

文章编号 1004-924X(2007)02-0199-07

# 铰链式高冲击微加速度传感器封装的有限元模拟

车录锋<sup>1</sup>, 卢云<sup>1,2</sup>, 徐志农<sup>2</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050; 2. 浙江大学机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**给出了一种新型铰链式高冲击微加速度传感器实际封装结构的有限元模拟分析。首先分析了封装前铰链式加速度传感器的振型, 然后分析了封装结构在无灌封和五种不同灌封材料下的前十阶模态频率特性。灌封胶弹性模量对封装后加速度传感器整体结构的振动模态有一定的影响, 封装结构同一振型的模态频率随着灌封胶弹性模量的增大而增大, 但是灌封胶弹性模量很小时( $E \leq 1$  GPa)会导致加速度传感器信号失真。模拟结果表明, 可以选择弹性模量足够高的材料( $E > 9$  GPa)作为高冲击加速度传感器的灌封材料。

**关键词:**微加速度传感器; 封装; 有限元模拟

**中图分类号:** TP212.17 **文献标识码:** A

## Finite element simulation on packaging of hinged high-g micromachined accelerometer

CHE Lu-feng<sup>1</sup>, LU Yun<sup>1,2</sup>, XU Zhi-nong<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*; 2. *College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

**Abstract:** A novel packaged hinged high-g micromachined accelerometer was studied by finite element simulations. The mode shape of high-g accelerometer without packaging were analyzed, and then the first ten natural frequency characteristics of packaging structure without and with different potting materials were discussed. Experimental results conclude that the elastic modulus of potting material has a significant influence on the mode shape of the accelerometer packaged. The mode frequency of the packaging structure increases with the elastic modulus of potting material, but the small elastic modulus ( $E \leq 1$  GPa) will bring a strong distortion of the accelerometer output. The simulation results also show that the potting material with enough large elastic modulus ( $E > 9$  GPa) should be optimal selection for high-g accelerometer.

**Key words:** high-g micromachined accelerometer; packaging; finite element simulation

## 1 引言

加速度传感器是一种重要的力学量传感器,是最早受到关注的微机械惯性传感器之一,普通量程的 MEMS 加速度传感器广泛应用在一般场合<sup>[1-3]</sup>,而高量程 MEMS 加速度传感器可以用于爆炸、撞击、冲击等使用环境比较苛刻的场合,所测量的加速度通常在几万 g 到几十万 g 之间,持续时间为毫秒量级。封装质量的好坏,在一定程度上决定了器件性能的高低,因此必须研究封装对高冲击下传感器性能的影响。Tanner<sup>[4]</sup>等人曾对封装好的 MEMS 加速度传感器在冲击环境下的可靠性进行了研究;而 Davies<sup>[5]</sup>等人提出了高 g 值加速度传感器封装设计上的几个原则;黄卫东<sup>[6,7]</sup>等人则对一种悬臂梁式高量程加速度传感器的封装简化模型进行了模态分析,认为封装材料的弹性模量对封装结构的模态有重要影响。本文对一种新型铰链式高冲击加速度传感器实际的封装结构进行了模态分析,主要研究了灌封胶对加速度传感器封装结构模态的影响,为高 g 值加速度传感器的封装提供了设计依据。

## 2 有限元模拟

本文所模拟的是一种新型铰链式双梁岛结构的微机械加速度传感器,采用硅硅键合的方法,在敏感结构上增加一铰链,可大大提高敏感结构的固有频率,从而在更宽的频带内真实地反映冲击过程的加速度波形;应力基本集中在敏感梁上,通过调节敏感梁的结构参数,可使器件在提高固有频率的同时仍保持一定的灵敏度。铰链式加速度传感器的结构如图 1 所示。

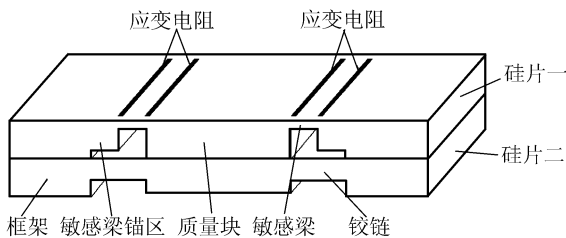


图 1 加速度传感器的器件结构图

Fig. 1 Structure diagram of accelerometer

传感器封装管壳及其盖板材料为高致密氧化铝陶瓷,加速度计芯片与硅保护盖板粘结在一起后,使用一种环氧型胶粘剂将芯片粘接到管壳底部,随后将管壳灌封起来,其封装结构如图 2 所示。该结构是对实际封装结构的一种简化,忽略了硅芯片上的键合玻璃以及环氧胶的影响。有限元模型所用的各部件材料的参数如表 1 所示。

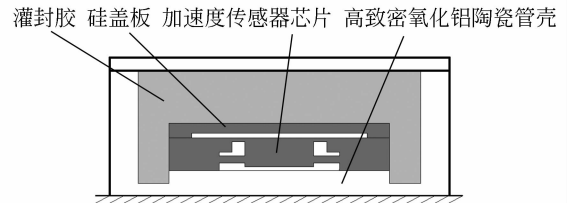


图 2 封装结构示意图

Fig. 2 Packaging structure for accelerometer

表 1 有限元模型所用部件的材料参数

Tab. 1 Material parameters used in finite element model

	$E/\text{GPa}$	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比 $\nu$
Ceramic	296	3 970	0.28
Silicon	170	2 330	0.28
adhesive1	0.1	1 800	0.3
adhesive2	1	1 800	0.3
adhesive3	9	1 800	0.3
adhesive4	16	1 800	0.3
adhesive5	296	1 800	0.3

有限元模拟中选用了五种不同弹性模量  $E$  值的灌封胶:软性灌封材料 adhesive1 的弹性模量为 0.1 GPa,其力学性能接近于橡胶;adhesive2 和 adhesive3 的弹性模量分别为 1 GPa 和 9 GPa,对应于集成电路使用的两种塑料( $\text{SiO}_2$  粉末低充填和高充填的环氧树脂);adhesive4 的弹性模量为 16 GPa,对应于通常使用的环氧树脂基 FR4 印刷电路板;而 adhesive5 的弹性模量为 296 GPa,这是高致密氧化铝陶瓷的弹性模量,是虚拟的,模拟灌封胶的弹性模量与封装基体弹性模量相同时的情形。

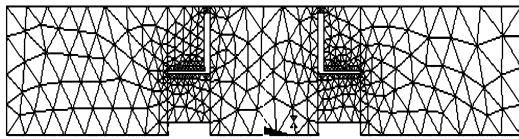
采用商用 ANSYS 有限元分析软件进行模态分析。首先建立加速度传感器封装结构的几何模型,然后用 10 节点四面体实体结构单元 SOLID92 进行网格划分,得到有限元模型。进行模态分析<sup>[8]</sup>时,模型不加载加速度载荷。所采用的模态提取方法为 ANSYS 软件默认的 Block Lanc-

zos 方法,这种方法具有很高的精度。

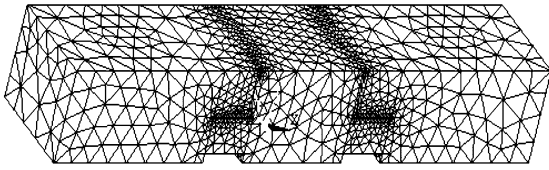
### 3 模拟结果分析

#### 3.1 封装前铰链式加速度传感器芯片的振型分析

图 3 为传感器芯片的有限元模型,通过约束芯片底面不动,对芯片进行模态分析。采用的模态提取方法为 Subspace 法,Subspace 法使用子空间迭代技术,其内部使用广义 Jacobi 算法;由于该方法采用完整的 K 和 M 矩阵,因此具有很高的精度。有限元模拟分析得出封装前加速度传感器芯片的前十阶模态频率如表 2 所示,相对应的前十阶振型图如图 4 所示。



(a) 芯片截面图(XZ 截面)  
(a) Die cross-section (XZ)



(b) 三维立体图  
(b) 3-D structure

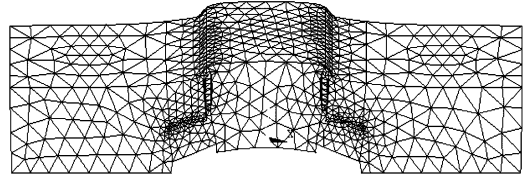
图 3 传感器芯片的有限元模型及其网格划分  
Fig. 3 Finite element model and mesh for accelerometer

表 2 封装前加速度传感器芯片的前十阶模态频率  
Tab. 2 The first ten natural frequencies of accelerometer without packaging

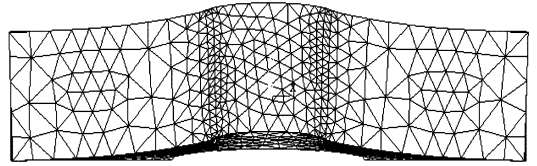
Mode	Frequency(kHz)	Mode	Frequency(kHz)
1	621	6	1 280.3
2	634.85	7	1 374.7
3	812.4	8	1 440.3
4	1 066.7	9	1 461.3
5	1 120.8	10	1 576.6

芯片的第 1 阶模态为振动质量块在敏感方向(Z 方向)的摆动,模态频率仅为 621 kHz,此频率

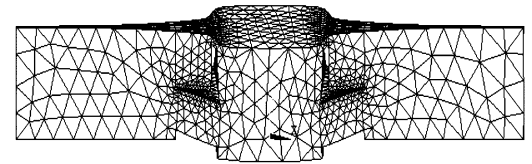
定为加速度传感器芯片的振动基频。第 2 阶模态为振动质量块在平行于芯片底面(Y 方向)的摆动。第 3、6 阶模态为振动质量块绕 X 轴方向的扭转。第 4、8 阶模态为振动质量块绕 Z 轴方向的



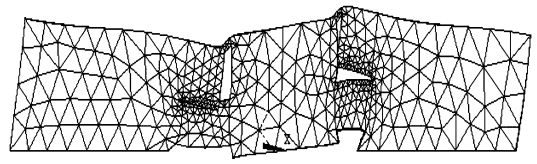
Mode 1 垂直于芯片底面(Z 方向)



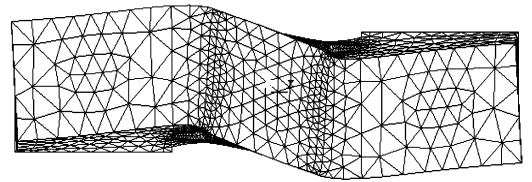
Mode 2 平行于芯片底面(Y 方向)



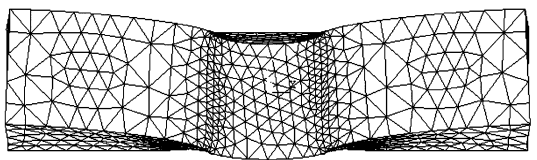
Mode 3



Mode 4



Mode 5



Mode 6

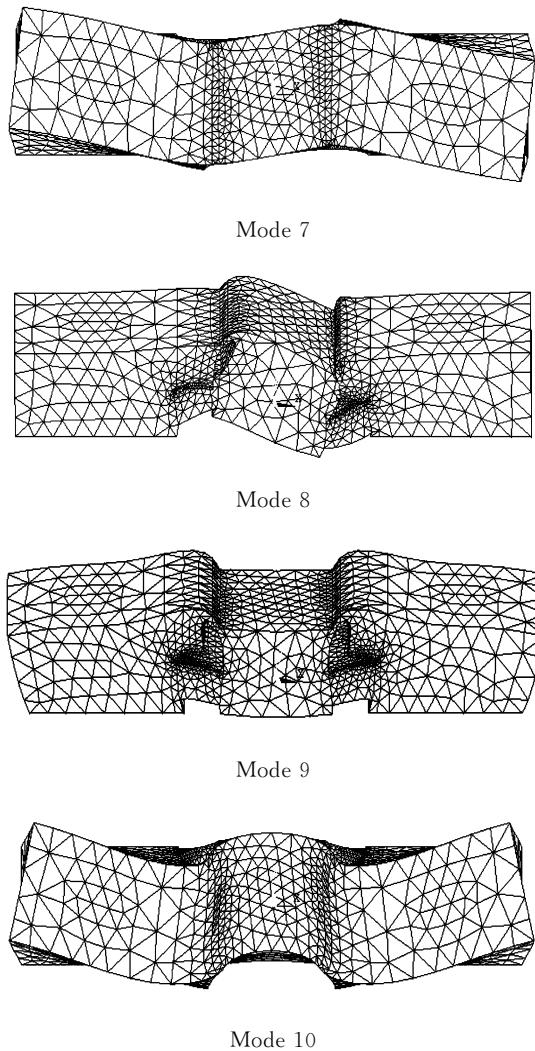


图 4 芯片的前十阶振型(固定芯片底面)

Fig. 4 The first ten natural mode shapes of accelerometer without packaging

扭转。第 5、7 阶模态为振动质量块绕  $Z$  轴方向的扭转。

### 3.2 封装结构的模态分析

#### 3.2.1 封装结构的振型分析

封装器件在冲击环境中使用时,除了主要感受到  $Z$  轴方向的应力波之外,还可能感受到  $Y$  轴和  $X$  轴方向的应力波作用。因此,所感兴趣的主要是如下三个振型:封装结构在  $Z$  方向(即加速度的加载方向)、 $Y$  方向(管壳宽度方向)、 $X$  方向(管壳长度方向)的振动,分别称为 Mode  $Z$ 、Mode  $Y$ 、Mode  $X$ 。通常 Mode  $X$ 、Mode  $Y$  分别表现为管壳壁在  $X$ 、 $Y$  方向的摆动,Mode  $Z$  表现为管壳盖板在  $Z$  方向的凹凸变形。

封装结构在无灌封和五种不同灌封材料下的前十阶模态频率如表 3 所示,封装结构在无灌封时的振型如图 5 所示,灌封胶弹性模量为 9 GPa 时的封装结构的振型如图 6 所示。在封装结构的模态频率较高的情况下才有利于加速度传感器抵抗冲击载荷的作用;并且,为避免封装结构的共振对加速度传感器芯片振动的影响,封装结构的  $Z$  方向振型(Mode  $Z$ )的模态频率应该比加速度传感器芯片的基频高。在未灌封情况下,加载方向的振型  $Z$  的模态频率约为 318 kHz,仅为加速度计芯片基频的 1/2,远远不足<sup>[9]</sup>。无灌封模型与灌封模型( $E=9$  GPa)相比,前十阶的振型相似,只是振型的阶序不同;而且受封装结构共振影响,十阶模态均只是管壳的振动模态。因此,在对高量程微加速度传感器进行封装时,应当选用振动模态频率足够高的管壳。

表 3 封装模型在灌封前后的前十阶模态频率

Tab. 3 The first ten natural frequencies of package structuring without and with potting materials

Mode	Frequency(kHz)					
	灌封前	Seal	Seal	Seal	Seal	Seal
		adhesive $E=0.1$ GPa	adhesive $E=1$ GPa	adhesive $E=9$ GPa	adhesive $E=16$ GPa	adhesive $E=296$ GPa
1	245.53 (Y)	60.6 (X)	182.03 (X)	241.74 (Y)	248.1 (Y)	298.05 (Y)
2	256.14 (X)	61.6	182.36 (Y)	251.94 (X)	257.62 (X)	301.88 (X)
3	269.08	63.1	187.1 (Z)	262.75 (Z)	298.39 (Z)	320.31
4	311.46	66.9	195.55	308.51	309.58	416.48
5	317.92 (Z)	69.4 (Y)	207.69	335.93	341.3	436.14
6	338.18	69.8	212.56	336.27	344.12	446.14
7	339.26	72.4	216.39	397.48	410.64	473.9
8	409.67	74.7 (Z)	219.73	400.81	425.02	496.51
9	415.81	75.9	224.16	415.05	429.81	517.73
10	420.16	77.4	237.52	434.73	452.46	539.71 (Z)

灌封对加速度传感器芯片的振动基频并无影响,但是,由于管壳的振型 Z 的模态频率较低,加速度传感器芯片基频在封装结构模态中出现的阶次较晚。当灌封胶弹性模量增大,加速度传感器基频出现的阶次随之提前。在不同灌封胶下,封装结构振型出现加速度计芯片基频的阶次分别为  $>30(E \leq 1 \text{ GPa})$ 、 $24(E = 9 \text{ GPa})$ 、 $21(E = 16 \text{ GPa})$ 、 $14(E = 296 \text{ GPa})$ 。

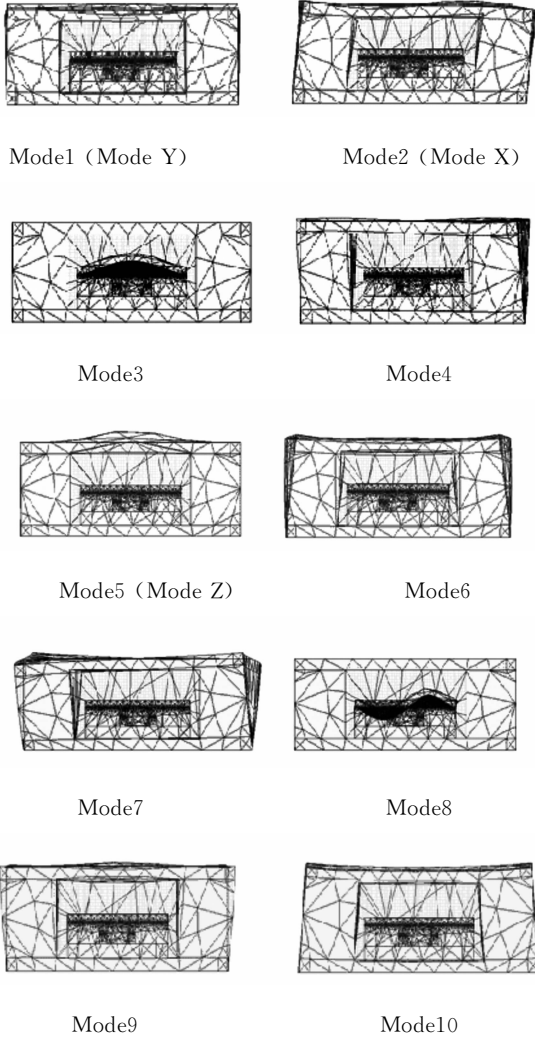


图 5 无灌封时封装模型的前十阶模态振型  
Fig. 5 The first ten mode shapes of packaging structure without potting material

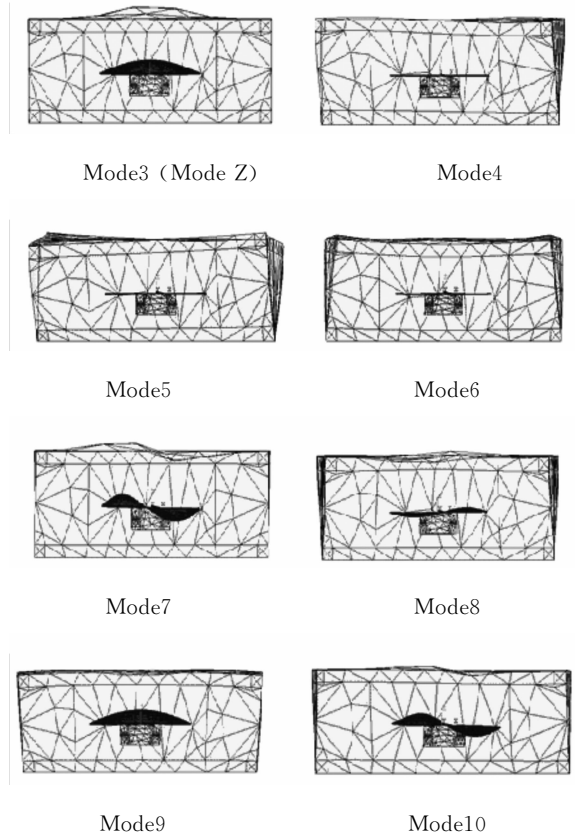
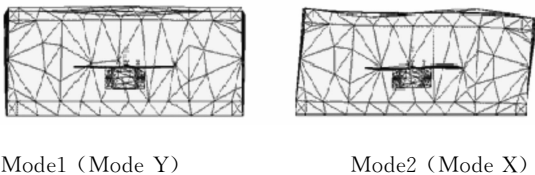


图 6 灌封时封装模型的前十阶模态振型  $E=9 \text{ GPa}$   
Fig. 6 The first ten mode shapes of packaging structure with potting material

### 3.2.2 灌封胶的影响

灌封胶的弹性模量( $E$ )对封装结构的共振频率的影响如图 7 所示。随着灌封胶弹性模量的增加,封装结构的刚度提高,封装结构同一振型的模态频率也提高。当灌封胶不够硬时,封装结构的模态频率可能比管壳的模态频率还低些。灌封胶的弹性模量越小,封装结构各阶振型之间的模态频率也越接近;这样,某一模态下的振动可能会同时引起其他模态的振动。因此,选择灌封胶时,不宜选用弹性模量太小(即太软)的灌封胶,以防加速度计输出信号的失真。

下面将从振型的角度来考察封装结构的振动特性。在所研究的振型中,封装结构在 Z 方向的振动(Mode Z)是最重要的,因为加速度传感器测量的是 Z 方向的加速度。图 8 分别显示了封装结构和管壳的 Mode Z 的 Z 方向节点位移( $U_z$ )。从图中可以观察到,当  $E \leq 1 \text{ GPa}$  时,灌封胶的最大振幅比管壳的最大振幅还要大。在这种情况下,灌封胶很软,对振动很敏感,封装结构在明显

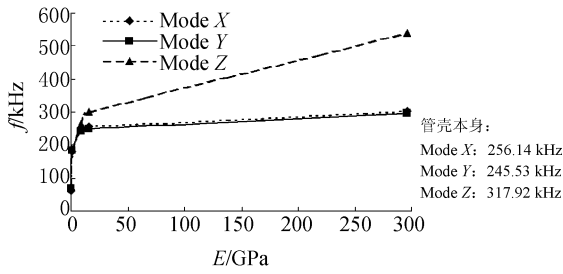


图 7 灌封胶弹性模量对模态频率的影响

Fig. 7 Effect of elastic modulus of potting material on mode frequency

低于管壳共振频率的情况下发生共振,表现为灌封胶的振动。

封装结构振型 Z 的模态频率随管壳盖板厚度和灌封胶弹性模量的变化如表 4 所示。与图 7 相对应,模态频率随着灌封胶弹性模量的提高而增大。当管壳盖板厚度较薄时(如厚度为 0.5 mm),振型 Z 的模态频率比振型 X 和振型 Y 的模态频率的增长速率快;且振型 Z 的模态频率随灌封胶 E 的增长比盖板较厚时的增长快。增加管壳盖板的厚度,Mode Z 的模态频率更趋近于管壳的模态频率(增长较缓)。这表明,当灌封胶 E 值较小时,Mode Z 的共振主要来源于灌封胶,而盖板则起到抑制灌封胶振动的作用;盖板越厚,抑制灌封胶振动的效果就越明显,振型 Z 的频率就越高。当灌封胶 E 值较大(如  $E \geq 9$  GPa),振型 Z 的共振主要来自盖板,灌封胶则起抑制盖板振动的作用;盖板越厚,灌封胶抑制盖板振动的效果越不明显,表现为灌封对振型 Z 的频率增加的贡献比盖板较薄时要小些。

由表 4 和图 7 可知,当  $E > 1$  GPa 时,封装结构模态频率的增长速率开始减慢,且模态频率与管壳的模态频率相接近。当  $E \geq 9$  GPa 时,模态频率一般比管壳自身的模态频率高,可以起到抵

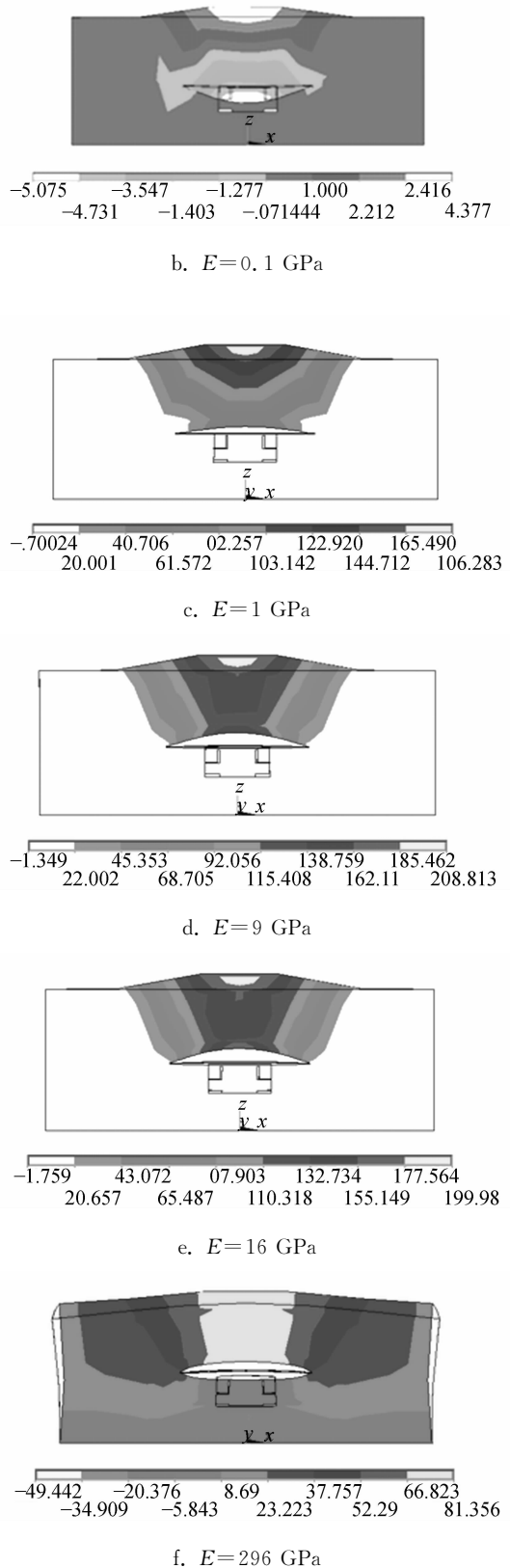
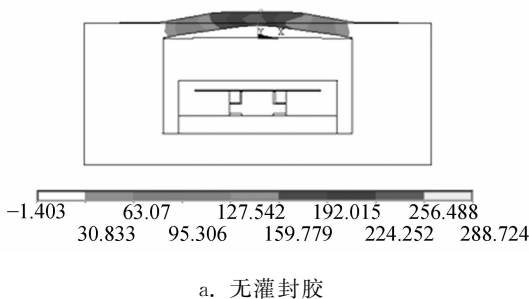


图 8 封装结构 Z 方向的节点位移 ( $U_z$ , Mode Z)

Fig. 8 Node displacement in z direction of packaging structure

抗管壳振动变形的作用。通常希望灌封后的模态频率高于灌封前的模态频率,以使封装结构更加

牢固,因此使用弹性模量 $>9$  GPa 的灌封胶来灌封高量程加速度计是适宜的。

表 4 振型 Z 的模态频率随管壳盖板厚度和灌封胶弹性模量的变化

Tab. 4 Natural frequency of mode shape Z versus thickness of shell and elastic modulus of potting material

盖板厚度	Frequency(kHz)					
	灌封前	Seal	Seal	Seal	Seal	Seal
		adhesive $E=100$ MPa	adhesive $E=1$ GPa	adhesive $E=9$ GPa	adhesive $E=16$ GPa	adhesive $E=296$ GPa
0.5	239	81.4	215.4	305.7	346.9	598
1	300	83.7	250	274.5	336.8	515.4
1.5	311	83.7	265.4	314.9	328.6	438.4

## 4 结 论

对加速度传感器的封装结构进行了有限元模拟分析,从模态角度分析了灌封对加速度传感器性能的影响。其中模态分析表明:在通常灌封胶弹性模量下( $E>1$  GPa),封装结构的模态频率主

要取决于管壳的模态频率;提高灌封胶的弹性模量,可提高封装结构同一振型的模态频率。在为高  $g$  值加速度传感器封装时,必须使用模态频率足够高的管壳来进行封装,同时,使用足够弹性模量( $E>9$  GPa)的灌封胶进行灌封,以使加速度传感器有足够的抵抗冲击载荷的能力。

## 参考文献:

- [1] 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,2003,10(5):425-431.  
LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 10(5):425-431. (in Chinese)
- [2] XUE W, WANG J, CUI T H. Highly sensitive micromachined tunneling sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 10(5):491-503.
- [3] 张燕君,陈才和,吴波,等. 硅微光机械加速度地震检波器中 M-Z 光波导干涉仪结构设计[J]. 光学精密工程, 2006, 13(1):77-82.  
ZHANG Y J, CHEN C H, WU B, *et al.*. Structure design of M-Z interferometer in electrooptic integrated acceleration seismic geophone[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 13(1):77-82. (in Chinese)
- [4] TANNER D M, WALRAVEN J A, HELGESEN K, *et al.*. MEMS reliability in shock environments[C]. *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2000, Piscataway: 129-138.
- [5] DAVIES B R, BARRON C C, MONTAGUE S, *et al.*. High  $g$  MEMS integrated accelerometer[J]. *SPIE*, 1997, 3046: 52-62.
- [6] 黄卫东,彩霞,徐步陆,等. 封装对 MEMS 高  $g$  值传感器性能的影响[J]. 功能材料与器件学报,2002,8(3):251-258.  
HUANG W D, CAI X, XU B L, *et al.*. Packaging effects on the performance of an accelerometer used in high- $g$  environments[J]. *J. Funct. Mater. Devic.*, 2002, 8(3):251-258. (in Chinese)
- [7] HUANG W D, CAI X, XU B L, *et al.*. Packaging effects on the performance of MEMS for high- $g$  accelerometer with double-cantilevers[J]. *Sensor Actuator A*, 2003, 102(3): 268-278.
- [8] 蒋玉齐,杜茂华,罗乐. 灌封对高量程微机械加速度计封装的影响[J]. 机械强度,2004,26(2):149-153.  
JIANG Y Q, DU M H, LUO L. Effect of potting on the packaging of high- $g$  MEMS accelerometer [J]. *J. Mech. Strength*, 2004, 26(2):149-153. (in Chinese)
- [9] WALTER P L. Trends in accelerometer design for military and aerospace application [J]. *Sensors Magazine*, 1999, 16(3):21-25.