

# 秦淮新河泵站前池流态改善措施研究

刘建龙<sup>1</sup>,李志爽<sup>2</sup>,陈书宁<sup>1</sup>,薛 铮<sup>1</sup>,王翹楚<sup>1</sup>,成 立<sup>2</sup>

(1. 江苏省秦淮河水利工程管理处,江苏 南京 210000; 2. 扬州大学 水利科学与工程学院,江苏 扬州 225100)

**摘要:**采用CFD数值模拟方法,以秦淮新河泵站为研究对象,开展泵站前池流态分析及改善措施的数值模拟研究。结果表明在超低水位工况下,前池导流墩附近存在大面积的回流区影响边机组的进水条件,导致导流墙边机组的流速均匀度和加权平均角远低于其他机组。增设圆形通水孔和“Y”形导流墩均可改善前池内的流态,消除导流墙附近的不良流态,提高边机组的流速均匀度及加权平均角,研究成果可为同类泵站优化改造提供参考。

**关键词:**泵站; 前池; 流态; 整流措施; 数值模拟

中图分类号:TV675

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)12-0024-0006

## Research on improvement measures of flow pattern in fore bay of Qinhuaxinhe Pumping Station

LIU Jianlong<sup>1</sup>, LI Zhishuang<sup>2</sup>, CHEN Shuning<sup>1</sup>, XUE Zheng<sup>1</sup>,  
WANG Qiaochu<sup>1</sup>, CHENG Li<sup>2\*</sup>

(1. Management Division of Qinhuai River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210000, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

**Abstract:** Using the CFD numerical simulation method and taking the Qinhuaxinhe Pump Station as the research object, a numerical simulation study on the flow pattern analysis and improvement measures of the forebay of the pump station is carried out. The results show that under the condition of ultra-low water level, there is a large area of recirculation zone near the diversion pier of the fore bay, which seriously affects the water inlet condition of the side unit, resulting in the flow velocity uniformity and weighted average angle of the side unit being much lower than that of the other units. The addition of circular water holes and Y-shaped diversion pier can improve the flow pattern in the fore bay, eliminate the bad flow pattern near the diversion wall, and improve the flow velocity uniformity and weighted average angle of the side unit. The research results can provide a reference for the design and transformation of pumping stations.

**Key words:** pumping station; fore bay; flow pattern; rectification measures; numerical simulation

秦淮新河泵站属于典型的感潮河段泵站,水位升降取决于长江径流变化,兼受潮汐、支流入流和汛期的影响<sup>[1]</sup>,长江潮位直接影响泵站的入流条件,特别是受泵站与水闸中间分隔墩的影响,加之长江低潮位影响,导致前池内流态紊乱,降低机组的性

能和运行稳定性<sup>[2-3]</sup>。

针对如何改善泵站前池的流态,相关学者进行了大量研究。张聪聪等<sup>[4]</sup>通过增设“Y”形导流墩成功地改善了前池内的流态,并进一步分析了不同尺寸和位置“Y”形导流墩的整流效果,提出合理尺寸

收稿日期:2024-09-19

基金项目:江苏省水利科技项目(2022017)

作者简介:刘建龙(1982—),男,正高级工程师,主要从事水利工程建设与运行管理工作。E-mail:20846457@qq.com

通信作者:成立(1975—),男,教授,博士,研究方向为泵站工程。E-mail:chengli@yzu.edu.cn

建议。相关研究采用正交试验和CFD方法探索了导流墩的参数优化,分析了不同参数组合下导流墩的流动特性。张从从等<sup>[5]</sup>为探究开孔数量和尺寸对导流墩整流效果的影响,采用模型试验方法对6种方案进行对比分析,得出最优方案,为开孔导流墩设计提供了参考。

泵站机组振动不仅与泵装置本身性能有关,当泵站流道进口处出现超低水位工况时,机组更易出现进水漩涡,严重危及泵站机组运行<sup>[2]</sup>。特别是近年来泵站冬季非汛期引水运行时,长江水位长年偏低,前池中会出现旋涡、回流等恶劣流态,导致水泵淹没深度减小,汽蚀加剧,当前池水位低于最低运行水位时,前池内回流漩涡现象加剧,可能对水泵性能造成一定影响。因此,开展秦淮新河泵站前池流态改善措施研究具有一定意义。

## 1 计算方法

### 1.1 流动控制方程

秦淮新河泵站前池内部流动为不可压缩流动,可以忽略热交换。本文采用CFD技术分析前池内的湍流流动,计算式为

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

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_i) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $u_i$ 为 $x_i$ 方向上流体速度分量; $g$ 为重力加速度; $\rho$ 为密度; $p$ 为压力; $v$ 为运动黏性系数; $v_i$ 为湍动黏性系数。

### 1.2 湍流模型

大量工程实践表明,RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型能够更好地预测复杂的湍流运动。因此,本文选用RNG  $k-\varepsilon$ 模型,计算式为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon)$$

(4)

式中: $k$ 为湍流动能; $\varepsilon$ 为湍流耗散项; $\mu_{eff}$ 为有效湍动黏度; $\alpha_k$ 、 $\alpha_\varepsilon$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 为常数, $C_1=1.42$ , $C_2=1.68$ , $\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.39$ ; $C_\mu$ 、 $\beta$ 为模型常数, $C_\mu=0.0845$ , $\beta=0.012$ ; $\eta_0$ 为湍流时间尺度与平均湍流时间尺度之比在均匀剪切流中的典型值, $\eta_0=4.377$ 。

### 1.3 研究对象

秦淮新河泵站安装5台卧式轴流泵机组,水泵型号为1700ZWSQ10-2.5。采用UG12.0软件,建立

了秦淮新河泵站全过流系统的水体模型,具体包括前池、进水流动道、前导叶、叶轮、后导叶和出水流动道等结构,计算域的水体模型如图1所示。

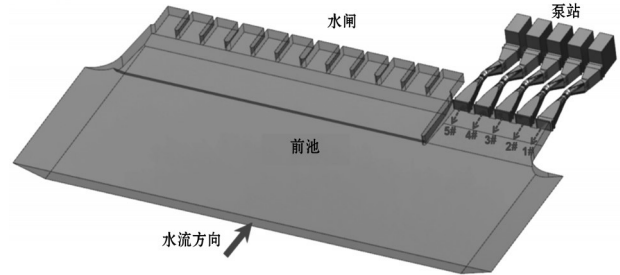
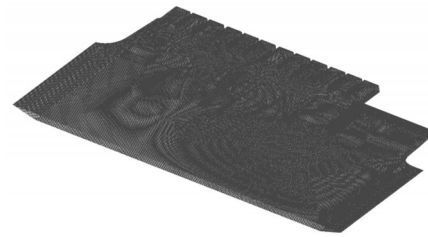


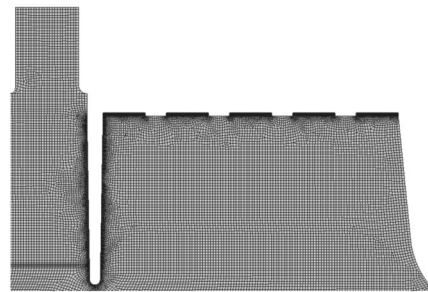
图1 泵站三维计算域

### 1.4 网格剖分

采用ANSYS软件的MESH模板,对泵站全过流系统的水体模型进行六面体结构化网格剖分,同时对流速变化大的区域进行壁面加密处理。其中,前池网格示意图见图2。



(a) 前池



(b) 导流墙及泵装置进口加密处

图2 泵站前池网格示意

在数值计算过程中,计算域的网格结果至关重要,直接影响计算结果。因此,本文以进水流动道的水力损失为变量,开展网格无关性分析。网格无关性分析的结果见图3,由图3可知,当计算域网格超过2 070万个,进水流动道水力损失无明显变化,故本文采用此网格数量作为后续计算的网格。

### 1.5 边界条件

计算域进口设置在前池的进口断面,采用总压进口条件,数值为101 325 Pa。计算域出口设置在

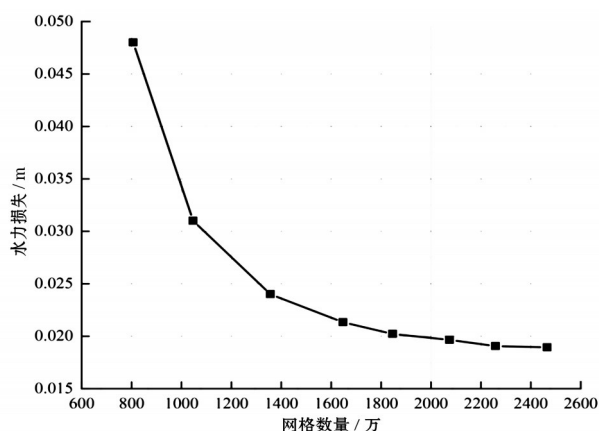


图3 网格无关性分析结果

出水通道延伸段的出口断面,采用质量流量出口条件,数值根据工况设定。不同子域之间通过GCI传递信息。其中,前导叶、叶轮和后导叶之间的交界面选用Frozen Rotor交界面,其他子域之间选用none交界面,自由液面选用Symmetry条件,所有壁面设置为无滑移条件。在数值计算过程中,采用二阶迎风格式,迭代步数为1 500步,收敛精度为 $1 \times 10^{-6}$ 。

## 2 前池流态现状分析

### 2.1 典型断面选取

在前池水位2.5 m的条件下,研究秦淮新河泵站现状方案下前池内部流动特征。为此,剖分了3个水平断面,分别用于分析前池表层、中层和底层的流动特征。图4为前池内水平断面的示意图,表层距离前池底板2.45 m,中层距离前池底板1.25 m,底层距离前池底板0.05 m。

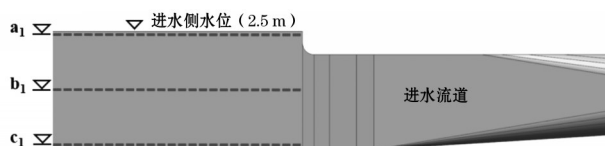


图4 前池剖面示意

### 2.2 前池流态分析

在前池水位为2.5 m的工况下,前池底层、中层和表层流线及其速度云图如图5所示。从图5可以看出,当泵站运行时,当前池内水流流经导流墙前端时,会产生一个大尺度的回流区,该回流区从表层延伸至底层,严重影响前池内的水流流态。在回流区中心范围,存在小范围的低速区。在旋涡挤压作用下,旋涡中心左侧则出现小尺度的高速区,在主流及旋涡的联合作用下,旋涡中心右侧则存在大尺度的高速区。同时,导流墙前端回流区的范围超

过单个进水通道进口断面,严重挤压前池内的主流,使得靠近导流墙进水通道的流线严重偏移,并导致4#和5#机组进口处的入流角度远小于 $90^\circ$ ,而远离导流墙回流区的1#~3#机组的进水流态相对较好。此外,沿着前池水深的下降,导流墙附近低速区的范围逐渐减小,而高速区范围逐渐增大。相比表层和中层流态,底层处的旋涡尺度有所减小。

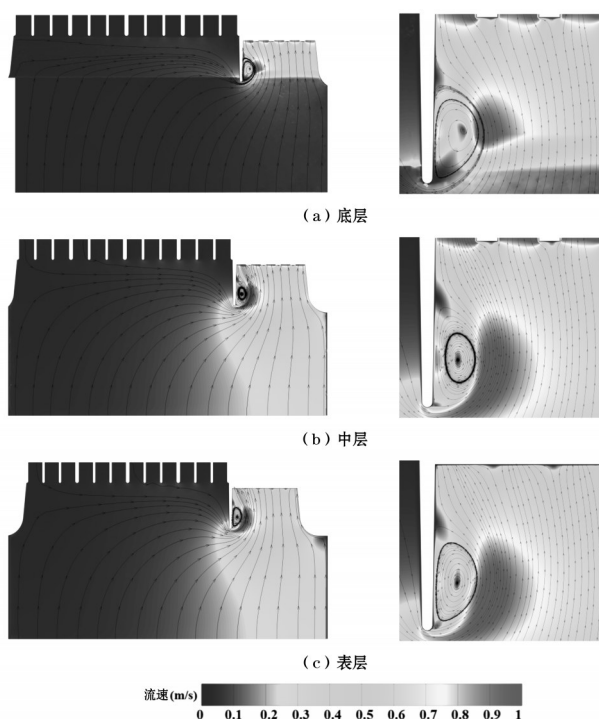


图5 2.5 m水位流线及速度云图

在定性分析秦淮新河泵站进水流态的基础上,定量分析前池内的流态也尤为重要。图6为5台机组进口断面的流速均匀度和加权平均角。从图6可知,5台机组中,1#机组进口断面的流速均匀度和加

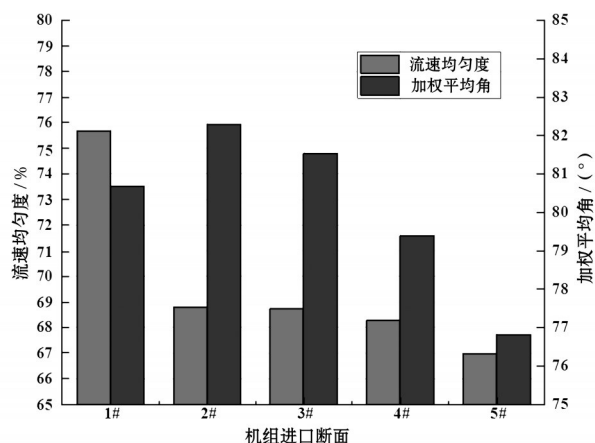


图6 现状方案下机组进口断面的流速均匀度及加权平均角



权平均角相对较好,这是因为该机组离导流墙附近的回流区最远。对于5#机组而言,由于受回流区的影响最大,所以进水水道进口的流速均匀度和加权平均角最小。此外,水泵机组越靠近导流墙,其流速均匀度和加权平均角也就越低。

### 3 前池流态改善措施研究

#### 3.1 在导流墙开圆形通水孔

通过上述研究发现秦淮新河泵站现状方案下前池内存在大尺度的回流区,不良流态会影响进水水道的进水条件。为了减弱前池内不良流态对泵站机组的影响,有必要探索消涡的工程措施。

圆形通水孔的几何尺寸和位置尺寸见图7,圆形通水孔的半径为0.1 m,横向间距为1 m,纵向间距为1 m。在导流墙上开圆形通水孔,可以利用射流原理,将水闸前方的死水区高速流入导流墙右侧的回流区,射出的高速水流可以破坏低速回流区,使得该回流区的回流尺度有所减弱。

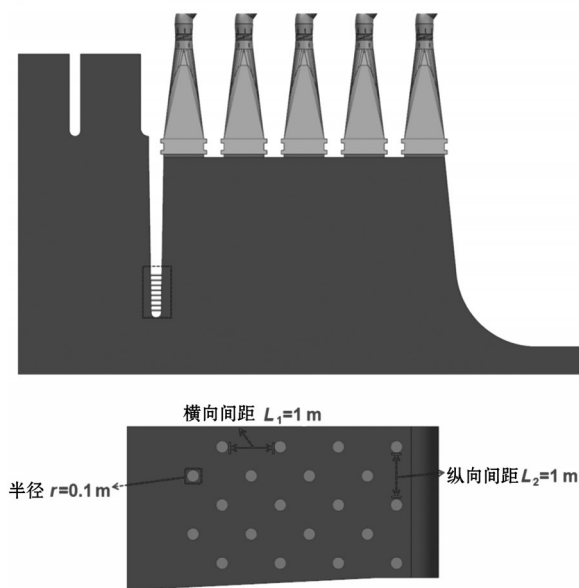


图7 圆形通水孔位置及结构示意

在增加圆形通水孔后,前池水深2.5 m工况下,底层、中层和表层流线及其速度云图如图8所示。结合图5可以看出,在导流墙增设圆形通水孔后,圆形通水孔内的水流高速流出,冲击导流墙右侧的回流区,使得回流区的尺度缩小。此外还可以发现,水流经过圆形通水孔后,原回流区左侧的高速区转变为低速区,并冲击了回流区的旋转强度,使得回流尺度大幅度缩小。同时,旋涡右侧高速区基本消失,前池内水流流速分布基本均匀。

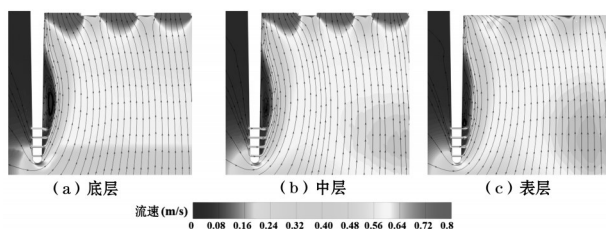


图8 增设圆形通水孔后前池不同断面上的流线及流速云图

在导流墙开圆形通水孔后,5台机组进口断面的流速均匀度和加权平均角如图9所示。结合图6的分析可知,与现状方案相比,增设圆形通水孔后,所有机组进口断面的流速均匀度和加权平均角得到不同程度的提高。1#机组进口断面的流速均匀度和加权平均角分别提高了1.1%和0.1°,2#机组进口断面的流速均匀度和加权平均角分别提高了2.0%和0.2°,3#机组进口断面的流速均匀度和加权平均角分别提高了2.1%和0.2°,4#机组进口断面的流速均匀度和加权平均角分别提高了1.9%和1.1°,5#机组进口断面的流速均匀度和加权平均角分别提高了2.4%和1.0°。由此可知,圆形通水孔对5#机组水力性能的提升相对最大,其次是2#、3#和4#机组,最后是1#机组。

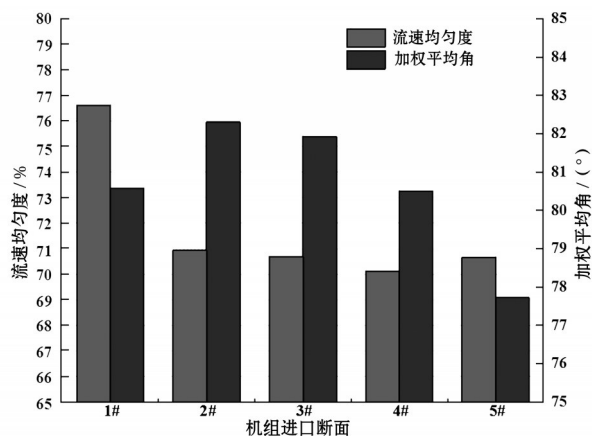


图9 增设圆形通水孔后机组进口断面的流速均匀度和加权平均角

综上所述,在导流墙上开圆形通水孔,可以利用射流原理,将水闸前方的死水区高速流入导流墙右侧的回流区,射出的高速水流可以破坏低速回流区,使得该回流区的回流尺度有所减弱,并明显提高进水水道进水断面的流速均匀度和加权平均角。

#### 3.2 在导流墙附近布置“Y”形导流墩

除了在导流墙增加圆形通水孔后,在其附近布置“Y”形导流墩也是一种有效的工程消涡措施。“Y”

形导流墩可以将来流分成2股,左侧来流与导流墙交互作用,可以缩小回流区范围,右侧来流随主流平顺流入进水流动。图10为“Y”形导流墩的几何参数,可以看出,“Y”形导流墩距离导流墙3.5 m,并由3段直导流墩组成,每段导流墩的宽度为0.2 m,迎水面导流墩长度为1.2 m,两侧导流墩长度为1.2 m,其夹角为60°。

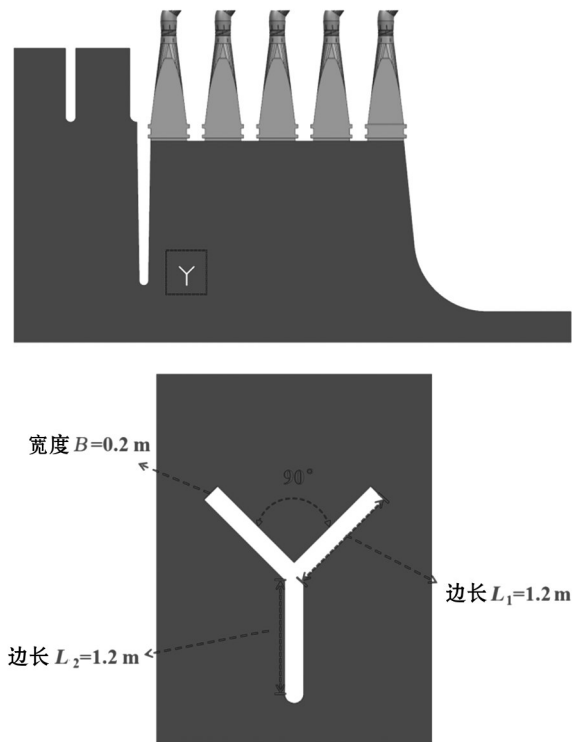


图10 “Y”形导流墩几何参数

在增加圆形通水孔后,前池水深2.5 m工况下,底层、中层和表层流线及其速度云图如图11所示。相比于现状方法,前池内水流在流经导流墙和“Y”形导流墩后,原来大尺度的回流区变为2个较小尺度的回流区。由于水闸前方的水流绕过导流墙后与“Y”形导流墩左侧的来流相互掺杂,所以在导流墙和“Y”形导流墩之间形成了小范围的回流区。此外,在卡门涡街的作用下,前池内主流经过“Y”形导流墩后,在其后方形成了小尺度的回流区。在2个

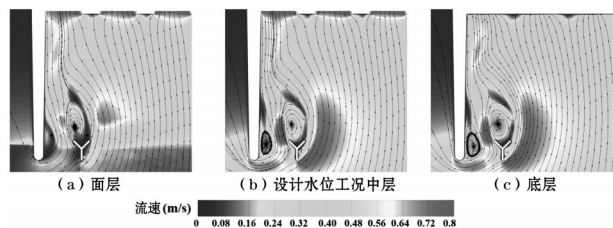


图11 增设“Y”形导流墩后前池不同断面上的流线及流速云图

旋涡和主流的挤压作用下,在“Y”形导流墩两侧后方形成了2个高速区。可见,“Y”形导流墩可以明显缩小回流区的范围,并适当改善池内流速的分布。

在前池内增设“Y”形导流墩后,5台机组进口断面的流速均匀度和加权平均角如图12所示。在前池内布置“Y”形导流墩后,所有机组进口断面的流速均匀度都有所提高,而部分机组的加权平均角略有降低。1#机组进口断面的流速均匀度提高了0.4%,而加权平均角降低了1.0°。2#机组进口断面的流速均匀度提高了1.5%,而加权平均角降低了0.8°。3#机组进口断面的流速均匀度提高了2.5%,而加权平均角降低了0.7°。4#机组进口断面的流速均匀度提高了1.9%,而加权平均角降低了0.2°。5#机组进口断面的流速均匀度提高了7.9%,加权平均角提高了1.2°。由此可知,“Y”形导流墩可以提高所有机组进口断面的流速均匀度,但是会略微降低1#机组—4#机组进口断面的加权平均角,“Y”形导流墩对5#机组的流速均匀度和加权平均角提高最大,但是对1#机组—4#机组进口断面的加权平均角有一定的影响。

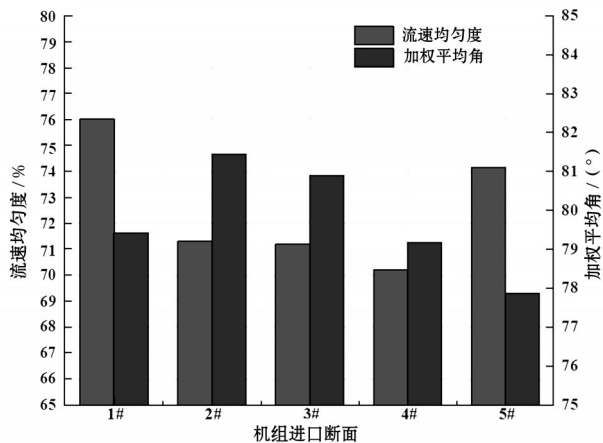


图12 增设“Y”形导流墩后机组进口断面的流速均匀度和加权平均角

## 4 结 论

本文以秦淮新河泵站为研究对象,采用CFD数值模拟方法,研究了泵站前池内的进水流态及其改善措施。主要结论如下:

(1)受长江潮位的影响,在超低水位(2.5 m)工况下,导流墙右侧的回流范围较大,水流在导流墙右侧生成低速区,从而导致靠近导流墩的4#机组和5#机组的流速均匀度和加权平均角远低于其他机组。

(2)增设圆形通水孔,利用圆孔射流的原理,使

得导流墙右侧回流区的范围明显缩小,5#机组进口断面的流速均匀度及加权平均角分别提高了2.4%和1.0°,并在一定程度上也提高了其他机组的相应指标。

(3)增设“Y”形导流墩,利用导流和分流原理,可以消除导流墙附近的大尺度旋涡,5#机组进口断面的流速均匀度及加权平均角分别提高了7.9%和1.2°,但是略微降低了其他机组的加权平均角。

#### 参考文献:

[1] 黄竞争,张先毅,吴峥,等. 长江感潮河段潮波传播变化

特征及影响因素分析[J]. 海洋学报,2020,42(3):25-35.

[2] 童建伟. 秦淮新河泵站偏离设计工况运行分析与对策[J]. 江苏水利,2023(3):57-60.

[3] 朱明成,苏福,滕娟,等. 感潮河段支流口门枢纽局部流态优化试验研究[J]. 水运工程,2021(6):110-114.

[4] 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,2020,18(3):192-200.

[5] 张从从,韦爱群,李金宝,等. 基于模型试验的导流墩对闸站合建工程通航水流条件的影响研究[J]. 江苏水利,2019(4):13-17.

(上接第23页)

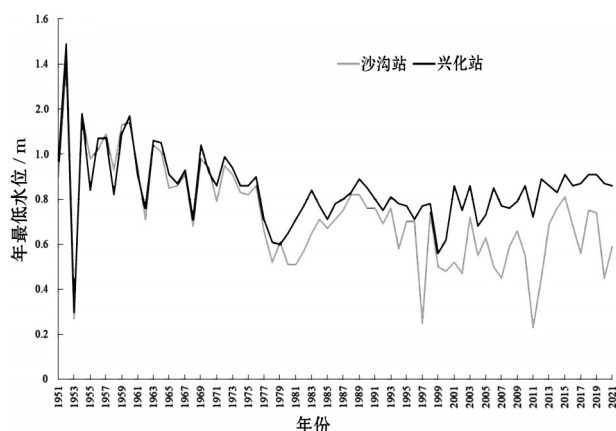


图3 沙沟站与兴化站全系列逐年最低水位统计

站水位为0.7 m,呈偏旱趋势,因此兴化站旱限水位考虑范围为0.8~0.9 m。

#### 3.3.5 综合分析

旱限水位的设定,综合考虑最低通航水位、区域内城乡居民生活用水需要、工农业生产用水及生态用水需求,建议兴化站旱限水位设定为0.9 m。

## 4 结 语

本次防汛抗旱特征水位分析采用里下河兴化站1950—2021年和2001—2021年系列水位资料进行水文分析,具有较好的代表性、一致性和可靠性,成果符合里下河现状工情和水情。本文通过复核论证分析,核定里下河兴化站警戒水位为2.0 m,保证水位为3.0 m,旱限水位为0.9 m(均为废黄河基面)。复核成果通过相关审查,可为地区和水利工

程管理单位制定防汛抢险应急预案、及时发布预警信息、启动应急抢险预案提供重要依据,对防汛抗旱组织指挥和调度决策具有一定的参考价值。

防汛抗旱特征水位确定方法目前尚无统一的技术标准和相关规范,现有核定手段侧重水文要素成果与调查评价成果的结合,具有一定的科学性和合理性。本文主要以淮河流域里下河地区的实际情况为出发点,通过水文分析、水情特性并结合当地经验,综合确定了该地区的特征水位。确保防汛安全和用水安全至关重要,建议定期复核相应特征水位,组织制定相关规范,科学指导特征水位复核工作。

#### 参考文献:

[1] 季海萍,王凯燕,刘敏. 太湖流域河网地区防汛特征水位合理性分析与建议[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(11):49-53.

[2] 孙勇. 里下河地区除涝排水优化规划研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[3] 于飞龙,刘月,严锋,等. 秦淮河流域东电站防汛特征水位复核分析[J]. 江苏水利,2020(5):13-17.

[4] 王凯. 浮渡河行洪能力及防汛特征水位研究[J]. 吉林水利,2020(3):16-20.

[5] 梅海鹏,王振龙,刘猛,等. 洪泽湖近50 a特征水位变化规律及影响因素[J]. 长江科学院院报,2021,38(1):35.

[6] 李结华,王超,杨勇. 南京主要控制站防汛特征水位核定研究[J]. 水利规划与设计,2021(1):27-30.

[7] 朱大伟,仲晓林,赵勇,等. 里下河地区洪涝调度方案优化研究[J]. 江苏水利,2017(10):44-47.