

斜向进流城市排水泵站进水箱涵配水均匀性的改善研究

张 睿, 徐 辉, 陈毓陵, 冯建刚, 王晓升, 曾一夫
(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘 要: 为了分析上海某斜向进流城市排水泵站的水力流动特性,改善其进水箱涵的配水均匀性。基于非定常的雷诺时均N-S方程(URANS)和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用CFD数值模拟方法研究泵站进水系统的水流流态和进水箱涵的配水均匀性,针对泵站进水系统存在的不足提出整流措施并对其进行数值模拟分析和物理模型试验验证。结果表明,斜向管涵进流容易造成泵站进水箱涵各孔内的流量分配不均,闸门井、部分箱涵孔内以及前池进口处存在旋涡、回流、横向流等不良流态;通过在闸门井内设计布置一种新型的整流措施,可以有效地改善斜向进流城市泵站进水箱涵内的水力流态和提高其配水的均匀性,其中箱涵各孔的流量分配系数由38.41%、5.11%、42.52%和13.96%分别调整为28.07%、22.48%、25.49%和23.96%,进而有利于保障泵站良好的进水条件;物理模型试验进一步验证了整流措施的有效性;数值计算方法的可靠性。斜向管涵进流形式城市排水泵站的进水箱涵容易产生配水不均、进水流态不良等问题;通过在闸门井内设置本文所提的整流措施,能够有效改善上述不足。

关 键 词: 泵站; 斜向进流; 进水箱涵; 配水均匀性; 数值模拟

中图分类号: TV87; TV675

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.2017.12.013

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.

0 引 言

作为城市排水系统中重要的基础设施,排水泵站担负着城市防洪排涝的主要职责。而良好的进流条件是城市排水泵站设计的重要指标,是保障其安全稳定运行的关键^[1-2]。上海某排水泵站因受用地及管网布置等条件限制,采用了斜向管涵进流形式,泵站进水建筑物结构布置示意图如图1所示。但是该泵站进水箱涵配水不均,前池进流存在明显偏流,进而导致水泵进流条件不良、进水池表面存在间歇性吸气现象,严重影响泵站的正常运行。由于该泵站占地面积偏小,进水建筑物总体布置较为局促,尤其是前池和进水池的空间尺寸狭小,常用整流措施如底坎^[3]、导流墩^[4]、压水板^[5]等的布置空间有限,难以保证泵站具有良好的进流条件。因此,有必要分析该斜向进流城市排水泵站的进流特点,并研究提高进水箱涵配水均匀性的有效措施,对于改善此类排水泵站的进水条件和保证其安全稳定运行具有重要意义。

近年来,随着计算机技术和计算流体动力学(CFD)理论的不断发完善,数值模拟成为泵站进水流态分析及改善研究的主要手段^[6-9]。周正富等^[10]应用CFX软件,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对某侧向进水泵站前池进行了无整流措施和多种整流措施的数值计算,得到了有效改善前池流态的整流方案;罗灿等^[11]基于CFD数值模拟技术研究了底坎整流措施的位置、高度及宽度对前池流态的影响;谢宇琦等^[12]对兼有正向和侧向进水的大型泵站前池流态进行了数值模拟分析,并研究获得了改善前池流态的整流方案;夏臣智等^[13]基于Fluent软件,运用RNG $k-\varepsilon$ 模型对加单排方柱的正向进水泵站前池流态进行数值模拟,分析了单排方柱的几何参数对前池流态改善的影响。目前研究者多关注于泵站前池流态的改善,而对于提高箱涵流量分配均匀性及改善其内部流态的研究尚不多见。

兹将采用CFD数值模拟方法,针对上海某斜向进流城市排水泵站开展进水箱涵内的水力流动特性分析,研究进水箱涵的配水均匀性,对于其存在的不足提出改善措施并进行物理模型试验验证分析。本文的研究成果可为同类型城市排水泵站的设计提供一定参考。

收稿日期:2017-07-18

基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150808);中央高校基本科研业务费项目(2014B12314);江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:张睿(1984-),男,讲师,博士,主要从事泵站工程水力学方面的研究。E-mail: gulie1984@163.com

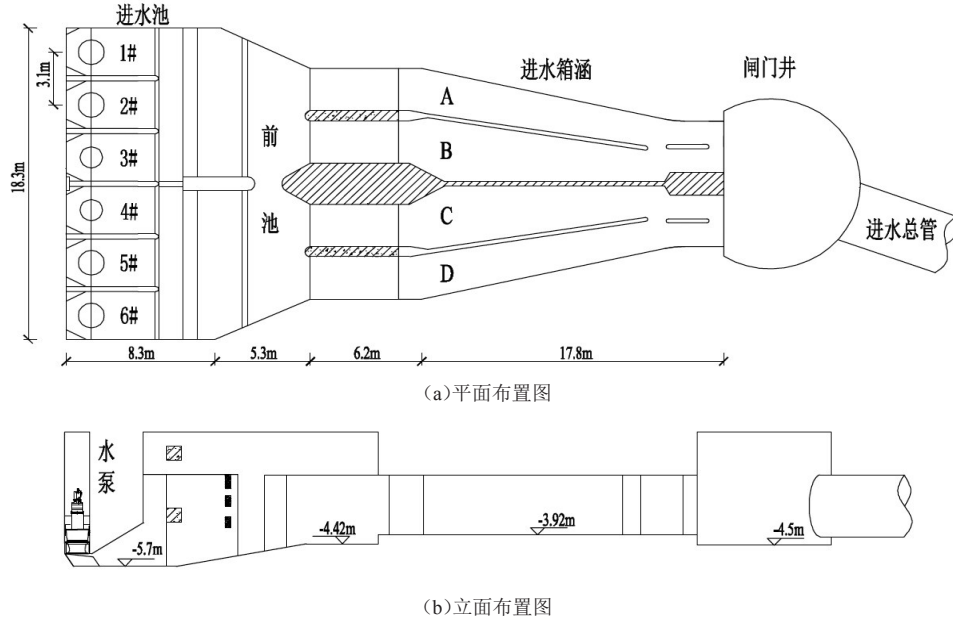


图1 城市排水泵站进水建筑物结构布置示意图

1 数值计算模型

1.1 控制方程和湍流模型

通常来说,泵站内的水流流动属于三维不可压缩湍流,因此文中的控制方程采用非定常的雷诺时均N-S方程(URANS):

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right]. \quad (2)$$

对于方程(2)中的湍流黏性系数 μ_t ,可通过引入湍流模型进行求解。由于泵站进配水系统常常存在回流、旋涡、边壁脱流等复杂的非稳定流动现象,重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型^[14]能够较好地模拟具有流动曲率影响的湍流分离流动。其中,RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的计算方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (4)$$

湍流黏性系数 μ_t 的计算公式为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

式中: $C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$, $\eta = Sk/\varepsilon$, $S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$, $C_\mu = 0.0845$, $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.7194$, $C_{\varepsilon 1} = 1.42$, $C_{\varepsilon 2} = 1.68$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ 。

1.2 模型建立及网格划分

对于数值模拟的计算区域,主要包括:部分进水管涵、闸门井、进水箱涵、前池、进水池以及水泵机组。根据图1所示的排水泵站进水建筑物结构布置示意图,建立如图2所示的泵站三维几何模型,其中前池及闸门井的水位与箱涵顶部高程齐平。该排水泵站的水泵机组采用的是6台大小搭配的潜水轴流泵,泵站总设计流量为 $20.4 \text{ m}^3/\text{s}$,其中位于中间位置的2台小泵(3#和4#)的设计流量参数为 $Q_1 = 2.04 \text{ m}^3/\text{s}$,另外4台大泵的设计流量参数为 $Q_2 = 4.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

采用ANSYS ICEM CFD对建立的泵站三维计算模型进行网格划分,考虑到泵站结构的复杂性,采用自

适性较强的非结构化网格形式对其进行网格划分,其中对于结构尺寸较小的几何(如消涡板、墩头等)以及近壁面进行网格局部加密处理,为减小网格对数值计算结果的影响,采用理查德森外推法^[15]对网格引起的截断误差和计算精度进行评估,最终确定泵站计算模型的网格数量约为401万,如图3所示。

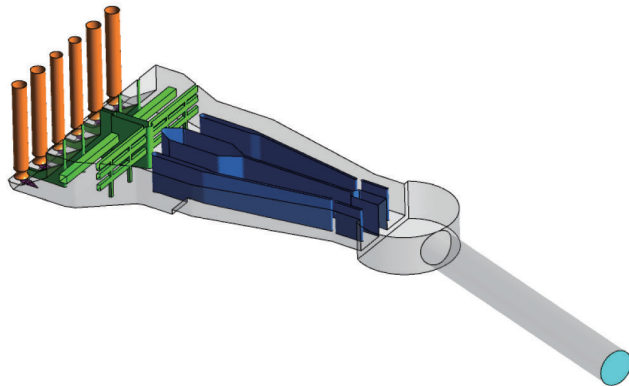


图2 泵站三维几何模型

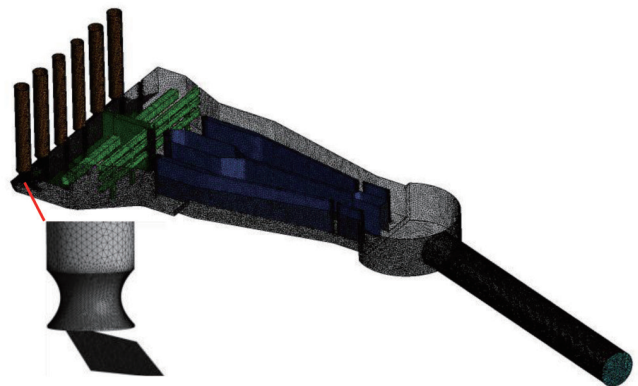


图3 计算模型的网格划分

1.3 数值算法与边界条件

采用ANSYS CFX对计算模型进行求解,其中控制方程中的扩散项和压力梯度项采用有限元函数表示,对流项采用高分辨率格式(High Resolution Scheme)。流场的求解使用全隐式多重网格耦合方法,同时引入代数多重网格技术,提高了求解的稳定性和计算速度。对于边界条件,泵站计算模型的进口边界采用总压进口,同时根据每台水泵的运行情况给定出口流量,固体壁面采用无滑移边界条件;因前池水面波动较小,基于刚盖假定将自由水面设定为对称面进行处理;对于采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来封闭RANS方程时,需要对近壁面的流动采用特殊的处理方式,与标准壁面函数相比较而言,可伸缩壁面函数对 y^+ 的要求并不十分严格,故在计算过程中采用可伸缩壁面函数来将壁面处的物理量与湍流核心区相应物理量联系起来。

2 进水箱涵的流态分析

为方便研究闸门井、进水箱涵、出口处的水流流态及流速分布情况,选取了如图4所示的若干典型截面进行分析,其中截面P1为过进水管涵出口中心的水平截面,截面P2、P3和P4分别为进水箱涵内的前置短隔墩进口、后置长隔墩进口以及进水箱涵出口的垂直过流截面。

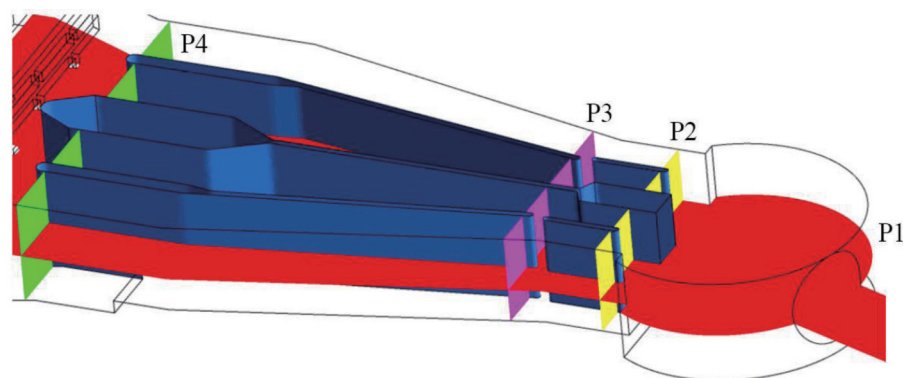


图4 选取的典型截面示意图

图5和图6是水平截面P1上的流线和进水箱涵各垂直截面P2~P4的速度分布云图。结合图5和图6分析可以发现,斜向管涵进流形式会引起闸门井内主流集中且与箱涵进流方向相偏斜,进而造成进水箱涵配水不均,各孔内的流量存在明显差异:经统计,进水箱涵A、B、C、D各孔的流量分配系数 ψ 分别为38.41%、5.11%、42.52%和13.96%,其中 $\psi = Q_i / Q_z \times 100\%$, Q_i 为箱涵某孔内的流量, Q_z 为泵站总流量。此外,斜向管涵进流还引起了泵站进水建筑物内出现不良流态:闸门井内主流两侧形成较大范围的回流区;箱涵孔B内不仅过流量低,且存在旋涡、回流等不良流态;进水箱涵各孔出流流量及流速分布的明显差异,进而前池进口处形成旋涡、横向流动等不良流态。

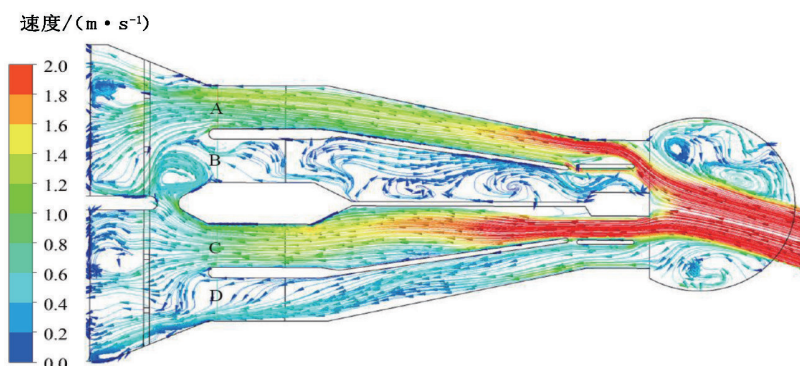


图5 P1水平截面上的速度流线矢量图

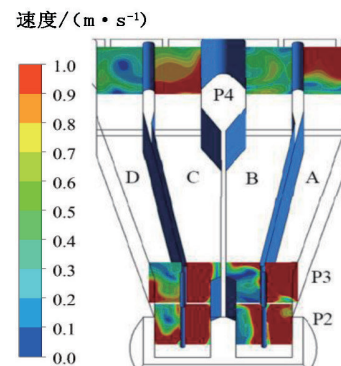


图6 P2~P4截面的流速分布云图

3 进水箱涵流态的改善研究

3.1 整流措施的设计

为改善斜向进流城市排水泵站存在的进水箱涵配水不均和不良的进水流态问题,拟通过在闸门井中设置合适的整流措施,以实现对闸门井内的斜向入流进行有效整流。图7所示的是在闸门井内设计布置的一种新型整流措施,由组合梁、主分流墩以及2个短导流墩组成的复合式整流措施。图8所示的是该整流措施的三维几何模型。为研究其对进水箱涵流态及配水均匀性的改善效果,下面对其进行CFD数值模拟分析。

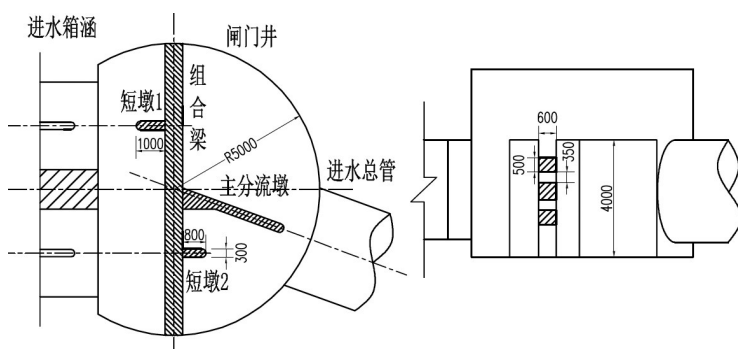


图7 闸门井内整流措施结构布置图(单位:mm)

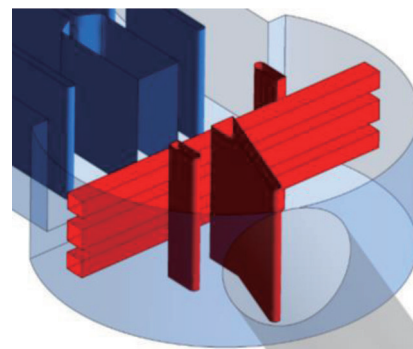


图8 整流措施三维几何模型

3.2 整流后的进水箱涵流态分析

图9所示的是水平截面P1上的流线图,图10所示的是整流前后闸门井立面三维流线图。相比整流之前(图5),由图9和图10可以发现,主分流墩首先将闸门井入流进行了有效分流,一部分水流继续沿斜向流动,在经组合梁和短导流墩1的整流作用下得到有效均化,分别流入到箱涵孔A和孔B中,另一部分水流则沿主分流墩下边界,经短导流墩2分流和组合梁的均化作用下,较均匀的分别流入到箱涵孔C和孔D中。整流措施的设置使得闸门井进流得到有效的均化、闸门井内的旋涡区范围变小,进水箱涵各孔内以及前池进口处的流态得到显著改善。

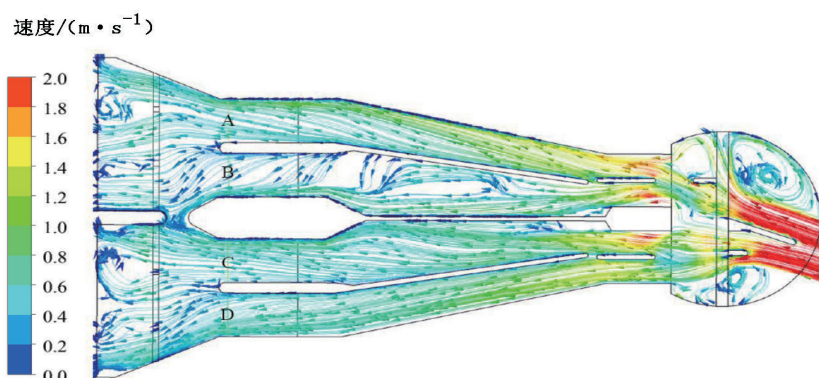


图9 P1水平截面上的速度流线图

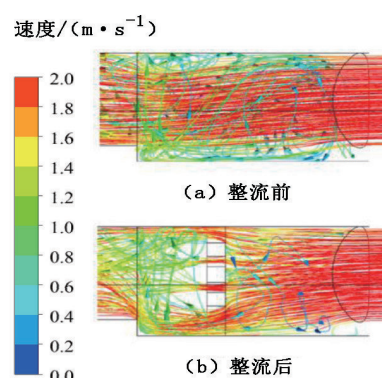


图10 闸门井立面三维流线图

图11所示的是整流后的进水箱涵各过流截面的速度分布云图。由图11可知,相比整流之前(图6),整流后的各过流截面的速度分布情况得到明显改善,各孔内的流速分布规律也变得较为近似。图12所示的是

整流前后箱涵各孔流量分配系数。从图12可以看出,经闸门井内设置的新型整流措施的作用下,箱涵各孔内的流量分配得到显著的提高,其中A、B、C、D各孔的流量分配系数 ψ 分别调整为28.07%、22.48%、25.49%和23.96%。

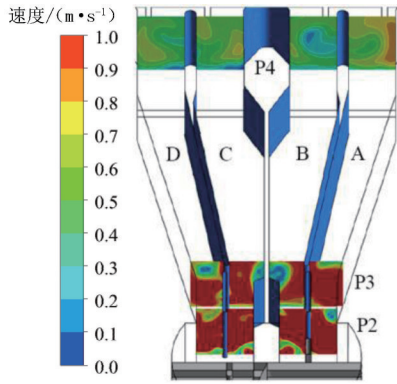


图11 P2~P4整流后截面的流速分布云图

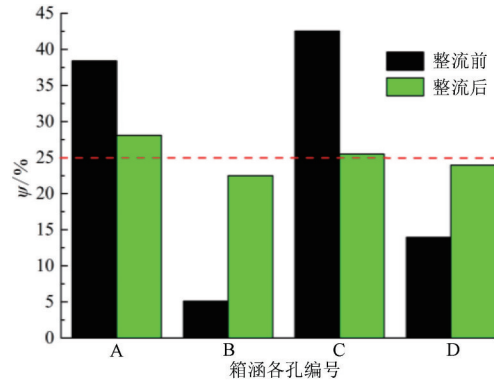


图12 整流前后箱涵各孔流量分配系数对比图

3.3 整流方案的试验验证

为验证文中数值计算的可靠性以及整流方案的实际改善效果,针对该泵站开展物理模型试验验证。物理模型基于重力相似准则进行设计,模型线性比尺为 $\lambda_L=8$,如图13所示。其中,在泵站物理模型的进水箱涵各孔出口截面上布置了3条测量垂线(图14)。各箱涵孔内的二侧垂线(a和c、d和f、g和i、j和l)与其邻近边壁距离为25 mm,同进水箱涵孔内相邻二垂线间距均为131.25 mm,每条测量垂线从近水底至近水面均布9层垂向测点,采用多普勒三维剖面流速仪(ADV)对各测点的水流流速进行测量。



图13 物理模型实物照片

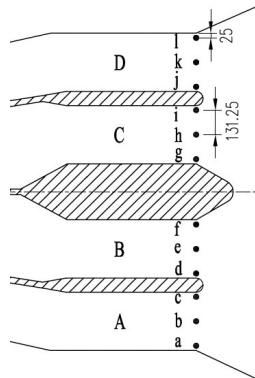


图14 测量垂线布置图(单位:mm)

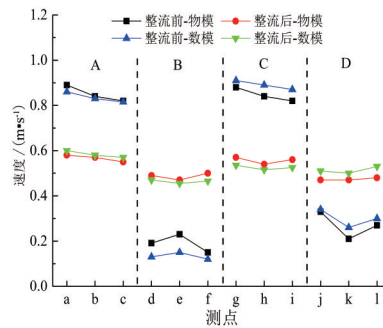


图15 整流前后各测量垂线沿主流方向的速度分布图

通过对整流前后每条测量垂线上的测点沿前池主流方向的速度分量进行统计平均以及相似换算,并与数值计算结果进行对比,获得如图15所示的流速分布图,其中流速相似换算系数 $\lambda_v=\lambda_L^{0.5}=2.83$ 。由图15可以看出,相比整流前,整流后的进水箱涵各孔的流量分配不均程度得到显著改善,箱涵各出口处的流速均匀程度有所提高,从而验证了本文所提整流措施实际改善效果的有效性;另外,通过对比数值计算与试验测量的结果,二者的流速分布情况较为相近且变化规律也基本一致,由此说明本文所采用的数值计算方法是可行的。

4 结 论

1)斜向管涵进流容易造成泵站闸门井内主流集中,进水箱涵各孔内的流量分配明显不均,引起闸门井、箱涵部分孔内以及前池进口处形成旋涡、回流、横向流等不良流态,难以保证泵站良好的进水条件;

2)通过在闸门井内设计布置一种新型的整流措施,可以有效改善斜向进流城市泵站进水箱涵内的不良流态和提高其配水的均匀性,其中箱涵各孔的流量分配系数由38.41%、5.11%、42.52%和13.96%分别调整为28.07%、22.48%、25.49%和23.96%,从而改善了泵站前池的进流条件,有助于保障泵站的安全稳定运行;

3)通过与物理模型试验结果进行对比,验证了本文所提出的整流措施的有效性以及所采用数值方法的可靠性。

在对泵站进水系统三维流场的数值模拟计算时,基于刚盖假定对自由水面进行了处理,在泵站实际运行过程中,闸门井、前池内的自由水面存在一定的波动,因此在后续研究中还将会进一步考虑自由水面的影响;另外,对于本文所提出的整流措施,还将进一步研究其结构尺寸参数变化对泵站进水流态及配水均匀性的改善效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 洪磊,周春天,王晓升,等. 城市排水泵站前池压水板的整流效果[J]. 江苏农业科学,2013,41(5):357-360.
- [6] 朱红耕. 双泵共用进水池三维紊流数值模拟和试验研究[J]. 灌溉排水学报,2004,23(1):66-69.
- [7] 颜红勤,陈松山. 泵站进水池构筑物布置形式对水流的影响[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):55-58.
- [8] 周济人,仲召伟,梁金栋,等. 侧向进水泵站前池整流三维数值计算[J]. 灌溉排水学报,2015,34(10):52-55.
- [9] 雷恒,李颖,罗全胜. Kamalapur雨水泵站前池水力特性数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2016(5):113-116.
- [10] 周正富,陈松山,何钟宁. 侧向进水泵站流态改善措施的研究[J]. 中国农村水利水电,2014(6):120-124.
- [11] 罗灿,成立,刘超. 泵站正向进水前池底坎整流机理数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(5):393-398.
- [12] 谢宇琦,娄绍撑,虞鸿. 杭州三堡泵站进水池复杂流场的三维模拟分析[J]. 水电能源科学,2015(10):84-87.
- [13] 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.
- [14] 王福军. 计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:113-143.
- [15] 张睿. 轴流泵失速和空化流动特性及其性能改善研究[D]. 上海:上海大学,2014.

Improving the Uniformity of Water Distribution in the Box Culvert of Urban Drainage Pumping Station with a Slanted Intake

ZHANG Rui, XU Hui, CHEN Yuling, FENG Jiangang, WANG Xiaosheng, ZENG Yifu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, the flow and water distribution uniformity in the box culvert of an urban drainage pumping station with slanted intake in Shanghai was studied numerically based on the unsteady Reynolds averaged N-S equation and the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. The results showed that the oblique inflow could easily cause an unequal water distribution in different box culvert channels of the urban drainage pumping station, and that there were some adverse flow patterns such as backflow, vortex flow, transverse flow, found in the gate shaft, some box culvert channels and the fore-bay of the pumping station. The flow pattern and water distribution uniformity in the box culvert could be improved by a thorough design and setting a new typical rectification measure in the gate shaft. And there would be good inflow condition in the pumping station. The results of this paper could provide some valuable references to design and operation of urban drainage pumping station with slanted intake.

Key words: pumping station; slanted intake; inflow box culvert; uniformity of water distribution; numerical simulation

责任编辑:陆红飞