文章编号　1004-924X(2017)01-0123-10

基于柔性止动的 MEMS 惯性开关冲击可靠性强化

步　超，聂伟荣*，徐安达，周织建
（南京理工大学 机械工程学院，江苏 南京 210096）

摘要：为了提高 MEMS 惯性开关的冲击可靠性，提出了一种柔性止动结构。首先，利用连续接触力理论建立了止动碰撞模型，通过 Simulink 对模型进行仿真，研究开关在不同止动形式下的响应特性。接着，从空间占用和应力集中的角度对悬臂梁和平面微弹簧两种止动形式进行讨论，设计止动结构。最后，利用 UV-LIGA 工艺制作开关样机，通过落锤冲击系统对样机进行测试。碰撞接触力对于冲击可靠性至关重要，Simulink 仿真结果表明柔性止动结构能够极大的延长碰撞接触时间，从而降低接触力。同时，采用柔性止动还改善了碰撞后的弹跳现象，提高闭锁稳定性。冲击试验表明，开关累积失效分布函数符合韦布尔分布，标度参数（参考加速度）$\alpha=29\ 600$、形状参数 $\beta=8.2$。相比无柔性止动的 MEMS 开关，提出的柔性止动明显改善了开关的抗冲击性能。对柔性止动的建模、仿真与试验为 MEMS 惯性开关的抗冲击设计提供了有益参考。

关　键　词：微机电系统；冲击可靠性；柔性止动；接触力
中图分类号：TH703　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172501.0123

Shock reliability enhancement by flexible stop for MEMS inertial switch

BU Chao, NIE Wei-rong*, XU An-da, ZHOU Zhi-jian

(*School of mechanical engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: njnwr@hotmail.com*

Abstract: To improve the shock reliability of the MEMS inertial switch, a flexible stop structure was proposed. Firstly, the stop collision model was established using the theory of continuous contact force, and the response characteristics of the switch in different stop modes were researched conducting simulation on the model through Simulink. Then, from the perspectives of space-efficient and the stress concentration, the cantilever type and plane micro-spring type stops were discussed and the stop structure was designed. Finally, the switch prototypes were fabricated using the UV-LIGA technology, and the prototypes were tested by the drop hammer shock system. Collision contact force was critical for shock reliability, Simulink simulation result shows that the flexible stop structure can greatly prolong the collision contact time, thus reducing the contact force. At the same time, it also improves the contact bounce phenomenon using flexible stop after collision and the stability of latching. The shock test shows that the cumulative failure distribution function (CDF) of the switch accords with Weibull distribution, with scale parameter (reference acceleration) $\alpha=29\ 600$, shape parameter $\beta=8.2$. Compared with the MEMS switch without flexible stop, the proposed flexible stop

收稿日期：2016-08-20；**修订日期**：2016-09-27.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No. 51475245）

improves the shock resistance of the switch significantly. Modeling, simulation and test of flexible stop provide beneficial reference resources for anti-shock design of MEMS inertial switch.

Key words: MEMS; inertial switch; shock reliability; flexible stop; contact force

1 引 言

微机电系统(Micro Electro-Mechanical System, MEMS)具有尺寸小、易集成和可大批量生产等优点,近年来得到迅速发展。微惯性开关是一种集传感器和执行器功能于一体的MEMS器件,当加速度满足设计阈值时,开关电极接触形成电气通路。微惯性开关可实现加速度敏感和响应驱动一体化,在工业、汽车、航天航空以及军事等领域具有广阔的应用前景[1-8]。在许多应用场合,开关器件会经受高达万 g 的冲击,冲击可靠性是一个亟待解决的问题。许多学者已经对MEMS器件进行了冲击可靠性的试验分析与理论建模。Tanner D M[9]等针对微引擎开展了全面的冲击测试,结果表明随着冲击等级的提高,器件会逐渐产生黏连、分层以及断裂等失效。周织建等[10]测试了UV-LIGA多层电铸镍的抗冲击性能,并利用韦布尔分布拟合了累计失效概率与加速度峰值的关系。Srikar V T等[11]指出冲击响应与器件固有频率、冲击上升时间以及声学传播时间有关,并根据3者关系将冲击响应分为弹性波、振动和准静态3种方式。Sundaram S等[12]提出了一种冲击可靠性模型,能够预测单自由度MEMS器件在半正弦加速度下失效的临界冲击值。

产生冲击失效的主要原因之一为器件的变形超出材料屈服强度从而导致断裂或分层。采用止动结构能够限制可动部件的偏转可改善冲击可靠性。Hartzell等[13]在加速度计上设计了能够限制双轴向位移的止动结构。多数MEMS惯性开关[1-8]也都设置了单轴或多轴限位块。通过限制运动,止动结构确保了器件形变应力低于断裂强度(或者弹性极限)从而避免断裂,也减少了分层失效。但是刚性止动结构仍然具有局限性:由于剧烈的冲击,止动结构会产生应力集中,从而使器件产生碎片或发生黏连。刚性冲击产生的振动还会影响器件的工作稳定性,特别是对于MEMS惯性闭锁开关,强烈振动会造成回弹现象和闭锁不稳。为了消除刚性止动结构的不足,本文在一种新型MEMS惯性闭锁开关中设计了柔性止动结构,建立了开关在高冲击下的碰撞数学模型,对比分析刚性止动和柔性止动的作用效果,设计了止动结构。碰撞接触力是冲击可靠性的关键参数,研究了不同载荷条件下接触力的变化情况。通过UV-LIGA技术制作了具有柔性止动结构的开关样机,并通过落锤冲击系统验证了这种柔性止动的性能。

2 止动建模

描述系统冲击碰撞最简单的方法是瞬时冲量法,当已知两碰撞体的质量,初始速度并已知恢复系数[14-17]时,可方便的计算出碰撞后的速度。但这种模型无法考虑接触力,接触力对于冲击可靠性是至关重要的参数,在建立碰撞模型时不能忽略。因此,建立能够描述开关活动部件运动过程,且能计算碰撞接触力的数学模型。开关活动部件的整个运动过程分为未与止动结构碰撞的状态和正在发生碰撞的状态。活动部件未与止动结构碰撞时等效为弹簧质量阻尼系统,其运动状态用式(1)描述。碰撞时的运动状态则与止动结构的类型有关,对于刚性接触,两碰撞体的相对速度在极短的时间内发生突变,碰撞体表面相互挤压产生弹性变形(甚至塑性变形),从而产生较大的非线性接触力,此时碰撞状态用式(2)描述。对于柔性接触,两碰撞体在发生碰撞后能够保持接触并在接下来的一段时间内一同运动,其相对速度变化时间将明显长于刚性接触,此时不会产生非线性接触力,碰撞状态用式(3)描述:

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx(t)=ma(t),\ x<d_{\mathrm{stop}},\quad(1)$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx(t)+\mathrm{F}_{\mathrm{collision}}=ma(t),\ x\geqslant d_{\mathrm{stop}},\quad(2)$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx(t)+k_{\mathrm{stop}}(x(t)-d_{\mathrm{stop}})=ma(t),\ x\geqslant d_{\mathrm{stop}},\quad(3)$$

式中:m,c 和 k 分别为系统的质量、阻尼系数和刚度;$x(t)$为活动部件的位移;$a(t)$是幅值为 a_0 脉

宽为 τ 的半正弦激励加速度：

$$a(t)=\begin{cases} a_0\sin\left(\dfrac{\pi}{\tau}t\right), 0\leqslant t\leqslant\tau \\ 0, t>\tau \end{cases}, \tag{4}$$

式中：d_{stop} 为活动部件静止时到止动结构的距离；$F_{collision}$ 为碰撞接触力，用基于赫兹理论的非线性接触模型表示[18]：

$$F_{collision}=K\delta^n\left[1+\frac{3(1-e^2)}{4}\cdot\frac{\dot{\delta}}{\dot{\delta}^{(-)}}\right], \tag{5}$$

式中：δ 为碰撞体的法向形变量，$\delta=x-d_{stop}$；e 为碰撞体恢复系数；$\dot{\delta}^{(-)}$ 为初始接触速度，指数 n 通常取 3/2。K 为接触体的广义刚度：

$$K=\frac{4}{3(\sigma_i+\sigma_j)}\left[\frac{R_iR_j}{R_i+R_j}\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{6}$$

式中：R_i 和 R_j 分别为碰撞体的等效几何半径；材料参数 σ_i 和 σ_j 为：

$$\sigma_l=\frac{1-\upsilon_l^2}{E_l}(l=i,j), \tag{7}$$

式中：E_l 和 υ_l 分别为材料的杨氏模量和泊松比。

活动部件在碰撞接触力的作用下被弹开，随后又在惯性力的作用下撞向止动结构，这个过程反复发生，直到惯性力消失。为方便求解，建立 Matlab Simulink 模型对其进行仿真。如图 1 所示，Simulink 模型主要包括输入信号，弹簧质量阻尼二阶系统，柔性止动系统，非线性接触力系统以及选择刚性或柔性止动的模式选择系统。模型仿真使用的典型参数如表 1 所示。

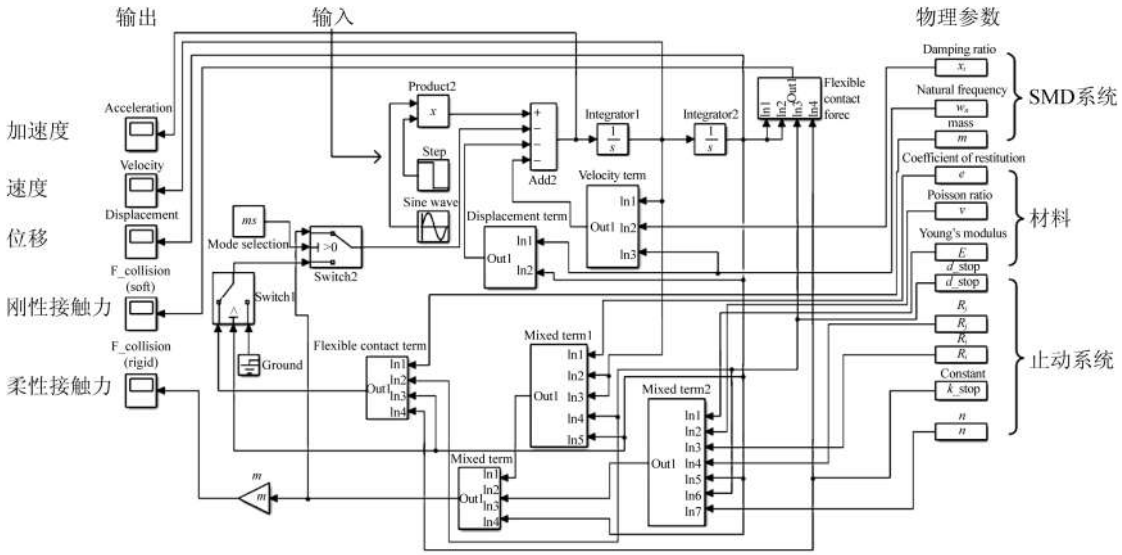


图 1　具有止动结构的 MEMS 惯性开关 Simulink 模型

Fig. 1　Simulink model of MEMS inertia switch with stop

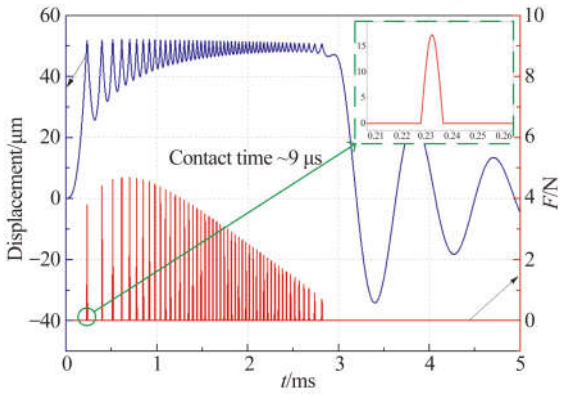
表 1　仿真中的典型参数

Tab. 1　Typical parameters in simulation

项目	参数	值
SMD 系统	质量块 m/mg	15
	弹簧刚度 $k/(\mathrm{N\cdot m^{-1}})$	4×200
	阻尼比 ξ	0.1
止动	间隙 d_{stop}/μm	50
	止动刚度 $k_{stop}/(\mathrm{N\cdot m^{-1}})$	10 000
	等效半径 $R_i, R_j/\mu$m	200
材料	杨氏模量 E/Gpa	1.8
	泊松比 ν	0.312
	恢复系数 e	0.9

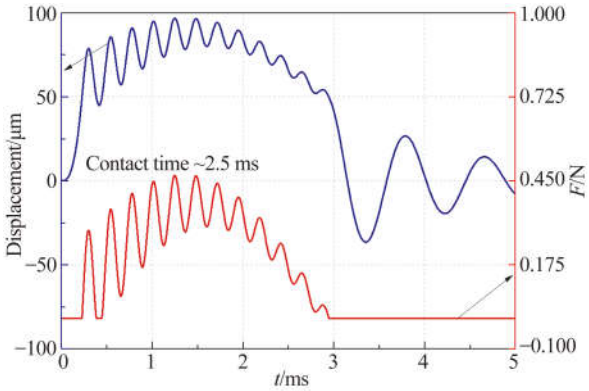
图 2 所示为在 3 000 g，3 ms 半正弦加速度冲击下，开关分别采用刚性止动结构和柔性止动时，活动部件的位移响应曲线和碰撞接触力曲线。如图 2(a)所示，当开关采用刚性止动时，活动部件与止动结构碰撞就会产生很大的接触力时，活动部件在接触力的作用下被迅速弹回，其首次碰撞接触时间约为 9 μs。随后活动部件又在惯性力的作用下撞上止动结构，随着这个过程的反复进行，接触力逐渐减小，直到惯性力消失活动部件不能接触到止动结构。在整个运动过程中，活动部件的位移都被限制在 d_{stop} 以内。刚性止动引起了多次碰撞，产生了较高的接触力，可能造成器件粘连或断裂失效。如图 2(b)所示，当开关采用柔性

止动，活动部件能够和柔性止动结构一起运动，其运动距离超出 d_{stop} 的限制。柔性止动使得接触过程从脉冲形式变为连续形式，接触时间增加到约 2.5 ms，从而大大降低了接触力。柔性止动延长接触时间，减小接触力，增加器件冲击可靠性的作用明显。



(a)刚性止动

(a)Rigid stop



(b)柔性止动

(b)Softstop

图 2　活动部件与止动结构的碰撞

Fig. 2　Collision between moving component and stop

止动刚度是柔性止动的重要参数，图 3 所示为开关在 3 000 g，3 ms 半正弦加速度冲击下柔性止动刚度对最大位移和碰撞接触力的影响。当止动刚度开始增加时最大位移迅速减少，同时接触力随之增加。当刚度进一步增加时，最大位移将被限制为略高于 k_{stop}(50 μm)，此时接触力接近刚性碰撞的水平。也即提高止动刚度能够减小器件占用空间，但是也增加了冲击失效的风险，因此在设计柔性止动结构时要选择合适的止动刚度。

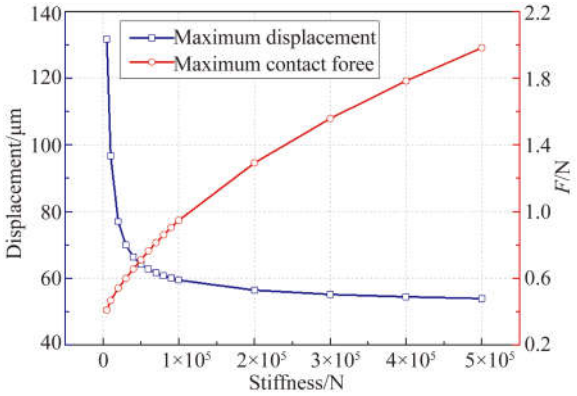


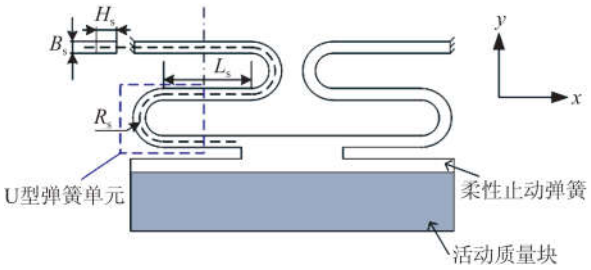
图 3　止动刚度对碰撞接触的影响

Fig. 3　Effect of stop stiffness on collision contact

3　止动设计

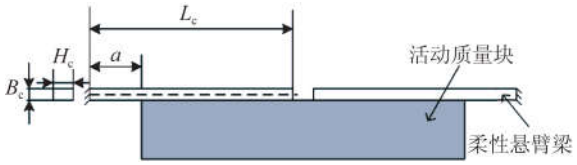
3.1　止动结构选型

从结构上实现柔性止动需要使用弹性元件，MEMS 弹性元件主要有微悬臂梁和平面微弹簧两种，对于多数 MEMS 器件，其设计空间受到限制，在结构设计前需要分析两者的性能，在满足功能要求的前提下，选择空间占用更小的方案，以满足小型化需求。两种柔性止动的结构原理如图 4 所示。



(a)弹簧型

(a)Spring type



(b)悬臂梁型

(b)Cantilever beam type

图 4　两种典型柔性止动结构原理图

Fig. 4　Structure principle diagram of two typical flexible stop

S 型弹簧是最常用的平面微弹簧，由 U 型单

元组成的 S 型弹簧在 y 轴的刚度为[19]：

$$k_s=\frac{EB_s^3H_s}{n_s(L_s^3+3\pi R_sL_s^2+24R_s^2L_s+6\pi R_s^3)},\quad(8)$$

式中：B_s、H_s 分别为弹簧的宽度和高度，n_s 和 R_s 分别为 U 型单元的数目和弯半径，L_s 为 U 型单元直梁长度的 2 倍。悬臂梁在 y 轴的刚度为：

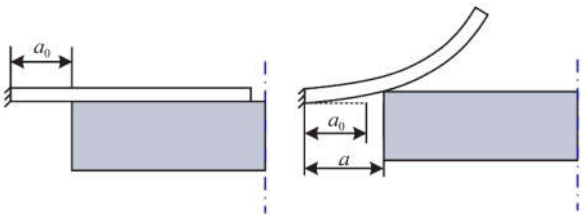
$$k_c=\frac{EB_c^3H_c}{2a^2(3L_c-a)},\quad(9)$$

式中：B_c、H_c 和 L_c 分别为悬臂梁的宽度、厚度和长度；a 为悬臂梁受力点到固定锚点之间的距离。

需要特别注意的是，a 并非常数，它的值会随着悬臂梁形变的增大而增大。如图 5 所示，悬臂梁形变前的初始值为 a_0，形变后其值可以近似表示为：

$$a=\frac{a_0}{\cos(6a_0^2F/EB_cH_c)},\quad(10)$$

式中：F 为施加于悬臂梁的外力。显然 a 值的改变将引起悬臂梁形变的非线性，这将对悬臂梁型止动结构的空间利用率产生影响。



(a)形变前
(a)Before deformation

(a)形变后
(a)After deformation

图 5　悬臂梁型止动结构形变示意图

Fig. 5　Diagram of deformation of cantilever type stop

通过式(8)～(10)对弹簧型和悬臂梁止动结构进行形变分析，弹簧的几何参数为 $B_s=15$ μm、$H_s=80$ μm、$R_s=65$ μm、$L_s=500$ μm、$n_s=6$，悬臂梁的几何参数 $B_c=15$ μm、$H_c=50$ μm、$L_c=500$ μm、$a_0=250$ μm，得到这两种止动结构在外力作用下的绕度曲线如图 6 所示。通过合理选择几何参数，保证了这两种止动结构在形变初始阶段具有相同的单位挠度。但是对于悬臂梁型止动结构，随着作用力的增加形变也增加，导致了 a 值增加，挠度变化将大于对应的弹簧型止动结构。因此，弹簧型止动结构具有更好的空间利用率。

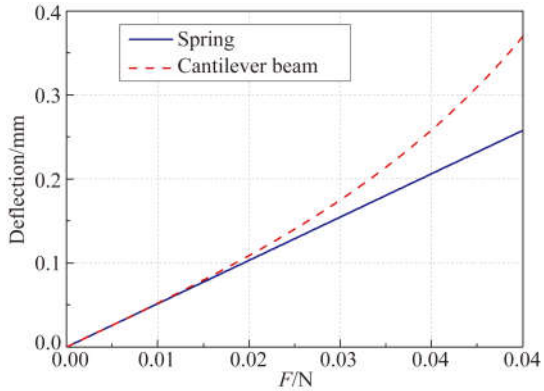
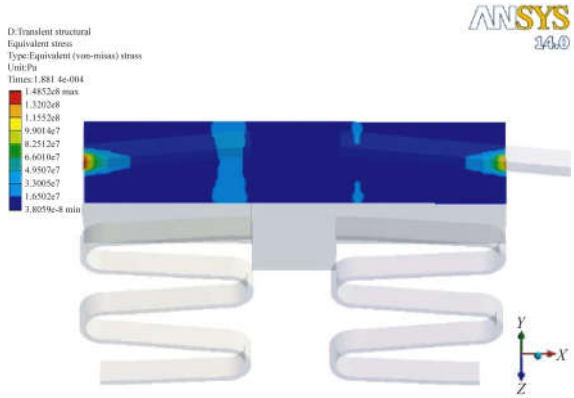


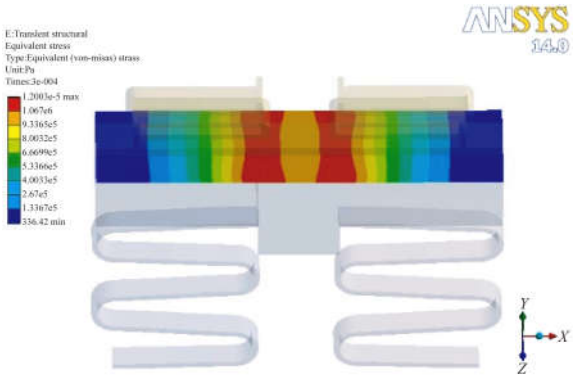
图 6　两种止动在外力作用下的挠度

Fig. 6　Deflection of two stop under the action of force

另外，弹簧型止动结构在接触后其接触面积基本保持不变，而悬臂梁型止动结构在接触后其接触面积会迅速下降。图 7 所示为利用有限元软件 ANSYS 仿真得到的接触面上的应力分布，由图 7 可知，悬臂梁变形后只与活动质量块接触面的边缘接触，在边缘处出现了明显的应力集中现象，较弹簧型止动结构更易发生失效。因此，采用弹簧型设计止动结构。



(a)悬臂梁型止动
(a)Cantilever type stop



(b)弹簧型止动
(b)Spring type stop

图 7　两种止动结构的接触应力

Fig. 7　Contact stress of two kinds of stops

3.2　止动结构设计

在设计止动结构设计之前应首先分析MEMS惯性开关的工作原理。开关的物理模型如图 8 所示，为一种闭锁开关，开关由双模块组成（M_1 和 M_2）。M_1 是动态响应模块，由质量块 m_1 弹簧 k_1 和阻尼器 c_1 组成，其作用为感受输入加速度，并产生位移响应 y_1。M_2 是接电模块，由质量块 m_2 弹簧 k_2 和阻尼器 c_2 组成，其作用是稳定的接通负载电路，当 m_2 单独受到加速度激励时产生位移 y_2。D 为锁头（即 m_2）到锁钩之间的距离，L 是质量块 m_1 到 m_2 的距离。开关运动状态受 y_1，y_2 以及 D 和 L 控制，当 $y_1 < y_2 + L$ 时开关保持断开。当 $y_1 > y_2 + L$ 且 $y_2 > D$ 时开关稳定接通。

MEMS惯性开关及其止动结构如图 9 所示，根据使用要求，M_1 的固有频率约为 1 200 Hz。开关的作用方式决定了其敏感方向及其反方向是最易受到高冲击的方向，因此，开关设计 2 个柔性止动结构，即止动 1 和止动 2。

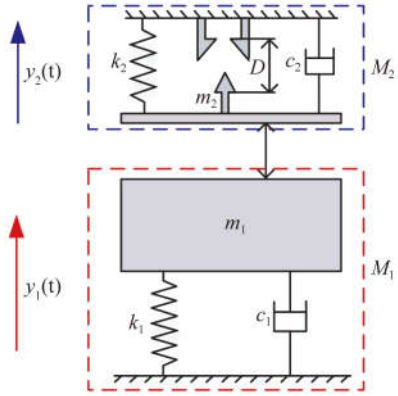


图 8　MEMS 惯性开关物理模型

Fig. 8　Physical model of MEMS inertial switch

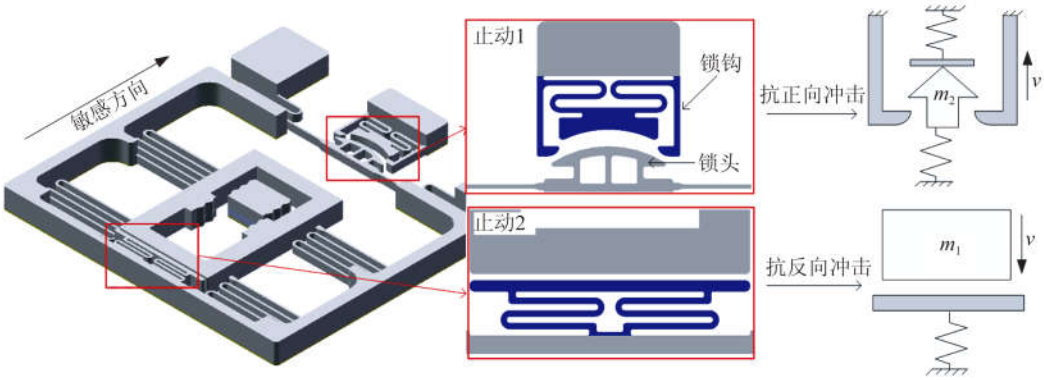
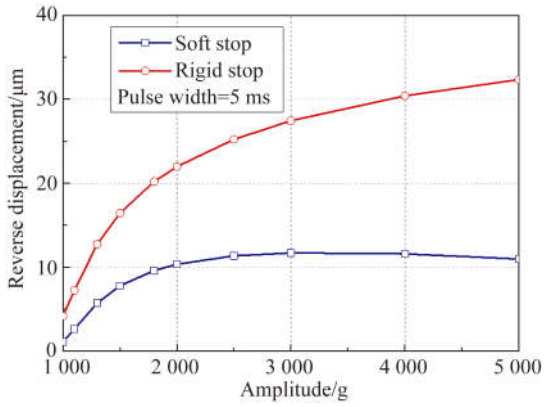


图 9　MEMS 惯性开关及其结构示意图

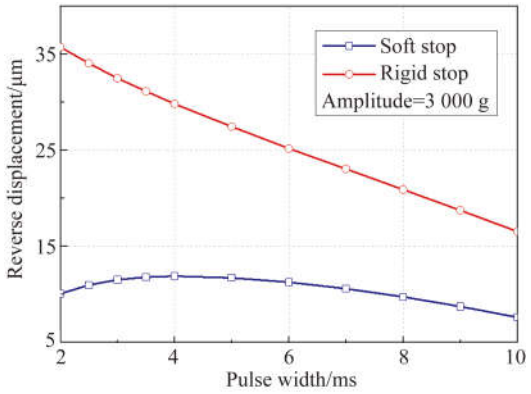
Fig. 9　Schematic diagram of MEMS inertial switch and its stops

止动 1 的作用为抗锁头的正向冲击，它应用于开关工作加速度，防止锁头在过大接触力的作用下产生的弹跳，弹开锁钩从而导致闭锁不稳定。止动 1 弹簧的宽度 $B_s = 31$ μm、高度 $H_s = 100$ μm、U 型单元的数目 $n_s = 2$、弯半径 $R_s = 41.5$ μm、长度 $L_s = 224$ μm，止动间隙 $d_{stop} = 92$ μm，由式(8)可知它在 y 轴的刚度为 12 931 N/m。图 10 所示为在可能的工作加速度激励下，锁头反向弹跳最大位移。由图 10(a)可知，柔性止动不仅使得整个工作加速度幅值范围内反向位移小于刚性止动，并且由于柔性运动，幅值进一步增大后反向位移依然能够被极大的抑制。在整个工作加速脉宽范围内柔性止动的反向位移同样严格小于刚性止动，因此，柔性止动改善了开关闭锁稳定性。



(a)不同的幅值

(a)Diffident amplitude

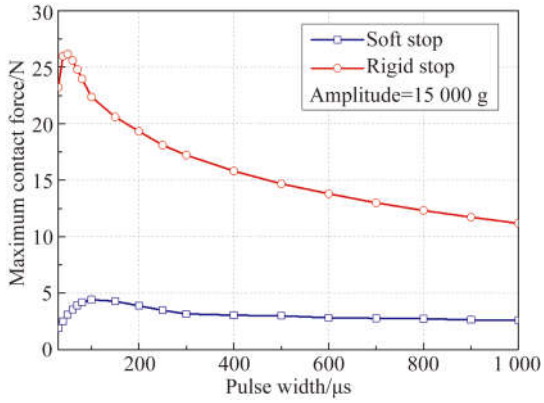


(b)不同的脉宽

(b)Diffident pulse width

图 10　锁头反向跳动最大位移

Fig. 10　Maximum reverse displacement of arrow lock



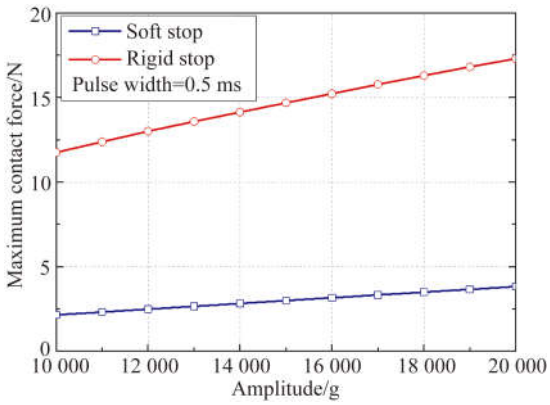
(b)不同的脉宽

(b)Diffident pulse width

图 11　不同幅值下的接触力

Fig. 11　Contact force under different amplitudes

止动 2 的作用为抗质量块反向冲击，其弹簧的宽度 $B_s=27$ μm、高度 $H_s=240$ μm、U 型单元的数目 $n_s=3$、弯半径 $R_s=27.5$ μm、$L_s=376$ μm，止动间隙 $d_{stop}=27$ μm，由式(9)可知它在 y 轴的刚度为 35 181 N/m。图 11 给出了在可能的反向冲击下，质量块与止动结构之间的接触力。由图 11(a)可知，随着幅值的增加柔性止动和刚性止动的接触力都线性增加，柔性止动接触力明显小于刚性止动。由图 11(b)可知，柔性接触力和刚性接触力都在某固定脉宽处存在极大值，刚性接触在极值处具有很高的接触力，采用柔性止动后能够将接触力降到原来的 1/5 以下。



(a)不同的幅值

(a)Diffident amplitude

4　试　验

4.1　样机加工

考虑到对 MEMS 开关的高韧性和导电性要求，选择镍材料利用 UV-LIGA 工艺制作样机，整个制作流程如图 12 所示。首先将作为基底的不锈钢钢板研磨、抛光和清洗，使用甩胶机(KW-4A)将 SU-8 2015 胶涂于基片表面，得到厚度约为 45 μm 的胶模(如图 12(a))。然后在恒温保烘箱中采用阶梯升温的方式进行前烘，前烘后的胶模跟随保烘箱冷却。接下来使用休斯紫外光刻机进行曝光，曝光剂量为 450 mJ/cm^2，时间为 45 s。最后使用 SU-8 胶进行显影，将基片充分浸入显影液中，并附加振动，使未曝光的 SU-8 胶溶胀去除，显影时间为 3～8 min。最后将基片放入电铸槽内进行电铸，得到 30 μm 的第一层结构(如图 12(b))。使用相似的甩胶和电铸工艺，得到 20 μm 的第二层结构(如图 12(c))。由于第三层具有悬空结构，所以使用磁控溅射仪(JS3X-808)溅射一层厚度约为 200 nm 的种子层(如图 12(d))。通过重复以上各步骤，得到各层结构(如图 12(e)～(g))。利用湿法化学去胶技术，去除开关中的SU-8 光刻胶，释放出悬空的微结构(如图 12(h))。开关样机的 SEM 图像如图 13 所示。

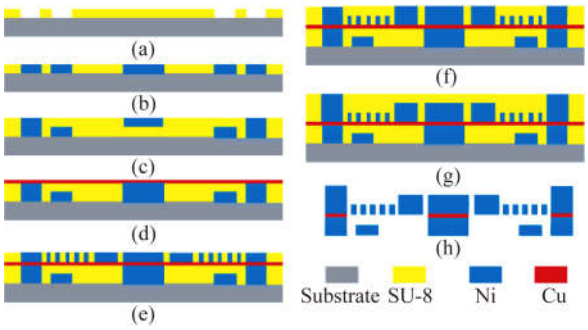


图 12　开关工艺流程

Fig. 12　Fabrication process for the switch

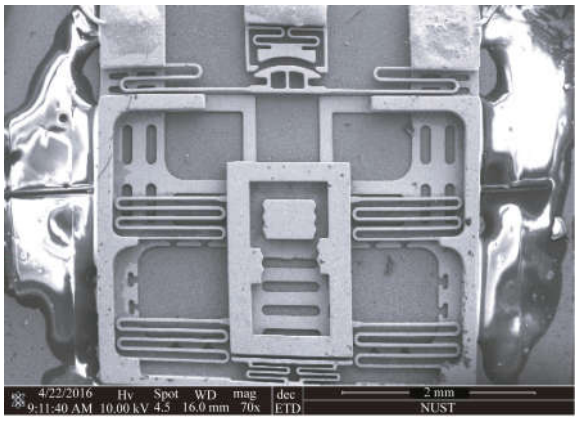


图 13　MEMS 惯性开 SEM 图像

Fig. 13　SEM image of MEMS inertial switch

4.2　试验设备

使用落锤冲击系统对开关样机进行抗冲击试验，试验系统如图 14 所示。系统主要包括大型冲击落锤和数据采集系统。冲击落锤调节棘轮齿数调节释放高度，通过击锤对铁砧的撞击，能够产生不同幅值和脉宽的加速度。产生的加速信号经过电荷放大器和数据采集器，最终记录在计算机上。图 15 给出了利用此落锤冲击系统获得的典型加速度曲线。其幅值为 2.411 V，传感器总灵敏度为 0.1 mV/g，因此，加速度为 24 110 g。

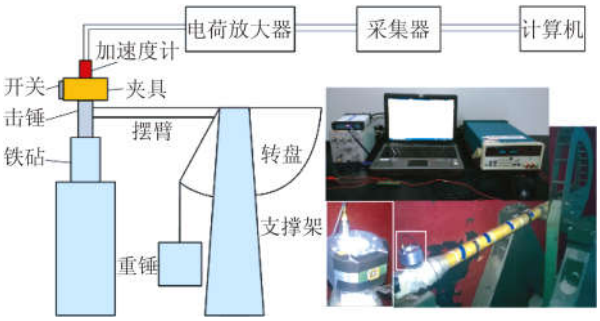


图 14　落锤冲击系统

Fig. 4　Drop hammer system

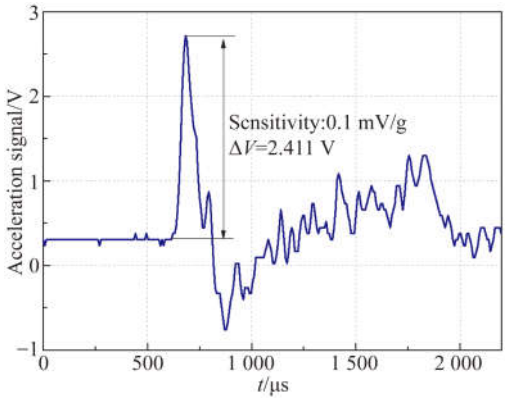


图 15　落锤冲击典型加速度信号

Fig. 15　Typical acceleration signal of harm shock system

4.3　试验结果

采用 10 个样品进行抗冲击测试，使用夹具固定好样机，使其敏感方向与加速度方向一致，逐渐增加冲击加速度，记录样机在每一冲击等级下的失效情况。试验结果表明，冲击在 15 000 g 之前样机几乎没有失效，当冲击达到 30 000 g 时，失效率快速增加，主要失效形式为分层和弹簧的塑性变形和翘曲。由于柔性止动的存在，冲击后接触面没有明显的粘连现象。对于失效数据，可以将其累计分布(CDF)用韦布尔分布拟合[20]：

$$F(A)=1-e^{-\left(\frac{A}{\alpha}\right)^{\beta}}. \tag{11}$$

采用最小二乘法拟合，标度参数 $\alpha=29\ 600$、形状参数 $\beta=8.2$，拟合结果如图 16 所示。

在前期工作中，对一种采用相同工艺相似结构的 MEMS 惯性开关进行了抗冲击测试[10]，这种开关没有采用柔性止动，其拟合的累计失效分布函数为 $F(A)=1-e^{-\left(\frac{A}{21\ 300}\right)^{7.6}}$，对比试验结果可知，采用柔性止动的 MEMS 惯性开关具有更好的抗冲击性能。

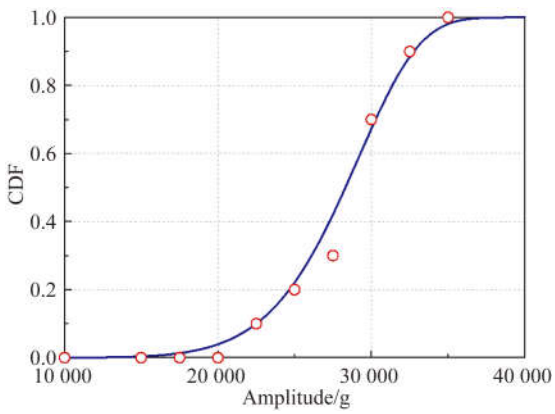


图 16　累积失效-加速度峰值的韦布尔分布

Fig. 16　Weibull distribution of CDF-acceleration amplitude

5 结　论

本文利用连续接触力理论建立了 MEMS 惯性开关的止动碰撞模型，通过 Simulink 对模型进行仿真，研究开关在不同止动形式下的响应特性。碰撞接触力对于冲击可靠性至关重要，Simulink 仿真结果表明柔性止动结构能够将刚性止动时的接触脉冲极大的延长，使得接触过程更为连续，从而大大的降低了接触力。同时，采用柔性止动还减轻了碰撞后的弹跳现象，改善了闭锁稳定性。止动刚度直接关系到柔性止动效果，提高止动刚度能够减小器件占用空间，但是也增加了冲击失效的风险，因此在设计柔性止动结构时要选择合适的止动刚度。弹簧型止动结构较悬臂梁型具有更好的空间利用率，同时能够降低应力集中，因此选择平面微弹簧设计止动结构。落锤冲击试验表明，开关累积失效分布函数符合韦布尔分布，标度参数（参考加速度）$\alpha=29\ 600$、形状参数 $\beta=8.2$。相比无柔性止动的开关，本文提出的柔性止动明显改善了开关的抗冲击性能。本文工作对柔性止动的建模、仿真与试验为 MEMS 惯性开关的抗冲击设计提供了参考。

参考文献：

[1] XIONG W, HONG-LI Q I, JI-ZONG W U, *et al.*. Simulation, fabrication and characterization of an all-metal contact-enhanced triaxial inertial micro-switch with low axial disturbance [C]. *IEEE Conference on Local Computer Networks*, *Edmonton*, *AB*, *Canada*, 2014:194-203.

[2] WANG Y, CHEN W, YANG Z, *et al.*. An inertial micro-switch with compliant cantilever fixed electrode for prolonging contact time [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*(*MEMS*), *Estoril*, 2013:600-603.

[3] 蔡豪刚，杨卓青，丁桂甫，等. 基于非硅衬底的微机电系统惯性开关的研制[J]. 机械工程学报，2009，45(3):156-161.
CAI H G, YANG ZH Q, DING G F. *et al.*. Development of a MEMS electrical inertia micro-switch based on non-silicon substrate [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 156-161. (in Chinese)

[4] 黄新龙，熊瑛，陈光焱，等. UV-LIGA 技术制作微型螺旋形加速度开关[J]. 光学 精密工程，2010，18(5):1152-1158.
HUANG X L, XIONG Y, CHEN G Y, *et al.*. Fabrication of micro spiral acceleration switch using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1152-1158. (in Chinese)

[5] WANG Y, YANG Z, XU Q, *et al.*. Design, simulation and characterization of a MEMS inertia switch with flexible CNTs/Cu composite array layer between electrodes for prolonging contact time [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(8):085012.

[6] CAO Y, XI Z, YU P, *et al.*. A MEMS inertial switch with a single circular mass for universal sensitivity [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(10):105005.

[7] XI Z, CAO Y, YU P, *et al.*. The simulation and visual test contact process of a MEMS inertial switch with flexible electrodes [J]. *Microsystem Technologies*, 2015:1-8.

[8] ZHANG Q, YANG Z, XU Q, *et al.*. Design and fabrication of a laterally-driven inertial micro-switch with multi-directional constraint structures for lowering off-axis sensitivity [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26(5):055008.

[9] TANNER D M, WALRAVEN J A, HELGESEN K, *et al.*. MEMS reliability in shock environments [C]. *Reliability Physics Symposium*, *San Jose*, *California*, 2000:129-138.

[10] 周织建，聂伟荣，席占稳，等. 多层 UV-LIGA 电铸镍材料的抗冲击性能[J]. 光学 精密工程，2015，23(4):1044-1052.
ZHOU ZH J, NIE W R, XI ZH W, *et al.*. Anti-impact material properties of UV-LIGA multi-layered electroformed nickel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1044-1052. (in Chinese)

[11] SRIKAR V T, SENTURIA S D. The reliability of microelectromechanical systems(MEMS) in shock environments [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(3):206-214.

[12] SUNDARAM S, TORMEN M, TIMOTIJEVIC B, *et al.*. Vibration and shock reliability of

MEMS: modeling and experimental validation [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2011, 21(4): 45022-45034(13).

[13] HARTZELL A, WOODILLA D. Reliability methodology for prediction of micromachined accelerometer stiction [C]. *Reliability Physics Symposium Proceedings*, *San Diego*, 1999: 202-205.

[14] 姚文莉，岳嵘. 有争议的碰撞恢复系数研究进展 [J]. 振动与冲击，2015，34(19): 43-48.
YAO W L, YUE R. The controversial coefficient of restitution for impact problems [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(19): 43-48. (in Chinese)

[15] HUNT K H, CROSSLEY F R E. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1975, 42(2): 440-445.

[16] FLORES P, MACHADO M, SILVA M T, *et al.*. On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics [J]. *Multibody System Dynamics*, 2011, 25(3): 357-375.

[17] GILARDI G, SHARF I. Literature survey of contact dynamics modelling [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2002, 37(10): 1213-1239.

[18] LANKARANI H M, NIKRAVESH P E. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1990, 112(3): 369-376.

[19] NIE W, CHENG J, XI Z, *et al.*. Elastic coefficient analysis on planar S-shaped micro spring under high impact load [J]. *Microsystem Technologies*, 2015: 1-9.

[20] WAGNER U, MULLER-FIEDLER R, BAGDAHN J, *et al.*. Mechanical reliability of epi-poly MEMS structures under shock load [C]. *Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, International Conference, Boston*, 2003(1): 175-178.

作者简介：

步 超(1991—)，男，江苏扬州人，博士研究生，2014于南京理工大学获得学士学位，主要从事MEMS惯性器件的设计与可靠性研究。E-mail: buxychao@163.com

导师简介：

聂伟荣(1969—)，女，山西原平人，博士，副教授，2002于南京理工大学获得博士学位，主要从事引信MEMS安全系统技术研究以及智能探测与控制技术研究。E-mail: njnwr@hotmail.com