

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.05.009

## 泵站前池水沙流的数值模拟

唐学林, 王武昌, 王福军, 黎耀军

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对泵站前池内的水沙流动, 基于格子 Boltzmann 方法和大涡模拟思想, 建立了二维浅水 LBM-BGK 模型和泥沙数学模型的联合计算模式, 进行了水沙流的数值模拟研究. 介观 LBM-BGK 模型采用了 LES 的亚格子尺度应力 SGS 模式模拟二维浅水方程, 宏观二维平面泥沙数学模型包括悬沙输运方程、河床变形方程、水流的挟沙力公式等. 水流与悬沙之间的求解方法采用非耦合解模式, 即先求解出水流运动控制方程, 再求解泥沙输运方程, 推求前池底部的冲淤变化. 最后, 成功地模拟了泵站前池水沙流的流速分布、水深变化和旋涡的位置和尺寸, 以及泥沙的冲淤变化. 流速计算结果与试验结果比较吻合. 计算结果表明: 此联合计算模式在一定程度上客观地、较好地重演了前池内水流的基本流态以及泥沙的冲淤变化.

**关键词:** 水沙流; 泵站前池; 格子 Boltzmann 方法; 大涡模拟; 二维浅水方程; 泥沙数学模型

**中图分类号:** S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)05-0411-07

## Numerical simulation of slit-laden flows in pumping station forebay

Tang Xuelin, Wang Wuchang, Wang Fujun, Li Yaojun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on a two-dimensional lattice Boltzmann method coupled with large eddy simulation (LES), a LBM-LES model combined with sediment mathematic model is proposed for 2D silt-laden flows in a pumping-station forebay. Shallow water equations is numerically simulated by the mesoscopic LBM-BGK (Bhatnagar Gross Krook) model and the turbulence can be taken into account and modeled efficiently by a Sub-Grid-Scale stress (SGS) model. A macroscopic 2D horizontal sediment mathematic model consists of suspension transport equations, riverbed deformation equations, formula of sediment-carrying capacity and so on. The segregating scheme is adopted to solve the governing equations for turbulent flows and sediment governing equations, i. e., the solutions to the turbulence governing equations, suspension transport equations, and sediment erosion & deposition along the forebay-bed are solved sequentially. Finally, the simulated velocity distribution is in agreement with the experimental data, and the depth distributions, the vortex position and size as well as the sediment erosion-deposition are successfully predicted in the forebay. All the calculation results agree well the hydrodynamic rules in nature. The numerical results show that this model can well reproduce the sediment-laden flow patterns, sediment erosion and deposition in the forebay, and the mathematical model and numerical algorithms are accurate, reliable and feasible to predict the sediment-laden flows in forebays.

**Key words:** slit-laden flows; pumping station forebay; lattice Boltzmann method; large eddy simulation; 2D shallow water equations; sediment mathematic model

收稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976124, 50779069); 新世纪优秀人才支持计划项目(NETC-10-0784)

作者简介: 唐学林(1969—)男, 河南南阳人, 教授(xl-tang@mail.tsinghua.edu.cn), 主要从事流体工程的两相流计算研究.

王武昌(1985—)男, 湖北天门人, 硕士研究生(talmud123@126.com), 主要从事流体工程的CFD研究.

在泵站工程中,当泵站前池设计不合理时,容易导致前池内出现水壁脱流、回流和旋涡等不良流态;在多泥沙的水源泵站中,前池内的不良流态还会引起泥沙的淤积等问题,从而堵塞进水流道,严重时还会恶化水泵的进水条件,致使水泵效率降低,甚至危及水泵的运行安全<sup>[1]</sup>.所以设计合理的前池,对确保水泵机组正常、稳定、高效运行十分重要.同时,对于含沙水流的泵站,泵站前池普遍存在淤积问题,给泵站运行、管理带来不便,有必要研究浑水泥沙冲淤,探求前池防淤措施.

对于泵站工程,最好的方法就是采用物理模型试验,研究各工程方案对水流运动及河床冲淤的作用,由此优化出技术可行、经济合理的方案,为工程规划设计和施工提供科学依据.但物模试验周期长、费用高,且受比尺及试验环境、场地等的影响<sup>[2]</sup>.近年来,随着现代计算机技术和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的飞速发展,通过数值模拟方法复演水沙流的自然演变,并通过试验数据加以验证,这种研究方法已成为泵站方案优化的重要手段<sup>[3]</sup>.

对于水体湍流模拟,格子 Boltzmann 方法(lattice Boltzmann method, LBM)<sup>[4]</sup>和大涡模拟方法(large eddy simulation, LES)<sup>[5]</sup>以其独特的优势和特点,成为目前研究的热点.与其他数值方法相比, LBM 具有数值方法简单、程序易于实现,方便处理复杂边界,计算效率高,并且很适合于大规模的并行运算等显著优点,但是,目前的 LBM 模式还有待于进一步提高雷诺数湍流的模拟. LES 利用滤波函数对 Navier-Stokes (N-S) 方程进行空间滤波,大尺度涡运动通过滤波 N-S 方程直接模拟,而小尺度涡具有广泛的普适性,其对大尺度涡的影响则通过建立模型来模拟,即亚格子尺度应力模型(Sub-Grid-Scale stress, SGS).同时,二维水流泥沙数学模型近年来发展迅速,主要用于研究泥沙水流的冲淤变化,并已用于解决大范围的工程泥沙问题<sup>[6]</sup>.

因此,文中利用 LES 和 LBM 各自模型的优势,构建 2D LBM-LES 模型和泥沙数学模型的联合计算模式,对泵站前池的水沙流进行数值模拟,预测前池水流流态和泥沙冲淤变化,并与相关试验数据进行比较分析<sup>[2]</sup>.

## 1 二维浅水流动的 LES 控制方程

利用滤波函数对三维湍流 N-S 方程进行滤

波,然后再沿水深方向积分平均,可得到以下的二维浅水 LES 控制方程<sup>[7]</sup>.

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial(hu_i)}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x_i}, \quad (2)$$

式中:  $u_i$  和  $u_j$  为滤波后的速度张量;  $h$  为水深;  $g$  为重力加速度;  $\nu$  为分子运动黏度;  $\tau_{bi}$  为前池底面摩擦阻力张量  $\tau_{bi} = \rho C_b \sqrt{u_j u_j}$ ;  $\rho$  为液体密度;  $C_b$  为前池底面阻力系数;  $z_b$  为前池底面高程;  $\tau_{ij}$  为亚格子尺度应力.

采用 Smagorinsky 模型,即 SM(Smagorinsky model) 模型  $\tau_{ij}$  可写为

$$\tau_{ij} = -2\nu_t S_{ij}, \quad (3)$$

式中:  $\nu_t$  为湍动黏度  $\nu_t = C_s \Delta^2 |S|$ ;  $C_s$  为 Smagorinsky 常数  $\Delta$  为格子滤波宽度,  $|S| = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}}$ ;  $S_{ij}$  为速度应变率张量  $S_{ij} = \left[ \frac{\partial(hu_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(hu_j)}{\partial x_i} \right] / 2h$ .

## 2 LBM-LES 联合模型

考虑到前池底面摩擦力对流场的影响,含有外力项的浅水 LBM-BGK(Bhatnagar Gross Krook) 方程可写为<sup>[7]</sup>

$$f_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) - f_\alpha(x, t) = -\frac{1}{\tau_e} [f_\alpha(x, t) - f_\alpha^{eq}(x, t)] + \frac{\delta t}{6e^2} e_{\alpha i} F_i, \quad (4)$$

式中:  $f_\alpha$  为  $\alpha$  方向上的速度分布函数;  $e = \delta x / \delta t$  为格子速度,  $\delta x$  为网格尺度,  $\delta t$  为时间步长;  $e_\alpha$  表示格子点在  $\alpha$  方向上的速度矢量;  $e_{\alpha i}$  为速度矢量  $e_\alpha$  的分量;  $\tau_e$  为总松弛时间,包括分子运动黏度的松弛时间  $\tau$  和湍动黏度的松弛时间  $\tau_t$ , 即  $\tau_e = \tau + \tau_t$ ;  $f_\alpha^{eq}$  为  $\alpha$  方向上的局部平衡分布函数;  $F_i$  为外力项  $F_i = -\frac{\tau_{bi}}{\rho} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x_i}$ .

在 LBM 中,二维九点(D2Q9)格子模式见图 1. 粒子沿着 1-8 方向运动, 0 方向代表停留在节点上的粒子,其速度为 0, 那么,各方向的格子速度  $e_\alpha$  计算表达式为

$$e_\alpha = \begin{cases} (0, 0), & \alpha = 0, \\ e \left[ \cos \frac{(\alpha-1)\pi}{4} \sin \frac{(\alpha-1)\pi}{4} \right] & \alpha = 1, 3, 5, 7, \\ \sqrt{2}e \left[ \cos \frac{(\alpha-1)\pi}{4} \sin \frac{(\alpha-1)\pi}{4} \right] & \alpha = 2, 4, 6, 8. \end{cases}$$

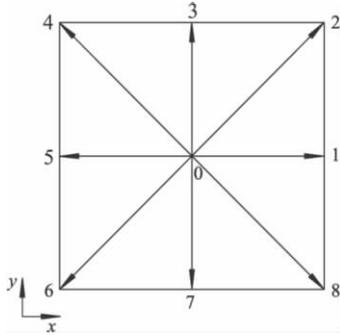


图 1 D2Q9 格子模式  
Fig. 1 Lattice pattern: D2Q9

利用 Chapman-Enskog 展开法可恢复 2D 浅水 LES 控制方程 相应的局部分布函数表达式为

$$f_\alpha^{eq} = \begin{cases} h - \frac{5gh^2}{6e^2} - \frac{2h}{3e^2}u_i u_i, & \alpha = 0, \\ \frac{gh^2}{6e^2} + \frac{h}{3e^2}e_{\alpha i}u_i + \frac{h}{2e^4}e_{\alpha i}e_{\alpha j}u_i u_j - \frac{h}{6e^2}u_i u_i, & \alpha = 1, 3, 5, 7, \\ \frac{gh^2}{24e^2} + \frac{h}{12e^2}e_{\alpha i}u_i + \frac{h}{8e^4}e_{\alpha i}e_{\alpha j}u_i u_j - \frac{h}{24e^2}u_i u_i, & \alpha = 2, 4, 6, 8. \end{cases}$$

水深  $h$  和流速  $u_i$  可表示为

$$\begin{cases} h = \sum_\alpha f_\alpha, \\ u_i = \frac{1}{h} \sum_\alpha f_\alpha e_{\alpha i}. \end{cases} \quad (5)$$

有效运动黏度和总松弛时间之间的关系式为

$$\nu_e = \frac{e^2 \delta t}{6} (2\tau_e - 1), \quad (6)$$

同时, 分子运动黏度满足关系式

$$\nu = \frac{e^2 \delta t}{6} (2\tau - 1), \quad (7)$$

由此可得湍动黏度和湍动松弛时间之间的关系式为

$$\tau_t = \frac{3\nu_t}{e^2 \delta t}. \quad (8)$$

为了得到总松弛时间  $\tau_e$ , 首先, 式(3) 通过应变率张量  $S_{ij}$  来求得湍动松弛时间  $\tau_t$ . 但  $S_{ij}$  是由宏观物理量决定的, 所以, 通过 LBM 的 Chapman-Enskog 展开法, 基于 LBM-BGK-SGS 方程的展开形式, 可得到应变率张量的分布函数表达式为

$$S_{ij} = \frac{1}{2h} \left[ \frac{\partial(hu_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(hu_j)}{\partial x_i} \right] = - \frac{3}{2e^2 h \tau_e \delta t} \sum_\alpha e_{\alpha i} e_{\alpha j} (f_\alpha - f_\alpha^{eq}), \quad (9)$$

于是, 湍动黏度  $\nu_t$  可表示为

$$\nu_t = C_s \Delta^2 \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} = \frac{3C_s \Delta^2}{\sqrt{2}e^2 h \tau_e \delta t} \sqrt{\Pi_{ij} \Pi_{ij}}, \quad (10)$$

式中:  $\Pi_{ij} = \sum_\alpha e_{\alpha i} e_{\alpha j} (f_\alpha - f_\alpha^{eq})$ .

如果  $\Delta = \delta x$ , 湍动松弛时间可写为

$$\tau_t = \frac{9C_s}{\sqrt{2}e^2 h (\tau_t + \tau)} \sqrt{\Pi_{ij} \Pi_{ij}}, \quad (11)$$

于是, 可通过求解方程(11), 求得湍动黏度的松弛时间为

$$\tau_t = \frac{-\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{36C_s}{\sqrt{2}e^2 h} \sqrt{\Pi_{ij} \Pi_{ij}}}}{2}. \quad (12)$$

最终, 总松弛时间为

$$\tau_e = \tau + \tau_t = \frac{\tau + \sqrt{\tau^2 + \frac{36C_s}{\sqrt{2}e^2 h} \sqrt{\Pi_{ij} \Pi_{ij}}}}{2}. \quad (13)$$

总之, 上述 2D 浅水的 LBM-LES 控制方程的求解过程为: ① 给定初始水深和流速; ② 计算局部分布函数  $f_\alpha^{eq}$ ; ③ 计算总松弛时间; ④ 计算分布函数  $f_\alpha$ ; ⑤ 更新水深和流速; ⑥ 如果不收敛, 回到 ②.

### 3 平面二维泥沙数学模型

#### 3.1 二维悬沙输运方程

水深平均的平面二维输运方程为

$$\frac{\partial(hS)}{\partial t} + \frac{\partial(huS)}{\partial x} + \frac{\partial(hvS)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial(hS)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial(hS)}{\partial y} \right] + \alpha \omega (S^* - S). \quad (14)$$

式中:  $S$  为含沙量;  $\sigma_s$  为扩散系数;  $S^*$  为水流挟沙能力;  $\omega$  为泥沙流速.

假设非均匀悬移质泥沙按其粒径大小可分成  $n_0$  组, 用  $S_L$  表示第  $L$  组粒径泥沙含沙量,  $P_{SL}$  为此粒径悬沙含沙量所占的比值, 于是有式(15) 关系式:

$$\begin{cases} S_L = P_{SL} S, \\ S = \sum_{L=1}^{n_0} S_L. \end{cases} \quad (15)$$

针对非均匀悬移质中第  $L$  组粒径的含沙量, 二

维悬移质不平衡输沙基本方程为

$$\frac{\partial(hS_L)}{\partial t} + \frac{\partial(huS_L)}{\partial x} + \frac{\partial(hvS_L)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial(hS_L)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial(hS_L)}{\partial y} \right] + \alpha_L \omega_L (S_L^* - S_L), \quad (16)$$

式中:  $S_L^*$  为水流挟沙能力;  $\alpha_L$  为含沙量恢复饱和系数;  $\omega_L$  为第  $L$  组粒径泥沙的沉速。

### 3.2 分组挟沙能力公式

针对非均匀沙,可采用由悬移质级配求分组挟沙力的方法,计算水流的总体挟沙能力<sup>[8]</sup>,得到总体挟沙能力公式为

$$S^*(\omega) = \left[ \sum_{L=1}^{n_0} \frac{P_{SL}}{S^*(L)} \right]^{-1} = K_0 \left[ \frac{(u^2 + v^2)^{3/2}}{h} \right]^m / \sum_{L=1}^{n_0} P_{SL} \omega_L^m, \quad (17)$$

式中:  $K_0$  为挟沙能力系数;  $m$  为指数;  $\omega_L$  为第  $L$  组粒径泥沙的沉速,通常由式(18)的经验公式确定。

$$\omega_L = \sqrt{\left( 13.95 \frac{\nu}{D_L} \right)^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D_L} - 13.95 \frac{\nu}{D_L}, \quad (18)$$

式中:  $\rho_s$  为泥沙的干密度;  $D_L$  为第  $L$  组泥沙颗粒的粒径。

于是,第  $L$  组粒径泥沙的挟沙能力就可以通过悬移质泥沙的级配计算得到:

$$S_L^* = P_{SL} S^*(\omega). \quad (19)$$

### 3.3 河床变形方程

文中主要考虑悬移质输运引起的河床变形。针对非均匀沙第  $L$  组粒径的悬沙,平面二维悬移质河床变形方程可以表示为

$$\rho_s \frac{\partial z_{bL}}{\partial t} = \alpha_L \omega_L (S_L - S_L^*), \quad (20)$$

式中:  $z_{bL}$  为河床高程。

河床总变形为

$$z = \sum_{L=1}^{n_0} z_{bL}. \quad (21)$$

### 3.4 数值方法

悬移质泥沙为非均匀沙,按照其粒径大小总共可分为 6 组,各粒径大小及其级配见表 1。给定进口含沙量为  $S_0 = 0.50 \text{ kg/m}^3$ 。同时,假设前池底为刚性床面,因而不用考虑床沙交换而引起悬移质泥沙级配的变化。

采用有限体积法离散泥沙数学模型的相关方程,其中采用混合格式离散对流项,采用二阶中心差分离散扩散项,采用 TDMA 方法求解离散方程。

表 1 悬移质泥沙分组粒径级配表

组别	1	2	3	4	5	6
$D_L/(10^{-6}\text{m})$	2.5	7.4	16.9	36.8	73.6	169.0
$P_{SL}/\%$	10.0	13.6	20.9	25.9	17.6	12.0

## 4 边界条件和初始条件

计算域的进出口和固壁边界条件如图 2 所示。

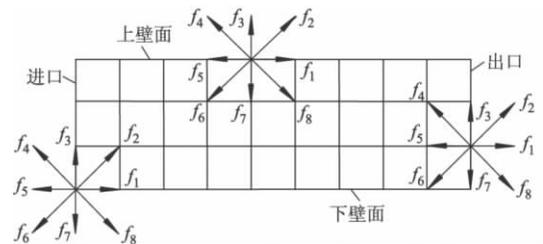


图 2 边界条件示意图

Fig. 2 Boundary condition schemes

### 4.1 固壁边界条件

水体 LBM: 采用反弹格式,以确保无滑移、无渗透的固壁边界条件。

泥沙: 泥沙浓度梯度为 0。

### 4.2 进口边界条件

水体 LBM: 假设在与边界垂直的方向上,反弹格式对非平衡态部分仍然正确<sup>[9]</sup>。由此可得未知分布函数  $f_1$ ,  $f_2$  和  $f_8$  的表达式为

$$f_1 = f_5 + \frac{2hu}{3e}, \quad (22)$$

$$f_2 = \frac{hu}{6e} + f_6 + \frac{f_7 - f_3}{2}, \quad (23)$$

$$f_8 = \frac{hu}{6e} + f_4 + \frac{f_3 - f_7}{2}. \quad (24)$$

泥沙: 均匀来沙。

### 4.3 出口边界条件

水体 LBM: 速度分布函数的梯度为 0,所以,未知  $f_4$ ,  $f_5$  和  $f_6$  可表示为  $f_\alpha(N_x, j) = f_\alpha(N_x - 1, j)$ , ( $\alpha = 4, 5, 6; j = 1 - N_y$ )。

其中:  $N_x$  和  $N_y$  分别是  $x$  轴和  $y$  轴方向上最大节点数。

泥沙: 泥沙浓度梯度为 0。

### 4.4 初始边界条件

水体 LBM: 一般来说,确定宏观参数比微观参数要容易,所以,首先给定流速场,然后,计算局部平衡分布函数  $f_\alpha^{eq}$ ,并把  $f_\alpha^{eq}$  作为初始条件,即  $f_\alpha = f_\alpha^{eq}$ 。

泥沙: 泥沙浓度均匀分布。

### 5 前池模型

泵站前池的几何参数与文献 [2] 一样, 见图 3. 泵站设计安装 8 台泵, 其中, 中间的 6 台泵为工作泵, 两侧靠边壁的 2 台为备用泵. 单泵设计流量为  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , 进水池的设计水深为 8.3 m.

如图 3 所示 泵站前池的单侧扩散角  $\theta = 15.3^\circ$ , 底坡  $i = 4.4\%$ , 池长  $L_1 = 70 \text{ m}$ , 吸水水道长  $L_2 = 23 \text{ m}$ , 宽为  $W = 60 \text{ m}$ , 每台泵的进水池均用导流墩隔开.

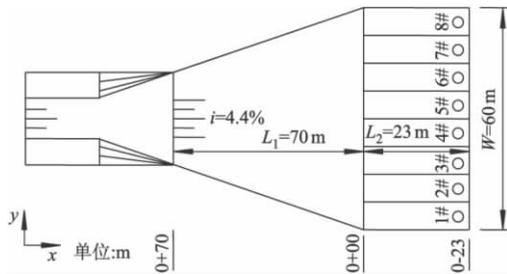


图 3 泵站前池示意图

Fig. 3 Sketch map of pumping-station forebay

在数值计算中, 为了减小引渠的流速对前池水流的影响, 其长度选取为 100 m; 同时, 也为了尽量减小出口边界条件对前池内部流场的影响, 保证出

口流态为充分发展流, 将进水池长度延伸为 40 m, 所以, 流场的计算区域选取长为 210 m、宽为 60 m 的矩形区域. 计算网格均采用二维九点方格子模式, 通过网格无关性计算试验, 最终格子尺寸  $\Delta x = \Delta y = 0.75 \text{ m}$ , 节点数为  $I \times J = 281 \times 81$  其中  $I$  为  $x$  方向,  $J$  为  $y$  方向.

### 6 LBM-LES 模型在前池中的应用

#### 6.1 前池水流速度分布

在设计水位条件下, 当水泵开启 6 台机组, 抽水流量为  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 引水渠平均流速约为  $2.00 \text{ m/s}$ .

在前池中布置了许多测点, 试验观测结果见图 4, 测点处的水深平均流速变化范围为括号内外

的值. 由图 4 可知, 引渠水流进入前池向两侧扩散, 出现两侧回流压迫主流的现象, 水流以较大的速度直达泵站进水道进口. 第 4、5、6 号流道的流速最大值达  $0.98 \text{ m/s}$ , 前池两侧出现回流流态; 第 2、3、7 号流道的水流斜向进入, 第 2、3、7 号流道的流速最大值达  $0.87 \text{ m/s}$ , 最小值为  $-0.27 \text{ m/s}$ . 各流道流速值偏大, 流速不均匀. 水泵安全稳定运行要求流道流速为其平均流速  $0.30 \text{ m/s}$  以下, 由此可知, 此时的流态不利于泵站安全运行.

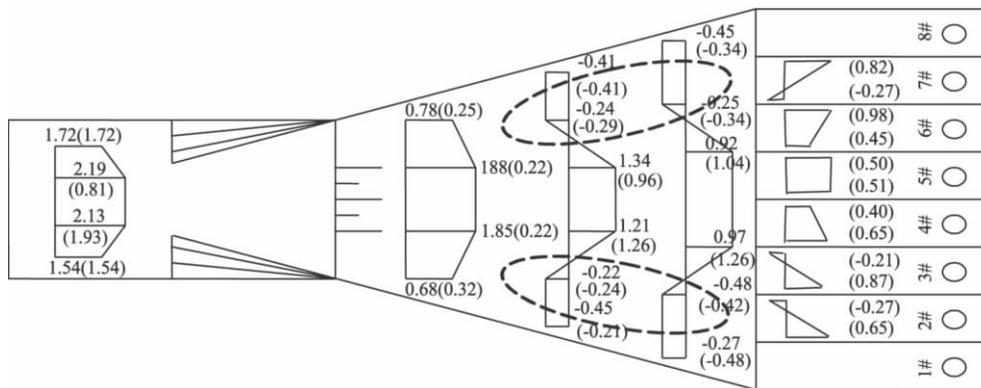


图 4 泵站前池水体流态的试验数据

Fig. 4 Experimental data for flow pattern in pumping-station forebay

数值模拟流速矢量分布和流线分布分别见图 5、6. 由图可见, 引渠水流进入前池向两侧扩散流动, 在靠近进水池端的两侧产生了低流速的回流区, 出现了两个明显的大旋涡、水壁脱流、两侧回流压迫主流的现象. 而主流来不及扩散, 则以较大的速度直达泵站进水道进口, 导致中间的第 3、4、5、6 号进水流道内的流速过快, 而两侧的第 2、7 号流道的流速

较缓慢; 第 1、8 号机组在设计工况下为备用机组, 处于停泵状态, 故其内没有流速, 水流几乎处于静止状态, 为死水区.

由此可见, 设计工况下各工作泵的进水流道流速分布不均匀, 很显然, 初始设计方案下的前池内流态并不理想, 不能充分满足水泵均匀进水的要求, 这些现象均与试验观测结果图 4 一致.

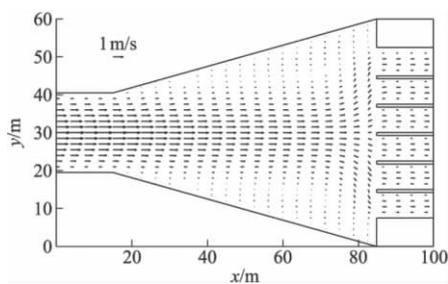


图 5 计算流速分布

Fig. 5 Computational velocity distribution

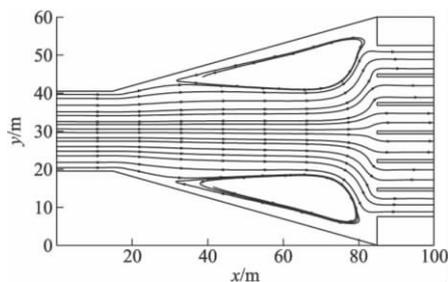


图 6 计算流线分布

Fig. 6 Computational streamline distribution

## 6.2 前池水深分布

前池水深等值线见图 7。由图可以看出,由于前池的底坡降  $i=4.4\%$ ,其中出现了类似阶梯状的等值线图,代表前池内水深沿程逐渐增加,而引渠和进水渠道底部基本没有考虑坡降,因而其内部的水深变化得比较平缓,计算结果符合实际的物理规律。此外,在每个泵的进水渠道进口处,数值模拟的进水池进口水深为 8.40 m,说明进水池中由于导流墩的影响,使进水渠道处的水位局部发生了雍高,符合流场水力特性的变化规律。

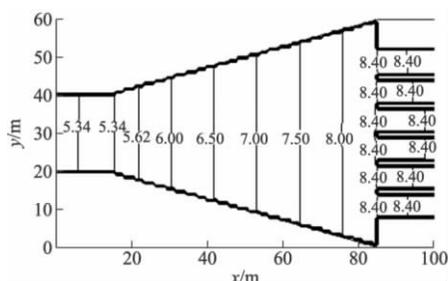


图 7 计算水深分布

Fig. 7 Computational water level distribution

## 6.3 前池泥沙冲淤变化

针对前池水流含沙量很低的情况,根据预测的前池内流场水力要素,采用非耦合解法求解二维悬移质泥沙数学模型,计算出了前池在设计工况下联合运行 30 d 后的含沙量及其内部的冲淤情况,见图 8。由图可以看出,在前池的两个低流速的回流区里

发生了大量的泥沙淤积,泥沙淤积的最大值达到了 3.4 cm。此外,前池的主流过水部位由于受到前池底部坡降和水流逐渐扩散的影响,使靠近进水池的水深沿程逐渐加大,流速逐渐降低,导致此处的挟沙能力降低,因而出现了不同程度的泥沙淤积,淤积厚度沿程加深。对于各泵进水渠道里的冲淤情况,由于各进水渠道中水深较大,相应的流速较低,挟沙能力变弱,因而都出现了不同程度的淤积。其中,中间的第 4、5 号流道的流速比较大,挟沙能力相对较强,淤积量较小;而两侧的第 2、3、6、7 号进水渠道的流速较低,挟沙能力变得较弱,因而淤积量偏大。

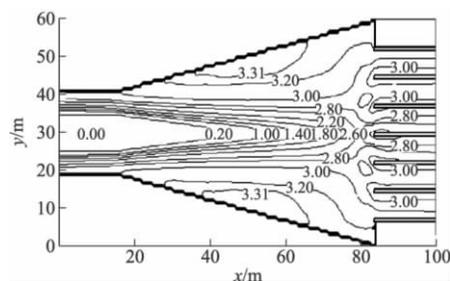


图 8 泥沙冲淤量等值线图

Fig. 8 Contour of sediment deposition

从泵站的长期稳定、安全运行角度出发,此泵站的原始设计方案不合理,导致前池内部产生了两个大的低流速回流区,出现了水壁脱流、两侧回流压迫主流的现象,致使主流以较大的速度到达水泵中间的第 4、5 号进水渠道进口,而两侧的第 2、3、6、7 号流道的流速偏低,导致水泵的进水条件不均匀。同时,若该泵站的水源处于多泥沙河流中,那么河流中的泥沙会随着水流通过引渠进入到前池内部。由泥沙的冲淤计算和分析可知,前池内部不良的进水流态导致前池内的低流速回流区和部分进水渠道的不同程度泥沙淤积,显然泥沙的淤积会堵塞进水渠道,影响水泵的正常吸水。

## 7 结论

首先,基于 LBM 和 LES 思想,建立了二维浅水 LBM-BGK 模型和泥沙数学模型的联合模式。然后,利用此联合模式对泵站前池内的水沙流进行了数值模拟,成功预测出了前池内部在设计工况下的基本流态,例如泵站前池水沙流的流速分布、水深变化和旋涡的位置和尺寸,以及泥沙的冲淤变化。流速计算结果与试验结果比较吻合。从模拟结果可以看出,前池的不合理设计,导致了前池内的较大回流区和旋

涡等不良流态。同时,前池内的大回流区和死水区,造成了前池底部中的大量泥沙淤积,所有计算结果都符合客观实际。

所用的数学模型和计算方法具有很好的准确性、可靠性和可行性。因此,所提出的研究方法和成果能够应用于类似的泵站前池的设计和改造工程,为其提供参考和理论依据。

#### 参考文献 (References)

- [1] 高传昌,王玉川,石礼文,等. 泵站前池非连续挑流消能防沙技术措施[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 133-138.  
Gao Chuanchang, Wang Yuchuan, Shi Liwen, et al. Technical measure for discontinuous trajectory bucket energy dissipation and sediment prevention at forebay of pumping station[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* 2011, 29(2): 133-138. (in Chinese)
- [2] 陈树容,邱静. 改善大型泵站前池水流流态的试验研究[J]. 人民珠江, 2006(4): 15-17.  
Chen Shurong, Qiu Jing. Experimental study on improving flow patterns in the forebay of large pump station [J]. *Pearl River* 2006(4): 15-17. (in Chinese)
- [3] Constantinescu G S, Patel V C. Role of turbulence model in prediction of pump-bay vortices [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 2000, 126(5): 387-391.
- [4] Yu Huidan, Girimajia S S, Luo Lishi. DNS and LES of decaying isotropic turbulence with and without frame rotation using lattice Boltzmann method [J]. *Journal of Computational Physics* 2005, 209(2): 599-616.
- [5] Tang Xuelin, Wang Fujun, Wu Yulin. An improved large eddy simulation of two-phase flows in a pump impeller [J]. *Acta Mechanica Sinica* 2007, 23(6): 635-643.
- [6] Wang Guangqian, Wu Baosheng, Xia Junqiang. Modeling of the diversion channel closure for the third stage of the three gorges project [J]. *International Journal of Sediment Research* 2004, 19(1): 75-82.
- [7] Zhou J G. A lattice Boltzmann model for the shallow water equations with turbulence modelling [J]. *International Journal of Modern Physics C* 2002, 13(8): 1135-1150.
- [8] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [9] Zou Qisu, He Xiaoyi. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model [J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9(6): 1591-1598.
- [7] Shuji Hattori, Morio Kishimoto. Prediction of cavitations erosion on stainless steel components in centrifugal pumps [J]. *Wear* 2008, 256: 1870-1874.
- [8] 刘建瑞,肖志杰,王鸿睿,等. 基于CFD技术脱硫泵的设计与试验[J]. 排灌机械, 2009, 27(1): 6-9.  
Liu Jianrui, Xiao Zhijie, Wang Hongrui, et al. Design and experiment of desulphurization pump based on CFD [J]. *Drainage and Irrigation Machinery* 2009, 27(1): 6-9. (in Chinese)
- [9] 赵斌娟,袁寿其,刘厚林,等. 基于Mixture多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 7-12.  
Zhao Binjuan, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on mixture model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2008, 24(1): 7-12. (in Chinese)
- [10] 刘世光,梁双印. 脱硫浆液泵内部流场的数值模拟及磨损特性分析[J]. 现代电力, 2010, 27(4): 55-61.  
Liu Shiguang, Liang Shuangyin. Numerical simulation of internal flow field and abrasion analysis on desulphurization slurry pump [J]. *Modern Electric Power*, 2010, 27(4): 55-61. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)

(责任编辑 陈建华)

(上接第378页)