

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312043

# 基于 MEMS 的量热式传感器气体流量测量的模型研究\*

孙宏军,徐浩文,丁红兵,刘雨航

(天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072)

**摘要:**气体流量测量广泛应用于呼吸监测、管道运输等领域。本研究细致分析了 MEMS 量热式传感器温度一维分布模型中的热边界层参数,进行了相应的经验修正。并且在温度一维分布模型的基础上,针对具有两对上下游测温电阻芯片结构的 MEMS 量热式传感器,提出了一种新的传感器输出电压关于气体流量的半修正理论模型。该理论模型能够适用于不同类型的单介质气体。同时,开展了 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 流量测量实验,与理论模型进行对比,证明所提出的理论模型可以正确预测不同气体介质的流量,其中针对 CO<sub>2</sub> 测量介质的均方根误差为 0.15%。此外,结合理论分析,提出了一种高精度,拟合形式简单、针对确定气体适用性更好的测量模型,其中针对 CO<sub>2</sub> 测量介质的均方根误差为 0.05%。

**关键词:** MEMS;量热式流量传感器;温度 1D 分布模型;热边界层;气体流量测量

**中图分类号:** TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Modelling of gas flow measurement based on MEMS calorimetric sensors

Sun Hongjun, Xu Haowen, Ding Hongbing, Liu Yuhang

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Gas flow measurement is widely used in respiratory monitoring, pipeline transport, and other fields. In this study, the thermal boundary layer parameters in the one-dimensional temperature distribution model of MEMS calorimetric sensors are carefully analyzed, and the corresponding empirical corrections are made. On the basis of the one-dimensional temperature distribution model, a new semi-corrected theoretical model of the sensor voltage output with respect to the gas flow rate is proposed for MEMS calorimetric sensors with two pairs of upstream and downstream temperature measuring resistor chip structures. The theoretical model can be applied to different types of single-medium gases. Meanwhile, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> flow measurement experiments are implemented to compare with the theoretical model, which shows that the proposed theoretical model can accurately predict the flow of different gases, and the RMSE is 0.15% for the CO<sub>2</sub> measurement medium. In addition, combined with the theoretical analysis, a high-precision measurement model with a simple fitting form and a better applicability to deterministic gases is proposed, and the RMSE is 0.05% for the CO<sub>2</sub> measurement medium.

**Keywords:** MEMS; calorimetric flow sensor; temperature 1D distribution model; thermal boundary layer; gas flow measurement

## 0 引 言

随着微机电系统 (microelectromechanical systems, MEMS)、精密化学分析和医疗监测行业的发展,对气体流量精确测量的需求与日俱增<sup>[1-3]</sup>。MEMS 流量传感器主要包括 MEMS 热式传感器、MEMS 压阻传感器和 MEMS 压电传感器,其中 MEMS 热式传感器得益于其无运动部件、压降小、流量范围宽、响应时间短、精度高等优

点<sup>[4]</sup>,被广泛应用于多个领域,如自动水下航行器的导航和目标检测<sup>[5-6]</sup>、生物医学手术中的呼吸监测<sup>[7-8]</sup>、药物输送<sup>[9-10]</sup>、液体分配系统<sup>[11-12]</sup>、燃料气体计量<sup>[13]</sup>和气体监测系统<sup>[14-15]</sup>。

热式传感器有 3 种类型:热线式、量热式和热脉冲式,它们利用流体与热源之间的传热关系实现流量的测量<sup>[16]</sup>。量热式流量计的测量的原理为,当没有气体流动时,热源两侧的温度是对称分布的,当气体以一定速率通过时,气体会把热源上游的热量带到下游,温度场会向下

收稿日期:2023-10-20 Received Date: 2023-10-20

\* 基金项目:国家自然科学基金(62373270,52276159)项目资助

游移动,此时上下游的温度差能够反映气体流量的变化。1974年,Af等<sup>[17]</sup>首次提出利用MEMS技术制造硅基片流量传感器,将MEMS技术与热式流量计进行结合。21世纪以来,围绕MEMS热传感器的相关研究也在不断深入,多集中在芯片材料结构的优化,其中包括采用数值仿真的方法对芯片结构进行改进优化<sup>[18-19]</sup>,包括传感器的封装设计,如电路、测量管线和芯片结构等硬件设计<sup>[20-21]</sup>。然而,针对成品芯片在流量测量方向的模型研究有待进一步深入。在过去的几十年中,相关研究学者提出了多种温度一维(one-dimensional, 1D)分布模型。1930年,Blackett等<sup>[22]</sup>首次在研究混合气体比热测量时就提出了理想的管道传热一维(1D)模型。随着模型研究的不断深入,不同研究学者提出了相应的优化方法,文献[23]增加了热传导和热辐射所导致的热损失实验修正项,文献[24]提出将 $z$ 轴温度分布线性化,文献[25]提出引入平均热边界层,文献[26]提出在最后传感器输出方程内引入了全局修正系数。上述1D模型的推导主要针对的都是成对测温电阻的电桥结构,而文献[2]指出两对测温电阻的芯片结构能够使得电桥输出范围增大,具备更宽的测试范围和更高的灵敏度。然而,针对两对测温电阻的芯片结构还尚未有明确的理论模型和优化方法。

另外,如何利用理论分析模型,求得热式质量流量计特性曲线的显函数形式,也成了研究的关键之一。现有的拟合形式主要是以实验结果为导向,通过实验曲线的趋势进行拟合形式的确定,未能结合理论分析说明这样确定的具体原因。然而,文献[27-30]对于不同的测量介质,仅通过实验数据确定的拟合形式的相关系数的波动范围会比较大,其显函数形式需要在一定的流量范围内才能够得到,且文献[31]提出不同组分的气体对传感器输出也会有一定的影响。

因此,本研究通过在热边界层方程中引入适当的修正系数,并基于两对测温传感器的结构,提出了一种新的传感器输出电压关于气体流量的半修正理论模型。该理论模型充分考虑了不同气体的不同热特性对气体流量的影响,通过具体实验证明了其在量程范围内针对不同气体具有广泛的适用性。此外,进一步结合理论分析,在量程范围内,提出了一种形式简单、针对确定气体精度更高的测量模型。

## 1 理论模型的构建

通道型量热式传感器的一维结构如图1所示,它由一个中心热源、两对上下游温度传感器和1个环境温度传感器组成,其布局从宏观上可分为3个区域,Ⅰ为流体流动区,Ⅱ为薄膜区,Ⅲ为空腔流体流动区。其中 $t$ 、 $h_c$ 、

$h$ 、 $L$ 、 $s$ 、 $W$ 、 $D_1$ 和 $D_2$ 分别表示芯片薄膜厚度、管道高度、芯片空腔高度、芯片空腔半长度、传感器半长度、热源半宽度、热源距第1对上下游传感器的距离和热源距第2对上下游传感器的距离,单位均为m。

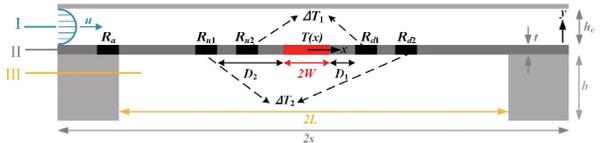


图1 传感器内部的一维通道结构

Fig. 1 One-dimensional channel structure inside the sensor

相应的传热推导过程现有研究已充分说明<sup>[23-26]</sup>,最终能够得到式(1)的传热平衡方程,其中 $Q$ 表示传递的热量,单位为W;上标 $cond$ 表示热传导, $conv$ 表示强制对流换热;下标 $f$ 表示管道内的流体, $s$ 表示薄膜, $f_1$ 表示空腔流体;下标 $in$ 表示热量流入微元体, $out$ 表示热量流出微元体;下标 $u$ 表示上游, $d$ 表示下游。

$$Q_{f,x,in}^{cond} + Q_{f,x,in}^{conv} + Q_{s,x,in}^{cond} + Q_{f_1,x,in}^{cond} = Q_{f,x,out}^{cond} + Q_{f,x,out}^{conv} + Q_{s,x,out}^{cond} + Q_{f_1,x,out}^{cond} + Q_{f,y,out}^{cond} \quad (1)$$

并解得关于芯片表面温度场的一维分布 $T(x)$ 的二阶系数齐次微分方程式(2)。

$$\left( \frac{1}{2} \lambda_f \delta_{t,x} + \lambda_s t + \frac{1}{2} \lambda_{f_1} \delta_{t,x} \right) \frac{d^2 T(x)}{dx^2} - C_p \rho u \left( \frac{\delta_{t,x}^2}{h_c} - \frac{\delta_{t,x}^3}{2h_c^2} \right) \frac{dT(x)}{dx} - \left( \frac{\lambda_f}{\delta_{t,x}} + \frac{\lambda_{f_1}}{h} \right) T(x) = 0 \quad (2)$$

其中, $\lambda$ 、 $\delta_{t,x}$ 、 $C_p$ 、 $\rho$ 和 $u$ 分别表示为导热系数(单位为 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )、热边界层厚度(单位为m)、定压比热容(单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )、流体密度(单位为 $kg \cdot m^{-3}$ )和流体平均流速(单位为 $m \cdot s^{-1}$ )。

$$\text{设微分方程各系数为: } A = \frac{1}{2} \lambda_f \delta_{t,x} + \lambda_s t + \frac{1}{2} \lambda_{f_1} \delta_{t,x}, \\ B = -C_p \rho u \left( \frac{\delta_{t,x}^2}{h_c} - \frac{\delta_{t,x}^3}{2h_c^2} \right), C = - \left( \frac{\lambda_f}{\delta_{t,x}} + \frac{\lambda_{f_1}}{h} \right)。$$

在求解该微分方程之前,需要先对方程中的热边界层 $\delta_{t,x}$ 进行分析,现有对热边界层的分析<sup>[16, 25-26]</sup>可以解出关于热边界层 $\delta_{t,x}$ 的方程(3):

$$\frac{1}{15h_c^2} \delta_{t,x}^3 + \frac{1}{32h_c^3} \delta_{t,x}^4 = \frac{\lambda_f}{4C_p \rho u h_c} x \quad (3)$$

但该方程难以直接进行求解得到热边界层 $\delta_{t,x}$ 关于 $x$ 的显函数表达式,现有研究采取忽略 $\delta_{t,x}$ 的高阶项的方法得到解析解<sup>[26]</sup>,忽略的 $\delta_{t,x}$ 的四阶项,可以解出热边界层的表达式(4):

$$\delta_{t,x} = \left( \frac{15\lambda_f h_c}{4C_p \rho u} x \right)^{1/3} \quad (4)$$

实际过程中, $\delta_{t,x}$ 是随 $x$ 变化而变化的,但以式(4)的

形式代入微分方程(2)中无法求解得到(2)的解析解。因此,需要对 $\delta_{t,x}$ 在整个测试区间内取平均值,可以得到平均热边界层 $\delta_{ia}$ 的表达式(5):

$$\delta_{ia} = \frac{\int_0^{2L} \delta_{t,x} dx}{2L} = 1.17h_c \left( \frac{2L}{h_c Re_c Pr} \right)^{1/3} \quad (5)$$

其中,管道雷诺数 $Re_c = uh_c/\mu$ ,普朗特数 $Pr = C_p \rho \mu / \lambda_f$ 。其中, $\mu$ 为流体的运动粘度(单位为 $m^2 \cdot s^{-1}$ )。

然而,在上述已有研究中,两处化简会影响传感器的实际输出。其一,是式(4)忽略了 $\delta_{t,x}$ 的四阶项,本研究在进行 $N_2$ 和 $CO_2$ 的流量测量实验发现,式(4)的幂次在实际中并不一定恒等于 $1/3$ ,对于不同气体,该幂次应当在一定的微小范围内变化,处在某个值时对于不同气体能够有较好的适应性,该忽略会对传感器低流量段输出的计算结果产生一定的误差,具体会在后续实验结果分析中作详细说明。因此,本研究在解得的原方程的幂次上引入了一个修正因子 $\varepsilon_1$ ,以弥补该简化过程对模型精度带来的影响;其二,是式(5)为简化计算把热边界层的厚度近似认为其在整个芯片长度段内是恒定的,而在实际中,热边界层沿流动方向不是恒定的,而是沿着流动方向逐渐增大的,这将导致上游热边界层厚度被过度高估,下游热边界层厚度被过度低估,使得传感器输出增大。经过实验发现,热边界层在入口处(即上游处)有着很大的增长速度,而在下游处趋于平缓,这表明传感器的输出受上游测温电阻温度的影响远大于下游测温电阻,具体会在后续测量模型分析中作详细说明。因此,本研究引入一个修正系数 $\varepsilon_2$ ,在确定的上下游测温电阻位置上,通过尽可能满足上游热边界层厚度的准确性,以尽可能抵消该简化过程对传感器输出的影响。引入修正系数 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 后的热边界层半修正表达式如式(6)所示。

$$\delta_{im} = 1.17\varepsilon_1 h_c \left( \frac{2W}{h_c Re_c Pr} \right)^{\varepsilon_2/3} \quad (6)$$

将修正后得到的热边界层表达式(6)代入微分方程(2)中,本研究采用的是恒温差控制,因此,热源温度恒定不变等于 $T_h$ ,单位为K。代入边界条件 $T(W) = T_h$ , $T(L) = 0$ ; $T(-W) = T_h$ , $T(-L) = 0$ 。最终能够得到温度的一维分布解析式(7)。

$$T(x) = \begin{cases} \frac{T_h(e^{r_2^x} - e^{-r_2^{L+r_1(x+L)}})}{e^{-r_2^W} - e^{-r_2^{L-r_1(W-L)}}}, & -L \leq x \leq -W \\ T_h, & -W \leq x \leq W \\ \frac{T_h(e^{r_2^x} - e^{r_2^{L+r_1(x-L)}})}{e^{r_2^W} - e^{r_2^{L+r_1(W-L)}}}, & W \leq x \leq L \end{cases} \quad (7)$$

其中, $r_1$ 和 $r_2$ 是微分方程(2)的特征方程的两个根,

$$r_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, r_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}。进一步$$

地,可以得到两对上下游温差输出关于体积流量 $q_v = h_c^2 u$ (正方形通道)的表达式(8):

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T(W + D_1) - T(-W - D_1) = f_1(q_v) \\ \Delta T_2 = T(W + D_2) - T(-W - D_2) = f_2(q_v) \end{cases} \quad (8)$$

## 2 实验平台搭建

### 2.1 传感器设计

在测量过程中,热式质量流量传感器需要在测试部分保持流体的层流状态<sup>[28]</sup>,而芯片则需要布置在通道相对平坦的部分。考虑到上述原因,流道结构设计如图2所示。将圆管通过过渡管转换为方管,芯片通过方管底部水平方向的金丝键合与外围电路连接,金丝键合线通过添加保护壳进行保护。最外层设计为密封壳,通过胶合密封。

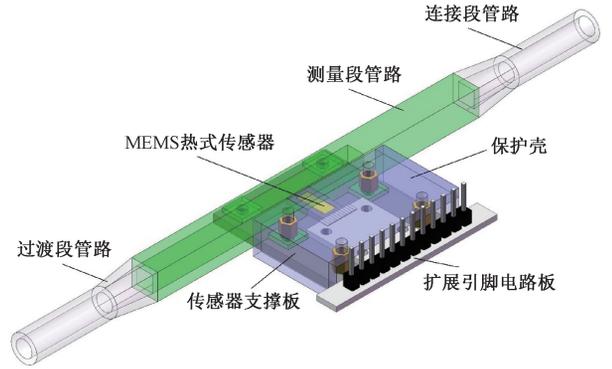


图2 通道型量热式传感器的结构

Fig. 2 Structure of the channel calorimetric sensor

在本研究中,基于MEMS的热量计传感器采用恒定温差工作模式,控制热源温度 $T_h$ 和环境温度 $T_a$ 之间保持恒定值。恒定温差控制电路如图3(a)所示。控制策略是,当电桥处于平衡状态时,放大器输出端的电压为0,此时不会对热源进行额外加热。如果流体流经热源,热源温度降低,则运算放大器同相输入端电压高于反相输入端电压,热源的加热电流增大,直至温差再次达到设定值。

在测量过程中,温度通过两对上下游测温电阻来反映,两对测温电阻 $R_{u1}$ 、 $R_{u2}$ 、 $R_{d1}$ 和 $R_{d2}$ 被设计成图3(b)所示的差分式电桥形式,可以得到输出电压的表达式如式(9)所示。其中, $U$ 、 $I$ 和 $R$ 单位分别为V、A和 $\Omega$ 。

$$\Delta U = U_a - U_b = I_2 R_{d2} - I_1 R_{u1} \quad (9)$$

假设4个测温电阻具有相同的初始电阻值 $R_0$ 和相同的温度系数 $\alpha$ ,则可以得到电阻值随温度变化的表达式(10),其中 $T_0$ 为环境初始温度。

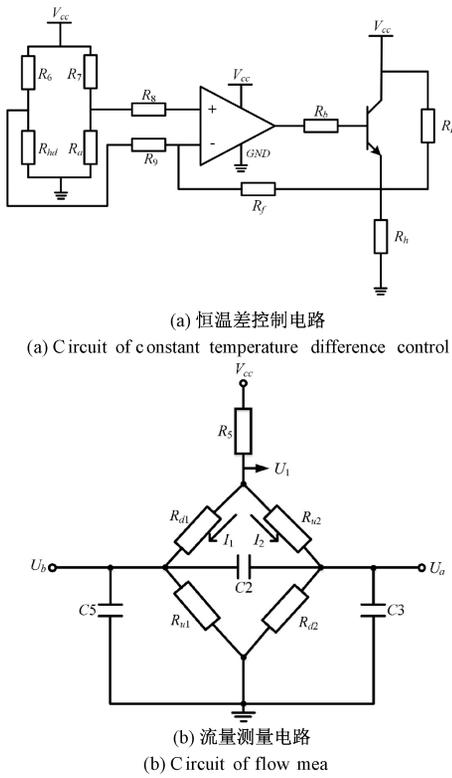


图3 量热式传感器恒温差控制电路和流量测量电路  
Fig. 3 Constant temperature difference control circuit and flow measurement circuit for the calorimetric sensor

$$R_{u1} = R_{u2} = R_{d1} = R_{d2} = R_0(1 + \alpha T_0) \quad (10)$$

流速为0的静态温度分布下,两对测温电阻  $R_{u1}$  和  $R_{u2}$ ,  $R_{d2}$  和  $R_{d1}$  对称分布,两侧的初始温度相同,分别记为  $T_{10}$  和  $T_{20}$ ;当流体流经芯片表面时,温度分布不再对称,此时  $R_{u1}$ 、 $R_{u2}$ 、 $R_{d1}$  和  $R_{d2}$  的温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$ 。

由于电桥在初始状态下处于平衡状态,因此电桥的输出为0V。同时,在实际实验中,电流的变化仅为  $\mu A$  级别,相对于温差而言可以忽略不计,因此  $I_1$  和  $I_2$  可以近似为常数,从而得到静态电压输出的表达式(11)。

$$\Delta U = a\alpha T_{10} - b\alpha T_{20} + c = 0 \quad (11)$$

其中,  $a = I_2 R_0$ ,  $b = I_1 R_0$ ,  $c = a - b$ ,均为常数。当流体流过芯片表面时,可以得到动态下的电压输出表达式(12):

$$\Delta U = a\alpha T_4 - b\alpha T_1 + c \quad (12)$$

从式(12)中减去式(11),即可得到输出电压与一对温度测量电阻  $R_{u1}$  和  $R_{d2}$  的温度变化关系的表达式(13)。

$$\Delta U = a\alpha(T_4 - T_{10}) - b\alpha(T_1 - T_{20}) \quad (13)$$

同理,可以得到输出电压与另一对温度测量电阻  $R_{u2}$  和  $R_{d1}$  的温度变化关系的表达式。最后,可以得到输出电压关于两对测温电阻温差的解析方程(14)。

$$\Delta U = \frac{1}{2}a\alpha\Delta T_1 + \frac{1}{2}b\alpha\Delta T_2 + \eta = g(q_v) \quad (14)$$

其中,  $\Delta T_1 = T_4 - T_1$ ,  $\Delta T_2 = T_3 - T_2$ 。 $\eta$  为零点修正系数,用于修正4个测温电阻在实际电路中的初始阻值与温度系数存在的微小差异。式(14)为最终确定的传感器输出电压关于气体流量的半修正理论模型。

### 2.2 传感器性能测试

本研究在进行流量测量实验之前,对MEMS量热式传感器内部的两对上下游测温电阻 ( $R_{u1}$ 、 $R_{u2}$ 、 $R_{d1}$ 、 $R_{d2}$ ), 热源电阻  $R_{hd}$  以及环境测温电阻  $R_e$  进行了相关的标定实验。在恒温箱内,温度从  $25^\circ C \sim 50^\circ C$  变化,间隔温度为  $5^\circ C$ ,采用  $100 \mu A$  瞬时激励,测量出电阻两端电压,每个温度测量点进行了多次重复测量,最终确定了传感器内部每个电阻的导热系数和初始阻值,从而确定出理论模型(14)的相关系数,标定结果如图4所示。

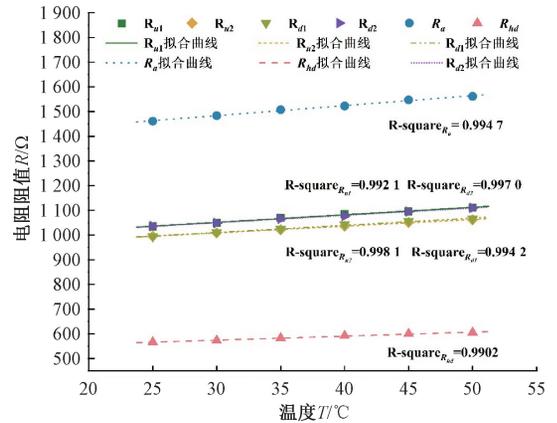


图4 传感器内部电阻标定曲线  
Fig. 4 Sensor internal resistance calibration curves

同时,本研究在进行流量测量实验前,对MEMS量热式传感器进行了重复性测试,本次测试根据流量范围,选取了5个测量点(包含了  $q_{min}$ ,  $0.2q_{max}$ ,  $0.5q_{max}$ ,  $q_{max}$ ): 1、5、8、11、15 L/min,分别进行5次重复测量,测量结果如图5所示。

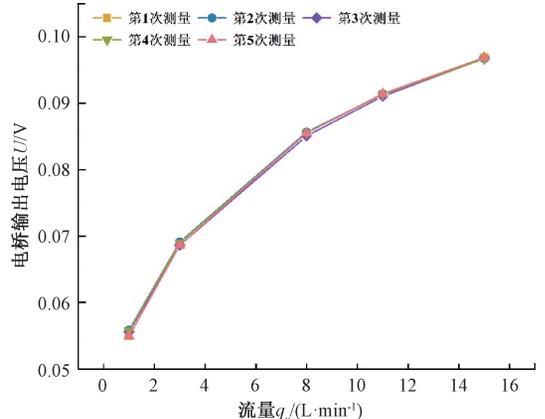


图5 重复性测试结果  
Fig. 5 Repeatabile test results

观察测试结果可以发现, 5 条曲线几乎重合在一起, 利用 A 类不确定式 (15) 计算了每组测量数据的不确定度  $u_a$ , 均小于 0.01%, 这表明每组实验数据的偏差集中在有效数字的第 3~4 位, 因此流量计的重复性较好。

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)n}} \quad (15)$$

### 2.3 实验装置设计

本研究实验在如图 6 所示的流量气体实验装置上开展。该装置主要包括气源、质量流量控制器、压力传感器、测试段、温度传感器、容积式体积流量计等实验设备。流量控制核心为两路质量流量控制器, 该控制器可选择质量流量和体积流量两种控制方式, 控制器误差为  $\pm 0.6\%$  读数或  $\pm 0.1\%$  F.S 二者较大值, 流量控制范围分别为 0~20 L/min 和 0~10 L/min。两支路配合调节使用, 使得该装置具备纯气 0~30 L/min 的高精度流量控制与测试能力。实验是在图 6 所示的实验平台上进行的, 先后依次进行流量范围为 0~15 L/min 的  $N_2$  和  $CO_2$  单一气体介质流量测量实验, 流量测量间隔为 1 L/min。

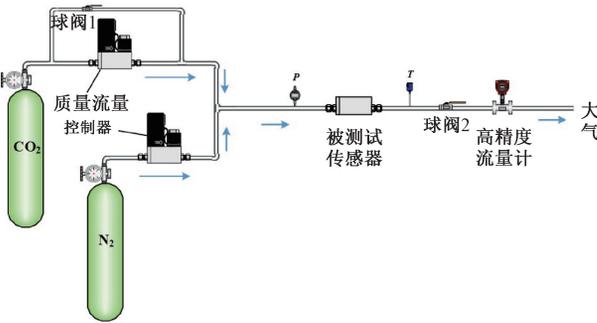


图 6 流量气体实验检测装置

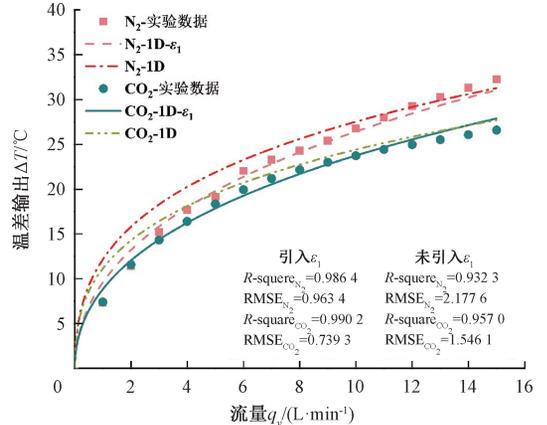
Fig. 6 Experimental detection device for small flow gases

## 3 模型对比分析

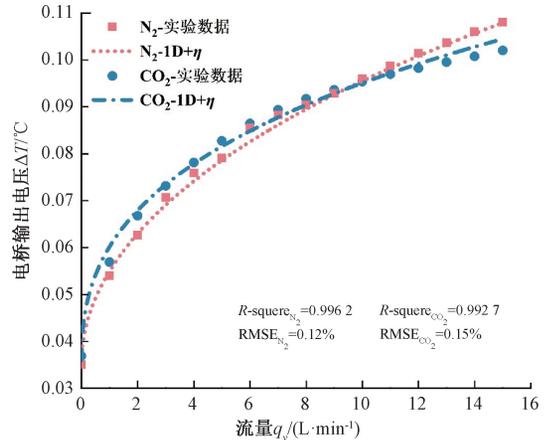
### 3.1 实验结果与理论模型

对单一气体介质下的流量测量实验结果进行分析, 得到传感器的温差和流量之间的关系, 如图 7 (a) 所示。根据实验数据, 确定上述式 (8) 温差理论模型的修正因子  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ , 进而得到温差输出与气体体积流量的半经验表达式。同时, 根据温差与流量的关系, 最终能够确定由式 (14) 导出的电压输出半修正理论模型, 如图 7 (b) 所示。将理论模型与实验数据进行比较, 可以发现在 0~15 L/min 的流量范围内, 针对不同气体介质, 传感器电压输出与体积流量的增长速度存在明显的差异。并且  $N_2$ 、 $CO_2$  的决定系数 (R-square) 分别为 0.996 2 和

0.992 7, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 0.12% 和 0.15%, 理论特性曲线与实验数据能够较好地吻合, 验证了本研究提出的流量测量理论模型的正确性。上述理论模型可广泛应用于不同种类的气体, 不局限于  $N_2$  和  $CO_2$  气体介质。



(a) 理论温差输出特性曲线(引入  $\varepsilon_1$  前后)与实验结果的对比  
(a) Comparison of theoretical temperature difference output characteristic curves (before and after introduction of  $\varepsilon_1$ ) with experimental results



(b) 理论电压输出特性曲线与实验结果的对比  
(b) Comparison of theoretical voltage output characteristic curves with experimental results

图 7 理论温差和电压输出特性曲线与实验结果的对比

Fig. 7 Comparison of theoretical temperature difference and voltage characteristic curves with experimental results

另外, 为了验证上述修正幂次  $\varepsilon_1$  对不同气体带来的具体影响 ( $\varepsilon_2$  保持不变), 将未引入  $\varepsilon_1$  的温差输出结果, 与引入了  $\varepsilon_1$  的温差输出结果进行对比, 如图 7 (a) 所示。根据比较引入修正因子  $\varepsilon_1$  前后,  $N_2$ 、 $CO_2$  的 R-square 和 RMSE 可以发现, 引入  $\varepsilon_1$  后的模型的 R-square 更趋近于 1, RMSE 更趋近于 0, 预测效果明显优于未引入  $\varepsilon_1$  的模型。同时, 未引入修正因子  $\varepsilon_1$  的  $N_2$  与  $CO_2$  温差输出曲线在低流量测试段难以吻合, 而引入了修正因子  $\varepsilon_1$  的温差输出曲线在低流量测试段的吻合程度有了很大地改进,

这证明了上述在热边界层处引入幂次修正因子  $\varepsilon_1$  的正确性。

### 3.2 实验结果与测量模型

然而,即便经过修正后的理论模型具备对不同气体的适用性,但是由于其理论模型解析式十分的复杂,本研究希望通过进一步简化理论分析,从而来确定传感器实验输出曲线拟合的具体形式。

将式(7)的边界条件改为  $T(W) = T_h, T(+\infty) = 0$ ;  $T(-W) = T_h, T(-\infty) = 0$ , 并将热边界层视为与流速无关的恒定值(管道高度  $h_c$ )<sup>[23-25]</sup>, 这样能够进一步简化温度一维分布的解析式, 同时也不影响传感器最后输出的趋势, 得到的新的边界条件下温度的一维分布解析式(16)。

$$T(x) = \begin{cases} T_h e^{r_1(x+W)}, & -L \leq x \leq -W \\ T_h, & -W \leq x \leq W \\ T_h e^{r_2(x-W)}, & W \leq x \leq L \end{cases} \quad (16)$$

新的传感器温差输出形式仍然满足式(8), 为了分析式上游和下游温度信号对传感器输出的影响程度, 观察上下游传感器的温度与流量的关系曲线, 如图8所示。

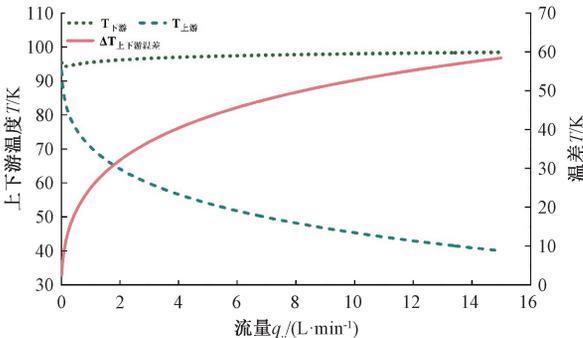


图8 上下游传感器的温度、温差与流量的关系

Fig. 8 Temperature of upstream and downstream sensors, temperature difference versus flow rate

可以发现,下游段的温度输出曲线在中高流量段上几乎是一个恒定值,温差曲线的变化趋势几乎就是上游温度输出曲线的翻转。因此,可以认为影响传感器的输出集中在上游段,这证明了在上述热边界层处引入修正因子  $\varepsilon_2$  所分析的传感器输出主要受上游测温电阻的温度影响是一致的。进一步分析式(17)中上游段温度解析式可以发现,由于热源温度  $T_h$  以及上游传感器的位置  $W+D$  是固定的,则影响温度变化的参数只有  $r_1$ , 而  $r_2$  与微分方程的各项系数相关。分析  $r_1$  中微分方程(2)的系数,其中除了流量是主要的影响参数,其余的都可以在后续确定为与流量无关的拟合系数,因此可以将微分方程的系数化简为式(17):

$$\begin{cases} A = \frac{1}{2}\lambda_f\delta_{t,x} + \lambda_{s,t} + \frac{1}{2}\lambda_{f1}\delta_{t,x} = A_c \\ B = -C_p\rho u\left(\frac{\delta_{t,x}^2}{h_c} - \frac{\delta_{t,x}^3}{2h_c^2}\right) = B_c \\ C = -\left(\frac{\lambda_f}{\delta_{t,x}} + \frac{\lambda_{f1}}{h}\right)T(x) = C_c \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $A_c$ 、 $B_c$ 、 $C_c$  均为与流量无关的系数。将化简后的式(16)代入微分方程(2)的各项系数中,最终可以得到传感器上游温度关于流量的简化表达式(18):

$$T(q_v) = T_h e^{r_1(W+D)} = a'' e^{b''} q_v \quad (18)$$

其中,  $a'' > 0$ 、 $b'' < 0$ , 均与流量无关。因此,可以得出传感器的理论输出模型曲线本质上是两个单调指数函数的相减。经实验发现,如果上下游均采用形式为式(18)的测量模型,并相减进行拟合输出,这样能够很好地满足精度的要求,但是由于存在两个指数函数的运算,无法求得该测量模型下的反函数的显函数形式,函数的简洁性没办法满足。若传感器输出仅采用一个指数函数的测量模型,这样会在低流量测量段上产生较大的测量误差。

因此,为了保证测量模型的简洁性,并使低流量测量段也能满足精度要求,经过上述的理论分析并观察实验特性曲线的趋势,本研究发现传感器的输出曲线(本质为两个指数函数的相减),可以等效为式(16)的反函数,即对数形式的测量模型,如式(19)所示,其中  $a$ 、 $b$  和  $c$  均为拟合系数。

$$U = a \times \ln(b \times q_v + c) \quad (19)$$

测量模型的拟合效果如图9所示。可以发现,测量模型能够很好地吻合各实验数据点,  $N_2$ 、 $CO_2$  的 R-square 分别为 0.997 9 和 0.999 2, RMSE 分别为 0.09% 和 0.05%, 拟合效果表明测量模型能在理论分析所得的指数函数形式基础上提高低流量测量段的测量精度。同

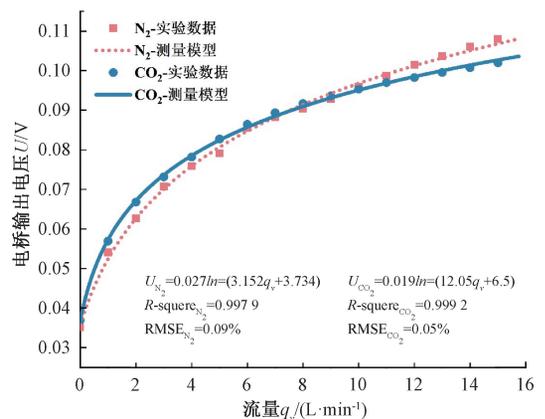


图9 流量测量模型与实验结果的对比

Fig. 9 Comparison between flow measurement model and experimental results

时,相对于理论模型,其形式简单,无需外加条件,通过简单推导即可得到式(19)的反函数形式,从而实现确定气体的精确测量。

### 3.3 理论模型与测量模型

最后,为了更直观地看出理论模型和测量模型的效果,本研究通过实验测量点相对于理论模型和测量模型的误差分布来说明,如图10所示。可以发现,本研究提出的流量理论模型对不同气体介质具有广泛的适用性,与实验数据的相对误差(模型输出减去实验数据/实验数据)基本在 $\pm 3\%$ 以内,其中针对 $N_2$ 测量介质的RMSE为0.12%,针对 $CO_2$ 测量介质的RMSE为0.15%。而气体流量测量模型对于确定的气体介质有着更高的精度,与实验数据的相对误差基本在 $\pm 1\%$ 以内,其中针对 $N_2$ 测量介质的RMSE为0.09%,针对 $CO_2$ 测量介质的RMSE为0.05%。上述结果进一步验证了本研究提出的理论模型的适用性,以及测量模型的准确性。

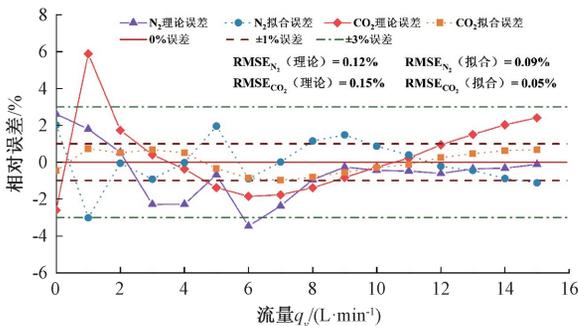


图10 理论误差与测量误差的分布

Fig. 10 Distribution of theoretical and measurement errors

## 4 结 论

本研究首先针对通道式热量计传感器的温度一维分布模型,细致分析了其中热边界层的推导过程,并进行了相应的经验修正。在修正后的温度一维分布模型的基础上,针对两对测温电阻的芯片结构,提出了一种新的传感器输出电压关于流量的半修正理论模型,该理论模型对于不同气体具备广泛的适用性。此外,进一步开展了单一气体介质流量测量实验,根据具体理论分析和实验现象,提出了一种形式简单,针对确定气体精度更高的测量模型。最后,将实验结果与模型进行对比,理论模型的相对误差在 $\pm 3\%$ 以内,其中针对 $N_2$ 测量介质的RMSE=0.12%,针对 $CO_2$ 测量介质的RMSE=0.15%;测量模型的相对误差在 $\pm 1\%$ 以内,其中针对 $N_2$ 测量介质的RMSE=0.09%,针对 $CO_2$ 测量介质的RMSE=0.05%。本研究提出理论模型可针对用于两对测温电阻结构下的

MEMS量热传感器气体流量的预测,广泛适用于不同的气体介质,为传感器的结构优化提供指导。而形式简单、精度高,针对确定气体适用性强的气体流量测量模型可以进一步推广应用,满足实际工程中的不同需求。

### 参考文献

- [1] KUO J T, YU L, MENG E. Micromachined thermal flow sensors—A review [J]. *Micromachines*, 2012, 3(3): 550-573.
- [2] EJEIAN F, AZADI S, RAZMJOU A, et al. Design and applications of MEMS flow sensors: A review [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 295:483-502.
- [3] WANG Y H, CHEN C P, CHANG C M, et al. MEMS-based gas flow sensors [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 6:333-346.
- [4] WOLTERINK G, UMRANI A, SCHOUTEN M, et al. 3D-printed calorimetric flow sensor [C]. *Proceedings of the 2020 IEEE Sensors*, IEEE, 2020.
- [5] ASADNIA M, KOTTAPALLI A G P, HAGHIGHI R, et al. MEMS sensors for assessing flow-related control of an underwater biomimetic robotic stingray [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(3): 036008.
- [6] KEPPEL J H, CLAUS B C, KINSEY J C. A navigation solution using a MEMS IMU, model-based dead-reckoning, and one-way-travel-time acoustic range measurements for autonomous underwater vehicles [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 44(3): 664-682.
- [7] LAGHROUCHE M, SADDAOUI R, MELLAL I, et al. Low-cost embedded spirometer based on commercial micro machined platinum thin film [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168:1681-1684.
- [8] HEDRICH F, KLICHE K, STORZ M, et al. Thermal flow sensors for MEMS spirometric devices [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 162(2): 373-378.
- [9] LEE D, KIM J, PARK Y, et al. Sensitive and reliable thermal micro-flow sensor for a drug infusion system [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 309:112033.
- [10] SILVESTRI S, SCHENA E. Micromachined flow sensors in biomedical applications [J]. *Micromachines*, 2012, 3(2): 225-243.
- [11] SAZHIN O. Liquid flow meter based on a thermal anemometer microsensor [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, 9:1991-1996.

- [12] TIAN B, LI H, YANG H, et al. A MEMS SOI-based piezoresistive fluid flow sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89 (2), DOI: org/10.1063/1.5022279.
- [13] JAWORSKI J, DUDEK A. Study of the effects of changes in gas composition as well as ambient and gas temperature on errors of indications of thermal gas meters[J]. *Energies*, 2020, 13(20): 5428.
- [14] KOTTAPALLI A, ASADNIA M, KANHERE E, et al. Smart skin of self-powered hair cell flow sensors for sensing hydrodynamic flow phenomena[C]. *Proceedings of the 2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, IEEE, 2015.
- [15] BALAKRISHNAN V, DINH T, PHAN H-P, et al. Highly sensitive 3C-SiC on glass based thermal flow sensor realized using MEMS technology[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279:293-305.
- [16] HOLMAN J P. *Heat transfer*[M]. McGraw Hill, 1986.
- [17] AF V, MIDDELHOEK S. Integrated silicon anemometer[J]. *Electronics Letters*, 1974, 10 (21): 425-426.
- [18] CHEN C, HU H, WANG J J. Numerical study of the thermal thermopile flow sensor[C]. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, IEEE, 2018.
- [19] ZHU Y Q, HEPP C J, URBAN G A. Modelling and simulation of a thermal flow sensor for determining the flow speed and thermal properties of binary gas mixtures[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 1028-1031.
- [20] OLIN J G. New developments in thermal dispersion mass flow meters [C]. *Proceedings of the American Gas Association Operations Conference Pittsburgh, PA May, 2014*.
- [21] XUE D, WANG J, LI X. A front-side microfabricated thermoresistive gas flow sensor for high-performance, low-cost and high-yield volume production [J]. *Micromachines*, 2020, 11(2): 205.
- [22] BLACKETT P, HENRY P, RIDEAL E. A flow method for comparing the specific heats of gases. Part I. The experimental method [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1930, 126(801): 319-332.
- [23] KOMIYA K, HIGUCHI F, OHTANI K. Characteristics of a thermal gas flowmeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, 59(3): 477-479.
- [24] LAMMERINK T S, TAS N R, ELWENSPOEK M, et al. Micro-liquid flow sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1993, 37:45-50.
- [25] NGUYEN N, DÖTZEL W. Asymmetrical locations of heaters and sensors relative to each other using heater arrays: A novel method for designing multi-range electrocaloric mass-flow sensors [J]. *Sensors and Actuators A: physical*, 1997, 62(1-3): 506-512.
- [26] XU W, SONG K, MA S, et al. Theoretical and experimental investigations of thermoresistive micro calorimetric flow sensors fabricated by CMOS MEMS technology [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, 25(5): 954-962.
- [27] 杨辉华, 简捷, 黄南民, 等. 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 (6): 37-41, 64.  
YANG H H, JIAN J, HUANG N M, et al. Study on characteristic curve and its fitting method of the TMF[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 1996(6): 37-41, 64.
- [28] 王利恒, 李昌禧. 热式气体流量计组分补偿方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(11): 2390-2394.  
WANG L H, LI CH X. Study on component compensation method for thermal gas mass flowmeter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(11): 2390-2394.
- [29] 黄颖. 小流量热式气体质量流量测量方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.  
HUANG Y. Research on small flow rate thermal gas mass flow measurement method [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [30] 林煌. 高精度微型量热式 MEMS 气体流量传感器研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.  
LIN H. Research on high-precision miniature calorimetric MEMS gas flow sensor [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [31] 刘家旭, 徐英, 张涛, 等. 气体组分变化对热式质量流量计测量精度的影响[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12): 32-38.

LIU J X, XU Y, ZHANG T, et al. Effect of gas composition change on the measurement accuracy of thermal mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 32-38.

## 作者简介



**孙宏军**, 于 2007 年获中国天津大学控制科学与工程博士学位, 2006 年起担任中国天津大学电气与信息工程学院副教授。目前的主要研究方向为过程参数检测与信息处理、传感技术与信息处理、嵌入式系统设计和流体参数检测与数值模拟。

E-mail: sunhongjun@tju.edu.cn

**Sun Hongjun** received her Ph. D. degree in control science and engineering from Tianjin University in 2007. She has been an associate professor in the School of Electrical and Information Engineering at Tianjin University since 2006. Her main research interests include process parameter detection and information processing, sensing technology and information processing, embedded system design, and fluid parameter detection and numerical simulation.



**徐浩文**, 于 2022 年获得中国福州大学自动化专业工学学士学位, 目前正在天津大学攻读控制工程硕士学位, 目前主要研究方向为 MEMS 热式传感器测量特性研究和多相流检测技术。

E-mail: xuhaowen2000@tju.edu.cn

**Xu Haowen** received the B. Sc. degree in automation from Fuzhou University in 2022. He is currently pursuing his M. Sc. degree in control engineering at Tianjin University. His main research interests include MEMS thermal sensor measurement characterization and multiphase flow detection technology.



**丁红兵** (通信作者), 分别于 2009 年、2011 年和 2014 年在中国天津大学获得学士、硕士和博士学位, 现任天津大学副教授。目前的主要研究方向多相流测量与数值模拟、超音速分离与计量技术和 AI 智能环控大数据分析。

E-mail: hbding@tju.edu.cn

**Ding Hongbing** (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 2009, 2011, and 2014, respectively. His main research interests include multiphase flow measurement and numerical simulation, supersonic separation and metrology technology, and AI intelligent environmental control big data analysis.



**刘雨航**, 于 2022 年获得中国天津大学控制科学与工程专业硕士学位, 主要研究方向为 MEMS 热式传感器测量特性研究和多相流检测技术。

E-mail: liuyuhang1997@tju.edu.cn

**Liu Yuhang** received his M. Sc. degree in control science and engineering from Tianjin University in 2022. His main research interests include MEMS thermal sensor measurement characterization and multiphase flow detection technology.