

# 导叶角度对轴流泵高效区运行范围的影响

王 丽<sup>1</sup>, 施 伟<sup>2</sup>, 刘连建<sup>1</sup>, 郭 瑞<sup>1</sup>, 沈媛媛<sup>3</sup>, 石丽建<sup>4</sup>

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210000;  
3. 淮安市防汛物资管理中心, 江苏 淮安 223001; 4. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 为了研究导叶角度对轴流泵高效区运行范围的影响, 采用CFD和模型试验对不同导叶角度下轴流泵水力性能进行数值模拟计算, 并且进行内流场比较分析。结果表明, 通过改变导叶角度后, 优化导叶在设计和大流量工况下的内部流场更加均匀合理, 导叶优化后的轴流泵最高效率为87.53%, 与初始导叶方案相比, 配优化导叶的轴流泵高效区运行范围扩宽了近1.36倍。最后通过模型试验对比分析, 验证了数值计算的可靠性。研究结果可为提高轴流泵高效区的运行范围提供参考。

**关键词:** 轴流泵; 导叶角度; 高效区; 数值模拟; 模型试验

**中图分类号:** TV675 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2023)05-0017-0004

## Influence of the angle of the guide vane on the operating range of the high efficiency zone of the axial flow pump

WANG Li<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>2</sup>, LIU Lianjian<sup>1</sup>, GUO Rui<sup>1</sup>, SHEN Yuanyuan<sup>3</sup>, SHI Lijian<sup>4</sup>

(1. Huai'an Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Huai'an 223001, China;  
2. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210000, China;  
3. Huai'an Flood Control Materials Management Center, Huai'an 223001, China;  
4. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the angle of the guide vane on the operating range of the high efficiency zone of an axial flow pump, CFD and model test are used to carry out numerical simulation calculations of an axial flow pump with different guide vane angles and to carry out a comparative analysis of the internal flow field. The results show that after changing the angle of the guide vane, the internal flow field of the optimized guide vane is more uniform and reasonable under the design and high flow conditions, and the maximum efficiency of the axial flow pump after the optimization of the guide vane is 87.53%. Compared to the initial guide vane solution, the operating range of the axial flow pump with optimized guide vane is extended by nearly 1.36 times in the high efficiency zone. Finally, the reliability is verified by model test comparison. The research results can provide a reference for improving the operating range of high efficiency areas of axial flow pumps.

**Key words:** axial flow pump; guide vane angle; high efficiency zone; numerical simulation; model test

收稿日期: 2023-03-13

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021012); 江苏省南水北调科技研发项目(JSNSBD202201); 扬州市科技计划项目市校合作专项(YZ2022178)

作者简介: 王丽(1981—), 女, 高级工程师, 主要从事水利工程设计工作。E-mail: 50442537@qq.com

通信作者: 石丽建(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水泵及水泵站相关研究工作。E-mail: shilijian@yzu.edu.cn

轴流泵流量大扬程低,被广泛应用于灌溉排涝、大型泵站以及南水北调大流域调水等方面。随着CFD软件的开发和应用,对于轴流泵的数值模拟研究相较于传统的实验方法更加方便节时,并且在很多方面都取得了很好的效果<sup>[1-3]</sup>。在水泵实际运行当中,不仅希望其具有较高的效率,而且要求其高效区范围较宽,汽蚀性能好。石丽建等<sup>[4]</sup>分析了不同导叶扫掠角度对轴流泵段能量特性的影响,得出了导叶前掠 $16^\circ$ 整流效果最好以及导叶损失最小。孙奥冉等<sup>[5]</sup>研究了基于CFD的导叶进口角对轴流泵水力性能的影响,得出了导叶对泵段性能的影响取决于其自身能量回收能力。本文将采用CFD数值模拟与模型试验相结合的方法,研究不同导叶角度对轴流泵高效区的影响,为以后的水泵导叶研究设计来提高轴流泵高效区范围提供参考。

## 1 数值计算

### 1.1 计算模型

轴流泵段模型见图1。轴流泵设计流量 $Q$ 为360 L/s,转速 $n$ 为1 450 r/min,进水直管直径为350 mm,叶轮直径为300 mm,轮毂比为0.4,叶顶间隙设为0.15 mm,叶轮采用ZM60A水力模型,叶轮叶片数为4片,导叶叶片数为7片。进水直管、导水锥、出水弯管段均采用NG建模,叶轮和导叶采用Turbo-Grid建模。主要研究导叶角度对轴流泵高效区的影响,研究结果可为提高轴流泵高效区范围提供参考。

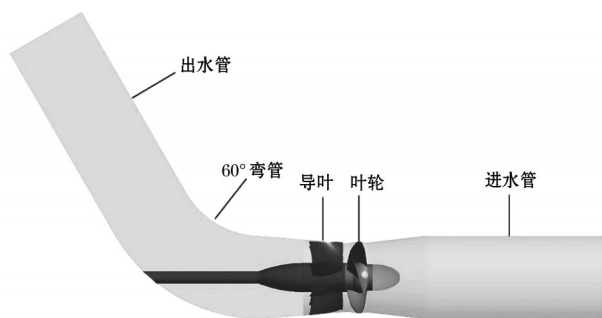


图1 轴流泵数值计算模型

### 1.2 网格划分及无关性分析

叶轮和导叶采用Turbo-Grid建模,并进行结构化网格划分,经检验网格质量良好,满足计算要求。进水管、60°弯管、出水管采用ICEM CFD进行结构化网格划分,网格质量都在0.4以上,质量良好。顺轮网格、导叶网格见图2。

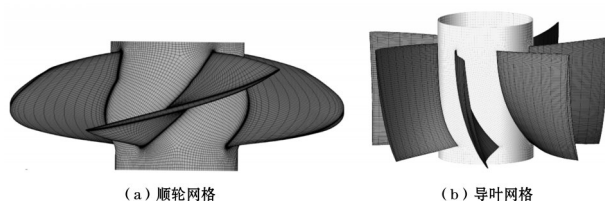


图2 主要计算部件网格

验证网格无关性的目的在于减小乃至消除网格数量及大小对计算结果的影响来保证数值计算的合理性。本次选取设计工况下不同叶轮网格数量对轴流泵段效率的影响进行网格数量无关性分析,共采用7个不同网格数量方案,计算结果见图3。由图3可以看出,当单通道网格数量从7.5万增加到13.75万以后,轴流泵段的效率明显变小,当进一步增加网格数量,轴流泵的效率基本没变化。因此本文选取叶轮网格总数为55万左右,其中导叶单通道网格在13万左右,整个泵段网格总数在190万以上。

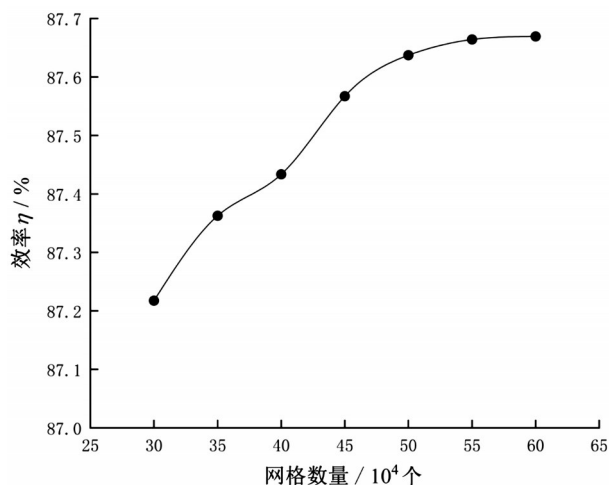


图3 网格数量无关性

### 1.3 边界条件

基于雷诺时均N-S方程,采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对轴流泵内部流动进行三维数值模拟计算。将进水段进口边界条件设置为总压力进口(1个标准大气压),出水段出口边界条件设置为质量流量出口,设计流量为360 L/s,轴流泵内流体为连续性流体,叶轮为旋转域,其转速为1 450 r/min,其他为静止域。轮毂表面、轮缘表面、叶片表面等固壁表面采用no-slip壁面,壁面光滑,近壁区域采用标准的壁面函数边界条件。各过流部件的交界面之间均采用GGI网格拼接技术。进水段的导水锥出口与叶轮

进口、叶轮出口与导叶进口的动静交界面均采用速度平均的 Stage 交界面模型,其余部分均采用 None 交界面类型。求解模式为 High Resolution,自动时间控制,时标因子为 1.0,残差(RMS)设置为  $10^{-5}$ 。

2 CFD 计算结果分析

本次对于导叶角度的研究基于初始导叶和优化导叶。优化导叶是在初始导叶的基础上通过只改变导叶进口角来实现,优化前后不改变导叶的叶栅稠密度,同时保证导叶出口角均为  $90^{\circ}$ 。优化前后导叶的主要参数见表 1。初始和优化导叶模型对

比见图 4。  
2.1 数值模拟对比  
初始导叶与优化导叶的数值模拟结果对比见图 5。从图 5 可以看出,设计工况下,初始导叶下泵段的最高效率为 87.62%,优化导叶的最高效率为 87.53%,二者效率差别不大。本次将轴流泵最高效率点下降 5%的两点所对应的流量点之间的范围定为轴流泵的高效区。导叶优化后,轴流泵高效区的范围相较于初始导叶拓宽近 1.36 倍。这说明了通过只改变轴流泵导叶进口角是可以提高轴流泵高效区的运行范围。

表 1 初始导叶与优化导叶进口角

导叶	进口角(轮毂—轮缘)/(°)										
初始导叶	40.11	43.71	48.27	52.79	56.34	59.07	61.13	62.73	63.36	63.88	63.00
优化导叶	50.11	51.71	54.27	56.79	58.34	59.07	61.53	63.53	64.56	65.48	65.00

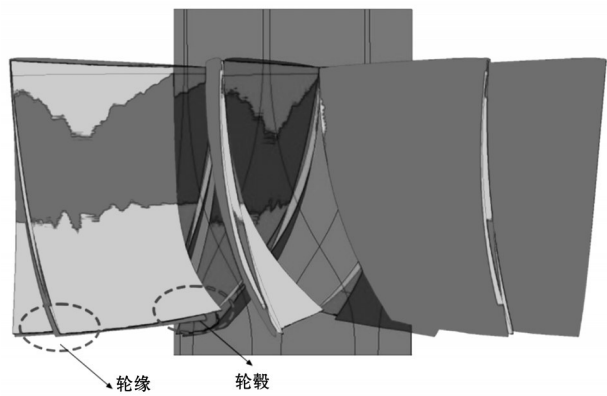


图 4 初始导叶与优化导叶对比

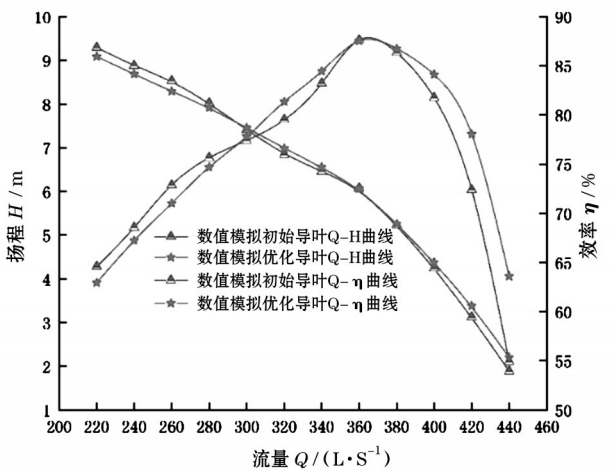


图 5 初始导叶与优化导叶数值模拟结果对比

2.2 内流场对比

选取 3 种典型流量工况(小流量  $Q=300$  L/S、设计流量  $Q=360$  L/S、大流量  $Q=400$  L/S),对初始导叶和优化后的导叶进行内流场分析。取出导叶体内顺流线方向的流场( $X=0$ )见图 6。

从图 6 可以看出,在小流量工况下初始导叶和优化导叶体内部流场很差,流速分布不均匀,这将导致导叶体内部产生的水力损失很大。另外可以明显看出优化后的导叶内部产生的脱流经过导叶体中部的调整,水流流向出口的流场逐渐变好。在设计流量及大流量工况下,初始导叶与优化后的导叶体内流线顺直,没有出现回流和旋涡的发生,流场较好,相比初始导叶,优化后的导叶体内部流场流速分布更加合理。

3 模型试验验证

3.1 轴流泵段试验

将轴流泵进出水管、 $60^{\circ}$ 弯管、叶轮、初始导叶和优化导叶等加工出来进行轴流泵段试验研究。轴流泵段试验在扬州大学测试中心高精度水力机械试验台上进行,效率测试系统综合误差为  $\pm 0.39\%$ ,满足国家标准 GB/T 18149—2017 和中华人民共和国水利部行业标准 SL140—2006 精度要求。高精度水力机械试验台系统见图 7。初始导叶和优化导叶的模型见图 8。

3.2 模型泵段试验结果分析

模型试验获得了轴流泵的初始导叶和优化导叶的性能数据,见图 9。从图 9 可以看出,在设计工

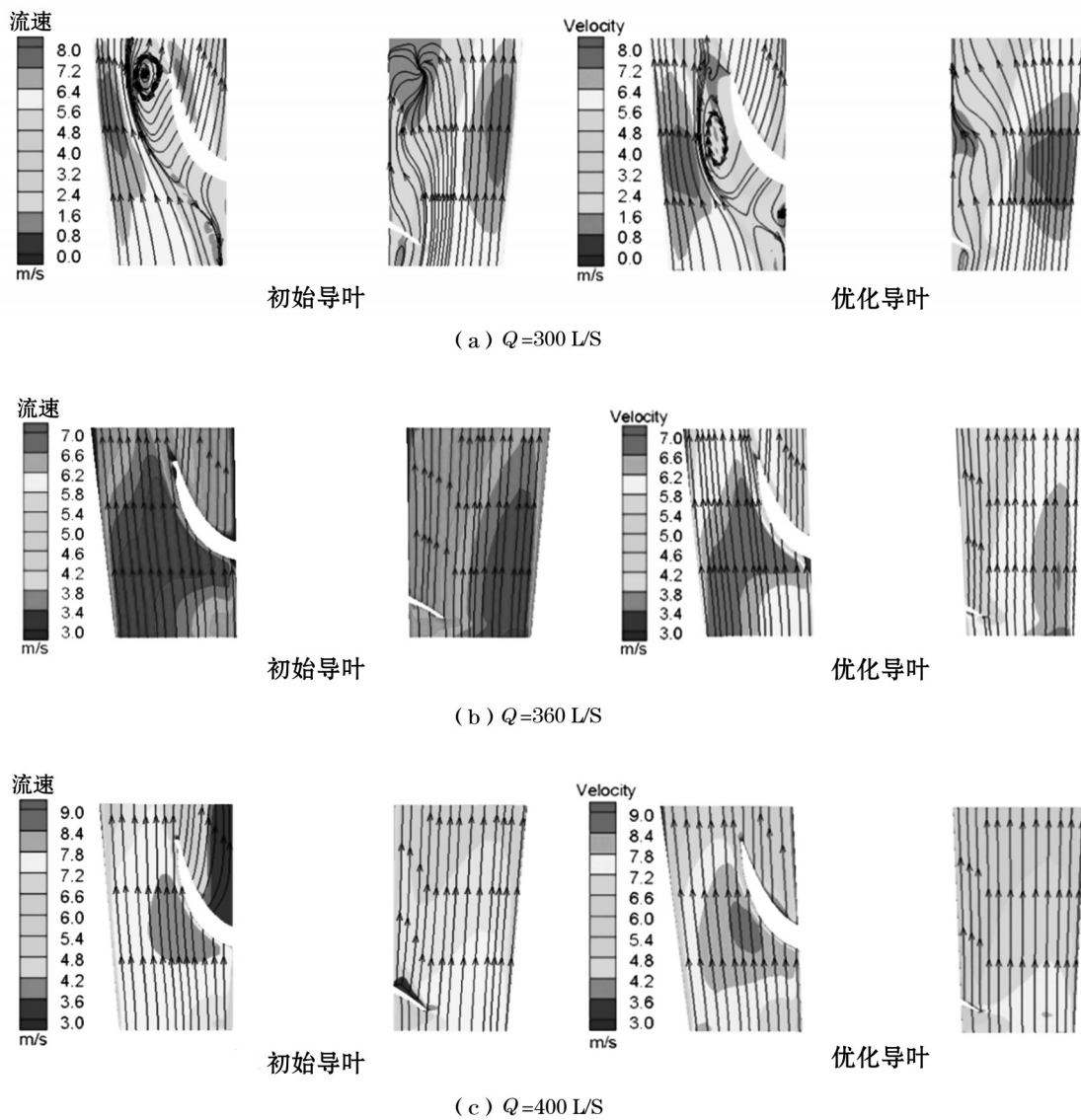


图6 初始导叶与优化导叶内流场

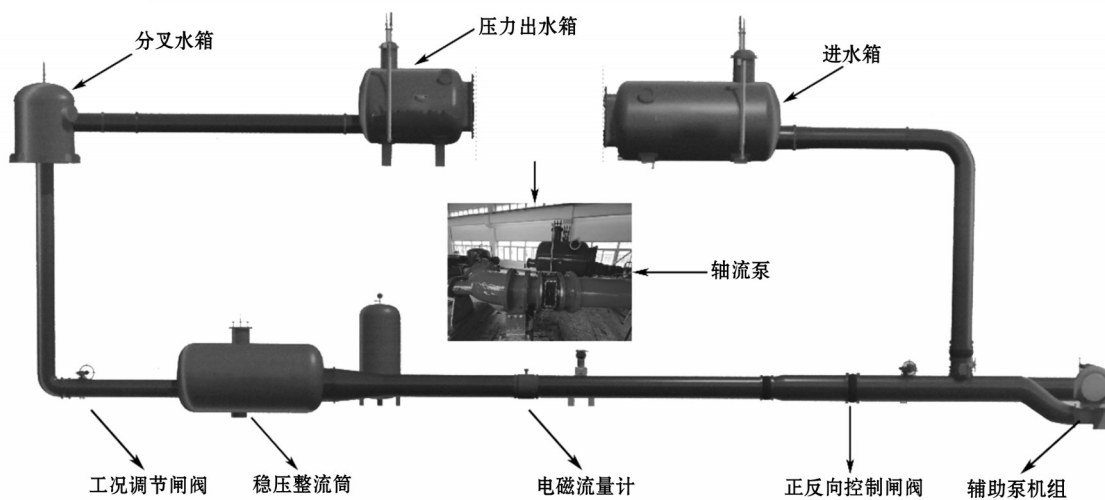


图7 高精度水力机械试验台

(下转第29页)



施工快捷简单,方便脱模,可以极大程度地避免出现返工或后期修饰造成的工期浪费和成本增加。

## 5 结 语

在普通模板内侧粘贴一层透水模板布,在混凝土浇筑振捣时能够有效将表层混凝土水分和起泡由内部向表面迁移,降低表层数毫米水胶比,从而提高混凝土结构表面强度、密实性等能力,从而提高外观质量。另外,通过试点工程应用得知,使用透水模板布提高了混凝土抗碳化能力,增加了混凝土抗侵蚀的能力,延长混凝土结构使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 朱炳喜,夏祥林,王小勇,等. 混凝土表层致密化技术在水利工程试点应用[J]. 粉煤灰综合利用,2016(4):11-13.
- [2] 朱炳喜,周金山,彭志芳,等. 混凝土表层致密化技术提

高混凝土耐久性试验研究与试点应用[C]//江苏省水利学会. 第七届江苏水论坛论文集,南京:江苏省水利学会,2016:167-171.

- [3] 郭毅,曹佳. 透水模板布在水工混凝土施工中的应用[C]//2012年12月建筑科技与管理学术交流会论文集,北京:《建筑科技与管理》组委会,2018.
- [4] 王豪. 浅谈整体式桁架模板在桥墩安装施工中的质量控制[J]. 现代企业文化,2017(2):192.
- [5] 张润芝. 墩柱模板布施工工艺[J]. 城市建设理论研究(电子版),2015,5(31):1422-1423.
- [6] 任轶,钱缘雨. 新河东闸工程现状调查分析[J]. 珠江水运,2021(7):58-59.
- [7] 汪胜义,姜天华,张秀成,等. 双重劣化机制下高性能混凝土抗氯离子渗透性研究[J]. 交通科技,2021(5):149-152.
- [8] 傅立容. 透水模板在盐田港区三期工程中的应用研究[J]. 水运工程,2004(10):36-39.

(上接第20页)



初始导叶

优化导叶

图8 初始导叶与优化导叶实体模型对比

况下,初始导叶下轴流泵的最高效率为84.52%,优化导叶下轴流泵的最高效率为84.75%,二者基本吻合。另外可以看出,优化后导叶的高效区范围是初始导叶的1.13倍,初始导叶和优化导叶的性能曲线变化趋势基本一致,这进一步说明了数值模拟与模型试验的可靠性。

## 4 结 语

(1)根据轴流泵的数值模拟和模型试验对比结果,导叶的进口角度增大后,轴流泵扬程整体有所增大,高效区范围变宽,但轴流泵最高运行效率基本不变。

(2)在小流量工况下,由于脱流原因初始导叶和优化导叶内部流场均存在一定的紊流,在设计和大流量工况下导叶内部流场较好,相比初始导叶,优化后导叶内部流速分布更加合理。

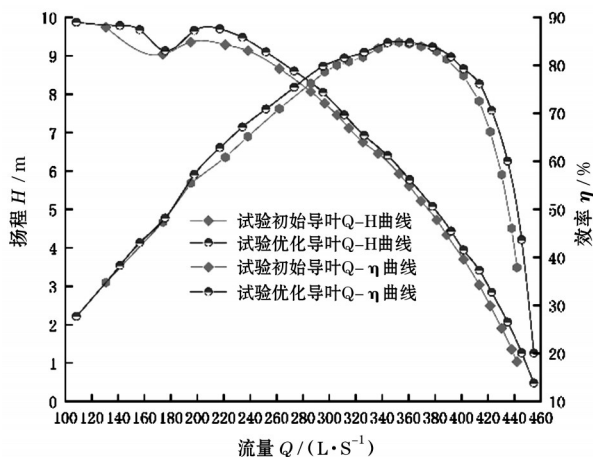


图9 初始导叶与优化导叶模型试验结果对比

### 参考文献:

- [1] 罗欣,郑源,冯俊. 基于CFD的轴流泵后置导叶水力性能分析[J]. 水电能源科学,2014,32(3):188-191.
- [2] 朱国俊,冯建军,戈振国,等. 后置导叶对潮汐双向贯流式机组性能的影响[J]. 水力发电学报,2021,40(6):12-20.
- [3] 任向轩,汤方平,石丽建,等. 导叶叶片数对轴流泵水力性能的影响[J]. 中国农村水利水电,2020(9):75-79,83.
- [4] 石丽建,汤方平,周捍珑,等. 不同导叶叶片掠角下轴流泵段水力特性分析及试验[J]. 农业工程学报,2015,31(14):90-95.
- [5] 孙奥冉,郑源,杨春霞. 基于CFD的导叶进口角对轴流泵水力性能的影响[J]. 水电能源科学,2017,35(3):170-173,63.