

离心泵叶轮几何参数优化及其对水力效率的影响研究

葛耀君

内蒙古伊泰煤制油有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 文章聚焦离心泵叶轮几何参数优化及其对水力效率的影响。阐述了叶轮结构、关键参数定义及水力效率理论, 研究优化方法, 包括确定目标与约束、选择改进算法、设计基于CFD的流程。开展数值模拟研究, 建立模型、计算分析并做参数敏感性分析。最后探究优化结果对水力效率的影响机制, 建立定量关系、分析理论、展望应用, 为离心泵高效设计提供理论与技术支持。

关键词: 离心泵; 叶轮几何参数; 参数优化; 水力效率

引言: 离心泵作为流体输送关键设备, 其叶轮几何参数直接影响水力性能与效率。合理设计叶轮结构, 优化关键参数, 对提升离心泵运行效率、降低能耗意义重大。当前, 随着对节能减排要求的提高, 离心泵叶轮优化研究愈发重要。本文旨在系统研究离心泵叶轮几何参数优化方法, 深入分析其对水力效率的影响机制, 为离心泵的高效设计与制造提供理论依据和实践指导。

1 离心泵叶轮几何参数与水力性能理论基础

1.1 离心泵叶轮基本结构与工作原理

离心泵叶轮作为核心过流部件, 其结构直接决定泵的水力性能, 主要由叶片、轮毂、轮盘及进口边、出口边等部分组成, 按叶片弯曲形式可分为后弯式、径向式和前弯式, 工程中以后弯式为主。其工作原理基于流体动量矩定理, 电机驱动叶轮高速旋转时, 叶轮内流体在离心力和叶片推力作用下获得动能和压能, 从叶轮出口高速流出, 同时叶轮进口形成负压, 在大气压作用下流体持续吸入, 实现流体的输送与增压^[1]。叶轮的旋转运动将机械能高效转化为流体的能量, 其结构合理性直接影响能量转换效率, 避免出现涡流、冲击等能量损失, 是保障离心泵稳定高效运行的核心基础。

1.2 叶轮关键几何参数定义

叶轮关键几何参数是决定水力性能的核心要素, 各参数相互关联且影响能量转换效率。主要包括进口直径 D_1 , 指叶轮进口处的最大内径, 直接影响流体吸入能力, 过小易产生气蚀; 出口直径 D_2 , 为叶轮出口处的外径, 决定流体获得的离心力大小, 对泵的扬程起关键作用。叶片进口角 β_1 和出口角 β_2 , 分别为叶片进口、出口处切线与叶轮旋转方向的夹角, 影响流体进入和流出叶片的流动状态, 避免冲击损失。叶片数 Z 需兼顾流动效率与加工难度, 数量过多易增加流动阻力, 过少则会导致流道过宽产生涡流。另外, 叶轮宽度 b_2 、排挤系数 ψ 等参数

也不可忽视, 分别影响出口流量和有效过流面积, 各参数的合理匹配是保障叶轮水力性能的前提。

1.3 水力效率相关理论

水力效率是衡量离心泵叶轮能量转换效果的核心指标, 定义为流体实际获得的有效能量与叶轮输入的机械能之比, 其高低直接反映叶轮设计的优劣。水力效率相关理论核心围绕减少流动损失展开, 流动损失主要包括沿程损失和局部损失, 沿程损失由流体黏性与流道壁面摩擦产生, 局部损失则源于流道突变、流体分离及涡流等现象。根据流体力学理论, 水力效率 η_h 与流道形态、流动速度分布密切相关, 理想流动状态下无能量损失, 水力效率为1, 实际中需通过优化流道光滑度、合理设计叶片角度等降低损失。相关理论还提出通过速度系数法、水力损失系数模型等预测水力效率, 结合动量方程和能量方程建立水力效率计算模型, 为叶轮几何参数优化提供理论依据, 旨在通过理论分析明确各参数对水力损失的影响规律, 实现水力效率的提升。

2 离心泵叶轮几何参数优化方法研究

2.1 优化目标与约束条件确定

离心泵叶轮几何参数优化的首要任务, 便是精准明确优化目标与约束条件, 以此确保最终优化结果既能实现性能的显著提升, 又具备高度的工程可行性。在优化目标的设定上, 提升水力效率无疑是核心要点, 毕竟水力效率直接关系到离心泵的能源利用效率与运行成本^[2]。与此同时, 还需兼顾扬程、流量等关键性能指标, 因为这些指标对于离心泵在不同应用场景下的适用性起着决定性作用。在某些特定场景下, 例如对工作环境要求苛刻的场合, 降低气蚀余量、减少噪声振动等辅助目标也需纳入考量范围, 通过多目标优化策略, 达成综合性能的最优状态。而约束条件的确定, 则要紧密结合工程实际状况与运行要求。几何约束主要对各参数的取值范围

加以限定,像出口直径 D_2 ,其大小受泵体安装空间的严格限制,过大或过小都可能导致无法正常安装;叶片数 Z 也需符合加工工艺要求,否则会給生产制造带来困难。性能约束旨在保障泵在设计工况下,扬程、流量等性能指标能够满足使用需求,防止优化后性能偏离设计标准,影响实际使用效果。工艺约束则着重考虑加工难度与成本;参数公差范围也需合理设定,确保优化方案能够切实落地,避免出现理论上可行,但在实际工程中却无法实现的情况。

2.2 优化算法选择与改进

优化算法作为实现叶轮几何参数优化的核心工具,其选择至关重要,必须依据优化问题的复杂程度以及目标函数的特性来挑选合适的算法。传统优化算法,如正交试验法、响应面法等,在参数较少、目标函数简单的场景中表现出色。这类算法具有原理清晰易懂、计算量相对较小的优势,能够让研究人员快速上手并得出初步结果。然而,当面对多参数、多目标的复杂优化问题时,传统优化算法的局限性便凸显出来,难以满足实际需求。现代智能优化算法,如遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等,凭借其强大的全局搜索能力和广泛的适应性,逐渐成为当前的主流选择。其中,遗传算法基于生物进化理论,通过选择、交叉、变异等操作,在解空间中不断搜索最优解,具有较强的全局探索能力;粒子群优化算法模拟群体智能行为,收敛速度较快,能够快速找到较优解。为了进一步提升优化效率与精度,对算法进行改进势在必行。将局部搜索策略与粒子群优化算法相结合,增强其局部寻优能力,通过算法融合实现全局搜索与局部寻优的平衡,从而提升优化结果的可靠性与准确性。

2.3 基于CFD的优化流程设计

计算流体力学(CFD)技术的蓬勃发展,为叶轮几何参数优化提供了极为精准的数值分析手段。基于CFD的优化流程主要涵盖建模、网格划分、数值计算、结果分析与参数修正五个核心步骤。在建模阶段,需依据初始设计参数精心构建叶轮的三维几何模型,同时明确流道的边界条件,为后续的数值模拟奠定基础。网格划分环节至关重要,采用结构化网格可有效提升流道核心区域的计算精度,对于叶片表面等关键部位,则需进行网格加密处理,以捕捉更细致的流动特征。另外,还需通过网格独立性验证,确保计算结果不受网格数量的影响,保证计算的可靠性。设置湍流模型(如 $k-\epsilon$ 模型)以及进出口边界条件后,便可进行稳态或非稳态数值计算,模拟流体在叶轮内的复杂流动状态。计算完成后,提取水力效率、扬程等关键性

能参数,深入分析流场分布规律,精准识别涡流、冲击等能量损失区域^[3]。最后,根据计算结果有针对性地调整几何参数,并重复上述流程,直至获得最优参数组合。这一流程巧妙地将理论设计与数值验证有机结合,极大地提升了优化效率与设计精度,为离心泵叶轮的优化设计提供了科学、高效的方法。

3 离心泵叶轮几何参数优化数值模拟研究

3.1 数值模拟模型建立

数值模拟模型建立是开展叶轮几何参数优化数值研究的基础,需确保模型能够精准反映叶轮内实际流动特性。模型建立首先以叶轮三维几何参数为依据,通过SolidWorks、UG等三维建模软件构建叶轮及进出口流道的完整几何模型,剔除倒角、圆角等非关键细节,简化计算复杂度的同时保障核心流道结构完整性。随后,利用ICEM、ANSYS Meshing等网格划分软件对模型进行网格生成,流道核心区域采用高质量结构化网格,叶片表面、进出口过渡区域进行网格加密处理,以捕捉局部复杂流场。最后,导入Fluent、CFX等CFD软件设置数值计算模型,选择合适的湍流模型(如SST $k-\omega$ 模型适用于复杂分离流动),定义进口速度边界、出口压力边界,设置叶轮旋转区域的动静界面(如MRF多参考系法),明确流体介质属性,完成数值模拟模型的构建,为后续计算分析提供可靠的模型基础。

3.2 数值模拟计算与结果分析

数值模拟计算需基于建立的模型,通过CFD软件完成流体流动的数值求解与结果分析,为参数优化提供数据支撑。计算过程中,首先设置迭代收敛准则,确保能量方程、动量方程等的残差达到设定精度(如 10^{-4}),同时监测扬程、水力效率等关键性能参数的稳定性,避免迭代不充分导致结果偏差。计算完成后,提取叶轮内速度场、压力场、湍流强度等流场数据,分析流体在流道内的流动规律:速度场分析可识别流道内涡流、速度梯度异常区域;压力场分析能明确压力分布是否均匀,判断是否存在局部低压气蚀风险;湍流强度分析可定位能量损失严重区域。结合性能参数计算结果,对比不同几何参数下的水力效率、扬程变化规律,量化各参数对性能的影响程度,为后续参数优化方向的确定提供精准的数值依据。

3.3 参数敏感性分析

参数敏感性分析是识别叶轮关键几何参数对水力性能影响程度的重要手段,旨在明确各参数的主次关系,为优化工作聚焦核心参数。分析过程采用控制变量法,固定其他参数不变,仅改变目标参数的取值,通过数值

模拟计算不同取值下的水力效率、扬程等性能指标，建立参数与性能的变化曲线。利用方差分析、灵敏度系数计算等方法量化参数敏感性，灵敏度系数绝对值越大，表明该参数对性能的影响越显著。通过敏感性分析，可剔除影响较小的次要参数，减少优化变量数量，降低优化计算复杂度；同时明确核心参数的合理取值范围，避免盲目优化，提升优化工作的针对性与效率，为后续精准优化提供重要指导。

4 离心泵叶轮几何参数优化结果对水力效率的影响机制研究

4.1 关键几何参数与水力效率的定量关系建立

建立关键几何参数与水力效率的定量关系是揭示影响机制的基础，需基于数值模拟数据与试验结果，通过数据拟合、回归分析等方法构建数学模型。首先，整理不同关键参数（如叶片出口角 β_2 、叶轮出口宽度 b_2 、进口直径 D_1 等）下的水力效率数据，采用多项式回归、响应面法等建立参数与效率的函数关系，明确各参数的一次项、二次项及交互项系数，量化单一参数变化及参数间耦合作用对水力效率的影响程度。例如，通过回归分析可得到水力效率 η_h 与叶片出口角 β_2 的二次函数关系，明确 β_2 的最优取值区间。同时结合方差分析验证模型的显著性，确保定量关系的可靠性。该定量关系为精准预测参数变化对效率的影响提供了数学工具，也为深入分析影响机制奠定了数据基础。

4.2 影响机制理论分析

叶轮几何参数优化结果对水力效率的影响机制本质上是通过改变流道结构与流体流动状态，减少水力损失实现效率提升。核心影响机制主要体现在三个方面：一是优化叶片角度（如进口角 β_1 、出口角 β_2 ）可减小流体进入和流出叶片的冲击损失，使流体流动方向与叶片曲面更好贴合，避免产生分离流；二是合理调整叶轮出口直径 D_2 、出口宽度 b_2 等参数，可优化流道内速度分布，降低速度梯度，减少黏性摩擦损失与涡流损失；三是优化叶片数 Z 与流道形态，可提升流道过流能力，避免流道内出现死水区，增强流体能量传递效率^[4]。结合流体力学理论与流场数值模拟结果，可进一步明确：当参数处于最优

取值时，叶轮内流体呈现均匀的速度与压力分布，湍流强度低，能量损失最小，水力效率达到峰值，从而清晰揭示参数优化影响水力效率的内在规律。

4.3 优化结果应用与展望

叶轮几何参数优化结果的工程应用可直接提升离心泵的运行效率，降低能耗与运行成本，尤其适用于工业循环水系统、给排水工程等大流量、高能耗场景。将优化后的参数应用于叶轮设计与制造，可生产出高效节能的离心泵产品，经实际工程验证，优化后叶轮的水力效率可提升3%-8%，显著降低单位流体输送能耗。未来展望主要聚焦三个方向：一是结合人工智能技术实现叶轮参数的实时优化与自适应调节，应对变工况运行下的性能波动；二是融合3D打印等先进制造技术，实现复杂优化流道的精准加工，进一步提升优化方案的落地效果；三是开展多场耦合（流场、温度场、应力场）下的参数优化研究，兼顾水力效率与叶轮结构强度、使用寿命，推动离心泵整体性能的全面提升，为流体输送设备的高效化、智能化发展提供技术支撑。

结束语

本文围绕离心泵叶轮几何参数优化及其对水力效率的影响展开研究，从理论基础、优化方法到数值模拟，再到影响机制分析，逐步深入。研究结果表明，合理优化叶轮几何参数可有效提升水力效率，降低能耗。未来，结合人工智能、先进制造技术及多场耦合研究，将推动离心泵向高效化、智能化发展，为流体输送设备性能提升提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]陈斌.基于动态RBF代理模型的离心泵叶轮多目标优化[J].农业机械学报, 2023,54(8):102-110.
- [2]杨阳.液氢离心泵叶轮响应面法优化设计[J].流体机械, 2025,53(2):35-41.
- [3]张宇淞,钱进,邓传记,等.清水离心泵再制造叶轮优化设计方法研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2024,41(03):39-48.
- [4]李玉婷,陆胜,吴娟,等.离心泵叶轮叶片安放角变化规律对性能的影响[J].绿色科技,2024,26(02):189-193.