

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.06.016

导叶对涡轮型垂直轴风力机气动性能的影响

原红红^{1,2},赵振宙¹,郑源¹,黄娟¹

(1.河海大学可再生能源发电教育部工程研究中心,江苏南京 210098;
2.国网新源山东文登抽水蓄能有限公司筹建处,山东威海 264205)

摘要:针对传统垂直轴风力机效率低的缺陷,阐述带导叶垂直轴风力机的结构优势,并分析导叶对涡轮型垂直轴风力机的作用。应用计算流体力学理论,在设计风速 12 m/s 下,采用滑移网格技术及 $k-\varepsilon$ 模型对有、无导叶两种涡轮型垂直轴风力机的气动性能进行比较。研究表明,导叶可以有效降低由于来流对逆风区叶片吸力面的直接冲击而造成的阻力扭矩,也会负面影响顺风区叶片的性能,但其负作用效果远不及在逆风区挡流降阻的正作用效果,故加导叶后风轮的性能会有很大提高。带弧线形导叶涡轮型垂直轴风力机最大风能利用系数可达 0.24,具有工作范围广、最佳尖速比大的特点。

关键词: 涡轮型垂直轴风力机;导叶;计算流体力学;气动性能

中图分类号:TK83 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)06-0560-05

Effects of guiding vanes on aerodynamic performance of vortex vertical axis wind turbine

YUAN Honghong^{1,2}, ZHAO Zhenzhou¹, ZHENG Yuan¹, HUANG Juan¹

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shandong Wendeng Pumped Storage Power Station Co., Ltd., State Grid Xinyuan Company, Weihai 264205, China)

Abstract: To overcome the problem of low efficiency of the traditional vertical axis wind turbine, the structural advantages of the wind turbine with guiding vanes are introduced and the effects of guiding vanes on the vortex vertical axis wind turbine are analyzed in detail. Based on computational fluid dynamics theory, the slippage mesh technique and the $k-\varepsilon$ model were used to compare the aerodynamic performance of the vortex vertical axis wind turbine with and without guiding vanes at a design velocity of 12 m/s. Studies have shown that the guiding vanes can effectively prevent the direct impact of the coming flow from acting on the suction section of the blade in the upwind area so as to decrease the drag torque, while the guiding vanes also negatively affect the performance of blades in the downwind area, but the positive effect of the former is more significant, so the performance of a wind turbine with guiding vanes greatly improves. The vortex vertical axis wind turbine with arc-type guiding vanes has a wider operating range, higher optimum tip speed ratio, and higher aerodynamic efficiency. The maximum wind power coefficient can reach 0.24.

Key words: vortex vertical axis wind turbine; guiding vanes; computational fluid dynamics; aerodynamic performance

优化风轮的结构参数可以提高垂直轴风力机的性能^[1-3],但提高幅度不大,且寻优工作量较大。阻力型垂直轴风力机利用顺风区叶片推力较逆风区叶片阻力大的原理来旋转,因此,降低逆风区阻力是提高垂直轴风力机效率的有效方法。

收稿日期: 2012-08-21

作者简介: 原红红(1985—),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事风力机叶片优化研究。E-mail: yuanhong268@163.com

加固定导叶的方法叶可以有效降低逆风区叶片阻力扭矩^[4-13],为此许多学者对 S 形风轮进行了加导叶研究。Deda 等^[46]为传统的 S 形风力机引入两个遮板,将其安放在气流进口一侧,并对遮板的最优长度与安放角进行了研究。Mohamed 等^[7-8]在 S 形风力机逆风侧安装一个挡板,并用 OPAL 及 ANSYS-Fluent 耦合方法对挡板的安装位置进行自动优化。曹紫胤等^[9]在 S 形风轮的四周加直线形导叶,并分析叶片数、导叶及导叶安装角对风轮性能的影响,证实加导叶后效率明显提高,且 45°~50°导叶安装角性能最佳;后在最优参数基础上将导叶改成弧线形^[10],数值研究表明,弧线形较直线形导叶的性能更好。Pope 等^[11-12]研究了带弯钩直线形固定导叶的涡轮型垂直轴风力机的性能,对不同结构参数的几何模型进行数值模拟,得出风能利用系数与这些参数之间的关系,认为此相关性可以拓展到其他几何模型,适用于其他阻力型风力机的设计。王鑫等^[13]对带直线形导叶的涡轮型垂直轴风力机进行了研究,分析有、无导叶风轮的转矩特性,结果表明,加导叶后涡轮型垂直轴风力机的对外做功性能会得到提高。以上研究均表明导叶可以改善风力机的气动性能,但改善程度与导叶形状及风轮的结构有关。

本文在以上研究的基础上对如图 1 所示的有、无导叶涡轮型垂直轴风力机进行比较,通过叶片表面压力分布及风轮内外流场分布数值分析弧线形导叶对涡轮型垂直轴风力机气动性能的影响。

1 流场模拟

1.1 风力机模型

加导叶前、后涡轮型垂直轴风力机模型如图 1 所示。无导叶风轮结构参数由初步数值优化得到:叶片数为 5,圆弧状叶片半径 $R_1=0.52\text{ m}$,内切圆半径 $R_2=0.5\text{ m}$,风轮半径 $R=1\text{ m}$,见图 1(a),与王鑫等^[13]研究的模型不同。加导叶风轮是在无导叶风轮基础上,根据 Pope 等^[12]的研究确定所加固定导叶的结构参数:导叶数为 13,安装角为 50°,风轮整体直径 $D=1.25\text{ m}$,见图 1(b)。定义风向为 X 正轴,逆时针旋转 90°为 Y 正轴,径向角 θ 为风轮轴与叶尖的连线偏离 Y 负轴的角度,代表叶片所处方位角,逆时针方向为正。

1.2 网格划分

为了减小计算区域壁面对风轮流场的影响,设置计算区域前、后边界 10 倍于风轮的直径,上、下边界 5 倍于风轮的直径。采用非定常滑移网格技术来模拟风轮旋转,对每个时间步求解流动方程。计算区域采用三角形非结构网格,网格划分如图 2 所示。

1.3 数学模型及边界条件

控制方程为二维不可压缩雷诺 Navier-Stokes 方程,包括质量守恒和动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = - \nabla P + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{F} \tag{2}$$

式中: ρ ——密度; $\mathbf{v}$ ——速度矢量; P ——流体微元体上的压力; $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ ——黏性应力张量; $\mathbf{F}$ ——外部体积力。

用标准 $k-\varepsilon$ 模型来预测湍流影响,湍动能 k 和湍动耗散率 ε 的输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{3}$$

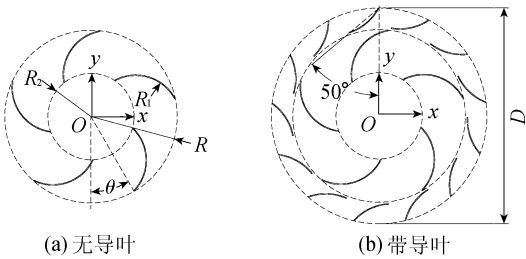


图 1 有、无导叶涡轮型垂直轴风力机结构示意图
Fig. 1 Sketch map of vortex vertical axis wind turbines with and without guiding vanes

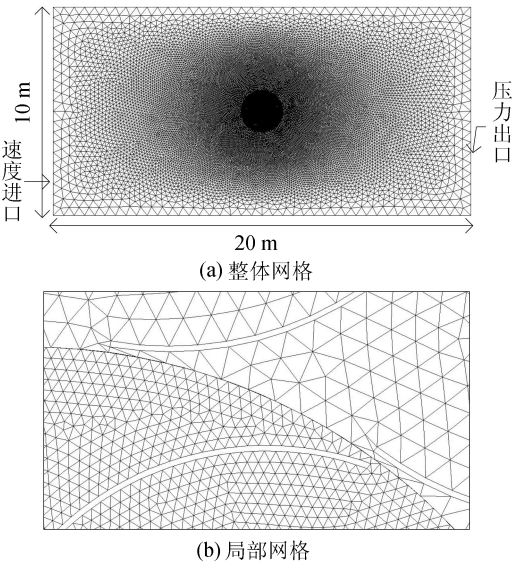


图 2 风轮网格划分

Fig. 2 Mesh discretization of wind turbine

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_E \tag{4}$$

式中： u_i ——平均时速； μ ——湍动黏度； G_k ——平均速度梯度引起的湍动能产生项； G_b ——浮力引起的湍动能产生项； Y_M ——可压湍流中脉动扩张的贡献； $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ——湍动能和耗散率对应的 Prandtl 数； $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——经验常数； S_k, S_E ——用户定义源项。

定义进口为速度入口,速度为 12 m/s,湍流强度为 10%,湍流黏度比为 1;定义出口为压力出口,回流湍流强度为 12%,回流湍流黏度比为 1^[11];固体表面采用无滑移边界条件。压力耦合方程采用 SIMPLE 算法,动量、湍动能及湍动耗散率均使用二阶迎风流散格式,压力离散格式采用 Standard。物理时间步长取 0.001 s,每个物理时间步进行 20 个伪时间步计算。经过 4 s 物理时间的计算,风力机的扭矩系数具有良好的周期性。

2 气动性能分析

2.1 风轮整体性能比较

图 3 为有、无导叶风轮的风能利用系数曲线。从图 3 可知,导叶明显改善了风轮的性能。无导叶风轮的风能利用系数整体较低,最佳叶尖速比 λ 为 0.35,最大风能利用系数仅为 0.11。加导叶后,最大风能利用系数达 0.25,最佳叶尖速比为 0.44,且有效尖速比的范围变大,尖速比可达 0.6 以上。

2.2 叶片性能比较

将叶片受力分为顺风区与逆风区。顺风区,来流对叶片的冲击产生有效旋转力矩,力矩为正值;逆风区,来流对叶片的冲击产生阻力矩,力矩为负值。逆风区使风轮的有效旋转总力矩明显下降。为了准确揭示不同径向位置叶片的性能,有、无导叶两种风轮在叶尖速比为 0.44 时叶片转矩系数曲线见图 4。

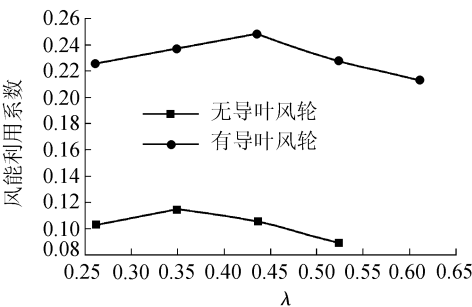


图 3 有、无导叶风轮的风能利用系数

Fig. 3 Wind power coefficients for wind turbines with and without guiding vanes

图 4 表明无导叶风轮逆风区为 160°~280°区域,有导叶风轮逆风区为 188°~260°区域。加导叶后逆风区减少 48°,且在整个逆风区转矩系数有很大提高,表明导叶对逆风区来流有阻挡作用,可降低来流对叶片冲击产生的阻力矩。有导叶风轮叶片仍存在部分逆风区,表明导叶只能降低不能完全避免阻力冲击。从图 4 还可看出,在 θ 为 100°~160°及 280°~305°的顺风区,叶片性能均有所改善,变化不大;但在 θ 为 0°~100°及 305°~360°的顺风区,导叶对叶片性能起副作用,导致有导叶风轮叶片的转矩系数小于无导叶风轮。加导叶后顺风区叶片的性能改变是由于导叶缩放气流通道并起导流作用,使风轮内部气流的流向改变所致。

图 5 为风轮某瞬时流场分布,叶片分别位于 θ 为 0°, 72°, 144°, 216°及 288°位置。

$\theta=0^\circ$ 及 72° 叶片位于加导叶起副作用的顺风区。

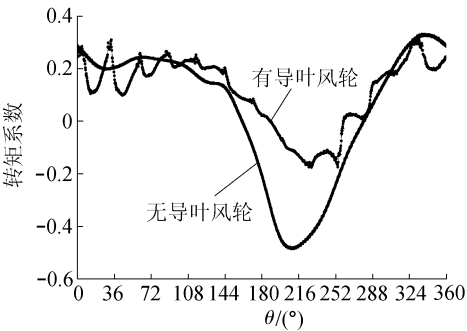


图 4 不同径向位置叶片系数

Fig. 4 Torque coefficients for blade at different radial positions

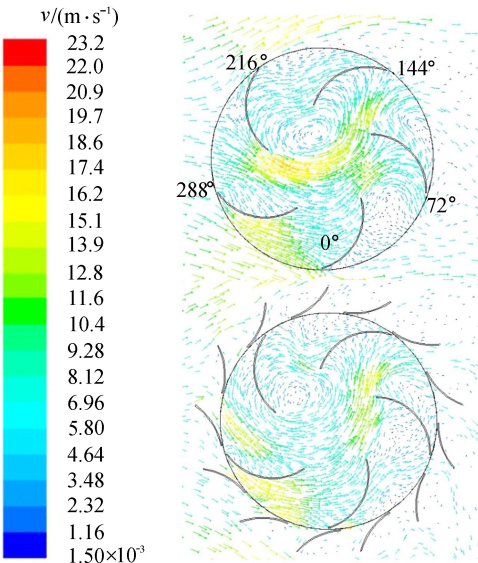


图 5 两风轮流速分布

Fig. 5 Velocity vector distribution of two VAWTs

图 6(a)(b)为 0° 及 72° 叶片上压力分布图,叶片凹面为压力面,凸面为吸力面。从图 6 (a)(b) 可知无导叶风轮叶片压力面与吸力面压差大于有导叶风轮。结合图 5 可知,对于有导叶风轮,导叶可以缩放气流通流道并起导流作用,造成 0° 叶片压力面跟吸力面的压力均增大,但压力面压力增大的幅度小于吸力面;同时导叶改变了风轮内部气流的流向,冲击到 72° 叶片压力面的气流减少,使得压力面压力减小,吸力面则相反。这些均是 θ 为 0° 及 72° 位置无导叶叶片转矩系数较大、性能较好,及 $0^\circ \sim 100^\circ$ 及 $305^\circ \sim 360^\circ$ 顺风区导叶起副作用的原因。

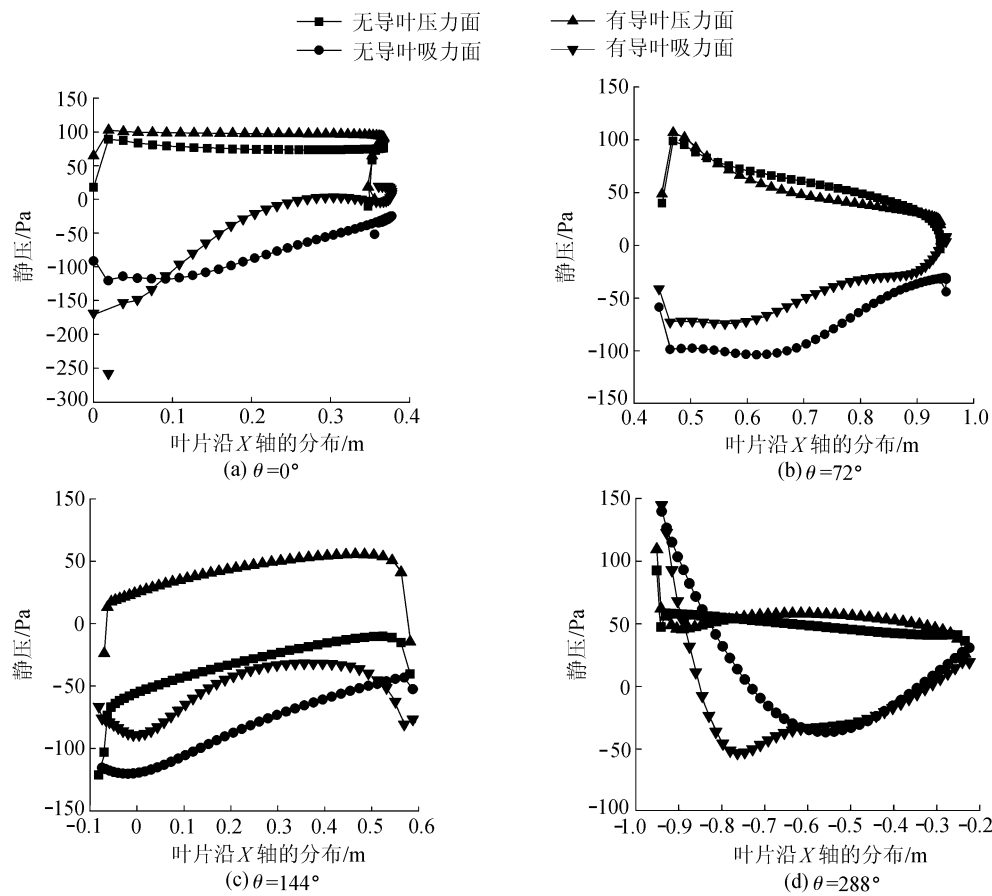


图 6 顺风区不同位置叶片上压力分布

Fig. 6 Pressure distribution on blade surface in different positions in downwind region

$\theta = 144^\circ$ 及 288° 叶片位于加导叶起正作用的顺风区。从图 5 可知, 288° 叶片位于来流进口处, 由于导叶的挡流及导流作用, 直击压力面气流增多, 使得压力面的压力增大; 靠近叶尖吸力面处则由于流道收缩速度增大, 压力下降。对于 144° 叶片, 加导叶后风轮内部流道改变, 更多的气流冲击到该叶片上, 使得 144° 叶片压力面跟吸力面 (除叶尖处) 的压力均增大, 压力面压力增大幅度大于吸力面, 叶尖处则由于导叶的挡流作用使得吸力面压力下降。图 6(c)(d) 为两位置叶片上压力分布, 表明加导叶后叶片压力面与吸力面的压差变大。这些均是 θ 为 144° 和 288° 处有导叶风轮叶片性能较好, 即 θ 为 $100^\circ \sim 160^\circ$ 及 $280^\circ \sim 305^\circ$ 顺风区有导叶风轮叶片转矩系数大于无导叶风轮的原因。

从图 5 可知, 对于位于逆风区 $\theta = 216^\circ$ 叶片, 导叶阻挡了原本冲击到叶片吸力面的气流, 使其能量耗散, 并将其导向 288° 叶片压力面, 大大减少了来流对叶片的阻力作用, 提高了叶片在逆风区的转矩系数。从图 7 可以看到加导叶后叶片的吸力面压力大大下降; 同时压力面的压力有所提高, 故压差有很大提高, 这是有导叶风轮叶片在逆风区转矩系数有很大提高的原因。

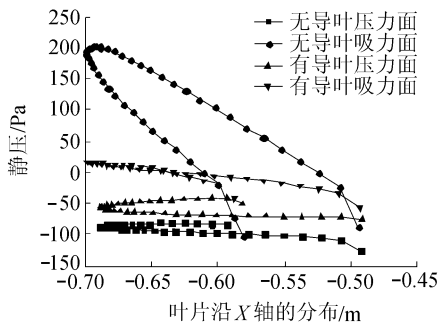


图 7 $\theta = 216^\circ$ 位置的叶片上压力分布

Fig. 7 Pressure distribution on blade surface at $\theta = 216^\circ$

根据以上分析可知,给风轮加导叶后叶片上压力面跟吸力面的压差将发生变化,在顺风区压差会因位置的不同出现增大和减小两种情况,总体为减小;在逆风区压差则增大,且增大幅度远远大于在顺风区的变化量。因此导叶的主要作用是阻挡来流对叶片的有害冲击,降低逆风区叶片吸力面上的压力;但其对顺风区叶片性能并没有很大的改善,甚至在部分顺风区出现性能下降的趋势。图4中有导叶风轮叶片仍存在一部分逆风区,表明加导叶只能降低来流在逆风区中对叶片的有害冲击,却不能完全避免这种冲击效果。

2.3 结果验证

为了验证 $k-\epsilon$ 模型及数值计算的适用性,将物理模型计算结果与 Pope 等^[12]的研究结果进行对比,见图8。数值计算结果比试验数据偏高,符合规律且两者变化趋势基本吻合,证明本文模型及数值计算结果具有较高的适用性,所得结论具有参考价值。

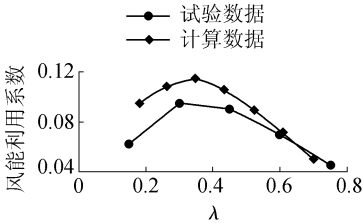


图8 试验和数值计算结果对比
Fig. 8 Comparison of experimental and numerical calculation results

3 结 论

a. 加弧线形导叶后,涡轮风力机风能利用系数明显提高,最大值可达到0.24,最大尖速比为0.44,且具有工作范围广、最佳尖速比大的特点。

b. 对于涡轮型垂直轴风轮,导叶可以有效降低由于来流对逆风区叶片吸力面直接冲击造成的阻力扭矩,却不能完全避免这种冲击效果;同时导叶也会负面影响顺风区叶片的性能,但其负作用效果远不及在逆风区挡流降阻的正作用效果。由于导叶是固定的,转动部件大幅减小,可以降低该风力机的制造成本。

参考文献:

[1] 赵振宙,郑源,徐小韵,等. 基于部分结构参数的螺旋形 Savonius 风轮性能优化[J]. 太阳能学报,2010,31(11):1480-1483. (ZHAO Zhenzhou, ZHENG Yuan, XU Xiaoyun, et al. Performance optimization of helix Savonius rotor based on part configuration parameters[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2010,31(11):1480-1483. (in Chinese))

[2] 赵振宙,郑源,周大庆,等. 基于数值模拟 Savonius 风力机性能优化研究[J]. 太阳能学报,2010,31(7):907-911. (ZHAO Zhenzhou, ZHENG Yuan, ZHOU Daqing, et al. Optimization of the performance of Savonius wind turbine based on numerical study[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2010,31(7):907-911. (in Chinese))

[3] 徐小韵,郑源,赵振宙,等. 基于计算流体动力学的 S 型风力机性能分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(3):332-336. (XU Xiaoyun, ZHENG Yuan, ZHAO Zhenzhou, et al. Evaluation of performance of Savonius rotors based on computational fluid dynamics[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2010,38(3):332-336. (in Chinese))

[4] DEDA A B, ATILGAN M. An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor [J]. Energy Conversion and Management,2008,49:3425-3432.

[5] DEDA A, ATILGAN M, OZDAMAR A. An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2008,32:1673-1678.

[6] DEDA ALTAN B, ATILGAN M. The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind turbine[J]. Renewable Energy,2010,35:821-829.

[7] MOHAMED M H, JANIGA G, PAP E, et al. Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade[J]. Energy Conversion and Management,2011,52:236-242.

[8] MOHAMED M H, JANIGA G, PAP E, et al. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade [J]. Renewable Energy,2010,35:2618-2626.

[9] 曹紫胤,黄典贵,蔡瑞忠. 适合任意风向聚能风力机的数值模拟[J]. 上海大学学报:自然科学版,2008,14(6):617-621. (CAO Ziyin, HUANG Diangui, CAI Ruizhong. Simulation of energy collection wind turbine suitable to arbitrary wind directions [J]. Journal of Shanghai University: Natural Sciences,2008,14(6):617-621. (in Chinese))

[10] 曹紫胤,黄典贵. 聚能——遮风型风力机[J]. 工程热物理学报,2008,29(6):960-962. (CAO Ziyin, HUANG Diangui. Wind turbine with wind collection; shield boards [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2008,29(6):960-962. (in Chinese))

[11] POPE K, RODRIGUES V, DOYLEA R. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine[J]. Renewable Energy,2010,35:1043-1051.

[12] POPE K, NATERER G F, DINCER L, et al. Power correlation for vertical axis wind turbines with varying geometries[J]. Energy Research,2010,35:423-435.

[13] 王鑫,童正明,王企鲲. 导流型垂直轴风力机气动特性的数值研究[J]. 上海理工大学学报,2010,32(5):423-426. (WANG Xin, TONG Zhengming, WANG Qikun. Numerical investigation on aerodynamic performance of the vertical axis wind turbine with guiding impeller[J]. University of Shanghai for Science and Technology,2010,32(5):423-426. (in Chinese))