

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513931

一种基于双向热膨胀流的 MEMS 陀螺研究

马炫霖, 朴林华, 刘琚宇

(北京信息科技大学传感器重点实验室 北京 100000)

摘要:提出并验证了一种基于双向热膨胀流原理的 MEMS 陀螺,陀螺通过加热器的瞬时温度变化产生气流,进而导致热敏电阻的温变,并转换成相应的输出电压,最终实现对 Z 轴角速度的准确检测。为了进一步提高陀螺性能,降低交叉耦合,同时优化制备工艺,需对所设计的陀螺结构进行优化设计。首先,需借助 COMSOL Multiphysics 仿真软件,针对敏感元件的位置分布、摆放方式以及单、双向热膨胀流等因素对灵敏度的影响展开深入探究。通过系统性的仿真分析,明确最优的敏感元件摆放位置范围,确定平行摆放方式为最佳选择。其次,从理论与仿真结果两方面论证,双向热膨胀流能够实现更高的输出灵敏度,并且在抑制耦合方面表现更为出色。最后基于以上研究,对该 MEMS 陀螺进行流片制备,并对制作的基于双向热膨胀流的 MEMS 陀螺进行性能测试并分析陀螺的不足。测试结果表明,在加热器的驱动信号为 2.5 V、50% 占空比、10 Hz 方波的情况下,该陀螺能够在 $\pm 600^\circ/\text{s}$ 范围内检测角速率,灵敏度为 $3.04 \text{ mV}/(^\circ \cdot \text{s}^{-1})$,非线性度为 7.09%。实验结果与数值模拟相符,该陀螺具有灵敏度高、抑制交叉耦合和工艺简单等特点,可用于电子设备、航天和医学仪器等领域。

关键词: 热膨胀流陀螺;有限元分析;MEMS 工艺;无掩膜光刻

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A study of a MEMS gyro based on bidirectional thermal expansion flow

Ma Xuanlin, Piao Linhua, Liu Junyu

(Key Laboratory of Sensors, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100000, China)

Abstract: A MEMS gyro based on the principle of bi-directional thermal expansion flow is proposed and validated. The gyro generates airflow through the instantaneous temperature change of the heater, which induces a corresponding temperature change in a thermistor. This temperature variation is then converted into an output voltage, enabling accurate detection of angular velocity along the Z-axis. In order to further improve the performance of the gyroscope, reduce the cross-coupling, and optimize the preparation process, structural design optimization is necessary. COMSOL Multiphysics simulation software is used to explore the influence of factors such as the positional distribution of the sensitive components, the placement mode, and the uni-directional and bi-directional thermal expansion flows on the sensitivity. Through systematic simulation analysis, the optimal placement range of sensitive elements is clarified, with the parallel placement determined to be the most effective configuration. Furthermore, both theoretical and simulation results demonstrate that the bidirectional thermal expansion flow realizes higher output sensitivity and superior cross-coupling suppression compared to its uni-directional counterpart. Finally, based on the above findings, a MEMS gyro is prepared and its performance is experimentally evaluated. The test results show that the gyro is capable of detecting the angular rate in the range of $\pm 600^\circ/\text{s}$ with a sensitivity of $3.04 \text{ mV}/(^\circ \cdot \text{s}^{-1})$ and a nonlinearity of 7.09%, under a heater drive signal of 2.5 V, 50% duty cycle, and 10 Hz square wave. The experimental results are consistent with the numerical simulations, confirming that the gyro offers high sensitivity, effective cross-coupling suppression, and a simplified fabrication process. These characteristics make it suitable for applications electronic devices, aerospace and medical instruments.

Keywords: thermal expansion flow gyro; finite element analysis; MEMS process; maskless lithography

0 引言

热膨胀流陀螺是热惯性传感器中的一类,通过加热器的瞬时温度变化产生气流^[1-2]。与基于自然对流的气体惯性传感器相比,它可以有效抑制外部线性加速度的影响,并显著降低旋转加速度耦合效应。目前针对热膨胀流的陀螺主要集中在优化结构,提高灵敏度,抑制陀螺产生的加速度信号干扰等方面^[3-8]。

自从 Liu 等^[9-12]提出热膨胀流陀螺以来,为提高性能,许多人对热膨胀流陀螺结构进行着研究和优化。凤瑞等^[13-14]提出了一种热膨胀流陀螺仪,它通过加热器和热敏电阻的平行配置产生振荡气流。Zhu 等^[15]使用加热器和热敏丝垂直的结构进行结构配置,利用 3 组加热器产生双向膨胀流,开发出一种两轴惯性测量装置。Chang 等^[16-17]提出了方形配置的用单向膨胀流进行测量的三轴惯性测量装置,后续为降低交叉耦合又,采用双向膨胀流实现多轴测量的三轴气体惯性传感器。Kock 等^[18-19]采用一组加热器进行加热,使用平行结构进行配置,同时首次提出热陀螺基础上改进参数进而探究对陀螺仪性能的影响。Luo 等^[20]通过对计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型进行仿真,得出热膨胀流陀螺平行结构的灵敏度大于垂直结构,同时证明如热敏元件位置摆放,加热器宽度等参数与实现极高的灵敏度息息相关。然而由于没有综合考虑加热方式和探究敏感元件的摆放位置对灵敏度带来的影响,导致灵敏度仍有提高的空间。

通过提供一种新的配置结构,采用 3 组加热器进行不同的加热模式,为每个热敏电阻对分别生成单、双向热膨胀流来对比其对灵敏度以及双向热膨胀流对非敏感轴的交叉耦合的影响。同时,将制定温差量化标准,并基于有限元仿真对敏感元件的位置分布和摆放方式进行探究,来对敏感元件最佳位置的摆放进行判定,达到提高灵敏度的目的。

1 工作原理

基于双向热膨胀流的陀螺的三维结构示意图如图 1 所示。

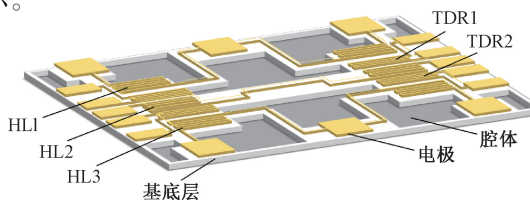


图 1 基于双向热膨胀流的陀螺的三维结构

Fig. 1 Schematic of the three-dimensional structure of a gyro based on bidirectional thermal expansion flow

其结构主要包括密封盖板和敏感层,陀螺的核心是一个封装在充满空气的密封腔内的硅传感芯片。该陀螺包含 6 个加热电阻 HL1、HR1、HL2、HR2、HL3、HR3(下文统一简称为 H1、H2、H3)及 4 个热敏电阻 TDL1、TDR1、TDL2、TDR2,从而形成 3 组左右对称的加热器进行交替加热以及上下两组检测电阻单元进行温差测量(L、R 分别表示位于左、右两侧的敏感元件)。以上方的一组检测单元为例,加热器 H1 和 H2 分别由两个相位差为 90°、脉冲占空比为 50%的同频率方波驱动,如图 2 所示。

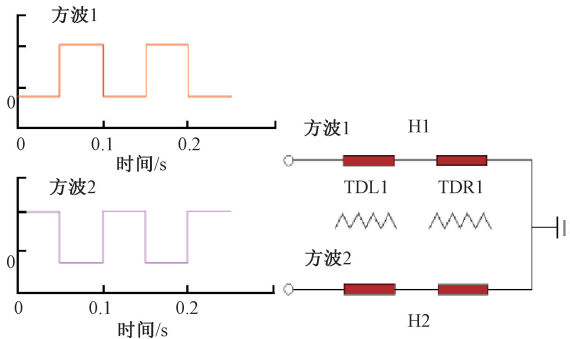


图 2 加热器 H1 和 H2 的驱动方波图

Fig. 2 Driving square waves for heaters H1 and H2

如图 3 所示为角速度测量工作原理。推拉式热膨胀流(图 3(a)和(b))是通过交替加热和冷却相对的加热

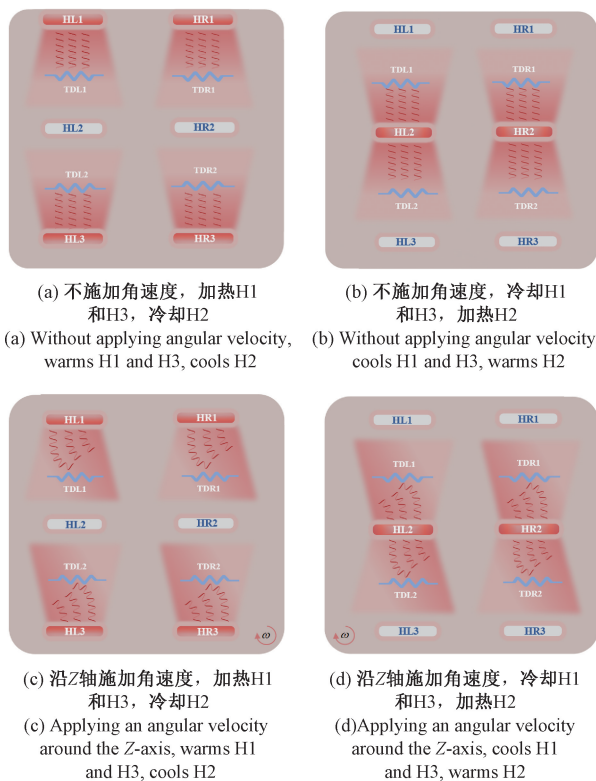


图 3 角速度测量工作原理

Fig. 3 Angular rate measurement operating principle diagram

器而产生的。热敏电阻 T1 和 T2 都用来检测温度变化引起的电阻变化。由于采用这种异步驱动方式,形成的流动可以在两个方向上更快地移动,并且在腔室内对称。因此,可以实现更高的输出灵敏度和更好的交叉耦合抑制。

理论上,假设加热器和热敏电阻的结构和分布理想对称,设热敏电阻 TDL1 敏感到的温度为 T_1 ,热敏电阻 TDR1 敏感到的温度为 T_2 ,TDL2 敏感到的温度为 T_3 ,TDR2 敏感到的温度为 T_4 ,上、下侧温差分别用 ΔT_A 、 ΔT_B 表示,气流将沿科里奥利力的方向并在热敏电阻 T_1 和 T_2 之间产生温差 ΔT_A 。则上下热敏电阻间的平均温度差 ΔT 为:

$$\Delta T_A = T_1 - T_2 \quad (1)$$

$$\Delta T_B = T_3 - T_4 \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{2} \quad (3)$$

敏感元件的材料是铂,热流陀螺的工作温度为 $15^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$,采用 $0^\circ\text{C} \sim 850^\circ\text{C}$ 的铂特性方程,即:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha T + \alpha_0 T^2] \quad (4)$$

其中, T 是随时间变化的温度, R_T 是在温度 T 下的铂丝阻值, R_0 是在温度 $T = 0$ 下的铂丝阻值, α 和 α_0 分别为铂丝温度一次和二次电阻温度系数,理想情况下, $\alpha T \gg \alpha_0 T^2$,所以 $\alpha_0 T^2$ 项可以忽略不计。式(4)可以转换为:

$$R_i = R_0 [1 + \alpha T_i] \quad (5)$$

温差在铂电阻上体现为阻值的变化,热敏电阻 TDL1、TDR1 和惠斯通电桥输出电压关系为:

$$R_{TDL1} = R_0 (1 + \alpha T_1) \quad (6)$$

$$R_{TDR1} = R_0 (1 + \alpha T_2) \quad (7)$$

$$\Delta R_A = R_{TDL1} - R_{TDR1} = \alpha R_0 (T_1 - T_2) = \alpha R_0 \Delta T_A \quad (8)$$

$$U_5 = A \left(\frac{R_{TDL1}}{R_{\text{ref}} + R_{TDL1}} - \frac{R_{TDR1}}{R_{\text{ref}} + R_{TDR1}} \right) V_{\text{cc}} = A \alpha V_{\text{cc}} \frac{R_{\text{ref}} R_0}{(R_{\text{ref}} + R_{TDL1})(R_{\text{ref}} + R_{TDR1})} \Delta T_A \quad (9)$$

同理可推出:

$$U_6 = A \left(\frac{R_{TDL2}}{R_{\text{ref}} + R_{TDL2}} - \frac{R_{TDR2}}{R_{\text{ref}} + R_{TDR2}} \right) V_{\text{cc}} = A \alpha V_{\text{cc}} \frac{R_{\text{ref}} R_0}{(R_{\text{ref}} + R_{TDL2})(R_{\text{ref}} + R_{TDR2})} \Delta T_B \quad (10)$$

式中: R_{ref} 是参考电阻; R_{TDL1} 和 R_{TDR1} 是为热敏电阻 TD1 和 TD2 阻值,理想情况下,各个桥臂阻值相同; $\Delta T = \Delta T_A = \Delta T_B$; U_5 、 U_6 是经过一次差分放大后的输出电压; α 为铂电阻的温度系数; A 为一级差分放大器放大倍数; B 为二级差分放大器放大倍数。则理论电路输出电压 V_{out} 为:

$$V_{\text{out}} = \frac{U_5 - U_6}{2} = \alpha AB V_{\text{cc}}$$

$$\left(\frac{R_{\text{ref}} R_0}{(R_{\text{ref}} + R_{TDL1})(R_{\text{ref}} + R_{TDR1})} \right) \Delta T \quad (11)$$

由式(11)可知,输出电压 V_{out} 的大小与平均温差 ΔT 成正比。热流偏转使得热敏电阻产生温差,通过将温度变化转化为热敏电阻的阻值变化,最后转化为输出电压的变化,通过测量电压的大小,进而测出角速度的,实现 Z 轴角速度的精确测量。为了实现 Z 轴角速度的提取和检测,设计了包括 2 个惠斯通电桥的读取电路,MEMS 陀螺的解调读取电路如图 4 所示。

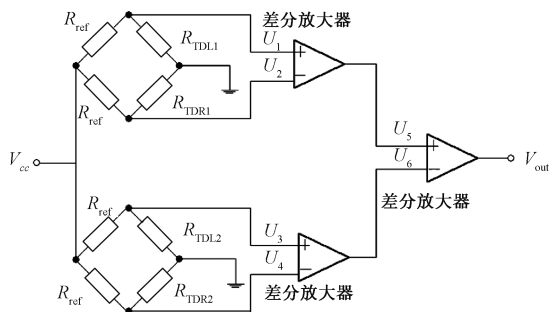


图 4 MEMS 陀螺仪输出电路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of MEMS gyro output circuitry

2 数值模拟与分析

为理解惯性传感器中流体流动的机理,建立一个计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型,利用 COMSOL Multiphysics 软件构建瞬态三维模型并进行网格划分,模拟充满气体的尺寸为 $10.24 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ($X \times Y \times Z$) 的微室中的膨胀流行为。来描述传感器腔室中的三维流动(忽略湍流),通过求解该模型可以得到腔室中气体的瞬态流速、温度和压力。以此验证设备并帮助优化结构参数。仿真模型如图 5 所示。密封腔内的气体流动被模拟为牛顿流体的可压缩层流。

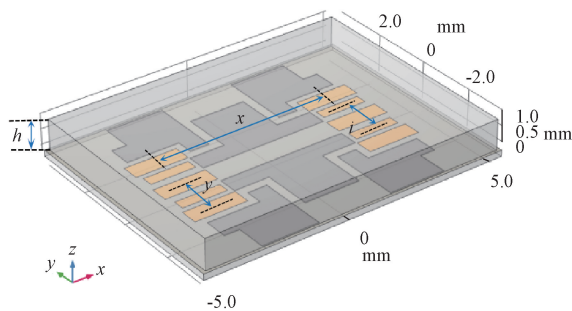


图 5 MEMS 陀螺的 3D 流体模型

Fig. 5 The 3D fluid model of the MEMS gyro

MEMS 热膨胀流陀螺腔体内部的气体流动和温度变化过程符合质量守恒方程、惯量守恒方程、热能守恒方程

和状态方程,即:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla(\rho \vec{v}) = \rho \vec{a} + 2\rho \vec{\omega} \times \vec{v} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = k \nabla^2 T - \rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T + Q_s \quad (14)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \rho R \frac{\partial T}{\partial t} + TR \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (15)$$

其中, c_p 是气体比热容, ρ 是气体密度, k 是气体热导率, T 是微元体温度, P 是压强, $\vec{v}$ 是流速, R 是气体常数, $\vec{a}$ 是线性加速度, Q_s 是内热源。

在模拟中,加热器接收 10 Hz 方波,功率为 18 mW。同时,该模型的 Z 轴角速度为 $300^\circ/\text{s}$ 。

图 6 展示了热膨胀流陀螺在 0.30 s 时,分别在 $0^\circ/\text{s}$ 和 $300^\circ/\text{s}$ 角速度旋转下的陀螺温度场的分布和等温线分布图,单位为 K。无角速度时陀螺温度场分布均匀,等温线对称分布,如图 6(a) 和 (c) 所示。当施加角速度后,温度场产生了梯度变化,等温线开始偏转,如图 6(b) 和 (d) 所示。其中图 6(c) 和 (d) 为陀螺俯视图。说明该结构的热流陀螺有陀螺效应。

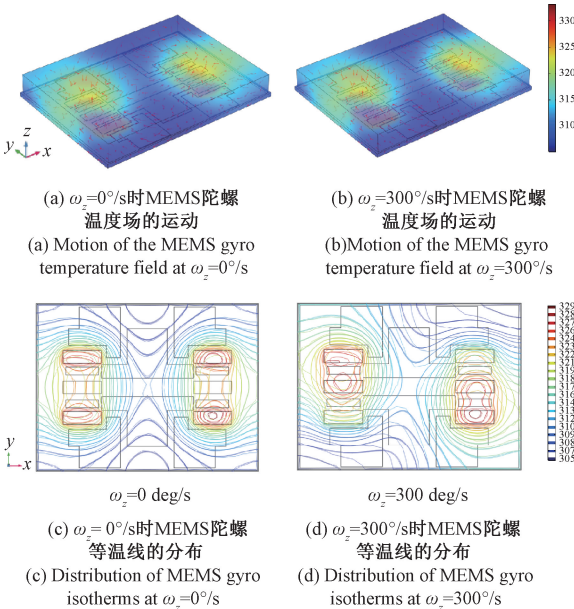


图 6 温度分布图

Fig. 6 Temperature mapping

对于气体传感器而言,将传感元件布置在检测腔内的适当位置对于实现高灵敏度至关重要。图 7 显示了 Z 轴角速度在腔室中热敏电阻不同位置处引起的温度差。

通过将温差达到 1.8 K 的位置参数标定为最佳位置,模拟结果表明,当热敏电阻的位置满足式 (16) ~ (19) 参数时,温差 ΔT 可以达到 1.8 K 以上的高值,即:

$$2.99 \leq x \leq 3.50 \quad (16)$$

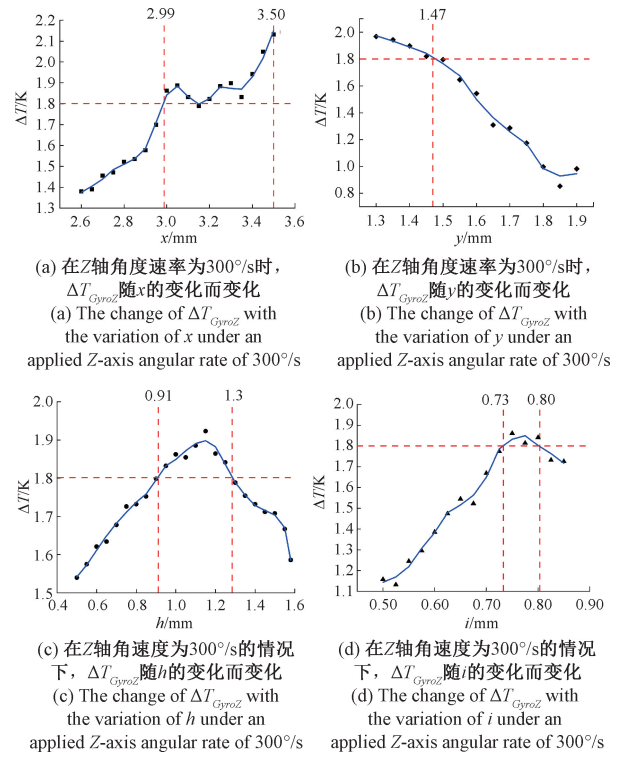


图 7 温差随结构参数变化

Fig. 7 Graph of temperature difference variation with structural parameters

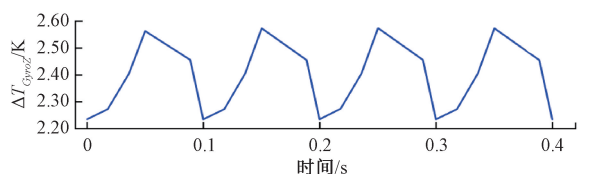
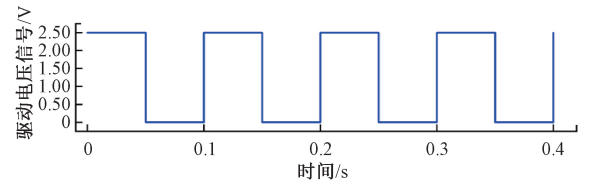
$$y \leq 1.47 \quad (17)$$

$$0.91 \leq h \leq 1.3 \quad (18)$$

$$0.73 \leq i \leq 0.8 \quad (19)$$

其中, x, y, h, i 分别是左右两组加热器及热敏电阻的距离、上下相邻加热器的距离、上腔室的高度、上下相邻热敏电阻的距离。

当热敏电阻的位置选择 $x=3, i=0.75 \text{ mm}$ 时, Z 轴角速度下的上下两组热敏电阻温差平均值如图 8(b) 所示。图 8 为在 Z 轴角速度的影响下,由于加热器驱动信号的交替变化,产生的上下两组热敏电阻和加热器温差是周期性的温度波动。



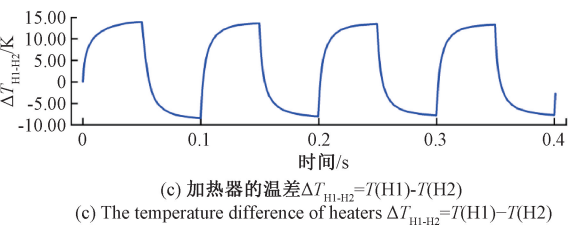


图 8 驱动信号及温差

Fig. 8 Drive signal and temperature difference diagram

单、双向热膨胀流指的是敏感电阻对所接收的热气流来源于几个方向,只能接收到一个方向的热气流,称之为单向热膨胀流,能接收两个方向的热气流称之为双向热膨胀流。图 9 展示了不同加热方式根据转速产生的温差输出信号,针对本结构,对 H1、H2、H3 分别进行加热从而产生单向热膨胀流,以及对 H1、H3 和 H2 进行交替加热,产生双向热膨胀流。

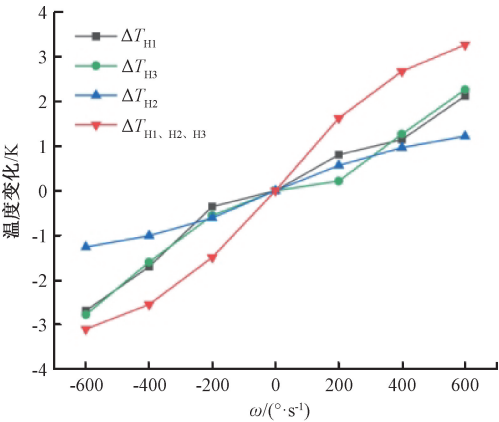


图 9 不同加热方式根据转速产生的温差输出信号

Fig. 9 Output signals of the temperature difference generated by different heating methods according to the speed of rotation

对其进行仿真,对热敏电阻对所敏感温差输出进行数值分析,结果表明,在不同的角速度下,当只对处于结构位置中间的加热器 H2 进行加热时,热敏电阻对所敏感到的温差输出最小。对 H1、H3 分别加热时,H1、H3 所敏感到的温差几乎一致且大于 H2 的温差,而在对 H1、H3 和 H2 进行交替加热时的温差输出最大,温差最大能达到前者的 2.6 倍。这是因为只有在 H1、H3 和 H2 进行交替加热时,热敏电阻对才能敏感到来自两个方向最多的热气流,同时陀螺结构上下完全对称,且 H1、H3 的位置更靠近腔体边缘,使得绝大部分流向腔体壁的热气流会有一部分进行反弹,被热敏电阻对所敏感。而 H2 位处中间,部分产生的热量直接被损耗,此仿真结果论证了本结构采用 3 对加热器进行交替加热以此产生双向热膨胀流的合理性。

图 10 显示了平行和垂直对称结构的温度变化情况,纵轴表示热敏电阻的平均温差 ΔT 的变化,横轴是时间。在相同功率下,水平和垂直结构的平均温差随着时间增加而增加,最终温度趋于稳定。在相同角速度下,在时间 0~2 s 内,平行结构的铂电阻温度差变化平均值比垂直结构高约 1.6 倍,温差也更为稳定。这是由于平行结构提高了热膨胀流和热敏丝之间的热交换面积,气体流动更充分,使得接收到的热气流更多,更稳定,从而温差输出得到提高。

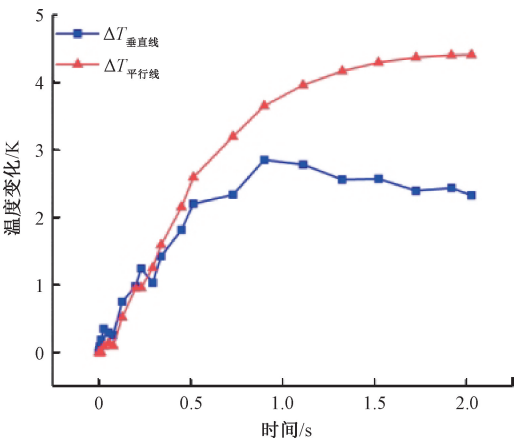


图 10 平行和垂直结构热敏电阻之间的温差随时间的变化关系

Fig. 10 Variation of temperature difference between parallel and vertical structure thermistors with time

相比与自然对流,热膨胀流可以有效抑制外部线性加速度的影响,降低旋转加速度和非敏感轴的耦合效应,同时有效的减少由倾斜角带来的重力影响。图 11 显示了绕 Z 轴从 $-600^{\circ}/s$ 旋转到 $+600^{\circ}/s$ 时的平均温差输出。仍然存在 Z 轴旋转耦合效应引起的 X/Y 等非敏感轴的温差输出,均在 6% 左右。

表 1 显示了陀螺在不同倾角下相比于无倾角时的温差仿真误差。

表 1 不同倾角对陀螺敏感温差仿真误差
Table 1 Simulation error of gyroscope sensitive temperature difference at different inclinations

倾角/(°)	仿真误差/%
5	0.632
10	0.952
15	1.253
20	1.985
25	2.657
30	3.064

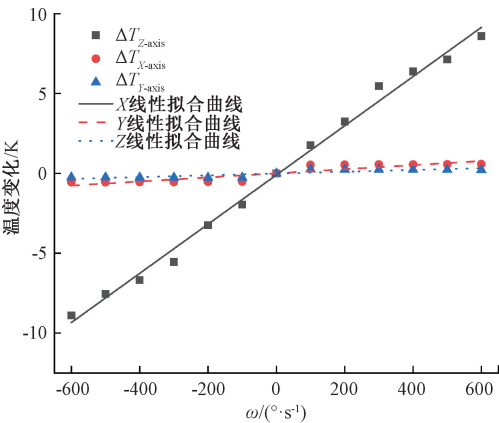


图 11 Z 轴陀螺仪的平均温差与应用角速度的关系,以及
与 X/Y 轴温差输出的相应耦合关系

Fig. 11 The Average temperature difference of the Z-axis gyroscope versus applied angular rate and the corresponding coupling on X/Y axis temperature difference output

3 制作流程

如图 12 所示为芯片制造工艺。传感芯片的制造从基于 300 μm 厚的 4 in 硅片制造开始。首先,使用低压 CVD(LPCVD)在双抛的硅片表面制备 1.1 μm 的氧化硅

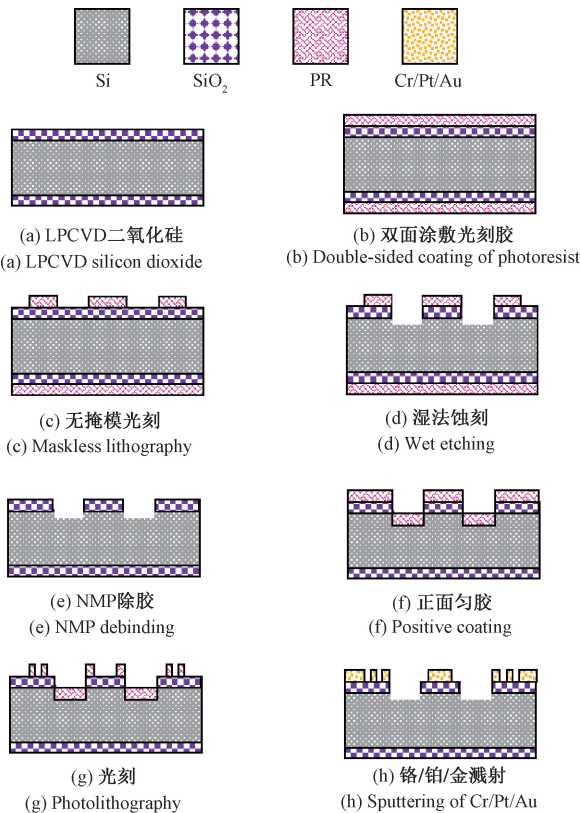


图 12 芯片制造工艺
Fig. 12 Processes for chip fabrication

膜,如图 12(a)所示。然后,使用抗蚀剂(KMP C5315)进行双面涂覆,使用无掩膜光刻(DS2000-14G)腔体图案,如图 12(b)和(c)所示。之后,使用湿法腐蚀去除腔体表面的 SiO₂ 膜,漏出 Si 衬底。用 KOH 腐蚀 Si 衬底,刻蚀出 20 μm 深腔体,如图 12(c)~(e)所示。空腔是为了增大热膨胀流流动的空间,使热膨胀流的流动更充分,从而提高去增益灵敏度。最后,使用金属溅射工艺制造丝结构(加热丝、热敏丝和焊盘),金属的厚度为 0.24 μm。

完成的芯片如图 13 所示,图 13 中①为未封装设备的原型,②为传感器芯片的超深视图,③为已封装设备的原型。将芯片放置在 PCB 板上,使用紫外线固化粘接剂将上盖和 PCB 板粘接。该芯片被密封封装在腔室高度为 2.5 mm 的金属帽中,并充有空气作为气体介质。铂电阻用作加热器和热敏电阻。加热器的电阻约为 300 Ω,热敏电阻的电阻约为 100 Ω。工作加热器功率约为 18.5 mW,电压为 2.5 V,频率为 10 Hz。

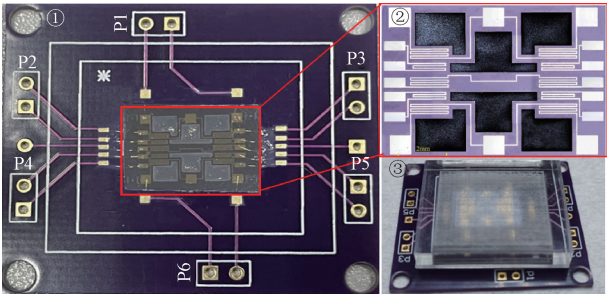


图 13 MEMS 陀螺实体图
Fig. 13 Schematic diagram of MEMS gyroscope

4 实验验证

在 20℃ 左右的室温下采用如图 14 所示的装置进行了实验以验证器件,封装后的陀螺固定在印制电路板上并安装在旋转平台上,通过数据线连接笔记本电脑 1(PC1)控制转台,通过蓝牙连接笔记本电脑 2(PC2)实现数据传输。旋转测试采用误差<0.01°/s 的转台进行。该装置安装在转盘水平面的中心。转台绕垂直轴以每步 50°/s 的速度从 -600°/s 到 +600°/s 旋转,而放大倍数约为 2 200 的传感器读数将传输到 PC 以进行每一步的数据收集。当前方案适用于静态/准静态倾角变化场景,且对于大倾角(>30°)的耦合效应需进一步研究。

加热器的驱动信号为 2.5 V、50% 占空比、10 Hz 方波。如图 15 所示,测得 Z 轴陀螺仪在 ±600°/s 范围内的灵敏度为 3.04 mV/(°·s⁻¹),线性度为 7.09%。

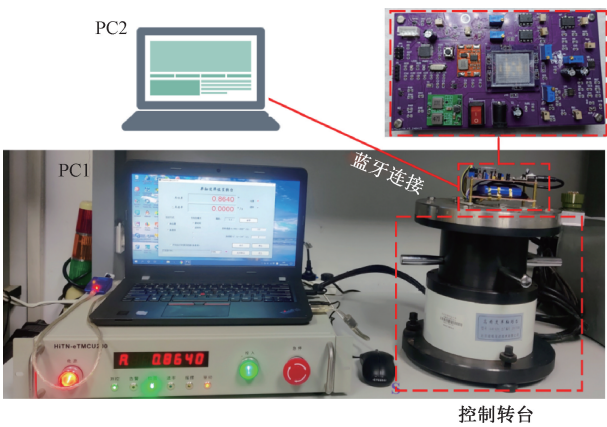


图 14 实验测试装置
Fig. 14 Experimental test setup

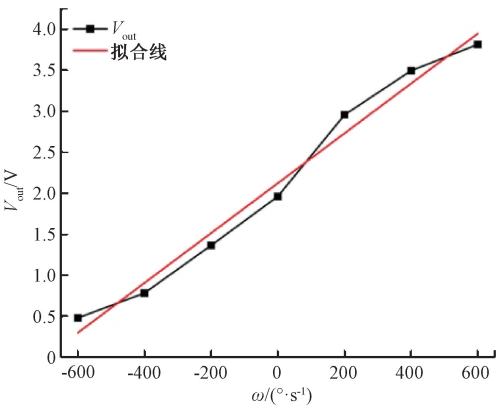


图 15 Z 轴陀螺仪输出电压与应用角速度的关系
Fig. 15 Output voltage of the Z-axis gyroscope
versus applied angular rate

5 结 论

本研究提出并验证了一种基于双向热膨胀原理的 MEMS 陀螺,基于有限元仿真对敏感元件的最佳位置分布以及摆放方式进行了探究,得出最优的元件摆放位置范围,以及采用平行的摆放方式可以提高在气体流动性,从而增大热膨胀流和热敏丝之间的热交换面积的结论,并以此进一步提高灵敏度。此外,针对该结构,分别进行了针对单向,双向热膨胀的性能对比仿真,论证了基于双向膨胀流的结构有着更高的灵敏度。同时由于其设计结构高度对称,利用求解平均值的算法可以降低由于工艺上导致的结构不完全对称所带来的误差。测试结果表明,该传感器能够在 $\pm 600^{\circ}/s$ 范围内检测角速率,灵敏度为 $3.04\text{ mV}/(^{\circ}\cdot\text{s}^{-1})$,线性度为 7.09% 。实验结果与数值模拟相符,该传感器除了具有高灵敏度、制造成本低、抗震性高等优点外,还利用气体热膨胀抑制了加速度对陀螺仪灵敏度的耦合影响。

参考文献

[1] NILSSON J O, SKOG I. Inertial sensor arrays—a literature review[C]. 2016 European Navigation Conference (ENC), 2016: 1-10.

[2] 叶剑飞,刘晓阳. 基于 MEMS 的热对流加速度计的现状和发展综述[J]. 传感器与微系统,2018,37(10): 5-7.

YE J F, LIU X Y. A review of the status and development of MEMS-based thermal convection accelerometers[J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(10): 5-7.

[3] 朴林华,佟嘉程,李备,等. 动热源摆式单轴 MEMS 热加速度计敏感机理的研究[J]. 压电与声光,2023, 45(1): 105-111.

PIAO L H, TONG J CH, LI B, et al. Study on the sensitivity mechanism of uniaxial MEMS thermal accelerometer[J]. Piezoelectricity and Sound and Light, 2023,45(1): 105-111.

[4] 朴林华,佟嘉程,李备,等. 动热源摆式双轴 MEMS 热加速度计敏感机理的研究[J]. 电子元件与材料, 2022,41(12): 1324-1331.

PIAO L H, TONG J CH, LI B, et al. Study on the sensitivity mechanism of dynamic heat source pendulum type biaxial MEMS thermal accelerometer[J]. Electronic Components and Materials, 2022,41(12): 1324-1331.

[5] 邹泽兰,徐同旭,徐祥,等. 基于两步修正法的 MEMS 三轴陀螺仪标定方法[J]. 仪器仪表学报,2022, 43(4): 191-198.

ZOU Z L, XU T X, XU X, et al. MEMS triaxial gyroscope calibration based on two-step correction method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4): 191-198.

[6] 崔让,魏雯强,蔡麒,等. MEMS 环形陀螺仪带宽拓展控制器设计[J]. 仪器仪表学报,2024,45(12): 45-54.

CUI R, WEI W Q, CAI L, et al. Design of bandwidth extension controller for MEMS ring gyroscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 45-54.

[7] 刘娟花,柯熙政. 多 MEMS 陀螺数据融合方法性能比较[J]. 电子测量与仪器学报,2017, 31(8): 1265-1273.

LIU J H, KE X ZH, Performance comparison of data fusion methods for multi MEMS gyroscopes[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(8): 1265-1273.

[8] 关存贺,许高斌,王焕章,等. 复杂应力条件下 MEMS 加速度传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2023,37(7): 17-25.

- GUAN C H, XU G B, WANG H ZH, et al. Reliability analysis of MEMS acceleration sensors under complex stress conditions[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 17-25.
- [9] LIU SH Q, ZHU R. Micromachined fluid inertial sensors[J]. Sensors, 2017, 17(2):367.
- [10] LIU SH Q, ZHU R, DING H G. A temperature compensation method for micromachined thermal gas gyroscope[C]. 2015 IEEE Sensors, 2016:638-641.
- [11] ZAREI N, LEUNG A M, JONES J D. High performance MEMS thermal gyroscope[C]. Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2012, 2013:931-936.
- [12] XU W, WANG X Y, CHUI Y, et al. High sensitivity and wide dynamic range thermoresistive micro calorimetric flow sensor with CMOS MEMS technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8):4104-4111.
- [13] 凤瑞. 微型热膨胀式流体陀螺及其关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
FENG R. A micro thermal expansion fluidicgyroscope and its key technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [14] BAHARI J, FENG R, LEUNG A M. Robust MEMS gyroscope based on thermal principles[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(1): 100-116.
- [15] ZHU R, CAI S L, DING H G, et al. A micromachined gas inertial sensor based on thermal expansions[J]. Sensors Actuators A: Physical, 2014, 212:173-180.
- [16] CHANG H L, ZHOU P W, XIE ZH J, et al. Theoretical modeling for a six-DOF vortex inertialsensor and experimental verifications[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22(5):1100-1108.
- [17] NIE B, WANG W M, YE F, et al. A micromachined three-axis gas inertial sensor based on bidirectional thermal expansion flow[C]. 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2017: 1091-1094.
- [18] KOCK G, COMBETTE P, TEDJINI M, et al. Experimental and numerical study of a thermal expansion gyroscope for different gases[J]. Sensors, 2019, 19(2):360.

- [19] KOCK G, COMBETTE P, TEDJINI M, et al. Realization and study of a thermal gyroscope based on thermal expansion[C]. 2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS, 2018:1-6.
- [20] LUO H H, DUAN M ZH, TAVAKKOIL H, et al. A thermal expansion-based angular motion sensor with detection limit towards sub-degree per second[C]. 2021 IEEE Sensors, 2021:564-567.

作者简介



马炫霖,2022 年于北京信息科技大学获得学士学位,现为北京信息科技大学研究生,主要研究方向为热膨胀流陀螺。

E-mail:18009437107@163.com

Ma Xuanlin received his B.Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2022. He is currently a master student with the College on Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes thermal expansion flow gyroscopes.



朴林华(通信作者),2004 年于电子科技大学研究院获得博士学位,现为北京信息科技大学理学院教授,研究生导师,主要研究方向为传感器与微系统集成。

E-mail:bjplh@163.com

Piao Linhua (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Institute of Electronic Science in 2004. He is currently a professor at the School of Science of Beijing Information Science and Technology University and a postgraduate supervisor. His main research direction is the integration of sensors and microsystems.



刘琨宇,2022 年于华北理工大学获得学士学位,现为北京信息科技大学研究生,主要研究方向为热膨胀流陀螺。

E-mail:2095382386@qq.com

Liu Junyu obtained a B.Sc. degree from North China University of Science and Technology in 2022. He is currently a graduate student at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes thermal expansion flow gyroscopes.