

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.0717

安装高度对水平轴潮流能水轮机尾流特性的影响

王 焱¹, 朱善强², 李振琦³, 李广年^{1*}

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2. 合肥天鹅制冷科技有限公司, 安徽 合肥 230051;

3. 天时海洋工程及石油装备研究院(青岛)有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 为探究水轮机的安装高度对水轮机尾流场的影响, 本文以水平轴潮流能水轮机为研究对象, 采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对水轮机尾流特性进行分析. 分别设置水轮机的中心距离海底高度为 $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$ (D 为水轮机直径), 对水轮机尾流场的轴向、径向上的速度亏损以及涡量结构图进行分析. 研究表明: 安装高度为 $1.5D$ 时, 约在下游轴向位置 $X/D=15$ (X 为轴向距离) 处, 梢涡与海底碰撞导致涡结构发生破损, 这也使得该工况在下游 $X/D=15$ 后的速度亏损明显大于安装高度 $2.0D$ 和 $2.5D$, 而安装高度为 $2.0D$ 和 $2.5D$ 工况的速度变化基本一致. 同时从 3 种工况不同轴向位置速度亏损图可以看出, 从下游 $X/D=10$ 开始, 最大亏损速度均出现在中心轴线的位置. 因此在考虑到对下游流场的影响和安装的成本时, 建议安装高度为 $2.0D$.

关键词: 潮流能水轮机; 安装高度; 数值模拟; 尾流特性

中图分类号: TK730.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 04-0007-07

潮流能是一种能量密度高、规律性较强、土地占用率低的清洁能源, 在实际应用中, 潮流能水轮机的安装位置对单桩潮流能水轮机以及水轮机阵列排布的影响不可忽略^[1]. 潮流能水轮机一般布置在海底, 其安装高度和所处环境对实际性能影响较大. Myers 等^[2]通过改变实验水槽中致动器盘的垂直位置来研究边界邻近性的影响, 发现致动器盘越靠近海床, 尾流速度的亏损越大. 张亚超^[3]采用小威龙测速仪在水槽中测试了水轮机的尾流流场, 研究来流速度、水轮机安装高度、水轮机推力系数及潮流场海底地形对水轮机尾流的影响. Kolekar 等^[3]研究了边界邻近的影响, 结果表明水轮机离床层越远, 就推力和功率系数来说, 其性能就越好. 但水轮机离自由表面太近时, 自由表面将变形, 并与尾流产生强烈相互作用, 从而导致水轮机性能下降. Aghsaee 等^[5]通过 LDV 测试水轮机

流场, 研究了在固定水轮机轮毂高度和流入条件下, 水深变化对水平轴水轮机尾流的影响, 结果显示水越深, 速度恢复得越快, 但与两个较浅的水深相比, 其在尾流中保持了较高的湍流强度水平. 郑源等^[6]通过水槽实验和数值模拟的方法, 对具有单桩支撑结构的水轮机尾流流场进行研究, 结果显示安装高程越高, 会导致沿转轮中心直线处的流速恢复越快. 张玉全等^[7-8]将动量理论与 CFD 方法相结合, 通过致动盘来模拟水轮机对流场的作用, 结果表明该方法能够较为精确地模拟出水轮机远场尾流上的变化情况; 此外还在循环水池中利用 ADV 技术研究不同水深工况下水平轴潮流能水轮机尾的流场特性, 研究表明不同水深会影响近尾流区域内速度亏损形状和远尾流区域速度恢复.

本文以水平轴潮流能水轮机为研究对象, 采用 CFD 方法对水轮机尾流特性进行分析, 并分别

收稿日期: 2022-08-01.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(52171263); 宁波市“科技创新 2025”重大专项(2020Z076).

第一作者: 王焱(1998-), 女, 浙江嘉兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 流体机械仿真研究. E-mail: wy68163101@163.com

*通信作者: 李广年(1981-), 男, 山东东平人, 博士/教授, 主要研究方向: 海洋动力能源、船舶推进. E-mail: liguangnian@nbu.edu.cn

设置水轮机的中心距离海底高度为 $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$ (D 为水轮机的直径), 对水轮机尾流场轴向、径向上的速度亏损以及涡量结构图进行分析。

1 问题描述

1.1 CFD 基本理论

采用的 CFD 软件为 NUMECA Fine/Marine, 求解器使用不可压缩非定常雷诺平均纳维-斯托克斯方程 (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, URANS)。基于有限体积法建立输运方程的空间离散化, 速度场由动量守恒方程得到, 压力场由质量守恒约束或连续性方程得到, 转化为压力方程。质量守恒方程、动量守恒方程分别如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{U_i}{\partial x_j} + \frac{U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i + S_i, \quad (2)$$

式中: U_i 、 U_j 为速度分量; x_i 、 x_j 为位置坐标分量; i 、 j 为张量的分量; ρ 为水的密度; P 为静压; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项, 通过湍流模型求解; μ 为水动力黏性系数; S_i 为动量方程的附加源项。

在研究翼型的水动力特性时, 鉴于湍流模型中的 SST $k-\omega$ 模型与实验值具有较好的吻合值, 且该模型对近壁区域、尾流、绕流计算结果也比较准确^[5], 因此本文的计算模型采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。

1.2 研究对象与计算设置

文中研究对象是直径为 700 mm 的三叶片水平

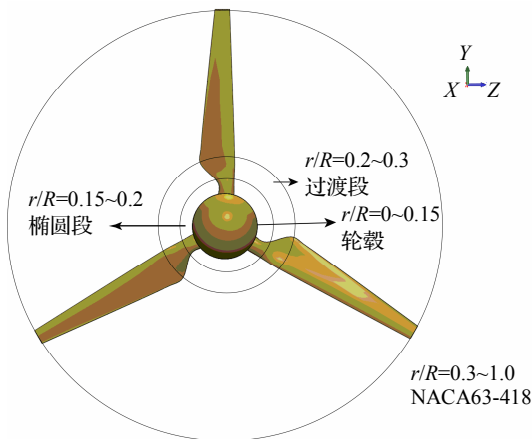


图1 水轮机模型

轴潮流能水轮机^[9], 如图 1 所示, 该模型由 15 个 NACA63-418 截面控制其形状(其中, R 为水轮机半径)。

采用长方体计算域, 对旋转状态下的水平轴潮流能水轮机绕流场进行求解。在数值模拟过程中, 采用大地固定坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 对水轮机的运动情况进行描述, 具体设置条件如下: 坐标系原点 O_0 定义在水轮机模型重心位置, X_0 为水流方向, Z_0 沿水深竖直向上, Y_0 采用右手定则得到。静止域设置的入口距离水轮机中心位置为 $6D$, 出口距离水轮机中心为 $30D$, 长方体的宽和高均为 $6D$; 旋转域设置为以水轮机中心为中心, 高度为 $0.3D$, 直径为 $1.2D$, 以 X 轴为旋转轴的圆柱。边界条件方面, 设置静止域入口为速度入口, 出口为压力出口, 其余 4 个面为远场边界。

对尾流场的网格进行细化加密。计算域网格总数约为 381 万, 静止域网格数约为 288 万, 旋转域网格数约为 92 万, 网格划分及边界条件与旋转域网格如图 2 和图 3 所示。

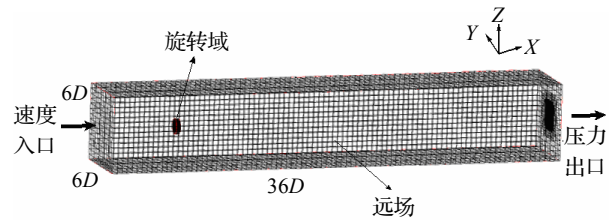


图2 网格划分及边界条件

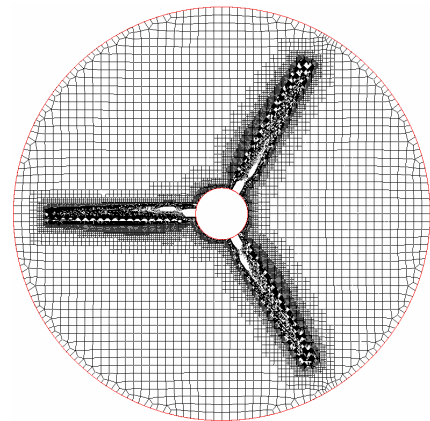


图3 旋转域网格

1.3 验证和确认

CFD 模拟的精度通常随着网格密度的增加而提高, 特别是在复杂流动区域。网格收敛性分析的目的是检验流动模拟结果对网格的依赖性, 对网

格进行成本效益分析, 以此表明所获得结果不受所用网格质量的过度影响. 网格密度足够高的网格能够更好地模拟细小区域的流场, 并捕捉流动中的泄出涡和近壁面剪切层. 这种精度的提高通常是非线性的, 即便增加计算成本, 精度提高仍很小.

按照 ITTC 的推荐, 网格无关性研究采用 3 套网格, 分别为细网格、中等网格、粗网格, 网格细化比 $r_G = \sqrt{2}$, 上节中的网格设置对应中等网格, 并以中等网格为基础, $\sqrt{2}$ 倍增大或减小网格尺寸. 如图 4 所示, 交接面上的尺寸大致相等, 满足滑移网格计算的要求.

本文参数设定: 选择非定常计算, 介质为 15°C 的海水, 密度为 $1026.021\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 湍流模型选择 SST $k-\omega$, 水轮机转速为 $270\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 初场水流速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 水流方向与进口边界垂直, 物理时间步长设置为每 100 个时间步长水轮机旋转一周, 计算 10 000 步, 每步迭代 10 次. 3 套网格计算结果见表 1. 对力矩进行验证和确认, 计算结果见表 2 和表 3.

由于 $0 < R_G = 0.1667 < 1$, 可得上述 3 套网格为

表 1 3 套网格的网格数量和计算结果

参数	细网格	中等网格	粗网格
网格总数	7 445 491	3 810 117	1 819 876
计算力矩 $Q/(\text{N}\cdot\text{m})$	22.3	21.9	19.5

表 2 网格尺寸计算力矩的验证

R_G	p_G	C_G	U_G	δ_G^*	S_C	$U_{G,C}$
0.167	5.17	5.00	0.72	-0.4	22.7	0.32

表 3 网格尺寸计算力矩的确认

E	E_C	U_V	$U_{V,C}$
2.5	0.743	3.73	2.44

单调收敛, 网格收敛性满足. 修正后不确定度 $U_{G,C} = 0.32$. 此工况对应力矩的试验值 $B = 22.87\text{ N}\cdot\text{m}$, 因为 $|E| < U_V$, 所以 U_V 层的确认得以实现; 又因为 $|E_C| < U_{V,C}$, 所以 $U_{V,C}$ 层的确认也得以实现.

1.4 计算工况

为探究安装高度对潮流水轮机的尾流影响, 研究设置 3 种不同的安装高度. 为防止自由液面对研究产生干扰, 控制水轮机与水面的距离保持不变(图 5). 除安装高度不同以外, 计算域的其他尺

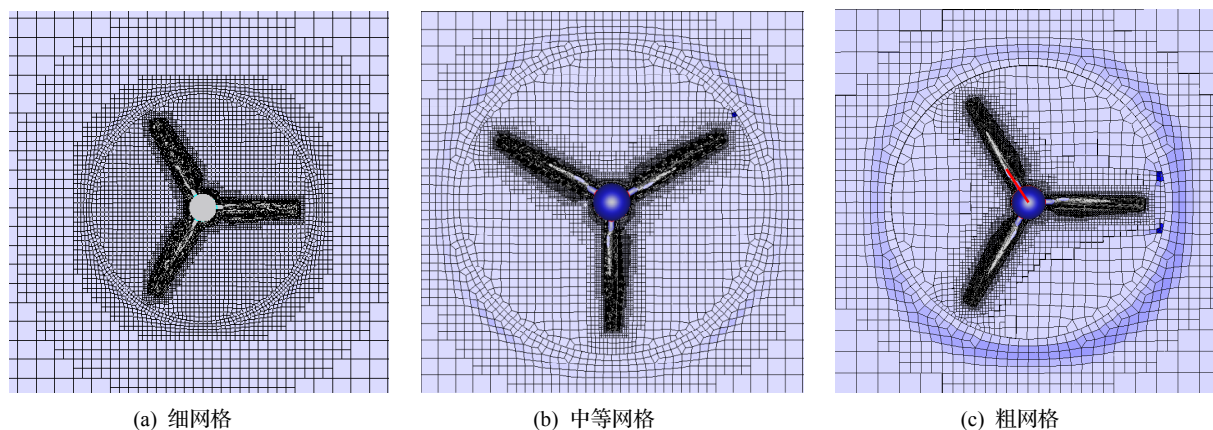


图 4 不同密度网格

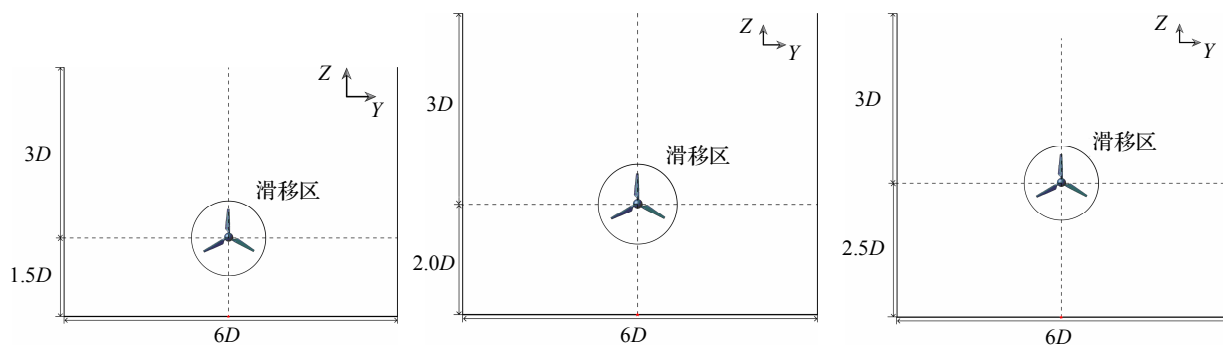


图 5 水轮机不同安装高度示意图

寸以及滑移域尺寸与数值验证时的设置一致, 边界条件底部为固壁边界, 其他边界条件保持不变, 具体工况设置见表 4.

表 4 工况设置

工况	安装高度*	叶尖速比 λ	转速 $\omega/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	$1.5D$	5	270
2	$2.0D$	5	270
3	$2.5D$	5	270

注: *为距离底部的高度.

2 分析与讨论

定义尾流的速度亏损 U_{def} 如下:

$$U_{\text{def}} = 1 - \frac{U}{v}, \quad (3)$$

式中: U 为尾流速度; v 为潮流能的来流速度.

图 6 是 $Z=0$ 平面上的速度亏损云图. 由图可知, 在距离海底 $1.5D$ 的工况下(图 6(a)), 水轮机在该平面上的速度亏损相比其他两种工况更大; 而距离海底 $2.0D$ (图 6(b))和 $2.5D$ (图 6(c))两种工况下, 远尾流的亏损趋势大致相同.

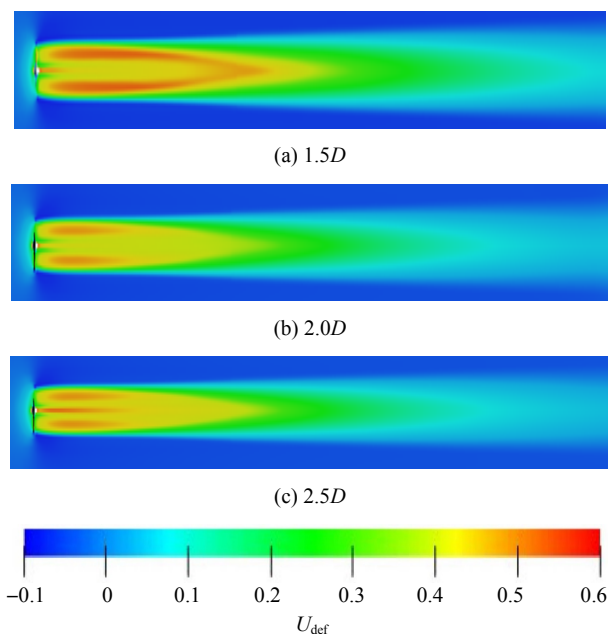
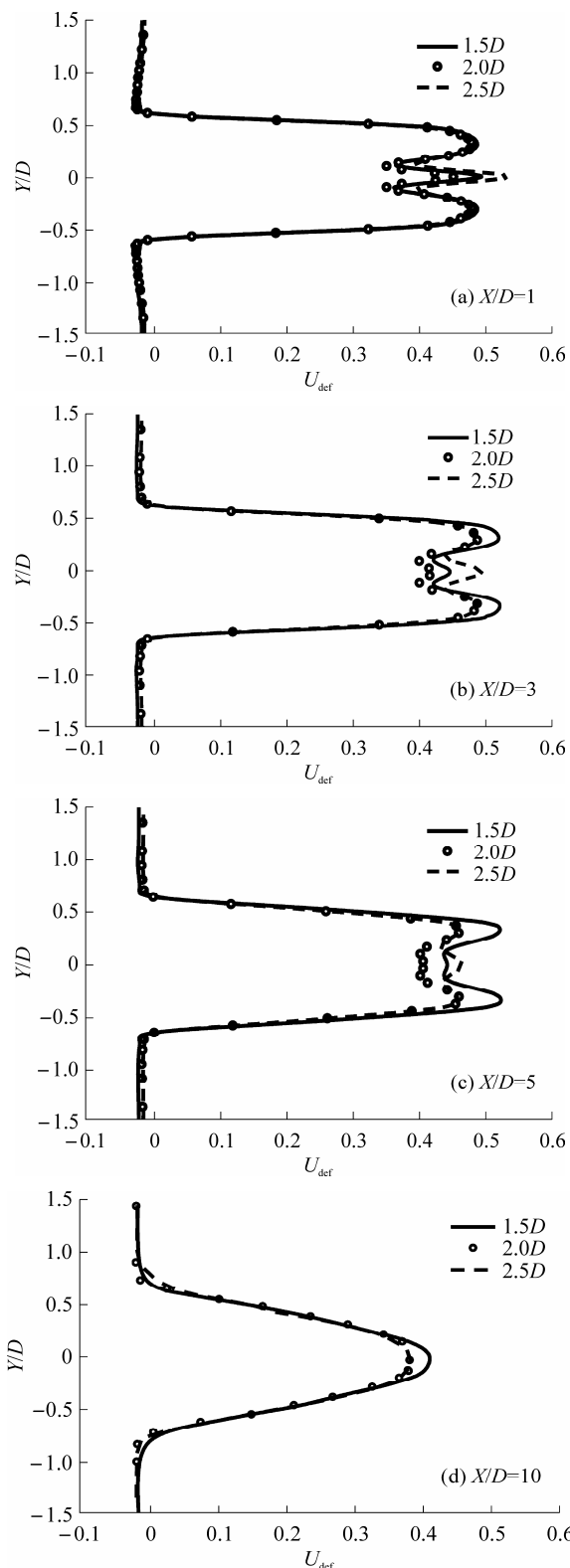


图 6 $Z=0$ 平面速度亏损云图

图 7 是距离海底不同高度的 3 种工况下, 在 $Z=0$ 水平面上不同轴向位置沿径向的速度亏损曲线. $X/D=1$ 时, 工况 1 与工况 3 的最大亏损速度出现在中心轴线位置, 工况 1 和工况 3 在此处的最大亏损速度分别为 50% 与 54% 左右; 而工况 2 的最大亏损

速度出现在中心轴线两侧, 约为 48%; 在其他轴向位置, 工况 1 的最大亏损速度均大于其他 2 种工况. $X/D=10$ 以后, 最大亏损速度均出现在中心轴线的位置, 工况 1 最大速度亏损均明显大于其他 2 种工



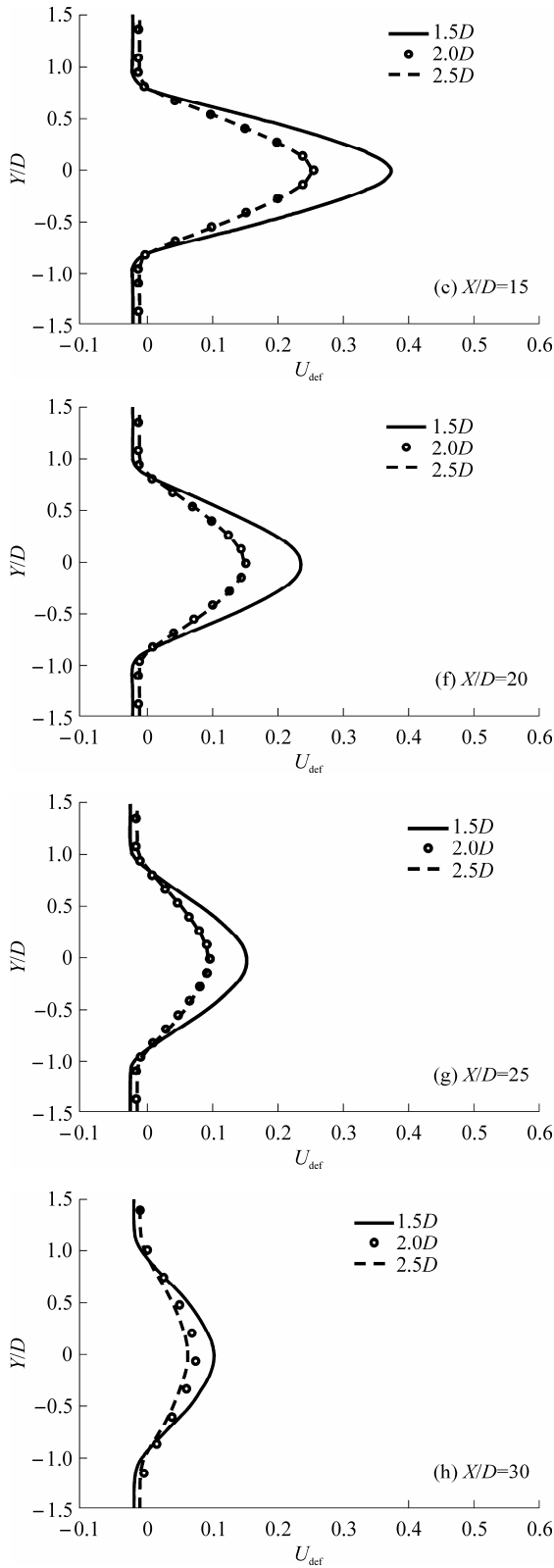


图7 不同轴向位置的速度亏损

况. $X/D=10\sim 25$ 时, 工况 2 和工况 3 的速度亏损曲线基本保持一致. $X/D=10$ 时, 工况 1 最大速度亏损

是 43%, 而在该位置上的工况 2 和工况 3 最大速度亏损约为 38%. $X/D=15$ 时, 工况 1 最大速度亏损为 36%, 工况 2 和工况 3 的最大速度亏损约为 24%. $X/D=20$ 时, 工况 1 最大速度亏损是 24%, 工况 2 和工况 3 的最大速度亏损约为 14%. $X/D=25$ 时, 工况 1 最大速度亏损为 16%, 工况 2 和工况 3 的最大速度亏损约为 10%. $X/D=30$ 时, 工况 1 最大速度亏损为 10%, 工况 2 和工况 3 的最大速度亏损分别约为 7% 和 5%. 即工况 1 尾流速度均恢复至来流的 90% 发生在 $X/D=30$ 的位置, 而工况 2 和工况 3 尾流速度均恢复至来流的 90% 发生在 $X/D=25$ 的位置.

图 8 为距离海底不同高度的 3 种工况下, 在 $Z=0$ 水平面上不同径向位置沿着轴向的速度亏损曲线. 工况 2 和工况 3 在 $Y/R=0.8$ 、 1.0 的 2 个径向位置沿

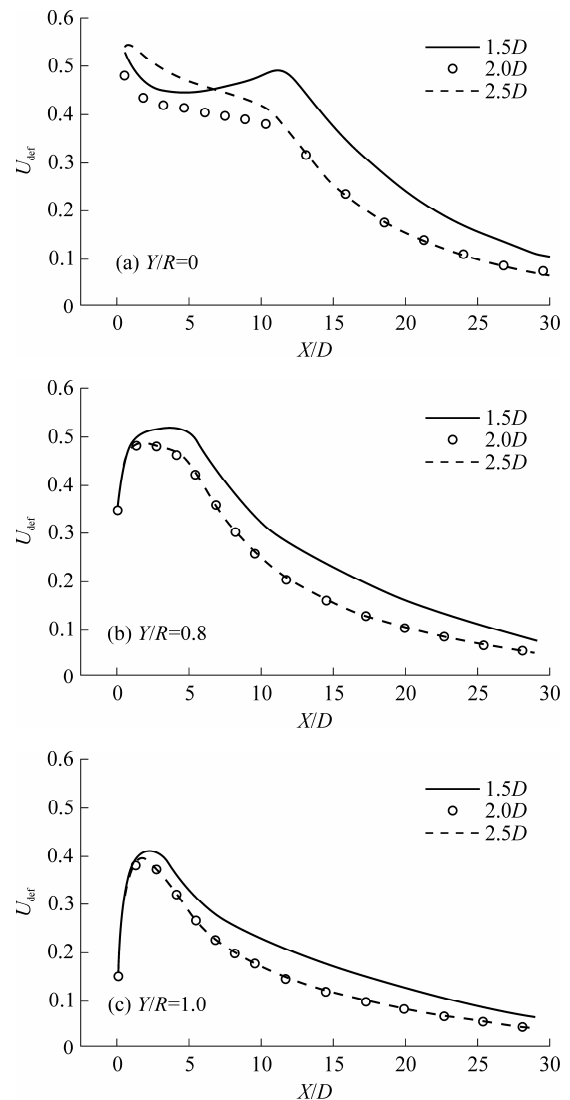


图8 不同径向位置的速度亏损

轴向的速度基本一致, 主要区别在中心轴线位置上. $Y/R=0$, 当 $X/D>6$ 时, 工况 1 的速度亏损均大于其他 2 种工况; 当 $X/D<6$ 时, 工况 1 的速度亏损值在工况 2 和工况 3 之间; $X/D=10$ 后, 3 种工况的恢复趋势基本一致. $Y/R=0.8、1.0$ 时, 工况 1 的速度亏损在相同位置均大于其他 2 种工况, 3 种工况的尾流亏损的趋势大致相同.

潮流能水轮机在转动过程中因叶片扰动会出现泄涡现象, 而泄涡过程能够直观地表现水轮机尾流的流场特性, 并通常使用 Q 准则来对涡系进行可视化处理^[10]. 通过涡量等势面可以观察到水轮机的叶梢和轮毂泄出的涡系, 进而能够讨论水轮机尾流的发展及扩散的过程.

Q 准则定义:

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}^2 - S_{ij}^2), \quad (4)$$

其中, 非对称部分旋转率 Ω_{ij} :

$$\Omega_{ij} = \frac{U_{ij} + U_{ji}}{2}, \quad (5)$$

对称部分应变率 S_{ij} :

$$S_{ij} = \frac{U_{ij} - U_{ji}}{2}. \quad (6)$$

螺旋度 He 为表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力性质物理量($m^2 \cdot s^{-2}$).

$$He = \frac{\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega}}{|\mathbf{v}| \cdot |\boldsymbol{\Omega}|}, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为速度矢量; $\boldsymbol{\Omega}$ 为涡量矢量.

图 9 为不同安装高度的涡结构图. 图中水轮机叶片的叶尖脱落的梢涡螺旋式向下游发展, 图片下方横线表示海底, 图 9(a)、(b)、(c) 距离海底的安装高度分别为 $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$. 梢涡结构分为规则和非规则两部分, 由于各涡系之间的相互作用以及尾流耗散, 使得原本规则涡结构呈非规则变化. 由图 9 可以看出, 当安装高度为 $1.5D$ 时, 约在下游 $X/D=15$ 处, 梢涡与海底碰撞, 使得涡结构发生破损, 而安装高度为 $2.0D$ 、 $2.5D$ 时, 则均未发现该情况. 结合图 7 可知, 正是由于涡结构与海底碰撞发生耗散, 使得安装高度为 $1.5D$ 的工况在下游 $X/D=15$ 后的速度亏损明显大于其他 2 种工况.

3 结论

通过数值模拟对不同高度下的水平轴潮流能

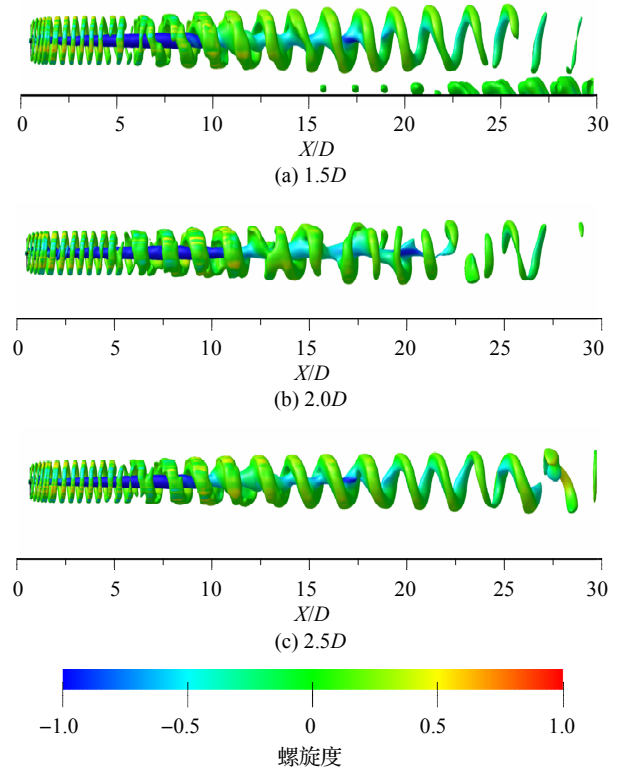


图 9 不同工况涡结构图($Q=0.05 \text{ s}^{-2}$)

水轮机的尾流特性进行研究, 并对近尾流区域的轴向速度、径向速度以及水轮机尾部的泄出涡结构变化展开分析, 结论如下:

(1) 当安装位置距离海底 $1.5D$ 时, 其尾流亏损较大, 对下游影响更大, 安装位置距离海底 $2.0D$ 、 $2.5D$ 的 2 种工况, 尾流流场差别不大, 特别是两者在远尾流场的速度亏损基本一致, 并且对下游的影响相似. 在 $X/D=10$ 之后, 最大亏损速度均出现在中心轴线位置, 并且安装位置距离海底 $1.5D$ 的最大亏损速度明显大于其他 2 种工况.

(2) 对比分析 $Z=0$ 水平面上不同径向位置沿轴线的速度亏损曲线, 可以得到: $Y/R=0.8$ 和 $Y/R=1$ 时, 安装位置距离海底 $1.5D$ 的速度亏损在相同位置均大于其他 2 种工况, 其他 2 种工况的速度亏损趋势大致相同. $Y/R=0$, $X/D>6$ 时, 安装位置距离海底 $1.5D$ 的速度亏损大于其他 2 种工况, $X/D<6$ 时, 其速度亏损在其他 2 种工况之间.

(3) 通过对不同安装高度的涡结构图分析, 可以看到安装位置距离海底 $1.5D$ 的涡结构在下游 $X/D=15$ 之后与海底碰撞发生耗散, 这样造成安装高度为 $1.5D$ 的工况在下游 $X/D=10$ 后的速度亏损明

显大于其他2种工况,且与前文不同轴向位置速度损失相对应。

(4)当安装高度达到 $2.0D$ 时,水轮机尾流对下游影响相对减小,且随安装高度的增加,尾流变化相对较小,考虑到对下游流场的影响和安装的成本,建议水轮机的安装高度为距离海底2倍水轮机的直径。

参考文献:

- [1] 魏东泽, 吴国荣, 郭欣, 等. 潮流能开发技术研究进展[J]. 可再生能源, 2014, 32(7):1067-1074.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Kolekar N, Banerjee A. Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects[J]. Applied Energy, 2015, 148:121-133.
- [5] Aghsaei P, Markfort C D. Effects of flow depth variations on the wake recovery behind a horizontal-axis hydrokinetic in-stream turbine[J]. Renewable Energy, 2018, 125:620-629.
- [6] 郑源, 李东阔, 张玉全, 等. 单桩结构的潮流能水轮机尾流流场分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11):3031-3038.
- [7] 张玉全, 郑源, 孙勇, 等. 基于致动盘的潮流能水轮机尾流场研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(1):144-150.
- [8] 张玉全, 张智, 张继生, 等. 水深变化影响下潮流能水轮机尾流场特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21):6973-6982.
- [9] Song M, Kim M C, Do I R, et al. Numerical and experimental investigation on the performance of three newly designed 100 kW class tidal current turbines[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, 4(3):241-255.
- [10] 张玉超. 垂直轴水轮机尾流场及并列水轮机尾流干扰特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.

Influence of installation height on wake characteristics of horizontal axis tidal energy turbine

WANG Ye¹, ZHU Shanqiang², LI Zhenqi³, LI Guangnian^{1*}

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China; 2.Hefei Swan Refrigeration Technology Co., Ltd., Hefei 230051, China; 3.TSC Offshore Equipment Research Institute, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to explore the influence of the installation height on the wake field of the turbine, this paper takes the horizontal axis tidal energy turbine as the research object, and employs the Computational Fluid Dynamics (CFD) method to analyze the wake characteristics of the turbine. The height of the center of the turbine from the seafloor was set as $1.5D$, $2.0D$ and $2.5D$ respectively, where D is the diameter of the water turbine; and the velocity deficit and vorticity structure chart of the turbine wake field in the axial and radial directions were analyzed. The research results show that when the installation height is $1.5D$, the collision between the tip vortex and the seafloor leads to the damage of the vortex structure at the downstream axial position $X/D=15$, where X is the axial distance. It also makes the velocity loss after $X/D=15$ downstream being significantly larger than that of the installation height of $2.0D$ and $2.5D$. The velocity changes of the installation height of $2.0D$ and $2.5D$ are basically the same as those of the installation height of $1.5D$. It can be seen from the velocity deficit diagrams of different axial positions under the three working conditions that the maximum velocity deficit occurs at the central axis starting from the downstream $X/D=10$. Considering the impact on the downstream flow field and the cost of installation, the installation height is recommended to be $2.0D$.

Key words: tidal current energy turbine; installation height; numerical simulation; wake characteristics

(责任编辑 章践立)