

文章编号 1004-924X(2015)12-3350-07

时分复用数字闭环电容式微加速度计接口电路

储宜兴¹,池保勇²,刘云峰¹,董景新^{1*}

(1. 清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084;

2. 清华大学微电子学研究所,北京 100084)

摘要:为实现电容式微加速度计的数字输出闭环,设计了一种数字输出闭环 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)接口电路,以降低电路输出噪声并提高测量量程。对已有的电容式微加速度计 ASIC 电路进行了改进,分时段在中间极板上加载差分电容读出信号和由脉宽调变(PWM)波控制的反馈信号,然后由控制器实现闭环,利用 Sigma Delta 调制器实现模数转换。通过分析差分电容读出电路和 Sigma Delta 调制器的原理和特性,建立了该数字输出闭环电容式微加速度计的模型,进行了系统的设计与仿真。实验结果表明,该数字输出闭环电容式微加速度计的噪声水平为 $9.6 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$,量程为 $\pm 3\text{g}$ 。这些结果验证了时分复用方案的可行性和本文所提出模型的正确性。

关键词:电容式微加速度计;数字闭环;接口电路;Sigma Delta 调制器;时分复用

中图分类号:TH824.4;U666.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3350

Interface circuit for digital close-loop capacitive microaccelerometer with time division multiplexing

CHU Yi-xing¹, CHI Bao-yong², LIU Yun-feng¹, DONG Jing-xin^{1*}

(1. *State Key Laboratory for Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

** Corresponding author, E-mail: dongjx@mail.tsinghua.edu.cn*

Abstract: To implement the digital close-loop for a capacitive microaccelerometer, a digital close-loop ASIC(Application Specific Integrated Circuit) was designed to reduce the output noise and to improve the measuring range of the interface circuit. The current interface circuit ASIC for the capacitive microaccelerometer was improved. A differential capacitance readout signal and a feedback signal controlled by Pulse Width Modulation(PWM) wave were applied to a middle plate sequentially, then the controller was used to operate the accelerometer to realize the close-loop configuration and a Sigma Delta modulator was used to perform the analog to digital conversion. The principle and characteristics for the capacitive microaccelerometer and the Sigma Delta modulator were analyzed, and a system model of the proposed digital close-loop capacitive microaccelerometer was built to implement the system design and simulation. The experiment on the capacitive microaccelerometer presents $9.6 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

收稿日期:2015-06-06;修订日期:2015-08-09.

基金项目:十二五预研资助项目(No. 20114113015)

noise and an input range of about $\pm 3g$. The results indicate the interface circuit with Time Division Multiplexing works well in microaccelerometers and the proposed system model is correct.

Key words: capacitive microaccelerometer; digital close-loop; interface circuit; Sigma Delta modulator; time division multiplexing

1 引言

微加速度计是一种利用微机械加工工艺制造的惯性传感器,因具备体积小、噪声低、精度高等优点被广泛应用于惯性导航、汽车安全、智能手机等领域^[1]。电容式闭环微加速度计通过检测敏感质量块的位移变化趋势并施加静电反馈力,保持动极板在平衡位置,其施加的静电力可反映输入加速度^[2]。由于机械敏感结构的电容变化较微弱,对寄生参数异常敏感,加上微加速度计的输出随温度漂移,制约了其测量精度。另一方面,目前微加速度计输出一般为模拟信号,需经模数转换才能被后级处理,增加了惯性导航系统的复杂性^[3]。

数字输出 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)接口电路由于寄生小、功耗低、温漂低、体积小,和敏感结构组合形成的闭环微加速度计便于系统集成,已成为目前的研究热点。Berkeley 大学^[4]和 Georgia 理工大学^[5]研制出的 Sigma Delta 结构微加速度计 ASIC 接口电路的量程较小,应用范围较窄。哈尔滨工业大学^[6-8]研制的数字输出 ASIC 电路输出噪声较大,性能还有待提高。

本文设计了一种数字输出闭环 ASIC 接口电路,用于降低电路输出噪声、提高系统的测量量程。该接口电路采用开关电容技术读出敏感结构的差分电容信号,经过控制器调节后被 Sigma Delta 调制器转换为 PWM(Pulse Width Modulation)波,受 PWM 波控制的反馈信号加载在微加速度计的极板上形成静电力。为了实现微加速度计的闭环,其读出信号和反馈信号被分时加载在中间极板上。

2 数字闭环接口电路

2.1 接口电路组成

接口电路如图 1 所示,其工作时差分电容读出电路读出敏感结构的差分电容变化,转换为电压信号。控制器改变微加速度计系统的零极点,

调节其参数使得闭环系统稳定并具有良好的动态性能。Sigma Delta 调制器将模拟信号转换为数字信号,并对低频带内噪声进行整形。差分电容读出电路、控制器、Sigma Delta 调制器在逻辑控制电路的控制下周期工作,控制载波产生电路生成所需的载波,加载在微加速度计极板上,改变电容式微加速度计受到的反馈静电力,形成数字闭环反馈。

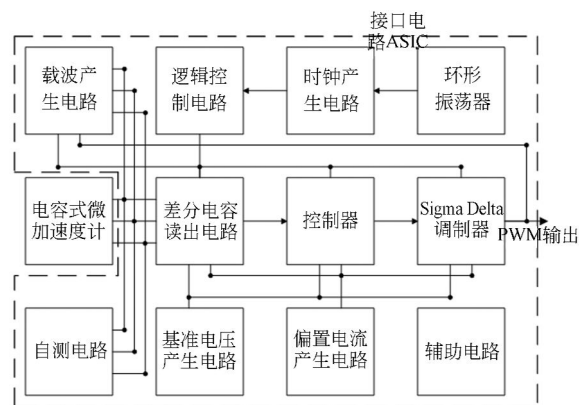


图 1 接口电路框图

Fig. 1 Block diagram of interface circuit

2.2 差分电容读出电路

图 2 所示为微加速度计差分电容读出电路的原理图。系统时钟 φ_1 与 φ_2 互为两相不交迭时钟。 φ_1 与加载到敏感结构上极板的激励信号同相, φ_2 与加载到敏感结构下极板的激励信号同相, φ_M 为敏感结构中间极板的控制时钟,与加载到中间极板的反馈信号同相。在 φ_1 相,复位开关 S_R 上的采样开关噪声被存储在电容 C_i 上;在 φ_2 相,复位开关的采样开关噪声再次被采样并与电容 C_i 上存储的噪声相抵消,使得采样开关噪声被消除^[9]。

图 2 所示前端电路的输出为:

$$V_{out} = \frac{V_{CC} - V_{SS}}{2} \frac{1}{C_i} (C_{S1} - C_{S2}), \quad (1)$$

其中:电容 C_{S1} 、 C_{S2} 为传感器的等效差分电容, C_i 为放大器的反馈电容;表明差分电容读出电路的输出与传感器等效差分电容的大小成正比,与电路的输入电容 C_i 、寄生电容 C_p 无关。

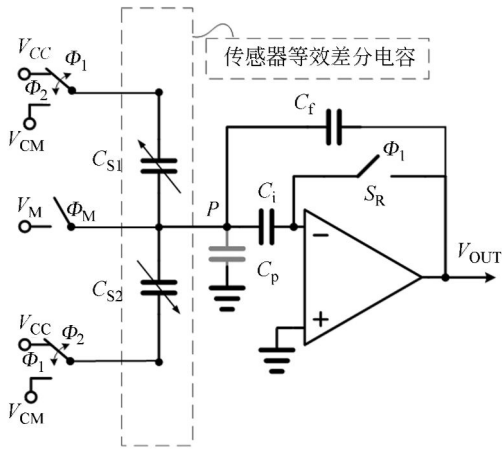
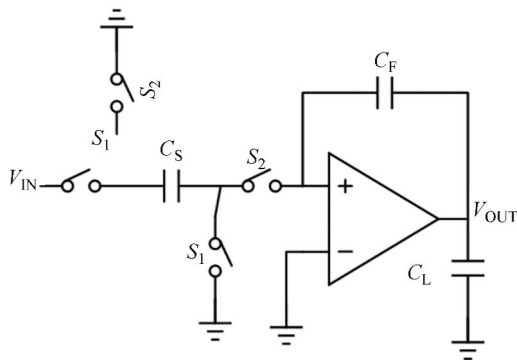


图 2 差分电容读出电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of front-end readout circuit

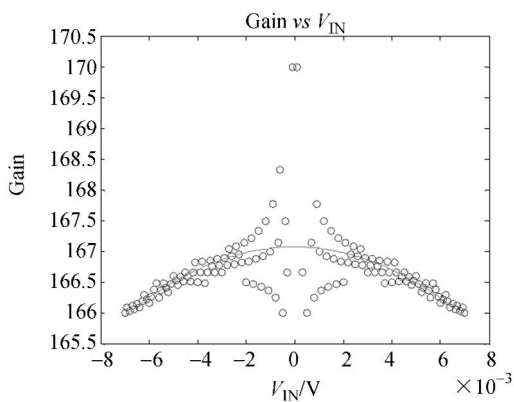
2.3 Sigma Delta 调制器

开关电容积分器是 Sigma Delta 调制器的关键组成部分。图 3(a) 所示为典型的开关电容积分



(a) 开关电容积分器原理图

(a) Schematic diagram of switch capacitor integrator



(b) 运算放大器的有限非线性增益

(b) Nonlinear and finite gain of OTA

图 3 开关电容积分器原理及增益

Fig. 3 Schematic diagram and gain of switch capacitor integrator

分器原理图。将运放的增益记为 G , 开关电容积分器输出对输入的传递函数为^[10]:

$$\frac{V_{OUT}(z)}{V_{IN}(z)} = \frac{C_S}{C_F} \frac{1}{z^{-\alpha}}, \alpha = \frac{G-1}{G} \quad (2)$$

如图 3(b), 运放的增益 G 会随着输入电压的变化而非线性变化, 因而系数 α 也存在非线性。利用插值得到的运放增益 G 与输入电压 V_{IN} 的关系为:

$$G = 147 - 0.83V_{IN}^2 \quad (3)$$

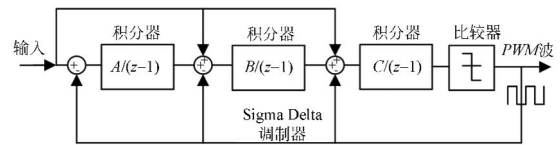


图 4 Sigma Delta 调制器原理框图

Fig. 4 Block diagram of Sigma Delta modulator

为简化系统设计, 采用输出 PWM 波的一位 Sigma Delta 调制器。为保证系统稳定、获得最大的量程, 采用了如图 4 所示的 CIFF (Cascade of integrators, feed forward form) 结构。其噪声传递函数为:

$$NTF(z) = \frac{1}{1 + Ck_q \frac{1}{z-1} + BCk_q \left(\frac{1}{z-1}\right)^2 + ABCk_q \left(\frac{1}{z-1}\right)^3} \quad (4)$$

其中: k_q 为 Sigma Delta 调制器中比较器的增益。比较器将第三级积分器的输出量化为一位数据, 即 PWM 波。

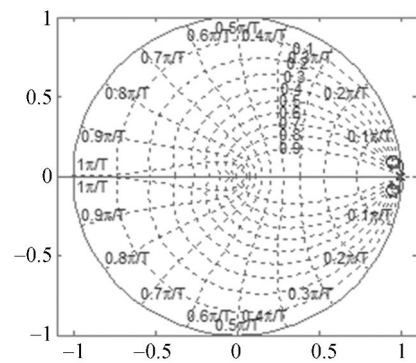


图 5 噪声传递函数的根轨迹图

Fig. 5 Root locus of noise transfer function

图 5 所示为式(4)给出的噪声传递函数的根轨迹图。当 $k_q > 1.2$ 时, 一位 CIFF 结构 Sigma Delta 调制器稳定。Simulink 仿真显示, 当图 4 中

的参数 A、B、C 均取 0.1 时,第三级积分器的输出幅度大约为 Sigma Delta 调制器输入幅度的 0.1 倍,因此系统的输入范围较大。

3 接口电路应用验证

将数字输出闭环接口电路与电容式微加速度计敏感结构结合,形成数字闭环系统。建立的系统模型和实测结果均证明该方案有效。

3.1 敏感结构

电容式微加速度计的结构包括扭摆式、三明治式等结构,其中梳齿式结构由于设计简单、适合 MEMS 加工工艺而被广泛使用^[11]。图 6 所示为梳齿电容式敏感结构示意图。敏感结构关于敏感方向对称,与敏感质量相连的梳齿在外界加速度作用下可自由运动,被称为动齿;固定在敏感结构上不可动梳齿被称为定齿。动齿被分成两组,形成差分电容的上极板和下极板;定齿则为差分电容的中间极板。敏感结构的相关参数如表 1 所示。

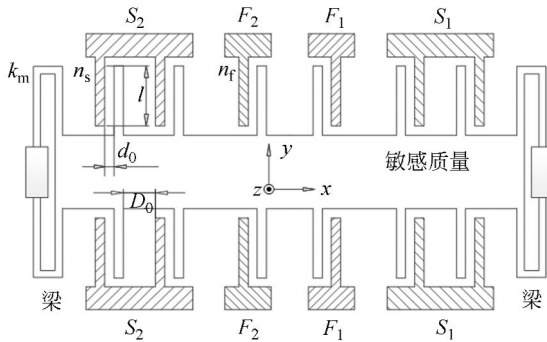


图 6 敏感结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sense element

表 1 MEMS 加速度计系统中的敏感结构参数

Tab. 1 Parameters of sense element used in MEMS accelerometer

参数	单位	值
敏感质量(<i>m</i>)	mg	0.57
阻尼系数(<i>b</i>)	N · s/m	10.31 × 10 ⁻³
刚度(<i>k_m</i>)	N/m	150
梳齿间距(<i>d₀</i>)	μm	3.1
总电容量(<i>C_{S0}</i>)	pF	9.66
梳齿重叠长度(<i>l</i>)	μm	300
梳齿数目(<i>n</i>)		376

3.2 时分复用和数字闭环微加速度计系统

图 7 所示为数字输出闭环微加速度计的工作原理。外界加速度引起的差分电容变化被读出后,经过 PID 控制器,再由 Sigma Delta 调制器转换为 PWM 波。由 PWM 波控制的反馈信号加载到敏感质量块的极板上产生静电力形成闭环^[12]。

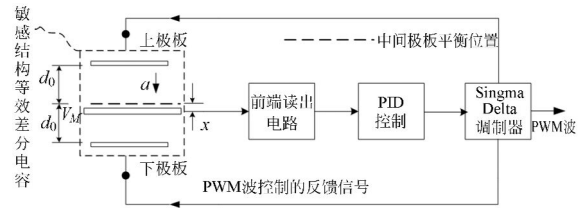


图 7 数字闭环微加速度计工作原理图

Fig. 7 Digital close-loop principles of microaccelerometer

为了实现数字闭环微加速度计的闭环工作,对文献[9]提出的接口电路进行改进。图 8 所示为数字闭环微加速度计工作时序图,每个周期被依次分为反馈、复位、读出 3 个部分。

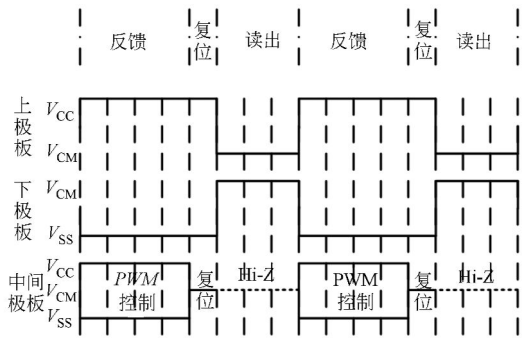


图 8 数字闭环微加速度计时序图

Fig. 8 Timing diagram of digital close-loop microaccelerometer

反馈阶段,上极板被充电至电源电压 V_{DD} ,下极板被接至地信号 V_{SS} 。当 Sigma Delta 调制器输出的 PWM 波为高电平时,中间极板接到 V_{DD} ; PWM 波为低电平时,中间极板接到 V_{SS} 。复位阶段紧跟反馈阶段之后,确保差分电容大小被准确读出。在读出阶段,上极板和下极板接到共模电平 $V_{CM} = (V_{DD} + V_{SS})/2$,中间极板悬空。在反馈阶段,敏感质量块受到的静电力为^[13]:

$$F_e = F_{e1} - F_{e2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon A \cdot \left[\frac{(V_{SS} - V_M)^2}{(d_0 - x)^2} - \frac{(V_{DD} - V_M)^2}{(d_0 + x)^2} \right] \quad (5)$$

加速度计闭环工作时,可忽略 x 的影响。记

Sigma Delta 调制器输出高点平时, $SD=1$; 输出低点平时, $SD=-1$, 则式(5)简化为:

$$F_e \approx SD \cdot \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon A \cdot \frac{(V_{DD} - V_{SS})^2}{d_0^2} \quad (6)$$

由式(6)可知, 反馈静电力也为脉宽调制信号。其大小保持不变, 方向受 Sigma Delta 调制器输出电平的控制。加速度计闭环工作时系统受到的惯性力 F_a 和静电力 F_e 处于平衡状态, 根据力平衡公式可得:

$$F_a = F_e, \quad (7)$$

其中:

$$F_a = ma, \quad (8)$$

得:

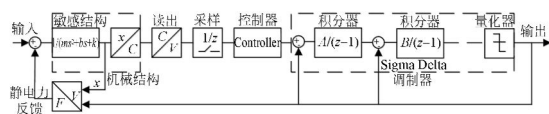
$$ma \approx SD \cdot \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon A \cdot \frac{(V_{DD} - V_{SS})^2}{d_0^2}, \quad (9)$$

其中: m 为敏感结构质量, a 为惯性加速度, d_0 为微加速度计极板间间隙, x 为中间极板与几何中心距离, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ 为相对介电常数, A 为极板正对面积, V_M 为中间极板反馈电压。当反馈静电力的平均值抵消微加速度计受到的惯性力时, 微加速度计处于闭环工作状态, 且 Sigma Delta 调制器输出的 PWM 波信号表征着输入加速度值。

3.3 数字闭环微加速度计系统模型

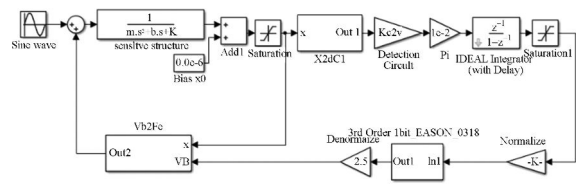
图 9 所示为数字闭环电容式微加速度计系统模型和 Simulink 模型, 其中差分电容读出电路被简化为线性增益模型, Sigma Delta 调制器的模型如前所述。采用图 9(b) 所示的 Simulink 模型进行仿真, 可以辅助数字闭环微加速度计系统的设计。

在闭环稳态下, 输入加速度引起的作用力和静电反馈力平衡, 此时动极板稳定在平衡位置附近, 差分电容读出电路输出为零, 积分器和 Sigma Delta 调制器的输出保持不变, 表征着外界输入加速度值, 如式(9)所示。图 9(b) 的 Simulink 模型仿真验证了该结果。



(a) 数字闭环电容式微加速度计的系统模型

(a) System model of digital close-loop microaccelerometer



(b) 数字闭环电容式微加速度计的 Simulink 模型

(b) Simulink model of digital close-loop microaccelerometer

图 9 系统模型及 Simulink 模型

Fig. 9 System model and Simulink model

3.4 测试结果与分析

图 10(a) 所示为采用 $0.35 \mu\text{m}$ 2P4M CMOS 标准工艺设计并流片实现的 ASIC 接口电路照片。图 10(b) 为实验装置图, 电容式微加速度计敏感结构和 ASIC 接口电路被键合在印刷电路板 (PCB) 上, 并采用锂电池供电以避免工频干扰。整个 PCB 工作在 5 V 电源下, 消耗约 7 mA 的电流, 即功率约为 35 mW 。

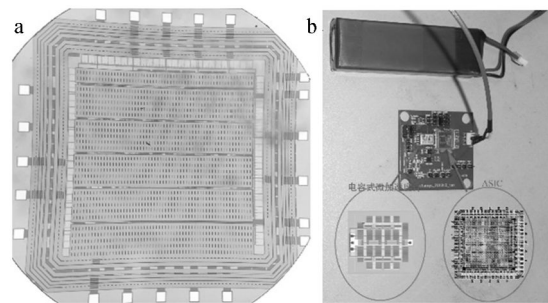
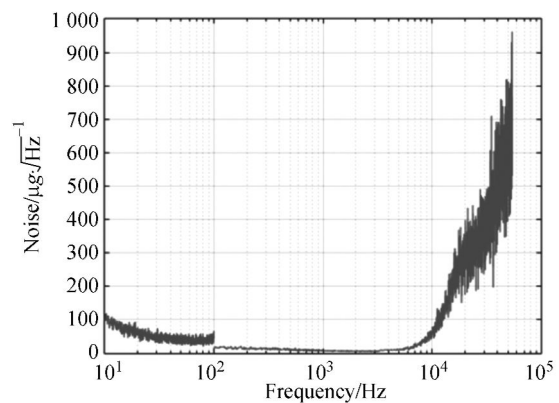


图 10 (a) ASIC 显微照片 (b) 实验装置图

Fig. 10 (a) Micro photo of ASIC (b) Photo of experimental setup



(a)

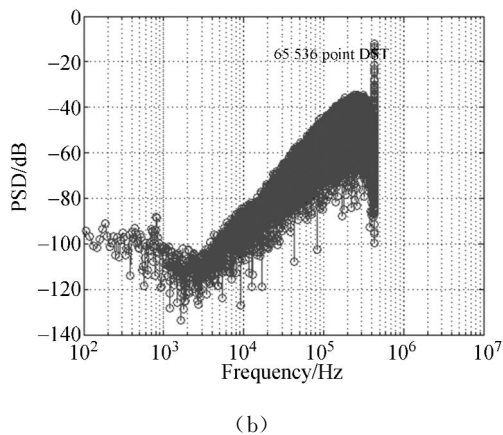


图 11 使用(a)频谱分析仪 (b)逻辑分析仪获取的 PSD
Fig. 11 PSDs gained using (a) spectrum analyzer (b) logic analyzer

使用频谱分析仪测量数字闭环电容式微加速度计输出 PWM 波的功率谱密度 (PSD), 如图 11 (a)所示。利用逻辑分析仪采集 PWM 波的数字信号并进行分析处理得到的 PSD 如图 11 (b)所示。两种方法得到的结果一致,在 100 Hz 处, PSD 为 $9.6 \mu g/\sqrt{Hz}$ 。

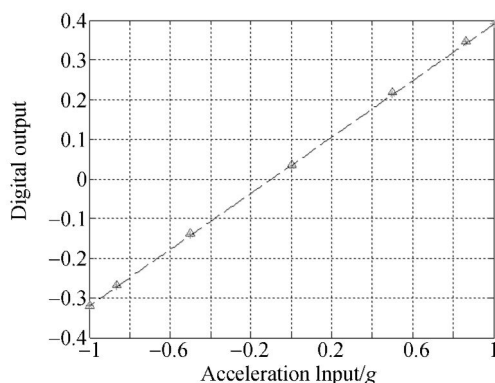


图 12 输出数字值与输入加速度的线性关系
Fig. 12 Linear relationship between digital output and input acceleration

重力场 1g 静态翻滚实验显示,输出数字值与输入加速度有着良好的线性关系,如图 12 所示。经计算,±1 g 内的非线性度为 0.065%,标度因子为 0.335/g,即量程大约为 ±3g。

图 13 给出了输入为 0 时偏值 K_0 的长时间稳定性,计算得知偏值稳定性约为 400 μg 。表 2 对比了本文与已知数字微加速度计的性能。

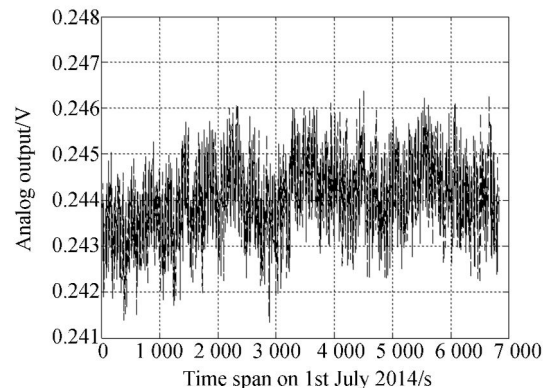


图 13 K_0 的长时间稳定性
Fig. 13 Long term stability of K_0

表 2 本文实验数据与已知数字微加速度计的性能对比
Tab. 2 Comparison of performance between reported digital microaccelerometers and this paper

机构(年份)	功耗/ mW	噪声水平/ $\mu g \sqrt{Hz}^{-1}$ (@ 100 Hz)	量程
Berkeley 大学 (2005) [4]	13 mW	150	未注明
Georgia 大学 (2006) [5]	4.5	300	±0.1 g
哈尔滨大业大学 (2010) [7]	40	100	±2 g
哈尔滨大业大学 (2012) [8]	40	30	±1.5 g
本文	35	10	±3 g

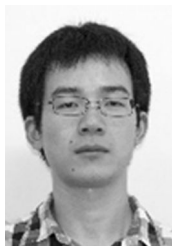
4 结 论

本文改进了电容式微加速度计 ASIC 电路结构,提出了分时段在中间极板上加载反馈信号和读出信号,利用控制器将中间极板控制在平衡位置,并使用 Sigma Delta 调制器进行模数转换和噪声搬移,进而实现微加速度计数字输出闭环的方案。建立了该数字输出闭环微加速度计的系统模型,用于系统的设计和仿真。实测结果显示所设计的系统的噪声水平为 $9.6 \mu g/\sqrt{Hz}$,量程为 ±3g,验证了数字输出闭环方案的可行性和系统模型的正确性,并优于已有测试结果。

参考文献:

- [1] 陶永康,刘云峰,董景新. 电容式高过载微机械加速度计的设计与实验[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 918-925.
TAO Y K, LIU Y F, DONG J X. Design and experiment of high-overload capacitive micromachined accelerometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 918-925. (in Chinese)
- [2] 李童杰,刘云峰,董景新,等. 力反馈式微机械加速度计刚度的自适应调整[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 24-30.
LI T J, LIU Y F, DONG J X, et al.. Adapting adjustment of stiffness for force feedback micro accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 24-30. (in Chinese)
- [3] 张晞,李德燕,王洪波,等. 数字闭环加速度计的带宽测试[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1):92-98.
ZHANG X, LI D Y, WANG H B. Bandwidth measurement of closed-loop accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):92-98. (in Chinese)
- [4] PETKOV V P, BOSER B E. A Fourth-order $\Sigma\Delta$ interface for micromachined inertial sensors [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, 40(8):1602-1609.
- [5] AMINI B V, AYZAZI F. A 4.5-mW closed-loop micro-gravity CMOS SOI accelerometer [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2006, 41(12): 2983-2991.
- [6] 刘晓为,尹亮,李海涛,等. 闭环电容式微加速度计全差分 CMOS 接口电路[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3), 580-586.
LIU X W, YIN L, LI H T, Full differential CMOS interface circuit for closed-loop capacitive micro-accelerometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3), 580-586. (in Chinese)
- [7] 刘云涛. 电容式 SIGMA_DELTA 微加速度计接口 ASIC 芯片研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] 吕炳均. 高阶 SIGMA DELTA 微加速度计接口 ASIC 芯片研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [9] 刘民杰,池保勇,刘云峰,等. 具有零偏补偿功能的电容式微加速度计接口电路[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2010, 50(11), 1815-1819.
LIU M J, CHI B Y, LIU Y F, et al.. Interface circuit with zero compensation function for capacitive microaccelerometers [J]. *J Tsinghua Univ (Sci&Tech)*, 2010, 50(11): 1815-1819. (in Chinese)
- [10] LIU L Y, CHEN L D, LI D M, et al.. A 1.1 mW 87 dB dynamic range $\Delta\Sigma$ modulator for audio application [J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, 31(5): 17-20.
- [11] XIE J B, SONG M, YUAN W Z. A high sensitivity micromachined accelerometer with an enhanced inertial mass SOI MEMS process[C]. 2013 8th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2013 336-339.
- [12] 刘爽,刘云峰,董景新. 静电悬浮加速度计轴间耦合误差角的在线测量[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2), 415-422.
LIU SH, LIU Y F, DONG J X. Online measurement of the coupled angle between different axes of electrostatically suspended accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2), 415-422. (in Chinese)
- [13] FAN D, LIU Y F, HAN F T, et al.. Identification and adjustment of the position and attitude for the electrostatic accelerometer's proof mass [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012.

作者简介:



储宜兴(1991—),男,安徽安庆人,博士研究生,2011年于电子科技大学获得学士学位,主要从事从事微加速度计 ASIC 研究。E-mail: chuyx11@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:



董景新(1948—),男,上海人,教授,博士生导师,1981年于清华大学获得硕士学位,主要从事 MEMS 惯性仪表技术和导航系统研究。E-mail: dongjx@mail.tsinghua.edu.cn