

施伟,倪春,于贤磊,等. 闸站并列布置工程泵站前池流态改善[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 810-820. SHI W, NI C, YU X L, et al. Flow pattern improvement in the forebay of pumping station with parallel sluice[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 810-820. (in Chinese)

闸站并列布置工程泵站前池流态改善

施伟¹,倪春¹,于贤磊¹,吕复生²,刘军¹,陆林广²,徐磊²

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司,南京,210029; 2. 扬州大学水利科学与工程学院,江苏扬州 225009)

摘要:为研究闸站并列布置工程泵站运行时清污机桥位置对前池内水流流态的改善效果,以南水北调东线刘山泵站工程为例,基于 Navier-Stokes 方程和 Standard $k-\epsilon$ 湍流模型对前池原设计方案和改进设计方案的进水流场进行了定常数值模拟,分析比较不同开机组合同时前池流场分布和流道进口后断面的流速分布均匀度及速度加权平均角度,并进行水工模型试验验证。结果表明:原设计方案前池在 4 号和 5 号机组进水流道进口前存在回旋区,4 号机组流道进口前产生有害吸气旋涡;改进设计方案前池将清污机桥整体向泵房方向移动 25 m,并将节制闸与泵站间导流墙长度减短使其头部与清污机桥墩齐平,不仅消除了 4 号机组流道进口处有害吸气旋涡,还将 4 号机组进水流道进口流速分布均匀度平均提高 2.5%,泵站进水流态改善显著。通过调整泵站进口清污机桥墩位置解决了前池流态存在的问题,不需再另增底坎、立柱和导流墩等措施,研究成果可为同类型工程研究提供参考。

关键词: 闸站并列; 前池; 流态; 清污机桥墩; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TV131.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0079

水闸与泵站并列布置工程既可以通过泵站完成从下游向上游调水的功能,也可以通过水闸完成从上游向下游放水功能。闸站并列布置工程具有布置紧凑、占地范围小的优点,在水利工程中应用十分广泛^[1-2]。近年,由于极端气候增多、天气变化异常,许多地区出现旱涝急转情况,为了同时满足抽引自排或抽排自引双重功能,闸站并列布置工程的应用越来越多。前池是低扬程泵站工程的重要进水建筑物^[1-3],其作用是将引渠末端水流引至进水流道进口,以提供好的进水条件、保证水泵机组安全稳定运行。但是,闸站并列布置工程的泵站运行时,进入前池水流的流动方向与泵站前池纵向中轴线存在一定夹角,易导致泵站前池内水流发生偏流,产生大范围回流区,严重时会导致流道进口前产生吸气旋涡,影响泵站的安全稳定运行。为此,对于闸站并列布置工程的前池流动研究需给予重视。

目前,关于泵站前池流态改善已有一些研究。对于侧向进水的泵站前池,可以采用导流栅^[4]、立柱^[5]、Y形导流墩^[6]和底坎^[7]等方式减小回流区范围,改善前池流态;对于正向进水的泵站前池,文献[8]

至文献[12]采用长短组合型、多人字型、开孔和楔型等各种型式的导流墩对前池流态进行了改善,夏臣智等^[13]和张校文等^[14]分别提出在前池内设置立柱和隔板改善前池内水流流动,在前池底部设置底坎也可以解决前池内存在的大范围回流及偏流问题^[15-17]。营佳玮等^[18]还对采用立柱、底坎以及立柱底坎联合布置的某大型泵站前池流态进行数值模拟,结果表明采用立柱底坎联合布置的整流效果优于单一措施下的整流效果。关于闸站并列布置工程泵站前池流态研究的还比较少:奚斌等^[19]针对某闸站结合工程前池及引渠较短、进流条件较差问题,提出了带通水孔的导流墙、Y形导流墩和沿流向导流坎所形成的组合式整流措施,对前池流态改善效果显著;赵苗苗等^[20]采用圆弧形导流墩改善了闸站并列布置工程靠近闸站隔墩处机组前池内有大范围回流区的流态;徐波等^[21]采用模型试验的方法研究了某非对称式闸站结合式泵站前池流态,提出了在闸站间导流墙开孔和前池内增设底隔墙措施以改善流态。

大型泵站工程前池流态受到水位、流量、开机

收稿日期: 2023-04-18 修回日期: 2023-07-17 网络出版时间: 2023-07-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230721.0820.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779215); 江苏南水北调水利科技项目(JSNSBD202105)

作者简介: 施伟(1980—),男,江苏盐城人,正高级工程师,博士,主要从事泵站工程建设与管理研究。E-mail: nsbdsw@126.com

通信作者: 徐磊(1984—),男,江苏连云港人,副教授,博士,主要从事泵站工程方面的研究。E-mail: leixu@yzu.edu.cn

组合、底坡和扩散角等多种因素的影响,不同泵站工程的设计参数有一定的差异性,改善前池流态所需要采取的措施不尽相同。数值模拟和模型试验是研究泵站前池和进水渠道流态的主要方法^[20-24]。本文基于南水北调东线一期刘山泵站与水闸并列布置工程的设计参数,采用数值模拟和模型试验相结合的方法对该工程泵站前池流态进行研究。

1 前池方案及计算工况

1.1 前池方案

南水北调刘山泵站工程为南水北调东线一期工程的第七梯级泵站,位于京杭运河的不牢河段,主

要用于提水北送和航运补水,该工程采用水闸与泵站并列布置方式,该站前池原设计方案见图1。南水北调工程刘山泵站布置了5台水泵机组(4用1备),泵站抽水设计流量为 $125\text{ m}^3/\text{s}$,单泵设计流量为 $31.25\text{ m}^3/\text{s}$,泵站站身顺水流向长度 32.3 m 、垂直水流向宽度 43.32 m ,引河扩散角为 10° ,泵站进口底高程 13.5 m ;刘山节制闸共分5孔,每孔净宽 10 m ,堰顶高程 20.5 m ,节制闸顺水流向长度 24.5 m 、垂直水流向宽度 57.82 m ;刘山泵站与节制闸缝墩上、下游由导流墙隔开,站上导流墙长 40 m ,站下导流墙结合清污机桥布置,长 48 m ;清污机桥与泵站间距 38 m ,站下公路桥纵轴线距泵站 70.35 m 。

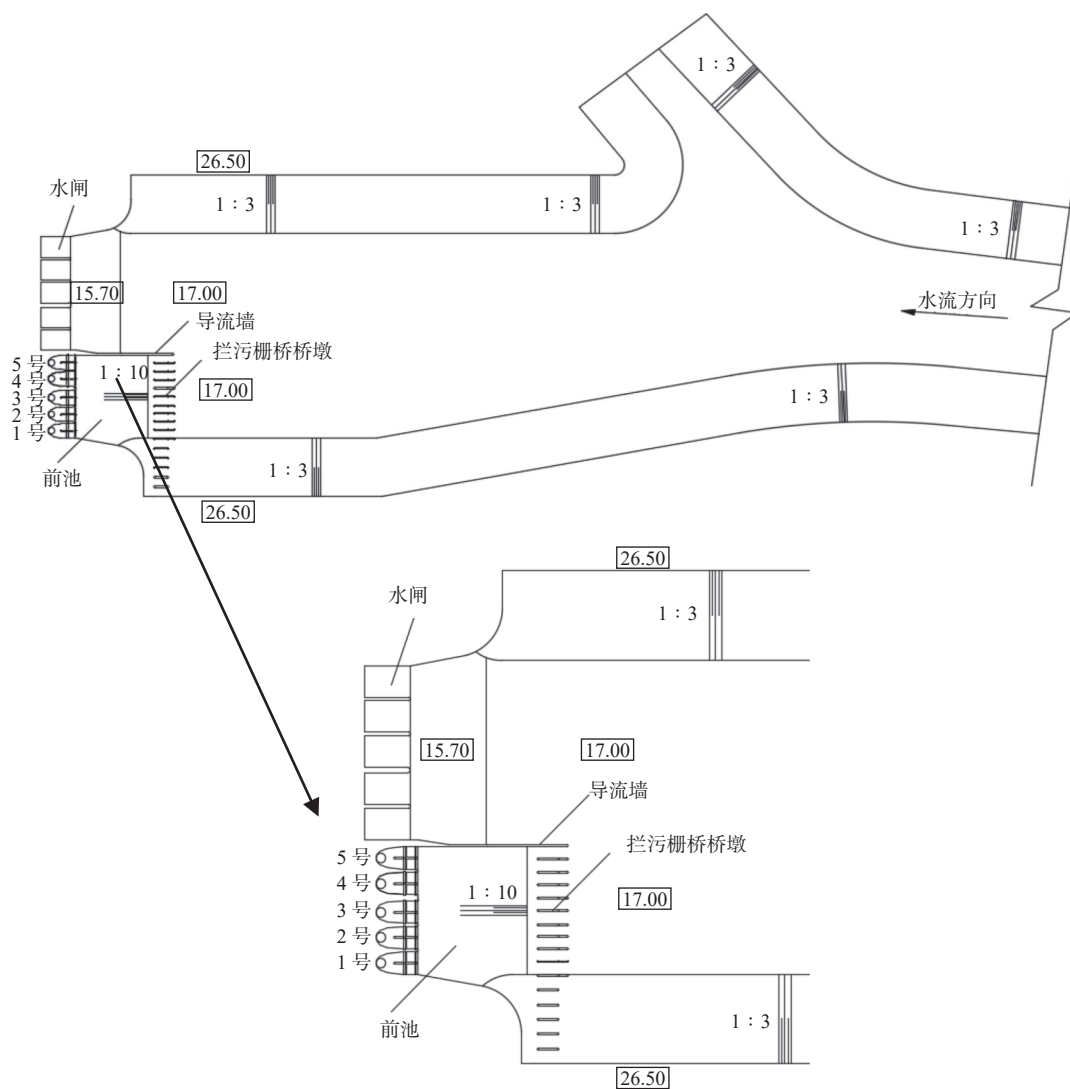


图1 原设计方案闸站并列布置

Fig. 1 Layout of pumping station with parallel sluice in the origin design scheme

基于对原设计方案前池流场的数值模拟结果,结合工程设计情况,保持引河原扩散角不变,采用与现有导流墩、立柱和底坎等布置不同的整流措施,利用泵站的清污机桥桥墩对前池流动进行改善,前

池改进设计方案如下:将原清污机桥的位置整体向泵房方向移动 25 m ;缩短节制闸与泵站之间导流墙的长度,使导流墙头部与清污机桥墩齐平,以压缩前池回旋流动的范围、减弱回旋流动的强度;顺水

流方向看,将泵站前池左侧翼墙由斜线调整为直线,以便更好地引导水流进入进水流道。前池改进设计方案见图 2。

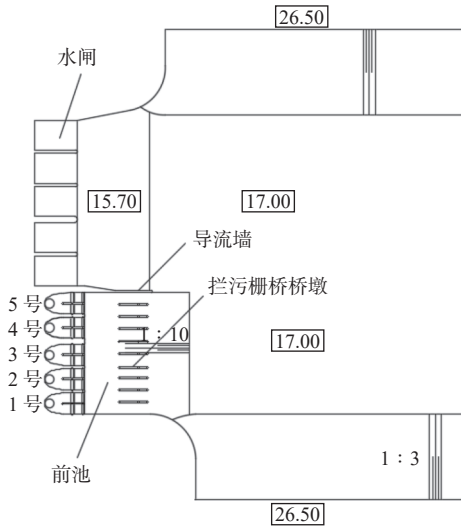


图 2 前池改进设计方案

Fig. 2 Layout of the improvement design scheme of forebay

1.2 计算工况

刘山泵站采用闸站并列布置方式,布置 5 台水泵机组,即使泵机组对称运行,前池来流也不对称,根据排列组合泵站开机运行工况达到了 31 种,为保证各工况运行时前池均能有较好的流态,需要对每种运行工况前池流场进行数值计算。水位是影响前池流态的另一重要因素,据已有研究成果,水位越低出现水面涡的可能性越大,故一般主要针对保证最低运行水位进行前池流态研究。各运行工况的流量根据开机台数确定,每台机组按单机设计流量计算。

对刘山泵站最低运行水位时 31 种开机组的原型前池流场均进行三维湍流流动数值模拟,受篇幅影响不能将所有计算结果呈现,故选取其中 5 种典型工况作为代表,这 5 种典型工况的开机组组合见表 1。为了清楚地对流场进行描述,顺水流方向看,从左至右将 5 台水泵机组依次编号为 1 号~5 号(图 2)。

2 数值计算方法

2.1 控制方程

对南水北调刘山泵站工程前池的原设计方案和改进设计方案分别进行原型三维定常湍流流动数值模拟。泵站前池内的水为均质、常黏性以及不可压缩流体,其三维湍流流动可以用连续性方程以及 Navier-Stokes 方程进行描述,同时还需引入反应湍

动能 k 和湍动能耗散率 ε 两个方程使方程组封闭。雷诺时均方法在低扬程泵站前池流场数值模拟中应用广泛,连续性方程以及 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + F_i \quad (2)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \bar{u}_i 、 \bar{u}_j 为平均速度分量, m/s ; x_i 、 x_j 为坐标方向; \bar{p} 为平均压强, Pa ; μ 为动力黏滞系数, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$; F_i 为体积力分量。

表 1 泵站前池流场计算 5 种典型工况的开机组组合

Tab. 1 The start-up combinations for 5 typical operating conditions for pumping station forebay flow field calculations

机组编号	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
1号	开	开	开	开	开
2号	停	开	开	开	开
3号	停	停	开	开	开
4号	停	停	停	开	开
5号	停	停	停	停	开

$-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力,为使方程组封闭,引入 Boussinesq 假定,将雷诺应力表示为湍动黏度 μ_t 的函数:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: k 为湍动能; δ_{ij} 为 Kronecker delta; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; ε 为湍动能耗散率; C_μ 为无量纲经验系数。

许多前池流场数值模拟研究结果表明, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型能够更好地对前池三维流场进行数值模拟^[5,7,13],其中的 k 方程和 ε 方程为

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial k \bar{u}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varepsilon \bar{u}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:湍动能生成项 $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$; 经验常数 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 σ_k 和 σ_ε 的取值分别为 $C_{1\varepsilon} = 1.42 - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.68$ 、 $\sigma_k = 0.7179$ 和 $\sigma_\varepsilon = 0.7179$, 其中的 $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$ 、 $\eta_0 = 4.377$ 、 $\eta_0 = 4.377$ 和 $\beta = 0.012$ 。

2.2 边界条件

为使流向泵站前池的流动能够与实际情况更为符合,将泵站前池三维流动数值模拟计算的进口设置在距前池进口断面足够远的引渠中,该处引渠较

为顺直,采用速度进口边界条件。前池内水流三维流动计算时包含了进水水道部分,因进水水道出口断面的流速方向为未知,为保证进水水道计算流场出口为充分发展的流动,将进水水道出口断面沿断面法向延长,计算流体域的出口设置在距进水水道出口断面2倍直径处,采用自由出流边界条件。前池流场计算中的引渠、拦污栅桥墩、水闸上游侧、前池和进水水道的边壁等均为固壁,应用对数式固壁函数处理。对于引渠和前池的自由水面,忽略水面的风所引起的切应力及与大气层的热交换,将其作为对称平面处理。

2.3 计算区域网格划分

泵站前池流场的计算区域包括引渠、前池、节制闸上游侧、进水水道和短直管5个部分。采用GAMBIT软件对流场数值模拟计算区域进行网格划分,对于形体较为复杂的前池和进水水道部分采用适应性强的非结构化网格,对于形体较为简单的引渠、短直管和水闸部分采用混合网格和结构化网格。对近壁区的网格进行局部加密,使得整体计算

域的 y^+ 值小于300,本次计算的 y^+ 值最大值约为270,位于进水水道出口处。以水力损失作为网格无关性的评判指标,对计算区域进行网格无关性检查,前池流场计算网格无关性的检查情况见图3。可以看到,当前池流场计算区域网格数量大于580万个时,水力损失无明显变化,故最终确定计算区域网格数约为600万个。计算区域网格剖分情况见图4。

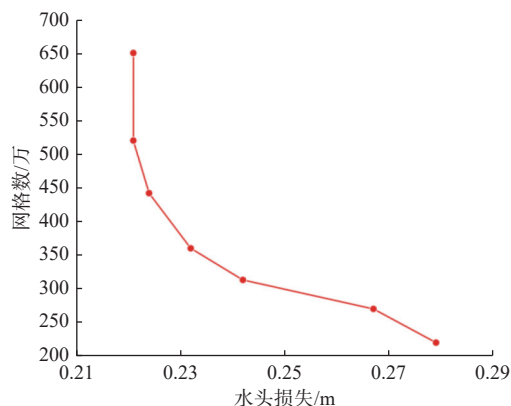


图3 不同网格数量下的水力损失

Fig. 3 Relationship between hydraulic loss and mesh quantities

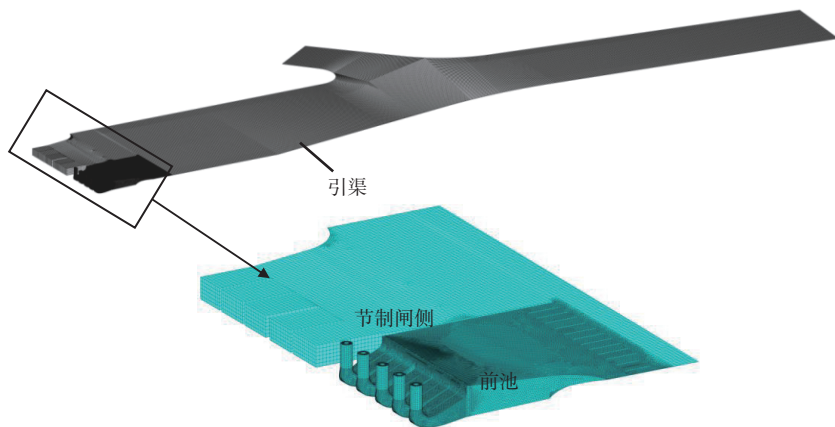


图4 前池流场三维流动数值模拟计算区域及网格剖分

Fig. 4 Calculation domains and mesh generation of three-dimensional flow field numerical simulation of forebay

3 数值计算结果

3.1 原设计方案前池流态

根据原设计方案前池内水流三维流动数值模拟结果,5种开机组合工况时前池面层和底层的流场图见图5。为更为清楚地表达前池内的流动情况,底层流场仅显示泵站前池部分,由图5可知:在泵站运行时,节制闸侧为大范围滞水区,随着泵站开机台数的增加,节制闸侧滞水区范围呈减小趋势;受闸站并列布置的影响,引渠来流以一定的倾斜角度

流向泵站前池,远离导流墙侧的水流倾斜角度较小,从引渠较为平顺地流向泵站前池,靠近导流墙侧水流的倾斜角度较大,开机台数越多、倾斜角度越大;引渠斜向来流经清污机桥墩后流入前池,清污机桥对斜向水流具有一定的调整作用,远离导流墙侧的水流较为顺直,而靠近导流墙侧,在斜向水流和导流墙的共同作用下,除工况1外各工况的导流墙头部背水面存在旋涡区;未运行机组进水水道进口前存在滞水区,与滞水区相邻的机组进水水道进口前存在较大的横向流动。

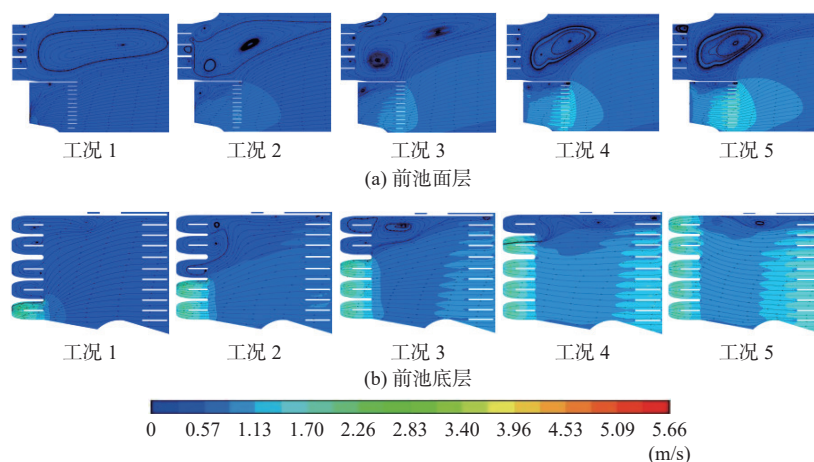


图 5 原设计方案前池面层和底层流场图

Fig. 5 Flow field diagram of surface layer and bottom layer of forebay in the original design scheme

各计算工况下前池面层与底层流场分布不同,不同工况下的底层流态均较好。对于 1 台机组运行的工况 1,泵站前池面层有较大的横向流动,进水流道进口前无不良流态;对于 2 台机组运行的工况 2,1 号机组进水流道前流态较好,2 号机组进水流道进口具有一定横向流动;对于 3 台机组运行的工况 3,1 号和 2 号机组进水流道进口前流态较好,3 号机组进水流道进口具有一定横向流动;对于 4 台机组运行的工况 4,4 号机组进水流道进口前面层靠近 5 号侧存在立轴旋涡;对于 5 台机组运行的工况 5,顺水流方向看,前池内存在从左向右的横向流动,5 号机组进口前面层存在立轴旋涡,再向前一段距离存在较大范围的旋涡区。4 号机组和 5 号进水流道进口前面层的立轴涡强度达到一定程度时将诱发吸气涡,导致水中污染物或气体进入流道和水泵,影响泵机组的安全运行。

流速分布均匀度可衡量所选取特征断面的速度分布,速度加权平均角度可衡量进水流道各断面的横向流速分布。流速分布均匀度和速度加权平均角度^[25]计算公式为

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{\bar{v}_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2 \Delta A_i}{A}} \right] \times 100\% \quad (6)$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ai} \left[90^\circ - \arctan \frac{v_{ti}}{v_{ai}} \right]}{\sum_{i=1}^n v_{ai}} \quad (7)$$

式中: V_u 为断面流速分布均匀度, %; \bar{v}_a 为断面平均轴向流速, m/s; v_{ai} 为断面各计算单元的轴向速度, m/s;

ΔA_i 、 A 分别为各计算单元的面积和断面面积, m^2 ; θ 为断面的速度加权平均角度, ($^\circ$); v_{ti} 为断面各计算单元的横向速度, m/s。

根据数值计算得到的不同工况下各机组进水流道进口后的断面流速分布均匀度和平均角度结果见表 2, 各机组肘形进水流道直线段内均设置了中隔墩, 将进水流道进口分为了左孔和右孔。由表 2 可知, 对于不同的开机组组合, 因受横向流动影响, 各机组进水流道之间以及进水流道左孔和右孔之间的均匀度呈现出不同的分布情况: 工况 1 时, 1 号机组进水流道右孔均匀度明显低于左孔; 工况 2 时, 1 号机组进水流道左孔、右孔均匀度接近, 2 号机组右孔均匀度明显低于左孔; 工况 3 时, 1 号~3 号机组进水流道之间和各机组进水流道左孔和右孔之间的均匀度相差不大; 工况 4 时, 1 号~4 号机组进水流道进口的均匀度依次逐渐减小, 4 号机组进口均匀度最低, 且左孔均匀度明显低于右孔; 工况 5 时, 1 号~5 号机组进水流道进口的均匀度依次逐渐减小, 4 号和 5 号机组进口均匀度和角度均差, 5 号机组进水流道左孔均匀度明显低于右孔。由图 6 所示的工况 4 和工况 5 流道进口后断面流场可以看到, 顺水流方向看 4 号机组和 5 号机组分别位于工况 4 和工况 5 运行机组的最右侧, 受前池来流影响流道左孔内左侧的流速大于右侧、右孔内的流速大小则较为接近, 故出现了左孔均匀度低于右孔的现象。

3.2 改进设计方案前池流态

从原设计方案前池流场可以发现清污机桥墩对泵站前池内的水流流动具有一定的整流作用, 为此在原设计方案的基础上对清污机桥墩位置及导流墙和左侧翼墙进行了调整得到改进设计方案,

具体见本文 1.1 节。根据改进设计方案前池内水流 面层和底层的流场图见图 7。
 三维流动数值模拟结果,5 种开机组合工况时前池

表 2 原设计方案前池 5 种计算工况进水流道进口后断面流速分布均匀度和平均角度

Tab. 2 Uniformity and average angle of flow velocity distribution at the inlet of inlet conduits of forebay under 5 calculation conditions in the original design scheme

机组编号		工况1		工况2		工况3		工况4		工况5	
		均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)
1号	左孔	93.58	73.25	95.10	73.05	95.57	72.90	96.28	72.67	96.10	72.49
	右孔	87.57	72.67	94.12	73.19	94.94	73.09	95.36	72.86	95.36	72.62
2号	左孔			92.95	73.44	94.79	73.24	94.56	72.82	94.02	72.33
	右孔			87.71	72.87	94.37	73.20	94.42	73.03	93.35	72.54
3号	左孔					93.46	73.59	93.40	72.99	92.07	72.15
	右孔					93.35	72.98	92.29	73.74	91.89	73.02
4号	左孔							83.52	71.64	83.42	70.51
	右孔							87.87	71.79	82.73	71.26
5号	左孔									81.47	70.20
	右孔									87.19	69.90

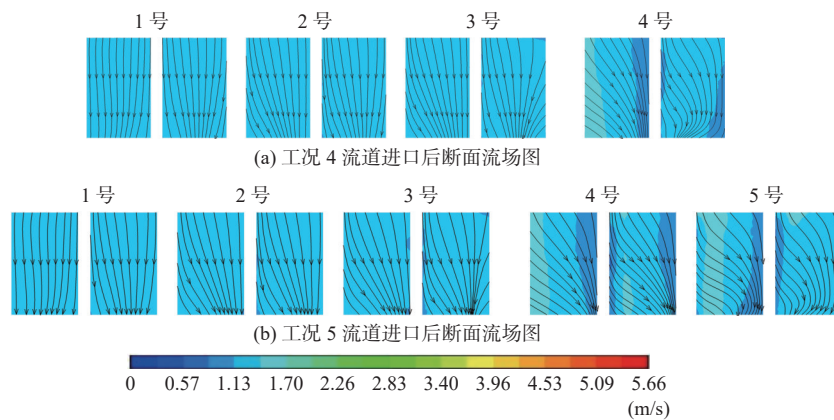


图 6 原设计方案工况 4 和工况 5 流道进口后断面流场图

Fig. 6 Flow field diagram of cross section after conduit inlet of the original design scheme under working conditions 4 and 5

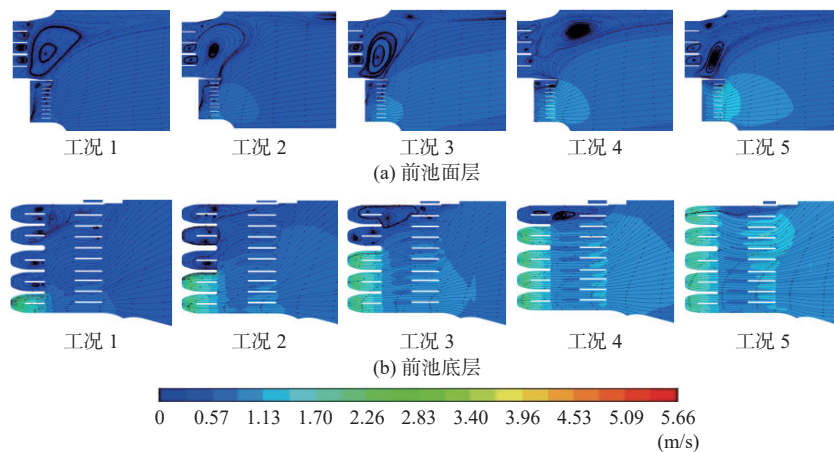


图 7 改进设计方案前池面层和底层流场图

Fig. 7 Flow field diagram of the surface layer and bottom layer of the forebay in the improved design scheme

将改进设计方案前池面层流场与原设计方案面层流场比较可以看到:相同开机组合时,改进设计方案前池的导流墙节制闸一侧的滞水区范围明显减小,引渠水流流向前池的倾斜角度减小,清污机桥墩头部背水面因脱流出现较小旋涡区,未运行机组进水水道进口前滞水区减小,工况 4 时 4 号机组进水水道进口前无立轴涡,工况 5 时 5 号机组进水水道前的立轴涡向前移动至清污机桥墩尾部。

将改进设计方案前池底层流场与原设计方案底层流场比较可以看到:相同开机组合时,两种方案前池底层的流场基本相同,工况 1 至工况 4 改进设计方案前池中流向进水水道进口的水流更为平顺,但工况 5 改进设计方案的 5 号机组进水水道右孔进口横向流动较原设计方案明显。

根据数值计算得到的不同工况下各机组进水水道进口后的断面流速分布均匀度和平均角度结果见表 3,与原设计方案相比可以看到:改进设计方案工况 1 和工况 2 的运行机组进水水道均匀度和角度变化较小;工况 3 时,1 号和 2 号机组进水水道均匀度和角度变化较小,3 号机组进水水道左右两孔均匀度降低;工况 4 时,1 号~3 号机组进水水道均匀度和角度变化较小,4 号机组进水水道左孔均匀度由 83.52% 提高至 87.35%、右孔均匀度由 87.87% 提高至 88.93%;工况 5 时 1 号~3 号机组进水水道均匀度和角度变化较小,4 号和 5 号机组进水水道左右两孔均匀度均提高,4 号机组进水水道左孔均匀度由 83.42% 提高至 86.18%、右孔均匀度由 82.73% 提高至 84.91%。

表 3 改进设计方案前池 5 种计算工况进水水道进口后断面流速分布均匀度和平均角度

Tab. 3 Uniformity and average angle of flow velocity distribution at the inlet of inlet conduits of forebay under 5 calculation conditions in the improved design scheme

机组编号		工况1		工况2		工况3		工况4		工况5	
		均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)	均匀度/%	平均角度/(°)
1号	左孔	93.08	72.74	94.93	72.83	95.18	72.72	95.38	72.62	95.55	72.52
	右孔	86.78	73.16	93.34	73.19	94.40	73.13	94.51	72.98	94.48	72.88
2号	左孔			91.14	73.44	93.45	73.54	94.64	73.27	95.37	73.09
	右孔			86.52	73.40	93.06	73.44	94.56	73.16	95.30	72.98
3号	左孔					90.98	73.77	92.90	73.50	95.25	72.96
	右孔					90.39	73.45	92.35	73.78	93.41	73.17
4号	左孔							87.35	73.83	86.18	71.34
	右孔							88.93	74.85	84.91	72.44
5号	左孔									82.87	72.23
	右孔									87.31	70.42

4 模型试验结果及现场情况

4.1 试验标准及测试方法

试验标准是泵站进水设计整体模型试验的重要依据,刘山泵站前池流态模型试验标准采用《美国国家标准:水泵进水设计》^[26],该标准对水泵进水设计模型试验提出了具体明确要求。泵站整体模型试验中的进水流动是具有自由表面的、主要由重力支配的流动,为了模拟泵站进水水流的流态,采用弗劳德相似准则,原型和模型的弗劳德数相等。

在采用弗劳德相似准则的条件下,需同时满足对雷诺数和韦伯数的要求,为尽可能清楚准确地测试泵站引河、前池和进水水道内的流态,兼顾试验

费用和试验场地的限制,刘山泵站进水流态模型试验时取原模型比 λ 为 28.8。根据闸站布置情况,进水流态模型的范围包括引河、水闸上游侧、前池和 5 个进水水道。根据原型尺寸和模型比设计制作了刘山泵站进水流态整体模型试验装置,试验装置的照片见图 8。泵站前池和肘形进水水道模型均采用透明有机玻璃制作,以便观察流态。泵站进水流态试验所模拟的 5 台泵分别采用了单独的供水泵、电磁流量计和流量调节闸阀,每台水泵流量可分别地进行调整和测试。刘山泵站进水流态整体模型的制作和试验详情见文献 [27]。

模型试验中每台水泵流量的测试采用电磁流量计,流量测试的精度为 $\pm 0.5\%$ 。前池水位采用水位

测针测量水位,测量误差在 $\pm 1\text{ mm}$ 之内。在模型试验中,采用与水相近的塑料粒子观察前池中的水面

涡和水下涡。

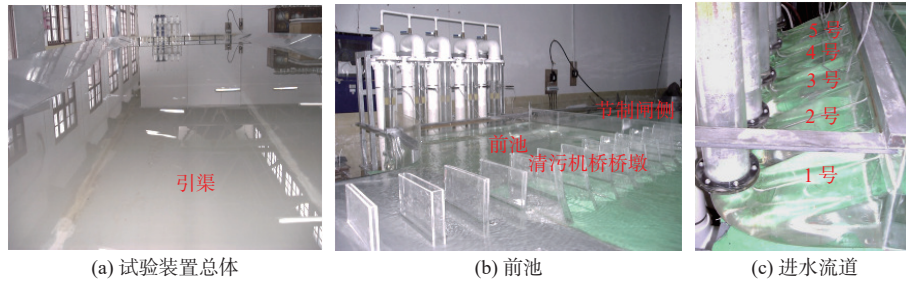


图8 前池流态水工模型试验装置照片

Fig. 8 Photo of forebay flow hydraulic model test device

4.2 原设计方案前池模型试验流态

对刘山泵站枢纽工程5台水泵不同开机组合时的原设计方案进水流态进行了模型试验,由试验中观察的流态可以看到:在5台水泵全开的情况下,引渠水流流向泵站侧,通过清污机桥的水流由节制闸方向偏斜进入泵站前池,前池内出现顺时针方向的面层回旋流动,回旋流动的区域较小,主要位于4号机组和5号机组进水渠道前,进水渠道前有浅涡出现,但未观察到有害吸气涡发生。

根据原设计方案前池流态模型试验结果,在5号泵停而1号至4号泵运行的情况下,通过清污机桥的水流仍是由节制闸方向偏斜进入前池,前池内出现顺时针方向的大范围面层回旋流动,回旋流动紧靠泵房,偏向4号和5号泵一侧。受大回旋流动的影响,4号泵进水渠道进口前出现较强的吸气涡(图9),形成长串气泡进入流道,旋涡旋转方向为顺时针,旋涡直径最大处约4~5 cm,出现频率较高,约1分钟左右出现一次,对照试验标准,该旋涡类型

达到了V型^[26],属于有害旋涡,这种吸气涡影响水泵的安全稳定运行。

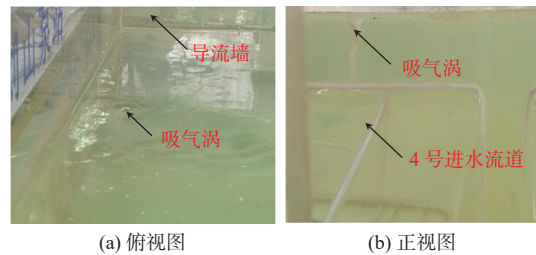


图9 4号机组进水渠道进口吸气旋涡模型试验照片

Fig. 9 Photos of suction vortex model test at inlet of inlet conduits of unit 4

4.3 改进设计方案前池模型试验流态

在前池原设计方案模型的基础上,根据改进设计方案对试验模型进行了调整:将清污机桥向泵房方向移动一定距离,缩短导流墙长度使其头部与清污机桥墩齐平,对左侧翼墙形线进行调整。改进设计方案前池模型的照片见图10(a)。

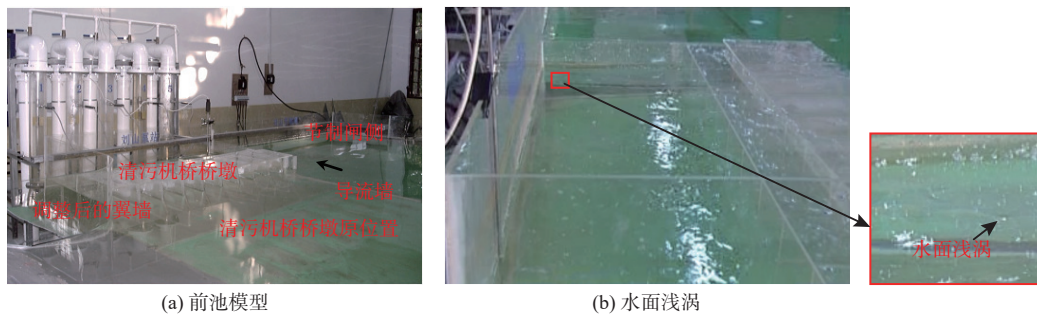


图10 改进设计方案前池模型和水面浅涡照片

Fig. 10 Photos of the forebay model and shallow vortex on the water surface of improved design scheme

改进设计方案前池流态水工模型试验表明,当清污机桥向泵房方向移动25 m后,缩小了清污机桥桥墩与泵站进水渠道之间的距离,有效地压缩了前池面层的回旋流动的范围,进水渠道进口前的回流

强度明显减弱,消除了吸气涡产生的主要诱因,不同流量、水位和水泵运行组合的所有工况下进水渠道进口前的前池水面只有表面浅涡[图10(b)],属于I型和II型水面涡,不能够形成吸气涡,这种浅

涡对水泵运行不产生危害。

4.4 泵站前池现场流态情况

刘山泵站工程于 2005 年 3 月开工建设, 2008 年 10 月通过试运行验收, 2012 年 12 月通过设计单元工程完工验收。自 2013 年试通水以来, 先后投入进行了江苏省内的抗旱运行、南四湖的生态补水及北延应急供水。截至 2023 年 1 月底, 刘山泵站已累计运行 16 102 台时, 调水量达 17.91 亿 m^3 , 充分发挥了工程效益。图 11 所示为 3 号和 4 号机组运行时泵站现场的前池照片, 可以看到前池内的水流流动较为平静, 没有出现大范围的旋涡区, 仅在运行机组进水流道进口前的水面存在无害浅涡, 前池流动模型试验结果与现场观测结果一致。多年来的泵站现场运行情况表明各种开机组合时前池内无不良流态, 水泵运行平稳, 水泵噪声及振动等均在标准范围内。



图 11 刘山泵站机组运行时前池照片

Fig. 11 Photo of forebay of Liushan pumping station pump during operation

5 结论

闸站并列布置工程泵站前池轴线与引渠轴线具有一定的夹角, 引渠水流将以一定的倾斜角度流向泵站前池, 泵站不同开机组合下易引起前池表面产生回旋区, 导致流道进口产生吸气旋涡, 影响水泵机组的稳定运行。

改进设计方案将原设计方案前池的清污机桥整体向泵房方向移动 25 m, 并将节制闸与泵站之间导流墙的长度减短使其头部与清污机桥墩齐平, 有效压缩前池回旋流动的范围、减弱回旋流动的强度, 消除前池内的吸气旋涡, 提高原产生吸气旋涡机组进水流道进口的流速分布均匀度和角度, 改善泵站进水流道进口的水流流态。

本文采用的闸站并列布置工程泵站前池流场数值模拟方法较为准确地预测了流道进口前出现吸

气旋涡的位置, 数值计算结果与模型试验结果基本一致。

与已有的采用底坎、立柱和导流墩等新增措施改善前池流态的方法不同, 本研究通过调整工程中原有的清污机桥墩改善了泵站前池, 无须另外增加措施, 工程经济性好, 可为同类型泵站工程建设提供借鉴。

参考文献:

- [1] 徐波, 高琛, 陆伟刚, 等. 基于 CFD 的闸站结合布置优化设计与研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(10): 115-119. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2017.10.023.
- [2] 顾梦凡. 峨溪河排洪新站进水流态分析及优化措施研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021. DOI: 10.27441/d.cnki.gyzdu.2021.001140
- [3] AHMED N, YANG F, ZHANG Y Q. Analysis of the flow pattern and flow rectification measures of the side-intake forebay in a multi-unit pumping station[J]. Water, 2021, 13(15): 2025. DOI: 10.3390/W13152025.
- [4] 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. DOI: 10.12396/znsd.220476.
- [5] 周曼, 周春峰, 周艳霞, 等. 圆形立柱对侧向进水泵站前池流态的影响及其整流机理[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2020, 23(1): 73-78. DOI: 10.19411/j.1007-824x.2020.01.014.
- [6] 张聪聪, 周春峰, 周艳霞, 等. “Y”形导流墩几何参数对侧向进水泵站前池流态影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(3): 192-200. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0064.
- [7] 陈伟, 成立, 周春峰, 等. 分叉型侧向进水泵站前池底坎整流机理[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 176-180. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2020.10.031.
- [8] 赵苗苗, 贾君德, 秦景洪, 等. 闸站结合泵站前池导流墩整流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 125-130. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2018.04.027.
- [9] 陆伟刚, 姚天雯, 夏辉, 等. 泵站机组非对称运行下的前池导流墩整流模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2018, 21(1): 62-67. DOI: 10.19411/j.1007-824x.2018.01.014.
- [10] 白玉川, 李彬, 徐海珏, 等. 大跨度泵站多人字型前池导流墩整流分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 75-79.

- [11] 徐波,高琛,夏辉,等.开孔导流墩几何参数对闸站工程前池整流效果的影响[J].*长江科学院院报*, 2019, 36(2): 58-62. DOI: 10.11988/ckyyb.20170909.
- [12] 钱华港,蔡林涛,李娜,等.大扩散角泵站前池楔形导流墩整流研究[J].*中国农村水利水电*, 2022(4): 144-149,155. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.04.021.
- [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. DOI: 10.3880/j.issn.1006.2017.04.010.
- [14] 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实验验证[J].*排灌机械工程学报*, 2022, 40(4): 378-384. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0259.
- [15] 夏臣智,成立,焦伟轩,等.泵站前池倒T形底坎整流措施数值模拟[J].*南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 146-150. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0051.
- [16] 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. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.03.007.
- [17] 雷镇.多机组泵站前池流动特征和组合整流[D].扬州:扬州大学,2020. DOI: 10.27441/d.cnki.gyzdu.2020.000005
- [18] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.19.0176.
- [19] 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): 91-97,110. DOI: 10.11988/ckyyb.20201258.
- [20] 施伟,成立.水源地取水泵站水流流态数值模拟与改善[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 159-176. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0039.
- [21] 高传昌,高余鑫,李晓超.不同进水流速对泵站进水池漩涡的影响[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 180-190. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0020.
- [22] XI W, LU W G, WANG C. Optimization of the hollow rectification sill in the forebay of the pump station based on the PSO-GP collaborative algorithm[J]. *Shock and Vibration*. 2021, 2021: 6618280. DOI: 10.1155/2021/6618280
- [23] SONG W W, PANG Y, SHI X H. Study on the rectification of forebay in pumping station[J]. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018, 2018: 2876980. DOI: 10.1155/2018/2876980
- [24] 车晓红,张帝,成立.立式混流泵站进出水流道水力优化[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(5): 144-150. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0103.
- [25] 周东方,王怡波,周济人,等.闸站结合泵站进水池优化数值模拟研究[J].*水利水运工程学报*, 2023: 1-14. DOI: 10.12170/20220628002.
- [26] ANSI/HI 9.8-2018, American national for pump intake design[S].
- [27] 刘丽君,谢伟东,江树荣,等.南水北调东线工程刘山泵站进水流态整体模型试验研究[J].*水利水电技术*, 2004, 35(10): 70-73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2004.10.024.

Flow pattern improvement in the forebay of pumping station with parallel sluice

SHI Wei¹, NI Chun¹, YU Xianlei¹, LYU Fusheng², LIU Jun¹, LU Linguang², XU Lei²

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co., Ltd, Nanjing 210029, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The project of pumping station with parallel sluice has the advantages of compact layout and small land occupation, and it is widely used in water conservancy projects. For the project of pumping station with parallel sluice, the flow direction of the water flows into the forebay has a certain angle with the longitudinal center line of the forebay when the pumping station is working, so that deviation and backflow is prone to appear in the forebay of pumping station, the flow pattern at the inlet of the inlet conduit will be deteriorated, and a suction vortex belt will be generated in severe cases. The safe and stable operation of the pump unit will be affected when the suction vortex belt enters the pump.

In order to study on the improvement of flow pattern in the forebay when the pumping station of the project is arranged in parallel with the sluice station, taking the Liushan Pumping Station in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project as an example, the numerical simulation study on the flow pattern in forebay of the project of pumping station with parallel sluice was carried out based on the Navier-Stokes equations and the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. Aiming at the flow field problems in the forebay, the improvement measures of moving the cleaning machine bridge to the pump house and shortening the length of the diversion wall between the sluice and the pumping station were proposed, and the flow pattern in the forebay under different schemes was analyzed based on the numerical calculation results, the uniformity and average angle of the cross-sectional flow velocity distribution after the inlet of the inlet conduit of each pump unit were compared, and finally the numerical calculation results were verified by the method of hydraulic overall model test.

The research results show that there was a reflux vortex area in the original forebay before the inlets of inlet conduits of No. 4 and No. 5 pump units of the Liushan Pumping Station in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project, and a harmful suction vortex was generated before the inlet of inlet conduit of No. 4 pump unit. In the improvement scheme of forebay, the cleaning machine bridge was moved by 25 m to the pump house as a whole, and the length of the diversion wall between the sluice and the pumping station was shortened so that its head was level with the pier of cleaning machine bridge. The range of the swirl flow in the forebay was effectively compressed and the intensity of the swirl flow was weakened. Not only the harmful suction vortex at the inlet of the inlet conduit of No. 4 pump unit was eliminated, but also the uniformity of the flow velocity distribution at the inlet of the inlet conduit of No. 4 pump unit was increased by 2.5% on average, and the inlet flow pattern of the pump station was significantly improved. The on-site operation of the Liushan Pumping Station over the years shows that there is no bad flow pattern in the forebay under the conditions of different start-up combinations, and the pumps operates steadily.

The position of the suction vortex before the inlet of the inlet conduit is accurately predicted by the method of numerical simulation of the forebay flow field in project of pumping station with parallel sluice, and the numerical calculation results are basically consistent with the model test results and field observation results. The problem of the flow pattern in the forebay is solved by adjusting the position of the pier of the cleaning machine bridge of the pumping station without adding measures such as bottom sill, column and diversion pier. The research results can provide reference for the same type of engineering research.

Key words: pumping station with parallel sluice; forebay; flow pattern; pier of cleaning machine bridge; numerical simulation; model test