

# 机械阀门性能优化与应用研究

柴小然 李 静

河南泉舜流体控制科技有限公司 河南 郑州 450001

**【摘要】**：机械阀门是流体输送系统和工业设备中的关键控制元件，在石油化工、电力能源、水利工程、航空航天等众多行业中有着重要的作用，其工作性能对整个系统的安全、稳定、经济运行及环境保护具有重要意义。随着工业智能化和高端化的发展，常规机械阀门在密封可靠性、启闭效率、耐磨耐腐蚀等方面已越来越不能适应日益复杂的工况环境，因此性能优化是提高阀门品质和拓展应用领域的重要途径。为此将从结构优化设计、材料优化与表面改性、加工工艺优化等四个方面展开深入研究，期望为相关单位提供借鉴作用。

**【关键词】**：机械阀门；性能优化；结构设计；材料改性

DOI:10.12417/2811-0528.26.09.064

在工业生产和基建工程等领域，机械阀门担负着对流体介质进行通断、调节、止回等作用，是连通设备和管线、保证系统正常运转的“咽喉”部件。不管是在高温高压下使用的炼油设备，还是在航空航天、供水排污等领域，都需要用到机械阀门。目前由于行业工艺不断更新，工况环境越来越复杂，对其密封性能、服役寿命、操作便捷性和节能性能等方面的需求越来越高，而常规机械阀门普遍存在泄漏、磨损、启闭迟滞、能耗高、维修费用高等问题，已经严重影响系统性能的提升。为此开展机械阀门性能优化与应用研究，发掘其性能优化途径，优化设计制造与使用过程，对改善阀门工作可靠性、延长服役寿命、降低运行成本，促进我国相关产业科技发展，均有重大的科学与现实意义。

## 1 机械阀门分类、结构组成和工作原理

根据机械阀门的结构形式不同，可以将其分为闸阀、球阀、蝶阀、截止阀、止回阀等。根据使用用途，还可以将其分为切断阀、调节阀、节流阀、安全阀等。根据其驱动方式，可以将其分为手动阀、电动阀、气动阀、液动阀等。各种类型的阀门，都能满足不同工况条件的需求<sup>[1]</sup>。机械阀门主要由阀体、阀芯、阀座、阀杆、填料函、执行机构等构成。在这些部件中，阀体是流道的核心部分，阀芯和阀座共同完成密封和通断控制，阀杆传递驱动力，填料函保证阀杆和阀体的密封，执行机构则为阀门启闭提供动力。其工作实质是通过执行机构推动阀杆，带动阀芯与阀座做升降、旋转等运动，使阀芯和阀座的间隙发生变化，从而达到通断流体介质、调节流量、控制压力等作用，其关键在于通过结构匹配保证密封可靠性，通过合理传动提高操作便捷性，以适应各种工况下的控制要求。

## 2 机械阀门核心性能指标

其关键性能参数是影响其适配性与工作可靠度的关键，也是性能优化的重要目标。作为重要的阀门，机械阀门最重要的

性能是在其闭合后防止流体泄漏的能力。

启闭特性包括启闭力矩、启闭速度以及运行的平稳性等，它们对阀门的操作便捷性及使用寿命有很大的影响；抗磨特性主要是针对易损零件如阀芯和阀座，确定其在含杂质流体或经常开闭状态下的工作寿命；耐腐蚀性能主要是根据材质的特点而定，适用各种恶劣的工况环境，如酸碱、高温高压等；高强度和刚性保证在恶劣的工况环境中不会出现变形和断裂；其节能特性表现为启闭能耗及流动阻力，减少能源消耗是工业绿色发展的需求，各指标间相互联系，相互影响，共同影响着机械阀门的整体性能。具体如表1所示。

表1 机械阀门核心性能指标

核心性能指标	核心参数说明	标准数据
泄漏性能	阀门闭合后防泄漏能力，用泄漏率表示	软密封闸阀：气泡级零泄漏（GB/T 13927 A级）；硬密封球阀：泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
启闭特性	含启闭力矩、速度，影响操作与寿命	DN100 手动闸阀：启闭力矩 $\leq 200 \text{N} \cdot \text{m}$ ； DN300 电动闸阀：启闭时间 $\leq 60 \text{s}$
耐腐蚀性能	适应恶劣工况，与材质相关	316L 不锈钢：盐雾测试 2200 小时无锈蚀；衬氟闸阀：耐受 pH 0-14 腐蚀

## 3 机械阀门性能关键影响因素

### 3.1 结构设计因素

机械阀门结构的合理与否将直接关系到其密封的可靠性、启闭效率及工作寿命。如果阀芯和阀座密封面的角度不对，或者间隙太大或者太小，都会使阀门的密封效果变差，从而产生

渗漏；如果阀杆和填料函之间的匹配结构不合理，则会引起外漏或阀杆卡死，从而降低启闭效率；阀体流道设计不完善将增大流动阻力，使其节能性下降，并加重了其内部的磨损；另外，由于阀体的总体刚性不够，在高温高压工况下容易产生变形，造成密封失效；由于执行机构和阀杆之间的连接结构不够合理，会导致驱动力传递不均、启闭力矩增大、工作寿命降低，所以对其进行合理的结构设计是保证其工作性能的重要前提。

### 3.2 材料选型因素

如果关键零件如阀体、阀芯、阀座等材料的选型不合理，则会造成工作中出现磨损、腐蚀和变形等问题，如腐蚀介质中采用的是普通碳钢，容易出现腐蚀和渗漏；选择耐高温性能不佳的材料，易造成部件变形失效；选择不当的填料会引起阀杆部位的泄漏，从而降低其密封性；另外材料的硬度、韧性、强度等力学性能还会对阀门的耐磨和抗冲击性能产生很大的影响，在不同的工况条件下，所使用的材料有很大的差别，如石化行业需要选择耐腐蚀耐高温的合金材料，而在给排水方面则需要选择具有良好的性价比的铸铁或者不锈钢材料，在选择的时候需要与工况需求精准匹配<sup>[2]</sup>。

### 3.3 加工和装配工艺因素

加工与装配工艺的精度将会对其结构与匹配特性产生重要的作用，从而对其综合工作性能产生重要的影响。在加工过程中，由于阀芯和阀座等密封部位的加工精度不足，如果密封表面粗糙度超标或尺寸偏差过大，就会造成密封面贴合不紧密，从而产生渗漏；阀体流道加工精度不足，将增大流体的流动阻力，加大部件的磨损；如果阀杆的加工精度不够，就会造成填料函和执行机构之间的配合间隙过大，从而造成卡滞或外漏。在装配过程中，如果装配顺序错误或装配力度不当，就会造成零件变形，配合间隙不均匀，从而降低启闭特性；如果密封件装配不到位，将会造成密封失效；另外加工时产生的残余应力以及装配后的调试不充分也会对其工作稳定性及服役寿命产生不利的影响，因此高精度加工与规范装配是保证其正常工作的关键环节。

### 3.4 工况环境因素

工况环境包括工作介质特性、工作温度、工作压力和外界杂质等，对机械阀门工作状态及工作寿命有很大的影响。在工作过程中，有腐蚀性的流体会加快零件的腐蚀速度，含有固体杂质的流体会使阀芯和阀座的磨损加剧，而粘性流体会增大启闭的阻力；工作温度太高或过低，将使阀门材料力学性能下降，使密封件老化失效，阀体和阀杆发生变形，从而降低其密封及启闭特性；当工作压力太大时，将超过其设计承载范围，造成密封失效和零件损坏，而压力波动过大又会加重其疲劳损伤；外界的灰尘、湿度等因素，也会对阀门的外部部件产生侵蚀，

从而导致执行机构的工作异常，而工况条件对阀的工作特性有很大的影响，也是进行性能优化时需要考虑的重要因素。

## 4 机械阀门性能优化方法

### 4.1 结构优化设计

结构优化是实现机械阀门性能优化的关键，其关键在于提高密封的可靠性，减小流体阻力，优化启闭性能。相关人员需要以密封能力为目标，通过柔性密封、多道密封等新的密封结构，对阀芯-阀座之间的密封面夹角及粗糙度进行优化，降低密封间隙，并通过偏心式的结构来降低密封面的磨损，提高密封的使用寿命。

以流体阻力为目标对阀体流道进行优化，通过流线型流道设计，减小流道死区及突变点，减小流场能耗，提高节能性。同时针对性地对阀杆与执行机构的连接结构进行优化，使其能够降低启闭力矩，提高启闭效率，并对阀杆的导向结构进行优化，以防止阀杆的卡滞；同时做好阀体、阀杆等关键构件的力学特性研究，实现对阀体及阀杆等关键部位的力学特性的优化，实现其在高温、高压条件下的高效稳定运行，在满足一定的强度要求的情况下，实现对阀门整体性能的改善。

### 4.2 材料优化与表面改性

阀门的材料和表面改性是提高阀门耐磨损、耐腐蚀、耐高温等性能的重要途径，其核心在于通过对材料的选择和表面处理来提高阀门的服役寿命，适应各种复杂工作环境<sup>[3]</sup>。在材料的选择上，针对工作条件的要求选择高性能材料，如在强腐蚀环境中，选择耐腐蚀的哈氏合金和蒙乃尔合金来代替普通碳钢；选择耐热钢或高温合金作为核心材料，以提高其耐热性及强度；在含有杂质流体的条件下，选择高硬度耐磨钢和陶瓷等材料，以提高其耐磨能力，并注意材料的性价比，在保证其使用功能的情况下，选择合适的材料，以降低制造成本。在此期间需要采用等离子喷涂、激光熔覆、镀铬和氮化等方法，在易磨损和易腐蚀的部件表面制备高性能的涂层，提高部件的硬度、耐磨性和耐蚀性，对阀杆进行氮化，提高其表面硬度及抗磨损能力，达到提高其使用寿命的目的。

### 4.3 加工工艺优化

提高部件的制造质量，降低部件的制造误差，保证部件间的配合精度，从而提高阀门的综合性能。对于密封部件，借助精密研磨、超精密加工等工艺来提高密封面的粗糙度及形状精度，保证密封面的贴合紧密，降低泄漏；在阀体加工方面，利用数控加工、五轴联动加工等工艺，对流道进行精确的加工，确保流道流线型，减小流体的阻力，并降低加工中的残余应力，防止了部件的变形。对于阀杆的制造，通过精密的车削和磨削技术，提高阀杆的直线度和型面的精度，保证与填料函及执行

机构之间的合适的配合间隙,防止卡滞和泄漏。在此基础上,对切削速度、进给量、切削深度等工艺参数的优化,降低工件的损伤,提升加工效率与品质。利用三坐标测量仪和激光检测等现代检测手段,精确地检测被加工部件,并对其进行实时检测和校正,保证其制造的精度满足预定的需求。

#### 4.4 数值模拟和智能算法多目标优化

在智能控制的基础上,采用数值模拟与智能算法相结合的方法,对机械阀门进行多目标优化,以达到高效精确的优化设计目的。在此基础上,利用有限元分析、计算流体力学等方法,对不同结构参数和工况条件下的阀门进行仿真分析,揭示其性能弱点,为进一步优化设计奠定基础。采取有限元法对阀门阀体进行温度、压力作用下的受力情况的仿真计算,并对其结构进行优化,以防止其发生变形。以密封性能、启闭性能、节能性能、服役寿命等为优化目标,以结构、材料、工艺等为优化变量,采用遗传算法优化阀腔结构参数,采用遗传算法对

阀芯-阀座结构参数进行优化,达到密封性能与启闭性能的同步提高。通过多目标智能优化与数值仿真的迭代验证,有效解决传统阀门设计中多性能指标相互制约的难题,优化后阀门综合性能较传统设计显著提升。构建多目标优化决策模型,实现密封、启闭、节能、寿命等指标的协同最优,大幅降低阀体变形、密封失效等故障风险。

## 5 结语

综上所述,机械阀门作为工业生产和基础设施建设中的核心部件,其性能优化对于提升系统运行可靠性、降低能耗、延长使用寿命具有重要意义。文章从机械阀门的分类、结构组成及工作原理,明确密封性能、启闭性能等核心性能指标,深入分析结构设计、材料选型、加工装配工艺及工况环境四大关键影响因素,并针对性提出结构优化设计、材料优化与表面改性、加工工艺优化及数值模拟与智能算法多目标优化四种优化方法,旨在有效地推进阀门综合性能的提升。

## 参考文献:

- [1] 唐明亮.低压锅炉给水系统机械阀门故障分析与改进[J].机械管理开发,2025,40(08):244-245+271.
- [2] 谢智能.火箭发动机阀门密封面的机械性能优化[J].中国机械,2025,(14):8-11.
- [3] 张慧斌.基于 CFD 的往复机械阀门流场与故障特性分析研究[D].北京化工大学,2023.