

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0064

张聪聪,周春峰,周艳霞,等.“Y”形导流墩几何参数对侧向进水泵站前池流态影响[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):192-200. ZHANG C C, ZHOU C F, ZHOU Y X, et al. Analysis of geometric parameters of Y-shaped diversion piers on flow pattern in the forebay of the side-intake pump station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 192-200. (in Chinese)

“Y”形导流墩几何参数对侧向进水泵站前池流态影响

张聪聪¹,周春峰²,周艳霞³,许龙⁴,成立¹

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院,江苏 扬州 225100;2. 南京市水务设施管理中心,南京 210000;
3. 盐城市大丰区农业农村局,江苏 盐城 224100;4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200082)

摘要:为改善侧向进水泵站前池流态,基于 CFX 软件,采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型,对无整流措施和布置“Y”形导流墩情况下的侧向进水前池进行了数值模拟,分析“Y”形导流墩位置、高度、角度、长度等因素对侧向进水泵站前池流态的影响。数值结果表明:无整流措施时,泵站前池左侧区域存在大面积回流区,泵站右侧机组水流偏斜非常明显,对机组有不利影响;“Y”形导流墩具有分流作用,通过在进水池前布置“Y”形导流墩可显著均匀流速、消除回流区,水流能够更均匀地流入各台机组。研究发现,当“Y”形导流墩位于进水池前 $33.33D_0$ 、高度为 $1.11D_0$ 、角度为 120° 、长度为 $2.78D_0$ 时,侧向进水泵站前池流态有明显改善,进水池前行近流速分布更加均匀。

关键词:“Y”形导流墩;侧向进水;前池;流态;数值模拟

中图分类号:TV131 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Analysis of geometric parameters of Y-shaped diversion piers on flow pattern in the forebay of the side-intake pump station

ZHANG Congcong¹, ZHOU Chunfeng², ZHOU Yanxia³, XU Long⁴, CHENG Li¹

(1. College of hydraulic science and engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China; 2. Nanjing Waterworks Management Center, Nanjing 210000, China; 3. Agricultural and Rural Bureau of Dafeng District, Yancheng 224100, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: In order to improve the flow pattern in the forebay of the side-intake pumping station, the numerical simulations were performed on the forebay of the side-intake pumping station with no rectifying measures and settings of Y-shaped diversion piers using CFX software and RNG $k-\epsilon$ turbulence model. An analysis of the influence of the position, height, angle, and length of the Y-shaped diversion piers on the improvement of the flow pattern in the forebay of the side-intake pump station were carried out. Numerical results indicated that if there was no rectification measure, then there was a large area of recirculation in the left area of the forebay of the pumping station. The water flow deflection on the right side of the pumping station was very obvious, which had an adverse effect on the unit. The Y-shaped diversion pier had a shunting effect. The velocity of flow can be significantly uniform by arranging the Y-shaped pier in front of the inlet pool. The recirculation zone could be eliminated, and the water flow could flow into the units more evenly. It was found that the flow pattern in the forebay of the side-intake pumping

收稿日期:2019-07-24 修回日期:2019-09-20 网络出版时间:2019-10-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191008.1357.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(51779214);江苏水利科技项目(2018035);江苏省第五期“333 高层次人才培养工程”;南京市水务科技项目 2018-3

作者简介:张聪聪(1995—),女,江苏徐州人,主要从事水利水电工程方面研究。E-mail:1171884873@qq.com

通信作者:成立(1975—),男,江苏盐城人,教授,博士,主要从事泵站工程研究。E-mail:chengli@yzu.edu.cn

station significantly improved, and the approach velocity distribution before the inlet pool was more uniform when the Y-shaped diversion pier was located at $33.33D_0$ in front of the inlet pool and the height was $1.11D_0$, the angle was 120° and the length was $2.78D_0$, respectively.

Key words: Y-shaped diversion pier; side-intake; forebay; flow pattern; numerical simulation

为了保证水流从引渠流进泵站进水池的过程中流态更好,水流扩散更加均匀,前池一般布置在引渠和进水池之间^[1-2]。地形限制、设计不合理等原因都会给前池带来较差的影响,尤其是侧向进水泵站前池,易受水流惯性影响出现大尺度回流、折冲、主流偏移等情况,这些流态可能会导致泵性能降低,甚至出现泥沙淤积等情况^[3],因此,通常在前池布置整流措施以达到改善流态的目的。泵站前池的整流措施^[4-5]通常包括增加前池长度、增设隔墩^[6-8]、底坎^[9-11]、立柱^[12-14]、导流墩^[15-17]、压水板^[18]等。

泵站前池流态的改善一直是重点研究内容,国内外学者对正向进水前池流态改善做了很多研究^[19-23],但对在侧向进水泵站前池内增加“Y”形导流墩作为整流措施的研究较少。刘超等^[24]研究了“Y”形导流墩与底坎两种整流措施联合整流的情形;成立等^[25]对在正向进水泵站前池中布置“Y”形导流墩整流措施进行了数值模拟,分析了“Y”形导流墩的整流机理;于磊等^[26]将“Y”形导流墩与底坎联合整流的措施成功应用于工程实践。目前研究“Y”形导流墩不同几何参数对侧向进水泵站前池流态影响的较少,本文在验证数值模拟结果值得信赖的基础上,采用数值模拟的方法模拟了不同几何参

数下的“Y”形导流墩对侧向进水泵站前池的整流效果,通过比较分析面层流线图、进水池前行近流速及流速分布均匀度,得出了侧向进水泵站前池中“Y”形导流墩的最优参数。

1 数学模型及计算方法

1.1 数学模型

本文初步采用 RNG k- ϵ 模型和 Realizable k- ϵ 模型对无整流措施情况下的模型进行数值计算,通过对两种模型的计算结果进行收敛性、相容性和稳定性分析,发现 RNG k- ϵ 湍流模型对该泵站模型适用性更好,故最终选用 RNG k- ϵ 模型作为数学模型。

1.2 计算区域

计算区域见图 1(a),进水池机组号从右到左分别为 1,2,3,4,5,模型的进口为引渠进水断面(断面 2-2),出口为泵站进水池内出水管的出口侧,共 9 个出口侧,各出口流量相等,断面 1-1 位置选在进水池前 $0.4D_0$ 处。本文研究的整流措施为“Y”形导流墩,具体参数见图 1(b),包括位置 X 、高度 H 、角度 θ 、长度 L 、宽度 D 等,其中位置指“Y”形导流墩中心距进水池的距离(图 1(a))。

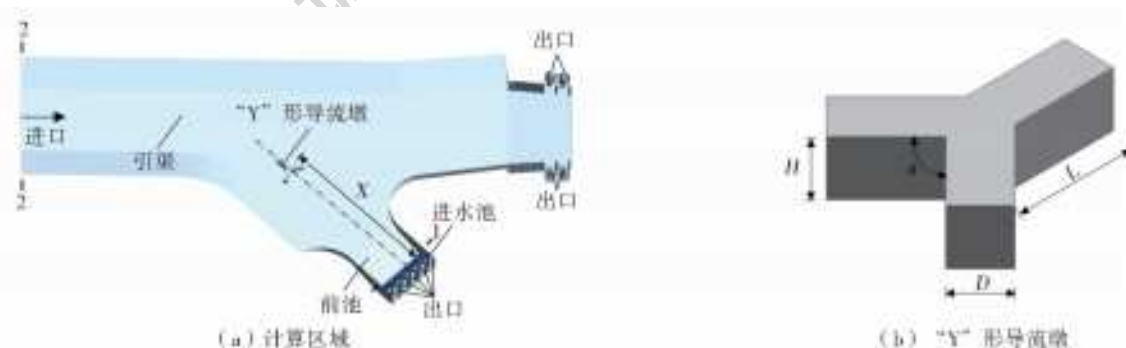


图 1 计算区域及“Y”形导流墩示意图

Fig. 1 Computational domain and Y-shaped diversion pier

1.3 边界条件

此次计算设置的边界条件主要包括以下 4 部分。(1)进口。进口为引渠进水断面,设置流量进口,单泵流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$,总流量为 $22.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。(2)出口。出口为泵站进水池内出水管的出口侧,采用静压出口,压力值为 1 个标准大气压。(3)固体边壁。计算区域的边壁及底部等设置为 wall,采用无

滑移的壁面进行处理。(4)自由水面。忽略水面和空气的热交换,计算区域自由水面设为对称边界条件。计算步数为 500 步,收敛精度为 10^{-6} 。

1.4 网格无关性分析

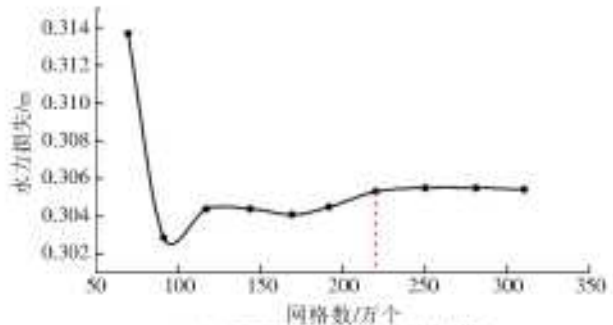
局部网格划分见图 2(a),高质量的网格可以有效缩减计算量,提高收敛精度,因此对计算区域划分了不同数量的网格从而分析网格无关性,选取的网格

数量分别为 697 812、914 368、1 174 078、1 437 195、1 693 517、1 916 817、2 203 580、2 503 236、2 812 040、3 103 637 个。采用总水力损失作为网格数量的评价指标,式(1)为计算公式。

$$H_f = \frac{(P_{in} - P_{out})}{\rho g} \quad (1)$$



(a) 局部网格划分



(b) 不同网格数量下的水力损失

图 2 局部网格划分及不同网格数量下的水力损失

Fig. 2 Partial meshing and hydraulic loss under different grid numbers

2 研究方案

为了研究“Y”形导流墩的位置、高度、角度、长度等因素对侧向进水泵站前池内流态的影响,设计了如表 1 所示的 11 种整流方案。方案 1 至 4 的变量为“Y”形导流墩在前池中轴线上的位置,比较后在最佳位置的基础上,分别以“Y”形导流墩高度、角度、长度为变量,逐步确定“Y”形导流墩的最佳参数,从而选出最优方案。

3 计算结果及分析

3.1 无整流措施的前池流态

无整流措施(原方案)前池的面层流线见图 3(a),由于水流从引渠流向进水池为侧向进水,侧向进水前池的左侧出现大面积回流区,进水池内水流流态紊乱、向左侧偏斜,对泵站运行效率有不利的影响。图 3(b)为无整流措施情况下断面 1-1 行近流速的计算值和试验值比较,由图可知,断面 1-1 处数

式中: H_f 为水流进出口的总水力损失; P_{in} 为引渠进口总压; P_{out} 为出水管出口总压; ρ 为水的密度; g 为重力加速度。

由图 2(b)可知,当网格数超过 220 万时,水力损失变化较小。因此为了缩减计算量,网格数量取 220 万比较合适。

值模拟结果呈现出右侧机组行近流速大,左侧机组行近流速小的趋势,这和试验研究报告^[27]中结果具有统一性,这表明数值模拟结果可以信赖。

表 1 研究方案

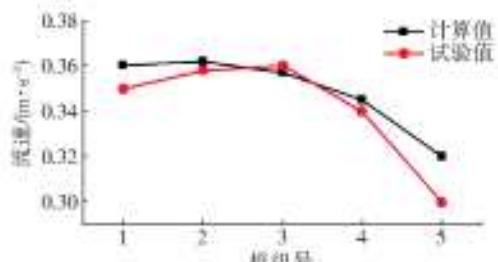
Tab. 1 Research plan

方案	位置 X	高度 H	角度 θ	长度 L
1	38.89 D_0	1.11 D_0	120°	1.67 D_0
2	33.33 D_0	1.11 D_0	120°	1.67 D_0
3	27.78 D_0	1.11 D_0	120°	1.67 D_0
4	16.67 D_0	1.11 D_0	120°	1.67 D_0
5	33.33 D_0	0.83 D_0	120°	1.67 D_0
6	33.33 D_0	1.39 D_0	120°	1.67 D_0
7	33.33 D_0	1.11 D_0	90°	1.67 D_0
8	33.33 D_0	1.11 D_0	150°	1.67 D_0
9	33.33 D_0	1.11 D_0	120°	1.11 D_0
10	33.33 D_0	1.11 D_0	120°	2.78 D_0
11	33.33 D_0	1.11 D_0	120°	3.33 D_0

注: D_0 为吸水管直径, $D_0=0.9\text{ m}$;上述方案的“Y”形导流墩均布置在前池中心线上,宽度 $D=D_0$ 。



(a) 流线图



(b) 行近流速

图 3 无整流措施情况下流线图及行近流速比较

Fig. 3 Comparison of streamlines and near line velocity without rectifying measures

3.2 “Y”形导流墩位置对前池流态的影响

为了讨论“Y”形导流墩位置对前池水流及流速均匀度的影响,在新站进水池前不同位置处布置了一个“Y”形导流墩,具体参数见表 1,方案 1($X=38.89D_0$)为“Y”形导流墩位置距进水池稍远时,“Y”形导流墩对左下方回流区有明显改善,但由于该泵站是侧向进水设计,过早的分流使分流后的低速水流受到流向老站水流的影响,导致“Y”形导流墩尾部出现回旋,见图 4(a);方案 3($X=27.78D_0$)和方案 4($X=16.67D_0$)的位置均离进水池较近,导

致分流过晚,未对左下方回流带来好的影响,反而致使水流流速在前池收缩处加剧,对均流流速产生不利影响,见图 4(c)、4(d);对比之下方案 2($X=33.33D_0$)位置更加合适,基本消除了回流区,导流墩尾部也没有出现回旋,见图 4(b)。比较 4 个方案在断面 1-1 处的行近流速(图 4(e)),可以看出,方案 2 的流速分布比较均匀。因此,从上述 4 种方案的位置参数看,当“Y”形导流墩距离进水池位置适中时($X=33.33D_0$),导流墩的分流效果较好,进水池前行近流速更加均匀,对前池流态整流效果较好。

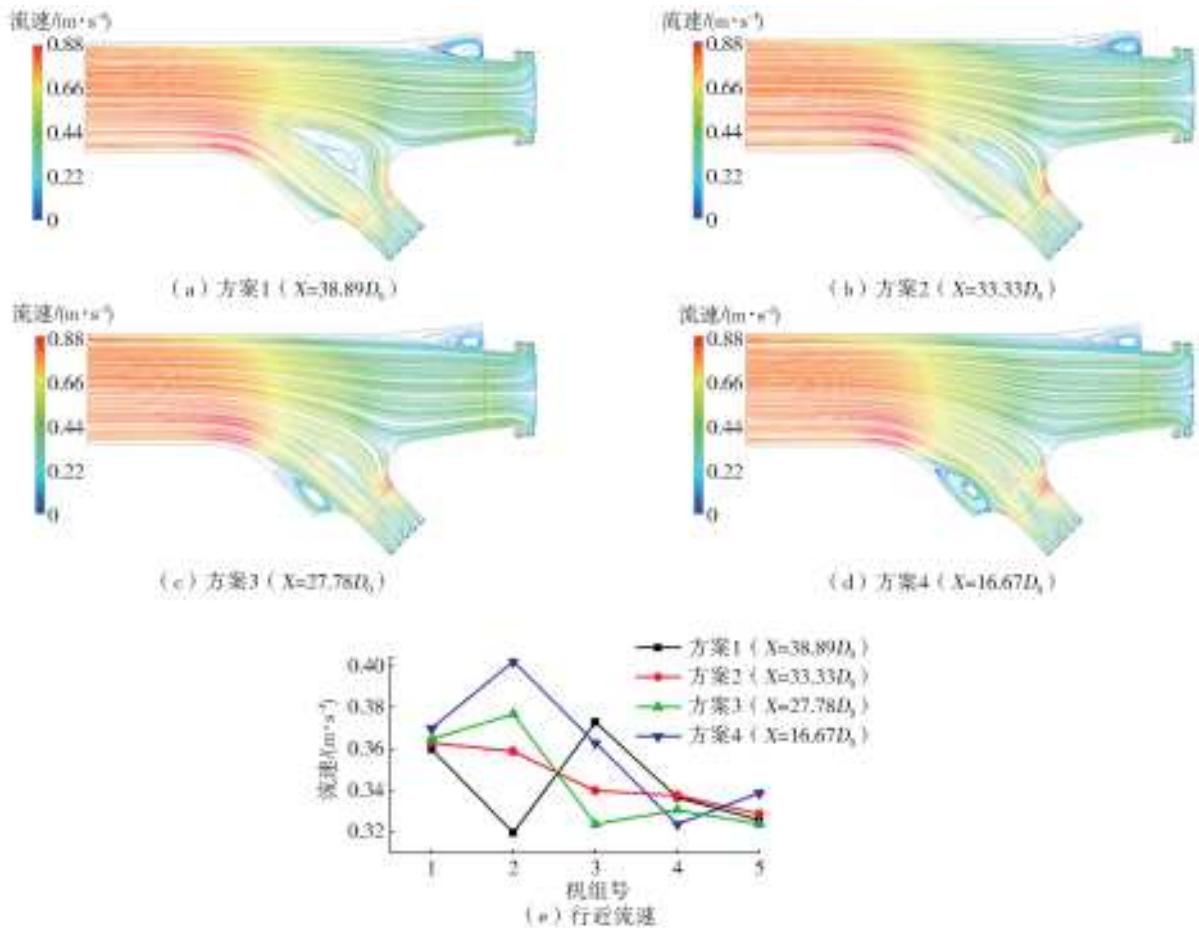


图 4 “Y”形导流墩不同位置情况下流线图及行近流速比较

Fig. 4 Comparison of streamlines and near velocity of Y-shaped diversion pier at different positions

3.3 “Y”形导流墩高度对前池流态的影响

为了研究“Y”形导流墩高度对前池水流及流速均匀度的影响,设计了 3 个比较方案(方案 2、5、6)。当“Y”形导流墩高度较低时(方案 5),分流效果不明显,对前池流态改善不大;当导流墩高度较高时(方案 6),分流效果较好,可以消除左侧回流区,但由于高度较高,对尾部水流的影响较大,易产生回流;方案 2($H=1.11D_0$)中“Y”形导流墩的高度适中,可以消除回流区,尾部也不会产生回流。通过图 5(c)的行近流速图可以发现,方案 2 的行近流速更加均匀,由此可见,导流墩高度对行近流速影响很

大,适当的高度下流速更均匀。

3.4 “Y”形导流墩角度对前池流态的影响

方案 2、7、8 变量为角度,由图可知,当“Y”形导流墩 θ 角较小时(方案 7),导流墩的分流作用不明显,且进水池前行近流速分布较不均匀;当 θ 角较大时(方案 8),原本消去的回流区又出现了,但是对均匀行近流速有所帮助。通过图 6(c)可以发现,当“Y”形导流墩角度越大时进水池前行近流速越均匀,但是不利于消除回流区。当“Y”形导流墩角度适中时($\theta=120^\circ$),可以消除回流区,行近流速也处于较均匀的状态。

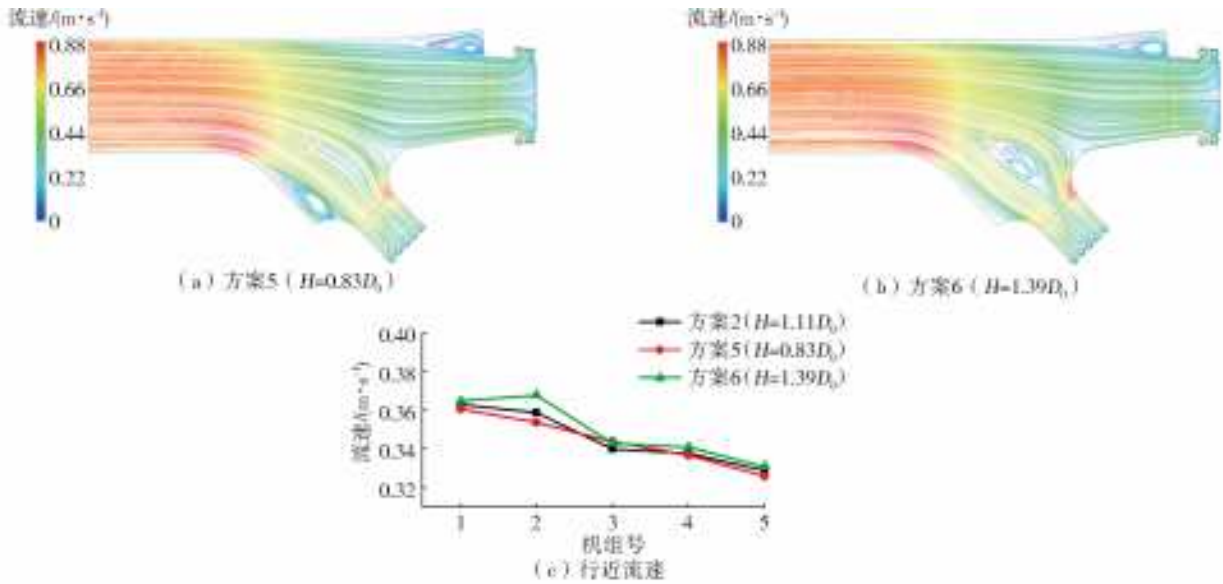


图 5 “Y”形导流墩不同高度情况下流线图及行近流速比较
Fig. 5 Comparison of streamlines and near velocity of Y-shaped diversion pier at different heights

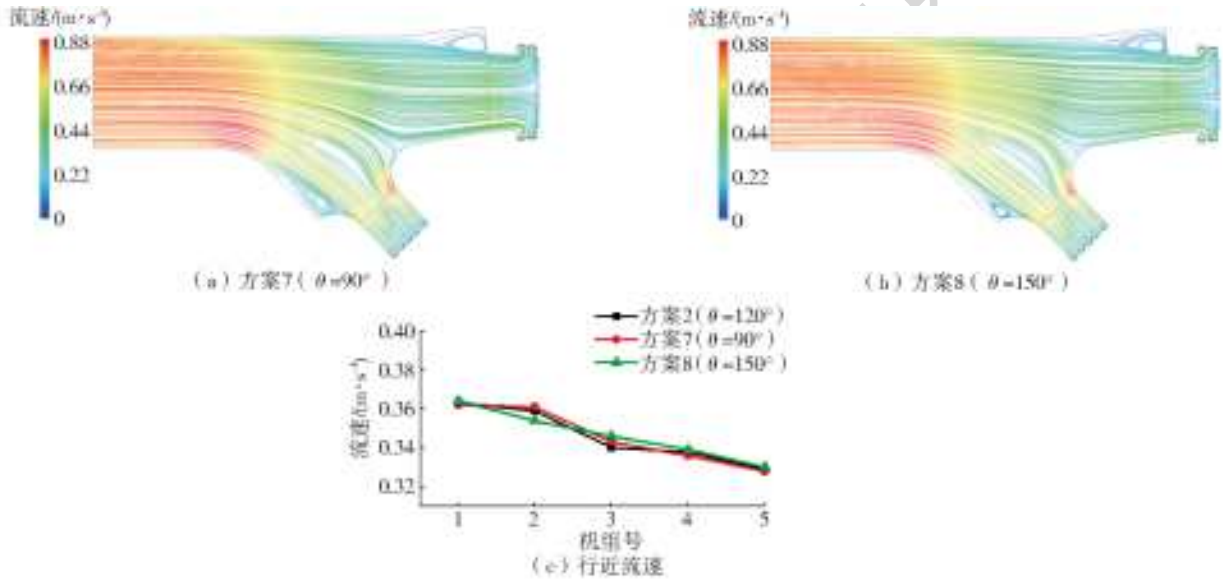


图 6 “Y”形导流墩不同角度情况下流线图及行近流速比较
Fig. 6 Comparison of streamlines and near velocity of Y-shaped diversion pier at different angles

3.5 “Y”形导流墩长度对前池流态的影响

方案 2、9、10、11 四种方案的导流墩长度不同,由图可知,当“Y”形导流墩长度较小时(L=1.11D₀),对前池的整流作用不大,效果较差;“Y”形导流墩长度适中时(L=2.78D₀),分流效果较好,可明显消除左侧回流区;当“Y”形导流墩长度较大时(L=3.33D₀),导流墩尾部易出现回流,整流效果较差,进水池进水条件差。从图 7(d)的行近流速比较可以看出,导流墩对水流流速有削减的作用,在合适的长度范围内,“Y”形导流墩长度越长对进水池前行近流速影响越大,因此从长度参数来看,方案 10 优于其他方案。

3.6 泵站行近流速分布均匀度分析

为了定量分析前池水流流态对泵站行近流速的影响,采用断面流速分布均匀度指标进行评价。计

算公式为

$$\bar{V}_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{i}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: \bar{u}_a 为断面轴向平均速度; u_{ai} 为断面 i 点处轴向速度分量; i 为自变量。

行近流速均匀度计算断面 1-1 距进水池 0.4D₀ (图 1(a))。根据公式(2)计算出包括无整流措施方案在内的 12 个方案各进水池进口断面的流速分布均匀度。无整流措施时进水池 4 号和 5 号的均匀度较差,仅为 76.21%和 68.42%。图 8 为“Y”形导流墩不同几何参数下流速分布均匀度对比情况,由图可知,方案 10 的流速分布均匀度较好,4 号和 5 号机组的行近流速均匀度为 87.30%和 80.34%,较原方案高出 11.09%和 11.92%。

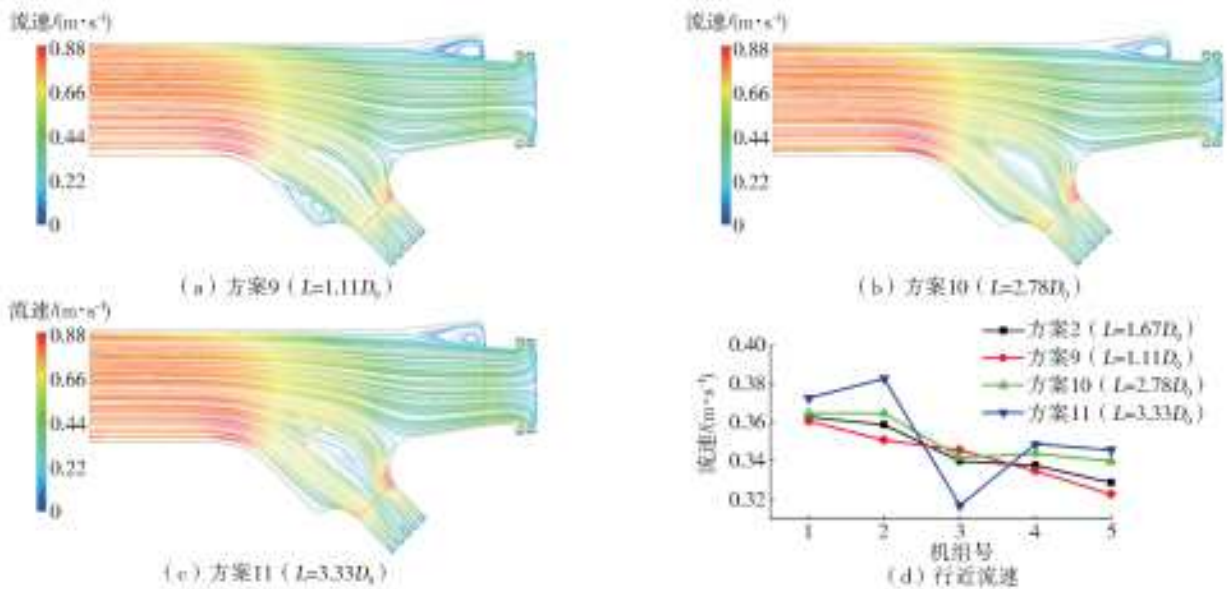


图7 “Y”形导流墩不同长度情况下流线图及行近流速比较

Fig. 7 Comparison of streamlines and near velocity of Y-shaped diversion pier with different length

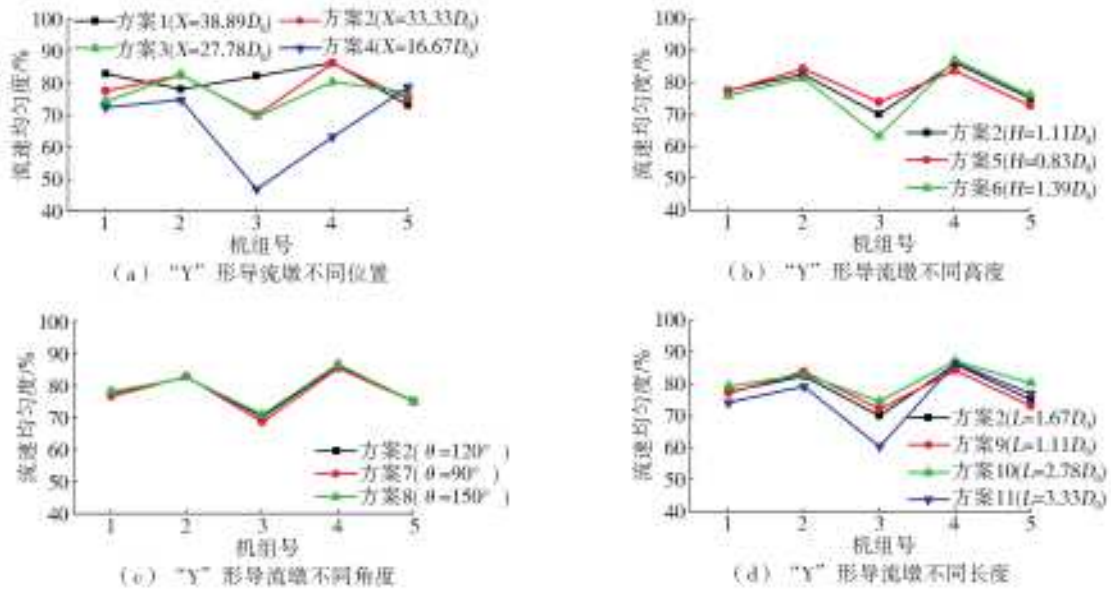


图8 各方案行近流速分布均匀度比较

Fig. 8 Comparison of velocity distribution uniformity approach of each scheme

3.7 原方案和最优方案比较

通过分析“Y”形导流墩位置、高度、角度、长度等因素对前池流态的影响,最终发现方案10设计参数下的前池流态较好,基本消除了左下方回流区(图7(b)),图9(a)为原方案和最优方案(方案10)的行近流速比较,由图可见,进水池前行近流速有了明显的改善,由于“Y”形导流墩的阻水作用,3号进水池前流速下降,两侧进水池前流速相应增大,但最大流速和最小流速之差变小,总体行近流速更加均匀。图9(b)为原方案和最优方案断面流速分布均匀度比较,由图可见,4号和5号机组的流速均匀度有了显著的改善,1号进水池略有改善。综上所述,参数合适的“Y”形导流墩对前池流态有较好的影响。

3.8 “Y”形导流墩整流机理

由图10(a)可知,“Y”形导流墩有分流作用,水流流经“Y”形导流墩向两侧分开,尾后的低速水流易受影响产生回流,而分流和回流的范围受“Y”形导流墩的高度、角度和长度等因素影响。图10(b)为水流流速变化示意图,从图中可以看出水流流经“Y”形导流墩后,尾后水流流速较低,易产生回流,流经前池流速会由不均匀分布向均匀分布过渡,由此也可看出,“Y”形导流墩位置不宜距进水池较近,推荐作为前期整流措施使用。

4 结论

(1)无整流措施时,泵站前池左侧区域存在大面

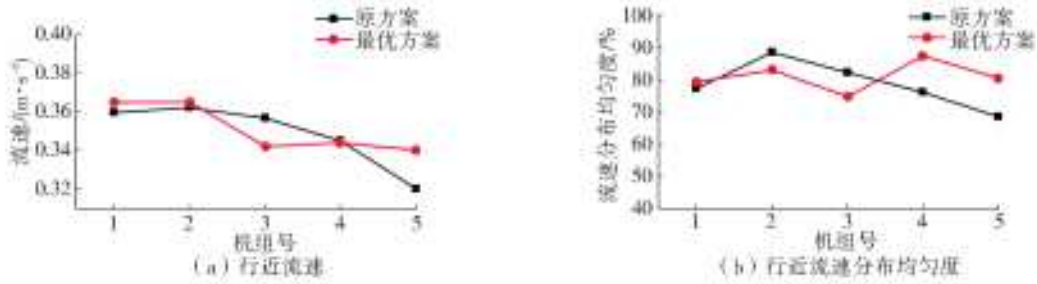


图 9 原方案和最优方案比较
Fig. 9 Comparison of original plan and optimal plan

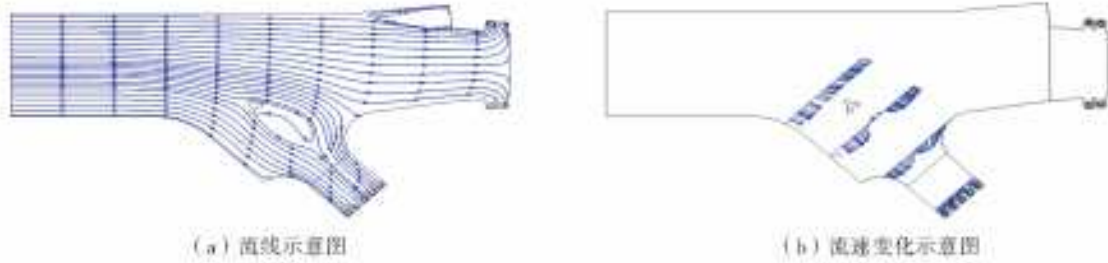


图 10 “Y”形导流墩整流机理示意图
Fig. 10 Schematic diagram of rectification of Y-shaped diversion pier

积回流区,泵站右侧机组水流偏斜非常明显,进水池前测速断面行近流速分布不均匀。

(2)“Y”形导流墩宜布置在前池中轴线上,且距进水池位置应适中,其中“Y”形导流墩的高度、角度、长度太小,对侧向进水泵站前池流态无明显改善;高度、角度、长度太大,尾后的低速水流易受影响产生回流,行近流速分布均匀度较差。

(3)当“Y”形导流墩位于进水池前 $33.33D_0$ 、高度为 $1.11D_0$ 、角度为 120° 、长度为 $2.78D_0$ 时,侧向进水泵站前池水流流态优化效果较好,进水池前行近流速较平稳,行近流速分布均匀度较好。

(4)“Y”形导流墩在侧向进水泵站前池中有很好的适用性,研究结果为其他侧向进水泵站前池改造提供了依据。

参考文献(References):

[1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009. (LIU C. Pumps and pumping stations[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2009. (in Chinese))

[2] 成立,刘超,颜红勤,等. 泵站水流运动特性及水力性能[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016. (CHENG L, LIU C, YAN H Q, et al. Flow characteristics and hydraulic performance of pumping stations[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2016. (in Chinese))

[3] 杨帆,刘超,汤方平,等. 大型立式轴流泵装置流道内部

流动特性分析[J]. 农业机械学报,2011,42(5):39-43, 55. (YANG F, LIU C, TANG F P, et al. Character crit- ics of flow in large vertical axial flow pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 39-43, 55. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1000-1298. 2011. 05. 008

[4] 成立,刘超,周济人,等. 泵站侧向进水流态及其改善措施机理探讨[J]. 排灌机械, 2001, 19(1): 31-34. (CHENG L, LIU C, ZHOU J R, et al. Discussion on the mechanism of lateral inflow of pumping station and its improvement measures[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(1): 31-34. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1674-8530. 2001. 01. 007.

[5] 吴晓兰,马晓辉,许一新. 泵站正向进水前池水流流动均匀性分析[J]. 江苏水利, 2017(3): 53-57. (WU X L, MA X H, XU Y X. Analysis of flow uniformity of front inflow forebay in the pump station[J]. Jiangsu Water Resources, 2017(3): 53-57. (in Chinese)) DOI: 10. 16310/j. cnki. jssl. 2017. 03. 011.

[6] 周龙才. 泵站前池隔墩整流的数值分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 31-33. (ZHOU L C. Numerical analysis on improvement of flow conditions in forebay of pumping station by setting separation piers[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(2): 31-33. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1001-5485. 2010. 02. 007.

[7] 冯建刚,李杰. 大型城市水源泵站前池流态及改善措施

- 试验[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (2): 70-74. (FENG J G, LI J. Flow patterns in forebay of large urban water source pumping stations and countermeasures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 70-74. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2010. 02. 018.
- [8] 罗灿, 刘超. 多机组泵站侧向进水特性模拟和改进研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1): 207-214. (LUO C, LIU C. Numerical simulation and improvement of side-intake characteristics of multi-unit pumping station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (1): 207-214. (in Chinese))
- [9] 成立, 刘超, 周济人, 等. 泵站前池底坝整流数值模拟研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(3): 42-45. (CHENG L, LIU C, ZHOU J R, et al. Numerical simulation of sill flows in the forebay of pumping station[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29 (3): 42-45. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-1980. 2001. 03. 009.
- [10] 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, 2014, 32 (5): 393-398. (LUO C, CHENG L, LIU C. Numerical simulation of mechanism for sill rectifying flow in pumping station intake [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2014, 32 (5): 393-398. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-8530. 13. 0122.
- [11] 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 H R, YANG F, LIU C, et al. Numerical simulation of side-intake flow for fluid meliorating of pumping stations[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2017, 48 (7): 79-84. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2017. 07. 014.
- [12] 周济人, 仲召伟, 梁金栋, 等. 侧向进水泵站前池整流三维数值计算[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(10): 52-55, 80. (ZHOU J R, ZHONG Z W, LIANG J D, et al. Three-dimensional numerical simulation of side-intake forebay of pumping station[J]. Journal of Irrigation and Drainage. 2015, 34(10): 52-55, 80. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2015. 10. 011.
- [13] 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 C Z, CHENG L, ZHAO G F, 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)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2017. 04. 010.
- [14] 刘梅清, 林琦, 梁兴, 等. 泵站前池流态改善效果的数值模拟分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45 (2): 152-156. (LIU M Q, LIN Q, LIANG X, et al. Numerical simulation research on improving flow pattern of forebay of a pumping station[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45 (2): 152-156. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WSDD. 0. 2012-02-005.
- [15] 陆伟刚, 陈华, 吴月, 等. 破罡湖闸站前池整流的数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 120-123. (LU W G, CHEN H, WU Y, et al. Numerical simulation study on rectification schemes of the forebay of Poganghu Station[J]. Water Resources and Power, 2018, 36 (10): 120-123. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDNY. 0. 2018-10-031.
- [16] 赵苗苗, 贾君德, 秦景洪, 等. 闸站结合泵站前池导流墩整流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 125-130. (ZHAO M M, JIA J D, QIN J H, et al. Numerical simulation of division pier rectifying flow in forebay of combined sluice-pump station[J]. China Rural Water and Hydro-power, 2018(4): 125-130. (in Chinese))
- [17] 资丹, 王福军, 姚志峰, 等. 大型泵站进水流场组合式导流墩整流效果分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (16): 71-77. (ZI D, WANG F J, YAO Z F, et al. Effects analysis on rectifying intake flow field for large scale pumping station with combined diversion piers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 71-77. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2015. 16. 011.
- [18] 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. (GAO C C, LIU X Y, SHI L W, et al. Numerical simulation of flow pattern modification schemes for the forebay and suction sump of pumping station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30 (2): 54-59. (in Chinese))
- [19] HOU C. Three-dimensional numerical analysis of flow pattern in pressure forebay of hydropower station[J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 128-135. DOI: 10. 1016/j. proeng. 2012. 01. 694.
- [20] FELIX A M, HOLBEIN P, DUPONT P. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoff to maximum Flow[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124: 798-802. DOI: 10. 1115/1. 1478061.
- [21] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An intro-

- duction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. New York: Pearson Education, 2007.
- [22] JUN M, YUKI S, KENJI K. Numerical simulation on flow in pump sump with free surface[C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering, IET, Wuhan, China, 2014: 928-932.
- [23] 资丹, 王福军, 陶然, 等. 边界层网格尺度对泵站流场计算结果影响研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 139-149. (ZI D, WANG F J, TAO R, et al. Research for impacts of boundary layer grid scale on flow field simulation results in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 47(2): 139-149. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20150495.
- [24] 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. (LIU C, HAN X, ZHOU J R, et al. Numerical simulation of turbulent flow in forebay with side-intake of pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(5): 281-286. (in Chinese))
- [25] 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 L, QI W J, LUO C, 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)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2014. 01. 014.
- [26] 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. (YU L, GU W, LIU B W, et al. Numerical simulation on improvement of flow Pattern in forebay of pumping station[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2017, 20(4): 75-78. (in Chinese)) DOI: 10. 19411/j. 1007-824x. 2017. 04. 017.
- [27] 范楼. 梁寨泵站整体模型试验研究报告[R]. 扬州: 江苏机电排灌工程研究所, 1996. (FAN L. Report on the overall model test of Liangzhai pumping station [R]. Yangzhou: Jiangsu Institute of Mechanical and Electrical Irrigation and Drainage Engineering, 1996. (in Chinese))

.....

(上接第 173 页)

- [20] 梁小俊, 张庆庆, 许月萍, 等. 层次分析法-灰关联分析法在京杭运河杭州段水质综合评价中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(3): 312-316, 325. (LIANG X J, ZHANG Q Q, XU Y P, et al. Application of analytic hierarchy process-gray correlation analysis in comprehensive evaluation of water quality in Hangzhou Section of Beijing-Hangzhou Grand Canal[J]. Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2011, 44(3): 312-316, 325. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WSDD. 0. 2011-03-010.
- [21] 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 等. 辽宁省辽河水生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 181-188. (HUI X J, YANG T, LI F Y, et al. Health assessment of Liaohe water ecosystem in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 181-188. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 2011. 0005.
- [22] 彭涛, 陈晓宏. 海河流域典型河口生态系统健康评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 631-634, 639. (PENG T, CHEN X H. Health assessment of typical estuarine ecosystem in Haihe River basin[J]. Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2009, 42(5): 631-634, 639. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WSDD. 0. 2009-05-018.
- [23] 叶芳芳. 南四湖藻类及生态系统健康评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. (YE F F. Evaluation of algae and ecosystem health in Nansi Lake[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (in Chinese))