

Y 形导流墩几何参数对泵站前池整流效果的影响

成 立,祁卫军,罗 灿,商邑楠,袁红彦

(扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要:为了改善泵站前池流态,基于 Fluent 软件,运用可实现的 $k-\varepsilon$ 模型对加 Y 形导流墩的正向进水泵站前池流态进行数值模拟,分析 Y 形导流墩几何参数对前池流态改善的影响。结果表明:Y 形导流墩具有分流效果,流经 Y 形导流墩的水流会沿其两翼发生扩散,同时在 Y 形导流墩尾后产生漩涡。无整流措施时,泵站前池流态紊乱;通过在前池加设 Y 形导流墩可显著改善流态;Y 形导流墩位置宜在前池中间,其中长度、高度、尾部夹角越大,两侧漩涡越小,行近流速分布越不均匀。

关键词:泵站;Y 形导流墩;前池;流态;数值模拟

中图分类号:TV133;TV675 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)01-0068-05

Effect of geometric parameters of Y-shaped diversion piers on flow pattern in forebay of pumping station//CHENG Li, QI Weijun, LUO Can, SHANG Yinan, YUAN Hongyan (School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The fluid calculation software Fluent was used to determine the way to improve the flow pattern in the front inflow forebay of a pumping station with Y-shaped diversion piers, in which the realizable $k-\varepsilon$ turbulence model was applied to numerical simulation of the flow pattern. The effect of geometric parameters of Y-shaped diversion piers on the flow pattern was analyzed. It was found that, without adoption of any rectification measures, the flow pattern was disordered in the forebay, while it was significantly improved when the Y-shaped diversion pier was adopted. The Y-shaped diversion pier has the function of flow diversion: currents flowing toward piers are separated by the piers and spread along the wings of piers, and vortexes form at the tail of piers. It is also demonstrated that the Y-shaped diversion pier should be located in the middle of the forebay, where larger lengths, heights, and angles between two wings of the Y-shaped diversion pier correspond to a smaller size of vortexes at the two sides of piers and more uneven distribution of flow velocities.

Key words: pumping station; Y-shaped diversion pier; forebay; flow pattern; numerical simulation

前池分为正向进水前池和侧向进水前池两种类型。前池设计不当易导致不良流态产生,而前池内的不良流态将严重影响进水池内的流态,导致水泵能量性能和抗空蚀性能下降,甚至引起水泵的空蚀和振动,同时回流还会引起前池内的局部淤积,而泥沙淤积又会进一步加剧不良流态的发展^[1]。国内外学者对泵站前池流态的改善做了较多研究,刘超等^[2]针对泵站侧向进水引河段的回流流动,研究了“底坎+Y 形导流墩”的组合整流措施后的流动;成立等^[3]对泵站前池底坎整流的流动进行了数值模拟,分析了底坎整流机理;周济人等^[4]通过王山泵站整体模型试验研究,分析了前池不良流态的成因,研究了加设导流墙等措施的前池整流机理;Gaston 等^[5]验证了采用 CFD 分析方式能更好分析复杂流

态。目前研究内容主要集中于在前池中放置底坎^[6-7]、压水板^[8]、八字形隔墩^[9-10]和导流板^[11],但对 Y 形导流墩整流机理的研究不多。本文基于 Fluent 软件,采用数值模拟的方法模拟 Y 形导流墩的整流效果,分析研究 Y 形导流墩在不同设置位置和几何参数下对改善前池流态的影响。

1 前池及 Y 形导流墩参数

本文研究的泵站进水前池为正向扩散前池,其中研究区域如图 1 所示,包括涵洞(两孔)、前池、进水池(1~10 号)和吸水管。前池相关参数包括前池宽度 B 、吸水管直径 D_0 ,测速断面 1-1 距进水池 $0.438D_0$ 。拟研究的 Y 形导流墩如图 2 所示,其主要参数包括高度 H 、长度 L 、宽度 D 、角度 θ 及 Y 形导

基金项目:国家自然科学基金(51179167);扬州大学新世纪人才工程(扬大人[2012]22 号);江苏省高校自然科学重大项目(12KJA570001)

作者简介: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

流墩至进水池距离 X 。

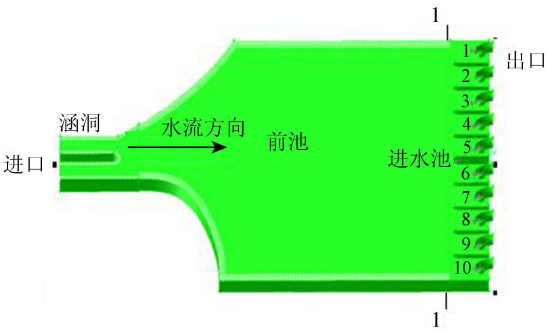


图 1 前池示意图

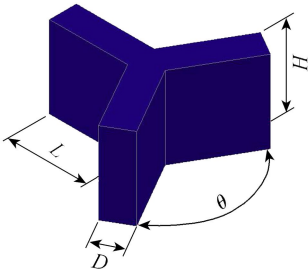


图 2 Y 形导流墩示意图

2 数值计算

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和 SIMPLE 算法求解流速场分布。由于流动需遵循质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程,故选择雷诺时均 N-S 方程和连续性方程对整个流动进行描述。连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

动量方程为

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

式中: u_i 分别为 x, y, z 方向的速度分量; p 为压力; ρ 为密度; g 为重力加速度; ν 为水的运动黏性系数, ν_t 为紊动黏性系数。

进口取在进水涵洞入口,本文研究中给定进水涵洞的流量,进口边界设为质量入口。由于前池内水面波动不大,采用刚盖假定,简化为对称边界条件。由于出口流动已成单向状态,为自由出流,选用 outflow 出流条件。壁面边界条件采用标准壁面函数。

3 研究方案

为了深入研究 Y 形导流墩位置及几何参数对前池流态的影响,设计了 13 个方案,如表 1 所示。先分析无整流措施的方案 1;然后分别分析比较不同的 Y 形导流墩位置(方案 2 ~ 4)、高度(方案 5 ~

7)、角度(方案 8 ~ 10)和长度(方案 11 ~ 13)对前池流态的影响。为了定量分析,选取断面 1-1 为行近流速测量断面。

表 1 不同方案的 Y 形导流墩几何参数

方案	位置 X	高度 H	角度 θ	长度 L
2	$36.475D_0$	$\frac{2}{3}h$	120°	$1.388D_0$
3	$22.7D_0$	$\frac{2}{3}h$	120°	$1.388D_0$
4	$17.875D_0$	$\frac{2}{3}h$	120°	$1.388D_0$
5	$22.7D_0$	$\frac{1}{2}h$	120°	$1.388D_0$
6	$22.7D_0$	$\frac{3}{4}h$	120°	$1.388D_0$
7	$22.7D_0$	$\frac{5}{6}h$	120°	$1.388D_0$
8	$22.7D_0$	$\frac{2}{3}h$	60°	$1.388D_0$
9	$22.7D_0$	$\frac{2}{3}h$	90°	$1.388D_0$
10	$22.7D_0$	$\frac{2}{3}h$	150°	$1.388D_0$
11	$22.7D_0$	$\frac{2}{3}h$	120°	$1.041D_0$
12	$22.7D_0$	$\frac{2}{3}h$	120°	$1.736D_0$
13	$22.7D_0$	$\frac{2}{3}h$	120°	$2.430D_0$

注: h 为前池内水深。

4 计算结果及分析

4.1 无整流措施的前池流态

无整流措施的前池流线和断面 1-1 行近流速分别如图 3 和图 4 所示,无整流措施的前池流态不良,前池左右两侧出现与前池长度近乎相等的漩涡;由于两侧水流存在大尺度回漩,逼近进水池,断面 1-1 行近流速分布很不均匀。

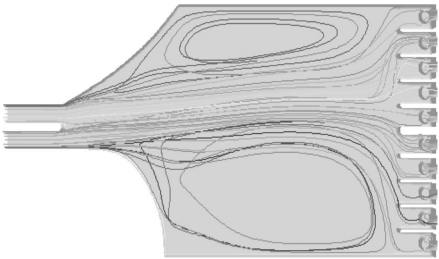


图 3 方案 1 前池流线

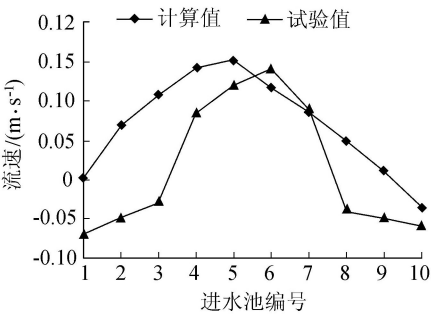


图 4 方案 1 行近流速

由图 4 可知,数值模拟结果的变化趋势及数值大小与试验结果^[2]呈现出一致性,这表明数值模拟方法基本可行。

4.2 Y 形导流墩位置对前池流态的影响

从图 5 ~ 7 可知,当 Y 形导流墩位置过于接近涵洞时(方案 2),其分流效果较为明显,但前池中间的水流出现大尺度的回流,对进水池流态产生不利影响;当 Y 形导流墩位置过于接近进水池时(方案 4),Y 形导流墩尾部漩涡影响到了进水池。当 Y 形导流墩位置适中时(方案 3),进水池前侧的流态获得更均匀分布。由图 8 可知,方案 3 和方案 4 中进水池前的行近流速分布较为均匀。从上述 3 种方案的位置参数看,方案 3 整流效果较好。

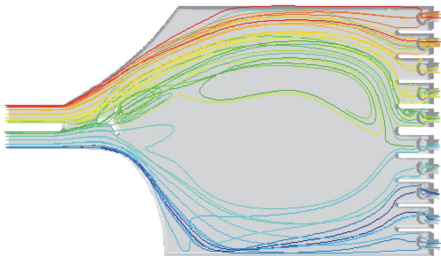


图 5 方案 2 前池流线

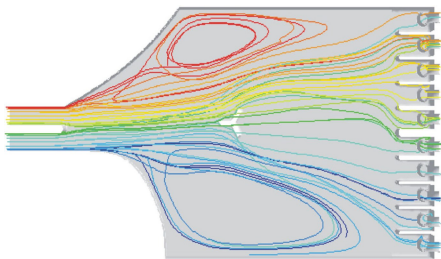


图 6 方案 3 前池流线

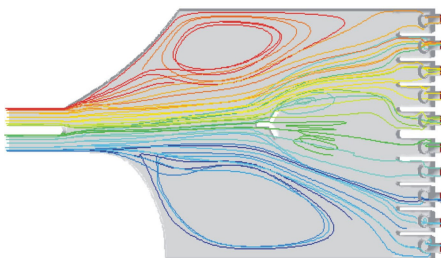


图 7 方案 4 前池流线

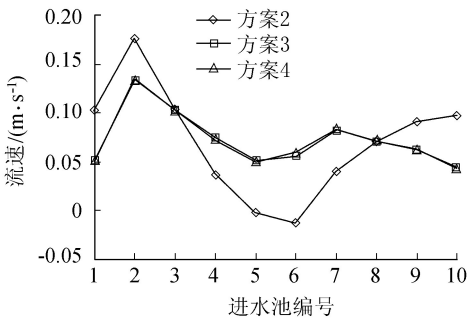


图 8 方案 2 ~ 4 行近流速

4.3 Y 形导流墩高度对前池流态的影响

从图 9 ~ 12 及图 6 可知,当 Y 形导流墩高度较低时(方案 5),行近流速分布相对均匀,但是前池两侧的回流区较大;当 Y 形导流墩高度适中时(方案 3),即 Y 形导流墩高度 $H = \frac{2}{3}h$ 时,流态和行近流速分布都比较均匀;当 Y 形导流墩高度较高时(方案 6 和方案 7),虽然两侧的回流区变小,但是导流墩后漩涡比较大,断面 1-1 行近流速分布不均匀,影响进水池进水。因此从高度参数角度看,方案 3 的整流效果优于其他方案。

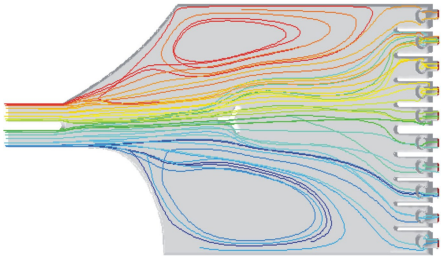


图 9 方案 5 前池流线

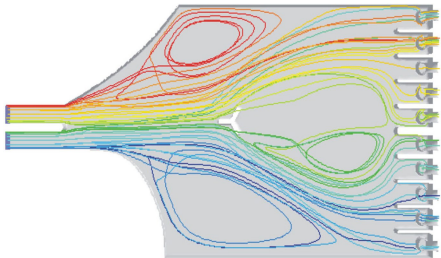


图 10 方案 6 前池流线

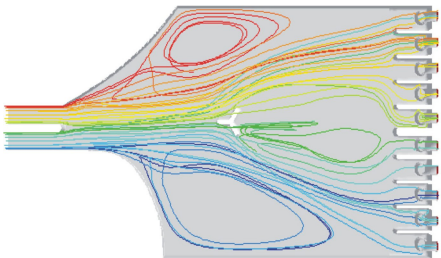


图 11 方案 7 前池流线

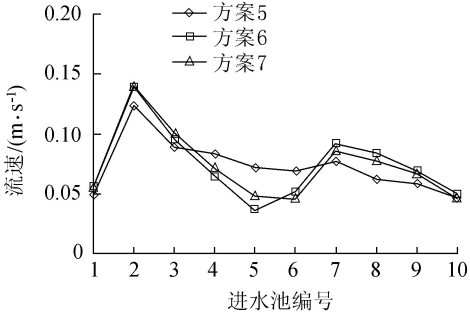


图 12 方案 5 ~ 7 行近流速

4.4 Y 形导流墩角度对前池流态的影响

由图 13 ~ 16 及图 6 可知,当 Y 形导流墩尾部夹角较小时(方案 8 和 9),虽然进水池前的行近流速

比较均匀,但是前池两侧漩涡更大;当 Y 形导流墩尾部夹角适中时(方案 3, $\theta = 120^\circ$),两侧回流区相对变小,行近流速相对均匀;当 Y 形导流墩尾部夹角较大时(方案 10),两侧回流区明显变小,但是 Y 形导流墩尾后漩涡较大,行近流速分布变得不均匀。从角度参数看,方案 3 整流效果较好。

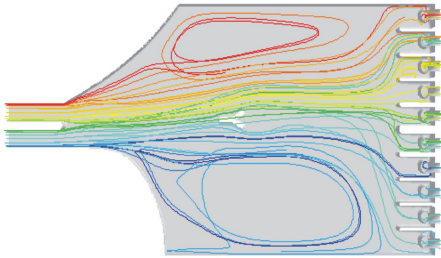


图 13 方案 8 前池流线

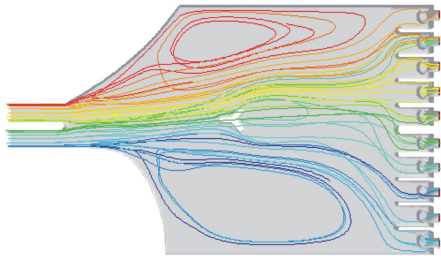


图 14 方案 9 前池流线

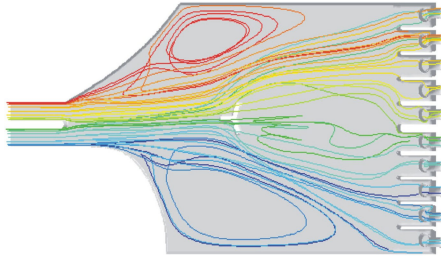


图 15 方案 10 前池流线

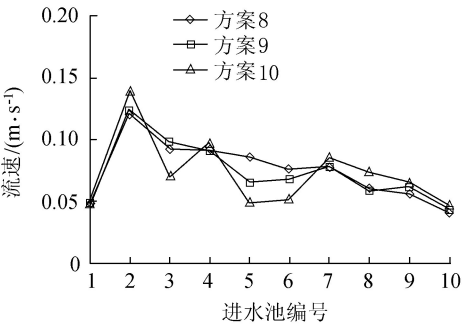


图 16 方案 8~10 行近流速

4.5 Y 形导流墩长度对前池流态的影响

由图 17~20 及图 6 看出,当 Y 形导流墩长度较小时(方案 3 和 11),两侧回流区相对较大;Y 形导流墩尺寸适中时(方案 12),前池两侧回流区减小,Y 形导流墩尾后的漩涡对进水池影响不大;当 Y 形导流墩长度增大时(方案 13),对比流线图可以看出,Y 形导流墩尾后漩涡较大,影响进水池进水,整流效果不明显。从长度参数来看,方案 12 优于其他方案。

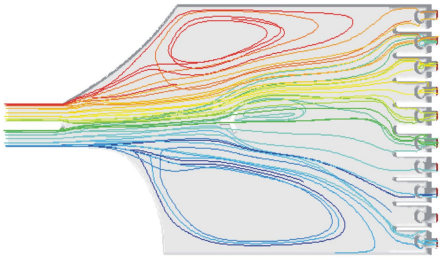


图 17 方案 11 前池流线

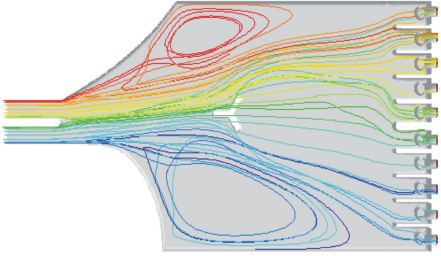


图 18 方案 12 前池流线

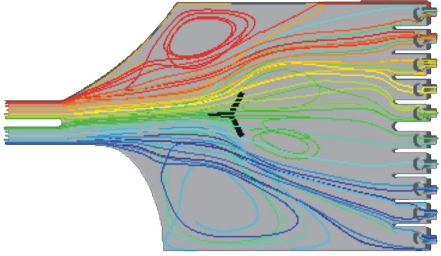


图 19 方案 13 前池流线

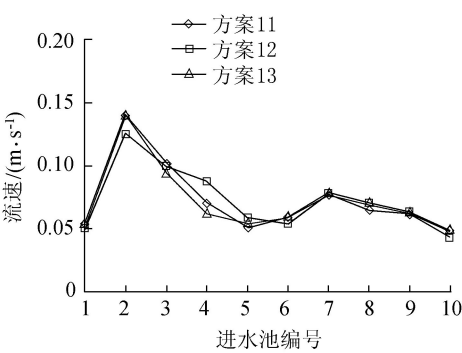


图 20 方案 11~13 行近流速

由于方案 3 和方案 12 只有长度参数不一样,所以在单个 Y 形导流墩整流的案例中,方案 12 为最优方案。

5 Y 形导流墩整流机理

根据对上述各研究方案的综合分析可知,当水流流经 Y 形导流墩时,由于 Y 形导流墩两翼的作用,水流会分开,沿 Y 形导流墩张角方向扩散,漩涡的位置会前移(图 21);与此同时,Y 形导流墩尾后的水流会产生回漩,范围受 Y 形导流墩的大小、角度和高度影响。Y 形导流墩表面以上的水流也会产生轻微的分流现象,行近流速会由不均匀分布向均匀分布过渡(图 22)。

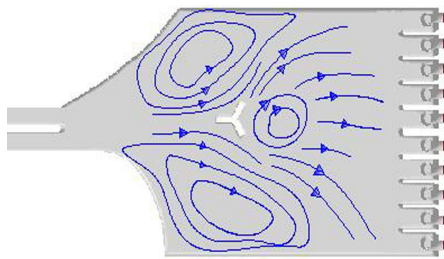


图 21 Y 形导流墩整流示意图

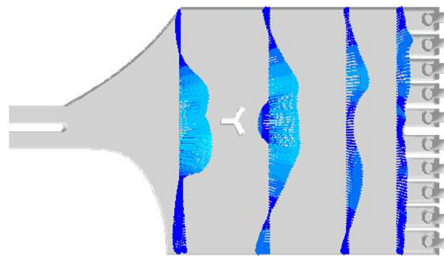


图 22 行近流速变化示意图

6 结 论

a. 无整流措施时,前池两侧水流存在大尺度回流,泵站进水池前行近流速分布不均匀。

b. 无整流措施泵站前池计算值和试验值比较表明,数值模拟方法可行,数值模拟结果可信,可以采用 CFD 模拟计算的研究方法来研究泵站前池复杂流态问题。

c. 当 Y 形导流墩位于 $22.7D_0$ 、高度为 $\frac{2}{3}h$ 、尾部夹角 120° 、长度为 $1.736D_0$ (方案 12) 时,前池内流态得到很好的改善,断面 1-1 行近流速分布均匀。

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, 2009:162-163.
- [2] 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): 272-286. (LIU Chao, HAN Xu, ZHOU Jiren, et al. Numerical simulation of turbulent flow in forebay with side-intake of pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(5): 272-286. (in Chinese))
- [3] 成立,刘超,周济人. 水泵站底坎二维绕流湍流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 37-39. (CHENG Li, LIU Chao, ZHOU Jiren. Numerical simulation of turbulent flow around sill with RNG $k-\varepsilon$ turbulent model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 37-39. (in Chinese))
- [4] 周济人,汤方平,刘超,等. 改善王山泵站前池水流流态的实验研究[J]. 排灌机械, 1995(2): 12-18. (ZHOU Jiren, TANG fangping, LIU Chao, et al. Modeling study on improving flow pattern in diffusion channel of WANGSAN

pumping-station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995(2): 12-18. (in Chinese))

- [5] GASTON E F, MARCELA P, LARRY W. Numerical simulation of free surface flows on a fish bypass[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(5): 997-1002.
- [6] 冯旭松. 泵站前池底坎整流及坎后流动分析[D]. 扬州:扬州大学, 1996.
- [7] 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, 2011, 30(2): 54-59. (LIU Xinyang, GAO Chuanchang, SHI Liwen, et al. Numerical simulation for fluid meliorating in both forebay and suction bay of pumping station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 30(2): 54-59. (in Chinese))
- [8] 石礼文,杨洪存,刘伟. 泵站前池改造方法与效果[J]. 中国水运, 2010, 10(12): 168-170. (SHI Liwen, YANG Hongcun, LIU Wei. Methods and results of pumping forebay transformation[J]. China Water Transport, 2010, 10(12): 168-170. (in Chinese))
- [9] 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 Longcai. Numerical analysis on improvement of flow conditions in fore-bay of pumping station by setting separation piers[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(2): 31-33. (in Chinese))
- [10] 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 Jiangang, LI Jie. Flow patterns in forebays 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))
- [11] 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. (YU Yonghai, XU Hui, CHENG Yongguang. CFD numerical simulation on modification of flow pattern with flow deflector at fore-bay of pumping station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(9): 41-43. (in Chinese))

(收稿日期:2013-03-22 编辑:熊水斌)

