

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306492

PPD 气体层流元件设计和使用中几种情况分析^{*}

倪洁¹ 季建辉¹ 李国占¹ 张东飞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:针对 PPD 层流流量传感元件在设计制作和使用中可能出现的 3 种非标准设计或非理想情况采用数值模拟进行研究。对于两个支路中毛细管根数不同的非标准结构设计,数值仿真得到的压降曲线、差压-流量关系与标准结构相比差别微小,根据压降计算得到流量与准确流量之间的相对偏差在 $\pm 0.4\%$ 以内;流量测量实验数据也验证了仿真结果,说明 PPD 原理适用于两通道毛细管数量不同的结构设计。对制作或使用中可能出现的毛细管进出口部分堵塞情况,计算发现,差压会出现非线性偏差,根据不同堵塞位置,可能正偏差也可能负偏差。当两支路中毛细管直径存在偏差时,两支路阻抗特性不再相同,两支路毛细管中流量和流速不同导致进出口局部阻力不能完全抵消,差压-流量曲线将偏离理想曲线。上述研究结果对于 PPD 层流流量传感技术的实际应用有一定的参考价值。

关键词: PPD 层流流量传感元件; 气体流量; 数值模拟; 非理想情况; 阻抗特性

中图分类号: TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460 · 40

Analysis of several cases in design and application of pressure potential difference gas laminar flow element

Ni Jie¹ Ji Jianhui¹ Li Guozhan¹ Zhang Dongfei² Zhang Hongjun¹

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

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

Abstract: Numerical simulations were conducted to investigate three non-standard design or non-ideal situations that may arise in the design, fabrication, and usage of PPD laminar flow elements. For the non-standard design with different numbers of capillaries in two branches, in which the numerical simulations were conducted, the pressure drop curves and differential pressure-flow relationships obtained showed minimal differences compared to the standard structure. The relative deviation between the calculated flow rate and the accurate flow rate, as determined by the pressure drop calculations, was within $\pm 0.4\%$. Additionally, the experimental data from flow rate measurements confirmed the simulation results, further demonstrating the applicability of the PPD principle to structural designs with varying numbers of capillaries in the two channels. Regarding the potential occurrence of blockages at the capillary inlets or outlets during fabrication or usage, calculations revealed the presence of nonlinear deviations in the differential pressure. Depending on the location of the blockage, either positive or negative deviations may occur. Furthermore, when there is a deviation in the capillary diameter between the two branches, the impedance characteristics of the two branches become dissimilar. This dissimilarity in flow rates and velocities within the capillaries of the two branches leads to incomplete compensation of local resistances at the inlets and outlets, causing the differential pressure-flow curve to deviate from the ideal curve. The aforementioned research findings hold valuable insights for the practical application of PPD laminar flow sensing technology.

Keywords: PPD laminar flow sensor; gas flow; numerical simulation; non ideal situation; impedance characteristic

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领域具有很大的优势^[1-3]。但在传统的层流传感元件设计中，压差取自于上下游取压腔室，压差（即压力损失）包含了毛细管进出口局部损失和层流起始段流动损失等非线性部分，因此，测得的差压与流量不是严格的线性关系。

为了克服非线性的影响，研究人员从数据处理模型和层流元件设计两个方面寻找方法。张嘉祥^[4]在假设毛细管进出口流动损失满足流速二次方关系基础上，提出了JX2009方程。这个方法对于层流流量计数据处理有一定的适用性，但由于二次方假设不是严格符合实际情况，而且方程系数相当敏感，因此误差较大。

若要减小差压中非线性部分压降占比，可采用较大的毛细管长径比。台湾计量标准中心(CMS)Feng等^[5]研发基于层流元件的流量标准装置，发现若长径比不小于500时，入口段非线性影响在可接受范围。在实验室高精度流量或粘度测量的应用中，毛细管长径比在10 000~20 000之间，甚至超过了20 000^[6-8]。层流流量计难以做到很大的毛细管长径比，为了从层流元件结构设计方面减少非线性压损影响，Pena等^[9]提出了一种3个取压点的层流元件设计方案，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，但是装置中增加了阀门切换系统，相对复杂。西北工业大学王筱庐等^[10-12]提出了微小缝隙式层流元件，并将引压孔设置在层流通道中间，可有效避免毛细管进出口局部损失影响，流量计样机精度等级均达到1.0级。

2019年，王剪等^[13]提出了一种差分式层流流量传感元件，包含两个长度不同的串联毛细管组在两个毛细管组之间和传感元件流动进出口设有3个取压孔，两段的差压之差计算流量值。这个方案可以抵消除部分非线性影响，但是需要两个差压传感器，对于气体测量由于膨胀影响，无法保证两段毛细管入出口条件一致，非线性部分不能完全抵消。2020年，黄浩钦等^[14]提出压力位差式(pressure potential difference)层流流量传感技术，其层流元件构造了含有4组毛细管组件的交叉对称的双通道结构，将两个通道上游毛细管进出口局部损失和入口段流动损失相互抵消，从而差压输出与流量具有更好的线性关系。

其后，王晴晴等^[15-17]应用数值模拟技术对PPD层流传感元件两条支路的流阻特性进行了细致研究，验证了这种新型层流传感技术理论模型的正确性，给出了用于

可压缩气体流动测量时的修正方法，提出了PPD层流传感元件毛细管长度设计准则。

上述关于PPD层流传感元件研究中，都是针对两个通道中毛细管直径和根数相同的情况，从理论上分析，两通道毛细管直径相同、根数不同时，PPD流量模型仍可适用。此外，当制造和使用中出现影响传感器性能的非理想情况时（如毛细管部分堵塞、两支路中毛细管直径偏差），PPD传感器输出会有什么变化？对于这些问题，本文将采用数值模拟方法进行研究分析。

1 问题分析

图1为PPD层流流量传感元件结构示意图，其内部通道由两条管径相同的并联支路1和2组成，每条支路上串联长度不同的两个毛细管组件，两条支路上的毛细管组交叉对称排列两两相同。两个支路中上游毛细管组出口取压腔之间的差压 ΔP （即压力位差PPD）用于测量流经层流元件的流量。

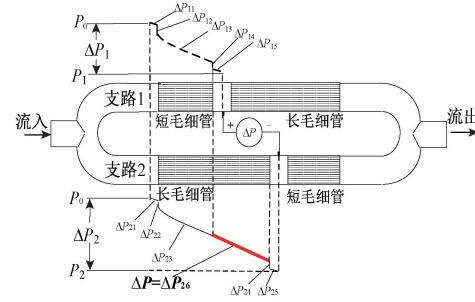


图1 压力位差式层流传感元件结构及其压降示意图

Fig. 1 Structure diagram of PPD laminar flow sensing element and its pressure drop

针对不可压缩流动，对图1所示两个支路上游毛细管压降进行简单分析可以得到，压力位差 $\Delta P = \Delta P_{26}$ ，即 ΔP 为层流充分发展段压降，不包含进出口流动影响，与流量之间有理想的线性关系。

根据哈根-泊肃叶定律，流经层流元件的体积流量为：

$$Q = \frac{n\pi d^4}{128\mu\Delta L} \Delta P \quad (1)$$

式中： n 为层流毛细管组中的毛细管根数； ΔL 为两种长毛细管的长度之差。

上述分析中，各毛细管组中毛细管直径相同、根数相等，两支路流阻特性几乎完全相同，传感器工作时流经两支路流量相等，流经单根毛细管的流量也相等。而当两个支路中毛细管数量不同时（直径相同），两支路总流通面积不一样，流量不同，两支路流动的主要差别为取压腔室中压损会有所不同，但与流道总压降相比，此差别很

小。如果实际情况如此,会给结构设计上带来灵活性和便利。

层流元件在制造和使用中可能出现影响传感器性能的非理想情况,如 1) 毛细管端部加工毛刺或流体中脏污颗粒造成毛细管进出口部分堵塞;2) 层流元件制作中出现两支路中毛细管直径偏差。对于第 1 种情况,如果某个毛细管组或毛细管端部出现部分堵塞,必然导致该支路阻抗增大,流经的流量相对变小,毛细管内部压降曲线发生变化,采用式(1)计算流量出现较大误差;第 2 种情况下,毛细管直径差别导致两支路阻抗特性发生变化,两支路中上游毛细管层流入口段长度不同,内部压降曲线不同,流经两支路中各毛细管流量不同,因此式(1)不再适用。

2 仿真计算模型和方法

2.1 物理模型

1) 两支路中毛细管根数不同

如图 2 所示,3 个模型中,下支路都是 1 根毛细管,上支路中毛细管根数不同,图 2(a)、(b)、(c) 中模型分别记为模型 I、模型 II 和模型 III,其上支路毛细管分别为 1 根、2 根和 3 根。

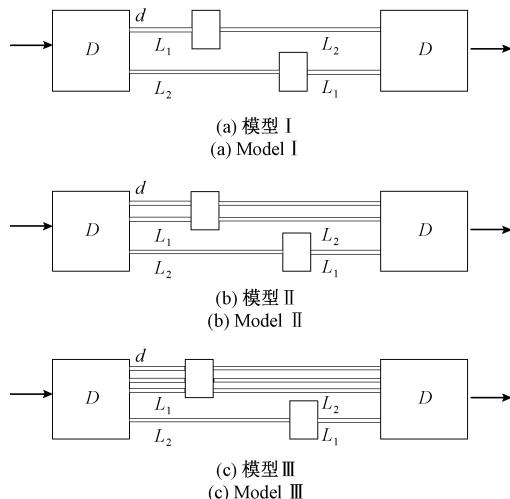


图 2 两支路中毛细管根数不同的 PPD 元件模型

Fig. 2 PPD models with different capillary tube numbers in the two branches

模型中毛细管直径和管路参数列于表 1。

2) 毛细管端部部分阻塞

毛细管端部堵塞会有不同程度,这里仅取堵塞截面面积 50% 的情况,研究不同位置堵塞会出现什么现象。如图 3 所示,模型中上下支路中分别含有 1 根毛细管,考虑图中毛细管进出口 A、B、C、D 4 处单独出现部分堵塞

表 1 层流元件两支路毛细管数量不同的模型参数

Table 1 Parameters of PPD models with different capillary tube numbers in the two branches

参数名称	数值/mm
管道内径 D	10
毛细管内径 d	0.5
短毛细管长度 L_1	35
长毛细管长度 L_2	85
取压腔直径	5
取压腔长度	10
入口管道长度	50
出口管道长度	150

的情况。模型中毛细管和连接管道参数除了 $L_2 = 65$ mm 以外,其他与表 1 中数据相同。

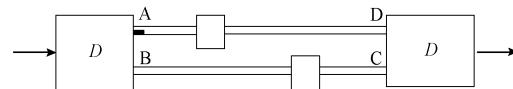


图 3 毛细管端部部分阻塞 PPD 模型

Fig. 3 PPD model with capillary end being partial blocked

3) 两支路毛细管直径偏差

模型中两个支路中都是 1 根毛细管,毛细管直径有所不同,参见图 4(a)、(b),图 4(a) 上支路中毛细管直径为 0.6 mm,下支路中毛细管直径为 0.5 mm,图 4(b) 上支路中毛细管直径为 0.4 mm,下支路中毛细管直径为 0.5 mm,其他参数与表 1 中相同。

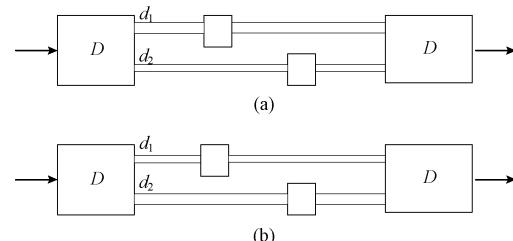


图 4 两支路中毛细管直径有偏差的 PPD 模型

Fig. 4 PPD model with diameter deviation between capillary in the two branches

2.2 网格划分

采用前处理软件 Gambit 对模型进行建模和网格划分。采用了结构化网格,在毛细管的入口和出口处的网格进行加密处理,管壁处网格也进行加密。圆面网格用 pave 生成,壁面网格用 map,然后通过 cooper 方法生成整个体的网格。网格质量对计算结果有很大影响,保证网格质量在 0.6 以内。图 5 为毛细管入口管道处网格及其加密情况。

网格数量与质量对数值计算结果有直接的影响,在进行正式模拟计算之前,需要进行网格无关性验证。参

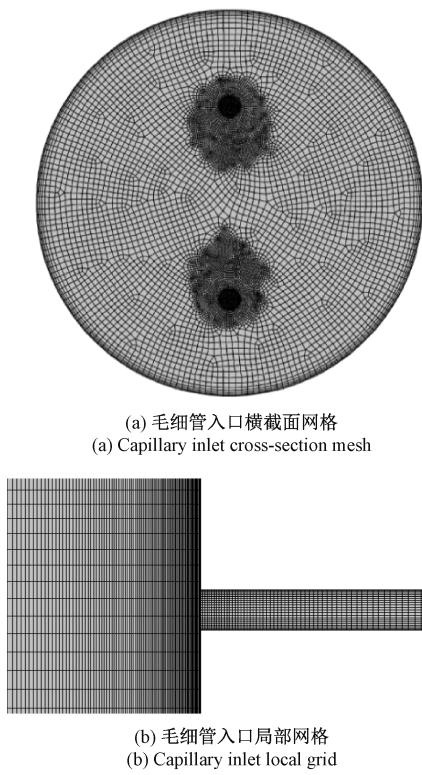


图 5 计算网格示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the calculation mesh

考文献[15]，在本文对照研究，即两支路中单根毛细管，无阻塞情况下，网格数选取 4 230 360 能够满足计算要求，其他计算中，模型 II 和模型 III 网格数量为 4 986 040 和 5 309 390，毛细管端部 A、B、C、D 部分阻塞 4 个模型网格数量为 3 921 014, 4 070 525, 4 181 714 和 4 141 475，两支路直径不同网格数量为 4 280 360 和 4 003 600。

2.3 边界条件及计算方法

采用流体力学数值计算软件 Fluent 进行控制方程离散求解。设置流体为空气，温度 $t = 15^\circ\text{C}$ ，标准大气压下物性为密度 $\rho = 1.2252 \text{ kg/m}^3$ ，动力粘度 $\mu = 1.8003 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。毛细管根数不同模型以及毛细管端部部分堵塞入口条件为质量流量入口，毛细管两支路直径不同入口为压力入口，出口都为压力出口，设定压力为标准大气压。根据雷诺数公式：

$$\text{Re} = \frac{q_m d}{\mu A} \quad (2)$$

式中， d 为毛细管直径， A 为毛细管截面面积， q_m 为流经单根毛细管的质量流量。取 Re 为 100、200、500、800、1 000 和 1 200，根据式(2)可计算得到相应的质量流量 q_m 。

选择大涡模拟方法^[18]，对大于滤波宽度的大尺度涡运动通过求解 N-S 方程直接求解出来，对小于滤波宽度

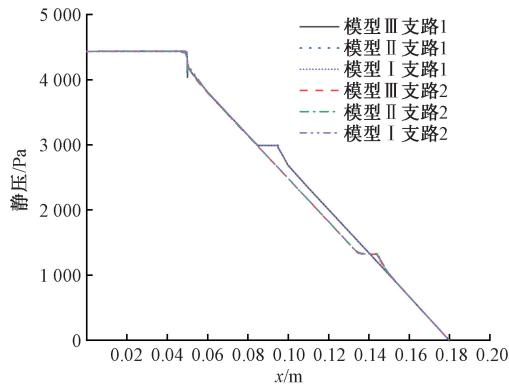
的小尺度涡运动则引入亚格子模型，建立与大尺度涡的关系进行模拟，亚格子模型选择 WALE (wall-adapting local eddy-viscosity) 模型。压力-速度耦合采用 Simple 算法，计算过程各离散项的松弛因子设置为 0.5。

3 计算结果与分析

3.1 两支路毛细管根数不同

1) 仿真结果

图 6 为 PPD 层流元件两支路中压降曲线 ($\text{Re} = 500$)，横坐标为以计算区域入口为 0 点的流道轴向距离， $x = 0.05 \text{ m}$ 对应毛细管入口，纵坐标为静压。模型 II 上支路(支路 1)中含 2 根毛细管，由于两根毛细管压降相同，只需取其中 1 根压降曲线展示，模型 III 也同样处理。3 个模型中支路 1 和支路 2 压降曲线分别重叠在一起。在毛细管入口处，静压曲线呈现一段陡降，这是由于气流进入毛细管，流速(动能)陡增，压力下降所致。支路 1 和支路 2 压降曲线分别在 $x = 0.09$ 和 0.14 m 附近出现一个平台，对应两个取压腔室，取压腔室内流速很低，压力几乎不变。

图 6 两支路毛细管根数不同的 PPD 层流元件流道内静压变化曲线 ($\text{Re} = 500$)Fig. 6 Static pressure variation curve in the flow channel of PPD laminar flow element with different numbers of capillaries in the two branches ($\text{Re} = 500$)

PPD 层流元件 ΔP 是两个平台之间的压力之差，也就是虚线压降曲线在两个平台之间对应的压降。从压降曲线来看，两个支路中毛细管数量不同情况下，压降特性几乎完全相同。

根据哈根-泊肃叶定律，基于仿真得到的压差 ΔP 可计算得出流量。考虑气体的可压缩性，在假设理想气体密度与压强成正比情况下，单根毛细管内质量流量 q_{m0} 为^[14]：

$$q_{m0} = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 \mu \Delta L} \frac{P_1 + P_2}{2 R_{\text{gas}} T} \quad (3)$$

式中: P_1, P_2 分别为两个取压腔室的压力; $\Delta P = P_1 - P_2$; R_{gas} 为空气气体常数, $R_{\text{gas}} = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; T 为温度, $T = 288.15 \text{ K}$ 。

对于本文中毛细管直径和流体介质参数, 壁面滑移和非理想气体影响可忽略, 但气体膨胀影响不能忽略, 需进行修正。经气体膨胀修正后流量为^[16]:

$$q_{mc} = q_{m0} \left(1 + \frac{C_e}{16} \frac{d}{\Delta L} \text{Re} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right) \quad (4)$$

其中, C_e 为气体膨胀修正系数, 根据前人研究结果^[19], 可取为 $C_e = 1$ 。

运用式(3)和(4)根据仿真得到的差压 ΔP 计算单根毛细管流量, 并计算元件总流量 Q_{mc} ($= n q_{mc}$), 与准确流量 Q_m (即仿真计算中入口给定流量)进行对比, 两者偏差如下:

$$\delta = \frac{Q_{mc} - Q_m}{Q_m} \times 100\% \quad (5)$$

其中, Q_{mc}, Q_m, δ 数据列于表 2, 表中数据显示, 3 个模型中根据 ΔP 计算得出的流量与实际流量(即流量准确值)之间的相对误差均在 $\pm 0.4\%$ 以内, 可见这种两支路非等数量毛细管的设计是可行的。

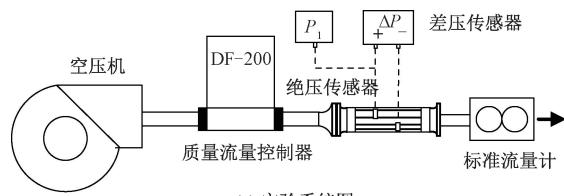
表 2 毛细管根数不同的 PPD 元件数据

Table 2 Data for the PPD elements with different capillary numbers

	Re	$Q_m / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$Q_{mc} / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$\delta / \%$
模型 I	100	1.41	1.41	-0.38
	200	2.83	2.82	-0.24
	500	7.07	7.06	-0.20
	800	11.31	11.29	-0.11
	1 000	14.14	14.11	-0.21
	1 200	16.97	16.92	-0.29
模型 II	100	2.12	2.11	-0.36
	200	4.24	4.23	-0.22
	500	10.60	10.59	-0.12
	800	16.97	16.97	0.01
	1 000	21.21	21.26	0.24
	1 200	25.45	25.55	0.41
模型 III	100	2.83	2.82	-0.34
	200	5.66	5.65	-0.18
	500	14.14	14.13	-0.04
	800	22.62	22.61	-0.08
	1 000	28.28	28.23	-0.19
	1 200	33.94	34.03	0.26

2) 实验测试

为了验证上述仿真结果, 对根数不同 PPD 模型实验测试, 搭建了图 7 所示的实验管路, 其中图 7(a)为实验系统图, 图 7(b)为 PPD 层流元件实物照片。



(a) 实验系统图
(a) Experimental system diagram



(b) PPD 元件实物
(b) PPD element physical picture

图 7 实验管路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experimental pipeline

实验系统主要包括空压机、PPD 传感元件、质量流量控制器、差压传感器、绝压传感器和标准流量计等。PPD 层流元件最大流量为 11 L/min, 模型中毛细管和管路参数列于表 3。

表 3 实验模型参数

Table 3 Experimental model parameters

参数名称	数值/mm
管道内径 D	22
毛细管内径 d	0.6
短毛细管长度 L_1	35
长毛细管长度 L_2	85
取压腔直径	5
取压腔长度	10
入口管道长度	7.5
出口管道长度	7.5
支路 1 毛细管根数	12
支路 2 毛细管根数	6

质量流量控制器型号为 Kofloc DF200, 流量控制范围 2%~100%; 差压传感器为 Keller 41X 系列, 测量范围: 0~30 mbar, 最大误差为 $\pm 0.1\%$; 绝压传感器为 Keller PAA-33X 系列, 测量范围: 0.8~1.2 bar; 标准流量计为自行开发的层流流量计, 并在苏州计量测试院活塞法气体流量标准装置上进行标定和校准, 最大流量为 12 L/min, 最大测量误差为 $\pm 0.5\%$ ^[20]。

通过质量流量控制器设定所需流量点, 流量点为 PPD 层流元件满量程流量的 10%、30%、40%、50%、60%、70%、85%、100%。

数据处理中, 首先根据标准流量计测量数据计算获

得 PPD 层流元件各流量点流量系数。

对于可压缩气体流动,未经膨胀修正情况下,PPD 元件测量的平均压力($(P_1+P_2)/2$)下体积流量为:

$$Q = C_q \frac{n\pi d^4}{128\mu\Delta L} \Delta P \quad (6)$$

其中, C_q 为流量系数。

标准流量计测得是标况流量 $Q_{s,N}$, 转换为工况流量如下:

$$Q' = \frac{2 \times Q_{s,N} \times 101.325 \times (t + 273.15)}{(P_1 + P_2) \times 293.15} \quad (7)$$

式中: 压力为 P_1, P_2 , 单位为 kPa, t 为温度, 单位为 °C。

未经膨胀修正情况下标准流量计工况流量为:

$$Q_0 = \frac{Q'}{1 + \frac{C_e}{16} \frac{d}{\Delta L} \text{Re} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \quad (8)$$

则第 i 个流量点流量修正系数为:

$$C_{q,i} = \frac{Q_0 \times 128\mu\Delta L}{n\pi d^4 \Delta P} \quad (9)$$

各流量点所获得流量系数进行平均得到平均流量系数:

$$C_q = \frac{\sum_{i=1}^m C_{q,i}}{m} \quad (10)$$

经膨胀修正后 PPD 元件测量的工况流量:

$$Q_1 = C_q \cdot \frac{n\pi d^4 \Delta P}{128\mu\Delta L} \left[1 + \frac{C_e}{16} \frac{d}{\Delta L} \text{Re} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \right] \quad (11)$$

标况流量为:

$$Q_{c,N} = Q_1 \times \frac{(P_1 + P_2) \times 293.15}{2 \times 101.325 \times (t + 273.15)} \quad (12)$$

式中: P_1, P_2, t 的单位与式(7)相同。

$Q_{c,N}$ 与 $Q_{s,N}$ 相对偏差为:

$$\delta' = \frac{Q_{c,N} - Q_{s,N}}{Q_{s,N}} \times 100\% \quad (13)$$

其中, $C_q, Q_{c,N}, Q_{s,N}, \delta'$ 数据列于表 4。表中数据显示, 在整个流量测试范围内, 根据 ΔP 计算得出的流量与标准流量计读数之间的相对偏差均在 $\pm 0.7\%$ 以内, 偏差很小, 可以认为 PPD 层流元件原理对于两通道中非等数量毛细管的设计完全适用, 实验测试同时验证了仿真研究所得到的结论。

3.2 毛细管端部部分堵塞

以 $Re=500$ 的数据为例, 来展示毛细管部分堵塞对 PPD 测量元件内部压降的影响。图 8 为两条支路内部静压变化曲线。很显然, 在毛细管半堵塞之处, 都会出现显著的局部压力降, 这是由于局部流动动能损失的原因。由于管端局部堵塞, 导致两支路流动阻力特性(阻抗)不

表 4 两支路毛细管根数不同的 PPD 元件实验数据

Table 4 Experimental data of PPD elements with different capillary numbers in two branches

Re	$\Delta P/\text{Pa}$	C_q	$Q_{s,N}/$	$Q_{c,N}/$	$\delta'/\%$
			($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	
153	286.60	1.10	1.20	1.20	-0.15
435	799.25	1.10	3.41	3.40	-0.51
580	1 054.70	1.10	4.53	4.51	-0.36
726	1 308.10	1.10	5.65	5.64	-0.27
873	1 555.70	1.10	6.70	6.75	0.69
1 016	1 791.60	1.10	7.77	7.82	0.68
1 229	2 129.50	1.10	9.45	9.39	-0.55
1 472	2 505.60	1.10	11.16	11.14	-0.17

再相同, 流经两支路中毛细管的流量不再相等(参见表 5 数据), 两支路中毛细管内压力曲线也远远偏离了图 6 中未发生堵塞时的曲线。图 8(a)中, 支路 1 毛细管入口堵塞, 使得上游短毛细管压损相对增大, 取压腔室处压力相对更低, 导致差压 ΔP 相对变小。同样道理, 堵塞发生在不同的位置, 会导致差压 ΔP 产生相对增大或者减小的变化, 具体如图 8(b)、(c)、(d)所示, 这里不再赘述。

表 5 毛细管端部堵塞时两支路流量数据

Table 5 Flow rate in the two branches when a capillary is partially blocked

Re	$Q_m/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-6}$	支路 1		支路 2
		$q_{m1}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ $\times 10^{-6}$	$q_{m2}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ $\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$
A 点堵塞	100	1.41	0.69	0.72
	200	2.83	1.36	1.47
	500	7.07	3.32	3.78
	800	11.31	5.16	6.14
	1 000	14.14	6.37	7.76
	1 200	16.97	7.53	9.38
B 点堵塞	100	1.41	0.72	0.69
	200	2.83	1.46	1.36
	500	7.07	3.75	3.32
	800	11.31	6.14	5.18
	1 000	14.14	7.68	6.36
	1 200	16.97	9.34	7.56
C 点堵塞	100	1.41	0.73	0.68
	200	2.83	1.48	1.35
	500	7.07	3.80	3.27
	800	11.31	6.18	5.08
	1 000	14.14	7.81	6.32
	1 200	16.97	9.46	7.51
D 点堵塞	100	1.41	0.69	0.73
	200	2.83	1.35	1.48
	500	7.07	3.30	3.81
	800	11.31	5.10	6.21
	1 000	14.14	6.30	7.84
	1 200	16.97	7.48	9.49

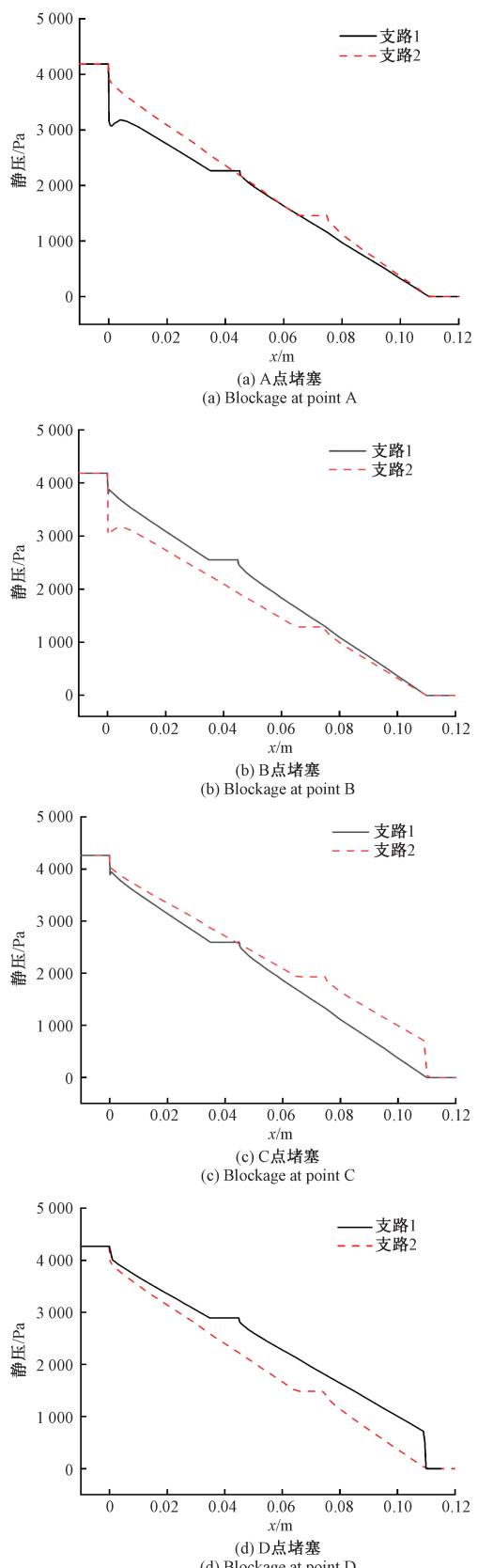
图 8 毛细管端部部分堵塞情况下两支路静压曲线($Re=500$)

Fig. 8 Static pressure curve of two branches in case of capillary end being partial blocked($Re=500$)

图 9 为毛细管进出口端部存在部分堵塞情况下,流量与差压关系曲线。图中显示,支路 1 入口堵塞和支路 2 出口堵塞导致同样流量(流过 PPD 元件的总流量)情况下差压相对无堵塞时减小,前一种情况是由于 P_1 相对减小,而后一种情况是由于 P_2 相对增大;支路 1 出口堵塞和支路 2 入口堵塞时,同样流量下差压增大,其原因分别是 P_1 相对增大和 P_2 相对减小。流量(或 Re)越大,相对于无堵塞时差压偏离越大,这是因为局部堵塞造成的局部压损与流量不是线性关系,而是二次方(或接近二次方)关系。

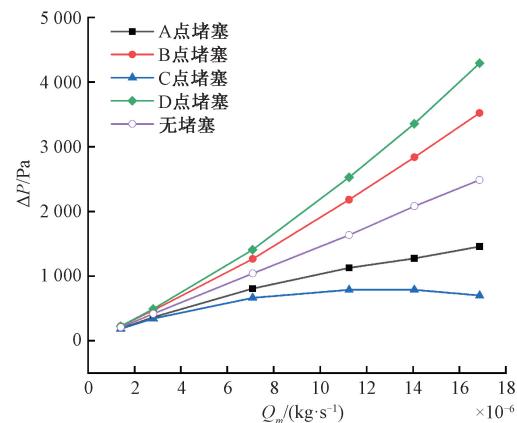


图 9 毛细管进出口局部堵塞时流量-差压关系

Fig. 9 $Q-\Delta P$ curves when the capillary inlet or outlet is partially blocked

可见,PPD 层流元件流量-差压特性对于各毛细管组几何状况是比较敏感的,如果各毛细管组制作过程中出现毛细管进出口端加工毛刺,或在使用过程中个别毛细管组发生堵塞,都会对测量数据产生显著影响,这是在制造和使用过程中需要注意的。

3.3 毛细管直径偏差

图 10 为两支路毛细管直径不同时流道内压降曲线。图 10(a)中, $d_1 > d_2$,支路 1 毛细管内流量更大,流速更大,因此,入口处产生了更多的动能损失,图中显示出比支路 2 更大的局部压降,这就导致 P_1 相对减小,差压 ΔP 相对减小,测量流量负偏差,表 6 中数据证明了这一点。与此相反,在图 10(b), $d_1 < d_2$,支路 2 流量和流速更大,支路 2 入口局部动能损失增大,导致差压 ΔP 相对增大,测量流量正偏差(参见表 7 中数据)。

图 11 为两支路毛细管直径不同时流量与差压关系曲线。很显然,差压和流量越大, Q_{mc} 与 Q_m 的偏差越明显。实际上,PPD 层流元件正常工作的一个假设是两支路中各毛细管直径相同,流过的流量相同,这样上游毛细管进出口局部损失和入口段流动压力损失可以抵消掉。而当不能满足这样假设时,上述压损不能全部抵消,造成

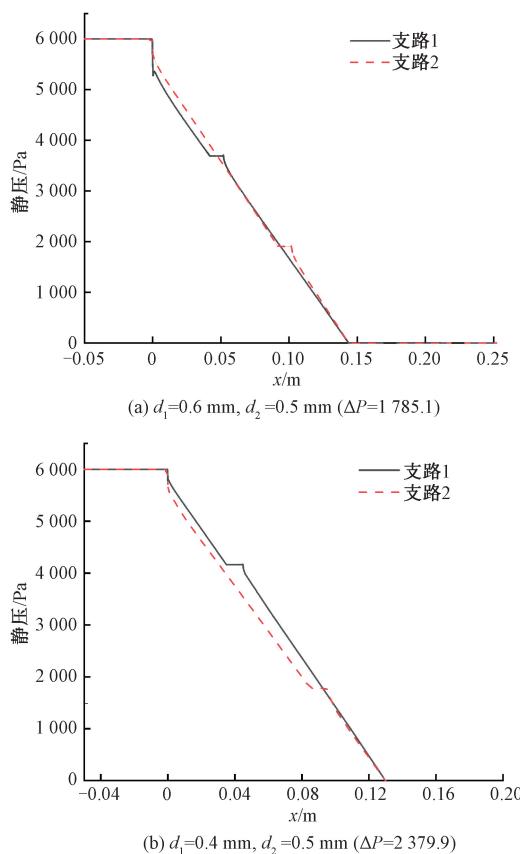


图 10 两支路毛细管直径不同情况下压降曲线

Fig. 10 Pressure drop curves when the diameter of the capillaries in the two branches are different

较大测量误差。当然,对于图 11 显示的情况可以通过非线性标定消除非线性影响,但这样就失去了 PPD 技术的优势,实用性较差。

表 6 两支路毛细管直径有偏差时流量数据

($d_1=0.6 \text{ mm}$, $d_2=0.5 \text{ mm}$)

Table 6 Flow rate data when the diameter of the capillaries in the two branches are different

($d_1=0.6 \text{ mm}$, $d_2=0.5 \text{ mm}$)

$Q_m/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$\Delta P/\text{Pa}$	$q_{mc1}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$q_{mc2}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$Q_{mc}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$\delta/\%$
2.32	355.91	1.55	0.75	2.29	-0.98
3.42	521.59	2.28	1.10	3.37	-1.35
5.56	833.95	3.65	1.76	5.40	-2.77
8.62	1264.67	5.58	2.69	8.22	-4.65
12.50	1785.13	7.94	3.83	11.63	-7.02
14.40	2027.71	9.06	4.37	13.21	-8.28

表 7 两支路毛细管直径有偏差时流量数据 2
($d_1=0.4 \text{ mm}$, $d_2=0.5 \text{ mm}$)

Table 7 Flow rate data when the diameter of the capillaries in the two branches are different

$(d_1=0.4 \text{ mm}, d_2=0.5 \text{ mm})$					
$Q_m/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$\Delta P/\text{Pa}$	$q_{mc1}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$q_{mc2}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$Q_{mc}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \times 10^{-6}$	$\delta/\%$
1.203	407.48	0.35	0.86	1.21	0.16
1.785	606.53	0.52	1.28	1.80	0.67
2.919	1004.15	0.87	2.12	2.99	2.29
4.564	1596.01	1.39	3.40	4.76	4.49
5.384	1988.89	1.74	4.26	5.95	5.66
6.695	2379.99	2.10	5.12	7.13	6.68

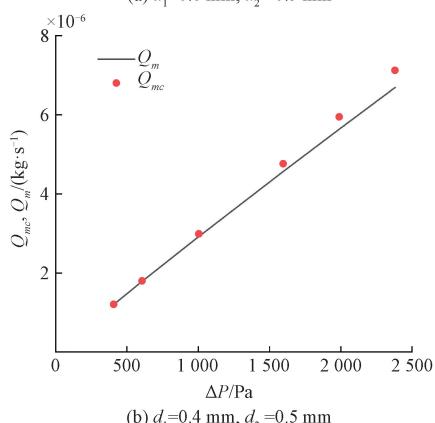
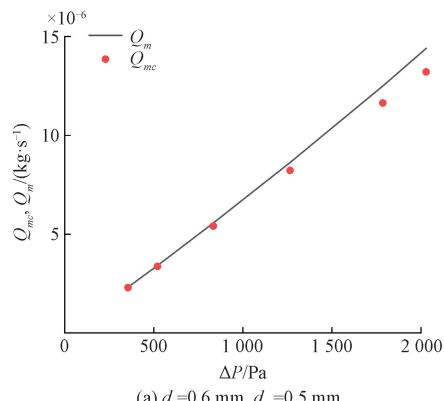


图 11 两支路毛细管直径不同流量与差压关系曲线

Fig. 11 $Q-\Delta P$ curves when the capillary diameter in the two branches is different

4 结论

本文对于 PPD 层流流量传感元件在设计制作和使

用可能出现的 3 种非标准设计或非理想情况进行了分析,采用计算流体力学方法对 PPD 层流元件流道内部流动进行了仿真,获得了压降曲线和流量-差压关系。

对于两个支路中毛细管根数不同的非标准结构设计,仿真研究中,不等数量毛细管模型计算得到流量与准确流量之间的偏差在 $\pm 0.4\%$ 以内;实验研究中,实验模型测得的流量数据与标准流量计测量数据偏差在 $\pm 0.7\%$ 以内。计算仿真和实验测试中,非等数量毛细管模型流量测量偏差都很小,说明 PPD 原理适用于两通道毛细管数量不同的结构设计,这就使得 PPD 层流元件设计有更加灵活的选择。

考虑了另外两种非理想情况:1) 在制作或使用过程中,由于加工毛刺或脏污颗粒可能造成毛细管进出口端部部分堵塞。如果发生这种情况,差压会出现非线性偏差,流量越大偏差越大,根据不同堵塞位置,可能正偏差也可能负偏差。2) 当由于设计或制作失误导致两支路中毛细管直径出现偏差时,两支路阻抗特性不再相同,两支路毛细管中流量和流速不同,进出口局部阻力不能完全抵消,差压-流量曲线将偏离理想情况。可见,PPD 层流元件流量-差压特性对于各毛细管组几何状况是比较敏感的,毛细管局部堵塞、直径偏差等都会给差压带来明显的非线性影响,这是在制造和使用过程中需要注意避免的。

参考文献

- [1] 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 and application of gas small flow test technology [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [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 ZH. Research on dynamic gas flow testing system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [3] 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 multi-component gas flow measurement and compensation algorithm based on laminar flow meter [J]. Metrology and Testing Technology, 2017, 44(5): 114-116.
- [4] 张嘉祥. 层流流量计计算数学模型和标定方法的研究 [J]. 中国测试, 2009, 35(5): 14-17.
- ZHANG J X. Study on the mathematical model and calibration method of laminar flow meter calculation [J]. China Testing, 2009, 35(5): 14-17.
- [5] 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.
- [6] BERG R F. Simple flow meter and viscometer of high accuracy for gases [J]. Metrologia, 2005, 42(1): 11-23.
- [7] 车晋. 双毛细管粘度计的深入研究 [D]. 保定: 河北大学, 2013.
- CHE J. In-depth study of double capillary viscometer [D]. Baoding: Hebei University, 2013.
- [8] 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.
- [9] PENA F L, DIAZ A D, LEMA M R, et al. A new approach to laminar flowmeters [J]. Sensors, 2010, 10(12): 10560-10570.
- [10] WANG X L, CHEN Y C, JIANG Y X, et al. Rectangle-gap-type laminar flow meter with inward pressure taps [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 79: 101893.
- [11] 王筱庐, 陈玉春, 蒋宇翔, 等. 小型片式层流流量计研究 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4): 792-796.
- WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X, et al. Study on small laminar flow meters [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(4): 792-796.
- [12] 王筱庐, 陈玉春, 蒋宇翔. 基于层流流量计的航发燃油流量动态测量技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 35-41.
- WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X. Research on dynamic measurement technology of avionics fuel flow based on laminar flow meter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 35-41.
- [13] 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): 1790-1794.
- WANG J, DOU F, ZHAO X D, et al. Research on differential laminar flow sensing technology [J]. Journal of Sensing Technology, 2019, 32(12): 1790-1794.
- [14] 黄浩钦, 赵鹏, 李国占, 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, ZHAO P, LI G ZH, et al. Study on the laminar flow sensing technique of pressure potential differential type [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 72-79.

- [15] 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 pressure level difference laminar flow sensing elements [J]. Journal of Sensing Technology, 2020, 33(11): 1587-1593.
- [16] 王晴晴, 李国占, 李长武, 等. 压力位差式层流流量传感技术气体测量适用性研究[J]. 传感技术学报, 2021, 31(4): 446-453.
WANG Q Q, LI G ZH, LI CH W, et al. Study on the applicability of pressure level difference laminar flow sensing technology for gas measurement [J]. Journal of Sensing Technology, 2021, 31(4): 446-453.
- [17] WANG Q Q, LI G Z, ZHANG D F, et al. Study on the parallel pressure differential type gas laminar flow sensing technique[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 81: 102046.
- [18] 吴霆, 时北极, 王士召, 等. 大涡模拟的壁模型及其应用[J]. 力学学报, 2018, 50(3): 453-466.
WU T, SHI B J, WANG SH ZH, et al. Wall model for large eddy simulation and its application [J]. Journal of Mechanics, 2018, 50(3): 453-466.
- [19] BERG R F. Simple flow meter and viscometer of high accuracy for gases [J]. Metrologia, 2005, 42 (1): 11-23.
- [20] 董双双, 黄浩钦, 彭衡芾, 等. 压力位差式气体层流流

量传感器开发[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 130-136.

DONG SH SH, HUANG H Q, PENG H F, et al. Development of pressure level difference gas laminar flow sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10): 130-136.

作者简介



倪洁, 2021 年于南京理工大学泰州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: nijie1232021@163.com



Ni Jie received her B. Sc. degree from Taizhou Institute of Science and Technology, Nanjing University of Technology in 2021. She is now a M. Sc. candidate in 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、能源计量技术、流体输送技术等。

E-mail: zhanghongjun@cjlu.edu.cn

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