

海南东方电厂温排水平面二维数值模拟研究

胡晓张¹, 庄佳², 杜万保¹

(1. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

摘要: 建立平面二维水流、温度扩散数学模型, 研究了海南东方电厂的温度扩散规律、影响范围和取水升温变化, 为电厂的取排水工程布置方案和电厂项目环境影响评价等提供依据和参考。

关键词: 东方电厂; 温排水; 平面二维数学模型

中图分类号: TV137

文献标识码: B

文章编号: 1008-0112(2008)04-0011-05

随着经济的快速发展, 大量的火电厂和核电厂在我国滨海地区建设, 这类电厂冷却水工程多数采用表面冷却方式。电厂循环冷却水升温后排入海域, 会引起受纳水体水温的升高, 一方面, 在局部范围内影响水生生物的生长发育, 破坏生态平衡; 另一方面, 热量在水域的分布情况也直接影响取排水工程布置方案的确定。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。目前国内关于电厂温排水影响的研究多限于河道或者河口地区, 外海区的温排水数值模拟由于计算边界难以控制, 研究略为复杂, 本文采用整体数学模型和局部嵌套数学模型的方法对电厂温排水影响进行模拟研究, 为工程应用服务。

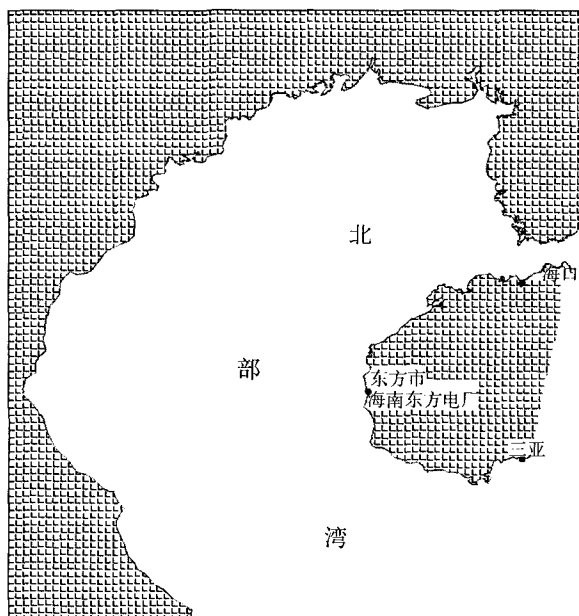


图1 海南东方电厂地理位置示意

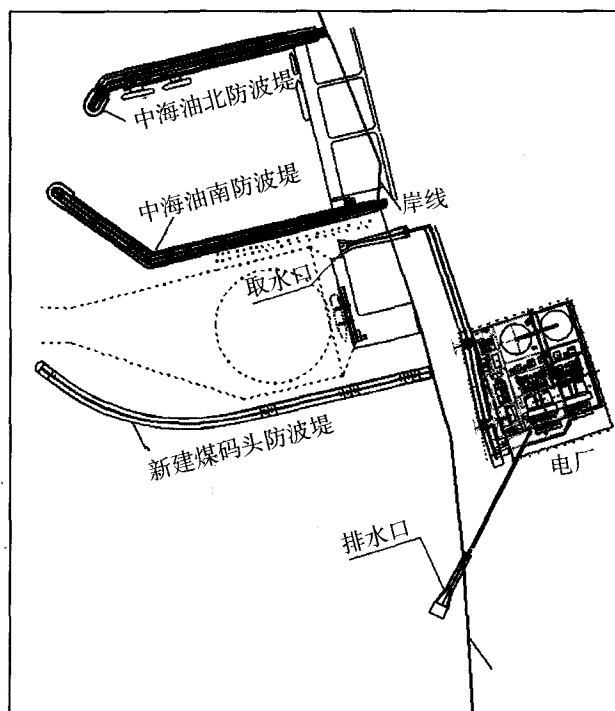


图2 海南东方电厂取排水方案示意

1 工程概况

海南东方电厂厂址位于海南省东方市南约6km处的小洲塘附近, 西临北部湾, 地理位置见图1所示。电厂一期工程建设2台350MW级燃煤机组, 循环冷却水水源为海水, 采用直流循环扩大单元制供水系统, 循环水泵房布置在靠近主厂房的厂区固定端, 取水明渠引水至循环水泵房前池, 经循环水泵升压通过循环水进水管进入凝汽器, 凝汽器出水通过循环水排水管排至虹吸井, 经排水明渠排至海域。取水明渠海域引水段毗邻煤

收稿日期: 2007-07-25; 修回日期: 2008-05-06

作者简介: 胡晓张, 男, 硕士, 主要从事河流及海岸的数值模拟研究工作。

码头南端并垂直海岸线布置,排水口位于港池南防波堤南侧约0.8km近岸处。电厂取排水平面示意图见图2所示。

2 平面二维数学模型

为了研究海南东方电厂温排水扩散规律和温升影响范围,采用贴体正交曲线坐标系^[1]下的平面二维潮流数学模型^[2]和温度扩散数学模型进行研究。

2.1 基本方程

水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (Hu C_\eta) \frac{\partial}{\partial \eta} (H\nu C_\xi) \right] = \frac{q}{C_\xi C_\eta}$$

水流运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\nu}{C_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{u\nu}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \frac{\nu^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} = f\nu - \\ \frac{g}{C_\xi} \frac{\partial h}{\partial \xi} + E_\xi \left\{ \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial B}{\partial \eta} \right\} - \frac{gu}{C^2 H} \sqrt{u^2 + \nu^2} + \frac{q}{C_\xi C_\eta} \frac{u_1}{h} \\ \frac{\partial \nu}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial \nu}{\partial \xi} + \frac{\nu}{C_\eta} \frac{\partial \nu}{\partial \eta} + \frac{u\nu}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} = -fu - \frac{g}{C_\eta} \\ \frac{\partial h}{\partial \eta} + E_\eta \left\{ \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial B}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right\} - \frac{g\nu}{C^2 H} \sqrt{u^2 + \nu^2} + \frac{q}{C_\xi C_\eta} \frac{\nu_1}{h} \end{aligned}$$

$$A = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u) \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \nu) \right];$$

$$B = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \nu) \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi u) \right];$$

式中 u, ν 为 ξ, η 方向流速分量; h 为水位; q 为单元汇入汇出流量; u_1, ν_1 分别为沿水深平均的源汇流速在 ξ, η 方向上的分量; H 为水深; g 为重力加速度; f 为柯氏力系数; E_ξ, E_η 为紊动粘性系数; 拉梅系数 C_ξ, C_η 如下:

$$C_\xi = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2} \quad C_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$$

温度对流扩散方程^[3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (HT)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta H u T) \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi H \nu T) \right] = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \\ \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ H D_\xi \frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right\} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ H D_\eta \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right\} \right] - \frac{K_s T}{\rho C_p} + q T_0 \end{aligned}$$

式中 T 为垂线平均温升值 ($^{\circ}\text{C}$); H 为水深 (m); u, ν 为 ξ, η 方向垂线平均流速 (m/s); D_ξ, D_η 为 ξ, η 方向的热扩散系数 (m^2/s); K_s 为水面综合散热系数 ($\text{Cal}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$); C_p 为水的比热 ($\text{Cal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$); ρ 为水的密度 (kg/m^3); q 为热源的单位面积流量 ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$); T_0 为热源的温升 ($^{\circ}\text{C}$)。

$$D_\xi = D_L \frac{|u|}{\sqrt{u^2 + \nu^2}} + D_N \frac{|\nu|}{\sqrt{u^2 + \nu^2}}$$

$$D_\eta = D_L \frac{|\nu|}{\sqrt{u^2 + \nu^2}} + D_N \frac{|u|}{\sqrt{u^2 + \nu^2}}$$

D_L : 纵向(沿水流方向)扩散系数;

D_N : 横向(垂直水流方向)扩散系数。

2.2 定解条件

1) 初始条件

$$u(t, x, y) \Big|_{t=t_0} = u_0(x, y)$$

$$\nu(t, x, y) \Big|_{t=t_0} = \nu_0(x, y)$$

$$\zeta(t, x, y) \Big|_{t=t_0} = \zeta_0(x, y)$$

$$\Delta T \Big|_{t=t_0} = 0$$

其中: $u_0, \nu_0, \zeta_0, \Delta T$ 分别为初始流速潮位和温升值, 通常取 u_0, ν_0, ζ_0 为常数, t 表示某一时刻。

2) 边界条件

水流边界条件:

$$\text{开边界 } \Gamma_o \text{ 内: } u \Big|_{\Gamma_o} = u(t, x, y) \quad \nu \Big|_{\Gamma_o} = \nu(t, x, y)$$

$$\text{或者潮位边界条件: } \zeta \Big|_{\Gamma_o} = \zeta(t, x, y)$$

u, ν, ζ 均为根据现场观测确定的已知量, 分别可用流速过程线或潮位过程线确定。

在闭边界 Γ_c 上: $V_n = 0$, 即法向流速为 0, n 为边界的外法向。

为了正确模拟河道浅滩在涨、落潮期间淹没及出露的不同状况, 模型还采用动边界技术^[4]对计算水域进行模拟, 将落潮期间出露的区域转化为滩地, 同时形成新边界; 反之将涨潮期间淹没的滩地转化成计算水域。

温度边界条件:

$$\text{在开边界流出区域, } \frac{\partial \Delta T H}{\partial T} + \frac{\partial u H \Delta T}{\partial x} + \frac{\partial \nu H \Delta T}{\partial y} = 0;$$

在闭边界, 通常假定服从绝热条件, $\frac{\partial \Delta T}{\partial n} = 0, n$ 为边界的外法向。

2.3 计算参数

在冷却水数值计算中, 影响温度扩散的因素主要是涡动扩散系数 D_L, D_N 以及水面综合散热系数 K_s 。

1) 涡动扩散系数

涡动扩散系数是由于水流涡动造成的扩散, 电厂冷却水是一种热流, 虽然热本身没有方向性, 但它的扩散与水流的运动形式密切相关。按方向可分为沿水流方向和垂直水流方向的扩散系数 D_L, D_N , 根据相关研究成果^[5], 取 $D_L = 5 \text{ m}^2/\text{s}, D_N = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2) 水面综合散热系数

水面散热是热扩散的重要途径之一。按照热扩散的方式水面综合散热系数可表达为:

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

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。

对于 K_s 的选取尚没有完整的资料来确定, 常用的办法是利用经验公式。目前比较常用的有 Gunneberg 公式, 其考虑了风和海水的温度对热扩散的影响。

$$K_s = 2.27 \times 10^{-7} (T_s + 273.15)^3 + (1.5 + 1.12U) \times 10^{-3} \times \left[(2501.7 - 2.366T_s) \frac{25509}{(T_s + 239.7)^2} \times 10^{\frac{7.56T_s}{(T_s + 239.7)}} + 1621 \right]$$

式中 T_s 为水面温度, 根据工程海区东方海洋站资料, 冬季取 20°C , 夏季取 30°C ; U 为风速, 根据厂址北部洋浦港的气象资料, 取 3.6m/s 。

2.4 计算区域及网格划分

海南东方电厂西临北部湾海域, 近岸水流受地形影响显著, 模型需要选择合适的控制边界, 才能正确地模拟关心区域的水沙运动。为反映研究区域大范围内的潮流运动情况, 建立了东北从海口, 西南至三亚, 包括整个北部湾海域的大范围潮流数学整体模型。该整体模型共有网格 401×501 个, 为了更好地弥合岸边界和外海岛屿采用了正交曲线网格, 网格尺寸为 $100 \sim 5\,000\text{m}$ 不等, 其中工程区近岸网格较密, 离岸逐渐稀疏, 研究区域范围及网格布置见图 3。

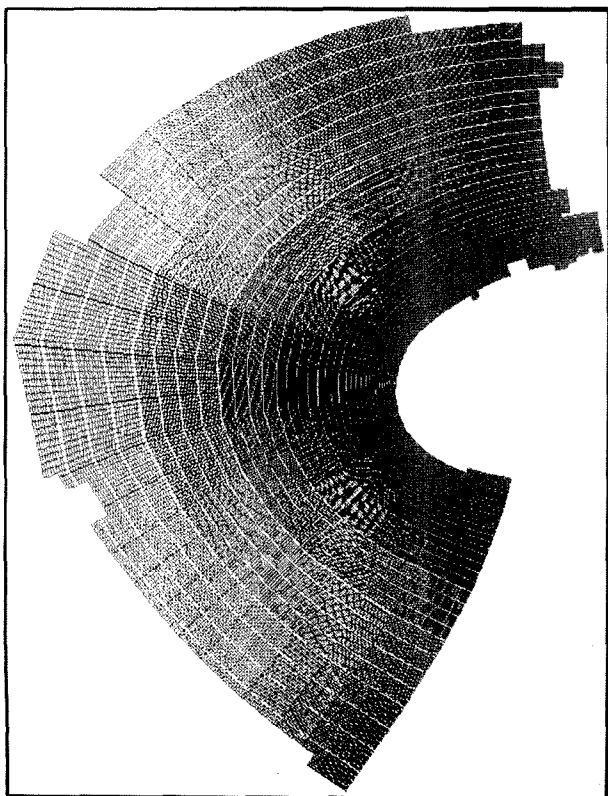


图3 整体模型网格示意

为更好地反映工程局部温排水扩散规律, 建立了东方电厂局部模型。模型网格呈南北方向布置, 北边界距电站取水口 21km , 南方向边界距排水口 25km , 向西至水深 20m 的深海区。计算水域采用贴体正交曲线网格剖分, 其平面网格划分粗细相间, 根据研究需要在拟建工程附近水域的网格较密, 而在其它水域则较粗。共布网格 281×361 个, 网格尺寸为 $10 \sim 500\text{m}$ 不等, 研究区域的网格布置见图 4。

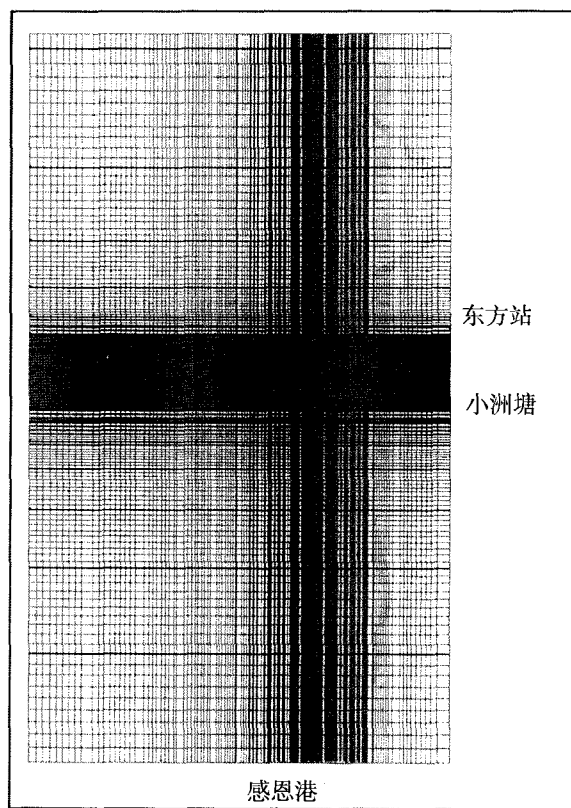


图4 局部模型网格示意

模型计算的地形资料主要有工程局部实测水下地形及外海大范围海图, 主要有: 北部湾海图(1:700 000, 理论最低潮面, 2004 年版)、珠江口至琼州海峡海图(1:500 000, 理论最低潮面, 2004 年版)、感恩角至龙门港海图(1:150 000, 理论最低潮面, 2000 年版)、三亚港至感恩角海图(1:150 000, 理论最低潮面, 2000 年版)、厂址附近 2006 年最新实测地形。

2.5 模型验证

为了使模型能够适用于夏季和冬季等不同的水文条件, 研究选择 2006 年 1 月 29 日 0:00 ~ 30 日 0:00 (冬季大潮)、2006 年 1 月 22 日 0:00 ~ 23 日 0:00 (冬季小潮) 及 2006 年 7 月 4 日 0:00 ~ 5 日 0:00 (夏季小潮)、2006 年 7 月 11 日 0:00 ~ 12 日 0:00 (夏季大潮) 等 4 组

水文条件作为验证的潮位资料,这4组潮型有东方潮位站的同步潮位资料可供模型验证,同时选取八所港海区2004年9月23日11:00~24日12:00(夏季小潮)的水文条件作为验证的潮流资料,该组潮型具有6条垂线的同步流速资料可供模型验证,模型验证点的位置及编号见图5。

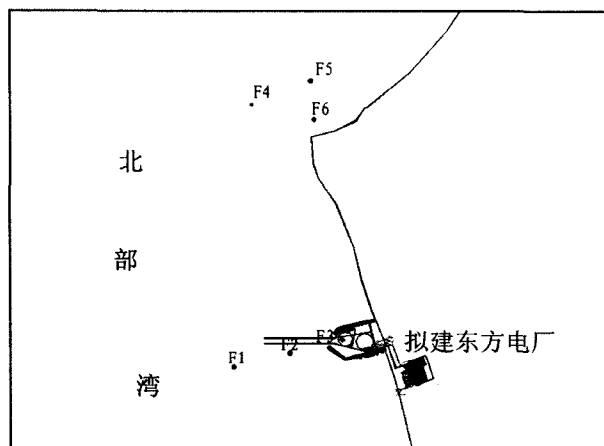


图5 模型验证站点布置示意

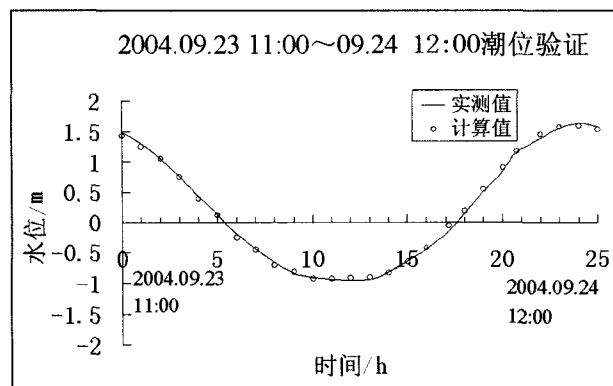


图6 整体模型东方站潮位验证

模型验证结果如图6~图7所示,限于篇幅,本文仅列出了整体模型东方站2004年9月23日的潮位验证图和局部模型F1号站点的流速、流向验证图,模型验证最终采用的海区糙率在0.015~0.018之间。从验证结果来看,模型计算得到的各测点潮位、流速、流向过程的模拟和实测值都非常相近,其模拟精度满足相关规范的要求。利用整体模型所提供的边界条件对局部模型实施运行控制是有效的,局部模型是整体模型的真实放大,它所模拟的局部区域潮流运动与整体模型能保持较好的一致性,能够较好地复演工程附近及周边海区的潮流运动情况,可以用来预测工程方案实施后工程附近海域的潮流运动规律。

至于温排水的温度场验证,由于工程缺乏实测水温

资料,难以验证。但温度计算中所采取的参数在横门国电中山电厂温排水数模计算中进行了验证,验证结果表明计算参数的取值合理,精度满足计算要求。

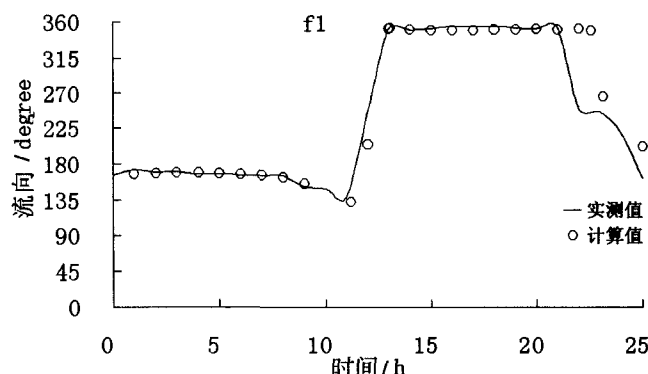
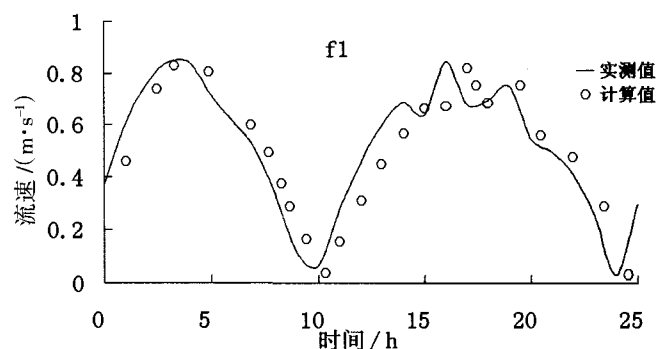


图7 局部模型流速、流向验证

3 计算工况

根据电厂建设规模,一期 $2 \times 350\text{MW}$ 机组循环水热季(6个月)排水量为 $24.7\text{m}^3/\text{s}$,温升 8.11°C ;冷季(6个月)排水量为 $20.995\text{m}^3/\text{s}$,温升 9.54°C 。

根据研究问题的需要,计算分别选取冬季和夏季大、小潮作为计算代表潮型,各计算工况如表1所示。其中,典型潮型冬季大、小潮和夏季大、小潮分别选用2006年1月29日、1月7日、7月11日、7月7日的海口、三亚同步潮位资料,构建北部湾整体数学模型,从整体模型提取局部模型的边界条件,进行流场及温度场的数值模拟计算。

表1 电厂冷却水计算工况表

工况	计算潮型	一期取排水流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	排水温升 $/^\circ\text{C}$
1	冬季大潮	20.995	9.54
2	冬季小潮	20.995	9.54
3	夏季大潮	24.7	8.11
4	夏季小潮	24.7	8.11

4 计算成果

4.1 排水温升影响范围

排水口水域的温度场分布,主要取决于排水口的位置、形式、出口流速及受纳水域潮流流速、流态、本底温度等。随着潮流的变化,电厂冷却水在排水口附近水域内形成的水温分布形态亦发生变化。

海南东方电厂排水口位于防波堤南侧约 0.8km 的近岸水域,排水口处水流流速较大,温水扩散稀释作用较强,计算得到各典型潮型下排水温升最大包络线见图 8~ 图 11 所示。

从温升包络线图可以看出,冷却水的扩散主要表现为沿水流的纵向扩散,温升线呈狭长型,等温线基本与岸线平行。排水口处垂直岸线方向扩散范围较小,温升影响范围主要集中在排水口西北、东南两侧区域。最大温升超过 6℃,主要集中在排水口附近,近似呈半圆形分布,扩散面积较小。表 2~ 表 5 为各个典型潮型温升包络线图特征值统计表,从统计结果来看,温升扩散影响范围大潮大于小潮,冬季大于夏季。其中,6℃高温区影响范围在 0.01km² 以内,0.5℃低温区影响范围在 3.61~5.15km² 之间。

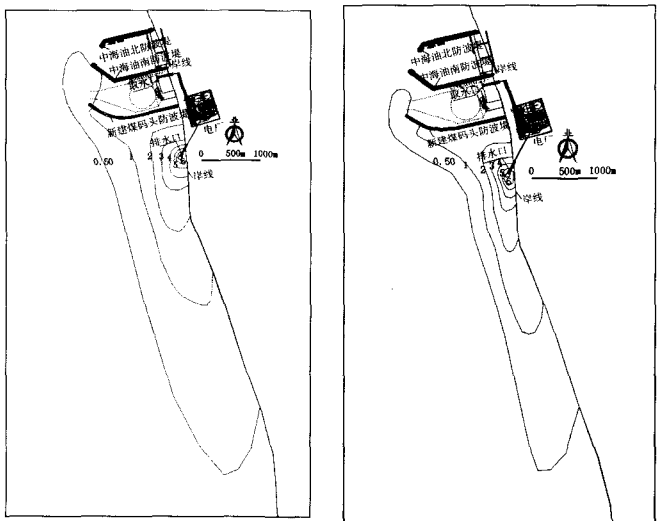


图 8 冬季大潮温升包络线

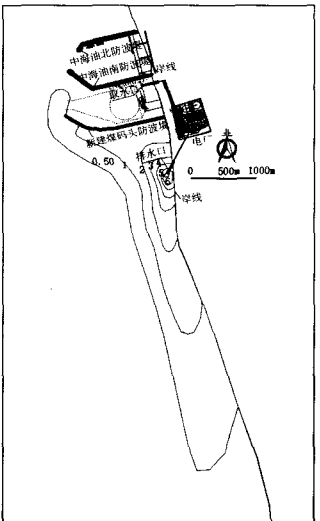


图 9 冬季小潮温升包络线

表 2 冬季大潮温升包络线特征值统计

温升值	向北扩散 距离 /km	向南扩散 距离 /km	扩散长度 /km	扩散宽度 /km	扩散面积 /km ²
6℃	0.08	0.10	0.18	0.15	0.01
5℃	0.15	0.18	0.33	0.19	0.02
4℃	0.22	0.33	0.55	0.29	0.05
3℃	0.30	0.53	0.83	0.42	0.19
2℃	0.55	1.23	1.78	0.58	0.67
1℃	1.29	2.53	3.82	1.30	2.36
0.5℃	2.02	5.45	7.47	1.55	5.15

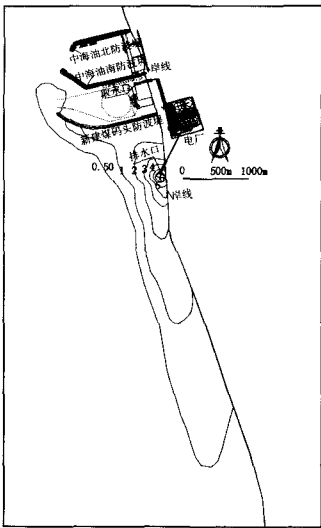


图 10 夏季大潮温升包络线

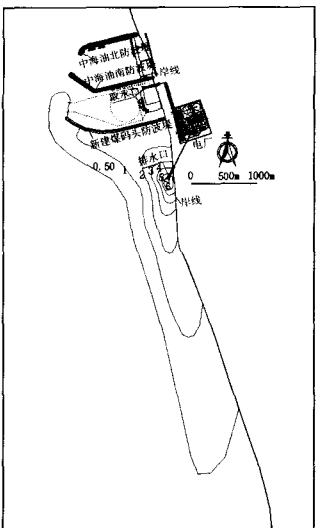


图 11 夏季小潮温升包络线

表 3 冬季小潮温升包络线特征值统计

温升值	向北扩散 距离 /km	向南扩散 距离 /km	扩散长度 /km	扩散宽度 /km	扩散面积 /km ²
6℃	0.07	0.10	0.17	0.13	0.01
5℃	0.13	0.17	0.30	0.17	0.03
4℃	0.19	0.30	0.49	0.23	0.06
3℃	0.28	0.48	0.76	0.32	0.15
2℃	0.53	1.12	1.65	0.42	0.54
1℃	1.26	2.44	3.70	1.24	1.97
0.5℃	1.55	4.54	6.09	1.48	4.08

表 4 夏季大潮温升包络线特征值统计

温升值	向北扩散 距离 /km	向南扩散 距离 /km	扩散长度 /km	扩散宽度 /km	扩散面积 /km ²
6℃	0.06	0.08	0.14	0.12	0.01
5℃	0.01	0.13	0.23	0.18	0.02
4℃	0.18	0.28	0.46	0.24	0.04
3℃	0.27	0.45	0.72	0.32	0.12
2℃	0.53	1.03	1.56	0.43	0.44
1℃	1.25	2.37	3.62	1.23	1.92
0.5℃	1.63	4.36	5.99	1.50	4.11

(下转第 34 页)

机形成的第一个波将使运行机组转速升高 10%，但扰动很快衰减，100s 之内影响就消除了。0.2% 的调节时间小于 60s。

计算结果表明对于高水头电站水力干扰的影响是可以接受的，对安全运行不会带来什么问题。

5 结语

在抽水蓄能电站中，输水系统关系到整个抽水蓄能电站的安全、稳定运行。而输水系统的水力过渡过程计算关系到输水系统的安全、稳定运行，特别是对高水头、大容量、长距离、一洞多机的输水系统布置的抽水蓄能

电站尤为重要。本工程上下游调压井间管长 2 185m，且上下游调压井和地下厂房位置基本限制在很小的范围内，目前又没有真机的机组曲线，因此是一个值得关注的重点问题。通过对深蓄水力调保的计算，我们觉得只要采取成熟的计算程序，选取合理的机组特性曲线，参照已建类似工程经验，完全可以解决长距离输水系统的调保计算，为优化工程设计方案提供更有利的依据。

参考文献：

- [1] 武汉大学水电站教研室. 深圳抽水蓄能电站可研阶段水力过渡过程计算专题报告[R]. 2005.

(上接第 15 页)

表 5 夏季小潮温升包络线特征值统计

温升值	向北扩散 距离 /km	向南扩散 距离 /km	扩散长度 /km	扩散宽度 /km	扩散面积 /km ²
6℃	0.06	0.07	0.13	0.11	0.01
5℃	0.10	0.12	0.22	0.16	0.02
4℃	0.16	0.25	0.41	0.21	0.04
3℃	0.26	0.44	0.70	0.30	0.10
2℃	0.53	0.98	1.51	0.43	0.39
1℃	0.92	2.21	3.13	0.93	1.63
0.5℃	1.35	4.10	5.45	1.45	3.61

4.2 取水温升

取水温升是取水温度与自然温度的差值，它是电厂排出热水在自然水域中随潮扩散、掺混和散热后回流取水口的综合反应值，是选择电厂排水口布置方案冷却效果的关键指标之一。在一个全潮过程里，取水口的温升会随时间而变化。

不同潮型条件下，取水口温升过程线如图 12 所示，取水口处温升特征值统计于表 6。从图表来看，在各种潮型下，取水温升变化不大。电厂一期工程实施后取水口最大温升为 0.16℃~0.17℃，最小温升为 0.08℃~0.13℃。整体上取水温升较小，对取水影响不大。

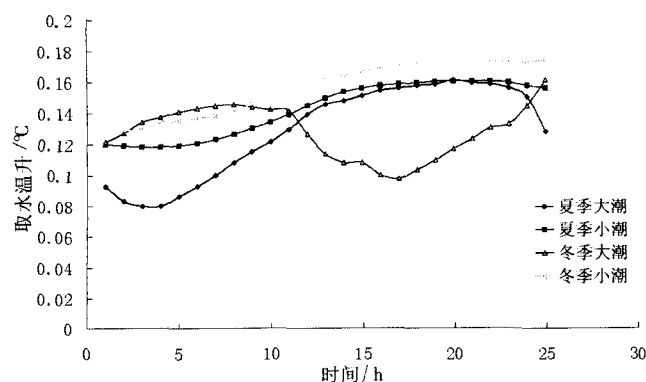


图 12 取水口温升过程线

表 6 电厂取水口温升特征值统计 单位:℃

典型潮	最大温升	最小温升	平均温升
夏季大潮	0.16	0.12	0.14
夏季小潮	0.16	0.08	0.13
冬季大潮	0.17	0.13	0.16
冬季小潮	0.16	0.10	0.13

5 结语

采用平面二维水流、温度扩散数学模型模拟计算了海南东方电厂温排水的扩散规律、影响范围和取水温升变化，主要结论如下：

- 1) 冷却水的扩散主要表现为沿水流的纵向扩散，温升线呈狭长型，等温线基本与岸线平行。
- 2) 温升影响范围主要集中在排水口西北、东南两侧区域。最大温升超过 6℃，主要集中在排水口附近，近似呈半圆形分布，扩散面积较小。
- 3) 温升扩散影响范围大潮大于小潮，冬季大于夏季。
- 4) 在各种潮型下，取水温升变化不大，且取水温升较小，对取水影响不大。

参考文献：

- [1] 李义天, 赵明登, 曹志芳. 河道平面二维水沙数学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] 曹祖德, 王运洪. 水动力泥沙数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994.
- [3] 张细兵, 金琨, 林木松. 潮流河段温排水影响的平面二维数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(3): 13-16.
- [4] 程文辉, 王航海. 用正交曲线网格及“冻结法”计算河道流场[J]. 水利学报, 1988, (6): 8-12.
- [5] 中国海洋大学. 国电蓬莱发电厂工程冷却水数值模型计算结果报告[R]. 2003.