

旋流竖井中部消能水垫数值模拟分析研究

向 星, 邓 军*, 陈 藜, 陈鑫淼

(四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 采用数值模拟的方法, 以现阶段实际工程应用中, 最大流量竖井旋流泄洪洞为研究对象, 对竖井中部形成的消能水垫进行分析研究, 得到结论: 在流量 $667 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 收缩面直径为 6.6 m 、上收缩角为 20° , 竖井中部成功形成预想的消能水垫; 相同工况下, 在消能水垫装置上方, 及其下方一定范围内, 高程相同的位置, 设置消能水垫后水流的壁面流速均小于不设置消能水垫时的壁面流速, 即消能水垫装置起到了一定的消能效果。

关键词: 数值模拟; 旋流竖井; 消能水垫; 消能效果

中图分类号: TV735

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 12-0054-04

Numerical simulation analysis on the energy dissipation water cushion in the middle part of gyrating shaft well

XIANG Xing, DENG Jun, CHEN Li, CHEN Xinmiao

(College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan)

Abstract: Taking the maximum flow gyrating shaft well tunnel spillway in the practical application at present as a research object, the energy dissipation water cushion formed in the middle part of gyrating shaft well was analyzed by using the method of numerical simulation. The conclusion was drawn: when the flow rate was $667 \text{ m}^3/\text{s}$, the diameter of the contraction surface was 6.6 meter , the upper shrinkage angle is 20° , and the expected energy dissipation water cushion was successfully formed in the middle part of the shaft. Under the same conditions, above and below a certain range of the energy dissipation water cushion device, at the same elevation, the wall velocity of flow after setting energy dissipation water cushion were lower than the wall velocity when the energy dissipation water cushion was not set. That is, the energy dissipation device did have a certain energy dissipation effect.

Key words: numerical simulation; gyrating shaft well; energy dissipation water cushion; energy dissipation effect

1 概述

竖井旋流泄洪洞作为一种新型的消能工, 具有对复杂地形的良好适应性和高效的消能效果, 已经在许多的电站中应用^[1~3]。竖井旋流泄洪洞的消能机理是利用水流进入竖井后贴壁运动产生摩擦损失以及竖井底部的消能水垫来达到消能的目的。

^[4]。但是在高水头水利工程中, 竖井中水流的高度差和沿程损失相差很大, 会导致竖井下段水流的速度很大, 从而导致竖井壁面空蚀空化破坏严重, 而水流对竖井底板的冲击过大也可能极易造成底板的破坏。这就影响了竖井旋流泄洪洞在高水头水电站中的应用。针对这一问题, 已有学者提出, 可以通过在竖井中部设计消能水垫装置, 使

收稿日期: 2017-08-12

作者简介: 向星 (1996-), 男, 本科生, 研究方向为水工水力学。

通讯作者: 邓军 (1973-), 男, 教授, 研究方向为水工水力学。

水流在竖井中的该位置形成实体的消能水垫^[5], 从而使水流速度减小, 相应地削弱了竖井壁面的空蚀空化破坏, 减小了水流对竖井底板的冲击。

数值模拟计算具有效率高、经济成本低、数据资料完整等优势, 且已有诸多研究^[6~8]表明, 一定情况下, 数值模拟计算结果和实际情况符合程度较高, 是目前水力学研究的主流研究方法之一。因此, 本文采用数值模拟的方法, 对旋流竖井中部设置的消能水垫进行分析研究。

2 紊流模型

本文采用 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型对水流流动状态进行求解, 该模型包含以下方程^[7]:

连续性方程:

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

动量方程:

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

k 方程:

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

ε 方程:

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

式中:

t —时间;

μ_i, μ_j —速度分量;

x_i, x_j —坐标分量;

ρ —密度;

M —分子黏度系数;

P —修正压力;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —分别为 k, ε 的紊流普朗特数, 计算时 $\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$;

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ — ε 方程常数, 计算时 $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92$;

μ_t —紊流粘性系数,

G' —平均速度梯。

μ_t, G' 由以下公式定义:

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

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

并且引入 VOF 法对自由水面进行跟踪捕捉。同时, 边界条件设置如图 1 所示, 入口为速度边界, 出口及空气边界均为压力边界, 壁面为固定无滑移边界, 粘性底层用壁函数求解。利用结构化网格与非结构化网格结合的方法对计算区域进行网格划分。

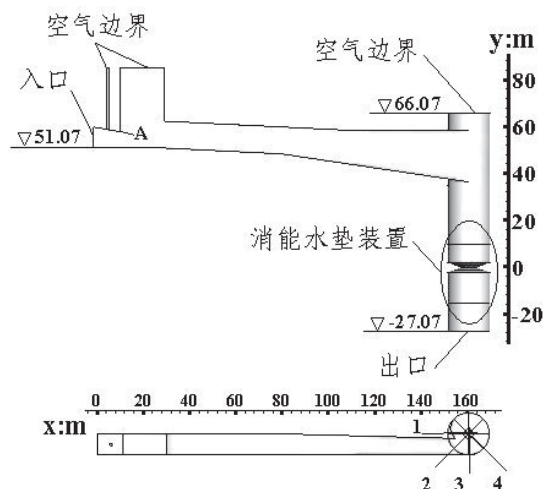


图 1 模型示意图

3 消能水垫的分析研究

在计算前, 首先针对研究对象建立数值模型, 然后对模型进行数值求解, 为了进行对比, 本文的计算针对不设置消能水垫和设置消能水垫 2 种体型, 进行了相同流量的计算, 得到 2 种体型流量相同时, 水流在竖井中的流态与竖井各截面的速度, 并进行了对比分析。

3.1 计算体型

模拟模型如图 1 所示, 令消能水垫装置收缩面高程为 0 m, 则竖井顶板高程为 66.07 m, A 处高程为 58.07 m, 入口底板高程为 51.07 m, 竖井出口高程为 -27.07 m。令入口处 $x=0$ m, 则模型的模拟范围为 0 ~ 169 m, 且竖井中心处 $x=160$ m。如图 2 所示, 竖井入口为宽 9 m、高 8.97 m 的矩形入口, 竖井直径 $D=18$ m, 收缩面直径 $d=6.6$ m, 上收缩角 α 与下收缩角 β 均为 20° 。且上游水位为 64.47 m

时,估算得到不设置消能水垫时, $y=0\text{ m}$ 处的水流速度在 $30 \sim 35\text{ m/s}$ 内,则据文献^[5]知该模型中消能水垫装置的位置设置合理。

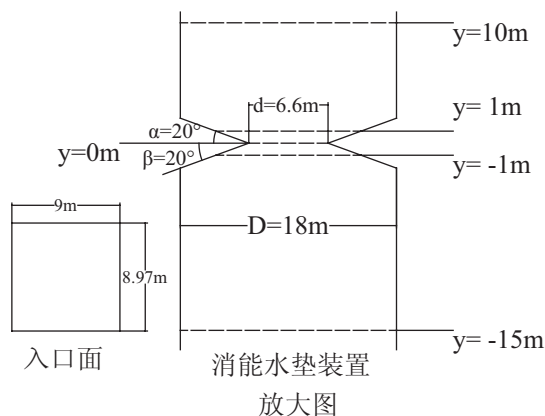


图2 局部放大图

模拟工况:上游水位 64.47 m , 入口为压力进水口,则估算得到入口流量为 $667\text{ m}^3/\text{s}$, 竖井出口无压出流。

3.2 流态分析

为了清晰地观察竖井中水流的流动情况,沿竖井圆心纵向剖出4个等分涡室的面^[7],4个剖面的位置示意图见图1模型俯视图中的涡室处,剖面详图见图3。同时在不同高程处取出竖井的5个横剖图以便观察竖井不同高程处气液二相的分布情况^[9],详见图4。图3、图4共用图3中的图例。

经过对计算结果的处理,可以得到在不设置消能水垫和设置消能水垫2种体型下竖井内流态的情况。结合图3(a)和图4(a)2组图可知,不设置消能水垫时,竖井与涡室内形成贯通空腔,水流进入涡室后,贴壁形成旋流流下。由于本文研究的竖井规模较大,所以贴壁水层很薄。由图3中(b)组图可知,水流进入涡室后,形成空腔螺旋流,然后旋流随着高程的降低环向收缩,贴壁水层逐渐增厚,空腔直径对应减小,由图4中(b)组前3个图可知,在高程为 10 m 的截面处,空腔已经完全消失,水流收缩为实体水垫,且高程在 $10 \sim 0\text{ m}$ 的范围内都是不含空腔的实体水垫。由图3中(b)组图和图4中(b)组后3个图可知,水流在收缩面和竖井出口这段竖井中会经历2个过程:第一个过程是水流刚流过收缩面,水流集中但具有旋转环量,所以在因重力作用而向下运动的同时还会向四周旋转扩散,图4中 $y=-1\text{ m}$ (b) 的横截面图即为该过程中水流在竖井内的典型分布情况——

水流集中分布在竖井横截面中心附近,竖井壁面无水流分布;第二个过程是水流扩散到达墙壁后,继续以贴壁旋流的形式流下,图4中 $y=-15\text{ m}$ (b) 的横截面图为该过程中水流在竖井内的典型分布情况——水流紧贴竖井壁分布,竖井横截面中心附近没有水流分布。

因此,入口流量为 $667\text{ m}^3/\text{s}$ 时,上收缩角为 20° 、收缩面直径为 6.6 m 的消能水垫装置能够使旋流竖井中部形成消能水垫,且经过消能水垫装置的水流也能再次形成贴壁旋流继续流下。

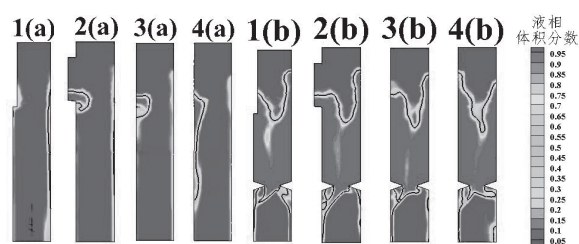


图3 纵剖图

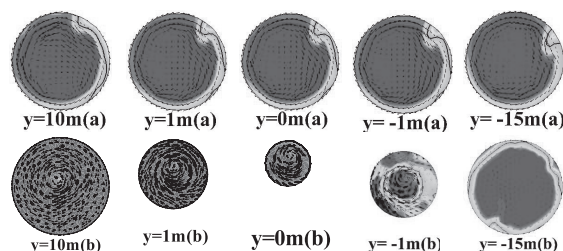


图4 横截面图

3.3 壁面流速对比分析

根据计算结果,分别读出2种体型下水流在竖井不同高程处的最大流速,所取高程为: 15 m , 10 m , -10 m , -20 m , 结果见表1。表中A表示不设置消能水垫的情况,B表示形成了消能水垫的情况, η 为速度相差率,由以下公式得到:

$$\eta = \frac{V_A - V_B}{V_A} \times 100\% \quad (7)$$

表1 截面壁面流速表

类型	高程 (m)	壁面流速 (m/s)	η (%)
A	15	28.36	51.30
B		13.81	
A	10	29.35	46.92
B		15.58	
A	-10	32.51	8.92
B		29.61	
A	-20	34.39	10.06

由表 1 可知, 入口流量 $667 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 在消能水垫装置上方, 以及其下方的一段范围内, 相同高程处, 形成了消能水垫的竖井中的水流壁面流速均小于未设置消能水垫的竖井中的壁面流速。且由速度相差率可知, 消能水垫装置上方, 2 种体型下的壁面流速差别远大于竖井下方 2 种体型下的壁面流速差别, 原因是水流在收缩面时为有压孔口出流, 导致水流速度在此处会有一个突变, 从而减小其下方位置 2 种体型中的壁面流速的差别。

总的来看, 消能水垫会使竖井中水流的壁面流速减小, 起到了消能的效果。

4 结论

通过对不设置消能水垫与设置消能水垫 2 种情况时的竖井中水流进行数值模拟研究, 得到以下结论:

(1) 流量为 $667 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上收缩角 20° 、收缩面直径 6.6 m 的消能水垫装置可以使竖井中部成功形成消能水垫, 且水流在流出收缩面后, 能够再次贴壁, 以贴壁旋流的形式继续流下;

(2) 相同工况条件下, 在设置了消能水垫的竖井中, 水流的壁面流速小于相同高程处没有设置消能水垫竖井中的水流壁面流速, 即消能水垫装置具有一定的消能作用。

但是由于本文仅计算了一种体型在一种工况

下的工作情况, 所以以后还需要通过更多的研究来探寻该项技术的应用规律与潜在优势。

参考文献:

- [1] 刘永良. 竖井旋流内消能技术在辽宁恒仁水电站的应用[J]. 中国水能及电气化, 2016(12):42-44.
- [2] 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.
- [3] 王超, 陈立秋, 陈俊杰. 竖井旋流内消能技术在双沟水电站的应用[J]. 东北水利水电, 2015, 33(8):1-3.
- [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(2):146-154.
- [5] 邓军, 田忠, 张法星, 等. 一种适用于高水头的多级水垫旋流竖井泄洪洞: CN 103758093 A[P]. 2014.
- [6] 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(工程科学版), 2007, 39(2):41-46.
- [7] 张晓东, 刘之平, 高季章, 等. 竖井旋流式泄洪洞数值模拟[J]. 水利学报, 2003, 34(8):58-63.
- [8] 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, 34(3):79-82.
- [9] 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(11):20-22.

(责任编辑: 王宏伟)