

长江水域电厂温排水数值模拟

孙艳涛¹, 吴修锋²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 南京水利科学研究所, 南京 210029)

摘要: 对电厂环境水域温排水进行预测有助于合理地布置电厂取排水工程, 使电厂取到低温水, 使废热在水环境中得到充分的消散。针对常熟电厂附近水域水流和污染物的对流扩散特点, 采用 Delft 3D 软件平面二维水流温度场数学模型对电厂温排水进行数值模拟, 在水位和流速测点验证的基础上, 考察温度场的分布情况。分析结果显示: 冬季小潮条件比冬季大潮条件下的温升影响面积更大, 且向下游和离岸方向扩散的距离更远; 两种条件下取水口处的温升均较小。

关键词: 温排水; 热污染; 数值模拟

中图分类号: TV 133; X57 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0163-04

Numerical Simulation on Thermal Discharge of Yangtze River Power Plant

SUN Yar tao¹, WU Xiu feng²

(1. CCC Third Harbor Consultants Co., Ltd, Shanghai 200032, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Prediction of the thermal discharge of water environment of a power plant can reasonably arrange the water intake and drainage project of the power plant, which can help the power plant obtain the low-temperature water and fully dissipate the waste heat into the water environment. In this study, a power plant in Changshu City was chosen. According to the convection diffusion characteristics of flow and contaminants in the water environment of the power plant, the 2-D flow mathematical model in the Delft 3D software was used to simulate the thermal discharge of the power plant. On the basis of the verification of water depths and flow velocities, the distribution of temperature field was evaluated. The results showed that the affected area of temperature rise and the diffusion distance to downstream and offshore are larger under neap tide conditions than that under spring tide conditions, while the temperature rise at the water intake area is small under the two tide conditions.

Key words: thermal discharge; waste heat; numerical simulation

随着沿江地区经济的迅速发展和工业化城市进程的加快, 大量的工业废水和生活污水排入近江水域, 使水环境质量明显下降, 已造成不可忽视的环境问题, 其中火电厂是排放工业废热水的主要行业。一些发达国家在 20 世纪 70 年代以前就已开始研究电厂热排水对水生生态系统的影响。从 20 世纪 80 年代初, 国内也有人开始研究与电厂热排水有关的问题^[1-3]。合理地布置取排水工程, 使电厂取到低温水的同时使废热在水环境中得到充分的消散, 从而防止热污染, 这些是电厂建设过程中所必须考虑的问题, 而解决这些问题的基础是能够对环境水域温升分布进行合理预报。

由于江段河道水流运动可简化为沿水深平均的二维非恒定流动, 因此本文将采用平面二维水流温度场数学模型,

对常熟电厂的温排水流场和温度场进行数值模拟, 为长江环境管理提供决策依据。

1 工程概况

江苏常熟发电有限公司(以下称一期工程)位于江苏省常熟市吴市乡境内、长江徐六泾河段的南岸, 距常熟市城区 24 km。电厂厂址地势开阔, 不占良田, 具有建设大型电厂的良好条件。

常熟电厂现状工程容量为 1 200 MW, 配备有 4 台 300 MW 的改进型燃煤机组, 分别于 1993 年和 1994 年建成投产。在现状建设时预留的煤码头、煤场和取、排水口等共用设施位置已被华润电力常熟二电厂 3×600 MW 机组工程(以下简称二期工程)使用。

本次水文测验期间共布设营船港、徐六泾、白茆口 3 个固定潮位站(均属于国家基本站)和电厂煤码头 1 个临时潮位站。在测验水域共布置 6 条固定垂线,其中 1 号、2 号、3 号垂线采用 ADCP 走航式测流,4 号、5 号、6 号采用定船抛锚测流,另外在测验水域还布置了 6 条测温垂线。布置点位见图 1。



图 1 原型观测点位置布置

Fig. 1 Location of prototype observation points

2 平面二维水流数学模型

本工程采用荷兰 Delft 水力学研究所开发的 Delft 3D 平面二维数值模型,研究工程水域潮流和温排水对流的扩散过程。

2.1 基本方程

水流连续方程:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \xi} (C_{\eta} H u) + \frac{1}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} (C_{\xi} H v) = q \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_{\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_{\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial C_{\xi}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \xi} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - \\ f v + \frac{g}{C_{\xi}} \frac{\partial \xi}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0 C_{\xi}} \frac{\partial P_a}{\partial \xi} - \frac{\tau_{\xi}}{\rho_0 H} = \frac{E}{C_{\xi}} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{E}{C_{\eta}} \frac{\partial B}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{C_{\xi}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_{\eta}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial C_{\xi}}{\partial \eta} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} + \\ f u + \frac{g}{C_{\eta}} \frac{\partial \xi}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0 C_{\eta}} \frac{\partial P_a}{\partial \eta} - \frac{\tau_{\eta}}{\rho_0 H} = \frac{E}{C_{\eta}} \frac{\partial A}{\partial \eta} + \frac{E}{C_{\xi}} \frac{\partial B}{\partial \xi} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ξ 为潮位; t 为时间坐标; H 为总水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的垂线平均流速; q 为单位面积温排水水量的源汇强度 (m/s); $f = 2\omega \sin \varphi$ 为科氏系数(ω 为地球自转的角速度, φ 为计算区的纬度); $C = \frac{1}{n} (h + \xi)^{1/6}$ 为谢才系数(n 为曼宁系数); $g = 9.8 m/s^2$ 为重力加速度; E 为紊动黏滞系数, E_x 、 E_y 分别为 x 、 y 方向紊动黏滞系数; ξ 、 η 分别为正交曲线坐标系中两个正交曲线坐标; $A = \frac{1}{C_{\xi} C_{\eta}} \left[\frac{\partial (u C_{\eta})}{\partial \xi} + \frac{\partial (v C_{\xi})}{\partial \eta} \right]$, $B =$

$\frac{1}{C_{\xi} C_{\eta}} \left[\frac{\partial (v C_{\eta})}{\partial \xi} - \frac{\partial (u C_{\xi})}{\partial \eta} \right]$; C_{ξ} 、 C_{η} 表示正交曲线坐标系中的拉梅系数, $C_{\eta} = \sqrt{a} = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$, $C_{\xi} = \sqrt{b} = \sqrt{\xi^2 - \eta^2}$; τ_{ξ} 、 τ_{η} 为风应力在 ξ 、 η 方向上的分量。

2.2 定解条件

$$\xi_j(x, y, 0) = \xi_0(x, y)$$

$$\text{初始条件 } u(x, y, 0) = u_0(x, y)$$

$$v(x, y, 0) = v_0(x, y)$$

边界条件 上游和下游计算边界均以潮位过程线作为

其边界条件;固定边界采用可滑动边界条件,即 $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$ (U 为边界水流合速度, n 为固定边界法向单位向量),对于两岸边滩,则按动边界处理。

2.3 数值方法

(1) 至 (3) 式组成的水流模型基本方程中含有非线性混合算子,可采用剖开算子法进行离散求解^[46]。这一数值方法可以根据方程所含算子的不同特性,将该方程剖分为几个不同的子算子方程,各子算子方程可采用与之适应的数值方法求解。这种方法能有效地解决方程的非线性和自由表面确定问题,具有良好的计算稳定性和较高的计算精度。

3 平面二维温度场数学模型

3.1 基本方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (HT)}{\partial T} + \frac{1}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial (H u C_{\eta} T)}{\partial \xi} + \frac{1}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial (H v C_{\xi} T)}{\partial \eta} = \frac{H}{C_{\xi} C_{\eta}} \cdot \\ \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_x \frac{C_{\eta} \partial T}{C_{\xi} \partial \xi} \right) \right) + \frac{H}{C_{\xi} C_{\eta}} \left(\frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_y \frac{C_{\xi} \partial T}{C_{\eta} \partial \eta} \right) \right) - \frac{K_s T}{\rho_0 C_p} + q \Delta T_s \end{aligned} \quad (4)$$

式中: T 为沿水深的平均温升值 ($^{\circ}C$); ΔT_s 为温排水超温升 ($^{\circ}C$); D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向的热扩散(涡动分散)系数 (m^2/s); K_s 为水面综合散热系数 ($J/(s \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$); ρ_0 为江水密度 (kg/m^3); C_p 为江水的等压比热 ($J/(kg \cdot ^{\circ}C)$)。其余符号同前。

3.2 定解条件

$$\text{初始条件: } T(x, y, 0) = T_0(x, y)$$

边界条件:入流边界, $T = T(t)$; 出流边界, $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, n 为出流边界法向单位矢量。

3.3 数值方法

对于方程(4),仍选用剖开算子法,将其剖分为对流分步、扩散分步及反应分步进行求解。

4 计算条件的选取

4.1 计算区域

计算区域选取电厂上游约 19 km 的营船港断面至下游约 9 km 的白茆河口断面间长约 28 km 的江段,其范围见图 1。全域采用正交曲线计算矩形网格,共布置了 351 × 81 个节点,27 194 个单元,在排水口及测点附近进行了网格加密,见图 2、图 3,整个区域内最大网格步长为 290 m 左右,最小网格步长为 24 m 左右,时间步长取 12 s。

4.2 计算水文条件

计算水文条件为数学模型验证计算以及温排水影响预测计算所需的水文条件,都采用现状冬季实测大潮水文条件

和实测小潮水文条件计算。原型观测水文资料中,2010年3月30日-31日为大潮过程,3月23日-24日为小潮过程,即模型验证和预测的计算水文条件。

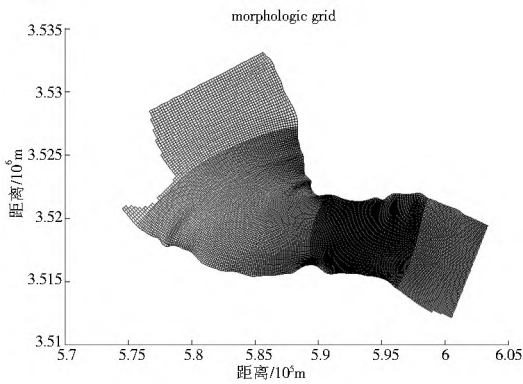


图2 计算区域网格剖分示意图

Fig. 2 Model grid discretization of the study area

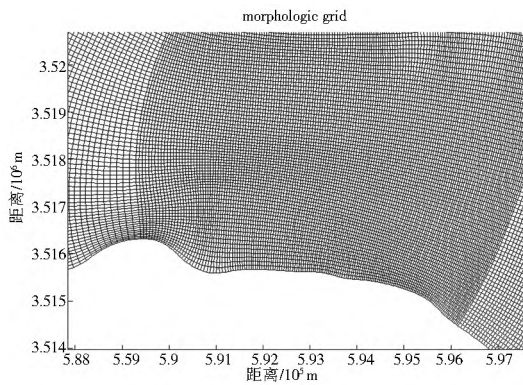


图3 电厂附近加密部分网格图

Fig. 3 Denser model grids near the power plant

4.3 计算参数的选择

床面阻力系数:床面阻力系数由经验值给定。根据该河段的特征,本文主河道粗糙度根据当地河道情况选为0.018~0.035;

涡黏性系数:假定各向同性, $E_x = E_y = E = 30 \text{ m}^2/\text{s}$;

水面综合散热系数:按照工业循环冷却水设计规范(GB/T 50102 2003)规定的经验公式,根据当地的气象条件资料计算出当地的水面综合散热系数 K , 约为 $24.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^4)$;

不考虑风速的影响,扩散系数选用 $D_x = 5.0 \text{ m}^2/\text{s}$, $D_y = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

5 模型计算结果分析

电厂附近江段潮流流场的分布直接影响着温排水的输运扩散,因此对电厂附近江段潮流场的认识有助于更好地分析温升场的分布规律。常熟电厂所在河段潮汐为非正规半日浅海潮,且日潮不等,潮位每日两涨两落,涨潮历时短,落潮历时长,在计算水文条件下的潮流场均为往复流动。

利用所建白茆沙河段潮流和温度场数学模型,对2010年3月30日15:00-31日16:00(大潮)和2010年3月23日12:00-24日13:00(小潮)进行计算。此时电厂一期、二期工程同时运行,电厂冷却水直接取自长江,采用直流供水方式。一期工程直流循环水水量为 $50.0 \text{ m}^3/\text{s}$,二期工程直

流循环水水量为 $63.0 \text{ m}^3/\text{s}$,冷却水经冷凝器后直接排入长江,其设计排水温升约为 9.0 C 。冬季取、排水量约为最大循环水取、排水量的60%,排水温升约为 15.0 C 。

5.1 数学模型验证

比较任意监测点在大潮、小潮下的潮位和流速的计算值与相应实测值(图4至图7),发现计算结果和实测结果吻合良好,结果偏差满足相关规范对潮流模拟精度的要求,说明模型可行及所选参数合理,所建立的水流数学模型较好地模拟了计算江段的水流变化情况,可以用来模拟温度场。

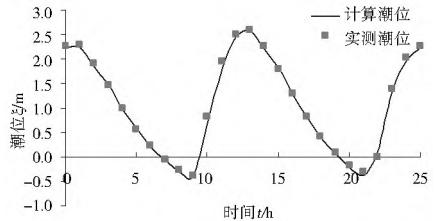


图4 大潮徐六泾站潮位验证

Fig. 4 Verification of tide level at Xuliujing station under spring tide

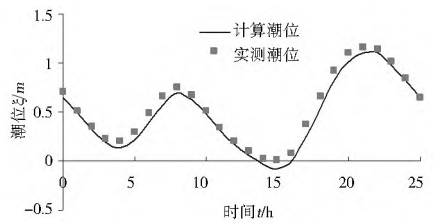


图5 小潮徐六泾站潮位验证

Fig. 5 Verification of tide level at Xuliujing station under neap tide

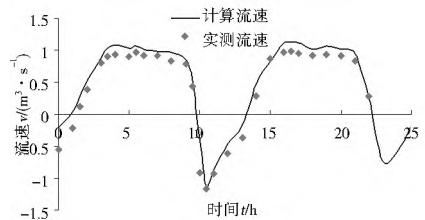


图6 大潮4号测点流速验证

Fig. 6 Verification of flow velocity at 4# point under spring tide

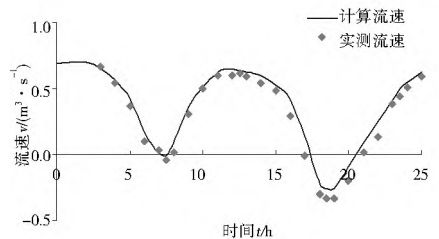


图7 小潮4号测点流速验证

Fig. 7 Verification of flow velocity at 4# point under neap tide

5.2 现状温度场计算结果分析

图8、图9为计算冬季大潮、小潮水文条件下现状机组运行时的温升场包络线分布,其相应的温排水影响范围特征值见表1。对温升总体状况进行分析,电厂热水从排水口排出后与江水掺混,在潮流和径流的双重作用下向周围输移和扩

散,温升范围主要落在电厂附近江面。具体结果分析如下。

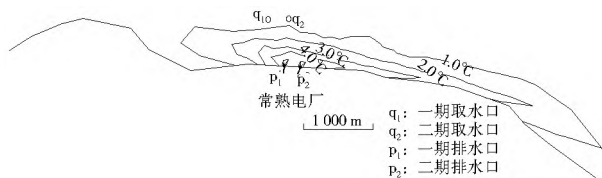


图 8 现状运行下大潮温升包络线

Fig. 8 Envelope lines of temperature rise for spring tide under present operational conditions

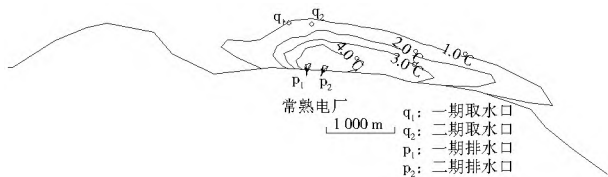


图 9 现状运行下小潮温升包络线

Fig. 9 Envelope lines of temperature rise for neap tide under present operational conditions

(1) 冬季大潮水文条件下, 由于电厂附近江段有一定的负流量, 潮流为往复流动, 因此电厂温排水对排水口上、下游两侧电厂附近江段水域均有影响, 但主要集中在排水口下游侧沿岸水域, 呈扁长状沿岸热污染带。可见, 冬季大潮水文条件下, 潮位较高, 逆向流速较小, 温排水掺混效果较为明显, 电厂温排水影响范围相对最小。

(2) 冬季小潮水文条件下, 电厂附近江段也有一定的负流量, 潮流为往复流动, 电厂温排水对排水口上、下游两侧水域均有一定的影响, 呈扁长状沿岸热污染带。但是, 冬季小潮位水文条件下潮位较低, 水流掺混作用较弱, 电厂温排水影响范围较冬季大潮时大。

表 1 温升分布特征值

Table 1 Characteristic values of the temperature rise distribution

潮型	温升值(°C)	沿岸方向最远扩散距离/km	离岸方向最远扩散距离/km	包络面积/km ²
冬季大潮	1.0	5.433	0.590	2.398
	2.0	4.172	0.409	0.930
	3.0	2.453	0.282	0.334
	4.0	1.078	0.216	0.129
冬季小潮	1.0	4.911	0.750	2.457
	2.0	3.265	0.582	1.291
	3.0	2.202	0.451	0.729
	4.0	0.961	0.384	0.507

(3) 冬季小潮水文条件下的温升包络线面积相对最大, 其中 1.0 °C 等温升值包络线影响面积 2.457 km², 2.0 °C 等温升值包络线影响面积 1.291 km², 3.0 °C 等温升值包络线影响面积 0.729 km², 4.0 °C 等温升值包络线影响

面积 0.507 km²。

(4) 相对而言, 冬季小潮水文条件下 1.0 °C 等温升值包络线离岸方向扩散距离最远, 为 0.750 km, 仅约占排水口处河道宽度(5.66 km)的 13.0%。

6 结语

本文针对常熟电厂一期、二期扩建工程, 采用平面二维水流温度场数学模型进行了模拟计算。模型的计算值和实测值吻合良好, 说明所采用方法和建立的模型合理, 因此可以将其推广应用于类似的工程领域。模拟结果显示: 冬季小潮条件比冬季大潮条件下的温升影响面积大、向下游和离岸方向扩散的距离远; 两种条件下取水口处的温升均较小。研究结果可为电厂及环境保护提供决策依据。

参考文献(References):

[1] 盛连喜, 侯文礼. 电厂冷却系统对梭幼鱼和对虾仔虾卷载效应的初步探讨[J]. 环境科学学报, 1994, 14(1): 47-55. (SHENG Lian xi, HOU Wen li. Entrainment Effect of Power plant Cooling System on Young Fish and Postlarve Shrimp [J]. Journal of Environmental Sciences, 1994, 14(1): 47-55. (in Chinese))

[2] 盛连喜, 刘伟. 热污染对陡河水库鱼类及其水环境的影响[J]. 环境科学学报, 1990, 10(4): 453-463. (SHENG Lian xi, LIU Wei. Effects of Thermal Pollution on Aquatic Environment and Fish in Douhe Reservoir [J]. Journal of Environmental Sciences, 1990, 10(4): 453-463. (in Chinese))

[3] 金岚. 水域热影响概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. (JIN Lan. Introduction to Thermal Effects [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. (in Chinese))

[4] 吴时强, 丁道扬. 剖开算子法解具有自由表面的平面紊流速度场[J]. 水利水运科学研究, 1992, (1): 39-47. (WU Shi qiang, DING Dao yang. Numerical Solution to the Horizontal Turbulent Velocity Field with Free Surface by OSFEM [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1992, (1): 39-47. (in Chinese))

[5] 吴时强, 吴修锋, 周辉. 淮河入海水道淮安地涵枢纽河道水流数值计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(3): 27-32. (WU Shi qiang, WU Xiufeng, ZHOU Hui. Numerical Simulation of Transient Channel Flow for Hua'an Culvert Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(3): 27-32. (in Chinese))

[6] 张细兵, 王东林. 电厂温排水累积影响数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 103-106. (ZHANG Xi bing, WANG Dong lin. Numerical Simulation Research on Accumulated Influence of Warm Water Discharge of Power Plant [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3): 103-106. (in Chinese))