

文章编号: 1006-4710(2011)02-0224-06

基于能量方程的柏叶口水库三维流场的模拟研究

王彦芳¹, 冯民权¹, 郑邦民², 范世平¹, 王少旋¹

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 采用基于能量方程的条带分析方法, 对矩形河槽流速进行了模拟, 在对模拟结果进行验证之后, 将模型应用在拟建柏叶口水库三维流场研究中。通过适体坐标变换生成水库曲线型计算网格, 将生成的曲线型网格细化、分层、分条带, 最后用基于能量的方程进行一维、二维和三维的流场计算。整个模拟过程易于编程实现, 并可通过设置网格的疏密程度, 有效控制流场的计算精度。该方法可推广应用于其他水库的流场计算、水库三维温度场和污染物浓度计算。

关键词: 柏叶口水库; 数值模拟; 元流; 适体坐标; 流场

中图分类号: TV131

文献标志码: A

Numerical Simulation of 3-D Flow Field in the Baiyekou Reservoir Based on Energy Equation

WANG Yanfang¹, FENG Minquan¹, ZHENG Bangmin², FAN Shiping¹, WANG Shaoxuan¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology of Education Ministry,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Water Resource and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The stripebelt analysis method based on energy equation is adopted to simulate the flow speed of rectangular river channel. After the simulated results are tested, the model is used to simulate the 3-D flow field of Baiyekou reservoir to be built. The reservoir curved type computation grid is generated via the changes in a boundary-fitted coordinate. The generated curved-type grid can be fined, stratified and striped. Finally, the equation based on energy is used to carry out 1-D, 2-D and 3-D flow field calculation. The calculated flow field accuracy can be effectively controlled via the setting-up of the looseness and compactness degrees of grids. The whole simulation process is easily realized via programming and the accuracy can be effectively controlled. Accordingly, this method can be extended in the application of flow field calculation of other reservoirs, reservoir 3-D temperature field and pollutant concentration calculations.

Key words: Baiyekou reservoir; numerical simulation; element flow; boundary-fitted-coordinate; flow field

水库具有防洪、发电、灌溉, 以及给水资源缺乏地区供水等作用, 但建成的水库对库区所在地区的自然环境也会造成一定的影响, 如气候、水质和生物种类及分布。因此, 针对水库的相关研究有很多^[1-7]。在水库三维数值模拟的研究过程中, 常常会涉及到库区流场分布计算, 因此对水库流场进行

研究有很大意义。马方凯等基于三维不可压缩流动的 N-S 方程建立水流水温模型, 应用所建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^[3]。董延超等采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型对大伙房水库主溢洪道三维流场进行了模拟, 得到流场分布规律, 数值模拟结果与物理实验

收稿日期: 2010-11-18

基金项目: 山西省科技攻关计划基金资助项目(201008)。

作者简介: 王彦芳(1983-), 女, 河北巨鹿人, 硕士, 研究方向为环境模拟与污染控制。E-mail: wang055250@yahoo.com.cn。

冯民权(1964-), 男, 山西永济人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为环境模拟与污染控制、流域生态环境修复。

E-mail: mqfeng@xaut.edu.cn。

结果相吻合^[7]。陈群等采用 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型，成功地对鱼背山水库岸边阶梯溢洪道流场进行了三维紊流数值模拟，并得到了溢洪道沿程的速度大小及分布^[8]。采用上述模拟方法计算水库三维流速时，需要求解很多相关二维、三维方程，使得整个模拟计算及编程过程十分繁琐复杂，且工作量很大。本文采用简化三维问题的办法，以拟建的柏叶口水库为研究对象，基于能量方程，把库区计算网格分层分条带，逐个计算库区流速。

1 理论基础

1.1 适体坐标 (Boundary-Fitted-Coordinate) 变换

适体网格系统系是一种曲线坐标系，它的曲线坐标线可以与物理边界重合，如图 1 所示。适体坐标变换在二维数值模拟中很常见^[9-10]，在水库三维数值模拟中使用较少。

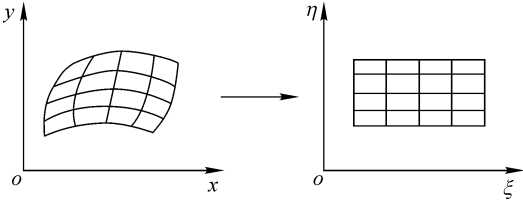


图 1 适体坐标变换示意图
Fig. 1 Transformation of the BFC method

为了使用适体坐标变换，假定三维空间上任意一点的向径为 \vec{r} ，笛卡尔坐标 (x, y, z) 表示物理空间 x^j ，任意曲线坐标 (ξ, η, ζ) 表示计算空间 ξ^i 。则有：

$$\begin{aligned} \vec{r} &= \vec{r}(\xi, \eta, \zeta) = \vec{r}(\xi^i) = \\ \vec{r}(x, y, z) &= \vec{r}(x^j) \end{aligned} \tag{1}$$

本文中令 ξ, η 为自变量，求其等值线对应的 (x, y) 点的值，解泊松方程式 (2) 或拉普拉斯方程得到式 (3)。

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi &= \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial \xi^i} \left(\sqrt{g} g^{ij} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi^j} \right) = 0 \tag{2} \\ \begin{cases} g^{ij} \frac{\partial^2 x^k}{\partial \xi^i \partial \xi^j} + F^j \frac{\partial x^k}{\partial \xi^j} = Q^k \\ F^j = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (\sqrt{g} g^{ij}) \\ \sqrt{g} = |g^{ij}| \end{cases} \tag{3} \end{aligned}$$

式中， g^{ij} 为逆变度量张量，且有：

$$g^{ij} = \alpha_i^k \alpha_j^k \tag{4}$$

数值计算中，使用：

$$\begin{cases} g_{11} = x_\xi^2 + y_\xi^2 + z_\xi^2 \\ g_{22} = x_\eta^2 + y_\eta^2 + z_\eta^2 \\ g_{12} = g_{21} = x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta + z_\xi z_\eta \end{cases} \tag{5}$$

则有：

$$g^{ij} = (g_{ij})^{-1} \tag{6}$$

用此法可得到原物理空间点 (x, y, z) 和坐标变换后的空间点 (ξ, η, ζ) 一一对应的变换关系。

1.2 能量方程

流束的能量方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} + g \cdot J_s = 0 \tag{7}$$

对方程 (7) 积分得到：

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = (z_2 + \frac{u_2^2}{2g}) + h_w \tag{8}$$

式中， u 是三维流场中的点流速； s 是水流断面距离； J_s 是能坡； h_w 是总流能量损失，即计算出的总能量损失，包括沿程损失 h_f 和阻力损失 h_i 。

$$h_w = h_f + h_i \tag{9}$$

给定初始断面上的总流量 Q ，用不同断面上的平均比降 J_s 的变化，表示不同断面间的能量损失，计算出每个断面的 J_s ，有：

$$J_s = \frac{Q^2}{A^2 C^2 R} \tag{10}$$

式中， A 为断面面积， C 为谢才系数， R 为水力半径。

如图 2 所示，用公式 (11) 推导出流量 Q 和最大流速 u_m 的关系，则给定断面总流量 Q ，便可确定出断面上任一点流速。

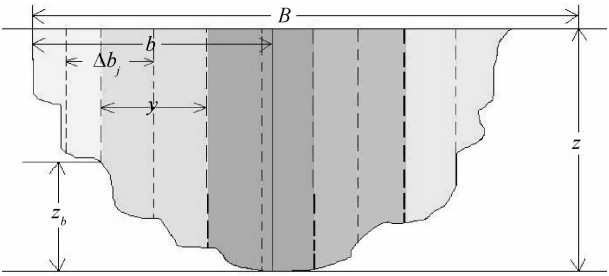


图 2 水流计算断面示意图
Fig. 2 The schematic of section of flow calculation

$$\begin{cases} h = z - z_b \\ B = b + b \\ q = u \cdot h \\ Q = \sum_{j=1}^n q_j \cdot \Delta b_j \\ u_{yz} = u_m \left(\frac{z}{h} \right)^{0.142} \\ u_{xy} = u_m \left(\frac{y}{b} \right)^{0.142} \quad (y \leq b) \\ u_{xy} = u_m \left(\frac{B-y}{b} \right)^{0.142} \quad (y > b) \end{cases} \tag{11}$$

式中， B 为断面河宽； b 为断面半宽； z 为水位； z_b 为底

高程; y 为断面上的分条带的距离; h 为水深; u 为流速; u_m 为断面最大流速; q 为分流量; A 为断面面积; Δb_j 为半宽增量。

2 典型算例和模型验证

2.1 典型算例计算

以一假设河槽作为模拟对象,具体计算参数如表 1 所示。根据库区网格节点坐标,将河槽划分为 $76 \times 6 \times 4$ 的计算网格图,具体网格划分结果见图 3。

表 1 断面计算参数

Tab. 1 The calculation parameters of the section

断面类型	槽长 /m	水深 /m	断面流量 /(m ³ /s)	河槽底宽 /m	边坡	糙率
矩形	75	1.46	3.94	2.5	0	0.014

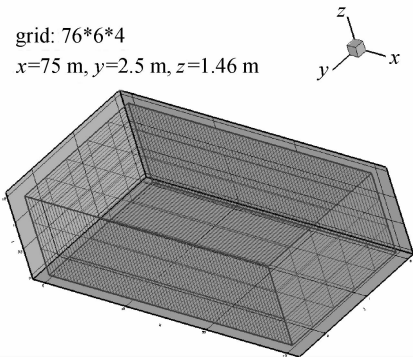


图 3 河槽网格划分图
Fig. 3 The map of mesh generation on river channel

选取河槽长 50 m 处,绘制河槽断面流速分布图,具体结果见图 4 流速等值线分布图。可以看出断面最大流速分布在 0.9 m 水深左右,距离底面越近,流速越小,离壁面越近流速越小。

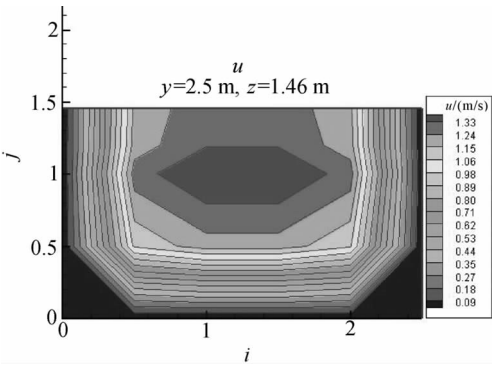


图 4 流速分布
Fig. 4 The map of the velocity distribution

2.2 模型的验证

基于能量方程,计算了河槽断面的流速分布,计算结果是否能满足工程的实际需要,还需对结果进

行验证。
鉴于计算条件与文献[11]中的一致,故选西干渠首的实测数据与本文流速计算结果进行对比验证。具体验证结果如表 2 所示。

表 2 西干渠首断面流速计算值与实测值对比

Tab. 2 The comparison result of the calculated value and the measured value of velocity on cross section of Nishimoto canal head

离右侧渠壁距离/m	相对水深	实测流速 /(m/s)	计算流速 /(m/s)	相对误差 /%
0.1	0.95	0.699	0.641	-8.30
	0.80	0.732	0.724	-1.09
	0.60	0.741	0.773	4.32
	0.40	0.679	0.725	6.77
	0.20	0.589	0.593	0.68
0.7	0.95	1.158	1.140	-1.55
	0.80	1.225	1.223	-0.16
	0.60	1.236	1.272	2.91
	0.40	1.174	1.211	3.15
	0.20	1.052	0.990	-5.89

从表 2 可以看出,计算值与实测值吻合较好,说明本文采用的基于能量方程计算流速分布的方法是可行的。

3 模型的应用

本文以拟建的柏叶口水库为模拟对象,由于缺乏完整的库区地形资料,故选取库长的一部分(720 m)来进行模拟,其中库区总流量 $Q = 1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

将库区划分为 $24 \times 9 \times 4$ 的计算网格,结合库区的地形资料,给定库区网格边界上的网格节点的坐标。最后基于能量方程,进行流速计算。

3.1 库区网格划分结果

库区网格划分结果如图 5 和图 6 所示,其中图 6(a)、(b)、(c)、(d)是空间不同角度上的水库库区模拟图。

由于网格密度可调节,所以可以人为控制计算精度。

3.2 流场模拟结果

通过以下步骤可得柏叶口水库库区的三维速度分布。

1) 给定水库的总流量 Q ,按紊流速度指数分布关系(12),找出 Q 和最大流速 u_m 的关系。

$$\begin{cases} u = u_m (y/b)^{1/n} \\ u = u_m (z/h)^{1/n} \\ Re = 10^n \end{cases} \quad (12)$$

2) 当 Q 和 u_m 关系确定以后,将库区网格计算模型分层、分条带,也就是将三维计算网格转化为二维网格,最终变成一维网格来求解,从而解决三维问题。

3) 基于能量方程,逐个计算网格节点上的流速 u 。从而得到水库三维流场分布。计算中用断面比降 J_s 来表示总流的能量损失。

柏叶口水库流速模拟具体结果(垂直于 z 方向库区表面到库底上的3层流速分布结果)如图7所示,可见库区流速沿水流方向逐渐变小,沿着 z 方向向下,即从库区表面到库底方向流速逐渐变小,每个层面的流速中间较大,并向两侧减少,流速分布定性上符合逻辑。

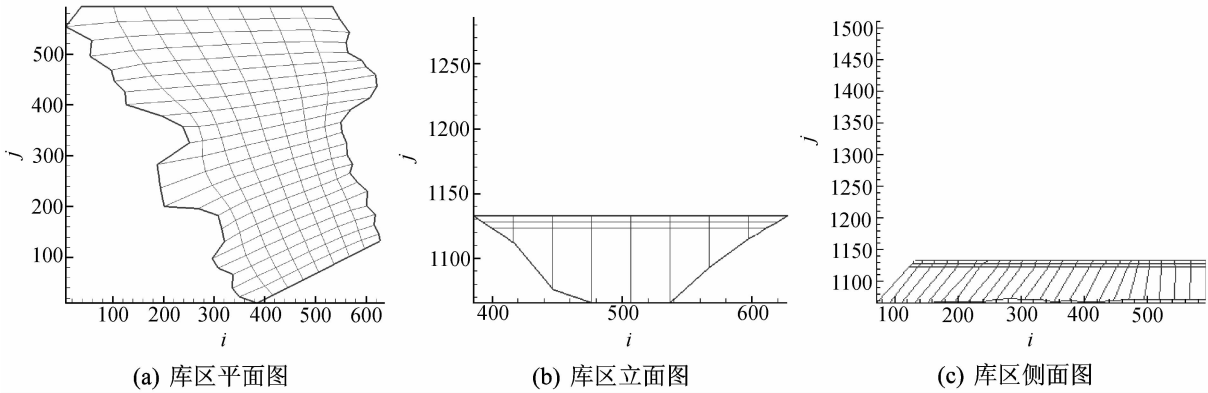


图5 水库库区网格剖分图
Fig. 5 The grid section of reservoir area

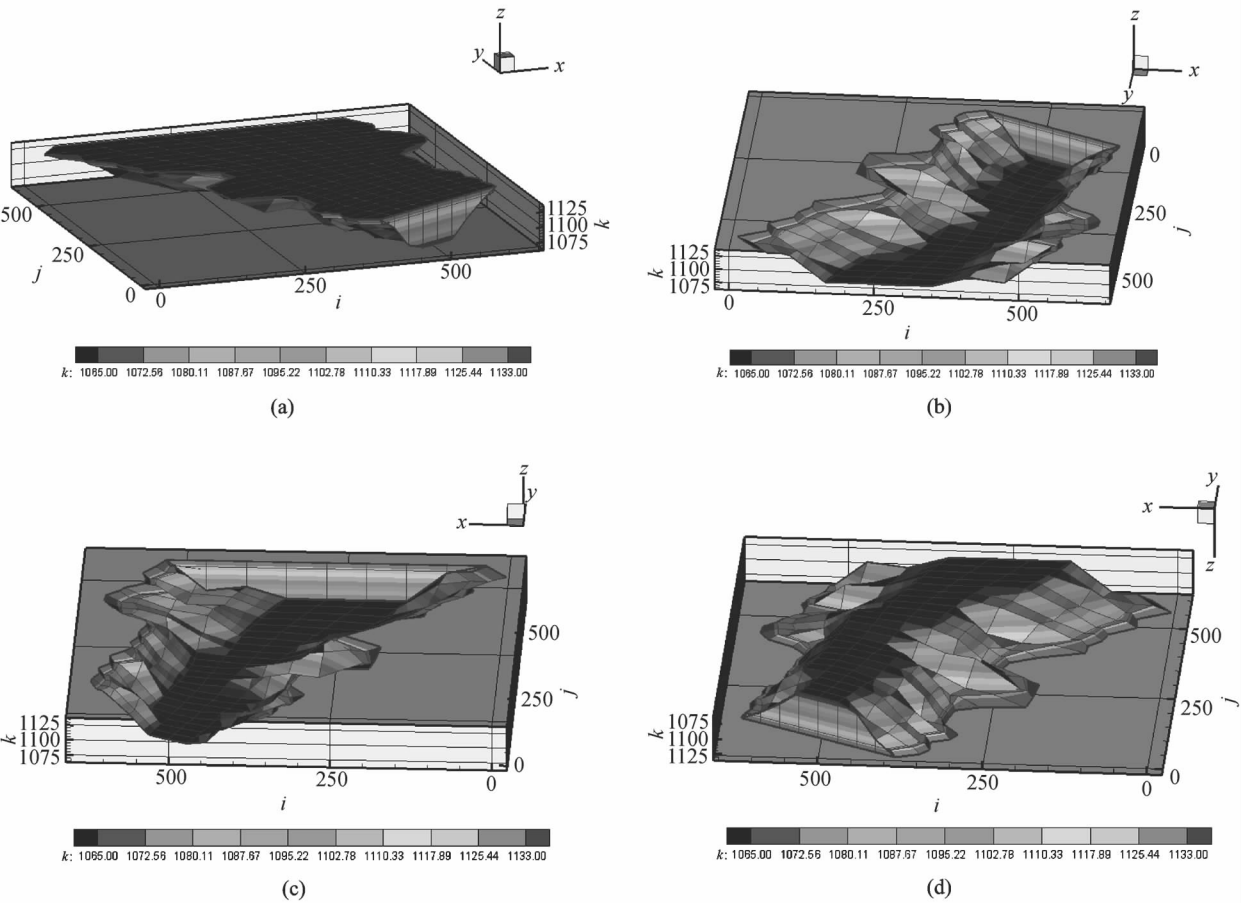


图6 水库库区模型图
Fig. 6 The map of reservoir area model

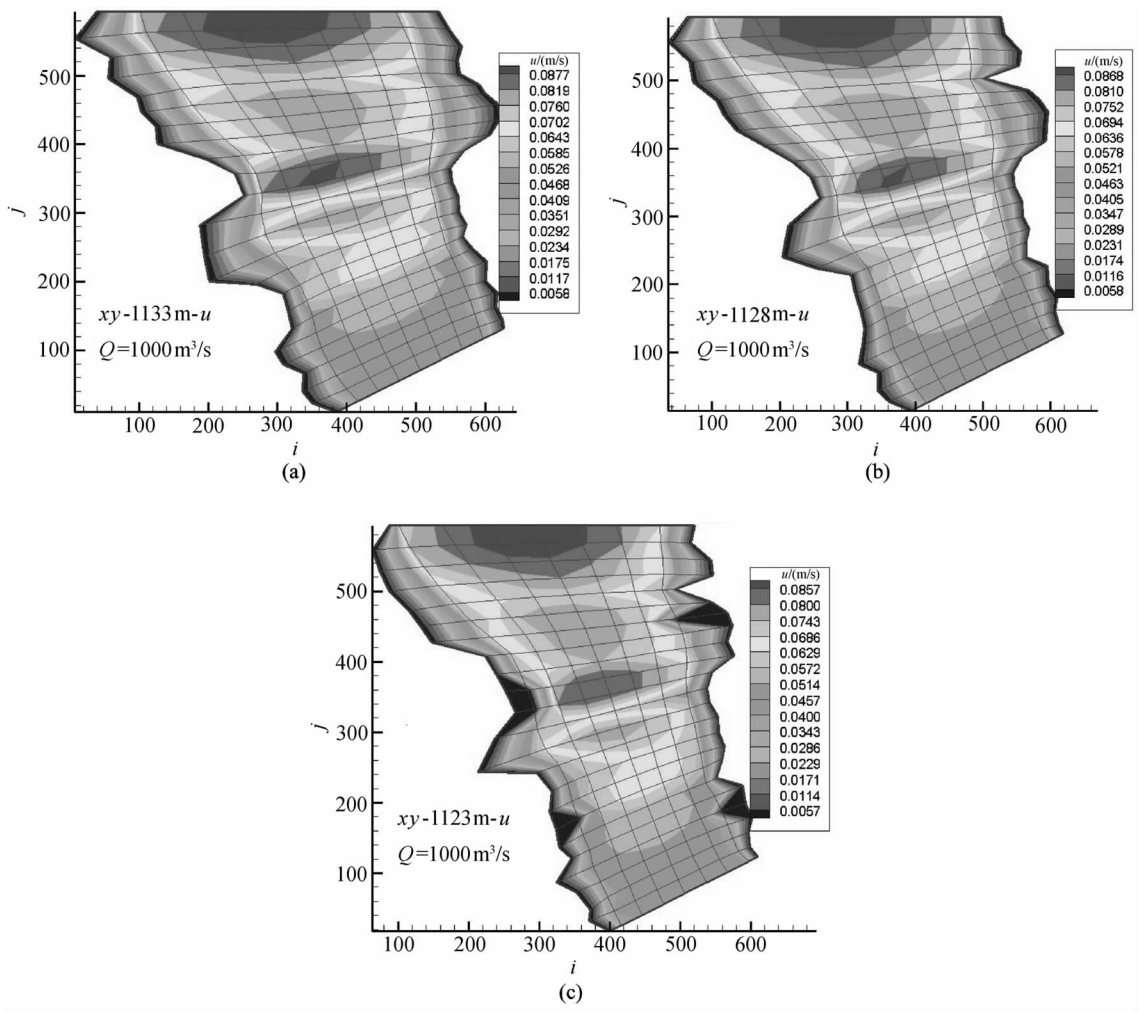


图 7 库区流速分布
Fig. 7 Maps of the velocity distribution of the reservoir area

4 结 论

1) 本文系统地分析了研究所需的理论基础,进行了典型算例的计算验证。通过适体坐标变换以及网格分层、分条带的办法,基于能量方程求得柏叶口水库三维流速的分布。

2) 基于能量方程模拟水库三维流场,流速分布模拟结果定性上符合逻辑,且整个模拟过程易于编程实现且可人为控制精度,该方法可推广应用到其他水库的流场模拟计算中去。

3) 基于能量方程来计算柏叶口水库三维流场的划分网格办法,不仅可以用来模拟流速分布,还可以将此方法应用于其它需要划分网格的模拟计算(如水库三维的温度场和具有取排水口的污染物浓度计算)中去。

参考文献:

[1] 郭磊,高学平,张晨,等. 北大港水库水质模拟及分析

[J]. 长江流域资源与环境,2007,(1):11-16.

Guo Lei, Gao Xueping, Zhang Chen, et al. Analysis and simulation water quality of Beidagang Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, (1):11-16.

[2] 梁瑞峰,李嘉,李克峰,等. 立面二维水库水温模型的并行研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2009,41(1):30-33.

Liang Ruifeng, Li Jia, Li Kefeng, et al. A parallelism study on laterally averaged 2-D reservoir water temperature model[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(1):30-33.

[3] 马方凯,江春波,李凯. 三峡水库近坝区三维流场及温度场的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3):17-20.

Ma Fangkai, Jiang Chunbo, Li Kai. Numerical simulation of 3D flow field and temperature field near dam area of Three-Gorges Reservoir[J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3):17-20.

[4] 张智,龙天渝,谷尘勇,等. 三峡成库后重庆段运行水位

- 流场模拟[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(08): 14-17.
- Zhang Zhi, Long Tianyu, Gu Chenyong, et al. One-dimensional water flow modeling for chongqing region at two typical storage levels in the three-gorges reservoir. [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(08): 14-17.
- [5] 黄程, 邓春光, 朱德军, 等. 三峡水库 175m 蓄水后川维厂排污口污染带预警分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 11098-11100.
- Huang Cheng, Deng Chunguang, Zhu Dejun, et al. Forewarning analysis of Chuanweichang contamination zone around discharge outlet after impounding in Three Gorges Reservoir at water level of 175 meter[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(23): 11098-11100.
- [6] Chatila Jean, Tabbara Mazen. Computational modeling of flow over an ogee spill way [J]. Computers and Structures, 2004, 82(7): 1805-1812.
- [7] 董延超, 郭维东, 杨天恩, 等. 大伙房水库主溢洪道三维流场数值模拟[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(1): 183-185, 188.
- Dong Yanchao, Guo Weidong, Yang Tianen, et al. Three dimensional numerical simulation of main spillway overflow in the Dahuofang Reservoir [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(1): 183-185, 188.
- [8] 陈群, 戴光清. 鱼背山水库岸边阶梯溢洪道流场的三维数值模拟[J]. 水力发电学报, 2002, (3): 62-72.
- Chen Qun, Dai Guangqing. Three-dimensional numerical simulation of the stepped spillway overflows at the Yubeishan Reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, (3): 62-72.
- [9] 茅泽育, 许昕, 王爱民, 等. 基于适体坐标变换的二维河冰模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 214-223.
- Mao Zeyu, Xu Xin, Wang Aimin, et al. 2D numerical model for river-ice processes based upon body-fitted coordinates [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 214-223.
- [10] 介玉新, 揭冠周, 李广信. 用适体坐标变换方法求解渗流[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 52-56.
- Jie Yuxin, Jie Guanzhou, Li Guangxin. Seepage analysis by boundary-fitted coordinate transformation method [J]. Chinese Journals of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 52-56.
- [11] 蔡甫款. 明渠流量测量的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- Cai Pukuan. Study on Some Key Techniques of Open Channel Flow Measurement [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

(责任编辑 王卫勋)

简 讯

西安理工大学水利工程获全国工程硕士教育特色工程领域称号

日前, 根据全国工程硕士专业学位教育指导委员会《关于开展工程硕士研究生教育创新院校评选活动的通知》(教指委[2010]9号)要求, 经专家组评审, 全国工程硕士专业学位教育指导委员会审定与公示, 西安理工大学水利工程领域获得“全国工程硕士研究生教育特色工程领域”荣誉称号。

水利工程领域是我校获批的首批工程领域之一, 在多年的建设与发展过程中, 该领域针对西部地域和行业特点, 依托水利工程国家一级重点学科优势, 强化实践, 突出创新, 构建理论与实践有机结合的研究生专业学位人才培养平台, 培养了一大批扎根西部、锐意进取、基础扎实、专业面广、实践和创新能力强、综合素质高的水利工程一流高级工程师和高层次管理人才。

(摘自西安理工大学新闻网 2011-06-07)