

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221266

泵站正向大扩散角前池八字形导流墩整流研究

徐波¹, 吕和品², 谭超³, 夏辉³

(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 221200; 3. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏扬州 225127)

摘要: 针对泵站正向大扩散角前池内存在的大尺度回流问题, 基于CFD软件, 采用 RNG κ - ϵ 模型模拟计算了某泵站前池流态, 分析原方案下的前池水力特性, 并探究了八字形导流墩的整流效果。结果表明, 在前池内增设八字形导流墩能有效消除两侧的大尺度回流; 沿流道隔墩方向布置两组八字形导流墩后, 平面流场回流区消失, 边机组轴向流速分布均匀度相较于原方案分别提升了 11.03%、11.32%, 前池进水条件得到极大改善, 泵站入口流速分布更均匀。研究结果可为正向前池泵站整流提供参考。

关键词: 泵站前池; 整流; 导流墩; 数值模拟

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0127-04

1 引言

泵站前池是连通引水渠与进水池的进水建筑物, 其功能是保证来流能平顺地扩散, 均匀地进入水泵进水流动道, 可为进水池提供良好的进水条件^[1]。前池扩散角的大小及适用性对获得理想的进水条件至关重要。某泵站为双向流动泵站, 受条件限制, 在老泵站房前池内新建泵站, 新泵站引江侧前池空间有限, 扩散角偏大, 泵站运行时, 前池边侧易产生较大的回流, 恶化进水条件, 因此需对其进行优化研究。目前, 多采用模型试验及数值模拟方法^[2,3]分析前池流态, 如包括立柱^[4,5]、导流墩^[6,7]及底坎^[8]等的整流方式, 有效改善了流态。但对于组合式导流墩不同布置方式的整流效果有待进一步探究。为此, 本文以某泵站前池为例, 探讨了八字形导流墩对前池进水流态的改善效果, 以期对工程提出流态改善措施及改进建议, 保障工程安全稳定运行。

2 数值模拟

2.1 数学模型

泵站前池水流符合高雷诺数湍流特性, 为不可压缩液体湍流。当前池扩散角偏大时, 池内易

发生回流漩涡等不良现象, 考虑到 RNG κ - ϵ 模型能充分考虑分离流和涡旋的影响, 在处理复杂涡流时能展现较好的效果, 因此对于前池高雷诺复杂湍流, 采用 RNG κ - ϵ 模型进行模拟计算, 并运用 SIMPLEC 算法进行求解。对于不可压缩流体, 需遵守物理守恒定律, 其控制方程^[9]为:

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$u_j \partial u_i / \partial x_j = g_i -$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中, u_i 、 u_j 分别为各方向的速度分量; x_i 、 x_j 分别为坐标分量; g 为重力加速度; ρ 为计算流态密度; p 为微元体上的压力; ν 为水的动力粘度系数; ν_t 为紊流粘度系数。

2.2 边界条件

将长江侧引河进水断面作为进口断面, 设为速度进口 (Velocity Inlet), 流速为 0.45 m/s; 将出口边界设置在新站下层流道进口处, 并将出水断面加以延伸以确保出水水流能充分发展, 并采用自由流出边界条件 (outflow); 自由水面随时间变幅不大, 可视为对称面, 采用刚盖假定法 (symmetry) 处理; 其余壁面采用壁面函数法进行求解。

2.3 设计方案

为保证数值模拟的准确性, 建立了包括上下游引河等在内的三维计算模型。设计方案为: 长

收稿日期: 2022-06-18, 修回日期: 2022-07-12

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

江底高程为-0.4 m,老泵站底板高程为-5.7 m,新站底板高程为-6.37 m,前池斜向连接新老站房,正向进水。前池池长为 35 m,扩散角为 37.75°。新站共 6 台机组,单泵流量 35 m³/s,进水流道单宽 10.2 m。工程尺寸及计算区域见图 1 (图中,*D* 为叶轮直径)。以顺水流方向-X 方向为正方向,将新站 6 台机组从-Y 向+Y 依次编号为#1~#6 流道。

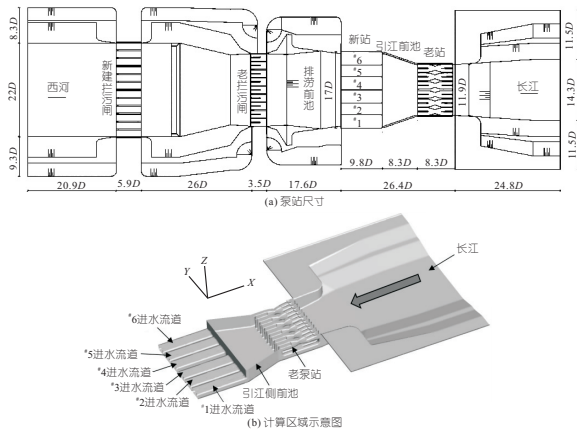


图 1 泵站尺寸及计算区域示意图

Fig. 1 Diagram of size of pumping station and schematic diagram of calculation area

由于模型形状复杂,采用 MESH 软件中适应性较强的非结构化网格对研究区域进行网格划分,并评估网格质量,发现当网格数超过 303.98×10⁴ 个时,水力损失基本不变,亦可认为在网格数量为 303.98×10⁴ 个时即可满足网格无关性要求。

2.4 优化方案设计

2.4.1 数值模拟方案

导流墩的作用为沿纵向对水流进行引导,使水流更好的发散^[6]。本文共设计了三组八字形导流墩整流方案:①方案 1。在进水前池内部沿新老站#2、#3 流道墩墙及#4、#5 流道墩墙连线方向对称布置了一组八字形导流墩,导流墩长为前池池长 *L* 的 1/2;②方案 2。在进水前池内部沿新老站#1、#2 流道墩墙及#5、#6 流道墩墙连线方向对称布置了一组八字形导流墩,导流墩长为前池池长的 1/4;③方案 3。将方案 1、2 结合起来设置两组八字形导流墩。具体方案布置见图 2。

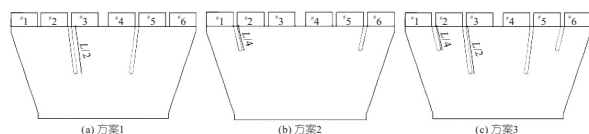


图 2 各方案布置图

Fig. 2 Layout plan of each scheme

2.4.2 特征断面与评价方法

为了直观描述前池的水流流态,考虑到低水

位时水流流速快,水面变幅大,回流、漩涡等问题较易发生^[10],因此选择引水工况最低水位进行模拟计算,此时长江水位为 1.7 m,并在顺水流方向选择 *Z* = -5.0 m (底层)、*Z* = 0.7 m (面层) 两个剖面;垂直水流方向在新站流道进口处截取断面,采用轴向速度分布均匀度 η 进行评价^[8],计算公式为:

$$\eta = \left(1 - \frac{1}{V_a n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ai} - \bar{V}_a)^2} \right) \times 100\% \quad (3)$$

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

3 数值模拟结果与分析

3.1 原方案数值模拟流态分析

原方案计算结果见图 3。由图 3 可知,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。对于面层流场,由于老站房原叶轮室结构尺寸较大,老站与前池衔接处存在一个近死水区,水流不断地上下翻滚后进入前池,流场较差。

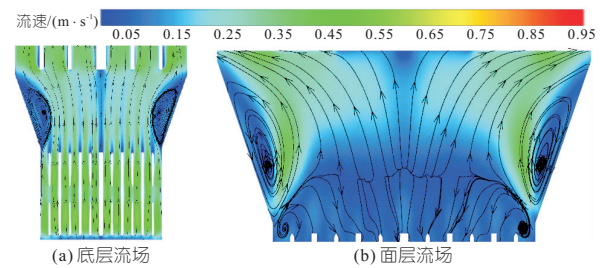


图 3 原方案各剖面流场图

Fig. 3 Flow field diagram of each section of original scheme

综上所述,老站与进水前池衔接处面层流场较紊乱,原方案下的前池两侧存在范围较大的脱壁回流区,回流区的存在易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要求。因此,需对进水前池进行整流优化。

3.2 优化方案数值模拟流态分析

方案 1、2、3 流场计算结果见图 4。由图 4 可知:①方案 1。在#2 与#3 流道、#4 与#5 流道隔墩前增设一组八字形导流墩后,主流流经导流墩墩头时向两侧发散,原方案中前池两侧存在的大尺度回旋得到有效压缩,仅在边壁侧存在少部分近壁回流,且此部分回流离进水流道较接近,易发生进水池漩涡,危害泵站安全稳定运行;面层流场

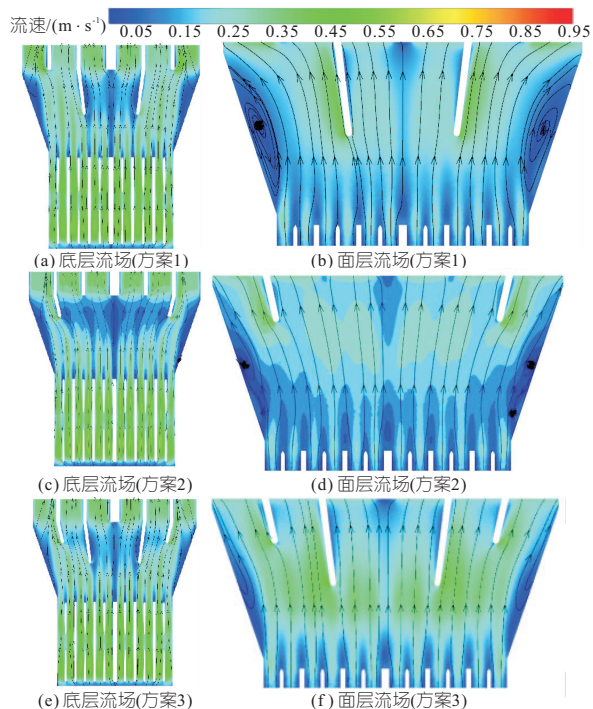


图 4 方案 1、2、3 各剖面流场图

Fig. 4 Flow field diagram of each section of scheme 1, 2 and 3

两侧边机组仍存在较大的回流区,并有向下发展的趋势。②方案 2。将八字形导流墩布置在#1 与#2 流道、#5 与#6 流道隔墩处后,边机组侧水流遇到导流墩后向两侧发散,有效地改善了前池两侧回流范围较大的问题,底层与中层流场进流较顺畅,仅在面层流场边壁侧存在部分回流区,但相较于方案 1 回流范围已得到有效压缩。此方案下,边机组水流流经导流墩向中间机组发散,使中间机组进水流道前端存在较大范围的低速区,低速区的存在将降低各流道流速分布均匀度,进而降低泵站机组运行效率。③方案 3。在前池内布置两组八字形导流墩后,对于底层及中层流场,原方案前池内存在的大尺度回旋消散,各剖面流场进流均较顺直,仅在前池中段边壁侧存在少部分低速区,对泵站正常进流影响不大;对于面层流场,方案 1、2 中面层流场存在的回流区几乎已消散,整体进流较平顺。

综上所述,合理布置八字形导流墩能有效地消除前池内存在的大尺度回流现象,改善正向大扩散角前池的进水流态。

3.3 轴向流速分布均匀度对比分析

为了更直观地对比各方案对前池流态的影响,定量分析各流道轴向流速分布均匀度,结果见表 1。由表 1 可知,原方案下#1、#6 流道流速分布均匀性较差,分别为 59.22%、59.58%,其余机组流速分布较为均匀,均在 72% 左右;方案 1 在

表 1 各方案下流道轴向流速分布均匀度

Tab. 1 Axial flow velocity distribution uniformity of flow channel under each scheme %

方案	各流道流速分布均匀度					
	#1 流道	#2 流道	#3 流道	#4 流道	#5 流道	#6 流道
原方案	59.22	71.15	72.09	71.66	71.34	59.58
方案 1	63.09	72.60	71.35	71.45	73.08	63.51
方案 2	68.92	68.81	70.41	69.94	68.16	69.67
方案 3	70.25	72.04	72.48	72.11	72.20	70.90

#2 与#3 流道、#4 与#5 流道隔墩前增设一组导流墩后,#1、#6 流道流速分布均匀度分别提升至 63.09%、63.51%,但相对来讲数值仍偏低;方案 2 在#1 与#2 流道、#5 与#6 流道隔墩前增设一组导流墩后,#1、#6 流道流速分布均匀度改善较为明显,分别提升了 9.70%、10.39%,但此方案下,主流流至导流墩前产生分流,使中间机组各流道流速分布均匀度有所下降;方案 3 的改善效果最明显,各流道分布均匀度均在 70% 以上,#1、#6 流道分别为 70.25%、70.9%,相较于原方案分别提升了 11.03%、11.32%。综上可知,方案 3 对整体流速分布均匀度提升效果最好,整流效果最佳。

4 试验验证分析

为验证数值模拟结果的准确性,在试验场地采用 PVC 灰板搭建比尺为 1:50 的水工模型,过水流道及前池等重点研究部分采用透明塑料板搭建,满足相似准则及试验要求。模型采用分离式结构安装动力泵及电磁流量计;试验数据采用 LDY 型电磁流量计、LGY-III 型智能流速仪及 WYG-III 型无线测控水位仪进行量测。模型布置见图 5。图 5 中,1 为长江侧汇水箱、2 为长江、3 为老泵站、4 为引江侧前池、5 为新站、6 为模型动力泵及管路、7 为 U-PVC 循环管路、8 为老拦污闸、9 为新建拦污闸、10 为西河。



图 5 泵站模型布置图

Fig. 5 Model layout of pumping station

为更好地分析数值模拟与水工试验结果之间的差异及评判数值模拟计算结果的可靠性,选取前池原方案与方案 3,采用 LGY-III 型流速仪对新

站流道的进口断面进行了轴向流速测定,分别在进水流道前端垂直方向上 $Z = -5.0、-3.2$ m 处取两根测线 L1、L2,并将测得的模型流速换算为原型进行横向比较,对比结果见图 6。由图 6 可知,水工试验结果与数值计算结果基本一致,原方案下各断面行进流速变化较大,均匀性较差;经方案 3 整流后,各流道均匀性大幅提高,表明方案 3 的整流效果较好。

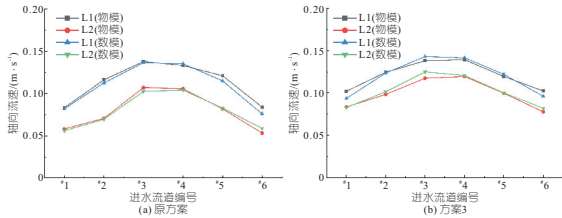


图 6 测点试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of test results and numerical simulation results at measuring points

5 结论

为解决某大扩散角泵站前池两侧存在大尺度回流的问题,本文通过数值模拟和模型试验相结合的方法,采用在前池内布置八字形导流墩的方式,有效地改善了流态,前池边侧回流区基本消失,边机组轴向流速分布均匀度大幅提高,[#]1、[#]6 流道较整流前分别提升了 11.03%、11.32%。

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] ZHAO Z L, QIAN Z D, GUO Z W, et al. Experimental study of subsurface vortices in pump intake with an improved diversion-cone[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2019, 240(3): 1-7.
- [3] 吕和品, 陆伟刚, 顾梦凡. 凤凰颈泵站工程前池流态优化试验研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 106-108, 96.
- [4] 徐瑞兰, 徐磊, 陆林广, 等. 泵站超大扩散角压力前池立柱阵列整流的优化设计[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(2): 134-145.
- [5] 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.
- [6] 徐波, 高琛, 夏辉, 等. 开孔导流墩几何参数对闸站工程前池整流效果的影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 58-62.
- [7] 成立, 祁卫军, 罗灿, 等. Y 形导流墩几何参数对泵站前池整流效果的影响[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 68-72.
- [8] 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.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [10] 高传昌, 解克宇, 黄丹, 等. 不同水位对泵站进水池流态影响的数值模拟[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 10-14.

Research on Rectification of Figure-eight Diversion Pier in Forward Forebay of Pumping Station with a Large Diffusion Angle

XU bo¹, LV He-pin², TAN Chao³, XIA Hui³

(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 Project Jiangsu Water Source Co., Ltd., Xuzhou 221200, China; 3. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: Aiming at the large-scale backflow problem in the forebay with large forward diffusion angle of the pumping station, based on the CFD software, the RNG $\kappa-\epsilon$ model was used to simulate the flow state of the forebay of a pumping station. The hydraulic characteristics of the forebay under the original scheme were analyzed. The rectification effect of the figure-eight-shaped diversion piers was explored. The results show that adding figure-eight diversion piers in the forebay could effectively eliminate the large-scale backflow on both sides. The backflow area of the plane flow field disappeared, and the uniformity of the axial flow velocity distribution of the side unit was improved by 11.03% and 11.32% compared with the original scheme. The research results can provide a reference for the rectification of the forward forebay pumping station.

Key words: forebay of pumping station; rectification; diversion pier; numerical simulation