

单桩结构的潮流能水轮机尾流流场分析

郑 源¹, 李东阔², 张玉全², 杨春霞²

(1. 河海大学创新研究院, 南京 210098; 2. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100)

摘 要: 为降低潮流能水轮机尾流效应对机组间距的影响,合理布置水轮机位置,通过数值模拟和水槽实验的方法对具有单桩支撑结构的潮流能水轮机尾流流场进行研究,在此基础上分析具有单桩支撑结构和不同安装高程对潮流能水轮机尾流流场的影响。结果显示:数值模拟与水槽试验总体上数值模拟与实验结果的趋势具有一致性;单桩结构对纵向近尾流场造成影响,会产生一个谷值突变;安装高程越高则导致沿转轮中心直线处的流速恢复越快。

关键词: 潮流能; 实验; 尾流; 数值模拟; 单桩支撑结构

中图分类号: TK730.7

文献标识码: A

0 引 言

潮流能水轮机叶片转动会对周围水流运动产生一定的阻塞效应,影响水流的正常流道,对水轮机的布置产生巨大影响^[1]。研究潮流能水轮机对降低水轮机之间的间距、降低尾流场对机组间距的影响及对潮流能利用的科学研究提供帮助。Mycek 等^[2]通过对两个潮流能水轮机之间相互影响进行数值与实验,发现下游的水轮机受上游水轮机影响很大。Harrison 等^[3]基于制动盘理论和实验研究对水平轴潮流能水轮机的远尾流场研究,发现近远尾流场的分布规律。安柏娜^[4]研究单机组水轮机尾流流场实验结果显示,远尾流场的流速逐渐恢复,在水轮机后 $10D$ (10 倍直径)处恢复到 86.3% 。MacLeod 等^[5]模拟单个和两个串联布置的水轮机尾流的恢复情况,研究结果显示水轮机周边紊动越强烈,尾流恢复越快;水轮机推力系数越大,尾流恢复则越慢。在研究潮流能水轮机的实验过程中,王晓航等^[6]和张亚超^[7]采用悬挂式固定结构实验。国内对尾流的研究大部分采用多孔介质实验或者悬挂结构实验,鲜有人采用单桩支撑式的潮流能水轮机进行实验研究,且关

于单桩支撑结构和安装高程对潮流能水轮机尾流场影响方面的研究相对较缺乏。潮流能水轮机尾流场的主要因素较多,其中安装高程是影响潮流能水轮机尾流效应的重要外部因素^[8]。潮流能水轮机之间会产生相互影响,且潮流能水轮机间距越小相互影响越大^[9],其各项参数受上游流场影响严重,因此分析潮流能水轮机尾流场的分布特性和恢复规律对优化潮流能水轮机的布置方式非常重要。本文在数值模拟的基础上,通过实验研究进行对比分析,研究单桩支撑结构对尾流场分布规律和恢复规律的影响,同时对安装高程对尾流场分布规律的影响进行讨论。

1 实验测量

根据实验条件,本文选定河海大学设计的三叶片潮流能水轮机,其转轮直径 D 为 0.27 m ,叶尖速比为 2.2 ,额定流速为 0.35 m/s 。在由天津大学制造的水动力实验室中对具有单桩支撑结构的潮流能水轮机进行水槽实验。图 1 为实验装置和实验水槽。水槽长度为 57 m ,高位 1.2 m ,深度为 1.4 m ,最低工作水深 0.2 m ,最高工作水深 0.8 m ,可根据实验条件要求调节水深和流速,产生流速恒定的变速流场。

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(51809083); 江苏省自然科学基金(BK20180504); 中国博士后科学基金(2019M651678); 南通市科技项目(JC2018006)

通信作者: 郑 源(1964—), 男, 博士、教授, 主要从事流体机械方面的研究。zhengyuan@hhu.edu.cn

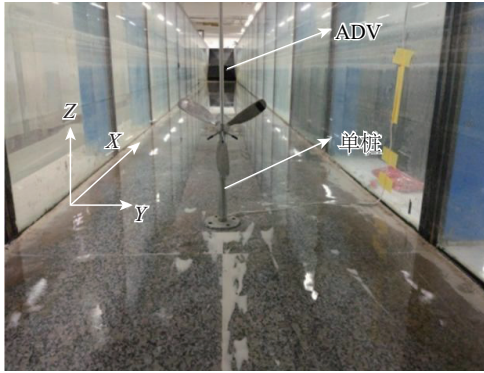


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental device diagram

实验水深为 0.55 m, 水流流速为 0.35 m/s, 现阶段业界对潮流能水轮机的水深一般为 30~50 m^[9], 根据相似理论模型机与原型机的弗劳德数应相等, 由式(1)可知实验可模拟的真实流速在 2.25~3.30 m/s 之间, 符合现阶段业界对潮流能水轮机开发利用的范围, 即 1~3 m/s。

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p l_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m l_m}} \quad (1)$$

式中, v_p ——原型机的潮流流速; g_p ——原型机的重力加速度, m/s; l_p ——原型机的水深, m; v_m ——模型机的潮流流速, m/s; g_m ——模型机的重力加速度, m/s; l_m ——模型机的水深, m。

由图 1 可知, 为模拟真实情况, 潮流能水轮机由不锈钢制造。本实验在 0.35 m/s 流速下对安装高程为 0.8D、1.0D、1.2D 这 3 种情况的潮流能水轮机尾流场流速分别进行数据采集。流速数据采用小威龙剖面流速仪, 即声学多普勒流速仪 (acoustic doppler velocimetry, ADV), 由挪威 Nortek 公司生产, 流速测量精度高 (测量精度为 $\pm 0.5\% \pm 1$ mm/s, 采样频率为 100 Hz)。实验直角坐标系的原点位于转轮轮毂后面圆的圆心位置, X 轴的正方向为水槽的水流流向, Y 轴平行于水槽的水平向, Z 轴垂直于水槽的底部平面向上为正方向。

为保证使符合实际情况, 对水轮机前的 10D 位置处的流速进行测量, 测量结果如图 2 所示。水流流速自底部到顶部, 流速随水深的增大呈近似指数分布的平滑曲线, 符合正常情况中的湍流剪切层变化过程。

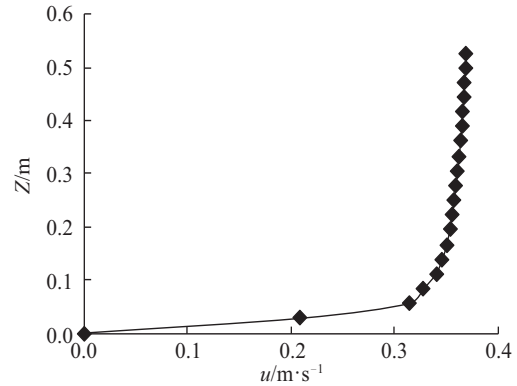


图2 纵向流速分布图

Fig. 2 Longitudinal velocity profile

2 计算模型

2.1 网格划分和边界条件

计算模型分为带有叶轮的旋转域及带有单桩和水槽的静止域。由于叶片表面扭曲度较大, 旋转域采用非结构化网格进行划分; 带有单桩和水槽的静止域采用结构化网格。为获得更精准的结果, 对叶片的前缘、尾缘、转轮的轮毂部分进行局部网格加密。为确保计算结果的真实性和准确性, 计算模型与真实水槽进行 1:1 建模, 最终所得网格如图 3。由于水流的来流速度已知, 设置进口边界条件为速度进口 (velocity-inlet); 设置出口边界条件为压力出口 (pressure-outlet), 相对大气压力为 0 Pa; 叶片及轮毂边界条件设置为无滑移旋转壁面; 水槽的顶面设置为对称面, 左右面和下面均采用固定壁面; 内流域流场设置为旋转域, 外流场设为静止域, 内外流场连接处边界条件设置为交界面 (interface)。

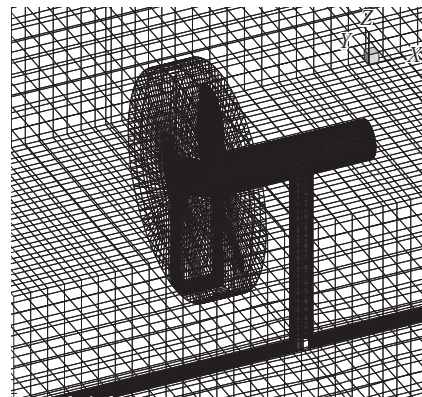


图3 整体网格布置图

Fig. 3 Overall grid layout

2.2 在湍流模型和求解器

在研究翼型的水动力特性时,湍流模型中的 SST $k-\omega$ 模型与实验值具有较好的吻合值,且湍流模型 SST $k-\omega$ 对近壁区域、尾流、绕流计算结果比较准确,因此计算模型采用湍流模型 SST $k-\omega$ 。压力速度耦合方程采用 SIMPLEC 算法,使用 Green-Gauss Cell-Based 格式进行梯度插值,对离散原项、扩散项和对流项皆采用 2 阶迎风格式差分,提高计算精度和避免计算发散。

3 结果分析

3.1 单桩的近远尾流场特性

3.1.1 纵向尾流效应

图 4 为安装高程 $1D$ 时,纵向尾流场流速分布

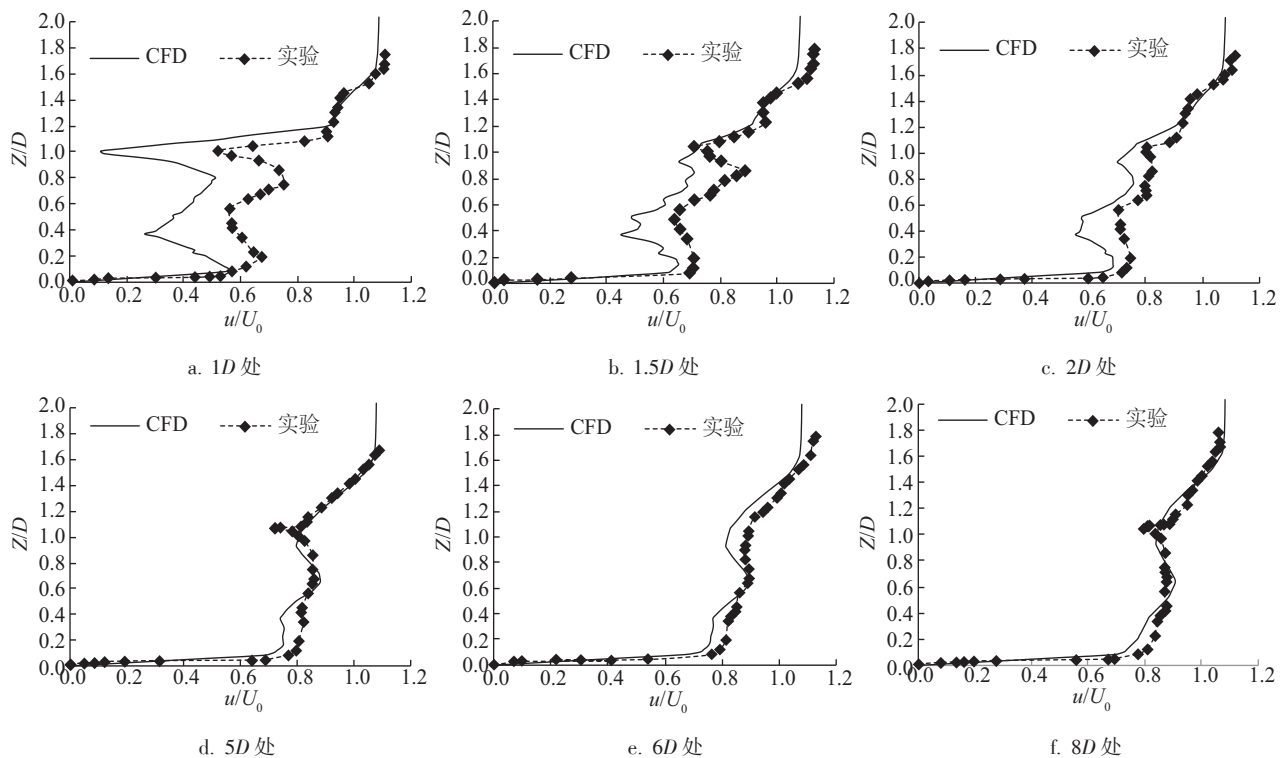


图4 安装高程 $1D$ 纵向尾流场分布图

Fig. 4 Vertical tail flow field distribution of installation elevation $1D$

3.1.2 横向尾流效应

图 5 为安装高程为 $1D$ 时,横向尾流场分布图 Y/D 为横向位置与转轮直径的比值。由图 5 可知,流速基本沿转轮中心处呈对称分布,中心部位流速最低,且低于进口流速。两侧流速比进口流速变

图。 u/U_0 为径向流速与来流流速的比值, Z/D 为高度与转轮直径的比值。由图 4 可知,水轮机下游 $1D$ 位置处具有明显的 2 个谷值,其中 1 个谷值在转轮中心位置,此处靠近单桩尾部。随后流速渐渐恢复,在水轮机后方 $5D$ 处,谷值恢复到入口流速的约 82%。从图 4a~图 4c 可知,单桩支撑结构后方有另一处明显的峰值,峰值处于水轮机转轮下方 $0.5D$ 处,在水轮机下游 $1D$ 处为入口流速的 41%。此处的谷值主要由单桩支撑结构的阻塞作用导致^[10]。随着尾流的发展,单桩的阻塞作用渐渐减弱,水轮机后方 $1D \sim 5D$ 范围内,第 2 个谷值逐渐变大。由图 4d 可知,水轮机下游 $5D$ 处,谷值近似消失,可知单桩的阻塞作用几乎可以忽略;从图 4d~图 4f 可知,水轮机下游 $5D \sim 8D$ 范围内的流速分布情况几乎相似,皆为仅有 1 个谷值。

快,原因可能是水流为了保持连续性所导致^[11]。从图 5a~图 5d 可知,在水轮机下游 $1D \sim 5D$ 范围内流速分布变化较大, u/U_0 小于 0.9 的范围逐渐减小;从图 5d~图 5f 可知,在 $5D \sim 8D$ 的区域内,随下游距离的增加,横向流速变化程度较之前变慢,中间流

速有所恢复,与两边流速渐渐相等。根据横向尾流流速分布情况可知,横向尾流效应主要受水轮机的阻塞作用,单桩支撑结构对横向尾流效应影响不明

显,同时可发现水轮机对横向尾流效应的影响集中在水轮机转轮中心附近。

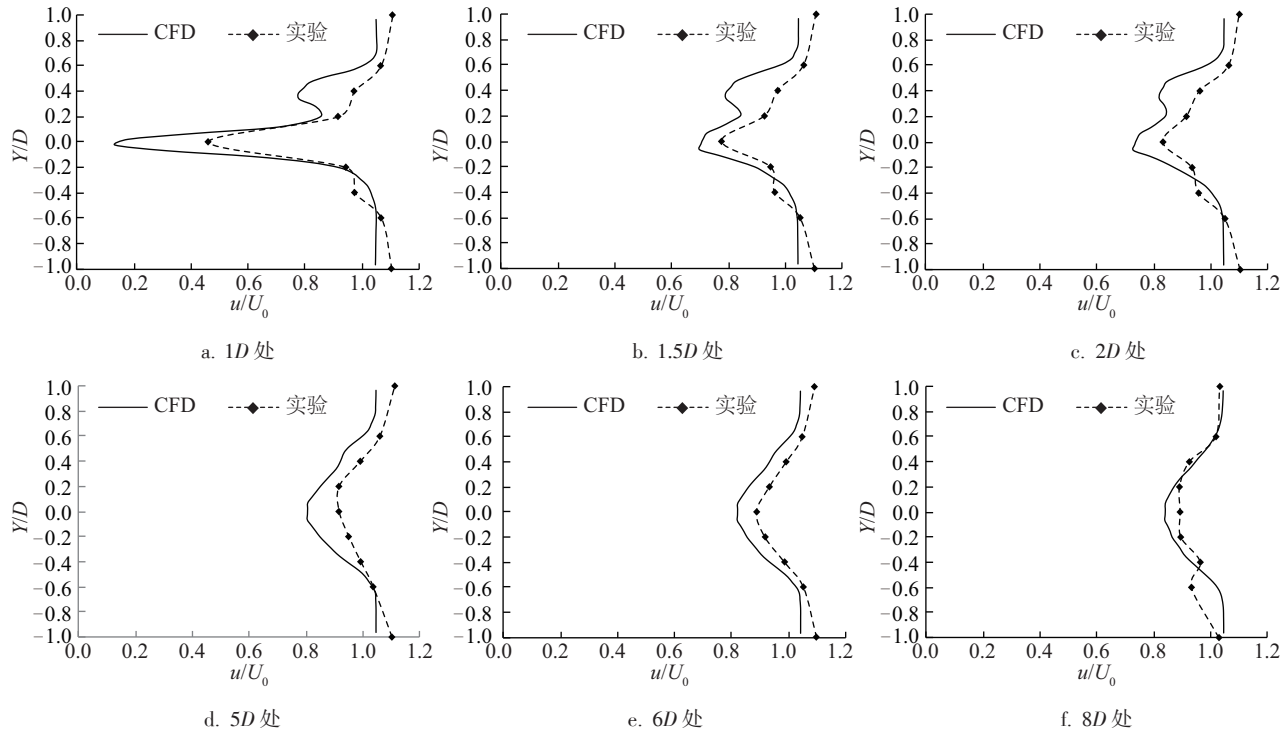


图5 安装高程1D横向尾流场分布图

Fig. 5 Horizontal tail flow field distribution of installation elevation 1D

3.1.3 尾流恢复特性

通常,当尾流流速恢复到一定程度便可布置另一台潮流能水轮机^[12]。因此研究潮流能水轮机恢复特性对多机组的布置具有重要意义。图6为安装高程为1D时,沿转轮中心X方向流速分布图。在转轮上游1D范围内,水流流速比 u/U_0 大于1,说

明水轮机前方具有局部的速度激增,此现象可能由水轮机转轮的阻塞作用导致^[13]。0.0D~0.8D处于水轮机转轮和单桩位置,速度为零;在下游0.8D~5.0D范围内,水流流速迅速恢复;5D~8D范围内,流速恢复变慢;在8D处水流流速恢复到水槽入口流速的约86%。

3.2 不同安装高程的尾流流场特性

为保证数据分析的准确性,下文仅对不同安装高程的实验数据进行对比分析。

3.2.1 纵向尾流效应

图7为不同安装高程情况下,纵向尾流场分布图。不同安装高程下的尾流流场的流速变化趋势基本相同,但尾流流速恢复快慢有所不同。随着安装高程的不同,在水轮机下游5D处,转轮中心处的流速分别恢复到原流速的61%、82%、85%,这可能是因安装高程不同导致水轮机周围湍流强度不同,进而影响尾流的恢复速度。但在水轮机下游5D以

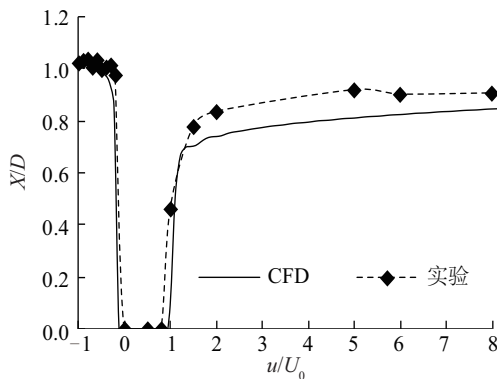


图6 安装高程1D流速恢复特性图

Fig. 6 Flow rate recovery feature diagram of installation elevation 1D

后,纵向尾流流场的峰值近似消失,此处单桩的阻塞作用可忽略,单桩支撑结构对纵向尾流的影响基

本一致进一步说明安装高程对纵向尾流效应影响比较小,可以忽略。

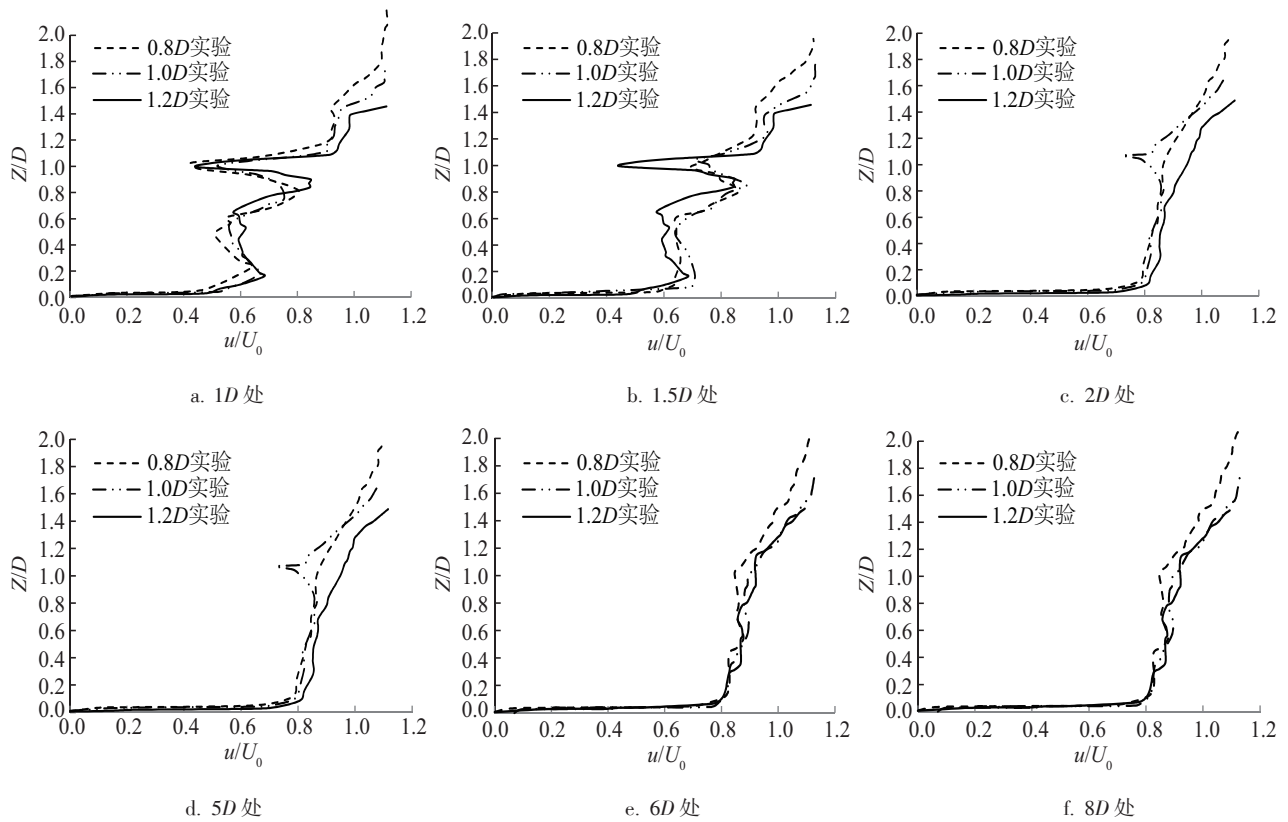


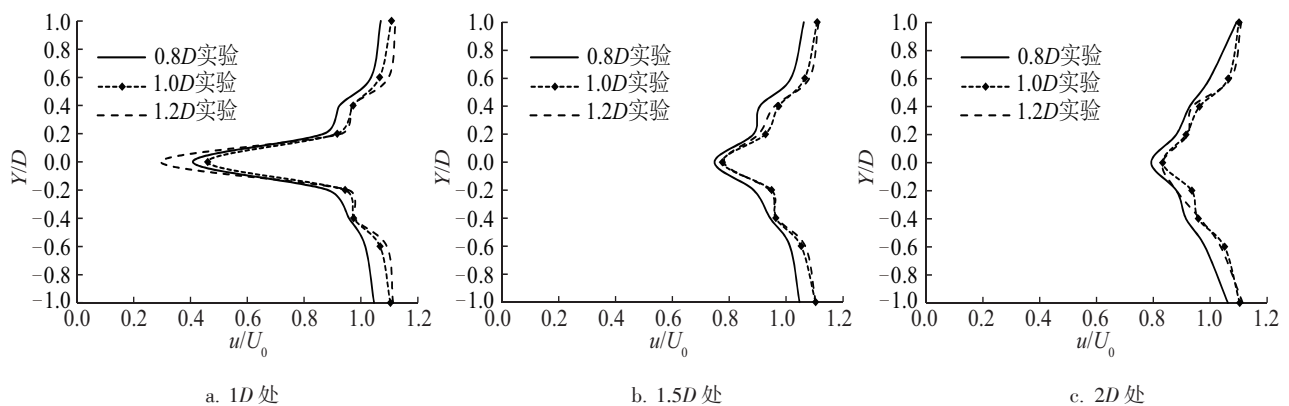
图7 不同安装高程纵向尾流场分布图

Fig. 7 Vertical tail flow field distribution of different installation elevation

3.2.2 横向尾流效应

图8为不同安装高程情况下,横向尾流场分布图。不同安装高程下的横向尾流场具有相似的分布规律,这进一步表明单桩结构对横向尾流效应影响不大。其原因为纵向尾流范围内,水轮机的旋转是决定尾流流速分布的主要因素,不同安装高程

的水轮机对纵向尾流效应的影响因素相同。但安装高程的不同会导致横向 u/U_0 小于 0.9 范围的最大宽度变大,在水轮机后方 1D 处,当安装高程为 0.8D 时,最大宽度为 0.6D;当安装高程为 1D 时,最大宽度为 0.45D;当安装高程为 1.2D 时,最大宽度范围为 0.4D。



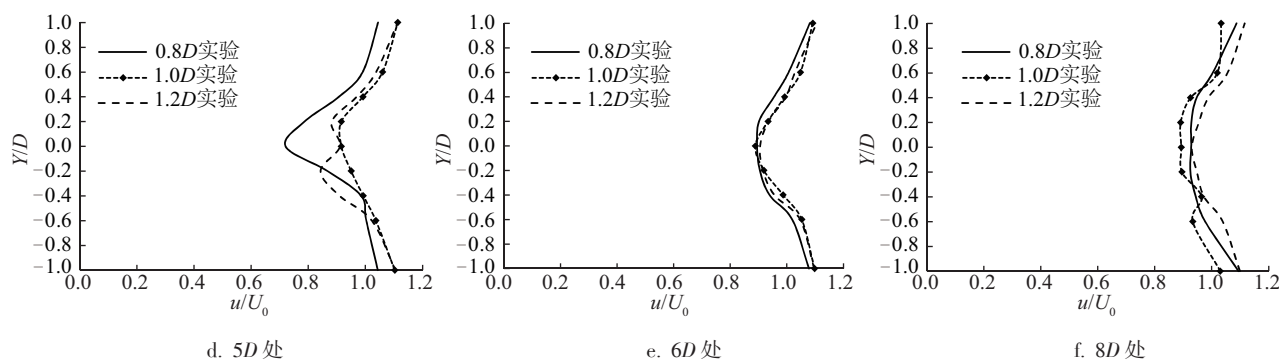


图8 不同安装高程横向尾流场分布图

Fig. 8 Horizontal tail flow field distribution of different installation elevation

3.2.3 尾流恢复特性

图9为不同安装高程的情况下,沿转轮中心 X 方向流速分布图。不同的安装高程沿 X 方向的恢复趋势一致,具有较强的规律性,即随着安装高程的增大,转轮中心 X 方向的尾流流速恢复值变大,当安装高程为 $0.8D$ 、 $1.0D$ 、 $1.2D$ 时,下游 $8D$ 处流速分别恢复到进口流速的 88.8% 、 90.3% 、 94.0% 。在 $0.8\sim 1.0D$ 范围内,流速差异并不明显,但 $1\sim 8D$ 区域内可明显看出不同安装高程尾流流速恢复速度的不同,这主要由于海床底面和流速的纵向分布对湍流强度造成影响,进而改变 X 方向尾流的恢复速度^[14]。

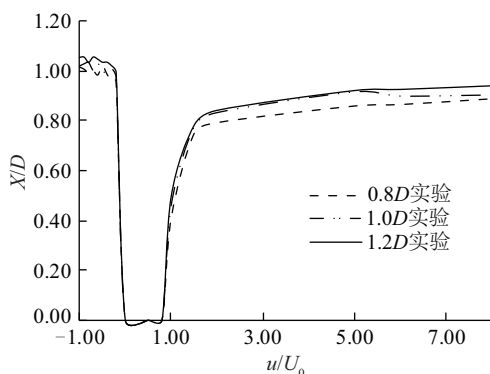


图9 不同安装高程尾流恢复特性图

Fig. 9 Flow rate recovery feature diagram of different installation elevation

桩支撑结构的潮流能水轮机尾流流场分析,发现数值模拟与实验结果总体上一致,验证了数值模拟和实验的正确性。

2)在纵向尾流场中,不同安装高程的分布趋势大致相同。在水轮机下游 $1\sim 5D$ 范围内,由于单桩和转轮作用会产生2个谷值。随着距离的增加,下游 $5D$ 以后区域内,单桩阻塞作用产生的谷值会变大,可近似忽略。

3)在横向尾流场中,不同安装高程的流速基本沿转轮中心呈轴对称形式分布,转轮中心处流速最小,向两侧边壁流速呈逐渐增大的趋势。单桩支撑结构对横向尾流场的影响并不明显, Y 方向上水流流速比 u/U_0 小于 0.9 的最大宽度范围都随 X 方向增大而变小。但随着安装高程的增大,同一断面处水流流速比 u/U_0 小于 0.9 的最大宽度范围会变大。

4)不同安装高程下,水轮机在沿 X 、 Y 方向上恢复规律相同。在 X 方向上恢复规律都是在 $1\sim 5D$ 范围内迅速恢复, $5D$ 以后恢复速度减缓,但安装高程的不同会导致 X 方向上流速恢复的快慢不同,且安装高程越高,恢复越快。

由于实验条件限制,本文仅对单台机组的尾流流场进行分析。在后续研究中,将根据实际情况,研究多台机组综合作用下的尾流流场分布规律,为多机组潮流能水轮机布置提供指导。

4 结 论

本文通过数值模拟与实验验证的方法得到以下主要结论:

1)通过数值模拟与实验结合的方式,对拥有单

[参考文献]

- [1] Garrett C, Cummins P. Generating power from tidal currents[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2004, 130(3): 114—118.

- [2] Mycek P, Gaurier B, Germain G, et al. Numerical and experimental study of the interaction between two marine current turbines [J]. *International Journal of Marine Energy*, 2013, 1: 70—83.
- [3] Harrison M E, Batten W M J, Myers L E, et al. Comparison between CFD simulations and experiments for predicting the far wake of horizontal axis tidal turbines [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2010, 4 (6): 613—627.
- [4] 安佰娜. 潮流能发电场尾流场数值模拟及其多机组影响规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [4] An Baina. Numerical analysis of the wake and interaction effect analysis for tidal arrays in the tidal farm [D]. Tsingdao: Ocean University of China, 2012.
- [5] MacLeod A J, Barnes S, Rados K G, et al. Wake effects in tidal current turbine farms [A]. *Proceedings of the International Conference on Marine Renewable Energy-Conference* [C], Irish, Dublin, 2002.
- [6] 王晓航, 荆丰梅, 张亮. 潮流能水平轴水轮机数值模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(8): 1841—1847.
- [6] Wang Xiaohang, Jing Fengmei, Zhang Liang. Numerical simulation of horizontal axis tidal turbine [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2015, 36(8): 1841—1847.
- [7] 张亚超. 水平轴潮流能发电机尾流效应的实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [7] Zhang Yachao. Experiment study on the wake effect of horizontal axis tidal current turbine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] Bai Guanghui, Li Jun, Fan Pengfei, et al. Numerical investigations of the effects of different arrays on power extractions of horizontal axis tidal current turbines [J]. *Renewable Energy*, 2013, 53: 180—186.
- [9] Myers L E, Bahaj A S. Experimental analysis of the flow field around horizontal axis tidal turbines by use of scale mesh disk rotor simulators [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(2-3): 218—227.
- [10] Chen Yaling, Lin Binliang, Lin Jie, et al. Experimental study of wake structure behind a horizontal axis tidal stream turbine [J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 82—96.
- [11] Zhang Yachao, Yao Yanming, Wan Meng, et al. Experimental study on wake effect of horizontal axis marine Current Turbine base-on different initial velocity and thrust coefficient [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition*, 2014, 48(12): 2271—2276.
- [12] 王丹丹. 水平轴潮流能发电水轮机尾流场效应及其影响规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [12] Wang Dandan. Research on wake effect of horizontal axis tidal turbine and its influence [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [13] Sun Xiaojiang. Numerical and experimental investigation of tidal current energy extraction [J]. *Transilvania University Publishing House Brasov*, 2008, 20(2): 135—148.
- [14] 陈娅玲. 潮流水轮机及阵列对周边流场影响研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [14] Chen Yaling. Study on the effects of tidal turbine and array on the flow field [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

STUDY ON WAKE EFFECT OF HORIZONTAL AXIS MARINE CURRENT TURBINE BASED ON SINGLE PILE SUPPORT STRUCTURE

Zheng Yuan¹, Li Dongkuo², Zhang Yuquan², Yang Chunxia²

(1. *Innovation Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: In order to reduce the influence of the tidal current flow field on the unit spacing, the position of the turbine and the utilization of the marine space resources, the research is studied based on the numerical simulation and the tank test method. On this basis of the flow field of the turbine with a single pile support structure and different installation heights is analyzed. The results show that the numerical simulation is consistent with the results of the tank test. The structure of single pile has obvious influence on the wake flow field. The recovery law of the wake flow in different installation height is different.

Keywords: tidal power; experiments; wakes; computer simulation; single pile support structure