

城市雨水泵站侧向出水箱涵整流措施模型试验

徐 辉,张喆鑫,张 睿,冯建刚

(河海大学农业科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:为研究上海某雨水泵站侧向出水箱涵的水力流态,采用物理模型试验方法对出水箱涵内部的水力流态特性进行分析,并针对发现的问题提出了在出水箱涵内加设由导流短墩、底坎、组合梁构成的组合式整流措施。试验结果表明:出水箱涵内部水流扩散不良,导致出水箱涵出口流量分布不均、主流居中且出口两侧出流较小;增设组合式整流措施后,出水箱涵在导流短墩、底坎、组合梁的综合整流作用下,显著均化了出水箱涵各孔流量,有效提高了出水箱涵的出流均匀度,解决了出水箱涵流态存在的问题。

关键词:城市雨水泵站;出水箱涵;流速均匀度;整流措施;模型试验

中图分类号:TV675 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0001-05

Model test on rectification measures of lateral outlet box culvert in an urban rainwater pumping station//XU Hui, ZHANG Zhixin, ZHANG Rui, FENG Jiangang(*College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: To study the hydraulic flow state of a lateral outlet box culvert of a rainwater pumping station in Shanghai, a physical model test method was used to analyze the hydraulic flow state characteristics inside the culvert. Aiming at the founded problems, a combined rectification measure consisting of short diversion piers, bottom sills and composite beams was put forward. The test results show that the water flow inside the outlet box culvert is poorly diffused, resulting in uneven flow distribution at the outlet of the box culvert, centered main flow, and weak outflow on both sides of the outlet. After the combined rectification measures, under the comprehensive rectification action of the short diversion pier, the bottom sill and the composite beam, the flow distribution of each hole of the outlet box culvert is significantly homogenized, which effectively improves the outflow uniformity, and solves the existed problems of the flow state.

Key words: urban rainwater pumping station; outlet box culvert; velocity uniformity; rectification measures; model experiment

近年来,由于气候变化以及人类活动等影响,造成城市内涝排水问题愈加严重^[1]。作为城市基础设施建设重要设施的雨水泵站被广泛应用于城市的内涝防治^[2]。出水箱涵作为城市雨水泵站常用的出水建筑物,往往受城市规划用地、周边地形环境、已有建筑物以及已建管网系统等条件限制,使得出水箱涵的尺寸大小无法按照理想情况设置,尤其当出水箱涵扩散角过大时会产生回流、漩涡、偏流等不良流态^[3-4],易造成泥沙淤积及难以保障泵站出流满足河道通航要求等一系列问题^[5-6]。

物理模型试验是研究泵站水力特性及其整流措施的一种有效手段,国内外学者围绕泵站水力流态

展开了深入的研究^[7-11]。Nakato^[12]在 Chicot 湖取水泵站模型试验研究中,通过 1 : 24 的泵站前池模型试验研究了泥沙淤积分布和前池的平均流速、平均水深以及水流流态之间的密切关系;王晓升等^[13]通过物理模型试验,对分水闸站枢纽分水池产生不良流态的原因进行了分析,指出 V 形底坎能显著增强分水池水流的侧向扩散能力,有效改善分水池中的水流流态;罗海军等^[14]采用物理模型试验方法对排水泵站进水系统的水力流动特性进行了分析研究,通过在闸门井内设置导流墩,在有效提高进水箱涵配水均匀性的同时显著改善了泵站前池和进水池的水流流态;张睿等^[15]通过物理模型与数值分析相结

基金项目:国家自然科学基金(51809081,51779082);江苏省自然科学基金(BK20201315);中国博士后科学基金(2019M661707);江苏省博士后科研资助计划(2019K095)

作者简介:徐辉(1961—),男,教授,博士,主要从事泵站工程研究。E-mail: hxu@ hhu. edu. cn
通信作者:张睿(1984—),男,副教授,博士,主要从事泵站工程水力学研究。E-mail: gulie1984@ 163. com

合的方法,针对斜向管涵进流雨水泵站箱涵的水流流态,在闸门井内设计布置了3种不同的整流措施,显著改善了闸门井、箱涵以及前池进口处的不良流态;Zi等^[16]采用物理模型与数值分析相结合的方法研究了大型泵站进水流场中的组合式导流墩在大型泵站进水系统整流方面的效果与作用。对于出水系统的研究,张春辉等^[17]针对泵站压力储水箱涵进行了物理模拟试验,通过在压力出水箱涵内的隔墩上开孔来达到使各通道流量平均分配的目的,从而有效改善了箱涵出口处的流态。目前针对泵站水力特性的研究主要关注进水系统,对于出水系统尤其是出水箱涵方面的研究较少。

上海某雨水泵站设计规模为22.2 m³/s,采用了8台轴流泵,由于受场地面积、施工条件等限制,采用了8孔出流的侧向出水箱涵设计方案,同时因为出水箱涵整体长度偏短,导致箱涵扩散角偏大。为分析其出水系统水力流动特性,本文采用物理模型试验研究该泵站出水箱涵内存在的水力学问题,并提出优化措施改善出水系统水力流动特性,以期为工程设计与建设提供参考。

1 物理模型设计

泵站整体水力模型采用几何正态模型,按重力相似准则设计。泵站整体水力模型包括泵机组(模拟流量)、出水管、出水井、出水箱涵、部分河段(出水口上、下游各150 m)等部分。泵站出水系统水力模型中的出水井、出水箱涵采用透明有机玻璃制作,以方便观测水流流态。综合考虑试验内容及试验条件,泵站出水系统选取几何正态比尺 $\lambda_{L_{出}}=15$ (原型与模型之比),则相应的流速比尺 $\lambda_{v_{出}}=\lambda_{L_{出}}^{0.5}=3.87$,流量比尺 $\lambda_{Q_{出}}=\lambda_{L_{出}}^{2.5}=871.42$,时间比尺 $\lambda_{t_{出}}=\lambda_{L_{出}}^{0.5}=3.87$,糙率比尺 $\lambda_{\Delta_{出}}=\lambda_{L_{出}}^{1/6}=1.57$ 。泵站出水系统主体部分水力模型如图1所示。

2 初始方案出水箱涵流态分析

2.1 试验工况

试验在两种外河水位下进行,泵站出水系统初



图1 泵站出水系统主体部分水力模型

始方案试验工况如表1所示。为了分析出水箱涵的出水流态,在出水箱涵的出口处设置测速断面,采用光电流速仪测量流速,由计算机采集数据,可同时测得多点流速。局部重点测点采用三维剖面流速仪(ADV)测量流速。光电流速仪和三维剖面流速仪的精度均为±1.0%,故流速的相对误差为±1.0%。出水箱涵布置见图2。

表1 泵站出水系统初始方案试验工况

工况	外河水位/m	泵站流量/(m ³ ·s ⁻¹)	开机台数	潮流流速/(m·s ⁻¹)
1	3.90(设计最高水位)	22.2	8	0
2	2.80(设计平均水位)	22.2	8	0

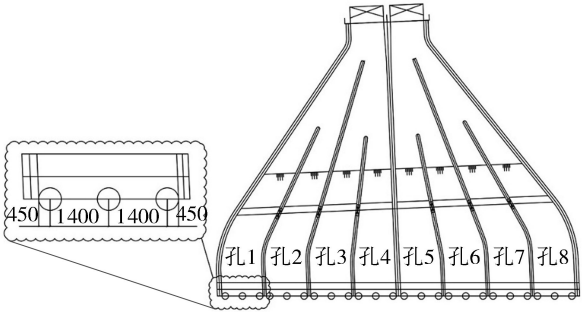


图2 初始方案出水箱涵总体布置示意图(单位:mm)

2.2 出水箱涵出口水力分析

平潮工况不同外河水位下的出水箱涵出口断面垂线平均流速如图3所示,不同外河水位下出水箱涵各孔流量分配系数见表2。由图3和表2可见,两种典型工况出水箱涵出流的规律是相似的,出水箱涵中部两孔出口流速较大,两侧边孔出口流速较低,总体上出水箱涵水流扩散不良,出水箱涵出口流量存在分布不均、主流居中且出口两侧出流较小的问题。

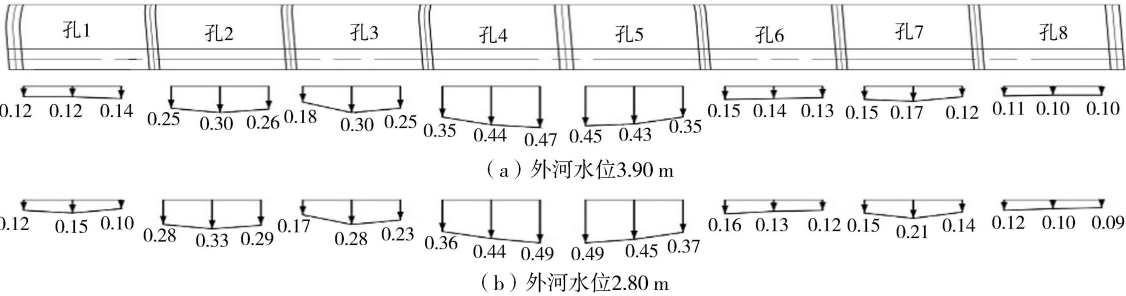


图3 初始方案出水箱涵出口断面垂线平均流速分布(单位:m/s)

表 2 初始方案出水箱涵各孔流量分配系数

外河 水位/m	流量分配系数/%							
	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4	孔 5	孔 6	孔 7	孔 8
3.90	5.55	7.89	7.53	22.04	22.58	13.08	14.52	6.81
2.80	5.37	8.67	7.11	22.70	22.36	11.78	15.60	6.41

当外河水位为设计最高水位 3.90 m 时,出水箱涵扩散角较大,出水箱涵内部扩散段水流扩散不良,出水箱涵出口流速与流量呈现不均匀分布,出口处主流居中且出口两侧出流较小,各孔流量分配系数最大差值达到 17.03%。当外河水位为设计平均水位 2.80 m 时,出水箱涵扩散段水流扩散不良,出口断面存在主流居中的问题,两侧边孔出流较少、流速极低,各孔流量分配系数最大差值达到 17.33%。

3 出水箱涵整流措施

3.1 出水箱涵整流措施设计

针对泵站出水箱涵扩散角偏大、出口流速分布不均等一系列问题,在不改变泵站主体结构的情况下,采用合理的工程整流措施来改善泵站内不良的水力流态,对于泵站的安全高效运行至关重要。泵站出水系统优化方案出水箱涵整流措施如图 4 所示,模型实物如图 5 所示。

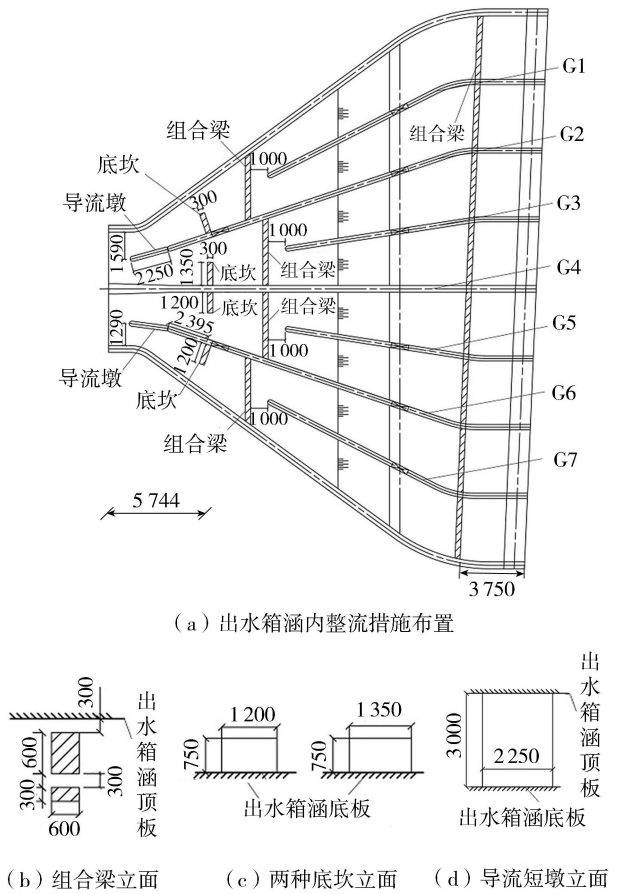


图 4 组合式整流措施布置(单位:mm)

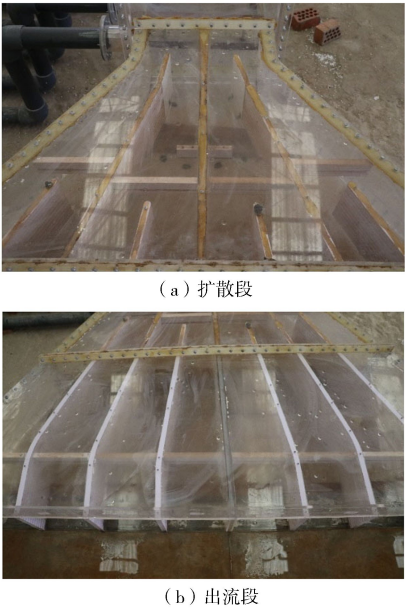


图 5 组合式整流措施模型布置

在出水箱涵左右侧第二道隔墙 G2、G6 头部增设导流短墩。导流短墩的工作原理是通过不同角度导流墩的导流作用,对来流进行分割并强迫其转向^[18],从而减小出水箱涵平面扩散角,在平面上均化水流。因此增设导流短墩可以对出水箱涵进口处的后两孔水流分别进行调整,使进入两侧扩散段的水流再分为左右流量大致相近的两股,为出水箱涵 8 个孔口均匀出流提供基础。导流短墩顶部和底部分别与出水箱涵的顶面和底面相接,导流短墩的宽度为 0.30 m、长度为 2.25 m。经多方案比较,得到相对较优的布置方案,即隔墙 G2 上游端的导流短墩头部与隔墙 G4 的间距为 1.41 m,隔墙 G6 上游端的导流短墩头部与隔墙 G4 的间距为 1.71 m。间距太小或太大都会导致两孔水流产生分布不均的问题。

在导流短墩已经确定的基础上,在出水箱涵扩散段和出流段分别加设整流措施。如图 4 所示,在出水箱涵扩散段的 4 个流道各布置 1 道底坎,对初步分流的水流进行整流,使其得到初步的扩散,从而使得 4 个流道中的水流流量分配得到一定的优化。4 个底坎的宽度均为 0.30 m,3 个底坎长度为 1.20 m,另一个为 1.35 m,底坎的长度过小将无法起到有效的向外挑流和均衡水流横向分布作用,太大则会导致局部水力损失过大。在底坎之后布置一道靠近顶板的组合梁,以此对扩散段水流进行垂向和水平方向上的进一步整流,保障出水箱涵各流道中水流的均匀性。在出水箱涵出流段布置一道靠近顶板的组合梁,对靠近出口处的水流进行垂向和水平方向上的整流,降低表层的流速,使其主流下压,从而改善出水箱涵 8 个孔口水流流速分布的均匀性。

3.2 优化方案改善效果

出水箱涵进口处的两孔水流在流经增设的两道导流短墩之后,导流短墩对来流进行分割,减小了出水箱涵平面扩散角,在平面上均化了水流。根据来流方向,将4个流道从右到左分别记为流道1~4,在不同外河水位下,来流在出水箱涵左右侧第二道隔墙处(图4中G2、G6处)的流量分配系数对比见表3,可见增设导流短墩后,4个流道水流的流量分配系数得到了显著的改善。

表3 整流前后出水箱涵内部流量分配系数对比

外河水位/m	整流状态	流量分配系数/%			
		流道1	流道2	流道3	流道4
3.90	整流前	13.44	29.57	35.66	21.33
	整流后	24.04	22.95	25.87	27.14
2.80	整流前	14.04	29.81	34.14	22.01
	整流后	23.24	25.47	26.85	24.44

不同外河水位下的出水箱涵出口断面垂线平均流速如图6所示,不同外河水位下出水箱涵各孔流量分配系数见表4,两种典型工况出水箱涵出流的规律大致相似,出水箱涵出口中部6孔流量稍大,两侧边孔流量略小,总体上较为均匀。各孔流速分布虽稍有不均,但较初始方案已显著优化。

表4 优化方案出水箱涵各孔流量分配系数

外河水位/m	流量分配系数/%							
	孔1	孔2	孔3	孔4	孔5	孔6	孔7	孔8
3.90	9.65	14.39	11.75	12.20	11.84	14.03	14.75	12.39
2.80	11.19	12.05	11.36	14.11	14.29	12.56	12.91	11.53

在增设整流措施之后,当外河水位3.90 m时,出水箱涵出口平均流速为0.23 m/s,最大垂线平均流速为0.28 m³/s,出水箱涵各孔的流量分配系数最大差值为5.10%;当外河水位2.80 m时,出水箱涵出口平均流速为0.24 m/s,最大垂线平均流速为0.29 m/s,出水箱涵各孔的流量分配系数最大差值为3.10%,此时出水箱涵各孔的流量分配系数与初始方案相比,流量分配系数最大差值在两种外河水位下分别降低了11.94%和14.23%。

优化方案增设的组合式整流工程措施均有一定的阻水作用,会造成出水箱涵内水力损失增大,导致

整个出水系统的运行效率下降,但整流措施的增设又改善了水流均匀性从而减小了出水箱涵内的水力损失。当外河水位在3.90 m和2.80 m时,初始方案水力损失分别为0.10 m和0.12 m,而优化方案水力损失分别为0.12 m和0.15 m,由试验可以得出增设整流工程措施引起的附加水力损失总体较小,且出水系统水力损失随外河水位降低而增大。

采用轴向流速均匀度 V_u 来定量检验整流措施的整流效果,以此来判断出水箱涵出口断面的轴向(顺水流方向)流速分布的均匀程度^[19-21], V_u 越接近100%,表明出水箱涵出口处水流轴向速度分布越平均。 V_u 计算公式为

$$V_u = \left[1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left(\frac{v_{ai}}{v_a} - 1 \right)^2} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: v_a 为断面平均轴向流速; v_{ai} 为断面各测点的轴向流速; n 为断面上的测点数。

由式(1)可计算得到外河水位在3.90 m和2.80 m时,初始方案出水箱涵出口断面的流速均匀度分别为71.64%和70.36%,而优化方案出水箱涵出口断面的流速均匀度分别为98.05%和98.84%,整流前后流速的均匀度在两种外河水位下分别提升了26.41%和28.48%,可见采用整流措施后,出水箱涵出口断面的流速均匀度得到了显著改善。

4 结 论

a. 对于泵站初步设计方案而言,出水箱涵内部存在水流扩散不良、流态较为紊乱、出口流量分布不均的问题,流量分配系数最大差值较大,在两种外河水位下分别达到了17.04%和17.33%。

b. 通过在出水箱涵首段增设短导流墩、扩散段加设不同长度底坎和近顶板组合横梁,较好地加强了出水箱涵内水流的扩散能力,出水箱涵各孔流量平均分配,出水箱涵出口水流较为均衡,流速横向分布较原方案显著优化,有效减弱了初始方案中出水箱涵出口主流居中的问题,出水箱涵各出口的流量分配较为均匀,整流前后流速均匀度在两种外河水位下分别提升了26.41%和28.48%;流量分配系数最大差值在

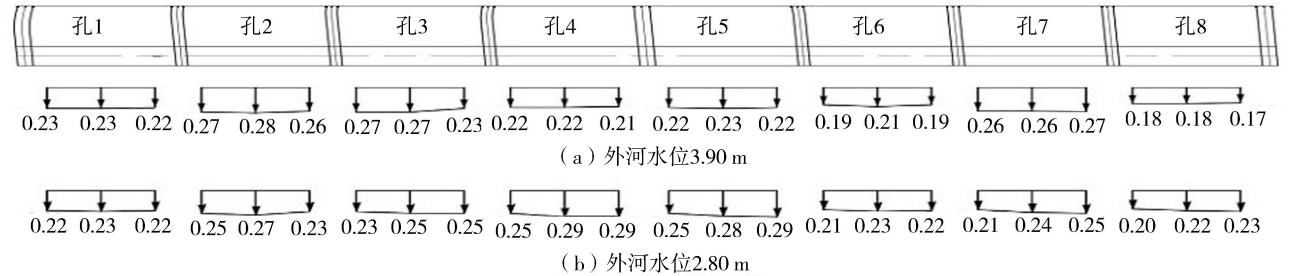


图6 优化方案出水箱涵出口断面垂线平均流速分布(单位:m/s)

两种外河水位下分别降低了 11.94% 和 14.23%。

参考文献:

- [1] 周宏,刘俊,高成,等.我国城市内涝防治现状及问题分析[J].灾害学,2018,33(3):147-151. (ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Analysis of current situation and problems of urban waterlogging control in China[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33 (3): 147-151. (in Chinese))
- [2] 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. (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. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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 Lei, GU Wei, LIU Biwei, 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))
- [5] 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. (XU Cundong, WANG Rongrong, LIU Hui, et al. Research on the influence of start-up combinations on the flow pattern in forebay of side-inlet pumping station on sandy river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1): 92-101. (in Chinese))
- [6] 杨庆胜,顾靖超,窦元之,等.高含沙水泵站侧向进水前池试验与分析[J].中国农村水利水电,2020(7):136-143. (YANG Qingsheng, GU Jingchao, DOU Yuanzhi, et al. Test and analysis of lateral inlet front pool in high sand water pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(7): 136-143. (in Chinese))
- [7] 石丽建,汤方平,刘雪芹,等.大型箱涵式泵装置优化设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(1):96-103. (SHI Lijian, TANG Fangping, LIU Xueqin, et al. Optimization design and experiment of large cube-type pump device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (1): 96-103. (in Chinese))
- [8] 向旭东,张劲松,田明旺,等.富池口泵站进口整流试验研究[J].水电与新能源,2016(7):6-11. (XIANG Xudong, ZHANG Jinsong, TIAN Mingwang, et al. Experimental study on the intake flow rectification in Fuchikou pumping station [J]. Hydropower and New Energy, 2016(7): 6-11. (in Chinese))
- [9] 张睿,徐辉,陈毓陵,等.斜向进流城市排水泵站进水箱涵配水均匀性的改善研究[J].灌溉排水学报,2017,36(12):75-80. (ZHANG Rui, XU Hui, CHEN Yuling, et al. Improving the uniformity of water distribution in the box culvert of urban drainage pumping station with a slanted intake [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(12): 75-80. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 张成波,唐泽润,郭佳栋,等.基于PIV的泵站进水池模型速度场测量及结构优化[J].中国农村水利水电,2020(9):16-24. (ZHANG Chengbo, TANG Zerun, GUO Jiadong, et al. Velocity field measurement and structure optimization of pump sump model base on PIV [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020 (9): 16-24. (in Chinese))
- [12] NAKATO T. Application of suction scoops to improve pump-approach flow distributions in three-pump intake bays [EB/OL]. [2021-09-01]. [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40737\(2004\)184](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40737(2004)184).
- [13] 王晓升,陈毓陵,孙靖康.分水闸站枢纽分水池流态改善措施研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):107-113. (WANG Xiaosheng, CHEN Yuling, SUN Jingkang. A modified method to improve flow pattern in water distributing station [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 107-113. (in Chinese))
- [14] 罗海军,张睿,徐辉.改善城市排水泵站进水流态的试验研究[J].中国农村水利水电,2019(1):176-179. (LUO Haijun, ZHANG Rui, XU Hui. Experimental study on the improvement in the inflow pattern of an urban drainage pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(1): 176-179. (in Chinese))
- [15] 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 pipe culvert [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 598-607. (in Chinese))

(下转第 19 页)