

文章编号:0559-9350(2020)07-0788-09

超窄联合泵房前池水力性能优化:实例研究

付辉¹, 牛华寺², 毛雨佳², 杨若冰², 郭新蕾¹, 施春蓉¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要:火/核电站的泵房前池作为循环水系统的重要组成部分,关系到电站整体的稳定、安全和高效运行。本文以单进流条件下,纵横比为0.193,且进流平面扩散角达到180°的某核电站超窄联合泵房前池为研究对象,通过多方案多组次的系统模型试验,提出了半圆形扩散墩和悬空隔板相结合的水力性能优化措施,在不大幅改变原设计方案的基础上,消除了原方案前池内水体的大幅紊动、壅高和强回流等不利的水力现象,提高了泵房流道各断面流速分布的均匀性,基本实现了泵房吸水室两侧进水断面的对称进流,同时降低了泵房吸水室内的水面涡强度,使得泵房流道整体的水力性能得到优化。研究成果可为类似火/核电站泵房前池的设计和水利性能优化提供参考。

关键词:泵房;前池;水力性能;流速分布;回流;电站

中图分类号: TU991

文献标志码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20190880

1 研究背景

泵房流道作为火/核电站循环水系统的核心,关系到电站的安全、稳定和高效运行。前池在泵房流道中起到了连接进水流道和吸水流道的作用,使其具有较优的水力性能,不仅可以减小泵房吸水室内的表面涡和水内涡等不利流态发生的概率和强度,还可节省后期运行的费用^[1-4]。

王广聚等针对纵横比为0.265,进流平面扩散角180°的泵房前池,通过模型试验提出在引水隧洞出口的正面设置与前池同宽度的横梁和导流墙,以改善水体的均匀和平顺性^[5]。刘超等通过模拟分析认为,泵房前池处于侧向取水时,采用导流墩和底坎的组合措施可改善泵站进口流速分布的均匀性^[6]。于永海等针对进流平面扩散角为80.2°的前池,提出通过在引水隧洞出口的正面设置悬空导流板以减少回流区和漩涡等不利的水力现象,并给出了导流板下缘悬空高度选择的方法^[7]。刘新阳等采用非连续底坎、非连续挑流坎与顶部压水板相结合的方式提高了前池的水力性能,并通过现场试验证明:上述措施可使得两种典型工况下的泵站效率分别提高1.82%和5.96%^[8]。秦晓等采用物理模型试验研究了平面扩散角为60°的前池,对前池进口处布置的消能横梁的尺寸、位置和整流效果进行了比选^[9]。张睿等研究了斜向管涵进流条件下泵站的流态特性,提出了分流墩、格栅式组合梁以及短导流墩的组合式优化措施,该泵站前池的纵横比为0.290,进水采用无扩散角的全断面进水^[10]。白玉川等对纵横比为0.207,进流平面扩散角为180°的前池进行了模型试验和数值模拟研究,提出了由倾斜型和顺直型导流墩组成的“多人字型”结构以缩小回流区的范围和强度,但是该前池采用的是双箱涵进流方案,降低了小纵横比的影响^[11]。Feng等采用多孔进水口、底坎、导流墩在内的一系列工程措施优化了五号沟泵站前池的水力性能,该泵站前池的

收稿日期:2019-12-16;网络首发时间:2020-07-06

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200706.1337.001.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401706);中国水科院科研专项(HY0145B642017)

作者简介:付辉(1981-),教授级高级工程师,主要从事水力学及冰工程相关研究。E-mail: fuhui_iwahr@126.com

进流平面扩散角为 40° ^[12]。Zhan采用RNG $k-\varepsilon$ 模型对比分析了正向、L型、侧向、扩散型等不同进水条件下前池流态和泵房吸水室内的漩涡情况^[13]。徐存东等研究了多泥沙河流侧向进水泵站不同开机组合时的前池流态变化^[14]。目前研究的前池似乎均未达到本文所述纵横比为0.193，进流平面扩散角达到 180° ，且为单进流的情况。

受场地、循环水泵机组选型、建设和后期维护成本等多种因素的制约，前池在结构和布置型式上变化较大，近年来总体趋向于压缩前池的整体尺寸，再配合以多种型式的水力性能优化措施，以达到节省建设和后期维护成本的目标。采用小尺寸方案的前池，无法达到《火力发电厂循环水泵房进水流道设计规范》^[15]推荐的扩散角和长度布置的要求，因此需要在前池内修建墩、梁类的消能或均流建筑物以优化水力性能。但是在日本福岛核电厂事故后，核电站抗震设计要求提高^[16-17]，仅单侧约束或大跨度的墩、梁等优化结构在抗震设计上有一定的困难，这就给前池水力性能的优化提出了新的要求。

本文以某滨海核电站超窄联合泵房前池为研究对象，针对原设计方案中隧洞集中进水和泵房分佈式取水，以及进、取水流道轴线相差较大所导致的前池水力性能不佳等问题，提出了半圆形扩散墩和悬空隔板相组合的水力性能优化措施，在不进行大范围修改的前提下，短距离内优化了前池的水力性能，改善了泵房吸水室的不对称进流和水面漩涡情况，并通过物理模型试验验证。

2 模型布置

联合泵房前池的设计方案和模型布置如图1所示，其主要包括引水隧洞，联合前池，1号小型机组，2号大型机组(每个机组设置有2套循环水泵和流道)等。小型机组选择在大型机组一侧贴建，形成联合泵房前池；大型机组采用吸水室和前池取水流道交错布置的方式；前池内的大、小型机组间

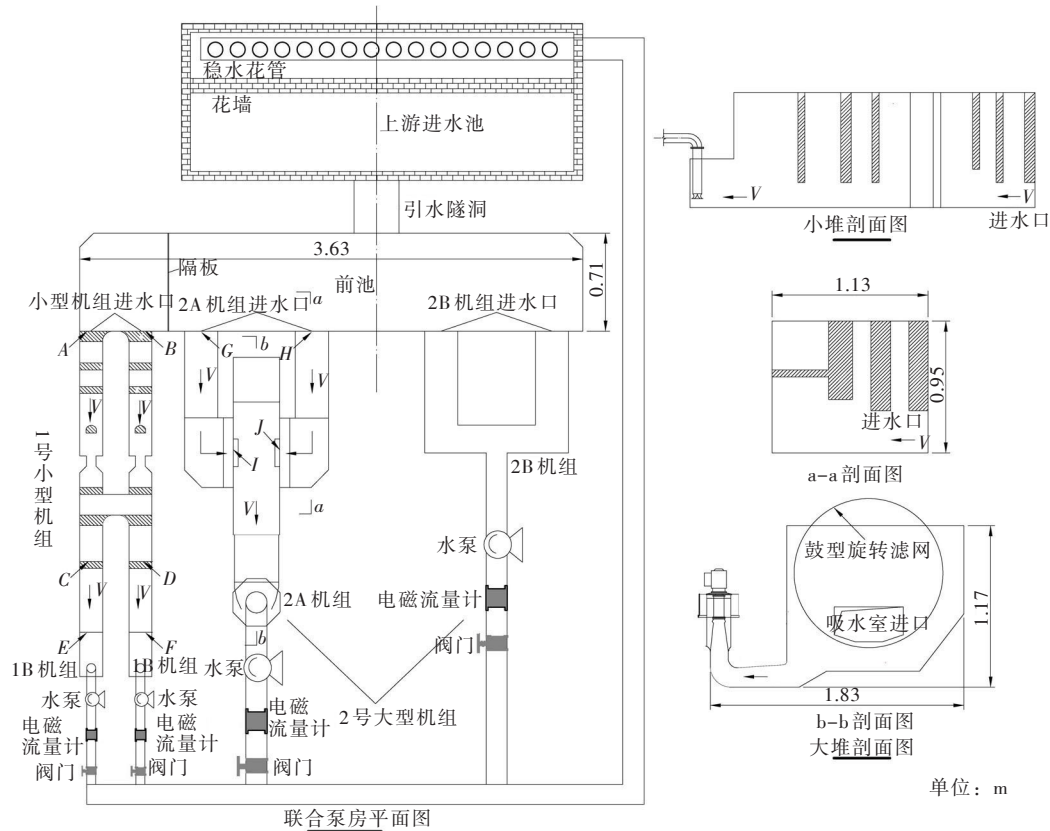


图1 联合泵房前池模型布置图

设置了隔板以减弱大型机组运行对小型机组的影响。

试验采用正态模型,比尺为1:20,物理模型整体宽4 m,长12 m,高1.5 m,其中联合泵房前池的横向长度为3.6 m(1号小型机组前池的宽度为0.6 m,2号大型机组前池的宽度为3.0 m),纵向长度为0.7 m(纵横比为0.193)。主要试验潮位包括百年一遇低潮位(-1.58 m)和平均低潮位(0.11 m);小型机组单泵流量原型值为 $4.4\text{ m}^3/\text{s}$ (模型值为2.4 L/s),大型机组单泵流量原型值为 $32.4\text{ m}^3/\text{s}$ (模型值为18.1 L/s)。考虑到大型机组的泵房流道成对称布置,且与小型机组相邻的2A机组受小型机组前池取水的影响,水力性能更差一些,因此大型机组中的2A机组模拟了完整的流道,2B机组仅模拟流量边界条件。

试验中布置了A—J共计10个测量断面,每个测量断面在横向上均布1[#]—5[#]共5个测点,测点在垂向上设置在过流断面的1/2高度处,流速测量断面的具体布置见图1。流速测量设备采用Nortek三维多普勒流速仪,精度为0.5%,采样频率为20 Hz,采样时间为30 s;流量测量设备采用Sinomeasure电磁流量计,精度为0.3%。

3 原设计方案的体型特点和水力特性

3.1 体型 根据规范^[15],管道引水条件下前池平面扩散角宜在 $20^\circ\sim 40^\circ$ 之间(图2(a))。但本文所述的前池平面上采用无扩散的 180° 角设计,且原型中在流动方向上的纵向长度仅为14.1 m,而横向长度达到了72.7 m,形成了超窄进水前池(图2(b))。由于纵向距离很短,水体由引水隧洞进入前池后很难扩散均匀,形成了变角度的侧向取水。如按规范推荐的最大 40° 扩散角设计,开挖量为现有方案的3.5倍左右,增加工程量约6.2万 m^3 (设计总深度24 m)。此外,前池规模的大幅缩小也有利于降低清理杂质和水生物附着的工作量,减小后期维护成本。

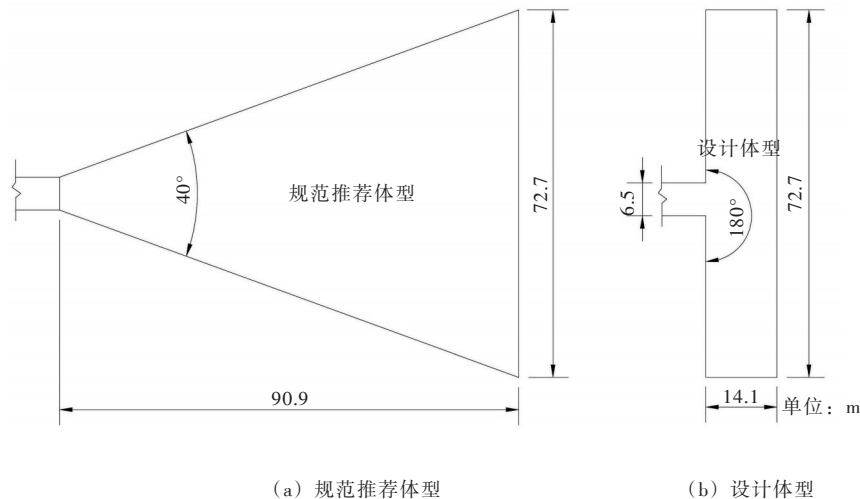


图2 前池规范推荐体型和设计体型开挖面积对比

3.2 流态 由于前池纵向长度极小,而进水隧洞出口流速较大(2.2 m/s),因此水体流出进水隧洞后,直接冲击前池的边墙。在垂向上,形成由底部向水面的水体紊动和显著的水体壅高;在横向上,受边墙的阻挡作用,水体在靠近机组进水口位置,向左右两侧分水,主流再由纵向转为横向,在大型机组前池内形成对称的2个大面积强回流区(图3)。因此,原设计方案形成了前池集中进水和泵房分布式取水,且进、取水流道轴线相差较大,前池中的主流方向在短距离内由纵向转为横向导致了偏流、水体壅高、大范围强回流和流速分布不均等问题。前池中的上述流态不仅易于导致前池中出现泥沙淤积、海上漂浮物和水生物滞留等不利情况,以及导致大型机组水泵吸水室内存在明显的不对称进流和第二类表面漩涡(图4),对循环水泵和鼓网的长期安全和稳定运行不利。

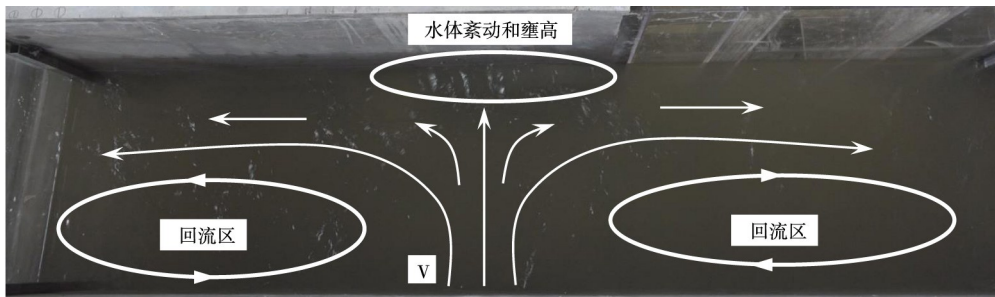
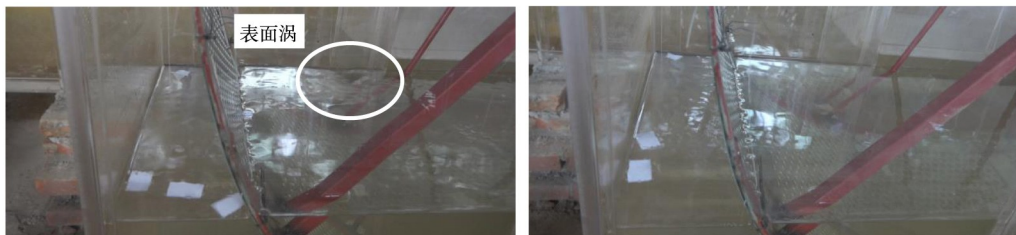


图3 2号大型机组前池的流态



(a) 百年一遇低潮位工况

(b) 平均低潮位工况

图4 原设计方案大型机组吸水室内的流态

相比大型机组的前池，各工况下小型机组前池内的水体流态则基本稳定，阵发性的水体壅高现象不明显，仅在百年一遇低潮位下有低强度的回流现象；小型机组吸水室内的流态也基本稳定，偶发第一类表面涡。这主要是因为小型机组虽然与大型机组共用前池但采用了隔板阻隔，因此减少了大型机组前池不利流态的影响。

3.3 流速分布 在最不利的百年一遇低潮位工况下，主要测量断面法线方向的流速分布如图5所示。小型机组虽然取水流量较低，但是在一侧贴建，其流道各断面流速的流速分布情况也是研究的重点之一。经试验发现，虽然小型机组在前池进口处的流速分布均匀上稍差，但是沿流向方向的纵向长度远大于横向，因此经过沿程整流，至吸水室最近的断面E和F，断面流速平均值分别为0.25 m/s和0.26 m/s，基本相同，未出现明显的偏流现象。大型机组流道各测量断面的流速分布均匀性较差，特别是流道进口断面G的平均流速(0.50 m/s)达到了断面H的2.5倍左右，两侧流道存在着明显的不对称进流，对旋转滤网和水泵的运行安全不利。

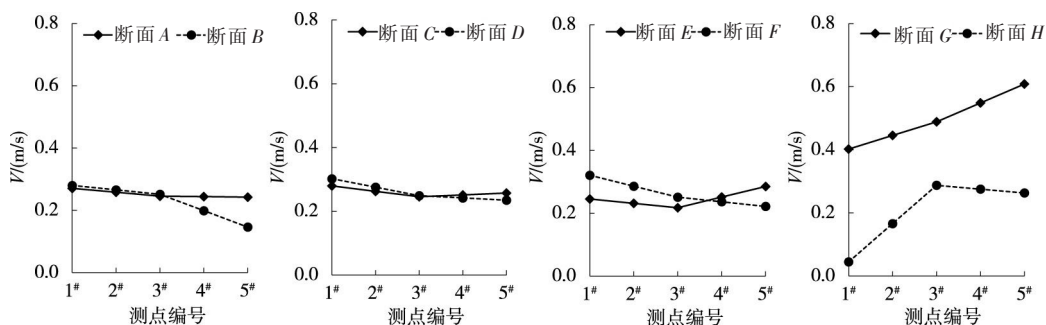
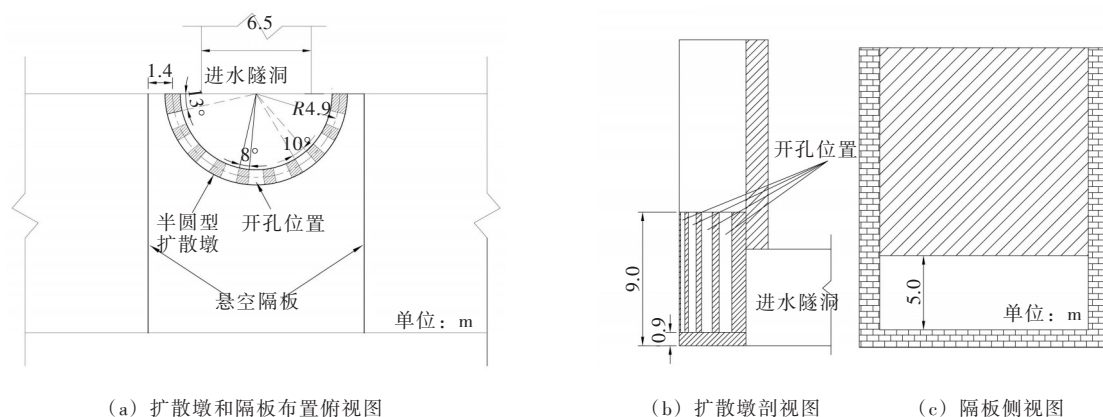


图5 原方案百年一遇低潮位条件下过水断面法线方向的流速分布

4 优化方案的体型特点和水力特性

4.1 体型 为解决上述问题，尝试了在隧洞出口设置挡板、分流墩等多种措施，但是由于隧洞出口流速较大，前池纵横比极小，前池流态对上述结构的位置非常敏感，很难达到均匀分流的效果，前池中仍然会存在较大面积的回流区。通过系统的分析，提出了半圆型扩散墩和悬空隔板组合的结构



(a) 扩散墩和隔板布置俯视图

(b) 扩散墩剖视图

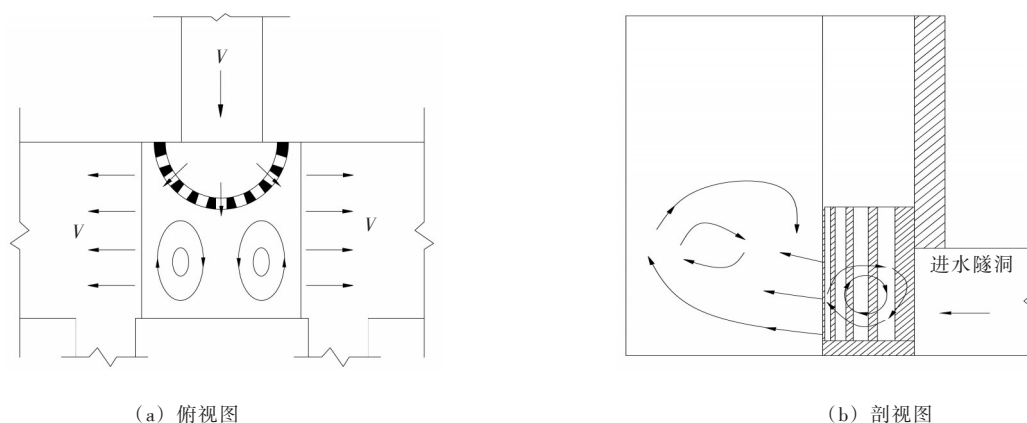
(c) 隔板侧视图

图6 优化方案中半圆型扩散墩和悬空隔板的具体布置

体型以改善前池的水力性能，其结构体型和布置具体如图6所示。

半圆型扩散墩设置在引水隧洞出口，其圆心为进水隧洞的中心点，中心线半径为4.9 m；在开孔方式上虽然非均匀开孔(中部小角度开孔，至两侧逐渐扩大开孔角度)时的扩散效果可能更好，但是从施工便利性考虑最终还是采用均匀开孔，总开孔数量为9个，开孔高度为9.0 m，各开孔的角度为10°，半圆形扩散墩与前池墙体连接处从结构强度考虑将墩体角度设置为13°，其余的墩体角度为8°。悬空隔板设置在扩散墩左右两侧，底部的悬空高度为5.0 m，距扩散墩的中心线1.4 m。除了整流消能的作用，前池内设置悬空隔板的另一个优点是可将前池的上下游边墙连为整体，减小前池的横向跨度，在结构设计时有利于满足抗震要求。

4.2 流态 在优化方案情况下，水体流出引水隧洞后，受到半圆型扩散墩的阻挡作用，先在扩散墩内旋滚消能，再由扩散墩之间的开孔进入消力井，同时向两侧扩散。两侧的悬空隔板可在前池中形成消力井式结构，当水体流出扩散墩后，在消力井内的横向和垂向两个维度上再次旋滚消能，此后通过悬空隔板的底部均匀、有压出流(图7)，以抑制前池内水体的壅高和消除大面积的回流区，并改善各机组流道各进水口的流速分布。



(a) 俯视图

(b) 剖视图

图7 半圆型扩散墩和悬空隔板组合体型的流线示意图

在最不利的百年一遇低潮位和常遇的平均低潮位工况下，大型机组前池和吸水室内的流态分别如图8和图9所示。相比于原设计方案(图3和图4)，优化方案情况下前池中的流态得到大幅改善，即使在最不利的百年一遇低潮位工况下，也基本消除了水体的壅高现象和大范围的强回流区，也未观察到漩涡滞留的情况出现；水面处释放的示踪粒子(图中圆圈所示)分布均匀；大型机组旋转滤网外的吸水室内仅间歇性出现第1类表面涡，优于规范^[15]的要求。在电站运行常遇的平均低潮位工况，相比百年一遇低潮位工况水深升高1.69 m，水体紊动强度减弱，此时的整体流态要优于百年一

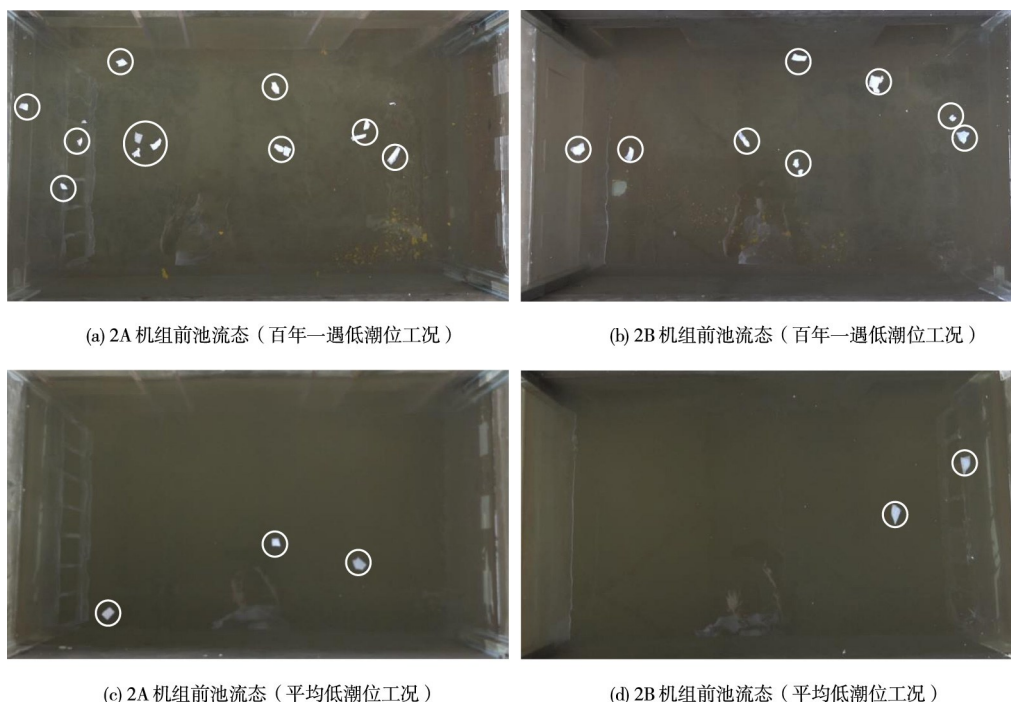


图8 优化方案2号大型机组前池中的流态



图9 优化方案大型机组吸水室内的流态

遇低潮位工况。

4.3 流速分布和局部水头损失 根据原设计方案的试验结果，优化方案重点关注了百年一遇低潮位和平均低潮位工况下断面 E — J 的流速分布(图 10 和图 11)。百年一遇低潮位工况下，在过水断面的法向方向上，小型机组吸水室断面 E 和 F 流速分布的均匀性比原设计方案有所改善，流速标准差分别由 0.02 m/s 和 0.04 m/s 降至 0.01 m/s 和 0.02 m/s；大型机组流道进口断面 G 和 H 的测点流速平均值之比由原方案的 2.5 倍降为优化后的 1.32 倍，不对称进流现象得到很大改善；断面 G 流速标准差由 0.07 m/s 降为 0.03 m/s，断面 H 流速标准差由 0.09 m/s 略升为 0.10 m/s，断面流速分布的均匀性总体得到改善(具体见对比表 1)。对于直接关系到旋转滤网稳定运行的吸水室进口断面 I 和 J ，优化后过水断面法线方向上的平均流速分别为 0.30 和 0.29 m/s(三维总合成流速分别为 0.40 m/s 和 0.43 m/s)，这说明吸水室进水流道两侧的进流基本一致，消除了原设计方案中对旋转滤网运行不利的不对称进流。

在电站运行常遇的平均低潮位工况，断面 E 和 F 的流速分布均匀，基本呈对称进流，流速标准差与百年一遇低潮位基本相同；断面 G 和 H 的测点流速平均值之比进一步下降至 1.24，流速标准差分别下降至 0.02 m/s 和 0.09 m/s，进流的均匀性也进一步改善(表 1)。吸水室进口断面 I 和 J 过水断面法线方向上的平均流速分别为 0.31 m/s 和 0.29 m/s(三维总合成流速均为 0.37 m/s)，也基本处于对称进流的状态。

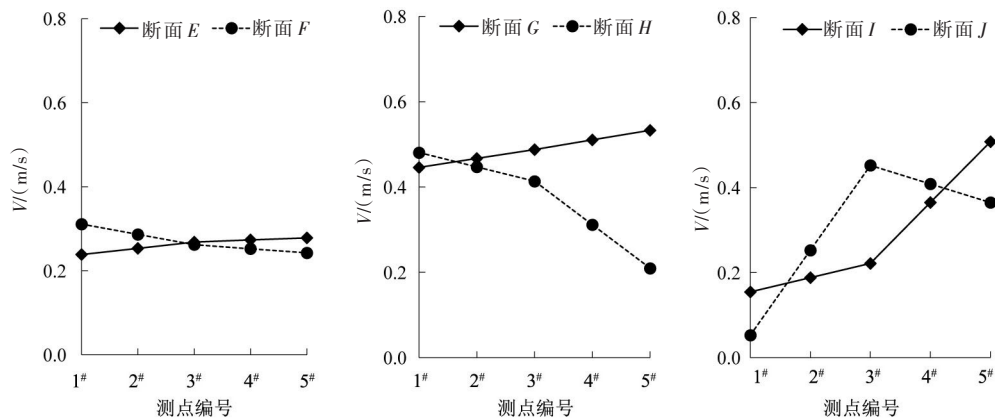


图 10 优化方案百年一遇低潮位条件下过水断面法线方向的流速分布

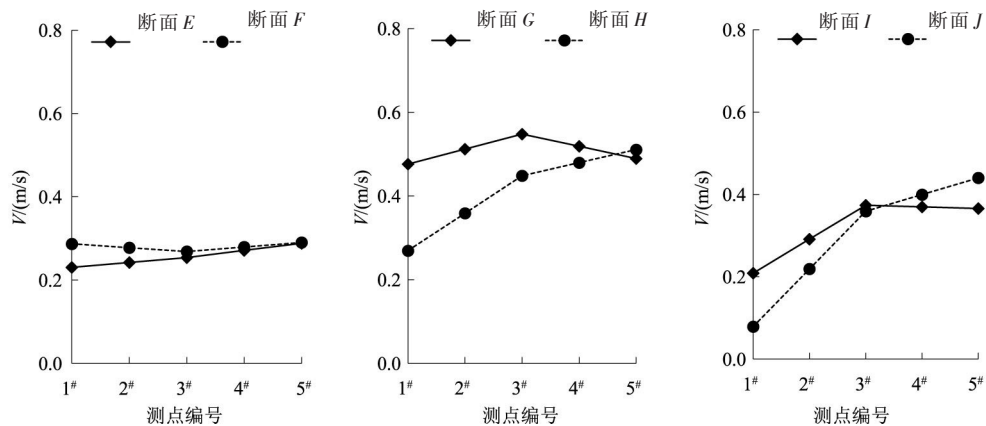


图 11 优化方案平均低潮位条件下过水断面法线方向的流速分布

表 1 原方案和优化方案下断面 E~H 测点平均流速和标准差对比表

			流速/(m/s)			
			断面 E	断面 F	断面 G	断面 H
原方案	百年一遇低潮位	平均值	0.25	0.26	0.50	0.21
		标准差	0.02	0.04	0.07	0.09
优化方案	百年一遇低潮位	平均值	0.26	0.27	0.49	0.37
		标准差	0.01	0.02	0.03	0.10
	平均低潮位	平均值	0.26	0.28	0.51	0.41
		标准差	0.02	0.01	0.02	0.09

经过测量, 优化方案取水隧洞出口与 4A 机组前池间的水位差约为 18 cm(原型值)。根据参考文献[18], 设计方案下前池突扩断面的局部水头损失系数为 0.84, 隧洞出口流速为 2.2 m/s, 则局部水头损失计算值为 0.21 m, 因此优化方案并未明显增大进水隧洞至前池的水头损失, 这有利于降低水泵的运行成本。

5 结论

以单进流条件下,纵横比为0.193,进流平面扩散角为 180° 的某核电站超窄联合泵房前池为研究对象,针对原设计方案中前池集中进水和泵房分布式取水所导致的偏流、水体壅高、大范围强回流和流速分布不均等问题,提出了半圆形扩散墩和悬空隔板相结合的水力性能优化措施。经优化后:(1)在最不利的百年一遇低潮位工况下,基本消除了前池中的水体壅高和大范围的强回流区;大型机组流道进口断面 G 和 H 的测点流速平均值之比,由原方案的2.5倍降为优化后的1.32倍;吸水室进口断面 I 和 J 法线方向上的平均流速分别为0.30和0.29 m/s(三维总合成流速分别为0.40和0.43 m/s),基本消除了原方案中的不对称进流。(2)在电站运行常遇的平均低潮位工况下,断面 I 和 J 过水断面法线方向上的平均流速分别为0.31和0.29 m/s(三维总合成流速均为0.37 m/s),也基本一致。(3)大型机组吸水室内的表面涡强度由第二类降为偶发第一类。研究成果可为采用类似结构型式的泵房前池水力性能优化提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 纪平,赵懿珺,袁珏.火/核电厂冷却水研究回顾与展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5): 487-494.
- [2] FU Hui, JI Ping, XIA Qingfu, et al. A siphon well model for hydraulic performance optimization and bubble elimination[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 311: 43-49.
- [3] 王福军,唐学林,陈鑫,等.泵站内部流动分析方法研究进展[J].水利学报,2018,49(1): 47-61, 71.
- [4] 张睿,徐辉,陈毓陵,等.斜向管涵进流城市雨水泵站箱涵流态分析及整流措施研究[J].水利学报,2018,49(5): 598-607.
- [5] 王广聚,周静,纪平.泵房进水前池优化试验研究[J].水利水电技术,2014,45(2): 123-125.
- [6] 刘超,韩旭,周济人,等.泵站侧向进水引河段三维紊流数值模拟[J].排灌机械,2009,27(5): 281-286.
- [7] 于永海,徐辉,程永光.泵站前池导流板整流措施数值模拟研究[J].水利水电技术,2006,37(9): 41-43.
- [8] 刘新阳,高传昌,石礼文,等.泵站前池与进水池整流数值模拟[J].排灌机械工程学报,2010,28(3): 242-246.
- [9] 秦晓,纪平,梁洪华,等.某火电厂循环水泵房流道布置方案模型试验及优化研究[J].给水排水,2019,55(7): 87-91.
- [10] 张睿,徐辉,陈毓陵,等.斜向管涵进流城市雨水泵站箱涵流态分析及整流措施研究[J].水利学报,2018,49(5): 598-607.
- [11] 白玉川,李彬,徐海珏,等.大跨度泵站多人字型前池导流墩整流分析[J].水电能源科学,2019,37(6): 75-79.
- [12] FENG Jiangang, WANG Xiaosheng, CHENG Bin. Experimental study on the flow pattern modifying in the fore bay of large urban side inflow pumping stations[J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 214-219.
- [13] ZHAN Jie-min, WANG Ben-cheng, YU Ling-hui, et al. Numerical investigation of flow patterns in different pump intake system[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(6): 873-882.
- [14] 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.
- [15] 火力发电厂循环水泵房进水流道设计规范: DLT 5489-2014[S]. 2014.
- [16] 毛庆,吴应喜,张健,等.福岛核事故后中国广东核电集团核电厂抗震设计和评估进展[J].中国工程科学,2013,15(4): 46-51.
- [17] 刘国强,金波,高永武.国内外核电厂抗震设计规范比较[J].世界地震工程,2014,30(4): 68-76.
- [18] 李伟.水力计算手册[M].北京:中国水利水电出版社,2006.

(下转第 804 页)

System index attribute and application of groundwater function zoning in northwest inland area of China

WANG Jinzhe^{1, 2}, ZHANG Guanghui¹, CUI Haohao¹, WANG Qian¹, DONG Haibiao¹, HAO Jing¹

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China;*

2. *Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, China)*

Abstract: The natural wetland and natural vegetation in the northwest inland plain of China are strongly dependent on the groundwater table, the groundwater function zoning is urgently needed, in order to strengthen the ability of “water level–water volume” control of groundwater. Aimed at the demand of how to determine the ecological function protection area, the basic farmland quality protection area and the exploitable resources function area of groundwater in the middle and lower reaches plain areas of the inland basins in Northwest China, based on the newly established theory and method of groundwater function evaluation and regionalization in arid and semi-arid area, this paper expounds attribute composition, characteristics, connotation, regionalization principles and methods of the system suitable for groundwater function regionalization in northwest inland area. The Application results in the Shiyang River basin show that, the area of class B₁, class B₂ and B₃ are 30.60%, 12.90% and 56.50% respectively. In the first grade function area of category B₁, the area of groundwater extraction on a large scale accounts is 58.84%, and the area of appropriate extraction accounts is 41.16%, the area of natural wetland protection area in the first grade functional area of B₂ type is 11.20%, the area of natural vegetation protection area is 48.39%, the area of spring water source protection area is 9.58%, and the area of cultivated land quality protection area is 30.83%. The results accord with the conditions and functions of local groundwater, which is beneficial to the most strict “water level–water quantity” double control management.

Keywords: the north–west inland plain; groundwater; functional zoning; attribute connotation

(责任编辑: 韩 昆)

(上接第 795 页)

Hydraulic performance optimization of the ultra narrow union pumping forebay: a case study

FU Hui¹, NIU Huasi², MAO Yujia², YANG Ruobing², GUO Xinlei¹, SHI Chunrong¹

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,*

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. *China Nuclear Power Engineering Company Limited, Beijing 100840, China)*

Abstract: As an important part of the circulating water system, the pumping forebay of the thermal and nuclear power plant is related to the stability, safety and efficient operation of the whole system. In this paper, the ultra narrow union pumping forebay of a nuclear power plant was taken as the research object. The forebay had an aspect ratio of 0.193–to–one and a single inlet, and the inlet diffusion angle was 180°. Through the systematic experiments with different methods and multiple flow conditions, the hydraulic performance optimization scheme which was consist of the semi-circular diffusion pier and the suspended diaphragm was proposed. On the basis of not greatly changing the original design scheme, the turbulence of water body, backflow height and strong return area in the pumping forebay were all eliminated, the uniformity of flow velocity distribution at the sections of the flow passages was improved, the vortex strength at the water surface in the inlet sump was also reduced. The research results can provide reference for the design and hydraulic performance optimization of pumping forebay of similar thermal and nuclear power plant.

Keywords: pump station; forebay; hydraulic performance; velocity distribution; backflow; power plant

(责任编辑: 李福田)