

文章编号 1004-924X(2014)10-2708-07

## 真空封装硅微陀螺品质因数的标定

王玉朝\*, 滕霖, 孙香政, 王刚, 郭志想, 余才佳

(中国航空工业集团 西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**建立了真空封装陀螺的无激励欠阻尼二阶系统模型,用于测量真空封装硅微陀螺的品质因数。对该模型进行理论推导,提出了一种时延常数测试方法。该方法首先利用锁相环路,驱动陀螺实现闭环谐振,获得较大的初始振幅。然后关断激励信号,通过放大电路和解调电路,记录硅微陀螺振荡幅值的衰减过程;用计算机通过 Matlab GUI 实时采集并拟合振幅衰减曲线,获得时间常数。最后,通过时间常数解算获得真空封装硅微陀螺的品质因数。对真空封装硅微陀螺品质因数的实验测试结果表明:该方法实测数据与理论分析模型的拟合度为 99.999%,测试重复性为 4.03%,优于传统的扫频测试法的重复性。对比时延常数法与锁相放大器扫频测试法的测试数据显示:时延常数法具有更高的测量精度和更高的测试效率。该方法可以推广到其它高真空封装 MEMS 器件的品质因数测量。

**关键词:**硅微陀螺;真空封装;品质因数;标定;时延常数法;扫频法

**中图分类号:**V241.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2708

## Quality factor measurement of vacuum-packaged microgyroscopes

WANG Yu-zhao\*, TENG Lin, SUN Xiang-zheng, WANG Gang, GUO Zhi-xiang, YU Cai-jia

(Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry  
Corporation of China, Xi'an 710065, China)

\* Corresponding author, E-mail: tinghx@163.com

**Abstract:** A under-damping second-order system model without excitation was proposed to measure the quality factor(Q factor) for a vacuum packaged microgyroscope. The model was analyzed theoretically and a time decay constant method was presented. Firstly, an initial displacement of the seismic mass was obtained by exciting the microgyroscope to implement a closed loop resonance with a Phase Locked Loop (PLL). By releasing the excitation signal, the vibration amplitude decay curve was then acquired through demodulating the vibrating displacement signal and was transferred to a computer by a Field Programming Gate Array(FPGA) hardware and Matlab GUI software simultaneously. Finally, the Q factor of the vacuum packaged microgyroscope was calculated by exponentially fitting the envelope of decay curve. The experimental results show that the R-square value of the fitted curve reaches up to 99.999% as compared to the measured data and the repeatability of the tested Q factor is 4.03%, much better than that of the frequency sweeping method. Comparing the measurement data of decay constant method and frequency sweeping method, the former shows better measurement accuracy and higher efficiency. The method is also suitable for the measurements of microsensors with high Q factors.

收稿日期:2014-01-23;修订日期:2014-03-12.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA110102);国家国际科技合作专项资助项目(No. 2011DFA72370)

**Key words:** microgyroscope; vacuum packaging; quality factor; calibration; decay constant method; frequency sweeping method

## 1 引言

硅微陀螺作为核心惯性元件之一,被广泛应用于军事领域的微惯性测量和民用领域的汽车和消费电子、工业控制等<sup>[1]</sup>。真空封装技术有助于硅微陀螺降低能量损耗,提高信噪比<sup>[2]</sup>以及提升整表的可靠性和长期稳定性,是实现高精度硅微陀螺仪的关键技术之一<sup>[3-4]</sup>;而品质因数是衡量硅微陀螺封装真空度的核心参数,对其进行准确快速评价和表征也非常重要。

目前文献中所述的测量硅微陀螺和其它 MEMS 谐振器品质因数的方法包括两大类<sup>[5-6]</sup>。一是利用动态信号分析仪、网络分析仪进行频响测试<sup>[7]</sup>,获得硅微陀螺的幅相特性曲线,或者利用锁相放大器的静电激励,谐波检测,消除电气耦合<sup>[8]</sup>,获得硅微陀螺的幅相特性曲线。然后从幅频响应曲线上获得-3 dB 带宽( $f_{-3dB}$ ),品质因数即等于谐振频率除以-3 dB 带宽。该方法的测量精度取决于扫频信号源的频率分辨率,特别对于高 Q 值的测试,一方面为方便寻找谐振峰值,需要增大观测带宽;另一方面为获得较高的测量精度,需要加大频率采样点数,但如此必然导致数据处理量的增加,使处理时间较长<sup>[9]</sup>,费时费力。二是利用有初始位移的谐振器,检测瞬态振幅衰减包络线,结合衰减正弦信号频率解算 Q 值的时域法<sup>[10]</sup>。该方法有两个问题,一是获得电路能够检测到的足够大的初始位移,需通过阶跃信号激励,如通过用钝器敲击,这在物理实现上的重复性和可靠性比较差;另一方面,数据处理时需通过在振幅衰减曲线上取两个点计算 Q 值,但其误差较大。

本文针对真空封装硅微陀螺,提出了一种用于 Q 值测量的时延常数法,通过激励环路闭环谐振产生足够初始位移,然后关断激励源,检测振幅衰减以标定 Q 值,避免了初始位移信号产生的不可靠性,可快速有效地实现硅微陀螺驱动和检测

双模态品质因数测量。在数据处理上,采集一段时间内的振幅衰减,进行曲线拟合获得时间常数,解决了因为只取两个点导致的计算结果随机误差较大的问题。随后将该测试方法的计算结果与锁相放大器扫频测试结果进行了对比分析。

## 2 时延常数法原理

时延常数法是基于无激励欠阻尼二阶系统振幅衰减时间常数为常值的一种测量方法。具体过程是,首先把硅微陀螺激励到闭环谐振状态,使硅微陀螺中心质量块在零时刻获得一个较大的初始位移,然后取消激励力,此时硅微陀螺会按照欠阻尼二阶系统的振幅衰减曲线进行振荡衰减。其衰减曲线的方程为<sup>[10]</sup>:

$$V(t) = V_0 e^{(-\omega_0/2Q)t} \left[ \cos(\omega_0 t \sqrt{1-1/(4Q^2)}) + \frac{1}{\sqrt{4Q^2-1}} \sin(\omega_0 t \sqrt{1-1/(4Q^2)}) \right], \quad (1)$$

其中: $V_0$  为  $t=0$  时刻位移  $x_0$  对应的等比例电压信号( $x/V$  转换通过电荷放大器 CSA 获得), $\omega_0$  为硅微陀螺二阶系统自然谐振频率,  $Q$  为待测品质因数。

对式(1)进行整理,可以得到式(2),对应的振幅衰减振荡波形如图 1 所示。

$$V(t) = V_0 e^{(-\omega_0/2Q)t} \cos(\omega_0 t \sqrt{1-1/(4Q^2)} + \varphi), \quad (2)$$

其中:

$$V_0 = V_0 \sqrt{1+1/(4Q^2-1)}, \quad (3)$$

$$\varphi = -\operatorname{arccot}(\sqrt{4Q^2-1}), \quad (4)$$

振幅衰减曲线方程表示为:

$$V_{\text{amp}}(t) = V_0 e^{(-\omega_0/2Q)t}. \quad (5)$$

从式(4)可得到硅微陀螺振幅将按照指数规律进行衰减,其衰减的时间常数为  $\omega_0/2Q$ 。对式(5)两边取自然对数,可得:

$$\ln V_{\text{amp}}(t) = \ln V_0 - \frac{\omega_0}{2Q} t. \quad (6)$$

通过记录时间  $t$  和对应的瞬时振幅输出  $V_{amp}(t)$ , 根据式(6), 可以利用一次线性拟合方式获得曲线(6)的对应系数, 其中负一次项系数为时间常数  $\omega_0/2Q$ , 即:

$$\tau = \omega_0 / 2Q. \quad (7)$$

同时测量振幅衰减正弦曲线的频率  $\omega$ , 根据式(2), 可得:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - 1/(4Q^2)}, \quad (8)$$

联立式(7)、(8), 即可计算  $Q$  值大小为:

$$Q = \frac{\sqrt{\omega^2 + \tau^2}}{2\tau}. \quad (9)$$

### 3 实验测试平台

待测硅微陀螺是基于 SOG (Silicon On Glass) 圆片级阳极真空键合工艺加工而成, 理论真空密封气压可以达到  $1 \times 10^{-4}$  mbar. 陀螺结构是框架式结构形态, 具体样片结构简图及表头实物如图 2 所示. 硅微陀螺表头的外框运动在驱动方向 ( $x$  轴方向), 当  $z$  轴方向有角速率输入时, 内框因为科氏力作用, 会在检测方向 ( $y$  轴方向) 有位移. 为了提高线性度, 驱动模式采用电容变面积设计; 为了提供电容检测灵敏度, 检测模式采用变间隙设计.

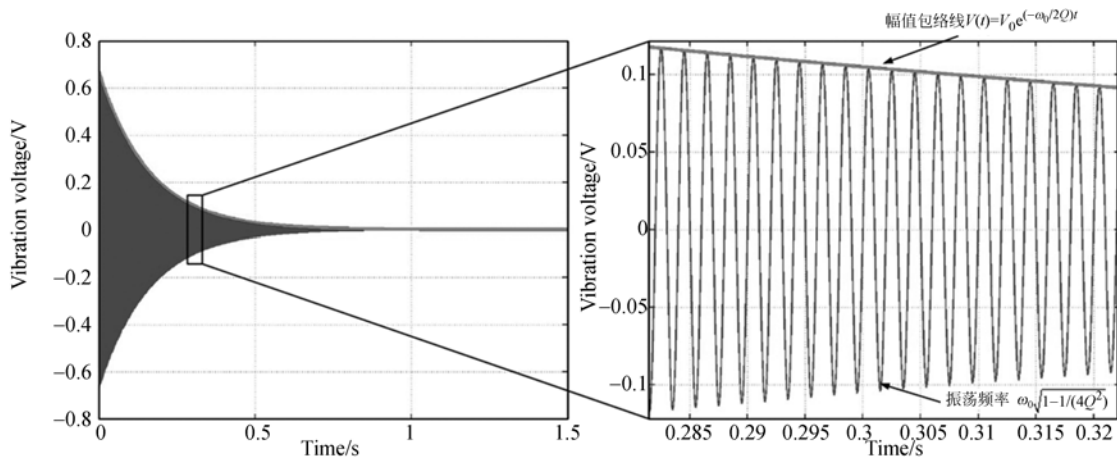
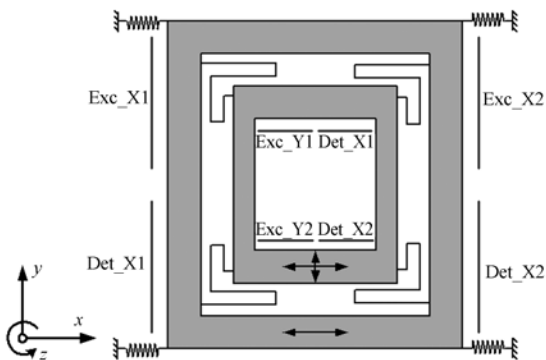


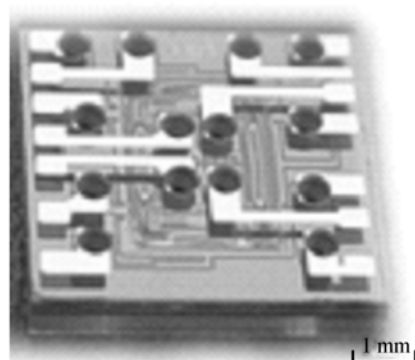
图 1 时延常数法测试振幅衰减曲线

Fig. 1 Damping curve of decay constant method



(a) 陀螺表头结构简图

(a) Simplified view of gyro chip structure



(b) 陀螺表头实物图

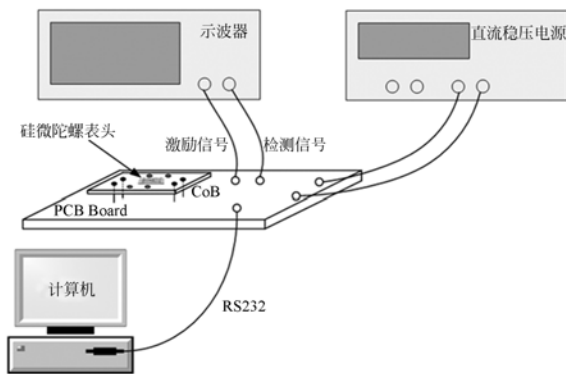
(b) Photograph of gyro chip

图 2 待测硅微陀螺表头

Fig. 2 Measured microgyroscope chip

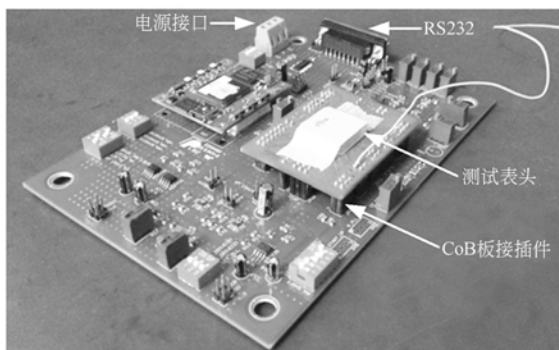
为实现硅微陀螺的闭环谐振,保证足够的初始位移,搭建硬件电路测试平台,如图 3(a)所示。硬件电路(3(b))利用锁相环(Phase Locked Loop, PLL)原理实现闭环驱动,并且在 PLL 设置使能端,控制压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)振荡激励信号的产生与关断。硅微陀螺位移信号经过电荷放大器(Charge Sensitive Amplifier, CSA)+可变增益放大器(Variable Gain Amplifier, VGA)两级放大后,通过 16 位 A/D 转换器进入现场可编程门阵列(FPGA),FPGA 对振动位移信号进行有效值 RMS 解调,根据正弦波有效值 RMS 与峰峰值  $V_{pp}$  间比例关系,获得硅微陀螺振荡幅值  $V_{amp}(t)$ 。FPGA 可以利用较高的时钟频率(100 MHz)作为计数器,获得衰减正弦频率  $\omega$ 。FPGA 将测量获得的  $V_{amp}(t)$  与  $\omega$  通过 RS232 串口线实时传输到计算机。计算机通过 Matlab GUI 进行解算处理。

根据硅微陀螺电极布置的特点,设计了可同时测量驱动和敏感双模态品质因数的通用方形



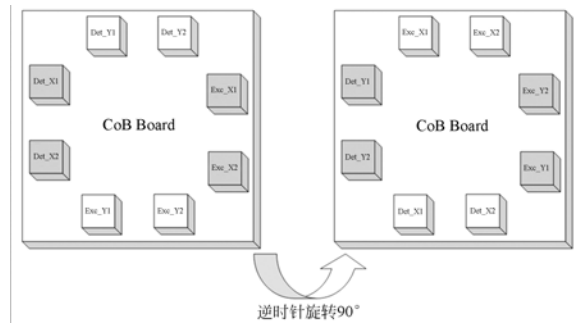
(a) 测试系统结构简图

(a) Setup of measurement system



(b) PCB 电路板

(b) PCB board



(c) CoB 电路板

(c) CoB circuit board

图 3 品质因数测试硬件平台

Fig. 3 Hardware platform of quality factor measurement

CoB 电路板,电极布置如图 3(c)所示。该电路板充分利用了硅微陀螺驱动模态电极对和敏感模态电极对的旋转对称特性,在 CoB 板上对称布置 8 个电极,分别为差分驱动模态驱动电极 Exc\_X1、Exc\_X2,差分驱动模态检测电极 Det\_X1、Det\_X2;差分敏感模态驱动电极 Exc\_Y1、Exc\_Y2,差分敏感模态检测电极 Det\_Y1、Det\_Y2(与图 2(a)所示硅微陀螺表头对应电极互连)。当测量驱动模态 Q 值时,保证 Exc\_X1、Exc\_X2 和 Det\_X1、Det\_X2 与下层的 PCB 电路板互联。如果测量敏感模态 Q 值,则将 CoB 板逆时针旋转 90°,即可将敏感模态对应的 4 个电极与下层 PCB 电路板互联,从而可以测量敏感模态 Q 值(图 3(c)所示)。

### 4 测量实验与结果

根据前文所述的数据处理方法,选取硅微陀螺同一圆片中的  $D_{22}$  和  $B_{22}$  表头芯片进行 Q 值测量实验。 $D_{22}$  号陀螺表头驱动模态测量数据与拟合曲线对比如图 4 所示,数据拟合度  $R^2 = 99.999\%$ ,表明实测数据与理论分析结果吻合,验证了时延常数法原理。

扫频法测试 Q 值是一种相对比较成熟的科研用测试方法<sup>[9]</sup>,为了评估时延常数法的准确性,对锁相放大器扫频激励、谐波检测测试结果与本方法测试结果进行验证比较。锁放扫频测试 Q 值搭建的设备如文献[8]所述,区别仅是在电荷检测端没有外接的跨阻放大器,而直接利用了锁相放大器内部自带的 I/V 转换。

锁相放大器获得的  $D_{22}$  和  $B_{22}$  驱动模态扫频

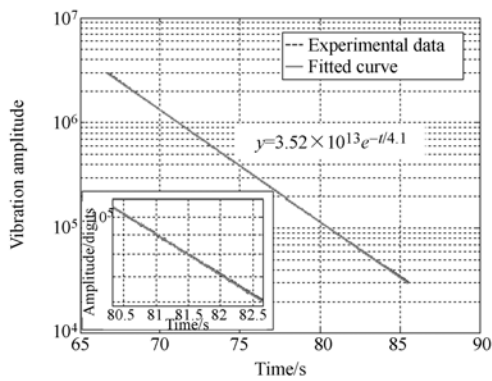
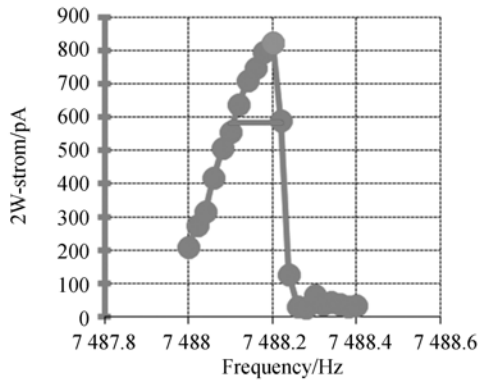
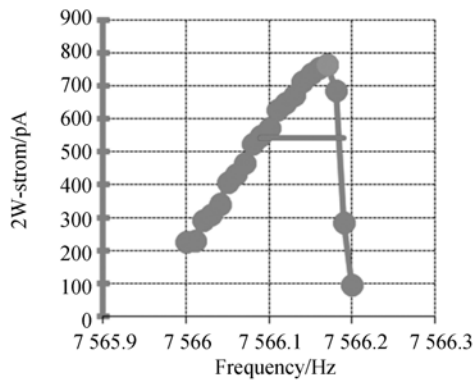


图 4 振幅衰减实测曲线与拟合曲线对比(D<sub>22</sub>驱动模式)  
Fig. 4 Comparison between tested curve and fitted curve of decaying amplitude (D<sub>22</sub>\_Drive Mode)



(a)D<sub>22</sub>驱动模式

(a) Drive mode of chip D<sub>22</sub>



(b)B<sub>22</sub>驱动模式

(b) Drive mode of chip B<sub>22</sub>

图 5 锁相放大器幅频响应曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency response curves of lock in amplifier

曲线如图 5 所示。Q 值通过式(10)计算获得,其中  $f_0$  为谐振频率(扫频曲线顶点所对应的横坐标

频率),  $f_{-3dB}$  为 -3 dB 带宽:

$$Q = \frac{f_0}{f_{-3dB}} \quad (10)$$

时延常数法与锁相放大器扫频法测试结果对比如表 1 所示。由表可知时延常数法测得的 Q 值结果要稍高于扫频法。考虑到 1/Q 表征硅微陀螺在每个周期损耗能量的比例,结果表明时延常数法具有更高的测量精度。此外,两种方法测得谐振频率有微小差异,这是源于加工硅微陀螺所用的硅材料是温度敏感材料,测试环境的温度差异导致了所测谐振频率的差异。

表 1 时延常数法与扫频法测试结果对比

Tab. 1 Comparison between decay constant method and frequency sweeping method

	扫频法	时延常数法	时延常数法拟合度 R <sup>2</sup>
D <sub>22</sub> 驱动品质因数	62 400	89 238	99.999%
D <sub>22</sub> 敏感品质因数	—	41 055	99.99%
B <sub>22</sub> 驱动品质因数	75 700	77 082	99.999%
B <sub>22</sub> 敏感品质因数	—	31 995	99.999%
D <sub>22</sub> 驱动谐振频率/Hz	7 488.2	7 489.6	
D <sub>22</sub> 敏感谐振频率/Hz	—	7 743.6	
B <sub>22</sub> 驱动谐振频率/Hz	7 566.17	7 575.2	
B <sub>22</sub> 敏感谐振频率/Hz	—	7 812.9	

锁相放大器扫频测试 Q 值较低,说明其每个周期内的能量损耗较大,主要有两方面原因。一是在芯片级测试过程中,表头芯片质量太轻,而且探针台吸附不够紧固,导致静电激励时卸力所致;二是通过扫频法测试,扫描频率步进无法准确找到谐振峰值点,导致对应的 -3 dB 带宽较大,从而 Q 值被低估。本文提出的时延常数法,在表头贴片方面经过了严格的对比分析,优化了表头贴片方式,使得芯片与测试平台能够紧密贴合,降低了能量损耗带来的误差,从而获得更为准确的 Q 值。

对硅微陀螺 Q 值进行重复性测量,假定 Q<sub>i</sub> 为第 i 次硅微陀螺 Q 值测试结果,定义陀螺 Q 值测试的重复性为:

$$R = \frac{\text{Standard deviation}(Q_i)}{\text{Average}(Q_i)} \times 100\% \quad (11)$$

用该参数表征 Q 值测试的重复性精度。按照上述方法,分别进行 7 次测试,时延常数法的测试重复性为 4.03%,而扫频法测试重复性为

10.4%。在重复性测试方面,时延常数法要优于扫频法。

另外,在测量效率方面,扫频法测试需要花费较长的时间,锁相放大器数据采集效率一般为 7~15 min/chip。而时延常数法花费的时间较短,Q 值测试一般不超过 1 min/chip。

## 5 误差分析

硅微陀螺 Q 值测试系统误差的来源主要包括两部分,原理性误差和量测误差。

### 5.1 原理性误差

硅微陀螺作为一类典型的微机械谐振器,其机械谐振存在刚度非线性特性,传递函数并非理想的二阶系统,刚度会随着振幅的大小而变化<sup>[11]</sup>,其准确的解析解需根据初始条件求解 Duffing Equation。实测的硅微陀螺振幅衰减波形和拟合曲线的差值曲线如图 6 所示。在振幅较大时,两者差值表现为明显的单方向性,且绝对值较大。因为阻尼作用,振幅减小,刚度非线性逐渐减小,刚度非线性因素影响逐渐减弱。因此,从测试准确性的角度考虑,硅微陀螺在 Q 值测试时,减

小初始驱动电压,使得硅微陀螺小振幅振荡,此时陀螺刚度非线性影响较小,测试的 Q 值更准确。

### 5.2 量测误差

量测误差包括数字量化误差和模拟电路噪声。数字量化误差主要包括对两个测量物理量:驱动幅值和谐振频率的量化误差,其中驱动幅值信号的获取,是通过 16 位 ADC 实现的;而谐振频率是通过 100 MHz 高频信号进行计数实现的,也存在量化误差。但是这两类误差分布都满足均匀分布,通过对大量的数据进行拟合和平均化处理,可以确定其对 Q 值测试结果无影响。

前端模拟电路,包括 CSA 和 VGA,都存在电路噪声,通过对前端模拟电路进行优化设计,提高了电容检测灵敏度。前端模拟电路的电容检测噪声和运放噪声如文献[12]所述,这两类噪声都是白噪声,在硅微陀螺振荡位移较小时,检测电路无法分辨其为有用机械位移信号还是电路噪声。故硅微陀螺 Q 值测试的初始振幅需要权衡消除刚度非线性和电路噪声淹没的影响,设置合适的初始值,保证足够的振幅衰减采集时间。

## 6 结 论

本文针对真空封装硅微陀螺品质因数的测量,建立了其欠阻尼二阶系统振幅衰减模型。推导了时延常数法测试 Q 值的原理,并依据该原理在实验室环境中搭建了真空封装硅微陀螺品质因数测量的软硬件环境,利用指数拟合衰减曲线,减小了系统测试误差。实验结果表明:该方法实测数据与理论分析结果数据拟合度为 99.999%。与锁相放大器扫频法测试 Q 值相比,时延常数法测试重复性达 4.03%,具有更高的测量精度和更快的效率,特别适合 Q 值大于 1 000 的真空封装硅微陀螺。该方法也可推广应用到其它静电驱动、电容检测类 MEMS 谐振器品质因数测量。

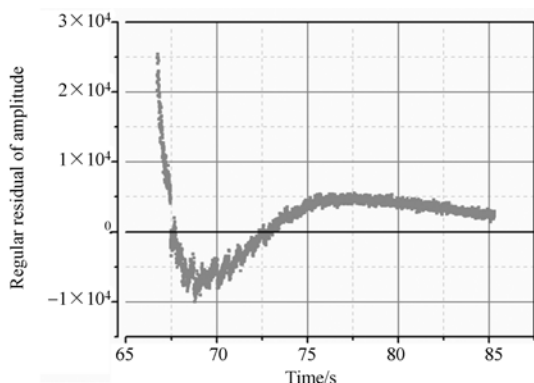


图 6 实测数据与拟合曲线的差值曲线

Fig. 6 Difference of measured decay curve and fitted curve

## 参考文献:

- [1] 姜劲栋, 袁安萍, 施芹, 等. 硅微陀螺仪正交耦合系数的计算及验证[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 87-93.  
JIANG SH D, QIU A P, SHI Q, et al.. Calculation and verification of quadrature coupling coefficients of silicon microgyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 87-93. (in Chinese)
- [2] SCHOFIELD A R, TRUSOV A A, SHKEL A M. Versatile vacuum packaging for experimental study of resonant MEMS [C]. *Micro Electro Mechanical System (MEMS)*, 2010 *IEEE 23rd International Conference*, 2010: 516-519.
- [3] 施芹, 苏岩, 袁安萍, 等. MEMS 陀螺仪器件级真空封装技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8):

- 1987-1992.
- SHI Q, SU Y, QIU A P, *et al.*. Device level vacuum packaging technologies of MEMS gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1987-1992. (in Chinese)
- [4] 贾方秀, 袁安萍, 施芹, 等. 硅微振动陀螺仪设计与性能测试[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1272-1281.
- JIA F X, QIU A P, SHI Q, *et al.*. Design and experiment of micro machined vibratory gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1272-1281. (in Chinese)
- [5] NIEDERMAYER A O, BRUNNMAIER T V, SELL J, *et al.*. Methods for the robust measurement of the resonant frequency and quality factor of significantly damped resonating devices [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2012, 23 085107.
- [6] RAJAMANI V, BUNTING C F, WEST J C. Differences in quality factor estimation in frequency and time domain [C]. *Electromagnetic Compatibility(APEMC)*, 2012:505-508.
- [7] JEONG C, SEOK S, LEE B, *et al.*. A study on resonant frequency and Q factor tunings for MEMS vibratory gyroscopes[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2004, 14(2004): 1530-1536.
- [8] BRUSCHI P, NANNINI A P F. Electrical measurements of the quality factor of microresonators and its dependence on the pressure[J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, 114:21-29.
- [9] WANG L Y, DU X H, SU Y ZH, *et al.*. Accuracy analysis of quality factor measurement based on time domain method for MEMS resonators [C]. *The 3rd International Conference of CSMNT*, 2012.
- [10] MATHIAS H, PARRAIN F, GILLES J P, *et al.*. Architecture for integrated MEMS resonators quality factor measurement [J]. *DTIP of MEMS & MOEMS*, 2007.
- [11] BRAGHIN F, RESTA F, LEO E, *et al.*. Nonlinear dynamics of vibrating MEMS [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 134: 98-108.
- [12] SAUKSKI M, AALTONEN L, SALO T, *et al.*. Interface and control electronics for a bulk micromachined capacitive gyroscope [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 147:183-193.

#### 作者简介:



王玉朝(1985—),男,山东潍坊人,工程师,2011年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事 MEMS 惯性传感器控制系统和专项测试技术研究。Email: tinghx@163.com



滕霖(1960—),男,博士,研究员,博士生导师,国防科技工业"511人才工程"学术技术带头人,现为中航工业自控所总工艺师,主要从事航空宇航制造工程、超精密加工方面的研究。

(版权所有 未经许可 不得转载)