

The Optimal Design and Numerical Simulation of the Swept-Back Blade Sludge Return Pump

Bin Chen¹, Yang Ma¹, Zhenxing Sun¹, Jialin Yang², Qiuqing Jin³

¹Institute of Chemical Machinery of School of Mechanical Engineer, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

²Lanshen Group Co. Ltd., Nanjing Jiangsu

³Nanjing Hegong Fluid Technology Co. Ltd., Nanjing Jiangsu

Email: chenbin21cn@21.com

Received: Nov. 2nd, 2018; accepted: Nov. 20th, 2018; published: Nov. 27th, 2018

Abstract

In view of the return sludge pump's winding problem in the sewage, this paper designs three sweepback angles of blades: 20°, 40°, 60°; Aiming at the problem of low efficiency of the unit, two types of guide vanes: segmental type and twisted type, are redesigned. This paper compared and analyzed the performance of the pump before and after optimization separately from the external characteristics and the internal flow field distribution based on RNG $k-\varepsilon$ turbulent model and SIMPLE algorithm. Numerical simulation results show that with the increase of the blade swept angle, the lift and shaft power falls and as the Angle increases, so does the drop; the efficiency curve of 20° back swept blade is smooth and higher than that of the prototype pump. The modification of the distorted guide blade has greatly improved the lift and efficiency of the reflux pump.

Keywords

Sludge Reflux Pump, Back Swept Blade, Guide Vane Design

后掠式叶轮污泥回流泵优化设计与数值模拟

陈 斌¹, 马 洋¹, 孙振兴¹, 杨加林², 金秋景³

¹合肥工业大学机械工程学院化工机械研究所, 安徽 合肥

²蓝深集团股份有限公司, 江苏 南京

³南京合工流体科技有限公司, 江苏 南京

Email: chenbin21cn@21.com

收稿日期: 2018年11月2日; 录用日期: 2018年11月20日; 发布日期: 2018年11月27日

文章引用: 陈斌, 马洋, 孙振兴, 杨加林, 金秋景. 后掠式叶轮污泥回流泵的优化设计与数值模拟[J]. 流体动力学, 2018, 6(4): 85-92. DOI: 10.12677/ijfd.2018.64011

摘要

针对污泥回流泵在污水中缠绕问题,设计了 20° 、 40° 、 60° 三种后掠角的叶片;针对机组效率低下的问题,重新设计了节段式、扭曲式两种导叶。基于RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型与SIMPLE算法分别从外特性和内部流场分布方面对比分析了优化前后水泵性能情况。数值模拟结果表明:随着叶片后掠角的增加,污泥回流泵扬程与轴功率均下降,随着后掠角度变大,下降幅度也变大;后掠角为 20° 的污泥回流泵效率曲线较平稳,高于原型泵。扭曲导叶的改型使得污泥回流泵的扬程和效率都得到了大幅提高。

关键词

污泥回流泵, 后掠叶片, 导叶改型

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

本污泥回流泵主要应用于市政工程、污水处理和环保工程等领域,其输送介质中含有大量悬浮物、纤维等,易造成污泥回流泵发生叶轮缠绕现象,导致电机负载增加,泵的效率降低甚至停机。

污泥回流泵的缠绕主要发生在叶轮进口边,因此可考虑后掠式叶片设计。谷文涛等[1]研究了后掠叶片在搅拌器上的应用,发现后掠叶片具有良好的抗缠绕性能和传质性能。夏永忠等[2]将后掠式叶轮应用在推流器上,发现后掠式叶片具有防缠绕的特性。王小云等[3]对污水泵叶片进行后掠式优化,发现后掠叶片能够提高污水处理泵的运行效率。郭龙凯等[4]对不同前缘后掠角叶片的离心压气机进行研究,发现掠角越小,叶片表面压差越小,流动更稳定。王峰[5]用弯掠叶片技术设计风力机叶片,发现在低风速工况下,弯掠叶片可以提高叶片输出功率,减少轴向推力。郎涛等[6]等采用固液两相流模拟了不同后掠角度叶片上固相分布情况,发现在设计工况下, 60° 后掠叶片上固相分布比 40° 少。国外学者 Larwood S M 等[7]发现后掠叶片可以让风机运行更平稳,减少了叶片动态载荷。Chattot J 等[8]分析了扭曲和后掠叶片对风机性能的影响,认为叶片前弯和后掠对风力机性能有着不同影响。但国内外学者对污泥回流泵后掠式叶片研究较少。

另外,污泥回流泵属于24小时连续运转设备,耗能大,提高其效率有助于行业发展。而实际上污泥回流泵导叶型式通常为直导叶,这种型式的导叶降低了叶轮出口液体能量的回收,降低了整体性能,应进行优化设计。

因此本文主要探讨后掠式叶片设计方法并研究后掠角度对污泥回流泵的影响,同时对导叶进行优化设计,提高机组效率,为污泥回流泵的设计提供指导和参考价值。

2. 物理模型与数值计算

2.1. 物理模型及网格

本本文以一比转速 $n_s = 1600$ 的污泥回流泵为原型泵,其基本结构如图1所示,设计参数如表1所示。采用多面体网格和棱柱层网格的混合划分策略,并对叶轮局部加密,在网格无关性检查的基础上生

成最终网格。取泵扬程作为判断标准，网格数分别取 100 万、160 万、220 万、250 万和 280 万，对五种方案在设计工况下进行模拟计算。结果如图 2 所示，当网格大于 220 万时扬程基本趋于稳定。确定最终取用整体网格数量为 2,213,752。网格如图 3 所示。

Table 1. Hydraulic parameters of designed

表 1. 设计参数

参数	数值	参数	数值
流量 Q (m^3/h)	3000	叶轮直径 D_2 (m)	0.612
扬程 H (m)	1.15	出水管直径 φ (m)	0.618
转速 n (r/min)	480	叶轮叶片数 Z_1	3
比转速 n_s	1600	导叶叶片数 Z_2	4

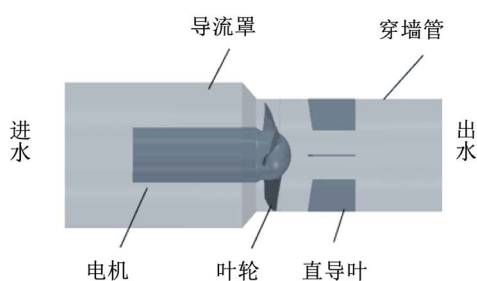


Figure 1. Three-dimensional model of sludge return pump

图 1. 污泥流泵三维模型图

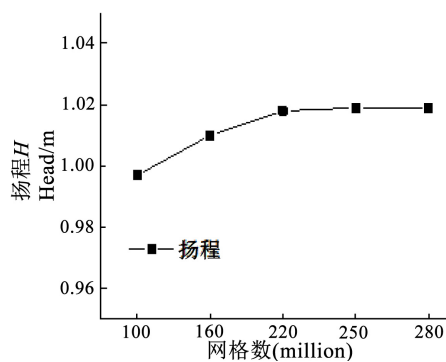


Figure 2. Grid independence check

图 2. 网格无关性检验

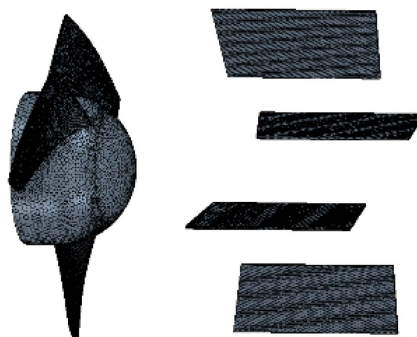


Figure 3. Meshes of hydraulic components

图 3. 水力部件网格图

2.2. 控制方程

污泥回流泵数值模拟中, 流体介质为清水, 为不可压缩单相流流体。不考虑温度影响, 只需考虑质量守恒方程和动量守恒方程。下式是上述两个方程的通用形式[9]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}\rho u\varphi = \text{div}\Gamma\text{grad}\varphi + S$$

其展开形式为:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial\rho u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial\rho v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial\rho w\varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + S$$

式中 ρ 是密度, t 是时间, φ 为通用变量, 可代表 u 、 v 、 w 、 t 等求解变量, u 、 v 、 w 分别是速度矢量在 x 、 y 、 z 轴上的速度分量, Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

2.3. 湍流模型和边界条件

湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对污泥回流泵内复杂流场进行定常数值模拟。进口条件设置为速度进口, 以适应不同流量需求, 出口条件设置为压力出口。叶轮部分为旋转区域, 可设定不同转速, 进口段和出水段设置为静止坐标系, 动静区域之间用交界面连接。判定模拟结果收敛的标准是所有残差小于 10^{-5} 。

3. 数值计算及结果分析

外特性预测值与实验结果对比

为了验证湍流模型和网格的适用性, 选择了 5 个工况点进行数值模拟计算, 并与污泥回流泵样机外特性试验结果比较分析, 图 4 为污泥回流泵外特性的实验曲线和数值模拟曲线的对比图, 可以看出, 两者流量 - 扬程曲线的变化趋势较为一致, 表明所采用的网格规模和数值模拟方法正确可行。数值计算结果略高于试验结果, 其主要原因为: 叶片焊接的不一致性; 叶顶间隙的不一致性; 叶片表面粗糙度影响; CFD 中为均匀来流, 试验中受水池影响。

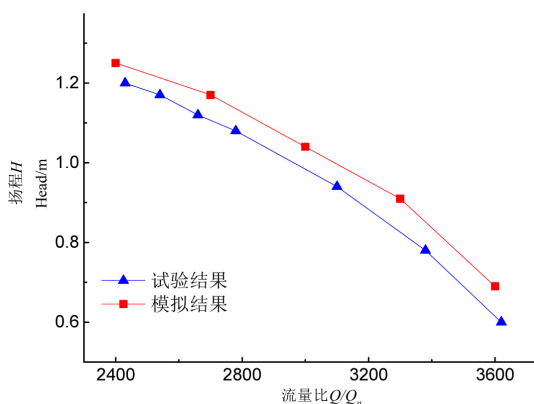


Figure 4. Comparison of simulation and experimental values of the prototype
图 4. 模拟值与实验值对比

4. 后掠式污泥回流泵叶片优化设计

4.1. 后掠设计方法

通过调研, 发现后掠式叶片设计具有良好的抗缠绕能力, 因此将本方法应用至污泥回流泵叶轮的设计

计, 具体方法为: 在原有叶片水力模型的基础上, 保持叶片轮毂位置不变, 叶片轮缘沿圆周向叶轮旋转反方向扫掠某一角度, 中间各个截面按线性规律沿圆周向后扫掠移动适宜的角度。在叶轮旋转作用下, 叶片进出口边均向后延伸, 可使缠绕钩挂在叶轮上的杂物易于沿叶片边缘向轮缘移动, 减少缠绕发生的概率。叶片后掠示意图如图 5 所示。

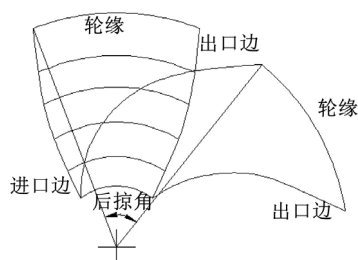
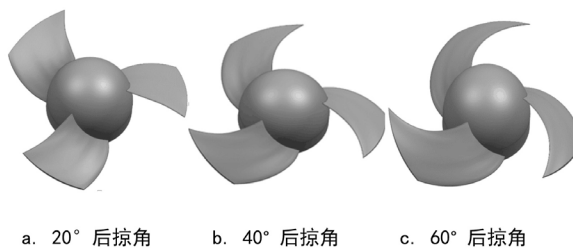


Figure 5. Back swept angle of impeller
图 5. 叶片后掠示意图

4.2. 数值模拟结果

本文共设计了三种后掠角叶轮, 分别为 20° 、 40° 、 60° (如图 6 所示)。采用设计工况点流量 $Q_d = 3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 作为 $1.0 Q$, 对流量分别为 $0.8 Q$ 、 $0.9 Q$ 、 $1.0 Q$ 、 $1.1 Q$ 、 $1.2 Q$ 的五个工况点进行数值模拟, 外特性结果如图 7 所示。



a. 20° 后掠角 b. 40° 后掠角 c. 60° 后掠角

Figure 6. Three-dimensional model of impellers
图 6. 叶轮三维模型图

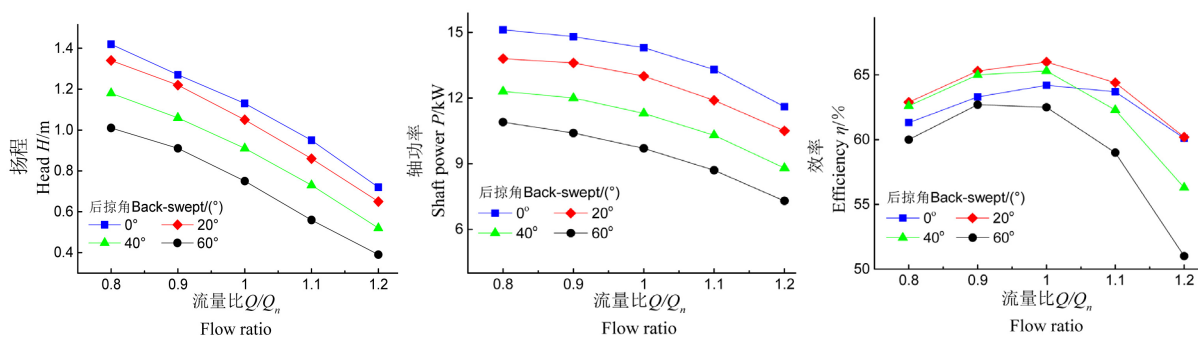


Figure 7. Performance curves of different back-swept impellers
图 7. 不同后掠叶片的性能曲线

整体上看, 后掠叶片对污泥回流泵外特性的影响颇为明显, 随着叶片后掠角度增大, 扬程和轴功率逐渐降低, 且降低幅度随后掠角增加而变大。从后掠叶片对污泥回流泵效率影响来看, 后掠角度为 20° 的污泥回流泵效率在各个流量下均高于原型叶片; 后掠角为 60° 的污泥回流泵却低于原型泵的效率; 后掠

角度为 40° 的泵效率在小流量区域高于原型叶片效率，随着流量增加效率下降较快，又低于原型叶片泵的效率。

5. 导叶改型对污泥回流泵性能影响

在获得抗缠绕叶轮的基础上，进一步对机组进行优化设计。针对污泥回流泵通常为直导叶的情况，重新设计了两种导叶：节段式和扭曲式导叶。

5.1. 直导叶及改型导叶

本节分析导叶 0.5 半径处圆柱截面的流动情况，图 8 从左向右依次为原型直导叶、节段式和扭曲式导叶。导叶厚度为 5 mm，节段式导叶是将直导叶下部沿中线翻折 20° 得到。扭曲式导叶则是按照流线法设计出来，进口安放角 $\beta_1 = 70^\circ$ ，出口安放角 $\beta_2 = 90^\circ$ 。

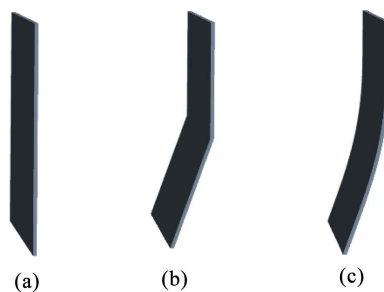


Figure 8. Three-dimensional model of guide vane, (a) Straight, (b) sectional, (c) distorted
图 8. 导叶模型图, (a) 直导叶, (b) 节段导叶, (c) 扭曲导叶

5.2. 三种导叶流线图

在设计工况下进行数值模拟，得到导叶 0.5 半径处圆柱截面的流线图，如图 9 所示。直导叶进口安放角为 90° ，来流对导叶的冲击较大，导叶工作面出现流动分离现象，范围较大并且产生回流，导叶尾部脱流现象严重。

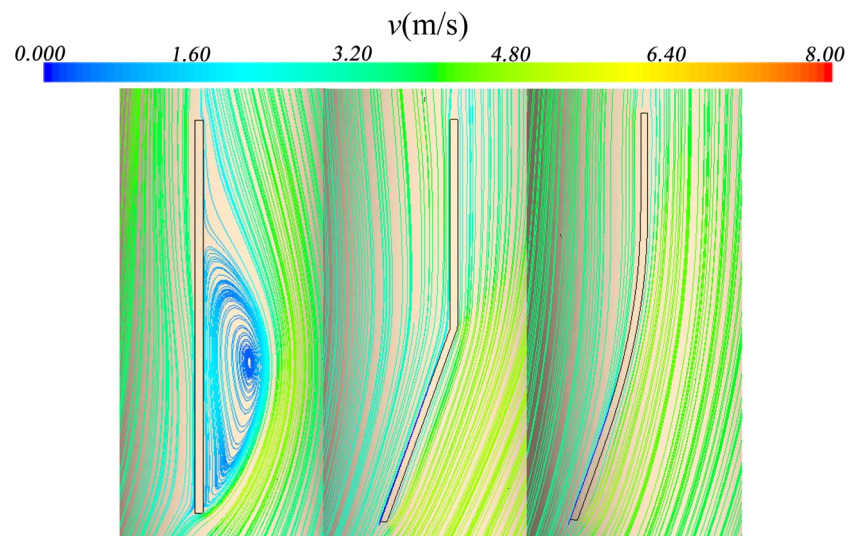


Figure 9. Streamline graph of three guide vanes
图 9. 三种导叶的流线图

节段式导叶内液流的流动情况得到明显改善。来流对导叶的进口边的冲击得到改善，液流在导叶中部位置流动比较均匀，在导叶形状突变处出现小范围低速区，工作面液流无流动分离的现象。尾部有轻微扰流发生。

扭曲导叶内流动情况比较好，液流顺着导叶流动，未发生冲击和脱流现象。

5.3. 导叶改型对外特性影响

分别在 $0.8 Q$ 、 $0.9 Q$ 、 $1.0 Q$ 、 $1.1 Q$ 、 $1.2 Q$ 五个工况下对 3 种导叶方案的模型进行数值模拟，得到污泥回流泵外特性曲线，如图 10 所示。由图可知，导叶改型不影响污泥回流泵的外特性走势，污泥回流泵设计工况点仍是最优工况点；在设计工况下，节段式导叶污泥回流泵的扬程比原型扬程提高了 7.5%，效率提高了 7.9%；扭曲导叶污泥回流泵扬程和效率又比节段式导叶污泥回流泵提高了 1.3%；轴功基本保持不变。

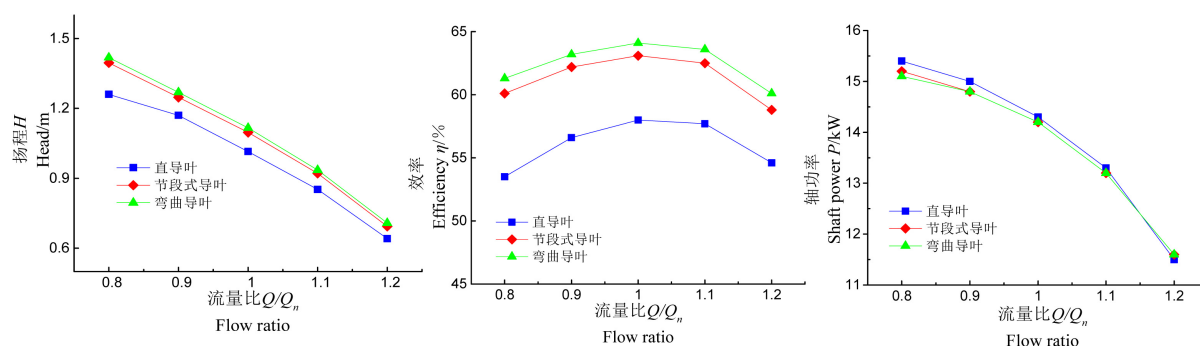


Figure 10. Comparison of characteristic curves of different guide vane schemes

图 10. 不同导叶方案的特性曲线比较

6. 结论

1) 叶片的后掠降低了污泥回流泵的扬程与轴功率，并且随着叶片后掠角度的增大，扬程与轴功率下降幅度更大。

2) 随着叶片后掠角的变化，污泥回流泵效率曲线变化并不规律；后掠角为 20° 的污泥回流泵效率在各个流量下均高于原型泵。

3) 扭曲导叶方案提高了污泥回流泵的扬程和效率，并且能较好的改善导叶内液流的流动情况，提高污泥回流泵整体性能。

参考文献

- [1] 谷文涛, 张纯德, 戴文权. 三叶后掠式搅拌器的设计开发及其应用[J]. 聚氯乙烯, 1998(2): 1-6.
- [2] 夏永忠, 高峰, 吴进, 等. 潜水搅拌机(推流器)结构优化[J]. 泰州职业技术学院学报, 2011, 11(5): 71-73.
- [3] 王小云. 后掠式双叶污水泵优化设计与试验研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(12): 110.
- [4] 郭龙凯, 刘艳明, 崔庆, 等. 叶片前缘不同后掠角对离心压气机气动性能的影响[J]. 热能动力工程, 2016, 31(4): 45-50.
- [5] 王峰. 低风速风力机弯掠叶片优化及 CFD 分析[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2017: 49-60.
- [6] 郎涛, 施卫东, 邢津, 等. 相同外特性的后掠式轴流泵固液两相分布与缠绕试验[J]. 农业工程学报, 2015(23): 42-50.
- [7] Larwood, S.M. and Zuteck, M.D. (2006) Swept Wind Turbine Blade Aeroelastic Modeling for Loads and Dynamic

Behavior. American Wind Energy Association Windpower, Pittsburgh.

- [8] Chattot, J. (2009) Effects of Blade Tip Modifications on Wind Turbine Performance Using Vortex Model. *Computers & Fluids*, **38**, 1405-1410. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2008.01.022>
- [9] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijfd@hanspub.org