基于动网格的活动导叶流道内湍流场数值模拟

黄剑峰，张立翔，王文全，姚　激
（昆明理工大学 工程力学系，云南 昆明 650051）

摘　要：基于任意拉格朗日欧拉框架下的二维时均 N－S 方程，应用非结构动网格技术，对某型号混流式水轮机活动导叶单流道内的导水机构关闭过程，进行了动态湍流数值模拟. 利用 CFD 软件 Fluent 6.3，采用非结构化三角形网格，标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和压力速度耦合的 PISO 算法，真实地模拟了导水机构关闭的动态过程中，活动导叶流道内的压力场和速度场的瞬态变化过程. 数值计算结果表明，导水机构两段折线关闭过程中，随着活动导叶开度的减小，流场发展呈现明显的非定常特性，水流绕过活动导叶后出现强的旋涡，对过渡过程的动态特性产生了影响. 该方法能有效地模拟由于活动导叶动作诱发的流场脉动.

关键词：混流式水轮机；活动导叶；动网格；瞬态湍流场；数值模拟
中图分类号：TK730.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674－8530(2010)02－0140－04

Numerical simulation of turbulent flow in vane passage based on dynamical mesh technology

Huang Jianfeng, *Zhang Lixiang*, *Wang Wenquan*, *Yao Ji*
(Department of Engineering Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: The numerical simulation of two dimensional transient turbulent flow in a guide vane passage of a Francis turbine was conducted based on the ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) and dynamic mesh technology. The dynamical changes of the pressure and velocity were simulated by Fluent 6.3, using unstructured-triangle grid, standard $k-\varepsilon$ turbulence model and PISO algorithm as the guide vane was moving. The results show that the evolution of the flow field is unsteady with decreasing of the vane opening. Based on these researches, the eddy structures evolving spatially and temporally were visualized. The calculation provides some reference for vortex-induced vibration in a complex turbulent flow of hydraulic machinery. The study is valuable for simulating the turbulence induced by the guide vane adjustment.

Key words: francis turbine; guide vane; dynamic mesh; transient turbulent flow; numerical simulation

水电站引水发电系统的过渡过程，是流体、机械、电气甚至结构相互耦合的复杂的动态过程. 水电站运行中经常会遇到由于各种事故，而致机组突然与系统解列甩掉负荷的情况. 此时，机组转速急剧上升，严重时会导致机组损坏. 为此，调速器必须迅速关闭导叶，使引水管道中流量急剧减小. 但此时，水轮机压力过水系统又会产生水击，使水压大幅度上升或下降，对压力过水系统和机组的安全构成了严重威胁. 转速上升和最大水压都与导叶关闭速度有关. 导叶关闭越快，水压上升越大；导叶关闭越慢，转速上升越快. 为此，必须进行调节保证计算，寻求合理的关闭时间和关闭规律，使最大水压和转速上升值均在允许范围内[1].

近年来，随着计算流体动力学(computational

收稿日期：2009－08－11
基金项目：国家自然科学基金重点资助项目(50839003)；云南省自然科学基金资助项目(2008GA027)
作者简介：黄剑峰(1978—)，男，云南楚雄人，讲师，博士研究生(hjf30@126.com)，主要从事水力机械流动数值模拟研究.
张立翔(1959—)，男，云南石屏人，教授，博士生导师(zlxzcc@126.com)，主要从事流固耦合振动研究.

万方数据

fluid dynamics,CFD)和计算机技术的飞速发展,数值模拟手段广泛应用于水轮机内部的复杂流动的研究.数值模拟手段加深了水轮机设计者和科研人员对其内部复杂流动的认识,从而有可能从改善其内部流场结构出发,达到降低流动损失,改善水轮机振动性能的目的.但以往的数值模拟多局限于定常或非定常静态(即导叶静止)研究,例如文献[2-6],它们的共同点是分别具体研究活动导叶停留在某几个特殊位置(开度)时的流动状态.这对于模拟水轮机稳定工况是合理的,但作为设计参考,必须考虑变工况以及导叶起闭过程等.

在水电工程实践中采用的两段折线关闭规律,与一段直线关闭规律相比,在改善水轮机甩负荷过渡过程品质方面,显示出较大的优越性.导水机构两段折线关闭规律:当水轮机甩掉负荷时,导叶首先以较快的速度等速关闭到某开度,而后再以较慢的速度等速关闭至零.由于第一段关闭的速度较快,转速上升值将被降低;导叶第二段关闭速度较慢,从而限制引水系统水压上升值.只要两段关闭拐点的所在位置和两段关闭速度选择适当,这种关闭方式不论对于限制机组转速上升,还是限制压力上升,均有好处[7].导叶不同的控制规律对水轮机过渡过程的动态特性影响很大.

本研究以某型号混流式水轮机的活动导叶单流道为计算对象,应用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和动网格方法,对活动导叶两段折线关闭过程进行二维瞬态湍流数值模拟,获得导水机构关闭过程中不同瞬时活动导叶单流道内的压力场和速度场,捕捉在导水机构的关闭过程中活动导叶尾部的涡旋,找到导致水轮机产生涡激振动、影响机组安全运行的因素.

1 数值模拟方法

1.1 计算对象及网格设计

计算对象为某混流式水轮机活动导叶二维单流道,计算网格采用适应性强的三角形非结构化网格划分.网格节点数共约 203 000 个,网格单元数共约 403 000 个.计算程序由商用 CFD 软件 Fluent 6.3 完成.采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型[8].采用有限体积法对瞬态 N-S 方程进行离散[9],对流项的离散采用二阶迎风格式,扩散项的离散采用具有二阶精度的中心差分格式.在时间离散上,采用一阶全隐式格式.压力和速度的耦合求解采用适于非定常计算的 PISO 算法.

1.2 ALE 动网格模型控制方程

对于通量 ϕ,在任意控制体 V 内,其边界是运动的,守恒方程的通式为[10]

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho\phi \mathrm{d}V + \int_{\partial V}\rho\phi(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_s)\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A} = \int_{\partial V}\Gamma\nabla\phi\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{A} + \int_V S_\phi \mathrm{d}V, \quad (1)$$

式中 ρ 是流体的密度;$\boldsymbol{u}$ 是流体的速度矢量;$\boldsymbol{u}_s$ 是动网格的网格变形速度;$\boldsymbol{A}$ 是控制体 V 界面的面积;Γ 是扩散系数;S_ϕ 是通量 ϕ 的源项;∂V 代表控制体 V 的边界.

在方程(1)中,第一项可以用一阶向后差分形式表示为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho\phi \mathrm{d}V = \frac{(\rho\phi V)^{n+1}-(\rho\phi V)^n}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中 n 和 $n+1$ 分别代表当前步和紧接着的下一时间步.第($n+1$)步的体积 V^{n+1} 由式(3)计算:

$$V^{n+1} = V^n + \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Delta t, \quad (3)$$

式中 $\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}$ 是控制体的时间导数.为了满足网格守恒定律,控制体的时间导数由式(4)计算:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \int_{\partial V}\boldsymbol{u}_s\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{A} = \sum_j^{n_f}\boldsymbol{u}_{s,j}\cdot\boldsymbol{A}_j, \quad (4)$$

式中 n_f 为控制体积的面网格数;$\boldsymbol{u}_{s,j}$ 为对应于面 j 的网格变形速度;$\boldsymbol{A}_j$ 为面 j 的面积向量.点乘 $\boldsymbol{u}_{s,j}\cdot\boldsymbol{A}_j$ 由式(5)计算:

$$\boldsymbol{u}_{s,j}\cdot\boldsymbol{A}_j = \frac{\delta V_j}{\Delta t}, \quad (5)$$

式中 δV_j 为控制体积面 j 在时间间隔 Δt 中扫过的空间体积.

1.3 边界条件

采用速度进口和自由出流边界条件,在壁面处采用无滑移边界条件,近壁区采用标准壁面函数.活动导叶的运动方式采用动边界文件(profile)来控制[10].活动导叶采用两段折线关闭规律.计算中时间步长为 0.001 s.第一段以较快速度关闭的时间为 5 s,关闭到导叶开度的 50%;第二段以较慢速度关闭到全关的时间为 10 s.

1.4 可动区域计算的动网格模型

动网格技术用于计算运动边界问题,可以用来模拟由于流域边界运动引起流域形状随时间变化的流动情况.由于在动网格技术中,是根据边界或物体的移动,自动进行计算域的网格重建,因此,动网格模型

万方数据

是求解非定常问题的，而且对计算资源要求比较高. 动网格模型是在每一个时间步迭代之前，根据边界或物体的运动、变形，来更新和重新构建计算域的网格，从而达到计算各种非定常的流固耦合、计算域随时间变形变化问题的目的. 动网格的含义就是计算域的网格是运动的、不断更新变化的. 动网格重新构建的计算方法，采用弹性光顺法(spring-base smoothing)和局部网格重划法(local remeshing). 弹性光顺法是将网格系统看作是由节点之间用弹簧相互连接的网格系统，初始网格就是系统保持平衡的弹簧网格系统. 任意一个网格节点的位移都会导致与之相互连接的弹簧中产生弹性力，进而导致临近网格节点上的力的平衡被打破. 由此波及出去，经过反复迭代，最终在整个弹簧网格系统达到新的平衡时，就可以得到一个变形后的、新的网格系统. 局部网格重划法是对弹性光顺法的补充. 如果边界的移动和变形过大，可能导致局部网格发生严重的歧变，甚至出现网格体积为负的情况. 局部网格重划法可对这些质量差的网格进行合并或拆分后重新划分新的网格.

2 结果及分析

2.1 活动导叶关闭过程不同瞬时的压力场

活动导叶关闭过程各个时刻的压力场(静压)分布如图 1 所示. 第一阶段关闭初期 $t=2$ s(导叶转过 18°)时，活动导叶关闭速度较快，活动导叶工作面形成较大范围的高压区，背面压力相对较小，在活动导叶前缘形成了一个小范围的低压区，而在活动导叶后缘产生了一个很小的负压中心；在第一阶段关闭快要结束的 $t=4$ s(导叶转过 36°)时，流场压力分布变得不均匀，活动导叶尾端的负压中心逐渐扩大并向后转移. 第二阶段关闭开始 $t=8$ s(导叶转过 59°)时，活动导叶关闭速度减慢，负压中心继续增大并向下游传递；第二阶段关闭基本结束的 $t=14$ s(导叶转过 86°)时，活动导叶工作面之前整个流场已处于高压区，背面后部低压区有一个明显的负压中心.

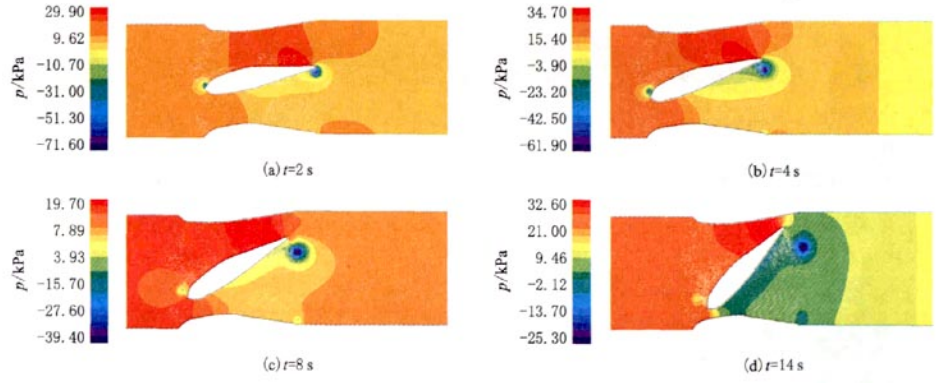
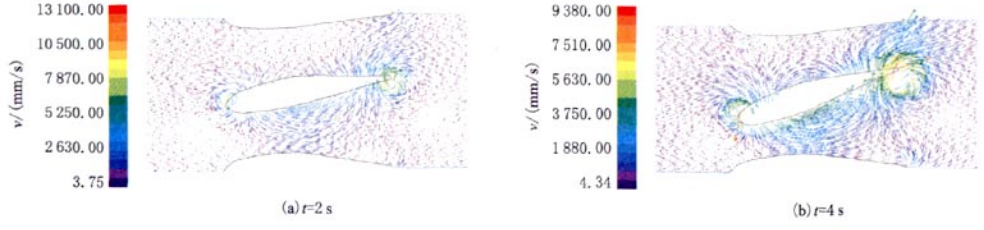


图 1 活动导叶关闭过程中不同瞬时压力分布

Fig. 1 Profile of instantaneous pressure in guide vanes passages

2.2 活动导叶关闭过程不同瞬时的速度场

活动导叶关闭过程各个时刻的速度场分布如图 2 所示. 第一段关闭速度较快，在 $t=2$ s(导叶转过 18°)时，活动导叶后缘已形成一个很小的旋涡；在 $t=4$ s(导叶转过 36°)时，活动导叶前缘已有较为明显的撞击和脱流，活动导叶尾端的涡旋继续发展壮大向下游转移. 第二段关闭速度较慢，在时刻 $t=10$ s(导叶转过 68°)时，活动导叶尾端涡旋已明显增长形成强的旋涡并向下游传播；在 $t=14$ s(导叶转过 86°)时，活动导叶背面前端有较大的撞击和脱流，活动导叶尾端的强涡旋继续向下游转移和传递，会诱发水轮机产生涡激振动.



万方数据

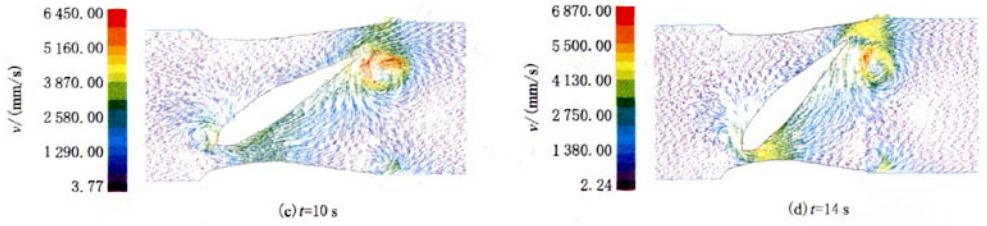


图2 活动导叶关闭过程中不同瞬时速度分布

Fig. 2 Profile of instantaneous velocity in guide vanes passages

3 结 论

(1)使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和动网格技术,对某型号混流式水轮机导水机构中活动导叶的关闭过程,进行了二维瞬态湍流数值模拟研究. 计算得到了活动导叶单流道内的压力场和速度场.

动网格模型可获得活动导叶关闭过程中水流的瞬态变化情况,相对于静态仿真,动态仿真更能准确地模拟出导叶关闭过程中流场结构的瞬时变化. 随着导叶开度的减小,流场呈现复杂的非定常特性,水流绕流后导叶尾端出现强的涡旋,会引起水轮机产生涡激振动,这对机组的安全运行非常不利. 该研究对于采用动态模拟的方法模拟水轮机导水机构调节过程有一定的参考价值.

(2)动网格技术适用于模拟流体与结构相互作用的非定常流动问题. 该技术对运动边界的描述与我们对运动边界的认识是一致的,不像滑移网格技术通过交界面传递数据,给计算区域模型处理上带来不便. 动网格直接建立计算区域模型,通过 UDF 或 profile 文件驱动动边界运动.

该研究验证了采用动网格方法来仿真活动导叶关闭过程瞬态流场的可行性,并为将动网格技术应用到三维模型的非定常流动演化研究奠定了基础.

参考文献(References)

[1] 王 煜,田 斌. 对水轮机导叶最优关闭规律的探讨[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2007,29(2):113-115.
Wang Yu, Tian Bin. Research for optimizing closing law of wicket gate of hydro-turbines[J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2007, 29(2):113-115. (in Chinese)

[2] He L. Three-dimensional unsteady Navier-Stokes analysis of stator-rotor interaction in axial-flow turbines[J]. *Journal of Power and Energy*, 2000,214(1): 13-22.

[3] Yilbas B S, Budair M O, Naweed Ahmed M. Numerical simulation of the flow field around a cascade of NACA 0012 airfoils-effects of solidity and stagger[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998,158(1/2): 143-154.

[4] Michelassi V, Wissink J G, Rodi W. Direct numerical simulation, large eddy simulation and unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes simulations of periodic unsteady flow in a low-pressure turbine cascade: a compa-rison[J]. *Journal of Power and Energy*, 2003,217(4): 403-412.

[5] Jadic I, So R M C, Mignolet M P. Analysis of fluid-structure interactions using a time-marching technique[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1998,12(6): 631-654.

[6] 王春林,郑海霞,张 浩,等. 可调叶片高比转速混流泵内部流场数值模拟[J]. 排灌机械,2009,27(1): 30-34.
Wang Chunlin, Zheng Haixia, Zhang Hao, et al. Numerical simulation for adjustable high specific speed mixed-flow pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*,2009,27(1): 30-34. (in Chinese)

[7] 常近时. 水力机械装置过渡过程[M]. 北京:高等教育出版社, 2005: 86-87.

[8] 严 军,何 仁,鲁 明. 液力缓速器变叶片数的三维数值模拟[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2009,30(1):27-31.
Yan Jun, He Ren, Lu Ming. Numerical simulation of hydraulic retarder with different blade number[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2009,30(1): 27-31. (in Chinese)

[9] 施卫东,田 飞,曹卫东,等. 不同池形中推流搅拌器功率消耗的数值模拟[J]. 排灌机械,2009,27(3): 140-144.
Shi Weidong, Tian Fei, Cao Weidong, et al. Numerical simulation of mixer power consumptions in different ponds[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*,2009,27(3): 140-144. (in Chinese)

[10] 江 帆,黄 鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008:205-216.

(责任编辑 张文涛)

万方数据