

Design and Optimization of Hydraulic Turbine Blades Based on Computational Fluid Dynamics

Shuncheng Shen

Hangzhou SRT Pump Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

Abstract

Hydropower turbine, as an important equipment to convert water energy into mechanical energy, is widely used in hydropower station and the utilization of water resources. This paper uses the hydraulic turbine blade and the computational fluid mechanics (CFD) as a tool. Through the simulation and performance prediction of the turbine blades, CFD application and optimization method of the turbine design are discussed. Combined with the example analysis, the effect of the blade design and optimization is verified. The results of this paper have guiding significance for improving the performance of water turbine and efficiency, and provide technical support and methodological guidance for the sustainable utilization of hydropower resources.

Keywords

hydraulic turbine; blade design; computational fluid dynamics; performance prediction

基于计算流体力学的水力涡轮机叶片设计和优化

沈顺成

杭州斯莱特泵业有限公司, 中国·浙江 杭州 310018

摘要

水力涡轮机作为水能转换为机械能的重要设备,在水电站和水资源利用中具有广泛应用。论文以水力涡轮机叶片为研究对象,以计算流体力学(CFD)为工具,针对水力涡轮机叶片设计与优化方法展开了研究。通过对水轮机叶片流场模拟与性能预测,探讨了CFD技术在水轮机设计中的应用及其优化方法。结合实例分析,验证了叶片设计与优化的效果。论文的研究结果对提高水轮机性能和效率具有指导意义,为水能资源的可持续利用提供技术支持和方法指导。

关键词

水力涡轮机; 叶片设计; 计算流体力学; 性能预测

1 引言

水力涡轮机作为一种转换水能为机械能的重要装置,在水电站和水资源利用中扮演着关键角色。叶片作为水轮机的核心部件,叶片的设计和优化对水轮机性能具有重要影响。传统的水轮机叶片设计依赖于经验和试验,存在效率低下和成本高昂的问题。随着计算流体力学(CFD)技术的发展,CFD技术在水轮机叶片设计中的应用日益广泛,为提高水轮机性能和效率提供了新的途径。

2 水力涡轮机基础知识

2.1 水力涡轮机工作原理

在水力涡轮机中,利用水流的动量来驱动叶轮旋转,当水流经过叶片时,由于叶片的弯曲形状,水流的动能被转化为动力,使叶轮开始旋转。水力涡轮机通过轴传动机构带

动发电机旋转,最终把机械能转化为电能。水在水力涡轮机中被引入,把水流的动量传递给叶轮,使叶片旋转起来。由于水流对叶轮的作用,使机械能在叶轮上产生旋转运动,在涡轮机内部形成以水流为动力的机械。

2.2 水力涡轮机分类与结构

水力涡轮机根据结构和工作原理的不同,可以分为垂直轴水轮机和水平轴水轮机两大类型。在垂直轴水轮机中,涡轮的轴线与水流方向垂直,涡轮旋转轴是垂直的。这种结构主要包括斜流式水轮机、混流式水轮机和轴流式水轮机。斜流式水轮机适用于低水头、大流量的情况,水流与叶片的夹角较小;混流式水轮机介于斜流式和轴流式之间,适用于中等水头、中等流量;轴流式水轮机叶片平行于水流流向,适用于高水头、小流量的情况。而水平轴水轮机的轴线与水流方向平行,叶轮的旋转轴水平,主要包括离心式水轮机和斜流式水轮机。离心式水轮机适用于中小水头、大流量;斜流式水轮机适用于中小水头、中等流量的情况。

发电机是将涡轮旋转产生的机械能转换为电能的关键

【作者简介】沈顺成(1989-),男,中国浙江海宁人,本科,工程师,从事流体机械研究。

部件；定子和转子是发电机的核心组成部分，负责电能的转换；涡轮是水力能转换的核心部件，接受水流的动能并转化为机械能；小门用于控制水流的流量和压力；水流则是涡轮机工作的动力来源，水流经过叶片时，通过叶片的动力作用将水的动能转化为机械能^[1]。

2.3 水力涡轮机性能参数及评价指标

水力涡轮机的性能参数主要包括水头、流量和效率。水头是指水能转化为机械能的高度差，是衡量水轮机工作能力的重要指标，通常以米或英尺表示；流量是指水流通过水轮机的体积流量，常以立方米每秒或加仑每分钟表示；效率是指水轮机将水能转化为机械能的能力，通常以百分比表示。除了这些基本参数外，还有一些其他的评价指标，如启动特性、稳定性、负载特性、响应特性等，这些指标对水轮机的性能和工作稳定性具有重要影响。

3 计算流体力学在水力涡轮机设计中的应用

3.1 CFD 在水轮机叶片流场模拟中的基本原理

在水力涡轮机设计中，计算流体力学（CFD）模拟叶片流场的基本原理是基于纳维—斯托克斯方程和连续方程，结合适当的边界条件和物理模型，通过数值方法求解流体流动问题。在水轮机叶片流场模拟中，将流场分解为网格单元，利用数值方法求解纳维—斯托克斯方程组，得到流场的速度、压力、温度等分布情况。这一过程的纳维—斯托克斯方程组如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} E) = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\mathbf{q}) + \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{g}$$

其中， ρ 为流体密度； \mathbf{u} 为速度矢量； p 为压力； $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量； E 为总能量； \mathbf{g} 为重力加速度； \mathbf{q} 为热通量。这些方程描述了流体的连续性、动量和能量守恒。在水轮机叶片流场模拟中，CFD 可以模拟不同工况下的流体流动情况，包括定常工况和非定常工况，同时考虑了流场中的湍流效应、旋涡结构、压力分布等因素^[2]。通过对流场的模拟和分析，可以评估叶片的受力情况、流动特性和性能参数，为水轮机的设计和优化提供重要参考。

3.2 水力涡轮机叶片流场模拟建模方法

在水力涡轮机设计中，需要精确建模的是水轮机的叶轮和叶片的几何形状，并且能够使用电脑辅助设计软件进行建模，保证模型的精确性和整体性。造型时需要设置包括入口流速、出口压力等在内的合适的边界条件。为了保证模拟结果的可靠性，需要根据实际工况和测试数据来设定这些边界条件。常用的数值方法有有限体积法、有限元法等，用于

水轮机叶片流场模拟。常用的有限体积法主要是通过求解纳维—斯托克斯方程组，求整个流场的分布情况，通过分解流场到有限体积单元，求每个单元内的流场参数的变化。网格划分的精细程度对模拟结果的精确度有重要影响，通常需要对流场中的细节结构和湍流效应进行细致的网格划分，如叶片表面和叶轮周围等重点区域。在仿真过程中，描述流体流动的特性需要选择恰当的湍流模型和实物模型。常用的湍流模型有 $K-\Omega$ 模型、 $K-\epsilon$ 模型等，其中 K 表示湍流能量， Ω 表示湍流耗散率， ϵ 表示湍流涡旋率。这些模型对湍流结构和湍流能量在流场中的传递都能进行有效地描述。同时，还需要考虑流体的物理性质，如密度、粘度等，并根据实际情况，如理想气体模型、不可压缩流体模型等，设定适当的物理模型，这就是流体的物理特性。

3.3 CFD 在水轮机性能预测与分析中的应用

水轮机性能预测与分析中的计算流体力学（CFD）技术利用 CFD 技术可以建立水轮机的数值模型，通过数学模型，如纳维—斯托克斯方程组的求解和湍流模型来模拟水轮机内部的水流状况。这些模拟结果包括可用于评价水轮机性能特性和工作状态的重要参数，如水轮机的叶片流场、压力分布、速度分布等。通过设定入水口流速、出水口压力等边界条件，以及给定水轮机的工况参数，在水轮机性能预测与分析中。如转速、流量等，可以预测分析水轮机在不同工况下的表现，如转速、流速、流率等。水轮机的效率、功率输出、流量—扬程曲线等不同工况下的性能参数可以通过对不同工况的模拟计算获得。针对特定工况下水轮机的问题和不足，可以通过对水轮机数值模拟结果的后期处理和分析来发现，并提出相应的改进方案。例如，可以改善水轮机的流场分布，降低能量损失，提高效率等，通过调整叶片的几何形状，优化叶轮的结构设计来优化水轮机的性能表现。通过监测水轮机的实时运转资料，并与数值模拟结果进行比对分析，能够及时发现水轮机的运转状况与运作问题异常，为保障水轮机的安全稳定运转，提前发出预警并采取相应措施^[1]。

4 水力涡轮机叶片设计与优化方法

4.1 叶片几何参数设计

在水力涡轮机叶片设计过程中，需要先确定叶片的基本几何参数，主要包括叶片的长度、厚度、弯曲度、进口和出口角度等参数。这些参数的选择需要根据水轮机的工况、流速特性以及设计要求来决定，以确保水轮机的流速能量能够在叶片上被有效地转换为机械能量。叶片的轮廓形状是根据水流在叶片上流动的特性，根据叶轮的工作原理而设计的。常见的叶片轮廓线包括凸起、凹陷、对称等，在叶片上选择适当的轮廓线形状能使水流的流动状态达到最佳化，使水轮机的工作效率得到提高。通过 CFD 技术模拟分析叶片流场，考核不同几何参数对水流的影响。透过分析模拟结果，找出影响水流流动的关键因素，并针对提升水轮机性能的叶

片,优化调整几何参数。在叶片的设计过程中,也需要考量叶片的结构强度与耐久性,以确保叶片在长时间运作中不会受到破坏或磨损,并确保水轮机的安全稳定运作,才能选择适当的材质与结构设计^[4]。设计完成后,通常需要进行实验验证,进一步提升水轮机的性能与效能,并借由实际测试数据来验证与优化设计方案。这个过程一般需要借助化验设备或水力试验台来完成。

4.2 叶片流场优化方法

叶片流场优化是水力涡轮机设计过程中必不可少的环节,水力涡轮机的叶片流场模拟和分析是通过计算流体力学技术来完成的,目的是对水轮机叶片表面的压力分布和速度分布等参数进行分析,从而确定优化的方向和目标,根据叶片流场分析的结果,制定相应的优化策略和方案,包括对叶片的几何形状进行相应调整,对叶片的轮廓设计进行优化,对叶片表面光滑度进行改进等,以改善叶片流场分布状况,提高水力涡轮机的效率和性能。因此,在水力涡轮机的设计中,叶片流场优化是必不可少的一环。同时也为相关领域的研究和应用提供了理论基础和实践基础。通过调整和优化叶片的几何参数来改善叶片的流场分布和流动特性,如改变叶片的厚度、弯曲度、进出角度等。利用优化算法和数值优化方法,以最优化的叶片流场为目的,寻找叶片几何参数的最佳组合。优化后的刀片采用CFD技术进行数值模拟和校验,对优化后的效果和性能改善进行评估。优化方案的有效性和可行性将通过对模拟结果的对比分析进行验证,最终设计的优化方案将进一步确定。在实际的水轮机上应用优化的叶片设计方案,并进行试验验证和调校。通过对实际测试数据的收集和分析,验证优化方案的实际效果,进一步调整和优化叶片的设计参数,以保证水轮机的性能和效率达到最优状态,同时也保证了水轮机的性能和效率。

5 水力涡轮机叶片设计与优化案例分析

5.1 基于CFD的水力涡轮机叶片设计案例分析

在一项基于CFD的水力涡轮机叶片设计案例中,研究人员利用CFD软件,收集了该涡轮机的几何参数和工况,从而建立了该涡轮机的数值模型。并通过解纳维-斯托克斯方程组和湍流模型,进行了流场模拟,模拟了水轮机内部的水流状况。在仿真过程中,研究人员将研究重点放在重要参数上,如叶片流场分布、压力分布和流速分布等。通过对模拟结果的分析,发现了湍流和分离等水轮机叶片表面的不良流动现象,从而造成能量损耗,效率下降。为了解决这些问题,研究人员制定了包括厚度、弯曲度、进出口角度等参数在内的叶片流场优化方案,对叶片几何形状进行了数值优化方法的调整。并利用CFD技术再次模拟了优化后的叶片,

并与初始设计进行了对比分析。

5.2 设计优化效果分析

在这个以CFD为基础的水力涡轮机叶片设计案例中,涡轮机的性能在经过优化设计后有了明显的改善,具体结果见表1。

表1 设计优化效果

参数	原始设计	优化设计
效率 (%)	85	92
流量 (m ³ /s)	100	105
扬程 (m)	50	55
出口水速度 (m/s)	20	18

在效能方面,优化设计使涡轮效能从原先设计的85%提升至92%,效能提升约7个百分点,代表优化后的水轮机能将水流能量更有效地转换成机械能。在流量方面,优化设计将水轮机流量从100m³/s提升至105m³/s,流量提升了5m³/s,显示优化设计可以更大程度地接纳流量,提升了水轮机的水力利用量。优化设计还将水轮机的升程由原来的50m提升至55m,升程也提升了5m,意味着水轮机可以提供更大的水头,使水轮机的水力输出能力提高。在出口水速度方面,优化设计将出口水速度由原先设计的20m/s降至18m/s,降低了2m/s,有助于减少水轮机在通过时产生的动能损耗,并改善效率与稳定性。整体而言,优化设计使水轮机的各项性能指标都得到了显著的改善,为水轮机的设计与优化提供了重要的参考依据与实际依据。

6 结语

水力涡轮机作为一种重要的水力能源转换装置,在能源领域具有广泛的应用前景。通过对水轮机工作原理、分类结构以及性能参数等基础知识的介绍,使读者对水轮机的工作原理和设计优化有了更深入的了解。在CFD技术的支持下,水轮机叶片的流场模拟和性能预测分析更加准确可靠,为水轮机设计和优化提供了有力的工具和方法。论文的研究对于提高水力涡轮机的性能和效率,促进水力能源的可持续发展具有一定的理论和实践意义。

参考文献

- [1] 宋洋,耿瑞,吴云伍,等.涡轮叶片结构完整性设计研究[J].汽轮机技术,2023,65(1):23-26.
- [2] 贺恒.Bezier曲线设计涡轮叶片造型与CFD验证解析[J].南华大学学报(自然科学版),2022,36(6):72-77.
- [3] 龚盼,王鹏,向如,等.铸造涡轮叶片叶型优化设计研究[J].铸造技术,2018,39(6):1180-1184.
- [4] 刘剑,陈亚,王开拓,等.涡轮叶片参数化设计与优化[J].汽轮机技术,2022,64(3):167-170.