

开关点电可调节的 MEMS 冲击加速度锁定开关^{*}

贾孟军^{1,2,†} 李昕欣² 宋朝晖² 王跃林²

(1 中国科学院研究生院, 上海 200050)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 介绍了一种基于机电耦合原理的新型冲击加速度 MEMS 开关. 此开关的阈值开关点可以通过偏置电压的改变进行调节设置, 同时具有自锁定功能. 文中分析了这种开关的准静态加速度静力学平衡条件和在阶跃冲击加速度输入情况下的响应特性, 并通过 CoventorWare 软件模拟, 得到悬臂梁型开关在各种加速度输入信号(阶跃、脉冲和半正弦)情况下的瞬态响应过程. 开关的实际阈值范围为 1000~5000g, 响应速度小于 60 μ s. 采用 MEMS 技术制造开关, 并通过冲击加速度测试验证了设计结果.

关键词: MEMS; 冲击加速度开关; 开关点电可调节; 锁定; 机电耦合
EEACC: 2575

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)08-1295-07

1 引言

加速度开关是在检测到超过设置阈值的加速度信号幅值时闭合开关, 触发电信号的惯性敏感器件. 使用微机械加工技术制作的 MEMS 加速度开关, 具有体积小、功耗低、导通电阻小、接口电路简单、便于与数字系统集成等特点, 适用于替代传统加速度控制单元在诸多控制系统中的应用, 如安全气囊系统、工业安全控制等.

自 Frobenius 在 1973 年首先制作出一种金属悬臂梁型加速度开关以来, 已经出现了各种不同的 MEMS 加速度开关. 在工作原理上可以分为两类: 一类是准静态开关, 该开关结构是通过弹性结构连接一个质量块, 并将质量块作为一个敏感质量和可动电极. 根据牛顿第一定律 $F = ma$, 当所受的加速度 a 达到一个预定阈值时, 质量块受力 F 作用, 克服弹性恢复力, 发生位移达到一个预设位置, 并与一个定电极接触, 从而触发电信号, 导通电路使开关工作. 开关阈值由惯性力和弹性恢复力之间的线性关系 $a_{th} = kd_{max}/m$ 确定^[1~3]. 其中 a_{th} 是测量加速度阈值, k 是弹性结构的弹性系数, d_{max} 是可动结构的最大移动距离, m 是敏感质量. 这种开关对于工艺容差要求严格, 精度较低, 阈值范围局限在低频低量程加速度范围内, 测量能力和环境适应能力较弱, 容易造成开关失灵或误操作, 并且此类开关测量阈值单一, 难以实现智能化集成. 另一类开关是动态开

关^[4,5], 这类开关受惯性力、弹性恢复力、应力和静电吸引力等多个力共同作用, 加速度阈值通过动态方程计算分析确定, 因而这种开关具有动态信号的测量能力^[5].

本文介绍一种利用微机械技术制作的 MEMS 冲击加速度开关, 开关设计阈值范围 1000~5000g, 响应时间小于 60 μ s. 基于机电耦合原理中独特的静电“Pull-in”现象设计^[6], 使开关具有独特的阈值可调能力, 即控制开关偏置电压, 可以在量程范围内调节测量阈值, 以进行不同加速度幅值测量. 并且该开关还具有锁定功能, 即冲击过程完成后, 开关仍可以长时间保持在闭合状态直至重新置位, 从而提高了开关可靠性.

2 基本原理

静电驱动方式由于具有结构简单、易于 IC 工艺集成、功耗低等优点, 被广泛应用于 MEMS 器件设计. 静电驱动工作方式中, 驱动电压或是质量块位移超过一定幅度, 将会发生静电“Pull-in”现象, 质量块会被静电力束缚与驱动电极贴合, 最终导致 MEMS 器件失效. 因此“Pull-in”效应作为静电驱动所特有现象, 是 MEMS 研究者努力避免的内容. 而本文正是利用了这个现象, 对相关原理进行理论分析, 设计了 MEMS 冲击加速度开关.

如图 1 所示的弹簧-质量块系统中, 动极板受如下几个力作用: 弹性恢复力 $F_{elastic} = -kx$, 阻尼力

^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号:60376038)

[†] 通信作者. Email: jah@mail.sim.ac.cn

2007-01-04 收到, 2007-03-07 定稿

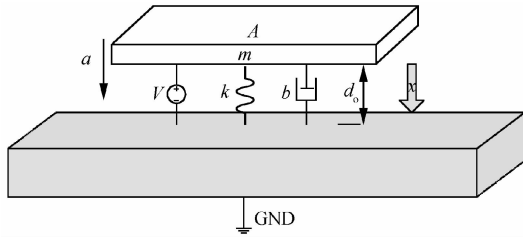


图 1 弹簧-质量块系统示意图

Fig. 1 Schematic of the mass-spring system, with both the electrostatic force and the damping force involved

$F_{\text{damping}} = -b \frac{dx}{dt}$, 静电力 $F_{\text{electrostatic}} = \frac{\epsilon_0 A}{2(d_0 - x)^2} V^2$, 惯性力 $F_{\text{inertial}} = ma(t)$. 其中 k 为弹性系数, x 是动极板运动距离, b 为阻尼系数, ϵ_0 为极板间介质的介电常数, A 为极板面积, V 为偏置电压, d_0 为极板初始间距, m 为极板质量, $a(t)$ 为冲击加速度. 令 $x = \frac{x}{d_0}$, $v = \frac{V}{V_{\text{pi}}}$, $a = \frac{ma}{kd_0}$, 其中 $V_{\text{pi}} = \sqrt{\frac{8kd_0^3}{27\epsilon_0 A}}$ 是 Pull-in 电压, 以上各力可归一化表示为:

$$F_{\text{elastic}} = -x, F_{\text{electrostatic}} = \frac{4}{27(1-x)^2} v^2, F_{\text{inertial}} = a(t)$$

分析以上各式, 绘出各力-位移图, 如图 2 所示. 由于惯性力与位移无关, 根据其幅值, 在图 2 中将静电力曲线向上移动相应幅度, 即可得到静电力与惯性力合力曲线. 从图中可以看到, 合力曲线与弹性力曲线同样有两个交点, 与静电力曲线表现相似. 由此定性分析可知对于惯性或静电输入信号, 输入信号幅值被限制在一个稳定范围内, 在此范围内系统可以保持稳定状态; 否则系统将失去稳定, 发生 Pull-in. 下面将理论分析系统在静态和动态加速度输入条件下的运动规律.

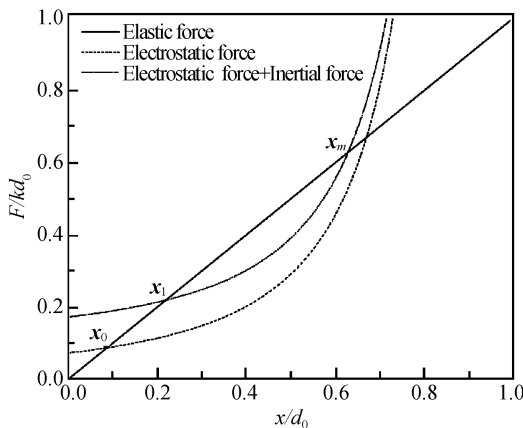


图 2 归一化力-位移函数关系图 实线为弹性力, 虚线为静电力, 点划线为静电力与惯性力的合力.

Fig. 2 Normalized forces for the mass-spring system

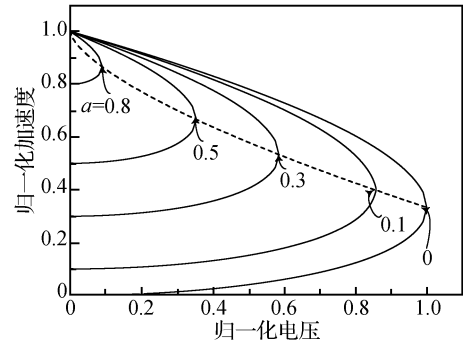


图 3 驱动电压-稳定位置曲线图

Fig. 3 Curves of normalized stable equilibrium position for different normalized driving voltage values

2.1 准静态特性

当系统阻尼足够大且输入加速度缓慢增加时, 可以认为质量块位移在准静态条件下缓慢发生位移. 弹簧-质量块系统状态可由如下平衡方程描述:

$$a + \frac{4}{27(1-x)^2} v^2 - x = 0 \quad (1)$$

根据(1)式, 在图 3 中绘出不同加速度条件下, 系统驱动电压和极板稳定位置曲线. 当极板位置在该曲线与纵轴包围范围内各点(初始速度为零), 系统能够保持稳定状态; 否则, 系统会在耦合力作用下发生 Pull-in. 从图中可以看到, 随着加速度增加, 系统 Pull-in 电压相应降低, Pull-in 位置变化轨迹在图中用虚线标出. 由此可见 Pull-in 电压和系统所能承受加速度之间存在对应关系.

对(1)式求导, 令 $\frac{da}{dx} = 0$, 可以求得在 $x_{\text{cr}} = 1 - \frac{2}{3} v^{\frac{2}{3}}$ 点, 加速度取值最大值:

$$a_{\text{th}} = 1 - v^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

图 3 中虚线即是(2)式所描述的曲线, 也即 x_{cr} 变化曲线. 综合以上计算, 临界加速度 a_{th} 可表示为驱动电压 v 的单值函数, 两者之间存在一一对应关系.

2.2 动态特性(阶跃信号输入条件)

动态条件下, 系统状态不能忽略速度、阻尼等暂态量变化对极板暂态位置的影响. 质量块运动状态由动态方程描述^[8]:

$$\frac{m}{k} \times \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{b}{k} \times \frac{dx}{dt} + x = \frac{4}{27(1-x)^2} v^2 + a_{\text{th}}(t) \quad (3)$$

由于上述的暂态量、极板位置与系统历史有关, 并且计入变阻尼作用的解析过程相当复杂, 得不到解析解, 为简化解析过程以便于分析, 本文将忽略阻尼影响, 仅考虑无阻尼近似条件下的响应特性.

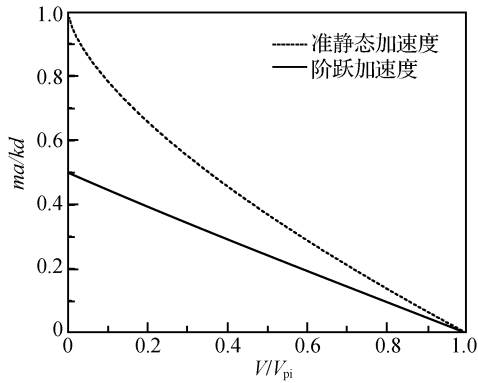


图 4 归一化的加速度阈值-偏置电压关系

Fig. 4 Analyzed dimensionless acceleration threshold, a_{th} , in terms of the normalized voltage V , for both the static acceleration and the step chock acceleration

在初始状态 ($t \leq 0$), 加速度输入为零 $a(t) = 0$, 偏置电压 $0 \leq v < 1$, 静电吸引力与弹性恢复力相平衡, 使动极板保持在稳定初始位置 x_0 ($x_0 < 1/3$).

$$\frac{4}{27(1-x_0)^2} v^2 = x_0 \quad (4)$$

当一个方向向下的阶跃信号输入时, 即 $a(t) > 0$ 且 a 为定值, 动极板在惯性作用下离开初始平衡位置 x_0 向下电极运动. 如果这个加速度信号幅值不足以使动极板达到吸合, 动极板过冲, 将在达到一个最大稳定位置 x_m 后, 经衰减恢复到一个新的平衡点 x_1 ($x_0 < x_1 < x_m$). 在这一点, 由静电力与恒定惯性力的合力与静电力重新达到平衡, 如图 2 点 x_m 所示.

在这个最大位置 x_m , 质量块速度衰减为零, 利用能量法可以得到能量方程:

$$\frac{1}{2} m \dot{x}_m^2 = \int_{x_0}^{x_m} \left[\frac{\epsilon A}{2(d_0 - x)^2} V^2 + ma - kx \right] dx = 0$$

解该方程, 归一化的加速度可表示为 x_m 的函数:

$$a(x_m) = \frac{1}{2}(x_m + x_0) - \frac{4}{27} \times \frac{v^2}{(1-x_m)(1-x_0)} \quad (5)$$

令 $\frac{da}{dx_m} = 0$, 可以得到最大临界位移 $x_{m,cr}$ 和临界加速度 a_{th} :

$$x_{m,cr} = 1 - \sqrt{\frac{8}{27(1-x_0)}} v^2 \quad (6)$$

$$a_{th} = \frac{1}{2}(x_{m,cr} + x_0) - \frac{4}{27} \times \frac{v^2}{(1-x_{m,cr})(1-x_0)} \quad (7)$$

(7)式表明, 阶跃加速度信号输入条件下, 临界加速度 a_{th} 同样表示为偏置电压 V 的函数. 施加的驱动电压 V 和准静态以及阶跃加速度条件阈值的关系如图 4 所示.

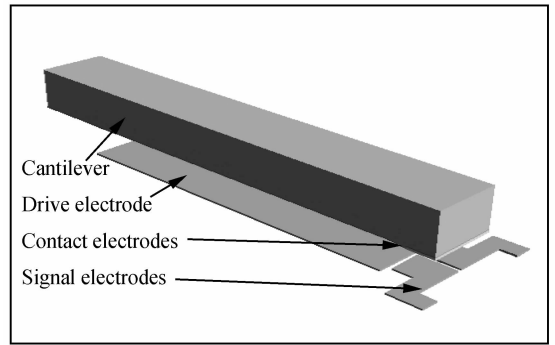


图 5 Coventor-Ware 模型

Fig. 5 Configuration of the designed cantilever-type shock switch

由图 4 可知, 在准静态条件和动态(阶跃信号输入)条件下, 临界加速度 a_{th} 和驱动电压 V 之间有一一对应的函数关系. 在脉冲、半正弦等较为复杂的变加速度输入条件下, 通过数值计算, 也可以得到类似对应关系, 即驱动电压不同, 可测的阈值加速度不同. 一种结构尺寸的加速度开关, 可以通过控制吸合电压实现对加速度开关闭合阈值的调节, 满足可加速度阈值的测量要求, 实现开关的可控功能.

通过上述解析计算, 在系统施加驱动电压 V 稳定后, 输入一个大于临界加速度 a_{th} 的加速度, 动极板由于不能在合力作用下重新形成稳定, 将发生吸合. 从这个角度上说, 最大加速度 a_{th} 可被定义为静电开关的阈值加速度. 超过这一阈值的加速度会触发开关, 使其闭合. 因此在这个定义上, 与已有的开关阈值定义有所区分: 只要加速度达到开关阈值, 就能使准静态开关闭合.

开关的锁定功能也是利用了静电吸合力来实现闭合状态保持. 当开关完成闭合后, $d_0 - x$ 趋近无穷小, 由于极板间仍存在电压降 V 使 $F_{electrostatic} = \frac{\epsilon_0 A}{2(d_0 - x)^2} V^2 \rightarrow \infty$, 静电力远大于弹性恢复力, 从而通过静电力束缚作用把开关稳定保持在闭合状态, 直至偏置电压降低到释放电压, 同时还促使闭合开关与下极板形成良好接触, 保证较低的信号回路的导通电阻.

3 器件设计

加速度开关采用悬臂梁设计, 如图 5 所示. 当待测的冲击加速度幅值超过阈值时, 悬臂梁在静电力和惯性作用下, 发生形变, 闭合开关. 梁自由端和下金属电极发生欧姆接触, 触发电信号. 通过外部电源模块适当调整偏置电压控制测量阈值. 本次设计在单芯片上共有四根悬臂梁, 构成加速度阈值开关阵

列. 分别给每个开关设置不同的电压值, 可设定不同的加速度阈值, 通过检测这个阵列各个梁的具体状态, 可以获得较高精度的阈值测量范围.

将悬臂梁的弹性系数 $k = \frac{2Ewt^3}{3l^3}$ 和质量 $m = \rho btl$ 代入(7)式, 阈值加速度表示为:

$$a_{th} = \frac{2Et^2 d_0}{\rho^4} \left(\frac{x_m + x_0}{2} - \frac{4}{27} \times \frac{v^2}{(1-x_m)(1-x_0)} \right) \quad (8)$$

其中 E 和 ρ 是 Si 的杨氏模量和密度; t, w 和 l 分别是悬臂梁的厚度、宽度和高度.

使用 Coventor-Ware 软件对开关阈值加速度进行数值模拟. 在本设计中, 阻尼主要是存在于可动悬臂梁和下极板之间的压膜阻尼. 根据 $c = \frac{\rho LB^3}{h^3}$

$$\beta \left[\frac{B}{L} \right], \left(\text{其中 } \beta \left[\frac{B}{L} \right] = 1 - \frac{192}{\pi^5} \left[\frac{B}{L} \right] \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \left[\frac{n\pi L}{2B} \right] \right)^{[7]}$$

阻尼系数与变化的间距有关. 优化阻尼设计对于开关的设计相当重要. 首先阻尼力和器件的运动速度相关, 而且随着悬臂梁接近下极板, 极板间距减少, 阻尼系数变得更大. 过阻尼条件会延缓质量运动的闭合过程, 在较短的冲击脉宽条件下, 可能导致开关闭合失败. 而欠阻尼条件下, 悬臂梁闭合时以较高的运动速度撞击下极板而发生弹跳, 导致开关不稳定而失败或者增加接触面的磨损, 造成破坏. 从某个角度看, 冲击波形也会对开关的响

表 1 设计参数及测试结果

Table 1 Designed parameters of the switch and the test results

参数	测试值	模拟值
悬臂梁尺寸 $l \times w \times t$	$550\mu\text{m} \times 80\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$	
极板间隙 d_0	$3.65\mu\text{m}$	
自然频率 f_0	-	24.6kHz
Pull-in 电压 V_{pi}	24.8~28.45V	26.5~26.75V
阈值加速度范围 a_{th}	<3000g	1000~3000g
阻尼比 ξ	0~0.7(变阻尼)	0.7377

应结果发生影响. 由于求解计入阻尼影响的解析解相当困难, 利用模拟软件, 这些复杂问题得到了一定的解决. 利用 Coventor-Ware 系统级模拟结果结合解析解, 确定设计参数, 如表 1 所示. 开关自由端对阶跃、脉冲、半正弦信号瞬态响应位移变化(实际尺寸)如图 6 所示.

4 微机械开关制作

本文介绍的加速度开关阵列利用微机械技术制作, 工艺流程如图 7 所示. 制作材料是双面抛光的 100mm p^+ (100)型 SOI 硅片.

(a) 使用 KOH 溶液在 SOI 硅片器件功能层各向异性腐蚀氧化形成 $4\mu\text{m}$ 的硅阱, 作为悬臂梁可动结构的活动间隙.

(b) 在硅阱内用 DRIE 形成悬臂梁结构, 刻蚀停止在 SOI 掩埋层.

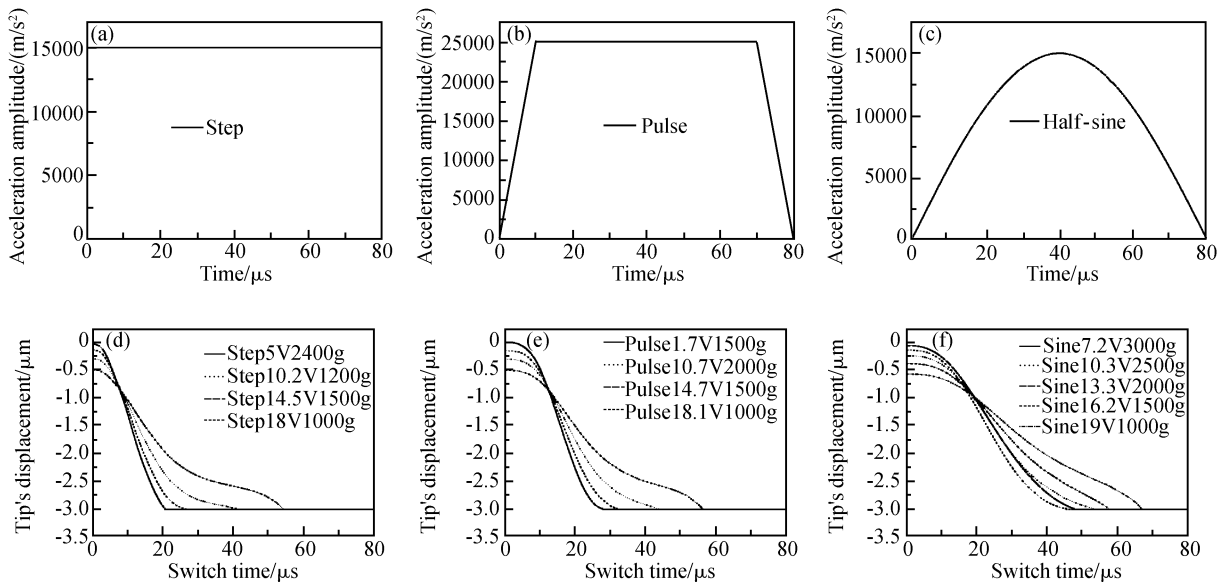


图 6 动态响应曲线 脉冲宽度为 $80\mu\text{s}$.

Fig. 6 Corresponding to the various types of shocking acceleration (at up side), the dynamic displacement versus time for the cantilever end is simulated with Coventor-Ware software (at down side) (a), (d) For pulsed shock; (b), (e) For step shock; (c), (f) For half-sine waved shock

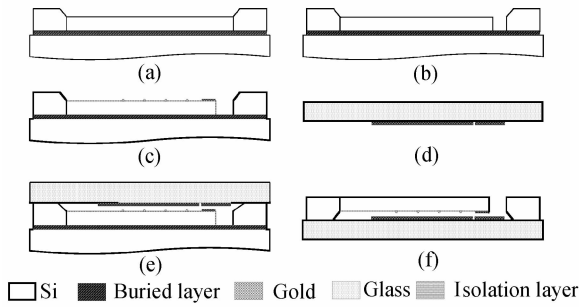


图 7 工艺流程示意图

Fig. 7 Main steps of the fabrication process for the micromechanical switch

(c) 在悬臂梁正面热氧化生长 SiO_2 层作为开关闭合状态时的电介质绝缘层. 在电介质绝缘层上均匀分布若干 SiO_2 bumper 作为闭合时的防止粘连结构. 在梁的绝缘层末端上溅射 Au/Cr 作为欧姆接触上接触点.

(d) 在 Prex7740 玻璃上溅 Au/Cr 层, 作为开关走线和欧姆接触下接触点.

(e) 玻璃与硅片进行对准键合.

(f) 划片后, 先后通过 KOH 腐蚀和 DRIE 干法刻蚀对键合片衬底背面减薄, 在 SOI 掩埋层停止. 然后 RIE 干法刻蚀选择性剥离 SOI 掩埋层, 完全释放悬臂梁. 制作完成的器件 SEM 照片如图 8 所示.

5 开关测试与讨论

加速度开关的动态特性直接影响开关的工作性能. 我们采用了自由落杆比较法来进行加速度开关的动态特性测试. 在落杆冲击系统中, 将一个加速度开关和一个标准加速度传感器同时安装在落杆上, 让自由杆自由下落碰撞在钢砧上, 测试装置如图 9 (a) 所示. 标准传感器通过 YE5858 放大器和 TOP4012 多通道瞬态数字分析仪, 可以测出铝杆和钢砧冲击过程中的波形图. 根据波形图可以测出冲

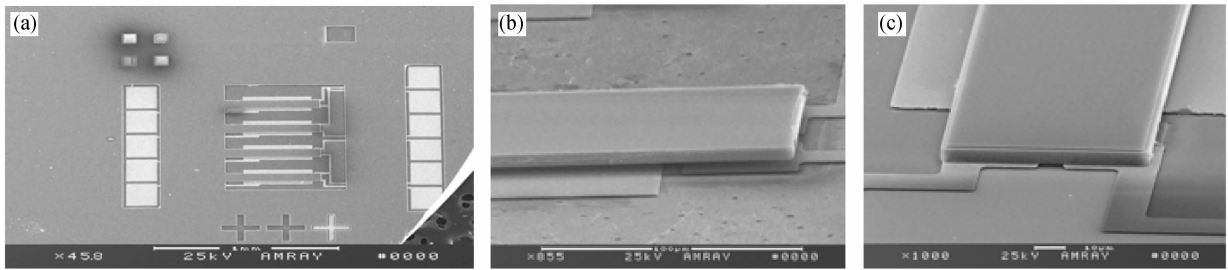


图 8 器件 SEM 照片 (a) 器件全貌图; (b) 释放的悬臂梁自由端; (c) 自由端闭合

Fig. 8 SEM images of the fabricated switch-array chip and close-up views of the cantilever end (a) Top view; (b) Close-up SEM image showing the cantilever apex at the “off” state; (c) Close-up SEM image showing the cantilever apex at the “on” state

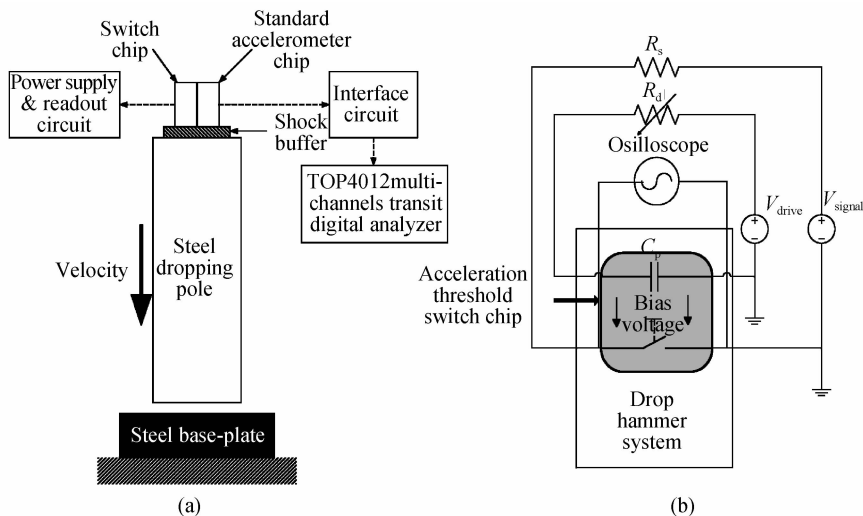


图 9 加速度开关测试装置示意图(a)与开关测试接口电路图(b)

Fig. 9 (a) Schematic diagram of the dropping hammer experiment setup; (b) Circuit diagram for testing the switch

击波形的脉冲时间和冲击过程中的最大电压,根据标准传感器标定的灵敏度计算出碰撞过程产生的最大加速度.通过调整落杆的高度以及附加作为机械滤波的垫片改变冲击时间的方法,来获得不同加速度幅值以及时间的半正弦加速度信号,模拟加速度阈值的信号.如果加速度开关闭合时,可以通过接口电路检测得知.

开关接口电路如图 9(b)所示.器件偏置电压由一个带有 0~30V 恒压源的驱动回路提供.通过测量检测开关信号负载的电压变化,闭合开关触发的电脉冲信号被记录在与开关输出端并联的数字示波器中.

在不同电压和冲击加速度条件下重复实验,测试结果如图 10 所示.通过测试结果和模拟结果对比,可以发现测量结果得到的阈值-偏置电压关系曲线与模拟结果基本一致,介于无阻尼和阻尼比为

0.7 条件的半正弦信号响应曲线之间.存在的偏差主要由于在开关实际闭合过程中阻尼系数随着极板间距减小而增大,与定阻尼模拟过程不同.同时由于工艺过程的缺陷,导致开关驱动端口间的电流负载能力较低,使得驱动回路的 RC 常数被限制在 40 μ s 左右(接近测试信号脉冲宽度),降低了信号捕捉能力.

6 结 论

本文研究了一种通过调节电极的电压可以设置不同的开关阈值的加速度开关.静电吸合与惯性信号共同作用的开关可以使惯性信号消失后继续保持开关闭合状态,同时也提高了开关闭合的可靠性.经模拟、制造和初步的冲击加速度测试,结果表明该静电吸合惯性开关实现了预想的开关功能.

参 考 文 献

- [1] Frobenius W D, Zeitman S A, White M H, et al. Microminiature ganged threshold accelerometers compatible with circuit technology. *IEEE Trans Electron Devices*, 1972, 19: 37
- [2] Selvakumar A, Yazdi N, Najafi K. A wide-range micromachined threshold accelerometer array and interface circuit. *J Micromech Microeng*, 2001, 11: 118
- [3] Go J S, Cho Y H, Kwak B M, et al. Snapping microswitches with adjustable acceleration threshold. *Sensors and Actuators*, 1996, A54: 579
- [4] Loke Y, McKinnon G H, Brett M J. Fabrication and characterization of silicon micromachined threshold accelerometers. *Sensors and Actuators*, 1991, A29: 235
- [5] Bao M H. *Analysis and design principles of MEMS devices*. Amsterdam: Elsevier, 2004
- [6] Bao M H, Huang Y P, Yang H, et al. Reliable operation conditions of capacitive inertial sensor for step and shock signals. *Sensors and Actuators*, 2004, A114: 41
- [7] Ni Zhenhua. *Vibration mechanics*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publisher, 1989 (in Chinese) [倪振华. 振动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 1989]

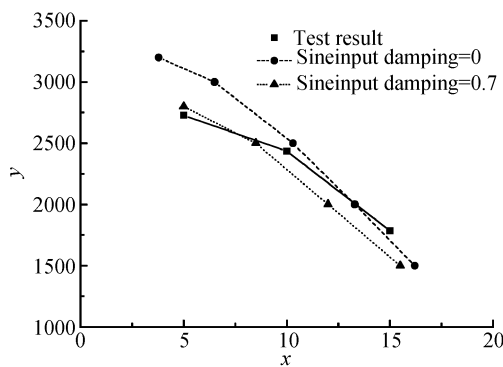


图 10 加速度开关测试结果与仿真结果对比

Fig. 10 With various electrostatic voltage preset to the switch, the threshold adjusting function of the cantilever switch is realized by applying various shocking acceleration amplitudes. The measured shock threshold values generally agree with the simulated results.

MEMS Shocking-Acceleration Switch with Threshold Modulating and On-State Latching Function *

Jia Mengjun^{1,2,†}, Li Xinxin², Song Zhaohui², and Wang Yuelin²

(1 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Based on the electro-mechanical coupling principle, a shocking-acceleration switch with a threshold adjusting function is presented. The threshold acceleration is set by adjusting the bias voltage. Based on a theoretical analysis for an inertial step-signal, the transient response of the switch in terms of half-sinusoidal, pulsed, and stepped shocking acceleration is simulated using Coventor-Ware. The threshold of the switches ranges from 1000g to 5000g, and the response time is less than 60 μ s. A fabricated micro-switch array has been tested, resulting in satisfactory switching capability under shocking acceleration, which agrees well with the design.

Key words: MEMS; shocking-acceleration switch; threshold adjusting function; latching function; electro-mechanical coupling principle

EEACC: 2575

Article ID: 0253-4177(2007)08-1295-07

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60376038)

† Corresponding author. Email: jah@mail.sim.ac.cn

Received 4 January 2007, revised manuscript received 7 March 2007