

大型混流式水轮机高负荷工况能量特性数值模拟

乔 鹏¹,刘昆庭²,李 秘¹,于韵宽²,陈典龙¹,朱文兵¹,阚 阚²

(1. 三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂; 2. 河海大学电气与动力工程学院)

摘要:为揭示大型混流式水轮机高负荷工况下效率下降的原因,对旋涡诱导能量损失的机理进行了数值模拟研究;采用平均动能理论量化各过流部件内的水力损失,并基于刚性涡量理论识别转轮和尾水管内复杂涡结构。模拟结果表明:当超过额定流量后,转轮和尾水管是产生水力损失的主要区域,其水力损失最大占比分别达到 30%和 75%;转轮叶片进水边流动分离诱导的脱流涡与叶根马蹄涡合并,引发强剪切流动,导致进水边附近能量损失显著增加;尾水管柱状涡带涡核附近的低速流动与涡带外围高速主流之间的速度梯度显著增强了湍动能耗散;转轮内脱流涡与尾水管柱状涡带是高负荷工况下的主要损失源,其强度随流量增大而增强,是机组效率下降的主要原因。

关键词:大型混流式水轮机;刚性涡;平均动能;能量损失;数值模拟

Numerical simulation of energy characteristics of a large Francis turbine under high-load conditions//Qiao Peng¹, Liu Kunting², Li Mi¹, Yu Yunkuan², Chen Dianlong¹, Zhu Wenbing¹, Kan Kan² (1. Ningnan Baihetan Hydropower Station, Three Gorges Jinshajiang Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd.; 2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: To reveal the causes of efficiency degradation in a large Francis turbine under high-load conditions, a numerical simulation investigation was conducted on the mechanism of vortex-induced energy losses. The mean kinetic energy theory was employed to quantify hydraulic losses in each flow passage component, while the rigid vorticity theory was adopted to identify complex vortex structures in the runner and draft tube. The results show that once the discharge exceeds the rated value, the runner and draft tube become the dominant sources of hydraulic loss, accounting for up to 30% and 75% of the total hydraulic loss, respectively. The flow separation-induced vortex at the leading edge of the runner blade merges with the horseshoe vortex at the blade root, producing intense shear flow and significantly increasing energy loss near the leading edge. The velocity gradient between the low-velocity flow near the vortex core of the cylindrical vortex rope in the draft tube and the high-velocity main flow in the outer region significantly enhances turbulent kinetic energy dissipation. The separation vortex in the runner and the cylindrical vortex rope in the draft tube are the primary loss sources under high-load conditions. Their intensities increase with discharge, leading to a substantial reduction in turbine efficiency.

Key words: large Francis turbine; rigid vortex; mean kinetic energy; energy loss; numerical simulation

水电作为技术成熟、调节灵活的可再生能源,在高可再生能源占比的电力系统中承担着重要的调节作用^[1]。混流式水轮机因其宽水头适应性与高效能量转换的特点,成为大中型水电站的核心装备。在水电站运行中,电网负荷波动与调度需求迫使水轮机在偏离最高效率工况下运行,在这些工况下水轮机流道内不稳定的流动特征显著增强^[2],带来了额外的水力损失,导致效率下降,严重制约电站经济性。

国内外很多研究聚焦于低负荷工况下运行时水轮机内部的不稳定流动特征。易万爽等^[3]对某混

流式水轮机的小流量工况进行了数值模拟分析,发现在小流量工况下转轮叶片间流道存在显著的叶道涡,尾水管直锥段壁面上附着涡带。吴在强等^[4]探索了改善混流式水轮机在低负荷下运行时尾水管内不良流态的方法,发现水轮机在低负荷下运行时尾水管内偏心涡带诱发的压力脉动会导致机组的振动。Presas 等^[5]对中水头混流式水轮机进行了数值模拟研究,发现机组在低负荷工况下定速运行时需要更多的流量才能维持稳定的功率输出。虽然在低负荷工况下混流式水轮机内部的不稳定流动特征较为明显,但在运行工况超过最高效率工况后,继续提

基金项目:三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂科研项目(Z532302052)
作者简介:乔鹏(1988—),男,高级工程师,硕士,主要从事水电厂机械维护工作。E-mail:qiao_peng1@ctg.com.cn
通信作者:阚阚(1990—),男,教授,博士,主要从事流体力学及工程研究。E-mail:kankan@hhu.edu.cn

高流量会使得进入水轮机的水流携带更多的能量,反而破坏了水轮机内部的稳定流动。

水轮机在偏离最高效率工况运行时,不稳定流动会加剧水轮机内部能量损失,直接降低了能量的转换效率。王李科等^[6]采用熵产法量化评估了某水泵水轮机在S区内能量损失特性,指出在小流量工况下转轮进口处形成的挡水环是造成无叶区能量损失占比增加的主要原因。Ohiemi等^[7]使用熵产法量化评估了某轴流式水轮机内部的能量损失,得到水轮机内部的大部分能量损失主要发生在导叶尾流区下游、流道壁面附近和叶顶附近的结论。虽然熵产法能够精准定位水轮机内发生能量损失的区域^[8],但由于仅考虑了湍流耗散效应,导致计算结果误差较大^[9]。

水轮机流道内的涡结构是水轮机内部不稳定流动最直观的表现,不仅破坏了水轮机的水力稳定性,还增加了能量损失。朱强等^[10]对某低水头混流式水轮机转轮内叶道涡的数值模拟表明,叶片表面的脱流进入叶间流道诱导了叶道涡的生成。Pang等^[11]研究了导叶开度影响混流式水轮机转轮内涡流演化的机制,发现低负荷工况下转轮内部的涡流现象最明显。然而,上述研究均采用传统的涡识别方法,如 Q 准则、 λ 准则、 Δ 准则等,这些涡识别方法通常会流场中的强剪切流动误判为旋涡,大大降低了涡识别精度^[12]。

本文以某大型混流式水轮机为研究对象,基于刚性涡量理论和平均动能理论对额定202 m水头高负荷工况下水轮机流道内的流动特性和能量特性进行数值模拟分析,以期大型混流式水轮机叶片的设计优化和大型水电站的运行优化提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 平均动能理论

根据Wilhelm等^[13]基于RANS方程提出的平均动能理论,通过对平均动能输运方程中的耗散项进行体积分来计算能量损失。在混流式水轮机中,能量损失主要包括平均动能耗散损失和湍动能耗散损失两部分,两者之和表征了混流式水轮机内部的总能量损失。此外,采用刚性涡量理论识别混流式水轮机流道内的旋涡,以提高旋涡的识别精度^[14]。

1.2 模型设置

本文以一台大型混流式水轮机为研究对象。如图1所示,该水轮机三维流道几何模型主要包括蜗壳、固定导叶、活动导叶、转轮和尾水管。水轮机的设计参数如下:转轮叶片数15,固定导叶数23,活动

导叶数24,额定转速111 r/min,额定水头202 m,额定流量544.2 m³/s,额定出力1015 MW。

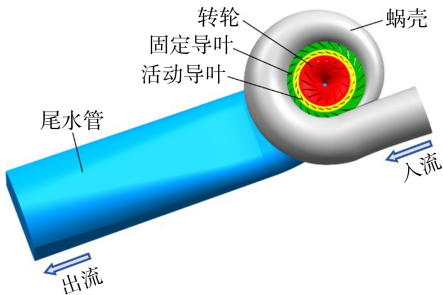


图1 水轮机三维全流道几何模型

使用ANSYS CFX软件进行稳态数值模拟,采用SST $k-\omega$ 湍流模型捕捉流场内的湍流特征^[15]。蜗壳进口和尾水管出口边界条件分别设置为压力进、出口。计算域采用多重参考坐标系实现分区设置:将转轮域定义为旋转坐标系,其他计算域定义为静止坐标系。动静交界面间采用冻结转子法传递数据,壁面采用无滑移边界条件。采用SIMPLEC算法实现速度压力的耦合求解,收敛精度设置为 10^{-5} 。

1.3 网格方案

使用ICEM CFD软件对几何模型进行结构化网格划分,网格划分结果如图2所示。在设计工况下,分别采用3套网格方案开展数值模拟计算,基于理查森外推法^[16]计算网格收敛指数,以评估数值模拟误差,验证结果如表1所示。选取数值模拟得到的水轮机效率作为评价参数,对不同网格方案的收敛特性进行分析,结果表明,由于网格不断加密,离散解逐渐趋近于精确解,网格收敛指数逐步减小。其中,方案3的网格收敛指数已小于3%,满足收敛性要求,能够保证数值计算结果的准确性。综合考虑计算精度与计算成本,最终选定方案3作为后续计算网格,不再进一步加密。

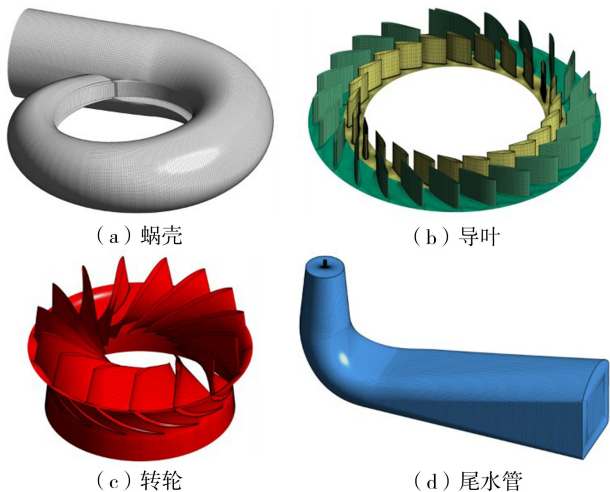


图2 水轮机结构化网格划分

表 1 外推法网格无关性验证

方案	网格单元数/万个	水轮机效率/%	网格收敛指数/%
1	265.00	91.16	
2	637.00	92.83	1.56
3	14.66	93.16	0.12

2 结果与分析

2.1 外特性对比

在水头为 202 m 时,通过数值模拟得到了水轮机的外特性曲线,将数值模拟结果与模型试验数据进行对比验证,结果如图 3 所示。水轮机模型试验在中国水利水电科学研究院水力机械实验室的水力试验台上进行,该试验台对模型效率的综合试验误差不超过±0.2%,模型试验按照 GB/T 15613—2023《水轮机、蓄能泵和水泵水轮机模型验收试验》进行。所有工况下数值模拟误差均小于 3%,并且外特性曲线变化趋势与模型试验数据保持一致,证明了数值模型的精确性和仿真策略的适配性。

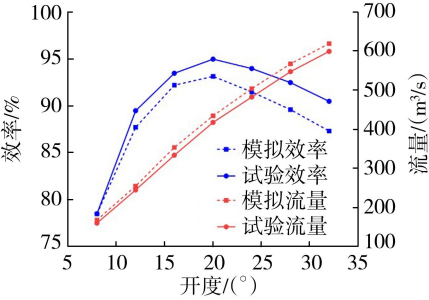


图 3 模型精度验证

2.2 各部件水力损失占比

本文采用平均动能法对水轮机各过流部件的水力损失进行定量计算。图 4 为水轮机各部件水力损失随流量的变化规律。当进入水轮机的流量超过额定流量 Q_r 后,即在高负荷工况下运行时,蜗壳和固定导叶内的水力损失对总水力损失的贡献度呈现下降趋势,其占比不足 1%。转轮和尾水管的水力损失呈现快速上升趋势。其中,尾水管的水力损失最大占比达到 75%,转轮内水力损失最大占比达到 30%。相较于最优效率工况,流量达到 1.25 Q_r 时,尾水管的水力损失增加了约 3 倍,转轮内的水力损

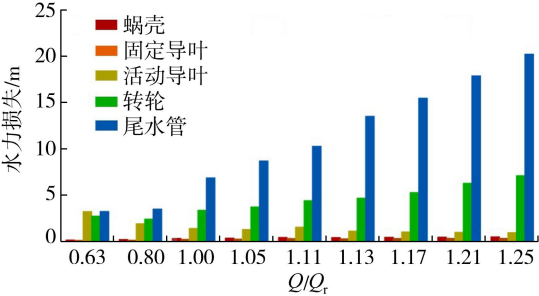


图 4 各部件的水力损失随流量的变化规律

失增加了约 1.5 倍。这说明,在流量超过额定流量后,尾水管和转轮内水力损失的急剧增加是导致水轮机组效率快速下降的主要原因。

2.3 转轮内能量损失空间分布

图 5 通过刚性涡量等值面展示了不同开度下,高负荷工况时水轮机转轮内部主要的涡结构。当流量高于 Q_r 时,转轮叶片进口处形成负冲角。负冲角的形成导致水流无法完全附着于叶片表面流动,使得流动在压力面上发生了边界层分离,诱导了脱流涡的形成。转轮叶片根部(叶根),即叶片与下环连接区域存在典型的马蹄涡。叶根复杂的几何形状和端壁效应导致流动在叶根处发生了边界层分离,进而诱导了马蹄涡的形成。马蹄涡的存在进一步加剧了局部流动的不稳定性。随着导叶开度 α_0 的增大,转轮内的流量增大,转轮叶片进水边的脱流涡逐渐沿压力面向转轮下游发展。当流量进一步增大时,叶片进口的负冲角随之增大,压力面上的脱流涡体积显著增大,并与叶根的马蹄涡相互卷合,形成复杂的涡结构。

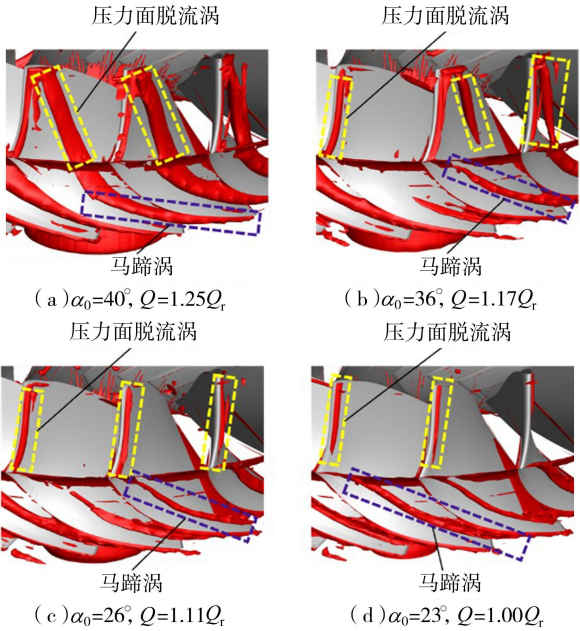


图 5 转轮内的涡结构

图 6 为转轮 50% 叶高流面上的压力分布情况。在高负荷工况下,叶片进水边和压力面上均出现了由脱流涡造成的低压区。水流经过脱流区时,携带的能量被涡流耗散,这不仅降低了流速,同时引起了局部的压力降低。脱流涡导致的低压区范围较广,是造成叶片在进水边附近产生负力矩的主要原因。

在高负荷工况下,转轮压力面上出现了脱流涡与马蹄涡合并的涡结构。这种复杂的涡结构引起了局部的能量损失。图 7 为转轮叶片表面能量损失的空间分布规律。叶片压力面沿流向的能量损失呈现

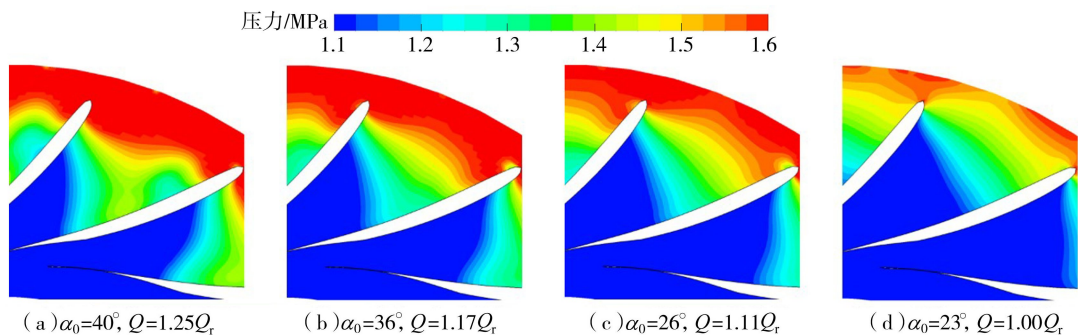


图6 转轮 50%叶高流面上的压力分布

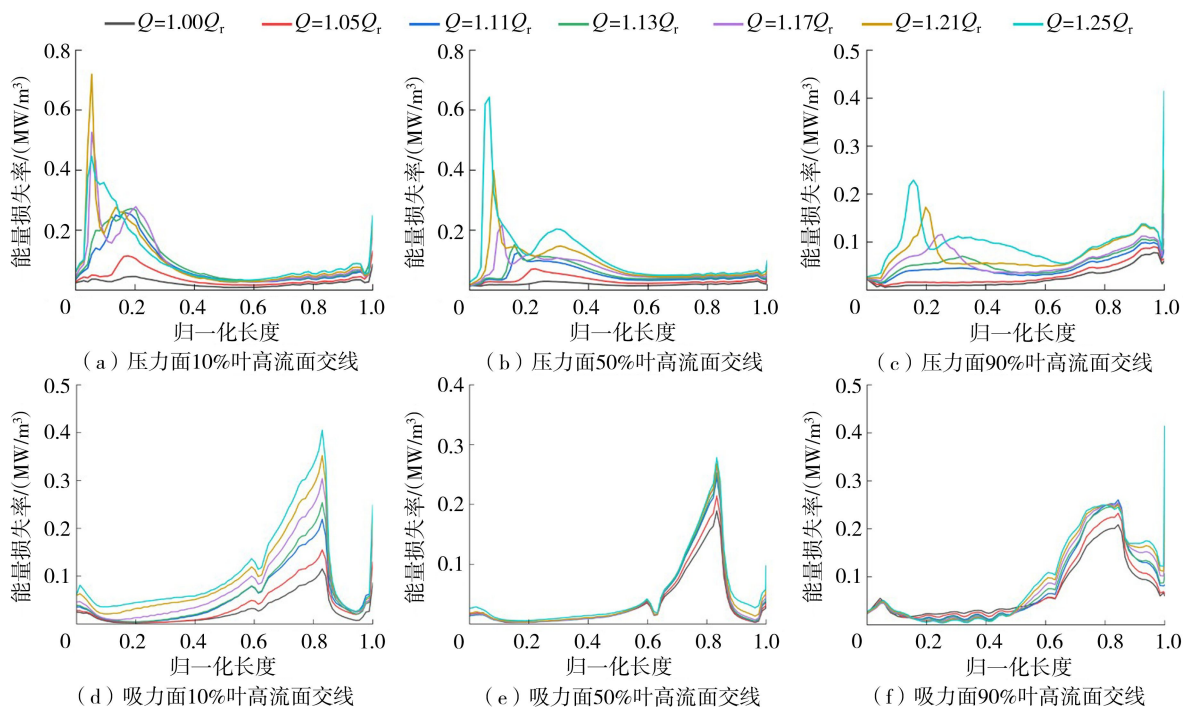


图7 转轮叶片表面能量损失分布

先减小后增大的趋势,能量损失峰值集中出现在叶片进水边附近,这与进水边附近的脱流涡密切相关。而在吸力面,能量损失沿流向呈整体增大的趋势,其能量损失峰值主要分布在叶片出水边附近,这与尾流区湍流耗散增强有关。

在高负荷工况下,叶片压力面上的高能量损失与脱流涡的形成密切相关。在脱流涡涡核区域,流速显著低于主流区,由此产生的速度梯度强化了压力面附近的剪切流动,这导致叶片进水边压力面侧的能量损失显著增加。此外,在转轮出口区域,由于流速增大导致对流效应增强,显著提高了湍动能生成率,引发较大的能量损失。从展向分布来看,脱流涡诱导的能量损失沿上冠到下环方向呈递减趋势,这是由于在高负荷工况下,流动分离倾向于发生在转轮叶片进水边靠近上冠的区域。随着流动沿展向向下环发展,叶片进口的负冲角逐渐减小。此时,流动分离随之被抑制,脱落涡强度减弱,最终表现为能量损失沿展向梯度降低的分布特征。

2.4 尾水管内能量损失空间分布

图8为水轮机尾水管涡带的形态,可以清晰地观察到尾水管内典型的柱状涡带结构。该涡带在尾水管直锥段呈现纺锤体形态,并附着在泄水锥上,一直向尾水管下游延伸至弯肘段。随着流量的逐渐增大,涡带延长,直径逐渐增大。

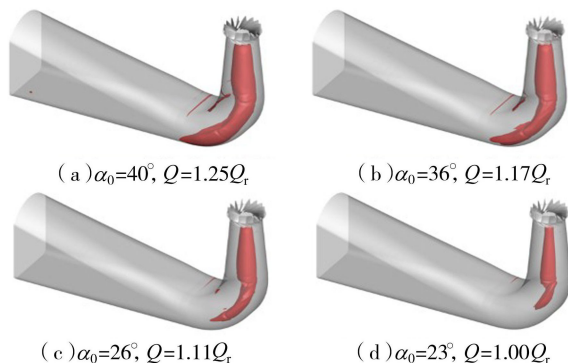


图8 尾水管涡带形态

柱状涡带的形成机制主要受转轮出口水流绝对速度周向分量的影响。当水轮机偏离最优效率工况

运行时,转轮出口水流的绝对速度在圆周方向上存在显著的分量,这一速度分量诱导了尾水涡带的形成。在高负荷工况下,转轮出口的绝对速度具有与转轮旋转方向相反的周向分量,这种反向速度分量破坏了尾水管内的轴对称流动,促使柱状涡带的形成。涡带的旋转运动与主流之间的相互作用增加了湍动能耗散。随着流量的增大,涡带的尺寸和强度逐渐增加,进一步加剧了尾水管内部的能量损失。

图 9 为尾水管内的能量损失分布云图,尾水管直锥段和弯肘段区域内存在明显的能量损失。在高负荷工况下,尾水管内存在强烈的柱状涡带。涡核中心的低速流动与涡带外围的高速流动形成了显著的速度梯度,带来了能量损失。随着导叶开度的增大,尾水管内的流量增多,涡带体积得以增大,尾水管内的能量损失增加。此外,涡核中心区域的能量损失明显低于涡核外围区域。这表明,流体在涡核中心的低速旋转对湍动能生成的影响相对较小,尾水管内的能量损失主要源自涡核中心的低速流动与涡带外围的高速流动之间显著的速度梯度引发的剪切流动。这种剪切流动显著增强了湍动能的生成和耗散,从而加剧了能量的损失。

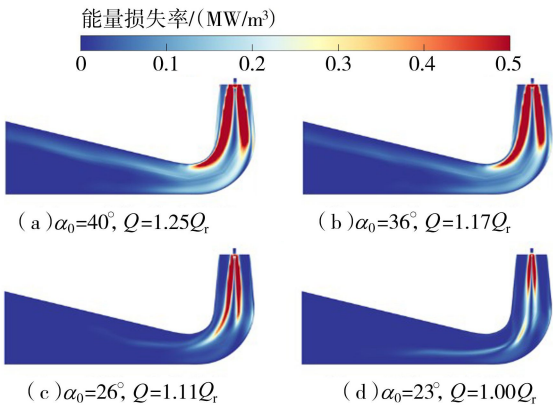


图 9 尾水管内能量损失分布云图

3 讨论

本文对某大型混流式水轮机高负荷工况下内部流动进行了数值模拟,重点分析了转轮和尾水管流道内不稳定流动与水轮机能量损失之间的关联性,阐明了流道内涡结构诱导能量损失的机制。采用平均动能理论量化水轮机各部件内的能量损失,并对转轮流道内的能量损失特性进行了定量分析,采用基于刚性涡量理论的涡识别方法精准识别了转轮和尾水管内的复杂涡结构。本文的研究结论可为大型混流式水轮机叶片和尾水管的设计优化,以及大型水电站的运行策略优化提供数据支持和理论依据。然而,本文研究仍存在一定的局限性:求解雷诺时均 N-S 方程时,需要额外引入湍流模型来封闭方程,这

导致数值模拟无法准确预测复杂的三维湍流。因此可以考虑使用大涡模拟的方法捕捉水轮机三维流道内小尺度的湍流细节。水轮机内回流、卡门涡、旋转失速等复杂的流动现象引起的能量损失未纳入本文的研究。此外,电网对大型水电站的调节能力提出了更高的要求,水轮机不仅要具备在宽负荷工况范围下运行的能力,同时还要能够快速实现工况转换^[17],因此今后的研究要重点关注水轮机过渡过程中的水力不稳定性和能量损失。

4 结论

- a. 在高负荷工况下,转轮和尾水管内的水力损失在总水力损失中占比较高,其损失最大占比分别为 30% 和 75%。当流量超过额定流量后,尾水管和转轮内水力损失的急剧增加是导致水轮机组效率快速下降的主要原因。
- b. 高负荷工况下,转轮叶片进口负冲角诱导压力面发生流动分离,形成脱流涡,并与叶根马蹄涡合并形成复杂涡结构。脱流涡导致的强剪切流动显著增强湍流耗散,是转轮内能量损失的主要来源,水力损失主要分布于叶片进水边附近。
- c. 高负荷工况下,尾水管内形成了柱状涡带。涡核附近的低速流动与涡带外围高速主流之间产生强烈速度梯度和剪切流动,显著增强湍动能生成与耗散,是尾水管能量损失的主要来源。随着流量增大,柱状涡带强度和尺度增加,其诱导的水力损失进一步加剧。

参考文献:

[1] Vagnoni E, Gezer D, Anagnostopoulos I, et al. The new role of sustainable hydropower in flexible energy systems and its technical evolution through innovation and digitalization[J]. Renewable Energy, 2024, 230: 120832.

[2] 郭涛,张晋铭,孙震,等. 运行负载扰动条件下水轮机流态演化和空化性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41 (12): 224-236. (Guo Tao, Zhang Jinming, Sun Zhen, et al. Influence of operating load conditions on vortex evolution and cavitation performance in Francis turbine [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41 (12): 224-236. (in Chinese))

[3] 易万爽,薛炳,宋晶辉,等. 巨型混流式水轮机小流量工况下高保真数值模拟[J]. 水力发电, 2025, 51 (4): 69-74. (Yi Wanshuang, Xue Bing, Song Jinghui, et al. Numerical simulation on the flow characteristics of giant Francis turbine under low flow rate condition[J]. Water Power, 2025, 51 (4): 69-74. (in Chinese))

[4] 吴在强,林亚涛,关英波,等. 混流式水轮机尾水管涡带及改善措施研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41 (7): 197-

200. (Wu Zaiqiang, Lin Yatao, Guan Yingbo, et al. Study on vortex zone of draft tube and improvement measures of Francis turbine[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7):197-200. (in Chinese))
- [5] Presas A, Valero C, Valentín D, et al. Water saving options in hydropower by means of variable speed operation; a prototype study in a mid-head Francis turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291:117296.
- [6] 王李科, 姚亮, 冯建军, 等. 水泵水轮机 S 特性区能量损失及流动特性研究[J]. 水利学报, 2024, 55(3):344-354. (Wang Like, Yao Liang, Feng Jianjun, et al. Energy loss and flow characteristics analysis of a model pump turbine in the S-shape region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3):344-354. (in Chinese))
- [7] Ohiemi I E, Yang Sunsheng, Singh P, et al. Evaluation of energy loss in a low-head axial flow turbine under different blade numbers using entropy production method[J]. Energy, 2023, 274:127262.
- [8] 周罗香, 张志兵, 孙政, 等. 基于熵产理论的水泵水轮机驼峰区内部水力损失特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1):62-67. (Zhou Luoxiang, Zhang Zhibing, Sun Zheng, et al. Study on internal hydraulic loss characteristics of pump-turbine hump region based on entropy generation theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):62-67. (in Chinese))
- [9] Qin Yonglin, Li Deyou, Wang Hongjie, et al. Investigation on hydraulic loss component and distribution in hydraulic machinery: a case study of pump-turbine in pump mode[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52:104932.
- [10] 朱强, 龚莉, 袁玲丽, 等. 某低水头混流式水轮机叶道涡特性数值分析[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(3):6-10. (Zhu Qiang, Gong Li, Yuan Lingli, et al. Numerical analysis of blade passage vortex characteristics in a low head mixed flow turbine[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2023, 46(3):6-10. (in Chinese))
- [11] Pang Jiayang, Yao Bing, Liu Xiaobing, et al. Influence of guide vane opening on channel vortex and pressure pulsation in Francis turbine runners[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(4):043325.
- [12] Gao Yisheng, Liu Chaoqun. Rortex and comparison with eigenvalue-based vortex identification criteria[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(8):085107.
- [13] Wilhelm S, Balarac G, Métais O, et al. Analysis of head losses in a turbine draft tube by means of 3D unsteady simulations[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2016, 97(4):1255-1280.
- [14] Liu Chaoqun, Gao Yisheng, Tian Shuling, et al. Rortex: a new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(3):035103.
- [15] 阚闯, 张清滢, 黄佳程, 等. 叶顶泄漏流动对轴流泵反向发电能量特性的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(9):2416-2422. (Kan Kan, Zhang Qingying, Huang Jiacheng, et al. Tip Leakage flow on energy performance for an axial flow pump as turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(9):2416-2422. (in Chinese))
- [16] Celik I B, Ghia U, Roache P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7):078001.
- [17] 李桂林, 冯陈, 张玉全, 等. 基于特性曲线的水轮机调速器新型功率调节模式研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6):110-118. (Li Guilin, Feng Chen, Zhang Yuquan, et al. Research on a novel power regulation mode of water turbine governor based on characteristic curve[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6):110-118. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-11 编辑:熊水斌)

(上接第 78 页)

- [22] 彭浩, 韩玉, 梁铭, 等. 基于多源信息融合的隧道施工综合安全动态评估技术研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(9):1893-1902. (Peng Hao, Han Yu, Liang Ming, et al. Research on dynamic safety assessment technology for tunnel construction based on multi-source information fusion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(9):1893-1902. (in Chinese))
- [23] 刘东海, 王爱国, 柳育刚, 等. 基于碾轮振动动态分析的土石坝压实质量实时监测与评估[J]. 水利学报, 2014, 45(2):163-170. (Liu Donghai, Wang Aiguo, Liu Yugang, et al. Real-time monitoring and assessment of compaction quality for earth-rock dam basing on roller vibration behavior analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2):163-170. (in Chinese))
- [24] Deng Naifu, An Zaizhan, Hao Jiawang, et al. Few shot intelligent assessment method for compaction quality of earthwork considering uncertainty[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 256:125000.
- [25] 钱劲松, 杨以诚, 凌建明. 路基智能压实的地统计分析与空间均匀性评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(10):2859-2869. (Qian Jinsong, Yang Yicheng, Ling Jianming, et al. Geostatistical analysis and evaluation of subgrade spatial uniformity based on intelligent compaction technology[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10):2859-2869. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-20 编辑:俞云利)