



苏南电厂热污染预测研究

施 诊 张永春

(华东水利学院) (南京环境科学研究所)

比较宽阔的天然河流,工业废水和电厂冷却水常采用岸边排放形式,形成污染带。它对于环境的影响往往要求在建厂之前进行预测评价,为选址和技术设计提供必要的依据。

根据不同的运动机理,污染带分为近区和远区。本文主要介绍近区简化处理的一种方法,同时建立远区浓度分布规律的二维水质模型。

一、近区处理方法

从热电厂排出的冷却水由于其密度与河水不同,受到密度差产生的浮力作用,称为浮射流。紊动浮射流的控制方程以雷诺方程为主体,加上连续方程、扩散方程和状态方程等。为使方程封闭,还必须增加紊动能方程,其中含有许多脉动量的二阶相关。严格的计算要求采用一定的紊流模式,相当复杂。

根据 Naudascher 的思想,设想在排水口上游有一个垂直的线源(潮水河涨潮时在排水口下游),假定此线源以扩散方式产生的远区起始断面的横向浓度分布和实际上掺混作用的结果相当,则可以从假想源开始,应用对流-扩散方程进行远区的计算。

对上海黄浦江闵行电厂冷却水排放的原型资料分析计算,获得 $x_v/y_0 \sim Q_{ER}^*/Q_E/v_0 y_0^2$ 相关图(图1)。其参变量为排水口水平倾角 θ 。其中 x_v 为假想源到排水口的距离称为位移长度,它是近区混合和稀释程度的判据。 y_0 为断面平均水深; v_0 为河水流速; Q_E 为排水口的流量。

$Q_{ER}^* = f(B_E/y_0, v_E/v_0, F_0, E_z/y_0 u_*^*, B_E, y_E/y_0)$ 式中 B_E 为排水口宽度; v_E 为排水水流的速度; F_0 为河水佛汝德数; E_z 为横向扩散系数; u_* 为摩阻流速; y_E 为排水口断面的平均水深。由水力要素和排水口几何特征参数可查得该河段的 x_v 值。

通常情况下,对于密度分层流应该增加关于浮力的参变量 S ,它称为稳定分层指数,用一个分式表示。其分母反映了水流的紊动作用,分子则反映了由于密度差产生的浮力作用。由于黄浦江的流速较大,特别在密度

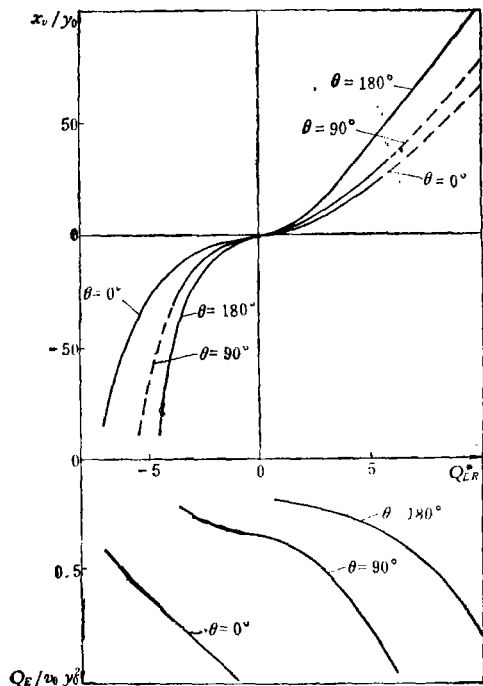


图1 黄浦江 $x_v/y_0 \sim Q_{ER}^*/Q_E/v_0 y_0^2$ 相关图

差较小时, S 值甚小. 浮力作用可忽略不计, 故在图 1 中不加考虑.

二、远区二维污染带计算

在天然河流中, 描述水温变化的对流扩散方程

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial \Delta T}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \right) \\ & - K \Delta T \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ν 为断面平均流速; ΔT 为热水排放而使水体增加的温度即温升; T 为当时水温; T_∞ 为河水自然水温或平衡水温; K 为综合散热系数.

$$\Delta T = T - T_\infty$$

赛尔 (Sayre) 研究认为水面垂向扩散系数为零, 故水面温升可用二维对流扩散方程计算. 在宽浅河流中, 垂向很快趋于均匀混和, 也可作二维处理.

式 (1) 中纵向扩散项与对流项相比可略而不计, 又考虑天然河流横向水深变化较大, 式 (1) 简化为

$$h u \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(h E_z \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \right) - K \Delta T \quad (2)$$

式中 h 是水深. 设累积单宽流量为

$$q_c = \int_0^z h u dz = \int_0^z q dz$$

q 为单宽流量. 以 $T(x, q_c)$ 代替 $T(x, z)$ 并令无因次累积流量

$$P = q_c / Q_0 = \frac{1}{Q_0} \int_0^z q dz$$

整理得

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial P} \left[\frac{h^2 u E_z}{Q_0^2} \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial P} \right] - K \Delta T$$

取断面平均

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial P^2} - K \Delta T$$

$D = E_z h v / Q_0^2$ 称扩散因子

式中 h 为断面平均水深; v 为断面平均流速; Q_0 为断面平均河水流量; E_z 为横向扩散系数.

对于连续线源, 上式的解为

$$\begin{aligned} \Delta T(x, P) = & \frac{\Delta T_0}{2} \left\{ \left[\operatorname{erf} \frac{P + L_2}{\sqrt{2} \sigma_P} \right. \right. \\ & \left. \left. - \operatorname{erf} \frac{P - L_2}{\sqrt{2} \sigma_P} \right] \right. \\ & \left. - \left[\operatorname{erf} \frac{P + L_1}{\sqrt{2} \sigma_P} \right. \right. \\ & \left. \left. - \operatorname{erf} \frac{P - L_1}{\sqrt{2} \sigma_P} \right] \right\} \\ & \cdot \exp(-Kx/u) \end{aligned}$$

式中 ΔT_0 为起始温升; L_1, L_2 为起始断面线源的边界坐标, 以相对流量计; σ_P 为以 P 为横坐标的浓度横向分布均方差.

对流扩散方程是一个线性齐次偏微分方程, 可应用简单的叠加原理. 在具体计算中, 将上游的线源分成若干段, 各段取平均温升, 它们在下游断面扩散结果的叠加即为下断面相应点的温升, 避免了用断面平均温升代替横向的高斯正态分布所产生的误差. 根据河道断面形态的变化, 将河流分段计算, 每个河段的上断面温升分布作为下断面线源的分布.

$$\begin{aligned} \Delta T(x, P) = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \Delta T_{0i} \\ & \times \left\{ \left[\operatorname{erf} \frac{P + L_i}{\sqrt{2} \sigma_P} - \operatorname{erf} \frac{P - L_i}{\sqrt{2} \sigma_P} \right] \right. \\ & \left. - \left[\operatorname{erf} \frac{P + L_{i-1}}{\sqrt{2} \sigma_P} - \operatorname{erf} \frac{P - L_{i-1}}{\sqrt{2} \sigma_P} \right] \right\} \\ & \cdot \exp(-Kx/u) \end{aligned} \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, m.$

m 是线源分段数.

三、横向扩散系数的估值

1. 有实测资料的情况

将式 (3) 中的误差函数进行泰勒展开

$$\operatorname{erf}\left(\frac{P \pm L_i}{\sqrt{2} \sigma_P}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{P \pm L_i}{\sqrt{2} \sigma_P} - \frac{1}{3 \cdot 1!} \times \left(\frac{P \pm L_i}{\sqrt{2} \sigma_P}\right)^3 + \frac{1}{5 \cdot 2!} \left(\frac{P \pm L_i}{\sqrt{2} \sigma_P}\right)^5 - \frac{1}{7 \cdot 3!} \left(\frac{P \pm L_i}{\sqrt{2} \sigma_P}\right)^7 + \dots \right] \quad (4)$$

K 值作为已知量输入, 采用最小二乘方法和逐步逼近法相结合的算法, 从式(3)中推求 σ_P , 亦即使残差平方和

$$ER_1 = \sum_{i=1}^n R_i^2 \Rightarrow \min \quad i = 1, 2, \dots, n$$

R_i 是实测资料系列中第 i 个样本与计算值的离差。

若资料含有较大的偏离点, 则使残差绝对值之和

$$ER_2 = \sum_{i=1}^n |R_i| \Rightarrow \min$$

以免误差放大。也可以采用其它优选法估算。

一般认为远区的温升横向分布属高斯正态分布:

$$\sigma_P = \sqrt{2 D x}$$

由此可得横向扩散系数 E_x 和相对横向扩散系数 α_x 。

2. 无实测资料的情况

拟建厂附近河段的远区计算可移用相似河流(或河段)的 α_x 值, 作为横向扩散的特征参数。

建立扩散因子 D 与断面特征参数(水深、河宽等)以及 α_x 间的关系:

横向扩散系数

$$E_x = \alpha_x H u_* = \alpha_x v n H^{5/6} \sqrt{g}$$

横向扩散因子

$$D = \frac{E_x}{Q_0^2} \int_0^1 h^2 u dP$$

n 为河道糙率系数。

为反映横断面上的水深变化, 引入断面

形态系数 φ ,

$$\varphi = \overline{h^2 u} / (\overline{h^2} \overline{u})$$

可得 $D = \varphi \alpha_x n H^{5/6} \sqrt{g} / B_0^2$

综上所述, 采用无因次累积流量 P 作横向坐标以及提出断面形态系数 φ , 能够更确切地模拟天然河流断面的不规则性对于水流结构, 最终对于温升分布的影响。

以上介绍的二维污染计算方法同样可用于生化污染。若污水的排放量(点源)与河水流量相比较小, 使近区掺混不明显时, 通过分析对近区的计算还可进一步简化。

四、实 例

长江下游的苏南热电厂于 1981 年进行工程选厂阶段的可行性研究, 这是潮汐河流有密度分层情况的二维问题。

由于缺乏实测资料, 工程时间又十分紧迫, 借用其支流黄浦江的 $x_v/y_0 \sim Q_{EK}^* \sim Q_E/v_0 y_0^2$ 相关图, 求得不同水力条件的假想源位移长度。

排水口设计温升 $\Delta T_E = 8^\circ\text{C}$, 设计排水口倾角为向下游 $60^\circ-70^\circ$ 。计算表明, 在排水口上、下游一公里处(横向离岸距离为 50 米)水面的最大温升已减至 $2.0^\circ-2.4^\circ\text{C}$ (退潮时, 在下游)和 $1.2^\circ-1.98^\circ\text{C}$ (涨潮时, 在上游)。

在电厂排水口上、下游各四公里范围内每半公里取一断面, 按设计潮位过程线每半小时进行一次计算。

在密度分层流的情况下, α_x 随里察生数 R_i 变化, 因而在潮汐河流中 α_x 是时间的函数。

此处 $R_i = g^* H / v^2$ $g^* = (\Delta\rho/\rho)g$

ρ 为河水密度; $\Delta\rho$ 为河水和冷却水的密度差。

考虑长江的涡旋尺度较大, 借用黄浦江的 α_x 值并加以适当的放大。

电厂附近河宽约 5200—9400 米, 且为复式断面。根据紊流特性及其涡旋体系, 电厂

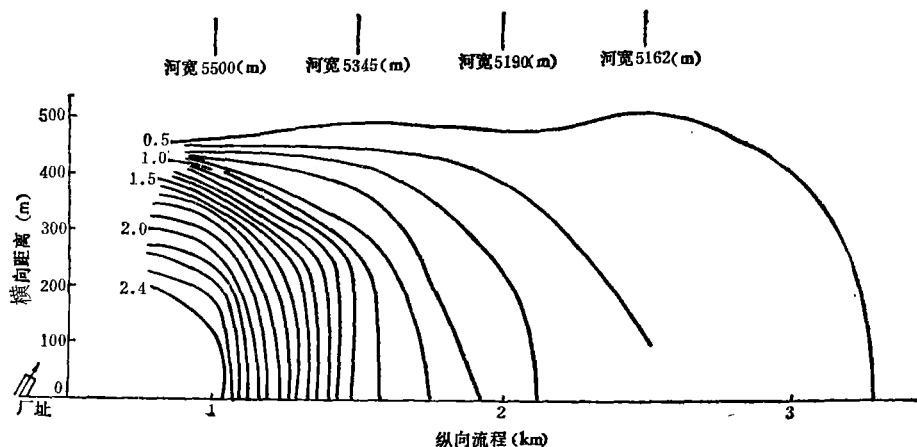


图2 最高水温时水面等温升线(°C)

冷却水只受岸边邻近的大涡旋控制, 因此按断面形状和上、下游连贯性分割断面, 用局部断面进行计算。实际热水带的宽度远小于局部断面。

在憩流前后流速最小, 里察生数 R_i 很大, 热水上浮并在横向漫溢开来, 形成稳定分层。此时浮力起主要作用, 即使在远区也不能用扩散方程计算。针对憩流期间以横向扩展为主, 可用相应的算法。

分析了上海黄浦江闵行电厂冷却水排放的实测资料, 对取水口的水温变化进行了研究。结论是最高温升出现在涨潮流量最大之时, 憩流附近不可能出现最高值。华东电力设计院在闵行电厂的模型试验也证实了这一结论。为此, 在本次可行性研究中, 憩流期间

不参与计算。

计算结果, 电厂在所选两处厂址冷却水的排放对附近水温的影响均符合国家排放标准。

本计算在华东水利学院的 DJS-170 机上实现, 程序编制采用 ALGOL-60 算法语言。

苏南电厂的热污染预测工作得到张书农教授的指导。华东电力设计院、上海航道局和长办南京河床试验站提供了有关资料, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Schatzmann, M., Naudascher, E., *Journal of The Hydraulics Division, A. S. C. E.*, 106 (HY3), 397(1980).
- [2] Sayre, W. W., *Modelling of Rivers*, H. W. Shen, Ed., p. 15, John Wiley, New York, 1979.
- [3] 张书农, 水利学报, (12), 8(1983).
- [4] Webel, G., Schatzmann, M., *Wasserwirtschaft*, (5), 37(1983).
- [5] Schiller, E. J., Sayre, W. W., *Journal of The Hydraulics Division, A. S. C. E.*, 101(HY6), 749(1975).

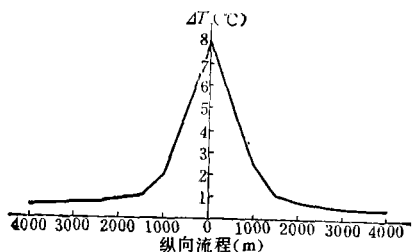


图3 水面温升沿岸分布图(离岸50米处)