

通过可动触点延长接触时间的新型微冲击开关

蔡豪刚, 丁桂甫, 杨卓青, 周镇威, 汪一红

(上海交通大学 微纳科学技术研究院, 薄膜与微纳技术教育部重点实验室,
微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 上海 200240)

摘要: 基于非硅表面微加工技术, 设计并制造了一种用于振动监测的新型微机电系统 (MEMS) 冲击开关。开关主要由三部分构成: 作为可动电极的质量块, 作为固定电极的十字梁, 和位于质量块中心的具有延时作用的可动触点。通过 ANSYS 有限元仿真, 对器件进行模态分析, 考察了器件的横向抗干扰能力; 并提取了器件的物理参数 (如弹簧弹性系数和系统有效质量), 用于 Simulink 动态仿真。通过动态仿真验证了器件的工作原理, 并与传统微冲击开关进行了比较。使用落锤试验对所制造出的微冲击开关进行测试, 加载脉宽 1 ms 的半正弦冲击加速度, 测得其阈值约为 145 g, 并且接触时间可稳定在 50 μ s 以上。测试结果与仿真符合较好, 证明了新型设计可以有效地增强接触效果, 所建模型可以较准确地描述器件的动态响应。

关键词: 微冲击开关; 微机电系统; 可动触点; 接触时间

中图分类号: TH703

文献标识码: A

基于微机电系统技术的冲击开关, 相对于传统精密机械加工冲击开关而言, 具有尺寸小、成本低、性能可靠等优点, 因此广泛应用于玩具、附件、汽车、工业等领域中的振动监测。例如微冲击开关可以嵌入商品、货物、集装箱中用于监测其存储和运输状态, 也可以用于汽车安全气囊系统监测车体的意外碰撞情况^[1-3]。微冲击开关的特点在于其既是传感器又是执行器, 一般通过质量块—弹簧系统感应外界加速度的变化, 并在加速度超过阈值的情况下执行开关闭合动作。其与加速度计的区别在于, 不需要输出每一时刻的加速度变化情况, 因此在以上的应用场合中, 冲击开关相比加速度计具有结构和处理电路简单、功耗低、制造成本低等优点^[4]。尤其重要的是, 它可以避免电磁干扰引起的误触发^[5]。

根据运动方向与衬底的关系, 微冲击开关可以分为水平驱动和竖直驱动两种, 均由可动电极和固定电极两部分构成^[2,4,6,7]。其中可动电极一般是通过弹簧或者悬臂梁悬空的质量块, 固定电极往往也是刚体, 因此质量块的碰撞反弹效应比较严重, 而且由于冲击加速度一般不会持续很长时间 (往往在两电极达到稳定接触之前就已消失), 所以传统设计中开关的接触时间很短, 甚至低于 10 μ s。

为了充分发挥冲击开关的优点, 便于信号处理和提高器件的可靠性, 如何增强两电极间的机械接触效果, 延长接触时间, 就成为研究者最关心的问题之一。

Tønnesen 等人制造了一种质量块—悬臂梁系统构成的水平驱动微冲击开关, 他们发现通过将质量块的位置从悬臂梁末端移至悬臂梁中间, 即通过使用较柔软的悬臂梁末端替代刚性的质量块去接触固定电极, 可以实现减小反弹效应, 延长接触时间的效果^[8,9]。在之前的研究中, 我们提出了一种在竖直驱动开关中使用置于质量块上方的弹性梁代替刚性衬底作为固定电极的设计方案, 得到了约 12 μ s 的较长接触时间^[6]。本文采用非硅表面微加工技术制造了一种通过可动触点进一步延长接触时间的新型微冲击开关, 采用 ANSYS 和 Simulink 软件对其进行了建模和仿真分析, 并在落锤试验中证实了预期的接触增强效果。

1 器件设计

1.1 器件结构和工作原理

不同于传统设计, 带有可动触点的新型微冲击开关是一种双质量块—弹簧系统, 图 1 给出了器件工作的动态过程与相应的开关状态: (a) 质量块—弹簧系统 (m_1-k_1) 与触点—弹簧系统 (m_2-k_2) 均处于平衡状态, 开关断开; (b) 质量块—弹簧系统发生位移 x_0 , 触点—弹簧系统仍处于平衡状态, 触点接触固定电极, 开关恰好接通; (c) 质量块—弹簧系统达到最大位移, 触点—弹簧系统发生反方向的形变, 触点仍然接触固定电极, 开关保持接通状态。在外界加速度的作用下, 新型微冲击开关经历了 (a) $\rightarrow$ (b) $\rightarrow$ (c) $\rightarrow$ (b) $\rightarrow$ (a) 的过程: 首先质量块偏离平衡位置, 触点接触固定电极, 然后质量块继续运动, 触点则与固定电极保持较长时间的稳定接触, 直到质量块反弹使触点脱离, 最后回复到平衡位置。而传统设计中由于触点是固定而不是可

基金项目: 国家自然科学基金 (50675139) 和 863 计划 (2006A04Z308, 2006A04Z326)

收稿日期: 2008-07-28 修改稿收到日期: 2008-09-22

第一作者 蔡豪刚 男, 硕士生, 1984 年 10 月生

动的,所以只经历了(a)→(b)→(a)的过程,造成接触时间短暂。

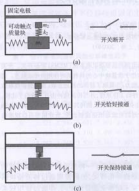


图1 微冲击开关工作原理图

相对于基于绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)基片的深度反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)工艺^[3,17],非硅表面微加工技术可以制造较高深宽比、较复杂的准三维结构,并且电镀金属的密度、机械性能和导电性能相对硅而言都具有一定的优势。所制得器件的SEM照片如图1所示。从图2(a)可以看

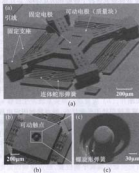


图2 微冲击开关的SEM照片 (a) 器件整体图 (b) 除去固定电极的器件图 (c) 可动触点放大图

到器件的基本结构:质量块作为可动电极,通过连体蛇形弹簧悬空在玻璃衬底上,十字梁作为固定电极,位于质量块上方。图2(b)中的器件除去了上电极,图2(c)是可动触点的放大图,通过螺旋形弹簧固定在质量块的中心。图2(a)和图2(b)分别给出了可动电极的侧视图和俯视图并标出主要几何参数,其取值在表1中列出。

1.2 理论模型

当敏感方向发生碰撞时,质量块—弹簧系统(m_1-k_1)与触点—弹簧系统(m_2-k_2)同时受到惯性加速度 $a(t)$ 的作用,其运动控制方程为:

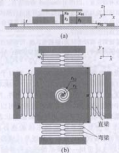


图3 微冲击开关设计示意图与主要结构参数

表1 微冲击开关的几何参数

部件	几何参数	取值/ μm
质量块	边长 a	760
	内径 r_{in}	100
	厚度 t_1	50
触点	半径 r_2	25
	厚度 t_2	70
蛇形弹簧	宽度 w	10
	厚度 t	10
	直梁长度 b	250
	弯梁内径 r	10
气隙厚度	x_0	10
	x_{in}	30
	x_{out}	10

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = m_1 a \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = m_2 a \end{cases} \quad (1)$$

其中 x_1 和 x_2 分别是质量块和触点的位移, k_1 和 k_2 分别

是连体蛇形弹簧和螺旋形弹簧的弹性系数, c_1 和 c_2 分别是质量块和触点的压膜阻尼系数。通过对表征压膜阻尼的特征参数努森数 $K_n = \lambda/h_0$ 和挤压数 $\sigma = \frac{12\mu\omega l^2}{P_0 h_0^2}$ 的考察(其中, λ 是气体分子平均自由程, h_0 是气膜厚度, μ 是气体粘滞系数, ω 是气膜振动频率, l 是平板的特征尺寸, P_0 是周围气体压强), 可以知道, 微冲击开关气隙中的稀薄气体处于滑流区, 并且在其工作频率内可视为不可压缩, 以粘滞阻尼效应为主。因此, 各气膜的有效粘滞系数可根据相应的气隙厚度得到^[12]

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 9.638K_n^{1/3}} \quad (2)$$

由 x_0, x_m, x_{m0} 可分别得到 $\mu_{m0}, \mu_{m1}, \mu_{m2}$, 为方便起见, 下文公式中仍使用 h_0 和 μ_{m0} , c_1 和 c_2 基于不可压缩气体的粘滞阻尼理论分别进行求解; 质量块通过等效为相同面积的环形板进行简化计算, 触点则通过圆形板公式进行计算^[13]

$$c_m = \frac{3\pi\mu_{m0}^4}{2h_0^3} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^4 + \frac{(1 - r_1^2/r_0^2)^2}{\ln(r_1/r_0)} \right] \quad (3)$$

$$c_{m0} = \frac{3\pi\mu_{m0}^4}{2h_0^3} =$$

$$\frac{3\pi}{2h_0} \mu_{m0} [r + 1.3(1 + 3.3K_n)h_0/2]^4 \quad (4)$$

其中圆形板的计算通过等效半径 r_{eq} 计入了边缘效应^[14], 因为触点的面积不满足远大于气隙厚度的条件, 而不能使用近似的零边界条件, 不能忽略从边界逃出的气流所引起的阻尼。此外, 由于微冲击开关中可动电极的位移可以达到气隙厚度, 所以要计入振幅效应, 引入修正因子^[15]

$$f_d(x) = \frac{1}{(1 - x^2)^{1/2}} \quad (5)$$

其中 x 是位移与气隙厚度之比。

2 器件仿真

2.1 ANSYS 有限元仿真

虽然 ANSYS 软件可以直接用于系统的瞬态仿真, 但是有限元方法比较耗时, 故仅用 ANSYS 提取相关物理参数, 如弹性系数 k_1, k_2 和有效质量 m_1, m_2 , 然后作为 Simulink 动态仿真的输入参数。微冲击开关的 ANSYS 模型如图 3 所示, 包括 (a) 质量块-蛇形弹簧系统和 (b) 触点-螺旋形弹簧系统。选用 SOLID45 为有限元类型, 材料属性选用金属镍, 用 SWEEP 进行网格划分, 将弹簧各端面作全自由度约束。弹簧的弹性系数 k_1 和 k_2 可以分别通过在质量块和触点的上表面施加一定大小的位移 x , 求出此面上节点受力的总和 F , 然后根据胡克定律进行计算:

$$k = F/x \quad (6)$$

作为集总质量块-弹簧系统, m_1 和 m_2 应为计入弹簧质量的有效质量, 而非非质量块和触点的实际质量。通过对 ANSYS 模型在敏感方向施加静态加速度载荷 a , 得到一定的位移 x , 可求得有效质量为:

$$m = kx/a \quad (7)$$

图 3(c) 和图 3(d) 分别显示了质量块和触点在 1000 m/s^2 加速度下的位移情况, 根据以上方法计算得到的物理参数如表 2 所示, 其中有效质量 m 与实际质量 m_0 进行了比较。

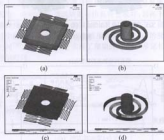


图3 (a)质量块-蛇形弹簧系统和(b)触点-螺旋形弹簧系统 (c)质量块和(d)触点在 1000 m/s^2 加速度下的位移

表2 ANSYS 仿真得到的物理参数

部件	弹性系数 $k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	有效质量 m/kg	质量 m_0/kg
质量块-蛇形弹簧	$k_1 40.58$	$m_1 2.5095 \times 10^{-7}$	2.447×10^{-7}
触点-螺旋形弹簧	$k_2 134.90$	$m_2 1.630 \times 10^{-9}$	1.231×10^{-9}

使用 ANSYS 对图 3(a) 中的质量块-蛇形弹簧系统进行模态分析, 得到前四阶模态的频率(分别为 2031.6 Hz , 3281.9 Hz , 3281.9 Hz , 5895.8 Hz)和相应振型, 如图 4 所示。一阶模态为竖直方向的振动, 其频率低于二三阶模态, 说明开关的横向敏感度较低^[16]。在敏感方向(z 方向) 100 g 加速度作用下, 质量块中心处在 z 方向的位移为 $6.3730 \mu\text{m}$, 而 x, y 方向的位移仅为 $10^{-5} \mu\text{m}$ 量级。在 x 方向 100 g 加速度作用下, x 方向的位移为 $0.78547 \mu\text{m}$, 而 z 方向位移不超过 $10^{-2} \mu\text{m}$ 量级, 横向耦合很小。以上分析证明了所设计微冲击开关的横向抗干扰能力较强, 非敏感方向的冲击难以造成器件的误触发或者损坏。

2.2 Simulink 动态仿真

根据 1.2 中系统的理论模型, 对微冲击开关的新

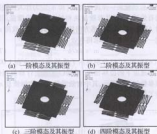


图4 模态分析图

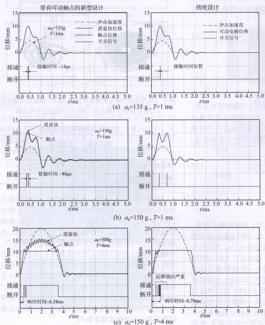


图5 新型设计与传统微冲击开关在不同冲击加速度下的动态仿真结果

型设计和传统设计分别建立 Simulink 模型。以几何、物理参数(通过 ANSYS 仿真得到)及冲击加速度作为输入,得到质量块、触点的位移作为输出。当触点的位移达到 x_0 , 外电路接通,即可得到开关接通信号。通过仿真还可得到阻尼系数、阻尼比、运动速度、加速度等信息。将微冲击开关在不同冲击加速度下的响应与传统设计进行比较,如图5所示。

以脉宽 $T=1$ ms, 峰值为 a_0 的半正弦冲击加速度为例,从图5(a)中可以看到,此开关的阈值加速度约为 135 g,即在此加速度下质量块和触点(两者位移曲线重合)刚好达到 $x_0 = 10$ μm 的位移,触点接触固定电极,产生接通信号。此时的接触时间较为短暂,约为 14 μs ,仅略高于传统设计 10 μs 左右的接触时间,因为可动触点的延长机制尚未开始工作。当冲击加速度大

于阈值时,触点在接触到固定电极后被阻挡,而质量块继续向上运动,两者的位移曲线不再重合,触点与固定电极保持稳定接触,直到质量块反弹带动触点脱离固定电极,位移曲线再次重合,触点在质量块附近做振幅较小频率较高的振动。整个过程中,微冲击开关的接触时间得到了延长,在 150 g 加速度下可达约 88 μs ,远高于传统设计,如图5(b)所示。对于持续时间较长的冲击加速度,传统设计在达到稳定接触之前会经历剧烈的碰撞过程,反弹效应严重,而带有可动触点的微开关则可以实现更为连续的接触。如图5(c)所示,对于脉宽 $T=4$ ms,峰值 $a_0=500$ g 的冲击加速度,响应时间仅为 0.38 ms,而传统设计则需要 0.79 ms 才能达到稳定接触。

在1.2节中提到,微冲击开关气隙中的稀薄气体处于滑流区,气体会在固体壁面发生滑移现象,需要引入有效粘滞系数进行修正。图6比较了开关在滑流区(采用有效粘滞系数 μ_{eff})与连续流区(采用粘滞系数 μ)的动

态响应,所受加速度与图5(a)中相同。两者的质量块位移—时间曲线略有偏差,从虚线框部分的放大图可以看到,滞流区的压膜阻尼略小于连续流区,因此自由振荡过程中其振幅较大。当气膜厚度更小时,稀薄气体效应对动态响应的影响会更加明显,因此建模当中应当予以考虑。

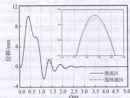


图6 滞流区与连续流区动态响应比较图

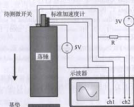


图7 落锤测试装置示意图

3 测试结果

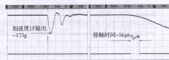
采用非硅表面微加工技术制造的微冲击开关,通过落锤试验测试其性能。使用ADI公司的标准高g加速度计作为标定,其灵敏度为8 mV/g,即每受到一个g的加速度,输出电压为8 mV。加速度计和待测开关一起固定在落锤上并使敏感方向垂直于地面,使用Agilent6000型多通道示波器采集两者的输出信号,测试装置如图7所示。当落锤从一定高度自由下落到基座上时,可产生脉宽约为1 ms的半正弦冲击加速度,通过调整落锤的下落高度,可对加速度的峰值大小进行调节。

图8给出了测试结果及其放大图,包括加速度计输出和微冲击开关输出,可从图中读出冲击加速度的峰值大小以及微开关的接触时间。其中,145 g是能够使被测开关接通的最小加速度,也就是此开关的阈值加速度,相应的接触时间约为15 μ s,如图8(a)所示。在175 g加速度下接触时间约为56 μ s,如图8(b)所示。

通过与动态仿真进行比较,可以看到,微开关的阈值145 g略高于仿真的135 g,而其在阈值加速度下的接触时间15 μ s与仿真的14 μ s符合很好,说明此时可动触点只是恰能碰到固定电极,而尚未起到延长接触时间的作用。当冲击加速度超过阈值后,接触时间通过可动触点得到延长,稳定在50 μ s以上(例如在175 g加速度下接触时间约为56 μ s),但是整体上略低于仿真结果(例如仿真结果中150g加速度下的接触时间已达88 μ s)。这可能是由于微加工过程中的微小误差,以及实际冲击加速度与理想半正弦波的差异所引起的。总的说来,测试结果与仿真符合较好,远高于传统设计中不超过10 μ s的接触时间,而且也高于之前设计中使用弹性梁作为固定电极所得到的12 μ s的接触时间^[10],说明新型设计实现了预期效果,进一步延长了接触时间。



(a) 冲击加速度145 g



(b) 冲击加速度175 g

图8 落锤测试结果

4 结论

基于非硅表面微加工技术,设计、仿真和制造了一种新型微机电系统冲击开关。在保证开关竖直方向敏感度的前提下节约了器件面积,减小了水平方向的敏感度,更为重要的是,通过可动触点的新式设计延长了开关的接触时间。使用ANSYS软件对器件建模,进行了模态分析和参数提取,验证了器件的横向抗干扰能力较强,横向耦合较小。使用所得参数输入Simulink模型中,对器件进行动态仿真分析,并与传统设计进行了比较。仿真结果表明,对于脉宽较短($T=1$ ms)的半正弦冲击,新型微冲击开关的接触时间大大延长;对于持续时间较长($T=4$ ms)的冲击,新型微冲击开关可以更快地实现稳定接触,而且接触状态也更为连续。通过动态仿真还验证了稀薄气体的滞移效应对开关动态响应的影响,滞流区气体引起的压膜阻尼小于连续流

区。最后,对制得器件进行了落锤试验,测试结果表明,微冲击开关的阈值约为145 μg ,在超过阈值的冲击加速度下,接触时间可达50 μs 以上,与仿真符合较好。

参考文献

- [1] Wycisk M, Tønnessen T, Binder J, Michaelis S, Timme H J. Low-cost post-CMOS integration of electroplated microstructures for inertial sensing[J]. *Sensors Actuators A*, 2000, 83(1): 93-100.
- [2] Ma W, Zohar Y, Wang M. Design and characterization of inertia-activated electrical micro-switches fabricated and packaged using low-temperature photoresist molded metal-electroplating technology[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2003, 13(6): 892-899.
- [3] Whitley M H, Kraus M, Kennedel R, et al. Latching Shock Sensors for Health Monitoring and Quality Control[C]. *Proceedings of SPIE-Progress in Biomedical Optics and Imaging*, 2005, 185-194.
- [4] McNamara S, Gianchandani Y B. LIGA fabricated 19-element threshold accelerometer array[J]. *Sensors Actuators A*, 2004, 112(1): 175-183.
- [5] Matsunaga T, Esashi M. Acceleration switch with extended holding time using squeeze film effect for side airbag systems[J]. *Sensors Actuators A*, 2002, 100(1): 10-17.
- [6] Frobenius W D, Zeitman S A, White M H, et al. Microminiature gaged threshold accelerometers compatible with integrated circuit technology[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1972, 19(1): 37-40.
- [7] Selvakumar A, Yasdi N, Najafi K. A wide-range micromachined threshold accelerometer array and interface circuit[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2001, 11(2): 118-125.
- [8] Norstel J, Tønnessen T, Bencke W, et al. Quasistatic accelerometer using microswitch array[J]. *Sensors Actuators A*, 1996, 54(1-3): 574-578.
- [9] Tønnessen T, Lühke O, Norstel J, et al. Simulation, design and fabrication of electroplated acceleration switches[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1997, 7(3): 237-239.
- [10] Yang Z, Ding G, Chen W, et al. Design, simulation and characterization of an inertia micro-switch fabricated by non-silicon surface micromachining[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, 17(8): 1598-1604.
- [11] Jin M, Li X, Song Z, et al. Micro-cantilever shocking-acceleration switches with threshold adjusting and 'on'-state latching functions[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, 17(3): 567-575.
- [12] Veijola T, Kuusela H, Lahtinen J, et al. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer[J]. *Sensors Actuators A*, 1995, 48(3): 239-248.
- [13] Bao M, Yang H. Squeeze film air damping in MEMS[J]. *Sensors Actuators A*, 2007, 136(1): 3-27.
- [14] Veijola T, Pursula A, Rihacek P. Extending the validity of squeezed-film damper models with elongations of surface dimensions[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, 15(9): 1624-1636.
- [15] Starr J B. Squeeze film damping in solid-state accelerometers[C]. *Technical Digest, 1990 Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 1990, 44-47.
- [16] 李 俊, 王保安, 胡 军. 一种交叉梁谐振加速度开关的设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2003, 11(3): 45-47.