

阿基米德水轮机阵列的耦合增益效应研究

郭朋华, 王逸远, 张大禹, 邹瀚森

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了探究阿基米德水轮机阵列间的耦合增益效应, 从而实现对深海超低速海流能的高效利用, 对阿基米德水轮机阵列进行了研究, 建立了阿基米德水轮机的数值模型, 并通过水槽实验验证了模型的可靠性, 分析了不同排布方式下轮机的能量利用系数和启动力矩系数。结果表明: 当并联阵列间距为 1.3 倍直径时, 受耦合增益效应影响, 能量利用系数、启动力矩系数均出现峰值, 为并联阵列的最佳距离; 当串联阵列间距大于 5 倍直径时, 下游轮机的能量利用系数恢复到孤立轮机的 70% 以上且恢复趋势变缓, 为串联阵列的最佳距离; 反向旋转布置的三角形阵列, 当列间距为 1.2 倍直径时耦合增益效果较好, 可使能量利用系数提升 8%, 并获得更大的能量密度。研究结果可为该类型轮机的优化布置策略提供一定的参考。

关键词: 海流能; 阿基米德水轮机; 计算流体力学; 耦合增益

中图分类号: TK730 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202304014 **文章编号:** 0253-987X(2023)04-0133-09

Study on Coupling Gain Effect of Archimedes Screw Turbine Array

GUO Penghua, WANG Yiyuan, ZHANG Dayu, ZOU Hansen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming to explore the coupling gain effect of Archimedes screw turbine array and utilize the low-speed current energy in deep water, an experimentally verified numerical model was developed to study the power coefficient and torque coefficient of Archimedes screw turbines under different arrangements. The results indicate that when the spacing of the parallel array is $1.3d$, the power coefficient and torque coefficient reach peak values due to the coupling effect, which is the optimal distance of the parallel array. When the spacing of the series array is $5d$, the power coefficient of the downstream turbine recovers to 70% of that of the isolated turbine. After that, the recovery trend slows down, indicating that the spacing of $5d$ is the optimal distance of the series array. The triangular array with reverse rotation can achieve better performance when the column spacing is $1.2d$ due to the coupling gain, and the maximum power coefficient can increase by 8%, improving the energy density. These results can provide reference for optimal arrangements of the Archimedes screw turbine array.

Keywords: deepwater current; Archimedes screw turbine; CFD; coupling gain effect

随着人类对深海探索需求的不断增加, 出现了由深海声纳、无人潜航器等组成的深海观测网^[1-3],

传统的陆基和船基电缆供电方式存在使用成本高、电缆易被切断的问题,因此利用深海能源实现相关设备长周期的原位供电十分必要。深海中蕴含着多种能量形式,诸如温差能、盐差能、生物质能等^[4-5],其中只有海流能具备足够大的能量密度以满足相关设备的电力需求^[6]。

深海环境下流速很低,远小于常规海流能发电技术所采用的 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的额定设计流速^[7]。传统升力型水轮机低流速下的自启动能力较差,几乎很难在深海区域实现自启动^[8-9];阻力型垂直轴水轮机虽然具有较好的自启动能力,但是其能量利用系数较低^[10-14]。阿基米德水轮机是一种极具潜力的阻力型水平轴水轮机,具有良好的自启动性能且能量利用系数接近升力型水平轴水轮机^[15],可以有效利用深海超低流速的海流能。

在实际应用中,水轮机通常采用阵列形式布置,轮机间的耦合效应可能会提高水轮机的自启动能力和能量利用系数^[16]。传统升力型水轮机阵列的机组间干扰较大,排布方式对功率影响显著。Li 等^[17]研究了达里厄水轮机之间的水动力耦合规律,发现串联安装的水轮机阵列会大大降低下游叶片的功率系数,而并联安装时可以通过减少间距进而增加机群的总功率系数。袁鹏等^[18]通过动量损失的方法对潮流能水轮机阵列进行研究,结果表明,水轮机并联间距小于 4 倍轮机直径时,可以更好地利用单位面积的潮流能。相较水平轴水轮机,垂直轴水轮机受湍动能影响较小,轮机之间耦合增益效果更显著。Antheaume 等^[19]研究了不同数量的垂直轴水轮机并联排布的影响,发现合理的排布方式能提高单台水轮机 40.5% 的能量利用系数。阵列中水轮机不同的旋转方向对轮机间的耦合效应也有影响。安琪^[20]分析了不同排布方案对水轮机阵列功率及性能的影响规律,发现旋转方向相反的水轮机可以提高阵列整体性能。Bai 等^[21]数值研究了不同排布方式下的水平轴水轮机转向和间距对性能的影响,结果表明,直线网格阵列中反向旋转对水轮机的影响大于交错网格阵列的影响,并且反向旋转的影响随着水轮机下游距离的增大而迅速减小。部分学者基于对尾迹区的流场分析,认为交错排布阵列可以利用被加速的尾流,有可能提高水轮机的能量利用系

数。于书帆等^[22]数值研究了双水轮机在不同轴间距、相对位置角和不同尖速比情况下的各项性能参数,与孤立轮机相比,双水轮机交错排布的能量利用系数大于孤立轮机的能量利用系数,但由于尾流涡列区较长,尾流速度恢复所需距离也较长。

综上所述,水轮机的阵列布置可能带来耦合增益效应,从而提升整体机群的功率输出,然而迄今为止没有文献对阿基米德水轮机阵列进行研究。因此,本文通过数值模拟的方式开展阿基米德水轮机的阵列耦合增益研究,为该类型轮机阵列的优化布置策略提供参考。

1 数值模型

1.1 几何模型建立

本文采用的阿基米德水轮机如图 1 所示,本项目组前期对孤立轮机进行了优化设计,其具体几何参数如表 1 所示。

表 1 阿基米德水轮机几何参数	
Table 1 Main dimensions of the Archimedes turbine	
参数	数值
长度 L/mm	299.785
间隔 p/mm	281.122
直径 d/mm	300
叶片厚度 h/mm	9
曲率 k/m^{-1}	6.14
锥顶角 $\alpha/(\text{^\circ})$	89.812

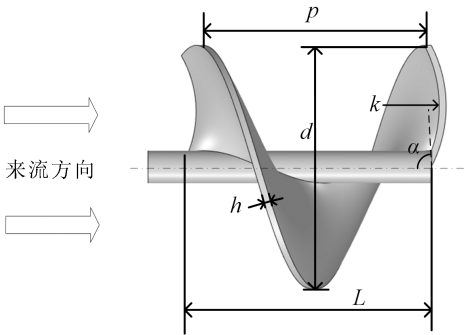


图 1 阿基米德水轮机几何参数示意图
Fig. 1 Geometrical parameters of the Archimedes turbine

1.2 计算域建立

利用 ANSYS SpaceClaim 建立计算域,坐标原点位于螺旋 1 叶片底部。正对来流方向的流域横截面尺寸为 $12d\times6d$,螺旋叶片前沿距入口 $2d$,后端距出口 $10d$,具体尺寸如图 2 所示。

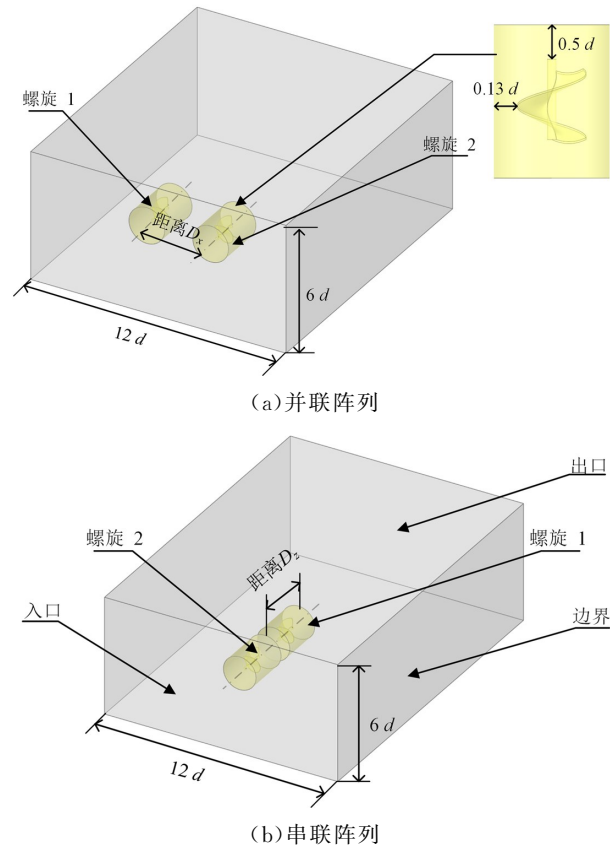


图 2 阿基米德水轮机阵列计算域

Fig. 2 Computational domain of the Archimedes turbine array

1.3 计算设置及边界条件

采用四面体网格划分,并对阿基米德螺旋叶片周围进行局部网格加密,边界层为 20 层,调整第一层边界层的厚度,以得到接近 1 的 y^+ 值。在计算设置上,采用二阶迎风算法,湍流模型为 SST $k-\omega$ 模型。选取水作为流体介质,密度为 $998.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,动力黏度为 $10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,入口速度为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出口设置为压力出口,相对压力为 0。速度分量和湍流性质均采用 10^{-5} 的收敛标准。

水轮机的能量利用系数和启动力矩系数是水轮机重要的性能特征,尤其是部署在深海的水轮机,良好的启动力矩系数可以在一定程度上简化控制系统和额外的机械装置。能量利用系数 C_p 、启动力矩系数 $C_{t,s}$ 和叶尖速比 λ 计算式为

$$C_p = \frac{T\omega}{0.5\rho\pi R^2 V^3} \tag{1}$$
$$C_{t,s} = \frac{T}{0.5\rho V^2 \pi R^3} \tag{2}$$
$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \tag{3}$$

式中: T 为力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; ω 为转速, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; ρ 为流

体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; R 为水轮机半径, m ; V 为来流速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.4 数值模型无关性验证

为了保证数值模拟结果的准确性,本文进行了网格无关性验证、时间步长无关性验证和计算区域无关性验证。对单个阿基米德螺旋轮机进行不同网格尺寸划分,以性能指标 C_p 、 $C_{t,s}$ 作为判断指标,网格数量及计算结果如表 2 所示。当网格数量为 133 万时, C_p 、 $C_{t,s}$ 的波动幅度低于 1.5%,继续增大网格数量对计算结果影响较小。时间步长的影响如表 3 所示,当时间步长为 0.01 s 时, C_p 、 $C_{t,s}$ 的波动幅度低于 1%,缩小时间步长对计算结果影响不大。对不同尺寸的计算区域进行无关性验证结果如表 4 所示,选择图 2 所示计算区域尺寸为参考值。当计算区域缩放比例为 1.1 时, C_p 、 $C_{t,s}$ 的波动幅度低于 1%,扩大计算区域面积对计算结果影响不大。故在保证计算精度的前提下本文依据图 2 的计算区域,选择 133 万级别的网格和 0.01 s 的时间步长进行数值模拟。

表 2 网格无关性验证
Table 2 Grid independence test

级别	网格数量	$C_{t,s}$	C_p
1	615 687	0.361	0.338
2	1 337 107	0.373	0.343
3	3 973 336	0.372	0.348

表 3 时间步长无关性验证
Table 3 Time step independence test

级别	时间步长/s	$C_{t,s}$	C_p
1	0.040	0.372	0.335
2	0.020	0.367	0.340
3	0.010	0.373	0.343
4	0.005	0.373	0.345

表 4 计算区域无关性验证
Table 4 Computational domain independence test

级别	缩放比例	$C_{t,s}$	C_p
1	0.9	0.376	0.346
2	1.0	0.373	0.343
3	1.1	0.370	0.341
4	1.2	0.368	0.339

1.5 实验验证

为了进一步验证数值模型的准确性,对阿基米德水轮机进行了循环水槽实验。实验装置示意图如图 3 所示,实验段来流面积为 $0.5\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,长为 1 m ,实验流速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。阿基米德水轮机的螺杆水平置于实验段的中心,阻塞比为 17.7% ,采用钝体水槽修正方法^[23-24]补偿阻塞比带来的影响,结果对比如图 4 所示,数值模拟结果与修正后的实验数据吻合较好,验证了本文数值模拟方法的可靠性。

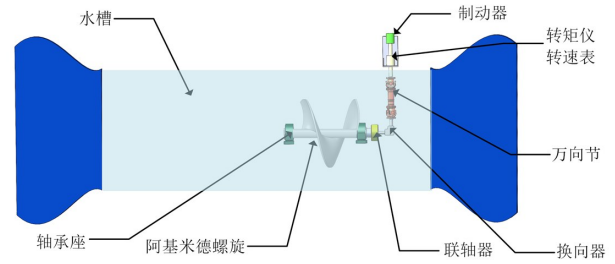


图 3 实验装置示意图
Fig. 3 Diagram of experimental device

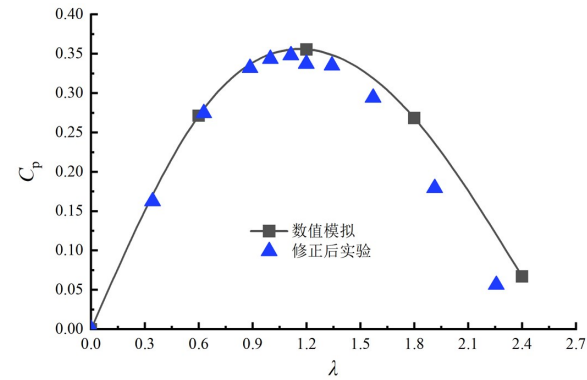


图 4 数值模拟结果与实验数据对比
Fig. 4 Validation of C_p between experiment and simulation

1.6 速度控制策略

以往文献中关于水轮机阵列研究,通常将阵列中的轮机设置为相同的转速以便计算,然而实际中由于不同位置处的水轮机来流速度不同,因此阵列中各轮机的最优工作转速也应该是不同的。本文通过计算得到不同流速下最佳功率输出所对应的转速,采用多项式拟合的方法获得孤立轮机的最佳功率曲线。利用 Fluent 中用户自定义函数 UDF 对阵列中的孤立轮机进行转速控制,通过迭代计算使转速匹配到最佳功率,计算流程如图 5 所示,其中系数随时间变化:当 $t\leq 10$ 时, $r=0.5$;当 $10< t\leq 50$ 时, $r=0.2$;当 $t>50$ 时, $r=0.1$ 。

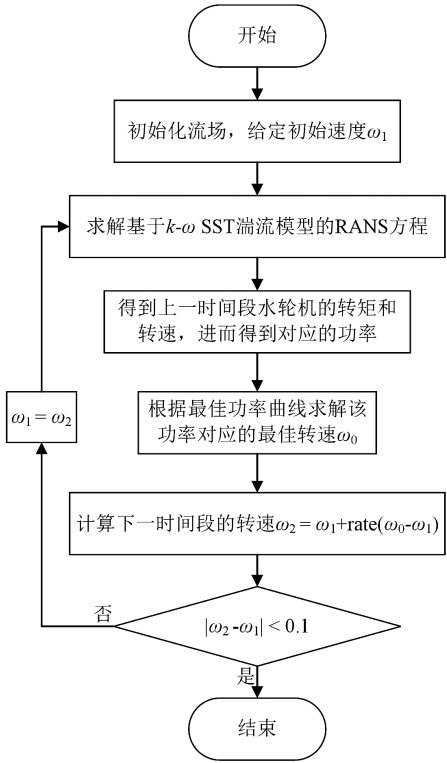


图 5 速度控制框图
Fig. 5 Flow chart of the speed control method

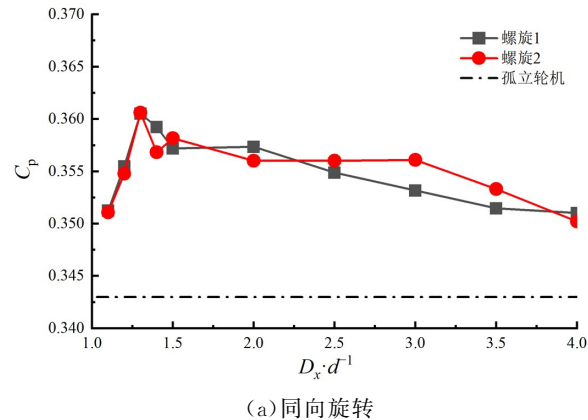
2 并联与串联阵列耦合增益研究

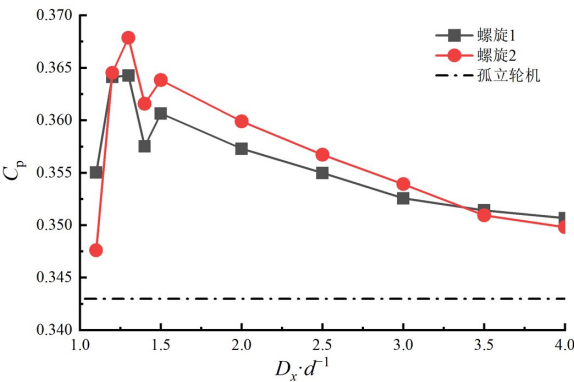
2.1 并联阵列

2.1.1 并联阵列能量利用系数

对并联的阿基米德水轮机阵列,分别进行同向和反向旋转布置,计算结果如图 6 所示。

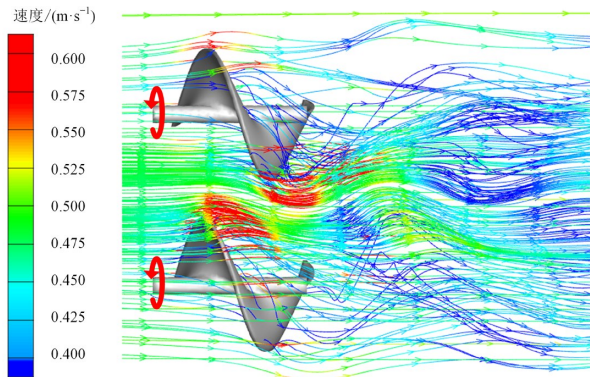
阿基米德水轮机并联阵列中单个轮机的 C_p 均有不同程度的提高,同向和反向旋转布置的轮机阵列的 C_p 在距离 $D_x=1.3d$ 时均达到峰值,分别较孤立轮机的 C_p 提升了 5% 、 7% 。随着距离 D_x 的增加,在 $1.5d$ 之后两种旋转方向的水轮机的 C_p 均逐渐减小,直至接近孤立轮机的 C_p 。



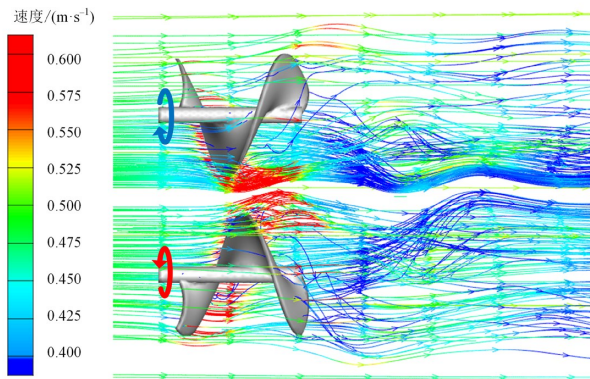


(b)反向旋转
图 6 并联阵列能量利用系数
Fig. 6 C_p of the parallel array

并联阵列间距 $D_x = 1.3d$ 时的流场如图 7 所示,图中上方轮机为螺旋 2,下方轮机为螺旋 1,两台并联轮机的周围形成高速区,中间流域的加速效果尤为显著。由于阿基米德水轮机具有一定的轴向长度,所以受阻塞效应影响,阿基米德水轮机在入流面和侧面持续受到位于中间流域加速区的影响,从而获得高于孤立轮机的性能参数。此外,根据角动量



(a)同向旋转



(b)反向旋转
图 7 并联阵列流场图

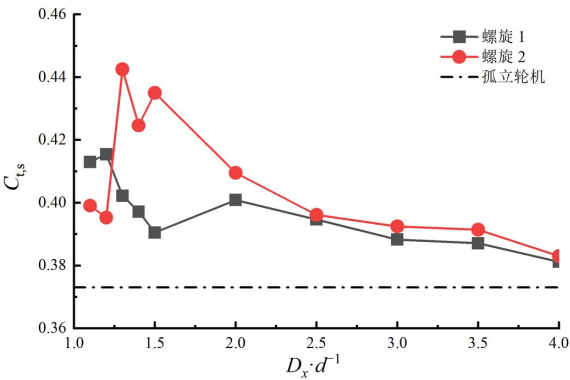
Fig. 7 Streamlines of the parallel array

守恒,旋转轮机的周围会产生与之转向相反的尾流,同样由于阿基米德水轮机的轴向长度,相反转向的尾流会出现在水轮机的侧面和尾流面。反向旋转阵列中的轮机尾流会与相邻轮机产生啮合效应,所以在轮机间距较小时,反向旋转阵列的能量利用系数大于同向旋转阵列的能量利用系数。

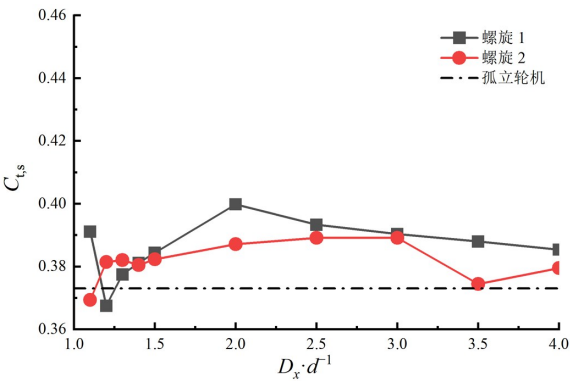
随着 D_x 的不断增大,这种增益效果逐渐减小,当 $D_x = 4d$ 时, C_p 较孤立轮机仅提高 2%;当 D_x 小于 $1.3d$ 时,轮机之间的干涉影响逐渐显著。

2.1.2 并联阵列启动力矩系数

并联阵列的 $C_{t,s}$ 如图 8 所示,相比反向安装,同向安装阵列的自启动性能更为优越,其 $C_{t,s}$ 大于孤立轮机,同样是在间距为 $D_x = 1.3d$ 附近达到峰值,螺旋 2 的 $C_{t,s}$ 较孤立轮机提升了 19%。随着距离 D_x 的不断增大, $C_{t,s}$ 逐渐接近孤立轮机。综合考虑 $C_{t,s}$ 、 C_p , 并联阵列的间距应该选择在 $D_x = 1.3d$ 左右。



(a)同向安装



(b)反向安装

图 8 并联阵列启动力矩系数
Fig. 8 $C_{t,s}$ of the parallel array

2.2 串联阵列

2.2.1 串联阵列能量利用系数

对串联的阿基米德水轮机阵列,同样进行同向

和反向旋转布置,结果如图 9 所示。

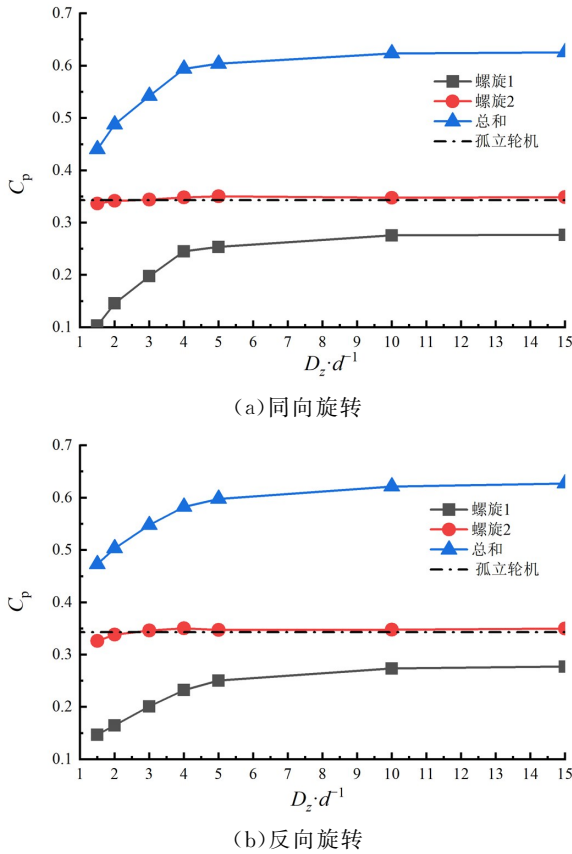


图 9 串联阵列能量利用系数
Fig. 9 C_p of the series array

阿基米德水轮机串联放置时,随着间距的不断 增加,上游轮机在 $D_z=3d$ 时恢复到孤立轮机的 C_p , 此后基本不受下游轮机的影响。下游轮机的 C_p 随 距离的增加先快速上升,当间距 $D_z=5d$ 时恢复到 孤立轮机 C_p 的 70%,随后上升趋势明显变缓,当间 距 D_z 增加到 $10d$ 时, C_p 恢复到孤立轮机的 80%, 对应的流场尾迹速度云图如图 10 所示。虽然在 $D_z=5d$ 处的流场仍存在较强的尾迹涡,但是下游 阿基米德轮机已经能够恢复至较高的 C_p ,这是由于 阿基米德水轮机运行尖速比较低,受湍动能的

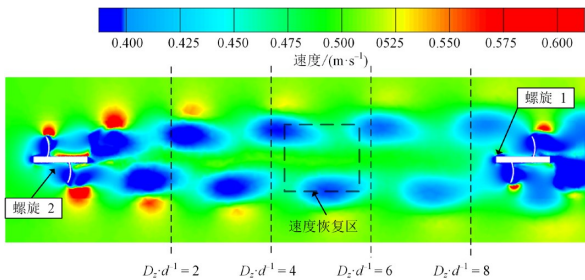


图 10 串联阵列同向旋转速度云图

Fig. 10 Velocity contour of the serial array with the same rotation direction

影响较小。而在较高尖速比运行下的升力型水平 轴水轮机中,串联阵列要获得类似的恢复效果通 常间距要在 $8d$ 以上^[25],以上结果表明阿基米德水 轮机可以组成更为密集的串联阵列,从而最大化 阵列的能量密度。

2.2.2 串联阵列启动力矩系数

不同放置间距下的 $C_{t,s}$ 如图 11 所示。无论是 同向还是反向安装,上游轮机在 $D_z=3d$ 时 $C_{t,s}$ 均 出现最小值,随后逐步恢复至孤立轮机的 $C_{t,s}$ 。下 游轮机的 $C_{t,s}$ 随间距的变化情况与 C_p 类似,在间距 $D_z=5d$ 之前快速上升,随后增长趋势变缓。特别需 要注意的是,在距离 D_z 小于 $2d$ 时下游轮机的 $C_{t,s}$ 极 低,对于同向安装间距为 $1.5d, 2d$ 时甚至出现了 $C_{t,s}$ 为负数的工况,此时上游轮机的尾流效应会严重 影响下游轮机的自启动性能。

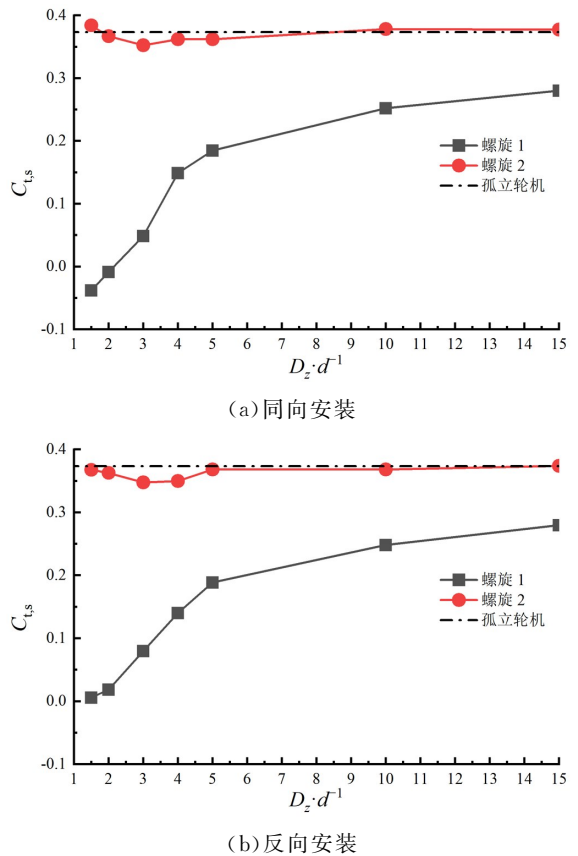


图 11 串联阵列启动力矩系数
Fig. 11 $C_{t,s}$ of the series array

3 交错排布水轮机阵列性能研究

通过对并联阵列和串联阵列的研究,可以发现 上游轮机的尾流效应和相邻轮机间的阻塞效应是影 响水轮机 $C_p, C_{t,s}$ 的主要因素。因此,可以采用交错 的阵列排布方式,一方面可以减少尾流低速区的影

响,另一方面可以有效利用阻塞的耦合增益效应。

本文以典型的三角阵列排布方式为研究对象,以垂直于来流方向间距 D_x 和平行于来流方向间距 D_z 为研究变量,分析了两种不同旋转方案下三角形阵列的耦合增益效应,两种旋转方案如图 12 所示。

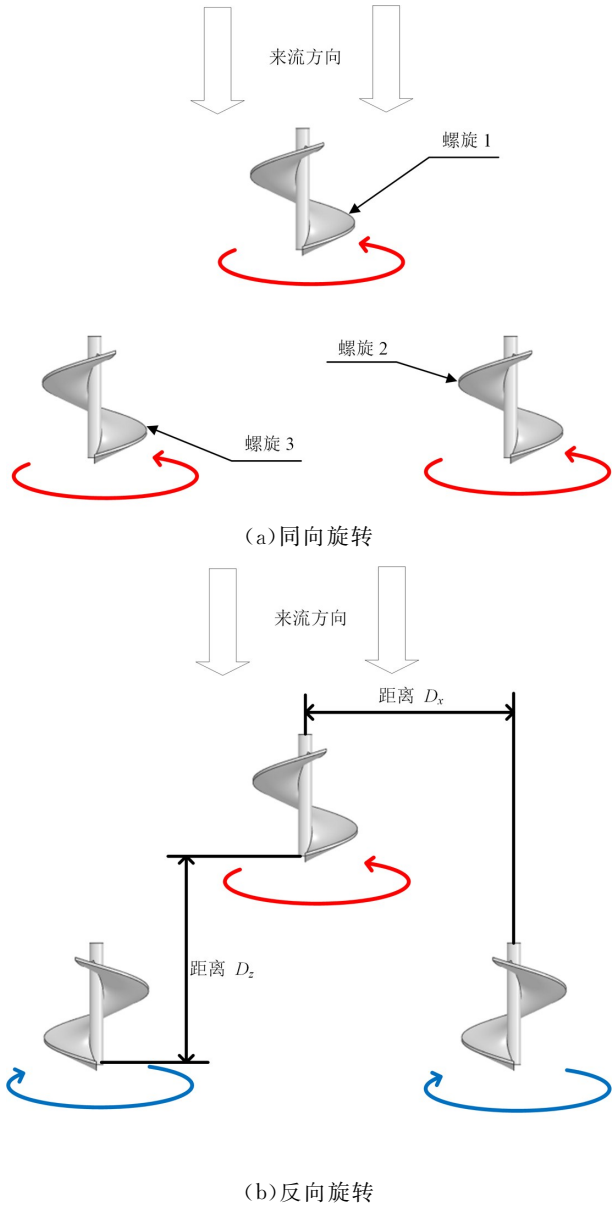


图 12 三角形阵列两种旋转方案

为了更直观地比较阵列中单个轮机与孤立轮机的 C_p 值大小,定义相对能量利用系数 $\tilde{C}_p$

$$\tilde{C}_p = \frac{C_p - C_p^s}{C_p^s} \tag{4}$$

式中 C_p^s 为孤立轮机的能量利用系数。

同向、反向旋转阵列中各轮机 C_p 分别如图 13、图 14 所示。对于同向旋转布置,当列间距 D_x 小于

d 时,过小的间距使得下游轮机处于尾流效应明显的区域,此时上游轮机尾迹的不利影响超过了轮机间的耦合增益效应,使得下游轮机的 C_p 均低于孤立轮机;当 $D_x = 1.2d$ 时,只有在行间距 D_z 小于 $3d$ 的情况下才会高于孤立轮机。随着列间距 D_x 的继续增大,下游轮机的 C_p 均高于孤立轮机,当 $D_x = 2d$ 时, C_p 出现峰值,较孤立轮机提升 6%,此时尾流效应影响较小,而下游轮机之间以及下游与上游轮机之间均存在较强的耦合增益效应。反向旋转布置时下游轮机 C_p 的变化趋势与同向旋转相似,但峰值出现在 $D_x = 1.2d$ 处,较孤立轮机提升 8%。

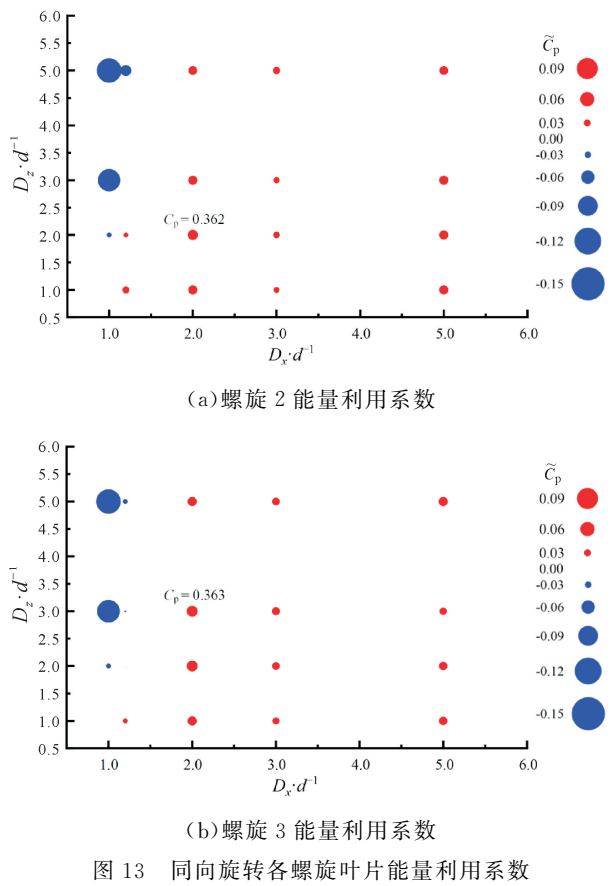
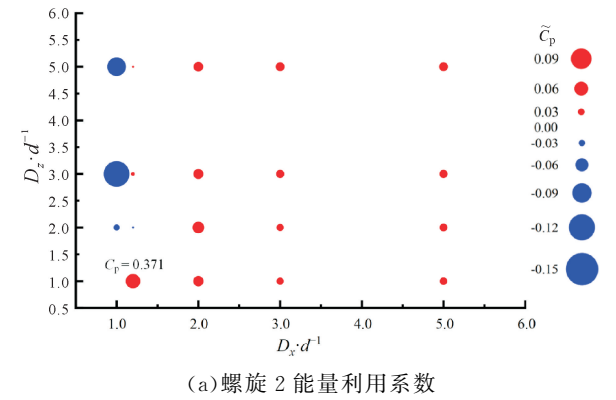
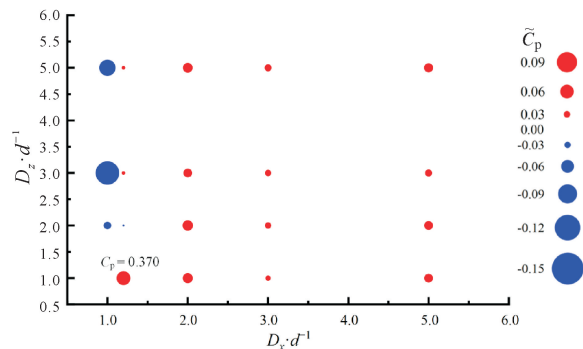


Fig. 13 C_p of each rotor with the same rotation direction



(a)螺旋 2 能量利用系数

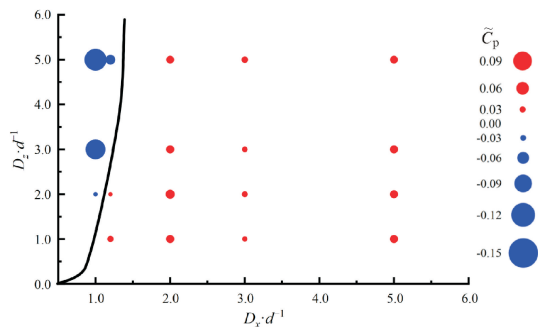


(b)螺旋 3 能量利用系数

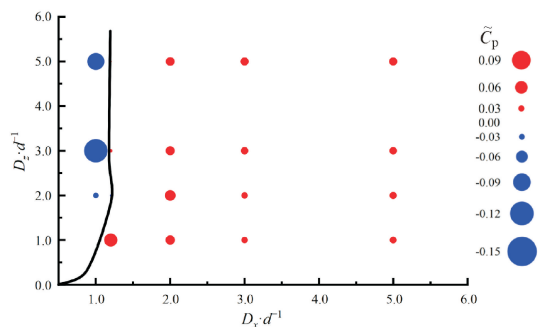
图 14 反向旋转各螺旋叶片能量利用系数

Fig. 14 C_p of each rotor with reverse rotation direction

图 15 为同向和反向旋转时下游两个轮机的平均 $\tilde{C}_p$, 图中标示出了三角形阵列放置时增益效果的分界线, 该分界线右侧均为下游轮机 C_p 高于孤立轮机的区域。对于三角阵列, 反向旋转放置的增益效果更为显著, 表明反向旋转时下游轮机能够与上游轮机的尾流产生更强的耦合增益效应。同向旋转布置时, 最佳的列间距 D_x 、行间距 D_z 均在 $2d$ 附近, 相比于 2.2 节的串联布置, 行间距大大减小, 尾流效应被明显削弱; 反向旋转放置的 C_p 峰值点位于列间距 $D_x = 1.2d$ 附近, 此时行间距 D_z 仅为 $1d$, 此时反向旋转布置具有更显著的优势, 不仅能获得更大的能量利用系数, 而且布置更加紧凑。



(a)同向旋转



(b)反向旋转

图 15 三角形阵列耦合增益分界线示意图

Fig. 15 Diagram of coupling gain boundary of triangular arrays

4 结 论

(1) 受益于耦合增益效应, 并联阵列条件下轮机的功率输出和自启动性能均有提升。反向旋转时耦合增益最大, 在间距为 $1.3d$ 时 C_p 提升至孤立轮机的 107%; 同向旋转时轮机具有更高的 $C_{t,s}$, 在间距为 $1.3d$ 时可以提升至孤立轮机的 119%。

(2) 受尾迹效应影响, 串联阵列中上游轮机的 C_p 、 $C_{t,s}$ 略有降低, 在间距大于 $5d$ 时恢复至接近孤立轮机的水平; 下游轮机的 C_p 、 $C_{t,s}$ 均出现明显下降, 在间距大于 $5d$ 之后恢复趋势变缓, C_p 恢复至孤立轮机 C_p 的 70%。

(3) 受耦合增益和尾迹效应的综合作用, 三角形阵列在保持一定间距的条件下, 可以使 C_p 得到 8% 的提升。上游轮机和下游轮机进行反向旋转布置既可以获得较大的功率提升, 又能够实现紧凑布置。

参考文献:

- [1] BALARAM V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact [J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10(4): 1285-1303.
- [2] LEVIN L A, BETT B J, GATES A R, et al. Global observing needs in the deep ocean [J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 241.
- [3] WEDDING L M, FRIEDLANDER A M, KITTINGER J N, et al. From principles to practice: a spatial approach to systematic conservation planning in the deep sea [J]. Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences, 2013, 280(1773): 20131684.
- [4] CHEN Lisu, LI Wei, LI Jie, et al. Evolution trend research of global ocean power generation based on a 45-year scientometric analysis [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2): 218.
- [5] 丁文俊, 宋保维, 毛昭勇, 等. 浅水域探测型无人水下航行器海洋动能发电装置特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 73-78.
DING Wenjun, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. Research on characteristics of power generation device for detection UUV by ocean kinetic energy in shallow water [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 73-78.
- [6] 张世龙, 缪军翔. 基于国际比较的海洋可再生能源技术创新阶段评价 [J]. 特区经济, 2019(2): 68-70.
ZHANG Shilong, MIAO Junxiang. Evaluation of technological innovation stage of marine renewable en-

- ergy based on international comparison [J]. *Special Zone Economy*, 2019(2): 68-70.
- [7] ZHOU Zhibin, BENBOUZID M, CHARPENTIER J F, et al. Developments in large marine current turbine technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 852-858.
- [8] GOUNDAR J N, AHMED M R. Design of a horizontal axis tidal current turbine [J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 161-174.
- [9] 白光辉, 樊鹏飞, 郭涛, 等. 水平轴潮汐透平场的数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(7): 98-102.
BAI Guanghui, FAN Pengfei, GUO Tao, et al. Numerical investigation of horizontal axis tidal turbine farm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(7): 98-102.
- [10] SAHA U K, THOTLA S, MAITY D. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(8/9): 1359-1375.
- [11] LI Ye, CALISAL S M. Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(10): 2325-2334.
- [12] DRAGOMIRESCU A. Performance assessment of a small wind turbine with crossflow runner by numerical simulations [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(3): 957-965.
- [13] POPE K, RODRIGUES V, DOYLE R, et al. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(5): 1043-1051.
- [14] 田文龙, 宋保维, 毛昭勇, 等. 水下航行器垂直轴海流发电装置叶轮特性的数值仿真 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(11): 19-24.
TIAN Wenlong, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. Numerical analysis on impeller behavior of vertical axis water turbine for underwater vehicles [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(11): 19-24.
- [15] ZITTI G, FATTORE F, BRUNORI A, et al. Efficiency evaluation of a ductless Archimedes turbine: laboratory experiments and numerical simulations [J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 867-879.
- [16] VENNEL R, FUNKE S W, DRAPER S, et al. Designing large arrays of tidal turbines: a synthesis and review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 454-472.
- [17] LI Guangnian, CHEN Qingren, GU Hanbin. Study of hydrodynamic interference of vertical-axis tidal turbine array [J]. *Water*, 2018, 10(9): 1228.
- [18] 袁鹏, 刘小栋, 王树杰, 等. 潮流能水轮机阵列方式与其产能关系研究 [J]. *可再生能源*, 2019, 37(9): 1406-1414.
YUAN Peng, LIU Xiaodong, WANG Shujie, et al. Research on relationship between arrangement of tidal turbines array and its actual power output [J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(9): 1406-1414.
- [19] ANTREAUME S, MAÎTRE T, ACHARD J L. Hydraulic Darrieus turbines efficiency for free fluid flow conditions versus power farms conditions [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(10): 2186-2198.
- [20] 安琪. 锚泊浮台潮流能水轮机组的阵列研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [21] 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.
- [22] 于书帆, 陈建, 昌垚晖, 等. 不同交错排布对潮流能垂直轴水轮机性能的影响 [J]. *热能动力工程*, 2022, 37(1): 157-165.
YU Shufan, CHEN Jian, CHANG Yaohui, et al. Influence of different staggered arrangements on the performance of vertical axis turbine with tidal current energy [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(1): 157-165.
- [23] MASKELL E C. A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel [EB/OL]. [2022-06-06]. <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/handle/1826.2/3982>.
- [24] HACKETT J E, COOPER K R. Extensions to Maskell's theory for blockage effects on bluff bodies in a closed wind tunnel [J]. *The Aeronautical Journal*, 2001, 105(1050): 409-418.
- [25] 盛传明, 徐宝, 周欢, 等. 海流能水平轴水轮机尾流场流速研究 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(2): 390-397.
SHENG Chuanming, XU Bao, ZHOU Huan, et al. Study of wake flow rate of marine current horizontal axis turbine [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2018, 39(2): 390-397.

(编辑 赵炜 亢列梅)