

Research on Thermal Pollution Prediction in Regional Water Based on Fluent

Qiang An*, Xin Shu, Xueqin Li, Yunqiu Jiang

Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing
Email: *anqiang@cqu.edu.cn

Received: Nov. 4th, 2015; accepted: Nov. 22nd, 2015; published: Dec. 4th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper set up a mathematical model by power plant cooling water used for predicting water temperature distribution effect of receiving waters; based on a domestic power plant in the river in summer and winter which are unfavorable hydrological conditions, under the power plant running normal condition and abnormal conditions in both cases, the water movement and diffusion rules of cooling water after entering water temperature were studied. Research found that: overall, the cooling water influence area of the temperature rise is mainly manifested in the downstream port within 250 m, mainly along the river longitudinal dispersion in the river. After 250 m, the temperature rise effect significantly reduces; temperature influence range significantly decreases, and the cooling water temperature is almost consistent with the river environment. Under the hydrological conditions of different seasons, in the obvious temperature rise effect region, the influence of the temperature rise of summer is more obvious than winter, and the transverse distribution range of summer is larger. In terms of different working conditions, the temperature rise effect change is not obvious, but for the influence on the temperature range change, the temperature rise effect of the abnormal condition is bigger. Finally, through the actual simulation of the predicted and the measured results, the verification results are more ideal, demonstrating that this model can be applied to similar engineering and research, and prediction results can provide the scientific basis for power plant design and environment evaluation.

Keywords

Thermal Pollution, Regional Water, Fluent, Simulation

基于Fluent模拟区域水体热污染预测研究

安强*, 舒鑫, 李雪琴, 蒋韵秋

作者简介: 舒鑫(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 水文水资源。

*通讯作者。

重庆大学城市建设与环境学院, 重庆
Email: *anqiang@cqu.edu.cn

收稿日期: 2015年11月4日; 录用日期: 2015年11月22日; 发布日期: 2015年12月4日

摘要

本文建立了一个用于预测评估电厂温排水对受纳水体水温分布影响情况的数学模型,通过对国内某电厂在河流夏季和冬季两种不利的水文条件下,就电厂运行正常工况和非正常工况两种情况下,对温排水进入水体后的水流运动及温度扩散规律进行了研究。研究发现:总体上,温排水的温升影响区域主要体现在排水口下游250 m以内,在河道中主要沿河道纵向扩散,在250 m后温升效应显著下降,温升影响范围明显变小,温度几乎与河流环境一致;而对不同季节的水文条件下,在温升明显区域影响范围内,夏季的温升影响比冬季温升影响要强,且其横向分布范围变大;就不同工况而言,温升范围影响变化不明显,但对温升范围影响变化而言,非正常工况下的温升影响效果相对较大。最后,通过模拟预测的结果与实测的实际结果对比,验证结果比较理想,说明本模型可以应用于相似的工程和研究,预测结果可以为电厂设计和环境评价提供科学依据。

关键词

热污染, 区域水体, Fluent, 模拟

1. 引言

随着国民经济的持续发展,人们对电力能源的需求急剧上升,导致电力能源资源进一步紧张。为了充分满足人们对电力资源的需求,越来越多大型电厂逐渐建成并且投产进行发电,与此同时,对冷却水的需求也大量增加,电厂排放的冷却水进入受纳水体后,经过混合和扩散,使得一定范围内的受纳水体水温高于自然水温,然而电厂冷却水的排放将不可避免的改变原有天然河道的水文情势和水温结构,这些变化会给流域内的水生生物的产卵繁殖带来不利影响。另外,如果温度衰减缓慢,在排水口附近徘徊,就有可能从进水口重新进入火电厂,使冷却水的初始温度较高,从而降低冷却效果。因此,对电厂温排水在受纳水域中的时空分布规律进行深入的研究十分必要,且能有效的为受纳水体热污染与生态环境保护方面提供防治依据。

2. 水体热污染研究进展

2.1. 国内的研究进展

80年代以来,我国就逐步对电厂区域温排水数值模型预测方面的研究取得了很大进展。1987年,吴江航等[1]就利用 L_{∞} 稳定的分步杂交的方法在改变热电厂冷却水系统在潮汐作用下的取水温度和水环境温度条件下,对其水力热力特性和水环境污染进行了预测;其主要采用特征线—有限方法数值模拟福州电厂冷却水水力、热力特性等,数值计算结果与实测资料吻合良好。1997年,王丽霞等[2]就影响海洋温度变化的因素研究,指出引起海洋水温变化的主要因素是海气热交换和人为的温排水,弄清了温排水过程和热在海湾或沿海水域内的扩散规律,建立了热扩散预测模型,并以扩散预测的研究方法为基础对二维和三维预测研究方法做了总结。90年代,随着电子计算机技术和数值计算方法的发展,数值模型计算已成为电厂温排水研究的重要手段。丁德文等[3]通过采用有限元方法对电厂取水口的流场进行了分析求解。故数值模拟方法愈渐成熟化,能客观地评价电厂运行时温排水热影响范围,具有一定的实际价值。

2.2. 国外的研究进展

从 20 世纪 70 年代起, 国外就有关电厂温排水对周边水体环境影响的问题进行研究, McGuirk 和 Rodi [4] 通过采用深度平均形式 k-e 的紊流模型来模拟冷却水排放周边区域的温度分布。1986 年, Yakhot 和 Orszag [5] 在基于湍流重组化群理论研究上, 提出了 NRGk-e 模型。2000 年, Rodrigues 与 Diogo 等[6]通过利用 CE-Qual_W2 模型研究了电厂热排放对附近河流水质的影响。2005 年, CarlosE.Romero [7]基于人工神经网络原理开发了软件, 并在一定环境条件下, 对电厂温排水进行控制。2011 年, Fossati, Monica 等[8]对拉普拉塔河和蒙得维的亚港湾建立二维 RMA-10 数值模型对水温进行了模拟分析。2013 年, Hofmeister 等[9]就格赖夫斯瓦尔德湾电厂的冷却水动态蔓延进行了 Hind-cast 模拟和差异类似模拟并对该区域水域进行了评估。从而可知温排水水源热污染方面的模拟分析方法多样, 形式不一。

3. 基于 Fluent 模拟在热污染方面的应用

Fluent 是国外开发的一种数值模拟核心软件, 是目前 CFD 应用最广的一种方法, 将计算区域划分为网格, 并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积, 将待解决的微分方程对每个控制体积积分, 从而得到一组离散方程。Fluent 适用于各种复杂外形的可压和不可压流动计算, 可用于模拟湍流和噪声模型、动态和移动网格模型以及传热、相变、辐射模型等, 其在国内研究温排水水源热污染方面应用较少。近年来, 我国开始逐步通过数学模型来对热源污染的影响范围进行模拟预测, 黄晓龙、田静等人利用 Fluent 对地表水水源热泵系统温排水进行了分析; 并对重庆嘉陵江化龙桥段瑞安新天地江水水源热泵系统尾水排入受纳水域的过程进行了二维数值模拟; 选取 Fluent 中非耦合、隐式求解器对模型内的定常流动进行求解, 得出受纳水域受水源热泵系统温排水影响后的温升面积和温度梯度。关膺等人运用 Fluent 对电厂冷却水取排水差位式布置方案进行模拟和分析, 通过比较得到了差位式布置特性和一系列取水温升随参数的变化规律, 从而可知将 Fluent 模拟进一步应用在热污染方面的应用是可行且必要的。

4. 应用实例

4.1. 工程概况

某电厂位于中国内陆某河段右岸, 该电厂现运行装机容量为 264 万千瓦, 机组规模均为 2×360 MW; 取水口布置在厂区以北约 1000 m 处的长江右岸岸边, 取水口下游 300 m 处有一长约 4000 m、宽约 1000 m 的中坝洲(江心洲), 将长江分成左右汉道, 位置见图 1。笔者主要研究温排水退水口为一、二期工程尾水电站出水口, 直冷温排水经尾水电站退水口进入柑子溪, 约 150 m 后汇入长江, 柑子溪长江入河口电厂取水口在下游约 100 m 处。

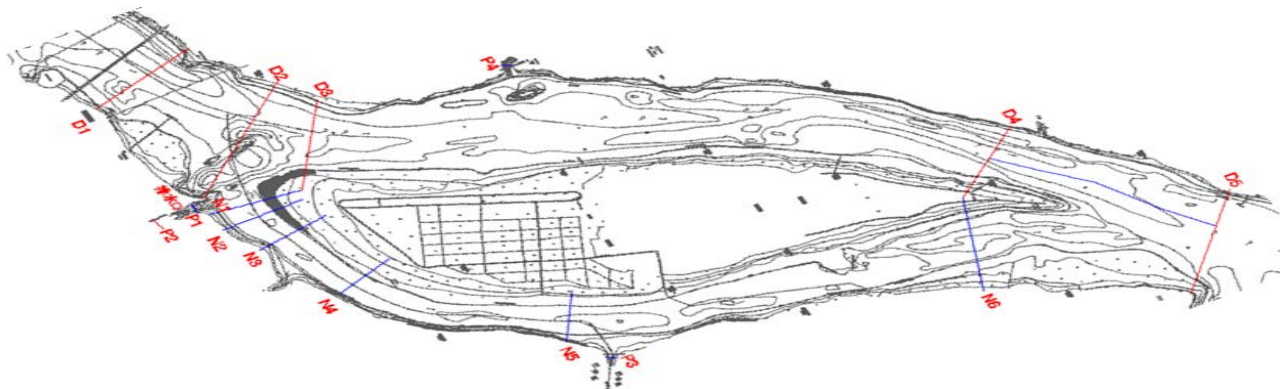


Figure 1. The plan about power plant layout and measurement section of downstream river basin
图 1. 电厂布置及下游流域测量断面布置图

4.1.1. 模拟工况

该电厂修建运行后，电厂排放的冷却水将对原有环境水体产生一定影响。本次研究主要考虑夏季和冬季两个时期的不同工况下电厂温排水对原有水体的研究变化，由于典型水文条件通常为夏季和冬季，则主要选择夏季和冬季的不利水文条件。根据当地流量统计站的统计资料，夏季该流域流量为 $3.42 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，冬季水文条件下该流域流量为 $2.18 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.2. 模型的建立及网格划分

计算模型如图 1 所示，模型区域在地图呈现范围：底宽 3982.3 m，高为 4716.8 m，以水位线为基准，以此对河流进行数值模拟。计算模型采用非结构网格进行划分，并对局部复杂区域，进行网格加密处理。

4.3. 控制方程

假设整个流场的水体密度为常数；同时假定垂直方向的压强为静水压强分布，则水流运动的控制方程为：

① 连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0$$

式中： u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 X、Y、Z 三个方向的速度分量，m/s； t 为时间，s； ρ 为密度， kg/m^3 。

② 动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

式中： p 为静压强； $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 为应力张量； $\rho \mathbf{g}$ 和 \mathbf{F} 分别代表重力和外力；

$$\text{其中：} \quad \bar{\boldsymbol{\tau}} = \mu \left[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{v} I \right]$$

式中： μ 为分子粘度； I 为张量单位，右边第二项为体积膨胀的影响。

③ 能量方程：

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\boldsymbol{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{u}) \right] + S_h$$

式中： E 为流体微团的总能， J/kg ，包含内能、动能和势能之和， $E = h - p/\rho + u^2/2$ ； h 为焓， J/kg ； h_j 为组分 j 的焓， J/kg ； k_{eff} 为有效热传导系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， $k_{eff} = k + k_t$ ， k_t 为湍流热传导系数，根据所用的湍流模型来确定； J_j 为组分 j 的扩散通量； S_h 为包括了化学反应热以及其他用户定义的体积热源项。

④ k 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

⑤ ε 方程：

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - Y_M + S_\varepsilon$$

$$\text{其中：} \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中： G_k 是由于平均速度引起的湍动能产生， G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生； Y_M 为可压缩湍流脉动

膨胀对总的耗散率的影响； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 C_{μ} 为经验常数，其中 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $C_{\mu} = 0.09$ 。 k 为紊流脉动动能， ε 是紊流脉动动能的耗散率， σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 紊流普朗特数，其中取值为 $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ； ρ 是水体密度。

4.4. 边界定义

模型采用 $k-\varepsilon$ 模型，对河流进行稳态模拟。D1 面为进口面，采用恒定流为边界条件，河流流速和流量由当地水文水资源勘测局提供；D5 断面为出口边界，采用以自然出流边界条件；冷却水主要以 P1、P2 排水口排出，对于 P1、P2 断面采用恒定流为边界条件。对于温度边界条件，在河流边壁采用绝热边界，即 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ，其中 n 为外边界的法向向量。

4.5. 模型结果及分析

图 2 和图 3 分别为电厂 1 期夏季和冬季正常工况下的温度云图。电厂排放的冷却水进入河流后，在排放口不远处排放的高温冷却水与温度较低的河流混合，在河流的掺混作用下形成温度不同的两条温度相差带，由于河流流场效果较强，温水沿岸并逐步沿着河流下游扩散。从温度云图可以看出温度带主要集中在排水口下游稍大于 250 m 处，初始排水口处温度带分界线在 120 m 左右。在温排水下游 250 m 处以后，高温带已很大程度减弱，而后的温度场显示削弱高温温度带随河流迁移，即逐渐减弱；分界线主要分布在离岸边 50 m 以内，温度逐渐降至河流温度，减弱的温度带下游区域等温线与河道趋于平行，由此可见温排水在河道中以沿河道纵向扩散为主。在 P1 排放口高温带温度影响范围比较集中，主要是由于 P1 分叉口的河道变窄，河流速度本身比较大，而 P1 排放口的流速与河流流速相比较小，导致开始的温水带范围狭窄。

从夏季和冬季正常工况的温度分布云图即图 4 和图 5 可以看出：温排水在夏季对下游流域的影响范围比较大，在出水口处横向分布也相对较大；温排水在冬季对下游流域的影响范围比较大，在出水口处横向分布也相对较大。然而两季相比，冬季的温度影响在横向分布比夏季的稍大，其温升范围也比夏季的温升范围大。通过对比夏季和冬季的正常工况和非正常工况的温度云图，可以看出：温排水出口下游高温，在非正常工况下的横向温升影响范围要比正常工况下的横向温升影响范围稍大。

4.6. 模型验证

本次模拟采用 2015 年 8 月和 9 月该流域观测所得到的实测水文资料分别以流速和温度作为数学模型验证的水文条件。图 6~图 9 为 8 月河流在 D5 界面和 N6 断面对流速和温度的实测值与模拟值的对比，通过对比 D5 界

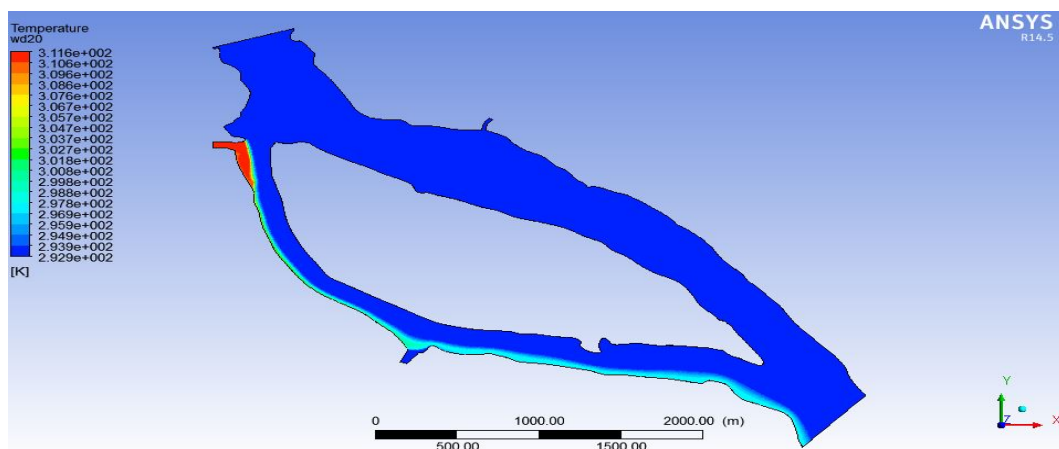


Figure 2. The figure about the first phase of the normal working temperature in summer

图 2. 夏季一期工程正常工况温度云图

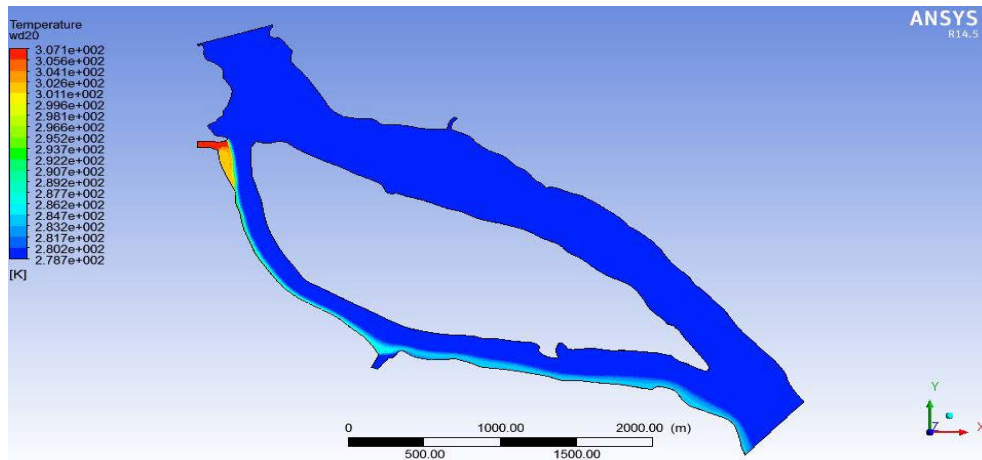


Figure 3. The figure about the first phase of the normal working temperature in winter
图 3. 冬季一期工程正常工况温度云图

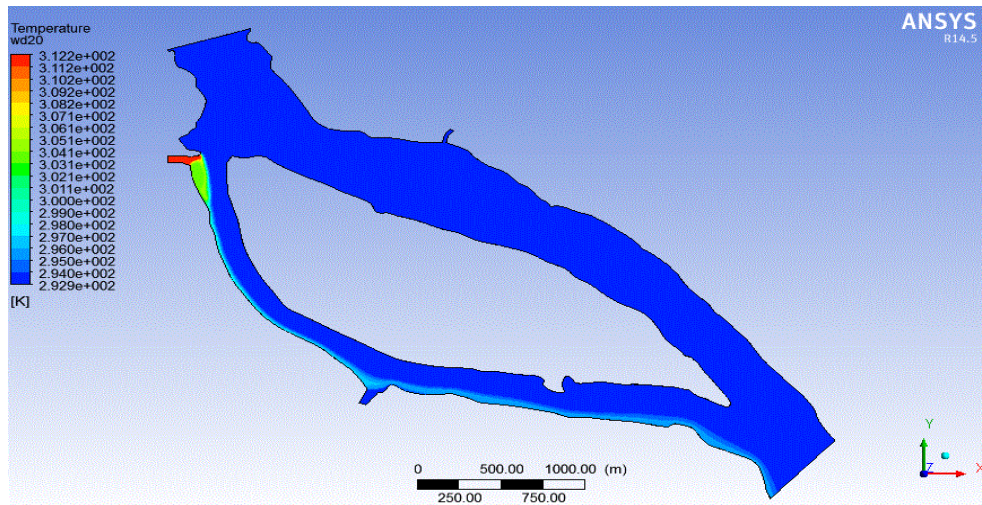


Figure 4. The figure about the first phase of the abnormal working temperature in summer
图 4. 夏季一期非正常工况温度云图

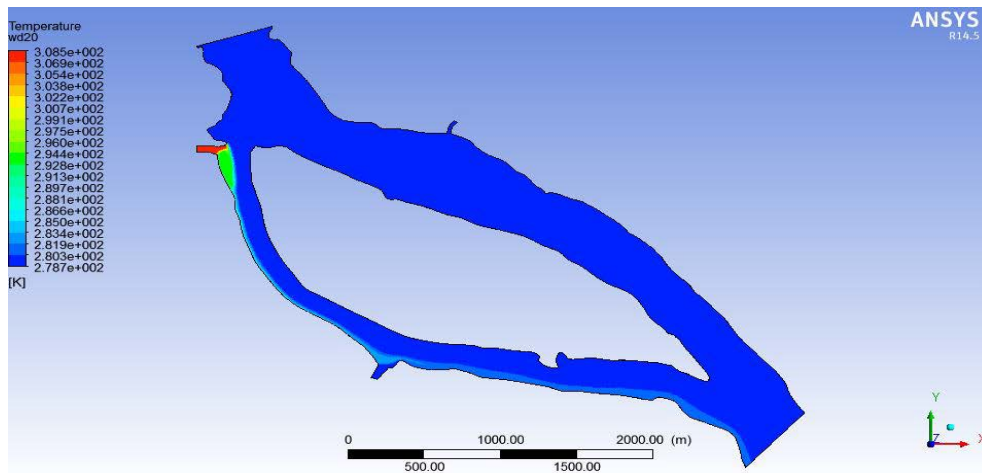


Figure 5. The figure about the first phase of the abnormal working temperature in winter
图 5. 冬季一期非正常工况温度

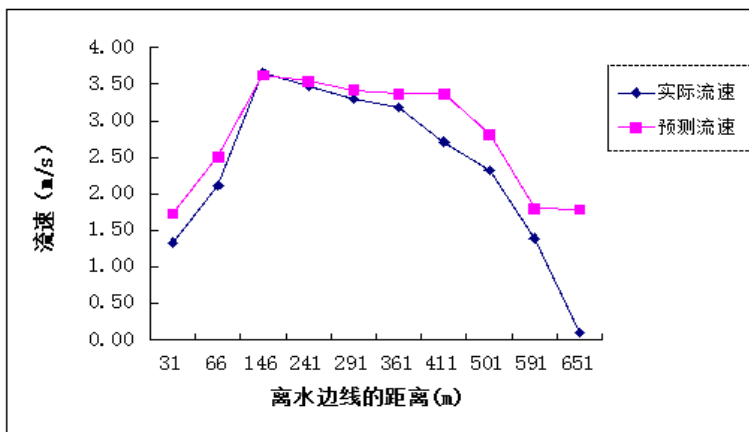


Figure 6. The figure about the measurements and the simulations of section D5 velocity in August

图 6. 8 月份 D5 断面流速观测值与模拟值对比图

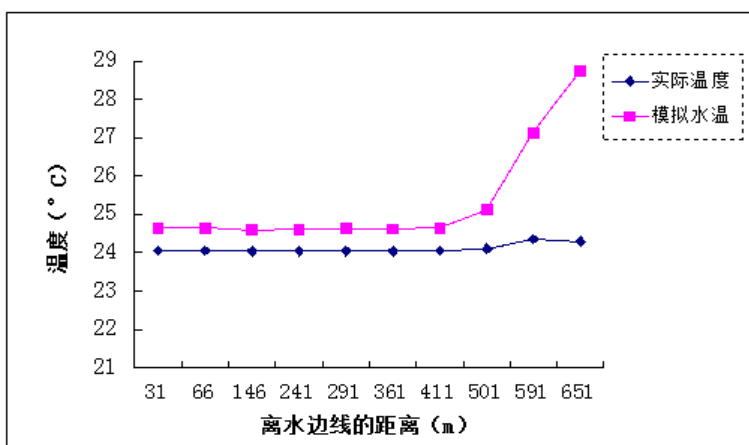


Figure 7. The figure about the measurements and the simulations of section D5 temperature in August

图 7. 8 月份 D5 断面温度观测值与模拟值对比图

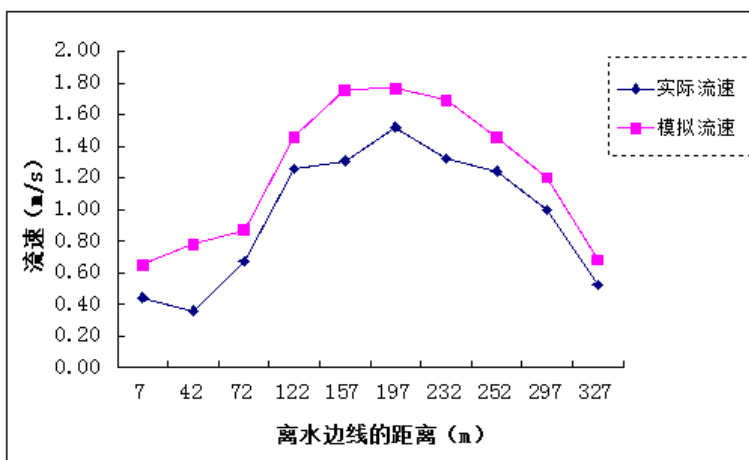


Figure 8. The figure about the measurements and the simulations of section N6 velocity in August

图 8. 8 月份 N6 断面流速观测值与模拟值对比图

面和 N6 界面上的各垂线的数据可知计算值和模拟值大部分吻合, 说明该水动力模型有较高的精度, 能够一定程度上反应出河流的客观规律。图 10~图 13 为 9 月份河流状态在 D5 界面和 N6 断面对流速和温度场的实测值

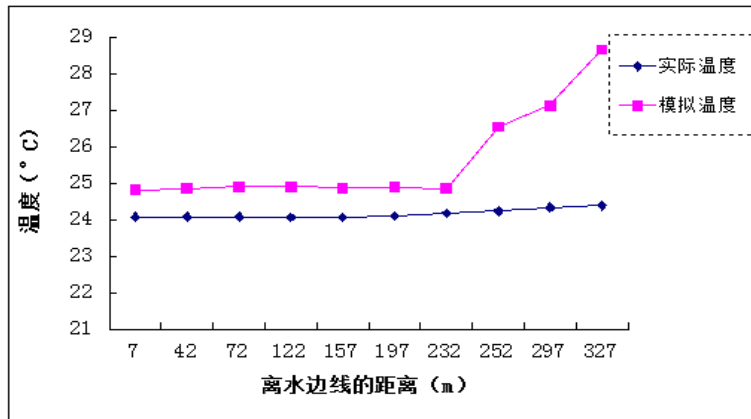


Figure 9. The figure about the measurements and the simulations of section N6 temperature in August

图 9. 8 月份 N6 断面温度观测值与模拟值对比图

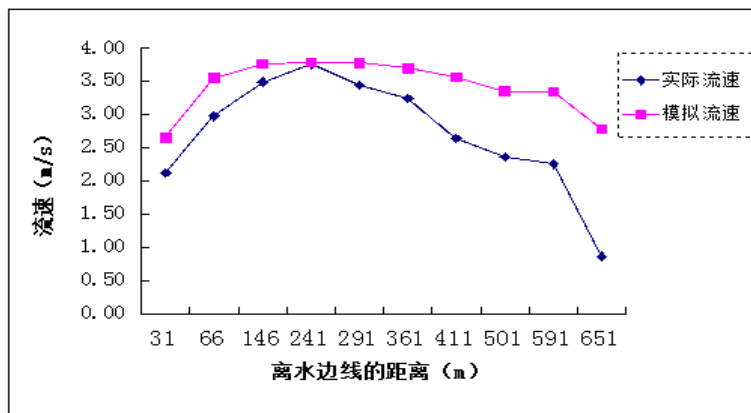


Figure 10. The figure about the measurements and the simulations of section D5 velocity in September

图 10. 9 月份 D5 断面流速观测值与模拟值对比图

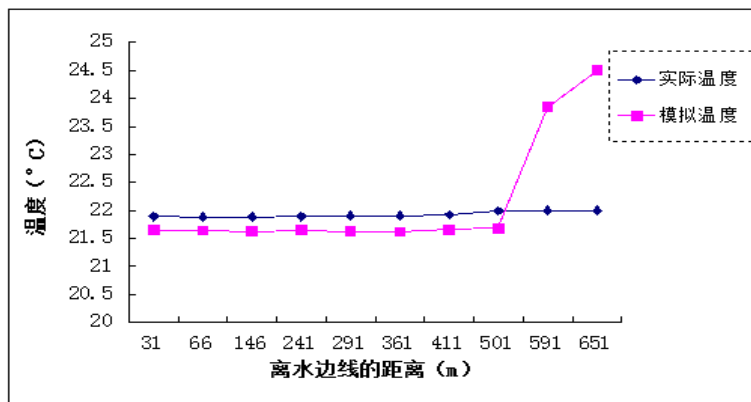


Figure 11. The figure about the measurements and the simulations of section D5 temperature in September

图 11. 9 月份 D5 断面温度观测值与模拟值对比

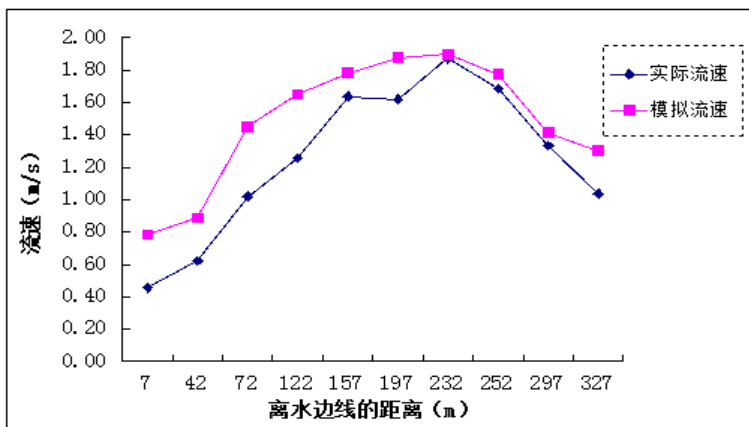


Figure 12. The figure about the measurements and the simulations of section N6 velocity in September

图 12. 9 月份 N6 断面流速观测值与模拟值对比

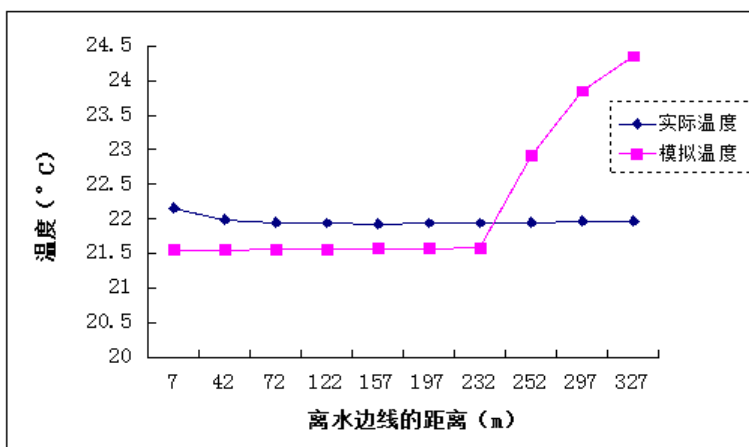


Figure 13. The figure about the measurements and the simulations of section N6 temperature in September

图 13. 9 月份 N6 断面温度观测值与模拟值对比

与模拟值的对比，通过对于 D5 界面和 N6 界面上的各垂线的数据可以看出，计算值和模拟值大部分吻合，说明该水力模型有较高的精度，能够一定程度上反映出河流的客观规律。模型实测值与模拟值存在偏差，这主要是因为准确判定温升范围的边界有一定难度，以及受试验条件限制，所以试验结果与实际存在一定偏差。

5. 结论

本文对国内内陆某电厂温排水的水体热污染影响情况进行了分析，针对电厂下游河段采用数学模型对电厂排放的温排水的影响范围进行了计算分析，数值模拟的预测结果与实际情况测量值有较好的吻合度，说明研究采用 Fluent 软件建立的数学模型合理，并具有一定的精确度，能够一定程度上反应出河流温度变化的客观规律。模拟结果显示：温度带主要集中在排水口下游 250 m 以内，温排水在河道中主要沿河道纵向扩散，减弱的温度带下游区域等温线与河道趋于平行。温排水在对下游流域的影响范围比较大，冬季的温度影响在横向分布较夏季的温度影响在横向分布稍大，而且每一度温升范围也比夏季的温升范围稍大。对比于正常工况，非正常工况的温升影响相对较大，主要集中于出口下游高温 250 m 以内区域，在非正常工况下的横向温升影响范围要比正常工况下的横向温升范围稍大。

基金项目

国家自然科学基金(项目号: 51209240/51208534), 中央高校基金(项目号: CDJZR14215501)。

参考文献 (References)

- [1] 吴江航, 韩庆书, 张继春, 李平衡. 潮汐河道中热电厂冷却水系统水力热力数值模拟[J]. 计算物理, 1987(1): 35-45.
WU Jianghang, HAN Qingshu, ZHANG Jichun and LI Pingheng. Hydraulic thermal numerical simulation of cooling water system for thermal power plant in tidal river. Computational Physics, 1987(1): 35-45. (in Chinese)
- [2] 王丽霞, 孙英兰, 田晖. 热扩散预测方法研究概况 I. 影响海洋水温的因素[J]. 海洋科学, 1997(5): 24-25.
WANG Lixia, SUN Yinglan and TIAN Hui. Thermal diffusion forecast method research I. The influence factors of the ocean temperature. Journal of Marine science, 1997(5): 24-25. (in Chinese)
- [3] 蒋春风. 感潮河段电厂温排水热影响范围的特征分析[J]. 河海大学学报, 1990(6): 114-121.
JIANG Chunfeng. The characteristics analysis of tidal power plant cooling water heat affected scope. Journal of Hohai University, 1990(6): 114-121. (in Chinese)
- [4] MCGUIRK, J. J., RODI, W. A depth averaged mathematical model for near field of side discharges into open channel flow. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 86(4): 761-781. <http://dx.doi.org/10.1017/S002211207800138X>
- [5] YAKHOT, V., ORSZAG, S. A. Renormalization group analysis of turbulence. Basic theory. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-51. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01061452>
- [6] RODRIGUES, A. C., DIOGO, P. A. and COELHO, P. S. Mathematical simulation on thermal discharges in an estuary. 8th International Conference on Hydraulic Engineering Software, Lisbon, Portugal, 2000.
- [7] ROMERO, C. E., et al. Development of an artificial neural network-based software for prediction of power plant canal water discharge temperature. Expert Systems with Applications, 29(4): 831-838. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2005.06.009>
- [8] FOSSATI, M., SANTORO, P., URRESTARAZU, S. and PIEDRA-CUEVA, I. Numerical study of the effect of a power plant cooling water discharge in the Montevideo bay. Journal of Applied Mathematics, 2011, Article ID: 970467.
- [9] HOFMEISTERA, R., BOLDINGC, K., HETLANDD, R. D., SCHERNEWSKIB, G., SIEGELB, H. and BURCHARDB, H. The dynamics of cooling water discharge in a shallow, non-tidal embayment. Continental Shelf Research, 2013, 71: 68-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.10.006>