

## Thermal Gas Flow Measurement Based on Single Sensor

ZHAO Wei-guo<sup>1,2</sup>, SONG Zhi-huan<sup>1\*</sup>, HUANG Zhen-wei<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Control Science and Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
2. College of Metrological and Measurement Engineering, Jiliang University, Hangzhou 310018, China

**Abstract:** A thermal gas flow measurement is proposed based on heat transfer principle of single platinum resistance. Firstly, the temperature characteristics are studied at different surrounding temperatures and various currents passing through the resistance. Then, the measurement principle and temperature compensation are analyzed under the developed circuit. Finally, The constant temperature algorithm is designed to control the sensor at two different temperature, and the gas flowrate is obtained from the output voltage of the sensor. The research results show that the measurement accuracy is within 1% and the ratio of the dynamic measurement range is close to 100:1.

**Key words:** gas; flow measurement; platinum resistance; constant temperature control

EEACC:7230M

## 一种基于单传感器的热式气体流量测量方法

赵伟国<sup>1,2</sup>, 宋执环<sup>1\*</sup>, 黄震威<sup>2</sup>

1. 工业控制技术国家重点实验室浙江大学控制科学与工程学系, 杭州 310027;  
2. 中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018

**摘要:** 基于热传递的原理, 提出了基于单一铂电阻的热式气体流量测量方法。首先研究了在不同温度和电流下铂电阻的温度特性。然后设计了流量测量系统的电路, 分析了流量测量原理及温度补偿。最后通过恒温控制算法使铂电阻工作在 2 个不同的设定温度, 由铂电阻的输出电压计算出气体的流量。实验结果表明该测量方法的测量精度优于 1%, 流量量程比近 100:1。

**关键词:** 气体; 流量测量; 铂电阻; 恒温控制

中图分类号: TB937

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)03-0442-05

热式气体流量计是基于早期热线风速计的基础上发展起来的一种新型气体流量检测仪表, 具有压损低, 流量范围大, 精度高, 无可动部件及低流量测量等优点, 已广泛应用于航空、航天、能源、医学、汽车工业以及天然气管道运输等行业<sup>[1-2]</sup>。它的基本原理是基于加热传感元件的对流传热。当有气体流过加热元件表面时, 会带走一部分热量, 引起加热元件阻值的变化, 这个变化量与气体的流量和温度有关。目前, 热式气体流量计按照传感器的电路工作模式分为恒流式和恒温式。恒温式测量电路具有易于使用, 频带宽, 低噪声等优点, 在实际应用中非常广泛。

恒温热式流量计一般采用 2 金属铂电阻, 分布在一个惠斯顿电桥的两臂, 分别用于测量流体的温度(温度传感器)与流体的速度(流量传感器)。测量电路中通过运算放大器形成负反馈, 保证流量传感器的工作温度恒定。温度传感器用于测量流体的温度, 实现对流量测量的温度补偿<sup>[3-5]</sup>。由于温度补偿电阻的非线性以及电阻之间的差异, 导致电路调试过程比较复杂, 在一定程度上影响了测量的精度<sup>[3-6]</sup>。文献[7]虽然提出了 2 种相同的恒温测量电路工作在不同的温度下的测量方法, 但是没有给出实验数据。文献[8-9]在文献[7]的基础上, 提出了

基于单传感器的温度补偿方法,但是测量过程需要切换电桥桥臂的电阻,电路比较复杂,而且运放的偏置电压对测量结果有一定的影响,导致测量误差较大。

针对当前恒温热式流量计存在的问题,本文提出了一种基于单传感器的流量测量方法。采用单一铂电阻 PT20 作为测量元件,设计了气体流量测量电路,在无额外补偿电阻的情况下,通过温度控制算法控制铂电阻工作在两个不同的设定温度,由两个不同温度下铂电阻的输出电压计算出气体的流量,消去了气体温度对测量的影响,实现了气体流量的测量以及温度补偿,提高了测量精度。

### 1 铂电阻温度特性研究

铂电阻 PT20 的温度特性实验如图 1 所示。铂电阻放置在温度可调的恒温箱中,加上某一恒定电流  $I$ ,在不同的工况条件下,测量电阻两端电压  $V$ ,然后计算铂电阻的大小及工作温度。

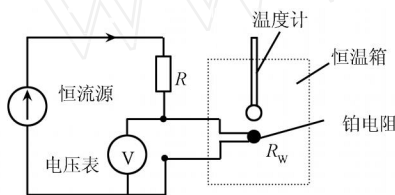


图 1 温度特性实验测试图

实验中恒温箱型号为 101-3 型,温度计采用 NO KONIX 数字温度计,电压表型号为 VC9807A。铂电阻加上 70 mA 的电流时,首先从低到高调节恒温箱的温度,同时记下对应温度下铂电阻的电压。然后从高到低调节恒温箱的温度,记下铂电阻的电压,来回重复 5 次,获得 10 组测量数据。分别将同一环境温度下的 10 个数据平均后,计算出该环境温度下铂电阻的阻值,同时计算出铂电阻的工作温度和温差(铂电阻的工作温度与环境温度之间的差值)。实验数据见表 1 所示。

表 1  $I=70\text{ mA}$  下的  $R_w$  温度与环境温度实验数据

环境温度/	$R_w$ 阻值/	$R_w$ 温度/	温差/
15.7	28.4	108.5	92.8
31.4	29.96	129.3	97.9
39.4	30.51	136.5	97.1
52.9	31.6	150.6	97.7
60.9	32.14	157.7	96.8
79.9	33.57	176.3	96.4
89.7	34.3	185.7	96

铂电阻通入 90 mA 电流的实验数据见表 2 所示。

表 2  $I=90\text{ mA}$  下的  $R_w$  温度与环境温度实验数据

环境温度/	$R_w$ 阻值/	$R_w$ 温度/	温差/
15.7	33.98	181.5	165.8
31.4	35.7	203.6	172.2
39.4	36.41	213.1	173.7
52.9	37.48	227	174.1
60.9	38.04	234.3	173.4
79.9	39.4	252.5	172.6
89.7	40.15	261.8	172.1

从实验数据可以看出,在恒定电流下,随着环境温度的升高,铂电阻的工作温度升高,但是与环境温度之间的差值基本恒定,70 mA 时对应的温差为 95 左右,90 mA 时对应的温差为 170 左右。铂电阻的工作温度可通过的工作电流来调节。铂电阻温度特性的研究为流量测量系统提供了设计依据。

### 2 气体流量测量系统

#### 2.1 流量的测量原理与温度补偿

由根据传热学原理,提供给铂电阻的电功率等于流动气体对流换热所带走的热量<sup>[1]</sup>。

$$U^2 / R_w = hA_s (T_w - T_f) \tag{1}$$

其中: $U$  为铂膜电阻两端电压, $R_w$  为铂电阻的阻值, $h$  是表面传热系数, $A_s$  是铂电阻的表面积, $T_w$  是铂电阻的温度, $T_f$  是气体温度。

由传热理论可知<sup>[8-9]</sup>

$$hA_s = A + B \sqrt{q} \tag{2}$$

其中: $A, B$  是经验常数, $q$  为气体的流量。

对于铂电阻,其电阻可近似为

$$R_w = R_{w0} (1 + T_w) \tag{3}$$

其中: $R_{w0}$  为铂电阻在 0 时的电阻,是铂电阻的温度系数。

由式(1),式(2)及式(3)可得

$$U^2 = R_{w0} (1 + T_w) (T_w - T_f) (A + B \sqrt{q}) \tag{4}$$

当铂电阻在工作温度  $T_{w1}$  下,根据式(4)知

$$U_1^2 = R_{w0} (1 + T_{w1}) (T_{w1} - T_f) (A + B \sqrt{q}) \tag{5}$$

其中  $U_1$  为铂电阻在温度  $T_{w1}$  时两端电压。

当铂电阻在工作温度  $T_{w2}$  下,根据式(4)知

$$U_2^2 = R_{w0} (1 + T_{w2}) (T_{w2} - T_f) (A + B \sqrt{q}) \tag{6}$$

其中  $U_2$  为铂电阻在温度  $T_{w2}$  两端电压。

假设  $T_{w1}$  大于  $T_{w2}$ ,由式(5)和式(6)知

$$q = \left[ \frac{U_1^2 / [R_{w0} (1 + T_{w1})] - U_2^2 / [R_{w0} (1 + T_{w2})]}{B (T_{w1} - T_{w2})} - \frac{A}{B} \right]^2 \tag{7}$$

由式(7)知,气体温度  $T_f$  对气体流量  $q$  没有影

响。实际测量中,分别控制铂电阻工作在温度  $T_{w1}$  和  $T_{w2}$ ,通过 ADC 采样得到  $U_1$  和  $U_2$ ,由式(7) 可以计算出气体的流量  $q_0$ 。其中  $A, B$  通过流量标定实验可计算出。

### 2.2 测量系统设计

本文设计的气体流量测量系统结构如图 2 所示,由铂电阻  $R_w$ ,精密电阻  $R$ ,信号调理电路,功率放大电路,液晶显示器以及 MSP430 单片机内部的 12 bit ADC 模块和 16 bit 的 PWM 模块组成。铂电阻 PT20 位于测量管道(管径 60 mm)的几何中心,工作在恒温方式(电阻恒定),用于气体流量的测量。信号调理电路对铂电阻的电压进行滤波,放大等一系列处理。首先 ADC 模块采集经信号调理电路的铂电阻电压,CPU 算出铂电阻的阻值,并与设定工作温度  $T_{w2}$  下的电阻比较。然后,CPU 根据比较的结果,控制 PWM 模块产生一定占空比的脉冲信号,经功率放大电路驱动三极管 Q,调整通过铂电阻的电流,使铂电阻阻值达到设定值,即铂电阻的工作温度恒定,并采集铂电阻的电压  $U_2$ 。接着 CPU 控制铂电阻工作温度达到  $T_{w1}$ ,并采集铂电阻的电压  $U_1$ 。最后,单片机由式(7)计算出气体的流量并显示在液晶上。

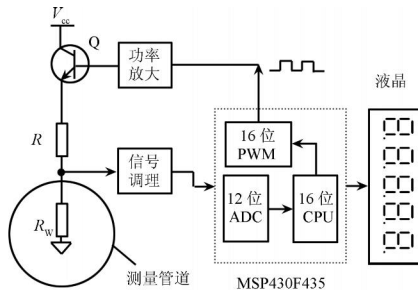


图 2 流量测量系统的测量电路

### 2.3 铂电阻恒温控制算法

当气体流量恒定时,铂电阻在工作温度  $T_w$  下的动态方程由文献[10]可导出

$$\frac{mcL}{HR_w} \frac{d}{dt} r + \frac{r}{R_w} = 2(L - 1) \frac{i}{I_w} \quad (8)$$

其中: $c$ 为铂电阻的比热, $m$ 为铂电阻的质量, $L$ 为过热比, $\frac{mcL}{HR_w}$ 与当前流量有关, $\overline{R_w}$ 为工作温度  $T_w$  下铂电阻的阻值, $\overline{I_w}$ 为工作温度  $T_w$  下铂电阻的电流,以上各参数为恒值。 $r$ 为铂电阻的波动值, $i$ 为通过铂电阻的波动电流。

为了保证铂电阻工作在恒温方式,即铂电阻的阻值恒定,本文首先采用了 Sigma-Delta 调制器工作原理<sup>[11]</sup>,控制通过铂电阻的电流,使铂电阻到达恒定温度附近,然后采用图 3 恒温控制系统,达到精确的工作温度。电流的调节由 MSP430 单片机输

出 PWM 实现。

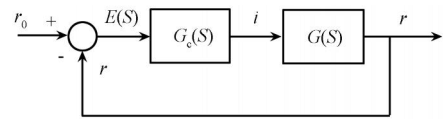


图 3 恒温控制系统结构图

图 3 中,  $r_0$  为铂电阻小信号设定值,  $G(S)$  为铂电阻的小信号传递函数,  $G_c(S)$  为控制器。

对式(8) 进行拉普拉斯变换,有

$$G(s) = \frac{r}{i} = \frac{K}{T_0 s + 1} \quad (9)$$

其中:

$$K = \frac{2(L - 1) \overline{R_w}}{I_w} \quad (10)$$

$$T_0 = \frac{mcL}{\overline{I_w}} \quad (11)$$

控制器  $G_c(S)$  采用相位超前环节进行补偿,其传递函数为

$$G_c(S) = \frac{i(s)}{E(s)} = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \quad (12)$$

依据根轨迹的校正法,当  $T_0$  与  $T_1$  配置为一对偶极子时,可以获得满意的暂态性能,同时不影响系统的稳态性能<sup>[12]</sup>。由式(12) 知

$$i(k) = \frac{T_1}{T_2 + T} i(k - 1) + \frac{T_1 + T}{T_2 + T} E(k) - \frac{T_1}{T_2 + T} E(k - 1) \quad (13)$$

其中: $T$ 为系统的采样时间, $i(k)$ 为  $k$  时刻的电流, $i(k - 1)$ 为  $(k - 1)$  时刻的电流, $E(k)$ 为  $k$  时刻的电阻差值, $E(k - 1)$ 为  $(k - 1)$  时刻的电阻差值。

铂电阻恒温控制算法如下:

设定工作温度  $T_s$ , 对应的电阻  $\overline{R_w}$ , 初始 PWM 占空比赋值  $\overline{0} = 0$ 。

计算  $E(k) = \overline{R_w} - R_w(k)$ ,  $R_w(k)$  为  $k$  时刻采样得到的铂电阻阻值,由图(2) 可知

$$R_w(k) = \frac{U(k) \times R_1}{(U_{cc} - U_{ce})(k) - U(k)} \quad (14)$$

式中: $(k)$ 为  $k$  时刻 PWM 的占空比, $U(k)$ 为  $k$  时刻铂电阻电压, $U_{cc}$ 测量电路的供电电压, $U_{ce}$ 为 Q 导通时,集电极与发射极之间电压。

如果  $E(k)$  大于设定值,则根据  $E(k)$  正负来增加或减少 PWM 的占空比,并返回到第(2)步。如果  $E(k)$  小于设定值,即到达设定电阻附近。此时令

$$\overline{w} = (k) \quad (15)$$

并使铂电阻工作在占空比  $\overline{w}$  条件下。

计算  $E(k) = \overline{R_w} - R_w(k)$ 。根据式(16) 计算 PWM 的占空比  $(k)$ 。

$$(k) = K_1 i(k) + w \quad (16)$$

式中:  $K_1$  是电流与 PWM 占空比的比例系数,  $i(k)$  由式(13) 计算。

如果  $E(k)$  大于 ,则返回(4) 步,直至  $E(k) <$ ,与 控制的精度有关。

### 3 流量测量实验与分析

#### 3.1 流量实验

在气体温度 25 下,通过钟罩式气体流量标准装置,对模拟电路<sup>[3,5]</sup>的热式流量计和本文设计的流量测量系统进行实验,实验数据分别见表 3,表 4。

表 3 气体温度 25 传统模拟电路的热式流量计

标准流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	测试流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	满度误差 %
2.780	2.56	- 0.11
36.562	37.778	0.61
106.022	108.05	1.04
132.310	131.018	- 0.65
164.819	163.726	- 0.55
223.632	225.187	0.78

表 4 气体温度 25 时单传感器热式流量计

标准流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	测试流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	满度误差 %
2.650	2.48	- 0.08
35.362	36.562	0.6
100.1	101.556	0.73
125.225	123.832	- 0.7
158.876	157.735	- 0.57
210.655	212.138	0.74

从表 3 和表 4 数据可知,在相同环境温度下,2 种测量方法测量的最小流量约为  $2.50 m^3/h$ ,最大流量约为  $200 m^3/h$ ,量程比接近 100:1。取流量上限为  $200 m^3/h$ ,那么采用模拟电路热式流量计的测量误差最大误差为 1.04 % F. S,而单传感器的热式流量方法的误差小于 0.74 % F. S,比模拟电路测量方法的测量精度有所提高。

表 5,表 6 为气体温度为 35 下的实验数据(取流量上限为  $200 m^3/h$ )。表 5 的误差与表 3 相比略有所增大,而表 6 的测量误差与表 4 基本相同。

表 5 气体温度 35 传统模拟电路的热式流量计

标准流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	测试流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	满度误差 %
2.70	2.86	- 0.08
36.053	38.135	1.04
110.152	112.316	1.08
128.653	131.018	0.68
168.373	167.989	- 0.7
219.381	221.163	0.89

表 6 温度 35 单传感器热式流量计

标准流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	测试流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	满度误差 %
2.583	2.392	- 0.1
38.135	39.235	0.55
115.231	116.813	0.79
140.156	138.869	- 0.64
169.776	168.212	- 0.78
201.678	203.157	0.74

实验结果表明,采用单传感器的测量方法具有较好的温度补偿。

### 4 误差分析

由式(7) 知,流量  $q$  由铂电阻的电压  $U_1, U_2$  以及铂电阻的工作温度  $T_{w1}, T_{w2}$  决定的。因此系统的误差由以上 4 个参数的测量误差产生。铂电阻电压的测量误差主要来源于外部干扰,需要进一步提高滤波的作用。此外,单片机 ADC 的转换误差也会对系统误差产生一定的影响。铂电阻工作温度  $T_{w1}, T_{w2}$  的误差主要来源于 PWM 对铂电阻工作温度的控制误差,可通过优化控制算法来减小误差。

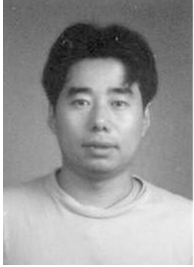
### 5 结论

本文采用铂电阻 PT20,设计了基于单传感器的的气体流量测量系统。钟罩式气体检定装置下的实验表明,测量误差小于 1 %,量程比接近 100:1。与传统的热式流量计相比,简化了测量电路,提高了测量的精度。因此,该气体流量测量方法是有效的。

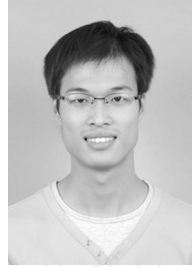
#### 参考文献:

- [1] 梁国伟,蔡武昌. 流量测量技术与仪表 [M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] Moh 'd Sami Ashhab, Ahmed Al-Salarymeh. Optimization of Hot-Wire Thermal Flow Sensor Based on a Neural Net Model [J]. Applied Thermal Engineering, 2006,26:948-955.
- [3] 梁国伟,王芳,李长武等. 基于热传递的铂膜气体流量计实验研究[J]. 中国计量学院院报,2006,17(1):36-39.
- [4] 梁一灵,梁国伟,王雨辰. 组合热膜探头在气体流速测量种的应用[J]. 中国计量学院学报,2007,18(3):191-194.
- [5] 梁国伟,李长武,王芳. 多点热式气体质量流量测试方法实验研究[J]. 传感技术学报,2005,18(4):785-789.
- [6] Kei Toda, Isao Sanemasa, Koichi Ishikawa. Simple Temperature Compensation of Thermal Air-Flow Sensor [J]. Sensors and Actuators A,1996,57(3):197-201.
- [7] Oliveira A, Freire R C S, Deep G S. Compensation of the Fluid Temperature Variation in a Hot-Wire Anemometer [C]// IMTC97 Proc, Ottawa, 1997:1377-1380.
- [8] Ferrerial R P C, Ferrerial R C S, Deep G S et al. Hot-Wire Anemometer with Temperature Compensation Using Only One

- Sensor[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(4):954-958.
- [9] Ferrerial R P C, Ferrerial R C S, Deep G S et al. Fluid Temperature Compensation in a Hot Wire Anemometer Using a Single Sensor[C]. IMTC2000 proc, Baltimore, 2000:512-517.
- [10] 吴克钢. 热膜式空气质量流量传感器的动态响应[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(5):99-102.
- [11] Marques Lino, Tomaszewski Grzegorz, de Almeida Anibal T. Switch Thermal Anemometer[C]// IMTC2008 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, 2008:1783-1786.
- [12] 徐科军. 传感器动态特性的实用研究方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.



赵伟国,男,1997年于浙江大学获学士学位,2004年于浙江大学获硕士学位,现为浙江大学博士研究生,中国计量学院讲师。主要研究方向为自动检测技术和智能仪表, zjufriendly@cjlu.edu.cn



黄震威(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为流量计量测试和智能化仪表, hzhuangzw@126.com



宋执环,1983年于合肥工业大学获学士学位,1986年于合肥工业大学获硕士学位,1997年于浙江大学获博士学位,现为浙江大学教授,博士生导师。研究领域为控制工程,自动化仪表, zhsong@iipc.zju.edu.cn