

文章编号 1004-924X(2014)06-1590-08

硅微振梁式加速度计的温度检测及闭环控制

王帆, 董景新*, 赵淑明

(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)

摘要:为实现硅微振梁式加速度计系统芯片级温度测量及系统闭环, 本文针对系统的非惯性结构部分提出了微机电系统(MEMS)结构温度的芯片级测量和闭环控制优化方法。与以温控罩的温度作为参考温度的方法不同, 该方法提出了供芯片级温度测量的 MEMS 结构、工艺及配套电路, 通过直接测量 MEMS 结构的温度完成实时补偿, 从而提高了测量精度。该方法在闭环控制的前置电路中应用了二极管电容解调电路, 与前期使用的跨阻或者跨导方案相比, 对器件的要求从 pA 级降至 nA 级。运用时域方法求得二极管电路方案的解析解, 提出参数优化设计方法, 保证了电容测量输入与输出间的线性关系。最后, 采用二阶最优模型对闭环控制的后置电路进行参数优化, 控制了上电时间。配合硅微振梁式加速度计原理样机进行了实验。实验结果表明, 温度补偿后的零偏稳定性为 $52.0 \mu\text{g}$, 标度因子稳定性为 16.0×10^{-6} , 分辨率为 $34.9 \mu\text{g}$ 。这些结果验证了本文理论的可行性。

关键词:硅微振梁式加速度计; 温度测量; 电容测量; 闭环控制。

中图分类号: TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1590

Temperature measurement and close-loop control of silicon resonant accelerometer

WANG Fan, DONG Jing-xin*, ZHAO Shu-ming

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

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

Abstract: To measure the chip-level temperature and to achieve close-loop control for a Micro-Electro-Mechanical(MEMS) resonant accelerometer system, this paper investigates non-inertial parts of the system, proposes a method to measure the temperature of the MEMS structure and optimizes the parameters in the close-loop control. Different from the traditional method that using a temperature from a temperature control cover as the conference, this paper proposes design methods of MEMS structures, processing technology and circuits, and achieves the temperature compensation by measuring the MEMS structure temperature directly to improve the temperature measuring accuracy. Furthermore, a diode pre-circuit is applied to detection of the variation of the tiny capacity instead of the transimpedance amplifier and transconductance amplifier, which reduces the requirement for high-performance components from pA to nA magnitudes. Based on the analysis in the time domain, analytical so-

收稿日期: 2013-12-05; 修订日期: 2014-01-20.

基金项目: 国家预研基金资助项目(No. 9140A09023110JW0102)

lution of diode pre-circuit is proposed to optimize the parameters and to guarantee the linear relationship between input and output. Moreover, a second-order optimal mode is applied to control of the settling time of the post-circuit. Experiment shows that after compensation on temperature, the MEMS resonant accelerometer has the performance of bias stability of $52.0 \mu\text{g}$, scale factor stability of 16.0×10^{-6} , resolution of $34.9 \mu\text{g}$. The result indicates that the proposed theories can satisfy the requirements of high-performance MEMS resonant accelerometer systems.

Key words: silicon resonant accelerometer; temperature measurement; capacitance detection; close-loop control

1 引言

硅微振梁式加速度计(Silicon Resonant Accelerometer, SRA)是将敏感轴方向加速度输入转换为频率输出的惯性传感器。与硅微电容式加速度计相比,由于其在谐振状态工作,在系统能量损耗、精度上具有一定优势^[1]。与摆式积分陀螺加速度计相比,由于其可以利用 MEMS 工艺在晶圆上批量加工并封装,在成本及体积上具有优势^[2]。

目前,美国 Draper 实验室、麻省理工大学的合作研究团队在硅微振梁式加速度计领域处于国际领先地位。其于 2005 年研制的原理样机,零偏稳定性和标度因子稳定性分别达到了 $2 \mu\text{g}$ 和 1×10^{-6} ^[2]。此后,国内外的多家研究机构均展开了相关研究^[2-9,14]。2013 年中国航天电子技术研究院研究的原理样机实现的零偏稳定性已达 $42.5 \mu\text{g}$ ^[4]。

本文围绕高精度硅微振梁式加速度计的非惯性结构部分展开研究,包括芯片级温度检测及闭环控制两部分。硅微振梁式加速度计芯片具有输出频率随温度变化而漂移的缺陷^[4]。为了在不同的温度环境下应用硅微振梁式加速度计,需要获取芯片上的温度并进行补偿^[7]。通常以温控罩显示的温度代表硅微芯片上的实时温度^[5],但这会造成一定的误差。本文通过设计可用于温度检测的 MEMS 结构、工艺及配套电路,提出了一种芯片级温度测量的方法。该方法可以更准确地获得芯片上的温度,供后续温度补偿。此方法还可推广至其他 MEMS 结构的芯片级温度检测。之前硅微振梁式加速度计的前置电路采用跨阻、跨导放大器方案^[5,6,9,10],此方案对系统中运放的输入偏置电流等指标有较高要求。本文采用二极管电

容解调电路,降低了对器件的要求。同时在时域上对电路求得解析解并完成参数优化,保证了二极管电容解调电路输出与输入之间的线性。通常硅微振梁式加速度计的后置闭环电路有自激振荡^[2]和锁相环^[6]两种方案。本文针对自激振荡的电路方案,运用二阶最优模型提出了电路参数的优化原则,控制了上电稳定时间。文中利用课题组自主研发的硅微振梁式加速度计原理样机进行了仿真和实验,验证了理论推导的可行性及可靠性。

2 硅微振梁式加速度计工作原理

2.1 谐振梁加速度计芯片工作原理

加速度计系统如图 1 所示,硅微振梁式加速度计主要由敏感质量块、振梁及支撑梁 3 个部分组成。通电时,静电激励使得两侧的振梁于反相谐振状态工作。当有敏感方向 x 向的加速度输入时,左右两侧的振梁分别承受拉力和压力,使得一侧振梁的谐振频率 f_1 增加,另一侧谐振频率 f_2 减小。可以证明,频率差 $(f_1 - f_2)$ 与输入加速

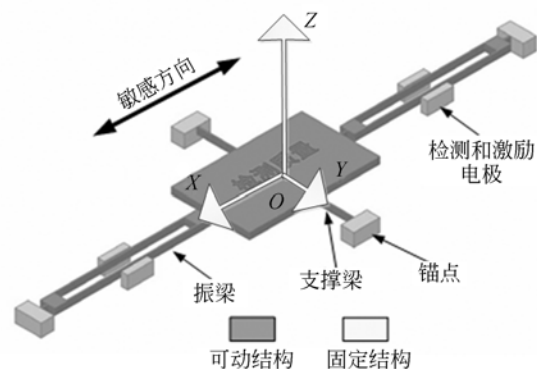


图 1 谐振式加速度计系统原理图

Fig. 1 System diagram of MEMS oscillator accelerometer

度 a 在一定量程内呈正比关系^[2]。检测到这个频率差,即可得到输入加速度的大小。

此外,还可通过加微杠杆的方式放大惯性力^[14]。

2.2 电路系统

电路系统如图 2 所示,其主体包括温度检测、闭环控制及频率检测 3 个部分。闭环控制分为前置二极管电容检测和后置自激振荡电路。自激振荡电路包含有移相环路和稳幅环路共 2 个环路。

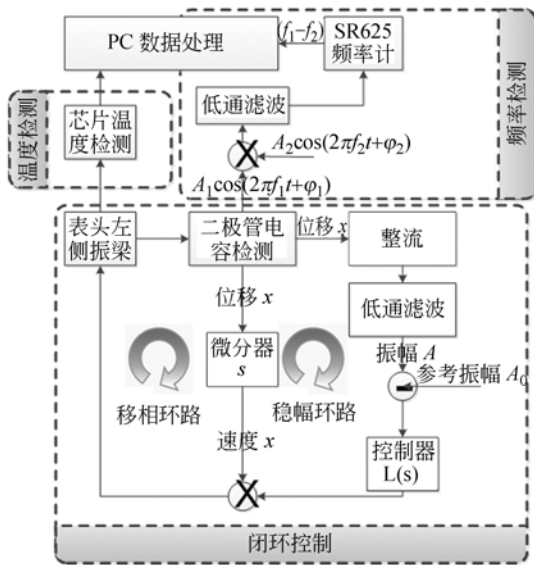


图 2 电路系统原理图

Fig. 2 System diagram of electrical system

由于每一侧振梁中点的位移 x 和振梁上的动梳齿与定梳齿之间的电容值变化量呈正比^[2]。故硅微振梁式加速度计每一侧振梁的位移 x 可以通过检测动梳齿与定梳齿之间的电容信号获取。该信号采用二极管电容解调电路作为前置电路进行检测。

硅微振梁式加速度计需要其两侧振梁始终工作在反相谐振状态。为了保持谐振状态,采用自激振荡电路激励谐振梁工作在谐振状态。

自激振荡电路需要保证整个电路相移为 0° 且幅值放大倍数为 1^[2,6]。因此,图 2 包括了移相和稳幅 2 个环路。

移相环路中,通过振梁谐振状态移相 90° ,微分器移相 -90° ,再经反相,实现了整个谐振系统的总相移为 0° ^[2,6]。

稳幅环路的功能是通过负反馈将实时振幅 A 稳定在设定值 A_0 处,满足了自激振荡电路对于

环路幅值放大倍数为 1 的要求。

温度检测电路包括了芯片上溅射形成的铂电阻及配套电路,用于测量芯片温度。芯片温度数据输入 PC 供实时补偿。

频率检测电路的作用是获取频率差 ($f_1 - f_2$)。两侧振梁的电容检测信号 $A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1(t))$ 、 $A_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2(t))$ 经乘法器再通过低通滤波,相当于将两侧振梁的信号频率做了差分。通过检测差分后的信号频率 ($f_1 - f_2$),即可得到输入加速度 a 的大小。

3 温度检测部分

3.1 温度检测的 MEMS 结构

将与 MEMS 结构锚接的 PYREX 玻璃基底进行表面处理,然后采用玻璃方法光刻显影。随后干法清洗,先后溅射 100 nm 的钛和 200 nm 的铂,最后超声剥离,形成图形化的长导线作为铂电阻。加工好的铂电阻如图 3 中细导线所示,图中其它结构是应工艺及导热等要求而形成的。

由于钛电阻率是铂电阻率的约 4 倍,故最终导线阻值主要取决于铂电阻。经测量,加工完成的芯片上铂电阻阻值为 2.10 k Ω 。

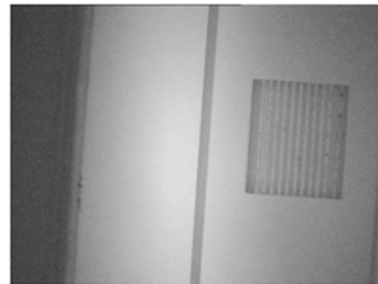


图 3 芯片上铂电阻加工图

Fig. 3 Photo of platinum resistanc on IC

3.2 温度检测的配套电路

测温电路原理如图 4 所示,配合芯片上的铂电阻,应用图中电路实现温度测量。图中 R_{Pt} 为芯片上的铂电阻,其余电阻为精度达 0.01% 的高精度电阻。

运放的输出为:

$$V_o = \frac{5R_{Pt}R_2}{R_0R_1} \quad (1)$$

由于铂电阻阻值在一定温度范围内对温度呈线性,故运放的输出的变化量 ΔV_o 正比于温度的

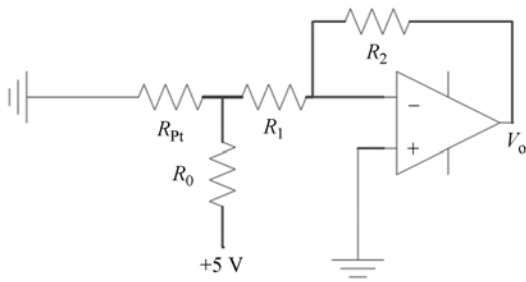


图 4 测温电路原理图

Fig. 4 System diagram of circuit detecting

变化量 ΔT 。用四位半万用表测量 ΔV_0 。即可以得知芯片上的温度变化量,精度优于 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

4 前置二极管电容解调电路

4.1 谐振频率的检测原理

在谐振状态时,每一侧振梁的模式如图 5 所示。振梁谐振频率的检测方案如图 6 所示。

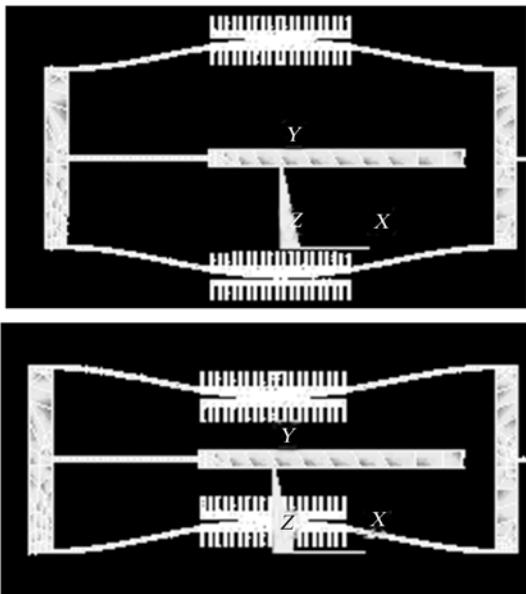


图 5 反相谐振状态示意图

Fig. 5 System diagram of inverting mode

图 6 中跟随振梁振动的动梳齿和固定在基底上的两个定梳齿之间的电容分别为 C_1 、 C_2 。由于 $(C_1 - C_2)$ 与振梁中点 x 方向的位移成正比^[2,5],通过检测 $(C_1 - C_2)$ 信号的频率可知振梁的振动频率。采用二极管电容解调电路对 $(C_1 - C_2)$ 信号进行检测。

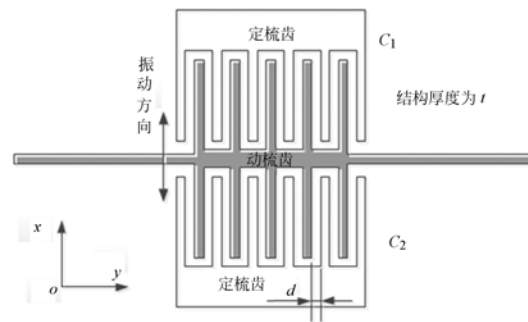


图 6 谐振频率检测原理图

Fig. 6 System diagram of resonant frequency

4.2 前置二极管电容解调电路的参数设计

通电时,图 6 中动梳齿接频率为 f_0 的方波载波,定梳齿接二极管电容解调电路,原理如图 7 所示。

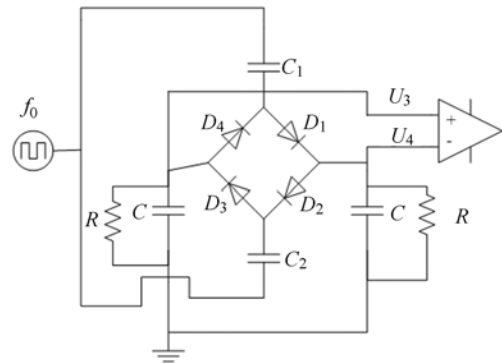


图 7 二极管电容检测原理图

Fig. 7 Scheme of diode circuit detecting capacity

下面将证明二极管解调电路的输出 $(U_3 - U_4)$ 与 $(C_1 - C_2)$ 在一定条件下呈正比关系。

在每一个电容前串联一虚拟电阻 R' ,建立模型如图 8 所示。

记 U_0 和 $2T_0$ 分别为方波载波的幅值和周期, U_D 为二极管的压降。

在载波方波的正半周时,二极管 D_1 、 D_3 导通, D_2 、 D_4 截止。

对于 C_1 、 i_1 、 u_5 支路,时域上有如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{u_5 - u_7}{R'} = \frac{du_7}{dt}C \\ i_1 = \frac{u_5}{R} + \frac{u_5 - u_7}{R'} \\ \frac{d(u_0 - i_1 R' - u_1)}{dt}C_1 = i_1 \\ u_1 = u_5 + i_1 R' + U_D \end{cases} \quad (2)$$

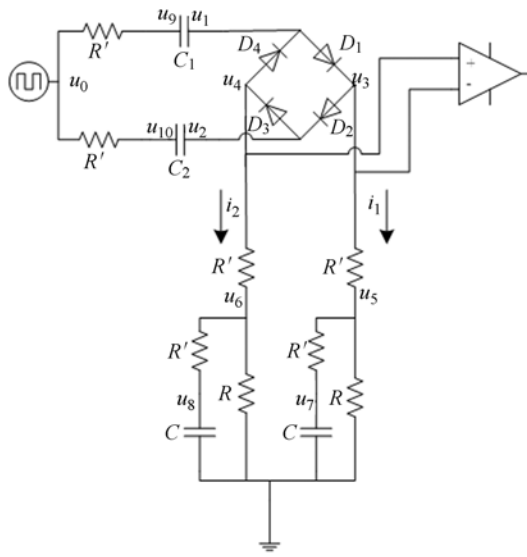


图 8 二极管电容检测电路模型
Fig. 8 Model of diode circuit

四式联立得：

$$\frac{d^2 u_7}{dt^2} R' C (3 + 2 \frac{R'}{R}) + \frac{d u_7}{dt} [(\frac{R'}{R} + 1)(\frac{C}{C_1} + 1) + \frac{R'}{R}] + \frac{u_7}{RC_1} = 0, \quad (3)$$

解出：

$$u_7 = \hat{A} e^{-x_1 t} + \hat{B} e^{-x_2 t}, \quad (4)$$

其中： \hat{A} 、 \hat{B} 为常数；

$$x_1 = \frac{(\frac{R'}{R} + 1)(\frac{C}{C_1} + 1) + \frac{R'}{R}}{R' C (3 + 2 \frac{R'}{R})}, \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{1}{RC_1 (\frac{R'}{R} + 1)(\frac{C}{C_1} + 1) + \frac{R'}{R}}. \quad (6)$$

同时可以得到：

$$u_0 - u_1 = u_0 + \hat{A} \frac{C}{C_1} e^{-x_1 t} - \hat{B} e^{-x_2 t} - U_D, \quad (7)$$

对于 C_2 、 i_2 、 u_6 支路，经类似讨论可以得到：

$$u_8 = \hat{C} e^{-y_1 t} + \hat{D} e^{-y_2 t}, \quad (8)$$

其中： \hat{C} 、 \hat{D} 为常数；

$$y_1 = \frac{(\frac{R'}{R} + 1)(\frac{C}{C_2} + 1) + \frac{R'}{R}}{R' C (3 + 2 \frac{R'}{R})}, \quad (9)$$

$$y_2 = \frac{1}{RC_2 (\frac{R'}{R} + 1)(\frac{C}{C_2} + 1) + \frac{R'}{R}}. \quad (10)$$

$$u_{10} - u_2 = u_0 + \hat{C} \frac{C}{C_2} e^{-y_1 t} - \hat{D} e^{-y_2 t} - U_D, \quad (11)$$

在载波方波为负半周时，进行类似讨论。

由于正负半周切换时， C_1 、 C_2 和 C 两侧电压差（即 $u_0 - u_1$ 、 $u_{10} - u_2$ 、 u_7 、 u_8 ）无跃变，以此建立方程组，可解出 $\hat{A} \sim \hat{D}$ 。再令 $R' \rightarrow 0$ ，可得：

$$u_3 - u_4 = \frac{2(U_0 - U_D) C (C_1 - C_2) (1 + e^{-\frac{1}{RC} T_0})}{(C + C_1)(C + C_2) (1 + e^{-\frac{1}{RC} T_0}) - C^2 e^{-\frac{2}{RC} T_0}} \cdot \frac{RC(1 - e^{-\frac{T_0}{RC}})}{T_0}, \quad (12)$$

可以证明，欲使 $(u_3 - u_4) \propto (C_1 - C_2)$ ，令 $\frac{C_1}{C}$ ，

$\frac{C_2}{C}$ ， $\frac{1}{RC} T_0$ 足够小即可。

由于硅微振梁式加速度计 MEMS 结构的 C_1 、 C_2 均低于 1 pF，为满足上述要求， f_0 可取 4 MHz， R 为 10 k Ω ， C 为 220 pF。

用死电容 $C_1 = 10.55$ pF， $C_2 = 7 \sim 12$ pF 进行实验，结果显示输入和输出之间的相关系数为 0.999 5，如图 9 所示。由于硅微振梁式加速度计实际的 C_1 、 C_2 均低于死电容容值，结合式(12)可知，实际应用时的相关系数会优于死电容实验结果。

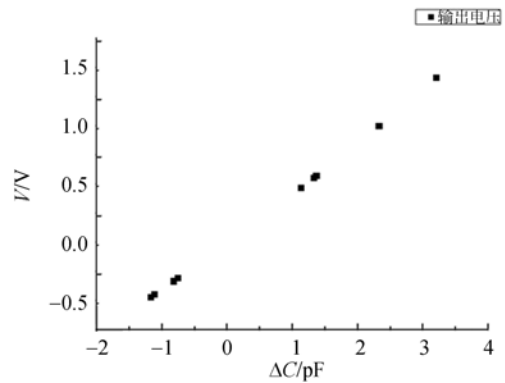


图 9 二极管电容检测电路实验

Fig. 9 Experiment result of diode circuit

实验表明，放大环节输入端的电流幅值不低于 10 nA，而跨阻、跨导放大器方案普遍需要前置电路的运放敏感 pA 级的输入电流，故二极管电容解调电路对器件的要求较低。

5 后置自激振荡电路

5.1 移相环节

由于在机械谐振状态时，谐振梁的输出信号

滞后输入信号 90°相位,而后串联微分环节,保证了整体 360°的相移^[2,6]。

5.2 稳幅环节

实际应用中,图 2 中控制器 $L(s)$ 的响应速度远低于其他环节^[12],于是将其他环节以其积分平均值(记为常数 B)来代替,得到稳幅环节的简化模型如图 10 所示:

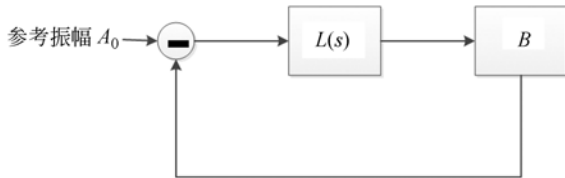


图 10 稳幅环节简化图
Fig. 10 Scheme of AGC loop

二阶最优控制器^[13]的 Bode 图如图 11 所示,令其低、中、高频段的转折频率远小于谐振频率,根据原理样机实际情况,可取为 2 Hz 及 2 kHz 左右。

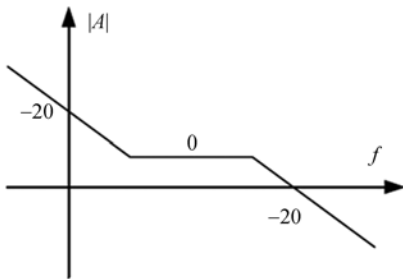


图 11 $L(s)$ 理想 Bode 图
Fig. 11 Ideal Bode graph of $L(s)$

5.3 闭环控制仿真

根据原理样机的实际参数,考虑到非线性的影响^[11],在 Matlab 的 Simulink 环境下进行仿真,原理如图 12 所示。仿真结果如图 13 所示,上电

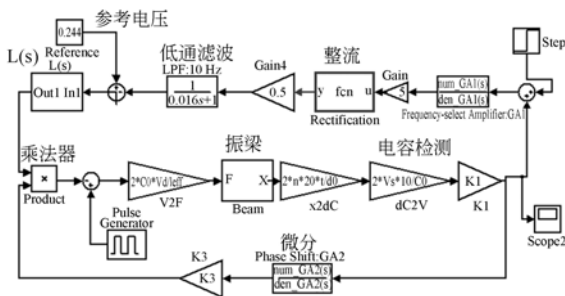


图 12 simulink 仿真框图
Fig. 12 Block of simulation in simulink

0.2 s 后,谐振梁输出信号即进入稳幅谐振状态。

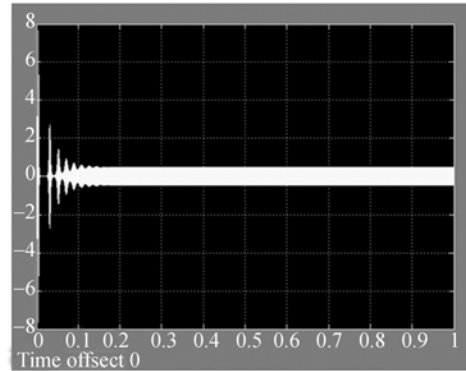


图 13 谐振梁输出信号的时域仿真图
Fig. 13 Simulation result of oscillator in time domain

6 实验结果及分析

应用前文所述理论搭建系统,利用自主研发的硅微振梁式加速度计原理样机,在室温环境下进行相关实验。系统如图 2,使用 SR625 采集输出频率、数字万用表 BM859 采集输出温度,PC 端用线性一阶模型进行温度补偿,实时输出补偿后的加速度数据。

6.1 标度因子稳定性测试

一次启动情况下,采用 +1g 和 -1g 两点法,重复测 7 次标度因数,用如下公式计算标度因子稳定性:

$$K_{stab} = \frac{1}{\bar{K}} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (K_m - \bar{K})^2 \right]^{1/2}, \quad (13)$$

式中, K_{stab} 为标度因子稳定性, K_m 为第 m 次测试的标度因数, \bar{K} 为标度因数平均值, n 为测试次数。

结果如图 14 所示,按如上方法得到标度因子

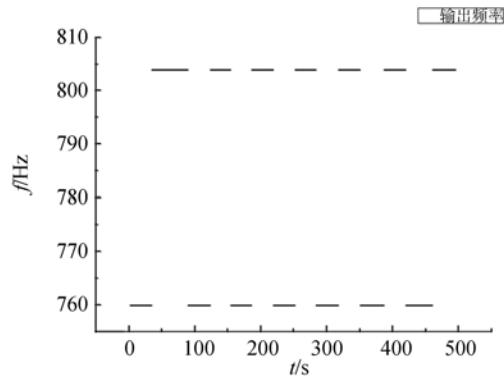


图 14 标度因子稳定性实验结果
Fig. 14 Experiment result of scale facotor stability

稳定性指标为 16.0×10^{-6} 。

6.2 零偏稳定性测试

使硅微振梁式加速度计原理样机的输入轴处于水平,认为此时加速度处于 $0g$ 附近。原理样机通电 1 h 后,测试时长为 60 min 的数据,以标准差作为稳定性的指标。按如下公式计算零偏稳定性:

$$\sigma_{K_0} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (K_{0m} - \bar{K}_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (14)$$

其中: \bar{K}_0 为零偏平均值(以 g 为单位), K_{0m} 为第 m 次测试的零偏值(以 g 为单位), n 为测试次数, σ_{K_0} 为零偏的标准差。

如图 15,按如上方法,测得零偏稳定性为 $52 \mu g$ 。重复 3 次实验,结果相近,最差为 $60.1 \mu g$ 。

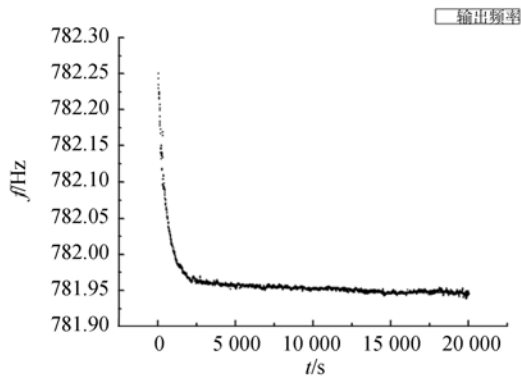


图 15 零偏稳定性实验结果

Fig. 15 Experiment results of output drifts

6.3 分辨率测试

将加速度计转到 $0g$ 位置,以 $0.1''$ 为角增量,顺时针逐次转动分度头,测量每个位置的加速度输出,直到测量变化量的实验值 Δa_p 大于或者等于输入加速度 Δa_m 的 50%。分度头转回原 $0g$ 位置,逆时针转动至与最近一次顺时针转动的相同角度,测量加速度计的输出 Δa_n 是否大于或者等

于输出加速度 Δa_n 的 50%。如果未达到,则继续以 $0.1''$ 为角增量进行测试。如果重复 3 次均达到,记此位置下的加速度为分辨率。

按如上方法测试,结果如图 16 所示,得到原理样机的分辨率为 $34.9 \mu g$ 。

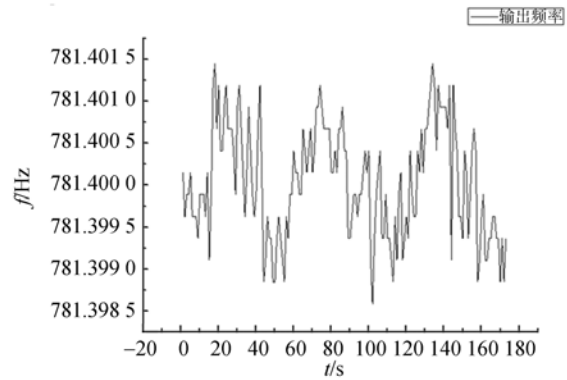


图 16 分辨率实验

Fig. 16 Experiment results of resolution test

7 结 论

本文针对硅微振梁式加速度计芯片级温度检测的需求,提出了相应的 MEMS 结构设计和配套电路,实现了片上温度检测,精度优于 $0.1^\circ C$ 。为了降低硅微振梁式加速度计闭环系统的前置电路对器件的要求,应用二极管电容解调电路方案,同时通过参数设计,保证了输出与输入之间的线性关系。然后,采用二阶最优模型完成了对闭环系统的后置自激振荡电路的参数优化,控制了上电时间。最后,利用课题组研制的硅微振梁式加速度计原理样机进行实验,结果表明:温度补偿后,标度因子稳定性达到 16.0×10^{-6} ,零偏稳定性达到 $52.0 \mu g$,分辨率达到 $34.9 \mu g$ 。实验表明提出的理论基本满足了硅微振梁式加速度计系统高精度的设计要求。

参考文献:

- [1] TRUSOV A A, ZOTOV S A, BRENTON R, et al. Silicon accelerometer with differential frequency modulation and continuous self-calibration [C]. *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Taipei, MEMS, 2012*:29-32.
- [2] HOPKINS R, MIOLA J, SAWYER W. The sili-

con oscillating accelerometer: A high-performance MEMS accelerometer for precision navigation and strategic guidance application [J]. *Ionntm*, 2005: 970-979.

- [3] 李晶, 樊尚春. 谐振式加速度计模型分析与仿真 [J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(6): 33-35.

LI J, FAN SH CH. Modeling analysis and simulation of resonant accelerometer [J]. *Transducer and Microsystem Technologie*, 2013, 32(6):33-35. (in

- Chinese)
- [4] 王巍,王岩,庄海涵,等. 硅微谐振加速度计的温度特性[J]. 中国惯性技术学报,2013,21(2): 255-258.
WANG W, WANG Y, ZHUANG H H, *et al.*. Temperature characteristic of silicon resonant accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013,21(2): 255-258. (in Chinese)
- [5] 石然,袁安萍,苏岩. 硅微谐振式加速度计的实现及性能测试[J]. 光学精密工程,2010,18(12): 2583-2588.
SHI R, QIU A P, SU Y. Implementation and experiments of micromechanical differential silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(12):2583-2588. (in Chinese)
- [6] 王巍,王岩,庄海涵,等. 谐振式硅微加速度计闭环控制系统的分析与设计[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(6): 744-748.
WANG W, WANG Y, ZHUANG H H, *et al.*. Analysis and design of closed-loop control system for silicon resonant accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012,20(6): 744-748. (in Chinese)
- [7] 袁安萍,董金虎. 硅微谐振式加速度计的温度效应及补偿[J]. 纳米技术与精密工程,2012,10(3): 215-219.
QIU A P, DONG J H. Temperature effect and compensation of silicon resonant accelerometer [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2012,10(3):215-219. (in Chinese)
- [8] SANGKYUNG S, CHANG J K, JUNGKEUN P, *et al.*. Oscillation amplitude-controlled resonant accelerometer design using a reference tracking automatic gain control [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2009,7(2): 203-210.
- [9] CLAUDIA C, ALBERTO C, GIACOMO L, *et al.*. A resonant microaccelerometer with high sensitivity operating in an oscillating circuit [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010,19(5):1140-1151.
- [10] 刘恒. 静电刚度谐振式微加速度计相关技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
LIU H. *Research on Micro Resonant Accelerometers Based on Electrostatic Stiffness* [D]. Chongqing: Chongqing University,2011. (in Chinese)
- [11] ZHAO S M, LIU Y F, WANG F, *et al.*. Research on non-linear vibration in micro-machined resonant accelerometer [C]. *Proceedings of the 14th Nanotech Conference, Washington*, 2012: 637-640.
- [12] HE L. *Silicon Micromachined Resonant Accelerometer with CMOS Interface Circuits* [D]. Singapore: National University of Singapore,2008.
- [13] 董景新,赵长德,熊沈蜀,等. 控制工程基础[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
DONG J X, ZHAO CH D, XIONG SH SH, *et al.*. *Introduction to Control Engineering* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [14] HUANG L, CHEN W, NI Y, *et al.*. Structure design of micromechanical silicon resonant accelerometer[J]. *Sensors and Materials*, 2013,25(7): 479-492.

作者简介:



王帆(1988—),男,天津人,博士研究生。2009年于清华大学获得学士学位,主要从事硅微惯性技术研究。E-mail: regatest@163.com

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,主要从事惯性仪表和系统控制研究。E-mail: dongjx@tsinghua.edu.cn