

两丝球形气流式倾角传感器敏感机理的研究

朴林华¹, 朴然², 丁霞³, 段磊¹, 常兴远¹

(1. 北京信息科技大学北京市传感器重点实验室, 北京 100101; 2. 清华大学附属中学, 北京 100084;

3. 青岛科技大学数理学院, 山东 青岛 266061)

摘要:采用有限元法(FEM)计算了两丝球形敏感元件内的温度场和流场,解释和验证了该结构传感器的敏感机理。计算结果和实验表明,两丝球形敏感元件内的流场和温度场随倾角 θ 发生变化;倾斜时等温线不再左右对称,高温等温线重叠部分减少; $\theta=0^\circ$ 时,热敏电阻丝 r_1 、 r_2 的平均温度差 $\Delta T=0$; $\theta=10^\circ$ 时, $\Delta T=7.31$ K; $\theta=20^\circ$ 时, $\Delta T=13.64$ K。 ΔT 随着 θ 变化的平均灵敏度为 0.707 K/($^\circ$);倾斜时位置偏高的热敏电阻丝平均温度高, θ 和 ΔT 基本呈线性关系;与实测值相比,理论值偏大,平均相对偏差为 4.5% ;热敏电阻丝 r_1 、 r_2 的温度差 ΔT 随着倾角 θ 变化,引起两热敏电阻丝阻值改变,检测电桥输出一个对应于倾角 θ 的不平衡电压 ΔV 。该文采用的方法为两丝球形敏感腔结构气流式倾角传感器的结构优化和性能改进开辟了有效的研究途径。

关键词:有限元法(FEM); 气体摆; 对流场; 敏感机理; 温度场; 温差

中图分类号: TN379; TN37 **文献标识码:** A

Study on the Sensitive Mechanism of the Flow Inclination Sensor With Two-wire Spherical Sensitive Cavity

PIAO Linhua¹, PIAO Ran², DING Xia³, DUAN Lei¹, CHANG Xingyuan¹

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

2. The High School Attached to Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Physics & Mathematics, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The temperature field and stream field of the two-wire spherical sensitive element are calculated by using the finite element method(FEM), and the sensitive mechanism of the sensor is explained and verified. The numerical results and experimental results show that the temperature field and stream field of the two-wire spherical sensitive element change with the inclination angle θ . When the inclination of the isotherms is no more symmetrical, the overlap of the high temperature isotherm is reduced; when $\theta=0^\circ$, the average temperature difference of thermal resistance r_1 and r_2 is $\Delta T=0$, when $\theta=10^\circ$, $\Delta T=7.31$ K, when $\theta=20^\circ$, $\Delta T=13.64$ K. The average sensitivity of ΔT changing with θ is 0.707 K/($^\circ$). When the closed spherical cavity is inclined, the average temperature of the thermal resistance wire with high position is higher, θ and ΔT are almost linear relationship; the average relative deviation is 4.5% compared with the measured values. The temperature difference ΔT of thermal resistance r_1 and r_2 changes with θ , which causes the thermal resistance r_1 and r_2 to change, the detection of bridge outputs a unbalanced voltage ΔV corresponding to θ . The proposed method have opened up an effective way for structure optimization and performance improvements of the structure of the flow inclination sensor with two-wire spherical sensitive cavity.

Key words: finite element method; gas pendulum; stream field; sensitive mechanism; temperature field; temperature difference

0 引言

倾角传感器是测量水平面倾角的装置,是载体

静态姿态测量和控制的关键部件之一。目前,最常用的倾角传感器是固体摆式、液体摆式和气体摆式

收稿日期:2015-08-01

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资助项目 & 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基金资助项目;北京市新世纪百万人才工程培养基金资助项目;现代测控技术教育部重点实验室基金资助项目;促进高校内涵发展—学科建设类基金资助项目;北京信息科技大学研究生科技创新基金资助项目

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

倾角传感器,其中气体摆式倾角传感器结构简单,以气体为敏感质量,敏感元件内没有固体质量块和悬挂部件,因此,其耐强振动冲击,响应时间短,成本低,可广泛应用在汽车安全、无人机、雷达、机器人和石油钻井等领域^[1-10]。气体摆式倾角传感器的发明是基于密闭腔体内自然对流的摆特性^[11],而描述自然对流的动量和能量方程的互相耦合给密闭腔体中自然对流问题的求解带来了困难,对数值计算来说,这种困难可以克服^[12]。为便于计算,文献[2]中将热源设定为恒温,这与实际热源保持恒定功率的情况差距较大,计算误差较大。本文针对一种两丝球形敏感腔结构的气流式倾角传感器,采用有限元法(FEM)在给定热源功率的条件下,计算敏感元件的温度场和流场,揭示两丝球形敏感腔结构的气流式倾角传感器敏感机理,为此类传感器的结构优化和性能提高奠定理论基础。

1 结构原理和物理模型

图1为两丝球形敏感腔结构气流式倾角传感器的结构和检测电桥电路。敏感元件是由外壳围成的球形密闭腔体,图中给出了半球体,相对球心等距离平行设置2个敏感电阻丝 r_1 和 r_2 ,并构成所示检测电桥的两臂。 r_1 和 r_2 既起加热作用,使密闭腔内气体产生自然对流,又起敏感倾角的作用。当球形敏感元件所在平面相对水平面(xOz 面)倾斜时, r_1 、 r_2 的阻值发生变化,引起电流改变,检测电桥失去平衡,输出与倾角 θ 相对应的电压 ΔV 。

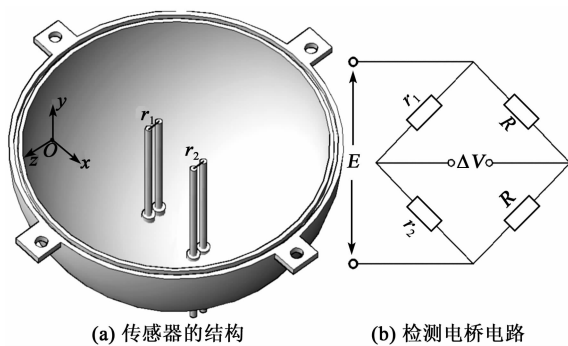


图1 敏感元件结构和检测电桥

热敏电阻丝采用对温度敏感,在空气中不易氧化的铂丝制作,铂丝直径为 $\varnothing 10 \mu\text{m}$, $r_1 = r_2$,两铂丝平行安装,间距为3 mm。密闭腔体的直径为 $\varnothing 10 \text{ mm}$ 。

由于两丝球形敏感腔结构气流式倾角传感器的敏感元件沿敏感轴 z 轴完全对称,所以为便于

建模和计算,可将敏感元件简化为二维结构,如图2所示。气体流动区域是二维圆形空腔, r_1 和 r_2 为两圆形热源, x 轴作为密闭腔体的基准线, g 为重力加速度。

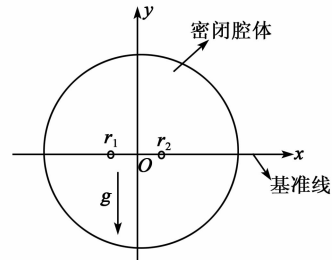


图2 二维敏感元件简化图

2 有限元法求解

ANSYS FLUENT 软件是目前最先进的分析二、三维流体工程问题的有限元计算工具之一,可解决自然对流及热辐射等流体热传递问题^[13-14]。该软件通过质量、动量和能量守恒性质计算流体的速度分布和温度分布。有限元求解包括:

1) 前处理。建立如图2所示面代表密闭腔体,选择形状为四边形四节点单元将整个面划分为2 366个单元,设置密闭腔体外边界和两热源 r_1 、 r_2 外边界为固壁。

2) 求解器。选择默认解算器,设置沿 y 轴的重力加速度及工作温度为298 K,打开辐射模型;设置流体材料为空气,设定空气的密度、比热容、导热系数、粘度、吸收系数和热扩散系数;设置两热源功率为0.1 W,腔体四壁保持散热;采用稳态隐式有限容积SIMPLE算法,计算精度选双精度格式,压力项用普通格式、对流项用快速格式、能量项用二阶迎风格式,并选用合适的亚松弛因子;设置298 K为初始条件,并设置200次迭代步数。

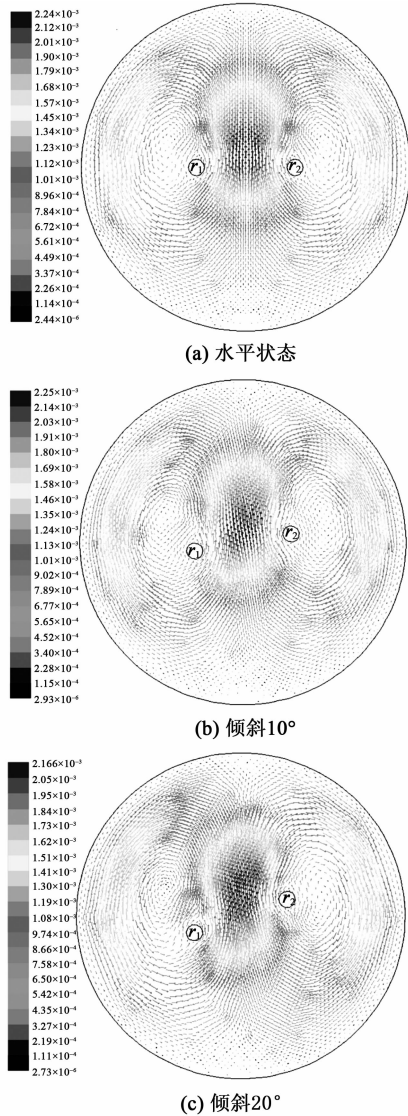
3) 后处理。计算结束后,用其后处理功能导出速度、温度等的矢量场、云图等结果。

3 计算结果

图3为在不同倾斜状态下敏感元件内气流速度矢量图。由图可看出,水平状态时敏感元件内的气流速度相对于 y 轴左右对称分布,气流在 y 轴两侧形成对流,并在 y 轴上汇合成竖直向上的气流,气流速度的最大值出现在此处;在倾斜状态下,敏感元件内的流场发生了变化,气流速度重新分布,不再相对于 y 轴左右对称,但气流仍在 y 轴上汇合成竖直

向上的气流,气流速度的最大值出现在此处,这是气体摆特性引起的气体摆现象^[15]。

0.707 K/(°)。由此可见,倾斜状态下位置偏高的 r_2 平均温度高于 r_1 , θ 和 ΔT 基本呈线性关系。



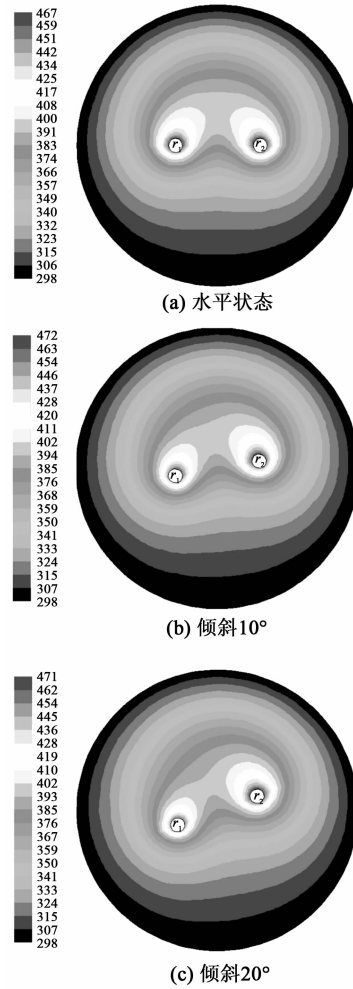
(a) 水平状态

(b) 倾斜10°

(c) 倾斜20°

图3 敏感元件内的气流速度矢量图

图4为在不同倾斜状态下敏感元件内温度场云图。由图可看出,水平状态时敏感元件内的等温线相对于 y 轴左右对称分布;随着倾斜角度的增加,等温线相对于 y 轴不再左右对称,高温等温线重叠的部分减少。图5为不同倾斜状态下 r_1 和 r_2 上的温度分布。由图可看出,倾斜状态与水平状态 r_1 和 r_2 上的温度分布差异明显。根据有限元的计算结果,可得不同倾角 θ 下 r_1 、 r_2 的平均温度 T 。水平状态下 r_1 、 r_2 的平均温度 $T_{r_1} = T_{r_2} = 455.19$ K; $\theta = 10^\circ$ 时, $T_{r_1} = 450.83$ K, $T_{r_2} = 458.14$ K, 温差 $\Delta T = 7.31$ K; $\theta = 20^\circ$ 时, $T_{r_1} = 446.87$ K, $T_{r_2} = 460.51$ K, $\Delta T = 13.64$ K, ΔT 随着 θ 变化的平均灵敏度为

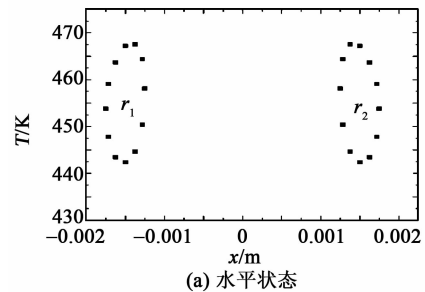


(a) 水平状态

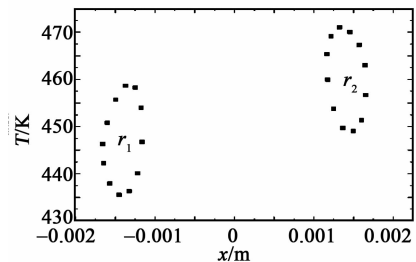
(b) 倾斜10°

(c) 倾斜20°

图4 温度场云图



(a) 水平状态



(b) 倾斜10°

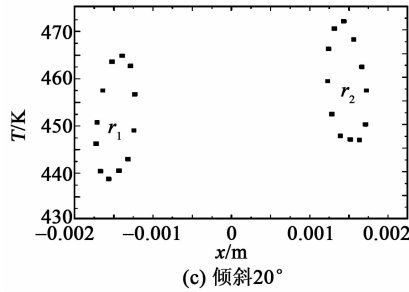


图 5 不同倾斜状态下 r_1 和 r_2 上的温度分布

4 实验测试

r_1 、 r_2 在倾角 θ 输入时的电阻值 R_{1t} 、 R_{2t} 和相应的温度 T_1 和 T_2 的关系可表示为

$$T_1 = \frac{R_{1t} - R_0}{\alpha} + T_0 \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{R_{2t} - R_0}{\alpha} + T_0 \quad (2)$$

式中： R_0 、 T_0 分别为传感器水平($\theta=0^\circ$)时 r_1 、 r_2 初始电阻值和温度值； α 为热敏电阻丝的温度系数，这里取铂(Pt)温度系数。

由式(1)、(2)可得 r_1 、 r_2 温度差为

$$\Delta T = \frac{R_{2t} - R_{1t}}{\alpha} \quad (3)$$

通过伏安法测量 r_1 、 r_2 的电流 I_{r_1} 、 I_{r_2} 和电压 V_{r_1} 、 V_{r_2} ，然后计算得出 R_{1t} 和 R_{2t} 。

表 1 为不同 θ 下 r_1 、 r_2 温度差 ΔT 的理论值和实测值比较。由表可看出，实测 θ 和 ΔT 基本呈线性关系， ΔT 随着 θ 变化的平均灵敏度为 0.658 K/°。采用有限元法计算 r_1 、 r_2 的 ΔT 理论值与实测值间的相对偏差为 4.11%~9.44%，平均相对偏差为 4.5%。造成有限元法误差的原因主要是敏感元件实际尺寸和有限元模型尺寸间的偏差、参数的取值与实际值的差异，以及有限元模型划分单元的数量等因素。

表 1 θ 不同时 ΔT 理论值和实测值比较

$\theta/(\circ)$	$\Delta T/K$ (理论值)	$\Delta T/K$ (实测值)	绝对偏差 δ/K	相对偏差 $\varepsilon/\%$
0	0	0	0	0
10	7.31	6.62	0.69	9.40
20	13.64	13.08	0.56	4.11

5 讨论

气体摆式倾角传感器核心敏感元件为热敏电阻丝。当电流流过热敏电阻丝，热敏电阻丝产生热量，使热敏电阻丝保持一定的温度和电阻。由于热量交换，使热敏电阻丝周围的气体的温度升高，动能增

加，所以气体向上流动(见图 3)。当敏感元件处在水平状态下，热敏电阻丝处于同一水平面上，上升气流穿过它们时速度相同，气流对热敏电阻丝的影响相同，热敏电阻丝的温度和电阻相同，流过热敏电阻丝的电流也相同，电桥平衡，传感器输出电压为 0；当敏感元件倾斜时，两热敏电阻丝相对于水平面的高度发生了变化，由于密闭腔中气体的流动是连续的，热气流在向上的运动过程中，依次经过 r_1 、 r_2 ，穿过上部 r_2 的气流已经过与下部 r_1 热交换，所以带走的热量少， r_2 温度变化少， r_1 、 r_2 的温度不同，即 $T_{r_2} > T_{r_1}$ ；随着 θ 的加大， r_1 、 r_2 相对于水平面的高度差增加，气体在上升过程中克服重力的能量损失增多，使流过上热敏电阻丝的气流速度变小， ΔT 也就越大，导致电阻差加大，因此，流过两根热敏电阻丝的电流之差就越大，电桥失去平衡，传感器输出一个与倾斜角度相对应的电压信号。这就是对两丝球形敏感腔结构气流式倾角传感器的敏感机理的解释。图 6 为实验测得的两丝球形敏感腔结构气流式倾角传感器的输出特性曲线，该传感器的灵敏度为 80 mV/°C。

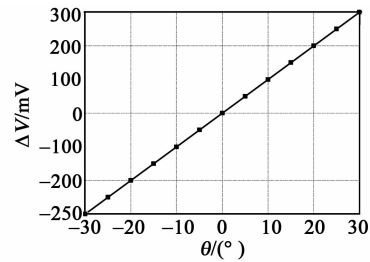


图 6 两丝球形气流式倾角传感器的输出特性曲线

6 结论

在给定热源功率的条件下，采用有限元法及 ANSYS FLUENT 软件计算了在不同倾斜状态下二维两丝球形敏感元件内的温度场和流场，计算和实验验证表明：

1) 两丝球形敏感元件内出现显著的气体摆现象。

2) 两丝球形敏感元件内在倾斜状态时等温线不再左右对称，高温等温线重叠部分减少，倾斜状态下位置偏高的热敏电阻丝 r_2 平均温度高于热敏电阻丝 r_1 。

3) 热敏电阻丝 r_1 、 r_2 的平均温度差 ΔT 和 θ 基本呈线性关系，此特性是两丝球形气流式倾角传感器的敏感基础。

参考文献:

- [1] 张福学. 现代压电学(下册)[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 张福学. 自然对流气体的摆特性及其在传感器中的应用[J]. 中国工程科学,2002,4(8):50.
ZHANG Fuxue. The pendulum Characteristics of natural convection gas and its application in sensor[J]. Chinese Engineering Science, 2002, 4(8):50.
- [3] 张福学,赵启凤. 二维微机械气体摆式加速度计与倾角传感器[J]. 压电与声光,2010,32(1):27-29.
ZHANG Fuxue, ZHAO Qifeng. Two dimensional micro machined gas pendulum accelerometer and tilt sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(1): 27-29.
- [4] 杨东升,谭民军,冯秦鹏. 传感器的发展和军事应用[J]. 现代电子技术,2006(22):34.
YANG Dongsheng, TAN Minjun, FENG Qinpeng. Development and military applications of sensors[J]. Modern Electronic Technology, 2006(22):34.
- [5] 杨锦尊. 新型传感器的应用及发展[J]. 现代电子技术,2006(20):17.
YANG Jinzun. Application and development of new sensor [J]. Modern Electronic Technology, 2006(20):17.
- [6] 徐景硕. 惯性传感器技术及发展[J]. 传感器技术,2001(5):1.
XU Jingshuo. Inertial sensor technology and its development[J]. Sensor Technology, 2001(5):1.
- [7] 朴林华,王星,余全刚. 气流式角速度传感器:201110186345.7[P]. 2012-12-12.
- [8] FLEMMING W J. Overview of automotive sensors[J]. J of IEEE Sensors, 2007(1):296-308.
- [9] 杨其锐. 微机械气流式水平姿态传感器的仿真优化和信号处理技术[D]. 北京:北京信息科技大学,2015.
- [10] 李言杰. 气流式惯性传感器的耦合场和信号处理的研究[D]. 北京:北京信息科技大学,2010.
- [11] DINH T X, DAUA V T, SUGIYAMA S, et al. Fluidic device with pumping and sensing functions for precise flow control [J]. Sensors and Actuators, 2010, 15: 819-824.
- [12] ZHU R, DING H, SU Y, et al. Micromachined gas inertial sensor based on convective heat transfer[J]. Sensors and Actuators, 2006(130):68-74.
- [13] 张昆,杨荣,王津,等. 圆筒内开缝圆筒自然对流的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2014,35(1):128-131.
ZHANG Kun, YANG Mo, WANG Jin, et al. Numerical simulation of natural convection in cylindrical slotted cylinder[J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 2014, 35(1):128-131.
- [14] 郭宽良. 数值计算传热学[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,1987.
- [15] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,1999.
- [16] 朴林华,张福学. 密闭腔中自然对流体摆特性的有限元分析[J]. 电子元件与材料,2003,22(12):16-18.
PIAO Linhua, ZHANG Fuxue. Finite element analysis of natural convection gas in confined cavity[J]. Electronic Components and Materials, 2003, 22 (12): 16-18.

读者信息反馈卡(2016年第5期)

- ▲您目前最感兴趣的技术问题: _____
- ▲您认为本期最佳文章: _____ 理由: _____
- ▲您认为本期欠佳文章: _____ 理由: _____
- ▲您希望本刊增加哪些内容: _____
- 读者姓名: _____ 通信地址: _____ 邮编: _____

复印有效

《压电与声光》免费索阅卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____

地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____

企业产品: _____

索阅期号: _____ 年 _____ 月(每次仅限壹期)

复印有效