

三轴高 g 压阻式微加速度计的设计

林 杰, 林立伟, 郭 航*

(厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院, 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 提出了一种三轴高 g 的压阻式微加速度计的设计方法. 通过理论推导和计算, 分析了模型的应力和频率, 得到了具有较高频率的高 g 微加速度计的结构参数. 通过有限元软件 ANSYS 分析确定了在获得高输出电压条件下的电阻布置方案. 在此基础上, 对三轴进行了 200 000 g 载荷下的性能研究, 结果表明所设计的微加速度计具有较高的灵敏度和线性度.

关键词: 三轴; 高 g ; 压阻; 微加速度计; 仿真

中图分类号: TP 212.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2014)04-0496-06

在过去的 20 年, 基于硅微加工技术的传感器已应用于各种传感测量, 如压力、应力和加速度^[1]. 其中, 压敏电阻微加速度计在车辆碰撞试验、安全控制和引信系统^[2]中发挥着越来越重要的作用. 而对微加速度计的性能要求也越来越高, 如冲击环境下的加速度要求达到 100 000 g 以上^[3], 弹药制导化中要检测从几 g 到上万 g 的加速度^[4], 因此需要研发高 g 且性能优良的微加速度计. 运用微机电系统技术制造的硅微加速度计具有灵敏度高、线性度好、谐振频率高等优点. 孟美玉等^[5]在理论上分析了三轴压阻式微加速度计的结构参数对应力、频率的影响, 但对于灵敏度和应力的关系尚未分析清楚, 也未进行有限元软件 ANSYS 的仿真分析; 石云波等^[6]设计了一种基于绝缘层上的硅(SOD)的三轴压阻式微加速度计, 但结构设计中未考虑梁的惯性力, 也未对器件的灵敏度和线性度进行详细的探讨. 针对高 g 压阻式加速度计固有频率低、输出信号有谐振的现象^[7], 设计具有较高固有频率的微加速度计, 使其能满足高 g 环境的要求具有重要的意义, 而压阻式微加速度计的理论分析和仿真分析中^[4,6], 大部分未对电阻的布置进行详细的探讨, 所以改变电阻的位置来提高加速度计的性能也具有很大的必要性.

1 结构设计

1.1 应力和频率的推导

如图 1(a)为三轴八梁压阻式微加速度计的一般结构, 外边框为固定端, 中间为质量块, 两部分通过悬臂梁连接. 当对称结构上受对称载荷作用时, 在对称截面上, 反对称内力即剪力等于 0, 但是弯矩不为 0. 微加速度计关于对角线对称, 则可以简化为一次静不定问题, 即一个仅有单根悬臂梁和 1/8 质量块的结构简化模型, 如图 1(b)所示. 因梁的变形引起的应力不能被忽略, 梁的惯性力应该考虑进去, 其力学简化模型如图 1(c)所示, 其中, P_1 和 P_2 分别是图 1(c)中梁和质量块的惯性力, F 和 M 是固定端的反力和弯矩, M_x 为截面上的弯矩. 而

$$P_1 = m_1 a, P_2 = \frac{1}{8} m_2 a, \quad (1)$$

其中, m_1 和 m_2 分别为单梁和整个质量块的质量, a 为加速度.

假设在 Z 方向加载加速度, 且质量块必须视为刚体, X 方向上梁和质量块的弯矩方程为:

$$M(x) = -EI_1 w'' = -M + Fx - \frac{P_1 x^2}{2l_1} \quad (0 \leq x \leq l_1), \quad (2)$$

$$M(x) = 0 \quad (l_1 \leq x \leq l_1 + l_2), \quad (3)$$

其中, l_1 是悬臂梁的长度, l_2 是质量块的半长, E 是弹性模量, I_1 是单梁关于 Z 轴的惯性矩.

收稿日期: 2013-09-06

基金项目: 航空基金(2008ZH68002); 教育部新世纪优秀人才支持计划(2007NCET-07-0723)

* 通信作者: hangguo@xmu.edu.cn

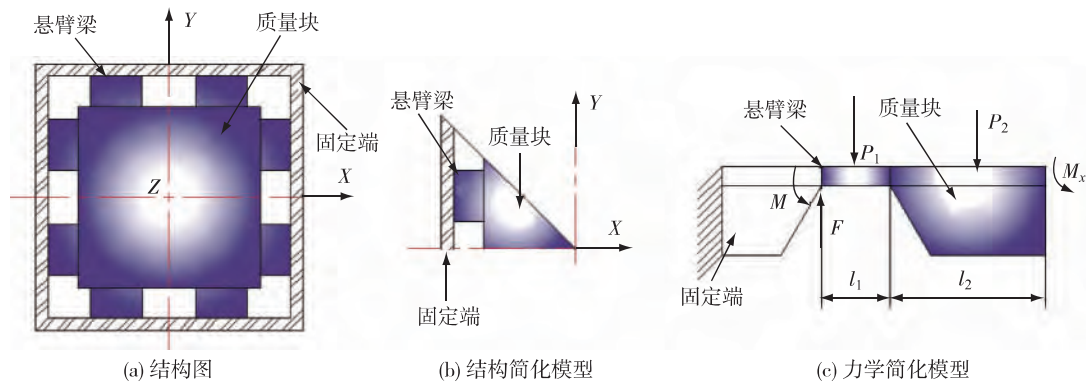


图 1 加速度计的结构图

Fig. 1 Structural diagram of accelerometer

通过力法正则方程,使用莫尔积分求对称截面上的弯矩 M_x , 可得:

$$M_x = \frac{P_1 l_1}{6} + \frac{P_2 l_1}{2}, \quad (4)$$

$$F = P_1 + P_2, \quad (5)$$

$$M = \frac{P_1 l_1}{3} + \frac{P_2 l_1}{2}, \quad (6)$$

代入式(2),则可化为:

$$-EI_1 w'' = -\frac{P_1 l_1}{3} - \frac{P_2 l_1}{2} + (P_1 + P_2)x - \frac{P_1 x^2}{2l_1}, \quad (7)$$

根据边界条件积分式(7)求弯曲挠度得:

$$-EI_1 w = -\left(\frac{P_1 l_1}{3} + \frac{P_2 l_1}{2}\right) \frac{x^2}{2} + (P_1 + P_2) \frac{x^3}{6} - \frac{P_1 x^4}{24l_1}, \quad (8)$$

梁截面上的弯曲正应力为:

$$\sigma(x) = \frac{M(x)y}{I_1} = M(x) \frac{h_1}{2I_1} = \left[-\frac{P_1 l_1}{3} - \frac{P_2 l_1}{2} + (P_1 + P_2)x - \frac{P_1 x^2}{2l_1}\right] \frac{h_1}{2I_1}, \quad (9)$$

则梁截面上的最大弯曲正应力应在 $x=0$ 处:

$$\sigma(0) = \frac{M(0)y}{I_1} = M(0) \frac{h_1}{2I_1} = \left(\frac{P_1 l_1}{3} + \frac{P_2 l_1}{2}\right) \frac{h_1}{2I_1}. \quad (10)$$

通过 Rayleigh-Ritz 法^[8],求得最低的固有频率:

$$f^2 = \frac{\int_0^{l_1+l_2} EI w''^2 dx}{\int_0^{l_1+l_2} \rho b h w^2 dx} =$$

$$\frac{\int_0^{l_1} EI_1 w_1''^2 dx}{\int_0^{l_1} \rho_1 b_1 h_1 w_1^2 dx + \int_{l_1}^{l_1+l_2} 0.5 \rho_2 b_2 h_2 w(l_1)^2 dx}, \quad (11)$$

其中, ρ_1 和 ρ_2 分别为梁和质量块的密度, b_1 和 b_2 分别为梁和质量块的宽, h_1 和 h_2 分别为梁和质量块的厚. 这里加速度 a 取 200 000 g , 将式(7)和式(8)代入式(11)即可求得一阶的固有频率.

根据微型化和加工工艺的要求,质量块的大小被限制为 2 200 $\mu\text{m} \times 2 200 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 梁的厚度限制为 100 μm , 因此 P_2 已确定. 根据式(10), 可得梁的宽度、长度和截面上的最大弯曲正应力之间的关系如图 2 所示; 同样, 根据式(11), 可得梁的宽度、长度和一阶固有频率之间的关系如图 3 所示.

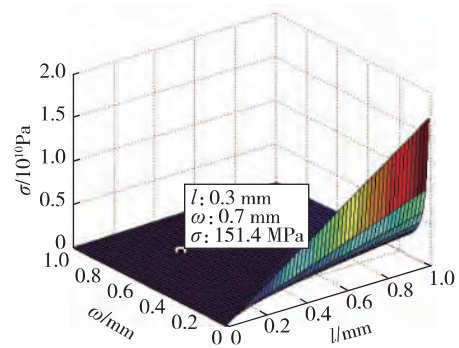


图 2 梁长度、宽度和最大弯曲正应力的关系
Fig. 2 Relationship between maximum bending stress and length or width of beam

从图 2~3 可以看到, 随着梁长度的增加, 最大应力逐渐增大, 固有频率迅速减少, 因此减小梁的长度可以显著增大固有频率, 同时减小最大应力. 随着梁的宽度的增加, 最大应力迅速减少, 固有频率逐渐增大, 所以增

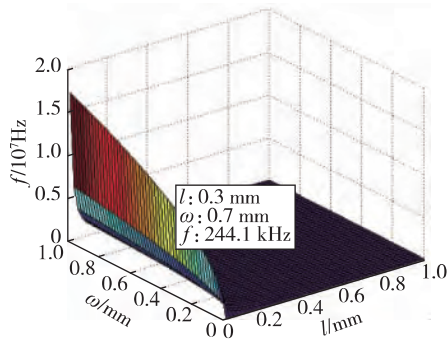


图3 梁长度、宽度和一阶固有频率的关系
Fig. 3 Relationship between first-order natural frequency and length or width of beam

大梁的宽度可以减小最大应力,同时提高固有频率.不过,减小最大应力的同时也会降低灵敏度的大小.

综合考虑最大应力、固有频率和灵敏度等因素后,确定微加速度计的参数如表1所示.把参数代入以上方程,求得最大弯曲正应力为151.4 MPa,一阶固有频率为244.1 kHz.

对于硅的微机械结构中的断裂应力有不少研究,因研究对象、手段与方法的不同,所得的值有所差异,大致为1.0~3.3 GPa^[9-10],远大于最大弯曲正应力151.4 MPa,满足强度条件,同时又有较高的一阶固有频率以承受高频信号冲击.

表1 结构参数

Tab. 1 Structure parameters

参数	l_1, b_1, h_1	l_2, b_2, h_2
大小(μm)	300,700,100	2 200,2 200,400

表2 模态频率

Tab. 2 Modal frequencies

阶数	1	2	3	4	5
$f(\text{kHz})$	227.07	745.95	899.80	1 571.0	1 742.4

1.2 应力和频率的仿真分析

利用 ANSYS 软件建立该微加速度计的三维有限元模型,硅材料的密度为2 330 kg/m³,杨氏模量为130 GPa,泊松比为0.278,整个微加速度计网格划分的单元类型为三维固体结构 Solid185.

在外边框施加全约束后,在 Z 轴上加载一个200 000 g的加速度,分析得 Mises 等效应力如图4所示,最大等效应力发生在梁和质量块的交界处,大小为261 MPa,也远小于硅的断裂应力,亦满足强度条

件.一阶模态如图5所示,其一阶固有频率为227 kHz,与理论结果244.1 kHz非常接近,验证了理论公式.而前5阶模态下的固有频率如表2所示,说明该高g微加速度计的高阶频率值也很大.

为了分析其他方向的应力情况,在 X 轴上加载一个200 000 g的加速度,得到的 Mises 等效应力最大为91.1 MPa,可知相同加速度负载下 X 轴方向的灵敏度会较小.

由于理论计算结果为截面上的弯曲正应力,仿真结果为 Mises 等效应力,故最大点不同.于是在梁与外边框的交界线进行路径仿真分析,求得分界线上的最大应力为165 MPa,与理论结果151.4 MPa也基本一致,亦验证了理论公式.以上结果也表明该微加速度计具有较好的力学性能.

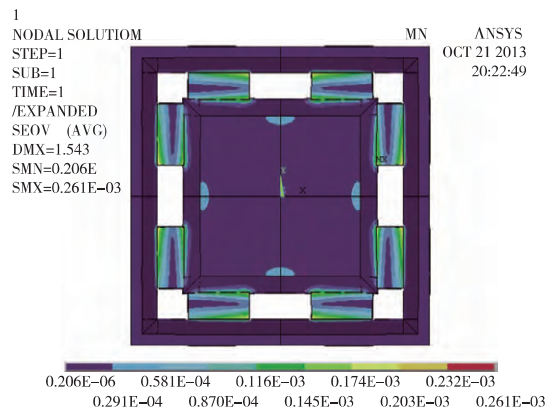


图4 Z轴加载时的等效应力
Fig. 4 The equivalent stress when loaded in Z



图5 一阶振动模态
Fig. 5 1st vibration mode shape

2 压敏电阻的布置

2.1 输出电压

压敏电阻在 $[011]$ 和 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 晶向上的电阻变化

率^[4]为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_{//} \sigma_{//} + \pi_{\perp} \sigma_{\perp} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_{//} - \sigma_{\perp}), \quad (12)$$

其中, $\pi_{//}$ 和 π_{\perp} 为纵向和横向压阻系数, $\sigma_{//}$ 和 σ_{\perp} 为纵向和横向应力, π_{44} 为 P 型硅的剪切压阻系数, 由掺杂浓度和温度决定, 根据工艺条件, 取 $138.1 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$.

如图 6 所示, 通过恒压源均输入电压 $U_i = 5 \text{ V}$, Z 轴全桥电路的输出电压为:

$$U_z = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} U_i, \quad (13)$$

X 轴的半桥电路输出电压(Y 轴与 X 轴类似)为:

$$U_x = \frac{(R_7 + R_8 + \Delta R_7 + \Delta R_8)R_4 - (R_5 + R_6 + \Delta R_5 + \Delta R_6)R_3}{(R_7 + R_8 + \Delta R_7 + \Delta R_8 + R_5 + R_6 + \Delta R_5 + \Delta R_6)(R_3 + R_4)} U_i. \quad (14)$$

微加工中使 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 如图 7 布置电阻, 则在 Z 轴上加载时 $\Delta R_1 = \Delta R_4$ 和 $\Delta R_2 = \Delta R_3$, 全桥电压为:

$$U_z = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{\Delta R_1 + \Delta R_2 + 2R} U_i. \quad (15)$$

将式(12)代入式(15)中, 而且 Z 轴电桥的 $\sigma_{1//}$ 和 $\sigma_{1\perp}$ 和 $\sigma_{2//}$ 和 $\sigma_{2\perp}$ 有:

$$U_z = \frac{\pi_{44}}{4} [(\sigma_{1//} - \sigma_{1\perp}) - (\sigma_{2//} - \sigma_{2\perp})] U_i = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_{1//} - \sigma_{1\perp}) U_i, \quad (16)$$

其中, $\sigma_{1//}$ 和 $\sigma_{1\perp}$ 为电阻 R_1 的纵向和横向应力, $\sigma_{2//}$ 和 $\sigma_{2\perp}$ 为电阻 R_2 的纵向和横向应力.

同理微加工中使 $R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = R_{13} = R_{14}$, $R_9 = R_{10} = R_{11} = R_{12} = R_{15} = R_{16}$, 其中 R_{13} 、 R_{14} 、 R_{15} 、 R_{16} 为定值电阻, 布置在任意适当的位置均可, 如图 7 在 X 轴上加载时 $\Delta R_5 = -\Delta R_7 = \Delta R$, 在 Y 轴上加载时 $\Delta R_9 = -\Delta R_{11} = \Delta R$, 则根据式(12)和式(14), X、Y 轴的半桥电压为:

$$U_x = \frac{\Delta R}{2R} U_i = \frac{\pi_{44}}{4} (\sigma_{5//} - \sigma_{5\perp}) U_i, \quad (17)$$

$$U_y = \frac{\Delta R}{2R} U_i = \frac{\pi_{44}}{4} (\sigma_{9//} - \sigma_{9\perp}) U_i, \quad (18)$$

其中, $\sigma_{5//}$ 和 $\sigma_{5\perp}$ 为电阻 R_5 的纵向和横向应力, $\sigma_{9//}$ 和 $\sigma_{9\perp}$ 为电阻 R_9 的纵向和横向应力. 由此也可以看出相同应力差负载情况下, 全桥电路的输出电压是半桥电路的 2 倍.

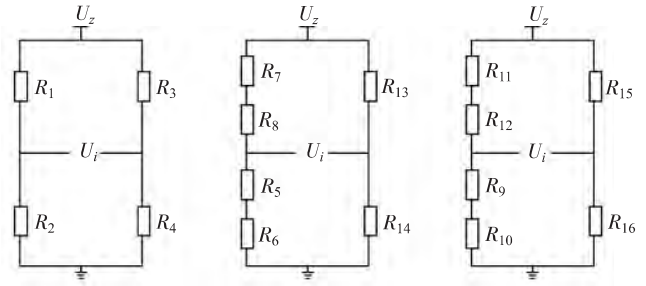


图 6 惠斯通电桥
Fig 6 Wheatstone bridge

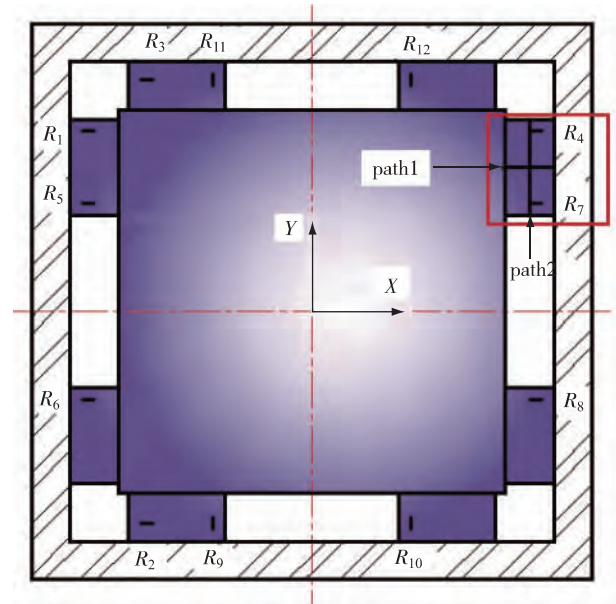


图 7 电阻的布置
Fig 7 Layout of varistors

2.2 电阻位置的仿真分析

根据如图 7 所示的布线图, 把 Z 轴的 4 个力敏电阻对称布置在 4 条边上的 $[011]$ 晶向, 且靠近梁端部; 把 X 轴的 4 个力敏电阻对称布置在 X 轴方向的 4 个梁上的 $[011]$ 晶向; 把 Y 轴的 4 个力敏电阻对称布置在 Y 轴方向的 4 个梁上的 $[01\bar{1}]$ 晶向.

从式(16)~(18)可知, 输出电压与横纵向应力差成正比, 因此通过 ANSYS 软件分析电阻的应力差即可求得输出电压. 由于 8 梁结构的对称性, 选择任意一个悬臂梁(图 7 中方框标出)研究其应力. 先选择水平方向的一个梁的中线作为路径 1 分析其应力, 如图 8 所示(原点为路径的最左端). 接着选择该梁的竖直方向作为路径 2 进行应力分析, 如图 9 所示(原点为路径的最下端). 图中 σ_x 、 σ_y 、 σ_{DETA} 分别为横向应力、纵向应力、应力差.

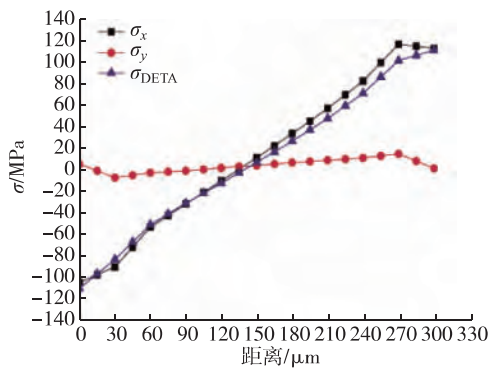


图 8 路径 1 的横纵向应力及其差值
Fig. 8 Stresses and difference along path1

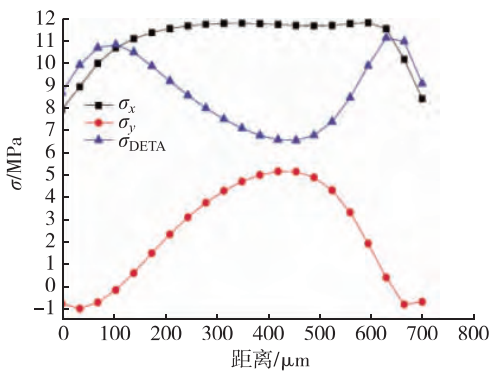


图 9 路径 2 的横纵向应力及其差值
Fig. 9 Stresses and difference along path2

为了保证输出的线性度,电阻必须布置在远离非线性的区域;同时,电阻应该靠近梁的末端以获得较大的表面应力差.从图 8 可以看出,梁中间区域的应力关系接近线性.所以电阻布置在距离右末端 60~120 μm 的区域.从图 9 可以看出,距离上下端 100 μm 处的应力差较大,所以选择该区域来布置电阻.

3 三轴的灵敏度和线性度

3.1 三轴的灵敏度

同图 4 通过 ANSYS 软件在 Z 轴加载 200 000 g 的加速度,求 R₄ 的横纵向应力及其差值,通过仿真和计算求得应力差的平均值为 46.68 MPa.而类似图 4,在 X 轴加载 200 000 g 的加速度,求 R₇ 处的横纵向应力及其差值,得应力差的平均值为 17.66 MPa.

将 Z 方向的差值代入式(16),求得输出电压为 161.16 mV,则 Z 方向的灵敏度为:

$$S_z = \frac{U_z}{a} = \frac{161.16 \text{ mV}}{200\,000 \text{ g}} = 0.81 \mu\text{V/g} \quad (19)$$

将 X 方向的差值代入式(17),求得输出电压为 30.48 mV,则 X 方向的灵敏度为:

$$S_x = \frac{U_x}{a} = \frac{30.48 \text{ mV}}{200\,000 \text{ g}} = 0.15 \mu\text{V/g} \quad (20)$$

Y 方向的灵敏度与 X 方向相同.

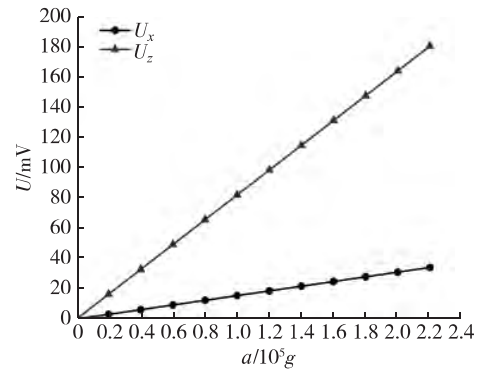


图 10 三轴加速度和输出电压的关系
Fig. 10 Relationship between output voltage and acceleration in three axis

3.2 三轴的线性度

将应力表达式(9)分别代入输出电压的表达式(16)和(17),可提出一个公因子加速度 a,故理论上输出电压与加速度成正比.通过仿真不同加速度的应力情况代入式(16)和(17),得到三轴的输出电压和 a 的关系如图 10 所示,由图可知输出电压在高 g 变化中保持线性.

4 结 论

通过理论推导和 ANSYS 分析设计了一种高 g 八梁压阻式微加速度计,在满足强度条件的情况下,通过应力和频率分析确定了梁的结构尺寸,接着分析得到了最适合布置电阻的位置,并仿真求解了三轴的灵敏度和线性度.本文提出了一种在明确的负载目标下和有限的空间中,分析设计性能优良的微加速度计的方法,所得结果对实际应用具有重要的指导意义.

参考文献:

[1] Robert B. MEMS sensors: past, present and future[J]. Sensor Review, 2007, 27(1): 7-13.
 [2] Najafi K, Chac J, Kulah H, et al. Micromachined silicon accelerometers and gyroscopes[C] // Intelligent Robots and Systems, 2003 IEEE/RSJ International Conference on. Las Vegas, USA; IEEE, 2003; 2353-2358.
 [3] 马喜宏,周鹏斌,李建军.高 g 值微加速度计在冲击环境

- 下的可靠性[J]. 测试技术学报, 2010, 24(5): 402-404.
- [4] 郭涛, 鲍爱达. 一种压阻式硅微复合量程加速度计[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 186-189.
- [5] 孟美玉, 刘俊, 石云波. 三轴压阻微加速度计的结构力学分析[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(3): 355-358.
- [6] 石云波, 孟美玉, 刘俊, 等. 基于 SOI 的三轴压阻微加速度计的设计[J]. 传感技术学报, 2008, 21(3): 454-456.
- [7] 李平, 石云波, 朱正强, 等. MEMS 高 g 加速度传感器固有频率的优化及验证[J]. 传感技术学报, 2010, 23(3): 388-392.
- [8] Xiong J J, Fan B, Guo H G, et al. Calculation, simulation, and testing for the natural frequency of a micro accelerometer [J]. Journal of Semiconductors, 2008, 29(9): 1715-1722.
- [9] 梅年松, 黄庆安. MEMS 薄膜断裂强度测试结构[J]. 微纳电子技术, 2002, 39(12): 32-35.
- [10] Wilson C J, Ormeggi A, Narbutovskih M. Fracture testing of silicon microcantilever beams[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(5): 2386-2393.

Design of a Triaxial High- g Piezoresistive Microaccelerometer

LIN Jie, LIN Li-wei, GUO Hang*

(Pen-Tung Sah Micro-Nano Science and Technology Institute, School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper presents a method of designing a tri-axial high- g piezo-resistive micro-accelerometer. First, the equivalent mechanics model of the micro-accelerometer is set up, and then the theoretical analysis of stress and frequency are conducted to obtain the structure parameters. Furthermore, FEM in ANSYS is used to determine the positions of piezo-resistors to gain a better output voltage signal. In the end, the performance of the micro-accelerometer is studied under 200 000 g loads in three axis, and results show that the presented micro-accelerometer is associated with high sensitivity and high linearity in the high- g environment.

Key words: triaxial; high- g ; piezoresistive; microaccelerometer; simulation