

潮汐水域水力热力特性模拟及工程应用

高燕芳

(山西省水利水电工程建设监理公司 总工办, 山西 太原 030002)

摘要: 结合可门电厂工程实际,采用数值模拟和物理模型试验相结合的方法,对电厂附近潮汐水域的水力热力特性进行了系统的研究。数值模拟和物理模型试验是分析温排水在受纳水域中扩散运移规律的有效方法,可以模拟电厂冷却水排放所产生的流速场、温度场,分析热量的影响范围、时间及强度,优化取排水口工程布置。

关键词: 冷却水; 水力特性; 热力特性; 物理模型; 数学模拟

中图分类号: TV744

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0153-04

Simulation and application about hydraulic and thermal characteristic in tidal area

GAO Yanfang

(Chief Engineer Office, Shanxi Water Resources and Hydropower Construction Supervision Company, Taiyuan 030002, China)

Abstract: Combined with the situation of Kemen power station, the hydraulic and thermal characteristic in full tide near the power station have been studied by numerical simulation and physical model systematically. Numerical simulation and physical model are effective methods to analyze the diffuse and transfer rule of warm water in acceptance water, which can simulate the velocity and temperature field, analyze the heat affected area, time and intensity, optimize the intake and discharge disposal.

Key words: cooling water; hydraulic characteristic; thermal characteristic; physical model; numerical simulation

1 研究意义

随着国民经济的发展,河流、海湾、湖泊和水库受工业废水或生活废水的注入而引起的水环境问题已不容忽视,如何正确地预报水域水质的变化情况,防止环境污染及水生物链的损害是目前的研究课题。工业废弃水中常常伴有不同程度的废热存在,因此,热排放问题也是水环境预测、保护中经常遇到的问题。

火/核电厂是向水环境排放废热的主要单位。尽管现代科学技术已很发达,但电厂的热效率仍很低,携带巨大能量的温排水,采用水面冷却时,要给附近水域带进大量废热。利用天然水域释热的方法涉及到两方面的问题:①冷却水取水温度的高低直接影响电厂的发电效益,如何合理地布置取排水口,充分利用水面资源散热,使电厂能取到低温水,避免发生热水短路现象^[1];②冷却水排入附近的受纳水域中,不仅会引起受纳水域水温变化,而且对水质、水生物等会产生许多连带影响,严重时会发生热污

染现象。

上述两方面问题的深入研究都要求对受纳水域的温度进行合理的预报和控制,其基础就是对受纳水域温度分布的定量描述。

2 研究方法

针对废热在水环境中随水流的扩散、迁移变化规律,主要研究方法有:理论分析、原型观测、数值模拟和物理模型试验。目前,数值模拟与物理模拟缺一不可,它们互相补充,取长补短,在工程设计和环境评价中起到了重要的作用。

2.1 数值模拟

数值模拟是将描述水流运动的方程组,采用离散化方法,建立数学模型,并通过计算机进行计算,得到时间和空间上离散点各变量的值,从而对流场进行定量的描述。

2.1.1 数值模拟的优点 数值模拟方法有其突出的优点,所有试验条件都以数字形式给出,对流体无扰动,不存在缩尺效应,不受实验场地和观测仪器影

响。数值模拟时间取决于计算机速度和计算方法,某一数学模型及其计算程序完成后,对同类问题具有普适性,可被反复引用。因此,数值模拟方法具有高效、经济、简便的优点。

2.1.2 数值模拟的局限性 数值模拟的局限性主要表现在:①数值模拟依赖于控制方程的可靠性,计算结果也不能提供任何形式的解析表达式,只有有限个离散点上的数值解;②数值模拟的可靠性和精度取决于数学模型、离散方法、边界处理各环节,处理不当将难以准确地表达实际情况,甚至造成伪物理现象;③数值模拟往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些流动参数。

2.1.3 深度平均的潮流运动方程 对于河口或大型水库,往往垂向加速度与重力加速度相比很小,可以忽略。当模拟水域的水平尺度远大于垂向尺度,水平流速远大于垂向流速时,物理量沿水深方向的变化相对沿水平方向的变化要小的多,略去物理量沿水深方向的变化,可得到沿水深平均的二维流动基本方程^[2]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + fv - \frac{gu}{C^2 H} \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{\tau_{sx}}{\rho H} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (HE_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} (HE_y \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - fu - \frac{gv}{C^2 H} \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{\tau_{sy}}{\rho H} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (HE_x \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} (HE_y \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (3)$$

温度方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \theta}{\partial y}) - \frac{K\theta}{\rho C_p H} \quad (4)$$

式中: $\tau_{sx} = \tau_s \cos \alpha$, $\tau_{sy} = \tau_s \sin \alpha$, $\tau_s = C_D \rho_a W^2$, $H = h_b + \xi$, $\theta = T - T_\infty$, $f = 2\omega \sin \Phi$, u, v 分别为 x, y 方向的垂向平均流速; t 为时间变量; g 为重力加速度; C 为谢才系数, 用公式 $C = H^{1/6}/n$ 计算, n 为曼宁糙率系数; H 为水深; ξ 为相对基准面水位; h_b 为基准面以下水深; E_x, E_y 为 x, y 方向广义粘性系数; θ 为超温; T 为垂向平均水温; T_∞ 为自然水温; K_x, K_y 为广义热扩散系数; ρ 为水密度; ρ_a 为空气的密度; C_p 为水的定压比热; K 为水面综合散热系数; W 为风速; α 为风向角度; f 为柯氏力系数; ω 为地球自转角

速度; ϕ 为当地的纬度; τ_s 为表面风应力; τ_{sx}, τ_{sy} 为表面风应力在 x, y 方向的分力; x, y 为坐标。

定解条件:

(1) 初始条件: $u(x, y, 0) = u_0(x, y)$, $v(x, y, 0) = v_0(x, y)$, $\xi(x, y, 0) = \xi_0(x, y)$

$\theta(x, y, 0) = \theta_0(x, y)$

(2) 边界条件: 陆地边界: 采用滑移条件, 即 $\vec{V} \cdot \vec{n} = 0$, 潮间带采用动边界模拟处理;

温度为绝热条件, $\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0$ 。

潮流水边界: 给出变化过程, 即 $\xi(x, y, t) = \xi(t)$, 其潮位过程由实测资料推求。流速、温度采用基于对流的外延插值法获得。

取排水口边界: 速度和温度由不同工况下的排水流量和热量守恒推出。

2.2 物理模拟

物理模型试验是根据水流流动特性, 抓住影响水流运动的主要作用力, 按照相似准则, 将原体缩制成模型, 使模型模拟与原体相似的流动情况, 对模型进行观测, 取得试验数据后, 再按照模型比尺将模型结果引伸于原体, 对自然现象进行研究的方法。

2.2.1 物理模拟的特点 与数值模拟相比, 物理模型具有投资大、周期长, 灵活性差的特点。同时物理模型试验也存在着如缩尺效应、变态影响等深层次问题。

2.2.2 水力热力物理模型 水力热力物理模型是在水流特性模拟的基础上, 增加了温度变量, 使试验考虑因素增多, 不仅要求模型水流与原体相似, 还要求冷热水产生的浮力分层相似。对于潮汐水域温排水的物理模型试验, 应首先通过控制模型的边界流量或水位, 使模型水流能反映潮流特性。一般潮流开边界条件由原体观测资料或经过验证的数模计算结果给出。

2.2.3 水力热力物理模拟方程 物理模型试验, 是应用量纲和谐^[3]及相似理论等知识, 将原体缩制成模型, 研究水流运动规律的方法。

根据相似理论, 得严格的相似条件为:

几何相似:

$$\left[\frac{b}{a} \right]_r = \left[\frac{c}{a} \right]_r = \left[\frac{\Delta}{h} \right]_r = 1 \quad (5)$$

运动及动力相似:

$$(Eu)_r = (Fr_d)_r = (Fr)_r = (Re)_r = (Pe)_r = 1 \quad (6)$$

热平衡相似要求:

$$\left[\frac{\varphi'}{\varphi_0}\right]_r = \left[\frac{\varphi}{\varphi_0}\right]_r = 1 \tag{7}$$

式中: E_u 为欧拉数; Fr_d 为密度佛汝得数; Fr 为佛汝得数; Re 为雷诺数; P_c 为比热系数; φ_0 为进入水体的总热量; φ' 为固壁总体散热量; φ 为水面总体散热量。

模型设计都是以模型相似理论为基础,但不可能同时满足所有的相似准则,需结合试验目的,根据水流运动的特点,抓住主要矛盾,选择适宜的模型相似准则,使模型水流能与原体相似。

3 验证试验

3.1 潮位验证

影响模型与原体潮位相似的主要因素有:模型地形、河床糙率、水边界进出流量^[4]。水边界控制条件一般由原体资料或经过验证的数模计算结果给出,按相似原理换算到模型。在模型中至少应有两个潮位验证点,模型制做及设备安装工作完成后,要试放水,进行水位观测,并与原体或数模结果相比较。若不符合,应首先核对地形,其次对糙率和水边界流量适当调整,使模型水位与原体水位基本一致。

3.2 流速验证

在潮位验证的基础上,模型内应包括多个流速验证点,模型与原型各验证点的流速、流向应基本吻合。在水流进出口处流速、流态不相似往往是由于模型进口段水流或尾门的影响,可采取加设滤波设施等措施,减小对水流流态的影响。当沿程潮位均一致时,流速的相似性将不致有太大的偏离^[5]。

4 工程应用

4.1 工程概况

福州可门火电厂位于福州市连江县坑园镇颜岐村,在罗源湾南岸。电厂一期工程已建设 2×600 MW 机组;二期扩建工程拟建设 2×600 MW 机组。电厂采用海水作为冷却水源,可门电厂附近海域潮汐属正规半日潮,罗源湾内潮流基本上沿等深线作往复运动,大潮时最大余流流速 13.4 cm/s ,小潮时最大余流流速 6.2 cm/s 。

4.2 试验目的

对二期运行工况(装机容量 $4 \times 600\text{ MW}$)取排水方案进行温排水试验:方案 1:二期取排水原设计方案;方案 2:二期取水口向岸缩近 50 m 。了解温排水随潮流的变化规律,对二期取水口向岸缩进对温排水的影响进行分析。

4.3 模拟范围

数值模拟应用二维浅水潮流数学模型,采用分步杂交法求解深度平均的水流运动控制方程,采用能适应天然不规则边界的三角形计算网格,网格布置见图 1 所示。

物理模型选定将南北两水道的分、汇流线取为固壁曲线边界,忽略扩散效应,将模型设计为半整体模型,模拟范围为 $15.0\text{ km} \times 5.4\text{ km}$ (见图 2)。

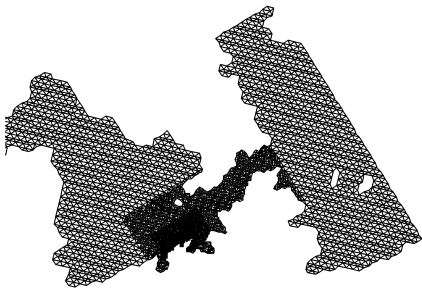


图 1 数模计算网格布置图

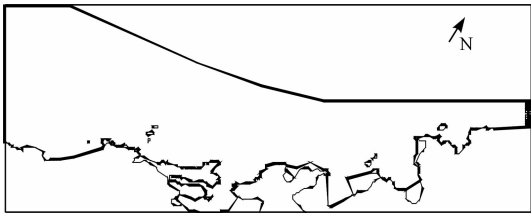


图 2 物理模型范围示意图

4.4 潮流验证

4.4.1 数值模拟验证 计算结果与实测结果比较见图 3。由图可见,无论是潮高还是相位,计算值与实测值都吻合良好,计算所得各测点的流速、流向与实测数据趋于一致。

4.4.2 物理模型验证 结合数值模拟计算结果,确定物理模型试验的边界流量及潮位、流速验证点,计算值、实测值及模型值对比见图 4。由图可见:模型潮位、实测潮位及计算潮位变化过程基本一致。模型流速、流向与实测资料及计算结果均吻合良好。

模型流场与原型流场相似,能反映原型流场的流动特性,为热水的输移和扩散提供了可靠的流场基础。

4.5 热力试验

4.5.1 试验数据 针对取水口两个布置方案,分大、小潮共四组工况进行了电厂冷却水水力热力特性物理模型试验,对热水温升分布规律进行了分析,得出了全潮最大温升等值线包络面积和全潮平均温升等值线分布面积,见表 1。 $1^\#$ 、 $2^\#$ 取水口试验所得的取水温升特征值见表 2。

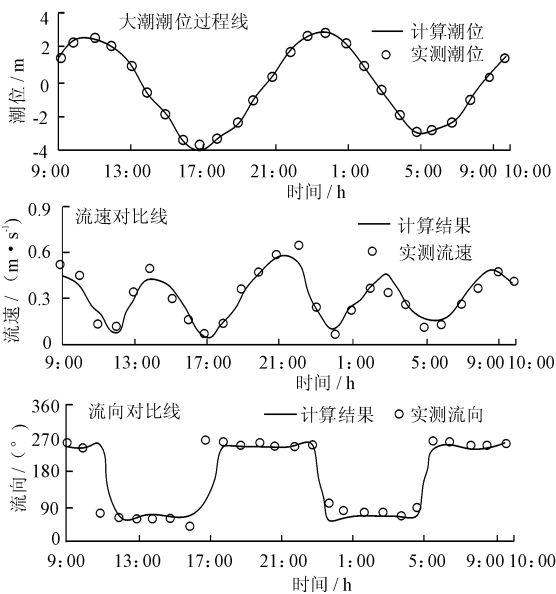


图3 数值模拟潮流验证

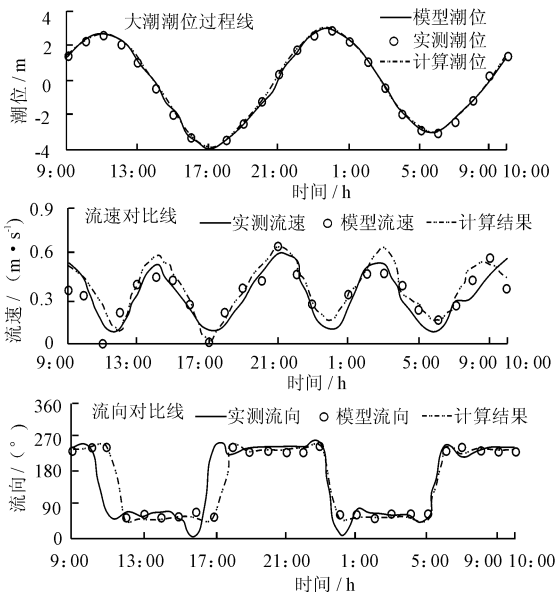


图4 物理模型潮流验证

表1 温升等值线面积								km ² , ℃				
组次	工况	潮型	温排水全潮最大温升等值线包络面积					温排水全潮平均温升等值线包络面积				
			4	3	2	1	0.5	4	3	2	1	0.5
1	1	大潮	0.22	0.64	1.41	3.79	7.53	0.04	0.08	0.18	1.14	5.33
2	2	小潮	0.52	1.05	2.27	4.17	6.57	0.04	0.08	0.23	1.29	3.37
3		大潮	0.30	0.62	1.55	3.72	7.86	0.03	0.07	0.19	1.11	5.36
4		小潮	0.43	0.91	2.17	4.58	6.68	0.03	0.08	0.22	1.32	3.99

表2 取水温升特征值									℃	
组次	潮型	方案	编号	1 [#] 取水口			2 [#] 取水口			
				最大	最小	平均	最大	最小	平均	
1	大潮	方案1	1-S	1.28	0.23	0.46	1.05	0.23	0.44	
3		方案2	2-S	1.02	0.29	0.48	1.51	0.47	0.68	
2	小潮	方案1	1-S	0.97	0.38	0.56	0.86	0.37	0.53	
4		方案2	2-S	0.93	0.39	0.63	1.12	0.53	0.81	

4.5.2 试验结论 ① 同一潮型下,各种工况温升分布形状、面积相近,取水口有无缩进对温升分布影响不大。② 2[#]取水口向岸缩进对 1[#]取水口影响不大,取水温升过程线基本接近,平均温升变化在 0.1℃ 以内。③ 2[#]取水口向岸所进后,取水温升有所增加,比缩进前高 0.3℃ 左右。

5 结 语

随着计算机和现代计算技术的不断发展,物理模拟与数值模拟相结合,成为研究温排放扩散、掺混运动的重要手段;数学模型可以克服试验场地、模型比尺的限制,为物理模型提供必要的边界流量及潮位、流速验证点,提高物理模型的可信度;物理模型

的试验结果能对数学模型提供验证资料。二者在工程实际中相结合,互相取长补短,能够取得满意的试验结果。

参考文献:

[1] Helmut Kobus. 清华大学水利系泥沙实验室译. 水力模拟[M]. 北京:清华大学出版社,1988. 5.
[2] 周雪漪. 计算水力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995. 9.
[3] 吴持恭. 水力学(上、下册)[M]. 高等教育出版社,1979. 2.
[4] 陈凯麒. 潮流海域冷却水运动的模拟验证[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),1994,9(1):104-111.