

微加速度计研究的进展*

李圣怡, 刘宗林, 吴学忠

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要 :介绍了微加速度计的基本原理以及国内外常见的各种微加速度计的结构形式,包括压电式、电容式、扭摆式、隧道式等,分析了这些传感器的基本特点,总结微加速度计发展中存在的一些问题,并提出一些解决关键问题的措施,预测微加速度计未来的发展趋势。

关键词 :微加速度计,微机电系统,制作工艺

中图分类号 :TH824⁺.4 文献标识码 :A

Developments of Microaccelerometer Research

LI Sheng-yi, LIU Zong-lin, WU Xue-zhong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :The basic principle of microaccelerometers is explained and several kinds of them with different structures are investigated, including piezoelectric type, capacitive type, torsional-cantilever type, tunneling type, etc. The characteristics of those types are introduced. Some focused problems are pointed out. Furthermore, several methods and advices are offered to improve the property of microaccelerometers.

Key words :microaccelerometer, MEMS, fabrication technology

随着微机电系统(Micro Electro Mechanical System)技术的发展,微加速度计制作技术越来越成熟,国内外都将微加速度计开发作为微机电系统产品化的优先项目。微加速度计与通常的加速度计相比,具有很多优点:体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性好等。它可以广泛地运用于航空航天、汽车工业、工业自动化及机器人等领域,具有广阔的应用前景。常见的微加速度计按敏感原理的不同可以分为:压阻式、压电式、隧道效应式、电容式以及热敏式等^[1-5]。按照工艺方法又可以分为体硅工艺微加速度计和表面工艺微加速度计。

常见的振动式微硅加速度计是由振动质量块和支撑弹性横梁构成(如图 1 所示)。当有加速度输入时,质量块由于惯性力作用而发生位移,位移变化量与输入加速度的大小有确定的对应关系,可以描述为一个单自由度二阶弹簧阻尼振动系统,系统的数学模型即为:

$$ma = kx + c\dot{x} + m\ddot{x} \quad (1)$$

式中 k 为等效弹性系数, c 为等效阻尼系数, m 为等效惯性质量, a 为输入加速度。

根据式(1)可以求出位移量和输入加速度的关系公式:

$$x = \frac{am}{k} + q_1 e^{\left(\frac{-c - \sqrt{c^2 - 4km}}{2m}\right)t} + q_2 e^{\left(\frac{-c + \sqrt{c^2 - 4km}}{2m}\right)t} \quad (2)$$

其中 q_1 和 q_2 是积分常数,决定于系统的边界条件。

1 各种微加速度计比较

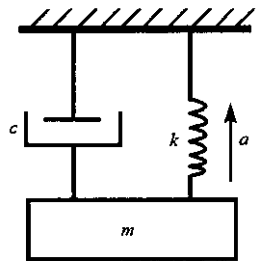


图 1 微加速度计模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the model of microaccelerometers

* 收稿日期 2004 - 07 - 02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375154)

作者简介:李圣怡(1947—)男,教授,博士生导师。

1.1 压阻式微加速度计

压阻式微加速度计是由悬臂梁和质量块以及布置在梁上的压阻组成。横梁和质量块常为硅材料。当悬臂梁发生变形时,其固定端一侧变形量最大,故压阻薄膜材料就被布置在悬臂梁固定端一侧(如图2所示)。当有加速度输入时,悬臂梁在质量块受到的惯性力牵引下发生变形,导致固连的压阻膜也随之发生变形,其电阻值就会由于压阻效应而发生变化,导致压阻两端的检测电压值发生变化,从而可以通过确定的数学模型推导出输入加速度与输出电压值的关系。

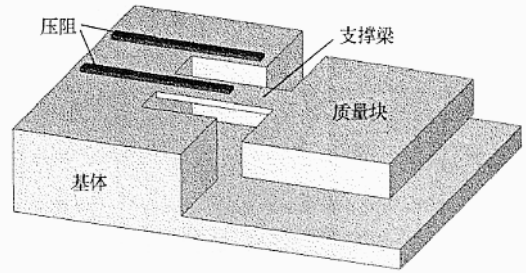


图2 压阻式微加速度计原理图

Fig. 2 Schematic of piezoresistive microaccelerometers

压电式微加速度计是最早出现的微加速度计^[6],其优点是:结构简单,芯片的制作相对容易,并且接口电路易于实现。其缺点是:温度系数比较大,对温度比较敏感,和其他原理微加速度计相比,其灵敏度比较低,蠕变和迟滞效应比较明显。

1.2 电容式微加速度计

电容式微加速度计是最常见的,也有成熟推广的产品。其基本原理就是将电容作为检测接口,来检测由于惯性力作用导致惯性质量块发生的微位移。质量块由弹性微梁支撑连接在基体上,检测电容的一个极板一般配置在运动的质量块上,一个极板配置在固定的基体上。图3所示为典型的三明治结构的平板电容式微加速度计。还有AD公司开发的电容式微加速度计采用梳齿阵列电容作为检测接口。

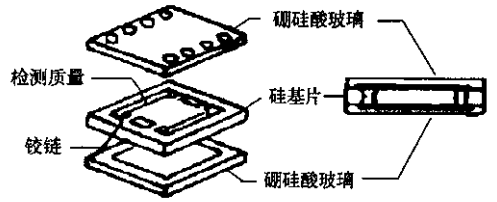


图3 电容式微加速度计示意图^[7]

Fig. 3 Schematic of capacitive microaccelerometers

电容式微加速度计的灵敏度和测量精度高、稳定性好、温度漂移小、功耗极低,而且过载保护能力较强,能够利用静电力实现反馈闭环控制,显著提高传感器的性能。

1.3 扭摆式微加速度计

扭摆式微加速度计的敏感单元是不对称质量平板,通过扭转轴与基座相连,基座上表面布置有固定电极,敏感平板下表面有相应的运动电极,形成检测电容(如图4)。当有加速度作用时,不对称平板在惯性力作用下,将发生绕扭转轴的转动^[7]。转动角与加速度成比例关系,可用下式表示:

$$maL = K\theta \quad (3)$$

式中 a 为输入加速度; L 为质量平板质心到支撑轴转动中心的距离; K 为支撑轴的扭转刚度系数; θ 为平板的扭转角。

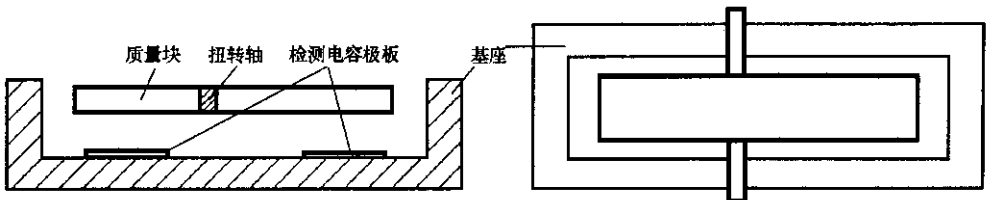


图4 扭摆式微加速度计的结构

Fig. 4 Schematic of torsional-cantilever microaccelerometers

当质量平板发生偏移时,可以利用电容的静电力来调节平板的偏转角度,提高系统的测量范围,改善系统的动态特性。其基本特点与电容式类似。

1.4 隧道式微加速度计

隧道效应就是平板电极和隧道针尖电极距离达到一定的条件,可以产生隧道电流。由 J. G. Simmons 推导的隧道电流和针尖与下电极之间的距离关系可以描述为^[10]:

$$I_{tun} \propto v_{tun} \exp(-\alpha \sqrt{\phi} x) \quad (4)$$

式中 p_{min} 为施加在电极两端的电压 χ 为有效势垒高度 λ 为电极间隙 ρ 为常数。

这样可以看出,隧道电流与极板之间的间隙 x 呈负指数关系。隧道式微加速度计常用悬臂梁或者双端固支梁支撑惯性质量块,质量块在惯性力的作用下,位置将发生偏移,这个偏移量直接影响到隧道电流的变化,通过检测隧道电流变化量来间接检测加速度值。系统的典型结构示意图如图 5 所示^[10]。

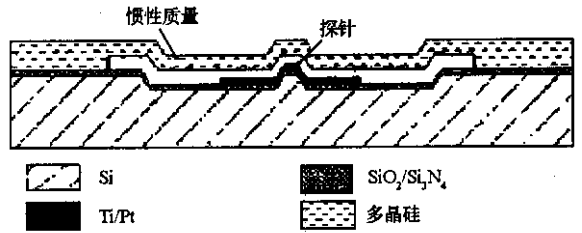


图 5 隧道式微加速度计原理示意图

Fig. 5 Schematic of tunneling microaccelerometers

隧道式微加速度计具有极高的灵敏度,易检测,线性度好,温漂小,抗干扰能力强,可靠性高。但是由于隧道针尖制作比较复杂,所以其工艺比较困难。

还有其他一些新型加速度计,譬如基于热阻抗原理的热加速度计^[12],具有很好的实验结果。

2 微加速度计的发展趋势

自 1977 年美国斯坦福大学首先利用微加工技术制作了一种开环微加速度计以来,国内外开发出了各种结构和原理的加速度计,国外一些公司已经实现了部分类型微加速度计的产品化,例如美国 AD 公司 1993 年就开始批量化生产基于平面工艺的电容器式微加速度计。相比之下国内的相关研究还存在很多问题,有很多共性难题没有解决。

(1) 微结构的振动质量比较小,产生的输出信号非常微弱,基本上与机械噪声以及电噪声同数量级,因此弱电量检测以及噪声抑制成为提高加速度计性能的难题;

(2) 微结构的迟滞和温漂是影响微加速度计精度的重要因素,如何改善结构减小迟滞效应,采取措施降低温漂的影响,是微加速度计实用化的重要课题;

(3) 微加速度计存在明显的横向干扰,如何采用合理的结构实现结构在各方向解耦,并且通过合理布置检测单元,实现对横向干扰的抑制,也是研究的重要内容;

(4) 除了基于半导体平面工艺的特殊结构电容式加速度计成本较低,利于批量生产外(例如 AD 公司的微加速度计系列),其他原理的加速度计的制作成本相对较高,不利于批量生产;针对上述问题,国内外研究人员已经进行了充分的研究。文献[13]报道采用相关双采样接口电路(如图 6 所示)能提高微弱信号的检测能力,降低电路噪声干扰。文献[14]报道利用静电力平衡实现微加速度计的闭环控制,提高器件的动态性能,避免支撑梁发生大形变,降低传感器的迟滞和非线性影响,提高器件的可靠性。也有学者采用在线温度补偿技术,实现微加速度计温漂补偿。

同时微机电系统技术的进步和工艺水平的提高,也给微加速度计的发展带来了新的机遇。通过了解国内外微加速度计的研究动态,分析其研究特点,总结出微加速度计以下几点发展趋势:

(1) 高分辨率和大量程的微硅加速度计成为研究的重点。由于惯性质量块比较小,所以用来测量加速度和角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,精度高、量程大的微加速度计将会大大拓宽其运用范围。

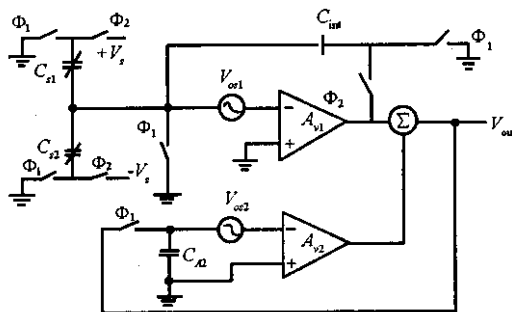


图 6 应用相关双采样技术的接口电路

Fig. 6 Interface circuit using correlated double sampling technology

(2) 温漂小、迟滞效应小成为新的性能目标,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。

(3) 多轴加速度计的开发成为新的方向。已经有文献报道开发出三轴^[11~14]微硅加速度计,但是其性能离实用还有一段距离,多轴加速度计的解耦是结构设计中的难点。

(4) 将微加速度计表头和信号处理电路集成在单片基体上,也能够减小信号传输损耗,降低电路噪声,抑制电路寄生电容的干扰。

(5) 选择合理的工艺手段,降低制作成本,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,为微加速度计投产生产提供一套利于操作、重复性好的工艺方法,也是微硅加速度计发展的重要方向。

3 总结

微加速度计是武器装备所需的关键传感器之一,具有广阔的军事运用前景。国外已有文献报道将微加速度计与微陀螺运用于增程制导弹药(ERGM)上^[15],能有效改善弹药的战斗性能,但目前大部分微加速度计的精度不高,不能适应军事装备发展的需求。本文分析与比较了各类型微加速度计的特点,提出了影响微加速度计性能提高一些共性难题,总结出其发展趋势,为微加速度计的研究和开发提供了明确的方向。

参考文献:

- [1] Patrick S, Jens O G, Lars M K. A Piezoelectric Triaxial Accelerometer[J]. J. Micromech. Microeng., 1996: 131-133.
- [2] Roylance L M, Angell J A. A Batch-fabricated Silicon Accelerometer[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1979, ED26: 1911-1917.
- [3] Kenny T W, Waltman S B, Reynolds J K, et al. A Micromachined Silicon Electron Tunneling Sensor[A]. In Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop(MEMS90), Napa Valley, CA, 1990: 192-196.
- [4] Danel S, Michel F, Delapierre G. Micromachined of Quartz and Its Application to an Acceleration Sensor[J]. Sensors and Actuators, 1990, A21/A23: 971-977.
- [5] Maily F, Giani A, Martinez A, et al. Micromachined Thermal Accelerometer[J]. Sensors and Actuators, 2003, A103: 359-363.
- [6] 才海男,周兆英,李勇,等. 微硅加速度传感器的动态特性补偿方法研究[J]. 宇航计测技术, 1998, 18(2).
- [7] 罗小章,周百令. 扭摆式硅微加速度计的研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1).
- [8] 韩荔,龙志峰,李庆祥,等. 电子隧道加速度计输出信号的分析与处理[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1).
- [9] 龙志峰,韩荔,李庆祥,等. 微硅隧道加速度变送器的优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3).
- [10] Simmons J G. Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(6): 1793-1803.
- [11] Velten T, Krause P, Jansen E, et al. A New Three-axis Accelerometer[A]. Sensor99 Proceedings II, A 5.2, 1999: 47-52.
- [12] Masory O, Alfano J P. Design of a MEMS Six DOF Accelerometer[A]. Proc. 2nd International Conf. on Recent Advances in Mechatronics, Istanbul Turkey, 1999.
- [13] 李万玉,阮爱武,罗晋生,等. 硅微加速度计的接口检测电路的研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(2).
- [14] Lemkin M A, Boser B E, Auslander D, et al. A 3-axis Force Balanced Accelerometer Using a Single Proof-mass[A]. Transducers97: 1185-1188.
- [15] Barbour N, Schmidt G. Inertial Sensor Technology Trends[J]. IEEE Sensors Journal, 2001: 332-339.

