

Research on Temperature Compensation of Thermal Gas Flowmeter

WANG Li-heng, LI Chang-xi*

(Department of control science and engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The heat exchanged between the probe of constant temperature thermal flowmeter and the flow correlates not only with the mass flux but also with the flow temperature. The temperature compensate model is deduced from analysis of heat transfer model of the thermal gas flowmeter. Meanwhile, the structure of sensor and the general driver circuit are analyzed, and the shortcoming of the general compensation circuit was presented. A new type of temperature compensation circuit was given based on the analysis. The result of analysis and test of the new circuit show that the temperature compensation effect has been improved.

Key words: thermal flowmeter; temperature compensation; heat-transfer model; bridge circuit
EEACC: 7230; 7320 R

热式气体流量计温度补偿研究

王利恒, 李昌禧*

(华中科技大学控制科学与工程系, 武汉, 430074)

摘要: 恒温型热式流量计加热探头与被测介质之间交换的热量不仅与质量流量有关还与被测介质的温度有关。通过对流量计热交换模型的分析, 导出了热式气体流量计温度补偿的模型。同时对传感器的结构和常用的驱动电路进行了分析, 指出了现有补偿电路的不足, 提出了一种新的温度补偿电路。通过电路分析和试验证明, 新补偿电路能改善温度补偿效果。

关键词: 热式流量计; 温度补偿; 换热模型; 桥式电路

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)08-1379-04

对流型热式气体流量计又分成能量恒定型(恒流)和温度恒定型(定温)两种。温度恒定型热式气体流量计的响应速度比能量恒定型快, 是目前热式气体流量计的主要发展方向, 以下简称为热式气体流量计。该仪表具有以下特点^[1]: 能测量极低流速的微小流量; 无可动部件, 可靠性高; 压力损失非常小、几乎可以忽略; 直接测量质量流量, 无需压力、温度修正; 电信号输出, 输出值较大; 量程比极高; 价格与管径关系不大, 易于安装; 复现性能好。基于以上优点, 进行热式气体流量计的研究开发具有很好的应用前景。但在工程应用中, 热式气体流量计也面临诸多问题。比如流量计的输出受被测气体组分和温度变化的影响造成较大测量误差。本文分析介质温度变化对热式气体流量计的影响, 并提出了一种新的温度补偿方法。

1 换热模型

热式气体流量计以热线风速仪的理论为基础, 对于定温侵入式气体流量计, 与 CT 热线风速仪相似, 加热探头与气体间的对流换热为:

$$H = \dot{I}_w^2 R_w = hA(T_w - T_c) = hld(T_w - T_c) \quad (1)$$

$\dot{I}_w^2 R_w$ 为加热探头的加热功率; h 为对流换热系数; A 为探头的表面积; l 为探头的长度; d 为探头的直径; T_w 为探头温度; T_c 为介质温度。

根据传热学, 引入对流换热系数与努塞尔数关系式:

$$Nu = \frac{hd}{\rho_f}, Pr = \frac{c_p}{\rho_f}, Re = \frac{Ud}{\rho_f} \quad (2)$$

式中 ρ_f 为被测气体的热导率; ρ_f 为动力粘度; c_p 为气体定压比热容; ρ_f 为气体密度; U 为气体速度。

收稿日期: 2008-02-01 修改日期: 2008-03-31

式(1)可写为:

$$H = I_w^2 R_w = h l d (T_w - T_c) = \frac{Nu \cdot f}{d} l d (T_w - T_c) \quad (3)$$

努塞尔数 (Nusselt number, Nu)、普朗特数 (Prandtl number, Pr)、雷诺数 (Reynolds number, Re) 的关系可以用如下准则方程表示:

$$Nu = f(Re, Pr) \text{ 或 } Nu = C \cdot (Re)^m \cdot (Pr)^n \quad (4)$$

考虑不同的换热形式,努塞尔数有不同的关联式,都体现了物性参数和流动特性对对流换热的影响。

对于热式气体流量探头的对流换热计算,特征关联式可以表示为:

$$Nu = C \cdot (Re)^m \cdot (Pr)^{1/3} \quad (5)$$

式(5)中的普朗特数取 $0.7^{[2]}$,且该参数基本不随气体温度变化,而 C 和 m 两个参数随着 Re 变化而变化。将 Nu/Re 的曲线进行分段拟合即可得到 C 和 m 的值^[3]。取 Re 范围为 $40 \sim 4000$,查得对应的 $C = 0.683$; $m = 0.466$ 。式(5)变化为 $Nu = 0.683 (Re)^{0.466} \cdot (Pr)^{1/3}$,将 $Pr = 0.7$ 代入得

$$Nu = 0.606 (Re)^{0.466} \quad (6)$$

将上式代入式(3)的热平衡方程得:

$$H = I_w^2 R_w = \frac{0.606 (Re)^{0.466}}{d} f A (T_w - T_c) \quad (7)$$

将 $Re = \frac{Ud}{\nu}$ 代入式(7)可得流过探头的电流表达式

$$I_w^2 = \frac{0.606 \cdot f \cdot d^{0.534}}{0.466} \cdot \frac{T_w - T_c}{R_w} \cdot (U)^{0.466} \quad (8)$$

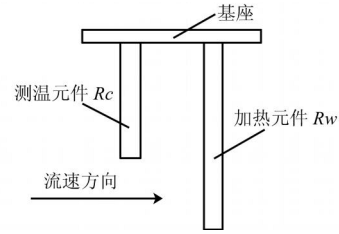
从式(8)可以看出,当被测流体的组分不变(即物性参数不变)时,保持 $\frac{T_w - T_c}{R_w}$ 不变,就可以建立流经加热探头的电流 I_w 和待求的质量流量 U 之间的单值函数。

2 传感器结构分析

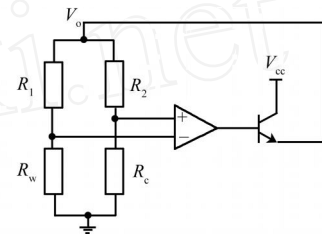
热式气体流量计探头由两只铂热电阻构成。其结构形式如图1(a)所示,一只用作加热元件 R_w ,另外一只用作温度补偿的测温元件 R_c 。通常使用的驱动电路简化模型如图1(b)所示。 R_w 、 R_c 与另外两只精密电阻 R_1 、 R_2 构成测量电桥,桥路的不平衡电压经放大器放大后调节供桥电压,改变供桥电流实现电功率调节,跟踪并保持加热元件温度始终比介质温度高出一定值(保证 $\frac{T_w - T_c}{R_w}$ 恒定)。

驱动电路电桥平衡条件是

$$\frac{R_1}{R_w} = \frac{R_2}{R_c} \quad (9)$$



(a) 传感器探头



(b) 驱动电路

图1 热式气体传感器结构及传统驱动电路简化模型

R_1 、 R_2 是精密固定电阻,则 R_w 、 R_c 的比值应为常数。由铂电阻的阻值公式可得 $R_w = R_{w0} (1 + t_w)$, $R_c = R_{c0} (1 + t_c)$ 。 R_{w0} 和 R_{c0} 分别为加热铂电阻和测温铂电阻在零度时的阻值。为电阻的温度系数。

设在某稳定工作状态时,加热电阻的温度为 t_{w1} ,测温电阻的温度(即被测介质的温度)为 t_{c1} 。当质量流量发生改变或被测介质的温度改变时,电桥处于新的平衡状态,此时加热电阻的温度为 t_{w2} ,测温电阻的温度(即被测介质的温度)为 t_{c2} 。将阻值代入平衡式得如下关系式

$$\frac{R_{w0} \cdot (1 + t_{w1})}{R_{c0} \cdot (1 + t_{c1})} = \frac{R_{w0} \cdot (1 + t_{w2})}{R_{c0} \cdot (1 + t_{c2})} \quad (10)$$

展开上式得

$$t_{w1} + t_{c2} + t_{w1} \cdot t_{c2} = t_{w2} + t_{c1} + t_{w2} \cdot t_{c1} \quad (11)$$

由上式可推得

$$\frac{(t_{w1} - t_{c1})}{R_{w0} (1 + t_{w1})} = \frac{(t_{w2} - t_{c2})}{R_{w0} (1 + t_{w2})} = \frac{t_w - t_c}{R_w} \quad (12)$$

上式表明,理论上,桥式电路可以保证 $\frac{T_w - T_c}{R_w}$

不变,使得质量流量是加热电流的单值函数而与介质的温度无关,从而实现温度的补偿功能。

进一步分析可发现该桥路的温度补偿电路存在两个问题。首先按理论要求测温补偿元件只对气体温度敏感,而对气体速度不敏感。这要求流经补偿元件的电流远小于流经加热元件的电流^[4-5],测温补偿元件从电路吸收极其微弱的电功率,自身不会在工作中被加热,其温度只取决于气体温度。因此电桥中要满足 $R_2 \gg R_1$, $R_c \gg R_w$ 。但铂电阻阻值过大除了工艺实现不便,还会导致测温补偿元件的热惯性

增大,使系统的响应变慢。其次,该电路的输出通常是取 V_o ,即建立的是 V_o 与质量流量之间的函数关系。由前面的分析可知,经过温度补偿后,流经加热元件的电流 I_w 是质量流量的单值函数,而 $V_o = I_w \cdot (R_1 + R_w) = I_w \cdot [R_1 + R_{w0} \cdot (1 + t_w)]$,除了受质量流量的影响,还会受流体介质温度的影响(导致 R_w 改变,从而影响 V_o 输出)。实验结果也表明,原有桥路的温度补偿精度是不够的。

3 新型自动补偿电路

针对性设计了一种新型的自动补偿电路,可以有效解决以上问题,进一步提高温度补偿效果。

图 2(a) 是补偿原理框图,反馈放大器的输出 V_b 向测量元件支路直接供电,而向补偿支路供电时经过了 K_M 的衰减,补偿支路的供电电压为 V_b / K_M 。若满足 $K_M \gg 1$,则补偿电阻 R_c 的工作电流将远小于测量元件的工作电流,补偿元件只能获得微小电功率,在工作中不会被电路加热,满足测温补偿元件的基本要求。为了使桥路工作正常,测温补偿桥路的分压电压需要经过 K_M 增益后再引入反馈放大器。图 2(b) 是实际的测量补偿电路,电桥平衡时,满足下式:

$$\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_c} \cdot \frac{R_6 + R_7}{R_7} = \frac{R_2}{R_2 + R_w} \quad (13)$$

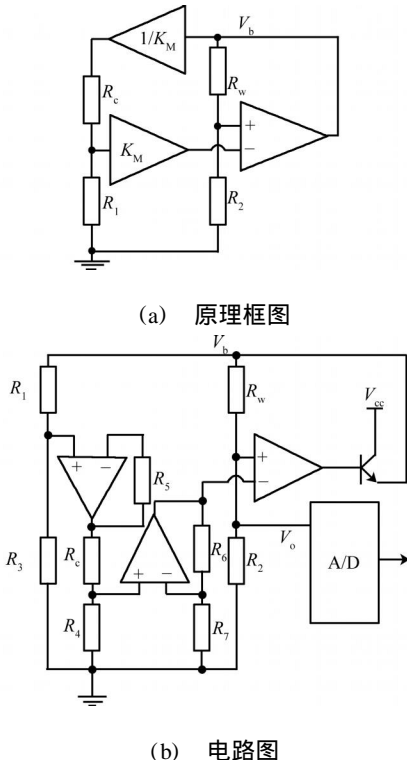


图 2 新型自动温度补偿电路

电路中除了补偿电阻 R_c 和加热电阻 R_w 是铂电阻外,其他都选用精密电阻。取 $R_1 = R_6, R_3 = R_7$,

上式化简为 $\frac{R_c}{R_4} = \frac{R_w}{R_2}$,和普通电桥一样,满足前面分析的 $\frac{T_w - T_c}{R_w}$ 不变条件。 $K_M = 1 + \frac{R_1}{R_3}$,在不改变补偿元件的阻值条件下,流经 R_c 的电流只有普通电桥的 $\frac{1}{K_M}$,合理选择桥路电阻就能保证补偿元件在工作中不会被加热。

同时,加热和测温电阻交换至上桥路,此时测量输出的电压来自标准电阻 R_2 的分压,则 $V_o = I_w \cdot R_2$, R_2 选为精密固定电阻,这样即可保证采样的输出电压是质量流量的单值函数而与介质的温度无关,从而有效地实现温度补偿。

4 温度补偿实验验证

按照上述补偿电路研制了流量计样机,并将实验气体加热到不同的温度进行实验。使用调压器调节加热管段加热电阻丝的电压可将气体加热到实验所需的温度。在本实验中,分别取室温(24)、27、30、35 四个温度点进行实验。

由于实验装置不能产生温度阶跃,且流速变化与温度之间存在耦合,故只能获得温度补偿的稳态效果。流量计样机按照以上步骤进行了四个温度点(24、27、30、35)实验,实验结果如图 3 所示。从图中可以看出,若气体速度保持不变,当气体温度发生变化时流量计输出信号的稳态值也发生一定的改变,但其变化值基本保持在 2.5% 以内。故采用本文提出的温度补偿方法可以较好地补偿气体温度变化。

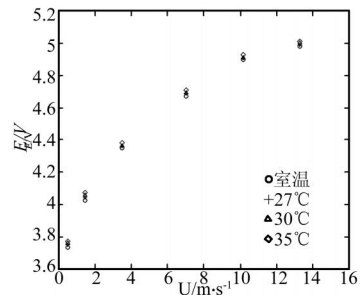


图 3 流量计样机温度补偿实验结果

5 结论

通过对热式气体流量计传热模型的分析,导出了恒温式热式流量计必须满足加热温度与介质温度差与加热电阻的比值恒定的条件,同时分析了普通桥式测量补偿电路模型及其存在的不足,在此基础上提出了一种新型的测量补偿电路,并进行了分析。试验结果表明新的测量补偿电路有效地改善了温度

补偿效果。

参考文献:

- [1] 蔡武昌. 热式质量流量计的应用[C]// 第4届工业仪表与自动化学术会议论文集. 北京: 中国仪器仪表学会, 2001: 258-268.
- [2] 杨世铭. 传热学[M]. (第1版). 北京: 人民教育出版社, 1980: 442.
- [3] Vasanta Ram V. On the Effects of Fluid Temperature on Hot Wire Characteristics, Part 2: Foundations of a Rational Theory[J]. 1992, 13: 267-278.
- [4] 李昌禧, 张世荣. 热式复合传感器分析[J]. 传感技术学报, 2003(2): 144-146.
- [5] 李昌禧, 邵阳, 李午. 热式多传感器信息融合的气固质量流量检测[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(8): 50-52.



王利恒(1973-),男,华中科技大学博士后,主要从事测量与智能仪表方面的研究,wlhust@163.com



李昌禧(1946-),男,华中科技大学教授,博导,主要从事测量与智能仪表方面的研究,changxilee@yeah.net