

高压减压阀气动参数优化设计路径

王吉昌, 朱帅全

(江苏神通核能装备有限公司, 江苏 南通 226232)

摘要 围绕高压减压阀在超高压、多相流下的气动参数设计瓶颈展开分析讨论, 以“动态特性—参数耦合—多目标优化”为主要研究思路, 融合计算流体力学与多物理场耦合仿真技术, 阐明阀口开度、弹簧刚度、膜片特性设计方法, 依靠协同优化模型以及自适应遗传算法, 切实解决高压环境下流体可压缩性与阀件力学响应的耦合难题。研究结果显示, 优化后的参数设计能够使减压精度提升至 ± 0.04 MPa, 动态响应时间缩短至 98 ms。

关键词 计算流体力学; 高压减压阀; 弹簧刚度; 气动参数设计

中图分类号: TH137.52

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.001

0 引言

在现代工业生产中, 高压减压阀主要用于将流体系统中较高的输入压力降低至所需的输出压力, 广泛应用于石油化工、天然气输送等领域。但随着我国工业技术的不断发展, 对高压减压阀的性能要求不断提升, 如何提高构件的气动参数设计效果, 逐渐成为确保其高效运行的重点研究课题。我国在减压阀研究方面更多地集中在减压阀的结构设计与工作原理分析上, 并尝试借助数值模拟法, 探究减压阀内部流场, 以此为气动参数优化提供参考依据。现有研究并未涉及高压工况下减压阀气动参数设计以及协同优化。一般情况下, 在高压环境中, 流体的可压缩性以及气体与阀内构件的相互作用极为复杂, 若仍沿用传统设计方法, 则无法满足高可靠性的设计标准。因此, 本文的研究重点是如何在保证减压精度的基础上, 进一步提高减压阀动态响应速度。

1 高压减压阀工作原理与气动特性分析

高压减压阀的结构组成主要涵盖阀体、阀芯、膜片等, 能够基于力平衡原理, 保证高压流体进入阀腔后, 作用在阀芯上的流体压力始终与膜片下的压力、弹簧弹力保持平衡。通常来说, 初始状态下, 弹簧始终保持预压缩状态, 阀芯处于关闭模式, 可阻止流体通过。若上游压力持续增长, 流体压力会进一步推动阀芯克服弹簧弹力开启, 此时流体会经阀口节流减压后流出。而在下游压力出现显著改变后, 膜片会第一时间感知压力信号, 产生位移操作, 带动阀芯运动, 以此改变阀口开度, 起到调节流体流量的作用, 确保压力能够持续、稳定地输出。

2 高压减压阀在超高压、多相流下的气动参数设计瓶颈

超高压环境(通常指压力 ≥ 20 MPa)下, 流体可压缩性显著增强, 导致实际流场与基于不可压缩假设的传统模型偏差增大。实际流量波动幅度可达理论值的 10%, 影响减压精度。而阀芯、膜片等部件受流体压力产生微形变, 导致压力平衡方程中弹簧刚度、阀芯位移的匹配关系失衡。若沿用常规弹簧刚度设计, 可能出现阀芯开启滞后, 使动态响应时间延长 30%。至于在多相流工况下, 气相与液相的流速差异显著, 传统锥形或平面阀口容易出现流场分离、涡流等问题, 导致开度调节精度下降。并且多相流压力波动具有高频、非对称等特性, 膜片有效面积设计需适配气相的快速冲击与液相的持续静压。若仍沿用常规膜片面积, 会出现压力信号感知延迟, 动态响应时间延长至常规工况的 1.5 ~ 2 倍。

3 高压减压阀核心气动参数优化设计

3.1 阀口开度参数设计

阀口是指用于控制介质流量与压力的部件, 其开度大小主要决定减压阀的流量调节与减压效果。在设计过程中, 应充分衡量减压阀的额定流量以及流体特性。基于伯努利方程 + 流量连续性方程, 确定以下计算公式:

$$Q = C_d A \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (1)$$

式(1)中, Q 、 C_d 、 A 、 ΔP 、 ρ 分别用于阀口流量、流量系数、阀口流通面积、上下游压力差、流体密度。在设计时, 应优先考虑减压阀的工作要求, 初步确定额定流量 Q_n 以及上下游压力差 ΔP_n , 之后计算流体的

密度 ρ 大小,获得流量系数 C_d ,求解所需的阀口最小流通面积 $A_{\min}$,以此得出阀口开度的初始值。并且还要注意,减压阀在不同工况下的流量可能存在一定差异,因此还需设置流量调节区间,设计阀口的最大开度,确保减压阀满足各类工作条件的流量需求。

除此之外,阀口开度本身也在一定程度上受到阀芯行程、弹簧预紧力等因素的约束。为保证减压阀的稳定使用,还要打造建立阀口开度与限制因素的数学模型,实现多参数协同优化,搭配动态补偿机制,使阀口开度可依照压力与流量的改变动态调整。

3.2 阀口形状参数设计

除上述提出的阀口开度会对高压减压阀的气动性能产生影响,阀口形状也能直接决定高压减压阀的应用效果。通常来说,不同的阀口形状会使流体流经阀口时产生不同的流场分布以及压力损失,也会对流量特性产生显著影响。常见的阀口形状可分为以下几种:

1. 锥形阀口是目前应用较广的一种结构,其构造简单,加工便捷。当流体经过锥形阀口时,流道会逐渐收缩,使流体速度大幅提高,压力下降,实现减压的效果。在锥形阀口的角度设计上,尽可能采用较小的锥角,让流体流动更平稳,最大程度减少涡流的产生,但也可能增加阀口的加工难度。而较大的锥角则难免会导致流体流速发生剧烈变化,从而引发振动。所以,在设计过程中,要借助仿真分析,计算不同锥角下的流场特性,以此确定最佳的锥角范围。

2. 抛物线型阀口、流线型阀口,是指基于流体力学原理所设计的阀口类型,两者均能使流体在阀口位置保持顺畅流动,减少湍流的产生,降低压力损失,显著提高流量系数。但需注意的是,抛物线型阀口、流线型阀口的形状加工工艺相对复杂,成本较高,因此在实际设计时,需要进一步衡量减压阀的性能要求、制造成本等因素,选择适合的阀口形状,实现最佳的气动性能^[1]。

3.3 弹簧刚度参数设计

弹簧的作用在于实现压力调节,稳定输出,其刚度设计可直接决定高压减压阀的响应速度。在设计时,需要以减压阀的力平衡方程为原理,如下所示:

$$P_1A - P_2A = kx + F_0 \quad (2)$$

式(2)中, P_1 、 P_2 、 A 、 k 、 x 、 F_0 分别表示上游压力、下游压力、膜片有效面积、弹簧刚度、阀芯位移、弹簧预紧力。在设计时,应结合减压阀的设定压力区间以及阀芯行程,进一步确定弹簧的预紧力与最大工作载荷。并探究减压阀在不同压力条件下的力平衡关系,

设置弹簧刚度与压力调节精度、响应速度间的数学模型。比如:对于高压、大流量的减压阀,可适当提升弹簧刚度,以此保障减压阀的稳定性;对于响应速度要求较高的场景,则应适当降低弹簧刚度,以此改善减压阀的动态响应性能^[2]。

除此之外,在设计弹簧刚度时,还需评估弹簧自身的疲劳寿命和材料特性。在高压环境下,弹簧因需长时间承受交变载荷,极易发生疲劳失效。为解决这一问题,应优先选用具有高疲劳强度的不锈钢或合金弹簧钢。同时,采用变径弹簧、组合弹簧等结构形式,确保弹簧受力分布均匀^[3]。

3.4 膜片有效面积参数设计

膜片作为压力传感与信号传递的弹性元件,需要尽可能保持较大的有效面积,保证膜片在相同压力作用下产生的变形量偏高,从而精确控制阀芯运动,达到压力稳定调节的目的。在设计时,应充分考虑减压阀的工作压力范围、弹簧刚度等因素。基于力平衡原理,梳理膜片有效面积与压力调节间的关系,如下述公式所示。

$$\Delta P = kx/A \quad (3)$$

式(3)中, ΔP 表示压力变化量。通过探究不同膜片有效面积下减压阀的压力调节性能,根据减压阀的设计标准确定适合膜片规格大小。并依照膜片的结构强度调整膜片的材料类型与厚度大小,使其在高压环境下仍可正常工作。比如:平膜片结构简单,制造方式简便;波纹膜片借助波纹结构,能显著增加表面积,提高灵敏度;碟形膜片则具有较高的承载能力。最后,还要对膜片的波纹参数、碟形角度进行优化设计,以充分发挥膜片的性能优势。同时,要保证膜片与阀体、阀芯之间具有良好的密封效果,防止流体泄漏,提高减压阀的可靠性^[4]。

4 高压减压阀气动参数设计的数值模拟与优化

4.1 多场耦合数值模型构建

高压减压阀内部存在流体流动、结构形变与压力反馈的强耦合效应,需通过多物理场协同建模实现精准仿真:几何建模与网格划分,基于三维扫描技术还原阀体、阀芯、膜片等部件结构,采用非结构化网格对阀口、节流通道等湍流敏感区域实施加密,通过网格无关性验证,确保离散化误差可控;物理模型选择,针对高压气体可压缩性特征,采用理想气体状态方程耦合 SSTk- ω 湍流模型,以捕捉激波、边界层分离等复杂流场现象。引入流固耦合模块,将阀芯、膜片的弹性形变与流场压力分布进行双向迭代求解,模拟真

实工况下的力平衡动态过程；边界条件设定，入口边界采用总压进口，出口边界设为静压出口，固体域边界施加固定约束与弹簧预紧力，并设置膜片与阀芯的接触副为刚性连接。

4.2 流场特性与参数敏感性分析

通过数值模拟获取高压减压阀内部流场的关键特征参数，揭示气动参数对性能的影响机制：流场可视化分析，高压工况下，阀口处存在明显的超音速射流与激波结构，压力梯度可达 10^{-7} Pa/m，且涡流强度随阀口开度增大呈非线性增长。弹簧刚度增加会导致阀芯响应滞后，使流场稳态时间延长；参数敏感性量化，基于拉丁超立方抽样，设计 200 组参数组合，通过方差分析，确定各参数对减压精度的影响权重。阀口开度（35%）> 弹簧刚度（28%）> 膜片有效面积（22%）> 阻尼孔直径（15%）。

4.3 多目标优化算法与参数寻优

以减压精度（ $\leq \pm 0.05$ MPa）、动态响应时间（ ≤ 100 ms）、压力损失（ ≤ 20 kPa）为优化目标，构建约束条件下的参数优化模型：优化变量与约束，选取阀口开度（5%~80%）、弹簧刚度（30~200 N/mm）、膜片有效面积（500~1 500 mm²）为设计变量，约束条件包括阀芯最大位移（ ≤ 10 mm）、弹簧疲劳寿命（ $\geq 10^6$ 次循环）；算法选择与迭代，采用改进粒子群优化算法，引入自适应惯性权重与交叉变异算子，提升全局寻优能力。通过 50 次独立运算验证算法稳定性，优化结果收敛标准差 $\leq 3\%$ [5]。

5 试验验证与结果分析

5.1 多物理场耦合模型的有效性验证

基于上文提出的计算流体力学与流固耦合理论构建仿真模型，需要通过三重验证机制，确保其对高压减压阀动态特性的表征能力，具体方法表现为：理论一致性验证，将仿真得出的阀口流量系数与伯努利方程解析解对比，偏差控制在 5% 以内，证明流场计算的理论基础可靠；参数敏感性交叉验证，采用控制变量法单独调整弹簧刚度，仿真得到的动态响应时间变化趋势与力平衡方程推导结果完全吻合，验证结构力学模型的准确性；极端工况适配性验证，在超高压与多相流条件下，模型对激波位置偏移量与压力波动周期的预测精度，满足工程设计对仿真可信度的要求。

5.2 优化参数的性能影响规律

通过多组参数组合仿真分析，揭示核心气动参数对减压阀性能的调控机制。阀口开度的双效特性，在

5%~30% 开度区间，流量随开度增大呈线性增长，减压精度维持在 ± 0.05 MPa 以内；当开度超过 40%，流场湍流强度激增，导致减压精度下降至 ± 0.08 MPa，验证上文阐述的开度需控制在 35% 左右的优化结论。多相流下的结构适配规律，对比四种阀口形状的流场仿真结果，抛物线型阀口在气液混流工况下的压力损失比锥形阀口降低 32%，涡流区域面积减少 65%，印证了流线型结构对复杂流态的适应性优势。

5.3 优化方案的综合性能评估

基于仿真数据库的多维度分析，优化后的气动参数组合呈现显著性能提升，具体研究结果如表 1 所示。当减压精度从初始设计的 ± 0.1 MPa 提升至 ± 0.04 MPa 时，动态响应时间从 240 ms 缩短至 98 ms，两项指标同步优化。在超高压持续运行仿真中，优化参数下的阀芯振动幅度比优化前降低 70%，膜片疲劳损伤累积速率减缓 58%，证明结构参数对高压环境的适应性增强。

表 1 不同工况下的减压阀性能比对分析

工况	减压精度	响应时间	压力损失
常温高压	± 0.04 MPa	98 ms	22 kPa
低温高压	± 0.05 MPa	112 ms	25 kPa
多相流	± 0.06 MPa	125 ms	30 kPa

6 结束语

通过对高压减压阀气动参数设计路径进行分析讨论，包括阀口开度、弹簧刚度、膜片有效面积等，并依托计算流体力学实现数值模拟与优化，结合研究分析，评估设计方案的有效性与可靠性。研究结果显示，科学的气动参数设计可大幅度改善高压减压阀的减压精度，也能优化动态响应性能，为日后高压减压阀的应用提供实践参考。

参考文献：

- [1] 王晓凯, 马强. 电液比例减压阀的设计与优化 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(08): 176-181.
- [2] 张正春, 石红. 核级高压气体减压阀设计与试验 [J]. 阀门, 2023(03): 268-276.
- [3] 路远航, 张雪根. 三阀口可调式高减压比减压阀结构设计及性能分析 [J]. 阀门, 2022(06): 431-433, 485.
- [4] 王晓凯. 高压降比例减压阀的特性分析与优化 [J]. 机电工程, 2022, 39(09): 1227-1234.
- [5] 关云霞. 一种定压输出式减压阀的设计研究 [J]. 液气动力与密封, 2022, 42(03): 14-16.