

# 压力位差式气体层流流量传感器研究

张洪军\*, 王晴晴, 黄浩钦, 董双双, 李国占<sup>1</sup>

(中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 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测试工作。传感器分为本体和集成盖板两部分, 壳体为一体化加工而成, 取压盖板采用内部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。文中分析了传感器工作原理, 给出了修正公式。基于音速喷嘴气体标准流量装置进行了传感器实验测试, 流量测量范围为(0.0821-5.2008) m<sup>3</sup>/h。测试结果显示, 在整个量程范围内, 流量测量误差小于±0.8%, 量程比超过60倍, 达到了设计目标, 说明设计工作是成功的。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

## Study on the Pressure Potential Differential Type Laminar Flow Transducer for Gas Flowrate Measurement

Zhang Hongjun, Wang Qingqing, Huang Haoqin, Dong Shuangshuang, Li Guozhan

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, 310018, China)

**Abstract:** Designing and test works on a pressure potential differential (PPD) type laminar flow transducer is introduced in this paper. 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. There are internal channel in the cover plate for pressure acquisition, which can replace outside pressure tubes. Other components, such as capillary 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 correction formula is given. The PPD transducer was tested based on a sonic nozzle gas standard flow device. The flow range in the testing is (0.0821-5.2008)m<sup>3</sup>/h. The results show that, in the whole flow range, flow measurement error is less than ±0.8%, and the

---

张洪军(通讯作者), 2001年获香港理工大学工学博士学位, 现任中国计量大学教授, 主要研究方向为流量、能源计量技术、流动测试技术。

E-mail: zhanghongjun@cjlu.edu.cn

turndown ratio is great than 60, which prove that the design work is successful. It is predicted that this new kind of flowrate transducer will be used in the micro and small gas flowrate measurement field.

**Keywords :** Gas flow measurement; Small flow; Laminar flow transducer; Pressure potential difference type; Modularity

## 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<sup>[1-3]</sup>。

层流流量计是基于哈根-伯肃叶定律工作的，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来获得流量。实际上，传统层流流量计层流元件两端压差与流量之间并不是严格的线性关系，这是只有充分发展层流流动摩擦阻力损失是线性的，而层流元件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<sup>[4,5]</sup>。为了减小非线性压损占比，一般采用加大毛细管长径比的方法，但这样会带来很大的流动阻力损失<sup>[6,7]</sup>。

目前气体层流流量计产品的自身压损一般在6kPa以上，这对于有些应用来说太大了。为了克服层流流量计流动阻力大的问题和充分发挥层流流量计线性特点，研究人员一直在寻找改进的方法。2010年，Fernando等<sup>[8]</sup>提出了一种三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，不利方面是这种方法中增加了阀门切换系统，装置相对复杂。2019年，中国计量大学王翦等<sup>[9]</sup>提出了一种差分式层流流量传感技术，采用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。缺点是该方法中需要两个差压传感器，成本高，而且增加一个传感器就增加一个误差来源。

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<sup>[10]</sup>。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，因此可以获得更高的精度和更宽的量程比。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，需要进行实用化结构设计。本文的目

的是基于压力位差式层流量流量传感技术，设计一款集成化、模块化的气体微小流量测量传感器，并进行相关测试和分析。

## 1 压力位差式层流流量传感原理简介

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<sup>[7,11]</sup>，即

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

式中，

$d$ -圆管（毛细管）内径；

$L$ -层流通道长度；

$\mu$ -流体动力粘度；

$P_1$ 、 $P_2$ -上、下游取压点处流体的压力。

当流体粘度已知时，基于公式（1），可通过测量层流元件两侧差压获得流量<sup>[12]</sup>。反过来，知道流量情况下，可获得流体粘度<sup>[13,14]</sup>。实际上，对于层流流量计或粘度计，公式（1）只能是近似成立<sup>[7,11,13,14]</sup>，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。实际使用中，当毛细管长径比足够大时，上述非线性损失造成的测量误差可以忽略，代价是流量计压损非常大。

压力位差式层流流量传感原理参见图 1，传感元件内部流道由两条管径相同的并联支路组成。支路上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。

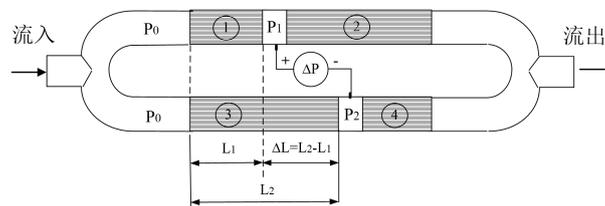


图2 压力位差式层流流量传感单元及压降示意图

Fig.2 Schematic diagram of a PPD laminar flow sensor 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  $\Delta P$  称为压力位差（PPD, pressure potential difference），则

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

可见， $\Delta P$  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， $\Delta P$  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站段（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， $n$ -单个毛细管组件中毛细管根数；

$\Delta L$ -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

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

## 2 模块化PPD层流流量传感器设计

### 2.1 性能指标和设计要求

本项工作的目的是设计一款用于气体流量测量的结构紧凑、功能完善、通用性强的压力位差式层流流量传感器。作为一款新型传感器的尝试，提出如下性能参数和要求：

- 1) 最大流量  $5\text{m}^3/\text{h}$ ；
- 2) 量程比不小于50倍；
- 3) 测量准确度， $\pm 0.8\%$ ；
- 4) 压力范围， $0.05\text{-}0.3\text{MPa}$ （绝压）；
- 5) 适用气体：洁净气体
- 6) 结构紧凑，模块化设计，数字输出

### 2.2 传感器结构设计

考虑上述要求，进行了传感器结构设计，如图2所示。传感器分为传感器本体和集成盖板两部分。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。

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，这样就构造了压力位差式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。

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。传感器主要参数列于表1。

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。

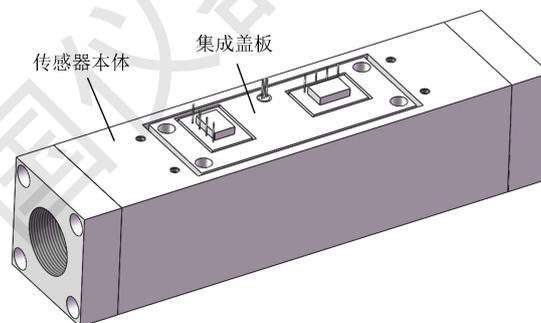


图2 PPD层流流量计传感器结构图

Fig.2 Structure diagram of the PPD laminar flowrate transducer

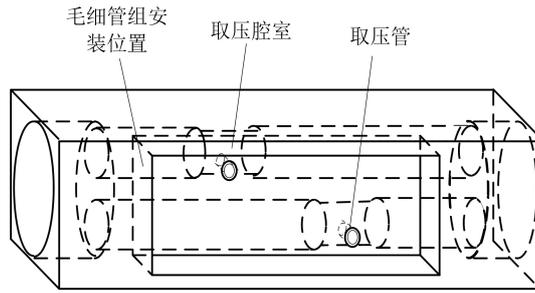


图3 壳体示意图

Fig.3 Diagram of shell

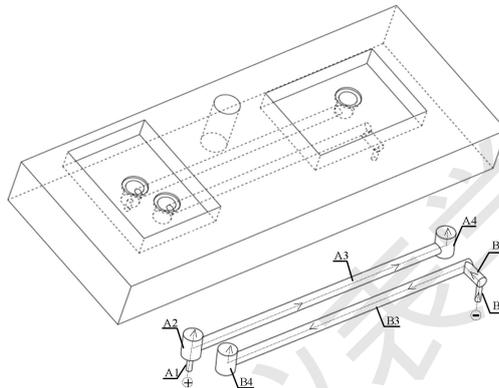


图4 取压盖板结构示意图

Fig.4 Structure diagram of the cover plate for pressure acquisition

表1 传感器选型和主要参数

Table 1 Model of the transducers and their main perimeters

| 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：0~2.5kPa<br>精度：±0.5%    |
| 绝压传感器 | NPC-1210-030A-3N | 测量范围为0~350kPa<br>精度：±0.5%    |
| 温度传感器 | DS18B20          | 测量范围为-55℃~+125℃。<br>精度：±0.5℃ |

### 2.3 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。考虑防阻塞和避免过大流阻等，不锈钢

毛细管内径选择 $d=0.8\text{mm}$ 。实际工作时，短毛细管内流动应达到充分发展，毛细管层流入口段长度 $L_e$ 可按式计算

$$L_e = Cd Re \quad (5)$$

式中，雷诺数

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

式中， $v$ -毛细管内平均流速；

$\rho$ -流体密度；

$C$ -系数。

定义平均流速达到充分发展段流速的 0.95 达到充分发展，则  $C=0.033^{[15]}$ 。取最大工作雷诺数  $Re=1200$ ，则  $L_e=40\text{mm}$ ，因此取  $L_1=40\text{mm}$ 。其他模型设计参数列于表 2。

表2 毛细管组设计参数

Table2 Design parameters of capillary bundles

| 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   |

### 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。基于音速喷嘴气体流量标准装置对所设计传感器进行测试。音速喷嘴流量标准装置为负压法，内含7个临界流量喷嘴，装置流量范围为  $(0.016-6.5) \text{ m}^3/\text{h}$ ，装置测量不确定为 $\pm 0.3\%$  ( $k=2$ )。

测试分为传感器标定和性能测试两部分。经传感器标定确定流量修正系数 $C_q$ ，然后进行性能测试分析传感器流量范围、测量精度等是否达到设计目标。

#### 3.2 数据处理和修正

测试中流体介质为空气，是可压缩流体，密度不同时其体积流量也不同，需进行换算。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。取毛细管工作段的平均压力 $(P_1+P_2)/2$ 下的密度进行换算<sup>[5]</sup>

$$Q_w' = \frac{n\pi d^4 (P_1 + P_2) \Delta P}{128\mu \Delta L P_a} \quad (7)$$

式中， $P_a$ 为当地大气压。

另外，绝压传感器直接测量的是 $P_1$ ， $P_2=P_1-\Delta P$ 。

层流元件用于气体流量和气体粘度实验室内高精度测量时，为了达到测量精度要求，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<sup>[7,11,13,14]</sup>。本文中传感器用于低压气体流量测量，可认为是理想气体，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，只需进行膨胀效应修正<sup>[7,13]</sup>。另外，由于毛细管尺寸不准确等影响因素，需引入流量修正系数 $C_q$ （由标定试验确定），最终工况体积流量 $Q_w$ 可表示为

$$Q_w = C_q Q_w' \left[ 1 + \frac{K_{\text{exp}}}{16} \frac{d}{\Delta L} \text{Re} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \right] \quad (8)$$

### 3.3 测量结果和分析

测量结果如表3所示，流量修正系数 $C_q=0.941$ ，修正后得到最终工况体积流量 $Q_w$ 。第4列数据为 $Q_w$ 与 $Q_s$ （标准装置读数）的相对偏差值，即测量相对误差

$$\delta = \frac{Q_w - Q_s}{Q_s} \% \quad (9)$$

由表3数据可见，在 $(0.0821-5.2008)\text{m}^3/\text{h}$ 测量范围内，流量测量误差在 $\pm 0.8\%$ 以内，量程比超过60倍，达到了设计目标。最大流量时对应的毛细管流动Re数为1203，可以认为满足工作要求，测量数据有效。

从当前国际上主要几个气体层流流量计品牌（如Alicat）来看，其产品测量误差指标一般为 $\pm 0.8\%$ ，本项工作中开发的传感器达到了同样水平。当然，更宽的量程比还没有验证，若要实现更大的量程比，设计上需考虑更长的毛细管以满足大于层流入口段长度的要求，另外需考虑进一步验证所选差压传感器在更大量程内的性能，目前这款差压传感器还有一定余量。此外，本项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。

该传感器采用了模块化设计，非常容易实现系列化。层流流量计在微小流量测量方面更有优势，特别是压力位差式层流流量计，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。预计这种层流流量计传感器将在微小气体流量准确测量领域获得较多较好的应用。

**表3 压力位差式层流流量传感元件测试数据**

**Table 3 Test data of PPD laminar flow transducer**

| $\Delta P$ | $Q_s$       | Re   | $Q_w$       | $\delta(\%)$ |
|------------|-------------|------|-------------|--------------|
| (Pa)       | ( $m^3/h$ ) |      | ( $m^3/h$ ) |              |
| 21.0       | 0.0816      | 19   | 0.0821      | 0.59%        |
| 130        | 0.4944      | 114  | 0.4916      | -0.56%       |
| 211        | 0.7968      | 184  | 0.7938      | -0.38%       |
| 320        | 1.2073      | 278  | 1.2040      | -0.27%       |
| 454        | 1.7016      | 394  | 1.7046      | 0.18%        |
| 536        | 2.0039      | 465  | 2.0106      | 0.33%        |
| 672        | 2.4984      | 581  | 2.5116      | 0.53%        |
| 1088       | 3.9487      | 916  | 3.9612      | 0.32%        |
| 1242       | 4.4429      | 1032 | 4.4610      | 0.41%        |
| 1335       | 4.7452      | 1099 | 4.7508      | 0.12%        |
| 1489       | 5.2395      | 1203 | 5.2008      | -0.74%       |

## 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主要性能测试情况，主要结果如下：

(1) 完成了一款压力位差式气体层流流量传感器结构设计和计算。该传感器的壳体一体化加工而成，取压盖板设计内部通道替代外部取压管，包括毛细管组、滤网、管路连接件、集成盖板等零部件完全模块化、集成化。

(2) 对所设计传感器进行了实验测试。基于音速喷嘴气体流量标准装置进行实验测试，流量测量范围为(0.0821-5.2008)  $m^3/h$ ，量程比超过 60 倍，在整个量程范围内，流量测量误差小于 $\pm 0.8\%$ ，达到了设计目标，测试结果证明这种设计方案是成功的。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。

## 参考文献:

- [1] 王伯年. 脉动流量的测量-层流流量计简介[J]. 计量技术, 1980, (4): 15-28.
- [2] 王伯年. 有关层流流量计的理论分析[J]. 江苏工学院学报, 1983, (1): 15-28.
- [3] 叶慧传. 气体动态流量测试系统的研究[D]. 浙江大学, 2013.
- [4] Kanda H, Shimomukai K. Numerical study of pressure distribution in entrance pipe flow[J]. *Journal of Complexity*, 2009, 25(3): 253-267.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Berg R F. Quartz capillary flow meter for gases[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(3): 772-779.
- [8] Fernando Lopez Pena, Alvaro Deibe Diaz, Marcos Rodriguez Lema and Santiago Vazquez Rodriguez. A New Approach to Laminar Flowmeters, *Sensor*, 2010, 10: 10560-10570.
- [9] 王翦, 豆峰, 赵晓东, 罗献尧, 张洪军. 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.
- [10] 黄浩钦, 赵鹏, 李国占, 张洪军. 压力位差式层流流量传感技术研究[J], 仪器仪表学报, 2020 (审稿中).
- [11] Wright J D, Cobu T, Berg R F, Moldover M R. Calibration of laminar flow meters for process gases[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 25: 8-14.
- [12] 王伯年, 王荣杰, 王利民, 周厚龙. 层流流量计设计参数的选择与确定[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(5): 474-476.
- [13] Berg R F. Simple flow meter and viscometer of high accuracy for gases[J]. *Metrologia*, 2005, 42: 11-23.
- [14] 刘灿. 双毛细管测量高温气体粘度的研究[D]. 河北大学, 2014
- [15] Smith A M O. Remarks on transition in a round tube[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1960, 7(4): 565-576.