

电站进水口的水流数值模拟分析

任 坤 杰, 王 凤, 韩 继 斌

(长江科学院 水力学研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要:采用 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型对电站进水口水流进行了三维数值模拟。模型利用有限体积法对方程进行离散, 采用对压强初始值依赖性不强且收敛性较好的 SIMPLER 数值方法, 自由表面采用 VOF 追踪模拟法。结果表明: 计算得到的流态、流速、压强及水头损失等水力要素与物理模型试验成果吻合较好, 这说明所建立的模拟大区域复杂进水口水流的方法是可靠的, 可为类似工程设计、计算提供参考。

关键词: $k-\varepsilon$ 紊流数学模型; SIMPLER 法; VOF 法; 水力要素; 电站进水口
中图分类号: TV732.1 **文献标志码:** A

电站进水口位于电站引水系统的首部, 是电站的重要组成部分。电站运行时要求其进水口进流平顺, 避免出现有害吸气漩涡, 且水头损失较小, 应以提高发电效率。近几年, 利用数值模拟研究电站进水口水力特性取得了一定的成果, 陈云良与叶茂等人研究了电站进水口漩涡的形成^[1-2]; 高学平与张正楼等人研究了侧式双进出口水流流动特性^[3-4]; 章军军等人研究了侧式短进出口水的水力特性^[5]; 最近, 李妍等人对电站进水口水流流态、水头损失等方面进行了研究^[6]。

电站进水口区域边界复杂, 以往研究中大多是简化或缩小计算边界, 如不考虑联系梁、拦污栅槽、检修门井、工作门井的影响等, 但往往就是这些被减化掉的结构影响了水流内部流态以及水头损失; 再者, 采用非结构网格或网格分辨率不够精细, 也会降低计算结果的精度。

本文将采用三维 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型对某电站岸塔式进水口进行三维数值模拟研究。模型利用有限体积法对方程进行离散, 数值方法采用对压强初始值依赖性不强且收敛性较好的 SIMPLER 法, 追踪模拟自由表面采用 VOF 法, 计算区域的离散采用分辨率较高的规则性六面体网格, 模拟范围包括部分库区、拦污栅段及流道段以及尺度相对微小的拦污栅槽、网格划分比较困难的联系梁以及检修门井、工作门井, 分析流态、

流速、压强及水头损失等水力特性, 并与物理模型试验成果进行对比。研究成果可为设计提供支撑, 模拟方法可供类似工程的研究参考。

1 数学模型

1.1 控制方程

采用三维 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型模拟电站进水口水流流场, 控制方程为:

$$\text{连续方程 } \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程 } \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{k 方程 } \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + C_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon \text{ 方程 } \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, t 为时间; u_i, u_j, x_i, x_j 分别为速度分量与坐标分量; v, v_t 分别为运动粘性系数与紊动粘性系数, $v_t = C_u k^2 / \varepsilon$; p 为修正压力; f_i 为质量力; k, ε 分别为紊动能

与紊动耗散率; C_k 为平均速度梯度产生的紊动能项,
 $C_k = v_i \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]$; 经验常数 $C_u = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\varepsilon = 1.33, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.42$ 。

自由面采用 VOF 方法进行处理, 令函数 $\alpha_w(x, y, z, t)$ 与 $\alpha_a(x, y, z, t)$ 分别代表控制体内水、气所占的体积分。在每个单元中, 水、气体积分数之和为 1, 即:

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (5)$$

对于单个控制体积, 存在 3 种情况: $\alpha_w = 1$ 表示该单元完全被水充满; $\alpha_w = 0$ 表示该单元完全被气充满; $0 < \alpha_w < 1$ 表示该单元部分为水, 部分为气, 并且存在水气交接面。显然, 自由面问题为第 3 种情况。水的体积分 α_w 的梯度可以用来确定自由面的法线方向。计算出各单元的 α_w 值及梯度之后, 就可以确定各单元中自由边界的近似位置。

水的体积分 α_w 的控制方程为:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

式中, 参变量含义同上。水气界面的跟踪通过求解该连续方程完成。

1.2 数值方法

将控制方程写为通用格式:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\Phi \nabla \Phi) + S_\Phi \quad (7)$$

式中, Φ 为通用变量, 如速度 u_i 、紊动动能 k 、耗散动能 ε ; U 为速度矢量; Γ_Φ 为通用变量 Φ 的扩散系数; S_Φ 为方程源项。

令 $F(\Phi) = \rho U\Phi - \Gamma_\Phi \nabla \Phi$, 对方程(7)在单元控制体 (ΔV) 上进行积分, 利用高斯定理将体积分化为单元面 (A) 积分, 得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} \rho\Phi dV = \oint_A F(\Phi) \vec{n} dA + \int_{\Delta V} S_\Phi dV \quad (8)$$

式中, \vec{n} 为单元面外法向矢量。

对通用变量在控制体上取平均值, 则方程(8)变为:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{1}{\Delta V} \sum_{j=1}^m F_j(\Phi) A_j + \bar{S}_\Phi \quad (9)$$

式中, m 为单元控制体的单元面总数; A_j 为单元面的面积; \bar{S}_Φ 为单元控制体的源项平均值; $F_j(\Phi) A_j$ 为单元面的法向通量, 包括对流通量与扩散通量。

1.3 模拟范围及边界条件

选取满发状态下的 1 台机组为研究对象。

(1) 模拟范围。图 1 给出了某电站 1 台机组的模拟范围: 库区段长度 80 m; 进水口段长度 32.5 m, 包括拦污栅、通仓、喇叭口和闸门槽段; 方变圆段长 20 m; 压力管道段长度 100 m。模拟总长度 232.5 m。

模拟的库区宽度与进水口前缘宽度相同, 为 29.5 m。拦污栅段孔口净宽 5 m × 3.5 m, 抓斗门槽尺寸 0.5 m × 0.4 m, 拦污栅门槽尺寸 0.7 m × 0.4 m, 其间有诸多纵横联系梁支撑; 喇叭口曲线采用双心圆, 检修闸门槽与工作闸门槽尺寸 1.8 m × 1.0 m, 喇叭口出口尺寸 8 m × 10 m。

库区段高程 737 ~ 766.5 m; 拦污栅段高程 739 ~ 766.5 m; 流道段高程 739 ~ 752 m, 其中门井顶高程 766.5 m。

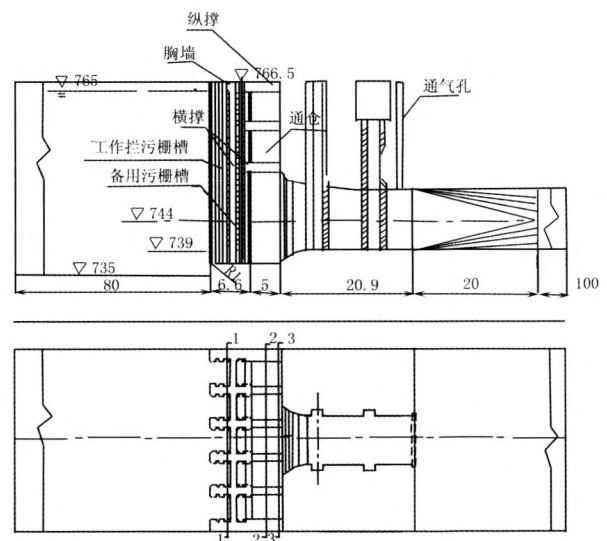


图 1 水位 765 m 工况下模拟范围示意 (单位: m)

(2) 边界条件。开边界: 库区入口为压力入口, 即上游边界给定水位; 管道出口为速度出口, 即下游边界给定流量。固壁边界: 在固壁边界上, 规定无滑移边界条件; 固壁上的糙率系数取 0.014。

1.4 网格划分

计算区域边壁网格示意图 2。坐标系统: X 为水流方向, Y 为沿水深方向, Z 为在平面上垂直水流方向。计算区域采用六面体网格进行划分, 网格总数为 85 万。大尺度网格: 库区网格最大尺寸 2 m × 0.5 m × 0.5 m; 小尺度网格: 抓斗门槽网格 0.16 m × 0.1 m × 0.5 m, 拦污栅槽网格 0.175 m × 0.1 m × 0.5 m, 闸门槽网格 0.1125 m × 0.125 m × 0.5 m。

2 计算结果及分析

在死水位 765 m 条件下, 模拟计算了不同拦污栅

形式尺寸与不同流道体型的组合工况,分析各工况的通仓流态、水头损失、压力、流速等水力特性,提出了较优的拦污栅形式与流道体型。限于篇幅,下面仅对优选的拦污栅形式与流道体型工况的模拟结果进行分析。

2.1 通仓流态

图 3 给出了通仓流态示意。由图 3 可知,通仓水流经 5 孔汇入通仓,在拦污栅隔墩头部形成绕流,隔墩尾流道突扩,产生 4 个漩涡,另外抓斗槽、拦污栅槽内有立轴漩涡产生,与物理模型上观察到的流态相似。

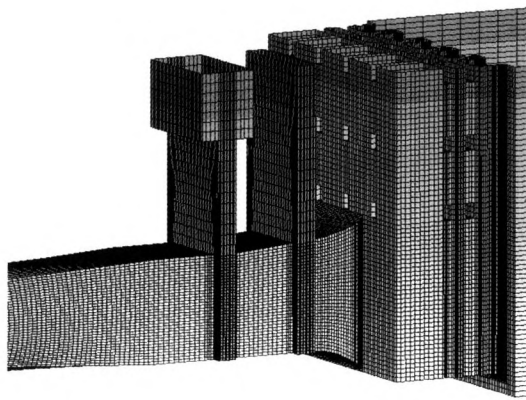


图 2 计算区域边壁网格示意

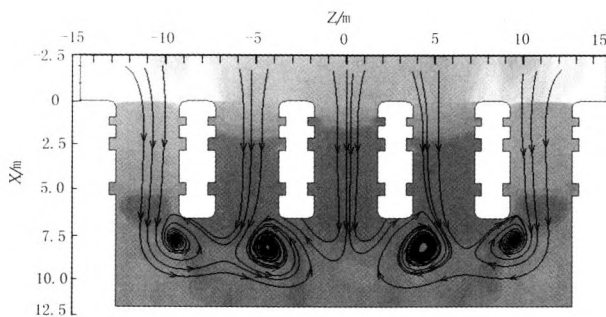


图 3 通仓流态示意

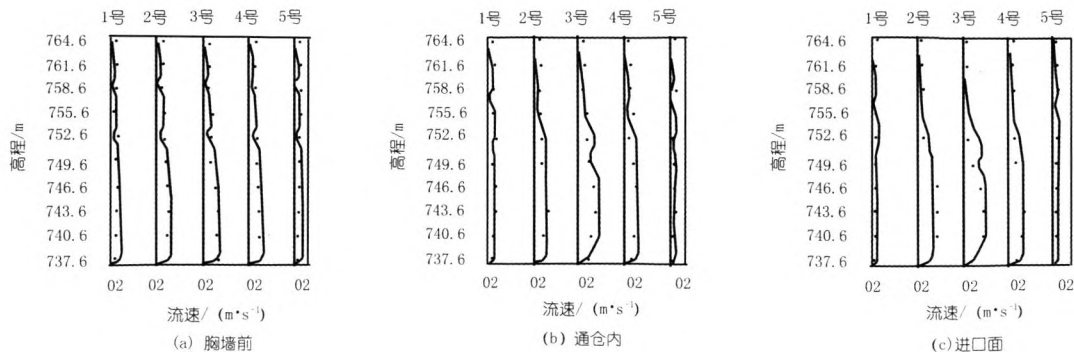


图 5 胸墙前、通仓内、进口面垂向流速分布

2.2 压力

为判断体型的合理性,定义压降系数 K_d 为:

$$K_d = \frac{H_0 - H_d}{V_p^2 / 2g} \quad (10)$$

式中, H_0 为库水位, m; H_d 为监测点测压管水头 ($Z + \frac{p}{r}$), m; V_p 为压力管道的平均流速, m/s。

图 4 给出了压力流道壁面顶中沿程压降系数 $X/D \sim K_d$ 曲线图,监测点至流道进口断面的距离为 X ,压力管道直径为 D ,单位均为 m。由图可知,喇叭口段压降系数沿程大幅度增加,表明压力沿程大幅度减小;在检修门井前、后,压降系数略有减小,压力有所增大;在检修门井与工作闸门井之间,压降系数沿程增大,压力沿程减小;工作门井前、后压降系数增大,压力减小;工作门井以后至渐变段压降系数变化幅度较小,表明沿程压力分布基本均匀。压力管道壁面顶中压降系数 K_d 的数学模型计算值与物理模型测量值基本吻合。

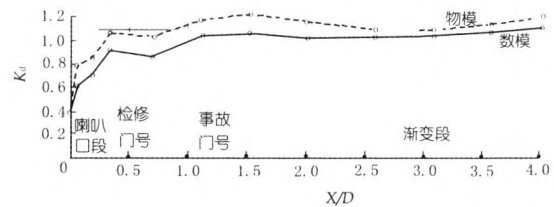


图 4 压力流道壁面顶中沿程压降系数 K_d 曲线

2.3 流速

图 5~6 给出了胸墙前、通仓内、进口断面沿 5 孔流道中心线上的垂线流速分布及等值线图,分布图中散点为物理模型量测值,曲线为数学模型计算值,从左至右依次为 1~5 号流道。可以看出,各断面垂线流速以中孔为中心呈对称分布,向两侧呈减小趋势,主流集中在中间 3 孔。垂线流速分布为:胸墙前断面呈底大、表小;胸墙后断面呈底小、中大、表小;联系梁附近流速

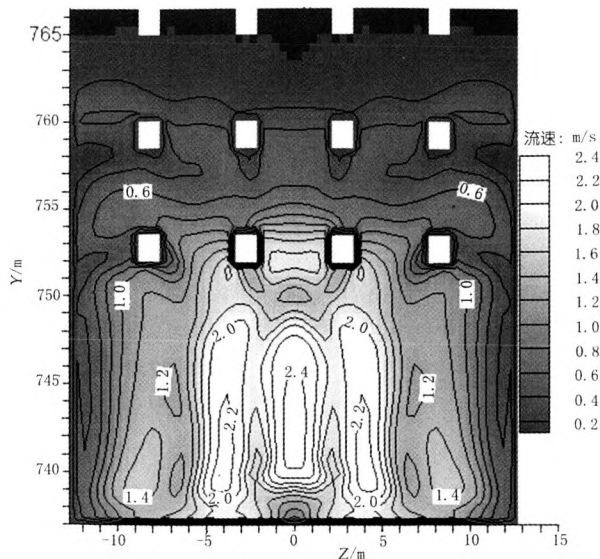


图 6 通仓内流速分布及等值线

明显减小;胸墙前、通仓内、进口断面流速最大值分别为 2.0, 2.4 m/s 和 3.0 m/s。

对比物理模型量测值与数学模型计算值,可以看出垂线流速分布变化规律基本一致,数值上吻合较好。

2.4 水头损失

模拟计算得到进水口段(包括拦污栅段与流道段,总长 58.5 m)的水头损失为 0.295 m。物理模型测得此段的水头损失为 0.291 m,数学模型与物理模型的成果接近。

3 结论

(1) 本文采用三维 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型对电站进水口水流进行了三维数值模拟研究,模拟得到的流态、压力、流速、水头损失等与物理模型试验成果吻合较好,说明采用的模拟方法是合理可靠的。

(2) 本次研究对大尺度与微小尺度并存的计算区域进行无简化建模,计算区域采用可控性较好的六面体网格进行划分,大大提高了计算精度,同时也提高了计算速度,可供类似工程研究参考。

参考文献:

- [1] 陈云良,伍超,叶茂,等. 水电站进水口水流流态的研究[J]. 水动力学研究与进展,2005,A20(3):340-345.
- [2] 叶茂,伍超,杨朝晖,等. 进水口前立轴漩涡的数值模拟及消涡措施分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2007,39(2):36-40.
- [3] 高学平,叶飞,宋慧芳. 侧式双进/出水口水流运动三维数值模拟[J]. 天津大学学报,2006,39(5):519-522.
- [4] 张正楼,郑亚军,雷兴春,等. 抽水蓄能电站侧式双进/出水口三维数值模拟[J]. 水电能源科学,2009,27(1):158-160.
- [5] 章军军,毛根海,程伟平,等. 抽水蓄能电站侧式短进出水口水力优化研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2008,42(1):188-192.
- [6] 李妍,高学平,徐茂杰,等. 水电站进水口水力特性数值模拟研究[J]. 水利水电技术,2010,41(1):29-32.

(编辑:徐诗银)

Flow Numerical simulation of hydropower station intake

REN Kunjie, WANG Feng, HAN Jibin

(Institute of Hydraulics, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: A 3D flow numerical simulation is carried out for hydropower station intake by $k-\varepsilon$ turbulent numerical model. We adopt finite volume method for equation discretization and volume of fraction (VOF) for tracking free surface, and use SIMPLER method with little dependency on initial pressure intensity and better convergence as numerical computation method. The calculation results show that the hydraulic parameters such as flow pattern, flow velocity, pressure and head loss simulated by the numerical simulation match well with the physical model test results. Therefore, the numerical simulation method used for complex large-area intake is reliable and can be taken as references for the project design and numerical simulation of similar projects.

Key words: $k-\varepsilon$ turbulent mathematical model; SIMPLER method; VOF method; hydraulic parameters; hydropower station intake

欢迎订阅

欢迎投稿

欢迎刊登广告