

离心泵叶轮结构对流体机械效率的影响研究

张 懿

江苏中科能源动力研究中心 江苏 连云港 222000

摘 要：叶轮作为离心泵的核心做功部件，结构构型直接决定内部流体流动状态与能量转化质量。该研究梳理离心泵叶轮的整体构造与几何属性，剖析叶片、流道及附属结构的运行特征，厘清不同结构对流体运动、能量传递及能耗损耗的作用规律，本文结合流体运转机理，针对性提出叶片、流道、附属构件的精细化优化方案，搭建叶轮整体结构协同优化体系。合理的叶轮结构设计能够规整流场分布、削弱流动损耗，有效提升离心泵流体能量转化质量与整体输送效能。

关键词：离心泵；叶轮结构；流道特性；流体运动；机械效率

引言：离心泵广泛应用于工业输送、水利调控等诸多领域，设备运行效能直接影响流体输送的经济性与稳定性。叶轮是决定离心泵能量转换效率的关键构件，各类结构参数的差异化配比，会改变内部流体的流转轨迹与能量传递状态。现阶段叶轮结构适配性不足引发的涡流、泄漏、流动扰动等问题，持续造成流体能量损耗，制约离心泵运行性能提升。通过拆解叶轮各类结构特征，分析不同结构与流体运转、能量交换的内在关联，梳理科学的结构优化思路，能够改善内部流场运行状态，弱化无效能耗，为离心泵高效稳定运行提供坚实的结构支撑。

1 离心泵叶轮结构体系与流体运转特征

1.1 离心泵叶轮常规结构构成

离心泵叶轮是离心泵实现流体输送的核心做功部件，核心组成包含轮毂、叶片、前盖板与后盖板，各部件协同构成完整的叶轮作业结构。轮毂设置于叶轮中心，整体为实心圆筒结构，内置装配轴孔，可与泵轴牢固对接，承接设备运转产生的机械转矩，为叶轮整体转动提供定位支撑。叶片是直接作用于流体的核心部件，常规离心泵叶轮一般布设5~9片叶片，多片叶片均匀周向排布在前后盖板之间，常见结构包含圆弧弯曲叶片、平直叶片等类型，适配不同工况的流体输送需求。前后盖板为对称环形盘体，分别布置在叶片的轴向两端，圈定出规整的流体流通通道，限制流体侧向溢出^[1]。工业生产中多通过整体铸造工艺成型各部件，各结构单元形成稳定的空间装配关系，封闭成型的流道结构，可为流体有序流转提供稳定的结构基础。

1.2 离心泵叶轮结构几何属性

离心泵叶轮拥有复杂的三维空间构型，整体呈现中心紧凑收拢、外缘平缓扩散的整体形态。叶片曲面是叶

轮核心几何结构，曲面曲率沿流体流动方向呈现规律性渐变。叶轮进口位置曲率更为平缓，能够削弱流体流入阻力，减少入流扰动现象。出口位置曲率逐步提升，适配流体向外扩散的运动趋势，辅助流体完成扩压过程。叶轮壁厚分布具备明显的差异化特点，轮毂承载整体扭转荷载，壁厚数值最大。叶片和盖板壁厚均匀变薄，在满足结构刚度、抵御高速运转荷载的前提下，降低整体运转负荷。叶轮进出口直径、叶片包角、流道宽度等几何参数相互配合，塑造出连续渐变的流道空间，适配流体输送的动态工况。

1.3 叶轮内部流体运动与能量传递规律

设备运行阶段，流体沿轴向进入叶轮中心流道，受叶轮旋转作用改变运动方向，沿径向向外扩散流动。流体在叶片流道内形成复合运动形式，可跟随叶轮做圆周转动，也可沿叶片曲面完成相对滑移。流体流速从叶轮中心到外缘逐步递增，形成稳定的速度梯度，常规工况下叶轮外缘流体流速可达到8~15m/s。叶轮转动过程中，叶片持续对流体施加作用力，机械能量持续输入流体介质，以此提升流体运动速度。流体向外流动时，流道截面持续扩大，流体动能发生转化，静压能得到有效提升。叶轮各项几何参数直接决定流道成型效果，影响流体流动的平顺性。科学合理的结构设计可以抑制脱流、漩涡等异常流动问题，降低能量损耗，让机械能高效转化为流体的压力能与动能，提升离心泵整体输送效能。

2 离心泵叶轮各分项结构特征分析

2.1 叶片结构特征分析

叶片承担叶轮主要的流体做功任务，普遍采用三维扭曲曲面造型，适配流道内复杂的流体运动状态。常规离心泵叶片可分为后弯、径向、前弯三种主流形式，不同造型适配不同的扬程与流量工况，满足多样输送需

求。叶片沿叶轮圆周均匀排布,数量与安装角度决定流道疏密程度,直接影响流体通行顺畅度与运行稳定性^[2]。设计过程重点把控进出口安放角、叶片包角和截面厚度几项关键参数。进出口安放角合理调节流体进出角度,减轻流体冲击,减少流动扰动。叶片包角改变流体在流道内的作用行程,取值偏大可让能量转换更加充分,取值偏小则有效降低流体流动阻力。叶片厚度采用根部厚重、边缘轻薄的渐变形式,根部抵御高速转动带来的弯折与冲击荷载,边缘弱化对流体的遮挡干扰,让结构强度与通流效果形成良好匹配。

2.2 叶轮流道结构特征分析

叶轮流道由叶片与前后盖板共同围合而成,属于形态顺滑的三维渐变通流腔体。流道从内侧进口到外侧出口逐步拓宽,流通截面持续变大,符合流体输送过程中增速扩压的工作特点。流道设计主要参考进口宽度、出口宽度和径向延伸长度等尺寸参数,结合设备额定流量、介质黏度等实际工况完成匹配优化。流道整体曲面过渡均匀顺滑,不存在局部突变结构。进口位置曲面变化平缓,流体可以平稳进入流道内部,不易出现淤积、紊流等不良流动现象。出口位置曲面逐步舒展,为流体提速、压力蓄积提供充足的流动空间。整体渐变结构能够有效约束流体运动轨迹,减小流动摩擦造成的能量损耗,提升叶轮通流能力与能量转换水平。

2.3 叶轮附属结构特征分析

叶轮除核心叶片与流道以外,还配备轮毂、盖板、平衡孔、减磨环等辅助构件,共同支撑叶轮稳定、长效运行。轮毂布置在叶轮中心位置,依靠实心筒状结构承接泵轴传递的动力,约束叶轮转动偏移幅度,保证整体运转状态稳定。前后盖板封堵叶片轴向两侧空间,规整流道整体边界,避免流体从轴向缝隙外泄。后盖板表面均匀布设平衡孔,连通叶轮内外腔体压力,缓解轴向受力不均的问题,减轻轴承和泵体部件的磨损。减磨环布置在叶轮进出口关键位置,缓冲高速流体冲刷和结构接触摩擦带来的损耗。各类辅助构件合理分布在叶轮整体结构中,改善设备受力条件,强化密封与耐磨性能,实现叶轮结构的全方位完善。

3 叶轮结构对流体机械效率的作用机理

3.1 叶片结构对流体能量交换的作用机理

叶片结构参数是决定流体能量交换质量的核心因素,直接把控机械能向流体势能与动能转化的完整过程。叶片进出口安放角的合理设计,能够弱化流体进入流道时的冲击损耗,让流体贴合叶片曲面完成有序运动,保障能量交换的基础效率。叶片包角的大小会改变

流体受力作用的路径长度,适度增大包角可以延长能量交换时长,让动力传递更加充分,提升流体压力与速度的提升幅度。叶片厚度与曲面曲率的合理配比,能规避流体局部脱层、涡流等不良现象,减少动力传递过程中的无效能耗^[3]。叶片整体构型的差异化设计,会改变能量交换的强度与均匀度,合理的结构参数可以最大化挖掘做功潜力,提升离心泵有效输出效率,参数失衡则会引发大量能量损耗,降低设备整体工作性能。

3.2 流道结构对流体运动状态的作用机理

流道空间构型全程干预流体流动状态,规整流体运动轨迹,控制流动损耗的产生量级。连续平滑的渐变流道可以引导流体有序流动,规避流速突变引发的紊流与回流问题,维持稳定的流动状态。流道截面尺寸的梯度变化,适配流体增速扩压的运动规律,截面过渡合理时,流体流速变化均匀,不会产生局部高压或低速淤积区域。曲率过渡不均匀的流道,会打乱流体运动节奏,让部分流体脱离主流轨迹,形成无序涡流,产生大量流动损耗。科学的流道结构设计可以稳定流体流动形态,降低流动过程中的摩擦损耗与扰动损耗,为高效的能量转化提供稳定的流动基础,间接提升离心泵整体机械工作效率。

3.3 附属结构对流体能量损耗的作用机理

叶轮各类附属结构通过改变腔体压力分布与流体密封状态,对流体能耗水平产生直接影响。盖板密封精度不足会形成流体泄漏通道,部分高压流体回流至低压进水区域,造成压力势能的无效损耗,降低有效输送流量。轮毂结构尺寸不合理,会扰乱叶轮中心流体的入流状态,引发入流扰动,增加前期流动能耗。平衡孔孔径与排布密度不合理,会打破腔体压力平衡,诱发流体无序窜动,产生额外的流动损耗。减磨环磨损或配合间隙过大,会扩大流体泄漏范围,加剧能量流失。附属结构的运行状态决定泄漏损耗与扰动损耗的大小,优化附属结构与装配精度,能够抑制无效能耗,有效优化离心泵整体运行效率。

4 适配流体机械高效运行的叶轮结构优化逻辑

4.1 叶片结构优化逻辑

叶片结构优化以提升流体能量交换效率、弱化流动能耗为核心目标,依托叶片做功机理制定适配性优化思路。设计工作优先优化叶片进出口安放角,结合设备额定工况下的流体入流角度调整参数,减少流体冲击与脱流现象,让能量交换过程更加稳定。针对叶片包角开展精细化调控,结合输送介质特性调整包角数值,低黏度介质可选用小幅包角缩减流动阻力,高黏度介质采用偏

大包角延长流体做功行程,提升能量转化完整度^[4]。叶片厚度遵循渐变优化原则,适度加厚叶片根部提升结构刚度,规避高速运转下的结构形变,精简叶片边缘厚度,减少对流场的遮挡干扰。叶片曲面曲率做平滑过渡处理,消除曲面局部突变问题,抑制涡流、紊流等不良流动状态,从核心结构层面提升叶片做功能力。

4.2 流道结构优化逻辑

流道结构优化聚焦稳定流体运动状态、削减流动损耗,依据流道对流体的作用机理明确优化方向。重点调整流道截面梯度变化规律,让进口到出口的截面面积匀速递增,避免截面突变引发的流速骤变与压力波动。对流道内壁曲面做顺滑打磨处理,统一曲率变化节奏,改善局部流场紊乱问题,让流体沿固定轨迹平稳流动。结合设备工作流量优化流道径向长度与进出口宽度,匹配流体输送的增速扩压需求,杜绝局部流体淤积与高压滞留问题。规整流道整体空间形态,保证单条流道结构参数统一一致,让叶轮周向流场分布更加均匀,降低单侧流道异常流动带来的整体能耗,持续提升流道通流质量与流体运动稳定性。

4.3 附属结构优化逻辑

附属结构优化围绕抑制泄漏损耗、平衡腔体压力、减少摩擦能耗展开,完善各类辅助构件的设计与装配方案。针对前后盖板,通过提升板面平整度与密封装配精度,缩小结构配合间隙,阻断高压流体回流泄漏通道,减少压力势能流失。轮毂优化以匹配入流状态为核心,规范中心孔径与外形尺寸,规整叶轮中心入流流场,弱化入流扰动带来的无效能耗。平衡孔采用均匀等距排布设计,根据叶轮腔体压差标定合理孔径,稳定内外腔压力状态,削弱流体无序窜动产生的流动损耗。定期匹配更换减磨环构件,控制装配配合间隙,缓解高速流体冲刷与机械摩擦造成的结构损耗,长久维持叶轮稳定的密封与耐磨性能。

4.4 叶轮整体结构协同优化逻辑

叶轮整体性能提升依托各分项结构的协同适配优化,单一结构的独立调整无法实现全工况高效运行。叶片参数优化需匹配流道空间构型,叶片曲面曲率、安放角的调整,要与流道曲率、截面变化规律相互适配,保证流体做功、流动、扩压全过程顺畅衔接。附属结构优化贴合核心流场运行需求,通过密封结构、压力平衡结构的优化,为叶片与流道的高效做功提供稳定运行环境,抵消各类附加能耗。整体优化过程摒弃单一参数极致调整的思路,以设备实际工况为基准,平衡结构强度、通流性能、能耗水平三类核心指标,形成多结构联动的优化体系,全面提升离心泵叶轮的运行效率与工况适配能力。

结束语

离心泵叶轮各类构件具备差异化结构特征,不同结构形态对内部流体流动、能量转换及损耗生成存在显著影响。叶片、流道与附属结构的构型差异,直接改变泵内流场的分布形态,决定能量转化的平稳程度。通过梳理各类结构的水力作用特性,明确结构缺陷引发流动紊乱、能量损耗的核心原因,形成多维度的结构改良与整体协同适配方案。结构参数的合理匹配可稳定流体运行状态,降低输送过程中的各类能耗,提升离心泵水力工作性能,为叶轮结构设计与优化改良提供可靠的理论支撑。

参考文献

- [1]颜林,宋文武.叶片不同切割形状对离心泵各项性能的影响[J].机电工程,2024,41(11):2106-2118.
- [2]谭叶文,宋文武,刘孟豪.径向间隙对中比转速离心泵空化性能的影响研究[J].机电工程,2026,43(2):310-320.
- [3]赵伟国,亢艳东,李清华,等.叶片吸力面不同结构对离心泵空化初生的影响[J].振动与冲击,2022,41(7):23-30.
- [4]张金凤,张文佳,王国军,等.空间导叶式多级离心泵级间能量损失机理[J].排灌机械工程学报,2024,42(10):989-996.