 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i6.6018

Design and Optimization of Anti high Overload Capacitive Acceleration Sensor

Jianjun Ren Yanyu Yang

Xi'an Institute of Mechanical and Electrical Information Technology, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

In response to the problem of damage to the upper and lower boards due to electrostatic adsorption in high overload environments, complex processing technology, inability to overcome alignment errors, and low sensitivity of capacitive accelerometers commonly used in all electronic fuses, a structure of anti overload capacitive accelerometer with a range of ± 100g is proposed. This structure adopts a "sandwich" structure of glass silicon glass, and adds a "protective platform" structure on the mass block to avoid the problems of cantilever beam damage and upper and lower plate adhesion caused by excessive displacement of the mass block in high overload environments, resulting in sensor failure. MEMS processing technology is also designed to overcome alignment errors. The verification test shows that the sensor range is ± 100g, the output sensitivity is 13.5 μ v/g, the operating frequency is 6.2KHz, and it works normally under high overload of 10000g. Therefore, the anti high overload capacitive accelerometer meets the requirements for the use of fully electronic fuses.

Keywords

fuse; Electronic security system; Capacitive accelerometer; Anti high overload

抗高过载电容式加速度传感器设计与优化

任建军 杨雁宇

西安机电信息技术研究所，中国 · 陕西 西安 710065

摘 要

针对全电子引信常用的电容式加速度传感器在高过载环境下，上下级板由于静电吸附而损坏，加工工艺复杂，无法克服对准误差，造成传感器灵敏度低的问题，提出了一种量程为 ± 100g抗过载电容式加速度传感器结构。该结构采用玻璃-硅-玻璃的"三明治"结构，并在质量块上加"防护台"结构，避免了在高过载环境质量块位移过大而引起悬臂梁损坏以及上下极板黏附，造成传感器失效的问题，并设计了MEMS加工工艺，克服了对准误差。验证试验表明：传感器量程为 ± 100g，输出灵敏度为13.5 μ v/g，工作频率为6.2KHz，并在10000g的高过载下正常工作。因此该抗高过载电容式加速度传感器满足全电子引信的使用要求。

关键词

引信；电子安全系统；电容式加速度传感器；抗高过载

1 引言

电子安全系统是引信安全系统继机械式、机电式之后的第三代安全系统。相比而言，电子安全系统具有安全性、高可靠性，可测试性等特点，实现了引信的智能化，性能最优化的要求 [1]。随着电子安全系统的逐渐普及，其工作环境越来越复杂，而加速度传感器作为电子安全系统重要组成部分，其可靠性关乎引信的解保以及能否正常起爆等功能 [2]。

对全电子引信常用的电容式加速度传感器在 10,000g 高过载环境下损坏以及加工工艺复杂，无法克服对准误差，造成传感器灵敏度低的问题，提出了一种量程为 ± 100g 抗过载电容式加速度传感器结构。

【作者简介】任建军（1991–），男，中国山西运城人，硕士，工程师，从事传感器设计研究。

2 电容式加速度传感器工作原理

电容式加速度传感器实际上是利用惯性质量块在加速作用下被检测极板间间隙发生变化从而引起等效电容的变化来测定加速度。电容式加速度传感器的结构示意图如图 1 所示，1 和 4 为固定极板，2 为质量块。在静止状态时，中间极板与固定极板间的电容都为 C_0，当感受到外界加速度时，中间极板发生位移，两个等效电容发生变化，一个增大 $\triangle C$，一个减小 $\triangle C$，电容变化量为：

$$\Delta C' \approx C - C_2 = (C_0 + \Delta C) - (C_0 - \Delta C) = 2\Delta C$$

通过传感器得灵敏度可得外接加速度：

$$a = \frac{\Delta C'}{s}$$

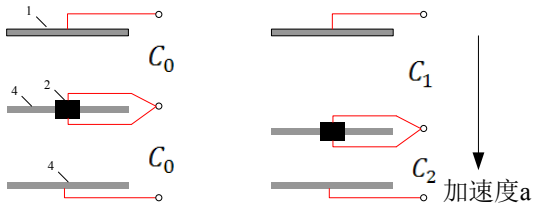


图 1 电容式加速度传感器结构示意图

3 抗高过载电容式加速度传感器

3.1 抗高过载电容式加速度传感器结构设计

本文提出的抗高过载电容式加速度传感器结构采用玻璃 - 硅 - 玻璃的“三明治”结构。其中，硅结构采用四端悬臂梁结构，质量块上下表面的电极板为运动的电极板，上下玻璃基板为固定的电极板，如图 2 所示，“防护台”在质量块的四角，主要是在高过载环境下限制质量块位移过大造成悬臂梁断裂，以及上下极板黏附 [3]。

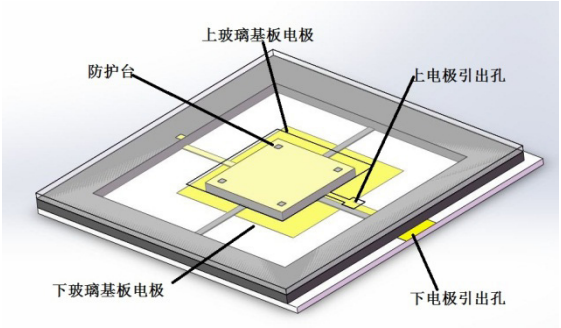
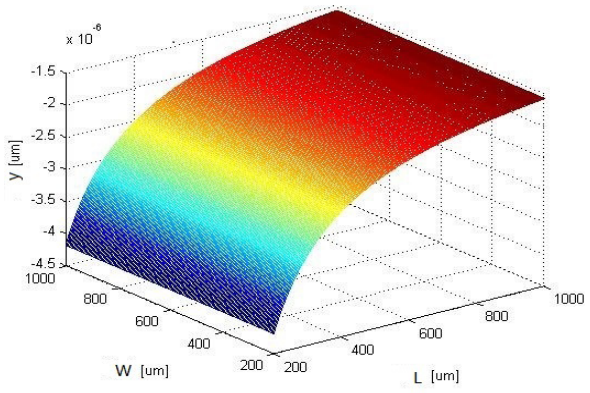
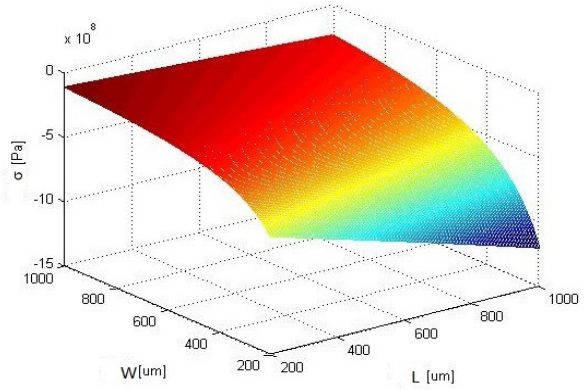


图 2 电容式加速度传感器结构图

根据四端固支的梁岛型结构的力学特性结合结构的挠曲度微分方程，利用 Matlab 软件求解，得到悬臂梁尺寸与挠度、应力的关系如图 3 所示。



a 挠度与梁长、梁宽的关系



b 应力与梁长、梁宽的关系

图 3 挠度、应力与梁长、梁宽关系

通过图 3 梁长、梁宽与结构最大应力和挠度的关系，从而可以看出结构参数对结构应力和挠度是相互制约的 [6]。从结构最大应力、挠度和梁长、梁宽的关系曲面中可以看出，在相同载荷作用下，随着梁长度的增加，梁上最大应力增加，挠度减少；随着梁宽增加，梁上最大应力减小，挠度增加。综合各个因素，得到传感器具体尺寸如表 1 所示。

表 1 芯片敏感结构尺寸

	质量块	梁	边框	防护台
长（μm）	3200	1200	7000	100
宽（μm）	3200	120	700	100
厚（μm）	300	60	305	1~2

3.2 抗高过载电容式加速度传感器结构应力分析

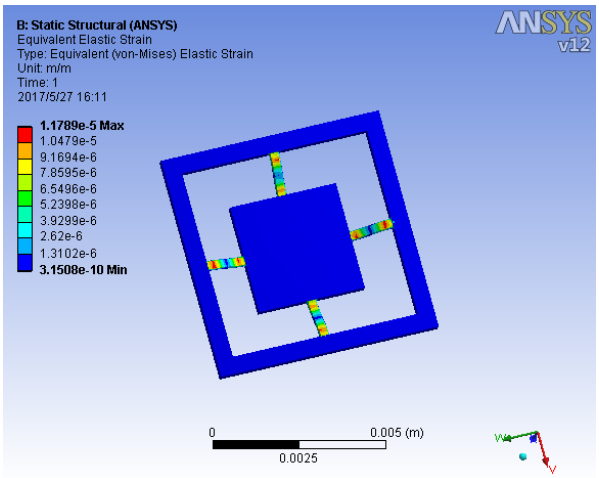
根据传感器敏感元件尺寸进行有限元分析，即在对加速度计的敏感方向 Z 方向施加 10000g 的加速度冲击信号后，传感器敏感结构的等效应力、位移分布图如图 4 所示。

图 4（a）为：传感器在 10000g 冲击信号的作用下，端部应力为 11.34MPa，远小于双硅片的最大许用应力（80 ~ 120MPa）；图 4（b）为，在 10000g 冲击信号的作用下，传感器质量块的最大位移达到 6.5μm，防护台未与玻璃基板贴合；电容变化量为 14.09pF，灵敏度为 0.2818pF/g；质量块防护台限制了其位移，防止中间极板与上下极板贴合造成传感器损坏 [4]。

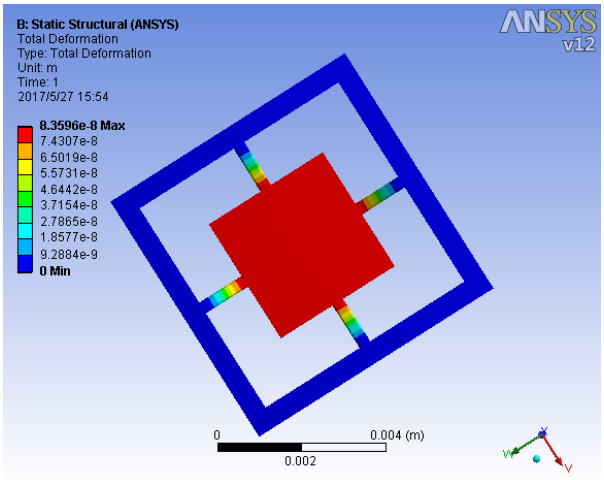
分别对传感器施加 20g、50g、80g、100g（传感器的设计量程值）冲击信号，最大应力、等效位移、电容变化均成线性变化关系，如表 2 所示。所以，因此传感器的灵敏度也成线性变化关系。

3.3 抗高过载电容式加速度传感器模态分析

由 ANSYS 有限元分析软件对优化过后的传感器结构进行模态分析，如表 3 所示。



a 敏感结构在 10000g 过载下的等效应力分布图



b 敏感结构在 10000g 过载下等效位移分布图

图 4 传感器静力学仿真

表 2 不同冲击条件下最大应力、等效位移、电容变化表

	20g	40g	60g	80g	100g
最大应力（mpa）	2.28	4.56	6.85	9.12	11.34
等效位移（μm）	1.28	2.57	3.85	5.14	6.43
电容变化（pF）	5.63	11.27	16.90	22.54	28.18

表 3 各阶振动频率（kHz）

模态	1	2	3	4	5	6
频率	6.2	10.6	10.6	21.6	83.1	83.1

由仿真结果得出，传感器的二阶振动频率远大于一阶振动频率，可以有效地避免各频率阶段间相邻过密导致的加速度传感器耦合振动的问题，有效的提高了传感器的稳定性和抗干扰性。

4 试验验证测试

加工出的传感器芯片结构如图6所示，尺寸如硬币大小。

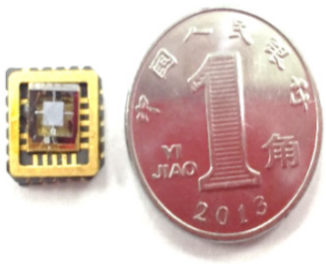


图 9 传感器封装结构图

4.1 静态电容测试

采用 HP-4284A 阻抗分析仪对传感器进行初始电容测试，因此采用重力场静态翻滚实验来测试传感器的静态电容，测试结果如图 7，由图可得，该传感器的静态电容为 14.09pF。

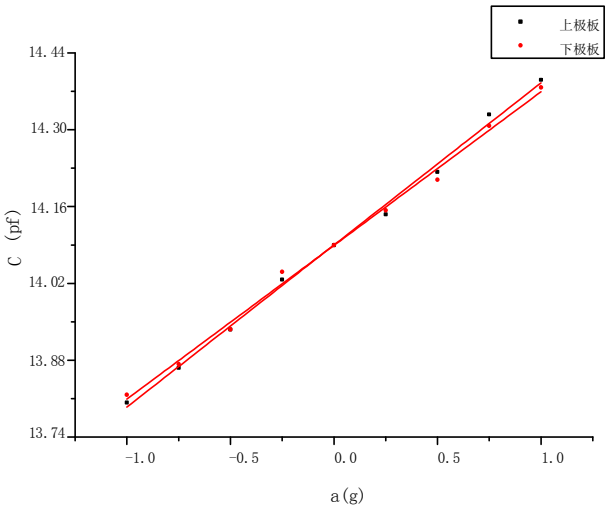


图 7 初始电容测试结果

4.2 动态测试

使用离心机对传感器进行动态测试，测试加速度为 10g、20g、30g、40g、50g，测试结果如表 4 所示，所使用的电路放大倍数为 185 倍，最后求得该加速度计的灵敏度为 13.5μv/g。

表 4 离心机测试结果

加速度 /g	10	20	30	40	50
输出电压 /v	2.431	2.456	2.481	2.506	2.531

4.3 验证试验

常规火炮在出膛瞬间膛内过载以及打水泥靶时着靶时刻过载往往达到 10,000g~20,000g，电容式加速度传感器在这种恶劣环境下还要实时输出有效信号，因此对高过载能力要求极高。因此使用 Hopkinson 杆对加速度传感器在高冲击载荷作用下进行了测试，在高过载下传感器输出曲线如图 8 所示。

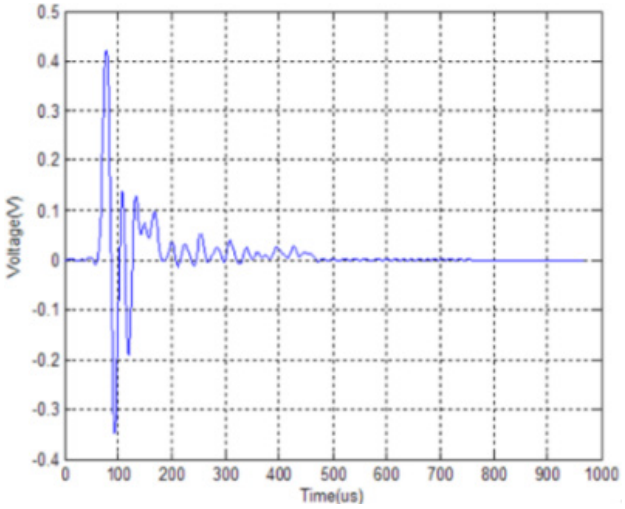


图 8 传感器输出曲线

从图 8 实测的试验曲线得出，冲击过载数据超过了 10000g，试验后对传感器进行测试，加速度传感器正常输出。结果表明: 传感器能够抗 10000g 的冲击过载，能够可靠工作，使得引信能够在复杂的弹上环境正常解保。

5 加速度传感器的可靠性优化

5.1 敏感结构可靠性优化

仿真分析和实验验证表明，传感器失效的重要原因之一为传感器悬臂梁的固支端（根部）容易产生裂纹甚至断裂，从而造成传感器失效。造成这一问题的主要原因是悬臂梁结构在冲击载荷作用下产生了应力集中现象。

为解决这一问题，本文对加速度传感器的结构进行了优化，如图 9 所示。在梁的固支端的直角处增加了“倒角”结构。通过 ANSYS 分别对有“倒角”结构和无“倒角”结构进行路径分析，其中圆圈标注尖峰为传感器敏感结构悬臂梁根部最大应力，结构优化前，梁根部应力集中，最大为 40Mpa, 优化后根部应力最大为 3040Mpa. 在相同冲击作用下，倒角结构有效避免了在梁的端部和根部处的应力集中问题，使得悬臂梁在冲击载荷作用下出现的应力集中问题得到改善，从而增加了传感器的可靠性 [5]。

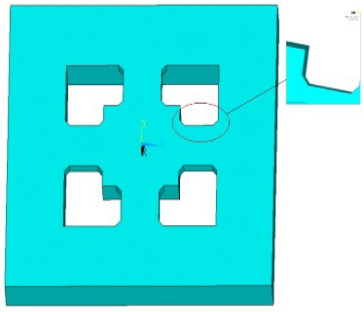


图 9“倒角”结构示意图

5.2 封装结构可靠性优化

高 g 值加速度传感器在高过载情况下主要的失效模式中还有引线键合失效，主要是由于连接线在高冲击下产生相对错动，进而导致引线断裂。针对这一问题，对传感器的封装结构进行了优化设计。主要分为两点：高 g 值加速度传感器芯片与转接板采用无引线互连；对传感器整体结构进行三层键合，并用灌封胶对传感器整体进行包装，使其固化成块。

无引线互连技术，就是采用银粉导电胶制作导电带实现敏感芯片与转接板的无引线互连，采用厚膜技术中的丝网印刷工艺进行导电胶的涂抹，使得导电带能够区分敏感结构上的电极点，从而完成敏感芯片与转接板的连接。

采用无引线互联技术，在高过载环境下就克服了引线键合断裂的问题，其次对传感器的结构封装采用（玻璃 - 硅 - 玻璃）三层键合，并使用灌封胶使其固化成整体，避免了连接线在高过载情况产生相对错动而断裂，进而提高了器件可靠性。

6 结论

本文提出了一种量程为 ±100g 的抗高过载电容加速度传感器，该结构采用玻璃 - 硅 - 玻璃的“三明治”结构，并在质量块上加“防护台”结构，避免了在高过载环境质量块位移过大而引起悬臂梁损坏以及上下极板黏附，造成传感器失效的问题，并在结构上增加对准标记，在上下极板与硅极板阳极键合过程中增加对准工艺，克服了对准误差，进而提高了传感器的灵敏度。验证试验表明：传感器量程为 ±100g，输出灵敏度为 13.5μv/g，工作频率为 6.2kHz，并在 10000g 的高过载下正常工作。并对传感器结构进行优化，采用无引线互联技术，在高过载环境下就克服了引线键合断裂的问题，其次对传感器的结构封装采用（玻璃 - 硅 - 玻璃）三层键合，并使用灌封胶使其固化成整体，避免了连接线在高过载情况产生相对错动而断裂，进而提高了器件可靠性。因此该抗高过载电容式加速度传感器满足引信在火炮出膛时刻以及着靶时刻采集有效信号的使用要求。

参考文献

[1] 席占稳，传感器在引信中的应用研究[D]，南京理工大学，2003.

[2] 屈新芬, 苏伟. 侵彻武器用MEMS大g值加速度计.电子技术参考, 2002, (2): 27-31.

[3] 王辅辅，娄文忠，微机电技术在引信中的应用综述[J]，探测与控制学报，38(3): 22-28, 2016.

[4] 陈艳香,石云波,智丹,杨志才,冯恒振. SiC高温高量程加速度传感器的仿真与分析[J]. 传感技术学报,2015,10:1471-1475.

[5] 冯建斌. 电容式加速度传感器的优化设计[D].大连理工大学,2014.