

仪器研制

# 热线式流量计的研制

李梅 简森夫

(南京化工学院材料科学与工程系, 南京, 210009)

**摘要** 研制了测量微小气体流量的恒流型热线式流量计, 对电路进行了设计与研制。结果表明, 研制的恒流型热线式流量计具有精度高、灵敏度高、稳定性好、测量下限低等优点, 可用于对微小流量进行精确测量。

**关键词** 热线 恒流型 微小流量检测

**中图法分类号** TK313

在科研、生产活动中, 常常遇到流量测量的问题。随着科学技术的发展, 流量测量的范围逐渐扩大, 对流量测量的精度要求也越来越高。扩大流量测量范围的方向之一, 就是对非常小的流量进行测量, 使仪表向扩大下限流量方面发展。对测量微小流量的方法进行研究时, 往往会遇到两个问题: (1) 由于流量较小, 传感器的检出信号小, 信号的准确检测比较困难; (2) 管径较小, 仪表各部分元件加工困难。因此, 市场上适于测量微量流量的仪器很少, 并且测量下限不够低, 精度不高。目前通用的转子流量计精度较低, 最高精度只能达到 2.5%, 量程范围也很小。进口产品虽然能够满足精度要求, 但价格昂贵, 在实际应用中受到限制。为了对微小流量进行连续测量, 提高流量测量的精度、降低测量下限, 有必要研制一种新型的流量计<sup>[1]</sup>。

## 1 恒流型热线式流量计的设计与研制

### 1.1 基本电路及其原理

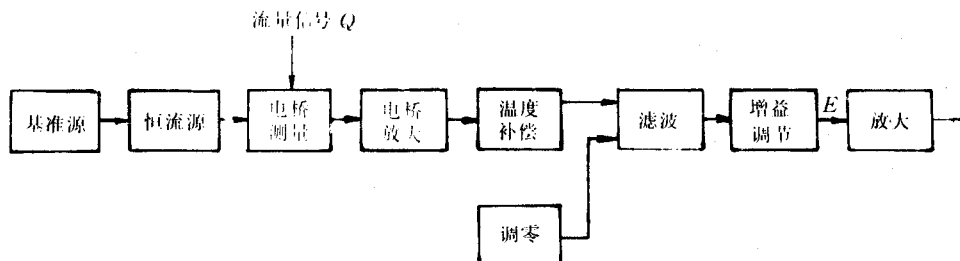


图1 热线式流量计的组成方框图

Fig. 1 Block diagram of the hotwire flowmeter

收稿日期: 1994-01-11

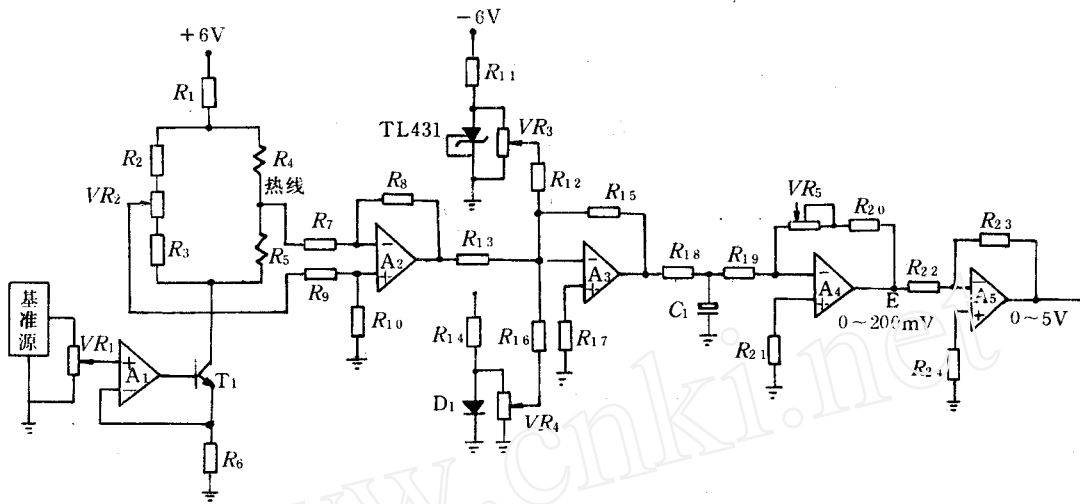


图2 热线式流量计的电路原理图

Fig. 2 Circuit of the hotwire flowmeter

对应于图1、图2可见,恒流源由A<sub>1</sub>、T<sub>1</sub>组成,A<sub>2</sub>为电桥放大,A<sub>3</sub>与D<sub>1</sub>组成温度补偿电路,A<sub>3</sub>与TL431组成调零电路,A<sub>4</sub>为增益调节,A<sub>5</sub>作为最后一级放大。

电路工作的基本原理:将热线接入惠斯通电桥的一臂,流量信号经热线转变为电信号,电桥测量电路则将热线电阻值的相对变化量转换为电桥的不平衡电压输出,送到电桥放大器的两输入端,再经过温度补偿、滤波、增益调节,不平衡电压最终转换为0~200 mV标准数显电压输出。0~200 mV电压经最后一级放大,可得到0~5 V标准电压。

当流过管道的流体流量减少(增加)时,流体从热线带走的热量就相应变化,使热线的温度升高(或降低),引起热线电阻的增大(或减小)。热线电阻值的变化,表现为电桥不平衡电压的变化。不平衡电压经过放大、补偿,在数字电压表上显示,从显示电压的大小,即可知道流量的大小。

### 1.2 流量方程的推导

克英通过对热线基本理论的研究,推导出克英公式<sup>[4]</sup>:

$$Q_b = (A' + B' \sqrt{V})(T_w - T_f) \tag{1}$$

式中:Q<sub>b</sub> 单位时间内的热耗散;

A'、B' 常数;

V 流体的平均速度;

T<sub>w</sub> 热线的温度;

T<sub>f</sub> 流体的温度。

在达到热平衡时,热线的热耗散等于电流产生的热量。若热线的加热电流为I<sub>w</sub>,那么单位时间内热线产生的热量Q=4.184 I<sub>w</sub><sup>2</sup> · R<sub>w</sub>。

$$4.184 I_w^2 \cdot R_w = (A' + B' \sqrt{V})(T_w - T_f) \tag{2}$$

令R<sub>w</sub>、R<sub>f</sub>分别为温度等于T<sub>w</sub>和T<sub>f</sub>时热线的电阻值,它们满足下述关系:

$$R_w = R_f \cdot [1 + \beta(T_w - T_f)]$$

则

$$T_w - T_f = (R_w - R_f) / (R_f \cdot \beta) \tag{3}$$

将(3)式代入(2)式,并把热线材料在  $T_f$  时的电阻温度系数  $\beta$  及常数 4.184 包括在常数  $A'$ 、 $B'$  内,推导后得到:

$$R_w = \frac{R_f(A + B\sqrt{V})}{(A + B\sqrt{V}) - I_w^2 \cdot R_w} \quad (4)$$

在室温时,热线的电阻值用  $R_0$  表示,温度为  $T_w$  时,热线电阻值  $R_w = R_0 + \Delta R_w$ ,代入(4)式:

$$R_0 + \Delta R_w = \frac{R_f \cdot (A + B\sqrt{V})}{(A + B\sqrt{V}) - I_w^2 \cdot R_f} \quad (5)$$

由图 2 的电路原理图,我们推导出输出电压  $E$  的表达式如下:

$$E = K \frac{\Delta R_w}{R_0} = K \cdot x \quad (6)$$

式中:  $K$  常数;

$\Delta R_w$  热线电阻的变化量;

$R_0$  室温时的热线电阻;

$x$  热线电阻的相对变化率。

将(5)式方程左边化为输出电压的形式:

$$\begin{aligned} E &= K \cdot \frac{\Delta R_w}{R_0} \\ &= \frac{K \cdot \frac{R_f}{R_0} (A + B\sqrt{V})}{(A + B\sqrt{V}) - I_w^2 \cdot R_f} - K \\ &= \frac{(\frac{K \cdot R_f}{R_0} \cdot A - K \cdot A + K \cdot I_w^2 \cdot R_f) + (\frac{K \cdot R_f}{R_0} \cdot B - K \cdot B) \sqrt{V}}{(A + B\sqrt{V}) - I_w^2 \cdot R_f} \\ &= \frac{C_1 + D_1 \sqrt{V}}{A_1 + B_1 \sqrt{V}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:

$$A_1 = A - I_w^2 \cdot R_f$$

$$B_1 = B$$

$$C_1 = \frac{K \cdot R_f}{R_0} A - K \cdot A + K \cdot I_w^2 \cdot R_f$$

$$D_1 = \frac{K \cdot R_f}{R_0} B - K \cdot B$$

(7)式为数字表的显示电压  $E$  与流速  $V$  的关系式。

流体的流速  $V$  与流量  $Q$  的关系为:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot V$$

式中:  $d$  为流体所流过管道的直径。

$$\therefore E = \frac{C_1 + D_1 \sqrt{\frac{4Q}{\pi d^2}}}{A_1 + B_1 \sqrt{\frac{4Q}{\pi d^2}}} = \frac{C_2 + D_2 \sqrt{Q}}{A_2 + B_2 \sqrt{Q}} \quad (8)$$

式中:  $A_2=A_1; B_2=B_1\sqrt{\frac{4}{\pi d^2}}; C_2=C_1; D_2=D_1\sqrt{\frac{4}{\pi d^2}}$

(8)式表示数字表的显示电压  $E$  与体积流量  $Q$  之间的函数关系。

由(7)、(8)式可见,只要知道  $E$  的大小( $A_1\sim D_1$ 、 $A_2\sim D_2$  均为常数),就可以知道对应的流速  $V$ 、流量  $Q$  的大小。 $E$  与  $V$ 、 $E$  与  $Q$  之间为复杂的函数关系,要得到常数  $A_1\sim D_1$ 、 $A_2\sim D_2$  的大小比较困难,但通过对流量计的校正,我们可以得到对应的函数关系。

## 2 校正与结果

为了使用流量计准确地测量流量,必须每隔适当时期标定一次。采用实流标定方式进行标定,结构如图3。

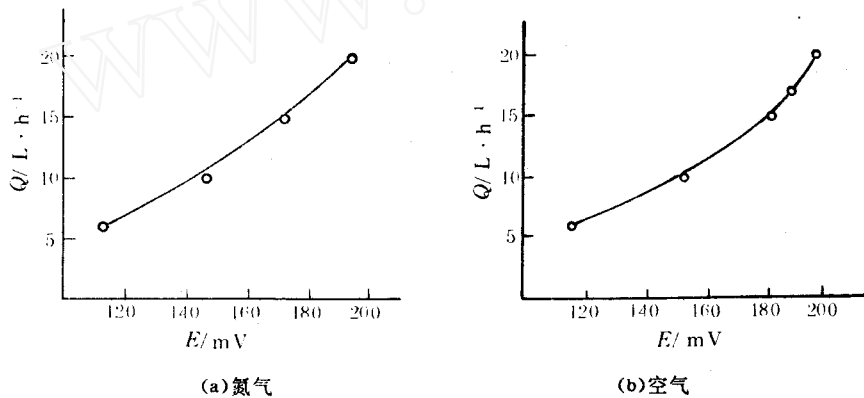


图3 输出电压  $E$  与流量  $Q$  的对应关系

Fig. 3 Relation between output voltage  $E$  and flow  $Q$

对于标定结果,可以采用两种方法进行校正:(1)查表,(2)用单片机校正,即先将标定数据(或拟合公式)输入计算机,计算机根据输出电压  $E$  的大小,经过数据处理,直接显示流量  $Q$  的大小。

考虑到实际应用、计算的方便,把方程(8)展开成多项式的形式,并用计算机进行曲线拟合。从拟合结果分析,用3次方程拟合时,误差很小,并且拟合公式的形式简单。

拟合结果如下:

氮气:

$$\hat{Q} = 29.75061 - 5.753914 \times 10^{-1}E + 3.964101 \times 10^{-3}E^2 - 6.504377 \times 10^{-6}E^3 \quad (9)$$

空气:

$$\hat{Q} = -59.96485 + 1.317034E - 9.036632 \times 10^{-3}E^2 + 2.238244 \times 10^{-5}E^3 \quad (10)$$

拟合公式计算值与实际值比较如表1、表2所示。

表1 氮气的计算值与实际值比较

Table 1 Calculated values vs experimental values of nitrogen

$Q/L \cdot h^{-1}$	6	10	15	20
$E/mV$	113.5	146.0	172.2	194.8
$\hat{Q}/L \cdot h^{-1}$	5.99994	9.99974	15.00229	20.00937

表2 空气的计算值与实际值比较

Table 2 Calculated values vs experimental values of air

$Q/L \cdot h^{-1}$	6	10	15	17	20
$E/mV$	114.8	151.6	180.8	187.9	193.3
$\hat{Q}/L \cdot h^{-1}$	6.00012	9.99648	15.04228	16.94162	20.01947

从表1、表2可见,拟合公式计算结果 $\hat{Q}$ 与实际流量 $Q$ 非常接近,这样,只要知道输出电压 $E$ ,从公式(9)、(10)就能解出氮气、空气的流量(公式(9)、(10)只适用于 $6 L \cdot h^{-1} \leq Q \leq 20 L \cdot h^{-1}$ )。

另外,还可以对 $V$ 、 $E$ 的关系进行校正,或根据需要,进行其它气体的校正。

### 3 结论

通过对热线流量计的设计、安装、调试及校正,并用计算机进行曲线拟合,误差分析后得最大误差小于1%。与其它形式的流量计相比,具有下列特点:

- 1 热线体积很小,对气体的流动阻力小,对测量影响小;
- 2 测量精度高,灵敏度高;
- 3 稳定性能比较好;
- 4 流量测量的下限低;
- 5 可以连续测量,并直接用电信号显示;
- 6 结构简单,使用方便。

在调试、校正中发现,热线流量计还有很大的发展潜力。如果有了小的基准源以后,只要将电路稍加改进,减小运放的放大倍数,就可以使热线流量计所测的流量达到更小的流量范围。

### 参考文献

- 1 川田裕郎. 流量测量手册. 北京: 计量出版社, 1982. 231~239
- 2 吉野新治. 传感器电路设计手册. 北京: 中国计量出版社, 1989. 307~311
- 3 胡瑞雯. 智能检测与控制系统. 西安: 西安交通大学出版社, 1991. 70~71
- 4 周作元, 李荣先. 温度与流体参数测量基础. 北京: 清华大学出版社, 1986. 379~403

## RESEARCH AND PREPARATION OF HOTWIRE FLOWMETER

Li Mei Jian Miao fu

(Department of Materials Science and Engineering, Nanjing Institute of Chemical Technology,  
Nanjing, China, 210009)

**Abstract:** A constant-current hotwire flowmeter for measuring tiny gas flow was researched. Its circuit was designed and developed. The results show that the flowmeter prepared has good stability; high

precision and sensitivity, as well as lower limit of measurement. It is suitable for the accurate measurement of tiny gas flow.

**Key words:** hotwire, constant-current, tiny gas flow measurement.

### 科技简讯

## Nasicon 和 $ZrO_2$ 系陶瓷湿敏材料和湿度传感器的研制通过省教委鉴定

陶瓷湿度传感器是新一代测量环境湿度的基本元件,它具有测量范围宽、响应时间短、体积小、成本低等特点,与2次仪表配用可以显示和控制环境湿度,有广泛的应用前景。80年代国内广泛开展陶瓷湿度传感器的研制和生产,但传感器稳定性问题始终未能很好解决,80年代末研制和生产跌入低谷。我院课题组从1986年开始该课题研究工作,经多年研究达到预期目标,1994年9月1日通过省教委组织的鉴定。

该项目研制开发了 Nasicon 和  $ZrO_2$  系(5组份)2类材料,型号分别为 4-3、N-2、N-6 和 I-2 的4种陶瓷湿度传感器,其中 Nasicon 系陶瓷湿度传感器属国内首创。所研制的湿度传感器对数湿阻特性为线性,低湿度(30%RH)阻值均小于  $10^6\Omega$ ,便于和2次仪表配用;湿阻变化 R30/R60 复盖 1.1~3.0 范围。除 I-2 传感器外,存放状态和工作状态的响应速度分别小于 10 s 和 20 s。传感器性能达国内先进水平。

对离子电导型陶瓷湿度传感器的稳定化进行了研究,阐明了陶瓷湿度传感器存在亚稳态,室温平稳态和外电场下的活化态等固有状态,以及传感器处于不同状态时的湿阻和湿敏特性,提出利用外电场锁定其活化状态是保持传感器稳定化途径之一,对应用开发有一定的指导意义。

传感器均已进行了应用试验,Nasicon 系 N-6 传感器与自制的湿度数字显示仪配套成为数字式湿度计,经用户试用反应良好; $ZrO_2$  系传感器与湿度控制器配套,已批量用于去湿机。应用表明这4种传感器性能稳定可靠。

(罗家汉)