

【文章编号】 1004-1540(2009)01-0027-04

# 组合热膜探头热式气体流量计的研制

黄震威, 梁国伟, 赵伟国, 杨松迎

(中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

**【摘要】** 介绍了一种传热原理的组合热膜探头, 在该组合热膜探头的温度特性以及温度补偿性能进行实验研究的基础上, 设计了具有温度补偿的气体流量计, 并在音速喷嘴检定装置上对该流量计进行了流量检测实验. 对实验结果的拟合和处理表明, 该气体流量计的测量精度优于 0.5%, 流量范围度大于 60:1.

**【关键词】** 组合热膜探头; 气体流量计; 流量范围

**【中图分类号】** TB937 **【文献标识码】** A

## Development of assembled hot-film probe thermal gas flow-meters

HUANG Zhen-wei, LIANG Guo-wei, ZHAO Wei-guo, YANG Song-yin

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** An assembled hot-film probe which was based on the principle of the heat transfer was introduced. On the basis of tests on the temperature characteristics of the hot-film probe and experimental research on the temperature compensation performance, a gas flow-meter for temperature compensation was designed. The flow measuring experiment of the flow-meter was tested on Sonic Nozzle. The results of experiment data processing proved that its precision is below 0.5% and its measuring range is over 60:1.

**Key words:** assembled hot-film probe; gas flow meter; flow range

目前气体流量检测使用仪表一般有涡轮流量计、涡街流量计、旋进旋涡流量计、差压式流量计和容积式流量计等. 这些仪表虽能满足一般的工业应用, 但仍存在许多不足<sup>[1,2]</sup>. 首先, 差压式、旋进旋涡和容积式等流量仪表压力损失较大, 浪费能源的现象严重, 涡轮流量计有可动部件, 工作寿命短; 其次, 它们的测量范围度都比较小, 差压式流量计一般在 3 倍左右, 其它流量计在 10 倍左右, 有的可以达到 20 倍左右, 但在小流量测量方

面有较大缺陷; 第三, 测量精度低, 目前国内的上述气体流量仪表的测量精度一般也只能达到 1%.

热式流量计在热线风速仪的基础上发展起来, 一般用来测量气体的质量流量. 它具有压损低, 测量范围度大, 无可动部件以及可用于极低气体流量监测和控制等特点. 在气体流量检测领域已得到一定的应用<sup>[3-5]</sup>.

早期的热式流量计也有用热线(一般是直径

为3~20  $\mu\text{m}$ 的铂丝)作探头的,但由于结构上的原因,热线置于气流中,比较容易损坏.热膜探头就是因为能够克服热线探头容易损坏的缺点得到广泛应用的.目前使用的热膜探头一般都是在微小的陶瓷基片上沉积金属铂形成的热膜探头<sup>[6-8]</sup>,具有结构牢固、反应灵敏、一致性好等特点.

组合热膜探头将多个电阻集成在同一陶瓷基片上,是目前比较新颖的热式流量探头.一般在同一陶瓷基片上集成两个热膜电阻,一个作加热使用,一个作补偿使用.两个电阻或独立引线(4线),或接成公共端引线(3线).3线组合热膜探头的内部结构如图1.

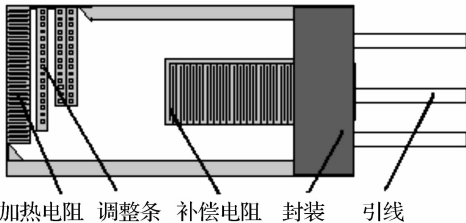


图1 组合热膜内部结构

Figure 1 Structure of the assembled hot-film probe

从内部结构可以看到,该探头是将加热电阻和补偿电阻串联集成在一片底层陶瓷基片上,基片厚度仅为0.15 mm,两个电阻由三条低阻导线引出,探头尺寸为7 mm×2.4 mm.传感元件包括两个固定于底层基片的随温度变化的铂膜电阻和一个公共端,其中低阻值电阻的一块小区域用作加热电阻  $R_H$ ,在0  $^{\circ}\text{C}$ 时,探头电阻为45  $\Omega$  ( $\pm 0.5\%$ );而另外一个高阻值电阻用作补偿电阻  $R_C$ ,在0  $^{\circ}\text{C}$ 时,探头电阻为1 200  $\Omega$  ( $\pm 0.5\%$ ).因为它的热容量低,传感器有较快的加热和冷却的反应时间.

## 1 整体系统设计

控制核心单元选用的是美国TI公司生产的单片机MSP430F435,图2为整个系统的结构框图.系统控制器为一片MSP430F435单片机.外部模块包括流量检测、电源模块、按键模块、液晶显示模块、标准电流输出、时钟芯片等.

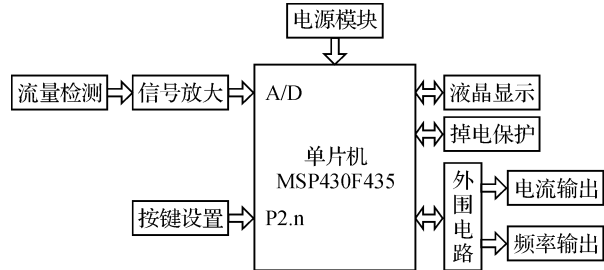


图2 系统结构框图

Figure 2 Diagram of the system structure

对于热式质量流量计来说,它的流量检测是根据热平衡原理,电流流过热膜探头所产生的热量应该等于流体流过热膜探头所带走的热量.在恒温工作模式下,利用惠斯登电桥可以得到与流量成一定对应关系的电压输出,然后经过信号放大电路使电压信号进入MSP430单片机的A/D转换模块转换为数字量,并进行流量的积算,最终使其具有瞬时流量和累积流量的液晶显示.

### 1.1 组合热膜探头检测电路

组合热膜探头的流量检测电路如图3.主要包括温度补偿电路和信号放大两部分,其中温度补偿桥路完全是在探头散热特性的基础上进行设计,在整个检测电路中具有很重要的作用.探头散热特性试验和补偿设计原则与单热膜探头类似<sup>[6,7]</sup>.不同点是组合热膜探头的补偿电阻与加热电阻在同一陶瓷基片上,所以,加热电阻的热量必定会影响补偿电阻感受介质温度.为了消除这种影响,可以在探头散热特性试验时预先检测加热探头在不同环境温度下对补偿探头测温的影响,并在补偿桥路设计时加以扣除.

加热探头  $R_H$  和补偿探头  $R_C$  都安装在流通管道中,两个探头与固定电阻  $R_1$  和  $R_2$  组成测量桥路.管道中气流静止时,根据加热探头的散热特性设计的桥路参数将使通过加热探头  $R_H$  的电流  $I_H$  维持在某一静态电流以维持探头温度  $T_H$ .当气流通过管道时,探头温度  $T_H$  有下降的趋势,这一趋势通过反馈能及时增加探头电流  $I_H$  来维持探头原有的温度  $T_H$ ,这就是恒温工作方式.

可以证明,通过加热探头的电流  $I_H$  与质量流速  $\rho v$  之间有式(1)所示的关系<sup>[9]</sup>.

$$I_H^2 R_H = (a + b \sqrt{\rho v})(T_H - T_C) \quad (1)$$

当探头工作在恒温方式时,热线和被测气体

的  $R$  温度差  $(T_H - T_C)$  保持一定,  $R_H$  应为常数, 供给热线的电流  $I_H$  就是空气质量流量的衡量尺度. 信号电流  $I_H$  的平方与质量流量  $q_m$  的平方根成正比. 电流  $I_H$  在  $R_1$  上的压降  $V$  作为流量信号, 通过放大处理输出, 与质量流量  $q_m$  之间的关系应为四次多项式曲线关系.

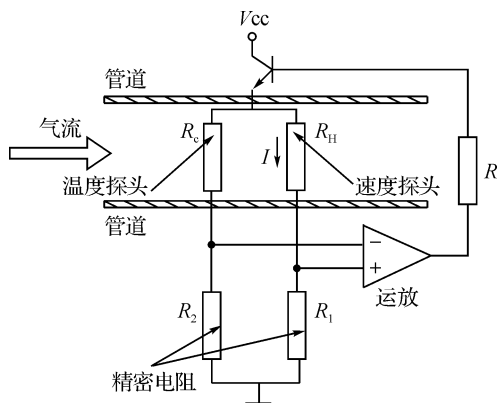


图 3 流量检测电路

Figure 3 Measurement circuit of the flow

### 1.2 软件设计

整体系统的软件程序采用 C 语言编写, 软件算法的设计以测量的精确性为主要目标, 其主要程序流程图如图 4.

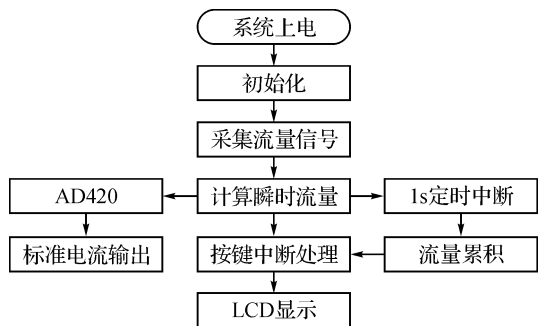


图 4 程序基本流程图

Figure 4 System program flowchart

系统的软件部分主要包括信号采集、瞬时流量计算模块、流量累积模块、串行同步/异步模块、显示和按键处理模块<sup>[10]</sup>.

瞬时流量计算模块主要就是將 A/D 转换后的电压信号按照式(2)算出瞬时流量.

$$Q = A + BU + CU^2 + DU^3 + \dots \quad (2)$$

式(2)中:  $A, B, C, D$  为待定常数.

流量累积模块是整个系统的核心, 关系到整个仪表的精度. 软件设计思路采用 1 s 一次的定时中断对瞬时流量进行累积, 实现流量的累积.

为了能够实现流量信号的远传需要将流量信号转换为 4~20 mA 的标准电流信号, 也就是标准电流输出单元. 本单元的核心部分是采用 AD420 芯片来实现的, 单片机通过串行同步/异步模块(USART), 然后再经过 AD420 转换为标准的 4~20 mA 电流信号进行远距离传输.

按键处理模块主要是使 LCD 液晶具有瞬时流量和累积流量的切换显示功能.

## 2 流量测量实验

根据上述流量检测电路, 设计了 DN25 的组合热膜探头气体流量传感器, 流量传感器的探头安装结构如图 5. 在音速喷嘴检测装置上对流量传感器进行了多次检测实验, 取 3 组实验结果数据进行分析, 如表 1.

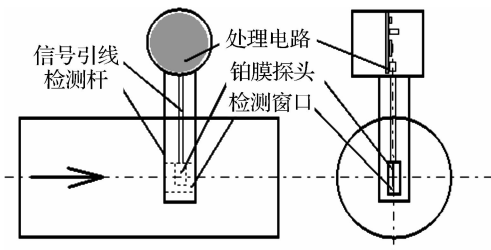


图 5 流量传感器探头结构示意图

Figure 5 Installation structure of the flow sensor

表 1 流量测量实验数据

Table 1 Results of experiment data

第 1 组		第 2 组		第 3 组	
流量/ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	电压/ V	流量/ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	电压/V	流量/ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	电压/V
1.007	0.562	1.007	0.562	1.009	0.568
1.968	0.741	1.968	0.741	1.971	0.748
2.975	0.858	2.976	0.86	2.981	0.862
3.939	0.945	3.939	0.946	3.946	0.951
7.966	1.179	7.967	1.179	7.978	1.182
9.931	1.268	9.933	1.266	9.947	1.272
19.982	1.58	19.979	1.584	20.002	1.587
32.111	1.902	32.102	1.902	32.135	1.909
39.934	2.093	39.924	2.092	39.93	2.095
51.677	2.316	51.655	2.315	51.687	2.318
62.971	2.474	62.98	2.474	63.025	2.474

把表1的数据画成曲线图如图6。

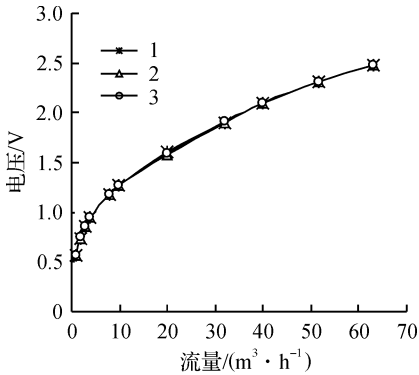


图6 流量与电压关系图

Figure 6 Curve graph of the experimental results

从表1和图6可以看出,电压与流量之间具有较好的一一对应关系,于是我们就可以根据输出的电压来检测流场中的流量.并且在相同的实验条件下,当气体流量相同时,三组实验的输出电压值也基本相同,即三组实验的输出电压重复性较好.这就表明该组合热膜探头测量气体流量是可行的.

### 3 曲线拟合及误差分析

我们采用的是多项式拟合.一般流量计对应的响应方程通常需要描述成  $Q=F(U)$ ,  $Q$  为流量,  $U$  为对应变化的电压.

这里对实验中的第一组数据进行基于最小二乘法的6阶多项式曲线拟合,并确定其拟合公式,建立流量传感器的数学模型,如式(3):

$$Q=1.8969U^6-7.1578U^5-9.1679U^4+76.901U^3-111.92U^2+68.772U-14.705 \quad (3)$$

根据式(3)计算这三组所测流量的拟合误差,如表2.

从表2可以看出三组实验数据的拟合误差均在0.5%以下,完全符合一般工业管道流量的测量,而且其测量范围很广,在60倍左右,且精度非常高.这是其它流量计无法比拟的.

### 4 结语

本文所研究的组合热膜探头气体流量传感器,在工作电流为30 mA左右时,探头环境温度差已有摄氏100多度,具有较高的灵敏度.该工作电

流不到一般20 Ω热膜电阻工作电流的一半,从而使探头更不容易损坏.

表2 三组实验数据的拟合误差

Table 2 Fitting error of the experiment data

第1组		第2组		第3组	
流量/ (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	拟合误 差/%	流量/ (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	拟合误 差/%	流量/ (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	拟合误 差/%
1.007	-0.027	1.007	-0.027	1.009	0.030
1.968	0.117	1.968	0.117	1.971	0.184
2.975	-0.051	2.976	-0.023	2.981	-0.001
3.939	-0.094	3.939	-0.074	3.946	0.014
7.966	-0.092	7.967	-0.094	7.978	-0.005
9.931	0.191	9.933	0.106	9.947	0.331
19.982	-0.327	19.979	-0.097	20.002	0.036
32.111	-0.168	32.102	-0.154	32.135	0.241
39.934	0.220	39.924	0.165	39.93	0.370
51.677	-0.150	51.655	-0.212	51.687	0.028
62.971	0.020	62.98	0.006	63.025	-0.066

试验表明,该气体流量传感器测量范围大,重复性好,响应速度快.经音速喷嘴气体流量装置实验检测,6阶拟合误差小于±0.5%,测量范围达60:1,可以用于管道气体流量的测量.

### 【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,2002:350-365.
- [2] BRUNN H H. Hot-wire anemometry: Principle and signal analysis[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1995:19-38.
- [3] 刘 焱,宋彦峥.一种智能型气体流量传感器的设计[J].黑龙江大学学报(自然科学版),2006,22(3):379-381.
- [4] 梁国伟,文英杰,黄震威.热式气体流量计原理及影响因素分析研究[J].中国计量学院学报,2008,19(3):201-205.
- [5] 李长武,梁国伟.汽车用热线式空气流量传感器[J].传感器技术,2004,23(8):38-40.
- [6] 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].中国计量学院学报,2006,17(1):36-39.
- [7] 梁一灵,梁国伟,王雨辰.组合热膜探头在气体流速测量中的应用[J].中国计量学院院报,2007,18(3):191-194.
- [8] 梁国伟,郑永军,王 芳,等.基于微型热探头的气体流量测量方法研究[C]//2006全国流量会议.郑州:中国计量测试学会,2006:78-80.
- [9] DURST F, AL-SALAYMEH A, BRADSHAW P. The development of a pulsed-wired probe for measuring flow velocity with bandwidth[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003,24:1-13.
- [10] 赵伟国,梁国伟,李文军.低功耗远传热能表的研究[J].电测与仪表,2005,42(12):31-34.