

文章编号: 1673-5196(2015)06-0060-05

水泵水轮机导叶开启瞬态过程数值分析

李琪飞^{1,2}, 蒋雷¹, 李仁年^{1,2}, 权辉^{1,2}, 谭海燕¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于滑动网格和动态网格相结合的思想, 实现水泵水轮机二维模型在转轮区转速增大和活动导叶开启共同作用下引起的瞬变流场的数值模拟, 得到速度、压强随时间的瞬态变化规律, 探讨水泵水轮机导叶开启过程的流场特性; 对预开一对导叶下的启动过程进行模拟, 分析导叶区域的内部流场瞬态演化过程。结果表明: 导叶开启过程中叶片对导叶区域的干涉作用由强变弱, 速度分布的均匀性和周向对称性逐渐提高; 设置预开一对导叶后, 破坏了初始阶段流动的对称性, 导致流动的不稳定性增强, 活动导叶与转轮之间的压强波动幅度增大, 对机组运行的稳定性有一定影响。

关键词: 水泵水轮机; 滑动网格; 动态网格; 导叶开启; 瞬态演化; 数值模拟

中图分类号: TK730.3 **文献标识码:** A

Numerical analysis of transient process of guide vane opening of pump-turbine

LI Qi-fei^{1,2}, JIANG Lei¹, LI Ren-nian^{1,2}, QUAN Hui^{1,2}, TAN Hai-yan¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the idea of combination of sliding mesh with dynamic mesh, the numerical simulation of the transient flow field in the two-dimensional model of pump-turbine is implemented in the case of impeller speed rising and guide vane opening so that the pattern of transient variation of velocity and pressure with time will be acquired and the flow field characteristics during the opening of the guide vanes will be explored. Besides, the start-up process is also simulated in the case of pre-opening a pair of guide vanes and the evolution process of the flow field around guide vanes is analyzed. The results show that the interference of the impeller blades with the guide vanes area during the guide vane opening will change from strong to weak and the uniformity and the circumferential symmetry of velocity distribution will be improved gradually. The setting of guide vane pre-opening pair will deteriorate the flow symmetry at the initial stage, leading to the enhancement of the flow instability and the increase of the amplitude of the pressure fluctuation. It will have a certain effect on the stability of the unit operation.

Key words: pump-turbine; sliding mesh; dynamic mesh; guide vane opening; transient evolution; numerical simulation

水力机械启动过程会引起明显的瞬态效应, 转速、流量和压力等流动参数短时间里急剧变化, 同时可能出现双列叶栅扰流尾迹干涉, 以及流动分离、旋转失速等不稳定现象。可逆式水泵水轮机作为一种特殊的水力机械, 其流道具有双向流动功能, 内部湍流的研究难度较常规水力机械更大。当水泵水轮机

在低水头启动时, 普遍存在“S”形不稳定水力特性区。在“S”区域内机组在同一单位转速下可能处在 3 个不同的单位流量点上, 其中一个还是负流量^[1], 此时机组易进入反水泵工况, 流道内湍流结构复杂, 水压异常上升, 转速波动不定, 且很难达到稳定, 最终导致机组难以并网。

预开启导叶法, 即设定少数导叶比其他导叶预先开启一个较大的开度使其他导叶在较小开度时就能得到相应的流量和速度, 从而使机组能在导叶较小开度时避开“S”不稳定区^[2]。目前国内外的学

收稿日期: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(51566009), 甘肃省自然科学基金(1310RJZA023)

作者简介: 李琪飞(1975-), 男, 甘肃靖远人, 博士生, 副教授。

者^[3-7]针对导叶的不同步操作和“S”特性区已进行了相关的研究,但就 CFD 模拟而言,多数研究均是在定开度、定转速条件下对机组内部流场进行的模拟研究,无法得到启动过程流动参数与导叶开度变化的内在规律,也无法反映启动过程流场内部结构随时间的瞬变过程。此外,针对边界运动带来的流场变形问题,吴大转、王乐勤等学者将动网格方法运用到离心泵启动瞬态过程的研究当中,证实了该方法在泵启动过程数值计算研究的可行性^[8-10]。但将该方法运用于水泵水轮机过渡过程的研究还鲜有报道。其主要原因在于转速、导叶开度及阀门的动态变化导致水泵水轮机启动过程的边界条件十分复杂^[3],此外旋转加速度引起的附加力矩等多种因素对内部流场的共同作用,使得水泵水轮机启动过程的流场结构相当复杂,更加增大了研究的难度。

因此,提出运用滑移网格与动态网格相结合的方法,通过 Fluent 软件中用户自定义函数(UDF)定义导叶开启规律以及转轮转速变化规律,实现了水泵水轮机二维模型导叶开启过程的瞬态数值模拟;对比分析转速增大情况下,导叶同步开启及带预开导叶非同步开启两种方案下活动导叶区域内部流场瞬态演化过程。

1 数值方法

1.1 计算模型

参考某电站装机容量为 250 MW 的混流式水泵水轮机,转轮叶片数为 9,活动导叶和固定导叶数均为 20,建立二维计算模型(见图 1)进行研究。参照文献^[7]中预开导叶的布置方式,设置 3 号(GV3[#])和 13 号(GV13[#])活动导叶为预开导叶(见图 1)。为监测预开导叶附近静压变化状况,在预开导叶附近设置四个压强监测点 a、b、c、d(见图 1)。

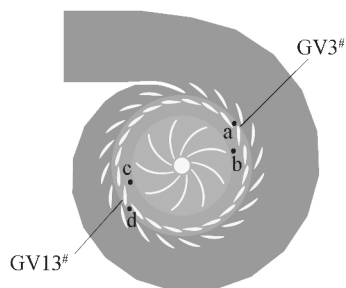


图 1 水泵水轮机二维计算模型

Fig. 1 Two-dimensional computing model of pump-turbine

利用 ICEM 软件建立起对复杂边界条件的物理区域适应性较强、适用范围更广^[11]的非结构化网格,在运动壁面(同步导叶、预开导叶)附近采用较小

尺寸的网格单元,便于实现网格运动更新后节点间的数据传递。

1.2 模拟方法

基于任意拉格朗日-欧拉描述(ALE)的滑移网格技术和动态网格技术相结合的方法,解决转速变化和导叶开度增大带来的边界运动问题。其基本理论是:在旋转叶片区域,为保持较好的网格质量,采用滑移网格方法;在活动导叶区域采用动态网格方法,网格更新方法选用弹簧光滑法(spring-based smoothing)和局部网格重构法(local remeshing)结合使用,确保精确的插值和积分结果。导叶开启规律和转速变化均通过 UDF 来给定,实现变转速、变开度瞬态过程的模拟。基于 ALE 描述的控制方程为^[12]

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j - \hat{u}_j) = 0 \quad (1)$$

式中: u_j 、 \hat{u}_j 分别为流体的运动速度和网格的运动速度,对于静止区域 $\hat{u}_j = 0$ 。

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_j - \hat{u}_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

式中: f_i 为单位体积力; ρ 为密度; p 为压强; ν 为水的运动黏性系数。

1.3 方案选定

1) 方案 I:所有活动导叶按直线规律开启,活动导叶开启过程的开度方程为

$$a_0(t) = 2.4t \quad 0 \leq t \leq 5 \quad (3)$$

式中: t 为时间,s; a_0 为活动导叶开度,mm。

2) 方案 II:预开导叶(GV3[#]和 GV13[#])在 $t=0$ s 时预开启到 26 mm(保持不变),其余 18 个同步导叶按式(3)开启。

两种方案下统一给定叶片区域转速变化规律为

$$n(t) = 5t \quad 0 \leq t \leq 6 \quad (4)$$

式中: n 为转速,rad/s。

1.4 湍流模型、离散方法与边界条件

选择 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对 N-S 方程进行封闭求解。采用贴体坐标系下的有限体积法和非交错网格对方程进行离散,压力和速度耦合采用 SIMPLEC 算法,压力项采用二阶中心差分格式,其他项均采用一阶迎风格式。给定蜗壳进口压力和出口压力,壁面处采用无滑移边界条件。时间步长为 0.01 s,整个模拟过程一共 6 s,以残差 0.000 1 作为收敛依据进行迭代计算^[13]。

2 结果分析

2.1 瞬时速度场

为了较好地对比两种方案下活动导叶区域流动状态,选取 $t=1、3、5\text{ s}$ 三个时刻的速度云图(见图 2 和图 3)进行分析。

图 3 是方案 II (非同步开启方案)下三个时刻的速度云图。可以看出, $t=1\text{ s}$ 时,活动导叶区域内流动速度明显大于同一时刻方案 I 下的流动速度,且速度变化剧烈,均匀度差,说明 GV3# 和 GV13# 的预开启增加了初始时刻的过流量,同时破坏了流动

的对称性,导致此时流动的湍流度高,流场极不规则; $t=3\text{ s}$ 时,速度变化梯度逐渐平缓,不均匀度有所降低,与方案 I 相比动态滑移面附近没有出现局部速度突变区,旋转叶片对该区域流动的干涉作用降低; $t=5\text{ s}$ 时速度分布与方案 I 下速度分布较为一致,区域内速度分布更加均匀。对比发现,增加一对预开导叶对初始时刻导叶区域内速度分布影响很大,破坏了流动的对称性,随着同步导叶的开启和转速的升高,转轮叶片对活动导叶区域流动的干涉被弱化,区域内速度分布逐渐均匀。

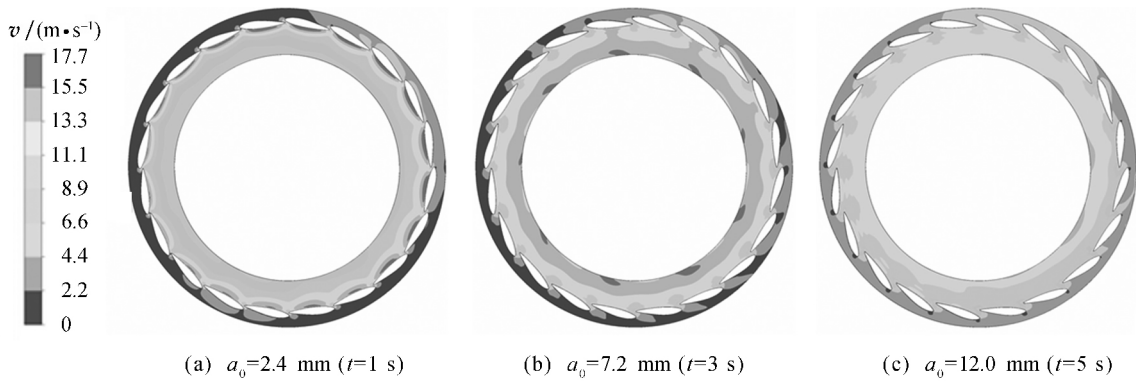


图 2 方案 I 下活动导叶区域速度云图

Fig. 2 Nephogram of velocity in guide vanes area in case of program I

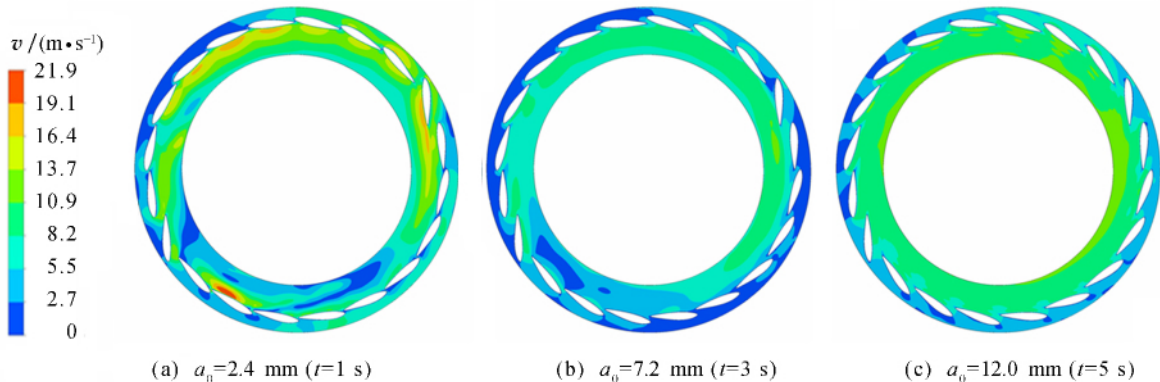


图 3 方案 II 下活动导叶区域速度云图

Fig. 3 Nephogram of velocity in guide vanes area in case of program II

2.2 导叶局部速度矢量

图 4 给出了方案 I 下三个时刻 GV3# 和 GV13# 附近的局部速度矢量图。从图 4 可以看出,同步启动过程中从导叶出口到动态滑移面间的切向速度较大,说明在流量较小时,导叶与转轮之间的水流沿圆周方向呈环状运动,引起该现象的原因是转速的快速升高使离心力作用增强,从而阻滞水流快速进入转轮区。随着导叶开度的增大,流量增大,导叶出口角变大,切向速度减小,矢量方向逐渐趋于一致。

图 5 给出了方案 II 下三个时刻 GV3# 和 GV13# 附近的局部速度矢量图。由图 5 可以看出,增设一对预开导叶后,在 $t=1\text{ s}$ 时,在 GV3# 的前缘、GV13# 的尾部撞击现象明显,预开导叶与相邻同步导叶流道间的速度矢量分布紊乱。这一方面是由于从固定导叶出口进入活动导叶区的水流方向与预开导叶进口的冲角较大,另一方面由于活动导叶开度较小,流道较窄的原因所导致的。随着同步导叶开度的增大,矢量分布的变化情况逐渐与方案 I 相似,这是因为预开导叶的投入强制增大了过流量,离

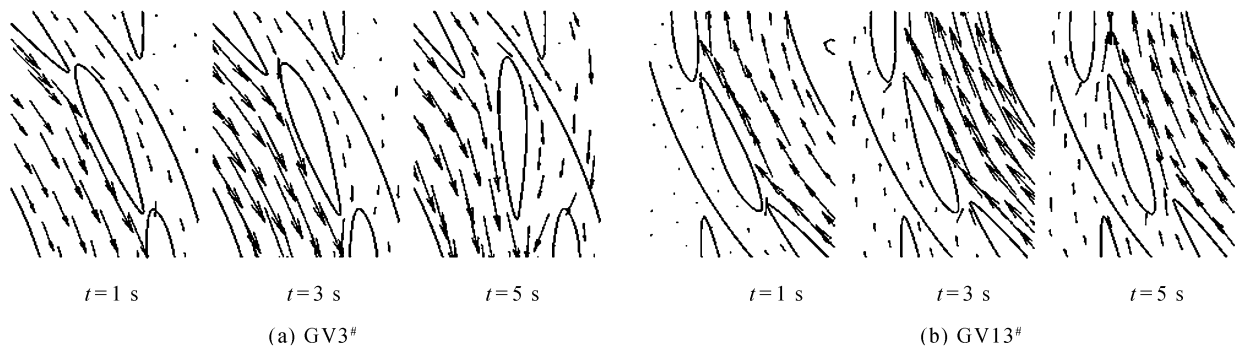


图 4 方案 I 下 GV3# 和 GV13# 处局部速度矢量图

Fig. 4 Diagram of local velocity vector at GV3# and GV13# in case of program I

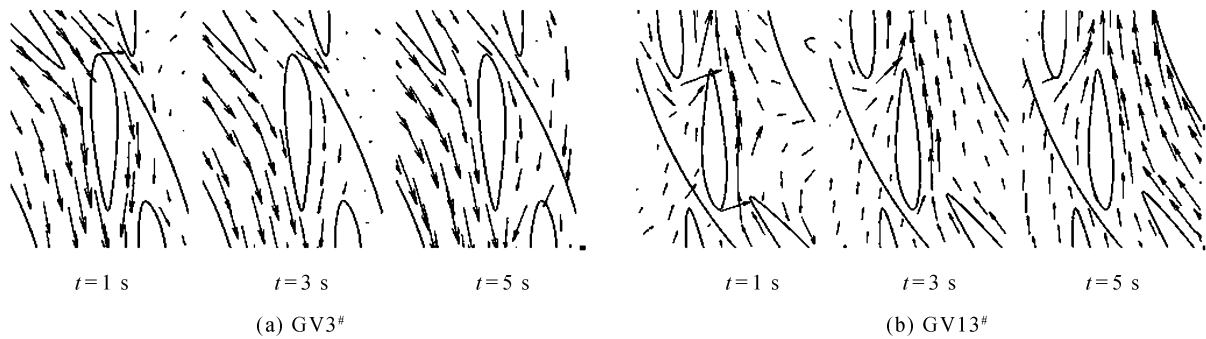


图 5 方案 II 下 GV3# 和 GV13# 处局部速度矢量图

Fig. 5 Diagram of local velocity vector at GV3# and GV13# in case of program II

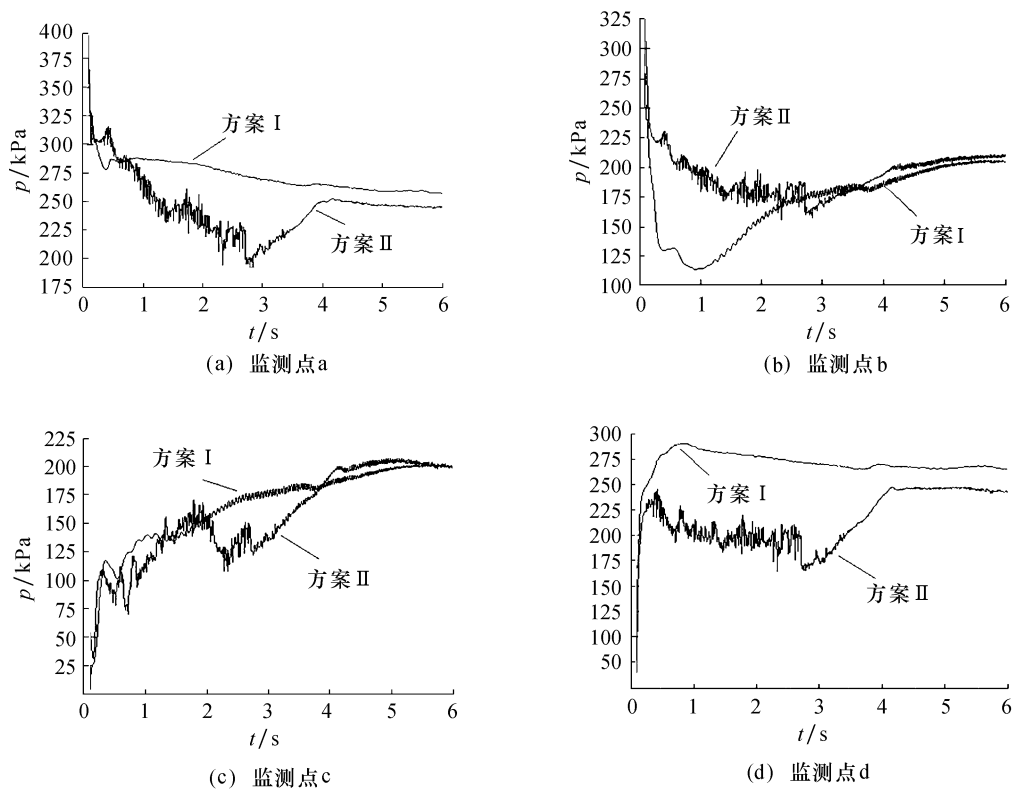


图 6 监测点压强瞬态变化

Fig. 6 Pressure transient change at monitoring station

心力对导叶开启过程的影响降低,使得导叶区域的速度分布逐渐均匀,这与分析速度云图后所得的结论相一致.

2.3 监测点压强瞬时变化

选择 GV3[#]附近的点 a 和点 b, GV13[#]附近的点 c 和点 d 四个点为压强监测点(位置如图 1 所示).图 6 显示在两种导叶开启方案下四个监测点的瞬态静压变化情况,可以看出,方案 I 下大约在 $t=1$ s 之前,各点的静压变化幅度较大,这与导叶突然开启,流道内速度发生剧烈变化有密切关系,随后各点的静压变化逐渐平缓,波动幅度较小.增设一对预开导叶后,各点的压强变化趋势发生明显改变,约在 3 s 之前各点的波动幅度较方案 I 明显变大,监测点 b 和监测点 d 在这一阶段的静压变化较方案 I 要缓和很多, $t=3$ s 以后各点波动幅度减小,静压变化趋势逐渐与方案 I 相似.因此,设置一对预开导叶后机组的振动现象和内部流动的不稳定性比同步开启过程更加明显.

3 结论

1) 导叶同步开启过程中,在导叶开度较小时,离心力作用导致导叶背面出现局部高速区;随着导叶的开启,旋转叶片对导叶区流动的干涉作用逐渐减弱,速度分布趋于均匀并呈现出周向对称性,全过程的非定常特性十分明显.

2) 非同步开启方案下(GV3[#]和 GV13[#]预开到 23 mm),由于初始阶段的过流量被强制增大,区域内流动对称性遭到严重破坏,导致速度变化剧烈;监测点静压的波动幅度较同步开启方案会明显增大,这会导致机组振动加剧,运行不稳定性增强.随着同

步导叶的开启,活动导叶区域内速度分布和压强变化规律逐渐与同步开启方案相似.

参考文献:

- [1] 梅祖彦.抽水蓄能发电技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 陈云山.水泵水轮机“S”特性区危害及解决对策[J].水力发电学报,2008,34(6):70-73.
- [3] 尹俊连.水泵水轮机“S”区内流机理及优化设计研究[D].浙江大学,2012.
- [4] 李仁年,刘殿兴,董志强,等.水泵水轮机“S”区全流道数值模拟[J].排灌机械工程学报,2013,31(5):401-405.
- [5] VLAD H, MOHAMED F, STEVEN R, *et al.* Experimental Evidence of Rotating Stall in a Pump-Turbine at Off-Design Conditions in Generating Mode[J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(5):2-8.
- [6] 黄剑锋,张立翔,王文全,等.基于动网格的活动导叶流道内湍流场数值模拟[J].排灌机械工程学报,2010,28(2):141-143.
- [7] 刘竹青,孙卉,肖若福,等.水泵水轮机“S”特性及其性能改善[J].水力发电学报,2013,32(2):257-260.
- [8] 李志锋,吴大转,王乐勤.圆柱和直浆叶突然启动瞬态流动的数值研究[J].工程热物理学报,2007,28(6):945-947.
- [9] 王乐勤,李志峰,戴维平,等.离心泵启动过程内部瞬态流动的二维数值模拟[J].工程热物理学报,2008,29(8):1319-1322.
- [10] 黄思,杨福翔,郭京,等.运用三维动网格技术模拟计算离心泵非定常流动[J].科技导报,2013,31(24):33-36.
- [11] 李琪飞,李仁年,韩伟,等.混流式水轮机引水、导水部件内部固液两相流动的数值分析[J].兰州理工大学学报,2008,34(6):47-50.
- [12] 周大庆,吴玉林,刘树红.轴流式水轮机模型飞逸过程三维湍流数值模拟[J].水力学报,2010,41(2):233-238.
- [13] 李琪飞,张毅鹏,敏政,等.变工况下贯流式水轮机叶片形变分析[J].兰州理工大学学报,2015,41(2):61-64.