

# 闸站枢纽泵站前池流态 及其改善数值模拟研究

王铁力<sup>1</sup>, 赵文军<sup>2</sup>, 许潘东<sup>3</sup>, 陈 武<sup>2</sup>, 仇宝云<sup>4</sup>, 黄先北<sup>4</sup>

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127; 2. 江苏省骆运水利工程项目管理处, 江苏 宿迁 221200;  
3. 泗洪县机电排灌管理总站, 江苏 宿迁 221200; 4. 扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 分析了沙集闸站前池泥沙淤积成因, 并试图改造在下游新建清污机桥, 应用桥墩改善前池流态、减少泥沙淤积, 采用三维建模软件UG NX建立河道流场三维模型, 基于ICEM CFD进行计算域网格划分, 并使用ANSYS CFX进行数值计算。计算结果表明: 现状抽水工况下, 导流墙内侧存在大范围低速区, 因而产生大范围泥沙淤积。将泵站下游两侧导流墙延长至60 m, 在导流墙头部新建清污机桥, 应用桥墩导流, 导流墙内侧低速淤积区范围大大减小, 泵站进水流态大为改善。

**关键词:** 闸站枢纽; 前池流态; 清污机桥; 桥墩导流; 流态改善; 数值试验

中图分类号: TV675 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2024)04-0001-0004

## Numerical simulation study of flow pattern and improvement in front pool of sluice-pumping station

WANG Tiel<sup>1</sup>, ZHAO Wenjun<sup>2</sup>, XU Pandong<sup>3</sup>, CHEN Wu<sup>2</sup>,  
QIU Baoyun<sup>3</sup>, HUANG Xianbei<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;  
2. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 221200, China;  
3. Sihong County Pumping Drainage and Irrigation Master Station, Suqian 221200, China;  
4. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** This paper analyzed the causes of sediment deposition in the front pool of Shaji Sluice Station, and tried to rebuild the new cleaning machine bridge in the downstream. The bridge piers were used to improve the flow pattern of the front pool and reduce sediment deposition. The three-dimensional modeling software UG NX was used to establish a three-dimensional model of the river flow field, and ICEM CFD was used for computational domain mesh division. ANSYS CFX was used for numerical calculation. The calculation results indicate that under the current pumping conditions, there is a large-scale low-speed zone on the inner side of the diversion wall, resulting in large-scale sediment deposition. Extend the diversion walls on both sides downstream of the pump station to 60 meters, build a new cleaning machine bridge at the head of the diversion wall, and use bridge piers for diversion. The low-speed sedimentation area on the inner side of the diversion wall is greatly reduced, and the inflow flow pattern of the pump station is greatly improved.

**Key words:** sluice station hub; front pool flow pattern; cleaning machine bridge; pier diversion; flow pattern improvement; numerical experiments

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(52179091)、江苏省水利科技项目(2022016)

作者简介: 王铁力(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利工程设计工作。E-mail: 451096828@qq.com

多机组闸站枢纽工程,枢纽宽度远大于引河底宽,需在引河与泵站之间设置扩散段——前池,从而保证水流从引河到泵站的过程中能够平顺扩散。在泵站长期抽水运行过程中,前池水流流速偏低,易形成泥沙淤积。泥沙淤积会导致前池产生不良流态,导致水泵工作性能下降,甚至引起水泵汽蚀和机组振动,同时回流会进一步加剧前池的局部淤积,形成恶性循环<sup>[1]</sup>。因此应深入分析前池淤积的成因,从而优化工程设计、优化运行管理方案。

目前,一些学者对前池的不良流场及泥沙淤积原因进行过相关理论研究<sup>[2-3]</sup>,也有学者通过模型试验的方法开展了相关研究。刘成等<sup>[4]</sup>通过泵站水力模型试验,分析城市污水泵站普遍存在的前池不良进水流态现象以及对水泵性能、前池淤积的影响;丛日颖等<sup>[5]</sup>利用水力模型试验对泵站不同开机组合条件下的泵站前池流态进行了研究,分析了前池不良流态的产生原因以及对前池泥沙沉积和水泵工作性能的影响;王小振等<sup>[6]</sup>基于水工模型试验分析了不同形式泵站前池的泥沙淤积机理;周龙才等<sup>[7]</sup>应用正交曲线坐标系下的二维水深平均数学模型对泵站的前池流态进行了数值模拟,从而为改善泵站的进水条件提供预见性的建议和措施。

综合近些年研究现状,对多机组闸站双向泵站枢纽泥沙运动特性研究较少,本文拟采用三维建模软件UG NX建立河道流场三维模型,基于ICEM CFD进行计算域网格划分,并使用ANSYS CFX进行数值计算,分析泵站在不同运行工况下,泵站前池水流流动特性,探究泥沙淤积原因及位置,通过移位新建下游清污机桥导流,改善前池流态。

## 1 工程概况

沙集闸站枢纽位于江苏省宿迁市睢宁县沙集镇南约2 km处的徐洪河上,为江水北调徐洪河第一梯级站,南水北调东线中运河线并行站。建成于1993年,采用闸站结合的布置形式,中间为抽水能力 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 的抽水站,两侧布置设计流量为 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 的节制闸。抽水站选用1800HD-10.5型导叶式立式混流泵5台套,单机流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$ ,设计扬程10.5 m,配套TL1600-20/2150主电机5台,单机功率1 600 kW,总装机容量8 000 kW。抽水站为堤身式块基型结构,肘形管进水流道,平直管出水流道,快速闸门断流。节制闸共6孔,两侧各3孔,每孔净宽6 m,胸墙式结构;闸门为钢质平面直升门,固定卷扬式启闭

机启闭。根据沙集闸站2012—2020年河道水下检查结果,泵站下游前池内存在泥沙淤积现象。

## 2 计算模型与数值模拟方法

### 2.1 物理模型及网格划分

根据工程总体布置参数,建立河道流体计算域三维模型如图1,为确保计算可靠性,将计算域出口延伸至泵站进水流道进口直段。考虑到导流墩和隔墩对流动的影响,在其附近进行网格局部加密。经分析,网格总数约为300万时河道内低速区范围达到网格无关性条件。

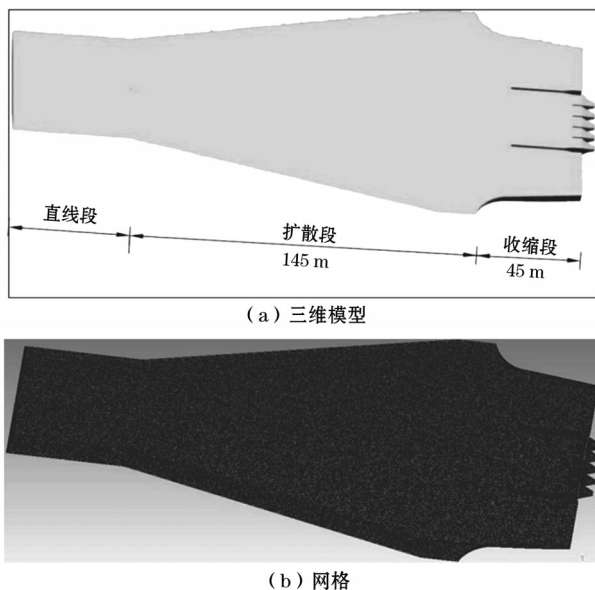


图1 下游河道三维模型与网格

### 2.2 数学模型及边界条件

#### 2.2.1 数学模型及求解方法

根据流体动力学中的质量守恒、动量定律和能量守恒等基本原理,建立过流流动数学模型。采用时均、不可压、黏性、定常流动的Navier-Stokes方程,描述计算域流动三维流场,选择广泛使用的标准 $k-\epsilon$ 模型计算流场内速度和压力。控制方程采用控制体积法进行离散化,压力项采用标准格式进行离散,动量、紊动能及紊动能耗散率采用迎风格式进行离散,离散方程采用SIMPLE算法分离式进行求解,并采用亚松弛技术,加快计算收敛速度。

#### 2.2.2 边界条件

计算域进口、出口均给定质量流量,流量对应相应工况下泵站设计流量及节制闸设计流量。除进、出口及计算域之间交界面,其余均采用固壁边界,满足不滑移条件。采用壁面函数法处理近壁区

的湍流流动,从而避免将湍流模型直接用到近壁区,在黏性底层内不布置任何节点,壁面上的切应力仍然按第一个内节点与壁面上的速度之差计算,以减少计算机内存占用,提高计算效率。开敞边界上根据流量设置流速。

## 2.3 泥沙淤积与起动流速

### 2.3.1 泥沙止动流速

泥沙之所以能够运动,是受到流速较快水流的裹挟作用,例如在河道变窄处,水流速度明显加快,从而促使泥沙被水流裹挟。而当河道由窄变宽时或形成脱流时,水流速度降低,当流速进一步降低到某一临界值,即到泥沙的止动流速时,泥沙受重力的作用容易沉积。泥沙的止动流速计算公式为

$$U_s = 2.24 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \quad (1)$$

式中: $\rho_s$ 为泥沙的密度,取 $2\,650\text{ kg/m}^3$ ;  $\rho$ 为清水密度,取 $1\,000\text{ kg/m}^3$ ;  $g$ 为重力加速度,取 $9.81\text{ m/s}^2$ ;  $d$ 为悬沙中值粒径,取 $0.05\sim 0.1\text{ mm}$ 。止动流速越大则泥沙越容易淤积。

由式(1)知,止动流速受多方面影响:①泥沙直径,泥沙直径越大越容易淤积;②泥沙与水的密度差,泥沙密度与水的密度差异越大,则浮力的作用越小,泥沙越容易淤积。将本工程水流泥沙参数代入式(1)可得泥沙止动流速范围:

$$U_s = 0.06\sim 0.1\text{ m/s} \quad (2)$$

当河道内流速低于 $0.1\text{ m/s}$ 时,泥沙易沉积,而

当流速进一步低于 $0.05\text{ m/s}$ 时,泥沙沉积情况将更加严重。

### 2.3.2 泥沙起动流速

泄洪时,由于流量大、流速高,原本抽水工况下淤积的泥沙可被高速水流冲走。水流的冲沙能力取决于泥沙自身的起动流速,当水流速度大于起动流速时,泥沙将被水流冲走。

泥沙起动流速可按式计算:

$$U_e = \left(\frac{h}{d}\right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10+h}{d^{0.72}}\right)^{0.5} \quad (3)$$

式中: $U_e$ 为泥沙起动流速,  $\text{m/s}$ ;  $h$ 为水深,  $\text{m}$ 。水深越大则起动流速越高,而泄洪工况下的最大水深为 $6.35\text{ m}$ ,将以上参数代入式(3)计算得到泥沙的最大起动流速范围为

$$U_{e, \max} = 0.59\sim 0.61\text{ m/s} \quad (4)$$

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 工程现状数模计算结果分析及验证

双向可逆泵站,抽水工况(上游水位 $21.5\text{ m}$ ,下游水位 $12.0\text{ m}$ ,单机流量 $10\text{ m}^3/\text{s}$ ),发电工况(上游水位 $20.03\text{ m}$ ,下游水位 $12.73\text{ m}$ ,单机流量 $8.64\text{ m}^3/\text{s}$ ),机组全开时前池池底以上 $z=2\text{ m}$ 平面内速度分布如图2。抽水工况下,导流墙内侧靠近导流墙区域因脱流始终存在低速区,产生淤积;发电工况下,泥沙淤积主要集中于导流墙外侧以及河道扩散段的两侧;泄洪工况下,导流墙外侧闸室流速高于泥沙起动

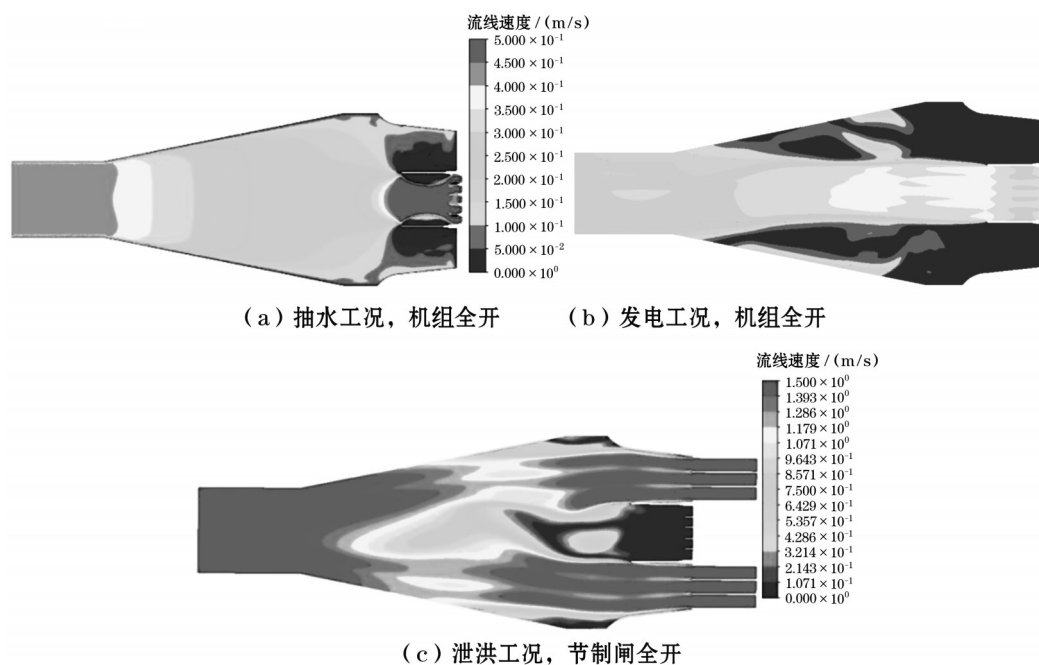


图2 抽水、发电、泄洪工况前池 $z=2\text{ m}$ 平面内速度分布



流速,淤积可被水流冲走,而导流墙内侧几乎为静水,无法冲走抽水工况下导流墙内侧淤积的泥沙。

图3所示为沙集闸站工程整体模型试验研究报告中的下游泥沙淤积模型试验结果,由图3可见,泄洪时泥沙淤积最严重的位置为河道扩散段末端的两侧,以及导流墙内侧,与本研究数值计算所得低于0.1 m/s的低速区位置一致。因此,可根据CFD计算结果的速度分布低于泥沙止动流速0.1 m/s来确定泥沙淤积的范围与程度。

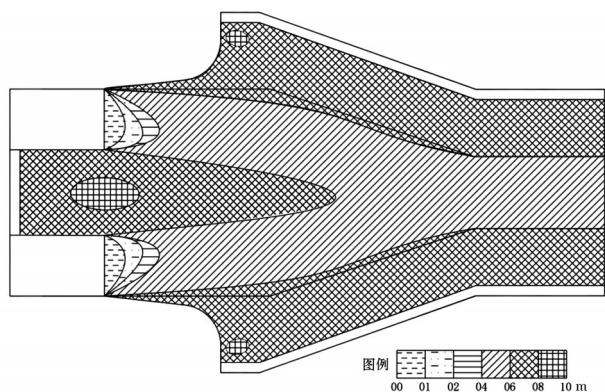


图3 下游前池河道模型泥沙淤积结果  
(泄洪工况,流动从右至左)

### 3.2 下游设置清污机桥导流效果数模计算结果及分析

现状下游清污机紧贴站身布置,直接影响泵站进水流道的进水流态。本次加固改造移位新建清污机桥,方案初拟阶段对3个方案进行比选,以期通

过移位新建清污机桥,利用清污桥桥墩导流,改善两导流墙内前池流态,减少泥沙淤积,确保泵站安全运行。方案(a):将现状导流墙延长10 m,清污机桥布置于距泵站站身下游40 m位置;方案(b):清污机桥布置于距泵站站身下游60 m位置,导流墙延长至清污机桥所在位置;方案(c):现状导流墙长度不变,将清污机桥布置于距泵站站身下游110 m位置。考虑机组全开抽水工况,泵站下游清污机桥设置在不同位置时,前池 $z=2$  m平面内的流速和流线分布情况见图4~5。

清污机桥设置位置比选主要考虑的问题:对泵站前池水流有较好的导流整流作用;清污机桥清污段不应太长,否则需要更多的清污机,造成清污设备浪费,并增加运行费用;不影响节制闸行洪排除水草。由图4~5可知:

方案(c)由于清污机桥桥墩距进水流道前的两导流墙之间的前池较远,导流作用小,导流墙内侧流速小于0.1 m/s低速区的范围仍较大,且需在河道全宽上沿清污机桥布满清污机,造成清污设备浪费,并阻碍节制闸行洪时水草漂浮物随水流流走,行洪时必须将拦污栅吊起,因此,不可取。

方案(a)、方案(b)清污机距离泵站分别为40 m、60 m,由于桥墩和两侧导流墙的导流作用,导流墙内侧的低速区范围较小,特别是方案(b),由于导流墙长度更长,低速区范围更小,而导流墙外侧闸室区域尽管抽水工况时死水区导致的低速区范围更大,可以通过泄洪工况高速水流冲走淤积。可大幅降低设备成本,运行管理方便。

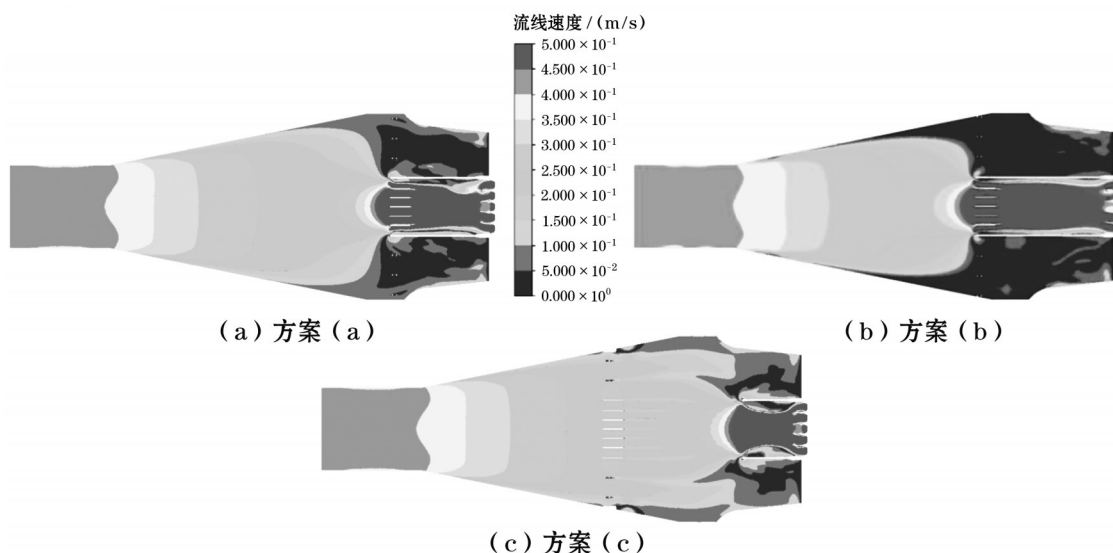


图4 机组全开抽水下游清污机桥不同位置时, $z=2$  m平面内速度分布

0.1206 W/K,是设计工况下能量耗散的3.4倍。在大流量工况下,系统内能量耗散为0.1023 W/K,是设计工况下能量耗散的2.9倍。

(3)叶轮内的能量耗散主要集中分在进口边、压力面、出口边以及间隙处,蜗壳内的能量耗散主要集中在隔舌和出口通道内。

#### 参考文献:

[1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.

- [2] 陈金维. 基于改进离散型遗传算法的管道离心泵非定常特性优化[D]. 镇江:江苏大学,2022.
- [3] 孙浩. 叶轮振荡条件下多级离心泵内部流场及外部特性研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [4] 石保虎,刘金龙,李晨昊,等. 小流量工况双吸离心泵能量损失及受力特性分析[J]. 水电与抽水蓄能,2023,9(5): 68-73.
- [5] 罗文. 双吸离心泵正反转工况内部能量损失机理研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2023.001126.
- [6] 王福军. 水泵与泵站流动分析方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

(上接第4页)

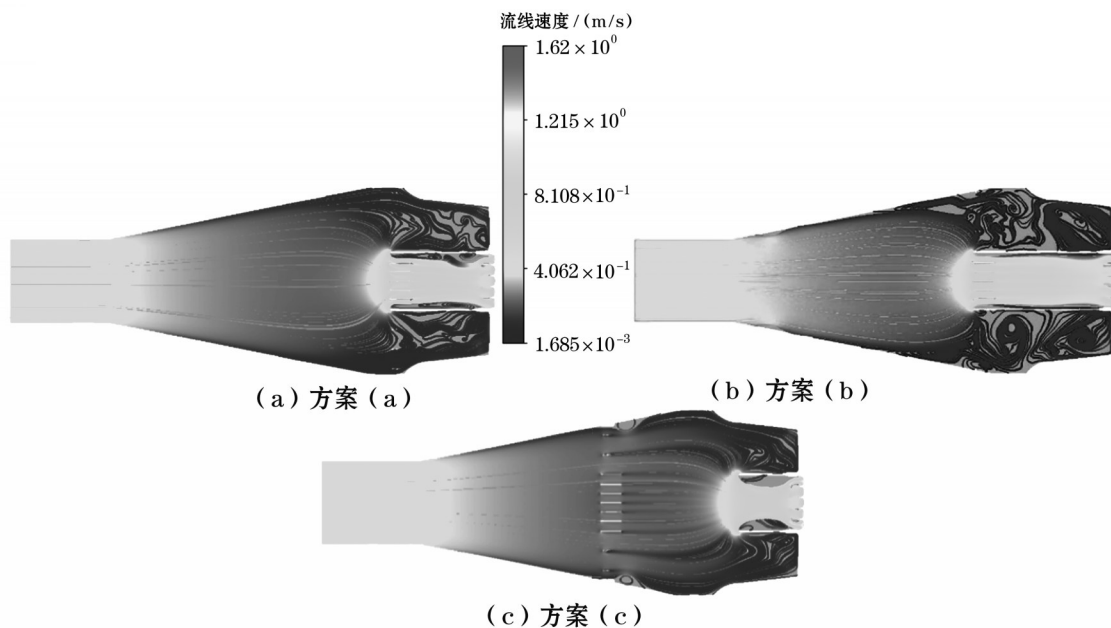


图5 机组全开抽水下游清污机桥不同位置时, $z=2$  m平面内流线分布

## 4 结 论

(1)闸站结合泵站下游,采用两导流墙将泵站前池与闸室分开,但在导流墙内侧靠近导流墙的区域产生回流漩涡,造成大量泥沙淤积。

(2)适当延长泵站下游导流墙,将清污机桥移位至导流墙头部,采用墩墙式桥墩进行导流,可以大幅度减小前池内低速回流区,减少泥沙淤积,改善泵站进水流态。

(3)泵站两导流墙外侧的闸室区域的泥沙淤积,可以在节制闸行洪时予以冲刷排除。

#### 参考文献:

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,

2009.

- [2] 窦国仁. 河口海岸全沙模型相似理论[J]. 水利水运工程学报,2001,1(1):1-11.
- [3] 吉庆丰,陈永明,冯丽华. 用蒙特卡罗方法计算泵站前池泥沙淤积[J]. 灌溉排水学报,2004,23(4):40-43.
- [4] 刘成,何耘,韦鹤平. 泵站前池进水流态及泥沙淤积的试验研究[J]. 水泵技术,1997(3):40-44.
- [5] 丛日颖,陈毓陵,冯建刚,等. 污水泵站前池进水流态对水泵性能及泥沙淤积的影响[J]. 中国农村水利水电,2005(3):103-105.
- [6] 王小振. 大型泵站前池泥沙淤积机理及结构优化设计研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2010.
- [7] 周龙才,刘士和,丘传忻. 泵站正向进水前池流态的数值模拟[J]. 排灌机械工程学,2004,22(1):23-27.