

文章编号 1004-924X(2008)02-0295-05

# 振动轮式微机械陀螺动态特性的光学测试

蒋 明<sup>1,2</sup>,何小元<sup>2</sup>

(1. 苏州科技学院 土木学院, 江苏 苏州 215011; 2. 东南大学 土木学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**建立了基于高速摄像技术、显微技术与数字图像处理技术的光学测试系统。配有光学显微镜的高速摄像设备(32 000 frame/s)记录并保存被测物瞬时刻序图像,根据被测物的角振动特性设计相应的图像处理方法以获得振子各时刻的运动位移,并通过位移时间曲线分析振子的固有频率、阻尼系数及品质因子等动态特性参数。实验结果显示,频率测量误差 $<0.01\%$ 。高精度地测量了振动轮式微机械陀螺的动态特性,为微结构动态特性的研究提供了一个有效方法。

**关键词:**高速摄像;图像处理;振动轮式微机械陀螺;固有频率;品质因子

**中图分类号:**O318;TB872.17 **文献标识码:**A

## Optical testing of dynamic characteristic of vibrating wheel micromechanical gyroscope

JIANG Ming<sup>1,2</sup>, HE Xiao-yuan<sup>2</sup>

(1. *College of Civil Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China;*

2. *College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

**Abstract:** To evaluate the dynamic characteristics of vibrating wheel micromechanical gyroscope, an optical test system based on high speed camera system combined with microscope and digital image processing technique was set up. A sequence of real time images of the tested object were recorded by high speed camera (32 000 frame/s) equipped with a microscope. Then, based on the angular vibrating characteristics of the tested object, the corresponding image processing method was applied to figure out the displacement of vibrator at any time. Through the analysis of displacement-time curve, the dynamic characteristics of vibrator such as nature frequency, damp coefficient and quality factor could be obtained. The experimental results show that the measurement error is less than  $0.01\%$ , which indicates the test system has high precision in dynamic characteristic measurement of vibrating wheel micromechanical gyroscope, and it is an available method to study dynamic characteristics of micro-structure as well.

**Key words:** high speed photography; image processing; vibrating wheel micromechanical gyroscope; natural frequency; quality factor

收稿日期:2007-08-28;修订日期:2007-10-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10472026)

## 1 引言

振动轮式微机械陀螺是利用哥氏力测量空间角速度的一种陀螺仪,与框架式、音叉式角速度传感器相比,具有灵敏度高,容易实现驱动轴和检测轴共振频率一致的优点,可广泛应用于汽车工程、生物工程、大地测量、矿山开采、机器人控制等领域,因而受到各国的普遍重视。对于振动轮式微机械陀螺力学性能的研究已成为当今力学及其他相关学科的热点问题。为了提高其可靠性和实用性,除了对其结构进行必要的优化外,用有效的测量手段精确评估其材料特性、运动特性、位移、形变等各种力学性能参数也是必不可少的。对微结构在静态或准静态条件下的力学性能的测量目前已有一些成熟的方法<sup>[1-3]</sup>,但是对其动态条件下的力学性能的测量和分析则报导较少。振动轮式微机械陀螺的振动频率很高,一般都在几千赫兹以上<sup>[4]</sup>,很难观察到其振动过程,其振动稳定性、固有频率和品质因子等难以精确评价,需要研究有效的检测方法。

针对振动轮式微机械陀螺动态特征,本文提出了以高速摄像与显微技术相结合的测试方案。高速摄像是研究高速运动过程的一种行之有效的方法,具有很高的时间分辨率,能快速跟踪并记录高速运动过程,因此利用高速摄像可获取被测物瞬间图像。作者曾将此方法运用于硅微双线性振动陀螺的动态特性测量<sup>[5]</sup>,与硅微双线性振动陀螺相比,振动轮式微机械陀螺是角振动而非线性平动,需要研究合适的图像相关方法以识别其振动角位移,本文详细介绍了基于全场动态序列图像相关的动力学特征参数的识别方法,给出了振动轮式微机械陀螺的固有频率和品质因子等动力学特征参数。实验结果显示,本文方法是可行且有效的。

## 2 振动轮式微机械陀螺

振动轮式微机械陀螺<sup>[6-8]</sup>结构形式如图 1 所示,其主要由驱动轮和外框架两部分组成。工作时,通过梳状机构驱动,外框架和驱动轮绕垂直于驱动轮的中心轴  $Z$  做简谐角振动。如果基片沿垂直于  $Y$  轴的方向在  $XZ$  平面内有惯性角速度  $\Omega$

出现,则在哥氏力的作用下,位于振动轮下的电容将发生变化。在理想情况下,电容的变化量与角速度大小成正比,通过检测电容的变化量可以获得角速度  $\Omega$ 。

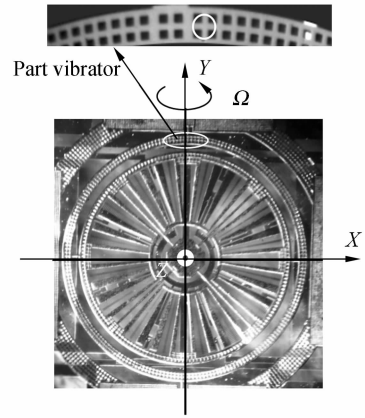


图 1 振动轮式微机械陀螺结构图

Fig. 1 Structure of vibrating wheel micromechanical gyroscope

## 3 测量原理

在高速摄像机上装配光学显微镜,令其垂直于振子振动平面,以光纤冷光源照明,为了最大限度地提高测量分辨率,采集时只取振动梁部分,如图 1 中放大部分。当微陀螺在驱动平面内振动时,由高速摄像机采集并保存已自动编号的时间序列图像。对序列图像中每相邻的两幅图像进行相关运算,得到相邻两图像之间的位移差,将结果进行累加,可获得振子各时刻的位移。

### 3.1 时间序列数字图像相关方法

数字图像相关方法是根据物体表面随机分布的散斑场在变形前后的统计相关性来确定物体的位移或变形,如图 2 所示,其实现过程是以变形前图像的某一点  $P(x_p, y_p)$  为中心选择一区域,称作子区或窗口,在变形后图像中与该点坐标相同的点周围划定一搜索范围,在其中寻找与所选子区灰度值相关系数最大的区域,则该区域的中心  $P'$  就认为是变形后  $P$  的位置,其中变形前以  $P(x_p, y_p)$  为中心的区域的灰度分布为  $f(x_i, y_i)$ ; 变形后以  $P'$  为中心的区域的灰度分布为  $g(x_i^*, y_i^*)$ 。被测点  $P$  与  $P'$  的位置最匹配时,相关系数  $C$  取极大值。

$P$  点的子区通常选择为矩形,以便在搜索过

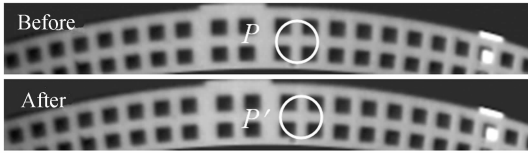


图 2 局部振子位移前后图

Fig. 2 Diagrams before and after displacement

程中与目标区域进行点对点的相关性比较,这样的子区在测试对象只有平动、不存在转动的情况下使用可以获得较高的计算精度。但振动轮式微机械陀螺的振子子区既有平动、又有转动,采用矩形子区将无法得到准确的结果。因此本文选择以计算点  $P$  为中心的圆形子区来进行相关性搜索。相关系数定义为:

$$\begin{bmatrix} x_i^* \\ y_j^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} \sin(\theta_0 + \theta) - \sin \theta_0 \\ \cos \theta_0 - \cos(\theta_0 + \theta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $(x_i, y_j), (x_i^*, y_j^*)$  表示位移前后对应点的横纵坐标,  $(dx, dy)$  表示子区里的点与子区中心的距离,  $R$  为子区中心至陀螺中心距离,  $\theta_0, \theta$  表示子区的转角, 顺时针转动为正, 如图 3 所示。采用亚像素插值计算, 相关计算精度为 0.01 pixel。

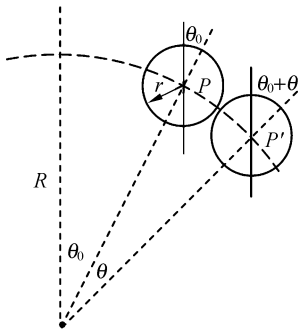


图 3 位移前后子区相对位置

Fig. 3 Subsets before and after displacement

### 3.2 振子振动特性分析

高速摄像机可实时记录振动轮式微机械陀螺周期简谐振动的时序图像, 由数字图像相关获得位移-时间曲线; 再通过傅里叶变换, 获得振子振动频率。

令振子做自由振动, 通过位移-时间历程曲线, 可获得陀螺的固有频率及相对阻尼系数。图

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

( $C=1$  相关;  $C=0$  不相关)

式中:

$$\bar{f} = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f(x_i, y_j),$$

$$\bar{g} = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m g(x_i^*, y_j^*),$$

$$\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2} \leq r;$$

( $r=(m-1)/2$  为子区半径,  $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m; m$  为子区直径)

目标区域中像素点位置在变形前后的关系为:

4 所示为有阻尼自由振动的衰减过程, 由质点从一个最大偏离位置到下一个最大偏离位置(或检测平衡位置)所需时间求得自由振动周期和频率。在小阻尼情况下, 相对阻尼系数  $\xi$  可由式<sup>[9]</sup>(3)计算,

$$\xi = \frac{1}{N\pi} \ln \frac{|A_k| + |A_{k+1}|}{|A_{k+N}| + |A_{k+N+1}|} \quad (k=1, 3, 5, \dots), \quad (3)$$

式中:  $A_k, A_{k+1}$  为相邻的两个振幅,  $A_{k+N}, A_{k+N+1}$  为经过  $N$  个周期后相邻的两个振幅。

振动轮式微机械陀螺的品质因子:  $Q=1/(2\xi)$ <sup>[10]</sup>。

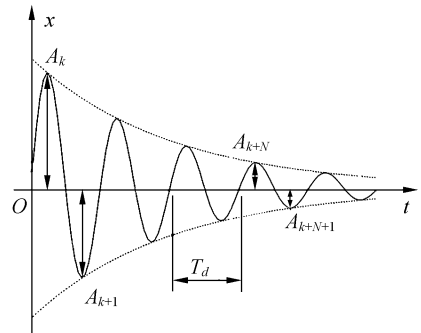


图 4 自由振动的衰减过程

Fig. 4 Attenuation of damping vibration

## 4 实验结果

本文实验采用 PHOTRON 高速摄像机, 采样频率为 32 000 frame/s; 配备 OPTEM 高倍显微镜。所测试件如图 1 所示, 尺寸为  $2\,500\ \mu\text{m} \times 2\,500\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ , 采集时对所测部位局部放大以最大限度地提高测量分辨率; 序列图像大小为  $256\ \text{pixel} \times 32\ \text{pixel}$ , 光学系统的分辨率为  $1\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。数字图像相关计算子区为图 1 中圆形模板。

### 4.1 受迫振动响应频率

图 5 为受迫振动(驱动频率为 2 109 Hz)的振幅-时间曲线中的一段(0~500 幅), 全程共取 2 048 幅图像, 2 047 个测试值。由傅里叶变换得振动频谱图如图 6 所示, 振子响应频率为 2 109.12 Hz。驱动频率与振子响应频率间绝对误差为 0.12 Hz, 相对误差为 0.005 7%。表 1 列出不同驱动频率下的振子响应频率及误差。

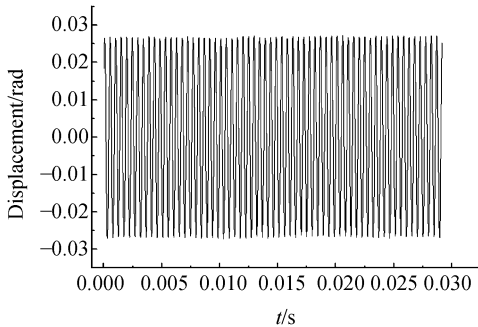


图 5 振子位移-时间曲线

Fig. 5 Displacement-time curve of vibrator

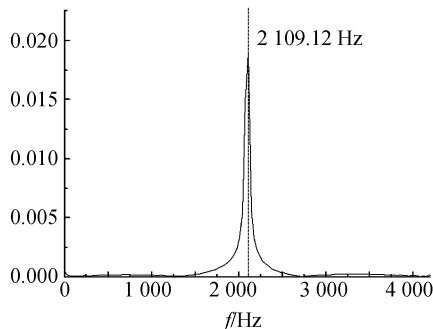


图 6 振子受迫振动频谱图

Fig. 6 Frequency spectra of driving vibration of vibrator

表 1 不同驱动频率下的振子频率响应

Tab. 1 Response frequency under different driving frequencies

驱动频率(Hz)	响应频率(Hz)	相对误差(%)
2 099.00	2 098.86	0.006 7
2 109.00	2 109.12	0.005 7
2 119.00	2 119.17	0.008 0

### 4.2 固有频率及品质因子

为了测量陀螺的固有频率及品质因子, 首先静电驱动振子振动, 然后关闭电源, 振子做有阻尼自由振动, 其位移-时间曲线如图 7 所示。在图中取 4 个不同的时间段(每段 10 周期, 约  $4.8 \times 10^{-3}\ \text{s}$  时间间隔), 算得频率值列于表 2。测量结果的平均值为 2 108.69 Hz。

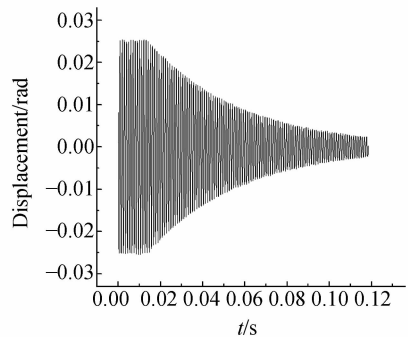


图 7 自由振动位移-时间曲线

Fig. 7 Displacement-time curve of free vibration

表 2 自由振动频率

Tab. 2 Frequency of damping vibration

$f/\text{Hz}$	2 108.63	2 108.68	2 108.71	2 108.75
---------------	----------	----------	----------	----------

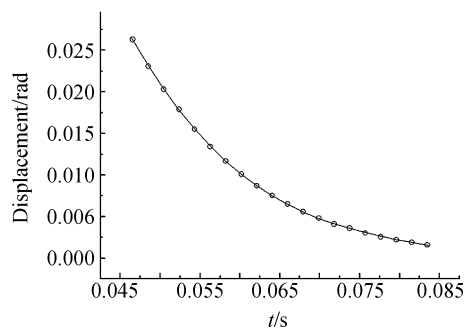


图 8 不同时刻位移幅值分布

Fig. 8 Amplitude distribution at different time

振动轮式微机械陀螺的振动属小阻尼情况,测量相对阻尼系数时,为保证测量精度,每隔一时间段(3周期,约0.002 s)取一个振动位移总幅值( $|A_k| + |A_{k+1}|$ ),不同时刻位移总幅值及包络图如图8所示。由位移幅值变化关系,得:

$$\text{阻尼系数: } \xi = 5.1905 \times 10^{-3};$$

$$\text{品质因子: } Q = 1/(2\xi) = 96.33;$$

无阻尼振动固有频率:

$$f_0 = \frac{f}{\sqrt{1-2\xi^2}} = 2108.75 \text{ Hz}.$$

## 5 结 论

本文对振动轮式微机械陀螺的动态特性进

行了测量,测量结果为:(1)微振子的固有频率为2108.75 Hz。(2)对微振子在2109 Hz激励下受迫振动的频率测量结果为2109.12 Hz,误差为0.0057%,由此可见固有频率的测量结果是可靠的。(3)微振子在常压下的品质因子为96.33。

上述测量结果显示,本文方法用于振动轮式微机械陀螺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。

本文方法为微结构动态特性的研究提供了一个有效途径。

## 参考文献:

- [1] 张泰华,杨业敏,赵亚涛,等. MEMS材料力学性能的测试技术[J]. 力学进展, 2002,32(4):545-562. ZHANG T H, YANG Y M, ZHAO Y P, et al.. Measurement of mechanical properties of MEMS materials[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002,32(4):545-562. (in Chinese)
- [2] 李智,王向军. 微机电系统测试技术及方法[J]. 光学精密工程, 2003,11(1):37-42. LI ZH, WANG X J. MEMS measurement technologies and methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(1):37-42. (in Chinese)
- [3] 宋康,赵玉龙,蒋庄德. 激光干涉微轮廓测量仪[J]. 光学精密工程, 2003,11(3):245-249. SONG K, ZHAO Y L, JIANG ZH D. Laser profilometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(3):245-249. (in Chinese)
- [4] 王寿荣. 硅微型惯性器件理论及应用[M]. 南京:东南大学出版社, 2000. WANG SH R. *Theory and Applications of Micromechanical Silicon Inertia Components*[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2000. (in Chinese)
- [5] 蒋明,杨福俊,董萼良,等. 基于高速摄像的双线性振动陀螺力学特性分析[J]. 光学精密工程, 2006,14(1):121-126. JIANG M, YANG F J, DONG E L, et al.. Analysis of mechanical characteristic in the double linear vibratory gyroscope using high speed photograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):121-126. (in Chinese)
- [6] 袁安萍,苏岩,周百令. 基于隧道效应的微机械角速率传感器[J]. 中国惯性技术学报, 2000,8(4):75-79. QIU A P, SU Y, ZHOU B L. A tunneling based micromechanical angular rate sensor[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2000,8(4):75-79. (in Chinese)
- [7] 苏岩,周百令,王寿荣. 微机械角速度传感器信号分析与处理[J]. 测控技术, 2000,19(6):22-23. SU Y, ZHOU B L, WANG SH R. A silicon micro-mechanical vibratory angular rate sensor[J]. *Measurement and Control Technology*, 2000,19(6):22-23. (in Chinese)
- [8] 董煜茜,高钟毓,张嵘. 微机械角速率传感器的性能分析[J]. 传感技术学报, 1998,(4):28-36. DONG Y Q, GAO ZH Y, ZHANG R. Performance analysis of a vibratory wheel micromechanical gyroscope[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 1998,(4):28-36. (in Chinese)
- [9] 李德葆,陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. LI D B, LU Q H. *Analysis of Experiments in Engineering Vibration*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [10] CHOA S H. Reliability of vacuum packaged MEMS gyroscopes[J]. *Microelectronics Reliability*, 2005,45:361-369.

作者简介:蒋明(1961—),女,江苏人,副教授,在读博士研究生,主要从事微电子机械系统(MEMS)材料与结构动静态光学测试方法及图像处理技术的研究。E-mail: cemjiang@tom.com