

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104220

# 平衡孔板孔数和分布研究\*

董双双<sup>1</sup> 林天齐<sup>2</sup> 林子遗<sup>2</sup> 李国占<sup>1</sup> 张洪军<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 浙江苍南仪表集团股份有限公司 苍南 325800)

**摘要:**采用数值模拟方法研究平衡孔板平衡孔数量和圆心圆直径的最佳取值。以管径  $D=100\text{ mm}$ 、等效开孔直径比  $\beta=0.6$  工况为例,介绍了获得最佳平衡孔数量和圆心圆直径比的方法和过程。取定圆心圆直径比情况下 ( $K=0.67$ ),对比不同平衡孔数量时流出系数、压力损失和动量差等指标,得到最佳开孔数量为  $N=10$ ;取定平衡孔数量情况下 ( $N=10$ ),对比不同圆心圆直径比时上述评判指标,得到最佳圆心圆直径比为  $K=0.67$ 。文中给出了 DN50~DN1000 五种管道规格和 6 个等效开孔直径比各种工况组合的最佳结构参数,平衡孔最佳开孔数量为 8 或 10 个,最佳圆心圆直径比  $K$  的取值在 0.64~0.73 之间(多数情况下取值在 0.66~0.70 之间)。文中提出了动量差概念用于进行平衡孔性能的评判,对比结果表明,以动量差  $\Delta M$  达到最小值作为某个结构参数取得最佳的辅助依据是可行的。研究结果对于平衡孔板结构设计具有参考价值。

**关键词:**平衡孔板;数值模拟;动量差;流出系数;压力损失系数

**中图分类号:** TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Study on the hole number and distribution of a balanced orifice plate

Dong Shuangshuang<sup>1</sup> Lin Tianqi<sup>2</sup> Lin Ziyi<sup>2</sup> Li Guozhan<sup>1</sup> Zhang Hongjun<sup>1</sup>

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

2. Zhejiang Cangnan Instrument Group Co., Ltd., Cangnan 325800, China)

**Abstract:** Numerical simulation is used to study the optimal values of the balancing hole number and the diameter of hole opening circle of a balanced orifice plate. It introduces the method and procedure to obtain optimal balancing hole number and circle diameter ratio are presented for the case of pipe diameter  $D=100\text{ mm}$  and equivalent diameter ratio of  $\beta=0.6$ . It is found that the optimal hole number is  $N=10$ , after comparing the discharge coefficient, pressure loss and momentum difference for different hole numbers with a fixed circle diameter ratio of  $K=0.67$ , and the optimum circle diameter ratio is  $K=0.67$ , after comparing the above-mentioned evaluation indexes for different circle diameters with a fixed balancing hole number of  $N=10$ . The optimal mechanical parameters are given for various combinations of five pipe sizes within DN50 to DN1000 and six equivalent diameter ratios. The optimal balancing hole number is 8 or 10, and the optimal center-circle diameter ratio  $K$  is between 0.64 and 0.73 (in most cases, it is between 0.66 and 0.70). In the paper, the concept of momentum difference is proposed to evaluate the performance of a balanced orifice plate, and it is proved that  $\Delta M$  reaching to the minimum value can be used as an auxiliary criterion for achieving an optimal mechanical parameter. The results of the study are of reference value for the mechanical design of a balanced orifice plate.

**Keywords:** balanced orifice plate; numerical simulation; momentum difference; discharge coefficient; pressure loss coefficient

收稿日期: 2021-04-23 Received Date: 2021-04-23

\* 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

## 0 引言

平衡孔板相比于标准孔板具有压损小、量程宽和直管段要求低等优点<sup>[1-4]</sup>,在化工、核电等工业领域获得广泛应用。由于在孔板上开取多个函数孔,又将平衡孔板称为多孔孔板。平衡孔孔数、分布位置等结构参数对平衡孔板的流出系数、压力损失等性能指标有直接影响,但相关研究还不够系统,尚不能给出比较通用的设计理论和方法。

2004年,美国国家航空航天局流体力学专家提出一款新型的差压式流量计,也称平衡孔板流量计,在火箭设计中获得应用,但相关设计技术未见公开报道。事实上,要获得一款优化设计的平衡孔板并不容易,除了开孔位置和孔数影响以外,等效开孔直径比、中心孔直径、平衡孔圈数、孔板厚度和倒角等因素都会影响平衡孔板测量性能<sup>[5]</sup>。针对这些平衡孔板性能影响因素,国内外学者进行了大量研究,发现了一些影响规律,给出了相关设计原则。Zhao等<sup>[6]</sup>实验研究了平衡孔板关键结构参数对其节流特性的影响,发现等效开孔直径比是平衡孔板结构设计中的重要参数,这一结果在王慧锋等<sup>[7]</sup>研究工作中得到了验证。同时,孔数和孔分布对平衡孔板流出系数也会产生明显影响,需要进行优化设计。孔板厚度影响规律比较明确,程宇<sup>[8]</sup>、马英<sup>[9]</sup>和Guo等<sup>[10]</sup>研究发现在其他参数不变情况下,增加厚度可以减小孔板压力损失,该结果与Malavasi等<sup>[11-12]</sup>实验研究基本一致,后者还发现随着平衡孔板厚度的增加,压力损失系数呈现先减小后增大。浙江大学课题组<sup>[13-15]</sup>关于平衡孔板厚度、倒角等研究同样发现适当增加孔板厚度和开前后45°倒角可以提高流出系数,降低压损,另外发现平衡孔比中心孔略小的平衡孔板结构参数性能较优。研究人员还尝试对平衡孔板进行机理研究与分析,例如,周乃君等<sup>[16]</sup>通过研究平衡孔板形成的涡流尺寸,对其压损少、高精度和稳定性好等性能进行理论分析。于仕洪等<sup>[17-19]</sup>采用数值模拟方法获得比较准确的平衡孔板内部流场,在此基础上得到了比较合理的平衡孔排列方式。马有福等<sup>[20]</sup>与焦乾峰等<sup>[21]</sup>发现孔数和厚度对压力损失系数有影响,在压力损失系数关联式应考虑这两个因素。

现有研究表明,等效开孔直径比是影响测量差压和压力损失的最大因素,但并没有太多的优化余地。平衡孔数量和圆心圆直径比是除了等效开孔直径比以外最主要的影响因素,而且存在优化的可能和必要。

本文采用数值仿真方法,研究平衡孔数量及圆心圆直径比对平衡孔板流出系数与压力损失系数的影响,分析探讨影响平衡孔板工作特性的流体力学机理,获得系列规格平衡孔板开孔数量和分布位置优化设计数据,为

平衡孔板的结构优化设计提供理论和方法支持。

## 1 平衡孔板工作原理和设计理论分析

### 1.1 工作原理

图1为典型的平衡孔板开孔示意图,开孔分为中心孔和外围平衡孔,统称为函数孔。平衡孔板的测量原理与标准孔板类似,当流体流经孔板时,流通面积突然缩小,流速增大,压力降低,导致孔板前后产生压差。根据流体力学原理,被测流体不可压时,体积流量公式为:

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} D^2 \beta^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

式中: $D$ 为管道直径; $\beta$ 为等效开孔直径比; $C$ 为流出系数; $\Delta P$ 为差压; $\rho$ 为流体密度。

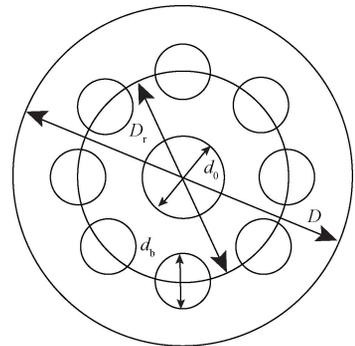


图1 平衡孔板开孔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of balanced orifice plate hole opening mechanical

流出系数的稳定区间大小决定了平衡孔板的量程比,评价平衡孔板的一个重要指标是流出系数。流出系数的标准差 $\lambda_1$ 和非线性度 $\lambda_2$ 是评价流出系数稳定性两个指标,定义为:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\sum (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$\lambda_2 = C_{\max} - C_{\min} \quad (3)$$

式中: $C_i$ 为稳定区间内各流量点多次测量的流出系数值; $\bar{C}$ 为稳定区间平均流出系数; $C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 为稳定区间内最大和最小流出系数。

管内流体流经孔板时产生不可恢复压力损失(简称为压力损失),评价平衡孔板性能的另外一个指标是压力损失系数 $\xi$ ,定义为:

$$\xi = \frac{\Delta\omega}{0.5\rho v^2} \quad (4)$$

式中: $\Delta\omega$ 为压力损失; $v$ 为管道平均流速。

### 1.2 平衡孔板设计理论分析

平衡孔板设计给定条件为介质种类(物性)、管道规

格、设计流量和最大允许压损等,需要设计确定的几何参数(参见图 1)包括等效开孔直径比  $\beta$ 、函数孔开孔大小( $d_0$  和  $d_b$ )、平衡孔数量  $N$ 、分布位置  $D_r$  和孔板厚度。其中,等效开孔直径比  $\beta$  可由最大允许压损和流量等给定条件初步确定,孔板厚度可根据管径(管道规格)选取,而  $d_0$ 、 $d_b$ 、 $N$  和  $D_r$  由于相互关联,并不独立,需要进行优化设计。

对于含有多层函数孔的平衡孔板,确定各层函数孔之间的尺寸关系是设计工作中的重要步骤。针对两层函数孔的平衡孔板,常见的有 3 种函数孔尺寸确定方法,即 3 种开孔结构,分别为等面积结构、速度分布结构和等径结构。目前研究表明,速度分布结构是较优的一种方法<sup>[12-14]</sup>,该方法类比圆管湍流速度分布经验公式来确定中心孔和外围平衡孔直径,即:

$$d_b = d_0 \left( 1 - \frac{D_r}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

式中: $d_0$  为中心孔直径; $d_b$  为平衡孔直径; $D_r$  为圆心圆直径,平衡孔均匀分布在直径为  $D_r$  的圆心圆上; $n$  为与雷诺数相关的常数, $n$  的取值参照圆管湍流速度分布经验公式,当  $Re$  为  $10^4 \sim 10^6$  时, $n$  取 7~10。

式(5)确定了  $d_0$ 、 $d_b$  和  $D_r$  之间的关系,而根据等效开孔直径比  $\beta$  的定义:

$$\beta = \sqrt{\frac{N \times d_b^2 + d_0^2}{D^2}} \quad (6)$$

式(6)表明,当管道直径  $D$  和等效开孔直径比  $\beta$  已知时, $d_0$ 、 $d_b$  和  $N$  之间的关系是确定的。式(5)和(6)可视为两个约束方程,对于  $d_0$ 、 $d_b$ 、 $N$  和  $D_r$  这 4 个变量还有两个自由度,即在任意确定两个变量值后,另外两个变量值可根据式(5)和(6)求取,这就存在平衡孔板设计参数优化取值的问题。通常将开孔数量和位置作为优化设计对象。本文采用数值模拟方法研究平衡孔板平衡孔数  $N$  和圆心圆直径  $D_r$  的优化取值,结果涵盖 DN50~DN1000 之间 5 种常用规格。

## 2 计算模型和网格无关性验证

平衡孔板物理模型如图 2 所示,为了保证上游来流稳定和下游静压力得到充分恢复,上下游直管段长度分别为  $5D$  和  $15D$ ,取压点位于距离孔板上下端面的 25.4 mm 处。

采用前处理软件 Gambit 对计算域进行结构化网格划分(图 3)。为准确预测平衡孔板流量计内部及其下游流场,对平衡孔板及其上下游附近区域进行网格加密处理,同时对所有壁面附近网格也进行加密,以保证壁面第 1 层网格  $y^+ < 1.0$ 。采用商业软件 ANSYS Fluent 对平衡

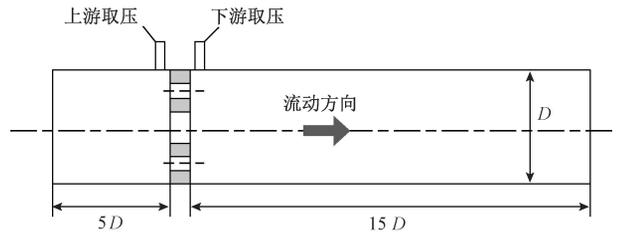


图 2 平衡孔板物理模型

Fig. 2 Physical model of a balanced orifice plate

孔板流场进行数值计算,流体质为水,入口边界为速度入口条件,出口边界为压力出口条件,壁面均设为无滑移壁面。采用大涡模拟方法,亚格子模型选择 Smagorinsky-Lilly 模型,压力-速度耦合采用 Simple 算法,各离散项的松弛因子设在 0.3~0.5 范围内。时间项的离散采用一阶隐式格式,步长为  $1 \times 10^{-3}$  s,当流动达到准稳态后对流场进行统计平均以获得更为丰富的流场信息。

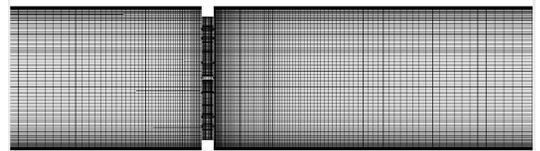


图 3 计算域网格

Fig. 3 Mesh of the computational domain

为验证数值方法的准确性和可信性,进行了实验结果对比和网格无关性验证。采用流量校验标准装置对管径 DN250 的平衡孔板进行实验测试,图 4 为实验结果和不同网格数量的计算结果。显然,网格数 230 万和 330 万时数值仿真结果与实验数据吻合良好,考虑不浪费计算资源的情况下保证计算准确性,后续数值计算中网格数量采用 230 万。其他管径的平衡孔板也采用上述方法进行网格划分和无关性验证。

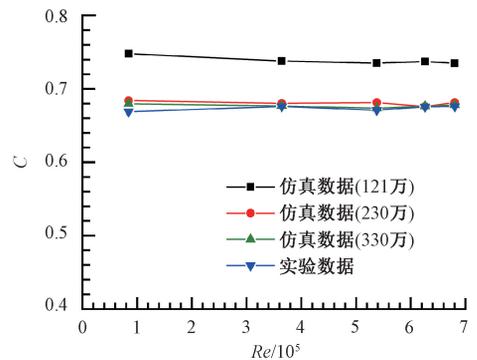


图 4 不同网格数情况下流出系数仿真结果

Fig. 4 Discharge coefficient data with different grid numbers

### 3 计算结果与讨论

#### 3.1 平衡孔数量

为讨论方便,引入圆心圆直径比,  $K = D_r/D$ 。以 DN100 规格的平衡孔板为例,对计算结果进行讨论,选取等效开孔直径比  $\beta = 0.6$ ,其他工况和不同规格孔板结果的分析过程与之相同,不做具体呈现,只将最终优化数据以表格形式给出。

首先针对平衡孔数量  $N$  进行研究。给定条件:管径  $D = 100 \text{ mm}$ ,等效开孔直径比  $\beta = 0.6$ 。可以采用穷举法得到  $N$  和  $K$  (即  $D_r$ ) 的各种结构组合,这里取圆心圆直径比  $K = 0.67$  (该值为开孔位置的较优取值,不同  $K$  值情况下开孔数量研究结果类似),展示最佳平衡孔数  $N$  的优化设计计算结果。

图 5 为平衡孔板和标准孔板的流出系数和压力损失系数随雷诺数的变化曲线(雷诺数  $Re = \rho v D / \mu$ ,其中,  $\mu$  为流体动力粘度)。与标准孔板相比,  $N = 10$  时平衡孔板的流出系数由 0.63 增至 0.74,增大约 18%,流出系数越大有利于同样规格的孔板测量更大的流量;同时,压力损失系数由 9.80 减至 7.41,减小约 25%。此外,图 5 中曲线显示,  $Re < 1.0 \times 10^5$  时,流出系数数值出现较大波动,此时孔板流动处于失稳区,孔板流量计工作范围应在右侧区域,即  $Re = 1.0 \times 10^5$  可定为孔板流量计的临界雷诺数。

表 1 列出了不同平衡孔数量时流出系数稳定性评价数据。与标准孔板相比,平衡孔数量  $N = 10$  时,标准差和非线性度都降低了 45%左右,流出系数的稳定性最好。

表 1 不同开孔数量下平衡孔板流出系数及稳定性评价数据 ( $K = 0.67$ )

Table 1 Discharge coefficients and stability evaluation data of a balanced orifice plate with different hole numbers ( $K = 0.67$ )

平衡孔数量 $N$	流出系数 $C$	标准差 $\lambda_1$	线性度 $\lambda_2$
8	0.705 0	$2.12 \times 10^{-3}$	$5.88 \times 10^{-3}$
10	0.739 0	$1.79 \times 10^{-3}$	$4.98 \times 10^{-3}$
12	0.698 2	$2.38 \times 10^{-3}$	$7.66 \times 10^{-3}$
标准孔板	0.627 9	$3.26 \times 10^{-3}$	$9.00 \times 10^{-3}$

借助流场分析,可进一步理解结构参数对孔板特性的影响。图 6 为  $Re = 2 \times 10^5$  时平衡孔板流场  $x-y$  平面 ( $x$  为管道轴向,  $y$  为径向) 内轴向速度云图。由图 6 可见,当  $N = 12$  时,函数孔与中心孔的射流流动产生融合,造成孔板后射流和尾迹区域变长,孔板的流动影响区域变大,这会导致压力恢复变慢(图 7)。当  $N = 8$  和  $N = 10$  时,流体经孔板后产生的射流区域相对较短,下游形成涡流区域较短。

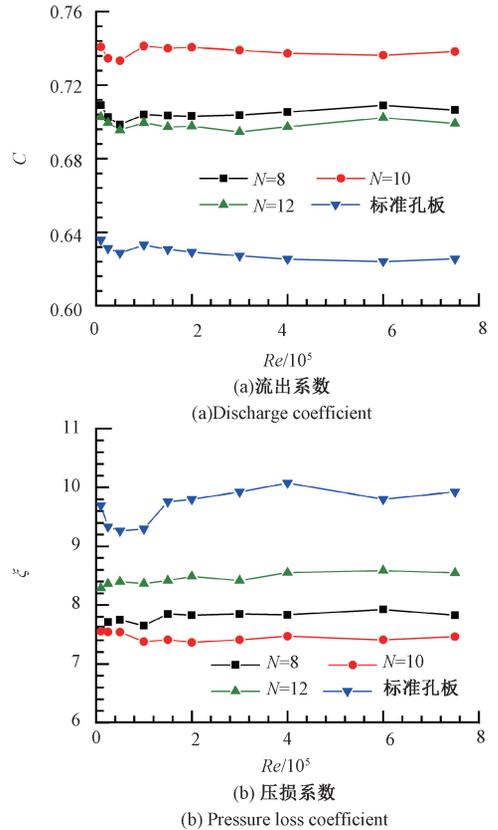


图 5 平衡孔开孔圆心圆直径不变时孔数对流出系数和压力损失系数的影响 ( $K = 0.67$ )

Fig. 5 Influence of hole number to the discharge coefficient and pressure loss coefficient for a fix  $K$  value ( $K = 0.67$ )

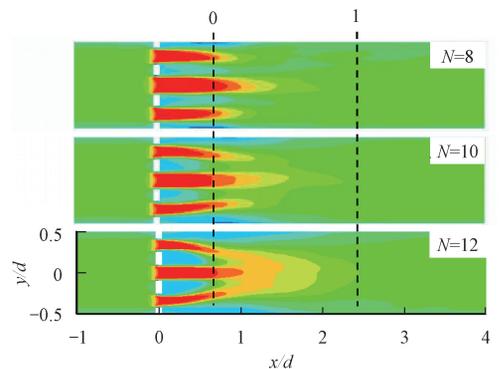


图 6 不同开孔数量的平衡孔板  $x-y$  平面内速度云图 ( $Re = 2 \times 10^5$ )

Fig. 6 Contour diagram of flow velocity in the  $x-y$  plane for balanced plates with different hole number ( $Re = 2 \times 10^5$ )

差压信号脉动大小对于测量也是比较重要的考虑因素。图 8 为平衡孔板下游取压点位置静压时域曲线,  $N = 8, 10$  和  $12$  时,压力脉动区间分别为 4、1 和 2 kPa 左右,  $N = 10$  时平衡孔板的差压脉动最小,该项指标最优。

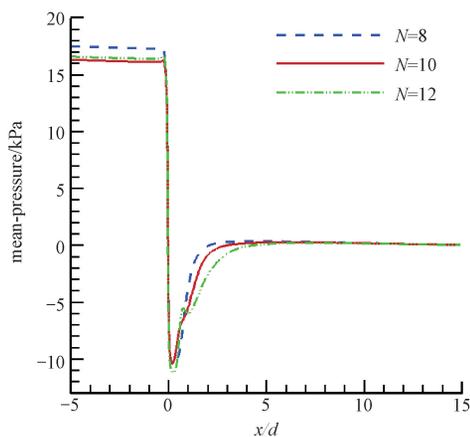


图 7 平衡孔板中心线上的静压 ( $Re = 2 \times 10^5$ )  
Fig. 7 Static pressure at the center line of the balanced orifice ( $Re = 2 \times 10^5$ )

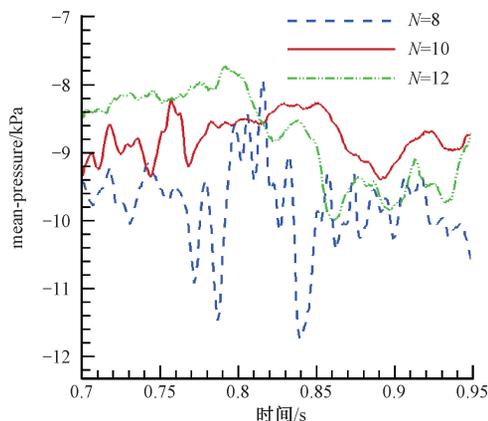


图 8 平衡孔板下游流动静压信号 ( $Re = 2 \times 10^5$ )  
Fig. 8 Static pressure signals downstream of the balanced orifice ( $Re = 2 \times 10^5$ )

为了寻找最佳平衡孔数量,分析了取得最佳性能时的流场特点,对平衡孔板流体流动物理机制进一步探讨。根据流体力学原理,管内流动流型和流速变化大时,会产生更大的流动损失。假设孔板上游为管内充分发展流动,其横截面内流速分布具有重复性,在不考虑壁面粗糙度影响情况下流速分布曲线只与  $Re$  数有关。如图 9 所示,取孔板上游  $1.0d$  截面 0,孔板厚度中心位置为截面 1,定义动量差:

$$\Delta M = \sum_{i=0}^N (\bar{v}_{i1} - v_{i0}) \times \rho \bar{v}_{i1} A_i \quad (7)$$

式中: $N$  为平衡孔数量; $v_{i1}$  为截面 1 处第  $i$  个孔平均流速; $v_{i0}$  为截面 0 处第  $i$  个孔中心对应位置处流速; $A_i$  为第  $i$  个孔的面积。其中  $i=0$  为中心孔, $i=1 \sim N$  时为平衡孔。

根据式(7)计算得到的动量差  $\Delta M$  数值大小代表了流体流经孔板时流速分布偏离充分发展流动的程度,同

样等效开孔直径比情况下,动量差  $\Delta M$  数值越小意味着流型畸变越小,能够越快恢复到充分发展流动。因此,可借助  $\Delta M$  数值大小来辅助判断和评价平衡孔板性能优劣。

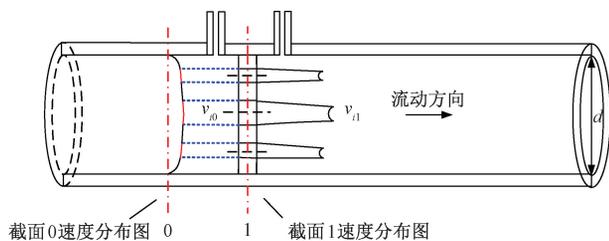


图 9 两截面流速分布示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the velocity profiles at the two sections

图 10 为不同平衡孔数量情况下动量差数值,对比平衡孔数量为 8、9、10 和 12 这 4 个数据,当  $N=10$  时  $\Delta M$  达到最小。结合前述流出系数、孔板压损和压力信号稳定性结果,均表明  $N=10$  为最优,可见以  $\Delta M$  达到最小值作为平衡孔板性能的一个判断依据是可行和合理的。

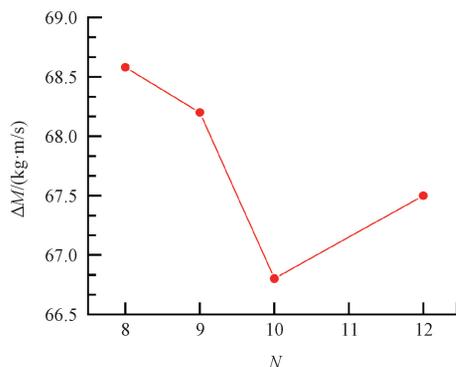


图 10 动量差与平衡孔数量的关系 ( $K=0.67$ )

Fig. 10 Relationship between the momentum difference values and the balanced hole numbers ( $K=0.67$ )

### 3.2 平衡孔开孔位置

由于几何限制,平衡孔开孔位置圆心圆直径变化范围并不大。基于最佳平衡孔板数量的研究,在管径  $D=100$  mm,等效开孔直径比  $\beta=0.6$  工况条件下,取定开孔数量  $N=10$ ,变化圆心圆直径寻找最优值(严格来说是较优值),具体针对  $K=0.64$ 、 $0.67$  和  $0.70$  3 种开孔位置情况进行了研究。图 11 为 3 种圆心圆直径比的平衡孔板流出系数和压力损失系数随雷诺数的变化曲线,图中可以看出,当  $K=0.67$  时,流出系数取得最大值 0.74,压力损失系数取得最小值 7.32,与标准孔板相比,流出系数提高约 18%,永久压力损失降低约 25%。

表 2 给出了孔板流出系数及其稳定性数据,当  $K=$

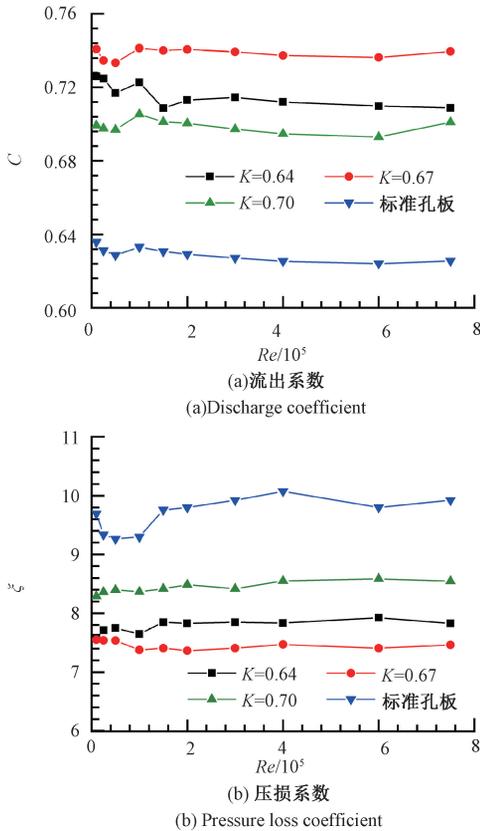


图 11 不同圆心圆直径下平衡孔板流出系数和压力损失系数 ( $N=10$ )

Fig. 11 Discharge coefficients and pressure loss coefficients for the different hole opening circle diameters ( $N=10$ )

0.67 时,标准差和线性度均达到最小,与  $K=0.64$  相比,标准差降低了约 60%,非线性度减少了约 65%,即平衡孔板圆心圆直径比为 0.67 时流出系数稳定性最好。

表 2 不同圆心圆直径下平衡孔板流出系数及稳定性评价数据 ( $N=10$ )

Table 2 Discharge coefficients and stability evaluation data of a balanced orifice plate with different hole opening circle diameters ( $N=10$ )

圆心圆直径比 $K$	流出系数 $C$	标准差 $\lambda_1$	线性度 $\lambda_2$
0.64	0.712 8	$4.92 \times 10^{-3}$	$14.1 \times 10^{-3}$
0.67	0.739 2	$1.79 \times 10^{-3}$	$4.98 \times 10^{-3}$
0.70	0.699 0	$4.26 \times 10^{-3}$	$12.3 \times 10^{-3}$
标准孔板	0.627 9	$3.26 \times 10^{-3}$	$9.00 \times 10^{-3}$

图 12 为不同圆心圆直径比情况下,  $x$ - $y$  平面上的流向速度云图及流线 ( $Re=2 \times 10^5$ )。图 12 中可见,流体流经平衡孔板时通流面积减小而形成收缩流动和射流,下游出现壁面旋涡和射流间旋涡,之后沿流向逐渐恢复至充分发展湍流状态。 $K=0.64$  时,平衡孔板下游管壁附

近形成长度约  $2.0d$  的壁面旋涡区,此时壁面旋涡占主导地位; $K=0.67$  时,平衡孔板下游壁面旋涡区的尺度显著减小,射流影响区域小,从而减少旋涡的黏性耗散;当  $K=0.70$  时,平衡孔开孔位置更加接近壁面,壁面旋涡区基本消失,同时平衡孔和中心孔射流间产生多个旋涡,射流间旋涡明显增大,导致流动损失增大,流出系数降低。从流场结构分析, $K=0.67$  时,流动最优,这与图 11 和表 2 给出的结果是一致的。

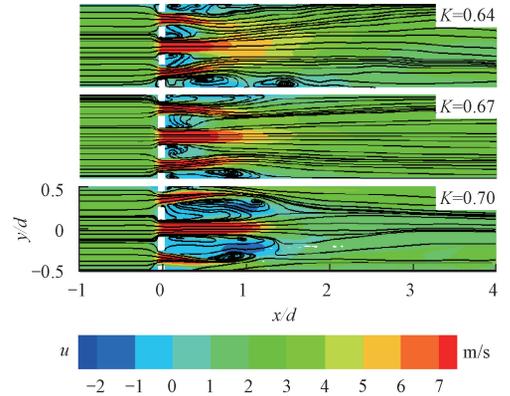


图 12 不同圆心圆直径比  $K$  的平衡孔板  $x$ - $y$  平面上速度云图和流线图 ( $Re=2 \times 10^5$ )

Fig. 12 Contour and streamline diagrams of flow velocity in the  $x$ - $y$  plane for the balanced orifice plate with different  $K$  values ( $Re=2 \times 10^5$ )

与开孔数量研究中一样,计算了动量差  $\Delta M$  数值,结果如图 13 所示。对于所计算的 6 个  $K$  值,当  $K=0.67$  时, $\Delta M$  数值达到最小,约为  $66.7 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ;与之对应的是,其他  $K$  值所对应的动量差数值基本不小于  $70.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。可见, $K=0.67$  时,平衡孔板性能为最佳,这与图 11、表 2 和图 12 显示与分析的结果一致。

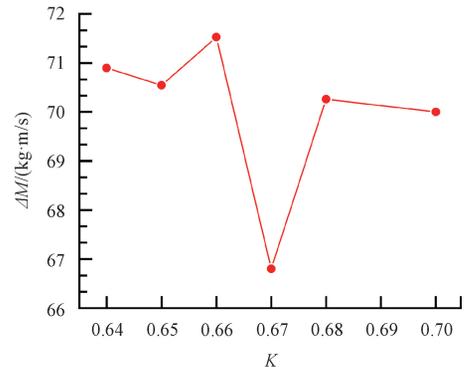


图 13 动量差与圆心圆直径比的关系 ( $N=10$ )

Fig. 13 Relationship between the momentum difference values and the hole opening circle diameter ratios ( $N=10$ )

### 3.3 不同规格和等效开孔直径比平衡孔板计算数据汇总

采用上述方法,对于不同平衡孔板规格和等效开孔直径比的情况,都可以寻找并获得平衡孔最佳开孔数量和最佳开孔位置。本文研究的工况包括:DN50、DN100、DN250、DN500 和 DN1000 共 5 种管道规格,等效开孔直径比为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.75。表 3 和 4 分别列出了各种平衡孔板规格和等效开孔直径比情况下最佳平衡孔数量和圆心圆直径比数据,其中,对于 DN50 和 DN100 两种规格,当等效开孔直径比 0.75 时,由于几何限制而无法实现多孔设计,因此没有数据。

表 3 数据显示,各种工况组合情况下,平衡孔最佳开孔数量为 8 或 10 个。等效开孔直径比为中间值时,即  $\beta=0.4, 0.5$  和  $0.6$ ,最佳开孔数都是 10,其他较小和较大  $\beta$  值对应的最佳开孔数是 8 或者 10,平衡孔板尺寸对于最佳开孔数量基本没有影响,一般情况下可取平衡孔开孔数  $N=10$ 。

表 3 最佳平衡孔数量数据列表

Table 3 List of optimal balanced hole number data

$D/\text{mm}$	50	100	250	500	1 000
0.3	8	10	10	8	8
0.4	10	10	10	10	10
0.5	10	10	10	10	10
0.6	10	10	10	10	10
0.7	8	8	10	10	8
0.75	-	-	8	8	8

表 4 数据显示,对于所研究的平衡孔板规格和等效开孔直径比范围内,最佳圆心圆直径比  $K$  的取值在  $0.64\sim 0.73$  之间(多数取值在  $0.66\sim 0.70$  之间),随着平衡孔板直径增大, $K$  的最佳取值略有增大; $K$  的最佳取值随等效开孔直径比的增大略有减小( $D=250\text{ mm}$  的情况有所不同)。

表 4 最佳圆心圆直径比数据列表

Table 4 List of optimal hole opening circle diameter ratios

$D/\text{mm}$	50	100	250	500	1 000
0.3	0.68	0.70	0.70	0.73	0.71
0.4	0.66	0.67	0.67	0.70	0.70
0.5	0.66	0.67	0.67	0.70	0.70
0.6	0.66	0.67	0.68	0.70	0.70
0.7	0.64	0.67	0.68	0.70	0.70
0.75	-	-	0.67	0.68	0.69

## 4 结 论

本文采用数值模拟方法对平衡孔板设计中平衡孔数量  $N$  和圆心圆直径  $D_r$  等结构参数优化问题进行了比较系统的研究。在  $\beta$  已知和中心孔直径  $d_0$  与平衡孔直径  $d_b$  相对关系确定情况下,对于  $d_0$ 、 $d_b$ 、 $N$  和  $D_r$  这 4 个变量

有两个自由度,文中取  $N$  和  $D_r$  为设计优化对象,仿真获得不同参数组合情况下孔板流动数据,以流出系数和压损大小、流动稳定性,以及动量差作为评判指标,确定开孔数量  $N$  和圆心圆直径比  $K(=D_r/D)$  的优化取值。结果表明,所提出的动量差法用于评判平衡孔板性能是可行的。文中提供了 DN50~DN1000 范围内 5 种常用规格的优化设计数据,这些结果可为平衡孔板研究和设计人员提供有益参考。

## 参考文献

- [1] 周人. A+K 平衡流量计的独特性能和典型应用[J]. 医药工程设计, 2011, 32(3): 54-57.  
ZHOU R. Unique characteristics and typical application of A + K balanced flow meter [J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2011, 32(3): 54-57.
- [2] SINGH V, THARAKAN T. Numerical simulations for multi-hole orifice flow meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45: 375-383.
- [3] 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.
- [4] 郝彩哲, 宋晓明, 王东, 等. 对称多孔孔板差压式流量计计量性能试验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 174-180.  
HAO C ZH, SONG X M, WANG D, et al. Experimental study on measurement performance of symmetrical multi-hole orifice pressure differential flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 174-180.
- [5] HUANG S, MA T, WANG D, et al. Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 46: 74-83.
- [6] 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, 2008(1): 9-12.
- [7] 王慧锋, 凌长玺. 几何特征对多孔板特性的影响[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2015, 41(5): 677-685.  
WANG H F, LING CH X. Effect of general geometric characteristics for multi-hole orifices' features [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2015, 41(5): 677-685.
- [8] 程宇. 多孔流量计的数值模拟与设计[D]. 长沙: 中

- 南大学, 2014.
- CHENG Y. Numerical simulation and design of the porous flowmeter [ D ]. Changsha: Central South University, 2014.
- [ 9 ] 马英. 差压式节流装置的数值模拟与实验验证 [ D ]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- MA Y. Numerical simulation and experimental validation of differential pressure throttle devices [ D ]. Xi' an: Xidian University, 2018.
- [ 10 ] GUO B Y, HOU Q F, YU A B, et al. Numerical modelling of the gas flow through perforated plates [ J ]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(3): 403-408.
- [ 11 ] MALAVASI S, MESSA G, FRATINO U, et al. On the pressure losses through perforated plates [ J ]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 28(12): 57-66.
- [ 12 ] MALAVASI S, MESSA G. Dissipation and cavitation characteristics of single-hole orifices [ J ]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(5): 051302.
- [ 13 ] JIN T, TIAN H, GAO X, et al. Simulation and performance analysis of the perforated plate flowmeter for liquid hydrogen [ J ]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(6): 3890-3898.
- [ 14 ] 王洁. 平衡型低温流量计多孔板流动特性影响因素研究 [ D ]. 杭州:浙江大学, 2018.
- WANG J. Influencing factors on flow characteristic of the perforated plate in a balanced flowmeter for cryogenic fluids [ D ]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [ 15 ] 陈虹, 高旭, 王洁, 等. 孔板倒角对平衡型低温流量计工作性能影响的数值分析 [ J ]. 推进技术, 2020, 41(2): 423-430.
- CHEN H, GAO X, WANG J, et al. Numerical analysis of orifice chamfer effects on performance of balanced flowmeter for cryogenic fluids [ J ]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(2): 423-430.
- [ 16 ] 周乃君, 向衍, 余亚雄. 多孔均流式流量计的结构设计与特性仿真 [ J ]. 仪表技术与传感器, 2015(5): 50-52.
- ZHOU N J, XIANG Y, YU Y X. Structure optimization and performance simulation for multi-hole balanced-flow flowmeter [ J ]. Instrument Technique and Sensor, 2015(5): 50-52.
- [ 17 ] 于洪仕, 张涛, 葛利俊, 等. 多孔孔板流量传感器的结构参数对计量性能的影响分析 [ J ]. 化工自动化及仪表, 2014, 41(4): 383-386.
- YU H SH, ZHANG T, GE L J, et al. Structure parameters of porous plate flow sensor analysis on the influence of measurement performance [ J ]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2014, 41(4): 383-386.
- [ 18 ] 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 flow meter [ J ]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, 47(1): 61-66.
- [ 19 ] 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 multi-hole orifice flowmeter [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1356-1364.
- [ 20 ] 马有福, 王凡, 吕俊复. 孔数与孔厚对多孔板压损系数的影响机理 [ J ]. 化工进展, 2020, 39(2): 446-452.
- MA Y F, WANG F, LYU J F. Influencing mechanism of orifice number and thickness on pressure loss coefficient of multi-orifice plates [ J ]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(2): 446-452.
- [ 21 ] 焦乾峰, 马有福, 吕俊复, 等. 多孔板压降特性实验与关联式比较 [ J ]. 化工进展, 2018, 37(9): 3320-3325.
- JIAO Q F, MA Y F, LUY J F, et al. Comparison of experiment with correlation on pressure drop of multi-orifice plates [ J ]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(9): 3320-3325.

## 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 in 2017 from China Jiliang University,

College of Modern Science and Technology. Now she is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. Her main research interest includes flow measurement technology.



李国占(通信作者), 2018 年获哈尔滨工业大学工学博士学位, 现任中国计量大学副教授, 主要研究方向为流量、能源计量技术、流体输送技术等。

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

**Li Guozhan** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the Harbin Institute of Technology in 2018. He is now an associate professor in China Jiliang University. His main research interests include flow, energy metering technology and fluid delivery technology.