

# 潮流能水轮机尾流场特性研究

侯二虎, 杜 敏, 武 贺, 吴国伟

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

**摘 要:** 研究水平轴水轮机的尾流场, 在循环水槽中开展试验工作, 采用 ADV 测量流速特性。利用计算流体力学技术进行数值模型研究, 结合致动盘理论将水轮机进行简化, 与试验结果进行对比分析, 验证此方法的可行性。研究尾流场中速度和湍动能的变化规律, 发现衰减系数在  $8D$  之后趋于一致, 湍动能最大值出现在  $3D$  附近等现象。

**关键词:** 潮流能; 试验; CFD; 水轮机; 尾流场

**中图分类号:** P743.1

**文献标志码:** A

## 0 引 言

海洋可再生能源日益受到各国的重视, 覆盖地球表面积超过  $2/3$  的海洋储存着丰富的能源, 包括潮流能、温差能及盐差能等<sup>[1]</sup>。潮流能在确定海域可准确预测, 因而得到越来越广泛的关注。潮流能发电场需数十台甚至上百台机组并网运行, 优化阵列布局是一个重要环节。研发阵列布置的核心工作就是分析水轮机的尾流场<sup>[2]</sup>。国内外学者多采用将水轮机进行简化的方式开展尾流研究, 大致可分为 3 类: 1) 结合致动盘理论的模型, 即采用多孔圆盘代表水轮机, Bahaj 等<sup>[3-4]</sup>开展多次试验研究, Liu 等<sup>[5]</sup>进行了数值模拟研究; 2) 结合叶素动量理论的模型, Olczak 等<sup>[6]</sup>、Edmunds 等<sup>[7]</sup>、Bai 等<sup>[8]</sup>均采用此方法建立了尾流场的简化模型; 3) 将尾流场的流速简化至半经验公式, Lam 等<sup>[9]</sup>借鉴了轮船螺旋桨中的理论分析, Brutto 等<sup>[10-11]</sup>改进了风能中常用的 Jensen 模型。

本文在循环水槽中开展尾流场试验, 在计算流体力学技术基础上结合致动盘理论建立简化模型, 与试验结果对比验证其可行性。分析尾流场轴向及径向流速和湍动能特性, 发现衰减系数在  $8D$  以后趋于一致及湍动能最大值出现在  $3D$  附近等现象, 初步了解水平轴水轮机尾流场的变化特性, 以期对轮机组的阵列布局及优化提供技术支撑。

## 1 尾流场试验

本文利用天津的国家海洋技术中心海洋监测设备动力环境实验室中的循环水槽开展尾流场试验。

### 1.1 试验方案

试验水槽及水轮机如图 1 所示。水槽长  $75\text{ m}$ 、宽  $1.6\text{ m}$ 、高  $2\text{ m}$ 。水轮机模型与原型机保持几何相似关系, 比例为  $1:15$ 。水轮机为 2 叶片水平轴叶轮, 叶轮直径为  $0.8\text{ m}$ 。



图 1 试验水槽及水轮机

Fig. 1 Test flume and turbine

试验过程中水槽水深为  $1.2\text{ m}$ , 水轮机安装至水槽实验段, 轮毂位于水槽中央位置。来流速度为  $0.49\text{ m/s}$ , 水

收稿日期: 2018-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51679125); 海洋可再生能源专项资金项目(GHME2017ZC01; GHME2018ZC01); 国家海洋技术中心科技创新基金(F2180Z002)

通信作者: 侯二虎(1986—), 男, 硕士、工程师, 主要从事潮流能利用及海洋仪器水动力仿真方面的研究。houerhu@163.com

轮机转速稳定至 60 r/min,尖速比为 5.1。利用声学多普勒流速仪(ADV)完成流场测量工作,测量示意图如图 2 所示,01 曲线为尾流场中心线位置,01~04 曲线在 Z 方向上距离依次增加 0.1 m,最终得到 4 条曲线上轴向距离为 4D~12D 范围内的数据。

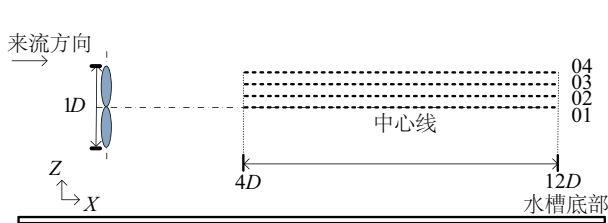


图2 水槽测量示意图

Fig. 2 Measurement arrangement

## 1.2 测流设备及原理

试验采用诺泰克小威龙 ADV 完成测量工作,测速范围:±0.01、0.10、0.30、1.00、4.00 m/s(可选择,本次试验选取 1.00 m/s);测速精度:±6 mm/s,采样频率最高为 200 Hz,测量原理示意图 3。试验过程中 ADV 采样频率设置为 200 Hz,测速范围设置为 0~1 m/s。依次完成图 2 所示 01~04 曲线的测量,每条曲线上均间隔 20 cm 设置一个测量点位,每点位处测量时长为 3 min。

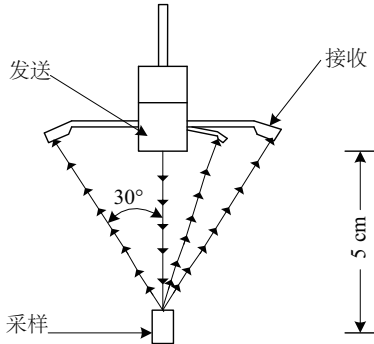


图3 ADV测量原理

Fig. 3 Measuring principle of ADV

## 2 数值模型

致动盘理论已被广泛应用在风能研究中,这种理论是一维的,并且假设穿过轮机面的速度和压力变化为常数。本研究中应用的致动盘模型为在来流方向上加入一恒定阻力,该阻力应与水轮机所受到的推力相近。致动盘模型受到的推力见式(1)。在流场的水轮机区域,通过致动盘来表示,并将代表水轮机的动量源项加入到流场的动量守恒方程中,在流场的其他区域,仍由标准

的雷诺时均方程控制。代表水轮机的源项可表示为式(2)。水轮机的参数化基于其推力系数  $C_T$ ,其定义如式(3)。渗透率与阻力系数的关系见式(4)。推力系数与阻力系数的关系见式(5)。

$$T_i = \frac{\rho}{2} K U_{i(d)} |U_{i(d)}| A_d \quad (1)$$

$$S_i = \frac{K}{\Delta x} \frac{\rho}{2} U_{i(d)} |U_{i(d)}| \quad (2)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_o^2 A_d} \quad (3)$$

$$\theta^2 = \frac{1}{(1+K)} \quad (4)$$

$$C_T = \frac{K}{(1+0.25K)^2} \quad (5)$$

式中,  $T_i$ ——水轮机受到的推力;  $K$ ——致动盘模型的阻力系数;  $U_{i(d)}$ ——通过致动盘的水流速度;  $A_d$ ——致动盘的横截面积;  $\Delta x$ ——圆盘厚度;  $U_o$ ——来流速度;  $\theta$ ——渗透率。

数值水池计算区域如图 4 所示,入口处设置为速度入口,速度为 0.49 m/s,出口为压力出口,上表面为滑移壁面,两侧及下表面均设置为非滑移壁面。计算区域尺寸为 28 m×1.6 m×1.2 m,均采用结构化网格,整体网格数量为 556140,湍流模型采用 SST  $k-\omega$  模型,采用定常计算的方式。

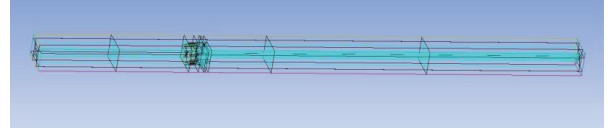


图4 计算区域示意图

Fig. 4 Calculation area of numerical model

## 3 结果分析

数值模型计算得出的尾流场速度云图如图 5 所示。水流在流经轮机后流速急剧减小,随着轴向距离的增加,尾流场流速逐渐增大,其影响范围也扩大。在 10D 之后可看出,由于水槽底部的影响,流速恢复相比水表面区域变慢。

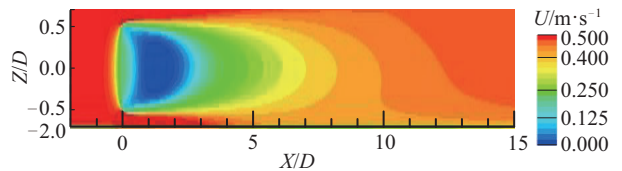


图5 尾流场速度云图

Fig. 5 Velocity of wake

图 6 所示为衰减曲线的仿真结果与试验结果的对比。可以看出,仿真曲线与试验结果趋势一致,均表现为随着轴向距离的增加,衰减系数逐渐减小并且趋于一致。在轴向距离较小时,仿真结果与试验结果差距略大。随着轴向距离的增加,差距逐渐缩小。与试验结果相同的是:01 曲线与 02 曲线仿真结果也较接近,8D 处,01 曲线仿真结果为 0.25,试验结果为 0.20,差距为 0.05;04 曲线仿真结果为 0.20,试验结果为 0.15,差距为 0.05。仿真结果与试验结果在 8D 之后差距已极小,数值模型可模拟尾流场变化规律。

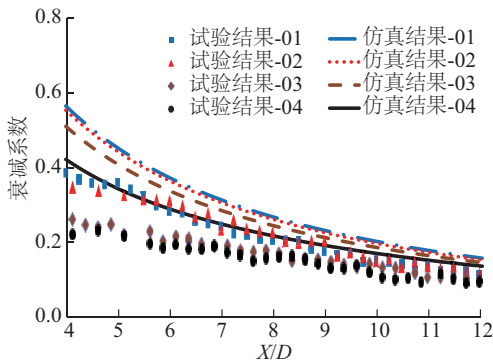


图 6 尾流场衰减曲线

Fig. 6 Deficit curve of wake

图 7 为尾流场径向衰减曲线,其中轮机的范围为  $-0.5D \sim 0.5D$ ,从 2D 曲线可看出,在圆盘的上下边缘附近,衰减曲线出现负值,说明流速有增大的现象,这反映出水流在流经轮机叶尖处会导致轴向流速增大。在  $Z/D=0.69$  处,衰减系数为  $-0.24$ ,流速增大了约 24%。此外,由于水槽底部是固体边界,在靠近水槽底部区域附近,衰减系数相比水槽顶部较大,影响尾流场的恢复速度,并且随着轴向距离的增加,各径向位置处的衰减系数值趋于一致。2D 处,最大衰减系数为 0.91,最小为  $-0.24$ ,相差为 1.15。6D 处最大衰减系数

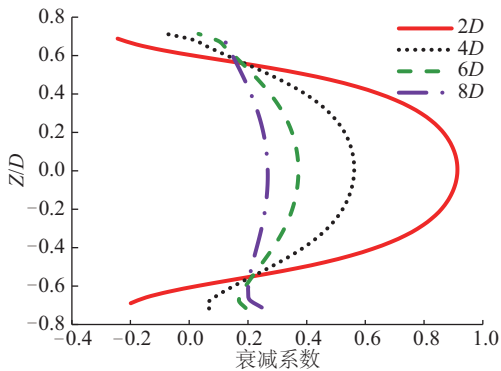


图 7 径向衰减曲线

Fig. 7 Radial deficit curve

为 0.37,最小为 0.03,相差 0.34。8D 处最大衰减系数为 0.26,最小为 0.08,相差 0.18。

湍动能  $TKE$  (turbulent kinetic energy) 是单位质量流体的湍流脉动动能,是衡量湍流混合能力的重要指标,其表达式见式(6),尾流场的湍动能云图如图 8 所示。

$$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (6)$$

式中,  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  ——脉动速度。

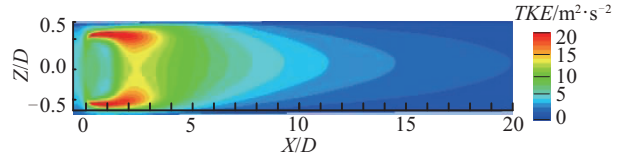
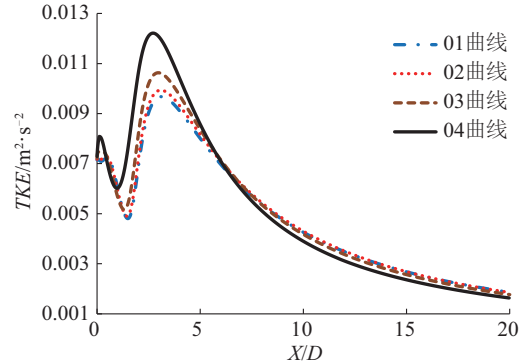


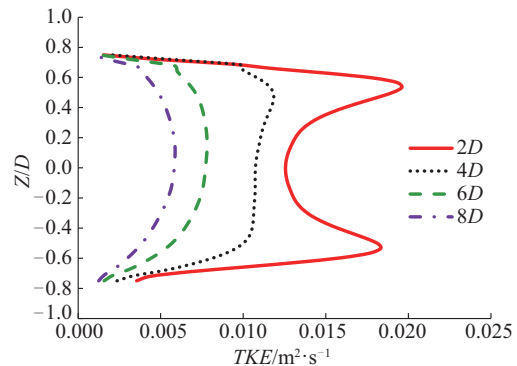
图 8 湍动能云图

Fig. 8 Contour of TKE (turbulent kinetic energy)

图 8 列出了轴向距离 0~20D 范围内的湍动能结果。可看出,在近尾流场区域内的圆盘上下边缘处,湍动能值很大。在远流场区域内,湍动能值在中心线附近较大,两端较小。图 9 为轴向与径向的湍动能曲线。从图 9a 可看出,湍动能在 1D 之后呈先增大后减小的趋势,各位置处的湍动能值在 3D 附近到达峰值,随后开始减小,峰值范围为 0.001~0.0012,在 6D 之后湍动能值



a. 轴向



b. 径向

图 9 轴向/径向湍动能曲线

Fig. 9 Axial or radial TKE

趋向一致。从图 9b 可看出,  $2D$  处, 湍动能最大值为 0.02, 发生在  $Z/D=0.54$  处, 中心线处的湍动能值为 0.013。  $4D$  处湍动能最大值为 0.011, 出现在  $Z/D=0.48$  处, 中心线处的湍动能值为 0.01,  $6D$  及  $8D$  处湍动能最大值均出现在中心线处, 分别为 0.008 及 0.006。

## 4 结 论

本文对潮流能水轮机尾流场进行研究, 得到以下主要结论:

1) 随着轴向距离的增加, 尾流场衰减系数逐渐减小并趋于一致,  $8D$  之后不同位置处的衰减系数差距仅为 0.07, 已非常接近。在同一轴向位置处, 离中心线距离越远, 衰减系数越小, 越靠近中心线处, 衰减系数越大。

2) 基于致动盘理论建立的水轮机简化数值模型, 可实现对尾流场的模拟, 随着轴向距离的增大, 仿真得出的衰减系数与试验结果差距越来越小, 可应用于水轮机阵列布置研究中。

3) 水流在轮机的上下边缘附近存在流速增大现象, 尾流场的湍动能在  $1D$  之后均呈先增大后减小的趋势, 湍动能最大值出现在  $3D$  附近。叶轮边缘后方流场区域内湍流动能值较大, 不同位置处的湍动能值在  $6D$  之后趋于一致。

本文是基于实验室尺度的物理试验及数值模型得出的研究结论, 试验研究中尚未考虑水槽阻塞效应等问题, 是否适用于真实海洋环境还需继续研究, 今后应在此基础上, 深入开展水轮机尾流场及阵列布置等研究, 为潮流能电站微观选址等工作提供技术支撑。

## [参考文献]

- [1] BAHAJ A S. Marine current energy conversion: the dawn of a new era in electricity production[J]. Philosophical transactions, 2013, 371 (1985): 20120500.
- [2] 张理, 李志川. 潮流能开发现状、发展趋势及面临的力学问题[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1019-1032.  
ZHANG L, LI Z C. Development status, trend and the problems of mechanics of tidal current energy[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2016, 48(5): 1019-1032.
- [3] BAHAJ A S, MYERS L E. Shaping array design of marine current energy converters through scaled experimental analysis[J]. Energy, 2013, 59(59): 83-94.
- [4] 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.
- [5] LIU J, LIN H, PURIMITLA S R. Wake field studies of tidal current turbines with different numerical methods[J]. Ocean engineering, 2016, 117: 383-397.
- [6] OLCZAK A, STALLARD T, FENG T, et al. Comparison of a RANS blade element model for tidal turbine arrays with laboratory scale measurements of wake velocity and rotor thrust[J]. Journal of fluids & structures, 2016, 64: 87-106.
- [7] EDMUNDS M, MALKI R, WILLIAMS A J, et al. Aspects of tidal stream turbine modelling in the natural environment using a coupled BEM-CFD model[J]. International journal of marine energy, 2014, 7: 20-42.
- [8] BAI G, LI W, CHANG H, et al. The effect of tidal current directions on the optimal design and hydrodynamic performance of a three-turbine system[J]. Renewable energy, 2016, 94: 48-54.
- [9] LAM W H, LONG C, HASHIM R. Analytical wake model of tidal current turbine[J]. Energy, 2015, 79(C): 512-521.
- [10] BRUTTO O A L, NGUYEN V T, GUILLOU S S, et al. Tidal farm analysis using an analytical model for the flow velocity prediction in the wake of a tidal turbine with small diameter to depth ratio[J]. Renewable energy, 2016, 99: 347-359.
- [11] BRUTTO O A L, THIÉBOT J, GUILLOU S S, et al. A semi-analytic method to optimize tidal farm layouts-application to the Alderney Race (Raz Blanchard), France[J]. Applied energy, 2016, 183: 1168-1180.

## STUDY ON HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF DOWNSTREAM WAKE FIELD OF TIDAL POWER TURBINE

Hou Erhu, Du Min, Wu He, Wu Guowei

*(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)*

**Abstract:** The wake of the horizontal axis turbine was studied in this paper, and the test work was carried out in the circulating water flume, the flow velocity characteristics were measured by ADV. The numerical model research was carried out by using technology of computational fluid dynamics, the actuator disc theory was used to simplify the turbine. The experimental results were compared with numerical results, the feasibility of this method was verified. The characteristics of velocity and turbulent kinetic energy of wake was studied. The deficit coefficient tends to be same after  $8D$  and the maximum value of turbulent kinetic energy appears around  $3D$  was found.

**Keywords:** tidal power; experiments; computational fluid dynamics; turbines; wakes