

Analysis on Shock Resistance of Micromachined Angular Rate Sensor Based on Convection Heat Transfer

ZHAO Ying¹, ZHU Rong^{1*}, YE Xiong-ying¹, YANG Yong-jun²

1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Dept. of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China;
2. Electronics Technology Group Corporation the 13th Research Institute, Shijiazhuang 050051, China

Abstract: Micromachined thermal gas angular rate sensor is kind of novel inertial device, which takes an advantage of high shock resistance due to use gas instead of conventionally used proof-mass as the key sensing element. The calculation of the static and transient strain and stress in supporting layer of heating wire and detection wires is performed, and the position with the largest stress is figured out by means of finite element software ANSYS. The results show that the largest stress point of support layer of heating wire is close to the clamped edges. The largest stress point of support layer of detection wire is close to the clamped edges and corners. When an acceleration loading is applied along z direction, the largest stress of support layer of heating wire is larger than that of support layer of detection wire. Experimental results show that our device can withstand the shock of 21 200 g_n , and the theoretic prediction of the shock resistance of the device can reach 200 000 g_n , all of which indicates the sensor has a good shock resistance.

Key words: micro-thermal convection; angular rate sensor; shock resistance; ANSYS

EEACC:7230;7320E

微热对流角速度传感器抗冲击性能分析

赵影¹, 朱荣^{1*}, 叶雄鹰¹, 杨拥军²

1. 清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;
2. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051

摘要: 微热对流角速度传感器是一种新型的惯性传感器件, 由于采用流体代替传统的固体质量块作为敏感载体, 因而具有极其独特的性能, 特别是高抗冲击性。采用 ANSYS 有限元分析软件, 对微热对流角速度传感器的加热丝支撑层和检测丝支撑层进行动静态变形和应力计算, 得出应力最大点, 微加热丝支撑层的应力最大点在固支位置附近, 检测丝支撑层的应力最大点在固支位置附近和内拐角处。在 z 方向有一定加速度载荷作用下, 加热丝支撑层的最大应力比检测丝支撑层的最大应力大, 更容易破坏。理论计算得到微热对流角速度传感器样品可抗冲击 200 000 g_n , 经过抗冲击实验验证, 微热对流角速度传感器样品在 21 200 g_n 的冲击下仍完好无损, 有极好的抗冲击性能。

关键词: 微热对流; 角速度传感器; 抗冲击性; ANSYS

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)04-0628-04

微惯性传感器体积小、成本低, 在某些应用领域中, 要经受冲击环境的考验。冲击大, 作用时间短, 加速度急剧变化, 引起传感器内部存在着很大的应力, 极易被破坏。本文研究的微热对流角速度传感器, 利用气体热对流原理检测角速度, 结构中设有如

质量块等可动部件, 具有极强的抗冲击性。

1 微热对流角速度传感器的工作原理

微热对流角速度传感器是由封闭的微腔体、单根微加热丝、位于其两侧相互对称的四根检测丝, 以

及与该检测丝相连的检测电路构成,微加热丝和检测丝悬在微腔体上面,如图 1 所示(检测电路未画出)。微加热丝和四根检测丝为铂金属材料,厚度很薄,均为纳米级,为增加结构强度,采用了应力低、机械强度高的氮化硅作为加热丝和检测丝的支撑,厚度为 2 μm。Z 轴为微热对流角速度传感器的输入轴,垂直于 Z 轴的平面为工作面。工作面中,加热丝沿 Y 轴方向布置,检测丝沿 X 轴方向分布。

微加热丝加热,使其周围的气体温度升高、密度减小,在重力加速度的作用下,腔体内的气体发生对流。当 Z 轴方向无角速度输入时,密封在腔体内的气体在温度梯度和重力作用下做规则流动^[1],如图 2(a)所示。此时位于工作面的气流沿 X 轴做相反运动,气流流速为 v_x ,气流运动示意图如图 2(b)所示。检测丝在加热丝两端对称分布,则检测到的温度相等。

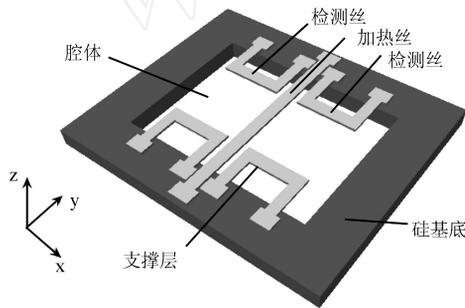


图 1 热对流角速度传感器

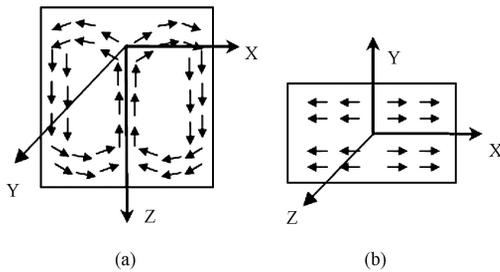


图 2 密封腔体内气流流动示意图

在工作面,当外界有角速度输入,由哥氏效应在 y 方向产生哥氏加速度,即

$$\vec{a}_y = 2 \vec{\omega}_z \times \vec{v}_x$$

其中, \vec{a}_y 为在 y 方向产生的哥氏加速度, \vec{v}_x 是工作面气流在 x 方向的流速, $\vec{\omega}_z$ 为 z 方向输入角速度。

位于工作面的气流沿 X 轴做相反运动,因此对称于 Y 轴两边的哥氏加速度大小相等,方向相反,气流偏转方向相反,带走相应的热量,引起不同的温度改变,热敏丝电阻的阻值也随之变化,如图 3 所示^[1]。

由图 3 可以看出,位于 Y 轴同侧、对称于 X 轴的 R_{w1} 与 R_{w2} 构成一对温度传感器,与两参考电阻构成一电阻电桥;位于 Y 另一同侧、对称于 X 轴的 R_{c1}

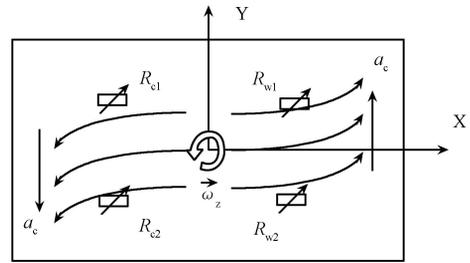


图 3 有角速度输入时气流运动方向示意图

与 R_{c2} 构成一对温度传感器,与两参考电阻构成另一电阻电桥。每个电阻电桥中的两热敏电阻之间、两参考电阻之间与一级差动放大器相连,两个一级差动放大器之间的输出电压差即为检测信号,其原理图如图 4 所示。

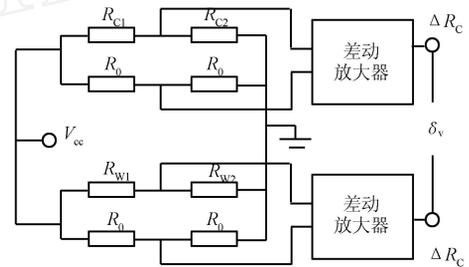


图 4 检测电路原理图

2 冲击应力的有限元分析

当微热对流角速度传感器受到冲击时,加速度载荷作用在封装外壳上,由外壳传到硅基底、微加热丝、检测丝等,在结构中形成应力。

假设微热对流角速度传感器结构采用加热丝支撑层长 1 300 μm,宽 110 μm;检测丝支撑层尺寸如图 5 所示,单位微米,厚度均为 2 μm;材料为氮化硅。

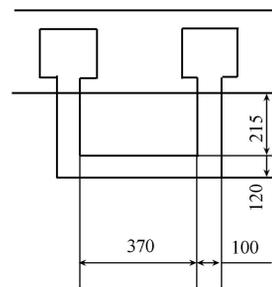


图 5 检测丝支撑层尺寸(单位:μm)

低应力氮化硅薄膜其杨氏模量为 (308.4 ± 24.1) GPa,弯曲强度为 (6.2 ± 1.3) GPa^[6]。

针对制作完成的微热对流角加速度传感器样品,用 ANSYS 有限元数值计算进行瞬态和静态三维分析,计算其受冲击作用时的动静应力分布,分别对微加热丝支撑层和检测丝支撑层进行数值计算分析,找出应力最大点及能承受的最大冲击载荷,为器

件结构优化,进一步改善其抗冲击性提供方法。瞬态冲击加载为幅值 200 000 g_n ($1 g_n = 9.8 m/s^2$),时间为 0.08 ms 的脉冲加速度,静态载荷为幅值

200 000 g_n 的加速度。从三维方向上加载冲击,图 6、图 7 是瞬态分析下微加热丝支撑层和检测丝支撑层在一个周期中最大应力分布云图。

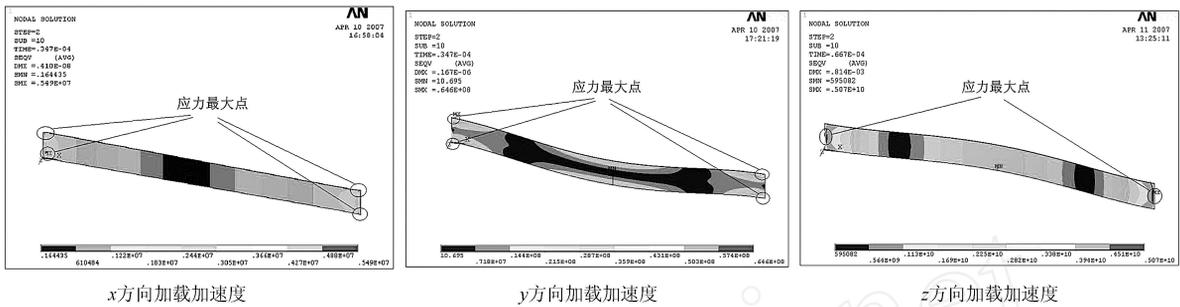


图 6 瞬态分析下加热丝支撑层应力云图

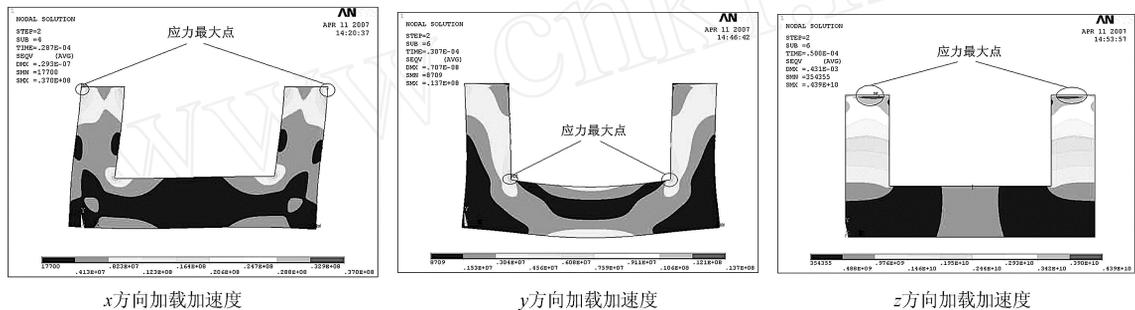


图 7 瞬态分析下检测丝支撑层应力云图

可以看出,微加热丝支撑层的应力最大点在两端固支位置附近,检测丝支撑层的应力最大点在固支位置附近和内拐角处。可在应力最大位置采取如加厚等设计,以增大传感器的抗冲击性。

瞬态分析下微加热丝支撑层和检测丝支撑层在一个周期内的应力最大值如表 1、表 2 所示,可见,在 x 方向上有加速度加载时,检测丝支撑层的最大应力比加热丝支撑层的最大应力大,更容易破坏;在 y 方向和 z 方向有加速度加载时,加热丝支撑层的最大应力比检测丝支撑层的最大应力大,更容易破坏。

表 1 瞬态分析下加热丝支撑层最大应力 (氮化硅弯曲强度 6.2 GPa)

加载加速度/ g_n			最大应力
X	Y	Z	/ GPa
200000	0	0	0.00549
0	200000	0	0.0646
0	0	200000	5.07

表 2 瞬态分析下检测丝支撑层最大应力 (氮化硅弯曲强度 6.2 GPa)

加载加速度/ g_n			最大应力
X	Y	Z	/ GPa
200000	0	0	0.037
0	200000	0	0.0137
0	0	200000	4.39

静态分析下微加热丝支撑层和检测丝支撑层应力最大值如表 3、表 4 所示。可见,静态分析与瞬态分析下微加热丝支撑层和检测丝支撑层的最大应力有相似的规律。在 x 方向上有加速度加载时,检测丝支撑层的最大应力比加热丝支撑层的最大应力大,更容易破坏;在 y 方向和 z 方向有加速度加载时,加热丝支撑层的最大应力比检测丝支撑层的最大应力大,更容易破坏。静态分析下的最大应力比瞬态分析下的最大应力都小。

表 3 静态分析下加热丝支撑层最大应力 (氮化硅弯曲强度 6.2 GPa)

加载加速度/ g_n			最大应力
X	Y	Z	/ GPa
200000	0	0	0.00543
0	200000	0	0.0598
0	0	200000	2.72

表 4 静态分析下检测丝支撑层最大应力 (氮化硅弯曲强度 6.2 GPa)

加载加速度/ g_n			最大应力
X	Y	Z	/ GPa
200000	0	0	0.0357
0	200000	0	0.0134
0	0	200000	2.32

可以看到在 x 、 y 、 z 各个方向上施加 200 000 g_n 的加速度时,加热丝和检测丝支撑层的最大应力为

5.07 GPa,小于氮化硅的弯曲强度 6.2 GPa,因此还未破坏。该传感器样机抗冲击过载理论上可达 200 000 g_n 。

对该样机在 SSH-1 型冲击台上进行了抗冲击试验,采用 21 200 g_n 的过载冲击,该微热对流角速度传感器冲击前后加热丝和检测丝电阻的变化在 0.5% 以内,传感器完好无损。

3 结论

1) 利用有限元分析法研究微热对流角速度传感器的冲击薄弱环节,并理论计算出传感器的理论抗冲击指标,对于传感器的结构优化具有指导意义。

2) 实验证明微热对流角速度传感器样机能够承

受 21 200 g_n 的冲击,理论抗冲击过载为 200 000 g_n ,具有极好的抗冲击性能。

参考文献:

- [1] Zhu Rong, et al. Sensors and Actuators[J]. 2006,130-131 (2006):68-74.
- [2] Leung A M, et al, Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems[C]//1998,627-630.
- [3] Zhu Rong, et al, The 13th International Conference on Solid State Sensors[C]//2005,114-116.
- [4] 刘梅, et al, 中国惯性技术学报[J]. 2007,15(1):77-80.
- [5] 方绪文, et al, 半导体学报[J]. 2005,26(2):379-384.
- [6] 宗登刚, et al, 功能材料与器件学报[J]. 2003,9(2):133-138.



赵影(1981-),女,清华大学精密仪器及机械学系硕士研究生,研究方向为微流体角速度传感器。



朱荣(1968-),女,清华大学精密仪器及机械学系副教授,研究方向为微机电传感器及系统,rong_zhu@263.net.