

小翼扭角对潮流能水轮机水动力性能的数值研究

郭 彬^{1,2}, 王宝龙¹, 桂洪斌¹, 张 岩¹

(1. 哈尔滨工业大学(威海)海洋工程学院, 威海 264209; 2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室, 天津 300112)

摘 要: 以三维水平轴潮流能水轮机作为初始模型, 采用CFD数值计算的方式分析叶梢小翼的扭角对潮流能水轮机水动力性能以及尾流特性的影响规律, 进而阐明叶梢小翼扭角对水轮机叶片水动力性能的作用机理。研究数据显示, 叶梢小翼扭角的改变会显著改变潮流能水轮机整机水动力性能, 相较于水轮机初始模型, 叶梢小翼扭角为 -6° 时水轮机能量转换效率相对增加5.17%, 阻力系数相对增加7.01%。在小翼扭角 $-9^\circ \sim -6^\circ$ 的变化区间内, 带小翼水轮机的能量转换效率受扭角角度变化影响, 总体呈先增长后减小趋势, 阻力系数则呈单调下降趋势。叶梢小翼扭角变化会显著影响水轮机叶片梢部后方的流体径向流动状态, 对叶片梢部三维效应损失产生影响, 进而影响小翼与叶片梢部表面压力分布, 改变潮流能水轮机的水动力性能。对比速度波动功率谱密度曲线可知, 小翼扭角会影响叶片后梢涡轴向速度波动, 且随着轴向距离的增加影响逐渐降低, 但对径向速度波动影响不明显。

关键词: 潮流能; 数值计算; 水动力; 水轮机; 叶梢小翼; 功率谱密度

中图分类号: TM612

文献标志码: A

0 引 言

海洋能被认为是拥有巨大潜力的可再生能源, 其中潮流能具有周期性、可预测性以及能量密度高等优点, 被认为是最具开发潜力的海洋能之一^[1]。随着潮流技术的发展, 提升潮流能水轮机能量转换效率以及阵列化发展是加速潮流能商业应用的重要途径^[2]。由于海洋工作环境的限制, 潮流能水轮机无法像风力机一样通过增大叶片直径来提高装机功率, 因此一些学者提出在水轮机外围施加导管、改善水轮机位置处海底坡度等方法, 通过提升水轮机桨盘处流量来增加装置发电功率^[3]。此外, 在潮流能水轮机叶片叶梢处添加小翼被认为是改善叶片性能的有效途径, 小翼的存在可减少来流在叶片径向的流动和叶梢处三维损失, 从而降低叶片诱导阻力以及提升叶片能量转换效率^[4]。

“小翼”(Winglets)最初由航空工程师 Whitcomb^[5]于1976年提出, 用来代指几乎垂直的机翼延伸。Shimizu等^[6]在1990—2003年期间对“Mie-Type”型小翼进行了一系列实验和仿真研究, 结果表明该型小翼在风力机设计尖速比下可提升叶片8.75%的能量转换效率。代尔夫特理工大学的 Bussel等^[7]发展了部分小翼对叶片梢部影响的理论, 其主要假设是叶片效率增加是由尾流下游涡度变化造成的。Johansen等^[8]通过数值计算的方法探究了小翼对风力机能量转换效率影

响的可能机理, 并定义了8个关键参数描述小翼几何外形, 研究结果表明叶片能量转换效率最好的工况是小翼折角为 90° (指向下游方向), 高度为叶片直径的1.5%, 能量转换效率增加了1.3%, 阻力系数增加了1.6%, 并认为能量转换效率的增加是由于叶梢效应(reduction of tip effects)的减少, 这与文献[7]结论不一致。Elfarra等^[9]用遗传算法对潮流能水轮机叶梢小翼进行了优化设计, 结论表明优化后的小翼提升了叶片9%的能量转换效率, 并指出小翼对叶梢梢涡强度无明显影响。陈恺^[10]探究了多个小翼几何变量对叶片翼型性能的作用, 发现加装小翼后实现了叶梢近尾流区流场环量的重新分配, 改进后的小翼结构能够减小梢涡能量密度, 减小了叶片径向向下洗速度, 降低了其对叶片主体段的诱导阻力。王晓宇等^[11]通过数值计算的方法探究了L型小翼的作用机理, 结果表明添加L型小翼后风力机阻力系数最大增幅为0.81%, 风力机功率最大增幅为4.2%。Mühle等^[12]研究了小翼对梢涡及尾流场的影响, 结果表明在大于4倍直径的尾流区域, 小翼使尾流轴向流速恢复更快, 并使水轮机产生了更高的能量转换效率。Rodolfo^[13]通过实验探究了不同小翼对潮流能水轮机性能的影响, 并通过油性涂料流动可视化(oil-based paint flow visualisation)方法对小翼影响机理进行了研究, 实验表明指向上游的小翼产生了1%~2%的能量转换效率提升, 并伴随3%~4%的阻力系数增加, 而指向下游的小翼

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 北京市教育委员会科研计划(KZ20231001720); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QE282); 自然资源部海洋观测技术重点实验室开放基金(2022klootA03); 航空科学基金(2023M031077001)

通信作者: 张 岩(1989—), 女, 博士、副教授, 主要从事海洋结构物设计与制造方面的研究。zhangyan@hitwh.edu.cn

平均使叶片能量转换效率降低 12%,阻力系数平均增加 5%。王毅等^[14-15]探究了不同小翼形状对潮流能水轮机尾流特征的影响,研究发现小翼会使近尾流区的尾流轴向速度损失增加,且伴随轴向距离的增加,有小翼的叶片尾流轴向速度恢复更快。张大海等^[16]探究了小翼长度和折角角度变化对水轮机叶片水动力性能的作用,研究表明当小翼折角为 45°时叶片性能最优,能量转换效率提高约 11%,阻力系数增大约 8%,此外小翼使梢涡产生位置远离叶片旋转平面,从而减少了叶片载荷波动,而非降低梢涡涡核强度。

综上,尽管在叶梢小翼对潮流能水轮机水动力性能影响分析方面取得了较为丰硕的成果与进展,但当前公开发表的文献中叶梢小翼对潮流能水轮机的作用机理尚不明确,小翼扭角等几何参数影响规律的研究较为匮乏。因此,本文以双向对称潮流能水轮机模型为研究主体,采用 CFD 数值仿真求解的方法研究小翼扭角变化对潮流能水轮机水动力性能及近尾流场的影响规律,并阐明叶梢小翼扭角对水轮机叶片水动力性能的作用机理。

1 潮流能水轮机几何模型

本文采用三叶双向对称水平轴潮流能水轮机作为初始模型(无小翼潮流能水轮机模型),叶片直径 0.3 m,设计尖速比为 5,设计参数如表 1 所示,详细设计过程在本文作者的前期工作^[17]中已有描述,本文不再重复,以表 2 的形式给出水轮机叶片主要参数沿半径方向的分布。小翼几何参数定义方法与文献^[8]中一致,如图 1 所示。其中小翼基础翼型与

表 1 潮流能水轮机初始模型设计参数

Table 1 Design parameters for initial model of tidal current turbine

叶数	毂径比	来流流速/(m/s)	设计尖速比	直径/m
3	0.2	2.0	5	0.3

表 2 水轮机初始模型叶片弦长与扭角沿半径方向分布

Table 2 Distribution of turbine's chord and pitch angle of turbine along radius direction

半径/m	弦长/mm	螺距角/(°)
0.030	38.2	22.6
0.045	35.5	16.1
0.060	32.8	11.5
0.075	30.0	8.3
0.090	27.3	6.0
0.105	24.6	4.3
0.120	21.9	3.0
0.135	19.2	2.0
0.150	16.5	1.2

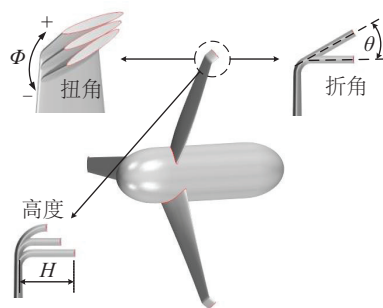


图 1 叶梢小翼几何参数定义示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric parameters definition of winglet

叶梢处保持一致,小翼折角固定为 45°,高度固定为 7.5 mm,折角处半径固定为高度的 1/2,在此基础上小翼扭角变化区间为 -9°~6°。为进一步方便读者理解,将文中水轮机叶片区域划分的描述以图 2 的形式给出。

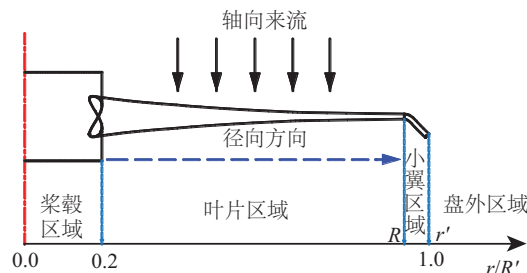


图 2 潮流能水轮机桨叶区域划分

Fig. 2 Regional division of tidal current turbine blade

2 潮流能水轮机数值计算方法

2.1 控制方程

单相流由三维的、不可压缩的 N-S 方程控制。控制方程定义在一个固定的惯性参考系中,质量和动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} = \rho F_i - \frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j'} \right] \quad (2)$$

式中: u_i ——速度分量, m/s; ρ ——流体密度, kg/m³; F_i ——外部作用力, m/s²; p_i ——压强平均值, Pa; $-\rho \overline{u_i u_j'}$ ——速度波动产生的雷诺应力, N。

数值求解过程中,使用有限体积分法将求解域细分为有限数量的小控制体积,使用二阶迎风格式对网格单元物理量进行线性插值;并通过 SIMPLE 压力-速度耦合算法按顺序求解质量和动量的积分守恒方程,时间步长为 0.0005 s,对应水轮机转过 2°所用时间。

为对比扭角作用效果,将水轮机相关水动力参数进行无

量化处理,无量纲化的尖速比(λ)、能量转换效率(C_p)、阻力系数(C_T)以及相对压力系数(C_{pre})定义为:

$$\lambda = \frac{\omega R'}{V} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{Q\omega}{0.5\rho\pi R'^2 V^3} \quad (4)$$

$$C_T = \frac{F}{0.5\rho\pi R'^2 V^2} \quad (5)$$

$$C_{pre} = \frac{p - p_\infty}{0.5\rho[V^2 + (\omega R')^2]} \quad (6)$$

式中: ω ——叶片角速度,rad/s; R' ——带小翼潮流能水轮机真实半径, $R' = R + r'$,其中 R 为无小翼潮流能水轮机半径, r' 为小翼在叶片半径方向投影长度,m; V ——水流速度,m/s; Q ——叶片上的扭矩, $N\cdot m$; F ——叶片承受的轴向阻力,N; p ——水轮机叶片附近表面压力,Pa; p_∞ ——计算域入口处压力,Pa。

2.2 边界条件以及网格划分

将整个计算区域划分为旋转域和静止域两部分,其中静止域范围与纽卡斯尔大学的空泡水洞(emerson cavitation tunnel, ECT)实验段尺寸一致。静止域总长 $20D$ (D 为特征长度),宽为 $4.06D$,高为 $2.69D$,如图3所示,旋转域直径为 $1.5D$,长为 $0.6D$,二者之间通过内部原位交界面(Interface)保证数据传输。

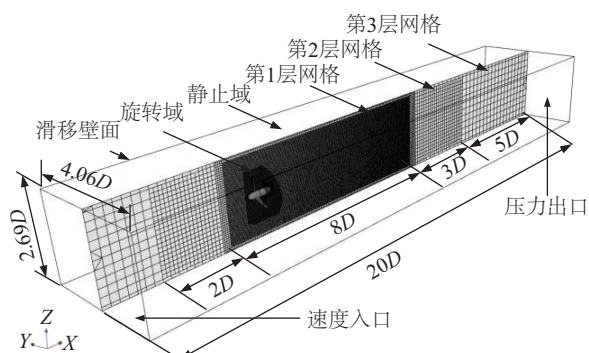


图3 计算域边界条件设置及网格划分

Fig. 3 Schematic diagram of boundary condition settings and grid division for computational domain

计算域左侧施加速度入口边界条件,来流速度为 2 m/s ;右侧施加压力出口边界条件;四周施加滑移壁面边界条件。为更好地捕获水轮机叶梢局部流体流动信息,本文对计算域体网格采用三级加密形式来分析水轮机的尾流特性,生成的计算域网格如图3所示;对叶片及小翼面网格进行线加密和面加密控制,生成的潮流能水轮机面网格如图4所示。为进一步分析小翼对潮流能水轮机叶片梢部径向流动的影响,本文在水轮机叶片后流速及压力测点分布,如图5所示。

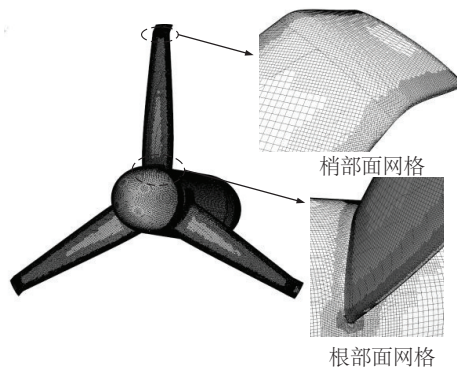


图4 潮流能水轮机叶片面网格

Fig. 4 Surface mesh of tidal current turbine

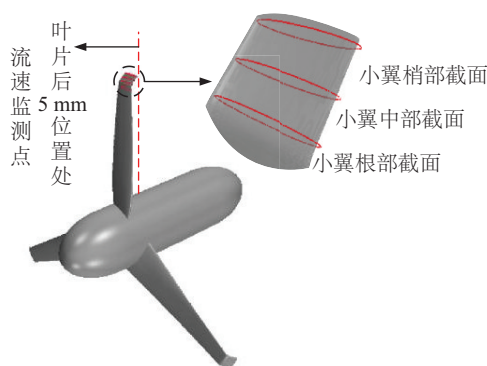


图5 水轮机叶片后流速及表面压力测点分布

Fig. 5 Schematic diagram of measuring point distribution of velocity and surface pressure behind turbine blades

3 结果与分析

3.1 数值计算方法验证

为检验数值环境设置的可靠性,本文在纽卡斯尔大学的空泡水洞测试了初始潮流能水轮机模型的水动力性能,空泡水洞平面示意图如图6所示,试验段的长、宽、高分别为 $3000\text{ mm}\times 1219\text{ mm}\times 806\text{ mm}$,水流流速范围 $0.5\sim 8.0\text{ m/s}$ 。潮流能水轮机安装在敞水动力仪上(型号:Kempf & Remmers H33)。在试验过程中保持来流流速恒定,通过调节水轮机转速的方法改变水轮机叶片尖速比,使用敞水动力仪采集不同工况下水轮机叶片的水动力参数,并采用式(3)~式(5)计算水轮机叶片不同工况下的能量转换效率和阻力系数。

通过定义相对误差(δ)来衡量数值计算结果和空泡水洞试验测量结果之间的可靠度:

$$\delta = \frac{R_T - R_C}{R_T} \times 100\% \quad (7)$$

式中: R_T ——空泡水洞试验测得的潮流能水轮机水动力性能结果; R_C ——数值计算求解的潮流能水轮机水动力性能结果。

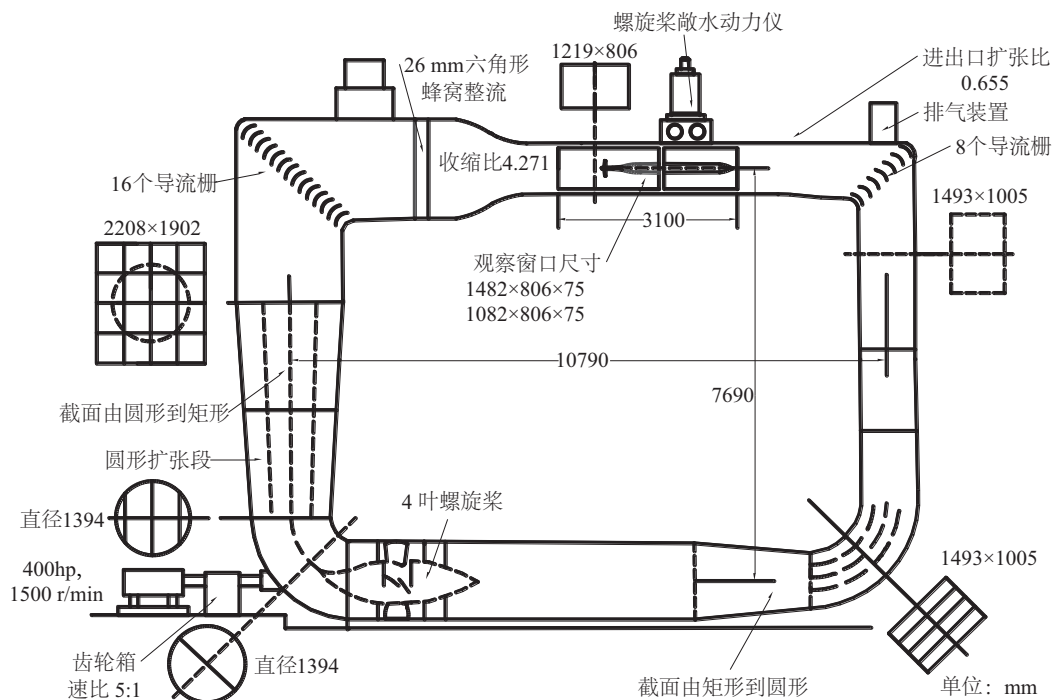


图6 纽卡斯尔大学空泡水洞示意图

Fig. 6 Sketch of ECT at Newcastle University

图7为不同尖速比下数值计算结果与空泡水洞试验量的水轮机水动力性能结果对比。由图7可知,数值计算结果与试验测定结果具有较好的一致性。在设计尖速比下,来流流速为2.0 m/s时,空泡水洞试验测定的能量转换效率为0.4184,数值计算所得的能量转换效率为0.4227,二者之间的相对误差为1.03%;空泡水洞实验测定的阻力系数($C_T/10$)为0.08582,数值计算的阻力系数为0.08218,两者之间的相对误差为4.24%。在全尖速比范围内能量转换效率平均误差为2.87%,阻力系数平均误差为3.79%。由此可认为本文搭建的数值计算环境设置正确,求解结果准确性较好。

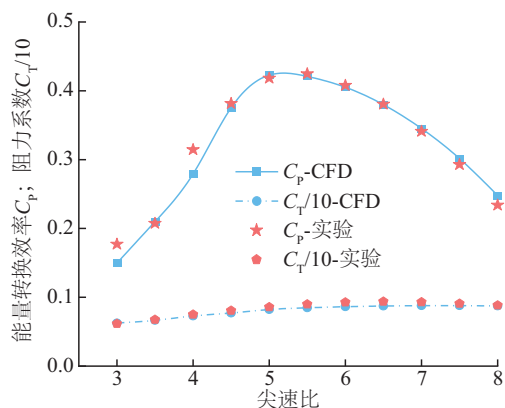


图7 不同尖速比下潮流能水轮机初始模型的数值计算结果与模型实验结果对比

Fig. 7 Hydrodynamic performance comparison of calculation results of turbine initial model and model testing uresults under various tip speed ratio

在作者前期研究中已对本文数值计算采用的网格划分方法进行了无关性验证,并通过理查德森外推法分析了网格数量对计算结果的影响,相关工作^[17,19-21]在本文中不再重复。

3.2 水轮机水动力性能

图8为潮流能水轮机的能量转换效率及阻力系数与叶梢小翼扭角变化关系曲线。由图8可看出,在扭角 $-9^\circ \sim -6^\circ$ 区间(区间1)中,水轮机整体能量转换效率随扭角的增加呈逐渐增大的趋势。在扭角 $-6^\circ \sim 0^\circ$ 区间(区间2)变化时,潮流能水轮机能量转换效率变化趋于平缓;在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 区间(区间3),伴随扭角的增加叶片的能量转换效率呈快速减小的趋势。带小翼水轮机叶片相比于水轮机初始模型在扭角为 -6° 时能量转换效率相对提升5.17%,而单纯扭角改变可使水轮机能量转换效率产生的相对变化约2.5%(小翼扭角为 -6° 与 6° 时)。由图8可看出,阻力系数随扭角的增大单调减小,小翼扭角最大可产生7.01%的阻力系数增加,因此可认为小翼扭角对水轮机性能的影响不容忽视,合适的扭角可使水轮机在承受较小阻力的同时具有较大能量转换效率。

为探究小翼扭角变化对水轮机整体能量转换效率和阻力性能产生的影响,分别提取水轮机叶片和小翼水动力性能信息,如图9a与图9b所示。由图9a可看出,叶片产生的扭矩伴随扭角的增加呈逐渐下降的趋势,图9b中小翼产生的扭矩伴随扭角的增加呈先增加后减小的趋势。在小翼扭角 $-9^\circ \sim -6^\circ$ 区间内,叶片产生的扭矩变化趋势平缓,但小翼产生的扭矩增幅较大,该变化导致水轮机整体能量转换效率在区间1呈上升趋势;在扭角 $-6^\circ \sim 0^\circ$ 区间内,小翼和叶片产生的

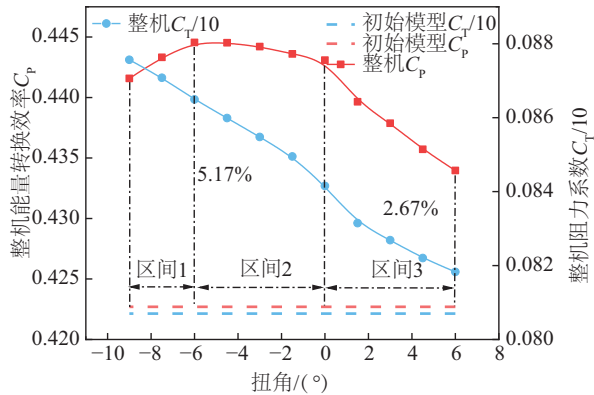


图8 设计尖速比下小翼扭角对水轮机整机水动力性能影响

Fig. 8 Influence of winglet's twist angle on hydrodynamic performance of tidal current turbine under design tip speed ratio

扭矩随扭角变化呈明显相反趋势,小翼产生的扭矩上升明显,叶片产生的扭矩则下降趋势明显,该趋势导致水轮机整体能量转换效率在区间2变化平缓;在扭角 $0^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 区间内,叶片和小翼产生的扭矩均呈下降趋势,故水轮机整体能量转换效率在区间3呈快速减小趋势。由图9c与图9d可看出,水轮机小翼和叶片两者的阻力系数伴随扭角的增大均呈下降趋势,导致水轮机整体阻力系数呈随扭角的增大而单调减小的现象。

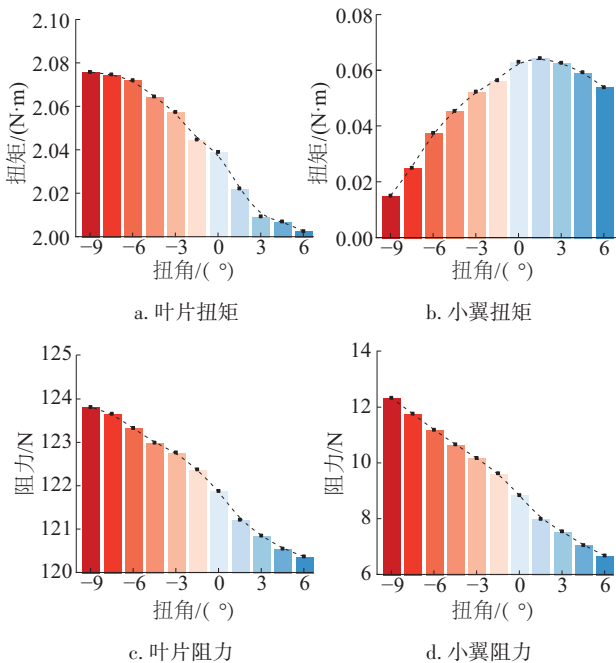


图9 扭角对水轮机叶片和小翼水动力性能影响

Fig. 9 Influence of winglet's twist angle on hydrodynamic performance of turbine blade and winglet

为进一步探究小翼扭角对水轮机水动力性能影响的作用机理,本文首先分析小翼扭角对叶片梢部三维效应的影响,如图10所示。由图10可看出,叶梢小翼的扭角变化可

显著改变潮流能水轮机叶梢后方的流体流动,伴随小翼扭角的增大,叶片梢部后5 mm截面处测点(测点位置如图5所示)径向速度(沿叶片半径方向)逐渐减小,在小翼扭角为 6° 时叶片梢部径向的下洗速度为负值(流体流向由叶梢流向叶根),即扭角增大使小翼对叶梢处下洗流的抑制作用减弱,叶梢损失加剧,能量转换效率降低。

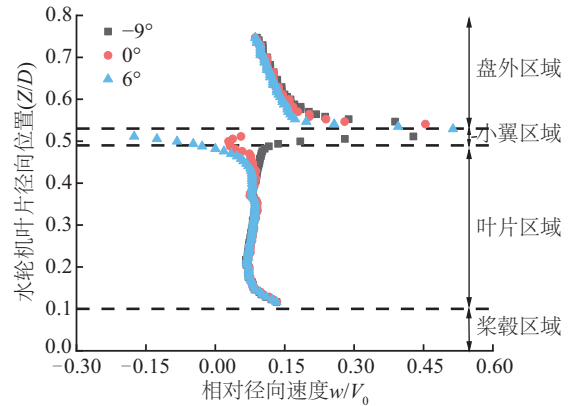


图10 水轮机叶片紧后位置处径向流速分布

Fig. 10 Distribution of radial velocity at position immediate behind turbine blades

然后提取了水轮机梢部不同截面处表面压力分布数据,如图11所示。由图11可看出,扭角改变主要影响小翼以及叶片梢部表面压力分布,且影响程度随半径的减小(靠近叶根方向)呈现整体减弱趋势。但在小翼梢部因流体流动三维效应的原因,扭角对小翼梢部截面表面压力分布的影响(图11a)反而弱于对小翼中部截面的影响(图11b))。以小翼根部截面压力分布为例(图11c)),扭角主要改变了剖面导边吸力侧负压值,导边吸力侧负压值随扭角减小而减小,而导边压力侧压力分布变化相对缓慢,造成导边正负压差随扭角的增大而减小,因此小翼阻力系数呈随扭角的增大单调减小的趋势。对于小翼产生的扭矩而言,扭角为 0° 时本文叶梢小翼根部剖面处于最佳升阻比攻角附近,无论小翼扭角减小或增加,小翼根部剖面升阻比都呈减小趋势,反映在图9d中小翼在扭角为 0° 时具有最佳扭矩。

综上,小翼扭角变化会显著影响水轮机叶片后流体径向流动状态,进而改变潮流能水轮机梢部三维效应损失,且流动状态的改变致使小翼表面压力分布发生变化,从而影响水轮机整体的水动力性能。虽然叶片与小翼水动力性能在部分扭角变化区间内呈现相互抵消的趋势,但小翼仍能使水轮机整体水动力性能产生较大的提升。

3.3 叶片附近流场速度波动

考虑小翼扭角变化可能会影响到水轮机尾流速度波动,本文通过提取翼梢($Z/D=0.55$)后 $0.5D$ 、 $3D$ 和 $4.5D$ 位置处速度波动功率谱密度,如图12所示。由图12可看出,所得

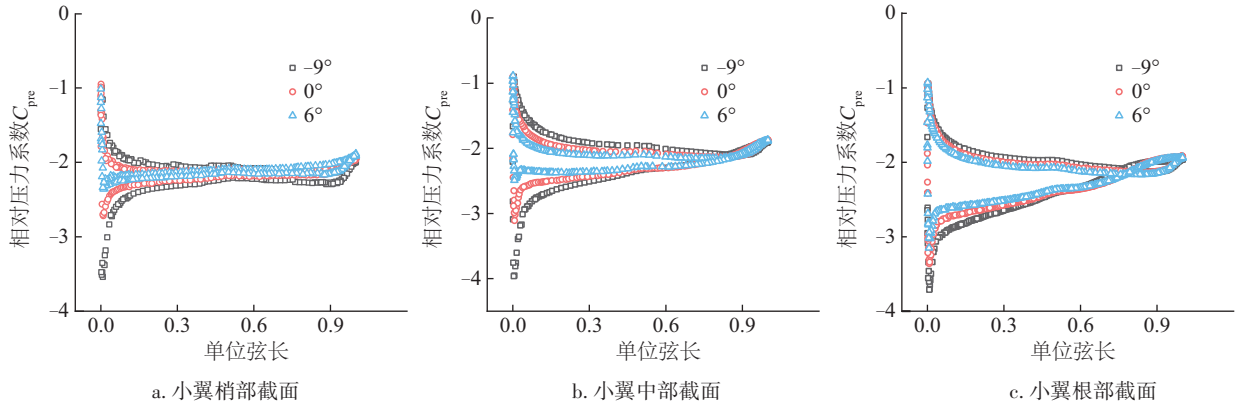


图 11 不同小翼扭角下小翼不同截面位置处相对压力分布对比

Fig. 11 Comparison of relative pressure distribution at different section positions under different winglet twist angles

功率谱密度变化趋势和各向同性惯性流中求解的理论趋势(点划线)相吻合^[22]。且叶频及其谐波分量相对应的谱峰随轴向距离的增加逐渐消失的现象与 Lee 等^[23]的实验结果一致,验证了本文数值计算所得近尾流速度波动数据的可靠性。

在图 12a 中水轮机盘后轴向距离 $0.5D$ 处($X=0.5D$)轴向及径向速度波动都呈现与叶频及其谐波分量相对应的谱峰,

该现象可表征水轮机叶片梢涡;扭角为 6° 时水轮机叶片的功率谱能量密度显著高于扭角为 0° 和 -9° ,且 0° 和 -9° 能量密度差别较小,说明扭角改变会影响叶片后梢涡速度波动。随着轴向距离的增加, $X=3D$ 及以后位置轴向速度波动功率谱密度曲线(图 12b、图 12c)在叶频及其谐波分量下的峰值逐渐消失,说明随梢涡向下游运动,梢涡运动与叶片旋转运动逐渐解耦,而叶片扭角变化对这一过程的影响并不明显。对比

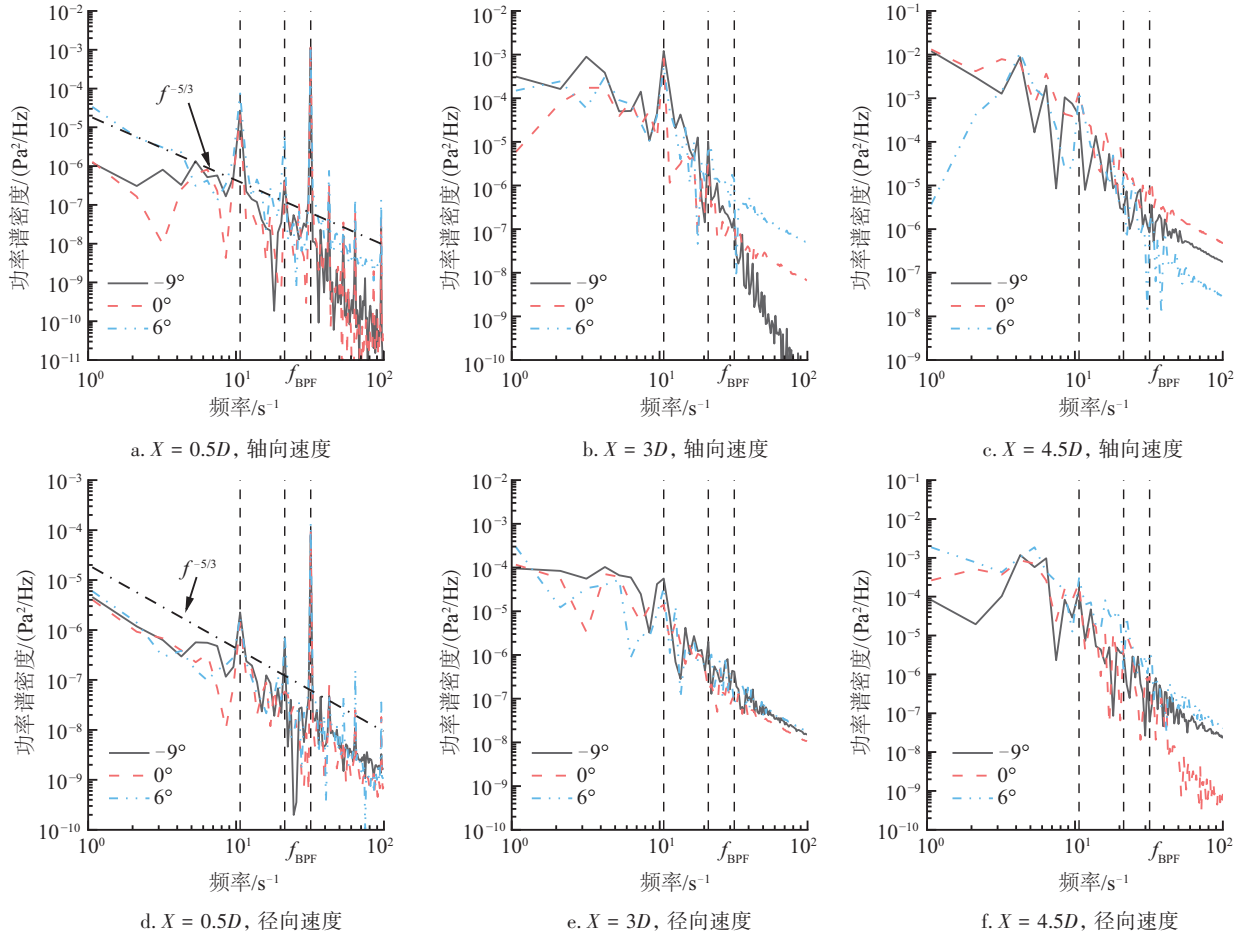


图 12 不同小翼扭角下水轮机叶片下游叶梢位置处功率谱密度对比

Fig. 12 Comparison of power spectral density at downstream position of turbine blade tip under different winglet twist angles

图 12d~图 12f 可看出,不论是盘后位置(0.5D 位置)还是近尾流区(3D、4.5D 位置)扭角变化对其影响都不明显,说明扭角改变对近尾流区梢涡的扩张影响较小。

4 结 论

本文探究了叶梢小翼扭角对潮流能水轮机水动力性能的影响规律,并通过对比小翼与叶片在不同小翼扭角下的水动力性能探索了叶梢小翼对潮流能水轮机叶片的作用机制,得到以下主要结论:

1)将潮流能水轮机初始模型的空泡水洞试验测量结果与本文数值计算结果进行对比,验证了本文采用的数值计算方法在评估水轮机水动力性能方面的准确性,为后续研究叶梢小翼对水轮机水动力性能的影响提供了基础。

2)叶梢小翼扭角改变会对潮流能水轮机整机水动力性能产生较为明显的影响。相较于水轮机初始模型,叶梢小翼扭角为 -6° 时水轮机能量转换效率相对增加 5.17%,阻力系数相对增加 7.01%。在小翼扭角 $-9^\circ \sim 6^\circ$ 的变化区间内,带小翼水轮机的能量转换效率伴随扭角的增大呈先增大后减小的趋势,阻力系数则呈单调下降的趋势。

3)叶梢小翼扭角变化会显著影响水轮机叶片梢部后方的流体径向流动状态,对叶片梢部三维效应损失产生影响,进而影响小翼与叶片梢部表面压力分布,改变潮流能水轮机的水动力性能。

4)由速度波动功率谱密度曲线可知,小翼扭角会影响叶片后梢涡轴向速度波动,且随轴向距离的增加影响逐渐降低,对径向速度波动影响不明显。

〔参考文献〕

- [1] YANG Z X, REN Z Y, LI H, et al. A review of tidal current power generation farm planning: methodologies, characteristics and challenges [J]. *Renewable energy*, 2024, 220: 119603.
- [2] 张继生, 汪国辉, 林祥峰. 潮流能开发利用现状与关键科技问题研究综述[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 220-232.
ZHANG J S, WANG G H, LIN X F. A review of recent development and key technology problems in utilization of tidal stream energy [J]. *Journal of Hohai University (natural sciences)*, 2021, 49(3): 220-232.
- [3] 孙科, 陈天宇. 海洋潮流能发电技术研究现状与趋势[J]. *船舶工程*, 2024, 46(1): 16-27.
SUN K, CHEN T Y. Current status and trends of research on ocean tidal energy generation technology [J]. *Ship engineering*, 2024, 46(1): 16-27.
- [4] REN Y R, LIU B W, ZHANG T T, et al. Design and hydrodynamic analysis of horizontal axis tidal stream turbines with winglets[J]. *Ocean engineering*, 2017, 144: 374-383.
- [5] WHITCOMB R T. A design approach and selected wind tunnel results at high subsonic speeds for wing-tip mounted winglets[R]. NASA-TN-D-8260, 1976.
- [6] SHIMIZU Y, ISMAILI E, KAMADA Y, et al. Power augmentation of a HAWT by Mie-type tip vanes, considering wind tunnel flow visualisation, blade-aspect ratios and Reynolds number[J]. *Wind engineering*, 2003, 27(3): 183-194.
- [7] BUSSEL G J W. A momentum theory for winglets on horizontal axis wind turbine rotors and comparison with experiments [C]//Proceedings of the Fourth IEA Symposium Aerodynamics of Wind Turbines. Rome, Italy, 1990.
- [8] JOHANSEN J, SØRENSEN N N. Aerodynamic investigation of winglets on wind turbine blades using CFD [R]. RISO-R-1543, 2006.
- [9] ELFARRA M A, SEZER UZOL N, AKMANDOR İ S. Investigations on blade tip tilting for HAWT rotor blades using CFD [J]. *International journal of green energy*, 2015, 12(2): 125-138.
- [10] 陈恺. 基于叶尖小翼的大型风力机增功研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
CHEN K. Research on power increase of large wind turbine based on tip winglet [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [11] 王晓宇, 廖伟丽, 赵鹏, 等. L型叶尖小翼对风力机性能影响的研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(1): 242-248.
WANG X Y, LIAO W L, ZHAO P, et al. Study on the impact of L-shaped tip winglet on wind turbine performance [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020, 41(1): 242-248.
- [12] MÜHLE F, BARTL J, HANSEN T, et al. An experimental study on the effects of winglets on the tip vortex interaction in the near wake of a model wind turbine [J]. *Wind energy*, 2020, 23(5): 1286-1300.
- [13] RODOLFO O T. An experimental study on the effects of winglets on the performance of horizontal axis tidal turbines [D]. Southampton: University of Southampton, 2022.
- [14] WANG Y, GUO B, JING F M, et al. Hydrodynamic performance and flow field characteristics of tidal current energy turbine with and without winglets [J]. *Journal of marine science and engineering*, 2023, 11(12): 2344.
- [15] 荆丰梅, 王毅, 郭彬, 等. 潮流能水轮机流场特性的数值与实验研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(8): 660-667.
JING F M, WANG Y, GUO B, et al. Numerical and experimental study of flow field characteristics of tidal energy turbines[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(8): 660-667.

- [16] ZHANG D H, LIU D, LIU X D, et al. Unsteady effects of a winglet on the performance of horizontal-axis tidal turbine [J]. *Renewable energy*, 2024, 225: 120334.
- [17] GUO B, WANG D Z, ZHOU X, et al. Performance evaluation of a tidal current turbine with bidirectional symmetrical foils[J]. *Water*, 2020, 12(1): 22.
- [18] ATLAR M. Recent upgrading of marine testing facilities at newcastle university [C]//In proceedings of the 2nd Intl' Conference on Advanced Model Measurement Technology for the EU Maritime Industry. Newcastle, UK, 2011.
- [19] 郭彬, 王大政, 夏岚, 等. 池壁效应对水平轴潮流涡轮水动力性能影响分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(6): 917-925.
- GUO B, WANG D Z, XIA L, et al. An analysis of blockage effect on the hydrodynamic performance of a horizontal axis tidal current turbine [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(6): 917-925.
- [20] 郭彬. 悬浮锚定式潮流发电装置水动力性能研究及样机研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- GUO B. Study on hydrodynamic performance and prototype development of suspended anchored tidal current power generation device [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [21] 郭彬, 王大政, 夏岚, 等. 水平轴潮流涡轮池壁效应修正方法分析[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(9): 382-390.
- GUO B, WANG D Z, XIA L, et al. Analysis of blockage correction methods for horizontal axis tidal stream turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(9): 382-390.
- [22] EL FAJRI O, BOWMAN J, BHUSHAN S, et al. Numerical study of the effect of tip-speed ratio on hydrokinetic turbine wake recovery [J]. *Renewable energy*, 2022, 182: 725-750.
- [23] LEE J, KIM Y, KHOSRONEJAD A, et al. Experimental study of the wake characteristics of an axial flow hydrokinetic turbine at different tip speed ratios [J]. *Ocean engineering*, 2020, 196: 106777.

NUMERICAL STUDY ON INFLUENCE OF WINGLET TWIST ANGLE ON HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF TIDAL CURRENT TURBINE

Guo Bin^{1,2}, Wang Baolong¹, Gui Hongbin¹, Zhang Yan¹

(1. School of Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China;

2. Key Laboratory of Ocean Observation Technology, MNR, Tianjin 300112, China)

Abstract: Taking the three-dimensional horizontal axis tidal current turbine as the initial model, the influence of the winglet twist angle on the hydrodynamic performance and wake characteristics of the tidal current turbine is analyzed by CFD numerical calculation, and the influence mechanism of the winglet's twist angle on the hydrodynamic performance of the turbine blade is clarified. The results show that the change of the winglet twist angle has a significant impact on the hydrodynamic performance of the tidal current turbine. Compared with the initial model, when winglet twist angle is -6° , the power coefficient of the tidal current turbine increases by 5.17% and the drag coefficient increases by 7.01%. In the range of twist angle from -9° to 6° , the power coefficient with winglet first increases and then decreases with the increase of twist angle, while the drag coefficient decreases monotonously. The changes of the winglet twist angle significantly affect the radial flow state of the fluid immediate behind the blade tip of the turbine, affect the tip loss and the surface pressure distribution, and then change the hydrodynamic performance of the tidal current turbine. By comparing the power spectrum density curve of velocity fluctuation, it can be seen that the winglet's twist angle will affect the axial velocity fluctuation of blade tip vortex, and the influence will gradually decrease with the increase of axial distance, but the influence on radial velocity fluctuation is not obvious.

Keywords: tidal energy; numerical simulation; hydrodynamics; hydraulic turbine; winglet; power spectral density