

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407255

一种平衡孔板主要结构参数设计计算方法*

陈殷婕¹ 林天齐² 董双双³ 杨诗涵¹ 林子遗² 杨威² 李国占¹ 张洪军¹

(1. 中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018; 2. 浙江苍南仪表集团股份有限公司 温州 325800;

3. 中国电子科技集团公司第五十二研究所 杭州 310012)

摘要:针对多孔平衡孔板的设计需求,提出了一种结构参数设计计算的总体思路,并以含有中心孔和一圈函数孔的平衡孔板为例,详细阐述了具体设计方法和算例。首先,计算并确定孔板的壁厚和倒角;其次,根据永久压损比与等效开孔直径比($\Delta\omega/\Delta P-\beta$)的关系,以及压损系数与等效开孔直径比($\zeta-\beta$)的关系,通过迭代计算确定 β 数值;接着,基于管道直径计算确定圆心圆直径 D_b 和平衡孔数量 N ;然后,根据等效开孔直径比的定义式和补充几何关系式,建立了关于中心孔直径 d_0 和平衡孔直径 d_b 的方程组,并成功求解出 d_0 和 d_b 的具体数值;最后,计算流出系数 C ,以此评估孔板的性能。文中以一款DN250平衡孔板的结构参数计算过程为例,对方法进行了展示。实验结果显示,设计得到的流出系数和满量程差压与标定数据偏差分别在5%和10%以内,满足工程设计需要,证明了本方法的实用性。

关键词:平衡孔板;结构参数;设计方法;算例;多孔孔板

中图分类号: TH814

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460·40

Design calculation method for the main structural parameters of a balance orifice plate

Chen Yinjie¹ Lin Tianqi² Dong Shuangshuang³ Yang Shihan¹ Lin Ziyi²Yang Wei² Li Guozhan¹ Zhang Hongjun¹

(1. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Cangnan Instrument Group Co., Ltd., Wenzhou 325800, China; 3. The 52nd Research

Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hangzhou 310012, China)

Abstract: To meet the requirements of the multi-hole balance orifice plate structure parameters design, a general idea for the design and calculation of structural parameters was proposed, and take the plate containing a central hole and one circle of function holes as an example to give the specific design method and calculation example. Firstly, determine the thickness and chamfer angle of the orifice plate. Secondly, according to the relationship between the permanent pressure loss ratio and the equivalent hole opening diameter ratio ($\Delta\omega/\Delta P-\beta$), and the relationship between the pressure loss coefficient and the equivalent hole opening diameter ratio ($\zeta-\beta$), the β value is determined by iterative calculation. Then, determine the diameter of the hole opening circle D_b and the hole number N , according to the pipe diameter. After that, according to the equivalent hole opening diameter ratio definition and supplementary geometric relationship, establish an equation group about the central hole diameter d_0 and the equilibrium hole diameter d_b , then solving the equation group to obtain values of them. Finally, calculate the outflow coefficient. The general idea, process of the method and a design calculation example are given in the paper. In this paper, the structure parameter calculation process of a DN250 balance orifice plate is taken as an example to show this method. The results show that deviations between the calculated and the calibrated data of the discharge coefficient and full range differential pressure are within 5% and 10%, respectively, which meet the needs of engineering design. The example proves the practicability of this method.

Keywords: balance orifice plate; structural parameter; design method; design example; multi-hole plate

收稿日期: 2024-01-30

Received Date: 2024-01-30

* 基金项目: 浙江省“尖兵领雁”研发攻关计划项目(2023C01247;2024C01258)、浙江省教育厅科研项目(Y202353658)资助

0 引言

平衡孔板也称为多孔孔板,是一种新型非标节流件,是平衡孔板流量计的核心元件。平衡孔板圆盘节流件上开取多个圆孔,称为函数孔。当流体流经函数孔时,函数孔对流动有整流作用,不会像标准孔板一样产生大的漩涡而造成较大流体动能损失,平衡孔板对流动造成的永久压力损失比标准孔板降低 1/3 左右,同时可减短压力恢复段,达到平衡整流的效果。因此,与标准孔板相比,平衡孔板流量计具有上下游直管段要求低、永久压力损失小、测量范围宽等优点,在航天器液体燃料、高温过热蒸汽、低温流体,以及化工、电力等装置流量测量领域具有广泛的应用前景^[1]。

由于含有多孔,平衡孔板性能影响因素要比标准孔板复杂。除了开孔直径比、孔板厚度和孔加工倒角以外,还包括其他结构参数,如开孔数量、分布位置和开孔大小等^[2-3]。

与其他节流装置一样,等效直径比是节流差压和永久压损的最大影响因素^[4-5]。等效直径比越小,节流差压和永久压损越大,另一方面,在相对孔板厚度和函数孔数量一定情况下,永久压损和节流差压的比值与等效开孔直径比单调变化,符合一定的函数关系^[6-7]。赵天怡等^[8-9]以水为介质,通过实验研究了等效直径比对平衡孔板特性的影响,发现等效直径比是影响平衡孔板性能的重要因素,并根据实验结果提出了压力损失系数与等效直径比的数学模型。其后,Özahi^[10]以空气为介质,通过实验研究平衡孔板等效直径比对压力损失系数的影响,得到了压力损失系数与等效直径比的经验公式,在等效直径比 0.25~0.58 和函数孔数量 5~26 个范围内,其拟合误差小于 12%。

开孔形式,即开孔数量、尺寸和开孔位置的变化对流出系数值和压力损失系数也有影响,在一定条件下,存在最佳开孔数、最佳孔距等^[11-13]。程宇等^[3,11]研究了平衡孔板数量和分布对压力损失的影响,发现在等效直径比一定条件下,采用合适的开孔数量可降低平衡孔板压力损失。Singh 等^[12]以水为介质对平衡孔板结构参数进行实验研究,发现在相同等效直径比情况下,函数孔分布位置和开孔大小存在一个最佳值,另一方面函数孔的大小对流出系数的影响较小。王慧锋等^[13]研究了平衡孔板开孔形式对其特性的影响,发现采用环形分布和具有中心孔结构的平衡孔板流出系数相对稳定,压力损失系数较低。浙江大学课题组^[14-15]研究了平衡孔板用于液氮测量时,函数孔开孔形式对其性能的影响,也获得较优的开孔结构参数。由于开孔形式影响参数多,使得多孔平衡孔板结构设计和优化变得极为复杂,开孔数量、分布还是存

在优化的可能和必要,相关研究在持续进行^[16-17]。

孔板厚度和加工倒角对于流出系数和压损有较为显著影响。Huang 等^[18]发现其他条件不变时平衡孔板厚度存在一个最佳值,随着厚度增大压力损失会增大。Liu 等^[19]研究发现在一定厚度范围内,随着孔板厚度的增大,流出系数逐渐增大且趋于定值,永久压损逐渐减小最终也趋于定值。马有福等^[20]关于厚度影响研究中得到了文献^[18]和^[19]类似的结果。

开孔倒角也是影响平衡孔板压损和流量系数的因素之一。天津大学研究人员发现函数孔前倒角是减小永久压力损失系数的关键因素,但对测量精度无明显影响,函数孔后倒角对尾流流场具有调整作用^[21-22]。陈虹等^[23]研究发现孔板开设前倒角后,流出系数增大,压力损失系数减小,但前倒角的引入会在一定程度上增加流量计流量测量时的不稳定性,后倒角对平衡孔板性能的影响较小。

平衡孔板结构影响因素多,导致设计计算比较复杂,除了跟标准孔板一样需要确定等效开孔直径比以外,还需要确定开孔大小、数量和分布位置等结构参数。文献^[24]给出了一个多孔孔板结构参数设计方法,涵盖开孔数量、孔分布密度和等效直径比取值准则。目前,平衡孔板设计一般是依赖经验,辅之以流体力学计算仿真优化,缺乏统一的设计准则和系统化、流程化的设计方法,这在一定程度上限制了其推广应用^[25-26]。本文提出一个比较通用的平衡孔板结构参数设计的总体思路,并以含有中心孔和一圈平衡孔的孔板为例给出了具体设计方法以及简单的算例。

1 平衡孔板工作原理和结构参数设计思路

1.1 工作原理

平衡孔板(也称为多孔孔板)流量测量是基于节流现象,其测量原理是根据当流体流经孔板时,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力差。如图 1 所示,孔板产生节流效应,截面 0 为上游截面,截面 3 为最低压力截面,截面 4 位置压力恢复完成,截面 0 和截面 4 之间压力差称为永久压损, $\Delta\omega = P_0 - P_4$ 。根据流体力学原理,由 P_0 和 P_3 之差可计算获得流量,但由于截面 3 不是一个固定位置,会随流动参数变化而变化,实际应用时不取 0 和 3 两截面,而是取孔板上下游固定截面 1 和 2 的差压 $\Delta P (= P_1 - P_2)$ 。

平衡孔板体积流量公式与标准孔板相同,即:

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

式中: D 为管道直径; β 为等效开孔直径比; ΔP 为差压; ρ

为流体密度; C 为流出系数; ε 为可膨胀系数。

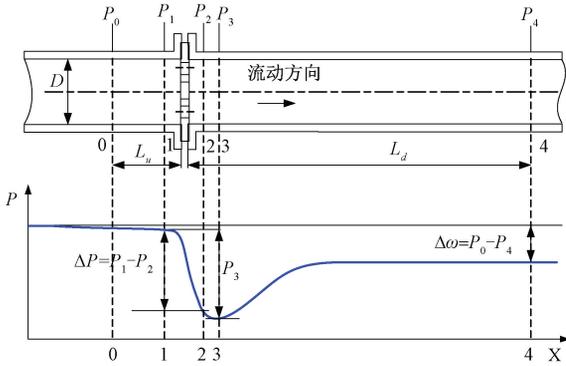


图 1 平衡孔板测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement principle of a balanced orifice plate

流出系数 C 定义为实际流量和理论流量的比值,由于实际流体粘度和湍流等影响,实际流量要比基于伯努利方程推导的理论流量小,数值在 0.6~0.9。影响流出系数大小的因素包括节流件型式、等效直径比 β 、雷诺数 Re ($Re = \rho v D / \mu$, μ 为流体动力粘度)、管道粗糙度,以及取压位置等,一般通过实验标定获得流出系数的取值。

可膨胀系数 ε 的计算参考 GB/T 2624. 2—2006^[27],根据等效开孔直径比和节流前后压力的比值计算确定,对于不可压缩流体其值为 1。

1.2 结构参数设计思路

与标准孔板设计类似,平衡孔板结构参数计算给定条件通常包括:被测介质物性参数(密度 ρ 、粘度 μ 等)、管道内径 D 、满刻度流量 Q_{FS} 、工作压力 P 、最大允许压损 $\Delta\omega^*$ 和上限差压 ΔP^* 。

而与标准孔板设计相比,平衡孔板结构参数设计目标除了确定等效开孔直径比 β 和孔板厚度 E (标准孔板还需要确定节流孔厚度 e) 以外,还需要设计确定平衡孔开孔方式(包括开孔数量、位置和大小),以及开孔倒角。

1) 总体思路

式(1)中 β 、 C 和 ε 是孔板设计中所要设计确定和计算的几个参数。如前述,等效直径比 β 是节流差压和永久压损的最大影响因素,而永久压损和节流差压的比值随 β 单调变化,符合一定的函数关系,永久压损系数也是 β 的函数。因此,可以先根据永久压损限制条件,以及永久压损与节流差压关系确定 β 值。

影响流出系数 C 的因素包括了等效直径比 β 、开孔方式、雷诺数 Re 、管道粗糙度和取压位置等,当 β 确定后,开孔方式就是 C 的最主要影响因素,而较佳的开孔方式就是以流量系数 C 为优化目标得到的,这也是开孔方式设计所需解决的问题。 ε 变化范围一般不大,可先取其值等于 1,后期根据 β 设计数据进行具体计算。

如前所述,平衡孔板厚度对于流量系数、压损大小和量程比都有影响,但从实用角度,平衡孔板结构设计过程中对于厚度的考虑更多的是从孔板强度和刚度出发。孔板厚度设计可参考标准孔板设计标准, E 的取值一般在 0.005 D ~0.05 D 之间,当 $D < 64$ mm 时, E 取上限值^[27]。

开孔倒角对压损影响比较明显,有无倒角情况下永久压损系数与 β 关系式是不一样的,因此,平衡孔板结构参数设计中首先需要计算确定板厚度,并选择是否有倒角。然后再进行等效直径比的设计,以及开孔方式的设计确定。

2) 开孔方式

平衡孔板函数开孔方式包括开孔数量、大小和分布。

开孔分布总体来说可以分为两类,一类是等边三角形均匀分布,孔径大小也相同,例如 Kolodzie 等^[28] 的工作,如图 2(a) 所示;另一类是函数孔同心圆分布,如图 2(b) 所示,还可细分为有无中心孔和个圈函数孔等径和不等径的情况。

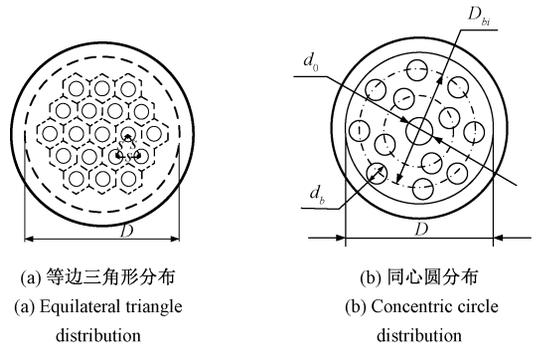


图 2 平衡孔板不同结构开孔示意图
Fig. 2 Schematic drawing of different structures of balance orifice plate

开孔方式设计流程可参考图 3,平衡孔板开孔方式设计首先需选择均匀分布或同心圆分布。一般在节流减压应用中均匀分布更多一些,而在流量孔板应用中同心圆分布更多,文献[20] 研究显示,圆形分布方式能够更好地实现流体的平衡分配、适应流体的特性和减少压力损失。尽管如此,总体上同心圆分布优势不是特别明显,两种方式都可选择。若选择均匀分布,则下一步工作是根据管道直径和等效直径比计算确定开孔数量 N 、函数孔直径 d_0 和孔间距 S ;若选择同心圆分布,则下一步工作是选择是否有中心孔。文献[3] 和[22] 的研究显示,中心孔不仅能够减小阻力系数,而且能够提高流量计的平衡整流效果,中心孔设计对于提高孔板强度和刚度有利并可促进流体均匀分布,因此,中心孔设计更加推荐。但是,当管道直径比较小的时候,中心开孔受几何条件限制,可考虑无中心孔设计。

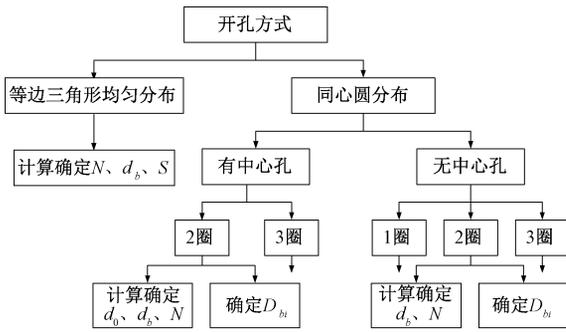


图 3 平衡孔板开孔方式设计框图

Fig. 3 Block diagram for the opening mode design of a balance orifice plate

关于函数孔圈数,虽然圈数越多,孔板整流效果更好,但压损并不是孔数越多越小^[23],而且,圈数和孔数增多会增大加工制造成本,因此,函数孔一般不超过 3 圈。

在等效直径比 β 已经确定的情况下函数孔尺寸(包括中心孔直径 d_0 和平衡孔直径 d_b)、数量并不独立,需根据相关研究结果进行计算确定,开孔位置(即函数孔所在圆心圆直径 D_{bi})同样存在优化取值,一般需要针对开孔大小、数量和位置进行统筹优化。

2 平衡孔板结构参数设计计算方法-以两圈函数孔平衡孔板为例

鉴于开孔方式的复杂性,本文仅以两圈函数孔(即含有中心孔和一圈平衡孔)的平衡孔板为例给出平衡孔板设计方法,其他型式的开孔方式可参考本文方法,在相对应开孔方式充分研究的基础上进行设计。

图 4 为含有中心孔和一圈平衡孔的平衡孔板示意图,中心孔直径 d_0 ,平衡孔直径 d_b ,圆心圆直径 D_{bi} 。在给定被测介质物性参数(密度 ρ 、粘度 μ 等)、管道内径 D 、满刻度流量 Q_{FS} 、工作压力 P ,最大允许压损 $\Delta\omega^*$ 和上限差压 ΔP^* 条件下进行平衡孔板结构参数设计。

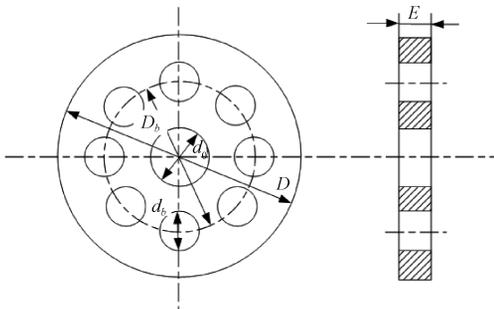


图 4 两圈函数孔的平衡孔板结构示意图

Fig. 4 Schematic structure diagram of a balance orifice plate with two-loop function holes

设计计算分为 5 个步骤(参见图 5),分别为:1)计算确定平衡孔板厚度 E 和选择开孔倒角;2)计算确定等效开孔直径比 β ;3)计算确定圆心圆直径 D_{bi} 平衡孔数量 N ;4)计算确定中心孔直径 d_0 、平衡孔直径 d_b ;5)计算流出系数 C 。

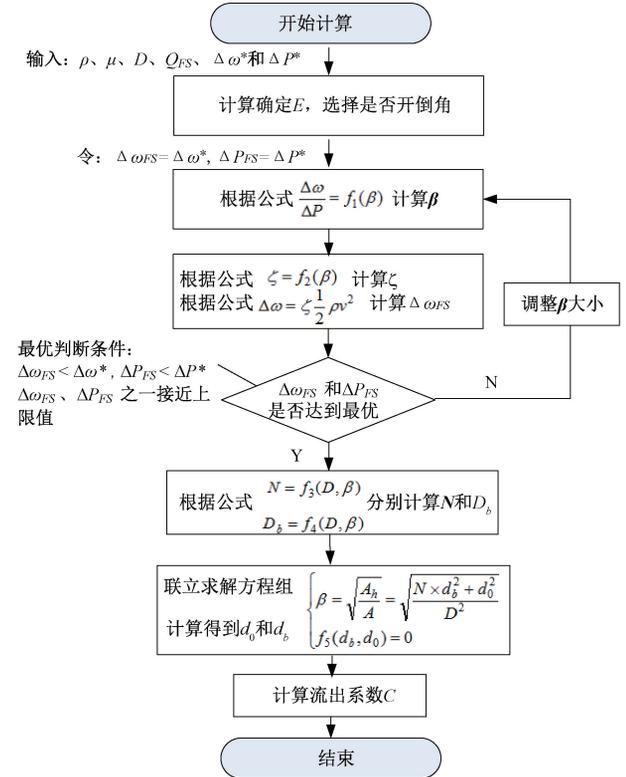


图 5 平衡孔板结构参数设计计算框图

Fig. 5 Block diagram of structural parameter design for a balance orifice plate

2.1 计算确定 E 和选择开孔倒角

对于平衡孔板厚度 E ,主要考虑孔板强度和制造工艺等,其取值主要与孔板直径 D 有关,如上文所述,参考标准孔板标准确定 E ,一般可按表 1 进行选择和差值计算,可根据强度、工艺等要求进行校核和取整等。

表 1 平衡孔板厚度选用表

Table 1 Data sheet of the balance orifice plate thickness

		(mm)							
D	E	50	80	100	150	200	250	500	1 000
		5	7	8	12	15	18	25	60

开孔倒角对于流量系数、压损有明显影响,一般可根据给定条件压损要求大小。考虑加工成本,在没有特殊要求情况下,很多厂家采用无倒角设计。本文介绍无倒角设计,后续计算中均为无倒角条件下的结果。对于有倒角情况,计算步骤完全相同,只是相关压损系数公式中

的系数替换为响应倒角情况下的数据。

2.2 计算确定 β

根据 $\Delta\omega/\Delta P-\beta$ 和 $\zeta-\beta$ 关系,通过迭代计算确定等效开孔直径比 β 。

平衡孔板的永久损失 $\Delta\omega$ 与节流差压 ΔP 正相关,其比值与等效开孔直径比 β 存在函数关系(参见图 6),即:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = f_1(\beta) \quad (2)$$

压力损失可采用式(3)计算获得,即:

$$\Delta\omega = \zeta \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

式中: v 为管内平均流速, ζ 为压力损失系数。

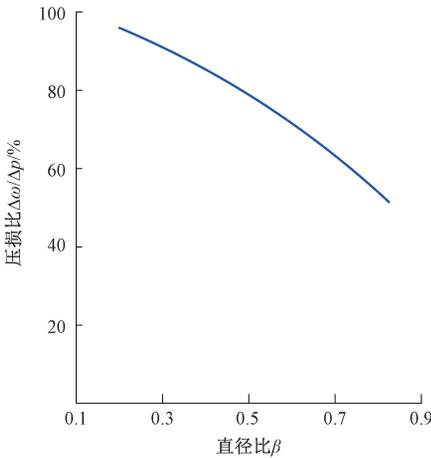


图 6 典型的 $\Delta\omega/\Delta P$ 与 β 关系曲线

Fig. 6 A typical relationship curve between $\Delta\omega/\Delta P$ and β

压力损失系数 ζ 最大影响因素是等效开孔直径比 β ,同时,孔板厚度和开孔倒角对其也有较大影响。为了简化设计过程,孔板厚度的影响这一步暂不考虑,并且按无倒角进行设计。如不考虑孔板厚度和倒角因素,压损系数 ζ 仅是 β 的函数(参见图 7)^[29],即:

$$\zeta = f_2(\beta) \quad (4)$$

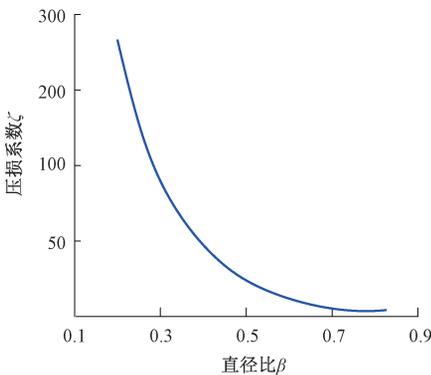


图 7 典型的 ζ 与 β 关系曲线

Fig. 7 A typical relationship curve between ζ and β

设计中如有耐磨要求,或制造厂给定倒角工艺,则需考虑开孔倒角,其影响体现在式(4)中。

已知管道满刻度流量 QFS 、最大允许压力损失 $\Delta\omega^*$ 和上限差压 ΔP^* ,可根据式(2)、(3)和(4)迭代求出等效开孔直径比 β 、满刻度压力损失 $\Delta\omega FS$ 和满刻度差压 ΔPFS 。

具体步骤(参见图 5):

1) 令:满刻度压损 $\Delta\omega FS =$ 最大允许压损 $\Delta\omega^*$,满刻度差压 $\Delta PFS =$ 上限差压 ΔP^* ;

2) 基于 $\Delta\omega FS/\Delta PFS$ 数值,根据式(2)获得等效开孔直径比 β 初步数值;

3) 把所得的 β 值代入式(4),得到压力损失系数 ζ ;

4) 根据式(3)计算获得满刻度压损 $\Delta\omega FS$,并根据 β 值,结合式(2)计算出 ΔPFS 的数值。

5) 比较 $\Delta\omega FS$ 是否小于最大压损 $\Delta\omega^*$, ΔPFS 是否小于最大压损 ΔP^* ,并检查 $\Delta\omega FS$ 和 ΔPFS 中至少有一个接近其上限值 $\Delta\omega^*$ 和 ΔP^* 。如果满足这 3 个条件,则 β 值可用;如果不满足条件,则调整 β 数值,再次进行迭代计算,直至输出压损 $\Delta\omega FS$ 满足要求,确定 β 值。

2.3 计算确定 N 和 D_b

对于实际两圈函数孔平衡孔板,比较优化的平衡孔数量和开孔位置变化范围很小,即 N 和 D_b 取值变化范围变化很小, N 一般在 $8 \sim 10$ ^[17,30],圆心圆直径比 $K(=D_b/D)$ 在 $0.64 \sim 0.73$ 。 N 和 K 的合理取值与管道直径 D 和等效开孔直径比 β 有关,或者可以认为是 D 和 β 的函数。

$$N = f_3(D, \beta) \quad (5)$$

$$D_b = f_4(D, \beta) \quad (6)$$

根据式(5)和(6)可计算确定 N 和 D_b 的取值。

2.4 计算确定 d_0 和 d_b

根据等效开孔直径比定义,可以得到关系式如式(7)和(8)所示。

$$\beta = \sqrt{\frac{A_h}{A}} = \sqrt{\frac{N \times d_b^2 + d_0^2}{D^2}} \quad (7)$$

式中: A 为管道截面积, A_h 为平衡孔板开孔总面积。

$$A_h = a_1 + a_2 + \dots + a_n = A\beta^2 = \frac{\pi}{4} D^2 \beta^2 \quad (8)$$

其中, a_i 为平衡孔板每个函数孔(包括中心孔和平衡孔)的面积。

到目前为止,式(7)中还有两个量没有确定数值, d_0 和 d_b 需要再补充一个中心孔与平衡孔之间的几何关系才能确定这两个量的大小。这个补充的 d_0 和 d_b 关系,可表示为:

$$f_5(d_b, d_0) = 0 \quad (9)$$

联立求解式(7)和(9)组成的方程组,可以计算确定 d_0 和 d_b 的数值。

需要补充的是,对于两层函数孔的平衡孔板,式(9)常见的几何关系包括等面积法、湍流速度分布法和等径法等。

至此,含有两圈函数孔的平衡孔板主要几何结构参数都计算确定了,包括平衡孔板等效开孔直径比 β 、平衡孔数量 N 、圆心圆直径 D_b 、中心孔直径 d_0 、平衡孔直径 d_b 和孔板厚度 E 。

2.5 计算流出系数 C

由式(1)可得,对应满量程流量和压差,流出系数计算公式为:

$$C = \frac{4Q_{FS} \sqrt{1 - \beta^4}}{\pi D^2 \varepsilon \beta^2 \sqrt{2\Delta P_{FS}/\rho}} \quad (10)$$

式中:可膨胀系数 ε 的值参考 GB/T 2624.2—2006^[27] 计算确定。

3 设计算例

下面以某 DN250 平衡孔板的主要结构参数计算过程为例,对本方法进行进一步展示。

3.1 设计给定条件

平衡孔板结构参数计算给定条件和数据列于表 2,被测介质种类为水,平衡孔板管道内径 $D = 254.46$ mm,水温 $t = 20$ °C,工作压力 $P = 2.0$ MPa,水的密度 $\rho = 999.2$ kg/m³,粘度 $\mu = 1.0087$ mPa·s,满刻度流量 $Q_{FS} = 550$ m³/h,最大允许压损 $\Delta\omega^* = 27$ kPa,上限差压 $\Delta P^* = 50$ kPa。

表 2 某 DN250 平衡孔板设计给定数据

Table 2 Given data for a certain DN250 balance orifice plate design

$D/$ mm	$t/$ °C	$P/$ MPa	$\rho/$ (kg/m ³)	$\mu/$ mPas	$Q_{FS}/$ (m ³ /h)	$\Delta\omega^*/$ kPa	$\Delta P^*/$ kPa
254.46	20	2.0	999.2	1.0087	550	27	50

设计计算的任务是确定平衡孔板主要结构参数数值,包括:等效开孔直径比 β 、圆心圆直径 D_b 、平衡孔数量 N 、中心孔直径 d_0 和平衡孔直径 d_b 。

3.2 设计计算过程

第 1 步:计算确定孔板厚度 E

本例中管道直径 $D = 254.46$ mm,非常接近表 1 中 250 mm,选用孔板厚度 $E = 18$ mm,采用差值取整会得到同样结果。如果管道直径偏离表 1 中常用数据较大,应采用差值方式计算孔板厚度 E 。

第 2 步:根据 $\Delta\omega/\Delta P - \beta$ 和 $\zeta - \beta$ 关系,通过迭代计算确定等效开孔直径比 β 。具体步骤如下:

1) 令:满刻度压损 $\Delta\omega_{FS} =$ 最大允许压损 $\Delta\omega^*$,满刻度差压 $\Delta P_{FS} =$ 上限差压 ΔP^* ,得到 $\Delta\omega_{FS}/\Delta P_{FS}$ 数值;根据满刻度流量 Q_{FS} 和管道直径 D ,计算得出满刻度平均流速 $v_{FS} = 3.01$ m/s。

2) 基于所得 $\Delta\omega_{FS}/\Delta P_{FS}$ 数值,根据 $\Delta\omega/\Delta P - \beta$ 关系式获得等效开孔直径比 β 初步数值。

参考文献[30],有两圈函数孔并有中心孔的平衡孔板有如 $\Delta\omega/\Delta P - \beta$ 关系式所示。

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = 1.1166 - 0.5907\beta - 0.3525\beta^2 \quad (11)$$

根据给定设计调节,最大允许压损 $\Delta\omega = 27$ kPa,上限差压 $\Delta P^* = 50$ kPa, $\Delta\omega^*/\Delta P^* = 0.54$,将 $\Delta\omega_{FS}/\Delta P_{FS} = 0.54$ 数值代入式(11),得到 $\beta = 0.6911$ 。

3) 把所得的 β 值代入 $\zeta - \beta$ 关系式,得到压力损失系数 ζ 。

同样参考文献[30],有如 $\zeta - \beta$ 关系式所示。

$$\zeta = 0.5732\beta^{-5.242} \quad (12)$$

将所得 β 数值代入式(12),得到 $\zeta = 3.976$ 。

4) 根据式(3)计算获得满刻度压损 $\Delta\omega_{FS}$, $\Delta\omega_{FS} = \zeta \rho v_{FS}^2 / 2 = 3.976 \times 1000 \times 3.01^2 / 2 = 17.97$ kPa,已知 β 和 $\Delta\omega_{FS}$,代入式(11)得 $\Delta P_{FS} = 33.20$ kPa。

5) 比较所得 $\Delta\omega_{FS}$ 是否小于 $\Delta\omega^*$, ΔP_{FS} 是否小于 ΔP^* ,检查 $\Delta\omega_{FS}$ 和 ΔP_{FS} 中至少有一个接近各自的上限值 $\Delta\omega^*$ 和 ΔP^* ,前两个条件满足,第 3 个条件不满足,计算得到的 $\Delta\omega_{FS}$ 和 ΔP_{FS} 与其上限值 $\Delta\omega^*$ 和 ΔP^* 都明显偏小,于是减小 β 数值,根据式(3)、(11)和(12)重新计算 ζ 、 $\Delta\omega_{FS}$ 和 ΔP_{FS} ,重复进行迭代计算,直至输出压损 $\Delta\omega_{FS}$ 满足要求,确定 β 值。最后得到:

$$\beta = 0.6392, \Delta\omega_{FS} = 26.99 \text{ kPa}, \Delta P_{FS} = 45.37 \text{ kPa}.$$

第 3 步:计算确定平衡孔数量 N 和圆心圆直径 D_b 。

对于两圈函数孔的平衡孔板,比较优化的平衡孔数量和开孔位置变化范围很小, N 一般在 $8 \sim 10$ ^[17,30],圆心圆直径比 $K (= D_b/D)$ 在 $0.64 \sim 0.73$ 之间。

表 3 和 4 分别给出了相关研究得到的推荐 N 和 K 的取值^[17]。根据表 3 和 4, N 和 K 的最佳值分别为 10 和 0.684(线性差值得到),圆心圆直径 $D_b = KD = 0.684 \times 254.46 = 174.73$ mm。

第 4 步:计算确定中心孔直径 d_0 和平衡孔直径 d_b 。

如前述,根据等效开孔直径比定义,有式(7),但还需要补充一个关于 d_0 和 d_b 的方程,联立求解两个方程组成的方程组,得到 d_0 和 d_b 的数值。

对于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,分别为等面积结构、湍流速度分布结构和等径结构。等面积结构是指中心孔面积与第 2 圈平衡孔总面积相等,湍流速度分布结构是指孔径与所在管道截面位置流速大小类比,等径结构是指中心孔直径和平衡

表 3 圆心圆直径比 K 推荐数据^[17]Table 3 Recommended data sheet for the hole opening circle diameter ratio K

	D/mm					
	50	100	250	500	1 000	
β	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

表 4 平衡孔数量 (N) 推荐数据表^[17]Table 4 Recommended data sheet for the balance hole number N

	D/mm					
	50	100	250	500	1 000	
β	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

孔直径相等。这里采用速度分布结构^[15],即:

$$d_b = d_0 \left(1 - \frac{D_b}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

其中,指数 n 是与雷诺数相关的常数,当 Re 为 $10^4 \sim 10^6$ 时, $n = 1.661gRe$ 。本例中 $Re = 7.57 \times 10^5$, $n = 9.76$ 。将已知数据 ($\beta = 0.639 2$, $N = 10$, $D = 254.46 \text{ mm}$, $D_b = 174.73 \text{ mm}$) 代入式(7)和(13)组成下面方程组:

$$\begin{cases} 0.639 2 = \sqrt{\frac{10 \times d_b^2 + d_0^2}{254.46^2}} \\ d_b = d_0 \left(1 - \frac{174.73}{254.46} \right)^{\frac{1}{9.76}} \end{cases}$$

求解这个方程组得到: $d_0 = 54.54 \text{ mm}$, $d_b = 48.43 \text{ mm}$ 。

第 5 步:计算流出系数 C 。

将 QFS 、 ΔPFS 、 ρ 和 β 等值代入式(10),得到流出系数 $C = 0.703 8$ 。

需要再次指出的是,本文方法主要针对包括中心孔的两圈平衡孔板设计计算问题,对于其他开孔方式,如多圈平衡孔、无中心孔和均匀开孔等方式,开孔数可根据参照当前研究结果,根据管道直径和等效开孔直径比等参数确定开孔数量、开孔位置和开孔大小。

至此,平衡孔板主要几何结构参数都计算确定了,包括平衡孔板等效开孔直径比 β 、平衡孔数量 N 、圆心圆直径 D_0 、中心孔直径 d_0 、平衡孔直径 d_b 和孔板厚度 E 等,

数据汇总于表 5。

表 5 平衡孔板结构参数设计计算结果

Table 5 Result of the structural parameter design of the balance orifice plate

β	N	$E/$	$D_b/$	$d_0/$	$d_b/$	$\Delta P_{FS}/$	$\Delta \omega_{FS}/$
		mm	mm	mm	mm	kPa	kPa
0.639 2	10	18	174.73	54.54	48.43	26.99	45.37

按表 5 结构参数设计加工了孔板,并进行了实验测试。实验在上海自动化仪表研究院的水流量标定实验室进行,实验装置为容积法,流量范围为 $7.6 \sim 599 \text{ m}^3/\text{h}$,容积法装置的不确定度为 0.052% ($k=2$)。表 6 为实验标定数据。实验标定流出系数 $C_{cal} = 0.671 9$,流量系数设计值与标定值相对偏差小于 5% ,具体数据为:

$$|0.703 8 - 0.671 9| / 0.671 9 \times 100\% = 4.75\%$$

设计差压(系数)与实验测试数据相偏差为 8.21% ,小于 10% ,具体计算如下:

表 6 中检测点 1 流量 $548.8 \text{ m}^3/\text{h}$,接近设计满量程流量 $550 \text{ m}^3/\text{h}$,采用等差压系数进行折算,实验测试流量 $550 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的差压为 $550^2/548.8^2 \times 49.21 = 49.43 \text{ kPa}$ 。满量程差压设计值与实测值相对偏差为

$$|45.37 - 49.43| / 49.43 \times 100\% = 8.21\%$$

流出系数和满量程差压设计偏差分别在 5% 和 10% 以内,能够满足工程设计需要。

表 6 平衡孔板实验标定结果

Table 6 Experimental calibrating results of the balance orifice plate

检测点	流量/ (m^3/h)	差压/ kPa	重复性%	流出系数 C_i
1	548.8	49.21	0.08	0.672 3
2	488.8	38.89	0.05	0.673 6
3	368.1	22.15	0.03	0.671 9
4	289.4	13.73	0.06	0.671 3
5	222.9	8.19	0.08	0.670 1
实验标定平均流出系数 C_{cal} ,				0.671 9
$C_{cal} = [(C_i)_{\max} + (C_i)_{\min}] / 2$				

4 结 论

多孔平衡孔板结构复杂,参数优化设计是非常困难的,设计中需要确定的结构参数包括:孔板厚度、开孔倒角、等效开孔直径比、圆心圆直径(对于圆心圆分别的形式)、平衡孔数量、中心孔直径、平衡孔直径等。本文在对平衡孔板结构参数设计需求和各参数影响研究结果进行分析的基础上,给出了结构参数设计的总体思路和方法。基于该方法可以在给定条件下(被测介质物性、管道内径、满刻度流量、工作压力,最大允许压损和上限差压)设计得到平衡孔板的主要结构参数。本文以含中心孔和一

圈平衡孔的平衡孔板为例给出了平衡孔板结构参数的设计计算方法,尝试给出一种系统化、规范化设计方法。对于其他开孔方式,设计人员需参照相关研究结果,根据管道直径和等效开孔直径比等参数确定开孔数量、开孔位置和开孔大小等,参照本文方法完成孔板结构参数设计工作。

参考文献

- [1] 于杰,俞旭波. 多孔平衡节流装置设计选用[J]. 石油化工自动化, 2009, 45(1): 20-22.
YU J, YU X B. Design selection of the multi-pores balance throtter unit [J]. Automation in Petrochemical Industry, 2009, 45(1): 20-22.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] MEHMOOD M A, IBRAHIM M A, ULLAH A, et al. CFD study of pressure loss characteristics of multi-holed orifice plates using central composite design [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 70: 101654.
- [6] 焦乾峰, 马有福, 吕俊复, 等. 多孔板降压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, LYU 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.
- [7] 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.
- [8] 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, (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, (12): 1878-1881.
- [9] 赵天怡, 张吉礼. 多孔孔板水节流特性试验及数学模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(10): 1606-1609.
ZHAO T Y, ZHANG J L. Experimental study on water throttling model of multi-hole orifice [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(10): 1606-1609.
- [10] ÖZAHİ E. An analysis on the pressure loss through perforated plates at moderate Reynolds numbers in turbulent flow regime [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 43: 6-13.
- [11] 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]. Instrument Technique and Sensor, 2015(2): 23-25, 28.
- [12] SINGH V K, THARAKAN T J. Numerical simulations for multi-hole orifice flowmeter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45: 375-383.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 crvogenic fluids [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [16] MEHMOOD M A, IBRAHIM A, ULLAH A, et al. CFD study of pressure loss characteristics of multi-holed orifice plates using central composite design [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 70: 101654.
- [17] 董双双, 林天齐, 林子遗 等. 平衡孔板孔数和分布研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 196-203.
DONG SH SH, LIN T Q, LIN Z Y, et al. Study on the hole number and distribution of a balanced orifice plate [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 196-203.
- [18] HUANG S F, MA T Y, 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(4): 74-83.
- [19] LIU H F, TIAN H, CHEN H, et al. Numerical study on

- performance of perforated plate applied to cryogenic fluid flowmeter[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2016, 17(3): 230-239.
- [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] 于洪仕,张涛,葛利俊. 多孔孔板流出系数和压力损失的影响因素[J]. 化工自动化及仪表, 2016, 43(1): 20-22, 88.
YU H SH, ZHANG T, GE L J. Influencing factors for discharge coefficient and pressure loss of multi-hole orifice plate [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2016, 43(1): 20-22, 88.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] ZHAO T Y, ZHANG J L, MA L D. A general structural design methodology for multi-hole orifices and its experimental application [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(9): 2237-2246.
- [25] 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.
- [26] 王慧鹏,刘欣荣,张鑫,等. 多孔孔板流量计结构参数的数值研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 75-84.
WANG H P, LIU X R, ZHANG X, et al. Numerical study of structural parameters of the multi-hole orifice flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 75-84.
- [27] GB/T 2324. 2—2006, 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量—第 2 部分:孔板[S]. 2006.
GB/T 2324. 2—2006, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted circular cross-section conduits running full—Part 2: Orifice plates[S]. 2006.
- [28] KOŁODZIE P A, VAN WINKEL M. Discharge coefficients through perforated plates[J]. AIChE Journal, 1957, 3(3): 305-312.
- [29] WU Y X, MA Y F, LYU J F, et al. Experimental study on effect of structural parameters on pressure drop characteristics of multi-orifice plates [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, 91: 102346.
- [30] 董双双. 平衡孔板结构参数影响研究及设计软件开发[D]. 北京:中国计量大学, 2022.
DONG SH SH. Structural design and software development of balanced orifice plate[D]. Beijing:China Jiliang University, 2022.

作者简介



陈殷婕, 2023 年于绍兴文理学院元培学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为流量测量技术。

E-mail: 769964211@qq.com

Chen Yinjie received her B. Sc. degree from Shaoxing University Yuanpei College in 2023. 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 年获香港理工大学机械工程系博士学位, 现任中国计量大学教授, 主要研究方向为流量测量与流量计量、流体定量输送技术。

E-mail: zhanghongjun@cjlu.edu.cn

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