

基于 ADINA 的混流式水轮机 流固耦合分析

李建锋, 刘小兵, 王宏伟, 李培军
(西华大学能源与环境学院, 四川 成都 610039)

摘要: 以连续方程、动量方程、Reynolds 应力方程和 RANG 湍流 $k-\varepsilon$ 模型为控制方程, 采用流固耦合理论追踪耦合界面, 建立了混流式水轮机数值模型。通过 ADINA 软件平台, 采用流固耦合模块, 实现了转轮叶片与内部流场耦合的模拟, 得到了转轮结构的应力应变、流场的压力、流速和 $k-\varepsilon$ 分布。

关键词: RANG 湍流; 流固耦合; 混流式水轮机

ADINA-based Fluid-structure Interaction Analysis of Francis Turbine

Li Jianfeng, Liu Xiaobing, Wang Hongwei, Li Peijun

(School of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu Sichuan 610039)

Abstract: The mathematical model of the Francis turbine was developed by using continuity equation, momentum equation, Reynolds stress equations and RANG turbulence $k-\varepsilon$ model as the governing equations, and the fluid-structure interaction method to trace the interaction surface. Based on the ADINA software platform, the flow field of Francis turbine was simulated, and the stress-strain of runner, the distribution of pressure, velocity and $k-\varepsilon$ of flow field were obtained.

Key Words: RANG turbulence; fluid-structure interaction; Francis turbine

中图分类号: O358

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2010)04-0067-03

0 引言

随着大型水电站的建设, 水轮机的稳定性成为水电站设计考虑的重要因素, 而其中的重点和难点问题就是解决水轮机水体和结构两种介质之间的非线性流固耦合问题。流固耦合的主要表现为: 流体的流动压力作用在结构表面, 构成结构的力边界, 引起结构的变形振动; 同时结构变形改变流体的流动空间, 构成流体的运动边界, 导致流场变化。这两种介质的相互作用耦合在一起, 构成一个整体。在解决水轮机的流固耦合问题时, 由于水轮机转轮以一定的转速旋转, 蜗壳内部水流以一定的压力冲击转轮, 两种介质的相对运动位移很大, 相对运动速度也很大, 内部流场异常复杂, 是三维的非定常的层流湍流混合作用, 还可能是亚音速、音速和超音速的二次流相互作用。处理这种大位移曲面界面上的两种介质的相互作用, 是解决耦合动力学问题的关键。

目前解决流固耦合问题主要运用强耦合和弱耦合两种方法, 强耦合主要采用不同参数作为桥梁,

将流体控制方程和结构控制方程及耦合条件经过离散后组成统一的耦合系统方程同时求解, 对于耦合性较强的系统来说效果较好, 但是, 对于复杂的高度非线性的流固耦合问题, 流体流动的特点带来计算网格的大变形, 求解速度相对较慢, 对计算机性能的要求较高^[1]。弱耦合是在每一时间步内分别依次对结构方程和流体方程求解, 通过中介交换固体域和流体域的计算结果数据, 从而实现耦合计算。

目前研究和预测水轮机振动特性和磨损还缺少准确有效的手段和方法。文章针对上述问题, 考虑现有条件, 采用迭代耦合方法解决具有变化界面的流体自由表面问题, 固体大变形流动问题, 瞬态响应模拟流体和固体界面的过渡, 保证耦合

收稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家教育部骨干教师基金项目和四川省杰出青年基金项目 (05ZQ026-007)

作者简介: 李建锋(1983—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事流固耦合方面的研究。

面的相容性和协调性。

1 数学模型

这种以恒定转速转动的混流式水轮机叶轮中带有强旋流或弯曲壁面的流动，由于流体为不可压缩的液体，因而这是一种相对紊流的流动，针对这一旋转复杂的流动问题，本文提出了如下完整的数学模型。

1.1 控制方程

固液连续性方程： $\nabla \cdot W = 0$

$$\text{动量方程：} \frac{DW}{Dt} = W \cdot \nabla W = -\frac{\nabla P}{\rho} + f + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 W - [2\omega \times W + \omega \times (\omega \times R)]$$

Reynolds 应力方程：

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_k u_j u_i})}{\partial x_k} = -\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u_i u_j u_k} + p \overline{u_i} \delta_{kj} + p \overline{u_j} \delta_{ik}] + D_{Lij} + P_{ij} - G_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} - F_{ij}$$

式中， W 为相对速度； P 、 ρ 、 f 、 μ 分别为压强、密度、质量力、粘度； $-2\omega \times W$ 为科氏力； $-\omega \times (\omega \times R)$ 为离心力； D_{Lij} 、 P_{ij} 、 G_{ij} 、 Φ_{ij} 、 ε_{ij} 、 F_{ij} 分别为分子粘性扩散项、剪应力产生项、浮力产生项、压力产生项、粘性耗散项、系统旋转产生项。

1.2 湍流模式

文章采用了 RNG $k-\varepsilon$ 模型来进行耦合的流场模拟^[2]。

湍流动能方程(k 方程)：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon$$

湍流能量耗散率方程(ε 方程)：

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

湍动粘度表示式： $\mu_{eff} = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

经验数表达式：

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}, \quad \eta = (2E_{ij} E_{ji})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$$

主流时均应变率表达式： $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

式中， G_k 是由于时均速度梯度产生的湍流动能的产生项； $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数。

1.3 耦合方程的建立

流固耦合采用了迭代耦合方程，依次对流体域和固体域中所有的未知量进行求解，利用有限元法对流体域、结构域进行离散，边界条件在单元的组合过程中强迫实现，假定 ΔX^f 为耦合系统的变量，根据节点所在物理域的不同得到简化的耦合方程^[3]。

$$\begin{bmatrix} A_{ii}^f & A_{ic}^f & 0 \\ A_{ci}^f & A_{cc}^f + A_{cc}^s & A_{ci}^s \\ 0 & A_{ic}^s & A_{ii}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_i^f \\ \Delta X_c^f \\ \Delta X_i^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i^f \\ R_c^f \\ R_i^s \end{bmatrix}$$

式中，上标 f 和 s 分别表示为流体域和结构域；下标 c 和 i 分别表示为耦合界面处和内部节点上的变量； A^f 、 A^s 为耦合系统的等效质量矩阵； ΔX_i^f 、 ΔX_c^f 、 ΔX_i^s 分别为流体域、耦合界面处和结构域内的节点未知数向量； R_i^f 、 R_c^f 、 R_i^s 分别为流体域、耦合界面处和结构域内的外力向量。采用结合界面的结构分析，消除流体内部变量；结合界面的流体求解，消除结构内部变量。根据流体域和结构域边界得到信息的不同，将流固耦合边界分为基本边界条件和自然边界条件，基本边界条件给出了运动学条件速度、位移等边界信息，自然边界条件给出了力的条件压强压力等。对于耦合方程的形式，可以对耦合问题、线性耦合方程组中的耦合系统变量同时求解，对变量向量进行修正。

1.4 模型与边界条件

以型号 HLA696-LJ-108 水轮机为例，整个流场包含了蜗壳、导叶、转轮、尾水管。流体部分的边界条件设定为：蜗壳所在的内壁和外壳设置为 WALL；导叶的内壁设置为 WALL；流场后两端自由，前端设置流速边界；流场跟转叶及转轴接触的地方设置成流固耦合边界。约束固体部分的旋转轴，轴跟内流场接触的地方设成流固耦合的边界，其余设置为 WALL，采用无滑移边界条件，在近壁处设置标准壁面函数。

2 计算结果与分析

上面建立了一个描述转轮叶片在清水中运行的流固耦合数学模型，流体和结构通过耦合矩阵连接在一起，充分体现了流体作用使结构产生位移和变形，而结构的位移和变形又影响了流体，从而将两种介质系统耦合成一个统一的系统，反映了流固耦合的内在机理，进而为深入研究转轮叶片在受激振动过程中的各种动力特性奠定了一定的理论基础。

图 1~5 为通过上述数学模型建立方程，进行模拟计算，利用 ADINA 软件对数据进行分析处理后得出的流体和结构的结果云图。

云图分析时间步长定为 0.02 s。由图 1、2 可以看到，应力应变主要集中在转叶的进口和出口端，最大应力发生在转叶进口端上冠和出口端位置，最大值为 1 316 168 Pa，与实际破坏位置相应。转轮叶片在这种条件下，经过长时间的运行，叶片上出现深坑、穿孔，叶片的出水边磨成锯齿状，下环出口内侧形成沟槽状，严重导致叶片出水边大块脱落，



图 1 固体部分应力分布 (单位: Pa)



图 2 固体部分应变分布

形成鱼鳞坑。应变最大值为 4.56×10^{-6} 。

图 3 为流体部分压力分布图, 反应了水体流动和转轮对其反作用的压力分布, 在叶片头部靠近背面处存在撞击产生的高压区, 压强分布情况正常; 在叶片出流区存在一个负压区, 这个位置经常出现真空涡带, 导致水轮机的振动。

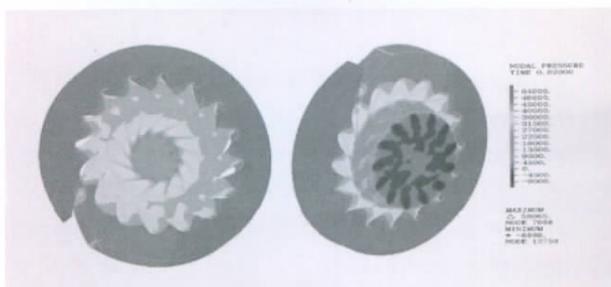


图 3 流体部分压力分布 (单位: Pa)

在图 4 为流体部分 $z-x$ 截面流速矢量图, 可以看到流速的矢量图流线比较光滑, 流过渡也比较顺畅, 较合理。工作面进口边处水流速度较高, 压力较低, 易发生空蚀破坏; 靠近下环进口端出现脱流现象; 最大流速发生在转叶附近。

图 5 为流场计算 $k-\varepsilon$ 分布图, 可以看出较大的 k 值发生在转轮叶片根部附近, 在进流端能量 k 值明显比出流端小一些, 较大的 ε 值分布在转叶附近比较明显的流体区域。

3 结 语

目前流固耦合分析主要停留在流体结构振动、

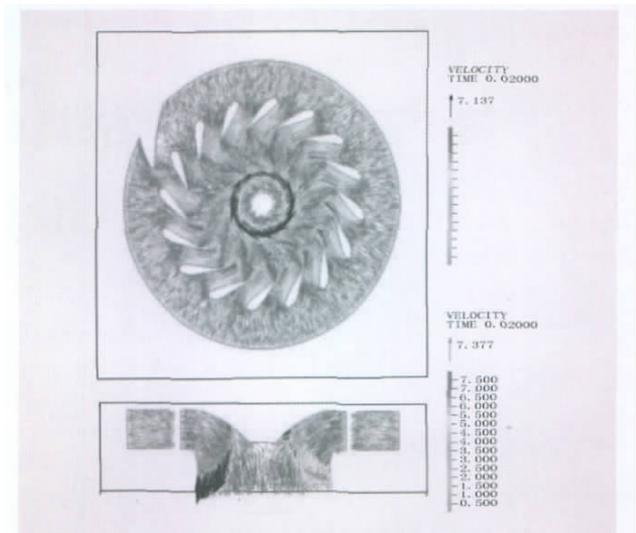


图 4 流体部分 $z-x$ 截面流速矢量 (单位: m/s)



图 5 流场计算 $k-\varepsilon$ 分布

结构静止状态下的耦合分析上, 而本文依托 ADINA 软件实现了瞬态流体和结构两种介质的耦合作用, 取得了以下方面的进展:

- (1) 模拟了旋转水轮机转轮对内部流场的作用, 通过数值计算得到了流场的流速、压力和 $k-\varepsilon$ 分布, 说明了内部流场的复杂性。
- (2) 模拟分析得出了结构应力、应变分布, 体现了水轮机转轮叶片的弹性变形, 进一步验证了结构域容易破坏受损的位置, 进而说明了水轮机转轮在耦合作用下的破坏机理, 为水轮机转轮结构的设计提供一定的数据资料。

参考文献:

[1] Melville R B, Morton S A. Fully implicit aeroelasticity on overset grid systems[R]. AIAA Paper, 1998: 98-0521.
 [2] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
 [3] 钱若军, 石麟, 行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构, 2008 (3): 4-15.

(责任编辑 高 瑜)