

微小差分电容检测电路设计

周丽丽^{1,2}, 孔德义¹, 江儒龙^{1,2}, 郭家玉^{1,2}

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230032; 2. 中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 介绍一种 MEMS 电容式微加速度计的结构和等效电路, 然后介绍了开关电容放大器的工作原理, 最后用可消除寄生电容的等效跨阻取代普通开关电容运放中的并联模拟电阻。设计了一种对寄生电容不敏感的电容-电压转换电路, 该电路可用于检测电容传感器的微小差分电容。

关键词: 开关电容技术; 微小差分电容检测; MEMS 电容式微加速度计

中图分类号: TM934.2

文献标识码: B

文章编号: 1006-2394(2008)10-0062-03

Design of Micro Differential Capacitance Detecting Circuit

ZHOU Li-li^{1,2}, KONG De-yi¹, JIANG Ru-long^{1,2}, GUO Jia-yu^{1,2}

(1. Institute of Intelligent Machines of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230032, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: First, the structure and equivalent circuit of a MEMS capacitance micro-accelerometer are introduced in this paper. Then, the operational principles of switch-capacitance amplifier are described. Finally, the parallel equivalent resistor in normal switch-capacitance amplifier is replaced by the equivalent transresistance in which parasitic capacitance can be eliminated. And a capacitance-to-voltage signal converter circuit insensitive to the parasitic capacitances is designed, which can be used to detect the micro differential capacitance.

Key words: switch-capacitance circuit technology; detecting technique of micro differential capacitance; MEMS capacitance micro-accelerometer

1 微电容加速度计等效电路

图 1 是一种梳状电容加速度计的结构示意图, 上下是固定极板, 中间是可以运动的质量块, 质量块和上下极板之间产生的电容分别为 C_1, C_2 。在外力作用下, 质量块沿加速度的方向摆动, 改变其与上下极板之间的距离, 从而使 C_1 和 C_2 的电容量跟着变化。

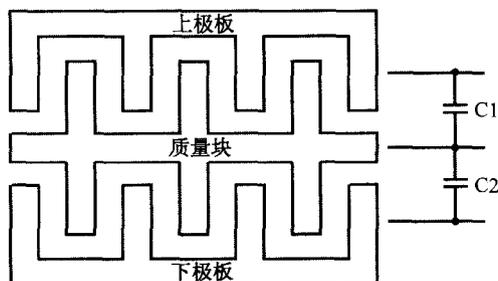


图 1 梳状电容加速度计的结构及等效电路

有关文献分析表明, C_1 和 C_2 与加速度 a 之间有

着如下的线性关系: $\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = ka$

其中 k 为常数, $C_1 + C_2$ 近似不变, 测出 $C_1 - C_2$ 就可计算出加速度的大小。

2 开关电容放大电路的工作过程

由 MOSFET 开关、电容和高精度 CMOS 运算放大器组成的电路称为开关电容电路, 它已成为用标准 CMOS 工艺实现模拟信号处理电路的一种常用方法。

图 2 是开关电容同相放大电路的工作过程, 主要经历两个阶段: 采样阶段和放大阶段。首先, S_1 和 S_3 接通, S_2 断开, 电路进入图 2(b) 所示的采样阶段, $V_{in} = 0, V_{in}$ 对 C_1 充电, 使 C_1 两端的电压跟踪输入电压。接着, S_1 和 S_3 断开, S_2 接通, 电路进入图 2(c) 所示的放大阶段, 存储在 C_1 上的电荷转移到 C_n 上, 产生的输出端电压为 $V_{in0}(C_1/C_n)$, 其中 V_{in0} 为电路进入放大阶段瞬间的输入电压值。

收稿日期: 2008-05

作者简介: 国家自然科学基金资助项目(60574093, 50534050); 863 计划资助项目(2007AA04Z341)

作者简介: 周丽丽(1976—), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为微小电容检测和模拟集成电路研究与设计; 孔德义(1966—)男, 博士, 研究员。

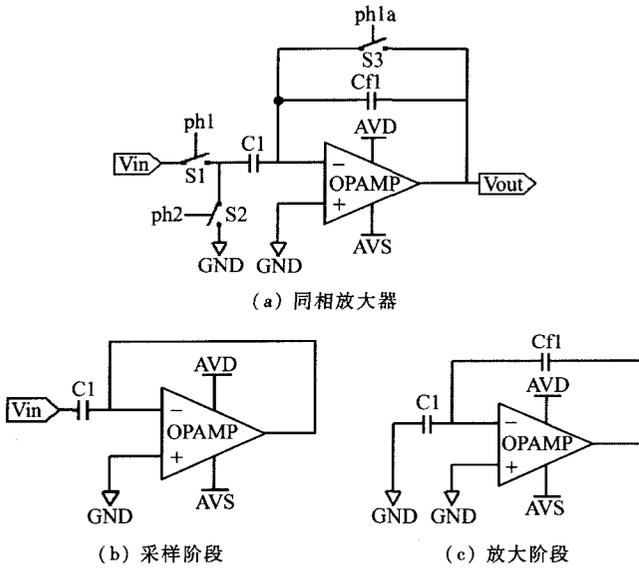


图 2 开关电容放大电路工作过程示意图

为了避免输入端沟道电荷注入效应,三个开关必须采用适当的时序。图 3 所示的时钟时序适用于本文所有的电路。S3 在 S1 之前断开,S3 断开之后,运放反相输入端的总电荷保持不变,使得电路不会受 S1 电荷注入或 S2 电荷吸收作用的影响。

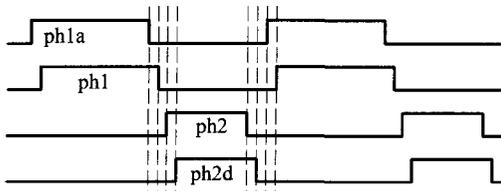


图 3 开关控制端时序

此种结构的放大电路无法消除电容两极板寄生电容的影响,从而使采样精度受到限制。本文利用开关电容等效正跨阻和负跨阻,设计了一种对寄生电容不敏感的开关电容放大电路,并利用它来测量微小差动电容。

3 微小差分电容整体检测电路设计

3.1 开关电容跨阻等效电路

图 4 所示两端口网络为负跨阻等效电路, S2 的接地端在实际应用中连接到运放差分输入端的端口,即虚地。

C_p 是电容两极板等效寄生电容。 C_1 右极板始终接地(S2 和 S4 交替接通),所以,右极板寄生电容被短路而不能被充电。在 ph1 周期内,S1 接通,左极板寄生电容并联在 V_1 两端,被充电至 V_1 ,但是在下个相位周期,即 ph2 周期内, C_p 又被短路,电荷可以释放掉,不影响整个电路的精度。

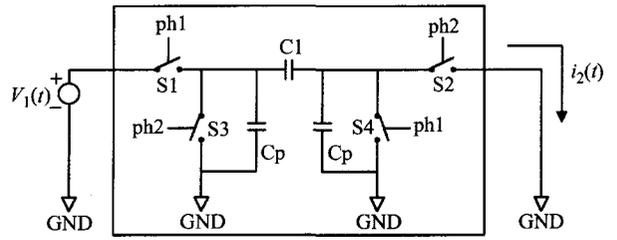


图 4 负跨阻等效电路

同样,将图 4 中 S1 和 S3 的栅极控制端互换,可得到正跨阻等效电路。将正负跨阻等效电路用在图 2 中的开关电容放大器中,即可得到与寄生电容无关的同相和反相开关电容电压放大器。

3.2 互补开关的设计

MOSFET 处于导通状态时,二氧化硅与硅的界面必然存在反型层;开关断开后,反型层中的电荷会通过源端和漏端流出,这称为沟道电荷注入。其中,注入到电容上的电荷会影响采样精度。为了降低或完全抵消沟道电荷注入,必须采用高精度的开关。如图 5 所示的互补开关,可以减小这种电荷注入效应。将 PMOS 和 NMOS 器件结合起来,使得相反的电荷量被两个沟道相互注入。

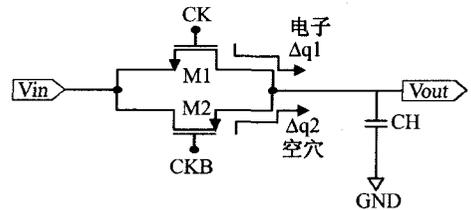


图 5 互补开关

3.3 高精度运放的设计

开关电容放大器中用到的高精度运放选用两级运放结构,输入级为差动式共源共栅结构,第二级为共源结构。该运放差模增益可达到 10000 倍以上,且共模抑制比和电源抑制比都很高,可以作为理想运放用于电容检测电路。

3.4 整体检测电路设计

综合上述各种电路功能,所设计的整体电路见图 6。

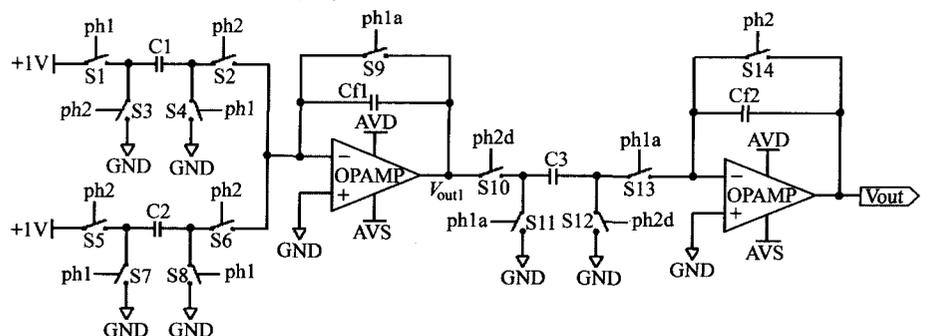


图 6 不受寄生电容影响的差分电容检测电路

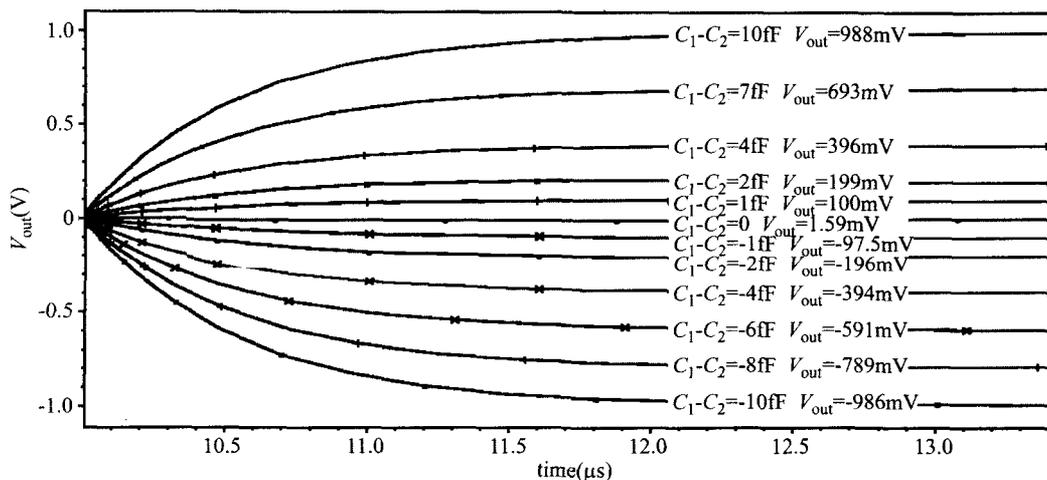


图 7 微小差分电容检测电路 spectre 仿真结果

整个电路分为两级,第一级为差动电容 - 电压转换。 C_n 为参考电容,和待测电容原始值处于同一数量级,此处取 1pF ; $C_1 - C_2$ 为 fF 量级,所以第一级的输出电压非常小,仅为几个 mV ; 如此小的电压不易区分,且容易造成测量不准确。所以加了第二级放大电路,将第一级输出电压放大 100 倍,即对于 1fF 的差分电容,所输出的电压波动允许范围为 100mV 。这样,即使测量有微小的误差,也能精确的检测出待测差分电容值。

运放输入端为等效负跨阻和正跨阻的组合,分别构成同相和反相放大电路。 ph1 下降沿先于 ph1 , 同时 ph2 下降沿先于 ph2d , 是为了避免沟道电荷注入对运放输入端的影响。 ph1 周期内, C_1 左端接 1V 直流电压,运放输出端虚地; ph2 周期内, C_1 左极板接地,电荷转入 C_n , 实现放大功能; 同时, C_2 也采样输入端直流电压。在第一级电路处于放大阶段的同时,第二级电路处于采样阶段。待第一级放大结束,并进入下一采样周期时,第二级同时进入放大阶段,此阶段所得的输出电压即为最终的与待测电容差值成比例的电压。

$$\text{第一级的输入输出电压关系为: } V_{\text{out}} = \frac{C_1 - C_2}{C_n} V_{\text{in}},$$

其中, V_{in} 为 1V 直流电压, $C_n = 1\text{pF}$, 待测电容差值在 $-10 \sim 10\text{fF}$ 之间,且分辨率为 1fF , 所以 V_{out} 输出为 $-10 \sim 10\text{mV}$ 。

第二级为同相放大,取 $C_3 = 100\text{pF}$, $C_{\text{r2}} = 1\text{pF}$, 则 $V_{\text{out}} = V_{\text{out1}} \frac{C_3}{C_{\text{r2}}} = 100V_{\text{out1}}$, 所以 V_{out} 输出范围为 $-1 \sim 1\text{V}$ 。

分析可得,若 $C_1 - C_2 = 0\text{fF}$, 则 V_{out} 应该在 0V 附近波动,只要 V_{out} 在 $-50 \sim 50\text{mV}$ 范围内,均可以认为待测电容差值为 0 ; 同理, $C_1 - C_2 = 1\text{fF}$ 时, V_{out} 应该在 100mV 上下有微小波动,在 $50 \sim 150\text{mV}$ 范围内,均可认为待测电容差值为 1fF 。实际上,参数调整合适的

测量电路,其输出电压实际波动范围应该是非常小的。依次类推,可测量 $-10 \sim 10\text{fF}$ 之间的电容差值。

4 测量电路仿真分析

C_1, C_2 原始值设置为 1pF , 然后在 1pF 上下修改 C_1, C_2 的值,使其差值落在 $-10 \sim 10\text{fF}$ 之间,然后对电路进行瞬态仿真,得出图 7 所示的输出电压波形。

由图 7 可见, $C_1 - C_2 = 0\text{fF}$ 时, $V_{\text{out}} = 1.59\text{mV}$; $C_1 - C_2 = 1\text{fF}$ 时, $V_{\text{out}} = 100\text{mV}$ 。电容差值为其他值时,输出电压均非常接近理论输出电压值,所以此电路符合设计要求。

5 结束语

本文基于开关电容技术,利用等效正、负跨阻可以完全抵消电容极板寄生效应的原理,设计了一种对寄生电容不敏感,并且能对 fF 量级的差分电容进行放大并加以区分的电容-电压变换电路。该电路适用于差分结构的电容式传感器。而 MEMS 电容式加速度计在汽车防撞、飞机导航、导弹等领域都得到了广泛的应用。所以本文设计的电容检测电路与 MEMS 电容式微加速度计的配合使用具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] Zhixiong Xiao, Min Chen, Guoying Wu. Silicon micro-acclerometer with mg resolution, high linearity and large frequency bandwidth fabricated with two mask bulk process[J]. Sensors and Actuators A, 1999, (77): 113 - 119.

[2] Razavi B. Design of analog CMOS integrated circuits[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.

[3] Phillip E. Allen. CMOS 模拟集成电路设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

(许雪军编发)