

于桥水库风季流场的计算与分析^{*}

王运洪 秘兆兰

(天津市水利局, 天津 300074)

摘要 本文依据水流运动的基本理论,并考虑风对水体的剪切作用,应用改进的移步 ADI 法,建立了风作用下流场的数值模拟系统,其结果与连续四年的实测资料验证相吻合。计算预报了于桥水库三个典型水文年定常风不同风速、风向的流场,并由计算机绘制出彩色流场图。文中还针对计算应用成果进行了分析。

关键词 水库 流速场 数值模拟

于桥水库位于北纬 40°00', 东经 117°30', 天津市蓟县境内,控制流域面积 2060 km²,正常蓄水位 21.16 m,时库水面积 86.8 km²,库容 4.2 × 10⁸ m³,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 4 m,是引滦入津输水工程的重要调蓄水库。由于水库面积较小(属宽浅带型水库),在湖流计算中柯氏力影响很小,可以忽略,故数值模拟中采用二维模拟方法。

自 1983 年引滦入津工程通水后,该水库调洪蓄水,对缓解天津市工农业用水困难起了非常重要的作用。然而,通水前后水质实测表明,水库已呈现中营养型和局部富营养化特征,影响引用水的水质。要解决这些问题,其中,水库风作用下湖流流场的计算分析是重要的前提条件。

由于风作用下湖流研究系环境水力学与工程水力学、水动力学间的边缘新型学科,国内外虽已有不少研究成果,但因未形成通用的计算软件,因而针对某一地区水域及不同动力因素边界条件的湖泊水库,尚需进行模拟实验研究计算,以满足实际治理工程的需要^①。本文针对我国北方典型湖泊水库——于桥水库季风特点进行了湖流流场计算,并在数值模拟计算中采用了几种新的处理技术及对 ADI 差分方法进行了双向双步扫描改进。

1 基本控制微分方程

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - \frac{\tau_{xy}}{\rho h} = K_x \Delta u \quad (2)$$

* 国家环保“七五”攻关项目子课题(编号:75-3-2-9),并获天津市科技进步二等奖。

① 王运洪、秘兆兰。湖泊水库富营养化及湖流特征研究发展现状与展望。1990。

收稿日期:1991年8月31日;接受日期:1994年1月23日。

$$\frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - \frac{\tau_{wx}}{\rho h} = K_x \Delta v \quad (3)$$

式中: ζ 为自由水面与静止水面间的竖向位移;

u, v 分别为 x, y 向的水流分流速;

h 为水深 ($h = d + \zeta$), d 为静水时的水深;

ρ 为水密度;

τ_{bx}, τ_{by} 为分别为底摩阻应力在 x, y 向的分量^[1], 即:

$$\tau_{bx} = \rho g u (u^2 + v^2)^{1/2} / C^2 - 0.5 \rho_s g W_x (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} / C^2$$

$$\tau_{by} = \rho g v (u^2 + v^2)^{1/2} / C^2 - 0.5 \rho_s g W_y (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} / C^2$$

其中: ρ_s 为空气密度; $C = \frac{1}{n} h^{1/6}$ 为谢才系数; n 为糙率;

τ_{wx}, τ_{wy} 分别为水面处风的剪切应力在 x, y 向的分量, 即:

$$\tau_{wx} = C_f \rho_a W_x (W_x^2 + W_y^2)^{1/2}$$

$$\tau_{wy} = C_f \rho_a W_y (W_x^2 + W_y^2)^{1/2}$$

其中: W_x, W_y 分别为 x, y 向风的分速, C_f 为风对水表面的剪切系数^[2];

K_x, K_y 分别为 x, y 向动量扩散系数;

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

于桥水库流域属温带湿润型大陆性季风气候, 风是扰动水库水体、影响潮流运动的重要因素。水库全年以西南风最多, 东北风最少, 风向则因季节不同而不同, 春、秋两季多西南风, 夏季东南风为主, 冬季多刮西北风。风速全年以东北风最强, 东南风最弱, 多年平均风速为 1.6—3.0 m/s, 汛期(7—10月)平均风速减弱为 1.6—1.9 m/s, 冬、春季平均风速为 2.1—3.0 m/s, 年内月最大风速为 11.0—16.0 m/s。全年平均发生 6 级以上大风天约 109 天^①。根据天津蓟县气象站多年实测统计资料, 典型水文年各月平均风速及盛行风向, 见表 1。

表 1 蓟县典型水文年各月平均风速及盛行风向

单位: m/s

Tab. 1 The monthly average wind velocity and the dominant wind direction of typical flood years in Jixian County

典型水文年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1978 (丰水年)	2.4 NW	2.4 W	2.7 E	3.0 SW	2.8 ENE	2.5 ESE SW	1.9 NE SE	1.6 NE	1.7 SW	1.9 SW	2.1 SSW SW	2.2 SSW
1982 (枯水年)	1.7 ENE	1.4 NE	1.8 WSW	2.0 ENE	2.2 ENE	1.7 ENE E	1.5 ENE	1.5 ENE	1.4 NE	1.4 NE	1.7 NE	1.9 NE
1985 (正常年)	1.7 NE	2.0 ENE	2.1 ENE	2.1 ENE	1.5 ENE	2.2 ENE	1.4 ENE	1.6 ENE	1.3 ENE	1.4 NE	2.3 WNW	1.7 WNW

① 王运洪, 秘兆兰. 于桥水库潮流特性综合研究. 天津市水利科学研究所, 1990.

2 数值模拟方法及其改进

对于宽浅型湖泊、水库,不仅存在风的剪应力,而且还存在着底摩阻力。在方程(1—3)中这两项均已包括在内。为了在数值模拟中求微分方程组的近似解,首先对微分方程进行离散。

本模型的差分网格为矩形,各未知数 ζ, u, v 在同一网格节点上,差分形式采用空间中心差分、时间向前差分。差分后的方程整理成(式中已将第二下标 j 及上标 $(n+1)/2$ 略去):

$$A_i u_{i-1} + B_i \zeta_i + C_i u_{i+1} = D_i \quad (4)$$

$$E_i \zeta_{i-1} + F_i u_i + G_i \zeta_{i+1} = H_i \quad (5)$$

$$V_i = R/S \quad (6)$$

由于采用 ADI 法计算时的流速、水位不在同一网格节点,而通常实测的流速和水位又在同一个站位,因此本文对 ADI 法进行了改进,使之将上述流速和水位归于同一网格节点上,并且改变了原 ADI 法在 x 和 y 向各扫描一次为在 x 和 y 向各扫描二次(移步双向双步扫描)。本模拟采用的该方法对方程进行差分求解,与通常采用的 ADI 法相比,具有节省计算机内存、缩短计算时间等优点,由于扫描次数的增多,从而提高了计算精度。其计算过程简述为:

在每一 Δt 时间步长内,将 Δt 分成前后两个相等的半步长:当时间从 $n\Delta t \rightarrow (n+1/2)\Delta t$ 的前半个步长内,在 x 向扫描求出未知值;在从 $(n+1/2)\Delta t \rightarrow (n+1)\Delta t$ 的后半个步长内,在 y 向扫描求解。而在前半个时间步长内(x 向扫描求解时),又分为两个子步骤,先由已知的边界条件求出 ζ, u , 然后求出 v , 同样在后半个时间步长内(y 向扫描求解时)也分为两个子步骤,其过程基本相同。在求出后半个时间步长数据后,即完成了一个求解过程。据此方法,按时间步长次序逐步进行,直到求出全部时间过程中所有的 (ζ, u, v) 为止。

首先,使用改进的移步 ADI 法,提高了模型的精度和稳定性。由于原 ADI 法计算时流速、水位交叉布设,当网格上无流速(或水位)时,只能使用相邻网格上的值进行平均,因此在计算过程中进行了多次数值平滑。而采用此改进的移步 ADI 法,则将其值归于同一节点上,最后再采用数值滤波,因此大大提高了精度和稳定性。

其次,在边滩上,考虑到滩地蓄水和动量交换,则采用了水流漫滩的新技术,在边界处,用漫滩流速来控制,其公式为:

$$u = \frac{dz/dt}{\tan\theta_x} \quad (7)$$

$$v = \frac{dz/dt}{\tan\theta_y} \quad (8)$$

式中: θ_x, θ_y 分别为 x, y 向之边坡角。

另外,在模拟中还采用了自动调整糙率,公式为:

$$n_i = n_{i-1} \left(1 - \frac{H_o - H_c}{H_o} \right) \quad (9)$$

式中: H_o 为实测水位; H_c 为计算水位。

3 计算验证及成果分析

根据1987—1990年连续四年的原型观测资料^①,进行了模型验证。于桥水库现场原型观测是在水库入库河口(淋河入库河口及濛河与沙河汇合的果河入库河口)、水库大坝出口及水库库区设置定断面、定站位,采用同步原型观测。其中,入库两个河口及出库口共设定断面6个;水库库区设定站位10个。原型观测同时实测水位、流速、流向、风速、风向等各种水文、气象参数。出、入库口采用普通流速流向仪及风速风向仪实测,库区中由于流速较小,采用旋杯式低流速仪循环检测,选入库河口及库区原型观测的12组不同年份、不同水文、气象条件下的实测资料进行验证。图1是选自1987年7月9日和8月17日的2组验证曲线,由图可知,计算值与现场实测值十分接近^②。

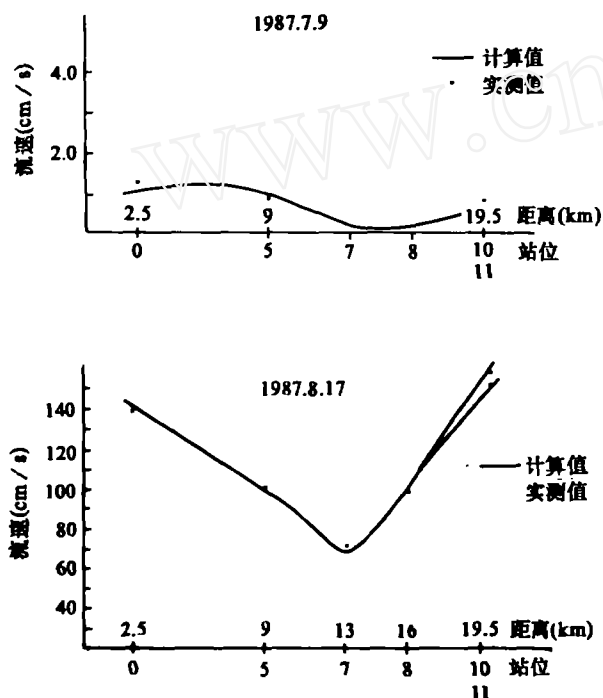


图1 流速验证曲线

Fig. 1 Verification curve of current

该水域流速变化亦不大,流速值近于零,是水库东南的明显滞流区。库区北岸及南岸边滩亦有面积不等的几片滞流区,滞流区内由于流速甚小,水体不易交换,容易引起富营养化。

根据不同水文、气象条件,对于桥水库丰水年(1978)、枯水年(1982)、正常年(1985)三种典型水文年逐月进行流场计算,同时计算了各月逐日、特征水文日、最大典型出入库流情况的无风及不同风速、风向的风吹流流场,选代表性流场计算图(图2、3)。

由计算流场图分析可知,经同样水文条件下,无风和有风作用流场计算,在风作用下风吹流可引起湖流流场较大差异,风向与流向一致时,加速了流速变化。

从于桥水库流速的空间分布特征看,强流速带一般集中在库中部及老河道区域,在库边滩及宽浅水区流速较小,正常年流场计算流型稳定后,平均流速为0.01—0.1 m/s。库内藻类和水生植物丛生的水域流速很小,如库区8[#]站位及二百户老河道以南水域,水浅草密,即使低水位或果河入库径流量较

① 王运洪、秘兆兰。于桥水库现场原型观测资料研究分析。1990。

② 王运洪、秘兆兰。湖流数学模型的建立及验证。1990。

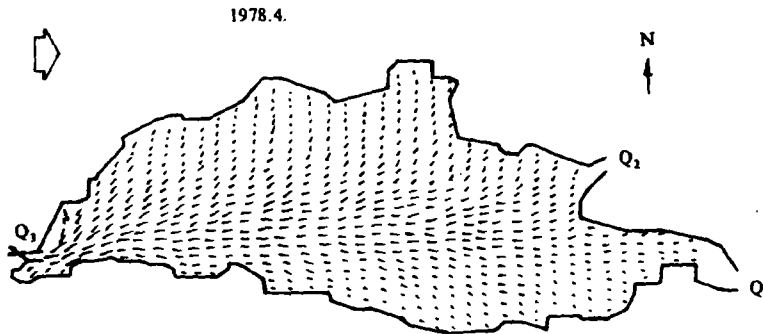


图2 典型丰水年计算流场图

Fig. 2 The computed flow field of typical flood year

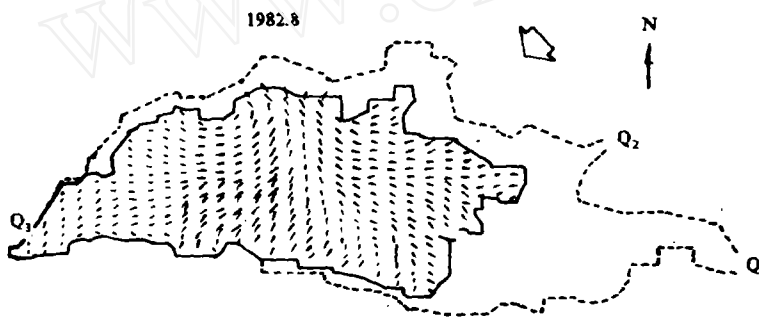


图3 典型枯水年计算流场图

Fig. 3 The computed flow field of typical dry year

4 结 语

本研究针对我国北方季风作用较强的重要蓄滞水水库——于桥水库,在风作用影响下的流场进行了计算分析。研究首先经理论分析和推导,建立了风作用库流流场数值模拟系统,并经连续四年的定站位同步现场原型观测,对数值模拟系统进行了验证、调试。经实测资料验证表明,其计算值与实测值吻合良好,证实本模拟能准确地反映水库风吹流特征。与此同时,在数模调试过程中,采用了移步 ADI 法双向双步扫描技术、水流漫滩处理技术、计算数值滤波技术、地形平滑处理技术以及数模的自动调糙等处理技术,使得该风作用流场计算模拟程序(系统)本身具有计算精度高、收敛快、稳定性好、通用性强的特点。数值计算了于桥水库三个典型水文年风季不同风速、风向的流场,并由计算机绘制彩色流场图。

本研究建立的风季流场计算模拟系统,经扩充设计、改进,已调整成为标准化通用模拟

系统,可适用于其它不同边界、外负荷条件及空间变步长的湖泊、水库风作用流场计算,为湖泊、水库综合治理提供了有效的模拟方法和科学的定量计算依据。

参 考 文 献

- 1 王运洪.泥沙起动规律的研究.海洋学报,1984,6(6):874—880.
- 2 王运洪.波浪与水流共同作用下的底砂起动.海洋科学,1983,(3):11—14.

NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS ON THE FLOW FIELD IN WIND SEASON

Wang Yunhong Mi Zhulan
(Tianjing Water Conservancy Bureau, Tianjing 300074)

Abstract

Yuqiao Reservoir is an important regulating-impounding reservoir of the diversion project to channel the Luanhe water to the city of Tianjing. An analysis of the flow field affected by the wind is the main way of studying the transportation-diffusion of pollutants and eutrophication of Yuqiao Reservoir. Based on the governing equations of fluid movement, and water surface shear stress under the action of the wind, a numerical simulation system of flow field has been developed by means of moving Alternating Directional Implicit Method. The simulation results are in very good agreement with the original data measured in the last 4 years. In addition, the flow field under the effects at stationary and unstationary situations of wind on 3 typical hydrographic years is predicated, a color picture of flow field given out, and its application discussed.

Key Words Reservoir, flow field, numerical simulation