

文章编号 1004-924X(2010)11-2430-07

力反馈式微机械加速度计刚度的自适应调整

李童杰, 刘云峰, 董景新, 范 达

(清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了提高模拟力平衡式电容微机械加速度计的鲁棒性和分辨率, 对系统的非线性进行了研究。通过分析系统的数学模型, 认为力发生器的非线性会引入一个可变负刚度。在传统方案中, 为保证加速度计满量程时总刚度大于 0, 预载电压要小于失稳预载的 0.707, 这就造成在加速度输入较小时其总刚度较大, 从而影响其阈值以及小输入时的分辨率。为弥补传统方案中力矩器非线性对系统分辨力的影响, 本文应用自适应理论, 提出一种基于总刚度不变的变预载自适应调整方法来提高闭环系统的鲁棒性和分辨率。设计了一种基于 DSP 的数字式微机械加速度计并进行了试验。试验结果表明, 采用自适应调整方案后, 加速度计在 0g 附近的分辨率由 43.2 μg 提高到 11.3 μg , 1g 附近的分辨率由 36.4 μg 提高到 12.1 μg , 这些数据验证了自适应调整方案对系统性能的提高。

关键词: 微机械加速度计; 自适应控制; 刚度; 变预载; 分辨率

中图分类号: TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2430

Adapting adjustment of stiffness for force feedback micro accelerometer

LI Tong-jie, LIU Yun-feng, DONG Jing-xin, FAN Da

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

Abstract: To improve the roborant capacity and the resolution of a micromechanical accelerometer, the nonlinearity of the system was studied. The mathematic model of the system was discussed and the variable electrostatic stiffness brought by the nonlinearity of a electrostatic torque was analyzed. Analytical results show that the preload voltage is used to be less than 0.707 time of crippling load voltage so as to make total stiffness greater than zero, which will cause a poor resolution when the input is near 0g. In view of the nonlinear effect, an adaptive adjustment method in which the total stiffness was kept a constant and the preload voltage and the feedback voltage were renewed every sampling cycle was proposed to improve the stability and resolution of the system. Finally, a digital micro accelerometer based on DSP was developed, then it was tested by using the adaptive adjustment method. Experimental results indicate that the resolution of the accelerameter is improved from 43.2 μg to 11.3 μg near 0g and from 36.4 μg to 12.1 μg near 1g. These data prove the system performance has been improved greatly.

Key words: micro accelerometer; adaptive control; stiffness; variable preload; resolution

收稿日期: 2010-02-26; 修订日期: 2010-04-26.

基金项目: 国家“十一五”预研项目 (No. 51308050208)

1 引 言

加速度传感器是一种重要的力学量传感器,是最早受到研究的微机械惯性传感器之一,它的研究与开发始于 60 年代末、70 年代初。随着对微硅加速度计原理研究的深入,工艺微机械加速度计已成为微机电系统具有代表性的产品,是重要的惯性仪表之一。近年来,已在工业、军事等领域试验性地开始使用^[1-2]。

随着微机电系统技术的进步和工艺水平的提高,微加速度计有以下发展趋势^[1-2] :

(1)高灵敏度。由于惯性质量块比较小,所以用来测量加速度的惯性力也相应比较小,系统的灵敏度相对较低,这样开发出高灵敏度的加速度计显得尤为重要。无论是民用还是军事用途,高灵敏度的微加速度计将会大大拓宽其运用范围。

(2)高分辨率。当前随着宇航、空间站等技术快速的发展,微重力测试成了一个重要方向。

(3)温漂小、迟滞效应小。选择合适的材料,采用合理的结构,以及应用新的低成本温度补偿环节,能够大幅度提高微加速度计的精度。

(4)多轴加速度计。多轴加速度计的解耦一直是结构设计中的难点,到了 90 年代末已经开发出了三轴可以付诸实际应用的微硅加速度计。

(5)将微加速度计表头和 ASIC 电路集成在单片基体上。随着微电子技术,MEMS 微电子封装技术的快速发展,全集成加速度计是必然的趋势,微机械微电子集成能够减小信号传输损耗,降低电路噪声。

(6)降低制作成本。选择合理的工艺手段,为微加速度计批量化生产提供工艺路线;同时,标准化微机电系统工艺,为微加速度计投片生产提供了一套利于操作、重复性好的工艺方法,也是微硅加速度计发展的重要方向。

电容式微机械加速度计是一种力平衡式的微机电系统(MEMS)电容加速度计,通过敏感元件把惯性力转换成电容的变化,然后通过电容检测电路、放大电路、校正电路和力发生器,最终反馈到电容两个极板形成的闭环系统来检测加速度。其中,力发生器的工作原理为:将预载电压与反馈

电压叠加后分别施加在两个施力电极上,通过施力电极产生对摆片的静电作用力,用来平衡由输入加速度引起的惯性力^[3-4]。

本文在进行理论分析和仿真后,设计出以 DSP 为核心的数字式微机械加速度计,并基于 DSP 提出刚度自适应调整方案以及 PI 校正方案。对采用该方案的数字式微机械加速度计在实验室进行了闭环系统频率特性,大载荷冲击试验和分辨率试验,验证了这种调整方法的可行性。

2 微机械加速度计的主要性能分析

2.1 微机械加速度计的数学模型

微机械加速度计闭环系统主要由敏感元件、信号检测电路、校正网络和力矩器等几部分组成^[5-9],如图 1 所示。

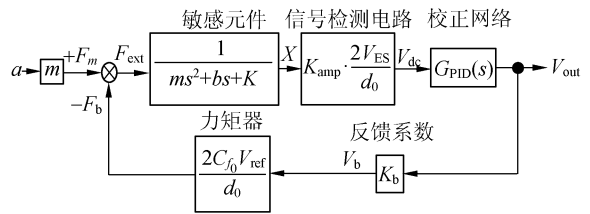


图 1 微机械加速度计的系统框图

Fig. 1 Block diagram of micro accelerometer

闭环情况下,每一个固定的加速度输入 a 都对应一个反馈电压 V_b 。当 a 在一固定值附近发生微小变化时, V_b 将在一固定附近发生微小的变化,从反馈电压 V_b 到信号检测电路输出 V_{dc} 的等效开环频率特性表达式近似为^[10] :

$$\frac{V_{dc}(S)}{V_b(S)} = -\frac{C}{S^2 + \frac{b}{m}S + \frac{K}{m}}, \quad (1)$$

式中:

$$K = K_m - K_{ec} - \left(\frac{2C_{f_0} V_{ref}^2}{d^2} + \frac{2C_{f_0} V_b^2}{d^2} \right), \quad (2)$$

$$C = \frac{4C_{f_0} V_{ref} K_{amp} V_{ES}}{md^2}, \quad (3)$$

文献[1-4]指出:设计时,令系统满量程输出时的反馈电压与预载电压相等,此时的预载电压

称为最佳预载。为保证大载荷冲击下的闭环稳定性,取 $K \geq 0$,于是可以得出得:

$$V_{\text{ref-opt}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{\text{ref-max}}, \quad (4)$$

其中 $V_{\text{ref-max}}$ 为失稳预载,也称最大预载。

2.2 微机械加速度计的刚度分析

加速度计总刚度 K 由机械刚度 K_M 和等效的电弹簧刚度 K_e 组成。 K_M 由结构支撑梁的材料参数和几何参数决定,而 K_e 由预载电压 V_{ref} 反馈电压 V_b 和载波构成,如式(5)所示。

$$K_e = -\left(\frac{2C_{f_0} V_{\text{ref}}^2}{d^2} + \frac{2C_{f_0} V_b^2}{d^2} + K_{ec}\right), \quad (5)$$

模拟静电力反馈微加速度计是一个闭环系统,需满足稳定条件 $K = K_M - K_e \geq 0$ 。 K_M 为敏感元件的机械刚度,当敏感元件结构确定时其值固定,传统方案中, K_e 中的预载电压 V_{ref} 为固定值,而反馈电压 V_b 是随输入加速度的增大而增大的,这会导致以下几种结果:1)系统的频率特性将随着加速度输入的变化而变化。为了保证闭环系统的稳定性,校验电路将变得复杂。2)由于加速度计闭环系统分辨率和总刚度成正比,当加速度计输入 a 较小时,闭环系统分辨率较大。

2.3 微机械加速度计的校正方案

设从反馈电压 V_b 到信号检测电路输出 V_{dc} 的等效开环系统的频率特性表达式为:

$$\frac{V_{dc}(S)}{V_b(S)} = -\frac{0.2 \times 10^8}{S^2 + 2 \times 10^4 S + K}, \quad (6)$$

其中, K 取 $0 \sim 10^8$ 。

采取文献[2]PI 加滞后的校正方案:以 $V_b = 0$ 时的开环频率特性为准进行校正,校正方案如式(6)所示:

$$K_b \cdot G_{PID}(S) = 2.345 \cdot \frac{S+100\pi}{S+1} \cdot \frac{S+2000\pi}{S}. \quad (7)$$

相应的开环伯德图如图 2 所示:

当 $V_b = 0$ 时,此校正方案能保证开环系统 $\omega = 1$,增益为 $K_{(\omega=1)} = 116$ dB;闭环系统 3 dB 复现频率 $f_m = f_b = 621$ Hz,谐振峰 $M_r = 0.666$ dB。随着 V_b 的增大,稳定性变差,当 V_b 增大到满量程时, $f_m = 338$ Hz, $M_r = 10.8$ dB。闭环系统频率特性曲线如图 3 所示。

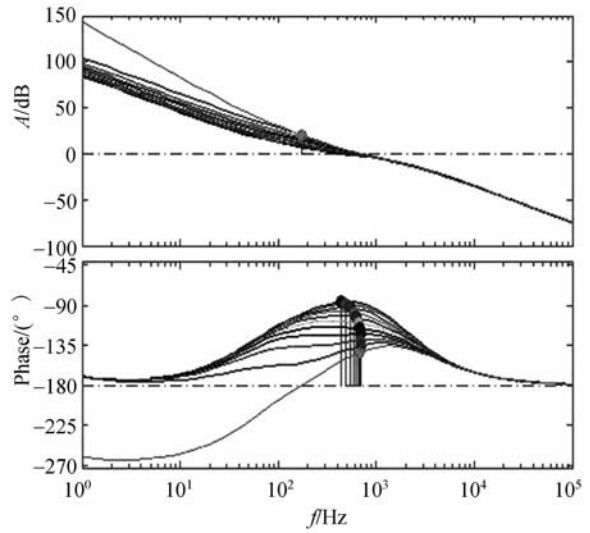


图 2 不同加速度输入时的开环伯德图

Fig. 2 Open-loop Bode diagram in different accelerating inputs

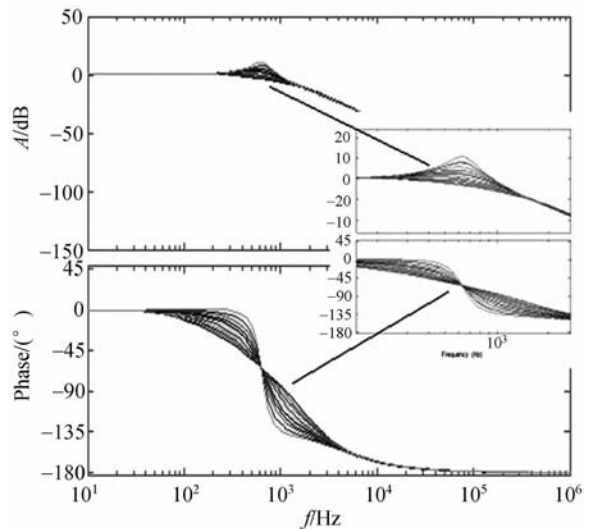


图 3 不同加速度输入时的闭环伯德图

Fig. 3 Close-loop Bode diagram in different accelerating inputs

2.4 微机械加速度计的分辨率

加速度计的分辨率包括输入与输出两部分:前者定义为最小可检测位移对应的加速度分辨率,后者定义为输出噪声水平对应的加速度分辨率,所以,闭环系统的分辨率同时受到这两个分辨率的限制。输入分辨率由前置电路可检测的最小电容变化量 ΔC_{min} 决定^[1]:

$$R = a_{\text{min}} = \frac{Kd_0}{2mC_{s0}} \cdot \Delta C_{\text{min}}, \quad (8)$$

不难看出,分辨率 R 与系统总刚度 K 成正比,减小 K 值有利于提高分辨率。结合式(2)可知:当加速度计输入较小时,总刚度 K 较大,即系统的输入分辨率较差,而随着加速度计输入的增大分辨率提高。

2.5 微机械加速度计的输出

根据加速度计系统方框图可知,当开环增益足够大时,惯性力 F_m 和反馈力 F_b 近似相等。

$$a = \frac{F_m}{m} \approx \frac{F_b}{m} = \frac{2C_{f_0}}{md} \cdot V_{ref} \cdot V_b = \frac{2C_{f_0}}{md} \cdot V_{ref} \cdot K_b \cdot V_{out}, \quad (9)$$

其中, C_{f_0}, m, d 由敏感元件自身的特性决定。

文献[1-4]的方案中,取 V_{ref} 和 K_b 为固定值,加速度 a 可以用 V_{out} 表示。

3 微机械加速度计的自适应调整方案

3.1 基于总刚度不变的变预载控制

根据小节 1.1 和 1.2,当预载电压固定时,总刚度随加速度输入变化而变化。

将加速度计数字化,并采用的自适应调整算法,根据不同的输入加速度(正比于反馈电压 V_b) 实时调整预载电压,保证总刚度为 0,令:

$$K = K_m - K_{ec} - \left(\frac{2C_{f_0} V_{ref}^2}{d^2} + \frac{2C_{f_0} V_d^2}{d^2} \right) = 0, \quad (10)$$

可以得出:

$$V_{ref}(n) = \sqrt{\frac{d^2}{2C_{f_0}} (K_m - K_{ec}) - V_b(n)^2}, \quad (11)$$

而根据式(10)可得:

$$V_b(n) = \frac{ma \cdot d}{2C_{f_0} \cdot V_{ref}(n-1)}. \quad (12)$$

3.2 自适应调整方案校正部分的设计

根据式(11),式(2)可以化成:

$$\frac{V_{dc}(S)}{V_b(S)} = -\frac{C}{S^2 + \frac{b}{m}S}. \quad (13)$$

自适应调整方案得到的开环频率特性如式(12)所示,可以看出采用自适应调整方案得到的开环系统频率特性参数的固定可使校正方案变得容易。

采用 PI 校正方案使得系统变成 II 型系统以

降低低频时系统的误差。

3.3 自适应调整方案的分辨率

结合式(8)和(10),自适应调整方案理论上的分辨率为:

$$R = a_{min} = \frac{Kd_0}{2mC_{s0}} \cdot \Delta C_{min} = 0. \quad (14)$$

3.4 自适应调整方案的输出

自适应调整方案中,预载电压根据加速度输入进行自适应调整。根据式(10)和(11)可以得出 $V_{ref}(n)$ 和 $V_b(n)$,而其它参数均为固定值,从而加速度 a 为:

$$a(n) = \frac{2C_{f_0}}{md} \cdot V_{ref}(n) \cdot V_b(n). \quad (15)$$

4 数字式自适应微机械加速度计

4.1 硬件系统图

基于 DSP 的微机械加速度计由敏感元件,电容检测电路,AD,DSP,DA 组成如图 4 所示:

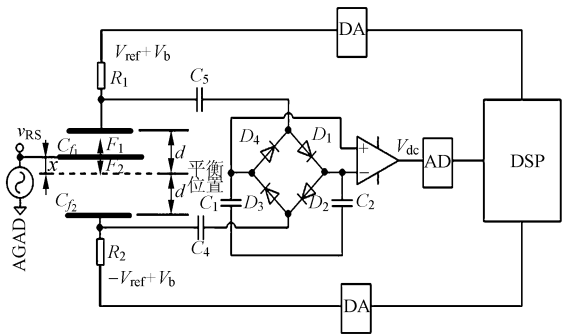


图 4 数字式微机械加速度计的硬件组成

Fig. 4 Schematic diagram of digital micro accelerometer

此方案中,加速度计闭环系统的带宽控制在 350 Hz 左右,系统采样频率设为 10 kHz;要提高到系统的分辨率,需尽可能减小 AD 和 DA 的量化误差,此方案选用 18 位单通道 AD,16 位双通道 DA, AD/DA 的采样/更新频率都大于 10 kHz。

4.2 加速度计的开环频率特性

选取一块梳齿式电容加速度计敏感元件作为实验对象,该敏感元件无谐振峰带宽为 592 Hz。将其固定在加速度近似为 0 的水平台上,改变预

载电压并通过电激励法测试从反馈电压 V_b 到信号检测电路输出 V_{dc} 的开环频率特性曲线,测试结果如图 5 所示。

由图 5 得出:当预载电压增大时(即总刚度减小),二阶系统两个根之间的距离逐渐变大,当总刚度为 0 时,开环系统变成有一个 0 根的 I 型系统。

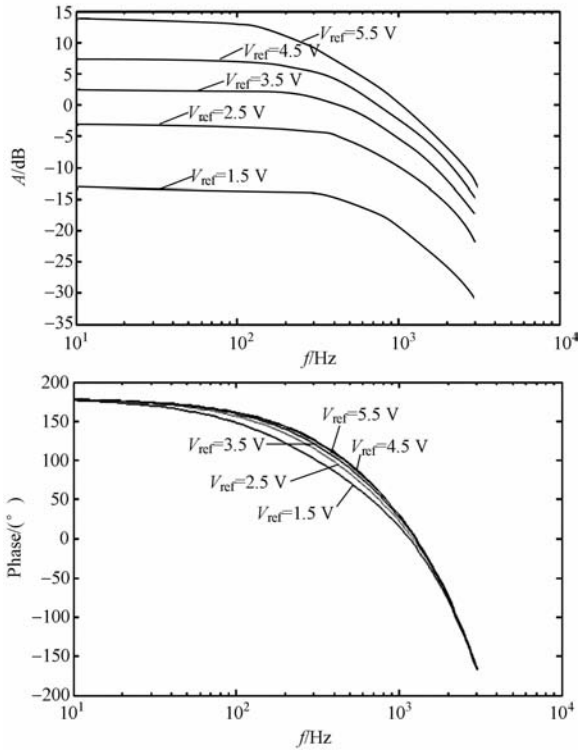


图 5 不同预载电压时系统的开环频率特性曲线

Fig. 5 Open-loop Bode diagram at different preload voltages

4.3 预载电压和校正参数的选用

根据文献[3]的方案确定机械刚度和最大预载,并按照小节 2.1 中的式(10)式(11)确定反馈电压 $V_b(n)$ 和预载电压 $V_{ref}(n)$ 。

本方案中最大预载为 5.82 V,采用拐点为 33 Hz 的 PI 校正,调整 PI 校正的增益使得校正后的系统开环剪切频率为 350 Hz,以保证足够的稳定裕量。

4.4 数字式自适应微机械加速度计的测试结果

刚度为零的数字式刚度自适应调整微机械加速度计的系统闭环频率特性如图 6 所示:

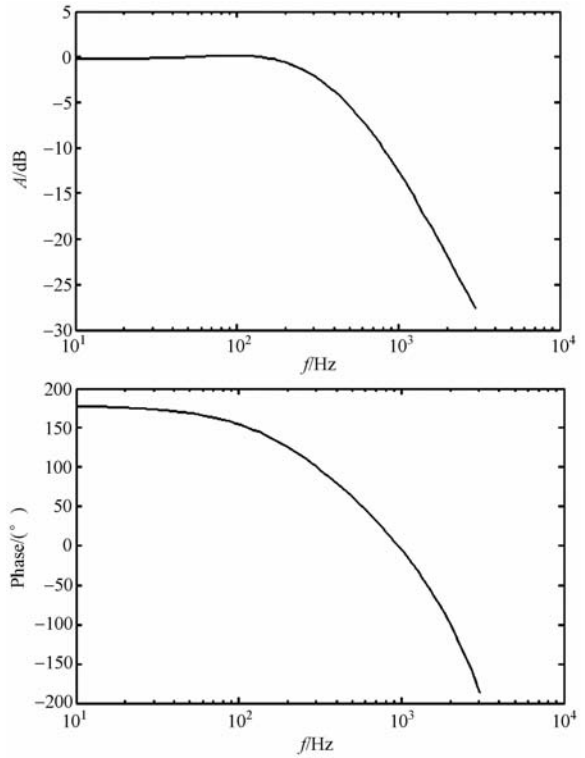


图 6 自适应调整微机械加速度计的闭环频率特性曲线
Fig. 6 Close-loop Bode diagram of adapting adjustment accelerometer

数字式自适应微机械加速度计的功率谱密度如图 7 所示:

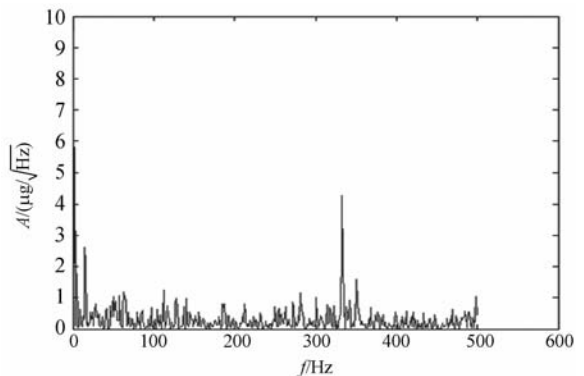


图 7 自适应调整微机械加速度计的功率谱密度
Fig. 7 Power spectrum density of adapting adjustment accelerometer

为测试加速度计的输入分辨率,需尽量减少加速度计输出噪声的影响。这里采用的方案是:把微机械加速度计固定到水平台上的精密分度台上,通电稳定后,分别在 0g 和 1g 两个位置微调

分度台角度,调整后静置 20 s 取平均值以减少输出噪声的影响。采用此方案得出的数据如表 1 所示,通过对比可以看出自适应调整方案对输入分辨率的改进。

表 1 传统方案和自适应方案的分辨率对比

Tab.1 Resolution comparison of two methods

位置	分辨率/ (μg)	
	传统方案	自适应方案
0g 附近	43.2	11.3
1g 附近	36.4	12.1

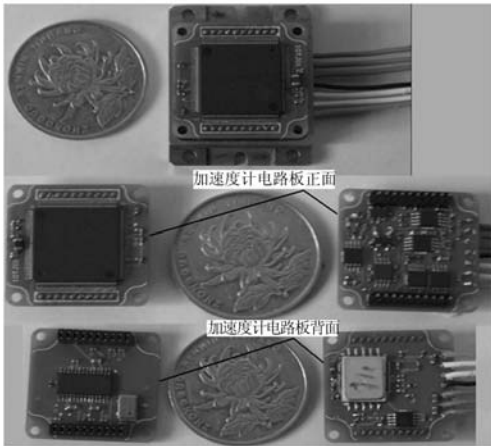


图 8 数字式自适应微机械加速度计

Fig.8 Digital adapting adjustment accelerometer

根据文献[11]所提的方案,对加速度计进行强度约为 60g 的机械冲击试验,实验结果表明 60g 冲击下,自适应微机械加速度计未发生吸合。

数字式刚度自适应自调整微机械加速度计如图 8 所示。

5 结 论

本文为了弥补传统方案中模拟力反馈微机械加速度计力矩器非线性对系统分辨率等性能的影响,提出了一种基于总刚度不变的变预载自适应调整方案。该方案具有以下优点:(1)提高了加速度计在小载荷时的分辨率;(2)提高了闭环系统的鲁棒性;(3)简化了校正方案;(4)保证了大载荷冲击下加速度计的稳定性。实验结果表明:0 g 附近的分辨率由 43.2 μg 提高到 11.3 μg ,1 g 附近分辨率由 36.4 μg 提高到 12.1 μg ,验证了该方案对系统性能的改进。

参考文献:

- [1] 吴天准,董景新,刘云峰,等. 梳齿式微加速度计闭环系统性能的分析与优化[J]. 仪器仪表学报,2006(3):285-289, WU T ZH, DONG J X, LIU Y F, et al.. Analysis and optimization for performance of a multi-finger micro-accelerometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006(3):285-289. (in Chinese)
- [2] 冯宇翔. 梳齿式微机械加速度计的电路改良及工程化研究: [D]. 北京: 清华大学精仪系, 2004. FENG Y X. *Circuit Improvement and Engineering study on Comb-finger Micromechanical Accelerometer* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [3] 李疆,董景新,刘云峰. 预载电压对力平衡式微硅加速度计性能的影响[J]. 传感器技术,2004,23(8):35-37. LI J, DONG J X, LIU Y F. Effects of preload voltage on performance of force-rebalance micro silicon accelerometer[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004,23(8):35-37. (in Chinese)
- [4] WAN C X, DONG J X, LIU Y F, et al.. Nonlinearity of a closed-loop micro-accelerometer [C]. *IEEE International Conference on Control Applications. Singapore:IEEE*, 2007:1260-1265.
- [5] YANG Y CH, LI D L, SHANG ZH G. Methods for reducing Senssitivity of Micromachined Silicon Accelerometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(6):1361-1366.
- [6] YIN L, CHEN W P, LIU X W, et al.. CMOS interface circuit for closed-loop accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(6):1311-1315.
- [7] LIU Y T, YIN L, CHEN W P, et al.. Design of

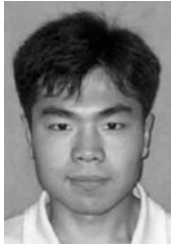
interface circuit of closed-loop accelerometer with self-test function[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1379-1384.

- [8] YAAKOBVITZ A, KRYLOV S. MEMS accelerometer with mechanical amplification mechanism for enhanced sensitivity[C]. *15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Denver, CO, USA: IEEE*, 2009:1948-51.
- [9] VAVILOV V D, GLAZKOV O N. The MEMS-accelerometer proof mass robust control[J]. *Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2009, 3(3): 45-8.
- [10] 李童杰, 刘云峰, 董景新. 力反馈式加速度计动态

特性分析及重要参数选择[J]. *惯性技术学报*, 2009, 17(4):483-487.

- LI T J, LIU Y F, DONG J X. Analysis and optimization on the dynamic characteristics and important parameters of force feedback accelerometer[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(4):483-487. (in Chinese)
- [11] 刘云峰, 董景新. 静电力反馈微加速度计的吸合失效[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(5): 649-652.
- LIU Y F, DONG J X. Pull-in failures of electrostatic force feedback micro accelerometer[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2006, 46(5): 649-652. (in Chinese)

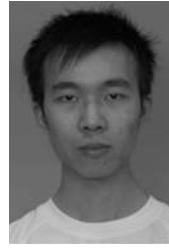
作者简介:



李童杰(1981—),男,河北唐山人,博士研究生,主要从事微机械加速度计研究和核电仪控系统的设计。E-mail: uniacaptain@sina.com



刘云峰(1973—),男,四川达州人,博士,助理研究员,2006年于清华大学获博士学位,主要从事惯性仪表技术的研究。E-mail: yfliu@mail.tsinghua.edu.cn



范达(1985—),男,湖南郴州人,博士研究生,主要从事微机械加速度计和静电悬浮加速计的研究。E-mail: fand08@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:



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