

数值模拟方法在双洞式溢洪道体型优化中的应用

许文海,李国栋,党彦,邵建斌,陈刚

(西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

[摘要] 采用可行化 k -湍流模型、VOF 法界面跟踪技术及分区结构非结构网格区域离散方法,对甘肃九甸峡水电站双洞式溢洪道引水渠和溢流段的三维自由面流动进行了数值模拟,并以改善进口不良流态、消除堰顶较大负压,平衡两洞间的流量分配作为目标,对其体型进行了优化研究。结果表明,原设计方案过堰流动水面严重扭曲,且存在明显的负压,体型设计不合理;优化方案获得了理想的进水口与溢流堰曲线形式。所有计算结果与实测值吻合良好,说明数值模拟技术可以在岸边溢洪道的水力设计和体型优化中发挥重要作用。

[关键词] 明流溢洪道;数值模拟;VOF 方法;体型优化

[中图分类号] TV135.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)10-0224-05

Application of numerical modeling in the optimization design of the bi-tunnel spillway

XU Wen-hai, LI Guo-dong, DANG Yan, SHAO Jian-bin, CHEN Gang

(College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The realizable k -turbulent model is applied to simulating the turbulent overflow in the bi-tunnel spillway of Jiudianxia Hydropower Station. The complex flow region is divided into several sub-regions and meshed with structure and non-structure grids, respectively. The free surface is traced with volume of fluid method (VOF). The computed results for the original design geometry show that the free surface over the crest of weir is distorted highly, and there exists unreasonable negative pressure over the crest of weir. Taking the improvement of inflow pattern, the elimination of negative pressure over the crest, and the balance of flow rate between two tunnels as objective functions of hydraulic design of inlet region, an optimal design scheme is obtained by numerical simulations and optimization. Consistency of computed results with the experimental data shows that the suggested model can be applied to the selection design of the inlet configuration of spillway tunnel.

Key words: spillway channel; numerical simulation; VOF method; optimal design

岸边溢洪道(洞)是各级各类水利水电工程常用的溢流设施,由于布置的要求,溢洪道引水渠往往存在一定角度的平面转向,导致水面产生不同程度的横向比降,甚至出现漩涡。这不仅增大了水头损失,影响溢洪道的泄流能力,而且如果其影响达到下游

急流段,还会在泄洪槽内产生急流冲击波,致使水流发生自由水面波动,导致贯顶或溢出,直接威胁到泄水建筑物乃至大坝的安全^[1];在溢洪道控制部分的溢流堰上也往往由于存在不合理的负压而导致流动不稳定或发生空蚀破坏。因此,准确预测其流场特

收稿日期] 2006-09-21

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50579085)

[作者简介] 许文海(1965-),男,甘肃兰州人,高级工程师,在读博士,主要从事水利水电工程的设计与研究。

[通讯作者] 李国栋(1967-),男,陕西米脂人,副教授,博士,主要从事水力学与河流动力学的研究。

性是岸边溢洪道(洞)优化设计和安全运行的关键。由于问题的复杂多变,到目前为止,与其他水力设施一样,岸边溢洪道研究基本采用模型试验的方法完成^[2-3]。近年来,随着 CFD 技术的日趋成熟,其在水利水电工程中的应用也日益广泛,数值模拟辅助物理模型试验成为必然的趋势^[4-7]。本试验以甘肃九甸峡左岸溢洪设施为例(其左岸溢洪道由 2 条平行布置的溢洪洞组成,这又增加了平衡流量在两洞间的分配问题),采用物理模型与数值模拟相结合的技术手段,对双洞式溢洪道的体型进行数值模拟研究,以期对双洞式溢洪道的优化设计提供参考。

1 九甸峡水利工程双洞式溢洪道物理模型

甘肃九甸峡水利枢纽工程明流溢洪设施,由平行布置的 2 条明流溢洪洞组成(图 1),除了引水渠外,2 条溢洪道的体型基本相同。流动控制段为曲线型实用溢流堰,由一单圆弧与抛物线段相连,泄槽上有一收缩段,堰顶处宽度是 12 m,收缩后宽度为 9 m,校核洪水位下泄流量达 3 298 m³/s。模型试验按重力相似准则设计,几何比尺为 $L = 1/50$ 。

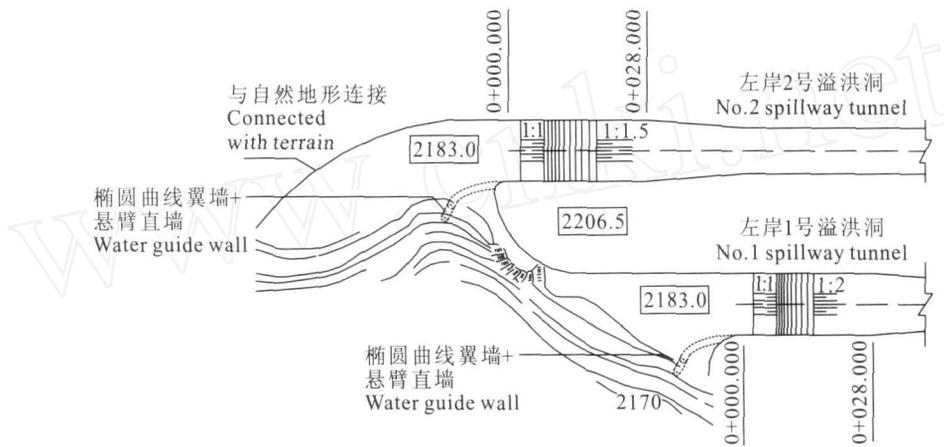


图 1 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道的平面布置图
实线为原方案体型,虚线为优化方案体型

Fig. 1 Top view of the bi-tunnel spillway of the Jiudianxia Hydropower Station.

Full lines for the original design geometry, and dashed lines for the optimal design geometry.

2 数学建模

2.1 紊流模型

考虑到溢洪道的流动特点,经比较分析认为,可行化 $k-\epsilon$ 模型比较合适,该模型是标准 $k-\epsilon$ 模型的改进,在充分考虑应变张量场特性的基础上,引入了与旋转曲率有关的内容,并消除了标准 $k-\epsilon$ 模型中的奇异性,在模拟强逆压梯度、射流扩散、分离、旋转回流上有较高的精度^[8]。其对于不可压缩流动,张量形式的湍流输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu + \frac{\mu_t}{k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \epsilon; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu + \frac{\mu_t}{k} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 S \epsilon - C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{(\mu V)}} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; k 为紊动能; t 为时间; u_i 为速度分量; x_i 为坐标分量; μ 为粘性系数; μ_t 为紊动粘性

系数; $k = 1.0$, 为模型常数; G_k 是关于平均流速梯度的紊动能产生项, $G_k = \mu_t S^2$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$, 其中 S_{ij} 为应变率张量, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; ϵ 为紊动能耗散率; $C_1 = 1.2$, 为模型常数; 系数 $C_2 = \max(0.43, \frac{1}{1 + 5 S^k})$, $S = \frac{\epsilon}{k}$; 模型常数 $C_2 = 1.9$ 。湍流粘性系数取 $\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, 其中: C_μ 不再为常数,按 $C_\mu = 1 / (A_0 + A_s U^* k / \epsilon)$ 计算, $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\omega}_{ij} \tilde{\omega}_{ij}}$, $\tilde{\omega}_{ij} = \omega_{ij} - 2 \omega_{ijk} \omega_{ijk}$, $\omega_{ij} = \omega_{ij} - \omega_{ijk} \omega_{ijk}$, ω_{ij} 是从角速度为 ω_{ijk} 的参考系中观测到的时均旋转率张量, 系数 $A_0 = 4.0$, $A_s = \sqrt{6} \cos \theta$, $\theta = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6} W)$, $W = S_{ij} S_{jk} S_{ij} / \tilde{S}$, $\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$ 。

2.2 自由面处理

准确计算自由面形状是非常困难的,目前确定自由面的方法很多,近年来基于多相流原理的体积率法(VOF 法)等到了广泛应用^[9-11],对于水利工程

中具有明显水气界面的流动,其准确度基本可以满足工程需求。VOF 法^[12]是用体积率函数 $F(x_i, t)$ 表示空间某处各相流体所占的体积,当 $F(x_i, t) = 1$ 时,表示该处为气相;当 $F(x_i, t) = 0$ 时,则表示该处为水相,若 $F(x_i, t) \in (0, 1)$,则表示该处为水和气的界面区域。通过求解体积率函数:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

得到界面区域,然后采用几何重构法插值得到界面形状。

VOF 法并不是一个真正意义上的多相流模型,水和气仍然共享一套控制方程,不过引入 VOF 后控制方程中的 ρ 和 μ 不再是单一相的值,而是基于体积率函数的两相加权平均值,即:

$$\begin{aligned} \rho &= F \rho_a + (1 - F) \rho_w; \\ \mu &= F \mu_a + (1 - F) \mu_w. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ_a 为空气密度; ρ_w 为水的密度; μ_a 为空气的粘性系数; μ_w 为水的粘性系数。

2.3 区域划分与网格生成

计算区域为从上游库区到 1 号洞 0+050.000 断面和 2 号洞 0+048.000 断面。为了保证计算的精度,且节约资源,将流动区域分为 3 大区 9 块,库区为不规则区域、引水区为过渡区域、溢流堰及以下为棱柱体区域。棱柱体区域内又按溢流堰、渐变段及直槽段分割,采用结构网格,溢流堰段网格最密,流动方向的网格间距为 0.25 m,以适应这里流动要素变化剧烈的特点;溢流堰以下区域依次为 0.5 和 1 m。过渡区域内采用混合网格,库区内完全是非结构化网格,最大间距为 2.5 m。棱柱体区域内垂直和横向网格均采用由壁面向外比例增长的办法,以保证壁面区域网格足够细。总网格数为 50 万。

2.4 边界条件与计算方法

VOF 法是两相流模型,所以必须在自由面上方预留气相区域,其范围应在估算自由面上方留足水面可能波动的空间,太大则会消耗计算机资源,其形状要最适于网格的生成,本研究预留高度为 6 m,整个气相区域按大气压条件给出。进流条件只需在库区给定泄量即可,为了获得流量在两洞间的分配,出流必须以压力边界给出,本研究规定出口压力为大气压,这相当于将出口处视为一个跌坎,虽与实际有一定的差异,但由于陡坡上为急流,故其影响仅限于局部范围之内。固壁边界定义为无滑移边界,由于湍流模型只适用于旺盛湍流区,近壁区必须特殊处理,本研究采用标准壁面函数法^[13]进行处理。在计

算时采用有限体积法离散控制方程。速度与压力耦合采用 PISO 算法^[14]处理。为了减少数值扩散,对流项采用二阶迎风离散格式^[15]。

3 原设计方案计算结果分析

3.1 流量分配

原设计方案校核洪水工况下进口流量为 3 298 m^3/s ,计算 1 号洞流量为 1 638 m^3/s ,2 号洞流量为 1 660 m^3/s ,流量分配比为 1 : 1.011。实测流量分配比为 1 : 1.013,误差仅为 0.2%。表明流量在两洞间的分配是平衡的。

3.2 水面形态

计算结果表明,无论是 1 号洞还是 2 号洞,其内侧边墩头部绕流后,水流产生了很大的横向倾斜,溢流堰顶处发生严重的水面凹陷,流态较差。图 2 为计算获得的进口流态,其边墙和底板由网格显示,自由水面以灰度面显示。从图 2 可清晰看到水流在绕过溢流堰内侧边墩头部后的水面凹陷区。

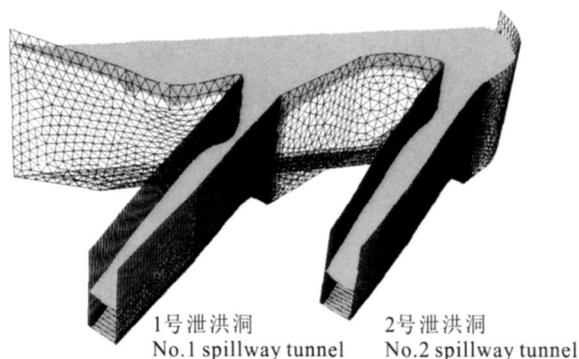


图 2 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道原设计方案自由水面的空间形态

Fig. 2 Calculated free surface pattern for the original design of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station

图 3 是 1 号洞 0+007.500 断面(溢流堰顶)计算与实测横向水面线的比较,该断面横向水位差高达 4.8 m。图 4 为计算获得 1 号洞进口水口区域的表面流场,由图 4 可以看出,内侧水流呈很大的弯曲角度进入引水渠,接着水流立即进入溢流堰垂直收缩段,流速迅速增加,所以该水面的凹陷由 2 个原因引起,一是侧向进水的自然跌落,二是流线弯曲离心力作用下引起的水面倾斜。

3.3 底板压力

1 号洞底板中线沿程压力分布如图 5 所示,从图 5 可以看出,堰前压力由于水流的纵向收缩而急剧下降,在反斜坡末端产生了较大的负压,其后压力

逐渐回升。计算结果显示,最大负压出现在桩号0 + 6.300 处,为 - 3.41 m,与实测符合良好。堰顶前反

坡与堰顶圆弧连接处存在折角,流动在此处有分离的趋势,这是导致负压产生的主要原因。

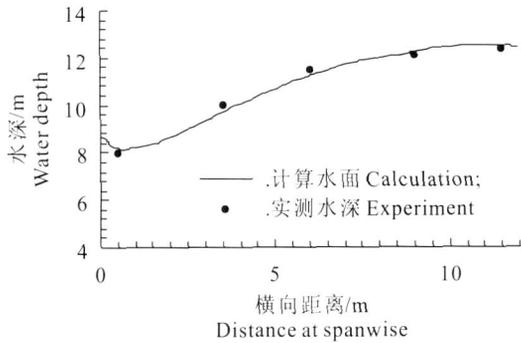


图 3 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道原设计方案 1 号洞的堰顶横向自由水面线

Fig. 3 Free surface profile along the crest of No. 1 spillway tunnel for the original design of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station

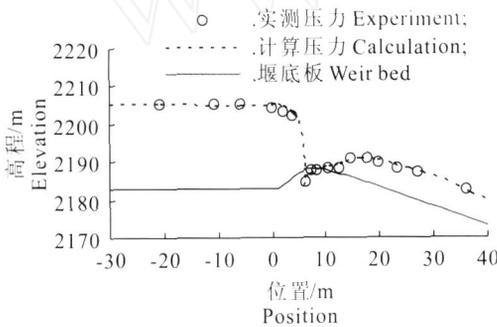


图 5 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道原设计方案 1 号洞底板中线压力的分布

Fig. 5 Pressure profile of the No. 1 spillway tunnel for the original design geometry of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station.

4 体型优化及结果分析

4.1 优化方案

根据原设计体型的试验和计算结果,以消除进口水面凹陷、改善堰面流态、降低堰顶负压、保持两洞间流量的平衡为目标,对体型进行局部修改并进行数值模拟以寻求优化方案。内侧堰口前导水墙太短,致使大角度绕流直接进入堰口,这是导致流态恶化的体型原因,所以加设导水墙以使水流平顺进入堰口就成为优化的方向。通过对 6 种曲线翼墙导水墙方案的数值模拟分析,选择流态较好的 3 种方案进行物理模型试验研究,最终推荐采用“椭圆曲线翼墙 + 悬臂直墙”的形式(图 1)。对于溢流堰,根据最大负压发生位置,以改进堰顶上游连接曲线为优化

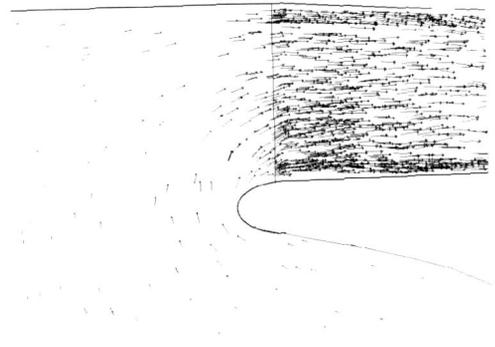


图 4 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道原设计方案 1 号洞进水口表面流速的分布

Fig. 4 Distribution of velocity vector in the inlet section of No. 1 spillway tunnel for the original design of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station.

方向,最终将单圆弧方案改为标准的双圆弧方案,并保证在连接点处相切。

4.2 优化方案的结果分析

由图 6,7,8 可见,加设导墙后的左岸 1 号及 2 号溢洪洞,进口右侧导流翼墙前部虽有局部绕流,但较原设计方案已明显减弱,水面凹陷基本消失,在堰口前水流已调整得非常平顺,横向水深分布趋于均匀。同时堰顶的负压区域大大减小(图 9),实测最小负压为 - 1.8 m,可见优化方案的水流流态及压力分布得到了根本性的改善。不过计算没有获得负压,原因可能既与计算模型有关,也于物理模型的体型加工精度有关。优化方案在校核洪水工况下的泄流量达 3 492 m³/s,较原方案增加了 5.88%,两洞间的流量差为 0.45%。



图 6 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道优化方案计算自由水面的空间形态

Fig. 6 Calculated free surface pattern for the optimal design geometry of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station

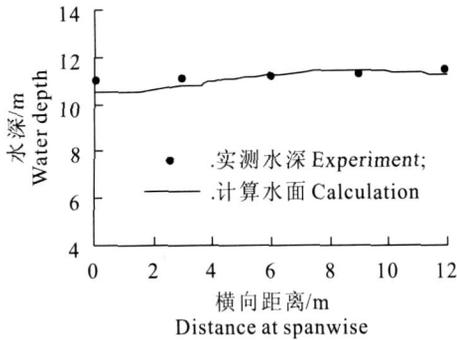


图 7 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道优化方案 1 号洞堰顶横向自由水面线

Fig. 7 Water free surface along the crest of No. 1 spillway tunnel for the optimal design geometry of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station

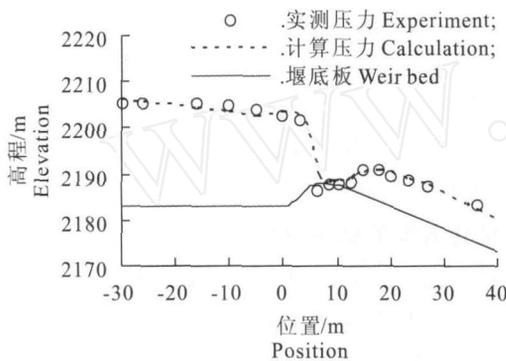


图 9 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道优化方案 1 号洞底板中线压力的分布

Fig. 9 Pressure profile of No. 1 spillway tunnel for the optimal design geometry of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station

5 结 论

本文对甘肃九甸峡水利枢纽工程左岸双洞式明流溢洪道的水力特性进行了研究,对原设计体型进行了成功优化。优化方案的水面凹陷基本消失,堰顶负压大为减小,堰下急流折冲波消失,流动形态得到根本改善,泄流能力进一步提高。通过本研究可以得出如下结论:(1)对于非完全正向进水的岸边泄洪建筑物,堰前一定要有足够长的引水导流段,以保证流态在进入堰口前的缓流段得以平顺调整,避免下游急流冲击波的产生。(2)VOF 法对于模拟复杂三维自由面形态是可行的,匹配的压力出口条件也满足多出口边界的要求。计算流体力学可以在岸边溢洪道的水力设计、体型优化中发挥重要作用。

[参考文献]

[1] 麦家煊. 水工建筑物[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

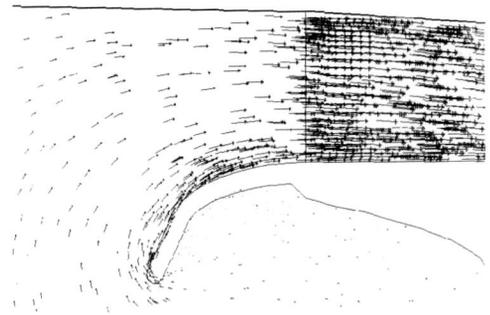


图 8 甘肃九甸峡水利枢纽工程双洞式溢洪道优化方案 1 号洞进水口表面流速的分布

Fig. 8 Distribution of velocity vector in the inlet section of the bi-tunnel spillway in the Jiudianxia Hydropower Station

- [2] 周玉娟,霍自民,穆志勇,等. 黑河水库溢洪洞进口岸坡连接形式优化选择[J]. 水利水电技术,2006,37(5):48-50.
- [3] 花立峰,南晓红. 河岸式溢洪道体型布置分析与优化研究[J]. 水利与建筑工程学报,2003,1(1):22-25.
- [4] Nguyen V, Nestmann F. Applications of CFD in hydraulics and river engineering[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics,2004,18(2):165-174.
- [5] 张士乔,尹则高,毛根海. 弯曲圆形管道紊流的数值模拟[J]. 水利发电学报,2005,24(3):61-65.
- [6] Song C C S, Zhuo F Y. Simulation of free surface flow over spillway[J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering,1999,125(9):959-967.
- [7] 邓军,许唯临,雷军,等. 高水头岸边泄洪洞水力特性的数值模拟[J]. 水利学报,2005,36(10):1209-1218.
- [8] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flow: Development and validation[J]. J Computers Fluids,1995,24(3):227-238.
- [9] 程香菊,陈永灿. 波浪形底板上水跃的数值模拟[J]. 水利学报,2005,36(10):1252-1257.
- [10] Chen Q, Dai G Q, Liu H W. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway over flow[J]. ASMA Journal of Hydraulic Engineering,2002,128(7):683-688.
- [11] 张建,方杰,范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展,2005,25(2):67-70.
- [12] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. J Computational Physics,1981,39:201-225.
- [13] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics[M]. London: Pearson Education Limited,2000.
- [14] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [15] Issa R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal computational physics,1986,62(4):40-65.