

# 潮汐电站贯流式水轮机的流场数值模拟\*

吴 磊, 潘华辰\*

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 基于 Navier-Stokes 方程和标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  紊流模型和 SIMPLE 算法的改进型混合格式, 用 Fortran 语言编程对潮汐电站水轮机模型正反向全流道三维流场做了数值计算。针对水轮机性能预测的准确性问题, 将计算所得的模型水轮机效率值与河海大学提供的 Fluent 计算结果及模型试验数据进行了比较分析。研究结果表明, 该改进算法对于水轮机模型内部流场是精确可靠的, 适用于优化改进水轮机性能, 能够提高其效率。

**关键词:** 江夏潮汐电站; 水轮机; 计算流体力学; 效率

**中图分类号:** TH432.1; TH122

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2010)10-0021-04

## Simulation of flow fields in a hydroturbine used for tidal hydropower stations

WU Lei, PAN Hua-chen

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Flow simulations were carried out on the 3-D flow passage of a model hydroturbine used for tidal hydropower station. The computational method was based on the Navier-Stokes equation, the standard k-epsilon turbulence model and a 2nd order hybrid scheme in the SIMPLE scheme. Aiming at the accuracy of the hydroturbines performance prediction, the computational results were compared with the experimental data as well as with the results of the Fluent solver. The results indicate that the new computational method is accurate enough for predicting the performance of the hydroturbines. The numerical method is fit for optimizing the hydropower design.

**Key words:** jiangxia tidal hydropower station; hydroturbine; computational fluid dynamics(CFD); efficiency

## 0 引 言

水轮机是水电站的核心部件, 其性能决定了水电站对水能源的利用率。水轮机的传统研究方法一般是把经验设计与模型试验相结合, 但由于试验反复进行才能得出相对比较满意的结果, 耗时又耗资。随着计算机速度的不断提高和计算流体力学(CFD)技术在水力学应用中的发展, 通过 CFD 方法研究水轮机内部流场和优化设计已成为趋势<sup>[1-3]</sup>。

Dragical 和 Leopold<sup>[4]</sup> 采用标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型和 Kato-Lanuder  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型对混流式水轮机进行了各部件的独立计算和联合计算, 比较了水轮机效率在两种计算下

的区别; 肖惠民<sup>[5]</sup> 等选用标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型对水布垭混流式模型和原型水轮机在不同工况下进行了三维定常计算, 并分析了水轮机内部流场的特征; 刘胜柱<sup>[6]</sup> 等采用多块网格技术, 对混流式和轴流式水轮机各流通部件进行模拟, 从而改进了水轮机的整体性能。

采用新算法的目的在于: 达到二阶精度, 同时保持好的稳定性, 该改进格式对混合格式中的一阶迎风格式做了改进, 使之达到 2 阶精度。本研究用 Fortran 语言编程, 对河海大学水利水电工程学院提供的水轮机模型进行了数值模拟计算, 并将结果与所提供试验结果数据进行比较分析。

收稿日期: 2010-03-22

基金项目: 浙江省科技厅计划资助项目(2007C24014)

作者简介: 吴 磊(1985-), 男, 浙江嘉兴人, 主要从事计算流体力学方面的研究. E-mail: wuleihfut@163.com

通信联系人: 潘华辰, 男, 教授, 硕士生导师. E-mail: huachen\_pan@hdu.edu.cn

## 1 试验模型概述

江夏潮汐电站采用低水头双向灯泡贯流式水轮机,其转轮直径为 2.5 m。试验模型<sup>[7-8]</sup>为原型尺寸的十分之一,模型水轮机转轮直径为 0.25 m,进口直径为 0.45 m,尾水管出口尺寸为 0.392 m×0.577 m。模型水轮机全流道如图 1 所示。根据水电站的实际工作情况规定:水流从水库流到海里为正向,由大海流进水库为反向。可以通过调整转轮叶片转角和导叶开度来实现水轮机的双向高效运行。

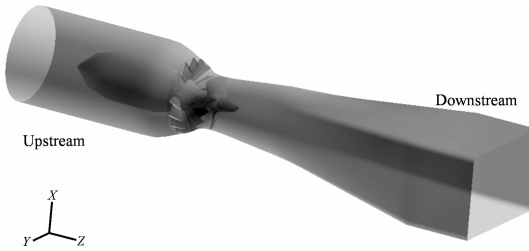


图 1 模型水轮机全流道

水轮机转轮装有 4 片叶片,转轮前有 16 片活动导叶。在正向流动中,6 种转叶角度和 4 种导叶开度共组成 24 种工况。水轮机转轮叶片角度分别取 10°、15°、20°、25°、30°、35°,导叶开度分别取 45°、50°、55°、60°。在反向流动中转叶角度取 5°、10°、15°、20°,此时导叶位于水轮机的下游对流动影响不大,所以导叶开度取 100°。水轮机水头变化范围在 1 m~5 m,正向设计水头为 3 m,反向为 2.4 m。

## 2 数值算法

本研究对水轮机全流道流场的求解采用 Navier-Stokes 方程,并做了合适的修改使方程能应用于多级旋转机械。在流动中心区域采用  $\kappa$ - $\varepsilon$  紊流模型,边界层区域用代数稳流模型<sup>[9-15]</sup>。在转轮与尾水管及导叶的连接面处采用滑移网格技术,解决动静界面的数据交换。假设上流管道和下流水域都有平直的水面,则水面边界条件采用镜面边界,其压力为大气压。值得指出的是,本计算方法中上下游水面高度差或压力差为给定条件,而流量为计算结果。

对于不可压流体,连续方程和动量守恒方程(旋转轴为  $z$  轴)可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \\ \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zx}) + \omega \rho v + \rho g_x \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}v) + \\ \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yy}) + \\ \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zy}) - \omega \rho v + \rho g_y \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}w) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}w) + \\ \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zz}) + \rho g_z \end{cases} \quad (2)$$

式中  $x, y, z$ —Cartesian 坐标; $\rho$ —密度; $u, v, w$ —绝对速度分量; $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ —相对速度分量; $p$ —压力; $g$ —重力加速度; $\omega$ —旋转速度; $\tau$ —剪切应力。

在曲线坐标系  $\begin{cases} \xi = \xi(x, y, z) \\ \eta = \eta(x, y, z) \\ \zeta = \zeta(x, y, z) \end{cases}$  下,连续方程、动量

方程以及标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  紊流模型的方程都能写成如下基本形式:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \xi}(\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho V \phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho W \phi) = \\ & \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{\Gamma}{J} \left( q_{11} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + q_{12} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + q_{13} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \frac{\Gamma}{J} \left( q_{21} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + q_{22} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + q_{23} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ \frac{\Gamma}{J} \left( q_{31} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + q_{32} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + q_{33} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right) \right] + S(\xi, \eta, \zeta) J \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $J$ —雅克比行列式; $q_{ij}$ —传热系数; $U, V, W$ —逆变相对速度分量,其定义为  $(U, V, W)^T = [A](\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})^T$ ; $\phi = 1, \Gamma = 0, S = 0$ (连续方程); $\phi = u, v, w, \Gamma = \mu$ (运动粘性系数);源项  $S$  包括粘性项、旋转项和重力项(动量方程)。

在计算域各个控制体上将方程离散化成代数形式为:

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + S \quad (4)$$

式中 下标  $p$ —网格中心处的变量; $nb$ —相邻网格结点上的变量。

式(4)中各个系数可采用不同的离散化格式,常用的格式是混合格式。混合格式结合了 1 阶迎风格式的稳定性和 2 阶中心差分格式的精度。当对流项变得比较强时,它变为迎风格式,当扩散项起主导作用时,它变为中心差分格式。本研究提出新算法的目的在于达到 2 阶精度,同时保持混合格式好的稳定性。新的

修正混合格式采用 2 阶迎风格式取代 1 阶混合格式中的迎风格式部分。它把附加的项移到方程的源项中,使方程的主要部分与混合格式一样。但由于解释三维空间的离散化比较复杂,只在一维形式上对该算法作出解释,定义一维网格如图 2 所示。

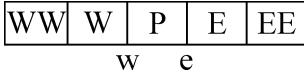


图 2 一维有限体积离散化

P—计算网格的结点;W—上游相邻网格的结点;E—下游相邻网格的结点;w—P、W 的网格连接面;e—P、E 的网格连接面

图 2 中各个网格的一维对流扩散方程为:

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \quad (5)$$

式中  $\phi$ —广义变量(如速度、浓度、温度等); $\rho$ —密度; $A$ —控制体连接面面积; $x$ —坐标; $\Gamma$ —扩散系数。

若定义  $F = \rho u, D = \Gamma / \Delta x$ (其中  $\Delta x$  是网格长度),则方程式(5)离散化为:

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (6)$$

将其改写成类似于式(4)的形式为:

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + S \quad (7)$$

其中:

$$a_W = \max \left[ F_w, \left( D_w + \frac{F_w}{2} \right), 0 \right] \quad (8)$$

$$a_E = \max \left[ -F_e, \left( D_e - \frac{F_e}{2} \right), 0 \right] \quad (9)$$

$$a_P = a_W + a_E + (F_e - F_w) \quad (10)$$

将源项  $S$  表示为:

$$S = S_W + S_E \quad (11)$$

其中:

$$S_W = \begin{cases} 0, & |F_w| < 2D_w \\ 0.5F_w(\phi_W - \phi_{WW}), & F_w > 2D_w \\ 0.5F_w(\phi_P - \phi_E), & F_w < -2D_w \end{cases} \quad (12)$$

$$S_E = \begin{cases} 0, & |F_e| < 2D_e \\ 0.5F_e(\phi_W - \phi_P), & F_e > 2D_e \\ 0.5F_e(\phi_{EE} - \phi_E), & F_e < -2D_e \end{cases} \quad (13)$$

### 3 计算结果与分析

本算法水轮机水头  $H$ (m) 和转速  $N$ (r/min) 是给定的条件,对水轮机模型正反向的全流道三维流场进行计算,可得转轮扭矩  $T$ (N·m)、水轮机流量  $Q$ (m<sup>3</sup>/s),水电站总效率  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{\pi TN}{3 \times 10^5 \times QH} \times 100\% \quad (14)$$

将模型试验数据和模型模拟结果都标准化为单位转速  $N_{11}$ (r/min) 和单位流量  $Q_{11}$ (m<sup>3</sup>/s),即转轮直径为 1 m,水头为 1 m 情况下的转速和流量。其定义如下:

$$N_{11} = N \frac{D}{\sqrt{H}}, Q_{11} = Q \frac{1}{D^2 \sqrt{H}}$$

式中  $D$ (m)—水轮机转轮直径。

本研究将由模拟结果得到的效率值和由河海大学提供的 Fluent 计算结果及试验数据得到的效率值表示在以  $Q_{11}$  为横坐标、以  $N_{11}$  为纵坐标的二维图(图中曲线是模型水轮机效率的等高线)中。

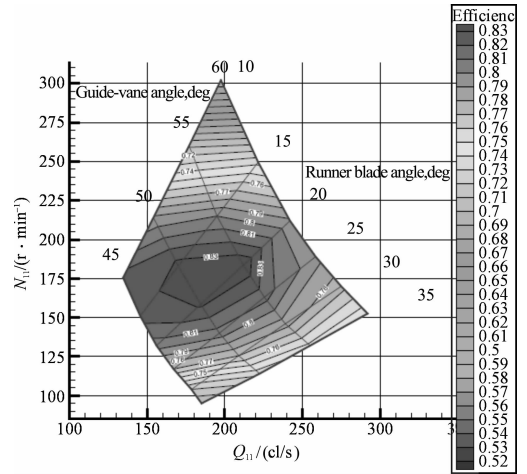


图 3 河海大学模型试验正向流动结果

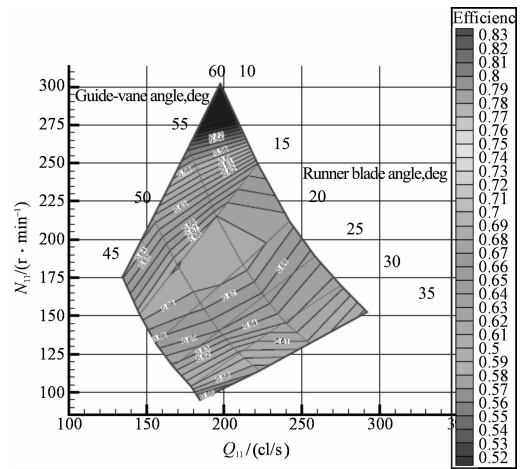


图 4 河海大学 Fluent 模拟正向流动结果

模型水轮机在各工况下效率值的等高线图如图 3~图 8 所示。图中包括正反转,各种转轮叶片角度与导叶开度的组合。对于正向流动,试验模型的最大效率为 83%(如图 3 所示),用 Fluent 模拟水轮机模型得到的最大效率是 68%(如图 4 所示),而用新算法模拟水轮机模型得到的最大效率是 78%(如图 5 所示)。对于反向流动,试验模型的最大效率为 68%(如图 6

所示),用 Fluent 模拟水轮机模型得到的最大效率是 62% (如图 7 所示),而用新算法模拟水轮机模型得到的最大效率是 70% (如图 8 所示)。从图中可以看出,本算法对最大效率的计算更接近试验数据<sup>[16]</sup>。

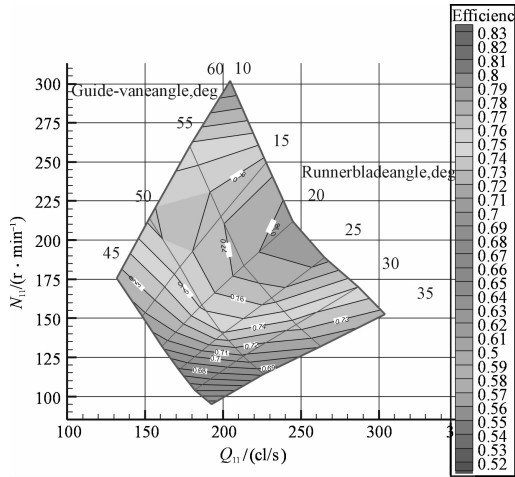


图 5 改进混合格式模拟正向流动结果

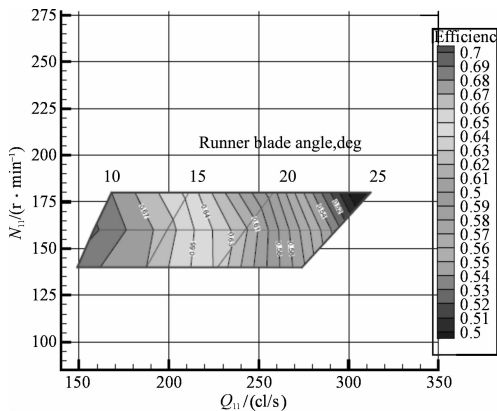


图 6 河海大学模型试验反向流动结果

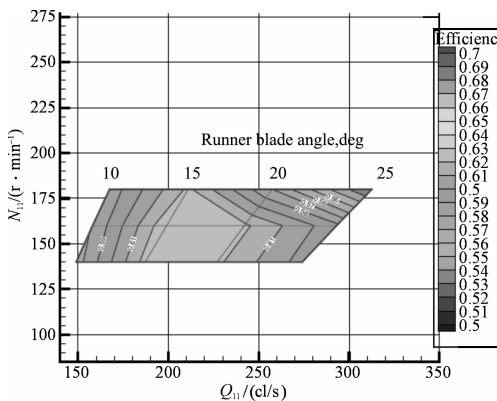


图 7 河海大学 Fluent 模拟反向流动结果

## 4 结束语

本研究通过改进混合格式,提高了其精度,对水轮机模型正反向的全流道三维流场进行了数值模拟。模拟结果与试验数据及 Fluent 结果进行比较,可以看出

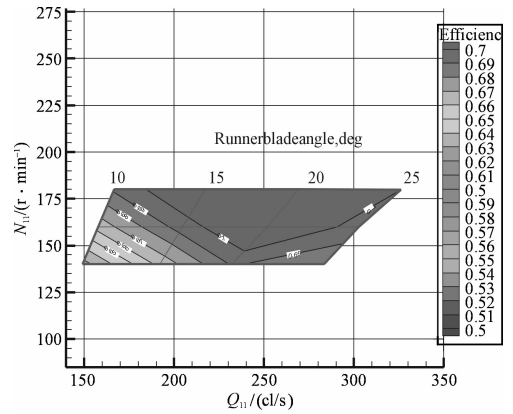


图 8 二阶混合格式模拟反向流动结果

本算法对于水轮机模型内部流场是精确可靠的,适用于优化改进水轮机性能,提高其效率。

## 参考文献 (References) :

- [1] RHIE C M, CHOW W L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation[J]. *AIAA J*,1983,21(11):1525-1532.
- [2] SHYY W, BRAATEN E. Three-dimensional analysis of the flow in a curved hydraulic turbine draft tube[J]. *International Journal for Numecial Methods in Fluids*,1986,6(12):861-882.
- [3] HAYASE T, HUMPHREY J A C, GREIF R. A consistently formulated quick scheme for fast and stable convergence using finite volume iterative calculation procedures[J]. *Journal of Computational Physics*,1992,98(1):108-118.
- [4] DRAGICAL J, LEOPOLD E. Three-dimensional analysis of the flow in curved hydraulic turbine draft tube[J]. *Int. J. Nm. Meth. in Fluid*,1986(6):861-882.
- [5] 肖惠民. 基于计算流体动力学的水轮机及水电站尾水系统数值研究[D]. 武汉:武汉大学水利水电学院,2005.
- [6] 刘胜柱. 水轮机内部流动分析与性能优化研究[D]. 西安:西安理工大学水利水电学院,2005.
- [7] PATANKAR S V. *Numecial Heat Transfer and Fluidflow* [M]. Hemisphere,1980.
- [8] 耿在明. 双向贯流式水轮机数值模拟研究[D]. 南京:河海大学水利水电工程学院,2006.
- [9] 张 梁,吴玉林,刘树红,等. 混流式水轮机内部流场的三维空化湍流计算[J]. *工程热物理学报*,2007,28(4):598-600.
- [10] 陶建民. 低水头径流式电站水轮机优化选型设计[D]. 西安:西安理工大学水利水电学院,2003.
- [11] 刘延泽,常近时. 重力场对灯泡贯流式水轮机流场分析及水力性能评估的影响[J]. *水利学报*,2008,39(1):96-101.
- [12] 王正伟. 灯泡贯流式水轮机水力损失分析[J]. *大机电技术*,2004(5):40-43.
- [13] 梁章堂,胡斌超. 贯流式水轮机的应用与技术发展讨论[J]. *中国农村水利水电*,2005(6):89-92.
- [14] 王树杰. 柔性叶片潮流能水轮机水动力学性能研究[D]. 青岛:中国海洋大学工程学院,2009.
- [15] 刘 洁. 冲击式水轮机内部流动数值模拟及性能研究[D]. 武汉:华中科技大学能源与动力学院,2004.
- [16] 严添明. 水轮机调速器并联型液压控制系统的设计[J]. *机电技术*,2008(4):31-35.

[编辑:柴福莉]