

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0020

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.
GAO C C,GAO Y X,LI X C. Influence of different inlet flow rates on pumping station sump vortex[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(1):180-190. (in Chinese)

不同进水流速对泵站进水池漩涡的影响

高传昌,高余鑫,李晓超

(华北水利水电大学,郑州 450045)

摘要:为探究泵站进水流速大小与泵站进水池水流流态、漩涡的产生与发展变化规律,结合泵站实际运行情况,建立引渠、前池、进水池和进水管的泵站物理模型和湍流数学模型,采用VOF模型和非定常的SST $k-\omega$ 湍流模型对9种不同流速的泵站进水水流特性进行数值模拟,分析不同进水流速的泵站进水池水流流场分布、漩涡涡量的变化及分布规律。研究表明:当进水流速为0.322 2~0.564 2 m/s时,泵站表面漩涡的强度随进水流速的增大而增强;当进水流速为0.322 2~0.401 6 m/s时,进水池出现Ⅲ、Ⅳ型漩涡;当进水流速为0.483 5 m/s时,进水池出现Ⅴ型漩涡;当进水流速为0.520 8~0.564 2 m/s时,进水池出现Ⅵ型漩涡。将数值计算结果与模型试验结果进行对比,两者基本吻合。研究结果可为泵站工程设计提供参考。

关键词:泵站;进水流速;进水池漩涡;数值模拟;模型试验

中图分类号:TV675 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



泵站进水池的形式和尺寸如果不合理,不仅在水泵或进水管周围产生环流,而且容易在自由水面产生进气漩涡,水下也容易产生附壁漩涡。这些环流和漩涡不仅要消耗能量,更严重的是,当空气或涡带进入水泵后,水泵性能变坏,效率降低,甚至会引起水泵汽蚀,机组发生强烈振动而无法工作^[1]。

迄今为止,国内外学者就引起进水池漩涡的因素做了大量研究:郭苗^[2]基于LBM数值模拟和试验结果研究了后壁距、临界淹没水深、水中空气含量对进水池流态的影响,并模拟出了进水池内部的漩涡结构及演化过程;宋希杰^[3]采用V3V测量技术和VOF方法研究了进水池内的漩涡流动,分析了附底漩涡演化过程中的动力学特性,提出新的消涡抑涡措施;张德胜等^[4]采用大涡模拟和VOF方法探讨了泵站进水池表面涡和底涡的形成和演化的基本机制,并通过PIV试验进行验证;吴鹏飞^[5]基于数值模拟和模型试验的方法,研究表

面吸气涡动态过程和特性,揭示了表面吸气涡形成及其抑制机理;文献[6-16]分别采用V3V技术、PIV技术、数值模拟方法研究了自由表面漩涡的流场结构,得到自由表面漩涡的变化规律;文献[17-23]通过理论分析、数值计算、模型试验方法研究了进水口淹没深度对漩涡的影响,得到漩涡强度与淹没深度的关系。这些研究主要关注漩涡流场结构的测量、进水口淹没深度、漩涡形成机理、进水池的体型优化等方面,而对于进水流速对表面漩涡的影响研究甚少。

以黄河下游田山引黄一级泵站为研究对象,采用数值模拟和试验研究相结合的方法,就不同进水流速对泵站进水表面漩涡的影响进行研究。表面漩涡判别采用美国Alden实验室的6型漩涡分类,即:Ⅰ型涡为表面涡纹;Ⅱ型涡为表面漩涡;Ⅲ型涡为染色漩涡;Ⅳ型涡为挟物漩涡;Ⅴ型涡为间断吸气漩涡;Ⅵ型涡为连续吸气漩涡^[24]。由于Ⅰ型和Ⅱ型漩

收稿日期:2021-04-15 修回日期:2021-07-02 网络出版时间:2021-07-19

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210719.1314.004.html

作者简介:高传昌(1957—),男,河北邯郸人,教授,博士,主要从事流体机械及流体动力工程研究。E-mail:gcc@ncwu.edu.cn

通信作者:高余鑫(1995—),男,河南项城人,主要从事流体机械及流体工程研究。E-mail:gaoyuxin19950117@163.com

涡对水泵性能影响甚微,工程上允许存在,因此本文仅对Ⅲ型以上漩涡进行判别。

1 田山一级泵站概况及存在问题

1.1 泵站概况

田山一级引黄泵站位于济南市平阴县。泵站包括进水闸、前池、进水池、泵房和出水池等,共装有设计流量和设计扬程分别为 $2.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 7.7 m 的轴

流泵 12 台,装机容量为 $2\ 670 \text{ kW}$,水泵安装高程 32.6 m 。进水池位于泵房下部为开敞式矩形进水池,被隔墩分成对称的单泵进水池,2 台水泵共用 1 孔进水闸。单泵进水池池宽 B 为 3.3 m ,池长 L 为 6.72 m ,池底高程 30.4 m ,设计水位 34.3 m ,最低水位 33.7 m ;悬空高度 P 为 1.2 m ,后墙距 T 为 1.26 m ;进水管直径 900 mm ,进水喇叭口直径 $1\ 280 \text{ mm}$ 。见图 1。

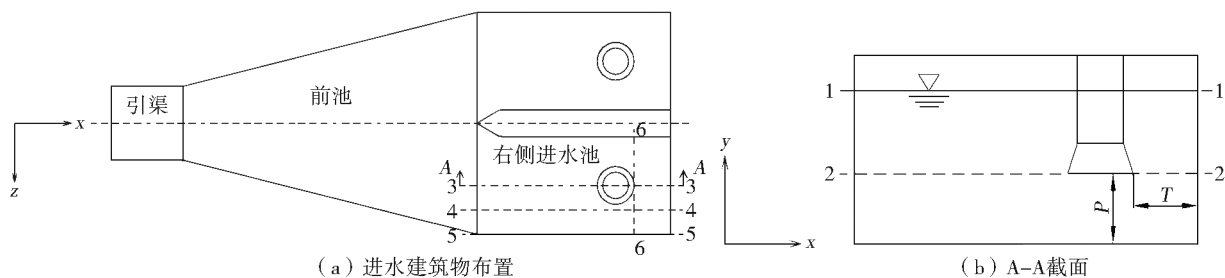


图 1 泵站进水建筑物布置及特征截面

Fig. 1 Layout and characteristic cross-section of the intake structure of the pumping station

1.2 存在问题

小浪底水库多次调水调沙后,黄河下游主河槽河底高程大幅降低,黄河水位的显著下降使得田山一级泵站的引水水位低于最低水位 (33.70 m),进水管口的淹没深度降低,水泵在超低水位下运行,引

起进水池流态恶化和空化条件的改变,导致进水喇叭管和水泵叶轮汽蚀严重、机组振动和水泵性能下降等一系列问题,甚至迫使机组停机。检查发现,水泵的叶轮与叶片上均出现了汽蚀现象,气蚀部位表面出现蜂窝状凹坑,见图 2。



(a) 叶轮汽蚀情况



(b) 叶片汽蚀情况

图 2 叶轮和叶片汽蚀情况

Fig. 2 Cavitation of impeller blades

2 数值计算模型和计算方案

2.1 数值计算模型

采用 NX UG 10.0 软件建立由引渠、前池、进水池、进水池隔墩、喇叭管和进水管构成的数值计算物理模型,模型比尺 $1:10$,泵站计算物理模型见

图 3。

2.2 网格划分及无关性分析

计算区域分为引渠、前池、左侧进水池、右侧进水池、左侧进水管和右侧进水管 6 部分,采用 Fluent Meshing 将模型剖分为适应性更好的混合网格(边界为多面体网格,内部为六面体网格),其中,网格最

小尺寸为 3,最大尺寸为 6,边界层为 10 层,增长率为 1.1。由于 SST $k-\omega$ 湍流模型避免了构造复杂的非线性壁面衰减函数,降低了对近壁区网格 y^+ 的要求,可较好地预测带有逆压梯度的边界层分离问题^[25],因此,计算过程中近壁区网格自动满足 SST $k-\omega$ 模型要求。无关性分析后确定网格数量为 390.7 万个,其中:引渠部分 28.3 万个,前池 163.8 万个,左、右侧进水池和进水管分别为 90.3 万、89.5 万、9.4 万和 9.4 万个,见图 4。

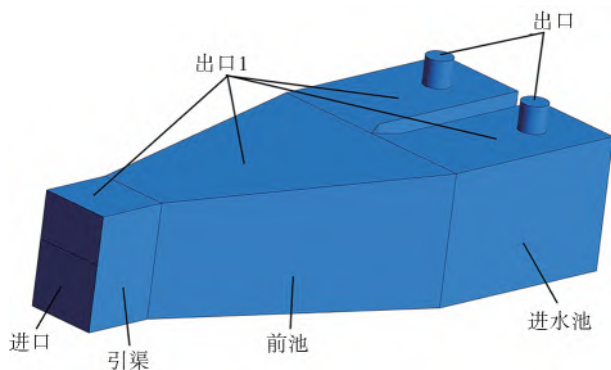


图 3 模型
Fig. 3 Model

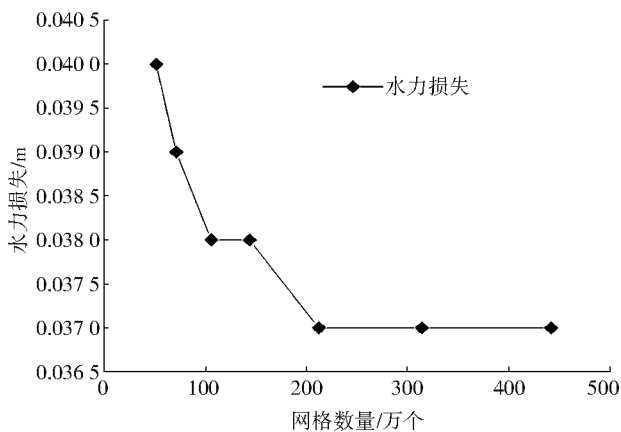


图 4 模型网格数目无关性分析

Fig. 4 Analysis of the independence of the number of model grids

水力损失选择进口断面为引渠进口,出口断面为进水管出口进行计算,见图 3 和式(1)。

$$H_f = (z_1 - z_2) + \frac{(p_1 - p_2)}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (1)$$

式中: z_1 、 $\frac{p_1}{\rho g}$ 和 $\frac{v_1^2}{2g}$ 分别为引渠进口断面的位置水头、压力水头和流速水头; z_2 、 $\frac{p_2}{\rho g}$ 和 $\frac{v_2^2}{2g}$ 分别为进水管路出口断面的位置水头、压力水头和流速水头。

2.3 模型及边界条件

计算采用非定常的 SST $k-\omega$ 湍流模型和 VOF 模型、SIMPLE 算法,离散方法为有限体积法,动量、

湍动能和湍流耗散率均采用二阶迎风格式。引渠进口为速度进口边界条件,进水管出口为速度出口,出口 1(空气域上部)为压力出口(其大小为 1 个标准大气压),壁面为无滑移壁面。

2.4 数值计算方案

为了研究田山一级泵站不同进水流速进水表面漩涡特性,选择 9 种流速工况进行数值模拟,计算模型进出口速度值见表 1。

表 1 原模型流速对照

Tab. 1 The original model flow rate comparison table

计算模型进口流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	计算模型出口流速/ ($m \cdot s^{-1}$)
0.171 3	1.480 6
0.182 8	1.580 6
0.188 3	1.480 6
0.201 1	1.580 6
0.209 3	1.480 6
0.223 5	1.580 6
0.256 9	2.221 1
0.282 6	2.221 1
0.314 0	2.221 1

注:模型几何比尺 $\lambda_L=10$;流速比尺 $\lambda_V=3.16$

2.5 特征截面的选取

选择右侧进水池的 1-1 截面(自由水面)、2-2 截面(喇叭管进口水平面)、3-3 截面(喇叭管进口中心纵截面)、4-4 截面(进水池右部中间纵截面)、5-5 截面(进水池右部边壁纵截面)和 6-6 截面(喇叭管进口后部边缘横截面)为特征截面,见图 1。对特征截面进行流态和涡量分析。

3 数值计算结果分析

3.1 特征截面流态分析

3.1.1 进水池水平剖面流态分析

图 5 为进水池自由水面(1-1 截面)和喇叭管进口水平面(2-2 截面)的流线和流速分布。在不同进水流速 v 时,1-1 截面的流速分布呈现出内部大于边壁,2-2 截面的流速分布为喇叭管进口附近最大且后墙与喇叭管进口间流速变化梯度明显。流线分布均表现为进水池前部平顺、后部紊乱,漩涡均在喇叭管与后墙间的区域,2 个截面产生的漩涡数量分别为 4~5 和 3~4 个,且随着进水流速的减小漩涡数量减少、强度降低。

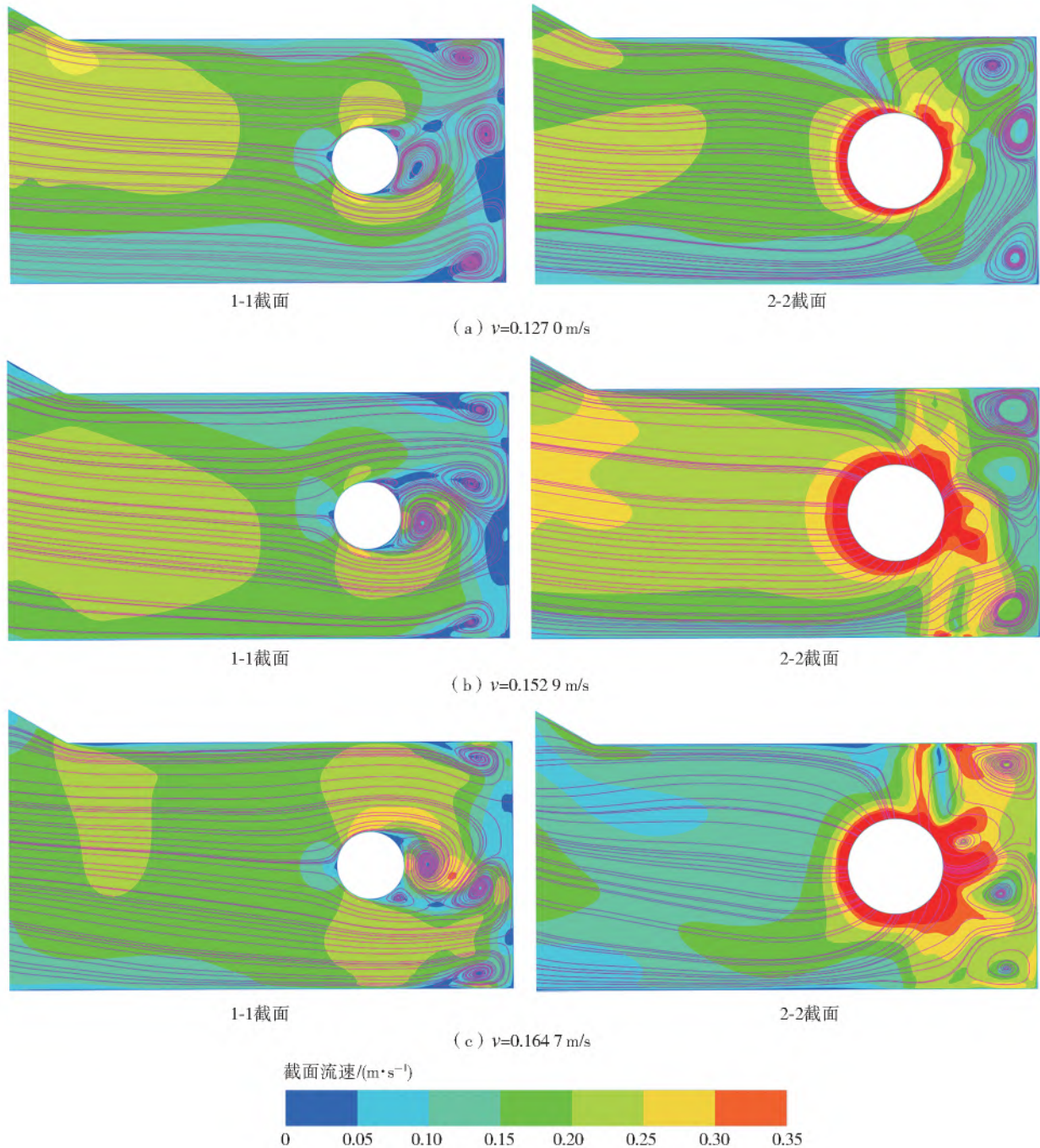


图5 在不同进水流速时进水池水平截面流速和流线分布

Fig. 5 Flow velocity and streamline distribution in the horizontal section of the inlet tank in different inlet flow rates

3.1.2 进水池纵剖面流态分析

图6为进水池喇叭管进口中心纵截面(3-3截面)、进水池右部中间纵截面(4-4截面)、进水池右部边壁纵截面(5-5截面)的流线和流速分布。3-3截面的高流速区域位于喇叭管进口附近,随着进水流速的增加区域增大,流线从前后部向喇叭管进口集中。4-4截面在喇叭管进口高度附近及前部形成高流速区域,流线起始于前部聚集于进水喇叭管口高度附近,在底壁和后墙夹角处形成水中漩涡。5-5截面的高流速区域位于喇叭管进口高度附近的后墙和喇叭管之间区域,受边壁效应影响,流线分布比较

紊乱,在底壁、右侧边壁和后壁的夹角处形成1个附壁涡。随着进水流速增大,4-4和5-5截面漩涡产生位置不变,水中漩涡强度变化。

3.1.3 进水池横剖面流态分析

图7为进水池喇叭管进口后部边缘横截面(6-6截面)的流线和流速分布。该截面的高流速区域位于喇叭管进口高度附近,且随着进水流速的增加区域增大,流线分布紊乱;在喇叭管口下方、侧底壁夹角及底壁产生2~3个附底涡和附壁涡,漩涡的位置变化不大,但水中漩涡强度随着进水流速增大有所增强。

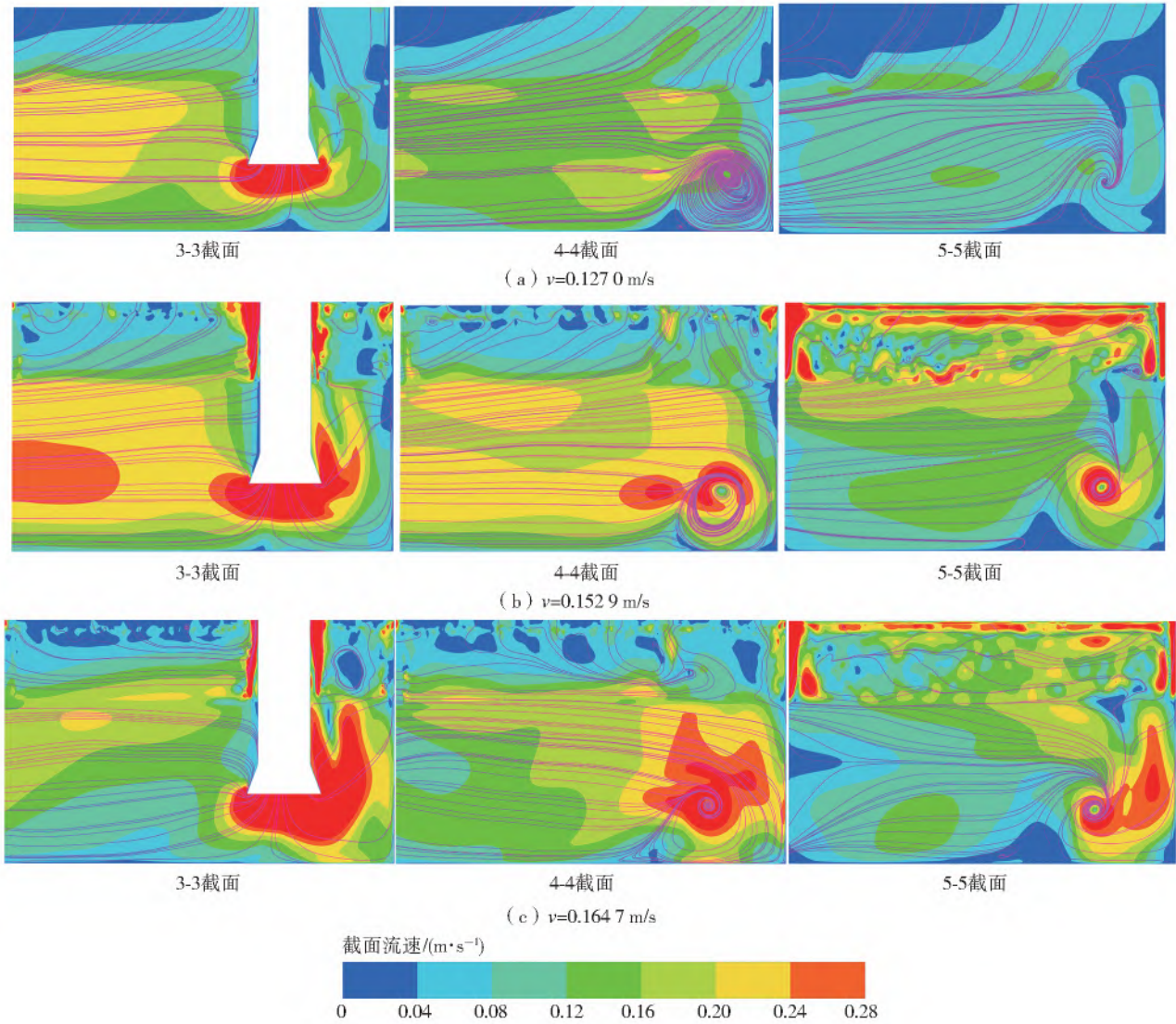


图 6 在不同进水流速时进水池纵截面流速和流线分布

Fig. 6 Flow velocity and streamline distribution in the longitudinal section of the inlet tank in different inlet flow rates

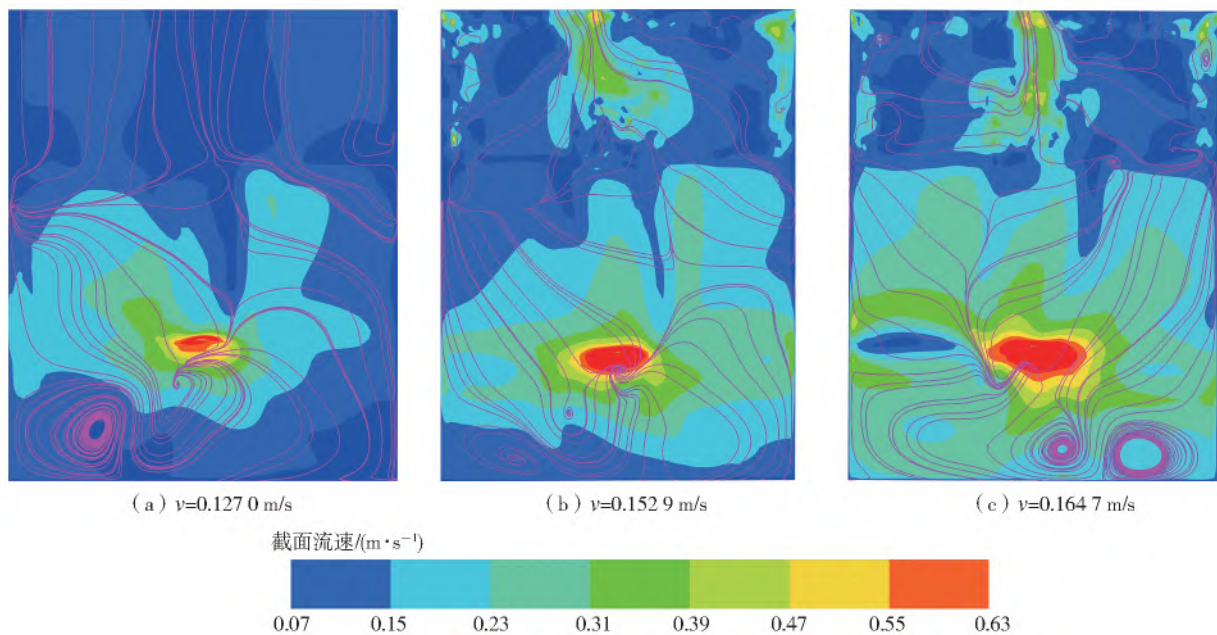


图 7 在不同进水流速时进水池横截面流速和流线分布

Fig. 7 Flow velocity and streamline distribution of the cross section of the inlet tank in different inlet flow rates

3.2 漩涡及涡量分布

3.2.1 漩涡分布

在不同进水流速(v)下进水池和进水管形成的漩涡见图8,漩涡分布采用Q准则进行体现。由图8可知:进水流速在0.1019~0.1270 m/s时,水面产生波动,形成的气泡浸入水体较深且间歇性地进入喇叭管口,形成Ⅲ、Ⅳ型涡;流速在0.1529 m/s

时,水面波动明显,形成的气柱浸入水体的深度达到喇叭管口附近,气柱间歇性地进入喇叭管口,形成Ⅴ型涡;流速在0.1647~0.1784 m/s时,水面波动剧烈,形成的气体连续地进入喇叭管口,形成Ⅵ型涡。可见,进水池形成的表面漩涡强度随着进水流速增加逐渐增强。

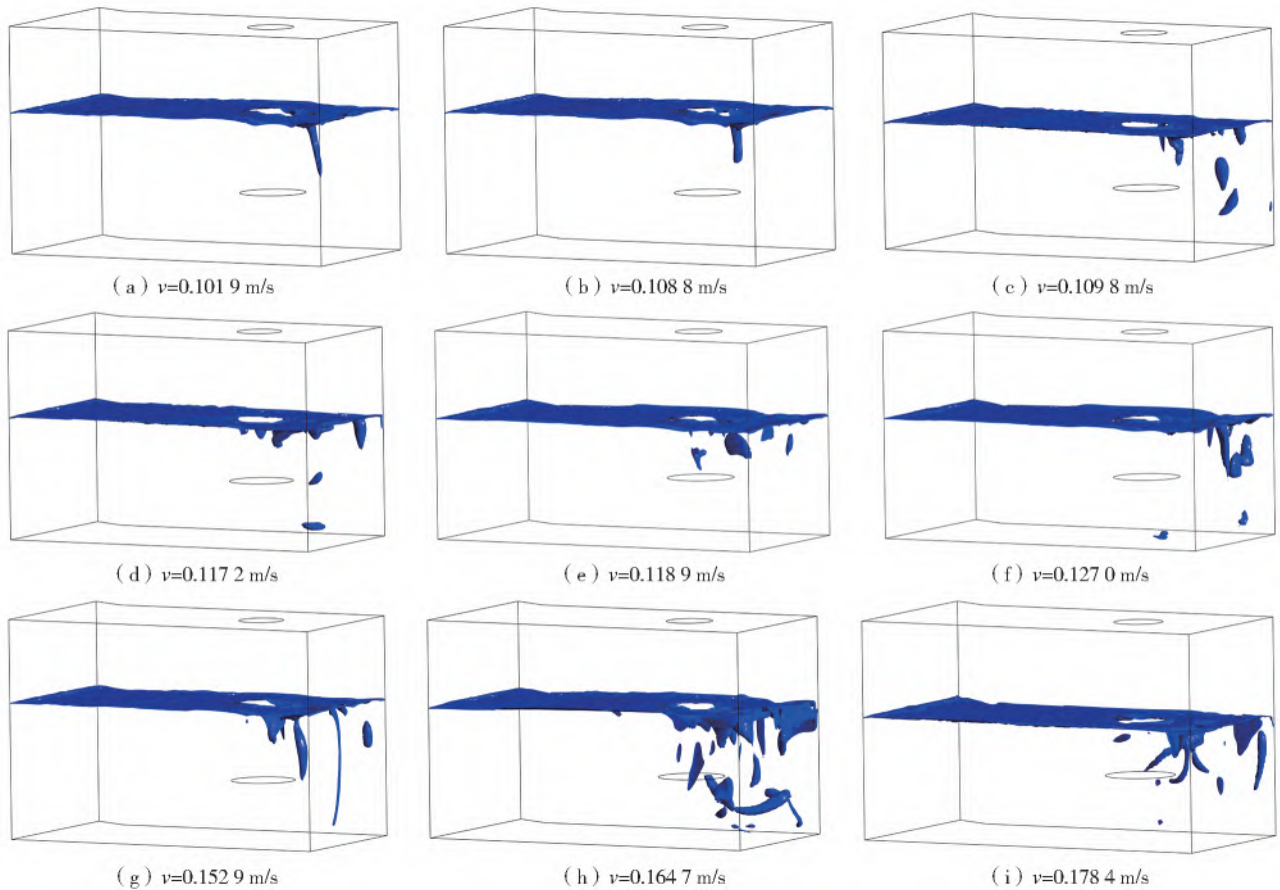


图8 在不同进水流速时表面漩涡分布
Fig. 8 Surface vortex distribution map in different inlet flow rates

3.2.2 涡量分布

图9为喇叭管进口水平面(3-3截面)涡量分布图。在涡量为-30~40 s^{-2} ,不同进水流速下,截面

最大涡量值均位于进水管与后部边壁之间,随着流速增大,涡量值最大区域更加明显、数量增多或集中,漩涡强度不断增大。

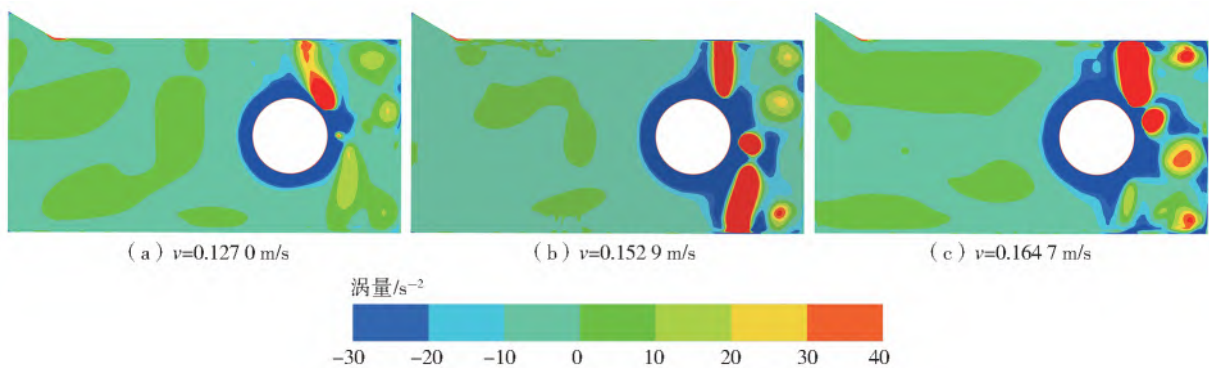


图9 在不同进水流速时喇叭管进口水平面涡量
Fig. 9 Vorticity diagram of the horn tube inlet horizontal plane in different inlet flow rates

3.3 进水流速与漩涡类型关系

对9种流速泵站模型进水池表面漩涡特性进行分析,得到进水池表面漩涡类型与进水流速的关系为:模型进水流速在 $0.1019\sim 0.1270$ m/s(原型进水流速 $0.3225\sim 0.4016$ m/s)时,漩涡类型为Ⅲ、Ⅳ型涡;模型进水流速在 0.1529 m/s(原型进水流速 0.4835 m/s)时,漩涡类型为Ⅴ型涡;模型进水流速在 $0.1647\sim 0.1784$ m/s(原型进水流速 $0.5208\sim 0.5642$ m/s)时,漩涡类型为Ⅵ型涡。

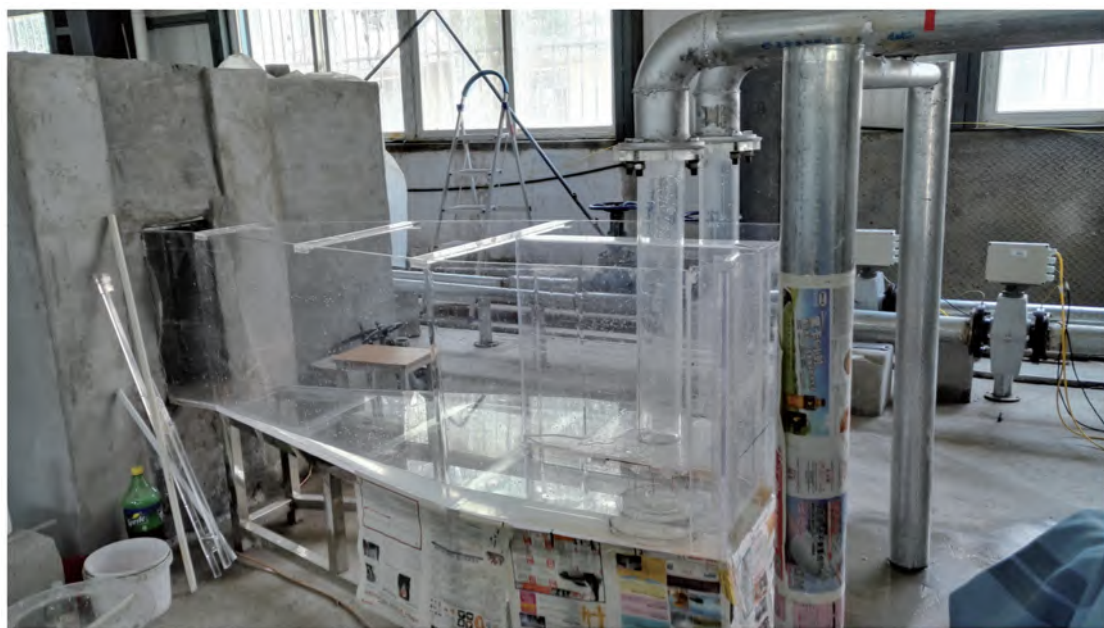


图10 模型试验系统

Fig. 10 Schematic diagram of model test system

表2 测量仪器参数

Tab. 2 Measuring instrument parameters

仪器名称	型号	数量	规格	精度	用途
电磁流量计	E-mag	1	DN50 0~80 m ³ /h	±0.3%	测量供水管流量
电磁流量计	E-mag	2	DN100 0~100 m ³ /h	±0.3%	测量进水管流量
信号采集软件	Vib'SYS	1			将电压信号转变为流量信号
水位标尺	透明直尺	1	0~500 mm	±0.5 mm	测量进水池水位

4.2 不同流速的试验研究

试验采用3台高性能DV同时进行多角度拍摄和录像,不同进水流速的模型进水池漩涡流态见图11。由图11可知,不仅产生了表面漩涡,还产生了水中涡(附底涡和附壁涡):进水流速为 0.1019 m/s时,在进水喇叭管和后墙之间,出现强度时大时小的Ⅲ、Ⅳ型涡现象;流速为 0.1088 m/s时,出现2个对称的Ⅳ型涡或Ⅴ型涡;流速为 0.1098 m/s时,长时间出现Ⅲ、Ⅳ型涡现象;流速为 0.1172 m/s时,出现1个显著的Ⅳ型涡或Ⅴ型涡;流

4 试验验证

4.1 模型试验与方法

通过模型试验方法对田山一级泵站进水物理模型数值模拟结果进行验证,试验研究为不带泵的研究。田山一级泵站进水池中水流主要受重力支配,试验按重力相似准则进行,模型比尺为 $1:10$ 。试验系统包括:引渠、前池、进水池、进水管、模拟黄河水位水池、循环水池、连接管路、真空泵及离心泵,见图10。试验中采用的测量仪器见表2。

速为 0.1189 m/s时,出现1个更显著的Ⅳ型涡,偶尔出现Ⅴ型涡;流速为 0.1270 m/s时,出现1个更显著的Ⅳ型涡或Ⅴ型涡;流速为 0.1529 m/s时,出现Ⅲ、Ⅳ型涡和Ⅵ型涡;流速为 0.1647 m/s时,出现2个Ⅵ型涡;流速为 0.1784 m/s时,长时间出现Ⅵ型涡。

4.3 试验与模拟结果的对照

试验研究中漩涡类型与数值模拟结果的对照见表3。由表3可知,试验研究结果很好地验证了数值模拟结果,在不同进水流速时进水池产生的漩涡

类型不同。对泵站工程来说,允许 I、II 型漩涡存在,避免产生 III、IV 型漩涡,不允许存在 V 型及以上

漩涡,因此要保证进水流态良好,进水流速值不应大于 0.322 2 m/s。

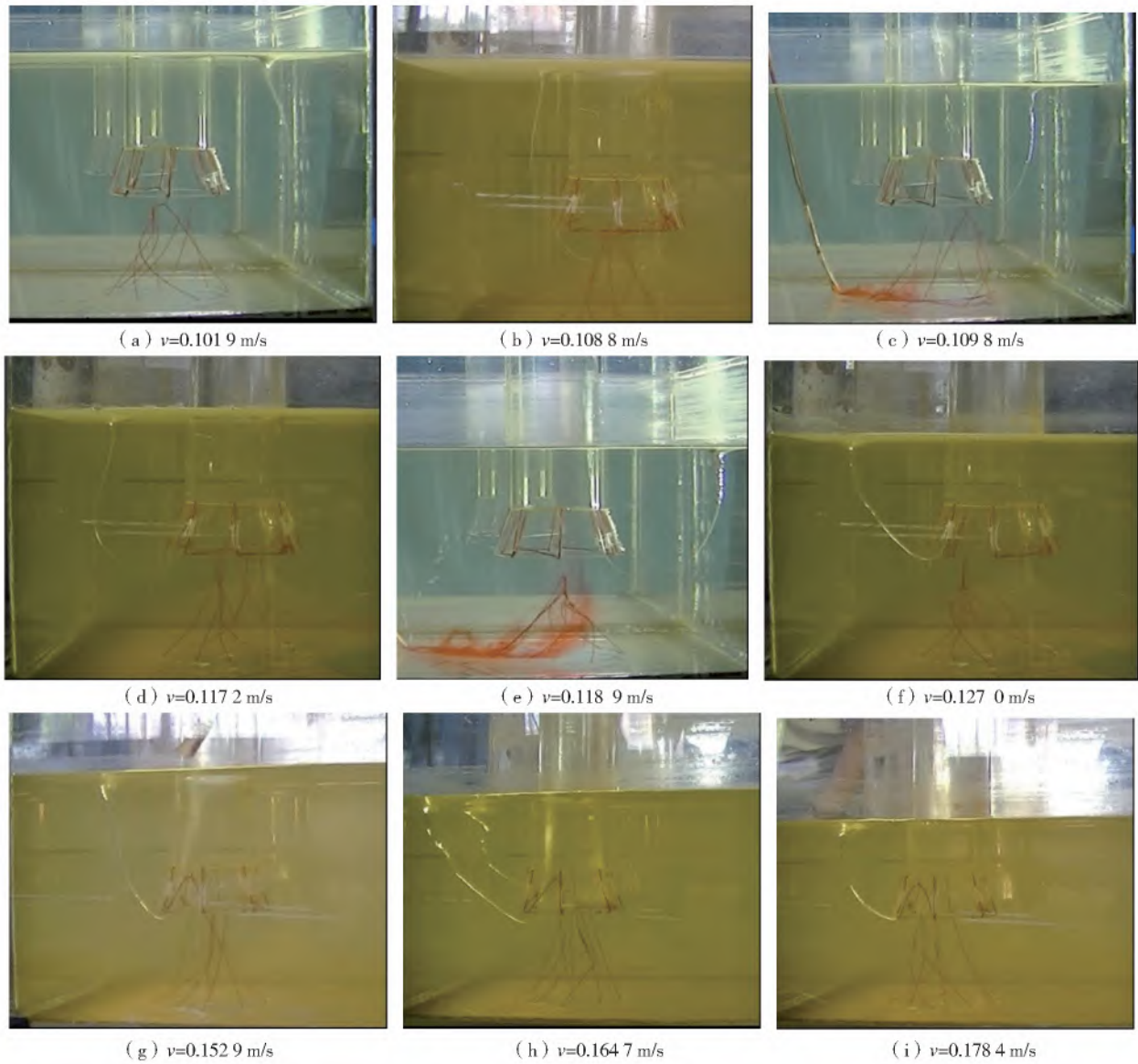


图 11 在不同进水流速时的模型进水漩涡流态

Fig. 11 Model inlet vortex flow pattern in different inlet flow rates

表 3 试验研究与数值模拟漩涡类型对照

Tab. 3 Comparison of experimental research and numerical simulation vortex types

模型流速/(m·s ⁻¹)	原型流速/(m·s ⁻¹)	试验研究	数值模拟
0.101 9	0.322 2	时大时小的 III、IV 型涡	III、IV 型涡
0.108 8	0.344 1	2 个对称的 IV 型涡或 V 型涡	III、IV 型涡
0.109 8	0.347 2	长时间出现 III、IV 型涡	III、IV 型涡
0.117 2	0.370 6	1 个显著的 IV 型涡或 V 型涡	III、IV 型涡
0.118 9	0.376 0	1 个更显著的 IV 型涡现象,偶尔出现 V 型涡	III、IV 型涡
0.127 0	0.401 6	1 个更显著的 IV 型涡或 V 型涡	III、IV 型涡
0.152 9	0.483 5	出现 III、IV 型涡和 VI 型涡	V 型涡
0.164 7	0.520 8	2 个 VI 型涡	VI 型涡
0.178 4	0.564 2	长时间出现 VI 型涡	VI 型涡

5 结 论

对田山一级泵站9种进水流速的表面漩涡特性进行数值模拟和试验研究,得出如下结论:

泵站进水水深不变,进水流速为0.322 2~0.564 2 m/s时,泵站表面漩涡的强度随进水流速的增大而增强。流速在0.322 2~0.401 6 m/s时,出现表面下凹的Ⅲ、Ⅳ型漩涡;流速在0.483 5 m/s时,出现表面下凹较深的间断进气V型漩涡;进水流速在0.520 8~0.564 2 m/s时,出现漩涡中心为贯通的连续进气的Ⅵ型漩涡。

保证泵站开敞式进水池进水流态良好,进水流速不应大于0.322 2 m/s。

研究还表明,进水池不仅产生了表面漩涡还产生了水中漩涡,水中漩涡产生的类型、强度、机理与进水流速的关系,需要进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 邱传忻,李继珊. 泵站改造[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:336-347. (QIU C X, LI J S. Rehabilitation of pumping station[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005: 336-347. (in Chinese))
- [2] 郭苗. 进水池内涡旋流动的LBM-VOF数值模拟与实验研究[D]. 北京:中国农业大学,2018. (GUO M. LBM-VOF numerical simulation and experimental research on vortex flow in inlet pool [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)) DOI: cnki;cdmd;1. 1018. 069336.
- [3] 宋希杰. 轴流泵进水池附底漩涡动力特性及诱导压力脉动研究[D]. 扬州:扬州大学,2020. (SONG X J. Study on the dynamic characteristics and induced pressure pulsation of the bottom vortex in the intake pool of the axial flow pump [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese)) DOI: 10. 27441/d. cnki. gyzdu. 2020. 000179.
- [4] 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. (ZHANG D S, LI P X, ZHAO R J, et al. Large eddy simulation of the vortex structure and turbulence characteristics of the suction inlet of a pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 134-141. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 10. 015.
- [5] 吴鹏飞. 进水池表面吸气涡动态过程及机理研究[D]. 武汉:武汉大学,2018. (WU P F. Study on the dynamic process and mechanism of the suction vortex on the surface of the intake pool [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese))
- [6] 魏航. 泵站进水池自由表面漩涡及防护措施研究[D]. 扬州:扬州大学,2016. (WEI H. Study on the free surface vortex and protective measures of the pumping station inlet pool [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016. (in Chinese)) DOI: cnki; cdmd; 2. 1016. 284363.
- [7] 刘超,梁豪杰,金燕,等. 立式轴流泵进水流场PIV测量[J]. 农业机械学报,2015,46(8): 33-41. (LIU C, LIANG H J, JIN Y, et al. PIV measurement of the inlet flow field of a vertical axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 33-41. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 08. 006.
- [8] 杨帆,赵浩儒,刘超,等. 涡带工况下轴流泵装置内部脉动特性数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(4): 670-678. (YANG F, ZHAO H R, LIU C, et al. Numerical analysis of internal pulsation characteristics of axial flow pump device under vortex working condition [J]. Journal of Applied Basic Science and Engineering, 2017, 25(4): 670-678. (in Chinese)) DOI: 10. 16058/j. issn. 1005-0930. 2017. 04. 002.
- [9] 李大亮,刘超,汤方平. 开敞式进水池内部流动的3DPIV试验研究[J]. 中国农村水利水电,2012(4): 101-106. (LI D L, LIU C, TANG F P. 3DPIV experimental study on the internal flow of an open intake tank [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(4): 101-106. (in Chinese)) DOI: cnki; sun; znsd. 0. 2012-04-029.
- [10] 李海峰. 自由表面旋涡的机理研究[D]. 上海:上海大学,2009. (LI H F. Study on the mechanism of free surface vortex[D]. Shanghai: Shanghai University, 2009. (in Chinese)) DOI: cnki; cdmd; 1. 2009. 252686.
- [11] 孙洪亮,刘亚坤. 进水口自由表面漩涡特性研究[J]. 水力发电学报,2016,35(4): 67-71. (SUN H L, LIU Y K. Study on the vortex characteristics of the free surface of the water inlet[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 67-71. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slfdx. 20160408.
- [12] 杨猛,刘硕,徐万海,等. 油水两相自由表面漩涡的数值模拟[A]. 第三十一届全国水动力学研讨会论文集(下册)[C]. 2020: 6. (YANG M, LIU S, XU W H, et al. Numerical simulation of oil-water two-phase free surface vortices [A]. Proceedings of the 31st National Hydrodynamics Symposium (Volume 2) [C]. 2020: 6. (in Chinese)) DOI: 10. 26914/c. cnki. hy. 2020. 036950.
- [13] 初长虹. 泵站进水口淹没深度对漩涡的影响研究[D]. 扬州:扬州大学,2020. (CHU C H. Study on the

- influence of the submerged depth of the pumping station inlet on the vortex [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese)) DOI: 10. 27441/d.cnki. gyzdu. 2020. 001632.
- [14] YOUNG K P, MOHAN K D. Numerical visualization of air inlet induced by free surface vortex[C]//Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 2016. DOI. org/10. 1007/s11630-017-0971-2.
- [15] 赵永志, 顾兆林, 郁永章, 等. 自由水涡结构及运动特征的数值研究[J]. 西安交通大学报, 2003, 37(1): 85-88. (ZHAO Y Z, GU Z L, YU Y Z, et al. Numerical study on the structure and motion characteristics of free water vortex[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(1): 85-88. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:0253-987X. 2003. 01. 022.
- [16] 李书斌. 进水口漩涡影响因素研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (LI S B. Research on influencing factors of inlet vortex[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)) DOI: cnki: cdm: 2. 2010. 090699.
- [17] 杨超林, 王均星, 罗志鹏, 等. 竖式进水口消涡措施试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 152-155. (YANG C L, WANG J X, LUO Z P, et al. Experimental study on vortex elimination measures for vertical inlets[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(8): 152-155. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2017. 08. 032.
- [18] 王自明, 王月华, 韩晓维, 等. 泵站进水池自由表面漩涡研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 158-160, 164. (WANG Z M, WANG Y H, HAN X W, et al. Study on the free surface vortex of the pumping station inlet pool[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 158-160, 164. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2018. 07. 034.
- [19] KHADEM, BEHROUZ. Numerical simulation of anti-vortex devices at water inlet[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2018, 171(WM1): 18-29. DOI. org/10. 1680/jwama. 16. 00051.
- [20] 孙洪亮, 刘亚坤, 刘洁, 等. 弧形闸门前漩涡临界淹没水深研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(3): 374-379. (SUN H L, LIU Y K, LIU J, et al. Research on critical submerged depth of vortex in front of arc gate[J]. Research and Progress in Hydrodynamics (Series A), 2017, 32(3): 374-379. (in Chinese)) DOI: 10. 16076/j. cnki. cjhd. 2017. 03. 015.
- [21] 初长虹, 刘超, 孙玉民, 等. 泵站进水口淹没深度对漩涡的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 178-186. (CHU C H, LIU C, SUN Y M, et al. The influence of the submerged depth of the pumping station inlet on the vortex[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 178-186. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0149.
- [22] WANG Y, JIANG C, LIANG D. Comparison between empirical formulae of intake vortices[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011(1): 113-116. DOI: org/10. 1080/00221686. 2010. 534279.
- [23] 章晋雄, 张东, 吴一红, 等. 锦屏一级水电站分层取水叠梁门进水口水力特性研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 1-6. (ZHANG J X, ZHANG D, WU Y H, et al. Study on hydraulic characteristics of stratified water intake and stacked beam gate inlet of Jinping I hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: cnki: sun: sfxb. 0. 2010-02-002.
- [24] KNAUSS J. Swirling flow problem at intakes[M]. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, 1987. DOI. org10. 1201/9780203737552.
- [25] 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. (WANG F J, TANG X L, CHEN X, et al. Research progress of internal flow analysis methods in pumping stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 47-61, 71. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170887.

Influence of different inlet flow rates on pumping station sump vortex

GAO Chuanchang, GAO Yuxin, LI Xiaochao

(North China University of Water Conservancy and Hydropower, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The bottom elevation of lower Yellow River main channel has been greatly reduced because of Xiaolangdi Reservoir several water and sand adjustments, resulting in a significant drop in the water level of the Yellow River, making the submerged depth of the horn nozzle of the pumping station into the pool that does not meet the pump requirements. The pump runs at an ultra-low water level, which causes deterioration in the flow pattern of the intake pool and changes in cavitation conditions, resulting in serious cavitation of the water inlet horn and pump impeller, unit vibration, and degradation of pump performance, etc., which will force the unit in severe cases. The flow rate of the inlet water of the pumping station directly affects the flow pattern of the inlet pool of the pumping station. The turbulent flow pattern is often accompanied by the generation of vortices, which will not only reduce the performance of the pump but even cause the pump to cavitation, vibration, and unable to work.

To explore the flow rate of the pumping station and the generation and development of the flow pattern and vortex of the pumping station's intake pool, combined with the actual operation of the pumping station, the NX UG10.0 software is used to construct the drainage channel, fore pool, intake pool, and intake pipe. Taking pumping station water intakes physical model, and a three-dimensional turbulence mathematical model of the corresponding physical model is established. The calculation adopts the Reynolds NS equation, VOF model, and unsteady SST $k-\omega$ turbulence model. The algorithm adopts the simple algorithm of flow field calculation. The discrete method adopts a limited volume method. The gradient adopts the least square method based on grid unit, the momentum, turbulent kinetic energy and turbulence dissipation rate adopt the second-order upwind style respectively. The inlet adopts the velocity inlet boundary condition, and the outlet adopts the velocity outlet boundary conditions, the water surface of the front pool and the inlet sluice chamber are set as the pressure outlet boundary conditions, and the atmospheric pressure reference point is selected as the contact point between the free water surface and the air. The rest are set as the wall boundary conditions, including: the front sump, the inlet sluice chamber, the side and bottom wall, the four walls of the inlet flow channel, the bell mouth and the outlet pipe wall are automatically processed by the SST $k-\omega$ model until the flow difference between the inlet and outlet no longer changes or the water surface is stable, while the flow field is considered to reach in a stable state. 9 different influent flow rates are selected, the characteristics of the influent water flow of the pumping station are numerically simulated, and the distribution of the influent flow field, the change of vortex, and the distribution law of the pumping station are analyzed under different influent flow rates.

The research results show that when the inlet water velocity is between 0.322 2 m/s and 0.564 2 m/s, the intensity of the vortex on the surface of the pumping station increases with the increase of the inlet water velocity. When the inlet water velocity is 0.322 2 m/s~0.401 6 m/s, Type III, and IV vortex appears in the inlet pool. Type V vortex appears when the inflow velocity is 0.483 5 m/s, and Type VI vortex appears when the inflow velocity is 0.520 8 m/s~0.564 2 m/s.

By comparing with the model test results, the two results are consistent. The research results can provide a reference for the engineering design of the pumping station.

Key words: pumping station; inlet water flow rate; inlet pool vortex; numerical simulation; model test

