

面向 MEMS 加速度传感器的仪表放大器的设计与实现

邢万里

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 加速度传感器已经广泛应用于军事、工业、环境监测等领域, 已经成为热点的研究对象, 但是器件的小型化与可靠性成为限制该技术发展的重要瓶颈; 因此, 针对新型硅基 MEMS 加速度传感器的信号处理电路小型化的问题, 提出了一种与 MEMS 技术完全兼容基于 CMOS 工艺的片上集成运算放大器电路; 通过提取分析相关加速度传感器的性能参数, 设计低功耗、低噪声且符合精度等特殊要求的前置放大器; 同时对集成仪表放大器的主要电路特性和功耗进行了仿真分析; 从仿真结果看, 设计的三运放仪表放大器的关键参数—共模抑制比可以到达 101 dB, 整体性能良好; 完成了对仿真结果的版图设计和验证, 继而在华润上华 0.5 μm CMOS 标准工艺线上进行了流片, 完成了芯片的封装测试, 该测试结果显示运放的增益能够达到 42 dB, 功耗仅为 5.25 mW, 符合预期的设计目标。

关键词: 片上集成; 仪表放大器; 共模抑制比; 低功耗

Design and Realization of Instrument Amplifier for MEMS Acceleration Sensor

Xing Wanli

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: Acceleration sensor has been widely used in military, industrial, environmental monitoring and other fields, which has become a hot research object. But the miniaturization and reliability of the device becomes an important bottleneck to limit the development of the technology. Therefore, downsizing the signal processing circuit for a novel silicon based MEMS accelerometer. This paper presents an on-chip integrated operational amplifier circuit based on CMOS, which is fully compatible with MEMS. A preamplifier with low power consumption, low noise and accuracy is designed by extracting the performance parameters of the relevant acceleration sensor. At the same time, the main circuit characteristics and power consumption of the integrated instrumentation amplifier are simulated and analyzed. From the results, the design of the three—amplifier instrumentation amplifier key parameters — common mode rejection ratio can reach 101dB, the overall performance is good. Completed the simulation results of the layout design and verification. And then in the CSMC 0.5 μm CMOS standard process line on the film, completed the chip packaging test. The test results show that the op amp's gain can reach 42 dB, power consumption is only 5.25 mW, in line with the expected design goals.

Keywords: integrated on—chip; instrumentation amplifier; the common—mode rejection ratio; low power consumption

0 引言

近年来电子技术不断发展, 使运算放大电路得到了非常广泛的应用。而仪表放大器实际上是一种差分电压放大器, 它主要由运算放大器构成, 但各方面性能却要远远优于运算放大器。仪表放大器把关键元器件集成在了放大器的内部, 可以只通过外接电阻 R_g 来实现增益可调。由于仪表放大器具有高共模抑制比、高的输入阻抗、低的输出阻抗等特点, 使其在数据采集、传感器信号放大、医疗设备和高档音响设备等方面备受青睐^[1-3]。

新型的压阻式硅微加速度传感器应用十分广泛。其突出特点便是采用了差分电容结构, 通过差分电容的改变来反映加速度的变化。但是压阻式加速度传感器必须和高精度的读出电路相匹配^[4-6]。随着硅微加速度传感器的应用越来越广泛, 因此

对其相匹配的读出电路也提出来更高的要求。同时, 随着 MEMS 技术和大规模集成电路技术的发展, 加速度传感器也逐渐向集成化、低功耗的方向发展, 要求我们把微硅传感器与读出电路集成到一块芯片上, 构成片上系统^[7-8]。但是目前国内还罕有电容式微硅加速度读出电路的成品, 更没有将其集成到一块芯片上的产品, 这使得其应用受到了很大的限制。

本文针对 MEMS 加速度传感器读出电路的片上系统中的仪表放大器进行了 CMOS 集成电路设计, 进行了相关仿真实验, 根据仿真结果进行了版图设计。最终完成了运放电路芯片的流片、封装与测试。

1 MEMS 加速度传感器的基本原理

本文所设计的运算放大器主要是面向一种压阻式加速度传感器, 该型加速度传感器是在研究硅的压阻效应的基础上, 结合了 MEMS 技术, 所设计出的一种新型的加速度传感器, 其测量原理就是通过利用特殊设计的压敏电阻构成的惠斯通电桥上电信号的变化测量加速度的大小。该型加速度传感器是在标准的 MEMS 工艺线上加工制作而成, 它将压敏电阻安放在 4

收稿日期:2017-05-18; 修回日期:2017-08-08。

作者简介:邢万里(1995-),男,山东滕州人,大学生,主要从事自动化方向的研究。

个悬臂梁的力学敏感节点上，再将一个刚性圆柱体固定在 4 个悬臂梁微结构的中心连接点处，如图 1。

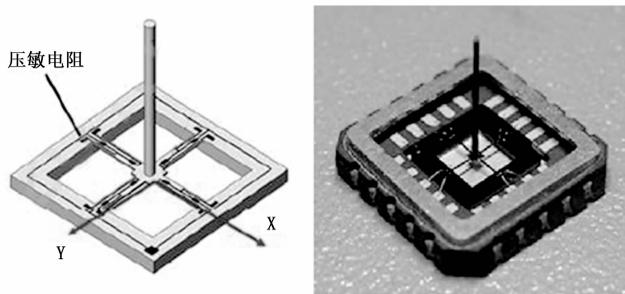


图 1 MEMS 加速度传感器

由于将压敏电阻安放在了悬臂梁的敏感节点处，我们通过压阻效应的基本原理能够进一步得知，悬臂梁上力学敏感节点的应变可以通过压敏电阻的阻值改变来感知。所以，一旦有加速度应变作用在刚性圆柱体上的时候，圆柱体会将感受到的力学应变传递给悬臂梁，使悬臂梁产生应力变化，安放在其上面的压敏电阻的电阻值就会随之发生变化。同时，我们是按照惠斯通电桥的方式连接的四块压敏电阻，通过在它上面外加的直流激励，惠斯通电桥的阻值变化就转变成了电学信号，从而实现加速度信号的探测。在没有应力作用下的时候，X 轴电桥的输出信号能够表示为：

$$V_{outAx}(\sigma=0) = \frac{(R_1 R_3) - (R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{in} = 0 \quad (1)$$

其中： V_{in} 是输入电压信号。

当没有应力作用的时候， $R_{AX1} = R_{AX2}$ ，电桥为平衡状态。当有应力作用的情况下，X 轴上的的压敏电阻阻值就会发生变化，X 轴电桥的输出电压记为：

$$V_{outAx} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 - \Delta R_4)} V_{in} \quad (2)$$

此时有， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ， $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$ 。

式 (2) 可以记为：

$$V_{outAx} = \frac{\Delta R}{R} V_{in} \quad (3)$$

2 电路设计与仿真

仪表放大器是在噪声存在的条件下放大小信号的器件。它的工作原理是利用差模小信号叠加在较大的共模信号之上的特性，并能够有效的去除共模信号，而又同时将差模信号放大。衡量仪表放大器性能的关键参数是共模抑制比，这个参数用来衡量差分增益与共模衰减之比^[9-10]。仪表放大器是传感电路系统中的重要模块，它的性能直接决定了传感器的品质。

2.1 仪表放大器的电路设计

本文中采用三运放的仪表放大器，如图 2 所示，由 3 个运算放大器组成，其中前两个运放构成同相比例放大器，输入电阻大，并且电路完全对称，共模抑制比高，第 3 个放大器实现差动放大器的功能，实现电路相减功能。因此图中输出电压有：

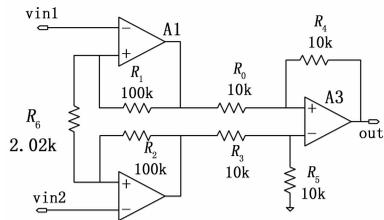


图 2 三运放仪表放大器

$$V_{OUT} = \frac{R_3}{R_2} (u_{o2} - u_{o1}) \quad (4)$$

$$u_{o2} - u_{o1} = 2u_{R1} + u_{Rg} \quad (5)$$

又根据放大器“虚短”和“虚断”的概念，有：

$$u_{Rg} = V_{in2} - V_{in1} \quad (6)$$

$$I_{Rg} = I_{R1} = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{R_g} \quad (7)$$

因此有：

$$u_{o2} - u_{o1} = 2 \times R_1 \times I_{R1} + u_{Rg} \quad (8)$$

$$A_u = \frac{V_{OUT}}{V_{in2} - V_{in1}} = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_g} \right) \quad (9)$$

仪表放大器的电路中有 7 个电阻，并且结合仪表放大器的增益 (式 9) 可知，若要达到 40 dB 的增益，主要由 R_1 和 R_g 有主要关系，因为第 3 个放大器构成基本相减电路，因此 R_2 和 R_3 的阻值大小相等并且假定为 10 K Ω ，而 R_1 假定为 100 k Ω ，则可以求得 R_g 的阻值为 2.02 k Ω 。

2.2 仪表放大器的电路仿真

仪表放大器直流仿真的目的是对电路中各直流工作点的确定，并且也是观察各直流工作点是否稳定的重要方法。通过对仪表放大器进行直流仿真分析，可以得出仪表放大器各直流工作点非常稳定，并且整体电流功耗为 137.637 μ A，可以计算出单个运算放大器的电流功耗为 45.879 μ A，从而满足运算放大器的设计要求。

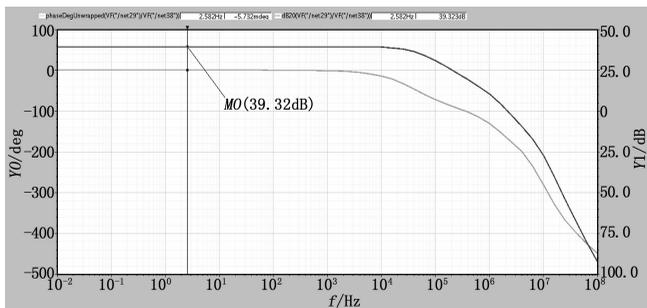


图 3 仪表放大器的增益

对仪表放大器的增益进行仿真，结果如图 3 所示，仪表放大器的增益达到 39.32 dB，单位增益带宽约为 2.177 MHz，基本满足设计要求。

由上图 4 可知在 1 kHz 处的输出噪声密度为 2.99 μ V/ \sqrt{Hz} ，输入噪声密度为 32.4 nV/ \sqrt{Hz} 。

由图 5 可知，仪表放大器的共模信号增益接近 -61 dB，根据共模抑制比的定义可得，仪表放大器的共模抑制比 (单位为 dB 时) 即为差模信号增益减去共模信号增益，大约为 101 dB。最后，电源抑制比的仿真结果为 117.72 dB，进而就可以

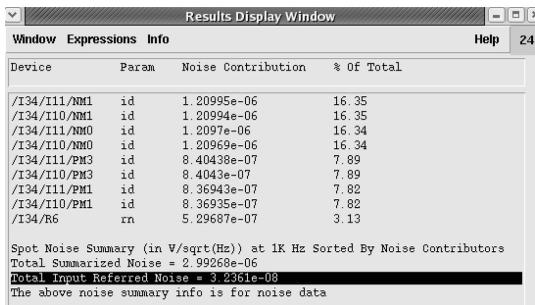


图 4 仪表放大器的噪声仿真

进而对三运放仪表放大器的版图进行布局和设计，为了尽量减小互连金属线之间的串扰，采用如图 6 所示的设计。

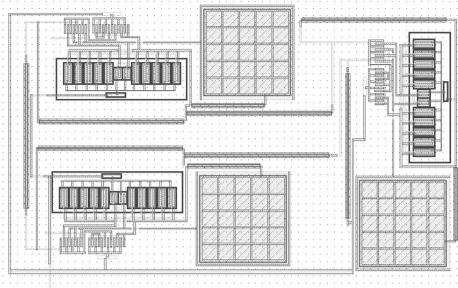


图 6 仪表放大器版图

为了防止外部环境或芯片内部积累的大量静电电荷对芯片造成不可逆损伤^[11]，设计了相应的 ESD 保护器件、保护电路来增强电路芯片的 ESD 耐受能力。为了使芯片内部的电路与外部接口相连接，则需要将芯片的四周放置压焊块 (PAD)，在版图设计时将压焊块与芯片中的相应节点相连接，芯片制造结束后，再通过压焊线将压焊块与外部接口连接。

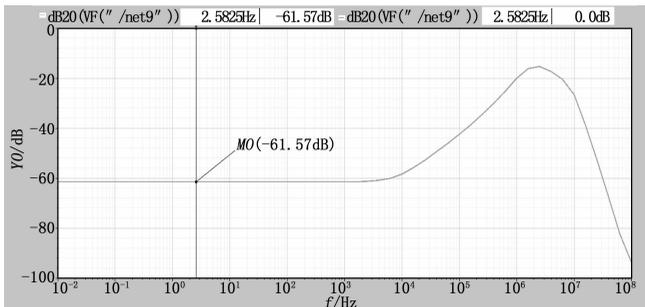


图 5 仪表放大器的共模增益

3 电路测试与结果分析

得到仪表放大器的仿真指标如表 1 所示。

表 1 仿真参数设定

增益	39.2 dB
增益带宽积	2.177 MHz
共模抑制比	101 dB
电源抑制比	117.72 dB
整体功耗	4.65 mV

在 MEMS 加速度传感器的振动台测试实验中，首先将其固定在振动台，使其最大输出方向垂直于振动台平面。振动台是由信号发生器产生可调频率幅值的信号经过功率放大之后传入振动台进行控制的，利用固定信号的幅值对待测加速度传感器进行扫频测量，就能够得到 MEMS 加速度传感器的频率响应曲线。实验结果如图 7 所示。

运放的电流源负载由 M3、M4 与 M6 组成，M3、M4 管的宽长比为 6/1，M6 管的宽长比为 120/1，考虑把 M6 管拆成 10 个 12/1 并联的晶体管。并把 M3、M4 管放中间，5 个 M6 管分别放左边和右边。

差分输入对管电路由 M1 和 M2 组成，宽长比均为 10/1，考虑把 M1 和 M2 管各拆成 2 个 5/1 并联的晶体管，为了差分对管的匹配，把 M1 和 M2 管进行交叉，其中每部分由两个拆分好的单元晶体管并联组成。尾电流源部分电路由 M5、M7 和 M8 组成，并且他们的宽长比均为 12/1，把他们均拆分成 2 个 6/1 的单元晶体管并联。通过综合考虑运算放大器各部分的大小和形状，以及各部分放在一起显得紧凑。

表 2 尺寸参数值设定

MOS 管	W/ μm	L/ μm
M1	20	2
M2	20	2
M3	120.4	20
M4	120.4	20
M5	25.2	2
M6	240.8	2
M7	25.2	2
M8	25.2	2

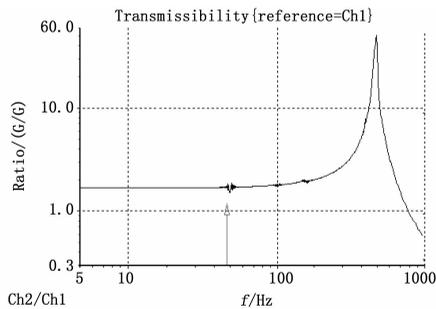


图 7 完整的芯片版图及 ESD、PAD 局部放大图

该型 MEMS 加速度传感器的频率测试范围设置为 5~1 000 Hz，从图 7 中我们能够得出：MEMS 加速度传感器的低频响应比较理想，传感器的共振频率在 50 Hz 上下，仪表放大器就是针对这种微弱低频信号进行设计的。

将本文设计的运算放大器电路在华润上华 DPTM 0.5 (m 标准半导体工艺线上进行了流片生产，整个芯片电路的总面积为 1.014 mm×1.673 mm，其中包括了其他 3 个芯片电路。在芯片的封装上我们采用了无锡中国电子科技集团 58 研究所的 CQFP64-02 封装。出于便于测试的目的，我们选择在适当的节点上加入零欧电阻，来更好地调整测试实验的方案。由于整个硅片当中不仅有本文设计的运放电路，同时包含着另外 3 个芯片电路，所以实际设计的测试外围电路是四块芯片的测试电路，因此整个 PCB 板的设计显得较为复杂。

在 PCB 测试电路之中，我们为芯片选择 5 V 的供电电源，

另外需要一个 2.5 V 的参考电压，为了尽量使输入电压信号更精准，本文选择德州仪器出品的 TPS76150 线性稳压芯片作为电源以及选择同样是德州仪器出品的 LM4128 芯片负责提供 2.5 V 的参考电压输出。由信号发生器提供时钟信号输入，结合反相器芯片 NC7S04 提供反向时钟信号输入。其他的测试设备还包括数字示波器、直流稳压电源以及 33533A 系列任意波形发生器。

因为运算放大器的开环增益比较大，所以在测试的时候，运算放大电路都按照负反馈的电路形式连接。本文所进行的实验主要是对运算放大器进行瞬态测试，一旦瞬态测试结果显示性能良好，就能够说明本文所设计的运放可以正常工作。因为本文所设计运放主要是应用在低频水声信号的采集当中，所以测试频率设定为 100 Hz，运放的双端输入信号为幅值 50 mV 且相位相反的正弦波信号，输出负载电路为 10 MΩ 的电阻与 15 pF 电容的并联电路。

本文所设计的运放采用的时钟信号是由任意波形发生器输出的，同时利用反相器产生输出另一路大小相等、相位相反的时钟信号。根据要求设置时钟频率为 10 MHz。设置输入偏置电压为 2.5 V，最终运算放大器的测试出实验结果。

从实验结果当中可以看出，在建立时间测试曲线测试当中电路一端的电压信号有些不稳定，推断是因为时钟输入信号是信号发生器产生之后通过了一个反相器才引入的，所以就导致了测试电路两端信号的差异。表 3 为运放工作性能的测试结果。

表 3 运放具体测试结果

参数	增益	单位增益带宽	供电电流	功耗	-3dB 频率	输出电压范围
符号	Gain/dB	GBW/MHz	IO/mA	PD/mW	f-3dB/kHz	VOMR/V
典型值	42	128	1.25	5.25	36	1.2-3.8

由运放工作性能的测试结果我们能够看出，测试结果完全符合预期的设计目标，只是输出电压信号的范围有一定的减小，其他的工作性能基本稳定，能够达到设计要求。本文所设计的面向 MEMS 加速度传感器的集成运放中，引用了许多的电流与电压偏置，但是基于电阻设计的自偏置电压存在着精度不高、功耗大、占用芯片面积大等问题，因此，计划下一步，设计更高精度的带隙基准电路来改进此项不足。

4 结束语

面向 MEMS 加速度传感器信号输出电路设计。本文主要对三运放仪表放大器进行了研究，并使用 Cadence 软件及

CSMC 0.5 μm 工艺模型对仪表放大器电路模型从仿真层面上进行了设计和研究。其中主要包括电路结构的选择、运算放大器电路的设计与仿真、仪表放大器电路的设计与仿真以及各电路的版图设计与验证。另外，本文所设计的仪表放大器有一个非常重要的特点就是增益可调^[12]，它由增益可调电阻 R_g 决定。

从仿真结果以及测试参数来看，所设计的仪表放大器基本满足设计要求，尤其是共模抑制比这一衡量放大器性能的重要参数。待进一步完成高精度加速度传感器的读出电路芯片级设计之后，我们将拥有完全自主知识产权的集成化电容式微硅加速度传感器芯片。同时，我们自主开发的纳机电水听器^[13-15]中也将应用我们本文中的实验成果代替从国外进口的产品。

参考文献：

- [1] 崔利平. 仪表放大器电路设计 [J]. 现代电子技术, 2009, 32 (11): 87-89.
- [2] 赵素梅, 刘诗斌, 崔智军. 一种恒跨导满幅 CMOS 运算放大器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 1161-1163.
- [3] 王雅丽. 神经桥集成电路的设计 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [4] 张文杰. MEMS 加速度传感器读出电路设计 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [5] 刘孟良. 全差分电容式传感的 CMOS 读出电路设计与实现 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- [6] 官泳华. 基于 MEMS 的电容式传感器信号调理电路设计 [J]. 电子器件, 2016, 39 (3): 551-557.
- [7] 刘珍超. 低功耗硅探测器前端读出电路设计与性能分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [8] 王岳生. 硅微电容式加速度传感器检测电路研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [9] 杨宏. 基于 CMOS 工艺的高性能电流模仪表放大器的设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [10] Adolpho Garcia. 单电源仪表放大器 [J]. 电子设计技术, 2000 (11).
- [11] 徐代果. 数模混合集成电路的防静电保护 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [12] 杨文凯. 6-18 GHz 小功率增益可调放大器设计技术研究 [D]. 电子科技大学, 2016.
- [13] 赵鹏, 张国军, 刘源, 等. 纳机电矢量水听器耐压结构设计 [J]. 传感技术学报, 2014 (5): 610-615.
- [14] 张勇, 文丰, 单彦虎, 等. 矢量水听器微弱信号调理电路设计 [J]. 科学技术与工, 2015, (32): 147-151.
- [15] 王立, 刘文怡, 张国军. 仿生矢量水听器水下监测记录装置 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 33-35.

（上接第 304 页）

面维修站及库房实际需求。该通用平台不仅适用空军、海军航空兵及陆军航空兵装备，也可推广应用于海军舰艇、兵器车载装备等众多测试应用场合。

参考文献：

- [1] 朱旖, 杜建军. 国外军用电子自动测试系统发展综述 [J]. 电子测量技术, 2008, 31 (8): 1-3.
- [2] 李行善, 等. ATS (自动测试系统) 及 ATE 技术 [J]. 测试仪器,

- [3] 于劲松等. 下一代自动测试系统体系结构与关键技术 [J]. 计算机测量与控制, 2005.
- [4] PXI 技术及其应用 [J]. 电子产品世界, 2004, 12.
- [5] PXI 技术指南 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 7.
- [6] NI: 与全新 PXI 技术接轨 [J]. 电子产品世界, 2004, 15.
- [7] 高性能 1.26 GHz 嵌入式控制器 NI8171 系列 [J]. 仪表技术, 2002, 2.