

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.010

基于欧拉固液两相流模型的泵站进水侧流场三维模拟*

周大庆¹ 米紫昊¹ 茅媛婷²

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 成都 610072)

摘要: 针对泵站过水建筑物中出现大量的泥沙淤积和不良流态, 基于欧拉固液两相流模型对大型泵站进水侧流场进行三维 CFD 数值模拟。数值模拟结果表明, 泵站原始的布置方案会引起低速区、漩涡以及回流等不良的进水流态, 会导致在泵站前池出现泥沙淤积的现象。为了改善泵站进水流态和减少前池的泥沙淤积, 对泵站分水堰形状进行修改并在引渠段加设整流底坎。数值模拟结果显示, 通过对泵站原始布置方案的修改, 消除了前池内的回流, 漩涡的范围也有所减小, 泥沙淤积的现象得到了较大的改善, 水流中的泥沙体积分数平均减少了 13%。

关键词: 泵站 进水侧流场 泥沙淤积 欧拉两相流模型 三维模拟

中图分类号: TV675 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)01-0048-05

3-D Numerical Simulation of Inlet Structure Flow in Pumping Station Based on Eulerian Solid-liquid Two-phase Flow Model

Zhou Daqing¹ Mi Zihao¹ Mao Yuanting²

(1. Department of Energy and Electrical, Hohai University, Nanjing 211100, China)

2. Hydroelectric Investigation and Design Institute, SPC, Chengdu 610072, China)

Abstract: Sediment deposition in the pumping station has a huge negative impact on unit operation. 3-D CFD method was used to simulate pumping station inlet structure flow based on Eulerian solid-liquid two-phase flow model. Numerical results of preliminary scheme show that sediment deposition occurs in the forebay of pumping station because of poor flow pattern therein. In order to improve hydraulic configuration in the forebay, one modified measure was reconstructing water diversion weir shape, and another measure was setting a water retaining sill in the approach channel. The simulation results of modified scheme prove that back flow in the forebay was eliminated and sediment deposition region was also reduced greatly.

Key words: Pumping station Inlet structure flow Sediment deposition Eulerian two-phase flow model 3-D simulation

引言

在泵站工程中, 进水结构包括引渠、前池过渡段、进水前池和进水池, 泵站进水侧水力特性对水泵性能有直接的影响。当泵站进水侧布置不合理时, 容易导致前池等重要过水建筑内出现低速区、回流以及漩涡等不良流态并引起泥沙淤积。合理的过水建筑物布置方案对保证水泵正常运行有着重要意义。

对于泵站工程, 过去人们主要关注水流的流态, 更多开展的是单相流数值研究工作^[1-4]。刘超等采用数值模拟的方法研究了泵站侧向进水前池的进水流态; 刘新阳等针对泵站前池内的流态, 通过数值模拟的方法, 对泵站进行了修改, 为后来的泵站修改研究提供了方案选择; Aldama 运用数值模拟结合线性规划的方法对泵站进行了优化; Pedro Antonio 等采取数值模拟的方法, 通过与实验数据相对比, 对具有特殊结构的 Socorridos 泵站进行了深入研究。然而,

收稿日期: 2012-06-20 修回日期: 2012-09-08

* 国家自然科学基金资助项目(51106042)

作者简介: 周大庆, 副教授, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: zhoudaqing@hhu.edu.cn

随着泥沙淤积问题的出现,人们开始进行水沙两相流的研究^[5-6]。高传昌等通过模型试验对防止泵站泥沙淤积的措施进行了研究;唐学林等对基于格子 Boltzmann 法和大涡模拟思想,对泵站前池二维水沙流进行了数值模拟。迄今为止,水沙两相流 CFD 数值模拟的成果相对较少且多数分析都是基于二维平面模型的,二维计算模型能较好地模拟流场结构,并较为准确地预测流态的发展趋势,但泵站前池的泥沙运动是非常复杂的,而且呈现很强的三维性,因此本文采用欧拉固液两相流模型对大型泵站进水侧流场进行三维 CFD 数值模拟。

1 泵站水沙两相流三维数值模拟方法

1.1 几何模型

模拟的泵站装设有 5 台竖井贯流泵,单泵设计流量 $34 \text{ m}^3/\text{s}$,泵站要求单向排水。根据工程情况,研究的泵站范围从进水口至出水口总长约 690 m ,包括泵站进水引渠、进水前池、进水池以及上下游部分河道;上游水位 $H = 1.88 \text{ m}$,总流量 $Q = 206.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据泵站实际的几何尺寸,对泵站进水侧进行三维建模,如图 1 所示。

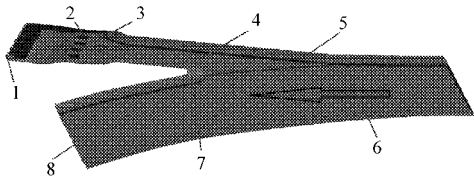


图 1 泵站进水侧布置原始方案三维模型示意图

Fig. 1 Sketch of whole preliminary arrangement of hydraulic structure

1. 进水池 2. 导流隔墩 3. 前池 4. 引渠 5. 拦沙底坎 6. 水流流动方向 7. 圆弧状分水堰 8. 闸门

考虑到分水堰、前池导流隔墩是由不规则的曲面组成,在相应的区域进行了网格局部加密,再对泵站进水侧整体三维模型采用四面体网格进行划分,通过权衡网格无关性和计算机的计算能力,模型的网格数为 3 000 000 个;网格质量均满足计算要求。

1.2 数学模型及求解

1.2.1 多相流数学模型及方程

欧拉多相流模型是将颗粒相作为拟流体,认为颗粒与流体是共同存在且相互渗透的连续介质,并一同在 Euler 坐标系下处理,即为连续流体模型。其模型包括 3 个重要部分:场方程、构造方程和界面条件的推导。场方程遵循动量、质量、能量守恒原理。描述固液两相流的连续方程为^[7]

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \mathbf{v}_1) = \frac{1}{\rho_1} \left(m_{s1} - \alpha_1 \frac{d\rho_1}{dt} \right) \quad (1)$$

式中 α_1 ——液相体积分数

\mathbf{v}_1 ——液相速度

ρ_1 ——液相的物理密度

m_{s1} ——固相与液相间的质量传递系数

液相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_1 \rho_1 \mathbf{v}_1) + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1) = -\alpha_1 \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_1 + \alpha_1 \rho_1 \mathbf{g} + \alpha_1 \rho_1 (\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_{\text{lift},1} + \mathbf{F}_{\text{vm},1}) + K_{s1} (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_1) + m_{s1} \mathbf{v}_{s1} \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\tau}_1$ ——液体间的剪应力张量

\mathbf{g} ——重力加速度

\mathbf{F}_1 ——液相外部体积力

$\mathbf{F}_{\text{lift},1}$ ——液相升力

$\mathbf{F}_{\text{vm},1}$ ——液相虚拟质量力

K_{s1} ——固相与液相间的动量交换系数

\mathbf{v}_s ——固相速度 \mathbf{v}_{s1} ——相间速度

p ——液体压力

固相动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \mathbf{g} + \alpha_s \rho_s (\mathbf{F}_s + \mathbf{F}_{\text{lift},s} + \mathbf{F}_{\text{vm},s}) + K_{ls} (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_s) + m_{ls} \mathbf{v}_{ls} \quad (3)$$

式中 p_s ——固体压力

α_s ——固相体积分数

$\boldsymbol{\tau}_s$ ——固相间的剪应力张量

\mathbf{F}_s ——固相外部体积力

$\mathbf{F}_{\text{lift},s}$ ——固相升力

$\mathbf{F}_{\text{vm},s}$ ——固相虚拟质量力

K_{ls} ——液相与固相间的动量交换系数

m_{ls} ——液相与固相间的质量传递系数

欧拉多相流模型规定,体积分数代表了每相所占据的空间,并且每相独自地满足质量和动量守恒定律,各项体积分数之和为 1^[7]。泵站进口所处流域多年平均含沙量为 $231 \text{ kg}/\text{m}^3$,出口所在流域多年平均含沙量为 $140 \text{ kg}/\text{m}^3$,泥沙密度为 $2\,500 \text{ kg}/\text{m}^3$,沙子颗粒的粘性系数为 $0.000\,103 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;所以在数值模拟中泵站水流进口处沙子的体积分数为 0.1,而在出口处沙子的体积分数为 0.06;在采用欧拉固液两相流模型进行数值模拟的过程中,水相作为主相,沙相作为次相。

1.2.2 计算区域的边界条件

将泵站上游进水口和进水池的出口断面设置为计算流场的进出口断面,进出口断面均垂直于水流方向,并且假定速度在整个断面上均匀分布。计算时流量为已知条件,故采用速度进出口边界条件。在计算流场中,固体壁面附近为紊流的粘性底层,其中速度梯度很大,高雷诺数情况的计算模型不再适

用,通过常用的壁面定理求得近壁处流速。计算流场中的水流表面为自由面,在不考虑水面波动影响的情形下,采用对称边界条件。

1.2.3 离散和求解算法

基于 Flunet 商业软件平台,利用有限体积法对雷诺时均 Navier-Stokes 方程进行数值离散,选用重整化湍流模型(简称 RNG $k-\varepsilon$ 模型),该模型通过修正湍流粘度,考虑平均流动中的旋流情况,便于处理流线弯曲较大的流动,比较适合模拟河段内复杂流动,对于解决具有旋转和回流特征的流体有独特的优势^[8]。方程的离散格式,选用分离式压力修正法作为流场的数值求解方法,扩散项和源项采用二阶中心差分离散,对流项采用二阶迎风差分格式离散;求解方法采用 van Doormal 和 Raithby 提出的 SIMPLEC (SIMPLE Consistene) 算法^[9-11]。计算中采用残差和质量守恒作为判断收敛的依据。

2 泵站原始布置方案数值模拟结果与分析

为了方便计算结果的分析,选取距离泵站底部 0.1 m 高处的水平截面和 3 个垂直于水流方向的横断面来研究,底部高程为 -2.5 m,3 个垂直截面分别在图 2 和图 3 中标出。采用非定常的多相流数值模拟,时间步长为 0.005 s,每个时间步长内的最大步数为 40 步,在经过 30 s 的计算后,数值模拟结果与分析如下:

图 2 为所截水平面的流速云图,并绘制有相应的流线。由图 2 可见,在原始泵站进水侧布置方案中,由于泵站引渠与河道成一定夹角,导致引渠内主流向右侧偏流,在泵站前池左侧出现了局部的漩涡。如图 3 所示,由于河流下游的水闸是关闭的,拦沙底坎使得大部分的泥沙淤积在泵站河道下游的低速区;然而,有一小部分泥沙依然随水流进入了引渠并且在泵站前池左侧导流墩附近的低速区形成了一定程度的泥沙淤积。

从图 4a 可看出,流场左侧流速 $v = 0.22$ m/s,远

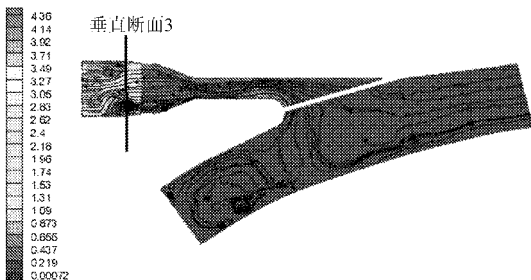


图 2 泵站进水侧原始布置方案 $H = -2.4$ m 水平截面
流线及流速云图

Fig.2 Velocity contours and streamlines in horizontal section ($H = -2.4$ m) for preliminary scheme

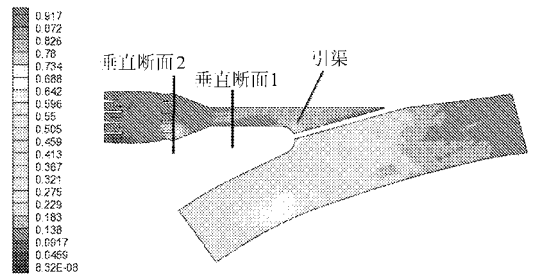


图 3 泵站进水侧原始布置方案 $H = -2.4$ m 水平截面
泥沙体积分数的云图

Fig.3 Contours of sand volume fraction in horizontal section ($H = -2.4$ m) for preliminary scheme

小于右侧流速 3.27 m/s,这说明在泵站引渠中主流向右侧偏流;图 4b 显示前池左侧靠近导流墩附近有一个低速区,最小速度为 0.15 m/s;图 4c 中同样显示,漩涡区域中心的最小流速 0.18 m/s。

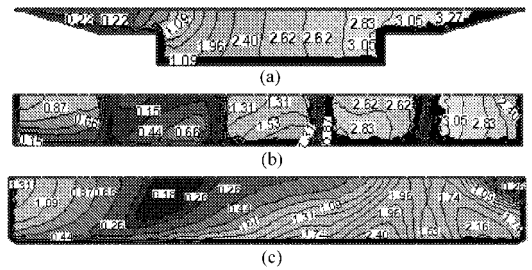


图 4 泵站进水侧原始布置方案垂直断面处速度

Fig.4 Contours of velocity magnitude in vertical cross section for preliminary scheme
(a) 断面 1 (b) 断面 2 (c) 断面 3

如图 5 所示,泥沙体积分分数由水面开始逐渐增大,渠底处的沙相体积分分数最大,泥沙大部分聚集在渠底;由于前池左侧漩涡在垂直方向分类上属于浅层漩涡,并且漩涡在垂直方向所覆盖的区域较小,所以前池左侧漩涡区域没有出现明显的泥沙淤积;泥沙主要淤积在前池左侧靠近导流墩附近,这与图 2 和图 4b 所示低速区分布特征一致。

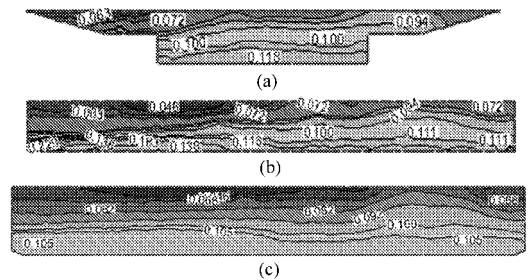


图 5 泵站进水侧原始布置方案垂直断面处泥沙体积分分数

Fig.5 Contours of sand volume fraction in vertical cross section for preliminary scheme
(a) 断面 1 (b) 断面 2 (c) 断面 3

以上数值模拟结果与分析表明,泵站进水侧原布置方案的水流流态不甚理想,因此需要在原布置方案的基础上作适当优化。

3 泵站修改布置方案数值模拟结果与分析

对泵站原始布置方案分两处修改。第一处对引渠进口左侧分水堰形状进行了修改,底部由原来的圆弧改为圆弧过渡至椭圆弧,引渠边坡延伸至进口,并使进口挡水渠与引渠进口左侧相切。第二处为在泵站前池的引渠段加设整流底坎,以期达到消除偏流、漩涡以及减少前池内泥沙淤积的目的,修改方案如图 6 所示。

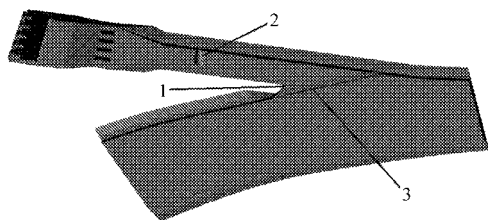


图 6 泵站进水侧修改布置方案三维模型示意图
Fig. 6 3-D sketch of the whole improved arrangement of hydraulic structure

1. 椭圆状分水堰 2. 整流底坎 3. 拦沙底坎

由于在引渠内加设了底坎,会引起相应的水头损失,而其水力损失主要表现为局部水力损失,坎后回流区是造成损失的主要区域。但由于未加底坎前池流态较差,使得进水的局部和沿程损失均很大,底坎的采用,消除了脱流和漩涡,改善了流态,减少了进水池水力损失,过坎局部水力损失与减少的进水池总损失相互抵消,因此底坎整流水力损失一般较小,通常仅占总水头的 1% ~ 5% [12]。

对比图 7 与图 2,可以看出引渠进口处附近的漩涡基本消失,同时,前池内部水流惯性作用产生的偏流现象基本消除;通过比较图 8a、图 8b 与图 4a、图 4b 可见,整个进水侧流态分布变得更加均匀,低速区的范围较之前有明显减小;图 8c 显示,由于消除了前池内的漩涡,前池的流态有了显著改善。

如图 9 所示,大部分沙子都被拦沙底坎所拦截并且淤积在河道的下游处;由于前池内流态得到了改善,低速区减小,前池内的泥沙淤积区域有了明显

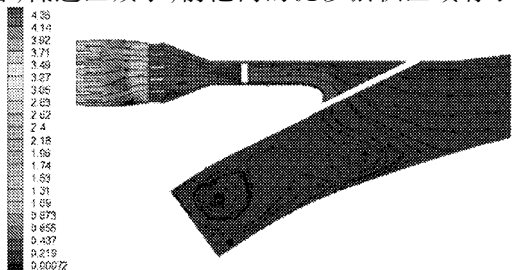


图 7 泵站进水侧修改布置方案 $H = -2.4$ m 水平截面等值线及流速云图
Fig. 7 Velocity contours and streamlines in horizontal section ($H = -2.4$ m) for improved scheme

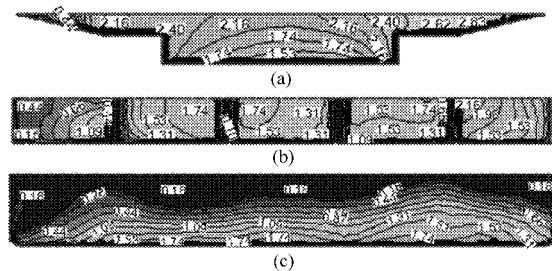


图 8 泵站进水侧修改布置方案垂直断面处速度
Fig. 8 Contours of velocity magnitude in vertical cross section for improved scheme
(a) 断面 1 (b) 断面 2 (c) 断面 3

的缩小;从图 10 可以看出,由于在引渠内设置了整流底坎,在对前池内流态进行整流的同时,也拦截了一部分泥沙,通过对比原布置方案和修改后布置方案的泥沙体积分数可知,通过引渠底坎后,水流中的泥沙体积分数平均减少了 13%。

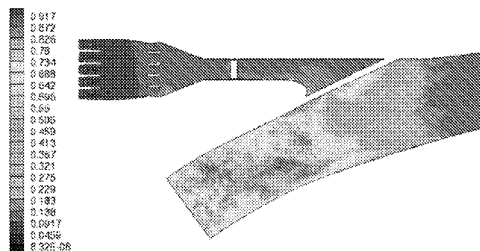


图 9 泵站进水侧修改布置方案 $H = -2.4$ m 水平截面泥沙体积分数云图
Fig. 9 Contours of sand volume fraction in horizontal section ($H = -2.4$ m) for improved scheme

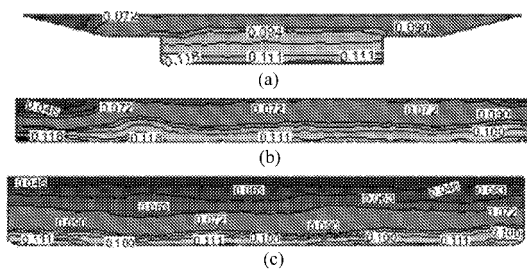


图 10 泵站进水侧修改布置方案垂直断面处泥沙体积分数
Fig. 10 Contours of sand volume fraction in vertical cross section for improved scheme
(a) 断面 1 (b) 断面 2 (c) 断面 3

4 结论

(1) 采用欧拉固液两相流模型对泵站进水侧进行数值模拟,成功预测了泵站进水侧的流场分布、泥沙相分布规律。

(2) 从数值模拟结果可以看出,进水侧不合理的布置方式会导致较大偏流和漩涡等不良流态;修改方案有效地消除了大尺度的偏流和大部分漩涡,泥沙淤积的情况也有了明显改善,计算结果与理论

分析相吻合。

(3)大尺度偏流、漩涡以及回流等不良流态将导致流场中出现低速区并伴有局部漩涡的产生,低速区中的流速若小于泥沙颗粒的启动速度,将造成

泥沙颗粒的沉积,若只是浅层低速漩涡区,则不会形成泥沙淤积;反之,就会造成泥沙颗粒的沉积,进而形成淤积。

参 考 文 献

- 1 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 Chao, Han Xu, Zhou Jiren, 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)
- 2 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 Xinyang,Gao Chuanchang,Shi Liwen, et al. Numerical simulation for fluid meliorating in both forebay and suction bay of pumping stations[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(3):242~246. (in Chinese)
- 3 Aldama A A. Pumping rate optimization in a storm drainage system through the combined use of numerical and linear programming [J]. Advances in Water Resources,1991,14(4):192~202.
- 4 Pedro Antonio, Sousa Jorge Almeida, Ambrosio Antonio, et al. Socorridos pumping station-numerical modelling[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering,2006:367~372.
- 5 高传昌,王玉川,石礼文,等. 泵站前池非连续挑流消能防沙技术措施[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):133~138.
Gao Chuanchang, Wang Yuchuan, Shi Liwen, et al. Technical measure for discontinuous trajectory bucket energy dissipation and sediment prevention at forebay of pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2011,29(2):133~138. (in Chinese)
- 6 唐学林,王武昌,王福军,等. 泵站前池水沙流的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(5):411~417.
Tang Xuelin, Wang Wuchang, Wang Fujun, et al. Numerical simulation of slit-laden flows in pumping station forebay[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2011,29(5):411~417. (in Chinese)
- 7 Fluent Inc. Fluent manual[M]. Lebanon, NH: Fluent Inc.
- 8 成立,刘超,周济人,等. 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 Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation of turbulent flow around sill with RNG $k-\varepsilon$ turbulent model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(3):37~39. (in Chinese)
- 9 陈松山,葛强,周正富,等. 大型泵站双向进水流道三维紊流数值模拟[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 in large pumping stations [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005,26(2):102~105. (in Chinese)
- 10 刘超,成立,汤方平,等. 水泵站开敞进水池三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报,2002,33(6):53~55.
Liu Chao, Cheng Li, Tang Fangping, et al. Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow for opening pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(6):53~55. (in Chinese)
- 11 van Doormal J P, Raithby G G. Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows[J]. Numerical Heat Transfer,1984(7):147~163.
- 12 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 Li, Liu Chao, Zhou Jiren, 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)
- 13 Tang Xuelin, Wang Fujun, Wu Yulin. An improved large eddy simulation of two-phase flows in a pump impeller[J]. Acta Mechanica Sinica,2007,23(6):635~643.