

# 基于 CFD 的混流式水轮机流道抗磨型线优化研究

万茂, 刘磊

四川凉山水洛河电力开发有限公司, 四川 凉山 627800

DOI:10.61369/RSTD.2026010006

**摘 要 :** 针对多泥沙河流中混流式水轮机过流部件磨损严重的问题, 本文基于计算流体力学 (CFD) 技术开展流道抗磨型线优化研究。通过建立 SST  $k-\omega$  湍流模型、欧拉 - 拉格朗日固液两相流模型及 Tabakoff 磨损预测模型, 实现水轮机全流道流场与磨损分布的数值模拟; 采用 NURBS 参数化建模技术构建叶片几何模型, 以水力效率和平均磨损率为目标函数, 结合 NSGA-II 多目标优化算法进行抗磨型线优化。结果表明: 优化后叶片平均磨损率降低 45.1%, 最大磨损率降低 40.0%, 水力效率仅下降 0.4% (保持 93.8%), 同时压力脉动幅值与振动烈度分别降低 15.3% 和 16.7%, 显著提升机组抗磨性能与运行稳定性, 经济效益显著, 投资回收期约 1.2 年。

**关键词 :** 混流式水轮机; CFD; 抗磨型线; NSGA-II 算法; 磨损预测; 参数化建模

## Research on Optimization of Anti-wear Profile of Mixed-Flow Turbine Flow Channel Based on CFD

Wan Mao, Liu Lei

Sichuan Liangshan Shuiluohu Electric Power Development Co., LTD., Liangshan, Sichuan 627800

**Abstract :** Aiming at the problem of severe wear of the flow passage components of mixed-flow turbines in rivers with abundant sediment, this paper conducts an optimization study on the anti-wear profile of the flow passage based on Computational fluid Dynamics (CFD) technology. By establishing the SST  $k-\omega$  turbulence model, the Euler-Lagrange solid-liquid two-phase flow model and the Tabakoff wear prediction model, the numerical simulation of the flow field and wear distribution in the entire flow channel of the turbine is achieved. The blade geometric model was constructed by using the NURBS parametric modeling technology. With the hydraulic efficiency and average wear rate as the objective functions, the anti-wear profile optimization was carried out in combination with the NSGA-II multi-objective optimization algorithm. The results show that After optimization, the average wear rate of the blades decreased by 45.1%, the maximum wear rate decreased by 40.0%, and the hydraulic efficiency only dropped by 0.4% (remaining at 93.8%). Meanwhile, the amplitude of pressure pulsation and vibration intensity decreased by 15.3% and 16.7% respectively, significantly enhancing the anti-wear performance and operational stability of the unit, with remarkable economic benefits. The payback period is approximately 1.2 years.

**Keywords :** mixed-flow turbine; CFD; anti-wear profile; NSGA-II algorithm; wear prediction; parametric modeling

## 引言

水力发电作为清洁能源核心组成, 混流式水轮机因结构紧凑、效率高广泛应用于中高水头电站, 但多泥沙河流 (如新疆大石峡水电站) 中泥沙磨损导致机组效率下降、寿命缩短、维护成本增加。CFD 技术凭借成本低、周期短、参数可调的优势, 可精准预测流场与磨损分布, 为抗磨优化提供理论支撑。本文通过 CFD 数值模拟、参数化建模与多目标优化, 实现水轮机流道抗磨型线优化, 兼顾水力效率与抗磨性能, 为多泥沙地区水轮机设计提供技术参考<sup>[1]</sup>。

作者简介:

成茂 (1975-), 男, 本科, 高级工程师; 研究方向: 电力生产管理;

刘磊 (1990-), 男, 本科, 工程师; 研究方向: 电力生产管理。

## 一、理论基础与文献综述

混流式水轮机的正常运行涉及多个关键环节与技术要点。其核心部件包含蜗壳、导水机构、转轮及尾水管，工作时，水流先经蜗壳实现均匀分配，再由导水机构精准调节流量与方向后，进入转轮推动其旋转做功，最后经尾水管排出。转轮叶片型线是影响流场特性与泥沙磨损分布的关键，导叶头部 / 尾部、转轮叶片进水边及尾水管锥管段是典型磨损部位。泥沙磨损主要有冲击磨损与磨粒磨损两种形式，前者由高速颗粒撞击材料表面引发，后者则因颗粒相对滑动产生切削导致，磨损率与颗粒速度的 2-3 次方成正比，且受颗粒特性、流体参数及几何形状影响。当泥沙浓度超过 60 kg/m<sup>3</sup>，材料失重量显著增加；在高水头工况下，导叶裙边易出现空蚀，与泥沙磨损共同造成复合破坏<sup>[2]</sup>。

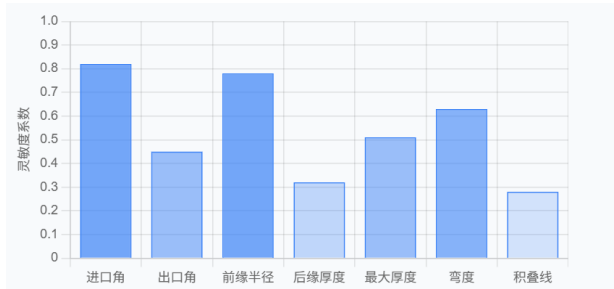


图1 各设计变量对磨损率的灵敏度分析

在技术应用方面，ANSYS CFX、Fluent 等商业 CFD 软件被广泛用于水轮机流场分析，其中 SST k- $\omega$  模型因擅长预测逆压梯度流动分离，成为湍流模拟的首选。网格划分采用“结构化 + 非结构化”混合策略，并对叶片表面与导叶间隙进行加密处理（最小网格 0.5mm）以保障计算精度。将 CFD 与优化算法相结合，可在基本不影响效率的前提下，实现磨损率降低 73%，是抗磨设计的重要技术手段<sup>[3]</sup>。

## 二、CFD 数值模拟方法

### （一）控制方程与物理模型

不可压缩流体连续性方程与动量方程（雷诺平均 N-S 方程）如下：

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i$$

其中  $u_i$  为速度分量， $\rho$  为流体密度， $\nu$  为运动粘度， $f_i$  为体积力。

采用欧拉 - 拉格朗日方法，液相为连续介质，固相颗粒（离散相）运动方程：

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (F_D \text{ 为阻力系数, } C_D \text{ 为曳力系数, } d_p \text{ 为颗粒直径。})$$

磨损预测采用 Tabakoff 模型：

$$E = C \cdot v^n \cdot \sin^m \alpha \cdot \cos \alpha$$

( $E$  为磨损率， $v$  为颗粒速度， $\alpha$  为冲击角度，韧性材料  $m=2.0$ )<sup>°</sup>

表1 数值计算关键参数

| 计算环节     | 参数设置                           | 技术要求                               |
|----------|--------------------------------|------------------------------------|
| 网格划分     | 全流道 1500 万网格 (60% 结构化)         | 叶片表面 $y^+ \approx 1$ ，导叶间隙最小 0.5mm |
| 边界条件     | 进口质量流量 (湍流强度 5%)；出口压力 0Pa (表压) | 动静部件采用滑移网格交界面                      |
| 求解器与离散格式 | 基于压力的求解器 (SIMPLE 算法)；对流项二阶迎风格式 | 稳态迭代 1000 步，非定常时间步 0.5° 转轮转角       |
| 收敛判据     | 连续性方程残差 < 1e-6，动量方程 < 1e-5     | 监控面流量 / 力矩变化 < 0.01%               |

## 三、抗磨型线优化设计方法

### （一）参数化建模

基于 NURBS 曲面技术构建叶片参数化模型，沿径向选取 11 个控制截面，每个截面由弦长、弯度、厚度分布及前缘半径定义，设计变量共 43 个 (表 2)，模型与原始 CAD 偏差 < 0.1mm，满足工程精度<sup>[4]</sup>。

### （二）优化目标与算法

目标函数：

$$\min F(x) = \left[ \frac{1}{A_s} \int E(x,s) ds, 1 - \eta(x) \right]^T \quad (A \text{ 为叶片面积, } \eta \text{ 为效率),$$

权重系数 (磨损率 0.4, 效率 0.35, 出力 0.25)

约束条件：叶片厚度 5-30mm，进出口角 20° - 70° / 10° - 35°，效率  $\geq 90\%$  原始值，空化系数  $\geq \sigma_{min}$ 。

表2 NSGA-II 算法参数

| 算法参数      | 取值        | 作用             |
|-----------|-----------|----------------|
| 种群规模      | 100       | 保证解集多样性        |
| 最大进化代数    | 200       | 控制收敛效率         |
| 交叉 / 变异概率 | 0.9/0.1   | 平衡全局搜索与局部优化    |
| 交叉 / 变异方法 | SBX / 多项式 | 保持基因多样性，避免早熟收敛 |

优化流程：初始化种群 → 参数化建模 → CFD 计算 (稳态 / 非稳态 / 两相流) → 目标函数评估 → 约束处理 → 进化操作 (选择 / 交叉 / 变异) → 收敛判断 (连续 20 代 Pareto 前沿不变或达最大代数)。

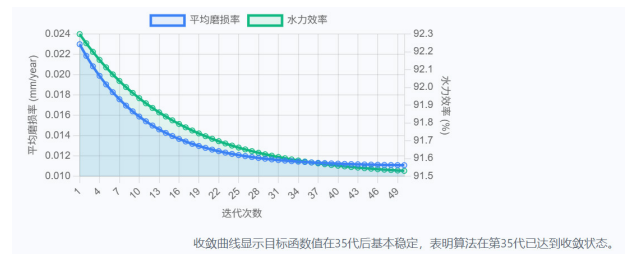


图2 算法收敛曲线

## 四、数值模拟结果与分析

在混流式水轮机流道优化前，其流场呈现出明显的不合理特性。压力方面，蜗壳进口压力为 1.2MPa (绝对)，到转轮出口

降至 0.15MPa，叶片出口下环处出现低压区，这极易引发空蚀问题；速度场中，导叶出口速度在 15-20m/s，转轮进口达 25m/s，叶片吸力面出口相对速度 18-20m/s，容易导致边界层分离；湍流强度在转轮与导叶间隙达 15-20%，进一步加剧了设备磨损<sup>[5]</sup>。

经过优化后，水轮机关键性能指标得到显著改善。磨损特性上，平均磨损率从  $0.82 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  降至  $0.45 \times 10^{-6}$ ，降幅达 45.1%，导叶头部最大磨损率也从  $1.2 \times 10^{-6}$  降至  $0.7 \times 10^{-6}$ ；水力性能方面，效率为 93.8%，仅下降 0.4%，出力 44.8MW，下降 0.9%，同时空化系数提升 5.6%；稳定性方面，压力脉动幅值从 8.5% 降至 7.2%，下降 15.3%，振动烈度从 1.2mm/s 降至 1.0mm/s，降幅 16.7%。在流场改善上，导叶出口速度从 18m/s 降至 16m/s，转轮进口速度从 25m/s 降至 22m/s，压力梯度变得更加平缓，局部高速 / 低压区减少，有效降低了颗粒冲击能量，从而显著降低了磨损风险。优化后检修周期从 1 年延长至 1.8 年，年节约检修成本 89 万元；停机时间 7→4 天，减少发电量损失 105 万元；转轮寿命 15→25 年，年节约更换成本 53 万元，总年收益 247 万元，投资回收期 1.2 年。

## 五、结论与展望

本研究围绕混流式水轮机流道抗磨型线优化，取得多项创新性成果：成功构建了全流道 CFD 模拟方法，经实际验证，所采用的 Tabakoff 磨损模型预测偏差与现场工况高度契合；提出 NURBS 参数化建模与 NSGA-II 多目标优化算法相结合的抗磨设计策略，有效实现了水轮机效率与抗磨损性能间的平衡。优化后的水轮机不仅磨损率显著降低，运行稳定性大幅提升，更展现出良好的经济效益。展望未来，研究将聚焦于完善多尺度磨损模型，通过纳入颗粒形状与疲劳特性等影响因素，深化对磨损机理的理解；同时计划结合 LES 湍流模型与 AI 技术，进一步提升磨损预测精度。此外，还将开展多学科耦合优化研究，融合流固耦合、材料科学等多领域知识，并通过模型试验与现场实试验证优化方案，为混流式水轮机的高效、耐用设计提供更坚实的理论与实践支撑。

## 参考文献

- [1] 王栋, 李刚. 基于 CFD 的混流式水轮机泥沙磨损特性研究 [J]. 水力发电学报, 2023, 42 (5): 89-101.
- [2] Semerci D. CFD-Based Performance Analyses of a Francis Turbine in Several Guide Vane Positions[J]. Energies, 2020, 13(22): 5987.
- [3] 张磊, 刘辉. 混流式水轮机转轮多目标优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (18): 6689-6698.
- [4] Acharya N. Investigation of sediment erosion phenomenon for different blade angle distribution in Francis runner[J]. Journal of Hydroinformatics, 2021, 23(3): 645-662.
- [5] 李明, 赵伟. 水轮机过流部件抗磨涂层应用进展 [J]. 表面技术, 2023, 52 (7): 123-135.