

Characteristic Research and Experiment of Micro Accelerometer Startup Drift *

DAI Gang^{1,2}, LI Mei¹, DU Lianming¹, HE Xiaoping¹, SU Wei¹, SHAO Beibei^{2*}

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, MianYang Sichuan 621900, China)
(2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The bulk silicon micro accelerometer exists the problem of long start-up time and large start-up drift which can not satisfy the requirement of fast start-up application. In order to reduce the start-up time of the micro accelerometer, this paper researches on the start-up characteristic of the micro accelerometer, analyzes the heat generating and its conduct in the micro structure and the detection circuit and establishes the finite element model for the thermal analysis. A thermal resistor with the micro structure inside the chip package was fabricated to verify the analysis. Finally, with a series of experiment, it was proved that the thermal conduction and time drift are the main reason of the micro accelerometer startup drift.

Key words: micro accelerometer; startup drift; thermal analysis; thermal conduction

EEACC: 7320E; 7230

doi: 10. 3969/j. issn. 1004-1699. 2011. 10. 009

微加速度计启动漂移特性研究与实验 *

代 刚^{1,2}, 李 枚¹, 杜连明¹, 何晓平¹, 苏 伟¹, 邵贝贝^{2*}

(1. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900;)
(2. 北京清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘 要: 目前研制的基于体硅工艺的微加速度计存在着启动时间较长, 启动漂移量较大的问题, 难以满足某些需要快速启动的应用。为了减少微加速度计的启动时间, 对微加速度计的启动漂移特性进行了研究。分析了启动过程中微加速度计表芯自身发热, 驱动和检测电路的发热热传导和电路参数漂移的影响, 并建立了包括电路的微加速度计有限元模型进行热仿真分析, 为了验证分析的结果设计了内嵌热敏电阻的微加速度计, 最后通过一系列的实验验证了微加速度计启动漂移主要是由于电路发热热传导和时间漂移共同作用所致。

关键词: 微加速度计; 启动漂移; 热分析; 热传导

中图分类号: TH824. 4

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)10-1416-06

微加速度计在冷启动后其输出会经历数分钟时间才会稳定, 这种漂移量称为启动漂移, 其中混合了时漂和温漂两种现象^[1]。目前制造的基于体硅工艺的微加速度计其预热时间约为 5 min ~ 10 min^[2], 漂移量约为全量程的 0.02% ~ 0.2% (50 g_n 量程典型值)。在引信或者飞行器的导航定位系统上应用时, 往往没有这么长的准备时间, 需要开机立刻开始使用^[3], 此时启动漂移会对输出造成较大的误差,

因此需要研究微加速度计的启动特性。当前的研究主要集中于微加速度计温度特性的实验建模与补偿^[4-5]以及温度控制方法等方面^[6-8], 对微加速度启动过程中的变化研究较少。

1 启动过程微加速度计变化因素分析

启动过程中微加速度计产生变化的因素可分为表芯自身的发热, 驱动和检测电路的发热至表芯的

热传导和驱动和检测电路的发热导致电路参数的漂移。

首先分析微结构上电后自身的发热情况,由于微加速度计的表芯可以等效为一个 RCR 串联电路^[9],其等效电路图如图 1 所示,只有交流分量能够通过,因此主要考虑交流电通过表芯产生的焦耳热。

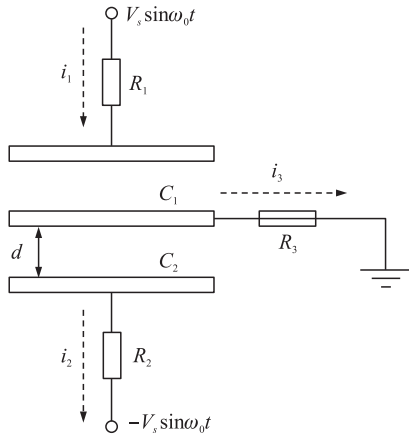


图 1 微加速度计表芯等效电路图

交流电通过电阻产生焦耳热,如果可以计算得到在电阻上的电流和微结构的电阻,即可计算热功率。由图 1,可得支路电流满足以下关系:

$$\begin{cases} V_s \sin \omega_0 t = i_1 R_1 + i_3 R_3 + \frac{1}{C_1} \int_{-\infty}^t i_1 dt \\ V_s \sin \omega_0 t = i_2 R_2 - i_3 R_3 + \frac{1}{C_2} \int_{-\infty}^t i_2 dt \\ i_1 = i_2 + i_3 \end{cases} \quad (1)$$

该微分方程组解析解较为复杂,可使用电路仿真工具或者数学工具建立该电路模型进行数值计算。分析时考虑理想情况,当微结构对称且闭环反馈平衡时, $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$, 此时有简化的解为

$$\begin{cases} i_1 = i_2 = \frac{V_s \sin \omega_0 t}{\sqrt{\left(\frac{2}{\omega_0 C}\right)^2 + 4R^2}} \\ i_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

浓硼硅的电阻率约为 $4 \times 10^{-5} \Omega \text{m}^{[10]}$, 根据微结构尺寸估计出 R_1, R_2, R_3 。估算出的 $R_1 = 5 \Omega, R_2 = 5 \Omega, R_3 = 10 \Omega$ 。在已知通过电阻的电流大小的情况下,电阻的焦耳热功率可以如式(3)计算。

$$P = \frac{\omega_0}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_0}} I^2 \sin^2(\omega_0 t) dt = \frac{I^2 R}{2} \quad (3)$$

本结构的微加速度计的相关参数为: $V_s = 4 \text{ V}, \omega_0 = 200 \text{ kHz}, C = 1.2 \text{ pF}$ 。可以计算得到表芯内部硅结构等效电阻上的热功率为 $P_1 = 1.2 \times 10^{-12} \text{ W}, P_2 = 1.2 \times 10^{-12} \text{ W}, P_3 = 0$, 根据微结构的体积 $V = 4.8 \times 10^{-9} \text{ m}^3$, 可以计算出热源系数为 $5 \times 10^{-4} \text{ W/m}^3$ 。实际上 R_1 和 R_2 的值不可能完全一样,只要 R_1 和 R_2 有差异, i_3 就不为零,这样 i_3 支路也会产生热量,由于 $i_3 < i_{1\text{max}}$, 因此 i_3 支路有最大电流时, $P_3 = 2P_1 = 2.4 \times 10^{-12} \text{ W}$, 因此可以计算出芯片由于焦耳热导致的热源系数最大为 $1 \times 10^{-3} \text{ W/m}^3$ 。

其次是驱动和检测电路自身的发热,通过电流计可以测得微加速度计的电流,进而计算出驱动和检测电路的总功耗。微加速度计的输入直流电压为 $\pm 12 \text{ V}$, 测得电流分别为 6.664 mA 和 2.52 mA , 因此总功率为 110.2 mW , 根据驱动和检测电路的 PCB 的体积,可以估算出驱动和检测电路的平均热源系数为 $8.6 \times 10^4 \text{ W/m}^3$, 远大于表芯自身的发热,但是由于 PCB 的发热是通过铜引脚传导到表芯中,所以不能确定表芯内部的发热情况,即不能确定哪部分的发热占主要部分,因此需要进行 PCB 的热传导的有限元仿真分析,以确定传导到表芯的热量以及对表芯温度的影响。

第 3 是驱动和检测电路芯片的发热导致其参数发生漂移,即电路自身的漂移。根据文献[12],可知电路参数自身的漂移对输出的影响极小,因此建模时排除了这种可能性。

2 微加速度计启动漂移建模

微加速度计启动漂移过程建立的模型主要是为了对微加速度计表芯的自发热和由驱动和检测电路发的热量的热传导进行仿真分析,以仿真启动漂移过程表芯的温度变化。建立的模型如图 2 所示。

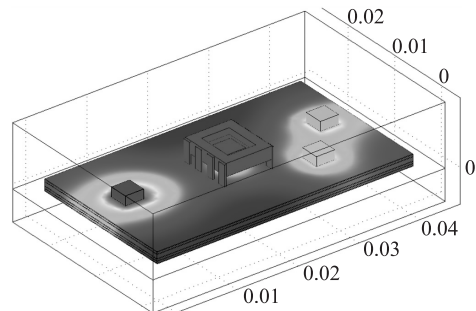


图 2 驱动和检测电路有限元模型

其中各部分的尺寸都是按照制作的微加速度计的驱动和检测电路进行建模,模型包括封装采用 DIP8 陶瓷封装的微加速度计表芯,驱动和检测电路

PCB 多层板和主要的芯片。模型中没有包括走线和电阻电容,并且将热源平均分布到驱动和检测电路中的几个主要的芯片上。由于 PCB 板所使用的环氧树脂与铜的热导率相差较大,所以需要根据具体电路的分层对 PCB 进行分层建模。多层 PCB 的尺寸参数如图 3 所示。使用的是 6 层 PCB 板,PCB 板的厚度为 1.814 mm,由 5 层 0.32 mm 厚的核心层与填充层组成,信号层厚度为 0.04 mm,若某一个信号层为敷铜层时,就需要进行分层,通常 6 层 PCB 板中有 4 层是敷铜层,包括顶层、底层、电源层和地层,微加速度计的驱动和检测电路共有 5 个敷铜层,如图 3 所示。

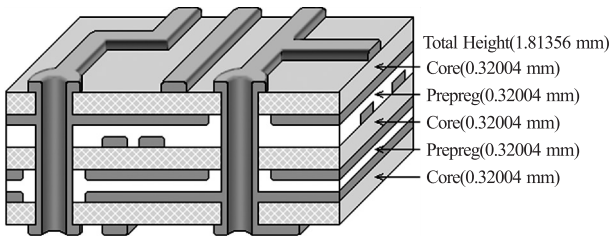


图 3 6 层 PCB 层间尺寸示意图

模型中使用的材料主要有铜,环氧树脂 (FR-4),陶瓷,硅与空气。其中硅是驱动和检测电路芯片中的主要热源,陶瓷是封装的材料,铜引脚将微加速度计表芯与 PCB 连接到一起,这几种材料的在 20 °C 附近的主要属性参数如表 1 所示^[11]。

表 1 模型材料主要属性表

项目	热源 (硅材料)	PCB (FR-4)	铜	陶瓷 Al ₂ O ₃	空气	塑料
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2330	1900	8940	3000	1.2	2700
热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	703	1369	400	840	1015	900
热传导 $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	163	0.3	400	15.91	0.026	0.2

几个主要的芯片作为热源,因为每种芯片的热源系数与通过芯片的电流大小有关,所以每种芯片的发热情况也有所不同,进行简化处理将每个芯片的热源系数设置为相同值。根据驱动的检测电路的功率与芯片的体积,可以计算出热源系数满足

$$Q_s = P/V \quad (4)$$

其中 P 是驱动和检测电路的总功率, V 是用作热源的芯片的总体积。微加速度计驱动和检测电路的输入直流电压为 $\pm 12 \text{ V}$,测得相应电流为 6.664 mA 和 2.52 mA ,因此驱动与检测电路的总功率为

110.2 mW 。当将芯片用作热源时,由于芯片的总体积约为 $6.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3$,因此可以计算出 $Q_s = 1.62 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ 。

3 启动漂移有限元仿真与实验

根据上一节建立的模型,可以对启动漂移过程进行有限元分析。首先进行热源为驱动和检测电路芯片的 $0 \sim 1000 \text{ s}$ 的瞬态分析,设置环境温度和初始温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,设置微加速度计芯片的自发热的热源系数为 100 W/m^3 ,分别设置热源为驱动检测电路芯片和 PCB 板两种情况进行仿真,可以得到微加速度计表芯中心点温度与上电时间的关系如图 4 所示。

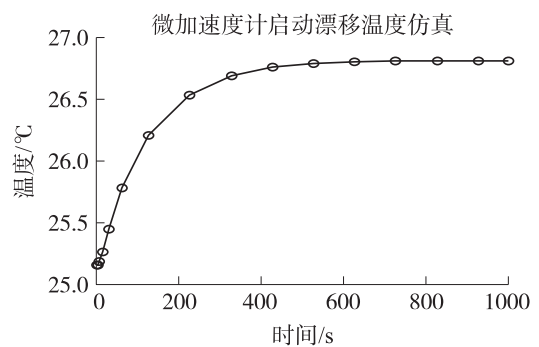


图 4 微加速度计芯片上电过程温度变化图

由仿真结果可见微加速度计芯片的上电时的升温过程是一个较为缓慢的过程,达到稳态需要近 300 s 的时间,温度上升约 $1.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为了验证仿真结果,我们参考文献[12]的方法将热敏电阻粘在微加速度计表芯 DIP8 封装内,再使用金线将热敏电阻的两端引出。通常为了减小热敏电阻自身的发热,通常会选择较大电阻值的热敏电阻,这里选择的是在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时阻值为 $100 \text{ k}\Omega$ 的 NTC 型的热敏电阻。热敏电阻的如图 5 所示。

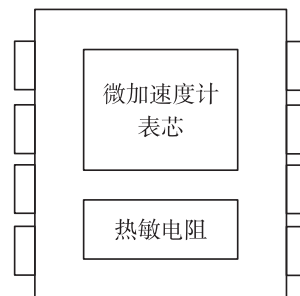


图 5 热敏电阻位置示意图

热敏电阻的阻值与温度的关系如式

$$R_T = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (5)$$

其中 R_T 是温度为 T 时热敏电阻的阻值, R_0 是在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时热敏电阻的阻值, B 是热敏电阻的温度系数, T_0 为参考温度点, 为 25 $^{\circ}\text{C}$, T 为当前温度。热敏电阻测量电路如图 6 所示。

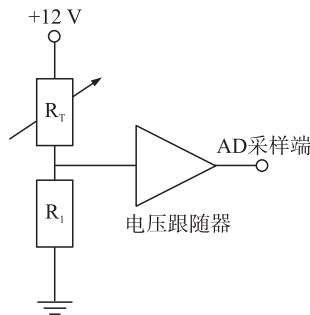


图 6 热敏电阻测量电路

R_1 是固定阻值的电阻, 于是输出电压满足

$$V = 12 \frac{R_1}{R_T + R_1} \quad (6)$$

在实验室环境条件下, 温度约为 10 $^{\circ}\text{C}$ ~ 20 $^{\circ}\text{C}$, 为了验证启动漂移分析的正确性, 设计了 3 次实验: 第 1 次是室温条件下, 只将微加速度计芯片的热敏电阻的两端通过短引线接到直流电源上, 芯片悬空, 测量热敏电阻的输出, 检查封装在微加速度计芯片内的热敏电阻的自发热是否能平衡。第 2 次是在室温条件下, 将驱动和检测电路的电容检测载波, 直流偏压与反馈电压断开, 并调节电源电压使得驱动和检测电路的电功率与正常工作状态一致, 这样微加速度计表芯内部就没有热源, 只有 PCB 发热的热传导, 可以检测电路的热传导影响表芯的温度变化。第 3 次是在室温条件下微加速度计静态正常工作, 记录其上电过程, 然后再进行温度实验, 得到其在大范围温度条件下的温度漂移系数, 以验证其上电过程的漂移是否是温度变化引起漂移占主要部分。由于温度实验的时间较长, 在实验室条件下室温随着一天时间的变化也略有不同, 因此需要使用一个室温测试电路作为参考, 即将同样型号的热敏电阻用引线将两端直接接到热敏电阻测量电路上, 测量室温。

当使用 100 $\text{k}\Omega$ 的热敏电阻, 串联电阻 R_1 的阻值为 100 $\text{k}\Omega$ 时, 热敏电阻自身的焦耳热功率约为 68 μW (25 $^{\circ}\text{C}$ 时), 热源系数为 $5.6 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^3$, 这个热源系数较大, 对其进行有限元建模仿真并只设置其为热源, 得到的仿真结果图如图 7 所示, 由仿真结果可知, 热敏电阻自身发热对微加速度计表芯的温度影响约为 0.06 $^{\circ}\text{C}$ 。可通过第一种实验进行验证。

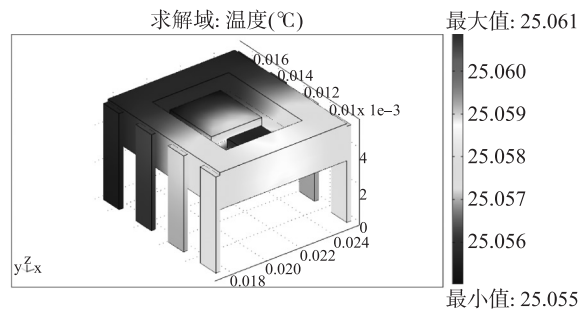


图 7 热敏电阻自发热仿真图

第 1 次实验的结果如图 8 所示, 根据式 (5) 和 (6) 将热敏电阻端的输出电压转化为温度值, 如式 (7)

$$T = \frac{BT_0}{T_0 \ln \frac{(12-V)R_1}{VR_0} + B} \quad (7)$$

其中 $B = 4\ 000$, $R_0 = R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $T_0 = 298 \text{ K}$ 。扣除掉参考热敏电阻得到的室温变化后, 在启动过程中热敏电阻自发热对表芯温度的影响如图 8 所示。

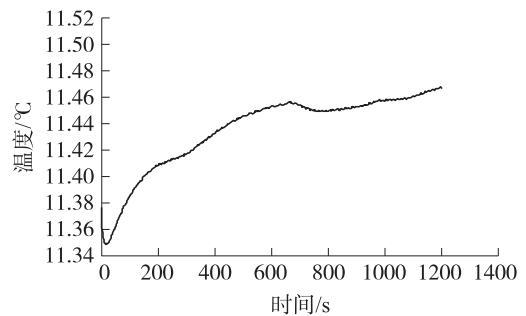


图 8 热敏电阻自发热影响图

可见热敏电阻自身的影响约为 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 与仿真结果大致相当, 并且是逐渐增加的, 符合理论推导。因此结论是热敏电阻的自发热基本不会影响表芯的温度。

然后进行第 2 次实验, 将检测载波, 反馈与偏压去掉, 并调节电路电压使得电功率一致时测量上电过程热传导导致的温度变化如图 9 所示。

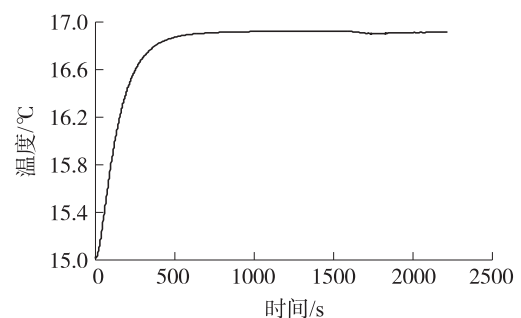


图 9 无载波时微加速度计表芯上电过程温度变化

由图知在无载波无偏压无反馈的条件下,只靠 PCB 自身发热的热传导,微加速度计表芯封装内的温度在上电后 300 s 时上升了约 1.9 °C,并在 400 s 时达到稳态,可见电路传导的热量使得微加速度计在上电过程中具有较大的温升,与仿真结果近似。

为了进一步研究电路传导热量的比重,进行了第 3 次实验,即微加速度计在正常工作状态下的输出,并与第 2 次实验进行比较,平移曲线使其起始温度点相同,结果如图 10 所示。

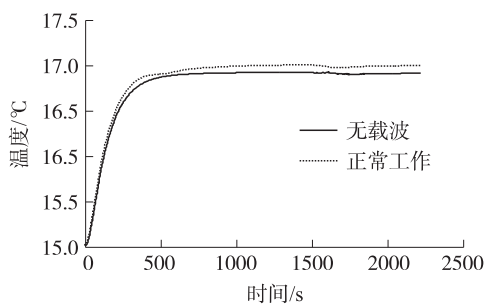


图 10 无载波与正常工作时微加速度计表芯上电过程温度变化

由图中可以看出,正常工作时达到稳态后的温度升高比正常工作时温度升高约 0.08 °C,与第 1 次实验表芯温升约为 0.1 °C 的结果相符,并且从曲线可以看出在升温过程中无载波情况与正常工作情况的温度曲线基本符合,因此可以推断出表芯自身发热的影响极小,因此可以在封装内加入温敏电阻起到温度传感器的作用,并根据该温敏电阻的输出对微加速度计启动漂移过程进行补偿。

第 3 次实验得到微加速度计上电过程的输出与温度的关系图如图 11 所示。由图中可知当上电时温度逐渐升高,在 900 s 的时间内温度漂移为 19 mg_n;当温度达到稳态后,即 $T > 900$ s,微加速度计的温度达到稳态,其输出仍在逐渐漂移,这就是时间漂移,在 1 600 s 的时间内,漂移量为 3.6 mg_n,要小于启动过程温度漂移的影响,可以推断在初始 900 s 的时间内,时间漂移同样存在,但是

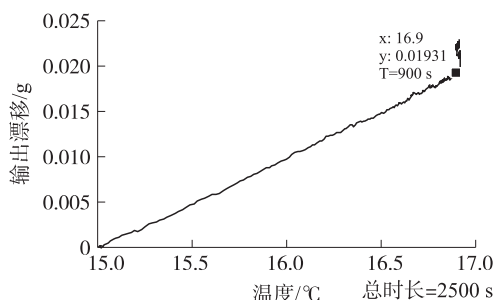


图 11 微加速度计上电过程的输出与温度的关系图

由于其量级小于温度漂移,因此不明显,这些就说明了启动漂移是由温度漂移和时间漂移共同作用产生的。

4 结论

本文研究了基于体硅工艺的电容式微加速度计的启动漂移特性,首先分析了启动过程中微加速度计表芯自身发热,驱动和检测电路的发热热传导和电路参数漂移的影响,并建立了包括电路的微加速度计有限元模型进行热仿真分析,为了验证分析的结果设计了内嵌热敏电阻的微加速度计,最后设计了一系列实验进行了验证,实验结果是微加速度计启动过程中驱动与检测电路的温升导致的微加速度计表芯温升约为 1 °C ~ 2 °C,由于表芯自身发热的温度升高基本上可忽略不计,启动漂移是由温度漂移和时间漂移共同作用产生的,由于时间漂移量较小,因此对于启动漂移可以利用内嵌温敏电阻的方法对微加速度计启动漂移中的温度漂移部分进行补偿,以达到抑制启动漂移的效果。

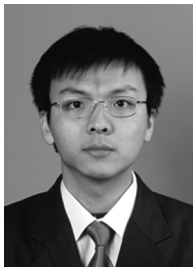
参考文献:

- [1] 翁彦雯,董景新,刘云峰. 微机械加速度计的温度特性实验研究[J]. 航空精密制造技术,2004,40(4):37-40.
- [2] 罗兵,尹文,吴美平. 滤波技术在 MIMU 温度漂移补偿中的应用[J]. 中国惯性技术学报,2008,16(3):348-351.
- [3] V Fleck, E Sommer, M Brokelmann. Study of Real-Time Filtering for an Inertial Measurement Unit (IMU) with Magnetometer in a 155 mm Projectile [C]//Position, Location, And Navigation Symposium, 2006 IEEE/ION, April 25-27, 2006, 803-807.
- [4] 张霄,房建成,李建利,等. 一种隐式结构 MIMU 设计及标度因数温度误差分析[J]. 中国惯性技术学报,2008,16(6):665-671.
- [5] 王楷群,张文栋,毛海央. 压阻式微加速度计灵敏度的温度特性研究[J]. 传感技术学报,2008,21(9):1536-1540.
- [6] K I Lee, Takao Hidekuni, Sawada Kazuaki, et al. Low Temperature Dependence Three-Axis Accelerometer for High Temperature Environments with Temperature Control of SOI Piezoresistors [J]. Sensors and Actuators A, 2003, 104:53-60.
- [7] K I Lee, H Takao, K Sawada, et al. Analysis and Experimental Verification of Thermal Drift in a Constant Temperature Control Type Three-Axis Accelerometer for High Temperatures with a Novel Composition of Wheatstone Bridge [C]//Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2004:241-244.
- [8] Christian Falconi, Marco Fratini. CMOS Microsystems Temperature Control [J]. Sensors and Actuators B, 2008, 129:59-66.
- [9] 施芹. 提高硅微陀螺仪性能若干关键技术研究-正交误差与杂散电容分析研究[D]. 东南大学博士论文,2005.
- [10] Ylönen Mari, Torkkeli Altti, Kattelus Hannu. In Situ Boron-Doped LPCVD Polysilicon with Low Tensile Stress for MEMS Applications [J]. Sensors and Actuators A, 2003, 109:79-87.

[11] Comsol Material Database[Z]. <http://www.comsol.com>.

[12] 李童杰,刘云峰,董景新,等. 微加速度计温度特性及敏感元件

自恒温方案[J]. 清华大学学报(自然科学版),2010,50(7): 1013-1017.



代 刚(1984-),男,四川绵阳人,博士研究生,2006 年获得北京清华大学学士学位,2006 年起攻读北京清华大学博士学位,主要从事基于 MEMS 的惯性器件与惯性引信,制导方面的研究, free.dai@hotmail.com;



邵贝贝(1946-),男,教授,博士生导师,1970 年毕业于清华大学工程物理系,致力于辐射监测仪器、核电子学、高能加速器及其它核装置的数据采集与控制系统,计算机嵌入式应用系统的建造与研究, bbshao@tsinghua.edu.cn。