

叶顶间隙对蜗壳式混流泵 流动特性影响研究

成 立¹, 颜红勤^{2*}, 蒋红樱², 潘卫锋³, 徐文涛¹, 李加旭¹

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029;
3. 江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 采用计算流体力学(CFD)数值模拟技术, 研究了蜗壳式混流泵在不同叶顶间隙下的水力性能及内部流动特性。通过对流场、涡流和压力分布的分析, 揭示了叶顶间隙变化对泵装置扬程、效率及运行稳定性的影响。结果表明, 随着间隙尺寸的增大, 混流泵的整体效率逐渐下降, 且对大流量工况的影响尤为显著。同时, 叶顶间隙的增大会导致叶轮区域泄漏涡的增强, 影响泵的运行稳定性。

关键词: 蜗壳式混流泵; 计算流体力学; 叶顶间隙; 叶尖泄漏

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)11-0001-0007

Research on effect of tip clearance on flow characteristics of volute-type mixed-flow pump

CHENG Li¹, YAN Hongqin², JIANG Hongying¹, PAN Weifeng³,
XU Wentao¹, LI Jiaxu¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100 China;
2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029 China;
3. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800 China)

Abstract: Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation technique is used to investigate the hydraulic performance and internal flow characteristics of a volute-type mixed-flow pump under varying tip clearances. Through analysis of flow fields, vortex formation, and pressure distribution, the effects of tip clearance changes on the pump's head, efficiency, and operational stability are revealed. The results show that with the increase of tip clearance, the overall efficiency of the mixed-flow pump gradually decreases, with the most significant impact observed under high-flow conditions. At the same time, the increase in tip clearance will lead to an increase in leakage vortices in the impeller area, affecting the operating stability of the pump.

Key words: volute-type mixed-flow pump; computational fluid dynamics; tip clearance; tip leakage

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022055, 2023039)

作者简介: 成立(1975—), 男, 教授, 博士, 研究方向为泵站工程。E-mail: chengli@yzu.edu.cn

通信作者: 颜红勤(1973—), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事泵站工程技术咨询工作。E-mail: 1448625167@qq.com

蜗壳式混流泵作为泵站系统中的关键设备,其运行效率、稳定性和安全性直接影响到水资源调配、电力生产以及其他工业流程的经济性与可靠性。特别是随着现代水利工程和工业泵站规模的扩大,混流泵在高效、稳定运行方面的要求越来越高。然而,混流泵在实际工况下运行时,叶顶间隙的存在是一个不可忽视的问题。叶顶间隙是指叶轮顶部与泵壳之间的间距,这一结构特性导致了部分流体的泄漏,进而引发了复杂的流场变化,如回流、涡流及流场的不稳定性。这些流动现象对泵的整体性能产生了显著影响,尤其是在扬程、效率和抗空化能力方面。

近年来,随着流体力学研究的深入和计算机数值仿真技术的快速发展,利用CFD(计算流体力学)对混流泵内部的流动状态进行模拟分析成为一种重要的研究手段^[1]。这不仅能够精确模拟复杂流动现象,还能够揭示叶顶间隙变化对混流泵水力性能的影响机制^[2]。以往的研究多集中于定常工况下的流动分析,较少涉及间隙对泵内瞬态动力学效应及混沌特性的影响。然而,在实际工况中,叶顶间隙的变化可能导致泵内流动状态的非线性波动甚至混沌现象,这些复杂的动力学效应对泵的运行稳定性有重要影响。

因此,本文采用CFD数值模拟,针对蜗壳式混流泵在不同叶顶间隙下的水力性能及内部流动结构进行了系统的研究。通过分析不同工况下的外特性参数(如扬程、效率等)以及内部的流场变化(如流动分离、涡流生成等),揭示了叶顶间隙变化对混流泵水力性能、运行效率和稳定性的多方面影响。本文的研究不仅丰富了对混流泵叶顶间隙问题的认识,同时也为泵站设计和优化提供了理论依据和技术参考,有助于提高泵站系统的整体能效和可靠性。

1 数值计算方法

1.1 流动控制方程

该蜗壳式混流泵以江苏省皂河抽水站为原型,混流泵装置内部的流动可视为不可压缩的三维流动,满足连续性方程和动量方程^[3],具体控制方程如为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: u_i 为泵内流体单元速度的方向分量; x_i 为分别

代表流体在 x 、 y 、 z 方向上的速度; p 为流体单元的压力; τ_{ij} 为流体单元的应力张量; ρg_i 为流体的重力项; F_i 为外部源项。

1.2 湍流模型

为了解决连续性方程以及动量方程的联合数值求解问题,本文采用了SST $k-\omega$ 湍流模型^[4]。公式(3)为湍动能传输方程,公式(4)为湍流比耗散率方程,具体表达式为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t)] = \tau_{ij} S_{ij} - \beta^* \rho \omega k \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho u_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] = P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中: ρ 为流体的密度,本案例作为不可压缩流体,视为常数项; u 为速度,而 u_i 则是各速度的方向分量; t 为时间; x 为坐标轴,而 x_i 则是各方向分量; k 为湍流动能; ω 为比耗散率。

1.3 研究对象及研究方案

本文以大型立式蜗壳式混流泵为研究对象,计算模型基于原型泵。采用UG NX 12.0软件对泵体进行三维实体建模及装配,该模型由4个关键区域构成,分别是进水流道、叶轮、导叶和出水流道,见图1。进水流道负责将流体引入系统,叶轮通过旋转对流体施加能量,使其产生动能和压力。导叶起到引导流体流动方向的作用,以减少能量损失并优化流动状态。最终,流体通过出水流道排出,完成整个流动过程。研究过程中,重点针对叶轮的轮缘间隙,即叶顶间隙(L_{RTC}),进行了系统性的调整,以探讨其对泵性能的影响。

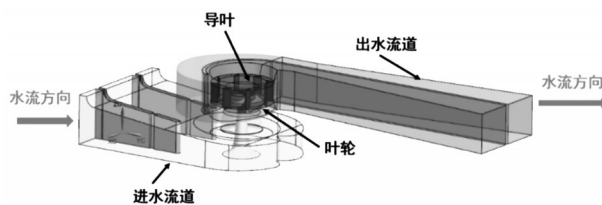


图1 泵站三维计算域

为了深入分析不同叶顶间隙对泵水力性能的影响,本文设计了4种不同的方案,分别为:无叶顶间隙($L_{RTC}=0$ mm)、设计间隙($L_{RTC}=2$ mm)、2倍设计间隙($L_{RTC}=4$ mm)和4倍设计间隙($L_{RTC}=8$ mm)。通过逐步增大RTC值,研究其对泵内部流场和整体性能的影响,从而为进一步优化蜗壳式混流泵的设计

提供参考。

1.4 网格剖分

针对叶轮与导叶的网格,ICEM CFD 19.0软件用来进行结构化网格的划分,最终将叶轮导叶划分为六面体结构化网格。由于进水流道和出水流道的结构相对简单,因此采用ANSYS Meshing 19.0软件进行网格划分,最终将进、出水流道划分为四面体非结构化网格。为满足网格无关性要求,划分过程中,本文进行了网格质量的控制,使其满足质量在0.4以上(网格质量范围0-1,越高越好),详细的网格划分见图2。

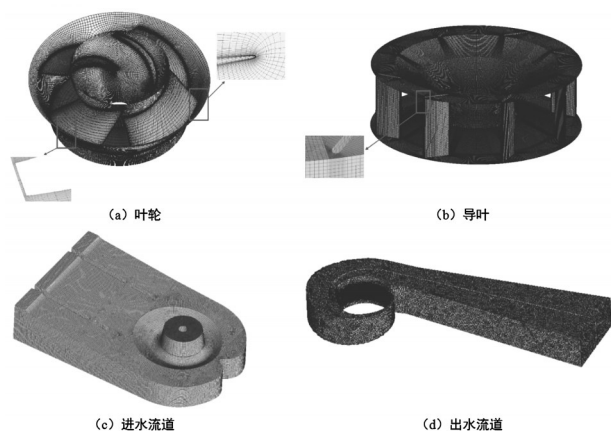


图2 泵装置网格划分示意

在不同软件中调整网格的尺寸,可以有效控制网格的总体数量。这种操作不仅能够优化计算资源,还可以提升模拟精度,确保数值计算结果的可靠性。根据需求灵活地改变网格密度,有助于更好地平衡计算效率和精度,满足不同阶段的分析要求。本文共设计了8个无关的验证方案。这些方案的网格数量分别为:451.8万、532.4万、612.4万、755.4万、836.6万、976.1万、1043.0万和1123.7万。每个方案的网格划分数量不同,目的是通过多次试验来验证计算结果的收敛性与稳定性。对于进水流道的总水力损失,采用了以下计算公式(5)来评估各方案的水力性能,确保不同网格数量下的精度与结果的一致性^[5]。

$$\Delta h = \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho g} \quad (5)$$

式中: Δh 为整个计算域内的总水力损失; P_{in} 为代表进口面上的总压强; P_{out} 为进水流道出口面的总压强; ρ 为密度; g 为重力加速度。

在图3中展示的8种方案的水力损失 Δh 表明了各方案之间的差异,当网格数量超过976.1万时,随

着网格数量的增加,水力损失 Δh 的相对变化值稳定在 $\pm 2\%$ 以内,表明模型具有良好的网格无关性。这一结果表明,通过对网格的优化划分,所获得的计算结果不受网格尺寸的显著影响,从而确保了模拟的准确性和可靠性。因此,本次计算最终选取了网格数量为1 043.0万的方案。

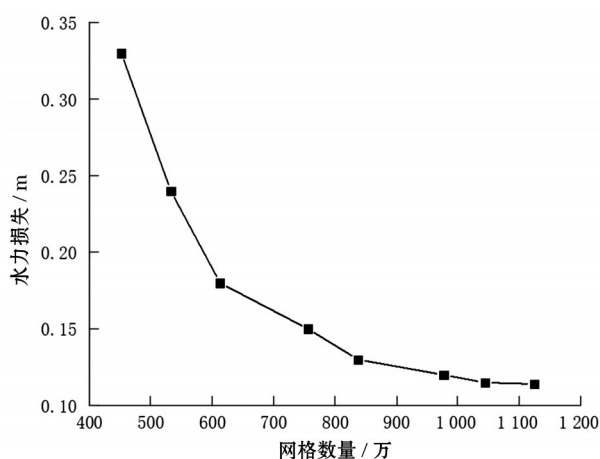


图3 网格无关性分析结果

1.5 边界条件设置

本文采用ANSYS CFX 19.0软件进行CFD数值模拟,包括定常与非定常两部分。定常计算主要用于性能特性的分析与比较,而非定常计算则聚焦于内部流动的变化。

在定常计算中,边界条件设置为入口为质量流量边界,流量根据情况进行调整;出口为压力出口,数值设为1个大气压。壁面函数采用Scalable壁面函数,以适应 y^+ 值较大的网格并保持良好的计算精度,边界条件设为无滑移壁面。旋转机械(叶轮)与相邻部件的交界面采用Frozen Rotor模式,收敛精度设为 10^{-5} 。

在非定常计算中,边界条件设置为瞬态数值模拟使用Transient Frozen Rotor模式,通过交界面差值方式传递数据。计算时间步长设为 $3^\circ (0.006667 \text{ s})$,总计算时间为6.4 s,即叶轮旋转8圈。

2 水力特性分析

2.1 数值模拟结果

为了验证数值模拟的准确性,图4展示了实际工程性能与数值模拟结果的对比,包括流量扬程曲线和流量效率曲线。从图4可以看出,数值模拟的结果在扬程和效率两个方面均低于实际测得的性能曲线。在设计流量条件下,扬程的相对误差为

4.9%。尽管预测的效率曲线与实际数据之间存在明显差异,这主要归因于数值模拟对叶轮扭矩的计算不够准确,然而,整体变化趋势仍然表现出较好的相似性。这一结果表明,所采用的数值模拟方法在整体上是可靠的,能够提供相对可信的预测,为后续分析和优化设计提供重要依据。

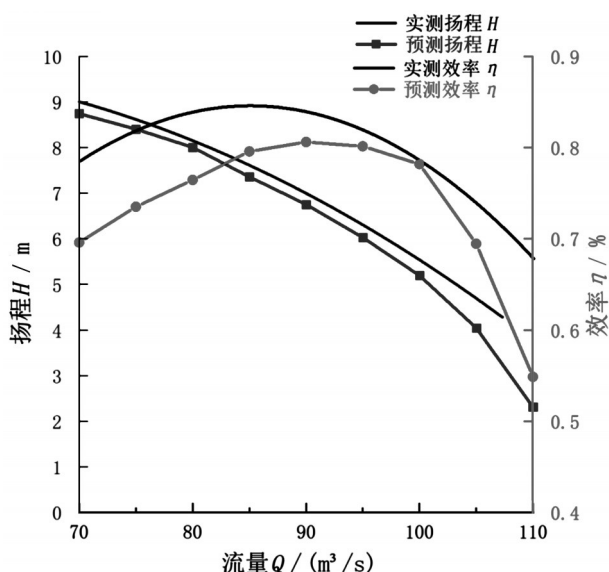


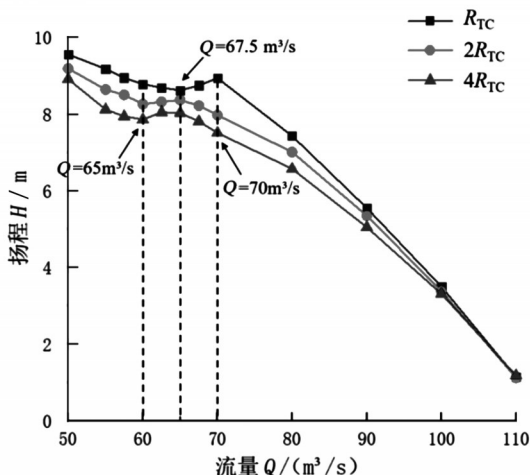
图4 外特性结果对比

2.2 叶顶间隙对外特性的影响

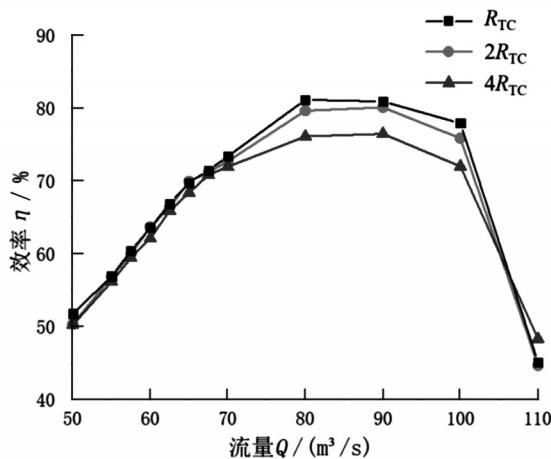
在验证完数值模拟的合理性后,再来探究不同叶顶间隙对水力性能的影响,结果如图5所示。其中,图5(a)为流量-扬程曲线,图5(b)为流量-效率曲线。从图5(a)可以发现,流量-扬程曲线的整体趋势相似,且小流量下存在明显的马鞍区。从

不同叶顶间隙的角度来看,随着叶顶间隙的逐渐增大,扬程逐渐降低。再从偏工况的角度分析叶顶间隙,可以发现随着流量的逐渐降低,扬程的下降越是明显,出现明显的分离,主要原因是在小流量马鞍区,叶轮压力面与吸力面的压差更大,叶顶间隙在此时更容易产生泄漏,从而导致了扬程的大幅降低。

从图5可以观察到,不同叶顶间隙(R_{TC} , $2R_{TC}$, $4R_{TC}$)对扬程和效率的影响是显著的。在图5(a)中,扬程曲线随着流量的增加呈现出下降的趋势。3种不同叶顶间隙的曲线在流量较低时相互接近,但随着流量的增加,扬程的差异逐渐增大。较小的叶顶间隙(R_{TC})在高流量工况下仍能保持相对较高的扬程,而较大的叶顶间隙($4R_{TC}$)则表现出更快的扬程下降。这表明,随着叶顶间隙的增加,混流泵在高流量下的扬程性能受到更大的影响,可能是由于增大的间隙引起了更严重的泄漏和水力损失。图5(b)展示了效率曲线的变化情况。从图5(b)可以看出,随着叶顶间隙的增大,整个流量范围内的效率逐渐降低。与扬程曲线类似,叶顶间隙对低流量工况效率的影响较小,但在中高流量工况下,较大的间隙对效率的负面影响更加明显。这种趋势可能是由于大流量时,叶顶间隙引发了更大的水力和容积损失,从而导致效率降低。然而,当流量进一步增大到接近最大流量时,由于整体泵效率的下降,叶顶间隙的影响相对减弱。总体来看,图5表明了叶顶间隙的大小显著影响了混流泵的扬程和效率性能,尤其是在中高流量工况下,较大的叶顶间隙会显著降低泵的性能。



(a) 流量-扬程曲线



(b) 流量-效率曲线

图5 不同叶顶间隙性能特征

2.3 叶顶间隙对叶轮区域流场的影响

在对不同叶顶间隙条件下蜗壳式混流泵的水力性能进行全面分析后,可发现流场特性在水泵的效率 and 稳定性中扮演着关键角色。因此,有必要深入研究流场,以揭示背后的机理并提出有效的应对策略。本文将重点探讨不同叶顶间隙下的内部流场流线、压力分布及湍动能的变化,相关结果见图6和图7。当叶顶间隙增大时,泄漏流量也随之增多,这种泄漏流量的增加会加深流体与主流的混合,从而显著影响叶轮的进口流场。为此,本文在不同流量工况下,对蜗壳式混流泵的叶轮轴面流场分布、轴面湍动能分布进行了详细分析,旨在深入揭示叶顶间隙对进口流场的影响机制。

在设计流量工况下,叶轮进口段的周向断面流场分布图(如图6所示)显示,叶顶间隙和叶轮叶片之间的压力差导致流体在叶片轮缘区域出现流动分离。这一流动分离现象使得部分压力面侧的流体通过叶顶间隙回流到叶轮的吸力面,由于流体从高压区域回流到低压区域时,速度和方向发生变化,

这会在近壁面区域形成一种旋转的涡流,称为“泄漏涡”。这种涡流的存在不仅会增加局部的能量损失,还可能破坏流体的正常流动,导致泵的效率下降以及水力性能的恶化。泄漏涡的形成往往是泵内不稳定流动的主要原因之一,尤其是在叶顶间隙较大时,涡流现象会更加明显。这种流动特征导致叶轮进口区域的流场极为紊乱,从而影响整体水泵的性能。

此外,随着叶顶间隙的增大,泄漏涡的强度不断增强,其影响的区域也逐渐扩大。在流量为2RTC的工况下,流场的变化在叶片压力面流体也开始发生紊乱流动,形成靠近轮缘的漩涡。这些漩涡不仅降低了水泵的运行效率,还有可能引发复杂的流动现象,如流体振动和噪声增加。因此,理解并控制叶顶间隙对流场的影响,将为蜗壳式混流泵的设计与运行优化提供重要的理论支持。

图7展示了在设计流量工况下,不同叶顶间隙条件下的叶轮区域轴向特征断面的湍动能分布情况。可以清晰地看到,湍动能主要集中在轮缘附近

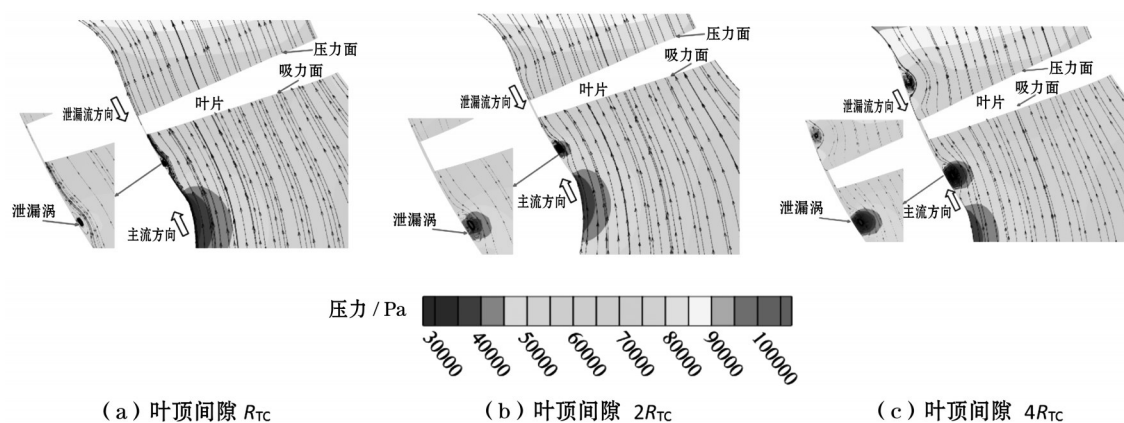


图6 不同叶顶间隙下进口轴向断面流场分布

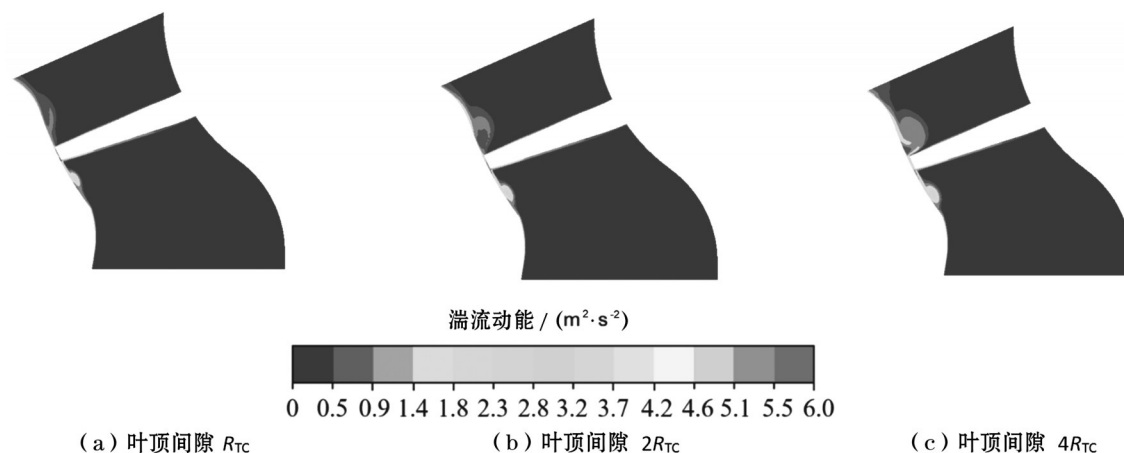


图7 不同叶顶间隙下进口轴向断面湍动能云

的壁面区域,这与图6中流线分布的结果高度吻合。这表明,在这一特定区域内,流体的运动状态相对复杂,湍动能的集中指示了流体经历了显著的扰动和波动。随着叶顶间隙的增大,泄漏流与主流之间的混合程度显著增强,这种混合不仅加剧了流动的不稳定性,还导致了能量损失的增加。结果是,叶轮进口轮缘区域的湍动能分布受到直接影响,其范围和强度均有所提升。具体来看,湍动能的增加意味着该区域内流体运动的波动性变得更加剧烈,进一步导致流场的混乱和不稳定。

进一步的分析表明,湍动能的分布主要集中在受到叶轮叶顶间隙影响的流场范围内。尤其是在叶轮的吸力面侧,湍动能的强度明显较高且分布较为集中,表明该区域的流体运动涉及了更多的能量转换和耗散过程。相比之下,位于叶片压力面的湍动能虽然强度相对较小,但其影响范围较广,这可能与该区域流体的流动特性有关,尽管流体的运动状态相对平稳,但在较大范围内仍受到湍动能的影响。

总的来说,湍动能的分布和强度变化不仅揭示了流体在叶轮区域的动态特性,还为深入理解流场特性与水泵性能之间的关系提供了重要的理论基础。这些分析结果有助于蜗壳式混流泵的设计与优化,从而提高其运行效率和稳定性。

在不同叶顶间隙条件下,叶轮进口区域普遍存在泄漏涡现象,这对流场的稳定性和流动特性产生了显著影响,尤其是在叶轮进口流道内,泄漏涡的强度和位置随着间隙的变化而导致了流场的不均匀性。这种现象不仅影响了泵的水力性能,还对整个流动过程带来了不同程度的扰动和损失。为了进一步深入研究叶轮区域的流动状态及其动态特征,本文引入了一个无量纲参数 R ,用于更好地量化和分析泄漏涡对叶轮内部流动的影响。 R 的计算公式如式(6)所示,能够为后续的流场分析提供可靠的数学基础与物理依据。基于该无量纲参数,将对叶轮区域的流动状态展开更加详尽的研究^[6]。

$$R = \frac{R - R_{\text{H}}}{R_{\text{s}} - R_{\text{H}}} \quad (6)$$

式中: R 为圆周截面半径; R_{s} 为叶轮出口轮缘半径; R_{H} 为叶轮出口轮毂半径。

鉴于叶顶间隙的变化对轮缘附近流场流动特性的影响,本研究选择了无量纲参数 $R=0.99$ 对应的特征断面A1作为重点分析对象。该特征断面的选取将有助于深入探讨流场的动态行为。图8中呈现了这一断面的示意图,清晰标示了流场的主要特征

及流动方向。通过对这一断面的详细分析,我们将揭示叶顶间隙如何影响流体的运动状态,为叶轮设计优化和水泵性能改进提供重要的理论支持。这一选择不仅促进了对流场复杂性的理解,还为后续实验和数值模拟研究奠定了坚实的基础。

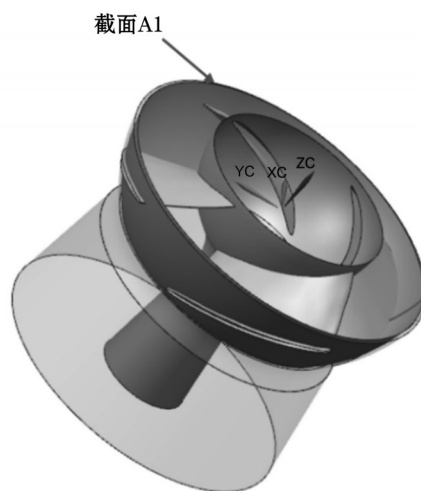


图8 特征断面A1示意

图9展示了在不同流量条件下($Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q=80 \text{ m}^3/\text{s}$ 以及设计流量工况)叶顶间隙附近区域的静压特征断面分布情况,并对这些特征进行了详细的分析。结果表明,叶轮叶片吸力面处的低压区域在不同叶顶间隙条件下都有明显的出现。这些低压区域的形成主要源自泄漏流与主流的相互作用,且其分布多集中在叶片的进水侧,表明流动状态的复杂性。在RTC工况下,尤其是在设计叶顶间隙条件下,随着流量从旋转失速区增大至设计流量工况,流道内的低压区域显著缩小,反映出流量增加后的流体特性改善,泵的性能因此得到提升。相比之下,在 $2R_{\text{TC}}$ 和 $4R_{\text{TC}}$ 叶顶间隙条件下,流量从 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,低压区域的变化幅度相对较小,但在设计流量工况下,低压区域仍然收缩至最小值,说明此时泵的运行状态接近理想。在小流量情况下,随着叶顶间隙的增加,叶轮叶片吸力面的低压区域有所减小。这一现象可能与流动模式的变化有关。然而,特征断面上的压力分布变得更加紊乱,表明流动的不稳定性加剧。同时,随着叶顶间隙的扩大,叶片进水侧的低压区域也变大,且压力分布愈加不均匀,这可能导致流动分离和涡流的产生,进而影响泵的整体性能。

综上所述,这些现象表明叶顶间隙的变化对立式蜗壳混流泵的运行稳定性有较大影响。因此,深

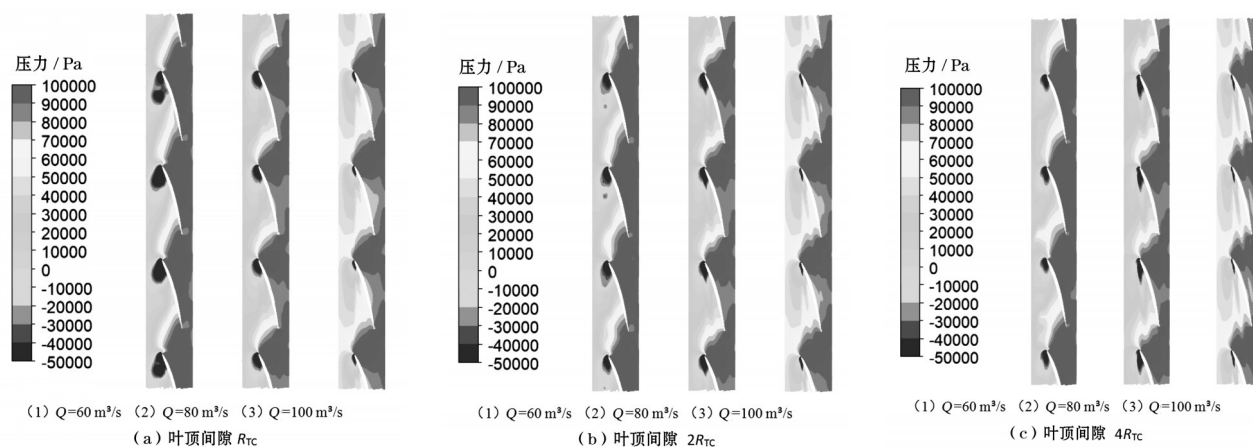


图9 不同叶顶间隙下近轮缘区静压分布云图

入研究和掌握叶顶间隙对流场的影响机制,将有助于水泵的设计优化和运行效率的进一步提升。

3 结 论

本文采用计算流体力学(CFD)数值模拟技术,系统分析了蜗壳式混流泵在不同叶顶间隙下的水力性能和内部流动特性。研究表明,叶顶间隙的增大显著影响了泵的扬程、效率及运行稳定性。具体表现为:随着叶顶间隙的增大,泵的效率呈现出明显的下降趋势,尤其是在大流量工况下,效率下降最为显著。这种现象的产生主要归因于叶顶间隙的增加导致了叶轮区域的泄漏流增强,泄漏流与主流之间的相互作用引发了流场的紊乱和涡流的生成,进一步加剧了泵内能量损失,降低了泵的水力性能。此外,叶顶间隙对泵的抗空化性能也产生了一定的负面影响,尤其是在高负荷运行条件下,涡流和流动分离现象明显,增加了泵的空化风险,影响了其长期运行的稳定性和安全性。

通过对不同叶顶间隙条件下的流场分布、压力变化以及湍动能的分析,本研究揭示了叶顶间隙变化对泵内复杂流动现象的影响机制。研究发现,叶顶间隙的增加不仅导致叶轮进口区域的流动分离现象增强,还加剧了流体的能量损失,显著降低了泵的运行效率。特别是在小流量和大流量工况下,叶顶间隙对流场的扰动较为明显,表现为叶轮区域湍动能的大幅增加,这一现象直接导致泵的稳定性下降。此外,数值模拟结果显示,随着叶顶间隙的增大,叶轮区域的静压分布更加不均匀,低压区域的范围逐渐扩大,增加了泵的运行不稳定性及流动振动的风险。基于本文的研究结果,可以得出以下几点结论:

(1)叶顶间隙的增大对蜗壳式混流泵的水力性能有显著的负面影响,主要体现在扬程降低、效率下降和运行稳定性减弱上。

(2)泵的叶轮区域泄漏流的强度随叶顶间隙的增大而增强,泄漏流和主流的相互作用引发了复杂的流动分离现象,对泵的抗空化性能产生了不利影响。

(3)随着叶顶间隙的增加,叶轮区域湍动能的分布范围和强度显著提升,流体的扰动性增加,导致流场的混乱和泵的能量损失加剧。

(4)流场的静压分布也受到叶顶间隙变化的显著影响,特别是在设计流量工况下,叶轮进口区域的静压分布不均匀性增加,影响了泵的运行效率。

本研究通过对蜗壳式混流泵的叶顶间隙效应进行系统分析,为泵的设计优化提供了重要的理论依据。未来的研究可以进一步深化对混流泵叶顶间隙对瞬态动力学效应的影响,特别是混沌现象对泵稳定性的作用机制。此外,结合实验验证与数值模拟结果,有望探索更加有效的设计优化方法,如通过优化叶轮几何形状、调整间隙结构等手段,来减小泄漏流的影响,提升泵的整体运行效率和可靠性。未来的研究也可以关注叶顶间隙对泵的长期运行寿命和维护成本的影响,为泵站系统的经济性和可持续性提供技术支持。

参考文献:

- [1] XU W, CHENG L, LEI S, et al. Mixed-flow pump cavitation characteristics extraction based on power spectrum density through pressure pulsation signal analysis [J]. Mech. Syst. Signal. Process, 2024, 208: 110904.

(下转第11页)

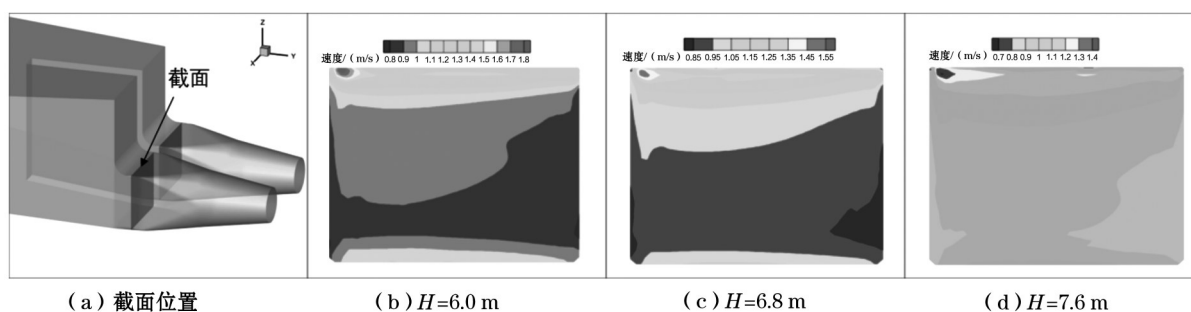


图7 竖直面速度云图

深度的增加,表面涡的强度逐渐减小直至消失;

(2)垂直涡量 ω_z 在泵站表面涡的形成中占主要地位,减少垂直涡量的形成可以抑制表面涡的形成;

(3)淹没深度越大则自由水面的扰动增强,相同流量下流速减小,但进水流道入口的流速均匀度增加。

参考文献:

- [1] 肖若富,李宇宁.进水池形状对吸入涡影响试验研究[J].排灌机械工程学报,2016,34(11):953-958.
- [2] 吴鹏飞.进水池表面吸气涡动态过程及机理研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [3] 张德胜,李普熙,赵睿杰,等.泵站进水池吸入口涡旋结构及湍流特性的大涡模拟[J].农业机械学报,2019,50(10):134-141.
- [4] GUO Q, HUANG X B, et al. The formation of the steady and unsteady air-entrained vortices in pump sump [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 129: 103312.
- [5] HUANG X B, GUO Q, et al. Air-entrainment in hydraulic intakes with a vertical pipe: the mechanism and influence of pipe offset [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 146: 103866.
- [6] 资丹.泵站进水池吸气涡水力特性研究[D].北京:中国农业大学,2019.
- [7] 潘强,施卫东,赵瑞杰,等.基于LES的泵站前池表面涡及液下涡流瞬态特性分析[J].农业机械学报,2018,49(5):186-194.
- [8] PARK Y K, DEY M K, CHOI Y H, et al. Numerical visualization of air intake induced by free surface vortex [J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(6): 540-544.
- [9] PETTERSSON REIF, B A, DURBIN P A, OOI A. Modeling rotational effects in eddy-viscosity closures [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1999, 20(6): 563-573.
- [10] YAMAMOTO T, OKANO Y, DOST S. Validation of the S-CLSVOF method with the density-scaled balanced continuum surface force model in multiphase systems coupled with thermocapillary flows [J]. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 2017, 83: 223-244.

(上接第7页)

- [2] YU L, CHENG L, XU W, et al. Study on the influence of tip clearance on cavitation performance and entropy production of an axial flow pump [J]. J. Mar. Sci. Eng, 2024, 12: 101.
- [3] 胡全友,刘小兵,赵琴,等.蜗壳式混流泵压力脉动特性研究[J].人民长江,2016,47(10):76-80,95.
- [4] 高海司,裴吉,袁寿其,等.蜗壳式混流泵叶轮部件湿模态流固耦合分析[J].流体机械,2018,46(1):46-51,5.
- [5] 鲁阳平,马灿,谭磊,等.混流泵启动过程瞬态性能理论模型[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(12):1938-1944.
- [6] 黎义斌,毕祯,李仁年,等.不同叶顶间隙下斜流泵轮缘压力脉动特性的数值分析[J].水利学报,2015,46(4):497-504.