

Analysis and Improvement of an Interface Circuit of Capacitive Sensors^{*}

WANG Bin^{*}, HUANG Xiaodong, QIN Ming, HUANG Qing-an^{*}

(Key laboratory of MEMS of Ministry of education, Nanjing 210096, China)

Abstract : A new integrated capacitive sensor is introduced briefly. The sensitive capacitance and the interface are integrated into one chip. The interface circuit, which is based on the Schmitt trigger, works as a capacitor-frequency converter. A differential frequency circuit is designed following the oscillator. It can reduce the common-mode distribution. The output frequency displays a large difference from theoretic calculation during testing. The reason for the difference is analyzed. Circuit schematic and parameters are re-designed to realize the integration with a new sensor designed in our laboratory.

Key words : MEMS; capacitive sensor; interface circuit; frequency output

EEACC : 7230; 7320; 7310 K

一种微电容式传感器检测电路的分析与改进^{*}

王 斌, 黄晓东, 秦 明, 黄庆安^{*}

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要 : 介绍了一种本实验室开发的集成传感器, 它实现了敏感电容和接口电路在一块芯片上的集成。重点分析了它的接口电路, 基于施密特触发器构建, 实现敏感电容值以及参考电容值与频率值的转换, 通过对两频率求差来抑制各种共模干扰。对样片进行了测试, 输出频率与理论值有较大的偏差。通过分析, 给出了测试结果发生偏差的原因。最后, 给该电路设计了启动电路, 改进了 CMOS 开关控制电路, 重新对电路的结构进行了设计, 实现了与实验室新一代传感器的集成。

关键词 : MEMS; 微电容式传感器; 接口电路; 频率输出

中图分类号 : TP212.1

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)02-0265-04

电容式传感器是将被测的非电量变化转换为电容量变化的一类传感器, 由于它具有灵敏度高、功耗低、温度漂移小等优点, 因此广泛应用于压力、湿度、温度和加速度等测量中^[1-3]。在国内, 尚无成熟的电容传感器接口集成电路投入市场。对于 MEMS 微电容传感器, 采用传统的分立元件搭制接口电路将无法达到精度要求, 因此设计匹配的接口集成电路是十分必要的。对于电容式 MEMS 传感器而言, 敏感电容值及电容变化量的读出是一个难点。MEMS 传感器体积小特点决定了敏感电容的电容值不可能大, 一般为 pF 量级或更小。由这些物理量引起的微电容的变化更加微小, 一般为 fF 甚至 aF 量级。如此小的变化量,

对检测电路设计是一个挑战。目前, 国际上常用的是利用电荷转移原理的开关电容电路。但是, 开关电容电路组成的测量电路一般结构复杂, 对工艺精度要求高。另一种常用的方法利用敏感电容构成振荡电路, 振荡频率取决于电容值^[4]。通过一个数字计数器测得输出频率, 可求得敏感电容值, 进而反映待测物理量的变化。本文介绍的电路正是基于这种原理。为了避免输出频率受电源电压、温度变化和工艺波动的影响, 设计了一种求两个频率之差的电路^[5]。其模块示意图如图 1 所示。作者对其流水芯片进行了测试和分析, 找出了测试结果不理想的原因, 通过结构和参数的重新设计, 改善了接口电路各方面的特性。

基金项目 : 国家自然科学基金重点项目资助课题(90607002)

收稿日期 : 2007-09-30 **修改日期 :** 2007-12-26

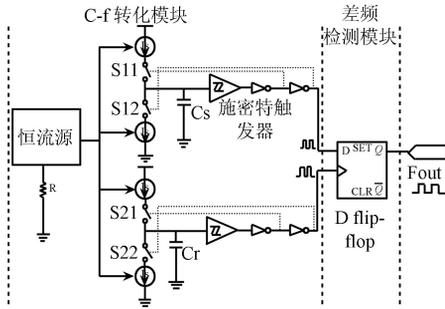


图1 微电容检测模块示意图

1 接口电路的分析与改进

为了避免输出频率受电源电压、温度变化和工艺波动的影响,设计了一种求两个频率之差的电路^[5](图1)。Cs为传感器敏感电容,Cr为与敏感电容结构相同的固定参考电容。C-f转化模块是由恒流源、CMOS开关、施密特触发器以及反相器组成的张弛振荡器。首先将传感器敏感电容值和固定电容转换成频率,然后送往由D触发器实现的差频模块,滤除较大的本征电容转换的信号,输出两路频率信号的差值。

作者对前期流水芯片进行了测试,结果表明两路输出信号频率都比模拟结果要小两个数量级且占空比偏离50%。差频模块单独测试结果如图2所示,输入两列的不同频率的方波(132.3 kHz和130.1 kHz),输出为2.236 kHz,误差在允许范围内。施密特触发器的测试结果如图3,输入三角波,输出为方波,动态特性较好。用HP半导体参数测试仪测得其高低阈值分别为3.05 V、1.1 V,与设计值3 V、1.5 V稍有差距。

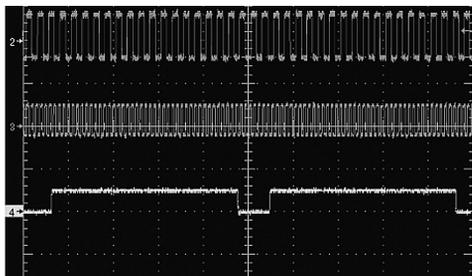


图2 差频模块测试波形

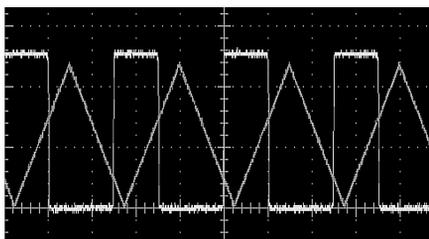


图3 施密特触发器的测试波形

由公式(1)分析导致频率过小的两点原因:一是

由于恒流源设计不合理导致的充放电电流过小;二是 CMOS 开关的控制信号不精确导致的充放电电流不等。

$$f_s = \frac{I}{2C_s(V_h - V_l)} \tag{1}$$

作者在新的工艺条件下重新设计了该电路。主要改进目标是:1)改善恒流源电流输出;2)重新设计 CMOS 开关的逻辑控制部分,使输出方波占空比更理想。

1.1 恒流源电路的分析与改进

恒流源电路如图4虚线右边所示,测试发现外接电阻中的电流小于0.1 μA,可认为其工作在亚阈值区,而非期望的饱和区,恒流源没有正确启动。设计时是希望漏电在电阻上的电压能够启动电路,但工作电流的大小表明这种启动是失败的。

在电阻的接地端加一电压,对流过电压源的总电流和恒流源支路电流的测试表明,在电路设计时加启动电路对该电路有效^[6-7]。作者添加了如图4虚线左边所示的启动电路,其原理如下:两个 PMOS 管 P₁、P₂ 和电容 C₀ 构成启动电路。上电瞬间,电容上没有电荷,P₁、P₂ 都导通,M₃ 的栅电位拉高,从而使 M₃ 开启并产生电流,M₁、M₂ 也陆续产生了电流,让基准电压源脱离零稳态。在这个过程中,P₁ 一直在向电容 C₀ 充电,电容上的压降逐渐升高,直至晶体管 P₂ 关断。此时,启动电路对基准部分就没有任何影响了。在稳定后,启动电路上没有功耗。图5为 Spice 模拟的启动管 P₂ 的电流变化,可以看出刚上电时 P₂ 流过大电流使电路启动,然后很快截止,启动电路停止工作。

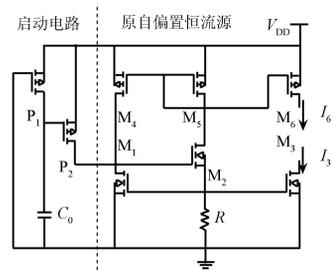


图4 自偏置恒流源及启动电路

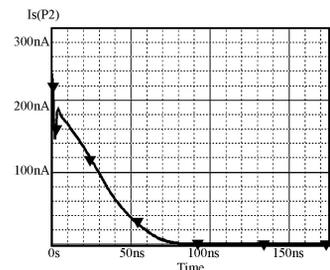


图5 上电后 P₂ 管电流随时间变化关系

但是,模拟结果还发现此时电流源的两路电流分别为 $23.613 \mu\text{A}$ 和 $23.329 \mu\text{A}$,有较大偏差,这将导致振荡输出的方波占空比出现偏差,影响电路性能。电流的偏差是由于 M_4 、 M_5 的栅漏电压不等导致的沟道长度调制效应引起的。为改善其特性,电流镜采用共源共栅结构,模拟结果显示其两路电流的偏差明显减小到了可以忽略不计的程度(都为 $23.32 \mu\text{A}$)。另外考虑到标准 CMOS 工艺实现 MOS 的便利,启动电路设计改为下图,刚上电时 M_{71} 流过大电流以启动电路,然后很快截止,启动电路停止工作。

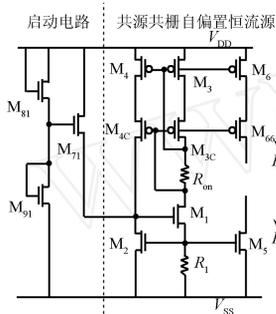


图 6 精确的自偏置恒流源及启动电路

1.2 CMOS 开关的逻辑控制部分

在原来的简化设计中,直接将图 1 中施密特触发器输出的 Clk_0 及其反相信号同时接入开关管 S_{11} 和 S_{21} 的栅极。然而,由于时钟 Clk_0 信号在跳变过程中存在 CMOS 瞬态导通电流,这不但增加了瞬态功耗,更重要的是,对精确控制电容的充放电不利。进一步的改进如图 7 所示:采用逻辑控制电路,将原始 Clk_0 信号分解成满足时序要求的 2 个相关控制信号 ClkW 和 ClkS ,分别控制 CMOS 开关 P 管和 N 管的导通与截止,避免两管的同时导通。

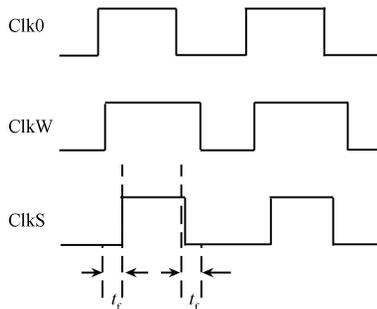


图 7 Clk_0 、 ClkW 和 ClkS 之间的控制关系

逻辑控制部分如图 8 所示^[8]。假设刚开始时施密特触发器的输出 clk_0 为高, clkW 和 clkS 都为低,当 clk_0 变低时, clkW 节点将很快的从 0 充电到 1,从而关掉 CMOS 开关 S_{11} 、 S_{21} 的 P 管,而 clkS 节点将缓慢地 0 充电到 1,这是因为通过 PMOS 管 M_{172} 的充电电流将受到 PMOS 管 M_{182} 的限制,

这样由 clkS 信号去控制 CMOS 开关 S_{12} 、 S_{22} 的 N 管去放电,而 Out_1 和 Out_2 相应地去控制 CMOS 开关的另一半,从而在 CMOS 开关支路中就没有短路电流,在降低功耗的同时可以精确控制对电容的放电电流。充电过程的分析与此类同。

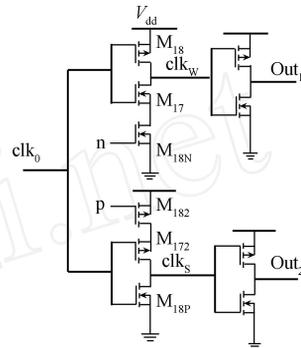


图 8 CMOS 开关的逻辑控制部分

2 设计和模拟结果

对以上设计的各子电路进行整合,得到了最终的电路形式。并在中国电子科技集团公司第五十八研究所 $1 \mu\text{m}$ N 阱硅栅标准 CMOS 工艺条件下,对各管尺寸进行了设计。通过 Tanner 公司的 Tspice 验证,得到电路的波形,如图 9 所示。可以看出输出方波频率与公式(1)的计算较吻合,且其占空比很理想。

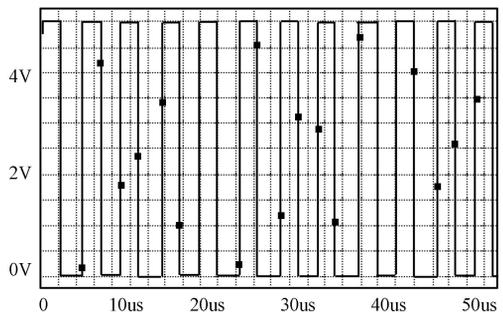


图 9 张弛振荡输出的方波

本电路的目的是为本实验室新一代传感器提供一个读出接口。通过前期对传感器的准确测试,传感器的基本电容约为 13pF ,变化从 12pF 到 14pF 。对敏感电容的变化情况进行了模拟,在 5V 条件下,电容从 12pF 到 14pF 变化时,输出频率在 250kHz 到 300kHz 之间变化。差频输出在 10kHz 左右。这样范围的频率变化可以很容易地用计数器或单片机检测到。

3 结束语

通过 SPICE 仿真,可以看出,改进后的电路结构满足了提出的各项目标。由于该电路是用频率的

变化反映敏感电容的变化,具有准数字输出的特点,只要用一个计数功能的单片机,即可实现信号的采集。

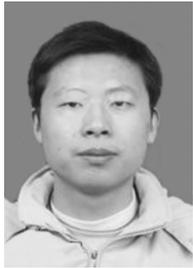
工艺的波动会对电路的电容-频率转换特性产生影响,从而引起流片结果个体间的差异。因此,必须对每个传感器分别定标。这样,工艺的波动才不会使单个传感器产生偏差。

参考文献:

- [1] 周闵新,多层膜结构电容式压力传感器及其 CMOS 兼容工艺的研究[D]. 南京:东南大学博士学位论文,2005.
- [2] 严先蔚,CMOS 集成湿度传感器研究[D]. 南京:东南大学博士学位论文,2002.
- [3] 程坤,MEMS 电容式传感器接口集成电路研究[D]. 南京:东

南大学硕士学位论文,2006.

- [4] Nihtianov S N, Shterev G P, Iliev B, et al. An Interface Circuit for R-C Impedance Sensors with a Relaxation Oscillator[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2001, 50(6): 1563-1567.
- [5] 程坤,一种简单实用的差频方法原理研究及其应用[J]. 电子器件, 26(2): 473-475, 2006.
- [6] P. E. Allen and D. R. Holberg, CMOS Analog Circuit Design [M]. New York: Oxford University Press, 2002.
- [7] P. R. Gray, Analysis and Design of Analog Integrated Circuit [M]. New York: Wiley, 1993.
- [8] Cheng K-H, etc. A CMOS Low Power Voltage Controlled Oscillator with Split-Path Controller[C]// The 8th IEEE Int Conf Electronic Circ and System. 2001, 1: 421-424.



王 斌(1983-),男,硕士研究生,主要从事 CMOS 模拟集成电路和传感器研究, wangbing_213 @163. com.



黄庆安(1963-),男,教授,博士生导师,长江学者,主要从事 MEMS、传感器研究, hqa @seu. edu. cn.