

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.01.005

水轮机转轮叶片流固耦合水力振动分析

付 磊¹,黄彦华²,朱培模³

(1.四川理工学院机械学院,四川 自贡 643000;2.四川理工学院理学院,四川 自贡 643000;
3.昆明理工大学建筑工程学院,云南 昆明 650093)

摘要 基于有限体积法的有限元,采用非结构网格对控制方程离散,时间上采用二阶后退欧拉法,固体采用非线性弹性瞬态模拟,流体为不可压缩黏性流体,进行双向交错迭代耦合模拟计算。计算得知最大网格位移大约出现在叶片测试点 2 的位置,从整个曲线变化趋势可以看出,在 $t = 0.5\text{ s}$ 时,叶片上网格位移最大,也就是说叶片摆幅较大,这样就会导致整个转轮偏心,进而引起整个水轮机的振动。

关键词 转轮叶片 水力振动 GCL 方法 κ - ϵ 湍流模型

中图分类号 :TK736 ;TV698.1⁺62 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)01-0024-03

Fluid-structure coupling hydraulic vibration of runner blades of hydraulic turbines//FU lei¹, HUANG Yan-hua², ZHU Pei-mo³ (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China ; 2. Faculty of Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China ; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650093, China)

Abstract :The finite element method based on the finite volume method was used, and the governing equation was discretized by unstructured elements. The second-order back-ward Euler scheme was temporally adopted. The solid was simulated by use of the nonlinear elastic transient analysis. The fluid employed the incompressible viscous fluid. The coupling mode was two-way staggered iteration simulation. The computed results show that the largest displacement approximately occurs at the position of measuring point 2 for the blades. It is seen from the variation trend of the displacement curve that the displacement is the largest when $t = 0.5\text{ s}$, and it results in unbalance of the whole runner and further in vibration of the whole hydraulic turbine.

Key words :runner blade ;hydraulic vibration ;GCL ; κ - ϵ turbulent model

水资源是现有能源中唯一可以大规模开发的可再生能源^[1],目前已建成的一批巨型水电站使得这种可再生资源得到了重视和开发,但大型混流式水轮机负荷变化频繁,运行条件恶劣,国内已投产的机组普遍存在振动大和叶片开裂等问题。机组振动影响水轮机的正常稳定运行,严重的甚至会造成整个厂房及大坝发生共振,危及电站安全运行,至今仍没有很好的解决方案。转轮叶片是水轮机的重要水力部件,转轮叶片受流体自激诱发振动,会造成整个机组不稳定和厂房的振动^[2-3]。本文主要研究转轮叶片在流动激励下的诱发振动,研究流体动压力脉动对转轮叶片振动的影响,以解释水轮机所存在的一直无法很好解决的水力振动问题。

由于转轮叶片在复杂的黏性流场作用下的振动问题是一个非常复杂的多场耦合的非线性动力学问题,它不仅结构复杂,振动原因很多,而且振动机理

尤为复杂。水轮机的振动是由水力、电气、机械等多种因素引起的,在水轮机运行过程中,流体激励振动、机械振动和电磁振动共存,耦合在一起构成一个复杂的大型耦合振动系统^[4]。而转轮叶片的耦合诱发水力振动也是重要因素之一。当激励涡频和薄壁的固有频率接近时发生共振^[5]。

本文主要模拟在动水压脉动作用下转轮叶片耦合界面上的压力和位移脉动,并对整个湍流道进行计算,进而为目前水轮机频频出现的振动问题提供依据。

1 固体计算动力学(CSD)

在流固耦合的固体部分应用瞬时弹性模拟,固体的运动动力学方程为

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \tag{1}$$

作者简介 :付磊(1979—),男,贵州六盘水人,硕士研究生,从事计算流体力学研究。E-mail :kunmingfulei@126.com

形等因素,流体区域采用适应性较强的非结构化四面体网格划分技术,将流体区域划分为1 216 146个网格单元(图 2(b))。转轮及其网格见图 2(c)(d)。图 3 为叶片上测试点位置。测试点 1、测试点 2 和测试点 3 分别为叶片压力面上不同位置的监控点,而测试点 4、测试点 5 和测试点 6 为负压面上对应的监控点。在小流量工况下,进口速度取4.5 m/s,出口压力设为 1 个大气压。

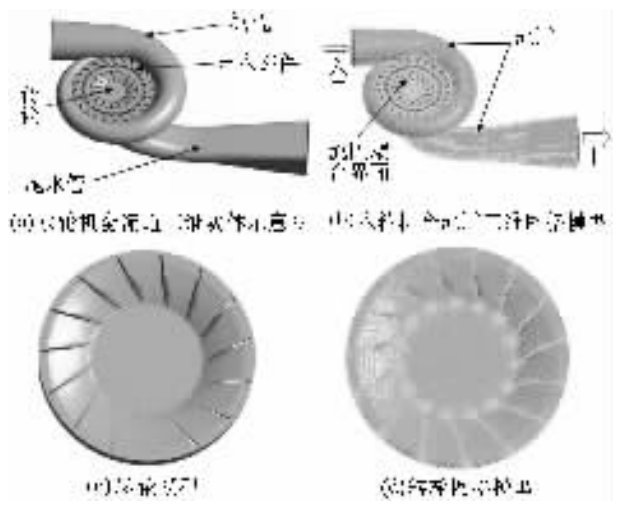


图 2 水轮机、转轮模型及网格

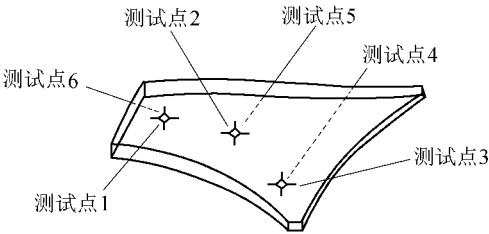


图 3 叶片上测试点位置

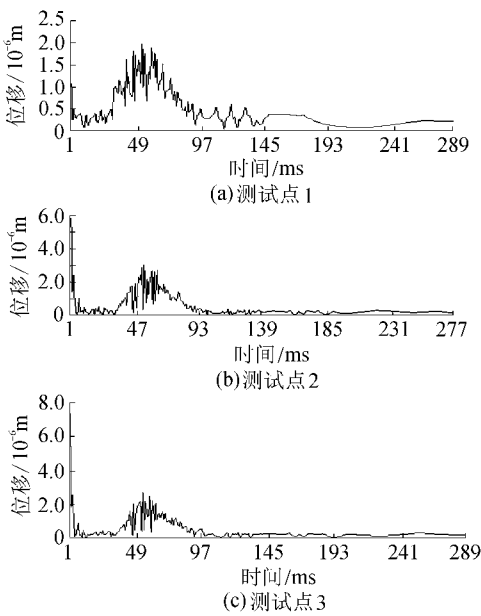


图 4 测点网格位移脉动(时间步长为 1 ms)

5 计算结果分析

本文将固体采用非线性弹性瞬态模拟,流体为不可压缩线性牛顿流体,进行双向交错迭代耦合计算,分析转轮叶片流动压力脉动所诱发的水力振动。在叶片的压力面上,对比图 4 可知,最大网格位移出现在叶片测试点 2 的位置。从整个曲线变化趋势可以看出,在 $t = 0.05\text{ s}$ 时,叶片上网格位移最大,也就是说叶片摆幅较大,这样就会导致整个转轮偏心,进而引起整个水轮机振动。当转轮转动达到稳定后,转轮叶片变形减小,并且振动趋于稳定。

6 结 论

采用非线性弹性瞬态模拟,流体为不可压缩线性黏性流体,进行双向交错迭代耦合模型计算,对水轮机叶片进行流体-固体耦合,计算结果表明 转轮叶片振动明显,变形最大处发生在叶片测试点 2 的位置。

参考文献：

[1] 陶星明,刘光宇.关于混流式水轮机水力稳定性的几点建议[J].大电机技术,2002(2) 40-44.
[2] 罗伟文,陈远玲,王小纯,等.基于流固耦合振动分析的水轮机转轮裂纹及制造过程研究[J].机械制造,2007,45(5) 46-48.
[3] 毕程敏,周建旭,胡明.长有压输水系统水电站水力振动特性分析[J].水利水电科技进展,2009,29(2) 5-8.
[4] 曹昆鸟,姚志民.水轮机原理及水力设计[M].北京:清华大学出版社,1991.
[5] 戴会超,槐文信,吴玉林,等.水利水电工程[M].北京:科学技术出版社,2006.
[6] 张兆顺,崔桂香.流体力学[M].北京:清华大学出版社,1998.
[7] FARHAT C B, GEUZANE P L P, GRANDMONT C L. The discrete geometric conservation law and the nonlinear stability of ALE schemes for the solution of flow problems on moving grid [J]. Journal of Computational Physics, 2001, 174 :669-694.
[8] 刘宇,吴伟章,吴玉林,等.混流式模型水轮机全流道三维定常湍流计算[J].大电机技术,2003(3) 38-42.

(收稿日期 2009-03-24 编辑 方宇彤)

