

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242099

基于进水系统水力特性分析的邓楼泵站 开机组合优选研究

雷晓辉^{1a,1b}, 魏宏郁^{1a,1b}, 张 召², 薛 萍³, 龙 岩^{1a,1b}

(1. 河北工程大学 a. 水利水电学院; b. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 3. 河海大学人工智能与自动化学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在泵站开机台数确定时,不同的开机组合会造成泵站进水系统的流态出现差异。选择非最优开机组合可能导致进水系统出现不良流态,进而导致泵站效率降低,甚至影响工程安全。为此,以邓楼泵站为研究对象,采用计算流体力学方法,建立进水系统的三维数学模型,结合衡量进水流态优劣的评价指标与前池、进水池的流场图,探究典型工况下的最优开机组合。研究表明,在泵组开机台数相同时,开启位置居中的机组优于开启两侧机组,开启相邻机组普遍优于开启间隔机组。根据全部开机组合模拟结果提出不同开机台数时的最优开机组合,为泵站优化调度提供了合理的开机决策参考。

关键词: 泵站;进水系统;计算流体力学;进水流态;开机组合

中图分类号: TV675; TV135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2025)10-0144-06

1 引言

前池、进水池和进水流道作为泵站的进水系统,应满足良好的流态,保障水泵的进水条件^[1]。若系统内长期存在漩涡等不良流态,易导致水泵的异常振动和汽蚀,大大降低泵站的运行效率,甚至影响工程安全^[2]。针对泵站进水系统的不良流态已进行了深入研究,在设计阶段可设置各种整流措施改善泵站的进水流态。如徐波等^[3]对梯形底坎设计了不同的位置和高度进行模拟,得到整流效果最佳的方案;于永海等^[4]通过优化泵站前池底坎的设计参数改善了前池流态。除工程结构外,进水系统的流态还受到实际工情的影响,不同开机组合也会造成进水流态的差异^[5];李迎春等^[6]利用三维数值模拟方法,对比同一流量不同开机组合下的前池流态情况并获取最优开机方案;王慧等^[7]通过设计8种开机方案,研究不同开机组合下泵站前池与进水池的水流流动特性。与改造工程结构相比,调整开机组合改善进水系统

流态的方式更加便利。近年来,计算流体力学(CFD)在泵站流动分析方面应用广泛^[8]。CFD技术可以对流场进行定性定量分析和可视化处理,与模型试验相比,具有成本低、耗时少、能详细展示流场的优点^[9]。因此,本文以邓楼泵站为研究对象,采用CFD方法开展泵站开机组合优选研究,旨在为调度方案的制定提供决策支持,并为同类型泵站提供参考。

2 研究对象

邓楼泵站是南水北调东线一期工程第十二级调水泵站,位于山东省梁山县,承担了沟通南四湖和东平湖的重要任务。泵站共布设4台立式机械全调节轴流泵,工作方式为3用1备。泵站设计输水流量 $100\text{ m}^3/\text{s}$,单机设计流量 $33.5\text{ m}^3/\text{s}$,站下设计水位 33.82 m 。泵站前引水渠道横断面为梯形,渠底宽 30.2 m 。引水闸位于渠道末端,后接泵站前池,闸门共设5孔,运行时全部开启。前池为陡坡段,长 30.0 m ,底宽为 34.7 m ,与进水

收稿日期:2024-11-07,修回日期:2024-12-24

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3204604);河北省自然科学基金项目(E2024402142);水利部重大科技项目(SKS-2022117)

作者简介:雷晓辉(1974-),男,博士、教授级高级工程师、博导,研究方向为流域水资源调度与智慧水利,E-mail:lxh@iwhr.com

通讯作者:张召(1992-),男,博士、高级工程师,研究方向为调水工程模拟与调控模型,E-mail:zhangzhao@iwhr.com

池进口顺直连接。进水池平面呈矩形布置,长 20.0 m,宽 34.7 m。进水流道为肘型,各流道中间设有导流隔墩,由隔墩将进水流道一分为二。邓楼泵站结构见图 1,水泵机组编号从上至下为 # 4、# 3、# 2、# 1。

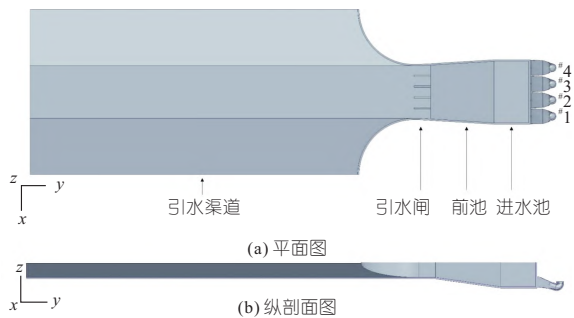


图 1 邓楼泵站结构图

Fig. 1 Schematic structure of Denglou pumping station

邓楼泵站自 2013 年投入运行后,各泵组长时间运行,可能出现设备性能下降、运行效率降低的问题。邓楼泵站于 2018~2019 年分别对 # 4、# 1 机组进行大修,检查发现机组存在调节叶片角度时流量增减不明显、运行工况恶化等情况^[10-11],影响泵站的运行效率。这与 2 台机组位于泵站两侧边缘位置、进水流态较差存在一定的关系。因此,通过选择适宜的开机组合改善泵站进水流态,进而保障泵站的高效和安全运行十分必要。

3 数学模型

3.1 控制方程和湍流模型

泵站进水系统内的流动为不可压缩湍流,采用雷诺时均法进行计算^[12],其中连续性方程为:

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

雷诺时均 N-S 方程为:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \overline{f_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中, x_i 、 x_j 均为流体位置; $\overline{u_i}$ 、 $\overline{u_j}$ 均为平均速度; $\overline{f_i}$ 为平均质量力; \overline{P} 为平均压力; ν 为流体粘度; $\overline{u'_i u'_j}$ 为附和应力张量; ρ 为流体密度。

湍流模型选择 RNG κ - ϵ 模型,该模型由 standard κ - ϵ 模型改进而来,能较好地处理速度梯度较大的流场和强旋转流动,并提升计算精度。

3.2 网格划分

网格划分采用非结构化网格。由于网格过于稀疏会导致模拟结果与实际不符,而过于密集会导致模拟时间延长,因此选取 55×10^4 、 96×10^4 、

126×10^4 、 174×10^4 、 208×10^4 、 252×10^4 、 353×10^4 共 7 个计算域网格数量划分方案进行无关性分析,以 # 1 机组进水流道进口断面的流速分布均匀度作为验证网格无关性的判断参数,查看参数随网格数量增加的变化情况。结果表明,随着网格数量的增加,流速分布均匀度呈现先增大而后逐渐稳定的趋势,当网格数量大于 208×10^4 个后,流速分布均匀度数值基本保持稳定,因此采取网格数量为 208×10^4 个的划分方案进行后续计算。

3.3 边界条件

模型进口位于泵站前引水渠道,进口断面距离引水闸 230 m,边界条件采用速度入流。模型出口位于水泵进口断面,边界条件采用自由出流。自由液面采用刚盖假定,设置为对称面处理。前池、流道等边壁均采用标准壁面函数法。

4 开机组合优选

邓楼泵站共有单机运行、双机运行、三机运行三种模式,为对比泵站不同开机组合进水流态的优劣,选取全部开机组合方案进行模拟计算,计算工况见表 1。进水池水位均采用设计水位,开机机组均采用单机设计流量。

表 1 计算工况

Tab. 1 Working condition of calculation

工况编号	进水池水位/m	流量 / (m ³ · s ⁻¹)	开机台数/台	开机组合
1	33.82	33.5	1	# 1
2	33.82	33.5	1	# 2
3	33.82	33.5	1	# 3
4	33.82	33.5	1	# 4
5	33.82	67.0	2	# 1# 2
6	33.82	67.0	2	# 1# 3
7	33.82	67.0	2	# 1# 4
8	33.82	67.0	2	# 2# 3
9	33.82	67.0	2	# 2# 4
10	33.82	67.0	2	# 3# 4
11	33.82	100.0	3	# 1# 2# 3
12	33.82	100.0	3	# 1# 2# 4
13	33.82	100.0	3	# 1# 3# 4
14	33.82	100.0	3	# 2# 3# 4

为了保障研究结果的准确性和可靠性,设置多个研究断面,共同分析开机组合的流态优劣。为了对比不同开机组合流态的差异并分析同一机组经过进水流道流态的变化情况,分别在泵站进水流道进口和水泵进口设置断面 A₁、A₂,断面位置见图 2。

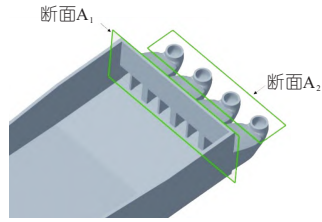


图 2 研究断面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the study surface

4.1 评价指标

为了定量表示开机组合的进水流态优劣,引入流速分布均匀度 V_u 和速度加权平均角度 θ ^[13-14] 作为评价指标,计算公式分别为:

$$V_{u1} = V_{u2} = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{1}{m} \sum (u_{ai} - u_a)^2} \right] \times 100\% \quad (3)$$

$$\theta_1 = \sum u_{ai} \left[\arctan\left(\frac{u_{ti}}{u_{ai}}\right) \right] / \sum u_{ai} \quad (4)$$

$$\theta_2 = \sum u_{ai} \left[90^\circ - \arctan\left(\frac{u_{ti}}{u_{ai}}\right) \right] / \sum u_{ai} \quad (5)$$

式中, V_{u1} 、 V_{u2} 分别为断面 A_1 、 A_2 的流速分布均匀度; θ_1 、 θ_2 分别为断面 A_1 、 A_2 的速度加权平均角度, ($^\circ$); u_{ai} 为断面各单元的轴向速度, m/s; u_a 为断面平均轴向速度, m/s; u_{ti} 为断面各单元的横向速度, m/s; m 为断面单元数。

流速分布均匀度反映了断面流速分布的均匀程度, 所求断面的流速分布均匀度 V_u 值越大, 证明断面各单元流速越均匀, 进水流态越好。速度加权平均角度反映了水流入流角度, 断面 A_1 的速度加权平均角度 θ_1 越接近 0° , 断面 A_2 的速度加权平均角度 θ_2 越接近 90° , 证明越接近垂直入流, 进水流态越好。当多台机组运行时, 取各开机机组指标的平均值作为该组合的评价指标值。

4.2 单机运行模式

单机运行时各机组的进流指标计算结果见表 2。在断面 A_2 处各开启机组的指标数值无明显差距, 对于评价流态的优劣并无较大的参考意义, 因此以断面 A_1 处的指标数值作为主要判断依据。同时在断面 A_1 处不同机组的流速分布均匀度 V_{u1} 极差在 5% 左右, 速度加权平均角度 θ_1 极差为 0.05° 。前者差距显著, 后者无较大变化, 因此流速分布均匀度是敏感指标, 当两项指标评价结果出现矛盾时, 以流速分布均匀度的评价结果为准。

对比不同机组指标可看出, 工况 3 ($\#3$) 的流速分布均匀度 V_{u1} 最大, 速度加权平均角度 θ_1 最小, 其进水流态最好。相反, 工况 1 ($\#1$) 的流速分

表 2 单机运行模式机组评价指标

断面	工况编号	开机组合	进流指标	机组指标值				平均值
				#1	#2	#3	#4	
A_1	1	#1	$V_{u1}/\%$	65.38				65.38
			$\theta_1/^\circ$	0.55				0.55
	2	#2	$V_{u1}/\%$		68.84			68.84
			$\theta_1/^\circ$		0.51			0.51
	3	#3	$V_{u1}/\%$			70.47		70.47
			$\theta_1/^\circ$			0.50		0.50
	4	#4	$V_{u1}/\%$				67.23	67.23
			$\theta_1/^\circ$				0.53	0.53
A_2	1	#1	$V_{u2}/\%$	80.22				80.22
			$\theta_2/^\circ$	89.88				89.88
	2	#2	$V_{u2}/\%$		80.18			80.18
			$\theta_2/^\circ$		89.89			89.89
	3	#3	$V_{u2}/\%$			80.38		80.38
			$\theta_2/^\circ$			89.89		89.89
	4	#4	$V_{u2}/\%$				80.09	80.09
			$\theta_2/^\circ$				89.88	89.88

布均匀度 V_{u1} 最小, 速度加权平均角度 θ_1 最大, 其进水流态最差。最终建议单机运行时投入运行的优先顺序为 $\#3 > \#2 > \#4 > \#1$ 。

图 3 为单机运行时进水流态最优和最劣工况的流场对比, 两种工况在进水闸隔墩后和池内边壁区域均存在漩涡, 其中两侧边壁的漩涡波及范围较大。前池、进水池在不同水平切面的流态并不完全相同, 随着切面位置下移, 漩涡的数量增多。与 $\#1$ 机组相比, $\#3$ 机组运行时池内漩涡数量更少, 水流更加平顺, 流速分布更加均匀, 流场对比结果与评价指标的判断结论一致。

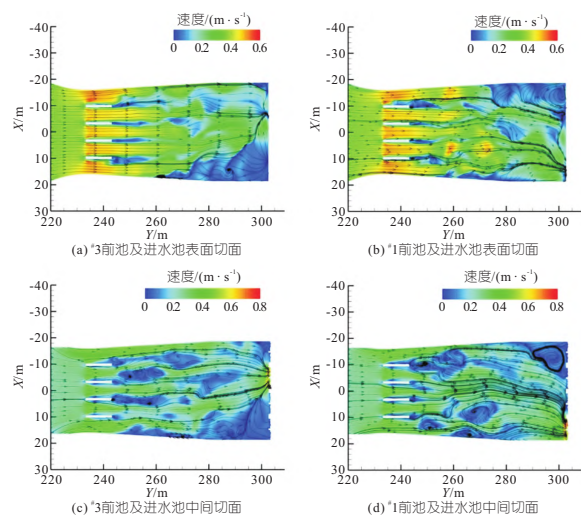


图 3 单机运行下前池、进水池流场

Fig. 3 Flow field of the front pool and inlet pool of stand-alone operation

4.3 双机运行模式

双机运行时各开机组合的进流指标计算结果见表 3。与单机运行时的结论一致, 双机运行时

表 3 双机运行模式机组评价指标

Tab. 3 Evaluation index in dual-machine operation mode

断面	工况编号	开机组合	进流指标	机组指标值				平均值
				# 1	# 2	# 3	# 4	
A ₁	5	# 1# 2	$V_{u1}/\%$	68.33	67.39			67.86
			$\theta_1/(\circ)$	0.49	0.52			0.50
	6	# 1# 3	$V_{u1}/\%$	64.49		68.88		66.69
			$\theta_1/(\circ)$	0.52		0.49		0.50
	7	# 1# 4	$V_{u1}/\%$	67.87			66.84	67.35
			$\theta_1/(\circ)$	0.50			0.51	0.50
	8	# 2# 3	$V_{u1}/\%$		67.79	68.86		68.32
			$\theta_1/(\circ)$		0.52	0.52		0.52
	9	# 2# 4	$V_{u1}/\%$		70.49		66.01	68.25
			$\theta_1/(\circ)$		0.50		0.50	0.50
10	# 3# 4	$V_{u1}/\%$			67.62	68.35	67.99	
		$\theta_1/(\circ)$			0.51	0.51	0.51	
A ₂	5	# 1# 2	$V_{u2}/\%$	80.26	80.36			80.31
			$\theta_2/(\circ)$	89.89	89.89			89.89
	6	# 1# 3	$V_{u2}/\%$	80.16		80.38		80.27
			$\theta_2/(\circ)$	89.88		89.89		89.89
	7	# 1# 4	$V_{u2}/\%$	80.43			80.77	80.60
			$\theta_2/(\circ)$	89.89			89.88	89.88
	8	# 2# 3	$V_{u2}/\%$		80.53	80.26		80.39
			$\theta_2/(\circ)$		89.89	89.89		89.89
	9	# 2# 4	$V_{u2}/\%$		80.42		80.22	80.32
			$\theta_2/(\circ)$		89.89		89.90	89.89
10	# 3# 4	$V_{u2}/\%$			80.16	80.33	80.25	
		$\theta_2/(\circ)$			89.88	89.88	89.88	

以断面 A₁ 处的指标值作为分析开机组合进水流态优劣的主要判断依据,并以流速分布均匀度这一指标的评价结果为准。

对比不同组合指标可看出,工况 8(# 2# 3) 的流速分布均匀度 V_{u1} 最大,工况 6(# 1# 3) 的流速分布均匀度 V_{u1} 最小,最终建议双机运行时投入运行的优先顺序为 # 2# 3 > # 2# 4 > # 3# 4 > # 1# 2 > # 1# 4 > # 1# 3。

图 4 为双机运行时进水流态最优和最劣工况的流场对比。与单机运行相比,双机运行时前池、进水池流态变好,池内漩涡的数量减少、范围缩小。在表面切面,漩涡集中分布在进水闸隔墩后和进水流道前两侧边壁区域。随着切面位置下移,流态变差,漩涡的数量增多,波及范围扩大。# 1# 3 机组运行时,池内漩涡较多且位置分散,水流受到影响导致方向并不平顺,流态明显劣于 # 2# 3 机组运行时的流态,流场对比结果与评价指标的判断结论一致。

4.4 三机运行模式

三机运行时各开机组合的进流指标计算结果见表 4。与单机、双机运行时的结论一致,三机运行时以断面 A₁ 处的流速分布均匀度作为主要判断依据。

对比不同组合指标可看出,工况 14(# 2# 3# 4) 的流速分布均匀度 V_{u1} 最大,工况 12(# 1# 2# 4)

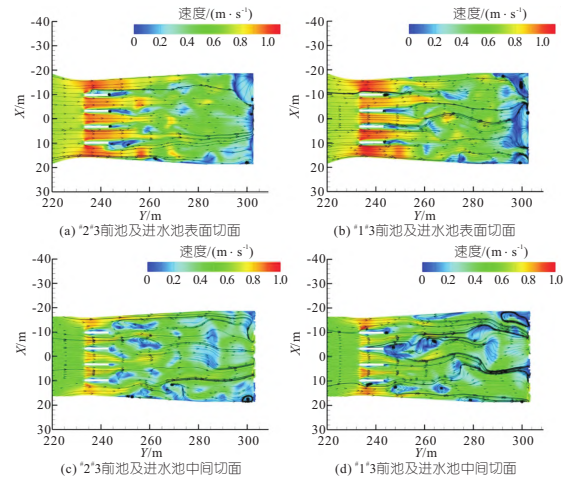


图 4 双机运行下前池、进水池流场

Fig. 4 Flow field of the front pool and inlet pool of dual-machine operation

表 4 三机运行模式机组评价指标

Tab. 4 Evaluation index in three-machine operation mode

断面	工况编号	开机组合	进流指标	机组指标值				平均值
				# 1	# 2	# 3	# 4	
A ₁	11	# 1# 2# 3	$V_{u1}/\%$	65.04	73.19	68.59		68.94
			$\theta_1/(\circ)$	0.40	0.45	0.51		0.45
	12	# 1# 2# 4	$V_{u1}/\%$	65.11	65.56		63.81	64.82
			$\theta_1/(\circ)$	0.54	0.47		0.52	0.51
	13	# 1# 3# 4	$V_{u1}/\%$	68.02		67.00	66.74	67.25
			$\theta_1/(\circ)$	0.39		0.44	0.48	0.44
14	# 2# 3# 4	$V_{u1}/\%$		69.38	71.66	69.98	70.34	
		$\theta_1/(\circ)$		0.42	0.48	0.47	0.46	
A ₂	11	# 1# 2# 3	$V_{u2}/\%$	81.05	79.99	80.45		80.50
			$\theta_2/(\circ)$	89.90	89.89	89.90		89.89
	12	# 1# 2# 4	$V_{u2}/\%$	80.70	80.23		81.16	80.69
			$\theta_2/(\circ)$	89.89	89.89		89.89	89.89
	13	# 1# 3# 4	$V_{u2}/\%$	80.94		81.08	80.51	80.84
			$\theta_2/(\circ)$	89.89		89.88	89.91	89.89
14	# 2# 3# 4	$V_{u2}/\%$		80.10	80.51	80.65	80.42	
		$\theta_2/(\circ)$		89.89	89.91	89.90	89.90	

的流速分布均匀度 V_{u1} 最小,最终建议三机运行时投入运行的优先顺序为 # 2# 3# 4 > # 1# 2# 3 > # 1# 3# 4 > # 1# 2# 4。

图 5 为三机运行时进水流态最优和最劣工况的流场对比。在表面切面,两种工况的漩涡主要分布在进水流道前的两侧边壁区域。随着切面位置下移,漩涡分散分布在进水闸隔墩后和前池、进水池内,且漩涡数量增多。# 1# 2# 4 机组运行时池内流速分布不均,池内漩涡较多且波及范围较大,与 # 2# 3# 4 机组运行时的流态相比较差,流场对比结果与评价指标的判断结论一致。

4.5 结果分析

将所有开机组合方案的指标数值进行综合比较,结果见表 5,分析可得:①所有开机组合的流速分布均匀度 V_{u1} 均达到 64% 以上, V_{u2} 均达到 80% 以上,速度加权平均角度 θ_1 均远小于 5°, θ_2 均接近 90°,任意开机组合的进水流态均良好。②在断面 A₁ 处,机组间的速度分布均匀度与入

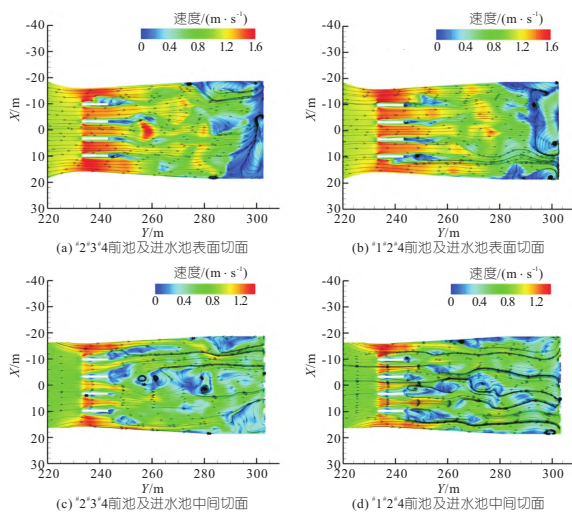


图 5 三机运行下前池、进水池流场

Fig. 5 Flow field of the front pool and inlet pool of three-machine operation

流方向存在差异,导致评价指标产生差异。以单机运行模式为例, # 1 机组位于泵站边缘位置,前池、进水池中流线更加弯曲,与 # 3 机组相比,水流进入进水流道的方向更加倾斜,导致进口处产生漩涡,使断面的流速分布不均匀度加剧。③经过进水流道,各开机组的流速分布均匀度均增加 10% 以上,由于进水流道显著的整流效果,在断面 A₂ 处水流均趋向于均匀分布并垂直于断面 A₂ 流出,因此各开启机组的指标均达到良好程度且无明显差距。④开启布置位置居中的机组优于开启两侧的机组。如单机运行时,工况 2(# 2) 和工况 3(# 3) 的机组位置居中,其流速分布均匀度 V_{u1} 大于开启边缘机组的工况 1(# 1)、工况 4(# 4)。双机运行时,工况 8(# 2 # 3) 的流速分布均匀度 V_{u1} 为 68.23%, 在相同运行台数的组合中进水流态最佳。⑤开启相邻机组普遍优于开启间隔机组。如双机运行时,工况 5(# 1 # 2)、工况 8(# 2 # 3)、工况 10(# 3 # 4) 机组相邻运行,其流速分布均匀度 V_{u1} 均大于间隔机组运行的工况 6(# 1 # 3)、工况 7(# 1 # 4)。三机运行时,相邻机组运行的工况 11(# 1 # 2 # 3)、工况 14(# 2 # 3 # 4) 的流速分布均匀度 V_{u1} 大于间隔机组运行的工况

表 5 开机组合方案指标对比

Tab. 5 Comparison of indicators for start-up combinations

断面	开机台数/台	流速分布均匀度/%			速度加权平均角度/(°)		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
A ₁	1	70.47	65.38	67.98	0.55	0.50	0.52
	2	68.32	66.69	67.74	0.52	0.50	0.51
	3	70.34	64.82	67.84	0.51	0.44	0.46
A ₂	1	80.38	80.09	80.22	89.89	89.88	89.89
	2	80.60	80.25	80.36	89.89	89.88	89.89
	3	80.84	80.42	80.61	89.90	89.89	89.89

12(# 1 # 2 # 4)、工况 13(# 1 # 3 # 4)。

5 结论

采用 CFD 技术进行邓楼泵站开机组合优选研究,结果表明邓楼泵站任意开机组合的进水流态均良好,但在开机台数相同的情况下,开启居中机组和相邻机组时进水系统的流态更佳。此外,单机、双机、三机运行时的最优开机组合为 # 3 机组、# 2 # 3 机组、# 2 # 3 # 4 机组。该研究可为泵站开机决策提供参考。

参考文献:

- [1] 王福军. 水泵与水泵站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 229-239.
- [2] 张德胜, 李普熙, 赵睿杰, 等. 泵站进水池吸入口涡旋结构及湍流特性的大涡模拟[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 134-141.
- [3] 徐波, 吕和品, 夏辉, 等. 梯形底坎对凤凰颈新站前池流态的影响研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 124-127.
- [4] 于永海, 闫浩迪, 叶长亮. 基于 BPNN-GA 的泵站前池整流底坎参数优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 106-113.
- [5] 黄九常, 刘伟. 泵站前池流场的数值模拟[J]. 科技信息, 2009(9): 770-771.
- [6] 李迎春, 罗卫国, 李崇智. 泵站前池流态分析及开机组组合优化[J]. 中国农村水利水电, 2014(4): 108-111.
- [7] 王慧, 罗晓旭. 不同开机组组合下泵站前池与进水池中的水流流动特性[J]. 江苏水利, 2024(3): 57-61, 65.
- [8] 王福军, 唐学林, 陈鑫, 等. 泵站内部流动分析方法研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 47-61, 71.
- [9] 雷辉. 泵站前池结构和开机组组合对流态及泥沙淤积的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [10] 张方磊, 黄雪梅, 刘辉. 邓楼泵站机组叶片调节机构事故处理分析[J]. 山东水利, 2020(12): 3-4, 9.
- [11] 刘海关, 刘辉, 李典基. 邓楼泵站 4 号机组大修电机处理及数据分析[J]. 水电站机电技术, 2020, 43(2): 33-35.
- [12] 史志鹏, 张根广, 刘家春, 等. 基于 CFD 的泵站进水池流场水流特性分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 196-199.
- [13] 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.
- [14] 韩晓维, 刘云, 孟金波, 等. 基于流道进流指标分析的大型泵站进水池优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(2): 177-181, 186.

Research on Optimal Selection of Start-up Combination for Denglou Pump Station Based on Hydraulic Characteristics Analysis of Inlet System

LEI Xiao-hui^{1a,1b}, WEI Hong-yu^{1a,1b}, ZHANG Zhao², XUE Ping³, LONG Yan^{1a,1b}

(1a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power;

1b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. School of Artificial Intelligence and Automation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: When determining the number of pump stations to be started up, different start-up combinations can cause differences in the flow state of the inlet system of the pump station. Choosing a non-optimal start-up combination may result in poor flow conditions in the inlet system, leading to lower efficiency of pump station and even affecting engineering safety. Therefore, this article takes Denglou Pump Station as the research object, computational fluid dynamics methods is used to establish a three-dimensional mathematical model of the inlet system. Combined the indicators to measure the quality of the inlet flow state with the flow field diagrams of the forebay and inlet pool, the optimal start-up combination under typical working conditions is explored. The research results show that when the number of pump units is the same, the unit with the center opening position is better than the units on both sides, and opening adjacent units is generally better than opening interval units. Based on the simulation results of all start-up combinations, the optimal start-up combination for different start-up numbers is proposed, providing a reasonable start-up decision reference for pump station optimization scheduling.

Key words: pump station; inlet system; computational fluid dynamics; inlet water flow regime; start-up combination

(上接第 143 页)

A Time-varying Prediction Model for Dam Slope Deformation Based on Particle Filter and Transformer-BiLSTM

WANG He-xian^{a,b}, CHEN Bo^{a,b}, GUO Ling-yun^{a,b}, ZHOU Cheng-tao^{a,b}

(a. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention; b. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper proposes a time-varying prediction model integrating a particle filter with the Transformer-BiLSTM (T-B) algorithm to accurately predict dam slope deformation. The particle filter was used to denoised environmental parameters such as rainfall, reservoir water level, and temperature, enhancing data quality. Combined these parameters with spatial features, the T-B algorithm was used to establish model for prediction spatio-temporal deformation of dam slope. Taking a dam slope project in Southwest China as a case study, the model prediction performance was verified through qualitative and quantitative analysis, and the main influencing factors were analyzed. The results show that particle filter improves the extraction of patterns from environmental data, while the T-B model can accurately capture the spatio-temporal distribution characteristics of slope deformation. The combined model has a very high accuracy in predicting the deformation of different measurement points, achieving error metrics (M_{MSE} , R_{RMSE} , M_{MAE}) close to 0 and high correlation (R^2 , correlation coefficient) close to 1. The analysis identifies rainfall, reservoir water level, and temperature as the primary factors influencing deformation, with their impact decreasing in that order. The proposed model can provide efficient and reliable predictive means for dam safety monitoring.

Key words: dam slope; deformation prediction; time-varying prediction model; Transformer-BiLSTM algorithm; particle filter; influencing factors