

# 微机械开放式 $z$ 轴射流陀螺敏感机理的研究

朴林华<sup>1</sup>, 朴 然<sup>2</sup>, 常兴远<sup>1</sup>, 胡永辉<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学 北京市传感器重点实验室, 北京 100101; 2. 北京工业大学 信息学部, 北京 100124)

**摘要:**揭示了一种基于开放式气流通道的微机械  $z$  轴射流陀螺的敏感机理。采用基于流固耦合的三维瞬态有限元分析法, 计算了敏感元件内部气流量, 并给出了数学模型。计算和测试结果表明: 敏感元件内有一开放式的气流通道, 分别设置两个入口和一个出口, 气流在压电泵的驱动下, 由两个入口进入并汇聚, 由喷口喷出的气流在射流敏感室形成射流敏感体并从出口流出。在静止条件下, 射流敏感体相对热线  $r_1$  和  $r_2$  对称分布, 作为电桥两个臂的热线  $r_1$  和  $r_2$  之间的速度梯度  $\beta_x = 0$ , 电桥平衡, 输出电压为 0; 有角速度输入时, 射流敏感体在哥氏力的作用下沿着  $z$  轴发生偏转, 射流敏感体相对热线  $r_1$  和  $r_2$  不再对称分布,  $\beta_x$  随着角速度的增加而加大, 在其他材料和结果参数不变的情况下, 由于射流敏感体与热线  $r_1$  和  $r_2$  不对称的热量交换, 热线  $r_1$  和  $r_2$  的电阻发生不对称的改变, 导致电桥失去平衡, 电桥输出与输入角速度成正比的不平衡电压。在  $\pm 120$  ( $^\circ$ )/s 的输入范围内, 陀螺灵敏度为  $2.0 \mu\text{V}/[(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}]$ , 非线性度优于 0.5%, 功耗为 5.2 mW, 热线电阻为  $3 \Omega$ , 热线电阻温度系数为  $2600 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。这种微机械开放式  $z$  轴陀螺敏感元件内气流由开放的入口和出口之间形成定向流动, 无需气流在敏感元件内循环, 敏感元件结构简单。

**关键词:**角速度; 开放式气流通道; 射流陀螺; 敏感机理; 灵敏度

**中图分类号:** TN37

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.005

## Research on the Sensitive Mechanism of Open $z$ -axis Fluidic Gyroscope Based on MEMS

PIAO Linhua<sup>1</sup>, PIAO Ran<sup>2</sup>, CHANG Xingyuan<sup>1</sup>, HU Yonghui<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory for Sensor, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China;

2. Dept. of Information, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In this paper, we revealed the sensitive mechanism of a MEMS  $z$  axis fluidic gyroscope based on the open airflow channel. The 3D transient finite element analysis method based on fluid-structure interaction was used to calculate the airflow field inside of the sensitive element and the numerical model is established. The calculation and test results indicated that: there was an open airflow channel inside of the sensitive element, and two inlets and one outlet were set up. The airflow was driven by the piezoelectric pump and entered from two inlets and was converged. The airflow from the nozzle created a jet-sensitive body in the jet-sensitive chamber and flew out of the outlet. At the static state, the jet-sensitive body was symmetrically distributed relative to the hotwires  $r_1$  and  $r_2$ , the speed gradient  $\beta_x$  between the hotwires  $r_1$  and  $r_2$  as the two arms of bridge was zero. Therefore, the bridge is balanced and output voltage is zero. When the angular velocity was applied, the jet-sensitive body was deflected along  $z$ -axis under the action of the Coriolis force; the jet-sensitive body was no longer symmetrically distributed with respect to the hotwire  $r_1$  and  $r_2$ , thus the velocity gradient  $\beta_x$  between  $r_1$  and  $r_2$  increased with the increase of the angular velocity. Additionally, at the same condition of other materials and result parameters, the resistance value of two hotwires changed asymmetrically because of the asymmetric heat exchange between  $r_1$  and  $r_2$  and sensitive jet flow. Therefore, the bridge was not balanced anymore and output an unbalanced voltage proportional to applied angular velocity. In the input range of  $\pm 120$  ( $^\circ$ )/s, the sensitivity of gyroscope was  $2.0 \mu\text{V}/[(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}]$ , and simultaneously, the nonlinearity was better than 0.5%. In addition, the power consumption was 5.2 mW, the resistance value  $R$  of hotwire was  $3 \Omega$  and the temperature coefficient of resistance of hotwire was  $2600/^\circ\text{C}$ . There was a directional flow between two inlets and outlet inside of the sensitive element of this open  $z$ -axis gyroscope based on MEMS, without circulation airflow. The sensitive element was simple in structure.

**Key words:** angular velocity; open airflow channel; fluidic gyroscope; sensitive mechanism; sensitivity

**收稿日期:** 2017-04-14

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60772012); 北京市自然科学基金重点项目 & 北京市教委科技计划重点基金资助项目(KZ201511232034); 北京市重点实验室开放课题资助项目; 北京市新世纪百万人才工程培养资助项目; 现代测控技术教育部重点实验室资助项目

**作者简介:** 朴林华(1970-), 男(朝鲜族), 吉林省人, 教授, 博士, 主要从事微机械气流式惯性传感器的研究。E-mail: bjplh@163.com。

## 0 引言

陀螺是敏感角速度、角加速度和角度等角参数的惯性传感器,在载体运动姿态测量和控制中始终是核心部分之一<sup>[1]</sup>。目前,利用微机电系统(MEMS)技术制作的 MEMS 陀螺体积小,可靠性高,成本低,适合于批量生产,可用于无人机、可穿戴式设备、头盔、智能机器人、摄像机等微型载体的稳定系统,是未来低、中精度陀螺的理想产品,未来这种传感器需求量可达到 108 亿只<sup>[2]</sup>。但在过去的十几年,以微机械振动陀螺为代表的微型陀螺,其敏感元件由含有不同质量块的振动部件构成,不仅在稍高加速冲击下易断裂或损坏,且在制作过程中为了减少阻尼需要真空封装使其工艺复杂,造成长时间工作时会产生疲劳损坏<sup>[3]</sup>。因此,近年来,人们开始探索利用气体质量块代替固体质量块来检测角速度<sup>[4-5]</sup>,即利用密闭腔体内射流敏感体在哥氏力作用下发生偏转,由几个适当排列的热线(丝)来检测角速度引起的偏转量的载体运动姿态角速度传感器—射流陀螺。这种射流陀螺不需要振动部件,结构简单,能承受高过载,寿命长,成本低,其应用范围更广泛<sup>[6-7]</sup>。V. T. Dau 等首先提出了一种利用 MEMS 工艺制作的基于原有射流陀螺等比例缩小结构的单循环气流通道的微机械射流陀螺<sup>[8]</sup>,后续相继出现了不同结构的单循环气流通道的微机械射流陀螺。目前,最具代表性的是 T. X. Dinh 等提出了圆盘形多循环气流通道的三轴微机械射流陀螺<sup>[9-10]</sup>。上述单循环、多循环气流微机械射流陀螺在结构上都有一个共同之处:气流在一个密闭的空间中定向流动并形成循环。为了实现气流的定向流动和循环,不仅要求压电陶瓷振子的驱动能力强,而且在气流通道结构设计上较复杂,因此制作工艺复杂,成品率低,成本高。为了解决上述射流陀螺存在的问题,本文提出了一种微机械开放式  $z$  轴射流陀螺( $z$  轴射流陀螺是指其角速度敏感轴垂直于角速度芯片表面)。这种陀螺有以下优点:

1) 采用开放式的射流通道,分别设置两个入口和一个出口,气流在压电泵的驱动下,由两个入口进入并汇聚,由喷口喷出的气流在射流敏感室形成射流敏感体并从出口流出,从而在入口到出口形成定向流动,无需气流在敏感元件内循环,敏感元件结构简单。

2) 采用层状的角速度芯片结构形成开放式的气流通道,充分利用硅片的整体厚度,在相同角速度输入时射流敏感体惯性大,气流束偏转量大,陀螺的灵敏度高。

3) 由于热电阻丝(以下简称热线)所在平面和射流敏感体中心轴线平行,故硅板的制造工艺与标准的体硅 MEMS 工艺兼容,结合成熟的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)高精度激光切割成型加工制作敏感元件,使  $z$  轴角速度芯片制作工艺变得简单。本文在给出微机械开放式  $z$  轴射流陀螺结构原理的基础上,采用基于流固耦合的三维瞬态数值分析的方法计算敏感元件内气流的运动规律,并通过气流和热线的相互作用试图解释该射流陀螺的敏感机理,并给出该陀螺的数学模型。

## 1 结构原理

如图 1 所示,微机械开放气流式  $z$  轴射流陀螺敏感元件主要由含一个压电陶瓷振子(压电陶瓷片粘接在薄铜片构成)的上盖、含气流通道の上硅板、表面有热丝的下硅板和底盖等 4 层长方形平板粘接而成。上盖和底盖采用 PMMA 材料。上盖、上硅板、下硅板和底盖粘接后,合围形成气流通道,主要由压电陶瓷振子下面的圆柱形泵室、泵口、入口、入口通道、排气室、集流室、喷口、射流敏感室和出口组成,其中喷口、排气室、集流室、喷口和形成“十”字气流区域,如图 2 所示。热丝由高温系数金属铂、SiN 和 Si 构成。压电陶瓷振子在交变电压的作用下沿着开放式  $z$  轴角速度芯片厚度方向变形,由于集流室的横截面积大于泵口的横截面积,且小于排气室的横截面积,这种特殊的结构在每一个压电陶瓷振动周期内气流通道内的流体阻力和流体动力会有不同,喷出量比吸收量大,使气流通道内的气体从进口吸进、从出口放出,从而形成定向流动。气流由喷口射出,在射流敏感室内形成射流敏感体(见图 2 箭头)。由图 2 可知,在  $z$  轴方向有角速度输入  $\omega_z$  时,由于哥氏力原理,从喷口喷出的射流敏感体将会发生偏转,从而在射流敏感室内的两相对平行的热丝上引起相反的冷却作用。两热丝  $r_1$  和  $r_2$  分别连接成惠斯登电桥的两个等臂,冷却会使热丝电阻发生改变,阻值的改变通过惠斯登电桥转换为与  $\omega_z$  成正比的电压  $E$  输出。

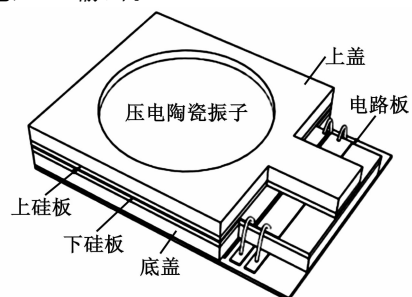


图 1 微机械开放式  $z$  轴射流陀螺外形图

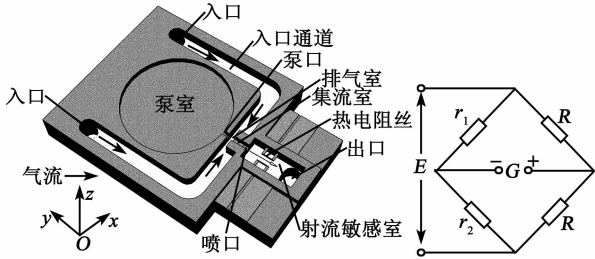


图 2 陀螺结构原理图

有限元数值法求解式(1)~(3)。在求解过程中采用半隐式的压力-速度耦合法。对于动量、密度和能量的空间离散化,使用了二阶逆风方案。对于瞬态分析,时间步长采用压电薄膜振子振动周期的 1/20。气流通道内气流是常温、常压下的空气,进口和出口的气压均设定为标准大气压强。器件的边界条件设置为恒定温度 300 K,流体在气流通道中可压缩性非常小,温度对压力的影响可忽略不计。对于流体防漏条件直接设置在除压电陶瓷振子外的其他部件上。

## 2 模拟仿真

为了获得射流陀螺敏感元件气流通道内部气体流动的机制和运动规律,本文采用数值模拟法计算气流通道内的流场分布,解释开放式气流通道内气流定向流动的原因和射流敏感体如何形成,并以计算结果为基础根据气流和热线之间的热量交换,推导出角速度和射流陀螺输出电压之间的定量关系,给出数学模型,从而揭示开放式 z 轴微机械射流陀螺的敏感机理。

流体的流动控制方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) - 2\rho \boldsymbol{\omega}_z \times \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho c_p T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}$ 、 $p$  和  $T$  分别为速度矢量、压力和流场温度; $\mu=1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda=24.2 \times 10^{-3} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , $c_p=1006 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$  分别为动力学粘度、密度、热导率、流体的比热容。给定的工作流体是空气,压力和密度之间的关系遵循理想气体状态方程  $p=\rho R_u T/M_w$ ,其中, $R_u=8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$  为通用气体常数, $M_w=28.96 \text{ g/mol}$  为摩尔质量。式(2)右边最后一项表示  $\boldsymbol{\omega}_z$  旋转系统中科里奥利加速度。

与以往对射流陀螺模拟仿真计算中忽略流体和固体之间的耦合作用不同,本文首次采用流固耦合分析法研究开放式射流陀螺敏感元件内的流速分布,通过三维固体-三维流体实体建模,将开放式 z 轴射流陀螺分成压电陶瓷振子和气流通道两部分,如图 3 所示。压电陶瓷振子由圆形压电陶瓷片和同心粘接的圆形薄铜片(Cu)弹性基板构成,将正弦交变电  $u(t)$  直接加载在压电陶瓷振子上, $u(t)=u_0 \sin(2\pi f)$ ,其中, $u_0$  为电压的峰值。采用载荷传递分析法将耦合面选在弹性基板下表面,耦合面实现了固体部分和流体部分之间载荷相互传递。本文利用多物理场仿真软件 comsol 实现基于流固耦合的

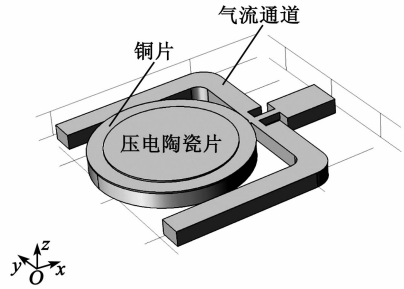


图 3 敏感元件三维有限元模型

图 4 为压电陶瓷振子变形位移和流场的计算结果。由图可看出,由于压电陶瓷振子的周期性振动引起从入口到出口之间的流体流动。图 5 为出“十”字气流区域和射流敏感室在压电陶瓷振子上、下半振动周期的流场矢量图。由图 5 可看出,在外加交变电压作用下,压电陶瓷振子周期性鼓形振动使泵室的体积发生扩张或缩小,因此,泵室的气体会出现交替的排出和吸入。起始状态在泵室和排气室内充满气体。在压电陶瓷振子振动的一个上半周期,即下冲程时,当振子向泵体内(向右)弯曲(见图 5(a)),泵室内的气体被挤压,泵室内气体产生高压,从出口排出,由于集流室的横截面积大于泵口的横截面积,且小于排气室的横截面积,排出的气体大部分进入与排气室对应的集流室,并在喷口形成射流敏感体;在压电陶瓷振子振动的一个下半周期,即上冲程时(见图 5(b)),在当振子向泵体外(向左)弯曲时泵室内气体低压,气体被吸进,此时由于排气室横截面大于集流室,气体流动的阻力小,故进入泵室的气体仍然主要来自排气室,同时由于气体的惯性,上一冲

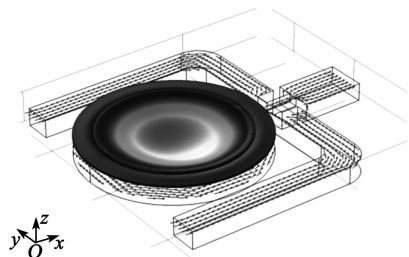


图 4 敏感元件内耦合场(压电陶瓷振子振动-流体流动)

程引起的流向到流口的气流不会马上消失,继续在喷口形成射流敏感体。由图5可知,在压电陶瓷振子振动的一个完整周期内,射流敏感室内维持一个稳定的射流敏感体,为利用哥氏效应制作开放式 $z$ 轴射流陀螺奠定了敏感基础。

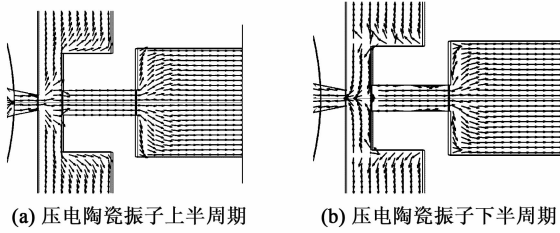


图5 “十”字气流区域和射流室流场矢量图

### 3 数学模型和讨论

根据图1给定的坐标系,在 $\omega_z$ 作用下,由喷口喷出的射流速度为 $v_y$ ,则该射流在 $x$ 方向的偏转距离 $d_{ax}$ 可以表示为

$$d_{ax} = \iint a_x dt = \iint 2v_y \times \omega_z dt \quad (4)$$

$$d_{ax} = v_y \omega_z t_y^2 \quad (5)$$

式中: $t_y$ 为射流从喷口到热线 $r_1$ 和 $r_2$ 所需的时间; $v_y = L_y/t_y$ 为平均速度; $L_y$ 为喷口到热线 $r_1$ 和 $r_2$ 的间距。因此,式(5)可改写为

$$d_{ax} = \omega_z \frac{L_y^2}{v_z} \quad (6)$$

$d_{ax}$ 可以转换为射流速度差 $\Delta v_{ax}$ 。设包含热线 $r_1$ 和 $r_2$ 的 $Y-Z$ 切面部分的射流速度梯度为 $\beta_x$ ,则射流速度差为

$$\Delta v_{ax} = \beta_x \cdot d_{ax} = \beta_x \omega_z \frac{L_y^2}{v_z} \quad (7)$$

当热线通一恒定电流 $I$ 加热时,热线和射流之间热传递的平衡方程为

$$c_{HW} \frac{dT_{HW}}{dt} = I^2 R - hA(T - T_a) \quad (8)$$

式中: $c_{HW}$ 、 $R$ 、 $A$ 分别为热线的热容量、电阻和热线的表面积; $h$ 为热传递系数; $T$ 为热线温度; $T_a$ 为参考温度。式(8)中忽略了因为辐射和传导的能量损失,其等式左侧为热线的热存储速度,等式右侧的第一、二项分别表示电流产生的焦耳热和射流、热线之间的热交换。决定热线电阻和温度的关系可表示为

$$R = R_a [1 + \alpha(T - T_a)] \quad (9)$$

式中 $R_a$ 和 $\alpha$ 分别是温度为 $T_a$ 时的电阻、热线电阻的温度系数。

热传递系数由Nusselt数确定,两者之间的关系为 $h = N_u \lambda / d$ ,其中, $\lambda$ 为气体导热系数, $d$ 为热线的有效直径。Nusselt数 $N_u$ 通过经验公式计算<sup>[8]</sup>:

$$N_u = 1.1C \left( \frac{v_{flow} d}{\gamma} \right)^n (P_r)^{0.31} \quad (10)$$

式中: $v_{flow}$ 为通过热线处的射流速度; $P_r$ 为普朗特数(Prandtl)数; $\gamma$ 为运动学粘度; $C$ 和 $n$ 为经验常数。

根据式(8)~(10),两个热线 $r_1$ 和 $r_2$ 电阻差 $\Delta R$ 和 $\Delta v_{ax}$ 间的关系为

$$\Delta R = \frac{\lambda \pi \alpha I^2 R}{(\lambda \pi l N_u - I^2 R \alpha)^2} \cdot \frac{N_u}{v_{flow}} n \cdot \Delta v_{ax} \quad (11)$$

式中 $l$ 为热线的长度。

把式(7)代入式(11)中, $\Delta R$ 和 $\omega_z$ 间的关系:

$$\Delta R = \frac{\lambda \pi \alpha I^2 R^2}{(\lambda \pi l N_u - I^2 R \alpha)^2} \cdot \frac{n N_u}{v_{flow}} \cdot \beta_x L_y^2 \omega_z \quad (12)$$

为了把 $\Delta R$ 转化为电压值,将一对热线 $r_1$ 和 $r_2$ 串联形成惠斯登电桥的两个臂,如图2所示。设两个热线电阻 $R_1 = R_2 = R$ ,电桥平衡电阻为 $R_0$ 。电桥输出的不平衡电压 $E$ 和电桥电源 $G$ 及各个桥臂电阻的关系式为

$$E = G \frac{(R + \Delta R)R_0 - RR_0}{(R + \Delta R + R_0)(R + R_0)} = U \frac{\Delta R R_0}{(R + \Delta R + R_0)(R + R_0)} \quad (13)$$

如果取 $R_0 \gg R$ ,式(13)可化简为

$$E = G \frac{\Delta R}{R_0} \quad (14)$$

将式(12)代入式(14)可得到 $E$ 与 $\omega_z$ 间的关系为

$$E = G \frac{\lambda \pi \alpha I^2 R^2}{R_0 (\lambda \pi l N_u - I^2 R \alpha)^2} \cdot \frac{n N_u}{v_{flow}} \cdot \beta_x L_y^2 \omega_z \quad (15)$$

式(15)给出了微机械开放式 $z$ 轴射流陀螺的输入-输出关系式,即微机械开放式 $z$ 轴射流陀螺的数学模型。

在外加角速度作用下,气流速度 $v$ 在 $L_z = 1.8$  mm敏感平面的剖面分布如图6所示,其中, $X$ 是此平面射流敏感体与射流中心轴的距离。根据图6可以计算热线 $r_1$ 和 $r_2$ 之间在不同角速度输入时的

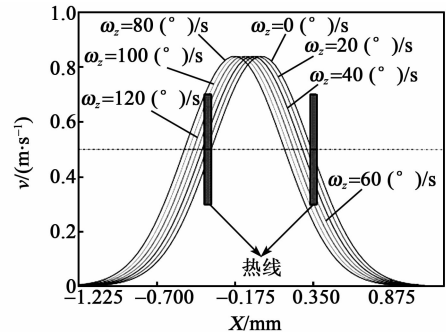


图6 在外加角速度下, $L_z = 1.8$  mm处敏感平面的气流分布图

$\beta_x$ 。由图可见,在静止条件下, $\beta_x = 0$ ;随着角速度的输入, $\beta_x \neq 0$ ,且随角速度的增加, $\beta_x$  加大。因此,我们根据式(15)可以得出,在其他材料和结果参数不变的情况下,电桥输出与输入角速度成正比的不平衡电压。

综上所述,结合微机械开放式  $z$  轴射流陀螺的数学模型,本文提出的射流陀螺敏感元件内有一开放式的气流通道,分别设置两个入口和一个出口,气流在压电泵的驱动下,由两个入口进入并汇聚,由喷口喷出的气流在射流敏感室形成射流敏感体并从出口流出。在静止条件下,射流敏感体相对热线  $r_1$  和  $r_2$  对称分布,作为电桥两个臂的热线  $r_1$  和  $r_2$  之间的  $\beta_x = 0$ ,电桥平衡,输出电压为 0;有角速度输入时,射流敏感体在哥氏力的作用下沿着  $z$  轴发生偏转,射流敏感体相对热线  $r_1$  和  $r_2$  不再对称分布,热线  $r_1$  和  $r_2$  之间的  $\beta_x$  随着角速度的增加而加大;在其他材料和结果参数不变的情况下,由于射流敏感体与热线  $r_1$  和  $r_2$  不对称的热量交换,热线  $r_1$  和  $r_2$  的电阻发生不对称的改变,导致电桥失去平衡,电桥输出与输入角速度成正比的不平衡电压。

根据式(15)可得到理论灵敏度曲线和实际测试结果的比较,如图 7 所示。从图中可看出,在  $\pm 120$  ( $^\circ$ )/s 内,射流陀螺理论灵敏度为  $2.2 \mu\text{V}/[^\circ \cdot \text{s}^{-1}]$ ,实际测试灵敏度为  $2.0 \mu\text{V}/[^\circ \cdot \text{s}^{-1}]$ ,两者的灵敏度相对误差约为 10%。实际测试灵敏度小,其主要原因是理论计算忽略了辐射和传导的能量损失。图 8 为本文提出的微机械开放式  $z$  轴陀螺的样品照片。根据实验测试可得最终测试结果为:在  $\pm 120$  ( $^\circ$ )/s 的输入范围内,陀螺灵敏度为  $2.0 \mu\text{V}/[^\circ \cdot \text{s}^{-1}]$ ,非线性度优于 0.5%,功耗为

5.2 mW,热线电阻为  $3 \Omega$ ,热线电阻温度系数为  $2\ 600 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

#### 4 结束语

本文提出了一种微机械开放式  $z$  轴射流陀螺,这种陀螺敏感元件采用开放式射流通道,气流在射流敏感室形成射流敏感体,无需气流循环,敏感机理简单。采用层状结构,充分利用硅片的整体厚度形成气流通道,射流敏感体惯性大,气流束偏转量大,陀螺的灵敏度高。与标准的体硅 MEMS 工艺兼容的硅板制作工艺,结合成熟的 PMMA 高精度激光切割成型工艺,使  $z$  轴角速度芯片制作工艺变得简单。

#### 参考文献:

- [1] FLEMMING W J. Overview of automotive sensors [J]. Jour of IEEE Sensors,2007,1(4): 296-308.
- [2] DAD V T, SHIOZAWA T, DAO D V. A dual axis gas gyroscope utilizing low-doped silicon thermistor[C]// Irvine, CA: IEEE Sensors 2005 Conference, 2005: 626-629.
- [3] SHIOZAWA T, DAU V T, DAOD V. A dual axis thermal convective silicon gyroscope[C]//Irvine, CA: IEEE Sensors 2005 Conference,2005:1-6.
- [4] DAU V T, DAO D V, SHIOZAWA T. Simulation and fabrication of a convective gyroscope [J]. IEEE Sensors Journal ,2008,8(9):1530-1537.
- [5] HOA P T, DINH T X, DAUV T. Development of a jet-generator and its application to angular rate sensor [C]//Hangzhou, China: Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), 2015:386-388.
- [6] DAU V T, DINH T X, BUIT T. Jet flow generation in a circulatory miniaturized system [J]. Sensors & Actuators B Chemical,2015, 223:820-826.
- [7] DAU V T, OTAKE T, DINH T X, et al. Design and fabrication of convective inertial sensor consisting of 3DOF gyroscope and 2DOF accelerometer [C]//Denver, CO, USA: Transducers 2009, 2009:1170-1173.
- [8] DAO D V, DAU V T, DINHT X. A fully integrated MEMS-based convective 3-DOF gyroscope[C]//Lyon, France: The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2007: 1211-1214.
- [9] DINH T X, OGAMI Y. A triple-axis fluidic angular rate sensor[C]//Kaohsiung, Taiwan: The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics,2012:748-752.
- [10] DINH T X, OGAMI Y. Design of a triple-axis MEMS-based fluidic gyroscope[C]//Taipei, China: IEEE Sensors 2012 Conference, 2012:721-726.

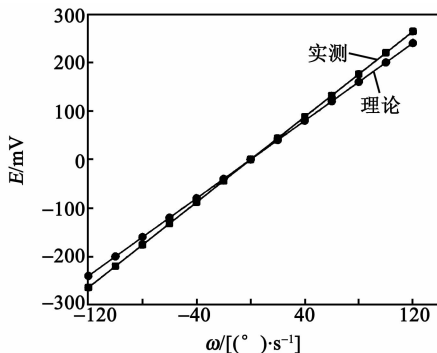


图 7 射流陀螺输入、输出特性理论和实测对比曲线

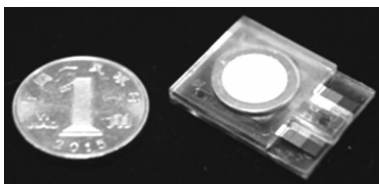


图 8 开放式微机械  $z$  轴射流陀螺外形图