

城市排水泵站水力特性及整流措施

丁哲, 张睿, 陈毓陵, 徐辉, 冯建刚, 牟童

(河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为了解弧形进水箱涵城市排水泵站水力特性, 探寻改善泵站内部不良流态的整流措施, 采用数值模拟方法对城市排水泵站水力流态及整流措施进行研究, 并通过物理模型对整流效果进行验证。研究表明: 弧形进水箱涵城市排水泵站的前池存在主流偏斜与分离流动现象, 前池主流集中在中上层, 中下层出现大范围的立面环流, 底层存在回流, 进水池内流态紊乱并出现旋涡, 导致水泵进水不够顺畅; 设计优化的“方形立柱+组合横梁”的组合式整流措施能够改善前池和进水池的水力流态, 前池内的偏流和分离流动消除, 底层回流消失, 进水池旋涡得到有效抑制, 3台水泵进水流道入口流速分布均匀度分别提升了12.0%、8.7%、8.3%, 入流速度加权平均角分别提升了 7.08° 、 9.07° 、 11.40° 。

关键词: 城市排水泵站; 弧形进水箱涵; 水力特性; 整流措施; 数值模拟

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)02-0007-08

Hydraulic characteristics and rectification measures of urban drainage pumping station//DING Zhe, ZHANG Rui, CHEN Yuling, XU Hui, FENG Jiangang, MOU Tong (College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to investigate the hydraulic characteristics of urban drainage pumping stations with curved inlet box culvert and explore the rectification measures to improve the adverse flow state inside the pumping station, the hydraulic flow state and rectification measures of urban drainage pumping stations were studied using the numerical simulation method, and the physical model was used to verify the rectification effect. It is found that the main stream of the forebay in the urban drainage pumping station with curved inlet box culvert is skewed and separated. The main stream of the forebay is concentrated in the middle and upper layers, and there is a large range of facade circulation in the middle and lower layers, and backflow in the bottom layer. The flow in the inlet pool is turbulent and vortices appear, resulting in the water not being able to enter the pump smoothly. The combined rectification measure of square column and combined beam was designed and optimized, and it is found that the combined rectification measure can improve the hydraulic flow pattern of the forebay and the inlet pool. The deviation and separation flow in the forebay are eliminated, the bottom backflow disappears, and the vortex in the inlet pool is effectively suppressed. The uniformity values of the inlet flow velocity distribution of the three water pumps were increased by 12.0%, 8.7%, and 8.3%. The weighted average angles of the inflow velocity were increased by 7.08° , 9.07° , and 11.40° .

Key words: urban drainage pumping station; curved inlet box culvert; hydraulic characteristics; rectification measure; numerical simulation

近年来,随着城市化水平快速提高,城市产生的污水总量随之加大,城市排水防涝需求日益提高,城市水安全问题突出^[1]。排水泵站是城市排水系统的重要组成,是城市防洪排涝、治理水污染的关键工程。受来流、地形以及周边建筑物等客观因素限制,城市排水泵站往往不能按照理想的水力条件进行布置,泵站前池、进水池内容易形成旋涡、回流、偏流等

不良流态,进而影响水泵进流条件,引起水泵性能下降,造成汽蚀、机组振动等问题,严重影响泵站安全稳定运行^[2]。因此,对城市排水泵站开展水力特性与整流措施研究具有重要意义。

目前,国内外诸多学者针对泵站内部流态及整流措施进行了大量的研究^[3-10]。例如:冯建刚等^[11]结合某城市输水泵站开展了前池流态与整流研究,

基金项目: 江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047);江苏省自然科学基金项目(BK20201315)

作者简介: 丁哲(1998—),男,硕士研究生,主要从事泵站工程研究。E-mail:1787426213@qq.com

通信作者: 张睿(1984—),男,副教授,博士,主要从事水力机械及泵站工程研究。E-mail:gulie1984@163.com

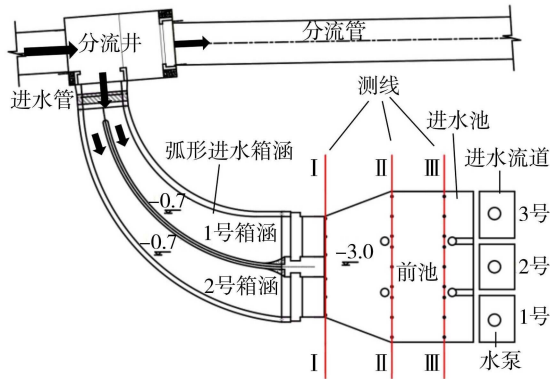
分析了八字形导流墩和底坎的组合式整流措施对改善前池流态与调整进水池流量的作用;张校文等^[12]对不同开机工况下的泵站前池流场进行了研究,提出了一种利用阵列式隔板整流的措施,并分析了阵列式隔板的整流效果;李颜雁等^[13]分析了前池内部流态对水泵机组的效率及水力稳定性的影响,提出了3种不同的增设立柱方案的整流措施,并分析了增设立柱对改善前池流态的影响;张睿等^[14]开展了斜向管涵进流泵站箱涵流态分析及整流措施研究,提出了3种不同的整流措施并分析比较了各整流措施在改善箱涵流态及配水均匀性方面的效果,优选出了最佳方案;徐波等^[15]针对泵站正向大扩散角前池内的大尺度回流问题进行了研究,并探究了八字形导流墩的整流效果,分析了八字形导流墩对前池两侧大尺度回流与进水条件的影响。

为改善泵站进水流态,目前所采用的整流措施大多布置于前池,而对进水箱涵内增设整流措施并配合前池内的整流措施共同优化泵站进水流态的研究并不多见。上海某排水泵站进水箱涵为弧形结构且前池相对狭小,前池、进水池内易形成偏流、回流、旋涡等不良流态。本文采用数值模拟方法研究该泵站的水力特性,分析其存在的不良流态并提出有效的整流措施,再进一步通过物理模型试验加以验证。

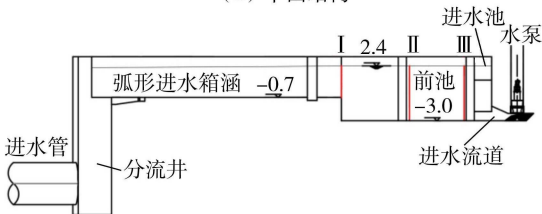
1 数值模型的建立与验证

1.1 几何模型与计算区域

城市排水泵站的平面和立面结构如图1所示,泵站主要的计算区域包括进水管、分流井、分流管、



(a) 平面结构



(b) 立面结构

图1 城市排水泵站平面和立面结构布置(单位:m)

弧形进水箱涵、前池、进水池、进水流道以及3台水泵机组。泵站运行时,进水管总流量为 $10.5\text{ m}^3/\text{s}$,泵站与分流管同时运行且均匀分流,泵站3台水泵全开且单泵流量为 $1.75\text{ m}^3/\text{s}$,前池水位为 2.4 m 。基于三维建模软件Creo建立泵站三维几何模型,如图2所示。

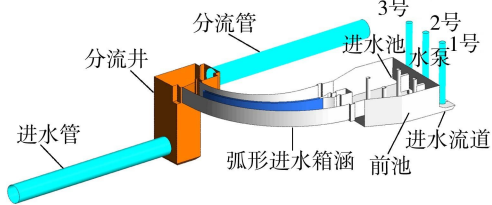


图2 城市排水泵站的三维几何模型

1.2 控制方程及湍流模型

泵站内的流动通常为三维不可压缩湍流,选择雷诺时均方程作为控制方程,考虑到前池结构狭小,易出现回流、旋涡等不良流态,因此选择在处理大曲率流动与分离流动具有良好效果的RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对泵站内的湍流进行求解^[15-16]。采用基于有限元的有限体积法对控制方程进行离散,对流项采用高分辨率格式,流场求解采用全隐式多重网格耦合方法。

1.3 网格划分及边界条件

由于本文研究对象的几何结构较为复杂,而非结构化网格具有生成速度快、网格自适应程度高、网格尺寸容易控制等优点,因此,选取四面体非结构化网格对泵站模型进行划分。网格数量是影响数值模拟计算效率与计算精度的重要因素,选择箱涵入口至进水流道入口之间的水力损失作为评价指标,开展网格无关性分析,结果表明当网格数超过570万时,相邻数量网格间水力损失误差不超过 $\pm 2\%$ ^[17-19]。综合考虑计算精度与计算效率,本文选择计算网格的数量为625万,网格划分图如图3所示。

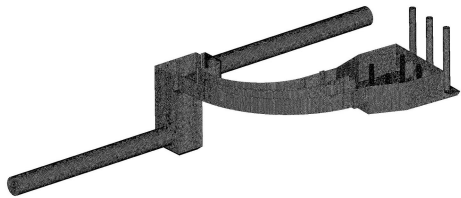


图3 城市排水泵站的网格划分

对于边界条件,泵站进水管入口采用压力进口,水泵出口和分流管出口给定各自的设计流量,固壁采用无滑移边界条件。由于分流井、箱涵及前池水面平稳,波动较小,基于刚盖假定将自由水面设定为对称面进行处理^[16,20],应用可伸缩壁面函数处理近壁区流动。

1.4 数值模拟可靠性验证

模型按重力相似准则设计,模型线性比尺 $\lambda_l=10$ 。试验系统采用透明有机玻璃制作,流速采用光电流速仪进行量测。箱涵出口断面(Ⅰ—Ⅰ断面)布置6条施测垂线,测线编号沿进水方向从左至右依次为测线1~6,前池扩散段末端断面(Ⅱ—Ⅱ断面)与进水池进口断面(Ⅲ—Ⅲ断面)分别布置9条施测垂线,测线编号沿进水方向从左至右依次为测线1~9。每个施测垂线均匀布置5个测点,通过对比物理模型试验与数值模拟计算在Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ、Ⅲ—Ⅲ3个典型断面的垂线平均流速,分析本文数值计算的可靠性。

图4为3个断面垂线平均流速的计算值与试验值对比图,计算值与试验值的数值接近,流速分布规律一致。3个断面试验值与计算值的相对误差均在10%以内,决定系数(R^2)^[21]均超过0.9,表明本文的数值模拟方法具有较好的可靠性。

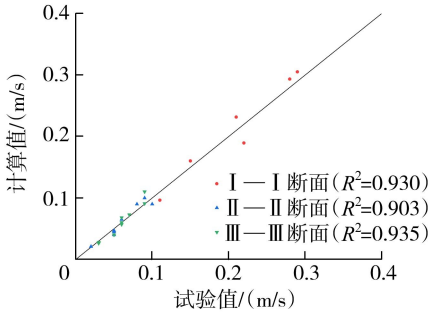


图4 断面垂线平均流速的计算值与试验值对比

2 泵站进水流态分析

图5为城市排水泵站初步设计方案的进水三维流线图。由图5(a)可知,在弧形进水箱涵内水流因受到惯性力影响,箱涵两仓内水流主流偏向右侧,进水箱涵两仓出口断面流速分布不均,如图6所示,而造成前池平面上存在明显的偏流现象。由图5(b)可知,在立面上,因弧形进水箱涵底部高程较高且水流从箱涵进入到前池内过流断面突然扩大,前池进口处存在较大的逆压梯度,前池内出现分离流动,其中主流集中于前池中上层,前池中下层形成大范围立面环流、底层存在回流,使得前池有效过流面积减小。由于城市排水泵站前池结构尺寸较小,其内部的偏流以及立面环流等不良流态很难得到调整,使得进水池进流较为紊乱,局部存在旋涡流动,其中图7所示的进水池涡结构采用 Q 准则进行显示^[22],进水池水流以较大俯角向下运动,进而影响进水流道进流平顺性。

为分析进水流道进口流态,选取进水流道进口断面,引用轴向流速分布均匀度 V_u 与速度加权平均

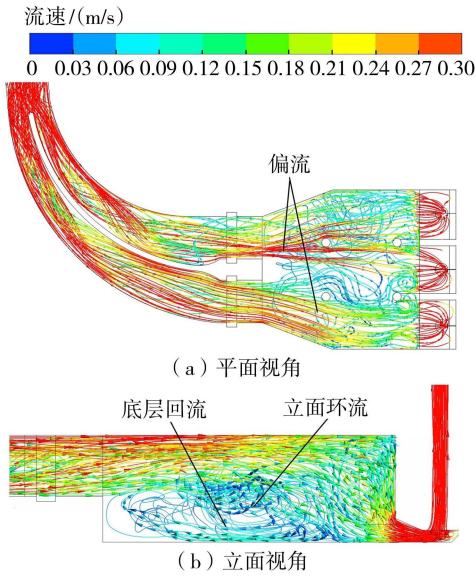


图5 弧形进水箱涵城市排水泵站进水三维流线

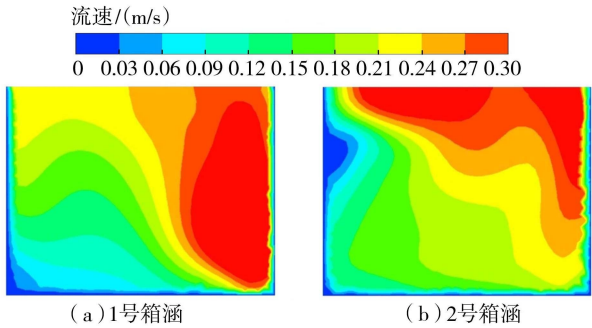


图6 箱涵出口断面流速云图

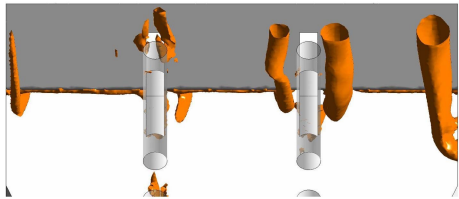


图7 进水池内涡结构

角 θ 进行分析评价^[23-26]。其中,轴向流速分布均匀度表征进水流道入口处断面流速分布的均匀程度,其数值越接近1,表示箱涵出口处流速分布越均匀;速度加权平均角反映进水流道入口处断面的水流偏转程度,最大值为 90° ,其数值越大,表示流动平顺性越好。

经统计分析,1~3号水泵进水流道进口断面的轴向流速分布均匀度分别为74.28%、77.01%、78.55%,速度加权平均角分别为 68.54° 、 68.9° 、 65.03° ,总体来看,弧形进水箱涵城市排水泵站各水泵进水流道进流均匀性偏低,平顺性有待提高。

3 泵站整流措施

3.1 整流方案设计及对比分析

为改善带有弧形进水箱涵城市排水泵站的不良

进水流态,考虑到泵站进水系统空间有限,提出“方形立柱+组合横梁”的组合式整流措施:通过在弧形进水箱涵末段设置一组方形立柱以改善箱涵出口的均匀性,在前池进口扩散段设置组合横梁以调整前池、进水池流态,促使主流下潜、底层流速提高,实现减弱立面环流和进水池旋涡、提升水泵进流均匀性的目的。

对于方形立柱方案,共设计了7套方案,其中单立柱3套、双立柱4套。单立柱方案如图8(a)所示,在弧形进水箱涵两仓各设置一个方形立柱且其迎水面宽度均为 X_1 。双立柱方案如图8(b)所示,在单立柱方案基础上又增设一个方形立柱且其迎水面宽度为 X_2 。方形立柱各方案的结构尺寸见表1。

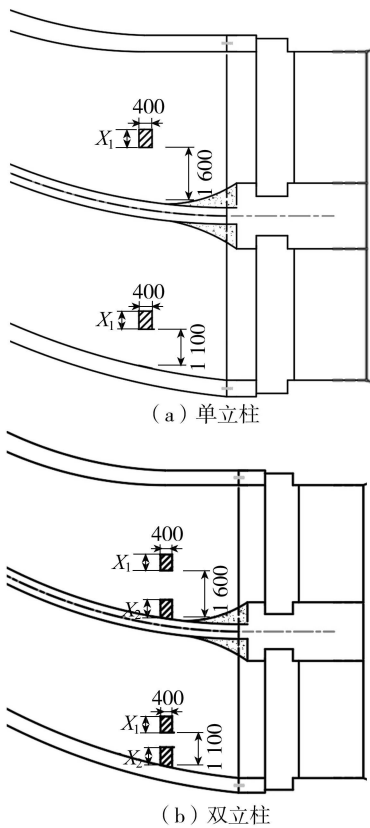


图8 方形立柱方案(单位:mm)

以弧形进水箱涵两出口断面的轴向流速分布均匀度的平均值 $\bar{V}_{u1}$ 为评价指标,对比分析上述7套方

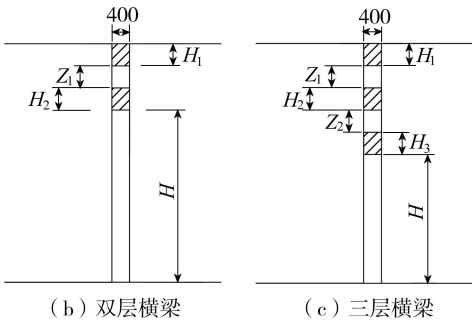
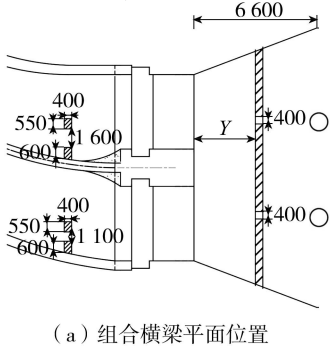


图9 组合横梁方案结构尺寸示意图(单位:mm)

形立柱方案,如表1所示。初步方案的 $\bar{V}_{u1}$ 为63.14%,相比于单立柱方案,双立柱方案对弧形进水箱涵出口流速分布均匀度的改善效果相对较优,其中方案SL4对弧形进水箱涵出口的流速分布均匀度的提升效果最佳,因此选用方案SL4。

表1 方形立柱方案的结构尺寸与结果

立柱类型	方案编号	X_1 /mm	X_2 /mm	$\bar{V}_{u1}$ /%
单立柱	L1	400		65.18
	L2	550		62.00
	L3	700		57.89
双立柱	SL1	400	400	70.64
	SL2	550	500	70.30
	SL3	550	550	68.30
	SL4	550	600	72.90

在方形立柱方案SL4的基础上,进一步设计了9套组合横梁方案,包括双层横梁3套、三层横梁6套。图9(a)为组合横梁平面位置, Y 为组合横梁距离弧形进水箱涵出口位置。双层组合横梁和三层组合横梁的结构尺寸示意图如图9(b)和9(c)所示。9套组合横梁方案的结构尺寸详见表2。

以泵站3台水泵进水通道入口断面的轴向流速分布均匀度和速度加权平均角的平均值 $\bar{V}_{u2}$ 、 $\bar{\theta}$ 为评价指标,对比分析上述9套组合横梁方案,如表2所示。初步方案的 $\bar{V}_{u2}$ 为76.61%、 $\bar{\theta}$ 为67.49°,相比于其他方案,三层横梁方案T6对泵站进水通道入口断面的流动均匀性与平顺性改善效果相对较优,因此,将其作为最终的组合式整流方案。

3.2 组合式整流方案的改善效果分析

图10为组合式整流方案的泵站进水三维流线图。由图10(a)可知,弧形进水箱涵内偏向外侧的主流由于受到方形立柱的阻挡而发生偏折,到达箱涵出口处变得主流居中,如图11所示。增设组合式整流措施后,弧形进水箱涵两个出口断面上的轴向流速分布均匀度得到提升,其中1号箱涵出口断面轴向流速分布均匀度从62.01%提升到了75.07%,2号箱涵出口断面轴向流速分布均匀度从64.26%提升到了67.33%。因此,方形立柱可以有效改善弧

表 2 组合横梁方案的结构尺寸与结果

组合横梁类型	方案	H_1/mm	H_2/mm	H_3/mm	H/mm	Z_1/mm	Z_2/mm	Y/mm	$\bar{V}_{u2}/\%$	$\bar{\theta}/(^{\circ})$
双层横梁	S1	500	500		3900	500		2200	78.77	70.59
	S2	500	500		3900	500		3300	77.49	71.77
	S3	500	500		3900	500		4400	78.96	69.66
三层横梁	T1	500	500	500	2900	500	500	2200	77.89	72.21
	T2	500	500	500	2900	500	500	3300	80.27	74.74
	T3	500	500	500	2900	500	500	4400	79.03	72.70
	T4	500	500	500	2500	300	400	3100	80.39	75.90
	T5	1000	1000	1000	2500	300	400	3300	81.53	74.52
	T6	700	700	700	2500	300	400	3500	84.01	76.67

形进水箱涵出口主流偏斜情况,从而有助于提高前池进流的均匀性。

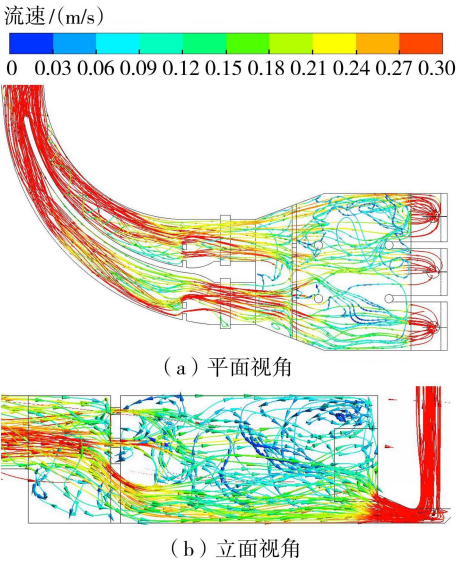


图 10 组合式整流方案弧形进水箱涵城市排水泵站进水三维流线

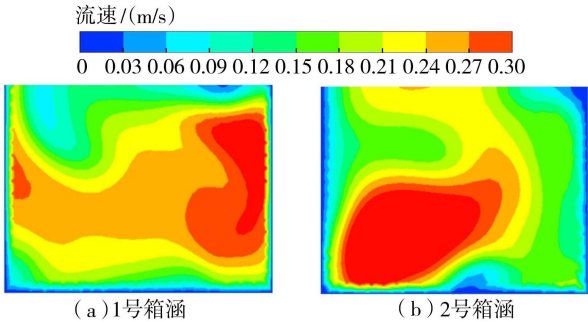


图 11 组合式整流方案箱涵出口断面流速云图

图 12 为泵站一纵截面上的流速云图,该截面垂直于 2 号箱涵出口断面与前池底面,并位于 2 号弧形进水箱涵出口断面中间位置,结合图 10(b)可知,组合横梁有效改善了前池中下层的分离流动,调整了前池主流位置,使原本集中于中上层的主流向下移动,前池下层流速明显提高,立面环流消失。由图 13 所示的前池底层流线可以发现,前池底层回流基本消除。水流在通过组合横梁的过程中,不断进行紊动扩散,水流之间互相掺混,流速沿水流方向重

新分布,平面上的主流偏斜情况基本消失,水流在前池能够得到比较充分的扩散,从而使下游流动变得均匀。图 14 为进水池内的涡结构,通过对比图 7 可以发现,初步方案进水池内出现的从水面延伸至进水流道内的旋涡已基本消除。

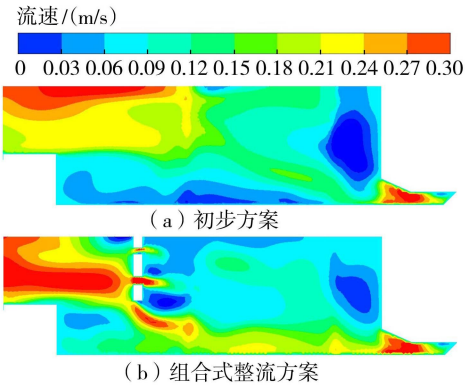


图 12 2 号箱涵纵截面流速云图

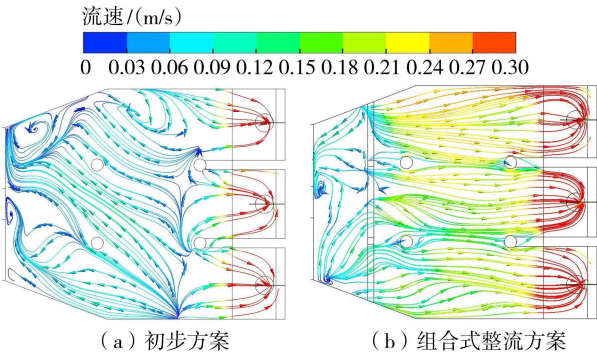


图 13 初步方案与组合式整流方案前池底层流线对比

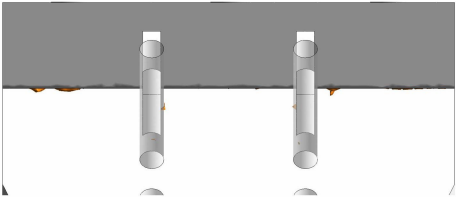


图 14 组合式整流方案进水池内涡结构

由图 10(b)可知,整流方案进水池内主流向下运动的俯角明显减小,进水流道进流更加顺畅。图 15、图 16 分别为增设组合式整流措施前后进水流道入口断面速度云图,由图可知,增设组合式整流

措施后,进水流道入口断面流速分布更加均匀,断面上层流速较大的情况得到改善。通过计算进水流道入口断面处的轴向流速分布均匀度 V_u 与入流速度加权平均角 θ 发现,增设组合式整流措施后,1、2、3号进水流道入口断面处 V_u 分别从74.28%、77.02%、78.55%提升到了83.23%、83.75%、85.04%,提升了12.0%、8.7%、8.3%, θ 分别从68.54°、68.90°、65.03°提升到了75.62°、77.97°、76.43°,分别提升了7.08°、9.07°、11.40°。在组合式整流措施的优化下,前池及进水池流态得到明显改善。

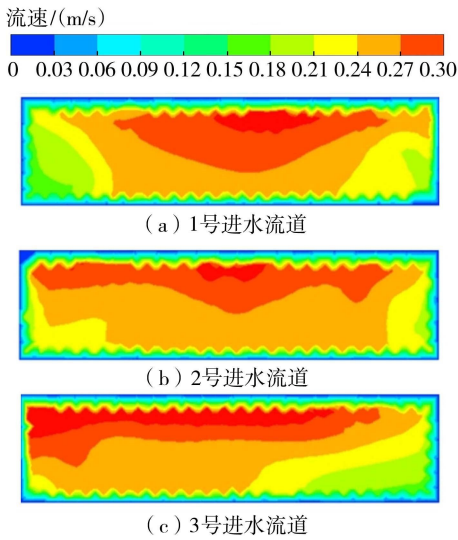


图 15 初步方案进水流道入口断面流速云图

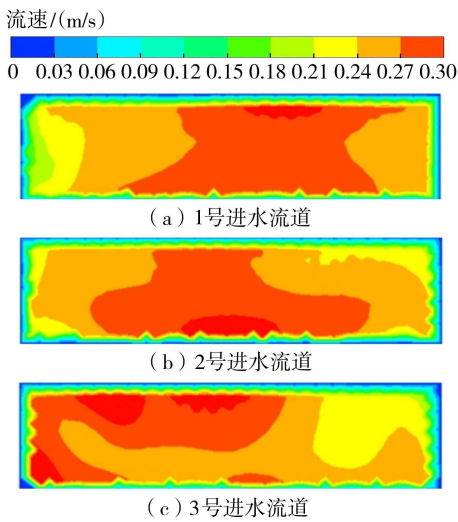


图 16 组合式整流方案进水流道入口断面流速云图

3.3 整流方案的物理模型验证

为了验证所提出的“方形立柱+组合横梁”组合式整流方案的流态改善效果,基于物理模型试验,进一步分析前池流态的改善情况。图 17 为采用组合式整流措施的泵站物理模型。

图 18 为初步方案与组合式整流方案前池垂线平均流速对比图,图 19 为前池扩散段末端断面

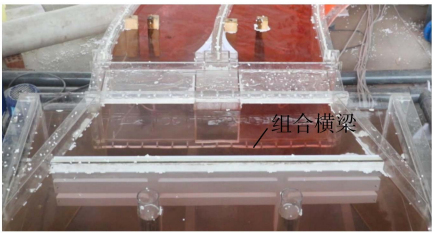


图 17 采用组合式整流措施的泵站物理模型

(II—II)流速分布,该断面布置 9 条施测垂线,其中每条测线从前池水面至前池底层均匀布置 5 层。由图 18 可以发现,在组合式整流措施的作用下,弧形箱涵出口流速分布偏斜情况得到改善,流速分布更加居中,进而使得前池流态得到改善,流速分布更加均匀。由图 19 可知,增设组合式整流措施后,前池主流向下移动,底层回流消失,这与上文中数值模拟结果的规律相符,表明“方形立柱+组合横梁”的组合式整流方案对改善带有弧形进水箱涵城市排水泵站的进水流态有良好的效果。

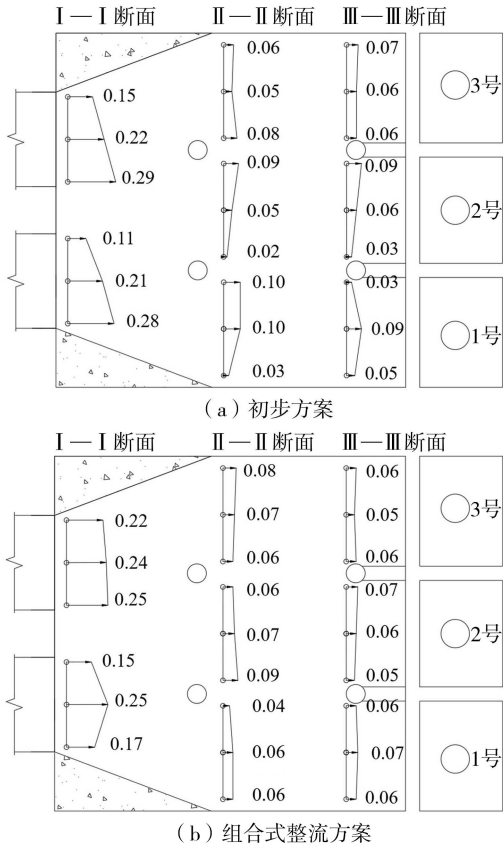


图 18 初步方案与组合式整流方案前池垂线平均流速对比(单位:m/s)

4 结 语

弧形进水箱涵出口流速分布不均,引起前池平面上主流偏斜,水流进入前池后出现分离流动,前池存在大范围立面环流,主流集中分布在前池中上层,底层出现回流,导致进水池流态紊乱并存在旋涡流

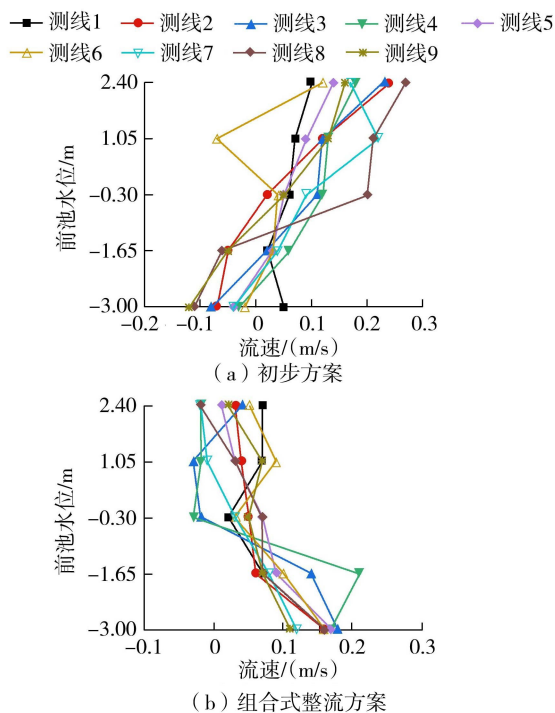


图 19 初步方案与组合式整流方案 II—II 断面流速分布

动,不利于进水流道顺畅进流。通过增设“方形立柱+组合横梁”组合式整流措施,弧形进水箱涵出口主流分布居中、流速分布均匀度提高,前池内的主流偏斜、底层回流以及进水池内旋涡情况基本消除;进水流道入口流速分布均匀度与入流速度加权平均角得到提升,使得水泵具有良好的进流条件。物理模型试验验证了“方形立柱+组合横梁”组合式整流措施对弧形进水箱涵城市排水泵站的水力流态的改善效果,有助于保障泵站的安全稳定高效运行。

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] 徐辉,张林.侧向进水泵站前池整流技术研究综述[J].水利水电科技进展,2008,28(6):84-88. (XU Hui, ZHANG Lin. Review of flow pattern modifying technology for pump sump with side-inlet[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(6): 84-88. (in Chinese))

[3] 冯建刚,李志祥,钱尚拓.泵闸工程闸下双底坎整流的水力特性[J].水利水电科技进展,2020,40(1):25-31. (FENG Jiangang, LI Zhixiang, QIAN Shangtuo. Study on hydraulic characteristics of double-sill rectification downstream a sluice-pump station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40

(1):25-31. (in Chinese))

[4] 徐存东,李嘉明,王荣荣,等.开机组对泵站前池水沙流场特性的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):11-16. (XU Cundong, LI Jiaming, WANG Rongrong, et al. Study on the influence of the start-up combinations on the characteristics of the water-sediment flow field in forebay of pumping station [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 11-16. (in Chinese))

[5] 王勇,吕立霖,刘厚林,等.泵站进水池低水位流态分析及整流方案研究[J].水电能源科学,2022,40(8):186-189. (WANG Yong, LYU Lilin, LIU Houlin, et al. Study on flow pattern analysis and adjusting flow scheme of intake pool of pump station at low water level [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(8): 186-189. (in Chinese))

[6] SONG Weiwei, PANG Yong, SHI Xiaohuan, et al. Study on the rectification of forebay in pumping station [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 2876980.

[7] 曾佳玮,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. (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. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 奚斌,郑雅珍,段元锋,等.闸站结合泵站前池流态优化[J].长江科学院院报,2021,38(12):91-97. (XI Bin, ZHENG Yazhen, DUAN Yuanfeng, et al. Optimization of flow pattern in the forebay of sluice-pump station project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 91-97. (in Chinese))

[10] YANG Fan, ZHANG Yiqi, LIU Chao, et al. Numerical and experimental investigations of flow pattern and anti-vortex measures of forebay in a multi-unit pumping station [J]. Water, 2021, 13(7): 935.

[11] 冯建刚,钱向栋,张睿.城市输水泵站前池流态及整流措施[J].水利水电科技进展,2018,38(2):77-83. (FENG Jiangang, QIAN Xiangdong, ZHANG Rui. Flow patterns and rectification measures in forebays of urban water pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 77-83. (in Chinese))

[12] 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))
- [13] 李颜雁, 郭鹏程, 孙龙刚, 等. 立柱对大型泵站前池和进水池流态影响的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(9): 929-936. (LI Yanyan, GUO Pengcheng, SUN Longgang, et al. Numerical analysis on influence of vertical column on flow pattern in forebay and intake of large pumping station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(9): 929-936. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 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, LYU 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))
- [16] 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))
- [17] 刘志泉, 成立, 卜舸, 等. 泵站正向进水前池“V”形导流墩整流数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 183-188. (LIU Zhiquan, CHENG Li, BU Ge, et al. Numerical simulation of V-shaped diversion pier for improving the flow pattern in forward inlet forebay of the pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 183-188. (in Chinese))
- [18] 王为术, 甄娟, 郭嘉伟, 等. 并联循环泵站前池及吸水室整流优化[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(11): 1119-1126. (WANG Weishu, ZHEN Juan, GUO Jiawei, et al. Optimization of rectification for forebay and suction chamber of parallel circulation pump station[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(11): 1119-1126. (in Chinese))
- [19] 罗灿, 雷帅浩, 陈锋, 等. 泵站进水池翼型导流板整流特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 53-59. (LUO Can, LEI Shuaihao, CHEN Feng, et al. Numerical simulation of rectifying characteristics of the airfoil deflectors in the sump of pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 53-59. (in Chinese))
- [20] 徐存东, 王国霞, 刘辉, 等. 大型泵站正向进池防淤优化模拟研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(7): 577-588. (XU Cundong, WANG Guoxia, LIU Hui, et al. Simulation study of preventing sedimentation in front inflow forebay at large-scale pumping station[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(7): 577-588. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 王义乾, 桂南. 第三代涡识别方法及其应用综述[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2019, 34(4): 413-429. (WANG Yiqian, GUI Nan. A review of the third-generation vortex identification method and its applications[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019, 34(4): 413-429. (in Chinese))
- [23] 黄佳卫, 刘超, 严天序, 等. 进水流道对泵装置性能影响的数值模拟分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10): 110-119. (HUANG Jiawei, LIU Chao, YAN Tianxu, et al. Numerical simulation analysis on influence of inlet flow-passage on performance of pump device[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(10): 110-119. (in Chinese))
- [24] 刘超, 张松, 谢传流, 等. 高效平面 S 形轴伸泵装置优化设计与模型试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 132-140. (LIU Chao, ZHANG Song, XIE Chuanliu, et al. Optimal design and model test of high performance S-shaped shaft extension pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 132-140. (in Chinese))
- [25] ZI D, WANG F J, YAO F Y, et al. Numerical simulation on rectifying flow in intake system of a pumping station connected with headrace pipe[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 49(3): 032004.
- [26] 徐辉, 张喆鑫, 张睿, 等. 城市雨水泵站侧向出水箱涵整流措施模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 1-5. (XU Hui, ZHANG Zhixin, ZHANG Rui, et al. Model test on rectification measures of lateral outlet box culvert in an urban rainwater pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 1-5. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-07-17 编辑: 俞云利)