

# 水库湖流多负荷数值模拟

## Multifunction Numerical Simulation on the Current of Reservoirs and Lakes

王运洪

Wang Yunhong

(广西水利厅 南宁市民主路 530023)

(Water Conservancy Administration of Guangxi, Minzhulu, Nanning, Guangxi, 530023, China)

**摘要** 系统地研究湖泊、水库中各类水动力外负荷作用,考虑了波、流共同作用下的底摩阻、波浪剩余动量流、风作用剪应力、风吹流及悬移质扩散分布等,创建了多负荷水动力泥沙数值模拟系统。该系统在引滦入津输水工程中的于桥水库、尔王庄水库湖流流场计算预报中应用,模拟结果与实测数据十分吻合。以于桥水库湖流流场计算为例,提出包括于桥水库特征年的逐月、特征水文日,无风及不同风向风速,不同出、入库流量,工程输水与否、悬沙输移扩散等内容的多种方案的流场和泥沙扩散分布,为水库水质污染防治提供了量化依据。

**关键词** 水库湖流 流场 数值模拟

中图法分类号 TV 697 O 241.8

**Abstract** The various hydrodynamic factor functions on lakes and reservoirs was researched systematically in consideration of bed friction under effect of wave and current, radiational stress, wind shear stress, wind current, suspended load. A multifunction hydrodynamic suspended numerical simulation system was established and applied to the flow pattern calculation and forecast of Yuqiao and Erwangzhuang reservoirs which are included in the important water-pilot project—Water Transfer from Luanhe River to Tianjin project, and the results are excellent in line with observations. This system was also used to calculate the flow pattern of Yuqiao reservoir as an example to offer many possible current fields and suspended load distributions for protection of water quality of the reservoir. These projects consist of the monthly and typically hydrological days of Yuqiao in special year, velocity at no wind and different wind directions, input and output of reservoir, water transfer, and suspended load distribution.

**Key words** reservoirs and lakes current, flow pattern, numerical simulation

我国水资源短缺,水资源综合利用已成为人们十分关注的重要问题。要保护水质,研究和解决湖泊水库的水质污染及富营养化防治,则必须了解和掌握其湖流运动特性、正确模拟流态特征、流速场及悬移质扩散分布,这是湖、库工程整治措施和治理方案实施的前题条件和关键步骤。

本文创建的多负荷水动力泥沙数值模拟系统,在模拟理论、模拟方法、计算处理及应用验证方面均有改进,可综合模拟湖、库中风吹流、水流、波浪、悬沙输移扩散等多类影响因素作用。该模型适用于各类湖泊、水库,为水域污染、富营养化防治以及工程整治方案实施提供依据<sup>[1]</sup>。

## 1 影响湖流运动的主要外负荷

### 1.1 表面影响

本文所指表面影响主要指水面上气候的影响,由于自然气候变化很大,因而气候对水面作用很复杂。在没有气流运动时,这种作用有辐射、传导(显热传输)和蒸发引起温水层内的热交换。在有气流掠过水表面时,更须进一步考虑风对水面的作用以及风成波对温水层内热混合的剧烈影响。

风吹水面时,由于拖曳力的存在而对水体作功,功率可用下式表示:

$$W_w = C_f \rho_a W^2 U,$$

式中, $W_w$ 为风对水面的作功率, $\rho_a$ 为空气密度, $W$ 为风速, $U$ 为水体表面的漂移速度, $C_f$ 是风对水面的剪

切摩阻系数,它包含了多种因素。风传给水体的能量将形成波浪、漂移流和水体下的旋涡等3种运动。但每种运动各占风能的多少,至今人们尚不完全清楚,在广阔海域中各专家采用的公式差别很大(图1)。

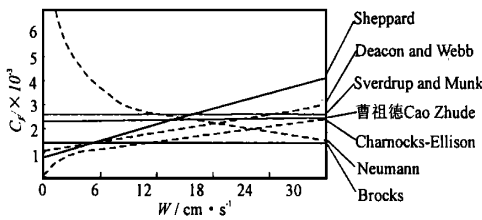


图1  $C_f-W$ 图

Fig. 1 Relationship between  $C_f$  and  $W$

根据 Pierson 研究,在深水中, Sheppard 的结果最好。近年来,曹祖德分析了各家公式,并从风能与紊动能平衡出发,利用大量波浪实测资料,求得<sup>[2]</sup>:

$$C_f = 2.55 \times 10^{-3}$$

在湖泊水库(小水域)中,对于中等情况的大气边界层, Hicks 发现小水域尺度的影响可以忽略,  $C_f$  是风速的一个弱函数。风速上升到  $5 \text{ m/s}$  时,  $C_f = 1.0 \times 10^{-3}$ , 随着风速增加到  $15 \text{ m/s}$  时,  $C_f$  线性地上升到  $1.5 \times 10^{-3}$ 。当水深小于  $2.5 \text{ m}$  时,较长的波不能充分形成,同时水面将保持较平滑的状态,在这种状态下, Hicks 的研究成果说明,在各种风速时,  $C_f$  都接近于  $1.0 \times 10^{-3}$ 。气压的稳定性对  $C_f$  值也有很大的影响,在稳定条件下,  $C_f$  值减少约 40%,而在不很稳定的气流下,  $C_f$  将增加 40%。

从实用角度看,习惯的做法取为常值,在大多数情况下,取  $C_f = 1.3 \times 10^{-3}$  是合适的。

### 1.2 入库河流影响

由于进入湖、库河流的水温和含沙量与湖、库本身的水温及含沙量常常不一样,因此流入湖、库的河水密度与湖、库中水密度也不一样。当河流水体进入湖、库时,河道水流推动湖、库中的水体前进,直到湖、库水位升高受回水影响或由于密度不同而引起浮力足以控制入流为止。如果河流水体较暖,含沙量很小,则进入湖、库水体的密度小于湖、库水体的密度,水流将沿湖泊水库表面流动,反之如果河流水体较湖、库水体温度低,且含沙量较大,则进湖、库水流将潜入湖、库底形成异重流沿湖、库中原河道作潜没流动。对于狭长形湖、库,入湖、库水流沿横断面较均匀分布,而宽阔形湖、库,河流入湖、库后除纵向流动外,还有横向扩散。

### 1.3 出库水流影响

流出湖、库水流的动力特征不但与出水口在湖、库平面位置有关,而且与出水口所在的垂线位置也有

很大关系。此外,出水口的位置和湖、库内水温分布情况还决定着放水时湖、库内水流特征。当湖、库混合均匀而不分层时,湖、库出流的流线呈辐射状从各个方面汇集到出水口。但在窄深型湖、库内的水体按温度分层时,这种分层性在斜温层尤为明显,即使在深水层,通常也有弱的温度梯度。如果出水口位于有温度梯度的水层中,出湖、库水流特性就有不同的特点,当泄出流量较小时,湖、库内垂向密度梯度产生的浮力可以阻止湖、库内水流的垂向运动,因此流出水口的水体来自同一层的薄水层;流量更大一些,取水层可能横切斜温层;流量很大时,浮力的影响能完全被压倒,流线从各方汇向出水口,流动又可回到势能流状态。

## 2 湖流流场数学模型

以往在湖、库的湖流数值模拟中通常只考虑单纯水流,个别模型中简单加入了风的作用。然而,自然界中影响湖流运动的因素很多,诸如径流、风、波浪、悬沙等等。对此,本文全面综合考虑了上述影响因素的作用,建立了复杂的综合性数学模型系统。

### 2.1 湖流流场数学模型

#### 2.1.1 基本控制微分方程

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{d} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial f_{xy}}{\partial y} +$$

$$\frac{1}{\rho h} \frac{\partial f_{xz}}{\partial z} = K_x \Delta u,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{d} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial f_{yx}}{\partial x} +$$

$$\frac{1}{\rho h} \frac{\partial f_{yz}}{\partial z} = K_y \Delta v,$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{d} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho h} \frac{\partial f_{zx}}{\partial x} +$$

$$\frac{1}{\rho h} \frac{\partial f_{zy}}{\partial y} = K_z \Delta w.$$

以上各式沿水深  $Z$  向积分,并经简化后,即可得出二维非恒定流基本微分方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0.$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{f_x}{\rho h} - \frac{f_{ux}}{\rho h} = K_x \Delta u,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{f_y}{\rho h} - \frac{f_{vy}}{\rho h} = K_y \Delta v,$$

式中  $Y$  为自由水面与静止水面间的竖向位移;  $u, v$  分别为  $x, y$  向的水流流速;  $h$  为水深,  $h = d + Y$ ;  $d$  为静水时的水深;  $f_{bx}, f_{by}$  分别为底摩擦应力在  $x, y$  向的分量;  $f_{wx}, f_{wy}$  分别为水面处风的剪切应力在  $x, y$  向的分量。

$$f_{bx} = d \frac{g}{c^2} u \sqrt{u^2 + v^2} - 0.5 d_a \frac{g}{c^2} u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2},$$

$$f_{by} = d \frac{g}{c^2} v \sqrt{u^2 + v^2} - 0.5 d_a \frac{g}{c^2} v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2},$$

$$f_{wx} = C_f d_a u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2},$$

$$f_{wy} = C_f d_a v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2},$$

$C_f$  为风对水面的剪切摩擦系数;  $u_w, v_w$  分别为  $x, y$  向的风速;  $K_x, K_y, K_z$  分别为  $x, y, z$  向动量扩散系数;  $c$  为谢才系数;  $d$  为水密度;  $d_a$  为空气密度;  $n$  为糙率;  $\Delta$  为微分运算符。

$$\Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}.$$

### 2.1.2 差分求解

在差分的方法中, ADI法 (Alternating Direction Implicit Method) 兼有隐式和显式的多种优点, 且概念清楚、解法简单, 目前在工程界广泛采用。但不足是流速、水位和水深分别标在不同的网格节点上, 因而增加了计算上的不便和编制程序的繁琐, 而在现场实测时, 水深和流速总在同一个节点上。为了克服这个缺点, 同时又保留 ADI法的优点, 笔者采用了移步 ADI法<sup>[3]</sup>。

使用移步 ADI法, 在每一  $\Delta t$  时间步长内, 将  $\Delta t$  分成前后两个相等的半步长。

当时间从  $n\Delta t \rightarrow (n + 1/2)\Delta t$  的前半个时间步长内, 在  $x$  向扫描求解时, 又分为两个子步骤, 第一步先由已知的边界条件 (设已知  $u_0^{n+1/2}$  和  $u_{m_i}^{n+1/2}$ ) 求出  $u_i^{n+1/2}$  和  $u_{i+1}^{n+1/2}$ , 第二步再将求出的  $u_0^{n+1/2}$  和  $u_{m_i}^{n+1/2}$  作已知边界, 求出  $u_i^{n+1/2}$  和  $u_{i+1}^{n+1/2}$ , 然后由求出的全部  $(Y, u)_i^{n+1/2}$ , 最后求出  $v_i^{n+1/2}$ 。

当时间从  $(n + 1/2)\Delta t \rightarrow (n + 1)\Delta t$  的后半个时间步长内, 解法和上述前半个时间步长内的解法基本相似, 不同的只是在  $y$  向扫描, 也是分两个子步骤, 第一步先由已知边界条件 (设已知  $v_0^{n+1}$  和  $v_{m_j}^{n+1}$ ) 求出  $v_j^{n+1}$  和  $v_{j+1}^{n+1}$ , 第二步将求出的  $v_0^{n+1}$  和  $v_{m_j}^{n+1}$  作已知边界条件, 求出  $v_j^{n+1}$  和  $v_{j+1}^{n+1}$ , 然后再由求出的全部  $(Y, v)_i^{n+1}$  求出  $u_j^{n+1}$ 。

由于  $(n + 1/2)\Delta t \rightarrow (n + 1)\Delta t$  的后半个时间步长内求解过程和前半个时间步长内求解过程基本相似, 因此, 只要将前半个时间步长内各公式中作如下

变换  $x \leftrightarrow y, u \leftrightarrow v, i \leftrightarrow j$  即可求出后半个时间步长内的全部数据。

根据此方法, 按时间步长次序  $n = 1, 2, \dots, n$ , 逐步进行, 直到求出全部时间过程中所有的  $(Y, u, v)$  为止。

### 2.2 风吹湖流数值模拟

本模拟与上述湖流数值模拟相似, 但须考虑风摩阻系数。风是引起水体混合的重要因素。当风吹过水面时, 剧烈的扰动将加速水体混合, 并引起风浪, 产生风吹流, 同时形成垂直环流和水平环流。由于风对水体运动和水质混合的影响很大, 因此, 在研究湖流时必须考虑风对水体作用。

风刮过水面时, 由于拖曳力造成了对水体的做功, 作用情况如图 2 所示。

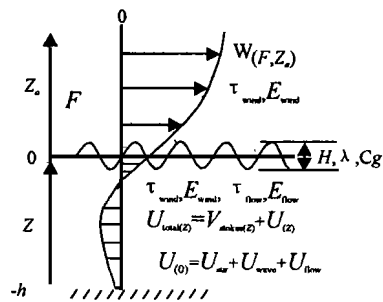


图 2 风对水体作用

Fig. 2 Action of wind to water mass

由图 2 可知, 风对水面的剪切应力  $f_w$  应分为两部分, 即  $f_{wb}$  和  $f_{ws}$ , 而能量也应分两部分, 即  $E_{wb}$  和  $E_{ws}$ 。风对水体表面的总剪切应力可由下式决定:

$$f_w = C_f d_a |W| W,$$

式中  $W$  为风速,  $C_f$  为风对水面的剪切摩擦系数。

在水面上, 风速沿垂线剖面呈对数分布, 根据水面的粗糙度不同而采用下列不同的计算公式。

光滑面:

$$w(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_a} + c_1 u_*^2,$$

粗糙面:

$$w(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_a} + c_2 u_*^2, \quad u_*^2 = \overline{f_w / d_a},$$

式中  $\kappa$  为卡门常数;  $d_a$  为空气密度;  $z_a$  为粗糙度,  $z$  为高程;  $v_a$  为空气的运动粘性系数。

由于波能中包括了各种能量及能耗, 取稳定传播时之风浪数值, 计算剪切应力:

$$f_{wb} = \frac{dM}{dt} = c \frac{dM}{dx} = c \frac{d}{dx} \left( \frac{E}{\omega} \right) = \frac{dE}{dx},$$

$$E = \frac{1}{8} d g H^2 \quad (H \text{ 为波高}),$$

$$f_{wb} = d_a C_{f, \text{波}} |w_{10}| w_{10}.$$

由此可得

$$Q_{波} = \frac{1}{d_b w_{10}^2} \frac{dM}{dx} = \frac{d_g H}{4d_b w_{10}^2} \frac{dH}{dx}$$

### 2.3 波浪 水流共同作用的湖流数值模拟

波浪和水流共同作用下的流速场变化表现在两个方面,一是流速在垂线上分布趋于均匀化,二是流速场中应加入波浪净质量流。由于波浪与水流共同作用时,其内部结构非常复杂,相互作用不是简单地线性叠加,因此,从机理上来分析,归纳起来说,一是在底部应考虑波浪与水流的综合摩阻作用,二是考虑波浪的剩余动量流(即“幅射应力”)的影响<sup>[4]</sup>。

#### 2.3.1 基本微分方程

连续方程:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0,$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{C_f}{h} \frac{d_b}{d} |W - U| (w_x - u) + \frac{1}{h} \frac{f_x}{d} + \frac{1}{d_h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) = K_x \Delta u,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial Y}{\partial y} - \frac{C_f}{h} \frac{d_b}{d} |W - U| (w_y - v) + \frac{1}{h} \frac{f_y}{d} + \frac{1}{d_h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) = K_y \Delta v,$$

式中  $u$ 、 $v$  为  $x$  向和  $y$  向的水流分流速;  $f_x$ 、 $f_y$  为  $x$  向和  $y$  向的底部摩阻应力,包含波浪和水流的共同作用;

$s_{xx}$ 、 $s_{xy}$ 、 $s_{yx}$ 、 $s_{yy}$  为剩余动量流张量

#### 2.3.2 波浪、水流共同作用下的底部摩阻

关于波浪与水流共同作用下的底部摩阻问题,过去已有很多学者作了研究,但以往的研究存在着两个不足:(1)有的研究者将单纯水流和单纯波浪作用下的摩阻线性叠加后就认为是波浪水流共同作用下底部摩阻;(2)没有考虑波浪与水流成任意夹角的情况。

笔者参考 Van Hoften<sup>[5]</sup> 研究,并进行了波浪与紊动水流相互作用的试验,得出波浪和水流共同作用的底部平均剪应力  $f_b$  为:

$$f_b = dgh \sin \theta + d_g T a^2 [(2/c)(\bar{u} + cg) - 1/2],$$

式中  $d$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $h$  为水深;  $\sin \theta$  为湖底坡度;  $T$  为波振幅。

#### 2.3.3 波浪剩余动量流<sup>[6]</sup>

波浪剩余动量流是个张量,在浅水地区可由下式表示:

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} n(1 + \cos^2 T) + \frac{1}{2} & \frac{2}{n} \sin 2T \\ \frac{2}{n} \sin 2T & n(1 + \sin^2 T) - \frac{1}{2} \end{bmatrix},$$

式中  $E$  为波能;  $n$  为波群速与波速之比;  $T$  为波向与  $x$  轴之间的夹角。

## 2.4 泥沙输移扩散湖流数值模拟

洪汛期间,上游河道挟带大量泥沙随暴雨径流进入湖泊水库,造成入口区淤积,并且,由于泥沙表面的吸附作用,悬移质和推移质也会吸附一定的污染物带入湖库。因此,计算入湖库河流的泥沙输移扩散,在湖库湖流及该水域水质污染研究中是不可忽视的<sup>[2]</sup>。

### 2.4.1 基本微分方程

悬沙输移扩散的基本方程为:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(su) + \frac{\partial}{\partial y}(sv) + \left[ \frac{\partial}{\partial z}(w - w_s)s \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right),$$

将上式沿水深积分,并设水面处无泥沙交换,即可得二维的泥沙输移扩散方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(sh) + \frac{\partial}{\partial x}(suh) + \frac{\partial}{\partial y}(svh) + F_s = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y h \frac{\partial s}{\partial y} \right),$$

式中  $s$  为悬沙的含沙量;  $w_s$  为泥沙的沉降速度;  $D_x$ 、 $D_y$  为悬沙在  $x$  向和  $y$  向的扩散系数;  $F_s$  为泥沙的沉降或冲刷函数,视泥沙性质的不同及不同状态而有不同的表示公式。

对于沙质泥沙:

(1) 当  $f_b \leq f_c$  时为沉降阶段

$$F_s = T w_s s \left( 1 - \frac{s^2}{s^*{}^2} \right);$$

(2) 当  $f_c < f_b < f_t$  时为不冲不淤阶段

$$F_s = 0;$$

(3) 当  $f_b \geq f_t$  时为底部发生冲刷阶段

$$F_s = - T w_s s \left( \frac{s^2}{s^*{}^2} - 1 \right) \left( \frac{f_b}{f_t} - 1 \right).$$

对于粘性土:

(1) 当  $f_b \leq f_t$  时,发生淤积

$$F_s = T w_s s \left( 1 - \frac{f_b}{f_t} \right);$$

(2) 当  $f_t < f_b < f_c$  时,不冲不淤

$$F_s = 0;$$

(3) 当  $f_b \geq f_c$  时,底部发生冲刷

$$F_s = - M \left( \frac{f_b}{f_c} - 1 \right),$$

式中  $T$  为泥沙沉降机率,  $w_s$  为泥沙陈降速度;  $s^*$ 、 $s^{*2}$  分别为变化前后的饱和挟沙力,  $M$  为系数,可由试验决定。

## 3 湖库流场数学模型的建立与调试技术

### 3.1 原始资料的收集与整理

建立湖库流场数学模型,首先应对湖库原始

实测数据资料进行收集和整理 原始数据资料包括地形、水文、气象等资料。

对地形资料(地形图)的整理,可采取奇点数据加权及平滑处理技术,计算公式:

$$h_{i,j} = U h_{i,j} + [(1-U)/4](h_{i-1,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1}),$$

式中  $U$  为平滑系数,其值在 0.5~ 0.98

### 3.2 自动调整糙率

在模型调试中,采用下式自动调糙,

$$n_k = n_{k-1} (1 - \frac{H_c - H_s}{H_c}),$$

式中  $H_s$  为计算水位;  $H_c$  为实测水位

### 3.3 计算数值滤波

为了提高计算的稳定性,本模型采用了如下的滤波技术:

$$\begin{bmatrix} Y \\ h \\ u \\ v \end{bmatrix}_{i,j} = T_1 \begin{bmatrix} Y \\ h \\ u \\ v \end{bmatrix}_{i,j} + \frac{1-T_1}{4} \begin{bmatrix} Y_{i-1,j} + Y_{i+1,j} + Y_{i,j-1} + Y_{i,j+1} \\ h_{i-1,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j-1} + h_{i,j+1} \\ u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j+1} \\ v_{i-1,j} + v_{i+1,j} + v_{i,j-1} + v_{i,j+1} \end{bmatrix},$$

式中  $T_1$  为滤波系数。

### 3.4 水流漫滩技术

在湖、库边滩上,考虑到滩地蓄水和动量交换,笔者采用水流漫滩的新技术,在边界处,用漫滩流速来控制,其公式如下:

$$u = \frac{dY/dt}{\tan \theta_x},$$

$$v = \frac{dY/dt}{\tan \theta_y},$$

式中  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  分别为  $x$ 、 $y$  向之边坡角

## 4 湖流数值模拟应用实例

本文创建的水库湖泊水模拟系统(包括水流、风吹流、波浪水流共同作用及泥沙输移扩散),在于桥水库湖流特性研究及引滦入津工程尔王庄水库湖流研究中应用成功,模拟结果与实测数据十分吻合。

今以于桥水库应用为例。于桥水库流域面积 2 060 km<sup>2</sup>,是引滦入津输水工程的重要调蓄水库。水库库区东西向直线长约 23 km,南北最大宽约 8 km,平均水深约 4 m,库容约 4 亿立方米,属宽浅型带状水库。水库上游东北部有淋河,东南部有黎河与沙河汇合后注入于桥水库。三条入库河流均为间歇性季节河流,洪汛期间暴雨产流较大,洪水径流主要

集中在汛期 7 月~ 9 月。

于桥水库数值模拟使用 1/10 000 地形图,采用矩形网格,取空间步长  $\Delta x = 250$  m,  $\Delta y = 125$  m,时间步长取  $\Delta t = 90$  s 首先进行了模型验证。模型验证是采用 1987 年至 1990 年于桥水库连续 4 年原型实测数据进行的。图 3 及图 4 是选 1987 年两组验证曲线作为证例

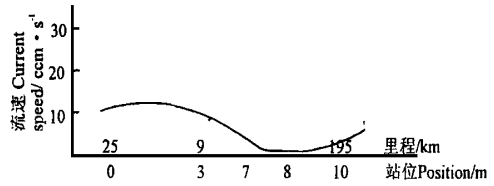


图 3 1987 年 7 月 1 日流速验证曲线

Fig. 3 Verification of flow velocity on July 1, 1987  
— 计算值 Calculated value; ° 实测值 Measuring value.

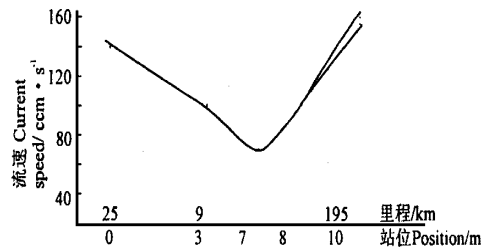


图 4 1987 年 8 月 17 日流速验证曲线

Fig. 4 Verification of flow velocity on August 17, 1987  
— 计算值 Calculated value; ° 实测值 Measuring value.

从图中看出,计算值与现场原型观测值十分接近,数值模拟预报了于桥水库丰水年、正常年、枯水年各典型水文、气象条件下的流速场及泥沙扩散分布。

各典型水文年逐月、特征水文日,无风及不同风向、风速,不同出、入库流量,引滦输水与否,悬沙输移扩散等多种方案的流场、泥沙分布场计算结果为于桥水库综合工程治理方案实施,提供了定量化依据。

典型丰水年(1978年)、典型枯水年(1982年)、典型正常年(1985年)计算流场图,参见图 5~ 图 7;图 8 为 1978 年汛期的泥沙输移扩散分布图。

## 5 结语

本文系统地分析了本研究所依据的基础理论,阐述了影响湖流场运动的各主要动力因素,创建了多负荷综合作用的水模拟系统,较全面、深入地湖泊水库湖流进行了综合模拟研究。

本研究创建的水模拟系统包括水流、风吹流、波浪共同作用、泥沙输移扩散等多种影响因素作用,由建立基本微分方程组、差分离散求解,进而进行移步

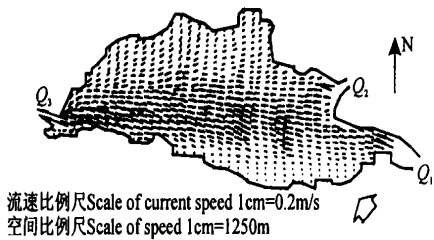


图 5 典型丰水年计算流场 (1978年 8月, 东南风)

Fig. 5 The flow patterns of rich water in typical year (Aug. 1976, wind direction was southeast)

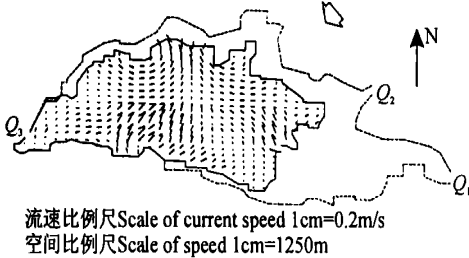


图 6 典型枯水年计算流场图 (1982年 9月, 东北风)

Fig. 6 The flow patterns of shortage water in general year (Sep. 1982, wind direction was northeast)

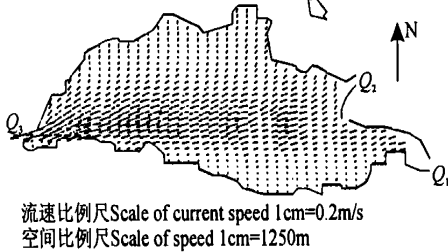


图 7 典型正常年计算流场图 (1985年 4月, 东北风)

Fig. 7 The flow patterns in general year (Apr. 1985, Northeast)

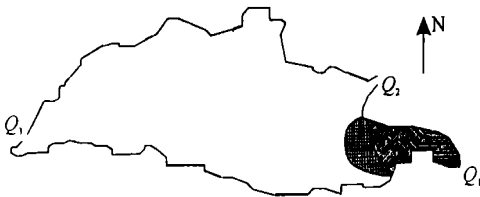


图 8 1978年于桥水库汛期泥沙输移扩散分布图 (1978年 7月)

Fig. 8 The concentration distribution of flow into Yuqiao Reservoir (July in 1978)

□ < 0.008 kg/m<sup>3</sup>; ▤ 0.008~0.05 kg/m<sup>3</sup>; ▨ 0.05~0.1 kg/m<sup>3</sup>;  
▩ 0.1~0.5 kg/m<sup>3</sup>; ▪ 0.5~0.9 kg/m<sup>3</sup>; ▫ > 0.9 kg/m<sup>3</sup>.

ADI法求解, 本文从模型建立、调试验证到实际应用等各个方面, 对该模拟系统进行了综合介绍。

数值模拟系统设计中, 采用了显式隐式交替的 ADI法双向双步扫描改进等处理技术, 并应用奇点数据加权、地形平滑、水流漫滩、数值滤波、自动调整糙率等多种新技术, 致使本模拟系统具有计算精度高、收敛快、稳定性好、通用性强之优点, 可适用于各类湖泊水库湖流的模拟预报, 并可应用于空间变步长及模拟多种外负荷的复杂因素作用。

### 参考文献

- 1 王运洪. 湖泊、水库湖流模拟系统. 海洋与湖沼学报, 1992, 23 (5): 25~31.
- 2 曹祖德. 风对浅水地区波浪传播的影响. 海洋学报, ACTA Oceanologica Sinica, 1983, 5 (2): 145~156.
- 3 曹祖德, 王运洪. 水动力泥沙数值模拟. 天津: 天津大学出版社, 1994. 305~325.
- 4 王运洪. 波浪与水流共同作用下的底砂起动. 海洋科学, 1983, (3): 20~25.
- 5 Van Hoften J D A, Karaki S. Interaction of waves and a Turbulent Current. Proceedings of the Fifteenth Coastal Engineering Conference, 1976, 1: 404~422.
- 6 Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. J Fluid Mechanics, 1960, 8: 565~575.
- 7 王运洪. 波浪、水流共同作用下底部较细颗粒砂的启动 (一). 天津水利, 1982, (1): 1~8.
- 8 王运洪. 波浪、水流共同作用下底部较细颗粒砂的启动 (二). 天津水利, 1982, (2): 1~7.
- 9 王运洪. 泥沙起动规律的研究. 海洋学报, 1984, 6 (6): 178~184.
- 10 Wang Yunhong. Study on wave decay in shallow water area. Australasian Conference on coastal and Ocean Engineering, NCP 89/20, 1989. 141~148.
- 11 Wang Yunhong. An investigation on the pattern of sediment initiation motion. Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering, NCP 89/20, 1989. 165~172.

(责任编辑: 黎贞崇)