

【文章编号】 1004-1540(2008)03-0201-05

# 热式气体流量计原理及影响因素分析研究

梁国伟<sup>1</sup>, 文英杰<sup>2</sup>, 黄震威<sup>1</sup>, 梁一灵<sup>1</sup>

(1. 中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 杭州市质量技术监督检测院, 浙江 杭州 310004)

**【摘要】** 讨论了热式探头的气体流量测量方法和热式流量仪表的设计方法. 在论述热式探头测量气体流量原理的基础上, 对探头型式、安装方式、环境温度、供电电源等影响因素进行了较深入的分析, 并对热式流量仪表的设计提出了建议.

**【关键词】** 热式气体流量计; 测量原理; 影响因素; 温度补偿

**【中图分类号】** TB937

**【文献标识码】** A

## Analysis and studies for measuring principle and affecting factors of hot type gas flowmeters

LIANG Guo-wei<sup>1</sup>, WEN Ying-jie<sup>2</sup>, HUANG Zhen-wei<sup>1</sup>, LIANG Yi-ling<sup>1</sup>

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Hangzhou Institute of Calibration and Testing for Quality and Technical Supervision, Hangzhou 310004, China)

**Abstract:** The measurement methods of gas flow rate based on hot type probes and design methods of hot type flowmeters were discussed. Based on the discussion of the principle of measuring gas flow rate with hot type probes, the affecting factors such as probe type, fixing way, environment temperature, power supply etc. Have been analyzed thoroughly and some suggestions about the design methods for hot type flowmeters are proposed in this paper.

**Key words:** hot type gas flowmeter; measuring principle; affecting factors; temperature-compensation

## 1 热式流量计测量原理

### 1.1 工作原理

热式质量流量计是根据介质热传递原理制成的一种流量仪表, 一般用来测量气体的质量流量. 根据被测物理量的不同可以有以下 3 种测量关

系: 1) 利用流体流过加热管道时产生的温度场变化与流体质量流量的关系; 2) 利用加热流体时流体温度上升某一值所需要的能量与流体质量流量之间的关系; 3) 利用流体流过加热探头时带走的热量与流体质量流量的关系. 热式气体流量计具有压损低, 流量范围度大, 高精度、高重复性和高

可靠性,无可动部件以及可用于极低气体流量监测和控制等特点.根据上述 3 种测量关系可以分成两种测量方法,一种是给流体加入必要的热量,热能随流体流动,可以通过检测相应点的热量变化来求出流量;另一种是在流动的流体中放置发热元件,其温度随流速变化,可以通过检测发热元件被冷却程度来测量流量;前者称为热量式,属于这种测量方法的仪表有早期的托马斯流量计、非接触式的边界层流量计和热分布型流量计;后者称为热导式,属于这种测量方法的仪表有热线风速仪,浸入型流量计等.

利用加热流体的热量(或温度)变化测量流体的质量流量计已有很长的历史.早期的热式流量计直接将加热线圈和测温元件放入流体中与流体直接接触,是一种接触式流量计,20 世纪初提出的托马斯流量计是这种流量计的代表<sup>[1]</sup>.由于不能解决腐蚀和磨损以及防爆等问题,使它的工业应用受很大的限制.到 20 世纪 50 年代,人们提出了一种与流体不接触的边界层流量计<sup>[2]</sup>,克服了接触式流量计的缺点,但测量结果易受介质参数(如导热系数、比热容、粘度等)的影响,常用来测量较大的液体流量;到 70 年代,基于测量流体温度分布的热分布型流量计,由于其独特的优点和与流体非接触的性能在国内外得到了很快的发展,用来测量气体的微小流量<sup>[3]</sup>;随着科技的发展,经过对流量计结构上的重新设计,在接触式流量计的基础上,人们提出了一种浸入型的热式流量计<sup>[4-9]</sup>,并得到了很快的发展,热探头有热线、热膜、微型热阻桥等,可以用来测量较大管径的气体流量.

综上所述,目前得到商用化的热式流量计从原理上主要可以分成浸入型和热分布型两大类.而且由于浸入型的探头型式与结构、安装方式等在近年来得到了很快的发展,在气体流量测量领域的应用也越来越多.本文的目的是通过几年来对热式流量计的研究<sup>[10-13]</sup>,在阐述热式流量计原理的基础上,就探头型式、安装方式、环境温度、供电电源等因数的影响作一总结.

## 1.2 数学模型

热式气体流量计的原理建立在热平衡原理基础上,目前主要有热线和热膜两种形式.热线的敏感元件一般为直径很细(约为 0.002~0.05 mm)的铂丝或钨丝,热膜的敏感元件则是在陶瓷基片上

沉积金属(如铂)形成的薄膜电阻.热线式和热膜式的工作原理相同,图 1 为热式气体流量传感器的的工作原理.在气流通道中放置热线(铂丝或钨丝)  $R_H$  和补偿电阻  $R_C$ ,在稳定的流场中形成平衡电桥,当气流通过流量传感器时,热线被冷却,热线温度下降,其电阻值随之减小,电桥失去平衡.通过集成运算放大器组成的反馈电路会自动增加供给热线的电流  $I_H$ ,使热线恢复到原来的温度和电阻值,从而使电桥恢复平衡.实际上,在气体流量变化时,热线电阻并不变化,而是工作在恒温方式.当它有变化的趋势时,通过运算放大器的反馈作用使供给热线的电流  $I_H$  发生变化而保持探头温度(电阻)的恒定.

根据热平衡原理,电流流过热线所产生的热量应该等于流体流过热线所带走的热量.因为热线产生的热量  $W$  取决于焦耳定律,而流体所带走的热量  $H$  取决于热耗散规律,所以有:

$$W = H \quad (1)$$

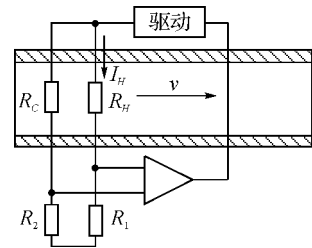


图 1 热式气体流量计原理

Figure 1 Principle of hot type gas flowmeter

对于有限长的热线,在稳定情况下的热耗散应为对流引起的热耗散  $Q_C$ 、热线对支杆的热传导引起的热耗散  $Q_K$  和热线热辐射引起的热耗散  $Q_R$  之和:

$$H = Q_C + Q_K + Q_R \quad (2)$$

由于大多数场合中热线与周围的流体温度差一般小于  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ,辐射热  $Q_R$  可以忽略;热线在长径比很大的情况下,热线对支架的热传导  $Q_K$  与  $Q_C$  相比也可以忽略不计,所以热线的热耗散主要是由对流引起的.

对于圆柱形的热线,因对流产生的热传递关系式可以明确地表示. L. V. King 对这个关系已进行了详细的研究,因对流引起的热耗散  $Q_C$  为<sup>[4,14]</sup>:

$$Q_C = 2\pi\kappa_0(T - T_0) \frac{l}{\ln \frac{\kappa}{\rho c_p v d} + 1.12} \quad (1)$$

$$\rho \frac{c_p v d}{\kappa} < 0.08$$

$$Q_c = \kappa(T - T_0)l \left\{ 1 + \sqrt{2\pi \frac{\rho c_p v}{\kappa} d} \right\}$$

$$\rho \frac{c_p v d}{\kappa} > 0.08 \quad (2)$$

式(1)(2)中: $T, l, d$ 分别为热线的温度、长度和直径; $T_0, \rho, c_p, v, \kappa$ 分别为气流的温度、密度、定压比热、流速和导热系数.对于 $d = 0.025 \text{ mm}$ 的热线测量常温空气的场合,式(1)和(2)的流速界限值约为 $0.075 \text{ m/s}$ .这是一个非常小的气体流速,对于热线风速仪或浸入式热式流量计,实际使用时流速一般都大于此值,属于式(2)给出的范围,并可改写成:

$$Q_c = (a + b \sqrt{\rho v})(T - T_0) \quad (3)$$

式(3)中: $\rho v$ 表示空气质量流速; $T$ 为热线工作温度; $T_0$ 为气流温度; $a, b$ 分别为

$$\begin{cases} a = \kappa l \\ b = l \sqrt{2\pi \kappa \rho} d \end{cases} \quad (4)$$

对于一定的流量计和一定的被测介质, $a, b$ 是常数;

而热线单位时间内产生的焦耳热为

$$W = I_H^2 R_H \quad (5)$$

当达到热平衡时,即有

$$I_H^2 R_H = (a + b \sqrt{\rho v})(T - T_0) \quad (6)$$

当探头在恒温方式工作时,热线和被测气体的温度差 $(T - T_0)$ 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 $q_m$ 之间的关系应为图2的四次多项式曲线关系:

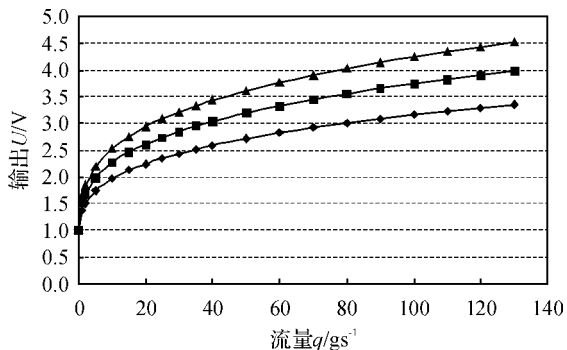


图2 热式气体流量计理论曲线

Figure 2 Theoretical curve of hot type gas flowmeter

## 2 热式探头的型式

经过几十年的发展,浸入型热式流量计探头已有很多种型式,适用于各种应用场合.

最简单的探头形式就是一段直径非常微小的圆柱体金属线,安装在一个微型支架上,如图3a所示,实验室用的热线风速仪就是这种型式.其直径一般只有 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ,长度只有毫米量级,电阻只有几欧姆.由于探头比较娇贵,一般只用于实验室场合,对流速变化的反应非常灵敏.

用于实际管道测量空气流量的热线探头如图3b所示,在两个金属支架上固定一根螺旋状的热线,其结构如灯泡中的灯丝.热线一般由直径为 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 的铂丝或钨丝组成,长度可达几十毫米,电阻为 $10 \sim 20 \Omega$ .由于热线长度比较长,所以常绕成几毫米长的螺旋状线管固定在支架上.

图3b的结构有较高的灵敏度,完全能满足一般的工程测量.但在强度和稳定性上始终存在问题,铂丝螺线管稳定性好,但强度较低,不容易定型;钨丝螺线管强度较高,但容易氧化,稳定性不够好.在陶瓷基片上做成的铂膜电阻,如图3c能较好地解决该矛盾,于是近几年在空气流量检测中得到了较广泛的应用,尤其在汽车空气流量测量中的应用.在陶瓷基片上沉积加热电阻和补偿电阻的组合铂膜探头如图3d,由于它使补偿电阻和加热电阻处于同一流场中,而且位置确定,能更好地补偿流体温度变化带来的影响,故在气体流速测量和工业管道气体流量测量中正逐步得到广泛应用.

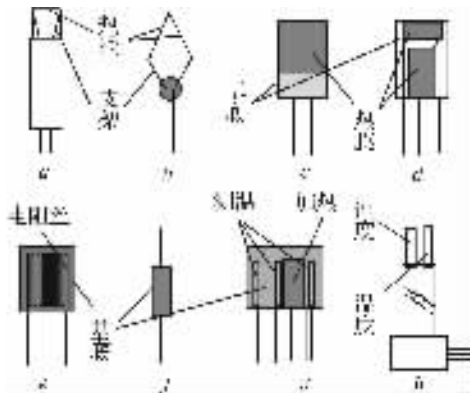


图3 热式探头的型式

Figure 3 Form of hot type probe

铂膜探头由于存在一个陶瓷基片,外形尺寸约为  $3\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$  或更大.这不仅使热膜探头有一定重量,用两个引脚安装在气体流道中时由于探头位置不容易固定而易引起信号输出的变化,而且由于陶瓷基片有一定厚度与体积,从而使热膜探头的热容量增加,响应速度下降,对气流瞬态变化的反应不够灵敏,致在某些特殊使用场合(如汽车行业)不能满足动态响应的要求.然而,图 3e 和 3f 的结构却可以解决该问题.图 3e 是将热线做在一张极薄的软胶片上,然后将软胶片用边框固定在流道中;图 3f 是在一个直径很小的圆柱基体上做热膜或热线,两端引线,很容易固定在流道中.这些结构都可以解决探头的固定问题和动态响应问题.

用半导体工艺研制的微型热式流量传感器如图 3g,在基片上集成一个微型加热器,在微型加热器上下游对称位置设置测温装置,测量由于流体流动造成的上下游温度不对称分布.在远离加热器上游设置的测温装置测量流体温度以补偿流体温度的影响.整个探头的加热测量部件被限制在一个非常小的尺度内,对流动的反应很敏感,它们已经被广泛应用于汽车空气流量的测量控制中.但由于半导体制作工艺复杂,只适合大批量生产,故该技术仍为少数国外企业所垄断.

应用于工业管道的热式流量传感器如图 3h,其速度探头与温度探头都由铂电阻组成,有坚固的保护外壳,铂丝不直接与流体接触,所以应用较广.但正由于有保护外壳的存在,使其动态响应速度大大降低,只适合于测量流量变化缓慢的定常流动.

上述各种热式探头目前都有应用,其性能各异,存在的问题有:温度补偿问题,湿度影响问题,信号输出长期稳定性问题,仪表设计中的安装问题,电源问题,动态响应问题,等等.

### 3 介质温度和湿度的影响分析

从前面的分析可知,不同的被测介质温度对热式探头的工作有很大影响.式(6)表明,所谓恒温工作方式是指介质温度  $T_0$  不变时,不管气流速度  $v$  如何变化,都能保持探头温差  $(T - T_0)$  不变,所以探头电阻  $R_H$  也为常数;当介质温度  $T_0$  变化时,探头温度  $T$  也随之变化,探头温差  $(T - T_0)$  也

不恒定.因为从图 1 的原理图可以知道,任何介质温度下,桥路平衡时,  $R_H/R_1 = R_C/R_2$ ,由于  $R_1$ 、 $R_2$  是固定的精密电阻,所以,任何介质温度下,其  $R_H$  与  $R_C$  的比值应为常数.如果用  $T_H$  表示热线温度,用  $T_C$  表示介质温度,则

$$\frac{R_{H0} \cdot (1 + \alpha T_{H1})}{R_{C0} \cdot (1 + \alpha T_{C1})} = \frac{R_{H0} \cdot (1 + \alpha T_{H2})}{R_{C0} \cdot (1 + \alpha T_{C2})} \quad (7)$$

展开式(7),并在等式两边同时加上  $\alpha R_{H1} R_{H2}$ ,整理后可得

$$\frac{T_{H1} - T_{C1}}{R_{H1}} = \frac{T_{H2} - T_{C2}}{R_{H2}} \quad (8)$$

这就从理论上证明了式(6)中的比值  $(T - T_0)/R_H$  依然保持常数,所以从式(6)可知,信号电流  $I_H$  仍然是空气质量流量的单元函数.这样的探头性能正是图 1 的测量桥路中补偿电阻  $R_C$  测量介质温度进行补偿的结果.

仔细分析式(6)中的系数  $a$  和  $b$  可知,介质温度变化时, $a$  和  $b$  并非常数,如式(4),它们与介质的导热系数  $\kappa$  和定压比热容  $c_p$  有关.各种气体的导热系数  $\kappa$  和定压比热容  $c_p$  有较大不同.对于空气,在中常温范围其导热系数  $\kappa$  和定压比热变化量相对较小, $a$  和  $b$  的变化,如图 4.

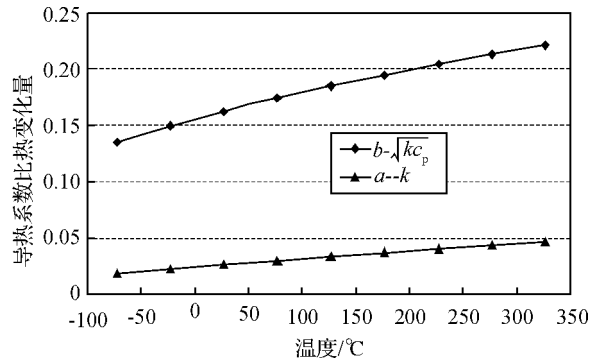


图 4 系数  $a$  和  $b$  变化曲线

Figure 4 Curves of coefficient  $a$  and  $b$

从图 4 可以看出,随着温度的提高,式(6)中系数  $a$  和  $b$  都在不同程度增加.即使质量流量不变,由于系数  $a$  和  $b$  都在提高,流量信号  $I$  也不是常数.所以,热式气体流量计尚不是真正的质量流量计,其输出信号除与质量流量有关外,还与气体物性参数如导热系数、定压比热容等有关.

被测介质湿度的影响表现在湿度对导热系数  $\kappa$  和密度  $\rho$  的变化上.常压下水蒸气的导热系数  $\kappa$

略小于空气,而密度 $\rho$ 要比空气小较多,定压比热 $c_p$ 差不多是空气的2倍,随温度有同样的变化规律.所以,空气中的水蒸气对热式探头的影响有与图4相同的规律,影响量与湿空气的相对湿度 $\phi$ 和温度 $t$ 有关.图5为湿空气密度随相对湿度和温度变化曲线,可以看出,温度较低时(如小于 $40^\circ\text{C}$ ),空气湿度引起的差异较小(大约可在3%以内),但在温度较高时,空气湿度的影响比较明显.

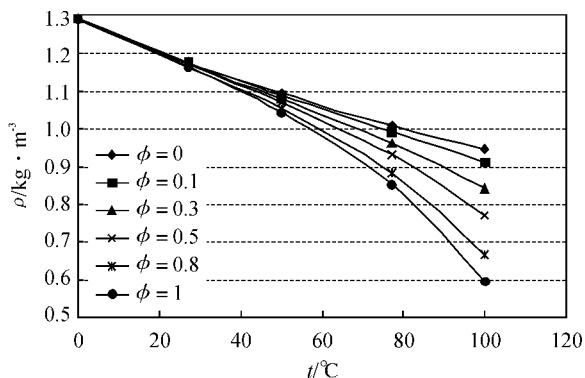


图5 湿空气密度随相对湿度和温度变化曲线

Figure 5 Curves of wet air density with  $\phi$  and  $t$

## 4 热式流量计设计

### 4.1 探头电阻

热式探头电阻的设计选取,除了直接与探头工作温度、工作电流等指标有关之外,还与探头结构及其几何尺度有关.

探头结构的散热条件对探头工作温度影响极大,如探头封装厚度等条件.即使几何尺寸、散热面积和探头体积等参数均差不多的两个热膜探头,在同样的加热电流条件下,试验发现其热性能也可有很大的差异,甚至可以是成倍的差异<sup>[12]</sup>.所以,散热条件越好,可以选用相对大一点的探头电阻.

散热面积越小,探头工作温度就越高.例如裸露的热线,由于它完全暴露在气流中,散热条件应该很好;但热线探头与热膜探头试验比较发现,由于热线直径非常小,散热面积比热膜陶瓷基片要小得多,而热丝的体积与热膜陶瓷基片比更加微小,所以热丝的热容量很小.热容量小和散热面积小都将导致热线探头的工作温度提高.同样的工作条件下,热丝的温度要远高于热膜温度.所以,对于热线,应该选用较小的探头电阻.

另外,探头电阻设计与工作电流有密切关系,如果希望有较小的工作电流,就应选用较大的探头电阻.目前常用的热式探头电阻有 $10\ \Omega$ 及以下的热线探头,以及 $20\ \Omega$ 、 $45\ \Omega$ 的热膜探头等.

### 4.2 供电电源

要使热式流量计正常工作,就必须使探头温度达到一定水平,也就是要给热式探头提供一定的能量.从式(5)可知,提供的能量为 $W = I_H^2 R_H$ .对于一定几何尺度和结构的热式探头,如果其散热条件等因素也相似,则欲保持一定探头温度水平的能量也应相近.所以,如果提高探头电阻,则加热电流可以减小,但减小的幅度并不一样,探头两端电压将有所增加.对于一定的供电电源电压,探头电阻的增加将有一限值,并不能一味地用提高电阻的方法来降低电流.

对于低压供电电源,原则上应降低探头电阻,以增加加热电流的方法来维持探头能量.但探头电阻一般无法随意改变,只有有限的几种可供选择.所以,当供电电压较小时,应尽量减小图1中的取样电阻 $R_1$ 的阻值,以避免出现大流量信号的饱和现象.

### 4.3 流量计结构设计

无论是热式流量计或热式风速仪,热式探头在气流通道上的安装位置与结构,补偿探头的安装位置与结构,对流量测量都有明显影响.主要有:加热探头位置是否固定,探头与周围固定架之间的距离对散热是否有影响,能否有效地感受流体的真实流速,补偿探头能否有效地感受流体温度,其自热效应有多大影响,对气流的流动是否有阻碍等问题,都是流量计结构设计时应充分考虑的问题.试验表明,这些因素对流量计的测量精度和稳定性有明显影响.

## 5 存在问题

通过几年来大量的试验研究表明,热式气体流量计的输出特性正如图2,尤其在小流量时有很高的灵敏度,流量测量范围度可达 $50\sim 100\ \text{g/s}$ 甚至更大.对于气体流量测量领域有特殊的应用场合,但也存在不少尚未解决的问题.

低功耗问题,由于热式探头需一定的加热电流,很难做到电池供电的低功耗运行.

(下转第224页)

## 5 结 语

本文结合 ADC 的静态测试和动态测试原理,搭建了基于仪器和 PC 机的 ADC 自动测试系统,重点讨论利用 Matlab 库函数进行快速傅立叶变换测试的方法.该自动测试系统具有测试速度快,硬件开销较小等特点,已应用于高速模数转换器 SCM530101 的测试,获得了良好的测试结果.

### 【参 考 文 献】

- [1] AZAIS F, BERNARD S, BERTRAND Y, et al. A low-cost BIST architecture for linear histogram testing of ADC [J]. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2001,17(2):139-147.
- [2] 李 坤,冯建华,李素君,等.一种 A/D 转换器静态参数的低成本测试方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006,27(12):1563-1568.

- [3] 朱彦卿,何怡刚,阳 辉,等.一种高速 ADC 静态参数的内建自测试结构[J]. *湖南大学学报*, 2007,34(10):62-65.
- [4] 蒋和伦.高速模/数转换器常规参数的动态测试[J]. *微电子学*, 2003,33(3):184-189.
- [5] 方穗明,王占仓.码密度法测量模数转换器的静态参数[J]. *北京工业大学学报*, 2006,23(11):977-981.
- [6] 王 蓓,张建秋,王 勇.低成本精确测量 A/D 动态参数的方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006,27(6):70-71.
- [7] 裘国华,申屠南瑛,夏哲雷,等.基于小波包的胃电信号消噪处理的研究[J]. *中国计量学院学报*, 2004,15(4):310-313.
- [8] 孙流星,于瀛洁.基于波长移相的改进加权多步算法[J]. *中国计量学院学报*, 2004,15(4):294-298.
- [9] 翁剑枫,杨 赢.基于 MA TLAB 语言设计的电生理信号分析系统[J]. *中国计量学院学报*, 2000,20(1):61-66.
- [10] BENOIT P, EDGAR S S. On-chip ramp generators for mixed-signal BIST and ADC self-test[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2003,38(2):263-273.
- [11] 吴光林,胡 晨,李 锐.一种有效的 ADC 内建自测试方案[J]. *电子器件*, 2003,26(2):190-193.

(上接第 205 页)

湿度的影响和修正问题,由于湿度环境的调节与检测都有困难,所以热式流量计湿度影响的实验数据与修正方法目前尚无有效方法.

粉尘影响问题,热式探头如果长期工作在含粉尘的气流环境中,探头表面将被污染,其散热性能也将改变,从而改变流量计的输出特性.但具体影响量目前尚无法用数据描述.

### 【参 考 文 献】

- [1] 川田裕郎.流量测量手册[M].北京:计量出版社,1982:231-239.
- [2] LAUB J H. Boundary-layer mass flowmeter[J]. *Inst & Control Systems*, 1957,34(4):642.
- [3] BENSON J M, BAKER W C, EASTER E. Thermal mass flowmeter[J]. *Instrumentation & Control Systems*, 1970,47(1):43.
- [4] BRUNN H H. Hot-wire Anemometry: Principle and Signal Analysis[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1995:19-38.
- [5] 杨辉华,简 捷.热式质量流量计特性曲线及其拟合方法的研究[J]. *化工自动化及仪表*, 1996,23(6):37-41.

- [6] 简 捷,黄南民,向廷元,等.工业热式气体质量流量计用于管道煤气流量计量的研究[J]. *计量与测试技术*, 1997(6):16-19.
- [7] BLUWSTRA S. Thermally excited resonating membrane mass flow sensor[J]. *Sensors and Actuators*, 1989,20:213-223.
- [8] LEGTENBERG R. Resonating micro bridge mass flow sensor with low-temperature glass-bonded cap wafer[J]. *Sensor and Actuators*, 1991,27:723-727.
- [9] 吴克刚.温差式热膜空气质量流量传感器[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2002,22(5):86-88.
- [10] 李长武,梁国伟.汽车用热线式空气质量流量传感器[J]. *传感器技术*, 2004,23(8):38-40.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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,2002:350-366.
- [14] 盛森芝,沈 熊,舒 玮.流速测量技术[M].北京:北京大学出版社,1987:99-105.