

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221740

梯形底坎对凤凰颈新站前池流态的影响研究

徐 波¹, 吕和品^{1,2}, 夏 辉³, 王 琳¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司徐州分公司, 江苏 徐州 221018; 3. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘要: 凤凰颈新站属于正向进水大扩散角泵站, 前池两侧岸墙处易发生大尺度脱壁回流, 不能提供较好的进水条件, 危害泵站安全稳定运行。因此, 以凤凰颈新站引江侧前池为例, 基于CFD数值软件, 模拟研究了梯形底坎位置及高度对正向进水大扩散角泵站前池流态的改善效果, 并借助物理模型试验对数值模拟结果进行了验证分析。结果表明, 当梯形底坎位于前池入口10 m处且坎高为1.2 m时, 可较好地改善凤凰颈新站的进水条件。研究成果可为本工程及类似工程提供技术支持和参考。

关键词: 凤凰颈新站; 大扩散角泵站; 正向进水前池; 流态; 梯形底坎; 整流

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0124-04

1 引言

泵站正向进水大扩散角前池边壁侧易产生脱壁回流, 恶化进水条件, 威胁泵站运行安全^[1-3]。因此, 保证大扩散角前池内水流均匀扩散, 为泵站提供一个优异的进水条件, 对泵站的稳定、高效运行具有重要意义。采用数值模拟和模型试验的方法对前池流态已进行了大量研究, 为改善流态, 提出了导流墩、底坎、立柱、压水板和隔板等多种整流方法^[4]。罗灿等^[3]研究了底坎对前池流态的改善效果, 结果表明合适的底坎参数能改善前池进水流态; 营佳玮等^[5]基于VOF模型, 采用立柱和底坎的组合式整流方案对正向前池存在的两侧回流现象进行改善研究, 发现复合式整流措施优于单一方案, 并给定了底坎和立柱的分布位置的范围; 高传昌等^[6]采用非连续底坎、挑流坎与压水板等相结合的整流措施, 改善了田山一级泵站前池与进水池内的流态, 消除了池内泥沙淤积和机组振动, 提高了泵的运行效率; 冯建刚等^[7]借助八字形导流墩和底坎的组合措施, 有效改善了前池流态, 均化了进水池进流; 陆伟刚等^[8]通过数值模拟分析了立柱、导流墩、底坎及隔墩等整流措施对某排涝泵站前池流态的影响; 李志祥等^[9]基于响应面法优化了底坎高度和间距, 进而达到了改善排

水泵站前池流态的目标。由此可见, 底坎是一种常用的前池整流措施, 既可单独使用也可与其他措施组合使用, 且底坎有多种结构形式, 包括倒T形底坎、镂空式底坎等^[10-11]。本文以凤凰颈新站引江侧前池为例, 采用优化布置梯形底坎的方式, 结合数值模拟与水工模型试验的方法, 研究梯形底坎对正向进水大扩散角泵站前池的整流效果, 为该工程及类似工程提供参考, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

2 数学模型与计算方法

本文所研究前池符合高雷诺数湍流特性, 为不可压缩液体湍流, 在遵循基本控制方程的前提下, 运用FLUENT软件进行数值模拟计算, 基于RANS方法选取RNG κ - ϵ 模型作为计算模型, 并采用SIMPLEC算法进行求解。将长江侧引河作为整个区域的进口边界, 设为速度进口, 运行时6台机组全开, 总流量为210 m³/s; 凤凰颈新站进水流道作为出口边界, 设为outflow; 自由水面采用刚盖假定(symmetry), 其余均设定为wall。

2.1 计算区域模型与网格

根据凤凰颈泵站工程设计参数, 设计方案下原型尺寸为: 长江侧引河河底高程为-0.4 m, 凤凰颈老站底板高程为-5.7 m, 新站底板高程为-6.37 m, 进水前池连接新老站房, 斜向连接,

收稿日期: 2022-08-23, 修回日期: 2022-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079120, 51779215)

作者简介: 徐波(1984-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水工结构优化设计, E-mail: xubo@yzu.edu.cn

为正向进水。前池池长为 35 m,扩散角为 37.75°。长江侧水流流经凤凰颈老站过流通道后进入引江侧前池,经凤凰颈新站抽提后进入下游。为减少因前池上下游附属结构的缺失对数值模拟的影响,本文建立了包括长江侧引河、凤凰颈老站、引江侧前池和新站进水渠道及两岸护坡边防等的三维数值计算模型,以保证数值模拟的准确性。计算区域见图 1,其中, X 负方向为顺水流方向, Y 方向为垂直水流方向, Z 方向为竖直方向。以顺水流方向负 X 方向为正方向,将凤凰颈新站 6 台机组从负 Y 向正 Y 依次编号为 #1~#6 流道。

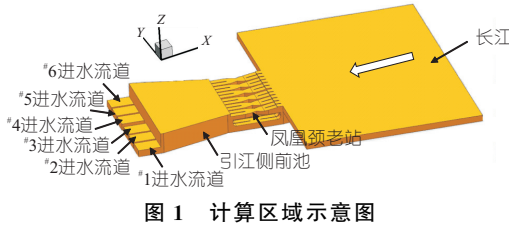


图 1 Schematic diagram of calculation area

由于本文所研究模型形状复杂,采用 MESH 软件中适应性较强的非结构化网格对计算域进行网格划分,并将长江侧引河到新站进水渠道间的水力损失作为评判参数评估网格质量,经对比分析发现,当网格数超过 303×10^4 个时,水力损失基本不变,亦可认为在网格数量为 303×10^4 个时即可满足网格无关性要求。

2.2 特征断面与评价方法

为了直观地描述前池的水流流态,根据本工程所研究水位工况,在顺水流方向选择 $Z = -5.0$ m(底层)、 $Z = 0.7$ m(面层)、 $Y = 1.35$ m(立面)三个剖面;垂直水流向在新站流道进口处截取断面进行分析,并采用轴向速度分布均匀度 η [11] 进行评价, η 值越大,表明各流道流速分布越均匀,计算公式为:

$$\eta = \left[1 - \frac{1}{V_a n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ai} - \bar{V}_a)^2} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中, \bar{V}_a 为流道进口断面平均轴向流速, m/s; n 为进口断面计算单元数; V_{ai} 为流道进口断面计算单元的轴向速度, m/s。

3 方案设计及模拟分析

3.1 方案设计

已有研究表明,底坎的高度和位置对流场影响较大,宽度影响较小[5]。因此,重点研究底坎的高度和位置的影响。采用一种梯形断面底坎(图 2),先探究底坎距前池入口的距离 D 对流场的影

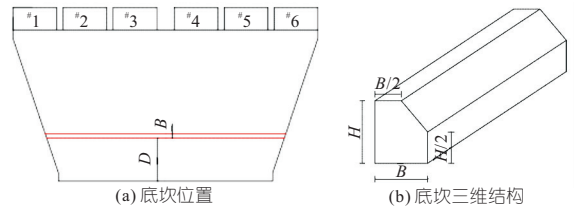


图 2 底坎结构

Fig. 2 Structure of bottom sill

响(方案 1~3),在获得较好流场方案的底坎位置 D 的基础上对底坎高度 H 进行了优化研究(方案 4~5),具体底坎设计参数见表 1。

表 1 底坎参数设计方案

Tab. 1 Design scheme of bottom sill parameters

方案	底坎位置 D /m	底坎高度 H /m	底坎宽度 B /m
原方案			
方案 1	5.0	1.2	1.0
方案 2	10.0	1.2	1.0
方案 3	15.0	1.2	1.0
方案 4	10.0	0.8	1.0
方案 5	10.0	1.6	1.0

3.2 原方案数值模拟流态分析

原方案流态计算结果见图 3。由图 3 可知,中间机组(#2~#5 流道)进流较为顺畅,两侧边机组(#1、#6 流道)主流偏斜,存在一个从面层流场贯穿到底层流场的较大的回流漩涡区,压缩主流进流空间,产生横向流速、恶化进流条件。由图 3(c)可知,由于凤凰颈老站原叶轮层较厚,老站与前池衔接处存在一个近死水区,水流不断的上下翻滚后进入前池,面层流场较为紊乱,受结构条件限制不易消除。本工程为双向流道,从新站下层进流,面层流场的紊乱对进流影响较小,因此后续重点分析底层流场和立面流场。

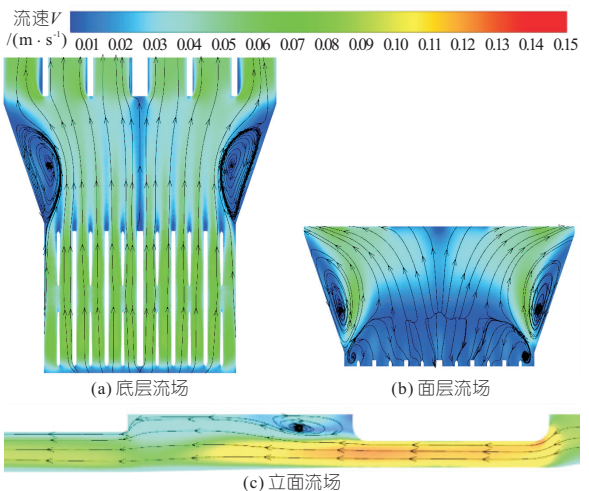


图 3 原方案各剖面流场

Fig. 3 Flow field of each section of original scheme

原方案下的前池边机组存在范围较大的脱壁回旋区,前池两侧存在两个大尺度回旋,压迫主流

进流空间,回旋区的存在易往下发展到进水流道形成吸气涡,恶化水泵进水条件,不能满足泵站正常运行的要求。因此,需对进水前池进行整流优化研究。

3.3 优化方案结果分析

图 4 为各方案底层流场图。比较图 4(a)~(c)可知,梯形底坎位置对前池流态的改善影响较大,能阻隔原方案存在的大尺度回旋,水流流经底坎后产生水面旋滚,破坏原有水流流场,使平面水流在坎后得到进一步发散。增设梯形底坎后,平面流场中间机组(2~5)水流流经底坎在前池中部翻滚后发散至各进水流道,边机组(1、6)底层回流区得到压缩。综合可知,当梯形底坎位置过于靠前时,底坎对大尺度回旋的消散效果不够明显,随着底坎位置的加深,回旋区范围开始减小,当梯形底坎位置为前池入口处 10.0 m(方案 2)时,回旋区范围得到有效控制,且随着底坎位置的推进回旋区范围几乎已不再变化。

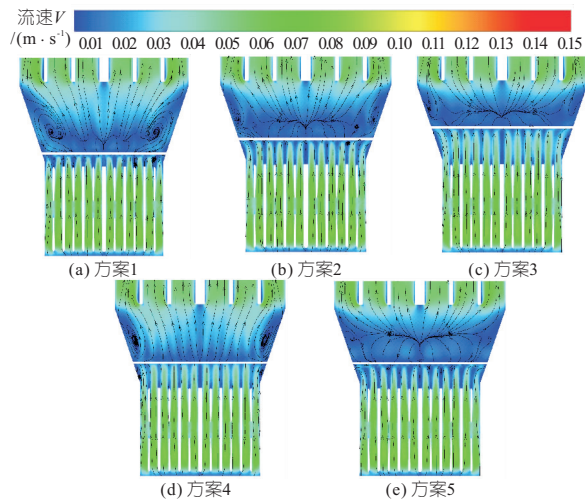


图 4 各方案底层流场

Fig. 4 Bottom flow field of each scheme

由图 4(d)、(e)可知,梯形底坎的高度同样对流场的改善作用很大。在确定最佳底坎位置方案的基础上对底坎高度进行模拟分析,可看出当梯形底坎高度较低时,平面流场回流区面积仍然较大,底坎的消减作用不明显,随着底坎的加高,回流区面积越来越小,且水流在流经坎后翻滚的位置也进一步地往进水流道侧推进。综合可知,随着坎高的增加回旋区面积进一步缩减,平面流场愈为均匀。

图 5 为各方案立面流场。由图 5 可知,前池和凤凰颈老站衔接处存在一个难以消除的死水区,此部分随着水流的流动产生水面旋滚,不断翻滚向前,但在前池中部已能均匀消散,对该前池整体进流的影响不大。比较图 5(a)~(c)可知,随

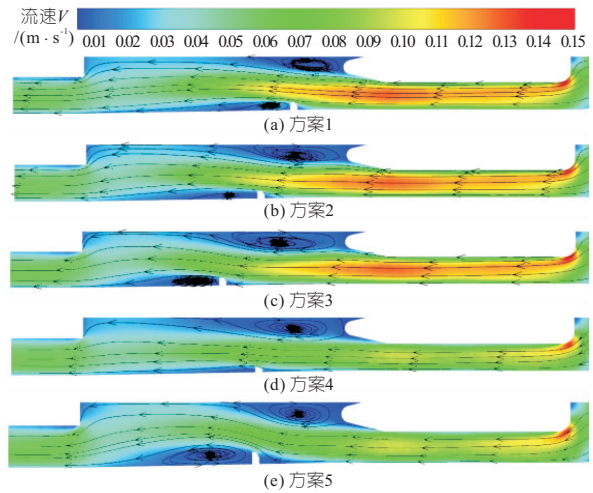


图 5 各方案立面流场

Fig. 5 Elevation flow field of each scheme

着梯形底坎位置的深入,坎后的旋滚也进一步往新站进水流道方向推进。当梯形底坎位于前池入口 15 m 处(方案 3)时,随着底坎位置的加深,坎后水流翻滚压迫至进水流道,坎后旋滚不易充分发散。由图 5(d)、(e)可知,梯形底坎高度对进流影响较大,随着坎高的加大,坎后水流翻滚范围逐渐变大,当坎高为 1.6 m(方案 5)时,坎后水流旋滚较大,压迫底坎上方主流进流空间,对流态改善不利。

为确定最佳梯形底坎方案,以各流道进口断面流速分布均匀度 η 为评价指标,进行分析评价。各方案流道进口断面流速分布均匀度 η 变化见图 6。由图 6 可知,从整体上来看,边机组 1、6 流道流速均匀度相较于其他流道数值偏低。每种方案下,6 个流道流速均匀度平均值分别为 67.17%、67.87%、69.01%、68.47%、68.10%、67.65%。综合比较可知,方案 2 时,2~5 机组流速较均匀,6 个流道的流速均匀度整体数值亦高于其他方案,各流道均匀度整体性较好。

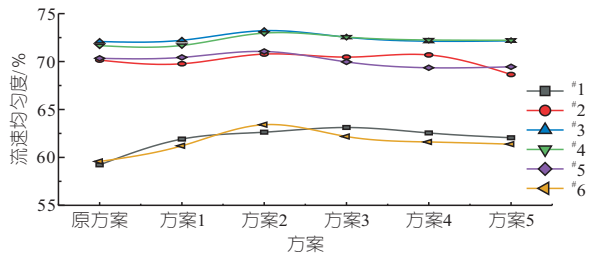


图 6 各方案流道流速均匀度变化

Fig. 6 Variation of flow velocity uniformity in each scheme

梯形底坎位置靠前或靠后均不能有效减小回流范围,底坎高度过低时整流效果有限,过高时坎后水流翻滚不能充分发散,因此合适的梯形底坎高度及位置尤为重要。相较于其他方案,当梯形底坎位置为前池入口处 10.0 m 且坎高为 1.2 m

(方案 2)时,回旋区范围得到有效控制,各流道流速分布更均匀。

4 模型试验验证

为进一步分析数值模拟结果是否可靠,选取原方案与优化方案 2,来进一步验证数值模拟与水工试验结果之间的差异。模型比尺为 1:50,模型采用整体架空式结构搭建,采用 pvc 灰板搭建模型河道部分;为方便观测流态,前池及凤凰颈新、老站进水水道部分采用透明塑料板搭建。试验模型长约 18 m,宽约 3.3 m,模拟范围包括凤凰颈新老站、引江侧前池、引河及两岸堤防等。采用流速仪对凤凰颈新站 6 个流道的进口断面进行了轴向流速测定,在进水流道进口前端取一根测线,并将测得的模型流速换算为原型进行横向比较,结果见图 7。

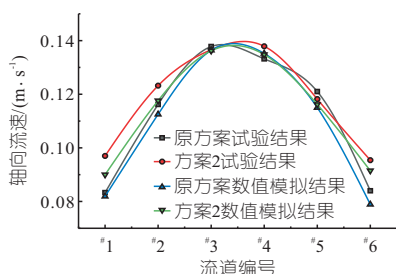


图 7 轴向流速误差分析

Fig. 7 Axial flow velocity error analysis

由图 7 可知,水工试验结果与数值计算结果基本一致,模型试验与数值模拟相对误差范围为 7.762%~0.312%。原方案下各断面行进流速变化较大,均匀性较差。经方案 2 整流后,各断面均匀性均有所提高,边机组进流得到提升,轴向流速差异缩小,表明方案 2 的整流效果较为良好。

5 结论

凤凰颈新站属于正向大扩散角泵站,对其引

江侧前池的进水流态进行模拟和试验验证表明,前池边侧存在大尺度脱壁回流,压迫主流,不利于泵站的安稳运行。当底坎位于前池入口处 10.0 m 且坎高为 1.2 m 时,池内回旋范围最小,各流道流速分布均匀度显著提高,整体进流效果较好。

参考文献:

- [1] 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,2022,40(4):378-384.
- [2] 于磊,顾巍,刘必伟,等.大扩散角泵站前池整流措施的数值模拟[J].扬州大学学报(自然科学版),2017,20(4):75-78.
- [3] 罗灿,成立,刘超.泵站正向进水前池底坎整流机理数值模拟[J].排灌机械工程学,2014,32(5):393-398.
- [4] 吕和品.凤凰颈新站前池水力特性及优化措施研究[D].扬州:扬州大学,2022.
- [5] 营佳玮,俞晓东,贺蔚,等.基于流体体积模型的泵站前池流态及组合式整流方案[J].排灌机械工程学,2020,38(5):476-480,493.
- [6] 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,2011,30(2):54-59.
- [7] 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.
- [8] 陆伟刚,孙晨光,徐波,等.某排涝泵站前池整流措施的数值模拟研究[J].水电能源科学,2020,38(3):90-93.
- [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.
- [10] 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.
- [11] 杨旭,奚斌,鲁儒,等.镂空式整流底坎对侧向进水泵站前池流态的影响[J].水电能源科学,2020,38(7):161-164,180.

Influence of Trapezoidal Sills on Flow Pattern in Forebay of Fenghuangjing New Station

XU Bo¹, LV He-pin^{1,2}, XIA Hui³, WANG Lin¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Xuzhou Branch of The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Xuzhou 221018, China; 3. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: Fenghuangjing new station belongs to the front inflow pump station with large diffusion angle. Large scale off-wall reflux is easy to occur at the bank walls on both sides of the forebay, which can not provide good inlet conditions and endanger the safe and stable operation of the pump station. Forebay at river diversion side of Fenghuangjing new station was taken as the research object. Based on the CFD numerical simulation software, the improvement effect of trapezoidal sill position and height on the flow pattern in the forebay of the front inflow pump station with large diffusion angle was studied. And the numerical simulation results were verified by physical model tests. The results show that when the trapezoidal sill is located at 10 m from the entrance of the forebay and the height of the sill is 1.2 m, the inflow conditions of Fenghuangjing new station can be better improved. The research results can provide technical support and reference for this project and the similar projects.

Key words: Fenghuangjing new station; pumping station with large diffusion angle; the front inflow forebay; flow pattern; trapezoidal sill; rectification