

文章编号: 1006-4710(2015)04-0385-06

# 梯形断面明渠丁坝绕流水力特性三维大涡模拟

魏文礼, 邵世鹏, 刘玉玲

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 对梯形断面明渠非淹没式单一丁坝绕流水力特性进行三维数值模拟, 为丁坝的设计和施工提供理论基础支持。数值模拟采用两相流混合模型, 并分别选取大涡模型(LES)和 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型封闭两相流时均方程。速度与压力的耦合使用半隐式 SIMPLE 算法, 模拟自由水面采用了 VOF 法。通过不同截面流线图和流速矢量图的比较得出大涡模型能更好地捕获水流瞬时流动特性, 动态再现二次流动结构; 并将其模拟的丁坝后回流区域边界线与试验值对比, 两者吻合良好, 表明大涡模型能够很好地模拟明渠丁坝绕流的水力特性分布规律。

**关键词:** 丁坝绕流; 数值模拟; 大涡模型; RNG  $k-\epsilon$  模型; 水力特性

**中图分类号:** TV131.4      **文献标志码:** A

## 3D numerical simulation of hydraulic behaviors of spur dike flow in a trapezoid open channel

WEI Wenli, SHAO Shipeng, LIU Yuling

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

**Abstract:** The 3-D numerical computation of flow hydraulic behaviors around non-submerged spur-dikes in a trapezoid open channel is carried out to provide theoretical basis support for design and construction of spur-dikes. The gas-liquid two-phase large eddy simulation and the gas-liquid two-phase mixture model with 3-D RNG  $k-\epsilon$  turbulence model are used in the simulation. The SIMPLE algorithm is used to solve velocity and pressure. The VOF method is used to simulate the free surface. The comparisons of the streamlines at different section simulated by the large eddy simulation and RNG  $k-\epsilon$  model show that the large eddy simulation can better capture the instantaneous flow behaviors and can simulate dynamic secondary flow structures. The comparisons of the biggest recirculation boundary line between the computed and the measured data are in a good agreement, which indicates that the large eddy simulation can well simulate the hydraulic characteristics of spur dike flow in trapezoid open channel.

**Key words:** spur dike flow; numerical simulation; large eddy simulation; RNG  $k-\epsilon$  model; hydraulic characteristics

丁坝是广泛使用的一种水工建筑物, 其主要作用是保护河岸免受水流冲刷、束窄河道提高河道通航能力等。修建丁坝后水流被导向河流中心, 所以河流主流区的流速明显提高<sup>[1]</sup>。早期的研究者主要

采用实验的方法对丁坝进行研究, 但随着计算机技术和计算流体力学的逐渐成熟, 采用数值模拟的方法对丁坝进行研究已被越来越多的研究者所接受。夏云峰等<sup>[2]</sup>将二维的水流运动方程与 SIMPLER 方

收稿日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178391); 陕西省科学研究计划基金资助项目(2014K15-03-05); 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室开放基金项目(106-221223); 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: 魏文礼, 男, 博士, 教授, 研究方向为环境水力学、水污染控制理论与技术。E-mail: wei\_wenli@126.com。

法结合,得到了丁坝水流流态及水面线变化规律,且与实测值的吻合度较高;邓绍云等<sup>[3]</sup>采用数值模拟的方法对一非淹没丁坝的绕流水力特性进行了研究,并对水流流速场和压力的分布规律进行了分析,其符合实际的丁坝绕流水力特性,说明数值模拟结果达到了捕捉丁坝周围水流流态的目的;周宜林等<sup>[4]</sup>采用大涡模拟方法研究了不同挑流形式下的丁坝水力特性,从模拟结果可以看出,不同挑流形式对水流影响较小,但是相比较而言,当丁坝采用下挑形式时可以更好地保护坝头;李冰冻等<sup>[5]</sup>通过研究丁坝试验和数值模拟两方面的成果,分析了丁坝附近区域复杂的水流特征,通过比较得出数值计算能够反映丁坝挡水所引起的水流流态的变化过程;Akahori R 等<sup>[6]</sup>用大涡模型对丁坝附近二次流进行了数值模拟;Mayerle R<sup>[7]</sup>和 Jia Y 等<sup>[8]</sup>采用数值模拟的方法对丁坝附近水流的流动规律进行了研究;白静等<sup>[9]</sup>将数值模拟和 PIV 测量实验结合在一起,对不同丁坝间距下丁坝群附近的水力特性进行了研究,得出丁坝的长度与丁坝之间距离的比值  $L/D$  对湍动强度,涡量分布和流场结构等有很大的影响;蒋昌波等<sup>[10]</sup>采用简化的二维大涡模型,对一非淹没丁坝群的丁坝绕流水力特性进行了研究,并将计算的结果与实验结果相比较,结果吻合良好,说明采用简化的大涡模型可以很好地反映丁坝绕流中的流场、流线及涡的变化等水力特性;辛永政等<sup>[11]</sup>采用不同的紊流数值模型对明渠丁坝绕流进行了数值模拟并与试验值进行了比较,结果表明标准模型可以比较准确地模拟明渠中丁坝绕流的情况。雷亚等<sup>[12]</sup>采用 FLUENT 软件对一非淹没丁坝进行了模拟研究,自由水面的捕捉采用 VOF 法;得出丁坝后回流区范围会因丁坝类型而变化;曹晓萌等<sup>[13]</sup>运用数值模拟的方法运用不同划分准则对一非淹没丁坝进行了研究,并将计算结果与实验值进行了对比,结果吻合良好,说明数值模拟达到了反映实际丁坝绕流水力特性的目的。

现有对丁坝绕流水力特性的研究都是在矩形断面水槽中进行的,而天然河道断面大多不是矩形的,天然河道断面更接近梯形断面,因此有必要对梯形断面水槽中丁坝绕流的水力特性进行数值模拟,并通过数值模拟比较选出能更好反映实际河道中丁坝绕流水力特性的数学模型。

## 1 数学模型

利用空间滤波函数对三维湍流 N-S 方程进行滤波后,得大涡模型的控制方程<sup>[14-15]</sup>为:

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \right\} \quad (2)$$

式中,  $x_i, x_j$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) 是笛卡尔坐标;  $\bar{p}$  是滤波后的压强;  $g_i$  表示质量力分量,  $\nu$  表示分子粘性系数;  $\tau_{ij}$  是在滤波时由非线性对流项引起的亚格子雷诺应力,其表达式为:

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j}$$

这表明小尺度变量对大尺度变量有作用,必须进行建模。

LES 湍流模拟方法假定湍流运动可分为大尺度涡和小尺度涡,两者之间的分离对大涡的演变不会有大的影响,并且小涡受水流的几何形状和边界条件的影响较小。

Smagorinsky 模型是基于涡粘性假设的最常用的亚格子雷诺应力模型。

LES 直接由一组滤波控制方程解决大尺度场,亚格子尺度是各向同性的,主要用来表示耗散,所以可以很容易地模拟其对网格尺度的影响<sup>[16]</sup>。对于这种模型,亚格子雷诺应力假定与应变速率张量成比例,即:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad k=1, 2, 3 \quad (3)$$

式中,  $\nu_t$  是湍流涡粘性系数,  $C_s$  是 Smagorinsky 系数,其值在 0.1 到 0.27 之间,  $|\bar{S}_{ij}|$  是  $\bar{S}_{ij}$  的大小,  $\Delta$  是滤波格子的长度,  $\bar{S}_{ij}$  是滤波应变力张量,  $\delta_{ij}$  是 Kronecker 三角张量。以上参数的相关表达式为:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}_{ij}|$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

以 RNG  $k-\epsilon$  模型封闭的描述气液两相流的时均控制方程见文献<sup>[17]</sup>。

自由水面的捕捉采用 VOF 法,其基本原理见文献<sup>[18-19]</sup>。

## 2 数值模拟及验证

### 2.1 计算区域及网格划分

本研究要进行数值模拟研究的水槽长为  $L=8.0$  m,底宽  $B=1.5$  m,高  $H=0.2$  m,边坡系数为 1.33。

数值模型参数:丁坝为方头丁坝,布设在水槽的右侧,丁坝迎水面轴线位于距计算入口 3.0 m 的地方,丁坝下底轴线长为  $D=0.2\text{ m}$ ,丁坝高度为  $0.2\text{ m}$ ,丁坝厚度为  $d=0.008\text{ m}$ ,水槽水深为  $h=0.15\text{ m}$ 。进口流量恒定为  $Q=0.05\text{ m}^3/\text{s}$ 。

计算区域体型图如图 1(a)所示,图 1(b)为水槽横断面尺寸示意图。

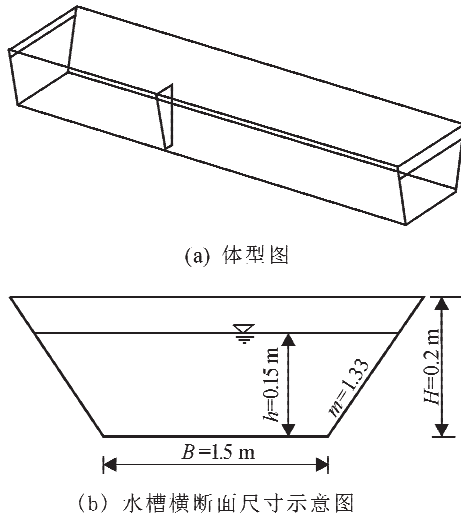


图 1 计算区域图  
Fig. 1 Computational region

### 2.2 网格划分

初始计算网格由 GAMBIT 程序生成。

计算时采用结构化网格进行划分,沿水流方向计算网格划分为渐变网格,在丁坝处加密,网格总数为 36 398 个,见图 2。

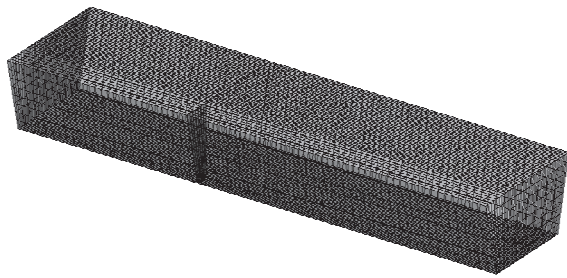


图 2 计算网格图  
Fig. 2 Computational mesh

### 2.3 边界条件

水流进口设为速度进口,速度为  $0.196\text{ m/s}$ ;空气进口也设为速度进口,速度为  $0.196\text{ m/s}$ 。

水流出口边界设定为压力出口,初始水位为  $0.15\text{ m}$ ;空气出口边界也为压力出口,相对压强为  $0$ 。水与空气接触面的相对压强设定为  $0$ 。

水槽和丁坝固体壁面上的边界条件符合流速在壁面上的不分离和无滑移条件。

模型的离散采用有限体积法;边界的拟合采用

非规则网格。自由水面按 VOF 法确定。

### 2.4 结果分析和讨论

#### 2.4.1 水平方向流线与流速矢量图分析

不同水深平面处的流线图如图 3、4 所示。

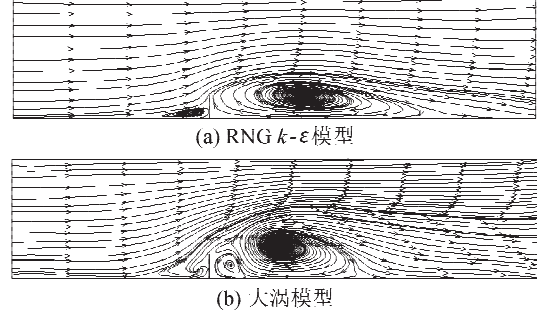


图 3  $0.2h$  水深处平面流线图  
Fig. 3 Computed streamlines on the horizontal plane at a depth of  $0.2h$

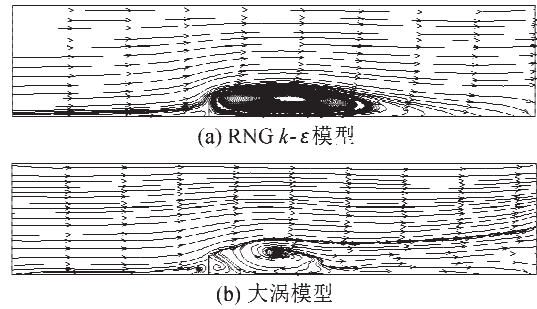


图 4  $0.5h$  水深处平面流速矢量图  
Fig. 4 Computed streamlines on the horizontal plane at a depth of  $0.5h$

由图 3、4 可以看出,由于丁坝的存在,部分水流绕过丁坝流向下流,而部分水流则沿丁坝上游坝面向水槽底部下潜,然后绕过丁坝坝头流向下流,在丁坝附近形成主流区和回流区;而且在丁坝后都形成了一个大的二次流,沿顺时针方向流动,这符合实际绕坝水流的运动规律。从流线图可以看出,由 RNG  $k-\epsilon$  模拟的涡规则均匀,能够反映出强流线弯曲;而大涡模型把湍流分成大尺度和小尺度两部分运动,能够更好地模拟丁坝后大尺度涡的基本特征,模拟的流线也更符合实际回流的流态。大涡模型模拟的丁坝后回流区域边界线长度比 RNG  $k-\epsilon$  模拟的小,而宽度较大;大涡模型模拟的主流区比 RNG  $k-\epsilon$  模拟的窄,说明大涡模拟能更好地反映丁坝后回流区对主流区的影响。大涡模型模拟的结果捕捉到了丁坝前后与边坡拐角处的小漩涡;而 RNG  $k-\epsilon$  模型只捕捉到了丁坝前与边坡拐角处的小漩涡。说明大涡模型能够捕获水流瞬时流动特性,动态再现二次流动结构。同时由图 3、4 也可以看出随着水深的增加丁坝后回流区域逐渐变小。

由图 5、6 可以看出在丁坝前水流流速矢量分布均匀,在靠近丁坝上游坝面处流速减慢水流雍向坝面后转向,流速矢量在坝头处和主流区分布密集,流速变化剧烈;在丁坝前后流速矢量分布稀疏,速度较小。同时可以看出在丁坝后是一个死角,水流速度很小,涡也很弱。计算结果也表明随着涡的扩散,在丁坝下游一段距离后水流流速逐渐恢复均匀。

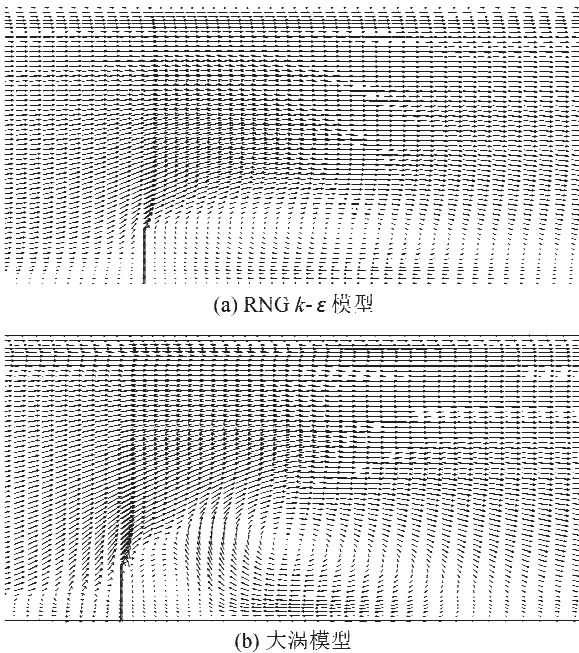


图 5 0.2h 水深处平面丁坝局部流速矢量图  
Fig. 5 Velocity vector around the spur dike on the horizontal plane at a depth of 0.2h

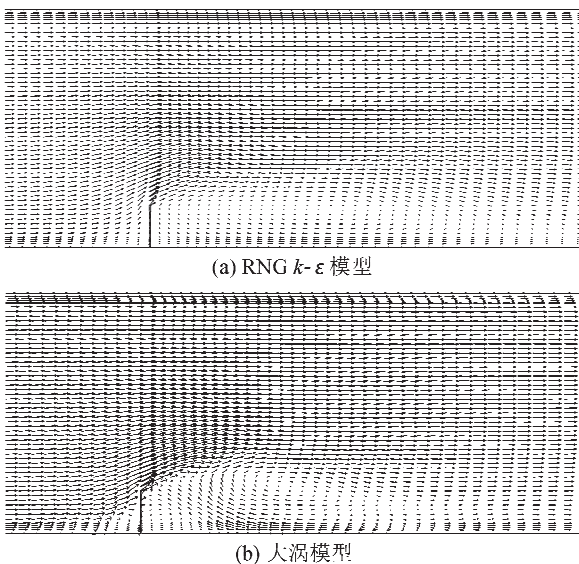


图 6 0.5h 水深处平面丁坝局部流速矢量图  
Fig. 6 Velocity vector around the spur dike on the horizontal plane at a depth of 0.5h

2.4.2 垂直方向流线图与流速矢量图分析

由图 7 可见,在丁坝前 RNG  $k-\epsilon$  模型和大涡模

型模拟的流线图都很均匀,但在靠近丁坝上游坝面处大涡模型模拟的流线图能更好地反映出丁坝前水流的壅水现象。在丁坝后 RNG  $k-\epsilon$  模型捕捉到了水流在垂直截面上的回流,流线分布均匀,但只是涡的局部;大涡模型模拟的回流比较完整,得到的涡没有 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟的规则,但更符合实际水流的流动,可以看出随着涡的扩散,在近底面处水流流向恢复到与进口水流相同的方向,能更好地反映丁坝后水流在垂直截面上的流动状态。由于水平方向的涡和垂直方向的涡的相互作用,形成典型的三维涡结构,因此在丁坝附近的水流是强三维紊流。

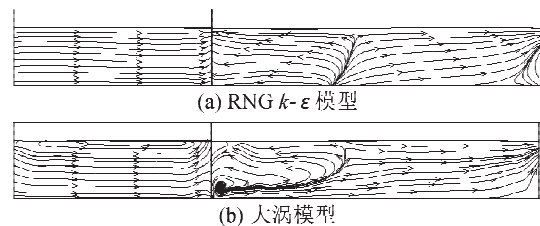


图 7 丁坝坝轴线中心纵向断面流线图  
Fig. 7 Computed streamlines on the central longitudinal section at the center axis of the spur dike

比较图 7,图 8 可以看出丁坝对水槽中心断面水流有一定的影响,但在丁坝附近的二次流现象消失了,水流方向相同且均匀,说明由于丁坝的作用不同垂直截面上的水流流线分布方式不一致,即不同垂直截面上水流流态不一致。

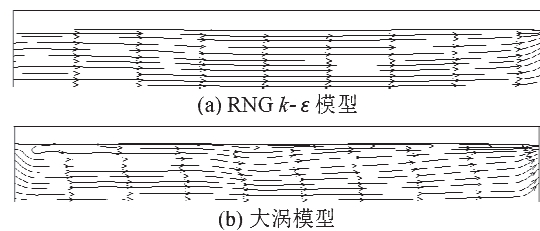


图 8 水槽中心纵向截面流线图  
Fig. 8 Computed streamlines on the central longitudinal section of the flume

比较大涡模型和 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟的丁坝坝轴线中心纵向断面矢量图(图 9(a),(b))可以看出,大涡模型比 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟的丁坝前水流的上升趋势明显,能更好地反映丁坝前的壅水现象。大涡模型模拟的丁坝后水流分布表现出明显的各向异性,有二次流产生,这更符合实际绕坝水流的流动特性,说明大涡模型能更好地捕获水流瞬时流动特性,动态再现二次流动结构。

由图 10 可以看出,在水槽中心断面矢量均匀,二次流现象消失。

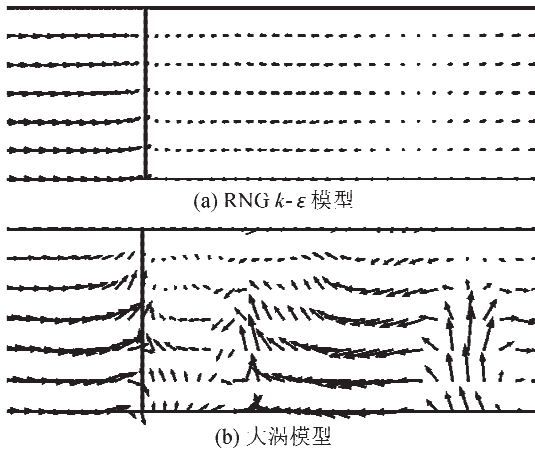


图 9 丁坝坝轴线中心纵向断面流速矢量图  
Fig. 9 Velocity vector on the central longitudinal section at the center axis of the spur dike

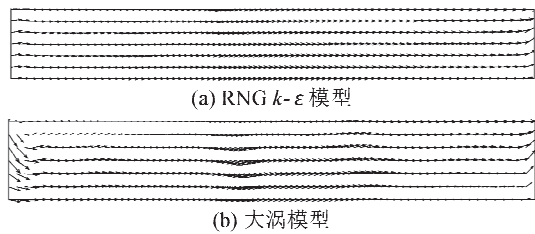


图 10 水槽中心纵向截面流速矢量图  
Fig. 10 Velocity vectors on the central longitudinal section of the flume

2.4.3 回流区域边界线比较

由以上流线图分析可知,大涡模型能更好地反映水流的瞬时流态和二次流的水流结构,所以将大涡模型模拟的水槽底部丁坝后的回流区域边界线与试验值相比较。由图 11 可以看出计算模拟的回流长度与试验值<sup>[20]</sup>吻合良好,但回流宽度有一定的误差。主要原因是,在试验时丁坝是圆头的,而在数值模拟时考虑到了丁坝很薄(0.008 m),为方便画网格,将丁坝近似画为方头,这样导致了模拟中的绕坝水流没有试验中的平顺,产生了一定的误差。

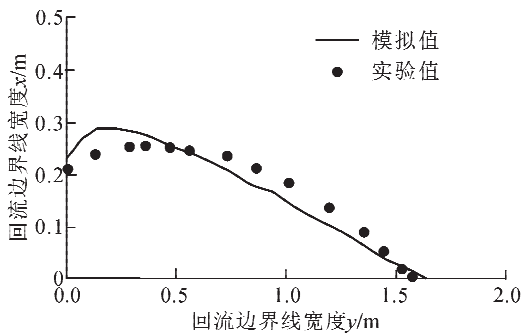


图 11 丁坝后回流区域边界线比较  
Fig. 11 Recirculation region boundary line comparison after the spur dike

3 结 论

本研究采用两相流混合模型,并分别选取大涡模型和 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型封闭两相流时均方程,对梯形断面明渠非淹没式单一丁坝绕流水力特性进行三维数值模拟,由以上的分析和比较可以得出以下结论。

- 1) 分析比较由大涡模型和 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟的流线图和流速矢量图得出,大涡模型能更好地捕获丁坝绕流的瞬时流动特性和流动结构。
- 2) 大涡模型模拟的丁坝后回流区域边界线与试验得出的结果吻合良好,说明大涡模型可以很好地预测丁坝附近水流的回流区域。
- 3) 由水平方向和垂直方向流线图可以看出,由于水平方向和垂直方向的涡相互作用,形成典型的三维涡结构使得丁坝附近水流为强三维紊流。
- 4) 由于丁坝的作用在丁坝后会形成一个大的顺时针流向的二次流,在丁坝前后与底面的拐角处会形成小的角涡,在丁坝后会形成一个死角,水流速度很慢,涡也很弱,容易造成泥沙沉积。

参考文献:

[1] Wu B S, Wang G Q, Ma J M, et al. Case study: river training and its effects on fluvial processes in the lower Yellow River[J]. Hydraul English ASCE, 2005, 131 (2): 85-96.

[2] 夏云峰,孙梅秀,李昌华. 用水深平均紊流模型计算淹没丁坝[J]. 水利水运科学研究,1993,(2):109-118. Xia Yunfeng, Sun Meixiu, Li Changhua. 2-D depth averaged turbulence model for flow around submerged spur dike[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute,1993,(2):109-118.

[3] 邓绍云,王义刚,邱清华. 非淹没丁坝三维绕流数值模拟[J]. 水运工程,2010,(6):90-94. Deng Shaoyun, Wang Yigang, Qiu Qinghua. 3D-circumferential flow value simulation to an un-submerged spur dike[J]. Port & Waterway Engineering, 2010,(6): 90-94.

[4] 周宜林. 淹没丁坝附近三维水流运动大涡模拟[J] 长江科学院院报,2001,18(5):28-31. Zhou Yilin. Division mechanism and flow scale investigation of circulation zone around spur dike[J]. Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(5):28-31.

[5] 李冰冻,李嘉,李克锋. 丁坝水流的水槽实验及数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展,2013,28(2):176-183. Li Bingdong, Li Jia, Li Kefeng. Flume experiment and numerical simulation on flow around a spur dike[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(2): 176-

- 183.
- [6] Akahori R, Schmeek E M. Numerical analysis of secondary-flow around a spur dike using a three-dimensional free water surface LES model; Parker & García. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2005 [C]. Taylor & Francis Group, London, 2006: 921-930.
- [7] Mayerle R, Wang S S Y, Toro F M. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of flow in the vicinity of spur-dikes[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(2):243-256.
- [8] Jia Y, Scott S, Xu Y, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of flows around a submerged weir in a channel bend way[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(8):682-693.
- [9] 白静, 方红卫, 何国建. 非淹没丁坝绕流的三维大涡模拟研究[J]. 力学学报, 2013, 45(2):151-156.  
Bai Jing, Fang Hongwei, He Guojian. Study of non-submerged groin turbulence flow in a shallow open channel by LES[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(2):151-156.
- [10] 蒋昌波, 吕昕, 杨宜章. 丁坝绕流的二维大涡模拟数值模拟[J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15(3):68-72.  
Jiang Changbo, Lü Xin, Yang Yizhang. Large eddy simulation of 2D flow around a spur dike numerical simulation[J]. Journal of Changsha Communications University, 1999, 15(3):68-72.
- [11] 辛永政, 张莉莉. 3种紊流数值模型模拟明渠丁坝三维水流初探[J]. 贵州水力发电, 2011, (5): 56-58.  
Xin Yongzheng, Zhang Lili. Three kinds of turbulent flow numerical model for the simulation of three-dimensional flow in open channel[J]. Guizhou Water Power, 2011, (5):56-58.
- [12] 雷亚, 刘杰. 基于 FLUENT 的丁坝回流区数值模拟[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(2):4-6.  
Lei Ya, Liu Jie. Simulation of the backflow zone around spur dike based on FLUENT[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2015, 21(2):4-6.
- [13] 曹晓萌, 顾正华. 3种非淹没双体丁坝作用尺度划分准则及比较[J]. 浙江大学学报:工学版, 2015, 49(2):200-207.  
Cao Xiaomeng, Gu Zhenghua. Three classification criteria and their comparison impact scale between double non-submerged spur dikes[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015, 49(2):200-207.
- [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] 戴会超, 王玲玲, 魏文礼, 等. 线性波中二维射流的大涡模拟[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(9):45-47.  
Dai Huichao, Wang Lingling, Wei Wenli, et al. Large-eddy simulation of the interaction between jets and linear waves[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 34(9):45-47.
- [16] Ferziger J H. Large eddy simulation: an introduction and perspective [M]. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [17] 戎贵文, 魏文礼, 刘玉玲, 等. 涌潮作用下丁坝附近水流运动特性的数值模拟研究[J]. 水利学报, 2012, 43(3):296-301.  
Rong Guiwen, Wei Wenli, Liu Yuling, et al. Study on flow characteristics near spur dikes under tidal bore [J]. Journal of Hydraulic, 2012, 43(3):296-301.
- [18] Shen Y M, NG C O, Zheng Y H. Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation  $\kappa-\epsilon$  turbulence modeling[J]. Ocean Engineering, 2004, 31(1): 87-95.
- [19] 袁丽蓉, 沈永明, 郑永红. 用 VOF 方法模拟横流下窄缝紊流射流[J]. 海洋学报, 2005, (4): 155-160.  
Yuan Lirong, Shen Yongming, Zheng Yonghong. Simulation on a slit-type turbulent jet in a cross-flow using the VOF method[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, (4): 155-160.
- [20] 马腾云. 岸坡对丁坝回流影响的实验研究[D]. 南京: 河海大学, 1988.  
Ma Tengyun. Experimental investigations of shore effecting on the size of groin's recirculating flow zone [D]. Nanjing: Hohai University, 1988.

(责任编辑 王卫勋)