

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.016

MEMS 加速度开关的冲击失效仿真分析与试验

丁丽梅,李世中*,段荣杰,杨 乐
(中北大学 机电工程学院,山西 太原 030051)

摘要:针对微机电系统(MEMS)器件的低可靠性问题,以 MEMS 加速度开关为研究对象,利用 ANSYS 有限元分析软件,采用“扭梁-悬臂梁-质量块”结构作为 MEMS 加速度开关主要作用部分,建立了开关的有限元模型。对 MEMS 加速度开关 3 个方向上的跌落冲击情况进行了有限元分析;通过仿真计算分析,得到了器件在冲击载荷作用下的最大量级,分析了导致加速度开关不能作用的主要失效模式;利用马歇尔锤击实验平台进行了冲击试验,得到了加速度开关冲击失效的极限量级,证明了 MEMS 加速度开关的主要失效模式为断裂失效。研究表明:针对 MEMS 加速度开关主要失效模式的仿真分析结果可靠,与试验验证结论相符。

关键词:微机电系统;加速度开关;冲击载荷;失效仿真;锤击试验

中图分类号:TH39;TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0197-04

Impact failure simulation analysis and experiment of MEMS acceleration switches

DING Li-mei, LI Shi-zhong, DUAN Rong-jie, YANG Le

(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor reliability of MEMS devices, regarding MEMS acceleration switch as the research object, ANSYS finite element analysis of ware was used, and the main part of the MEMS acceleration switch was the structure of the “block torsion beam-cantilever beam-quality”. The finite element model of the switch was established, and the finite element analysis of the drop impact in the three directions of the MEMS acceleration switch was carried out. Through simulation calculation and analysis, the maximum magnitude of the device under the impact load was obtained, and the failure mode of acceleration switch was analyzed. The impact test was verified by the Marshall hammer test platform, the limit magnitude of the acceleration switch impact failure was obtained, and the main failure mode of the MEMS acceleration switch was fracture failure. The results indicate that the simulation analysis results of the main failure modes of the MEMS acceleration switch are reliable and consistent with the test results.

Key words: microelectromechanical system(MEMS); acceleration switch; impact load; failure simulation; hammer test

0 引 言

随着 MEMS 技术的应用领域日益广泛, MEMS 器件经常需要在各种恶劣的环境下完成传感、执行等功能,因此其可靠性已经成为了 MEMS 技术的关键,这也是制约 MEMS 产业进一步发展的重要因素^[1]。研究 MEMS 器件可靠性问题的意义在于,一些 MEMS 器

件的失效机理还不明确,目前研究的方向也仅限于最后的产品可靠性检测,而没有将可靠性和失效分析贯穿于 MEMS 产品开发的整体过程中。已经投入使用的 MEMS 产品若发生失效后果将非常严重。因此,在分析影响 MEMS 器件性能相关因素的基础上,需进一步提高器件的可靠度,降低成本^[2-3]。

MEMS 加速度开关是把感知和传输相结合的精密

收稿日期:2018-70-30

作者简介:丁丽梅(1992-),女,山西朔州人,硕士研究生,主要从事机械电子工程方面的研究。E-mail:1808093755@qq.com

通信联系人:李世中,男,教授,硕士生导师。E-mail:lishizhong@nuc.edu.cn

惯性器件^[4]。相比于传统的加速度开关, MEMS 加速度开关具有其独特的优势: (1) 尺寸精度高、惯性质量小, 所以其触发速度快, 运动灵敏度高; (2) 当受到远超出阈值的载荷和冲击作用时, 开关的耐受能力强, 失效率低; (3) 大多数 MEMS 器件用硅制作而成, 性能稳定、成本低、精度高^[5]。

本研究将以 MEMS 加速度开关为典型器件, 通过有限元分析方法研究开关在冲击载荷作用下的失效机理, 并开展实验验证, 为 MEMS 器件的可靠性研究提供解决思路 and 手段。

1 MEMS 加速度开关的结构

MEMS 加速度开关采用“扭梁-悬臂梁-质量块”结构, 构成了开关的可动电极。

MEMS 加速度开关的结构如图 1 所示。

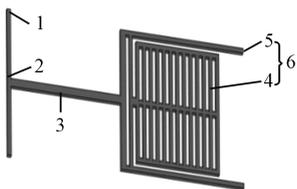


图 1 MEMS 加速度开关的结构

当开关受到惯性力的作用并达到阈值时, 质量块偏移与固定电极(图中未画出)接触, 电路导通。该 MEMS 加速度开关的电极活动范围为 $(-2, 13) \mu\text{m}$, 设计开关阈值为 150 g 。

2 有限元模型的建立

MEMS 加速度开关在装入载体前, 要进行严密的封装。在使用中惯性力并不能全部等效作用于 MEMS 加速度开关上, 而且 MEMS 开关的关键活动部件“扭梁-悬臂梁-质量块”部分的活动空间也是受限制的^[6]。另外, 由于开关本质为悬臂梁结构, 受力后会产生弹性振动, 实际中这种振动并不是自由振动, 还会受到上下接触面的约束反作用力。两者之间的相互作用力无法简单描述, 故除了关键部件“扭梁-悬臂梁-质量块”部分外, 其固定电极部分, 基底部分也必须建入模型之中^[7]。

同时考虑模型尽量简化以提高效率的原则, 故本研究将封装模型简化为硅材料外壳与悬臂梁结构面配合装配, MEMS 加速度开关的几何模型如图 2 所示。

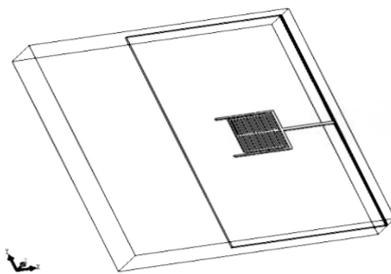


图 2 MEMS 加速度开关的几何模型

封装外壳为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 高约 0.732 mm ; 开关插入壳体缝隙, 距离上表面 0.013 mm , 下表面为 0.002 mm 。

建立了几何模型之后, 首先需定义模型的材料属性。本模型材料为硅, 弹性模量 E 为 170 GPa , 泊松比为 0.28 , 密度 2330 kg/m^3 。设置零部件接触为全局接触并接合, 具体约束通过相接触面组来定义^[8]。开关活动部件的运动范围以开关上下表面与对应壳体内部表面为无穿透类型, 扭梁与壳体相接触, 定义其类型为接合。

其次进行网格划分。由于模型中两部分的尺寸悬殊较大, 直接自动生成网格容易产生大型不平衡能。本研究采用网格控制来划分^[9], 最终得到有限元模型如图 3 所示。



图 3 MEMS 加速度开关的有限元模型

3 冲击失效仿真分析

3.1 方案设计

失效仿真的目的是彻底暴露器件的薄弱环节, 确定器件的危险截面危险点, 同时明确导致器件彻底失效的载荷量级和条件, 为器件的可靠度分析提供依据^[10]。失效仿真方案的设计则旨在用最少的资源快速确定失效载荷量级, 并尽量细化量级, 减小误差^[11]。

本文引用数学中二分法的原理, 进行仿真方案设计。即逐步增加载荷量级, 以开关未失效的量级为左区间 a , 对应应力小于许用应力, 以开关失效的量级为右区间 b , 其对应应力大于许用应力, 确定最初的失效区间 $[a, b]$ 。然后将区间一分为二, 取中间值判断开关是否失效, 逐步缩小失效区间, 以此类推, 最终确定满意的失效量级。

具体而言, MEMS 加速度开关的失效仿真采用跌落方案, 设置开关以 x, y, z , 这 3 个方向, 分别向钢板目标自由跌落。

3.2 仿真结果

MEMS 加速度开关的许用应力为 2.4 GPa, 初始跌落高度为 2 m, 仿真时逐步提高跌落高度, 增加载荷量级, 直至开关失效。在开关失效的量级区间内取中间量级, 再次仿真, 进一步细化确定得到导致开关失效的跌落冲击载荷临界值。

考虑保留一定的余量, 3 个方向的仿真结果如表 (1~3) 所示。

表 1 x 方向跌落仿真结果

高度/m	应力最大值/MPa
2	1 828.8
3	2 070.5
4	2 599.9
3.5	2 255.7

表 2 y 方向跌落仿真结果

高度/m	应力最大值/MPa
2	232.9
5	1 175.6
10	2 423.5
7.5	2 074.6
8.75	2 285.2
9.375	2 368.4

表 3 z 方向跌落仿真结果

高度/m	应力最大值/MPa
2	817.0
5	1 135.5
7	2 087.4
9	4 273.1
8	2 699.3
7.5	2 606.4
7.25	2 460.9
7.125	2 399.6

仿真结果表明: x 方向跌落失效的最大量级为 3.5 m; y 方向跌落失效的最大量级为 9.375 m; z 方向跌落失效的最大量级为 7.125 m。

3.3 失效分析

通过对 MEMS 加速度开关在冲击载荷作用下的失效仿真, 可以发现其主要失效模式是断裂失效和微粒污染, 导致开关不能动作或提前作用。

x 方向冲击的断裂失效开始于开关质量块的横梁两端, 大应力主要分布在多质量块横梁以及与悬臂梁连接部位, 其应力云图如图 4 所示。

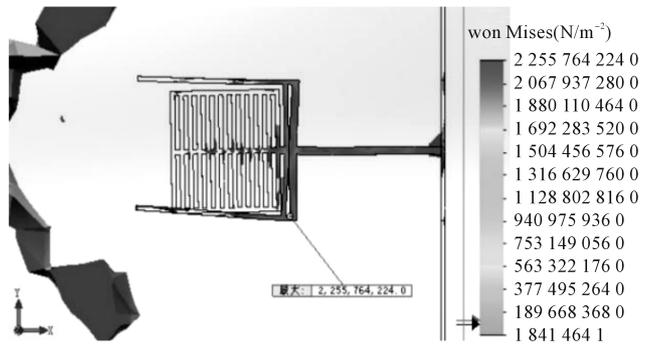


图 4 x 方向跌落失效应力云图

由图 4 可见, 开关的变形严重, 质量块横梁相互接触, 长叉与质量块相互接触, 接触挤压会导致长叉与固定电极提前接触, 开关提前作用, 危害极大。

y 方向跌落的高应力值主要集中在悬臂梁上以及悬臂梁两端连接处, y 方向跌落失效应力云图如图 5 所示。

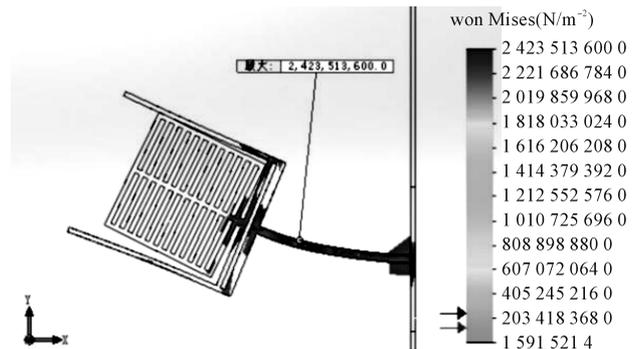


图 5 y 方向跌落失效应力云图

由图 5 可见, 在极限冲击量级作用下, 悬臂梁的变形严重, 有折断的风险。质量块与长叉也会发生碰撞, 引起开关提前作用。

z 方向的跌落失效应力云图如图 6 所示。

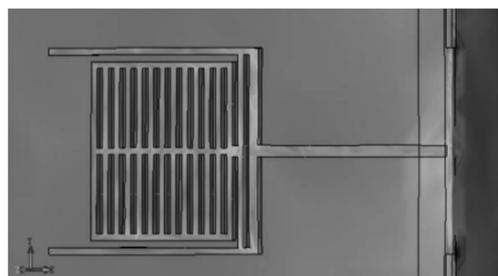


图 6 z 方向跌落失效应力云图

由图 6 可见, 质量块部分应力较分散, 扭梁整体都承受较大的应力, 在端部有应力集中, 硅材料会被压碎, 会产生微粒污染。压碎颗粒可能限制活动部件的运动, 也可能使固定电极与活动电极导通, 使开关提前作用。

4 实验验证

MEMS 加速度开关由绝缘体上硅(SOI)材料制作而

成,主要由顶层硅、绝缘层、底层硅 3 层构成,即在衬底上具有一层绝缘层,在绝缘层的上下两层分别为顶层硅和底层硅。传统的绝缘层为 SiO₂^[12]。开关表面镀有 2 000 Å 的金层,玻璃封装表面也镀有金层,扭梁一端连接导线并引向固定电极^[13-14]。对 MEMS 加速度开关机械冲击极限应力强度的考核采用马歇特标准锤击机来完成。

实验中采用步进应力机械冲击方式进行,马歇特锤的齿数从 9 齿开始,每次增加 3 齿,逐步增加,若结构发生断裂脱落,返回上一齿进行试验。对每一齿数沿工作方向(z 方向)冲击 2 次,每一次冲击结束后,在无机冲击条件下快速检测,记录失效样本个数,然后继续试验,当有一半以上的受试样品达到破坏极限时,或步进试验应力达到设备极限,则终止试验。

实验结果如表 4 所示。

表 4 机械冲击试验结果

冲击量级	对应加速度值/g	结果
9 齿	7 400	正常
12 齿	13 000	正常
15 齿	18 300	正常
18 齿	22 300	微结构断裂脱落;表面出现明显裂纹
17 齿	20 400	正常

由机械冲击强化实验可知:当马歇特冲击锤的齿数为 18 齿,对应的锤击加速度为 22 300 g 时,样本达到破坏极限;微梁断裂位置和应力水平与仿真结果基本一致,验证了仿真方法的可行性。

5 结束语

本研究采用有限元分析方法,对 MEMS 加速度开关在冲击载荷作用下的应力变化进行了失效仿真分析,确定了断裂失效和微粒污染是开关的主要失效模式;分析了在跌落冲击载荷作用下 x, y, z 各方向上发生失效的具体位置和最大量级,得到了在 x 方向上的最大量级为 3.5 m,发生断裂失效,主要分布在质量块横梁以及与悬臂梁连接部位;y 方向上的最大量级为 9.375 m,发生断裂失效,主要集中在悬臂梁上以及悬臂梁两端连接处;z 方向上的最大量级为 7.125 m,发生微粒污染,主要位于扭梁端部,由于硅材料被压碎引起的。

笔者采用马歇特锤击实验平台进行了步进应力机械冲击试验,得到了 MEMS 加速度开关发生断裂失效的极限冲击量级为 22 300 g。

通过对加速度开关的失效分析及试验验证,可以为 MEMS 器件采取有效的预防措施和改进结构的可靠性提供方法,有利于进一步提升 MEMS 器件的可靠度。

参考文献 (References):

- [1] 陈天佐,张琦,任德洁. 关于 MEMS 器件失效机理的讨论[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2018,36(1):39-42.
- [2] 雷昕,谢劲松. MEMS 惯性传感器可靠性试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009(6):13-18.
- [3] 郭永献,梁丽萍,张大兴. 微机电系统开关可靠性及失效分析[J]. 金属热处理,2007(z1):405-408.
- [4] 许建军,孔学东,李斌,等. MEMS 及微机械加速度计可靠性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2006(5):64-67.
- [5] 朱应敏. MEMS 开关关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学机电工程学院,2013.
- [6] 潘晓琳,张亚,李波. MEMS 开关悬臂梁建模及有限元分析[J]. 机械,2013,40(11):57-59.
- [7] 陈俊光,谷专元,何春华,等. MEMS 惯性器件的主要失效模式和失效机理研究[J]. 传感器与微系统,2017,36(3):1-5,13.
- [8] HE Chun-hua, ZHAO Qian-cheng, HUANG Qin-wen, et al. A novel robust design method for the sense mode of a MEMS vibratory gyroscope based on fuzzy reliability and Taguchide-sign[J]. Science China (Technological Sciences), 2017, 60(2):317-324.
- [9] 吕劲楠,唐洁影. MEMS 微悬臂梁在冲击环境下的可靠性[J]. 功能材料与器件学报,2008(1):103-106.
- [10] FANG Xu-wen, HUANG Qing-an, TANG Jie-ying. Modeling of MEMS reliability in shock environments[C]. International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology, Beijing:IEEE,2004.
- [11] 陈鹏霏,刘海芳,贺宇新. 基于虚拟可靠性试验的多体机械系统分析方法[J]. 石油机械,2014,42(5):20-24.
- [12] 杨江涛,马喜宏,郭琦. 微加速度计在冲击环境下的力学分析与仿真[J]. 压电与声光,2015,37(2):311-315,319.
- [13] 王占勇,王晓刚,郭刚. 飞机离心传感器测试装置的设计与实验[J]. 液压气动与密封,2017(3):49-53.
- [14] 李丹丹,梁庭,李赛男,等. 基于 MEMS 工艺的 SOI 高温压力传感器设计[J]. 传感技术学报,2015,28(9):1315-1320.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

丁丽梅,李世中,段荣杰,等. MEMS 加速度开关的冲击失效仿真分析与试验[J]. 机电工程,2019,36(2):197-200.

DING Li-mei, LI Shi-zhong, DUAN Rong-jie, et al. Impact failure simulation analysis and experiment of MEMS acceleration switches[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(2):197-200.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>