

# 热膜式气体质量流量计及测量电路设计

## 1 概述

热膜式空气质量流量传感器是根据传热学原理设计的。与其他类型直接式空气流量传感器相比，它最重要的优点是能够测定空气质量流量。

## 2 热膜式质量流量计原理

热膜式空气质量流量传感器是在热线式空气质量流量传感器的基础上发展起来的，两者原理相同。其传感元件是一根极细的高温系数系的金属电阻丝。金属电阻丝通电发热，故称热线。空气流过时，从热线上带走热量。在环境空气摄氏温度保持恒定的情况下，热线的热平衡取决于三个因素，即气流、电流和热线温度。为了建立热线的热平衡，有两种方案：一种是恒电流方案，气流改变时热线温度相应地改变，使得散失的热量不变；另一种是恒电阻方案，即恒温方案，气流改变时电流相应地改变，使得散失的热量也改变。因为恒电流方案的热膜式空气质量流量传感器受电阻加热时间常数的影响，由此会引起响应滞后，所以采取恒电阻方案。热线的电阻由温度决定，所以恒电阻要求热线恒温。在空气温度已定的情况下，若热线恒温，则热线与空气恒温度差。热膜式空气质量流量传感器电路是一个电桥，如图1所示。

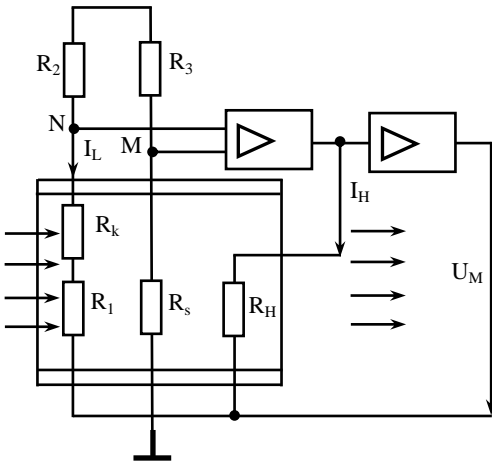


图1 热线和热膜式空气质量流量传感器电路原理

$R_K$ —温度补偿电阻； $R_H$ —加热电阻； $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ —电桥电阻  
 $R_S$ —膜电阻； $U_M$ —测量电压； $I_H$ —加热电流； $I_L$ —空气温度电流

$R_s$  是膜电阻，它只是传感元件，传感元件的加热另由加热元件  $R_H$  完成。 $R_s$  安置在气流中，其特点是：正温度系数，电阻随温度升高而增大，且数值很高；电路设计成电功率主要消耗在  $R_s$  (或  $R_H$ ) 上，所以  $R_s$  温度  $t_s$  高于环境空气温度  $t_\infty$ 。

$R_k$  为空气温度补偿电阻，用于补偿环境空气温度对测试结果的影响。 $R_k$  也安置在气流中，它的特点是：正温度系数；正温度系数值很高；因为  $R_k$ 、 $R_1$  和  $R_2$  之和很大，电流很小，所以  $R_k$  所消耗的电功率极低， $R_k$  的温度等于环境空气温度  $t_\infty$ 。

$R_3$  为测量电阻。 $R_3$  两端的电压可作为信号电压输出。 $R_1$  和  $R_2$  为可调电阻。 $R_3$ 、 $R_1$  和  $R_2$  的温度系数很低，其阻值可看作常数。

满足下式时电桥达到平衡： $R_s R_2 = R_3 \cdot (R_k + R_1)$  这个电路有自动趋于平衡的趋势，即  $M$  点与  $N$  点之间的电位差自动趋于零。伴随着电桥的平衡，还发生一个感电阻  $R_s$  热平衡过程。

在环境空气温度  $t_\infty$  保持恒定的情况下，假定某一气流流量下电桥达到平衡，则  $R_s$  阻值必然稳

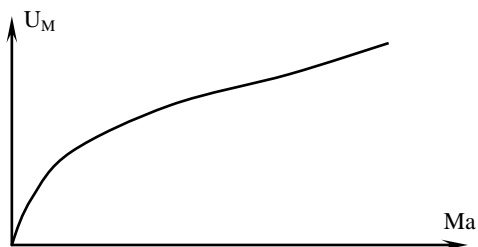


图2 热膜式空气质量流量传感器的输出电压特性

$U_M$ —电压输出  $Ma$ —空气质量流量

其温度  $t_S$  也必然稳定, 电流在  $R_S$  上产生的热量必然和气流从  $R_S$  带走的热量相平衡。电桥的电平衡和  $R_S$  的热平衡必须同时建立, 两种平衡相互依存。一种平衡被打破, 必然导致另一种平衡也要被打破。如果现在气流增强, 则气流从  $R_S$  带走的热量增多, 热平衡被打破,  $R_S$  的温度  $t_S$  下降, 使  $R_S$  阻值下降, 但  $R_3$  阻值不变, 因此  $R_S$  和  $R_3$  的电压降之比相应地改变, 即  $R_S$  电压降减小, 点  $M$  的电位升高。接下去发生的过程是, 点  $M$  和点  $N$  的电位差经运算放大器放大后使电桥供电电压增大,  $R_S$  电流增大,  $t_S$  回升, 一直升到气流增强之前的温度,  $R_S$  阻值也恢复到原先的水平。

在这一过程中, 其他各电阻的阻值均未改变, 所以此时电桥恢复平衡。同时,  $R_S$  也建立了新的热平衡。与气流增强以前不同的是,  $U_M$  提高了,  $R_S$  和  $R_3$  上的电流增大了,  $U_M$  随之增大。所以,  $U_M$  可反映出气流流量的变化(如图 2 所示)。

顺便指出, 在  $t_\infty$  保持恒定的情况下, 电桥恢复平衡后,  $(t_S - t_\infty)$  将与气流增强前的保持相同:  $t_S - t_\infty = \text{const}$ , 如果  $t_\infty$  变动, 则  $R_K$  的温度跟着变动, 因此, 只有在  $R_K$  的温度系数很低的情况下,  $t_S - t_\infty = \text{const}$  才成立。否则,  $R_K$  的阻值随  $t_\infty$  变动,  $(t_S - t_\infty)$  就不能保持恒定。实际上  $R_K$  设计成具有很高的正温度系数。正是利用这一点, 可以实现温度补偿。

### 3 实际测量原理

热式质量流量计是在测量管路中加入 2 个金属铂电阻, 一个铂电阻加入较小的电流(电流在 4 mA 以下, 不会引起电阻发热), 用于测量被测流体温度, 称为测温电阻。一个铂电阻通入较大电流(电流一般在 50 mA 以上), 用于测量被测流体的速度, 称为测速电阻。根据热扩散原理, 加热物体被流体带走的热量与加热物体与流体的温差、流体的流速以及流体的性质有关。若流体密度为  $\rho$ , 流速为  $v$ , 加热物体被流体带走的热量为  $Q$ , 加热物体与流体的温差为  $\Delta T$ , 则有关系式:

$$Q/\Delta T = K_1 + K_2 \cdot (\rho \cdot v) \cdot K_3$$

式中, 对于组分一定的流体,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为常数。

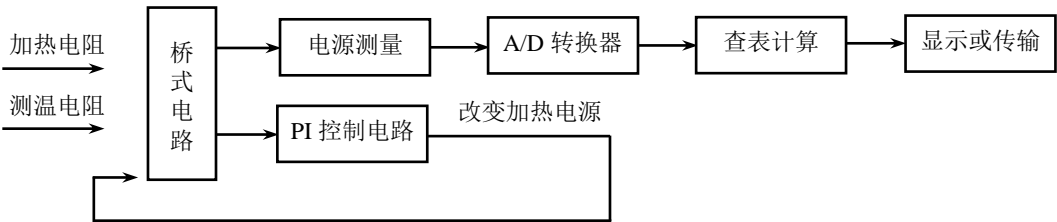
在横截面为  $S$  的管路中, 质量流量  $M_a = \rho \cdot v \cdot S$ 。

在实际测量过程中, 测速铂电阻  $R_H$  被仪表输入的电流  $I_H$  加热, 在热平衡状态下, 电流的加热功率与加热电阻被流体带走的热量处于平衡状态, 即有:  $Q = I_H^2 R_H$ 。因此质量流量  $M_a$  与  $Q/\Delta T$  成一一对应的关系, 可表示成:

$$M_a = f\{I_H^2 R_H / \Delta T\}$$

由此可以看出, 质量流量的测量方法有两种, 一种方法为恒流式, 即当加热电流  $I$  不变时, 通过测出流体的温差  $\Delta T$ (忽略了  $R_H$  随温度的变化), 计算流体的质量流量。另一种方法为恒温差式, 表面上是保持加热铂电阻与测温铂电阻的温差  $\Delta T$  不变, 实际是通过一个桥式电路保持加热铂电阻和测温铂电阻的温差  $\Delta T$  与加热铂电阻  $R_H$  的比值  $\Delta T/R_H$  不变, 通过测量加热电流  $I$  来计算流体的质量流量。采用恒温差方式, 利用桥式电路使  $\Delta T/R_H$  为恒定, 通过实验标定出质量流量  $M_a$  与加热电流  $I$  的关系曲线, 通过测出的电流值  $I$  来计算流体的质量流量  $M_a$ 。

### 4 测量电路总体设计



测量电路的总体框图如上图所示，其中 A/D 转换器、查表计算和显示(或传输)由单片机实现。桥式电路实现了保持  $\Delta T/R_H$  为定值的目的，当流体的质量流量发生变化时，电桥失去平衡，控制电路测量出不平衡电压，通过改变加热电流，使电桥重新处于平衡状态，加热电流通过电流测量电路转化成电压信号，送入 A/D 转换器，转换后的数据经查表、计算，求出对应的质量流量，再显示(或传输)给其他设备。上测量电路总体框图主要介绍测速桥式电路、PI 控制电路和电流测量电路，具体电路如图 3 所示。

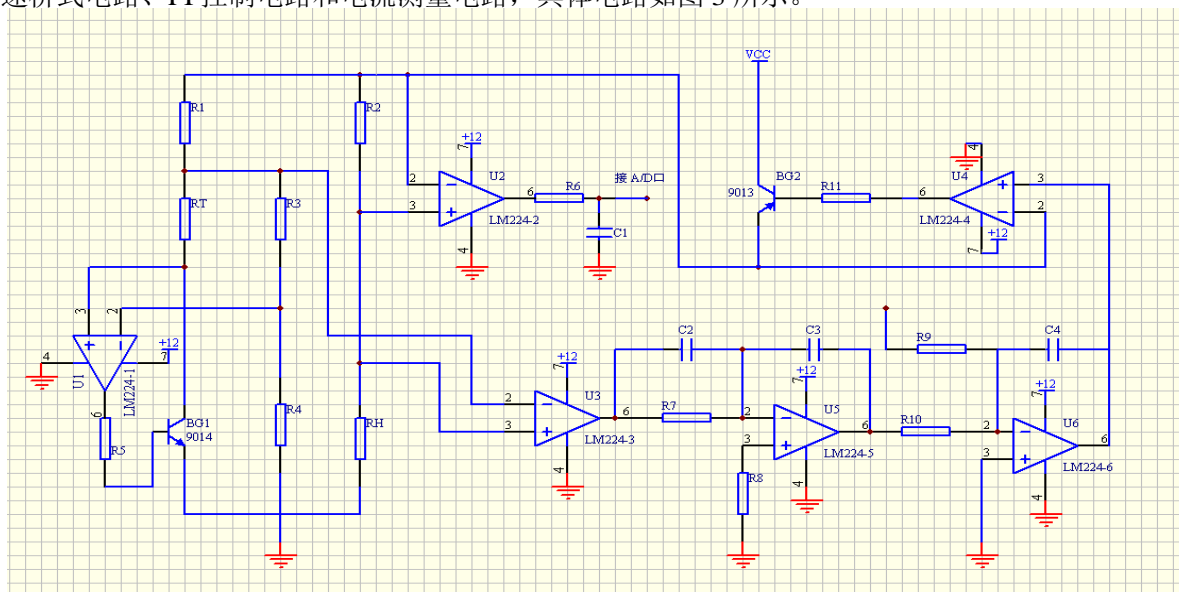


图 3 具体电路

## 5 桥式电路设计

桥式电路包括运算放大器 LM224-1、三极管 9014、测温铂电阻  $R_T$ 、测速铂电阻  $R_H$  和精密电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 。测速铂电阻  $R_H$  位于桥式电路的一臂，其上通以较大的电流，使之加热。测温铂电阻  $R_T$  位于桥式电路的另一侧，为了使它自身不产生热量，以保证测量温度与流体温度相等，通过它的电流必须很小，因此  $R_T$  的电阻值应较大，但如果  $R_T$  值过大，则测量的热惯性也增大，仪表的响应速度减慢。为了解决此问题，在电路中采用了等效大电阻(等效大电阻由 LM224-1、9014、 $R_T$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$  组成)。

### 5.1 等效大电阻电路设计

假设等效大电阻两端电压为  $U_1$ ，流入等效大电阻的电流为  $I_1$ ，则等效大电阻为  $R_T' = U_1/I_1$ ，对于理想运算放大器 LM224-1，根据正负输入端电压相等，可推出：

$$R_T' = (R_3 + R_4/R_T + R_3) R_T$$

当  $R_3 \ll R_T$  时，有  $R_T' \approx \{(R_3 + R_4)/R_3\} R_T$ ，所以相当于一个将测温电阻放大  $(R_3 + R_4)/R_3$  倍的等效电阻。

### 5.2 主电桥电路设计

由仪表的工作原理可知，比值  $\Delta T/R_H$  应保持恒定。这一点可以通过以下计算来证明：设在工作状态 1 的情况下，流体温度为  $t_1$ ，测速铂电阻温度为  $T_1$ ，测速铂电阻的阻值为  $R_{H1}$ ，测温铂电阻的阻值为  $R_{T1}$ ；在工作状态 2 的情况下，流体温度为  $t_2$ ，测速铂电阻温度为  $T_2$ ，测速铂电阻的阻值为  $R_{H2}$ ，测温铂电阻的阻值为  $R_{T2}$ 。由铂电阻的阻值公式得：

$$R_{T1} = R_{T0}(1 + \alpha t_1); R_{T2} = R_{T0}(1 + \alpha t_2); R_{H1} = R_{H0}(1 + \alpha T_1); R_{H2} = R_{H0}(1 + \alpha T_2)$$

式中， $R_{T0}$  为测温铂电阻在温度为零时的阻值， $R_{H0}$  为测速铂电阻在温度为零时的阻值； $\alpha$  为电阻温度系数。

由电桥平衡条件得：

$$R_1/R_2 = \{[(R_3 + R_4)/R_3] R_T\}/R_H$$

所以：

$$R_T/R_H = R_1 R_3/(R_3 + R_4) R_2 \text{ 为常数}$$

把工作状态 1 和工作状态 2 时的参数代入，得：

$$R_{T0}(1+\alpha t_1)/R_{H0}(1+\alpha T_1)=R_{T0}(1+\alpha t_2)/R_{H0}(1+\alpha T_2)$$

经化简可得：

$$(T_1-t_1)/R_{H1}=(T_2-t_2)/R_{H2}=\Delta T/R_H$$

由以上公式推导可知，此桥式电路实现了  $\Delta T/R_H$  恒定的目的。

## 6 电阻的选择

选择  $R_{T0}=100\Omega$ ； $R_{H0}=20\Omega$ ，经过实验验证，测速铂电阻的温度与环境温度相差  $70\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ ，测量效果较好，一般环境温度在  $20\text{ }^\circ\text{C}$  左右，若测速铂电阻工作选为  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ，则  $R_H=R_{H0}(1+\alpha t_H)=20\times(1+0.00385\times 100)=27.7\text{ }^\circ\text{C}$ ，取  $R_1=1\text{k}\Omega$ ， $R_2=10\Omega$ ，在电桥平衡时应满足  $R_1/R_2=R_T'/R_H$ ，所以  $R_T'=2.77\text{k}\Omega$ 。又因为  $R_T'\approx R_3+R_4/R_3 R_T$ ，所以  $R_4/R_3=26.7$ ，该电路取  $R_3=6.8\Omega$ ， $R_4=180\Omega$ 。经实验验证：电路在流量为零时，加热电流为  $60\text{mA}$ ，在通过最大流量时，加热电流为  $100\text{mA}$ ，则流过测温铂电阻的最大电流值为  $I_{T\max}\approx R_2/R_1 I_{H\max}=1\text{mA}<4\text{mA}$ ，满足测温铂电阻最大电流的要求。

## 7 电流测量电路设计

差动放大器 LM224-2 将流过加热电阻  $R_H$  的电流信号转换为电压信号，送入 A/D 转换器。LM224-2 的放大倍数  $G$  与反馈电阻  $R_G$  的关系为  $R_G=49/(G-1)$ ，根据具体加热电流范围(由流量范围定)选择  $R_G$  (即  $R_6$ )。

## 8 PI 控制电路设计

差动运算放大器 LM224-3 将主电桥差动电压信号放大，LM224-5， $C_2$ 、 $C_3$  和  $R_7$  组成 PI 调节器，用于消除静态误差。LM224-6、 $R_{10}$ ， $R_9$  和  $C_4$  组成一个具有低通滤波特性的加法器，加法器将输入信号放大，并在主电桥平衡的状态下，给电桥提供一个恒定的电压信号。LM224-4、 $R_{11}$  和三极管 9013 用于提供一个大的电流信号。

## 9 结论

与其他常用流量计相比，热式质量流量计具有量程比宽(差压式流量计量程比为 3:1，涡街流量计量程比为 10:1，热式流量计量程比可达 100:1)，抗振性能好(与涡街流量计相比)和对微小流量敏感的特点。

热式质量流量计存在的问题是：对被测流体组分的变化比较敏感，只适合测量组分基本不变的流体流量，若流体组分发生变化，流量计须重新标定；由于金属铂电阻的热惯性，热式流量计的响应速度较慢。