

深层隧道进流式泵站前池流态及整流措施研究

冯建刚^{1,2}, 曹亚萍¹, 王晓升², 费照丹³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100;
3. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:为改善深层隧道进流式泵站前池内的旋流、偏流等不良流态,基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对前池流态进行数值模拟,研究适用于此类城市排涝泵站的整流措施。数值计算结果表明:泵站前池、进水池内存在局部立面旋滚、螺旋流、斜向流、流速分布上高下低等不良水力现象,致使泵站进水流道水力条件不佳;采用双层环形板和两组导流墩的组合式整流措施可抑制前池、进水池中的立面旋滚、螺旋流和斜向流流态,从而有效改善流道的进水条件,提高进水流道进口处流速分布均匀度,使泵进水状况变好,提高泵站运行的可靠性。

关键词:深层隧道进流式泵站;前池;流态;整流措施;数值模拟

中图分类号:TV675

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)02-0001-06

Study on flow pattern and rectification measures in forebay of deep tunnel inflow pumping station//FENG Jiangang^{1,2}, CAO Yaping¹, WANG Xiaosheng², FEI Zhaodan³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve undesirable flow phenomena like spinning and partial flow in forebays of deep tunnel inflow pumping stations, the flow in forebays was numerically simulated based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, and rectification measures applicable to this kind of urban drainage pumping station were investigated. Numerical simulation results revealed the presence of several adverse hydraulic phenomena within the forebay and inlet pool of the pump station, including local vertical spinning, spiral flow, oblique flow, and uneven velocity distribution with higher velocity at the top and lower velocity at the bottom, resulting in poor hydraulic conditions in the inlet channel of the pump station. A rectification measure combining a double-layer ring plate and two groups of guide piers can suppress the vertical spinning, spiral flow and oblique flow in the forebay and inlet pool. This rectification measure significantly improves the inlet conditions of the flow channel, leading to more uniform flow velocity distribution at the inlet of the inflow channel. Consequently, the pump inflow water conditions become better, and the operation reliability of the pumping station is improved.

Key words: deep tunnel inflow pumping station; forebay; flow pattern; rectification measures; numerical simulation

城市排涝泵站有助于提升区域排水能力,是解决城市内涝问题的重要方式。受城市规划、地形、管网布置、施工等条件限制,城市排涝泵站占地面积偏小且布置局促,往往难以按照泵站设计规范中水力条件良好的要求进行布置,泵站前池容易产生偏流、回流、旋涡等不良流态,进而影响泵站的安全稳定运行^[1],因此,开展泵站前池流态及相应工程整流措施的研究具有重要意义。

国内外许多学者对泵站前池、进水池流态改善

进行了广泛研究。例如:Zhang等^[2]对非对称运行机组的侧向进水泵站前池流态进行了分析,探究了不同布置形式的导流墩对前池水流流态的影响;王琪等^[3]对侧向泵站进水前池流态进行了分析,提出增设不同尺寸导流栅优化前池流态;Li等^[4]通过模型试验方法分析了泵站前池流态,研究了横梁、胸墙和立柱等整流措施对前池流态的改善效果;冯建刚等^[5]对底部涵管进水形式的城市输水泵站前池流态进行了数值模拟,提出导流墩和底坎组合式措施

基金项目:江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047)

作者简介:冯建刚(1976—),男,教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:jgfeng@hhu.edu.cn

通信作者:王晓升(1983—),男,高级实验师,博士,主要从事复杂管网系统的气液两相流研究。E-mail:xswang@hhu.edu.cn

来改善泵站前池流态,并进行了试验验证;施伟等^[6]对闸站并列布置工程泵站前池进行了定常数数值模拟,分析比较了不同开机组合时的前池流态,调整泵站桥墩位置以优化前池流态;成立等^[7]对正向进水泵站前池流态进行了数值模拟,分析了Y形导流墩几何参数对前池流态的改善效果;Song等^[8]采用数值模拟和模型试验相结合的方法,对某侧式进水泵站前池无整流措施和增设Y型导流墩、T型导流墩、导流墙等整流措施的稳定性进行分析研究,选出了合适的整流措施;黄继宏等^[9]选取不同导流墩参数对泵站前池进行了数值模拟,分析了导流墩对泵站前池水流流态的影响因素,明确了优化导流墩布置的相关参数;徐波等^[10]模拟计算了某泵站前池流态,探究了八字形导流墩的整流效果;Nasr等^[11]采用数值模拟方法对多台机组运行时侧向进水泵站前池有无整流措施的计算结果进行了对比分析,探究了抛物线型导流墙和不同位置的导流墩对前池流态的影响;罗灿等^[12]采用数值模拟方法研究了前池底坎整流措施,探讨了底坎位置、高度及顶宽对整流效果的影响,提出了前池底坎设置方案;李志祥等^[13]基于响应曲面模型研究了底坎相对高度、相对距离与泵站进水流态之间的函数响应关系,从而得到优化底坎整流措施体型及布置参数;冯建刚等^[14]采用数值模拟结合物理模型试验的方法,探索了底坎对分侧式闸站枢纽下游回流和偏流问题的改善效果,分析了底坎不同参数对水力特性的影响,为底坎的优化设计提供了依据;夏臣智等^[15]对加单排方柱的正向进水泵站前池流态进行了数值模拟,分析了单排方柱的几何参数对前池流态的影响;近几年也有学者提出V形导流墩^[16]、阵列式隔板^[17]、镂空式底坎^[18]等新型整流措施用以改善泵站前池流态。

随着城市用地日益紧张,通过地下深层隧道向排涝泵站配水成为一种新型城市排涝泵站布置形式。由于进流隧道高程较低而水泵机组安装高程较高,泵站来流不得不从底部向上进入泵站前池,这种非常规进流方式极易造成泵站前池水流无法均匀扩散、水泵进流条件恶化等问题,因而对其进行前池流态优化研究意义重大。本文以深层隧道进流式泵站为研究对象,通过数值模拟分析泵站前池流态,解析流动特征产生的机制,针对性地提出改善泵站前池流态的工程措施。

1 泵站数值模型

1.1 模型建立

图1是某深层隧道进流式泵站平面和立面布置

示意图。水流由深层隧道通过入流竖井自下而上进入泵站前池,水泵机组对称布置。深层隧道直径为11 m,深层隧道与泵站前池中心线夹角为 19.38° ;入流竖井底部高程为 -56.5 m ,直径为 23.5 m ,高为 36.54 m ;前池底部高程为 -21.06 m ,总宽为 80 m 。泵站设有6台导叶式混流泵,编号如图所示,单机流量为 $50\text{ m}^3/\text{s}$,总流量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$,每台水泵均单独设进水池,以隔墩分隔。

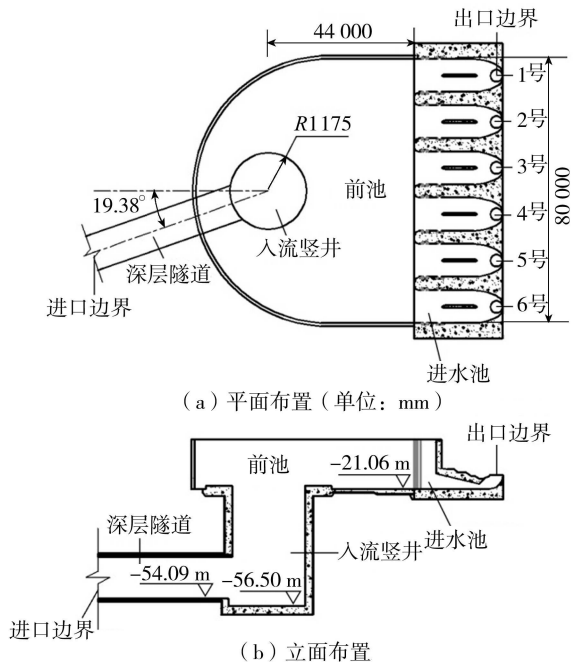


图1 深层隧道进流式泵站平面和立面布置示意图

泵站内的水流通常处于湍流状态,容易存在回流、旋涡、二次流等典型非稳定的流动现象。考虑到RNG $k-\varepsilon$ 模型能充分考虑湍流旋涡的影响,提高计算精度,因此选用RNG $k-\varepsilon$ 模型进行模拟计算,控制方程基于有限体积法进行离散,分别采用二阶中心差分、二阶迎风差分格式离散扩散项和源项、对流项,数值求解方法运用半隐式方法SIMPLEC算法。

1.2 边界条件及网格划分

选取前池水位为设计水位、高水位运行作为计算工况条件,相应流量、开机台数及组合见表1。深层隧道进口作为计算域进流边界,设置为速度边界条件;计算域出流边界设在水泵叶轮中心线断面,设置为压力出口边界条件;壁面设置为无滑移壁面边界,近壁面流动采用标准壁面函数进行处理。对于泵站前池,其自由液面通常采用刚盖假定方法和VOF方法进行处理,本文采用两种方法分别进行试算,发现前池自由液面无明显波动,且两种方法获得的前池流场信息基本相同,为减少计算资源消耗,本文研究采用刚盖假定法对自由液面进行处理。

表 1 泵站进水流态计算工况

工况	前池水位/m	泵站流量/(m ³ /s)	开机台数
机组全开运行	-4.82	300	6
机组部分运行	0.06	150	3(2、4、6号泵开)

本文采用适应性较好的非结构化网格对计算域进行离散,机组全开运行时,采用 6 套网格方案进行网格无关性分析。选取出口平均流速大小和计算域的总水力损失作为典型变量,表 2 显示了典型变量值随网格数量的变化,可以看出水力损失随着网格数的增加逐渐增大,最后趋于平稳;出口平均流速随着网格数的增加逐渐减小至慢慢平稳;当网格总量超过 3 269 241 时,两个变量已无明显变化,据此确定最终的网格数量为 3 269 241。图 2 为泵站数值模拟的计算模型示意图。

表 2 网格无关性分析结果

网格数量	总水力损失/m	出口平均流速/(m/s)
540 261	0.479 7	5.078 2
1 229 198	0.480 4	5.038 1
2 037 344	0.623 4	5.021 3
2 533 889	0.624 2	5.019 8
3 269 241	0.624 7	5.008 4
4 502 745	0.624 7	5.007 3

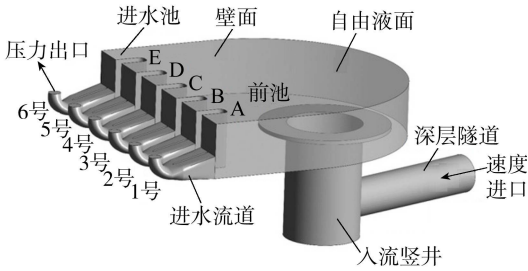


图 2 深层隧道进流式泵站数值模拟模型

2 泵站前池流态分析

图 3 为泵站机组全开运行时模拟计算区域的三维流线图。由图 3 可知,水流从深层隧道流入竖井,冲击竖井壁面后沿壁面向上进入泵站前池,由于隧道进流集中,在竖井中产生局部旋流和旋涡(图 3(b));水流通过竖井上翻进入前池,并向四周扩散,在前池后部产生自上而下的立面旋滚,同时因水泵吸水而向下游流动的水流受立面旋滚的影响,在前池两侧形成大范围的螺旋流(图 3(a)(c));另外,部分水流经前池壁面反射自前池两侧斜向流动至中部,进水池内发生明显的偏流现象(图 3(c))。

图 4 为典型水平截面上的流速分布图。选取距前池底板分别为 1.5、7.5、13.5 m 的水平截面 H1、H2、H3,可以明显看出前池内中下层水流流速小,上层水流流速较大;因前池壁面对水流有反射作用,使得前池内产生由两侧向中部的大角度斜向流动,进

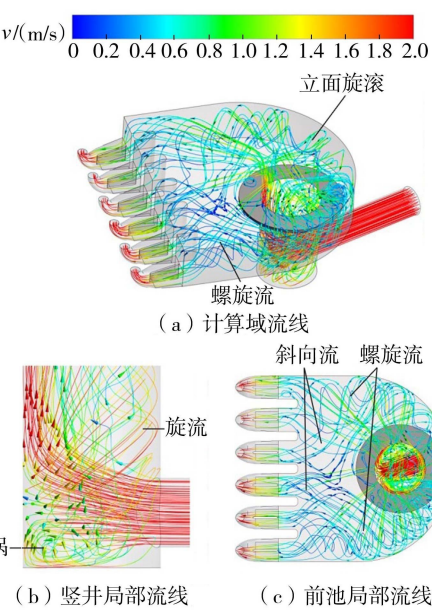


图 3 机组全开运行时三维流线

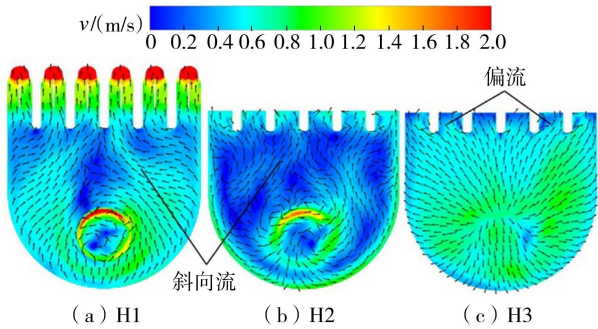


图 4 机组全开运行时典型水平截面流速分布

而导致进水池中存在偏流现象。各进水流道对应各泵机组的立面编号分别为 V1、V2、V3、V4、V5、V6,由各进水流道的立面流线图(图 5)可以看出,进水池上部水流进入进水流道时进口绕流使得进口上方产生小范围低流速回流区。

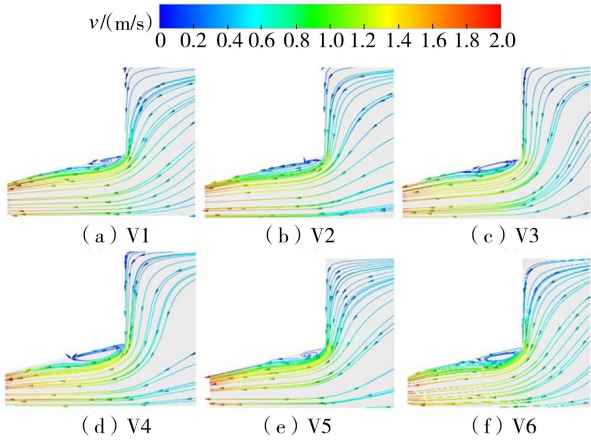


图 5 机组全开运行时进水流道立面流线

机组部分运行时,经计算及结果分析可知,泵站前池中的水流流动特征与机组全开运行时水流流动特征相似。此时泵站进流量小,进口处流速低,前

池水位高,竖井内底部旋涡范围缩小,泵站前池内立面旋滚范围增大,螺旋流现象更剧烈,部分机组吸水使得前池壁面向中部的斜向流动角度更大。

总体而言,深层隧道中的水流沿竖井上翻进入前池,前池内中下层流速小,上层流速大;由于竖井周向出流,水流在前池周向壁面的反射作用下,产生局部立面旋滚、螺旋流、斜向流、偏流等不良流态,致使泵站进水流道水力条件不佳。

3 泵站前池整流措施

3.1 整流方案设计

针对深层隧道进流式泵站前池存在螺旋流、偏流、立面旋滚、流速分布上上下下小的特点,设计如图6所示的整流方案:①方案1,在竖井上方布置双层环形板,通过环形板对竖井出流进行有序分流,以抑制前池上层流速过大的问题;②方案2,在方案1的基础上在前池两侧增设一组导流墩,以抑制前池中的螺旋流现象;③方案3,在方案2的基础上于前池中部增设一组导流墩,以改善前池和进水池中的斜向流及偏流问题。各方案特征及详细布置参数见表3。

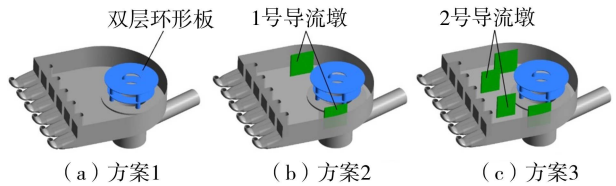


图6 整流后计算模型

表3 泵站前池整流方案

方案	方案说明	措施说明
1	双层环形板	底层环形板距前池底板 6.5 m, 内径 16.5 m, 外径 30.5 m; 上层环形板距底板 15.06 m, 内径 12 m, 外径 35 m
2	双层环形板+一组导流墩	方案1基础上在前池两侧增设一组对称布置的导流墩,导流墩与进水池侧边隔墩 A 和 E 对齐,导流墩长 15 m, 宽 0.8 m
3	双层环形板+两组导流墩	方案2基础上在前池中部增设一组对称布置的导流墩,导流墩与进水池中部隔墩 B 和 D 对齐,导流墩长 12 m, 宽 0.8 m

3.2 前池流态改善效果分析

图7和图8分别为机组全开运行时各整流方案的计算域三维流线和前池三维流线图,选取典型水平截面中下层 H1、上层 H3 的流速分布图(图9和图10)进行分析。在双层环形板的分层导流作用下,前池内底部流速增大,顶部流速减小,水流立面旋滚范围大幅减少,受环形板板面和前池后壁面反射作用,仅在板下和板正后方存在小范围旋涡,前池两侧螺旋流现象基本消除,但前池内部还存在大角

度的斜向流动,进水池内偏流现象亦未得到有效改善(图7~10(a))。

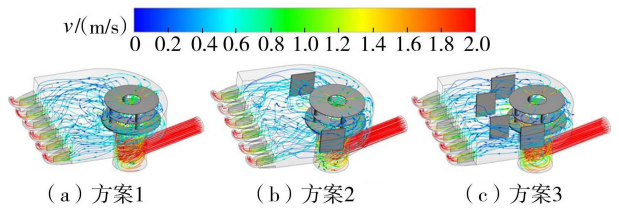


图7 机组全开运行时计算域三维流线

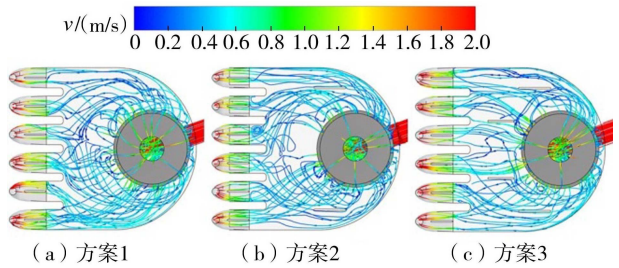


图8 机组全开运行时前池三维流线

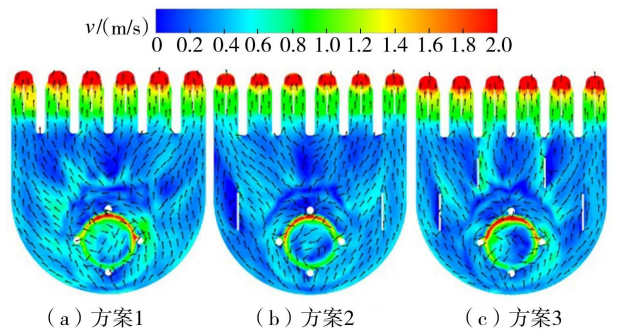


图9 机组全开运行时典型水平截面 H1 流速分布

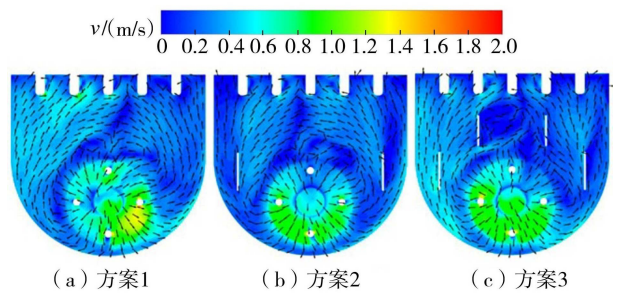


图10 机组全开运行时典型水平截面 H3 流速分布

选取 V3 进水流道的立面流线图(图11)进行分析可知,由进水池上方绕流进入进水流道的水流减少,大部分水流能够从前池下层顺直地进入进水流道,进水流道进口处低流速回流区范围减小,进水流道进流条件得到改善(图11(b))。在前池两侧再增设一组导流墩,导流墩阻隔了前池中的部分大角度斜向流动,使得前池两侧水流更平顺,进水流道进口处的低流速回流区域明显减小(图7~10(b)及图11(c))。在两组导流墩的导流作用下,前池内斜向流动和进水池偏流改善效果更明显,进水流道进口处的低流速回流区域基本消失,进入进水流道内

的水流更均匀(图 7 ~ 10(c) 及图 11(d))。

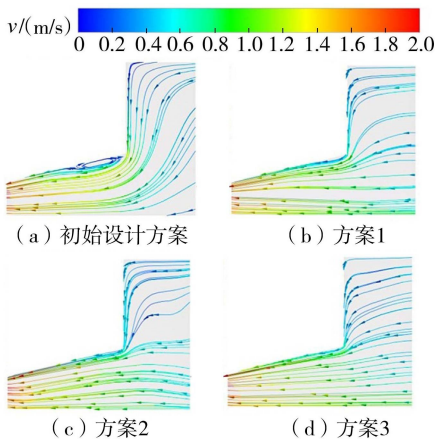


图 11 机组全开运行时 V3 进水流道立面流线

机组部分运行时,整流效果与机组全开运行时相似,因机组部分运行时初始方案下前池中斜向流现象严重,与机组全开运行时整流后的前池流态相比,前池中依旧存在部分角度较小的斜向流动。

表 4 为泵站总水力损失值表。在前池中增设整流措施,水流路径增加,局部受阻转向,导致水力损失有所增大;机组全开运行时,泵站总水力损失由 0.624 m 最大增加至 0.7 m;机组部分运行时,泵站总水力损失由 0.153 m 最大增加至 0.168 m,对于泵站的提升扬程而言,其影响较小。

表 4 泵站总水力损失值

工况	泵站总水力损失/m			
	初始设计方案	方案 1	方案 2	方案 3
机组全开运行	0.624	0.685	0.698	0.700
机组部分运行	0.153	0.164	0.167	0.168

3.3 流速均匀度对比分析

泵站进水流道内流速分布的合理性是水泵安全、高效运行的关键,均匀的流道进口速度分布是泵装置设计的假定条件。为此,本节采用不同均匀性评价指标对进水流道进口断面的流速均匀度进行对比分析,进一步评估各整流措施改善泵站前池流态的效果。其中,进水流道进口断面的编号对应泵机组编号,1 号泵机组对应进水流道进口断面为 1 号断面,以此类推。

首先基于相对标准偏差(CV)^[19]来评判断面流速均匀程度,CV 值越小,断面流速均匀度越高。机组全开运行时的 CV 值计算结果见表 5,初始设计方案时各流道进口断面的 CV 值基本大于 30%;增设双层环形板使得各流道进口断面 CV 值降低至 23% ~ 30%,流速分布均匀度显著上升;再增加一组导流墩,与初始设计方案相比,两侧流道进口断面流速 CV 值降低,但其余流道进口断面流速分布 CV 值均上升,与只加双层环形板方案相比,整体进水流道

进口断面流速 CV 值上升,断面流速均匀度降低;双层环形板加两组导流墩方案的改善效果最明显,此时各流道流速 CV 值大部分在 25% 以下,在 3 个整流方案中,相较于初始设计方案断面 CV 值降低最多。机组部分运行时的计算结果见表 6,与机组全开运行时改善效果一致,在各方案中双层环形板加两组导流墩方案的断面 CV 值最小。

表 5 机组全开运行时各方案进水流道进口断面 CV 值

进口断面	CV/%			
	初始设计方案	方案 1	方案 2	方案 3
1 号	31.73	25.65	27.40	26.18
2 号	29.50	30.29	30.26	28.15
3 号	30.90	28.94	30.76	24.64
4 号	29.85	26.92	30.95	24.10
5 号	30.35	23.21	32.27	22.93
6 号	32.30	23.74	27.81	23.92

表 6 机组部分运行时各方案进水流道进口断面 CV 值

进口断面	CV/%			
	初始设计方案	方案 1	方案 2	方案 3
2 号	28.60	25.17	26.54	24.91
4 号	33.80	26.30	27.79	25.45
6 号	31.78	25.48	27.13	25.70

克里斯琴森均匀系数(CU)^[19]是基于平均偏差的统计量,能够直观反映不同测点的速度分布相对平均速度的偏离程度。CU 值表述了各测点速度与平均速度偏差的绝对值之和与各测点速度和的比值。机组全开运行和部分运行时的 CU 值计算结果分别见表 7 和表 8,各方案 CU 值的变化趋势与基于相对偏差的断面流速均匀度变化趋势相似,在 3 个整流方案中,方案 3 各流道 CU 值相较于初始设计方案增加最多,断面流速均匀度最高。

表 7 机组部分运行时各方案进水流道进口断面 CU 值

进口断面	CU/%			
	初始设计方案	方案 1	方案 2	方案 3
1 号	68.29	74.37	71.3	81.91
2 号	70.28	69.63	70.77	76.70
3 号	69.68	71.08	70.32	79.95
4 号	70.17	73.15	70.39	81.72
5 号	69.67	73.47	73.62	73.63
6 号	67.72	76.27	74.74	79.19

表 8 机组部分运行时各方案进水流道进口断面 CU 值

进口断面	CU/%			
	初始设计方案	方案 1	方案 2	方案 3
2 号	82.33	84.59	84.14	84.90
4 号	78.08	84.08	82.80	84.46
6 号	79.20	84.46	82.83	84.90

综上所述,整流方案中,双层环形板和两组导流墩的组合式措施方案的 CV 值均最小,CU 值均最大,对整体流速分布均匀度提升效果最好,整流效果最佳,使泵进水状况变好,提高了泵站运行的可

靠性。

4 结 语

对于深层隧道底部进流式泵站,水流由底部隧道经竖井上翻进入前池,在水流上翻、周向出流、壁面反射等因素的综合作用下,前池、进水池内存在局部立面旋滚、螺旋流、斜向流、流速分布上高下低等不良水力现象,恶化了流道进水条件,不利于泵站安全运行。本文对比论证了不同工况条件下3种不同整流方案对该类型泵站前池流态的整流效果,结果表明,增设双层环形板和两组导流墩的组合式措施对深层隧道进流的整流效果最为显著。双层环形板可促使竖井出流有序分流,使得垂直向上的水流逐级转向并扩散,从而抑制前池、进水池中的立面旋滚和螺旋流流态,导流墩可进一步促使前池水流均匀平顺流入进水池,抑制前池、进水池中的斜向流,从而有效改善流道的进水条件。基于相对标准偏差、克里斯琴森均匀系数两个指标对不同整流方案下进水流道进口断面的流速均匀程度进行计算分析,计算结果表明,本文提出的双层环形板结合两组导流墩整流方案对流速分布均匀度提升效果较好,使泵进水状况变好,提高泵站运行的可靠性。该研究结果可为类似泵站工程前池流态改善提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 赵浩儒,杨帆,刘超,等.侧向进水泵站流态模拟及改善研究[J].水利水电技术,2017,48(7):79-84. (ZHAO Haoru,YANG Fan,LIU Chao,et al. Numerical simulation of side-intake flow for fluid meliorating of pumping stations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017,48(7):79-84. (in Chinese))
- [2] ZHANG Chen, YAN Haodi, JAMIL M T, et al. Improvement of the flow pattern of a forebay with a side-intake pumping station by diversion piers based on orthogonal test method[J]. Water,2022,14(17):2663.
- [3] 王琪,朱文辰,周济人,等.侧向泵站进水前池流态数值计算与优化[J].中国农村水利水电,2023(1):152-157. (WANG Qi,ZHU Wenchen,ZHOU Jiren,et al. Numerical calculation and optimization of flow regime in the inlet forepool of a lateral pump station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (1): 152-157. (in Chinese))
- [4] LI Yuan, GU Jinde, GUO Chao, et al. Flow patterns and rectification measures in the forebay of pumping station [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 794:012058.
- [5] 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 Jiangang, 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))
- [6] 施伟,倪春,于贤磊,等.闸站并列布置工程泵站前池流态改善[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(4):810-820. (SHI Wei, NI Chun, YU Xianlei, et al. Flow pattern improvement in the forebay of pumping station with parallel sluice [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 810-820. (in Chinese))
- [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. (CHENG Li, QI Weijun, LUO Can, et al. Effect of geometric parameters of Y-shaped diversion piers on flow pattern in forebay of pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 68-72. (in Chinese))
- [8] SONG Weiwei, PANG Yong, SHI Xiaohuan, et al. Study on the rectification of forebay in pumping station [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 2876980.
- [9] 黄继宏,王晓升,张晓毅.城市排水泵站前池导流墩整流措施的数值模拟[J].江苏农业科学,2013,41(5):360-362. (HUANG Jihong, WANG Xiaosheng, ZHANG Xiaoyi. Numerical simulation of rectification measures for the forebay diversion pier of urban drainage pumping station [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(5): 360-362. (in Chinese))
- [10] 徐波,吕和品,谭超,等.泵站正向大扩散角前池八字形导流墩整流研究[J].水电能源科学,2023,41(4):127-130. (XU Bo, LYU Hepin, TAN Chao, et al. Research on rectification of figure-eight diversion pier in forward forebay of pumping station with a large diffusion angle [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(4): 127-130. (in Chinese))
- [11] NASR A, YANG Fan, ZHANG Yiqi, et al. Analysis of the flow pattern and flow rectification measures of the side-intake forebay in a multi-unit pumping station [J]. Water, 2021, 13(15): 2025.
- [12] 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].排灌机械工程学报,2014,32(5):393-398. (LUO Can, CHENG Li, LIU Chao. Numerical simulation of mechanism for sill rectifying flow in pumping station intake [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 393-398. (in Chinese))

(下转第21页)

ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese))

[18] 左其亭. 人水和谐论: 从理念到理论体系[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 25-30. (ZUO Qiting. Human-water harmony theory: from idea to theory system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 25-30. (in Chinese))

[19] 左其亭. 和谐论的数学描述方法及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(4): 129-133. (ZUO Qiting. Mathematical description method and its application of harmony theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(4): 129-133. (in Chinese))

[20] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792. (in Chinese))

[21] 左其亭. 人水关系学的基本原理及理论体系架构[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 1-6. (in Chinese))

[22] 左其亭. 人水关系学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.

[23] 左其亭, 纪义虎, 马军霞, 等. 人与自然和谐共生的水利现代化建设体系及实施路线图[J]. 人民黄河, 2021, 43(6): 1-5. (ZUO Qiting, JI Yihu, MA Junxia, et al. Water conservancy modernization construction system and implementation roadmap of human-nature harmony theory[J]. Yellow River, 2021, 43(6): 1-5. (in Chinese))

[24] 夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 505-514. (XIA Jun, ZHAN Chesheng, ZENG Sidong, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River Simulator construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 505-514. (in Chinese))

[25] 左其亭, 秦西, 马军霞. 黄河模拟器建设框架设计及发展布局[J]. 人民黄河, 2023, 45(9): 18-23. (ZUO Qiting, QIN Xi, MA Junxia. Framework design and development layout of Yellow River Simulator construction[J]. Yellow River, 2023, 45(9): 18-23. (in Chinese))

[26] 左其亭. 新时代中国特色水利发展方略初论[J]. 中国水利, 2019(12): 3-6. (ZUO Qiting. Initial studies on water development strategy with Chinese characteristics in the new era[J]. China Water Resources, 2019(12): 3-6. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-07-24 编辑: 俞云利)

(上接第 6 页)

[13] 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))

[14] 冯建刚, 孟湘云, 钱尚拓. 分侧式闸站枢纽下游底坎整流特性[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 62-67. (FENG Jiangang, MENG Xiangyun, QIAN Shangtuo. Sill rectification characteristics downstream a unilaterally arranged pump-gateway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 62-67. (in Chinese))

[15] 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))

[16] 刘志泉, 成立, 卜舸, 等. 泵站正向进水前池“V”形导流墩整流数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 183-188. (LIU Zhiquan, CHENG Li, BU Ge, et al. Numerical simulation of V-shaped diversion pier for improving the flow pattern in forward inlet forebay of the pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 183-188. (in Chinese))

[17] 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 Yingchun, 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))

[18] 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. (YANG Xu, XI Bin, LU Ru, et al. Influence of hollow rectifying sill on flow pattern in forebay of side-inlet pumping station[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7): 161-164. (in Chinese))

[19] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 60-63. (LI Tan, JIN Shiping, HUANG Suyi, et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity: comparison and application[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 60-63. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-10-17 编辑: 俞云利)