排灌机械工程学报 2010年11月 Nov. 2010 第28卷 第6期 Vol. 28 No. 6
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

基于大涡模拟的水轮机内瞬态湍流场特性分析

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：基于三维瞬态N－S方程，采用大涡模拟方法中的Smargorinsky模型，应用模拟动静干扰效果较好的滑移网格技术，以标准$k-\varepsilon$模型稳态计算的结果作为初始条件，对某混流式水轮机全流道进行了的三维瞬态湍流数值模拟. 用Fluent 6.3，采用非结构化的混合网格和压力速度耦合的PISO算法，成功地模拟了水轮机在运行中的各种瞬态细节过程，如涡旋的卷起、增长、合并、破碎和脱落. 模拟结果给出了偏工况下水轮机导水机构和转轮流道内大尺度涡结构的瞬态发展演变过程. 计算结果表明大涡模拟方法能较好地模拟水轮机内水流的瞬态流动特性和瞬时涡的发展演化过程，该方法可为探索研究水力机械复杂流道湍流运动状态下涡旋的形成机理提供有价值的参考.

关键词：混流式水轮机；水力机械；计算流体动力学；三维瞬态湍流场；大涡模拟
中图分类号：S277.9；TK730.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674－8530(2010)06－0502－04

Large eddy simulation of transient turbulent flow in Francis turbine

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

Abstract: Numerical simulation of three-dimensional transient turbulent flow in the whole flow passage of a Francis turbine based upon the Reynolds averaged N－S equations was conducted with the large eddy simulation (LES) technique on Smargorinsky model and sliding mesh technology. The steady flow data simulated with the standard $k-\varepsilon$ model were used as the initial conditions for the unsteady simulation. The large scale structures evolving in spatially and temporally were visualized by the software Fluent 6.3, using unstructured hybrid-grid and PISO algorithm. The evolution details of the large scale structures such as eddy from generate to shedding in vane cascades and blade passages were well captured at special case. The results show that LES can well simulate transient turbulent flow in a Francis turbine with complex geometry. The computational method provides some reference for exploring mechanism of eddy formation in a complex turbulent of hydraulic machinery.

Key words: Francis turbine; hydraulic machinery; computational fluid dynamics; turbulent flow; large eddy simulation

水轮机中由于旋转部件与静止部件相互干扰所引起的非定常流可诱发水力振动，引起水轮机过流部件疲劳破坏，甚至在导叶、转轮叶片或尾水管管壁产生裂纹，影响水轮发电机组的安全运行[1]. 水力机械中复杂的非定常流都伴随着复杂的涡旋运动和相互作用. 随着数值分析方法的进展、计算机技术的提高和CFD技术的进步，三维非定常湍流数值模拟技术的应用为准确地预测水力机械流体动力学性能

收稿日期：2009－11－20
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，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(通讯作者，zlxzcc@126.com)，主要从事流固耦合振动研究.

万方数据

奠定了技术基础，水力机械三维湍流的数值模拟越来越精确，已在水力机械的研究、设计开发、优化中得到了广泛应用[2-3]. 目前水轮机非定常流数值模拟已成为水力机械 CFD 领域研究的热点之一.

目前，流动数值模拟常用的湍流模型多以雷诺时间平均为基础得到的，而雷诺时均的过程忽略了湍流若干细节，在时间域上对流场变量进行平均，无法准确地模拟旋涡的生成和运输，因而使用范围受到限制. 直接数值模拟(DNS)需要的存储和计算量都非常大，目前还无法解决工程问题，无法实现水轮机流动计算的 DNS. 而介于 DNS 和雷诺时均方法(RANS)之间的大涡模拟(LES)结合了以上两种方法的优点，可以获得比较精细的瞬态流场，且所需要的计算机资源不需 DNS 那么高，是最有发展潜力的数值方法，在科学研究和工程应用上都显示出良好的发展前景[4-5]. 采用大涡模拟理论进行水轮机的流动计算始于 Song[6]，他采用 Smargorinsky 的涡粘性公式模化亚格子雷诺应力，首次对水轮机主要的过流部件进行了计算. Chen Xiangying[7] 利用弱可压缩流体方程和有限体积法对包括蜗壳、转轮和尾水管在内的混流式水轮机进行了大涡模拟. 杨建明等[8]建立了基于大涡模拟思想而方程上类似于时均 $k-\varepsilon$ 模型的大涡模拟——双方程模型，对水轮机中的尾水管进行了计算，得到了与试验结果接近的计算结果. 王文全等[9]基于一方程混合动态亚格子模型对混流式水轮机的一个叶道进行了大涡模拟，获得了叶道内湍流流动的统计特性、动态特性和瞬时涡量结构. 由于水轮机几何流道结构复杂，使用大涡模拟进行水轮机过流部件计算的还不多见.

笔者以某水电站混流式原型水轮机为计算对象，应用 Smargorinsky 模型和滑移网格方法进行了全流道动静干扰的三维瞬态湍流大涡数值模拟，获得了偏工况下水轮机导水机构和转轮叶道内的瞬时涡量分布，捕捉到了大尺度涡旋结构的产生、发展、破碎和脱落，结果表明大涡模拟能够准确地给出水轮机流场中瞬时的不同尺度涡的结果，能够揭示水力机械中复杂流场涡的演化. 该研究对于大涡模拟方法在湍流机理研究以及工程应用具有指导意义.

1 数值模拟方法

1.1 计算对象及网格设计

计算对象为文献[10]中的原型水轮机蜗壳进口到尾水管出口的整个流道，计算网格采用适应性强的非结构化的混合网格分块划分. 网格节点数共约 40.8 万个，网格单元数共约 202 万个. 计算程序由商用 CFD 软件 Fluent 完成. 采用有限体积法和非交错网格对瞬态控制方程进行离散，源项和扩散项采用二阶中心格式，对流项采用二阶迎风格式. 在时间离散上，采用二阶全隐式格式. 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 大涡模拟方法及 Smargorinsky 涡粘模型

大涡模拟的方法包括大尺度涡的过滤和小尺度涡的模拟. 对大尺度涡进行直接模拟，而对小尺度涡采用亚格子模型进行模拟. 因此，对于大尺度的涡团，大涡模拟得到的是其真实结构状态，而小尺度涡虽然是用亚格子模型模拟的，但由于其具有各向同性的特点，因而建立普遍意义的模型是合理的. 在选用合适亚格子模型的条件下，大涡模拟可以得到很高的精度，而且大涡模拟的上述特性也决定了其模拟结果是真实的物理瞬态流场. Smagorinsky 模型[11]是 Smagorinsky 于 1963 年提出的第一个亚格子模型，直至今天仍然被广泛应用. 采用涡粘形式的亚格子雷诺应力模型 $\bar{\tau}_{ij}$ 为

$$\bar{\tau}_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j, \tag{1}$$

$$\bar{\tau}_{ij} - \frac{1}{3}\bar{\tau}_{kk}\delta_{ij} = -2v_t S_{ij}, \tag{2}$$

式中带上划线的量为滤波后的物理量，$\bar{\tau}_{ij}$ 为亚格子尺度应力，它体现了小涡对大涡的影响；$\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 为速度向量在直角坐标系中的速度分量；τ_{kk} 为黏性应力(k 取 1,2,3)；δ_{ij} 为 Kronecker 常数；S_{ij} 为流体应变率张量；v_t 为亚格子涡粘系数，$v_t = (C_S\Delta)^2 |S_{ij}|$，$|S_{ij}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$，$\Delta$ 为过滤网格尺度，C_S 为 Smagorinsky 常数，一般的 C_S 值在 0.1 到 0.3 之间.

1.3 初始条件和边界条件

与单部件的流动模拟相比，全流道所有部件整体模拟耦合计算的边界条件更容易给定，在动静部件间不会产生不准确的边界条件，计算时只需指定进口和出口的边界条件即可，计算结果与实际情况更接近. 根据水轮机的运行工况，给定蜗壳速度进口和尾水管自由出流边界条件，在壁面处采用无滑移边界条件，近壁区采用标准壁面函数.

初始条件通过标准 $k-\varepsilon$ 模型进行稳态计算获得. 大涡模拟计算中时间步长为 0.000 1 s.

1.4 可动区域动静干扰计算的滑移网格法

滑移网格法属于瞬态计算方法，在计算子域间设置网格分界面，计算中相邻子域将按照各自运动定义沿网格分界面进行滑移. 不同子域间的流动参

万方数据

数传递通过网格分界面完成，计算中网格是滑移的，分界面也就随时间变化. 为实时求解界面流动，在每一新的时间步长内需确定子域间新的网格分界面，通过实时的新分界面的通量传递实现不同子域间实时耦合. 计算中在水轮机动静干扰作用较为强烈的上游导叶与转轮进口、转轮出口与下游尾水管交接面设置为网格分界面.

2 结果及分析

考虑到当偏离设计工况运行时，由空间非均匀性和动静部件相对运动所导致的非定常流对机组的稳定性影响很大，主要对小开度（导叶开度为25%）和大开度（导叶开度为100%）两种工况进行了瞬态湍流场的大涡模拟研究.

2.1 导水机构不同瞬时涡量场

图1为大开度工况不同瞬时水轮机导水机构流向涡量分布图. 可以看出，水流在固定导叶和活动导叶的前端撞击后都出现了流向涡对，受活动导叶曲率的影响在活动导叶后的流向涡结构随时间和空间位置变化最为明显，流向涡对经过相互追随、吸引、合并、破碎和脱落等过程充分发展之后对下游的旋转转轮产生强动静干扰，产生的涡带进一步扩张到转轮中会诱发水轮机的水力振动. 这种复杂的非稳态特性对理解水轮机导水机构内实际流动及导叶起闭过程有很大的启示.

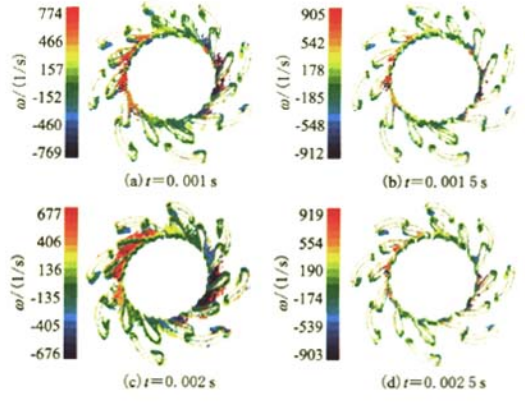


图1 大开度工况瞬时导水机构流向涡量分布

Fig. 1 Snapshots of instantaneous streamwise vortices in stay and moving vanes at large opening case

2.2 转轮流道内不同瞬时涡量场

水流通过水轮机转轮时，一方面沿着弯曲的转轮叶片做相对运动，另一方面又随转轮旋转，同时转轮流道内伴随着复杂的涡旋运动. 图2为大开度工况瞬时转轮流道内流向涡量分布图，图3为大开度工况瞬时转轮流道内展向涡量分布图，图4为小开度工况瞬时转轮流道内展向涡量分布图. 大开度工况下水流进入转轮后已经形成涡列结构，此后，随着流动的发展，流场结构变得复杂，不断出现涡的生成、增长、卷起、合并、破碎等过程，大、小尺度涡结构不断进行能量交换，表现出强烈的非线性，如图2，3所示. 此外，在该模拟结果中还发现，在大涡的尾迹区存在小尺度的涡，这些小涡在大涡的发展过程中始终伴随大涡运动而不被大涡吞没，同时其自身也经历复杂的演变，能量耗散进一步加大. 计算还表明，转轮中的涡经历了生成、增长、合并等过程而形成较大尺度的涡后，这些大尺度的涡会在发展过程中自行破碎为小涡，形成大涡到小涡的级联过程.

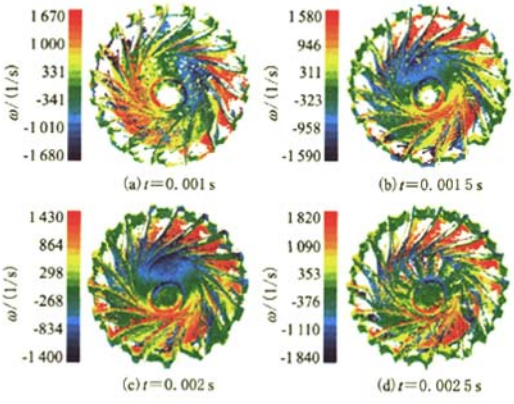


图2 大开度工况瞬时转轮流道流向涡量分布

Fig. 2 Snapshots of instantaneous streamwise vortices in blade passage at large opening case

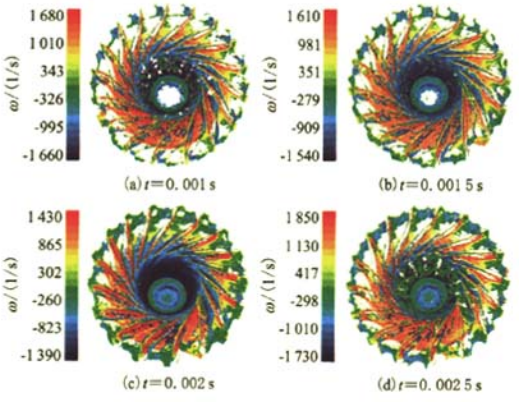


图3 大开度工况瞬时转轮流道展向涡量分布

Fig. 3 Snapshots of instantaneous spanwise vortices in blade passage at large opening case

万方数据

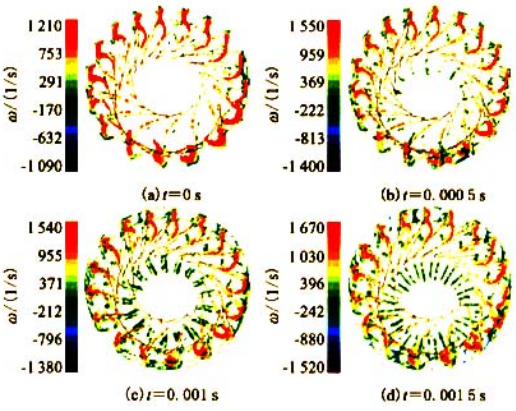


图4 小开度工况瞬时转轮流道展向涡量分布

Fig. 4 Snapshots of instantaneous spanwise vortices in blade passage at small opening case

从图4可以看出,在小开度工况下展向涡发生了扭曲、倾斜变形,形成了影响水轮机稳定性的叶道涡.正是由于展向涡在展向相位的不均匀,出现周期性变形,导致流动在展向出现剪切,这进一步说明了三维复杂的涡结构.整个转轮流道内水流的发展主要受大涡的演化所控制.

3 结 论

使用大涡模拟中经典的Smargorinsky涡粘模型和先进的滑移网格技术对混流式水轮机中动静干扰的三维瞬态湍流场进行了数值模拟研究,结果表明大涡模拟方法可获得水轮机内水流的瞬态流动特性,对水轮机内部复杂流道的湍流场具有较强的模拟能力,应用LES方法可以获得较RANS的$k-\varepsilon$家族模型更为精细的数值模拟成果,因为时均方法只能获得时均流场,不能揭示流场中的复杂的涡旋结构.该研究对进一步揭示水轮机内部的流动机理具有重要意义,为进一步发展大涡模拟在其他复杂流动中的应用提供了基础.同时大涡模拟也是联系雷诺时均湍流模型与直接数值模拟的桥梁,该方法必将在水力机械湍流数值模拟方面发挥越来越重要的作用,为探索研究复杂流道湍流运动状态下涡旋的形成机理提供更有效的研究手段.

参考文献(References)

[1] 于 波,肖惠民.水轮机原理与运行[M].北京:中国电力出版社,2008:311-327.

[2] 吴玉林,刘树红,钱忠东.水力机械计算流体动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2007:183-203.

[3] 李琪飞,李仁年,韩 伟,等.蜗壳内部含沙水两相流动的CFD模拟分析[J].排灌机械,2007,25(5):61-64.
Li Qifei, Li Rennian, Han Wei, et al. CFD simulation of sand-water two-phase inner flow field of volute[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(5):61-64. (in Chinese)

[4] Roland Bouffanais. Advances and challenges of applied large-eddy simulation[J]. *Computers & Fluids*, 2010, 39(5):735-738.

[5] Karabelas S J. Large eddy simulation of high-Reynolds number flow past a rotating cylinder[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2010, 31(4): 518-527.

[6] Song C, Chen X Y, He J, et al. Using computational tools for hydraulic design of hydropower plants[J]. *Hydro Review*, 1995, 14(4):114-121.

[7] Chen Xiangying, 等. 采用大涡模拟方法对混流式水轮机系统进行综合模拟[J].国外大电机,2001(1):64-67.
Chen Xiangying, et al. Comprehensive simulation of a Francis hydro turbine system based on large eddy simulation technique[J]. *Guowai Dadianji*, 2001(1):64-67. (in Chinese)

[8] 杨建明,刘文俊,吴玉林.用大涡模拟方法计算尾水管内非定常周期性湍流[J].水利学报,2001(8):79-84.
Yang Jianming, Liu Wenjun, Wu Yulin. The large eddy simulation method for computation of 3-D unsteady periodic turbulent flow in draft tube[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(8):79-84. (in Chinese)

[9] Wang Wenquan, Zhang Lixiang, Yan Yan. Large eddy simulation of turbulent flow considering inflow wakes in a Francis turbine blade passage[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(2):201-209.

[10] 黄剑峰,张立翔,何士华.混流式水轮机全流道三维定常及非定常流数值模拟[J].中国电机工程学报,2009,29(2):87-94.
Huang Jianfeng, Zhang Lixiang, He Shihua. Numerical simulation of 3-D steady and unsteady flows in whole flow passage of a Francis hydro-turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(2):87-94. (in Chinese)

[11] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations—I: The basic experiment[J]. *Monthly Weather Review*, 1963, 91(3):99-165.

(责任编辑 徐云峰)

万方数据