 0.1 μF 。因此, 高通滤波电路的通带放大增益为 1。

2.4 输出电路和电源转换模块

采用直流稳压电源提供 $\pm 15\text{ V}$ 电压来保证电路正常工作, 但是 MAX 7400 为单电源(+5 V)供电芯片, 因此, 需要使用稳压器将 +15 V 的直流电压转化为 +5 V 的芯片供电电压。LM 78L05^[13] 作为一种三端稳压电压调整器, 具有低静态电流的特点, 并且能够独立工作, 不需要外加部件, 内部含有热过载保护功能和电流限制功能。稳压电路由稳压二极管与 51 Ω 的金属膜电阻组成。TLE 2064 CDR 的基准电压 +2.5 V 由 +5 V 直流电压分压得到。输入端使用去耦电容滤波, 提高电源抗噪声能力, 使电源稳定输出。

3 硬件实现与测试

3.1 电荷源测试

为了验证硬件电路的可行性, 使用电荷信号发生器模拟传感器电荷输入, 通过示波器采集各模块电路的输出电压^[14]。

对 Q-V 电路进行测试, 输入 $f=200\text{ Hz}$, $Q=5\sim 130\text{ pC}$, 通过示波器采集转换电压的数据, 结果如图 5 所示。输出电压在 40~700 mV 范围内变化, 输出电压随输入电荷的增加呈现正相关趋势, 并具有较好的线性关系($R^2=0.99$)。

对滤波和电压放大电路进行测试时, 输入

$Q=20\text{ pC}$, $f=200\text{ Hz}$, 通过示波器采集滤波前后的输出波形, 结果如图 6 所示^[15]。图 6(a, b)分别为滤波前后的输出波形, 可以看出, 滤波后的输出电压放大且波形更平滑规整, 信号纹波大幅减少, 电路具有很好的放大和滤波效果^[16]。

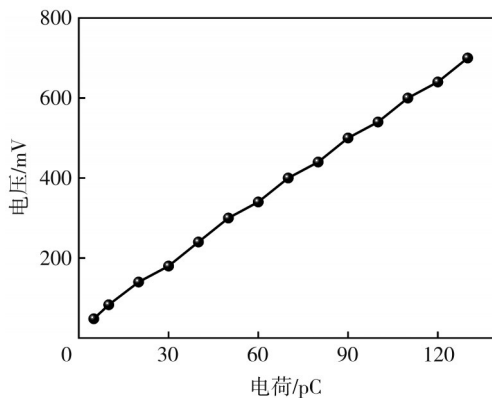
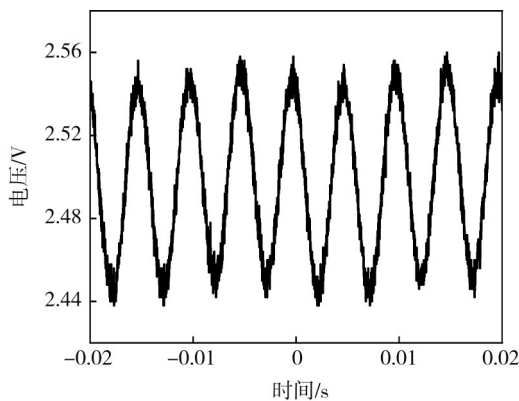
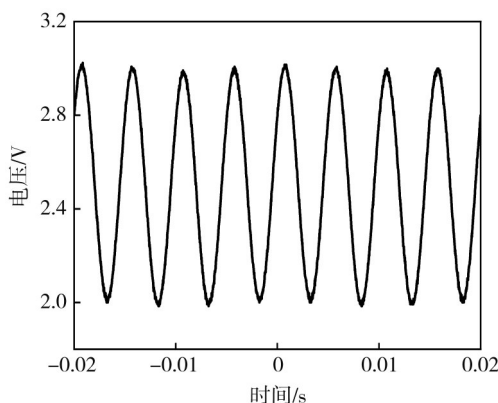


图 5 电荷-电压变化曲线图

Fig. 5 Charge-voltage curve



(a) 滤波前输出波形



(b) 滤波后输出波形

图 6 滤波前后输出波形

Fig. 6 Output waveform before and after filtering

对整个信号调理电路进行测试时, 输入 $f=200\text{ Hz}$, $Q=5\sim 130\text{ pC}$, 通过示波器采集整个电路的输出信号, 结果如图 7 所示。输出电压范围

为0.3~6.4 V,输出电压随输入电荷增加而增加,整个电路的放大增益为49.24,与理论放大倍数(50)的差异主要是由于电子元器件实际值与标称值存在偏差以及电路阻抗造成的,且整个电路具有较好的线性度($R^2=0.99$)。

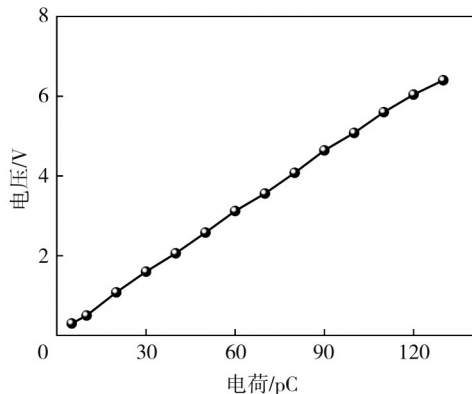


图7 电路输出波形

Fig.7 Circuit output waveform

3.2 振动台环境下调理电路测试

使用ACT 2000中元振动台施加不同频率和不同加速度的振动信号,对硅基铌酸锂压电MEMS振动传感器采用调理电路进行测试。

该系统由振动台、信号发生器、功率放大器、示波器、硅基铌酸锂压电传感器器件和采集电路(标准电荷放大器和本设计的信号调理电路)组成^[17]。通过信号发生器产生正弦激励,利用功率放大器驱动振动台振动。将压电MEMS振动传感器固定在振动台上,由振动台产生的不同振动信号作用于传感器上,使用示波器分别采集标准电荷放大器和本设计的调理电路的输出信号进行对比。振动信号采集系统如图8所示。

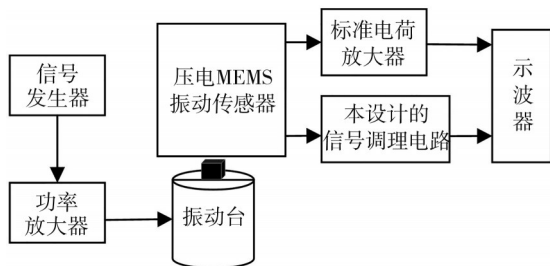
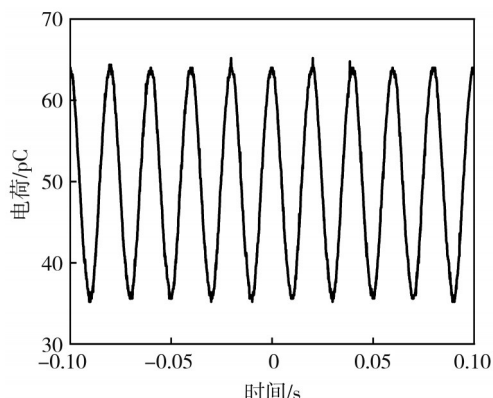


图8 振动信号采集系统

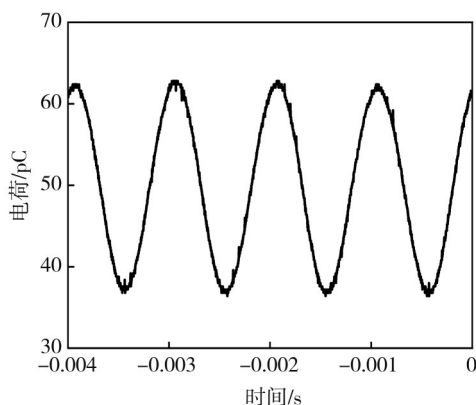
Fig.8 Vibration signal acquisition system

图9为采用本设计的信号调理电路采集的电荷信号,其中振动台的输入激励为 $ACC=5g$ 。图9(a)为输入频率 $f=50\text{ Hz}$ 时,采集的输出电荷信号峰峰值为30 pC;图9(b)为输入频率 $f=1\text{ 000 Hz}$ 时,采集的输出电荷信号峰峰值为

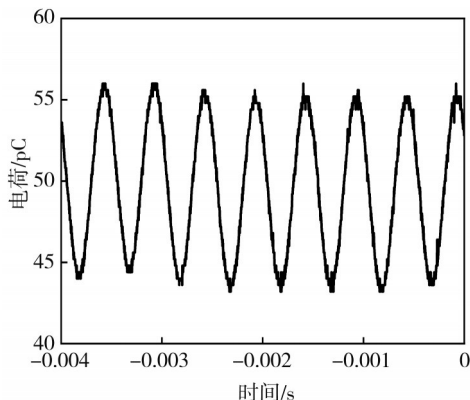
26.8 pC;图9(c)为输入频率 $f=2\text{ 000 Hz}$ 时,采集的输出电荷信号峰峰值为14 pC。不同激励频率下,采集到的输出电荷呈现下降的趋势。可以看出,从示波器中提取到的输出信号为正弦波,信号波形无明显畸变。正弦信号存在偏置,主要是由于电路中存在2.5 V的偏置电压导致的。结果表明所设计的调理电路能无失真地采集压电式MEMS传感器的电荷输出信号。



(a) 测试频率50 Hz



(b) 测试频率1 000 Hz

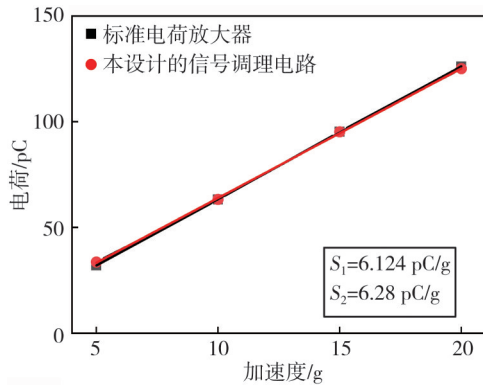


(c) 测试频率2 000 Hz

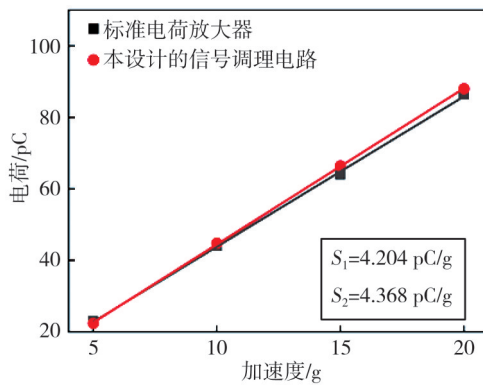
图9 输出电荷波形

Fig.9 Output charge waveform

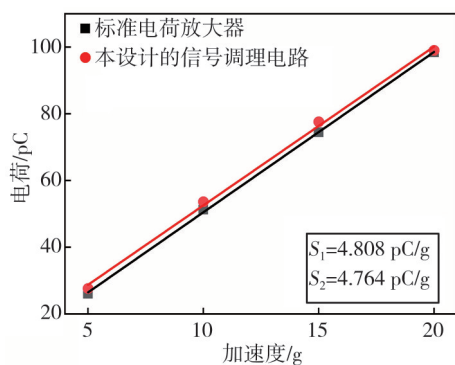
此外,当振动台分别产生 5~20 g 范围内的振动信号时,采集了标准电荷放大器和信号调理电路对不同频率下的输出电荷信号的响应,测试结果如图 10 所示,为不同频率下的输出电荷灵敏度对比。其中, S_1 为标准电荷放大器的电荷灵敏度, S_2 为信号调理电路的电荷灵敏度。



(a) 输入频率为 100 Hz



(b) 输入频率为 500 Hz



(c) 输入频率为 1 000 Hz

图 10 输出电荷灵敏度

Fig. 10 Output charge sensitivity

分析数据可得出: 振动频率 $f=100$ Hz 时, 标准电荷放大器和信号调理电路的电荷灵敏度差值为 -0.156 pC/g; 频率 $f=500$ Hz 时, 标准电荷放大器和信号调理电路的电荷灵敏度差值

为 -0.164 pC/g; 频率 $f=1000$ Hz 时, 标准电荷放大器和信号调理电路的电荷灵敏度差值为 0.044 pC/g。结果表明, 信号调理电路与标准电荷放大器的电荷灵敏度具有很好的一致性, 且输出电荷和输入加速度具有很好的线性相关性。

在振动台上产生 5 g 的激振, 研究信号调理电路对于宽频范围内的输出电荷采集能力, 并使用标准电荷放大器进行输出电荷对比。计算出不同频率下的电荷偏差值, 结果如表 1 所示。 Q_1 为标准电荷放大器的输出电荷值, Q_2 为信号调理电路的输出电荷值。频率在 50~2 000 Hz 时, 信号调理电路的输出特性与标准电荷放大器的输出特性相吻合, 呈现相同的变化趋势。输入加速度 $ACC=5$ g 时, 输出电荷偏差控制在 ± 1.6 pC 内, 具有很好的一致性, 可以满足 5~130 pC 的宽输入电荷的采集。综上所述, 信号调理电路和标准电荷放大器基本一致, 对于压电 MEMS 振动传感器高频微振信号采集具有良好的应用价值。

表 1 $ACC=5$ g 时性能测试表

Tab. 1 Performance test sheet at $ACC=5$ g

f/Hz	Q_1/pC	Q_2/pC	Q_1-Q_2/pC
50	31.6	30	1.6
100	32.4	33.2	-0.8
200	21.2	21.6	-0.4
300	20.8	21.2	-0.4
500	22.4	23.6	-1.2
600	23.6	24.4	-0.8
700	26.4	26.4	0
800	25.6	26	-0.4
1 000	27.2	26.8	0.4
1 200	22.4	23.2	-0.8
1 400	17.6	18.8	-1.2
1 600	14	14.8	-0.8
1 800	5.4	6.8	-1.4
2 000	15.2	14	1.2

4 结 论

本文根据铌酸锂单晶薄膜压电 MEMS 振动传感器输出电荷微弱的问题, 设计了具有信号放大功能和滤波功能的信号调理电路, 并将其与标准电荷放大器的采集性能进行对比。结果显示, 当振动台的输入加速度激励为 5~20 g, 测试频带为 50~2 000 Hz 时, 输出电荷与输入加速度存在较好的线性度 ($R^2=0.99$), 信号调理电路与标准电荷放大器的电荷灵敏度具有很好的一致性。输入加速度为 5 g 时, 输出电荷偏差控制在 ± 1.6 pC 内, 具有很好的一致性, 可以满足 5~130 pC 的宽输入电荷的采集。综上所述, 所设计的信号调理电路

输出性能稳定,且具有集成度高、灵敏度好、频带宽等特点,在高频微振信号采集与检测领域中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] JU M, DOU Z, LI J W, et al. Piezoelectric materials and sensors for structural health monitoring: fundamental aspects, current status, and future perspectives[J]. *Sensors*, 2023, 23: 543.
- [2] 王天资, 章建文, 张磊, 等. 抗电磁宽频率响应 IEPE 型压电式振动传感器设计研究[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(1): 9-14.
WANG Tianzi, ZHANG Jianwen, ZHANG Lei, et al. Design and research of IEPE piezoelectric vibration sensors with anti-electromagnetic interference and wide frequency response[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(1): 9-14. (in Chinese)
- [3] JIANG X, KIM K, ZHANG S, et al. High-temperature piezoelectric sensing [J]. *Sensors*, 2013, 14 (1) : 144-169.
- [4] 曾宏川, 彭斌, 张万里. 基于 CTGS 的高温压电加速度传感器研究[J]. *压电与声光*, 2021, 43(3) : 320-323.
ZENG Hongchuan, PENG Bin, ZHANG Wanli. Research on high temperature piezoelectric acceleration sensor based on CTGS [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(3): 320-323. (in Chinese)
- [5] 陈豪. 面向呼吸监测的柔性压电薄膜传感器设计及实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [6] 张斌婷, 闫保军, 刘术林, 等. 适用于电子倍增器件的电荷灵敏放大器的设计[J]. *红外技术*, 2022, 44(8): 792-797.
ZHANG Binting, YAN Baojun, LIU Shulin, et al. Design of charge-sensitive amplifiers for electron multipliers [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(8) : 792-797. (in Chinese)
- [7] 任勇峰, 尉易庆, 贾兴中. 一种微弱电荷信号的调理电路设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(3): 86-90.
REN Yongfeng, WEI Yiqing, JIA Xingzhong. Design of weak charge signal conditioning circuit [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(3) : 86-90. (in Chinese)
- [8] 魏慧芬, 穆继亮, 耿文平, 等. 铌酸锂单晶悬臂梁 MEMS 振动传感器的性能[J]. *微纳电子技术*, 2022, 59(7): 665-671.
WEI Huifen, MU Jiliang, GENG Wenping, et al. Performances of MEMS vibration sensor based on LiNbO₃ single-crystal cantilever-beam[J]. *Micronano-electronic Technology*, 2022, 59(7) : 665-671. (in Chinese)
- [9] 董方旭, 凡丽梅, 段剑, 等. 空气耦合超声信号调理电路的设计[J]. *测试技术学报*, 2023, 37(3): 253-259.
DONG Fangxu, FAN Limei, DUAN Jian, et al. Design of air-coupled ultrasonic signal conditioning circuit [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2023, 37(3) : 253-259. (in Chinese)
- [10] 梁鑫, 徐慧. 压电加速度传感器测量电路的设计[J]. *压电与声光*, 2015, 37(2): 354-356.
LIANG Xin, XU Hui. The design of the measurement circuit of piezoelectric accelerometer [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2015, 37(2) : 354-356. (in Chinese)
- [11] 董康, 焦新泉, 贾兴中. 冲击变换器调理电路的性能优化设计[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(9) : 128-134.
DONG Kang, JIAO Xinquan, JIA Xingzhong. Performance optimization design of shock converter conditioning circuit [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(9) : 128-134. (in Chinese)
- [12] 闫佳伟, 张丕状, 倪沛东, 等. WMS 温度测量中谐波信号锁相放大器的设计[J]. *测试技术学报*, 2023, 37(3): 214-220.
YAN Jiawei, ZHANG Pizhuang, NI Peidong, et al. Design of harmonic signal lock-in amplifier for temperature measurement in WMS temperature [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2023, 37(3) : 214-220. (in Chinese)
- [13] 田智文. 一种带有保护电路的直流稳压电源的设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [14] 陈梦凡. 基于 PZT 压电传感器的肺音监测装置研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [15] 刘鹏飞. LC 谐振式耐高温加速度传感器的设计 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [16] 李照华, 焦新泉, 贾兴中. 一种压电加速度传感器调理电路设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2017(10) : 10-13.
LI Zhaohua, JIAO Xinquan, JIA Xingzhong. Design of piezoelectric acceleration sensor conditioning circuit [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(10) : 10-13. (in Chinese)
- [17] 李章承, 杨灿, 贺慧勇. 双传感器法提高电动振动台低频采集精度研究[J]. *环境技术*, 2021, 39(4) : 11-15.
LI Zhangcheng, YANG Can, HE Huiyong. Research on improving low frequency acquisition accuracy of electric shaking table by dual-sensor method [J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(4) : 11-15. (in Chinese)