

床面颗粒在湍流相干结构作用下的运动

刘 波¹ 刘春嵘²

(1. 湖南大学机械与运载工程学院 湖南 长沙 410082 ; 2. 湖南大学工程力学系 湖南 长沙 410082)

摘要 采用大涡模拟的方法模拟台阶下游的三维瞬态流场 ,建立了床面上颗粒在水流作用下的运动方程。对颗粒运动方程进行数值求解 ,得到了颗粒的运动轨迹。根据数值模拟的结果 ,发现台阶下游流动具有三维性 ,且存在相干结构。距台阶 6 倍台阶高度附近的湍流强度具有最大值。在湍流相干结构的作用下 ,床面颗粒运动具有随机性 ,其运动轨迹可出现滚动、跳跃和悬浮 3 种情况。在湍流均方根速度较低时 ,床面颗粒的运动以滚动和跳跃为主。在湍流均方根速度较高时 ,床面颗粒能被水流扬起 ,并悬浮于水中。

关键词 相干结构 颗粒运动 大涡模拟 后台阶流

中图分类号 :TV142 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)S1-0033-04

在水利、海洋、港口、航道等工程中 ,水流作用下床面形状的演化规律有重要的意义。要研究床面形状在水流作用下的演化规律 ,首先必须了解床面泥沙颗粒在水流作用下的运动规律。

在过去的几十年里 ,人们对床面泥沙颗粒在水流作用下的运动规律进行了大量研究^[1]。在对床面泥沙颗粒进行受力分析的基础上 ,人们通过大量实验给出了床面泥沙颗粒起动的临界床面剪应力及推移质输沙率与床面剪应力的关系。由于测量和计算条件的限制 ,过去人们所研究的问题主要以单一方向的流动为主 ,并只考虑水流平均量对泥沙颗粒运动的影响。这些研究成果在河流输沙等一类问题中得到广泛应用。对于结构物附近局部冲刷这样的问题 ,由于水流中存在漩涡、强湍流等复杂结构 ,目前的理论还未能解决。近年来 ,由于流动显示技术、粒子图像测速(PIV)技术的发展及计算能力的不断提高 ,人们对湍流中的相干结构有了更深入的认识。湍流相干结构的知识被应用来研究湍流作用下床面上颗粒的运动。曹志先^[2]根据猝发事件发生的频率和所占面积与床面平均剪应力的关系 ,计算了床面上泥沙的上扬通量和床面平均剪应力的关系。Keshavarzy 等^[3]应用图像技术研究了泥沙颗粒起动概率与下扫事件中瞬时剪应力概率密度分布的关系。Sechet 等^[4]应用激光多普勒测速(LDV)技术对

壁面附近的瞬时流速进行了测量 ,同时用摄像机记录床面颗粒的运动轨迹 ,研究了推移质输沙与相干结构的关系。但是 ,这方面的研究工作刚刚开始 ,还有待深入系统的研究。

笔者采用大涡模拟的方法对后台阶下游的三维湍流场进行数值模拟 ,并建立了后台阶下游床面颗粒的运动模型。此外 ,还研究了后台阶下游的湍流相干结构及床面颗粒在其作用下的运动轨迹。根据对床面颗粒运动轨迹的分析 ,讨论了后台阶下游床面泥沙的起动与输运规律。部分结果与实验进行了比较。

1 数学模型

以后台阶流动为流动模型 ,图 1 给出了后台阶流动的示意图。当水流沿 x 轴的正方向流过 $x = 0$ 处的台阶时 ,由于水深发生突变 ,在台阶下游将有漩涡产生。当流动雷诺数 $Re(Re = U_0 D/\nu, U_0$ 为来流速度 , D 为台阶高度 , ν 为水的运动黏性系数)较大

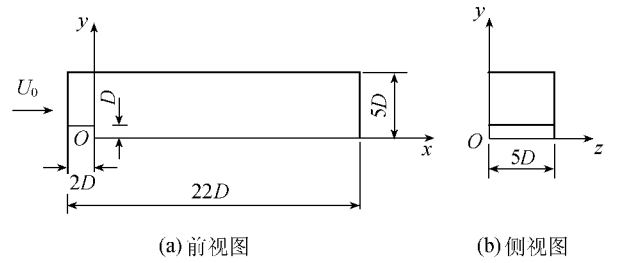


图 1 后台阶流动示意图

时,台阶下游的流动将由层流转变为湍流。采用大涡模拟方法模拟湍流运动,其控制方程为滤波后的动量方程和连续性方程。

1.1 流体控制方程及边界条件

动量方程：

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

连续性方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

式中 $\bar{u}_i$ 、 $\bar{p}$ 、 ρ 、 μ 分别为流体的速度分量平均值、压强平均值、密度和动力黏性系数； x_i ($i = 1, 2, 3$) 分别代表 X, Y, Z 坐标方向； τ_{ij} 为亚格子应力,它体现了小尺度扰动对大尺度运动的影响,本文采用标准 Smagorinsky-Lilly 模式模拟亚格子应力：

$$\begin{cases} \tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \mu_t \bar{S}_{ij} \\ \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \\ \mu_t = \rho C_s V^{1/3} \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \end{cases} \tag{3}$$

式中 $\bar{S}_{ij}$ 为应变率张量平均值； V 为网格体积； C_s 为经验系数,其值与流动有关,本文取 $C_s = 0.1$ 。

为了对流体运动进行数值模拟,除控制方程外,还需给出边界条件。本文采用直角坐标系,计算域范围为： $-2D \leq X \leq 20D, 0 \leq Y \leq 5D, 0 \leq Z \leq 5D$ 。在 $X = -2D$ 边界上的流速剖面为层流边界层的速度分布,边界层厚度 $\delta_{99} = 0.5D$ 。上边界($Y = 5D$)及侧边界($Z = 0, 5D$)采用对称边界条件。台阶上游底边界($-2D \leq X \leq 0, Y = D$)、台阶面($X = 0, 0 \leq Y \leq D$)、台阶下游底边界($-2D \leq X \leq 0, Y = 0$)采用无滑移条件。采用有限控制体积法对流动的控制方程进行求解,可得到瞬时流速和压强分布。

1.2 颗粒运动方程

本文给出 3 种状态(滚动、碰撞和悬浮)下的颗粒运动方程。

当砂颗粒绕点 M 滚动时,受到流体的拖曳力 F_{bD} 、升力 F_{bL} 、附加质量力 F_A 、有效重力 G 及黏着力 F_{ci} 的作用。根据角动量定律得到颗粒滚动方程：

$$I_p \frac{d\omega}{dt} = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{ci} \times \mathbf{s}_{iM} + \mathbf{F}_{bD} \times \mathbf{s}_{oM} + \mathbf{F}_{bL} \times \mathbf{s}_{oM} + \mathbf{F}_A \times \mathbf{s}_{oM} + \mathbf{G} \times \mathbf{s}_{oM} \tag{4}$$

式中： I_p 为颗粒转动惯量； ω 为颗粒转动角速度； N 为除 M 点外接触点数目； $\mathbf{s}_{oM}$ 和 $\mathbf{s}_{iM}$ 分别为颗粒质心和接触点指向接触点 M 的距离向量。

拖曳力和升力采用李桢儒等^[5]的结果计算。附

加质量力 F_A 的计算公式为 $F_A = -m_A \frac{du_p}{dt}$, m_A 为球的附加质量。有效重力表示为 $G = (\rho_s - \rho) \pi d^3 g / 6$, g 为重力加速度。黏着力采用韩其为^[6]给出的公式计算。

假设颗粒和床面发生弹性碰撞,则其碰撞方程为

$$\begin{cases} |V_{p2}| = |V_{p1}| \\ \mathbf{n}_c \times V_{p2} = \mathbf{n}_c \times V_{p1} \\ \mathbf{n}_c V_{p2} = -\mathbf{n}_c V_{p1} \end{cases} \tag{5}$$

式中： V_{p1} 和 V_{p2} 分别为碰撞前和碰撞后颗粒的速度； $\mathbf{n}_c$ 为碰撞点处床面的单位法向量。

当砂颗粒离开床面做悬浮运动时,受到流体的拖曳力 F_D 、升力 F_L 、附加质量力 F_A 和有效重力 G 的作用。根据动量定律得到悬浮颗粒的运动方程如下：

$$\frac{1}{6} \rho_s \pi d^3 \frac{dV_p}{dt} = F_D + F_L + F_A + G \tag{6}$$

对于悬浮颗粒,在计算拖曳力和升力时,本文分别采用 Clift 等^[7]和 Mei^[8]的结果。

颗粒运动方程为 1 组常微分方程,本文采用 4 阶龙格-库塔法进行求解。

2 结果与讨论

2.1 流场特性

由大涡模拟方法可得到瞬态流场。图 2 给出了 2 个不同时刻台阶下游垂直断面(X - Y 平面)的瞬态流速场。由图 2 可以看出在台阶下游存在回流区,回流区内流速很低。回流区的上方是流速很高的主流区。在回流区和主流区之间是流速梯度很高的自由剪切层。由于强剪切层的存在,流动发生失稳形成 T-S 波。随着 T-S 波的发展,自由剪切层中展向涡被扭曲成三维结构的涡。在涡的相互作用下,将会出现间歇性的高速流冲向床面(笔者称其为高速

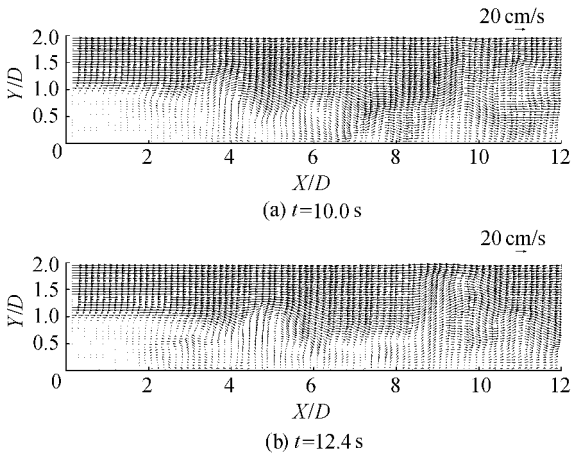


图 2 台阶下游垂直断面瞬时流场 ($Re = 5000$)

下分流)。图2中能看到 $t = 10.0\text{ s}$ 时大约在距台阶 $5D \sim 8D$ 的范围内出现了向下俯冲的高速流,而在 $t = 12.4\text{ s}$ 时距台阶 $5D \sim 8D$ 范围内向下俯冲的高速流已消失。大涡模拟还可给出更多时刻的瞬态流场,由这些瞬态流场可发现向下俯冲高速流出现的时间和空间具有一定的随机性,但基本上都是在距台阶 $5D \sim 8D$ 范围出现,出现的形态也基本相同。这种流动结构符合湍流相干结构的定义。

台阶下游瞬态流场的另一个重要特性就是流动的三维性。在台阶上游流动入口处的流动具有很好的二维性。但当流动越过台阶后,二维流动就发展成三维流动。流动的三维性可由台阶下游横断面($Y-Z$ 平面)上的瞬态流速场(图3)看出。由图3可以看出,在 $Y-Z$ 平面的流向涡和较大的展向(Z 方向)流速。三维流动主要出现在 $Y < 1.5D$ 的区域,在 $Y > 1.5D$ 的区域流动仍具有较好的二维性。流动三维性主要是因自由剪切层中三维结构涡形成的。自由剪切层中的涡对自由剪切层上方区域的影响很小,因此自由剪切层上方的区域流动能保持较好的二维性。由于台阶下游逆压梯度的影响,自由剪切层被大尺度流动带到回流区及其下游区域,因此在这些区域内流动出现三维性。

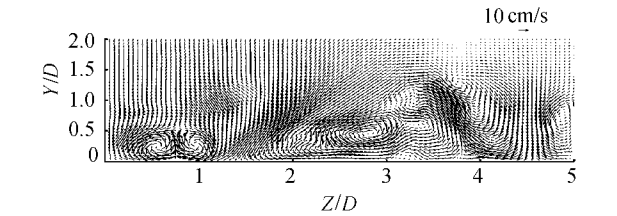


图3 台阶下游横断面瞬态流场($Re = 5000$)

对大涡模拟得到的瞬态流场进行 20 s 的统计平均,得到台阶下游的平均流速和湍流均方根速度。图4、图5分别给出了计算得到的台阶下游平均流向速度剖面 and 湍流均方根速度,并与Liu等^[9]的实验结果进行了对比。结果表明,计算结果与实验结果吻合较好。由图4、图5还可看出,回流区的平均长度大约为6倍台阶高度。Armaly等^[10]、Jovic等^[11]、Le等^[12]得到的平均回流区长度大约也在6倍台阶高度左右。由笔者的数值模拟结果发现,湍

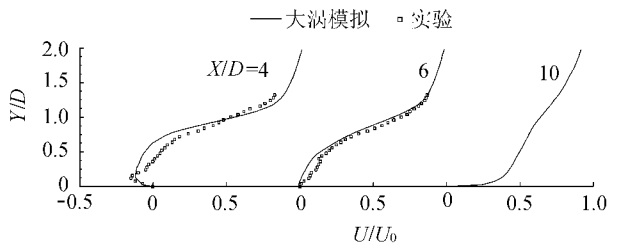


图4 台阶下游平均流向速度剖面($Re = 5000$)

流均方根速度的最大值也在距台阶6倍台阶高度附近,这可能是由于自由剪切层中高强度漩涡的相互作用引起的。

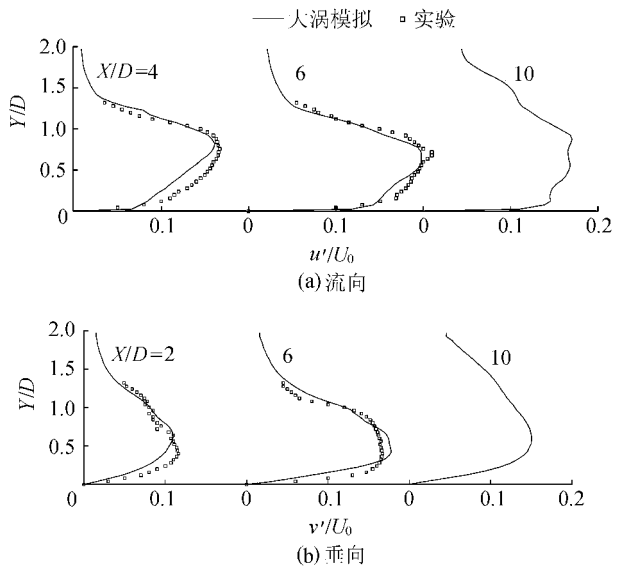


图5 台阶下游湍流均方根速度($Re = 5000$)

2.2 颗粒运动轨迹

笔者对台阶下游不同位置处床面上颗粒的运动轨迹进行了数值模拟。模拟的颗粒密度为 1400 kg/m^3 ,粒径为 0.425 mm 。模拟发现颗粒的运动轨迹可分为3类:(a)在床面上滚动;(b)在床面上跳跃;(c)离开床面悬浮在水中。

图6(a)为颗粒在床面上滚动时的运动轨迹。当颗粒在床面上滚动时,由于床面不平,颗粒上下波动,但波动的幅度很小(小于 $0.1d$)。颗粒在床面上滚动的情况主要发生在床面附近的平均流速和湍流均方根速度都较低的情况。在这种情况下流体作用

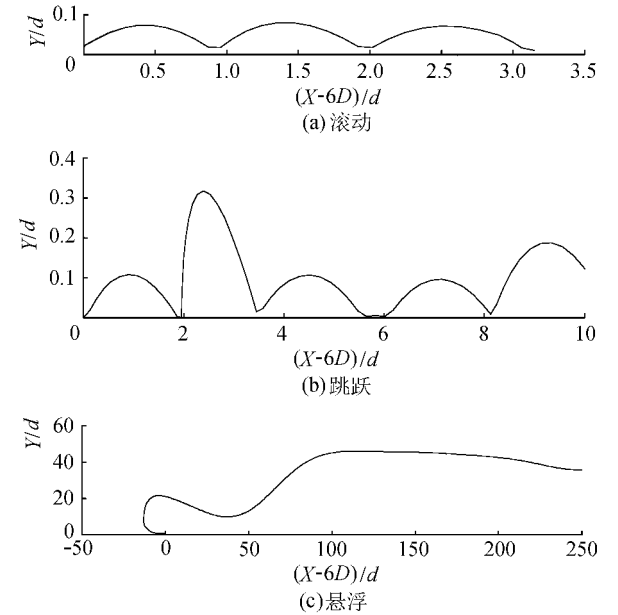


图6 颗粒运动轨迹

在颗粒上的力较小,颗粒大多数情况处于静止状态。有少数颗粒偶尔会发生运动,但运动速度很低,因此只能在床面上滚动,不可能离开床面。

图 6(b)为颗粒在床面上滚动时的运动轨迹。当颗粒在床面跳跃时,能离开床面一定高度,其跳跃高度具有一定的随机性,最大跳跃高度约为 $0.3d \sim 0.5d$ 。颗粒在床面上跳跃的情况主要发生在床面附近平均流速较高但湍流均方根速度较小时。这时,流体作用在颗粒上的水平力较大,颗粒能以较高的速度运动。当颗粒与床面碰撞时,则有可能跳离床面。由于颗粒的密度比水大,颗粒在跳离床面一定高度后,最终又落到床面上。

图 6(c)为颗粒离开床面悬浮在水中时的运动轨迹。在这种情况下颗粒被扬起,扬起的高度比颗粒粒径大得多,颗粒最终离开床面并被水流带走。颗粒被扬起的情况主要发生在床面平均流速大、湍流均方根速度较高的情况。颗粒在高速流的作用下会在床面跳跃。而在湍流均方根速度较高的区域,往往存在较强的漩涡,当颗粒跳离床面时就有可能被强漩涡带到离床面更高的地方,然后被水流带走。

3 结 论

- a. 在雷诺数较大的情况下,后台阶下游瞬态流场具有三维性。
- b. 后台阶流中,湍流均方根速度的最高值出现在再附点附近。
- c. 在台阶下游的流场中颗粒运动具有随机性,其运动轨迹可出现滚动、跳跃和悬浮 3 种情况。颗粒在湍流均方根速度较低时,床面颗粒的运动以滚动和跳跃为主。在湍流均方根速度较高时,床面颗粒能被水流扬起,并悬浮在水中。

参考文献:

[1] BEHESHTI A A ,ATAIE-ASHTIANI B. Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement[J]. Coastal Engineering ,2008 ,55 :423-430.

[2] 曹志先.基于湍流猝发的床面泥沙上扬通量[J].水利学报 ,1996(5) :18-21.

[3] KESHAVARZY A ,BALL J E. An application of image processing in the study of sediment motion[J]. Journal of Hydraulic Research ,1999 ,37(4) :559-576.

[4] SECHET P ,GUENNEC B L. The role of near wall turbulent structures on sediment transport[J]. Wat Res ,1999 ,33(17) :3646-3656.

[5] 李桢儒,陈媛儿,赵之.作用于床面球体的推力及上举力试验研究 C]//第二次河流泥沙国际学术讨论会组织委员会.第二次河流泥沙学术讨论会论文集.北京:水利电力出版社,1983 :330-343.

[6] 韩其为.泥沙起动规律及起动流速[M].北京:科学出版社,1999.

[7] CLIFT R ,GRACE J R ,WEBER M E. Bubbles ,drops and particles[M]. New York :Academic Press ,1978.

[8] MEI R. An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number[J]. Int J Multiphase flow ,1992 ,18(1) :145-147.

[9] LIU Chun-rong ,HUHE A ,TAO Long-bin. Experiment study on sediment incipience in backward-facing step flow[J]. Journal of Hydrodynamics ,Ser. B ,2007 ,19(2) :173-179.

[10] ARMALY B F ,DURST F ,PEREIRA J C F ,et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step[J]. J Fluid Mech ,1983 ,127 :473-496.

[11] JOVIC S ,DRIVER D M. Backward-facing step measurement at low Reynolds number , $Re_h = 5000$ [R]. New York :NASA Tech Mem ,1994.

[12] LE H ,MOIN P ,KIM J. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step[J]. J Fluid Mech ,1997 ,330 :349-374.

(收稿日期 2009-01-13 编辑:高建群)

(上接第 10 页)

[2] 裴源生,李云玲,于福亮.黄河置换水量的水权分配方法探讨[J]. 资源科学 ,2003 ,25(2) :32-37.

[3] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.

[4] 苑希民,李鸿雁,刘树坤,等.神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M].北京:水利水电出版社,2002.

[5] 韩力群.人工神经网络理论、设计及应用[M].北京:化学工业出版社,2002.

[6] 杨丽美.天津市水资源配置方案评价研究[D].天津:天津大学,2007 :52-54.

[7] 曹利军,王华东.可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究[J].环境科学学报,1998 ,18(5) :526-532.

[8] CHANG Ni-bin. Optional Management of Environmental and Land Resource in a Reservoir Watershed by Multiobjective Programming[J]. Journal of Environmental Management ,1995 ,44 :145-161.

[9] 李兰秀.天津市水资源安全研究[D].天津:天津大学,2006.

[10] 高学平,郭磊,李兰秀.蓄滞洪区蓄水优化研究[J].干旱区资源与环境,2006 ,20(5) :46-50.

(收稿日期 2009-04-27 编辑:高建群)