

45°斜式轴流泵装置的流动特性分析与实验

王亮¹, 陈松山¹, 周正富², 李天景¹

(1.扬州大学 能源与动力工程学院, 江苏 扬州 225009; 2.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 基于三维不可压缩流体的雷诺平均 N-S 方程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 采用 CFX 软件计算了对某一 45°斜式轴流泵装置在额定转速下 210 L/s ~ 370 L/s 流量范围内多个工况点的内部。分析了进、出水流道的流动特性, 重点研究了旋转叶轮对进、出水流道内流场及水力性能的影响, 预测了泵装置的水力性能。通过计算得出泵装置的水力性能, 并与泵装置模型试验结果比较, 表明斜式轴流泵在低扬程泵站中具有较优的性能特性。研究结果对低扬程泵站的水力设计具有重要的参考价值。

关键词: 斜式轴流泵; 水力特性; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TV131.4; TV675

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)05-0149-04

Analysis and Test for Flow Characteristics of 45° Slanting Axial Flow Pumping System

WANG Liang¹, CHEN Song-shan¹, ZHOU Zheng-fu², LI Tian-jing¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: The internal flow characteristic of a certain 45° slanting axial flow pumping system is analyzed by CFX software and based on the Reynolds averaged N-S equations and RNG $k-\epsilon$ turbulence model. Focusing on the flow characteristic of inlet and outlet passages, the impact of rotating impeller on the flow pattern and hydraulic performance of passages is analyzed based on the calculation of different operating conditions with the flow rates range 210 L/s ~ 370 L/s at the rated rotating speed. A good performance of the low water-head slanting axial pumping system is achieved by the turbulent numerical simulation and model test. The research results have an important reference for the hydraulic optimization design about low water-head pumping stations.

Keywords: slanting axial flow pump; hydraulic performance; numerical simulation; model test

0 引言

在大型排灌泵站中轴流泵装置因流量大、扬程低等特点得到了广泛应用。其中以立式和卧式这两种装置形式居多,斜式轴流泵在国内的发展时间短、装置的可靠性差,尤其因轴承的寿命等问题而较少应用^[1]。但在较低扬程的排灌泵站中,斜式轴流泵相比于立式和卧式有着投资少、安装检修方便、水力性能较好等优点^[2]。随着轴承加工工艺的提高及斜轴泵装置可靠性的改善,使得斜式轴流泵的应用问题得到解决^[3-4]。如上海太浦河、内蒙古红圪卜^[5-6]等大型斜式轴流泵站的成功可靠运行表明斜

式轴流泵装置在低扬程排灌泵站中有着广泛的应用前景^[7-11]。

本文应用数值模拟及装置模型试验的方法,利用 CFX 商业软件对某一 45°斜式轴流泵装置的内流场进行研究,通过数值计算分析其流动特性和能量特性,并用模型试验进行验证。

该泵站采用单机单流道布置方案,其进水流道为 45°斜式肘形进水流道,出水流道为直管式渐扩出水流道。泵站主要参数为:设计净扬程 2.4 m,最高净扬程 2.8 m,最低净扬程 0.41 m,单泵设计流量 16.7 m³/s。装设 6 台斜式轴流泵机组,配套功率 630 kW,转速 167 r/min 电机,总装机容量 6 × 630 kW

= 3 780 kW。

1 计算模型

斜式轴流泵装置由肘形进水流道、45°倾斜泵段、45°弯管及直管式出水流道组成。模型装置的尺寸是由原型装置按相似理论换算得出,主要参数包括:叶轮直径 $D = 0.3 \text{ m}$,叶轮转速 $1\ 224 \text{ r/min}$,叶轮叶片数为 3 片,导叶叶片数为 5 片,流量范围 $210 \text{ L/s} \sim 360 \text{ L/s}$ 。利用三维造型软件 Pro/E 创建装置模型,并对模型进行结构化网格的剖分,最后用 CFX 软件对模型泵装置从进口到出口的全流域进行计算。计算模型如图 1 所示。

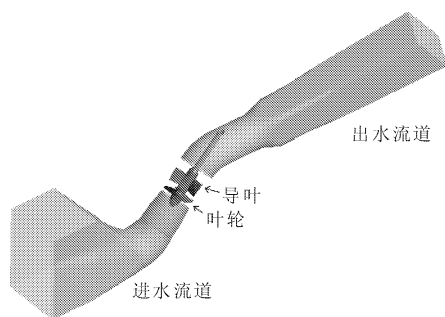


图 1 计算区域

2 计算方法

2.1 控制方程

泵装置内的流动为不可压缩湍流流动,可用连续性方程和雷诺时均 $N-S$ 方程描述。湍流模型选用能够较好地适应弯曲壁面和强旋流的 RNG $k-\epsilon$ 模型^[12]。控制方程采用有限体积法离散,其扩散项为中心差分格式,对流项为二阶迎风格式。

2.2 边界条件

(1) 进口边界条件:为使水流进入进水流道时已充分发展,进口边界设在进水流道前一直段处,进口边界条件设为总压进口(total pressure inlet),相对压力设为 0 Pa 。

(2) 出口边界条件:出口边界设置在出口流道出口处,并设置边界条件为质量出口(mass flow outlet),给定出口边界质量流量。

(3) 固壁条件:固体壁面均采用无滑移边界条件(no slip),近壁区采用壁面函数法进行处理。

(4) 自由表面:假设自由水面波动不大,且忽略水面所受到的外界切应力作用及大气热交换,则自由表面对速度和湍动能均可视为对称平面处理。

3 计算结果与分析

3.1 进水流道的内流场特性分析

进水流道内的水流流态直接影响到水泵叶轮进口处的流速分布和压强分布。与此同时,旋转叶轮对进水流道内部流场尤其是流道出口的流场存在一定的影响。本文对模型泵装置进水流道在不同流量下进行带泵和不带泵运行的湍流数值计算,并给出进水流道在小流量、设计流量($Q_{\text{设计}} = 310 \text{ L/s}$)及大流量下的湍流数值计算结果。为清晰反映旋转叶片对进水流道的影响,分别截取进水流道出口截面在 $0.8 Q_{\text{设计}}$ 、 $Q_{\text{设计}}$ 及 $1.2 Q_{\text{设计}}$ 流量下的速度分布,如图 2 所示。

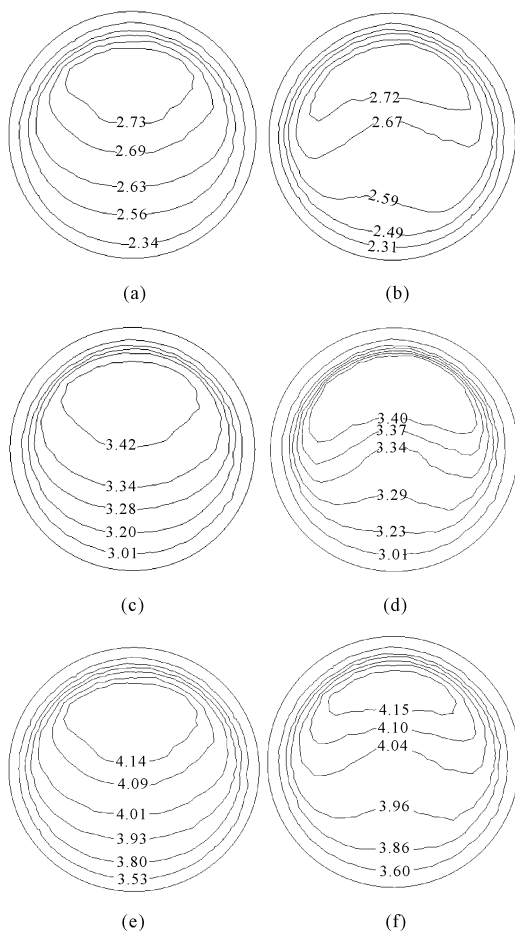


图 2 有、无叶轮进水流道出口断面速度云图

(a) $0.8Q$ 无叶轮流道出口速度云图; (b) $0.8Q$ 有叶轮流道出口速度云图; (c) $1.0Q$ 无叶轮流道出口速度云图; (d) $1.0Q$ 有叶轮流道出口速度云图; (e) $1.2Q$ 无叶轮流道出口速度云图; (f) $1.2Q$ 有叶轮流道出口速度云图

由速度云图可知,水流在通过流道肘部时受到离心力作用导致在流道出口断面高速区分布偏上,而旋转叶轮对进水流道的作用加剧了水流高速区偏

上分布的趋势。不同流量下速度云图基本相同,说明流量变化对进水流道出口处水流分布影响较小。

为定量分析旋转叶片对进水流道出口段的影响,引入流速分布均匀度 V_u 和速度加权平均角度 $\bar{\theta}$ 作为判别进水流道出口断面流态的指标^[8],其定义如下:

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{m}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{\sum u_{ai}} \cdot \sum u_{ai} \left[90^\circ - \arctg\left(\frac{u_{ti}}{u_{ai}}\right) \right] \quad (2)$$

式中: m 为计算断面的单元总数; u_{ai} 为计算断面第 i 单元轴向流速; u_{ti} 为计算断面第 i 单元切向流速; \bar{u}_a 为计算断面平均轴向流速。

为便于分析比较,选取叶轮进口附近 10 个等距截面作为计算断面。其中,第一个截面距叶轮中心 0.06 m,各截面间距为 0.03 m,如图 3 所示。分别计算各个截面上的速度分布均匀度 V_u 和速度加权平均角度 $\bar{\theta}$,从而获得水泵叶轮对进水流道出口段处流态的影响,计算结果如图 4 所示。

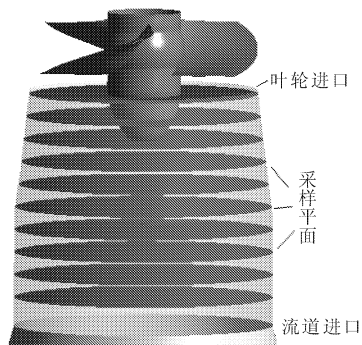


图 3 进水流道采样面分布图

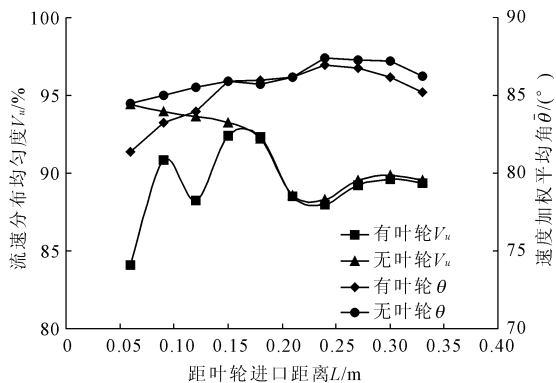


图 4 速度分布均匀度及加权平均角曲线

在不带泵的情况下,水流通过进水流道肘部后进入直管段,由于此前受到流道肘部的影响,在进水流道直管段入口处水流速度分布均匀度相对较低,但通过直管段发展后水流的速度分布均匀度有所提

高,在直管段中部时其速度分布均匀度为 89% (在图 4 中显示为距叶轮进口 0.33 m 处的计算截面)。随后水流通过渐缩管段的充分发展后其速度分布均匀度有较大的提升,在距离叶轮进口 0.06 m 处速度分布均匀度达到 95%。在该过程中,水流速度加权平均角基本上保持不变。在直管段处水流速度加权平均角呈递增趋势,进入渐缩管道后水流速度加权平均角则称递减趋势,但其整体的变化范围较小,上下波动范围不超过 3°。

在带泵运行的情况下,旋转叶轮对进水流道出口段处水流流态存在较大的影响,且越靠近叶轮进口处影响越大。由图 3 可知,旋转叶轮对进水流道出口流态影响范围存在一临界点,以本计算模型为例,该临界点距叶轮进口 0.15 m 左右,即叶轮导水帽尖端处。水流在通过该临界点之前,其流态与不带泵运行的情况基本一致;当水流通过该临界点之后,其流态相对于不带泵运行情况下产生明显的变化:水流流速分布均匀度出现较大的波动,并成明显的下降趋势,与不带泵运行情况相比降幅达到 10%;同时速度加权平均角也出现小幅下降,速度平均加权角由 86° 降至 81° 左右。

3.2 出水流道的水力特性分析

出水流道的主要作用是将导叶体出口的水流平稳均匀的转向并导入出水池,因此,出水流道水力性能的优劣将会对整个泵装置的效率造成不可忽略的影响。一般情况下,出水流道的水力损失与其流量的平方成正比。但实际情况是不同工况点下导叶体出口处水流速度环量对出水流道的水力性能产生较大的影响。经计算表明:出水流道水力损失在水泵设计工况点附近时达到最小值,而在小流量和大流量工况下,出水流道水力损失则呈较大分布,如图 5 所示。

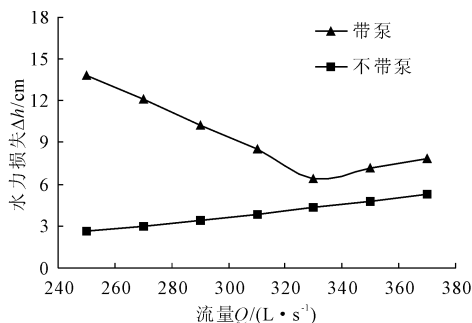


图 5 有、无叶轮出水流道性能曲线

由带泵与不带泵两种情况下出水流道的水力性能相比较可知,出水流道进口处速度环量的大小直接影响出水流道的水力性能。在不带泵的情况下,

出水通道进口处水流速度环量为 0, 此时出水通道内水流流态平顺, 通道水力损失较小且其值随流量的增大而增大。而在实际运行情况下, 出水通道进口处不可避免的存在一定的速度环量, 导致在出水通道进口段处水流流态较为紊乱, 从而使得通道的水力损失值偏大且随流量的分布规律发生根本性变化。具体分析可知, 水泵在偏离设计工况点时导叶体出口处存在较大的速度环量, 而在设计工况点时速度环量达到最小值。水流进入弯管后在该速度环量和离心力作用下其流态变的较为紊乱, 从而导致出水通道在大流量及小流量工况时存在较大的水力损失, 而在接近设计工况时, 其水力损失最小。

3.3 泵装置水力特性及实验对比分析

通过数值计算可以获得斜轴泵装置内流场的详细信息。由计算可知, 水流从进口端开始受到进水通道的约束逐步地收缩、转向, 在位于进水通道肘部上端(小半径处)的流体速度略大于下端(大半径处)的流体速度, 但经过进水通道之后的直管段及收缩管段的充分发展, 水流在叶轮进口前流速均匀, 在整个进水段中水流均匀平顺, 无回流、漩涡产生。经过叶片和导叶作用后液流以较小的速度环量进入 45°弯管, 在剩余速度环量及流动惯性作用下, 水流流态变的紊乱, 在经过出水通道的调整后趋于平顺均匀。水流在出水通道后段流线平顺且无偏转。

为验证数值模拟的准确性, 将模拟结果与泵装置实验获得的特性数据进行对比, 结果如图 6 所示。通过比较可看出, 数值模拟得到的流量-扬程曲线、流量-效率曲线与模型实验的结果总体趋势相同。由于计算模型的简化, 模拟过程中并未考虑装置的容积效率, 导致计算结果与实验值存在一定的偏差, 并且在非设计工况时偏差较大。

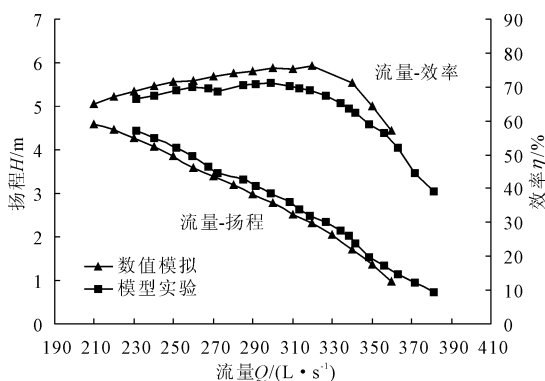


图 6 模型泵扬程流量与效率流量曲线

4 结 论

(1) 通过对进水通道数值分析可知, 旋转叶轮对叶轮进口段处水流流速分布均匀度的影响较为明显, 对水流入流角的影响较小, 且水流越接近叶轮进口受到影响越大。同时计算也表明, 旋转叶轮仅对其进口处较小范围内水流流动产生影响, 而这种影响并不会波及近水通道出口。

(2) 旋转叶轮对出水通道水力性能存在较大的影响, 出水通道水力损失在水泵运行设计工况点附近时达最小值, 而在偏离设计工况点时水力损失较大。并且水力损失较不带泵运行情况下数值偏大。

(3) 通过对泵装置的数值模拟及模型泵实验表明, 45°斜式轴流泵在低扬程泵站中具有较优的装置性能。随着水泵轴承可靠性的提高, 斜式轴流泵相比卧式贯流泵在低扬程大型泵站中更为适用。

参考文献:

- [1] 高盘林. 南水北调与斜式轴流泵[J]. 通用机械, 2003, (2): 51-53.
- [2] 徐 磊, 刘荣华, 陈 伟, 等. 3 种泵轴倾角斜式进水通道水力性能的比较[J]. 水力发电学报, 2011, 30(2): 128-132.
- [3] 杨树雄. 大型卧式轴流泵水导轴承的研究[J]. 排灌机械, 2003, 21(1): 15-17.
- [4] 冯艳蓉, 李奎生. 新型水润滑水轮机轴承的开发与应用[J]. 水电站机电技术, 2005, 28(4): 13-14, 20.
- [5] 施卫东, 关醒凡. 30°斜轴泵模型装置的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 1997, (3): 28-30.
- [6] 胡德义, 王为人, 李庆生, 等. 太浦河泵站斜 15°轴伸泵水力动态力分析[J]. 水力发电学报, 2002, 21(3): 81-87.
- [7] 陈毓陵, 华 明, 曹光华. 30°斜式轴流泵站的水力模型试验[J]. 水利水运科学研究, 2000, (2): 55-58.
- [8] 刘 君, 郑 源, 周大庆, 等. 大型斜式轴流泵装置能量特性研究[J]. 流体机械, 2010, 38(1): 1-4.
- [9] 周正富, 陈松山, 何钟宁, 等. 斜式轴流泵装置模拟计算研究[J]. 中国农村水利水电, 2009, (4): 65-68.
- [10] 何钟宁, 周正富, 谈 强, 等. 15°斜轴泵装置特性试验[J]. 排灌机械, 2008, 26(6): 36-40, 54.
- [11] 杨荣娣, 莫为泽, 张海平. 30°斜轴伸泵装置水力模型的开发及其应用研究[J]. 水泵技术, 1997, (2): 3-7.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 124-125.