

文章编号:1001 - 5485(2009)08 - 0028 - 04

河床式电站大坝泄洪流场的三维数值模拟

杨京广,把多铎,林劲松,童 星

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:在 1:100 水工模型试验的基础上,应用 $k-\varepsilon$ 紊流数值模型,采用 VOF 方法,对低水头大流量河床式电站大坝泄洪流场进行了三维数值模拟。将计算得出的各工况下泄洪闸闸室及下游流场的流态,水面线,闸室内流速、压力分布等水力特性值与试验数据对比,发现计算值与试验值基本吻合。说明所选择的紊流数学模型,建立基本控制方程以及求解数学模型的离散方法是比较可靠的,可以为工程设计提供参考。

关键词:VOF; $k-\varepsilon$; 紊流模型; 河床式电站

中图分类号:TV135.2 **文献标识码:**A

随着计算技术的日趋成熟和计算机性能的不断提高,越来越多的水利工作者将计算机这一工具应用于水利工程的数值计算。数值模拟花费少、速度快、信息完整等优点逐步显示出来,并逐渐被工程界所接受,成为物理模型试验的重要补充手段。

关于数值模拟在水利工程中的应用,国内外学者已经做了不少工作。如李玲^[1]等人对溢洪道出口扭曲型挑坎水流进行数值模拟;张盾^[2]等人对渥奇面掺气挑坎位置进行二维数值模拟研究;沙海飞^[3]等人采用三维紊流模型,对泄洪洞整体进行了数值模拟;吕欣欣^[4]采用紊流模型,对低水头大流量厂坝联合泄流消能流场进行了二维数值模拟研究。

1 工程概况

本文对黄河河口水电站^[5]泄洪闸泄流进行了三维数值模拟研究。河口水电站是一座中型河床式水电站,枢纽建筑物从左至右依次由安装间坝段、厂房坝段、冲沙闸(2 孔)、泄洪闸(5 孔)、右岸挡水坝段及 GIS 开关站组成,具体布置如图 1 所示,泄洪闸体型如图 2 所示。

2 数值计算

2.1 数学模型的控制方程

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

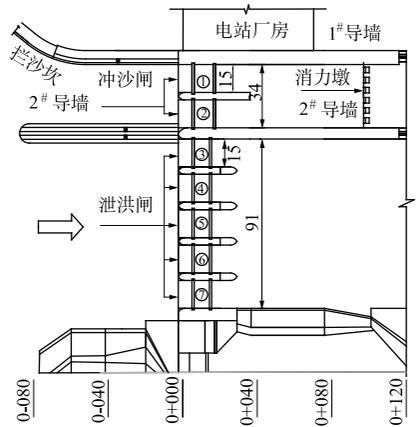


图 1 枢纽布置图(单位:m)
Fig. 1 General layout of Hekou Hydropower Station on the Yellow River(unit in m)

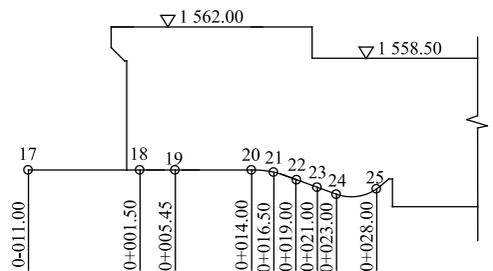


图 2 泄洪闸纵剖面及测压孔布置图(单位:m)
Fig. 2 Profile of release sluice and pressure measurement holes arrangement (unit in m)

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]; \quad (2)$$

收稿日期:2008 - 10 - 17; 修回日期:2008 - 12 - 20

基金项目:西北农林科技大学人才培养基金

作者简介:杨京广(1982 -),男,湖南湘乡人,硕士研究生,主要从事水工水力学方面研究。(电话)13720418202(电子信箱)yjg1022@yahoo.cn。

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G + \rho \varepsilon; \quad (3)$$

ε 方程

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K}. \quad (4)$$

式中: u_i 为 x_i 方向的速度分量, $i, j = 1, 2, 3$; ρ 为体积分数的平均密度; p 为修正压力值; μ 是体积分数的分子黏性系数, $\mu_i = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon}$, C_u 取值为 0.09; σ_k

和 σ_ε 为 k 和 ε 的紊流普朗特数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.33$; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为 ε 程常数, 取 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$; G 由平均速度梯度引起的紊动能产生项,

$$G = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (5)$$

式中的 ρ 和 μ 不是常数, 而是体积分数的函数, 计算公式如式(6)和式(7)所示,

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a, \quad (6)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a, \quad (7)$$

式中: α_w 为水的体积分数; ρ_w 和 ρ_a 分别为水和气的密度; μ_w 和 μ_a 分别是水和气的黏性系数。

2.2 数值求解

采用有限体积法 (Finite Volume Method) 进行数值求解。首先将计算区域划分网格, 使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积, 将控制方程对每一个控制体积积分, 再把积分方程线性化, 得到各未知变量的代数方程组, 求解这些方程组便可以求出各未知变量。各控制方程的通用形式如式(8)所示。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + s, \quad (8)$$

式中: ϕ 为通用变量, 可以代表 u, v, w, k 和 ε 等变量; Γ 为广义扩散系数; s 为广义源项。控制方程中, ϕ 和 Γ 的具体形式如表 1 所示。

表 1 各输运方程中 ϕ, Γ 和 s 的具体形式

Table 1 The concrete forms of ϕ, Γ and s used in transportation equation

方程	ϕ	Γ	s
连续方程	ρ	0	0
动量方程	u	$\mu + \mu_i$	$\partial \Gamma / \partial x_i$
k 方程	k	$\mu + \mu_i / \sigma_k$	$G - \rho \varepsilon$
ε 方程	ε	$\mu + \mu_i / \sigma_\varepsilon$	$(C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) / k$

对方程(8)在任意控制体积作体积分, 利用高

斯定理将体积分化为面积积分。如果令 $F(\phi) = \rho \phi u - \Gamma \phi \text{grad}\phi$, 则有限体积法的基本方程可以写为式(9)形式。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi dv = - \int_A F(\phi) n dA + \int_V S_\phi dv, \quad (9)$$

式中: $F(\phi) n$ 为法向数值通量; A 为表面矢量。

在一个给定的控制体中对方程进行离散, 得

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = - \frac{1}{\Delta v} \sum_{i=1}^n F_i^n(\phi) A_i + \bar{S}_\phi, \quad (10)$$

式中: Δv 为单元体积; n 为围成单元面的个数; A_i 为第 i 个单元面的面积; \bar{S}_ϕ 为单元的源相平均值。

3 网格划分及计算条件

3.1 网格划分

本文对泄洪闸进行了数值计算, 模拟的区域包括 5 孔泄洪闸, 模拟上游库区 30 m 和下游河床段 70 m, 泄洪闸单宽 15 m, 高 16 m。由于模拟的计算区域较大, 在某些部位不可避免出现体型不规则, 因此, 在进行网格划分时采用结构化网格与非结构网格相结合的方法。划分的网格单元数约为 37 万。

3.2 边界条件

进口边界: 进口采用水流速进口, 对于某一指定工况下, 紊动能 k 和耗散率 ε 可由下列经验公式得出。

$$k = 0.00375u^2, \quad \varepsilon = k^{3/2}/0.4L,$$

式中 L 为紊流特征长度。

出口边界: 出口边界条件根据下游流量水位关系确定。

壁面条件: 采用 Launder & Spalding 的壁面函数法。

自由水面: 采用 VOF 方法追踪自由水面。VOF 方法认为在每个单元中, 水和气的体积分数 α_w 与 α_a 之和为 1, 水的体积分数为 α_w , 气的体积分数为 α_a , 当 $\alpha_w = 1$ 时, 表示该单元内全部是水; 当 $\alpha_w = 0$ 时, 表示该单元全被气充满; 当 $0 < \alpha_w < 1$ 时, 表明该单元部分是水, 部分是气, 有水气界面。

4 计算结果及分析

按照上述计算条件, 对泄洪闸各工况进行了流场计算, 由于篇幅限制, 只对大流量 30 年一遇洪水 (6 170 m³/s) 举例说明。当遭遇 30 年一遇洪水时, 5 孔泄洪闸全开, 2 孔冲沙闸局开 7.2 m, 库水位为 1 558.00 m, 下游水位为 1 556.08 m, 泄洪闸过流量

为 $4\ 699\ \text{m}^3/\text{s}$, 2 孔冲沙闸过流量为 $1\ 471\ \text{m}^3/\text{s}$ 。计算分别得出了泄洪闸内水面线、压力及流速分布。图 3 为控制体积内气所占比例的数值计算结果。从图中可以比较清晰地看见水和空气的分界线。

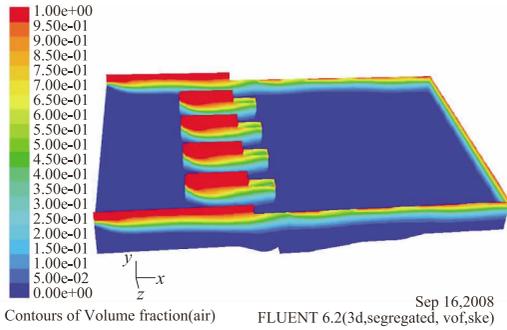


图 3 控制体积中气的体积分数
Fig. 3 Air fraction in control volume

4.1 水面流态

从模型试验可以看出,当泄洪闸遭遇 30 年一遇洪水 ($6\ 170\ \text{m}^3/\text{s}$) 时,水闸上游水面较为平稳,左右各孔进流均匀,无横向水面跌落、回流等,且各闸室内水流对称,左右侧水面线高度基本相等,有弱水跃发生。图 4 为泄洪闸实测水面线与计算水面线比较。从计算曲线可以看出,水面线较为平稳,在闸室内有弱水跃,与试验观察基本一致。由图还可以看出水流从水库流出,在到达堰顶之前出现水面跌落,这是因为进入堰顶的水流,受到堰顶垂直方向的约束,过水断面减小,流速加大。由于动能加大,势能必然减小,再加上水流进入堰顶时产生局部能量损失,所以进口处形成水面跌落,这是符合宽顶堰出流的特点。

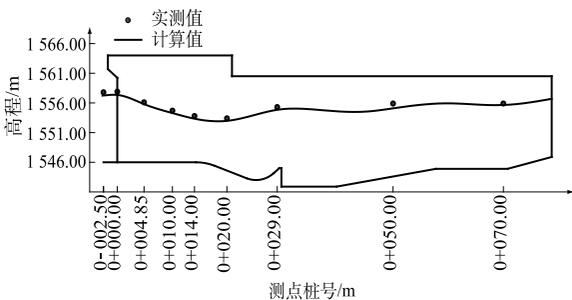


图 4 水面线实测值与计算值对比
Fig. 4 Calculated water surface line compared with the measured one

笔者还对控制断面处水面高程实测值和计算值作了比较,从比较结果来看,实测值与计算值的差值在 $0.18 \sim 0.55\ \text{m}$ 之间,大致相差 $1.3\% \sim 5.4\%$,两者基本吻合。引起误差的原因可能有 2 点,①试验过程中的测量误差;②网格划分不够细,会引起计算结果偏离真实值。

4.2 压强分布

计算了泄洪闸内沿底板中心线时均压强的分布,泄洪闸内共安装了 9 个测压孔,其具体分布位置如图 2 所示。图 5 是流量为 $6\ 170\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,泄洪闸纵剖面计算得出的压强分布等值线图,从图中可以看出,闸室内压强分布比较均匀。

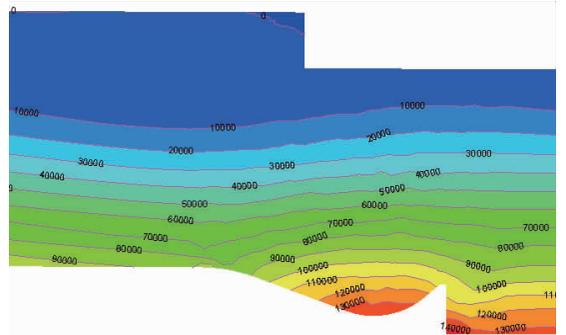


图 5 泄洪闸内压强分布等值线
Fig. 5 Pressure distribution contour lines in release sluice

图 6 为泄洪闸底板中线沿程压强分布的计算值与实测值之间的对比。由图可见压强的计算值与实测值在分布趋势和大小上均吻合得比较好,在模型体型突变的位置,压强变化较大。压强分布符合常规宽顶堰和反弧挑坎的压强分布规律。可以看出,自反弧段中心位置至鼻坎出口处,压强呈逐渐减小的趋势;堰面上没有出现负压,在体型突变的位置压强较小。下游压强分布比较均匀,没有突变的位置。说明泄洪闸体型设计是比较合理的。

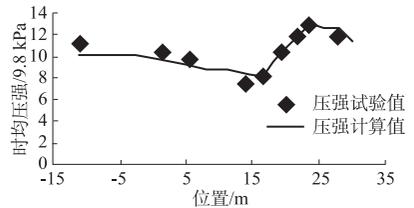


图 6 泄洪闸底板压强计算值与实测值对比
Fig. 6 Calculated pressure values compared with measured data on release sluice floor

4.3 流速分布

图 7、图 8 为泄洪闸内坝轴线线处、坝下 $0 + 10\ \text{m}$ 、 $0 + 20\ \text{m}$ 以及 $0 + 26\ \text{m}$ 处流速沿水深方向,计算值与实测值之间的对比。从图中可以看出,计算值与实测值在大小和变化趋势上基本一致,速度平均值相差不大,大致相差在 $0.01 \sim 0.17\ \text{m/s}$ 的范围。从图 4 水面线形状可以看出,闸室内弱水跃跃前位置在坝下 $0 + 20\ \text{m}$ 左右,所以在该处出现流速最大,计算得出的表流速为 $9.81\ \text{m/s}$,试验得出为 $9.83\ \text{m/s}$;底流速计算值为 $9.07\ \text{m/s}$,试验测得为 $9.36\ \text{m/s}$ 。从以上对比可以分析得出,数值计算得出的结果是非常可靠的。

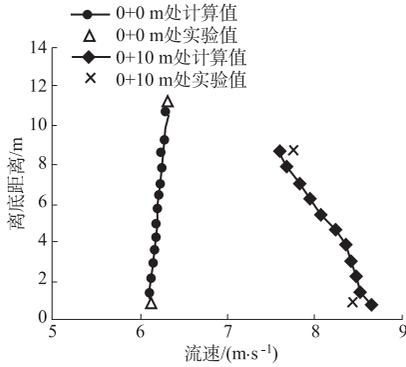


图 7 0+0m、0+10m 处流速试验值与计算值

Fig. 7 Measured and calculated velocities at 0+0m, 0+10m

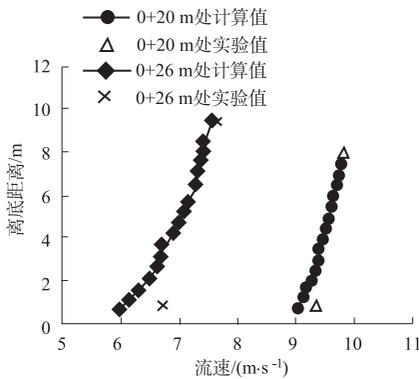


图 8 0+20m、0+26m 处流速试验值与计算值

Fig. 8 Measured and calculated velocities at 0+20m, 0+26m

5 结 论

(1) 河口水电站设计的枢纽整体布置是合理的,泄水建筑物位于主河槽上,泄流顺畅,泄洪闸进口水流对称,闸室内水流平稳,无脱壁、立面漩涡等不利流态,出闸水流顺直,两岸无明显回流。

(2) 泄洪闸内水面线、流速及压强分布合理,说

明枢纽建筑物体型设计是合理的;泄水建筑物及上、下游河道流态平顺。

(3) 应用 $k-\varepsilon$ 两方程模型、VOF 法对低水头大流量河床式水电站泄洪流场进行了三维数值模拟,计算得出了泄洪闸各工况下的水面线、闸室内压强及流速分布。将模拟结果用试验资料进行了验证,发现该模型可以较精确地模拟泄洪闸内部过流的各项水力要素。应用该数学模拟方法,可以为设计工作者提供第一手快捷、准确的成果信息。

(4) 应用成果信息,使水工设计提高效率 and 节省费用,并为物理模型试验提供前期预测和指导。

参考文献:

- [1] 李 玲,陈永灿,李永红. 溢洪道出口扭曲型挑坎水流的数值模拟[J]. 水力发电学报,2007, 26(2):79-82.
- [2] 张 盾,刘韩生. 渥奇面上掺气挑坎位置的试验与数值计算分析[J]. 山东大学学报,2008,38(2):101-105.
- [3] 沙海飞,吴时强,陈振文. 泄洪洞整体三维数值模拟[J]. 水科学进展,2006,17(4):507-511.
- [4] 吕欣欣,牛争鸣. 低水头大流量厂坝联合泄洪消能流场的二维数值模拟[J]. 西北水力发电,2007,23(2):10-14.
- [5] 林劲松,刘韩生,许海军,等. 黄河河口水电站可研阶段整体水工模型试验报告[R]. 陕西杨凌:水利部西北水利科学研究所试验中心,2006.

(编辑:周晓雁)

Three-Dimensional Numerical Simulation on Flood Field of Riverbed Hydropower Station

YANG Jing-guang, BA Duo-duo, LIN Jing-song, TONG Xing

(College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: On the basis of model test, a 3 D numerical simulation on the flow field of low waterhead and big discharge riverbed hydroelectric station was made by adopting $k-\varepsilon$ turbulence model and VOF method. The calculated flow pattern, water surface line, flow velocities, and the pressure distributions were compared with test results. The results show that the calculated results are in good agreement with the experimental data. It is proved that the turbulent mathematical model, the basic control equation and discrete method are reliable. The results can be used for the engineering design.

Key words: VOF; $k-\varepsilon$; turbulence model; riverbed hydroelectric station