

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104054

压力位差式气体层流流量传感器开发*

董双双¹ 黄浩钦¹ 彭衡蒂¹ 张东飞² 陈曹浪² 张洪军¹

(1. 中国计量大学 计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 苏州市计量测试院 苏州 215128)

摘要:基于压力位差式气体层流流量技术,进行了新型层流流量传感器的设计和测试工作。传感器由本体和集成盖板两部分组成,壳体采用一体化加工,毛细管组固定于壳体的两个流道中,取压盖板使用内部嵌入式管路联通的方式代替外部取压管,毛细管组、滤网、管路连接件等均采用模块化设计,差压、绝压和温度传感器集成在取压盖板上。分析了传感器工作原理,给出了修正公式,基于活塞式气体流量标准装置进行了空气和氮气两种介质的实验测试,最大流量约为 50 L/min。测试结果显示,两种气体的流量测量误差均小于 $\pm 0.8\%$,量程比达到 250 倍。预计这种传感器可以在微小气体流量准确测量领域获得应用。

关键词: 气体流量测量;小流量;层流流量传感器;压力位差式;模块化

中图分类号: TB937;TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Development of the pressure potential differential type laminar flow transducer for gas flow measurement

Dong Shuangshuang¹ Huang Haoqin¹ Peng Hengfu¹ Zhang Dongfei² Chen Caolang² Zhang Hongjun¹

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

2. Suzhou Institute of Metrology, Suzhou 215128, China)

Abstract: Based on the pressure potential differential (PPD) type gas laminar flow technology, a new type of laminar flow transducer is designed and tested. The flow transducer is composed of two components, i. e. main part and integrated cover plate. The shell of the transducer is machined from a block material, and capillary components are fixed in the two channels of the shell. There are internal embedded channels in the cover plate for pressure acquisition, which can replace outside pressure tubes. Other components, such as capillary components/bundles, mesh filter, and pipe connector, are designed with the idea of modularity. The differential, absolute pressure sensors, and temperature sensor are integrated on the pressure acquisition cover plate. The principle of the PPD gas flow transducer is analyzed and the correction formula is given. Based on a piston gas flow standard device, the PPD laminar flow transducer was calibrated with air, and tested with air and nitrogen gases. The maximum flow rate is about 50 L/min. The results show that, the flowrate measurement errors for the two kinds of gas are within $\pm 0.8\%$, and the turndown ratio is about 250. It is predicted that the PPD laminar flow transducer will be used in the micro & small gas flow measurement fields.

Keywords: gas flow measurement; small flow; laminar flow transducer; pressure potential difference type; modularity

0 引言

层流流量计具有无可动部件、量程比宽、测量准确、响应快等优点,在气体微小流量测量和瞬时气体流量测量领域有广泛的应用^[1-7]。

层流流量计是基于哈根-泊肃叶定律工作的,即层流传感元件进出口两截面之间的压差与流量成正比,通过测量层流元件两侧差压获得流量。实际上,传统层流传感元件两端压差与流量之间并不是严格的线性关系,毛细管进出口局部损失和毛细管入口段流动阻力损失都不能保证线性^[8-9]。为了减小非线性压损占比,一般采用加

收稿日期: 2021-03-11 Received Date: 2021-03-11

* 基金项目: 国家自然科学基金青年项目(12002335)、浙江省自然科学基金探索项目(LQ20E060006)、浙江省教育厅科研项目(Y202045292)资助

大毛细管长径比的方法,但会带来很大的流动阻力损失^[10],这在实验微小气体流量和气体粘度测量中得到较多应用^[11-14]。

因为大长径比毛细管会带来很大的流动阻力,对于工业和民用流量计是非常不利的,因此,研究人员寻求克服非线性压损影响的其他方法。2010年,Fernando等^[15]提出了一种3个取压点的层流流量计设计方案,小流量时取全部长度毛细管的压降,大中流量时取毛细管后半部分的压降,这样一方面可以更好地利用差压传感器测量范围,另一方面可减小差压非线性部分占比,不利因素是该方法增加了阀门切换系统,装置相对复杂。2019年,王剪等^[16]提出了一种差分式层流流量传感技术,采用了两个毛细管组件串联,取两个组件两端差压之差用于计算流量,可消除进出口局部损失和层流入口段流动等非线性流动损失。缺点是需要两个差压传感器,增大了成本,并且用于气体测量时气体沿流道密度变化影响抵消作用,导致线性变差。

为了克服差分式层流流量测量技术的不足,中国计量大学研究团队又提出了压力位差式层流流量测量技术^[17]。该技术的核心思想是构造含有4个毛细管层流组件、位置交叉对称的双流道结构,取压力位差用于计算流量,从而将毛细管进出口局部损失和层流入口段流动阻力损失等非线性压损予以抵消,可以获得好的线性和更宽的量程比。这种新型层流流量传感技术理论上优势明显,如何将其转化为实际产品,需要进行实用化设计研究。本文的目的是基于压力位差式层流流量传感技术,设计一款集成化、模块化的气体微小流量测量传感器,实现多种纯净气体的流量测量。

1 压力位差式层流流量传感技术原理简介

根据哈根-泊肃叶定律,对于不可压缩充分发展圆管层流流动,体积流量 q 和压力损失为线性关系^[18],即:

$$q = \frac{\pi d^4 (P_1 - P_2)}{128 \mu L} \quad (1)$$

式中: d 为圆管(毛细管)内径; L 为层流通道长度; μ 为流体动力粘度; P_1 、 P_2 为上、下游取压点处流体的压力。

当流体粘度已知时,基于式(1),可通过测量层流元件两侧差压获得流量,反之,已知管道流量,可获得流体粘度。实际上,对于层流流量计或粘度计,式(1)只能是近似成立^[19],这是因为毛细管层流元件压力损失中包括进出口局部损失、毛细管层流入口段流动损失等非线性部分。而如果用于气体测量,还需要考虑多方面的修正,如非理想气体、毛细管壁面滑移、膨胀效应、热效应等^[20]。压力位差式层流流量传感原理如图1所示,传感元件内部流道由两条管径相同的并联支路组成。支路中

分别串联两个毛细管组①和②、③和④,每个毛细管组所含毛细管直径和数量都相同,4个毛细管组长度交叉对称,即①和④长度同为 L_1 ,②和③长度同为 L_2 ,两条支路流阻特性相同。①和②之间、③和④之间为取压腔室。

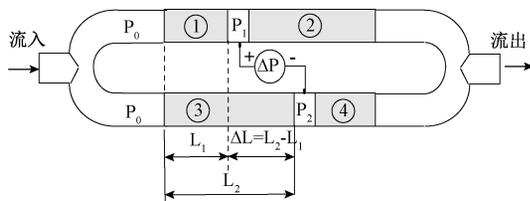


图1 压力位差式层流流量传感单元及压降示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a PPD laminar flow sensing unit and its pressure drop

假设流动方向由左向右,流经传感元件的流量为 Q ,由于两个并联支路流动阻力特性相同,两个支路的流量相同,均为 $Q/2$ 。两条并联支路左侧入口处压力均为 P_0 ,上、下支路取压腔室压力分别为 P_1 和 P_2 ,两个腔室之间的差压 ΔP 称为压力位差(pressure potential difference, PPD),则:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (P_0 - P_2) - (P_0 - P_1) \quad (2)$$

可见, ΔP 相当于毛细管组①和③的压降之差。由于两个并联支路流量相同,毛细管组①和③进出口局部阻力损失和层流入口段流动损失也相同,毛细管组①和③压降中相同部分相互抵消, ΔP 相当于毛细管组③虚线到出口之间的流动压损(不含出口局部损失)。因为虚线以后流动已经进入充分发展段(设计中需保证),此段管内流量与压降严格满足哈根-泊肃叶定律,流经毛细管组③的流量。

$$\frac{Q}{2} = \frac{n \pi d^4}{128 \mu \Delta L} \Delta P \quad (3)$$

式中: n 为单个毛细管组件中毛细管根数; ΔL 为长短毛细管长度之差, $\Delta L = L_2 - L_1$,其中, L_1 为短毛细管长度, L_2 为长毛细管长度。

流经传感元件的总流量为:

$$Q = \frac{n \pi d^4}{64 \mu \Delta L} \Delta P \quad (4)$$

2 模块化 PPD 层流流量传感器设计

2.1 传感器结构设计

本文设计的新型压力位差式层流气体流量传感器技术目标如下。

- 1) 最大流量 50 L/min;
- 2) 量程比不小于 250 倍;
- 3) 测量准确度为 $\pm 0.8\%$;

- 4) 压力范围为 0.05~0.3 MPa(绝压);
- 5) 适用气体为洁净气体;
- 6) 结构紧凑,模块化设计,数字输出。

传感器分为传感器本体和集成盖板两部分(图 2)。其中,传感器本体由壳体、毛细管组、滤网和管路连接件组成,作用是构造测量流道,以及流体过滤、管道连接功能;集成盖板由取压盖板和集成在其上的差压、绝压及温度传感器组成,功能是取压和进行差压、绝压和温度测量,进行数字信号输出。

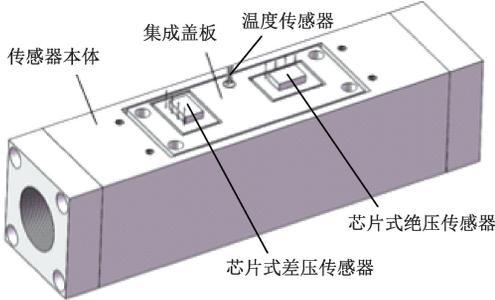


图 2 PPD 层流流量计传感器结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of PPD laminar flow

transducer structure

壳体由整块材料加工而成(图 3),含两个流道(两种长度的 4 个毛细管组安装在两个流道中,两流道中长短毛细管组位置交叉对称,两个毛细管组之间为取压腔室,从而构造了 PPD 层流流量传感器的测量管路)。壳体的一侧开有矩形凹槽,集成盖板将安装于此,凹槽底面对应两个取压腔室的位置开有取压孔。管路连接件用螺栓固定在壳体两端,滤网夹在两者之间,组成传感器本体。

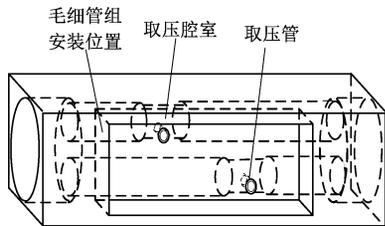


图 3 壳体示意图
Fig. 3 Schematic diagram of PPD laminar flow transducer structure

集成盖板包括取压盖板和其上的压力与温度传感器。取压盖板(图 4)一侧开有两个取压孔,位置对应于壳体上的取压孔,同时其内部设计有连通通道,将两个取压孔与盖板另一侧两个差压测压孔、一个绝压测压孔相连通。这样设计使得取压盖板与差压和绝压传感器直接连接而不需要通过额外的取压管,结构紧凑且连接可靠。芯片式差压传感器和绝压传感器用螺栓固定在取压盖板

上,其压力接口分别与取压盖板的差压测压孔和绝压测压孔紧密对接,芯片式温度传感器探头安装在取压盖板测温孔中,胶水固定。差压传感器用于读取压力位差值进行流量计算;绝压传感器用于读取绝压进行气体粘度和密度物性计算和工况流量的换算;温度传感器用于读取温度进行气体粘度和密度物性计算和流量的温度补偿。压力和温度传感器主要参数如表 1 所示。

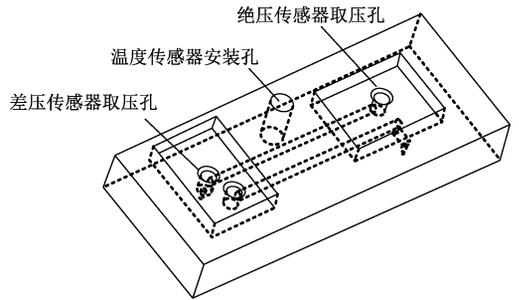


图 4 取压盖板结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of pressure acquisition plate

表 1 压力和温度传感器主要参数

Table 1 Main parameters of pressure and temperature sensors

传感器名称	规格型号	主要参数
差压传感器	NPC-1210-10WD-3S	测量范围 0~2.5 kPa 精度 ±0.5%
绝压传感器	NPC-1210-030 A-3N	测量范围为 0~350 kPa 精度 ±0.5%
温度传感器	DS18B20	测量范围为 -55 ℃ ~ +125 ℃。 精度 ±0.5 ℃

集成盖板放置在壳体矩形凹槽内并用螺栓固定,取压盖板和壳体上的取压孔对正,取压孔密封圈处于压紧状态,保证取压孔连接处密封。

壳体一体化加工和毛细管组、滤网、管路连接件、集成盖板、取压盖板模块化、集成化,使得设计、加工和组装非常容易实现标准化,保证传感器可靠性和稳定性,整体实物图如图 5 所示。



图 5 PPD 层流流量传感器实物
Fig. 5 Picture of the PPD laminar flow transducer

2.2 毛细管组设计计算

毛细管组由不锈钢管壳和内部多根毛细管组成,不锈钢毛细管内径 $d = 0.8 \text{ mm}$ 。实际工作时,短毛细管内

流动应达到充分发展,毛细管层入口段长度 L_e 可按如下式计算:

$$L_e = CdRe \quad (5)$$

雷诺数 Re 为:

$$Re = \frac{\rho vd}{\mu} \quad (6)$$

式中: v 为毛细管内平均流速; ρ 为流体密度; C 为系数。

定义管内中心流速达到充分发展段中心流速的 0.95 时达到充分发展, 则 $C = 0.033$ 。取最大工作雷诺数 $Re = 1\ 200$, 则 $L_e = 40\text{ mm}$, 因此取 $L_1 = 40\text{ mm}$ 。其他模型设计参数如表 2 所示。

表 2 毛细管组设计参数

Table 2 Design parameters of capillary components

参数名称	参数数值
不锈钢管壳内径 D/mm	10
毛细管内径 d/mm	0.8
毛细管壁厚 t/mm	0.1
短毛细管长度 L_1/mm	40
长毛细管长度 L_2/mm	90
毛细管根数(单个流道) n	51

2.3 多种气体适用性设计

PPD 气体层流流量计是基于哈根-泊肃叶定律工作的, 流量计算公式涉及粘度和密度参数。只要知道被测介质的粘度和密度, 就可以采用层流流量计对其流量进行测量, 层流流量计一大优势在于可以适应于不同纯净气体。为了满足用于多种气体测量的需要, 将几种常用的纯净气体 (N_2 、 O_2 、 He 、 Ar 、 Kr 、 CO 、 CO_2 、 H_2 和空气) 粘度和密度随温度和压力变化的函数存储在所开发流量传感器电路板中。具体做法是将某压力下气体的气体密度和粘度与温度关系按二次多项式拟合, 即:

$$\rho = At^2 + Bt + C \quad (7)$$

$$\mu = at^2 + bt + c \quad (8)$$

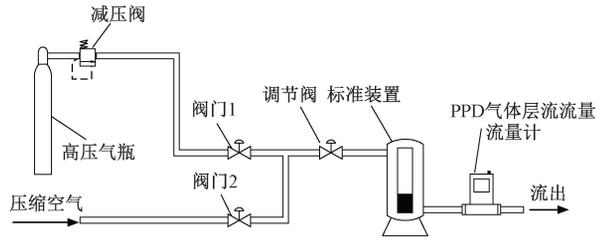
式中: A 、 B 、 C 、 a 、 b 、 c 为拟合系数。压力影响采用线性差值方法进行计算。

3 实验测试和结果分析

3.1 实验测试装置

为了对所开发传感器进行测试, 专门制作了基于单片机的数据采集和处理系统, 读取传感器差压、绝压和温度信号, 经数据处理直接输出流量数据, 相当于一个完整的 PPD 气体层流流量计。实验在苏州市计量测试院流量实验室进行, 采用美国 Sierra 公司生产的 DryCal ML-500 高精度模块化一次标准气体流量标准装置进行测试 (图 6), 装置流量范围为 $0.005 \sim 50\text{ L/min}$, 装置测量不

确定度为 $\pm 0.35\%$ 。



(a) 测试系统示意图

(a) Schematic diagram of the testing system



(b) 测试系统照片

(b) Picture of the testing system

图 6 实验测试系统

Fig. 6 Testing system

实验测试时, 首先进行传感器标定, 确定流量修正系数, 再进行性能测试和不同气体适用性试验, 分析传感器流量范围、测量精度等是否达到设计目标。

3.2 数据处理与修正

实验中流量标准装置给出的是当地大气压下的工况流量, 因此需要把测得流量换算成当地大气压下的流量。取毛细管工作段平均压力 $(P_1 + P_2)/2$ 下的密度进行换算:

$$Q'_w = \frac{n\pi d^4 (P_1 + P_2)}{128\mu\Delta LP_a} \Delta P \quad (9)$$

式中: P_a 为当地大气压。

绝压传感器直接测量的是 P_1 , $P_2 = P_1 - \Delta P$ 。气体在毛细管内流动过程中存在流动阻力, 沿流动方向压力降低, 密度变小, 体积流量增大, 即膨胀效应, 故引入膨胀效应修正系数。所设计传感器用于低压气体流量测量, 可认为是理想气体, 无需进行非理性气体修正; 所采用毛细管直径较大不需考虑壁面滑移影响, 热效应影响也可以忽略。

毛细管尺寸不准确等影响, 需引入流量修正系数 C_q (由标定试验确定)。工况体积流量 Q_w 可表示为:

$$Q_w = C_q Q'_w \left[1 + \frac{K_{exp}}{16} \frac{d}{\Delta L} \text{Re} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] \quad (10)$$

令:

$$Q_v = Q_w' \left[1 + \frac{K_{exp}}{16} \frac{d}{\Delta L} Re \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right] \quad (11)$$

则:

$$Q_w = C_q Q_v \quad (12)$$

3.3 测试结果和分析

表 3 为流量标定数据(流体介质为空气),其中 Q_s 为气体流量标准装置读数,流量修正系数 $C_q = Q_s/Q_v$,计算出流量修正系数平均值为 $C_q = 0.890$ 。

表 3 流量标定数据(采用空气)

Table 3 The calibration data (with air)

序号	$Q_s/(L \cdot \text{min}^{-1})$	$\Delta P/\text{Pa}$	$Q_v(\text{air})/(L \cdot \text{min}^{-1})$
1	0.202	3.5	0.225
2	0.4	6.9	0.447
3	0.601	10.3	0.671
4	0.811	14.0	0.914
5	1.016	17.6	1.15
6	2.014	34.9	2.275
7	4.006	69.0	4.499
8	6.002	103	6.732
9	8.024	138	9.003
10	10.121	173	11.349
11	20.358	348	22.759
12	30.098	518	33.799
13	40.118	697	45.359
14	50.066	875	56.639

3.4 不同气体适应性实验

为了验证 PPD 气体层流流量传感器不同气体的适应性,采用空气标定后,进行了氮气流量测试实验(图 6),实验数据如表 5 所示,表 5 数据显示,氮气流量测量误差在 $\pm 0.8\%$ 以内。同时把空气测量和氮气测量相对误差数据画成散点图(图 7),以便更加直观地对比误差数据。图 7 和表 4.5 数据显示,两种气体流量测量相对误差都在 $\pm 0.8\%$ 以内,满足设计要求。

表 5 氮气测试数据

Table 5 Testing data of nitrogen

序号	$Q_s/(L \cdot \text{min}^{-1})$	$Q_{W(N_2)}/(L \cdot \text{min}^{-1})$	$\delta_{N_2}/\%$
1	0.208	0.209	0.481
2	0.404	0.407	0.743
3	0.609	0.611	0.329
4	0.823	0.828	0.608
5	1.003	1.008	0.499
6	2.001	2.004	0.150
7	4.023	4.028	0.124
8	6.012	6.015	0.050
9	8.092	8.091	0.012
10	10.177	10.182	0.049
11	20.169	20.092	-0.382
12	30.335	30.302	-0.109
13	40.177	40.192	0.037
14	50.224	50.172	-0.104

空气流量测试结果如表 4 所示。其中 δ_{O_2} 为 Q_w 与 Q_s 的相对偏差值,

$$\delta = \frac{Q_w - Q_s}{Q_s} \% \quad (13)$$

由表 4 数据可见,在整个范围内,流量测量误差均在 $\pm 0.8\%$ 以内,量程比接近 250 倍。

表 4 空气测试数据

Table 4 Testing data of air

序号	$Q_s/(L \cdot \text{min}^{-1})$	$Q_w/(L \cdot \text{min}^{-1})$	$\delta_{O_2}/\%$
1	0.204	0.205	0.490
2	0.405	0.406	0.247
3	0.617	0.616	-0.162
4	0.823	0.817	-0.729
5	1.047	1.041	-0.573
6	2.063	2.054	-0.436
7	4.046	4.023	-0.568
8	6.077	6.089	0.197
9	8.108	8.108	0.000
10	10.331	10.336	0.048
11	20.160	20.036	-0.615
12	30.209	30.146	-0.209
13	40.082	39.898	-0.459
14	50.218	50.238	0.040

从当前国际上主要几个气体层流流量计品牌(如 Alicat)来看,其产品最好精度指标一般为 $\pm 0.8\%$,本次开发的传感器达到了同样水平。当然,目前工作只对这款传感器进行了初步测试,后续还应进行温湿度、震动等环境试验以考查其可靠性和稳定性。

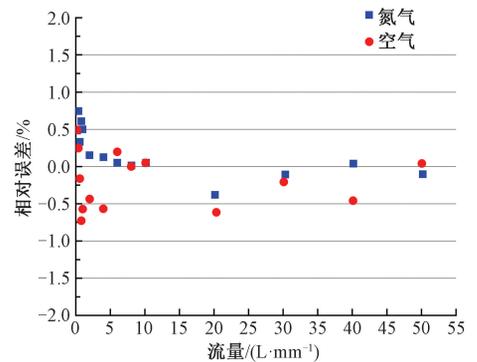


图 7 空气和氮气流量测量相对误差

Fig. 7 Relative measurement errors of air and nitrogen flow

本文研究的 PPD 气体层流流量传感器采用了模块化设计,非常容易实现系列化。层流流量传感技术在微小流量测量方面具有优势,特别是压力位差式层流流量

传感技术,由于消除了毛细管进出口压损等非线性影响,更容易实现小流量准确测量,预计这种层流流量传感器将在微小气体流量准确测量领域获得较多应用。

4 结 论

本文介绍了一种新型压力位差式气体层流流量传感器设计和实验测试工作,主要结果如下,进行了 PPD 气体层流流量传感器设计开发。传感器采用模块化设计,壳体采用一体化加工而成,取压盖板设计内部通道替代外部取压管,其他零部件包括毛细管组、滤网、管路连接件,以及差压、绝压和温度传感器与电子模块等。整个传感器具有结构紧凑、集成度高的特点。对所设计 PPD 气体层流流量传感器进行了实验标定与测试。基于活塞式气体流量标准装置进行实验测试,采用空气进行标定,并对空气和氮气进行了流量测试,最大流约为 50 L/min,量程比达到 250 倍,在整个量程范围内,两种气体流量测量误差均在 $\pm 0.8\%$ 以内,达到了设计目标。

参考文献

- [1] 魏少群,刘慧平,黄志凡. 基于层流流量计的多组分气体流量测量与补偿算法研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(5): 114-116.
WEI SH Q, LIU H P, HUANG ZH F. Research on measurement of multi-component gas flow and compensation arithmetic based on laminar flow meter[J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(5): 114-116.
- [2] 叶慧传. 气体动态流量测试系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YE H CH. Research on the gas dynamic flow test system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [3] 王筱庐,陈玉春,蒋宇翔,等. 微小缝隙式层流流量计设计及测量特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 48-54.
WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X, et al. Design and measurement characteristics of micro slot laminar flow flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 48-54.
- [4] WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X, et al. Rectangle-gap-type laminar flow meter with inward pressure taps [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101893.
- [5] 刘臣勇. 气体小流量测量技术研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
LIU CH Y. Research an application of small gas flow measurement technology [D]. Shanghai: Shanghai
- Jiaotong University, 2017.
- [6] 李明慧,高晶敏. 基于单片机控制的毛细管流量特性研究[J]. 传感器世界, 2018(6): 474-476.
LI H M, GAO J M. Study of capillary flow characteristics based on microcomputer control [J]. Sensor World, 2018(6): 474-476.
- [7] 赵鹏,陈红,黄浩钦,等. 基于压力位差式层流流量计的微型散热风扇气动性能测试实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2021(4):1-6.
ZHAO P, CHEN H, HUANG H Q, et al. Design of experimental platform for aerodynamic performance test of micro-cooling fan based on PPD laminar flowmeter[J]. Experimental Technology and Management, 2021(4): 1-6.
- [8] KANDA H, SHIMOMUKAI K. Numerical study of pressure distribution in entrance pipe flow[J]. Journal of Complexity, 2009, 25(3): 253-267.
- [9] 张嘉祥. 层流流量计计算测量模型和标定方法的研究[J]. 中国测试, 2009, 35(5): 14-17.
ZHANG J X. Research of flow calculation mathematic model and calibration of laminar flow meter[J]. China Measurement & Test, 2009, 35(5): 14-17.
- [10] FENG C C, LIN W T, YANG C T. Laminar flow meter with straight glass capillary [J]. MAPAN-Journal of Metrology Society of India, 2011, 26(3): 237-245.
- [11] 车晋,林鸿,高林虎,等. 测量理想气体状态下气体输运性质的双毛细管黏度计研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2): 167-172.
CHE J, LIN H, GAO L H et al. Research on two-capillary viscometer used to measure gas transport property under zero density status [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(2): 167-172.
- [12] 杜林,周嘉. 基于微流控原理的液体粘度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 188-194.
DU L, ZHOU J. Research on liquid viscosity measurement method based on microfluidics technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 188-194.
- [13] BERG R F. Simple flow meter and viscometer of high accuracy for gases[J]. Metrologia, 2005(42): 11-23.
- [14] MAY E F, BRRG R F, MOLDOVER M R. Reference viscosities of H₂, CH₄, Ar, and Xe at Lowdensities[J]. International Journal of Thermophysics, 2007, 28(4): 1085-1110.
- [15] FEMANDO L P, ALVARO D D, MARCOS R L, et al. A new approach to laminar flowmeters, Sensor, 2010(10): 10560-10570.
- [16] 王剪,豆峰,赵晓东,等. 差分式层流流量传感技术

- 研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(12): 1790-1793.
WANG J, DOU F, ZHAO X D, et al. Research on the differential type laminar flow sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(12): 1790-1793.
- [17] 黄浩钦, 李国占, 赵鹏, 等. 压力位差式层流流量传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 72-79.
HUANG H Q, LI G ZH, ZHAO P, Study on the laminar flow sensing technique of pressure potential differential type[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 72-79.
- [18] WRIGHT J D, COBU T, BERG R F, et al. Calibration of laminar flow meters for process gases [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 25: 8-14.
- [19] 刘灿. 双毛细管测量高温气体粘度的研究[D]. 保定: 河北大学, 2014.
LIU C. Study of the dual capillary viscometer in high temperature gas viscosity measurement [D]. Baoding: Hebei University, 2014.
- [20] 王晴晴, 董双双, 李国占, 等. 压力位差式层流流量传感元件数值模拟研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(11): 1587-1593.
WANG Q Q, DONG SH SH, LI G ZH, et al. Numerical simulation of the laminar flow sensing element of pressure

potential differential type[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(11): 1587-1593.

作者简介



董双双, 2017 年于中国计量大学现代科技学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为流量计量技术。

E-mail: Dongshuangshuang33@126.com

Dong Shuangshuang received her B. Sc. degree from China Jiliang University, College of Modern Science and Technology in 2017. Now she is a M. Sc. candidate at China Jiliang University. Her main research interest includes flow measurement technology.



张洪军(通信作者), 2001 年获香港理工大学力学博士学位, 现任中国计量大学教授, 主要研究方向为流量计量技术、力学计量技术、流体输送技术等。

E-mail: zhanghongjun@cjl.u.edu.cn

Zhang Hongjun (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the Hongkong Polytechnic University in 2001. He is now a professor at China Jiliang University. His main research interests include flow measurement, mechanical measurement, and fluid delivery technology.