

文章编号 1004-924X(2008)05-0889-05

驱动方式对微流体陀螺仪输出信号的影响

赵 燕¹, 苏 岩²

(1. 南京工业职业技术学院 电气与自动化系, 江苏 南京 210046;

2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:研究了不同驱动方式下微流体陀螺仪敏感信号的检测方法及其特性。介绍了陀螺仪的工作原理,给出了两种驱动方式下的信号检测方案。直流电压驱动时,敏感到直流流速,经过差动电桥放大后,可得输出电压。交流电压驱动时,敏感到交流流速,用相干检测方法提取有用信号,通过低通滤波、放大,最终得到正比于外界输入角速度的直流电压。实验数据分析可得:交流电压驱动时,输出信号的标度因数为 $17.05 \mu\text{V}/(^\circ\text{s}^{-1})$,标度因数非线性为 5.725%,标度因数对称性为 4.52%,零偏及零偏稳定性为 $1.066 \text{ }^\circ\text{s}$ 和 $14.3 \text{ }^\circ\text{s}$;直流驱动时指标分别为 $400.8 \mu\text{V}/(^\circ\text{s}^{-1})$ 、12.129%、15.29%、 $4.803 \text{ }^\circ\text{s}$ 和 $43.5 \text{ }^\circ\text{s}$ 。结果表明:从综合指标方面看交流电压驱动方式和相关检测方案下测量效果最佳。

关键词:微流体陀螺;驱动方式;信号测量

中图分类号:V241.5 文献标识码:A

Influence of drive modes on output signals of micro-fluidic gyroscope

ZHAO Yan¹, SU Yan²

(1. Department of Electronic & Automation, Nanjing Institute of Industry & Technology, Nanjing 210046, China; 2. Institute of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The operational principles of micro-fluidic gyros were introduced. Two kinds of drive modes for micro-fluidic gyroscope, DC drive and AC drive, were presented, the influence of the drive modes on the performance of output signals was analyzed. While the DC actuated, the Coriolis acceleration induced by an external angular velocity could cause the deflections of fluid velocity to cool the thermocouples oppositely, then, the temperature disturbances of thermocouples were converted to a DC differential output voltage proportional to the angular velocity. On the other hand, while the AC applied, the required signals included in sine wave velocity could be selected out with the use of the Phase Sensitive Demodulation (PSD), low-pass filters and the amplifiers and the DC voltage proportional to the external angular velocity was obtained. The experimental results indicate that the scale factor and its nonlinearity and the symmetry are $17.05 \mu\text{V}/(^\circ\text{s}^{-1})$, 5.725% and 4.52%, and the zero drift and the stability of output signals are $1.066 \text{ }^\circ\text{s}$ and $14.3 \text{ }^\circ\text{s}$ by AC drive, while the corresponding results are $400.8 \mu\text{V}/(^\circ\text{s}^{-1})$, 12.129%, 15.29%, $4.803 \text{ }^\circ\text{s}$ and $43.5 \text{ }^\circ\text{s}$ by DC drive. It comes to

收稿日期:2007-10-08;修订日期:2007-12-03.

基金项目:国家 973 工程资助项目(No. 51326010404);国家自然科学基金资助项目(No. 10572039)

the conclusion that the micro-fluidic gyroscope has better performance by the AC drive and correlation detection.

Key words : micro-fluidic gyroscope ; drive modes ; signal measurement

1 引言

由清华大学设计、中国电子集团第 13 研究所加工而成的微流体陀螺仪,是利用气体流速方向在哥氏加速度作用下发生偏转的原理,采用微机械加工工艺制作的一种角速度传感器。该类型传感器采用气体介质来敏感外界输入角速度的变化,并用气体取代了机械陀螺的检测质量。哥氏加速度改变了气体介质的流动方向,进而引起温度场的变化,通过检测温度的变化量测量出外界输入角速度的大小^[1]。与传统陀螺仪相比,由于没有悬挂质量块,此类陀螺仪结构大大简化,制作难度降低,更重要的是,省去了复杂的活动部件,其抗冲击、抗振动能力大大提高,特别适合在高冲击、高振动环境下使用^[2-4]。

此类陀螺仪传感器敏感信号非常微弱,本项目组进行了信号测试线路的实验及改进工作。由于不同驱动方式下敏感信号的性能具有显著差异,因此,寻找合适的驱动方法并配以相应的检测线路,得到陀螺仪最佳性能指标是研究中的一个重要问题。通过理论分析,设计了不同的驱动与检测电路,经过大量实验验证,以交流驱动方式并配以合适的检测方案测量效果最佳。

2 工作原理介绍

微流体陀螺仪由隔热腔体、加热器和两对对称的温度传感器构成。加热器和温度传感器密封在腔体内,防止外部气流和温度对器件产生影响。角速度从 z 轴输入,垂直于 z 轴的平面称为工作面。在工作面中,加热器位于 y 轴方向,两对共四个敏感丝放置在 x 轴方向,完全对称于加热器分布。其结构原理如图 1 所示^[5]。

当 z 轴方向无角速度输入时,密封在腔体内的气体在温度差异和重力作用下规则流动。当重力加速度方向与 z 轴一致时,位于工作面的气流沿 x 轴做相反运动,气体流速为 v_x , 气流运动示意图如图 2(a) 所示。

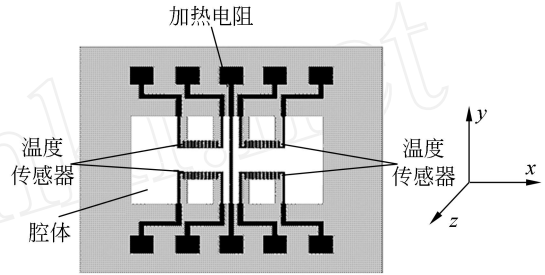
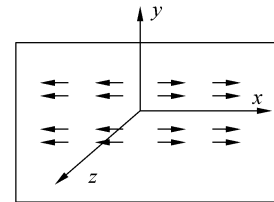
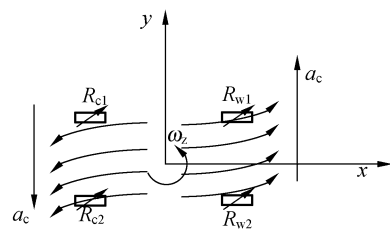


图 1 微流体陀螺仪结构示意图
Fig. 1 Scheme of micro-fluid gyroscope



(a) 工作面上
(a) On working plane



(b) 腔体转动时
(b) Rotating chamber

图 2 密封腔体内气流流动示意图

Fig. 2 Scheme of gas flow region in sealed chamber

当 z 轴方向有角速度输入时,会在 y 轴方向上引起哥氏加速度 a_c , a_c 改变气流 v_x 的运动方向,分别使两边对称的热敏电阻上呈现不同的温度场,电阻值随之变化,如图 2(b) 所示,分别用电压差 U_{RW} 和 U_{RC} 表示,经过差动结构后,总电压差 U 正比于角速度 ω_z :

$$U = U_{RW} - U_{RC} \quad a_y - a_y = 4 \omega_z v_x. \quad (1)$$

3 驱动方式与数据采集

针对微流体运动的特点,研制了合适的信号驱动与检测方案^[6-7]。

驱动方式主要指对加热丝的加热方式。在密闭腔体内,给加热丝施加电流或电压,使其温度升高,并在其周围形成不同温度梯度场。在温度差异和重力作用下,腔体内的空气发生自然对流。采用不同的加热方式,气体流速 v_x 的大小和方向不一样,对敏感输出信号会产生不同的影响。

3.1 直流驱动

采用直流电压驱动时,产生恒流流速 v_x , 在外界输入角速度时,产生哥氏加速度。通过热敏电阻构成的电桥电路,可以获得正比于输入角速度的敏感输出电压。直流驱动时陀螺效应测试原理见框图 3。这种检测方式直接利用直流放大器进行信号放大。此时,传感器和前级放大器的 $1/f$ 噪声及缓慢漂移(包括温度漂移和时间漂移)经放大后,以很大的幅度出现在后级放大器的输出端^[8],导致输出信号的信噪比很低,检测到的有用信号性能较差。

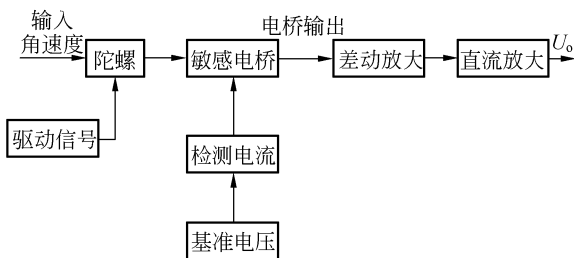


图 3 直流驱动时陀螺效应测试原理框图

Fig. 3 Detecting gyroscope effect by DC drive

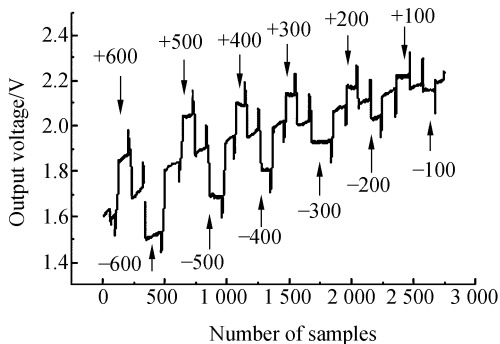


图 4 直流驱动时输出响应曲线

Fig. 4 Response curve by DC drive

直流电压加热驱动时输出响应曲线见图 4。图中横轴为采样点数,纵轴为输出电压值,单位为 V。实际实验中依次对陀螺仪输入不同的角速度 ± 600 、 ± 500 、 ± 400 、 ± 300 、 ± 200 、 ± 100 $^\circ/s$,测得各个角速度时对应的输出电压。

3.2 交流驱动

采用交流电流或电压进行加热驱动,产生交变的温度场,使得气体交替膨胀与收缩,产生交变的气流速度 v_x 。在外界输入角速度时,产生交变的哥氏加速度。通过热敏电阻电桥,可以将该信号转化为正弦信号。通过相干检测的方法获得与输入角速度成正比的敏感电压信号。陀螺效应测试原理见框图 5。

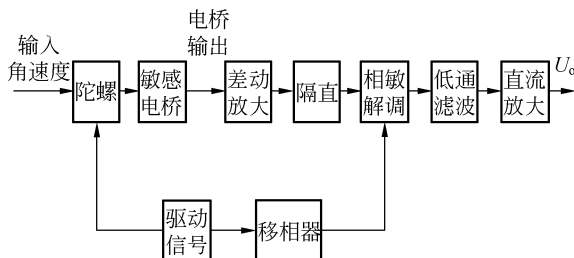


图 5 交流驱动时陀螺效应测试原理框图

Fig. 5 Detecting gyroscope effect by AC drive

采用交流电流加热驱动时,通过恒流源电路提供幅值恒定的交流电流给加热丝,加热功率为 $P = I^2 R$ 。对于不同加热电阻值的陀螺仪,需要限定加热电流和检测电流,采用恒流源电路可以方便地调节电流大小。当加热丝上电工作时,密闭腔体内的温度 t 增加,正温度系数的加热丝电阻阻值 R 会变大,由于加热电流幅值恒定,加热功率增大,导致腔体内的温度 t 进一步增加,热敏电阻 R 继续增加,功率 P 进一步增大,调整不好会导致加热丝烧毁。

采用交流电压进行加热驱动时,加热功率为 $P = U^2 / R$ 。加热时温度增加,加热丝电阻阻值 R 变大,由于加热电压幅值恒定,加热功率降低,导致腔体内的温度 t 下降,热敏电阻 R 减小,从而自发地达到动态平衡,近似维持恒定温度。测量数据如图 6 所示。图中横轴为采样点数,纵轴为输出电压值,单位为 V。实际实验中依次对陀螺仪输入的角速度与直流驱动时相同。

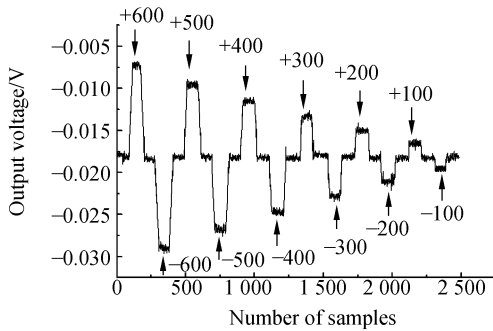
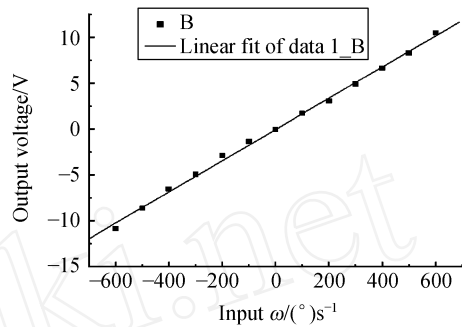


图 6 交变电压驱动时输出响应曲线
Fig. 6 Response curve by AC drive



(b) 交流驱动时线性度曲线
(b) Linear curve by AC drive

4 性能分析

在进行对比实验时,在相近的外部温度和湿度环境下,采用相同的稳压源、信号源和工作转台,并对同一陀螺仪传感器的多次测量数据进行分析,尽可能减小其他因素对实验结果产生的影响。

4.1 量程

根据转台的性能,两种测量方式均能达到最大测量量程 $\pm 600 \text{ }^\circ/\text{s}$ 。

4.2 标度因数

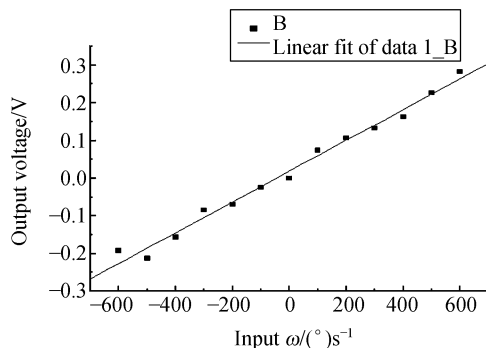
建立陀螺仪输入输出关系的线性模型:

$$F_j = k_{ij} + F_0 + j, \quad (2)$$

式中: k —标度因数,单位 $\mu\text{V}/(^\circ/\text{s})$;

F_0, j —拟合零位和拟合误差。

根据上述计算机采集到的不同输入角速度 ± 600 、 ± 500 、 ± 400 、 ± 300 、 ± 200 、 $\pm 100 \text{ }^\circ/\text{s}$ 时对应的输出电压,取各测量点的统计均值,作线性度曲线,见图 7。



(a) 直流驱动时线性度曲线
(a) Linear curve by DC drive

图 7 不同驱动方式时线性度曲线

Fig. 7 Linear curves by two drive modes

对数据进一步进行处理,计算标度因数、标度因数非线性和标度因数对称性指标,见表 1。交流电压驱动时输出信号标度因数的非线性及对称性均优于直流电压驱动。

表 1 标度因数性能对比

Tab. 1 Comparison of scale factors by two drives

	直流驱动时	交流驱动时
标度因数 $\mu\text{V}/(^\circ/\text{s})$	400.8	17.05
标度因数非线性	12.129 %	5.725 %
标度因数对称性	15.29 %	4.52 %

4.3 零偏

将陀螺仪固定在工作转台上,设定计算机采样周期 0.25 s,测试时间在启动时间的基础上顺延 30 min,测得陀螺仪零位输出电压,并计算零偏和零偏稳定性,见表 2。

表 2 零偏特性对比

Tab. 2 Comparison of zero drifts by two drives

	直流驱动时	交流驱动时
零偏 $(^\circ/\text{s})$	4 806	1 066
零偏稳定性 $(^\circ/\text{s})$	43.5	14.3

对上述特性进行比较,不难看出:直流驱动时零位漂移电压不断升高,而交变电压驱动时零位电压较稳定,零偏及零偏稳定性较好。

5 结 论

本文介绍了微流体陀螺传感器的工作原理,提出了直流驱动和交流驱动两种方式。直流加热驱动时,采用直流放大后得到敏感输出电压;交流加热驱动时,采用相干检测方法提取出敏感信号。交流驱动方式又可分为交流电流驱动和交流电压驱动。

实验数据表明:微流体陀螺传感器在 z 轴方向上的陀螺效应可以通过电路检测出来。从标度因数及其非线性和对称性分析,交流电压驱动时

输出信号的指标为 $17.05 \mu\text{V}/(9 \text{ s}^{-1})$ 、 5.725% 和 4.52% ,而直流驱动时相应为 $400.8 \mu\text{V}/(9 \text{ s}^{-1})$ 、 12.129% 和 15.29% 。交流电压驱动时输出信号标度因数的非线性及对称性明显优于直流电压驱动。采用直流信号驱动时,陀螺仪的输出信号极易受到噪声和漂移的影响,陀螺仪的零偏较大,零偏及零偏稳定性为 $4803 \text{ } \mu\text{s}$ 和 $43.5 \text{ } \mu\text{s}$;当采用交流驱动时,陀螺仪零位电压较稳定,零偏及零偏稳定性为 $1066 \text{ } \mu\text{s}$ 和 $14.3 \text{ } \mu\text{s}$ 。综上所述,用交流电压驱动和相干检测方案进行测量时输出信号性能最佳,为首选测量方案。

参考文献:

- [1] ZHU R, SU Y, DING H G. A MEMS hybrid inertial sensor based on convection heat transfer[C]. *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Seoul, Korea*, 2005, 6:114-116.
- [2] LEUNG A M, JONES J, CZYZEWSKA E, et al. . Micromachined accelerometer based on convection heat transfer [C]. *IEEE*, 1998, 2:627-630.
- [3] 张福学. 气流式惯性器件-压电射流速率陀螺与气体摆式加速度传感器[J]. *电子元件与材料*, 1999, 18(2):31-38. ZHANG F X. Air flow inertial sensor-piezoelectric gyro of jet rate and acceleration sensor of gas pendulum [J]. *Electronic Components & Materials*, 1999, 18(2):31-38. (in Chinese)
- [4] 尹杰. 微流体陀螺测控电路研究[D]. 东南大学硕士论文, 2006. YIN J. *Research of detecting & controlling circuit of microfluidic gyroscope* [D]. Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [5] ZHU R, DING H G, SU Y, et al. . Micromachined gas inertial sensor based on convection heat transfer[J]. *Sensors and Actuators*, 2006, 1:68-74.
- [6] 江小宁, 周兆英, 李勇, 等. 微流体运动的试验研究[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(6):51-55. JIANG X N, ZHOU ZH Y, LI Y, et al. . Study on micro-fluid flow behaviour[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(6):51-55. (in Chinese)
- [7] 江小宁, 周兆英, 李勇, 等. 微流量测量系统及其在微流体运动研究中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 1995, 2:346-351. JIANG X N, ZHOU ZH Y, LI Y, et al. . Microfluid measuring system and its application in the microfluid flow behaviour research[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1995, 2:346-351. (in Chinese)
- [8] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. GAO J ZH. *Detecting of the Weak Signal* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:赵燕(1978-),女,江苏南京人,讲师,工学硕士,主要研究方向为精密仪器及测控技术。E-mail: zhaoy2@niit.edu.cn, iamfeier@sohu.com
苏岩(1967-),男,江苏苏州人,教授,工学博士,主要研究方向为MEMS惯性技术。E-mail: suyuan@mail.njust.edu.cn