

Research on the Influence of Matching Optimization of Impellers and Guide Vanes in Mixed-Flow Pumps on Performance

Qingqing Lu Ming Qin

Zhejiang Shangfeng High-Tech Specialized Wind Industrial Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang, 312300, China

Abstract

With the increasing demand for pump equipment in industry and agriculture, mixed-flow pumps, due to their characteristics between centrifugal pumps and axial-flow pumps, have shown great application potential in terms of a wide range of head variations and a broad high-efficiency zone. This study was conducted by combining theoretical analysis, numerical simulation and experimental verification. It systematically explored the influence laws of the geometric parameter matching of the impeller and the guide vanes on the pump efficiency, head and cavitation performance. A multi-objective evaluation system for the matching optimization of the impeller and the guide vanes was studied and established. A method for achieving matching optimization based on flow field analysis was proposed. Finally, the optimization effect was verified with the help of cases. A reasonable combination of impellers and guide vanes can significantly improve the flow field distribution inside the pump, reduce hydraulic losses, and enhance the comprehensive performance level of the pump. This research provides a theoretical basis and technical reference content for the hydraulic design of mixed-flow pumps, which is of great engineering significance for improving the performance of pump products.

Keywords

mixed flow pump impeller and guide vane; matching optimization; hydraulic performance; numerical simulation; flow field analysis

混流泵叶轮与导叶匹配优化对性能的影响研究

卢青青 秦明

浙江上风高科专风实业股份有限公司, 中国·浙江 绍兴 312300

摘要

随着工业和农业对泵类设备需求的日益增长,混流泵凭借其介于离心泵与轴流泵之间的特性,在扬程变化范围大、高效区宽等方面展现出巨大的应用潜力。本研究凭借理论分析、数值模拟和实验验证相结合的手段来进行,系统探究了叶轮与导叶几何参数匹配对泵效率、扬程及气蚀性能的影响规律,研究建成了叶轮-导叶匹配优化的多目标评价体系,提出基于流场分析实现匹配优化的方法,最后借助案例对优化效果予以验证,合理搭配叶轮与导叶,可大幅改善泵内流场分布,降低水力损耗,拉高泵的综合性能水平。本研究为混流泵水力设计给出了理论依据和技术上的参考内容,对提高泵类产品性能有重要工程意义。

关键词

混流泵叶轮与导叶;匹配优化;水力性能;数值模拟;流场分析

1 引言

作为一种叶片泵,混流泵介于离心泵和轴流泵的范畴,兼具两者的特质,大量应用于农业灌溉、城市供水、电站循环水系统等范畴,当进行实际工程应用的时候,混流泵的性能表现并非仅仅由叶轮或导叶的单独设计所左右,更关键的是两者相互之间的匹配关系。叶轮-导叶匹配若不合理,会造成泵内流动的紊乱,还会带来效率下降、振动噪声增大等一系列问题,极大地削弱泵的运行稳定性,缩减其使用寿命^[1]。目前开展的混流泵性能优化研究,大多侧重于单一

部件(叶轮或导叶)的改进,有关两者匹配关系的研究显得不。叶轮跟导叶的匹配关联到多个几何参数的协调优化,涉及叶片数的配合、进出口角度的配合、轴向间距的选定等,这些参数的耦合关系呈现出复杂性,传统试错法不容易得到最优解,伴随计算流体力学(CFD)技术的发展,运用数值模拟对泵内流场特性进行研究现已可行,这为深入掌握叶轮-导叶匹配机理提供了有力支撑,本研究以理论分析、数值模拟和实验研究相结合的方法为途径开展,系统探寻混流泵叶轮与导叶匹配关系对泵性能产生的影响规律,搭建科学的匹配优化法子,为增进混流泵水力性能提供理论指导及技术支撑。

【作者简介】卢青青(1985-),男,中国浙江绍兴人,本科,工程师,从事流体机械研究。

2 混流泵叶轮与导叶匹配概述

基于流体力学基本理论开展混流泵叶轮与导叶的匹配设计,其核心要义是实现能量的高效转换及传递,叶轮充当能量输入的部件。混流泵结构如图1所示,借由旋转把机械能传递给流体,形成具备特定速度及压力的流动。导叶扮演着能量转换部件的角色,把流体动能进一步转换为压力能,同时引导流体沿最佳方向进入下一级叶轮或出口管,两者协同工作的成效直接关乎泵的整体性能。从流动连续性相关角度看,叶轮出口的流动需跟导叶进口形成良好匹配,遵照速度三角形理论,叶轮出口绝对速度的方向以及大小需与导叶进口几何角相一致,以防止出现冲击损失,要是两者不匹配,会于导叶进口处形成流动分离与涡流,引起水力损失上升,从能量转换效率的角度出发,叶轮生成的环量要与导叶的设计环量相互匹配,若差异过大,会造成导叶内流动恶化,引起能量转换效率的降低^[2]。

叶轮和导叶的轴向间距是影响匹配效果的关键参数,若间距过小,动静干涉会增加,引发压力脉动与振动;若间距过大,叶轮出口流动在抵达导叶前会出现过度扩散现象,引起混合损失增多,最优轴向间距与叶轮出口速度、湍流强度等要素相关联,一般会把该值控制在叶轮出口宽度的0.5-1.0倍的范围内。叶片数的匹配也是关键设计要点,叶轮与导叶的叶片数合理搭配起来,可降低流动干涉带来的压力脉动,要是两者叶片数互为质数的话,能对压力脉动的频率成分实现有效分散,弱化振动产生的噪声,叶片厚度分布、叶片包角等几何参数的协同情况同样会影响匹配效果,设计的时候应综合考量。

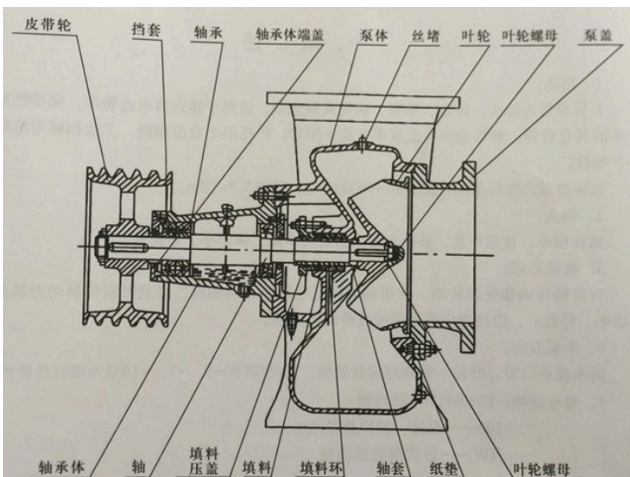


图1: 混流泵结构示意图

3 数值模拟方法与模型建立

本研究借助计算流体力学(CFD)方法对混流泵内部流动进行数值仿真,基于三维建模软件搭建了含有叶轮、导叶和泵壳的完整流道模型,采用多参考系(MRF)方法处理旋转域与静止域的数据传递相关问题,采用SSTk- ω 模

型作为湍流模拟的模型,该模型在预测分离流以及逆压梯度流动方面精度效果较好。

把计算域划分成叶轮旋转域、导叶静止域、进出口延伸段三部分,采用混合网格策略开展网格划分,在近壁区布置棱柱层网格,目的是精准捕捉边界层流动,核心区采用的网格类型为四面体网格,经过网格独立性验证,确定最终网格数量大概为350万,边界条件按照设定为:于进口位置给定质量流量,对出口位置给定静压,壁面采用无滑移的条件,收敛判断标准为残差降低到10⁻⁵。为系统地去研究叶轮与导叶的匹配关系,安排了多组对比方案,包含以下变量参数:叶轮跟导叶叶片数的组合搭配,为每组方案计算0.8Qd、1.0Qd、1.2Qd三个工况点,解析不同流量工况中的性能变化规律。

数值模拟结果后处理重点聚焦泵的外特性相关参数、流场里压力和速度的分布情形、叶轮跟导叶交接处的流动匹配情形,涡流和分离区的分布格局,如压力脉动特性等,以对这些流场信息的分析为途径,剖析不同匹配方案对泵性能的影响机理。

4 叶轮与导叶匹配参数对性能的影响

数值模拟结果表明,叶轮与导叶的匹配参数对混流泵性能有显著影响。在叶片数匹配方面,当叶轮叶片数为7、导叶叶片数为11时(互为质数),泵效率达到峰值,比最差方案提高4.2%。这种组合有效分散了动静干涉产生的压力脉动,进出口总压云图显示流动最为均匀。而叶片数相同或具有公约数的组合则表现出明显的压力脉动,在频域分析中出现了突出的叶片通过频率成分^[3]。

叶轮出口角与导叶进口角的匹配直接影响冲击损失大小。当导叶进口角比叶轮出口绝对流动角小3°-5°时,冲击损失最小。过大的角度差会导致导叶前缘产生明显的流动分离,速度矢量图显示分离区可占据流道高度的30%以上。角度匹配最优的方案在设计工况下效率比其他方案高2.8%-5.1%,且高效区更宽。

轴向间距的影响呈现非线性特征。当间距为叶轮出口宽度的0.7倍时,泵性能最佳。间距过小(0.3倍)导致强烈的动静干涉,压力脉动幅值增加60%;间距过大(1.2倍)则使叶轮出口射流过度扩散,增加了混合损失。最优间距方案在设计工况下扬程提高3.5m,效率提高2.3%。

气蚀性能也受匹配参数影响。叶片数互为质数的组合具有最佳的气蚀性能,临界气蚀余量(NPSHr)降低0.15m;导叶进口角适当小于叶轮出口角的方案可延缓气蚀发生;轴向间距对气蚀影响相对较小,但过小间距会加剧叶轮出口低压区的形成。通过分析低压区体积分数可以评估不同方案的气蚀初生特性。

5 匹配优化方法与案例验证

数值模拟结果证实,叶轮和导叶的匹配参数对混流泵

性能影响显著,就叶片数的匹配而言,若叶轮的叶片数量为7,导叶的叶片数量为11(这两数互为质数)时,泵的效率升至峰值,与最差方案对比,提高了4.2%,这种组合把动静干涉产生的压力脉动有效分散了,从进出口总压云图可看出流动最为均匀,若组合的叶片数相同或者具有公约数,会体现出明显的压力脉动,频域分析当中出现了明显突出的叶片通过频率成分。

叶轮出口角与导叶进口角的匹配效果直接影响冲击损失大小,若导叶进口角比叶轮出口绝对流动角小 3° 到 5° 时,冲击损失达到最小值,若角度差过大,导叶前缘就会产生明显的流动分离,依据速度矢量图,分离区可占据流道高度的30%以上,于设计工况而言,角度匹配最佳的方案效率比其他方案高2.8%-5.1%,而且高效区域更宽。

轴向间距造成的影响呈现出非线性的表现,若间距为叶轮出口宽度的0.7倍,泵表现出最佳性能,间距处于过小(0.3倍)的状态引发了强烈的动静干涉,压力脉动幅值上涨了60%。若间距过大(1.2倍),叶轮出口射流会出现过度扩散的情况,引起混合损失的增加,设计工况之下,最优间距方案令扬程提高3.5m,效率实现了2.3%的增长。

匹配参数也能影响气蚀性能,叶片数彼此为质数的组合表现出最佳气蚀性能,临界气蚀余量(NPSHr)降低至比原来少0.15m。采用导叶进口角适当小于叶轮出口角的方式,可延缓气蚀出现。轴向间距对气蚀产生的影响相对微弱,但间距过小的话,会加剧叶轮出口低压区域的形成,以分析低压区体积分数的方式评估不同方案的气蚀初生特性^[4]。

6 工程应用与性能提升策略

依照前面得出的研究结果,本文搭建了混流泵叶轮跟导叶匹配优化的多目标评价体系,该体系含有效率、扬程、气蚀余量、压力脉动幅值四个主要的指标,采用熵权法算出各指标的权重,借助参数敏感性分析找出关键变量,设计相关试验方案,开展CFD相关数值模拟,结果考量与方案筛选。采用一种以流场均匀性指标为基础的匹配优化方法,定义叶轮-导叶交界面处的流动角偏差系数与速度不均匀度作为衡量流动匹配质量的量化指标,依靠多参数协同优化,实现这两个指标的最小化效果,从而让性能达到最佳水平,该方法躲开了传统试错法的盲目状况,提高了优化工作的效率^[5]。

以一台比转数为 $ns=350$ 的混流泵案例进行优化验证,原始的设计方案里,叶轮叶片数为6,导叶的叶片有6片,

轴向间距设定为叶轮出口宽度的0.5倍,叶轮出口绝对流动角比导叶进口角少 2° ,优化后的方案设定为:叶轮配备7片叶片,导叶所采用的叶片数是11,轴向间距采用0.7倍,导叶进口角的度数比叶轮出口角少 4° 。实验测试结果呈现出,优化方案在设计工况点促使效率提高4.8%,扬程出现了3.2m的增长,NPSHr实现了0.2m的降低,压力脉动幅值出现了42%的降幅,性能曲线说明了,泵的高效区往大流量方向进行了偏移,且高效区的范围有15%的扩大,这些改进凸显了匹配优化方法的有效性。

7 结论

本研究采用系统的数值模拟和实验验证手段,深度探究了混流泵叶轮与导叶的匹配关系对泵性能的作用,叶轮和导叶的匹配参数显著影响混流泵性能,实施优化匹配,可让效率提高4%-5%,让高效区范围实现15%的扩大,同时改进气蚀性能和压力脉动特性。叶片数成互质关系的组合可有效降低压力脉动,达到最佳的轴向间距为叶轮出口宽度的0.6-0.8倍,导叶进口角宜比叶轮出口绝对流动角小 3° - 5° ,基于流场均匀性指标的多目标优化方法可有效指导匹配设计工作,提出的流动角偏差系数与速度不均匀度可作为匹配质量的量化衡量标准。工程应用时需综合考量泵的比转数、运行工况等要素,实施针对性的匹配优化方针,各参数协同优化的成效比单一参数调整的效果要好,本研究构建的匹配优化方法以及得到的最佳参数匹配关系,为混流泵的水力设计提供了理论支撑与技术借鉴,未来研究可进一步考量非设计工况下的匹配适应性,以及多级混流泵各层级间的匹配问题,进而全面改善泵类产品的性能水平。

参考文献

- [1] 刘欣,黎义斌,马文生,等.颗粒直径对混流泵叶轮及空间导叶磨损特性的影响[J].排灌机械工程学报,2023,41(12):1196-1202+1211.
- [2] 胡波,张双全,孙志翔.导叶进口边相对位置对混流泵压力脉动的影响[J].排灌机械工程学报,2021,39(01):16-22.
- [3] 赵斌娟,韩璐遥,刘雨露,等.混流泵叶片安放角对内涡结构及叶轮-导叶适应性的影响[J].排灌机械工程学报,2022,40(02):109-114.
- [4] 曹磊,李彦军,吴天澄.基于正交试验的低比转数混流泵叶轮和导叶匹配优化[J].中国农村水利水电,2021,(06):137-142+147.
- [5] 付玲玲,张文鹏,石丽建,等.混流泵叶轮和导叶数量匹配分析[J].中国给水排水,2020,36(11):51-56.