

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.006

高密实度H型风力机气动性能的数值分析

施培丽, 邵雪明*

(浙江大学 流体动力及机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对高密实度H型风力机在不同叶片数下的气动特性及风场布置等问题, 将采用 $k-\omega$ SST湍流模型进行数值模拟的方法应用到对高密实度H型风力机的研究中。开展了对风力机做功特性的分析, 建立了流场与风力机功率之间的关系, 提出了单个风力机设计选择叶片数时应综合考虑风力机效率和轴承安全这两个因素; 在尾流场分析的基础上对不同叶片数的风力机在风场前后串列布置进行了评价。研究表明: 叶片在上游($\theta=90^\circ$ 附近)的气动性能决定整个风力机的性能; 由正常工况点下的流场图显示, 叶片数的增加导致流场复杂, 以及叶片的内外压差逐渐减小, 从而使得功率下降; 尾流场流向速度恢复至来流速度的距离随叶片数的增加而减小了28.1%, 这对风力机的前后串列布置提供了依据。

关键词: H型风力机; 气动性能; 叶片数; 数值模拟

中图分类号: TM315; TH122 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0277-04

Numerical study of aerodynamic performance of a high solidity H-type wind turbine

SHI Pei-li, SHAO Xue-ming

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems of aerodynamic characteristics and the wind farm arrangement issues of the high solidity H-type wind turbine under different numbers of blades, the $k-\omega$ SST turbulent model was investigated. After analysis of aerodynamic characteristics around the turbine, the relationship between the flow and the performance of the turbine was established. A method was presented to consider the efficiency and bearing security when designed. The turbines arrangement was evaluated on the analysis of the wake flow field. The results indicate that the performance of the turbine is mainly dependent on the performance of the blade in the upstream ($\theta=90^\circ$ nearby). Figures show that, with the increasing of the blade numbers, the flow becomes complicated and decreases the pressure difference of inside and outside of blade, so that it makes the power decrease. The distance of the wake field flow velocity recovery to the inlet velocity decreases 28.1% with the blade number enhanced, which provides the references for the arrangement of wind turbines.

Key words: H-type wind turbine; aerodynamic performance; blade numbers; numerical simulation

0 引言

目前, 随着全球对可持续能源的投入, 风能作为绿色能源的一种, 也受到越来越多的关注。欧盟联合研究中心对全球能源构成变化进行了预测, 预计在未来的几十年内, 风电将在能源领域内占据越来越大的份额^[1]。H型风力机以其独特的优势, 如不需要偏航

机构, 启动性相对于水平轴要好, 噪音小, 不需要复杂的叶片外型, 安装、操作成本低等^[2], 也受到了国内外研究者的重视。

在H型风力机的设计中, 密实度与叶片数、弦长、半径有关, 是影响风力机特性的主要因素之一^[3]。高密实度风力机的主要特点是: 这种风力机的最佳叶尖速比低, 直径小, 能使风力机叶片的振动载荷的非平

收稿日期: 2012-11-12

作者简介: 施培丽(1987-), 女, 浙江湖州人, 主要从事叶轮机械流体力学方面的研究。E-mail: 21024029@zju.edu.cn

通信联系人: 邵雪明, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: mecsxm@zju.edu.cn

衡性较一般风力机低^[4]。但其叶尖速比小,往往会产生更大的攻角,容易超过静态失速攻角,导致动态失速效应^[5],因而风力机内部流场的空气动力学特性成了关注的焦点。加拿大 McMaster 大学的 K. McLaren^[6] 对其进行了数值模拟,并分析了流场叶片相互作用的机理,包括翼型表面流动分离产生的涡,涡的脱落及其对下游叶片的影响,使得风力机气动载荷产生一定的变化。也有一些研究者对展弦比、叶片数等参数对风力机的功率特性做过一些理论研究^[7],但这些研究都是在密实度改变的情况下分析的,目前尚未开展等密实度下不同叶片数风力机的气动特性比较。

随着 CFD 技术的发展,数值模拟已成为风力机结构设计和优化的重要手段之一^[8],有研究者发现在模拟风力机叶片绕流这类存在大规模流动分离现象的流场时,基于 k- ω SST 模型的一类湍流模型能够比较准确的描述流场特点,捕捉失速等流动现象的发生^[9],本研究采用 k- ω SST 模型和滑移网格技术,研究相同密实度情况下,不同叶片数 H 型风力机的功率特性、载荷特性及流场特性。

1 数值模型及验证

1.1 网格划分及边界条件

由于 H 型风力机叶片展弦比较大,本研究将基于二维模型进行数值模拟的研究。根据前人的经验^[10-12],计算区域需要足够大以忽略边界影响,一般取距离入口 5d~6d 以上,出口 10d 以上,与壁面间距 3d 以上。本研究的风力机距离进口 10D,出口 20D,与上下壁面间距 10D(其中 D 为风轮直径)。

全流场分为两部分:内部为包含叶轮的旋转区域,外部为静区域,旋转区域通过滑移网格法进行处理,本研究在计算中设定其旋转角速度,旋转与静区域通过一个交界面进行差值处理。本研究采用 ICEM 对流场进行结构化网格划分,根据雷诺数、弦长及 y^+ 确定第一层网格长度为 5×10^{-5} m,计算区域及网格如图 1 所示。

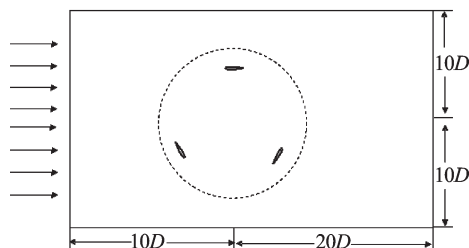
本研究在计算中设置左边界为速度入口,工质为常温常压下的空气,来流风速设为 13.45 m/s,对应的雷诺数为 3.7×10^5 ,来流湍流强度设为 3%;右边界为自由出流边界条件;上、下边界固定为入口速度;叶片表面为壁面无滑移条件。

1.2 控制方程

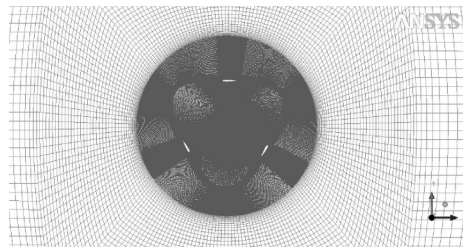
本研究对风力机流场的模拟采用雷诺时均法(RANS),控制方程如下所示。

连续性方程为:

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



(a) 计算区域



(b) 网格划分

图1 计算区域及网格划分

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

湍流模型采用 k- ω SST 模型,其涡粘系数 k 方程和 ω 方程可以写成如下形式^[13]:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (3)$$

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho \omega)}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \\ & 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$

式中: $\beta, \gamma, \sigma_k, \sigma_\omega$ —模型参数; F_1, F_2 —混合函数。

k- ω SST 湍流模型利用函数 F_1 将 k- ϵ 和 k- ω 二方程模式结合起来,再利用混合函数 F_2 改进涡团粘性系数 μ_t 在壁面逆压流动区域的结果,充分发挥了 k- ϵ 模型处理自由流、k- ω 模型处理壁面约束流动的特长。

1.3 模型验证

为了验证本研究数值模型的可靠性,笔者首先引用文献[3]中的一型 3.5 kW 风力机,对其流场进行数值模拟,该型风力机的几何参数如表 1 所示,模拟结果如表 2 所示,风轮功率系数随着叶尖速比的增大,先增大后减小。由表 2 对比结果可知,两者吻合较好,从而验证了本研究数值模型的可靠性。

2 模拟结果与分析

根据多流管理论模型,H 型风力机的密实度是影响风轮性能的主要因素之一,相同密实度的风力机会

表1 H型风力机的几何尺寸

参数	数值
风轮直径 $D_{\text{rotor}}/\text{m}$	2.5
叶片展长 $H_{\text{rotor}}/\text{m}$	3
叶片数 B	3
翼型	NACA0015
叶片弦长 C/m	0.4
密度 σ	0.48
安装角 $/(^{\circ})$	0

表2 风轮功率系数模拟结果及对比

叶尖速比 λ	功率系数 c_p	
	K.Mclaren CFD	本研究CFD
0.4	0.01	0.02
0.7	0.03	0.01
1.1	0.15	0.12
1.3	0.28	0.24
1.6	0.45	0.36
1.8	0.52	0.45
2.1	0.52	0.50
2.4	0.45	0.43

有相同的风能利用特性曲线。为了探讨不同叶片数对H型风力机实际功率特性及尾流场的影响,本研究在同一风能利用特性曲线(即同一密度 $\sigma = BC/R$)下设计不同叶片数的风力机,通过给定半径 $R_{\text{rotor}} = 1.25 \text{ m}$,改变弦长来设计不同叶片数的风力机,其几何参数如表3所示,其余参考表1数据。

表3 不同叶片数的风力机

C/m	B
0.6	2
0.4	3
0.24	5

2.1 叶片数对功率、载荷特性的影响

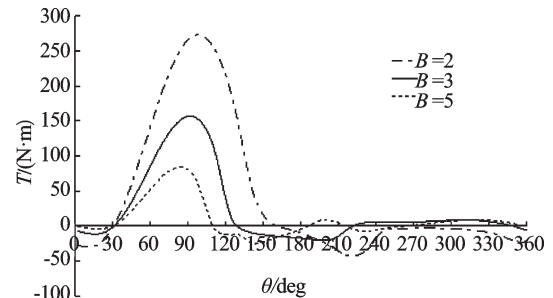
本研究对这3种不同叶片数的风力机进行了数值模拟,得到风力机功率系数随叶片数的变化情况,如表4所示。在同一叶尖速比下,2叶片风力机的功率系数最大,随着叶片数的增加,风力机的功率系数有所降低。对5叶片风力机来说,当叶尖速比 $\lambda = 1.3$ 时,其功率系数是2叶片风力机的23%;当叶尖速比增加到

表4 叶片数对风力机功率系数的影响

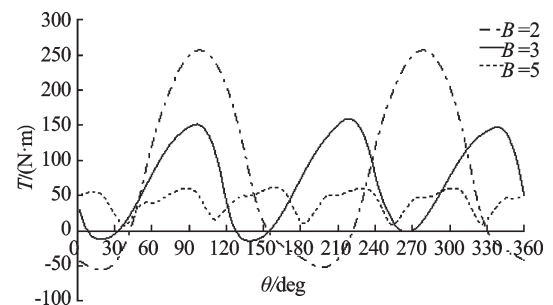
叶尖速比 λ	功率系数 c_p		
	2	3	5
1.1	0.23	0.12	0.01
1.3	0.30	0.24	0.07
1.6	0.38	0.36	0.12
1.8	0.47	0.45	0.13
2.1	0.46	0.50	0.34
2.4	0.44	0.43	0.42

$\lambda = 2.1$ 时,其功率系数增大到2叶片风力机的73%。

为了进一步研究风力机功率系数随叶片数变化的机理,本研究选取正常工况点($\lambda = 1.6$)下风力机的叶片和风轮扭矩如图2所示。其中风力机叶片位置角的定义及扭矩的方向如图3所示。



(a) 叶片扭矩



(b) 风轮扭矩

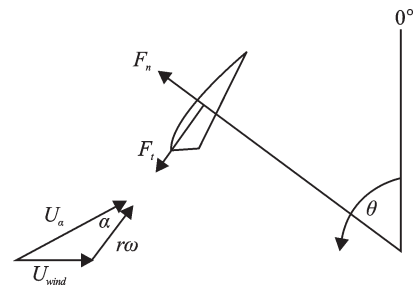
图2 $\lambda = 1.6$ 下风力机叶片和风轮扭矩

图3 叶片位置角及受力分析

如图2所示,3种风力机叶片的最大扭矩位置角均在 90° 附近。随着叶片数的增加,叶片的扭矩最大值越来越小,高扭矩位置角范围也越来越窄。风轮扭矩在圆周旋转过程中呈周期性变化,3种风力机的扭矩最大值与单个叶片的扭矩最大值相近,其中一个峰值区间所展现的扭矩图形也与单叶片的相似。所以,H型风力机单个叶片的气动性能可以反映整个风轮的气动特性。

由图2可知,2叶片数风力机的正负叶轮扭矩极值分别为 $M_{2\text{max}} = 82 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_{2\text{min}} = -52 \text{ N} \cdot \text{m}$,其作用在轴承上的交变载荷应力较大。这对轴承的材料提出更高的要求。所以,本研究在对单个H型风力机的设计过程中,选取叶片数时应综合考虑效率和安全这两个因素。

2.2 叶片数对风力机内部流场特性的影响

由于上游叶片($\theta = 90^{\circ}$ 附近)的气动性能对整个风力机的性能起决定性作用,本研究提取了叶片最大扭

矩值所对应的风力机流场进行分析。

3种风力机旋转区域周围的压力云图和速度云图如图4所示,随着叶片数的增多,整个风轮区域的流场

变得复杂,对于叶片数为5的风力机,出现了大量涡流,影响了整个风轮的做功特性。从图4可以看出,5叶片风力机的高扭矩区域出现局部扭曲现象。

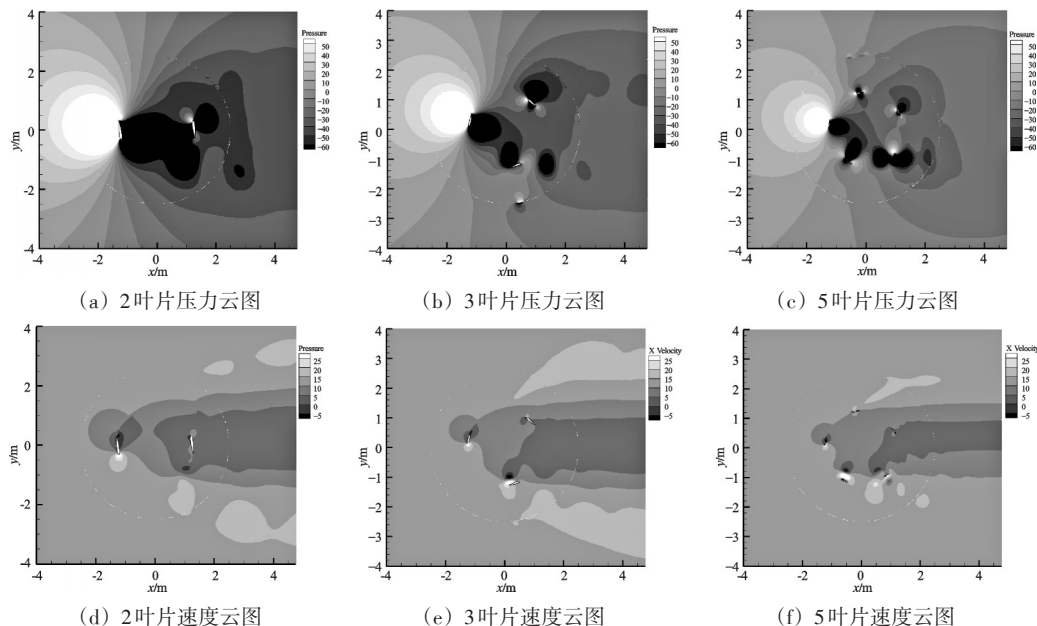


图4 3种风力机旋转区域周围的压力云图和速度云图

从图4可以看出,随着叶片数的增多,风力机上游叶片($\theta=90^\circ$ 附近)的高压区和低压区面积均在逐渐消减,内、外压差减弱,大大地减小了上游叶片($\theta=90^\circ$ 附近)的扭矩。由于叶片的气动性能可以反映整个风力机的气动特性,随着叶片数的增多,导致整个风轮将风能转化为电能的能力减弱了。

2.3 叶片数对风力机尾流场特性的影响

笔者还研究分析了风力机流场的速度分布,以了解不同叶片数风力机尾流速度恢复至来流速度的距离,可以为风场中前后串联的风力机布置提供依据。

风力机在旋转一周过程中尾流场不同位置流向平均速度的分布如图5所示,3种风力机恢复到入口速度的 $(100\pm5)\%$ 的距离不同,2、3、5叶片风力机的距离分别为 $21.7D$ 、 $17.4D$ 、 $15.6D$ 。由图5可知,风力机后面出现较长的尾流低速区,尾流场存在速度的亏损。由此可见,在尾流场中,靠近风力机的速度分布出现了扰动,随着远离风力机,速度场逐渐发展充分,叶片数

越多,恢复到来流速度所需要的距离越小。

所以本研究在风场布置前后串联的风力机时,选择不同叶片数的风力机需要布置不同的距离,以保证处于整个风场的输出功率性能。

3 结束语

本研究针对高密实度H型风力机容易引起大攻角失速、流场较为复杂的情况,指出相同密实度下,叶片数对风轮效率及尾流场的影响不可小视。首先对3.5 kW风力机在不同工况下的气动特性进行了模拟,验证了数值模型的可靠性。然后基于多流管理论模型,设计了相同密实度下,不同叶片数的风力机,分析比较了不同叶片数风力机的功率特性、载荷特性及流场特性,可以得出以下3个结论:

(1) 随着叶片数的增加,风力机的功率系数有所下降,低叶尖速比下尤为明显;风力机的扭矩主要由上游叶片($\theta=90^\circ$ 附近)提供的,该位置角附近叶片的气动性能决定了整个风力机的性能。

(2) 从叶片在上游($\theta=90^\circ$ 附近)的流场图可以看出,随着叶片数的增加,内部流场涡流增多,在上游 $\theta=90^\circ$ 附近,叶片的压力差在逐渐减小,从而减弱了风轮转化为电能的能力。

(3) 风力机尾流低速区较长,随着远离风力机,流场速度分布由扰动变为稳定,叶片数越多,尾流速度恢复到来流速度的距离越小。

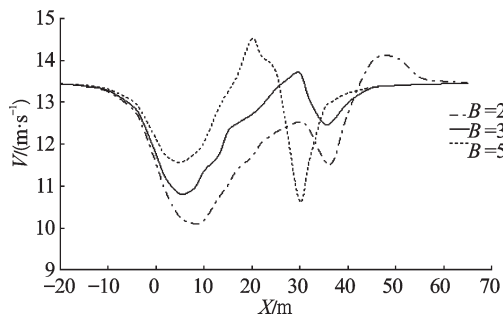


图5 流向平均速度沿X轴分布

(下转第291页)

作用下,滑移件速度降低,减速前进。CODAG 物理模拟试验台主机切换啮合过程中的中间滑移件试验曲线如图 3 中虚线所示。

从图 3 中可发现,两图的位移曲线走势一致,仿真曲线和试验曲线能够很好地吻合。当 $t=0\sim 0.3\text{ s}$,位移曲线斜率较大;当 $t=0.3\text{ s}$ 时刻,中间件移至 10 mm 处,液压油阻尼力开始起作用,斜率下降,产生拐点;当 $t=0.3\sim 0.68\text{ s}$,中间件移至末端,位移保持在 15 mm 。由于仿真中未考虑振动因素的影响,仿真曲线较试验曲线平滑。以上分析印证了本研究 SSS 离合器仿真模型的正确性。

4 结束语

仿真结果表明,本研究所推导的数学模型和建立的仿真模型是正确的,运用 AMESim 软件对 SSS 离合器的进行仿真是可行的,为接下来建立船舶推进系统完整仿真模型打下了基础。基于 AMESim 软件的仿真特点,本研究可以更加简便、细致地对结构细节进行仿真处理,如双向缓冲油腔、液压油源等,更加接近实际运行情况。

参考文献(References):

- [1] 魏军波. 船用大功率自动同步离合器实验[J]. 热能动力工程,1997,12(5):351-353.
- [2] 蒋得松,田 颖,张正一,等. CODOG 系统的三 S 离合器的一种数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报,2001,22(4):22-24.
- [3] 张 彪. 柴-燃联合动力装置(CODOG)的仿真与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学动力工程系,1997.
- [4] 卢成委. 船用大功率离合器结合过程仿真研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2003.
- [5] 王 乐,黄 河. 异型柴油机双机并车中的模型设计仿真[J]. 船海工程,2010,39(5):84-87.
- [6] 苏文斗. 自动同步离合器的啮合动力学问题[J]. 热能动力工程,1989,4(6):40-46.
- [7] 田 颖,牛中毅,张正一,等. 柴-燃联合动力装置自动同步离合器动态特性实验研究[J]. 热能动力工程,2002,17(1):37-40.
- [8] 张仁兴,王明新,马 俊. 全燃动力装置特性仿真研究[J]. 燃气轮机技术,2007,20(1):43-46.
- [9] 刘文进. 划痕损伤电机轴性能的仿真分析与研究[J]. 现代制造技术与装备,2012(1):30-32.
- [10] 夏天凉,王金娥. 基于 Maplesim 的喷气织机开口机构建模与仿真[J]. 轻工机械,2011,29(2):29-32.
- [11] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真—从入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [12] 陈国钧,曾凡明. 现代轮机工程[M]. 北京:国防科技出版社,2001.
- [1] 魏军波. 船用大功率自动同步离合器实验[J]. 热能动力工程,1997,12(5):351-353.
- [2] 蒋得松,田 颖,张正一,等. CODOG 系统的三 S 离合器的一种数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报,2001,22(4):22-24.
- [3] 张 彪. 柴-燃联合动力装置(CODOG)的仿真与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学动力工程系,1997.
- [4] 卢成委. 船用大功率离合器结合过程仿真研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2003.
- [5] 王 乐,黄 河. 异型柴油机双机并车中的模型设计仿真[J]. 船海工程,2010,39(5):84-87.
- [6] 苏文斗. 自动同步离合器的啮合动力学问题[J]. 热能动力工程,1989,4(6):40-46.
- [7] 田 颖,牛中毅,张正一,等. 柴-燃联合动力装置自动同步离合器动态特性实验研究[J]. 热能动力工程,2002,17(1):37-40.
- [8] 张仁兴,王明新,马 俊. 全燃动力装置特性仿真研究[J]. 燃气轮机技术,2007,20(1):43-46.
- [9] 刘文进. 划痕损伤电机轴性能的仿真分析与研究[J]. 现代制造技术与装备,2012(1):30-32.
- [10] 夏天凉,王金娥. 基于 Maplesim 的喷气织机开口机构建模与仿真[J]. 轻工机械,2011,29(2):29-32.
- [11] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真—从入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [12] 陈国钧,曾凡明. 现代轮机工程[M]. 北京:国防科技出版社,2001.

[编辑:张 翔]

(上接第 280 页)

本研究在固定风场面积内布置前后串联的风力风机时,选择不同叶片数的风力机需要综合考虑单个风力机功率、轴承安全性和尾流速度恢复至来流速度的距离等因素,以保证处于整个风场的输出功率性能。

参考文献(References):

- [1] 李 岩. 垂直轴风力机应用及其发展前景[J]. 可再生能源,2009,27(6):118-120.
- [2] HOWELL R, QIN N, EDWARDS J, et al. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine [J]. **Renewable Energy**, 2012, 35(2):412-413.
- [3] 杨从新,巫发明,王立鹏,等. 设计参数对直叶片垂直轴风力机功率系数的影响[J]. 兰州理工大学学报,2009,35(5):47-50.
- [4] MCLAREN K, S TULLIS, ZIADA S. Measurement of high solidity vertical axis wind turbine aerodynamic loads under high vibration response conditions [J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2012, 32(7):12-26.
- [5] 赵振宙,郑 源,高玉琴. 风力机原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [6] MCLAREN K, TULLIS S, ZIADA S. Computational fluid dynamics simulation of the aerodynamics of a high solidity, small-scale vertical axis wind turbine [J]. **Wind Energy**, 2012, 15(3):349-361.
- [7] 王子云,钟星灿,喻 渝. H 型垂直轴风力机气动设计参数分析[J]. 新能源及工艺,2009(6):31-33.
- [8] CASTELLI M R, ENGLARO A, BENINI E. The darrieus wind turbine: proposal for a new performance prediction model based on CFD [J]. **Energy**, 2011, 36 (8) : 4919-4921.
- [9] 张庆麟. 风力机叶片三维气动性能的数值研究[D]. 北京:清华大学热能工程系,2007.
- [10] 王超荣,洪 滔,候海鹏. 模具液流悬浮加工区流场仿真研究[J]. 轻工机械,2011,29(3):10-12.
- [11] 徐 鹏,魏修亭,李春花. 离心泵内部流场数值模拟与性能分析[J]. 现代制造技术与装备,2012(3):72-73.
- [12] GUPTA R, BISWAS A. Computational fluid dynamics analysis of a twisted three-bladed H-Darrieus rotor [J]. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 2010, 2 (4) : 043111-043126.
- [13] 周 宇,钱炜祺,邓有奇,等. $k-\omega$ SST 两方程湍流模型中参数影响的初步分析[J]. 空气动力学学报,2010,28(2):213-214.

[编辑:张 翔]