

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2020.01.004

# 泵闸工程闸下双底坎整流的水力特性

冯建刚<sup>1</sup>,李志祥<sup>2</sup>,钱尚拓<sup>1</sup>

(1. 河海大学农业工程学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**针对泵闸工程中出闸水流出现的不良流态,提出在其下游河道设置双底坎的整流措施,利用VOF法的RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型,探索其整流效果和水力特性,并对计算结果进行了物理模型验证。结果表明:底坎通过迫使出闸水流沿坎横向运动和形成漩涡,对偏流、回流和斜向水跃具有显著改善作用;双底坎的设置能有效减小坎后水面波动,进一步降低回流区范围,提高流速均匀程度;流速不均匀系数随下游出口  $Fr$  增大而减小,随二坎的相对坎高  $h_2/b$ 、相对间距  $d_2/b$  的增大先减小后增大;数学和物理模拟的水面线和流速分布吻合度较高,湍流模型计算结果可靠。

**关键词:**流态;双底坎;整流;回流;流速不均匀系数;数值模拟

中图分类号:TV135

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)01-0025-07

**Study on hydraulic characteristics of double-sill rectification downstream a sluice-pump station**//FENG Jiangan<sup>1</sup>, LI Zhixiang<sup>2</sup>, QIAN Shangtuo<sup>1</sup> (1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Aiming at the undesirable flow patterns in the discharging flow of a sluice-pump station, double sills were applied in the downstream for rectification. The rectification effects and the hydraulic characteristics were explored based on RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and VOF method. The calculation results were verified by a physical model experiment. The results show that the sill forces the discharge flow to move laterally along the sill and form a vortex which can significantly improve the flow bias, backflow and oblique jump. The double sills can effectively reduce the wave motion, the recirculation zone, and improve the uniformity of velocity. The velocity non-uniformity coefficient decreases with the increase of the  $Fr$  number at the downstream outlets, and decreases first and then increases with the increase of the relative height  $h_2/b$  and relative spacing  $d_2/b$  of the second sill. By qualitatively and quantitatively comparing the mathematical and physical model results, it is found that the water surface curve and the velocity distribution are well consistent with each other, indicating that the numerical simulation of the turbulence model applied is reliable.

**Key words:** flow pattern; double sills; rectification; backflow; velocity non-uniformity coefficient; numerical simulation

泵闸工程中泵站和水闸共用进出水流道,相对于分建工程减少了占地面积和工程量,降低了工程造价,因而得到广泛应用。泵站与水闸分别建于流道两侧(简称为分侧式)是泵闸工程的主要布置形式<sup>[1]</sup>,水闸在单独运行时存在如下不良流态:出闸水流越过消力池后,由于缺少泵闸隔墙约束,向泵站侧突扩,容易产生斜向水跃,冲刷流道并产生破坏;水闸、泵站两侧水流动量的显著差异将在泵站侧形成较大的回流区和横向流速,产生偏流问题。上述流态严重影响泵闸工程的安全性和运行效率,还会对通航任务的下游河道产生不利影响<sup>[2]</sup>。因此,研究泵闸工程出闸水流的水力特性,探索有效的

整流措施具有重要意义。

研究人员针对泵闸工程出闸水流的水力学问题开展了大量的物理模型和数值模拟研究<sup>[3-5]</sup>,得出在消力池下游设置底坎能够取得较好的整流效果。王法猛等<sup>[2]</sup>尝试在下游海漫段设置八字形底坎,通过模型试验发现其有利于下游河道的通航安全。曾昊等<sup>[6]</sup>采用数值模拟的方法论证了“一”字形底坎作为整流措施改善出闸水流流态。然而,当水闸在高水深和大流速条件下运行时,单一底坎难以达到较好的整流效果<sup>[7-8]</sup>。现有研究较少涉及多底坎整流问题,并且对三维流场中底坎整流机理认识有限<sup>[9]</sup>。另外,相关问题的数值模拟主要采用对称面

基金项目:国家自然科学基金(51779082,51009051);中央高校基本科研业务费专项(2019B18414)

作者简介:冯建刚(1976—),男,副教授,博士,主要从事泵站工程研究。E-mail:jgfeng@hhu.edu.cn

的刚盖假定法,难以模拟闸门控制条件下,上、下游水位落差大时,过坎水流产生雍高和斜向水跃等的真实流动特征。

本文采用流体体积(volume of fluid,VOF)法追踪水流自由表面的数值模拟,尝试探讨底坎整流效果和机理;研究分侧式闸站工程闸下双底坎整流的水力特性,分析水闸运行条件和双底坎结构参数对水力特性的影响;提出双底坎优化设计,为泵闸工程的整流措施设计提供依据。

## 1 模型建立

### 1.1 模型设计

图1是上海市某泵闸工程的布置示意图。泵站和水闸分别布置于河道左侧和右侧,中间由泵闸隔墙分隔。河道总宽36.0m,水闸闸室宽13.5m,底板高程-1.0m,消力池底板高程-1.5m,河道底高程-1.0m。选取长度为190.8m河段进行研究,以右侧河岸线闸前5m处为原点,右侧河岸线为x轴,垂直河岸线为y轴建立坐标系(图1)。闸门位于x=5m处,设计闸门开度0.8m,另取x=120m处为河道典型断面。物理模型设计按重力相似准则,综合考虑模型水流在阻力平方区的要求确定模型几何比尺 $\lambda_L=20^{[10]}$ 。图2为物理模型。

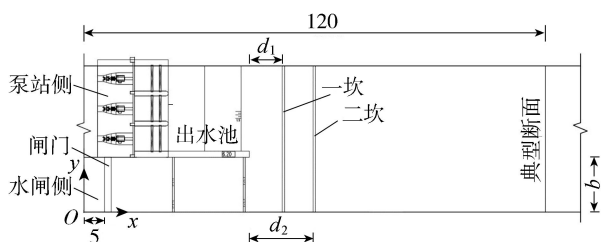


图1 泵闸工程布置示意图(单位:m)



图2 物理模型

表1为底坎体型布置方案,包括1个无坎方案、1个单坎方案和8个双坎方案,其中 $h_1$ 、 $h_2$ 分别为一坎、二坎的坎高, $d_1$ 、 $d_2$ 分别为一坎、二坎迎水面与泵闸隔墙末端的间距。预备试验表明,当底坎厚度小于4~6倍坎高时,其对流态和整流效果影响有限<sup>[11]</sup>,因此不考虑坎厚的影响,统一取0.6m。

表2为水闸的运行条件,包括上游水位 $H_1$ 、下游水位 $H_2$ 以及下游出口弗劳德数 $Fr$ 。

表1 底坎体型布置参数

方案	型式	一坎		二坎	
		$h_1$	$d_1$	$h_2$	$d_2$
m00	无坎				
m11	单坎	0.8	7		
m21	双坎	0.8	7	0.4	14
m22	双坎	0.8	7	1.2	14
m31	双坎	0.8	7	0.8	14
m32	双坎	0.8	7	0.8	10
m33	双坎	0.8	7	0.8	18
m34	双坎	0.8	7	0.8	22
m35	双坎	0.8	7	0.8	26
m36	双坎	0.8	7	0.8	30

表2 水闸运行条件

工况	$H_1/m$	$H_2/m$	$Fr$
工况1	3.68	3.11	0.07
工况2	3.68	2.10	0.12
工况3	3.00	1.00	0.28
工况4	3.68	1.00	0.34
工况5	3.68	0.00	0.78

### 1.2 计算模型

控制方程为

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

式中: $t$ 为时间; $u_i$ ( $i=1,2,3$ )分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的速度分量; $\mu$ 为水的动力黏度系数; $\rho$ 为水的密度; $p$ 为水微元体上的压力; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

本文应用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型处理闸下的高应变率及流线弯曲程度较大的流动<sup>[12]</sup>。形式如下:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

其中  $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \eta \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) / (1 + \beta \eta^3)$

$$\eta = (2E_{ji}E_{ij})^{0.5} \kappa / \varepsilon$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: $\kappa$ 为紊动能; $\varepsilon$ 为耗散率; $\mu_t$ 为动力涡黏系数; $\mu$ 为动力黏滞系数; $G_\kappa$ 为平均速度梯度产生的湍流动能; $\alpha_\kappa$ 、 $\alpha_\varepsilon$ 分别为 $\kappa$ 、 $\varepsilon$ 对应的 Prandtl 数;模型常数 $\eta_0=4.377$ 、 $\beta=0.012$ 、 $C_{1\varepsilon}=1.42$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.68$ 。

Flow-3D 基于结构化六面体网格的 Favor 方法对计算域进行划分,具有网格需求量较小,计算速度更快的特点<sup>[13-14]</sup>。湍流模型所结合的 VOF 法通过定义计算网格内流体体积分数  $F \in [0, 1]$ ,能有效捕捉水气交界面的变化和水体的飞溅、掺气<sup>[15-16]</sup>。 $F=0$  说明该网格内全为气体, $F=1$  说明该单元网格内全为水,当  $0 < F < 1$  时,水气混合处于自由液面。在应用计算时,利用体积分数对上述控制方程  $\rho$  和  $\mu$  进行加权处理。本次模拟采用单相水流,利用 GMRES 方法求解离散方程,计算迭代时间步长设置为  $10^{-4}$  s。

边界条件:上游给定固定压力入口,空气与外界接触的界面设置为标准大气压的开敞式边界,壁面为无滑移固体壁面条件,出口条件为给定下游水位。

图 3 为计算模型网格划分图,其中  $x$  轴、 $y$  轴与图 1 一致, $z$  轴竖直向上。用物理模型试验测得的过闸流量进行网格无关性分析。表 3 为网格无关性分析表,选取 4 套网格总量方案(50 万、100 万、200 万和 400 万)进行对比。模型试验测得过闸流量为  $37.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ,数模计算的流量均小于实际流量,但随着网格量的增加,其差值越来越小。当网格总量达到 200 万时,其流量与模型试验测得值偏差为 1.27%,能很好满足速度场精度要求。综合考虑计算精度和计算成本,最终采用  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  的立方体网格,网格总量约 200 万。

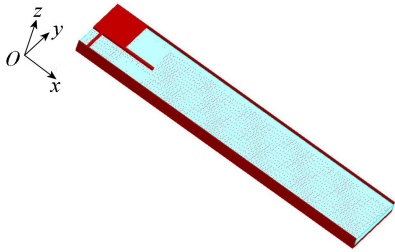


图 3 计算模型网格划分

表 3 网格无关性分析

网格序号	网格总量/万	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	与模型试验的偏差/%
1	50	33.37	11.51
2	100	35.12	6.87
3	200	37.23	1.27
4	400	37.44	0.72

### 1.3 数模验证

针对双底坎方案 m31(简称 m31,类似同此),选取水面波动较大的工况 4,通过对比数模和物模的水面线、典型断面流速分布等结果,分析本文采用数模方法的可靠性<sup>[17-18]</sup>。

图 4 为闸室中心剖面水面线沿程变化,可见数模和物模结果在消力池水跃段吻合度较高,仅在坎后局部区域存在少量偏差。

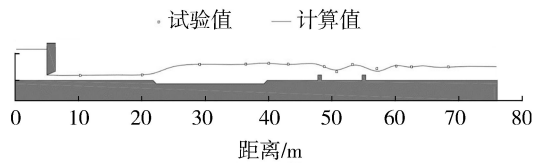


图 4 闸室中心纵向剖面沿程水面线

图 5 为典型断面流速  $v_x$  沿  $y$  轴分布情况,其中  $v_x$  为表、中、底层沿  $x$  轴方向流速平均值。数模计算的典型断面  $v_x$  整体略小于试验值,分析数值模拟产生误差原因可能有:控制方程及其离散方法、迭代步长和网格划分,尤其是消力池等关键部位网格没有充分加密。总体而言,数模计算与物模试验得到的流速变化趋势基本一致,最大流速均出现在  $y=24 \text{ m}$  附近。

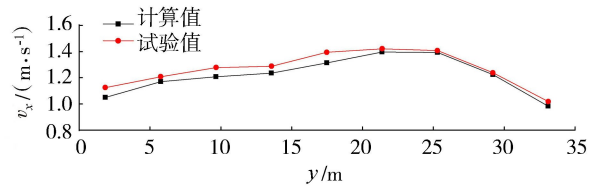


图 5 典型断面  $v_x$  沿  $y$  轴分布

综上所述,本文所采用结合 VOF 模型的数模方法能够较好地模拟闸下出流的流态和流速分布情况,所得结果基本可靠。

## 2 结果与分析

### 2.1 流态特征

图 6 为无坎方案 m00 的自由液面及流速计算结果。图 6(a) 中出闸水流在消力池内形成远驱式水跃,池末水面壅高,由于泵站侧突扩,在与下游水位衔接时发生跌落。跌落过程中,水流冲击边墙,同时边墙施加反作用力,迫使水流转向,在下游河道形成交叉的斜向水跃。远驱式水跃与斜向水跃之间的跌落区最大流速可达  $6.04 \text{ m/s}$ ,超过河床设计抗冲流速。另外,由于消能不足,斜向水跃下游产生系列弱水跃,水面波动较大,不利于通航和岸墙的稳定。

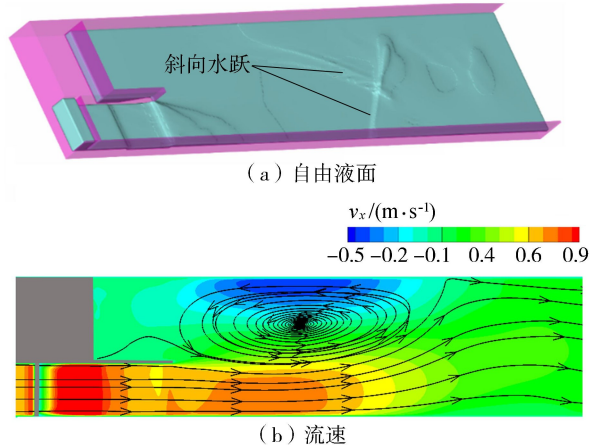


图 6 m00 自由液面和流速

图 6(b) 流速云图和流线图表明, 出闸水流流出泵闸隔墙后, 受到水闸泵站两侧动量梯度的驱动, 在泵站侧形成大尺度回流, 回流区范围内容易产生泥沙淤积等问题。另外, 回流区压缩主流过流宽度, 不仅使得该处断面流速增大, 造成局部冲刷, 而且减小了水闸的过流能力。主流在回流区下游向左岸突扩, 流向变化显著

图 7 是单坎方案 m11 和双坎方案 m33 在工况 5 条件下的自由液面图。对比 m00(图 6(a)), m11 通过设置底坎使得斜向水跃前移, 跌落区范围缩小, 最大流速降至 5.37 m/s。此外, m11 下游水面波动也有所减小, 但坎后仍出现较大的跌落区。m33 中, 消力池内水跃漩滚区移动至消力池前端, 两坎间存在强烈的水面波动, 水跃形态由单坎方案的交叉的斜向水跃转变为弧形水跃。双坎使得跌落区范围明显缩小, 最大流速降至 3.64 m/s, 而且相比单坎, 更能有效地降低下游水面波动。

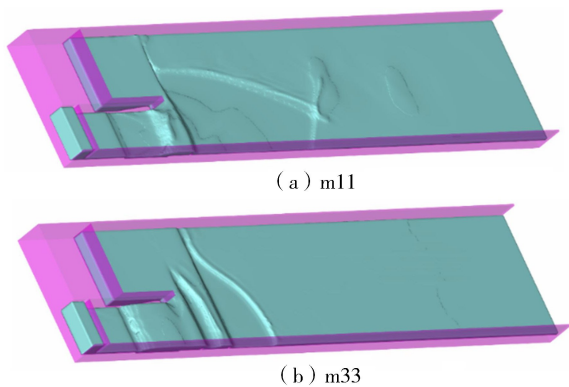


图 7 m11、m33 自由液面

引入水流扩散角  $\alpha$  和速度加权平均角度  $\bar{\theta}$ <sup>[19]</sup> 定量分析单坎、双坎对闸下(图 6(b) 反映的)另一不良流态—偏流的影响。

水流扩散角  $\alpha$  表达为

$$\alpha = \frac{\Delta b}{L} \quad (5)$$

其中  $\Delta b = B - b$   
式中:  $b$  为闸室宽度;  $B$  为河道宽度;  $L$  为水流开始扩散(即泵闸隔墙末端所处的  $x=40.8$  m 断面)至全断面过流, 沿  $x$  轴方向的距离。扩散角反映水流扩散的快慢, 扩散角越大, 偏流程度越弱, 整流效果越好。

速度加权平均角度  $\bar{\theta}$  为

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{n=1}^m u_x \left( 90^\circ - \arctg \frac{u_z}{u_x} \right)}{\sum_{n=1}^m u_x} \quad (6)$$

式中:  $m$  为典型断面的单元个数;  $u_x$  为典型断面各单元的  $x$  方向速度;  $u_z$  为典型断面各单元的  $z$  方向速度。速度加权平均角度反映典型断面处的水流偏转程度。

表 4 为无坎方案 m00、单坎方案 m11 和双坎方

案 m33 方案的  $\alpha$ 、 $\bar{\theta}$  及  $Q$  对比。底坎的设置使得出闸水流扩散角从  $15.64^\circ$  增大到  $16.70^\circ$ , 典型断面处的水流加权平均角度增大了 7.03%。由于具有横向扩散水流的作用, 底坎一定程度上减小回流范围, 削弱回流对主流的压缩, 主流过流宽度有所增大, 过流能力提高, 因此 m11 的流量较 m00 提高 10.72%。表 4 表明, 双坎较单坎能更有效地改善偏流问题。

表 4 无坎、单坎和双坎方案的  $\alpha$ 、 $\bar{\theta}$  及  $Q$  对比

方案	$\alpha/(^\circ)$	$\bar{\theta}/(^\circ)$	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$
m00	15.64	73.14	37.23
m11	16.70	78.28	41.22
m33	18.26	82.10	41.25

## 2.2 机理分析

图 8 是 m00、m11 和 m33 在工况 5 条件下的紊动能云图及底坎附近的流线图。m00 中最大紊动能发生于斜向水跃附近, 高紊动能区域甚至延伸到计算域之外; m11 中高紊动能区域主要位于底坎附近; m33 中高紊动能区域主要位于消力池内和两坎之间。由此可知, 底坎通过产生漩滚、水面波动等, 在附近形成高紊动能区域, 该区域内水体剧烈掺混、碰撞, 动能快速交换, 控制紊动能向泵站侧低动能水体传递, 促使下游河道在更短距离内达到平顺过流。对比单坎, 双坎产生的局部紊动能更强, 能获得更好的整流效果。底坎附近流线图显示了水微元体的运动特征。底坎通过挤压来流, 迫使水流发生翻越底坎的上爬运动和绕坎流向坎两端的横向运动, 坎后的部分水流发生螺旋式横向移动, 进一步反映了底坎的整流机理。

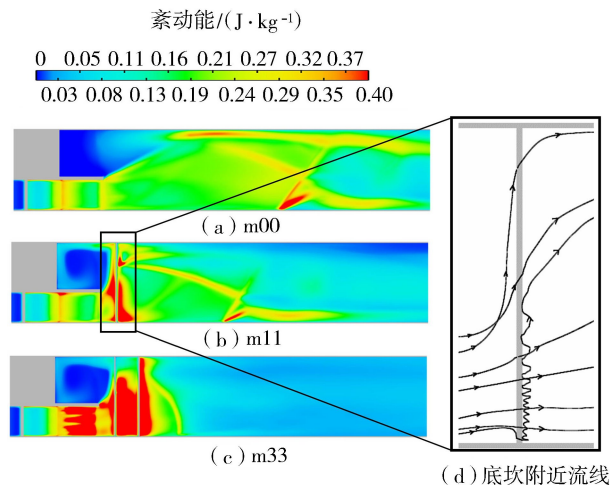


图 8 m00、m11 和 m33 的紊动能云图及底坎附近流线

## 2.3 回流特性

图 9 为出闸水流在下游河道产生的回流区特征<sup>[20-22]</sup>。

在泵闸隔墙下游, 水闸、泵站两侧水体的流速不同, 将形成较大流速梯度, 受水的黏滞作用, 产生紊

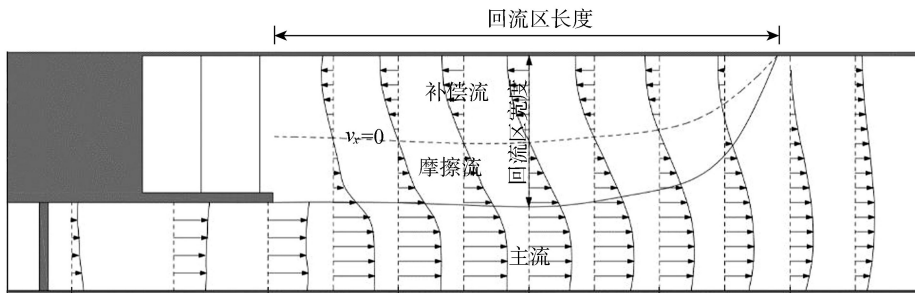


图9 出闸水流在下游河道的回流区特征

动切应力。在紊动切应力的作用下,回流区内靠近主流的水体随主流向下游流动形成摩擦流,远离主流的水体形成流速相反,呈现先大后小的补偿流。利用断面流量平衡方法确定回流区和主流区边界线;主流区内流量始终为过闸流量;回流区内摩擦流的正向流量与补偿流的反向流量相等; $v_x = 0$ 为摩擦流和补偿流的分界线。

图10为m21各工况回流区特性,包含中层水流沿 $x$ 轴方向的流速云图及矢量图。工况1至工况5下游出口 $Fr$ 逐渐增大,下游水深逐渐降低。回流区范围随 $Fr$ 数的增大,逐渐由椭圆状变为狭长,直至消亡。

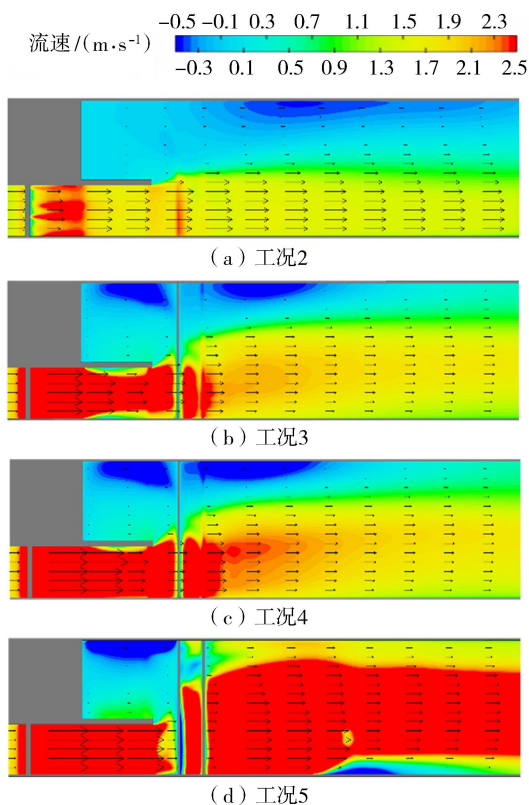


图10 m21各工况回流区特性

表5为各方案在工况1条件下的回流区范围、回流速度和回流强度。为定量对比不同方案对回流区的影响,选取工况1作为分析对象。回流区长度为回流区末端与泵闸隔墩之间沿 $x$ 轴方向的距离,

回流区宽度指回流中心( $v_x = v_y = 0$ )处宽度。回流速度指补偿流最大流速所处断面的平均流速。回流强度为回流速度与面积的乘积。

表5 工况1各方案回流区范围、回流速度和回流强度对比

方案	回流区范围/m		回流速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	回流强度/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
	长度	宽度		
m21	71.61	18.70	0.18	243.57
m22	64.61	15.30	0.12	119.32
m31	69.41	17.10	0.15	173.37
m32	74.01	19.10	0.20	289.61
m33	68.41	15.10	0.14	144.60
m34	66.21	15.10	0.14	136.19
m35	66.61	18.10	0.15	180.31
m36	66.21	17.50	0.16	190.75

对比m21、m22和m31可知,当双坎位置均保持不变时,随着二坎坎高增大,回流区范围、回流流速、回流强度均降低。因为二坎在一坎基础上促使水流进一步扩散,随着坎高增大,漩滚强度增大,水流掺混、碰撞效果提高,减小主流和回流区的流速梯度,减弱紊流切应力,从而降低回流区的尺寸及强度。然而Liu等<sup>[5-6]</sup>研究表明,当底坎高度超过下游0.5倍水深时,流态可能发生恶化,因此当坎高超过本文研究范围时需要进一步研究。

对比m31至m36可知,随着二坎间距增大,回流区范围、回流区流速和回流区强度先减小后增大,当二坎间距为22m时达到最小值。由此可得,当二坎间距较小时,漩滚填充双坎之间的空间,双坎近似等效于一个宽顶堰,其整流效果相对有限;当二坎间距较大时,二坎可能将原有的回流区分割为两个,从而恶化下游流态。

## 2.4 流速均匀性

流速均匀性也能反映整流效果,引入不均匀系数 $k$ 来评估流场的流速均匀性<sup>[5,18,23-24]</sup>:

$$k = \frac{v_{imax} - v_{imin}}{\bar{v}_i} \quad (7)$$

式中: $\bar{v}_i$ 为 $i$ 断面的平均流速; $v_{imax}$ 为 $i$ 断面垂线平均最大流速; $v_{imin}$ 为 $i$ 断面垂线平均最小流速。在泵闸隔墙后 $x$ 方向每间隔10m设置一个计算断面,共计11个断面,用以研究不均匀系数沿程变化规律。

由量纲分析可知沿程不均匀系数  $k = f(Fr, h_2/b, d_2/b, x/b)$ 。 $k$  值受 3 类因素影响:①相对距离  $x/b$ ;②结构参数  $h_2/b, d_2/b$ ;③运行条件,即下游出口断面处  $Fr$ 。

图 11 为  $k$  值与相对距离、结构参数关系,用以研究相对距离和结构参数对  $k$  值的影响。图 11(a) 为工况 1 不同方案不均匀系数的沿程变化,总体来看不均匀系数随相对距离  $x/b$  增大而减小。工况 1 回流区的存在使得  $k$  值出现增大现象。由式(7)可知,回流区的  $v_{\min}$  为反向流速,  $v_{\max}$  受回流区压迫变得更大,而速度均值并未发生明显变化,所以图像出现峰值。随后水流在河道内自行调整,在  $x/b=9.5$  处流速基本不再变化。

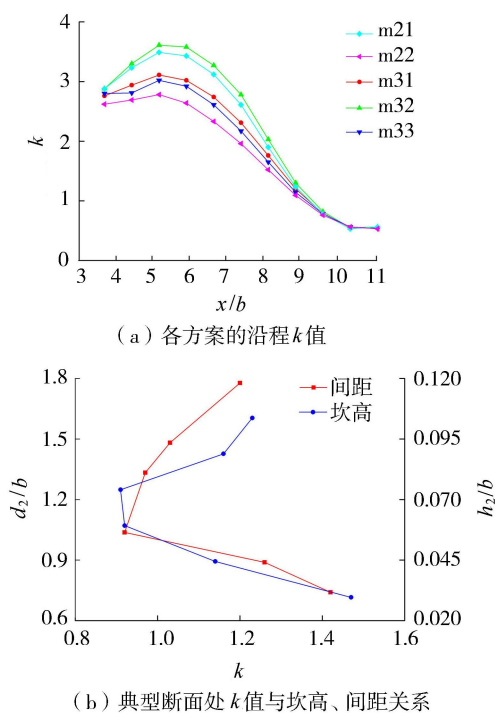


图 11  $k$  值与相对距离、结构参数关系

通过竖向对比各方案的沿程  $k$  值,拥有更高底坎和更大间距的方案位于下方,就意味着同一距离处,高坎大间距方案的不均匀系数更小;横向对比,若想获得相同的不均匀系数,低坎小间距的方案则需要更长的距离调整水流。

图 11(b) 为工况 5 典型断面处的不均匀系数与坎高、间距的关系。从图 11(b) 可以清晰地看出  $k$  与结构参数呈二次函数关系,  $k$  随结构参数的增大,先减小再增大。相对间距为 1.0、相对坎高为 0.07 时  $k$  有最小值。

图 12 为不同  $Fr$  m33 不均匀系数的沿程变化。总体看,高  $Fr$  位于图像下方,意味着  $k$  和  $Fr$  负相关。不同  $Fr$  下,  $k$  仍旧随  $x/b$  的增大而减小,但是减小趋势有所不同。在  $x/b=6$  左侧,更高  $Fr$  的水流,

$k$  沿程下降更快,表现为陡峭;低  $Fr$  水流的  $k$  沿程下降缓慢,甚至当  $Fr=0.07$  时出现了明显增长。而在  $x/b=6$  右侧,则呈现相反的变化,低  $Fr$  的水流  $k$  沿程下降剧烈,高  $Fr$  水流  $k$  沿程下降缓慢,后半段甚至渐渐敛于水平线。所以,随着  $Fr$  增大,图像线形逐渐从上凸变成下凹。可以给出这样一个解释:由  $Fr$  的定义可知,当  $Fr$  从低变高时,水深便从深变浅,流速从小变大。高水深,低流速的水流(如工况 1,  $Fr=0.07$ ),由对图 11 的解释可知,下游产生的回流区升高了  $k$  值,出现了上凸。低水深,高流速的水流(如工况 5,  $Fr=0.78$ )其下游的回流区消失,且由于水深降低更易受底坎整流效果的影响,  $k$  下降剧烈,可以很快地得到稳定的流速分布,沿程不再发生明显变化,所以线形出现了下凹,后半段渐渐收敛于水平线。

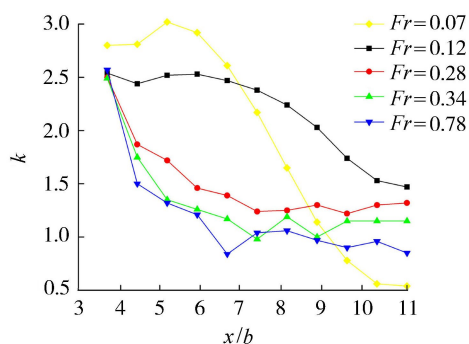


图 12 m33 中  $Fr$  与沿程  $k$  值关系

由以上的讨论可以得出:  $k$  与  $x/b, Fr$  负相关,与  $h_2/b, d_2/b$  呈二次函数关系,即  $k$  值随  $h_2/b, d_2/b$  的增大,先减小后增大。基于  $k$  的变化规律,可得双底坎结构参数对流速均匀性的影响:流速均匀性随着二坎坎高、间距的增大,先提高后降低。

水闸实际运行条件十分复杂,宜综合考虑回流特性和流速均匀性变化,选择适用于各个水流情况的双底坎体型布置参数范围:一坎间距为  $(0.5 \sim 0.6)b$ ,二坎的间距在  $(1.5 \sim 1.8)b$ ,坎高选择为  $(0.07 \sim 0.1)b$ 。

### 3 结论

a. Flow-3D 中 VOF 法的 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型计算得到的水面线、断面流速和模型试验资料吻合度很高,说明该计算模型能够有效追踪自由液面,模拟复杂水力现象,如水跃漩滚、水面雍高等。

b. 底坎能有效处理泵闸工程中出闸水流在下游产生的偏流、回流、斜向水跃等不良流态,相比较无整流措施,其出闸水流扩散角增大 7.03%,流量增大 10.72%。双底坎通过二坎对来流的再调整,相比较单坎能更快扩散水流,消弱下游水面波动。

c. 通过对回流特性和不均匀系数的研究发现:回流强度、回流速度等回流参数与二坎坎高负相关,与间距呈二次函数关系,即随间距的增大,先减小后增大;流速不均匀系数与  $Fr$  负相关,与二坎坎高、间距均呈二次函数关系,即随坎高、间距的增大,先减小后增大。

本文为了简化计算和降低试验成本,没有考虑双底坎之间的耦合作用,需要进一步研究。

## 参考文献:

[1] 严忠民,周春天,阎立文. 平原水闸泵站枢纽布置与整流措施研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):50-53. (YAN Zhongmin, ZHOU Chuntian, YAN Liwen. Study on the layout of combined sluice-pump station projects and modification of flow pattern [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2000, 28(2):50-53. (in Chinese))

[2] 王法猛,傅宗甫,吕家才,等. 闸站合建枢纽对河口通航影响的模型试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):29-31. (WANG Fameng, FU Zongfu, LYU Jiakai, et al. Model tests on influence of combined construction of sluices and pump stations on estuarine navigation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5):29-31. (in Chinese))

[3] 冯建刚,孟湘云,钱尚拓. 分侧式闸站枢纽下游底坎整流特性[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):62-67. (FENG Jiangang, MENG Xiangyun, QIAN Shangtuo. Analysis on sill rectification characteristics downstream a unilaterally arranged pump-gateway [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6):62-67. (in Chinese))

[4] QIAN Shangtuo, WU Jianhua, MA Fei, et al. Cavity filling water control below aerator devices[J]. Journal of Hydrodynamics,2014,26(3):424-430.

[5] LIU Qin, FANG Guohua, SUN Hongbin, et al. Joint optimization scheduling for water conservancy projects in complex river networks [J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(1): 43-52.

[6] 曾昊,陈毓陵,谭琳露,等. 闸站枢纽闸下的底坎整流措施[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):347-349. (ZENG Hao, CHEN Yuling, TAN Linlu, et al. Bottom sill rectification measures under the gate of the gate station hub[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2014,42(5):347-349. (in Chinese))

[7] 王晓升,陈毓陵,孙靖康. 分水闸站枢纽分水池流态改善措施研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12):107-113. (WANG Xiaosheng, CHEN Yuling, SUN Jingkang. A modified method to improve flow pattern in water distributing station [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2018,37(12):107-113. (in Chinese))

[8] 刘新阳,高传昌,石礼文,等. 泵站前池与进水池整流

数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):242-246. (LIU Xinyang, GAO Chuanchang, SHI Liwen, et al. Numerical simulation for fluid meliorating in both forebay and suction bay of pumping stations [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3):242-246. (in Chinese))

[9] 冯旭松. 泵站前池底坎整流及坎后流动分析[J]. 江苏水利,1998(1):31-33. (FENG Xusong. Analysis of the flow behind and rectification of the bottom sill of the forebay of the pumping station [J]. Jiangsu Water Resources, 1998(1):31-33. (in Chinese))

[10] 冯建刚,钱向栋,张睿. 城市输水泵站前池流态及整流措施[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):77-83. (FENG Jiangang, QIAN Xiangdong, ZHANG Rui. Flow patterns and rectification measures in forebays of urban water pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):77-83. (in Chinese))

[11] 罗灿,成立,刘超. 泵站正向进水前池底坎整流机理数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(5):393-398. (LUO Can, CHENG Li, LIU Chao. Numerical simulation of mechanism for sill rectifying flow in pumping station intake[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2014,32(5):393-398. (in Chinese))

[12] 王月华,包中进,王斌. 基于 Flow-3D 软件的消能池三维水流数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2012,45(4):454-457. (WANG Yuehua, BAO Zhongjin, WANG Bin. Three-dimensional numerical simulation of flow in stilling basin based on Flow-3D[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2012,45(4):454-457. (in Chinese))

[13] 吴鹏飞,郭志伟,钱忠东,等. 进水池表面涡数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2):120-125. (WU Pengfei, GUO Zhiwei, QIAN Zhongdong, et al. Numerical simulation and experiment on free-surface air-entraining vortices in pump sump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 120-125. (in Chinese))

[14] 孙志林,於刚节,徐丹,等. 正态曲面丁坝三维水流数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(7):1247-1251. (SUN Zhilin, YU Gangjie, XU Dan, et al. Three-dimensional numerical simulation of flow around spur dike with bivariate normal surface [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(7): 1247-1251. (in Chinese))

[15] 陈月君,顾晓峰,傅宗甫,等. 上游边坡系数对折线型实用堰流量系数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):425-432. (CHEN Yuejun, GU Xiaofeng, FU Zongfu, et al. Effects of slope coefficient in the upstream side on the discharge coefficient of broken-line practical weirs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(5):425-432. (in Chinese))

(下转第36页)