

# 高含沙侧向进水前池泥沙分布特征

樊新建<sup>1</sup>,姚薇<sup>1,2</sup>,董春海<sup>1</sup>,乔文<sup>1,4</sup>,贾广钰<sup>3</sup>,孙江河<sup>4</sup>

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃兰州 730050; 2. 重庆西科水运工程咨询有限公司,重庆 402247; 3. 甘肃省景泰川电力提灌管理局,甘肃景泰 730400; 4. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司,甘肃兰州 730000)

**摘要:**为解决从多泥沙河流取水的大型泵站侧向进水前池的泥沙淤积问题,以景泰川电力提灌工程某侧向进水前池为研究对象,基于 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型耦合混合多相流模型,采用 FLUENT 软件对淤积状态下不同收缩边墙体型的侧向进水前池开展水沙两相流数值模拟。结果表明:进水前池中央为高流速主流区,主流区两侧为大小不等的低流速回流区漩涡,受流场结构影响,两侧回流区为高含沙量区,自主流区向两侧回流区相对含沙量递增明显,回流区相对含沙量沿水深增幅较主流区显著。随着侧向进水前池边墙收缩角的增大,主流区外侧回流区面积明显减小,水流挟沙能力增强,高含沙量区面积占比显著减小,有效改善了侧向进水前池内泥沙淤积状况。

**关键词:** 泵站;侧向进水前池;收缩边墙;流场;含沙量

中图分类号:TV671

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)02-0017-07

**Characteristics of sediment distribution of lateral inflow forebay under high-concentration sediment conditions//** FAN Xinjian<sup>1</sup>, YAO Wei<sup>1,2</sup>, DONG Chunhai<sup>1</sup>, QIAO Wen<sup>1,4</sup>, JIA Guangyu<sup>3</sup>, SUN Jianghe<sup>4</sup> (1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd, Chongqing 402247, China; 3. Gansu Jingtaichuan Irrigation Management Bureau, Jingtai 730400, China; 4. Gansu Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** To address the problem of sediment accumulation in the lateral inflow forebay of large pumping stations that pumps water from sediment-laden rivers, taking a lateral inflow forebay of the Jingtaichuan Electric Power Irrigation Project in Gansu Province as the research object, FLUENT software was used to numerically simulate water-sediment two-phase flow under sedimentation conditions for different contraction wall configurations of the lateral inflow forebay based on the Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model coupled with mixture multiphase flow model. The results show that a high-velocity mainstream zone is formed in the center of the inflow forebay, and vortices of varying sizes are generated on both sides of the mainstream zone, forming two low-velocity recirculation zones. Affected by the flow field structure, these recirculation zone on two sides are high-concentration sediment areas, with the relative sediment concentration increasing significantly from the mainstream zone to the recirculation zone. The increase in relative sediment concentration with the water depth in the recirculation zones is more significant than that in the mainstream zone. As the contraction angle of the sidewall of the lateral inflow forebay increases, the area of the recirculation zone outside the mainstream zone decreases significantly, the sediment-carrying capacity of the water flow is enhanced, and the proportion of the high-concentration sediment areas is significantly reduced, effectively improving the sediment deposition situation in the forebay.

**Key words:** pumping station; lateral inflow forebay; contraction sidewall; flow field; sediment concentration

泵站前池具有平顺和均匀扩散水流的作用,合理的泵站前池设计可为取水提供良好的进水条件并发挥显著的工程效益<sup>[1]</sup>。部分泵站前池受地形限制和实际工程需要,不得不采用侧向进水的池布

置形式,侧向进水前池来水方向与机组吸水方向存在一定夹角,致使前池内产生回流、漩涡等不良流态,对于从高含沙河流取水的泵站,还会削弱水流的挟沙运动能力,造成前池内泥沙淤积,进一步恶化取

**基金项目:**国家自然科学基金项目(513798128);甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA238);甘肃省水利科学试验研究及技术推广项目(23GSLK038)

**作者简介:**樊新建(1979—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:fanxj008@163.com

**通信作者:**姚薇(1999—),女,硕士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:13790099692@163.com

水条件<sup>[2-3]</sup>。

目前针对改善泵站进水前池防淤整流措施的研究较为广泛。一方面,大量学者就泵站进水前池内流场的不良流态问题,提出增设导流墩<sup>[4]</sup>、隔墩<sup>[5]</sup>、立柱<sup>[6-7]</sup>、底坎<sup>[8-9]</sup>、隔板或导流板<sup>[10-11]</sup>,改变扩散角<sup>[12]</sup>以及布置组合式整流设施<sup>[13-14]</sup>等措施,显著改善了前池水流流态和泥沙淤积问题。刘香坤等<sup>[15-16]</sup>发现采用八字形导流墩和45°压水板能有效减小高含水大型泵站前池回流区影响,改善泥沙淤积状况并保证进水能力。周大庆等<sup>[17]</sup>基于欧拉固液两相流模型对前池进行三维CFD数值模拟,调整分水堰形状并加设整流底坎,得到回流消除、漩涡尺度减小和相对含沙量减小13%的结论。樊新建等<sup>[18]</sup>以景电提灌工程某泵站前池为研究对象进行数值模拟,发现正向进水前池扩散角为25°~30°时主流扩散效果较好,有效改善了多泥沙河流引水泵站的泥沙淤积问题。资丹等<sup>[19]</sup>调整开机台数和开机组后发现两侧边壁含沙量与开机台数呈反相关,不淤流速与开机台数呈正相关,两端机组停运会产生死水区和漩涡回流区。另一方面,学者们发现泵站前池的来水流量、泥沙粒径和含量对淤沙问题的影响也值得研究。Anuar等<sup>[20]</sup>研究发现来水流量增大和泥沙粒径减小均能降低泥沙沉降量。窦元之等<sup>[21]</sup>观测到前池淤沙高度随含沙量增大而升高。上述研究表明,现阶段进水前池防淤整流措施研究中以正向进水前池为研究对象且采取局部改良方案居多,而侧向进水前池和体型结构优化研究较少,尤其是泵站侧向进水前池收缩边墙体型结构对前池水流流态和泥沙淤积情况的影响研究还相对匮乏。

本文以甘肃省景泰川电力提灌工程某泵站侧向进水前池为研究对象,结合现场调查和数值模拟方法,开展侧向进水前池收缩边墙体型对池内水流流态和含沙量分布的影响研究,揭示侧向进水前池水沙运动特性,探讨侧向进水前池泥沙淤积机理,为同类泵站的设计和更新改造提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程布置

景泰川电力提灌工程是我国首次兴建的高扬程、大流量、多梯级电力提灌工程,仅一期、二期工程的26座泵站中侧向进水前池泵站就有14座,侧向进水前池占比较大,为景电灌区带来巨大的工程效益和社会效益<sup>[22]</sup>。图1为景泰川电力提灌工程中泥沙淤积状况较具代表性的某泵站侧向进水前池,该泵站设计流量为28 m<sup>3</sup>/s,泵站前池设计水位为1454.60 m,进水池池底高程为1451.97 m,共布置

了8台机组,其中1号和8号机组为备用机组,池长L=83.15 m,进水口宽度B<sub>m</sub>=12.1 m,末端宽度B<sub>n</sub>=71.8 m,水平段池深h=4.23 m,进水池池深H=7.3 m,外侧边墙收缩角α=0°。

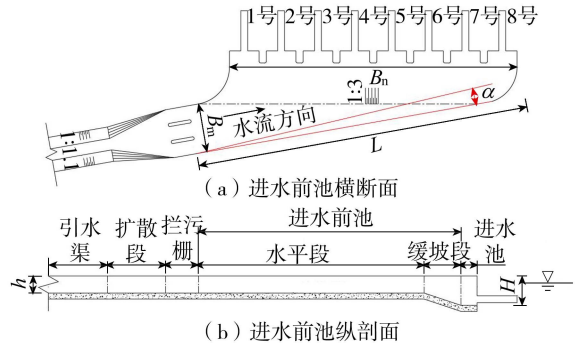


图1 侧向进水前池结构示意图

为研究泵站侧向进水前池边墙收缩角对前池内含沙量分布的影响,建立了α分别为0°、1°、2°、3°、4°、5°这6种体型参数的侧向进水前池模型,并进行水沙两相流数值模拟计算,其中α=0°为原型泵站的进水前池边墙收缩角。泵站设计工况下2~7号机组开启,1号、8号备用机组关闭。设前池进水口断面外侧边墙与前池水平段池底交点为坐标原点O,横向为x方向,纵向为y方向,垂向为z方向,布设Z1~Z7共7个垂向断面,其中Z3~Z5断面用于分析泥沙沉积状况,X1~X8断面分别对应1~8号机组横断面,X9断面为进水口断面,Y1~Y4为前池水平段和缓坡段始、中、末纵断面,各断面布置见图2。

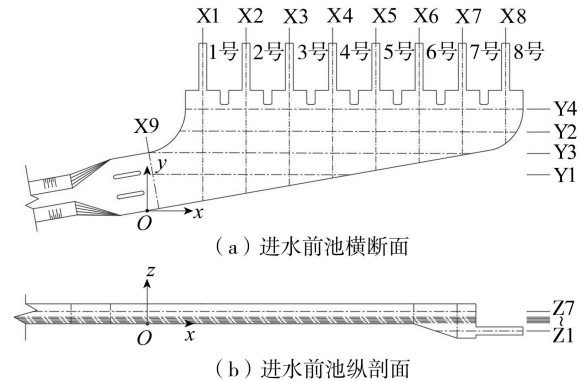


图2 特征观测断面布置示意图

### 1.2 现场调查

对泵站现场调查和取样分析发现,前池外侧边墙中部至末端存在大尺度立轴椭圆形回流漩涡,泵站引水年平均含沙量约为30 kg/m<sup>3</sup>,汛期最大含沙量达326 kg/m<sup>3</sup>。引水前池泥沙粒径分布在0.02~1 mm之间,中值粒径d<sub>50</sub>=0.025 mm,小于0.063 mm的极细颗粒沙土超过90%,可见该工程引水水流中的高含沙量小粒径悬移质泥沙是进水前池泥沙淤积的根本原因。停泵后,泥沙淤积集中分布在进水前池外侧边墙中部至池尾处,淤积量从外侧边墙到前池中

央逐渐减少,最高处可达 1.5 m,最大淤积面积约占前池面积的 1/4,泥沙堆积物挤压过流通道,前池调容能力大幅下降,影响泵站正常运行。

## 2 数学模型构建与验证

### 2.1 控制方程与边界条件

将侧向进水前池水沙两相流视为不可压缩流体,不计流体的热交换量,忽略能量方程,则泵站前池水流的连续方程和运动方程分别如下<sup>[23]</sup>:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla(\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla[\mu_m(\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla\left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k}\right) \quad (2)$$

式中: $\rho_m$  为混合流体密度; $\rho_k$  为第  $k$  相的密度; $\alpha_k$  为第  $k$  相的体积分数; $\mathbf{v}_m$  为混合流体的平均流速; $p$  为静水压力; $n$  为相数; $\mu_m$  为混合流体黏性系数; $\mathbf{g}$  为重力加速度; $\mathbf{F}$  为体积力; $\mathbf{v}_{dr,k}$  为次相第  $k$  相的漂移流速; $t$  为时间。

由于前池尺寸较大,池内水流流动较为复杂,前池内常发生回流及水流脱壁现象,选择 realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型进行水沙运动数值模拟与实际情况更为接近。计算过程中离散格式对流项采用二项迎风格式,数值求解方法采用 SIMPLEC 算法,迭代残差精度不低于  $10^{-4}$ <sup>[24]</sup>。

### 2.2 网格划分与检验

前池进水口设置为流速入口边界,设进水口流速  $v_0 = 1.84 \text{ m/s}$ ,吸水管设置为出口边界,液面采取刚盖假定,自由表面设置为对称边界条件,其余壁面为固体边界,使用壁面函数处理<sup>[25]</sup>。计算介质为水沙两相流,水为主相, $\rho_{\text{水}} = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,沙为次相, $\rho_{\text{沙}} = 2500 \text{ kg/m}^3$ ,入池水流相对含沙量为 1.2%,泥沙粒径为 0.025 mm。

前池网格划分结果如图 3 所示。借助 ANSYS Mesh 软件对三维模型进行非结构化网格划分,对比 8 种网格划分方案(网格特征长度在 0.24 ~ 0.48 m

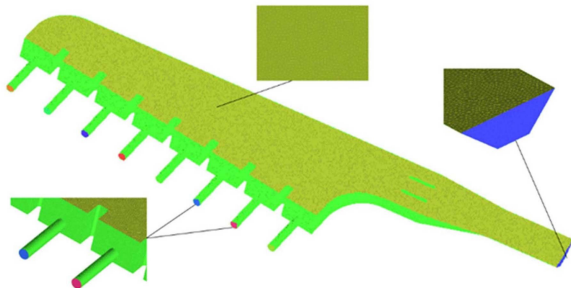
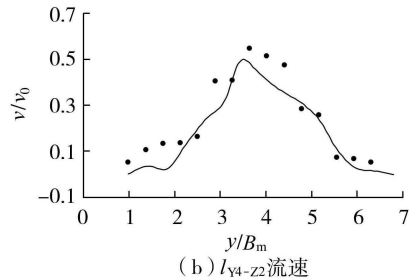
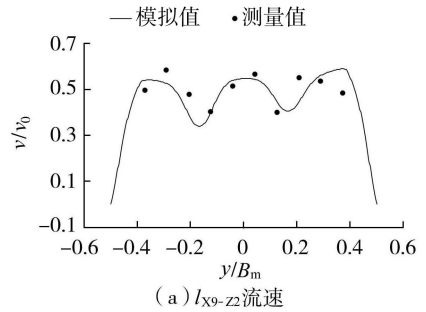


图3 前池网格划分结果

之间,网格数量在 87 万 ~ 660 万之间),经网格无关性检验后发现,当网格特征长度为 0.30 m、网格数量为 347 万时,网格质量合格。

当进出口水流流速及含沙量趋于稳定并形成明显的区域分布后,选取特征线  $l_{X9-Z2}$  和  $l_{Y4-Z2}$  (分别表示 X9 与 Z2 断面交叉线、Y4 与 Z2 断面交叉线)进行流速数值吻合度分析,并比较前池现场泥沙淤积情况和数值模拟得到的相对含沙量分布,结合流速和相对含沙量数据验证数值模拟的准确性。由图 4 (图中  $v$  为时均流速)可知,进水口特征线  $l_{X9-Z2}$  上流速实测值与模拟值相对误差为 0.116,标准误差为 0.032,吸水管特征线  $l_{Y4-Z2}$  上流速相对误差为 0.294,标准误差为 0.015,相对误差和标准误差均在合适范围内;前池外侧边墙中部高含沙量区位置与实测泥沙淤积区位置基本一致。现场流速、泥沙淤积情况和模拟结果相近,表明数学模型对侧向进水前池内水沙分布特性的计算准确可靠。



(c) 现场泥沙淤积情况



(d) 数值模拟得到的相对含沙量分布云图

图4 模拟结果与实测结果对比

### 3 收缩边墙体型对前池内泥沙分布的影响

#### 3.1 收缩边墙体型对前池内泥沙分布的影响

为研究前池内泥沙分布规律,基于计算域进口断面的平均含沙量  $C_0$ ,可将相对含沙量  $C/C_0$  划分为 3 个特征区间:0.80~<1.0 为低含沙量区,1.0~1.08 为高含沙量区,>1.08~1.17 为易淤区。设 Z6 断面( $z=0.2\text{ m}$ )为池内底层水体断面。由图 5 可知,底层水体除边墙中部范围为泥沙易淤区,其余范围为高含沙量区;随着水深增加,回流区从低含沙量区过渡到高含沙量区,增幅较主流区显著。受流场结构影响,底层水流流速低且漩涡涡心存在静水区,挟沙运动弱,悬移质颗粒逐渐下沉,当含沙量超出水流挟沙极限时,泥沙淤积量增大,严重影响泵站正常取水。

以进水前池面积  $S_0$  为标准,对比不同收缩边墙体型下同层水体的相对含沙量可知,工程原型( $\alpha=0^\circ$ )前池泥沙易淤区面积为  $0.38S_0$ , $\alpha=1^\circ、2^\circ、3^\circ、4^\circ、5^\circ$ 时泥沙易淤区面积  $S$  分别为  $0.33S_0、0.29S_0、0.20S_0、0.16S_0、0.15S_0$ ,较原型前池分别减少了 13.16%、23.68%、47.38%、84.21%、86.84%。 $\alpha$  较

小时底层存在明显椭圆涡状分布,随着  $\alpha$  的增大,漩涡尺度大幅减小, $\alpha$  增至  $3^\circ$ 时漩涡基本转变为细长带状,表明侧向进水前池的外侧边墙向内收缩一定角度可显著降低泥沙沉降淤积。

#### 3.2 泥沙纵向分布规律

图 6 为不同收缩边墙体型下侧向进水前池典型特征断面相对含沙量的纵向分布,为便于分析,选取相对含沙量较高的底层水体进行泥沙淤积研究。由图 6 可知,前池水平段(Y1 断面)挟沙水流不断扩散,相对含沙量沿纵向呈递增趋势,挟沙运动效应显著;缓坡段起始端(Y2 断面)受外侧边墙回流区的影响相对含沙量先增大后减小,其中外侧边墙处泥沙淤积严重;缓坡段中部(Y3 断面)和末端(Y4 断面)主流区中部相对含沙量高于两端并缓慢递减,两端受 2 号机组和 7 号机组引力作用出现拐点,回升后趋于稳定,其中进水口内侧 1 号机组入水口附近受回流作用影响,左侧回升幅度高于主流区,可见左侧更易发生泥沙堆积。

从相对含沙量的数值看,水平段和缓坡段起始端相对含沙量在 1.00~1.13 之间,峰值 1.13 位于边墙中部回流区;缓坡段中末端相对含沙量在

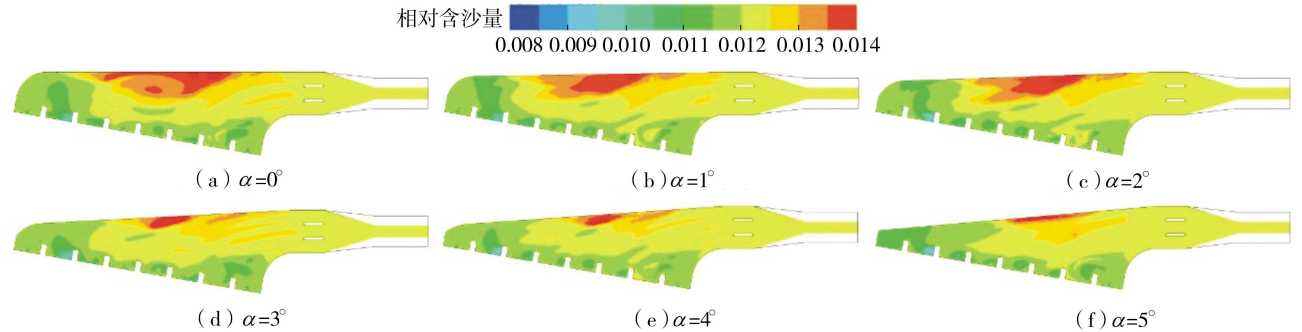


图 5 不同收缩角下底层水体含沙量分布云图

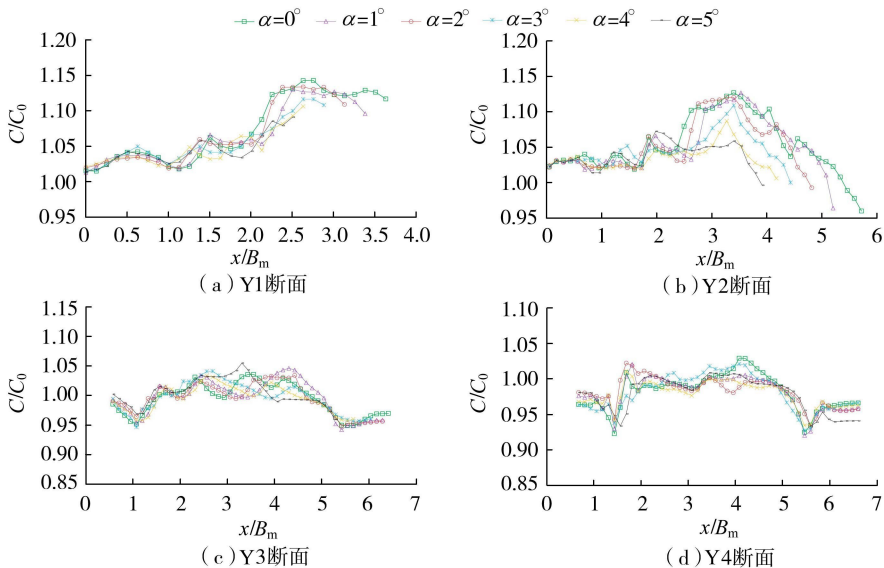


图 6 前池内含沙量纵向分布

0.92~1.03 之间,位于高含沙量区,且自前池入水口至外侧边墙相对含沙量显著递增。

从不同收缩边墙体型下前池相对含沙量沿纵向的分布对比可见,前池回流区相对含沙量随收缩边墙体型变化显著,上升区、回升区及稳定区的相对含沙量随边墙收缩角增大而减小,进一步表明回流区漩涡在体型优化中近乎消失,泥沙淤积得到明显改善。

### 3.3 泥沙横向分布规律

图 7 给出了侧向进水前池相对含沙量的横向分布。由图 7 可知,X1、X2、X3 断面位于进口端,几乎不受外侧边墙处不良流态影响,流速分布中间高两侧低,主流区相对含沙量分布稳定,但其在机组入水口回流区影响下略有下降,在 0.92~1.14 之间;X4、X5、X6 断面水流横穿回流区漩涡中心进入机组,漩涡流速急剧减小,相对含沙量呈梯度下降,此区域泥沙淤积严重;X7、X8 断面位于池尾处,流速变化不明显,呈“一”字形分布,水流挟沙能力受回流区影响较小,相对含沙量呈逐渐下降趋势。

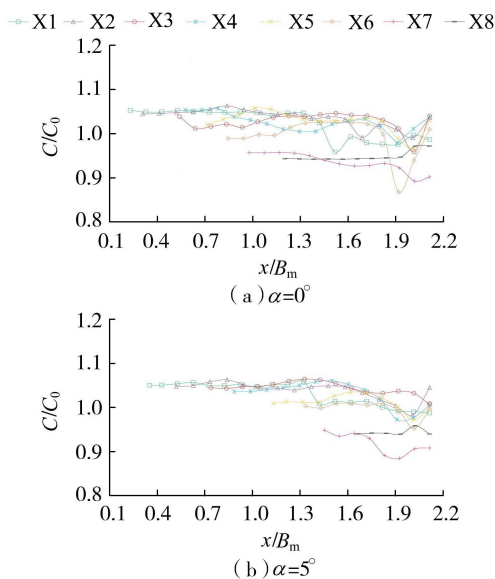


图 7 前池内相对含沙量横向分布(Z2 断面)

对比不同边墙收缩角下侧向进水前池相对含沙量变化,可知相对含沙量分布沿横向的变化规律与沿纵向基本保持一致,即收缩边墙角变化对主流区影响较小,对回流区的影响则显著得多。随着边墙收缩角的增大,回流区流速凹陷区减小乃至消失,说明经体型优化后,外侧边墙对入池水流约束力增大,流场稳定性显著提升,水流挟沙效应增强,池内相对含沙量降低,泥沙淤积情况得到缓解。

### 3.4 泥沙垂向分布规律

图 8 为侧向进水前池在不同收缩角下的垂向泥沙易淤区面积,可见泥沙易淤区面积沿水深逐渐增

大,原因在于回流区流速低,悬浮泥沙量超出挟沙极限并向下沉降淤积。当  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $5^\circ$  时,泥沙易淤区面积为原型前池的 89%、78%、41%、34%、27%,说明增大边墙收缩角能有效减小泥沙易淤区面积,低覆盖率的泥沙易淤区可减轻泥沙沉降对水流扩散的影响,挟沙能力得到提升。

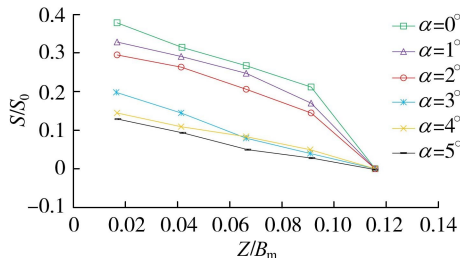


图 8 不同收缩角下垂向泥沙易淤区面积

图 9 给出了  $\alpha$  分别为  $0^\circ$  和  $5^\circ$  时下主流区、回流区、机组入水口及静水区的相对含沙量垂向分布。主流区相对含沙量呈下降趋势,下降速度先减小后增大,相对含沙量在 0.95~1.04 之间,水流挟沙效应较突出;回流区在漩涡影响下相对含沙量在 0.69~1.15 之间;机组入水口受泵站机组引力影响相对含沙量略微降低,可见此区域泥沙易发生淤积;静水区底层水体相对含沙量最大达 1.80,中层水体相对含沙量分布均匀且与进口断面平均值一致,表层水体相对含沙量低且下降梯度大,最小值为 0.40,说明静水区泥沙充分沉降。随着外侧边墙收缩角的增大,水流扩散效果增强,各区域相对含沙量下降,可见增大边墙收缩角在解决泥沙淤积问题上能取得良好成效。

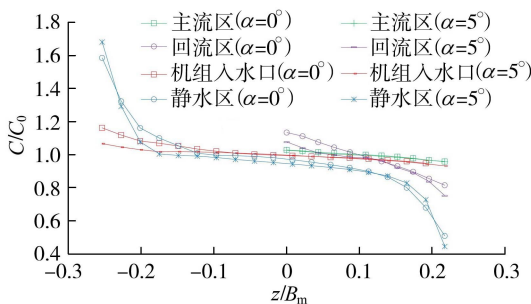


图 9 前池内相对含沙量垂向分布

### 3.5 收缩边墙体型对泥沙沉积率的影响

不同收缩边墙体型结构下泵站侧向进水前池泥沙沉积率计算公式为

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $C_{in}$ 、 $C_{out}$  分别为前池进水断面和出水断面平均相对含沙量。

计算结果表明泵站前池边墙收缩角与泥沙沉积率呈负相关,随着边墙收缩角的增大,泥沙沉积率逐

渐减小。 $\alpha=0^\circ$ 时,泥沙沉积率最大,为8.76%; $\alpha=5^\circ$ 时泥沙沉积率为2.29%,相较于原型泵站侧向进水前池下降了6.47%,表明增大侧向进水前池边墙收缩角后,泥沙沉积率显著降低,水流的挟沙能力提升,有效减少了池内相对含沙量。

### 3.6 水流流速对相对含沙量的影响

前池内流速相对含沙量具有较高相关性,由图10可知,前池内相对含沙量与水流流速为二次多项式关系。当泥沙粒径为0.025 mm且相对含沙量为1.2%时,池内不淤流速约为0.306 m/s。

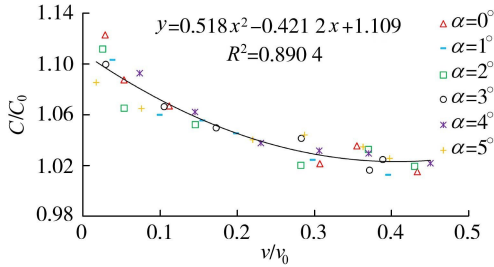


图10 前池相对含沙量与水流流速的关系

## 4 结论

a. 设计工况下,原型侧向进水前池高含沙量区面积较大,主流区向两侧回流区相对含沙量递增明显。随着边墙收缩角的增大,漩涡尺度减小,池内相对含沙量分布逐渐均匀,边墙收缩角为 $5^\circ$ 时前池泥沙易淤区面积较工程原型减小了86.84%,泥沙易淤区面积大幅减少。

b. 主流区相对含沙量沿纵向递增速率大,水流挟沙效应显著,回流区递增速率小。相对含沙量沿横向自外侧边墙至机组入水口处呈下降趋势,主流区泥沙稳定分布,外侧边墙中部至池尾处泥沙淤积最为严重。随着边墙收缩角的增大,泥沙淤积体减小了62%,主流区泥沙体积分数变化小,而回流区相对含沙量明显减小,进一步说明回流漩涡在体型优化中不断消减,回流区对相对含沙量分布的影响降低,泥沙淤积得到有效改善。

c. 收缩边墙体型与泥沙沉积率关系密切,边墙收缩角增大时,回流区相对含沙量显著降低,泥沙沉积率逐渐减小,至边墙收缩角为 $5^\circ$ 时泥沙沉积率下降了6.47%,提升了入池水流挟沙能力,有效减少了前池内泥沙淤积量,缓解了多泥沙河流引水泵站前池的泥沙淤积问题。

### 参考文献:

[1] LUO C, HE Y, SHANG Y, et al. Flow characteristics and anti-vortex in a pump station with laterally asymmetric inflow[J]. Processes, 2022, 10(11): 2398.  
[2] URISHEV B, ARTIKBEKOVA F, KUVVATOV D, et al.

Trajectory of sediment deposition at the bottom of water intake structures of pumping stations [J]. Materials Science and Engineering, 2021(1): 012137.

[3] 徐存东,王荣荣,刘辉,等.多泥沙河流侧向进水泵站开机组合对前池流态的影响研究[J].水利学报,2020,51(1):92-101. (XU Cundong, WANG Rongrong, LIU Hui, et al. Research on the influence of start-up combinations on the flow pattern in forebay of side-in-let pumping station on sandy river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020,51(1):92-101. (in Chinese))  
[4] ZHOU J, ZHAO M, WANG C, et al. Optimal design of diversion piers of lateral intake pumping station based on orthogonal test [J]. Shock and Vibration, 2021(1): 6616456.  
[5] 徐磊,夏斌,施伟,等.中隔墩长度对斜式轴伸泵装置出水流道水力特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(1):74-81. (XU Lei, XIA Bin, SHI Wei, et al. Influence of middle pier lengths on hydraulic characteristic of outlet conduit in pump system with slanted extension shaft [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(1):74-81. (in Chinese))  
[6] 夏臣智,成立,赵国锋,等.泵站前池单排方柱整流措施数值模拟[J].水利水电科技进展,2017,37(4):53-58. (XIA Chenzhi, CHENG Li, ZHAO Guofeng, et al. Numerical simulation of flow pattern in forebay of pump station with single row of square columns [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(4):53-58. (in Chinese))  
[7] 丁哲,张睿,陈毓陵,等.城市排水泵站水力特性及整流措施[J].水利水电科技进展,2024,44(2):7-14. (DING Zhe, ZHANG Rui, CHEN Yuling, et al. Hydraulic characteristics and rectification measures of urban drainage pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(2):7-14. (in Chinese))  
[8] 于永海,闫浩迪,叶长亮,等.基于BPNN-GA的泵站前池整流底坎参数优化[J].农业工程学报,2023,39(14):106-113. (YU Yonghai, YAN Haodi, YE Changliang, et al. Parameter optimization of rectification sill in the forebay of pumping station using BPNN-GA algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(14):106-113. (in Chinese))  
[9] 李志祥,冯建刚,钱尚拓,等.排水泵站整流底坎参数优化[J].农业工程学报,2021,37(3):56-63. (LI Zhixiang, FENG Jiangang, QIAN Shangtuo, et al. Optimization of rectification bottom sill parameters in drainage pumping stations [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(3):56-63. (in Chinese))  
[10] 张校文,刘超,荣迎春,等.多机组泵站正向进水阵列式隔板整流模拟及试验验证[J].排灌机械工程学报,

- 2022,40(4):378-384. (ZHANG Xiaowen, LIU Chao, RONG Yinchun, et al. Numerical simulation and experimental verification of forward feed array diaphragm rectifier for multi-unit pumping station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(4):378-384. (in Chinese))
- [11] 罗灿,雷帅浩,陈锋,等. 泵站进水池翼型导流板整流特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4):53-59. (LUO Can, LEI Shuaihao, CHEN Feng, et al. Numerical simulation of rectifying characteristics of the airfoil deflectors in the sump of pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4):53-59. (in Chinese))
- [12] 李明,王勇,熊伟,等. 泵站侧向进水前池几何参数优化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19):69-77. (LI Ming, WANG Yong, XIONG Wei, et al. Optimizing the geometric parameters for the lateral inflow forebay of the pump sump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(19):69-77. (in Chinese))
- [13] 冯建刚,曹亚萍,王晓升,等. 深层隧道进流式泵站前池流态及整流措施研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2):1-6. (FENG Jiangan, CAO Yaping, WANG Xiaosheng, et al. Study on flow pattern and rectification measures in forebay of deep tunnel inflow pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2):1-6. (in Chinese))
- [14] 冯建刚,钱向栋,张睿. 城市输水泵站前池流态及整流措施[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2):77-83. (FENG Jiangan, QIAN Xiangdong, ZHANG Rui. Flow patterns and rectification measures in forebays of urban water pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2):77-83. (in Chinese))
- [15] 刘香坤. 引黄灌区正向泵站前池防淤分析研究[J]. 中国水能及电气化, 2019(4):47-53. (LIU Xiangkun. Analysis and Study on silting prevention in forward direction pumping station forebay in the Yellow River Irrigation District [J]. China Water Power & Electrification, 2019(4):47-53. (in Chinese))
- [16] 徐存东,刘璐瑶,王国霞,等. 泵站直边正向前池流态模拟与泥沙淤积预防措施[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5):398-405. (XU Cundong, LIU Luyao, WANG Guoxia, et al. Flow simulation of front inflows in the straight-edge forebay of pumping station and preventive measures of sediment deposition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5):398-405. (in Chinese))
- [17] 周大庆,米紫昊,茅媛婷,等. 基于欧拉固液两相流模型的泵站进水侧流场三维模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):48-52. (ZHOU Daqing, MI Zihao, MAO Yuting, et al. 3-D numerical simulation of inlet structure flow in pumping station based on eulerian solid-liquid two-phase flow model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 44(1):48-52. (in Chinese))
- [18] 樊新建,董春海,王之君,等. 泵站正向进水前池扩散角对池内流场结构的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1):92-99. (FAN Xinjian, DONG Chunhai, WANG Zhijun, et al. Research on the influence of diffusion angle on the flow field structure in the forward inflow forebay of pumping station [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1):92-99. (in Chinese))
- [19] 资丹,王本宏,王福军,等. 开机组合对泵站进水系统泥沙浓度分布的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7):59-68. (ZI Dan, WANG Benhong, WANG Fujun, et al. Influences of start-up pump units on the sediment concentration for the intake system of a pumping station [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(7):59-68. (in Chinese))
- [20] ANUAR N, TALIB S, RADZALY N, et al. The effect of sedimentation to the pump sump system by using computational fluid dynamics (CFD) model [J]. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2020, 68(1):86-97.
- [21] 窦元之,顾靖超,陆立国,等. 高含沙水泵站前池扩散角试验与分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(5):114-119. (DOU Yuanzhi, GU Jingchao, LU Ligu, et al. Test and analysis of diffusion angle of front pool of high sand water Pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(5):114-119. (in Chinese))
- [22] 闫立泰. 甘肃省景电灌区现代化建设实践[J]. 中国水利, 2021(17):52-54. (YAN Litai. Practice of modernization construction of the Jingdian Irrigation District in Gansu Province [J]. Water Resources in China, 2021(17):52-54. (in Chinese))
- [23] XU C, TIAN J, WANG G, et al. Numerical analysis of water-sediment flow fields within the intake structure of pumping station under different hydraulic conditions [J]. Water, 2024, 16(5):779.
- [24] LIU Y Y, YANG L M, SHU C, et al. Three-dimensional high-order least square-based finite difference-finite volume method on unstructured grids [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(12):0030829.
- [25] MI Z H, ZHOU D Q, MAO Y T. Three-dimensional CFD simulation of solid-liquid two-phase flow in the pumping station forebay with sills [J]. Earth and Environmental Science, 2012, 15(6):062027.

(收稿日期:2024-04-01 编辑:骆超)