

常温下微机械陀螺长时漂移特性实验研究

王学敏,金磊,管延伟

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘 要:为了获取高线性度微机械陀螺仪常温下的长时漂移特性,该文采用光测法(计算机视觉测试系统)与传统电测法相结合的方法,分别在 $t=0, 25\text{ min}, 120\text{ min}$ 时测试了微机械陀螺驱动模态的振动特性。最后通过对比分析光测法和电测法的测试结果,获得了微机械陀螺仪的长时漂移特性,并给出了陀螺在常温下产生长时漂移的影响因素。

关键词:微机械陀螺;长时漂移;视觉测量;动态测试;幅频特性

中图分类号:TN40;U666.1

文献标识码:A

Experimental Study on the Long-Time Drift Characteristics of MEMS Gyroscope Under Normal Temperature

WANG Xuemin, JIN Lei, GUAN Yanwei

(State Key Lab. of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to obtain the long-time drift characteristics of the designed high-linearity MEMS gyroscope under normal temperature, the combination of vision identification method (computer micro vision system) and traditional electrical method is used to test the vibration characteristics of MEMS gyroscope under driving mode at $t=0, 25\text{ min}, 120\text{ min}$ respectively. The long-time drift characteristics of MEMS gyroscope and the influence factors produced the long-time drift are obtained by comparing the test results of the vision identification method and the traditional electrical method.

Key words: MEMS gyroscope; long-time drift; vision identification; dynamic test; amplitude-frequency characteristics

0 引言

微机械陀螺是用来测量角速度或角位移的惯性传感器,是微机电系统(MEMS)技术应用的一个重要方面^[1]。微机械陀螺与传统陀螺相比,具有体积小,质量轻,成本低,功耗低,抗过载能力强,能适用于较恶劣的环境,可批量生产,易与CMOS接口电路集成及数字化和智能化等特点。微机械陀螺的优良特性决定了它具有广阔的应用前景及商业和军事价值^[2-3]。然而微机械陀螺的性能指标易受到漂移的影响,因此对微机械陀螺漂移特性的精确测试显得尤为重要^[4-5]。长时漂移与陀螺的工作环境,如温度、温度梯度及自身的结构形变等因素相关。

目前,微机械陀螺的动态特性一般采用电测法或光测法进行测试。电测法是传统的信号分析方法,具有简单实用、稳定性好、信号分析与处理过程

相对容易等特点,在微机械量测量中占有重要地位。但由于MEMS的特征尺寸微小,导致微小机械运动量产生的电学检测信号相对较微弱,且微机械的动态特性本身也易受到测量过程的干扰,因此,通过电测法难以准确地获取微机械运动量。光学测试法属于非接触测量模式,通常具有与被测信号间互不干扰,检测分辨率好,精度高等特点。目前,用于MEMS动态参数检测的光学测试法,如激光多普勒测振仪(LDV)、频闪显微干涉系统(SMIS)、计算机微视觉系统(CMVS)、光纤迈克尔逊干涉仪等已投入实际应用^[6-7]。

本文同时采用电测法与光测法对微机械陀螺驱动模态的振动特性进行实验测试。通过对比分析电学测试和光学测试的结果,确定微机械陀螺的长时漂移特性。

收稿日期:2015-08-10

基金项目:总装基金预研资助项目

作者简介:王学敏(1990-),男,重庆人,硕士生,主要从事微陀螺仪方面的研究。金磊(1965-),女,山东烟台人,主要从事微机电技术研究。

1 微机械陀螺驱动模态幅频特性的测试方法

实验使用的是本课题组设计加工的微机械陀螺,该陀螺采用梳齿静电驱动结构。它具有驱动力与振动位移无关,驱动振幅不受电容间隙的限制,切向驱动滑膜阻尼远比法向驱动的压膜阻尼小,能在大气压强下得到很高的品质因数 Q 值等^[8]独特的优点。

微机械陀螺振动特性测试通常在常压、常温下进行,环境温度控制在 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度为 35%。

电学测试的仪器设备包括直流电源、动态信号分析仪、信号发生器和驱动系统振动特性测试电路等^[9]。微机械陀螺仪驱动模态振动特性电学测试的实现方法如图 1 所示。

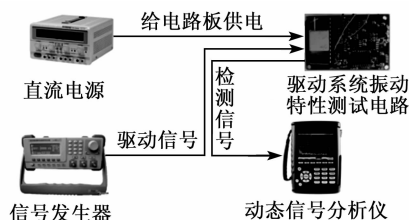


图1 微机械陀螺驱动模态振动特性电学测试方法

由直流电源给测试电路板提供 10 V 的直流电。信号发生器向测试电路板输入一个幅值恒定、频率周期性增大的扫频信号来作为陀螺仪驱动模态的驱动电压。同时,通过检测电路把微陀螺的振动信号从陀螺仪相应的管脚引出并输出到动态信号分析仪。根据输入和输出信号间的关系确定陀螺仪驱动模态振动单元的幅频、相频特性。

实验同时采用基于高速摄像的计算机微视觉测量系统(CMVS)对陀螺进行光学测试,CMVS 是一种非接触式的光学测量方法,它具有无信号干扰,检测分辨率好及精度高等特点,非常适用于微机械陀螺驱动模态振动特性参数的实时检测和可视化测试^[10]。该系统的功能结构图如图 2 所示。

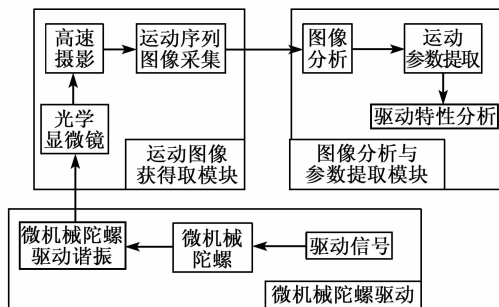


图2 微机械陀螺运动计算机视觉测量系统的功能结构图

从图 2 中可看出,微机械陀螺运动的计算机视觉测量系统包括 3 个功能模块。首先是微机械陀螺

驱动模块,该模块包含微机械陀螺的静电驱动和运动控制两个方面。其次是微机械陀螺驱动模态的运动图像获取功能模块,该模块是以光学显微镜及其自带的卤素灯照明系统为基础,采用入射光直接照明微机械陀螺封装表面,在合适的显微镜放大倍数下可观测到微机械陀螺驱动模态的振动图像。在显微镜的目镜端口结合高速摄像机镜头接口,即可通过高速摄像机以相匹配的采样频率(快门速度)获取驱动谐振的运动时序图像。最后是图像分析与运动参数提取功能模块,该模块是以高速摄像机获取驱动谐振的运动时序图对象,通过有效的图像处理与分析方法提取陀螺驱动模态代表性结构形态运动过程中的位移变化情况,从而获得微机械陀螺驱动模态振动运动的时间变化规律,并在此基础上进一步提取和分析其运动参数。测量系统的实物图如图 3 所示。



图3 微机械陀螺运动计算机视觉测量系统

2 测试原理

微机械陀螺驱动模态在谐振工作状态所表现出来的振幅-频率关系,即驱动模态振动系统的幅频特性曲线,该关系是微机械陀螺驱动模态动态特性表征与分析的重要内容,是用以测试分析微机械陀螺驱动模态的 Q 、陀螺带宽、固有频率、阻尼系数等重要指标参数的基础。

微机械陀螺驱动模态的动力学模型是一个受谐波激励下的强迫振动。这个单自由度线性振动系统的激励信号是交流驱动电压,系统直接的响应是振动位移。根据单自由度线性振动系统的特性,其位移响应的振幅 X 与激励信号的幅值 V 的关系为

$$X = |H(\omega)| \cdot V \quad (1)$$

式中 $|H(\omega)|$ 不仅是系统参数 $\xi, \omega_n(m, c, k)$ 的函数,也是驱动信号频率 ω 的函数^[11]。对于线性振动系统,系统参数 $\xi, \omega_n(m, c, k)$ 是定常值,因而 $|H(\omega)|$ 真正描述的是响应振幅与 ω 之间的函数关系,称为系统的幅频特性。

我们可以通过对驱动模态振动系统的参数测试

来获取微机械陀螺驱动模态的幅频特性曲线。参数测试的基本方法是对驱动模态施加一系列幅值固定、频率按规律变化的驱动电压信号,分别获取系统在相同强度、不同频率信号的激励下的位移响应,取得振动位移响应信号的幅值变化参数,再进一步通过位移响应信号与驱动电压信号之间的时序对比分析来确定位移振幅与驱动信号频率之间的参数关系,获取关注频率范围内的幅频特性曲线。具体测试过程如下:

1) 使用信号发生器 DG2041A 的扫频功能,将驱动电压信号的幅值设置为 ± 3 V、频率从 3 900~4 200 Hz 逐步线性增大、扫频循环周期为 0.75 s 的正弦扫频信号。该测试频率范围是由系统实际的固有频率值 4 070 Hz 来决定的。

2) 将该扫频信号作用于微机械陀螺的驱动电路,观察并拍摄获得微机械陀螺驱动模态振动位移的视频图像。视频有效时长应在扫频信号循环作用两个周期以上,本次实验的记录时间是 1.59 s。同时,通过驱动检测电路把微机械陀螺振动单元的振动信号从陀螺仪相应的管脚引出并检测出来,并输出到动态信号分析仪。

3) 保持微机械陀螺谐振 25 min 后,重复步骤 2),对微机械陀螺驱动模态进行第 2 次测量;谐振 2 h 后,再次重复步骤 2),对微机械陀螺驱动模态进行第 3 次测量。

4) 对 3 次测量获得的振动视频进行图像处理和运动参数提取,获取驱动模态振动位移的时域变化曲线。同时导出动态信号分析仪中的三组电学测量数据,利用工程数据管理软件(EDM)根据输入、输出信号间的关系确定微机械陀螺驱动模态振幅的时域变化曲线。

5) 以同一时间轴为横坐标,对比分析驱动电压扫频信号和驱动模态振动位移的时域曲线,按照位移时域曲线变化规律和驱动电压信号的时序状态确定两个信号间的同一个时间基准点。然后在同一时刻分别测取驱动电压信号的频率值和振动位移幅值,从而建立驱动电压频率值与振动位移幅值间的参数关系。逐个频率点完成参数对应关系后,获取驱动模态振动系统的幅频特性曲线。

3 测试结果及分析

对本课题组设计加工的微机械陀螺驱动模态进行电学测试,测得该陀螺驱动模态的振动幅值响应曲线如图 4 所示。

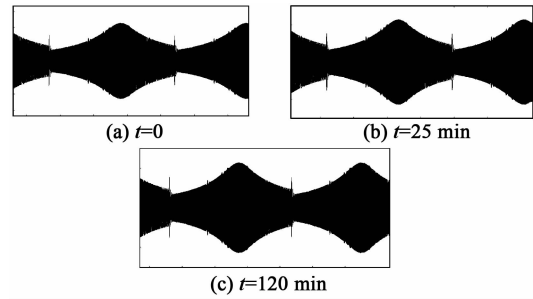


图 4 驱动电压扫频信号激励下振动幅值响应时域曲线

将图 4 振动幅值响应时域曲线的时间轴与驱动电压的扫频周期 0.75 s 的时间进程相对照,并根据幅值曲线变化规律确定两个信号间的同一个时间基准点,进而获得时间轴与频率值之间的转换关系。读取曲线峰值的坐标值,从而得到 3 个时间点的微机械陀螺驱动模态的固有频率值分别为 $f_1=4\ 070.4$ Hz, $f_2=4\ 071.0$ Hz, $f_3=4\ 069.5$ Hz。以图 4 所示的振动幅值响应时域曲线为对象,采用半功率点法作图测量,测得 3 个时间点的半功率点分别为 $\omega_{11}=4\ 024.2$ Hz, $\omega_{12}=4\ 119.4$ Hz, $\omega_{21}=4\ 024.1$ Hz, $\omega_{22}=4\ 119.4$ Hz, $\omega_{31}=4\ 023.5$ Hz, $\omega_{32}=4\ 119.2$ Hz。微机械陀螺驱动模态的工作带宽分别为

$$BW_1 = \omega_{12} - \omega_{11} = 95.2(\text{Hz}) \quad (2)$$

$$BW_2 = \omega_{22} - \omega_{21} = 95.3(\text{Hz}) \quad (3)$$

$$BW_3 = \omega_{32} - \omega_{31} = 95.7(\text{Hz}) \quad (4)$$

在采用半功率点法对幅频特性曲线进行处理的基础上,可以通过计算得到微机械陀螺驱动模态的 Q 分别为

$$Q_1 = \frac{f_1}{BW_1} = \frac{4\ 070.4}{95.2} = 42.8 \quad (5)$$

$$Q_2 = \frac{f_2}{BW_2} = \frac{4\ 071.0}{95.3} = 42.7 \quad (6)$$

$$Q_3 = \frac{f_3}{BW_3} = \frac{4\ 069.5}{95.7} = 42.5 \quad (7)$$

微机械陀螺驱动模态的电学测试结果如表 1 所示。

表 1 电学测试实验结果

t/min	f/Hz	ω_1/Hz	ω_2/Hz	BW/Hz	Q
0	4 070.4	424.2	419.4	95.2	42.8
25	4 071.0	424.1	419.4	95.3	42.7
120	4 069.5	423.5	419.2	95.7	42.5

实验采用非接触式应变位移视频测量分析软件 Video Gauge 对高速摄像机获取的驱动谐振的运动时序图像进行图像处理。通过选取微陀螺高速振动运动图像中能够代表驱动模态最大运动幅度部位的

局部进行计算^[12], 如图 5 所示。

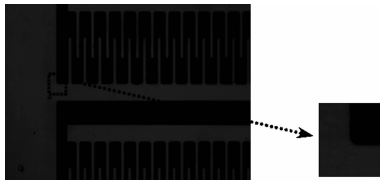


图 5 有限窗口选取的图像对象

然后在 MATLAB 环境中将通过图像处理获得的数据点绘制成的驱动模态振动位移响应曲线如图 6 所示。

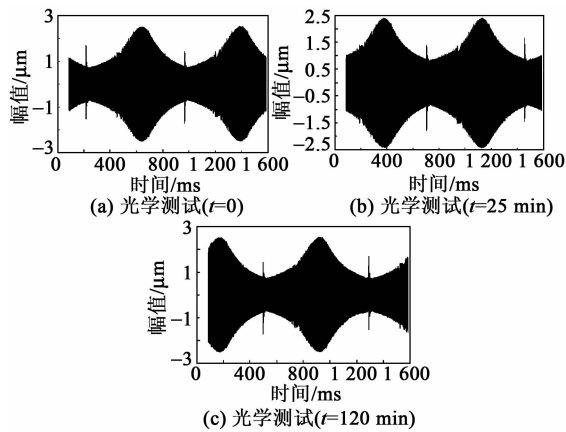


图 6 驱动电压扫频信号激励下振动位移响应时域曲线

在 MATLAB 环境中对照图 6 的时间轴和驱动电压的扫频周期 0.75 s 的时间进程, 按照位移曲线变化规律确定两个信号间的同一时间基准点。然后在同一时刻分别测取驱动电压信号的频率值和振动位移幅值, 从而将图 6 中的时间轴替换成频率轴。最后在固有频率值附近截取一段更小的有效频率范围, 获得的幅频特性曲线如图 7 所示。

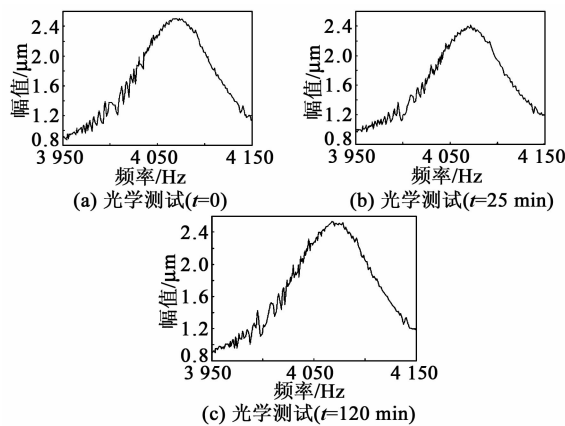


图 7 驱动模态振动系统的幅频特性曲线

图 6 中的幅频特性曲线是由驱动电压频率值与位移响应振幅测试值构成的数据点, 是在 MATLAB 系统中通过对图 6 所示振动位移时域曲线上

对应测取振幅值而编程实现的。分析这条测试获取的幅频特性可看出, 其形态完全符合谐波信号激励下单自由度强迫振动的幅频特性的特征。

在 MATLAB 系统中测取数据值, 可得 3 个时间点的微机械陀螺驱动模态的固有频率值分别为: $f_1 = 4\,068.8\text{ Hz}$, $f_2 = 4\,070.8\text{ Hz}$, $f_3 = 4\,068.1\text{ Hz}$ 。在图 7 位移幅频特性曲线上, 采用半功率点法, 在 MATLAB 系统中测得 3 个时间点的半功率点分别为 $\omega_{11} = 4\,023.8\text{ Hz}$, $\omega_{12} = 4\,113.1\text{ Hz}$, $\omega_{21} = 4\,023.1\text{ Hz}$, $\omega_{22} = 4\,112.9\text{ Hz}$, $\omega_{31} = 4\,021.4\text{ Hz}$, $\omega_{32} = 4\,112.6\text{ Hz}$ 。因而微机械陀螺驱动模态工作带宽分别为

$$BW_1 = \omega_{12} - \omega_{11} = 89.3(\text{Hz}) \quad (8)$$

$$BW_2 = \omega_{22} - \omega_{21} = 89.8(\text{Hz}) \quad (9)$$

$$BW_3 = \omega_{32} - \omega_{31} = 91.2(\text{Hz}) \quad (10)$$

在采用半功率点法对幅频特性曲线进行处理的基础上, 通过计算得到微机械陀螺驱动模态的品质因子 Q 分别为

$$Q_1 = \frac{f_1}{BW_1} = \frac{4\,068.8}{89.3} = 45.6 \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{f_2}{BW_2} = \frac{4\,070.8}{89.8} = 45.3 \quad (12)$$

$$Q_3 = \frac{f_3}{BW_3} = \frac{4\,068.1}{91.2} = 44.6 \quad (13)$$

微机械陀螺驱动模态的光学测试结果如表 2 所示。

表 2 光学测试实验结果

t/min	f/Hz	ω_1/Hz	ω_2/Hz	BW/Hz	Q
0	4 068.8	4 023.8	4 113.1	89.3	45.6
25	4 070.8	4 023.1	4 112.9	89.8	45.3
120	4 068.1	4 021.4	4 112.6	91.2	44.6

将通过电学测试与光学测试获得的微机械陀螺驱动模态的固有频率 f 和 Q 进行对比分析, 如表 3 所示。

表 3 电学测试与光学测试实验结果对比

t/min	$f_{\text{电}}/\text{Hz}$	$f_{\text{光}}/\text{Hz}$	$Q_{\text{电}}$	$Q_{\text{光}}$
0	4 070.4	4 068.8	42.8	45.6
25	4 071.0	4 070.8	42.7	45.3
120	4 069.5	4 068.1	42.5	44.6

由表 3 可知, 微机械陀螺驱动模态固有频率的长时漂移特性为随着陀螺谐振时间增加, 固有频率先向上漂移随后向下漂移。引起陀螺固有频率在开始阶段向上漂移的原因可能是硅微机械陀螺仪采用

的是硅-玻璃双层结构,随着陀螺谐振引起的局部温度升高,玻璃的膨胀变形较大,导致硅结构的弹性梁上产生拉应力,拉应力会引起结构刚度变大,固有频率向上漂移;而引起陀螺固有频率随后向下漂移的原因是随着陀螺谐振引起的局部温度升高,材料弹性模量 E 降低,从而使系统刚度降低,最终导致陀螺固有频率向下漂移。驱动模态的 Q 的长时漂移特性为随陀螺谐振时间增加, Q 持续向下漂移。这是由于在大气环境下,空气阻尼随温度增加而增加,而陀螺的 Q 与空气阻尼成反比,从而使微机械陀螺驱动模态的 Q 持续向下漂移。

4 结束语

实验采用光学测试与电学测试相互对比验证的方法,获得了常温下微机械陀螺仪的长时漂移特性。并对该长时漂移特性做出了合理的分析。

首先对陀螺固有频率的漂移情况进行了合理的分析,并给出了陀螺固有频率的影响因素:随着局部温度升高,一方面由于硅结构的弹性梁上产生拉应力,导致结构刚度变大,另一方面由于材料弹性模量 E 降低导致系统刚度降低。

然后对品质因子数的漂移情况进行了分析,给出了微机械陀螺驱动模态的品质因子数持续向下漂移的原因,即在大气环境下,由于温度增加导致空气阻尼增大,最终使品质因子数向下漂移。

参考文献:

- [1] 高钟毓. 微机械陀螺原理与关键技术[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(4): 40-44.
GAO Zhongyu. The operation principle and key technique of micromechanical gyroscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1995, 16(4): 40-44.
 - [2] NATHANSON H C, NEWELL W E, WICKSTROM R A, et al. The resonant gate transistor[J]. IEEE Trans Electron Devices, 1987, 14(3): 117-133.
 - [3] 谷庆红. 微机械陀螺的研制现状[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(5): 67-72.
GU Qinghong. Current state of MEMS gyro research[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2003, 11(5): 67-72.
 - [4] 邹达明. 动力调谐陀螺仪漂移测试与建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004: 51-52.
 - [5] 徐丽娜, 邓正隆. 陀螺仪漂移特性的小波分析[J]. 中国惯性技术学报, 2001, 9(3): 57-60.
XU Lina, DENG Zhenglong. Wavelet analysis of gyro drift characteristic [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2001, 9(3): 57-60.
 - [6] 王伯雄, 陈非凡, 董瑛. 微纳米测量技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
 - [7] 雷玉堂, 王庆有, 何加铭. 光电检测技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997: 3-8.
 - [8] TANG W C, NGUYEN T H, HOWE R T. Laterally driven polysilicon resonant microstructures[A]. Proc IEEE Micro Electro Mechanical Systems [C]//New York: USA, 1989: 53-59.
 - [9] 戴逸松. 微弱信号检测方法 & 仪器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
 - [10] 周明才, 白金鹏, 谢勇君, 等. MEMS 动态测试系统及其数据处理[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 398-402.
ZHOU Mingcai, BAI Jingpeng, XIE Yongjun, et al. MEMS dynamic testing system and data processing [J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 398-402.
 - [11] 师汉民. 机械振动系统(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
 - [12] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
-
- (上接第 619 页)
- [2] PLESSKY V P, REINDL L M. Review on SAW RFID tags[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(3): 654-668.
 - [3] KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas: for all applications[M]. 3th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
 - [4] KRAUS J D. Antennas since hertz and marconi[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, 33(2): 131-137.
 - [5] 章伟, 甘泉. UHF、RFID 标签天线设计、仿真及实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
 - [6] HARTMANN C S. Design of global SAW RFID tag devices[J]. Symp on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 2004 (3/5): 15-19.
 - [7] 童锐, 陈智军, 李庆亮, 等. 基于 MATLAB 的声表面波标签数据采集与处理[J]. 压电与声光, 2015, 37(2): 197-200.
TONG Rui, CHEN Zhijun, LI Qingliang, et al. Data acquisition and processing of the SAW tag based on MATLAB[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 197-200.
 - [8] 刘鹏, 张昌宏, 曹书豪. 一种移动射频识别系统模型设计与安全分析[J]. 四川兵工学报, 2014(6): 101-103.