

三峡水库近坝区三维流场及温度场的数值模拟

马方凯 江春波 李 凯

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 北京 100084)

摘要 基于三维不可压缩流动的 N-S 方程建立水流水温模型,模型在动量方程中考虑浮力作用并取消了静水压力假定,采用大涡模拟紊流模型计算紊动扩散,并考虑水面散热及其太阳辐射的影响因素,适合于对复杂流态及其有密度分层流动的数值模拟。应用所建立的数学模型对三峡近坝区从庙河至坝前水域的三维流场及温度场进行了数值模拟,计算出的水温分布与坝前观测的水温分布二者符合良好。模拟结果表明,三峡水库在蓄水至 139 m 水位时,垂向没有明显的水温分层,与实测结果相符。

关键词 三峡水库 流场 温度场 大涡模拟 三维数值模拟

中图分类号:TV62+2;TV131.4 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2007)03-0017-04

Numerical simulation of 3D flow field and temperature field near dam area of Three-Gorges Reservoir//MA Fang-kai, JIANG Chun-bo, LI Kai (State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A water flow and water temperature model was developed based on Navier-Stokes equations for 3D incompressible flows. In the momentum equation, the action of buoyancy was taken into account, and the assumption on static pressure was cancelled. With Smagorinsky-Deardorff large eddy simulation model used for calculation of turbulence diffusion and the factors of heat dissipation over water surface and solar radiation taken into account, the model is suitable for numerical simulation of complex flow patterns and flows with layered density. The developed model was applied to numerical simulation of 3D flow field and temperature field of the water area near the Three-Gorges Reservoir, and the water temperature distribution calculated by the model accorded well with that of the observed result. The calculated result also shows that water temperature stratification does not occur in vertical direction at the storage level 139 m of the Three-Gorges Reservoir, and the result is in good agreement with the reality.

Key words: Three-Gorges Reservoir; flow field; temperature field; large eddy simulation; 3D numerical simulation

长江三峡工程是治理和开发长江的关键工程,不仅在保障防洪安全和综合开发利用方面具有举足轻重的作用,而且将对河床河势及生态环境造成直接的影响,尤其是蓄水初期的环境问题将十分敏感。三峡水库蓄水后,由于坝前水位很快升高,流速降低,泥沙淤积,将造成污染物在坝前积聚,坝前的水环境承载力也发生变化。近坝区水域的水质状况及水温分布不仅影响坝前水体的生态环境结构,而且对水库下游水质、水生微生物及鱼类的繁殖生长产生影响^[1]。

目前,对于三峡库首的水温分布特性也已经开展研究工作,针对库首的复杂地形和水流条件,采用二维或三维模型,以垂向一维模型预测结果作为二维或三维模型的水温边界条件^[2],取得了具有参考价值的成果。在天然河流的复杂地形河段、汇流口

附近以及水库坝前部分河段,水体流动的三维特性比较明显,仅仅依靠一维和二维模拟很难准确模拟其流动特性,因此进行流场的三维模拟势在必行。随着计算机及计算技术的发展,三维数值模拟成为可能,并得到迅速发展^[3]。石荣荣等采用雷诺应力模型对复式河漫滩水流进行了三维数值模拟,计算结果与实验结果符合较好^[4]。申满斌等建立了考虑泥沙吸附和泥沙冲淤对污染物输移扩散影响的岸边排放污染物浓度场三维浑水水质模型,并模拟了三峡库区涪陵磷肥厂排污口附近的总磷浓度场^[5]。

本文计算了三峡水库蓄水初期庙河断面至三峡大坝坝前约 18 km 江段的流场和温度场,建立了基于正交矩形网格的有限体积法和大涡模拟紊流模型的三维数学模型,模型考虑了水表面日辐射等气象条件。采用美国陆军工程公司水槽温差异重流的试验

数据 对模型进行验证。利用该数学模型模拟了 2004 年 1 月到 12 月间坝前水域的三维流场及温度场。

1 数学模型

流体运动的连续方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\alpha u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g \delta_{i3} \tag{2}$$

温度方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\alpha u_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{H}{\rho C_p} \tag{3}$$

式中： i 为自由指标 ($i = 1, 2, 3$)； j 为求和指标 ($j = 1, 2, 3$)； δ_{i3} 为单位张量 ($i = 3$ 时 $\delta_{i3} = 1$, $i \neq 3$ 时 $\delta_{i3} = 0$)； u_j 为坐标 x_j 方向的流速分量； p 为动水压力； T 为温度； ν_{ij} 为紊动黏性系数 (i', j' 为非求和指标)； K_j 为 x_j 方向的紊动热扩散系数； ρ, ρ_0 分别为水体密度和水体基准密度； g 为重力加速度。

水的密度与温度之间的关系，可以通过有关公式确定。紊动黏性系数和紊动热扩散系数根据 Smagorinsky-Deardorff 大涡模拟公式计算：

$$\nu_{ij'} = C_L^2 \Delta x_{i'} \Delta x_{j'} \left[D^2 - \gamma g \alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right]^{1/4} \tag{4}$$

$$K_j = \alpha C_L \Delta x_{j'} \left[D^2 - \gamma g \alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right]^{1/2} \tag{5}$$

式中： $\Delta x_{j'}$ 为网格尺寸； C_L 为模型常数， $C_L = 0.23$ ； α 为模型常数， $\alpha = 0.21 \times 10^{-3}$ ； D 为速度变形率； γ 为模型参数。

通过 3 个方向的动量方程对空间求导并利用连续条件得到关于压力的泊松方程，从该泊松方程中隐式求解压力，流速通过 3 个动量方程显式求解。对于温度方程，利用 Crank-Nicolson 格式进行求解。数值格式为有限体积法。计算网格为构造性网格，对于导数项的离散相当于差分方法，具有概念明确、计算简便的特点。

2 模型验证

美国陆军工程公司的 Johnson 于 1980 年在水库试验水槽上进行试验^[6-7]，模拟重力流下潜过程。该水库模型长 24.39 m，深度从入口的 0.3 m 逐渐变化至坝址处的 0.91 m。横断面形状变化可分为两段，前一段长 6.1 m，底部水平，宽度从 0.3 m 线性变化至 0.91 m。后一段宽度恒定为 0.91 m，底部在 18.29 m 的长度上降低了 0.61 m。水槽的入口和出

口均距底部 0.15 m。水库中先充满 21.44℃ 的水，然后将 16.67℃ 的冷水从入口引入水库，入流流量为 0.00063 m³/s，见图 1。

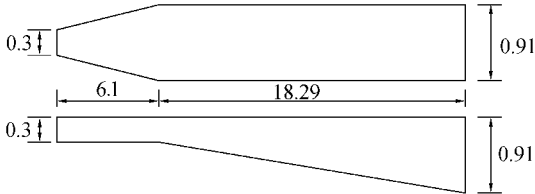


图 1 试验水槽模型 (单位：m)

Johnson 等比较了 2 种三维模型和 3 种二维模型模拟结果，并推荐二维 LARM 模型作为计算模型。四川大学的邓云等建立了 $\kappa-\epsilon$ 模型，模拟结果与 Johnson 的模拟结果以及试验结果进行了比较^[8]。本文计算中在入口处给定流量和入流水温，出口各变量梯度为零。计算初始时刻全场流速为零。采用规则交错网格，将整个水库模型划分为 $71 \times 22 \times 49$ 个单元。计算时段为 50 min，时间步长取 0.5 s，计算结果见图 2。

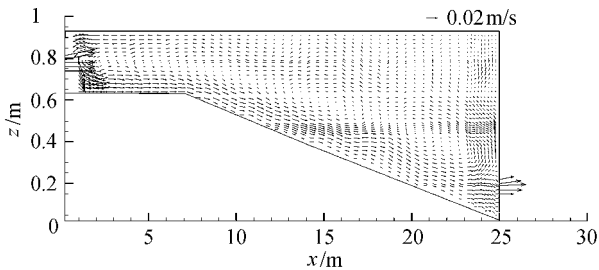


图 2 $t = 50$ min 时的流场

从图 2 可以看出，在冷水下潜过程中，底部冷水层向下游运动速度很快，而上层水体则出现了反方向涡流。

图 3 将第 11 min 时距入口 11.43 m 的中垂线上纵向流速分布的试验值与实测值以及文献 [8] 的计算结果相比较。本文所采用的 LES 模型计算结果介于 $\kappa-\epsilon$ 模型与 LARM 模型之间，沿着水槽底部最大流速在 0.03 m/s 左右，水槽上部反向流速为

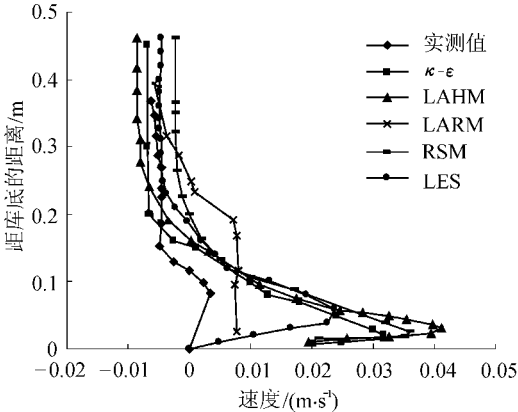


图 3 第 11 min 距入口 11.43 m 的中垂线上纵向流速分布比较

0.01 m/s 的量级。计算得到的流速与已有计算结果和实验观测值基本相符。

3 三峡近坝区流场及温度场

本文计算区域为大坝至上游的庙河断面,总计算长度大约为 18 km,采用规则交错网格离散计算区域,网格尺寸为 200 m × 100 m × 10 m,在坝前 2 km 范围内加密网格,加密后网格尺寸为 100 m × 50 m × 10 m。本文计算时段为 2004 年 1 月至 12 月,计算时间步长取为 5 s。

三峡水库蓄水初期计算时段内,水位低于 139 m,计算水位采用坝前实测水位,水面采用刚盖假定,同时在水面上考虑热量交换,进口边界流量及入流水温值均由进口庙河断面的实测资料给出,在出口位置给出速度和温度零梯度条件。

2004 年的大坝泄水方式主要为泄洪坝段的深孔出流和左岸电站出流。泄洪坝段位于河床中央,长 483 m,分 23 个坝块,在每个坝段中部设 7 m × 9 m 的泄洪深孔,进水口底高程 90 m。左岸厂房坝段包括 14 台水轮发电机组坝块和 1 个中间安装场坝块,长约 572 m,电站引水压力管道直径为 12.4 m,进水口底高程 110 m。计算出口处单个网格面积为 50 m × 10 m,根据面积等效的原则,参考实际大坝泄水调度情况,将泄水孔概化到离散网格上,概化情况见表 1。通过数值模拟所得到的三峡水库坝前水域表层的流场图如图 4 和图 5 所示。可以看出 2004 年 1 月到 12 月主流位置均偏于左岸,1 月到 3 月尤其明显,这是由现在的大坝实际运行情况决定的。坝前右岸附近水域存在较大漩涡。大坝附近的流态具有比较明显的流动不对称性。

表 1 出流边界的孔口分布 个

月份	泄水部位孔数		概化孔口数	
	发电孔口	深孔	左岸坝段	泄洪坝段
1	5		1	
2	5		1	
3	6		1	
4	8		2	
5	8	1	2	
6	8	7	2	1
7	8	12	2	1
8	9	10	2	1
9	10	20	2	2
10	10	6	2	1
11	10		2	
12	8		2	

分析三峡水库坝前水域的温度场分布可以得到以下结论：

a. 气温变化对水温的影响。计算表明同一层水体温度相差不大,保持在 0.3℃ 范围之内。本课题

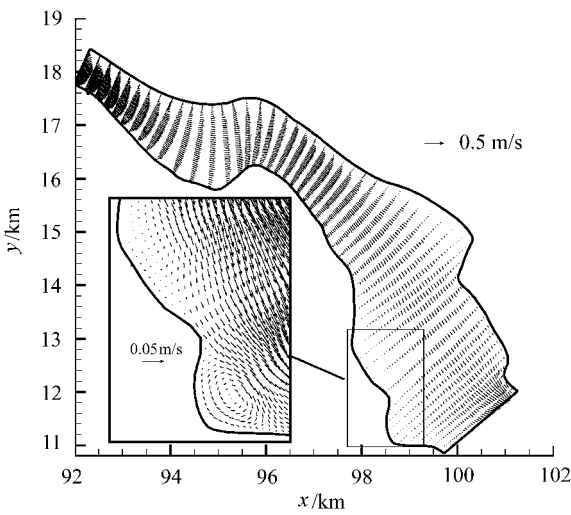


图 4 3 月末表层流场

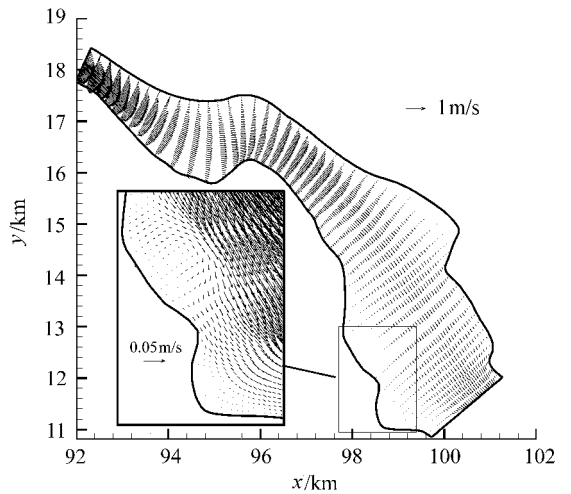


图 5 9 月末表层流场

计算时段为 2004 年 1 月至 12 月,气温相差比较明显,气象条件的变化对表层水温有影响,但不会使水温产生明显的变化。从图 6 可以看出如果气温较高,表层水温会逐渐升高,如果气温较低,则表层水温逐渐降低。

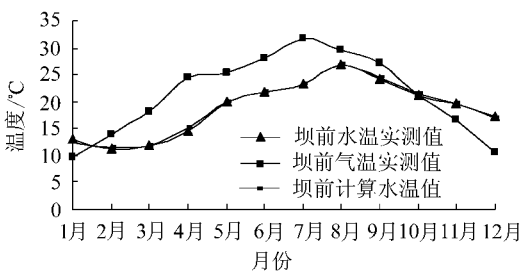


图 6 坝前气温、实测水温与计算水温比较

b. 没有出现温度分层。从表 2 可以看出河道垂向水温基本没有分层,计算结果表明河道垂向水温相差在 0.6℃ 范围之内,与实际河道垂向水温的实测值接近。由于计算只是针对蓄水初期,最高水位为 139 m,水深相对较浅。在计算时段中 6 月份流量达到 20000 m³/s,比 1 ~ 2 月份流量大 4 倍左右,气

表 2 2004 年坝前断面中间垂线各月末计算水温 ℃

水位/m	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
表层	12.6	11.5	11.8	15.4	20.0	21.8	25.7	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0
130	12.6	11.5	11.8	15.2	20.0	21.8	25.6	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0
120	12.6	11.5	11.8	15.0	20.0	21.8	25.6	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0
110	12.6	11.5	11.8	15.0	20.0	21.8	25.6	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0
100	12.6	11.5	11.8	15.0	20.0	21.8	25.5	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0
90	12.6	11.5	11.8	14.9	20.0	21.7	25.5	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0
80	12.6	11.5	11.8	14.9	20.0	21.7	25.5	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0
70	12.6	11.5	11.8	14.8	20.0	21.5	25.5	25.7	23.5	20.2	19.4	17.0

温较高时期对应的流量也较大 ,不易形成水温分层。实际计算也证实了这一结论。

c. 与观测值的比较。坝前断面水温监测设 3 条垂线 ,每个垂向设若干个采样点 ,按相对水深均匀布设。在图 6 中 ,将坝前断面中间垂线上水表面采样点的计算水温值与观测值进行比较 ,两者符合良好。

4 结 语

利用所建立的水流水温模型模拟了从 2004 年 1 月开始蓄水至 2004 年 12 月这一时段内的水流水温分布 ,并将模拟结果与观测结果进行对比分析 ,得出以下结论 :① 计算水温与坝前观测水温符合良好。② 三峡水库在蓄水达 139 m 水位时 ,垂向没有明显的水温分层 ,与实测结果相符。而同一层的水体水温相差也不大。③ 气象条件的变化仅对表面水体有影响 ,且影响不大 ,表面水温随气温升高而略有升高 ,随气温降低而略有降低。

三峡水库蓄水初期 ,流速降低明显 ,尤其是现状大坝运行方式导致近坝区域右岸流速很低 ,将造成污染物在坝前积聚 ,流速、水温和营养物质浓度这些控制因子的变化将会影响坝前水域藻类、鱼类的繁殖生长。三峡水库建成后 ,蓄水位将达到 175 m ,水

库内是否会发生水温分层是值得关注的问题。

参考文献 :

[1] 黄真理 ,李玉樛 . 三峡水库水质预测和环境容量计算 [M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2003.

[2] 熊伟 ,李克锋 ,邓云 ,等 . 二维耦合温度模型在三峡水库水温中的应用研究 [J]. 四川大学学报 :工程科学版 ,2005 37(2) 22-27.

[3] 韩国其 ,许协庆 . 天然水流三维数值模拟的进展 [J]. 水利水电科技进展 (河海科技情报) ,1989 9(1) :13-22.

[4] 石荣荣 ,刘兴年 ,杨克君 . 复式水槽漫滩水流的三维数值计算 [J]. 水利水电科技进展 ,2006 26(2) :13-16.

[5] 申满斌 ,陈永灿 ,刘昭伟 . 岸边排放污染物浓度场三维浑水水质模型研究 [J]. 水力发电学报 ,2005 24(3) 93-98.

[6] JOHNSON B H. A review of multidimensional reservoir hydrodynamic modeling[C]//STEFAN H F. Surface Water Impoundments : Proc of the Symp on Surface Water Impoundments . New York :ASCE ,1980 :497-507.

[7] JOHNSON B H. A review of numerical reservoir hydrodynamic modeling[R]. Vicksburg ,Mississippi :Waterways Experiment Station ,1981.

[8] 邓云 ,李嘉 ,罗麟 ,等 . 水库温差层流模型的研究 [J]. 水利学报 ,2003(7) :7-11.

(收稿日期 2006-11-16 编辑 骆超)

(上接第 8 页)

[16] OTSUKI N ,HISADA M ,RYU J S ,et al. Rehabilitation of concrete cracks by electrodeposition [J]. Concrete International ,1999 21(3) 58-63.

[17] RYU J S ,OTSUKI N. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique [J]. Cement and Concrete Research 2002 32(1) :159-164.

[18] HILBERTZ W. Mineral accretion of large surface structure , building components and elements :US A4246075[P]. 1981-01-20.

[19] HILBERTZ W. Repair of reinforced concrete structures by mineral accretion :US A440605[P]. 1984-04-13.

[20] RYU J S ,MONTEIRO P. Electrodeposition as a rehabilitation method for concrete materials[J]. Canadian Journal of Civil Engineering 2004 31(5) :776-781.

[21] 余建初 ,李卓球 . 碳纤维增强混凝土中钢筋的阴极保

护研究 [J]. 武汉理工大学学报 :信息与管理工程版 ,2003 25(3) :138-140.

[22] 张华 ,李卓球 ,宋显辉 . 碳纤维增强混凝土裂纹的钝化试验研究 [J]. 混凝土 ,2003(5) 22-24.

[23] 蒋正武 ,孙振平 ,王玉吉 ,等 . 电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的可行性研究 [C]//赵铁军 ,李秋义 . 第六届全国高强与高性能混凝土会议论文集 . 北京 :中国建材出版社 ,2004 :139-144.

[24] 蒋正武 ,孙振平 ,王培铭 . 电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的机理 [J]. 同济大学学报 :自然科学版 ,2004 ,32(11) :1471-1475.

[25] 蒋正武 ,孙振平 ,王培铭 . 电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的试验研究 [C]//全国第六届混凝土结构耐久性学术交流会论文集 . 北京 :中国交通出版社 ,2004 :473-479.

(收稿日期 2006-09-15 编辑 骆超)