

浅谈流量系数可调小流量阀门的设计及性能研究

耿国顺

宁波中金石化有限公司 浙江 宁波 315000

摘要：小流量CV值可调阀门作为精密流量控制领域的核心设备，广泛应用于精细化工、生物制药、新能源等关键场景。针对传统小流量阀门存在CV值调节范围窄、阀芯易断裂、调节精度低等技术痛点，本文提出一种集成双导向结构与多段式调节面的小流量CV值可调阀门设计方案。通过优化阀芯结构参数、采用无介质不平衡力设计及智能控制算法，实现CV值在0.001~0.05范围内的精准可调。基于计算流体力学（CFD）的k- ω SST湍流模型与空化模型，完成阀内流场仿真分析，验证了设计方案在抑制空化、降低流致振动方面的有效性，流量可调比提升至200:1，相较于传统单座式小流量阀门，在稳定性与可靠性方面实现显著提升。本文研究成果为小流量精密控制场景提供了高性能解决方案，对推动相关行业工艺升级具有重要工程价值。

关键词：小流量阀门；CV值可调；结构设计；流场仿真；性能测试

1 引言

流量系数是调节阀最重要的技术指标之一，它是衡量调节阀在规定条件下流通能力的基本系数，根据不同的单位制可分为Cv和Kv两种。小流量调节阀一般是指流量系数 $Cv \leq 0.05$ 的调节阀，通常应用于流量小，但要求精确控制的场合，在精细化工、生物制药等行业应用广泛。在实际工程应用中，部分小流量调节阀受工艺装置生产不同产品或实际运行工况参数变化大等因素的影响，对阀门的流量系数范围提出了更高的要求^[1]。

1.1 研究背景与意义

传统小流量阀门普遍存在三大技术瓶颈：一是CV值调节范围有限，多数产品可调比 $\leq 15:1$ ，无法适配宽工况需求；二是阀芯通常采用顶部单导向针式结构，易受介质冲击、阀门振动等因素影响而导致阀芯时常出现断裂情况，阀门维修、更换频繁，严重影响了装置的安全、平稳运行。三是小开度下易出现阀位震荡与流量波动，调节精度难以满足精密工艺要求。据国际阀门制造商协会（VMA）2025年统计数据，约37%的精密生产工艺故障与小流量阀门调节失准相关，直接导致产品合格率下降与生产效率降低。

因此，研发具备宽范围CV值可调、高稳定性与高精度的小流量阀门，成为解决行业痛点、推动精密制造升级的迫切需求。

1.2 国内外研究现状

近年来，国内外学者与企业围绕小流量阀门的性能优化展开大量研究。在结构设计方面，无锡智能自控工程股份有限公司提出一种基于行程调节的CV值可调方案，通过调整执行机构顶部调整杆与限位件的间距，实现阀

芯行程精准控制，同时采用上下双导向结构提升阀芯刚性，有效降低断裂风险。川武研发的微小流量滑板调节阀采用无介质不平衡力设计，通过滑板与阀座的相对位置调节实现流量控制，在 $CV = 0.001$ 工况下仍保持稳定调节，流量可调比提升至200:1^[2]。

1.3 研究内容与技术路线

本文核心研究内容包括：①提出一种集成多段式调节面与双导向结构的小流量CV值可调阀门结构方案；②基于CFD仿真开展阀内流场分析，优化流道参数以抑制空化与流致振动；③搭建性能测试平台，验证阀门的CV值调节范围、精度及长期稳定性；

技术路线为：首先通过文献调研与行业需求分析明确设计指标；其次完成阀门结构与参数优化，建立三维模型；随后采用CFD软件进行流场仿真，分析湍流、空化及流固耦合效应；基于仿真结果优化结构后制作样机；最后通过试验验证性能指标，并开展应用场景适配性研究。

2 小流量CV值可调阀门的结构设计

2.1 整体结构设计

阀门整体采用“阀体-阀盖-支架-执行机构-行程调节组件”的模块化结构，主要包括阀体、阀座、阀芯、导向套、薄膜式执行机构及行程调节组件等核心部件。阀体内部固定密封安装阀座，支架、阀盖与阀座内设置滑动阀芯；行程调节组件由限位壳体、调整杆与锁紧螺母组成，通过螺纹连接实现调整杆上下移动，进而限制执行机构推杆的上限位行程，实现CV值精准调节^[3]。

具体配置如下：

图1所示：调节阀主要包括：阀体1、阀座2、阀芯组

件3、阀盖4、导向套5、填料组件6、支架7、哈夫8、行程标尺9、薄膜式执行机构10、行程调节组件11。

调节阀的阀座2采用螺纹旋紧方式固定在阀体1内部，并通过阀座锥形密封面2-1与阀体1贴合实现锥面线密封。阀座2设有内外贯通的介质流通孔2-2，作为阀门打开时介质流通的通道，阀座2上端内孔为阀芯下导向面2-4，阀座密封面2-3堆焊硬质合金层2-5。

阀芯组件3由阀芯头3-1和阀杆3-2焊接后整体加工而成，阀芯头3-1采用高韧性硬质合金材料。阀芯头3-1下部采用针式结构3-4，阀芯直径 $\Phi d_{3-5} \leq 2.5$ 毫米，并在在一侧加工成扁式曲面3-6作为调节口，扁式曲面3-6由与中轴线夹角不同的两个斜面和斜面间的过渡曲面构成。

阀芯组件3整体从上方穿入阀座2，并通过阀芯锥形密封面3-3与阀座2的阀座密封面2-3贴合实现锥面线密封。同时，阀座2上部的阀芯下导向面2-4为阀芯组件3提供第一个导向。

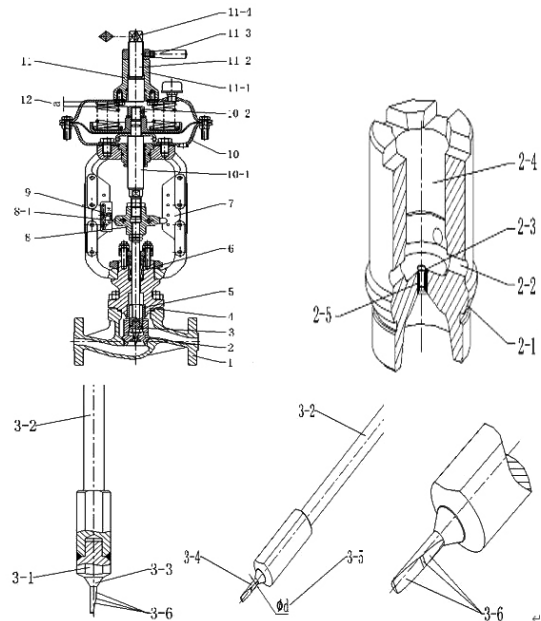
阀盖4穿过阀芯组件3上部的阀杆3-2，固定在阀体1的上，在阀盖4下端通过机械包边工艺嵌入导向套5，导向套5的内孔为阀芯组件3提供第二个导向。阀盖上安装有填料组件6，实现阀杆3-2的密封。

支架7安装在阀盖4上，薄膜式执行机构10固定在支架7上。薄膜式执行机构10内部上限位件10-2连接在推杆10-1上端。阀芯组件3与薄膜式执行机构10的推杆10-1采用哈夫8连接，行程标尺9固定在支架7上，哈夫8的一侧设有指针8-1，指向行程标尺9上的相应刻度，为阀门提供行程位置指示。薄膜式执行机构10内部的上限位件10-2连接在推杆10-1上端。

行程调节组件11安装在薄膜式执行机构10上，行程调节组件11主要由限位壳体11-1、调整杆11-2、手柄式锁紧件11-3组成。限位壳体11-1上端内孔为细牙内螺纹，调整杆11-2外侧设有相同牙距的细牙外螺纹，调整杆11-2从下方穿入限位壳体11-1，并通过上述螺纹旋出。调整杆11-2的下端限制上限位件10-2向上运动的范围，形成上限位间距 a_{12} 。手柄式锁紧件11-3从上方旋入调整杆11-2，并旋紧在限位壳体11-1上端，实现对调整杆11-2的锁紧和固定。阀门出厂状态按标准行程设定时，手柄式锁紧件11-3锁紧在限位壳体11-1的上端。

当需要调整阀门流量系数时，松开手柄式锁紧件11-3，通过常规扳手夹在调整杆11-2顶端的方榫11-4上，旋转调整杆11-2，并仔细观察指针8-1在行程标尺9上的刻度变化，以准确调整阀门行程，调整完成后将锁紧件11-3恢复到锁紧状态。正向或反向旋转调整杆11-2，可以增加或减小阀门行程；行程增加，流量系数将相应增加；

反之，行程减小，流量系数将相应减小。



图一 阀门结构及阀内件剖面图

2.2 阀内件设计结构

为解决传统阀芯易断裂问题，采用上下双导向结构设计：阀盖下端通过机械包边工艺嵌入导向套，阀座上部设置阀芯下导向孔，阀芯在导向套与下导向孔内滑动，大幅提升支撑刚性，有效抵御介质冲击与系统振动。阀盖安装填料组件，确保高温高压工况下的密封性能，防止介质泄漏。

2.3 核心部件优化设计

2.3.1 阀芯结构设计

阀芯采用“阀杆-阀芯头-阀芯针”一体化结构，从上至下依次为阀杆、阀芯锥形密封面与阀芯针。阀芯针采用圆柱状基材加工，一侧设计多段式调节面——由与中轴线夹角不同的两个斜面及过渡曲面构成。该设计的核心优势在于：不同开度下，阀芯针与阀座流道孔的重叠面积呈非线性变化，可实现宽范围CV值调节；过渡曲面平滑过渡，减少流场突变，降低空化风险。阀芯材料选用Inconel625合金，表面采用WC-Co硬质合金堆焊处理，提升耐磨、耐高温与抗腐蚀性能，延长使用寿命。

2.3.2 阀座结构设计

阀座采用可更换式设计，内部竖直贯穿阀座孔，中部为阀座流道孔，横向设置介质流通孔，内端连通阀芯下导向孔下部。阀座流道孔采用文丘里结构优化，减少流体节流损失，同时降低局部压力骤降导致的闪蒸空化现象。阀座材料选用316L不锈钢，针对强腐蚀工况可替换为钛合金材质，提升工况适配性。

2.3.3 智能调节组件设计

为实现CV值的精准与智能调节,集成“行程标尺-指针-智能定位器”的反馈控制结构:行程标尺固定在支架上,阀芯与执行机构推杆通过哈夫连接,哈夫一侧设置指针指向行程标尺,实时反馈阀位信息。采用带手柄的锁紧螺母,便于现场手动微调CV值;同时预留DC4-20mA信号接口,可搭载智能电气阀门定位器,实现远程自动调节。

3 阀内流场仿真与结构优化

3.1 仿真模型建立

为精准解析阀内流场特性,搭建阀内流场三维仿真模型,采用结构化网格对整个流道区域进行划分,针对阀芯-阀座间隙等流场变化剧烈的关键区域,实施网格加密处理,从基础上保障仿真结果的准确性与可靠性。

仿真过程中选用 $k-\omega$ SST湍流模型,该模型具备优异的边界层捕捉能力,可有效模拟流场中边界层分离与再附着等复杂流动行为,尤其适用于高梯度流场的精细解析。通过绘制流场contour(等高线/云图),直观呈现阀内速度参数的分布特征,清晰定位流场梯度集中区域及流动异常部位;同时,通过生成pathlines(迹线),追踪流体粒子在阀内的运动轨迹,明确流道内流体的流动路径、涡流分布及流动分离情况,进一步完善流场特性分析;

经实践验证,该模型的压降预测误差可控制在 $\pm 5\%$ 以内,仿真精度显著优于标准 $k-\epsilon$ 模型,为后续阀结构优化、性能提升提供了精准的仿真数据支撑。

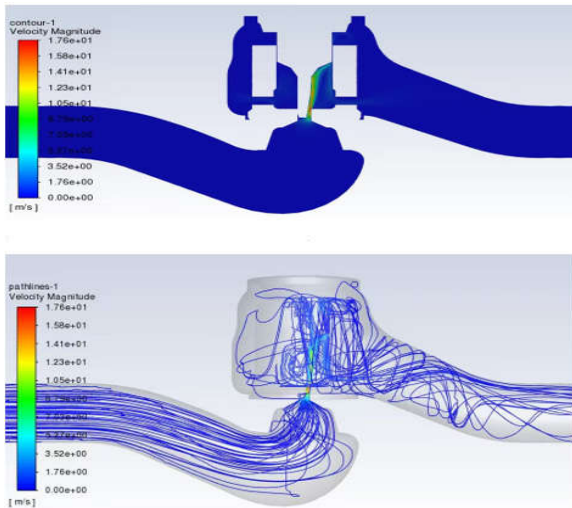


图2 流场contour(等高线/云图)及pathlines(迹线图)

3.2 仿真结果分析

3.2.1 流场分布特性

不同CV值调节工况下的流场仿真结果表明:流体经介质流通孔进入阀座流道孔,在阀芯针与流道孔间隙处形成高速射流,流速沿流道方向先增大后减小。多段式调节面使流速分布更均匀,避免局部流速过高导致的能量损失;文丘里式流道孔有效降低流道阻力,提升流通效率。

3.2.2 结构参数优化

基于仿真结果,对阀芯调节面夹角、流道孔直径等关键参数进行多目标优化。采用控制变量法,分别调整第一斜面夹角($15^\circ \sim 30^\circ$)、第二斜面夹角($5^\circ \sim 15^\circ$)与流道孔直径($2 \sim 4\text{mm}$),以CV值调节范围、压力损失与空化数为优化目标。以我司使用1台小流量调节阀仿真为例,最终确定最优参数:第一斜面夹角 22° ,第二斜面夹角 8° ,流道孔直径 3mm 。优化后阀门CV值调节范围扩展至 $0.001 \sim 0.055$,压力损失大幅度降低,空化抑制效果进一步提升^[4]。

4 结论

本文针对传统小流量阀门CV值调节范围窄、稳定性差、易损坏等技术痛点,完成了小流量CV值可调阀门的设计与性能研究,主要结论如下:

(1)提出一种集成多段式调节面与双向结构的阀门设计方案,通过行程调节组件实现CV值精准调节,双向结构显著提升阀芯刚性,解决了传统阀芯易断裂问题。

(2)基于CFD仿真与流固耦合分析,优化了阀芯调节面夹角与阀座流道参数,有效抑制了极端工况下的空化现象与流致振动,提升了运行稳定性。

(3)性能测试验证表明,阀门CV值调节范围为 $0.001 \sim 0.05$,流量可调比 $200:1$,综合性能优于传统小流量阀门。

(4)该阀门可广泛适配精细化工、生物制药、新能源及电站等多个行业的精密流量控制场景,具有良好的工程应用价值。

参考文献

- [1]清华大学自动化系,中控技术.基于轻量化LSTM网络的小流量阀门智能控制模块研发[J].自动化学报,2024,50(5):987-996.
- [2]川武.滑板调节阀突破微小流量调节瓶颈——额定 $Cv0.001$ 工况仍然高精稳定可调[J].阀门,2025(11):1-5.
- [3]耿国顺,金斌,张志超,等.一种流量系数可调式小流量调节阀:中国,202322127563.X[P].2024-02-19.
- [4]郭栋,李建英,陈鹏,等.微流量调节阀结构改进与参数优化[J].科学报告,2023,13(1):1-12.