

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 17 集

(冷却水)

水利电力出版社

86.8083
145
:17

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 17 集

(冷却水)

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是水利水电科学研究院冷却水研究所的科学研究论文选集，内容包括：深水库、湖泊和冷却池水温预报通用数学模型，浅水型冷却池的有限元数值分析及水力热力特性模拟计算，电厂重叠式排取水口的研究和实践，电厂冷却水对江河水温的影响，二元温差出流局部掺混及风对二元温差异重流的影响，机力通风冷却塔塔型，自然通风冷却塔的进风口区布置、设计和测试方法的探讨，横流式冷却塔的推力计算、除水器选型试验，漂浮喷射冷却，冷却水温度场数据采集和处理以及热脉冲示踪法低流量测量等。

本书可供从事冷却水工程的科研、规划、设计、工程运行人员和大专院校有关专业师生参考。

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院

科学研究论文集

第17集

(冷却水)

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.75印张 403千字

1984年3月第一版 1984年3月北京第一次印刷

印数 0001—2630册 定价 2.20元

书号 15143·5334

编者说明

我院自1963年8月至1965年7月由水利电力部办公厅图书编辑部编辑、中国工业出版社出版了《水利水电科学研究院科学研究论文集》共六集，第1集（土工），第2集（水文、河渠），第3集（水工），第4集（灌溉、排水），第5集（结构、材料），第6集（土工）。

自1982年起，由水利电力出版社继续出版我院科学研究论文集，已出版的有第7集（水力学、冷却水），第8集（岩土工程），第9集（结构、材料），第10集（灌溉、排水），第11集（泥沙），第12集（水利史），第13集（水力学），第14集（水资源），第15集（水力机电），第16集（抗震、爆破）。

冷却水问题的研究属于带有温度变量的流体力学范畴。随着我国电力建设事业的迅速发展，在工程规划设计中提出这方面的研究任务也日益增多。本集汇编了我院冷却水研究所近年来的部分科研成果，其中有关水面冷却方面的9篇，冷却塔方面的5篇，仪器设备方面的2篇。论文内容包括：水槽系统试验、数学模拟、物理模型、现场观测等方面的研究成果，主要服务于冷却水规划和学科发展的需要，其中有的已经用于工程实际。不当之处，请读者指正。

本集论文分别由陈惠泉、朱咸、许玉麟、岳钧堂高级工程师校核。全集由陈椿庭高级工程师审定。

目 录

湖泊、水库和深冷却池水温预报通用数学模型·····	范乐年 柳新之 (1)
浅水型冷却池中环流和温度分布瞬态数学模型的有限元数值分析·····	
·····	朱 咸 吴江航 刘兰芬 (31)
重叠式排取水口的研究与实践·····	陈惠泉 陈燕茹 (49)
闵行电厂冷却水对黄浦江水温影响的试验研究·····	岳钧堂 赵永明 李雪兴 (86)
昭阳湖冷却池水力热力特性的数值模拟简化计算·····	
·····	吴江航 朱 咸 刘兰芬 李瑞生 (107)
二元温差出流的局部掺混·····	陈惠泉 陈燕茹 (120)
风对二元温差异重流影响的试验研究·····	贺益英 (139)
浅水型冷却池水力热力数学模型的有限元法计算·····	黄柱崇 (156)
逆流式自然通风冷却塔进风口区的试验研究·····	赵振国 王显光 马莉青 (179)
逆流式机力通风冷却塔的塔型试验研究·····	许玉麟 陈俊伟 (193)
横流式冷却塔除水器的试验研究·····	许玉麟 陆振铎 陈俊伟 郭 智 (205)
圆形横流式冷却塔的有限差法热力计算·····	赵振国 马莉青 (221)
自然通风冷却塔设计和测试方法的探讨·····	赵振国 (230)
喷射冷却的研究和应用·····	李平衡 赵 国 张庆年 (239)
冷却水温度场数据采集和处理·····	刘长山 程丽英 (257)
热脉冲示踪法用于水流低流速测量·····	陈先朴 李 岩 (268)

COLLECTED RESEARCH PAPERS
Water Conservancy and Hydroelectric Power
Research Institute

Academia Sinica, Ministry of Water Resources and Electric
Power Vol.XVII. Cooling Water, 1983

Contents

Water Temperature Prediction in Deep Reservoirs, Lakes and Cooling Ponds...	
.....Fan Lonian, Liu Xinzhi (29)	
Modelling Transient State Circulation and Temperature Distribution in Shallow Cooling Pond by Finite Element Method.....	
..... Zhu Xian, Wu Jianghang, Liu Lanfen (48)	
The Experimental Research and Engineering Practice of Intake-under-Outlet Cooling Water System.....	
.....Chen Huiquan, Chen Yanru (85)	
Experimental Study on Effects of Heated Discharges from Min-Hang Power Plant on the Water Temperature of the Huang-Pu River	
.....Yue Juntang, Zhao Yongming, Li Xuexing(106)	
Simplified Mathematical Modelling of Hydrothermal Behavior in Zhao Yang Cooling Lake	
..... Wu Jianghang, Zhu Xian, Liu Lanfen, Li Ruisheng(119)	
Local Entrainment of Two-Dimensional Thermal Density Flow in Shallow Channel	
..... Chen Huiquan, Chen Yanru(138)	
Experimental Study of Wind Effects on Two-Dimensional Thermal Density Flow	
.....He Yiying(155)	
Mathematical Modelling of Hydrothermal Dynamics of Shallow Cooling Pond by Finite Element Method	
.....Huang Zhuchong(178)	
An Experimental Study about the Inlet Region of Natural Draft Counterflow Cooling Tower.....	
.....Zhao Zhenguo, Wang Xianguang, Ma Liqing(192)	
An Air Flow Model Study on Mechanical Draft Counterflow Cooling Towers...	
..... Xu Yulin, Chen Junwei(204)	
A Study on the Performance of Drift Eliminators for Crossflow Cooling Towers	
.....Xu Yulin, Lu Zhenduo, Chen Junwei, Guo Zhi(220)	
The Thermo-Computation for Circular Crossflow Cooling Towers	
..... Zhao Zhenguo, Ma Liqing(229)	
A Study on the Method of Design and Field Measurement of Natural Draft Cooling Towers.....	
.....Zhao Zhenguo(238)	
Research and Applications of Spray Cooling	
.....Li Pingheng, Zhao Guo, Zhang Qingnian(256)	
Application of a Micro-Computer in the Cooling Water Experiments for Acquisition and Processing of the Temperature Field Data in a Cooling Pond ...	
..... Liu Changshan, Cheng Liying(267)	
A Method of Heat Pulse Trace for Low Velocity Measurements in Water	
.....Chen Xianpu, Li Yan(278)	

湖泊、水库和深冷却池水温预报 通用数学模型

范乐年 柳新之

【提要】水库与湖泊水温预报是水质管理及水质、生态预报的重要组成部分。冷却湖与冷却池的水温预报是火力发电厂冷却水系统优化的核心工作之一，关系到系统布置、电厂运行效率及对水体的环境影响。

“湖温一号”是根据美国“MITEMP”通用数学模型扩充、修改而成的水温预报工具。模型能处理深水库、冷却湖与池等各种情况。水体水温分布分区按一维考虑，模拟了水面热交换、入流掺混、选择取水、热扩散、热对流、风吹掺混及热流散等现象。在模型发展过程中，经过现场及实验验证，估计主要水温参数的误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 左右。根据气象、水文条件及水库或电厂调度运行方式，可以利用模型进行动态水温预报。

文中介绍了“湖温一号”的内容与功能，并讨论了存在的缺点。结合辽宁发电厂扩建工程的冷却水水温预报工作，说明了模型中深冷却湖部分的应用及模型在冷却水系统规划设计中能起的作用。结果表明：过去采用的以设计工况进行稳态水温预报的方法不适用于这类问题，而应采用动态水温预报方法。

一、概 述

人们兴建水库来调节河川径流，以达到水资源综合利用、兴利除害的目的。水库的规划设计往往单一从控制水量观点出发。水库运行后，下游河流的水质与生态会发生重大的变化。如泥沙杂质含量往往减少，春夏放水水温可能很低（水温过低不利于灌溉，造成冷害问题），水库间歇放水加大了河流水温变幅，此外，水库蓄水能引起出流溶氧含量季节性下降，这些因素都不利于鱼类生存。

为了加强水资源的综合利用，一方面规划时应充分考虑对水质与生态的影响；另一方面在管理运用时应更好地发挥已建水库的功能，结合水质管理进一步完善调度运行方式。因此，对水库本身及对下游造成水质与生态变化的研究已经成为一项重要课题。它除与水库工程布置、物理特性及调度运行方式有关外，还受到气象、水文条件、上游输入热及异质数量变化的影响。由于问题复杂、牵涉学科多，许多机理仍处于摸索阶段，迄今尚无较理想的水质与生态数学模型可资应用。国外自60年代起已开始了这方面的研究工作，在水库水温的数学模拟方面取得了较多的成果。其发展过程、成果及有关重要文献见文献[1]。因水温变化对水库内部质、动量与能量的传输以及化学生物反应都起重要作用，所以上述成果为进一步发展其它水质参数及生态变化的预报方法提供了条件。湖泊情况也与水库的

类似。我国在这些方面起步较迟,差距很大。

国内外火电工程常有利用水库与湖泊作为冷却水水源和接纳水体的例子。电厂将大量废热排入水体,人为地增加了热负荷,改变了水体的温度场,从而影响了水环境与生态系统,而冷却水取水的水温又直接影响电厂的运行效率。如何准确预报水温变化就成为电厂冷却水系统优化及其对环境影响评价中的关键工作之一。我国过去大都利用物理模型进行水温预报,解决了工程设计上的许多问题^[2]。近年来也开展了对数学模型的研究。冷却湖的水温预报基本上属于上述无热负荷水库水温分析的延伸。在水库水温模拟的基础上,哈里曼(Harleman)等发展出一套通用水温预报数学模型“MITEMP”,内容见文献[3]、[4]。该模型除能处理上述两类问题外,还能模拟浅冷却池的水温变化。

1981年我们引进了上述模型,作为辽宁发电厂扩建工程的冷却水水温预报工具。根据应用需要,扩大了原模型功能并进行了修改与验证。模型命名为“湖温一号”。

二、“湖温一号”数学模型

模型的理论说明、程序说明及使用手册见专著^{①、②}。今仅就主要内容介绍如下。

(一) 水库、湖泊及冷却池的分类

水体间由于几何形状、气象及水文条件的差异,其中质、动量与能量交换性质也各不相同,从而决定了水温变化上的差别。目前尚无单一适用于所有水体的模型,首先须将水体区分为不同类型,然后按个别特性作出相应的简化近似,逐类予以处理。模型对温度场的模拟限于一维分析,因而分类主要是考虑水体温度场是否满足一维分布条件。

水体温度垂向分层明显时,例如一些年或多年调节水库及较深的冷却湖中,在分层季节表层以下的等温面基本为水平时,温度场可按垂向一维分布加以模拟。这类水体称为“深”水库、“深”湖泊或“深”冷却湖,须满足以下条件:

1. 水体密度佛劳德(Froude)数限制(选择取水条件)

$$F_{DR} = L_R Q_R / [H_R V_R (g\varepsilon)^{1/2}] < 1/\pi \quad (1)$$

式中 L_R 、 H_R ——水体长及水体平均深度,米;

Q_R ——通过流量,米³/秒;

V_R ——水体体积,米³;

g ——重力加速度,9.81米/秒²;

ε ——水体分层密度特征梯度 $\left(-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz}\right)$,一般取 10^{-6} /米。

2. 经常风速限制(深层淹没条件)

$$W^2 < 1.2 \times 10^6 h_m H_R L_t (\Delta\rho/\rho) \quad (2)$$

① 范乐年、柳新之,“湖温一号”——深水库、湖泊及冷却池水温预报通用程序——理论说明,水利水电科学研究院冷却水研究所,1983年3月。

② 柳新之、范乐年,“湖温一号”——深水库、湖泊及冷却池水温预报通用程序——程序说明及使用手册,水利水电科学研究院冷却水研究所,1983年3月。

式中 W ——最大风速平均值, 米/秒;

h_m ——表面均温层厚度, 米;

L_t ——水体沿风向平均长, 米;

$4\rho/\rho$ ——深层与表面均温层密度差比。

3. 冷却湖表层厚限制

$$h_s \leq 0.3H_R \quad (3)$$

$$h_s = [(f_i/4)D_v^3 Q_0 / (g\beta\Delta T_0 H_R^3 B_s^2) L/H_R]^{1/4} H_R \quad (4)$$

上两式中 h_s ——表层厚;

f_i ——摩擦系数, 一般取0.01;

D_v ——冷却水流入水体近区稀释比;

Q_0 ——冷却水流量, 米³/秒;

β ——水的热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ΔT_0 ——冷却水温升, $^{\circ}\text{C}$, $\beta\Delta T_0 = 4\rho_0/\rho$;

B_s 、 L ——表层平均宽度及长度, 米。

当满足式(1)~(3)各条件时, 除冷却湖表层须另加处理外, 水体温度场基本可按垂向一维分布考虑。

当冷却池水深较浅水体垂向充分掺混时, 水温垂向分布均匀, 则称为“浅”冷却池。条件为

$$h_s \geq H_R \quad (5)$$

h_s 按式(4)计算, f_i 值一般取0.02。

当冷却池属于 $0.3H_R < h_s < H_R$ 的情况时, 表明等温面倾斜, 可以按深、浅池状况分别作近似模拟, 所得两组取水水温值为高、低限。

(二) 深水库与深湖泊的水温模拟

水体水温因表面热交换、入流、出流、扩散、对流、风吹等现象影响而变化。目前对这些现象虽已有一定程度的了解, 但仍难以综合求解。在模型中先对入流及出流单独进行分析, 以确定流速场, 避免综合解动量方程的困难。然后直接根据热量方程解温度分布。其次再考虑热对流及风吹掺混的影响, 对温度分布进行迭代修正。

计算中所采用座标及一些变数的定义如图1所示。空间座标定为 z , 时间座标为 t , 水温变量 T 为 z 与 t 的函数。

总体连续方程为

$$dS/dt = \hat{Q}_{in} - \hat{Q}_{out} \quad (6)$$

式中 S ——水库蓄水量, 为 t 的函数;

$\hat{Q}_{in}$ 、 $\hat{Q}_{out}$ ——水库总入流与出流量, 均为 t 的函数。

由于水库库容随高程变化关系给定, 水面高程 z_s 可按 S 求得。

水体任意高程 z 处的连续方程为

$$\partial Q_v / \partial z = B(\hat{u}_i - \hat{u}_0) \quad (7)$$

式中 Q_v ——垂向入流量, 为 z 与 t 的函数;

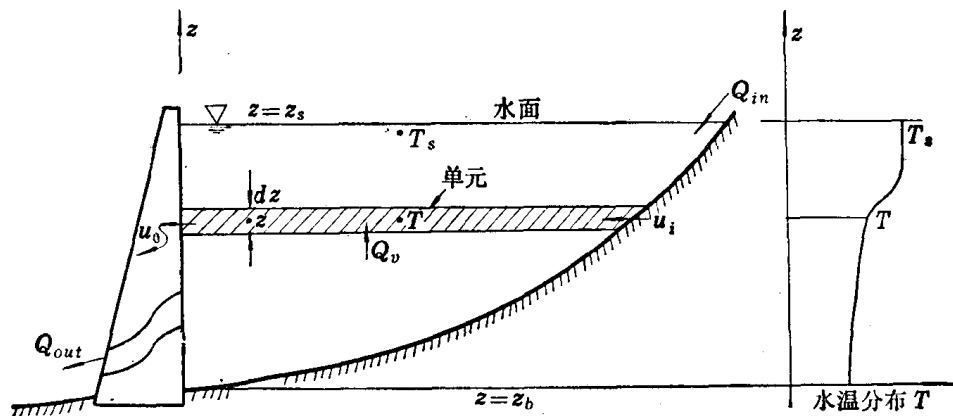


图1 深水库水温模拟

B ——宽度, 为 z 的函数;

$\hat{u}_i, \hat{u}_0$ ——入流及出流综合水平流速, 均为 z 与 t 的函数。

由于 $Q_v(z_b, t) = 0$, Q_v 可依式(7)根据所求得 $\hat{u}_i$ 及 $\hat{u}_0$ 值算出。

水体热量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{A} \left(\frac{\partial Q_v T}{\partial z} \right) = \frac{E}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{B}{A} (\hat{u}_i T_i - \hat{u}_0 T) + \frac{\Phi}{\rho C_h} \quad (8)$$

式中 A ——高程 z 处断面积;

E ——垂向热扩散系数, 取定值;

T_i ——入流水温;

Φ ——单位面积所吸收热通量;

ρ ——水的密度;

C_h ——水的热容量。

上式中各有关变量的取值及数值解法均如下述。初始 T 值为给定, 固体边界假设无热交换, 水面热交换由 Φ 值表示。

处理异重流现象时, 水密度 ρ 按近似状态方程计算

$$\rho = 1000 - 0.663 \times 10^{-2} (T - 4.0)^2 \quad T \geq 4.0^\circ\text{C} \quad (9)$$

ρ 的单位为千克/米³, T 为 $^\circ\text{C}$ 。模型中不考虑因泥沙、盐分含量引起的密度变化, 也不具备处理水温低于 4°C 以下情况的能力。

1. 水面热交换

通过水面进入水体的热通量 φ_n 为

$$\varphi_n = \varphi_{sn} + \varphi_{an} - \varphi_{br} - \varphi_e - \varphi_c \quad (10)$$

式中 $\varphi_{sn}, \varphi_{an}$ ——水体所接受太阳辐射通量及大气辐射通量;

φ_{br} ——水体向大气辐射通量;

φ_e, φ_c ——水面蒸发散热通量及传导散热通量, 千卡/米²·日。

(1) 太阳辐射热通量 φ_{sn} 。 φ_{sn} 值一般可引用现场或邻近主要气象站所测得的太阳辐射量值, 扣除水面反射部分(一般为 6%~11%, 随季节而变)后求得。如缺测时, 亦可按所在纬度依日历推算晴空太阳辐射量, 根据云量加以修正, 再扣除反射部分而得 φ_{sn} 。

估算值。

(2) 大气辐射热通量 φ_{an} 。 φ_{an} 值亦可引用观测值扣除反射部分(一般取3%)而得。但一般均缺测, 须根据气温及云量观测值间接推算, 公式为

$$\varphi_{an} = 1.064 \times 10^{-11} (T_a + 273.16)^6 (1 + 0.17C^2) \quad (11)$$

式中 T_a ——距水面高2米处气温, $^{\circ}\text{C}$;

C ——云量, 晴空为零, 全阴为1.0。

(3) 水体向大气辐射热通量 φ_{br} 。 φ_{br} 按表层水温 T_s ($^{\circ}\text{C}$) 计算

$$\varphi_{br} = 1.136 \times 10^{-6} (T_s + 273.16)^4 \quad (12)$$

(4) 水面蒸发散热通量 φ_e 。 φ_e 系根据空气水汽压(或相对湿度与气温)、风速观测值, 按水面温度依下式推算

$$\varphi_e = (H_w + C_h T_s) \rho f(W) (e_s - e_a) \quad (13)$$

$$H_w = 597.3 - 0.56 T_s \quad (14_a)$$

$$e_s = \exp[20.85 - 5278 / (T_s + 273.3)] \quad (14_b)$$

上三式中 H_w ——水的汽化潜热, 千卡/千克;

ρ ——水密度, 取1000千克/米³;

e_a ——距水面2米高处空气水汽压, 毫米汞柱;

e_s —— T_s 对应饱和水汽压, 毫米汞柱;

$f(W)$ ——风速函数。

模型中风速函数采用诺尔(Rohwer)公式

$$f(W) = (0.308 + 0.185 W') \times 10^{-3} \quad (15)$$

式中 W' 为距水面6英寸高处风速(米/秒), 从2米高风速 W 转换时, 如 $W > 1.76$ 米/秒, $W' = 0.57W$, 否则 $W' = 0.66W$ 。

当 $e_s - e_a$ 为负值时, φ_e 取为零。

(5) 水面传导散热通量 φ_c 。 φ_c 按与 φ_e 成固定比例关系推算

$$\varphi_c = 0.46 \varphi_e (T_s - T_a) / (e_s - e_a) \quad (16)$$

(6) 水体吸收热通量 φ 。根据太阳辐射、气温、云量、风速、水汽压等模型输入值, 加上计算所得表层水温值, 按式(11)~(16)即可推算各项热通量, 按式(10)算出 φ_n 值。

太阳辐射 φ_{sn} 所含短波部分具有穿透水体的能力。穿透至 z 高程的通量 φ_z 近似为

$$\varphi_z = (1 - \beta) \exp[-\eta(z_s - z)] \varphi_{sn} \quad (17)$$

式中 β ——表层吸收比;

η ——水体透光率, 1/米。

除穿透部分外, 其余均假设由表层所吸收。

式(8)中水体吸收热通量 φ 值表达如下

$$\text{表层 } \varphi = \varphi_n - (\varphi_z)_{z=z_s - \Delta z_s} \quad (18)$$

$$\text{表层以下各层 } \varphi = [(\varphi_z A)_{z=z_s} - (\varphi_z A)_{z=z_s - \Delta z_s}] / A \quad (19)$$

式中 Δz_s 、 Δz ——表层及以下各层厚度。

模型在热交换计算中未作线性近似,但仍推算了散热系数及平衡温度供作参考。

2. 入流

河道入流可以看作贴壁异重射流,它在库水体运动的性质须按入口几何条件、流量大小及其温度(不计其它影响密度因素)与库水分层状态决定。当入流水温低于水体表层水温时(图2),入流下沉并与表层水掺混。根据掺混后水温及水体水温分层情况,入流进入水温相等的层面而形成入流层。如何确定入流引起水体流速变化、掺混量及入流层位置,是一个很复杂的问题。

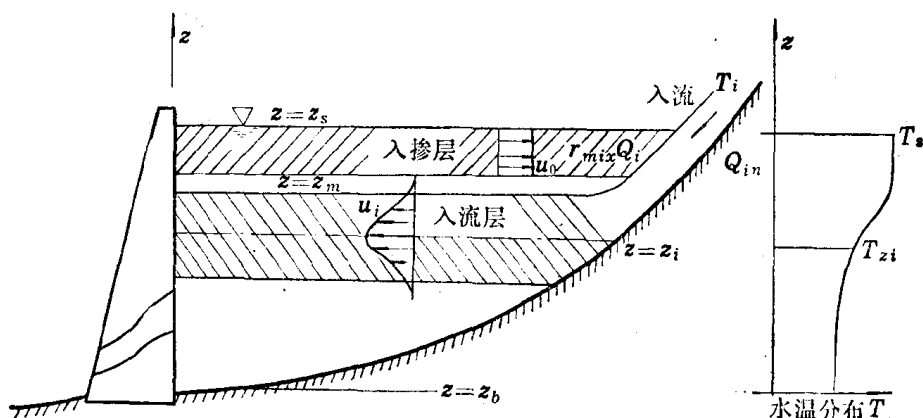


图2 深水库入流模拟

模型采用以下近似方法进行估算:

- (1) 给定水体加入掺混的水层厚度,设入掺层底部高程为 z_m ,即 $z_s - z_m$ 为给定值。
- (2) 给定入掺层入掺流量比 r_{mix} ,层内入掺流速 u_0 分布均匀,因此

$$u_0 = r_{mix} Q_{in} / \int_{z_m}^{z_s} B dz \quad (20)$$

式中 Q_{in} ——河道入流流量。

入流掺混后,流量加大为 $(1 + r_{mix})Q_{in}$,水温变为

$$T_{zi} = \left[T_{in} + r_{mix} \int_{z_m}^{z_s} T B dz / \int_{z_m}^{z_s} B dz \right] / (1 + r_{mix}) \quad (21)$$

式中 T_{in} 为入流水温, T 为水体水温。根据库水体温度分布,确定水温为 T_{zi} 处高程为 z_i 。 z_i 即为入流层中心高程。

- (3) 入流层流速 u_i 为正态分布,层厚为给定值以标准偏差 σ_i 表示。 u_i 按下式计算

$$u_i = (1 + r_{mix}) Q_{in} \exp[-(z - z_i)^2 / (2\sigma_i^2)] / \int_{z_b}^{z_s} B \exp[-(z - z_i)^2 / (2\sigma_i^2)] dz \quad (22)$$

- (4) 当水库有多条河流入流时,按上述方法逐个计算,然后将求得 u_i 与 u_0 各值分别

叠加。

(5) 未考虑因入流所增加的水体内部紊动掺混。

3. 出流——选择取水

从密度垂向分层的水体取水时, 因受密度变化的影响, 流速分布与从均匀水体取水的情况有很大的差别, 取水层厚受到限制, 形成“选择取水”现象, 如图3所示。选择取水现象发生后又同时能加强水体密度分层的倾向。因此, 在前述检验深水库条件中, 式(1)实际上就是要求满足选择取水条件。

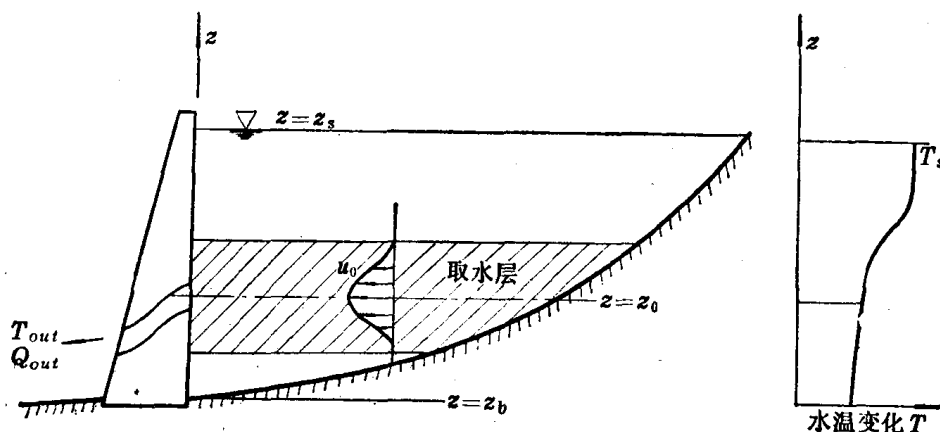


图3 深水库选择取水示意图

模型采用下述方法估算出流流速分布及水温值:

(1) 取水层理论厚度 δ 按取水口中心线高程 z_0 处密度梯度 ε_0 (即 $-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz}$)、单宽流量 q_0 依稳态状况计算

$$\delta = 4.8 [q_0^2 / (g \varepsilon_0)]^{1/4} \quad (23)$$

$$q_0 = Q_{out} / B_0$$

式中 Q_{out} ——取水流量;

B_0 —— z_0 处宽度。

(2) 当取水口不在水体内开阔位置时, 取水口以下取水层厚度受地形限制。这种限制以取水层底部截断高程 z_{ob} 表示, z_{ob} 为给定值。此外, 当取水口在跃温层以下而理论取水层包含了跃温层及以上部分, 则按一给定截断密度梯度 ε_c 截断, 作为取水层顶部, 其高程为 z_{ou} 。 ε_c 在模型中以温度梯度代替, 取为 $0.05^\circ\text{C}/\Delta z$, Δz 为差分间距。

(3) 取水层出流流速 u_0 为正态分布。推算公式为

$$u_0 = Q_{out} \exp[-(z - z_0)^2 / (2\sigma_0^2)] / \int_{z_{ob}}^{z_{ou}} B \exp[-(z - z_0)^2 / (2\sigma_0^2)] dz \quad (24)$$

式中 σ_0 ——标准偏差, $\sigma_0 = \delta/a$;

a ——常数, 一般取3.92。

上式仅适用于 $z_{ob} \leq z \leq z_{ou}$ 区间, 其它高程不受影响。

深取水口的 z_{ob} 值一般取零, z_{ou} 则按上述 ε_c 决定。浅取水口的 z_{ob} 值根据取水口附近地形条件决定, z_{ou} 值一般取 z_s 。受地形条件限制时,宽度 B 须相应以束窄值替代。

(4) 取水水温 T_{out} 根据水体水温分布及按式(24)求得流速值推算

$$T_{out} = \int_{z_{ob}}^{z_{ou}} u_0 B T dz / Q_{out} \quad (25)$$

(5) 水库有多个取水口时,按上述方法逐个计算。然后将所得 u_0 值叠加,即得各层因取水所引起出流流速。

4. 热量扩散

水体中热量的垂向扩散主要是由紊动引起。在跃温层以上,由于水面热通量变化造成热对流及风吹造成掺混的影响比较显著,掺混较均匀。其中很难确定热量紊动扩散量的比例,但可确认其作用相对较不显著。

跃温层及深层部分,主要受出、入流影响。几何尺度虽大而流速一般很低,又受到垂向密度梯度抑制,垂向紊动不强烈,因而垂向紊动扩散系数不大。其数值约为热量分子扩散系数的10~100倍。紊动扩散系数值与流态及密度梯度等相关,一般常取为理查森(Richardson)数的函数。由于流态复杂,函数关系没有公认和具体的形式,应用时又无法准确推算流速场,因此难于应用。

模型中的扩散系数 E 取定值,一般按分子扩散系数值($0.0125\text{米}^2/\text{日}$)计算。这就造成热量扩散可能偏小的问题。跃温层以上,由于模型模拟了热对流及风吹掺混,影响不大。跃温层以下,由于采用了定点网格数值解法,在计算中引进了数值扩散。据估计,所造成的“数值”扩散系数最大值约为 $(\Delta z)^2/(8\Delta t)$ 。在 Δz 为1~2米及 Δt 为1日时,约等于将扩散系数提高为分子扩散系数的10~40倍,约相应于深层应取值。应用中当出入流作用重要时,取 E 为零亦不致有大的影响。

5. 方程组数值解法

按上述方法及数值,根据输入数据即可对式(7)、式(8)求解。

将水体分成厚度为 Δz 的薄层,时间分成 Δt 的时段。由于表面高程 z_s 随时间变化,首先须按总体连续方程式(6)根据水体总入流、出流量输入值求出 z_s ,以确定各时段的薄层数。

水体初始水温分布为输入给定值。从 $t=\Delta t$ 开始,依照上时段末水体水温分布,按上述入流及出流计算方法确定各薄层总入流、出流流速 $\hat{u}_i$ 及 $\hat{u}_o$ 。

$$\hat{u}_i = \sum u_i, \quad \hat{u}_o = \sum u_o \quad (26)$$

式中 u_i 、 u_o ——该层因水库各入流及各取水口取水所引起入流与出流流速值。

Q_0 值根据 $\hat{u}_i$ 及 $\hat{u}_o$ 按式(7)逐层自 $z=0$ 开始向以上各层推求。 Φ 值按上述水面热交换计算方法求得,计算中水面水温值取上时段末值。 E 值为给定。至此,热量方程式(8)中求解所需各参数值都已确定。

式(8)采用显式差分法求解。数值计算稳定性要求为

$$E\Delta t/(\Delta z)^2 \leq 1/2 \quad (27)$$

及

$$(Q_v/A)(\Delta t/\Delta z) \leq 1 \quad (28)$$

由于所取 E 值一般很小, 均能满足式(27)条件。这也是能采用显式解法的原因。式(28)条件在 Q_v 过大时就难以满足。模型逐时段检验式(28), 不能满足时能自动缩短时间步长 Δt 以满足这项条件。

按式(8)所解出水温分布尚未考虑热对流及风吹掺混影响, 而且表面热交换系按上时段末水温计算尚存在一定的误差。模型中再依次模拟风吹掺混及热对流现象, 并进行迭代计算。完毕后才进入下一时段。

6. 风吹掺混

水体水温变化受风吹影响很大。如果风速过高, 会造成跃温层过度倾斜而引起深层翻出水面与表层直接掺混, 导致模型失真, 式(2)即表达了这个条件。蒸发及传导散热量亦都因风速而变化。另外, 由于风吹向水体输入动能, 可以造成跃温层下蚀, 也就是转换为水体的势能, 如图4所示。

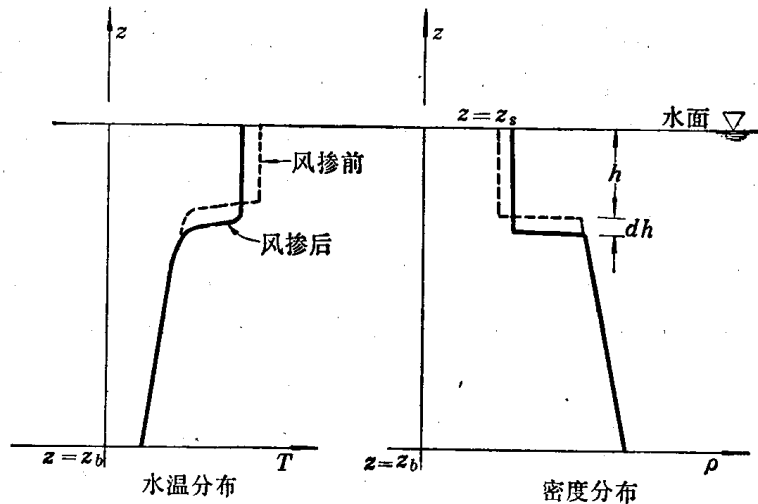


图4 水库风吹掺混温度及密度变化

因跃温层下蚀水体势能增长的功率 P_p 为

$$P_p = (\Delta \rho g h / 2) (dh / dt) A \quad (29)$$

式中 $\Delta \rho$ ——跃温层下蚀面与表面均温层的密度差;

h ——表面均温层厚度;

A ——平均面积。

因风吹水体获得动能的功率 P_k 为

$$P_k = \rho_a u_*^2 u_s A_s \quad (30)$$

式中 ρ_a ——空气密度, 约为1.18千克/米³;

u_* ——风吹水面摩擦速度;

u_s ——风生水面流速;

A_s ——水面面积。

在模型中假设 $u_s \approx u_*$, u_* 则根据2米高风速 W 推算

$$u_* = \sqrt{C_f} W \quad (31)$$

式中 C_f ——水面摩擦系数。

假设风速按对数律分布, C_f 值按下式求解

$$1/\sqrt{C_f} = (1/K) \ln[2g/(0.011C_f W^2)] \quad (32)$$

式中 K ——冯卡门(Von Karman)常数, 取0.41。

水体所获动能并不全部转换成势能。转换比例随风掺理查森(Richardson)数 R_i 变化, R_i 定义为

$$R_i = \Delta \rho g h / (\rho_a u_*^2) \quad (33)$$

当水体分层较弱, 即 R_i 趋近于零时, 表面输入动能主要传送给均温层, 增加均温层的动量而转换成势能的比例减少。当分层较强, R_i 较大时, 均温层动能耗散也相对增大, 转换比例亦将减小。上述性质以下式表示

$$P_p/P_k = 0.057 R_i (29.5 - R_i^{1/2}) / (14.2 + R_i) \quad (34)$$

在计算中, 用该时段风速 W 推算 C_f , u_* 及 P_k 各值。然后按求得水体水温分布自表层开始逐层向下进行风掺计算。先定出该层的 h 及 $\Delta \rho$ 值, 并算出该层与以上各层掺匀后的 P_p 值。其次求出 R_i 并按式(34)算出转换比及相应的势能增长功率 P'_p 。如 $P'_p > P_p$, 表示转换势能仍有余裕, 应继续向下掺混, 直至 $P'_p \leq P_p$ 为止。这时从水温分布比较, 较风吹掺混前均温层增厚, 表面水温下降。

表面热交换计算中所采用表面水温值与风掺计算后所得值不一致, 为消除这类误差模型采用迭代法修正。迭代时用新旧表面热通量的平均值, 重复求解温度分布及进行风掺模拟, 直至收敛为止。

7. 热对流

水体表面热通量 φ_n 为正值时, 表层处于升温状况, 水温较以下各层为高, 密度分层稳定。反之在降温状况, 表层水温则可能低于以下各层, 形成不稳定状态, 如图5中曲线 T' 所示。这时上下层发生热对流直到不稳定状态消失为止。

模型在各个时段完成前述计算之后, 即对所得温度分布进行检验。如发现存在不稳定状态, 假设即刻发生热对流, 将上层冷水与下层热水均匀掺混。计算时, 沿深度向下逐层掺匀, 直至掺匀后温度 T 与该层原温度 T' 相等处为止, 设该层高程为 z_v , 即

$$T = T'(z_v, t) \quad (35)$$

式中

$$T = \int_{z_v}^{z_s} T' A dz / \int_{z_v}^{z_s} A dz \quad (36)$$

这时表层以下至 $z = z_v$ 的水温均为式(36)所得 T 值, 如图5所示。

热对流模拟完成后, 所得水温分布即作为该时段末水温值。以此为根据, 再进行下一

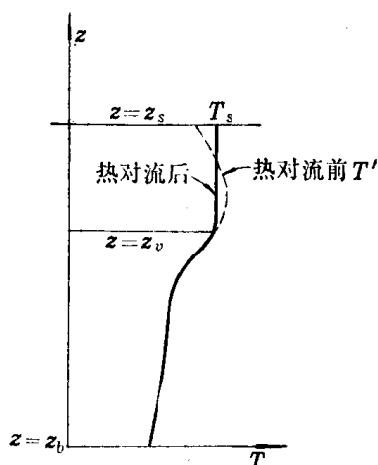


图5 水体热对流模拟水温分布示意图

时段的计算。

(三) 深冷却湖的水温模拟

由于受纳电厂冷却水, 深冷却湖表层水温呈不均匀分布, 如图 6 所示。冷却水排放处附近水温较高, 水温大致随水平距离降减。

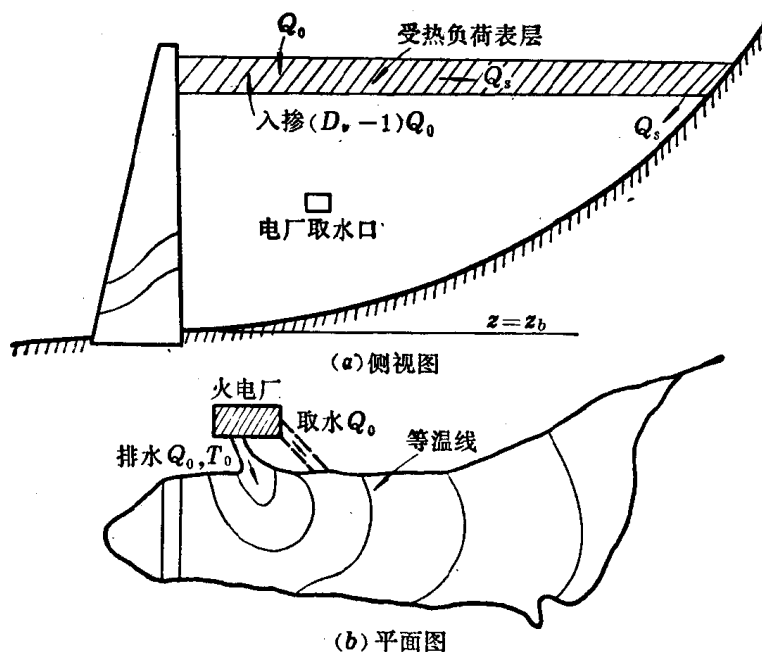


图 6 深冷却湖冷却水取排示意图

水体受冷却水施加热负荷大小一般可以按单位水面面积所承受热负荷量 φ_i 表示。当 φ_i 小于 $2.5 \sim 5$ 万千瓦热量/公里² 时, 作为弱负荷情况^①。在弱负荷时, 表层受冷却水排放影响区域小, 只要取水口布置合理能避免热水短路, 计算上可以采用前述无热负荷模拟方法。负荷较大时则必须按下述或其它方法进行估算。

模型将深冷却湖的表层与其它各层分开处理。表层以下部分仍按前述深水库模拟方法进行计算, 其中包括河道入流、选择取水及热扩散等现象, 水温分布仍按垂向一维考虑。表层承受冷却水热负荷, 必须考虑水平方向水温不均匀分布。现假设水平方向水温变化主要受异重流及表面热交换控制, 表层几何条件及纵向流散作用及其它因素影响不大。这样表层水温可以近似为按面积的一维分布, 如图 7 所示。水温分布 T 即为等温线所包含面积 A_x 的函数, 使计算工作大为简化。表层厚度 h_s 假定沿程不变, 可按式 (4) 或其它方法估算, 在模型中为给定输入值。

受热负荷表层的能量方程为

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial}{\partial A_x} (Q_s T_s) = E_L B_s^2 \frac{\partial^2 T_s}{\partial A_x^2} + \frac{\Phi}{\rho c_h h_s} \quad (37)$$

式中 T_s ——表层水温值;

① 我国火力发电厂每千瓦电量经冷却水排放约 1.4 千瓦热量。