doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.030

# 实度对直叶片垂直轴风力机风轮气动性能的影响分析\*

张立勋<sup>1</sup> 梁迎彬<sup>1</sup> 李二肖<sup>1</sup> 尉越啸<sup>1</sup> 杨 勇<sup>1,2</sup> 郭 健<sup>1</sup> (1. 哈尔滨工程大学机电工程学院,哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨瑞哈科技发展有限公司,哈尔滨 150001)

摘要:实度是直叶片垂直轴风力机设计的关键参数,对风力机气动性能起主导作用。分析并建立了垂直轴风力机 局部流场下的力学模型,研究实度与气动性能的关系;对风力机进行了数值模拟,分析了叶片的动态力学特性,并 重点研究风轮半径、弦长及叶片数量对风能利用率的影响;进行了样机实验验证了数值模拟的精度与可靠性。研 究发现:实度增加,风力机在低尖速比下的启动特性得到改善,但产生高风能利用率的有效尖速比范围变小;样机 实度为 0.628 时,2 叶片和4 叶片风轮的输出功率相当,但4 叶片风轮的输出功率比 2 叶片风轮更稳定;实度参数 对风能利用率贡献不同,弦长变化可提高风能利用率的峰值,而叶片数量的增加会降低风能利用率的峰值。 关键词:直叶片垂直轴风力机 实度 力学模型 气动性能 风能利用率 中图分类号: TK89 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)05-0169-06

# Effects Analysis of Solidity on Aerodynamic Performance of Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine

Zhang Lixun<sup>1</sup> Liang Yingbin<sup>1</sup> Li Erxiao<sup>1</sup> Wei Yuexiao<sup>1</sup> Yang Yong<sup>1,2</sup> Guo Jian<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
 2. Harbin Reha Technology Development Co., Ltd., Harbin 150001, China)

**Abstract**: Solidity is a significant design parameter for straight-bladed vertical axis wind turbine (S-VAWT) which has great impacts on aerodynamic performance. Mechanical models at local flow field were built to obtain the relationship between solidity and aerodynamic performance. Numerical investigations were implemented for the dynamic mechanical properties of blade, and efforts were devoted into the influences of radius, chord length and blade number on power coefficient. Experimental investigations were conducted to verify the accuracy and reliability of calculation results. From the results, it was concluded that, self-starting performance at low tip speed ratio was improved by increasing solidity, while the effective region of tip speed ratio to generate high power become smaller. Power coefficient of two and four supporting arms was almost the same when solidity was 0.628, but power output of four was more stable. Parameters of solidity played different role in contribution to power coefficient. Chord length had great effects on increasing the peak of power coefficient, while the blade number will reduce the power coefficient.

Key words: Straight-bladed vertical axis wind turbine Solidity Mechanical model Aerodynamic performance Power coefficient

# 引言

直叶片垂直轴风力机具有无需偏航机构、结构 简单、便于安装和维护及噪声低的优势<sup>[1~2]</sup>,已成为 水平轴风力机之后又一研究热点。旋涡模型和基于 动量理论的流管模型是广泛应用于垂直轴风力机性 能分析的气动模型,但由于垂直轴风力机周围复杂 的流场以及叶片攻角的动态变化,致使风力机的气

\*黑龙江省科技计划资助项目(TA09Q801)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCF110707)

作者简介:张立勋,教授,博士生导师,主要从事机电一体化研究,E-mail: lixunzhang2002@ yahoo. com. cn

收稿日期: 2012-04-06 修回日期: 2012-07-22

动模型尚不成熟<sup>[3~4]</sup>,垂直轴风力机缺乏有效的设 计手段。计算流体力学的发展以及 CFD 软件的成 熟,为垂直轴风力机的结构设计提供了理论依据。

风能利用率是衡量风力机气动性能的重要指标,而实度与风能利用率密切相关,风轮实度设计至关重要。国内外学者对此进行了深入研究<sup>[5~7]</sup>,但针对实度的研究还不具有普遍性,且没有考虑实度因素对气动性能的影响。

本文考虑局部风速和雷诺数对叶片气动载荷的 影响,建立风力机力学模型;进行 CFD 数值仿真,分 析低尖速比下风轮半径、弦长和叶片数量等实度因 素与叶片力学特性及气动性能的关系,并研究实度 对风能利用率的影响,以期为直叶片垂直轴风力机 结构设计提供依据。

# 1 直叶片垂直轴风力机力学模型建立

实度对直叶片垂直轴风力机流场有很大影响, 是决定气动性能好坏的关键因素之一。风轮实度被 定义为:叶片弦向纵剖面的面积之和与风力机截面 面积的比值。但是不同学者对风力机截面的理解不 同,导致实度具有不同的表达形式:Howell<sup>[6]</sup>和 Kiwata<sup>[8]</sup>将风轮周向扫略面积视为风力机截面面 积,而 Manohar<sup>[9]</sup>和 Khan<sup>[10]</sup>取风轮最大横截面积作 为风力机的截面积。本文采用后者,即将叶片数量 和弦长的乘积与风轮直径的比值定义为实度

$$\sigma = \frac{NC}{2R} \tag{1}$$

*C*——叶片弦长

式中 N——叶片数

R----风轮半径

为获得风轮实度与风力机气动性能的关系,分 析实度对风力机力学特性和气动性能的影响,研究 直叶片垂直轴风力机的流场特性很关键。垂直轴风 力机流场的局部风速为

$$V_{\theta} = \kappa_{\theta} V_{\infty} \tag{2}$$

式中 V<sub>2</sub>——无穷远处来流风速

 $\kappa_{\theta}$ ——沿圆周上的速度修正系数

应用双盘面多流管模型可获得沿圆周的速度修 正系数  $\kappa_{\theta}$  及任意方位角  $\theta$  下的局部瞬时风速  $V_{\theta}$ 。 风力机切向速度 U、局部风速  $V_{\theta}$  与有效风速  $W_{\theta}$  的 关系如图 1 所示,且直叶片垂直轴风力机局部速度 场可以表示为

$$\left(\frac{W_{\theta}}{V_{\theta}}\right)^2 = (\lambda_{\theta} + \cos\theta)^2 + \sin^2\theta \qquad (3)$$

$$W_{\theta} = V_{\theta} + U$$
 (4)  
其中  $\lambda_{\theta} = |U| / |V_{\theta}|$   
式中  $\lambda_{\theta}$ ——局部尖速比



图 1 直叶片垂直轴风力机叶片气动载荷示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aerodynamic forces exerting on blade in S-VAWT

由于局部风速的瞬态变化对叶片雷诺数 Re<sub>B</sub>产 生较大影响

$$Re_{B} = \frac{V_{\theta}C}{\nu} \sqrt{\left(\lambda_{\theta} + \cos\theta\right)^{2} + \sin^{2}\theta}$$
 (5)

式中 v----运动粘度,m<sup>2</sup>/s

最终导致作用在叶片上的气动载荷极为复杂。 叶片的瞬时气动载荷是雷诺数  $Re_{\sigma}$  和方位角  $\theta$ 的函数,则叶片升力  $F_{l}(\theta, Re, \alpha)$ 和阻力  $F_{d}(\theta, Re, \alpha)$ 的关系为

$$\tan\varphi_{\theta} = \frac{|\boldsymbol{F}_d|}{|\boldsymbol{F}_l|} = \frac{C_d}{C_l} \tag{6}$$

式中 *C<sub>l</sub>*——升力系数 *C<sub>d</sub>*——阻力系数 *φ<sub>θ</sub>*——瞬时气动升力与阻力的夹角 由图 1 可知,叶片的瞬时有效攻角 *α<sub>θ</sub>* 为

$$\tan \alpha_{\theta} = \frac{\sin \theta}{\lambda_{\theta} + \cos \theta} \tag{7}$$

单叶片上气动载荷产生的瞬时驱动力矩为

$$M_{\theta} = |\mathbf{R} \times \mathbf{F}_{p}| = F_{p} R \sin(\alpha_{\theta} - \varphi_{\theta}) \qquad (8)$$
  
式中  $F_{p}$ ——作用在叶片上的气动力

作用在叶片上的气动载荷除了可以分解为切向 力和轴向力外,同时还形成了绕叶片轴的俯仰力矩 *M<sub>p</sub>*。相比风力机的驱动力矩 *M<sub>θ</sub>*,俯仰力矩 *M<sub>p</sub>*较小 且与驱动力矩方向相反,并对叶片有效攻角产生影 响。因此,对定桨距垂直轴风力机而言,俯仰力矩被 视为干扰力矩并忽略其影响。最终,直叶片垂直轴 风力机的风能利用率 *C<sub>p</sub>*与风轮实度 σ 关系表示为

$$C_{P} = \sigma \frac{U}{V_{\infty}} \sum_{i=1}^{m} \frac{C_{\tau}}{m} \left(\frac{W_{\theta}}{V_{\theta}}\right)^{2}$$
(9)

式中 m—流管数  $C_{\tau}$ —切向力系数  $\begin{bmatrix} C_{\tau} \\ C_{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\alpha_{\theta} & -\cos\alpha_{\theta} \\ \cos\alpha_{\theta} & \sin\alpha_{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{l} \\ C_{d} \end{bmatrix}$ (10) 式中  $C_{n}$ ——轴向力系数 由式(9)可知,风能利用率是实度和尖速比的 函数,在运行环境已知的情况下,通过优化实度参数 可提高直叶片垂直轴风力机的整体性能。

# 2 CFD 模型及仿真分析

#### 2.1 CFD 模型

进行 CFD 模拟时采用 k - e RNG 模型解决高雷 诺数问题,用壁面方程方法处理低雷诺数问题,并进 行 RANS 的雷诺时均处理。计算过程中对流项采用 2 阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式;同时应用 基于压力的隐式方法,压力-速度耦合以及标准壁面 方程的方法研究叶片的动态特性和大攻角下的流场 分离情况。

为保证网格质量和提高计算结果的可信度,文 中采用了滑移网格技术。根据垂直轴风力机的特 点,将风力机流场划分为静止域和旋转域,二者结合 处用滑移面连接,如图2所示。





如图 2 所示,叶片随旋转域旋转,旋转域速度即 为风力机转速。针对网格无关性问题,通过大量试 验发现当网格数量大于 10 万时,风力机的力矩系数 波动较小,且满足收敛性和计算时间等要求,此时风 力机整个流域的网格数量为 108 488 个。由于叶片 近壁面网格质量关系到计算结果的精度,对叶片近 壁面网格进行细化处理,如图 2 所示。本文对叶片 力学特性和实度与风能利用率的关系展开研究, CFD 计算时,采用 NACA0015 翼型,进口风速 10 m/s, 风力机运行尖速比为 2。

#### 2.2 叶片力学特性分析

直叶片垂直轴风力机单叶片产生的瞬时切向力 系数如图 3 所示。 $C_{\tau} - \theta$ 曲线表明:在风轮上盘面 方位角 80°附近获得切向力峰值,上盘面(0°  $\leq \theta \leq$ 180°)对风力机运转贡献较大。这是因为上盘面风 速比下盘面(180°  $< \theta \leq$  360°)高,且风能大部分转换 为机械能;上盘面流体很少或不发生分离,涡流损失 小,气动力大部分转换为驱动力;而下盘面流线变化 复杂,且旋涡脱落范围扩大以及叶片间的相互作用 加剧导致下盘面切向力变化剧烈,从而使得上盘面 切向力优于下盘面。



图4为单叶片的轴向力系数。由图4可知,轴 向力系数在0°~180°为负值,在180°~360°内为正 值,即风轮上盘面轴向力表现为拉力,下盘面表现为 压力。这是因为翼型压力面(迎风面)和吸力面间 存在较大负压差,产生的气动力由吸力面指向压力 面,使得叶片具有向压力面运动的趋势,即为拉力; 而当进入下盘面后,压力面与吸力面互换,在压差作 用下叶片依旧向压力面方向运动,即产生了压力。



由  $C_n - \theta$  曲线可知,风力机上盘面产生较大的 轴向力,而下盘面相对较小。由于上盘面风速大,翼 型表面压差大,产生的轴向拉力也较大,而下盘面风 速小且翼型表面压差小,故轴向力小。相对叶片初 始位置(轴向力为零),上盘面轴向力系数近似正弦 曲线变化,由式(10)可知,风轮上盘面的轴向力主 要由气动阻力产生。

图 5 为单叶片上的俯仰力矩曲线。由图 5 可 知,在方位角 110°附近叶片承受的俯仰力矩最大, 且俯仰力矩方向与风力机旋转方向相反。风力机在 80°附近达到最大风能利用率之后,流体开始失速且 压力梯度增大,导致俯仰力矩剧烈变化。 $M_p - \theta$ 曲 线表明:在风力机逆风区(方位角为 – 90° <  $\theta$  < 90°),俯仰力矩为负值,且波动较小;在风力机顺风 区(方位角为 90° <  $\theta$  < 270°),俯仰力矩波动较大, 出现局部正值俯仰力矩。这是由叶片攻角变化率取 反导致的,如图6所示。









图 6 为直叶片垂直轴风力机单个叶片有效攻角 的变化情况。在逆风区叶片有效攻角逐渐增大,由 于还没达到失速角,升力系数几乎呈比例增加;在顺 风区有效攻角大部分是减少的,虽然在 90° < θ < 110°小范围内有效攻角增大,并在方位角 110°附近 达到失速角,此时风力机在该区域内发生了动态失 速,翼型表面压差增大,俯仰力矩急剧增大。由于存 在攻角迟滞现象,风力机失速后不能立刻回到失速 前的流场,一段时间后才能脱离失速状态。

#### 2.3 实度对风能利用率的影响

风轮实度是垂直轴风力机设计的重要参数之 一,风轮实度参数(半径、弦长、叶片数)的选取对直 叶片垂直轴风力机的气动性能起到了决定性作用, 本节将重点研究风轮实度与风能利用率的关系。

# 2.3.1 半径对风能利用率的影响

图 7 为风轮半径与风能利用率的关系。由图 7 可知,随着风轮半径的增加实度减小,脱落旋涡及叶 片间的相互干扰降低,风能利用率提高且有效工作 范围变宽,即小实度垂直轴风力机可以工作在较宽





在弦长 C 确定的情况下,虽然风轮半径越大风 能利用率越高且工作范围越宽,但不能通过无限增 加风轮半径的方法来提高风能利用率。因为随着风 轮半径的增加,风轮承受的载荷和制造成本等也急 剧增加,所以风轮半径的选取要适当。由于垂直轴 风力机尖速比在 3 ~ 5 范围内具有较高的风能利用 率,根据 Amet 对风力机尖速比、攻角和折合频率的 研究<sup>[11]</sup>,综合考虑下弦径比 C/R 在 0.1 ~ 0.5 范围 内都可接受。

#### 2.3.2 弦长对风能利用率的影响

图 8 为弦长对风能利用率的影响。由图 8 发现,随着弦长的增加风能利用率曲线左移,产生较大风能利用率的有效尖速比范围变小。由动态失速理论可知:弦长增加,折合频率变大,若风力机仍保持先前尖速比运行则叶片有效攻角增大,发生动态失速的方位角范围增加。为适应攻角增加,减少动态失速发生的区域,风力机会向低尖速比方向移动;由于弦长增加使得攻角增大,适合在大攻角下工作的尖速比区间变窄,从而导致风力机获得较高风能利用率的有效尖速比区间变小。

如图 8 所示,随着弦长的增加风能利用率的峰 值有所提高,但是增加幅度有限;如果弦长进一步增 大,峰值反而下降。由式(9)可知,弦长增加风能利 用率会提高,同时叶片瞬时雷诺数也增大(见



图 8 叶片弦长与风力机风能利用率的关系曲线 Fig. 8 Curves of relationship between blade chord length and power coefficient of S-VAWT

式(5))。当雷诺数达到一定程度时升力系数变化不 大,风能利用率的提高也就受限;若弦长继续增大, 叶片间的相互干扰现象严重,且叶片尾流以及旋涡 的影响加剧,风能以热能形式耗散掉,风能利用率降 低。

# 2.3.3 叶片数对风能利用率的影响

图9为叶片数对风能利用率的影响。由图9可 知,叶片数量增加,风能利用率曲线左移,风力机的 启动性能有所提高;但风能利用率的峰值降低,且产 生较高风能利用率的有效尖速比范围变窄。这是因 为随着叶片数量的增加,风轮实度对流场的干扰增 大,单个叶片产生的瞬时力矩减小,风能利用率降 低;若转速也增大,大实度风力机驱动力矩衰减幅度 加快,导致风力机有效尖速比区间左移且范围变小。



and power coefficient of S-VAWT

CFD 仿真表明:风轮实度增加,风能利用率向 低尖速比方向移动,垂直轴风力机的启动性能提高, 但产生较高风能利用率的有效尖速比范围变小。风 能利用率峰值的变化则取决于半径、弦长和叶片数 量等实度参数的贡献大小。

# 3 实验

采用  $k - \varepsilon$  RNG 湍流模型对文献[12] 提到的样 机进行数值模拟,以验证 CFD 仿真的精度和可信 度。经过大量的网格调试,当壁面网格为 0.1 mm、 时间步长为 0.5°时,获得了比较满意的结果,如 图 10和图 11 所示。



simulation and experimental data

由图 10 可知,切向力计算结果与实验数据趋势 基本一致,表明 CFD 可以较好地预测叶片切向力变 化。*C<sub>τ</sub>* - θ 曲线表明:风轮上盘面仿真结果与实验 数据吻合较好,但存在相对滞后,这可能是由 RNG 模型对动态失速区域和旋涡预测偏大导致的,使得 仿真结果相比实验值偏低。此外,由于尾流和脱落 涡旋对下盘面流场的影响增大,对涡旋预测的影响 加剧,使得风轮下盘面的结果与实验数据差别较大。



由图 11 可知,轴向力的仿真结果与实验数据具 有很好的一致性。但在获得切向力系数峰值的方位 角附近出现大量旋涡脱落,叶片动态失速严重,所以 在风轮上盘面 80°方位角附近的轴向力系数与实验 数据差别较大。

为验证实度对直叶片垂直轴风力机气动性能的 影响,进行了样机启动力矩和发电实验,样机如 图 12所示。样机风轮半径 0.557 m,有 4 组风轮支 撑梁且每个风轮支撑梁上可以安装 1~2 组叶片,叶 片弦长分为 350 mm 和 175 mm。采用不同弦长和叶 片数量进行启动力矩实验,样机参数如表 1 所示。



图 12 直叶片垂直轴风力机样机 Fig. 12 Prototype of S-VAWT

样机启动性能实验结果如图 13 所示。由 *M*-θ 曲线可知,垂直轴风力机的瞬时力矩呈现周期性变 化,且峰值个数基本上与风轮叶片数一致。叶片数 为4时,叶片弦长增加,瞬时力矩增大;但实度为 1.885时,由于实度过大,对流场产生了较大干扰,

表1 直叶片垂直轴风力机样机实验参数

Tab. 1 Experimental parameters setting of S-VAWT prototype

 实度 σ	1.257	0. 628	0. 628	0.314	1.885	0. 943
叶片数 N	4	4	2	2	4 + 4	2 + 2
弦长 C/mm	350	175	350	175	350;175	350;175

导致其瞬时力矩甚至比实度为 0.628 的实验结果还 小。当实度为 0.943 时,其在 0°~90°范围内的力矩 与实度为 0.628 的 2 叶片风轮的力矩差别较小,但 是在 90°~180°范围内力矩有了明显提高,说明增 大该区域的风轮实度可提高风力机的启动性能。此 外,叶片数量增多,瞬时力矩增大,可见风轮实度增 加,风力机启动性能有很大提高。



Fig. 13 Curves of instantaneous torque of prototype

直叶片垂直轴风力机样机输出功率曲线如 图 14所示。由P-v曲线可知:在叶片数均为4的 前提下,随着弦长的增加实度增大,样机输出功率增 加,且启动风速降低,风力机启动性能提高;对于实 验样机,当实度均为0.628时,4叶片和2叶片风轮 样机的输出功率相当,不过4叶片风轮的输出功率 更加平稳。



## 4 结论

(1)提出了考虑局部风速和雷诺数变化影响的 风力机力学模型,并进行了 CFD 数值模拟,对叶片 的力学行为和风力机的气动性能展开研究,分析并 验证了实度对气动性能的影响。

(2) 基于 k - ε RNG 模型建立的 CFD 模型,网 格数量大于 1 × 10<sup>5</sup>、壁面网格为 0.1 mm 的计算结 果可以很好地预测叶片的气动力变化趋势。

(3)风轮实度增加,风能利用率向低尖速比方 向移动,可产生较高风能利用率的有效尖速比范围 变小。

(4) 样机实度为 0.628 时,2 叶片和 4 叶片风 轮样机的输出功率相当,但 4 叶片风轮的输出功率 比 2 叶片风轮更稳定。

(5) 实度各参数对风能利用率的影响不同,风 能利用率峰值的变化取决于实度各参数变化程度。

- 参考文献
- 1 Thomas A, Lennart S. An overview of wind energy-status 2002[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(1 ~ 2): 67 ~ 128.
- 2 Dominy R G, Lunt P, Bickerdyke A, et al. Self-starting capability of a Darrieus turbines [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2007, 221(1): 111~120.
- 3 Asher I M, Drela M, Peraire J. A low order model for vertical axis wind turbines [C] // 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Chicago, Illinois, 2010.
- 4 Deglaire P, Engblom S, Ågren O, et al. Analytical solution for a single blade in vertical axis turbine motion in two-dimensions [J]. European Journal of Mechanics, B:Fluids, 2009, 28(4):506 ~ 520.
- 5 Kumar V, Paraschivoiu M, Paraschivoiu I. Low Reynolds number vertical axis wind turbine for mars [J]. Wind Engineering, 2010, 34(4):461~476.
- 6 Howell R, Qin N, Edwards J, et al. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine [J]. Renewable Energy, 2010, 35(2):412 ~ 422.
- 7 Takao M. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row [J]. Journal of Fluid and Technology, 2008, 3(3):379 ~ 386.
- 8 Kiwata T, Yamada T, Kita T, et al. Performance of a vertical axis wind turbine with variable-pitch straight blades utilizing a linkage mechanism [J]. Journal of Environment and Engineering, 2010, 5(1): 213 ~ 225.
- 9 Manohar K, Rampartap A, Ramkissoon R. Self-starting hybrid 'H' type wind turbine [C] // ASME 2007 Energy Sustainability Conference (ES2007). Long Beach, California, USA, 2007:1139~1146.
  (下转第 168 页)

能随着温度的升高而降低。在相同工艺条件下,PF 棉秆重组方材的抗弯弹性模量、抗弯强度和顺纹抗 压强度明显高于 MUF 棉秆重组方材。 重组方材的顺纹抗压强度普遍高于杉木、湿地松和 杨木;密度为0.7 g/cm<sup>3</sup>的棉秆重组方材,其力学性 能和人工林杨木的成熟材相当。

(2)和常见人工林木材的力学性能对比,棉秆

- 参考文献
- 唐帅,宋维明. 我国原木进口现状及面临的形势分析[J]. 林业经济,2012(5):34~38.
   Tang Shuai, Song Weiming. Analysis of China's timber imports status quo and its facing situation[J]. Forestry Economics, 2012
   (5):34~38. (in Chinese)
- 2 宋孝周,吴清林,傅峰,等.农作物与其剩余物制备纳米纤维素研究进展[J].农业机械学报,2011,42(11):106~112. Song Xiaozhou, Wu Qinglin, Fu Feng, et al. Research progress of nanocrystalline cellulose prepared from crops and agricultural residues[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):106~112. (in Chinese)
- 3 李兴平. 浅析农作物秸秆的综合利用[J]. 洛阳理工学院学报:自然科学版,2010,20(3):8~11. Li Xingping. Brief analysis of the comprehensive utilization of crop straw [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology:Natural Science Edition,2010,20(3):8~11. (in Chinese)
- 4 宋孝周,郭康权,冯德君,等.农作物秸秆特性及其重组材性能[J].农业工程学报,2009,25(7):180~184. Song Xiaozhou,Guo Kangquan,Feng Dejun, et al. Characteristics of crop stalks and performance of their scrimber[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(7):180~184. (in Chinese)
- 5 周定国. 农作物秸秆人造板的研究[J]. 中国工程科学,2009,11(10):115~121.

Zhou Dingguo. The development of straw-based panel[J]. Engineering Science, 2009, 11(10):115~121. (in Chinese)

- 6 Li Xianjun, Cai Zhiyong, Winandy J E, et al. Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4 662 ~ 4 666.
- 7 Tabarsa T, Jahanshahi S, Ashori A. Mechanical and physical properties of wheat straw boards bonded with a tannin modified phenol-formaldehyde adhesive[J]. Composites Part B: Engineering, 2011,42(2): 176~180.
- 8 Zhu X D, Wang F H, Liu Y. Properties of wheat-straw boards with FRW based on interface treatment [J]. Physics Procedia, 2012,32:430 ~443.
- 9 Pan Mingzhu, Zhou Dingguo, Zhou Xiaoyan, et al. Improvement of straw surface characteristics via thermomechanical and chemical treatments [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(20): 7930 ~ 7934.
- 10 鲍甫成,江泽慧,刘鹏,等. 中国主要人工林树种木材性质[M]. 北京:中国林业出版社,1998:162~206.

- 10 Khan M J, Iqbal M T, Quaicoe J E. Design considerations of a straight bladed Darrieus rotor for river current turbines [C] // 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, QC, Canada, 2006,3:1750 ~1755.
- 11 Amet E, Mitre T, Pelone C, et al. 2D numerical simulations of blade-vortex interaction in a Darrieus turbine [J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(11):1 111 031 ~ 11 110 315.
- 12 Wang L B, Zhang L, Zeng N D. A potential flow 2-D vortex panel model: applications to vertical axis straight blade tidal turbine [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(2):454 ~ 461.
- 13 李岩,田文强,冯放,等. 组合型垂直轴风力机结合角度对起动性的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(12):102~106. Li Yan, Tian Wenqiang, Feng Fang, et al. Starting performance effects of combining angle on combined type VAWT[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(12):102~106. (in Chinese)

<sup>(</sup>上接第174页)