

温排水数学模型温度场影响因子的探讨

郑国栋¹ 顾立忠² 黄东¹ 徐林春¹

(1. 广东省水利水电科学研究院 广州 510610; 2. 华北水利水电学院 郑州 450011)

摘要: 本文根据 MIKE21 在温排水数值模拟领域的应用, 分析了 MIKE21 平面二维热对流扩散模型, 提出在受潮汐影响的感潮河道中扩散系数, 散热系数和新增流量是影响温度场的三个重要影响因子。比较模型中热扩散系数和散热系数选取和计算方法可以得出: 扩散系数的大小取决于模型计算的网格尺度、时间步长和流速, 而影响散热系数的主要是水温和风速。对于枯水期的固定潮型 (径流量比例很小), 散热系数一定时, 温度场在水体中以热源 (排水口) 为中心向四周扩散, 且扩散系数越大, 温水扩散速度越快, 同时, 在纵向上, 受水流挟带的作用, 热水带随潮涨落在排水口上下游来回摆动; 当扩散系数一定时, 散热系数越大, 温度耗散的速度越快, 温升范围也越大, 水流间能量交换的能力也越强, 同一点的温升值就越小。当扩散系数和散热系数一定, 对于丰水期的固定潮型 (径流量比例较大), 温度场的范围有明显的缩小, 这说明温度场的范围也受上游来流流量的影响。最后, 应用模型在实际工程中的进行了验证计算。

关键词: 温排水模型, 对流扩散模型, 扩散系数, 散热系数, 新增流量

Discussion On The Factors of Temperature Field Influences In Thermal Discharge Model

Guodong Zheng¹ Lizhong Gu² Dong Huang¹ Linchun Xu¹

1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou, 510610

2. North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou, 450011

Abstract: According application of MIKE21 on thermal discharge numerical simulation of power plant, the MIKE21 2-d advection-dispersion flow model is analyzed in this paper. The idea that dispersion coefficients, heat dissipation coefficient and additional discharge are three important factors of temperature field influences in tide reach is advanced. Comparing with the computation methods of the dispersion coefficients and heat dissipation coefficient, it is found that the dispersion coefficients depend on the dimension of the grids, time step and velocity, while the heat dissipation coefficient mainly depends on water temperature and velocity of wind. For fixed tide type in dry season, when the heat dissipation coefficient is constant, the temperature field is dissipated around the heat source. The greater the dispersion coefficients are, the faster the dissipated velocity is. Simultaneously, on ordinate direction, because of the water flow, warm water is swung around the heat source as the tide rising and falling; when the dispersion coefficients are constant, the greater the dissipation coefficient is, the fast the dissipated velocity of temperature will be stronger. Therefore, the temperature rising scope will get bigger, the energy exchanging between cool and warm water will be stronger, and also the value of temperature rising in the same spot is getting smaller. When dispersion coefficients and heat dissipation coefficient are both constant, compared with the dry season, the discharge proportion of fixed tide type in wet season is greater. In this case, the scope of the temperature rising is apparently shrunk. That is to say the scope of the temperature is also impacted by the additional discharge. In the end of the paper, a actual project is simulated to verify the viewpoints.

Keywords: thermal discharge model, advection-dispersion 2-d flow model, dispersion coefficients, heat dissipation coefficient, additional discharge

1. 引言

水动力学数值模拟技术是人类研究水流运动的一个重要手段。由丹麦的 DHI 公司研制的 MIKE 软件可以应用于湖泊、河口、海湾、海岸及近海地区的一维、二维及三维水动力学模拟、水质模拟和泥沙输移等复杂问题,极大的方便了研究人员的工作。本文应用 MIKE21 的 HD 模块和 AD 模块进行热对流扩散的数值模拟,并对影响温度场模拟结果的因素进行了分析和探讨,结合工程实例的模拟结果发现,温度场扩散范围的大小及形状主要与扩散系数、散热系数、新增流量等三个因素有关。

2. MIKE21 温排水模型

2.1 HD 模块

MIKE21 软件的水动力学模块 (HD 模块) 是 MIKE21 软件的最核心的基础模块,其水流运动控制方程如下:

$$\begin{aligned} \text{连续方程} \quad & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \\ \text{动量方程} \quad & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \\ & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} \\ & - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned}$$

其中, d 为时变水深, ζ 为水面高程, h ($h = \zeta - d$) 为水深, p , q 分别为 x , y 方向的单宽流量, C 为谢才系数, f 为风阻力系数, V 为风速, V_x , V_y 分别为风速和风速在 x , y 方向的分量, Ω 为科氏力参数, p_a 为大气压强, τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 为各方向的有效切应力。

2.2 AD 模块

AD (advection-dispersion) 模块,即对流扩散模型。本文用该模型作为二维热对流扩散模型,其控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (hc) + \frac{\partial}{\partial x} (uhc) + \frac{\partial}{\partial y} (vhc) = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \cdot D_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \cdot D_y \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) - F \cdot h \cdot c + s$$

其中, D_x , D_y 分别为 x , y 方向的扩散系数, c 是物质浓度 (本文指温度, 相当与 T), F 为衰减系数。

式中 s 可表示为 $s = Q_s (c_s - c)$, 其中 Q_s 为排水口的流量, $(c_s - c)$ 为相对浓度 (本文指温升或超温)。

温排水数值模拟的准确性一方面取决于水流模拟的准确性,另一方面主要取决于 AD 模

块中各项参数值选取的合理性。因此，MIKE21 中模型参数的选取尤为重要。通过对扩散方程的分析可以得出，对温排水计算结果影响较大的参数有两个：扩散系数 D 和水面综合散热系数 K 。

3. 扩散系数的选取

3.1 定义

物质在流体中的扩散过程主要在两方面：一是由于水流流速梯度所引起的剪切流动；二是由于流体分子的运动和流体的紊动引起的物质扩散。早期的 Fick 和 Taylor 在假定质量的通量与物质浓度成比例的基础上，提出了分子紊动扩散系数。后来 Taylor 又把这种理论扩展到剪切流动当中，提出了扩散系数。

热扩散系数是指热能在水体中传递的速度，又称导热系数。其值是由单位质量的水体温度升高 1 度时所需的热量(比热容)和水体吸收热量的速度(导热系数)来决定。

3.2 扩散系数的影响因素

通过对扩散过程和定义的分析可以得出：压力对扩散系数影响较小，在许多情况下可忽略不计。分子的热运动是能量传递的主要途径，因此扩散系数受温度的影响较大，在温排水数值模拟中应根据自然水温的不同（如冬季和夏季）来选取相应的扩散系数。另外，由于扩散过程与剪切流动有关，所以扩散系数也受流速大小的影响。

3.3 MIKE21 模型扩散系数的选取

在 MIKE21 二维热对流扩散模型中，对扩散系数选取是比较困难的。通常是从一些模拟和测量的对比中，得到的率定结果。而在这个过程中几乎没有一个标准的尺度。另外，这个过程耗时较长，有时需要几个月或几年。因此，很少有准确的方法来测量这个传播过程，经常是利用一些经验公式来计算。

MIKE21 中对扩散系数 D 的计算所采用的经验公式有三个：

$$D = K_1 \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \quad \text{或} \quad D = K_2 \Delta x \cdot u \quad \text{或} \quad D = K_3 \Delta t \cdot u^2$$

其中， Δx 是网格的空间步长， Δt 是时间步长， u 是水流流速， K_1 、 K_2 、 K_3 是系数。

在 AD 模块中扩散系数的选定形式有两种，一是依据水流的流速，二是依据水流成比例的流量。前者比较常用，需要指定 x 、 y 两个方向的扩散系数，这两个系数一般情况下是相同的。后者则需要指定两个方向的流量比例因子，这里不加赘述。

无论那种形式，扩散系数总是取决于网格的空间步长、时间步长和水流速度。

4. 散热系数的选取及影响参数

4.1 定义

散热系数是另一个对数学模型影响较大的系数。它是蒸发、对流和水面辐射三种水面散热系数的综合。具体定义为，单位时间内，水面温度变化 10K 时，水体通过单位表面散失热量的变化量，单位为 $w/(m^2 \cdot K)$ ，通常用 $w/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

按照热扩散的方式水面综合散热系数可表达为：

$$K = \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad \varphi = \varphi_{br} + \varphi_e + \varphi_c$$

其中 φ_{br} 为水面逆辐射热通量； φ_e 为水面与大气之间的紊动热交换； φ_c 为水面蒸发热通量； t 为水面温度。

4.2 Gunneberg 公式

和扩散系数一样，散热系数在电厂温排水数值模拟也是非常重要的。由于长波的辐射、

水面蒸发和对流交换的影响，热量的损失会有所增减。因此，对散热系数的测定比较困难，在工程中常采用一些经验公式，这里只介绍 Gunneberg 公式，其具体形式如下：

$$K = 2.2 * 10^{-7} (T_s + 273.15)^3 + (1.5 + 1.12U) * 10^{-3} * \left[(2501.7 - 2.366T_s) \frac{25509}{(T_s + 239.7)^2} * 10^{\frac{7.56T_s}{(T_s + 239.7)}} + 1621 \right]$$

式中：U—风速，m/s；Ts—水面温度。从公式中可以看出，对散热系数影响较大是风速和水温。

4.3 MIKE21 模型散热系数的选取

MIKE21 中散热系数是用 F 来表示的，在 AD 模块中又叫做衰减系数，它的大小可以用以下公式计算得到：

$$F = \frac{0.2388}{\rho C_p H} (4.6 - 0.09(T_{ref} + T) + 4.06W) \exp(0.033(T_{ref} + T))$$

其中，w为风速，T_{ref}参照温度，ρ为水的密度，C_p为比热容，H为水深。

模型中温度的选取形式有两种，一是绝对温度。采用这种温度时，参考温度应设为零，源像（排水口）的温度也应采取相应的绝对温度。另一种形式是温度差。它是指工程后水温与自然水温的差。这种形式的温度运用比较多，模型中初始温度应设为零，源项的温度应是排水口绝对温度与自然水温的差，参考温度为自然水温。

5. 应用实例

本文以某电厂的温排水为例，运用 MIKE21 平面二维水流对流扩散模型进行数值模拟，比较分析扩散系数和水面综合散热系数对温度场的影响。

5.1 工程概况

电厂所在地区多年平均风速 1.9m/s，河道径流在年内分配不均，汛期（4月~9月）占全年径流量的 80%~85%，多年平均最大流量为 3240m³/s；多年平均流量为 1670m³/s。电厂所在水道，正向测点最大流速 0.86m/s，反向测点最大流速-1.01m/s，历年实测最高潮位 2.38m，历年实测最低潮位-1.93m，多年平均潮位-0.02m。冬季（2月）平均水温 17.9℃，夏季（7月）平均水温 30.9℃。电厂设计排水量均为 58.14m³/s。

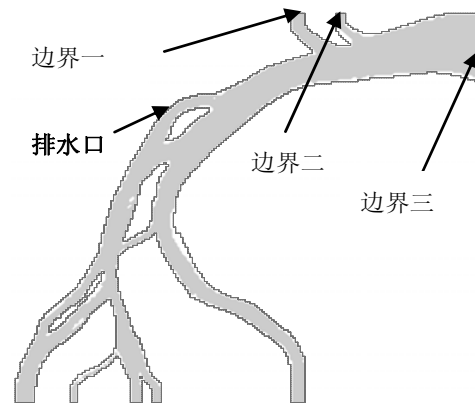


图 1 为河道在 MIKE21 中的平面图

5.2 模型计算工况

为了分析扩散系数、散热系数和新增流量对计算结果的影响，本文拟定的计算组次见表 5-1。其中采用了 1999 年 7 月的某潮型（丰水期）和 2001 年 2 月某潮型（枯水期）作为水文计算条件，下边界潮型过程见图 2、3。由表 5-2 可知，1999 年 7 月的潮型（丰水期）显然以径流动力为主，2001 年 2 月潮型（枯水期）则以潮流动力为主。

根据地形资料和河道概况，模型采取 392×386 的矩形网格布置，距离步长 40m，时间

表 5-1 计算工况

计算组次	热扩散系数 (x, y 方向同) m ² /s	散热系数 w/(m ² ·℃)	潮型
1	5	38	2001.2
2	10	38	2001.2
3	8	28	2001.2
4	8	48	2001.2
5	10	38	1999.7

步长 30s，计算时长是 31080s。

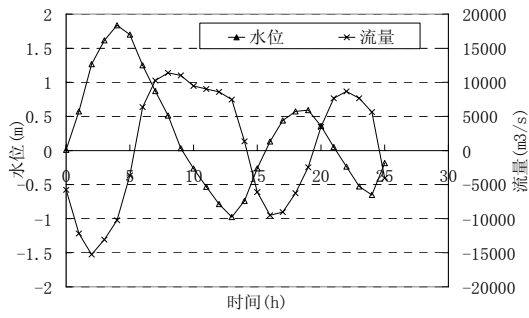


图2 2001年2月潮

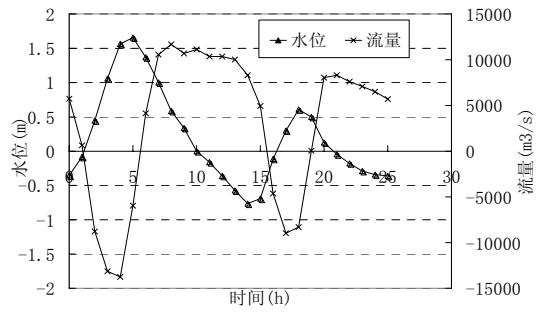


图2 1999年7月潮

表 5-2 两组典型潮过程的特征统计 (一个完整潮周期)

	1999年7月	2001年2月
涨潮量 (m ³)	63511	97699
落潮量 (m ³)	141729	108003
径流量/落潮量 (%)	55.19	9.54
山潮比	1.23	0.11

5.3 成果分析

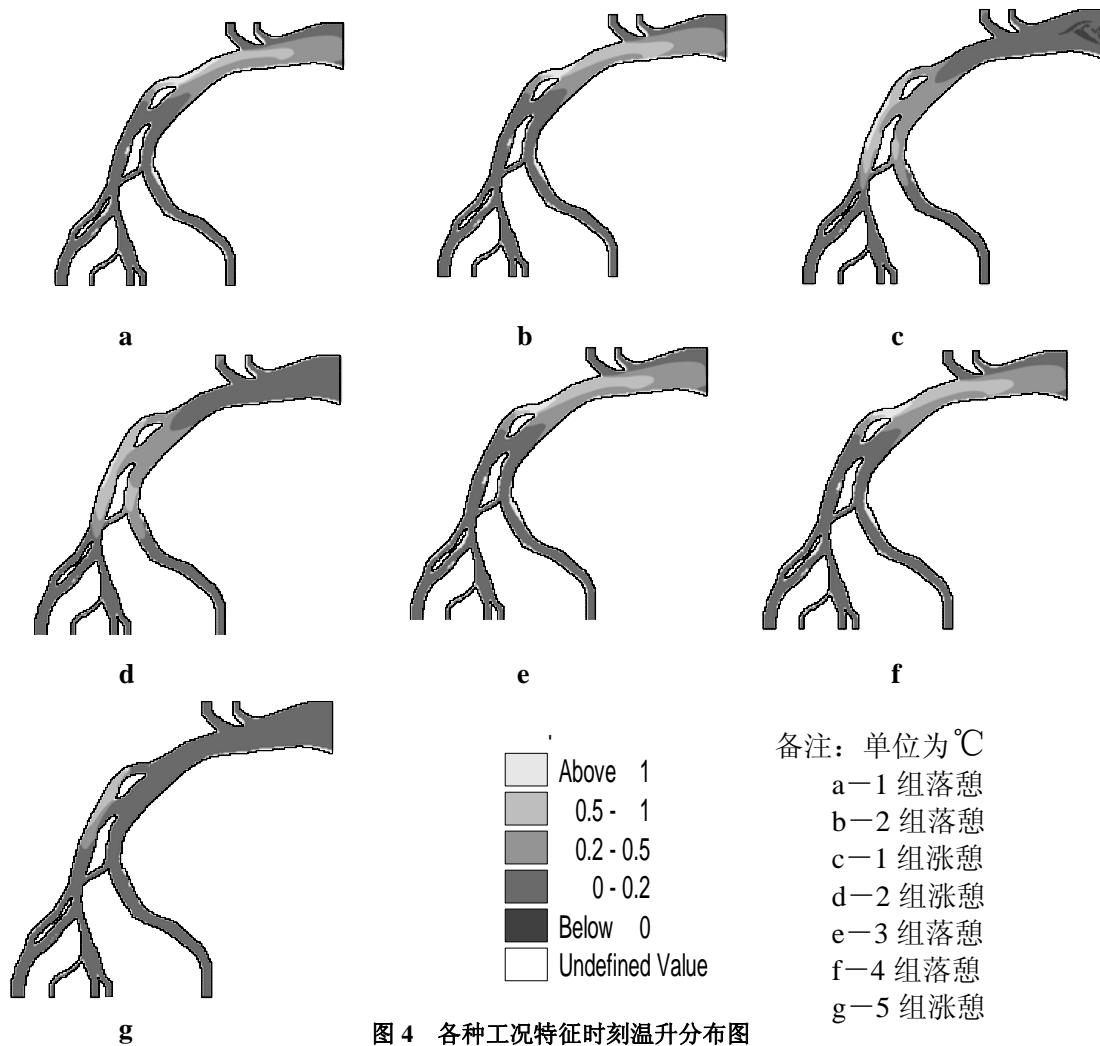


图 4 各种工况特征时刻温升分布图

图 4 分别为各种组次下涨落憩时刻的温升分布图。比较a图和b图可以看出，由于 1、2

两组的扩散系数不同（水面综合散热系数相同），落憩时刻温升范围和包络线的形状有明显的不同。以 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 包络线为例，第 1 组和第 2 组的包络面积分别为 3.3088km^2 和 4.4992km^2 ，面积相差 1.1904km^2 （约相差 36.0%）。这说明，当扩散系数较大时，水体的热量向周围扩散相对来说比较快，横向扩散力相对较大，靠近排水口温升较高的包络范围相对较小；反之，当扩散系数较小时，水体的热量向周围扩散的较慢，横向扩散力相对较小，靠近排水口温升较高的包络范围相对较大。涨憩时刻也是如此，见 c 图和 d 图。

第 3、第 4 计算组次扩散系数相同而水面综合散热系数不同，比较落憩时刻温升分布图（e 图、f 图）可以得出，总体上，两组的温度场扩散趋势和温升分布图形状大致相同，但水面综合散热系数的差异对模型的影响比扩散系数差异的影响要小得多。据统计，第 3、4 组次温升在 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 的面积分别为 4.0512km^2 和 4.3264km^2 ，面积相差 0.2752km^2 （约合 6.8%）。这说明，散热系数越大温度场的分布范围越大，温度扩散的速度越快，水流间能量交换的能力也就越强。

为了比较新增流量对温升分布的影响，本文模拟了电厂温排水在 1999 年 7 月某潮型下的温升分布（第 5 组），g 图为该潮型涨憩时刻的温升分布图，与 d 图相比，由于夏季水量充沛，水中的热量会随着潮流的涨落迅速扩散，温升范围要比枯水期时小得多。以 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$ 包络线为例，一个完整潮周期该范围枯水期时（第 2 组）的温升包络面积为 4.6464km^2 ，而丰水期（第 5 组）的温升包络面积仅为 1.0560km^2 ，为枯水期时的 22.7%。由此可以得出，在扩散系数和水面综合散热系数相同的情况下，不同的来流流量或者不同的代表潮型会给温升分布带来明显的差异。

6. 结语

（1）本文介绍了 MIKE21 软件的温排水数学模型，并提出影响温度场分布的三个因素：热扩散系数、水面综合散热系数和新增流量。

（2）通过对 MIKE21 模型中热扩散系数和散热系数选取和计算方法的分析，可以得出：热扩散系数总是取决于网格的空间长和时间步长的，另外还与流速有关。而影响水面综合散热系数的主要是温度和风速。

（3）通过比较工程实例的模拟结果发现，在枯水期（潮流动力为主），当水面综合散热系数一定时，温度场以排水口为中心向四周扩散，同时随潮流在排水口上下游摆动，且扩散系数越大，温度场的范围就越大；而当扩散系数一定时，水面综合散热系数越大，温度耗散的速度越快，温升范围也越大，水流间能量交换的能力也越强。但相比之下，扩散系数差异的影响要大于水面综合散热系数差异的影响。

（4）通过比较丰水期潮型和枯水期潮型下的温度场分布，可知当扩散系数和散热系数一定，有新增流量时水体中的热量掺混较快，热能耗散也较快，温升范围明显较小。

参考文献：

[1] Tallot, J.W. and Tallbot, G.A (1974): *Diffusion in shallow seas in English coastal and estuarine waters*. In *Physical Processes Responsible for Dispersal of Pollutants in the Sea*. Ed.G.kullenberg and Tallbot, J.W. International Council for Sea Exploration,pp.93-110

[2] Talor,G.I(1954):*The dispersion of matter in turbulent flow througe a pipe*. Proc.Royal Soc.London,Serv.223-A,.446-468

[3]Vieira,J.R(1992):*On the general dispersibe coefficients used in mathematical models of flow circulation and transport*. Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book. In press.

[4]黄埔电厂“上大压小”环保示范燃煤工程（ $2\times 600\text{MW}$ ）投标阶段冷却水工程数字模拟计算报告，广东省水利水电科学研究院，2006.9