

8-13-2020

## Numerical Simulation Study of Impact of Stagger Angle and Radius Ratio on Performance of Combined Type VAWT

Xiucong Fu

*1. Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou 511458, China;;2. Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China;;*

Xiaoting Liang

*2. Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China;;4. Guoke Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China;*

Baoxing Ou

*1. Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou 511458, China;;*

Chili Wu

*1. Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou 511458, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Numerical Simulation Study of Impact of Stagger Angle and Radius Ratio on Performance of Combined Type VAWT

## Abstract

**Abstract:** Darrieus-Savonius combined rotor could effectively improve the performance of sole type vertical axis wind turbine. *In order to investigate the impacts of radius ratios and stagger angles on the combined rotor, and their best combination, aerodynamic simulations of different radius ratios and stagger angles were studied.* The numerical simulation is based on 2D unsteady incompressible air model and realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model. The result indicates that the radius ratio represents the occupied swept area of Savonius rotor, the larger radius ratio, the higher proportion of the positive momentum outputs ( $M \geq 0$ ) in a rotation period. In addition, there exists an optimal stagger angle under a specific radius ratio making the turbine operate in higher tip speed ratio zone with maximum power coefficient.

## Keywords

combined type, vertical-axis wind turbine, stagger angle, radius ratio, simulation

## Authors

Xiucong Fu, Xiaoting Liang, Baoxing Ou, Chili Wu, Ruheng Zhao, Yuepeng Li, Kaihong Pi, and Xiao Shuai

## Recommended Citation

Fu Xiucong, Liang Xiaoting, Ou Baoxing, Wu Chili, Zhao Ruheng, Li Yuepeng, Pi Kaihong, Xiao Shuai. Numerical Simulation Study of Impact of Stagger Angle and Radius Ratio on Performance of Combined Type VAWT[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 2951-2958.

## 交错角与半径比对组合型垂直轴风轮影响仿真

傅秀聪<sup>1,2</sup>, 梁小婷<sup>2,4</sup>, 欧宝星<sup>1</sup>, 吴池力<sup>1</sup>, 赵汝恒<sup>1,2</sup>, 李跃鹏<sup>1</sup>, 皮开红<sup>3</sup>, 肖帅<sup>3</sup>(1.广州市香港科大霍英东研究院, 广东 广州 511458; 2.香港科技大学, 香港;  
3.广州红鹰能源科技股份有限公司, 广东 广州 510800; 4.国科天地科技有限公司, 北京 100089)

**摘要:** Darrieus-Savonius 组合型垂直风轮可有效改善单一型垂直轴风力机性能。为探究半径比和交错角对组合风轮性能的影响和其最优参数组合, 对多组半径比和交错角参数组合下的组合风轮的气动特性进行仿真研究。数值模拟计算基于二维非定常不可压缩流体, 采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型。结果表明, 半径比越大, 周期内输出的正力矩值(力矩值 $\geq 0$ )所占比例越大; 在不同的半径比下, 交错角存在最优值使得组合风轮运行在高尖速比区域, 并功率系数最高。

**关键词:** 组合型; 垂直轴风力机; 交错角; 半径比; 数值模拟

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 12-2951-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201612011

### Numerical Simulation Study of Impact of Stagger Angle and Radius Ratio on Performance of Combined Type VAWT

Fu Xiucong<sup>1,2</sup>, Liang Xiaoting<sup>2,4</sup>, Ou Baoxing<sup>1</sup>, Wu Chili<sup>1</sup>, Zhao Ruheng<sup>1,2</sup>, Li Yuepeng<sup>1</sup>, Pi Kaihong<sup>3</sup>, Xiao Shuai<sup>3</sup>(1. Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou 511458, China; 2. Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China; 3. Guangzhou Hong Ying Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510800, China;  
4. Guoke Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

**Abstract:** Darrieus-Savonius combined rotor could effectively improve the performance of sole type vertical axis wind turbine. In order to investigate the impacts of radius ratios and stagger angles on the combined rotor, and their best combination, aerodynamic simulations of different radius ratios and stagger angles were studied. The numerical simulation is based on 2D unsteady incompressible air model and realizable  $k-\epsilon$  turbulence model. The result indicates that the radius ratio represents the occupied swept area of Savonius rotor, the larger radius ratio, the higher proportion of the positive momentum outputs ( $M \geq 0$ ) in a rotation period. In addition, there exists an optimal stagger angle under a specific radius ratio making the turbine operate in higher tip speed ratio zone with maximum power coefficient.

**Keywords:** combined type; vertical-axis wind turbine; stagger angle; radius ratio; simulation

## 引言

小型风力发电机是新能源灵活分布的一种重要方式, 可用于离网海岛发电, 渔船发电, 通讯

基站供电, 路灯供电等。水平轴风力机和垂直轴风力机理想效率基本相同, 相比于水平轴风力机, 垂直轴风力机具有受风多向性、噪声小、便于维修等优点<sup>[1]</sup>。由于垂直轴风力机基础理论研究较少, 风能利用率较低, 且起动困难, 所以在市场推广上, 垂直轴风力机所占的市场份额与水平轴风力机相差甚远。

早在 1977 年 Sandia 实验室关于 Savonius 风力



收稿日期: 2015-04-09 修回日期: 2015-07-26;  
基金项目: 广东省自然科学基金 (2014A030310440),  
广州市对外科技合作项目(201508030030);  
作者简介: 傅秀聪(1977-), 男, 香港特别行政区, 博士,  
副研究员, 研究方向为新能源研究、节能热能系统设计、  
传染性微粒的再悬浮、超细微粒的空气动力学特性、  
超细微粒的声波聚集去除、风能利用及风力发电。

<http://www.china-simulation.com>

• 2951 •

机的实验便证明了 Savonius 转子是垂直轴风力机绝佳的启动装置<sup>[2]</sup>。何宗敬<sup>[3-4]</sup>推导出两者结合的尺寸与气动优化的数学模型，并用风洞实验数据对其进行验证与修正，对 Savonius-Darrieus 组合风轮的交错角与半径比进行了研究，李岩<sup>[5]</sup>等采用实验方法对组合风轮结合角度进行了起动性能研究，而王绍龙<sup>[6]</sup>等通过二维数值模拟的方式对组合风轮的直径比进行最大风能利用系数与平均启动力矩的研究。但 Savonius 风轮与 Darrieus 风轮在组合风轮中的交错角(即结合角度<sup>[5]</sup>)对组合风轮风能利用率和力矩的影响，和半径比(即直径比<sup>[6]</sup>)与交错角两组参数同时存在并相互影响的情况下，组合风轮性能的变化在目前国内外的研究中仍为缺乏。

本文采用数值模拟的方法，对多组半径比和交错角参数组合的组合风轮的气动性能进行研究，并探求两参数下最优的组合情况，可为垂直轴组合风轮的设计提供一定的设计依据。

## 1 几何建模与数值模型

### 1.1 建立几何模型

本文组合风轮模型的基本几何参数如表 1 所示，在 Sandia 实验室所作报告中表明，间隙度  $e=s/d=0.1\sim 0.15$  的双风斗半圆形 Savonius 转子(S 轮)具有较佳的启动性能<sup>[1-2]</sup>；而由于高升力低阻力和良好失速特性，Darrieus 转子(D 轮)大多采用对称翼型<sup>[1]</sup>，故本文中 S 轮采用间隙比为 0.1 的双风斗半圆形转子，而 D 轮采用 NACA0012 对称翼型。双风斗半圆形 Savonius 转子与 NACA0012 对称翼型 Darrieus 转子为垂直风轮中较为经典简明的模型，选取的意义旨在采用经典模型得到较为普遍性的结论。仿真中使用的几何模型为二维模型，坐标轴原点为旋转中心依次建立 Savonius 转子与 Darrieus 转子，Savonius 转子轴间含有间隙，间隙度为 0.1，组合风轮的几何模型如图 1 中滑移交界面内组合风轮在坐标系内的建立所示。

表 1 Darrieus-Savonius 组合风轮模型尺寸

Tab.1 Model sizes of Darrieus-Savonius combined rotor

Darrieus (D)		
翼型		NACA0012
叶片数	$N$	3
弦长	$c$	220 mm
转子半径	$R_{\text{Darrieus}}$	750 mm
旋转中心	$O_{\text{Darrieus}}$	(0, 0)
Savonius (S)		
转子形状		半圆
风斗数	$n$	2
轴间间隙比	$e$	0.1
转子半径	$R_{\text{Savonius}}$	500 mm
转子厚度	$t$	3 mm

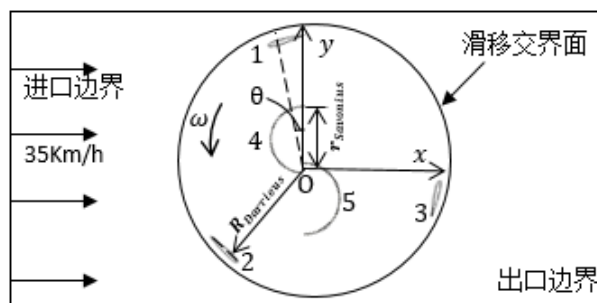


图 1 控制参数定义与计算域示意图

Fig. 1 Definition of the parameters and computational domain

确定几何模型后，建立其计算域，如图 1 所示。在本文中主要的研究对象为组合风轮的交错角( $\theta$ )与半径比( $K_D = R_{\text{Savonius}} / R_{\text{Darrieus}}$ )。以旋转轴中心为原点建立坐标系。以叶片旋转方向为正方向，Z 轴垂直纸面方向向外。交错角( $\theta$ )定义为保持叶片 4 初始位置状态为基准，叶片 1 从初始位置转动，其质心与基准的夹角。叶片 1 初始位置为弦线垂直 Y 轴位置，并质心位于 Y 轴上。叶片 4 初始位置为其半径与 Y 轴重合的位置。

### 1.2 数值模型

二维数值仿真采用压力修正方程的压力基隐式求解器和二阶迎风 COUPLED 压力-速度耦合算法。近壁面处理采用半经验公式的标准壁面函数法(Standard Wall Function)，将自由流中的湍流与壁面附近的流动连接起来。在湍流模型中，研究

表明  $k-\varepsilon$  模型比其他湍流模型如 Spalart-Allmaras 模型等要精确<sup>[7]</sup>, 其中, Realizable  $k-\varepsilon$  模型较 RNG 和 Standard  $k-\varepsilon$  模型更能保持雷诺应力与真实湍流的一致, 同时在旋流计算、带方向压强梯度的边界层计算和分离计算中, 计算结果更符合真实情况。由此, 本研究中湍流模型采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型 RANS 模拟方法。

仿真中的控制方程为纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 守恒方程组, 对流场内运动的无穷小微团进行受力分析, 可得其在 X,Y,Z 方向上的动量方程组:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \mathbf{V}) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z\end{aligned}$$

代入牛顿流体应力方程组, 假设叶轮中的气体为理想气体, 即其分子间的作用力可以忽略, 则有状态方程:  $p = \rho RT$ 。

当确定控制方程后, 不同的边界条件决定了其控制方程的特解。在此风力机的几何模型中, 其边界条件包括: 进口边界、出口边界、壁面边界、滑移交接边界。进口边界采用自由来流条件, 风力 5 级, 风速为 35 km/h 的清风水平, 湍流条件设定为 5% 的湍流强度, 湍流水力直径为风力机直径, 出口边界为自由流出口。

流场内空气设为黏性流动, 风力机叶轮设定为无滑移条件, 即紧挨叶片的气流与物面之间的相对速度为 0。如果气流流经叶轮表面, 则

$$u=v=w=0 \quad (\text{在物体表面})$$

风力机叶轮为旋转机械, 故在边界条件中应设定旋转与静止区域, 并在两区域间设置滑移界面 (interface) 传递速度、压力、密度等状态变化量。

从旋转区域跨过滑移界面至静止区域, 从旋转区域绝对速度  $\vec{v}_r$  到静止区域的绝对速度  $\vec{v}$  的传递为:  $\vec{v} = \vec{v}_r + (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{v}_t$ 。

则绝对速度的矢量增量为:

$$\nabla \vec{v} = \nabla \vec{v}_r + \nabla(\vec{\omega} \times \vec{r})。$$

其中:  $\vec{v}_r$  为平移速度;  $\omega$  为旋转区域角速度;  $r$  为旋转区域半径。其余状态参量如密度、静压、静温等则从邻近单元内获取。

风力机是把风能转化为电能的动力机械。对经过风力机的来流, 由风力机的圆盘理论可得, 其功率为

$$P = \frac{d(KE)}{dt} = \frac{1}{2} \rho A U_0^3 \quad (1)$$

由式(1)可得功率系数为

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} = \frac{M \omega}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3}$$

一般来说, 风力机的输出功率依赖于风速  $U_0$ 、空气密度  $\rho$ 、风力机半径  $R$ 、风力机转速  $\omega$ 、空气运动粘度  $\nu$ , 即

$$f(P, U_0, \rho, R, \omega, \nu) = 0 \quad (2)$$

对式(2)进行量纲分析可得

$$f\left(C_p, \frac{\omega R}{U_0}, \frac{U_0 R}{\nu}\right) = 0$$

第二个参数群命名为尖速比, 即

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_0} = \frac{V_{tip}}{U_0}$$

叶尖速比是叶片叶尖圆周速度  $V_{tip}$  与风速的比值。叶尖速比决定了叶片的攻角, 并控制着叶片气动性。在仿真中使用变转速法测量风力机的空气动力曲线, 所测的参数为风力机力矩, 引入力矩系数  $C_m$  值。改变转速可得不同的  $\lambda$  下的力矩系数, 进而得到功率系数  $C_p$ 。

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho A r V_\infty^2}$$

$$C_p = \frac{M \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho A r V_\infty^2} \cdot \frac{\omega r}{V_\infty} = \frac{C_m \cdot \lambda}{2 \cdot r^2}$$

其中:  $\omega$  为组合风轮转速;  $r$  为其半径;  $V_\infty$  为风速;  $\rho$  为风密度;  $A$  为组合风轮迎风面积;  $P$  为组合风轮有效功率;  $M$  为组合风轮力作用点上气压梯度力与粘性力相对于旋转中心的力矩之和。

## 2 无关性研究

当计算域与网格数过裕时会造成计算资源的浪费, 而当其不足时会造成结果误差过大, 同时为了增加数值仿真的可靠性, 本文在仿真前进行无关性研究, 包括计算域与网格的无关性研究。以风轮的性能参数力矩输出作为在计算域无关性研究中的衡量参数。

### 2.1 计算域无关性

在计算域中, 主要改变矩形区域, 控制进口边界距离风轮的长度, 即前距( $F$ ); 矩形宽度( $W$ )与矩形长度( $L$ )。当控制网格数与拓扑结构相似, 存在计算域增大至一定范围时, 所得结果相差较小, 则认为此值进入无关范围。

从图 2 可知, 在此网格尺度下, 力矩输出预测值  $M \approx 5.21$ 。前距过小会导致目标输出值偏大, 而当计算域宽度过小会使得目标输出值偏小。当前距增至 5 倍直径距离时, 力矩输出值与预测值平均误差小于 1%。而计算域宽度过小会使得目标输出值严重偏离预测值, 当增至 15 倍直径距离时, 力矩输出值与预测值平均误差小于 6%。力矩输出对计算域整体长度变化的敏感程度降低, 当长度达 30 倍直径时, 力矩输出值相差小于 0.2%。

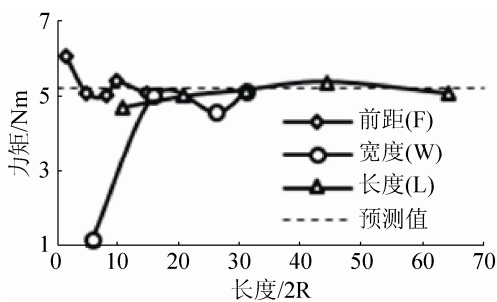


图 2 不同计算域边界大小下力矩输出

Fig. 2 Momentum output under different domain sizes

### 2.2 网格无关性

在数值计算中, 差分方程结果在网格中心进行传递, 网格的粗细程度对计算结果影响很大。计算模型的区域离散化采用非结构化网格, 并在叶片

表面设置壁面边界层以捕捉近壁面的流场变化。在网格无关性研究中, 对两个网格参数进行无关性研究: 总体网格数; 近壁面第一层网格尺度。

从图 3 可知, 当控制边界条件和第一层网格尺度不变, 而改变总体网格数目时, 发现在总网格数目上, 当其达到 100 万时, 力矩输出值变化小于 4%; 而保持总网格数相似, 而改变第一层网格尺度, 可发现其达 1 mm 时, 力矩输出值与预估值相差小于 14%, 当其达到 0.1 mm 时, 力矩输出值与预估值相差小于 7%, 但再减小第一层网格尺度至 0.02 mm 时, 力矩输出值于预估值相差变大。

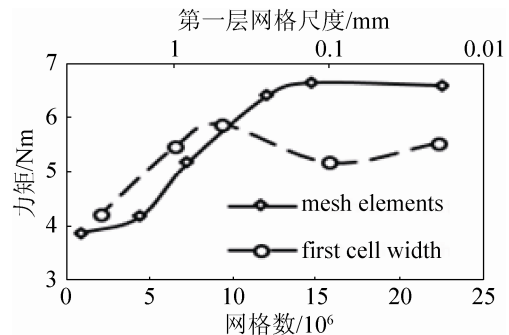


图 3 第一层网格尺度与总网格数无关性

Fig. 3 Mesh independence results

其中, 近壁面第一层网格尺度由无量纲数  $y^+$  进行估算。其公式为:

$$\mu_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}; \quad y^+ = \frac{y\mu_\tau}{\nu}$$

式中:  $\mu_\tau$  为壁面摩擦速度;  $\tau_w$  为壁面剪切力;  $y$  为第一层网格质心距离壁面的距离;  $\nu$  为运动黏度。当第一层网格大小  $ds \leq 0.1$  mm 时,  $y^+ \leq 3$ 。图 4 为在组合风轮的叶轮边界层周围截取的速度云图。对组合风轮, 当来流切入叶片时, 由于叶轮表面水平速度小于来流速度, 而使来流在叶轮表面产生边界层分离。

由图 4 可观察到, 在转子的表面可辨析出层层细薄的边界层, 并对于 Savonius 转子叶尖处产生的涡流也较为清晰可辨。在此种情况下, 当第一层网格大小为 0.1 mm 时, 能满足边界层的仿真需求。

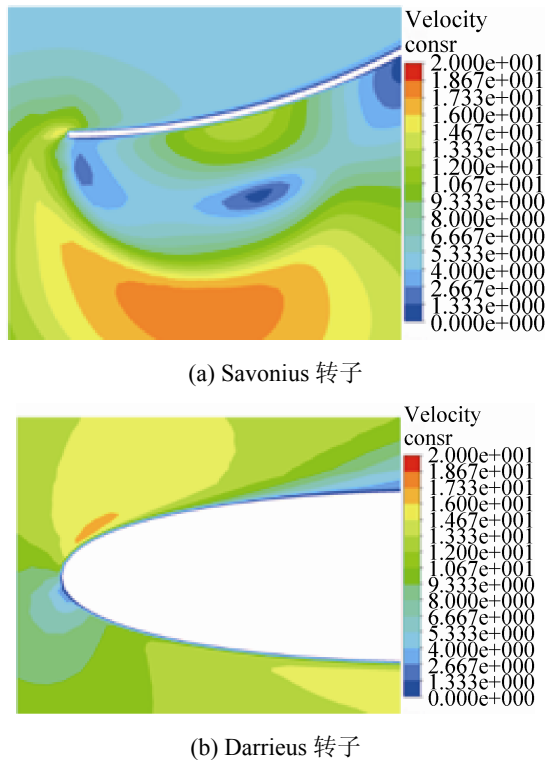


图 4 第一层网格厚度为 0.1 mm 时转子叶尖周围速度云图

Fig. 4 Speed contour of the rotors when the first layer thickness is 0.1mm

### 3 仿真结果与分析

由于在本数值仿真模型中采用变转速测量法得到风轮的功率系数曲线, 所以对不同的半径比、不同的交错角  $\theta$ 、以及两者交叉影响下的风轮的空气动力特性进行探究。

#### 3.1 半径比对组合风轮的影响

取两个不同半径比最高功率系数条件下一个旋转周期内的组合风轮力矩输出曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知, 叶轮输出力矩的峰值数目与 Darrieus 转子的叶片数相等, 随着半径比的增大, 即 Savonius 转子所占组合风轮的扫风面积越大, 整个周期输出的正力矩值(力矩值  $\geq 0$ )所占比例越大。组合风轮为 2 叶 Savonius 转子与 3 叶 Darrieus 转子的组合, 由于 Darrieus 转子受叶片旋转角度(即叶片的攻角)的影响较大, 而且其在最佳攻角时输出的力矩值较大, 所以在一个在周期内, 等角度排布的 Darrieus 转子的叶片数决定了组合风

轮输出力矩的峰值数目。而当半径比  $K_D$  增大时,  $K_D=0.25$ ,  $K_D=0.38$  和  $K_D=0.54$ , 当  $K_D=0.25$  时, 一个旋转周期内有三个小于零的极小值, 当  $K_D=0.38$  时, 一个旋转周期内有 2 个小于零的极小值, 而当  $K_D=0.54$  时, 一个旋转周期内输出力矩值皆为正, 当风轮的力矩输出皆为正值时, 风轮在运行过程中更稳定。在组合风轮中一般被认为 Savonius 转子可以有效改善 Darrieus 转子的启动性能<sup>[5-6]</sup>, 当  $K_D=0.54$  时, Savonius 转子投影面积所占组合风轮扫风面积的比例大于 Darrieus 转子, S 轮在低尖速比区域对组合风轮产生了积极的影响, 使组合风轮在全旋转周期内的正输出力矩可以有效提高风轮运行的稳定性。

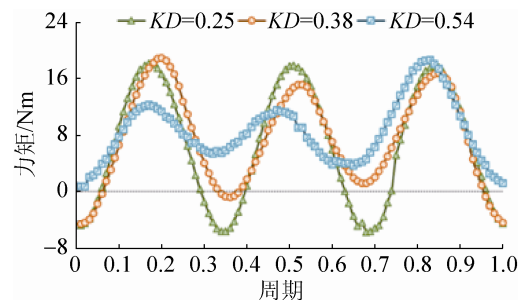


图 5 不同半径比下组合风轮力矩输出曲线

Fig. 5 Momentum outputs of the combined rotor under different radius ratios

#### 3.2 交错角对组合风轮的影响

由图 6 可知, 在相同半径比情况下, 组合风轮交错角有其最优值使得其最大功率系数, 运行的尖速比范围最广。在目前的角度间隔下, 当  $KD=0.25$  时, 其最佳的交错角为  $\theta=15^\circ$ , 此时最大功率系数相对处于最高值, 运行的尖速比范围最广。

一般而言, Savonius 转子的尖速比范围为 2 以下, 而 Darrieus 转子的尖速比可接近 8, 因而 Darrieus 转子的功率系数要比 Savonius 转子要高。改变组合风轮的交错角, 由图 6 中结果可知, 可以改变组合风轮的尖速比运行范围, 而达到更高的功率系数。当交错角  $\theta=0^\circ$  到  $\theta=15^\circ$ , 尖速比范围更广, 功率系数更高, 当交错角  $\theta=15^\circ$  到  $\theta=30^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$ , 尖速比范围变窄, 功率系数降低。

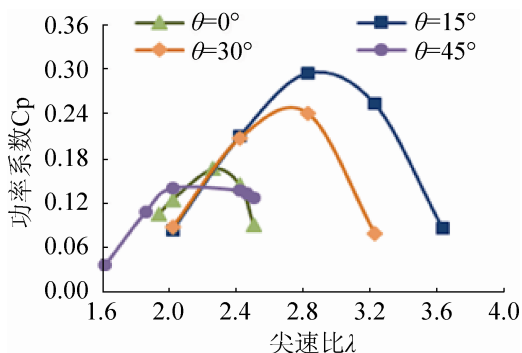


图 6 不同交错角下组合风轮功率系数曲线图(KD=0.25)

Fig. 6 Cp curves of the combined rotor under different stagger angles (KD=0.25)

### 3.3 半径比与交错角间的相互影响

单独 D 轮风轮与在不同半径比的最佳交错角下的组合风轮的功率系数曲线对比如图 7 所示。由图 7 可得,在不同的半径比下最佳组合交错角的组合风轮与单独 D 轮风轮最大功率系数相差不大,但最大功率系数对应的尖速比  $\lambda'$  与其功率曲线的有效运行尖速比范围有所差异。当半径比增大时,受 Savonius 转子的影响,运行的尖速比范围较窄,且最大功率系数对应的尖速比较小。调整交错角的大小,可以使得输出的最大功率系数接近于单独 Darrieus 转子的最大功率系数,更有效地利用所捕获的风能。

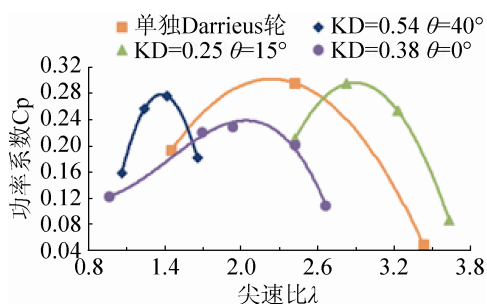


图 7 单独 D 轮风轮与各组合型风轮的功率系数曲线

Fig. 7 Cp curves of Sole Darrieus rotor and different combined rotors

图 8 为在不同半径比与其最佳交错角下最高与最低力矩输出值位置处截取的流线与压力云图,以深入探究两参数对组合风轮的影响。当半径比为 0.54,交错角为  $40^\circ$ ,最大功率系数对应的

尖速比为 1.42 时,图 8(a)为组合风轮转动至  $300^\circ$  ( $\delta=300^\circ$ ),力矩输出值最高时对应的压力云图与流线,当其转动至  $0^\circ$  ( $\delta=0^\circ$ ),力矩输出值最低,如图 8(b)所示。其中, D 轮叶片 #2 与 S 轮 N2 为基准叶片。在此半径比下,风轮的干涉较多,形成了较多的漩涡区(图中 A-H 所示)。在旋转角度  $\delta=300^\circ$  时, D 轮叶片 #1, #2 产生了较大的压差驱使风轮转动,此时在叶片内侧形成了低压漩涡区 B 和 C; S 轮叶片 N1 迎风,在其凹面迎风面由于阻塞形成了漩涡 D 和 H,而其凸面背风面则形成了低压,叶片 N1 压差较大,产生的力矩较大。此时, S 轮的另一叶片 N2,由于轴间隙的存在,叶片 N1 中的气流泄漏至 N2 的凹面而形成漩涡 E,来流也由于 N2 的凸面和 D 轮叶片 #2 而在叶尖形成漩涡 F, G。当风轮转动至  $0^\circ$  ( $360^\circ$ ) 时, S 轮的凹面内的漩涡 D, E 变大,低压区面积变大, S 轮驱动压差变小,输出力矩输出变小,而 D 轮叶片 #1 失效,叶片 #3 在前沿遇由 S 轮形成的涡区 G,只有叶片 #2 形成驱动力矩,此时组合风轮形成的力矩值最小。

图 8(c)为当半径比为 0.25,交错角为  $15^\circ$ ,  $\lambda'$  为 2.82 时,组合风轮转动至  $275^\circ$  ( $\delta=275^\circ$ ),力矩输出最高时对应的压力云图与流线,图 8(d)为其转动至  $25^\circ$  ( $\delta=25^\circ$ ),力矩输出最低时对应的压力云图与流线,其中, D 轮叶片 #1 与 S 轮 N1 为基准叶片。对比图 8(c)与图 8(d),可知在不同半径比下,组合风轮输出力矩值主要受 D 轮影响,其峰值与 D 轮位置有关。在旋转角度  $\delta=275^\circ$  时, S 轮由于半径较小,在间隙中形成了一个小漩涡 D,而且对来流影响不大,输出的力矩值很小。而当风轮转至  $25^\circ$  时,则在叶片 N1 叶尖形成漩涡 F,对叶片 #3 产生影响。在此半径比下, S 轮形成的压差较小,主要由 D 轮产生作用。由于半径比较小, S 轮所占据的迎风面积较小,对组合风轮产生的影响较小。在不同半径比下,漩涡的形成与分布可能是造成不同尖速比运行比范围与力矩输出值的原因。



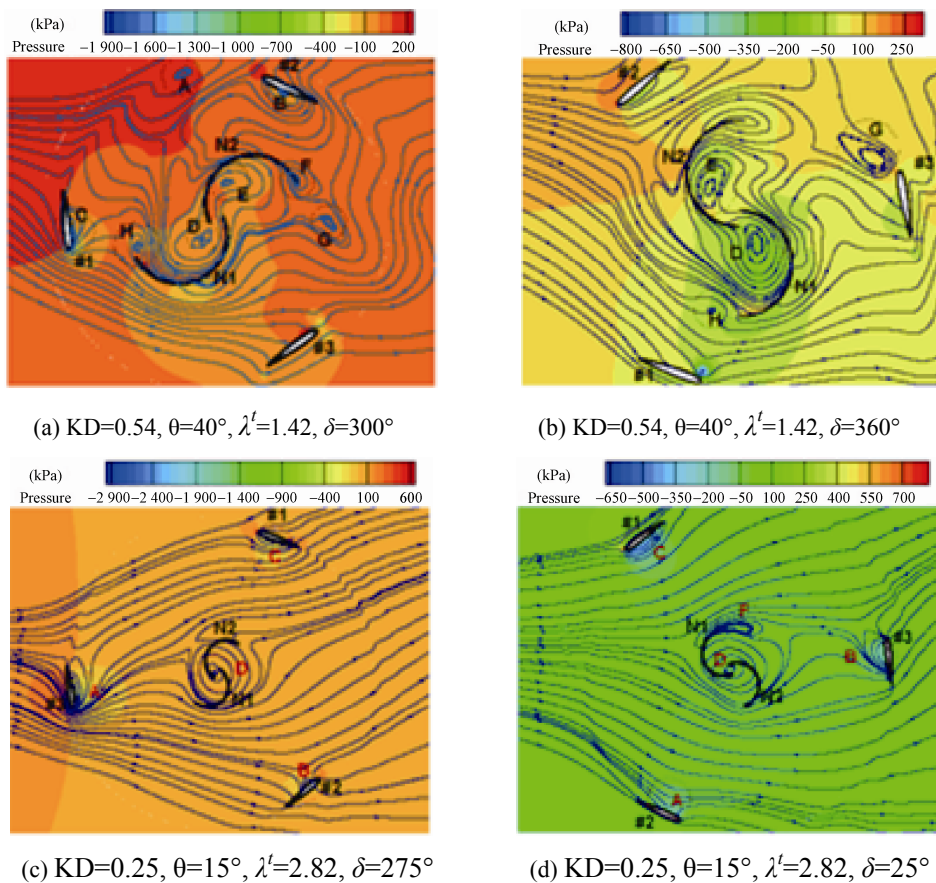


图 8 不同半径比, 最佳交错角下流线与压力云图

Fig. 8 Flow streamline and pressure contour in different radius ratios and stagger angles

## 4 结论

本文通过对多组半径比和交错角参数组合下的组合风轮的气动特性进行仿真研究, 探究了半径比和交错角对组合风轮性能的影响和其最优参数组合, 结论如下:

(1) 计算域边界距离风轮: 前距为 5 倍, 宽度为 15 倍, 后距 30 倍风轮直径时比较合适, 既不会造成计算资源的浪费, 而且能够保证数值仿真的可靠性。

(2) 基于 Realizable  $k-\varepsilon$  模型建立的 CFD 模型, 非结构化网格数量大于  $1 \times 10^6$ 、壁面第一层网格尺度为 0.1mm 的网格尺度下能够得到此风轮模型下经济合理地得到可信的力矩值输出和精细的边界层流动形态。

(3) 叶轮输出力矩的峰值数目与 Darrieus 转子

的叶片数相等, 并且随着半径比的增大, 即 Savonius 转子所占组合风轮的扫风面积越大, Savonius 转子发挥积极的作用, 改善了组合风轮运行情况, 使得静转矩输出为正值。

(4) 在不同半径比下, 组合风轮的交错角都存在最优值能使风轮能运行在较高尖速比范围内, 功率系数达到最高。

(5) 当半径比增大时, 受 Savonius 转子的影响, 运行的尖速比范围较窄, 但调整交错角的大小, 可以使得输出的最大功率系数接近于单独 Darrieus 转子的最大功率系数, 更有效地利用所捕获的风能。

(6) 由不同半径比与其最佳交错角下最高与最低力矩输出值位置处截取的流线与压力云图可以看出, 漩涡的形成与分布可能是造成不同尖速比运行比范围与力矩输出值的原因。

(下转第 2965 页)