

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905584

# 微小缝隙式层流流量计设计及测量特性研究

王筱庐<sup>1</sup>, 陈玉春<sup>1</sup>, 蒋宇翔<sup>1</sup>, 张凯<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学动力与能源学院 西安 710072; 2. 陕西易度智能科技有限公司 西安 710018)

**摘要:**为解决层流流量计(LFM)线性度不佳的问题,提出了一种微小缝隙式 LFM,并介绍了层流流量计的测量原理、结构设计及参数计算。对一台设计流量范围约为 0~280 mL/min 的试验件进行了试验,试验中使用的标准装置为活塞标准装置,合成不确定度为 0.12%,扩展不确定度为 0.24% ( $k=2$ )。试验结果显示,在未使用任何修正系数的前提下,试验件最大引用误差为 -0.90%。试验件基本达到准确度 1.0 级的设计指标,量程比 10:1。此外试验件线性度优良,其  $Re_{\max} d_c/l$  值为 3.42,大于传统要求的 2~2.5,说明此结构设计可有效克服突扩突缩带来的非线性影响。

**关键词:**层流流量计;微小气体流量;缝隙式;不确定度;线性度

中图分类号: TH814 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

## Design and measurement characteristic study on micro gap-type laminar flow meter

Wang Xiaolu<sup>1</sup>, Chen Yuchun<sup>1</sup>, Jiang Yuxiang<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>2</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shaanxi Yidu Intelligent Technology Co., Ltd, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of poor linearity of laminar flow meter, a micro gap-type laminar flow meter is proposed. The measurement principle, structure design and parameter calculation of the laminar flow meter are introduced in this paper. A gap-type LFM with a designed flow range of 0~280 mL/min was tested, the used standard equipment was a standard piston device. In the test the combined uncertainty is 0.12% and the extended uncertainty is 0.24% ( $k=2$ ). The test result shows that under the premise of not using any correction factor the maximum reference error of the tested device is -0.90%, which means that the LFM under test reaches the designed specification; accuracy of 1.0 class with a flow range of 10:1. In addition, the tested LFM has a good linearity, and the value  $Re_{\max} d_c/l$  is 3.42 that is greater than the traditional required value of 2~2.5, which indicates that this structure design can effectively overcome the nonlinear influence caused by sudden expansion and sudden contraction.

**Keywords:** laminar flow meter; micro gas flow; gap-type; uncertainty; linearity

## 0 引言

微小流量测量技术,特别是气体流量测量技术,在半导体、生物医药、航空航天等领域得到了广泛应用,在过程控制中发挥着关键作用。例如在半导体工业中,微小气体流量控制对材料的性能至关重要<sup>[1]</sup>,国际半导体产业协会(Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI)中有十余项标准同流量控制器有关,涉及精度、线性度、重复性等各方面的性能测试,足见其

重要性;在航天用等离子发动机中,氙气等工质气体流量往往小于 100 mL/min,需要流量控制器进行精确测控<sup>[2]</sup>;在航空工业中,涡轮发动机的叶片冷却技术与微小气流的控制息息相关<sup>[3]</sup>。

微小流量测量一直是个难题,微小气体流量测量更是难上加难。目前,可实用的微小气体流量测量仪器仅有皂膜流量计、热式流量计、浮子流量计、微小孔板流量计等少数几种。受精度、压力损失、自动化水平、工质类型等诸多因素的制约,仅热式流量计适合大规模应用于工业自动化<sup>[4]</sup>。然而热式流量计因精度较低、线性度差、

长期稳定性差、响应速度慢、需要各种气体实流标定等优点饱受诟病<sup>[5]</sup>,其性能还和安装位置和安装姿态有关,使用起来很不方便。因此有必要继续研究微小气体流量测量技术。

层流流量计(laminar flow meter, LFM)精度高、重复性好,被认为非常适合应用于微小流量测量,并且具有响应速度快这一热式流量计不具备的优点<sup>[6]</sup>。而且 LFM 作为一款差压式的流量计,压力损失一般在 7 kPa 以下,远小于孔板等其他差压式流量计<sup>[7]</sup>。前人针对 LFM 及相关应用进行了大量研究,取得了丰富的成果<sup>[8-10]</sup>。但是目前 LFM 因自身结构的问题,测量误差随被测介质静压的增加快速增加。因此在测量微小流量时,LFM 一般只作为标准装置使用,而无法像其他类型的流量计一样适用于各种测量场合。

本文提出了一种新型 LFM 结构,并以此为基础进行了相关技术研究,旨在解决现有 LFM 在微小流量测量上面临的问题。本文研究了相关的测量原理、结构设计和参数计算等,并通过试验验证了设计的可行性。

## 1 测量原理及结构设计

LFM 是根据哈根-泊肃叶定律设计的,该定律具体表述为当牛顿流体流经一圆管时,在温度、管径等参数一定的情况下,若管内流体处于层流状态,则流量  $q_v$  与压降  $\Delta p$  成正比,即:

$$q_v = \frac{\pi \Delta p d^4}{128 \mu l} \quad (1)$$

式中: $q_v$  为体积流量,单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $d$  为圆管当量直径,单位为  $\text{m}$ ;  $l$  为圆管长度,单位为  $\text{m}$ ;  $\mu$  为流体的动力黏度,单位为  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\Delta p$  为圆管两端的压差,单位为  $\text{Pa}$ 。

一般认为圆管内的流体雷诺数  $Re < 2\ 300$  时处于层流状态,  $Re$  的计算公式如下:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (2)$$

式中: $\rho$  为流体密度,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$  为流体平均速度,单位为  $\text{m}/\text{s}$ 。

传统 LFM 结构如图 1 所示,由尺寸微小的流道构成层流元件,并在层流元件的两端安装差压传感器,其中的引压孔用于测量层流元件两端的差压和静压,温度传感器用于修正温度对流体黏度的影响。

目前 LFM 一般采用毛细管制造,根据测量流量的大小,将合适数量的毛细管集束,如图 2 所示。不过毛细管过于细小,其内部容易存在瑕疵且不易发现,容易影响毛细管式 LFM 的测量精度;而且毛细管在堆叠时无法填充整个空间,毛细管之间的缝隙也容易形成瑕疵。也有 LFM 使用波纹板卷制而成,其层流通道类似梯形,如图 3

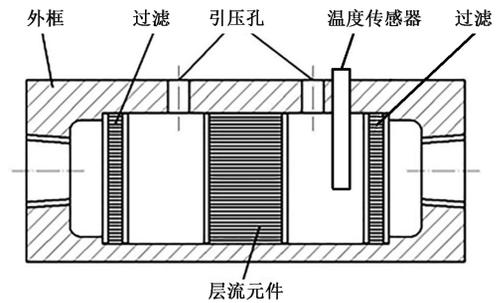


图 1 LFM 结构

Fig.1 LFM structure



图 2 毛细管式 LFM

Fig.2 Capillary-type LFM

所示。波纹板式 LFM 需要极高的工艺水平,并且不适用于微小流量的测量。此外,还有一些其他构型,例如环形缝隙式 LFM,利用同轴圆柱和圆管之间形成的间隙作为层流通道,圆柱则依靠 4 个支柱安装在圆管上,如图 4 所示。这种构型的安装结构将会对层流造成一定破坏,从而影响测量精度。

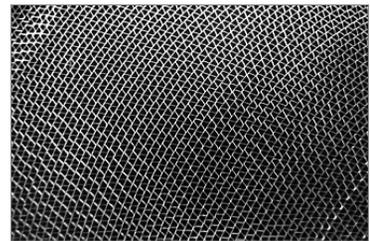


图 3 波纹板式 LFM

Fig.3 Flute-type LFM

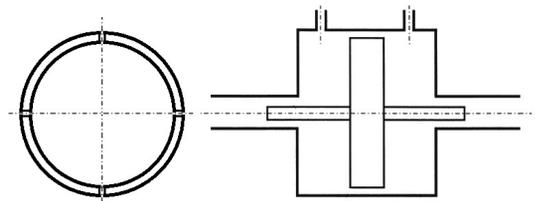


图 4 环形缝隙式 LFM

Fig.4 Annular gap-type LFM

这些构型的气体 LFM 存在固有缺陷,具体表现为差

压传感器测量得到的压差并非完全由层流引起,LFM 的压差如图 5 所示,从图 5 中可以清晰看出压差的构成。

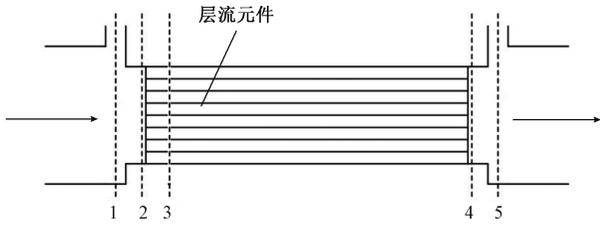


图 5 LFM 压差

Fig.5 LFM pressure difference

差压传感器测量的是截面 1~5 之间的压差,而截面 1~2、2~3、4~5 之间的压差分别为突缩损失、层流发展段损失和突扩损失,只有截面 3~4 之间的压差为层流损失。因此实际上,LFM 的压差和流量并非严格遵循式(1),这也是 LFM 的测量误差往往大于 1% 的原因。为防止非线性因素带来的误差过大,LFM 在设计时需要保证层流元件的长度,满足式(3),即保证层流损失占绝大多数<sup>[11]</sup>。此外,根据突扩突缩损失的计算公式式(4)可知,突扩突缩损失与流体的密度成正比,当流体的速度一定时,气体静压越大,密度越大,突扩突缩损失也越大。这导致层流流量计很难应对宽压力范围下的气体流量测量,多数只能用于内燃机进气测量、微小流量标准装置这类气体静压较为固定的场合。

$$Re \frac{d}{l} \leq 2 \sim 2.5 \tag{3}$$

$$\Delta p = \xi \frac{\rho u^2}{2} \tag{4}$$

式中:ξ 为损失系数,与流道结构相关。

非线性问题给层流流量计的研制带来了很大麻烦,为了解决这一问题,前人在计算模型上提出了诸多改进,在线性模型的基础上提出了指数模型、二项式模型和多项式模型等<sup>[12]</sup>。也有研究人员从 LFM 结构入手,在 LFM 的入口和出口增加导流结构,如图 6 所示,但是这种结构并未从根本上消除突扩突缩带来的影响。



图 6 带导流结构的 LFM

Fig.6 LFM with flow guiding structure

史绍熙院士曾提出一种片式 LFM 结构,由交替排布的宽窄金属薄片堆叠而成,利用平行薄片之间形成的空间作为层流流道,如图 7 所示,希望能从充分发展的层流中引压测量层流损失,从根本上解决突扩突缩带来的影响,但因材料和技术问题至今未实用化<sup>[13]</sup>。

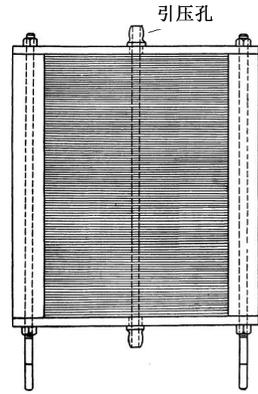


图 7 片式 LFM 主视图和俯视图

Fig.7 The front view and top view of the sheet-type LFM

图 7 所示结构本意用于内燃气进气流量测量,测量流量较大,虽未实用,却可为解决微小气体 LFM 的问题提供思路。本文提出了一种类似的微小缝隙式 LFM,其结构如图 8 所示。该 LFM 由上主体、下主体两部分组成;上主体和下主体均由整块金属加工而来,两者通过螺钉紧固在一起;下主体上有一道层流槽,与上主体连接时形成的空隙即为层流流道;层流流道的两侧有密封槽,防止气体从两侧流出;上主体上开有两个引压孔,从层流流道的中间引压。

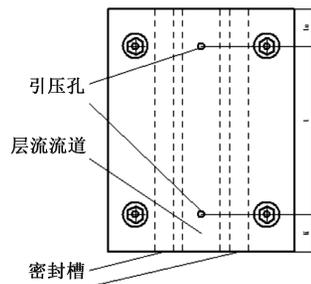
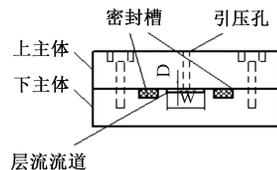


图 8 缝隙式 LFM 主视图和俯视图

Fig.8 The front view and top view of the gap-type LFM

这种结构的 LFM 上下主体均为外表面加工,表面光滑,加工质量稳定可控,不容易像毛细管一样产生内部瑕疵,形成的层流更加稳定。

## 2 参数设计

图 8 所示 LFM 的层流流道为缝隙式,其临界雷诺数要比圆形管道更小,一般为 1 000~1 100。该 LFM 的主要结构参数由  $q_v$ 、 $\Delta p$  决定,具体计算公式如下:

$$Re_{\max} = \frac{\rho d_e u_{\max}}{\mu} \quad (5)$$

$$q_{v\max} = u_{\max} WD \quad (6)$$

$$\Delta p_{\max} = \frac{12\mu Lu_{\max}}{D^2} \quad (7)$$

$$d_e = 4 \frac{WD}{2W + 2D} \approx 2D \quad (8)$$

$$l_i = l_o = 0.02875 Re_{\max} d_e \quad (9)$$

式中: $d_e$  为当量直径,单位为 m; $u_{\max}$  为设计最大平均流速,单位为 m/s; $Re_{\max}$  为设计最大雷诺数; $q_{v\max}$  为设计最大体积流量,单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\Delta p_{\max}$  为设计最大压差,单位为 Pa; $W$  为层流流道的宽,单位为 m; $D$  为层流流道的深,单位为 m; $l$  为层流流道两个引压孔之间的距离,单位为 m; $l_i$  为层流流道入口距离入口端引压孔的距离,单位为 m; $l_o$  为层流流道出口距离出口端引压孔的距离,单位为 m。

式(7)为两平行平板间流动时压力损失的近似计算公式,是研究图 7 结构时推导而来的。图 7 中  $W=152.4$  mm, $D=0.48$  mm,单个流道的流量往往在 60 L/min 以上,式(7)能否适用于本文所研究的微小气体流量测量,需要进行试验验证。

此种形式的缝隙式 LFM,流量大小由流道尺寸  $W$ 、 $D$  所决定。一般而言, $W$ 、 $D$  不宜小于 0.1 mm,不然加工质量很难控制。选择合适的  $W$ 、 $D$  的值,可测量获得不同的测量范围。当  $W$ 、 $D$  值均为 0.1 mm,该种构型的 LFM 理论上最小可测量 1 mL/min 左右的微小流量。

本文中设计了一台流量约为 0~280 mL/min 的微小缝隙式 LFM 试验件,预期设计准确度等级 1.0 级,具体参数选择和计算结果如表 1 所示。计算时采用 25℃,101 325 Pa 时干空气的物性参数。

## 3 试验装置

为验证微小缝隙式 LFM 的性能,本文对试验件进行了试验。试验参考了 JJF 1314-2011《气体层流流量传感器型式评价大纲》(以下简称大纲)<sup>[14]</sup>,试验装置的设计参考了小流量体积管标准装置<sup>[15]</sup>,试验装置如图 9 所示。试验装置以高压气瓶为气源,气瓶内装的是干燥

表 1 参数选择和计算

Table 1 Parameter selection and calculation

序号	符号	单位	设计值
1	$W$	mm	2
2	$D$	mm	0.12
3	$d_e$	mm	0.226
4	$u_{\max}$	m/s	20
5	$Re_{\max}$	-	292
6	$l$	mm	20
7	$l_i$	mm	1.95
8	$l_o$	mm	1.95
9	$q_{v\max}$	mL/min	289
10	$\Delta p_{\max}$	Pa	6 117

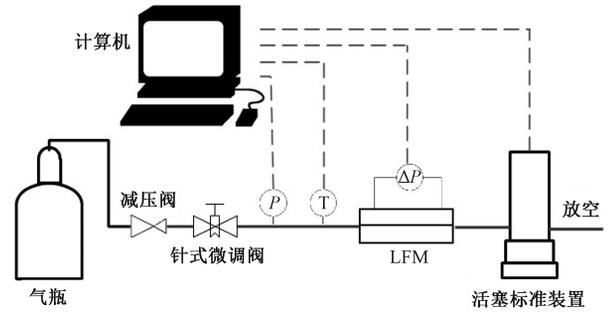


图 9 试验装置结构

Fig.9 Structure of the test equipment

空气。试验装置运行时,气体从高压气瓶流出,经减压阀减压后由针式微调阀调节流量,然后流过微小缝隙式 LFM 试验件,最后流入标准装置。由于测试所需要的流量很小,无需过多的稳压设计就能保证试验时流量的稳定。根据设计的压力损失,采用量程为 7 kPa,基本误差为 0.25% FS 的单晶硅差压传感器测量 LFM 产生的压差。

试验采用的标准装置为一款量程为 5~500 mL/min,基本误差为  $\pm 0.15\%$  RD 的活塞标准装置,按矩形分布估计,其标准不确定度为 0.087%,如图 10 所示。活塞标准装置的精度建立在初级的 SI 单位上,装置内含有一个近似无摩擦的活塞,可在硼硅玻璃测量筒内自由活动。当旁路阀门关闭时,气流会流入测量筒,迫使活塞移动。两个光电传感器用于捕捉活塞的运动。两个光电传感器之间的距离,测量筒的直径均已经被精确测量,活塞通过两个光电传感器之间的时间由晶振测量,活塞标准装置可由此计算出体积流速。活塞标准装置的内部装有高精度的温度传感器和压力传感器,通过温压修正可以得到流入测量筒的质量流速(25℃,

101 325 Pa)。根据式(6)和(7),在试验件前安装温压传感器,将活塞标准装置测得的质量流速转化为试验件入口处的体积流速。

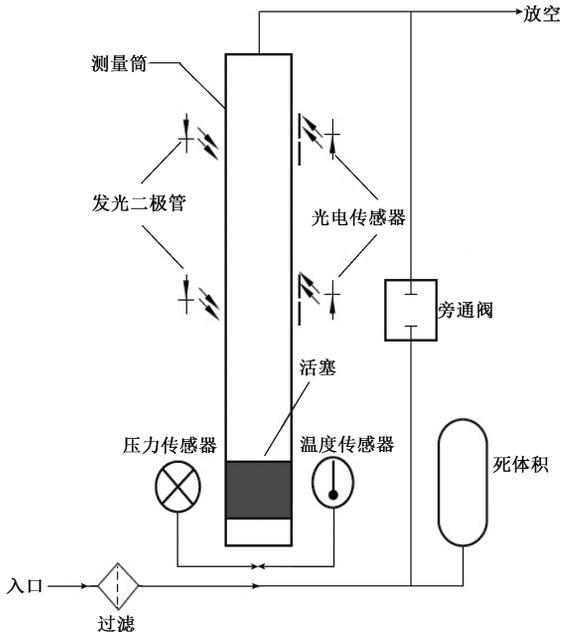


图10 活塞标准装置

Fig.10 Piston standard device

综合分析系统,可得整套试验装置的合成不确定度为0.12%,扩展不确定度为0.24%, $k=2$ ,不确定度分析如表2所示。

表2 试验装置不确定度分析

Table 2 Uncertainty analysis of the test equipment

序号	符号	来源	标准不确定度 $u_r(x_i)/\%$	灵敏系数 $c_r(x_i)/\%$	$ c_r(x_i) $ $u_r(x_i)/\%$
1	$q_m$	活塞标准装置	0.087	1	0.087
2	$P$	试验处压力	0.065	1	0.065
3	$T$	试验处温度	0.029	-1	0.029

## 4 试验结果及分析

试验时采用的气体为干燥压缩空气,大气温度为20.2℃,大气压力为96.6 kPa。整个试验过程采用计算机进行数据采集和处理。数据记录及处理如表3所示。

分析试验数据,可得以下主要结论。

1)分析测量压差和流量标准值,采用最小二乘法拟合两者之间的曲线<sup>[16]</sup>,如图11所示,可知微小缝隙式LFM试验件的线性拟合优度 $R^2$ 优良,可达0.999 55。根据表1所给参数,试验件的 $Re_{\max} d_e/l = 3.42$ ,要大于式(3)所要求的2~2.5。试验结果显示,试验件依旧具

表3 缝隙式LFM测试数据

Table 3 The test data of the gap-type LFM

序号	测量压差 (Pa)	标准流量值 /(mL/min)	测量流量值 /(mL/min)	绝对误差 /(mL/min)	引用误差
1	395.9	20.5	21.7	22.7	0.77
2	825.5	40.9	40.9	41.8	0.32
3	1 668.7	81.1	78.7	79.3	-0.63
4	2 550.3	120.6	118.2	118.6	-0.73
5	3 412.7	159.4	156.8	156.9	-0.90
6	4 351.3	197.4	198.9	198.7	0.47
7	5 147.8	235.0	234.5	234.1	-0.30
8	6 020.0	271.8	273.6	273.0	0.40

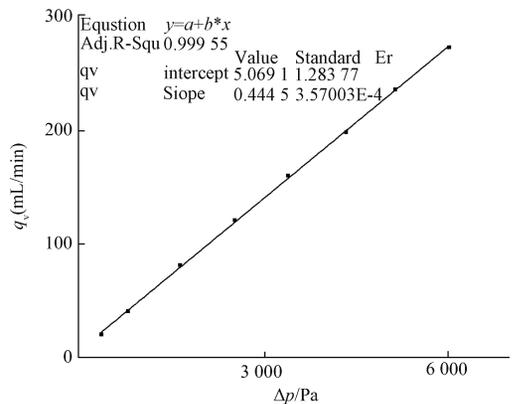


图11 测量压差和流量标准值拟合直线

Fig.11 The fitting line of the test pressure difference vs. standard flow value

有优良的线性度,说明该设计的确能有效减少突扩突缩带来的非线性影响。

2)微小缝隙式LFM的最大引用误差为-0.90%。根据《大纲》的要求,试验装置的扩展不确定度不能超过试验传感器最大允许误差的1/3,差压传感器的最大允许误差应不超过传感器最大允许误差的1/2。本文使用的试验装置及差压传感器均满足《大纲》要求。试验结果显示,试验件在量程比为10:1的条件下,基本达到准确度1.0级的设计指标。

3)参考文献[12]根据校准试验给出的校准公式如下:

$$q_v = q_{r0} \left[ 1 + g_{\text{virial}}(p_1, p_2) + 4K_{\text{slip}}Kn + \frac{K_{\text{ent}} + K_{\text{exit}}}{16} \cdot \frac{r}{l} \text{Re} + \left( \frac{K_{\text{exp}}}{8} + \frac{g_{\text{therm}}}{16} \right) \frac{r}{l} \text{Re} \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \right] \quad (10)$$

式中: $q_{e0}$ 为修正前流量,单位为 $\text{m}^3/\text{s}$ ; $p_1$ 为 LFM 入口压力,单位为 Pa; $p_2$ 为 LFM 出口压力,单位为 Pa; $g_{\text{virial}}$ 为实际气体修正系数; $K_{\text{slip}}$ 为壁面滑移修正系数; $Kn$ 为克努森数; $K_{\text{ent}}$ 、 $K_{\text{exit}}$ 为突扩突缩修正系数。

通过式(10)的修正,3款商用 LFM 在 10:1 的量程比下最大引用误差为 0.8%。式(10)中的修正系数由试验得出,且与 LFM 的采用的层流元件结构相关。本文试验件在仅使用式(6)和(7)这两个线性公式的前提下最大引用误差为-0.90%,证明了从充分发展的层流中引压这一设计的可行性。

4) 根据试验及结果分析,微小缝隙式 LFM 的设计思路及式(5)~(9)所给的设计方法基本可行。

## 5 结 论

为解决 LFM 在微小气体流量测量时线性度不佳、结构脆弱的问题,本文提出了一种缝隙式 LFM。该形式 LFM 结构简单、可靠,将引压孔设置在层流通道中间,从充分发展的层流中引压,克服非线性因素。本文设计了一台流量为 0~280 mL/min 的试验件,并用活塞标准装置对其进行了试验,装置扩展不确定度为 0.24%, $k=2$ 。试验结果显示,在未经过任何修正系数的前提下,试验件最大引用误差为-0.90%。试验件基本达到准确度 1.0 级的设计指标,量程比为 10:1。此外试验件线性度优良,试验件的  $Re_{\text{max}} d_e/l = 3.42$ ,要大于式(3)所要求的 2~2.5,说明此微小缝隙式 LFM 采用的设计可有效克服突扩突缩带来的非线性影响。本文提出的设计思路及方法基本可行。本文研究对于 LFM 在微小气体测量方面的工业推广应用意义明显。

## 参考文献

[1] 倪玉凤,董鹏,屈小勇,等.扩散气体流量对单晶硅太阳能电池性能的影响[J].电源技术,2017,41(3):422-424.  
NI Y F, DONG P, QU X Y, et al. Effects of gas flow in diffusion process on properties of single crystalline silicon solar cells[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(3):422-424.

[2] 郑茂繁,张天平,孟伟,等.20 cm 氙离子推力器性能扩展研究[J].推进技术,2015,36(7):1116-1120.  
ZHENG M F, ZHANG T P, MENG W, et al. Research of improvement performance for 20 cm xenon ion thruster [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015,36(07):1116-1120.

[3] 王克菲,骆剑霞,田淑青,等.叶片吸力面不同位置处气膜冷却特性对比[J].航空动力学报,2017,32(6):

1281-1288.

WANG K F, LUO J X, TIAN SH Q, et al. Film cooling performance comparison at different positions on blade suction side [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6):1281-1288.

- [4] 王池,王自和,张宝珠,等.流量测量技术全书[M].北京:化学工业出版社,2012.  
WANG CH, WANG Z H, ZHANG B ZH, et al. Flow measurement technique handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [5] 李雯.热式质量流量计的设计[D].杭州:浙江大学,2007.  
LI W. Design of thermal mass flowmeter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [6] 王荣杰,王伯年,张进明.准定常流法测定瞬时流量的判据研究[J].仪器仪表学报,2002,23(2):150-153,211.  
WANG R J, WANG B N, ZHANG J M. Study on the criterion for measuring the instantaneous flowrate with the quasisteady flow method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002,23(2):150-153,211.
- [7] 宋晓明,贾志宁,杨洋,等.一种对称多孔孔板差压式流量计设计[J].电子测量与仪器学报,2018,32(6):33-38.  
SONG X M, JIA ZH N, YANG Y, et al. Design of symmetrical multi-hole orifice differential pressure flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(6):33-38.
- [8] 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.
- [9] 刘臣勇.气体小流量测试技术研究与应用[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.
- [10] 叶惠传.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.
- [11] 王伯年,王荣杰,王利民,等.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.

WANG B N, WANG R J, WANG L M, et al. Selection and determination of laminar flow meter design parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000,21(5):474-476.

- [12] 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(6):8-14.

- [13] 王伯年.史绍熙院士对层流流量计和内燃机空气流量测量的贡献[J].内燃机学报,2001,19(6):531-534.

WANG B N. Contributions on laminar flowmeter and intake flowrate of ICE by academician Shih S.H. [J]. Transactions of CSICE, 2001,19(6):531-534.

- [14] JJF 1314-2011 气体层流流量传感器型式评价大纲[S].中国:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2011.

JJF 1314- 2011 Program of Pattern Evaluation for Gas Laminar Flow Transducers [ S]. China: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.

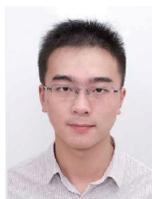
- [15] 尹保来,杨修杰,雷励,等.基于体积管标准装置的小流量临界流文丘里喷嘴检定方法研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(10):895-898.

YIN B L, YANG X J, LEI L, et al. Research on the measurement way of the small critical flow venture nozzle based on the gas prover standard device [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(10):895-898.

- [16] 刘军,崔学伟,田甜.最小二乘法在流量计算中的应用[J].电子测量技术,2018,41(21):35-41.

LIU J, CUI X W, TIAN T. Application of least square method in flow calculation [J]. Electronic Measurement Technology, 2018,41(21):35-41.

## 作者简介



王筱庐,分别在2013年和2015年于西北工业大学获得学士学位和硕士学位,现于西北工业大学博士研究生,主要研究方向为流体测控。

E-mail:15802950087@163.com

**Wang Xiaolu** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Northwestern Polytechnical University in 2013 and 2015, respectively. Now, he is a M. Sc. candidate at Northwestern Polytechnical University. His main research interest is fluid measurement and control.



陈玉春,分别在1989年、1992年和2009年于西北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为西北工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为航空宇航科学与技术。

E-mail:chych888@nwpu.edu.cn

**Chen Yuchun** received his B. Sc. Degree, M. Sc. and Ph. D. degrees both from Northwestern Polytechnical University in 1989, 1992 and 2009, respectively. Now, he is a professor and doctoral supervisor at Northwestern Polytechnical University. His main research interest is aerospace science and technology.



张凯,2013年于北京化工大学获得学士学位,2016年于西北工业大学获得硕士学位,现工作于陕西易度智能科技有限公司,主要研究方向为流体测控。

E-mail:1428405506@qq.com

**Zhang Kai** received his B. Sc. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2013, received his M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2016. Now, he is working for Shaanxi Yidu intelligent technology co., LTD. His main research interest is fluid measurement and control.