

# 基于多目标遗传算法的双向贯流式水轮机 正反工况联合优化设计

郑小波, 魏雅静, 郭鹏程\*, 王兆波

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安, 710048, Email: [guoyicheng@126.com](mailto:guoyicheng@126.com))

**摘要:** 为了实现双向贯流式水轮机发电工况与抽水工况的协同优化, 本文对双向贯流式机组转轮的多工况优化设计进行了初步探索。根据双向贯流式水泵水轮机的特点, 构建了集成几何参数化、网格自动划分、数值计算、应力计算以及整体优化的转轮优化设计系统。以转轮叶片七个翼型骨线的挠度参数、厚度变量以及进口偏移量等 21 个参数为优化变量, 以水力效率最大值、水压力的最小值以及结构应力最大值为优化目标函数, 对正向水轮机工况和反向水泵工况进行了联合优化。结果表明: 优化后叶片的效率和最低压力都有不同程度的提高, 结构最大应力极大降低, 应力分布更加均匀, 转轮总体性能得到提升, 为开展双向贯流式水轮机的多工况联合优化提供了参考。

**关键词:** 双向贯流式水轮机; 叶片参数化; 联合优化; S 型叶片

## 1 引言

能源应用和环境保护已成为全球关注的热点, 世界各国都在积极发展可再生的清洁能源, 其中海洋能尤其是潮汐资源最具开发潜力和工业价值<sup>[1]</sup>。潮汐发电作为潮汐能资源利用的主要形式, 开发规模不断趋于大型化<sup>[2]</sup>, 开发模式也由单库单向发电发展为效率更高的单库双向发电<sup>[3]</sup>。双向贯流式水泵水轮机是潮汐电站中使用的有效机型, 包括正反向发电、正反向抽水以及正反向泄水 6 种工况<sup>[4]</sup>。

国内外对于潮汐电站已经进行了相关的研究工作。郑璇对双向贯流式水轮机的正反向发电工况进行了性能预估<sup>[5]</sup>; 杨杰在对贯流式机组正反向水泵工况进行性能预测的同时对叶片进行改型<sup>[6]</sup>, 对于水轮机的多工况优化也进行了相关研究。朱国俊等引入 NSGA-II 算法作为寻优算法对贯流式叶片以及水轮机固定导叶开展了多学科优化设计<sup>[7-8]</sup>。郭鹏程等对

基金项目: 国家自然科学基金(51839010), 陕西省重点研发计划(2017ZDXM-GY-081), 陕西省教育厅服务地方专项计划(17JF019)

通讯作者: 郭鹏程, E-mail: [guoyicheng@126.com](mailto:guoyicheng@126.com).

水平轴海流能水轮机的转轮叶片以及水轮机活动导叶进行了多目标优化设计<sup>[9-10]</sup>。

以上研究仅针对抽水工况或者发电工况，运行工况单一，本文在此研究的基础上采用优化算法对抽水工况以及发电工况进行联合优化。主要方法为：应用 UG 的二次开发 GRIP 语言对转轮叶片进行参数化建模，在 ISIGHT 平台上搭建优化系统对正向水轮机工况以及反向水泵工况进行联合优化计算。

## 2 几何模型及基本参数

以某双向贯流式水泵水轮机模型为研究对象，在转轮前后分别设置前置导叶和后置导叶，前置导叶采用正曲率翼型，后置导叶采用对称翼型，其流道模型如图 1 所示。

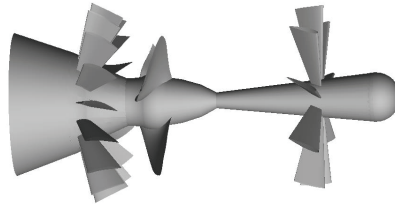


图 1 双侧导叶机组流道模型示意图

该水轮机的具体设计参数如表 1 所示。进行优化的两个工况为反向水泵工况（工况一）以及正向水轮机工况（工况二），两个工况的具体参数如表 2 所示。

| 表 1 机组模型参数 |      | 表 2 计算点工况                             |        |        |
|------------|------|---------------------------------------|--------|--------|
| 设计参数       | 数值   | 工况点                                   | 工况一    | 工况二    |
| 试验水头/m     | 7.73 | 桨叶角/°                                 | 22     | 22     |
| 转轮直径/m     | 0.34 | 前置导叶开度/°                              | 70     | 55     |
| 叶片数        | 3    | 后置导叶开度/°                              | 90     | 75     |
| 轮毂比        | 0.38 | 单位流量 $Q_{11} / (\text{m}^3/\text{s})$ | 1.673  | 1.532  |
| 前置导叶数      | 16   | 单位转速 $n_{11} / (\text{r/s})$          | 28.798 | 20.944 |
| 后置导叶数      | 9    | 水头/m                                  | 7.73   | 7.73   |

## 3 转轮叶片参数化建模

选取从上冠到下环 7 个截面翼型对转轮叶片进行参数化建模。采用四次贝塞尔曲线对翼型骨线进行拟合，其二维骨线的参数化示意图如图 2 所示。在参数化过程中需先将三维

翼型转换为平面的二维翼型。

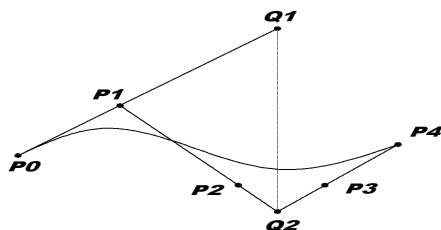


图2 转轮叶片参数化示意图

翼型的5个控制点为  $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ，根据贝塞尔曲线控制点反算方法，通过 Matlab 求解病态方程组，计算得到控制点坐标。为了减少控制变量，引入变量  $x_{01}$ 、 $x_{02}$ 、 $x_{03}$ ，通过控制变量  $x_{01}$ 、 $x_{02}$ 、 $x_{03}$  的值从而使得骨线的挠度发生变化，进而改变整个骨线。

$$\text{其中： } x_{01} = |P_0P_1| / |P_0Q_1|; \quad x_{02} = |P_1P_2| / |P_1Q_2|; \quad x_{03} = |P_4P_3| / |P_4Q_2|$$

通过上述方法得到参数化后的二维翼型骨线以后，将原始翼型的上下侧厚度分布规律分别叠加到各断面翼型骨线上，即可得到变化后产生的新二维翼型。将各二维翼型转换成三维翼型以后，通过造面即可产生新的转轮叶片。

## 4 网格划分及求解设置

### 4.1 流体域网格划分以及求解设置

本文流体域的网格是结构化网格，因此采用单周期计算。其网格划分如图3所示，包括前置导叶、转轮叶片和后置导叶。近壁面区域采用壁面函数法，在固壁面区域采用无滑移边界条件。湍流模型为 SST  $k-\omega$  模型。

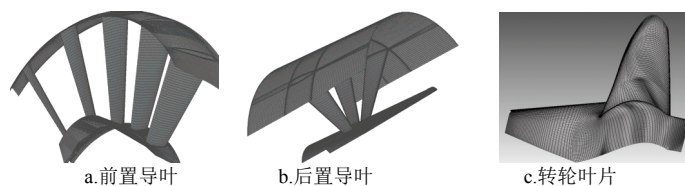


图3 过流部件网格划分

以工况二为例，对转轮区域进行网格无关性验证。由表3可知，在网格数为518820时，机组的效率趋于稳定，因此选定转轮区域的网格数为518820。

表3 网格无关性

| 网格数  | 201938 | 396215 | 518820 | 649304 | 795218 | 853605 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 效率/% | 78.0   | 78.09  | 78.15  | 78.16  | 78.15  | 78.16  |

#### 4.2 有限元网格划分以及求解设置

本文的有限元网格为四面体结构。网格单元格类型为 10 nodes 187，叶片材料为不锈钢，弹性模量和泊松比分别为 201GPa 和 0.3，材料质量密度为 7800kg/m<sup>3</sup>。在有限元计算过程中，对轮毂面施加固定约束，同时进行重力以及离心力的设置。

### 5 转轮优化系统建立

#### 5.1 权重系数的确定

在联合优化的过程中，对于各工况权重系数的确定尤为重要。为了方便研究，本文设定正向水轮机工况的重要性是反向水泵工况的 6 倍。本文采用的超传递近似法是基于特征向量法的基础上提出的，通过构建二元比较矩阵对各个指标之间的重要性进行模糊分析以及模糊评价来确定权重系数<sup>[11]</sup>。最终确定本文正向水轮机工况和反向水泵工况的目标权重系数分别为 0.8571，0.1429。

#### 5.2 转轮优化系统图模块的实现

本文的双向贯流式水泵水轮机正反工况联合优化设计主要是针对该转轮叶片在流体域中的水力性能以及固体域中的结构性能进行优化。优化的整体流程如图 4 所示。

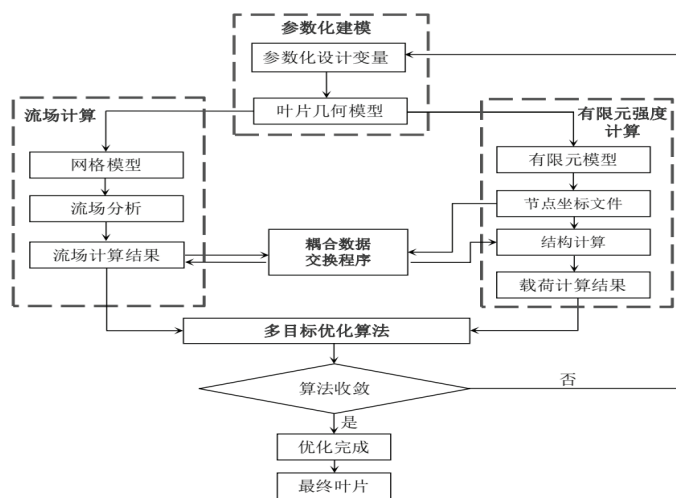


图 4 优化系统流程

本文的系统优化器建立在 Isight 平台上，采用了多目标遗传算法进行系统寻优，系统的优化目标为：

$$\begin{cases} X = (x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, \dots, x_{71}, x_{72}, x_{73}, P_0, T_{\max}) \\ Y = \text{Minp, Maxs, Effi} \\ \text{s.t. } \delta = (He_i - He) / He \leq 5\%, i = (1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (1)$$

## 6 优化结果分析

本文的优化计算选取的是两个工况效率都有显著提高且水压力以及静应力均有明显下降的一组解作为最优解。该最优解对应的目标性能函数值如表 4 所示。

表 4 优化前后的转轮综合性能对比

| 目标函数名         | 原始目标函数值 | 优化目标函数值 | 变化率     |
|---------------|---------|---------|---------|
| 总水头差/m        | 7.73    | 7.71    | 0.2%<5% |
| 转轮效率/%        | 83.79   | 84.29   | 0.597%↑ |
| 转轮叶片最大静应力/MPa | 27.719  | 24.760  | 10.67%↓ |
| 转轮叶片最小水压力/MPa | -0.6332 | -0.6259 | 1.153%↑ |

从表 4 中可以看出,与原始转轮相比,优化后的各加权目标函数均有所改善,转轮的效率提升了 0.597%,转轮叶片表面压力提升了 1.153%,转轮叶片最大静应力降低了 10.67%。目标函数的改变表明:优化后,转轮在这两种工况下运行的综合性能相比原始转轮都有了一定程度的提升。

## 7 结论

本文通过建立转轮优化系统,考虑正向水轮机工况和反向水泵工况,以水力性能和强度为优化目标,对双向贯流式水轮机转轮进行了多工况多目标联合优化设计,结论如下。

(1) 结合贝塞尔曲线参数化方法,基于 UG 二次开发平台对叶片几何进行参数化,实现了对几何的控制。通过对转轮叶片进行参数化建模,验证了这一方法的可行性。

(2) 对转轮的水力性能和结构性能进行了联合优化,建立了基于水力性能与结构性能联合优化的多工况优化系统。

(3) 优化结果表明,水轮机的整体效率、叶片表面最低静压有所提高,转轮最大静应力显著降低,水轮机的整体水力性能和结构性能均得到改善。

## 参考文献

- 1 王曰平. 潮汐发电机组[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.
- 2 高杨, 李玉超, 张红涛. 潮汐发电技术的展望[J]. 国网技术学院报, 2016, 19(06):60-62+73.
- 3 Rafael M F, Segen F E. Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions [J]. Renewable Energy.2009, ( 34):1151-1157.
- 4 于波, 肖慧民. 水轮机原理与运行[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.
- 5 郑璇. 基于计算流体动力学的双向贯流式水轮机的水力设计[D]. 西安理工大学, 2013

- 6 杨杰.双向贯流式水泵水轮机泵工况特性研究[D].西安理工大学.2018
- 7 朱国俊,郭鹏程,罗兴铤,等.贯流式水轮机转轮叶片的多学科优化设计[J].农业工程学报,2014,30(02):47-55.
- 8 朱国俊,郭鹏程,罗兴铤.基于 NSGA-II 的水轮机固定导叶多学科优化设计[J].水力发电学报,2013,32(06):256-261.
- 9 郭鹏程,朱国俊,罗兴铤.水平轴海流能水轮机的多目标优化设计[J].排灌机械工程学报,2013,31(09):778-782.
- 10 罗兴铤,郭鹏程,朱国俊,等.基于 NSGA-II 算法的水轮机活动导叶多目标优化设计[J].排灌机械工程学报,2010,28(05):369-373.
- 11 黄德才,李秉焱.AHP 中群决策的几何平均超传递近似法[J].控制与决策, 2012, 27(5): 797-800.

## **Joint optimization design of bidirectional tubular turbine positive and negative condition based on multi-objective genetic algorithm**

ZHENG Xiao-bo, WEI Ya-jing, GUO Peng-cheng\*, WANG Zhao-bo

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, E-mail: [guoyicheng@126.com](mailto:guoyicheng@126.com))

**Abstract:** In order to realize the synergistic optimization of the bi-directional tubular turbine power generation and pumping conditions, this paper makes a preliminary exploration on the multi-case optimization design of the two-way tubular unit runner. According to the characteristics of the bidirectional tubular pump turbine, this paper constructs a runner optimization design system with integrated geometric parameterization, grid automatic division, numerical calculation, stress calculation and overall optimization. Taking 21 parameters such as deflection parameters, thickness variables and inlet offset of the seven airfoil bone lines of the runner blade as the optimization variables, the maximum hydraulic efficiency, the minimum water pressure and the maximum structural stress are used as the optimization objective function. Joint optimization of forward turbine operating conditions and reverse pump operating conditions. The results show that the optimized efficiency and minimum pressure of the blade are improved to different extents, the maximum stress of the structure is greatly reduced, the stress distribution is more uniform, and the overall performance of the runner is improved, which is jointly optimized for the development of the two-way tubular turbine.

**Key words:** Bidirectional tubular turbine; Blade parameterization; Joint optimization; S-shaped blades.