

# 泵闸结构流场的水力特性

黄建军, 郑源, 张盾

(河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了提高泵闸工程工作的稳定性和高效性, 采用计算流体力学方法, 以设计参数作为控制条件, 运用 Fluent 软件对某泵闸工程进行了数值模拟计算和分析, 并对闸门附近的结构进行了优化。结合河道过流特点, 建立了断面有效过流面积率和过流均匀度两个表示过流断面水流流态的公式, 并以此作为数值模拟优化的目标函数, 对泵闸结构进行了优化。通过数值模拟, 分析了引、排水工况下的水流及流场分布规律, 分析了实际闸门附近的水流动特性和过流情况, 分析了内河侧“S”形转弯对工程水流的影响。通过整体水工模型试验, 对改造后的消能设施进行了论证。结果表明, 改造后的内外河最大流速均小于 0.6~0.8 m/s, 且河道的有效过流面积率和过流均匀度均大于 0.75。

**关键词:** 泵站; 闸门; 水流流态; 有效过流面积率; 过流均匀度; 数学模型

**中图分类号:** TV66    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-8530(2010)02-0149-06

## Hydraulic characteristics of flow field in pump and sluice gate

Huang Jianjun, Zheng Yuan, Zhang Dun

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** In order to raise stability and high effectiveness of pump and sluice gate engineering, the project on a pump and sluice gate works was carried out by an analysis of numerical simulation, and the structure near the sluice gate was optimized depending on the design parameters as a control condition and using Fluent software by computational fluid dynamics methods. Combining the river transflux features, effective transflux area rate and transflux uniformity were set up, which were two formula expressing flow patterns. Using two formulas as the objective of a numerical simulation and optimization function, the pump and sluice gate structure was optimized. The water current and flow field distribution at drawing and drainage conditions were analyzed, and the water flow circumstance and transflux near the gate as well as the effect of “S” turn at the inland river side on the water current were investigated. The results show that the maximum velocity modified of the inner and outer river area is less than 0.6~0.8 m/s, and the effective transflux area rate and transflux uniformity are greater than 0.75.

**Key words:** pumping station; sluice gate; flow pattern; effective transflux area rate; transflux uniformity; numerical model

收稿日期: 2009-07-31

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A03)

作者简介: 黄建军(1976—), 男, 江苏南通人, 博士研究生(hjjhlp@hhu.edu.cn), 主要从事泵站水力学研究。

郑源(1964—), 男, 山东日照人, 教授, 博士生导师(zhengyuan@hhu.edu.cn), 主要从事流体机械工程、水力机组仿真及水电站、泵站水力学教学与研究。

由于工农业生产发展的需要,我国的泵站工程得到迅速发展.其中水闸是调节水位、控制流量的低水头水工建筑物,主要依靠闸门控制水流,具有挡水和泄(引)水的双重功能;其在防洪、治涝、灌溉、供水、航运、发电等方面有着十分广泛的应用<sup>[1]</sup>.随着我国水利事业的蓬勃发展,在许多省市兴建了大量的大中型水闸,而小型水闸更是星罗棋布,不可胜数.这大大加强了平原地区抗旱和排涝的能力,促进了工农业生产的不断发展.

文献[2]中,作者从数学模型推导着手,自行研制开发了水力特性模拟软件,模拟泵闸不同的进出水流态;在此基础上,对泵闸进出水流的水力特性进行了比较,做了优化水力计算;根据泵闸的引排效果要求,模拟提出了最佳可行方案,并通过物理模型予以了论证;最后对建成后的泵闸的排涝引水效果进行了综合分析.

从以往的研究来看,对泵闸合建的工程,基本从模型试验出发对水力特性进行研究.本研究根据上海某泵闸工程实际施工,研究“泵+闸”工程的工作情况.由于“泵+闸”工作时,冲刷与消能是其主要任务,故笔者针对水闸下游的冲刷和消能,对泵闸工况进行数值模拟和试验研究.

## 1 泵闸结构的数学模型

在闸门局部开启引水工况下,闸下出流呈淹没孔口出流.对于高淹没度泄流,其流量系数计算公式为

$$\mu_Y = \frac{Q_Y}{eb \sqrt{2g(H_Y - h_s)}}, \quad (1)$$

式中  $Q_Y$  为引水流量,  $m^3/s$ ;  $e$  为闸门开启高度(即闸的控制开度),  $m$ ;  $b$  为闸孔净宽,单孔  $b = 12 m$ ;  $g$  取为  $9.8 m/s^2$ ;  $H_Y$  为引水工况下闸前外河水位与闸室底板高程之差,  $m$ ;  $h_s$  为闸室底板上的下游水深(即闸后内河水位与闸室底板高程之差),  $m$ .

根据试验结果结合  $\mu_Y$  与  $1 - h_s/H_Y$  的关系,通过回归分析,可以得到闸门局部开启引水工况下的流量系数计算公式为

$$\mu_Y = 0.685 \left( \frac{H_Y}{H_Y - h_s} \right)^{0.115}. \quad (2)$$

式(2)的适用范围:  $0.98 \geq h_s/H_Y \geq 0.4$ , 相关系数  $R^2 = 0.900$ .

由闸上下游的内外河水位及要求的引水流量,根据式(1)和(2)即可求出节制闸的控制开度  $e$ .

特征断面最大流速值的变化,不仅体现了消力

池消能效果的影响,还包含了结构优化前后水流流态变化的影响因素.定量表示水流流态,可以借鉴泵站进水流道 CFD 优化目标函数:流速分布均匀度及其各种加权变化形式.但是经过分析,流速分布均匀度取值为  $(-\infty, 1]$ ,特别是当断面平均流速小、断面各点流速差异大时,很容易取到  $-1$  以下.如果此时仍用流速分布均匀度表示水流流态就不合理了.

为了定量表示水流流态的变化,定义断面有效过流面积率  $K$  和过流均匀度  $V_u$  如下:

(1) 有效过流面积率

$$K = \frac{A_z - A_h}{A_z}, \quad (3)$$

式中  $A_z$  为断面总过流面积;  $A_h$  为断面回流面积.

(2) 过流均匀度

$$V_u = \frac{\overline{u_a}}{\overline{u_a} + u'_a}, \quad (4)$$

式中  $\overline{u_a}$  为断面平均轴向流速;  $\overline{u'_a}$  为断面平均轴向速度的偏差值.

$\overline{u_a}$  和  $\overline{u'_a}$  分别定义为

$$\overline{u_a} = \frac{\sum_1^n u_{ai} \cdot \omega_i}{\sum_1^n \omega_i}, \quad (5)$$

$$\overline{u'_a} = \frac{\sum_1^n |u_{ai} - \overline{u_a}| \cdot \omega_i}{\sum_1^n \omega_i}, \quad (6)$$

其中  $u_{ai}$  为网格单元轴向流速;  $\omega_i$  为加权系数;  $n$  为断面网格单元个数.

有效过流面积率和过流均匀度的取值范围都为  $[0, 1]$ .有效过流面积率可以定量表示断面回流的强弱,过流均匀度可以定量表示断面流速分布的均匀性.  $K$  和  $V_u$  值越大,表明断面的水流流态越好.

## 2 泵闸结构的数值模拟

应用计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法研究泵闸工程中的流动特性,可节省物理模型试验的时间和经费.

### 2.1 模型建立

对上海某处的泵闸进行了研究.研究的泵闸模型范围包括节制闸闸室段、内外河消力池、外河抛石防护段.模型范围内总长度约为  $100 m$ .

排涝是以水闸外河低潮位自排,或者外河水位

高时开启水泵抽排等两种方式运行;引水则以开闸纳潮的方式运行。

具体操作要求:当外河水位高于内河水位时,闸门关闭挡水;当外河水位低于内河水位时,闸门关闭,维持内河水位。正常情况下,维持内河水位为2.50~2.80 m。根据气象预报,在暴雨来临前,当内河水位高于2.80 m或需要紧急预降时,趁外河低潮位时,预降内河水位至2.00 m;当外河水位高于内河水位,且内河水位高于2.80 m或需要紧急预降时,开启水泵抽排,当内河需要引水时趁外河涨潮时开闸引水。

开闸引水、排涝需严格控制闸门的开启度,控制过闸流量,防止闸下冲刷。一般情况下,引水、排水应在上下游水位差不大于0.5 m时启闭闸门;当紧急预降或紧急排涝时,闸门操作需考虑局部开启,以控制流量。水闸的过闸单宽流量一般控制为3.00~8.75 m<sup>3</sup>/s。如果在特殊情况下需紧急排水,而闸内外水位差较大时,必须分级逐步开启闸门,且每提升一级闸门需待水流稳定后再提升一级。一般的,闸门开启度按0.3,0.5,1.0 m分级提升。

## 2.2 模拟结果

对内河水位和引水量不同的两组工况进行了数值模拟,发现冲刷的流态均匀,不易形成淤积;同时,上下游水道的流态分布均匀。

从图1~4中可以看出,在不同流量时闸门附近的水流顺畅,流速在闸门附近较大,并且闸门附近不会出现淤积。但流速较大则要注意附近的冲刷和对闸门的影响。同时还可以得出,在大流量时,其水流主要集中在闸门所在的直线的河流一侧;而流速小时,另一侧也有流动。因此可以初步得出结论:通常可以以较小的水流运行,既保证较小的冲刷,也可以尽量地让水体进行交换。

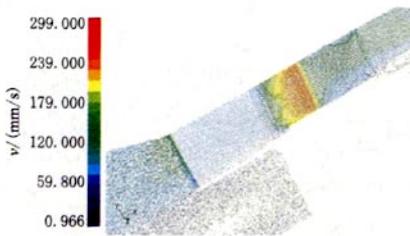


图1 闸门全开,内河水位2.8 m,引水流量75 m<sup>3</sup>/s时闸门附近的流速图

Fig. 1 Sluice gate full open, inland water level 2.8 m, velocity profile of vicinity sluice gate when diversion discharge was 75 m<sup>3</sup>/s

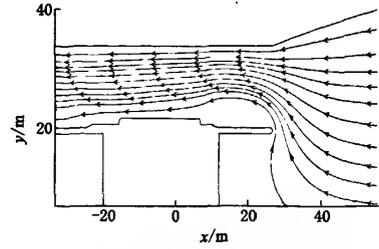


图2 闸门全开,内河水位2.8 m,引水流量75 m<sup>3</sup>/s时闸门附近的流线图

Fig. 2 Sluice gate full open, inland water level 2.8 m, streamline diagram of vicinity sluice gate when diversion discharge was 75 m<sup>3</sup>/s

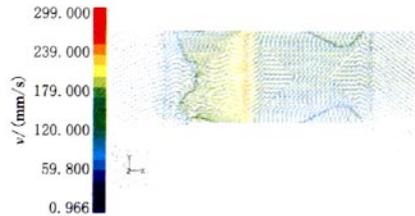


图3 闸门全开,内河水位2.8 m,引水流量50 m<sup>3</sup>/s时闸门附近的流速图

Fig. 3 Sluice gate full open, inland water level 2.8 m, velocity profile of vicinity sluice gate when diversion discharge was 50 m<sup>3</sup>/s

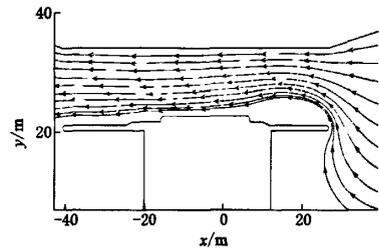


图4 闸门全开,内河水位2.8 m,引水流量50 m<sup>3</sup>/s时闸门附近的流线图

Fig. 4 Sluice gate full open, inland water level 2.8 m, streamline diagram of vicinity sluice gate when diversion discharge was 50 m<sup>3</sup>/s

## 2.3 结果分析

通过对常用流量下的工作情况进行数值模拟,主要对闸门处的有效过流面积率 $K$ 和闸门处过流均匀度 $V_0$ 进行了研究。利用公式(3)和(4)分别得到图5和图6。从图5中可以发现,有效过流面积率随着流量的增加而变大,是因为在流量较小时回流情况较为明显,且在流量大时其排水与引水效率均较高所致。

闸门处过流均匀度 $V_0$ 也随着流量的增加而增加。结合图2和图4可以看出,当流量减小的时候,

流线和流态在闸门附近的分布更趋向于闸门一侧,使流态更加平稳,但冲击更加明显。

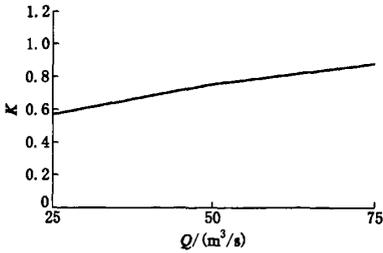


图5 数值模拟得到的K值与流量的关系  
Fig.5 Relationship between K-value and flow numerically simulated

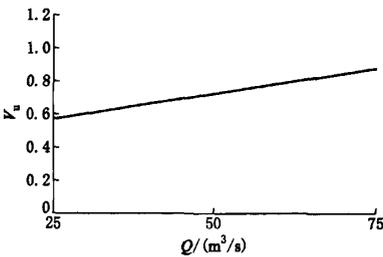


图6 数值模拟得到的 $V_u$ 与流量的关系  
Fig.6 Relationship between  $V_u$  and flow numerically simulated

综合上面的分析可以看出,改进后的泵闸,在兼顾冲刷和流动特性的情况下,设计是合理可行的。更精确的方法是通过试验,以检验设计。

### 3 泵闸试验

试验将着重对“泵闸”的冲刷和流动特性进行研究,主要研究闸出水处流道的冲刷情况,以及引水系数(均匀度与过流率相结合的情况)。

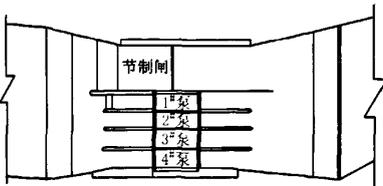


图7 泵闸水工模型平面  
Fig.7 Floor plan of pump and sluice gate hydraulic model

#### 3.1 试验目的

分析泵闸工程中流道冲刷情况:观测在各种工况下,闸门不同开度时,闸下试验范围内的水流流态、水力衔接形态、沿程水面线、流速分布、动静水压

力分布等,观察水流对流道的冲击情况;提供流速数据,包括防冲槽末端及抛石防护带末端的河床水流流速数据;提供在各种工况时的闸门开启角度与过流量的关系曲线和流量系数;提出改善意见,并提供内外河最佳消能防冲布置。

需要说明的是,在各种工况下,闸门不同开度时,闸下试验范围内的水流流态、水力衔接形态、沿程水面线、流速分布、动静水压力分布等的测试,前期进行的都是物理模型试验,由于测点多、工况多,测量费时费力,单一方案完整测量需一个月的时间。为了加快进度,最大限度地优化结构,后期在数学模型优化结果的基础上,用物理模型进行最终检验。

#### 3.2 试验手段

物理模型采用原型与模型长度比尺为25:1,建筑物模型全部按设计图纸用灰塑板精制。灰塑板糙率为0.008左右,相当于原型混凝土糙率0.014左右。内、外河河道地形采用断面板法进行地面控制,并用水泥砂浆抹面。水泥砂浆抹面的模型糙率为0.012左右,相当于原型河道糙率0.021左右。模型河道平面尺寸控制精度为 $\pm 5$  mm,高程精度为 $\pm 0.5$  mm;建筑物模型加工精度为 $\pm 0.3$  mm,安装精度为 $\pm 0.3$  mm。根据试验要求,模型水泵仅模拟进出水流量及流量。模型中采用4台小型管道泵模拟原型水泵抽水情况,按照流量比尺确定模型单泵流量为2.4 L/s,模型流量用三角堰进行率定。模型泵启闭及流量调节采用双阀控制。

模型试验由自循环式供水系统供水。自循环式供水系统由蓄水库、水泵、供水管及回水槽等组成。模型进水头部设有平水及整流设施,并与量水堰连接。模型中,内外河侧尾水位采用插板式尾门进行控制。

模型流量用三角形薄壁量水堰量测。模型中的水位采用测针筒引出后利用测针进行量测,测针量测精度为0.1 mm。动水压强用测压管量测,测压孔内径为1.5 mm,测压管内径为10 mm。流速测量采用光电旋浆流速传感器,启动流速为0.02 m/s,用光电直读式流速流向仪进行人工施测,采样时间为10 s,每点做3~5次采样,取其平均值为该点流速。水流流态则通过在模型水流中施放示踪剂、示踪浮标,利用数码相机或摄像的方法进行观测和分析。图8是从试验中得出的闸门全开、内河水位2.8 m、引水流量75 m<sup>3</sup>/s时闸门附近的流速分布,这与前面所得结论的情况相接近,从而验证了数值模拟的可行性。

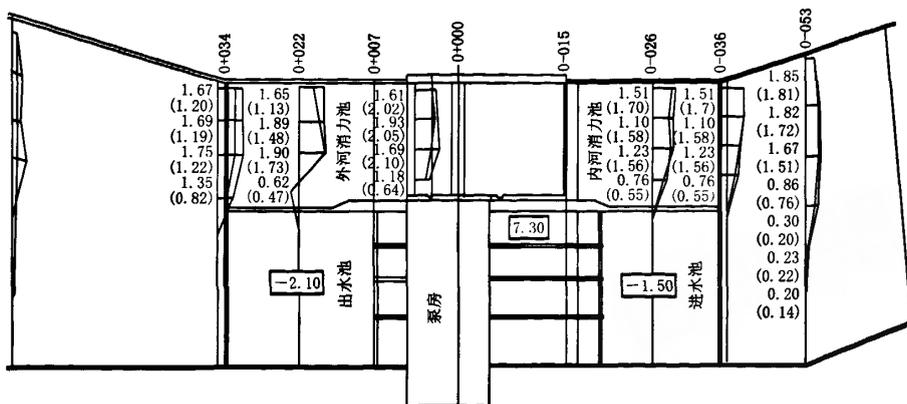


图8 闸门全开,内河水位2.8 m,引水流量75 m<sup>3</sup>/s时闸门附近的流速分布

Fig. 8 Sluice gate full open, inland water level 2.8 m, velocity profile of vicinity sluice gate when diversion discharge was 75 m<sup>3</sup>/s

### 3.3 试验数据

试验还通过对内外水位与引水流量系数的分析,研究了引水情况,给出了泵闸的整体工作特性,以便对其运行情况有全面的总结。通过试验可以看出,流量大时引水系数较大。表1为试验中闸门全开时引水的试验结果,主要从内河水位 $h_1$ 、外河水位 $h_2$ 与流量 $Q$ 展开研究, $M_y$ 为供水流量系数。

表1 闸门全开引水工况,过流能力的试验结果  
Tab.1 Test results of transflux capacity in sluice gate full open diversion condition

$Q/(m^3/s)$	$h_1/m$	$h_2/m$	$M_y$
75.00	2.798	2.970	0.178
75.00	2.010	2.255	0.240
56.00	2.798	2.900	0.137
46.50	2.010	2.115	0.159
32.10	0.838	0.960	0.220
75.00	1.983	2.218	0.245
75.00	2.813	2.975	0.178
50.00	2.013	2.135	0.170
50.00	2.810	2.905	0.122
25.00	2.010	2.050	0.088
25.00	2.785	2.815	0.063

### 3.4 结果分析与相关措施

采用数值模拟的前提条件是数值模拟结果和物理模型试验结果相差不大,在误差允许范围内必须进行数值模拟的参数率定。

模型试验表明,由于节制闸布置在一侧,当节制闸排涝时,海漫段主流偏于该侧,流速分布不均匀:在外河水位0.58 m,排涝流量40 m<sup>3</sup>/s时,出水水流出水面跌落现象;在外河水位2.50 m,排涝流量72 m<sup>3</sup>/s时,防冲槽末端断面后主流不稳定;同时,当以

外河抛石护底末端的最大垂线平均流速0.6 m/s为控制条件时,节制闸的允许排涝流量较小,在外河水位为0.58~3.97 m时,节制闸的允许排涝流量仅为11.5~26.7 m<sup>3</sup>/s。因此需增加辅助消能工程以改善外河流态。

节制闸排涝时,要使在各种水位下的外河流态得到明显改善,需要采取较为复杂的工程措施,消力墩的顶高程也须加到3.0 m。但是,受到景观设计及场地等因素的限制,消力池不能延长,消能工高程不能超过0.58 m。经综合考虑,并与相关部门商定,推荐消能工的平面布置方案为:将节制闸与泵站间的隔水墩向外河侧延长6.0 m,在消力池内设置一道高1.0 m、长10.5 m的横槛,在消力池尾坎上设置4个长2 m、高1.58 m的消力墩,即消力墩顶高程为0.58 m。

推荐方案的排涝试验结果表明,在外河水位较低时,消能工况对外河流态的改善效果较为明显;随着外河水位的升高,整流效果逐渐减弱。当以外河护底末端断面的最大垂线平均流速0.60 m/s为控制条件排涝时,推荐方案节制闸的排涝流量较原方案有较大幅度的提高。在外河水位为0.58~3.97 m时,节制闸的排涝流量为12.8~35.6 m<sup>3</sup>/s,但节制闸的排涝流量仍嫌不足。当以外河护底末端断面平均流速0.60 m/s为控制条件排涝时,在外河水位为0.58~3.97 m时,节制闸的允许排涝流量为16.1~75.0 m<sup>3</sup>/s(限制最大流量)。在相同排涝流量下,推荐方案外河护底末端的最大垂线平均流速较原方案有明显减小,但由于断面流速分布仍有一定程度的不均匀,局部流速仍然较大,护底末端以外的河道仍将受到不同程度的局部冲刷。

受内、外河河道允许过流能力的限制,节制闸在引排时,需采用闸门控制的运行方式.试验表明,泵站排涝或引水运行时(4台泵全开),进出水池的水流条件良好,流道进口前没有发现吸气旋涡,内外河水流的流速分布较为均匀,流速较小,符合抗冲要求.泵站在最高运行水位、设计运行水位和最低运行水位条件下,不同泵组合排涝运行时,内河来流均能保持平顺,进水前池水流平稳,水流出水池后主流偏左侧(泵站一侧),内外河最大流速均小于 $0.8\text{ m/s}$ ,泵站运行时基本能满足河道抗冲刷要求.

与原方案相比较,推荐方案的消能工况对外河流态有一定程度的改善.引水时,通过控制闸门开度,来满足排水要求.排水时,泵站单独运行时进水流态良好.枢纽整体布置及消能工程在整改后设计合理,可满足河道节制闸与泵站结合的排水和引水要求.

## 4 结 论

通过泵闸模型的数值模拟和模型试验,对泵闸的下游冲刷和流动特性进行了重点研究,以期使泵闸在建成后使用稳定.由数值模拟可见,排水时闸门前后,以及引水时泵的进出口处的流态均匀,常用流量附近的过流率也较高.由此可知,改造后的“泵闸”其设计是合理的和可行的.

通过水工模型试验,确定整改后的工程方案其引、排水工况对外河流态较原方案有较大幅度的改善.在排涝(或引水)时,通过控制节制闸闸门的开度,能满足工程引水、排涝的设计要求.泵站运行时进、出水池流态良好;工程实际运行工况与试验测量结果基本一致.故所设计应用的泵闸工程能达到引水、排涝工程的设计效果要求.

### 参考文献(References)

[1] Petrla T. Mathematical model for the free surface flow under a sluice gate[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2002, 25(1):49-58.

[2] 张建华. 杨树浦泵闸引水排涝工程效果研究[D]. 南京:河海大学水利水电工程学院,2006.

[3] 朱希平. 泵闸工程施工技术研究[D]. 南京:河海大学水利水电工程学院,2004.

[4] Amaral L G H, Righes A A, Filho P S, et al. Automatic regulator for channel flow control on flooded rice[J].

*Agricultural Water Management*, 2005, 75(3):184-193.

[5] 陈松山,葛强,周正富,等.大型泵站双向进水流道三维数值模拟[J].江苏大学学报:自然科学版,2005,26(2):102-105.

Chen Songshan, Ge Qiang, Zhou Zhengfu, et al. Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow for reversible intake passage large pumping stations[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2005, 26(2):102-105. (in Chinese)

[6] Tan Guangming, Ding Zhibang, Wang Changde, et al. Gate regulation speed and transition process of unsteady flow in channel[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, 20(2):231-238.

[7] Petrla T. Mathematical model for the free surface flow under a sluice gate[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2002, 125(1):49-58.

[8] Bryhn A C, Jimenez A, Mateos A, et al. Multi-attribute analysis of trophic state and waterfowl management in Ringkobing Fjord, Denmark[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1):2568-2577.

[9] 陆林广,徐磊,梁金栋,等.泵站进水流道三维流动及水力损失数值模拟[J].排灌机械,2008,26(5):55-58.

Lu Linguang, Xu Lei, Liang Jindong, et al. Numerical simulation for 3D turbulent flow and hydraulic loss of inlet conduit for pumping station[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(5):55-58. (in Chinese)

[10] Li Peijun, Wang Xin, Allinson G, et al. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2):516-521.

[11] 屈磊飞,王林锁,陈松山.闸站枢纽进水前池三维流动计算与研究[J].排灌机械,2005,23(4):18-20.

Qu Leifei, Wang Linsuo, Chen Songsan. Numerical simulation of 3D flow for forebay of combined sluice-pump station project[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(4):18-20. (in Chinese)

[12] 刘兴平.太湖波浪过程的数值模拟[J].江苏大学学报:自然科学版,2009,30(1):80-85.

Liu Xingping. Numerical simulation of wave process in Taihu Lake[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2009, 30(1):80-85. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)