

# MEMS加速度计的发展和应用的研 究

甄 真, 朱 红

西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年1月29日; 录用日期: 2022年3月7日; 发布日期: 2022年3月14日

## 摘 要

MEMS加速度计作为MEMS应用领域中最早开始研究的传感器之一, 是一种微型的机电设备, 它可以感知物体在多个轴上的加速度分量。如今, 基于微电子机械的加速度计已被广泛应用于太空测量、惯性导航、消费电子、汽车电子和地质勘探等各个领域, 其重量往往只有几毫克重, 足迹肉眼不可见。本文综述了MEMS加速度计的发展历史, 重点介绍了早期油阻尼压阻式微加速度计和空气阻尼电容式微加速度计的结构和原理, 并分析了近年MEMS加速度计的发展趋势与应用。

## 关键词

MEMS加速度计, 微加工, 压阻式, 电容式

# Research on the Development and Application of MEMS Accelerometer

Zhen Zhen, Hong Zhu

School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 7<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 14<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

As one of the earliest sensors in the field of MEMS application, MEMS accelerometer is a micro electromechanical device, which can sense the acceleration components of objects on multiple axes. Today, accelerometers based on microelectronics and machinery have been widely used in space measurement, inertial navigation, consumer electronics, automotive electronics, geological exploration and other fields. Their weight is often only a few milligrams and their footprints are invisible to the naked eye. This paper summarizes the development history of MEMS accelerometers, focuses on the structure and principle of early oil damping piezoresistive micro accelerome-

ters and air damping capacitive micro accelerometers, and analyzes the development trend and application of MEMS accelerometers in recent years.

## Keywords

MEMS Accelerometer, Micromachining, Piezoresistive, Capacitive

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

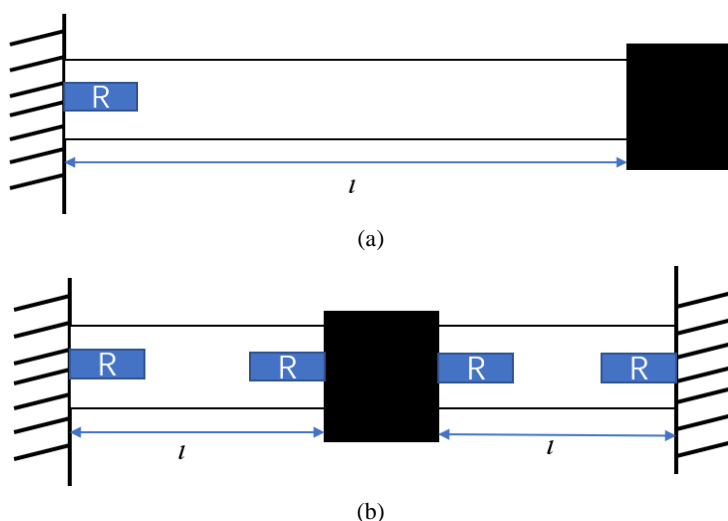
## 1. 引言

MEMS (现代微电子机械体系), 就是运用集成电路(IC)的生产技术和微小机械加工工艺将微架构、微传感器、微小运行器等材料加工到一个或多个晶片上的微型机械集成系统。MEMS 技术最初可以追溯到 1967 年, 美国加州西屋实验室 Nathanson 等人关于硅谐振晶体管集电极的研究成果, 采用静电驱动激发起栅的振荡, 是现代 MEMS 运行器的起点。1970 年, 美国 Cellulite 公司成功研发了世界第一台硅加速度样机。1977 年, 美国 Stanford 大学在世界上也是第一次运用各向异性的蚀刻版画, 研究出了这种微型开环控制系统加速度仪。1979 年, Roylance L. M 和 Angell J. B 教授共同研究出了一种基于 KOH 腐蚀体硅工艺的微机械压阻式加速度计, 这是世界上第一个复杂硅加速度计, 其由质量块加单悬臂梁构造而成, 在悬臂梁上通过杂质扩散形成的压敏电阻来检测施加的加速度所引起的应力大小的变化[1]。其后 ADI、ST 公司等纷纷加入 MEMS 加速度计的研究, 均取得了显著的效果。1993 年, 美国 ADI 公司成功地将微型加速度计运用到了车辆的防撞气囊控制系统中, 设计了一种多晶硅表面微机械加工的梳齿状电容式加速度计 ADXL50。到了 20 世纪 90 年代, 油阻尼逐渐被空气阻尼取代, 空气阻尼通过例如阳极键合或沟槽蚀刻技术等形成器件内狭窄的气隙来实现的。至于检测方法, 由于 CMOS 电路复杂的信号处理技术, 电容式加速度计逐渐普及。此外传统的“体微机械加工”技术无法做到零部件的平面化布局, 故而 MEMS 加工技术逐渐被“表面微机械加工”所代替。1991 年, 美国 Analog 公司与 Siemens 公司共同研发了世界上首个用表面硅工艺大批量生产的电容式硅加速度计, 该加速度计主要用作车辆气囊防护系统。它通过与标准集成电路 BIMOS 工艺并行的表面微加工技术, 把机械微结构和信号处理电路整合到了同一种硅片上[2]。2006 年, 美国佐治亚理工学院报道了利用 HARPSS (高深宽比多晶与单晶硅结合)和低噪声 CMOS 集成电路所制作的横向电容微加速度计, 这种加速度计可以获得更高深宽比的内部结构以及更小的电容间距, 还可以减少感应器的机械热噪声, 从而增加了仪器的加速率电容灵敏度[3]。2008 年, 奥克兰大学提出了一种基于单质量的单片集成的电容检测式三轴加速度计, 该三轴加速度计能够探测质量块在 X、Y、Z 三个方向上的线性运动[4]。随后, 基于光学检测和 MEMS 工艺的 MOEMS 加速度计逐渐兴起, 2008 年, Krishnamoorthy U 提出了亚波长谐振式 MOEMS 加速度计。该加速度计可以通过检测透射光的光强来检测加速度的大小, 其灵敏度很高, 但是加工难度也非常大, 检测难度也较高[5]。后来 Seok 等人设计了一种高灵敏度单轴谐振式加速度计, 该传感器对结构的几何参数进行了优化使其在很小的封装尺寸下仍能保持很高的灵敏度[6]。同时学者们也慢慢展开了基于石英材料的谐振式加速度计的研究[7]。近年来, MEMS 加速度计在灵敏度、高 g 值, 易于峰值等各方面的性能上均有了不同的发展, 2020 年 Lima 等人提出了基于 Sigma-Delta 调制的小尺寸真空封装的电容式加速度计, 该加速度计可以灵活地实时调整环路参数[8]。G. Gattere 等人则提出了一种能够提高器件在高 g 冲击下鲁棒性的一种新型电容式 MEMS 加速度计[9]。

压阻检测式微机械加速度计是最早开始研究的微加速度计, 而电容检测式微机械加速度计则仍是近年来研究的热门, 这两种加速度计均是 MEMS 加速度计领域的两种主要研究对象, 本文将在 3、4 节具体介绍压阻检测式微机械加速度计和电容检测式微机械加速度计的工作原理和发展历史以及近年来的研究成果。

## 2. 压阻检测式微机械加速度计

压阻检测式微加速度计一般使用的压敏电阻为敏感元件, 而压敏电阻的电阻率变化也和质量块的相对位置相关。其工作机理是把被测加速度转化为硅材料的电阻率变化, 来实现加速度的测定。相比于传统的应变型加速度仪, 微机械压阻型硅加速度仪的尺寸较小、质量轻、输出功率大、对高频响应速度较好; 可以测量静态加速度; 但是由于压阻材料普遍容易受到温度的影响, 压阻检测式微机械加速度计的敏感度往往不高, 准确度易受到影响。



**Figure 1.** Schematic diagram of cantilever beam. (a) Single cantilever beam structure; (b) Double cantilever beam structure

**图 1.** 悬臂梁式结构示意图。(a) 单悬臂梁结构; (b) 双悬臂梁结构

图 1 是一般的悬臂梁式结构示意图, 图中图 1(a)为单悬臂梁结构, 其一端为自由端常用来固定质量块, 另一端为固定端其上有一压敏电阻。悬臂梁根部受到的应力为:

$$\sigma = \frac{6ml}{bh^2} * a \quad (1)$$

其中  $a$  为加速度,  $m$  为质量块的重量,  $b$  为悬臂梁的宽度,  $h$  为悬臂梁的厚度,  $l$  表示质量块到悬臂梁根部的距离。通过该式可以得到电阻的变化率为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi \frac{6mla}{bh^2} \quad (2)$$

$\pi$  为压阻系数。由此, 悬臂梁根部的应变为:

$$\varepsilon = \frac{6mla}{Ebh^2} \quad (3)$$

$E$  为硅的杨氏模量。由此可以得到悬臂梁的最大作用力为:

$$F_{\max} = \varepsilon_{\max} * \frac{Ebh^2}{6l} \quad (4)$$

其固有频率公式为:

$$f = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{Ebh^2}{ml^2}} \quad (5)$$

图 1(b)为双端固支悬臂梁结构, 如图在悬臂梁的固定支点和质量块边缘分别添加两个压敏电阻, 由于这两处的应力最大且等值相反, 故而可以得到根部应力  $\sigma_1$  和质量块边缘应力  $\sigma_2$  分别为:

$$\sigma_1 = \frac{3ml}{bh^2} * a \quad (6)$$

$$\sigma_2 = -\frac{3ml}{bh^2} * a \quad (7)$$

由此其电阻变化率分别为:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \pi \frac{3mla}{bh^2} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\pi \frac{3mla}{bh^2} \quad (9)$$

其双端固支的固有频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ebh^2}{ml^2}} \quad (10)$$

当加速度作用于压阻式 MEMS 加速度计时, 质量块在加速度惯性力的作用下产生位移使得压敏电阻发生形变, 电阻率变化从而影响了电阻值的大小, 根据上述公式可以得到电阻值变化量与加速度大小的关系, 将电阻值的变化量经惠斯通桥转化为电压, 再由后续电路处理就达到了测量加速度大小的效果。

图 2 介绍了一种最早期的重油阻尼压阻式硅加速度计的结构, 该加速度计采用玻璃-硅-玻璃三明治式结构, 将惯性质量块和硅悬臂梁联接在一起于加速场中, 由于场形成了惯性运动, 在反惯力的影响下, 质量块左右运动, 悬臂梁也形成了反应, 而反应值的多少和加速成正比。基于硅的压阻效应, 在硅片上扩散电流的阻值改变的程度, 和施加于其上的应变能能力变化的程度成正比, 因而可利用测量电阻阻值的改变来测定加速率的高低。该传感器的测量范围有 0.01 g~50 g, 重量小于 0.02 g, 但其横向灵敏度达到了 27% 以上。

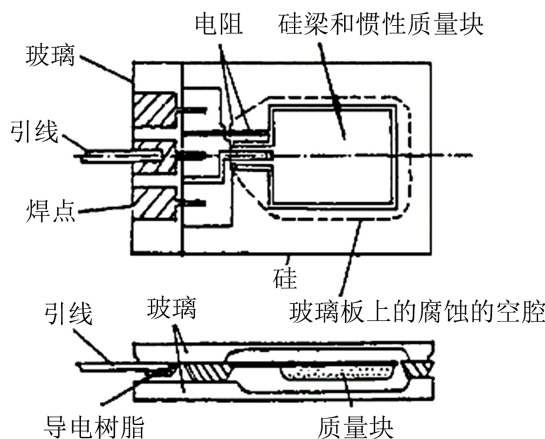


Figure 2. Schematic diagram of the structural structure of the early oily resistance-resistant silicon accelerometer [10]

图 2. 早期油阻尼压阻式硅加速度计结构示意图[10]

由于传统的单臂梁结构的加速度传感器横向效应较大, 不同机构开始展开采用不同的结构来减小加速度传感器的横向灵敏度。2000年, 美国的 Aaron Partridge 等人设计了一种横向侧壁敏感的压阻式加速度计, 通过斜向离子注入技术在侧壁注入淡硼压阻该传感器的灵敏度有  $3 \text{ mV/g}$ , 固有频率为  $700 \text{ Hz}$  [11]。2013年我国的张永平教授及其团队设计了一款三轴压阻式加速度传感器, 该传感器采用四边四固支梁结构, 在每根梁的根部都用三组惠斯顿电桥测量 X, Y, Z 三轴加速度, 图 3 为该加速度计的基本原理示意图, 其中  $R_1 \sim R_4$  组成了 X 轴的惠斯顿电桥,  $R_5 \sim R_8$  组成了 Y 轴的惠斯顿电桥,  $R_9 \sim R_{16}$  组成了 Z 轴的惠斯顿电桥, 三组惠斯顿电桥构成三个电阻器分别测量 X, Y, Z 三轴加速度, 故而每组桥只需负责自己方向的加速度分量, 每个桥只需对自己的给定方向敏感, 大大减小了加速度计的横向效应, 这种结构的加速度计将各轴横向灵敏度之间的影响控制在 5% 以下[12]。

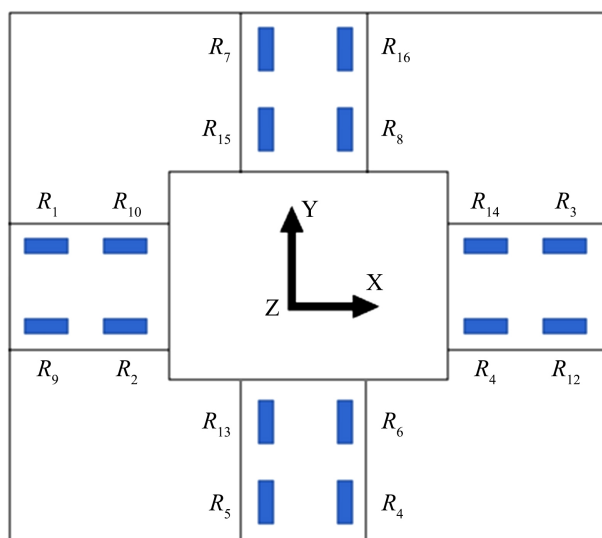


Figure 3. Schematic diagram of three-axis pressure resistance acceleration sensor structure

图 3. 三轴压阻式加速度传感器结构原理图

2014年 Anindya Lal Roy 等人研制了基于 SOIMEMS.CMOS 工艺的低  $g$  值高精度压阻式加速度传感器, 该传感器采用双边四梁结构, 每根梁上平行分布两个压阻, 在  $1.54 \text{ kHz}$  的固有频率下, 该结构的加速度传感器的灵敏度可达  $4 \text{ mV/g}$ , 横向灵敏度小于 1% [13]。基于对加速度计量程的考虑, 2018年, Liu 等人提出经典的 Bernoulli-Euler 理论不适用于高频环境下的短厚梁, 故而设计了一种基于 Timoshenko 梁理论的高量程加速度计的理论模型, 在自由端固定具有集中惯性矩的交叉夹夹紧 Timoshenko 梁, 该模型优化了谐振频率和灵敏度, 使其在抗过载为  $200,000 \text{ g}$  时也能具有较大的灵敏度, 同时该结构的加速度计具有  $0.4 \text{ } \mu\text{V/g}$  的灵敏度[14]。2020年, R. Mukhiya 等人提出了一种压阻式自支撑梁的新型高性能压阻式加速度计, 该加速度计通过将压阻传感微梁和支撑梁分别独立, 削弱了测量灵敏度与谐振频率之间的相关性, 在不牺牲谐振频率的情况下, 可以提高新型压阻式加速度计的测量灵敏度, 并通过有限元模拟对传感芯片的结构尺寸进行了优化, 该加速度计的灵敏度最终为  $0.54 \text{ } \mu\text{V/g}$ , 谐振频率可达  $445 \text{ kHz}$  [15]。

### 3. 电容检测式微机械加速度计

电容式微机械加速度计通常使用差动电容检测电路, 通过电容的电容量和两极板之间的距离变化关系来表征加速度的大小。电容式微加速度计灵敏度和检测精确、稳定能力好、环境温度偏移小、耗电量

少、过载防护能力好、易于使用静电自检。但其频响范围和准确度都受到限制, 而且校准不易, 又因为很小的寄生电容器也会影响其线性集成电路, 所以复杂信号处理电路的产品设计非常麻烦, 需要一种可以处理非常微弱信息的复杂调制集成电路。

图 4 是电容检测式微机械加速度计的机械传感结构示意图, 图中包括悬臂梁、惯性质量块和固定电容极板等。当对质量块施加外力使其产生位移时, 质量块会带动可移动极板使得可移动极板相对于两固定极板之间的距离发生变化, 从而使机械电容发生变化。

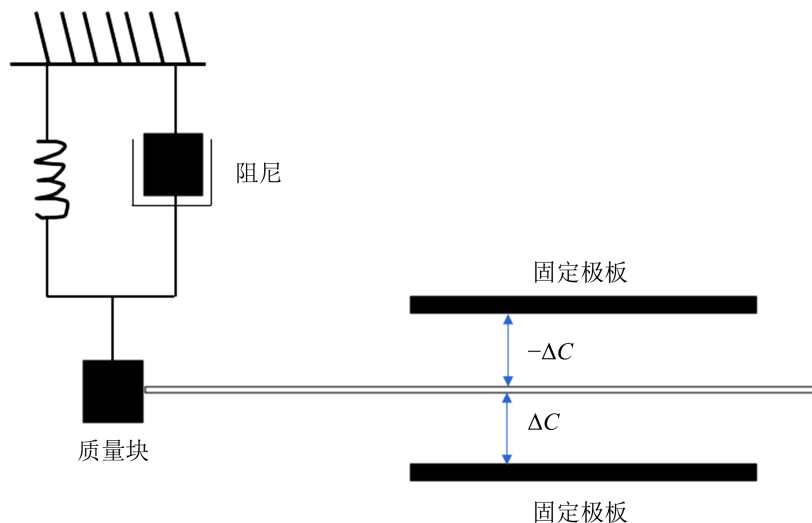


Figure 4. Mechanical sensing structure of the capacitor detection micro-mechanical accelerometer

图 4. 电容检测式微机械加速度计的机械传感结构示意图

依据牛顿第二公式, 当给质量块施加外部作用力时有:

$$ma + k(L - S) + bv = 0 \quad (11)$$

其中  $b$  为阻尼系数,  $k$  为弹性系数,  $L$  为质量块移动的距离,  $S$  为整体结构移动距离,  $v$  表示质量块相对整体结构的瞬时速度。又

$$a = \frac{dL^2}{dt^2} = \frac{dS^2}{dt^2} \quad (12)$$

$$v = \frac{d(L - S)}{dt} \quad (13)$$

对上述公式进行拉普拉斯变换并进一步推导可得:

$$H(S) = \frac{1}{s^2 + s \frac{b}{m} + \frac{k}{m}} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (14)$$

式中  $\omega_0$  为加速度计的固有谐振频率  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ ,  $\xi$  为阻尼比因子  $\xi = b/2\sqrt{mk}$ 。当  $w$  远小于  $\omega_0$  时有:

$$\left| \frac{Y(w)}{A(w)} \right| = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (15)$$

可见由加速度而产生的可移动极板位移的大小与加速度的大小成线性关系。对于机械电容而言, 其差分



电容的表达式如下:

$$\Delta C = 2C_0 \frac{\Delta d}{d} \quad (16)$$

其中  $C_0$  表示初始电容大小,  $\Delta d$  则为可移动极板移动的距离。综上可以得到加速度和电容之间的变化关系为:

$$a = \frac{d_0 w_0^2}{2C_0} \Delta C \quad (17)$$

当  $\Delta d$  远小于  $d_0$  时,  $w$  远小于  $w_0$ , MEMS 微加速度计可以实现从  $\Delta a$  到  $\Delta C$  的转变, 且加速度大小与差分电容变化量近似为线性关系, 经后续电路转换测量后达到检测加速度的效果。

图 5 中描述了一个早期具有空气阻尼器功能的电容型硅加速度计[16], 该加速度计采用玻璃-硅-玻璃三明治式结构, 作为惯性质量和电容器极板的活动板由一个或二个悬臂梁所支承, 当加速度信号输入时, 就会导致感应器内的检测电容出现变化, 而利用接口电路检测电容的改变就可以得到输入速率的大小。当时该加速度计的模拟输出信号为 5 V/g, 横向灵敏度低于 0.4%, 整体组件的大小为 33 mm × 15 mm × 5 mm。

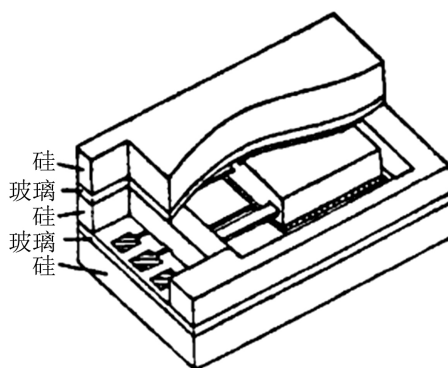


Figure 5. Capacitive micro sensor structure [16]

图 5. 电容式微传感器结构[16]

由于传统加速度计结构及检测电路中寄生电容的影响, 加速度计的稳定性无法得到保证, 1988 年 Huang S. M 等人研制了一种精确时序的电荷充放电电路, 该电路利用时序对电荷充放电达到精准控制, 大大减小了寄生电容的影响, 提高了整个加速度计系统的抗干扰能力[17]。2007 年党丽辉等人发现加速度计自身的结构会影响分辨率、线性度、稳定性、灵敏度等性能指标, 并得出了梳齿式 MMA 具有灵敏度高、稳定性好、结构简单等优点的结论[18]。2020 年, 牛昊彬等人针对小型化加速度计的需求设计了一款全硅梳齿电容式 MEMS 加速度计, 加速度计采用“日”字型的结构方案, 检测模块和施力模块电容采用变间隙梳齿构成, 测试结果表明, 该加速度计的稳定性优于 100  $\mu$ g, 灵敏度约为 80 mV/g, 稳定性良好, 且该加速度计得封装尺寸只有 4 mm × 4 mm × 0.85 mm, 尺寸非常小[19]。后来, 随着国防科技等的迅速发展, 单轴微加速度计已经不能满足各行业的需求, 双轴和三轴微加速度计的研究也慢慢展开步伐, 2005 年, Chae 等人提出了一种三轴微加速度计, 该加速度计由三个单独的单轴加速度计组成其测量的电容灵敏度达到了 2.9 pF/g [20]。由于 Z 轴加速度计结构独特的面外运动方式, 在参与 MEMS 加速度计的单片三轴集成化时, 需要对 Z 轴进行单独设计。2018 年, Mohammed 等人提出了一种采用扭摆式结构的高动态范围的混合梁 Z 轴电容式加速度计, 该加速度计利用扭转梁两侧质量不平衡的特点, 使得

Z 轴在感性加速度变化时, 让质量块与顶部固定极点间形成差动电容变化, 可以有效提高加速度计的动态范围, 实现更好的检测灵敏度, 其电容灵敏度达到了 12 fF/g [21]。

由于电容式加速度计稳定性好, 温度漂移小等优点, 近年来, 关于电容式微加速度计的研究仍是主流之选。对于电容式加速度计的研究也主要沿如何扩大频响覆盖范围、控制临界阻尼状态、抑制横向灵敏度、抑制温度漂移、先进 CMOS 电路集成等方面发展, 随着 MEMS 加工工艺的提升, 电容式 MEMS 加速度计的准确度也在提高[22]。

#### 4. 总结与展望

综合以上两节的分析, 对压阻式加速度计和电容式加速度计从工作原理、分辨率、灵敏度、优缺点等各方面进行如表 1 的对比分析, 压阻式加速度计作为最早开展研究的加速度计, 具有结构简单, 可抗高冲击, 可靠性高等优点, 但其温度效应严重, 易受温度影响不适用于温度变化较大的场景。而电容式加速度计稳定性好, 温度漂移小, 但其后续电路设计复杂, 也是目前研究的主要热门之选。

**Table 1.** Comparison of two accelerometer performance

**表 1.** 两种加速度计性能对比

性能分类	压阻式加速度计	电容式加速度计
工作原理	敏感元件的压阻效应	板间电容变化
灵敏度	低	高
分辨率	中	中
优点	结构简单, 可抗高冲击, 可靠性高	稳定性好, 温度漂移小
缺点	温度效应严重	易受电子干扰, 后续电路设计复杂

高精度、集成化与小型化, 主要应用于集成化封装是目前硅微加速度计的主要趋势, 将在此基础上进一步向着高精度、数字化和高可靠性的方向发展。同时为了满足多方向测量加速度信号的需求, MEMS 加速度计也从单轴向多轴发展, 目前, 三轴 MEMS 加速度计主要通过三个单轴的 MEMS 加速度计立体安装, 并不能适应设备小型化的需要。关于三轴单片集成电路的 MEMS 加速度计生产的研发工作目前大部分仍然集中在低速精度应用领域, 研发的三轴 MEMS 加速度计生产大多应用振动、冲击检测、手机、网络游戏等电子产业和消费领域, 不能满足高端设备在精度方面的需求。研制低成本、低噪声、长期稳定性好、低温度灵敏度的精密加速度计, 对于目前的科研领域而言依然是一种挑战, 其困难之一就是研制少应力、低偏移的精密包装工艺技术; 另外一种主要难题就是接口电路, 它们要求是高敏感度、低噪声和较大动作范围的低漂移读取/监控集成电路[23]。

如今, 基于 MEMS 的加速度计随处可见, 从测量大桥的振动[24]到用于监测人体活动的微型可穿戴传感器[25], MEMS 加速度计的应用几乎随处可见。例如将 MEMS 加速度计安装在相机或智能手机中, 用于对屏幕方向进行检测和图形稳定。为了获得无模糊和抖动的图像和视频, 相机中图像的稳定非常重要。安装在相机上的加速度计在捕捉图像时检测振动, 并对相机处理器中捕捉到的图像施加校正措施。惯性导航系统中嵌入式 MEMS 加速度计可测量物体的加速度[26], 并使用相关的电子电路将其转换位置、方向和速度, 这样可以对运动中的对象进行正确的导航引导。未来随着 MEMS 技术水平的提升, MEMS 加速度计的使用范围将会更加广阔, 而精密、大量程的 MEMS 加速度计也会大大拓展其使用范畴, 在军事和民用领域扮演更加重要的角色[27]。



## 参考文献

- [1] Roylance, L.M. and Angell, J.B. (1979) A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **26**, 1911-1917. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1979.19795>
- [2] Kuehnel, W. and Sherman, S. (1994) A Surface Micromachined Silicon Accelerometer with On-Chip Detection Circuitry. *Sensors & Actuators A*, **45**, 7-16. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(94\)00815-9](https://doi.org/10.1016/0924-4247(94)00815-9)
- [3] Monajemi, P. and Ayazi, F. (2006) Design Optimization and Implementation of a Microgravity Capacitive HARPSS Accelerometer. *IEEE Sensors Journal*, **6**, 39-46. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2005.854134>
- [4] Qu, H., Fang, D. and Xie, H. (2008) A Monolithic CMOS-MEMS 3-Axis Accelerometer with a Low-Noise, Low-Power Dual-Chopper Amplifier. *IEEE Sensor Journal*, **8**, 1511-1518. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2008.923582>
- [5] Krishnamoorthy, U., Iii, R., Bogart, G.R., et al. (2008) In-Plane MEMS-Based Nano-g Accelerometer with Sub-Wavelength Optical Resonant Sensor. *Sensors & Actuators A: Physical*, **145-146**, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.03.017>
- [6] Seok, S., Kim, H. and Chun, K. (2004) An Inertial-Grade Laterally-Driven MEMS Differential Resonant Accelerometer. *Proceedings of IEEE Sensors*, **2**, 654-657.
- [7] 白凤蕊. 新型一体式石英振梁加速度计研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [8] Lima, V., Cabral, J., Kuhlmann, B., et al. (2020) Small-Size MEMS Accelerometer Encapsulated in Vacuum Using Sigma-Delta Modulation. 2020 *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Piscataway, 23-26 March 2020, 1-4. <https://doi.org/10.1109/INERTIAL48129.2020.9090096>
- [9] Gattere, G., Rizzini, F. and Dall'Oglio, C. (2020) Antistiction Recoil Accelerometer. 2020 *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Piscataway, 23-26 March 2020, 1-4. <https://doi.org/10.1109/INERTIAL48129.2020.9090055>
- [10] Mutoh, M., Iyoda, M., Fujita, K., et al. (1990) Development of Integrated Semiconductor-Type Acceleration. *IEEE Workshop on Electronic Applications in Transportation*, Dearborn, 18-19 October 1990, 35-38.
- [11] Partridge, A., Reynolds, J.K., Chui, B.W., et al. (2000) A High-Performance Planar Piezoresistive Accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, **9**, 58-66. <https://doi.org/10.1109/84.825778>
- [12] Zhang, Y.P., He, C.D., Yu, J.Q., et al. (2013) An Integrated MEMS Piezoresistive Tri-Axis Accelerometer. *Journal of Semiconductors*, **34**, Article ID: 104009. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/34/10/104009>
- [13] Roy, A.L., Sarkar, H. and Dutta, A. (2014) A High Precision S01 MEMS-CMOS+49 Piezoresistive Accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, **210**, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.036>
- [14] Liu, F., Gao, S., Niu, S., et al. (2018) Optimal Design of High-g MEMS Piezoresistive Accelerometer Based on Timoshenko Beam Theory. *Microsystem Technologies*, **24**, 855-858. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3585-4>
- [15] Jia, C., Mao, Q., Luo, G., et al. (2020) Novel High-Performance Piezoresistive Shock Accelerometer for Ultra-High-g Measurement Utilizing Self-Support Sensing Beams. *Review of Scientific Instruments*, **91**, Article ID: 085001. <https://doi.org/10.1063/5.0008451>
- [16] Rudolf, F., Jornod, A., Bergqvist, J., et al. (1990) Precision Accelerometers with  $\mu\text{g}$  Resolution. *Sensors & Actuators A Physical*, **21**, 297-302. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(90\)85059-D](https://doi.org/10.1016/0924-4247(90)85059-D)
- [17] Huang, S.M., Stott, A.L., Green, R.G., et al. (1988) Electronic Transducers for Industrial Measurement of Low Value Capacitances. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, **21**, 242. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/21/3/001>
- [18] 党丽辉, 胡雪梅. 电容式加速度计的表头结构设计与分析[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2007, 23(5): 29-32.
- [19] 牛昊彬, 孙国良, 王帅民, 等. 圆片级封装全硅梳齿电容式 MEMS 加速度计设计[J]. 中国惯性技术学报, 2020(5): 672-676.
- [20] Chae, J., Kulah, H. and Najafi, K. (2005) A Monolithic Three-Axis Micro-g Micromachined Silicon Capacitive Accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, **14**, 235-242. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2004.839347>
- [21] Mohammed, Z., Elfadel, I.M. and Rasras, M. (2018) High Dynamic Range Z-Axis Hybrid Spring MEMS Capacitive Accelerometer. 20th *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS, DTIP*, Roma, 22-25 May 2018, 1-4. <https://doi.org/10.1109/DTIP.2018.8394219>
- [22] 薛连莉, 翟峻仪, 葛悦涛. 2020 年国外惯性技术发展回顾[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3): 59-67.
- [23] 卞玉民, 胡英杰, 李博, 等. MEMS 惯性传感器现状与发展趋势[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 50-56.

- [24] 王庆敏, 苏木标, 刘玉红, 等. MEMS 加速度传感器在桥梁横向动位移监测中的应用[C]. 2007'中国仪器仪表与测控技术交流大会论文集(二). 2007: 352-355.
- [25] 鲁鹏威, 贾方秀, 郝剑文. 基于 MEMS 的帕金森病人体姿态分类监测系统[J]. 现代电子技术, 2017(16): 169-172+177.
- [26] 岳鹏, 史震, 王剑, 等. 基于 MEMS 加速度计的无陀螺惯导系统[J]. 中国惯性技术学报, 2011(2): 30-34.
- [27] 沈玉芑, 杨文钰, 朱鹤, 等. 2020 年国外惯性技术的发展与展望[J]. 飞航导弹, 2021(4): 6.