

微机械隧道陀螺的振动特性测试

李文望^{1,2}, 王凌云²

(1. 厦门理工学院机械工程系, 福建 厦门 361024; 2. 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要:结合微机械陀螺仪和隧道效应的特点,提出了角振动微机械隧道陀螺仪的工作原理和结构设计方案。针对微机械陀螺的驱动和检测在面内和面外的结构特点,制定了图像处理法、静电力阶跃激励法和机械激励法等振动特性测试方法,在大气环境下分别对隧道陀螺仪驱动和检测模态的振动特性进行了测试,得到了相应的谐振频率,采用不同的方法得到的结果基本一致。

关键词:微机械隧道陀螺仪;驱动模态;敏感模态

中图分类号:TH703.8;TP274+.5

文献标识码:A

文章编号:1674-5124(2011)01-0010-03

Vibration measuring methods of micro-machined tunneling gyroscope

LI Wen-wang^{1,2}, WANG Ling-yun²

(1. Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

(2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on the characteristics of micro-machined gyroscope and tunneling effect, the principle of operation and structure design of angular vibrating tunneling gyroscope have been introduced. Given the vibration direction of driving and sensing mode in in-plane and out-of-plane, several vibration measuring methods, including image processing, electrostatic force step stimulation and mechanism excitation, were utilized to test the vibration characteristics of the driving and sensing model of the tunneling gyroscope under the atmosphere environment, the resonance frequency and quality factor of the tunneling gyroscope were also obtained. The same results are obtained by different methods.

Key words: micro-machined tunneling gyroscope; driving mode; sensing mode

1 引言

微机械隧道陀螺是近年发展起来的一种新型的微陀螺,它利用隧道电流对位移变化的高敏感特性检测角速度的变化,根据微机械隧道陀螺仪工作方式及特点^[1-4],对其驱动模态及检测模态固有频率初步测试,是对隧道陀螺仪进行进一步反馈控制及提取外界角速度输入的基础,也是对微机械隧道陀螺仪设计方法及工艺效果进行评价的有效检验手段。

2 角振动微机械隧道陀螺仪的结构和工作原理

微机械隧道陀螺仪与其他检测方式微陀螺相

比,结构设计原理基本相同,但由于电子隧道效应对电极间距的变化极其敏感,且制作工艺存在误差,所以微机械隧道陀螺在敏感和驱动方向上的正交误差要尽可能小。否则,驱动方向上的位移会引起隧尖的横向运动,导致隧尖的横向敏感。如果电极表面较粗糙,就会给陀螺检测引入噪声,因而支撑隧尖的敏感梁在驱动方向上应具有足够的刚度^[5-11]。

图 1 所示是角振动微机械隧道陀螺仪的结构图,当陀螺接通电源时,悬臂梁在偏转电极的静电力吸引下发生偏转,使隧尖靠近检测电极,进入隧道效应的工作状态。同时,变截面支撑梁在两边扇形固定梳齿驱动下,在 XY 平面内做往复角振动,当陀螺仪在 X 方向上有输入角速度时,扇形梳齿可动部分由于受到 Coriolis 力将产生 Z 方向的位移,该位移通过变截面梁传递到与其连接的悬臂梁,导致隧道间距发生改变。由于隧道效应对位移的敏感性,通过检测隧道电流的大小就可以检测出 X 方向输入角速度大小。

收稿日期:2010-09-05;收到修改稿日期:2010-10-28

基金项目:国家自然科学基金(50675222)

国家 863 高技术研究发展计划(2007AA04Z308)

福建省高校新世纪优秀人才支持计划(2007)

作者简介:李文望(1966-),男,福建永春县人,教授,硕士,主要从事 MEMS、静电纺丝的教学与研究。

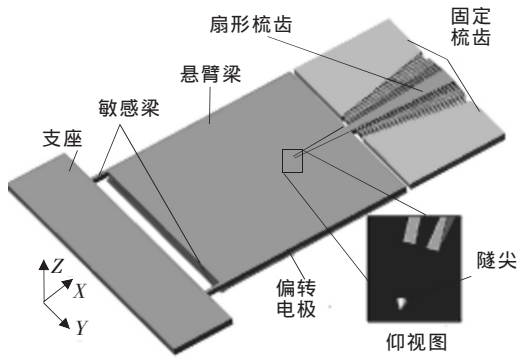


图1 角振动微机械隧道陀螺仪效果图

该结构方案的特点在于驱动和检测方向采用相互独立的支撑梁结构,避免了两个方向的正交耦合。同时,采用两个敏感梁左右支撑,进一步抑制了隧尖的横向振动。另外,扇形驱动随着半径的增大,驱动振幅相应增大,因而 Coriolis 力也相应增大,提高了陀螺仪的机械灵敏度。

3 微机械隧道陀螺仪的振动特性测试方法

3.1 驱动梁振动特性的测试方法

(1)图像法。由于陀螺驱动模态的振动方向是在面内振动,因而可以通过光学显微镜方便地观察结构在静态和动态振动下的位移,并可借助 CCD 和图像处理软件实现图像记录和位移测量。在谐振测试时,分别记录正弦激励频率及该频率下的最大振幅,绘制出幅频曲线便可得到陀螺仪在驱动方向上的谐振点。图像法测试谐振的测试平台主要由探针台、显微镜、信号发生器、功率放大模块、示波器、电源、CCD 及计算机等组成。图像法测试振动特性具有所见即所得的特点,在显微镜放大倍数足够高的情况下,具有较高的可靠性和真实性。

(2)静电阶跃激励测试法。如图 2 所示是静电阶跃激励法测试驱动梁振动特性的示意图。其测试原理为:当开关 K 断开或闭合瞬间,驱动梁受到静电力的阶跃激励,其阻尼自由振动引起可动梳齿与另一固定梳齿间电容改变,导致该电容上的充放电电流发生改变。该电流的变化过程,间接反映了振动梁的阶跃响应特性。静电阶跃激励法充分利用了微陀螺在驱动方向上的结构特点,并通过 C/V 方法得到驱动梁在静电冲击下的响应情况,由于其可以检测到纳米级的微小位移,因而该法具有较高的测量精度。

测试过程中,在可动梳齿上施加 $V_p=1\text{ V}$ 固定电压,两定齿中的一个定齿通过一开关 K 连接到另一固定电压 V_i 上, V_i 的大小在 30~70 V 间;另一固定梳

齿与 I-V 放大器相连接,其输出信号通过 A/D 采集卡记录于计算机中,通过 LabVIEW 和 Origin 等数据处理软件对测试结果进行分析,便可得出驱动梁的动态特性参数。

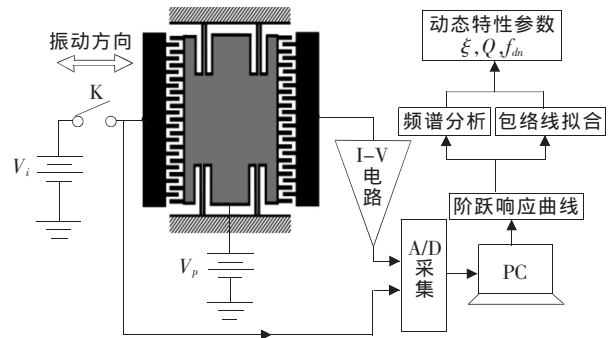


图2 静电阶跃激励法振动测试示意图

3.2 检测梁振动特性的测试方法

由于检测方向都在垂直方向上,且受到隧尖位移的限制,在垂直方向上检测梁的最大位移仅为 $1\ \mu\text{m}$ 左右,因而很难用前述光学方法分辨出振动位移的大小。另外,由于在垂直方向上只有一个电极可用,因而也很难采用静电激励方法测试垂直方向上的振动性能。基于这些特点,设计了如图 3 所示的机械激励-电容检测的方法测试悬臂梁在检测方向上的振动特性。由于悬臂梁的振动引起其与偏转电极之间的电容发生改变,通过 I-V 放大电路检测出电容变化过程中产生的充放电电流,经 A/D 数据采集和频谱分析软件,便可提取出检测梁在机械激励下的谐振情况。测试中,必须使陀螺仪检测梁的振动方向与激励器激励方向保持一致,信号发生器产生某一段正弦扫频信号经功率放大器后驱动激励器,当激励频率与检测梁频率一致时,使充放电电流发生较为明显的变化。因此,由频谱分析便可识别出陀螺在检测方向上的固有频率。

4 角振动隧道陀螺仪的振动测试及分析

4.1 驱动梁的固有频率测试

在扇形梳齿的两固定齿上分别施加 $V_d+V_a\sin\omega t$

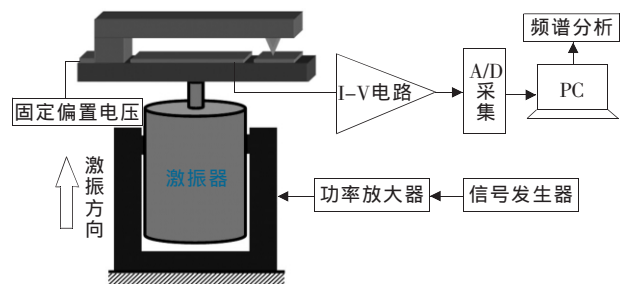


图3 机械激励法测试检测梁振动示意图

和 $V_d - V_a \sin \omega t$ 的激励信号时,驱动梁将在该静电激励下产生振动,当改变激励频率 ω 时,则可通过图像法找到驱动梁的谐振点。用 $40\text{ V} + 10\text{ V} \sin \omega t$ 和 $40\text{ V} - 10\text{ V} \sin \omega t$ 的驱动信号分别加在陀螺仪两固定梳齿下,驱动梁产生如图4所示的谐振响应振动。通过图像法,记录不同驱动频率下驱动梁振动图像,提取出相应振动角度,便得到如图5所示的频响曲线。由此可见,驱动梁的谐振频率为 6335 Hz 。

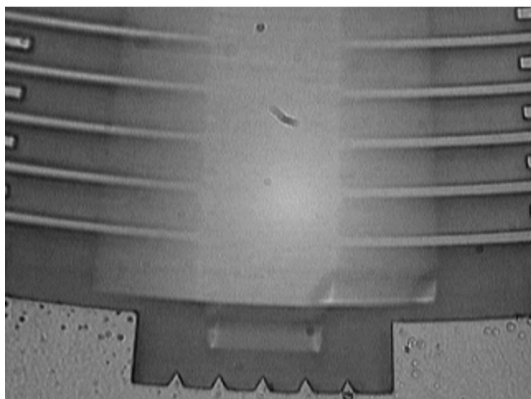


图4 驱动梁在正弦激励下的振动

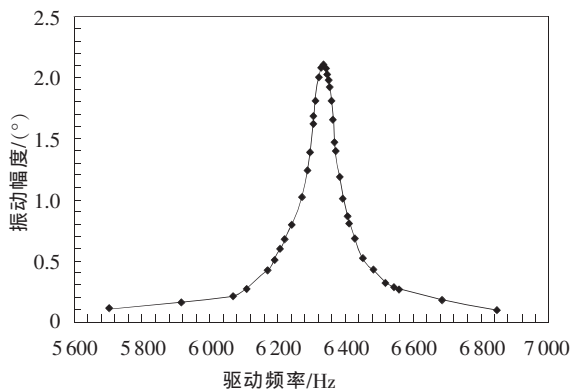
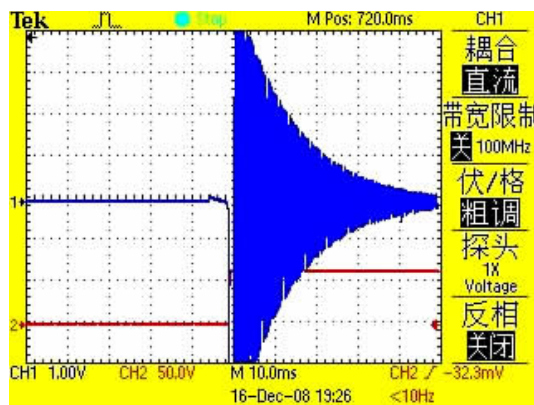


图5 图像法得到的角振动陀螺仪频响曲线

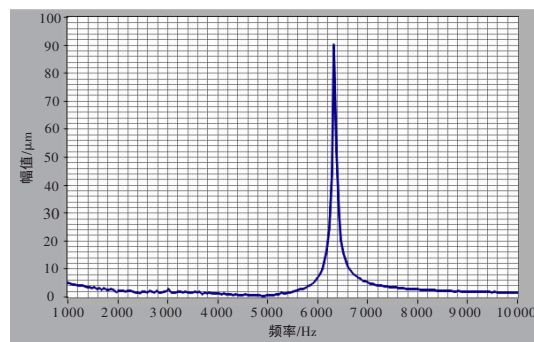
为了验证图像法所测试驱动梁的谐振频率,采用静电阶跃激励法对角振动陀螺仪进行了进一步测试。在图2所示的 V_i 上加上 60 V 直流电压,当开关 K 闭合瞬间,通过示波器得到如图6(a)所示阶跃响应曲线(CH1),CH2为连接 V_i 的变化曲线。当驱动梁受到静电力的阶跃激励后,将在新的平衡位置做阻力衰减自由振动,由于是小阻尼自由振动,因而可以认为其衰减振动频率即为驱动梁在驱动方向上的固有频率^[4]。其振动数据的频谱分析如图6(b)所示,从该结果得到的驱动梁谐振频率为 6340 Hz ,因而,进一步验证了图像法所得结果的可靠性。

4.2 检测梁固有频率测试

角振动隧道陀螺仪检测梁的振动特性测试采用

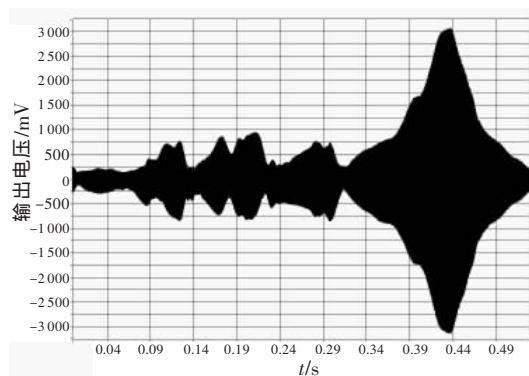


(a)示波器记录的驱动梁阶跃激励测试数据

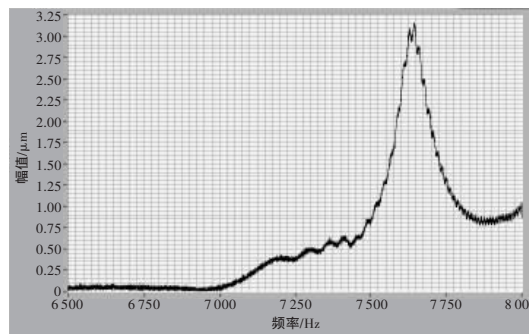


(b)测试数据频谱分析结果

图6 静电阶跃激励法测试驱动梁谐振频率



(a)谐振响应曲线



(b)谐振响应频谱图

图7 角振动隧道陀螺仪检测梁的机械激励测试

机械激励-电容检测方法。测试中使用信号发生器产生 $6.5\sim 8\text{ kHz}$ 的扫频信号,该信号经 (下转第30页)

的发生:一是内部因素,通过严格控制管线母材夹杂物分布与形状,即从减少母材中预先存在的微孔洞或微裂纹这一方面降低氢鼓泡发生的可能性;二是外部因素,主要通过降低 H_2S 浓度,减缓 H_2S 对压力容器的应力腐蚀,并合理控制输送介质 pH 值,尽量减少输送介质中水分含量等。

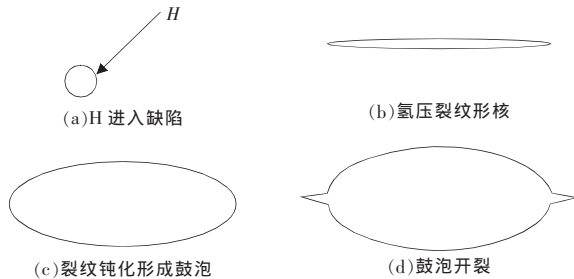


图 7 氢压裂纹钝化形成鼓泡示意图

3 结束语

高含 H_2S 集输管线因母材存在夹杂、气泡等缺陷以及受输送介质的侵蚀造成特殊部位局部腐蚀,裂纹沿垂直壁厚方向扩展并形成肉眼可见鼓泡分层现象,最终形成裂缝。存在均匀分布的腐蚀坑,且发现腐蚀过程中的 S 元素的堆积,由此判断氢鼓泡的发生是由于析出氢的聚集造成裂纹沿晶界开裂,裂纹的扩

(上接第12页)

功率放大器放大后,驱动 JZK-1(江苏联能电子有限公司)型激振器,在悬臂梁上施加 1 V 的固定电压。图 7(a)为截取的一次扫频过程中悬臂梁在检测方向上所产生谐响应曲线,该数据经频谱分析后所得的谐响应频谱图如图 7(b)所示,可得检测梁在检测方向上的谐振频率为 7 637 Hz,略低于理论设计的 7 794 Hz。

5 结束语

利用图像法和静电阶跃激励法分别测得角振动隧道陀螺仪在驱动方向的谐振频率以及通过机械激励-电容检测的方法得到角振动陀螺仪在其检测方向谐振频率与理论设计接近,为隧道陀螺仪进行进一步反馈控制及提取外界角速度输入打下扎实的基础。

参考文献

- [1] 孙道恒. 一种微机械隧道陀螺仪原型方案初探[J]. 微纳米科学与技术, 2000, 5(1): 106-108.
- [2] 裘安萍, 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.
- [3] Kubena R L, Vickers-Kirby D J, Joyce R J. A new tunneling-based sensor for inertial rotation rate measurements [J]. Journal of Microelectro-mechanical Systems, 1999, 8(4): 439-447.

展和生长造成分层现象。符合低强度钢在酸性、外加应力较低条件下发生氢鼓泡与氢诱发裂纹的现象。

参考文献

- [1] 杨燕. 高含 H_2S 天然气集输管道焊接工艺技术的研究[J]. 焊接技术, 2005, 34(7): 14-16.
- [2] 于洪喜, 李振林. 高含硫天然气集输管道泄露扩散数值模拟[J]. 中国石油大学学报, 2008, 32(2): 119-121.
- [3] 付建民, 陈国明. 设计阶段高含硫天然气管道泄露、爆炸危险的本质安全化分析与改进[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(2): 16-20.
- [4] 任学冲, 周庆军. 金属中氢鼓泡形核的机理[J]. 科学通报, 2007, 52(6): 725-729.
- [5] 任学冲, 褚武扬. 夹杂对氢鼓泡形成的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(7): 673-677.
- [6] 任学冲, 单广斌. 氢鼓泡的形核、长大和开裂[J]. 科学通报, 2005, 50(16): 1689-1692.
- [7] Chirita S. On saint-venant's principle for a homogeneous elastic arch-like region[J]. Elasticity, 2005(8): 115-127.
- [8] 李春风. 低碳钢质壳体表面形成氢鼓泡的原因分析[J]. 物理测试, 2002(6): 9-10.
- [9] 乔亮. 球罐氢鼓泡形成原因及防护措施[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2006, 23(2): 51-53.
- [10] 蒋文春, 巩建鸣. 湿 H_2S 环境下 16MnR 钢氢鼓泡的有限元模拟[J]. 吉林大学学报, 2008, 38(1): 61-65.

- [4] 董煜茜, 高钟毓, 张嵘. 一种振动轮式微机械陀螺仪的特性研究[J]. 中国惯性技术学报, 1999, 7(2): 30-34.
- [5] Geiger W, Butt W U, Gaisser A, et al. Decoupled microgyros and the design principle DAVED [J]. Sensors and Actuators, 2002, 95(2-3): 239-249.
- [6] 康新, 董萼良, 裘安萍, 等. 振动式微机械陀螺仪动态特性光学测试[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 202-206.
- [7] 徐铭陶, 肖明葵. 工程动力学振动与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 228-248.
- [8] 王曙霞, 梁洪洁, 王小营, 等. 基于虚拟仪器的机械陀螺仪测试系统研究[J]. 电子设计工程, 2010, 18(6): 42-44.
- [9] Chen Y. A novel tuning fork gyroscope with high Q-factors working at atmospheric pressure [J]. Microsystems Technologies, 2005, 11(2-3): 111-116.
- [10] Acar C, Andrei M S. Structurally decoupled micromachined gyroscope with post-release capacitance enhancement[J]. J. Micromech. Microeng, 2005(15): 1092-1101.
- [11] Ding H T, Liu X S, Cui J, et al. A bulk micromachined Z-Axis single crystal silicon gyroscope for commercial applications [C]// Proceeding of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Sanya, 2008: 1039-1042.