

叶片数对 VAWT - SWS 低风速自起动性能的影响*

曲建俊¹ 许明伟¹ 梅毅¹ 李岩²

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明叶片数对自适应风速垂直轴风力机 (VAWT - SWS) 自起动性能的影响, 设计了可更换叶片个数 (2, 3, 4) 的风力机模型, 通过风洞实验获得了 3 m/s 风速下风力机的静态转矩系数随方位角变化曲线, 并与相同参数的 Darrieus 直叶片风力机 (D-风力机) 进行了对比。之后使自适应风速垂直轴风力机空载, 得到了 3 m/s 风速下其转速随时间变化曲线。实验结果表明: 自适应风速垂直轴风力机的自起动性能优于 Darrieus 直叶片风力机, 增加叶片数可使自适应风速垂直轴风力机的静态自起动性能提高, 但使动态自起动性能降低。

关键词: 垂直轴风力机 自适应风速 自起动性能 转矩 风洞实验

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2014)05-0173-06

引言

现代风力机主要分为两大类: 水平轴风力机 (Horizontal axis wind turbine, HAWT) 和垂直轴风力机 (Vertical axis wind turbine, VAWT)^[1-2]。与 HAWT 相比, VAWT 不仅叶片结构简单, 而且运行时无需对风, 因此, 越来越受到人们的重视^[3]。垂直轴风力机按其做功方式主要分为 Savonius 型风力机、Darrieus 型风力机和 Savonius - Darrieus 组合型风力机。Savonius 型风力机是一种阻力型风力机, 具有结构简单、成本低、起动转矩高等优点, 但其风能利用系数较低^[4], 国内外研究者通过优化设计参数^[5]、结构改进等方式来提高该风力机的性能^[6], 但依然无法改变其转速低的事实, 用于发电缺乏竞争力。Darrieus 型风力机是一种升力型风力机, 其质量轻、平衡性好且具有较高的风能利用系数, 但由于结构上的限制, 较难实现自起动^[7], 目前主要通过变桨距技术^[8]来提高其自起动性能, 但成本较高、不适合小型应用等缺点制约了其发展。Savonius - Darrieus 组合型风力机是将 Savonius 风力机和 Darrieus 风力机安装在同一根主轴上使用, 利用 Savonius 风力机提高 Darrieus 风力机的自起动性能^[9], 但是 Savonius 风力机的低效率使风力机的整体效率低于纯粹的 Darrieus 风力机, 而且该风力机的结构复杂, 仍处于研究阶段。

为了改善升力型垂直轴风力机起动性能, 综合 S 型风力机和 D 型风力机的优点, 提出一种自适应

风速垂直轴风力机 (Vertical axis wind turbine with self-adapting wind speed, VAWT - SWS)^[10]。本文旨在研究这种风力机的低风速自起动性能。

1 风力机原理与自起动

1.1 风力机工作原理

自适应风速垂直轴风力机的结构基于 Darrieus 直叶片垂直轴风力机设计, 明显特征是叶片由活动叶片和固定叶片组成, 可以根据风速和转速的情况自动转换工作模式, 具有良好的自起动性能和较高的风能利用系数, 其工作原理如图 1 所示。在低风速时, 顺风边的活动叶片被风吹开, 活固叶片同时产生阻力。逆风边活动叶片在风阻和离心力的双重作用下处于闭合状态, 使气流的阻力作用大大减小。在顺风边和逆风边所产生的阻力差的作用下风力机开始旋转; 高风速时, 风力机转速提高, 由于高转速所产生的离心力使活动叶片保持贴合状态, 所有的

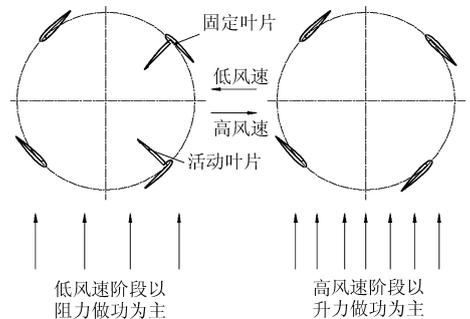


图 1 自适应风速垂直轴风力机的工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of VAWT - SWS

收稿日期: 2013 - 05 - 14 修回日期: 2013 - 12 - 02

* 国家自然科学基金资助项目 (51175104)

作者简介: 曲建俊, 教授, 博士生导师, 主要从事摩擦学功能材料、压电驱动技术及垂直轴风力发电机研究, E-mail: qujianjun@hit.edu.cn

叶片成为一个整体的翼型,风力机变成典型的升力型风力机,获得较高的风能利用率^[10-14]。

1.2 自启动定义

在本文中,利用静态自启动和动态自启动来研究风力机的自启动性能。

(1) 静态自启动

静态自启动是指风力机在静止状态下所能产生的转矩(堵转力矩),主要通过静态转矩系数 C_{ts} 来进行衡量,其定义式为

$$C_{ts} = \frac{T_s}{\frac{1}{4}\rho ADv^2} \quad (1)$$

式中 T_s ——静力矩, $N \cdot m$

ρ ——空气密度, kg/m^3

A ——风力机面积, m^2

D ——风力机直径, m

v ——来流风速, m/s

(2) 动态自启动

动态自启动是指在风力机处于空载状态下,从静止到转速稳定的过程。

风力机的自启动性能可以通过所需风速的大小来衡量,在本文所进行的实验中,风力机的最低启动风速为 $3 m/s$,按照英国蒲福风力等级表^[15],属于2级风——轻风。因此本文所有实验都在 $3 m/s$ 风速下进行。

2 实验装置

2.1 风力机与叶片参数的设置

设计的 VAWT-SWS 叶片的结构参数如图2所示,选择 NACA 0015 作为叶片的基础翼型,将固定叶片弦长设计为 $120 mm$,活动叶片弦长为 $105.45 mm$,闭合后的总弦长为 $150 mm$ 。活动叶片相对固定叶片伸出 $30 mm$,使其更容易被气流吹开。所有叶片的高度都为 $400 mm$,采用 EPP 材料,风力机的直径为 $0.7 m$ 。

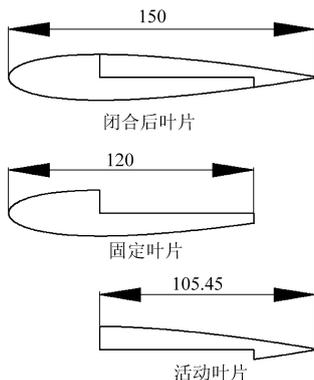


图2 叶片参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the blade parameter

将叶片数设置为2、3和4,通过增减支撑臂的数量来调节,以便研究叶片数的影响。

2.2 风洞实验装置

风洞实验在东北农业大学工程学院风能实验室的低速风洞中进行,该风洞为开口射流风洞,实验段的出风口面积为 $1 m \times 1 m$,风速范围 $1 \sim 20 m/s$ 。

2.3 测试系统与实验

图3是实验测试系统示意图。风力机固定在风洞出风口 $1 m$ 处。风力机可由带有制动器的电动机制动。转矩转速传感器为航空气动力技术研究院的 AKC215,转矩量程 $10 N \cdot m$,精度 $\pm 0.1\%$,转速量程 $5000 r/min$,转速精度为每转60个脉冲(无积累误差)。数据经过 A/D 转换,输入计算机处理,原始数据采样间隔为 $1 ms$ 。

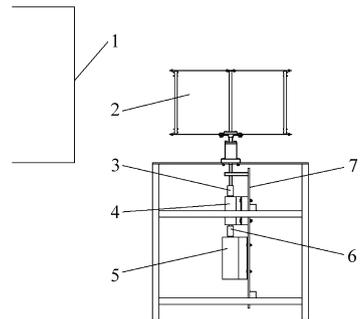


图3 实验测试系统简图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system

1. 风洞出口 2. 风力机 3. 联轴器 4. 扭矩传感器 5. 电动机
6. 联轴器 7. 轴承座

实验内容包括风力机静态自启动特性实验和动态自启动特性实验。

(1) 静态自启动特性实验

利用电动机制动器将风力机制动,将风速设定为 $3 m/s$,测量2、3和4叶片 $0.7 m$ 直径的 VAWT-SWS 与相同参数的 Darrieus 直叶片风力机在不同方位角 θ 下的静态转矩,方位角 θ 的定义如图4所示。

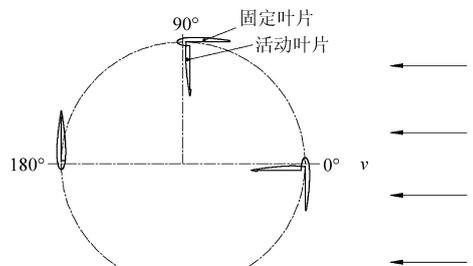


图4 方位角 θ 设定

Fig. 4 Definition of the azimuth angle θ

(2) 动态自启动特性实验

将风速设定为 $3 m/s$,使 VAWT-SWS 处于空载和静止状态,释放风力机的同时开始数据采集,直到转速稳定,得到风力机的转速随时间的变化曲线。

3 实验结果与分析

3.1 静态自启动特性

3.1.1 VAWT-SWS 与 Darrieus 风力机对比

将风力机制动,在不同方位角下测试两种风力机的静态转矩,通过式(1)得到风力机的静态转矩系数。

3.1.1.1 2 叶片风力机对比

图 5 是 3 m/s 风速下 2 叶片 VAWT-SWS 与相同参数 Darrieus 风力机静态转矩系数与风力机方位角之间的关系。由于是 2 叶片的风力机,静态转矩系数以 180°为周期变化,因此本实验仅在 0 ~ 170°范围内进行测试。由图 5 可见,在整个方位角范围内,VAWT-SWS 的静态转矩系数明显大于 Darrieus 风力机,仅在 0°方位角时两者的值非常接近。在整个方位角周期内,VAWT-SWS 的静态转矩系数均大于 0。而对于 Darrieus 风力机,静态转矩系数在方位角 170°附近为最大值,在方位角 50°附近最小(绝对值最小),在方位角 10°、30°、40°和 60°为负值(负值表示风力机反转)。当 Darrieus 风力机位于这些方位角时将不能自启动。在整个方位角周期内,VAWT-SWS 的平均静态转矩系数为 0.065,而 Darrieus 仅为 0.009。VAWT-SWS 的平均静态转矩系数较大,在存在摩擦阻力矩的情况下,更容易保证风力机的自启动。从以上可以看出,2 叶片 VAWT-SWS 的静态自启动性能优于 2 叶片 Darrieus 风力机。

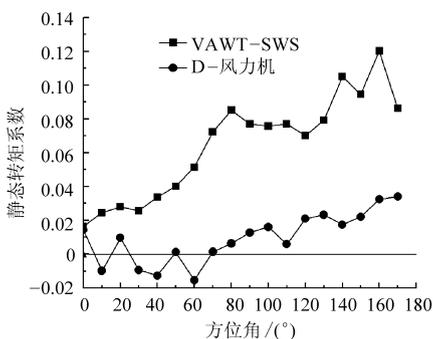


图 5 $v = 3 \text{ m/s}$ 时,2 叶片风力机静态转矩系数随方位角变化曲线

Fig. 5 Static torque coefficient of 2 blades turbine changing with azimuth angle at 3 m/s

3.1.1.2 3 叶片风力机对比

图 6 是 3 叶片 VAWT-SWS 与 Darrieus 风力机静态转矩系数与方位角之间的关系。由图 6 可见,在整个方位角周期内,VAWT-SWS 的静态转矩系数都大于 Darrieus 风力机,且不存在负力矩系数区域。Darrieus 风力机在方位角为 10°时静态转矩系数最大,在 100°时最小(绝对值),而在 90° ~ 110°之

间为负值,也就是说在一个周期内约有 1/4 的角度范围风力机处于反转状态。VAWT-SWS 的静态转矩系数最小值为 0.047,而 Darrieus 的最大值仅为 0.043。在整个方位角周期内,VAWT-SWS 的平均静态转矩系数为 0.094,而 Darrieus 仅为 0.016,两者相差近 6 倍。综上所述,3 叶片 VAWT-SWS 的静态自启动性能仍然优于 3 叶片 Darrieus 风力机。

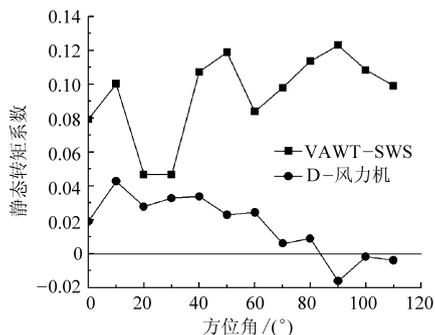


图 6 $v = 3 \text{ m/s}$ 时,3 叶片风力机静态转矩系数随方位角变化曲线

Fig. 6 Static torque coefficient of 3 blades turbine changing with azimuth angle at 3 m/s

3.1.1.3 4 叶片风力机对比

图 7 是 4 叶片 VAWT-SWS 与 Darrieus 风力机静态转矩系数与方位角之间的关系。由图 7 可见,在整个方位角周期内,VAWT-SWS 的静态转矩系数都大于 Darrieus 风力机,且不存在负力矩系数区域。Darrieus 风力机在方位角 50°时静态转矩系数为最大值,在 80°时为最小值,在整个方位角周期内同样不存在负转矩系数区域。VAWT-SWS 静态转矩系数的最大值为 0.118,而 Darrieus 风力机的最大值仅为 0.044,约为 VAWT-SWS 的 1/3。在整个方位角周期内,VAWT-SWS 的平均静态转矩系数为 0.094,而 Darrieus 风力机仅为 0.03。Darrieus 风力机的静态转矩系数虽然都为正值,但是均较小,在负载较小的情况下才能自启动。而 VAWT-SWS 的静态转矩系数在整个方位角周期内都较大,因此比较容易克服摩擦阻力并可以带动较大的负载启动。综上

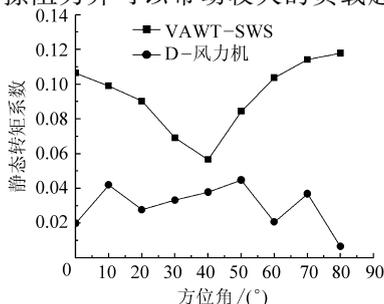


图 7 $v = 3 \text{ m/s}$ 时,4 叶片风力机静态转矩系数随方位角变化曲线

Fig. 7 Static torque coefficient of 4 blades turbine changing with azimuth angle at 3 m/s

所述,4叶片VAWT-SWS的静态自启动性能优于4叶片的Darrieus风力机。

从以上2、3和4叶片两种风力机在3 m/s风速下的静态转矩系数的对比中可以看出,VAWT-SWS的静态自启动性能明显优于Darrieus风力机。产生该结果的原因在于VAWT-SWS的活动叶片在顺风边可以打开,以阻力的形式获得较高的驱动力矩。在相同负载下,VAWT-SWS更容易实现自启动。Darrieus风力机在2叶片和3叶片情况下都存在负静态转矩系数,导致即使在理想情况下该风力机在某些方位角下仍然无法实现自启动;而VAWT-SWS在所有叶片情况下都不存在负转矩系数区域,在任意方位角下静态转矩系数都大于0,具有较好的静态自启动性能。

3.1.2 VAWT-SWS的静态自启动性能

图8为3 m/s风速下2、3和4叶片VAWT-SWS静态转矩系数随方位角变化。为便于对比,图中各种叶片数 N 下的静态转矩系数均为一个转动周期内的数据。由图8可见,叶片数对VAWT-SWS的静态转矩系数产生了较大影响。对于2叶片风力机,静态转矩系数在方位角 160° 时为最大值,在方位角 0° 时最小。对于3叶片风力机,静态转矩系数的最大值比2叶片的风力机略大,但获得最大值的方位角却减小为 90° 。对于4叶片风力机,其静态转矩系数最大值比2叶片和3叶片都要小,而获得最大值的方位角为 80° 。因此,随着叶片数的增加,获得静态转矩系数最大值的方位角有逐渐减小的趋势。在3种叶片数中,4叶片风力机的静态转矩系数随方位角变化所引起的波动最小,2叶片的风力机波动最大。

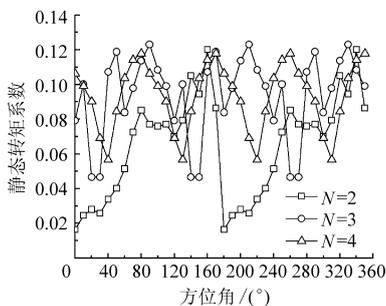


图8 $v = 3 \text{ m/s}$ 时,不同叶片数VAWT-SWS的静态转矩系数随方位角变化曲线

Fig. 8 Static torque coefficient of different blades turbine changing with azimuth angle at 3 m/s

计算得出,叶片数为2、3、4的风力机的平均静态转矩系数分别为0.065、0.094和0.094,可知,2叶片风力机的平均静态转矩系数最小,3叶片和4叶片风力机的大小相等。但是,从图8可见,4叶片

风力机的静态转矩系数波动要小于3叶片风力机,4叶片风力机的静态自启动性能优于3叶片风力机。这一结论在文献[16]的叶片数对直线翼垂直轴风力机影响研究中得到证实。

由此可以得出,4叶片风力机的静态自启动性能最好。本风力机的静态转矩系数主要来源于顺风边的叶片组,2叶片的风力机在其方位角周期内由于只有一组叶片位于顺风边以阻力形式受力,产生的正向转矩较少,因此在大部分周期内静态转矩系数均较小。以阻力形式受力的叶片组基本上不受到其他叶片的影响,因此在某些方位角下风力机仍能输出较大的转矩。3叶片风力机由于增加了1个叶片,在 $1/2$ 的方位角周期内有2组叶片位于顺风边,使风力机获得较大的正向转矩,因此在总体上其静态转矩系数大于2叶片的风力机。4叶片风力机静态转矩系数呈现先下降后上升的变化,当 $0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ 时,随着方位角增大,顺风边下游叶片受到上游叶片的遮挡程度在逐渐增加,因此风力机的静态转矩系数随着方位角的增加而减小; $40^\circ < \theta \leq 80^\circ$ 时,下游叶片所受到的遮挡在逐渐减小,因此风力机的转矩系数开始增加。4叶片风力机的叶片虽然更多,但与3叶片相似,最多只有2组叶片位于顺风边,且叶片之间的影响也体现得越来越明显,下游的叶片极易受到上游叶片的遮挡,因此其平均转矩系数基本上没有增加,但叶片的增加使其静态转矩系数变动幅度减小,有利于风力机在任意方位角下的自启动。

3.2 VAWT-SWS的动态自启动特性

图9为3 m/s风速下不同叶片数VAWT-SWS的转速随时间的变化。由图9可见,叶片数对风力机的动态自启动性能有较大的影响。2叶片的风力机从2 s开始出现转速,之后持续上升,30 s附近转速趋于稳定;3叶片风力机同样从2 s开始出现转速,但转速值低于2叶片的风力机,之后一直上升,大约40 s开始转速趋于稳定;4叶片的风力机同样从2 s开始出现转速,转速稍低于3叶片风力机,之

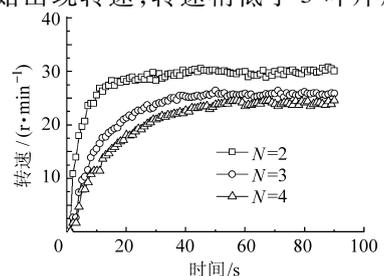


图9 $v = 3 \text{ m/s}$ 时,VAWT-SWS转速随时间变化曲线

Fig. 9 Rotation speed of VAWT-SWS changing with time at 3 m/s

后转速一直上升,大约50 s开始趋于稳定。对比3条曲线后可以看出,不同叶片数风力机启动时的转速上升趋势各不相同,转速的增幅随着叶片数的增加而减少,2叶片风力机的增幅最快,其次是3叶片风力机,4叶片增幅最慢。在任意时刻,风力机的转速都随着叶片数的增加而减小。

表1为叶片数2、3和4时VAWT-SWS的启动时间、稳定转速和稳定尖速比。从表中可以看出,风力机的启动时间随着叶片数的增加而增加,2叶片风力机所需启动时间最短,4叶片风力机所需时间最长。随着叶片数的增加,风力机最终的稳定转速呈递减的趋势。随着风力机叶片数的增加,稳定尖速比呈逐渐下降趋势。3叶片风力机的稳定尖速比比2叶片风力机小0.05,4叶片风力机比3叶片风力机小0.03,因此可以说,尖速比的变化趋势与转速类似,随着叶片数的增加而减小,但变化幅度非常小。

表1 在 $v=3\text{ m/s}$ 时VAWT-SWS的启动性能
Tab.1 Starting performance of VAWT-SWS at 3 m/s

叶片数	启动时间 /s	稳定转速 /($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	稳定尖速比
2	30	29.9	0.37
3	40	25.8	0.32
4	50	24.1	0.29

综上所述,VAWT-SWS的动态自启动性能随着叶片数的增加而下降。产生此现象的原因在于,该风力机在旋转过程中,顺风边的活动叶片在气流的推动下打开,叶片组以阻力形式为风力机提供正向转矩。逆风边的活动叶片在气流的推动下闭合,叶片组变成翼型的形状。但由于风力机的尖速

比较小,逆风边的叶片组经历大范围的攻角变化,因此主要产生的是负向转矩。顺风边活动叶片的打开程度主要取决于叶片处风速与叶片的线速度之差,只有在转速较低的状态下活动叶片才能充分打开并提供足够的正转矩,随着风力机转速的提高,活动叶片的离心力增大,打开变得困难,活动叶片的完全展开时间将减少,风力机的正向转矩也随着减小,当正转矩和负转矩相等时,风力机停止加速,转速开始趋于稳定。在3种叶片数的风力机中,4叶片的风力机在旋转过程中始终有2组叶片位于逆风边,因此相比于其他两种风力机,会产生较大的负向转矩,当其转速增加到 24.1 r/min 时,正向转矩即与负向转矩相等,风力机进入稳定状态。3叶片的风力机仅在 $1/2$ 的旋转周期中有2组叶片位于逆风边,因此相对于4叶片的风力机,其负向转矩较小,因此可在较高的转速下达到正向转矩与负向转矩的平衡。2叶片的风力机在一个旋转周期中始终只有1组叶片位于逆风边,因此其负向转矩最小,所能达到的稳定转速也最高。

4 结论

(1) 采用活动叶片和固定叶片组合方式的VAWT-SWS,其静态转矩系数大于Darrieus直叶片风力机,且在所有方位角都为正值,因此其静态自启动性能明显优于Darrieus风力机。

(2) 随叶片数增加,VAWT-SWS的静态转矩系数波动减小,增加叶片数可以提高VAWT-SWS的静态自启动性能。但是,叶片数增加使VAWT-SWS的稳定转速下降,并增加其启动所需时间,降低其动态自启动性能。

参 考 文 献

- Aslam Bhutta, Muhammad Mammood. Vertical axis wind turbine—a review of various configurations and design techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4):1926–1939.
- Islam Mazharul, Ting David S-K, Fartaj Amir. Aerodynamic models for darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(4):1087–1109.
- Li Yan, Tagawa Kotaro, Liu Wei. Performance effects of attachment on blade on a straight-bladed vertical axis wind turbine[J]. Current Applied Physics, 2010, 10(2):335–338.
- 李岩,原丰,林农. Savonius 风力机叶片重叠比的风洞实验研究[J]. 太阳能学报,2009,30(2):226–233.
Li Yan, Yutaka Hara, Tsutomu Hayashi. A wind tunnel experimental study on the overlap ratio of Savonius rotors[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009,30(2):226–233. (in Chinese)
- Kamoji M, Kedare S, Prabhu S. Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor[J]. Applied Energy, 2009, 86(7):1064–1073.
- Kamoji M, Kedare S B, Prabhu S V. Wind tunnel tests on a single stage helical Savonius rotor[C]//5th International Energy Conversion Engineering Conference, 2007, 1:86–95.
- Baker J R. Features to aid or enable self-starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 15(1):369–380.
- Hwang In Seong, Lee Yun Han, Kim Seung Jo. Effectiveness enhancement of a cycloidal wind turbine by individual active control of blade motion[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2007: 6525.

- 9 Gupta R, Biswas A, Sharma K K. Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius-three-bladed Darrieus rotor[J]. *Renewable Energy*, 2008, 16(9):1974 – 1981.
- 10 曲建俊,代汉达,陈虎.垂直轴半活动半固定的组合叶片的风车:中国,200820091137.2[P].2009-06-10.
- 11 曲建俊,许明伟,梅毅.升阻复合型垂直轴风力发电机:中国,101963139B[P].2012-07-04.
- 12 曲建俊,许明伟,李中杰,支钞.一种升阻复合型垂直轴风力机[J].*可再生能源*,2010,28(1):101 – 104.
Qu Jianjun, Xu Mingwei, Li Zhongjie, et al. A kind of lift and drag hybrid vertical axis wind turbine[J]. *Renewable Energy Resources*, 2010,28(1):101 – 104. (in Chinese)
- 13 Qu Jianjun, Xu Mingwei, Mei Yi. Aerodynamic model of vertical axis wind turbine with wind speed self-adapting in drag-mode [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 347:340 – 343.
- 14 Xu Mingwei, Qu Jianjun, Zhang Han. Experimental study of vertical axis wind turbine with wind speed self-adapting [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 215:1323 – 1326.
- 15 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2006:15 – 16.
- 16 李岩,田川公太郎,冯放. 直线翼垂直轴风力机起动性的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(6):885 – 890.
Li Yan, Tagawa Kotaro, Feng Fang. An experimental study on the starting performance of straight-bladed vertical axis wind turbine[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(6):885 – 890. (in Chinese)

Effects of Blade Number on Self-starting Performance of Vertical Axis Wind Turbine with Self-adapting Wind Speed under Low Wind Speed

Qu Jianjun¹ Xu Mingwei¹ Mei Yi¹ Li Yan²

(1. *Department of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

2. *Department of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China*)

Abstract: With the aim to investigate the influences of blade number on the self-starting performance of vertical axis wind turbine with self-adapting wind speed (VAWT – SWS), a prototype which could change the number of blades (2,3,4) was designed. Through the wind tunnel experiment the static torque coefficient curve with azimuth angle at a wind speed of 3 m/s was obtained, and compared experiments were done on Darrieus straight-bladed wind turbine with the same parameters. Then the load of VAWT – SWS was released, and rotation speed curve of VAWT – SWS changing with time at 3 m/s was gotten. The experimental results showed that the self-starting performance of VAWT – SWS was superior to that of Darrieus straight-bladed wind turbine; the increase of blade number could improve the static self-starting performance of VAWT – SWS, but degraded the dynamic self-starting performance.

Key words: Vertical axis wind turbine Self-adapting wind speed Self-starting performance Torque Wind tunnel experiment