

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0051

夏臣智, 成立, 焦伟轩, 等. 泵站前池倒T形底坎整流措施数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 146-150, 163. XIA C Z, CHENG L, JIAO W X, et al. Numerical simulation on rectification measure of inverted T-shaped sill at forebay of pump station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 146-150, 163. (in Chinese)

## 泵站前池倒T形底坎整流措施数值模拟

夏臣智, 成立, 焦伟轩, 张帝

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏扬州 225009)

**摘要:** 为了改善泵站前池边侧大面积回漩不良流态, 基于商用 CFD 软件 Fluent, 运用 N-S 方程和 Reliable k-ε 紊流模型对加倒 T 形底坎的前池进行数值模拟, 分析倒 T 形底坎的几何参数对前池流态和边侧流速的影响。结果表明: 无整流措施时, 前池中流态紊乱, 通过加设倒 T 形底坎可显著改善前池中的流态, 提高边侧机组的流速, 改善前池中流速分布均匀度; 倒 T 形底坎设置在前池中的位置和其上部的尺寸对前池整流效果有明显的影响; 倒 T 形底坎的位置距进水池入口  $7.5D$ , 上部结构高为  $0.4H$ , 宽为  $0.1B$ , 前池中流态得到明显改善, 边侧回漩范围减小。

**关键词:** 前池; 泵站; 数值模拟; 倒 T 形底坎; 流态

**中图分类号:** TV 131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0146-05

### Numerical simulation on rectification measure of inverted T-shaped sill at forebay of pump station

XIA Chenzhi, CHENG Li, JIAO Weixuan, ZHANG Di

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** In order to rectify the bad flow pattern at the forebay of the pump station, in this paper we conducted numerical simulation of the forebay with inverted T-shaped sill based on the Fluent software using the N-S equation and Reliable k-ε turbulence model, and analyzed the influence of the geometrical parameters of the sill on the flow pattern and lateral flow velocity at the forebay. The results showed that without the rectification measure, the flow pattern at the forebay was turbulent. Adding an inverted T-shaped sill could significantly increase the flow rate of the side unit and improve the uniformity of the velocity distribution at the forebay. The location parameter and superstructure size of the inverted T-shaped sill had significant influence on the flow pattern at the forebay. The recommended location of the inverted T-shaped sill is  $7.5D$  to the entrance of the intake pool. The recommended superstructure is  $0.4H$  high and  $0.1B$  wide.

**Key words:** forebay; pump station; numerical simulation; inverted T-shaped sill; flow pattern

前池是泵站建筑物中的一个重要组成部分, 其设计的优劣关系到水流能否从引水渠平顺扩散到进水池。设计不当的前池中常存在大区域的回流, 使得水泵的能量和汽蚀性能下降, 严重时甚至会引水泵汽蚀和振动, 危害泵站安全。同时回流的存在会使得前池内有泥沙淤积的问题, 进一步恶化进水条件<sup>[1-4]</sup>。

目前, 国内外的学者对前池流态改善做了大量研究, 整流措施主要包括增加前池长度、增大前池扩散角、设置底坎、立柱或压水板等<sup>[5-10]</sup>。冯旭松<sup>[11]</sup>通过试验分析了常规形式底坎的整流机理。成立<sup>[12]</sup>采用 CFD 软件从三维上分析了底坎整流机理。罗灿<sup>[13]</sup>采用 CFD 软件从三维分析了常规形式底坎的

收稿日期: 2017-07-25 修回日期: 2017-09-18 网络出版时间: 2018-03-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180302.1421.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51779214); 江苏省产学研前瞻性联合项目(BY201506F12); 江苏省研究生培养创新工程(KYLX16\_1395)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51779214); Prospective Joint Project of Jiangsu Province, school and Research Institute (BY201506F12); The Innovation Project of Graduate Training in Jiangsu(KYLX16\_1395)

作者简介: 夏臣智(1990), 男, 江苏兴化人, 博士, 主要从事泵站工程研究。E-mail: xiachenzhi@foxmail.com

通讯作者: 成立(1975), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 主要从事泵站工程研究。E-mail: chengli@yzu.edu.cn

整流机理。已有的研究表明设置底坎对前池中的流态有明显的改善,但是未见通过底坎提高前池边侧的水流流速的研究成果。而有研究表明前池边侧流速过低,会极大地影响边侧机组的运行效率,并使得边侧发生泥沙淤积更加恶化边侧机组的进水流态<sup>[14-20]</sup>。本文针对多机组泵站前池的扩散角过大,诱发大面积回流不良流态,边侧机组的流速过低,研究了倒T形底坎几何参数对改善前池的水流流态和边侧机组的流速分布的影响。

## 1 前池及倒T形底坎几何参数

本文研究进水正向扩散前池,其模型如图1所示,主要有涵洞、前池、进水池(1号-10号)和吸水管。

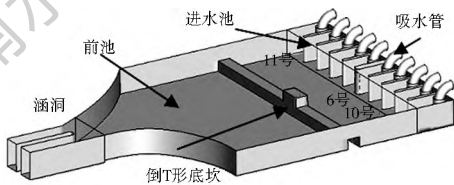


图1 前池模型  
Fig. 1 Model of forebay

图2为前池模型的尺寸示意图, $L$ 为底坎位置,行近流速断面1-1距进水池 $0.438D$ 。其中前池池宽 $B$ 为 $25D$ ,前池水深 $H$ 为 $0.73D$ ,其中 $D$ 为吸水管直径。

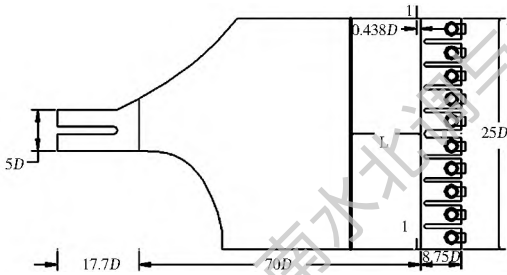


图2 模型尺寸示意图  
Fig. 2 Sketch of model dimensions

图3为倒T形底坎的剖面图。倒T形底坎由上下两部分组成,下部为矩形截面的常规底坎,上部为长方体结构, $X$ 为长度, $H_s$ 为上部坎高, $H_x$ 为下部坎高( $0.25H$ )。

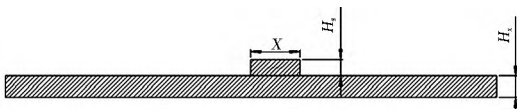


图3 倒T形底坎尺寸示意图  
Fig. 3 Sketch of inverted T-shaped sill

## 2 数值计算方法及边界条件

泵站前池内流动为不可压缩湍流流动,该流动可用雷诺时均 N-S 方程和连续性方程描述。由于

前池内流动为强曲率流动,采用 Reliable k- $\epsilon$  紊流模型要优于标准k- $\epsilon$  紊流模型<sup>[21-23]</sup>。

本文基于商用软件 Fluent,采用分离求解器求解离散方程组,采用 SIMPLEC 算法,求解精度为二阶。采用分块网格技术,对前池和涵洞采用六面体网格划分,对结构复杂的进水池采用四面体网格划分<sup>[24-25]</sup>。通过网格无关性分析,当网格节点数量大于  $2 \times 10^6$  时,计算结果趋于稳定。计算模型见图4。

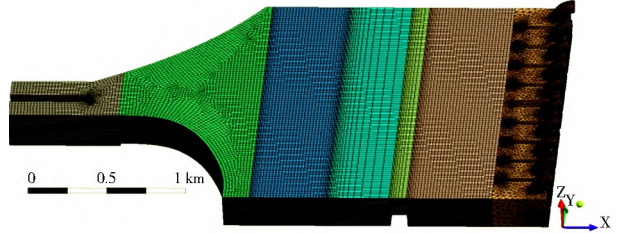


图4 网格示意图  
Fig. 4 Mesh of model

取涵洞的入口侧为质量进口,流量为  $33.4 \text{ L/s}$ 。取出水管的出口侧为自由出流出口。固体壁面处设置为标准壁面函数,且无滑移条件( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上的分速度均为0)。自由表面设为对称边界条件。

## 3 研究方案

本文研究了倒T形底坎几何参数对前池里水流改善,共8种方案。其中方案1为不加任何措施的方案,方案2、3和4分别研究倒T形底坎位置变化对前池进水流态影响。方案5、6、7和8分别研究倒T形底坎上部结构的顶宽和高度对前池进水流态影响。具体几何参数见表1。倒T形底坎的上部结构正对6号泵组。

表1 研究方案的位置和参数

Tab. 1 Locations and dimensions of the sill				
方案	位置 $L$	上部坎宽 $X$	上部坎高 $H_s$	备注
1	-	-	-	无措施
2	$5D$	$0.1B$	$0.4H$	
3	$7.5D$	$0.1B$	$0.4H$	
4	$10D$	$0.1B$	$0.4H$	
5	$7.5D$	$0.05B$	$0.4H$	倒T底坎
6	$7.5D$	$0.15B$	$0.4H$	
7	$7.5D$	$0.1B$	$0.3H$	
8	$7.5D$	$0.1B$	$0.5H$	

注: $D$ 为吸水管直径, $B$ 为前池池宽, $H$ 为前池设计水位。

## 4 计算结果及分析

### 4.1 方案1数模与试验对比

图5为方案1计算流线图。由图可见,无整流

措施时,前池两侧存在两个大尺度的回流区,图中顺水流方向右侧回流区面积较左侧的回流区大,主流偏向图中前池的左侧,进水池流态紊乱,不仅影响进水池的进水流态,而且还容易造成前池内的泥沙淤积,严重影响泵站的运行效率。

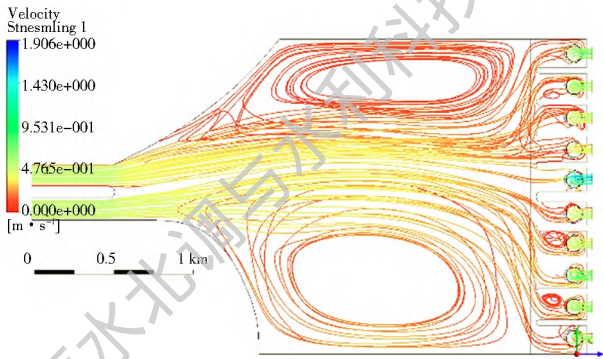


图 5 方案 1 流线图

Fig. 5 Streamlines of Scheme 1

图 6 为泵站前池内行近流速断面 F1 的数值模拟计算值和试验值的对比。研究表明数值模拟结果和试验结果的行近流速最大值均在 6 号机组前,且数模预测结果与试验结果变化趋势一致,数值模拟结果是可信的。

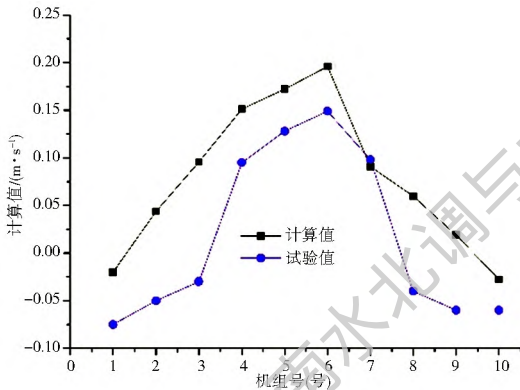


图 6 断面 F-1 行近流速计算和试验比较

Fig. 6 Comparison of CFD predicted and test approach velocity at Section F-1

## 4.2 倒 T 形底坎几何参数对流态影响

图 7- 图 13 为倒 T 形底坎几何参数方案前池计算流线图。当在前池中加入倒底坎后,前池两侧的大尺度回流区的区域明显变小,且被限制到在底坎的前部。坎后至进水池前的流线较为平顺,无回流区的存在,进水池的进水流态得到很好地调整。

### 4.2.1 倒 T 形底坎位置对流态改善影响

底坎距进水池的位置对底坎整流效果有重要的影响,方案 2 的底坎距离进水池较近( $L=5D$ ),坎后水流旋滚的区域比较小,水体能量得不到充分的交换,影响进水流态。方案 4 的底坎距离进水池较远

( $L=10D$ ),坎前的回流区被限制在较小的区域中,使得水流越过底坎前具有较大的能量,坎后的漩滚区变长,水流中的能量未被充分的交换就进入进水池内,影响进水池内流态。设置合理位置的倒 T 形底坎后(方案 3, $L=10D$ ),前池两侧回流区被限制到坎前,由于回流区变小,主流不再向前池的一侧偏斜。

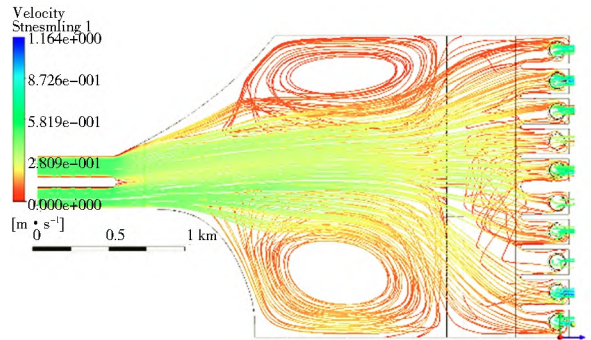


图 7 方案 2 流线图

Fig. 7 Streamlines of Scheme 2

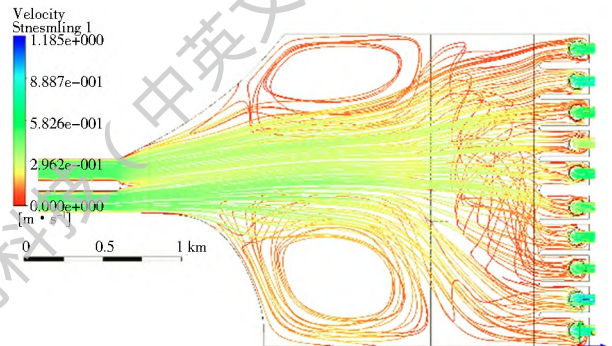


图 8 方案 3 流线图

Fig. 8 Streamlines of Scheme 3

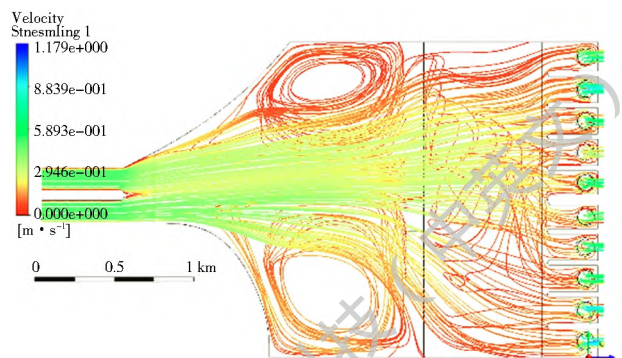


图 9 方案 4 流线图

Fig. 9 Streamlines of Scheme 4

### 4.2.2 倒 T 形底坎上部宽度对流态改善影响

研究表明,倒 T 形底坎的上部结构具有分流作用,方案 5 中的底坎上部结构过小( $X=0.05B$ ),分流作用不明显(图 10),方案 6 中的底坎上部结构过大( $X=0.15B$ ),使得水流经过底坎时的过水断面变小,坎后的漩滚变强(图 11),水力损失变大。当上部结构大小适中时( $X=0.1B$ )即方案 4,坎后漩滚能起到较好的分流和流态改善作用(图 8)。

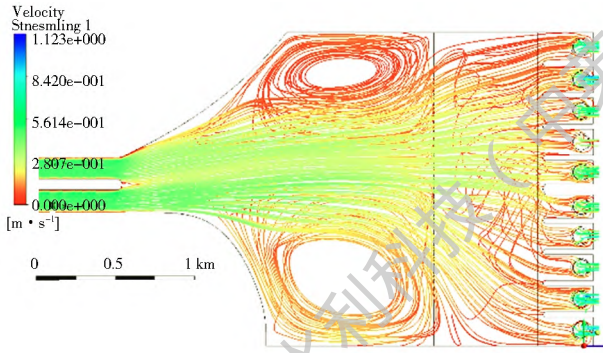


图 10 方案 5 流线图

Fig. 10 Stream lines of Scheme 5

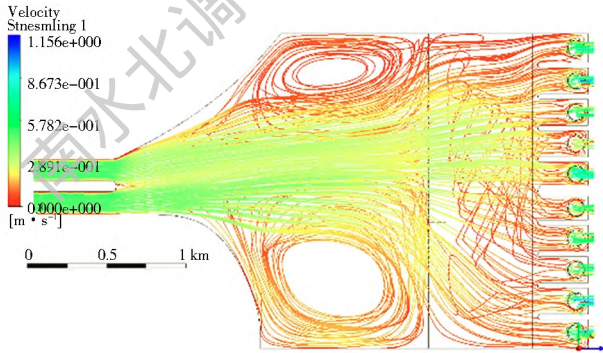


图 11 方案 6 流线图

Fig. 11 Stream lines of Scheme 6

#### 4.2.3 倒 T 形底坎上部高度对流态改善影响

不同倒 T 形底坎上部结构的高度(方案 7 和 8)对前池内回流区的影响较小(见图 12 和图 13)。

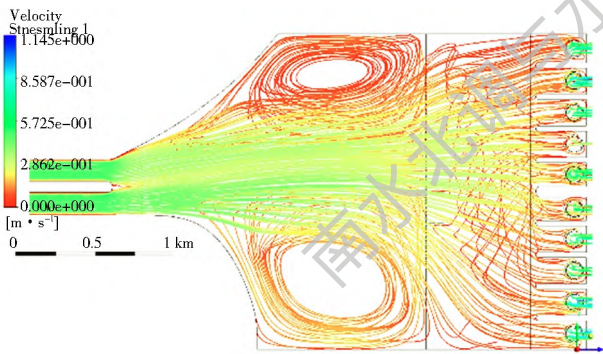


图 12 方案 7 流线图

Fig. 12 Stream lines of Scheme 7

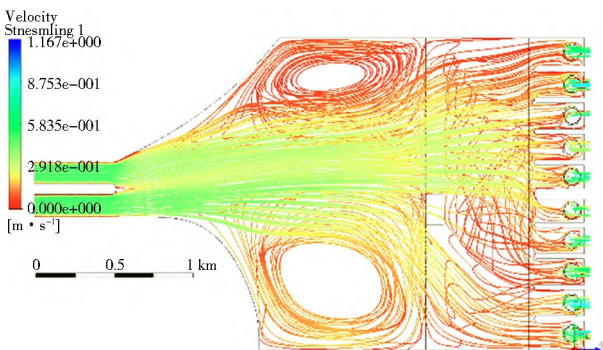


图 13 方案 8 流线图

Fig. 13 Stream lines of Scheme 8

#### 4.3 倒 T 形底坎对站前行近流速影响

图 14 为方案 1 和方案 3(优化方案)的 10 个机组在 F-1 断面上的行近流速分布比较。由图可知,方案 1 机组前行近流速分布呈锥形,中间机组流速高,两侧机组流速低,两侧机组(1 号、2 号、3 号、8 号、9 号和 10 号)前的行近流速为负值,前池两侧进水流态较差。方案 3 为倒 T 形底坎措施整流优化方案,其行近流速分布较方案 1 均匀,方案 3 中间机组行近流速分布更为均匀,流态改善效果明显。

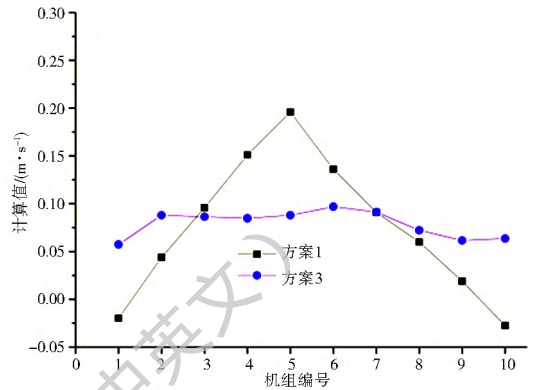


图 14 断面 F-1 行近流速分布比较

Fig. 14 Comparison of approach velocity at Section F-1

#### 4.4 倒 T 形底坎整流效果分析

综合上述各研究方案,当加入倒 T 形底坎后,底坎前的水流流速分布为中间大两侧小,水流流过倒 T 形底坎,在坎后形成漩滚,水流发生能量交换,同时受倒 T 形底坎上部结构的分流作用,在前池两侧的水流的流速变大,使得机组前的水流流速变得更加均匀,泵组进水池入流得到明显改善(图 15)。

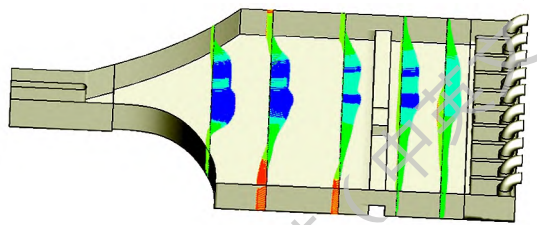


图 15 行近流速变化示意图

Fig. 15 Sketch of approach velocity

### 5 结论

基于 CFD 技术,研究了倒 T 形底坎的位置和其上部结构的宽度及高度对前池流态的影响。

(1) 倒 T 形底坎能改善大扩散角正向进水前池内水流流态,减少回流区的范围。

(2) 倒 T 形底坎对前池两侧机组行近流速有明显的提高作用,有助于提高两侧机组的运行效率,减少前池两侧的泥沙淤积。

(3) 倒 T 形底坎设置在前池中的位置和其上部结构的尺寸对前池整流效果有明显的影

(4) 本文推荐倒 T 形底坎设置在前池中距进水池入口  $7.5D$  的位置, 上部结构高度为  $0.4H$ , 宽度为  $0.1B$ 。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (LIU C. Pump and pump station[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese))
- [2] GASTON E F, MARCELA P, LARRY W. Numerical simulation of free surface flows on a fish bypass[J]. Computer & Fluids, 2009, 38(5): 997-1002.
- [3] TANG X L, WANG W C, WANG F J, et al. Application of LBM-SCS model to flows in a pumping station forebay[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(2): 196-206.
- [4] 张贤明, 吉庆丰. 泵站前池流态的数值模拟[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 35-38, 42. (ZHANG X M, JI Q F. Numerical simulation of three dimensional turbulent flow in forebay of pumping station[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(1): 35-38, 42. (in Chinese) DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2001.01.009.
- [5] 周龙才. 泵站前池隔墩整流的数值分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 31-33. (ZHOU L C. Numerical analysis on improvement of flow conditions in forebay of pumping station by setting separation piers[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(2): 31-33. (in Chinese))
- [6] 成立, 刘超, 周济人等. 泵站前池底坎整流数值模拟研究[J]. 河海大学学报, 2001, 29(3): 42-45. (CHENG L, LIU C, ZHOU J R, et al. Numerical simulation of sill flows in the forebay of pumping station[J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(3): 42-45. (in Chinese))
- [7] 刘超, 韩旭, 周济人等. 泵站侧向进水引河段三维紊流数值模拟[J]. 排灌机械, 2009, 27(5): 281-286. (LIU C, HAN X, ZHOU J R, et al. Numerical simulation of turbulent flow in forebay with side intake of pumping station[J]. Drainage And Irrigation Machinery, 2009, 27(5): 281-286. (in Chinese))
- [8] 刘新阳, 高传昌, 石礼文等. 泵站前池与进水池整流数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3): 242-246. (LIU X Y, GAO C C, SHI L W, et al. Numerical simulation for fluid meliorating in both forebay and suction bay of pumping station[J]. Journal Of Drainage And Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 242-246. (in Chinese))
- [9] 黄金伟, 朱丕春, 姚辉勇, 等. 引黄泵站前池进水池整流措施[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 146-149, 153. (HUANG J W, ZHU P C, YAO H Y, et al. Rectification measures of forebay in Yellow River Pumping Station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 146-149, 153. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdk.2014.02.034.
- [10] 李秋玮. 交错叶轮离心泵水力特性及泵站前池整流研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011. (LI Q W. Research on the hydraulic characteristics of a centrifugal pump with staggered impeller and the improvement of flow field in a forebay[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese))
- [11] 冯旭松. 泵站前池底坎整流及坎后流动分析[J]. 江苏水利, 1998(1): 31-33, 38. (FENG X S. Flow rectification and analysis of sill in the forebay of pump station[J]. Jiangsu Hydraulics, 1998(1): 31-33, 38 (in Chinese))
- [12] 成立, 刘超, 周济人. 水泵站底坎二维绕流湍流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 37-39. (CHENG L, LIU C, ZHOU J R. Numerical simulation of turbulent flow around sill with RNG k-ε turbulent model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 37-39. (in Chinese))
- [13] 罗灿, 成立, 刘超. 泵站正向进水池前池底坎整流机理数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5): 393-398. (LUO C, CHENG L, LIU C. Numerical simulation of mechanism for sill rectifying flow in pumping station intake[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 393-398. (in Chinese))
- [14] 万乐平. 多泥沙河流泵站前池泥沙淤积过程数值模拟与流态改善[D]. 扬州: 扬州大学, 2013. (WANG L P. Numerical simulation of flow field and improvement of the flow pattern in the forebay of a pumping station on the sediment laden river[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese))
- [15] 王铁力. 多泥沙河流泵站前池流态数值模拟及防淤措施研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012. (WANG T L. Numerical simulation of flow field and research on the settlement to avoid sedimentation in the forebay of a pumping station on the sediment-laden river[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese))
- [16] 刘升. 多泥沙河流泵站前池泥沙淤积特性分析及防淤措施研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011. (LIU S. Characteristic analysis of the sediment deposition and Research on the settlement to avoid sedimentation in the forebay of a pump station on the sediment-laden river[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011. (in Chinese))
- [17] 彭晓光. 多泥沙河流泵站前池防淤积措施研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010. (PENG X G. Research on the settlement to avoid sediment deposition in the forebay of a pumping station built on the sediment laden river[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese))
- [18] 张亚莉, 宋世露, 陈勇, 等. 泵站侧向进水池整流措施数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2016(5): 117-120. (ZHANG Y L, SONG S L, CHEN Y, et al. Numerical simulation of rectification measures for side direction forebay in pump station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(5): 117-120. (in Chinese))
- [19] 高传昌, 刘新阳, 石礼文, 等. 泵站前池与进水池整流方案数值模拟[J]. 水力发电学报, 2011(2): 54-59. (GAO C C, LIU X Y, SHI L W, et al. Numerical simulation of flow pattern modification schemes for the forebay and suction sump of pumping station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011(2): 54-59. (in Chinese))

(下转第163页)

- seepage and heat insulating material of SDM in the channel design: Mid route of South to North Water Transfer Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(4): 96-97. (in Chinese) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2005.04.038.
- [17] 董江伟, 姜海波, 汤骅, 等. 大断面刚柔混合衬砌渠道接触特性的有限元分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2015, 33(4): 505-510. (DONG J W, JIANG H B, TANG H, et al. Finite Element Analysis of Rigid Mixed Lining Channels' Contact Characteristics of Large Section[J]. Journal of Shihezi University(Nat. Sci. Ed.), 2015, 33(4): 506-510. (in Chinese) DOI: 10.13880/j.cnki.65.1174/n.2015.04.020.
- [18] 冯有亭, 陆立国. 膨润土防渗毯渠道衬砌防冻胀试验研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 87-92. (FENG Y T, LU L G. Experimental study on anti-frost heaving of channel lined with bentonite impervious blanket[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 87-92. (in Chinese) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2016.12.019.
- [19] 杨建平, 寿伟, 王铁强. 浅论复合土工膜在南水北调工程中的应用技术[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 109-110. (YANG J P, SHOU W, WANG T Q. Discussions on the application of composite geomembrane in the South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(3): 109-110. (in Chinese))
- [20] 李沛炜, 姚亮, 孙凤梅. 南水北调中线工程渠道衬砌体冻胀机理与防治措施[J]. 河南水利与南水北调, 2009(11): 28-29. (LI P W, YAO L, SUN F M. Frost heaving mechanism of canal lining and its prevention measures in middle route of South to North Water Transfer Project[J]. Henan Water Resources & South to North Water Diversion, 2009(11): 28-29. (in Chinese))
- [21] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 南水北调中线干渠冰期输水能力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 118-122. (MU X P, Chen Shu, Cui Wei, et al. Study on Water Diversion Capacity in the Middle Route of the South to North Water Transfer Project in ice period[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 118-122. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.028.
- [22] 刘建军, 滕丽娟, 刘嘉伟. 南水北调中线干渠冰期输水冰情分析及冰害防治措施[J]. 水科学与工程学报, 2015(3): 26-28. (LIU J J, TENG L J, LIU J W. Probable ice cases and methods of ice hazards prevention of China's middle route south to north water transfer project in freezing period[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2015(3): 26-28. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-9900.2015.03.009.
- [23] 宋玲, 余书超. 寒区冬季输水渠衬砌的冻胀破坏及防治措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(6): 96-97. (SONG L, YU S C. Frost heaving damage of water conveyance lining canal and its prevention measures in freezing regions in winter[J]. China rural water and hydroelectric, 2009(6): 96-97. (in Chinese))
- [24] 周富强, 吴艳, 何宁, 等. 严寒地区冬季运行渠道冻胀融沉特性原型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015(b02): 5-7. (ZHOU F Q, WU Y, HE N, et al. Experimental study on frost heave and thaw sink of winter running channel in the severe cold areas[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(b02): 5-7. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2015.002.0005.03.
- [25] 曹兴山, 陈志孟. 寒区冬季输水渠道冻胀破坏机制与防治——以新疆乌什水库引水渠为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(4): 405-409. (CAO X S, CHEN Z M. Prevention and cure of breaking of the water canal in the winter of frigid areas—an example in Wushishui water canal, Xinjiang[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(4): 405-409. (in Chinese))
- [26] 陈焰炯. 新疆玛纳斯河四级电站引水渠底宽调整方案比选[J]. 中国水运, 2014, 14(12): 199-200. (CHEN Y J. Comparison of adjustment schemes for bottom width of diversion channel of four stage hydropower station in Manasi River[J]. China Water Transport, 2014, 14(12): 199-200. (in Chinese))

(上接第 150 页)

- [20] 窦身堂, 余明辉, 杨国录, 等. 取水前池泥沙淤积分布数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2010(1): 58-62. (DOU S T, YU M H, YANG G L, et al. Numerical simulation of sediment movement in water intake forebay [J]. Journal of Sediment Research, 2010(1): 58-62. (in Chinese) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2010.01.007.
- [21] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence, basic theory[J]. J Sci Comput, 1986 1(1): 3-11.
- [22] 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 L. Numerical simulation for flow pattern and hydraulic performance of pumping systems [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [23] 张兄文, 李国君, 李军, 等. 带控制片方柱绕流的非定常数值模拟[J]. 应用力学学报, 2005(2): 275-278, 339. (ZHANG X W, LI G J, LI J, et al. Driving mechanism analysis of cylindrical ultrasonic motor with bending vibration mode[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005(2): 275-278, 339. (in Chinese))
- [24] 王宝潼, 张楚华, 席光. 三维分块非结构化网格上的可压缩流计算方法[J]. 航空动力学报, 2009(10): 2319-2325. (WANG B T, ZHANG C H, XI G. Numerical method of compressible flow on three dimensional sub block unstructured grid [J]. Journal of Aerospace Power, 2009(10): 2319-2325. (in Chinese) DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2009.10.005.
- [25] 赵峰, 周连第, 任安禄. 通用三维分块贴体网格的耦合生成方法[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1994(4): 404-412. (ZHAO F, ZHOU L D, REN A L. General coupled generation of 3D multiple block body-fitted grid[J]. Journal Hydrodynamics (A), 1994(4): 404-412. (in Chinese) DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.1994.04.005.