

支流影响下的水库水温预测模型

郝红升¹ 李克锋¹ 梁瑞峰¹ 崔 露² 刘 会³

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065 ;
2. 绵阳师范学院经济与管理科学系 四川 绵阳 621000 ; 3. 重庆市水文水资源勘测局 重庆 410047)

摘要 采用宽度平均的立面二维水温模型,通过分析支流和主库之间的相互影响,提出了支流与主库耦合的简化方法,建立了考虑支流影响的水库水温模型。在考虑有无支流影响的条件下,对水库水温分布、水库下泄水温和坝前垂向水温分布均作了比较,结果表明支流对水库水温分布有一定的影响,所建立支流与主库耦合的立面二维水温模型能够较好地反映存在支流影响的水库水温分布,预测水库水温分布比较合理。

关键词 水库水温;水温预测模型;支流

中图分类号:TV697.2 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2006)05-0007-03

Water temperature prediction model for reservoirs under influence of branches//HAO Hong-sheng¹, LI Ke-feng¹, LIANG Rui-feng¹, CUI Lu², LIU Hui³(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China; 3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Chongqing, Chongqing 410047, China)

Abstract: Through analysis of the interaction between branches and reservoirs, a simplified method for coupling analysis of branches and reservoirs is put forward by use of the elevation width-averaged 2-D water temperature model, and a water temperature model for reservoirs with consideration of the influence of branches is established. The comparison of the result about reservoir water temperature distribution, discharge water temperature distribution, and temperature distribution in vertical direction in front of the dam obtained by the present model with those obtained without consideration of the influence of branches shows that branches have certain influence on reservoir water temperature, and that the established model is effective and reasonable for reflecting and predicting the reservoir water temperature distribution under influence of branches.

Key words: reservoir water temperature; water temperature prediction model; branch

水库的水温预测是水电工程环境影响评价所需要的重要内容之一,对于水资源开发利用的可持续发展具有重大意义,因此对于水温预测模型的研究非常重要。现在已有很多比较成熟的并且在实际工程中得到运用的水温模型,如垂向一维水温模型、纵向一维水温模型、立面二维水温模型和三维湖泊水库水温模型等^[1-3]。一维水温模型在考虑支流影响的问题上已经有了比较合理的方法和理论^[4],运用二维模型对存在支流的大型深水水库进行水温预测时,考虑到模型的收敛性和经济性往往忽略支流的影响。

由于干流高坝水库的建设,使库区内的支流也呈现水库形态,尤其汇口靠近坝址的支流,汇口处往往水深较大,而流量相对干流较小,因而导致其蓄热、分层现象将更显著,流动缓慢将进一步增加富营养化的可能性。另一方面当支流流量不可忽略,且

支流水温与主库水温结构有明显差异时,应研究其汇入对主库水温结构可能产生的影响。因此研究存在支流影响的水库水温模型具有重要的价值。

考虑到除蓄水期可能出现短时间向支流的倒灌外,绝大部分时期水流都是从支流流向主库,因此,在仅考虑支流对主库水温影响的情况下,本文采用全库区立面二维水温模型研究支流对主库的水温影响。

1 无支流影响的水库水温模型

1.1 宽度平均的立面二维水温数学模型及其求解方法

在笛卡儿直角坐标系下,宽度平均的立面二维水温模型的方程组为

$$\frac{\partial}{\partial x}(Bu) + \frac{\partial}{\partial z}(Bw) = 0 \quad (1)$$

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50279025)

作者简介:郝红升(1979—),男,山东安丘人,博士研究生,从事环境水力学与山区河流开发保护研究。E-mail:haohongsheng1979@126.com

$$\frac{\partial}{\partial t}(Bu) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bu) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bu) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{B}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Bw) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bw) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bw) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{B}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial z} - \beta \Delta T g + \frac{\partial}{\partial z} \left(B\nu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(B\nu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Bk) + u \frac{\partial}{\partial x}(Bk) + w \frac{\partial}{\partial z}(Bk) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B \frac{\nu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B \frac{\nu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + B(G_k + G_b - \varepsilon) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(B\varepsilon) + u \frac{\partial}{\partial x}(B\varepsilon) + w \frac{\partial}{\partial z}(B\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B \frac{\nu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B \frac{\nu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + BC_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - BC_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(BT) + u \frac{\partial}{\partial x}(BT) + w \frac{\partial}{\partial z}(BT) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{B\nu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{B\nu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial B\varphi_z}{\partial z} \quad (6)$$

式中： $G_k = \nu_e \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$ ； $G_b = -\beta g \frac{\nu_e}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial z}$ ； ν_e 为分子黏滞系数 ν 与紊动黏滞系数 ν_t 之和， m^2/s ； ρ_s 为参考密度， kg/m^3 ； ρ 为水体密度， kg/m^3 ； u, w 分别为纵向和垂向流速， m/s ； β 为热膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ； p 为压强， Pa ； T 为水温， $^{\circ}\text{C}$ ； k 为紊动动能； ε 为紊动动能耗散率； B 为河宽， m ； C_p 为水的比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ； φ_z 为穿过 z 平面的太阳辐射通量， W/m^2 ； $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_T, C_{\mu}, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ 的取值分别为 1.0, 1.3, 0.9, 0.09, 1.44, 1.92。

1.2 解决方法和边界条件

入口给定均匀水温和流速， k 和 ε 可分别由入流速度近似计算：

$$k = 0.00375u^2 \quad \varepsilon = \frac{k^{1.5}}{0.4H_0} \quad (7)$$

式中： H_0 为进口断面水深， m 。

假定出口断面为充分发展的湍流，有 $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} =$

$\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0, w = 0$ 。水面采用“刚盖假定”，即

$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0, w = 0$ 。水面表层单元计入水

气热交换。库底和坝体表面采用无滑移边界条件，且为绝热边界。采用有限体积法和混合格式对微分

方程进行离散。采用 SIMPLE 算法求解差分方程，并采用交错网格避免出现棋盘式不均匀压力场。

水动力方程与温度方程耦合求解。计算中依次求解 u, w 动量方程和 k, ε 方程，再求解温度方程，然后用新的温度值修正 w 和 k 方程的源项，重新计算水动力学方程，直到各方程的误差余量小于容许值。

2 有支流影响的水库水温模型

由于支流具有水深大、流量小的特点，给计算带来极大的困难。若与主库耦合计算，计算的收敛性和经济性都很难满足工程研究的要求，因此必须进行一些合理的简化。

支流与主库耦合的简化方法：在支流水位与主库水位保持相同的情况下，首先计算支流库区的立面二维水温分布。因此在设置支流的下游边界时，水温给出了梯度为零的边界条件，在有温度分层的情况下，在纵垂向断面上可能存在涡流，若在汇口处设置全断面出流且流速梯度为零时，则有可能出现负流速，这种断面是不能作为下游边界条件的。因此笔者从干流汇口处向下游延长一段距离，设置了一虚拟的大坝作为下游边界，这样就避免了边界反向流速的出现。

在支流流量较大且温度与主库差异较明显的情况下，计算主库库区水温分布时应计入支流的影响。当主库在计算至汇合处时，连续方程式(1)中加入流量源项 S_{uQ_j} ，同时温度方程式(6)右边加入热源项 S_{uT_j}, S_{uQ_j} 和 S_{uT_j} 表达式如下：

$$S_{uQ_j} = Q_{b_j} B_j / V_j \quad (8)$$

$$S_{uT_j} = Q_{b_j} T_b B_j / V_j \quad (9)$$

式中： j 为主库的垂向单元； B_j, V_j 分别为汇口处垂向 j 单元的宽度和体积； Q_{b_j} 为汇入主库垂向 j 单元的支流流量； T_{b_j} 为汇入 j 单元的支流水温。

在确定支流汇入主流的分层流量 Q_{b_j} 时，采用等温层汇入，即认为在支流流入主库的过程中，由于断面平均流速很小，浮力对汇入过程起控制性作用。当支流水温高于同高程的主库水温时，支流水温在浮力的作用下会上浮至主库的同温层，而当支流水温低于同高程的主库水温时，支流水温则下潜。这样支流每层水体均流入主库的同温层，此时 Q_{b_j} 是与主库 j 单元水温相同的支流流量。上述的简化方法只考虑了支流对主库的影响，因此在蓄水期发生主库倒灌时，计算结果会存在一定的误差。同时主库计算中虽然考虑了支流流量和热量汇入的影响，但没有考虑流量汇入过程中的混合流动，因此汇口附近混合区内的流场也会有一定的误差。但如果混合区的流场或温度场不是重点考察的区域，且混合

区距坝址较远,简化方法引起的混合区局部的误差不会影响到整个库区的温度结构,更不会坝前温度分布和下泄水温产生明显的影响。

采用宽度平均的立面二维水温数学模型,并结合以上支流与主库耦合的简化方法,可得到有支流影响的水库水温模型。模型的方程组见式(1)~(9)。

3 水库水温预测结果分析

以存在支流的水库为例,采用代表年逐月入库流量及入库水温和气象条件。采用立面二维水温模型,在有无考虑支流影响下分别计算2、5、8、11月份的水温分布,计算结果见图1~2(图中数字表示温度(°C),细线表示等温线)。图3比较了有无考虑支流影响下水库的下泄水温。图4~5表示在有无考虑支流影响下水库坝前水温的分布。

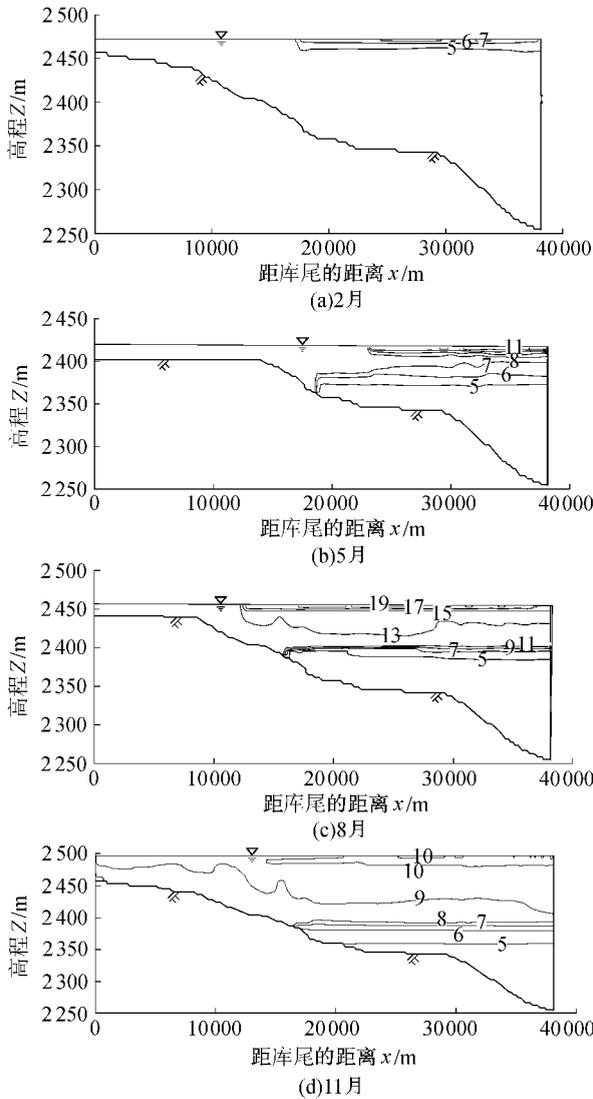


图1 考虑支流影响的水库水温分布

通过比较图1、图2中对应月份的水库水温分布,可以看出两种情况下的水温分布与实际相符合。但是,考虑支流影响条件下的水库水温分布较未考虑支流影响条件下的有所变化。从图3中可见两种

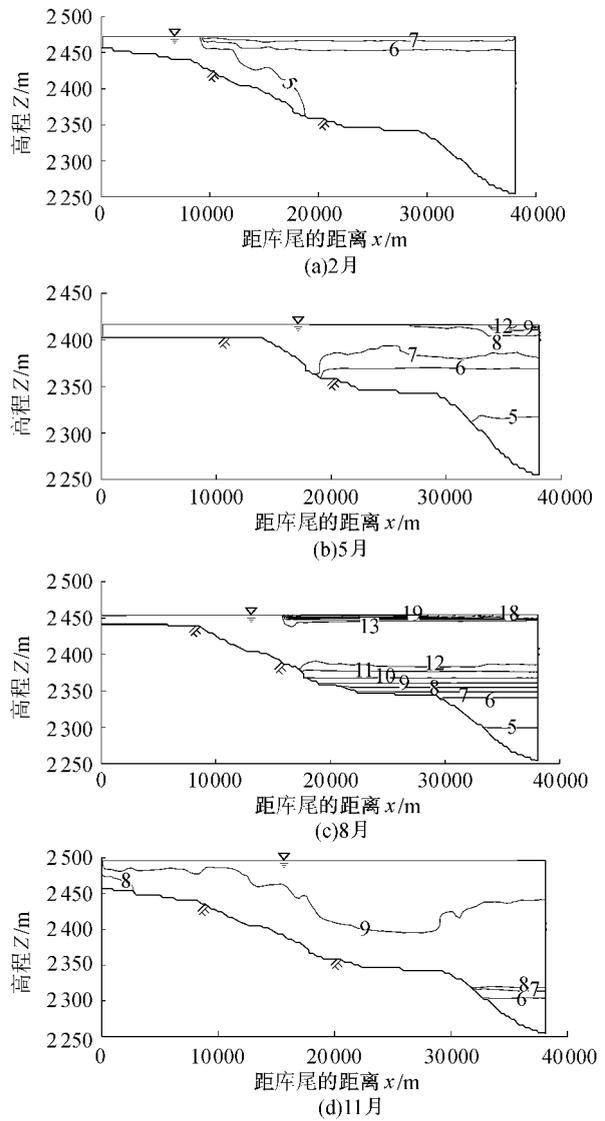


图2 未考虑支流影响的水库水温分布

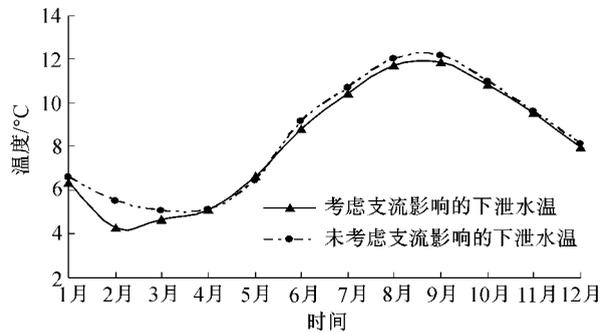


图3 水库下泄水温比较

情况下水库下泄水温有所不同,未考虑支流影响条件下的水库下泄水温略高于考虑支流影响条件下的水库下泄水温。但两种情况下每个月水库下泄水温仍然与实际情况相符。比较图4、图5可以看出,两种情况下的坝前水温分布基本符合实际情况,但对应月份的坝前水温分布有明显的区别。由于支流的水温比主库水温低,支流汇入主库使入库水温降低。在不考虑支流的影响条件下,入库 (下转第17页)

的动态不确定性,将大坝上下游渗入和渗出坝基的水溶液组分浓度的随机不确定性利用修正项直接代入模型之中,打破了以往常用的通过确定性模拟和随机模拟联合使用来分析输入不确定性对输出不确定性影响的做法,实现了同一模型范围内分析上下游渗入、渗出液随机不确定性对坝基岩-水间物质交换量随机变化的影响,这同以往的方法相比,无疑前进了一步。

b. 在模型求解方法上,统一使用较为完善的Barrodale-Roberts算法,使得模型数值求解速度更快,计算结果更加稳定和可靠。

c. 用所建立的模型来定量分析新安江大坝右岸2号坝段坝基岩体(包括帷幕)与水溶液之间的水文地球化学作用,为正确评价新安江大坝右坝段坝基长期稳定性和耐久性提供了有益的依据,同时也验证了该模型的可靠性和实用性。

d. 坝基老化的反向水文地球化学模型是建立

在大坝上下游监测获得的实际水化学资料基础之上的,因此模拟结果比较可靠。正因为如此,它只适用于水文地球化学监测资料较充足的已建工程坝基老化模拟分析,而对于拟建工程的坝基老化分析则无能为力。

参考文献:

- [1] International Commission on Large Dams. World register of dams[R]. Paris:ICOLD,1998.
- [2] International Commission on Large Dams. World register of dams 'short version (China only)[R]. Paris:ICOLD,2000.
- [3] BARRODALE I,ROBERTS F D K. LI solution to linear equations subject to linear equality and inequality constraints[J]. Transactions on Mathematical Software,1980(6) 231-235.
- [4] 马晓辉,彭汉兴,杨光中.坝址环境与三峡坝基帷幕耐腐蚀性探讨[J].中国三峡建设,2001(3) 22-23.
- [5] 童海涛.新安江坝址区水-岩作用水文地球化学随机模拟[D].南京:河海大学,2003.

(收稿日期:2005-11-04 编辑:骆超)

(上接第9页)

水温高于考虑支流影响的入库水温。由于入库水温的升高,水库库底水温也随之升高。

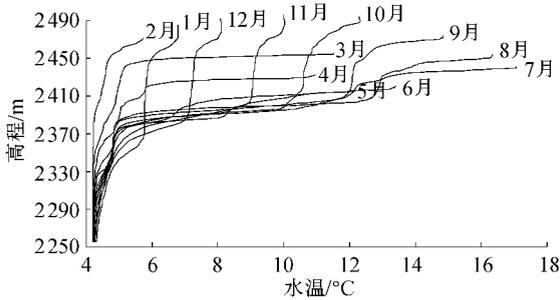


图4 考虑支流影响的坝前水温分布

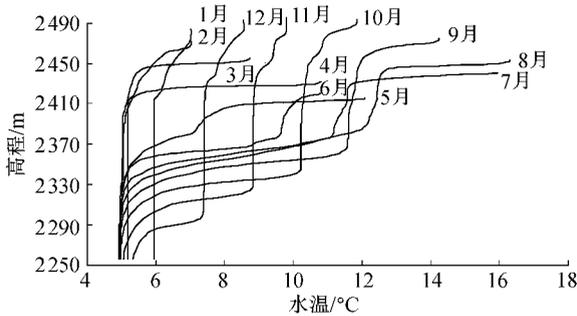


图5 未考虑支流影响的坝前水温分布

造成两种情况下水库水温分布、水库下泄水温和坝前水温分布有区别的原因是由于支流的汇入使主库水温分布发生变化。因此,在实际工程中对于有支流存在的水库不能轻易忽略支流对主库的影响。对于农业灌溉和水库下游水生生物的生存环境,如果对水库中的水温分布计算不准确会导致水

库水温分布和下泄水温不准确,因此在利用水库中的水进行农田灌溉时可能会影响农产品的产量,破坏下游水生生物的生存环境。因此,在存在支流的水库水温计算过程中,采用支流与主库耦合的立面二维水温预测模型来预测水库的水温分布比较合理。

4 结论

本文建立的支流与主库耦合的立面二维水温模型能够较好地反映存在支流影响的水库水温分布。采用简化的耦合模型具有计算稳定、收敛性好等特点。此预测模型的研究结果对制定水库生态用水调度方案和流域开发的环境影响评价提供了科学依据。

参考文献:

- [1] ASCE Task Committee on Turbulence Models in Hydraulic Computations. Turbulent modeling of surface water flow and transport:part 1[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988,114(9) 971-991.
- [2] VAN R,LEO C. Field verification of 2-D suspended sediment model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1990,116(10): 1270-1288.
- [3] 雒文生,周志军.水库垂直二维湍流与水温水质耦合模型[J].水电能源科学,1997,15(3):1-7.
- [4] 芮孝芳,冯平.多支流河道洪水演算方法的探讨[J].水利学报,1990(2) 26-32.

(收稿日期:2005-11-02 编辑:骆超)