

泵站锥形侧向进水前池水流流动特性分析

顾春雨¹, 薛士平², 杨晓红¹

(1. 江阴市水利工程公司, 江苏 无锡 214431;

2. 江阴市新桥水利农机管理服务站, 江苏 无锡 214426)

摘要: 结合泵站锥形侧向前池工程设计, 应用大型商业软件建立其三维数学模型, 基于 CFD 数值模拟技术, 分析了泵站锥形侧向前池水流流动特性。结果表明, 水流经过锥形侧向前池折向弯曲进入进水池, 前池流态较为平顺, 但进水池水流主流偏向一侧, 形成较大回流区, 低流速分布范围较广; 水流进入 1# 至 4# 进水池时弯曲程度越大, 进水池断面流速分布均匀度越来越小, 甚至出现负值, 会降低水泵机组工作效率; 当泵站设计采用锥形侧向前池时, 进水池水流流态需要通过工程措施整流, 或创新设计新型进水池。

关键词: 泵站; 锥形侧向前池; 流动特性; 数值模拟

中图分类号: TV131 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2017) 02-0017-04

Analysis of the flow characteristics in the conical forebay with side-intake of the pump station

GU Chunyu¹, XUE Shiping², YANG Xiaohong¹

(1. Jiangyin Irrigation Works Company, Wuxi 214431, Jiangsu;

2. Xinqiao Agricultural Water Management Service Station of Jiangyin, Wuxi 214426, Jiangsu)

Abstract: Combined with the design of the conical forebay with side-intake of pump station, three-dimensional mathematical model with large commercial software is established. Based on the CFD numerical simulation technology, the flow characteristics of the water flow in the conical forebay with side-intake of the pump station are analyzed. The results showed that the water flow through forebay with side-intake fold to enter the water inlet by bend, the flow of the conical forebay with side-intake are more smoothly, but the mainstream flow into side of the conical forebay with side-intake, a large recirculation zone is formatted. Low velocity distribution is in wide range. When the bending degree of water flows into the 1# to 4# is bigger and bigger, the distribution of flow velocity in the water inlet section is smaller and smaller, and even negative value will decrease the working efficiency of the pump. When the pump station is designed with the conical forebay with side-intake, the flow pattern of the water inlet needs to be rectified by engineering measures or innovative design of the new type of the water inlet.

Key words: pump station; conical forebay with side-intake; flow characteristic; numerical simulation

0 引言

泵站进水前池一般分为正向进水前池和侧向

进水前池^[1]。在地形条件受到限制、前池无法采用正向进水布置情况下, 往往采取侧向进水前池^[2]。侧向进水前池布置型式有三种型式, 分别为锥形、

收稿日期: 2016-11-14

作者简介: 顾春雨 (1980-), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利工程施工与管理工作。

曲线型、双侧向前池。锥形侧向前池的特点是流量沿程减小,其过水断面相应缩小,以保证池中流速和水深基本不变,但受惯性力的影响,前池及进水池易产生回流及漩涡,影响水泵性能,降低水泵机组工作效率^[3]。关于侧向前池水流流动状况,有关学者通过数值模拟展示了侧向前池的流态和流速分布,提出了可行性的整流措施^[4-5],但有关锥形侧向前池的水力设计及优化,并无经验公式,需要通过水工模型试验验证或CFD数值模拟计算。

1 CFD数值模拟特点

CFD数值模拟特点是以描述该类物理或化学现象的理论方程为基础(代数、微分方程等),采用计算机,运用一定的数学方法加以离散与求解,最终得到一系列对工程实践具有指导意义的规律性的研究结果。分析、评估在给定条件下的工程设计合理性,并确定修正措施。

获得水流流动特性的主要手段是水工模型试验及CFD数值模拟计算。水工模型试验优点是真实可靠,能反映水工模型水流流动规律,缺点是周期长、费用高,且由于费用限制不宜全面反映水流流动细节。CFD数值模拟能快速全面反映模型水流流动细节,且计算精度随着CFD数值模拟技术多年发展越来越精确,已被很多模型实验所证明。对于采用锥形侧向进水前池的小型泵站,其水力设计及优化,借用CFD数值模拟技术可节省可观的建设成本。

2 工程案例分析

某小型泵站在规划设计时,由于站址附近居民小区多、古桥文物保护等原因,为了减少占地,节省工程投资,故采用锥形侧向进水方式。该泵站4台机组,设计流量为 $4\text{ m}^3/\text{s}$,站下设计水位 4.0 m ,底高程 1.1 m (吴淞高程,下同)。

2.1 三维建模及网格划分

根据该泵站引水建筑物布置情况,应用大型商用建模软件UG NX 6.0,按照1:1比例,建立泵站引水渠、锥形侧向前池及进水池区域水流三维物理模型,如图1所示。

网格划分采用ICEM CFD软件。ICEM CFD是世界上顶级的网格划分工具之一,为绝大多数

CAD与CAE提供软件接口,快速提供高质量网格格式和求解器支持能力,允许快速创建四面体网格和多块结构或非结构六面体网格。对该泵站引水渠、锥形侧向前池及进水池水流区域划分为结构化网格,结构化网格优点是网格质量高,计算时间短,更容易收敛,更能迎合流场方向,离散误差小,能提高计算精度及准确度。



图1 泵站三维水流模型

本工程网格单元数为172066,节点数为155102,网格质量决定性评价指标0.45以上,该模型网格质量为优。进水池结构化网格,见图2所示。

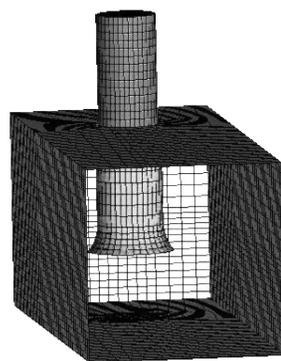


图2 进水池三维结构网格

2.2 控制方程及边界条件设置

控制方程采用三维雷诺时均N-S方程来描述不可压缩湍流流动,方程式如下:

$$\text{连续性方程: } \partial(\rho \bar{u}_i) / \partial x_i = 0$$

雷诺时均N-S方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

边界条件设置:在fluent计算中,采用Realizable(可实现) $k-\varepsilon$ 模型,一阶迎风格式;

进口设置为速度进口; 出口设置为 outflow (自由流出); 水流与空气接触面设置为 symmetry (对称); 枢纽所有边壁均设为无滑移壁面; 迭代残差值为 5×10^{-4} 。

湍流强度系数采用经验公式计算, 湍流强度系数公式为 $I=0.16Re^{(-1/8)}$, 其中 Re 为雷诺数。

2.3 计算结果分析

为更好的分析锥形侧向进水前池的水流流动规律, 设置两种计算工况: 4 台机组全部运行时为计算工况一; 只有 2# 与 3# 机组运行时为计算工况二, 进口流量为 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 3、图 4 分别为计算工况一时泵站表面水流流态示意图和流速分布云图。

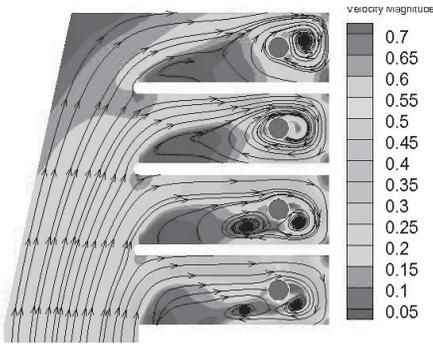


图 3 泵站 4 台机组运行时表面水流流态示意图

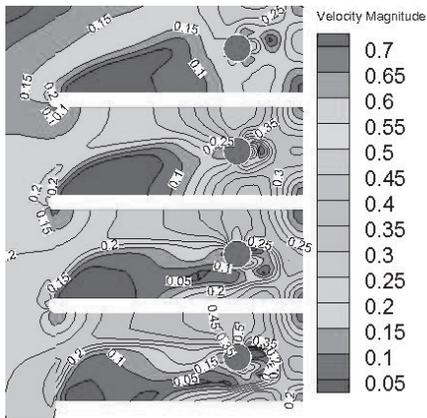


图 4 泵站 4 台机组运行时下表面水流流速分布云图

从图 3 中可以看出, 当泵站机组全部运行提水时, 水流经过锥形侧向前池折向弯曲进入进水池, 水流方向发生改变。锥形侧向前池水流流态较为平顺, 未出现不利的回流流态, 但池中流速分布范围为 $0.05 \sim 0.30 \text{ m/s}$ 之间, 流速分布难以均匀。进水池水流流态较为紊乱, 在水泵机组附近都出现了不同程度的回流, 这是由于水流折线弯曲进入进水池, 水流主流方向偏离进水池一侧, 在进水池后壁阻挡后形成回流, 回流范围包括进

水池后壁至偏离水流主流的区域, 回流范围较大。从图 4 流速分布图可以看出, 进水池流速范围为 $0.05 \sim 0.50 \text{ m/s}$, 流速分布不均匀, 影响水泵性能, 降低水泵机组工作效率, 甚至产生振动噪音。从流态和流速分布上看, 说明采用锥形侧向前池时, 水流方向发生折向改变, 进水池回流严重且流速分布不均匀, 进水池流态需要通过工程措施整流或者设计新型进水池。

当泵站机组只有 2# 和 3# 水泵机组工作, 即计算工况二时, 锥形侧向前池末端、1# 和 4# 进水池各出现一个回流区, 2# 和 3# 进水池回流区以及低流速分布区域也明显小于 4 台机组全部运行。图 5、图 6 为计算工况二时进水池水流流态示意图和流速分布云图。

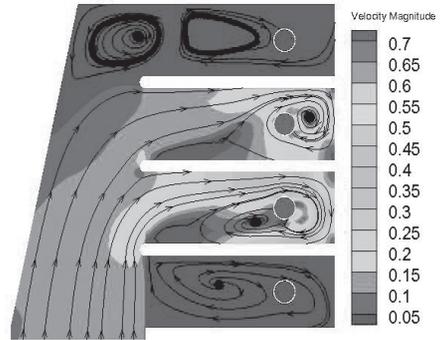


图 5 2#、3# 台机组运行时表面水流流态示意图

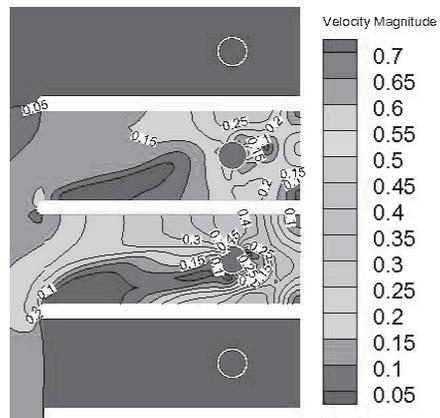


图 6 2#、3# 机组运行时下表面水流流速分布云图

从锥形侧向前池流态及流速分布图中还不能完全反映水流流入进水池后流速分布均匀性。为更好分析进水池水流动特性, 现引入水流流速均匀性水力目标函数 V_u , 分析进水池断面流速分布均匀性。取进水池进口 3 m 处断面, 导出流速分布数据, 该断面如图 7 所示。

速度分布均匀度 V_u 计算公式如下:

$$V_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{m}} \right] \times 100\%$$

式中:

\bar{u}_a —进口断面的平均轴向速度, m/s;

u_{ai} —进口断面各单元的轴向速度, m/s;

M—流场数值计算时刻该断面所划分的单元个数。

公式中断面平均轴向速度是指本文计算模型的 y 方向速度; 各单元的轴向速度是指本文模型所划分的每个网格单元面积速度; m 单元个数是指该模型所剖断面的网格数量。

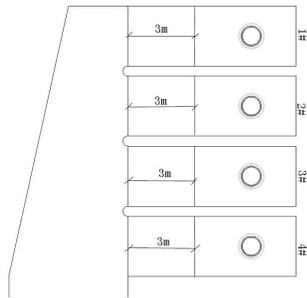


图7 进水池断面位置示意图

图8、图9分别为计算工况一、工况二时进水池断面流速分布云图。两种工况下该进水池断面

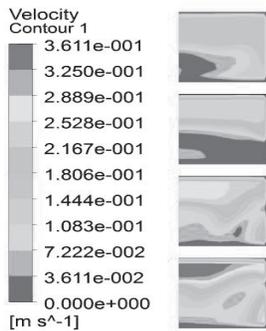


图8 工况一进水池断面流速分布云图

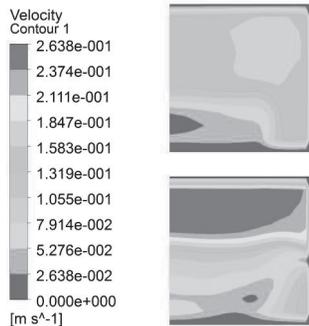


图9 工况二进水池断面流速分布云图

流速分布较为不均匀, 高流速区域分布范围与水流进入进水池主流方向一致, 低流速区域分布范

围偏离主流方向, 流速范围为 0.05 ~ 0.3 m/s 之间。其中计算工况二 2# 进水池断面流速分布均匀度明显好于计算工况一, 计算工况二 3# 进水池断面流速分布均匀度与工况一比较并不明显。

根据水流流速均匀性水力目标函数公式, 通过 Matlab 编程, 导入断面 Excel 表格数据, 计算各工况断面流速分布均匀度。表 1 中计算工况一 1# ~ 4# 进水池断面流速分布均匀度逐渐减小, 3# 与 4# 进水池断面流速分布均匀度均出现负值, 其中 4# 负值最大, 这是由于各个进水池水流流态中出现回流, 回流区水流流向与进口水流流向相反, 根据断面水流流速分布均匀度公式, 故流速分布均匀度出现负值。计算工况二中 2# 进水池流速分布均匀度最大, 是由于 2# 进水池水流流态最好, 低流速分布区域范围最小; 3# 进水池断面流速分布均匀度出现了负值, 这表明水流流向程度越小, 断面流速分布均匀度越大; 反之, 越小。

表1 各计算工况下进水池断面流速分布均匀度

运行	机组	1#	2#	3#	4#
4台		0.3608	0.0037	-0.072	-0.3786
2#、3#		/	0.3983	-0.1057	/

3 结语

(1) 水流经过锥形侧向前池折向弯曲进入进水池, 前池流态较为平顺, 但进水池水流主流偏向一侧, 形成较大回流区, 低流速分布范围较广。

(2) 水流进入 1# ~ 4# 进水池时弯曲程度越大, 进水池断面流速分布均匀度越来越小, 甚至出现负值, 会降低水泵机组工作效率。

(3) 当泵站设计采用锥形侧向前池时, 进水池水流流态需要通过工程措施整流, 或创新设计新型进水池结构。

参考文献:

[1] 刘超. 水泵与水泵站 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2003: 162-173.

[2] GB50265-2011, 泵站设计规范 [S].

[3] 丘传忻. 取水输水建筑物丛书—《泵站》[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 380-390.

[4] 张亚莉, 宋世露, 等. 泵站侧向进水前池整流措施数值模拟 [J]. 中国农村水利水电, 2016, 5: 117-120.

[5] 高传昌, 黄金伟, 等. 泥沙泵站侧向进水前池流场的数值模拟 [J]. 中国水运, 2007, 07(9): 81-83.

(责任编辑: 王宏伟)