

# 复合量程 MEMS 加速度计抗高过载的优化设计\*

徐香菊, 朱 杰, 郭 涛, 李文燕

(中北大学电子测试国家重点实验室, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:**在航空航天及武器系统中, 传感器承受很大的冲击, 这就要求传感器具有很高的抗高过载能力。文中在原有基础上对复合量程微加速度计中的高低量程模块进行抗高过载设计的优化。试验测得优化后的结构能够抗 20000g, 能够有效地满足高过载高冲击环境的要求。

**关键词:**抗高过载; 复合量程加速度计; ANSYS

中图分类号: TP212.6 文献标志码: A

## The Optimal Design for Anti-high Overload Capacity of Multi-range Micro-acclerometer

XU Xiangju, ZHU Jie, GUO Tao, LI Wenyan

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The sensor bears great impact in aerospace. The onboard sensor, which requires the sensor has a high resistance to high overload capacity. Based on the original design, the high and low range of the multirange micro-acclerometer was optimized. In the examination, it shows the optimized structure can resist 20000g, and can effectively meet high overload requirements of high-impact environment.

**Keywords:** anti-high over-load; multi-range micro-accelerometer; ANSYS

### 0 引言

随着社会的发展, 传感器阵列的需求越来越高。在航空航天及武器系统中, 加速度范围广, 且要求传感器向着多功能、小型轻量方向发展<sup>[1]</sup>。传感器阵列不仅要满足灵敏度、线性度等要求, 还要求能抗高过载。复合量程加速度计利用 MEMS 工艺制造, 覆盖高低量程、低功耗、模块化、通用化、体积小和结构强度高特点。而低量程传感器模块能否抗高过载环境, 对复合量程微加速度计性能十分重要<sup>[2]</sup>。在抗冲击试验中, 低量程模块比高量程更容易损坏。这说明加速度计的抗高过载能力还需进一步优化。

### 1 理论

文中低量程加速度计的量程为 10g, 高量程为 10000g。因结构类似, 下面以低量程结构为例进行介绍。低量程结构经过分析选用双端四梁结构。在 4 根梁上分布 8 个电阻组成惠斯通电桥。当加速度计

受到 Z 方向的加速度时质量块上下震动, 分布在梁上的电阻由于压阻效用会发生变化, 电桥有电压输出。结构图如图 1 所示。

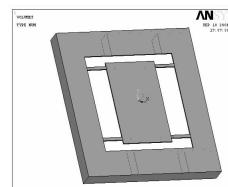


图 1 低量程 MEMS 加速度计

根据材料力学的理论推导相关公式如下:

$$\text{结构的刚度: } K = \frac{4Ewh_1^3}{l^3}$$

结构的第一阶固有频率:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M + 0.23 \times 4m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4Ewh_1^3}{l^3(M + 0.23 \times 4m)}}$$

$$\text{梁端部的挠度: } y_{\max} = \frac{F}{K} = \frac{Ma'}{4Ewh_1^3} = \frac{Ma'l^3}{4Ewh_1^3}$$

$$\text{结构灵敏度: } \eta_0 = \frac{|y_{\max}|}{a'} = \frac{Ml^3}{4Ewh_1^3}$$

梁根部或端部所受到的最大应力为:

\* 收稿日期: 2011-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(60806039)资助

作者简介: 徐香菊(1985-), 女, 河北任丘人, 硕士研究生, 研究方向: 智能传感器。

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{3Ma'l}{2wh_1^2}$$

$$\text{最大应变变量: } \varepsilon = \frac{\sigma_{\max}}{E}$$

理论设计抗高过载能力为 20000g。实际马歇特锤冲击试验中,由于是钢对钢的碰撞会产生高频信号,严重时损坏加速度计(见图 2)。加速度计样片在不到 10000g 的加速度冲击下就出现了损坏现象,与理论值相差甚远。加速度计是两层结构,上面一层是硅质量块结构,下面一层是玻璃盖板保护结构,质量块工作时在敏感方向上下活动。随着加速度 g 值的增大,质量块移动到玻璃盖板处时被限位向相反的方向弹出,由于质量块上面没有保护结构,使得质量块向上活动更远的距离,当 g 值增加到一定程度,质量块梁上的应力达到硅的屈服极限时,梁根部或端部会产生脆性断裂。可见加速度计的抗过载能力还需进一步优化。

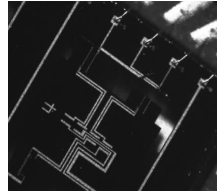


图 2 样片损坏

## 2 结构设计及仿真

针对试验现象,文中在原有基础上对结构进行优化,设计出过载保护结构。结构图如图 3。

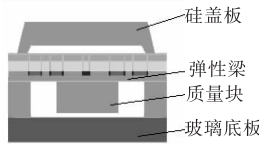


图 3 加速度计三层结构

### 2.1 结构仿真

在结构设计中,底面设计玻璃基地作为限位块后,在添加硅盖板前后施加 20000g 的加速度仿真结构见图 4、图 5。

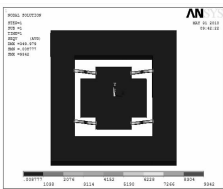


图 4 最大等效应力值为 9342MPa、最大位移量为 349.979 $\mu\text{m}$

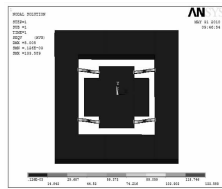


图 5 最大等效应力值为 213.74MPa、最大位移量为 5.005 $\mu\text{m}$

结构单元如图 4 所示,在不加任何保护措施下的最大应力为 9342MPa,远远超过了硅的屈服强度极限,加速度计结构会被破坏。结合加速度计的阻尼特性,综合考虑将硅层质量块和玻璃层的距离设定为 5 $\mu\text{m}$ ,因此质量块的最大行程为 5 $\mu\text{m}$ 。计算的质量块的位移达到 5 $\mu\text{m}$  时结构外加的加速度载荷应该达到 457.6g。

如图 5 所示,在 20000g 的加速度作用下,静态分析结果表明梁上的应力最大值分别为 213.742 + 6.042 = 219.784MPa,小于硅的许用应力 30MPa。仿真结果表明加速度计的三层结构有很好的抗高过载能力。

### 2.2 结构其它参数

图 6、图 7 为 ANSYS 仿真下对结构施加满量程 10g 的加速度 Z 方向上的最大位移和最大等效应力的仿真结果。从图中可以看出加速度计的最大位移为 0.175 $\mu\text{m}$ 。增加盖板后结构不影响满量程测量。

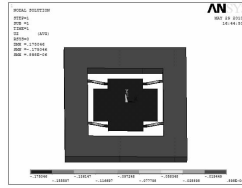


图 6 Z 方向最大位移为 0.175046 $\mu\text{m}$

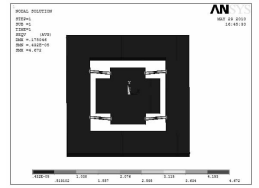


图 7 最大等效应力为 4.672MPa

根据仿真结果提取路径分析来确定压阻结构的摆放位置,从而计算出各结构单元的理论灵敏度。优化前后加速度计设计参数对比如表 1 所示。

表 1 优化前后加速度计参数对比

	参数	梁上最大应力 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$	挠度 $y_{\max}/\mu\text{m}$	固有频率 $f_0/\text{Hz}$	灵敏度 $uv/g$
优化前	0 ~ 10g	3.356	0.0414	7731	455.32
优化后		4.672	0.175046	6309	1029
优化前	0 ~ 10000g	365.007	2.668	25392	39.24
优化后		75.329	$3.887 \times 10^{-4}$	43514	18.87

由表 1 中可以看出优化后结构的灵敏度提高了一倍,固有频率有所降低,但降低的幅度较小仍然能够满足低量程加速度计带宽的要求,同时对加速度计结构进行了抗高过载的设计,抗过载能力达到 20000g。通过仿真验证了加速度计结构优化设计的合理性,达到了优化设计的目的。

## 3 试验特性

对加工完成的传感器进行马歇特锤试验(见图 8),并与标准传感器进行对比,其中实验结果见图 9。



图 8 马歇特锤试验

从图 9 中可以看出是,加速度传感器能很好的测量外界传感器变化。在施加 20000g 时,传感器结构也未出现损坏现象。试验结果表明,优化后的结构具

有很高的抗高过载能力。

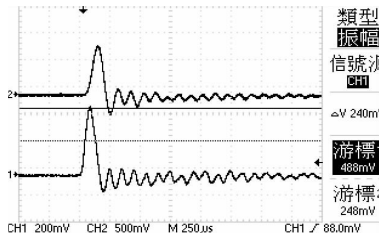


图9 某次冲击下标准传感器与被测传感器的冲击响应曲线

## 4 总结

文中针对原有结构的不足,提出的新的结构,经过 ANSYS 仿真及实验验证得出该结构能很好的满足

高过载要求。高低量程结构各项参数均能满足设计要求。该设计具有可行性。

### 参考文献:

[1] 王长虹. 阵列式硅压力加速度传感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.  
 [2] 夏烈芳, 郭涛, 向婷. 复合量程加速度计抗高过载技术的研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(3): 359 - 362.  
 [3] 石云波, 祁晓瑾, 刘俊, 等. 微型高过载加速度传感器的加工与测试[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 200 - 204.  
 [4] 王伟, 陈丽洁, 贲庆玲, 等. 抗高过载加速度计微结构的设计与分析[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(9): 5 - 7.

(上接第 146 页)

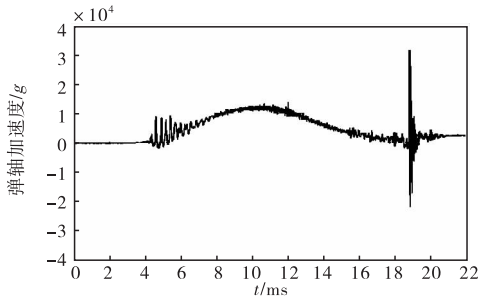


图7 弹轴方向加速度曲线

该仪器使用更方便、灵活,为弹底加速度的可靠测试提供了一种新的测试仪器。

### 参考文献:

[1] 胡功笠, 刘荣忠, 齐爱东. 动能弹侵彻钢筋混凝土靶的试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 24 - 26.

[2] 柳斌, 肖剑, 郭亚龙, 等. 大口径火炮弹丸膛内参数测量方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 167 - 169.  
 [3] 沙龙. 多层侵彻加速度及弹底压力测试研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.  
 [4] 徐鹏, 祖静, 范锦彪. 高 g 值侵彻加速度测试及其相关技术研究进展[J]. 兵工学报, 2011, 32(6): 739 - 745.  
 [5] 钱立志. 弹载任务设备抗高过载方法研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 1017 - 1020.  
 [6] 闻利群, 鲁建霞, 张同来. 泡沫铝和橡胶对测试仪器抗冲击波缓冲能力的仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 223 - 225.

(上接第 148 页)

获取的加速度曲线频谱在 20kHz 以下部分相似, 在 25 ~ 40kHz 区间, 舱壁上的频谱有较大的分量, 而龙骨上这部分分量很低。

## 4 结论

采用甲板触发控制单元控制探测头统一触发, 采集存储电路在测试点记录加速度信号, 并通过光纤实时传送到甲板的备份单元的记录仪能有效记录动爆过程中船体结构的加速度信号。记录仪能有效防水、抗电磁干扰、抗冲击、长时间保存数据。

### 参考文献:

[1] 童宗鹏, 汪玉, 李玉节. 舰船新型冲击防护层的水下爆

炸特性研究[J]. 船舶力学, 2007, 11(6): 924 - 932.  
 [2] 褚德英, 王贡献, 张志谊, 等. 舰载设备抗冲击试验系统建模与仿真[J]. 振动工程学报, 2007, 20(5): 507 - 510.  
 [3] 刘土光, 朱科, 郑际嘉. 爆炸载荷下矩形板的塑性动力响应[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(2): 166 - 169.  
 [4] 吴有生, 彭兴宁, 赵本立. 爆炸载荷作用下舰船板架的变形与破损[J]. 中国造船, 1995, 11(4): 55 - 61.  
 [5] 方斌, 朱锡, 张振华. 水下爆炸冲击波载荷作用下船底板架的塑性动力响应[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(4): 326 - 331.  
 [6] 梅志远, 朱锡, 刘润泉. 船用加筋板架爆炸载荷下动态响应数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(1): 80 - 84.