

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0149

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 submerged depth of pump station inlet on vortex[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(6):178-186. (in Chinese)

## 泵站进水口淹没深度对漩涡的影响

初长虹<sup>1</sup>,刘超<sup>1</sup>,孙玉民<sup>2</sup>,崔玉静<sup>3</sup>,张重阳<sup>1</sup>,雷镇<sup>1</sup>

(1. 扬州大学 水利与能源动力工程学院,江苏 扬州 225009;2. 山东省南水北调工程建设管理局,济南 250013;  
3. 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心,济南 250013)

**摘要:** 泵站流道进水口漩涡会危害水泵运行,降低水泵性能。进水口漩涡的发生发展情况与进水口淹没深度有关,结合泵站实际运行情况选取5种不同的淹没深度,通过数值模拟,分析不同淹没深度下流道进水口的流场结构、漩涡的涡量变化及分布规律。研究表明:在流量不变,淹没深度 $0.09D\sim 0.2D$ 时,随着淹没深度的增大,漩涡强度变小。淹没深度为 $0.09D$ 的漩涡强度最大,在淹没深度为0和 $0.05D$ 的状况下没有明显漩涡产生。淹没深度为 $0.09D$ 、 $0.14D$ 、 $0.2D$ 时,漩涡均在距离进水流道进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$ 附近终止。研究结果可为泵站设计进水口淹没深度参数提供一定参考。

**关键词:** 泵站;进水口;淹没深度;漩涡;数值模拟

中图分类号:TV136 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### The influence of submerged depth of pump station inlet on vortex

CHU Changhong<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, SUN Yumin<sup>2</sup>, CUI Yujing<sup>3</sup>, ZHANG Chongyang<sup>1</sup>, LEI Zhen<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;  
2. Shandong South-to-North Water Transfer Project Construction Administration, Jinan 250013, China;  
3. Rivero Haihe Rivero Huaihe Rivero Xiaoqing Serva Administrado Servo Centro, Jinan 250013, China)

**Abstract:** The inlet vortex of the pumping station can endanger the operation of the pump and reduce the performance of the pumping station. The occurrence and development of the intake vortex is related to the submerged depth of the intake. In this paper, five different submerged depths were selected based on the actual operation of the pumping station, and therefore, the numerical simulation was carried out by using fluent software. The flow field structure of the intake of different submerged depths were analyzed, and then the vortex value and the distribution law of vortex were obtained. The results showed that submerged depth at  $0.09D$  (intake height of passage) to  $0.2D$  and constant flow rate, the vortex strength become smaller with the increase of submerged depth. The vortex intensity of the  $0.09D$  submerged depth was the largest, and there was no obvious vortex at the submerged depth of  $0D$  and  $0.05D$ . The results also revealed that when the submerged depth was  $0.09D$ ,  $0.14D$  and  $0.2D$ , respectively, the vortex was terminated near  $0.3\text{ m}$  below the top plate. The research results can provide a reference for the design of the inlet submerged depth of the pumping station.

**Key words:** pumping station; intake; submerged depth; vortex; numerical simulation

收稿日期:2019-03-31 修回日期:2019-07-11 网络出版时间:2019-07-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190717.1402.006.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(51279173);山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201705)

作者简介:初长虹(1995—),男,山东滨州人,主要从事水泵及水泵站工程理论与应用方面研究。E-mail:1003550889@qq.com

通信作者:刘超(1950—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,主要从事水泵及水泵站工程理论与应用方面研究。E-mail:liuchao@yzu.edu.cn

泵站流道的进水口形成有害旋涡之后会扰乱进水流态,泵站的效率受此影响降低,更为严重时,会诱发汽蚀和振动,造成了泵站运行的不稳定性。进水口漩涡问题实质上就是进水口淹没深度问题,两者密切相关。漩涡产生区间存在一个最大深度和最小深度,当淹没水深小于这个深度或者大于这个深度时,漩涡会有不同程度的削弱,甚至消失。因此在设计泵站时,泵站进水口淹没深度是一个相当重要的设计参数,它不但影响工程造价,而且影响泵站的运行效率。

一直以来国内学者对于泵站进水口漩涡的产生机理和发展规律作了很多研究,包括理论和实验层面。郑双凌等<sup>[1]</sup>总结了进水口的临界淹没深度公式。王林锁等<sup>[2]</sup>利用能源原理,对淹没深度试验的相似准则及其相应的特征参数进行了研究和探讨,给出了临界淹没深度的换算公式。王自明等<sup>[3]</sup>研究了进水口淹没深度以及淹没弗劳德数与进水口吸气漩涡之间的关系。胡去劣等<sup>[4]</sup>在试验的基础上,提出低福氏数进水口分区成涡的规律及无涡进水口的体型设计。孙洪亮等<sup>[5]</sup>对弧形闸门前的漩涡特性及其临界淹没深度进行研究,可为泵站进水口设计提供参考。冯汉民等<sup>[6]</sup>以实验的形式研究了泵站进水口漩涡发生、发展的影响因素,得出了漩涡随淹没深度的变化规律。曹婷等<sup>[7]</sup>对水电站多种改变边界条件的技术方案的进水口流态进行流场三维数值模拟,陈亮熊等<sup>[8]</sup>通过消涡工程试验,比较了防涡梁法、进水口上部倾斜法和浮体法等3种消涡方法的多方案消涡效果,华明等<sup>[9]</sup>提出了泵站进水口临界淹没深度换算公式。目前运用CFD数值模拟研究漩涡相对较少。

为进一步研究泵站进水口漩涡特性和淹没深度对漩涡的影响,结合泵站实际运行情况,应用CFD流体计算软件去模拟仿真计算,分析得到进水口附近的流场结构,求出涡量数值,以反映泵站进水口漩涡的发生发展状况,揭示进水口漩涡的复杂结构,研究淹没深度和漩涡发生的关系。

## 1 建模及网格划分

### 1.1 模型参数及几何建模

选择典型泵站进水口,用ug10.0软件进行原型实体建模,原型的各个组成部分按照来流方向依次为前池,进水渠道。前池底部为斜坡状。当泵站部分机组运行时容易在进水口产生漩涡,尤其是单台机组运行时漩涡比较明显,所以本文选择单台机组进行流动模拟。如图1所示,计算区域为整个水体流动区域。

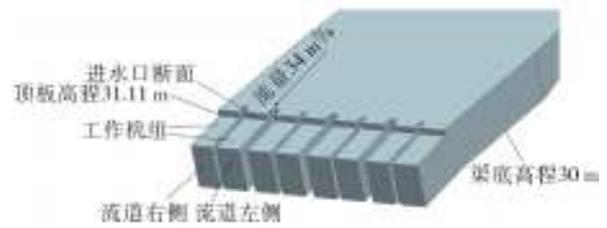


图1 进水前池模型

Fig. 1 Inlet forebay model diagram

### 1.2 网格划分与网格无关性分析

为了保证网格质量,提高仿真精度,本文采用ansys软件对原型进行网格划分。网格由四面体组成,边墩网格划分对计算结果影响较大,故对边墩网格进行加密处理。网格划分的数量会影响计算结果,为了得到可靠的数值模拟结果,需要进行网格无关性分析。将前池水力损失作为确定网格数的特征参数,计算公式为

$$H_f = \frac{(P_{out} - P_{in})}{\rho g} \quad (1)$$

式中: $H_f$ 为前池水力损失; $P_{out}$ 为前池出口总压; $P_{in}$ 为前池进口总压; $\rho$ 为液体密度; $g$ 为重力加速度。

计算不同网格数的水力损失见图2(a),当网格数大于200万后,前池水力损失不再随网格数的增加发生大的变化,故网格数取200万较为适宜。图2(b)为划分完成的网格。

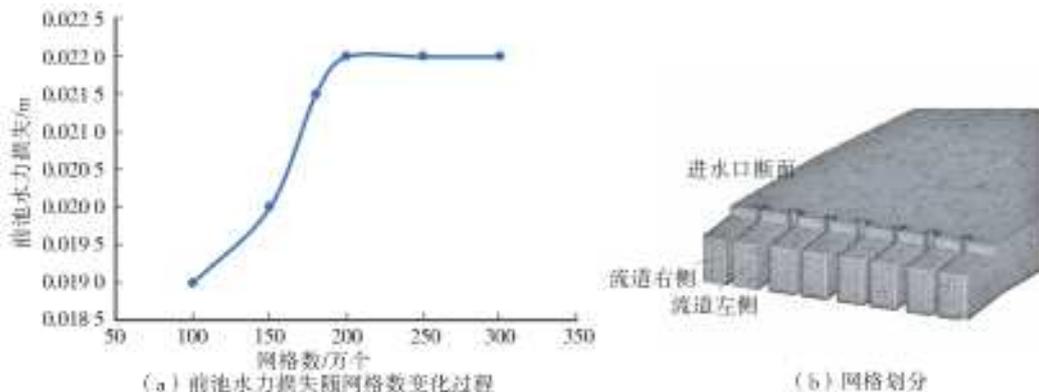


图2 (a)前池水力损失随网格数变化;(b)网格划分结果

Fig. 2 (a)Hydraulic loss varying with the number of grids;(b) Results of mesh generation

### 1.3 紊流模型和边界条件

计算采用雷诺 N-S 方程和 realizable  $k-\epsilon$  紊流模型。进水口设置为流量进水口条件,单机流量  $34 \text{ m}^3/\text{s}$ ,出口设置为自由出流条件,采用默认设置。计算区域的固体边壁均设为壁面边界条件,固体壁面处采取标准壁面函数处理,设为无滑移边界条件 ( $x, y, z$  方向上的速度分量均为 0),忽略前池液面和空气之间的热交换和热传导作用,对自由表面设为对称边界条件。

### 1.4 计算方案

为了较全面地研究泵站进水口淹没深度对进水口漩涡产生的影响,选取 5 种不同的进水口淹没深

度  $0, 0.05D, 0.09D, 0.14D, 0.2D$ ,  $D$ (渠道进口高度  $= 5.6 \text{ m}$ )。渠道进水口顶板高程为  $31.11 \text{ m}$ ,故 5 种淹没深度下水面对应的水位为分别是  $31.11, 31.41, 31.61, 31.91, 32.21 \text{ m}$ 。对泵站进水流动进行数值模拟,分析每种淹没深度下渠道进水口的流场结构,漩涡涡管,求出漩涡的涡量数值,对结果定量分析。

## 2 计算结果与分析

运用 TECPLOT 处理数值模拟的数据,每种淹没深度截取 A、B、C、D、E 5 个截面。各截面位置见表 1、图 3。

表 1 截面位置  
Tab. 1 Sectional schematic table

淹没深度	截面位置				
	A	B	C	D	E
$0.2D$	表面层	水面以下 0.3 m	进水口顶板	进水口顶板以下 0.2 m	进水口顶板以下 0.3 m
$0.14D$	表面层	水面以下 0.3 m	进水口顶板	进水口顶板以下 0.2 m	进水口顶板以下 0.3 m
$0.09D$	表面层	水面以下 0.3 m	进水口顶板	进水口顶板以下 0.2 m	进水口顶板以下 0.3 m
$0.05D$	表面层	水面以下 0.1 m	进水口顶板	进水口顶板以下 0.2 m	进水口顶板以下 0.3 m
0	表面层	进水口顶板以下 0.1 m	进水口顶板以下 0.2 m	进水口顶板以下 0.3 m	进水口顶板以下 0.4 m

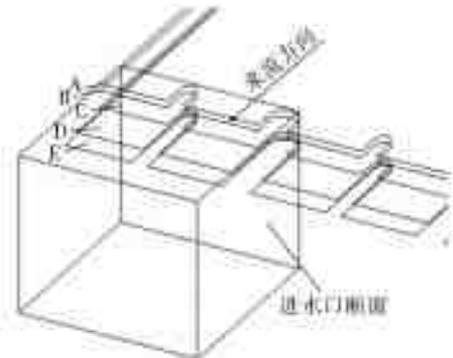


图 3 截面位置

Fig. 3 Sectional schematic diagram

### 2.1 水平截面流场分析

#### 2.1.1 淹没深度 $0.2D$ 截面流场

运用数值模拟数据,作出淹没深度  $0.2D$  下的 A、B、C、D、E 5 个截面的流线和速度云图,见图 4。淹没深度  $0.2D$  下的进水口漩涡流线图,见图 5。

#### 2.1.2 淹没深度 $0.14D$ 截面流场

运用数值模拟数据作出淹没深度  $0.14D$  下的 A、B、C、D、E 5 个截面的流线和速度云图,见

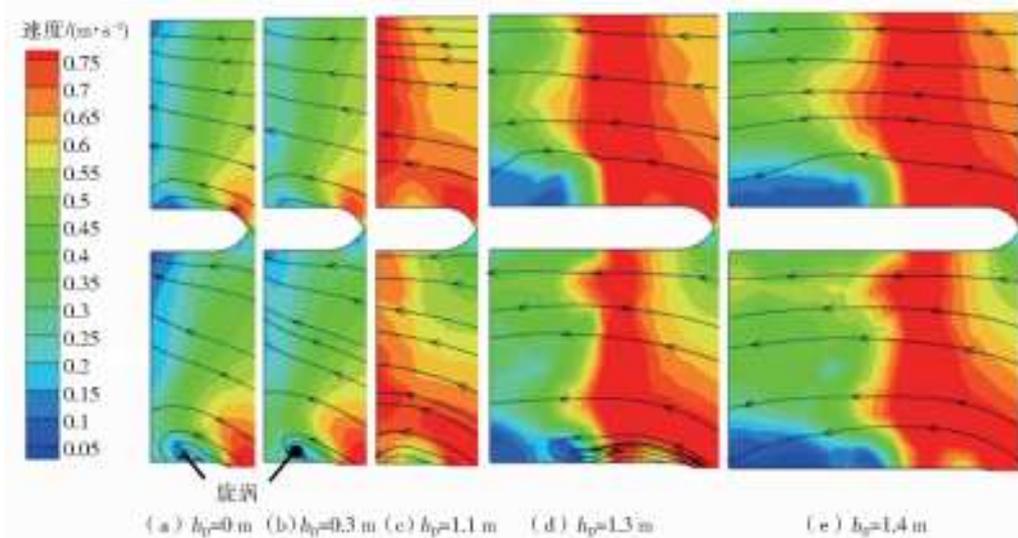


图 4 流场速度分布(淹没深度  $0.2D$ )

Fig. 4 Velocity distribution map of flow field (submerged depth  $0.2D$ )

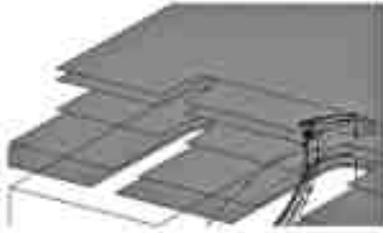


图5 进水口漩涡流线图(淹没深度 0.2D)

Fig.5 Vortex streamline map of inlet (submerged depth 0.2D)

图6. 淹没深度 0.14D 下的进水口漩涡流线图,见图7。

### 2.1.3 淹没深度 0.09D 截面流场

运用 TECPLOT 软件处理仿真模拟数据后,作出淹没深度 0.09D 下的 A、B、C、D、E 5 个截面的流线和速度云图见图 8,作出淹没深度 0.09D 下的进水口漩涡流线图,见图 9。

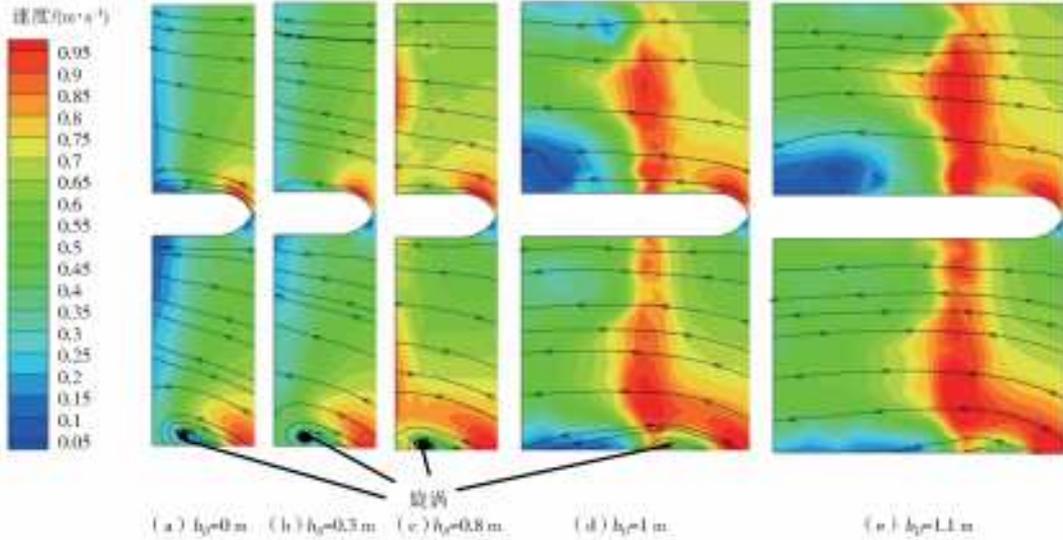


图6 流场速度分布(淹没深度 0.14D)

Fig.6 Velocity distribution map of flow field (submerged depth 0.14D)

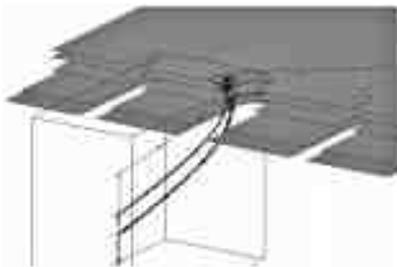


图7 进水口漩涡流线图(淹没深度 0.14D)

Fig.7 Vortex streamline map of inlet (submerged depth 0.14D)

### 2.1.4 淹没深度 0.05D 截面流场

运用 TECPLOT 软件处理仿真模拟数据后,作出淹没深度 0.05D 下的 A、B、C、D、E 5 个截面的流线和速度云图,见图 10。

### 2.1.5 淹没深度为 0 的截面流场

运用 TECPLOT 软件处理仿真模拟数据后,作出淹没深度为 0 的 A、B、C、D、E 5 个截面的流线和速度云图,见图 11。

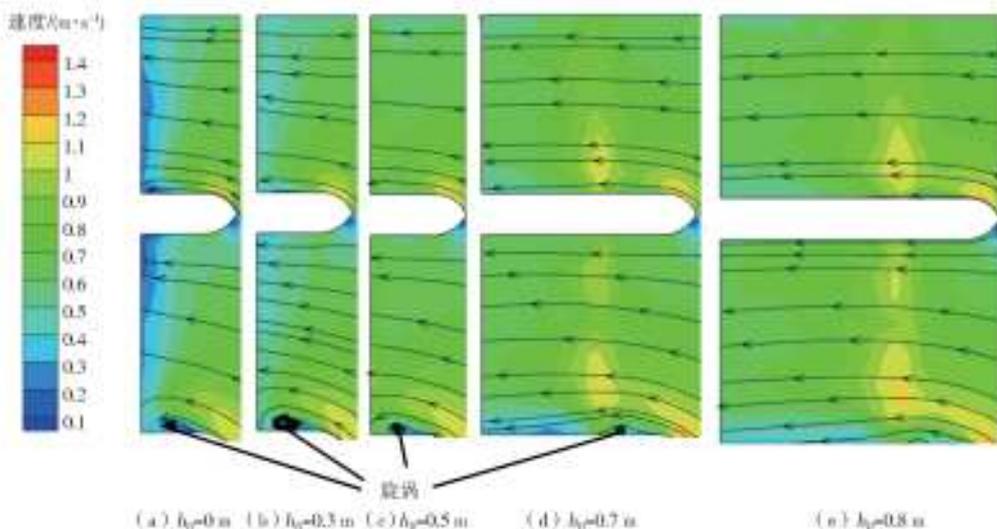


图8 流场速度分布图(淹没深度 0.09D)

Fig.8 Velocity distribution map of flow field (submerged depth 0.09D)

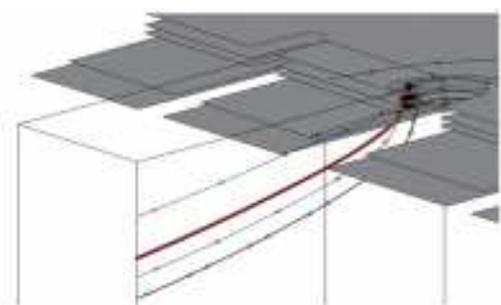


图 9 0.5 m 进水口漩涡流线(淹没深度 0.09D)

Fig. 9 Vortex streamline map of inlet (submerged depth 0.09D)

淹没深度为  $0.2D$ 、 $0.14D$ 、 $0.09D$  时,在不同淹没深度下的截面中,流线在流道右侧较为平顺,漩涡没有在流道右侧形成。流线在进水流道左侧边壁变得紊乱,漩涡在流道左侧边壁产生。图 5、图 7、图 9 给出了漩涡涡核的移动状况,涡核向着水流流动方向( $x$  轴正方向)迁移。在顶板以下  $0.3\text{ m}$  截面中,水流在流道左侧边壁的流态较好,漩涡消失。进水口漩涡产生的位置位于进水流道左侧边壁,漩涡的发生与发展是一个动态的过程,漩涡在表面层形成,

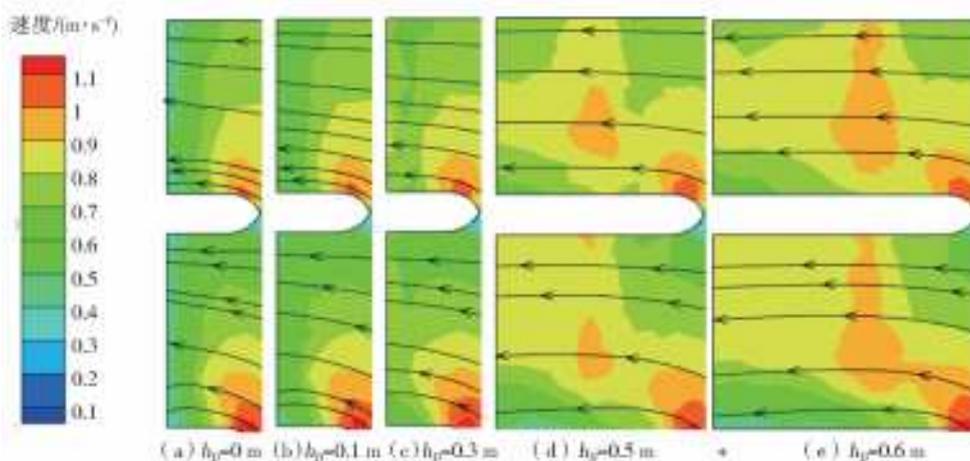


图 10 流场速度分布(淹没深度 0.05D)

Fig. 10 Velocity distribution map of flow field (submerged depth 0.05D)

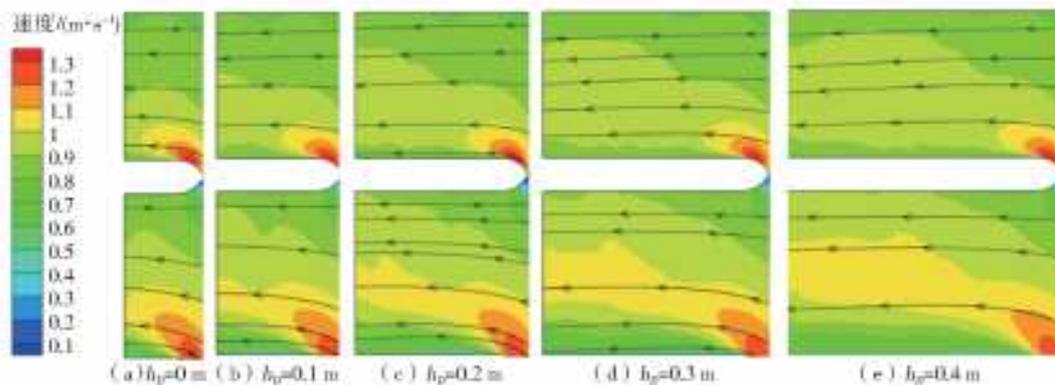


图 11 流场速度分布(淹没深度 0)

Fig. 11 Velocity distribution map of flow field (submerged depth 0)

自水面向下漩涡强度不断变化。在淹没深度为  $0.05D$ 、 $0$  时,观察图 10、11,流道左右两侧的水流流态较好。进水口上方的死水空间很小,水流剪切流动微弱,泵站流道进水口漩涡未能生成。各个截面无明显的低速区。水流没有受到流道进水口漩涡干扰,速度变化梯度较小。

从速度云图得知淹没深度在  $0.2D$ 、 $0.14D$ 、 $0.09D$  的状况下,不同的水平截面上速度分布存在明显的高速区和低速区,高速区的速度大小分别是  $1.4$ 、 $0.9$ 、 $0.75\text{ m/s}$ 。流道右侧和流道左侧的速度分布没有显著不同。流道左侧边壁速度普遍较小,

这是因为此位置产生了漩涡,此区域速度变化梯度较水流平顺处大。表面层速度云图中高速区面积明显小于其他截面的高速区面积。淹没深度为  $0.05D$ 、 $0$  时,截面流线在流道左右两侧均比较平整,水流平稳。进水口上方的死水区域很小,水流剪切流动微弱,未能看到进水口漩涡产生。各个截面无明显的低速区,水流不会受到流道进水口漩涡影响,速度变化幅度小。

## 2.2 进水流道截面涡量分析

为了定量研究漩涡在发展消散过程中的漩涡强度,因此对涡量进行分析。首先确定漩涡涡核的位

置。以涡核为中心截取矩形区域。其中仅含有独立漩涡,计算出该区域涡量数值。从流线图可知,流道左侧漩涡强度变化明显,通过计算流道左侧各个矩形区域5种淹没深度下的平均涡量,不同矩形区域的涡量数值随水深变化曲线见图12。

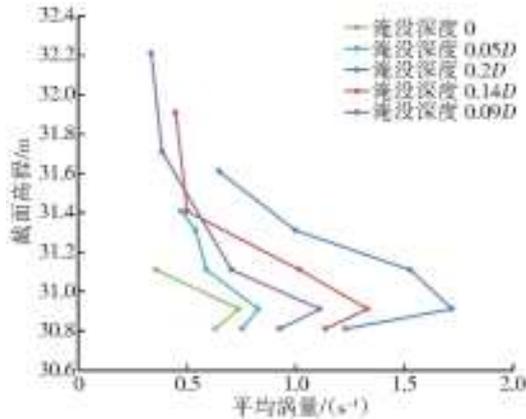


图12 矩形区域涡量平均值  
Fig. 12 Average section vorticity

图12显示,淹没深度 $0.2D$ 时,表面层的涡量为 $0.33\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.2\text{ m}$ 的涡量是 $1.12\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$ 的涡量是 $0.91\text{ 1/s}$ 。淹没深度 $0.14D$ 时,表面层的涡量为 $0.45\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.2\text{ m}$ 的涡量是 $1.33\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$ 的涡量是 $1.14\text{ 1/s}$ 。淹没深度 $0.09D$ 时,表面层的涡量为 $0.65\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.2\text{ m}$ 的涡量是 $1.72\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$ 的涡量是 $1.23\text{ 1/s}$ 。淹没深度 $0.05D$ 时,表面层的涡量是 $0.48\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.2\text{ m}$ 的涡量是 $0.83\text{ 1/s}$ ,流道进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$ 的涡量是 $0.76\text{ 1/s}$ 。将涡量数值整理见表2。

表2 平均涡量  
Tab. 2 Average vortex table 单位:1/s

位置	淹没深度			
	0.05D	0.09D	0.14D	0.2D
表面层	0.48	0.65	0.45	0.33
进水口顶板以下 $0.2\text{ m}$	0.83	1.72	1.33	1.12
进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$	0.76	1.23	1.14	0.91

从能量角度来说,单台机组运行时流速分布不均匀,在隔墩头部附近的脱流导致角动量在水面产生,进而产生漩涡。行近流速越大,产生角动量的趋势就越大,能提供的动能就越大。不同截面的涡量数值各不相同,水体能量不断发生交换,流动不稳定性明显,验证了上文观察流线图得出的进水口漩涡强度持续发生变化这一观点。漩涡起

始于水体表面,为空气与水体的交界面,交界面的剪切作用有利于漩涡的形成。在主流的带动下涡量逐渐增加。同时,漩涡在流动中的旋转动能克服阻力有所耗散,当能量耗散大于积累时,涡量减小。5种淹没深度下进水口漩涡的涡量随水深变化规律大致相同。从水面向下,随着水深增加,涡量增大,到达某一水深后涡量增加的梯度变大,在流道进水口顶板以下 $0.2\text{ m}$ (水位 $30.91\text{ m}$ )涡量达到最大,涡量峰值集中于涡核区域,而后迅速减小。漩涡在距离流道进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$ 附近消失。在流道进水口顶板以下 $0.2\text{ m}$ 到流道进水口顶板以下 $0.3\text{ m}$ 这一区间内,涡量迅速减小可能是因为漩涡耗散的能量远大于积累的能量,导致漩涡强度剧烈减弱。比较淹没深度 $0.09D$ 、 $0.14D$ 、 $0.2D$ 的进水口漩涡的涡量,流量一定时,随着淹没深度的增大,涡量数值变小。由此可知进水流道进水口漩涡的涡量和水深存在着密切的联系。为了研究最大涡量和淹没深度的变化关系,图13给出最大涡量随淹没深度变化曲线。

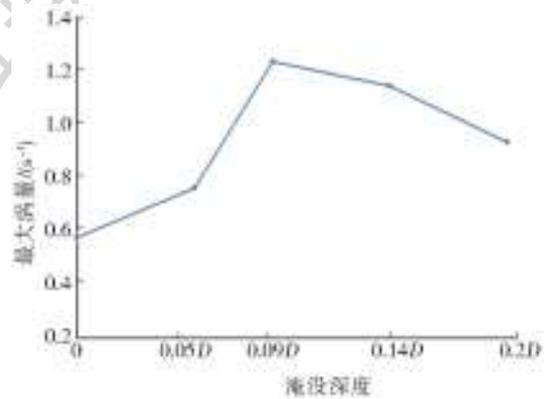


图13 最大涡量变化  
Fig. 13 Max. vorticity change chart

从图13可以发现,淹没深度0的最大涡量为 $0.58\text{ 1/s}$ ,淹没深度 $0.05D$ 的最大涡量为 $0.71\text{ 1/s}$ ,淹没深度 $0.09D$ 的最大涡量为 $1.23\text{ 1/s}$ ,淹没深度 $0.14D$ 的最大涡量为 $1.14\text{ 1/s}$ ,淹没深度 $0.2D$ 的最大涡量为 $0.91\text{ 1/s}$ ,涡量在淹没深度 $0.09D$ 时最大,漩涡强度最大,淹没深度大于或者小于 $0.09D$ 时漩涡强度均比淹没深度 $0.09D$ 漩涡强度小。其中,淹没深度小于 $0.09D$ 时的涡量数值远小于淹没深度大于 $0.09D$ 时的涡量数值。淹没深度 $0.09D$ 下,进水口前的死水区域更加有利于漩涡发生发展。为防止强度比较大的漩涡发生,淹没深度应该大于 $0.09D$ ,或者提升进水口顶板位置尽可能的消除死水区,将淹没深度控制在 $0.05D$ 以下。

## 2.3 进水流道进水口断面流速分布均匀度

泵站进水流道进水口断面的流速分布是否均匀影响到水泵的运行效率,而流道进水口漩涡的产生会影响到流道进水口断面的流速分布均匀度。因此有必要去探究进水口漩涡与流道进水口断面流速分布均匀度的关系。泵站进水流道进水口断面的流速均匀度计算公式为

$$V_{\text{una}} = \left[ 1 - \frac{1}{\bar{v}_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{ai} - \bar{v}_a)^2 \Delta A_i}{A}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: $V_{\text{una}}$ 为流速均匀度; $v_{ai}$ 为网格单元*i*的速度; $\bar{v}_a$ 为轴向速度平均值; $\Delta A_i$ 为网格单元*i*的面积。依据公式,计算得出的进水流道进水口断面速度分布均匀度见图 14。

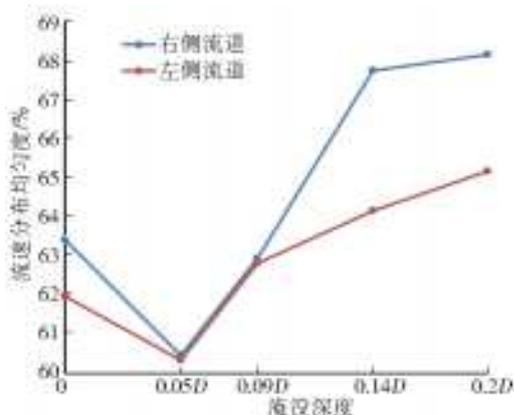


图 14 进水流道进水口断面速度分布均匀度

Fig. 14 Evenness of velocity distribution in section of inlet flow-passage

由图 14 可以看出:随着淹没深度的增大,流道进口断面的速度分布均匀度先变小后变大。在淹没深度  $0.2D$  时,流道的流速分布均匀度达到最大值,进水流道右侧的流速分布均匀度为  $68.13\%$ ,进水流道左侧的流速分布均匀度为  $65.15\%$ 。与其他淹没深度相比,淹没深度  $0.2D$  时漩涡强度较小,漩涡对水体造成的影响较小,水流流速分布均匀度相对较高。流道右侧进水口断面的流速均匀度变化幅度大于流道左侧进水口断面的流速均匀度的变化幅度。因为漩涡都在流道左侧产生,故五种淹没深度下,进水流道左侧的流速分布均匀度低于进水流道右侧的流速分布均匀度。流速分布均匀度表征进水流场的优劣,在淹没深度  $0.2D$  时,流速分布相对均匀,比起其他淹没深度,流速分布均匀度有明显提高。综合考虑,水泵流道进水口淹没深度应当大于  $0.09D$ 。

## 3 结论

(1)水泵流道进水口淹没深度在  $0.09D \sim 0.2D$

均有漩涡产生,漩涡强度随着淹没深度的增大变小。漩涡淹没深度  $0.2D$  时,漩涡发展的范围为水位  $30.81 \sim 32.21 \text{ m}$ ;淹没深度  $0.14D$  时,漩涡发展的范围为水位  $30.81 \sim 31.91 \text{ m}$ ;淹没深度  $0.09D$  时,漩涡发展的范围为水位  $30.81 \sim 31.61 \text{ m}$ 。在淹没深度  $0D$  和  $0.05D$  时,未能发现有明显的漩涡产生。

(2)揭示了 5 种淹没深度流道进水口漩涡涡量的分布规律。随着水深增加,流道进水口涡量增大,在流道进水口顶板以下  $0.2 \text{ m}$  (水位  $30.91 \text{ m}$ ) 涡量达到最大,而后迅速减小。淹没深度  $0$  的最大涡量为  $0.58 \text{ 1/s}$ ;淹没深度  $0.05D$  的最大涡量为  $0.71 \text{ 1/s}$ ;淹没深度  $0.09D$  的最大涡量为  $1.23 \text{ 1/s}$ ;淹没深度  $0.14D$  的最大涡量为  $1.14 \text{ 1/s}$ ;淹没深度  $0.2D$  的最大涡量为  $0.93 \text{ 1/s}$ 。

(3)通过分析得到不同淹没深度下流道进水口漩涡涡量的变化关系,淹没深度  $0.09D$  时漩涡涡量的峰值最大。淹没深度大于  $0.09D$  时的涡量峰值随淹没深度增大变小,淹没深度小于  $0.09D$  时的涡量峰值随淹没深度减少变小;流道进口流速均匀度随着淹没深度的增加逐步提高。综合考虑漩涡的涡量大小和改善流速分布的情况,水泵流道进水口淹没深度大于  $0.09D$  较为适宜。

## 参考文献 (References):

- [1] 郑双凌,马吉明,陈浩波,等. 进水口漩涡特性及临界淹没水深研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 129-132. (ZHENG S L, MA J M, CHEN H B, et al. Research progress of inlet swirl characteristics and critical submerged water depth [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 129-132. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/SP. J. 1201. 2010. 05129.
- [2] 王林锁. 流道进口漩涡特性及其相似准数的探讨[J]. 江苏水利, 1992(2): 55-60. (WANG L S. Discussion on the vortex characteristics and similarity of the inlet of the runner [J]. Jiangsu Water Resources, 1992(2) 55-60. (in Chinese))
- [3] 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 free surface vortex of pumping station inlet [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 158-160, 164. (in Chinese))
- [4] 胡去劣. 进水口漩涡的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 1982(3): 25-38 (HU Q L. Experimental study on the inlet vortex [J]. Journal of Water Resources and Hydropower Engineering, 1982(3): 25-38. (in Chinese))

- [5] 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 characteristics of free surface vortex at the inlet [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 67-71. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slfdb. 20160408.
- [6] 冯汉民,王林锁,袁伟声. 贯流泵站(前池灯泡式)进口淹没深度的试验研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),1986,7(3):35-41. (FENG H M, WANG L S, YUAN W S, Experimental study on inundation depth of tubular pumping station (front pool bulb type)[J]. Journal of Yangzhou University(Agriculture & Life Sciences),1986,7(3):35-41. (in Chinese))
- [7] 曹婷,曾莹,张贵金,等. 东坪水电站进水口流态改善技术方案模拟研究[J]. 水电能源科学,2018(2)121-123,143. (CAO T, ZENG Y, ZHANG G J, et al. Simulation study on technical scheme for improving intake flow pattern of Dongping hydropower station [J]. Hydropower Energy Science, 2018(2)121-123, 143. (in Chinese))
- [8] 陈亮雄. 泵站进水口消涡工程研究[J]. 人民珠江,1998(5):17-19. (CHEN L X. Research on the vortex elimination engineering of intake of pumping station [J]. People's Pearl River, 1998 (5): 17-19. (in Chinese))
- [9] 华明,曹光华. 泵站进水口临界淹没深度相似准则及换算公式探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(3):55-59. (HUA M, CAO G H. Discussions on similarity criteria and conversion formulas of critical submergence depth at intake of pumping station [J]. Journal of Hehai University (Natural Science Edition), 2000, 28(3):55-59. (in Chinese)) DOI:10. 3321/j. issn: 1000-1980. 2000. 03. 011.
- [10] 杜敏. 进水口漩涡形成机理及缩尺效应[D]. 天津:天津大学,2008. (DU M. Formation mechanism and scale effect of inlet vortex [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y1531773.
- [11] 高学平,杜敏,宋慧芳. 水电站进水口漩涡缩尺效应[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2008,41(9):1116-1119. (GAO X P, DU M, SONG H F. Scaling scale effect of water inlet of hydropower station[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology), 2008, 41(9): 1116-1119. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 0493-2137. 2008. 09. 018
- [12] 张磊. 进水口漩涡缩尺效应研究[D]. 天津:天津大学,2009. (ZHANG L, Study on the scale effect of the inlet vortex [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)) DOI:10. 7666/d. y1676588.
- [13] 杜敏,高学平,叶飞. 进水口漩涡缩尺效应研究综述[J]. 水利水电科技进展,2007,27(S2):16-18. (DU M, GAO X P, YE F. Review of research on scale effect of inlet vortex [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(S2): 16-18. (in Chinese))
- [14] 武华宝,张立,车华桥. 溢洪道进水口漩涡流动的数值模拟及体型优化研究[J]. 山东农业工程学院学报,2014(5):41-43. (WU H B, ZHANG L, CHE H Q. Numerical simulation and shape optimization of swirl flow in spillway inlet[J]. Journal of Shandong Agricultural Engineering University, 2014(5): 41-43. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1008-7540. 2014. 05. 015.
- [15] 杨正骏,谢佩珍. 水工建筑物进水口自由表面漩涡试验研究[J]. 水力发电学报,1987(1):24-37. (YANG Z J, XIE P Z. Experimental study on free surface vortex at the intake of hydraulic structures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1987(1): 24-37. (in Chinese))
- [16] 何学民,汝树勋. 水工建筑物进水口自由表面漏斗漩涡消除措施的试验研究[J]. 四川水力发电,1992(3):38-43. (HE X M, YAN S X. Experimental study on the elimination of free surface funnel vortex in the intake of hydraulic structures [J]. Sichuan Hydroelectric Power, 1992(3): 38-43. (in Chinese))
- [17] 段文刚,黄国兵,张晖,等. 几种典型水工建筑物进水口消涡措施试验研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(2):21-27. (DUAN W G, HUANG G B, ZHANG H, et al. Experimental study on vortex reduction measures of inlets of several typical hydraulic structures [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(2): 21-27. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-5485. 2011. 02. 004.
- [18] 马吉明,刘德朝. 小斜式进水口临界吸气深度的水力试验研究[J]. 水利水电技术,1997(11):52-56. (MA J M, LIU D C. Hydraulic test study on critical intake depth of small inclined inlet [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997(11): 52-56. (in Chinese))
- [19] 马吉明,梁元博. 电站双孔进水口临界淹没水深的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(5):122-124. (MA J M, LIANG Y B. Experimental study on critical submerged water depth of double-hole inlet of power station [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(5): 122-124. (in Chinese)) DOI:10. 3321/j. issn: 1000-0054. 2000. 05. 033.
- [20] MARUSIC I, MCKEON B J, MONKEWITZ P A, et al. Wall-bounded turbulent flows at high Reynolds numbers: Recent advances and key issues [J]. Physics of Fluids, 2010, 22(6): 1-58.

- [21] SHUKLA I, TUPKARI S S, RAMAN A K, et al. Wall Y+ approach for dealing with turbulent flow through a constant area duct[C]// American Institute of Physics, 2012.
- [22] HSIEH S C, LOW Y M, CHIEW Y M. Flow characteristics around a circular cylinder subjected to vortex-induced vibration near a plane boundary[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016(65): 257-277.
- [23] MARIANI R, QUINN M K, KONTIS K, et al. Shock-free compressible vortex rings impinging on a stationary surface: Effects of surface angle variation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013(47): 126-142.
- [24] TOKYAY T E, CONSTANTINESCU S G. Validation of a large-eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(12): 1303-1315.
- [25] TAKATA T, KAWATA Y, KOBAYASHI T, et al. Large eddy simulation of unsteady turbulent swirl flow in a pump intake[C]// Computational Fluid Dynamics. Computational Fluid Dynamics '92, 1992.

(上接第 147 页)

- [30] BOLAND, D. H. Trophic classification of lakes using landsat-1 (ERTS-1) multispectral scanner data[Z]. US: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Corvallis Environmental Research Laboratory, Assessment and Criteria Development, 1976.
- [31] LI W B, DU Z Q, LING F, et al. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI[J]. Remote Sensing, 2013, 5(11): 5530-5549. DOI: 10.3390/rs5115530.
- [32] YANG, K, LI M C, LIU Y X, et al. River delineation from remotely sensed imagery using a multi-scale classification approach[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7: 4726-4737. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2309707.
- [33] MANN, H. B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245. DOI: 10.2307/1907187.
- [34] KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods[M]. London: Griffin, 1948. DOI: 10.1007/978-1-4684-6683-6\_9.
- [35] YE A Z, DUAN Q Y, ZENG H J, et al. A distributed time-varying gain hydrological model based on remote sensing[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(3): 222-229, 230. DOI: 10.3969/j.issn.1674-764x.2010.03.005.
- [36] YE A Z, DUAN Q Y, ZHAN C S, et al. Improving kinematic wave routing scheme in community land model[J]. Hydrology Research, 2013, 44(5): 886-903. DOI: 10.2166/NH.2012.145. DOI: 10.2166/nh.2012.145.
- [37] 严家宝, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 近十年中国陆地水储量变化及其时空分布规律[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 21-28. (YAN J B, JIA S F, LYU A F, et al. Spatial-temporal variation characteristics of China terrestrial water storage in the last ten years[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 21-28. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2016.04.004.