

水利机械中新型水轮机流场特性数值模拟与优化设计研究

李志鹏

广东粤水电装备集团有限公司 广东 广州 511300

【摘要】：随着能源需求增长与环保要求提升，水力发电重要性凸显，水轮机作为核心设备，其性能关乎电站效益。本研究聚焦新型水轮机，运用数值模拟技术，深入剖析其内部流场特性，涵盖流速、压力分布及湍流特征等。通过构建精确数学模型与选用适宜湍流模型，获取详尽流场信息，明晰能量转换及流动损失机制。基于模拟结果，从叶片形状、流道结构等方面展开优化设计，借助多目标优化算法，权衡效率、稳定性等性能指标。研究成果有望为新型水轮机设计制造提供理论支撑，助力水力发电效率提升与可持续发展。

【关键词】：水利机械；新型水轮机；流场特性；数值模拟；优化设计

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.002

引言

在全球能源结构调整背景下，水力发电作为清洁可再生能源备受关注。水轮机性能对水电站发电效率与稳定性影响重大。传统水轮机在复杂工况下存在效率低、稳定性差等问题。深入研究新型水轮机流场特性并优化设计，能提升其性能，增强水力发电竞争力，对缓解能源压力、保护环境意义非凡。故探究新型水轮机流场特性及优化设计迫在眉睫。

1 新型水轮机流场数值模拟方法

(1) 几何模型构建与细节考量

构建新型水轮机精确几何模型时，需系统性还原蜗壳、导水机构、转轮与尾水管等过流部件的复杂形态。蜗壳作为水流的初始约束空间，其螺旋线轮廓与断面尺寸直接影响水流的均匀分配，建模时需兼顾水力性能与加工工艺，确保流道曲率平滑过渡。导水机构的叶片形状与布置角度决定了水流进入转轮的方向与速度，需通过多方案对比优化，避免水流产生涡旋与冲击。转轮作为能量转换的核心部件，叶片的三维扭曲形态与翼型参数需结合水轮机工作水头与流量特性精细调整，同时考虑叶片厚度变化对强度与空化性能的影响。尾水管的扩散段设计关乎能量回收效率，需通过数值模拟验证其渐变角度与长度，确保水流平稳排出。

(2) 网格划分技术与精度平衡

网格划分是数值模拟的关键环节，需在计算精度与效率间寻求最优解。对于蜗壳与导水机构的复杂曲面区域，采用非结构化四面体网格进行自适应加密，通过设置尺寸函数控制网格密度，确保壁面附近满足 y^+ 值要求，准确捕捉边界层流动特性。转轮叶片表面则采用棱柱层网格，模拟叶片表面的附面层发展与分离现象。尾水管的扩散段因流动相对稳定，可使用结构化六面体网格，减少网格数量与计算时间。在网格质量控制方面，需严格检查网格的纵横比、扭曲度等指标，避免因网格畸变导致数值计算发散。

(3) 控制方程与边界条件设定

选取雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 方程作为描述水流运动的基本方程，该方程通过时间平均处理湍流脉动，将瞬时流动分解为平均流动与脉动分量，平衡了计算精度与效率。结合标准 $k-\epsilon$ 湍流模型封闭方程组，该模型通过求解湍动能 k 及其耗散率 ϵ ，量化湍流强度与能量耗散，适用于多数工程湍流流动模拟。在边界条件设定上，进口边界采用速度入口或压力入口，需根据水轮机实际运行工况，结合上游水库水位与引水管道特性确定参数。出口边界采用自由出流条件，假定水流在出口处不受下游影响，均匀流出。壁面边界设置为无滑移条件，即流体在固体壁面处速度为零，并通过壁面函数法处理近壁区流动，将壁面附近的物理量与主流区联系起来。这些方程与边界条件的合理选择，为准确模拟水轮机内部流场奠定了理论基础。

2 流场特性分析

(1) 流速矢量图的深度解析

流速矢量图直观展现了水流在水轮机各部件内的运动轨迹与速度变化趋势。在蜗壳区域，通过分析流速矢量的螺旋分布，可判断水流是否均匀进入导水机构，若出现局部高速或低速区域，可能意味着蜗壳断面尺寸设计不合理或存在水力损失。进入导水机构后，流速矢量的方向与叶片角度的匹配程度直接影响水流冲击转轮的角度，若矢量方向紊乱，易导致叶片表面压力分布不均，增加水力损失。转轮区域的流速矢量分析尤为关键，高速旋转的叶片与水流相互作用，需关注叶片吸力面与压力面的流速差异，若吸力面流速过高，可能引发空化现象；而压力面流速分布不均，则会导致叶片受力不平衡，影响运行稳定性。

(2) 压力云图的规律挖掘

压力云图揭示了水轮机内部压力分布的空间特性，为评估设备性能提供重要依据。在蜗壳与导水机构连接处，常出现压力突变现象，这是由于水流方向与速度的急剧变化所致，过大的压力梯度可能引发振动与噪声。转轮叶片表面的压力云图可

清晰显示压力分布的非对称性，叶片进口与出口的压力差是能量转换的直接体现，而压力突变区域则可能预示着流动分离的发生。尾水管内的压力分布与能量回收效率密切相关，若出现局部低压区，可能导致水流空化，不仅降低效率，还会侵蚀管壁。压力脉动的频率与幅值分析对水轮机稳定性评估至关重要，过高的压力脉动可能引发共振，威胁设备安全运行。

(3) 湍流特性与边界层流动研究

湍动能与湍流耗散率分布是评估湍流强度与能量损失的核心指标。在水轮机内部，湍流主要产生于蜗壳弯道、导叶间隙以及转轮叶片的非正常流动区域。高湍动能区域意味着流体内部的剧烈混合与能量耗散，这些能量损失无法有效转化为机械能，降低了水轮机效率。通过分析湍流耗散率分布，可定位能量损失的关键位置，如叶片尾缘的涡流区、蜗壳的死角等，为结构优化提供依据。叶片表面的边界层流动特性对水轮机性能影响显著。边界层分离会在叶片表面形成低压区，增加阻力并降低升力，导致能量转换效率下降；而边界层再附现象则可能引发压力脉动与振动。研究边界层的厚度、分离点与再附点位置，有助于优化叶片形状，延缓分离发生，提高水轮机整体性能。

3 现有设计问题剖析

(1) 叶片表面压力分布缺陷

观察叶片表面压力分布可知，其非均匀性是导致水力损失的主要原因之一。在叶片吸力面，靠近进口区域常出现压力梯度骤增现象，这是由于水流加速导致压力急剧下降，易引发流动分离，形成低压涡区，阻碍水流顺畅通过叶片，增加局部水力损失。而在叶片压力面，压力分布的不对称性导致叶片承受周期性的交变载荷，加剧叶片疲劳损坏风险。叶片根部与顶部的压力差异过大，会产生横向力，引起叶片振动，影响水轮机运行稳定性。这些压力分布缺陷不仅降低了能量转换效率，还可能缩短叶片使用寿命，需通过优化叶片形状与角度，改善压力分布均匀性。

(2) 流道内流速分布不均问题

水轮机流道内的流速不均匀性贯穿于蜗壳、导水机构与转轮等多个部件。在蜗壳进口，若水流分配不均，会导致部分导水机构叶片承受过大流量，引发局部高速流动，而其他叶片则因流量不足出现低速区，影响整体效率。导水机构的叶片间隙与开度设置不合理，会产生射流 - 涡流现象，造成能量损耗。转轮内部的流速不均匀性更为复杂，叶片间流道的几何差异与安装误差，会导致水流速度在周向与径向分布不均，部分区域流速过高易诱发空化，而过低的流速则无法充分利用水能。

(3) 工况适应性与稳定性不足

现有水轮机设计在工况变化时表现出明显的适应性缺陷。当水轮机从额定工况向低负荷或高负荷工况过渡时，效率曲线

呈现剧烈波动，高效区范围狭窄，这是由于叶片形状与导水机构开度未充分考虑变工况需求，导致水流与叶片的匹配度下降。在部分负荷工况下，转轮内部易出现回流与涡流，引发压力脉动与振动，严重时甚至导致设备共振。水轮机的空化性能在变工况下显著恶化，低压区域扩大，空化侵蚀加剧，威胁设备安全。这些问题反映出现有设计缺乏对工况变化的系统性考量，需通过多工况联合优化，拓宽高效运行范围，提升水轮机的稳定性与可靠性。

4 优化设计策略制定

(1) 参数化设计变量选取

运用参数化设计方法，将影响水轮机性能的关键几何参数设为变量。叶片形状参数包括叶片曲率、扭转角、厚度分布等，这些参数直接决定叶片的气动性能与能量转换效率。调整叶片曲率可改变水流攻角，优化压力分布；通过调整扭转角，可改善叶片不同高度处的速度匹配，减少流动分离。流道结构参数如蜗壳尺寸、导叶开度、尾水管扩散角等同样至关重要。蜗壳的包角与断面尺寸影响水流的均匀分配，导叶开度控制着进入转轮的流量与速度，尾水管扩散角则决定能量回收效率。还需考虑部件间的装配间隙、过渡圆角等细节参数，这些参数虽小，却可能对整体性能产生显著影响。通过合理选取设计变量，构建参数化模型，为后续优化提供基础。

(2) 多目标优化函数构建

以水轮机效率、稳定性、空化性能等为核心优化目标，构建综合评价函数。水轮机效率是衡量能量转换能力的关键指标，需在不同工况下最大化效率值，并拓宽高效区范围。稳定性指标则通过控制压力脉动幅值、振动频率与强度来衡量，避免设备共振与异常振动。空化性能以空化系数为评价依据，需降低叶片表面低压区域面积，延缓空化发生。为平衡多目标间的冲突，引入权重系数法，根据实际需求为各目标赋予不同权重，将多目标问题转化为单目标优化问题。在调峰电站中，可适当提高稳定性权重；而在高水头电站，则更注重效率与空化性能的平衡。通过构建科学的优化函数，指导设计参数的寻优过程。

(3) 智能优化算法应用与验证

采用遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法，在参数空间中搜索最优解。遗传算法模拟生物进化过程，通过选择、交叉、变异等操作，在全局范围内寻找潜在最优解，适用于复杂非线性问题。粒子群优化算法则模拟鸟群觅食行为，通过粒子间的信息共享与协作，快速收敛至最优解，计算效率较高。在实际应用中，可结合两种算法的优势，先用遗传算法进行全局搜索，再用粒子群优化算法进行局部细化。对优化后的水轮机模型进行数值模拟验证，对比优化前后的流场特性与性能指标，如流速均匀性、压力脉动幅值、效率曲线等。若优化效果

未达预期,需调整设计变量范围或优化算法参数,重新进行迭代优化,直至获得满足多目标要求的设计方案。

5 优化效果验证

(1) 流场参数对比分析

对比优化前后的流速、压力、湍动能等流场参数分布,可直观展现优化效果。优化后的流速矢量图显示,蜗壳内水流分配更加均匀,导水机构出口流速方向与转轮叶片进口角度匹配度显著提高,减少了冲击损失。转轮叶片表面的流速分布更加平滑,吸力面与压力面的流速差异缩小,有效抑制了流动分离。压力云图表明,叶片表面的压力梯度明显降低,压力分布更加均匀,降低了空化风险。尾水管内的压力分布也更加稳定,低压区域面积减小,能量回收效率提升。湍动能与湍流耗散率分布显示,优化后高湍流区域显著减少,能量损失降低,表明水流流动更加顺畅,水力性能得到有效改善。

(2) 工况性能提升评估

计算优化后水轮机在不同工况下的效率,结果表明其效率曲线整体上移,高效区范围明显拓宽。在额定工况下,水轮机效率显著提高,能量转换能力增强;在低负荷与高负荷工况下,效率下降趋势减缓,有效解决了原设计工况适应性差的问题。通过分析不同工况下的压力脉动与振动特性,发现优化后压力脉动幅值大幅降低,振动频率与强度均在安全范围内,设备运

行稳定性显著提升。空化性能也得到明显改善,叶片表面低压区域面积减小,空化系数降低,有效延缓了空化发生,延长了设备使用寿命。这些性能提升指标表明,优化设计显著增强了水轮机在不同工况下的适应性与可靠性。

(3) 优化设计有效性验证

通过数值模拟与理论分析相结合的方式,全面验证优化设计的有效性与可行性。将优化前后的水轮机模型进行全流道数值模拟,对比关键性能指标的变化,结果与预期优化目标高度吻合。基于流体力学理论,分析流场参数变化对水轮机性能的影响机制,从理论层面解释优化效果产生的原因。还可通过模型试验或现场测试进一步验证优化设计的实际效果,将数值模拟结果与试验数据进行对比,确保设计方案的可靠性。综合数值模拟、理论分析与试验验证结果,充分证明优化设计能够有效提升水轮机的整体性能,为新型水轮机的工程应用提供了坚实的技术支撑。

6 结语

通过数值模拟深入探究新型水轮机流场特性,精准剖析现有设计问题,并制定实施优化策略,有效提升水轮机性能。未来,应持续完善数值模拟方法,提高模拟精度与效率;拓展优化设计目标,综合考虑更多因素;结合实验研究,进一步验证优化效果,推动新型水轮机设计制造技术发展,为水力发电事业注入新活力。

参考文献:

- [1] 李华,张涛.基于 CFD 的混流式水轮机内部流场数值模拟与性能分析[J].水力发电学报,2023,42(5):110-120.
- [2] 王强,刘畅.水轮机叶片优化设计对其流场特性及性能影响的研究[J].动力工程学报,2024,44(3):220-228.
- [3] 赵亮,孙宇.新型水轮机流道结构优化与流场数值模拟研究[J].中国农村水利水电,2022,(8):185-190.
- [4] 陈晨,周明.多目标优化算法在水轮机设计中的应用[J].机械设计与研究,2025,41(1):155-160.
- [5] 刘辉,吴迪.考虑空化影响的水轮机流场数值模拟与性能优化[J].排灌机械工程学报,2023,41(7):665-672.