组合整流措施对复杂泵站流道的流态优化研究

张怀远

同济大学土木工程学院,上海

收稿日期: 2022年9月9日; 录用日期: 2022年9月19日; 发布日期: 2022年11月16日

摘要

受限于城市用地规模、地形等因素,我国城市排水泵站流道的设计趋于复杂,普遍具有流道深、狭长的特点。这导致泵站进水流道存在回流、流速分布不均匀等不良流态,影响泵站稳定运行。本文以上海市临平排水泵站为实例,采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术,对该泵站进水流道的流态进行模拟并提出流态优化方案。研究结果表明:未经过整流的泵站进水流道会产生大面积的回流、横向流动,影响泵站的稳定运行。通过加设底坎和导流墩的组合整流措施,回流问题得到明显改善,前池回流区显著减小,流速横向偏差值也控制在合理范围内。同时,组合整流措施可以使泵站进水流道的湍流动能耗散更加充分,使水流有效消能,保障泵站机组的稳定运行。

关键词

泵站,流道设计,流态优化,数值模拟

Research on Flow Optimization of Complex Urban Pumping Station Flow Paths by Combined Rectification Measures

Huaiyuan Zhang

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Sep. 9th, 2022; accepted: Sep. 19th, 2022; published: Nov. 16th, 2022

Abstract

Limited by the size of the urban site, the design of flow paths in China's urban drainage pumping stations is becoming more complex, generally with deep, narrow and long flow channels. This leads to the existence of backflow, uneven flow velocity distribution and other undesirable flow patterns in the inlet channel of the pumping station, which affect the stable operation of the pumping station. This paper takes Shanghai Linping drainage pumping station as an example, uses Computational Fluid Dynamics technology to simulate the flow pattern of the inlet channel of the pumping station, and proposes a targeted optimization solution. The results of the study show that unrectified pumping station inlet channels produce large areas of backflow and lateral flow, which affects the stable operation of the pumping station. Through the combined rectification measures of adding a bottom sill and deflector piers, the backflow problem has been significantly improved and the lateral deviation of the flow velocity has been kept within a reasonable range. At the same time, the combination of rectification measures can make the turbulent energy dissipation in the inlet channel of the pumping station more adequate, so that the water flow effectively dissipates energy to ensure the stable operation of the pumping station.

Keywords

Pumping Station, Flow Path Design, Flow Optimization, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> CC Open Access

1. 引言

泵站进水流道由进水池、前池和吸水室组成,前池是连接进水池和吸水室的泵站建筑物,前池设计 的合理与否关系到水流能否平稳且均匀地进入吸水室,从而影响泵站机组的稳定与安全[1]。泵站进水流 道不合理会导致回流、横向流动等不良流态,引发气蚀,对泵站运行造成负面影响[2]。

我国城市排水泵站的设计与建造以《泵站设计规范》[3]为依据。在设计前池进水流道时,通常要考 虑将流道渠线设计得尽可能顺直。目前城市排水泵站的布局受到城市用地指标、地形等因素的限制,进 水流道的设计偏狭小,多弯道,水流在进水流道中不能充分扩散,容易产生涡流、水面超高、流速分布 不均等不良流态[4]。因此,在城市泵站设计的过程中分析其进水流道流态并提出合理的整流方案是极其 必要的。通过采取一定的整流措施,来改善泵站前池进水流道的水流条件,从而在既有条件下改善流态, 提高泵站机组运行效率[5]。

随着计算流体力学(CFD)技术的发展,越来越多的研究人员将 CFD 与实际工程设计相联系,用计算 机模拟技术来辅助排水泵站流道设计。

上海市临平排水泵站位于上海市虹口区,其设计建造受到地形、用地指标的限制,流道狭长,转角 较大,属于典型的复杂泵站流道。本文以临平泵站为研究对象,采用 Flow-3D 软件对其进水前池流态进 行模拟,并研究分析导流墩和底坎的组合整流措施对城市复杂泵站流道流态优化的效果,为泵站前池流 道设计提供依据。

2. 数值计算模型

2.1. 控制方程与湍流模型

在泵站的数值模拟过程中,选取不同的湍流模型会对计算结果产生较大影响。

在泵站流态的优化研究中,通常采用 k-ε 湍流模型进行数值模拟。k-ε 湍流模型分为标准 k-ε 模型、 Realizable k-ε 模型以及 RNG k-ε 模型。Cheng Li、Liu Chao、Zhou Jiren 等[6]采用 RNG k-ε 模型对泵站前 池内的流场进行了模拟,研究结果表明标准 k-ε 模型和 Realizable k-ε 模型对表面涡、附底涡和附壁涡的 位置预测比较精准,而对于旋涡形态的预测,Realizable k-ε 模型更有优势[7] [8] [9] [10]。在泵站前池进 水流道的模拟计算中,回流、漩涡的位置更为重要,因此,在 Flow-3d 的模拟计算中选用标准 k-ε 模型, 可以比较准确的预测出不良流态出现的位置及其形态。

连续性方程、动量方程、k-ε双方程分别为:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho v_i \right) = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = \frac{\partial \left[\mu_e \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right]}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + S_i$$
(2)

k-ε 双方程:

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

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]}{\partial x_j} + \rho\frac{\varepsilon}{k}(C_1P_k - C_2\varepsilon)$$
(4)

式中: ρ 为流体密度;t为时间; $x_i \ x_j$ 均为位置矢量, $v_i \ v_j$ 为平均相对速度分量; $\mu_e \ S_i$ 分别为有效 粘性系数和动量源项;k为紊流脉动动能, ε 是紊流脉动动能的耗散率; $\mu_i \ P_k$ 分别为湍流粘性系数和湍流 动能生成项; $\sigma_k \ \sigma_s$ 分别为 $k \ \varepsilon$ 方程的湍流普朗特数,取 1.0、1.3; $C_1 \ C_2$ 为系数,分别取 1.44、1.92。

2.2. 边界条件与网格划分

临平泵站共有水泵 8 台,单泵设计规模为 3.75 m³/s,水泵平均扬程为 7.37 m。图 1 为临平泵站前池 平面布置图,图 2 为前池侧视图,图 3 为泵站流动区域模型图。顺水流方向从右至左将前池编号为 A、B; 顺水流方向将水泵编号为 1#、2#、3#、4#、5#、6#、7#、8#。

进口边界采用体积流量进口边界,出口边界取在水泵吸水管喇叭口处,采用体积流量出口。对于壁 面区的流动采用标准壁面函数法处理。

在 CFD 模拟计算中,对于自由表面边界的处理很大程度影响了模拟的结果。大部分研究采用刚盖假 定法处理自由表面以提高运算效率[11] [12] [13]。刚盖假定法适用于自由表面变化不大的流态模拟,而本 课题的研究对象临平泵站流道深、狭长,且存在较大转角,水面波动较大,刚盖假定法无法准确反映其 流态。而流体体积法(Volume of fluid, VOF)可以追踪气液界面,反映出水面波动,与实际流动情况更加吻 合。因此,采用 VOF 法模拟水气界面流动情况。体积分数方程为:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial_t} \left(a_q \rho_q \right) + \nabla \cdot \left(a_q \rho_q \boldsymbol{v}_q \right) = S_{aq} + \sum_{p=1}^n \left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right) \right]$$
(5)

其中, ρ_q 、 a_q 分别为第 q 相的物理密度、体积分数; v_q 为第 q 相的速度; 源项 S_{aq} 为零; \dot{m}_{pq} 和 \dot{m}_{qp} 分 别为 p 相到 q 相的传质和 q 到 p 相的传质。

计算区域采用结构化网格,在关键区域进行加密,如图4所示。







Figure 2. Side view of pumping station forebay 图 2. 泵站前池侧视图



Figure 3. Pumping station 3D model 图 3. 泵站 3D 模型图



Figure 4. Grid of pumping station 图 4. 泵站网格划分

通过计算从进水口到吸水室的水头损失,在保证计算精度的前提下提高运算效率,节省计算资源与 计算时间,如图 5 所示,最终得到合理的网格数约为 1.65 × 10⁷。



Figure 5. Verification of meshing independence 图 5. 网格无关性验证

水头损失的H_f的计算公式为;

$$H_{f} = \frac{V_{in}^{2} - V_{out}^{2}}{2g} + \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho g}$$
(6)

其中, V_{in}为进口断面平均流速, V_{out}为出口断面平均流速, P_{in}为进水口处压力, P_{out}为出口压力。

3. 计算结果及分析

3.1. 泵站前池流态的评价指标

本文采用美国 ANSI/HI 标准,该标准要求在距离水泵吸水管喇叭口中心线上游 3.5D 断面处平均流速 偏差的绝对值小于 30%。

为评价前池的横向流速分布均匀性,定义横向平均流速偏差 и_н* 为:

张怀远

$$u_{H}^{*} = \frac{|u_{i} - \overline{u}|}{\overline{u}} \times 100\%$$
⁽⁷⁾

其中, u_i为同一断面同一水深不同位置处的流速值; ū 为各测点流速的平均值;

3.2. 原设计方案流速与流态分析



Figure 6. Lateral distribution of flow rates at different depths 图 6. 不同深度流速横向分布图

图 6 为吸水喇叭口 3.5D 断面处不同高度流速横向分布以及垂向流速分布。当水流流经进水池进入前 池时,断面面积突然增大,以及前池底坡的作用,使得流速减小。由于水流惯性的作用,主流方向流速较 大,沿两侧边壁形成了较大范围的回流以及横向流动,容易引发气蚀,对水泵的平稳运行造成不利影响。

对前池各机组距吸水喇叭口 3.5D 断面处流速进行计算与分析如表 1 所示。前池中流速均匀性差,横向偏差大,不符合泵站稳定运行的条件。其中,最大流速偏差出现在 1 号机组处,达到 117.93%,严重超出规范要求,给水泵运行带来不利影响。

工况		项目	水平位置				平均流速/(m·s ⁻¹)
原设计方案	A#	机组编号	1#	2#	3#	4#	0.1982
		流速/(m/s)	0.4320	0.2175	0.1189	0.0245	
		横向偏差(%)	117.93%	9.72%	40.02%	87.64%	
		机组编号	5#	6#	7#	8#	
	B#	流速(m/s)	0.0505	0.2528	0.2355	0.2181	0.1892
		横向偏差(%)	73.31%	33.60%	24.46%	15.26%	

Table 1. Flow rate and lateral deviation 表 1. 流速及其横向偏差

3.3. 整流方案

通过上述分析可知, 原设计方案前池内存在回流、泵站机组吸水喇叭口流速分布不均等问题, 泵站

整体运行稳定存在较大隐患,需要对泵站前池流道进行优化。目前,在泵站前池设置整流装置是常见的 泵站流态改善的方法。常见的整流方式有导流墩(墙)、压水板、消涡板、底坎等[14] [15],国内外的研究 人员针对各种整流方式也进行了一系列的研究。

导流墩的整流原理是通过其对水流的引导作用,改变前池水流的扩散角,从而改善前池流态。常鹏 程、扬帆、孙丹丹等[16]研究者对侧向进水泵站在运行中产生的大范围漩涡、回流现象展开研究,研究结 果表明,弧形导流墙可以显著提高带有明显转角前池水流的横向流速均匀度。但是单一的导流墩并不能 完全解决城市排水泵站前池存在的回流问题。ZARRATIA、ROSHANR、SARKARDELH 等[17]学者的研 究表明,设置多重导流墩可以显著抑制回流的产生,同时,该研究也探究了在导流墩上开孔对抑制涡流 的影响。底坎整流与导流墩的区别是底坎一般为潜水整流,处于流道底部,通过加设底坎,人为制造坎 后水流旋滚,从而影响平面回流,使坎后流态得到调整[2]。

导流墩和底坎的优势是结构简单施工方便,且导流墩对于改善前池的回流、漩涡效果显著;底坎的 优势在于可以使平面回流重新分布,对于改善下层水流流态效果十分明显。而本文旨在探究整流措施的 组合对于前池流态的改善效果,因此,选取以下三种整流方案,分别探究单独导流墩整流、单独底坎整 流以及导流墩和底坎的组合整流措施对前池流态的影响。

(一) 整流方案 1: 在原方案基础上, A、B两侧前池底部设置 0.2 m×0.2 m 的底坎;

(二) 整流方案 2: 在原方案基础上, A、B 两侧前池同时设置两对长度为 10 m 的八字形导流墩,导流墩与水平方向夹角分别为 10 度和~10 度;

(三) 整流方案 3: 在方案 1 的基础上, 仅在 B 侧前池内增设八字形导流墩, 并延长至距离吸水喇叭口 3.5D 处。

3.4. 整流方案数值计算结果分析

3.4.1. 流态与流速分析



Velocity Selected (m/s)

距池底 0.3 m 距池底 3.5 m 距池底 6.8 m (a) 原设计方案



距池底 0.3 m 距池底 3.5 m 距池底 6.8 m (b) 整流方案 1



距池底 0.3 m 距池底 3.5 m 距池底 6.8 m (c) 整流方案 2



距池底 0.3 m 距池底 3.5 m 距池底 6.8 m (d) 整流方案 3

Figure 7. Vector diagram of flow rates 图 7. 流速矢量图

将三个整流方案的流速矢量图与原设计方案的流速矢量图进行对比,如图 7 所示。可以看到,3 个整流方案明显使前池中水流平顺,回流面积被显著压缩。其中,整流方案1中A、B两侧均采用底坎整流。底坎显著压缩了A侧前池的回流范围,并且有效削弱了其横向流动,但是B侧前池距池底0.3 m处横向流动依然严重,底坎对B侧前池的整流效果有限;整流方案2中A、B两侧前池均采用导流墩整流。导流墩通过其导流作用,改变前池水流扩散角,从而达到均匀水流分布,削弱回流、横向流动的目的。从图中可以明显看到,导流墩对A侧前池的整流效果有限,A侧前池依然存在大量的横向流动以及回流,其原因是水流从进水池进入A侧前池的流速较B侧前池更大,A侧前池中的偏流更加强烈;方案2进一步优化了B侧前池流态,基本消除了距池底3.5 m处的回流。结合整流方案1、2,整流方案3在A侧前 池采取底坎整流,在B侧前池采取"导流墩+底坎"的组合整流方案,与原设计方案相比,整流方案3 对于B侧吸水室的流态优化效果尤为明显,基本消除了距池底0.3 m(底层)、3.5 m(中层)以及6.8 m(表层)的回流以及横向流动,对于A侧前池,回流区面积显著减小。

表 2 为原设计方案与各整流方案 3.5D 断面处吸水喇叭口断面平均流速。分析可知,采用整流方案 3 后,吸水喇叭口高度处的流速分布更加均匀,断面处最大流速与最小流速的差值减小了 1.88 倍。表 3 为 水泵中心线上游 3.5D 断面处吸水喇叭口悬空高度处流速偏差。原设计方案中,由于泵站受限于地形因素,本身设计不对称,A 侧前池最大流速偏差出现在 1#机组处,其值为 117.93%,此位置处横向偏差在整流方案 2 中降低为 93.49%,在整流方案 3 中降为 45.36%; B 侧前池最大流速偏差出现在 5#机组处,其值 为 73.31%,在整流方案 3 中降低为 27.67%。

3.4.2. 湍流动能沿程变化

湍流动能的变化体现了紊流脉动的大小,是衡量湍流强弱的指标。断面平均湍流动能的沿程变化详见图 8。分析可知,水流在从进水流道进入进水池的过程中较为平顺,湍流动能的值较小;在从进水池

Table	e 2. Average flow rate before and after rectification $(m \cdot s^{-1})$	
表 2.	整流前后的平均流速(m·s ⁻¹)	

	机组编号	原设计方案	方案1	方案 2	方案3
A#	1#	0.4320	0.3294	0.5815	0.3372
	2#	0.2175	0.2741	0.3086	0.2969
	3#	0.1189	0.1603	0.1890	0.1731
	4#	0.0245	0.1241	0.1230	0.1207
B#	5#	0.0505	0.1367	0.1328	0.1142
	6#	0.2528	0.1285	0.1589	0.0972
	7#	0.2355	0.0594	0.0668	0.0457
	8#	0.2181	0.0992	0.0971	0.1007



表 3.流速偏差(%)

	机组编号	原设计方案	方案1	方案 2	方案3
A#	1#	117.93%	48.40%	93.49%	45.36%
	2#	9.72%	23.48%	2.69%	27.99%
	3#	40.02%	27.78%	37.11%	25.38%
	4#	87.64%	44.09%	59.07%	47.97%
B#	5#	73.31%	29.02%	16.59%	27.67%
	6#	33.60%	21.28%	39.51%	8.66%
	7#	24.46%	43.94%	41.35%	48.91%
	8#	15.26%	6.37%	14.75%	12.58%



Figure 8. Turbulent kinetic energy changes along the course 图 8. 湍动能沿程变化图

进入前池的过程中,由于流道存在转角以及流道断面的变化,水流在这里发生激烈碰撞,湍流动能急剧 变大,达到最大值。在水流进入前池后,由于过水断面变大,水流趋于平缓,水流脉动强度减弱,水流 流速和湍流动能也随之减弱。

在泵站进水流道的进水池前段,可以看到原设计方案和三个整流方案的湍流动能都较小,且没有 明显差异;在水流从进水池到前池的过程中,由于底坎和导流墩对湍流动能的耗散作用,三个整流方 案较原设计方案都能有效降低水流的脉动强度,梳理水流,使其变得平缓,降低了水泵出现气蚀的可 能性,提高了泵站运行的稳定性和效率。从图中可以看出,在前池末端,三个优化方案的湍流动能大 小没有明显差异,都略小于原设计方案。综合来看,整流方案3对前池内湍流动能的耗散作用最为明 显。

4. 结论

基于上海市临平排水泵站流道的流态优化设计,采用导流墩和底坎的组合整流措施,本文分析了组 合整流措施对不良流态的改善作用,主要结论如下:

1) 流体体积法可以反映水面实际波动,相比底盖假定法能够更好反映复杂城市泵站流道的流态特征;

 2) 经过计算和分析,导流墩、底坎的组合整流措施可以有效改善泵站进水前池的不良流态,该组合 整流措施对于复杂城市排水泵站流道的不良流态整流效果明显;

3) 从湍流动能的角度分析表明,组合整流方案能够有效减小水流脉动,减轻水泵的气蚀作用,从而 保障泵站整体的稳定与高效。

参考文献

- [1] 郁片红,李君菡,付小莉. 大型雨水泵站进水流道水力特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 126-130.
- [2] 苏正洋, 陆嘉伟, 张志韬, 等. 泵站前池整流技术研究综述[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 69-75.
- [3] 中华人民共和国水利部. 泵站设计规范[M]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1997.
- [4] 黄继宏, 王晓升, 张晓毅. 城市排水泵站前池导流墩整流措施的数值模拟[J/OL]. 江苏农业科学, 2013, 41(5): 360-362. <u>https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2013.05.028</u>
- [5] 罗海军,张睿,徐辉.改善城市排水泵站进水流态的试验研究[J].中国农村水利水电,2019(1):176-179.
- [6] Cheng, L., Liu, C., Zhou, J., *et al.* (2007) The Study on the Flow Fields and Hydraulic Performance in the Pump Sump. Volume 2: Fora, Parts A and B. ASMEDC, San Diego, 831-839. <u>https://asmedigitalcollection.asme.org/FEDSM/proceedings/FEDSM2007/42894/831/326657</u>
- [7] 丛国辉, 王福军. 湍流模型在泵站进水池漩涡模拟中的适用性研究[J]. 农业工程学报, 2008(6): 31-35.
- [8] 张新,赵俊龙,舒崚峰,等.水泵水轮机压水充气过程的非稳态数值模拟湍流模型比较[J].中国农村水利水电, 2021(12): 192-197+202.
- [9] Constantinescu, G.S. and Patel, V.C. (1998) Numerical Model for Simulation of Pump-Intake Flow and Vortices. *Journal of Hydraulic Engineering*, **124**, 123-134. <u>https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:2(123)</u>
- [10] Rajendran, V.P., Constantinescu, S.G. and Patel, V.C. (1999) Experimental Validation of Numerical Model of Flow in Pump-Intake Bays. *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**, 1119-1125. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:11(1119)
- [11] 胥战海, 祖海坤. 光滑及粗糙壁面明渠湍流流动数值模拟[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 224-226.
- [12] 程科, 罗强, 宁芊, 等. 基于 CFD 的顺直明渠断面流场数值模拟研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(3): 160-164.
- [13] 王璞, 李雪梅, 牟时宇, 等. 基于 CFD 的弯道水流数值模拟[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 33-38.
- [14] 冯倜倜,梁金栋,孙晨光,等.导流墩偏斜角度对侧向进水泵站前池整流效果的影响[J].水电能源科学,2021, 39(7):121-125.
- [15] 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.
- [16] 常鹏程,杨帆,孙丹丹,等.多机组泵站侧向进水前池流态及整流措施分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(12): 229-234.
- [17] Amiri, S.M., Zarrati, A.R., Roshan, R., et al. (2011) Surface Vortex Prevention at Power Intakes by Horizontal Plates.

Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Water Management, **164**, 193-200. <u>https://doi.org/10.1680/wama.1000009</u>