

引黄泵站前池进水池整流措施

黄金伟^{1,2}, 朱丕春³, 姚辉勇², 刘世学², 李典基²

(1. 河海大学, 南京 210098;

2. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 济南 250014;

3. 山东省胶东调水局, 山东 青岛 266200)

摘要: 以引黄泵站工程田山一级泵站的更新改造为背景, 运用三维紊流数值模拟技术, 基于大型计算流体力学软件 Fluent 为平台, 对田山一级泵站4号前池、进水池内部水流流态进行了数值计算, 揭示了泵站前池水流特性, 并预测了泵站前池进水池流态分布。研究结果为泵站的改造提供了技术支持, 对保证泵站的安全运行、优化设计具有重要的指导意义。

关键词: 引黄泵站; 前池; 整流措施; 三维紊流; fluent 平台; 流态分布

中图分类号: TV68; TV135 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0146-04

Rectification Measures of Forebay in Yellow River Pumping Station

HUANG Jir wei^{1,2}, ZHU Pi chun³, YAO Hui yong², LIU Shi xue², LI Dian ji²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Mainline Co. Ltd. of the East Route of South-to-North Water Transfer Project, Jinan 250014, China;

3. Jiaodong Water Bureau, Qingdao 266200, China)

Abstract: In consideration of the transformation of Tianshan pump station in Yellow River pump station project, a three dimensional turbulent flow simulation technique was applied to simulate the flow patterns in the No. 4 forebay and intake pool of Tianshan pump station based on the large scale computational fluid dynamics software, Fluent. The results revealed the flow pattern in the forebay and predicted the flow distribution in the intake pool. The research results can provide a theoretical basis for the transformation of pumping stations, and thus ensure the safe operation and optimal design of pump stations.

Key words: Yellow River pumping station; forebay; rectification; 3D turbulent flow; fluent; flow distribution

1 研究背景

泵站进水建筑物一般包括引水渠、前池和进水池, 大型块基型泵站还包括进水流道, 是泵站工程中的重要组成部分^[1]。田山一级泵站是田山引黄灌区的唯一取水口, 直接提取黄河水为整个灌区提供水源。泵站共装有轴流泵12台, 设计提水流量24 m³/s, 引水渠口至进水喇叭口仅19 m。本泵站自1972年投入运行, 对灌区工农业生产的发展发挥了重要的作用, 保证了灌区粮食稳步增长。但是在管理运行中, 泵站装置效率不高, 效益不能充分的发挥, 其主要原因: 一是受地形所限, 进水前池设计较短, 泵室进水条件差, 水流紊乱, 易产生汽蚀现象, 加之提引黄河泥沙水, 水泵大轴和橡胶轴承及其过流部件磨损严重, 影响了装置效率的提高; 二是进水闸前无拦沙设施, 而且黄河水位较高产生闸下射流,

直冲到闸室, 严重降低了泵站效率。为了改善前池的流态, 在闸门后0.55 m处设置4个梳流趾墩, 前池进口处及其后2.4 m处设置了两道底坎, 这样使水流在深度方向扩散在平面上起到导流墩的作用, 起到消能的作用; 另外, 在前池高程33.7 m、36.52 m之间设了消力、消波梁4条。

2 泵站前池与进水池流态的数学模型

控制微分方程^[2-5]可以统一写成如下形式:

$$\frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

式中: ϕ 为待求未知量; Γ_ϕ 为与 ϕ 对应的扩散系数; S_ϕ 为相应的源项。对于待定义的 ϕ 、 Γ_ϕ 和 S_ϕ 特定的形式, 见表1。

$$G_k = \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

收稿日期: 2013-06-15 修回日期: 2014-01-15 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.001.html>

作者简介: 黄金伟(1977-), 男, 山东济宁人, 工程师, 博士, 主要从事水利水电工程方面研究。E-mail: hjw0211@126.com

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92 \quad (3)$$

表 1 三维直角坐标系中的控制方程

Table 1 Control equations in a three dimensional Cartesian coordinate system

	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
连续性方程	1	0	0
动量方程	u_i	$\mu + \mu_t \left[\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho u_i u_j \right] \right]$	
k 方程	k	$\mu + \frac{\mu}{\sigma_k}$	$G_k - \beta \epsilon$
ϵ 方程	ϵ	$\mu + \frac{\mu}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \epsilon \rho)$

3 田山泵站 4 号前池与进水池的数值模拟和成果分析

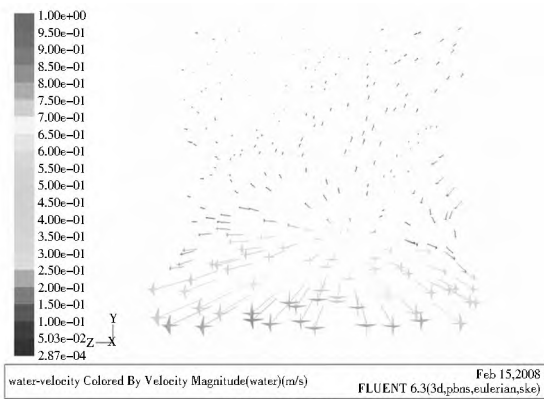
3.1 泵站改造前的数值模拟^[6-8]及成果分析

按前池设计水位高程 35.50 m 时的单泵或双泵运行条件,以及对泵站前池实施两种措施后的运行条件等 3 种计算工况(见表 2)进行模拟计算。

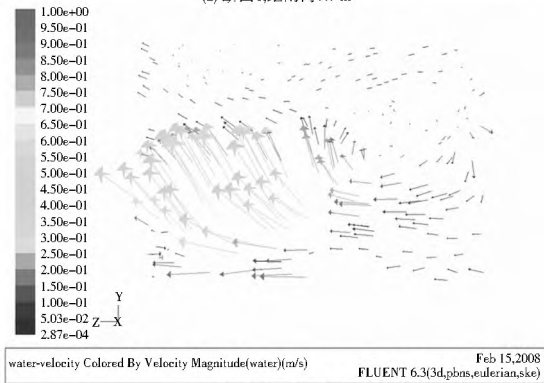
表 2 计算工况

Table 2 Calculated working conditions

序号	有无改造措施	运行情况	前池水位高程	备注
工况 1	无	单泵(7 号)	35.5 m	流量为 3 m ³ /s
工况 2	有	单泵(7 号)	35.5 m	流量为 3 m ³ /s
工况 3	有	双泵(7 号和 8 号)	35.5 m	流量为 6 m ³ /s



(a) 断面 1, 距闸门 7.7 m



(b) 断面 2, 距闸门 12.2 m

图 1 田山泵站工况 1 垂向剖面流速矢量图

Fig. 1 Vertical profile of velocity vector in Tianshan pump station under work conditions 1

对于田山泵站前池进水池浑水水流场,当计算达到收敛精度时,浑水水流场的速度、压力趋于稳定。工况 1 模

拟成果见图 1、图 2。图 1、图 2 中 H 表示前池水深,断面 1 为距离闸门 7.7 m,断面 2 为距离闸门 12.2 m。

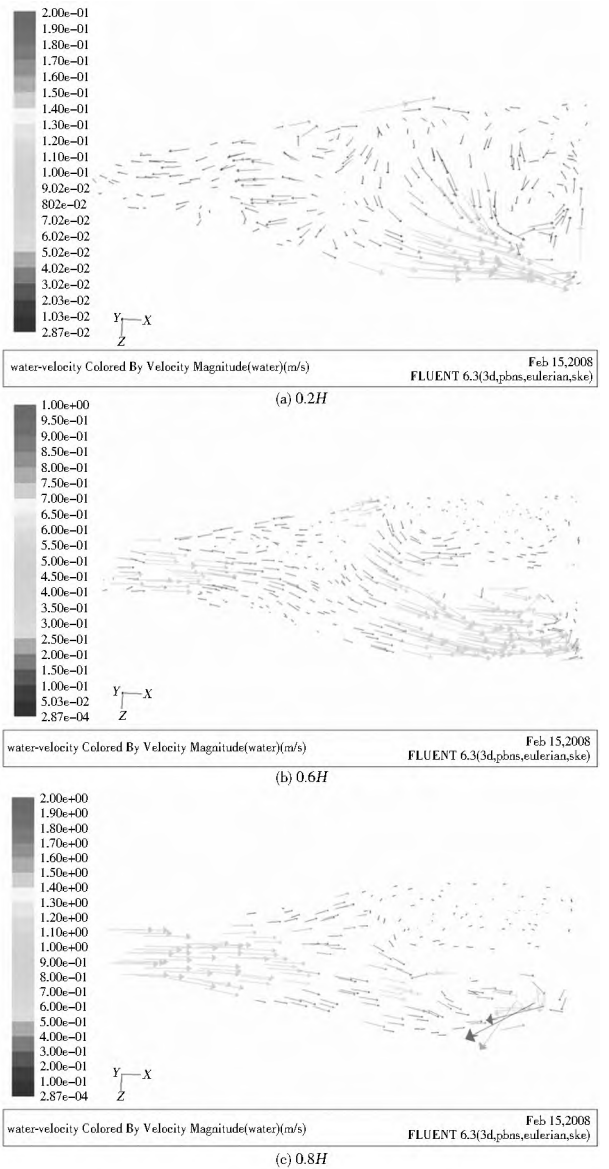


图 2 田山泵站工况 1 横向分层流速矢量图

Fig. 2 Stratified horizontal profile of velocity vector in Tianshan pump station under work conditions 1

由图 1 和图 2 可见,田山泵站改造前前池断面 1、断面 2 流速分布很不均匀,池底流速较大,中层流速和表层流速相对小的多;断面 1、断面 2 的底部流速明显的偏向运行 7 号泵的进水池中,在断面 2 的池底流速有偏向上的趋势,表层已经出现了逆向流动;在不运行的水泵机组 8 号的进水池内出现回水区、死水区以及一定量的大小不等的漩涡;图 2 显示速度的方向有向的趋势。

3.2 田山泵站前池改造后的数值模拟及结果分析

对于田山泵站改造后的前池进水池浑水水流场,当计算达到收敛精度时,浑水水流场的速度、压力趋于稳定。模拟工况 2 的成果如图 3、图 4 所示。

采用跃前底部疏流趾墩消能和跃后消力、消波整流措施后,由图 3 模拟结果可知,前池尾部断面流速分布相对于改造前的流态比较均匀,中层流速相对较大,底部流速减小,表

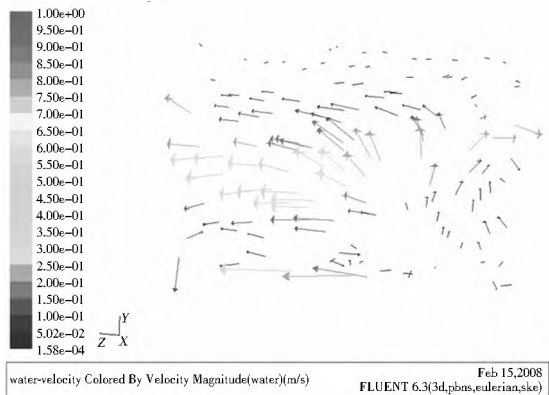
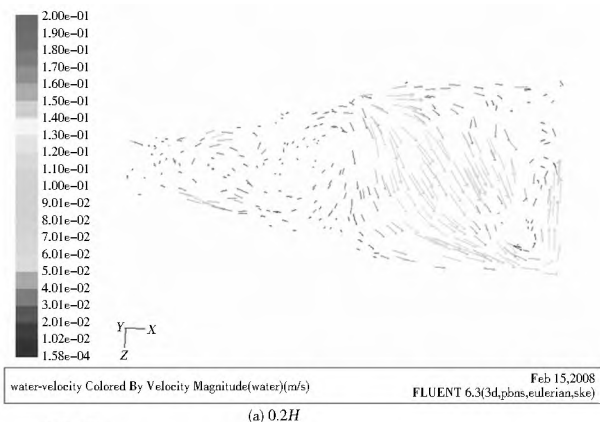
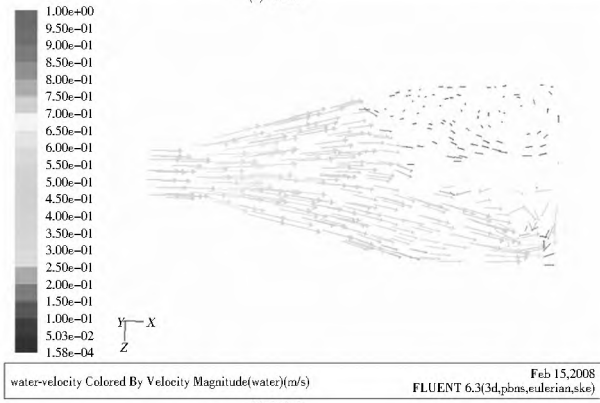


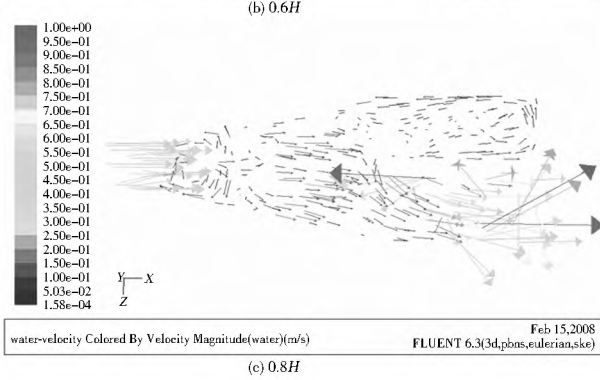
图 3 田山泵站工况 2 距闸门 12.2 m 处垂向剖面流速矢量图
Fig. 3 Vertical profile of velocity vector in the distance of 12.2 m to the gate in Tianshan pump station under work conditions 2



(a) 0.2H



(b) 0.6H



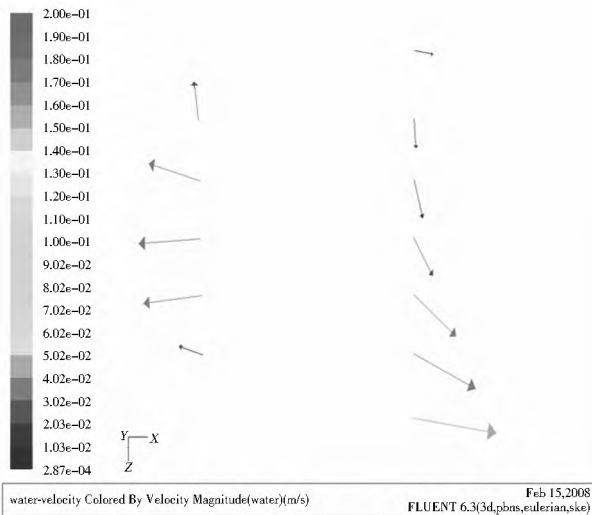
(c) 0.8H

图 4 田山泵站工况 2 横向分层流速矢量图

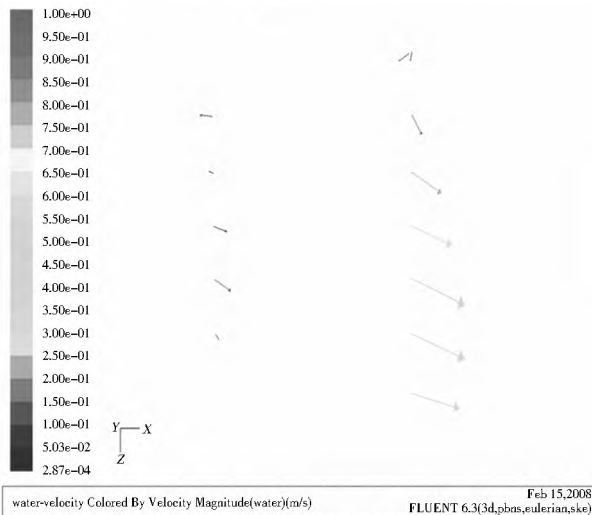
Fig. 4 Stratified horizontal profile of velocity vector in Tianshan pump station under work conditions 2

层流态平稳,几乎没有出现涡流;前池尾断面处的主水流仍是偏向于运行的 7 号泵池,这点与改造前的结论是相同的。

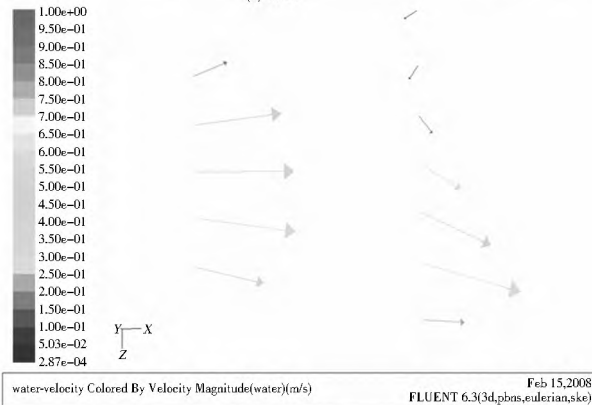
前池底部的水流在出闸门 0.5 m 处折偏向上流,这样梳理趾墩就在水跃前消弱了水能,同时水跃后增设消波整流横梁,消弱了前池中水流的波动。另外,表层的水流流向 7 号泵,并在此沿泵向下流到达喇叭吸水口。



(a) 0.2H



(b) 0.6H



(c) 0.8H

图 5 田山泵站工况 1 垂向分层流速矢量图

Fig. 5 Stratified vertical profile of velocity vector in Tianshan pump station under work conditions 1

4 数模与原型现场测试结果的对比

4.1 田山泵站前池流场的现场测试

田山一级泵站原设计前池流态的测试:在前池中设两个

测流断面,池中断面采用五线三点法和池尾采用了七线三点法^{9[10]}分两次测量不同水深(0.2H、0.6H、0.8H)处的流态变化。模拟计算成果见图5。

在图5(a)中,前池1断面的水流偏向 upstream,2断面的水流偏向运行的9号机组池,图5(b)和图5(c)中的水流基本没有产生回流,其中从图5(a)到图5(c)各个测点的流速大小依次增大的,这与前池水位35.50m试验测试结果基本一致。

4.2 实测点的流速与数值模拟计算的点流速比较

现场测试点是由田山泵站前池水位高程35.5m工况下的断面1和断面2上对应采用五线三点法和七线三点法沿水深方向分别取0.2H、0.6H、0.8H等水平面处的节点确定的。下面从泵站前池改造前和改造后等几种工况下对现场测试的实测点的流速和数值模拟计算的点的流速进行对比。

测点对比图的横坐标为建立的几何模型的Z轴坐标,方向从前池的左侧到右侧,其纵坐标为测点的流速的大小。在图6、图7实测点的流速图和数值模拟计算的流速图的对比中,系列1代表数值模拟计算点的流速曲线、系列2代表实测的试验点流速曲线。

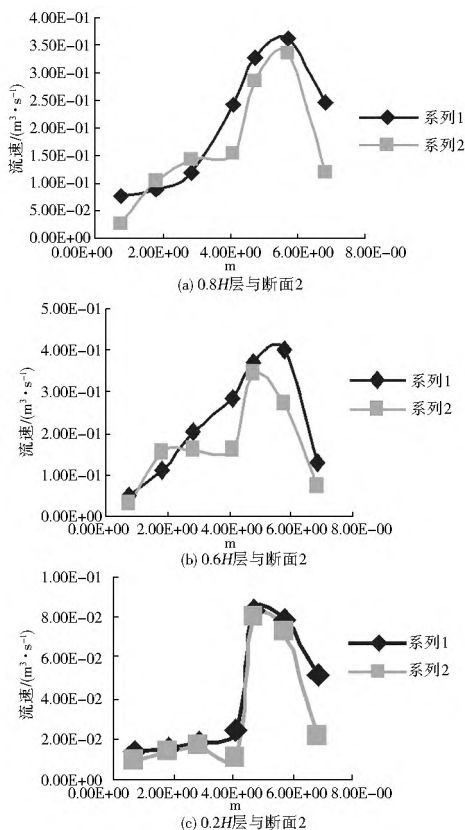


图6 田山泵站工况1 试验点与数模计算点的速度比较

Fig.6 Comparison of velocities at test points and numerical simulation points in Tianshan pump station under work conditions 1

由上述几个不同工况的试验测试点与数值模拟计算的点的流速的比较可见,数值模拟的计算结果与现场测试的流速分布是基本一致的,但两者存在一定的偏差。引起模拟误差的原因是多方面的,既有测试的误差,也有数值计算上的问题,数值计算上的问题主要是由边界的假定与实际情况间的差别引起的,而影响现场测试前池流态的主要因素包括:

(1) 测点流速变化。田山一级是从黄河直接抽水的,黄河的含沙量基本在5kg到30kg之间,因此现场测试时就在泵站的进水流动池底部避免不了有一定的淤积,这样测点的流速就有一定的差别;(2) 水位变化。由于黄河水位是变化的,本次的现场试验测试时,黄河水位高程是在35.1m到35.6m之间变化的,为了控制前池的水位只有提起或下压闸门来实现,因此前池的流态发生了微小的变化。但是,数值模拟的计算结果与现场测试的节点的流速的趋势一致,因此仍可认为建立的数学模型能较好地模拟泵站前池水流流态。

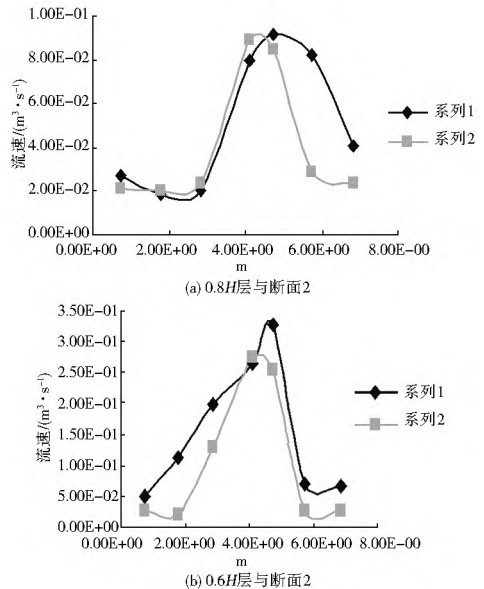


图7 田山泵站工况2 试验点与数模计算点的速度比较

Fig.7 Comparison of velocities at test points and numerical simulation points in Tianshan pump station under work conditions 2

5 结论

(1) 通过计算田山引黄泵站前池改造前后的水流流态,并根据前池原型现场测试的试验数据对模拟计算的结果进行验证,发现数值模拟计算的结果是可靠的。

(2) 首次采用清水和泥沙两相流模型对田山泵站进行数值模拟计算,揭示了泵站前池进水池中的三维流态和流速分布。通过剖析水流的纵断面和横断面可以清晰的预见前池中任意一点或任意断面的流速大小和方向。与试验方法相比,数值模拟计算既经济又省时间,还可以预测前池水流内部流态的变化。

(3) 采用跃前底部梳流趾墩消能,跃后消力、消波,整流效果比较显著,前池尾部断面流速分布比较均匀,中层流速较大,底部流速减小,表层流态平稳,没有出现漩涡。

参考文献(References):

[1] 严登丰. 泵站工程[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2005. (YAN Deng-feng. Pumping Station Project[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
 [2] 窦国仁. 紊流力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. (DOU Guo-ren. Turbulent Mechanics[M]. Beijing: People's Education Press, 1981. (in Chinese))

(下转第153页)

参考文献(References):

- [1] 赵峰,倪锦初,熊新宇,等.水泥改性土施工技术研究[J].人民长江,2010,41(16):81-83.(ZHAO Feng, NI Jir chu, XIONG Xir yu, et al. Research on Construction Technology of Modified Cement Soil[J]. Yangtze River, 2010, 41(16): 81-83. (in Chinese))
- [2] 张晨辰,刘斯宏,张学峰.膨胀土水泥改性掺灰量测定的龄期效应研究[J].南水北调与水利科技,2012,10(5):76-79.(ZHANG Chen chen, LIU Si hong, ZHANG Xue feng. Age Effects on EDTA Titration in Detecting Cement Content for Treatment of Expansive Soil[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 76-79. (in Chinese))
- [3] 高英.膨胀岩渠坡的变形破坏特点与稳定分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):1-5.(GAO Ying. Characteristics of Deformation Damage and Stability Analysis of Swelling Rock Slope[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 1-5. (in Chinese))
- [4] 冯旭松,孙衣春,王保田,等.基于二次掺灰法的改良膨胀土施工工艺与检测方法[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):6-8.(FENG Xu song, SUN Yi chun, WANG Bao tian, et al. Construction and Detecting Methods for Stabilized Expansive Soil Using Two step Lime cement Mixing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 6-8. (in Chinese))
- [5] 肖杰,王保田,孙衣春,等.水泥石灰复合改良膨胀土试验[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):9-13.(XIAO Jie, WANG Bao tian, SUN Yi chun, et al. Experimental Research on the Stabilized Lime cement Expansive Soil[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 9-13. (in Chinese))
- [6] NSBD-ZGJ 1-37,南水北调中线一期工程总干渠渠道水泥改性土施工技术规定(试行)[S].(NSBD-ZGJ 1-37, Technical Specification for Construction of Cement Modified Soil of the Main Channel of the First Stage of Middle Route of South to North Water Diversion Project (for Trial Implementation) [S]. (in Chinese))
- [7] 黄河勘测规划设计有限公司.南水北调中线一期工程总干渠渠道膨胀土处理施工工程预算定额研究报告[R].2012.(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd. Research on Construction Engineering Budget Quota of the Construction of the Main Channel of the First Stage of Middle Route of South to North Water Diversion Project[R]. 2012. (in Chinese))
- [8] 谷冠军.基本建设技术经济定额制定与管理[M].成都:四川科学技术出版社,1989.(GU Gu ar jun. The Establishment and Management of Technical and Economic Quota for Capital Construction [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. (in Chinese))
- [9] 中华人民共和国水利部.水利建筑工程预算定额[M].郑州:黄河水利出版社,2002.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The Budget Quota of Water Conservancy Construction Engineering[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国水利部.水利工程施工机械台时费定额[M].郑州:黄河水利出版社,2002.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The Machinery Stage at Fee Quota of Water Conservancy Project Construction [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [3] 王福军.计算流体动力学原理与应用CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社:2004.(WANG FU-jun. Computational Fluid Dynamics Principle and Application of CFD Software Principle and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2006.(TAO Wen quan. Numerical Heat Transfe[M]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University Press, 2006. (in Chinese))
- [5] Frank M. White. Fluid Mechanics(Fifth Edition)[M]. McGraw-Hill Companies, Inc. 2003.
- [6] E. John Finnemore and Joseph B. Franzini Fluid Mechanics with Engineering Applications[M]. McGraw-Hill Companies, Inc. 2002.
- [7] 刘超,成立,汤方平.水泵站前池三维流动计算和试验[J].农业机械学报,2001,32(6):41-44.(LIU Chao, CHENG Li. Numerical Simulation of Three dimensional Turbulent Flow inside a Pumping Forebay [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 41-44. (in Chinese))
- [8] 成立.泵站水流运动特性及水力性能数值模拟研究[D].南京:河海大学,2006.(CHENG Li. Pumping Water Flow Movement Characteristics and Hydraulic Performance of Numerical Simulation Research [M]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [9] SD 140 85,泵站现场测试规程[S].(SD 140-85, Pump Station Field Test Procedures[S]. (in Chinese))
- [10] SL 254 2000,泵站技术改造规程[S].(SL 254 2000, Pump Station Technical Modification Procedures[S]. (in Chinese))

(上接第149页)