

基于等效实度法的直叶片垂直轴风力机 风能利用系数分析

杨 帅, 王华君, 张家安, 朱鸿曦

(河北工业大学控制科学与工程学院, 天津 300310)

摘 要: 以叶素-动量理论为基础建立垂直轴风力机的矢量气动模型, 分析叶片在 360° 圆周上的静态动力学特性及在各个方位角下叶片的转矩与功率, 提出基于等效实度法的直叶片垂直轴风力机风能利用系数计算方法。借助 Matlab 对垂直轴风力机风能利用系数进行数值计算, 并通过样机对所提方法进行测试, 测试结果表明样机的实际风能利用系数与数值计算结果相接近, 由此验证所提方法的有效性。

关键词: 垂直轴风力机; 叶素-动量理论; 风能利用系数; 等效实度法

中图分类号: TK89

文献标识码: A

0 引 言

在水平轴风力发电机组为主流的风电领域中, 由垂直轴风力机构成的风力发电机组以其维护方便、成本低、噪音低仍具有一定的发展前景; 且相比水平轴风力机, 其整体受力较均匀的特点更加适合在一些特殊地形应用^[1]。当前垂直轴风力机发展的瓶颈主要有 3 个: 1) 低风速下不易自启动; 2) 风能利用率低; 3) 制动困难。另外, 当前垂直轴风力机的气动性能分析模型并不完善。

目前, 在国内外对垂直轴风力机的研究方面, 文献[5]建立新的垂直轴风力机一维流管气动性能计算方法。文献[6]采用滑移网格技术对直叶片垂直轴风力机进行非定常数值模拟, 验证了该技术对反映直叶片垂直轴风力机流场特性的有效性。文献[7]以 2 个浓缩风能装置模型为研究对象, 进行流场特性的理论分析和数值计算, 并与车载实验结果进行比较, 验证了两模型均起到浓缩风能的作用, 可有效提高风能的能流密度。文献[8]分析叶片的动态力学特性, 研究风轮半径、弦长及叶片数量对风能利用率的影响。文献[9]分析垂直轴达里厄风力机叶尖速比的选择方法和影响因素, 得出在

只考虑提高风能利用系数的情况下, 垂直轴风力机叶尖速比值应选择 4。文献[10]介绍垂直轴风力机开始发展阶段的基本气动理论。文献[11]建立垂直轴达里厄风力机的空气动力学模型, 并分析影响其气动性能的因素。文献[12]使用有限元分析建立垂直轴达里厄风力机的涡流模型。文献[13]基于达里厄理论对垂直轴风力机作详细气动分析与结构设计。文献[14]验证将 Savonius 风轮与直线翼垂直轴风力机相结合的方法对于改善直线翼垂直轴风力机起动性的有效性。文献[15]建立小容量直叶片垂直轴风力机翼型的受力分析模型与理想翼型的分析模型。

本文基于叶素-动量理论建立垂直轴风力机的矢量气动数学模型, 分别将垂直轴风力机风轮迎风侧与背风侧的周期性的变实度与来流风作用于水平轴风力机风轮前后的定实度作等效, 来实现垂直轴风力机风能利用系数的分析。

1 叶素气动性能分析

升力型风轮相比于阻力型风轮有着气动性能高效、布置合理等优点, 是当今垂直轴风力机发展领域的主流风轮, 有望广泛应用于并网发电的大型

垂直轴风力机上。本文在此针对升力型且叶片截面为对称翼型结构的风轮开展气动分析。

选取风轮半径 r 处一长度为 dr 、弦长为 c 的叶素, 由于叶素 dr 为微元体, 面积可近似为弦长与叶素长度的乘积, 即 $dS = c \cdot dr$ 。假设气流通过风轮时的轴向风速为 v , 风轮角速度为 ω , 风轮转速 $u = \omega r$, 则气流相对于转动叶片的相对速度 $w = v + u$ 。叶素在相对速度为 w 的气流下受到一个方向为斜向上、大小为 dF 的气动力作用, dF 可沿 w 垂直与平行方向分解为大小为 dL 和 dD 的升力与阻力, 如式(1)、式(2)所示:

$$dL = \frac{1}{2} \rho C_l \omega^2 ds \quad (1)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho C_d \omega^2 ds \quad (2)$$

式中, C_l 、 C_d ——叶片的升力系数和阻力系数; ρ ——空气密度常数; s ——叶素的横截面积。

由升力与阻力可得气动力产生的沿风向的推力 dF 以及作用在转子轴上的力矩 dT , 如式(3)、式(4)所示:

$$dF = dL \cdot \sin \varphi + dD \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$dT = r(dL \cdot \sin \varphi - dD \cdot \cos \varphi) \quad (4)$$

式中, φ ——叶片桨距角 β 与攻角 α 之和。

对定桨距垂直轴风力机而言, 桨距角 β 为零。力矩仅与相对风速与叶片弦长所夹的攻角有关。如图1所示, 当叶片处于迎风侧时, 将风速 v 正交分解为平行于叶轮转速 v_r 与垂直于叶轮转速 v_r , 可得攻角 α 的正切值, 如式(5)所示:

$$\tan \alpha = v_r / (u + v_r) = v \cdot \sin \theta / (v \cdot \cos \theta + u) \quad (5)$$

式中, θ ——方位角。

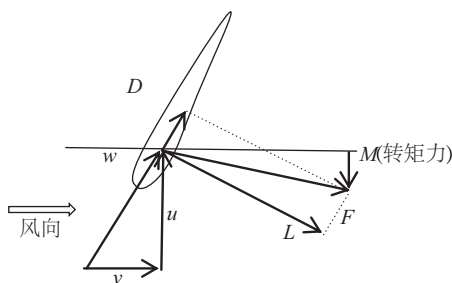


图1 迎风侧叶素受力分析图

Fig. 1 Stress analysis diagram of blade element on windward side

同理, 可分析风轮在背风侧时工况, 如图2所示。在式(5)中, 分式的分子、分母同时除以风速 v ,

且定义叶尖速比 $\lambda = u/v$, 则可得攻角 α 的表达式, 如式(6)所示:

$$\alpha = \arctan[\sin \theta / (\cos \theta + \lambda)] \quad (6)$$

根据各个方位角下所得的攻角值拟合升力系数以及阻力系数^[2], 如式(7)~式(9)所示:

$$C_l = 0.0012\alpha^2 + 0.0533\alpha + 0.3, \alpha \leq 0 \quad (7)$$

$$C_l = -0.0018\alpha^2 + 0.0801\alpha + 0.3, \alpha \geq 0 \quad (8)$$

$$C_d = 0.0002\alpha^2 + 0.05 \quad (9)$$

并结合升力系数与阻力系数定义平行于叶素弦长方向的李连塞尔空气动力学系数, 如式(10)所示:

$$C_i = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha \quad (10)$$

通过对叶素的气动性能分析, 得出叶素的攻角关于方位角与叶尖速比的方程, 然后将攻角作为变量拟合出叶素的升力系数与阻力系数。并结合以上3个参数定义叶素的李连塞尔空气动力学系数, 其作为下文叶片转矩计算的重要参数, 是风能利用系数模型计算的基础。

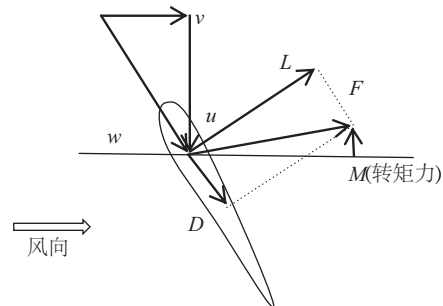


图2 背风侧叶素受力分析图

Fig. 2 Stress analysis diagram of blade element on leeward side

2 垂直轴风力机 C_p 值计算模型

与水平轴风力机一致, 垂直轴风力机的风能利用系数定义为: 风轮吸收来流风转化为风轮旋转的机械功率与风功率的比值。如图3所示, 将风轮圆周角 2π 无限等分(图中仅选取部分位置), 计算各方位角下叶素吸收功率之和作为叶素旋转一周的总功率。

与水平轴风力机的叶片不同, 垂直轴风力机叶片的叶素均相同, 即叶片吸收的风功率为叶素吸收的风功率在叶片长度上的积分值。并结合动量定理、动量矩定理与上文定义的李连塞尔空气动力学系数, 求出各位置叶片的转矩与功率, 如式(11)、式(12)所示:

$$M = \int_0^l 0.5 \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c \cdot c_i \cdot r dx \quad (11)$$

$$P = M \cdot \omega \quad (12)$$

式中, l ——叶片长度。

计算作用于风力机前的风功率, 如式(13)~式(15)所示:

$$P_{wind} = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (13)$$

$$A = \pi \cdot L \cdot l \quad (14)$$

$$L = \int_0^{180^\circ} c \cdot \sin x dx \quad (15)$$

A 为风分别经过风轮迎风侧与背风侧的扫略面积之和, 上文提到将风轮圆周长 2π 无限等分, 每个方位角位置均选取一个叶素, 所以风经过风轮的扫略面积的计算方法为所有叶素在风轮圆周上的周长之和与叶片长度的乘积。 L 为风经过风轮的扫略直径, 即在迎风侧选取的各个方位角下的叶素在风轮垂直直径的投影之和, 所以各方位角下的叶素在风轮圆周上的周长之和可以表示为 $\pi \cdot L$ 。

结合风轮功率与风功率定义垂直轴风力机的风能利用系数如式(16)所示:

$$C_p = P/P_{wind} \quad (16)$$

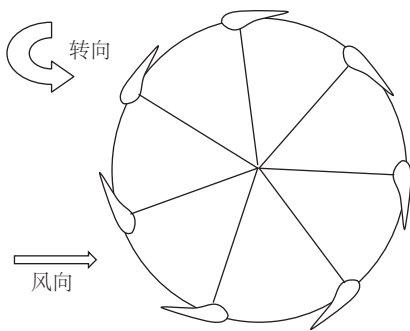


图3 风轮圆周上风速与受力分析图

Fig. 3 Wind speed and force analysis diagram of wind wheel circumference

3 等效实度法

风轮实度是指叶片在风轮旋转平面上投影面积的总和与风轮扫掠面积的比值^[3]。实度是衡量风力机气动性能好坏的重要指标, 其大小直接决定着风轮捕获风能的多少, 而不同的风能捕获量使得不同风力机风能利用系数的不同, 下面通过比较水平轴风轮与垂直轴风轮的实度差异分析两种风力机风能利用率的差异。如图4所示, 将水平轴风轮与垂直轴风轮放置于一个正六面体模块中, 二者风轮

的各项参数均相同。水平轴风力机旋转一周风轮在其投影面上的实度保持不变, 而对于垂直轴风力机, 其风轮在其投影上的实度处于不断变化中。

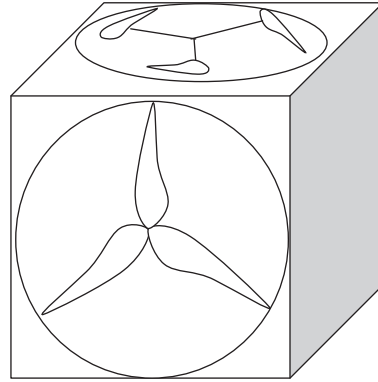


图4 2种风轮模块图

Fig. 4 Module diagram of two kinds of wind wheel

如图5所示, 风轮中各叶片处于该位置时, 风轮实度值的计算结果最大, 如式(17)所示:

$$\sigma_{max} = (c \times \sin 30^\circ + c \times \sin 30^\circ) \div 2r = \frac{c}{r} \quad (17)$$

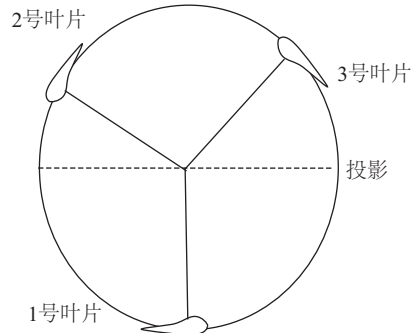


图5 最大风轮实度位置图

Fig. 5 Location diagram of maximum solidity of wind wheel

当风轮转过实度最大位置后, 实度开始减小但各叶片在风轮圆周的垂直直径方向上的投影面没有重叠。如图6中风轮所在的位置, 各叶片在垂直直径上的投影开始有重叠。在该位置, 1、2号叶片的前缘在风轮扫掠面上的投影相交。设相对于最大风轮实度位置的旋转角度为 ψ , 根据风轮内部三角形的投影关系推出其在风轮内部满足的方程, 如式(18)所示:

$$\begin{aligned} r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} + \psi\right) - c \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} + \psi\right) \cdot \frac{3}{4} = \\ c \cdot \cos\psi + r \cdot \sin\psi - \frac{1}{4} \cdot c \cdot \cos\psi \end{aligned} \quad (18)$$

可得 $\psi \approx 18.68^\circ$ 。即叶片相对于最大实度位置旋转 18.68° 时, 1、2号叶片在风轮扫掠面上的投影

开始有重叠。如图 7 中风轮所在的位置, 风轮实度值最小, 如式(19)所示:

$$\sigma_{\min} = (c \times \cos 30^\circ + c \times \cos 30^\circ) \div 2r = \frac{\sqrt{3}c}{4r} \quad (19)$$

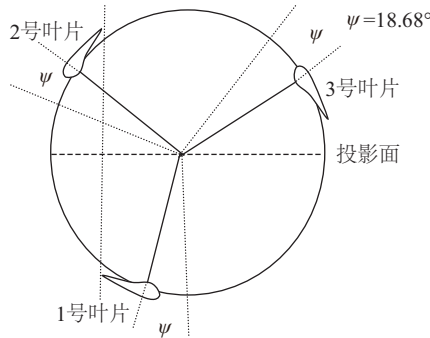


图6 过渡风轮实度位置图

Fig. 6 Location diagram of transitional solidity of wind wheel

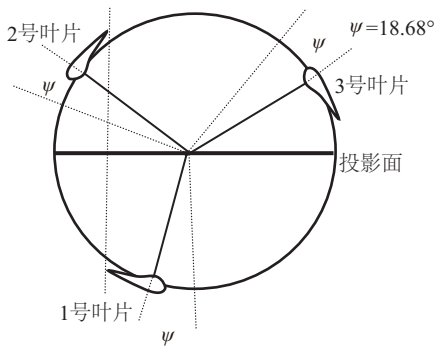


图7 最小风轮实度位置图

Fig. 7 Location diagram of minimum solidity of wind wheel

从图 5 至图 6 阶段, 任意时刻 1 号叶片的实度为 $c \cdot \cos \psi / 2r$, 2 号叶片的实度为 $c \cdot \sin(30^\circ + \psi) / 2r$, 3 号叶片的实度为 $c \cdot \sin(30^\circ - \psi) / 2r$, 推导该阶段风轮的实度方程, 如式(20)所示:

$$\frac{c \cdot \cos \psi + c \cdot \sin(30^\circ + \psi) + c \cdot \sin(30^\circ - \psi)}{2r} = \frac{c}{r} \cdot \cos \psi, \quad 0 \leq \psi \leq 18.68^\circ \quad (20)$$

从图 6~图 7 阶段, 根据风轮内三角形的线性关系, 推导出三叶片在风轮扫掠面上投影的直线长度方程, 如式(21)所示:

$$\left(\frac{\sqrt{3}}{2}r + \frac{3}{8}c \right) \cdot \cos \psi - \left(\frac{3}{2}r - \frac{\sqrt{3}}{8}c \right) \cdot \sin \psi \quad (21)$$

结合式(18)可得该阶段风轮的实度方程, 如式(22)所示:

$$\left(\frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{3}{16} \frac{c}{r} \right) \cdot \cos \psi - \left(\frac{3}{4} - \frac{\sqrt{3}}{16} \frac{c}{r} \right) \cdot \sin \psi, \quad (22)$$

$$18.68^\circ < \psi \leq 30^\circ$$

给定大型化垂直轴风力机的参数为 $c = 4 \text{ m}$, $r = 15 \text{ m}$, $c/r = 4/15$, 代入垂直轴风力机的实度方程, 如式(23)、式(24)所示:

$$\sigma = \frac{4}{15} \cos \psi, \quad 0^\circ \leq \psi \leq 18.68^\circ \quad (23)$$

$$\sigma = \left(\frac{5\sqrt{3}+1}{20} \right) \cdot \cos \psi - \left(\frac{45-\sqrt{3}}{60} \right) \cdot \sin \psi, \quad (24)$$

$$18.68^\circ < \psi \leq 30^\circ$$

且当 $\psi = 0^\circ$ 时, 最大实度 $\sigma_{\max} = 4/15$ 。当 $\psi = 30^\circ$ 时, 可得最小实度 $\sigma_{\min} = 1.732/15$ 。当旋转角度 ψ 为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时, 风轮实度又从最小升高至最大, 在 $30^\circ \sim 41.32^\circ$ 时风轮实度在二维坐标系上的曲线与 $18.68^\circ \sim 30^\circ$ 时的实度曲线关于 $x = 30^\circ$ 的直线对称。推导出该阶段实度计算方程, 如式(25)所示:

$$\sigma = \frac{4}{15} \cos(60^\circ - \psi), \quad 30^\circ < \psi \leq 41.32^\circ \quad (25)$$

同理在 $41.32^\circ \sim 60^\circ$ 时风轮实度在二维坐标系上的曲线与 $0^\circ \sim 18.68^\circ$ 时的实度曲线也关于 $x = 30^\circ$ 的直线对称。推导出该阶段实度计算方程, 如式(26)所示:

$$\sigma = \left(\frac{5\sqrt{3}+1}{20} \right) \cdot \cos(60^\circ - \psi) - \left(\frac{45-\sqrt{3}}{60} \right) \cdot \sin(60^\circ - \psi), \quad 41.32^\circ < \psi \leq 60^\circ \quad (26)$$

由各阶段的实度方程可得风轮上风向的实度变化曲线, 如图 8 所示。

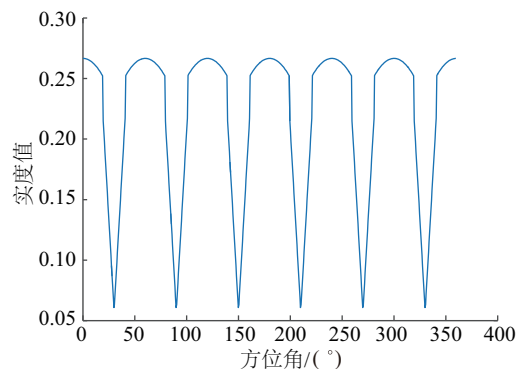


图8 上风向实度变化曲线

Fig. 8 Curve of varying solidity of upwind

由于本文所提出的方法是将垂直轴风力机与水平轴风力机等效,所以参考大型化水平轴风力机选定垂直轴风力机的设计参数:风轮的设计风速 $v_{up}=10\text{ m/s}$, 风轮转速 $n=15\text{ r/min}$, 风轮半径 $r=15\text{ m}$, 风轮高度 $l=30\text{ m}$ 。且由贝茨理论可知,在不考虑尾流因素影响的条件下,风力机达到最大风能利用率时风轮上下风向风速的轴向诱导因子为 $1/3$,所以可得风轮下风向风速 $v_{down}=6.7\text{ m/s}$, 风轮由上风向运动至下风向所需要时间为 $t=30\text{ m}/10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}=3\text{ s}$, 则每秒风轮转速为 $15\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}/60=0.25\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$, 3 s 后风轮旋转的转数为 $0.25\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}\cdot3\text{ s}=0.75\text{ r}$ 。可得风轮内叶片从上风向运动至下风向需旋转 270° , 由于上风向实度曲线的周期为 60° , 所以下风向实度曲线图相比于上风向实度曲线滞后 30° , 如图 9 所示。

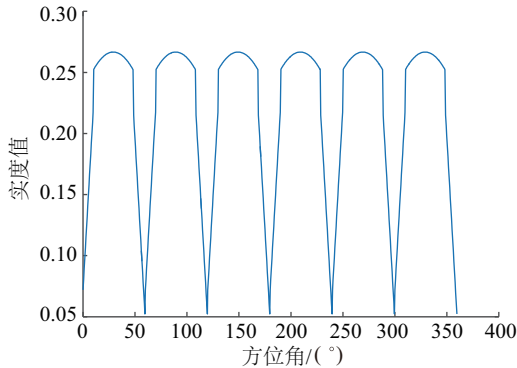


图9 下风向实度变化曲线

Fig. 9 Curve of varying solidity of downwind

将垂直轴风轮的参数转化为对称翼型的水平轴风轮的参数,其实度的计算公式为 $\sigma=0.5\cdot 15\text{ m}\cdot 4\text{ m}\cdot 3/\pi\cdot 15\text{ m}\cdot 15\text{ m}=0.125$, 且在一个周期内保持不变。已知流过风轮的风能为 $0.5\rho A v^3$, 垂直轴风轮上风向的风能为 $0.5\rho A v_{up}^3$, 下风向的风能为 $0.5\rho A v_{down}^3$, 流过水平轴风轮的风能为 $0.5\rho A v_{up}^3$ 。选择 $0^\circ\sim 120^\circ$ 内实度的变化进行计算, 对于垂直轴风轮而言, $0^\circ\sim 60^\circ$ 实度变化曲线为上风向风速作用的区域, $60^\circ\sim 120^\circ$ 实度变化曲线为下风向风速作用的区域。对于水平轴风轮而言, 忽略尾流效应的影响, 只由上风向风速作用在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 实度变化曲线上。

使用积分法计算垂直轴风轮上风向实度变化曲线与坐标轴围成的面积, 如式(27)所示:

$$\int_0^{18.68^\circ} \frac{4}{15} \cdot \cos \psi d\psi + \int_{18.68^\circ}^{30^\circ} \left(\frac{5\sqrt{3}+1}{20} \right) \cdot \cos \psi d\psi - \int_{18.68^\circ}^{30^\circ} \left(\frac{45-\sqrt{3}}{60} \right) \cdot \sin \psi d\psi = 1.63 \quad (27)$$

下风向实度曲线与坐标轴围成的面积与上风向相同。所以在单个周期内垂直轴风力机风轮实度为 $1.63\times 2=3.26$ 。

同理, 使用积分法计算水平轴风轮所占面积可得水平轴风力机风轮实度, 如式(28)所示:

$$\int_0^{30^\circ} 0.125 \cdot d\psi = 3.75 \quad (28)$$

在图 4 所示的模块中, 计算各尺寸均相同的 2 种风轮的扫风面积, 如式(29)、式(30)所示:

$$A_H = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 15\text{ m} \cdot 15\text{ m} = 706.5\text{ m}^2 \quad (29)$$

式中, R ——升力型风轮半径。

$$A_V = D \cdot L = 30\text{ m} \cdot 30\text{ m} = 900\text{ m}^2 \quad (30)$$

由贝兹极限可知, 在不考虑尾流影响的理想条件下, 水平轴风力机的最大风能利用系数为 0.593, 分别计算垂直轴风轮与水平轴风轮的来流风能与实度的比值, 再将两比值的乘积乘以水平轴风力机的最大风能利用系数推导垂直轴风力机的最大风能利用系数, 如式(31)所示:

$$C_{PV} = 0.593 \cdot 0.5\rho A_V (v_{up}^3 + v_{down}^3) / (2 \cdot 0.5\rho A_H v_{up}^3) \cdot 3.26/3.75 \approx 0.427 \quad (31)$$

4 数值计算分析与样机试验

4.1 数值计算分析

借助 Matlab 软件将叶素-动量理论模型中的式(7)~式(12)编写成计算程序^[3], 可得风轮旋转一周各方位角下的李连塞尔空气动力系数 C_i 值曲线图, 如图 10 所示。

同理, 可得风轮旋转一周各方位角下的功率曲线图, 如图 11 所示。

将各方位角下风轮吸收的功率进行矢量叠加可得风轮旋转的机械功率为 28.7 MW, 由垂直轴风力机风能利用系数模型中式(13)可得作用于风力机前的风功率为 89.1 MW, 由式(16)求出风力机的风能利用系数, 如式(32)所示:

$$C_p = P/P_{wind} = 28.7/89.1 = 0.322 \quad (32)$$

当前风电领域中的主流机型水平轴风力机的理想风能利用系数为 0.593, 而大量研究表明水平轴风力机的风能利用系数的仿真结果约为 0.5, 而这结果相差 0.093。对于本文研究的垂直轴风力机而言, 理想风能利用系数与仿真结果相差约 0.1, 与水平轴风力机的结论基本一致。

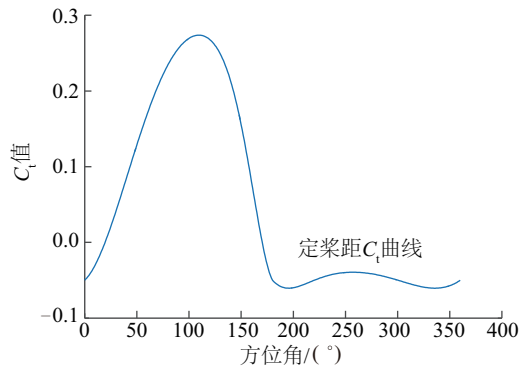


图 10 垂直轴风力机李连塞尔空气动力系数曲线

Fig. 10 Curve of aerodynamic coefficient of Lil ienthal of vertical axis wind turbine

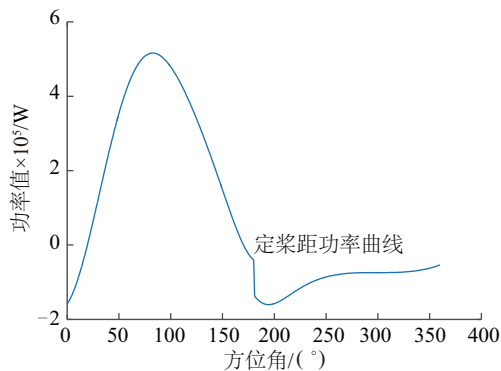


图 11 垂直轴风力机功率曲线

Fig. 11 Curve of power of vertical axis wind turbine

4.2 数值计算分析

为进一步验证风能利用系数理论分析与仿真分析的正确性, 在实验室中的模拟自然风资源条件下进行实验样机的测试, 实验样机如图 12 所示。由实验数据可得, 在较小的风速条件下垂直轴风力机吸收的风能大部分转化为风力机旋转的机械能与风力机自身存在的机械损耗, 很少一部分转化为电机的电磁功率, 所以该实验忽略电机的电磁功率, 仅通过垂直轴风轮旋转的机械功率值作为衡量风力机捕获风能能力的标准。通过实测风力机的转速值并结合式(7)~式(12)计算垂直轴风轮吸收

的总功率。测出升力型风轮前方实验风源的平均风速并结合式(13)计算来流风功率。最后通过式(16)计算实验样机的风能利用系数。

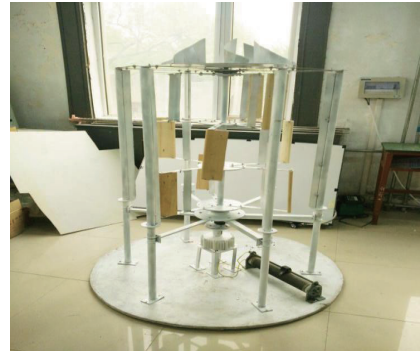


图 12 垂直轴风力机实验图

Fig. 12 Experiment diagram of vertical axis wind turbine

实验条件及实验数据测试过程: 选择额定风速为 3 m/s 的实验风源、型号为 DM6234P+ 的激光转速表与型号为 Digital Anemometer AS836 的风速仪。将实验样机置于风源正前方一段距离, 并将风源与实验样机之间的来流风通道的两侧放置两块挡板, 使得来流风均匀的通过通道并到达实验样机上, 减少因来流风向四周扩散引起的计算误差。由于需要计算升力型风轮吸收风能并转化为旋转机械能的能力, 在升力型风轮前方选取 6 点使用风速仪分别测量瞬时风速, 如图 13 所示。



图 13 风速测试图

Fig. 13 Diagram of wind speed

对风力机前已选定各点的风速测试结果详见表 1。对选取的 6 点的瞬时速度求取平均值 $v_L \approx 1.2$ m/s。通过风速实验的测试结果可知, 额定风速为 3 m/s 的风源到达实验样机前各点的速度大小不同且有一定比例的折减误差, 所以使用求得的平均值 $v_L \approx 1.2$ m/s 作为计算风功率的依据。

表 1 平均风速测量

Table 1 Measurement of average wind speed

不同位置 编号	瞬时风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	不同位置 编号	瞬时风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	2.5	4	1.2
2	1.6	5	0.8
3	0.5	6	0.6

当到达风力机前的风速趋于稳定后,在风力机的转轴上粘贴一块黑色的贴纸,每当风轮旋转一周使用转速表的激光感应器对准黑色贴纸记录一次。共分为 5 组测量实验样机风轮每分钟内的转速,如图 14 所示。



图 14 垂直轴风力机转速测试图

Fig. 14 Test diagram of rotation rate wind speed of vertical axis wind turbine

各组实验风轮转速的测试结果见表 2。可得实验样机风轮的实际平均转速 $r \approx 58.7 \text{ r/min}$ 。

表 2 风轮转速测量

Table 2 Measurement of rotational speed of wind wheel

实验编号	风轮转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
1	60.5
2	57.9
3	58.2
4	57.3
5	59.5

对上文参照大型水平轴风力机选定的垂直轴风力机的叶片弦长、风轮直径与风轮高度等设计参数等比例缩小选定实验样机的设计参数:升力型风轮半径 $R=0.33 \text{ m}$,风轮的整体高度为 0.9 m ,其中升力型风轮高度 $l=0.6 \text{ m}$,底部支架的高度为 0.3 m ,升力型风轮叶片弦长 $c=0.09 \text{ m}$ 。将实验样机的测量数

据与设计参数均导入上文 Matlab 仿真验证与分析部分由式(7)~式(12)编写的计算程序中,得出实验样机在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 各方位角下风轮吸收的功率曲线如图 15 所示,且实验样机功率曲线的变化趋势与如图 11 所示的借助 Matlab 软件计算所得功率曲线的变化趋势基本一致。

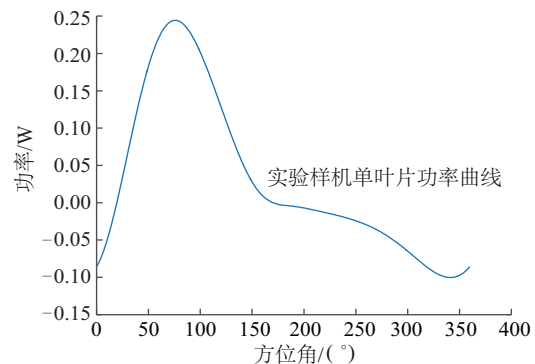


图 15 实验样机功率曲线

Fig. 15 Curve of power of experimental prototype

将各方位角下风轮吸收的功率进行矢量叠加可得风轮旋转的机械功率为 10.07 W ,由于风力机顶端的阻力型风轮只起到提高启动转矩的作用,而升力型风轮的作用为吸收风能并转化为机械能。由于实验风源与实验样机间的相隔距离导致到达实验样机前的风速相比于实验风源的额定风速有一定比例的折减,所以测量升力型风轮前端扫略面积上风速的平均值 $v_L \approx 1.2 \text{ m/s}$,将其代入垂直轴风力机风能利用系数模型中式(13)并乘以升力型风轮所占整体实验样机的比例因子可得作用于风力机前的风功率为 32.6 W ,再通过式(24)求出实验样机的风能利用系数,如式(33)所示:

$$C_p = P/P_{\text{wind}} = 10.07/32.6 = 0.309 \quad (33)$$

对比式(32)与式(33)的计算结果可知,实验样机的实测结果相比于大型垂直轴风力机风能利用系数的仿真结果有一定程度的降低,但由于选定的大型垂直轴风力机与实验样机之间叶尖速比的轻微差异、风源偏心力导致风速分布的不均匀以及叶片的尾流影响等因素,使得垂直轴风力机风能利用系数实验测试的结果相比于仿真分析的结果略有降低。

5 结 论

本文推导出垂直轴风轮旋转一周的实度计算

方程并拟合 360° 圆周下的实度变化曲线。提出一种新型的用于计算垂直轴风力机风能利用系数的等效实度法。并借助 Matlab 软件进行数值计算: 在选定垂直轴风轮弦长与半径之比为 $4/15$ 的条件下垂直轴风力机在理想条件下的风能利用系数约为 0.427 。通过对叶素-动量理论的适当简化建立了垂直轴风力机风能利用系数模型, 参照水平轴风力机将垂直轴风力机大型化并给定设计参数, 通过 Matlab 软件仿真分析得出大型化垂直轴风力机的风能利用系数为 0.322 。本文垂直轴风力机理想条件下的风能利用系数与仿真结果的差值为 0.105 , 与当今风电领域内水平轴风力机理想风能利用系数与仿真结果的差值 0.093 基本一致。且在实验室中对实验样机进行测试并结合垂直轴风力机风能利用系数模型得出实验样机的风能利用系数为 0.309 , 由于选定的大型垂直轴风力机与实验样机之间叶尖速比的差异、风源偏心力导致风速分布的不均匀以及叶片的尾流影响等因素, 使得垂直轴风力机风能利用系数实验测试的结果相比于仿真分析的结果略有降低。通过仿真计算与实验样机的测试验证了等效实度法计算垂直轴风力机理想条件下风能利用系数的有效性。

[参考文献]

- [1] 张洪昌, 王华君, 柴富俊. 一种层叠结构、自动变桨的垂直轴风力机 [P]. 中国: 201510306838.8, 2015-06-04.
- [1] Zhang Hongchang, Wang Huajun, Chai Fujun. A kind of automatic pitch changing vertical axis wind turbine with stepped construction and using finite element techniques [P]. China: 201510306838.8, 2015-06-04.
- [2] 梁小艳, 郭建伟, 芮晓明. 垂直轴风力机变桨距方式研究 [J]. 中国电力教育, 2007, (sup1): 110—112.
- [2] Liang Xiaoyan, Guo Jianwei, Rui Xiaoming. The research of plan on variable pitch vertical axis wind turbine [J]. China Electric Power Education, 2007, (sup1): 110—112.
- [3] 张 平. MATLAB 基础与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [3] Zhang Ping. Foundation and application of MATLAB [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2007.
- [4] 姚兴佳, 田 德. 风力发电机组设计与制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] Yao Xingjia, Tian De. Design and manufacture of wind generating set [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [5] 徐 夏, 周正贵, 邱 名. 垂直轴风力机叶轮气动性能计算 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 197—203.
- [5] Xu Xia, Zhou Zhenggui, Qiu Ming. Calculation of the aerodynamic performance of the vertical-axis wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(2): 197—203.
- [6] 杨从新, 巫发明, 张玉良. 基于滑移网格的垂直轴风力机非定常数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 98—102.
- [6] Yang Congxin, Wu Faming, Zhang Yuliang. Numerical simulation on unsteady rotated flow of a vertical axis wind turbine based on moving meshes [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 98—102.
- [7] 田 德, 姬忠涛, 韩巧丽. 浓缩风能装置内部流场模拟计算可靠性分析 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2362—2367.
- [7] Tian De, Ji Zhongtao, Han Qiaoli. Reliability analysis for internal flow field simulation of concentrated wind energy device [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2362—2367.
- [8] 张立勋. 实度对直叶片垂直轴风力机风轮气动性能的影响分析 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 170—174, 168.
- [8] Zhang Lixun. Effects analysis of solidity on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 170—174, 168.
- [9] 陈忠维. 垂直轴风力机叶尖速比分析研究 [J]. 可再生能源, 2008, 26(5): 76—79, 82.
- [9] Chen Zhongwei. Research on tip-speed ratio of vertical axis wind turbine [J]. Journal of Renewable Energy, 2008, 26(5): 76—79, 82.
- [10] Templin R J. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine [R]. N. A. E. Report LTRLA-160, 1974.
- [11] Islam M, Ting D S-K, Fartaj A, et al. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis [J]. wind Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(4): 1087—1109.
- [12] Ponta F L, Jacovkis P M. A vortex model for Darrieus turbine using finite element techniques [J]. Renewable Energy, 2001, 24(1): 1—18.

- [13] Paraschivoiu I. Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept [M/OL]. Presses inter Polytechnique, 2002.
- [14] 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.
- [14] Li Yan, Tian Wenqiang, Feng Fang, et al. Starting performance effects of combining angle on combined type VAWT [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 102—106.
- [15] Islam M, Ting D S-K, Amir F. Desirable airfoil features for smaller-capacity straight-bladed VAWT [J]. Wind Engineering, 2007, 31(3): 165—196.

ANALYSIS OF C_p VALUE OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE BASED ON EQUIVALENT SOLIDITY METHOD

Yang Shuai, Wang Huajun, Zhang Jiaan, Zhu Hongxi

(School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Wind turbine generator system of vertical axis wind turbine has the advantages of convenient maintenance, low cost and low noise, but it lacks a targeted analytical method in the C_p value. This article, which based on Blade element-momentum theory model, established the model of vector pneumatic and analyzed the blade at 360 degrees on the circumference of the static dynamic characteristics. This article also analyzed torque and power of the blades under various azimuth. And a calculation method of rotor power coefficient of the vertical axis wind turbine based on equivalent solidity method is put forward. Using Matlab to calculate the rotor power coefficient of vertical axis wind turbine, and the proposed method is verified by prototype testing, test results showed that actual rotor power coefficient of prototype is similar to the numerical results. Therefrom, The effectiveness of the proposed method is verified.

Keywords: horizontal axis wind turbine; blade element-momentum theory; rotor power coefficient; equivalent solidity method