

轴伸贯流泵站全过流系统启动三维过渡过程研究

徐 辉¹ 龚 严¹ 曹春建² 陈会向¹ 阚 阚³ 冯建刚¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122;
3. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100)

摘要: 为了分析轴伸贯流泵站全过流系统在含有附加拍门的出水水道闸门开启下机组外特性参数的变化规律和过流系统内部流场的演变过程,利用力矩平衡方程推导叶轮实时转速,基于铺层网格及动网格技术研究了含有附加拍门出水水道闸门的运动规律,对轴伸贯流泵全过流系统启动三维过渡过程进行了数值模拟。结果表明:计算结果与试验结果一致;在机组启动过程中,泵段扬程先增大,然后减小至额定扬程,2.25 s 时出现最大启动扬程 6.38 m;拍门前后压差最大值为 2.61 m,设有附加拍门的出水水道闸门可以有效降低启动过程中的最大启动扬程,提高水泵机组的安全系数。水泵的启动转速和流量变化对叶轮段压力分布梯度影响明显,当转速上升到最大值时,叶片承受最大水压力。在启动过程中闸门上的附加拍门起到了分流作用,避免因叶轮转速上升较快、闸门未充分开启而使出水水道水压力过大带来的系统不稳定性问题。

关键词: 轴伸贯流泵; 启动过程; 附加拍门; 三维数值模拟

中图分类号: TV675; S277.9⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0143-09

OSID:



3D Start-up Transition Process of Full Flow System for
Shaft-ention Tubular Pump Station

XU Hui¹ GONG Yan¹ CAO Chunjian² CHEN Huixiang¹ KAN Kan³ FENG Jian'gang¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China

3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to analyze the transient characteristics of tubular pump during non-regulative operating condition, a shaft-extension tubular pump with rapid-drop gate and slap doors attached was established, and a 3D numerical simulation for start-up process was investigated numerically. The rational speed was deduced by utilizing the moment balance equation. The movement of the gate with additional slap doors was specified based on the laying mesh and dynamic mesh technology. The simulation results showed good agreements with the test results. The result showed that the starting speed and the change of flow rate had obvious influence on the pressure gradient in the impeller section. The pump head was increased firstly and then decreased to the rated head during the start-up process. The maximum start head was 6.38 m at the time of 2.25 s, and the maximum pressure difference between front and rear of the slap door was 2.61 m. As a result, the outlet gate with additional slap doors could effectively reduce the maximum start head and improve the safety factor of the pump unit. Meanwhile, the additional slap doors on the gate played a good role in the shunt during the start-up process, which can avoid the system instability caused by excessive water pressure in the outlet passage when the impeller speed rose fast and the gate was not fully opened.

Key words: shaft-ention tubular pump; start-up process; additional slap doors; three-dimensional numerical simulation

收稿日期: 2020-07-02 修回日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52006053, 51779082, 52009033)

作者简介: 徐辉(1961—),男,教授,博士,主要从事泵站工程研究, E-mail: hxu@hhu.edu.cn

通信作者: 阚阚(1990—),男,副教授,博士,主要从事水力机械研究, E-mail: kankan@hhu.edu.cn

0 引言

轴伸贯流泵是贯流泵的一种,其结构特征是电机、轴承及传动设备布置在流道外,泵轴伸出流道,可以直接传动,也可以间接传动^[1-3],具有很好的双向运行功能,在南水北调工程及有防洪排涝、紧急调水需求的场合应用较多^[4]。轴伸贯流泵在启动过程中,由于转子系统转动惯量较小,转速、流量、扬程等相关参数的瞬态突变极易对机电设备造成巨大冲击。因此深入研究轴伸贯流泵的启动过程对泵站机组的高效、安全、可靠运行具有重要意义^[5]。

一维特征线法是研究泵站机组启动过渡过程的初始方法^[6-8],但该方法无法精确捕捉系统内部水流的瞬态流动特性,具有一定的局限性^[9]。虽然常规试验手段能够真实反映水泵启动过程参数的瞬变规律,但过渡过程试验往往成本高、难度大,且具有一定的危险性。近些年来,随着计算机技术的发展和计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)的广泛应用,通过三维数值模拟方法求解水力机械过渡过程的研究取得了重大进展^[10-12]。文献[13]采用三维方法对混流式泵站出口阀门瞬时开启过程的参数变化及流场演变进行了数值模拟和分析;文献[14]采用数值模拟和试验相结合的方法,对某离心泵启动过程的瞬态特性进行了数值模拟研究;文献[15]采用三维数值模拟方法对离心泵启动过渡过程进行了研究,并着重对该过程中水泵内部流场漩涡结构的演变规律进行了观测分析;文献[16]采用多相流模型(Volume of fluid, VOF)对立式轴流泵启动过程进行了模拟,着重研究了启动过程虹吸式出水管内空气囊的变化规律;文献[17]对液控蝶阀联动的混流泵启动过程进行了数值模拟,对启动过程中蝶阀联动对启动参数及泵内流场的影响进行了详细分析;文献[18]基于动网格技术对混流式水轮机转轮内部瞬态流动进行数值模拟,结果表明,动网格技术能够较好地模拟水轮机转轮内部流场的动态变化。文献[19]对加装快速门的大型贯流泵加速启动过程进行了研究,结果表明,快速门以 10 倍设计速度启动时,机组转速和流量也将快速达到额定值,同时最大倒灌流量增加了 30%。在泵站机组实际运行过程中,重力场对内部流态影响较大,需要在数值模拟时加以考虑;同时贯流泵的断流装置多为快速闸门及其附加拍门,其形式简单、阻力损失很小,主要特点就是可以全开或全关,特别适用于上游水位变幅较大和淹没较深的情况^[8,20]。由于贯流式泵站出水流道较短,泵机组在启动过程中开闸启动,闸门的开启规律与水泵启动特性密切

相关,因此需要结合动网格技术对轴伸贯流泵启动过程进行研究,以期为泵站的优化设计和系统稳定性的提高提供可靠依据。

本文基于 ANSYS Fluent 平台对轴伸贯流泵全过流系统进行三维数值模拟,针对轴伸贯流泵全过流系统模型,基于铺层网格及动网格技术研究快速闸门及其附加拍门的动态开启过程,分析机组启动过程中外特性参数变化规律及内部流场演变过程,探究快速闸门及其附加拍门对系统内流态的影响,以期为泵站瞬态过程安全控制提供理论参考。

1 数值计算

1.1 几何模型

本文计算模型基于秦淮新河卧式双向全调节轴伸贯流泵机组,采用带有双拍门的快速闸门作为截流装置,泵站的特征参数如表 1 所示^[21],轴伸贯流泵装置几何模型如图 1 所示。

表 1 贯流泵机组特征参数

参数	数值
叶轮直径 D/m	1.7
叶片数 Z	4
前置导叶数 Z_1	5
后置导叶数 Z_2	7
叶片安放角 $\alpha/(\text{^\circ})$	-2~4
设计水头 H_d/m	2.5
设计转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	250
设计流量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	10
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	320

图 1 贯流泵全过流系统示意图

Fig. 1 Schematic of full flow system of tubular pump unit

1. 进水池 2. S 型流道 3. 出水池 4. 闸门 5. 拍门 6. 后置导叶 7. 前置导叶 8. 叶轮

1.2 边界条件

进口设置在进水池的三侧断面,采用压力进口边界;出口设置在出水池的三侧断面,采用压力出口边界条件。由于贯流泵站设计扬程较低,重力场对

内部流态影响较大,为了更真实地模拟进出口边界,在计算时考虑重力项,并通过用户自定义函数(User definiend function, UDF)将进出口设置成压力沿水深变化。针对机组启动瞬态计算,初始条件为:流体域的全场速度为零,即表示静止流体,叶轮的初始转速为零,代表机组当前处于停机状态。贯流泵装置进水流道边壁、叶轮外壁、轮毂以及前后导叶体边壁等固体壁面采用无滑移条件,而近壁区采用标准壁面函数。

时间步长的选择:按照相关文献及经验,时间步长 Δt 可根据最小网格尺寸除以特征速度进行估算。此处,以最小网格尺寸除以最大来流速度来确定计算中所采用的时间步长,计算模型在启动过程中转轮区网格尺寸最小。转轮区域网格最小尺寸为 12 mm,转轮区域来流速度小于 11.0 m/s,所以取 $\Delta t \approx 0.001$ s,考虑到频谱、漩涡等特性导致的误差情况,启动过程时间步长取 0.001 s。

1.3 网格划分

为了获得高效合理的离散网格分辨率,建立了 4 组不同的贯流泵装置全过流系统网格进行对比分析。为了提高计算精度并通过减少网格数以提高计算效率,通过 ANSYS-ICEM 软件对整个流体域进行结构化六面体网格划分,并对所划分的 4 种不同尺度网格进行网格无关性分析。其中,4 种划分方案网格数分别选取 286 万、374 万、466 万、515 万。经过网格无关性验证,当网格数超过 466 万时,力矩和流量相对变化值小于 1.6%。因此,最终确定整个泵装置全过流系统计算域网格取 466 万。为了证明数值计算结果的可信性,采用文献[22]推荐的方法,基于 Richardson 外推理论,对本文所选取的网格进行网格收敛性检查^[23],经过计算,本文网格解的数值不确定度为 2.71%。该网格方案下流体计算区域网格如图 2 所示。本文采用的 SST $k-\omega$ 湍流模型是一种不同流动区域自适应的湍流模型,考虑

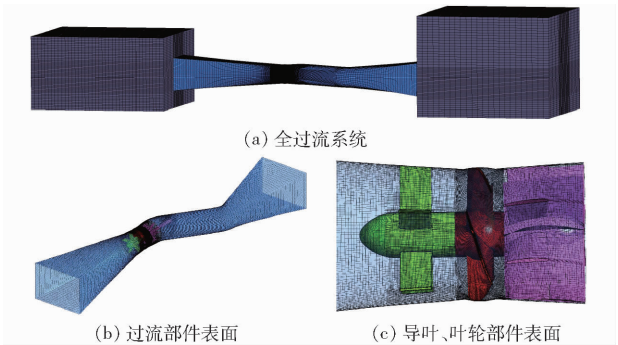


图 2 贯流泵全过流系统网格示意图

Fig. 2 Grid schematic of full flow system of tubular pump unit

到瞬态计算的复杂性和计算量较大,对于主要过流部件, $30 < y^+ < 60$ ^[24], y^+ 表示边界层处与壁面第一层网格距离,基本满足应用 SST $k-\omega$ 湍流模型对近壁网格质量的要求。

2 数值模拟

2.1 控制方程

轴伸贯流泵机组内部流体的介质为水,为不可压缩粘性流体,控制方程为连续性方程与纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程^[25]。

对轴伸贯流泵机组启动过程进行数值模拟时,在电机电磁力矩带动叶轮从静止开始旋转过程中,流场的大幅改变会导致叶轮叶片表面所受水体阻力矩发生变化,能否准确捕捉和模拟叶轮转速的提升规律是三维过渡过程的关键。此处引入力矩平衡方程,利用非定长数值计算在不同离散时间步长上进行时间推进的特点,通过每一时间逐步推进计算转轮转速下一时刻的数值,对于启动过程,初始机组为静止状态,转速为零。力矩平衡方程为^[26]

$$M_0 - M_1 - M_2 - M_3 = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi J}{30} \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

式中 M_0 ——水泵机组启动过程中的电机电磁力矩, N·m

M_1 ——水泵机组启动过程中叶轮所受水阻力矩, N·m

M_2 ——机组启动过程中轴承的摩擦力矩, N·m

M_3 ——机组启动过程中电机的风损力矩,本文模拟中忽略不计, N·m

J ——机组转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

t ——时间, s

ω ——机组叶轮旋转角速度, rad/s

n ——机组叶轮转速, r/min

在试验过程中观测确定拍门开启时刻和拍门开启最大值时刻,将拍门的开启过程简化为匀速打开过程,由此得到拍门开度随时间变化的曲线,同时,选取了典型时刻进行校验,误差符合基本要求。快速闸门及附加拍门开启速度的显式关系式为:

附加拍门

$$\alpha_d / \alpha_0 = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < 1 \text{ s}) \\ 0.55t - 0.06 & (1 \text{ s} \leq t < 2 \text{ s}) \\ 1 & (2 \text{ s} \leq t < 22 \text{ s}) \\ 0 & (t \geq 22 \text{ s}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 α_d ——活动拍门开度

α_0 ——拍门最大开度

α_d / α_0 ——拍门相对开度

快速闸门

$$\alpha_g/\alpha_0 = \begin{cases} 0.55t & (0 \leq t < 34 \text{ s}) \\ 1 & (t \geq 34 \text{ s}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 α_g ——快速闸门开度
 α_g/α_0 ——快速闸门相对开度

2.2 动网格技术

本文所研究轴伸贯流泵机组具有“S”形出水流动道,出水流动道中含有快速闸门及其附加拍门。在对快速闸门及其附加拍门进行三维数值模拟时,运用铺层网格和动网格的方法进行网格构建,模拟拍门启闭过程^[27]。在数值模拟过程中,拍门总体滑移速度与闸门启闭速度相同,同时拍门按照两侧水压进行开启和关闭。图3为快速闸门及拍门流体网格开启过程不同时刻位置,图中 $t_1 \sim t_4$ 表示开启过程中的不同时刻。

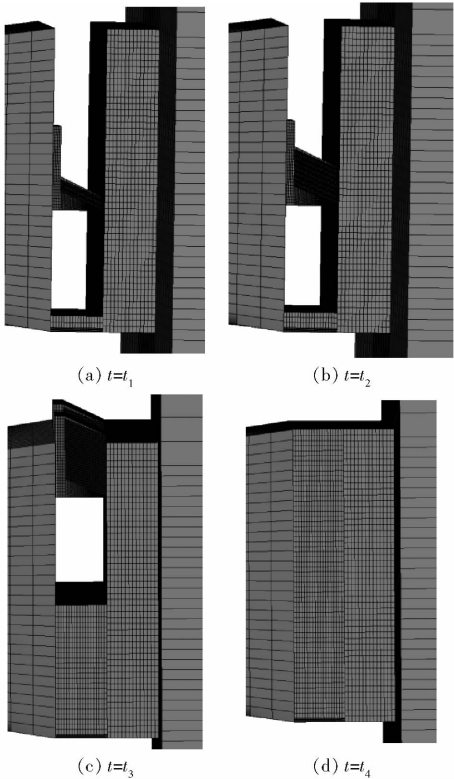


图3 快速闸门及拍门流体网格开启过程不同时刻位置图
Fig.3 Location diagrams of rapid-drop gate and slap door fluid grid opening process at different time

2.3 湍流模型及离散方法

轴伸贯流泵在运行过程中,边界层附近会发生流动分离,剪切压力输运 (Shear stress transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型能够有效预测逆压力梯度条件下的流动分离,因此选用 SST $k-\omega$ 湍流模型对控制方程进行封闭^[28]。采用有限体积法离散方程组,方程组中压力项采用 Body Force Weight 格式,对流项、湍动能以及耗散率采用二阶迎风格式。采用协调一致的求解压力耦合方程组的半隐式方法 SIMPLEC

算法对流场方程进行联立求解,不同区域间采用 interface 进行信息传递。

3 结果与讨论

3.1 数值模拟与试验结果对比

为了进一步验证数值模拟结果的准确性与可靠性,在该泵站进行真机机组压力脉动测试。在前置导叶部位开孔,选取监测点进行压力脉动测试,将监测点试验值和数值模拟中压力脉动进行对比。试验上下游水位约 2.2 m,试验真机转速为 250 r/min,试验中压力传感器作用为监测点压力的测量,可编程逻辑控制器 (Programmable logic controller, PLC) 作用为接收测量仪表模拟信号并将其转换为相应物理值。试验监测点及设备如图4所示。

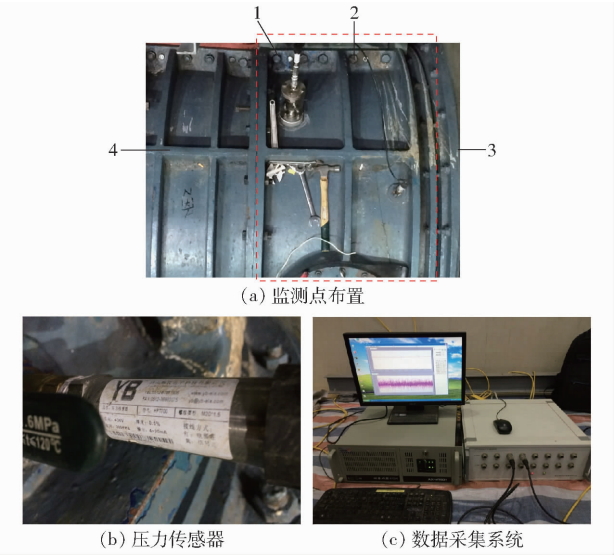


图4 试验监测点及设备图

Fig.4 Diagrams of test monitoring points and equipment

1. 监测点 2. 前置导叶段 3. 叶轮侧 4. 进水管

图5为轴伸贯流泵开机过程中监测点压力脉动模拟值与试验值对比图。可以看出,数值模拟与试验值总体变化趋势一致,吻合较好,在水泵扬程达到最大值时,两者出现偏差,且试验值达到平衡的时间滞后于模拟值。两者之间存在误差的可能原因是所

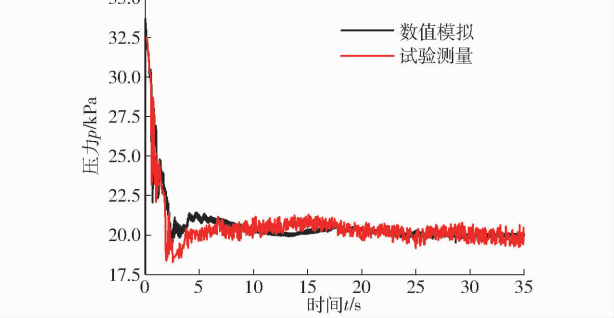


图5 水泵启动过程中监测点压力脉动对比曲线
Fig.5 Contrast curves of pressure pulsation at monitoring points during pump start-up process

测压力脉动信号夹杂有噪声等干扰信号,使得试验工况与实际设计工况有所偏差。综上所述,数值模拟在一定程度上能较真实地反映轴伸贯流泵启动过程中的动态特性,因此可作为研究贯流泵启动过程的有效方法和手段。

3.2 外特性参数变化分析

图 6(图中 α/α_0 表示相对开度)为贯流泵机组启动过程中叶轮转速、出水流动快速闸门及拍门相对开度的变化规律,可以看出,叶轮转速近似呈直线规律上升,在 $t=2.95\text{ s}$ 时达到额定转速。当叶轮到达额定转速后,由于二次限速机的作用转速即刻保持不变。快速闸门开启后其开度按直线规律上升,在 $t=34\text{ s}$ 时完全开启;拍门在 $t=0.13\text{ s}$ 时由水冲开,在 $t=1.92\text{ s}$ 时被完全冲开。拍门随闸门匀速上升,当 $t=21.67\text{ s}$ 时拍门开始离开水面, $t=21.77\text{ s}$ 时完全脱离水面, $t=34\text{ s}$ 时,闸门完全打开。

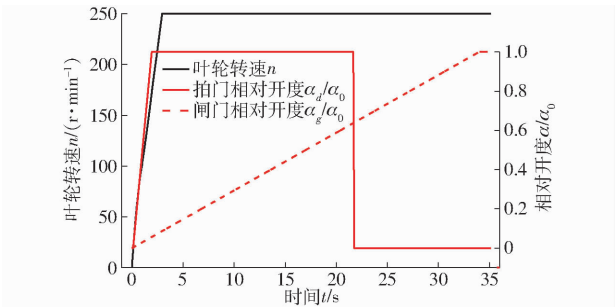


图 6 叶轮转速、快速闸门及拍门相对开度的变化规律

Fig. 6 Change law of impeller speed, rapid-drop gate and slap door opening

图 7 为贯流泵全过流系统进口流量 Q 、闸门通过流量 Q_1 和拍门通过流量 Q_2 随时间 t 分布的曲线。从图 7 可知,进口流量随转速上升逐渐增大直至 $t=4.66\text{ s}$ 时流量逐渐平稳,水泵机组额定流量为 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 。拍门流量先逐渐上升,在 $t=4.12\text{ s}$ 时到达最大值后逐渐降低,直至拍门离开水面,过水流量减为零。由于存在拍门分流,闸门流量低于进口流量,在 $t=0.13\text{ s}$ 后逐渐上升直至闸门全部打开时达到稳定。

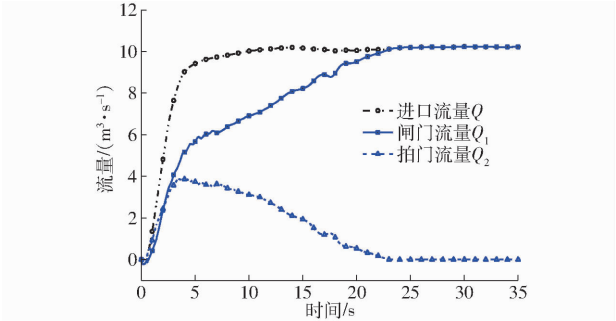


图 7 闸门、拍门流量随时间的变化规律

Fig. 7 Flow of gate and slap door changes with time

由图 6 和图 7 对比可以看出,拍门流量达到最大值滞后于叶轮转速达到最大值;进口流量达到最大值又滞后于拍门流量达到最大值。

图 8 为泵段扬程和拍门前后压差随时间的变化规律。其中,泵段扬程为启动过程中泵段前后的压力差,表现为泵段前后的实际提水扬程;拍门前后压差为启动过程中拍门前后降低的水头数值,表现为拍门分流对压力的削减作用。

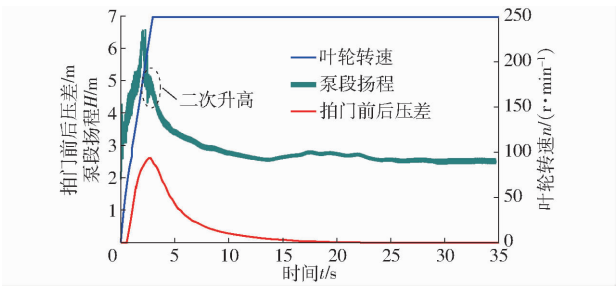


图 8 泵段扬程和拍门前后压差随时间的变化规律

Fig. 8 Diagram of pump head and pressure difference of pre- and post slap door with time

由图 8 可以看出,泵段扬程先增大而后减小至额定扬程, $t=2.25\text{ s}$ 时,泵段扬程的最大峰值出现,最大启动扬程为 6.38 m ; $t=2.64\text{ s}$ 时,泵段扬程的次峰值出现,为 5.01 m ;拍门前后压差从 $t=0.13\text{ s}$ 后开始逐渐增大, $t=2.64\text{ s}$ 时,拍门前后压差最大值是 2.61 m ,此后拍门前后压差随着转速上升逐渐降低, $t=23.11\text{ s}$ 时降低为零。总体分析图 8 可以得出,叶轮转速升高至最大值的时刻滞后于拍门前后压差达到最大值的时刻,拍门前后压差达到最大值时刻滞后于泵段扬程达到最大值的时刻,而拍门前后压差的峰值会带来泵段扬程的二次峰值。

3.3 内部流场演变分析

图 9 为轴伸贯流泵启动过程中泵段部分不同时刻流线分布图。水泵刚进入启动过程时流道内流速基本为零,当水泵通道内水流逐渐增大、流动逐步发展时,在旋转叶轮的作用下,叶轮区流态紊乱,同时各种不良流态向上下游传播。如图 9b 所示,随着贯流泵启动过程的进行,水泵转速和流量进一步增大,叶片进水边对水流的冲角逐渐减小,叶轮段和前置导叶段流动改善,当水泵转速和流量逐渐接近额定工况时,水泵通道内流速逐渐稳定,在后置导叶出口具有一定环量的水流呈螺旋状进入出水弯管,在离心力作用下会产生趋向于流道边壁的运动。随着水泵启动过程逐步完成,其运行工况进入较优运行工况点,出水流动螺旋状流动逐渐消失,水流流线平滑顺直。

为了方便研究启动过程中水流沿叶片和导叶翼型绕流情况,选取轮毂至轮缘中等跨度(Span 值为 0.5)的近似圆周截面进行分析,如图 10 所示。

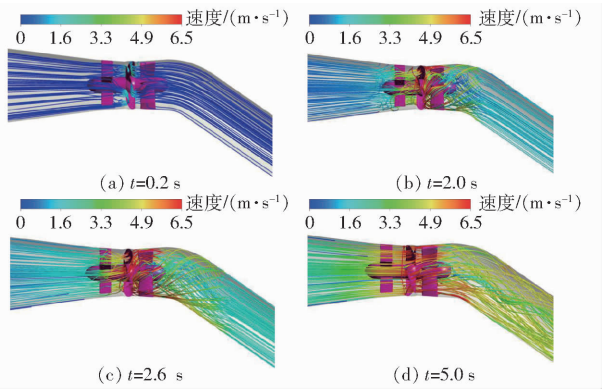


图 9 不同时刻泵段内部流线分布图

Fig. 9 Streamline distribution diagrams of pump segment at different time

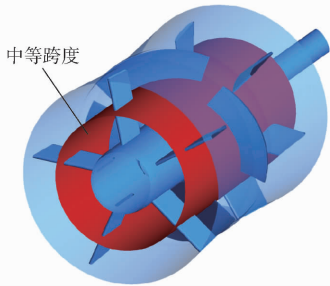


图 10 泵段中等跨度截面位置示意图

Fig. 10 Schematic of middle span section of pump section

图 11 为中等跨度截面不同时刻的流线分布图。启动初始阶段,叶轮段水流在叶轮旋转的作用下在圆周方向逐渐加速,并在叶轮进出水边形成小尺度的漩涡。如图 11c ~ 11e 所示,在启动过程中,随着叶轮转速的持续升高,泵段中部叶轮附近的高速区

也逐渐增大,叶轮进出口的涡分别向上下游传播,前置导叶下侧的漩涡比后置导叶上侧的漩涡要小,这是由前置导叶结构平直,流态受水平来流影响较小导致的;在水泵机组流量尚未达到额定流量前,由于流体质点通过叶轮后,叶轮出口流体速度与后置导叶进口形成的攻角关系并不匹配,导致后置导叶上侧的流动发生明显的流动分离。启动过程基本完成时,导叶区域和叶轮区域内水流流线平滑顺直,流态较好,无漩涡回流等不良流态发生。

图 12 为机组启动过程中不同时刻叶轮叶片表面静压分布云图,图中左侧表示压力面,右侧表示吸力面。水泵刚启动时,叶片压力面与吸力面压差不大,叶片压力面压力略高于吸力面($t = 0.2\text{ s}$)。随着水泵启动过程的进行,压力面与吸力面压差逐渐增大,压力面叶片外缘及叶片中间出现局部高压区域,吸力面前缘及靠近前缘中部低压区域逐渐扩大($t = 1.8\text{ s}$)。当启动转速达到最大值时,叶轮段叶片压力面与吸力面的压差达到最大值($t = 3.0\text{ s}$)。当水泵内流态与扬程逐渐稳定,只有叶片前缘进水侧存在低压与高压区域,其余叶片表面静压基本保持不变($t = 10.0\text{ s}$)。由此可见,贯流泵在启动过程中水流对叶片表面的瞬态效应明显,这种瞬态冲击使叶片表面载荷急剧增加,叶片承受交变作用力,导致叶片的振动与变形。

本文运用 Q 准则等值面来研究漩涡核心区域在叶轮通道内的演变过程,图 13 为不同时刻叶轮区

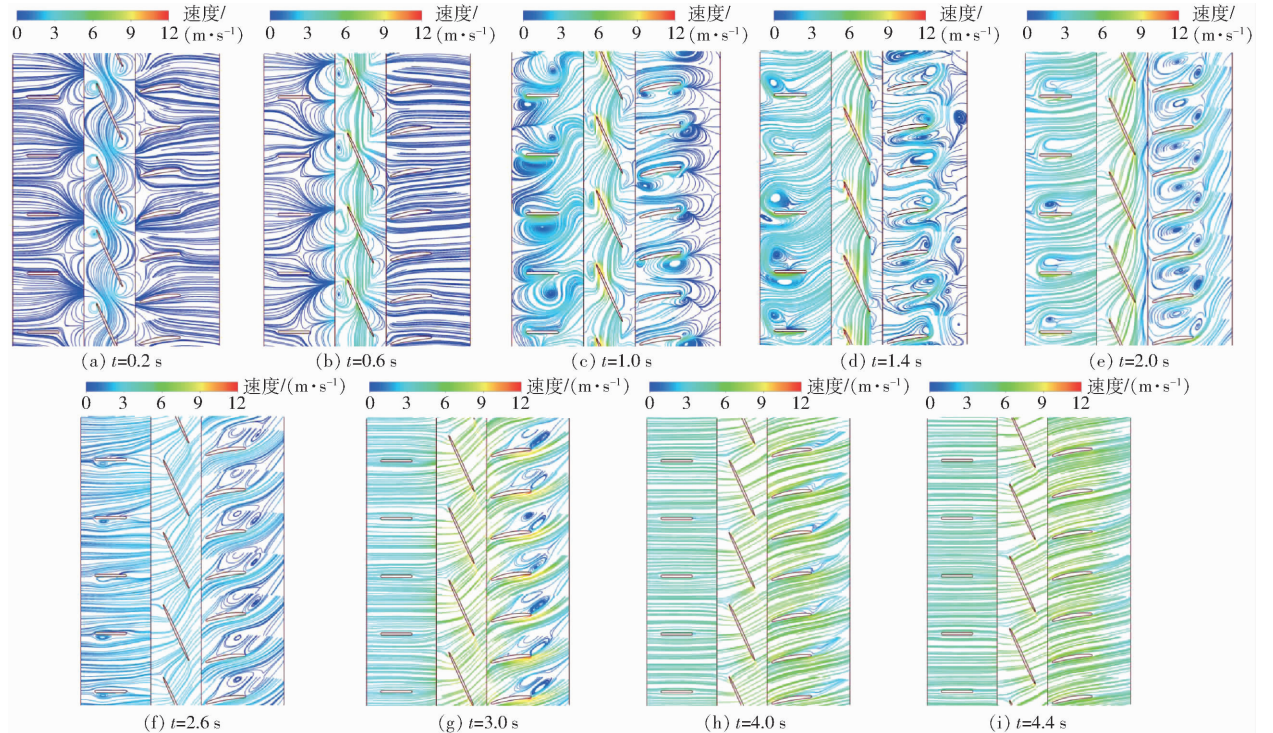


图 11 不同时刻泵段中等跨度截面流线分布图

Fig. 11 Streamline distribution diagrams of middle span section of pump section at different time

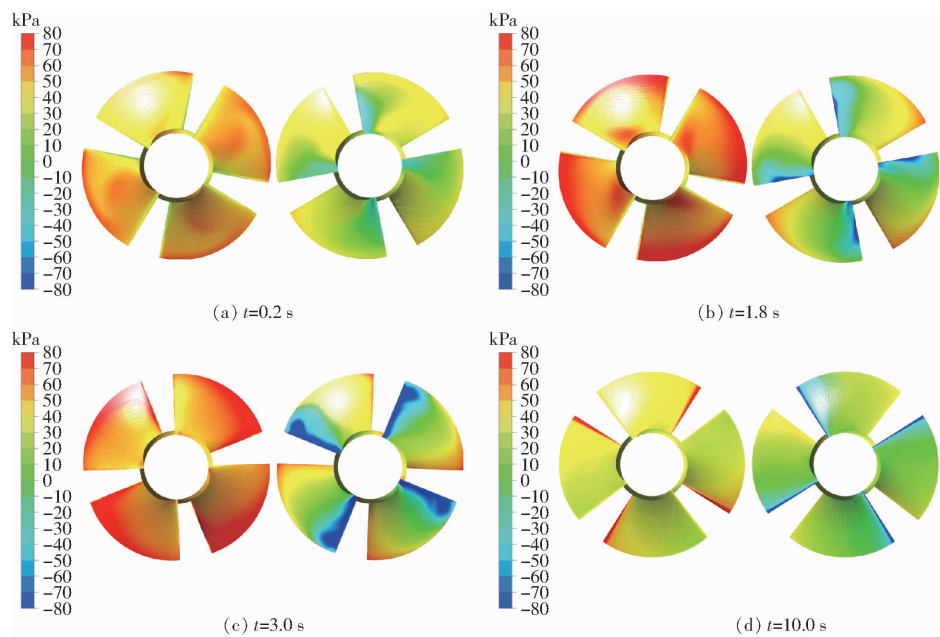


图 12 不同时刻叶轮叶片表面静压云图

Fig. 12 Static pressure contours of impeller blade surface at different time

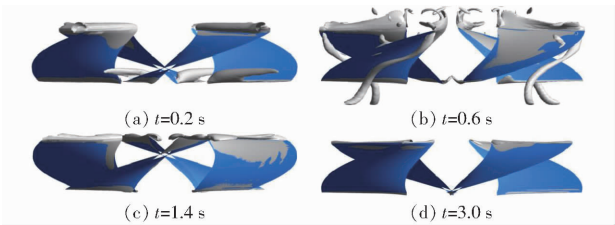


图 13 不同时刻叶轮区涡核分布图

Fig. 13 Vortex core distribution diagrams of impeller at different time

涡核分布。在启动过程的开始阶段($t = 0.2\text{ s}$),叶轮从静止刚开始加速,叶片前缘和后缘位置均可观察到少量涡核区,这是由于静止水体在刚启动旋转的叶轮作用下产生的速度梯度所形成的漩涡。随着叶轮转速的增加($t = 0.6\text{ s}$),涡核区域增大,大量的涡核区域出现在叶片前缘和叶间通道内,这些涡核堵塞叶间通道,使得叶轮内部流动不稳定性加剧。随着叶轮转速的继续增加($t = 1.4\text{ s}$),叶轮内部涡核区域逐步消失,当转速上升至额定转速并开始稳定运行时($t = 3.0\text{ s}$),叶片前缘只存在一个很小的涡核区域。涡核区域的演变规律与叶轮叶片压力面

静压变化规律相似,都是先增大后减小,但是由于叶轮叶片静压变化主要受叶轮转速的影响,而涡核区域的演变主要受叶轮区域流动影响,由于叶轮区域流动相对稳定且提前于叶轮转速上升至最大值,因此叶轮叶片表面静压变化极值出现时,叶轮段较大尺度漩涡已经接近消失。

贯流式泵站机组在启动过程中,当机组开机时,快速闸门和附加拍门相互配合,辅助水泵机组正常启动。图 14 为贯流泵启动过程中不同时刻闸门附加拍门处速度分布。如图 14a 所示,在 $t = 0.2\text{ s}$ 时机组处于反水泵工况,闸门初始提升高度较小,流速较低且流态平稳。随着贯流泵启动过程的推进,水泵转速升高,快速闸门和两个附加拍门开启,当拍门完全被水冲开后,流态紊乱,在闸门与出水池接触侧出现漩涡且漩涡随着闸门的运动而上移,随着闸门的逐渐开启,闸门处过流面积增大,闸门后方漩涡区域减小并逐渐消失。 $t = 35.0\text{ s}$ 时,机组完全启动,整个流道内流态平稳,无明显的回流、漩涡等不良流态。由此可见,闸门上的附加拍门在贯流泵启动过程中起到了很好的分流作用,避免了闸门瞬时开启

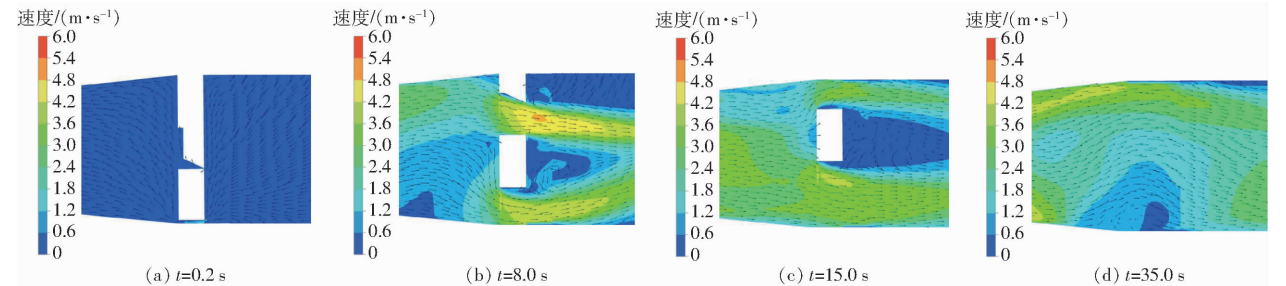


图 14 不同时刻闸门附加拍门处速度分布图

Fig. 14 Velocity distribution diagrams of additional slap door at different time

时闸门两侧压力发生突变和因叶轮转速上升较快同时闸门未充分开启时出水水道水压力过大可能带来的系统不稳定性。

4 结论

(1) 基于力矩平衡方程, 利用铺层网格和动网格技术, 对轴伸贯流泵全过流系统启动三维过渡过程进行了数值模拟, 模拟得到的压力脉动结果与实测数据相吻合, 证明了数值模拟的可靠性。

(2) 在机组启动过程中, 泵段扬程先增大, 然后减小至额定扬程, 2.25 s 时出现最大启动扬程

6.38 m; 拍门前后压差最大值是 2.61 m, 设有附加拍门的出水水道闸门可以有效降低启动过程中的最大启动扬程。同时, 附加拍门还可以起到很好的分流作用, 避免闸门瞬时开启时闸门两侧压力发生突变, 以及因叶轮转速上升较快、闸门未充分开启而使出水水道水压力过大, 从而带来的系统不稳定性问题。

(3) 在启动过程中, 泵段内流线随流量的增大而逐渐紊乱, 水泵的启动转速和流量变化对叶轮段压力分布梯度影响明显, 当叶轮启动转速达到最大值时, 叶轮段叶片压力面与吸力面的压差达到最大值。

参 考 文 献

- [1] 徐磊. 大型特低扬程泵装置水力性能优化与综合比较研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
XU Lei. Study on hydraulic performance optimization and comprehensive comparison for large especial low head pump system [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [2] 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 49–59.
LIU Chao. Researches and developments of axial-flow pump system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 49–59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.008. (in Chinese)
- [3] 石丽建, 焦海峰, 苟金澜, 等. 全贯流泵回流间隙对泵水力性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 139–146.
SHI Lijian, JIAO Haifeng, GOU Jinlan, et al. Influence of backflow gap size on hydraulic performance of full-flow pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 139–146. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200416&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.016. (in Chinese)
- [4] 李龙, 王泽. 轴伸式贯流泵装置全流场三维湍流数值模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 62–66.
LI Long, WANG Ze. Numerical simulation of 3D viscous flow in tubular pumping station on dual-directional operation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 62–66. (in Chinese)
- [5] 陈松山, 蒋红梅, 周正富, 等. 大型贯流泵站机组启动过渡过程仿真计算[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2009, 12(3): 74–78.
CHEN Songshan, JIANG Hongmei, ZHOU Zhengfu, et al. Study on start-up transient process simulation of large scale tubular pumping stations[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2009, 12(3): 74–78. (in Chinese)
- [6] 严登丰, 刘超. 泵系统起停期动态特性的计算[J]. 水利学报, 1989, 20(1): 66–72.
- [7] 葛强, 陈松山. 灯泡式贯流泵站机组启动过渡过程仿真计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 159–163.
GE Qiang, CHEN Songshan. The simulation during start-up transition of bulb type tubular pumping station[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 159–163. (in Chinese)
- [8] 于永海, 吴继成. 快速闸门断流大型立式轴流泵机组启动过渡过程的计算分析[C]//中国水利学会青年科技工作委员会. 中国水利学会第三届青年科技论坛论文集. 中国水利学会青年科技工作委员会, 2007: 333–338.
- [9] LI D Y, FU X L, ZUO Z J, et al. Investigation methods for analysis of transient phenomena concerning design and operation of hydraulic-machine systems—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 26–46.
- [10] 冯建军, 张钰, 朱国俊, 等. 采用熵产理论的离心泵断电过渡过程特性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 10–17.
FENG Jianjun, ZHANG Yu, ZHU Guojun, et al. Transition process characteristics of centrifugal pump with power-off based on entropy production theory[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 10–17. (in Chinese)
- [11] 夏鹤鹏. 竖井贯流泵装置启动停机过渡过程研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
XIA Hepeng. Study on transition process of starting and stopping of vertical shaft cross-flow pump system[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [12] 徐建叶, 张海胜, 刘跃飞, 等. 大套一站轴流泵装置事故飞逸特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(6): 173–176.
XU Jianye, ZHANG Haisheng, LIU Yuefei, et al. Numerical simulation of runaway accident characteristics of the axial pump unit in Datao NO.1 Station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(6): 173–176. (in Chinese)
- [13] WU D, WU P, LI Z, et al. The transient flow in a centrifugal pump during the discharge valve rapid opening process[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(12): 4061–4068.
- [14] LI Z F, WU P, WU D Z, et al. Experimental and numerical study of transient flow in a centrifugal pump during startup[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(3): 749–757.
- [15] HU F F, MA X D, WU D Z, et al. Transient internal characteristics study of a centrifugal pump during startup process[C]//

- 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2012; 989 – 995.
- [16] 周大庆,刘跃飞.基于VOF模型的轴流泵机组启动过程数值模拟[J].排灌机械工程学报,2016,34(4):307–312.
ZHOU Daqing, LIU Yuefei. Numerical simulation of axial pump unit startup process using VOF model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(4):307–312. (in Chinese)
- [17] 周大庆,姜胜文,陈会向.液控蝶阀联动的混流泵机组启动过程数值模拟[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):112–117.
ZHOU Daqing, JIANG Shengwen, CHEN Huixiang. Numerical simulation of start-up process of mixed flow pump unit combined with hydraulic control butterfly valve action[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(2):112–117. (in Chinese)
- [18] 李文锋,冯建军,罗兴铸,等.基于动网格技术的混流式水轮机转轮内部瞬态流动数值模拟[J].水力发电学报,2015,34(7):64–73.
LI Wenfeng, FENG Jianjun, LUO Xingqi, et al. Numerical simulation of transient flows in Francis turbine runner based on dynamic mesh method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(7):64–73. (in Chinese)
- [19] 许哲,郑源,阚阚,等.大型贯流式泵站快速门加速启动过渡过程[J].排灌机械工程学报,2020,38(10):1016–1022.
XU Zhe, ZHENG Yuan, KAN Kan, et al. Accelerated starting transition process of rapid gate in large tubular pumping station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(10):1016–1022. (in Chinese)
- [20] 陆伟刚,郭兴明,周秀彩,等.大型泵站快速闸门断流过程理论研究[J].农业机械学报,2005,36(4):56–59.
LU Weigang, GUO Xingming, ZHOU Xiucan, et al. Theoretical study on stop gate breaking flow in large pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4):56–59. (in Chinese)
- [21] KAN K, ZHENG Y, CHEN H X, et al. Study into the improvement of dynamic stress characteristics and prototype test of an impeller blade of an axial-flow pump based on bidirectional fluid-structure interaction[J]. Applied Sciences, 2019, 9(17): 3601.
- [22] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering—Transactions of ASME, 2008, 130(7):078001.
- [23] 张德胜,李普熙,赵睿杰,等.泵站进水池吸入口涡旋结构及湍流特性的大涡模拟[J/OL].农业机械学报,2019,50(10): 134–141.
ZHANG Desheng, LI Puxi, ZHAO Ruijie, et al. Large eddy simulation of vortex structure and turbulence characteristics in pump sump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):134–141. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191015&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.015. (in Chinese)
- [24] KAN K, ZHENG Y, CHEN H X, et al. Numerical simulation of transient flow in a shaft extension tubular pump unit during runaway process caused by power failure[J]. Renewable Energy, 2020, 154:1153–1164.
- [25] 王福军.计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:118–119.
- [26] 周大庆,吴玉林,张仁田.大型立式轴流泵站启动过渡过程研究[J].水力发电学报,2007,26(1):119–122,128.
ZHOU Daqing, WU Yulin, ZHANG Rentian. Research on start-up transient of vertical axial-flow pump station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1):119–122,128. (in Chinese)
- [27] 刘跃飞,周大庆,郑源,等.快速闸门断流的轴流泵启动过程三维数值模拟[J].南水北调与水利科技,2017,15(1):167–172.
LIU Yuefei, ZHOU Daqing, ZHENG Yuan, et al. Numerical simulation of starting process of axial flow pump with quick-stop gate[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1):167–172. (in Chinese)
- [28] ANSYS Inc. ANSYS Fluent theory guide[M]. Pittsburgh: ANSYS Inc., 2017.