

青草沙水库闸下海漫段加糙体消能效应的数值模拟

翟孟斌, 鞠伟, 丁珏, 李孝伟

(上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

摘要: 为了进一步提高青草沙水库的换水能力, 从雷诺平均 Navier-Stokes 方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流方程出发, 基于流体力学的相关理论和 SIMPLE 算法, 数值模拟加大青草沙水库排水量条件下, 下游水闸闸门下游水流特性以及对底部冲刷效应。结果表明: 在海漫段布置四脚空心块体进行加糙时, 可以调整海漫段近底流速分布, 降低海漫段近底流速, 而且布置四脚空心块体数量越多, 增加糙率的效果越显著。从工程经济角度出发, 在距离海漫段入口 13 m 处布置 2 排交错排列的四脚空心块体、在 35 m 和 57 m 处各布置 1 排四脚空心块体的方案能达到最佳的消能效果。此外, 护面块体间距的减小有利于增大底部的粗糙率和壅高水位, 但是对减小护滩段下游的近底流速并不显著。

关键词: 海漫段; 闸下消能; 人工护面加糙块体; 底部流速; 湍流强度; 青草沙水库

中图分类号: TV653⁺.7

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2013)03-0050-04

Numerical simulation of energy dissipation effects of aprons for sluices of Qingcaosha Reservoir//ZHAI Mengbin, JU Wei, DING Jue, LI Xiaowei (Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS), a standard $k-\varepsilon$ turbulent model, fluid mechanics theories, and the SIMPLE scheme, the motion characteristics and scouring effects of the downstream water of a sluice were analyzed numerically with large drainage discharge to further improve the drainage capability of the Qingcaosha Reservoir. The results show that four-legged rocks positioned on the roughened apron can be used to adjust the distribution of near bed velocity, and to decrease near bed velocity of aprons. The more four-legged rocks there are, the better the roughening effects are. From the viewpoint of the project's economy, the scheme, in which two rows of four-legged blocks are settled 13 m from the inlet of the apron, and rows of four-legged blocks are settled 35 m and 57 m, respectively, from the inlet, can have the best energy dissipation effect. Moreover, a decrease of rock spacing can increase the roughness of the bottom and raise the water level, but does not have much effect on the decrease of the near bed velocity downstream of the beach protection.

Key words: apron; energy dissipation effects for sluices; artificial concrete roughened blocks; near bed velocity; turbulence intensity; Qingcaosha Reservoir

青草沙水源地地处长江口江心部位, 位于长兴岛的西北方。该水源不受陆域排污的干扰, 水量丰富、水质优良, 是上海市难得的优良水源地和城市供水的战略储备。对于上海这座水质型缺水的城市而言, 青草沙水库的建成弥补了其饮用水的缺口。青草沙水库是蓄淡避咸型水库, 其功能主要是非咸潮期自流水入库供水, 咸潮期间通过预蓄水量来满足受水区域的原水供应。青草沙水库上游泵闸、下游水闸和输水泵站的位置见图 1。

青草沙水库及取输水泵闸工程自 2010 年底建成通水至今运行良好, 发挥了原有设计功能。由于

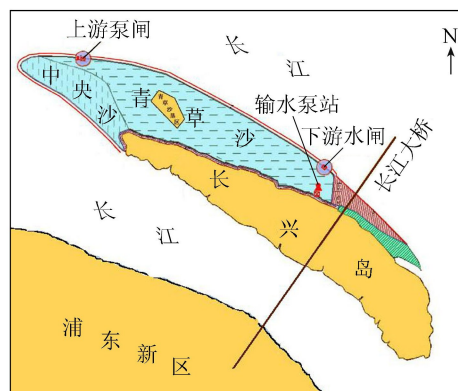


图 1 青草沙水库泵闸工程位置示意图

作者简介: 翟孟斌(1988—), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要从事流体力学研究。E-mail: bangbin122@shu.edu.cn

通信作者: 丁珏(1973—), 女, 江西南昌人, 副研究员, 博士, 主要从事环境力学研究。E-mail: dingjue_lu@shu.edu.cn

是大型水库,在运行中换排水主要依靠下游水闸和输水泵,为了进一步提高水库换水能力,缩短换水周期,设计人员根据青草沙水库现状运行情况的初步分析,提出适当增加下游水闸排水流量的方案。由于排水流量的增加会对下游的海漫段、护滩段造成较大的冲刷作用,因此需要考虑消能方案来降低对下游的冲刷效应。

为了防止闸下冲刷,国内外学者对消能问题已进行了长期而深入的研究。任会^[1]进行了一系列水工模型试验,研究了海漫加糙后对近底流速的影响,以及海漫加糙后的防冲效果。于庆峰^[2]建立了海漫加糙后水流垂向二维数学模型,能迅速模拟出加糙段下游各个截面在垂向上的流速分布情况。郭宪艳等^[3]详细分析了平原地区消能防冲设计中消力池、海漫、防冲槽以及上下游河岸的防护设计方法。韩昌海等^[4]采取模型沙试验,选用在消力池末端设齿坎的辅助消能方案,对青草沙水库下游水闸的消能冲刷进行了试验研究。李鹏飞等^[5]采用弹性较好的环状橡胶圈模拟废旧轮胎,在实验室人工水槽中开展了海漫柔性加糙的试验研究。史国庆等^[6]通过室内水工模型试验,测量了采用废旧轮胎加糙后三维流速的分布。王旺盛^[7]对海漫段加糙下游水流的近底流速降低、冲刷不再加剧的效果进行了模型验证,取得了预期的效果。吴修广等^[8]采用 σ 坐标下垂向二维自由表面流动的双方程湍流数学模型,加入了动水压强项,模拟了带有沟槽的明渠水流的垂向二维流速分布情况。卞华等^[9]采用激光流速仪对二维加糙明渠紊流进行了试验测量,讨论了二维粗糙床面的理论基面当量糙率值的确定问题。

综上所述,加糙海漫段有助于适当降低近底流速,防止下游冲刷。本文从青草沙水库的实际情况出发,采取在海漫段下游水闸底部增加四脚空心块体作为加糙体的消能方案,利用流体力学的相关理论和计算流体力学(CFD)方法开展加大排水量条件下,下游消力池、海漫段、防冲槽、护滩段以及外围区域流速的研究,为青草沙水库下游水闸排水量的增加、控制近底的冲刷效应等技术措施的完善奠定理论基础。

1 湍流理论方程

根据严格描述湍流瞬时量的三维 Navier-Stokes 方程,经过雷诺分解和平均,得到如下控制方程组:

连续方程
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程
$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) - \rho \bar{f}_i \tag{2}$$

能量方程
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i (\rho E + p) \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] + S_h \tag{3}$$

式中: p 为压强; ρ 为密度; $\bar{u}, \bar{p}$ 为流体的平均流速和平均压力; u 为 t 时刻的流速; T 为温度; μ 为黏性系数; $\bar{f}_i$ 为平均质量力; E 为总能; k_{eff} 为有效热传导系数; S_h 为能量源; τ_{ij} 为雷诺应力; u' 为湍流脉动速度; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为由湍流脉动引起的雷诺应力张量。根据 Boussinesq^[10] 于 1877 年提出的涡黏性模型 EVM (eddy viscosity model),雷诺应力项存在以下关系式:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = \tau_{ij} \tag{4}$$

其中
$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

式中: k 为湍流动能, $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$; μ_t 为湍流黏性系数。

本文从雷诺平均的 Navier-Stokes 方程出发,研究三维流场涉及的湍流流动,即采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模式,该模式适用于高雷诺数完全发展湍流流动。此外,采用有限体积法对方程进行离散,基于 SIMPLE 算法开展数值模拟^[11]。

2 几何模型和网格布置

底流消能一般由消力池、海漫段、防冲槽 3 个部分组成。消力池紧接闸室,其作用是促成水跃,并保护地基免受冲刷。海漫段紧接消力池,其作用是继续消除水流的动能,使水流扩散并调整流速分布。在海漫段的末端设置防冲槽来进一步减小冲刷效应。本文根据这 3 部分消能区域,并结合实际情况,对青草沙下游水闸的下游结构进行三维的几何建模。

几何模型通过在海漫段的底部增加人工护面块体的方式达到加糙的效果。常见的人工护面块体有四脚空心块体、扭工字块体、扭王字块体^[12]。本文选取四脚空心块体进行数值模拟研究,如图 2 所示,四脚空心块体高 1.3 m。

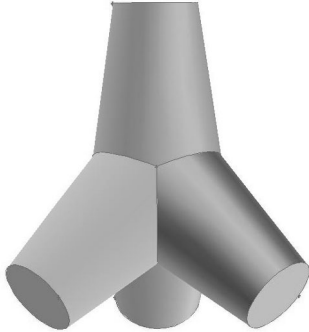


图 2 四脚空心块体示意图

模型设定的水闸出口水流流速为 4 m/s ,其流速是现行实际流速的 2 倍。模拟计算区域为: x 方向(水的流向)主要考察从下游水闸闸口开始至滩面 178 m ; y 方向区域的最大宽度为 191 m ; z 方向水深为 3 m 左右。由于流场存在对称性,因此把流场模型坐标系原点设在水闸出口位置的中心(图 3), y 方向的尺寸选取为水库实际尺寸的一半,从而模拟 $1/2$ 流场。模型的起点也就是下游水闸,位于 $x=0\text{ m}$ 处,宽度 $y=15\text{ m}$;紧接着的是海漫段,长度为 78 m ,宽度 y 由 15 m 线性增加至 35 m ;有抛石保护的护滩处于 x 方向 $78\sim 128\text{ m}$ 之间,宽度 $y=95\text{ m}$;最后是无保护措施护滩,处于 x 方向 $128\sim 178\text{ m}$ 之间,宽度 $y=95\text{ m}$ 。

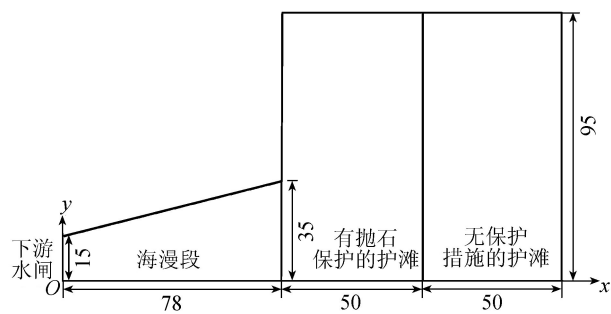


图 3 流场模型平面示意图 (单位:m)

采取非结构化网格布置计算区域,总计约 150 万网格。由于涉及的计算区域较大,为了较好地说明问题,着重对海漫段的流场进行分析。共选取了 9 种方案:①无护面块体;②在距离海漫段入口 13 m 处(即 $x=13\text{ m}$)布置 1 排四脚空心块体;③在距离海漫段入口 35 m 处布置 1 排四脚空心块体;④在距离海漫段入口 57 m 处布置 1 排四脚空心块体;⑤在距离海漫段入口 13 m 和 35 m 处各布置 1 排四脚空心块体;⑥在距离海漫段入口 13 m 和 57 m 处各布置 1 排四脚空心块体;⑦在距离海漫段入口 35 m 和 57 m 处各布置 1 排四脚空心块体;⑧在距离海漫段入口 13 m 、 35 m 、 57 m 处各布置 1 排四脚空心块体;⑨在距离海漫段入口 13 m 处布置 2 排交错排列的四脚空心块体,在 35 m 和 57 m 处各布置 1 排四脚空心块体。图 4 为当四脚空心块体交错排列时,计算区域网格的布置图。

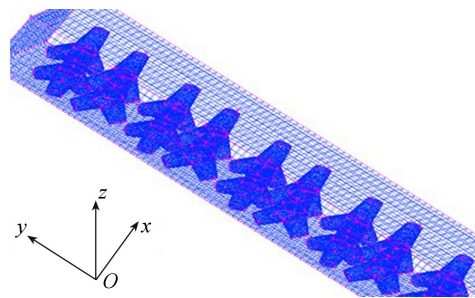


图 4 交错排列时的计算网格布置

3 模拟结果及分析

3.1 护面块体对海漫段流速的影响

对 $y=5\text{ m}$ (靠近对称轴) 以及垂直于主流的截面进行分析,选取 4 个沿流向 x 的截面: 7 m 、 24 m 、 46 m 、 68 m 。

水流流场中垂直流速的分布是闸下防冲和消能的一个判断因素,基于此,图 5 给出了 9 种方案下海漫段流速场的分布情况。可以看出:对于 $x=7\text{ m}$ 的纵向截面,由于流场受到底部护面块体的影响很小,

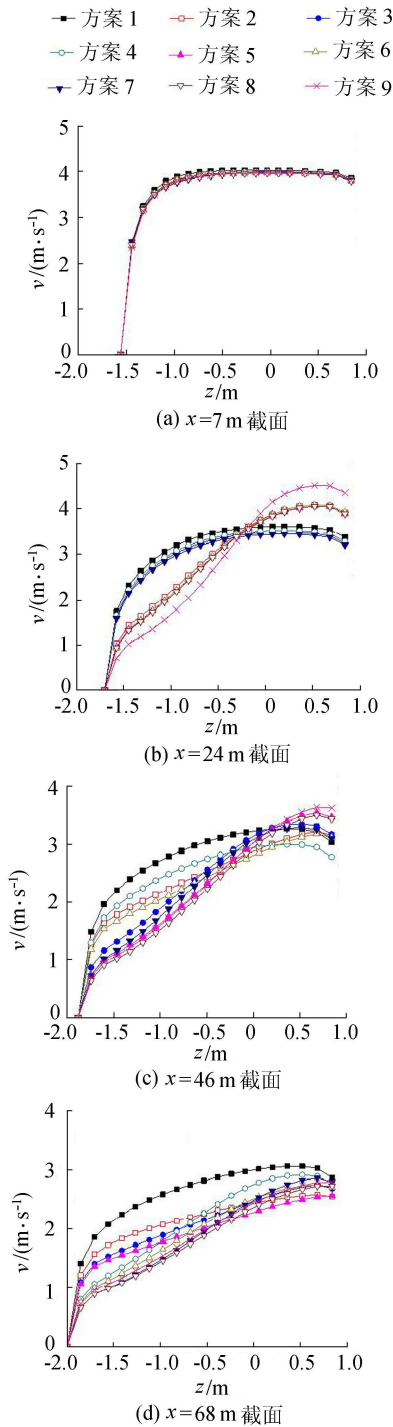


图 5 海漫段垂向流速分布 ($y=5\text{ m}$ 截面)

因此不同方案条件下流场近似一致。其他截面的流场,如 24 m、46 m、68 m 截面,由于受到护面块体的影响,其近底流速发生了明显变化。随着海漫段设置的四脚空心块体数量的增多,近底流速逐渐减小,部分方案中近底流速几乎减小了一半。同时,海漫段 $x = 68\text{ m}$ 截面的流速分布显示:护面块体的间距越大,流场中流速调整越显著,如方案 5 和方案 6 的情况。

图 6 给出了方案 9 流场中不同横向截面的竖向流速分布,可以看出,对于 $x = 68\text{ m}$ 的截面,靠近海漫段横向中心位置的流速较大;远离横向中心位置,流速逐渐减小。

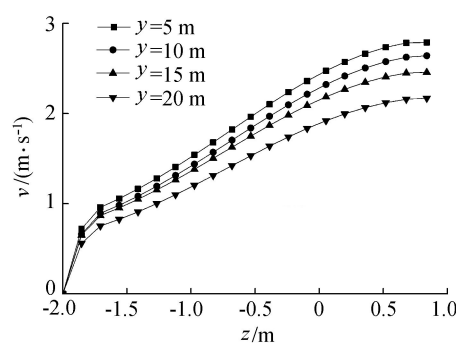


图 6 方案 9 中 $x = 68\text{ m}$ 截面不同位置的垂向流速

湍流强度是湍流脉运速度与流体平均流速的比值,是衡量湍流强弱的相对指标。图 7 给出了 $y = 5\text{ m}$ 的截面不同流向位置流场湍流强度的分布。

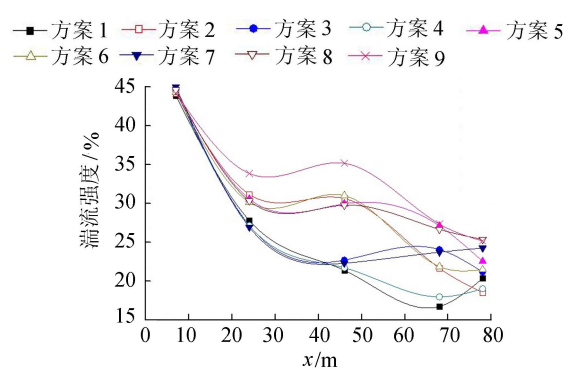


图 7 沿流向位置流场湍流强度的分布 ($y = 5\text{ m}$ 截面)

计算结果显示:随着护面块体排数的增加,水流的紊流强度平均值逐渐增大,说明由于护面块体的增加使得流场的附加切应力增大,消能效率得到提高。采用方案 9,即在海漫段布置 4 排四脚空心块体能达到较好的消能效果。湍流强度的变化则与近底流速变化趋势相反。

3.2 海漫段出口截面的流速分布

图 8 给出了不同方案下海漫段出口截面距流场底部 0.1 m 和 0.5 m 水平线的流速分布情况。可以看出,流场中越靠近底部,水平线上流速越低。

4 结 论

a. 在海漫段布置四脚空心块体进行加糙时,虽

—■—方案 1 —□—方案 2 —●—方案 3 —○—方案 4 —◆—方案 5
—△—方案 6 —▽—方案 7 —◇—方案 8 —×—方案 9

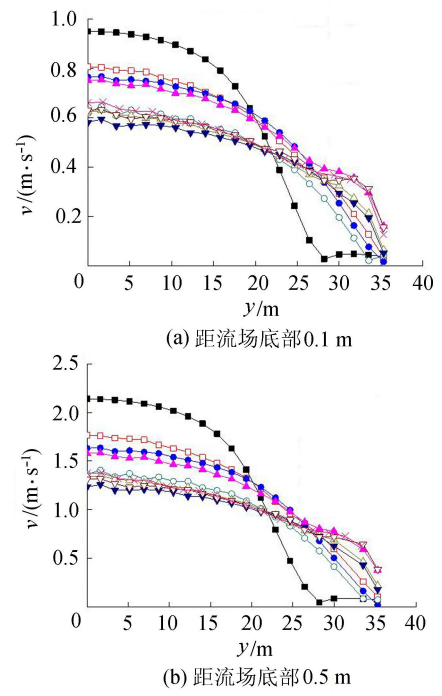


图 8 横向不同水平线上的流速分布

然下游流场截面的平均流速变化不大,但它对海漫段近底流速影响较大,起到了调整海漫下游流速分布,降低海漫段近底流速的目的。同时,随着四脚空心块体排数的增加,水流的紊流强度平均值增大,消能效应增强,可使海漫段近底流速降低近 50%。

b. 海漫段设置四脚空心块体数量越多,增加糙率的效果越显著。基于文中的数值模拟,在海漫段布置 4 排四脚空心块体能达到较好的消能效果,即采取方案 9:在距离海漫段入口距离 13 m 处布置 2 排交错排列的四脚空心块体,在 35m 和 57m 处各布置 1 排四脚空心块体的方案。

c. 四脚空心块体排列的间距影响近底部流速的分布。堆块间距的减小有利于增大底部的粗糙率和壅高水位,但是对减小护滩段下游的近底流速作用不显著。

参考文献:

[1] 任会. 海漫加糙对消能防冲影响机理的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2002.
[2] 于庆峰. 海漫加糙影响下水流垂向二维数值模拟[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.
[3] 郭宪艳,冯硕. 平原地区水闸消能防冲设计探讨[J]. 中国水运,2011,11 (3): 144-145. (GUO Xianyan, FENG Shuo. Design of sluice energy dissipation in plain areas [J]. China Water Transport, 2011, 11 (3): 144-145. (in Chinese))

(下转第 76 页)

- composite grid method (FAC) for elliptic boundary value problems[J]. Math Comp, 1986, 46: 439-456.
- [3] WHITCOMB J D. Iterative global/local finite element analysis[J]. Computers and Structures, 1991, 40(4): 1027-1031.
- [4] 陈文平, 马昌凤, 蒋利华. 组合网格法在搅拌摩擦焊接数值模拟中的应用[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 57-61. (CHEN Wenping, MA Changfeng, JIANG Lihua. Application of composite grid method in numerical simulation of friction stir welding[J]. Journal of Huainan Institute of Technology: Natural Science, 2009, 29(2): 57-61. (in Chinese))
- [5] 郭胜山, 李德玉, 唐菊珍. 水工结构动接触问题的组合网格算法[J]. 水力发电, 2009, 35(5): 24-59. (GUO Shengshan, LI Deyu, TANG Juzhen. A composite grid method of dynamical contact problem in hydraulic structure[J]. Water Power, 2009, 35(5): 24-59. (in Chinese))
- [6] 唐菊珍. 基于 FEPG 的组合网格法与接触问题的 Lagrange 乘子法[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2006.
- [7] 唐菊珍, 马昌凤. 基于有限元自动生成系统 (FEPG) 的组合网格算法[J]. 广西科学院学报, 2007, 23(1): 7-10. (TANG Juzhen, MA Changfeng. A composite grid method based on the system of finite element program generator (FEPG) [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2007, 23(1): 7-10. (in Chinese))
- [8] 孙振波, 朱国荣, 江思珉, 等. 地下水模型的快速自适应组合网格求解方法[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 18-21. (SUN Zhenbo, ZHU Guorong, JIANG Simin, et al. Solving methods of groundwater model with fast adaptive composite grids[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(1): 18-21. (in Chinese))
- [9] 戴妙林, 黄天成, 张胤, 等. 单滑动面岩质边坡数值计算影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 79-81. (DAI Miaolin, HUANG Tiancheng, ZHANG Yin, et al. Influencing factors analysis of numerical calculation for rocky slope with single sliding surface [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(2): 79-81. (in Chinese))
- [10] 周桂云. 基于强度折减的边坡稳定安全系数有限元迭代解法[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 58-61. (ZHOU Guiyun. Finite element iteration method for safety factor of slope stability based on strength reduction method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 58-61. (in Chinese))
- (收稿日期: 2012-06-23 编辑: 熊水斌)

(上接第 53 页)

- [4] 韩昌海, 杨宇, 骆少泽. 青草沙水库下游水闸冲刷及辅助消能研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 49-52. (HAN Haichang, YANG Yu, LUO Shaoze. Study on scouring and supplementary energy dissipation for sluice on lower reach of Qingcaosha Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(3): 49-52. (in Chinese))
- [5] 李鹏飞, 文恒, 杨建雄. 海漫柔性加糙对近底流速影响的研究[J]. 水科学与工程技术, 2005(2): 19-21. (LI Pengfei, WEN Heng, YANG Jianxiong. Study on different relative roughness effect to the velocity of water bottom [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2005(2): 19-21. (in Chinese))
- [6] 史国庆, 文恒, 牟献友. 闸下海漫柔性加糙体消能防冲机理试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 49-52. (SHI Guoqing, WEN Heng, MOU Xianyou. Experimental study on mechanism of energy dissipation and erosion control of aprons for sluices [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 49-52. (in Chinese))
- [7] 王旺盛. 海漫柔性加糙设计方法的研究与防冲效果的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [8] 吴修广, 沈永明, 王敏, 等. 非静压假定的 σ 坐标下垂向二维浅水模型的应用研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 93-97. (WU Xiuguang, SHENG Yongming, WANG Min, et al. Research on the vertical 2-D modeling of shallow water in σ coordinates with non-hydrostatic pressure assumption [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1): 93-97. (in Chinese))
- [9] 卞华, 李福田, 刘长辉, 等. 二维加糙明渠紊流结构的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1998, 26(1): 93-98. (BIAN Hua, LI Futian, LIU Changhui, et al. Investigation on turbulent structures in two dimensional strip roughness flume [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1998, 26(1): 93-98. (in Chinese))
- [10] BOUSSINESQ J. Théorie de l'écoulement tourbillant mem [J]. Présentés par Divers Savants Acad Sci Inst Fr, 1877, 23: 46-50.
- [11] PATANKER S V. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [12] 王晋军. 粗糙床面的阻力特性[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1992, 7(2): 132-136. (WANG Jinjun. Resistance of flow over rough bed [J]. Journal of Hydrodynamics, 1992, 7(2): 132-136. (in Chinese))
- (收稿日期: 2012-06-17 编辑: 熊水斌)