泄洪洞旋流阻塞消能的数值模拟

鲁学蕾,范济神,赵振兴

(河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要:运用标准 κ-ε 模型、RNG κ-ε 模型、Realizable κ-ε 模型、标准 κ-ω 模型,并结合 VOF 法对公伯峡水电站右 岸泄洪洞的水流进行数值模拟,利用原型观测资料对计算结果进行对比验证,结果表明 RNG κ-ε 模型的模拟结 果与原型观测资料最为接近。在此基础上,把原泄洪洞的旋流洞及其后段简化为直洞并在直洞不同位置布置 阻塞,然后应用 RNG κ-ε 模型对其内部水流进行数值模拟,通过比较消能率、沿程压力及流场空化数分布,得出 阻塞最佳布置位置,并给出最佳位置下水流的湍流特性。

关 键 词: 旋流阻塞消能; RNG κ-ε 模型; 消能率; 空化数 中图分类号: TV135.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2014)01-0078-07

建于高山峡谷的高坝泄水建筑物多具有水头高、落差大、泄洪量大,以及高速水流引起的问题较多等特点。为减少工程资源的浪费,改建导流洞为永久泄洪洞是一个值得探讨的问题^[1]。黄河公伯峡水电站右岸水平旋流泄洪洞改建工程是导流洞改建为永久泄洪洞的一个工程典范。该旋流泄洪洞具有减少空化空蚀、消能率高等优点。目前关于旋流泄洪洞的研究多为试验研究和原型观测,数值模拟研究较少。安丰勇等^[2]提出旋流阻塞复合式消能工的概念,并通过模型试验,研究了旋流阻塞复合式消能泄洪洞的基本水力特性。

本文先用原型观测资料验证所选用 RNG κ-ε 模型的适用性,然后把原泄洪洞的旋流洞及其后段简化为 直洞,并在直洞不同位置布置阻塞后进行数值模拟,通过比较消能率、沿程压力及流场空化数分布,得出阻塞 最佳布置位置。

1 紊流数学模型

当流体为不可压,不考虑用户自定义源项时,标准 κ-ε 模型基本控制方程如下:

连续性方程:

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

动量方程:
$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_i)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]$$
(2)

紊动能 κ 方程:
$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \kappa)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + G_{\kappa} - \rho \varepsilon$$
(3)

耗散率
$$\varepsilon$$
 方程: $\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} G_{\kappa} \frac{\varepsilon}{\kappa} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa}$ (4)

式中: u_i 为速度分量; x_i 为坐标分量; ρ 为水的密度;p为压强; μ 为动力黏度; μ_i 为湍动黏度系数; $\mu_i = \rho C_{\mu} \kappa^2 / \varepsilon$; κ 为湍动动能; ε 为湍动动能耗散率; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon} \approx C_{\mu}$ 为常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{\mu} = 0.09, G_{\kappa}$ 为湍 动动能产生项, $G_{\kappa} = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 。湍动动能 κ 与湍动动能耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_{\kappa} = 1.0$,

收稿日期: 2013-07-24

作者简介:鲁学蕾(1989-),女,安徽宁国人,硕士,主要从事计算流体力学研究。E-mail: luxuelei@ yeah. net

79

$\sigma_{\rm s} = 1.3_{\odot}$

标准 κ-ε 模型在孔板消能、洞塞消能研究及实际应用中得到了很好的验证与推广。但该模型假定黏度 系数 μ , 是各向同性的标量, 在面对弯曲流线的问题时, 会产生一定的失真。RNG κ - ε 模型和 Realizable κ - ε 模型都是标准 κ-ε 模型的修正方案。

RNG κ - ε 模型修正了湍动黏度,并在 ε 方程增加了一项,反映主流的时均应变率,使得 RNG κ - ε 模型中 的产生项 G_{κ} 不但与流动情况有关,而且和空间坐标相关,这为RNG κ - ε 模型更好地处理高应变率及流线弯 曲程度大的流动问题创造了有利条件。

当时均应变率特别大时,用标准 κ - ε 模型处理的问题可能会使正应力为"负",违背了湍流的物理规律, 为了避免出现这种情况,需要对正应力附加某种数学约束条件。针对 $\mu_1 = C_{\mu}\kappa^2/\varepsilon$ 式中的 C_{μ} ,文献[3]认为 它不应是常数,可以与应变率建立函数关系,提出了 Realizable κ - ε 模型。目前,此模型多被用于边界层流 动、旋转均匀剪切流、管道内流动、射流以及带有分离的流动等湍流问题的模拟。

标准 κ - ω 湍流模型是基于 Wilcox κ - ω 湍流模型修改而来的,在逆压梯度流动、分离流动、低雷诺数区域 流动以及可压缩流动的数值模拟上较为理想。

视泄洪洞中的水流为三维不可压缩流动,采用雷诺时均方程组和上述数值模型联合求解,控制方程使用 有限体积法离散求解,速度压力耦合采用 PISO 算法。

模型验证 2

2.1 建立计算模型

采用1:1比例建立三维模型,模型主要由竖井、起旋室、旋流洞、水垫塘以及退水洞组成。竖井断面为 直径 D₁=9 m 的圆,过渡段为由圆形至矩形的过渡断面,起旋室起始端为满足 x²/15.2² + y²/8² = 1 方程的椭 圆,后部为圆弧加导流坎,通气井直径3.3 m,与起旋室连接,旋流洞段横截面为 D₂=10.5 m 的弯曲形导流 洞,轴线是半径 R=360 m 的圆弧,水垫塘段为城门洞型,宽11 m、高14 m,中间有一段长20 m,宽为6.4 m 的 洞塞,以消减水流剩余能量,退水洞段截面为高15m,宽12m的城门洞形。具体布置及尺寸见文献[4]。

空间坐标系的零点位置为通气井与起旋涡室交界处中心位置,起旋室结构、原型三维布置分别见图1和2。



Fig. 1 Structure diagram of swirl-chamber

Fig. 2 Three-dimensional layout

2.2 边界条件

(1)进口边界条件 设计水位时泄流量 $Q=1032 \text{ m}^3/\text{s}$,得出竖井内平均流速为 v=16.5 m/s,竖井水流 入口采用速度进口边界条件;入口断面相对于水平旋流洞底部的高差 H₀=106.39 m;通气井入口与大气相 通,故通气井入口采用压力边界条件,压强为一个标准大气压;并且给出紊动能和耗散率的边界值:

 $u/u_1 = 1$, $v/u_1 = w/u_1 = 0$; $\kappa = 0.003 \ 7u^2$, $\varepsilon = \kappa^{3/2}/(0.4L)$

其中:u,v,w和u,v,u,分别表示x,y,z方向与入口处x,y,z方向上的分速度;特征长度L按等效管径计算。 计算得出 $\kappa = 1.007$ 3 m²/s², $\varepsilon = 1.011$ m²/s³。

(2)出口边界条件 出口边界根据公伯峡旋流泄洪洞原型观测实际情况按自由出流控制。

(3)壁面边界条件 壁面采用无滑移条件,近壁区采用标准壁面函数法。

(4)自由水面 采用气-液两相流模型 VOF 法捕捉自由水面。

2.3 结果比较分析

2.3.1 起旋室断面时均压强比较 原资料 1-1 断面为 x=4.5 m 处起旋室断面,2-2 断面为 x=8.1 m 处起 旋室断面,现将各模型计算结果与文献[5]原型断面时均压强观测结果进行对比(表1)。

	Tab. 1 Co	omparison between t	he calculated and 1	measured time-ave	rage pressures	kPa
	测点编号	原型观测	标准 κ-ε	RNG <i>κ-ε</i>	Realizable κ - ε	标准 κ-ω
1-1 断面	F-YX-01P	519.69	468.69	464.23	467.92	462.67
	F-YX-04P	513.56	551.30	507.16	551.38	545.48
	F-YX-05P	425.19	386.09	373.38	342.73	338.46
	F-YX-08P	456.22	471.53	460.53	463.18	466.97
2-2	F-YX-09P	652.84	563.65	560.53	560.41	558.91
断面	F-YX-10P	460.59	471.53	460.53	463.18	466.97
	F-YX-11P	306.31	333.33	310.54	317.34	329.08

表1 起旋室断面时均压强比较

由表1可见,各计算模型在F-YX-09P点和F-YX-05P点计算结果与原型观测值相比均偏小;F-YX-01P,F-YX-08P,F-YX-10P和F-YX-11P点所得结果与观测值均较接近,但RNG κ-ε模型更接近,差值均在4kPa之内;在F-YX-04P点,RNG κ-ε模型计算值与观测值相比仅有6.4kPa之差,而其他模型计算误差均约40kPa。由此可见,RNG κ-ε模型计算结果更接近原型观测资料。

2.3.2 旋流洞段壁面压强比较 旋流洞 8 个桩号上壁面压强的计算值与模型量测值^[6]对比见图 3。可见

旋流洞起始端计算压强与模型量测值有所偏差,这是由于水 流从起旋室过渡到旋流洞段时极其不稳定,空腔直径也随着 波动,增大了数值模拟的难度,但二者相差不大。旋流洞后 段数值计算结果与模型量测差值在2m以内,误差小于 10%。各个计算模型在各个测点处所得的压强很接近,且数 值计算结果与模型量测值的沿程变化规律比较相似。

2.3.3 消能率比较 消能率计算的基本原理均相同,即起 始断面总水头与出口断面总水头之差与总水头之间的比值。 参考文献[7],消能率计算公式为:

$$\eta = (H_0 - E)/H_0 \times 100\%$$



Fig. 3 Variation of wall pressure in the swirl hole

式中: $E = H + V^2/(2g)$, H为出口断面平均水深, V为断面平均流速, $H_0 = 106.39$ m。各模型水力参数计算结果见表 2。

(5)

Table 1 and hydraulic parameters of outlet section								
计算模型	断面平均水深/m	流量/ (m ³ •s ⁻¹)	断面平均流速/(m·s ⁻¹)	消能率/ %				
标准 κ-ε	5.9	1 041.24	14.71	84.08				
RNG κ - ε	5.7	1 053.90	15.41	83.25				
标准 κ-ω	5.5	1 016.75	15.41	83.44				
Realizable κ - ε	5.7	1 014.93	14.84	84.08				

从表 2 可见,各计算模型所得消能率均很接近,而文献[8]中消能率为 85.6%,说明数值模拟在消能率 上与实测数据吻合良好。综合各模型的计算结果,后续模拟研究采用 RNG κ-ε 模型。

根据相关参考资料^[2,9],将旋流洞及其后段简化为直洞后,对洞内布置阻塞进行研究(图4)。为防止因 阻塞口径比 d/D 过小而造成壅水现象,采用 d/D=0.9,L/h=5 的比例来控制阻塞大小,阻塞分别布置在x= 40,60,80,100,120 和 140 m 处,以下简称为位置 1~6。计算区域坐标原点选在旋流室与通气孔交界处中 心,x 轴正向取为旋流洞出口截面垂直方向,z 轴平行于竖井且正向向上,y 轴垂直 xz 平面且正向向内。图 5 为阻塞结构示意图。



Fig. 4 Structure of vortex spillway tunnel

3.1 流速分析

为便于直观流速变化情况,选取旋流洞流速变化明显区域作为研究对象,拟选取 x=0 m 至 x=200 m 之 间旋流洞 y=0 m 剖面为研究对象,6个位置的流速分布见图 6。



由图 6 可见,位置 3~6 在旋流洞入口处底部 x=10 m 至 x=20 m 和顶部 x=10 m 至 x=60 m 处流速比较 大,且阻塞出口处底端流速均高于顶端,而位置1和2由于分别在40和60m布置了阻塞,使旋流状态发生 改变,其顶端流速也发生改变,并且其阻塞出口上端流速较大。出现这一现象主要是因为进入阻塞时顶端和 底端水层厚度不同,水层厚度大则空气接触少,混掺空气也较少,动能较大所致。

3.2 压强分析

各位置洞底、洞顶沿程压力分布见图 7。从图 7 可见,各位置洞底、洞顶压强在阻塞前后都有先急剧增 大后急剧减小,然后又逐渐恢复的趋势。从洞顶压强可见,位置1~4旋流在x=160 m处消失,位置5旋流 在x=120 m 处消失,位置 6 旋流在 x=140 m 处消失。总体而言,阻塞对旋流流态起到了阻碍作用,位置 5 对 旋流流态的作用最大,旋流状态比直洞少维持60 m,对旋流洞稳定性起到一定作用。从 x=50 m 到旋流消失 段各个位置洞顶压强均小于大气压,其中位置4~6在此段距离内洞顶压强与标准大气压相差不大,但位置 1~3 在阻塞后洞顶压强急剧下降,尤其是位置1和2,其洞顶压强下降到25000 Pa以下,极可能发生空化空

81

蚀,故位置1和2的结构不适宜作为消能结构。



3.3 空化数分布

研究中常采用一个无量纲的空化数作为衡量实际水流是否容易发生空化的指标,以K表示:

$$K = \frac{p + p_0 - p_v}{0.5\rho v^2} \tag{6}$$

式中: p_v 为水的饱和蒸气压,取2 332.4 Pa;p为来流压强; p_0 为当地大气压,取 101 325 Pa;v为水流流速。

空化数越小,发生空化的可能性就越大,所以这里研究流场中低空化数(*K*≤0.3)的分布情况(图8)。 由图8可见,易空化区域主要集中在起旋室、阻塞出口及二者之间的洞顶上边壁,这与实际工程中常见易发 生空化的部位是相符的。比较流场空化数分布可以看出,位置1和2易空化区域较大且空化数低,在抗空化 能力上,位置3~6要优于位置1和2。





3.4 消能率比较分析

布置阻塞时,位置1~6的消能率分别为76.31%,79.34%,80.33%,78.33%,77.89%和77.37%,未布 置阻塞时的消能率为72.15%。可见,布置阻塞后的消能率相对于未布置阻塞时都有一定提高,位置3消能 率最大说明了把阻塞布置在 *x*=80 m 处能使旋流消能、阻碍效果和空气混掺三者综合消能效果充分发挥,结 合沿程压力及流场空化数分布,认为 *x*=80 m 为最佳阻塞布置位置。

3.5 最佳位置下水流的湍流特性研究

3.5.1 流态与自由水面 水流流态(水相体积分数)分 布如图9所示。水流经起旋室产生旋流后,由于巨大的 能量及洞体结构,形成近似圆形的空腔环流,空腔直径沿 程先增大后有所减小,直至经过阻塞后骤减,并最终消 失,出现平稳的自由水面。亦可看出泄洪洞内未出现壅 水现象,这说明 d/D=0.9 能满足泄洪要求。



3.5.2 紊动能与耗散率 紊动能是指流动在运动过程中的剧烈程度,碰撞、掺混、摩擦的程度加剧导致了紊 动强度增大^[10],紊动能 $\kappa = u'_{i}u'_{i}/2 = \rho(\overline{u'^{2}} + \overline{v'^{2}} + \overline{w'^{2}})/2;耗散率作为一种能量转化速率的量^[11],体现为机 械能转化为热能的速率,它的值越大,能量消耗就越大,耗散$

率表达式为 $\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_{\kappa}} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_{\kappa}} \right)$ 。

洞底的紊动能和耗散率的沿程变化规律见图 10。由图 10 可见,洞底的紊动能和耗散率先逐渐增大至最大值,之后 骤减,在骤减后又有增加趋势,但增加值较小且增加趋势不 明显。从紊动能和耗散率变化趋势可以清楚地看到,二者变 化规律一致,充分说明紊动能越大,耗散率越高。



4 结 语

本文经不同模型对比研究以及在旋流洞不同位置布置阻塞试验,得出主要结论如下:

(1)通过运用标准 κ-ε 模型、RNG κ-ε 模型、Realizable κ-ε 模型、标准 κ-ω 模型对原公伯峡右岸水平旋流 泄洪洞在设计水位下泄洪消能过程进行了模拟,得出 RNG κ-ε 模型在相应点所得结果整体更接近原型值。 说明利用该模型,结合 VOF 法模拟水平旋流泄洪洞内高紊动、强剪切和强旋转并带有自由水面的旋流是合 理可行的。

(2) 在旋流洞不同位置布置阻塞后,消能率均有一定提高。对泄洪洞流场的空化预测分析显示起旋室、 阻塞出口及二者之间的洞顶上边壁空化数较低,尤其是阻塞出口容易发生空化现象。经过比较消能率、沿程 压力变化及流场空化数分布,选择 x=80 m 处为阻塞最佳布置位置。

(3)从紊动能和耗散率变化趋势可见,二者变化规律一致,充分说明紊动能越大,耗散率越高。

参考文献:

- [1] 董兴林, 郭军,杨开林. 高水头大流量泄洪洞内消能工研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003(3): 185-189. (DONG Xing-lin, GUO Jun, YANG Kai-lin. Research and prospect of interior energy dissipaters in high head and large discharge tunnels[J]. Journal of China Water Resource and Hydropower Research, 2003(3): 185-189. (in Chinese))
- [2] 安丰勇,付波,牛争鸣,等. 阻塞对水平旋流泄洪洞水力特性的影响[J]. 西安理工大学学报,2008(2):210-214. (AN Feng-yong, FU Bo, NIU Zheng-ming, et al. The effect of barrage upon the hydraulic characteristics of the level rotary flow discharge tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008(2): 210-214. (in Chinese))

- [3] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new eddy viscosity model for high Reynold's number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [4] 董兴林,杨开林,王涛,等.公伯峡水电站旋流泄洪洞研究总结[J].水力发电,2008,34(1):75-78. (DONG Xing-lin, YANG Kai-lin, WANG Tao, et al. Review and summarization the swirling spillway tunnel in Gongboxia hydropower station[J]. Water Power, 2008, 34(1): 75-78. (in Chinese))
- [5] 付波, 牛争鸣. 公伯峡水电站旋流泄洪洞壁面压强的模型试验与原型观测[J]. 广东水利水电, 2008(9): 5-9. (FU Bo, NIU Zheng-ming. Model test and prototype observation of wall pressure of the rotary discharge tunnel of Gongboxia power station [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2008(9): 5-9. (in Chinese))
- [6] 牛争鸣,洪镝,张浩博,等. 公伯峡旋流泄洪洞的水力特性与原型观测[J]. 水力发电学报,2008(4): 30-35. (NIU Zheng-ming, HONG Di, ZHANG Hao-bo, et al. Hydraulic characteristics and prototype observation of the rotary discharge tunnel of Gongboxia power station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008(4): 30-35. (in Chinese))
- [7] 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:A 辑, 2009(2): 164-171. (FU Bo, NIU Zheng-ming, LI Guo-dong. Numerical simulation of level swirling flow of inner energy dissipation discharge tunnel with shaft inlet[J]. Journal of Hydrodynamics(SerA), 2009(2): 164-171. (in Chinese))
- [8] 巨江,卫勇,陈念水.公伯峡水电站水平旋流泄洪洞试验研究[J].水力发电学报,2004,23(5):88-91. (JU Jiang, WEI Yong, CHEN Nian-shui. Experiment study of horizontal vortex spillway tunnel in Gongboxia hydroelectric project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(5):88-91. (in Chinese))
- [9] 牛争鸣, 安丰勇, 余挺, 等. 旋流阻塞复合式泄洪洞的水力特性[J]. 长江科学院院报, 2008(4): 5-8. (NIU Zhengming, AN Feng-yong, YU Ting, et al. Hydraulic characteristics of swirl tunnel with barrage[J]. Journal of Yangze River Scientific Research Institute, 2008(4): 5-8. (in Chinese))
- [10] JONES W P, LAUNDER B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(2): 301-314.
- [11] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.

Numerical simulation of energy dissipation of vortex flow in flood discharging tunnel with barrage

LU Xue-lei, FAN Ji-shen, ZHAO Zhen-xing

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A standard κ - ε model, a RNG κ - ε model, a Realizable κ - ε model and a standard κ - ω model combined with VOF method which can get the free surface of water are applied to simulate the vortex flow in the flood discharging tunnel of Gongboxia Hydropower Station respectively. The validity of the calculation is verified by the prototype data, and the RNG κ - ε model is more applicable than others. Then the vortex-type tunnel and its posterior segment are simplified to a straight tunnel and the barrage is placed in different locations. The RNG κ - ε model is applied to simulate the internal flow. By comparing and analyzing the rate of energy dissipation, pressure distribution and cavitation number, the optimum location for placing the barrage and the corresponding turbulent characteristics are obtained by numerical simulation. It can be found from the change tendency of the turbulence kinetic energy and the dissipation rate that there is a same change rule between the both sides mentioned above, and this fully shows that the greater the turbulency kinetic energy is, the higher the dissipation rate is.

Key words: vortex flow dissipation with barrage; RNG κ - ε model; rate of energy dissipation; cavitation number