

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.019

侧向进流城市污水提升泵站进水流态改善研究

董磊¹, 张欣¹, 张睿², 莫建军², 施烨锋¹, 肖艳¹

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为改善侧向进流城市污水提升泵站进水流态,采用数值模拟方法对方柱、组合横梁和方柱+组合横梁3种不同的整流措施进行流态分析和流量分配均匀性对比,优选出最佳整流方案,并通过物理模型试验加以验证。结果表明,侧向进流城市污水提升泵站进水箱涵的流量分配不均,前池和进水池主流集中于中上层,底层流速偏低,且存在立面环流和回流等不良流态。优选出的方柱+组合横梁整流方案能够有效改善进水箱涵的流量分配,使进水箱涵总流量分配均匀度提高至0.97,同时前池和进水池的主流集中于底层,并消除了立面环流和回流等不良流态,进水通道入口流速的分布均匀度及加权平均角分别提高了3.8%和8.8°。

关键词: 城市污水提升泵站; 侧向进流; 整流措施; 水力优化; 数值模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0132-06

Improvement of Inflow Pattern in a Lateral Inflow Urban Sewage Pumping Station

DONG Lei¹, ZHANG Xin¹, ZHANG Rui², MO Jian-jun², SHI Ye-feng¹, XIAO Yan¹

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Using numerical simulation method, this paper analyzed the flow patterns and compared the uniformity of flow distribution under three different rectification measures: square column, combined crossbeam, and a combination of square column and combined crossbeam, and selected and validated the most effective rectification scheme through physical model testing, to improve the inflow pattern of the lateral inflow urban sewage pumping station. The inlet culvert of the lateral inflow urban sewage pumping station exhibited uneven flow distribution, where the main flow within the front and inlet ponds was predominantly concentrated in the middle and upper layers. The flow velocity in the bottom layer was comparatively reduced, and unfavorable flow patterns, such as vertical circulation and backflow, were also present. The selected square column combined with crossbeam rectification scheme significantly improved the flow distribution uniformity at the inlet culvert, achieving a uniformity index of 0.97. Concurrently, the main flow of the front and the inlet ponds was directed toward the bottom, effectively eliminating unfavorable flow patterns such as vertical circulation and backflow. Furthermore, the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809081); 上海市科技计划项目(23DZ1203504)

通信作者: 张睿 E-mail: gulie1984@163.com; 张欣 E-mail: zhangxin@smedi.com

uniformity of the inlet flow velocity distribution and the weighted average angle of the inlet passage increased by 3.8% and 8.8°, respectively.

Key words: urban sewage pumping station; lateral inflow; rectification measure; hydraulic optimization; numerical simulation

近年来,受城市化进程加快、人口激增等因素的影响,我国城市生生活污水量逐年增加,而城市污水提升泵站可有效减少排水系统中的污水滞留问题。因受用地面积限制和排水管网布置等影响,城市污水泵站进水建筑物难以按照泵站设计标准中水力条件良好的要求进行布置。特别是采用侧向进流方式的泵站进水系统易出现回流、漩涡、偏流等不良流态,容易导致水泵性能及运行稳定性降低,严重时还会引起水泵机组振动和诱发气蚀等危害^[1]。目前,许多学者对泵站进水系统开展了水力流态及整流措施研究^[2-4]。张睿等^[5]基于数值模拟和物理模型试验相结合的方法,分析了斜向管涵进流城市雨水泵站的水力特性,提出了有效改善泵站不良进水流态的整流措施。付小莉等^[6]采用物理模型试验的方法,分析了消力墩+防涡梁组合式整流措施对城镇排水泵站进水吸气涡等不良流态的改善效果。

笔者以上海某侧向进流污水提升泵站为研究对象,采用数值模拟方法对其开展水力特性分析,探讨有效改善泵站不良进水流态的整流措施,并通过物理模型试验加以验证。

1 计算模型及数值模拟

1.1 几何模型及计算模型

某城市污水提升泵站的结构布置和三维模型如图1所示。计算区域主要包括进水总管、进水闸门井、总箱涵、进水箱涵、前池、进水池和水泵机组。泵站的总流量为 $5.25 \text{ m}^3/\text{s}$,共有3台潜水轴流泵机组,单机流量为 $1.75 \text{ m}^3/\text{s}$,前池水位标高为2.4 m。

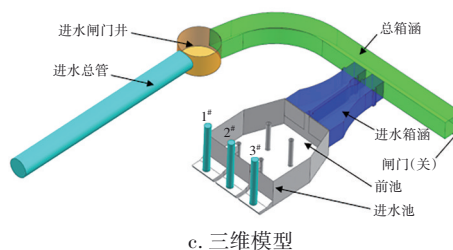
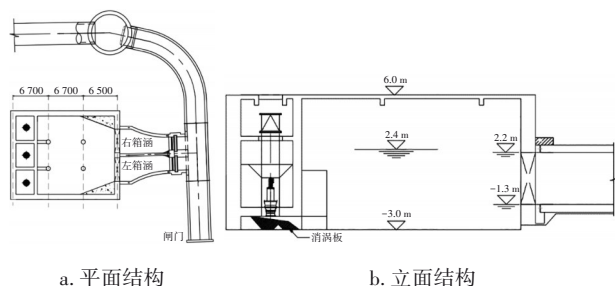


图1 城市污水提升泵站结构布置和三维模型示意

Fig.1 Schematic diagram of structural layout and three-dimensional model of urban sewage pumping station

1.2 数值模拟方法

泵站内部流态为典型的三维不可压缩湍流流动,同时考虑到箱涵的侧向进流方式容易导致前池出现漩涡、回流等现象,故控制方程采用雷诺时均方程结合考虑涡流影响因素并适用于大曲率流动的RNG $k-\varepsilon$ 方程^[7]。对于边界条件,进水总管进口为压力进口边界,水泵出水断面为出口边界并给定设计流量,固壁采用无滑移壁面条件。对于泵站进水建筑物中存在的自由水面,基于刚盖假定,采用对称面对其进行处理。

1.3 网格无关性分析

图2为不同网格数量下水力损失的变化。

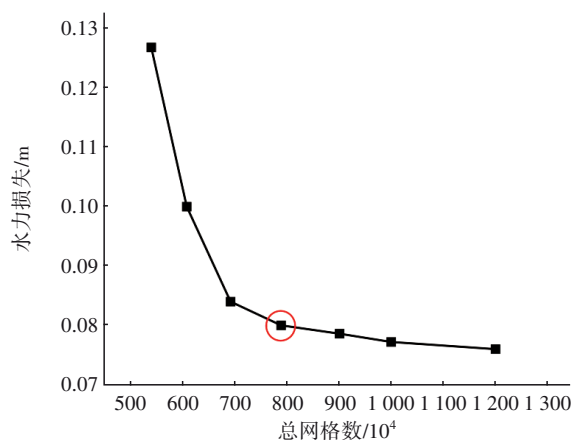


图2 不同计算网格数量下水力损失的变化

Fig.2 Change in hydraulic losses with different mesh numbers

城市污水提升泵站进水建筑物结构复杂,计算网格采用自适应程度好的非结构化网格。网格数

量会影响数值模拟效率和结果的准确性,因此选择箱涵入口至进水流道入口之间的水力损失作为网格无关性验证的衡量标准^[8]。从图2可以看出,当计算网格数量超过 692×10^4 后,泵站的水力损失趋于稳定且相对误差不超过2%^[9]。综合考虑后,选择计算网格数量为 789×10^4 。

2 泵站进水流态分析

泵站初步设计方案的进水三维流线如图3所示。由图3(a)可以看出,在进流方向上,侧向进水箱涵的进流因受到惯性力影响而偏向左侧,使得进水箱涵两个出口的流量分配和截面流速分布不均、右侧箱涵内出现明显的回流区。经统计,左、右箱涵流量占比分别为77.24%和22.76%。由于进水箱涵两个出口截面流速不均,进而造成前池平面上存在明显的偏流现象,右箱涵出口主流往右偏折流入1#水泵,左箱涵流量较大且受箱涵内螺旋流影响,水流无法在前池中快速扩散,流速变慢。由图3(b)可以看出,在立面上,因进水箱涵水流集中于前池中上层,且前池中下层存在立面环流和回流,导致前池有效过流面积较小且难以保证水泵良好的进流条件。

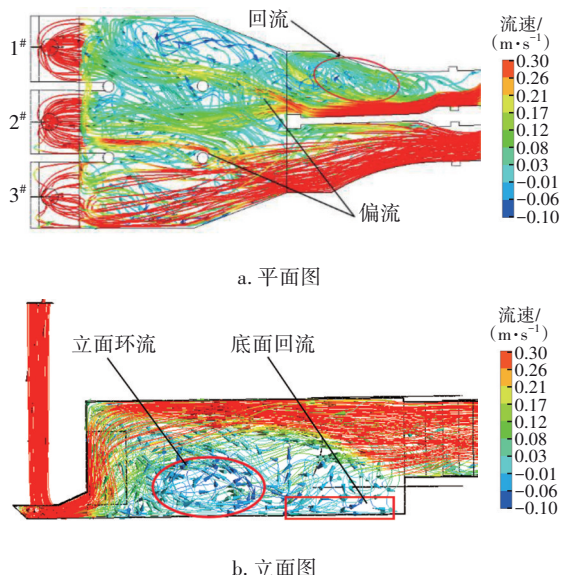


图3 泵站进水系统三维流线示意

Fig.3 Schematic diagram of three-dimensional streamline of pumping station inlet system

3 整流措施

3.1 整流方案设计

为改善侧向进流城市污水提升泵站的进水流态,提出3种整流方案,分别为方柱方案(P1)、组合

横梁方案(P2)、方柱+组合横梁方案(P3),并与初步设计方案(P0)进行对比。方柱、组合横梁的结构尺寸如图4所示。

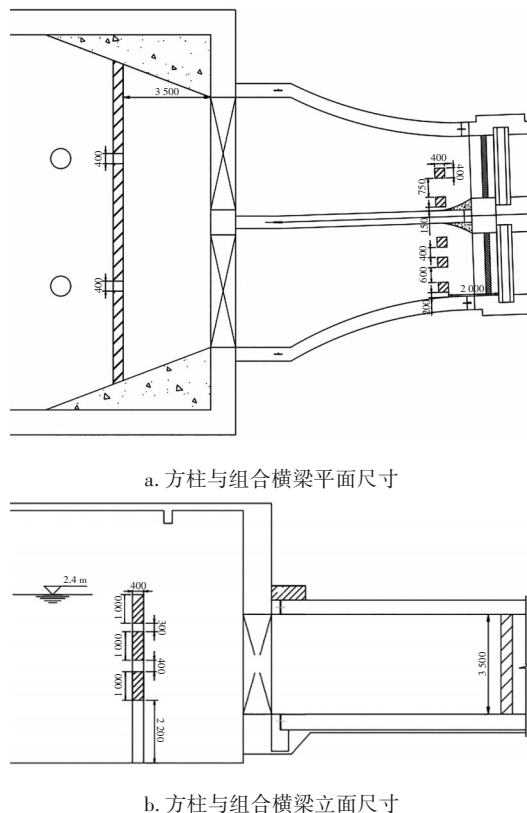
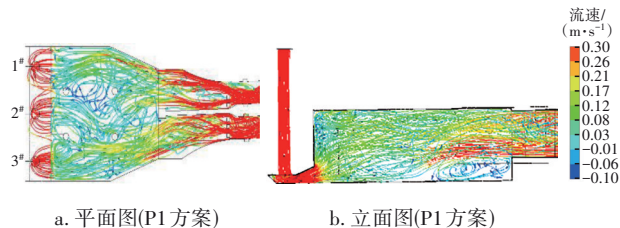


图4 方柱、组合横梁的结构尺寸

Fig.4 Structure dimension of square column and combined crossbeam

3.2 整流效果对比分析

3种整流方案的进水流态如图5所示。对比图3可以发现,对于进水箱涵内增加方柱的P1和P3方案,左、右箱涵的流态及流速分布得到显著改善。但是相比于P3方案,P1方案前池中仍存在回流和漩涡等不良流态。组合横梁能够调整前池主流在纵向上的分布,对比P0和P1方案,P2和P3方案的主流受到组合横梁影响而下潜,使得下层水流的流速提高,立面环流和底层回流消失,有利于水泵机组进流。



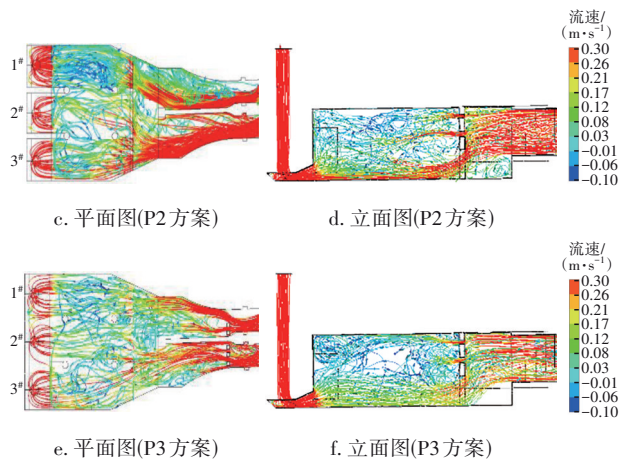


图5 各整流方案的三维流线

Fig.5 Three-dimensional streamline diagrams of each rectification scheme

各方案泵站底层流速分布云图及流线如图6所示。可以看出,相比于P0、P1及P2方案,P3方案的前池底层流速较大且低速回流区基本消失,水流能够均匀对称地进入进水池,整体进水流态较优。

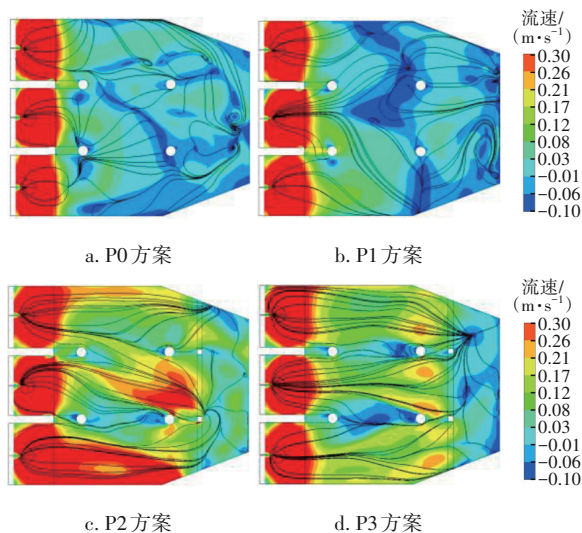


图6 泵站底层的流速分布云图及流线

Fig.6 Flow velocity distribution cloud and streamline diagrams of the bottom of pumping station

采用 Q 准则对进水池内涡结构进行展示,结果见图7。P0和P1方案进水池中存在大量涡结构,表明该处内部水流流动混乱、存在复杂的漩涡流动,而P3方案中涡旋较少、进流顺畅,流态表现良好。

图8为各方案进水渠道入口的流速云图。可以看出,相比于其他几种方案,P3方案进水渠道断面处的流速分布较均匀,能够保障水泵良好的进流条件。

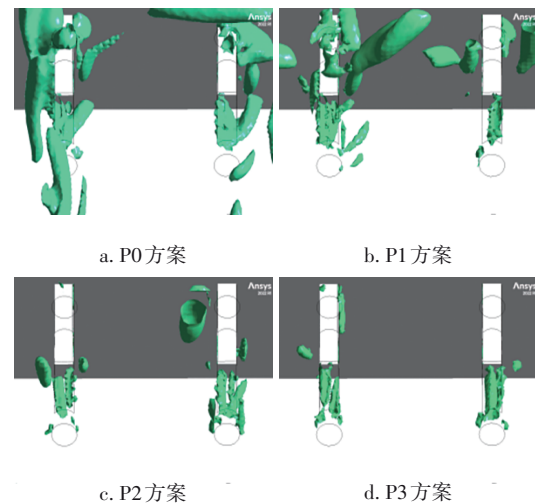


图7 进水池内涡结构

Fig.7 Vortex structure in inlet pond

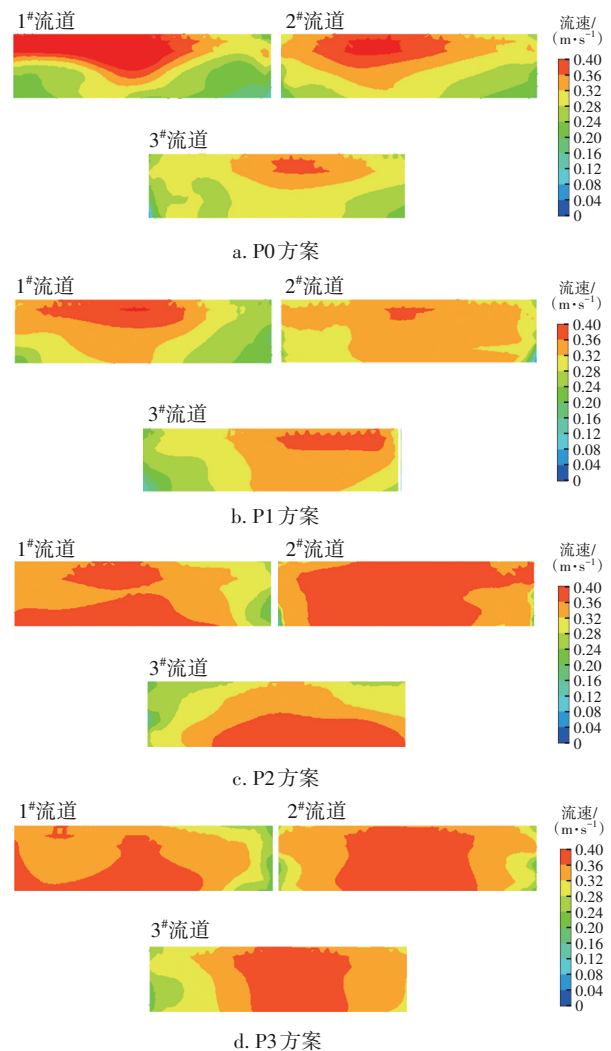


图8 各方案进水渠道入口的流速云图

Fig.8 Flow velocity cloud diagrams of inlet channel in each scheme

为进一步量化评价各方案的整流效果,以进水箱涵两出口的总流量分配均匀度 S 、进水箱涵各出口断面的法向速度分布均匀度 V_u 、水泵进水流道入口断面的法向速度分布均匀度的平均值 $\bar{V}_{u1}$ 和速度加权平均角 $\bar{\theta}$ 四个参数作为评价指标^[5,9]。其中, S 值越接近于1代表左、右箱涵的流量分配越均匀; V_u 及 $\bar{V}_{u1}$ 值越接近于1表示速度分布越均匀;速度加权平均角 $\bar{\theta}$ 反映进水流道入口处断面的水流偏折程度, $\bar{\theta}$ 越大表示流动平顺性越好。

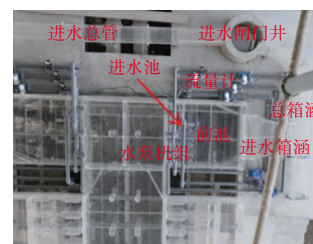
对各方案进水箱涵出口总流量分配均匀度 S 进行统计,结果表明,P0、P1、P2、P3方案的 S 分别为0.22、0.92、0.36、0.97。进一步对进水箱涵左、右出口断面的法向速度分布均匀度 V_u 进行统计,发现与P0方案的左、右箱涵相比,P1方案分别提高了3.88%和39.85%、P2方案分别提高了0.27%和6.46%、P3方案分别提高了4.38%和41.69%。显然,相比泵站初步设计方案P0,P3方案能有效改善进水箱涵的流量分配均匀度及其出口断面的流速分布均匀性。P0、P1、P2和P3方案泵站进水流道入口断面的 $\bar{V}_{u1}$ 分别为72.80%、73.35%、75.70%、76.60%, $\bar{\theta}$ 分别为62.4°、66.6°、70.6°、71.2°,可以明显看出P3方案的 $\bar{V}_{u1}$ 和 $\bar{\theta}$ 相比其他方案的改善效果显著,分别提高了3.8%和8.8°(相比P0方案)。因此,通过综合比较各方案的进水流态及各项评价指标可知,采用方柱+组合横梁的P3方案能够显著改善侧向进流城市污水提升泵站的进水流态,故选取P3方案作为最终的整流方案。

4 物理模型验证分析

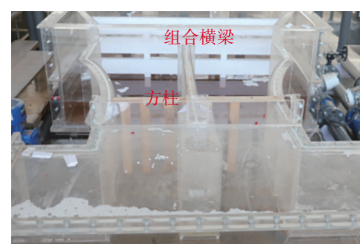
采用物理模型试验对P3方案(方柱+组合横梁)的整流效果进行验证。侧向进流城市污水提升泵站物理模型及整流方案如图9所示。物理模型按重力相似准则设计,采用透明有机玻璃进行制作,模型线性比尺 $\lambda_l=10$ 。

在开展泵站物理模型试验过程中,选取若干典型断面,并采用光电流速仪进行流速测量,其中典型断面分别位于进水箱涵的出口、前池扩散段末端和进水池进口。试验工况包含3个:工况1(3台泵机组全开,前池水位为2.4 m)、工况2(1#和2#泵运行,前池水位为1.9 m)、工况3(1#泵运行,前池水位为1.4 m)。图10为泵站左、右箱涵流量占比。可知,在方柱+组合横梁整流作用下,泵站左、右箱涵

的流量分配均匀性得到有效提高,且泵站前池流态得到显著改善,流速分布更加均匀。另外,工况1的物理模型试验与数值模拟计算结果较为吻合,也验证了数值模拟结果的可靠性。

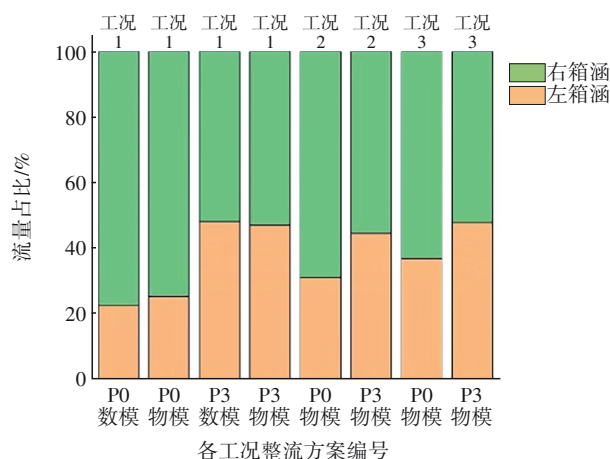


a. 泵站物理模型



b. 方柱+组合横梁整流方案

图9 侧向进流城市污水提升泵站物理模型及整流方案
Fig.9 Physical model and rectification scheme of lateral inflow urban sewage pumping station



各工况整流方案编号

图10 泵站左、右箱涵流量占比

Fig.10 Proportion of flow in left and right culverts of the pumping station

5 结论

侧向进流城市污水提升泵站的进水箱涵容易发生箱涵间流量分配不均、前池主流偏斜、主流集中于中上层且底层流速过低、前池内出现立面环流和低速回流区而影响水泵进流。采用方柱+组合横梁的整流方案后,进水箱涵总流量分配均匀度提高至0.97,右箱涵和左箱涵的轴向流速分布均匀度分

别提升了41.69%和4.38%,同时进水流道入口流速分布均匀度的平均值和入流速度加权平均角分别提高了3.8%和8.8°。物理模型试验验证了方柱+组合横梁整流方案的有效性,有助于保障侧向进流城市污水提升泵站的安全、稳定、高效运行。

参考文献:

- [1] 丁哲,张睿,陈毓陵,等. 城市排水泵站水力特性及整流措施[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 7-14.
DING Zhe, ZHANG Rui, CHEN Yuling, *et al.* Hydraulic characteristics and rectification measures of urban drainage pumping station [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(2): 7-14 (in Chinese).
- [2] 陈宝玉,王正雄,杨涛,等. 深层隧道排水系统中深隧泵站的设计与优化[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 62-66.
CHEN Baoyu, WANG Zhengxiong, YANG Tao, *et al.* Design and optimization of the deep tunnel pumping station in deep tunnel drainage system [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(4): 62-66 (in Chinese).
- [3] 张校文,刘超,荣迎春,等. 多机组泵站正向进水阵列式隔板整流模拟及试验验证[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(4): 378-384.
ZHANG Xiaowen, LIU Chao, RONG Yingchun, *et al.* Numerical simulation and experimental verification of forward feed array diaphragm rectifier for multi-unit pumping station [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(4): 378-384 (in Chinese).
- [4] XU W T, CHENG L, DU K L, *et al.* Numerical and experimental research on rectification measures for a contraction diversion pier in a pumping station [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(10): 1437.
- [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] 付小莉,郁片红,李君菡. 城镇排水泵站进水流道水力优化设计试验研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(1): 99-104.
FU Xiaoli, YU Pianhong, LI Junhan. Hydraulic optimization design of inlet channel of urban drainage pumping station [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(1): 99-104 (in Chinese).
- [7] 徐波,吕和品,谭超,等. 泵站正向大扩散角前池八字形导流墩整流研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 127-130.
XU Bo, LÜ Hepin, TAN Chao, *et al.* Research on rectification of figure-eight diversion pier in forward forebay of pumping station with a large diffusion angle [J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(4): 127-130 (in Chinese).
- [8] 王琪,朱文辰,周济人,等. 侧向泵站进水前池流态数值计算与优化[J]. 中国农村水利水电, 2023(1): 152-157.
WANG Qi, ZHU Wenchen, ZHOU Jiren, *et al.* Numerical calculation and optimization of flow regime in the inlet forepool of a lateral pump station [J]. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2023(1): 152-157 (in Chinese).
- [9] 罗灿,雷帅浩,袁尧,等. 小型闸站式侧向泵站进水流态数值模拟研究[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(8): 797-803.
LUO Can, LEI Shuaihao, YUAN Yao, *et al.* Numerical simulation research on inlet flow pattern of small sluice station lateral pumping station [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(8): 797-803 (in Chinese).

作者简介:董磊(1986-),男,山东泰安人,博士,正高级工程师,主要从事排水系统工程设计方面的研究。

E-mail: donglei@smedi.com

收稿日期: 2024-04-01

修回日期: 2024-04-15

(编辑:任莹莹)