

当温差异重流演进至坝前时,一部分水体从出口出流,另一部分水流则由于大坝的阻隔作用,沿大坝在垂向向上爬升,在坝前形成新的漩涡,由于漩涡中带有较多的低温水,促使低温水与环境水体混合加剧,从而导致坝前水体温度逐步减小。由 $t=20\text{ min}$ 时温度分布图可以看出, 21.0 等温线沿坝体爬升至坝顶,坝前水温下降。随着时间的推移,新的漩涡不断扩张,范围从坝前向水库上游推移,原有的低温水下潜导致的遍及全库区的漩涡逐步减小。坝前上层的低温水反向向上游演进,当上层漩涡遍及全库区时,库区水温整体下降,并且在同一水平高度上趋于同温。在反向漩涡形成和演进过程中,水库底部低温水潜流层仍然保持较高的流速。

由上述分析可以看出,模型较好地模拟了温差异重流在水库中的演进过程,能较好地模拟出温差对紊动的抑制作用导致的潜流层较大流速流动及库区内漩涡的形成、发展和消失,反映了温差异重流演进过程中温度和流场变化的强烈耦合。

3.2 数学模型结果与实测值比较

Johnson在实验中测量了距离入口 11.43 m 的断面中垂线上的纵向流速分布,并监测了出流水温过程,这些实验资料可以作为模型验证和比较的基础^[15]。Johnson在实验的基础上还采用数值模拟对重力下潜流进行了研究,经过多种模型的比选,最终推荐 LARM 模型^[14]。Kapik在 LARM 模型基础上进行改进,摒弃了静水压力假定,提出了适用于水库水温计算的算法,建立了 LAHM 的二维水库水温模型^[16]。

图 5 比较了各模型计算与实测 11 min 时距入口 11.43 m 横断面上中垂线的纵向流速分布。实测结果显示冷水下潜过程中,底部冷水层运动速度很快,而上层水体则出现了反向涡流。由图可以看出,本文模型及 RSM 模型与实测流速均表现出极好的一致性,无论在下潜流的厚度还是在垂向流速分布上都吻合得非常好。而浮力修正的标准模型流速分布特征与实测情况一致,但潜水层厚度较大,潜水层流速较实测结果偏小,上层反向流速偏大。

图 6 给出了各模型计算的下泄水温过程。实测结果显示在 $t=14.6\text{ min}$ 时出流水温开始降低,在 $t=25.6\text{ min}$ 时水温降至 19.4 。RSM 模型出口水温开始降低时间与实测最为接近,滞后约 1.6 min ,其次为本文模型,其出口水温开始降温时间结果较实测降低时间推迟约 2.4 min ,浮力修正的标准模型开始降温时间较实测推迟约 5.0 min 。比较水温下降过程,所有模型计算的水温下降过程均为初始时降温速度较快,陡降后的降温速度又较缓。其中 RSM 模型及本文模型与实测结果最为接近,实测 $t=25.6\text{ min}$ 时出口水温降为 19.4 ,两模型计算下泄水温下降为 19.4 需在 $t=40.0\text{ min}$ 左右,而浮力修正的标准模型在计算 $t=50\text{ min}$ 时,下泄水温为 19.6 ,与实测值有较大的相差。

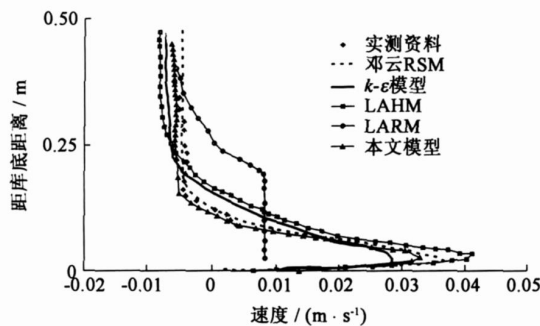


图 5 计算与实测流速分布比较

Fig. 5 Computed and measured velocities

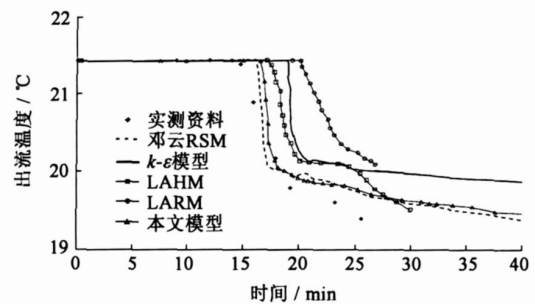


图 6 出流水温随时间的变化过程比较

Fig. 6 Computed and measured temperatures outlet

4 结 论

本文对非线性 RNG k - 模型进行浮力修正建立了各向异性的湍浮力流模型,根据 Johnson 水库温差实验资料对模型进行了验证,并对水库温差异重流的典型演进过程进行了分析。通过典型垂线流速分布、下泄水温过程等实测资料比较验证可以看出,本文模型由于考虑了引入非线性 RNG 模式,能更好地模拟密度流动

的各向异性特性, 计算结果与实测结果较为接近, 模拟精度较高。在模型验证中忽略了表面散热等源汇项对温差异重流的影响, 将该计算模型用于实际工程时, 需根据运输物质的不同情况计入相应的源汇项, 从而满足实际工程需求。

参考文献:

- [1] 华祖林. 湍流模型在环境水力学研究中的应用 [J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 403-411. (HUA Zu-lin. Application of the turbulence model to environmental hydraulics problem [J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 403-411. (in Chinese))
- [2] 邓云, 李嘉, 罗麟, 等. 水库温差异重流模型的研究 [J]. 水利学报, 2003(7): 7-11. (DENG Yun, LI Jia, LUO Lin, et al. Temperature prediction model for reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7): 7-11. (in Chinese))
- [3] ROD IW. Turbulence model for environmental problems [C] // Prediction Methods for Turbulent Flows. Kolmann: Hemisphere Publishing Cooperation, 1980: 260-349.
- [4] RABB IT M J. Some validation of standard, modified and non-linear k -turbulence models [J]. Int J Numer Methods Fluids, 1997, 24: 965-986.
- [5] MOMPEAN G. Numerical simulation of a turbulent flow near a right-angled corner using the Speziale non-linear model with RNG-equations [J]. Comput Fluids, 1998, 27(7): 847-859.
- [6] TUTAR M, HOLD A E. Computation modeling of flow around a circular cylinder in sub-critical flow regime with turbulence models [J]. Int J Numer Methods Fluids, 2001, 35: 763-784.
- [7] 崔占峰, 张小峰, 冯小香. 丁坝冲刷的三维紊流模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(1): 33-41. (CUI Zhan-feng, ZHANG Xiao-feng, FENG Xiao-xiang. Numerical simulation on scour around spur-dike by 3D turbulent model [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2008, 23(1): 33-41. (in Chinese))
- [8] 焦爱萍, 刘沛清, 刘宪亮. 基于计算流体动力学的不同流量比两股射流水垫塘的消能特性研究 [J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 238-244. (JIAO Ai-ping, LIU Pei-qing, LIU Xian-liang. Study on energy dissipation of two-jet with varying discharge ratio on a plunge pool based on computational fluid dynamics [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 238-244. (in Chinese))
- [9] 尹则高, 拾兵, 赵林, 等. 洞塞式消能工的数值模拟 [J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 89-93. (YIN Ze-gao, SHI Bing, ZHAO Lin, et al. Numerical simulation of plug energy dissipater flow [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 89-93. (in Chinese))
- [10] 杨中华, 槐文信. 采用 RNG 紊流模型计算静止环境中圆形负浮力射流 [J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 760-764. (YANG Zhong-hua, HUA Wen-xin. Simulation the negatively buoyant jet in stratic ambient by RNG turbulence model [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 760-764. (in Chinese))
- [11] SPEZIALE C G. On Nonlinear and models of turbulence [J]. J Fluid Mech, 1987, 176: 459-475.
- [12] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 194-254. (TAO Wen-quan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988: 194-254. (in Chinese))
- [13] JOHNSON B H. A review of multidimensional reservoir hydrodynamic modeling [C] // Proc of the Symp on Surface Water Impoundments. [s. l.]: ASCE, 1980: 497-507.
- [14] JOHNSON B H. A review of numerical reservoir hydrodynamic modeling [R]. Vicksburg: US Army Engr Waterways Experiment Station, 1981.
- [15] 邓云. 大型深水库的水温预测研究 [D]. 成都: 四川大学, 2003: 46-64. (DENG Yun. Study on the water temperature prediction model for the huge and deep reservoir [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003: 46-64. (in Chinese))
- [16] KARPIK S R, RA IHB Y G D. Laterally averaged hydrodynamics model for reservoir predictions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(6): 783-798.

An an isotropic buoyant turbulence model and its validation *

LU Jun-qing¹, ZHANG Xiao-feng², CUI Zhan-feng³

(1. South China Institute of Environmental Science, Guangzhou 510655, China;

2. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan university, Wuhan 430072, China;

3. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: A 3D numerical model combining the *Re*-Normalization Group (RNG) *k*- turbulent model, the buoyant correction and the non-linear Reynold stress model is developed to simulate density current, and suitable for solving the anisotropic flow problems. The evolution of the density current formed by temperature variance in reservoirs is simulated by the model. The simulated velocity distribution and temperature variation are compared well with the observations. The result indicates that the model can capture the nonisotropical characteristics of the density current effectively, simulate the exact flow field as well as the temperature distribution accurately, and predict the time interval between the density current's stratification and diving process precisely.

Key words: numerical simulation; density current; anisotropic; turbulence model

《水科学进展》编辑委员会两位委员新当选院士

中国工程院和中国科学院 2009 年院士增选结果在京揭晓,《水科学进展》编委会委员、主编张建云教授当选中国工程院院士,编委会委员王光谦教授当选中国科学院院士。至此,《水科学进展》第二届编辑委员会 49 位委员中已有 18 位两院院士。

张建云教授长期从事水文、防汛抗旱、气候变化影响、水利水电信息化等科研工作。曾长期从事和负责全国水文情报预报工作,研究并主持开发了“全国洪水预报系统”、“国家防汛会商系统”、“防汛抗旱水文气象综合信息系统”等一系列业务系统,为国家防洪抗旱调度决策和指挥提供科学依据和技术支撑。主持国家防汛抗旱指挥系统工程设计和一期工程建设的 technical work,构建了国家防汛抗旱减灾决策平台,提升了全国防汛抗旱决策指挥水平,推动了全国水利信息化。该工程在近年的防汛抗旱工作中发挥着重要的作用。在洪水预报理论研究及应用、气候变化对水文水资源影响评估和适应研究、设计暴雨和设计洪水应用研究等方面取得重要研究成果。主持编写了《水文情报预报规范》、《水文自动测报系统规范》等国家、行业技术标准和国家防汛抗旱指挥系统工程一系列标准规范和技术规程,推动了行业技术进步,培养了一大批专业人才。主持完成国家科技攻关(科技支撑计划)、863、省部级重大科研项目 20 余项。获国家科技进步一等奖 1 项、二等奖 3 项,省部级一等奖 2 项、二等奖 3 项。

王光谦教授长期从事泥沙学科与江河治理研究工作,开展了水沙两相流基本理论、流域水沙过程动力学模型及工程应用等方面研究。建立了水沙两相流的动力学模型,得出泥沙颗粒浓度分布及速度分布公式,揭示了泥沙颗粒运动与清水湍流的不同特性。建立了流域泥沙动力学模型,实现了河道与流域过程的耦合,将泥沙研究从河流拓展到流域尺度。研究成果应用于解决黄河治理及长江三峡泥沙等关键技术问题。曾获国家科技进步一、二等奖等多项奖励。

(贺瑞敏)

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50909047).