

一种压阻式传感器信号调理电路的设计

李艳^{1*}, 石云波¹, 赵锐¹, 张志峰²

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 山西北方机械制造有限公司, 山西 太原 030051)

摘要: 由于压阻式 MEMS 传感器输出信号极其微弱, 极易受到测试环境的噪声干扰, 还需要外接调理电路, 为了提升信号的采集精度, 提出一种压阻式传感器信号 ASIC 调理电路的设计方案, 实现输出信号的放大、滤波功能。测试结果表明, 调理电路可以在 10 ~ 200 倍的范围内调节增益, -0.5 dB 截止频率调节范围覆盖 0.1 ~ 20 kHz; 低频范围内, 芯片的等效噪声为 45 nV/√Hz。将调理电路与传感器相结合, 改进的测试系统响应速度快, 滤波效果更好, 测试精度优于 5%, 传感器非线性为 5.4%。同时, 调理电路的大小和体积也很小, 功耗低, 对后续继续研究传感器测试系统有重要意义。

关键词: 压阻式; 信号调理; 放大; 滤波; 灵敏度

中图分类号: TP212; TN43

文章编号: 1000-0682(2024)02-0010-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.002

Design of a piezoresistive sensor signal conditioning circuit

LI Yan^{1*}, SHI Yunbo¹, ZHAO Rui¹, ZHANG Zhifeng²

(1. State Key Laboratory of Testing Technology, North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi North Machinery Manufacturing, Shanxi Taiyuan 030051, China)

Abstract: As the output signal of piezoresistive MEMS sensor is extremely weak, it is easy to be disturbed by the noise of the test environment, and an external conditioning circuit is needed. In order to improve the signal acquisition accuracy, a design scheme of the piezoresistive sensor signal ASIC conditioning circuit is proposed to realize the amplification and filtering functions of the output signal. The test results show that the control circuit can adjust the gain in the range of 10 ~ 200 times, and the adjustment range of -0.5 dB cutoff frequency covers 0.1 ~ 20 kHz. In the low frequency range, the equivalent noise of the chip is 45 nV/√Hz. By combining the conditioning circuit with the sensor, the improved test system has fast response speed, better filtering effect, test accuracy is better than 5%, and the sensor nonlinearity is 5.4%. At the same time, the size and volume of the conditioning circuit are also small, and the power consumption is low, which is of great significance for the follow-up research on the sensor test system.

Keywords: piezoresistive; signal conditioning; amplification; filtering; sensitivity

0 引言

微电子工艺与技术的发展是人类历史上向科技

进步迈出的重大一步。微机电系统是在微电子工艺的基础上发展起来的^[1], 是集成电路技术与微电子共同发展的成果。其中, 压阻式加速度传感器^[2]是 MEMS 的一个杰出的代表, 它的工作原理是基于半导体的压阻效应, 属于最早研发的加速度传感器。

近年来, MEMS 实现了器件与设备的微型化, 具有准度高、功耗低、可靠性高等优点^[3], 在军事与

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 山西省基础研究计划面上项目(202103021224206)

第一作者: 李艳(1999—), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要研究方向为压阻式 MEMS 加速度传感器信号调理电路设计与优化。

民用领域得到了广泛的应用。但是受到输出信号极其微弱的限制^[4],往往需要在器件的外围设计适合的接口电路来满足测试需求。

结构敏感单元与后级的接口电路共同决定着传感器的性能^[5-6],两者相辅相成缺一不可。例如,卡内基·梅隆大学^[7]基于相敏调制解调原理,设计了一款连续时间微加速度计接口 ASIC。通过相敏解调法实现了高精度解调,从而极大程度提高了信号的质量和可靠性,但是电路集成度不高,芯片之间会产生相互干扰。针对不同的测试环境,Masahiko 等人^[8]设计了一个可以检测低频处各种微弱信号的专用集成电路,该电路由仪表运放、电荷放大器和一个Σ-Δ型 ADC 组成,其缺点是电路的转换时间比较长,在某些特殊场景下无法使用。Yu - Ting Jhong 等人^[9]设计了一款针对生物信号的模拟电路,电路包括放大器、低通滤波器和快速恢复环路,这是一个闭环系统,在极端环境下信号会出现偏移,不具有良好的稳定性。

随着近年来国家大力发展集成电路产业,国内多个公司以及高校研究团队^[10]对接口电路的研究还是取得了不少成绩。例如,电子科技大学团队设计的可编程增益的信号调理电路,电路通过改变反馈网络电阻阻值,实现从 -4 dB ~ 63.7 dB。

总体来说,压阻式传感器的信号调理电路大部分还是板级电路^[11],集成度低,体积大,功耗高。这对压阻式传感器的快速发展是非常不利的,针对此问题,本文提出了一种压阻式传感器的信号调理电路。

1 设计思路

该文提出的压阻式 MEMS 传感器调理电路的整体思路如下。

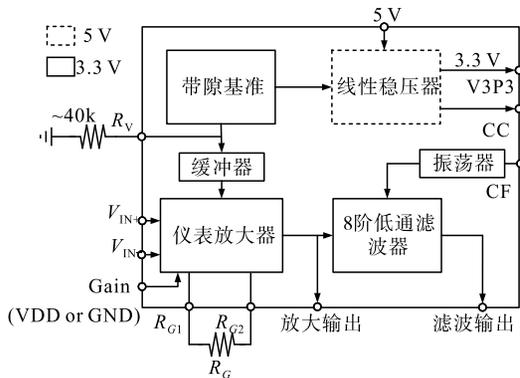


图1 调理电路设计思路图

ASIC 电路主要实现信号的放大以及滤波调理

功能,同时为了提高电路的稳定性,还研究了高精度带隙基准源和线性稳压器。整体设计思路如图 1 所示,ASIC 主要功能如下:

(1) 仪表放大器:对压阻式加速度计的差分电桥输出电压进行放大,可实现增益 10 ~ 200 倍范围内的调节。第一级增益由外置电阻 R_G 配置,第二级增益分为 1 和 10 倍两个档位,通过 Gain 引脚的高低电平切换,并将差分输入电压转换为单端输出;

(2) 低通滤波器:滤除仪表放大器输出电压中的高频成分,限制输出带宽。其中滤波阶数为 8 阶,提高设计灵活性, -0.5 dB 截止频率调节范围 0.1 ~ 20 kHz,倍频衰减 >30 dB。

2 电路的详细设计和仿真

2.1 仪表放大电路

仪表放大电路的重点在于实现压阻加速度传感器输出电压的低噪声准确放大。该文采用典型三运放差分输入结构,如图 2 所示。

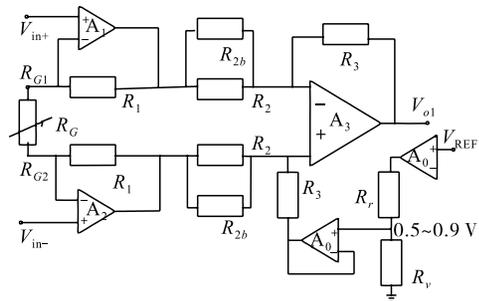


图2 仪表放大器原理图

输入运放 A₁、A₂ 抑制前端传感器共模输入, A₃ 实现对差分输入的放大,并将其转换为单端输出。仪表放大器的输出电压增益表达式为

$$V_0 = V_{REF} + (V_{in+} - V_{in-}) \left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) \frac{R_3}{R_2} \quad (1)$$

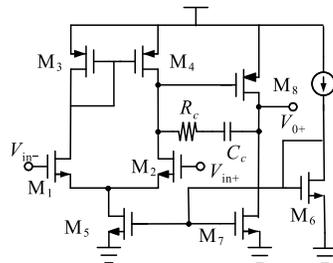


图3 两级密勒放大器结构图

运算放大器为仪表放大器设计中的核心电路,在设计中 A₁ ~ A₃ 均要求具有低输入电压噪声、高增益带宽积及大输出摆幅,因此三者采用同一放大器结构。如图 3 所示, M₁ ~ M₄ 构成第一级放大结构,

其增益为:

$$A_1 = g_{m1,2}(r_{o2} \parallel r_{o4}) \quad (2)$$

M_7, M_8 构成二级放大结构,对第一级输出进行再次放大,其增益为:

$$A_2 = g_{m8}(r_{o7} \parallel r_{o8}) \quad (3)$$

二级放大器的总增益为:

$$A_0 = g_{m1,2}(r_{o2} \parallel r_{o4})g_{m8}(r_{o7} \parallel r_{o8}) \quad (4)$$

为了提高二级放大器的增益带宽积,在一二级放大器间插入补偿电阻 R_c 及电容 C_c ,其所引入的零点频率为:

$$\omega_z \approx -\frac{1}{C_c(1/g_{m8} - R_c)} \quad (5)$$

因此可通过补偿电阻的合理设计补偿放大器的第二极点,使之成为单极点系统,其增益带宽积为:

$$GBW = \frac{g_{m1}}{C_c} \quad (6)$$

运用两级结构,由于输出级无偏置电流源,因此有助于放大器实现更高的输出摆幅,其输出摆幅可表示为:

$$V_{swing} = V_{DD} - |V_{gs7} - V_{th7}| - |V_{gs8} - V_{th8}| \quad (7)$$

由于放大器的电源抑制比及共模抑制比均正比于晶体管沟道长度,因此在设计中采用了长沟道晶体管,其电源抑制比为:

$$PSRR = g_{m1,2}(r_{o2} \parallel r_{o4}) \quad (8)$$

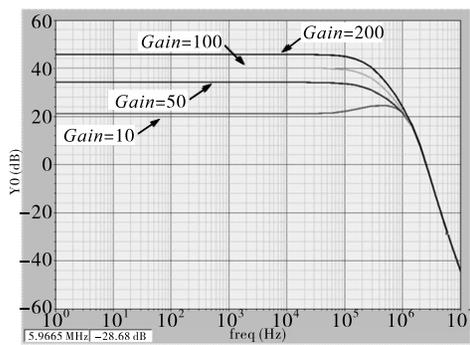
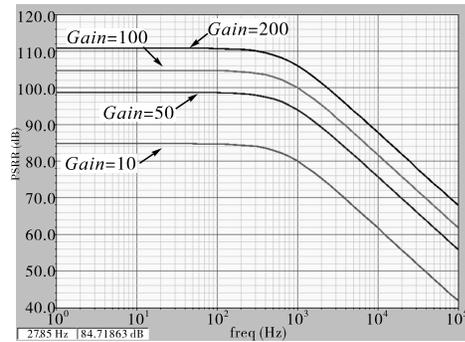
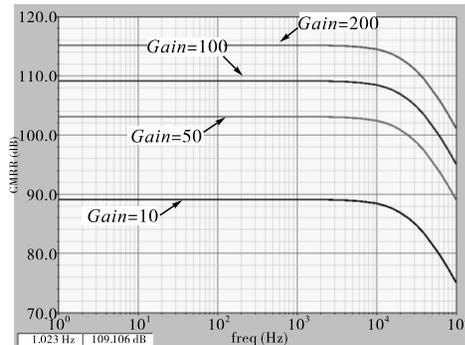


图 4 仪表放大器幅频特性曲线

使用 Cadence 软件进行仿真测试。图 4 所示为其不同增益情况下幅频曲线仿真结果。通过电阻 R_G 的调节,仪表放大器可实现 10 ~ 200 倍的增益范围,增益为 100 倍情况下对应的 -3 dB 带宽大于 100 kHz,典型增益带宽积大于 10 MHz。完成仪表放大器功能性验证后,对其电源抑制比及输入共模抑制比进行仿真,结果如图 5 所示。当信号增益为 10 倍时,电源抑制比为 85 dB,输入共模抑制比为 88 dB,满足了设计要求。



(a) 仪表放大器电源抑制比仿真曲线



(b) 共模抑制比仿真曲线

图 5 电源抑制比及输入共模抑制比进行仿真

2.2 低通滤波电路

压阻式 MEMS 传感器输出的信号一般在 μV 级,在实际的测试环境中由于外界环境的干扰,会很容易受到噪声信号的影响,从而在电路中出现混叠现象。为保证信号的采样精度,增加了滤波电路。

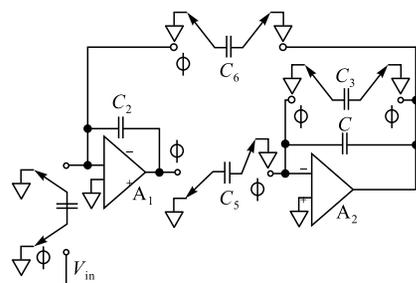


图 6 二级低通滤波器原理图

为了实现大于 30 dB 的倍频衰减,并且截止频率可以在 20 kHz 以内进行调节,设计采用了开关电容原理的滤波器结构。整体采用八阶巴特沃斯低通滤波器,滤波原理是以四级二阶低通滤波器级联来实现整体的滤波效果。如图 6 所示是二级低通滤波器的原理图。表 1 列出了四级电路的品质因数,品质因数的大小影响低通滤波器在截止频率处幅频特性的形状。

表 1 低通滤波器品质因数

电路级数	品质因数 Q
第一级	0.51
第二级	0.6
第三级	0.9
第四级	2.6

对所设计的低通滤波器进行频率特性仿真,如图 7 所示,滤波器在其截止频率处对应的衰减均小于 0.5 dB,带宽外衰减斜率为 -120 dB/dec ,倍频衰减 $> 30 \text{ dB}$ 。

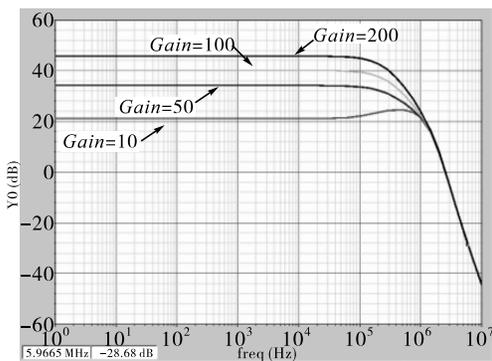


图 7 低通滤波器频率特性仿真曲线

3 电路功能性验证

通过仿真验证了设计的合理性,各项设计功能都能达到预期的效果,使用 TSMC $0.35 \mu\text{m}$ 工艺对设计的调理电路进行流片。最后对芯片进行测试,通过芯片功能性验证和传感器验证,同时对测试结果进行分析。

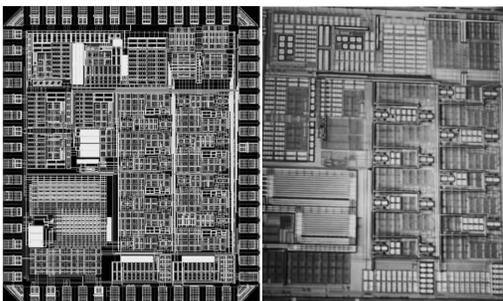
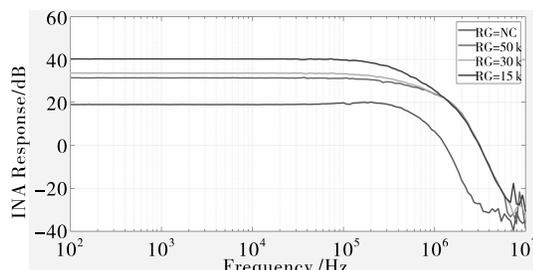


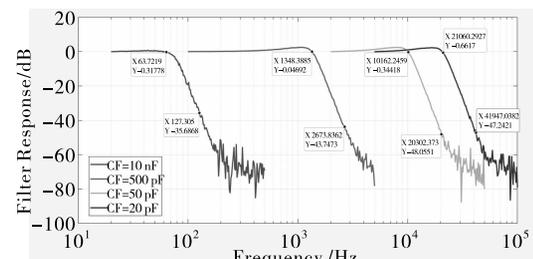
图 8 ASIC 版图与芯片

3.1 调理电路芯片验证

通过 Analog Discovery (包括信号发生、ADC 以及网络分析仪等功能)、NI 数据采集卡以及频谱分析仪等对设计的 ASIC 的关键性指标进行测试。



(a) 仪表放大器频率响应测试曲线



(b) 通滤波器频率响应测试曲线

图 9 不同增益配置情况下的频率响应特性测试曲线

对 ASIC 在不同增益配置情况下的频率响应特性进行测试,通过设置 $100 \text{ Hz} \sim 10 \text{ MHz}$ 范围内扫频,得到如图 9(a) 所示的频率响应。同时,对 ASIC 在不同滤波电容配置情况下的频率响应特性进行测试,得到如图 9(b) 所示的频率响应。

测试结果表明,仪表放大器可以在 $10 \sim 200$ 倍的范围内调节增益。增益为 100 时, -3 dB 带宽大于 100 kHz ,增益带宽积大于 10 MHz 。CMRR(共模抑制比)和 PSRR(电源抑制比)均大于 70 dB 。滤波器截止频率可由外置电容控制, -0.5 dB 截止频率调节范围覆盖 $0.1 \text{ k} \sim 20 \text{ kHz}$ 。低频范围内,芯片的等效噪声为 $45 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。这些参数表明该接口 ASIC 具有良好的性能指标,可以实现传感器的信号放大和滤波处理。

3.2 传感器验证

对 ASIC 电路性能验证完成后,将电路与压阻式 MEMS 传感器相结合,再次对调理电路进行传感器实验验证。使用激光绝对法进行校准,主要使用霍普金森杆、激光干涉仪以及数据采集卡来实现。

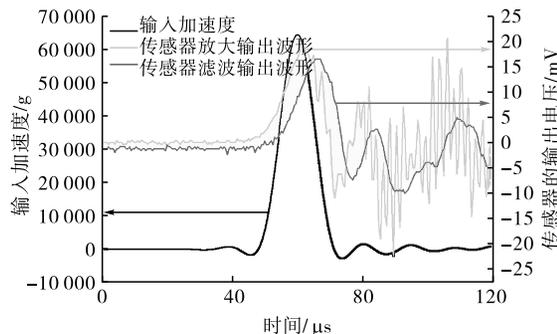


图 10 测试曲线

该文选择的加速度传感器量程为 100 000 g, 结构参数精度为 $\pm 1\%$, 对传感器性能影响较小。传感器的测试曲线如图 10 所示, 可以明显看出, ASIC 可以同步放大加速度传感器在冲击载荷下的响应信号, 并且能够进行有效滤波。

对传感器进行灵敏度测试, 测试结果表明, 传感器的平均灵敏度为 $0.266\ 4\ \mu\text{V/g}$, 测试精度优于 5%。同时, 通过最小二乘法对多普勒加速度和输出电压进行线性拟合, 得到传感器的线性度为 5.4%。可以看出, 冲击灵敏度线性度较好, 加速度传感器冲击灵敏度具有很好的一致性, 说明加速度传感器在动态测试过程中具有很好的动态性能。

4 结论

基于压阻式 MEMS 传感器输出信号小, 容易受到极端恶劣测试环境的影响, 该文设计了信号调理电路, 面积为 $1787\ \mu\text{m} \times 2048\ \mu\text{m}$ 。将输出信号直接通过键合的方式与测试电路相连, 与传统的测试方法相比, 解决了在某些测试条件下对传感器测试系统体积的要求, 通过传感器实验验证, 测试精度优于 5%, 传感器的非线性为 5.4%。同时, 测试结果表明, 调理电路可以在 10~200 倍的范围内调节增益, $-0.5\ \text{dB}$ 截止频率调节范围覆盖 $0.1\ \text{kHz} \sim 20\ \text{kHz}$; 低频范围内, 芯片的等效噪声为 $45\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

总之, 采用信号调理芯片可以简化传统的外围电路设计, 大大缩小了电路的面积和体积; 减少了传统板极电路间连接线上的干扰, 噪声低, 提高了整个测试系统的精度; 冲击下, 调理电路的稳定工作, 提升了传感器测试的可靠性, 对于压阻式 MEMS 传感器更好地应用于测试领域有着非常重要的意义。

参考文献:

- [1] 王浩. MEMS 加速度计传感器专用 ASIC 简介及设计[J]. 中国集成电路, 2019, 28(7): 35-40+88.
- [2] 赵源. 压阻式加速度传感器的设计与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [3] 李思颖. 压阻式压力传感器的补偿电路设计[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2013.
- [4] 赵广胜, 夏国明, 裘安萍, 等. 一种硅微谐振式加速度计频率读出方法与 ASIC 实现[J]. 半导体技术, 2022, 47(4): 307-312+331.
- [5] 周毓. 压阻式 MEMS 压力传感器专用集成电路设计[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020.
- [6] 滕建财, 陈聪鹏, 郭航. 压阻式压力传感器中的信号调整[J]. 仪表技术与传感器, 2009(B11): 3.
- [7] WU J. Sensing and control electronics for low-mass low-capacitance MEMS accelerometers[D]. Carnegie Mellon University, 2002.
- [8] MARUYAMA M, TAGUCHI S, YAMANOUE M, et al. An analog front-end for a multifunction sensor employing a weak-inversion biasing technique with 26 nVrms, 25 aCrms, and 19 fArms input-referred noise[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(10): 2252-2261.
- [9] JHONG Y T, HUANG P C. An analog front-end with fast motion artifact recovery for bio-signal recording[C]//2016 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). IEEE, 2016: 1-4.
- [10] 黄奇峰. MEMS 压力传感器芯片的数字信号调理与设计实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [11] 吕伟. 用于无线传感网络的逐次逼近型模数转换器研究与实现[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2014.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号: 52-49 国际发行代号: BM529 定价: 18.00 元/期 108.00 元/年
 地址: 西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编: 710075 电话: 029-81871277
 网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: gyybbjb@126.com