

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.05.040

查日扣水电站竖井旋流泄洪洞水力学数值模拟研究

南洪, 贺威, 韩鹏辉, 张丽花

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安 710065)

摘要: 水力学数值模拟计算具有成本低、效率高、计算精度高的优点,是水力学研究的新手段。为研究其在竖井旋流泄洪洞复杂水流特性的适应性,用 $k-\epsilon$ 紊流模型以及 VOF 方法,对查日扣水电站旋流泄洪洞进行了水力学数值模拟研究。研究表明:水力学数值计算在流量、流速、压强等方面与水工模型试验误差较小,计算精度比较高;在计算水流掺气量、通风流速、水流流线等方面,数值计算更有优势,能简单直观的给出结果;在计算水流脉动压力、河道的冲淤变形等方面还有一定的不足,要参考模型试验成果。

关键词: 竖井旋流泄洪洞;数值模拟; $k-\epsilon$ 紊流模型;VOF 方法

中图分类号: TV135.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)05-0204-04

Numerical Simulation of Silo Discharge Tunnel with Whirling Currents at the Charikou Hydropower Station

NAN Hong, HE Wei, HAN Penghui, ZHANG Lihua

(POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Hydraulic numerical simulation is a new research method in hydraulics which has many advantages such as low cost, high efficiency, high precision etc. To test its suitability in the calculation of complex flow characteristics of silo discharge tunnel with whirling currents, the $k-\epsilon$ turbulence model and VOF method were adopted in the research of Charikou hydropower station which has a spillway as such. The results indicate that the hydraulic numerical simulation method has relatively lower error and higher accuracy in calculating the flow rate, flow velocity and pressure compared to the hydraulic model. As for the flow aeration, ventilation flow rate, flow streamline, with the numerical calculation, the results can be easily displayed in a very intuitive way, however in the calculation of fluctuating pressure of the flow and riverbed deformation caused by the scouring and silting, this method is proven incompetent, therefore the results of the model tests should be consulted.

Keywords: silo discharge tunnel with whirling currents; numerical simulation; $k-\epsilon$ turbulence model; VOF method

竖井旋流消能结构是使泄洪洞高速水流在消能竖井内旋转,增大水流沿程损失,并且通过水流在井底水垫的掺和,达到水流消能的目的^[1],是泄水建筑物一种较新的布置形式^[2-4],近年来沙牌和溪古等水电工程采用了竖井旋流泄洪洞^[5-9]。

竖井旋流泄洪洞的研究方法主要有水力学仿真计算和传统的模型试验。因为竖井内水流复杂,常规的测量方法很难测量涡室及竖井内的水力参数^[10]。水力学仿真计算具有计算效率高、成本低、

无比尺效应等优点。因此,采用数值仿真计算方法,研究竖井旋流泄洪洞的水力特性,并与水工模型试验进行对比验证,可为评判竖井旋流泄洪洞水力学数值仿真计算的适应性提供参考。

1 数值计算原理

1.1 $k-\epsilon$ 双方程模型

本计算采用的紊流模型为 $k-\epsilon$ 模型,连续性方程为^[10-15]:

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

动量方程为:

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

紊动动能 k 方程为:

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

紊动耗散率 ϵ 方程为:

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

式中: t 为时间; ρ 和 μ 分别为密度和分子黏性系数; P 为修正的压力; u_i 和 x_i 分别为速度和坐标分量; σ_ϵ 和 σ_k 分别为 ϵ 和 k 的紊流普朗特数, 计算取 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$; G 为平均速度梯度引起的紊动动能产生项; $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为 ϵ 方程常数, 计算取 $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$; μ_t 为紊流黏性系数, 可由紊动耗散率 ϵ 和紊动动能 k 求出:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

式中: C_μ 为常数, 计算中 $C_\mu = 0.09$ 。

1.2 VOF 模型

采用 VOF 方法的 $k - \epsilon$ 紊流模型, 分子黏性系

数 μ 以及密度 ρ 用体积分数的平均值给出, μ 和 ρ 是体积分数的函数, 可用下式表示:

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

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

式中: α_a 和 α_w 分别为单元中气和水的体积分数; ρ_a 和 ρ_w 分别为气和水的密度; μ_a 和 μ_w 分别为气和水的分子黏性系数。

水和气的界面通过求解以下方程来完成:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

2 数值计算模型

2.1 竖井旋流泄洪洞设计体型

查日扣水电站竖井旋流泄洪洞由引水道、涡室和竖井段、退水洞段、原导流洞组成, 如图 1 所示。引水道和原导流洞夹角为 50° , 引水道长约 100 m, 进口底板高程为 3 950.00 m, 检修门孔口尺寸 3 m × 4 m, 工作门孔口尺寸 3 m × 3.5 m, 均为平板门, 引水道正常运行全有压状态。竖井段由通气孔、涡室、渐变段、竖井、消力池组成。退水洞长 20 m, 上游断面为 3.8 m × 7 m, 下游断面为 3.8 m × 4 m, 中间有一长 7.5 m, 厚 1.5 m 的中墩。导流洞断面尺寸为 5.5 m × 7 m, 结合段长约 343 m。校核洪水水位为 3 992.5 m 时, 最大设计泄量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

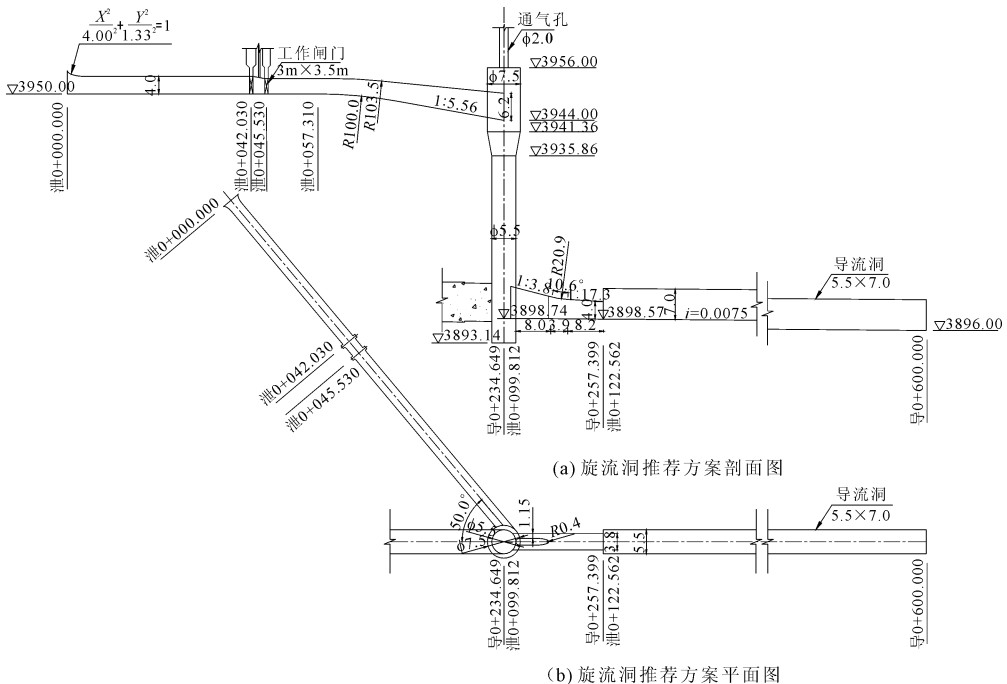


图 1 竖井旋流泄洪洞体型图(单位:m)

2.2 计算模型

竖井旋流泄洪洞计算模型如图 2 所示,泄洪洞进水口段、引水道段、旋流竖井段、退水洞和导流洞均按 0.5 m 剖分单元网格,上、下游水体部分适当变疏,按 1 m 剖分,共有节点 368 433 个,单元 328 233 个。上游水体四周设为进水边界;下游水体四周设为出水边界;通气孔顶设为通风边界,模型其它外边界均为流道边界。设计洪水水位为 3 992.00 m,相应下游水位为 3 900.62 m;校核洪水水位为 3 992.5 m,相应下游水位为 3 901.34 m。计算采用有限体积法隐式迭代求解方法,压力场和速度场的耦合采用 PISO 法。

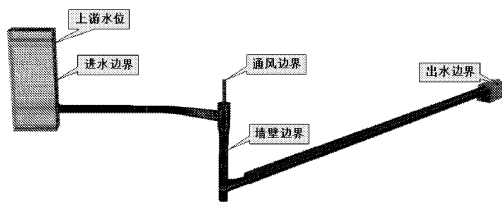


图 2 计算模型图

3 计算结果及分析

3.1 流量结果

计算泄洪洞设计及校核水位泄量分别为 206 m³/s、208 m³/s,水工模型试验确定设计及校核水位泄量分别为 210 m³/s、211 m³/s,二者差别较小,均满足最大泄量 200 m³/s 流量要求。

3.2 流态结果

泄洪洞校核工况流态计算结果如图 3 所示,设计工况流量仅比校核工况少 2 m³/s。由流态计算结果可以看出,水流在进入竖井前的引水道内全部为水;进入竖井后,在竖井边壁附近形成水气混合体,从上到下水流含气量逐渐变大,竖井中心为空气;水流在竖井出水口段为含气量在 45% ~ 55% 之间的水气混和体;导流洞顶部为空气,底部为含气量在 45% ~ 55% 之间的水气混和体。

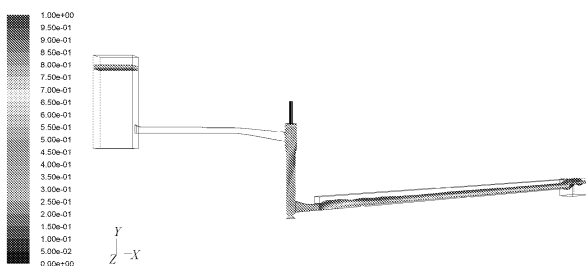


图 3 泄洪洞流态计算结果云图

水工模型试验结果表明,校核工况时泄洪洞引水洞段为满流;观察水流在竖井内的流态,也表明水流掺气量从上到下逐渐增大,但其含气量值很难测量;导流洞内顶部为空气,底部为水气混和体,在最大水深时,其掺气水面线较低。

3.3 流速结果

校核工况流速计算结果如图 4 所示,由计算结果可以看出,水流在进入竖井前,流速在 13 m/s ~ 21 m/s 范围之间,平均流速约 19 m/s;水流进入竖井后,在竖井进水口部位以水平向流速为主,平均流速约 13 m/s,在竖井中部以竖直向流速为主,最大值约 20 m/s;水流在竖井出水口部位的流速在 13 m/s ~ 20 m/s 范围之间,平均流速约 16 m/s;水流在导流洞内的流速从上游到下游逐渐减小,在导流洞末端流速约 13 m/s;通气孔风速约 45 m/s。

水工模型试验结果表明,校核水位时引水道段的平均流速在 11.9 m/s ~ 20.0 m/s 之间;退水洞口至泄 0 + 322.562 m 段,断面最大流速为 15.4 m/s ~ 18.6 m/s;泄 0 + 322.562 m ~ 泄洪洞末端(泄 0 + 472.562 m),断面最大流速为 13.4 m/s ~ 14.2 m/s,流速沿程减小;通气孔风速试验很难测量;说明水工模型试验流速结果与数值计算差别较小。

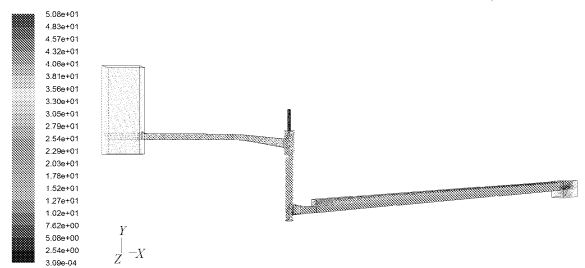


图 4 泄洪洞流速计算结果矢量图

3.4 压强结果

校核工况压强计算结果如图 5 所示,由计算结果可以看出,水流在泄洪洞工作闸门以前以及竖井消力池底部压强较大,其它部位压强均较小。在工作门以前,压强范围为 3 kPa ~ 300 kPa 之间,随水流流向逐渐减小;竖井消力池底部压强最大值约 377 kPa,在竖井和出水口交接处的顶部有最大值约 -30.8 kPa 的压强。

水工模型试验结果表明,泄洪洞内水流压强分布规律与数值计算结果基本一致,竖井消力池底部压强最大值约 415 kPa;在竖井和出水口交接处的顶部有最大值约 -37.2 kPa 的压强,说明水工模型试验压强与数值计算差别较小。

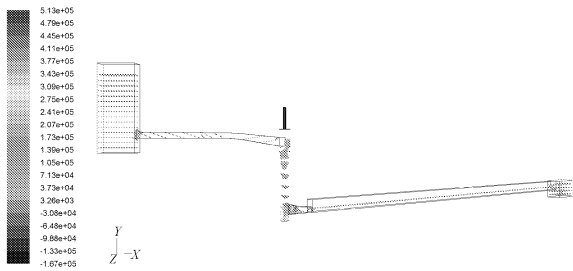


图5 泄洪洞压强计算结果云图

3.5 流线结果

校核工况流线计算结果如图6所示,由计算结果可以看出,由进水口进入竖井的水体,其上表部在竖井内旋转约两圈,底部在竖井内旋转约一圈,与土工模型试验成果基本一致。

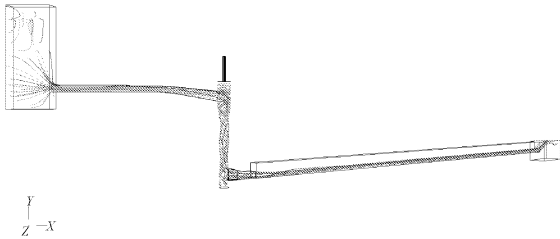


图6 泄洪洞上游水体流线计算结果

4 结论

通过对查日扣水电站竖井旋流泄洪洞进行水力学三维数值计算,以及与土工模型试验成果的对比较验证,结论如下:(1)水力学数值计算在流量、流速、压强等方面与土工模型试验成果误差较小,计算精度比较高;(2)在计算水流掺气量、通风流速、水流流线等模型试验很难测量的方面,数值仿真计算更有优势,能简单直观的给出结果;(3)数值计算在计算水流的脉动压力、河道的冲淤变形等方面还有很大的不足,要参考模型试验成果。

参考文献:

- [1] 安盛勋,王君利,陈念水,等.水平旋流消能泄洪洞设计与研究[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 董兴林,高季章,鲁慎吾,等.导流洞改为旋涡式竖井溢洪道综合研究[J].水力发电,1995,22(3):32-37.
- [3] 郭琰,倪汉根.旋流式竖井溢洪道的过流能力及蜗室与锥形渐缩段的水力特性研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(1):97-105.
- [4] 郭琰,倪汉根.旋流式竖井溢洪道竖井的水流特性研究[J].水动力学研究与进展,1995,10(2):146-154.
- [5] 李贵信,周一恒.公伯峡水电站导流洞改建为旋流泄洪洞方案研究[J].水力发电,2002,29(8):41-44.
- [6] 刘善均,许唯临,王伟.高坝竖井泄洪洞、龙抬头放空洞与导流洞“三洞合一”优化布置研究[J].四川大学学报,2003,35(2):10-14.
- [7] 邵敬东.漩流式竖井泄洪洞在沙牌工程中的应用[J].水电站设计,2003,19(4):61-68.
- [8] 方卫红,李学强.溪古水电站竖井旋流溢洪洞设计与分析[J].西北水电,2012(4):41-45.
- [9] 林崇勇.竖井旋流泄洪洞在甲岩水电站的应用[J].云南水力发电,2013(5):26-28.
- [10] 张晓东,刘之平,高季章,等.竖井旋流泄洪洞数值模拟[J].水利学报,2003,34(8):58-63.
- [11] 杨朝晖,吴守荣,余挺,等.竖井旋流泄洪洞三维数值模拟研究[J].四川大学学报,2007,39(2):41-45.
- [12] 钱小燕,邓军,张叶林,等.竖井旋流泄洪洞涡室整流挑坎试验与数值模拟[J].人民长江,2011,42(6):20-22.
- [13] 付波,牛争鸣,李国栋,等.竖井进流水平旋转内消能泄洪洞水力特性的数值模拟[J].水动力学研究与进展,2009(3):164-171.
- [14] 陈华勇,邓军,胡静,等.旋流式竖井泄洪洞水力要素的数值模拟与试验研究[J].水力发电,2008(3):79-82.
- [15] 牛争鸣,程庆迎,谭立新.竖井进流水平旋转内消能泄洪洞流场数值模拟[J].西安理工大学学报,2005,21(2):113-117.