

水利水电工程青年学术论文集

中国科学技术出版社

内 容 提 要

本书选编了我国水利水电行业青年科学工作者最新的一批科研论文。这些论文，观点新颖，有较高理论水平，大多又密切结合工程实践成果，具有实用价值。

全书共分四部分，论文69篇：第一部分水力学，论文10篇；第二部分水文与水资源，论文12篇；第三部分泥沙，论文23篇；第四部分水环境，论文5篇。

本书可供高等院校、科研设计单位及广大水利水电工程技术人员阅读。

(京)新登字175号

水利水电工程青年学术论文集

*

中国科学技术出版社出版 (北京海淀区白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京通县建新印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 24.25 字数: 516 千字

1992年11月第一版 1992年11月第一次印刷

印数: 1—1,200册 定价: 15.80元

ISBN 7-5046-0834-3/TV·19

目 录

水 力 学

应用K- ϵ -S紊流模型求解绕叶栅的流动	叶 坚 (1)
电厂冷却水排放温度场数值模拟	吴时强 (4)
潮汐河口盐水入侵的数值计算	匡翠萍 (9)
圆形浮力射流全场特性的数值模拟	槐文信、李 炜 (13)
混凝土板护面土石过水围堰面板稳定分析	孙志禹、肖焕雄 (18)
弯曲河流研究现状与展望	许建林、曹叔允、方 铎、吴持恭 (23)
渗透诱发固结的试验研究	张力霆、齐清兰 (27)
三河闸加固工程水工水力学问题研究	朱志敏 (32)
立堵截流戗堤边坡上抛石的稳定移距研究	唐晓阳、肖焕雄 (37)
明渠近壁紊流结构的特性分析	唐小南 (42)
天然河道中断面剖分法计算流量的探讨	黄才安 (47)
底流消能计算中的几个问题	卫 勇 (52)
明渠流流速分布指数律探讨	宁利中、李建中 (57)
三峡深孔表孔挑流鼻坎布置的优化计算	谢 齐 (62)
溢流坝面等空化数曲线的计算	王保安、向建军 (67)
一字闸水力特性的试验研究	齐清兰、王英华、胡荣辉 (71)
彭水水电站坝面溢流消能问题试验研究	陈飞勇、汪定扬、吴一兵 (76)
流体运动宏观现象及宏观运动方程	周经洲、梁 玲 (80)
蓄水闸闸门突然开启时的下游消能问题	兰耀东、陈阳生 (85)
三角形U形渠道直壁槽式量水堰的研究	张志昌、张宗孝、 刘亚菲、雷雁斌、王 伟 (90)
固液二相流水锤特性及分析方法概述	龚时宏 (95)
关于山区河流糙率问题的探讨	康 权、郑宜臻 (100)
用流动显示与数字图象处理技术测量水流流速	万 军、梁在潮、魏国强 (105)
孔板式消能工紊流特性初步研究	陈振玺、谢省宗、李世琴 (108)
黄河小浪底枢纽工程电站系统水力学模型试验研究	武彩萍 (113)
管网流动数值计算的一种新方法	宋朝晖、杨开林 (117)
大型水体的数值模拟	龙中林、吕邦泰、李晓芸 (122)
管网恒定流动和瞬变流动数值模型的研究	杨开林、王念慎、董兴林 (127)
越过连续式矩形坎的急流自由水面	孙 建、阎晋垣 (135)

水文与水资源

淮河流域水文气象与径流特征的探讨	吴玉柏、刘正祥 (140)
------------------	-----------------

多目标水库实时优化调度模型探讨	成宗俊 (144)
降水入渗过程中渗透速度时空变化规律	张光辉、费宇红 (149)
具有特大历史洪水时P—Ⅲ型参数估计方法的研究	陈元芳 (154)
坡面汇流时间计算公式的试验验证	岑国平、安智敏、吴彰春 (159)
水库形状的模糊分类方法	鄂德龙 (163)
三层水箱模型在清江隔河岩工程施工洪水预报的应用	张国祥 (167)
世界水能开发的回顾与展望	汪 达 (172)
梯级水电系统最优规划数学模型	张 毅 (176)
水电站在湖北省能源平衡和国民经济发展中的作用	万 俊、田正新 (181)
黄河禹门口冲洪积扇(东侧)水源地地下水系统模型	侯国伟、孙云伟 (186)
对经验频率计算问题的研究	胡宏达、刘蕴天 (190)

泥 沙

模型沙的坍落高度和水下休止角试验研究及其相似分析

.....	王延贵、王兆印、曾庆华、吕秀贞 (195)
正交试验法在充泥编织袋水力稳定研究中的应用	张小峰 (200)
土工织物防护控导工程联坝过水的试验研究	曹半生、刘 杰 (205)
泥石流发生机理初步分析	徐为群 (210)
高含沙水流流速分布	吴卫民 (214)
水库引水冲滩的计算方法	张崇山、王梦楼 (219)
泥沙数学模型的研究及应用	李义天 (223)
一个较实用的推移质输沙公式	高建恩 (228)
斜板沉沙池用于黄河高含沙量取水防沙的初步研究	石自堂 (233)
矩形明渠宽深比和近壁糙率对阻力系数的影响	胡春宏 (238)
黄河下游河道造床流量的研究	张 清、江恩惠、段亚玉 (243)
紊动水流中的泥沙沉降速度的初探	马有国 (248)
下荆江裁弯对荆江河段水位及荆江大堤护岸工程影响的初步分析	卢金友 (252)
粗颗粒推移质级配的理论计算	张红武 (257)
水库引水冲滩机理分析	张崇山、王梦楼 (262)
黄河花园口至东坝头河道整治模型的设计与验证	
.....	江恩惠、黄鸿海、赵新建、陈俊杰 (267)
水库纵向淤积形态的模糊分析预报	张跟广 (272)
冲积河流的水流挟沙力	张红武、张 清 (277)
高含沙水流“浆河”现象的试验研究	詹义正、白永峰 (282)
细沙河流悬移质絮凝初步分析	张 帆 (286)
松花江腰堡河段河道演变分析及整治措施	吴柏春 (291)
涡河动床数学模型	何华松、刘 玲、张有祥 (295)
泥沙的粘结力及其在泥沙结团沉降和泥沙起动中的应用	范宝山 (300)

水 环 境

固体颗粒表面吸附实验研究综述·····	周孝德、黄延林 (305)
水流紊动条件下河流底泥中重金属释放的研究评述·····	黄延林、周孝德 (310)
水体质量评价与富营养化评价中的灰色聚类分析方法·····	陈道英 (316)
河道型水库水质预测方法初探·····	客 江 (320)
植物生态系统水分能量传输的动态模拟·····	姚华夏 (325)
附 录	
《水利学报》1992年第10期专辑目录·····	(329)
《武汉水利电力学院学报》1992年第10期专辑目录·····	(330)

应用K-ε-S紊流模型求解绕叶栅的流动

叶 坚

(南京水利科学研究院)

一、前 言

绕叶栅的流动是一种重要的典型流动,这种流动在传热装置和边界层流动中得到应用。在水利建设的航道整治和防洪护岸工程中,绕流丁坝也属于这种类型的流动。当设计丁坝位置和长度时,需要了解丁坝下游回流的掩护范围。对回流范围估计的正确与否直接关系到工程的效果和造价。因此,丁坝回流问题是治河工程的一个基本问题。本文应用数值方法,求解平面二维绕叶栅的紊流流动问题。紊流模型采用k-ε-E模型(通常称为标准k-ε模型)和最近笔者根据紊流随机模型提出的k-ε-S模型^[2]。通过回流长度,沿程断面流速分布等参数的计算表明,k-ε-S模型对于分离——再附着流类型的流动具有较强的预测能力。

二、紊流模型

时均紊流运动的控制方程式为连续性方程和雷诺方程。为了封闭该方程组,需要应用紊流模型来决定雷诺应力 $-\overline{u_i u_j}$ 。假设紊流的特征参数可用基本量紊流动能 k 及其耗散率 ϵ 决定。高Re数充分紊动条件下的 k 、 ϵ 的模型方程参见文献[1]。

1. k-ε-E模型

k-ε-E模型通过布辛尼斯克(Boussinesq)假设求解雷诺应力:

$$-\overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} k \delta_{ij} + V_{ij} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$V_{ij} = C_\mu R^2 / \epsilon \quad (2)$$

其中, $C_\mu = 0.09$ 。k-ε-E模型被用于大量的流体计算,现已成为得到充分检验的紊流模型之一。研究表明,该模型可以模拟许多种类的自由剪切层,附壁边界层和明渠,管路水流等,所得结果比混和长假设,一方程模型的结果更加精确。但是由于采用各向同性涡粘性系数的Boussinesq假设,对于一些较复杂的流动情形预测能力降低。此外,只有当流动处于局部平衡状态时,即 $G = -\overline{u_i u_j} (\partial U_i / \partial x_i) \approx \epsilon$,经验系数 C_μ 才近似地等于通常所取的0.09^[1],系数的较大变化,反映了模型的不足。在k-ε-S模型中,由于采用了涡粘性系数为二阶张量形式的雷诺应力表达式,从而克服了k-ε-E模型的缺陷。

2. k-ε-S模型

该模型应用紊流随机模型^[4]求解雷诺应力,即:

$$-\overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} k \delta_{ij} + C_i \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - C_w \frac{k^2}{\varepsilon^2} [(S_{ij} - SD) \delta_{ij} + D_{ij}] \quad (3)$$

$$\text{其中, } S_{ij} = 2 \frac{\partial U_i}{\partial x_m} \frac{\partial U_j}{\partial x_m} \quad (4)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{8} (3 \delta_{im} - 1) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_m} + \frac{\partial U_m}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

$$SD = (S_{aa} + D_{aa})/3 \quad (6)$$

式中, 下标 m, l, a 表示三个坐标方向的和张量。模型系数 $C_i = 0.08386$, $C_w = 0.0147$ 。方程 (3) 右边的 S_{ij} , D_{ij} 项是附加的非线性时均流速梯度的二次项, 表示雷诺应力的各向异性部分。正是由于该项的影响, 在求解具有主导方向体积力作用的流动时 (例如受流线曲率影响的分离流), $k-\varepsilon-S$ 模型比 $k-\varepsilon-E$ 模型优越。而用 $k-\varepsilon-E$ 模型模拟较好的流动, $k-\varepsilon-S$ 模型具有相同的预测能力。

三、数值计算与成果分析

根据以上介绍的紊流模型, 选用 SIMPLEC 算法, 对如图 1 所示的绕叶栅流动进行了计算。

边界条件: 对于进口边界, 考虑充分发展的流动条件; 出口边界选在离叶栅足够远的下游段面, 变量沿出口边界的法向导数为零; 对于固壁边界, U_i 取为零 (无滑移条件), 对 k, ε 通过壁函数关系确定。通常选用对数律壁函数, 这种壁函数简单、实用, 但适用范围要求 $30 < y^+ < 100$ 。

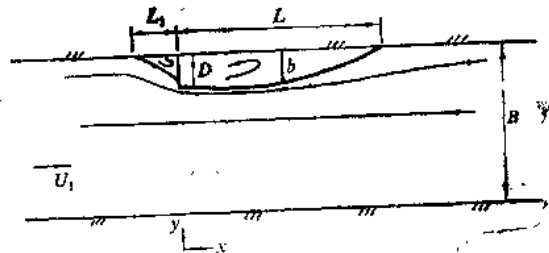


图1 绕叶栅流动示意图

因此, 对于复杂流动, 这种壁函数不再适用。另外, 在应用 $k-\varepsilon-S$ 模型时, 由于还要求知道近壁节点流速的导数项 $\partial U / \partial y$, 故对数律壁函数也不适用。为克服这些困难, 提出了两种应用范围广泛的壁函数, 即精细壁函数及其简化形式解析式壁函数^[2]。为了研究对比, 本文对 $k-\varepsilon-E$ 模型采用对数律壁函数, 而对 $k-\varepsilon-S$ 模型采用精细壁函数。叶栅作为无厚度的固壁边界处理。

Durst 和 Rastogi 曾对绕叶栅的流动进行了计算^[6], 并指出对不同阻塞比 $\gamma (\gamma = D/B)$ 其流动的物理背景是不同的。对高阻塞比 ($\gamma \geq 0.5$) 时, 压强梯度比任何紊动输运过程对流动的影响都大得多, 即压强控制流动; 而在低阻塞比时 ($\gamma \leq 0.2$), 紊动扩散起决定作用, 故紊流模型直接影响计算结果。采用 $k-\varepsilon-E$ 模型虽然对高阻塞比的流动计算结果比较理想, 但对低阻塞比的流动, 预测的回流范围过小, 例如回流长度小 30%, 回流宽度小 37%。而壁函数的修正对流场的影响不大。

本文用 $k-\varepsilon-E$ 和 $k-\varepsilon-S$ 模型, 采用相同的网格划分 90×21 , 对 $\gamma = 0.11 (B/D = 9)$ 的薄叶栅流动进行了模拟, 并与 Good 等人的试验结果^[6] 进行了比较。计算及试验条件为: $Re = U_1 D / \nu = 1.76 \times 10^5$, U_1 为进口段面最大流速, 进口处 $U_w / U_1 = 0.0358$ 。试验给出的回流长度为

$L/D=13.3$, $k-\epsilon-E$ 模型的计算值 $L/D=9.5$ (偏短约29%, 与文献5结论一致); 而 $k-\epsilon-S$ 模型的计算值 $L/D=11.5$, 计算结果得到明显改善。图2表示绕叶栅的流速沿程断面分布。在叶栅上游, 两种模型计算的结果一致, 并与试验值相吻合。对于叶栅下游的回流区和恢复区, 总的说来, $k-\epsilon-S$ 模型优于 $k-\epsilon-E$ 模型。在回流区内流速分布与试验值仍有偏差。为了进一步模拟回流区, 尚需改进 k, ϵ 的模型方程, 同时还应建立考虑压强梯度的壁函数。

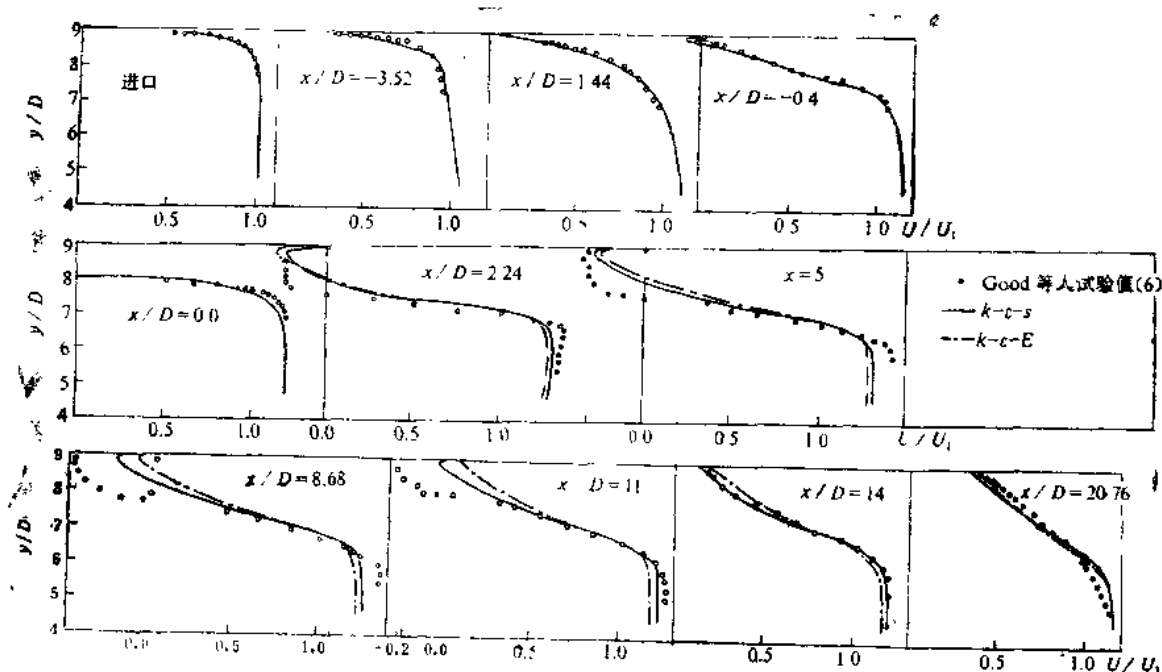


图2 绕叶栅流动沿程断面流速分布

四、结 论

本文研究了绕叶栅流动的数值解。通过对回流长度, 流速沿程断面分布等参数的计算, 表明各向异性的 $k-\epsilon-S$ 模型优于 $k-\epsilon-E$ 模型, 具有较强的预测能力。为了更好地模拟回流区, 尚需改进 k, ϵ 的模型方程。同时还应建立考虑压强梯度的壁函数。

参 考 文 献

- [1] Launder, B.E and spalding, D.B., The numerical computations of turbulent flows, Com. Meth. in Applied Mech. and Eng., 1974, V.3, pp.269-89
- [2] 叶坚 $k-\epsilon-S$ 紊流模型的研究及其应用, 南京水利科学研究院博士论文, 1989
- [3] Rodi, W., Turbulence models and their application in hydraulics, State-of-The-Art Paper, IA-HR Publication, 1980
- [4] 樊国仁, 紊流力学, 高等教育出版社, 1987
- [5] Durst, F. and Rastogi, A.K, Turbulent flow over two-dimensional fences, in Turbulence Shear Flow II, Springer-Verlay, Berlin, Heidelberg, New York, 1980, pp.219-32
- [6] Good, M.C. and Joubert, P.N., The form drago of two-dimensional bluff plates immersed in turbulent boundary layers, J. of Fluid Mech., 1968, V.31, part3, pp.547-82

电厂冷却水排放温度场数值模拟

吴 时 强

(南京水利科学研究所)

一、数学模型

1. 基本方程

(1) 连续方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = q \quad (1)$$

式中, z 为水面高程 (m); U 、 V 分别为 x 、 y 向水流速度 (m/s); H 为水深 (m); q 为单位面积上的源汇流量 (m/s), 源时 q 取正, 汇时 q 取负。

(2) 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} = & -gH \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2E_{11}H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[E_{12}H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{\rho} (\tau_x^s - \tau_x^b) + \bar{m}_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} = & -gH \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[E_{21}H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(2E_{22}H \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} (\tau_y^s - \tau_y^b) + \bar{m}_y \end{aligned} \quad (3)$$

式中, g 为重力加速度 (m/s^2); τ_x^s 、 τ_y^s 分别为 x 、 y 向水面切应力 (N/m^2); τ_x^b 、 τ_y^b 分别为 x 、 y 向河体底部切应力 (N/m^2); ρ 为水体密度 (kg/m^3); $\bar{m}_x$ 、 $\bar{m}_y$ 分别为 x 、 y 向水深平均的源汇作用输入的动量通量 (m^2/s^2), $\bar{m}_x = q \cdot U_0$, $\bar{m}_y = q \cdot V_0$, U_0 、 V_0 分别为 x 、 y 向源汇流速 (m/s); E_{ij} ($i, j=1, 2$) 为水流扩散系数 (m^2/s)。

(3) 能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta TH}{\partial t} + \frac{\partial UH\Delta T}{\partial x} + \frac{\partial VH\Delta T}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(DXH \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DYH \frac{\partial \Delta T}{\partial y} \right) \\ & - \frac{KS\Delta T}{\rho Cp} + q \cdot \Delta T_0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ΔT 为水体温升量 ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta T = T - T_{\infty}$, T 为水温 ($^{\circ}\text{C}$), T_{∞} 为水体自然温度 ($^{\circ}\text{C}$); ΔT_0 为源汇水体温升值 ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta T_0 = T_0 - T_{\infty}$, T_0 为源汇水体温温度; D_x 、 D_y 分别为热量扩散系数 (m^2/s); K_s 为水面综合散热系数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$); ρC_p 为水体定压比热, 取 $10^6 \text{Cal}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$

式 (1) ~ (4) 构成了水深平均的平面二维水力热力数学模型的基本方程。

在 (2)、(3) 中, 水面切应力 τ_x^s 、 τ_y^s 的影响很小, 一般可略去不计。底部切应力 τ_x^b 、 τ_y^b 可采用下式计算:

$$\begin{cases} \tau_x^b = C_f \rho (u^2 + v^2)^{1/2} u \\ \tau_y^b = C_f \rho (u^2 + v^2)^{1/2} v \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_f 为摩阻系数, 如采用 Manning 公式, 则 $C_f = \frac{n^2}{H^{1/3}} \cdot g$; n 为底部糙率。

2. 定解条件

(1) 初始条件

$$\begin{aligned} u(x, y, 0) &= u_0(x, y) & z(x, y, 0) &= Z_0(x, y) \\ v(x, y, 0) &= v_0(x, y) & \Delta T(x, y, 0) &= \Delta T_0(x, y) \end{aligned}$$

(2) 边界条件

1) 进流边界 给出流量过程线, 并由此换算出流速边界条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial n} - \frac{\partial Z}{\partial n} &= 0 \\ \Delta T &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, n 为进流边界法向矢量。

2) 出流边界。水位条件给出 $z = z(t)$, 其它物理量均采用 Neumann 条件, $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial \Delta T}{\partial n} = 0$, n 为出流边界法向矢量。

3) 固定边界。水位及温升量的边界条件仍采用 Neumann 条件, 即 $\frac{\partial Z}{\partial n} = \frac{\partial \Delta T}{\partial n} = 0$, 这里 n 为固定条件法向矢量, 水流速度边界条件给以可滑动的边界。

3. 数值方法

模型基本方程可写成通式:

$$\frac{\partial \phi H}{\partial t} + \frac{\partial \phi u H}{\partial x} + \frac{\partial \phi v H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x H \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y H \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_s + S_H + S_D \quad (7)$$

式中, ϕ 为输运物理量; D_x 、 D_y 为扩散系数; S_H 为传播源项; S_D 为扩散源项, S_s 为其 X 源项。方程通式 (7) 是一典型的对流扩散型方程, 为了解决经典有限元法或有限差分法求解

这类方程所存在的数值扩散、数值振荡及苛刻的稳定条件等问题,本文选用剖开算子法来求解方程,即将方程(7)剖分成对流、扩散、反应及传播四个算子方程,分别选用各自适应的数值方法求解。

(1) 对流方程

$$\frac{\partial \phi H}{\partial t} + \frac{\partial u H \phi}{\partial x} + \frac{\partial v H \phi}{\partial y} = q \phi \quad (8)$$

利用连续方程(1),上式可简化为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

式(9)可采用特征线法在任意三角形网络上很容易求出在对流后 ϕ 值。

(2) 扩散方程

$$\frac{\partial \phi H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x H \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y H \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (10)$$

利用Galerkin有限元法求解式(10),得到扩散作用后的 ϕ 值。

(3) 反应方程

$$\frac{\partial \phi H}{\partial t} = S_\phi - q_\phi \quad (11)$$

对于式(11),为了能利用解析方法求解,需对表达式 S_ϕ 作线性化,并保证式(11)右边为负斜率变化。

(4) 波动方程

波动方程与连续方程联解来确定自由表面的调整及高时位的速度场。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial u H}{\partial y} + \frac{\partial v H}{\partial x} = q \quad (12)$$

$$\frac{\partial u H}{\partial t} = -g H \frac{\partial Z}{\partial x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial v H}{\partial t} = -g H \frac{\partial Z}{\partial y} \quad (14)$$

由式(12)~(14)作适当的调整及线性化近似后,可推得自由表面调整量 ΔZ 的方程^[2]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Z}{g \Delta t^2} - \alpha^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial \Delta Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial \Delta Z}{\partial y} \right) \right] = & - \frac{\alpha}{g \Delta t} \left[\frac{\partial (u H)^{n+3/p}}{\partial x} + \right. \\ & \left. - \frac{\partial (v H)^{n+3/p}}{\partial y} \right] - \frac{1-\alpha}{g \Delta t} \left[\frac{\partial (u H)^n}{\partial x} + \frac{\partial (v H)^n}{\partial y} \right] + \alpha \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H^n}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial H^n}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

式中, ΔZ 为自由表面调整量(m); α 为隐式因子,取 $\alpha = \frac{1}{2}$, n 表示低时位, $n+3/p$ 表

示反应项计算结果; Δt 为计算时间步长 (S); p 为分步数。

式(15)用利隐式 *Galerkin* 有限元法求解, 得到自由表面调整量 ΔZ , 从而可确定高时位自由表面 $Z^{n+1} = Z^n + \Delta Z$ 。由此, 可由式 (13)、(14) 确定高时位的速度场。

二、算 例

吴泾热电厂冷却水采用直流供排水系统, 冷却水量 $17.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 如图1为计算网络^[2]。计算水文条件如图2所示, 为半日不规则潮型。电厂冷却水温升 $\Delta T_0 = 8^\circ\text{C}$, 水面综合散热系数 $K_s = 0.01 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$, 床面糙率 $n = 0.025$, 由于潮汐强对流作用, 水流扩散作用可忽略不计, 取 $E_{ij} (i, j = 1, 2) = 0$ 。

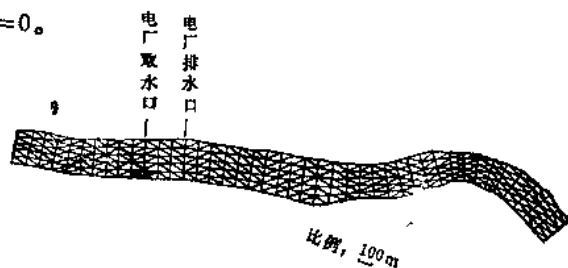


图1 计算网络布置图

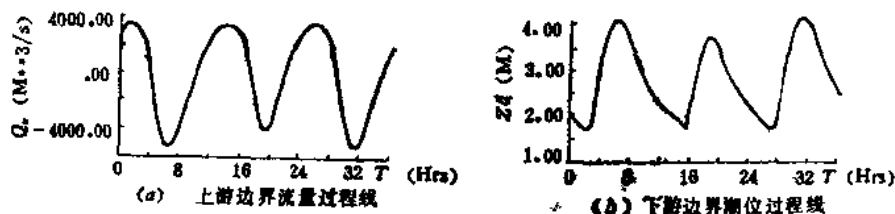


图2 边界条件

图3~图6分别为全日潮过程中四个不同瞬时(高平潮、落潮、低平潮、涨潮)电厂温排水引起的温度场计算结果。可见, 热污染带随着潮流上下漂移。合理地预测了电厂温排水可能引起的热污染范围及程度。

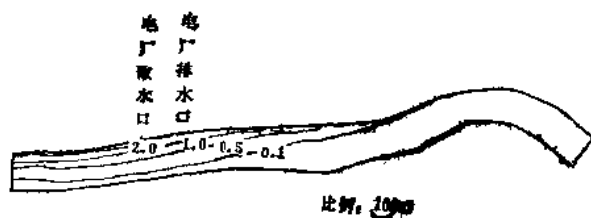


图3 高平潮时的温度场



图4 落潮时的温度场

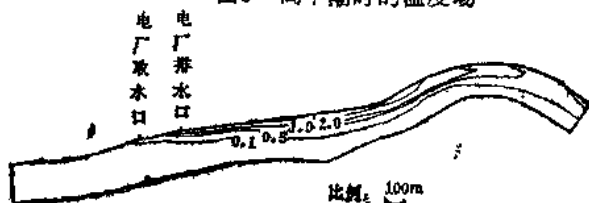


图5 低平潮时的温度场

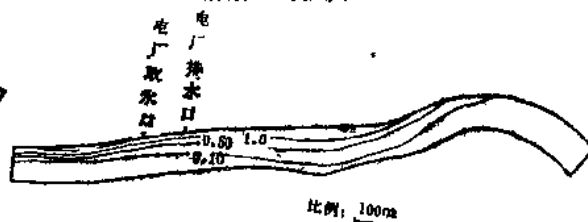


图6 涨潮时的温度场

阳宗海电厂利用阳宗海湖水作为冷却水源, 一期改造工程需冷却水 $8\text{m}^3/\text{s}$, 二期工程需冷却水 $16\text{m}^3/\text{s}$, 选取靠近电厂的阳宗海局部湖面作为计算区域。电厂冷却水温升 $\Delta T_c=8^\circ\text{C}$, $K_s=0.0065\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}^{(4)}$, $n=0.020$, $E_{11}=E_{22}=0.1\text{m}^2/\text{s}^2$, $E_{12}=E_{21}=0$ 。如图7~图8分别为一期和二期工程竣工运行后电厂温排水引起的湖水温度场。可见电厂引起的热污染范围很小, 定性地预测了工程的影响程度。

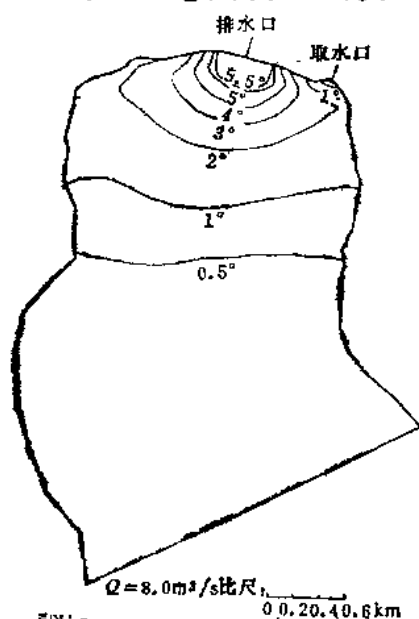


图7 一期工程温度场分布

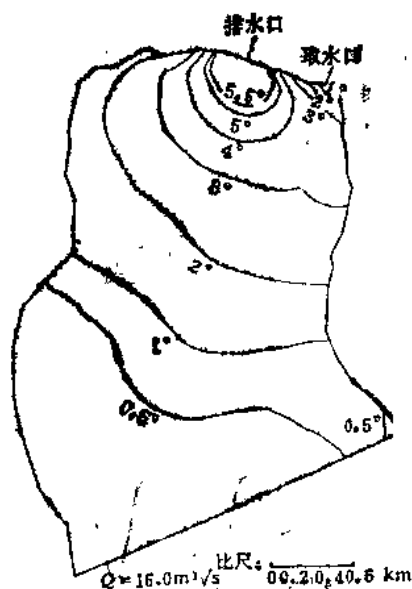


图8 二期工程温度场分布

由于缺乏实测资料, 本文所提出的数学模型尚待进一步验证, 然而, 两个算例结果表明本文所提出的二维水力热力模型能预测以宽线型的河道或湖泊等作为冷却水源的电厂温排水温度场分布。

三、结 语

1. 本文在前人研究的基础上, 进一步提出了一个平面二维水源汇作用的水力热力数学模型, 为电厂冷却水所引起的热污染问题的研究提出了有效的数值模拟工具。

2. 本文所提出的数学模型已在实际工程中得到应用, 证明具有良好模拟的能力。

致谢: 本文得到丁道扬高级工程师(教授级)的指导, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] Daoyang Ding and Philip L-F Liu (1989), An operation splitting algorithm for two-dimensional convection-dispersion-reaction problem, Int J. Num Mth. Engrg. Vol 28
- [2] 吴时强, 割开算法解具有自由表面的平面紊流流场, 水利水运科学, 1992年第二期
- [3] 吴时强、丁道扬, 吴时强电厂二期扩建工程温排水对黄浦江水质影响数模计算阶段报告, 南京水利院水工所 1991.7
- [4] 吴时强等, 阳宗海电厂改建工程环境影响评价——温排水对湖水温度影响预测及对生物影响评价报告, 能源部电力环保所, 1990.6

潮汐河口盐水入侵的数值计算

匡翠萍

(南京水利科学研究院)

一、基本方程

根据河口地区特点,假定:①压强服从静水压强分布;②水质点的横向流速对时间、空间的微分忽略不计;③流动要素在控制断面上沿宽度分布足够均匀。对三维雷诺方程和盐度守恒方程沿横向积分,得到垂向二维运动方程和盐度扩散方程分别为:

$$-\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{b} \frac{\partial}{\partial x}(bu) + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b e_x \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(e_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$-\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{u}{b} \frac{\partial}{\partial x}(bs) + w \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial}{\partial x}(bu) + b \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\text{水位方程} \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b \int_{z_b}^{\xi} u dz \right) = 0 \quad (4)$$

$$\text{状态方程} \quad \rho = \rho_0 + \beta s \quad (5)$$

$$\text{压强方程} \quad p = p_0 + \rho_0 g (\xi - z) + g \int_z^{\xi} (\beta S) dz \quad (6)$$

式中, u 、 w 为 x 、 z 向的流速分量; ρ_0 、 ρ 为淡水、盐水的密度; p_0 、 p 分别为大气压强、水压强; z_b 、 ξ 为河底高程、水位; e_x 、 e_z 为 x 、 z 向的紊动粘性系数; D_x 、 D_z 为 x 、 z 向盐度扩散系数; $\beta = (0.75 \sim 0.78) \times 10^{-3}$ 。

二、边界条件和初始条件

1. 水边界

$$\xi = \xi(t) \quad s = s(t) \quad (\text{涨潮时向海边界})$$

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{落潮时向海边界}) \quad \frac{\partial s}{\partial x} = 0 \quad (\text{向河边界})$$

2. 自由表面

$$e_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_s}{\rho} \quad p = p_0$$

$$ws - D_z \frac{\partial s}{\partial z} = 0$$

其中 τ_s 为风应力

3. 河底边界

$$e_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_b}{\rho} \quad \frac{\partial s}{\partial z} = 0$$

$$\tau_b = g n |u| / C^2 \quad C = \frac{1}{n} H^{1/6}$$

其中, τ_b 为床面摩阻力; n 为曼宁系数; H 为水深。

4. 初始条件

$$u = w = 0 \quad \xi = \text{const} \quad s = s_0(x, z)$$

三、紊流模型

紊流模型采用零方程模型。水平紊动粘性系数和扩散系数均取为常数。垂向紊动粘性系数和扩散系数依赖于垂向分层程度, 垂向分层程度可用当地 Richardson 指数 (RI) 表示:

$$RI = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (7)$$

$$e_z = e_{z0} (1 + 2 \cdot RI)^a \quad (8)$$

$$D_z = D_{z0} (1 + \beta \cdot RI)^q \quad (9)$$

式中, $a=10$, $\beta=3.33$, $p=0.5$, $q=-1.5$; e_{z0} 、 D_{z0} 分别为不分层时垂向紊动粘性系数和扩散系数。

四、坐标变换及其方程

由于水深沿程是不规则变化的, 因此垂向二维计算中计算域也是不规则的。通过坐标变换, 将不规则区域转换成规则区域, 便于差分计算, 定义无量纲坐标 z^* :

$$z^* = \frac{z - \xi}{\xi + h} = \frac{z + h}{H} \quad (10)$$

其中, h 、 H 分别为河底至基准面距离、水深在新坐标系 (x, z^*, t) 下, 定义一个新的垂向流速分量 w^* :

$$w^* = \frac{\partial z^*}{\partial t} + u \frac{\partial z^*}{\partial x} + w \frac{\partial z^*}{\partial z} \quad (11)$$

则基本方程式 (1)、(2)、(4) 化为,

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{b} \frac{\partial}{\partial x}(bu) + w^* \frac{\partial u}{\partial z^*} = - \frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x}(b\xi) - \frac{g\beta}{\rho_0 b} \left(\frac{\partial}{\partial x}(bH \int_{z^*}^1 s dz^*) \right) \\ + \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b e x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(e_z \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{u}{b} \frac{\partial}{\partial x}(bs) + w^* \frac{\partial s}{\partial z^*} = \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b D x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(D z \frac{\partial s}{\partial z^*} \right) \quad (13)$$

$$-\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(b H \int_0^1 u b z^* \right) = 0 \quad (14)$$

五、差分方程

本文离散网格为交错网格如图1, 对基本方程用分步差分法求解。对流项采用迎风格式离散, 扩散项采用中心差分离散, 垂向导数采用隐式格式。

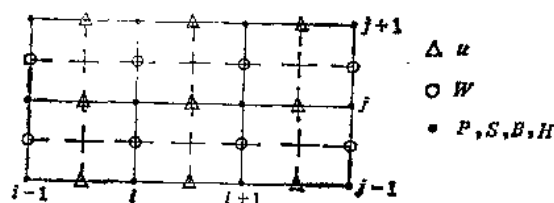


图1 交错网格

六、模型验证

采用1978年8月12~13日长江口南槽实测资料进行验证。步长 $\Delta x=1000$, $\Delta z^*=0.2$, $\Delta t=60(S)$ 。

各参数取值分别为:

$$n=0.012 \text{ (涨潮)} \quad n=0.019 \text{ (落潮)}$$

$$e_x=2000 \quad D_x=10$$

计算结果见图3、图4。从图中实测值和计算值比较可表明: 本文提出的数学模型能模拟河口地区的盐水入侵。

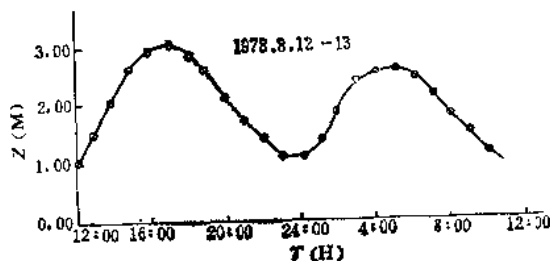


图2 中浚站潮位过程线

注: ——实测值 ○计算值

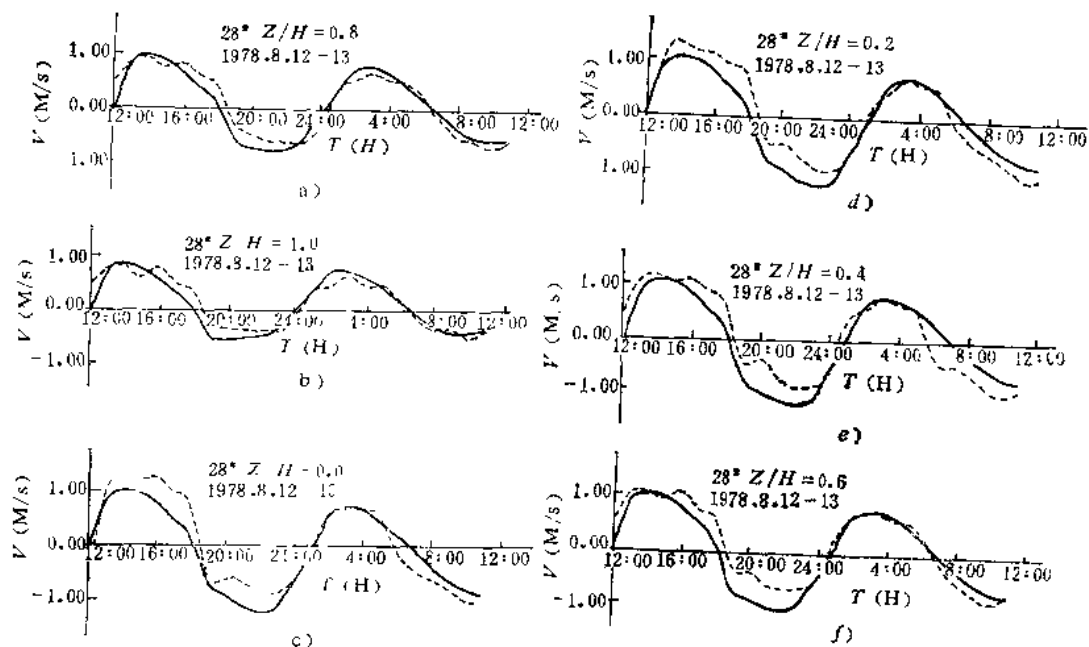


图3 28*流速过程线

注:实测值 ——计算值

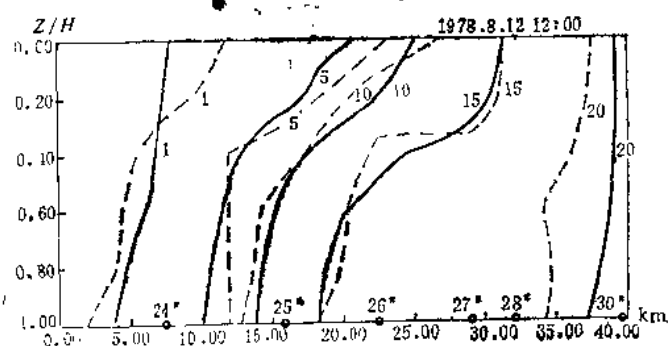


图4 含盐度等值线

参 考 文 献

- [1] P. A. J. Perrels and M. Korelse, A two-dimensional numerical model for salt intrusion in estuaries, Delft Hydraulics Laboratory, 1977
- [2] C. Koutitas, Three-dimensional models of coastal circulation, an engineering viewpoint, 1987