

大型双向轴伸贯流泵水力性能分析

吕玲玲¹, 张所新², 蒋涛³, 何中伟⁴

(1. 江苏省人民政府国有资产监督管理委员会, 江苏 南京 210008;
2. 江苏省河道管理局, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210001;
4. 河海大学, 江苏 南京 210001)

摘要: 为深入分析轴伸贯流泵装置水力瞬变特性, 建立贯流泵全过流系统三维模型, 考虑压力沿水深变化进出口边界和重力项影响, 采用 PISO 压力—速度耦合算法进行数值模拟计算, 分析不全流道流态、转轮区应力集中及流态情况以及针对转轮出口、出水流道截面不同测点压力脉动时域、频域分析。计算结果表明: 全流道流态顺畅, 无不良紊乱。叶片应力分布均匀, 最大应力出现在叶片压力面进水边处。对于压力脉动, 与转轮中心同高处压力幅值最大, 截面最上方压力幅值最小。转轮出口及流道出口处压力脉动频率皆为转轮转动频率 8 倍。

关键词: 水泵; 压力脉动; 水力性能; 静压

中图分类号: TV131.4 文献标识码: B 文章编号: 1007-7839(2017)04-0048-05

Analysis of hydraulic performance about horizontal-axial-flow pump

LV Lingling¹, ZHANG Suoxin², JIANG Tao³, HE Zhongwei⁴

(1. State Owned Assets Supervision and Administration Commission of Jiangsu Provincial People's Government, Nanjing 210008, Jiangsu; 2. River Channel Management Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu; 3. Qinhuai River Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Nanjing 210001, Jiangsu; 4. Hohai University, Nanjing 210001, Jiangsu)

Abstract: For an in-depth analysis of the shaft extension tubular pump device of hydraulic transient characteristics, the three-dimensional model of tubular pump full flow system is established. Considering the pressure along the depth change of import and export boundary and the effect of gravity, the PISO pressure velocity coupling algorithm for numerical simulation is used, whole flow runner, stress concentration and flow situation and pressure fluctuation time domain and frequency domain is analyzed. The results show that the flow pattern of the whole flow channel is smooth and has no adverse disorder. The stress distribution is uniform, and the maximum stress appears at the blade pressure surface. For the pressure fluctuation, the pressure amplitude is the same as that of the center of the runner, and the pressure amplitude at the top of the section is the smallest. The pressure fluctuation frequency at the exit of the runner and the outlet of the runner is 8 times of the rotation frequency of the runner.

Key words: water pump; pressure fluctuation; hydraulic performance; static pressure

收稿日期: 2017-04-06

作者简介: 吕玲玲(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事湖泊、水资源及水利工程管理工作。

秦淮新河泵站建于 1982 年 6 月, 为排灌两用泵站, 采用卧式平面 S 型流道形式。2002 年对抽水站进行了加固改造, 现安装 1700ZWSQ10-2.5 型卧式轴流泵 5 套, 主电机 630 kW, 总装机容量 3150 kW。秦淮新河泵站是秦淮河流域水利工程体系中重要的组成部分, 为秦淮河流域防洪、排涝、抗旱和水环境改善发挥了重要作用^[1]。特别在 2015 年开始实施秦淮河“引江调水”工程^[2], 利用秦淮河泵站等工程措施抽引长江水抬高秦淮河水位, 有效保障了流域内农业生产年年丰收, 极大改善了流域和南京市城区水环境和水生态^[3]。

大型轴伸贯流泵装置具有大流量、高效率的特点^[4]。但基于真机的能量特性及压力脉动相当复杂, 研究人员众多。朱荣生^[5]等采用大涡模拟方法对贯流泵内部进行数值模拟分析, 研究压力脉动对贯流泵性能影响。宋振华^[6]等采用模型试验的方法对贯流泵内压力脉动数据进行采集和分析, 进一步证明压力脉动对泵水力特性的影响。杨帆^[7]等对 S 型管道贯流泵叶片区压力脉动进行分析, 只研究叶片处水力特性。而郑源^[8]等则只针对贯流泵转轮出口处压力脉动进行分析。

1 数值计算模型

1.1 模型参数

本文所用计算模型为秦淮新河双向轴伸贯流泵全过流系统, 包括进出水池、进出水流道、前后导叶以及转轮, 具体结构如图 1 所示。该泵设计扬程 2.5 m, 设计流量为 10 m³/s, 转速为 250 r/min, 转轮转动惯量为 320 kg·m², 叶轮直径为 1.7 m, 叶片可在 -6° ~ +4° 之间调节。泵段部分分别由 5 枚前导叶、4 枚转轮叶片和 7 枚后导叶组成。排涝设计扬程 2.0 m。

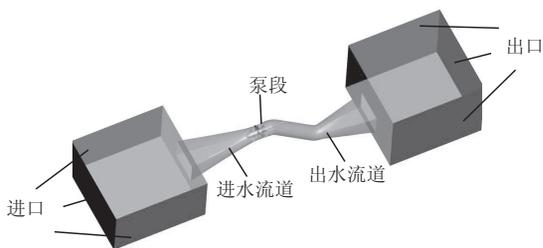


图 1 三维结构图

泵段具体部件如图 2 所示, 共设置四个监视面, 分别为前导的前端、转轮前、后端以及后导的后端。考虑重力场及压力沿水深变化, 监视点设

置在每个截面同一半径处的上中下三个位置处。

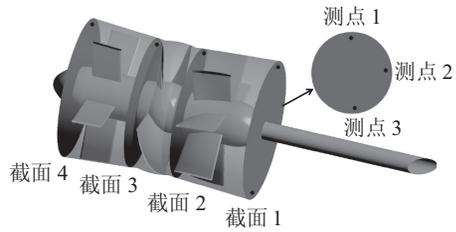


图 2 泵段监视点图

1.2 网格

采用结构化网格划分计算模型全流道, 图 3 为泵部分网格图。在近壁区域应用标准壁面函数 (Standard Wall Function) 方法, 与 *k-e* 湍流模型配合处理近壁区域的数值模拟计算。参数 y^+ 是用来衡量近壁面处离壁面距离的量^[9]:

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_t}{\mu} = \frac{\Delta y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1)$$

式中:

Δy —第一层网格离壁面距离;

ρ —流体密度;

τ_w —流体与壁面之间切应力;

ν —流体动力粘度。

轴伸贯流泵叶轮与导叶处模型扭曲较大, 网格划分复杂^[10]。相关研究^[11]要求近壁面网格的第一个结点 $y^+ < 11.63$ 。对导叶及转轮进行网格加密, 满足要求。

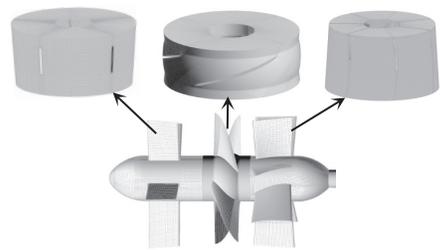


图 3 泵段网格图

对转轮、前后导叶网格, 进行 4 种方案验证。计算轴伸贯流泵稳态下效率计算对比。网格划分方案及验证结果见表 1 与图 4。

表 1 网格划分方案

方案	导叶 (万)	前导 (万)	后导 (万)
1	70	20	40
2	90	30	50
3	110	40	60
4	130	50	70

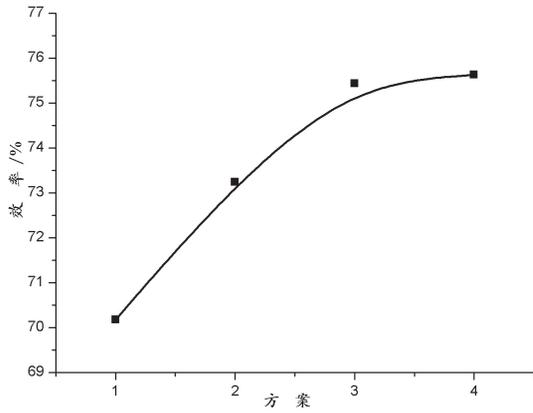


图4 网格无关性验证结果

因此,此次过渡过程全流道模型选取导叶为110万、前导叶40万、后导叶60万的网格进行数值计算。

2 轴伸贯流泵压力脉动计算方法

2.1 控制方程

连续性方程矢量^[12]表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (2)$$

式中:

ρ —密度;

t —时间;

u —速度矢量。

动量方程^[13]表示为:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + W \cdot \nabla W = S \cdot \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 W \quad (3)$$

式中:

W —相对速度;

ρ —流体密度;

P —压强;

S —变速旋转参考坐标系下的动量方程源项。

S 的具体表达式为:

$$S = f - [2\omega \times W + \omega \times (\omega \times r)] - \frac{d\omega}{dt} \times r \quad (4)$$

式中:

f —单位质量力。

2.2 湍流模型及离散格式

因为 Realizable $k-\varepsilon$ 模型耦合了新的湍流粘度公式,所以对雷诺应力的约束条件满足得更好,与真实湍流更接近。因此其已被有效应用于各种不同类型的流动模拟,其中包括有射流和混合流的自由流动、旋转均匀剪切流、带有分离的流动和管道流动等。本文轴伸贯流泵中流态复杂多变,因此选用湍流模型封闭控制方程组。

本次算例采用有限体积法对上述数学模型进行离散,压力—速度耦合采用 PISO 算法,压力项和动量项采用二阶格式,湍动能和对流项采用一阶迎风格式。时间步长 0.002 s,初始时间为 0。

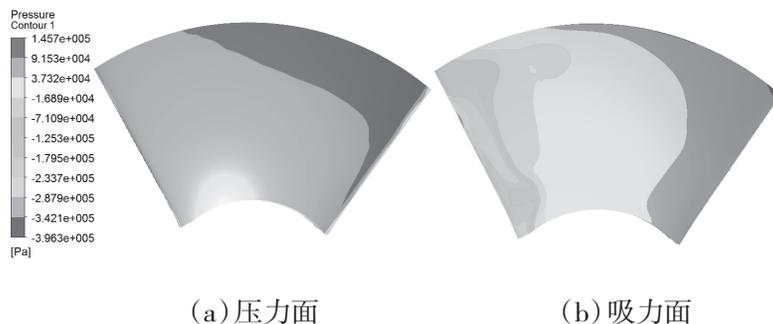
3 实例分析

通过对轴伸贯流泵进行三维数值模拟仿真,对叶片进行分析如下。

由图 5 可知,叶片压力面压力明显高于吸力面。对于压力面,进水口切面应力集中,整体压力均匀。对于吸力面,出水口处于低压区,进水口压力较高,进出水口压力过渡均匀,总体压力分布良好。

图 6 分别显示了转轮进出口速度矢量分布图。通过对比可以看出,在转轮出口处,速度在靠近轮缘处较大,在靠近轮毂处较小;在转轮进口处,流速由低速和高速区相间分布;在转轮叶片表面,速度也是由轮毂侧向轮缘侧增大。整体流态良好,没有明显不良涡旋。

全流道流线图如图 7,流线平滑无不良流态。



(a) 压力面

(b) 吸力面

图5 叶片压力云图

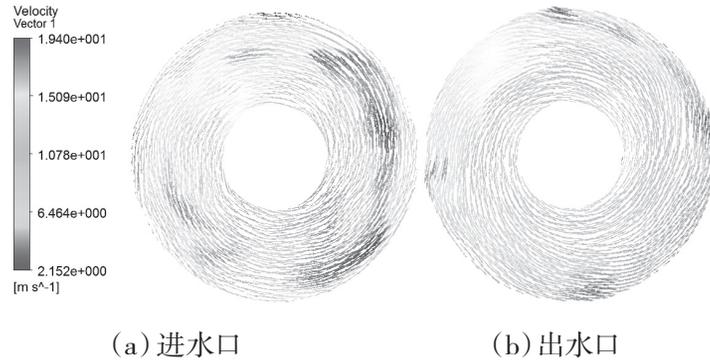


图 6 转轮进出水口速度矢量图



图 7 全流道流线图

在前流道中, 转轮无径向旋量, 在后导出口处同样无速度环量。后流道中因为有轴端的存在, 流态出现部分紊乱, 但由于后导的作用, 紊乱不明显, 在 S 型流道中逐渐恢复平稳。

从图 8 中可以明显看出, 对于出水流道截面, 由于轴段的存在, 不同测点压力脉动混乱。而对于转轮出口, 与转轮中心同高位置负压最大, 最下端压力次之, 上端负压最小。而由两幅图对比可以发现, 转轮出口压力相对出水流道负压值较高。因为转轮处流态复杂, 水流波动比较激烈。

图 9 中, 由于转轮有 4 个叶片, 转轮和出水流道处不同测点频率为转轮转动频率的 8 倍。转轮中心同高处幅值最大, 最高点压力幅值最小, 且在低频处存在明显脉动紊乱。

4 结论

(1) 对秦淮新河双向轴伸贯流泵进行全流道数值模拟, 分析泵段周围流态及叶片应力情况。全流道流态顺畅, 无不良紊乱。叶片应力分布均匀, 最大应力出现在叶片压力面进水边处。

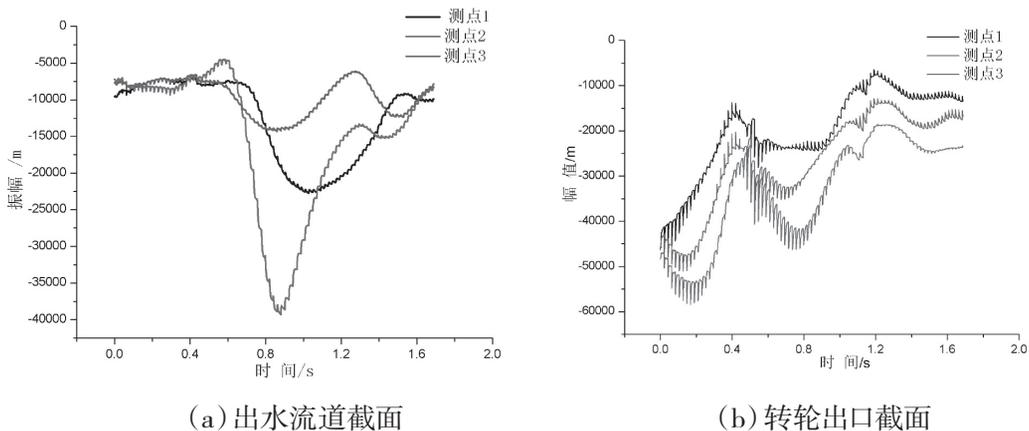


图 8 不同测点压力脉动时域图

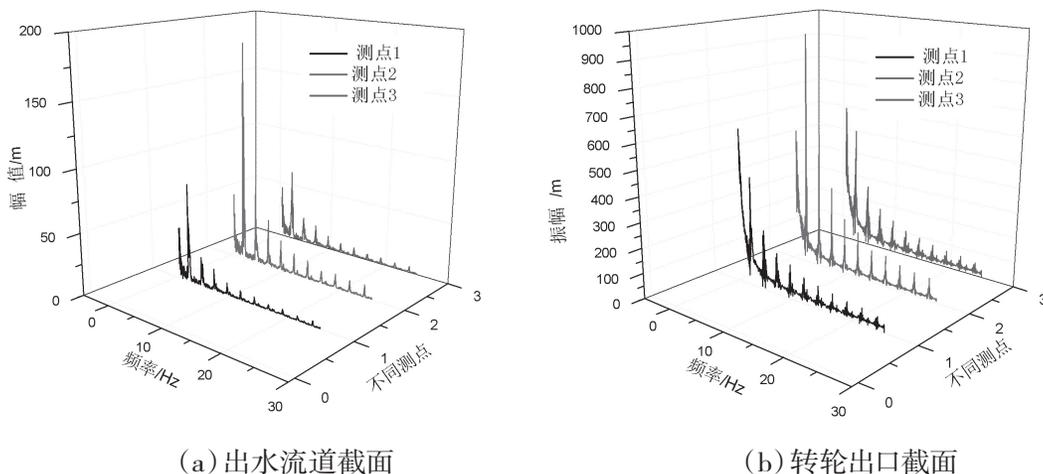


图9 不同测点压力脉动频域图

(2)对双向轴伸贯流泵转轮出口、出水流道进口截面设置不同监视点,监视其压力脉动情况。发现与转轮中心同高处压力幅值最大,截面最上方压力幅值最小。转轮出口及流道出口处压力脉动频率皆为转轮转动频率8倍。

参考文献:

- [1] 张新,郑源,毛秀丽,等.基于流固耦合的轴流泵叶轮强度分析[J].水电能源科学,2014(7).
- [2] 刘超,金燕.双向流道泵装置内三维流动数值模拟[J].农业机械学报,2011,42(9):74-78.
- [3] 张永勤,缪启龙,何毓意,等.区域水资源量的估算及预测分析——以南京地区为例[J].地理科学,2001,21(5):457-462.
- [4] 尹志杰,管玉卉.南京市水资源安全综合评价方法研究[J].水电能源科学,2010,28(6):22-24.
- [5] 朱荣生,燕浩,付强,等.贯流泵内部压力脉动特性的数值计算[J].水力发电学报,2012,31(1):220-225.
- [6] 宋振华,周济人,汤方平,等.贯流泵压力脉动测试信号的采集及处理分析[J].扬州大学学报(自然科学版),2009,12(2):53-57.
- [7] 杨帆,刘超,汤方平,等.S形下卧式轴伸贯流泵装置叶片区压力脉动特性研究[J].流体机械,2015(1):16-22.
- [8] 郑源,张飞,蒋小欣,等.贯流泵装置模型试验转轮出水口压力脉动研究[J].流体机械,2007,35(1):1-3.
- [9] 陈会向,周大庆,张蓝国,等.基于CFD的双向竖井贯流泵装置水力性能数值模拟[J].水电能源科学,2013(11):183-187.
- [10] 李晓俊,袁寿其,潘中永,等.离心泵边界层网络的实现及应用评价[J].农业工程学报,2012,28(20):67-72.
- [11] VersteegHK, MalalasekeraW. An introduction to computational fluid dynamics—The finite volume method[M]. 世界图书出版公司,1995.
- [12] 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,2004.114-158.
- [13] 周大庆,钟淋涓,郑源,等.轴流泵装置模型断电飞逸过程三维湍流数值模拟[J].排灌机械工程学报,2012,30(4):401-406.

(责任编辑:徐丽娜)