

## The Effects and Compensation of Ambient Temperature on an Air Flow Sensor Integrated Micro Channel \*

YU Bolin<sup>1\*</sup>, WANG Ruichun<sup>1</sup>, GONG Handong<sup>1</sup>, YU Fahong<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic & Communication, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen Guangdong 518029, China; )  
(2. State Key Lab of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The effect of ambient temperature on an air flow sensor integrated micro channel is studied, and a compensation solution of ambient temperature is proposed. For this flow sensor, the air flow velocity is obtained by testing temperature difference of upstream and downstream, and the temperature difference is different when ambient temperature is different. This can bring test bias. The increase of ambient temperature would cause the temperature difference of upstream and downstream decrease and output voltage decrease, but measurable range becomes wider. In this article, the compensation solution is that a film resistance used to test ambient temperature is installed in the upstream of chip. By this way the ambient temperature can transfer into voltage signal as the reference of compensation. The compensation solution is aimed to let the temperature difference of ambient and heater resistance maintain constant, meanwhile the measure deviation caused by ambient temperature change would decrease. When the air flow velocity is 2.5 m/s and ambient temperature is 0 °C, 27 °C and 50 °C, the output voltage signal is 4.5 V, 3.6 V and 2.4 V respectively before compensation, after compensation the output voltage signal is 3.62 V, 3.68 V and 3.75 V respectively.

**Key words:** air flow sensor; ambient temperature; test effect; compensation

EEACC: 7230; 7320W

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.05.012

## 环境温度对集成微沟道温差空气流量传感器的影响及其补偿 \*

余柏林<sup>1\*</sup>, 王瑞春<sup>1</sup>, 龚汉东<sup>1</sup>, 余法红<sup>2</sup>

(1. 深圳信息职业技术学院 电子通信技术系, 广东 深圳 518029; )  
(2. 武汉大学 软件工程国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 研究了环境温度对集成微沟道热式空气流量传感器的影响, 并提出了相应的环境温度补偿方案, 能显著减小测试误差。这种传感器的测试原理是通过加热电阻的上下游温度差来反映空气流速, 不同的环境温度, 该上下游温度差也不同, 从而导致测试结果出现偏差。随着环境温度的增加, 上下游温差变小, 输出电压也减小, 但可测试范围增加。同时, 文中提出的一种环境温度补偿方案是在芯片上游放置环境温度测试电阻, 将环境温度转化为电阻信号, 以作为环境温度补偿依据, 最终使得加热电阻与环境温度的温差保持恒定, 这样就减小了环境温度的变化带来的测试误差。当流速为 2.5 m/s, 环境温度分别为 0 °C、27 °C 和 50 °C 时, 补偿前传感器的输出电压信号分别为 4.5 V、3.6 V 和 2.4 V, 补偿后传感器的输出电压信号分别为 3.62 V、3.68 V 和 3.75 V。

**关键词:** 空气流量传感器; 环境温度; 测试影响; 补偿

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)05-0684-04

热式微型空气流量传感器是以托马斯提出的“气体的放热量或吸热量与该气体的质量流量成正比”理论为基础, 利用外热源对传感器探头加热, 气

体流动时会带走一部分热量, 使探头温度改变, 通过测量因气体流动而造成的温度变化来反映气体的质量流量<sup>[1-15]</sup>。目前主要有热线损失线型和热膜温差

热膜型。前者由于存在交叉灵敏度,热紊乱很大,热线抗污染腐蚀能力差等;限制了它的进一步发展<sup>[16-18]</sup>。伴随着微电子加工技术发展以及 MEMS 技术的兴起,热膜式气体质量流量传感器成为新的研究焦点。采用硅微机械加工技术制成的具有体积小、成本低、稳定性好、兼容性强、精确度高、功耗低、响应时间短等特点。2000 年 Hung 等人发展出新型的热敏电阻传热式流量传感器,该传感器的灵敏度为 3.2638 °C/mV,其响应速度小于 5 ms,测量速度高于 1.5 m/s,该传感器用新型“网式”薄膜结构代替传统的微型传感器结构<sup>[19]</sup>。2004 年 Seunghyun Kim 等人发展出一种可以探测流动方向和流量大小的环形热式微型流量传感器。传感器的技术指标为:方向最大角度差 5°,速度误差不超过 0.5 m/s,功率为 80 mW,传感器的整体尺寸 3 mm×3 mm<sup>[10]</sup>。2006 年,美国 Honeywell 物理科学中心研制出基于石英的微流量计主要用于高压流体中的流量测试,具有抗压能力强的特点,其抗流体的压强可高达 5 000 psi,响应时间为 3 ms。

本文中研究了环境温度对空气流量传感器测试的影响,热膜式空气传感器的测试原理是基于温度场的变化而反映流速大小的。不同的环境温度下,横隔膜上的对流换热也会不同,因此,加热电阻的温度恒定的工作模式下,当周围环境温度改变时,加热电阻的上下游的温度差也会随之改变,导致测试结果出现偏差。文中分析了环境温度对其测试影响的大小和趋势。另外,本文中提出了增加环境测温电阻的补偿方式,并验证了在该补偿下,不同环境测试时的一致性。

### 1 环境温度对测试结果影响的分析

本文中是以集成微沟道的空气流量传感器为研究对象,其结构设计示意图如图 1 所示,在横隔膜下方设计一条微通道,通过微沟道的导向作用,时横隔膜上下表均有流体流过,增加横隔膜表面的强迫对流换热面积  $A_s$ ,从而达到增加横隔膜上的强迫对流换热,提高传感器的测试精度。如图 1 分别给出了集成微沟道流量传感器的立体剖面图和横截面图。

在没有温度补偿时,加热电阻的温度控制电路中,将加热电阻和一个固定阻值的外电阻对等连结,如图 2 所示。根据惠斯通电桥原理有:

$$R_a : R_b = R_h : R' \tag{1}$$

即  $R_h = R' \cdot \frac{R_a}{R_b}$  另外,加热电阻由正温敏特性(PTC)材料组成,则有:

$$R_h = R_{h0} + \alpha R_{h0} T_h \tag{2}$$

其中  $R_h$  和  $R_{h0}$  分别为当前温度和 273 K 下的加热电阻阻值, $\alpha$  为薄膜电阻材料的温特系数, $T_h$  为当前温度。由式(1)和(2)可得, $T_h$  只与电路中外部电阻  $R_a, R_b$  和  $R'$  有关,在外部电阻固定的情况下, $T_h$  为常数。

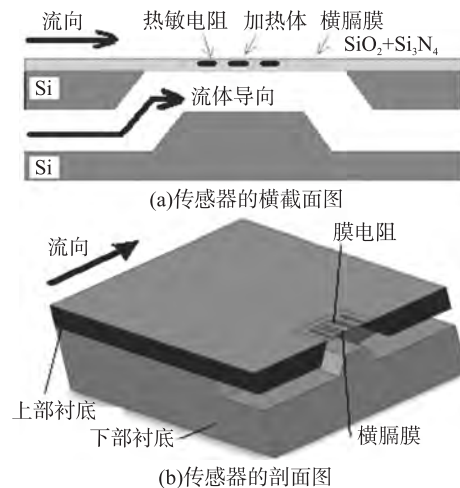


图 1 集成微沟道流量传感器结构图

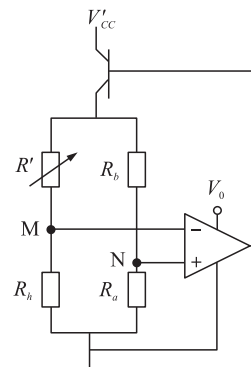


图 2 恒温控制电路

加热电阻的温度  $T_h$  恒定为 400 K,研究了环境温度分别为 0 °C, 15 °C, 27 °C, 40 °C 和 50 °C 下流量传感器的输出特性。图 3 为空气流量传感器在不同环境温度下输出信号电压与流速的关系,其中信号电压放大 1 000 倍。从图中可以看出,不同环境温度下,电压信号出现很大的误差,随着环境温度的增加,电压信号明显减弱,给流量传感器的测量带来很大的误差。加热电阻的温度保持在 400 K 时,随着环境温度升高,加热电阻与环境的温差减小,则加热电阻的强迫对流减弱,同时横隔膜整体温度也升高,流体边界层温度梯度变小,使得横隔膜上沿流向方向上的温度梯度变缓,各种热交换和热传递都减小。因此,在相同流速下,环境温度越高,上下游的温差越小,从而输出的信号电压也越小。当流速为 2.5 m/s,环境温度分别为 0 °C, 27 °C 和 50 °C 时,其

测试的输出电压信号分别为 4.5 V, 3.6 V 和 2.4 V。从图中可以看出,随着环境温度的降低,信号输出电压的饱和现象越显著。这是由于这两种传感器的横隔膜上的温度梯度较大,环境温度越低,流体与横隔膜的温差越大,强迫对流越明显,则随着流速的增加这种对流换热越容易达到饱和。传感器中不同环境温度,其测试量程发生很大的改变。当环境温度为 0 °C 时,最大测试流速为 2.5 m/s。

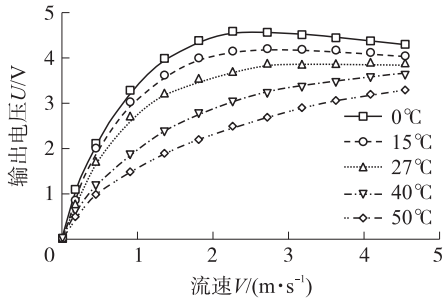


图3 传感器在不同环境温度下输出电压与流速的关系

## 2 环境温度的补偿

本中提出在空气流量传感器的补偿方法,即传感器芯片最上游放置一根环境温度测试电阻  $R_k$ ,通过该测试电阻反映流道进口温度,将该温度转化为电阻信号,作为环境温度补偿依据,使得加热电阻与进口空气之间的温差保持恒定值,采用的加热电阻的控制电路原理如图 4 所示。将环境温度测试电阻  $R_k$  作为惠斯顿电桥桥臂的一部分串入电路中。

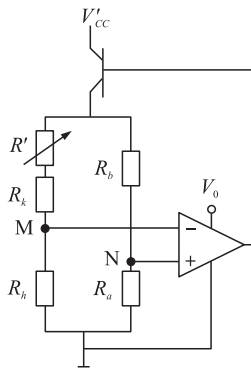


图4 带温度补偿的恒温控制电路

根据图 4,则:  $R_a : R_b = R_h : R' + R_k$ , 又由于  $\alpha R_{k0} = \alpha R_{h0}$  设定  $R_{k0} = R_{h0}$ ,  $R_a = R_b$ , 其中  $R_{k0}$  和  $R_{h0}$  分别为 0 °C 下  $R_k$  和  $R_h$  的值,由于环境温度测试电阻与加热电阻在制备中的一致性,其温敏系数均为  $\alpha$ ,由此可得

$$T_h - T_0 = \frac{R'}{\alpha R_{h0}} = \text{constant} \quad (3)$$

式中  $T_h$  和  $T_0$  分别为加热电阻的温度和环境温度,因此该电路实现了加热电阻与环境温度差保持恒定。

如图 5 所示为不考虑流速的情况下,加热电阻

和环境温度测试电阻的阻值随着环境温度的变化曲线。由于  $\alpha R_{k0} = \alpha R_{h0}$ ,所以在电阻温度曲线中  $R_k$  和  $R_h$  的斜率相等。图中  $R_k$  和  $R_h$  的电阻阻值之差即为温度差的反映。从图中可以看出,  $R_k$  和  $R_h$  的阻值温度曲线为两条成平行线,其差固定在一个值  $R'$ 。当环境温度为 0 °C 时,  $R_k$  和  $R_h$  分别为 63 Ω 和 79 Ω,  $R_k$  和  $R_h$  所处的温度分别为 0 °C 和 100 °C, 其温差为 100 °C。同样,当环境温度为 40 °C 时,  $R_k$  和  $R_h$  分别为 76 Ω 和 110 Ω,  $R_k$  和  $R_h$  所处的温度分别为 40 °C 和 140 °C, 其温差维持 100 °C 不变。所以该电路维持了加热电阻与进口空气之间的温度。并可以通过改变  $R'$  的阻值来调节该温差。

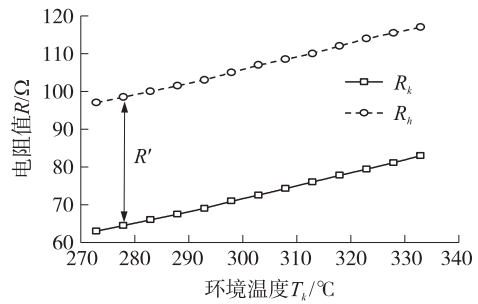


图5 加热电阻和环境温度测试电阻的阻值与环境温度的关系

如图 6 为环境温度补偿后,传感器的输出信号电压与流速的关系。环境温度为 0 ~ 50 °C, 芯片横截面的流速为 0 ~ 6 m/s 时传感器的信号输出与流速的关系。从图中可以看出,经过  $R_k$  的温度补偿之后,在不同环境温度下的传感器输出信号电压表现出的一致性相对较好。相比没有温度补偿时信号电压,其误差大大缩小,但还不能完全避免误差。随着温度升高,流体的热导率越高,强迫对流越大,固体热导率小,根据横隔膜上热平衡方程:

$$I_h^2 R_h + c \cdot m_a \cdot A_s \cdot (T_h - T_s) + \lambda \cdot A_0 \cdot \frac{\partial T}{\partial s} + E = 0 \quad (4)$$

其中  $I_h^2 R_h$  为加热电阻的热量,  $A_0$  为横隔膜的截面积,  $\frac{\partial T}{\partial s}$  为横隔膜上的温度梯度,  $\lambda$  的名义热传导系数。  $T_s$  为气体的温度。根据方程(4)可得强迫对流

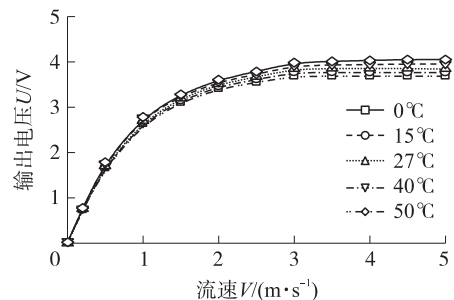


图6 温度补偿后传感器的输出信号电压与流速的关系

换热占能量交换比例越大,测试电阻的温度对流速的敏感性越高,致使信号电压越大。当流速为 2.5 m/s,环境温度分别为 0 °C, 27 °C 和 50 °C 时,传感器的输出信号分别为 3.62 V, 3.68 V 和 3.75 V。同时最大可测试流速均为 3 m/s。

### 3 结论

本文中研究环境温度对流量传感器的输出电压信号的影响,随着环境温度的增加,电压信号明显减弱,这会给流量计中作过程中带来很大的误差。随着环境温度的降低其饱和现象越显著,甚至影响到空气流量传感器的测试量程。当环境温度为 50 °C 时,传感器的最大测试流速分别为 2.5 m/s。

并提出环境温度的补偿方案,在传感器芯片最上游放置一根环境温度测试电阻  $R_k$ ,并将环境温度测试电阻  $R_k$  作为惠斯顿电桥桥臂的一部分串入电路中,使得加热电阻与进口空气之间的温差保持恒定值,得到信号输出电压的误差大大减小。随着温度升高,流体的热导率越高,强迫对流越大,固体热导率小,导致信号电压越大。当流速为 2.5 m/s,环境温度分别为 0 °C, 27 °C 和 50 °C 时,补偿前传感器的输出电压信号分别为 4.5 V、3.6 V 和 2.4 V,补偿后传感器的输出电压信号分别为 3.62 V、3.68 V 和 3.75 V。

### 参考文献:

[1] Nam-Trung Nguyen. A Novel Thermal Sensor Concept for Flow Direction and Flow Velocity [J]. IEEE sensors journal, 2005, 5 (6): 1224-1234.

[2] Bolin Yu, Zhiyin Gan, Jingping Xu, et al. The Study of a Micro Channel Integrated Gas Flow Sensor [J]. Chinese journal of electronics, 2009, 18(3): 435-438.

[3] Jianbo Sun, Ming Qin, Qingan Hung. Flip-Chip Packaging for a Two-Dimensional Thermal Flow Sensor Using a Copper Pillar Bump Technology [J]. IEEE sensors journal, 2007, 7(7): 990-995.

[4] Minako Terao, Tomomi Akutsu, Yoshiaki Tanaka. Non-Wetted Thermal Micro Flow Sensor [C]//SICE Annual conference, Kagawa University, Japan, 2007: 2084-2088.

[5] Liangcheng Chang, Yawei Deng, Dasheng Lee, et al. Development of a High Resolution CMOS Flow Sensor [C]. //Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular systems zhuhai, China, January, 2006: 890-895.

[6] Kikuchi K, Kanzaki M, Neda T, et al. A Novel and Highly Sensitive Gas Flow Sensor Using a Hot Spot on  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Thin Films [J]. Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters, 1995, 34: L1311-1313.

[7] 余柏林,甘志银,刘胜,等.新型空气质量流量传感器的建模与设计[J],传感技术学报,2007 20(7): 1517-1521.

[8] Carey V P. Monte Carlo Simulation of the Operating Characteristics of an Ultraminiature Hot-Film Sensor in a High-Speed Gas Flow [C]//ASME Heat Transfer Div Publ HTD [C]. 28th National Heat Transfer Conference and Exhibition. USA; ASME. 1992: 45-54.

[9] 余柏林,甘志银,罗小兵,等.应用于汽车的流量传感器研究[J],传感技术学报,2008 21(1): 44-48.

[10] Seunghyun Kim, Teckjin Nam, Sekwang Park. Measurement of Flow Direction and Velocity Using a Micro Machined Flow Sensor [J]. Sensors and Actuators, 2004, 114: 312-318.

[11] Cole K D, Ling P W. Hot Film Sensors in Unsteady Air Flow-Analysis and Experiment [C]//American Society of Mechanical Engineers [C]. Proceedings of the ASME Winter Conference USA: ASME, 1993: 1-10.

[12] Gurau B, Vassallo P, Keller K, et al. Measurement of Gas and Liquid Velocities in an Air-Water Two-Phase Flow Using Cross-Correlation of Signals from a Double Sensor Hot-Film Probe [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28: 495-504.

[13] Bruschi Paolo, Navarini Dino, Piotta Massimo, et al. A Closed-Loop Mass Flow Controller Based on Static Solid-State Devices [J]. Journal of microelectromechanical systems, 2006, 15(3): 652-658.

[14] Buchner Rainer, Rohloff Klaus, Benecke wolfgang, et al. A High-Temperature Thermopile Fabrication Process for Thermal Flow Sensors [C]//The 13th international conference on solid-state sensors, Actuators and Microsystems, Seoul, Korea, June, 2005: 575-578.

[15] Viarani Nicola, Massari Nicola, Gottardi Massimo, et al. A Low-Cost Microsystem for Noninvasive Uroflowmetry [J]. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, June 2006 55: 964-971.

[16] Nam-Trung Nguyen, A Novel Wind Sensor Concept Based on Thermal Image Measurement Using a Temperature Sensor Array [J]. Sensors and actuators A 2004, 110(1-3): 323-327.

[17] Salaymeh A A, Ashhab M S. Modelling of a Novel Hot-Wire Thermal Flow Sensor with Neural Nets under Different Operating Conditions [J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2006, 126(1): 7-14.

[18] Ashhab M S, Salaymeh A A. Optimization of Hot-Wire Thermal Flow Sensor Based on a Neural Net Model [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(8-9): 948-955.

[19] Shih-Ta Hung, Shwin-Chung Wong, Weileun Fang. The Development and Application of Microthermal Sensors with a Mesh-Membrane Supporting Structure [J]. Sensors and Actuators 2000, 84(1-2): 70-75.



余柏林(1977-),男,湖北监利人,2004年获得武汉理工大学材料学专业的硕士学位,2008年获得华中科技大学微电子与固体电子学专业的博士学位,2009年调入深圳信息职业技术学院电子通讯系任教,主要从事微纳材料/器件的设计与模拟, MEMS 系统与工艺技术的研究, ybolin930@126.com。