

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002891

对称多孔孔板差压式流量计计量性能试验研究^{*}

郝彩哲¹ 宋晓明¹ 王 东² 贾志宁¹

(1. 承德石油高等专科学校 河北省仪器仪表工程技术研究中心 承德 067000;
2. 承德菲时博特自动化设备有限公司 承德 067000)

摘 要:多孔孔板差压式流量计因其快速平衡调整流场和有效降低压力损失等能力得到广泛应用,但其尚缺乏完整的结构参数设计和性能优化设计准则。针对提出的对称多孔孔板差压式流量计进行实流试验,研究其计量性能并与数值模拟结果进行对比分析,结果表明,对称多孔孔板差压式流量计可有效提高计量精度($\pm 0.5\%$)、降低压力损失,具有更好的适应性,试验结果与数值模拟结果具有一致性,验证了数值模拟的正确性并对新型流量计进行了标定,研究结果可有效拓宽多孔孔板流量计的应用范围。

关键词: 多孔孔板;差压;计量性能;实流试验

中图分类号: TN911.72; TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Experimental study on measurement performance of symmetrical multi-hole orifice pressure differential flowmeter

Hao Caizhe¹ Song Xiaoming¹ Wang Dong² Jia Zhining¹

(1. Chengde Petroleum College, Hebei instrument & Meter Engineering Technology Research Center, Chengde 067000, China; 2. Fischer & Porter Limited, Chengde 067000, China)

Abstract: Multi-Hole orifice pressure differential flowmeter has been widely used due to this ability to quickly adjust the flow field and effectively reduce pressure loss, but it still lacks complete structural parameter design and performance optimization design criteria. In this paper, the actual flow test of the proposed symmetric porous orifice differential pressure flowmeter is carried out, and its measurement performance is compared with the numerical simulation results. The results show that the symmetric porous orifice differential pressure flowmeter can effectively improve the measurement accuracy ($\pm 0.5\%$), reduce pressure loss, have better adaptability. Test results are consistent with numerical simulation results, verify the correctness of numerical simulation and calibrate the new flowmeter, the research results can effectively broaden the porous orifice flowmeter The scope of application.

Keywords: multi-hole orifice; differential pressure; metrological performance; flow test

0 引 言

流量计量是工业生产的眼睛,广泛应用于科学研究、工农业生产、国防建设以及人民生活等领域^[1-3]。诸多流量计中,传统差压式流量计因其结构简单、成本低、实验数据丰富、标准化程度高等优点,应用最为广泛。但在实际应用中很多工况条件无法满足测量要求(如低于标准中推荐的雷诺数范围、测量介质中混有泥沙等),进而限

制了其应用范围^[4-6]。

在这些情况下,非标准差压式流量计得到快速发展和进一步的应用,目前最具代表性的非标准差压式流量计主要有锥形流量计和多孔孔板流量计^[7-10]。多孔孔板流量计不但继承了标准孔板流量计的优点,而且能够快速平衡调整流场,明显减少涡流、降低死区效应、减少流体动能损失^[11-13],在国际上引起广泛关注,自2006年被引进我国市场以来,得到广泛应用。但因涉及商业机密,多孔孔板流量计的结构参数与流出系数等计算公式未曾

公开。为了掌握该流量计的核心技术,国内科研技术人员对其进行了大量研究,主要集中于孔板结构参数优化及计量性能等方面^[14-18]。目前,实际应用中要根据不同测量条件来设计流量计,缺乏完整的结构参数设计和性能优化设计准则指导。

河北省仪器仪表工程技术研究中心对多孔孔板流量计进行了大量的研究工作,结合多孔整流器和标准孔板联合使用的测量原理,提出了一种对称多孔孔板差压式流量计的设计方法(即在中心节流孔周围均匀环形分布若干孔),采用 CFD 数值模拟预测了其内部流场,并研究了孔数量对多孔孔板流量计流场特性的影响规律^[19-20]。但数值模拟只能为研究提供方向性的指导,并不能很好的指导实际生产。本文基于数值模拟结果搭建对称多孔孔板差压式流量计实流标校试验平台,对其计量性能进行试验研究,检验了 CFD 设计成果的有效性,并对新型流量计进行了标定。

1 多孔孔板流量计

课题组提出并设计的多孔孔板流量计结合了多孔整流器和标准孔板的测量原理,基本结构为在节流板中心一个圆孔的基础上,对称分布数量不等的圆孔,如图 1 所示,均匀分布的圆孔的总面积和标准孔板的开孔面积相等。流量计整体结构如图 2 所示。

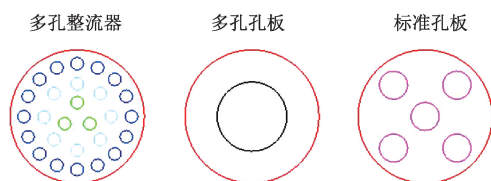


图 1 对称多孔孔板差压式流量计的孔板结构

Fig. 1 Orifice plate structure of symmetrical multi-hole orifice pressure differential flow meter

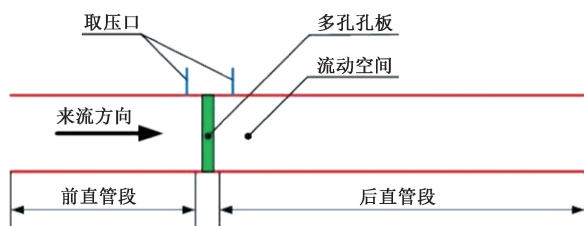


图 2 流量计整体结构

Fig. 2 Flowmeter overall structure

多孔孔板流量计的测量原理是以能量守恒定律和质量守恒定律为基础的,即在流量检测时,所测介质流过圆孔的同时进行流体整流,减小节流装置后形成的涡流,形

成较稳定的紊流(近似理想流体),从而获得稳定的差压信号,根据伯努利方程计算出流体的流量:

$$Q = KY \sqrt{\Delta P / \rho} \quad (1)$$

式中: Q 为介质流量; K 为仪表系数; Y 为膨胀系数; Δp 为差压值(Pa); ρ 为介质工况密度。

2 数值模拟

针对设计的对称多孔孔板差压式流量计,分别对开孔数量为 1、4、5、7(孔的分布位置如图 3 所示,参数如表 1 所示)的流量计采用 CFD 数值模拟技术分析了其内部流场情况,如图 4 所示,研究了孔数量对多孔孔板流量计流场特性的影响规律,得出对称多孔孔板差压式流量计具有可降低节流件前后涡流、快速平衡内部流场(前后直管段要求:前 $1D \sim 3D$,后 $0.5D \sim 1D$,其中 D 为流通直径)、提高测量精度、降低压力损失、适应性更好的优点,随着孔数量的增加压力损失逐渐降低、流出系数提高的结论。

3 试验标校平台的组成

为了验证数值模拟的正确性,搭建对称多孔孔板差压式流量计试验标校平台,由对称多孔孔板差压式流量计、截止阀、差压变送器、流量调节阀、电磁流量计、水泵和水槽及管路系统组成,如图 5 所示,其中对称多孔孔板差压式流量计和电磁流量计与试验管道均通过法兰连接。试验过程中,流量计工装示意图如图 6 所示。

工作原理如下:通过试验管路变频调速水泵及上游侧流量调节阀开度的适当调节,获得流速 $0 \sim 7 \text{ m/s}$ 连续可调的流体介质,并采用高精度电磁流量计(作为标准器具,准确度 $\pm 0.2\% \text{ R}$) 测量实际流量(流速),利用高精度差压变送器(EJA110E 系列、量程 $0 \sim 100 \text{ kPa}$ 、准确度 $\pm 0.065\% \text{ FS}$) 测量压差值及压力损失值。

为了与数值模拟结果进行比较,相应设置保持一致性:介质采用水(环境温度 $5^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$)、湿度 $35\% \text{ RH} \sim 95\% \text{ RH}$ 、大气压力 $86 \text{ kPa} \sim 106 \text{ kPa}$,流速 $(0.2、0.3、0.5、0.8、1.0、1.2、1.5 \text{ m/s})$,管路规格 DN80(节流元件上下侧直管段长度约为 5 m ,充分保证了多孔平衡流量计测量中对前后直管段研究的要求),取压方式为法兰取压(上下游取压孔轴线距离多孔流量计节流件上下游端面均为 $25.4 \pm 0.5 \text{ mm}$)。其他参数为介质水密度 $\rho = 998.403 \text{ kg/m}^3$ 、动力粘度 $1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、流束膨胀系数 $\epsilon = 1$ 。

实流试验现场如图 7 所示,试验用对称多孔孔板差压式流量计如图 8 所示。

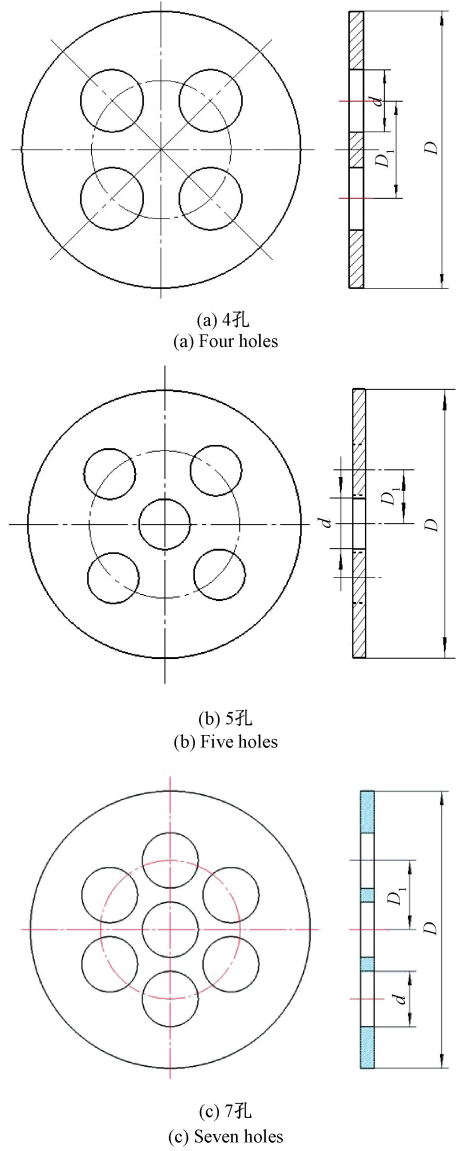


图 3 流量计孔板开口位置

Fig. 3 Flowmeter orifice plate opening position

表 1 多孔孔板参数

Table 1 The parameters of multi-hole orifice

孔数	通流直径/mm	开孔直径/mm	孔板厚度/mm	通流面积/mm ²
1		36		
4	80	18	4	5 024
5		16.1		
7		13.6		

4 试验结果分析

按要求搭建试验标校平台,进行实流试验,获得流量计试验的差压与压力损失值,如表 2 所示,并与数值模拟结果进行对比,为了更为直观和分析的方便,将不同开口数量流量计的压力损失值绘制成曲线,如图 9 所示。

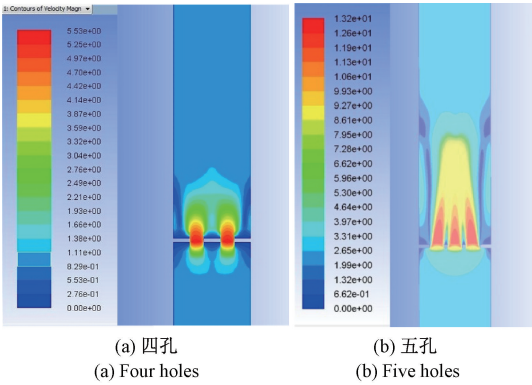


图 4 对称多孔孔板差压式流量计流场
Fig. 4 Flow field of symmetrical multi-hole orifice pressure differential flow meter

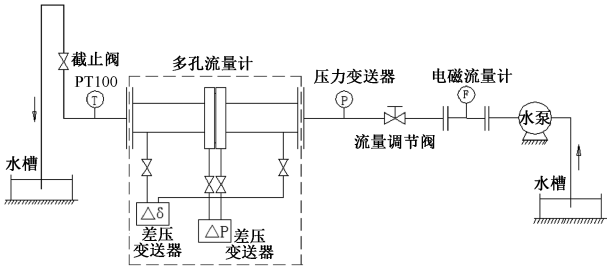
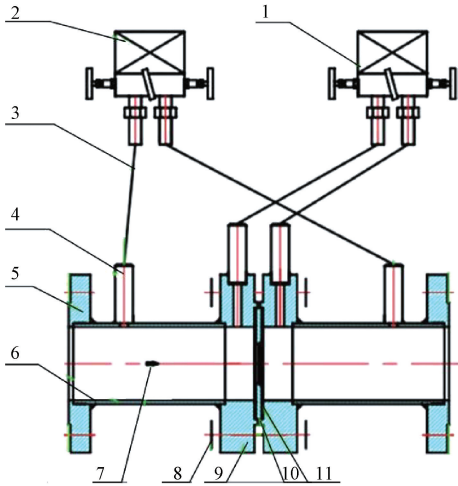


图 5 试验标校平台
Fig. 5 Test calibration platform



1-差压变送器(测量差压);2-差压变送器(测量压损);
3-取压软管;4-取压管;5-管道法兰;6-测量管;7-来流方向;
8-紧固件;9-取压法兰;10-节流件;11-垫片

图 6 流量计工装示意图

Fig. 6 Flowmeter tooling diagram

由图 9 可以看出,对称多孔孔板差压式流量计的压力损失比标准孔板流量计的要小一些,并且随着孔数的增加压力损失呈现逐渐减小的趋势。

流出系数是评价节流式仪表性能的最重要参数之

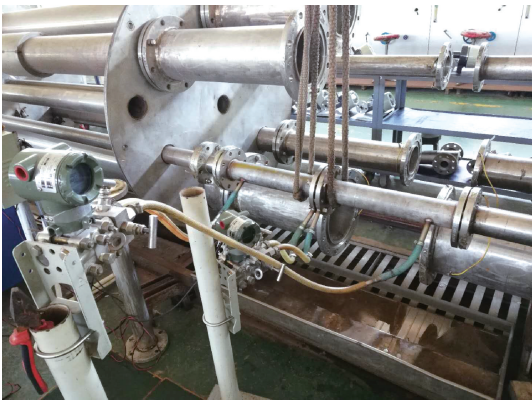


图7 现场实流试验
Fig. 7 On-site flow test

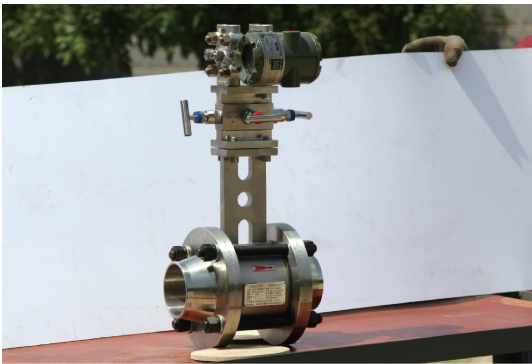


图8 试验用多孔流量计本体
Fig. 8 Test porous flowmeter

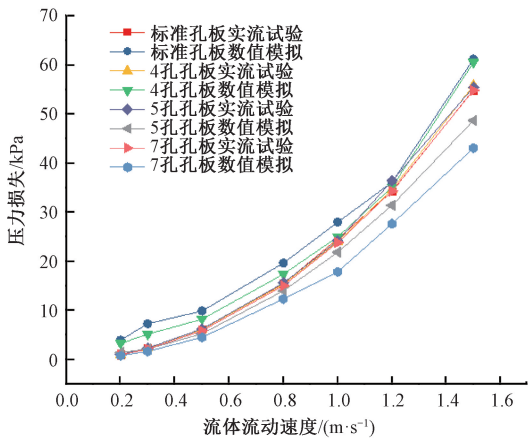


图9 流量计压力损失变化曲线
Fig. 9 Permanent pressure loss curve

一,为实际流量与理论流量的比值,是统计量,受设计、制造、安装及使用条件的影响。根据不可压缩流体的连续性方程和伯努利方程,定常流体的体积流量为^[8]:

$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

(2)

表2 试验的差压与压力损失值
Table 2 Differential pressure and pressure loss of the test

管道流速	平均管道流量	平均差压	平均压损
$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	$\Delta P_i/\text{kPa}$	$\delta P_i/\text{kPa}$
标准孔	0.2	3.78	1.34
	0.3	5.71	3.08
	0.5	9.18	7.99
	0.8	14.43	19.86
	1.0	18.22	31.55
	1.2	21.50	43.99
	1.5	27.26	70.53
	0.2	3.70	1.27
4孔	0.3	5.63	2.90
	0.5	9.20	7.78
	0.8	14.51	19.49
	1.0	18.15	30.48
	1.2	21.83	43.90
	1.5	27.68	70.96
	0.2	3.79	1.33
	0.3	5.63	2.98
5孔	0.5	9.19	7.89
	0.8	14.53	19.75
	1.0	18.02	30.65
	1.2	22.11	46.12
	1.5	27.28	70.29
	0.2	3.55	1.16
	0.3	5.61	2.90
	0.5	9.25	7.75
7孔	0.8	14.83	20.05
	1.0	18.83	32.64
	1.2	22.34	45.99
	1.5	27.43	69.26
			54.85

注:每点标准表数值 Q 、差压值 ΔP 、压损值 δ 记录 3 次,为了节省篇幅,取其平均值进行表格相应栏的填写

式中: C 为流出系数,无量纲; β 为等效直径比,无量纲 ($\beta^2=A_0/A$,其中 A_0 为孔板节流孔开孔面积, A 为管道截面面积); d 为孔板节流孔等效直径; Δp 为压差; q_v 为体积流量; ρ 为流体介质密度。

依据式(2),确定流出系数 C 的数值:

$$C = \frac{q_v \sqrt{1-\beta^4}}{\frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}}$$

(3)

结合实验数据和式(3)得不同开口数量流量计的流出系数,如表 3 所示,为了与数值模拟结果进行直观对比,将不同开口数量流量计的流出系数绘制成曲线,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,对称多孔孔板差压式流量计的流出系数比标准孔板流量计的要大一些(对于标准孔板,其试验范围内流出系数平均值为 0.614 0,对于多孔孔板流量计其试验范围内流出系数平均值为 4 孔孔板 0.622 1、

表 3 试验流出系数值

Table 3 Outflow coefficient value of the test

管道流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	流出 系数 C_{i1}	平均流出 系数 C_{i2}	流出 系数 C_{i3}	平均流出 系数 C_i
标准孔	0.2	0.616 6	0.617 3	0.616 6
	0.3	0.613 3	0.614 3	0.617 4
	0.5	0.612 9	0.613 9	0.613 5
	0.8	0.611 1	0.611 3	0.611 4
	1.0	0.612 7	0.612 6	0.612 6
	1.2	0.612 4	0.612 1	0.612 0
	1.5	0.613 0	0.612 8	0.612 9
	0.2	0.620 7	0.619 9	0.619 2
	0.3	0.625 4	0.624 2	0.623 1
	0.5	0.621 4	0.622 7	0.624 7
4 孔	0.8	0.620 9	0.620 2	0.620 2
	1.0	0.621 0	0.620 8	0.620 9
	1.2	0.621 7	0.621 1	0.623 8
	1.5	0.620 3	0.620 2	0.620 6
	0.2	0.620 5	0.629 8	0.627 3
	0.3	0.625 8	0.622 6	0.628 1
	0.5	0.627 5	0.627 8	0.627 7
	0.8	0.628 8	0.627 7	0.625 9
	1.0	0.623 9	0.624 2	0.625 7
	1.2	0.625 0	0.624 8	0.624 1
5 孔	1.5	0.622 4	0.625 4	0.625 6
	0.2	0.633 3	0.630 6	0.634 1
	0.3	0.635 2	0.636 4	0.635 8
	0.5	0.636 8	0.637 4	0.637 7
	0.8	0.635 4	0.636 3	0.634 8
	1.0	0.632 5	0.632 2	0.631 9
	1.2	0.632 4	0.632 6	0.630 8
	1.5	0.631 8	0.632 2	0.633 2
	0.2	0.633 3	0.630 6	0.634 1
	0.3	0.635 2	0.636 4	0.635 8
7 孔	0.5	0.636 8	0.637 4	0.637 7
	0.8	0.635 4	0.636 3	0.634 8
	1.0	0.632 5	0.632 2	0.631 9
	1.2	0.632 4	0.632 6	0.630 8
	1.5	0.631 8	0.632 2	0.633 2
	0.2	0.633 3	0.630 6	0.634 1
	0.3	0.635 2	0.636 4	0.635 8
	0.5	0.636 8	0.637 4	0.637 7
	0.8	0.635 4	0.636 3	0.634 8
	1.0	0.632 5	0.632 2	0.631 9

注:每点流出系数 C 记录 3 次,取其平均值进行表格相应栏的填写

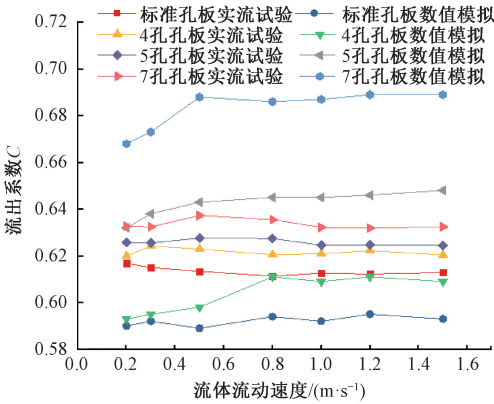


图 10 流量计流出系数变化曲线

Fig. 10 Outflow coefficient curve

5 孔孔板 0.626 8、7 孔孔板 0.634 6),随着孔数增加流出系数呈现逐渐增大的趋势。

结合图 9 和 10,试验结果和数值模拟计算的结果相

比,压力损失与流出系数的变化趋势完全一致,但在数值上存在一定偏差,误差在 8%。

流出系数的系统误差 e_1 为:

$$e_1 = \frac{C_i - C_0}{C_0} \times 100\% \tag{4}$$

式中: C_0 为理论流出系数,计算方法依据国际标准 ISO5167—2003 的规定; C_i 为实际流出系数的平均值。

若忽略管道制造和安装误差以及温度、流体密度的影响,依据式(3)可以得到:

$$\frac{dC}{C} = \frac{\frac{\partial q_v 4 \sqrt{1 - \beta^4}}{\pi d^2 \sqrt{2 \Delta P / \rho}} + \frac{\partial (1 / \sqrt{\Delta P}) 4 q_v \sqrt{1 - \beta^4}}{\pi d^2 \sqrt{2 / \rho}}}{\frac{4 q_v \sqrt{1 - \beta^4}}{\pi d^2 \sqrt{2 \Delta P / \rho}}} = \frac{\frac{\partial q_v}{q_v} - \frac{\partial (\Delta P)}{2 \Delta P}}{\tag{5}}$$

流出系数的随机误差 e_2 为:

$$e_2 = \left[\left(\frac{\partial q_v}{q_v} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \Delta P}{\Delta P} \right)^2 + e_3^2 \right]^{0.5} \times 100\% \tag{6}$$

式中: $\frac{\partial q_v}{q_v}$ 为标准状态下介质水的体积流量的不确定度;

$\frac{\partial \Delta P}{\Delta P}$ 为介质水流经孔板时产生的差压的不确定度; e_3 为流量校准装置的基本误差限。

则,流出系数的不确定度 e 为:

$$e = e_1 + e_2 \tag{7}$$

对于电磁流量计(标准表)精度为 0.2 级,EJA110E 高精度压差传感器(变送器)的准确度为 $\pm 0.065\%$,经计算,流出系数的不确定度为 4 孔 $\pm 0.467\%$ 、5 孔 $\pm 0.439\%$ 、7 孔 $\pm 0.446\%$,即流出系数的误差均不超过 $\pm 0.5\%$,由此并基于流出系数定义可见流量计的计量精度为 0.5%。

5 结 论

本文对多孔孔板差压式流量计进行了实流试验研究,分析了标准孔板与对称多孔孔板流量计的计量性能并与数值模拟结果进行对比,结论如下。

1) 实流试验结果与 CFD 数值模拟结果在趋势上体现出完全的一致性,但在数值上存在一定的偏差,因此 CFD 计算结果并不能完全代替试验研究的成果。但是这种偏差并不是很大,作为工程上的估算其精度能够满足要求。

2) 通过对称多孔孔板差压式流量计的实流标定,结果显示流出系数 C 相对于标准孔板流量计有较大的提高,量程范围大大拓宽,是一种可以应用于实际测量的新

型流量计产品。具体性能指标如下:精度 $\pm 0.5\%$;前后直管段要求为前 $1D\sim 3D$,后 $0.5D\sim 1D$ 。

3) 对称多孔孔板差压式流量计具有压力损失小、流出系数高、适应性好等特点,完全可以直接应用于工程中。目前该流量计已经在市场得到应用,一定程度上拓宽了其应用范围。

参考文献

- [1] ZHAO T Y, ZHANG J L. Experimental investigation of key parameters pertinent to multi-hole orifice throttling characteristic [J]. Journal of Harbin Institute of Technology: New Series, 2008, 15(1): 9-10.
- [2] 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 Publishing House, 2012.
- [3] SHAH M S, JOSHI J B, KALSI A S, et al. Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 71: 300-309.
- [4] READER-HARRIS M, BARTON N, HODGES D. The effect of contaminated orifice plates on the discharge coefficient [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 25(3): 3-5.
- [5] SINGH R K, SINGH S N, SESHADRI V. performance evaluation of orifice plate assemblies under non-standard conditions using CFD [J]. Indian Journal of Engineering and Materials Science, 2010, 17(6): 397-406.
- [6] 于洪仕, 张涛, 赵珊珊, 等. 多孔孔板流量计流场仿真[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(1): 61-66.
- YU H SH, ZHANG T, ZHAO SH SH, et al. Simulation of the flow field of multi-hole orifice flowmeter [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, 47(1): 61-66.
- [7] 程宇, 刘玉长. 多孔孔板流量计的函数孔结构研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(2): 23-25, 28.
- CHENG Y, LIU Y CH. Research on Function Pore Structure of Porous Orifice Flowmeter [J]. Instrumental Technique and Sensor, 2015(2): 23-25.
- [8] 于洪仕, 张涛, 许文达. 节流孔倒角对多孔孔板流量计流场特性的影响 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1356-1364.
- YU H SH, ZHANG T, XU W D. Influence of orifice chamfering on the flow field characteristic of muti-hole orifice flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1356-1364.
- [9] 赵天怡, 张吉礼. 多孔孔板节流特性主效应因素试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1878-1881.
- ZHAO T Y, ZHANG J L. Experimental study on main factor affecting throttling characteristic for multi-hole orifice [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12): 1878-1881.
- [10] 李小亭, 王小杰, 方立德, 等. 新型内外管差压流量计特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2371-2379.
- LI X T, WANG X J, FANG L D, et al. Study on the characteristics of a new internal and external pipe differential pressure flowmeter [J]. Journal of Instrumentation, 2012, 33(10): 2371-2379.
- [11] MIA B, SRDJAN S, MARGARITIS K, et al. Pettersson signal and two-phase numerical modes of dissolved ari flotation: Comparison of 2D and 3D simulations [J]. Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 5(365): 138-141.
- [12] 赵奇, 牛志娟, 杨雪峰. 基于 CFD 的非标准孔板流量计的数值模拟 [J]. 节能技术, 2015, 33(5): 453-456.
- ZHAO Q, NIU ZH J, YANG X F. Numerical simulation of the non-standard orifice flowmeter based on CFD [J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33(5): 453-456.
- [13] 程勇, 汪军, 蔡小舒. 低雷诺数的孔板计量数值模拟及其应用 [J]. 计量学报, 2005(1): 57-59.
- CHENG Y, WANG J, CAI X SH. Numerical simulation of orifice plate measurement based on Reynolds number and its application [J]. Journal of Metrology, 2005(1): 57-59.
- [14] 张宝良, 张恩科, 纪波峰, 等. 提高孔板流量计测量精确度的研究 [J]. 石油化工自动化, 2017, 53(4): 48-51.
- ZHANG B L, ZHANG E K, JI B F, et al. Study on orifice plate flow-meter measurement accuracy improvement [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2017, 53(4): 48-51.
- [15] 张宪, 刘钢. 新型孔板流量计的流出系数实验研究 [J]. 当代化工, 2019, 48(6): 1218-1220.
- ZHANG X, LIU G. Experimental study on outflow coefficient of new orifice flowmeter [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(6): 1218-1220.
- [16] 曹德嘉. 整流器对提高孔板流量计精度应用的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- CAO D J. Study on improving accuracy of orific-plate flow meter with flow conditioner [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

- [17] 李挺. 试析孔板流量计的误差及修正[J]. 化工管理, 2018(28): 77-78.
LI T. Trial analysis of the error and correction of orifice flowmeter [J]. Chemical Enterprise Management, 2018(28): 77-78.
- [18] 陈勇, 马璐文, 陈新亮, 等. 双量程孔板流量计不确定度及量程比[J]. 石油化工自动化, 2013, 49(5): 52-56.
CHEN Y, MA L W, CHEN X L, et al. Uncertainty and range ratio of dual-range orifice plate flowmeter [J]. Petrochemical Automation, 2013, 49(5): 52-56.
- [19] 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. A symmetrical multi-hole orifice pressure differential flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(6): 33-38.
- [20] HAO C Z, SONG X M, JIA Z M, et al. Influence of hole number on flow field of multi-hole orifice flowmeter[J]. Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association, 2018, 30(4): 484-491.

作者简介



郝彩哲, 1999 年于河北建筑工程学院获学士学位, 2005 年于燕山大学获硕士学位, 现为承德石油高等专科学校讲师, 主要研究方向为工程力学和仪器仪表技术。
E-mail: haocaizhe@163.com

Hao Caizhe received her B. Sc. degree from Hebei Institute of Architecture and Engineering in 1999, M. Sc. degree from Yanshan University in 2005. now she is an instructor at Chengde Petroleum College. Her main research interest includes engineering mechanics and instrument & instrument technology.



宋晓明 (通信作者), 2012 年于燕山大学获得学士学位, 2015 年于燕山大学获得硕士学位, 现为承德石油高等专科学校讲师, 主要研究方向为机械结构设计及仪器仪表技术。

E-mail: songxm012@126.com

Song Xiaoming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan university in 2012, M. Sc. degree from Yanshan University in 2015. Now he is a lecturer at Chengde Petroleum College. His main research interest includes mechanical design and instrument and instrument technology.



贾志宁, 1998 年于河南理工大学获得学士学位, 2004 年于燕山大学获得硕士学位, 2011 年于燕山大学获得博士学位, 现为承德石油高等专科学校教授, 主要研究方向为材料摩擦学和仪器仪表技术。

E-mail: ysujia@163.com

Jia Zhining received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 1998, M. Sc. degree from Yanshan University in 2004, Ph. D. degree from Yanshan University in 2011. Now he is a professor at Chengde Petroleum College. His main research interest includes material tribology and instrument and instrument technology.