

交叉潮汐透平阵列能量输出的数值研究

白光辉, 高铁瑜, 李国君

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了使交叉潮汐透平阵列得到更好的应用, 针对交叉透平阵列的特性对建立在叶素理论 (BE)、激盘模型和计算流体力学 (CFD) 技术基础上的计算潮汐透平水动力性能和流场的 BE+CFD 方法做了进一步的完善. 通过该方法深入研究了交叉透平阵列结构参数对阵列透平能量输出特性的影响, 结果表明: 透平阵列最优横向间距为 2.5 倍透平叶轮直径; 透平阵列纵向间距越大, 透平的能量输出越高, 纵向间距为 6 倍透平叶轮直径时, 4 排交叉透平阵列的相对功率系数可达 3.74; 最优结构参数时, 前两排透平的能量输出较相同条件的单机透平提高了 11%. 据此, 提出了一种新的交叉透平阵列布置方式, 经过比较发现, 新的交叉透平阵列布置方式较原交叉阵列的优势更为显著, 从流场周围吸收的能量更多, 透平阵列的能量输出更高.

关键词: 潮汐能; 交叉透平阵列; 叶素理论; 激盘模型; 数值研究

中图分类号: TV136.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)11-0035-05

Numerical Study on Power Extractions of Staggered Grid Tidal Turbine Array

BAI Guanghui, GAO Tieyu, LI Guojun

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To obtain better application of staggered grid tidal current turbine array, the BE+CFD method which is based on the blade element theory, the actuator disc model and the CFD technology, and can calculate the hydrodynamic characters and the flow field of tidal current turbines was improved for staggered grid turbine array. Using this method, the influence of staggered grid turbine array's structural parameters on the power extraction was investigated. The results show that the optimal lateral distance is around 2.5 times the turbine impeller diameter, and the power extraction increases with the longitudinal distance. The relative power coefficient of the four rows system in this study will reach its maximum value of 3.74 when the longitudinal distance is 6d. If the system contains only two rows of turbine, the power extraction of the system with optimal layout can be 11% higher than that of the same number stand-alone turbines. In addition, a new layout of staggered grid turbine array is presented according to the results of the analysis. The comparison shows that the new layout has more obvious advantages than that of the original staggered grid turbine array because it can absorb more energy from the flow field around the turbine and then increase the power extraction of the turbine array.

Keywords: tidal energy; staggered grid turbine array; blade element theory; actuator disc model; numerical study

潮汐能已经被视为具有重要发展前景的可再生能源之一. 潮汐透平是将潮汐能转变为电能等可利

用能源的关键设备, 它通常以阵列的形式安装在一起, 被称为潮汐场. 潮汐场的形状受水深和水道宽度

等因素的限制,所以潮汐透平的布局是决定潮汐场能量输出的关键因素. Stephen 等^[1]通过分析潮汐透平下游流体的速度分布对透平阵列的能量输出进行了估算;Ye 等^[2]对由垂直轴透平组成的双透平系统进行了建模;Lee 等^[3]对三叶片透平做了全尺寸建模并进行了潮汐场的计算流体动力学(CFD)计算. 为降低对计算资源的要求,由叶素理论(BE)、激盘模型和 CFD 技术相耦合的 BE+CFD 方法已被应用到潮汐透平流场的计算中^[4],相近的方法也应用于风力机风轮的气动计算中^[5],相对于全尺寸模拟的优势在于其无需考虑叶轮具体形状,从而降低了几何模型的网格数,缩短了计算时间. 目前该方法主要应用于分析单机透平的动力性能和尾流场速度分布,应用于透平阵列尚未见报道. 透平阵列中的模拟与单机透平模拟有所不同,在透平阵列中下游透平处于上游透平的尾流中,加上上游透平尾流的重叠,致使下游透平的人流杂乱不均. 因此,在阵列透平的模拟过程中需要改进现有的数学模型.

本文以改进后的 BE+CFD 方法为基础,定量分析了交叉潮汐透平阵列结构参数对整场能量输出的影响,优化了潮汐透平阵列的结构参数.

1 交叉透平阵列几何模型

交叉透平阵列与直线透平阵列相对应,交叉透平阵列中合理的透平布置可以有效利用透平的阻塞效应,降低来自上游透平尾流的影响. 决定交叉透平阵列形状的结构参数为横向间距 d_y 、纵向间距 d_x 和激盘直径 d ,如图 1 所示. 交叉透平阵列的流场沿横向周期性分布,因此计算域横向距离周期性变化,根据阵列分析的需要,纵向透平取 4 排. 为了增加数据的通用性,需对以上结构参数用透平直径做无量纲化处理.

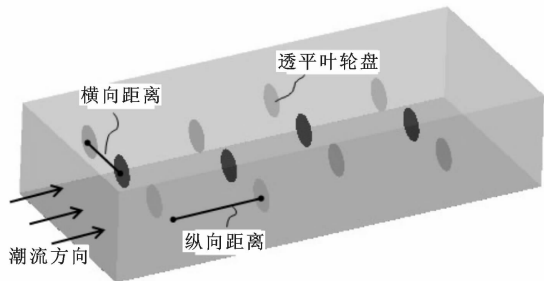


图1 交叉透平阵列

2 数学模型

BE+CFD 方法是一种可以同时计算潮汐透平

动力性能与流场的方法. BE+CFD 方法在文献[4]中已经进行了详细的推导,这里仅作简要说明. 激盘理论实现了透平叶轮的简化与近似,激盘直径与透平叶轮直径相等,轴向厚度取叶片线长的 20%~30%. 三维流场的控制方程包括连续性方程和动量守恒方程,即

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

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

式中: ρ 为水的密度; $U_i (i=1,2,3)$ 为控制体的速度分量; $x_i (i=1,2,3)$ 为控制体的位置; p 为压力; μ 为水的动力黏性系数; u' 为某一时刻的瞬时速度; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力; g_i 为重力加速度; S_i 为动量方程加入的动量源项.

动量方程中动量源项由叶素理论^[6]计算获得,在 FLUENT 软件中的动量源项的具体表达式如下

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \frac{B \rho c W^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi)}{4\pi |\mathbf{r}| e} F \\ S_y &= \frac{B \rho c W^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \cos \theta)}{4\pi |\mathbf{r}| e} F \\ S_z &= \frac{B \rho c W^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \sin \theta)}{4\pi |\mathbf{r}| e} F \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: B 为叶片数; c 为翼型弦长; θ 为旋转平面内控制体位置的切向角; C_L 为翼型升力系数; C_D 为翼型阻力系数; φ 为流体流向与旋转平面的夹角; e 为激盘轴向厚度; $\mathbf{r}$ 为控制体到叶轮旋转轴的距离; F 为 Prandtl 叶尖损失系数,本文采用的 Prandtl 叶尖损失系数的简化表达式^[7]计算

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \exp \left(-\frac{B(R - |\mathbf{r}|)}{2|\mathbf{r}| \sin \varphi} \right) \quad (4)$$

其中 R 为叶轮半径.

在 BE+CFD 理论中翼型截面的相对速度

$$W = (U_1^2 + [\Omega |\mathbf{r}| (1 + a')])^{1/2} \quad (5)$$

式中:切向速度诱导因子

$$a' = \left(U_2^2 + U_3^2 - \frac{(U_2 x_2 + U_3 x_3)^2}{x_2^2 + x_3^2} \right)^{1/2} / (\Omega |\mathbf{r}|) \quad (6)$$

Ω 为叶轮旋转角速度.

在潮汐透平阵列的模拟过程中,由于受上游透平旋转尾流的影响,所以在下游透平的激盘域内存在一个平行于旋转面的速度分量 u_r, u_t 的大小和方

向随上、下游透平的相对位置而变化. 式(6)中 a' 是在假定了激盘旋转方向和流体流向的基础上推导出来的,在透平阵列计算中需要修正. 首先判定 $\mathbf{u}_r$ 与透平旋转方向之间的关系,如图 2 所示,如果叶轮的旋转增加了控制体与叶轮间的相对速度,则 a' 为正值,用 $\mathbf{r} \times \mathbf{u}_r > 0$ 表示;如果叶轮的旋转减小了控制体与叶轮间的相对速度,则 a' 为负值,用 $\mathbf{r} \times \mathbf{u}_r < 0$ 表示.

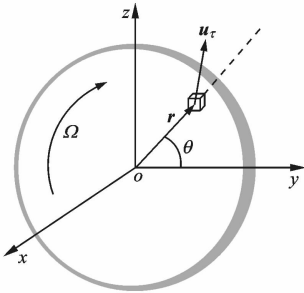


图 2 Ω 、 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{u}_r$ 之间的关系

3 计算网格与边界条件

交叉透平阵列的数值计算域如图 3 所示. 入口面位于第 1 排透平前 $2d$ 处, $d=0.8\text{ m}$ 为叶轮直径, 边界为入口速度且假设均匀分布; 出口边界为出口压力, 在最后一排透平后 $4d$ 处; 通道上下边界均为滑移壁面, 距通道中心 $3d$ 处; 横向边界为周期性边界; 激盘厚度 $e=0.005\text{ m}$. 轴向网格点数为 20, 径向网格点数为 75, 激盘内网格数为 11 万, 激盘外网格数自激盘附近向外逐渐增加, 共约 500 万. 各排透平之间的距离随工况而变. 计算域部分网格分布如图 4 所示.

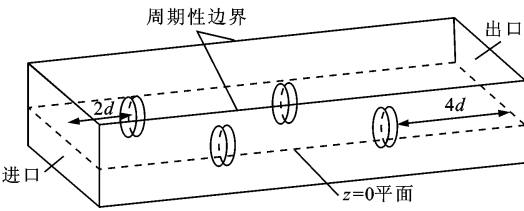


图 3 交叉透平阵列的数值计算域

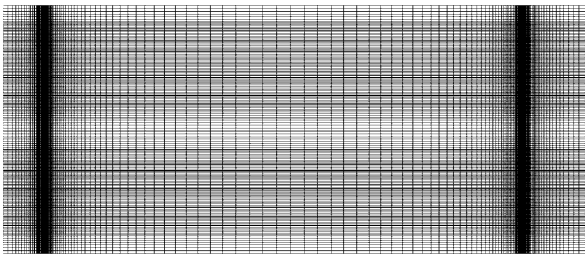


图 4 计算域部分网格分布 ($z=0$)

利用基于 $k-\omega$ 模型的 SST 湍流模型^[8-9]对交叉透平阵列进行了稳态计算,并假设流体为不可压缩的稳态流动. 压力-速度耦合计算采用 SIMPLEC 算法,控制方程离散采用有限体积法进行,动量、湍动能和耗散率均采用二阶迎风格式.

4 结果分析

本文以 Bahaj 等^[10]的实验透平结构为基础研究了交叉透平阵列的结构参数,探索了横向距离和纵向距离对各排透平功率系数和轴向推力系数的影响规律.

4.1 阵列结构参数对阵列能量输出的影响

交叉透平阵列中的 d_y 分别取 $2d$ 、 $2.5d$ 、 $3d$ 和 $4d$, d_x 分别取 $2d$ 、 $3d$ 、 $4d$ 和 $6d$. 设置入口速度 $U_0=1.54\text{ m/s}$,叶根处的俯仰角为 25° ,叶轮尖速比 $\gamma_{\text{TSR}}=\Omega R/U_0=5$. 为了直观地表述潮汐透平阵列的能量输出和轴向推力,本文定义了 2 个参数,即相对功率系数和相对推力系数

C_P^* = \frac{\sum_{n=1}^4 (C_P)_n}{C_{PS}}; C_T^* = \frac{\sum_{n=1}^4 (C_T)_n}{C_{TS}} (7)

式中: C_{PS} 和 C_{TS} 分别为相同条件下的单机透平功率系数和推力系数. 不同交叉透平阵列的能量输出和透平受到的推力如图 5 所示. 从图中可以看出,4 排透平系统的 C_P^* 和 C_T^* 随透平阵列结构参数的变化趋势相近,如果要获得高能量输出,该系统受到的推力相应增大. 当 d_y 为 $2.5d$ 、 d_x 为 $6d$ 时, C_P^* 为 3.74,属于最大能量输出(单机透平下的 C_{PS} 为 0.336 5^[4]). 从变化趋势来看, d_x 增加, C_P^* 提高, d_y 增加, C_P^* 减小, d_y 为 $2.5d$ 时最佳. 表 1 为 $d_y=2d$ 时不同 d_x 的各排透平的 C_P ,表 2 为 $d_y=2.5d$ 时不同 d_x 的各排透平的 C_P . d_x 的变化对第 1 排透平性能参数几乎无影响,但对第 2 排透平性能参数的影响较大,第 2 排透平的功率系数和推力系数均较第 1 排的大. 当 d_y 为 $2d$ 、 d_x 为 $2d$ 时,第 2 排透平的功率系数是第 1 排的 1.09 倍;当 d_y 为 $2.5d$ 时,第 2 排透平的功率系数是第 1 排的 1.06 倍. 随着 d_x 的增加,第 3 和第 4 排透平的功率输出均有所提高,主要是这 2 排透平处于第 1 和第 2 排透平的尾流之中,流场的流速较低,所以 d_x 的增加可以使得尾流速度得到恢复. 如果仅考虑前 2 排透平,当 d_y 和 d_x 均为 $2d$ 时,交叉透平阵列的功率输出是相同情况的单机透平的 2.11 倍.

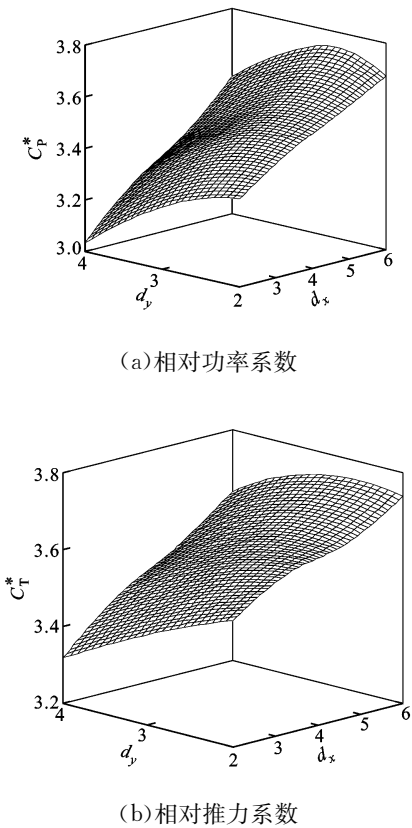


图 5 不同结构参数下交叉透平阵列的 C_p^* 和 C_T^* 比较

表 1 $d_y=2d$ 时各排透平的功率系数

排数	C_p			
	$d_x=2d$	$d_x=3d$	$d_x=4d$	$d_x=6d$
1	0.340 5	0.340 9	0.341 0	0.341 0
2	0.369 5	0.364 1	0.360 6	0.351 8
3	0.213 0	0.239 4	0.256 3	0.279 5
4	0.198 6	0.221 7	0.241 3	0.261 1

表 2 $d_y=2.5d$ 时各排透平的功率系数

排数	C_p			
	$d_x=2d$	$d_x=3d$	$d_x=4d$	$d_x=6d$
1	0.338 6	0.338 7	0.338 7	0.338 7
2	0.361 4	0.360 2	0.359 4	0.358 0
3	0.203 6	0.234 8	0.256 4	0.284 5
4	0.200 3	0.229 2	0.248 8	0.275 0

4.2 阵列结构参数优化

根据上述的交叉透平阵列结构参数的变化对各排透平性能的影响,本文提出一种新的交叉透平阵

列布置方案.将 2 排透平组成一个系统,系统中透平阵列的间距为 $2d$,通过增加系统间的距离(4 排透平时第 2 与第 3 排间距用 $d_{1,2}$ 表示)来恢复上游透平尾流的速度,提高下游透平的输出能量.优化布置前后交叉透平阵列速度场的分布如图 6 所示.从图中可以看出,2 种透平布置占用了相同的空间,但是二者的总能量输出有所不同.表 3 为 d_x 为 $3d$ 和 $4d$ 时 2 种阵列优化前后 C_p^* 的比较.从表中可以看出,优化后的交叉透平阵列的 C_p^* 均有所提高,约提高了 $3\%\sim 4\%$.

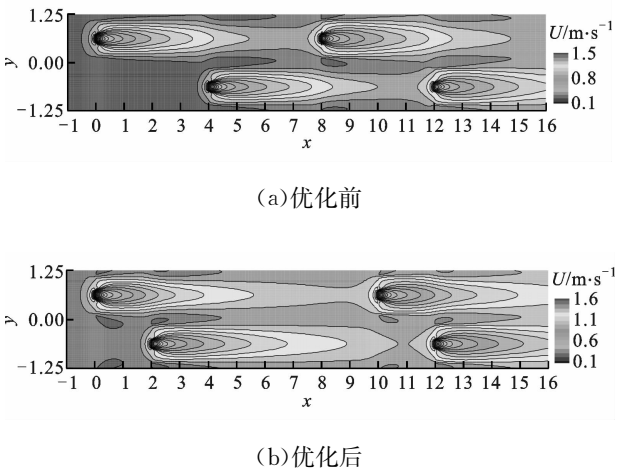


图 6 优化前后交叉透平阵列的速度场分布($z=0$)

表 3 交叉透平阵列相对功率系数比较

d_x	优化前	$3d$	$4d$
$d_{1,2}$	优化后	$6d$	$8d$
C_p^*	优化前	3.462 2	3.583 1
	优化后	3.607 3	3.701 4

优化后交叉透平阵列充分利用了透平的阻塞效应,同时可以加快上游透平尾流的恢复力度.交叉透平阵列与单机透平在转轴中心的尾流速度恢复比较如图 7 所示.从图中可以看出,下游 $2d$ 处由于受到周围透平的影响,致使尾流速度加速恢复,在接近 $10d$ 处,由于受到下一排透平的影响,致使速度恢复减慢,交叉透平的尾流速度较相同条件下的单机透平有很大提高.优化前后交叉透平阵列下游 $6d$ 处的速度分布如图 8 所示.从图中可以看出,经过优化后的透平阵列所携带的动能大于优化前.由表 3 数据还可知,优化后的透平阵列从流体中获得了更多的能量,表明优化后的阵列较优化前能更有效地吸收周围流场的能量,从而提高了透平的机械能.

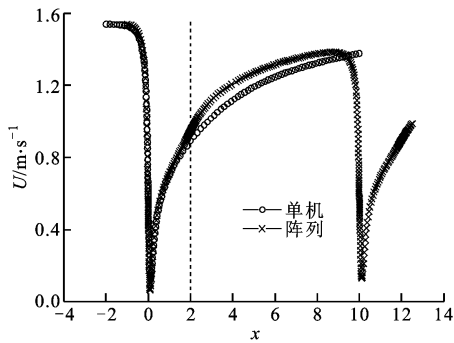


图 7 交叉透平阵列与单机透平在转轴中心的尾流速度恢复比较

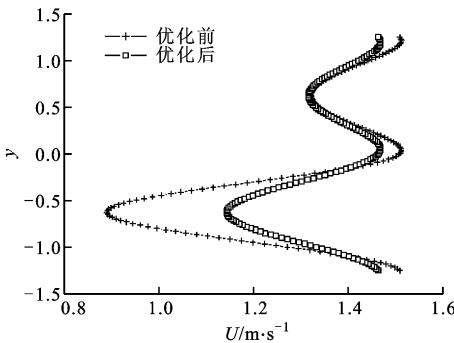


图 8 优化前后交叉透平阵列下游 6d 处尾流速度分布

5 结 论

(1)本文对 BE+CFD 方法做了进一步的改进,使其能够更准确地模拟潮汐场中透平间的相互作用,使得应用范围进一步拓宽。

(2)应用改进后的 BE+CFD 方法分析了交叉透平阵列的结构参数对透平阵列能量输出和透平所受推力的影响.分析结果显示,交叉透平阵列的最佳 d_y 为 $2.5d$, d_x 越大,对透平的能量输出就越有利.由 4 排交叉透平中各排透平的功率系数表明,透平周围的阻塞作用是交叉透平阵列能量输出增加的主要原因.当 d_x 为 $6d$ 时,透平阵列的 C_p^* 为 3.74,如果仅考虑两 2 透平在 d_y 和 d_x 均为 $2d$ 时的情况,相应的 C_p^* 可达 2.11。

(3)比较结果表明,本文方案的优势更明显,可从流场的周围吸收更多的能量,从而产生更多的机械能。

参考文献:

[1] TURNOCK S, PHILLIPS A, BANKS J, et al. Mod-

elling tidal current turbine wakes using a coupled RANS-BEMT approach as a tool for analysing power capture of arrays of turbines [J]. Ocean Engineering, 2011, 38(11):1300-1307.

[2] LI Y, CALLSAL S. Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbine; Part I Power output [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(7):627-637.

[3] LEE S, LEE S, JANG K, et al. A numerical study for the optimal arrangement of ocean current turbine generators in the ocean current power parks [J]. Current Applied Physics, 2010, 10(2):137-141.

[4] 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 investigate of horizontal axis tidal current turbine farm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7):98-102.

[5] JOURIEH M, KUSZLA P, DOBREV I, et al. Hybrid rotor models for the numerical optimization of wind turbine farms [C]//1st International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:173-177.

[6] BATTEN W M J, BAHAJ A S, MOLLAND A F, et al. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines [J]. Renewable Energy, 2008, 33(5):1085-1096.

[7] SHEN Zhongwen, MIKKELSEN R, SØRENSEN J N. Tip loss corrections for wind turbine computations [J]. Wind Energy, 2005, 8(4):457-475.

[8] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):1598-1605.

[9] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model [J]. Turbulence Heat and Mass Transfer, 2003 (4):625-632.

[10] BAHAJ A S, MOLLAND A F, CHAPLIN J R, et al. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank [J]. Renewable Energy, 2007, 32(3):407-426.

(编辑 苗凌)