

6-3-2020

Numerical Simulation on Hydraulic Characteristics of Free Hydraulic Jump on Corrugated Beds of Stilling Basin

Wenli Wei

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

Yunfei Hong

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

Yuling Liu

State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation on Hydraulic Characteristics of Free Hydraulic Jump on Corrugated Beds of Stilling Basin

Abstract

Abstract: The VOF (volume of fluid) method was applied to track the free water surface, and the RNG $k-\varepsilon$ turbulent model was used to close the two-phase flow time-averaged equations. The conditions properties of free hydraulic jumps on corrugated beds with a stilling basin under 9 kinds of conditions were studied by numerical simulation. *Simulation research results show: There are vortexes generated by corrugated beds surfaces, rotating in the clockwise direction. The pressure distribution on corrugated beds in hydraulic jump region appears a wavy change, and the difference between the pressure values at adjacent crest and trough gradually decreases along main flowing direction. With the same the gate opening and bottom roughness, the length of hydraulic jump and the efficiency rate of energy dissipation increase with Froude number increasing at the inlet section of the stilling pool with corrugated beds.*

Keywords

Corrugated bed, stilling basin, numerical simulation, energy dissipation rate

Recommended Citation

Wei Wenli, Hong Yunfei, Liu Yuling. Numerical Simulation on Hydraulic Characteristics of Free Hydraulic Jump on Corrugated Beds of Stilling Basin[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 918-925.

波浪形底板消力池自由水跃水力特性数值模拟

魏文礼, 洪云飞, 刘玉玲

(西安理工大学陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 西安 710048)

摘要: 采用 VOF (Volume of Fluid) 方法追踪自由液面, 辅以 RNG (重正化群) $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭两相流时均方程, 对 9 种工况波浪形底板消力池自由水跃的水力特性进行数值模拟。研究发现: 波浪形底板表面附近有漩涡产生, 沿顺时针方向旋转; 波浪形底板上压强呈波浪状分布, 相邻波峰和波谷的差值在水跃区沿程减小; 在闸孔开度和底板粗糙度相同时, 波浪形底板消力池的自由水跃长度和消能率随进口断面弗劳德数增加而增大。

关键词: 波浪形底板; 消力池; 数值模拟; 效能率

中图分类号: TP391.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 04-918-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704029

Numerical Simulation on Hydraulic Characteristics of Free Hydraulic Jump on Corrugated Beds of Stilling Basin

Wei Wenli, Hong Yunfei, Liu Yuling

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The VOF (volume of fluid) method was applied to track the free water surface, and the RNG $k-\varepsilon$ turbulent model was used to close the two-phase flow time-averaged equations. The conditions properties of free hydraulic jumps on corrugated beds with a stilling basin under 9 kinds of conditions were studied by numerical simulation. *Simulation research results show: There are vortexes generated by corrugated beds surfaces, rotating in the clockwise direction. The pressure distribution on corrugated beds in hydraulic jump region appears a wavy change, and the difference between the pressure values at adjacent crest and trough gradually decreases along main flowing direction. With the same the gate opening and bottom roughness, the length of hydraulic jump and the efficiency rate of energy dissipation increase with Froude number increasing at the inlet section of the stilling pool with corrugated beds.*

Keywords: Corrugated bed; stilling basin; numerical simulation; energy dissipation rate

引言

底流消能是水利工程中泄水建筑物下游的主要消能方式之一, 在各类泄水工程中得到广泛应

用。在底流消能中, 为了减少工程造价及提高消能效率, 应尽可能地缩短消力池的长度, 在池内设置辅助消能工以进一步加剧水流的紊动混掺作用, 例如把光滑底板改成波浪形底板。

Ead 等^[1-3]先后对波浪形消力池进行了大量的研究, 研究表明: 跃后水深减小了 20%~30%, 水跃的旋滚长度减小了 20%~50%。Carollo^[4]等研究了粗糙底板上水跃的水力特性, 他们得出结论: 粗糙底板能减小跃后水深和水跃长度, 而且水跃长度与弗



收稿日期: 2015-07-13 修回日期: 2015-10-13;
基金项目: 国家自然科学基金(51578452, 51178391),
陕西省科学研究计划(2014K15-03-05), 陕西省教育厅
重点实验室科学研究计划(15JS063);
作者简介: 魏文礼(1965-), 男, 陕西大荔, 博士,
教授, 研究方向为环境水力学、水污染控制理论与
技术。

<http://www.china-simulation.com>

劳德数和底板粗糙度有关。Pagliara 等^[5]研究了同一介质和不同介质的粗糙底板对跃后水深和水跃长度等水力参数的影响, 然后他们提出新的关系方法, 通过在常规水跃方程上添加校正系数, 来表示统一和不统一的粗糙底板上的水跃。Bejestan 和 Neisi^[6]研究了菱形粗糙底板对水跃的影响, 结果表明这种形状的底板跃后水深比光滑底板减少了 24%, 水跃长度减少了 40%。Abbaspour 等^[7]研究了波状床面粗糙高度为 0.015~0.035 m 的水跃特性, 结果表明: 跃后水深减小了 20%, 当弗劳德数 <6 时, 水跃长度比光滑床面减小了 50%, 当弗劳德数 >6 时, 水跃长度减小了 42%。程香菊等^[8]利用 $k-\varepsilon$ 紊流模型和体积率跟踪自由水面的方法, 模拟了波浪形底板上非恒定的水跃发展过程, 数值模拟结果包括自由表面位置、流速分布、漩滚长度以及水跃长度等。戴会超和王玲玲^[9]利用标准双方程紊流模型数值模拟了进口 Fr_1 为 8.19、淹没度为 0.24、闸下出流形成的淹没水跃。将数值模拟结果中的自由表面位置、平均流速、雷诺应力分量的分布与文献[10]所测的物理模型试验结果进行了对比, 表明该数学模型及数值方法能够较为准确的模拟淹没水跃的大尺度紊流结构及其微观结构。张春财等^[11]采用 VOF 方法处理闸门上、下游表面, 用二维 RNG 型 $k-\varepsilon$ 紊流数学模型, 对低佛氏数 ($Fr_1=2.0\sim 4.5$) 光滑地板水跃紊流进行数值模拟, 研究了不同低佛氏数水跃的跃后水深、水跃长度及流速分布, 分析了水跃区及其下游明渠流区压强、紊动能、耗散率和水跃消能率的特性。结果表明淹没系数大于 1.2 时, 水跃长度均大于其他经验公式计算的水跃长度, 且水跃长度随弗劳德数的增加而增大。张志昌等^[12]据已有文献对波浪形消力池流速、边界层厚度、壁面阻力的试验成果, 应用动量方程以及断面流速分布的对数律, 推导了波浪形底板消力池的壁面切应力、阻力系数、共轭水深、水跃长度等的计算公式。

到目前, 国内外对波浪形底板消力池的实验研究较多, 但对其进行数值模拟的研究文献却很少。本文根据实验资料, 建立波浪形底板消力池的二维

模型, 采用数值模拟方法, 进一步研究波浪形底板消力池自由水跃流场、速度场和底板压强等的分布规律, 以及不同工况波浪形底板消力池的消能率。数值模拟方法具有一定的优越性, 比如波浪底板上压强在实际试验中很难测量, 而数值模拟则可以很精确地实现这一点。

1 数学模型

1.1 湍流模型

改进的 RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型, 通过修正湍动粘度, 考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况, 提高了计算精度并可以正确处理近壁区域, 可以更好的处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 所以本文选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。其控制方程^[13]如下:

连续方程:

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

式中: ρ 为流体的密度; t 是时间; x_i 是沿 i ($i=1, 2, 3$) 方向的空间坐标, u_i 是沿 i 方向的时均速度分量。

动量方程:

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

式中: p 为压强; x_j 是沿 j 方向的空间坐标; μ 为流体的时均粘度; u_j 是沿 j 方向的时均速度分量; $\overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力; g_i 为 i 方向的重力加速度。

雷诺应力方程:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: k 为湍动动能; μ_t 为紊动黏度; δ_{ij} 是 Kronecker 函数: $\delta_{ij} = 1 (i = j)$, $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$ 。

它的紊流动能 k 和紊流动能耗散率 ε 的运输方程分别为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_m \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: $\mu_m = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \eta(1 - \eta / \eta_0) / (1 + \beta\eta^3)$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} k / \varepsilon$, $E_{ij} = 1/2(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$; u_i 为时均速度, G_k 为由于平均速度梯度引起的紊动能 k 的产生项, μ 为时均粘度, μ_t 为紊动粘度, μ_m 是混合粘度, E_{ij} 为时均应变率, α_k , α_ε , $C_{1\varepsilon}^*$, C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, η_0 , β 都为经验常数。

以上方程组构成了求解流场分布规律的封闭方程组, 根据实际工况施加相应的边界条件后, 构成该方程组的定解问题。

1.2 VOF 方法

VOF 方法^[14]是一种处理自由表面的有效方法。其基本思路是通过研究网格单元中流体和网格体积比函数 $F_w(x_i, t)$ 来确定自由面($i=1, 2, 3$), 追踪流体的变化而非追踪自由液面上质点的运动:

$F_w(x_i, t) = 1$, 则表示该单元被液体充满; 当 $F_w(x_i, t) = 0$, 则表示它是一个空单元; 若 $F_w(x_i, t) \in (0, 1)$, 则表示该单元部分充满液体。

描述 F_w 的控制方程为:

$$\frac{\partial F_w}{\partial t} + \frac{\partial(u_i F_w)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

引入 VOF 后, ρ 、 μ 是 $F_w(x_i, t)$ 的函数, 其表示式为:

$$\rho = F_w \rho_w + (1 - F_w) \rho_a \quad (7)$$

$$\mu = F_w \mu_w + (1 - F_w) \mu_a \quad (8)$$

式中: ρ_w 和 ρ_a 分别为水和空气的密度, μ_w 和 μ_a 分别为水和空气的分子黏性系数。

将上述方程(6)、(7)和(8)与紊流数学模型基本方程(1)至(5)联立求解, 就可得到相应各未知变量, 如压力、流速、紊动能、耗散率以及水体体积率函数等的分布。

2 模型计算区域和网格划分

波浪形底板消力池上自由水跃的纵断面如图 1 所示, 波浪形底板上波峰的位置与闸门上游底板处于同一水平面上。其中 h_1 和 h_2 分别为跃前和跃后断面水深; b_0 为闸孔开度, L_r 为水跃滚浪长度, L_j 为水跃长度, 即跃首至跃后断面之间的水平距离, 该区域为水跃区, 水跃区后面是明渠流区; s 为波长; k_s 为粗糙高度; v_1 和 v_2 分别为跃前和跃后断面平均流速; F 为床面摩阻力; U_m 为断面最大流速; δ 为边界层厚度。

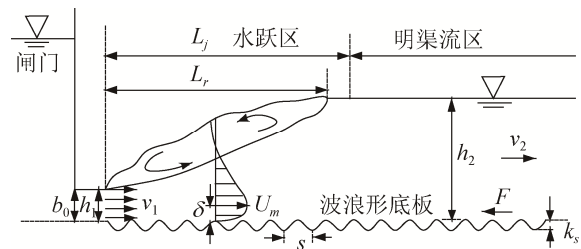


图 1 波浪形底板上水跃示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water jump on wavy-bottom plate

参考文献[2]的实验资料, 经过适当的简化, 建立波浪形底板消力池的二维模型, 计算区域长 2.5 m, 高 0.4 m。采用 Gambit 软件建模和进行网格划分。对于水跃流场, 由于流场速度高、变化快, 同时也由于描述自由表面的需要, 计算中整体网格的划分采用结构化网格。在波浪形底板附近, 为提高计算精度, 网格适度加密处理, 计算区域的部分网格如图 2 所示。

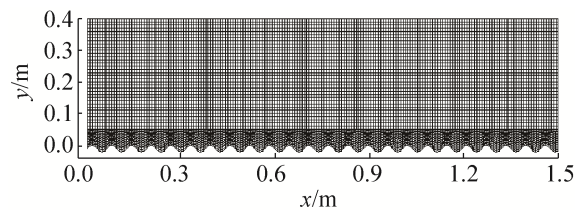


图 2 计算区域的部分网格图

Fig. 2 Partial grids of the computational region

3 模拟工况及参数

本文模拟了 9 种不同工况的波浪形底板消力池。A~E 工况其他条件相同, 仅 v_1 不同; F, G,

H, I 比前面工况 b_0 增大两倍, H, I 工况 k_s 比其他工况增大。模型底板的两种波浪曲线由正弦函数 $y=0.65\sin x$ 和 $y=1.1\sin x$ 控制, 各工况的相关参数如表 1 所示, 其中 F_{r1} 表示进口断面的弗劳德数。

表 1 9 种工况的设定参数
Tab. 1 Parameters of 9 cases

工况	s/cm	k_s/cm	b_0/cm	$v_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	F_{r1}	h_2/cm
A	6.8	1.3	2.54	2.00	4.0	10.4
B	6.8	1.3	2.54	3.00	6.0	14.5
C	6.8	1.3	2.54	3.49	7.0	18.8
D	6.8	1.3	2.54	3.99	8.0	20.0
E	6.8	1.3	2.54	4.99	10.0	26.3
F	6.8	1.3	5.08	2.82	4.0	21.0
G	6.8	1.3	5.08	4.07	5.8	31.0
H	6.8	2.2	5.08	2.82	4.0	21.0
I	6.8	2.2	5.08	4.07	5.8	31.0

4 边界条件和求解方法

进口边界给定速度值; 出口边界采用压力出口, 并认为出口处紊流达到相对平衡, 速度梯度为零; 顶面与空气接触, 采用压力进口; 并设定压力进口和压力出口处的相对压强均为 0。闸门、边壁和波浪形底板为固体壁面, 使用标准壁面函数法确定。

自由水面的追踪采用 VOF 方法, 用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭时均流方程, 控制方程的离散采用有限体积法, 速度与压力耦合求解时使用了压力隐式算子分裂 PISO(Pressure-Implicit with Splitting of Operators)算法。PISO 算法是为瞬态问题所建立的, 是一种无迭代的瞬时计算程序。紊动能、耗散率、动能均采用 Quick 离散格式。全场采用非恒定流过程进行计算, 直到进出口流量差值小于 3%, 认为计算达到收敛。

5 结果分析和讨论

5.1 模型验证

取 A、C、G 三个工况模拟计算的水面线与相应实测的水面线进行比较, 结果如图 3 所示。从图中看出, 模拟的水面线与实测的水面变化趋势和形状基本一致, 只有 C 工况在水跃末端模拟计算的水面

线比实测值略高, 这可能是由于实验过程中水面波动引起的测量误差造成的。从整体比较看, 模拟计算与实验结果吻合较好, 证明了数值模拟的可靠性。

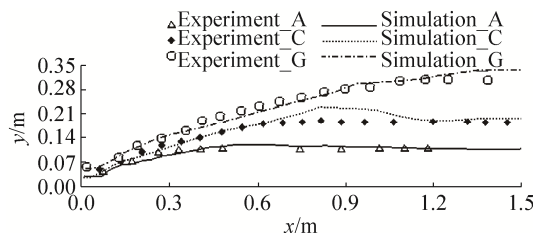


图 3 模拟水面线与实测值的比较

Fig. 3 Comparison of water surfaces between the simulated and measured

5.2 流线分布

部分工况的流线图如下图 4 所示。从流线图看出, 高速水流从闸孔流出后, 水流由急流状态过度到缓流状态, 形成水跃, 在水跃区水深沿水流方向逐渐增大, 最后到明渠流区水深几乎不变, 不再变化的水深就是跃后水深。在水跃区的上部有一个作剧烈回旋运动的表面漩滚, 在漩滚之下则是急剧扩散的主流。漩滚与主流间质量不断交换, 表面漩滚大量掺气, 致使水跃段内有较大的能量损失, 这是消力池消能的主体部分。比较 A、C、E 三个工况可以看出, 在闸孔开度和底板粗糙度相同时, 水跃长度随 F_{r1} 的增大而增长; 比较 F、H 两个工况, 此时闸孔开度, 进口流速和 F_{r1} 都相同, H 工况的底板粗糙度是 F 的两倍, 结果 H 工况的水跃长度明显比 F 短。由此可以看出在相同条件下, 增加底板粗糙度, 能有效的减小水跃长度。

另外, 此次研究还发现, 波浪形底板壁面附近一些地方产生有小的漩涡。从 A、C、E、F、H 各工况的流线图中都可以看到: 流线图中在底板表面附近流线密度较大的地方就是漩涡区, 且漩涡大小沿程不一。我们继续研究了底板表面附近漩涡的发展规律, 研究结果发现: 波浪形底板消力池中, 从水跃区开始, 底板表面形成小的漩涡, 漩涡沿顺时针方向旋转, 漩涡大小随着水跃的发展逐渐增大, 到水跃末尾处达到最大, 然后在明渠流区沿水流方向逐渐减小, 直至消失。以 H 工况为例, 局部漩

涡放大后如图5所示,其他各工况类似。底板附近的漩涡使得流场紊动能和耗散率增大,这也是波浪形底板消能率比光滑底板消能率提高的一个原因。

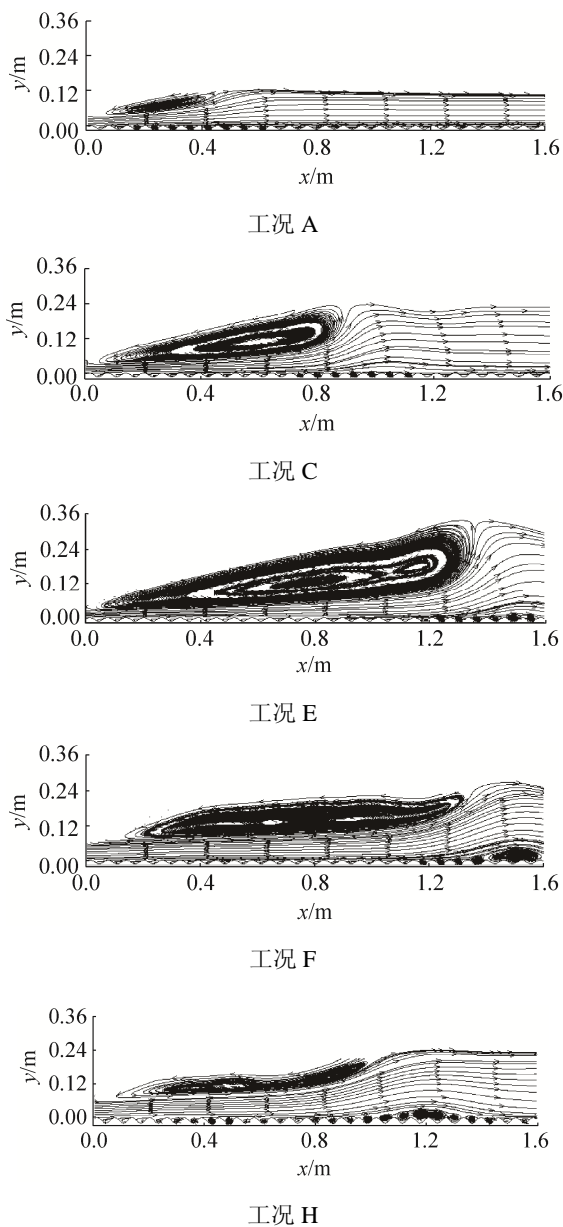


图4 5种工况水跃的流线分布图

Fig. 4 Streamline distributions of hydraulic jump under 5 cases

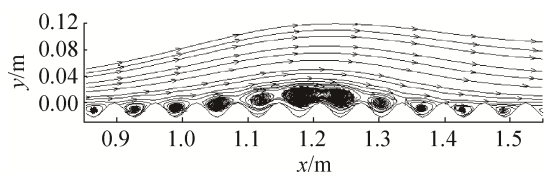


图5 H工况底板表面漩涡局部放大图

Fig. 5 Local enlarged image of the vortex near the bottom under H case

根据湍流形成理论^[15],分析底板漩涡产生的原因:由于液体的粘滞性和边界面的滞水作用,液流过水断面上的流速分布总是不均匀的。因此相邻各流层之间的流体质点就有相对运动发生,使个流层之间产生内摩擦切应力。对于底板附近的流层,流层上面的流速较大,加于它的切应力方向是顺流方向的,流层下面液体流速较小,加于它的切应力是逆流方向的。因此该流层所承受的切应力,就有构成力矩,使流层发生顺时方向旋转的倾向。由上文对流线分布的分析可知,水跃区表面漩滚之下是急剧扩散的主流,流线间距逐渐变大。根据伯努利方程,对底板表面附近指定的流层某一处:前面流线间距小的地方流速大,压强小,后面流线间距大的地方流速减小,压强就增大,因此对该处液体前后形成压力差。当压力差达到一定程度,底板附近水流在横向压力差和纵向切应力的综合作用下,就形成了漩涡,漩涡的旋转方向是顺时针的。水跃区流线间距扩散到水跃末端处达到最大,然后以明渠流流动,流线间距几乎不变,压差消失,故漩涡在水跃末端处达到最大,然后沿程逐渐减小直至消失。

5.3 横断面流速矢量分布

图6显示工况E横断面垂直线上的流速矢量分布。从矢量图看出,水跃区各横断面上的流速,从底板开始逐渐增大到最大值 U_m ,然后逐渐减小到零,再往上部流速变为负值,负值是因为水跃区域上部分有回流的缘故。各横断面从底板到流速最大值 U_m 的距离定义为边界层 δ 厚度。从图6中可以看出,水跃区各断面最大流速到底板的距离逐渐增大,即边界层 δ 厚度沿程逐渐增大,到达 $x=1.4\text{m}$ 左右时, δ 达到最大。另外在水跃区,各横断面上最大流速沿程递减,各横断面上流速梯度沿程越来越小;到水跃后部的明渠流部分,横断面上流速规律分布改变:从底板开始缓慢增大,到水面附近达到最大值,断面流速分布梯度不大,流速分布沿程不再变化,且没有负值。

图7显示工况E各横断面平均流速沿程分布。对比图7与图4中的工况E可知,波浪形底板自

由水跃横断面平均流速在水跃区沿程减小, 在水跃末端处达到最小值, 然后在明渠区沿程几乎不变。

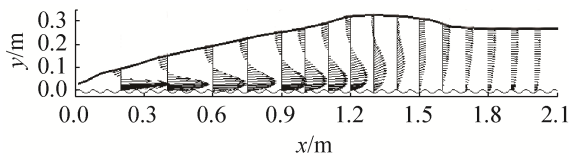


图 6 E 工况横断面流速矢量图

Fig. 6 Velocity vectors on cross-sections of E case

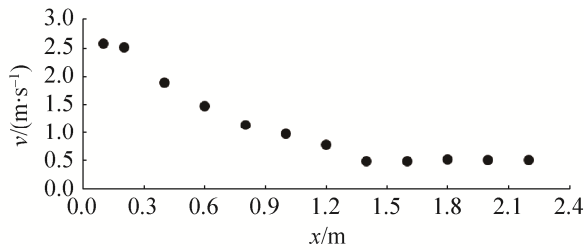


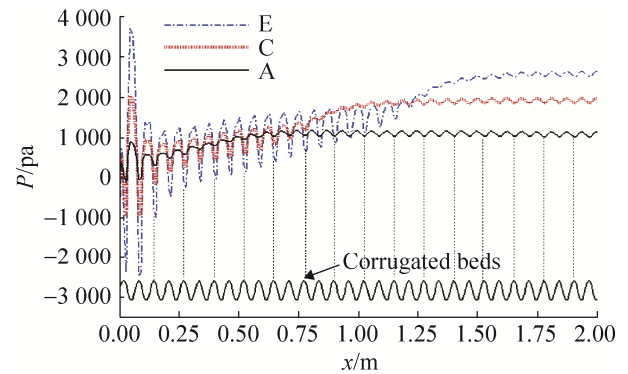
图 7 E 工况不同位置横断面平均流速分布

Fig. 7 Distribution of the average velocity over cross-sections of E case

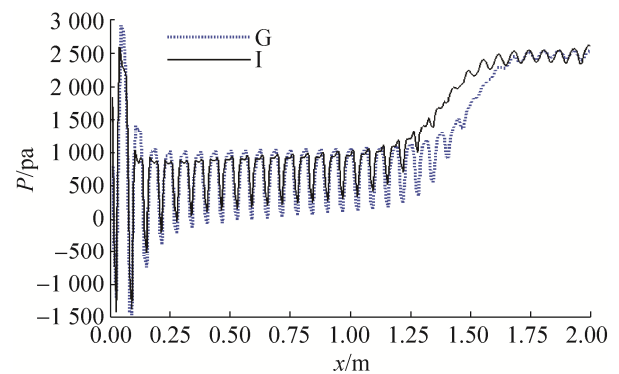
5.4 压强分布

本次模拟实验还研究了波浪形底板上压强的分布规律, 部分工况底板上的压强分布如图 8 所示。分析图 8 中(a)图可以看到: (1) 波浪形底板上压强成波浪形分布, 且压强分布波的波长与底板波长相同; (2) 各工况底板上的压强分布波相邻波峰与波谷的差值在闸门附近最大, 然后在水跃区沿程逐渐减小, 到明渠流区基本不变; 各工况底板上压强对空间(x 坐标)的平均值在水跃区整体趋势沿水流方向逐渐增大, 到明渠流区接近一个定值。(3) 比较(a)图中压强分布波和底板波浪形状发现, 波浪底板相邻波峰与波谷上压强值在底板波峰处达到最小, 在底板波谷处达到最大, 即压强分布波的变化与底板波状的变化趋势正好相反。(4) 比较 A、C、E 三个工况可知, 其他条件相同时, 进口断面平均流速越大, 底板上水跃区距离闸孔相同距离处, 压强分布波相邻波峰与波谷的差值越大。例如 E 工况在闸门附近压强分布波波峰与波谷的差值达到 6000 pa, C 工况在闸门附近压强分布波波峰与波谷的差值是 3000 pa, 而此时 A 工况压强分布

波波峰与波谷的差值只有 900 pa, 压强分布波相邻波峰与波谷的差值越大对底板的破坏也越大, 这是工程建设中需要考虑的一个因素。(5) 从(a)图中还可以看出, C 和 E 工况波浪底板上的压强, 在闸门附近形成较大的负压: E 工况最大负压值达到 -2500 pa, 负压值范围达到 $x=0.35$ m 左右; C 工况最大负压值达到 -1000 pa, 负压值范围达到 $x=0.15$ m 左右。即流速越大, 波浪底板上负压值越大, 负压范围也越大。消力池底板上较大的负压会造成气蚀, 破坏床面。这一现象可指导实际工程建设, 施工中应对闸门附近的底板做加固处理, 减小气蚀破坏。



(a) A、C 和 E 工况



(b) G、I 工况

图 8 不同工况波浪底板上压强沿流程分布规律
Fig. 8 Distribution of pressure on wavy-bottom along the flowing direction under different cases

图 8 中的(b)图比较的是 G、I 两个工况压强分布, 这两个工况的底板粗糙度不同, I 底板的粗糙度比 G 大, 其他水力要素都相同, 从(b)图看出 G、

I 工况压强分布波的变化趋势基本相同, 压强分布波的分布规律与上文分析结果相符合。但是在水跃区同一位置上 I 工况底板压强分布波相邻波峰和波谷差值比 G 工况略小, 即底板粗糙度增大, 底板上的压强分布波相邻波峰和波谷差值反而减小。

5.5 各工况的消能率

水跃理论消能率 η 可用下式计算^[13]:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \cdot 100\% \quad E_i = z_{ib} + \frac{v_i^2}{2g} + h_i \quad (9)$$

上式中 E_i 为断面单位水体的平均能量; $i=1, 2$, 分别表示跃前及跃后断面; z_{ib} 、 v_i 、 h_i 分别为断面渠底高程、断面平均流速和断面平均水深。

实际效能率 η^* 还需考虑跃前及跃后断面紊动能 k , 可用下式计算:

$$\eta^* = \frac{E_1^* - E_2^*}{E_1^*} \cdot 100\%, E_i^* = z_{ib} + \frac{v_i^2}{2g} + h_i + h_{ik} \quad (10)$$

$$h_{ik} = k / g \quad k = \sum_{j=1}^n k_j \rho_j q_j / \sum_{j=1}^n \rho_j q_j \quad (11)$$

式中: E_i^* 为考虑紊动能后单位水体的平均能量; h_{ik} 为断面平均紊动能水头; k 为断面平均紊动能; k_j 为断面上质点紊动能; ρ_j 为各质点水的密度; q_j 为各质点对应的单宽净流量。

根据上面公式, 可计算各工况的效能率, 结果如表 2 所示。比较 A、B、C、D、E 五种工况的消能率可知, 当闸孔开度和底板粗糙度相同时, 效能率随 F_{r1} 的增大而增加; 再分别比较 F 和 G、以及 H 和 I 的效能率, 此次闸孔开度增大, 结果表明当闸孔开度和底板粗糙度相同时, 消能率也随 F_{r1} 的增大而变大; 而且各工况的效能率基本超过了 50%, 说明波浪底板的消能力已经很高。再分别比较 F 和 H、以及 G 和 I 的效能率, 此时进口流速和底板闸孔开度相同, 但波浪底板粗糙度不同, 数据显示, 底板粗糙度增大, 效能率几乎不变, 可以认为波浪形底板上底板粗糙度改变时, 对效能率影响不大。

比较理论效能率和实际效能率, 结果表明考虑紊动能的实际效能率比理论值偏小, 因此工程建设中需考虑理论消能率值偏大对设计消能设施时的影响。

表 2 各工况的效能率

工况	A	B	C	D	E	F	G	H	I
F_{r1}	4.0	6.0	7.0	8.0	10.0	4.0	5.8	4.0	5.8
η	52.5	67.8	69.1	74.5	78.5	48.8	61.6	48.4	60.6
η^*	52.3	67.5	68.9	74.2	78.2	47.7	59.2	47.2	57.3

6 结论

本文采用 VOF 方法追踪自由水面, 用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭两相流时均方程, 数值模拟了 9 种工况波浪形底板消力池的自由水跃, 通过比较, 模拟结果与实验值吻合较好, 证明了数值模拟方法的正确性。

文中模拟并分析了自由水跃流速场和底板压力场的分布规律, 计算了各工况的效能率, 研究发现: (1) 波浪形底板表面附近部分区域有漩涡产生, 漩涡沿顺时针方向旋转。漩涡从水跃区开始形成, 到水跃末尾达到最大, 然后逐渐消失。(2) 水跃区: 横断面上的流速从零逐渐增长到最大值, 然后开始减小到 0, 再往上部流速变为负值; 断面平均流速沿程减小, 到水跃末端处达到最小值; 边界层厚度逐渐增大, 到水跃末端处达到最大值。在明渠流区: 横断面流速分布沿程不变。(3) 波浪形底板上压强的分布呈波浪形变化, 相邻波峰和波谷的差值在水跃区沿程减小, 到明渠流区接近相等; 而且闸门附近的底板上存在较大的负压。进口断面平均流速不同, 负压最大值和负压区范围也不同, 这一现象可以为实际工程施工提供指导。压强分布波的变化与底板波状的变化趋势正好相反。另外模拟结果表明底板粗糙度增大, 底板相同位置上的压强分布波相邻波峰和波谷差值反而减小。(4) 波浪形底板消力池的效能率比较高, η 基本上超过 50%; 当闸孔开度和底板粗糙度相同时, 效能率随 F_{r1} 的增大而增加; 而且理论消能率比实际效能率偏, 从而工程建设中需考虑理论消能率值偏大对设计消能设施时的影响。

参考文献:

- [1] Ead S A, Rajaratnam N, Katopodis C. Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts [J]. Journal of Hydraulic Engineering (S0733-9429), 2000, 126(10): 750-757.

- [2] Ead S A, Rajaratnam N. Hydraulic jumps on corrugated beds [J]. Journal of Hydraulic Engineering (S0733-9429), 2002, 128(7): 656-663.
- [3] Ead S A, Rajaratnam N. Plane turbulent wall jets on rough boundaries with limited tailwater [J]. Journal of Engineering Mechanics (S0733-9399), 2004, 130(10): 1245-1250.
- [4] Carollo F G, Ferro V, Pampalone V. Hydraulic jumps on rough beds [J]. Journal of Hydraulic Engineering (S0733-9429), 2007, 133(9): 989-999.
- [5] Pagliara S, Lotti I, Palermo M. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures [J]. Journal of Hydro-environment Research (S1570-6443), 2008, 2(1): 29-38.
- [6] Bejestan M S, Neisi K. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin [J]. Asian Journal of Applied Sciences (S1996-3343), 2009, 2(5): 436-445.
- [7] Abbaspour A, Dalir H A, Farsadzadeh D, et al. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics [J]. Journal of Hydro-environment Research (S1570-6443), 2009, 3(2): 109-117.
- [8] 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. (Cheng Xiangju, Chen Yongcan. Numerical simulation of hydraulic jumps on corrugated beds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1252-1257.)
- [9] 戴会超, 王玲玲. 淹没水跃的数值模拟 [J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 184-188. (Dai Huichao, Wang Lingling. Refined simulation of submerged jump [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 184-188.)
- [10] Long D, Steffler PM, Rajaratnam N. LDA study of flow structure in submerged hydraulic jumps [J]. J Hydraulic Research (S0022-1686), IAHR, 1990, 28(4): 437-460.
- [11] 张春财, 杜宇. 低佛氏数水跃紊流数值模拟研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 227-234. (Zhang Chuncai, Du Yu. Numerical simulation study on turbulence of hydraulic jump with low Froude number [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(1): 227-234.)
- [12] 张志昌, 傅铭焕, 赵莹, 等. 波浪形底板消力池自由水跃特性的探讨 [J]. 应用力学学报. 2013, 30(6): 870-875. (Zhang Zhichang, Fu Minghuan, Zhao Ying, et al. Study on properties of free hydraulic jump on corrugated beds of stilling basin [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(6): 870-875.)
- [13] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006: 75-77. (Wei Wenli, Dai Huichao. Turbulence model theory and engineering applications [M]. Xi'an, China: Shannxi Science and Technology Press, 2006: 75-77.)
- [14] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics (S0021-9991), 1981, 39(1): 201-225.
- [15] 吴持恭. 水力学 [M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 127-131. (Wu Chigong. Hydraulics [M]. 4th Edition. Beijing, China: Higher Education Press, 2008: 127-131.)

(上接第 917 页)

- [8] Bosse T, Mogles N M. Studying Aviation Incidents by Agent-based Simulation and Analysis - A Case Study on a Runway Incursion Incident [C]//Proc. of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Setubal, Portugal: SciTepress, 2013: 47-57.
- [9] T Bosse, Z A Memon, J Treur. A Recursive BDI Agent Model for Theory of Mind and its Applications [J]. Applied Artificial Intelligence (S0883-9514), 2011, 25(1): 1-44.
- [10] 罗军, 林雪宁. 基于模糊集和改进 TOPSIS 方法的跑道侵入风险评估 [J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(12): 16-22. (Luo Jun, Lin Xuening. Runway Incursion Risk Assessment Based on Fuzzy Sets Theory and Improved TOPSIS Model [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(12): 16-22.)
- [11] 霍志勤, 韩松臣. 跑道侵入的威胁与差错分析及控制研究 [J]. 安全与环境学报, 2012, 12(4): 192-197. (Huo Zhiqin, Han Songchen. Analysis on the Threats and Errors Caused by the Runway Incursions and the Corresponding Controlling Ways [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(4): 192-197.)
- [12] 许桂梅, 黄圣国. 基于人因可靠性的跑道侵入风险定量分析研究 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(19): 4715-4720. (Xu Guimei, Huang Shengguo. Runway Incursion Risk Assessment Model Based on HRA [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(19): 4715-4720.)
- [13] 高扬, 雒旭峰. 基于 Bowtie 模型的机场安全风险分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(5): 83-88. (Gao Yang, Luo Xufeng. Research on Risk of Airport Based on Bowtie Model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(5): 83-88.)
- [14] Manzano M. Extensions of First Order Logic [M]. UK: Cambridge University Press, 1996.
- [15] Alexei Sharpanskykh, Sybert H Stroeve. An agent-based approach for structured modeling, analysis and improvement of safety culture [J]. Computational and Mathematical Organization Theory (S1381-298X), 2011, 17(1): 77-117.

<http://www.china-simulation.com>