

文章编号: 0253-2239(2006)02-0202-5

振动式微机械陀螺动态特性光学测试*

康新¹ 董萼良² 裘安萍³ 何小元²

1 南京理工大学力学与工程科学系, 南京 210094
2 东南大学工程力学研究所, 南京 210096
3 东南大学仪器科学与工程系, 南京 210096

摘要: 针对振动式微机械陀螺的设计过程中对微振子动态特性的精确评价问题, 提出一种测量微振子动态特性的光学方法。该方法利用高速摄像机获取陀螺微振子在振动时的时间序列图像, 然后采用数字图像相关技术对序列图像进行相关计算, 以获得微振子在大气中振动的位移、速度和加速度曲线, 并由此计算微振子的固有频率和品质因数。该方法对位移的分辨力在亚微米量级, 具有较高的测量精度。对文中被测陀螺驱动模态的固有频率测量结果为 2061.67 Hz, 大气压下的品质因数测量结果为 66.67。提出的方法可为微陀螺动态特性的测量提供一种精确、有效的途径。

关键词: 光学测量; 微机械陀螺; 固有频率; 品质因数; 数字相关; 时间序列图像

中图分类号: TH113.1; TH824+.3 文献标识码: A

Optical Testing of Dynamic Characteristics of a Micro-Machined Vibratory Gyroscope

Kang Xin¹ Dong Eliang² Qiu Anping³ He Xiaoyuan²

1 Department of Applied Mechanics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094
2 Research Institute of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096
3 Department of Instrument Science and Technology, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract: To evaluate precisely the dynamic characteristics of the resonator of a micro-machined vibratory gyroscope during its design process, an optical method for measuring the dynamic characteristics of a micro-resonator is proposed. In the proposed method, a digital image correlation technique is used to calculate the correlation coefficients among the temporal series images of the micro-resonator captured using a high-speed video camera in order to acquire the displacement, velocity and accelerator curves of the micro-resonator in the atmosphere, and then the natural frequency and the quality factor of the micro-resonator is obtained accordingly. The proposed approach has a high precision since the vibrating displacement is measured at submicrometer resolution. The natural frequency and the quality factor in atmosphere for the driving mode of the tested gyroscope are measured as 2061.67 Hz and 66.67 respectively. The present method may provide an accurate and effective measurement tool for the evaluation of the dynamic characteristics of a micro-machined vibratory gyroscope.

Key words: optical measurement; micro-machined gyroscope; natural frequency; quality factor; digital correlation; temporal series image

1 引 言

近年来, 由于微加工技术的进步, 微惯性器件的研究得到快速发展。其中微电子机械系统陀螺(简称微机械陀螺, MEMSG)以其体积小、重量轻、功耗

低、可靠性高、成本低、抗震能力强以及可批量生产等传统惯性器件无法比拟的优点, 成为目前惯性传感领域的研究热点。它不仅可用于导弹、炮弹的惯性导航系统和姿态测量系统等军事领域, 同时还可

* 国家自然科学基金(10472026, 10572060)资助课题。

作者简介: 康新, 女, 河北石家庄人, 博士, 副教授, 主要从事微尺度光测方面的研究。E-mail: ckkang@sohu.com

收稿日期: 2005-04-19; 收到修改稿日期: 2005-07-04

用于卫星、飞机、汽车、机器人、玩具等民用领域,具有非常广阔的应用前景^[1]。

在微机械陀螺的设计过程中,作为陀螺关键部件的微振子的振动特性,如特征频率、品质因数、带宽以及陀螺振动的稳定性等的评价很重要。其中特征频率的精确分析最为关键,它关系到微陀螺工作模式的选取、驱动和检测频率的匹配等问题。不少人通过幅频特性曲线对微陀螺特征频率进行了研究^[2~5],这些方法中的关键技术是振动微位移的测量^[6~8]。文献[2]用激光反馈干涉方法测量了微陀螺在不同频率激励下的振动幅值,从而得到了陀螺的幅频特性曲线,并由此评估了微陀螺的谐振频率和品质因数。该方法测量装置简单,速度快,但不易得到固有频率和品质因数的精确值。文献[3]用差分电容信号调制及解调的方法,通过网络频谱分析获得陀螺的驱动模态和检测模态的谐振频率,其测量原理实质同文献[2],都是通过幅频特性曲线来分析固有频率。品质因数(Quality factor)也是一个很重要的参量^[9~11],它直接影响陀螺的灵敏度,应尽可能提高微振子品质因数。影响品质因数的因素很多,如空气阻尼、材料应力、支撑结构的功能损耗等,其中空气阻尼的影响最为显著,因此了解常压下空气阻尼对品质因数的影响是很有必要的。

本文着重于微陀螺的振动过程,采用高速摄像机,结合数字图像相关技术,提出一种测量振动式微机械陀螺动态特性的光学方法。该方法能获取微陀螺振动的位移、速度、加速度以及振动频率和品质因数等模态参量的精确值。文中给出了该方法的测量原理和对实际陀螺的测量结果。

2 振动式微机械陀螺基本工作原理

大部分微机械陀螺属于振动式陀螺(vibration gyroscope, VG),无旋转部件,因此体积可以做的很小。它的工作原理是利用元件的振动来敏感转动,即利用哥氏效应使陀螺的两个振动模态之间发生能量转换,从而检测输入角速度。图 1 是振动式微机械陀螺的简单模型,其中 P 为振子质量, K_x 、 K_y 分别为两个垂直振动方向的弹性系数, C_x 、 C_y 分别为两个振动模态的阻尼。当以某种驱动方式使质量块 P 产生沿 x 轴方向的受迫振动时,如果此时有沿 z 轴的角速度输入,则会产生沿 y 轴方向的交变哥氏力而使质量块沿 y 轴方向发生振动。因哥氏力大小与旋转坐标系的旋转速率成正比,因此, y 轴方向

振动的振幅与输入角速度 ω 的大小也成正比。所以,只要以某种检测方法检测到质量块沿 y 轴振动的振幅就可以知道输入角速度的大小。

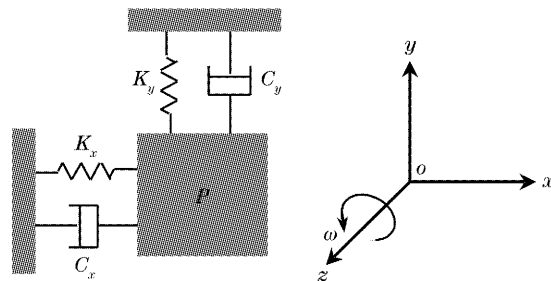


图 1 振动式微机械陀螺的简单模型

Fig. 1 The simple model of a micro-machined vibratory gyroscope

3 测量原理

微机械陀螺的振动频率很高,一般都在几千赫兹甚至上万赫兹,所以很难观察到陀螺的振动过程,因此其振动特性,如固有频率、稳定性以及品质因数等也就难以精确评价。本文利用高速摄像机获取陀螺振动时的时间序列数字图像,然后对其中每相邻两图像进行相关计算,得到每相邻两图像之间的位移差,该位移差比上采样周期即为振动速度。振动速度积分一次得到振动位移,微分一次得到振动加速度。这样就可以得到速度、位移和加速度的时间曲线。因为振动是简谐振动,所以对其中任一个时间历程曲线的分析都可以得到振动的频率,并且根据得到的振动信息可评价陀螺振动过程的稳定性。图 2 是其测量系统。被测硅微陀螺放在试样台上,连接正弦信号发生器。高速 C-MOS 摄像机连接远距显微镜头(LWDM)。摄像机采集的图像直接送到计算机进行处理。照明光源采用光纤以灵活改变

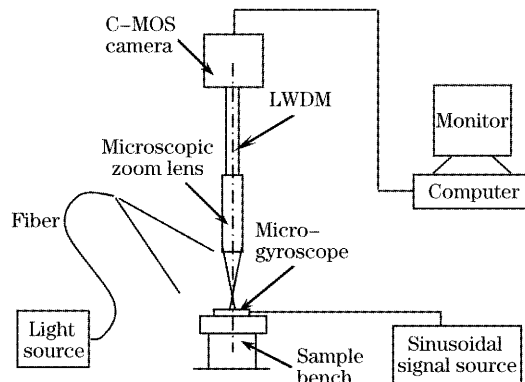


图 2 测量系统装置

Fig. 2 Experimental setup

照明方向。

因为陀螺在振动过程中变形甚微,因此可以认为陀螺的振动是刚体运动。对刚体运动,数字图像相关法是测量运动位移的一种精确有效的方法。该方法不同于激光干涉法,它对测量系统的防震性能要求较低。而且,如果测量系统的放大倍数足够高,则通过亚像素相关可以得到较高的位移测量精度。文中数字图像相关系数的计算采用

$$c = \frac{\sum [f(x,y) - \bar{f}][g(x,y) - \bar{g}]}{\left\{ \sum [f(x,y) - \bar{f}]^2 \sum [g(x,y) - \bar{g}]^2 \right\}^{1/2}}, \quad (1)$$

其中 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 是物体发生位移前后的数字灰度图, $\bar{f} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x,y)$ 是位移前模板子集的灰度平均值, $\bar{g} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g(x,y)$ 是位移后模板子集的灰度平均值, c 是相关系数;实验证明上式可以给出峰值很好的相关系数分布图,可通过搜寻相关系数 c 的峰值点来获得微振子的振动位移。

如果令微振子做自由衰减振动,则可以测得陀螺的固有频率(因为相对阻尼系数很小,因此衰减振动频率即为系统固有频率),并通过位移与时间曲线得到振幅衰减系数及相对阻尼系数,进而获得振子的品质因数。图 3 是自由振动衰减过程的示意图,衰减振动可以描述为

$$y = A \exp(-nt) \sin(\sqrt{\omega^2 - n^2}t + \alpha), \quad (2)$$

式中 A 为振幅, n 为衰减系数, ω 为固有频率, α 为初相位。图中 A_k 和 A_{k+1} 是两个相邻的振幅(k 取奇数),由(2)式可得衰减系数为

$$n = \frac{2}{(k-1)T_d} \ln \left(\frac{|A_1| + |A_2|}{|A_k| + |A_{k+1}|} \right), \quad (3)$$

($k = 3, 5, 7, \dots$)

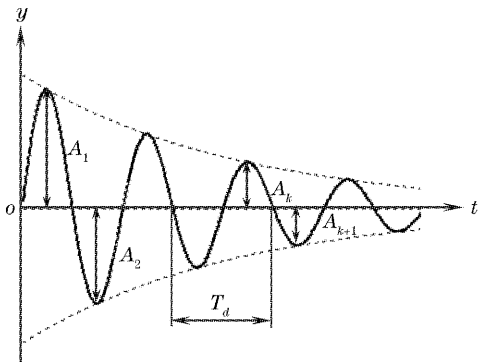


图 3 自由振动的衰减

Fig. 3 The amplitude attenuation of a free vibration

在小阻尼情况下, $\sqrt{1 - \xi^2} \approx 1$, 相对阻尼系数可近似为

$$\xi = T_d n / (2\pi). \quad (4)$$

4 测量及计算结果

绝大部分振动式微机械陀螺都是静电驱动、电容检测。静电驱动一般是通过梳状结构加载交变静电力,如图 4 所示。图中陀螺驱动模态的振子由十字框架构成,为减小阻尼,上面开有两排阻尼孔,阻尼孔尺寸是 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 。为了最大限度地提高分辨率,采集数字图像时只取振动梁部分,如图中上部的放大部分,采集的图像大小为 $512 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 。阻尼孔约为 $12 \text{ pixel} \times 12 \text{ pixel}$,因此,系统放大率约为 $3.3 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。高速摄像机采集频率为 32000 frame/s 。亚像素相关精度为 0.01 pixel ,所以位移分辨力为 $0.033 \mu\text{m}$ 。亚像素处的灰度值采用双线性插值。相关过程共取 9 个模板,如图中放大部分所示,最终相关结果取 9 个模板位移平均值。

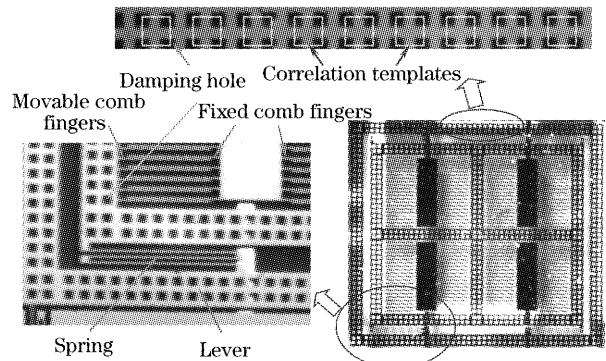


图 4 微陀螺振子的俯视图

Fig. 4 The planform of the micro-gyroscope resonator

4.1 振动稳定性

振幅的稳定与否是陀螺的一个重要性能指标,它直接影响检测信号的稳定性。图 5 是测得的陀螺微振子受迫振动(激振频率 2065 Hz)时的速度、位移和加速度随时间的变化曲线,其中图 5(b)曲线中各点的位移值是相对于第一个点的值,是离散速度值的积分。各图中离散点是测量值,光滑曲线是三次样条插值结果。其中图 5(a)曲线分别与图 5(b)、图 5(c)曲线相差 $\pi/2$ 相位,图 5(b)曲线与图 5(c)曲线是反相。由这些振动曲线可评价陀螺振动的稳定性,通过计算,振动位移总幅度(上峰值点到下峰值点)的平均值为 $14.3041 \mu\text{m}$ 。振动位移总幅度偏差(和位移总幅度平均值之差)的最大值为 $0.0299 \mu\text{m}$,相对误差为 0.21% 。由此可判定陀螺

的振动幅值还是比较稳定性。另外有必要指出,虽然对于高频振动采样点比较多,但由于在本文算法中速度是通过每相邻两幅图像的相关计算来获得的,所以得到的速度曲线没有累积误差。当然,位移是速度的积分,在理论上位移曲线中存在累积误差。但由于每相邻采样点相关计算的误差总是在零点上下浮动,所以这种误差累积对位移并无实质性影响,这可以从图 5(b)中清楚看出,其中的位移分布不但表现出很好的正弦性,而且振幅也比较稳定。

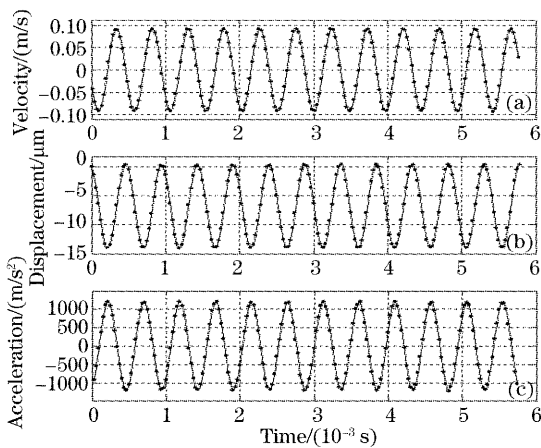


图 5 微陀螺受迫振动的速度、位移和加速度随时间的变化曲线。(a)速度,(b)位移,(c)加速度

Fig. 5 The variation of velocity, displacement and acceleration of the micro-gyroscope when subjected to a periodic electrostatic force. (a) Velocity, (b) displacement, (c) acceleration

4.2 固有频率

图 6 是陀螺微振子自由衰减振动时的速度随时间的变化历程。通过检测峰值点或平衡位置点,即可获得振动的固有频率。图中离散点是测量值,曲线为三次样条插值。测量时取了 4 个不同的时间段,测得的频率值见表 1。测量结果平均值为 2061.67 Hz。为检验本文方法对频率的测量精度,

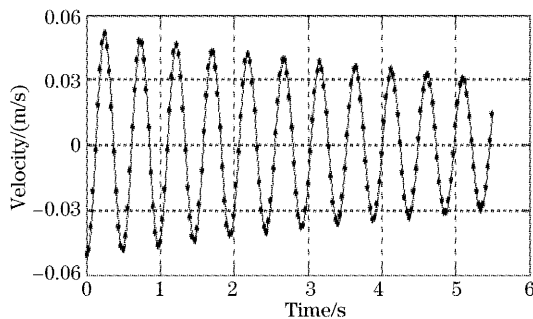


图 6 微陀螺自由振动时的速度衰减过程

Fig. 6 The velocity damping of the micro-gyroscope for a free vibration

同时对微陀螺在受迫振动下的频率进行了测量。当受 2065 Hz 激励时,用该方法测得的频率见表 2(表中的 4 个频率值也是取自不同的时间段)。测量结果平均值为 2064.84 Hz,和所受激励频率 2065 Hz 相比,绝对误差仅为 0.16 Hz,相对误差仅为 0.0077%。可见,本文方法对高频振动频率的测量是比较准确的。当然,实际测量时采样频率越大,即一个振动周期采样点越多,计算误差就越小。本文测量中一个振动周期采样点约为 15.5 幅。

表 1 衰减振动固有频率测量结果

Table 1 The measurement results of natural frequency in a damping vibration

Different duration (about 5.5×10^{-3} s)	1	2	3	4
Measured value /Hz	2061.80	2061.32	2061.93	2061.61

表 2 受迫振动激振频率测量结果

(激振频率为 2065 Hz)

Table 2 The measurement results of driving frequency in a forced vibration (driving frequency is 2065 Hz)

Different duration (about 5.8×10^{-3} s)	1	2	3	4
Measured value /Hz	2065.00059	2064.85	2064.59	2064.93

4.3 品质因数

高品质因数对应低阻尼情形。梳状谐振子的品质因数主要受周围空气粘滞阻尼的影响,而空气粘滞阻尼是大气压力的函数,所以减小周围空气压力可显著提高 Q 值。例如,梳状微振子在 0.1 Pa 高真空下,驱动模态和敏感模态的品质因数可高达 2.8×10^3 和 1.6×10^4 ,但在常压下,受空气阻尼影响,品质因数会跌落到 10^2 甚至更小。图 7 是微陀螺振子自由振动时的振幅衰减过程。各点的位移值仍是相对于第一个点的值。由图 7 及(3)式和(4)式

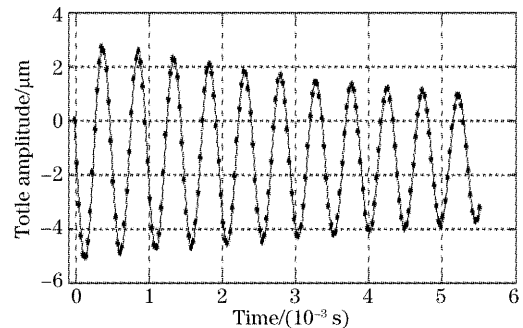


图 7 微陀螺振子自由振动时的振幅衰减过程

Fig. 7 The amplitude damping of the micro-gyroscope for free vibration

可得相对阻尼系数的平均值为 $\xi=0.0077$, 此时, (3)式中 k 取 3。

因为陀螺在空气中的振动属小阻尼情况, 为保证测量精度, (3)式中的 k 值宜取大些, 为此每隔一不定时间段(0.003 s 左右)取一个振动位移总幅值, 即 $|A_k| + |A_{k+1}|$, 共取 10 个, 其分布情况见图 8 中的 10 个离散值。此时, 用(3)式和(4)式计算的相对阻尼系数平均值为 $\xi=0.0073$ 。可见, 用相邻的位移总幅值($k=3$)得到的相对阻尼系数还是比较准确的, 这说明了用本文提出的光学测量方法对高频振动位移的测量是比较精确的。若取二者的平均值, 即 $\xi=0.0075$, 则品质因数^[12]为 $Q=1/(2\xi)=66.7$ 。

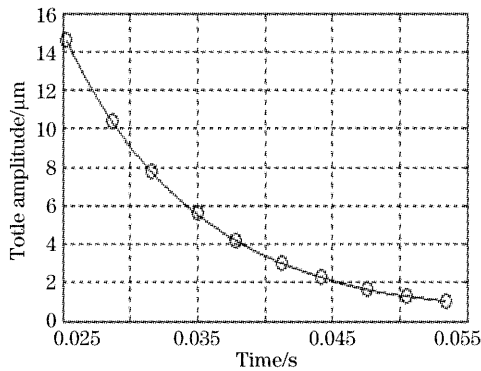


图 8 不同时刻振动位移总幅值的分布

Fig. 8 The distribution of the total amplitude at different time

5 结 论

本文对一振动式微机械陀螺的动态特性进行了测量, 结果为: 1) 微振子的固有频率为 2061.67 Hz。为检验本文方法对频率的测量精度, 文中同时对微振子在 2065 Hz 激励下受迫振动的频率进行了测量, 测量结果为 2064.84 Hz, 误差仅为 0.0077%, 由此可表明固有频率的测量结果是可靠的。2) 微振子在常压下的品质因数为 66.67。文中采用两种方法对阻尼系数进行了测量, 测量结果分别为 0.0077 和 0.0073。两种测量结果的一致性充分说明了本文提出的光学方法对高频振动品质因数测量的准确性。3) 基于上述两方面的验证, 所测微陀螺受迫振动是稳定的这一结论也是比较可靠的。总之, 上述

测量结果表明, 本文方法用于微陀螺动态特性测量不仅是可行的, 而且具有相当的精度。如果进一步提高采样频率, 可望得到更高精度的测量结果。本文方法为微陀螺动态特性的研究提供了一个准确、有效的途径。

参 考 文 献

- 1 Andrel M. Shkel. Micromachined gyroscope: Challenges, design solutions, and opportunities[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4334**: 74~85
- 2 V. Annovazzi-Lodi, S. Merlo, M. Norgia. Measurements on a micromachined silicon gyroscope by feedback interferometry[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2001, **6**(1): 1~6
- 3 Xiong Bin, Che Lufeng, Wang Yuelin. Study on dynamic characteristic of a novel silicon micromachined gyroscope[J]. *J. Mechanical Strength*, 2001, **23**(4): 527~530 (in Chinese)
熊斌, 车录峰, 王跃林. 栅结构微机械陀螺运动特性的研究[J]. *机械强度*, 2001, **23**(4): 527~530
- 4 Y. Mochida, M. Tamura, K. Ohwada. A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for the drive and detection modes[J]. *Sens. Actuators*, 2000, **80**(2): 170~178
- 5 Rong Ming Lin, Zhe Wang, Koh Wah Leow *et al.*. Design and simulation of a novel micromachined vibratory gyroscope with enhanced sensitivity performance[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4593**: 72~81
- 6 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Real-time micro-vibration measurement with a laser diode interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 578~580 (in Chinese)
宋松, 王向朝, 王学锋等. 半导体激光微小振动实时干涉测量仪[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 578~580
- 7 Guo Xiaojin, Yin Zongmin, Liu Jingjing *et al.*. Study on measuring micro vibration based on the principle of optical fiber resonance[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 559~561 (in Chinese)
郭晓金, 殷宗敏, 刘惊惊等. 光纤共振测微振动的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 559~561
- 8 Li Dailin, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Composite-light-source interferometer for real-time micro-vibration measurement[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 350~353 (in Chinese)
李代林, 王向朝, 王学锋等. 复合光源实时微振动干涉测量仪[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 350~353
- 9 K. Tanaka, Y. Mochida, M. Sugimoto *et al.*. A micromachined vibrating gyroscope[J]. *Sens. Actuators (A)*, 1995, **50**(1~2): 111~115
- 10 Zhang Bin, Liu Qingquan, Huang Qingan. Influence of slide film damping on quality factor and transfer function of laterally-driven comb microresonator[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(6): 827~830 (in Chinese)
章彬, 刘清倦, 黄庆安. 空气阻尼对微谐振器品质因数及其传输函数的影响[J]. *电子学报*, 2002, **30**(6): 827~830
- 11 K. Maenaka, T. Fujita, Y. Konishi *et al.*. Analysis of a highly sensitive silicon gyroscope with cantilever beam as vibrating mass[J]. *Sens. Actuators A*, 1996, **54**(1~3): 568~573
- 12 S. H. Choa. Reliability of vacuum packaged MEMS gyroscopes[J]. *Microelectronics Reliability*, 2005, **45**(2): 361~369