

文章编号 1004-924X(2014)04-0918-08

电容式高过载微机械加速度计的设计与实验

陶永康*, 刘云峰, 董景新
(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 针对某些高过载应用场合对微机械加速度计抗冲击能力的要求, 设计了一种三轴向抗冲击的梳齿电容式闭环微机械加速度计。通过分析带止档的闭环加速度计冲击响应过程, 提出在敏感方向使用悬臂梳齿结构作为柔性缓冲止档可以缓冲冲击过程中微结构间的接触碰撞; 在非敏感方向采用结构模态和阻尼分离的设计可减小冲击变形, 耗散冲击能量。马歇特锤冲击实验表明, 该加速度计能够分别承受 3 个轴向幅值为 13 200 g, 脉宽约 102 μ s 的加速度冲击, 冲击前后偏置漂移在 5 mV 以内。该闭环加速度计在 ± 10 g 的非线性优于 500×10^{-6} , 1.5 h 偏置稳定性为 0.27 mg。设计的样机基本满足高过载环境下惯性测量的要求。

关键词: 微机械加速度计; 闭环加速度计; 三轴向高过载; 柔性止档; 马歇特锤实验

中图分类号: TH824.4; U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0918

Design and experiment of high-overload capacitive micro-machined accelerometers

TAO Yong-kang*, LIU Yun-feng, DONG Jing-xin

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: tyk06@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: In consideration of the requirements of micro-machined accelerometers for enduring shock pulses in some special high-overload applications, a comb-finger capacitive closed-loop accelerometer with triaxial shock resistance was proposed. After analysis of the shock response of the closed-loop accelerometer with a stop, it points out that the flexible comb stop designed in the sensitive direction can reduce the impact force among the micro-structures and the modal separation and damping in the insensitive direction to strengthen the shock resistance in y and z axes can reduce the deformation and dissipate the shock energy. An impact hammer test demonstrates that the accelerometer can resist the acceleration shocks by 13,200 g, and 102 μ s respectively, and the bias drifts is less than 5 mV after shock. A prototype was designed and its nonlinearity is less than 500×10^{-6} in a full scale of ± 10 g, its bias stability is 0.27 mg for 1.5 h. The prototype can basically meet the demands of inertial measurements under high overload conditions.

Key words: micro-machined accelerometer; closed-loop accelerometer; triaxial high overload; flexible stop; impact hammer test

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2014-02-01.

基金项目: 国家十二五预研基金资助项目 (No. 51309020301)

1 引言

微机械加速度计是一种利用微机械加工制造的惯性传感器。电容式闭环微机械加速度计中的敏感质量与固定结构间构成差分电容对,通过检测电容值变化来反映输入加速度的变化,并可构成静电力平衡伺服控制工作状态^[1-4]。在某些特殊的应用场合,微加速度计需要承受三轴向上万 g 的冲击,同时高过载作用之后要求其在低量程敏感范围内(约 0~10g)仍具有较高的测量精度(偏值及标度因数的重复性、稳定性好,分辨率高)。随着研究深入和工程化应用的需求,高过载环境适应性成为微惯性仪表的一个重要研究方向。高冲击下微惯性仪表的存活能力和冲击过载作用后传感器的性能变化等是需要重点解决的关键问题。

目前,微机械系统(Micro-electro-mechanical System, MEMS)的可靠性技术成为国内外的研究热点和难点^[5-7],使用柔性缓冲结构来提高 MEMS 器件的抗冲击能力,近年来得到广泛关注^[7-9]。COLIBRYS 公司最早提出应用于三明治式微加速度计结构的柔性缓冲框架, Yoon 等人提出并验证了微机械结构中一种非线性级联止档的冲击保护作用。微机械加速度计在高冲击下的可靠性问题已经成为其实际应用的瓶颈之一。本文选取目前精度较高、技术相对成熟且有广泛应用背景的电容式闭环硅微加速度计为研究对象,在先前针对常规加速度计冲击实验和仿真研究的基础上^[10],分析了带止档的闭环微机械加速度计的冲击响应过程,通过柔性止档设计、结构模态和阻尼的分离优化,使得微加速度计能够分别承受 3 个轴向上万 g 的冲击。利用马歇特锤对微加速度计整表进行了冲击实验验证,实验结果表明样机可满足高过载环境下惯性测量的要求。

2 柔性梳齿止档设计

低量程闭环微加速度计的敏感结构通常具有较低的谐振频率以提高检测分辨率和输出稳定性水平,同时在敏感方向设置止档来抵御冲击^[3,4,11]。在超量程加速度输入时,止档能够限制敏感质量的运动,减少支撑梁变形引起的应力集中。常规止档是硅片和玻璃基底键合的固定结

构。仿真和实验表明冲击过程中敏感质量块与止档接触时会产生碰撞作用力,其数值可能远大于冲击惯性力,会造成二次冲击损伤。常规微机械加速度计的抗冲击能力^[3]约为 1 000 g,图 1 所示为常规加速度计在敏感方向一次冲击作用后(幅值为 3 629 g,脉宽为 325 μs)微结构破坏的局部显微图片^[10],可以观察到圆柱形止档结构和敏感质量接触面由于相互碰撞而引起的破坏以及支撑梁在大冲击下的断裂。

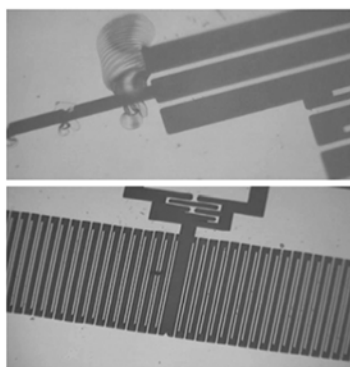


图1 加速度计微结构冲击破坏的显微图片
Fig. 1 Micrograph of accelerometer's micro-structure failure after shock

减小微机械加速度计中止档的刚度使其具有一定的柔性,一方面能够增加冲击作用时止档与敏感质量块的接触时间,减少两者之间的碰撞作用力;另一方面冲击输入能量通过止档的接触变形得到缓冲,可有效减少敏感结构的应力集中。综合考虑工艺难度和高过载保护效果,使用悬臂梳齿结构作为微加速度计的止档,不仅能提供柔性缓冲作用,还由于多个梳齿并列的形式既能节省微结构版图空间,又可以提供敏感轴正反两个方向的冲击保护,同时悬臂梳齿止档的结构形式还大大增加了接触面积,从而有利于进一步减小冲击应力集中。此外,敏感方向利用柔性梳齿止档的保护方案,使得止档设计和加速度计器件设计能够互相解耦,有效地解决了微加速度计抗冲击能力和其他常规性能指标难以平衡的矛盾。

图 2 所示为柔性止档示意图和实际流片后的显微照片。设单个止档长度和有效正对长度分别为 L 和 L_r ,柔性止档刚度和单侧有效止档接触面积分别为

$$k_{\text{stop}} = \frac{n_1 E b^3 h}{4 L^3}, \quad (1)$$

$$A_{\text{stop}} = n_1 h L_r, \quad (2)$$

其中: n_1 为有效梳齿止档对数, b 为止档宽度, h 为微结构厚度, E 为硅材料的杨氏模量。止档间隙 d_{stop} 小于检测和加力梳齿间隙 d_0 。

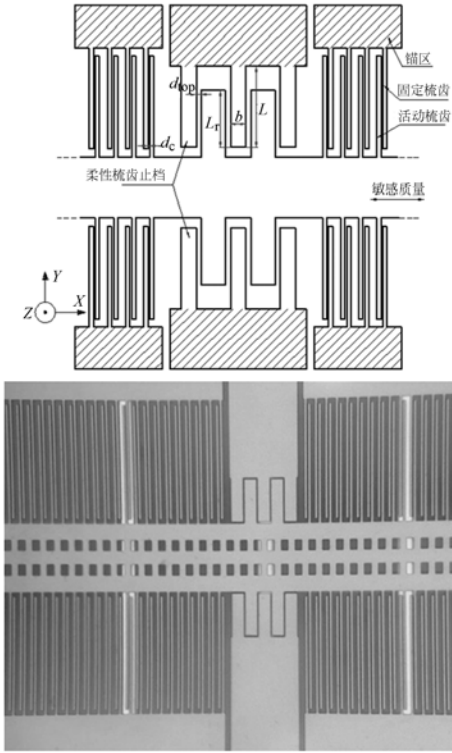


图 2 柔性梳齿止档示意图和显微图片

Fig. 2 Sketch and micrograph of flexible comb stop

冲击加速度作用时,带止档的闭环加速度计的动力学响应为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx(t) = ma_{\text{shock}}(t) + F_e(t), \quad (3)$$

$$x(t) < d_{\text{stop}},$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx(t) + k_{\text{stop}}(x(t) - d_{\text{stop}}) = ma_{\text{shock}}(t) + F_e(t) \quad x(t) \geq d_{\text{stop}}, \quad (4)$$

$$a_{\text{shock}}(t) = \begin{cases} a_p \sin\left(\frac{\pi}{\tau} t\right) & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \tau \leq t \end{cases}, \quad (5)$$

其中: m 为微结构敏感质量, k 为支撑梁机械刚度, c 为敏感方向阻尼系数。 $a_{\text{shock}}(t)$ 为冲击加速度,一般近似用半正弦波描述即如式(5)所示。其中 a_p 为冲击加速度幅值, τ 为半正弦波脉宽。 $F_e(t)$ 是由前端电容检测和闭环反馈控制电路共同产生的静电力。

闭环工作情况下,在加速度计检测带宽和量程范围内 $F_e(t)$ 与输入加速度成正比,敏感质量块被控制在平衡位置处一个非常小的位移范围内。超量程加速度输入时,受电源电压限制静电力不足以平衡冲击惯性力,质量块脱离控制与止档相撞。撞击力可能会造成止档与质量块接触面的应力集中,其大小近似用止档的弹性变形力表示,即 $F_{\text{stop}} = k_{\text{stop}} \delta_{\text{stop}}$ 。

利用图 3 所示的 Matlab Simulink 模型求解式(3)~(5)。在幅值 $1 \times 10^4 g$, 半正弦脉宽 10 ms 的冲击加速度作用下,冲击惯性力 F_{shock} 、止档接触变形力 F_{stop} 以及敏感质量块的加速度、速度和位移响应曲线如图 4 所示。可见,高冲击作用下冲击惯性力和止档的接触变形力两者量级相当,同是引起加速度计冲击破坏的重要来源。使用柔性止档有利于减小冲击过程中微结构间的接触碰撞力。柔性止档可以理解为加速度计微结构的机械反馈元件,将敏感单元控制在指定的止档间隙内运动。若敏感质量块位移超过止档间隙 d_{stop} ,柔性止档利用弹性变形,由比较后的位移差 $(x - d_{\text{stop}})$ 计算反向回复力 $F_{\text{stop}} = k_{\text{stop}}(x - d_{\text{stop}})$ 。取止档刚度 $k_{\text{stop}} = 1 \times 10^6 \text{ N/m}$ 和 $1 \times 10^8 \text{ N/m}$ 进行仿真,止档最大变形力由 0.5 N 降低到 0.05 N。

分析校核高冲击引起的微结构强度问题,主要包括柔性止档和敏感结构两部分。敏感结构上的应力集中主要来源于支撑梁的变形、撞击力引起的接触面强度问题、固定/活动梳齿和其他结构组件在冲击加速度作用下的变形等。悬臂梳齿止档由于接触变形引起的最大应力^[3,12] $\sigma_{\text{max1}} \propto 6 F_{\text{stop}} L / n_1 b^2 h$;微加速度计支撑梁上的最大应力 $\sigma_{\text{max2}} \propto kx$,止档限制了较软的支撑梁在大冲击下的变形从而有效减少该项应力集中;敏感结构接触面上的最大应力 $\sigma_{\text{max3}} \propto F_{\text{stop}} / A_{\text{stop}}$ 。减小柔性止档刚度和增大止档接触面积有利于减小 σ_{max1} 和 σ_{max3} 两项应力集中。取典型参数 $m = 5.2 \times 10^{-7} \text{ kg}$, $k_{\text{stop}} = 1 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k = 286 \text{ N/m}$, $d_{\text{stop}} = 4 \mu\text{m}$, 计算 $\sigma_{\text{max1}} = 142 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{max2}} = 52.7 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{max3}} = 38.4 \text{ MPa}$,敏感结构其他组件的最大应力 $\sigma_{\text{max4}} = 12.7 \text{ MPa}$,均在单晶硅的许用应力范围之内。考虑硅微机械工艺中深槽刻蚀结构的侧壁倾斜角^[3] $\theta \sim (90 \pm 1)^\circ$,以及敏感质量与止档间隙刻蚀后的不一致,实际接触面积会小于式(2)的计算值,使

同长度布置的止档数成 1 次方减小,使得止档有效接触面积减少;增加梳齿止档正对长度以增加接触面积,同时会造成其机械刚度成 3 次方减少。止档接触面积的优化如式(6)所示,其中 L_0 为微结构版图空间和键合工艺共同限制下的最大允许布置止档的线长度。

$$k_{\text{stop}} = N \frac{Eb^3 h}{L^3} \quad (6)$$

$$(2N-1)b + (N-1)d_{\text{stop}} = L_0$$

$$\text{st max} \begin{cases} A_{x,\text{stop}} = N(L-d_{\text{stop}})bh \\ A_{y,\text{stop}} = Nbd_{\text{stop}} \end{cases}$$

3 模态和阻尼分离设计

3.1 模态分离设计

对于加速度计非敏感方向的抗冲击保护,通过提高微结构敏感方向工作模态和其他方向扭转、弯曲模态的分离比,增加非敏感轴向的机械刚度以减小冲击变形是主要的解决措施。设计的微结构中使用 4 个折叠梁组并联的形式,每个折叠梁组可看作由 4 个单一折叠梁并联而成。同时将折叠梁内置于动片框架之内,梳齿在框架四周外延,如图 5 所示。

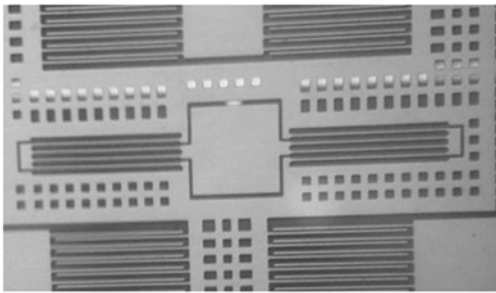


图 5 支撑梁显微图片

Fig. 5 Micrograph of micro beam

优化后支撑梁机械刚度^[13]的一组典型参数为 $k_x = 286 \text{ N/m}$, $k_y = 2.85 \times 10^4 \text{ N/m}$, $k_z = 1.63 \times 10^4 \text{ N/m}$, 由 $\omega = \sqrt{k/m}$ 可知 3 个方向弯曲模态频率比近似为 1 : 10 : 8, 微结构前 5 阶模态的 ANSYS 仿真结果如表 1 所示。1 × 10⁴ g 静态加速度作用下, y 方向最大变形为 0.05 μm, 最大应力为 11.83 MPa, z 方向最大变形为 2.895 μm,

最大应力为 169.8 MPa, 满足抗冲击要求。

表 1 ANSYS 模态仿真结果

Tab. 1 ANSYS modal simulation results

模态阶数	模态频率及模态形状
1	4 074 Hz, x 方向平动
2	33 478 Hz, z 方向扭转
3	33 803 Hz, z 方向平动
4	53 537 Hz, z 方向扭转
5	70 067 Hz, z 方向扭转

3.2 阻尼分离设计

敏感方向使用的柔性梳齿止档还能同时为微结构 y 方向提供限位保护。梳齿电容式微加速度计是采用体硅 SOG (silicon on glass) 工艺加工的面内敏感的加速度计, 对于 z 方向冲击保护来说, 在 z 方向黏结硅帽、设置离面止档、使用晶片级封装等方法会增加加工工艺难度、降低成品率。微加速度计的阻尼能够耗散能量、影响系统动态响应, 具体包括材料内部的结构阻尼和各运动部位之间的空气流动阻尼。设计分离不同方向的阻尼系数, 使得敏感方向具有较好动态响应特性的同时, z 方向能够利用大的阻尼耗散冲击输入能量。使用一维 Stokes 模型^[14]分析主要起作用的滑膜阻尼 c_{sd} 和压膜阻尼 c_{rec} , 加速度计微结构 3 个方向阻尼系数的计算公式为:

$$c_{\text{recx}} = \frac{2n\mu l_{\text{cr}} h^3}{d_0^3} \left(1 + \frac{1}{p} \right) \beta \left(\frac{h}{l_{\text{cr}}} \right), \quad (7)$$

$$c_{\text{sdx}} = \mu A_{\text{eff}} \left(\frac{1}{d_s} + \frac{1}{\delta} \right)$$

$$c_{\text{recy}} = \frac{4n\mu h b^3}{l_m^3} \beta \left(\frac{b}{h} \right), \quad (8)$$

$$c_{\text{sdy}} = \mu A_{\text{eff}} \left(\frac{1}{d_s} + \frac{1}{\delta} \right)$$

$$c_{\text{recz}} = \frac{2n\mu l_0 b^3}{d_s^3} + \frac{32\mu l_a \omega^3}{d_s^3} + \frac{3\mu A^2}{2\pi d_s^3 N} k(\beta), \quad (9)$$

$$c_{\text{sdz}} = \frac{2n\mu l_{\text{cr}} h}{d} \left(1 + \frac{1}{p} \right) + \frac{\mu L_{\text{all}} h}{\delta}$$

其中: n 为梳齿对数, l_{cr} 为梳齿正对长度, p 为定齿偏置倍数, μ 为气体的黏性阻尼系数, δ 为气体特征距离, d_s 为硅微结构与玻璃基底距离, A_{eff} 为质量框架、动齿、梁等与底部玻璃基底正对面积, L_{all} 为敏感质量块所有的线尺寸之和。

对于梳齿式结构来说, x 和 z 方向起主要作用的是压膜阻尼, 比滑膜阻尼系数高 2 个数量级

以上。y 方向阻尼系数较小, $c_{rec} \approx 1 \times 10^{-7}$, $c_{sd} \approx 1 \times 10^{-5}$, 滑膜阻尼占主导作用,加之 y 方向刚度很大,其阻尼较小,可忽略不计。分析上述计算公式,增大动片面积(指动片框架尺寸不变,通过设置阻尼孔的方式改变动片面积)、总阻尼孔大小不变的情况下减小阻尼孔的密度和增大阻尼孔尺寸、增大结构厚度、减小梳齿间隙、增大气压都有利于增大阻尼系数,近似关系如表 2 所示。

表 2 阻尼系数影响因素

Tab. 2 Influencing factors of damping coefficients

影响因素	x 方向		z 方向	
	压膜阻尼	滑膜阻尼	压膜阻尼	滑膜阻尼
梳齿间隙	三次方反比	—	—	一次方反比
结构厚度	三次方正比	—	—	一次方正比
基底间隙	—	一次方反比	三次方反比	—
气压	正比	正比	正比	正比
动片面积	—	一次方正比	二次方正比	—

其中梳齿间隙、结构厚度、动片面积等因素对加速度计的其他性能耦合影响较大,且受到工艺限制,不易调整。而基底间隙 d_s 可以在工艺允许的情况下做适当调整,实现阻尼分离。考虑工艺难度,实际加工时微结构的键合台高度取 $4 \sim 5 \mu\text{m}$, z 方向的阻尼比在 $2.5 \sim 5$ 之间,既提高了 z 方向阻尼,同时也不影响敏感方向的动态响应特性。

表 3 微结构阻尼系数计算

Tab. 3 Calculation of damping coefficients

基底 间隙 / μm	x 方向			z 方向		
	压膜阻尼 / $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	滑膜阻尼 / $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	阻尼 比	压膜阻尼 / $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	滑膜阻尼 / $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	阻尼 比
2	7.28×10^{-3}	2.79×10^{-5}	0.295	2.66	1.26×10^{-4}	39.27
4	7.28×10^{-3}	1.48×10^{-5}	0.295	0.33	1.26×10^{-4}	4.91
5	7.28×10^{-3}	1.22×10^{-5}	0.295	0.17	1.26×10^{-4}	2.52
10	7.28×10^{-3}	6.98×10^{-5}	0.294	0.02	1.26×10^{-4}	0.32

4 实验研究

4.1 基本性能试验

图 6 为设计的闭环高过载微机械加速度计原理样机。按照通用的微机械加速度计测试大纲,在稳定平台上,采集该加速度计上电约 2 h 内的

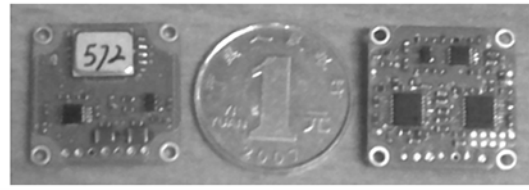


图 6 闭环高过载微机械加速度计原理样机

Fig. 6 Prototype of closed-loop high-overload micro-machined accelerometer

偏置输出数据。去除加速度计初始启动过程中由电路板发热造成的温度漂移输出,1.5 h 内的偏置稳定性为 0.27 mg ,如图 7 所示。该加速度计采用 $\pm 5 \text{ V}$ 供电,量程 $\pm 10 \text{ g}$,标度因数约为 300 mV/g ,精密离心机上测得的全量程非线性优于 500×10^{-6} ,数据如表 3 所示。

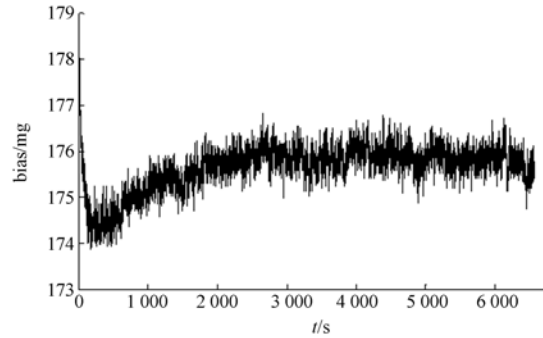


图 7 偏置稳定性测试数据

Fig. 7 Bias long-term stability test

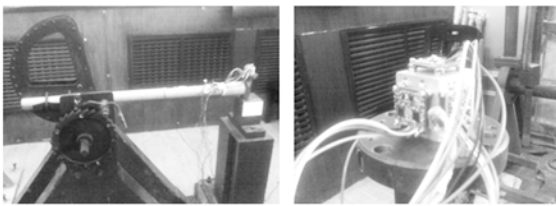
表 4 $\pm 10 \text{ g}$ 全量程离心试验结果

Tab. 4 Centrifugal test of $\pm 10 \text{ g}$ full-scale

正向输入 加速度(g)	输出电压 / V	反向输入加 速度(g)	输出电压 / V
0.0	-0.084 783	0.0	-0.094 867
1.5	0.362 007	-1.5	-0.549 619
3.0	0.806 950	-3.0	-1.007 571
4.5	1.251 563	-4.5	-1.466 128
6.0	1.696 133	-6.0	-1.925 175
7.5	2.139 127	-7.5	-2.384 538
9.0	2.584 817	-9.0	-2.843 793
10.5	3.028 411	-10.5	-3.304 561
非线性	268×10^{-6}	非线性	412×10^{-6}

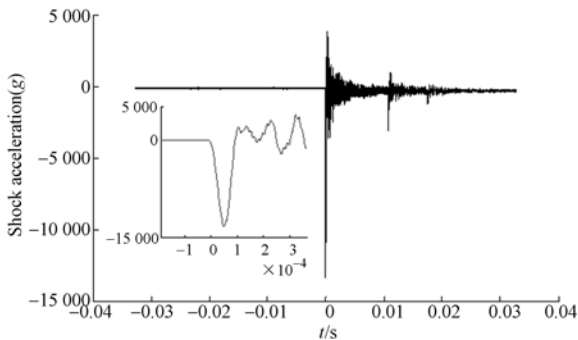
4.2 抗冲击能力测试

为了验证该微机械加速度计的抗冲击能力,利用马歇特锤进行 3 个方向的冲击实验。图 8 所示为冲击实验设备、冲击加速度曲线和冲击过程



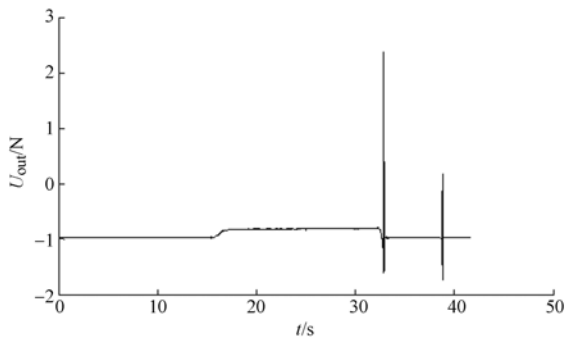
(a) 马歇特锤冲击设备和试件安装

(a) Impact hammer and the test specimen



(b) 冲击加速度

(b) Shock acceleration



(c) 冲击过程试件输出

(c) Output of the specimen in shock

图 8 冲击实验

Fig. 8 Shock tests by impact hammer

中待测加速度计的输出。冲击前先上电静态测试 5 min 偏置输出,冲击过程加速度计上电,冲击后尽量保证在相同安装位置,静态采集 5 min 加速度计输出数据。表 5 对比了冲击前后加速度计偏置变化情况。实验表明,该加速度计能够分别抵御 3 个方向 13 200 g,102 μ s 的冲击作用,冲击前后偏置输出电压漂移在 5 mV 以内,大冲击后恢复时间在 1 s 以内。分析冲击前后偏置变化的原因,包括冲击前后加速度计没有处在完全相同位置、环境温度变化造成的偏置温度漂移以及冲击后残余应力引起的微结构变形等因素。

表 5 冲击前后加速度计偏置变化情况

Tab. 5 Bias drift after shock

编号	冲击方向	冲击前静态输出/V	冲击后静态输出/V	冲击后漂移/V	冲击后恢复时间/s
506 #	x	-0.772 91	-0.777 12	-0.004 21	0.2
502 #	y	-0.970 17	-0.974 79	-0.004 62	0.31
503 #	z	-0.193 69	-0.194 41	-0.000 72	0.24

5 结 论

本文介绍了一种三轴向高过载电容式闭环微机械加速度计的设计和主要性能指标的实验结果。通过柔性梳齿止档、模态和阻尼分离设计,该微机械加速度计能够分别抵御 3 个方向 1×10^4 g 以上的冲击加速度作用,冲击前后偏置漂移在 5 mV 以内。进一步工作需要研究不同脉宽高冲击下加速度计的存活能力以及分析冲击后加速度计性能变化的原因,减少冲击前后偏置漂移,并结合具体应用场合优化其他性能指标。

参考文献:

[1] BARBOUR N M. Inertial MEMS systems and applications [C]. *Nato Rto-en-Set*, 2011: 1-16.
 [2] PASTRE M, KAYAL M, SCHMID H, et al.. A navigation-grade MEMS accelerometer based on a versatile front end [C]. *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE*, 2011: 4038-4043.
 [3] 董景新. 微惯性仪表——微机械加速度计[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
 DONG J X. *Micro Inertial Instruments*——Micro

Machined Accelerometer [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)

[4] 刘危,解旭辉,李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 425-430.
 LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 425-430. (in Chinese)
 [5] HARTZELL A L, SHEA H R. *MEMS Reliability* [M]. New York: Springer, 2011, 2-6.
 [6] 伞海生,宋子军,王翔,等. 适用于恶劣环境的

- MEMS压阻式压力传感器[J]. 光学精密工程, 2012,20(3):551-553.
- SAN H SH, SONG Z J, WANG X, *et al.*. Piezoresistive pressure sensors for harsh environments [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(3): 551-553. (in Chinese)
- [7] STAUFFER J M. Current capabilities of MEMS capacitive accelerometers in a harsh environment [J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine IEEE*, 2006, 21:29-32.
- [8] HIRATA Y, KONNO N, TOKUNAGA T, *et al.*. A new z-axis capacitive accelerometer with high impact durability [C]. *Actuators and Microsystems Conference*, 2009: 1158-1161.
- [9] YOON S W, LEE S, PERKINS N C, *et al.*. Shock-protection improvement using integrated novel shock-protection technologies [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20: 1016-1031.
- [10] TAO Y K, LIU Y F, DONG J X, *et al.*. Experimental analysis of MEMS capacitive accelerometer's shock resistibility [C]. *NSTI-Nanotechnology 2012: Electronics, Devices, Fabrication, MEMS, Fluidics and Computational*, Santa Clara, 2012:451-454.
- [11] 刘大为,尹亮,李海涛,等. 闭环电容式微加速度计全差分 CMOS 接口电路[J]. 光学精密工程, 2011,19(3):581-585.
- LIU X W, YIN L, LI H T, *et al.*. Full differential CMOS interface circuit for closed-loop capacitive micro-accelerometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(3): 581-585. (in Chinese)
- [12] TANNER D M, WALRAVEN J A, HELGESEN K, *et al.*. MEMS reliability in shock environments [C]. *Reliability Physics Symposium, Proceedings, 38th Annual 2000 IEEE International*, 2000:129-138.
- [13] 刘宗林. 电容式微惯性器件设计理论与方法研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学,2004.
- LIU Z L. *Study on the design theory and method of capacitive micro inertial device*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [14] BAO M H. *Analysis and Design Principles of MEMS Devices* [M]. Elsevier Science Ltd, 2005.

作者简介:



陶永康(1989—),男,安徽合肥人,博士研究生,2010年于清华大学获得学士学位,主要从事微机械加速度计研究。E-mail: tyk06@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:



董景新(1948—),男,上海人,教授,博士生导师,1981年于清华大学获得硕士学位,主要从事导航仪器仪表与系统控制的研究。E-mail: dongjx@tsinghua. edu. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)