

MEMS 压阻式加速度传感器的优化设计

杜春晖^{1,2}, 何常德^{1,2}, 葛晓洋¹, 于佳琪¹, 熊继军^{1,2}, 张文栋^{1,2}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:提出了一种新型的 MEMS 压阻式加速度传感器, 该传感器采用“四悬臂梁-质量块”结构, 16 个压敏电阻完全对称布放于悬臂梁上应力变化的线性区, 既提高了传感器的灵敏度, 又降低了轴间耦合度和非线性度。通过与八悬臂梁结构的仿真对比, 得出该传感器具有更高的抗横向耦合性, 约为八悬臂梁结构的 30 倍。

关键词:电阻对称分布; 抗耦合性; 压阻式; 三维; 加速度传感器

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

Optimization Design of MEMS Piezoresistive Acceleration Sensor

DU Chunhui^{1,2}, HE Changde^{1,2}, GE Xiaoyang¹, YU Jiaqi¹, XIONG Jijun^{1,2}, ZHANG Wendong^{1,2}

(1. Key Lab. of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of

China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Lab. of Science and Technology on Electronic Test & Measurement,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A new type of MEMS piezoresistive acceleration sensor is put forward. The structure of this sensor is “4-beam/mass” with completely symmetric distribution of 16 varistors in the stress linear region of the beam. The advantages of this structure are that the sensitivity of the sensor is improved, and the cross-axis couple degree and non-linearity are decreased. Compared with the sensor with “8-beam/mass” structure, it can be concluded that this acceleration sensor has larger anti-lateral-coupling degree, which is about 30 times higher than that of “8-beam/mass” structure.

Key words: varistor symmetric distribution; anti-coupling; piezoresistive; three-dimensional; acceleration sensor

0 引言

加速度传感器作为一种惯性器件, 已广泛应用于日常生活的各个方面, 如汽车安全防护系统、工业自动控制、电梯舒适度调节、振动及地震测试等^[1-3]。其中单维加速度传感器技术已相当成熟, 但随着科学技术的发展, 传统的单维加速度传感器已不能满足在测量、控制和信息技术等领域对传感信息越来越高的要求, 三维加速度传感器的出现有望弥补这样的不足。由于种种原因导致国内对三维加速度传感器的研究一直处于较低的水平, 制作的一些三维加速度传感器的性能达不到工程应用的要求^[4], 以致不能实现产品化, 其主因是轴间耦合度太大。现有压阻式三轴加速度传感器降低轴间耦合度所采用的方法主要是敏感结构的优化, 硬件电路补偿或利

用计算机对数据辅助处理等, 但后两种方法都需复杂的电路来实现。本文采用优化敏感结构的方法, 以提高灵敏度和减小轴间耦合度为目的, 设计了一种单片集成的压阻式三维加速度传感器。

本文设计的三轴加速度传感器以提高灵敏度的同时降低轴间耦合度为主, 由于“梁-质量块”结构比薄膜结构具有更高的灵敏度, 同时压阻式加速度传感器具有良好的线性输出^[5], 故本文采用压阻式的“悬臂梁-质量块”结构。

1 微传感器的结构设计和工作原理

1.1 结构设计

压阻式硅微加速度传感器的敏感单元一般是由一个可动质量块和支悬于质量块与支撑边框之间的悬臂梁组成, 悬臂梁的数量从 1~8 根不等, 通常都

收稿日期: 2012-01-04

基金项目: 国家“八六三”计划基金资助项目(2011AA040404); 国家自然科学基金资助项目(51075375)

作者简介: 杜春晖(1986-), 男, 山西吕梁人, 硕士生, 主要从事微纳传感与执行器的研究。E-mail: duchunhui319@163.com

是在梁臂上应力变化较大的地方采用扩散或离子注入工艺制作压敏电阻,使其与边框上的电阻或外接电阻构成惠斯通电桥,通过检测惠斯通电桥的输出电压来判断加速度的大小,但是以往的每一个惠斯通电桥检测电路中的 4 个电阻只有 1 个或 2 个电阻制作在悬臂梁上。其缺点是:

1) 不能充分利用悬臂梁的应力变化,使得加速度传感器不能得到最大的灵敏度^[5]。

2) 悬臂梁上的电阻均采用离子注入工艺制作而成,这些工艺都会引入残余应力,可能导致潜在的漂移,如果惠斯通电桥上的 4 个电阻对称分布在悬臂梁上,则它们的漂移系数一致,能很好地抑制输出电压的漂移^[6-7]。

3) 压敏电阻的不对称分布会导致悬臂梁上受力的偏向,从而使轴间耦合度增大。

为了解决以往加速度传感器存在的这些缺点,本文设计了完全对称的“四梁-质量块”结构。图 1 为本文提出的 MEMS 压阻式三维加速度传感器采用硅-玻璃键合的双层结构。该加速度计的整体结构对称,采用键合工艺与玻璃键合,起到过载保护的作用。该结构具有灵敏度高,非线性度小和轴间耦合度小的优点。

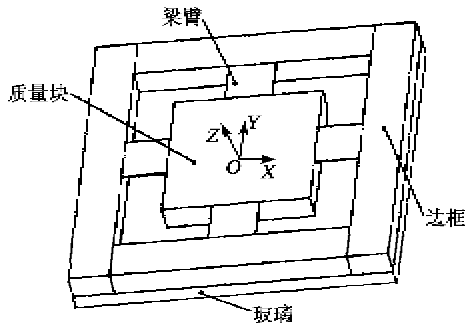
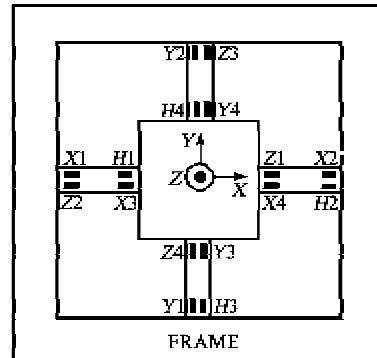


图 1 MEMS 压阻式三维加速度传感器结构示意图

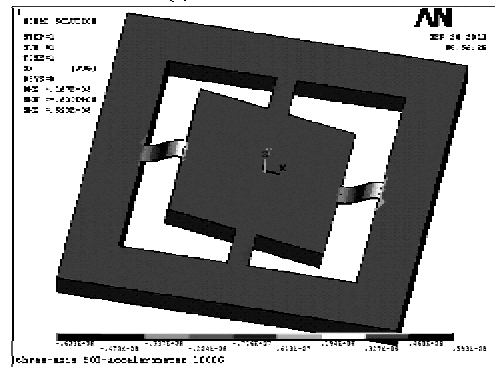
1.2 工作原理

图 2(a)为 MEMS 压阻式三轴加速度传感器的悬臂梁上压敏电阻分布图,16 个压敏电阻对称分布于 4 根悬臂梁上,当 X 方向施加有加速度时(见图 2(b)),X 方向的检测电桥上的 4 个电阻受到交叉相反应力,检测电路将有电压输出,而在 Y 和 Z 方向,惠斯通电桥上的电阻受到相等的平行应力,由于应力的大小相同,检测电路不会有电压输出。图 3 为当 X 方向受到加速度时,X、Y、Z 方向的检测电桥上各电阻的变化情况。同理,在 Y 和 Z 方向受到加速度时,Y 和 Z 轴的检测电路就会有电压输出。通

过检测电路输出的电压差就可换算出加速度值。



(a) 压敏电阻分布图



(b) X 方向施加载荷时悬臂梁上的应力分布图

图 2 悬臂梁上电阻的分布与应力分布图

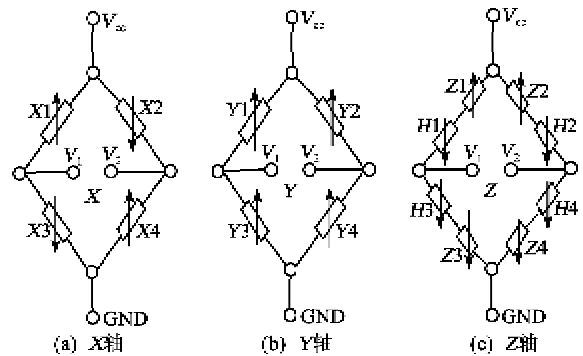


图 3 惠斯通电桥检测原理图

根据材料力学理论^[8-9],悬臂梁上压敏电阻的电阻变化率为

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_1 \sigma_1 + \pi_t \sigma_t + \pi_s \sigma_s \quad (1)$$

式中: σ_1 为横向应力; σ_t 为纵向应力; σ_s 为与 σ_1 和 σ_t 垂直方向上的应力,由于其较 σ_1 和 σ_t 小,一般均略去; π_1, π_t, π_s 分别为与 $\sigma_1, \sigma_t, \sigma_s$ 相对应的压阻系数。由于 P 型压敏电阻可获得比 N 型电阻更大的电阻变化率,为增加传感器的灵敏度,设计时选用 P 型压敏电阻,故式(1)可简化为

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_1 \sigma_1 + \pi_t \sigma_t = (71.8 \sigma_1 - 66.3 \sigma_t) \times 10^{-11} \quad (2)$$

2 微传感器的有限元分析

采用有限元分析软件 Ansys 对上述结构进行仿真。首先,初步设计结构的尺寸;然后建立有限元分析模型,通过对结构进行静态应力分析并优化,使结构达到最优;最后,选择电阻的布放位置,计算出3个轴向的灵敏度和互相之间的耦合度。

2.1 压敏电阻布放位置的设计

压敏电阻作为重要的信息捕获单元,是传感器的重要组成部分,悬臂梁上压敏电阻的布放位置关系到传感器灵敏度、轴间耦合度和非线性度等参数值^[6]。由式(2)可知,压敏电阻受到的横向应力越大,纵向应力越小,压敏电阻的变化率越大,传感器的灵敏度越大,悬臂梁的两端应力最大,但由于悬臂梁两端有不稳定的应力突变区,如果压敏电阻位于突变区域内,会使传感器的轴间耦合度和非线性度增大,所以,尽量将压敏电阻布放在应力变化的线性区域。图4为我们选择电阻的放置位置时,要适当的偏离A点和B点,向悬臂梁的中心点靠近。

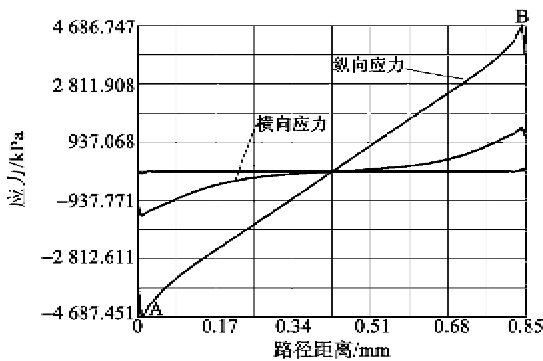


图4 轴向悬臂梁上的应力分布曲线

表2 X、Y、Z轴的轴向灵敏度和轴间耦合灵敏度

	轴向灵敏度/(V/g)	轴间耦合灵敏度/(V/g)	
X	$S_{XX}=1.1159 \times 10^{-4}$	$S_{XY}=1.0205 \times 10^{-8}$	$S_{XZ}=3.7523 \times 10^{-8}$
Y	$S_{YY}=1.1171 \times 10^{-4}$	$S_{YX}=1.5909 \times 10^{-8}$	$S_{YZ}=3.5202 \times 10^{-8}$
Z	$S_{ZZ}=5.5414 \times 10^{-4}$	$S_{ZX}=5.0728 \times 10^{-7}$	$S_{ZY}=3.0470 \times 10^{-7}$

由式(2)~(4)及图3可以得出,当加速度传感器在X方向施加载荷时,X方向惠斯通电桥上的4个压敏电阻受到大小相同、方向相反的交叉应力,X方向的检测电路有电压输出;且压敏电阻受到的横向应力越大,纵向应力越小,电阻的变化率越大,轴向灵敏度越大,而在Y方向和Z方向检测电桥的上半臂和下半臂受到相同比例的应力,所以,Y方向和Z方向的电桥仍然保持平衡,没有电压的输出,轴间

2.2 灵敏度和轴间耦合度的计算

为了保证传感器的输出具有较好的线性度,悬臂梁根部的最大等效应力值不超过80MPa,经过优化最终确定量程为 9800 m/s^2 的三维加速度传感器的具体尺寸如表1所示。

表1 传感器的具体尺寸

梁				
长/ μm	宽/ μm	厚/ μm	电阻间距/ μm	
800	400	20	100	
质量块			边框	边框
长/ μm	宽/ μm	厚/ μm	宽度/ μm	厚度/ μm
3000	3000	420.5	1000	430.5

硅的杨氏模量为 1.69×10^{11} ,泊松比为0.278,密度为2330,有限元分析的单元类型选用Solid95,使用映射网格划分,仿真时采用电阻条的尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$,电阻条距离悬臂梁两端的距离为 $80 \mu\text{m}$ 。通过仿真可得悬臂梁上各个电阻的变化率,传感器的输出电压 ΔV 和灵敏度 S 分别为

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{R_3 U_i}{R_1 + R_3} - \frac{R_4 U_i}{R_2 + R_4} = \left[\frac{1 + \frac{\Delta R_1}{R}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_3}{R}} - \frac{1 + \frac{\Delta R_2}{R}}{2 + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_4}{R}} \right] U_i \quad (3)$$

$$S = \frac{\Delta V}{a} \quad (4)$$

表2为惠斯通电桥采用5V电压供电时所计算出的X、Y、Z轴的轴向灵敏度和各轴之间的轴间耦合灵敏度。

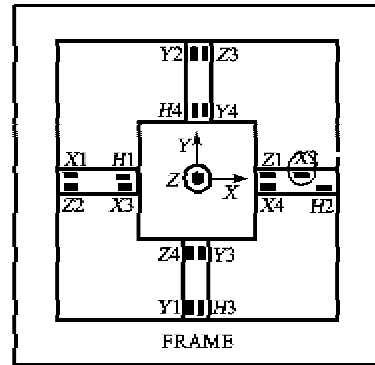
耦合灵敏度为0。

3 相同误差的抗耦合性对比

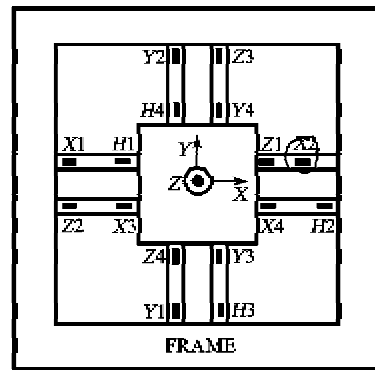
为了验证该结构具有良好的抗轴间耦合性,在整体结构尺寸相同的条件下,本文通过预设相同的电阻位置偏差量,将该结构与相同尺寸的八悬臂梁结构相比较。

图5(a)、(b)分别为整体结构尺寸完全对称相等的四梁和八梁结构,四梁结构的梁宽为 $400 \mu\text{m}$,

八梁结构的梁宽为 $200\ \mu\text{m}$, 两条平行梁的间距为 $400\ \mu\text{m}$ 。将两种结构中电阻 $X2$ 偏离原来的位置而放置在距离悬臂梁端部 $150\ \mu\text{m}$ 处, 通过分别在各个轴向施加 $9\ 800\ \text{m/s}^2$ 的加速度载荷, 计算并对比两种结构的轴向灵敏度和轴间耦合灵敏度。表 3 为四悬臂梁和八悬臂梁在相同电阻位置偏差量, 轴向受力相同的情况下, 各个轴向的输出灵敏度和轴间耦合灵敏度。通过分析可以得出, 当电阻 $X2$ 的位置出现偏差时, 若两种结构在 Y 方向受到 $9\ 800\ \text{m/s}^2$ 的加速度载荷时, 四悬臂梁结构 Y 方向对 X 方向的轴间耦合度仅为 5.63% , 而八悬臂梁结构 Y 方向对 X 方向的轴间耦合灵敏度高达 188.29% , 约为四梁结构的 30 倍, 所以四梁结构的抗横向耦合性远大于八梁结构。同时, 通过对比四梁结构和八梁结构的轴向灵敏度可见, 整体结构尺寸同样大小的情况下, 四梁结构能获得更大的轴向灵敏度, 比八梁结构提高了约 50% 。因此, 四梁结构具有更高的轴向灵敏度和更小的轴间耦合度的特点。



(a) 四梁结构的电阻 $X2$ 位置偏离 $150\ \mu\text{m}$



(b) 八梁结构的电阻 $X2$ 位置偏离 $150\ \mu\text{m}$

图 5 电阻 $X2$ 偏离原先位置 $150\ \mu\text{m}$ 的结构示意图

表 3 两种结构的灵敏度及轴间耦合灵敏度的对比

传感器结构	轴向	轴向灵敏度/(V/g)	轴间耦合灵敏度/(V/g)			轴间耦合度/%	
四悬臂梁	X	$S_{XX}=9.523\ 2\times 10^{-5}$	$S_{XY}=1.020\ 5\times 10^{-8}$	$S_{XZ}=3.752\ 3\times 10^{-8}$	0.11	0.39	
	Y	$S_{YY}=1.117\ 1\times 10^{-4}$	$S_{YX}=6.294\ 3\times 10^{-7}$	$S_{YZ}=3.520\ 2\times 10^{-8}$	5.63	0.32	
	Z	$S_{ZZ}=5.541\ 4\times 10^{-4}$	$S_{ZX}=8.080\ 8\times 10^{-5}$	$S_{ZY}=3.047\ 0\times 10^{-7}$	145.82	0.55	
八悬臂梁	X	$S_{XX}=6.414\ 8\times 10^{-5}$	$S_{XY}=2.586\ 5\times 10^{-9}$	$S_{XZ}=1.928\ 9\times 10^{-8}$	0.04	0.30	
	Y	$S_{YY}=7.492\ 8\times 10^{-5}$	$S_{YX}=1.410\ 8\times 10^{-6}$	$S_{YZ}=3.344\ 2\times 10^{-8}$	188.29	0.45	
	Z	$S_{ZZ}=3.754\ 6\times 10^{-4}$	$S_{ZX}=5.329\ 2\times 10^{-5}$	$S_{ZY}=9.661\ 5\times 10^{-8}$	141.94	0.26	

4 结束语

本文设计了一种新型的压阻式三维加速度传感器, 该传感器为“四悬臂梁-质量块”结构, 将 16 个压敏电阻完全对称分布于悬臂梁的两端, 通过仿真可以得出该传感器具有更高的灵敏度和更低的轴间耦合度。为了验证该传感器的抗耦合性, 我们通过预设相同电阻位置偏差量, 将相同尺寸的八梁结构和四梁结构作比较, 仿真结果表明四梁结构的传感器具有更好的抗横向耦合性, 同时, 轴向灵敏度也有所提高。

参考文献:

[1] ZHANG Jianbi. MEMS-based micro-silicon piezoresistive accelerometer design[J]. Electronic Sci & Tech, 2009, 22(10): 40-42.

[2] YAZDI, AYAZI F, NAJAFI K. Micromachined inertial sensors[J]. Proceeding of the IEEE, 1998, 86(8): 1640-1655.

[3] 陈尚, 薛晨阳, 张文栋, 等. 压阻式硅微二维加速度计的加工与测试[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(4): 272-277.

CHEN Shang, XUE Chenyang, ZHANG Wendong, et al. Fabrication and testing of a silicon-based piezoresistive two-axis accelerometer[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2008, 6(4): 272-277.

[4] 王小燕. 三维加速度传感器优化设计及静动态特性研究[D]. 安徽: 安徽理工大学, 2008.

[5] WU Rui, WEN Tingdun. Silicon micro-acceleration sensor technologies [J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(3): 8-10.

[6] 王大军, 李淮江. 一种基于 MEMS 技术的压力传感器芯片设计[J]. 吉林师范大学学报, 2011, 2(2): 133-

136.

WANG Dajun, LI Huaijiang. Design of silicon piezoresistive pressure sensor chip based on MEMS technology[J]. Journal of Jilin Normal University, 2011, 2(2): 133-136.

- [7] 乔慧, 刘俊, 张斌珍, 等. 一种新型压阻式硅微仿生矢量水听器的设计[J]. 传感技术学报, 2008, 21(2): 301-304.

QIAO Hui, LIU Jun, ZHANG Binzhen, et al. Design of a novel Si-based bionic vector hydrophone based on

piezoresistive effect[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(2): 301-304.

- [8] 李旭雯. 复合硅微传感器的研究[D]. 太原: 华北工学院, 1999.
- [9] 刘晓为, 霍明学, 陈伟平, 等. 多晶硅薄膜压阻系数的理论研究[J]. 半导体学报, 2004, 25(3): 292-296.
- LIU Xiaowei, HUO Mingxue, CHEN Weiping, et al. Theoretical research on piezoresistive coefficients of polysilicon films[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(3): 292-296.

(上接第 842 页)

- [9] LU Shaolin, XIE Ling, CHEN Jiabin. New techniques for initial alignment of strapdown inertial navigation system[J]. Journal of the Franklin Institute, 2009 (346): 1021-1037.

- [10] 杨艳娟. 捷联惯性导航系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.

- [11] 王新龙, 申功勋. 一种快速精确的捷联惯导系统初始对准方法研究[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(5): 19-23.

WANG Xinlong, SHEN Gongxun. A fast and precision initial alignment method of SINS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2003, 11(5): 19-23.

- [12] 程向红, 郑梅. 捷联惯导系统初始对准中 Kalman 参数优化方法[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 12-17.

CHENG Xianghong, ZHENG Mei. Optimization on Kalman filter parameters of SINS during initial alignment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(4): 12-17.

- [13] 李东明. 捷联式惯导系统初始对准方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

- [14] 祝燕华, 刘建业, 钱伟行, 等. 低成本捷联惯导系统的静基座快速精对准方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 836-840.

ZHU Yanhua, LIU Jianye, QIAN Weixing, et al. The rapid and accurate alignment for cost-efficient strapdown inertial navigation system on stationary base[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(5): 836-840.

- [15] 付印梦, 邓志红, 闫莉萍. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(上接第 847 页)

- [3] JO K, CHU K, LEE K, et al. Integration of multiple vehicle models with an IMM filter for vehicle localization[C]//San Diego, CA, USA; 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium University of California, 2010.

- [4] 钱伟行. 捷联惯导与组合导航系统高精度初始对准技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 27-30.

- [5] BRISTEAU P J, PETIT N, PRALY L. Design of a navigation filter by analysis of local observability[C]//Atlanta, GA, USA; 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2010.

- [6] 袁赣南, 梁海波, 何昆鹏, 等. 低成本车载导航仪的组合导航算法设计[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(6): 69-74.

《压电与声光》网络投稿

《压电与声光》编辑部已开通在线投稿系统, 以后文章均通过网上投稿, 请进入本刊网站 www.peaotec.com, 阅读投稿须知并按要求投稿, 2 个月内会有审查结果, 作者可随时登陆系统查看稿件状态。本刊将不再接受其他方式的投稿。

投稿网址: www.peaotec.com

《压电与声光》编辑部