## 大系数法与壁函数结合在丁坝绕流 三维数值模拟中的应用

### 假冬冬,邵学军,周 刚

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

**摘要:**采用三维紊流模型对实验室丁坝绕流进行了数值模拟,利用标准 k-ε 模型将大系数法与壁函数相结合 处理丁坝边界.模拟结果表明,模型能有效地处理丁坝边界,较好地模拟了坝头分离流、丁坝后回流及回流区横 断面上的二次流,计算值与实测值吻合较好.

**关 键 词:** 丁坝绕流; 三维数值模型; 丁坝边界; 大系数法; 壁函数 中图分类号: TV133:TV863 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2008)01-0036-06

# **3-D** numerical simulation of flow field around spur dike using wall function and large coefficient method

JIA Dong-dong, SHAO Xue-jun, ZHOU Gang

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Numerical modeling is an important tool applied to study local flow field with a spur dike. The flow field around the spur dike is simulated with a 3-D numerical model in this study. The standard k- $\varepsilon$  model is used. The wall function and large coefficient method are applied to treat the boundary of the spur dike. The flow field around the spur dike in laboratory is simulated. The simulated results demonstrate that the boundary of the spur dike can be treated efficiently, and the model can successfully simulate the separate structure of flow at the top of the spur dike, the circumfluence behind the spur dike and the secondary flow in the cross section in the circumfluence area. The computed results agree well with the experimental data.

Key words: flow field around spur dike; 3-D numerical model; boundary of spur dike; large coefficient method; wall function

丁坝是一种常用的河工建筑物,修建后缩窄了原河道,从而产生坝头分离流和坝后回流,使其附近的水 流流场具有明显的三维特性.为此,本文建立了三维紊流模型对其进行模拟.丁坝的修建会使边界条件变得

E-mail: jdd05@ mails. tsinghua. edu. cn

收稿日期: 2007-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50479004,50221903);国家科技支撑计划项目(2006BAB05B03)

作者简介: 假冬冬(1982-),男,广西桂林人,博士研究生,主要从事水力学与河流动力学研究.

很复杂,如何处理丁坝边界是模拟丁坝绕流的关键,本文模型中采用大系数法与壁函数相结合的方式处理丁 坝边界.

#### 三维紊流模型 1

#### 1.1 模型方程组

模型采用各向同性不可压缩流体雷诺微分方程组,用标准 k-e 模型来计算紊动粘性系数.在笛卡儿坐标 下的基本方程组可写成如下统一形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\varphi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\nu_{e}\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho\nu_{e}\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\nu_{e}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + S$$
(1)

式中: $\varphi$ 为所求问题的因变量;u,v,w为沿x,y,z方向的流速; $\rho$ 为密度; $\nu_z$ 为有效粘性系数:S为源项. 模型方程组各方程变量见表1.

37 . 11

Tab. 1 Variables of general equation			
方 程	arphi	$\nu_{e}$	S
连续	1	0	0
x 动量	u	$ u_e$	$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho\nu_{e}\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho\nu_{e}\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho\nu_{e}\frac{\partial w}{\partial x}\right)$
<i>y</i> 动量	v	$ u_e$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \nu_e \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \nu_e \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \nu_e \frac{\partial w}{\partial y} \right)$
z动量	w	$ u_e$	$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \nu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \nu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \nu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right)$
k 方程	k	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}$	$\rho(G-\varepsilon)$
ε 方程	ε	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\rho  \frac{\varepsilon}{K} ( c_1 G - c_2 \varepsilon)$

表1 统一形式中各方程变量 c

表中:g为重力加速度;p为压力;有效粘性系数 $\nu_e = \nu + \nu_i$ ,  $\nu$ 为水流粘性系数;紊动粘性系数 $\nu_i = C_\mu \frac{k^2}{s}$ ,湍流 常数  $C_{\mu} = 0.09$ , k 为湍流动能,  $\varepsilon$  为湍流动能耗散率; 湍流动能产生项  $G = \nu_{\iota} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 \right\}$  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right\} ; c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_s = 1.3.$ 

#### 1.2 数值方法

模型利用有限体积法来离散水流控制方程,采用 SIMPLEC 算法与 SIP 方法相结合求解同位网格条件下 的三维水流离散方程.

1.2.1 方程的离散 采用同位网格技术与动量插值技术相结合,所有变量均放在网格中心节点上,通过有 限体积法对控制方程进行离散化后整理得:

$$a_p \varphi_p = \sum a_i \varphi_i + b \quad (i = E, W, N, S, T, B)$$
<sup>(2)</sup>

 $\vec{x} \oplus : a_E = D_E A(|P_E|) + [[-F_E, 0]]; a_W = D_W A(|P_W|) + [[F_W, 0]]; a_N = D_N A(|P_N|) + [[-F_N, 0]]; a_S = D_E A(|P_V|) + [[-F_N,$  $= D_{S}A(|P_{S}|) + [[F_{S},0]]; a_{T} = D_{T}A(|P_{T}|) + [[-F_{T},0]]; a_{B} = D_{B}A(|P_{B}|) + [[F_{B},0]]; a_{P} = a_{E} + a_{W} + ([F_{B},0])]; a_{P} = a_{E} + ([F_{B},0])]; a_{P} = a_{E} + a_{W} + ([F_{B},0])]; a_$  $a_{N} + a_{S} + a_{T} + a_{B} + a_{p}^{0} - S_{p}\Delta V; a_{p}^{0} = \frac{\rho\Delta V}{\Delta t}; P_{i} = \frac{F_{i}}{D_{i}}(i = E, W, N, S, T, B); a_{p}, a_{i}$  为离散系数,  $D_{i}$  表示界面的扩散 传导性<sup>[1]</sup>, F, 为对流质量流量<sup>[1]</sup>, P, 表示对流与扩散的强度之比,其中下标 i 为 E, W, N, S, T 和 B 分别代表与 网格点 p 相邻的网格点; b 为离散后的源项;  $\Delta V$  为控制体的体积;  $\Delta t$  为时间步长;  $S_p$  为源项线性化处理后的负 斜率<sup>[1]</sup>; 函数  $A(|P_i|)$  取决于离散格式.本文采用幂函数格式时  $A(|P_i|) = [[(1 - 0.1|P_i|)^5, 0]]$ , 符号 "[[]]"表示取最大值.

**1.2.2** 边 界 条 件 边界条件主要包括进口边界、出口边界、壁面边界、自由水面边界以及丁坝边界,分别 作如下处理.

(1)进口边界 根据已知条件给定流速,即先按给定的流量及水深来确定垂向平均流速的横向分布,然 后再按垂向流速的分布公式来确定沿垂线每一点的流速值;湍流动能及湍流动能耗散率则由下式给定:

$$k_{\rm in} = 0.005 u_{\rm in}^2 \qquad \varepsilon_{\rm in} = \frac{C_{\mu} k_{\rm in}^2}{0.05h}$$
(3)

式中: $k_{in}, u_{in}, \varepsilon_{in}$ 分别为进口处的湍流动能、流速以及湍流动能耗散率;h为相应网格节点处的水深.

(2)出口边界 将出口边界设在远离所关心的区域,采用自由出流条件,各值沿流向的一阶导数均为0,即: $\frac{\partial \varphi}{\partial n}=0$ 

(3)壁面边界 采用 Spalding 等<sup>[2]</sup>提出的壁面函数法来处理壁面边界条件,其基本思想是:在粘性底层 内不布置任何节点,把靠近壁面的第一个计算节点布置在粘性底层之外的完全紊流区,即要求第一个计算节 点与壁面间的无因次距离  $z^+ = \frac{z_l u_*}{\nu} (z_l 为第一个节点距离壁面的距离, u_* 为摩阻流速)在 30~100 之间.此 时壁面上的切应力仍然按第一个内节点与边壁面上的速度之差来计算.这种方法能节省内存和计算时间,在 工程紊流计算中应用较广.$ 

(4)自由水面 自由水面位置由沿水深平均的平面二维模型计算得到.在自由水面上,除 *e*外的其它变量沿垂向的一阶导数均取为 0,*e*的值则由经验公式直接给定,即:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad \varepsilon_s = \frac{k_s^{1.5}}{0.43H} \tag{4}$$

式中: $k_s$ , $\varepsilon_s$ 分别为自由水面处湍流动能以及其耗散率;H为当地总水深.

(5)丁坝边界 即使在矩形的水槽当中加入方形的丁坝, 也会使边界条件变得很复杂.如何处理丁坝边界是丁坝模拟的 困难所在.本文的丁坝区域网格布置见图1,然后采用大系数法 与壁函数法相结合来处理丁坝区域的网格,即丁坝内的网格 (图1中由网格节点1~13所围的内部网格)采用大系数法处 理,亦即在计算时,令其计算式的分母为一大系数(如10<sup>30</sup>),则 其各值的计算结果即为0;而与丁坝壁面相邻的网格节点(图1

6 7 /8 *,*9 5 .4 /10 ,3 41 丁坝 区域 /2 /12 71 /13 图1 丁坝边界处理示意图

中的网格节点 1~13)则采用壁函数法来进行处理. 这样做既可 Fig. 1 Sketch of boundary treatment near spur dike 以避免复杂的网格生成,又能够准确地拟合丁坝边界.

**1.2.3** 模型求解 模型采用 SIMPLEC 算法,利用 Stone<sup>[3]</sup>提出的 SIP 方法来求解同位网格条件下三维水 流离散方程. 以各变量的误差均小于给定的值作为判断迭代收敛的依据,即:

$$Max(Error1, Error2, \dots, Errorn) \leq Error$$
(5)

式中:Error1, Error2,…, Errorn 为各变量的迭代误差; Error 为最大的允许误差.

#### 2 丁坝绕流数值模拟

#### 2.1 Holtz 丁坝实验

Holtz<sup>[4]</sup>分别做了坝头平面形状为矩形和三角形的非 淹没丁坝水流实验.本文选用坝头平面形状为矩形的实 验进行模拟.该实验水槽长为 30 m,宽为 2.5 m,水槽侧 壁均为直立光滑,丁坝的长为 25 cm,宽为 2.5 cm,实验时 平均水深为 23 cm,在未受丁坝干扰的区域水流的平均流 速为 0.345 m/s.

划分网格时,丁坝内同样布置网格,然后采用大系数 法与壁函数法相结合来处理丁坝边界.这样做既可以避 免复杂的网格生成,又能够准确地拟合复杂的丁坝边界. 算例中网格数为150×50×20.为了准确模拟丁坝附近的 流场,对丁坝附近的网格进行了加密(见图2),其中丁坝 所占网格为2×10×20.

计算的丁坝绕流沿水深平均后的流线图见图 3. 从 图 3可见,水槽中加入一非淹没丁坝后,在丁坝后产生一 回流区,其相对回流长度约为<sup>18-15</sup> = 12,这与实验观测 到的 11.5 相当吻合;同时从丁坝的局部放大图(见图 4) 中还可以看出,在丁坝前部也出现一小回流区,这与实际 观测一致.图 5 为 *z* = 17 cm 处流速实测值与计算值的验 证,可见模型的计算值与实测值基本一致.



Fig. 4 Streamline near spur dike





#### 2.2 Muneta 和 Shimizu 丁坝实验

上面是对 Holtz<sup>[4]</sup>的丁坝实验的模拟,并对其平面上的主流流速进行了比较.下面采用 Muneta 和 Shimizu<sup>[5]</sup>的实验来分析丁坝附近立面上的横向流速的分布情况,并与其实测值进行分析比较.

2.2.1 试验概况 Muneta和 Shimizu<sup>[5]</sup>于 1994年在实验室水槽中进行了多组丁坝绕流试验,本文选用其中一组实验进行模拟.试验水槽宽0.4 m,槽底坡度1‰,丁坝为长0.2 m、宽0.04 m的长方体(见图6),试

验流量为 0.001 87 m<sup>3</sup>/s,平均水深 0.07 m,平均流速约 0.067 m/s.

计算时水槽的末端出口位置选在远离丁坝的区域, 使其满足充分发展出口条件的要求.整个计算区域网格 为301×41×11,采用非均匀划分,壁面边界及丁坝附近进 行网格局部加密,远离丁坝区域的出口段适当加大网格 间距.

2.2.2 计算结果验证及分析 A-A 剖面、B-B 横断面的 计算流速与文献[6]计算结果的比较见图 7 和图 8;图 9 为 C-C 横断面横向流速的计算矢量图,C-C 横断面横向 流速的计算值与实测值的比较见图 10. 可见,本文的计算 值和实测值及文献[6]的计算结果吻合良好.









Fig. 8 Velocity field at cross-section *B-B* 



Fig. 9 Computed velocity field at cross-section C-C



Fig. 10 Comparison of the computed and measured values of velocity at cross-section *C-C* (注:图中虚直线为剖面位置,亦为横向流速等于零的位置)

*A-A* 剖面位于丁坝的坝根(*x*=0 处),由于丁坝的阻水作用,表面水流先流向丁坝,遇丁坝后沿着壁面附近向下流动,到底部后再向上运动,形成了一个顺时针的漩涡(见图 7),这与文献[6]的计算结果是相同的;由于丁坝对水流的收缩作用,使得靠近丁坝的横断面 *B-B* 上(丁坝的右面,*y*=25~35 cm)产生较大的横向流速,且底部横向流速比水面处要大得多,而在丁坝后(*y*=0~20 cm),由于受到丁坝的保护其横向流速则相对较弱;在下游回流区距丁坝稍远处的 *C-C* 横断面上则出现了一涡对(见图 9),在 *y*=30 cm 附近且靠近水面处,由于丁坝压缩作用有所减弱而形成了一逆时针方向的回流,而在 *y*=23 cm 附近且靠近底面处则出现了一个顺时针方向的漩涡,同时,Muneta 和 Shimizu<sup>[5]</sup>在其实验中亦实测到了这个涡对(见图 10). *C-C* 横断面横向流速的计算值与实测值的比较见图 10,模拟结果与实测值比较吻合.

#### 3 结 语

采用三维紊流模型对丁坝绕流进行了模拟研究,模型采用大系数法与壁函数法相结合对丁坝边界进行 了处理,这样做既可以避免复杂的网格生成,又能够准确地拟合复杂的丁坝边界.对 Holtz<sup>[4]</sup>以及 Muneta 和 Shimizu<sup>[5]</sup>的丁坝绕流实验进行了模拟.模拟结果表明,模型能有效地处理丁坝边界,较好地模拟坝头分离 流、丁坝后回流及回流区横断面上的二次流,模拟值与实测值吻合较好.

#### 参考文献:

- [1] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 32-52.
- [2] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Comp Methods Appl Mech Eng, 1974, (3): 269–289.
- [3] Stone H L. Iterative solution of implicit approximations of multi-dimensional partial differential equations [J]. SIAM J Numerical Analysis, 1968, 5: 530-558.
- [4] Holtz K P. Numerical simulation of recirculating flow at groynes [C]//Brebbia C A, Ouazar D, Ben Sari D. Computer methods in water resources. New York: Springwe Verlag, 1991: 463-477.
- [5] Muneta N, Shimizu Y. Numerical analysis model with spur-dike considering the vertical flow velocity distribution [J]. JSCE, 1994, 497: 31-39.
- [6] Nobuhisa Nagata, Takashi Hosoda, Tatsuaki Nakato, et al. Three-Dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures [J]. J of Hydraulic Eng, 2005, 131(12):1074-1087.