

文章编号: 1001-5485(2006)03-0013-04

# 潮流河段温排水影响的平面二维数值模拟

张细兵, 金 琨, 林木松  
(长江科学院 河流研究所, 武汉 430010)

**摘要:** 为研究电厂温排水对受纳水体的温升影响, 基于无结构的三角形网格, 采用有限元算法, 建立了平面二维非恒定流温排水数学模型。该模型建立在非恒定水动力学模型基础上, 考虑了源汇项的作用, 因此能适应于各种恒定与非恒定河道水流中的温排水计算, 并能适应于喇叭形和蘑菇头形等多种排水形式。该模型在多项电厂工程温排水问题研究中得到了成功应用, 以位于长江下游感潮河段中的南京马渡电厂为例进行了计算分析, 并采用实体模型试验成果对数学模型计算结果进行了对比检验。开发研制了数学模型的后处理软件, 实现了温排水运动过程的动态演示。

**关键词:** 温排水; 温升; 有限元; 数值模拟; 动态演示

**中图分类号:** TV142 **文献标识码:** A

电厂循环冷却水升温后排入河道, 会引起受纳水体水温的升高, 在局部范围内影响水生生物的生长发育, 破坏生态平衡, 因此估算电厂温排水的影响范围, 是电厂项目环境影响评价和水资源论证工作中的重要内容之一。

为模拟温排水与河道水体发生掺混后的时空变化规律, 可采用数学模型进行研究。在排水口附近, 由于温水密度小于周围水体, 因此可能存在分层现象, 但经过一定距离的充分掺混后, 分层现象会不明显, 因此在忽略排水口局部分层问题情况下, 可采用平面二维模型来模拟温水的扩散范围及过程。

当河道水流为单向流时, 温升影响一般分布在排水口附近及其下游, 并形成一条扁长状的沿岸热污染带。而在感潮河段中, 由于水流为非恒定往复流, 温水受潮汐水流的影响, 会在排水口上、下游沿岸往复运动, 情况较为复杂。本文在充分认识潮流河段的水流运动特性的基础上, 基于任意平面域渐变三角形网格, 采用有限单元法建立了平面二维非恒定流温排水数学模型, 并在长江下游感潮河段中得到了应用。

## 1 数学模型及定解条件

### 1.1 模型基本方程

#### (1) 水流方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gn^2 u}{h^{4/3}} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h} - f_v - v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{qu_s}{h}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{gn^2 v}{h^{4/3}} \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h} + fu - v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{qv_s}{h}, \quad (3)$$

式中:  $u$  和  $v$  分别为垂线平均流速在  $x, y$  方向上的分量;  $z$  为水位;  $h$  为水深;  $q$  为单位面积上水流的源汇强度;  $u_s$  和  $v_s$  分别为沿水深平均的源汇速度在  $x, y$  方向上的分量;  $g$  为重力加速度;  $n$  为糙率;  $v_t$  为水流紊动粘性系数;  $f$  为地球自转柯氏力系数。

#### (2) 热量方程

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + u \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + v \frac{\partial \Delta T}{\partial y} - D \left( \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} \right) + \frac{k \Delta T}{\rho h C_p} - \frac{q T_s}{h} = 0, \quad (4)$$

式中:  $\Delta T$  为垂线平均温升;  $D$  为热扩散系数;  $\rho$  为水的密度;  $C_p$  为水比热;  $T_s$  为热源处温升;  $k$  为水面综合散热系数, 可按照 Gunneberg F. 公式计算:

$$k = 2.2 \times 10^{-7} (T_w + 273.15)^3 + (0.0015 + 0.00112U_2) [(2501.7 - 2.366T_w) \frac{25509}{(T_w + 239.7)^2} \times \frac{7.56T_w}{10T_w + 239.7} + 162], \quad (5)$$

式中:  $U_2$  为水面以上 2 m 处的风速;  $T_w$  为各个网

收稿日期: 2005-05-12

作者简介: 张细兵(1976-) 男, 湖北鄂州人, 硕士, 工程师, 主要从事河流动力学数值模拟研究。(电话)027-82829871(电子信箱)zxb9871@1994-2024 Scholar Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

格节点的计算温升加上环境水温。

### 1.2 有限元方程

模型基本方程采用有限元法进行离散求解。首先将整个计算域划分为三角形网格,然后在每个三角形内采用伽辽金加权剩余法<sup>[1]</sup>对基本方程进行积分,经推导并化简后得到如下的有限元方程<sup>[2]</sup>:

$$A_{ij} \frac{dz_j}{dt} = -D1_{ij}(hu)_j - D2_{ij}(hv)_j - A_{ij}q, \quad (6)$$

$$A_{ij} \frac{du_j}{dt} = -B_{ij}u_j - gD1_{ij}z_j - A_{ij}g \cdot \left( \frac{n^2 u}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} \right)_j + A_{ij}fv_j - v_t(C_{ij} + E_{ij})u_j + A_{ij} \left( \frac{qu_s}{h} \right)_j, \quad (7)$$

$$A_{ij} \frac{dv_j}{dt} = -B_{ij}v_j - gD2_{ij}z_j - A_{ij}g \cdot \left( \frac{n^2 v}{h^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} \right)_j - A_{ij}fu_j - v_t(C_{ij} + E_{ij})v_j + A_{ij} \left( \frac{qv_s}{h} \right)_j, \quad (8)$$

$$A_{ij} \frac{d\Delta T_j}{dt} = -B_{ij}\Delta T_j - D \cdot (C_{ij} + E_{ij})\Delta T_j - A_{ij} \left( \frac{k\Delta T}{\rho h C_p} - \frac{qT_0}{h} \right)_j. \quad (9)$$

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \varphi_j \varphi_i dx dy, B_{ij} = B1_{ijk}u_k + B2_{ijk}v_k, \\ B1_{ijk} = \iint_{\Omega} \varphi_k \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} dx dy, B2_{ijk} = \iint_{\Omega} \varphi_k \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} dx dy, \\ C_{ij} = \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} \right) dx dy, \\ D1_{ij} = \iint_{\Omega} \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} dx dy, \\ D2_{ij} = \iint_{\Omega} \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} dx dy, \\ E_{ij} = \oint_{\Gamma} \left( \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \varphi_j dx - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \varphi_j dy \right).$$

式中:  $\varphi$  为形函数;  $i, j, k$  为三角形 3 个顶点的节点编号。

### 1.3 定解条件

(1) 初始条件 初始时刻计算域水位为下游边界水位,流速和温升均为 0。初始条件的偏差在计算中会很快消失,不会影响计算结果精度。

(2) 边界条件 流场边界条件:上、下游边界以潮位过程为边界条件;固定边界令边界法向流速分量为零,即  $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$  ( $U$  为边界水流合流速,  $n$  为固定

边界法向单位向量);两岸边滩按动边界处理<sup>[4]</sup>。

温度场边界条件:入流边界,  $\Delta T = \Delta T(t)$ ;出流边界,  $\frac{\partial \Delta T}{\partial n} = 0$ ,  $n$  为出流边界法向单位矢量。为反映电厂取水水温对排水水温的影响,计算中考虑了热回归影响,即将电厂冷凝器温升加上取水温升作为排水温升值。

电厂排水口形式一般有 2 种,一种为喇叭形明渠,通常采取“深取浅排”的布置形式,其优点在于能利用温水的分层特性,减小取水温升;另一种为蘑菇头形,一般布置在河底,其优点在于排出的温水能很快与河道水流掺混,从而也达到减小取水温升的目的。对于喇叭形排水口,模型中按开边界考虑;对于蘑菇头形排水口,模型中按源项考虑;对于取水口,模型中按汇项考虑。

## 2 数值解法及模型适用范围

将方程(6)~(9)的系数矩阵化为三对角矩阵进行求解,同时采用压缩存储方法来存储系数矩阵。有限元方程求解采用预估校正的时间推进算法<sup>[2]</sup>。主要思想为:用二阶显式 Adams 公式作为预测公式,梯形公式(隐式)作校正公式,来构造 Adams 二阶 PC 公式,为提高精度,可进行迭代。离散后的方程不需联接,计算过程稳定性好,同时还有效避免了数值振荡。对于恒定流场的计算可采用非恒定流逼近恒定流的算法。

模型计算得到的温升为各节点的垂线平均温升,对于排水口近区,由于存在温升分层现象因此误差相对大些;而对于远区,由于温水经充分掺混后,温升分层不明显,因此误差相对较小。对于河道水深较大、温升分层明显的情况,在求解热量方程时,可通过给定一限制水深,即温水能影响到的最大水层深度,当节点水深大于限制水深时,令其等于限制水深,这样处理能减小温升分层现象带来的误差。

## 3 计算实例

本模型已在多项电厂工程温排水问题研究中得到成功应用,现选用南京马渡电厂为例进行介绍。

### 3.1 计算河段及网格划分

拟建南京马渡电厂位于长江下游镇扬河段世业洲汊道段进口右岸。电厂一期工程建设规模为 2 台 600 MW 燃煤机组,取水水源为长江。2 台机组布置排水口 1 个,为喇叭形明渠;取水头 2 个,为蘑菇

头形。

选取三江口—六圩河口长约 40 km 河段作为计算河段(见图 1), 计算河段为弯曲分汊河道, 中间为世业洲汉道, 目前右汊为主汊。采用任意平面域渐变三角形网格<sup>[3]</sup>对整个计算河段进行网格划分(见图 2), 共划分为 16 589 个三角形单元, 8 744 个网格节点。网格中三角形边长一般为 50~200 m, 取排水口局部进行了加密, 三角形边长约为 10 m。为提高计算结果精度, 疏密网格间保持了良好的渐变性。

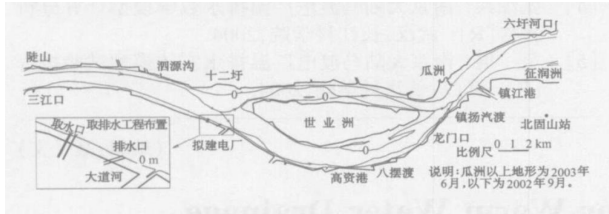


图 1 计算河段河势图

Fig. 1 The sketch of calculated river reach

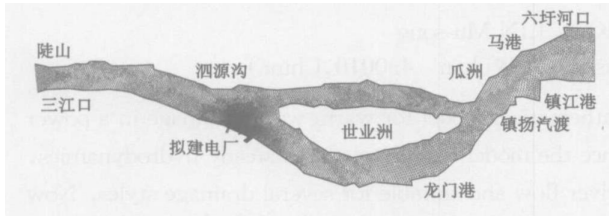


图 2 计算河段三角形网格划分图

Fig. 2 The triangular grids of the calculated reach

3.2 计算条件

温排水计算水流条件为长江多年 97% 频率流量条件, 对应大通流量为  $5\,680\text{ m}^3/\text{s}$ , 计算河段进出口给定相应条件的潮位过程进行计算。

电厂排水方式为喇叭形明渠, 排水口按开边界考虑, 给定排水流量、温升值, 并在模型中考虑热回归影响。排水流量为  $29\text{ m}^3/\text{s}$ , 温升为  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 参系数取值

在温排水计算之前, 首先进行流场的验证计算<sup>[4]</sup>, 验证计算内容包括潮位过程、垂线点流速过程、断面流速分布及汊道分流比等。经率定调试得到本河段河道深槽糙率为  $0.017\sim0.020$ , 滩地糙率为  $0.026\sim0.032$ 。

热量方程中热扩散系数根据大量工程经验并结合本河段情况, 取  $D=5$ ; 水面综合散热系数根据前述的 Gunneberg F 公式计算, 夏季和冬季分别为  $16.9\sim22.0\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $10.0\sim13.8\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

模型计算采用的时间步长根据 Courant 条件进行选取, 流场计算时间步长取为 1 s, 温度场计算取为 10 s。

3.4 计算成果分析

计算结果表明, 电厂温排水的温升影响范围主要分布在电厂排水口上、下游, 为扁长状沿岸热污染带。为形象表现温升等值线的动态变化过程, 笔者开发了相关后处理软件, 实现了温度场和流场的迭加动态演示。图 3 给出温升等值线在一个潮周期内(约 12 h)的动态变化过程图。由图可见, 温排水运动与潮流运动关系密切, 落潮时, 温水出排水口后贴岸向下游扩散(如  $T=10\text{ h}$  时); 涨潮时, 温水舌回缩, 并贴岸向上游扩散(如  $T=4\text{ h}$  时), 在一个潮周期内, 温水在厂址一侧河道岸边上、下回荡。

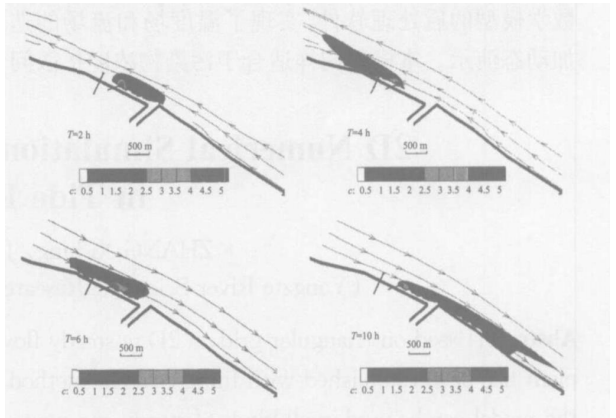


图 3 温升等值线动态演示过程图

Fig. 3 Dynamic displaying of the temperature-rise contours

3.5 数模计算与模型试验成果对比分析

为检验数学模型计算成果的可靠性, 采用该项目的温排水实体模型试验成果<sup>[5]</sup>进行了对比。拟建电厂温排水模型试验河段全长约 5 km, 模拟河宽为 600 m, 采用比尺为 100 的局部正态模型。

图 4 给出了落急时刻数模计算得到的温升等值线分布与实体模型试验成果的对比情况, 由图中可见, 两者差别不大, 由此证明了所建立的数学模型的可靠性。同时通过对比发现, 在排水口近区, 由于温升分层影响, 两者差别相对大些; 而在远区温水得到充分掺混后, 两者差别很小, 如图中的  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  温升线。

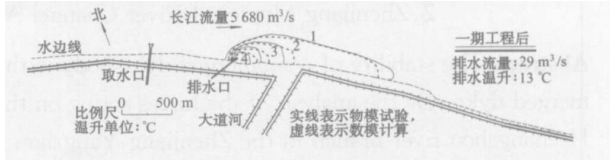


图 4 落急时刻数模计算与模型试验温升分布对比图

Fig. 4 Comparison of the temperature-rise contours between mathematical model and physical model results during ebb tide

4 结 论

基于任意平面域渐变三角形网格, 采用有限元法建立了能模拟电厂温排水影响的平面二维非恒定流数学模型。该模型能很好适应不规则的河道边界条件, 能自由对工程局部进行加密处理, 并能适应不同的排水形式。文中以位于长江下游感潮河段中的南京马渡电厂温排水影响问题为例进行了模拟计算, 并采用温排水实体模型试验成果对数学模型进行了对比检验, 证明了数学模型的可靠性。开发了数学模型的后处理软件, 实现了温度场和流场的迭加动态演示。本模型同样适合于污染物浓度扩散问

题的模拟, 可在河道温度场及浓度场等问题数值模拟中推广应用。

参考文献:

[ 1 ] J. E. 艾金. 有限元法的实现和应用[ M] . 北京: 科学出版社, 1992.  
[ 2 ] 张细兵, 殷瑞兰. 平面二维水流泥沙数值模拟的有限元方法[ J] . 水科学进展, 2002, ( 6): 9—13.  
[ 3 ] 张细兵. 河道有限元网格自动剖分方法研究[ J] . 长江科学院院报, 2002, ( 3): 19—21.  
[ 4 ] 张细兵. 南京大陆马渡电厂温排水数学模型计算分析报告[ R] . 武汉: 长江科学院, 2004.  
[ 5 ] 金 琨. 南京大陆马渡电厂温排水实体模型试验报告[ R] . 武汉: 长江科学院, 2004.

(编辑: 聂 文)

2D Numerical Simulation for Warm Water Drainage  
in Tide River Reach

ZHANG Xi-bing, JIN Kun, LIN Mu-song

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Based on triangular grid, a 2D unsteady flow mathematical model for warm water drainage in a power plant has been established with finite element method. Since the model is built on the unsteady hydrodynamics, the model can be used in all kinds of steady and unsteady river flow and suitable for several drainage styles. Now the model has been applied successfully in many power plants. A simulation for Madu Power Plant in Nanjing is given in the article, and the calculated results are compared with measured results of the physical model with the warm drainage. At last, the dynamic displaying of flow field and temperature rise field is illustrated in the paper.

**Key words:** warm water drainage; temperature rise; finite element method; numerical simulation; sensitivity analysis; dynamic display

(上接第 12 页)

Stability Analysis of Hechangzhou Plastic-Soil-Pillow Submerged Dyke

LU Cai-xia<sup>1</sup>, ZHANG Zeng-fa<sup>2</sup>

(1. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Zhenjiang Municipal River Channel Administration, Zhenjiang 212001, China)

**Abstract:** The stability of a submerged dyke body is the difficult point in the design of a plastic-soil-pillow submerged dyke. By the analysis of the forces acting on the submerged dyke located at the entrance of left branch of Hechangzhou river-branch in the Zhenjiang-Yangzhou stretch, the calculations on the stabilities of various locations of the submerged dyke were performed. The calculated results indicated that all stability factors are more than 1.5. Through over one year operation and monitoring, it is stable, and its expected targets are good.

**Key words:** plastic-soil-pillow submerged dyke; stability; Hechangzhou