

导叶安装角度对离心泵叶轮结构特性的影响

韩闯, 杨培生

沈阳格瑞德泵业有限公司, 辽宁 沈阳 110326

摘 要 : 离心泵作为各类工业领域广泛应用的关键流体输送设备, 其性能表现直接关联系统运行的稳定性与效率。本研究将关注点聚焦于导叶安装角度这一核心参数, 深入探究其对离心泵叶轮结构特性的影响。研究综合运用理论分析、数值模拟以及实验研究等多元方法, 对不同导叶安装角度下叶轮所承受的流体作用力、内部应力分布状态、变形特征以及疲劳寿命等关键结构特性展开细致剖析。研究结果清晰表明, 导叶安装角度的变动会对离心泵叶轮的结构性能产生极为显著的影响。因此, 精准合理地选择导叶安装角度, 对于提升离心泵的可靠性、稳定性, 延长其使用寿命而言, 具有无可替代的重要意义。

关 键 词 : 导叶; 离心泵; 安装角度; 叶轮结构

Influence of Guide Vane Installation Angle on Structural Characteristics of Centrifugal Pump Impeller

Han Chuang, Yang Peisheng

Shenyang gered Pump Co., Ltd. Shenyang, Liaoning 110326

Abstract : centrifugal pump is a key fluid conveying equipment widely used in various industrial fields, and its performance is directly related to the stability and efficiency of system operation. This study focuses on the core parameter of guide vane installation angle, and explores its influence on the structural characteristics of centrifugal pump impeller. The research comprehensively uses multiple methods such as theoretical analysis, numerical simulation and experimental research to analyze the key structural characteristics such as the fluid force, internal stress distribution, deformation characteristics and fatigue life of the impeller under different guide vane installation angles. The research results clearly show that the change of guide vane installation angle will have a very significant impact on the structure and performance of centrifugal pump impeller. Therefore, the accurate and reasonable selection of guide vane installation angle has irreplaceable significance for improving the reliability and stability of centrifugal pump and prolonging its service life.

Keywords : guide vane; centrifugal pump; installation angle; impeller structure

引言

在离心泵的复杂构造中, 叶轮与导叶作为核心组件, 承担着能量转换与传递的关键使命。叶轮负责将原动机的机械能高效传递给液体, 赋予液体动能与压力能; 导叶则致力于收集叶轮排出的液体, 引导其平稳流动, 并将部分动能转化为压力能。而导叶安装角度, 作为离心泵设计与运行中的关键参数, 能够显著改变泵内流场的分布格局, 进而深度影响叶轮所受的流体作用力, 最终对叶轮的结构特性产生连锁反应^[1]。深入洞察导叶安装角度对离心泵叶轮结构特性的影响规律, 不仅有助于优化离心泵的设计方案, 提升其运行可靠性, 还能为相关领域的技术革新提供有力的理论支撑与实践指导。

一、离心泵工作原理及结构概述

(一) 工作原理

离心泵运行是基于离心力作用实现流体的高效输送。在启动离心泵电机后, 带动泵轴高速旋转, 进而驱动固定在轴泵上叶轮一同做高速圆周运动。叶轮上的叶片犹如动力传输器, 旋转期间与液体充分接触产生强大的附着力、摩擦力。在该作用力的影响

下, 原本处于叶轮中心的液体被叶片紧紧裹挟, 在叶轮高速旋转作用下, 液体所受离心力持续增大。在离心力不足以克服液体的惯性和重力等阻力时, 液体便会沿着叶片曲面从叶轮中心被迅猛甩向叶轮边缘。此过程中液体流速快速增加, 显著提升动能。同时, 液体从叶轮中心向边缘流动时, 流道逐步变窄, 结合流体连续性方程, 流速增加会导致压力上升, 因此液体不仅会获得动能, 其压力也会随之提升。离开叶轮的高速高压液体进入到导叶

内部，其流道设计为逐渐扩张方式，液体流经导叶时的流速逐步放缓，结合伯努利方程，动能减少会转化为压力能的进一步增加，使液体在离开本体时具备更高压力，实现流体的高效运输^[2]。

（二）结构

离心泵主要由叶轮、导叶、泵轴、泵壳、密封装置、轴承等装置组成。其中，叶轮为离心泵的核心部件，是由叶片、轮毂、盖板组成。叶片可将机械能传递给液体的直接元件，其数量、形状、角度对泵的性能有着直接影响。轮毂用于固定叶片并将其与泵轴连接，以保证叶片在高速旋转时的稳定性。盖板可封闭叶片，产生特定流道，引导液体的流动方向。导叶环绕在叶轮外周，由进口段、叶片、出口段组成。进口段用于平稳接收从叶轮流出的液体，叶片根据设计角度对液体导流，将其动能转化为压力能，出口段则是经过能量转换的液体引导至泵出口。泵轴用于连接叶轮和电机，传递扭矩，带动叶轮高速旋转。泵壳起到包容、保护内部件的作用，并合理规划液体流动路径^[3]。密封装置可防止液体泄漏、空气进入，确保本体高效运行。轴承负责支撑泵轴，减少旋转期间的振动与摩擦，保证离心泵运转的平稳性。

二、导叶安装角度对离心泵叶轮结构特性的影响

（一）导叶安装角度对叶轮受力的影响

从流体学原理出发，导叶安装角度变化会影响到叶轮出口流体速度方向与大小。结合动量定理，流体对叶轮作用力也将发生改变。假设叶轮出口流体为均匀、稳定的流动，通过建立动量方程分析叶轮所受轴向力和径向力与导叶安装角度的关系。设叶轮出口半径为 R_2 ，叶轮出口处流体绝对速度为 V_2 ，相对速度为 W_2 ，圆周速度为 U_2 ，导叶安装角度为 θ 。导叶安装角度改变，流体进入导叶入射角改变，影响叶轮出口速度三角形。根据速度三角形关系： $V_{2u}=U_2-W_{2u}$ ，其中 V_{2u} 为绝对速度圆周分量， W_{2u} 为相对速度圆周分量^[4]。

叶轮所受径向力 F_r 主要由流体在叶轮出口的动量变化引起，近似表示为： $F_r = \rho Q(V_{2u}\sin\theta + V_{2m}\cos\theta)$ ，其中 ρ 为流体密度， Q 为流量， V_{2m} 为绝对速度径向分量。叶轮所受轴向力 F_a 与叶轮两侧压力差及流体动量变化有关，导叶安装角度改变，叶轮两侧压力分布变化，导致轴向力改变。

采用计算流体动力学（CFD）软件模拟离心泵内部流场，分析导叶安装角度对叶轮受力的影响。建立离心泵三维模型，包括叶轮和导叶，采用 $k-\omega$ SST 模型（湍流模型的一种）模拟流体流动，设置不同导叶安装角度，如 $\theta=15^\circ$ 、 20° 、 25° 、 30° ，计算不同工况下叶轮所受流体的作用力。模拟结果显示，随着导叶安装角度增大，叶轮所受径径向力和轴向力先减少后增大。在导叶安装角度达到 20° 时，叶轮收缩径径向力、轴向力达到最小值。此时流体即可顺畅从叶轮流入到导叶内，叶轮出口流场也更加均匀，动量变化小、流体作用力减小。对此，搭建离心泵实验台验证模拟结果的精度，实验装置包括离心泵、电机、流量计、压力传感器、扭矩仪、数据采集系统^[5]。在实验期间保持离心泵转速、流量等工况参数不变，改变导叶安装角度，测量叶轮所受径

向力和轴向力。最终实验结果与数值模拟基本吻合，证明导叶安装角度会影响叶轮受力。同时发现，实际运行中由于制造误差、安装偏差、流体非定常性等因素，叶轮受力存在波动，且导叶安装角度变化对力的波动幅值也有影响。

（二）导叶安装角度对叶轮应力分布和变形的影响

获取到不同安装角度下叶轮所受流体作用后，将其作为荷载附加在叶轮有限元模型中，采用有限元分析软件计算叶轮应力分布、变形状况。合理划分叶轮的网格，使用线性弹性模型描述叶轮材料力学行为。结果表明，不同导叶的安装角度，叶轮内部应力分布也存在显著差异。叶片根部、轮毂与叶片连接部位的应力较为集中。导叶安装角度增大，这部位应力水平先降后增，叶轮变形量也出现类似特点。倒也安装角度较小时，叶轮受力大、变形量大；角度逐渐增大至适宜数值，叶轮受力减小、变形量减小；继续增大角度，叶轮轴力增大、变形量增大^[6]。

使用应变片测量技术和激光测量技术对不同导叶安装角度下的叶轮进行测量，包括应力分布、变形情况。将应变片安装在叶轮关键部位，测量应变片电阻变化值即可获得叶轮表面应变值，得出最终应力参数。使用激光测量仪非接触式测量叶轮变形。实验结果基本与数值模拟结果一致，但具体数值存在一定差异，这是因为实验测量误差和实际工况与模拟假设条件存在差异。不过，实验仍有效验证导叶安装角度对叶轮应力分布和变形的影响规律。

（三）导叶安装角度对叶轮疲劳寿命的影响

在长期流体作用力的影响下，叶轮会逐渐产生疲劳损伤，影响其使用寿命。导叶安装角度会直接影响叶轮的荷载量以及变化规律，进而影响其疲劳寿命。采用疲劳分析软件，根据数值模拟、实验得出应力分布结果以及材料疲劳特性参数（如 S-N 曲线），采用 Miner 线性累积损伤理论，预测不同导叶安装角度下叶轮的疲劳寿命^[7]。

计算结果表明，导叶安装角度对叶轮疲劳寿命影响显著。导叶安装角度处于合适范围时，叶轮载荷小且波动小，疲劳寿命长；偏离合适范围时，叶轮载荷增大且波动加剧，疲劳寿命明显缩短。例如，导叶安装角度从最佳值增减一定角度，叶轮疲劳寿命可能降低 30%–50%。

三、导叶安装角度控制措施

（一）精确设计计算

在离心泵设计当中，应采用先进流体力学计算软件和优化算法，结合具体的工况需求，精准计算导叶的最佳安装角度参数。设计中综合考虑多项因素，包括泵的流量、扬程、转速、输送介质等特性等，采用多参数耦合分析，即可确定叶轮最佳受力、最优结构性能的安装角度。以 ANSYS CFX 和 Fluent 为例，工程师们通过构建涵盖叶轮、导叶、泵体等关键部件的精细三维模型，高度还原离心泵内部的真实流场环境。在此基础上，精准设置各类边界条件，不仅包括进出口压力、流量以及流体的密度、黏度等物性参数，还充分考虑实际运行中的各种复杂因素，如温度变

化对流体性质的影响^[8]。

为了找出导叶最佳的安装角度，可引入多目标优化算法。以遗传算法为例，其模拟生物进化过程，可对大量不同导叶安装角度“个体”进行选择、交叉、变异操作，经历多个迭代筛选后得出最佳的安装角度。例如某离心泵的设计流量为200m³/h，扬程为80m。通过多轮CFD模拟与遗传算法的协同计算，确定在导叶安装角度为22°时，叶轮所受的径向力相较于初始设计角度降低了30%，轴向力降低了25%。这大幅减少了叶轮因受力不均引发的疲劳磨损，显著提升了泵在长期运行中的稳定性，同时降低了约8%的能耗。

（二）制造工艺控制

在离心泵制造中，采用高精度加工设备是确保导叶安装精度的重要一环。例如，五轴联动加工中心可将其定位精度控制在0.001mm以内，导叶叶片角度公差控制在±0.3°以内，确保叶片形状与设计高度契合。同时还要做好装配工艺优化，导叶与泵体装配期间，使用高精度定位销和定位键，配合激光测量技术，实时监测装配过程，并进行微调。采用此类先进装配工艺后，可将导叶安装角度偏差控制在±0.8°以内，极大提升了产品良品率以及市场竞争力^[9]。

（三）实施监测与调整

在离心泵运行期间，搭建一套完善的实时监控系統对保障导叶安装精度意义重大。将高精度应变片布置在叶轮关键部位，用于实时感知叶轮所承受应力的变化。一旦应力值超出设计允许值要求，则系统会自动发出警报型号，提示可能存在叶轮安装角度异常问题。同时，将高灵敏度振动传感器安装至泵体上，一旦振动幅度超过标准值要求，系统发出警报，代表导叶安装可能出现

偏移问题。

针对大型工业离心泵，为了能有效应对各类工况，可采用可调节导叶结构。例如在某大型污水厂水泵系统中，给离心泵配备电动可调节的导叶机构。通过实时监测系统反馈的流量、压力、温度等数据，智能控制系统能够根据实际工况的动态变化，自动、精准地调整导叶安装角度。在污水流量高峰期，将导叶安装角度从初始的20°调整至22°，泵的实际输送流量提升了10%，同时能耗降低了约6%，确保了污水处理厂的高效稳定运行^[10]。这种实时监测与智能调整机制，不仅延长了离心泵的使用寿命，减少了设备维护成本，还为整个工业系统的稳定运行提供了坚实保障。

四、结束语

综上所述，导叶安装角度对离心泵叶轮的结构特性有着多方面的显著影响。通过理论分析、数值模拟和实验研究可知，导叶安装角度的改变会引起叶轮所受的流体作用力（包括径向力和轴向力）大小和方向的变化，进而导致叶轮内部的应力分布、变形情况以及疲劳寿命发生改变。在一定范围内，随着导叶安装角度的增大，叶轮所受的流体作用力、应力水平和变形量先减小后增大，而疲劳寿命则先增大后减小。因此，在离心泵的设计和运行过程中，必须充分考虑导叶安装角度对叶轮结构特性的影响，通过优化导叶安装角度，使叶轮处于较为理想的受力状态，以降低叶轮的应力水平、减小变形量，提高叶轮的疲劳寿命，从而提高离心泵的整体可靠性和稳定性。

参考文献

- [1] 裴吉, 刘总帅, 王文杰, 等. 导叶安装角度对离心泵叶轮结构特性的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2024(03):42.
- [2] 喻德辉, 陈燕, 马文生, 等. 导叶叶片数对离心泵特性的影响 [J]. 水电能源科学, 2022(05):40.
- [3] 喻德辉, 王超, 杨由超, 等. 叶轮斜切对导叶式离心泵特性的影响 [J]. 水电能源科学, 2021(05):155-157.
- [4] 江伟, 朱相源, 田辉, 等. 半高导叶对离心泵压力脉动影响的数值模拟与试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021(04):24.
- [5] 彭小娜, 朱相源, 李国君, 等. 导叶时序位置对离心泵叶片载荷影响的数值模拟 [J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(3):192-198.
- [6] 符杰, 金永鑫, 宋文武, 等. 叶轮相位交错对多级离心泵非定常外特性的影响 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(2):10-11.
- [7] 冀春俊, 张雪薇, 时茂, 等. 多级离心泵叶轮与流道式导叶的匹配特性 [J]. 风机技术, 2019(S1):7-13.
- [8] 郭荣, 李仁年, 张人会. 射流离心泵动静叶栅匹配的水力与声学性能优化设计 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):11-17.
- [9] 朱相源, 江伟, 李国君, 等. 导叶与隔舌相对位置对离心泵水力性能影响的数值研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2018, 51(1):844.
- [10] 史赞. 选导叶周向安装位置对离心泵叶轮径向力的影响 [J]. 信息记录材料, 2017, 18(10):30-32.