

· 航道及通航建筑物 ·



# 大涡模拟在河道平面二维水流 模拟中的初步应用\*

郭延祥<sup>1,2</sup>, 唐学林<sup>2</sup>, 陈雄盛<sup>2</sup>, 尚毅梓<sup>3</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;  
3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环调控与模拟国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 通过丁坝对水流进行控制是航道整治中常用的工程措施, 丁坝附近水流呈强紊动特性, 大涡模拟相对于基于雷诺方程的时均模型对涡旋有较强的捕捉能力。在直角坐标系的基础上, 将大涡模拟中的亚格子应力模型 (SGS 模型) 引入河道水流平面二维数学模型中, 通过盒式滤波函数将控制方程进行滤波, 大尺度量通过控制方程直接求解, 小尺度量借助 Smagorinsky 提出的亚格子尺度应力模型进行求解。采用空间等步长的正方形网格和交替方向隐式差分法对其控制方程进行离散求解。将模型初步应用于非淹没丁坝绕流的数值模拟中, 计算结果表明, 该模型对湍流旋涡的捕捉和水深计算较为合理, 计算精度可满足工程实践要求。

**关键词:** 非淹没丁坝; 绕流; 大涡模拟; SGS 模型; 平面二维

中图分类号: TV 135

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0112-05

## Application of 2-D LES in river flow simulation

GUO Yan-xiang<sup>1,2</sup>, TANG Xue-lin<sup>2</sup>, CHEN Xiong-sheng<sup>2</sup>, SHANG Yi-zi<sup>3</sup>

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China;

3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The spur dike is a common structure controlling river flow in channel regulation, around which the flow is characterized by strong turbulence. Comparing with the time-averaged models based on Reynolds equation, the large eddy simulation (LES) has a stronger capability to perform the eddy. The sub-grid-scale (SGS) model, one of LES, is introduced into 2-D river flow model under the Cartesian coordinate to filter the governing equations utilizing the box filter method. The large eddy is computed directly, while the small one is computed with the SGS model by Smagorinsky. The square grid and ADI algorithm is used to discretize the governing equations. The application of the model to simulation of river circumfluence around a non-submerged spur dike shows that the calculated eddies and depth distribution of turbulent flow are in accordance with the observation data and the precision satisfies the engineering requirements.

**Keywords:** non-submerged spur dike; circumfluence; LES; SGS model; 2-D flow model

通过丁坝对水流进行控制是航道整治中常用的工程措施<sup>[1-2]</sup>, 由于丁坝绕流有很强的三维紊流

特性, 需要采用三维数据模型进行模拟研究, 但对于工程应用, 在河道平面尺度上, 离丁坝头较

收稿日期: 2014-07-30

\*基金项目: 水利部黄河泥沙重点实验室开放课题基金 (20120003); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2012BH008); 国家自然科学基金 (51109112)

作者简介: 郭延祥 (1974—), 男, 高级工程师, 从事河流海岸水沙数值模拟。

远时水流的平面二维涡流远大于垂向流动, 可采用平面二维水流数学模型来计算流场。刘万利等<sup>[3]</sup>为了解决天然河道复杂的边界问题, 采用贴体正交网格并建立了一种平面二维水流数学模型, 通过该模型对安康枢纽回水变动区的水位和流速等进行了数值预测。袁德奎等<sup>[4]</sup>将“窄缝法”的思想引入二维水动力学模型中, 并将其与常用的“干湿判断法”数学模型进行对比, 通过计算实例表明: “窄缝法”可以更好地适用于潮流计算中。景何仿等<sup>[5]</sup>将传统的 RNG  $k-\varepsilon$  模型进行修正, 重新建立了适体坐标系的二维水流模型, 并用该模型模拟了黄河大柳树—沙坡头河段的典型弯道水流情况。目前工程上常用的平面二维水流模型大多基于雷诺平均法, 由于对流速脉动采用了时间平均, 使模型对非稳态水流结构的捕捉能力相对较弱。大涡模拟方法在 20 世纪末开始兴起<sup>[6]</sup>, 经过多年的发展, 技术已经较为成熟, 随着计算机性能的提高, 其计算量大的缺点也得到一定程度的克服, 基本具备了在工程实践中应用的条件。

## 1 数学模型

### 1.1 河道水深平均二维数学模型

河道水流是复杂的三维湍流运动, 对于宽浅河段, 可通过将流动沿水深方向积分, 并将水深方向的压力分布规律假定为静压分布, 同时忽略沿水深方向的水流加速度, 可将三维湍流简化为二维流动。常见的紊流模型一般是基于雷诺时间平均方法, 得到的二维水流基本控制方程为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hu)}{\partial t} + u \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(Hu)}{\partial y} = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gu}{C^2} \sqrt{u^2 + v^2} + \\ v_t \left[ \frac{2\partial^2(Hu)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(Hu)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(Hv)}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Hv)}{\partial t} + u \frac{\partial(Hv)}{\partial x} + v \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gv}{C^2} \sqrt{u^2 + v^2} + \\ v_t \left[ \frac{\partial^2(Hv)}{\partial x^2} + \frac{2\partial^2(Hv)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(Hu)}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为基准面以上的水位;  $H$  为总水深;  $u$ 、 $v$  分别为沿垂线积分后的时均流速在  $x$  和  $y$  方向的速度分量;  $C$  为谢才系数;  $v_t$  为涡黏系数;  $g$  为重力加速度。公式中忽略了地球自转时引起的柯氏力和外界风应力的影响。为了求得涡黏系数  $v_t$ , 研究者提出了不同的模式, 如经验公式<sup>[7]</sup>:  $v_t = \frac{C_e H}{C} \cdot$

$\sqrt{g(u^2 + v^2)}$ , 其中  $C_e$  实验室内取 0.15, 野外取 1.0。常用的  $k-\varepsilon$  模型即通过建立  $v_t$  和紊动能  $k$  及紊动耗散率  $\varepsilon$  的关系来求解  $v_t$ , 而后两者可表示为时均流速的函数。

### 1.2 河道二维水流大涡模拟 SGS 模型

如果采用大涡模拟的思想, 利用盒式滤波函数直接对  $N-S$  方程进行空间滤波, 大尺度量通过控制方程直接求解, 小尺度量借助 Smagorinsky 提出的亚格子尺度应力模型进行求解。忽略分子黏性后, 即可获得河道二维水流大涡模拟 SGS 模型的控制方程<sup>[8]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial y} = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ \frac{g\bar{u}}{C^2} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} + \frac{\bar{v}_t}{H} \left[ 2\frac{\partial^2(H\bar{u})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(H\bar{u})}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(H\bar{v})}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial y} = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \\ \frac{g\bar{v}}{C^2} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} + \frac{\bar{v}_t}{H} \left[ \frac{\partial^2(H\bar{v})}{\partial x^2} + \frac{2\partial^2(H\bar{v})}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(H\bar{u})}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: 除  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$  表示经空间滤波后的大尺度空间平均流速在  $x$ 、 $y$  方向的分量,  $\bar{v}_t$  表示对应空间平均

的涡黏系数外，其它各物理量含义与式(1)~(3)完全相同。

根据 Smagorinsky 模型,  $\nu_t = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|$ ,  $C_s$  为 Smagorinsky 常数, 对于简化得到的平面二维计算模型, 一般取值为 0.4;  $\Delta$  为格子滤波宽度, 取网格各边长的几何平均;  $|\bar{S}| = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ;  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 。

分别对比式(1)~(3)和式(4)~(6)不难看出, 通过雷诺时均法得到的方程和通过盒式滤波得到的空间平均方程, 其形式是一样的, 差别仅在于涡黏系数的计算方法不同。假设水流紊动是完全随机过程, 则空间平均流速和时间平均流速应该相等。据此, 可将采用雷诺方程的河道水流数学模型中的涡黏系数重新采用大涡模拟法求解, 用原模型中的时均流速直接代替大涡模拟中的空间平均流速, 即可得到河道二维水流大涡模拟 SGS 模型。

### 2 数值方法和定解条件

采用时间分裂交替方向隐式差分法和交错网格对控制方程进行离散求解。其方法是, 将时间步分成两步, 在第 1 步的计算中, 先假定 y 方向的变量为显式形式, 再将连续性方程和 x 方向的运动方程联合起来进行隐式求解 x 方向的水位和速度; 第 2 步的计算中, 假定 x 方向的变量为显式形式, 同样将连续性方程和 y 方向的运动方程联合起来进行隐式求解 y 方向的水位和速度。具体可参考文献[9]。

在河道上游入口给定流量过程, 假设流向垂直于入口边界, 在下游出口边界给定水位过程。初值由恒定流公式计算各网格的水位, 流速统一取为零。

### 3 实例计算

#### 3.1 研究对象

河道平面二维大涡模拟 SGS 模型是基于水深平均二维计算模型发展而来的, 需要验证该模型

对湍流运动计算的准确性、可靠性。文中通过用该模型对一个非淹没丁坝绕流的湍流运动进行数值研究, 将其模拟结果与试验值和文献[8]数据进行对比分析, 用以验证该模型的可靠性。图 1 给出了计算区域的平面示意图, 丁坝位于距离上游入口 3.8 m 处, 长 0.5 m、宽 0.1 m, 计算时采用正方形单元网格, 其尺度为  $x = y = 0.01$  m, 时间步长为 0.004 s,  $C_s$  取值为 0.4。上游入口给定流量边界为  $6.61 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$ , 下游出口给定水位边界为 0.09 m。

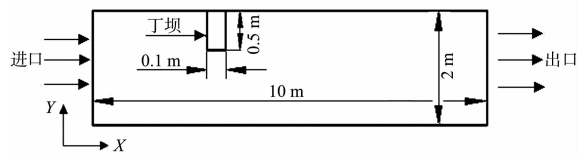
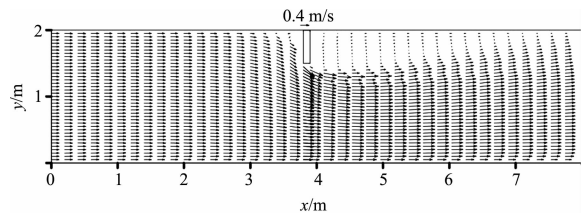


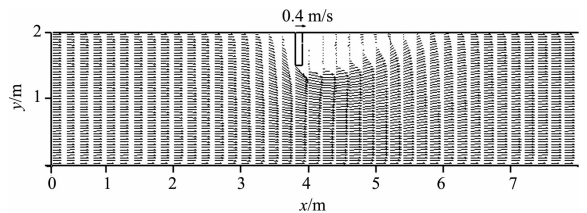
图 1 丁坝绕流平面

#### 3.2 计算结果分析

将采用河道二维大涡模拟 SGS 模型计算的结果与文献[8]计算结果、试验结果进行对比分析, 验证了该模型对湍流运动计算的准确性。图 2~4 为文献[8]数据和本文数据的对比结果。

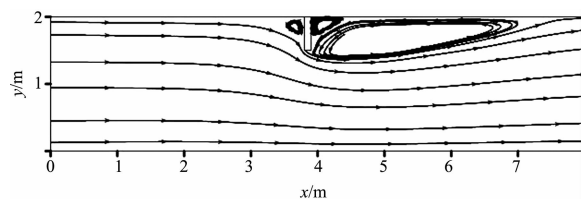


a) 文献[8]采用离散格子玻尔兹曼与亚格子应力联合模型计算结果

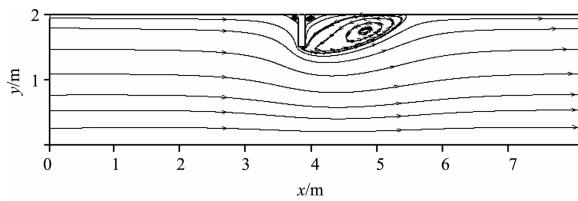


b) 本文模型计算结果

图 2 速度矢量

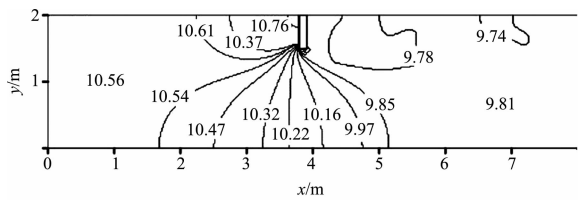


a) 文献[8]模型计算结果

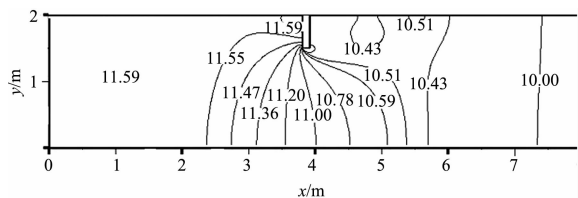


b) 本文模型计算结果

图 3 流线分布



a) 文献[8]模型计算结果

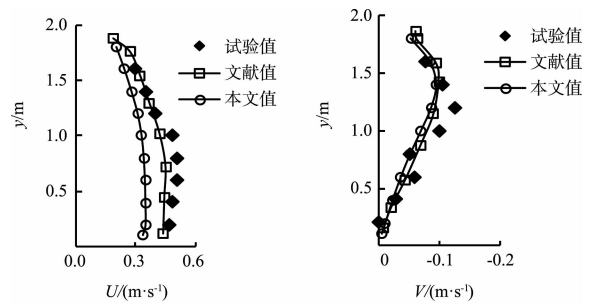


b) 本文模型计算结果

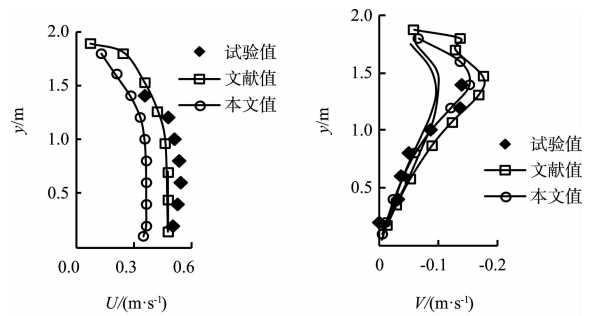
图 4 水深等值线 (单位: cm)

从速度图和流线图可以看出, 在丁坝下游出现了较大面积的回流区, 这可能是由于丁坝使过流断面面积减小, 丁坝下游断面面积又恢复正常, 水流绕过丁坝头部, 水流发生分离, 主流收缩, 随着流动的继续, 主流随着沿程的扩散逐渐恢复正常, 整个过程主流先收缩后扩散, 从而在丁坝下游产生了一个较大的回流区, 使得水位降低、流速减小。同时, 在丁坝根部的上下游两侧分别出现了一个角涡, 两角涡的方向相反, 其中, 上游侧的角涡方向与主流方向相反, 下游侧的角涡方向与主流方向相同, 两角涡的成功预测, 说明了该模型能够很好地捕捉出湍流运动的细节流态特性。从水深等值线可以看出, 在丁坝上游附近由于丁坝的存在及束水作用, 出现了局部的壅水现象, 同时水流也会由丁坝侧向对侧偏斜, 丁坝下游由于回流区的出现, 导致其水位降低, 同样水流由丁坝对侧向丁坝侧逐渐偏斜。综上分析, 本文模型计算出的流场规律与文献[8]模型计算的流场规律基本吻合, 另外这些流场规律也与理论分析相符, 从而验证了该模型在湍流运动计算中的准确性。

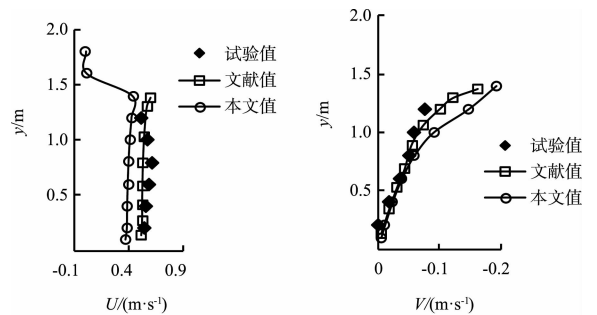
由定性分析可知, 该 SGS 模型对湍流运动规律的模拟是比较可靠的。为了更进一步探讨模型在数值上计算的准确性, 文中对丁坝附近 4 个过流断面的速度做了定量对比, 断面分别为  $x=3.34\text{ m}$ 、 $x=3.54\text{ m}$ 、 $x=3.80\text{ m}$  和  $x=4.03\text{ m}$ 。 $x$  和  $y$  方向的流速  $U$  和  $V$  对比见图 5。



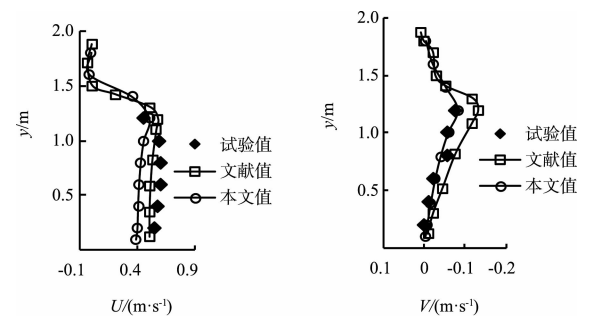
a)  $x=3.34\text{ m}$



b)  $x=3.54\text{ m}$



c)  $x=3.80\text{ m}$



d)  $x=4.03\text{ m}$

图 5 4 个断面速度分量对比

从图 5 可以看出,整体上 SGS 模型计算出的速度  $U$ 、 $V$  与试验值、文献[8]计算值吻合良好。在  $x = 3.34\text{ m}$  和  $x = 3.54\text{ m}$  两个断面的速度  $U$  值从丁坝对侧向丁坝侧逐渐减小,这是由于丁坝上游出现的壅水作用使得其速度降低;此时,速度  $V$  的绝对值在丁坝头部处达到最大,从丁坝头部向两侧逐渐减小,这是由于丁坝挡水作用使流动改向为  $y$  向的速度,另外丁坝的壅水使得水流从丁坝侧向对侧流动。在  $x = 3.80\text{ m}$  和  $x = 4.03\text{ m}$  两个断面的速度  $U$  值在  $y = 1.5 \sim 2.0\text{ m}$  段时由  $0.5\text{ m/s}$  左右急剧下降至接近于 0,这是由于该处水流被丁坝挡住使得速度骤降;在  $x = 4.03\text{ m}$  的断面,水流刚绕过丁坝面而在下游沿  $y$  轴正向向丁坝背后扩散,从而出现了速度  $V$  的正值。由图 5 分析可知,丁坝附近的水流规律符合实际情况,其数值与试验值相差不多,验证了该模型对湍流运动计算的准确性。

#### 4 结论

1) 在丁坝上游附近出现了壅水现象,同时丁坝侧的水位高于丁坝对侧的水位; 2) 在丁坝下游出现了一个较大的回流区域,回流区内的水位较低; 3) 在丁坝根部的上下游附近分别出现了一个小的角涡,上游的角涡方向与主流方向相反,下游的角涡方向与主流方向相同; 4) 该模型的计算结果与试验值和文献模型计算值吻合良好,验证

了该模型对湍流运动计算的准确性。

#### 参考文献:

- [1] 郑金海,王义刚.黄浦江航道改善方案的三维水流数学模型计算[J].水运工程,2002(1):34-37.
- [2] 张学梓.闽江口内沙浅滩整治方案[J].中国港湾建设,2005(5):37-396.
- [3] 刘万利,李一兵,崔喜凤,等.安康枢纽回水变动区航道整治数学模型研究[J].水道港口,2007(3):173-177.
- [4] Yuan De-kui, Sun Jian, Li Xiao-bao. Simulation of wetting and drying processes in a depth integrated shallow water flow model by slot method [J]. China Ocean Engineering, 2008(3): 491-502.
- [5] 景何仿,李春光.黄河大柳树—沙坡头河段典型弯道水流运动平面二维数值模拟[J].水利水电科技进展,2011(4):60-64.
- [6] 蒋昌波,吕昕,杨宜章.丁坝绕流的二维大涡数值模拟[J].长沙交通学院学报,1999(3):68-72.
- [7] Fischer H B, List E J, Koh R, et al. Mixing in Inland and Coastal Waters [M]. California: Academic Press, Inc, 1979.
- [8] 王武昌.泵站正向池内泥沙水流的数值模拟研究[D].北京:中国农业大学,2009.
- [9] 王阳.河流河道二维数学模型[D].西安:西安理工大学,2007.

(本文编辑 武亚庆)

