

分侧式闸站枢纽下游底坎整流特性

冯建刚^{1,2}, 孟湘云¹, 钱尚拓¹

(1. 河海大学农业工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 西藏农牧学院水利与土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

摘要:采用 Flow-3D 数值模拟结合物理模型试验的方法,探索底坎对分侧式闸站枢纽下游回流和偏流问题的改善效果,建立了漩长、漩宽、流速不均匀系数等水力特性与底坎尺寸、位置的相关关系,为底坎的优化设计提供依据。结果表明,底坎能有效改善回流和偏流问题,使单侧水流能够更快扩散到整个河宽断面;随着坎高和坎墩间距增大,漩长、漩宽和流速不均匀系数均明显降低,整流效果提高;随着坎宽增大,上述水力特性参数均先降低后升高,整流效果先提高而后出现减弱现象;流速不均匀系数沿水流方向变化趋势相同,均是先增大后减小。

关键词:分侧式闸站;底坎整流;VOF 方法;流速不均匀系数;漩长;漩宽

中图分类号:TV135 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0062-06

Sill rectification characteristics downstream a unilaterally arranged pump-gateway//FENG Jiangang^{1,2}, MENG Xiangyun¹, QIAN Shangtuo¹(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Xizang Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China)

Abstract: The improvement of the sill on the recirculation flow and the deflected flow downstream a unilaterally arranged pump-gateway was investigated based on a method combined numerical simulation of Flow-3D with physical model experiments. The effects of the size and location of the sill on the length and width of the recirculation flow and the velocity non-uniformity coefficient were studied, which can provide references for optimal design of the sill. The results show that the sill can suppress the recirculation flow and the deflected flow effectively, resulting in quick diffusion of the unilateral flow into the whole river width. The length and the width of the recirculation zone and the non-uniformity coefficient all decrease with the increase of both the height and adjacent distance of the piers, indicating a good rectification effect. With the increase of the sill width, the above parameters decrease at first and then increase, corresponding to better and non-significant rectification effect respectively. The variation trend of the velocity non-uniformity coefficients for all cases is similar in the flow direction, which increases at first and then decreases.

Key words: unilaterally arranged pump-gateway; sill rectification; VOF method; velocity non-uniformity coefficient; recirculation length; recirculation width

闸站合建枢纽具有布置紧凑,占地面积少,施工期短,节约工程投资,便于管理等优点,在水利工程中得到广泛应用,取得较好的经济和社会效益。如泰州引江河高港枢纽、常熟望虞河水利枢纽、无锡江尖水利枢纽等。其设计中较多采用对称式布置,但在特殊地形条件下需采用泵站与水闸分居河道两侧的分侧式布置。分侧式闸站合建枢纽在水闸单独运行时,闸下主流宽度小于天然河道过流宽度,水流难以在较短距离内通过自身调整而充分扩散,将在下游形成较大范围的回流和偏流^[1],增大消能防冲压力,危害通航安全。因此,有必要研究分侧式闸站枢纽下游流态问题并提出合理有效的整流措施,这对

其安全高效运行具有重大实际意义。

本文以上海市某闸站工程为例,研究分侧式闸站枢纽下游流态特征及整流问题。图 1 为闸站工程平面布置图,它采用“泵+闸”分侧布置形式,分别布置泵站、水闸于河道左侧和右侧。水闸为单孔闸,单孔净宽为 13.50 m,闸底高程为 1.00 m,闸下河道断面为矩形,河口宽度为 36.00 m,河底高程为-1.00 m,模型比尺为 1/20。本文针对该工程水闸运行的最常见工况展开研究,取闸门开度 0.8 m,上游水位 3.68 m,下游水位 3.11 m。初步研究表明,当水闸单独运行时,下游存在显著的回流和偏流等问题。

底坎作为一种泵站前池的整流措施,具有结构

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

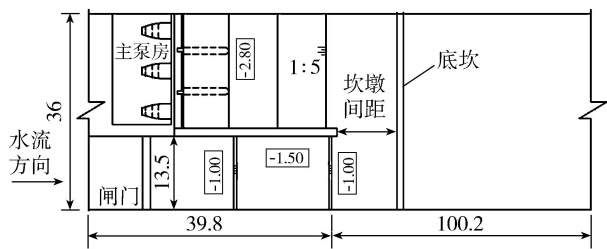


图1 闸站工程平面布置(单位:m)

简单、施工方便、整流效果显著等优势,有望应用于分侧式闸站枢纽下游整流问题。冯旭松^[2]、周正富等^[3]研究了坎高对前池整流效果的影响,认为:①坎高设计过低,坎后漩滚区较小,坎后流动不能重新均匀分布;②坎高设计过高,水流扰动强烈,扩散长度不足,泵前断面流速分布很不均匀;③随着坎高增大出现回流区先变小后增大的规律,给出建议坎高 $(0.35 \sim 0.65)H$ (H 为前池水深)。成立等^[4]、冯旭松^[2]研究了底坎位置对前池整流效果的影响,认为:①底坎离进水池较近时,泵前断面流速均匀度降低,进水流态较差;②底坎离进水池太远时,达不到理想的整流效果;③过坎后的漩滚长度直接决定底坎的设置位置,并给出建议整流底坎至进水池距离取 $(1.3 \sim 1.5)$ 倍漩滚长度。罗灿等^[5]研究了坎宽对前池整流效果的影响,认为随着坎宽变大,底层速度矢量分布大致相同,坎宽对前池流态的影响较小。

目前对分侧式闸站枢纽下游底坎整流特性研究成果仍不多。本文采用Flow-3D数值模拟结合物理模型试验的方法,研究底坎对分侧式闸站枢纽下游回流和偏流问题的改善效果,尝试建立漩长、漩宽、流速不均匀系数等水力特性与底坎尺寸和位置的相关性,为底坎的优化设计提供依据。

1 数学模型及计算方法

1.1 基本方程

闸下出流属于复杂的三维湍流运动,目前计算湍流的方法有雷诺平均方程法(RANS)、尺度解析模拟法(SRS)等。SRS需大量计算资源且效率远不如RANS。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型计算精度高,使用广泛,可以更好地处理旋流、高应变率流动及流线弯曲度较大的流动^[6-7]。所以本文采用雷诺平均方程法和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟。雷诺平均方程法的连续方程、动量方程为

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

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

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; $x_i (i=1,2,3)$ 为笛卡尔坐标系坐标; μ 为水的动力黏度系数; ρ 为流体密度; p 为流体微元体上的压力; $\rho \overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型形式为

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \mu_{\text{eff}} &= \mu + \mu_t & \mu_t &= \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \\ C_{1\varepsilon}^* &= C_{1\varepsilon} - \eta(1 - \eta/\eta_0)/(1 + \beta\eta^3) \\ \eta &= (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} k / \varepsilon \\ E_{ij} &= (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2 \end{aligned}$$

式中: k 为湍动能; ε 为耗散率; μ_t 为动力涡黏系数; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能; E_{ij} 为主流的时均应变率;常数项 $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$, $C_\mu = 0.0845$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ^[8]。

1.2 自由表面处理

在计算泵站进水池的三维流场时,普遍采用刚盖假定处理自由表面问题。对于闸站合建枢纽的下游,水面波动较为剧烈的情况,刚盖假定无法描述水面的变化。所以本文采用简单有效、可以描述自由表面各种复杂变化的VOF法。

VOF法是由Hirt和Nichols^[9]提出的处理复杂水面的一种新方法。其处理自由水面的思路是:在网格单元中定义水的体积比函数 $F \in [0, 1]$, $F=0$ 表示该单元只为气体, $F=1$ 表示单元只充满水体,而当 $0 < F < 1$ 时,表示该单元包含两相的交界面——自由水面。若以 α_w 和 α_a 分别代表单元内水和气所占的体积分数,应满足连续关系 $\alpha_w + \alpha_a = 1$ 。 α_w 可利用如下方程来求解:

$$\frac{\partial (\rho \alpha_w)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \alpha_w)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

利用 α_w 的梯度可确定自由水面的法线方向。

VOF的 $k-\varepsilon$ 模型与单相的 $k-\varepsilon$ 模型其形式完全一致。只在密度 ρ 和黏性系数 μ 中存在差异,二者都是通过单元的体积分数作加权平均后得出,表达式如下:

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

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

式中: ρ_w, ρ_a 分别为水与空气的密度; μ_w, μ_a 分别为水和空气的黏性系数。

1.3 边界条件与网格划分

数值模拟计算域选取闸门上游 5 m ($x=0$) 至闸门下游 135 m ($x=140$ m) 的区域,使得水流到达出口断面时已获得较为均匀的流速分布。进口和出口均设置水位边界条件,设置进口水位为 3.68 m、出口水位为 3.11 m,壁面采用无滑移边界条件。模型采用 Pro/E 软件建立,导入 Flow-3D 后采用结构化网格进行划分。经过网格无关性分析,最终确定网格数为 400 万。

2 底坎整流特性

2.1 底坎体型设计

设计 8 个底坎方案以系统研究底坎尺寸和位置对下游流态和水力特性的影响^[10],不同底坎尺寸和位置具体参数如表 1 所示。其中方案 M00(以下简称 M00,下同,其他方案同理简称)不设底坎,M00、M11 分析底坎对流态的影响,M00、M11、M12、M13 分析坎高对水力特性的影响,M11、M21、M22 分析坎宽对水力特性的影响,M11、M31、M32 分析坎墩间距对水力特性的影响。坎墩间距为泵闸隔墩末端与底坎的水平距离,具体位置见图 1 标注。

表 1 底坎尺寸和位置的参数 m

方案	坎墩间距	坎高	坎宽
M00		0	
M11	7	0.8	0.6
M12	7	0.4	0.6
M13	7	1.2	0.6
M21	7	0.8	0.2
M22	7	0.8	1.0
M31	3	0.8	0.6
M32	11	0.8	0.6

2.2 评价指标

对于分侧式闸站枢纽,水闸单独运行时理想的下游流态特征为:无大范围的回流及偏流,流速均匀分布,形成全断面过流。相应地引入 3 个评价参数:流速不均匀系数 K 、漩长 a 和漩宽 b 。

2.2.1 流速不均匀系数

利用流速不均匀系数 K 来表示水流在河道宽度上分布的均匀程度, K 越小说明断面流速分布越均匀。以水流入口为 0 点,顺水流方向 50 ~ 140 m 范围内,每隔 10 m 取一个断面。在每个断面上均匀布置 121 个垂线,然后将每条垂线上的流速进行积分,求得每条垂线的平均流速。由此,可采用式(8)计算某断面流速的不均匀系数:

$$K = (V_{\max} - V_{\min}) / \bar{V} \tag{8}$$

式中: $V_{\max}$ 为最大垂线平均流速; $V_{\min}$ 为最小垂线平均流速; $\bar{V}$ 为断面的平均流速。

2.2.2 漩长和漩宽

图 2 为表层回流区平面划分示意图^[11]。水流稳定后,存在一条曲线 AB ,其中 A 点是曲线与左岸的交点, B 点是隔墩末端($x=40.8$ m),此线右侧(顺水流方向)流量始终等于闸下出流流量,此区为主流区,此线左侧为回流区。漩长 a 是 A 点与 B 点之间顺水流方向的长度。十字位置为回流中心,此处各个方向速度均为 0,过回流中心做左岸的垂线与曲线 AB 交于点 C 。漩宽 b 是 C 点与左岸的垂直长度。 a 、 b 越小表示回流区越小,水流扩散的程度越好。

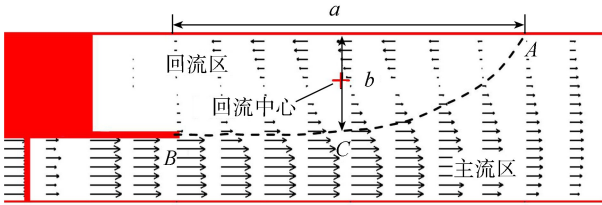


图 2 表层回流区平面划分示意图

2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 数值模型验证

图 3 为 M00 物理模型流态照片,拍摄过程中添加泡沫颗粒作为示踪粒子以反映水流表层的流线特征^[12]。图 4 为 M00 数值模拟表层流线图。对比图 3 和图 4 可得,数值模拟和物理模型得到的流态特征基本相似:水闸出流在泵闸隔墩以后,沿程逐渐向河道左岸(泵站侧)扩散,直至到达左岸;主流与左岸之间形成大尺度的椭圆形回流区,其上游侧最远可到达泵站出水池内,并且宽度较大,压迫主流现象严重。表 2 对比了 M00 漩长、漩宽的数值模拟和物理模型结果,分别相差 5.08%、5.41%,表明数值模拟结果具有较高的准确性。



图 3 M00 物理模型流态照片

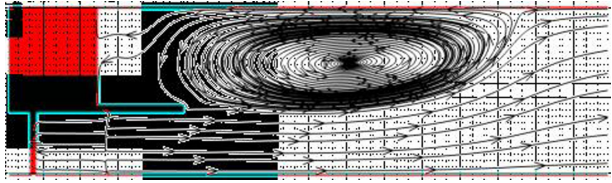


图 4 M00 数值模拟表层流线

表 2 M00 数值模拟与物理模型结果对比

参数	物理模型结果/m	数值模拟结果/m	相对差/%
a	82.6	78.4	5.08
b	22.2	21.0	5.41

2.3.2 底坎对流态的影响

图5为M11数值模拟表层流线图。相对于M00,M11的回流区尺寸显著减小,其上游侧由于受到底坎的阻挡难以到达泵站出水池内,宽度明显减小,因此对主流的压迫减弱,使得主流在更短距离内扩散到对岸。表3为多方案的漩长、漩宽数值模拟结果。相对于M00,M11的漩长、漩宽分别减小了5.10%、4.76%。

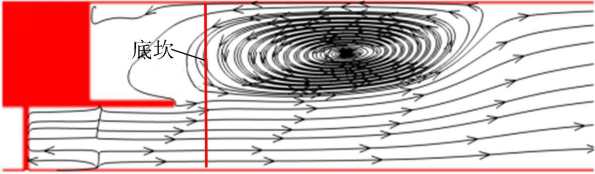


图5 M11数值模拟表层流线

表3 多方案的漩长、漩宽数值模拟结果 m

方案	a	b
M11	74.4	20.0
M12	76.8	20.6
M13	66.0	17.4
M21	77.2	20.8
M22	75.4	20.4
M31	77.2	20.6
M32	72.4	18.4

上述结果表明,底坎能够有效改善分侧式闸站枢纽的下游流态,显著缩小回流区尺寸,促进主流扩散,使其在更短距离内形成全断面过流。为了分析原因,图6给出了过坎水流流态。受到底坎的顶冲作用,出闸水流的一部分水体直接翻越底坎流向下游,另一部分水体流向急剧变化,获得较大的横向流速,在翻越底坎的同时,顺底坎向左岸流动一定距离后再流向下游。因此主流宽度在底坎附近显著增大,回流区受到挤压而明显减小。

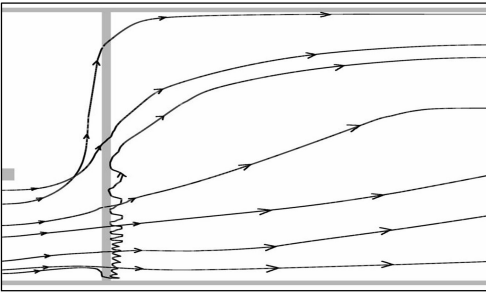


图6 过坎水流流态

2.3.3 坎高对水力特性的影响

图7、图8为M12、M13数值模拟表层流线图。对比图4、图5、图7和8可知,随着坎高增大,主流更快向左岸扩散,回流区向上游移动、尺寸逐渐减小,压迫主流现象减轻。对比表2和表3可知,当坎高从0增大到0.4m,漩长、漩宽分别减小了2.04%

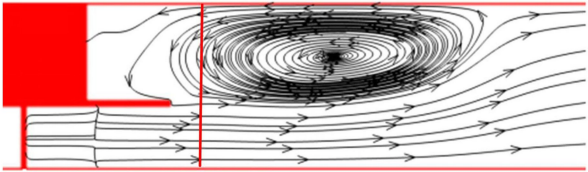


图7 M12数值模拟表层流线

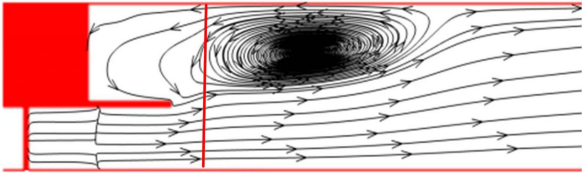


图8 M13数值模拟表层流线

和1.90%;当坎高从0.4m增大到0.8m时,漩长、漩宽分别减小了3.13%和2.91%;当坎高从0.8m增大到1.2m时,漩长、漩宽分别减小了11.29%和13.00%。图9为不同方案流速不均匀系数沿程变化。由图9可知,随沿程变化各方案K值变化趋势相同,均是先增大后减小,在 $x>130\text{m}$ 以后,基本趋于0.60。增大坎高使得不均匀系数沿程的最大值明显降低,更短距离内达到工程要求的较小值($K=0.3\sim1.4$)^[13],将显著提高外河的通航安全。

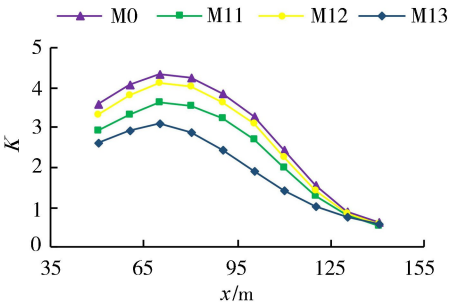


图9 不同方案流速不均匀系数沿程变化

上述结果表明,增大坎高可有效改善下游流态,显著减小回流区尺寸,提高流速均匀度。原因为:坎高增大,挤压水流的垂向过流空间,减小过流断面,增加水流流速,使平面上水流在底坎前顺着底坎向两侧流动,促进水流横向扩散。

2.3.4 坎宽对水力特性的影响

图10、图11分别为M21、M22数值模拟表层流线图。对比图5、图10和图11可知,随着坎宽增大,偏流现象先减弱后提高,回流区尺寸先减小后增大。由表3可知,当坎宽从0.2m增大到0.6m,漩长、漩宽

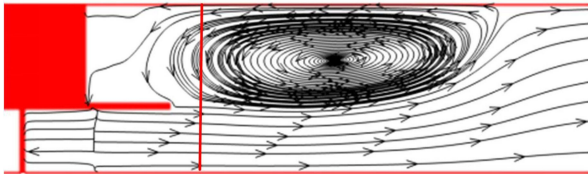


图10 M21数值模拟表层流线

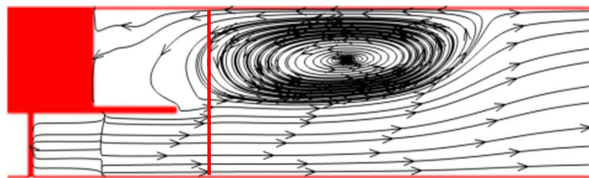


图 11 M22 数值模拟表层流线

分别减小了 3.63% 和 3.85%;当坎宽从 0.6 m 增大到 1.0 m, 漩长、漩宽分别增大了 1.34% 和 2.00%。图 12 为 M11、M21、M22 流速不均匀系数沿程变化。由图 12 可知,随沿程变化各方案 K 值变化趋势相同,均是先增大后减小,在 $x > 130$ m 以后,基本趋于 0.56。增大坎宽使得不均匀系数先减小后增大。

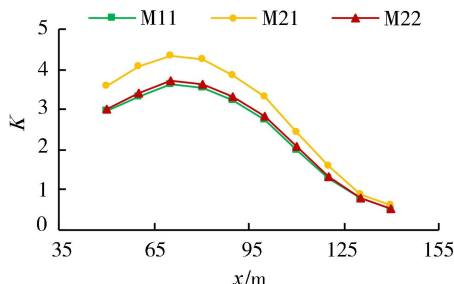


图 12 M11、M21、M22 流速不均匀系数沿程变化

上述结果表明,随着坎宽增大,回流区尺寸和流速不均匀系数先减小后增大。原因为:坎宽从 0.2 m 增大到 0.6 m,坎宽度适中,起到较好的分流作用,流态得到改善。坎宽从 0.6 m 增大到 1.0 m,使得水流经过底坎时的过水断面变小,坎后的漩滚增加,流态紊乱。

2.3.5 坎墩间距对水力特性的影响

图 13、图 14 分别为 M31、M32 数值模拟表层流线图。对比图 5、图 13 和图 14 可知,底坎距离隔墩的位置对底坎整流效果有显著影响。随着坎墩间距增大,回流区尺寸逐渐减小,压迫主流现象减轻。由表 3 可知,当坎墩间距从 3 m 增大到 7 m,漩长、漩宽分别减小了 3.63% 和 2.91%;随着坎墩间距继续增大到 11 m,漩长、漩宽分别减小了 2.69% 和 8.00%。图 15 为 M11、M31、M32 流速不均匀系数沿程变化。由图 15 可知,随沿程变化各方案 K 值变化趋势相同,均是先增加后减小,在 $x > 130$ m 以后,基本趋于 0.55。增大坎墩间距使得不均匀系数沿程的最大值明显降低,更短距离内达到工程要求的较小值。

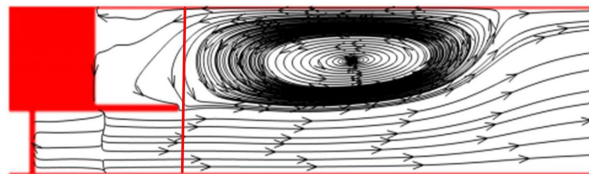


图 13 M31 数值模拟表层流线

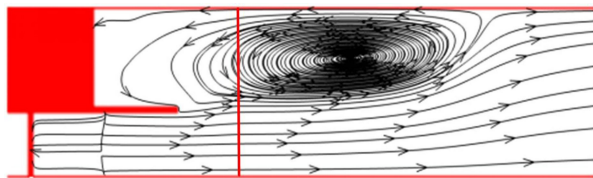


图 14 M32 数值模拟表层流线

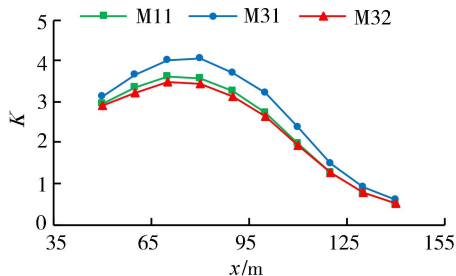


图 15 M11、M31、M32 流速不均匀系数沿程变化

上述结果表明,增大坎墩间距有效改善下游流态,显著减小回流区尺寸,提高流速均匀度。原因为:坎墩间距越大,坎前的回流区变大,使得水流越过底坎前所需能量较小,坎后的漩滚区变小。

3 结 论

a. 数值模拟流线图与物理模型流态图流态相近,泵站侧下游均存在大范围回流区。漩长、漩宽测量值与计算值,分别相差 5.08%、5.41%。数值模拟和物理模型结果在定量和定性上均较为吻合,表明采用数值模拟方法研究闸站合建枢纽下游整流是可行的,研究成果可为类似下游流态问题的改造,提供初步的设计依据。

b. 无整流措施情况下水闸单独运行时,由于水流过闸宽度缩窄,在闸下容易出现主流集中、偏斜以及主流的另外一侧河道内产生回流等不良水流流态。设置底坎后,漩长、漩宽减小,流速不均匀系数降低,表明底坎可以较好地改善回流和偏流问题,使单侧水流能够更快扩散到整个河宽断面。

c. 随着坎高和坎墩间距增大,漩长、漩宽和流速不均匀系数逐渐降低,整流效果提高,随着坎宽增大,上述水力特性均呈先降低后升高的规律,整流效果先提高而后出现减弱现象。各方案流速不均匀系数沿水流方向变化趋势相同,均是先增加后减小。由数值模拟可以看出,坎高是影响整流效果的主要因素,坎宽及坎墩间距是次要因素,且坎宽及坎墩间距对流态改善程度大致相同。

参考文献:

- [1] 严忠民,周春天,阎文立,等.平原闸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

Wenli, et al. Study on the layout of combined sluice-Pump station projects and modification of flow pattern[J]. Journal of Hohai University(Nature Sciences), 2000, 28 (2): 50-53. (in Chinese))

[2] 冯旭松. 泵站前池底坎整流及坎后流动分析[J]. 水利科技,1998(1):31-33. (FENG Xusong. Flow rectification and analysis of sill in the forebay of pump station[J]. Jiangsu Hydraulics,1998(1):31-33. (in Chinese))

[3] 周正富,陈松山,何钟宇. 侧向进水泵站流态改善措施的研究[J]. 中国农村水利水电,2014 (6): 120-124. (ZHOU Zhengfu, CHEN Songshan, HE Zhongning. Research on the improvement of side-inlet pumping station flow state[J]. China Rural Water and Hydropower,2014 (6):120-124. (in Chinese))

[4] 成立,刘超,周济人,等. 泵站前池底坎整流数值模拟研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(3):42-45. (CHENG Li, LIU Chao, ZHOU Jiren, et al. Numerical simulation of sill flows in the forebay of pumping station[J]. Journal of Hohai University(Nature Sciences),2001,29(3):42-45. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 王福军,唐学林,陈鑫,等. 泵站内部流动分析方法研究进展[J]. 水利学报,2018, 49 (1): 47-53. (WANG Fujun, TANG Xuelin, CHEN Xin, et al. A review on flow analysis method for pumping stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (1): 47-53. (in Chinese))

[7] HUANG Xibin, WANG Qing. Numerical models and

theoretical analysis of supercritical bend flow[J]. Water Science and Engineering, 2018,11(4): 338-343.

[8] RAHIMZADEH H, MAGHSOODI R, SARKARDEH H, et al. Simulating flow over circular spillways by using different turbulence models[J]. Engineering Application of Computational Fluid Mechanics,2012,6(1):100-109.

[9] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics,1981,39(1):201-225.

[10] 夏臣智,成立,赵国锋,等. 泵站前池单排方柱整流措施数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):53-58. (XIA Chenzhi, CHENG Li, ZHAO Guofeng, et al. Numerical simulation of flow pattern in forebay of pump station with single row of square columns[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (4):53-58. (in Chinese))

[11] 黑鹏飞. 丁坝回流区水流特性的实验研究[D]. 北京:清华大学,2009.

[12] 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))

[13] 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))

(收稿日期:2019-05-24 编辑:郑孝宇)

+++++

(上接第 36 页)

[18] 黄耀英,郑宏,向衍,等. 不确定性大坝地基几何尺寸智能识别初探[J]. 长江科学院院报,2013,30(6):76-79. (HUANG Yaoying, ZHENG Hong, XIANG Yan, et al. Preliminary discussion on intelligent identification of dam foundation's uncertain geometry size [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2013,30(6):76-79. (in Chinese))

[19] 顾冲时,吴中如. 坝体、坝基和库盘变模的整体反演分析[J]. 水力发电学报,1996, 15 (3): 43-48. (GU Chongshi, WU Zhongru. The convolutive analysis on deformation parameters of dam body and its foundation with whole reservoir bed [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,1996,15(3):43-48. (in Chinese))

[20] 赵斌,吴中如,沈振中,等. 应用 Hopfield 网络反演分层分区变形模量[J]. 水电能源科学,2000,18(3):4-6. (ZHAO Bin, WU Zhongru, SHEN Zhenzhong, et al. Inversion of divisional deformation modules with the Hopfield network[J]. Water Resources and Power,2000, 18(3):4-6. (in Chinese))

[21] 苏怀智,李季,吴中如. 大坝及岩基物理力学参数优化反演分析研究[J]. 水利学报,2007,10(增刊 1):129-134. (SU Huaizhi, LI Ji, WU Zhongru. Feedback analysis for mechanical parameters of dam and its foundation with optimization algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,10(Sup1):129-134. (in Chinese))

[22] 李季,孔庆梅. 高混凝土拱坝长期安全运行反馈分析[J]. 水利水电科技进展,2018,38(5):15-21. (LI Ji, KONG Qingmei. Feedback analysis of high concrete arch dams during long term safe operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (5):15-21. (in Chinese))

[23] FU Xiao, GU Chongshi, QIN Dong. Deformation features of a super-high arch dam structural system[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 130: 681-695.

(收稿日期:2018-07-11 编辑:郑孝宇)