

一种新的不受寄生电容影响的电容式传感器接口电路

曹新平 张大成 黄如 张兴 王阳元

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 给出了一种新的用于微小电容检测的接口电路。在电荷传送电路的基础上, 引入了一个用于参考微变电容读出的电荷传送电路部分, 将检测电路与参考电路的输出进行差分放大, 从而大大提高了电路的稳定性和检测灵敏度, 同时此电路也保持了电荷传送电路检测微小电容变化不受寄生电容影响的特性。

关键词: 微变电容; 电荷传送电路; 接口电路

EEACC: 7230; 1290

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)07-0762-04

1 引言

电容式硅微传感器系统被广泛应用于机车、医疗和工业控制等领域, 检测电容和信号处理电路的接口是此类微系统设计的主要问题之一, 在很多情形下, 接口决定了微传感器系统对检测量的分辨率。在微系统中, 往往有较大的寄生电容与检测电容同时存在, 大的寄生电容会在很大程度上降低接口电路对微变检测电容的分辨率。传统的用于此类微小电容检测的接口电路结构复杂^[1,2], 且其分辨率易受寄生电容影响。一些结构简单的开关电容电路提供了全集成的解决方案, 但由于其与电容式传感器接口处 MOS 开关的电荷注入而引入的误差使电路的性能受到限制^[3,4]。用于检测微小电容变化的电荷传送电路不受寄生电容的影响^[5], 但目前的电荷传送电路分辨率较低, 且由于其输出工作点随着基准电压和微变检测电容初始值的微小变化而发生大的漂移也限制了其分辨率的提高。

在微系统的制作中, 采用与制作检测电容相同的工艺方法很容易加工出与检测电容初始值大小相

同而不随被检测量变化的参考微变电容。基于此点, 可在以电荷传送电路为接口的微变电容式微传感器系统中引入参考微变电容及相应的电荷传送读出电路, 通过将此电路部分的输出与检测电路部分的输出进行差分放大, 即可获得工作点不随基准电压及检测电容初值变化, 并具有较高分辨率的输出信号。此外, 新的接口电路保持了电荷传送电路不受寄生电容影响的特性。

2 电路原理

电荷传送电路结构如图 1 所示。

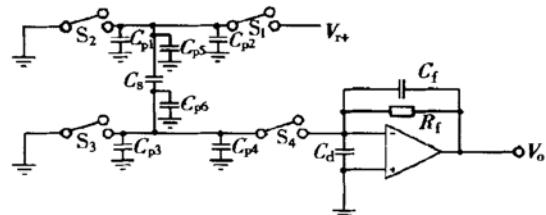


图 1 电荷传送电路结构

Fig. 1 Circuit diagram of charge transfer circuit

曹新平 男, 1973 年出生, 博士研究生, 现主要从事微机电系统及专用集成电路的研究。

张大成 男, 教授级高工, 主要研究兴趣包括微机电系统及其三维立体集成的研究。

黄如 女, 副教授, 主要研究兴趣包括新器件和器件物理以及电路设计。

2001-09-08 收到, 2002-01-09 定稿

图 1 中的电路是对一个未知的电容 C_s 进行充电直到其两端的电势差达到 V_r , 然后将此电容放电, 开关 S_1, S_2, S_3 和 S_4 受频率为 f 的数字时钟控制。在此控制时钟下, 一个单独的电容充放电周期的电流可认为是一个电流脉冲函数。

$$I(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT) V_r C_s(t) \quad (1)$$

对此脉冲电流输入, 检测电路的频率响应函数可写为:

$$G(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{C_s(\omega)} = \frac{fV_r R_f}{(j\omega/x - 1)(j\omega/y - 1)} \quad (2)$$

其中 x, y 为此二级系统的两个极点^[5]。

对一个阶跃的电容变化, 由拉普拉斯变换终值定理可知, 电路有稳态的输出为:

$$V_o = fV_r R_f C_s \quad (3)$$

此电路对电容的检测不受图 1 中所示的寄生电容的影响。

微变电容电荷传送读出电路结构可用来减小由充电电压 V_r 、开关频率 f 等导致的基线漂移。微变电容电荷传送读出电路如图 2 所示。

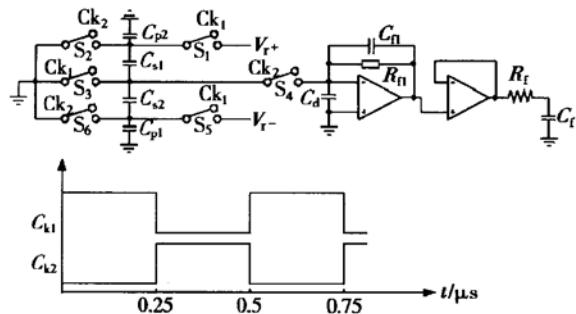


图 2 微变电容电荷传送电路及控制时钟

Fig. 2 Charge transfer circuit and the timing sequence of the CMOS switches

在图 2 的电路中, C_{s1} 和 C_{s2} 是微变传感器电容。 C_{p1} 和 C_{p2} 为寄生电容。 $S_1 \sim S_6$ 是六个 CMOS 开关, 由非交叠的二相(Ck_1, Ck_2)高频时钟控制。时钟 Ck_1 期间, 开关 S_1, S_3 和 S_5 闭合, 其它开关打开, C_{s1}, C_{s2}, C_{p1} 和 C_{p2} 被充电。时钟 Ck_2 期间, S_2, S_4 和 S_6 闭合, 其它开关打开, C_{s1}, C_{s2}, C_{p1} 和 C_{p2} 被放电。由于 C_{s1} 和 C_{s2} 所充电荷不同而有电流流过 S_4, C_{p1} 和 C_{p2} 所充电荷放电时并不流过 S_4 , 因而电路不受寄生电容 C_{p1} 和 C_{p2} 的影响。令 $C_{s1} = C_{s0} + \Delta C, C_{s2} = C_{s0} - \Delta C$, 对微变电容的阶跃变化 ΔC , 电路有输出

$$v_o = 2V_f R_f \Delta C \quad (4)$$

在一个确定的数字控制时钟下, 此电路的输出工作点由基准电压 V_r 、微变检测电容初值及电路运放失调决定。在微小微变电容式传感器制作中, 难以精确控制检测电容初始值大小, 此外, 检测电路的基准电压会随电源电压的漂移而变化, 同时也难以消除电路运放失调带来的影响, 这些因素都将会导致输出工作点产生大的漂移。而在微传感器的制作中, 采用制作检测电容的工艺方法很容易加工出与检测电容初始值大小相同而不随被检测量变化的参考微变电容。同时, 电荷传送电路具有非常简单的结构。因此, 在微系统中, 可通过引入一个与检测微变电容初值相同大小的参考微变电容及相应的电荷传送读出电路部分, 将检测电路的输出与参考电路的输出进行差分放大, 即可消除由基准电压变化、微变检测电容初值不同及运放失调对电路工作点产生的影响, 同时可获得大的分辨率。改进后的电路见图 3。

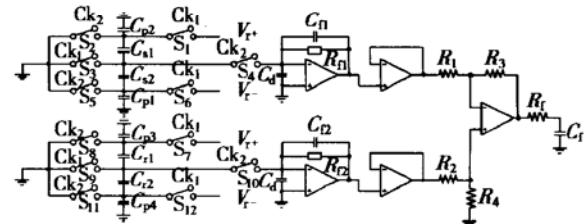


图 3 引入参考微变电容的电荷转换电路

Fig. 3 Architecture of novel interface circuit

在图中, C_{s1} 和 C_{s2} 为检测微变电容, C_{r1} 及 C_{r2} 为参考微变电容, 使

$$C_{r1} = C_{s10}, C_{r2} = C_{s20} \quad (5)$$

其中 C_{s10}, C_{s20} 为检测微变电容的初始值。令

$$R_3/R_1 = R_4/R_2 = A \quad (6)$$

在图 2 所示的数字控制时钟下, 电路的输出可写为:

$$v_o = (V_{os} - V_{or})(R_3/R_1) \quad (7)$$

$$= 2V_f R_f A \Delta C \quad (8)$$

由于检测电路与参考电路部分采用了对称的结构, 只要参考电容与检测电容初值相同, 电路即可获得稳定的输出工作点。同时, 电路检测灵敏度提高了 A 倍, 此外, 电荷传送电路结构也使得检测电路不受图 1 中所示的寄生电容的影响。

3 电路设计

由于放大器的输入阻抗存在一个大的动态值, 流过此放大器的放电电流脉冲会在放大器的输入端

产生瞬态的电压脉冲,通过在放大器的输入端和地之间接入一个大的去耦电容 C_d 可以吸收此瞬态脉冲并保证在电荷检测电路的输入端有稳定的虚地电位。

由(8)式可知,要得到大的灵敏度就要求有大的开关频率 f 、充电电压 V_r 和反馈电阻 R_{fi} ,在实际的电路设计中,开关频率 f 的最大值受到开关在检测电极产生的瞬态电压振荡稳定时间的限制,在此处取 f 为1MHz。CMOS开关具有最小的短时脉冲波形干扰,易于驱动,且能够开关同电源电压有相同幅值的信号,可选择采用此类开关。最大的充电电压 V_r 的值取决于电源电压。大的反馈电阻 R_{fi} 和 R_{f2} 使电荷转换电路对噪声干扰有大的灵敏度,通常反馈电阻的阻值要求小于 $100k\Omega$ 。 C_{fi} 和 C_{f2} 为反馈电容,其选择要求能提供合适的信号带宽 B 。

$$B = 1/R_{fi}C_{fi} \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

采用适当的设计和版图规则可减小运放失调,同时由于是将对称电路结构的输出进行差分放大,因而在很大程度上可消除失调对电路工作点的影响。此外,设计的电路对运放的带宽没有特殊要求。

采用简单的微机械加工工艺很容易制得电容初始值相等的微变电容和参考微变电容管芯,对应的电路管芯采用 $3\mu m$ CMOS工艺实现。目前,电容和电路管芯都已完成封装,整个微机电系统正在实现之中。

4 结果

在设计中,取 C_{s10}, C_{s20} 为 $1pF$ 左右。图4给出了电荷传送电路的输出随微变电容变化的电路仿真结果(对应不同的基准电压 V_r)。

由图4可以看出,输出曲线具有很好的线性度,但灵敏度较低(基准电压为 $3.2V$ 时,灵敏度为 $3.1mV/pF$),且工作点电位随着电压基准的微小变化发生大的漂移。

图5给出了引入参考微变电容后的电荷传送电路的输出随微变电容变化的模拟结果(对应不同的基准电压 V_r)。

由图5可知,改进后的电路输出曲线保持了好的线性度(线性系数大于99.9%),同时灵敏度得到了很大提高(基准电压为 $3.2V$ 时,灵敏度为 $62mV/pF$)。此外,输出工作点也不再随基准电压变化而变化。

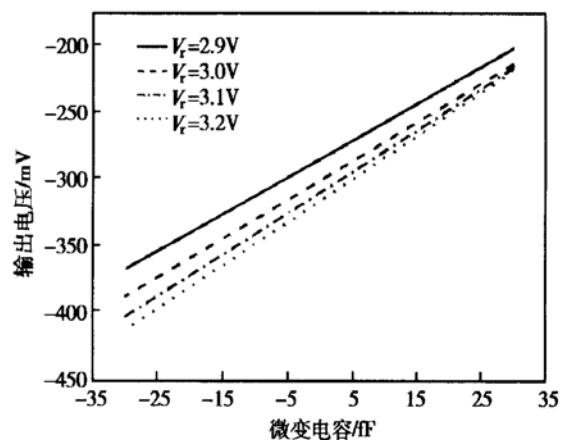


图4 图2所示电路输出随微变电容的变化(对应不同的基准电压)

Fig. 4 Output voltage of the charge transfer circuit versus differential capacitance

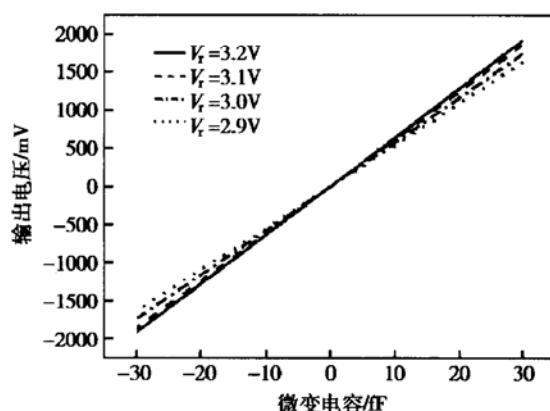


图5 图3所示电路的输出随微变电容的变化(对应不同基准电压)

Fig. 5 Change of the output voltage of the novel interface circuit with the change of the sensor differential capacitors

5 结论

用于微小微变电容检测的电荷传送电路具有不受寄生电容影响、结构简单和线性度好等特点,但由于这种电路的稳定性较差和灵敏度较低而使其使用范围受到很大限制。本文从电容式微传感器系统设计的角度出发,要求在制作检测电容的同时也制作参考电容;相应的接口电路的实现是在传统电荷传送电路的基础上,引入了一个参考电荷传送电路部分,通过将检测电路和参考电路的输出进行差分放大,大大提高了电路的稳定性和检测灵敏度。同时也保持了电荷传送电路不受寄生电容影响的特性。这

种高分辨率不受寄生电容影响的接口电路在电容式微硅传感器系统的设计和制作中将会有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] Kuehn W, Sherman S. A surface micromachined silicon accelerometer with on chip detection circuitry. *Sensors and Actuators A*, 1994, 45: 7
- [2] Chau K H, et al. An integrated force balanced capacitive accelerometer for low-g applications. *Sensors and Actuators A*, 1996, 54: 472
- [3] Burstein A, Kaiser W J. Mixed analog-digital highly sensitive sensor interface circuit for low-cost microsensors. *Sensors and Actuators A*, 1996, 52: 193
- [4] Schiffer B R, et al. An active charge cancellation system for switched-capacitor sensor interface circuits. *IEEE J Solid-State Circuit*, 1998, 33: 2134
- [5] Huang Songming, et al. A high frequency stray-immune capacitance transducer based on the charge transfer principle. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1988, 37(3) : 368

A New Stray-Immune Interface Circuit for Capacitive Sensors

Cao Xinping, Zhang Dacheng, Huang Ru, Zhang Xing and Wang Yangyuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A novel interface circuit is presented to detect the minimal change of the differential capacitance. Based on the charge transfer circuit, the interface circuit introduces another charge transfer circuit detecting the reference differential capacitance. By differentially amplifying the output of the detecting and reference circuit, the interface circuit shows better stability and much higher sensitivity. At the same time, it keeps the characteristic of high immunity to parasitic capacitance.

Key words: differential capacitance; charge transfer circuit; interface circuit

EEACC: 7230; 1290

Article ID: 0253-4177(2002)07-0762-04

Cao Xinping male, PhD candidate. His research interest focuses on MEMS and ASIC.

Zhang Dacheng male, senior engineer. His research interest is in the field of MEMS and its cubic integration.

Huang Ru female, associate professor. She is engaged in the research on SOI technology, design and simulation.

Received 8 September 2001, revised manuscript received 9 January 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics