排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 2 月 Feb. 2018 | 第 36 卷 第 2 期 Vol. 36 No. 2

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.3004



曲建俊

曲建俊[1]，王景元[1*]，许明伟[1]，李岩[2]，张磊[1]
（1.哈尔滨工业大学机电工程学院，黑龙江 哈尔滨 150001；2.东北农业大学工程学院，黑龙江 哈尔滨 150030）

摘要：为了研究自适应风速垂直轴风力机(VAWT-SWS)运行模式的变化规律，设计制作了含有活动和固定叶片的直叶片垂直轴风力机，同时制作出与活动叶片和固定叶片贴合后形状相同的直叶片垂直轴风力机.搭建出风洞试验台，在固定风速和风力机高度条件下，通过增减支撑臂的数量和长度，研究了风力机的叶片数和直径对自适应风速垂直轴风力机阻力和升力运行模式转换的影响.借助于风洞试验获得风力机转矩随尖速比的变化曲线，并与相同参数的直叶片纯升力垂直轴风力机进行了比较，以转矩的接近程度作为判据，判定了自适应风速垂直轴风力机所处的工作模式.试验结果表明：在一定条件下，自适应风速垂直轴风力机可以进行工作模式的自动转换，增加叶片数可使风力机阻升转换所需尖速比降低，而增大风力机直径可使阻升转换所需尖速比提高.研究结果可以为自适应风速垂直轴风力机的设计提供理论指导.

关键词：垂直轴风力机；自适应风速；阻升转换；转矩；风洞试验
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)02-0154-05

曲建俊，王景元，许明伟，等. 自适应风速垂直轴风力机的阻升转换特性[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(2)：154-158，165.
QU Jianjun，WANG Jingyuan，XU Mingwei，et al. Drag-lift conversion characteristics of vertical axis wind turbine with adapting wind speed[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(2)：154-158，165.(in Chinese)

Drag-lift conversion characteristics of vertical axis wind turbine with adapting wind speed

QU Jianjun[1]，*WANG Jingyuan*[1*]，*XU Mingwei*[1]，*LI Yan*[2]，*ZHANG Lei*[1]
(1. School of Mechatronics Engineering，Harbin Institute of Technology，Harbin，Heilongjiang 150001，China；2. Engineering College，Northeast Agricultural University，Harbin，Heilongjiang 150030，China)

Abstract：In order to study change rules of VAWT-SWS operating mode，a vertical blade wind turbine with movable and fixed blades was designed and fabricated. At the same time，a straight blade vertical axis wind turbine with the same shape as the movable-fixed blade was produced. Under the condition of fixed wind speed and wind turbine height，influences of the number of blades and diameter of wind turbine on the drag-lift operation mode of self-adaptive wind speed vertical wind turbine were studied by increasing the number and length of the support arm. By means of wind tunnel experiment，the variation of torque of wind turbine with speed ratio was obtained，and compared with the vertical wind turbine with the same parameters. The working mode of the adaptive wind speed vertical axis wind turbine was determined by the proximity of the torque as the criterion. The results show that un-

收稿日期：2017-08-26；**修回日期**：2017-09-09；**网络出版时间**：2018-01-09
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180109.1106.026.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51175104)；国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2013CB632305)
第一作者简介：曲建俊(1962—)，男，黑龙江哈尔滨人，教授，博士生导师(qujianjun@hit.edu.cn)，主要从事垂直轴风力发电技术与装备、超声电机及摩擦学研究.
通信作者简介：王景元(1991—)，男，黑龙江哈尔滨人，硕士研究生(wangjingyuan0225@163.com)，主要从事垂直轴风力发电技术与装备研究.

der certain conditions, the adaptive wind speed vertical axis wind turbine can automatically convert the working mode, which can reduce the required speed ratio for wind turbine resistance conversion by increasing the number of blades, and increases the required speed ratio by increasing the diameter of the wind turbine. The results can provide theoretical guidance for the design of adaptive wind speed vertical axis wind turbine.

Key words: vertical axis wind turbine; adapting wind speed; drag – lift conversion; torque; wind tunnel experiment

近年来,随着能源需求的不断增长,人们对可再生能源的关注不断提高. 在这些能源当中,风能被认为是较廉价的可再生能源,因此人们对风力发电技术进行了大量的研究. 目前有水平轴和垂直轴2种风力机[1],其中水平轴应用普遍,相关文献较多,但是垂直轴风力机具有无需对风、叶片受力状态好等优势,逐渐受到人们的青睐[2-3]. 近年来,升阻复合型风力机不断发展[4],但是升力轮和阻力轮的组合以及叶片设计方式对这种风力机的风能利用率影响很大. 为了解决这个问题,人们进行了许多研究并提出了一些改进方案[5-7],自适应风速垂直轴风力机[8-12](vertical axis wind turbine with self-adapting wind speed, VAWT – SWS)就是其中的一种,该风力机基于 Darrieus 直叶片风力机原理,其明显特征是每组叶片都由活动叶片和固定叶片组成,工作原理如图1所示. 在低风速时,顺风边的活动叶片在气流的推动力下打开,叶片组主要以阻力形式受力,可获得较高的转矩,而逆风边的活动叶片在气流的推动力下闭合,使逆向转矩大大减小;当风速较高时,活动叶片受到的离心力大于气流的推动力,顺风边的活动叶片不再打开,所有的叶片组都变成1个完整的翼型,风力机成为典型的 Darrieus 风力机,可获得较高的风能利用系数.

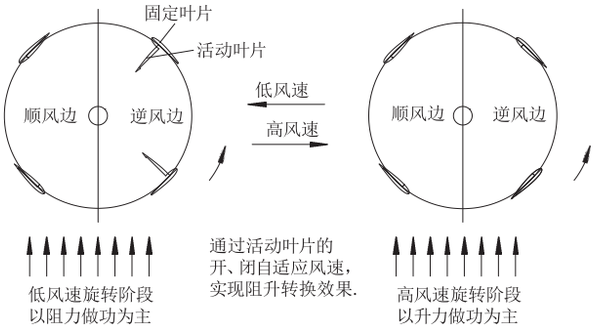


图1 自适应风速垂直轴风力机原理图

Fig. 1 Working principle diagram of VAWT – SWS

自适应风速垂直轴风力机与现存的垂直轴风力机最大不同之处在于可以根据工况的不同,自动完成工作模式的转换过程. 因此,对其阻升转换特性的研究是进行空气动力学性能预测的基础,只有准确掌握工作模式随工况的变化规律,才能使用正确的空气动力学模型. 文中利用风洞试验,详细地研究叶片数、风力机直径对 VAWT – SWS 阻升转换特性的影响.

1 试验装置与方法

1.1 风力机

本研究设计制作的风洞试验用 VAWT – SWS 模型如图2所示,叶片的参数设置如图3所示.



图2 VAWT – SWS 实物图

Fig. 2 VAWT – SWS prototype

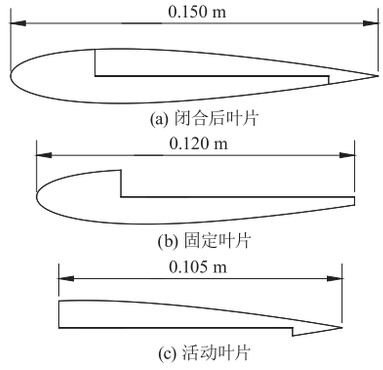


图3 叶片参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of blade parameter

模型高度为 0.4 m,直径可在 0.54,0.62 和 0.70 m 之间变化. 将叶片数设置为2,3和4,通过增减支撑臂的数量来进行设定. 选择 NACA 0015 作为

叶片的基础翼型,将固定叶片弦长设计为 0.120 m,活动叶片弦长为 0.105 m,闭合后的总弦长为 0.150 m. 活动叶片伸出 0.030 m,使其更容易被气流吹开. 所有叶片的高度都为 0.4 m,采用 EPP 材料.

1.2 测试系统与试验内容

试验在东北农业大学风能实验室的低速风洞中进行,该风洞为开口射流风洞,试验段的出风口面积为 1 m×1 m,风速范围 1~20 m/s,本次试验将风速设定为 6 m/s. 采用的测试系统原理参照了文献[13]的方案,如图 4 所示. 风力机固定在风洞出风口 1 m 处. 风力机可由电动机带动旋转. 转矩转速传感器为航天空气动力技术研究院的 AKC215,转矩量程 10 N·m,精度 ±0.1%,转速量程 6 000 r/min,测量不准确度≤0.5%. 数据经过 A/D 转换,输入计算机处理,原始数据采样速率为 1~10 次/s.

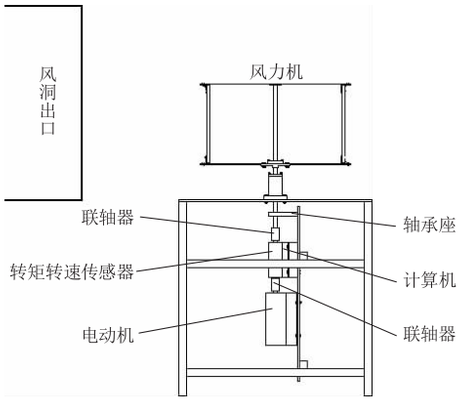


图 4 试验测试系统简图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

试验内容为风力机的转矩特性试验. 首先,用电动机带动风力机旋转,通过变频器调节转速,测试风力机在不同转速下的转矩,由于风力机的转矩随着方位角的变化而变化,因此取 1 个周期内的平均值作为转矩的最终值,得到转矩随尖速比的变化曲线. 然后,利用胶带将活动叶片与固定叶片粘在一起,使之成为 Darrieus 风力机,进行同样的测试后得到 1 组转矩随尖速比的变化曲线,对 2 组曲线进行对比,相近的部分表明 VAWT-SWS 在这些尖速比下工作于升力模式,不相近的部分工作于阻力模式.

2 试验结果与讨论

2.1 叶片数对阻升转换特性的影响

2.1.1 风轮 2 叶片

将风轮直径 d 固定为 0.7 m,研究叶片数对风力机阻升转换特性的影响. 2 叶片 0.7 m 直径的 VAWT-SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机在风速 v 为 6 m/s 下的转矩 T 随尖速比 λ 的变化如图 5 所示. 从图中可以看出,当尖速比 $\lambda<0.90$ 时,2 种风力机之间的转矩存在明显差距,因此可以认为 VAWT-SWS 工作于阻力模式. 当尖速比 $\lambda\geqslant0.90$ 时,2 种风力机的转矩之差明显减小,说明 VAWT-SWS 从尖速比 0.90 开始进入了升力模式.

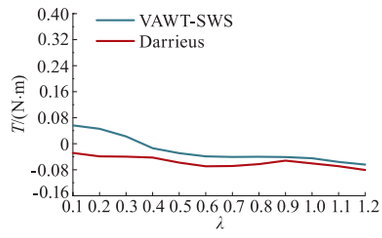


图 5 2 叶片 VAWT-SWS 与 Darrieus 型风力机的转矩随尖速比变化

Fig. 5 Variations of torque of 2 wind turbines with speed ratio under 2 blades

2.1.2 风轮 3 叶片

3 叶片的 VAWT-SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机在风速 v 为 6 m/s 下的转矩 T 随尖速比 λ 的变化如图 6 所示. 从图中可以看出,当尖速比 $\lambda<0.8$ 时,2 种风力机之间的转矩存在明显差距,故 VAWT-SWS 工作于阻力模式. 当尖速比 $\lambda\geqslant0.8$ 时 2 条曲线开始非常接近,说明 VAWT-SWS 从尖速比 0.8 开始进入了升力模式.

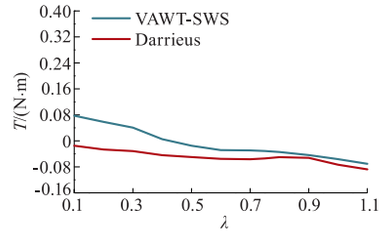


图 6 3 叶片 VAWT-SWS 与 Darrieus 型风力机的转矩随尖速比变化

Fig. 6 Variations of torque of 2 wind turbines with speed ratio under 3 blades

2.1.3 D 风轮 4 叶片

4 叶片的 VAWT-SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机的转矩随尖速比的变化如图 7 所示. 最初的试验表明,当尖速比 $\lambda=0.70$ 时,VAWT-SWS 工作于阻力模式;$\lambda=0.80$ 时工作于升力模式,该结果与 3 叶片的情况相同,因此将 0.70~0.80 的间隔变为 0.05. 从图中可以看出,当尖速比 $\lambda<0.75$ 时,2 种风力机之间的转矩存在明显差距,故认为在此区间

风力机工作于阻力模式. 当尖速比 $\lambda \geqslant 0.75$ 时,两者的转矩之差明显变小,说明 VAWT－SWS 从尖速比 0.75 开始进入了升力模式.

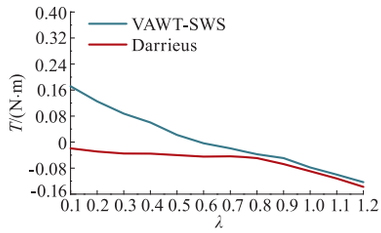


图 7　4 叶片 VAWT－SWS 与 Darrieus 风力机转矩随尖速比的变化

Fig. 7　Variations of torque of 2 wind turbines with speed ratio under 4 blades

为了探明叶片数对风力机阻升转换特性的影响,对具有 3 种典型叶片数 $N(N=2,3,4)$ 的 VAWT－SWS 进行了风洞试验. 0.7 m 直径的 VAWT－SWS 在 6 m/s 的风速下进入升力模式的尖速比 λ 随叶片数 N 的变化柱状图如图 8 所示. 从图中可以看出,随着叶片数的增加,其进入升力模式所需的尖速比呈递减趋势,2 叶片时为 0.90,3 叶片时为 0.80,4 叶片时为 0.75. 产生该结果的原因在于,当风力机的尖速比相同时,叶片数的增加对离心力矩不产生影响,但使叶片之间的干扰增强,使叶片处的风速减小,气流对活动叶片的推动力矩降低,活动叶片不易打开,因此在较低的尖速比下即可进入升力模式.

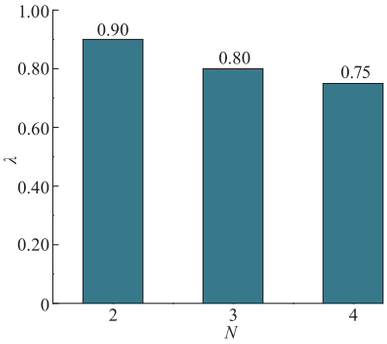


图 8　0.7 m 直径的 VAWT－SWS 进入升力模式尖速比随叶片数的变化

Fig. 8　Variations of speed ratio of VAWT－SWS with number of blades at 0.7 m diameter

2.2　风力机直径对阻升转换特性的影响

2.2.1　风轮 0.54 m 直径

将风轮叶片数 N 固定为 4,研究风轮直径 d 对风力机阻升转换特性的影响. 4 叶片 0.54 m 直径的 VAWT－SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机在 6 m/s 风速下的转矩随尖速比的变化如图 9 所示. 从图中可以看出,当尖速比 $\lambda < 0.65$ 时,2 种风力机之间的转矩存在明显差距,因此认为 VAWT－SWS 在此区间工作于阻力模式. 当尖速比 $\lambda \geqslant 0.65$ 时两者的转矩之差非常小,而随着尖速比的进一步增加,活动叶片受到的离心力也继续增加,活动叶片更不会被风吹开,说明 VAWT－SWS 从尖速比 0.65 开始进入了升力模式.

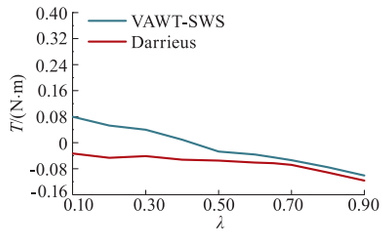


图 9　0.54m 直径的 VAWT－SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机的转矩随尖速比变化

Fig. 9　Variations of torque of 2 wind turbines with speed ratio at 0.54 m diameter

2.2.2　风轮 0.62 m 直径

0.62 m 直径的 VAWT－SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机的转矩随尖速比的变化曲线如图 10 所示. 从图中可以看出,当尖速比 $\lambda < 0.70$ 时,2 种风力机之间的转矩存在明显差距,故认为风力机仍然工作于阻力模式. 当尖速比 $\lambda \geqslant 0.70$ 时 2 种风力机的转矩非常接近,说明 VAWT－SWS 从尖速比 0.70 开始进入了升力模式.

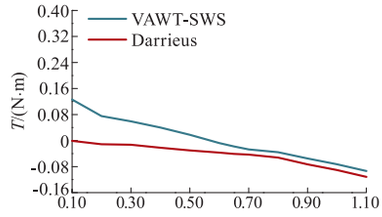


图 10　0.62 m 直径的 VAWT－SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机的转矩随尖速比变化

Fig. 10　Variations of torque of 2 wind turbines with speed ratio at 0.62 m diameter

2.2.3　风轮 0.70 m 直径

0.70 m 直径的 VAWT－SWS 及其对应的 Darrieus 型风力机的转矩随尖速比变化等同于前面图 7 所示. 从图中可以看出,风力机从尖速比 $\lambda = 0.75$ 开始进入了升力模式.

4 叶片的 VAWT－SWS 在 6 m/s 的风速下进入升力模式的尖速比 λ 随直径 d 的变化柱状图如图 11 所示. 从图中可以看出,随着直径的增加,风力机进入升力模式所需的尖速比呈递增趋势,0.54 m 直

径为 0.65;0.62 m 直径为 0.70;0.70 m 直径为 0.75. 当 $\lambda=0.65$ 时,活动叶片的离心力矩随着直径的增加而减少,原因在于当尖速比相同时,风力机的角速度与半径成反比,而离心力矩又与角速度成正比,因此 0.70 m 直径的离心力矩最小,0.54 m 直径的最大. 而气流对活动叶片的推动力矩却随着直径的增大而增加,原因在于直径的增大使风力机的实度减小,叶片之间的干扰减小,叶片处的风速得以增加. 只有 0.54 m 直径的离心力矩大于风阻力矩,因此只有其工作于升力模式,而其他直径的风力机仍然工作于阻力模式. 当 $\lambda=0.70$ 时,0.54 m 直径的风力机由于离心力的进一步增大而继续保持升力模式. 0.62 m 直径的离心力矩大于风阻力矩,其不再工作于阻力模式,经过阻升转换后进入升力模式. 0.70 m 直径风力机的风阻力矩仍然大于离心力矩,活动叶片在顺风边处于打开状态,因此其仍然工作于阻力模式. 当 $\lambda=0.75$ 时,0.54 m 和 0.62 m 直径的风力机仍然保持升力模式,0.70 m 直径的离心力矩开始大于风阻力矩,因此开始进入升力模式.

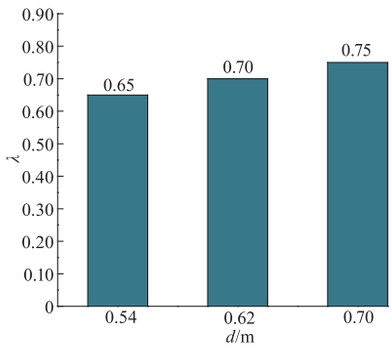


图 11 4 叶片的 VAWT－SWS 在 6 m/s 的风速下进入升力模式的尖速比随直径的变化

Fig. 11 Variations of speed ratio of VAWT－SWS with diameter under $v=6$ m/s and 4 blades

3 结 论

1) 在文中的试验条件下,自适应风速垂直轴风力机(VAWT－SWS)具有从阻力运行模式向升力运行模式的转换特性,证实了自适应风速原理的可行性,其转换条件与整个风轮的直径和叶片数有关.

2) 借助于风力机运行转矩随尖速比的变化,可以判断自适应风速垂直轴风力机(VAWT－SWS)运行模式是否发生了阻升转换,分别获得了不同叶片数和风轮直径下的风力机阻升转换的临界尖速比.

3) 增加叶片数可以使自适应风速垂直轴风力机(VAWT－SWS)进入升力模式所需的尖速比降低,使阻升转换提前.

4) 增加风轮的直径可以使自适应风速垂直轴风力机(VAWT－SWS)的阻升转换延迟,增大了进入升力模式所需的尖速比.

参考文献(References)

[1] 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.

[2] 徐林,李学敏,区家隽. 叶片数及弦长对升力型垂直轴风力机的影响[J]. 可再生能源,2016,34(12):1834－1840.
XU Lin, LI Xueming, QU Jiajuan. Influence of number of leaves and chord length on rigid vertical wind turbine [J]. Renewable energy, 2016,34(12):1834－1840. (in Chinese)

[3] 戴庚,徐璋,皇甫凯林,等. 垂直轴风力机研究进展[J]. 流体机械,2010,38(10):39－43.
DAI Geng,XU Zhang, HUANGFU Kailin, et al. Recent research progress in the vertical axis wind turbine[J]. Fluid machinery,2010,38(10):39－43. (in Chinese)

[4] 徐璋,霍玉雷,陈勇. 新型组合式垂直轴风机的优化设计与性能研究[J]. 浙江工业大学学报,2015,45(3):261－264.
XU Zhang, HUO Yulei, CHEN Yong. Optimization design and performance of new type combined vertical shaft fan[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015,45(3):261－264. (in Chinese)

[5] 王骥月,丛茜,梁宁,等. 基于海鸥翼型的小型风力机叶片仿生设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(10):72－75.
WANG Jiyue, CONG Qian, LIANG Ning, et al. Design and experiment of bionic design of small wind turbine blade based on seagull airfoil [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(10):72－75. (in Chinese)

[6] 顾荣蓉,蔡新,潘盼,等. 升阻互补型垂直轴风力机气动性能分析[J]. 兰州理工大学学报,2016,42(4):55－60.
GU Rongrong, CAI Xin, PAN Pan, et al. Analysis of pneumatic performance of vertical-shaft wind turbine with increased resistance [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016,42(4):55－60. (in Chinese)

(下转第 165 页)