

# 基于轮毂比的潜水轴流泵优化设计研究

陈斌<sup>1,2</sup>, 李贞彬<sup>1</sup>, 张华<sup>1,3</sup>, 马洋<sup>1</sup>, 顾玉中<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 化工机械研究所, 安徽 合肥 230009; 2. 南京信息工程大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044; 3. 蓝深集团股份有限公司, 江苏 南京 211500)

**摘要:** 针对潜水轴流泵进行水力性能优化设计,在满足设计要求的基础上,实现其叶轮水力效率的提高。以比转速  $n_s = 1\ 000$  的轴流泵为研究对象,借助 STAR CCM + 商用仿真平台,以 N-S 方程为基本控制方程,湍流模型为标准  $k-\varepsilon$  双方程,分别对 5 种轮毂比的潜水轴流泵模型在 3 个流量工况下进行数值模拟计算,确定该轴流泵的最佳轮毂比,并对优化前后模型进行水力性能对比分析。结果表明:由原始轮毂比 0.40 缩小至最优轮毂比 0.38 后,流道过流面积增大,轴流泵叶轮的水力性能得到明显提升,满足设计工况要求,叶轮扬程从 4.18 m 提高到 4.27 m,水力效率从 90.44% 提高到 91.46%,同时高效区明显扩大。从内部流动特性分析得出,优化后叶轮内部流线分布均匀,无脱流、旋涡等不良流态现象,流体损失较小。

**关键词:** 潜水轴流泵; 轮毂比; 叶轮; 水力性能; 优化设计; 数值模拟

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0091-05

## Optimum Design of Submersible Axial Flow Pump Based on Hub/Tip Ratio

CHEN Bin<sup>1,2</sup>, LI Zhen-bin<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>1,3</sup>, MA Yang<sup>1</sup>, GU Yu-zhong<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Chemical Machinery, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Lanshen Group Co. Ltd., Nanjing 211500, China)

**Abstract:** The hydraulic performance optimum design was carried out to improve the hydraulic efficiency of the submersible axial flow pump, in addition to meeting the design requirements. Taking the axial flow pump with specific speed  $n_s = 1\ 000$  as the study object, with the aid of STAR CCM + commercial simulation platform, taking the N-S equation as the basic governing equation and the standard  $k-\varepsilon$  dual equation as the turbulence model, the submersible axial flow pump models were numerically simulated with five hub/tip ratios under three flow conditions. The results of external characteristics were analyzed to determine the optimum hub/tip ratio of the axial flow pump. The comparison of computation results before and after the optimization was made. The comparison showed that when the hub/tip ratio was reduced from original 0.40 to 0.38, the flow area was increased and the hydraulic performance of the impeller was significantly improved, which all satisfied the design requirements. The lift of the impeller was increased from 4.18 m to 4.27 m, the hydraulic efficiency was increased from 90.44% to 91.46%, and the high efficiency area was substantially enlarged. From the analysis of the internal flow characteristics, it was concluded that the streamlines were uniformly distributed, no adverse flow phenomena such as decurrent or vortices were observed, and the fluid loss was low.

**Key words:** submersible axial flow pump; hub/tip ratio; impeller; hydraulic performance; optimum design; numerical simulation

轮毂比是轴流泵的重要设计参数之一,不仅对内部流场有重要影响,对轴流泵的结构强度也有影响。石丽建等<sup>[1-2]</sup>基于CFD数值模拟的方法分析了轮毂比对轴流泵水力性能的影响,得出增大轮毂比,扬程-性能曲线斜率会增大,轴流泵效率越高,但其气蚀性能会变差。杨敬江<sup>[3]</sup>从理论上分析了不同轮毂比对轴流泵叶轮水力性能的影响,认为减小轮毂比可以减小水力摩擦损失、增加一定的过流面积并提高抗气蚀性能,但过分减小轮毂比会增加叶片扭曲,造成紊流、二次脱流等不良流态,降低轴流泵效率。关醒凡<sup>[4]</sup>给出了自主设计的轴流式叶轮的轮毂比与比转数的统计结果,不同的比转数对应着合适的轮毂比值。张毅等<sup>[5]</sup>基于数值模拟手段研究了不同轮毂比的两个水力模型对轴流泵装置水力性能的影响,分析了不同轮毂比的轴流泵外特性及内流场,发现轮毂比较大的轴流泵水力模型效率更高、气蚀性能较差、高效区向小流量偏移。

目前大部分关于轴流泵优化设计的文献<sup>[6-8]</sup>主要通过叶片数、翼型、导叶因素等提高水力性能,研究轮毂比来改善水力性能的文献较少。笔者采用数值模拟与试验相结合的方法,分别对5种轮毂比的潜水轴流泵模型在3个流量工况下进行数值模拟计算,确定该轴流泵的最佳轮毂比,并具体分析优化前后的内流场,验证其优化结果的合理性。基于轮毂比的轴流泵优化设计研究,目的在于保证叶轮比转数不变的同时,使得在设计工况下叶轮效率最优。

## 1 数值模拟及试验验证

### 1.1 计算模型的建立

本研究参考南水北调轴流泵模型参数,设计流量  $Q = 1\,450\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H = 3.6\text{ m}$ ,比转数  $n_s = 1\,000$ ,叶轮轮缘直径为  $300\text{ mm}$ ,轮毂直径为  $120\text{ mm}$ ,轮毂比  $d$  为  $0.40$ ,叶片数为  $3$ ,导叶数为  $5$ ,转速  $n = 1\,450\text{ r/min}$ 。

叶轮和导叶均采用流线法设计,将叶片沿径向均分成5个翼型断面(记为I、II、III、IV和V),每个翼型所在直径依次为  $120$ 、 $165$ 、 $210$ 、 $255$  和  $300\text{ mm}$ 。根据设计参数计算出5个翼型的轴向高度、翼型安放角、叶轮及导叶进出口安放角等。表1所示为叶轮及导叶主要参数。其中  $D$  为翼型直径; $l/t$  为叶栅稠密度; $\delta_{\max}$  为叶片最大厚度; $\beta_1$  为进口安放角; $\beta_2$  为出口安放角; $\varphi$  为翼型安放角; $L_z$  为翼型轴向高度; $\alpha_1$  为导叶进口安放角; $l$  为弦长。

表1 叶轮及导叶主要参数

Tab. 1 Main parameters of impeller and guide vane

项目	翼型截面				
	I	II	III	IV	V
$D/\text{mm}$	108	156	204	252	300
$l/t$	0.93	0.81	0.73	0.66	0.60
$\delta_{\max}/\text{mm}$	10	9	8	7	6
$\beta_1/(\circ)$	39.03	30.68	25.28	21.62	19.05
$\beta_2/(\circ)$	66.12	43.04	31.65	25.08	20.82
$\varphi/(\circ)$	67.83	77.77	77.01	72.71	67.69
$L_z/\text{mm}$	92.81	83.95	76.52	69.86	64.26
$\alpha_1/(\circ)$	44.34	52.97	59.18	63.75	67.21
$l/\text{mm}$	129.96	129.00	129.51	130.79	132.50

### 1.2 网格划分及无关性验证

潜水轴流泵计算域包括进水流道、叶轮、导叶及出水流道。本研究网格划分采用多面体网格,并对局部结构进行适当加密。图1给出了计算域全局网格、壁面边界层网格、局部加密网格。

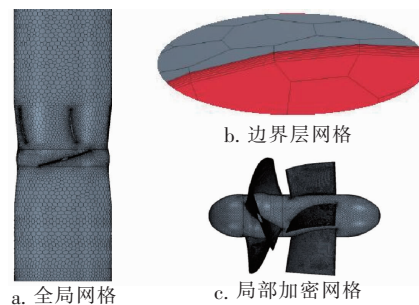


图1 网格划分

Fig. 1 Mesh generation

一般情况下,网格越细密,其功率、扬程及效率等越准确,但细密到一定程度,计算结果基本上趋于稳定。本研究中网格无关性验证是基于相同的三维模型,改变节点间距,使得网格总数不同。通过CCM+软件对轴流泵进行网格划分,通过分析网格数对轴流泵效率 $\eta$ 的影响,确定计算域网格总数在125万左右,其中进水流道网格数为31万、叶轮计算域网格数为54万、出水流道网格数为40万。

### 1.3 控制方程及边界条件

本次数值计算采用N-S基本控制方程和标准  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型。设定了静-动、动-静两个交界面,分别对应的是叶轮前端与叶轮水体交界面及叶轮水体与叶轮后端交界面。

进口采用速度进口边界条件;出口采用压力出流边界条件,出口压力为  $101\,325\text{ Pa}$ ;壁面边界采用无滑移壁面边界条件。叶轮区域选用旋转坐标系,

其旋转速度为叶轮转速。

#### 1.4 模型的试验验证

模拟试验在蓝深多功能试验台上(见图2)进行,试验台为立式封闭循环系统。外特性试验所用仪器及设备主要有智能型电磁流量计、扭矩仪、压力变送器、流量调节阀、信息采集箱、电控操作台等。

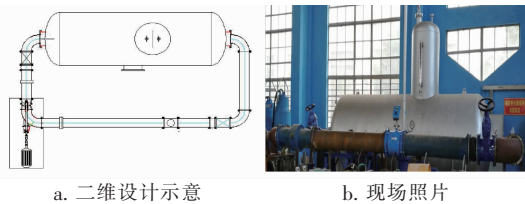


图2 多功能试验台

Fig.2 Multifunctional test bench

方案中管道直径为 300 mm,弯头采用 90°标准弯头。试验泵两端安装压力变送器,用于测量进出口的压力值;安装有小电机,通过微机型转矩转速仪测出轴流泵实际转速以及转矩;在直管道安装智能电磁流量计,统计流量值。通过调节出口阀门开度来改变管路流量,流量调节范围为 1 154 ~ 1 732 m<sup>3</sup>/h,分成 9 个测量工况点,在每个工况稳定运行 30 s 后,进行进出口压力、流量及轴功率等信号的采集,待采集完成后进行下一个工况点的测量,最终得到试验泵的数据报告。外特性曲线对比见图3。

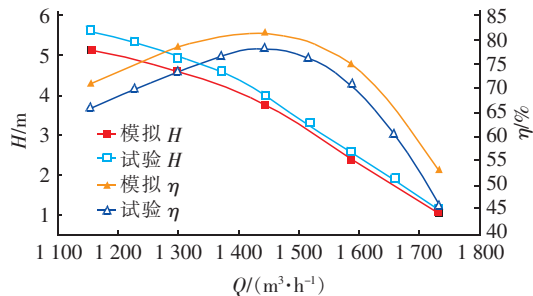


图3 外特性曲线对比

Fig.3 Comparison of external characteristic curve

由图3分析可得:试验扬程曲线与模拟扬程曲线拟合度较高,设计流量工况下扬程误差在 5% 左右。在小流量工况下,两者扬程值相差较大,但随着流量的增加,两者的扬程曲线逐渐接近。试验效率与模拟效率变化趋势相同,两者效率最高点对应的流量值基本一致,为 1 450 m<sup>3</sup>/h。需要说明的是,因为外特性试验考虑到机械损失以及管路损失等,所以模拟计算效率值较高,符合实际情况。综上直接验证了数值模拟计算的正确性,因此可以借助数值

模拟手段对优化方案研究做进一步分析。

## 2 轴流泵优化分析

### 2.1 优化方案的确定

主要研究叶轮处轮毂比对其水力性能的影响,故下述轮毂比均是叶轮处轮毂比。选取 5 组轮毂比进行研究,保证叶轮外径不变,通过调整轮毂直径(108、114、120、126、132 mm)来改变轮毂比(0.36、0.38、0.40、0.42、0.44)。为避免其他因素的影响,数值模拟不考虑导叶,且进出口水段均不做改动。图4为5种不同方案的叶轮段透视图。

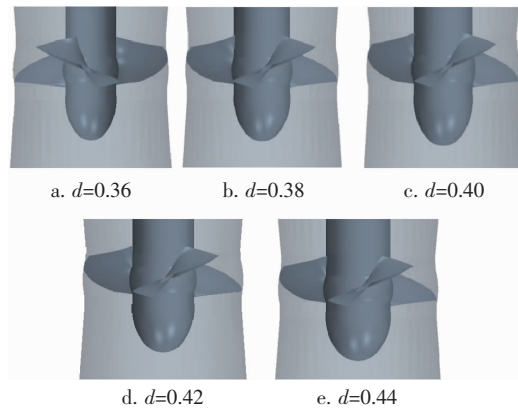
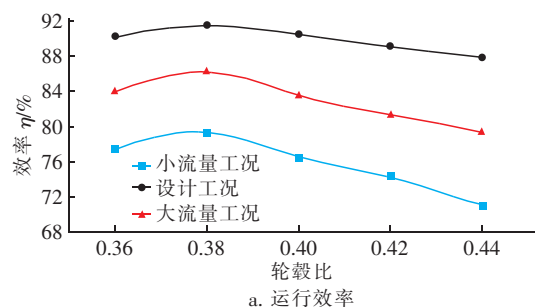


图4 不同轮毂比下叶轮段透视图

Fig.4 Perspective view of impeller segments with different hub/tip ratios

### 2.2 外特性对比

本次数值模拟主要通过小流量工况( $0.8Q_{BEP}$ )、设计工况( $1.0Q_{BEP}$ )和大流量工况( $1.2Q_{BEP}$ )3个流量工况进行统计分析,结果见图5。可知,当轮毂比为 0.38 时,3 个工况下的运行效率都最大;当轮毂比由 0.38 增加至 0.44 时,效率均下降,小流量工况下降最明显。轮毂比为 0.38 时的扬程比轮毂比为 0.40 时的扬程高,轮毂比从 0.40 增至 0.44 时,扬程也随之升高,3 条扬程曲线的变化趋势相同。3 个流量工况下,轴功率均随着轮毂比的增大而增大,轮毂比为 0.44 时轴功率最大。



a. 运行效率

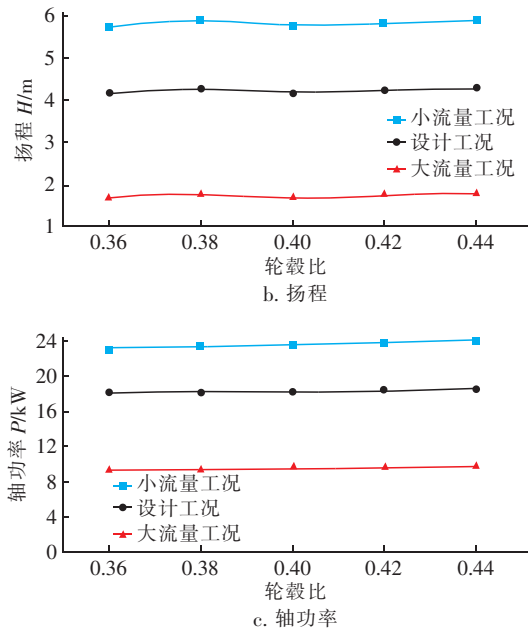


图5 不同工况的水力性能

Fig. 5 Hydraulic performance under different working conditions

综上所述可得:减小轴流泵的轮毂比,可增大过流面积,有助于叶片做功,从而提高了轴流泵运行效率,但过分减小轮毂比时,会增加叶片的扭曲,造成叶轮内液体流动状态紊乱,导致轴流泵效率下降。

### 2.3 内流场对比

外特性研究主要针对轴流泵5种轮毂比方案下3个流量工况的稳态数值模拟计算结果进行比较,通过对运行效率、扬程和轴功率的对比分析,发现相较于其他4个轮毂比而言,轮毂比  $d=0.38$  时各工况下运行效率最高,做功效果最好,所以选定0.38为该潜水轴流泵模型的最优轮毂比。下面主要分析轮毂比为0.38和0.40时叶轮域的内流场特性。

图6为设计流量下轮毂比优化前后的叶轮表面流线。可以看出:缩小轮毂比后,叶片压力面出口边靠近轮毂处流线变得均匀分布,减少了紊流等不良状态的发生;叶片吸力面流态明显好转,没有出现漩涡和脱流现象。

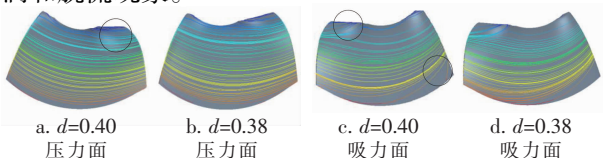


图6 叶片表面流线

Fig. 6 Streamline of blade surface

图7为叶轮表面湍动能分布情况。可以看出:两个模型均为轮毂处湍动能较小,轮缘处湍动能较大。湍动能高值区均在压力面与吸力面进口的圆角过渡边上,此区域因流体撞击频率较高导致流场紊乱,流动损失比较严重,但高端动能区域所占面积积极小。优化模型(轮毂比为0.38)的总体湍动能较小,说明流体能量消耗较小。

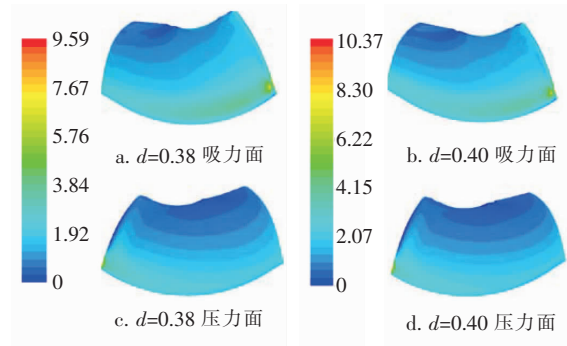


图7 叶片表面湍动能分布

Fig. 7 Turbulent kinetic energy distribution of blade surface

图8为叶轮表面压力分布情况。可以看出:压力最低值出现在叶片吸力面进口区域附近,压力最高值出现在叶片压力面进口区域附近。而优化模型(轮毂比为0.38)的压力分布梯度小,区域相对均匀,且工作面压差较小,说明流速更加均匀,做功效果较好。

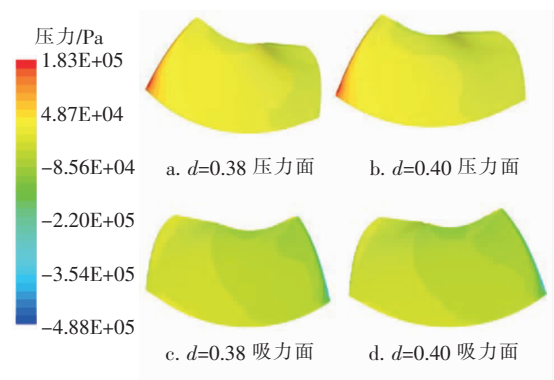


图8 叶片表面压力分布

Fig. 8 Pressure distribution on blade surface

### 2.4 优化结果

图9为轴流泵优化前后水力性能对比结果。分析可得:轴流泵优化后,在设计工况下叶轮扬程从4.18 m提高到4.27 m,叶轮水力效率从90.44%提高到91.46%,均满足轴流泵设计要求。优化模型高效区扩大,表明优化模型在多流量工况下的水力性能得到了提升。

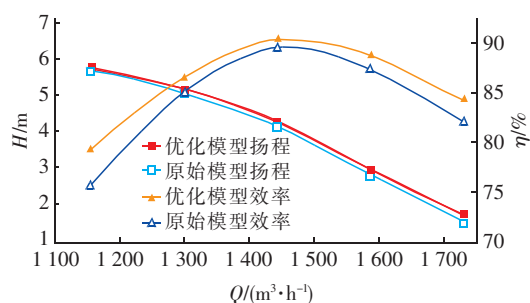


图 9 优化前后轴流泵水力性能对比

Fig.9 Comparison of hydraulic performance of axial flow pump before and after optimization

### 3 结论

① 采用 STAR CCM + 软件对 5 种轮毂比的潜水轴流泵模型在 3 个流量工况下进行定常流动计算,得到 15 个计算工况的运行效率、扬程、轴功率变化情况。发现一定范围内缩小轴流泵叶轮轮毂比可提高运行效率和扬程,由此确定 0.38 为该潜水轴流泵的最优轮毂比。

② 潜水轴流泵优化后,增大了流道过流面积,增强了叶片做功能力,且叶轮内部流线均匀分布,流态平稳,并扩大了轴流泵的高效区;在设计工况下,叶轮扬程从 4.18 m 提高到了 4.27 m,水力效率从 90.44% 提高到了 91.46%,均满足设计要求。

### 参考文献:

- [1] 石丽建,汤方平,谢荣盛,等. 轮毂比对轴流式叶轮水力性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(12):1045-1050.  
Shi Lijian, Tang Fangping, Xie Rongsheng, et al. Effects of hub/tip ratio on hydraulic performance of axial-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(12): 1045-1050 (in Chinese).
- [2] 石丽建,汤方平,谢荣盛,等. 基于 CFD 计算的轴流泵改型设计和效果[J]. 农业工程学报,2015,31(4):97-102.  
Shi Lijian, Tang Fangping, Xie Rongsheng, et al. Design of axial flow pump modification and its effect based on CFD calculation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 97-102 (in Chinese).
- [3] 杨敬江. 轴流泵水力模型设计方法与数值模拟研究[D]. 镇江:江苏大学,2008.  
Yang Jingjiang. Studies on Hydraulic Design Method and Numerical Simulation of Axial Flow Pump Model[D].

Zhenjiang: Jiangsu University, 2008 (in Chinese).

- [4] 关醒凡. 轴流泵和斜流泵:水力模型设计试验及工程应用[M]. 北京:中国宇航出版社,2008.  
Guan Xingfan. Axial and Oblique Flow Pumps: Hydraulic Model Design Test and Engineering Application [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2008 (in Chinese).
- [5] 张毅,胡俊峰,石丽建. 轮毂比改变的轴流泵装置数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2017(7):144-148.  
Zhang Yi, Hu Junfeng, Shi Lijian. Axial-flow pump modification research based on pump device simulation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(7): 144-148 (in Chinese).
- [6] Duquesne P, Maciel Y, Deschênes C. Investigation of flow separation in a diffuser of a bulb turbine[J]. Journal of Fluids Engineering, 2015. DOI:10.1115/1.4031254.
- [7] 陶然,肖若富,杨魏. 基于遗传算法的轴流泵优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(7):573-579.  
Tao Ran, Xiao Ruofu, Yang Wei. Optimization design for axial flow pump based on genetic algorithm [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(7): 573-579 (in Chinese).
- [8] 周济人,汤方平,石丽建,等. 基于 CFD 的轴流泵针对性设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(8):42-47.  
Zhou Jiren, Tang Fangping, Shi Lijian, et al. Specific design and experiment of axial-flow pump based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 42-47 (in Chinese).



作者简介:陈斌(1971-),男,江苏靖江人,博士,研究员,主要从事环保设备和流体机械研究。

E-mail: chenbin21cn@21.cn

收稿日期:2019-04-12