

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.015

城镇排水泵站进水流道水力优化设计试验研究

付小莉¹, 郁片红², 李君菡¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

摘要: 基于物理模型试验方法,对某城镇分流制强排系统雨水泵站进水流道的水力特性进行研究,并提出了改善不良流态及消除有害漩涡的整流方案。结果表明,原设计方案进水流道内有大面积回流和漩涡,可能会影响水泵的正常运行;采用不同的整流措施进行优化发现,布设单一消力墩、防涡梁这两类整流措施优化效果有局限性,消力墩+防涡梁组合式整流措施能对进水流道内的不良流态进行全面改善,有效防止漩涡和吸入空气等现象发生。

关键词: 排水泵站; 物理模型试验; 进水流道; 优化设计

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0099-06

Hydraulic Optimization Design of Inlet Channel of Urban Drainage Pumping Station

FU Xiao-li¹, YU Pian-hong², LI Jun-han¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Design & Research <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: Based on the physical model test method, the hydraulic characteristics of the inlet channel of a stormwater pumping station in an urban diversion and forced drainage system were investigated, and a rectification scheme to improve the undesirable flow pattern and eliminate the harmful vortex was proposed. The results showed that, in the original design, there was a large area of backflow and vortex in the inlet channel, which might affect the normal operation of the pump. Different optimized rectification measures indicated that the two kinds of rectification measures (single stilling pier and anti-vortex beam) had limitations in the optimization. The combined rectification measure of stilling pier and anti-vortex beam improved the undesirable flow pattern in the inlet channel and effectively prevented the occurrence of vortex and air intake.

Key words: drainage pumping station; physical model test; inlet channel; optimization design

进水流道由前池和吸水室组成,是泵站重要组成部分,其主要作用是为水泵提供良好的进流条件^[1],进水流道设计的合理性关系着水泵运行安全和工作效率。城镇排水泵站由于受场地等条件限制,进水流道内易形成大面积回流、漩涡等不良流态,从而引起水泵汽蚀,导致水泵振动、效率降低,严

重时可能无法正常工作^[2-3]。因此,分析泵站进水流道的水力特性,必要时采用整流措施对其进行优化,对于提高水泵运行效率、延长水泵使用寿命,以及节约工程造价具有重大意义。

目前,多数学者主要基于数值计算和模型试验两种方法对泵站进水流道内流态进行研究。资丹

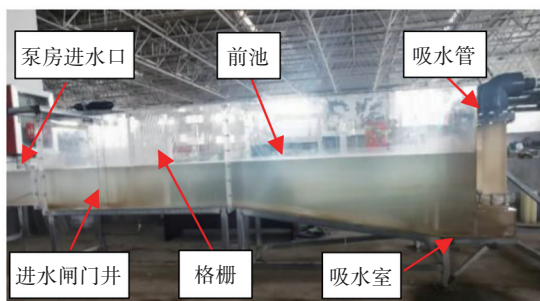
等^[4]对广东省永湖泵站进行了数值计算和现场测试,研究了组合式导流墩在改善大型泵站前池、进水池流态方面的效果。张睿等^[5]基于计算流体动力学(CFD),研究了斜向管涵进流对城市雨水泵站水力流态特性的影响,并发现采用分流墩、组合梁以及相背布置短导流墩的组合式整流措施可以显著改善不良流态。李志祥等^[6]对城市雨水泵站同时做了模型试验和数值计算,分析了引水构筑物内水流流态及其配水特性,认为采用分流墩、横梁和张角渐扩导流墩的组合式整流措施对分水箱涵、扩散段、拦污栅处的流态有明显优化效果。

笔者以某城镇分流制强排系统雨水排水泵站作为研究对象,在前期已对进水流道内的水流流态进行数值模拟^[7]的基础上,采用物理模型试验的方法,进一步开展城镇排水泵站进水流道的水力特性及整流优化研究,分析不同整流措施的改善效果,以期合理设计泵站进水流道提供参考依据。

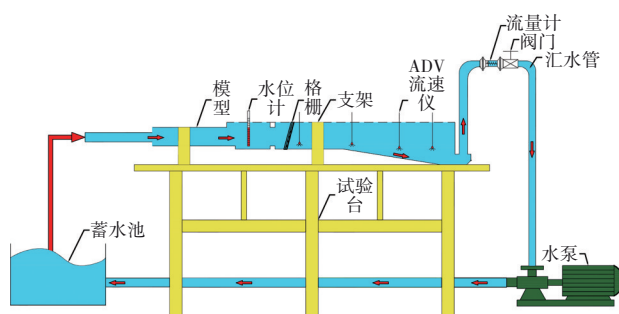
1 材料与方法

1.1 试验设计

泵站的设计规模为 $21 \text{ m}^3/\text{s}$,泵房采用矩形结构,设置8台雨水潜水轴流泵,水泵平行布置。参照泵站设计参数并保证循环泵房水流模拟的真实性,试验模型按重力相似准则设计,采用1:12的几何正态比尺对泵房进水口、进水闸门井、格栅、泵站前池、水泵吸水室和吸水管进行模拟。泵站原型长为52.00 m、宽为13.20 m、高为8.00 m、进水喇叭口直径为1.42 m、单泵流量为 $2.60 \text{ m}^3/\text{s}$,根据相应的流速比尺 λ_v 为3.46、流量比尺 λ_Q 为498.83、糙率比尺 λ_n 为1.51,计算得到模型长度为4.33 m、宽度为1.10 m、高为6.67 m、进水喇叭口直径为0.118 m、单泵流量为 $5.21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 。试验装置如图1所示,采用自循环敞开式系统,由蓄水池、模型主体、电磁流量计、阀门、汇水管、水泵机组等组成。



a. 模型实景图



b. 试验装置简图

图1 物理模型试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of physical model test device

1.2 试验内容

根据8台水泵的不同启动组合情况,针对单泵流量最高($Q=2.60 \text{ m}^3/\text{s}$)和不同水位条件下的多种代表性工况,进行定性观察和定量测试,从而分析不同工况对吸水室内水流流态的影响。选择近期安装5台泵全开(开2#~6#水泵,设计总流量为 $13.0 \text{ m}^3/\text{s}$,水深分别为3.3 m和5.0 m)作为典型工况进行分析,试验流量为 $0.026 \text{ m}^3/\text{s}$,低水位工况对应水深为27.5 cm,高水位工况对应水深为41.7 cm。

测量内容主要包含四项:一是通过在固定点处布设水位仪,测量不同工况下水位的变化;二是根据《发电厂循环水系统进水流道水力模型试验规程》(DL/T 286—2012),在进水流道内设置5个测速断面及多个测点(见图2),应用声学多普勒流速仪(ADV)测量各测点的流速;三是采用电磁流量计测量循环水泵的进口流量,并采用旋度流量计测量每台水泵的出口流量;四是用染色物质或示踪剂对流动道内流态、表面漩涡及附壁涡带进行观测,并摄影记录。

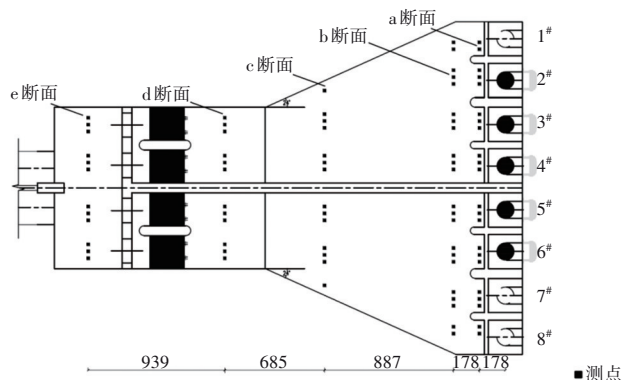


图2 测速断面及测点布置位置

Fig.2 Velocity measuring section and location of measuring points

2 结果与讨论

选择原设计方案以及选取消力墩、防涡梁、消力墩+防涡梁组合式工程作为整流措施的优化方案进行试验。为对这 4 种方案进行综合水力特性分析,首先通过观测水面波动幅度、流道内的表面流态和吸水室内表面漩涡、水内涡来定性判断进水流道内水流的均匀性和稳定性。再根据《发电厂循环水系统进水流道水力模型试验规程》(DL/T 286—2012)和美国水力学会设计规范 *American National Standard for Pump Intake Design* 等相关标准,将水泵中心上游 1.5D 断面(a 断面)或 3.0D 断面(b 断面)、吸水喇叭口的悬空高度处水平线上的横向偏差值大小作为定量评价指标。为此,引入横向平均流速偏差 u_{H}^* ,见式(1)^[1]。

$$u_{\text{H}}^* = \frac{|u_i - \bar{u}|}{\bar{u}} \times 100\% \tag{1}$$

式中: u_i 为同一断面、同一水深各测点的流速值,m/s; \bar{u} 为同一断面、同一水深各测点流速的平均值,m/s。

2.1 原设计方案水力特性分析

不同水位条件下,泵站关键位置处流态的观测照片如图 3 和图 4 所示。可以看出,高水位工况时,水面平稳,未观测到吸水口附近存在表面漩涡和水内涡。低水位工况时,进水流道内水面振荡剧烈,水流在前池无法扩散均匀,横流和回流的尺度及范围也较大,特别是在吸水口附近会出现明显的表面漩涡及水内涡。这易引发水泵振动、汽蚀等现象,

造成泵站效率降低甚至不能正常工作的严重后果,有必要对原设计方案进行优化整流设计。

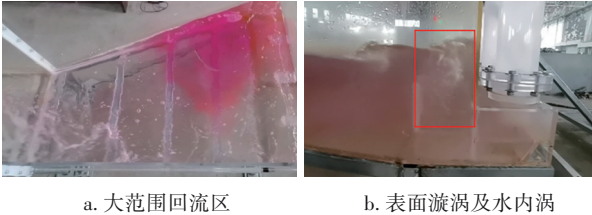


图 3 低水位工况流态观测照片

Fig.3 Photos of flow pattern in low-water condition

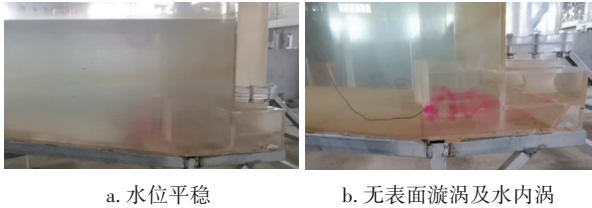


图 4 高水位工况流态观测照片

Fig.4 Photos of flow pattern in high-water condition

原设计方案 a 断面吸水喇叭口的悬空高度处横向偏差见表 1。可知,低水位工况下,单点流速偏差最大值达到 55.7%,所有单点流速偏差值均大于 15%,水泵吸水口前流速分布的均匀性极差。高水位工况下,单点流速偏差最大值达到 22.3%,仅有 13.6% 的单点流速偏差值大于 15%,水泵吸水口前流速分布的均匀性较好。可见,随着水位升高,流道流速分布增加均匀,水泵吸水口淹没深度增大,对水泵的运行更有利。针对上述结论,以低水位典型工况验证 3 种不同整流措施的优化效果。

表 1 原方案 a 断面吸水喇叭口的悬空高度处横向偏差

Tab.1 Lateral deviation at the suspended height of the water-absorbing bell mouth on the section a of the original design

项 目		测点编号										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A 流道	低水位	55.7	21.8	15.8	21.4	29.7	37.2	40.3	38.7	43.1	19.0	20.9
	高水位	4.3	22.3	8.1	14.0	1.8	13.5	14.2	7.4	14.2	8.6	0.8
B 流道	低水位	32.1	36.9	28.5	42.0	30.9	29.2	52.0	43.7	42.7	19.6	20.6
	高水位	10.3	2.2	8.0	3.2	14.5	17.6	11.2	10.4	21.6	11.8	11.8

2.2 消力墩优化分析

消力墩是一种被用于泵站前池内流态改善的工程措施。根据原设计方案的试验结果,为了缓解主流集中、部分低水位工况中存在表面漩涡以及水内涡等不良流态,结合工程实际经验,在雨水格栅后方 d 断面处分别布置了一排圆柱形消力墩或间距

0.2 m 的双排交错消力墩,如图 5 所示。其中,消力墩实物的尺寸为直径 0.6 m、高 4.2 m,各间距 0.72 m;物理模型的尺寸为直径 50 mm、高 350 mm,各间距 60 mm。

不同消力墩布设情况下,吸水室前流态照片和前池流态照片分别如图 6 和图 7 所示。可以看出,

经过优化以后,水体的平均流速明显减缓,前池内水面波动剧烈、主流集中,并且吸水室附近的表面漩涡等不良流态也随着消力墩排数的增加而有明显改善。

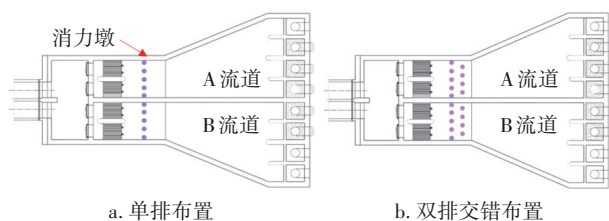


图5 消力墩布置示意

Fig.5 Schematic diagram of the layout of stilling piers

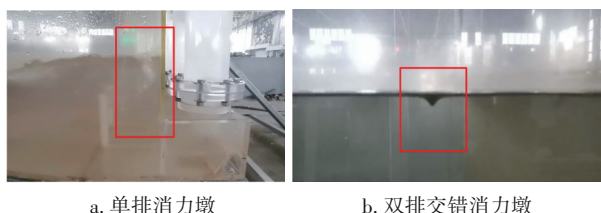
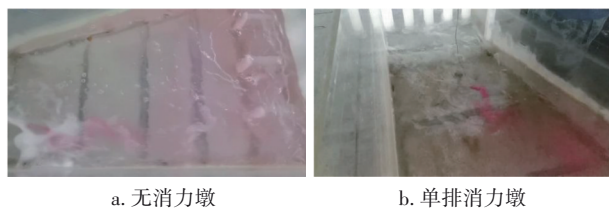


图6 吸水室前流态照片

Fig.6 Photos of flow pattern in front of suction chamber



c. 双排交错消力墩

图7 前池流态照片

Fig.7 Photos of flow pattern in front pool

表2为a断面处吸水喇叭口的悬空高度横向偏差。可以看出,布设一排消力墩以后,A流道内a断面吸水喇叭口的悬空高度处单点流速偏差最大值由原方案的55.7%降低为39.3%,但B流道内单点流速偏差最大值由原方案的52.0%上升为65.5%,造成这一现象的原因可能是:B流道开启的5#、6#水泵靠近中间边壁,而单排消力墩均流、消能作用有限,流道内依然存在主流集中、大面积回流以及表面漩涡等问题。

布设交错双排消力墩后,91%的单点流速偏差减小了,水泵吸水口前流速分布的均匀性得到一定改善。不同工况试验的结果表明,进水流道内水面平稳、无明显漩涡或严重偏流现象,主要测流断面的流速分布均匀,水泵进流流态均匀顺畅,两排交错圆柱形消力墩整流、均流、消能的作用均好于单排消力墩。

表2 a断面处吸水喇叭口的悬空高度横向偏差(消力墩措施)

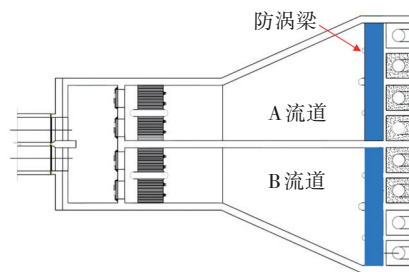
Tab.2 Lateral deviation of suspended height of water-absorbing bell mouth at section a (stilling pier measure)

项 目		测点编号										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A 流道	无消力墩	55.7	21.8	15.8	21.4	29.7	37.2	40.3	38.7	43.1	19.0	20.9
	单排消力墩	7.9	23.9	6.3	39.3	18.6	3.1	19.7	11.6	12.0	13.1	31.3
	双排交错消力墩	38.7	16.2	17.4	28.1	29.2	10.8	19.9	22.9	12.1	13.2	43.7
B 流道	无消力墩	32.1	36.9	28.5	42.0	30.9	29.2	52.0	43.7	42.7	19.6	20.6
	单排消力墩	28.9	42.1	24.6	22.7	9.8	10.8	60.7	65.5	48.2	59.5	60.6
	双排交错消力墩	21.5	21.4	7.0	12.3	19.4	32.3	43.9	8.4	9.8	42.1	1.7

2.3 防涡梁优化分析

出于工程实际考量,又鉴于水泵吸水口前是否存在较大表面漩涡及水内涡流是重要考虑因素,对仅在泵入口前增加横向布置的渐缩流线型进口的防涡梁优化整流措施进行试验。其中,防涡梁的实物尺寸为长13.2 m、上宽2.05 m、下宽0.6 m、高1.164 m,物理模型尺寸为长1100 mm、上宽171 mm、下宽50 mm、高97 mm。具体布置位置及尺寸

如图8所示。



a. 平面图

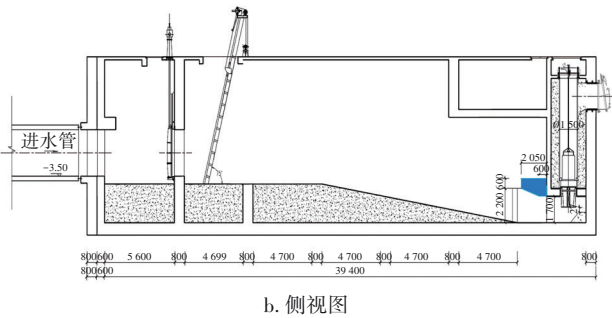


图 8 防涡梁布置示意

Fig.8 Schematic diagram of layout of anti-vortex beam

布置防涡梁以后,进水流道的整体流态如图 9 所示。可以看出,前池表面流态与原设计方案没有明显变化,依旧存在水面波动大、主流集中、大面积回流等问题,但能够充分遏制吸水室内水内涡流的产生以及表面漩涡的发展,吸水室内的流态有了显

著改善。

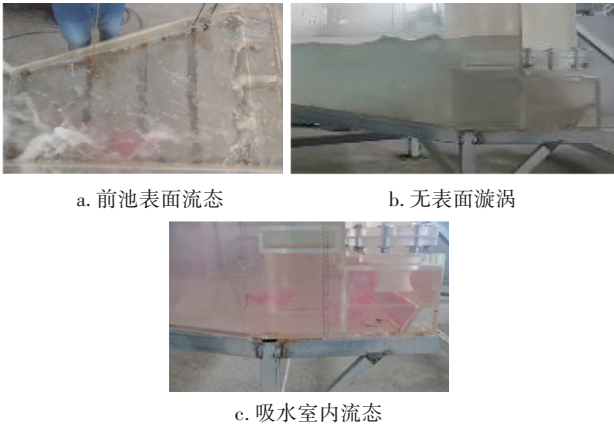


图 9 流态观测照片

Fig.9 Photos of flow pattern

a 断面的测点被防涡梁遮挡,分析表征偏流特征的 b 断面也可得出相似结论(见表 3)。

表 3 b 断面处吸水喇叭口的悬空高度横向偏差(防涡梁措施)

Tab.3 Lateral deviation of suspended height of water-absorbing bell mouth at section b (anti-vortex beam measure) %

项 目		测点编号										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A 流道	无防涡梁	21.2	21.0	25.9	40.6	17.2	20.3	31.5	15.8	5.8	30.3	31.5
	有防涡梁	20.3	27.0	25.9	37.2	15.3	1.4	16.7	20.9	15.5	18.7	30.8
B 流道	无防涡梁	48.0	29.1	24.8	45.9	41.4	19.2	41.1	55.0	35.8	30.1	20.4
	有防涡梁	6.1	7.1	2.4	4.2	5.7	23.1	20.1	24.8	11.1	16.0	27.4

无防涡梁的方案中,断面最大横向偏差值为 55.0%,增加防涡梁后,断面最大横向偏差值减少至 37.2%,吸水室内进流条件得到了较大提高。

2.4 组合式整流措施优化分析

结合消力墩和吸水室内泵前防涡梁的特点,提出了双排交错消力墩与吸水室内泵前防涡梁的组合式整流措施(见图 10),流态观测照片见图 11。

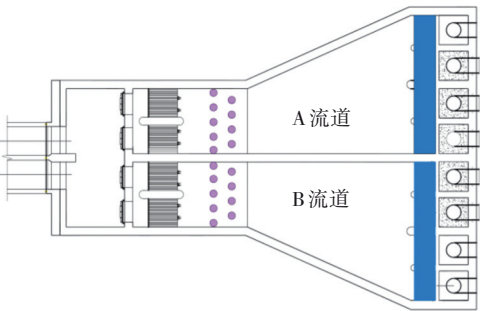


图 10 组合式整流措施布置示意

Fig.10 Schematic diagram of layout of combined rectification measures

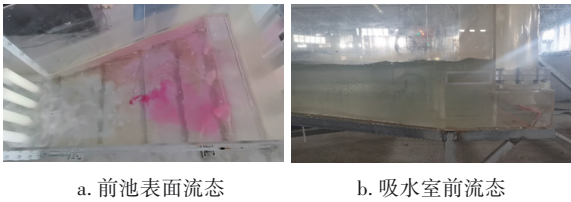


图 11 流态观测照片

Fig.11 Photos of flow pattern

将图 11 与图 3、图 6、图 9 进行比较,可以看出,采用组合式优化措施不仅有利于前池水流的调整与充分扩散,还可有效防止吸水室内水内涡的产生,避免了汽蚀对水泵的不利影响。进一步分析不同优化措施对吸水喇叭口进口断面流速均匀性的影响(见表 3 和表 4),发现相比于仅布设防涡梁的整流措施,A、B 流道内流态在采用组合式整流措施后,在 b 断面处的平均横向偏差值分别降低了 8.76% 和 5.23%,说明流速分布更加均匀,吸水室进流条件得到了进一步改善,具有较理想的进流条件。这有效弥补了单一整流措施优化效果有限的不足,体现了

组合式整流措施的优势,能针对进水流道内的流态 进行综合完善。

表 4 b断面处吸水喇叭口的悬空高度横向偏差(组合式整流措施)

Tab.4 Lateral deviation of suspended height of water-absorbing bell mouth at section b (the combined rectification measure) %

项 目		测点编号										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A 流道	无整流措施	21.2	21.0	25.9	40.6	17.2	20.3	31.5	15.8	5.8	30.3	31.5
	组合式整流措施	5.8	3.4	9.2	21.6	10.3	31.9	25.2	4.5	20.7	0.4	0.4
B 流道	无整流措施	48.0	29.1	24.8	45.9	41.4	19.2	41.1	55.0	35.8	30.1	20.4
	组合式整流措施	5.5	4.6	9.7	1.9	7.7	3.5	17.8	0.1	22.8	1.1	15.7

3 结 论

在雨水格栅后方布设消力墩,有利于前池水流的调整与扩散,可起到整流、均流的作用;在吸水室泵前增设防涡梁,可有效防止大型表面漩涡及水内涡的产生,避免了汽蚀对水泵产生的不利影响;单一的整流措施优化效果具有局限性,消力墩+防涡梁组合式整流措施能综合改善进水流道内的流态。

参考文献:

[1] 王晖. 循环水泵房进水前池水流特性和几何尺寸优化[D]. 太原:太原理工大学, 2012.

WANG Hui. Water Flow Characteristic and Geometry Size Optimization of Intake Forebay of the Circulating Water Pump Station[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012(in Chinese).

[2] 营佳玮, 俞晓东, 贺蔚, 等. 基于流体体积模型的泵站前池流态及组合式整流方案[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(5): 476-480,493.

YING Jiawei, YU Xiaodong, HE Wei, *et al.* Volume of fluid model-based flow pattern in forebay of pump station and combined rectification scheme [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(5): 476-480,493(in Chinese).

[3] 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).

[4] 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 Dan, WANG Fujun, YAO Zhifeng, *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).

[5] 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.

ZHANG Rui, XU Hui, CHEN Yuling, *et al.* Study on the flow patterns and rectification measures of box culvert of urban storm water pumping station with oblique pipe culvert [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 598-607(in Chinese).

[6] 李志祥, 冯建刚, 钱尚拓, 等. 斜向进流城市雨水泵站引水建筑物流态改善数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 139-143,147.

LI Zhixiang, FENG Jiangang, QIAN Shangtuo, *et al.* Numerical simulation of improvement of flow pattern in the diversion structure of the urban storm water pumping station with slanted intake [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 139-143,147(in Chinese).

[7] 郁片红. 复杂地块条件下排水泵站与调蓄池合建的优化设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 89-94.

YU Pianhong. Optimal design of the combined construction of drainage pump station and storage tank under complex land parcel conditions [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 89-94(in Chinese).

作者简介:付小莉(1979-),女,江西赣州人,博士,副教授,研究方向为水力学及流体力学。

E-mail: xlfu@tongji.edu.cn

收稿日期:2021-03-30

修回日期:2021-07-19

(编辑:任莹莹)