

# 独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺的机理研究

刘琨宇, 朴林华, 佟嘉程, 马炫霖

(北京信息科技大学北京市传感器重点实验室, 北京 100101)

**摘要:**提出了一种新型独立敏感式微机电系统(MEMS)热膨胀流陀螺并对其敏感机理进行了研究。通过COMSOL创建了该结构的三维模型,并使用有限元方法对其敏感结构的温度场进行了计算。结果表明,在加热器功率为50 mW,角速度为 $-10 \sim 10$  rad/s时,该陀螺的温度灵敏度为 $0.224 \text{ K} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,非线性度为2.37%,具有陀螺效应,且灵敏度为 $1.8 \text{ mV} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,非线性度为2.06%。该陀螺具有灵敏度高及工艺简单等特点,为后续结构优化提供了理论依据。

**关键词:**热膨胀流陀螺;微机械;独立敏感;单轴;敏感机理;COMSOL

**中图分类号:**TN384 **文献标识码:**A

## Research on the Mechanism of an Independent Sensitive MEMS Thermal Expansion-Flow Gyroscope

LIU Junyu, PIAO Linhua, TONG Jiacheng, MA Xuanlin

(Beijing Key Laboratory for sensor, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In this paper, a new independently sensitive micro-electromechanical system (MEMS) thermal expansion-flow gyroscope is proposed and its sensitivity mechanism is revealed. A three-dimensional model of the structure was created using the COMSOL multiphysics simulation software and finite-element calculations of the temperature field of its sensitive structure were performed. The computational results show that at a 50 mW heater power and an angular-velocity variation range of  $-10 \text{ rad/s} \sim 10 \text{ rad/s}$ , this gyro has a gyroscopic effect with a temperature sensitivity of  $0.224 \text{ K} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$  and a nonlinearity of 2.37%, and a sensitivity of  $1.8 \text{ mV} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$  and a nonlinearity of 2.06%. This gyro has a high sensitivity and simple process. In addition, this study lays a theoretical basis for subsequent structure optimizations.

**Key words:** expansion flow gyroscope; micromachinery; independently sensitive; single axis; sensitivity mechanism; COMSOL

### 0 引言

热膨胀流陀螺是一种重要的惯性传感器<sup>[1]</sup>,使用流体代替固体质量块作为移动的敏感元件,其原理是基于热膨胀流在输入角速度时,由于科氏力的作用产生不平衡的热效应<sup>[2]</sup>。热膨胀流陀螺具有工艺简单、抗冲击能力强等特点<sup>[3-4]</sup>,在运动医学、自动驾驶等领域都有实际应用<sup>[5]</sup>。2012年,Leung等<sup>[6]</sup>首次提出热膨胀流陀螺的结构和敏感机理,其陀螺的敏感结构主要由交替产生热膨胀流的加热器和

热敏电阻组成,加热器对称分布,加热器两侧的热敏电阻能敏感科氏力产生的温度偏差,从而检测出 $z$ 轴角速度。2021年,Luo等<sup>[7]</sup>在热膨胀流角速度传感器的基础上提出了一种改进方法,能在不改变传感器芯片面积和功率的情况下提高灵敏度。目前传统敏感式热膨胀流陀螺大多采用对称分布的加热器,加热器交替加热产生热膨胀流<sup>[8]</sup>,而仅设计一对热敏电阻来敏感角速度产生的温度变化,两个加热器交替产生的热膨胀流偏转方向不同<sup>[9-10]</sup>,热

收稿日期:2023-10-09

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61771060);北京市教育委员会科研计划项目资助(23JD0003);北京市新世纪百万人才工程培养资助项目(2019A20);北京市重点实验室开放课题资助项目(2023202109);北京信息科技大学促进高校分类发展项目(20230416);现代测控技术教育部重点实验室资助(2023202101);北京信息科技大学北京市传感器重点实验室资助(2023202108);北京信息科技大学学科与研究生教育校内项目(20230403)

**作者简介:**刘琨宇(2000-),男,河北省唐山市人,硕士生。通信作者:朴林华,男,研究员,硕士生导师,博士。

敏电阻持续受偏转热膨胀流的影响,冷却时间不足,从而降低了温度变化导致的热敏电阻阻值变化。针对上述问题,本文提出了一种新的独立敏感式微机电系统(MEMS)热膨胀流陀螺的敏感结构,通过改善独立敏感单元的热敏电阻的冷却效果来提高灵敏度。为了优化热膨胀流陀螺的性能,降低时间和制造成本,需要在工艺开始前对陀螺的敏感机理展开深入的理论研究<sup>[11]</sup>。本文利用 COMSOL 软件建立独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺的三维模型,同时使用有限元方法计算敏感元件内的温度场。对这种新型结构陀螺的敏感机理进行研究,为该陀螺今后的结构优化提供理论依据。

## 1 结构原理

独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺由敏感元件和上腔室组成,如图 1 所示。敏感元件由硅基层层、和 Pt 金属构成的敏感层组成。

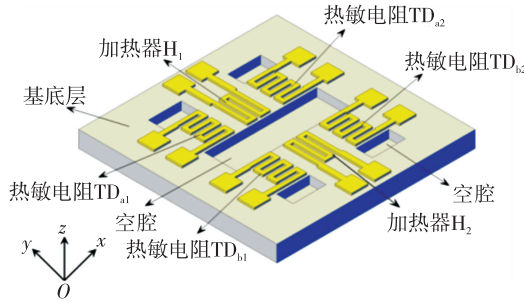


图 1 独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺三维结构示意图

在基底层通过刻蚀工艺刻蚀出矩形的凹槽,该凹槽与上腔室共同构成热膨胀流的工作空间。在两个对称分布的加热器  $H_1$ 、 $H_2$  两侧,设置由  $TD_{a1}$ 、 $TD_{a2}$  和  $TD_{b1}$ 、 $TD_{b2}$  组成的两对热敏电阻。如图 2 所

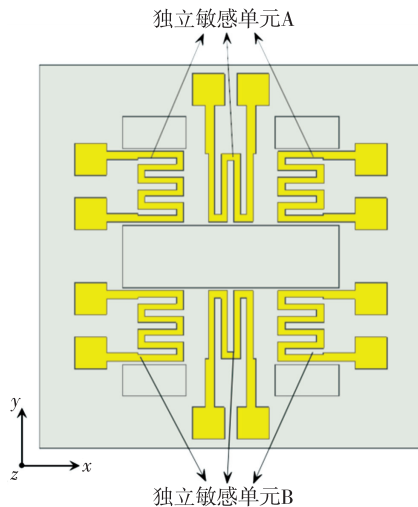


图 2 独立敏感单元示意图

示, $H_1$ 、 $TD_{a1}$  和  $TD_{a2}$  组成 A 敏感单元, $H_2$ 、 $TD_{b1}$  和  $TD_{b2}$  组成 B 敏感单元。一个敏感单元只敏感一个加热器产生的热膨胀流,不受对称加热器产生的热膨胀流的影响,以改善敏感单元热敏电阻冷却效果,从而提高陀螺的灵敏度。

图 3 为独立敏感式热膨胀流陀螺的工作原理示意图。加热情况为第一周期和第二周期交替进行,敏感单元的热敏电阻可敏感温度变化,设敏感单元 A 的热敏电阻  $TD_{a1}$ 、 $TD_{a2}$  敏感到的温度分别为  $T_{a1}$  和  $T_{a2}$ ,设敏感单元 B 的热敏电阻  $TD_{b1}$ 、 $TD_{b2}$  敏感到的温度为  $T_{b1}$  和  $T_{b2}$ ,敏感单元 A、B 热敏电阻温度差分别为  $\Delta T_a$ 、 $\Delta T_b$ ,即:

$$\Delta T_a = T_{a2} - T_{a1} \quad (1)$$

$$\Delta T_b = T_{b2} - T_{b1} \quad (2)$$

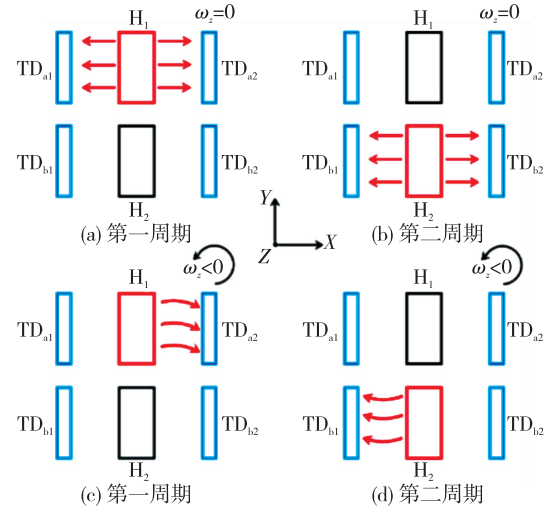


图 3 独立敏感式热膨胀流陀螺的原理图。

如图 3(a)、(b)所示,在  $z$  轴无角速度输入情况下,通过周期性变化的方波使两个加热器交替产生热膨胀流,热膨胀流沿加热器对称分布,此时加热器左右两侧热敏电阻的温度差为 0。在  $z$  轴有角速度输入的情况下,假设加热器产生的热膨胀流的质量为  $m$ ,流速为  $v_f$ ,角速度为  $\omega_z$ ,热膨胀流受到科氏力  $F_c$  的作用,有:

$$F_c = 2mv_f \times \omega_z \quad (3)$$

根据右手定则,有角速度输入时,如图 3(c)所示,在第一周期时,加热器  $H_1$  对气体进行加热,产生的热膨胀流向右进行偏转,使热敏电阻  $TD_{a2}$  敏感到的温度高于左侧热敏电阻  $TD_{a1}$  敏感到的温度,使温度差  $\Delta T_a > 0$ ,此时, A 敏感单元工作, B 敏感单元冷却。

如图 3(d)所示,在第二周期时,当加热器  $H_2$  对

气体进行加热,热膨胀流同样会受到科氏力的作用,并改变偏转方向,使左侧热敏电阻  $TD_{b1}$  敏感到的温度高于右侧热敏电阻  $TD_{b2}$  敏感到的温度,使温度差  $\Delta T_b < 0$ ,此时,B敏感单元工作,A敏感单元冷却。这种独立的敏感方式,使两个敏感单元不相互影响,其热敏电阻有更好的冷却效果,从而提高灵敏度。

图4为独立敏感式热膨胀流陀螺输出电路,加热器产生的热膨胀流的偏转使热敏电阻敏感到的温度产生了变化,这种温度变化转化为热敏电阻的阻值变化,在通过设计电路将阻值变化转化为电压的变化,从而测得角速度。不同温度下  $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$  和惠斯通电桥输出电压的关系如下:

$$R_{a1} = R_0 (1 + \alpha \Delta T_{TD_{a1}}) \quad (4)$$

$$R_{a2} = R_0 (1 + \alpha \Delta T_{TD_{a2}}) \quad (5)$$

$$U_5 = A \cdot \left( \frac{R_{a2}}{R + R_{a2}} - \frac{R_{a1}}{R + R_{a1}} \right) \cdot \frac{U_{cc}}{2} \quad (6)$$

同理可推出  $U_6$  为

$$U_6 = A \cdot \left( \frac{R_{b2}}{R + R_{b2}} - \frac{R_{b1}}{R + R_{b1}} \right) \cdot \frac{U_{cc}}{2} \quad (7)$$

式中: $R_0$  为热敏电阻初始阻值; $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$ 、 $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$  分别为不同温度下的热敏电阻  $TD_{a1}$ 、 $TD_{a2}$ 、 $TD_{b1}$ 、 $TD_{b2}$  的电阻值; $\Delta T_{TD_{a1}}$ 、 $\Delta T_{TD_{a2}}$ 、 $\Delta T_{TD_{b1}}$ 、 $\Delta T_{TD_{b2}}$  分别为热敏电阻  $TD_{a1}$ 、 $TD_{a2}$ 、 $TD_{b1}$ 、 $TD_{b2}$  敏感到的温度变化量的平均值; $U_5$ 、 $U_6$  为经过差分放大后的输出电压; $A$  为差分放大器放大倍数; $U_{cc}$  为惠斯通电桥输入电压; $\alpha$  为温度系数。最终电路输出电压  $U_{out}$  为

$$U_{out} = U_5 - U_6 = A \cdot \left( \frac{R_{a2}}{R + R_{a2}} - \frac{R_{a1}}{R + R_{a1}} - \frac{R_{b2}}{R + R_{b2}} + \frac{R_{b1}}{R + R_{b1}} \right) \cdot \frac{U_{cc}}{2} \quad (8)$$

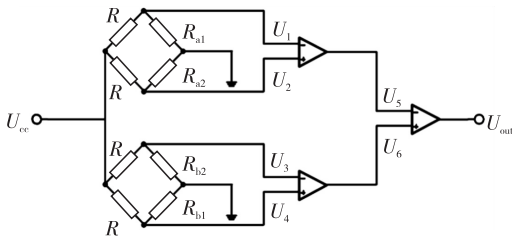


图4 陀螺电路

## 2 有限元计算

### 2.1 物理模型

如图5所示,为了提高有限元的计算效率,对三

维模型进行了简化,在三维建模时,将基底层的空腔合并为一个整体下腔室,在建模敏感单元的加热器和热敏电阻时,忽略其丝的结构,并用整体代替。

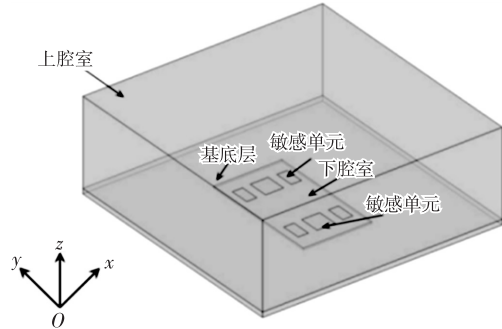


图5 独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺的三维模型

### 2.2 数学模型

有限元分析 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<sup>[11-12]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} - 2\rho \omega_z \mathbf{u} - \nabla P \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = K \nabla^2 T - \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T \quad (11)$$

$$P = \rho R T \quad (12)$$

式中: $\rho$  为气体密度; $\mathbf{u}$  为气体的速度矢量; $\mu$  为气体的粘度系数; $c_p$  为气体的比热容; $T$  为气体温度; $K$  为导热系数; $P$  为压强; $R$  为理想气体常数。

### 2.3 有限元法求解

使用 COMSOL 软件对输入不同角速度情况下的温度场进行有限元分析计算,分析过程如下:

1) 建立敏感元件和气体的有限元物理模型。因加热器交替加热、产生的热膨胀流的流动等是动态的过程,所以选用瞬态为研究类型。

2) 模型参数设置。设置材料种类和属性<sup>[13]</sup>。如图6所示,为设置方波函数控制两个加热器的加热与冷却。通过添加动网格,设置  $z$  轴的角速度,以控制模型的旋转。

3) 物理场选择固体和流体传热物理场。其中,流体域接口可以更好地模拟气体流动的实际情况。

4) 划分网格。网格质量决定了有限元计算的精度与计算机算力<sup>[14]</sup>,将网格质量设置为细化。

5) 计算。相对容差和步长与计算精度有关,相对容差和步长越小,对物理场的计算越准确,但是

相对容差要小于步长,定义瞬态研究的计算时间为

1 s,步长为 0.01 s,相对容差为 0.001。

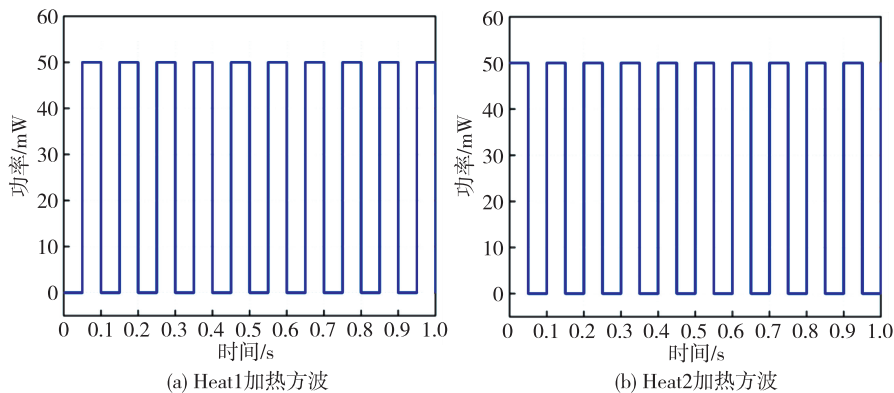


图6 Heat1 及 Heat2 加热方波

### 3 计算结果与讨论

加热器按照图6方波工作时的温度变化情况如图7所示。加热器  $H_1$ 、 $H_2$  的温度交替上升和下降,加热器持续工作,加热器温度的整体变化趋势逐渐升高。如图8所示,在此过程中,两加热器之间的温度差整体保持平稳,平均差值约为 45 K。

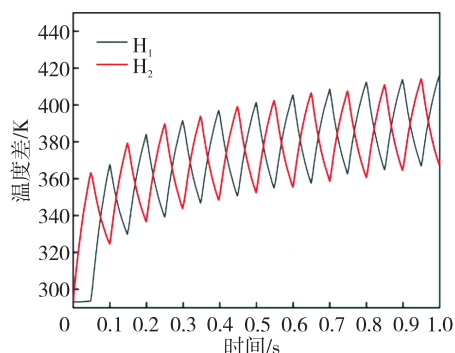


图7 加热器温度变化曲线

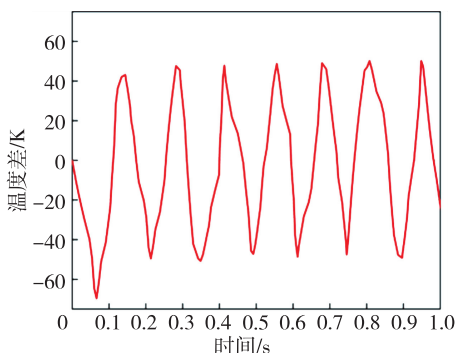


图8 加热器温度差

图9、10 分别是设置角速度输入为 0 时,陀螺的温度场和等温线情况。如图9(a)所示,当加热时间为 0.5 s 时,  $H_1$  进行冷却,  $H_2$  加热产生的热膨胀流对称地流向两侧的热敏电阻,如图10(a)所示,加热器  $H_2$  两侧热敏电阻周围温度相同。如图9(b)所

示,加热时间为 0.55 s 时,  $H_2$  进行冷却,同理  $H_1$  两侧的热敏电阻受到  $H_1$  加热产生的热膨胀流影响相同,如图10(b)所示,加热器  $H_1$  两侧热敏电阻周围温度相同。因此,在  $\omega_z = 0$  时,加热器产生的热膨胀流不受科氏力的作用,两侧热敏电阻受热膨胀流的影响相同,两侧热敏电阻敏感到的温度相同,两侧热敏电阻的温度差为 0。

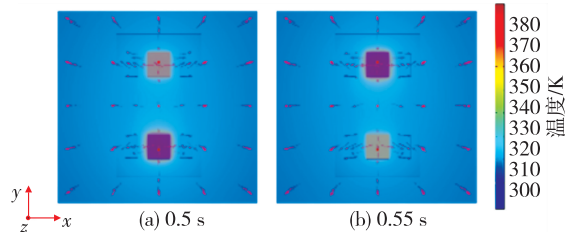


图9  $\omega_z = 0$  时陀螺的温度场情况

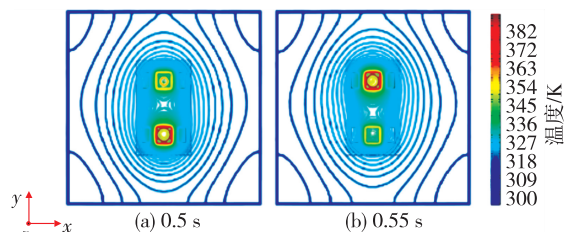


图10  $\omega_z = 0$  时陀螺的等温线情况

图11、12 分别为  $\omega_z = 10$  rad/s 角速度时陀螺的温度场和等温线情况。如图11(a)所示,加热时间为 0.5 s 时,  $H_1$  进行冷却,  $H_2$  加热产生的热膨胀流在科氏力的作用下发生偏转,使流向左侧热敏电阻的热膨胀流增多,流向右侧热敏电阻的减少。如图12(a)所示,加热器左侧热敏电阻周围温度高于右侧热敏电阻。如图11(b)所示,加热时间为 0.55 s 时,  $H_2$  进行冷却,同理  $H_1$  产生的热膨胀流发生偏转,使流向右侧热敏电阻的热膨胀流增多,流向左侧热敏电阻的减少。如图12(b)所示,加热器右侧热敏

电阻周围温度高于左侧热敏电阻。因此,在有角速度输入时,加热器进行周期性加热产生的热膨胀流发生偏转,使两侧热敏电阻周围温度产生不同的变化,两侧热敏电阻敏感到的温度不同,两侧热敏电阻的温度差不为0。计算结果验证了独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺仪的敏感机理,是陀螺灵敏度计算的基础。

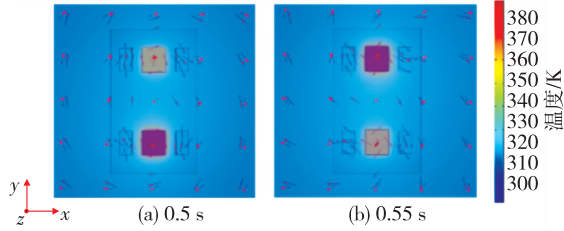


图 11  $\omega_z = 10 \text{ rad/s}$  时陀螺的温度场情况

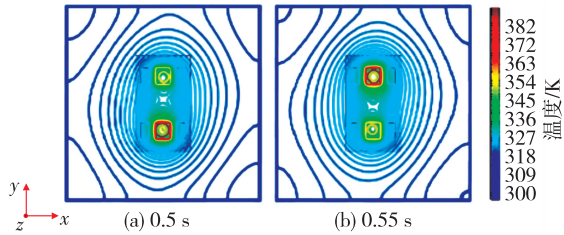


图 12  $\omega_z = 10 \text{ rad/s}$  时陀螺的等温线情况

通过输入不同的角速度值,计算热敏电阻的温度差,并对结果进行分析处理<sup>[15-16]</sup>,进一步验证独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺的陀螺效应,结果如图 13 所示,温度差整体随着角速度的增大而增大。

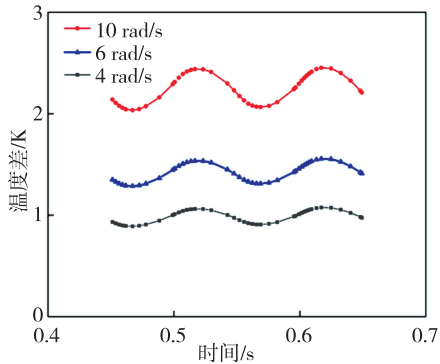


图 13 在不同角速度输入下陀螺的热敏电阻温度差

如图 14 所示,通过输入角速度为  $-10 \sim 10 \text{ rad/s}$ ,计算热敏电阻温度差的平均值,对计算结果进行最小二乘法拟合得到陀螺的结构灵敏度,陀螺的温度灵敏度为  $0.224 \text{ K} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,非线性度为  $2.37\%$ 。独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺的输入角速度与热敏电阻的平均温度差关系式和输入、输出曲线关系为

$$\Delta T = a\omega + b \quad (13)$$

$$U_{\text{out}} = c\Delta T + d \quad (14)$$

式中: $\Delta T = \Delta T_a - \Delta T_b$ ,  $\Delta T_a$ ,  $\Delta T_b$  分别为两对热敏电阻的温度差; $U_{\text{out}}$  为二级差分放大输出; $a, b$  分别为角速度与温差  $\Delta T$  关系方程的斜率与截距; $c, d$  分别为  $U_{\text{out}}$  与温差、 $\Delta T$  关系方程的斜率与截距。

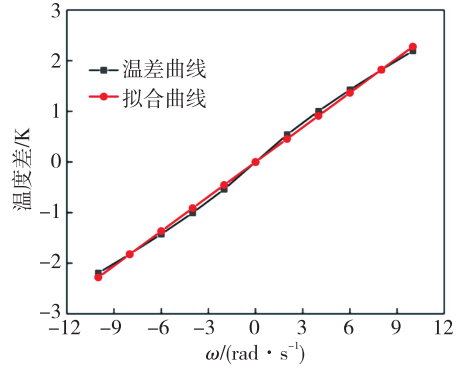


图 14 温度差拟合曲线图

独立敏感式热膨胀流陀螺的输入-输出曲线如图 15 所示。由图可知,  $c = 0.0018$ ,  $d = 0.0002$ 。由式(13)、(14)可得独立敏感式热膨胀流陀螺的输入-输出为

$$U_{\text{out}} = 0.0018\omega + 0.0002 \quad (15)$$

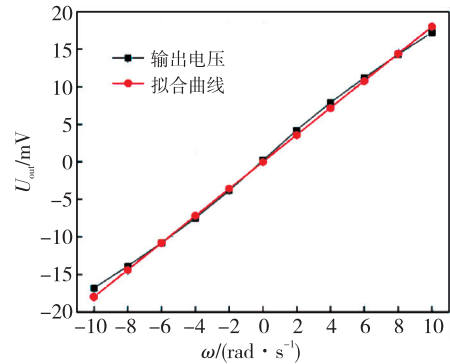


图 15 陀螺的输入-输出特性曲线

综上所述,本文所提出的独立敏感式热膨胀流陀螺在输入角速度为  $-10 \sim 10 \text{ rad/s}$  时,加热器的输出功率为  $5 \text{ mW}$  时,灵敏度为  $1.8 \text{ mV} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,非线性度为  $2.06\%$ 。

#### 4 结束语

本文提出了一种独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺,并介绍了该陀螺的结构和工作原理。该陀螺的敏感结构主要由两个独立敏感单元组成,在输入角速度不为 0 时,加热器产生的热膨胀流发生偏转,敏感单元独立敏感,因此产生温度差。通过电路将温度差转化为输出电压,以达到敏感角速度的目的。同时,利用 COMSOL 软件对该陀螺的

敏感结构进行三维建模,对敏感元件内的温度场进行了有限元计算,分析对比了在角速度输入为 0 和 10 rad/s 时陀螺的温度场和等温线的变化情况。计算结果表明,独立敏感式 MEMS 热膨胀流陀螺具有陀螺效应,输入的角速度变化范围为  $-10 \sim 10$  rad/s,在加热器功率为 50 mW 时,其温度灵敏度为  $0.224 \text{ K} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,非线性度为 2.37%,陀螺的灵敏度为  $1.8 \text{ mV} \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,非线性度为 2.06%。与现有的机械陀螺相比,该陀螺具有灵敏度高及功耗低等特点,可应用于家用电器、小型机器人、无人机等领域。

#### 参考文献:

- [1] LIU S, ZHU R. Micromachined fluid inertial sensors [J]. *Sensors*, 2017, 17(2): 367.
- [2] KOCK G, COMBETTE P, CHAROT B, et al. Realization and study of a thermal gyroscope based on thermal expansion [C]//Roma, Italy: 2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP), IEEE, 2018: 1-6.
- [3] BAHARI J, FENG R, LEUNG A M. Robust MEMS gyroscope based on thermal principles [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 23 (1): 100-116.
- [4] CAI S L, ZHU R, DING H G, et al. A micromachined integrated gyroscope and accelerometer based on gas thermal expansion [C]//Barcelona, Spain: 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers & Eurosensors XXVII), IEEE, 2013: 50-53.
- [5] LIU S Q, ZHU R, DING H G. A temperature compensation method for micromachined thermal gas gyroscope [C]//Busan, South Korea: 2015 IEEE Sensors, 2015: 1-4.
- [6] FENG R, BAHARI J, JONES J D, et al. MEMS thermal gyroscope with self-compensation of the linear acceleration effect [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 203: 413-420.
- [7] LUO H, CABOT J, LEE Y K. Sensitivity improvement of thermal expansion-based angular motion sensors with the parallel distribution of heaters [C]//[S. l.]: 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021: 841-844.
- [8] NIE B, WANG W, YE F, et al. A micromachined three-axis gas inertial sensor based on bidirectional thermal expansion flow [C]//Las Vegas, USA: 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2017: 1091-1094.
- [9] ZAREI N, LEUNG A M, JONES J D. Design principles of the thermal MEMS gyroscope [C]//Texas, USA: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2012, 45257: 357-361.
- [10] WANG S S, GONG X H, NIE B, et al. A micromachined fluidic reduced inertial measurement unit using thermal expansion flow principle [C]//Alaska, USA: 2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2015: 1223-1226.
- [11] 朴林华, 李备, 佟嘉程, 等. 单轴 MEMS 热膨胀流陀螺敏感机理三维有限元分析 [J]. *压电与声光*, 2023, 45 (2): 195-201.  
PIAO Linhua, LI Bei, TONG Jiacheng, et al. Three-dimensional finite element analysis of the sensitivity mechanism of a single-axis MEMS thermal expansion flow gyro [J]. *Piezoelectricity & Acoustooptics*, 2023, 45(2): 195-201.
- [12] 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.
- [13] 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 Linhua, TONG Jiacheng, LI Bei, 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.
- [14] ZAREI N, LEUNG A, JONES J D. Modeling a novel MEMS gyroscope [J]. *ECS Transactions*, 2013, 45 (14): 25.
- [15] LING Ji, WANG Lisong, HUANG Yuzhou, et al. autonomous control algorithm for quadrotor based on deep reinforcement learning [J]. *Computer Science*, 2023, 50(11A): 220900257-7.
- [16] KOCK G, COMBETTE P, TEDJINIM, et al. Experimental and numerical study of a thermal expansion gyroscope for different gases [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 360.