

浅尾水深水平底板上表面射流水力特性的数值模拟研究

郑艳^{1,2}, 魏文礼¹, 洪云飞¹, 刘玉玲¹

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘要: 采用 VOF (volume of fluid) 方法追踪自由液面, 辅以 Realizable (可实现化) 湍流模型封闭两相流时均方程, 对浅尾水深水平底板上的表面射流水力特性进行了数值模拟。微分方程的离散采用有限体积法, 速度与压力耦合求解使用了压力隐式算子分裂 PISO (Pressure - Implicit with Splitting of Operators) 算法。研究并分析了入射速度、尾水深和进口宽度等对流场流线分布、速度场及横断面最大流速沿程衰减规律等水力特性的影响。研究发现: 流场内存在一个大的漩涡, 入射流速越大, 漩涡长度越长; 横断面上水平流速和纵向流速在漩涡区和明渠流区分布规律不同; 横断面最大流速沿程衰减主要受进口流速大小的影响。

关键词: 水平底板; 浅尾水深; 壁面射流; 湍流; 数值模拟

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0147-05

Numerical simulation of hydraulic characteristics of surface jet on horizontal base plate with shallow depth

ZHENG Yan^{1,2}, WEI Wenli¹, HONG Yunfei¹, LIU Yuling¹

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

2. Zhejiang Design Institute of Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: The VOF (volume of fluid) method was applied to track free water surface, and the Realizable turbulent model was used to close the two-phase flow time-averaged equation to numerically simulate the hydraulic characteristics of surface jet on horizontal base plate with shallow depth. The finite volume method was used to discretize the differential equation, and the coupling velocity and pressure equations were solved with the pressure-implicit method of splitting operators (PISO) algorithm. The influence of inlet velocity, depth of shallow tail and width of nozzle on the characteristics of streamline distribution, velocity field and the variation of the maximum velocity on a cross-section along the flowing direction was studied and analyzed. The result showed that a big vortex exists in the flow field, and the greater the inlet flow velocity, the longer the length of vortex. The distribution laws of horizontal velocity and longitudinal velocity of a cross section are different in the backflow region and open channel flow region. The gradient decaying of the maximum velocity on cross-section was mainly affected by the inlet velocity.

Key words: horizontal base bed; shallow depth; wall jet; turbulent flow; numerical simulation

1 研究背景

射流一般指的是一股流体从排放口或喷口以较高的流速进入环境流体, 并同环境流体发生强烈混

合的流动状态。射流的基本特征是由于射流和周围流体之间存在速度差而形成卷吸和掺混, 使射流断面不断扩大, 射流轴线流速沿程减小, 浓度或温度降低。射流在水利、环保、航空、化工、机械等诸多领域

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2015-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578452、51178391); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101)

作者简介: 郑艳(1989-), 女, 浙江杭州人, 硕士, 主要从事水力学、水污染控制理论与技术研究。

都有应用,从20世纪90年代开始射流研究成为流体力学和环境水力学的重要研究对象。Ead等^[1-3]采用试验研究和理论分析的方法研究了光滑底板和粗糙底板上的壁面射流及表面射流的水力特性,包括壁面射流的发展和流速沿程衰减规律等,以及水面附近漩涡的长度和闸门附近的水位下降值。Cavvar等^[4]采用LES(大涡)模型模拟了横流中射流,试验中雷诺数 $Re = 2\ 400$ 、流速与射流直径的比值 $v/R = 3.3$,模拟结果与用PIV技术实测值吻合较好,表明LES模型可以准确地预测用PIV技术捕捉到的水力参数。Shabayek^[5]用试验方法研究了有限尾水深的壁面射流,主要研究了不同尾水深与喷口宽度比 y_t/b_0 ($5.3 \sim 20.0$)对壁面射流特性的影响。Ryu等^[6]利用PIV技术对波浪环境下水平射流沿喷口轴线的速度衰减及射流扩展率进行了研究。

张明亮等^[7]在水垫塘试验模型淹没射流中,应用PIV技术对模型单股淹没射流流场进行了测量,得到流场的流态及等流函数线、涡量、湍动能等特征参数。姜国强等^[8-9]采用PIV技术测量了有限宽度窄缝射流从底部射入横流的流场结构,然后采用湍流数学模型及相应的混合有限分析方法,得到横流中有限宽窄缝射流的时均及瞬态流场、涡量场,并对动水环境中多种喷口长度和流速比情况下的有限宽窄缝湍射流近区流场进行测试,结果表明射流势流核长度随着流速比的增加而增大,且逐渐趋近于平面自由湍射流的势流核长度。张燕等^[10]采用LIF和PIV技术对横流冲击射流尾迹涡结构进行了试验研究,试验结果得到两种明显的尾迹涡结构,即射流尾迹涡和横流尾迹涡,表明横流冲击射流中形成的主要尾迹涡结构主要依赖于流速比。周丰等^[11]使用PIV技术对有限水深规则波浪环境下圆形垂直射流进行了试验研究,应用相位分析法从测量结果中分离出时间平均的速度值,结果表明波周期对射流的流场特性有显著影响。卢艳娜等^[12]通过物理模型试验的方法详细分析了斜向淹没冲击射流形状(射流长度与宽度之比)对水垫塘底板的冲击动压分布特性影响。王月等^[13]采用模型试验的方法在1:400水工模型上,研究了射流水股间横向间距对水垫塘水力特性的影响。研究结果表明:随着窄长射流横向间距的减小,射流相互干扰掺混,冲击动压的压力峰形态由多峰合并为单峰,冲击动压值增大;冲击动压值随上游水深的增加而增大,随下游水深的增加而减小。综上可知,关于射流的试验报道较多,但对壁面射流进行数值模拟的研究较少。

为此,本研究对5种工况浅尾水深水平底板上的壁面射流进行了数值模拟,采用Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型封闭两相流时均方程,用VOF方法追踪自由水面,研究并分析了壁面射流的速度场、最大流速沿程衰减及底板切应力等水力特性与进口流速和尾水深的关系,以期增加对壁面射流行为的认识,并为壁面射流理论的发展提供参考。

2 数学模型

2.1 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型

Realizable $k - \varepsilon$ 模型满足对雷诺应力的约束条件,因此可以在雷诺应力上保持与真实湍流的一致,这一点是标准 $k - \varepsilon$ 模型和RNG $k - \varepsilon$ 模型都无法做到的。基于上述特点,在计算中可以更精确地模拟平面和圆形射流的扩散速度,同时在旋转流计算、带方向压强梯度的边界层计算和分离流计算问题中,使计算结果更符合真实情况。所以本研究选择Realizable $k - \varepsilon$ 模型进行计算,其控制方程^[14]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 为时间; x_i 为沿 i ($i = 1, 2, 3$) 方向的空间坐标; u_i 为沿 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:

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

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

紊动能 k 和耗散率 ε 的运输方程分别为:

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

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

式中: $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$, $C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right)$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon}$, $A_0 = 4.0$, $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$, $\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W)$,

$$W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ki}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}}, E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$
$$U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

式中: v 为平均速度; E_{ij} 为时均应变率; G_k 为由于平均速度梯度引起的紊动能 k 的产生项; $\tilde{\Omega}_{ij}$ 为时均转动速率张量; ω_k 为紊动能 k 的角速度, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_2, C_1, \eta, C_\mu, A_0, A_s, \phi, W, U^*$ 都是经验常数。

以上方程组构成了求解时均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。

2.2 VOF 方法

VOF 方法是一种处理复杂自由表面的有效方法^[15], 其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。当 $F_w(x_i, t) = 1$, 表示该单元被液体充满; $F_w(x_i, t) = 0$, 则表示其是 1 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:

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

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

$$\rho = F_w \rho_w + (1 - F_w) \rho_a \tag{7}$$
$$\mu = F_w \mu_w + (1 - F_w) \mu_a \tag{8}$$

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紊动黏度。

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。

3 计算区域与试验参数

水平底板上表面射流的示意图如图 1 所示。图中的 b_0 为进口高度; Z_0 为进水口下沿离地板的高程; L_e 为漩涡长度; v_1 为进口横断面的平均流速; v_2 为射流发展到整个水深时横断面的平均流速; y_t 为尾水深。

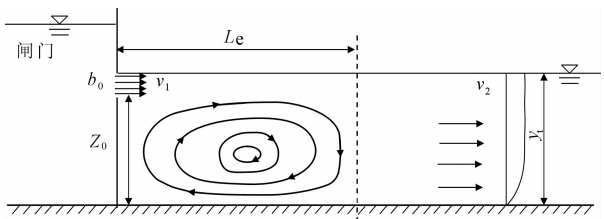


图 1 水平底板上表面射流示意图

模型试验在长 7.6 m、宽 0.446 m、高 0.6 m 的矩形水槽中进行, 用两个泵供水提供所需的位置水头, 流量用磁流量计来测定。进口设置在水面处, 进口上沿与水面齐平, 在进口上、下沿安装有流线型的装置, 使得水槽中产生统一的射流, 水槽末尾有个闸门用以控制水槽尾水深。经过适当的简化, 建立水平底板上表面射流的二维模型如图 2 所示。

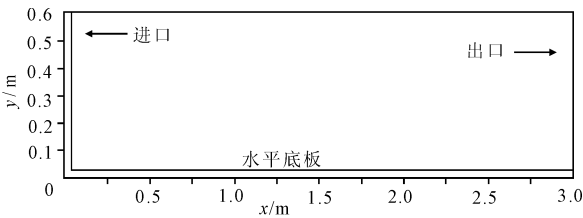


图 2 表面射流的二维计算区域

本研究模拟计算了 A、B、C、D、E 5 种不同工况的表面射流, 综合考虑进口高度、进口断面平均流速和尾水深 3 个因素对表面射流水力特性的影响, 各工况的相关参数如表 1 所示。

表 1 5 种工况表面射流的设定参数					
工况	$b_0 /$ cm	$Z_0 /$ cm	$u_0 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Fr_0	$y_t /$ cm
A	1.0	50	0.75	2.4	51
B	1.0	50	1.50	4.8	51
C	1.0	50	2.25	7.2	51
D	1.0	30	1.50	4.8	31
E	2.0	50	2.25	5.1	52

4 网格划分

采用 GAMBIT 软件建模和进行网格划分。对于射流流场, 由于流场速度大、变化快, 为了提高计算精度, 同时也由于描述自由水面的需要, 整体采用结构化网格进行划分, 且水面附近适度加密。垂直方向网格最小高度为 2 mm, 水平方向网格长度等于 1 cm。以工况 A 为例, 为清楚显示网格图, 在采用相同网格划分方式的前提下, 将网格尺寸较实际计算尺寸放大一倍, 如图 3 所示, 其他各工况网格划分方式相同。

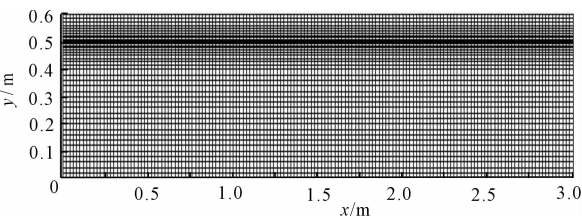


图3 二维计算区域的网格图

5 边界条件与求解方法

进口边界给定速度值,进口的紊动能 k 和耗散率 ε 的初始值由经验公式 $k = 0.0014v_1^2$ 和 $\varepsilon = 2.2 \times 10^{-5} v_1^3/h_1$ 计算。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 0;顶面与空气接触,采用压力进口。工作压强为 101 325 Pa,压力边界的相对压强为 0。闸门和底板等为固体壁面,使用标准壁面函数法确定。

自由水面的追踪采用 VOF 方法,采用 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型封闭时均流方程,用有限体积法控制方程的离散,速度与压力耦合求解时使用压力隐式算子分裂 PISO 算法。紊动能、耗散率、动量方程和连续方程均采用 Quick 离散格式。全场采用非恒定流过程进行计算,时间步长 $t = 0.0001$ s,各工况直到进出口流量差值小于 1% 时,认为计算收敛。

6 结果分析与讨论

6.1 模型验证

以工况 C 为例,取沿水流方向 $x = 0.5、1.0、1.5$ m 三处横断面垂线上水平流速的模拟计算值与实测值进行比较,结果如图 4 所示。从图中可知在水面附近模拟计算值与实测值有较小的误差,这可能是由于表面流速较大、水流紊动剧烈使得测量难度增大,从而引起的测量误差造成的,但整体上模拟计算值与实测值吻合较好,证明了模拟结果的正确性和可靠性。

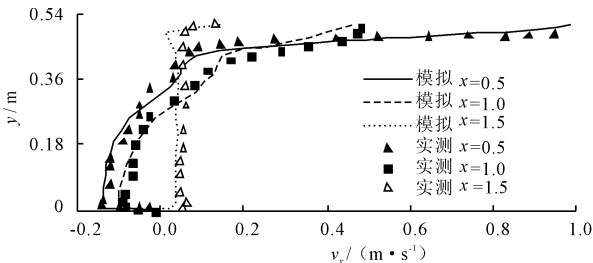


图4 工况 C 不同横断面上水平流速比较图

分析图 4 中的水平流速分布,在 $x = 0.5、1.0$ m 横断面上,表面流速较大,然后沿水深方向向下快速

衰减到零,且越靠近进水口处的横断面上最大值越大,衰减的越快。然后再沿水深往下变成负值,负值是由于漩涡引起的。在底板附近,由于边壁的滞水作用水平流速沿水深方向向下迅速减小到零。表明 $x = 0.5、1.0$ m 处的横断面在射流发展区内。到 $x = 1.5$ m 处,水平流速沿水深分布较均匀,只在水面附近有稍微波动,且速度大小均为正值,表明该处水流已接近明渠流态。

6.2 流线分布

工况 A、B、C 的流线分布如图 5 所示,流线密的地方代表流速大,流线稀疏的地方代表流速小。从图中可以看出,不同工况表面射流的流线分布规律相似:水流从喷口射入后,在靠近喷口的区域,高速水流贴近水面,高速表面流的下面是个大的漩涡,漩涡沿顺时针方向旋转,漩涡的高度几乎充满整个水深,这个区域是射流发展区。在漩涡的后面,流线快速扩散到整个水深,流线分布较均匀,相当于明渠流态。从工况 A 的流线图可以看出,漩涡后的明渠流区水面附近流线分布不均匀,这是由于受表面射流的影响,明渠流区表面水流波动较大引起的。另外比较 3 个工况的流线图中的漩涡尺寸可直观的看出,进口流速 v_1 越大,漩涡长度也越长。

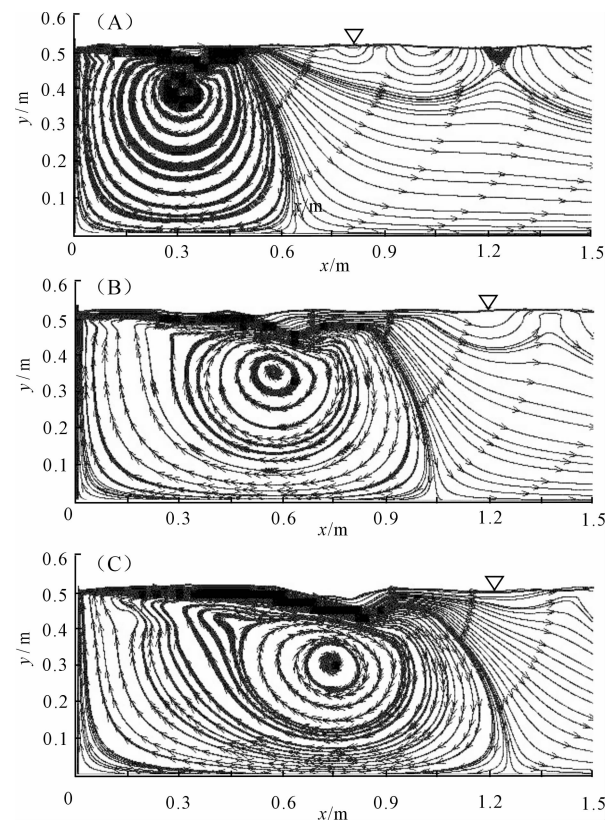


图5 工况 A、B、C 的流线分布

为了更精确的比较漩涡长度与各水力要素的关系,各工况漩涡长度如表 2 所示。比较 A、B、C 三个工况可知,在其他条件相同时,进口流速越大,漩涡长度越大;比较 B、D 两工况可知,其他条件相同尾水深不同时,漩涡长度变化不大,可以忽略不计;比较 C、E 两工况可知,在其他条件相同时,进口宽度增大,漩涡长度反而减小。

表 2 5 个工况漩涡长度

工况	A	B	C	D	E
L_e/m	0.65	1.00	1.30	1.05	1.15

6.3 横断面流速的分布

图 4 显示了表面射流场横断面水平流速沿程的分布情况,现在分析横断面上纵向流速沿程的分布规律。仍以工况 C 为例,截取 $x = 0.25 L_e$ 、 $0.50 L_e$ 、 $0.75 L_e$ 、 $1.00 L_e$ 、 $1.25 L_e$ 、 $1.50 L_e$ 6 个横断面,各横断面上纵向流速分布如图 6 所示。从图 6 可知,当 $x = 0.25 L_e$ 、 $0.50 L_e$ 时,横断面上纵向流速在表面附近很小,然后沿水深方向往下先增大后减小,且为正值,表明在此处水深中部流场有较大的纵向流速,这是由于流场内漩涡引起的,速度为正表明纵向流速向上,这与实际情况也相符。到底板表面,纵向速度减小为 0。当 $x = 0.75 L_e$ 时,纵向流速沿水深往下也是先增大,后减小,只是变成了负值,负值表示该处的纵向流速向下。到 $x = 1.00 L_e$ 之后,纵向流速沿水深方向分布较均匀,速度值也很小。表明回流区之后的流场,纵向流速值很小,主要以水平流速为主。

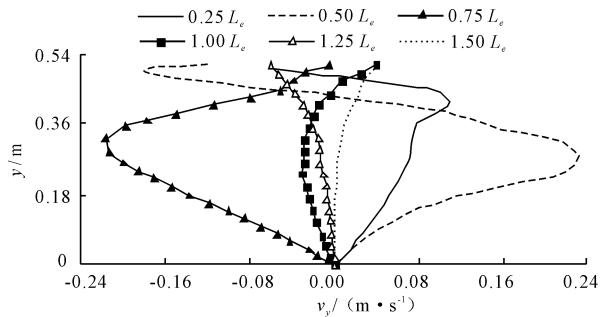


图 6 工况 C 不同横断面上纵向流速分布

6.4 横断面最大流速的沿程衰减

各工况横断面最大流速沿程衰减曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,不同工况断面最大流速沿程衰减曲线走势相似:衰减曲线从 V_1 开始,起初有一小段距离沿程几乎水平,然后沿程快速下降,最后减

小到一最小值,沿程几乎不变。且衰减曲线最后的最小值很小,这是由于射流发展充分后,横断面流速沿水深方向均匀分布所致。从图 7 可以看出,除工况 A 以外,其他各工况横断面最大流速衰减曲线有微小的波动,这可能是由于表面射流流速较大,导致流场紊动造成的。

比较图中 A、B、C 3 工况的衰减曲线可知:当尾水深相同时,进口平均流速 v_1 越大,横断面最大流速衰减的距离越长,衰减梯度越大。比较图中 B、D 两工况的衰减曲线可知:当进口平均流速 v_1 相同时,不同尾水深下横断面最大流速沿程衰减曲线几乎重合,故尾水深的不同对横断面最大流速沿程衰减的影响很小。比较图中 C、E 两工况的衰减曲线,此时两工况的进口宽度不同,其他条件都相同,从图 7 中可知,两工况从同一个速度开始衰减,然后开始阶段工况 E 的衰减曲线比工况 C 的略高,沿程近似平行,直到 $x = 1.1 m$ 附近时,两曲线相交,之后工况 E 的衰减曲线下降到工况 C 衰减曲线的下方,并且先达到最小值。表明进口宽度增大,横断面最大流速沿程先衰减的慢,后衰减的快。另外比较图 7 中各工况横断面最大流速衰减距离和表 2 中对应的漩涡长度可以发现,横断面最大流速衰减距离近似等于回流区长度。

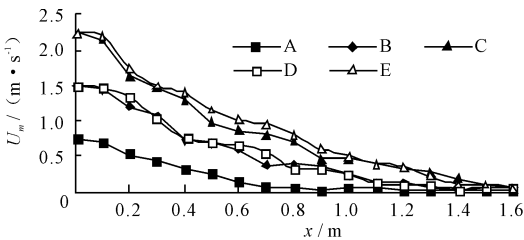


图 7 不同工况横断面最大流速的沿程衰减曲线

7 结 论

本文用数值模拟的方法研究了浅尾水深水平底板上表面射流的水力特性,通过模拟计算值与实测值的比较,结果吻合较好,证明了数学模型的正确性和模拟结果的可靠性。

研究还发现:进口流速越大,漩涡长度越大;进口宽度增大,漩涡长度反而减小。横断面上水平流速和纵向流速在射流发展区和明渠流区的分布明显不同,主要是受漩涡的影响。横断面最大流速沿程衰减长度和衰减梯度主要受进口流速大小和进口宽度的影响。

(下转第 157 页)

年的 52.17 亿 m^3 ,但万元产值的用水量在逐年下降并保持下降趋势,说明近年来关中地区用水效率在不断提高。

(3)关中地区总体用水效率要优于全国平均水平,但与世界水平还有着明显的差距,其中农业虽然近年来一直保持着良好的“脱钩”关系,其万元产值用水量达到了 338.08 m^3 ,对整体用水效率有着巨大的影响,应继续大力推广节水灌溉技术,调整农业产业结构,加大种植经济作物,提高农业用水效率。

(4)一、二产业用水效率近年来都有持续的提升,其中第二产业近 3 年脱钩指数有所下降,而第三产业的万元产值用水量呈回升趋势并出现了扩张性复钩的情况,需引起警惕。应继续发挥价格杠杆作用,推进节水设施的应用,采取多种措施推动水资源的更合理利用,第三产业是万元产值用水量最少的产业,建议大力发展第三产业,推动第三产业的进步,以期带动整体用水效率的提升。

参考文献:

- [1] 朱慧峰,秦复兴,吴耀民,等.上海市万元 GDP 用水量指标体系的建立[J].中国给水排水,2003,19(7):36-37.
- [2] Ridoutt B G, Eady S J, Sellaheva J, et al. Water footprint-

ing at the product brand level: case study and future challenges [J]. Journal of cleaner production, 2009,17(13): 1228 - 1235.

- [3] 汪奎,邵东国,顾文权,等.中国用水量与经济增长的脱钩分析[J].灌溉排水学报,2011,30(3):34-38.
- [4] 孟小宇.渭河关中地区用水结构优化研究[D].西安:西安理工大学,2010.
- [5] 罗光明,侍克斌,张宏俊.新疆水资源利用和经济增长之间的关系[J].干旱区地理,2009,34(4):566-570.
- [6] 邓朝晖,刘洋,薛惠峰.基于 VAR 模型的水资源利用与经济增长动态关系研究[J].中国人口·资源与环境,2012,22(6):128-135.
- [7] 廖虎昌,董毅鸣.基于 DEA 和 Malmquist 指数的西部 12 省水资源利用效率研究[J].资源科学,2011,33(2):273-279.
- [8] 钟太洋,黄贤金,王柏源.经济增长与建设用地扩张的脱钩分析[J].自然资源学报,2010,25(1):18-31.
- [9] 尹艳,邹君.湖南经济发展与水资源利用关系研究[J].衡阳师范学院学报,2014,35(3):155-161.
- [10] 李林娟,姚小翠.关中地区主导产业选择研究[J].大众商务(下半月),2010(9):39+44.
- [11] 尹剑,王会肖,王艳阳,等.关中地区农业节水分区研究[J].中国生态农业学报,2012,20(9):1173-1179.

(上接第 151 页)

参考文献:

- [1] Ead S A, Rajaratnam N, Asce F. Plane turbulent wall jets in shallow tailwater[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002,128(2):143-155.
- [2] Ead S A, Rajaratnam N, Asce F. Plane turbulent wall jets on rough boundaries with limited tailwater[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004,130(10):1245-1250.
- [3] Ead S A, Rajaratnam N. Plane turbulent surface jets in shallow tailwater[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(1):121-127.
- [4] Cavar D, Meyer K E. LES of turbulent jet in cross flow, Part 2: POD analysis and identification of coherent structures [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 36(2):35-46.
- [5] Shabayek S A. Plane turbulent wall jets in limited tailwater depth[J]. International Journal of Engineering & Technology, 2011,11(6):192-197.
- [6] Ryu Y, Chang K, Mori N, et al. Dispersion of neutrally buoyant horizontal round jet in wave environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(12):1088-1097.

- [7] 张明亮,陈刚,许联锋,等. PIV 技术在水垫塘实验模型淹没射流中的应用[J].实验流体力学,2005,19(3):79-84.
- [8] 姜国强,李炜.横流中有限宽窄缝射流的旋涡结构[J].水利学报,2004,35(5):52-57.
- [9] 姜国强,李炜,陶建华.动水环境中有限宽窄缝湍射流的水力特性研究[J].水利学报,2004,35(12):51-55+61.
- [10] 张燕,樊靖郁,王道增.横流冲击射流尾迹涡结构的实验研究[J].力学,2005,26(4):539-543.
- [11] 周丰,孙昭晨,梁书秀.波浪环境中圆形垂向射流的试验研究[J].水利学报,2007,38(8):981-985+990.
- [12] 卢艳娜,李龙国,李乃稳,等.射流形状对水垫塘底板冲击动压特性的影响[J].南水北调与水利科技,2014,12(6):89-92.
- [13] 王月,李龙国,李乃稳,等.多股窄长射流入下游水垫塘的水力特性试验[J].人民黄河,2015,37(2):111-115.
- [14] 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.
- [15] 张健,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.