

# 流动相似律在气流式倾角传感器中的应用

郑永红<sup>1,3</sup>, 彭世<sup>2</sup>, 黄小丽<sup>3</sup>, 靳映霞<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学电子工程学院 北京 西城区 100876; 2. 中国科学院力学研究所 北京 海淀区 100080;  
3. 北京信息工程学院传感技术研究中心 北京 朝阳区 100101)

**【摘要】**气流式惯性传感器因其独特的优点引起大家的关注,但是环境温度不可避免地对气流式传感器性能有影响,会产生严重的温度漂移。它不仅限制了传感器的应用范围,而且还影响了传感器性能的进一步提高。本文通过数值模拟的方法,研究了环境温度变化时气流式倾角传感器腔体内的流场变化,分析了流场变化对传感器性能的影响机理,并利用相似理论讨论了一种新的消除环境温度影响的解决办法。结果表明,可以通过设计的补偿电路改变热源温度使流场保持相似来消除环境温度的影响。

**关键词** 气流式; 自然对流; 相似; 温度场  
**中图分类号** TN6 **文献标识码** A

## Application of Flow Similarity to Convection-based Tilt Sensor

ZHENG Yong-hong<sup>1,3</sup>, PENG Shi-liu<sup>2</sup>, Hong Xiao-li<sup>3</sup>, JIN Ying-xia<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications Xicheng Beijing 100876;  
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100080;  
3. Center for Sensor Technology Research, Beijing Information Technology Institute Chaoyang Beijing 100101)

**Abstract** A kind of inertial sensor based on natural convection is attracting more and more attentions recently. But the environment temperature has inevitable effects on property of the convection-based sensors. By numerical simulation the fluid flow in chamber of such a tilt sensor, which is changing with the environment temperature, is researched. The mechanism of influence of fluid flow on property of sensor is analyzed. A method of eliminating the influence of environment temperature on property of sensor is proposed based on the theory of flow similarity. The results show that a compensative circuit specially designed can keep flow similarity so as to eliminate the influence of environment temperature.

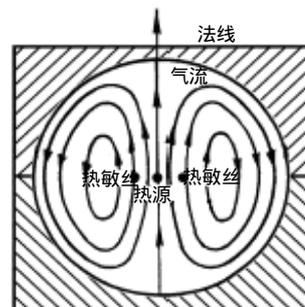
**Key words** convection-based; natural convection; similarity; temperature field

20世纪90年代,气流式倾角传感器得到了广泛的应用<sup>[1-10]</sup>。气流式倾角传感器的敏感质量是气体,惯性小。因此,它具有耐承受冲击高、响应时间短等特点,可用于坦克、舰船和机器人的姿态参考系统。但是,其性能由于受环境温度影响比较大,它在军用武器系统中的应用受到了限制。本文通过粘性流体运动的相似律理论,利用AFC软件数值仿真计算,提出了改善气流式倾角传感器性能的方法。

### 1 气流式倾角传感器的敏感原理

气流式倾角传感器测量倾角原理如图1所示。在一横卧圆柱形密闭腔体中,设置一热源和两热敏丝。丝状热源沿腔轴放置,热敏丝对称放置构成测量电桥的两个敏感臂。当传感器水平放置时,两个热敏

丝处于气流场中相同的温度区,电桥平衡,电压输出为零;当传感器倾斜时,水平面上方热敏丝处于温度高的位置,水平面下方的热敏丝处于温度低的位置,导致电桥失去平衡,电桥有电位差输出,输出与倾角成正比的电压信号<sup>[11-12]</sup>。



a. 处于水平状态

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: 北京市传感器重点实验室开放课题资助项目(53062024)

作者简介: 郑永红(1969-),女,博士生,讲师,主要从事气流式倾角传感器方面的研究。

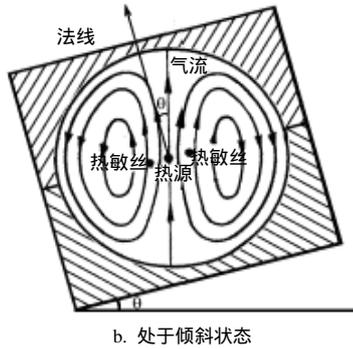


图1 气流式倾角传感器工作原理

## 2 粘性流体运动的相似律

在直角坐标系中牛顿型流体的运动方程——纳维-斯托克斯方程为：

$$\frac{du_i}{dt} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

式中  $f$  为作用在微团上单位质量流体的质量力的大小； $u$  为流体质点的速率； $\mu$  为流体的粘度； $\rho$  为流体的密度； $p$  为流体的压强。

纳维-斯托克斯方程的左端含有非线性的对流加速度项，右端有粘性扩散项，因此粘性流体的控制方程是非线性的对流扩散方程。除了少数简单流动能获得解析解外，很难用理论方法获得复杂流动的精确解。因此，工程中还常用实验方法研究复杂流体。例如，常在风洞、水洞或水槽中进行模型实验。如果研究对象是尺度很大的飞机、船舰等，就不得不用缩小的几何相似模型进行实验。这样就需要知道在什么条件下模型实验的流场能真实地再现物流场。流动的相似定律讨论了这样的问题<sup>[3]</sup>。

### 2.1 相似定律

(1) 几何相似：对应长度成比例，对应角度相等的两几何体称为几何相似；(2) 流动的力学相似：在时空中，几何相似对应点上的物理量成比例的两个流场称为动力相似流动，简称相似流动。流动相似的前提是几何相似；(3) 特征量与无量纲量：相似流动中某一指定状态的物理量称为特征物理量。在流动问题中应有以下特征量：几何特征量  $L$ ，时间特征量  $t_0$ ，速度特征量  $U$ ，压强特征量  $p_0$ ，密度特征量  $\rho_0$  等。相似流场中，对应点无量纲量相等。在相似流动中，只需要有一个无量纲解就可通过无量纲关系得到相似系统中任意一个流动的解，这就是相似论的重要意义；(4) 流动相似的充要条件：如果无

量纲方程和边界条件中所有无量纲参量相等，则对应的流动问题的无量方程有相同的解，也就是流动相似。

## 3 ANSYS-FLOTTRAN CFD软件数值仿真计算与结果

### 3.1 控制方程

对于轴对称的横卧圆柱形密闭腔体，其简化的二维情况下无量纲控制方程为<sup>[4]</sup>：

$$\text{连续性方程：} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0$$

能量守恒方程：

$$u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

动量守恒方程：

$x$ 方向：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) = u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y}$$

$y$ 方向：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} T =$$

$$u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y}$$

式中  $\text{Re} = LU/\nu$  为雷诺数； $\text{Pr} = \nu/\alpha$  为普朗特数； $\text{Gr} = g\beta(T_s - T_\infty)L^3/U^2$  为格勒射夫数。其中， $L$  为特征长度，即腔体半径； $U$  为特征速度； $\nu$  为粘度； $\alpha$  为热扩散系数； $\beta$  为热膨胀系数； $T_s$  为热源的温度； $T_\infty$  为环境温度。

### 3.2 边界条件

密闭腔体中的自然对流，其边界条件与腔体形状有关，对于横卧圆柱形腔体的边界条件为：

热学边界条件： $T_i^{(1)} = T^{(2)} = T_\infty$ ，其中， $T_i^{(1)}$  指气体边界上的温度， $T^{(2)}$  指固体边界温度， $T_\infty$  为环境温度。

力学边界条件： $u^{(1)} = u^{(2)}$ ，其中， $u^{(1)}$  指气体边界上的速度， $u^{(2)}$  指固体边界速度。

几何边界条件： $x^2 + y^2 = R^2$ ，其中， $R$  为腔体的半径。

### 3.3 数值仿真计算与结果

采用有限元方法<sup>[15]</sup>，利用ANSYS-FLOTTRAN CFD软件，通过建模、划分网格、加载和求解等途径，计算不同环境温度下二维密闭腔体中点热源引起的温度场，得到了环境温度的变化对气流式倾角传感器性能影响的机理。

图2是热源温度为373 K、环境温度为293 K, 通过计算机仿真得到的温度场云图。保持热源温度373 K不变, 改变环境温度分别为293 K、323 K、343 K, 可以得到不同的温度场云图。为了能更直观地说明环境温度变化对密闭腔体流场的影响, 选取Y轴上点的位置为横坐标, 对应点的温度为纵坐标, 从而得到不同的温度场在Y轴上各点的位置随温度变化的关系曲线, 如图3所示。从图中可以看到, 外界环境温度发生变时化, 气流场的温度分布也发生变化。当热源温度和环境温度之间的差值越大, 则腔体中温度场的梯度就越大; 反之, 则越小。可见环境温度影响密闭腔体中流场的变化, 导致了传感器的性能发生变化。

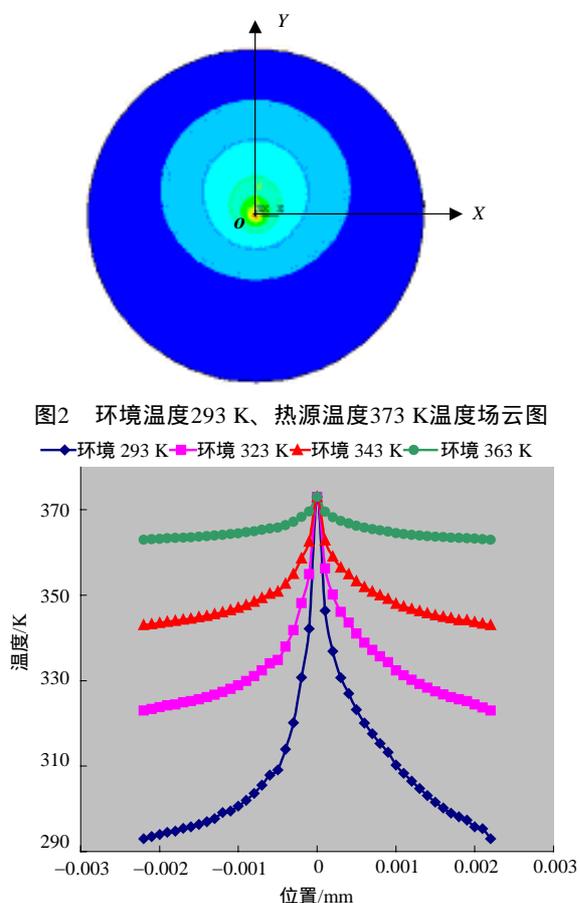


图2 环境温度293 K、热源温度373 K温度场云图

图3 热源温度373K不同环境温度下位置与温度的变化

根据流体力学的相似律和流动相似的充要条件, 本问题的无量纲参量为控制方程中的 Grashof 数 $G_r$ 。根据 $G_r$ 的定义, 在热源温度和环境温度之间的差值相等的条件下可以得到相似的流场。所以环境温度变化时, 可以调整热源温度使两个流场流动相似, 从而可以消除环境温度对传感器性能的影响。下面用数值模拟的结果来说明这一结论。

图4是热源温度为383 K、环境温度为303 K 的温度场云图, 与图2有相似流场。为了进一步说明图2和图4的相似性, 仍采用上述办法, 分别在两个温度云图中选取Y轴上点的位置为横坐标, 对应点的温度为纵坐标, 从而得到两个的温度场在Y轴上各点的位置随温度变化的关系曲线, 如图5所示。从图中可以看出, 两个温度场的温度梯度变化基本是一致的。可见, 利用流体力学的相似律, 通过热源温度与环境温度的差值关系可以得到相似的流场。

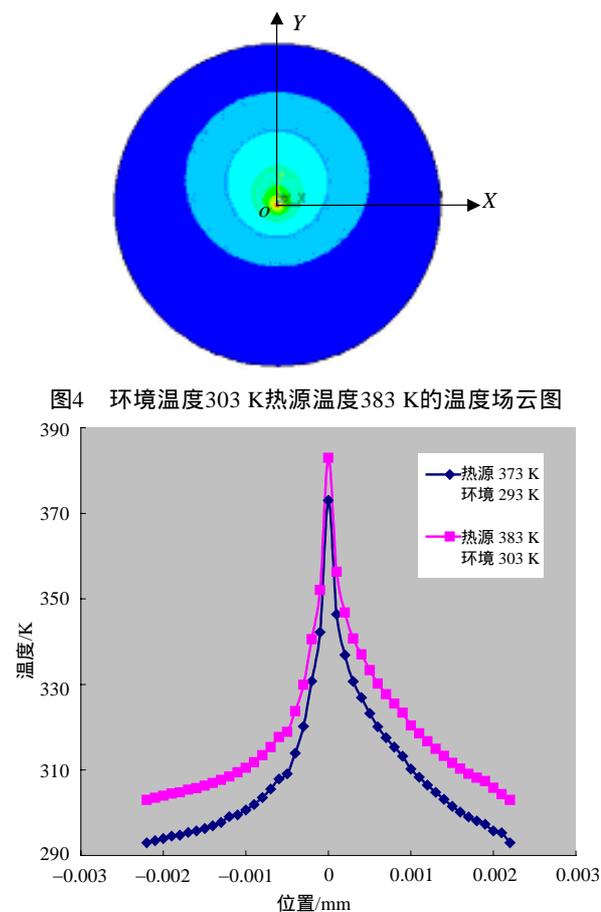


图4 环境温度303 K热源温度383 K的温度场云图

图5 热源与环境温差为80 K的温度场云图

利用上述讨论, 可以在电路中设计一反馈补偿电路, 来改变热源的温度, 使热源温度与环境温度的温差保持不变, 得到相似流场, 从而消除环境温度对气流式倾角传感器的影响。补偿电路的设计如下: 设热源供电电压为恒压, 在热源供电电路上, 串联一热敏电阻, 热敏电阻的阻值随环境温度变化。因此, 当环境温度发生变化时, 热源两端的电压也发生变化, 从而可以改变热源的温度大小。经过适当的计算和设计就可以达到消除环境温度影响的目的。图6为补偿前后环境温度从 $-20^{\circ}\text{C}$ 变化到 $30^{\circ}\text{C}$ 试

验中得到的气流式倾角传感器倾角为 $30^\circ$ 时的电桥输出电压。试验结果表明：补偿前，输出电压随环境温度的变化而变化，当环境温度升高时，环境温度与热源的温度的差值减小，温度梯度减小，输出电压减小；补偿后，电压输出基本保持不变。

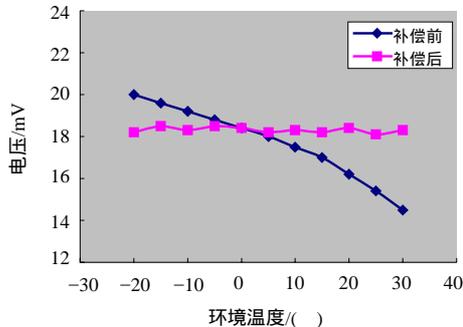


图6 倾角 $30^\circ$ 输出电压与环境温度的变化关系

## 4 结论

根据气流式倾角传感器的原理，电桥输出的电压是由两热敏丝所处的温度的不同决定的。通过仿真计算可见，气流式倾角传感器的性能是和热源温度与环境温度的差值有关系的。当差值越大时，气流式倾角传感器的性能越好；当差值越小时，气流式倾角传感器的性能越差。根据流体力学的相似律，当差值保持不变时，流场相似。

在实际应用中，由于外界环境温度的变化，会导致热源温度与环境温度的差值发生变化，从而导致气流式倾角传感器性能的变化。可以通过用补偿电路改变热源温度，使热源与环境温度的差值保持不变的方法，来消除环境温度对倾角传感器性能的影响，这样就可以大大提高气流式倾角传感器的性能和适用范围。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG Fu-xue. Gas pendulum acceleration sensor[J]. Chinese Journal of Electronics, 2000, 9(1): 14-16.
- [2] ZHANG Fu-xue. Gas-pendulum horizontal attitude sensor[C]//Electronic Components and Materials International Conference, Xi'an: [s.n.], 1995, 10: 343-344.
- [3] DAUDERSTÄDT U A, VRIES D, HIRATSUKA R, et al. Silicon accelerometer based on thermopiles[J]. Sens. Actuators, 1995, A46-47: 201-204.
- [4] DAUDERSTÄDT U A, P H S de Vries, HIRATSUKA R. et al. Simulation aspects of a thermal accelerometer[J]. Sens. Actuators, 1996, A55: 3-6.
- [5] DAUDERSTÄDT U A, SARRO P M, FRENCH P J. Temperature dependence and drift of a thermal accelerometer[J]. Sens. Actuators, 1998, A66: 244-249.
- [6] DAO R, MORGAN D E, KRIES H H, et al. Convective accelerometer and inclinometer: US, 5581034[P]. 1996.
- [7] 张福学, 陈占先, 罗玉华. 气体摆式倾角传感器: 中国, CN1064351[P]. 1992.
- [8] 陈占先, 张福学, 李兴教. 新型气体摆倾角传感器[J]. 压电与声光, 1995, 2(17): 20-22.
- [9] 张福学, 夏松, 缪旻. 气体摆式全方位水平姿态传感器: 中国, 99116757.0[P]. 1999-05-13.
- [10] 张福学, 田文杰, 朴林华, 等. 气体摆式水平姿态传感器: 中国, 99118007.0[P]. 1999-09-30.
- [11] 张福学. 密闭腔内气流的摆特性[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 141-142.
- [12] 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.
- [13] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [14] 林宇. 气体摆式姿态传感器的原理结构及其性能的研究[D]. 北京: 北京电子科学研究所, 2005.
- [15] 李黎明. ANSYS有限元分析实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

编辑 税红