排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 5 月 May 2018 | 第 36 卷 第 5 期 Vol. 36 No. 5
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0023

偏心风轮结构对垂直轴风力机气动特性影响数值模拟


李岩

李岩[1,2*]，吴志诚[1]，田川公太朗[3]，冯放[2,4]，张婷婷[1]，白荣彬[2]，李建业[2]
（1. 东北农业大学工程学院，黑龙江 哈尔滨 150030；2. 寒地农业可再生资源利用技术与装备黑龙江省重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150030；3. 日本鸟取大学地域学部，日本，鸟取 6808552；4. 东北农业大学理学院，黑龙江 哈尔滨 150030）

摘要：为了改善垂直轴风力机气动特性，提出了一种具有偏心结构的直线翼垂直轴风力机风轮形式，通过增大叶片气动力对转轴的作用半径来改善风力机的起动性能和提高输出功率特性. 以采用 NACA0018 翼型的 3 叶片风力机为对象，利用数值模拟方法计算了具有 6 种不同偏心量风轮结构的风力机静态起动力矩系数和输出功率系数，分析了不同偏心量对风力机气动特性的影响规律. 计算结果表明：适当的偏心量可消除在某些方位角处的反向力矩，使静态力矩系数波动变得平滑，从而有效改善直线翼垂直轴风力机整体起动性能. 同时，适当的偏心量还可有效提高风力机的输出功率特性，最大功率系数可提高 12%.

关键词：垂直轴风力机；偏心风轮；起动性；气动特性；数值模拟
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)05-0413-07

李岩，吴志诚，田川公太朗，等. 偏心风轮结构对垂直轴风力机气动特性影响数值模拟[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(5)：413-419.
LI Yan，WU Zhicheng，TAGAWA Kotaro，et al. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of vertical axis wind turbine with eccentric rotor structure[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(5)：413-419.(in Chinese)

Numerical simulation on aerodynamic characteristics of vertical axis wind turbine with eccentric rotor structure

LI Yan[1,2*]，*WU Zhicheng*[1]，*TAGAWA Kotaro*[3]，*FENG Fang*[2,4]，*ZHANG Tingting*[1]，*BAI Rongbin*[2]，*LI Jianye*[2]
(1. Engineering College，Northeast Agricultural University，Harbin，Heilongjiang 150030，China；2. Heilongjiang Province Key Laboratory of Technology and Equipment for Utilization of Agricultural Renewable Resources in Cold Region，Harbin，Heilongjiang 150030，China；3. Faculty of Regional Sciences，Tottori University，Tottori 6808552，Japan；4. College of Sciences，Northeast Agricultural University，Harbin，Heilongjiang 150030，China)

Abstract：A rotor with eccentric structure was proposed in order to improve the performance of straight-bladed vertical axis wind turbine (SB-VAWT). Then，the self-starting capacity and output power were enhanced by increasing the effective acting radius of blade on the rotor shaft. Numerical simulations were carried out on a SB-VAWT rotor with six eccentricities，respectively. NACA0018 airfoil was used as rotor blade section profile. The starting torque and power coefficients were predicted. The effects of eccentricity on the aerodynamic performance were analyzed. The simulated results show that a

收稿日期：2017-02-07；**修回日期**：2017-03-18；**网络出版时间**：2018-04-25
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180425.1418.018.html
基金项目：黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541012)
第一作者简介：李岩(1972—)，男，黑龙江宾县人，教授，博士生导师(通信作者，liyanneau@163.com)，主要从事风能及可再生能源利用研究.
第二作者简介：吴志诚(1991—)，男，福建宁国人，硕士(zhichengseason@163.com)，主要从事风力机气动特性研究.

proper eccentricity can diminish negative starting torque coefficient in some degrees at a few azimuth angles, resulting in a smooth torque coefficient curve. Consequently, the starting performance of SB – VAWT is improved effectively. Furthermore, a suitable eccentricity can increase the rotor output power, and the maximum power coefficient can be raised as high as 12% compared with an ordinary rotor.

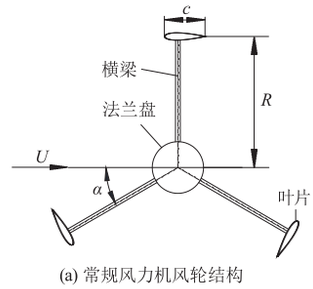
Key words: vertical axis wind turbine; eccentric rotor; staring performance; aerodynamic characteristics; numerical simulation

直线翼垂直轴风力机(SB – VAWT)是达里厄风力机的一种,在新能源发展迅速的今天,凭借其无需对风、造型独特等优点在中小型风能领域受到了越来越多的关注[1-2]. 然而,由于该种风力机在低风速下难以自起动以及相对于水平轴风力机输出功率偏低成了长期以来阻碍其发展的二大主要因素. 为了改善直线翼垂直轴风力机的气动特性问题,诸多学者从不同的角度开展了相关研究工作. 杨从新等[3-4]从翼型种类及个数、高径比、叶片的长度、叶尖比等结构参数对垂直轴风轮进行了大量的理论和试验研究. 徐璋等[5]通过利用超越离合器连接设计了一种新型自启式垂直轴风力机,利用升力型风力机和阻力型风力机的各自优势一定程度上提升了垂直轴风力机的起动状况以及不同风速下的风能利用情况. 李岩等[6]通过风洞试验分析了直线翼风力机与 Savonius 风力机进行组合的参数研究,在直线翼垂直轴风力机风轮上下安装了圆台型聚风罩,研究了聚风罩参数对风力机的起动性和气动特性的影响规律,还研究了在叶片前后加装小翼对风力机的影响等. 曲建俊等[7]采用复合形法对小型垂直轴风力机常用的 NACA0015 翼型进行了优化设计,提高了翼型的气动性能;姚激等[8]应用 Fluent 软件进行了变攻角垂直轴风力机三维定常流场数值模拟,有效地反应风力机不同攻角下的流场状况. 舒超等[9]基于 CFD 数值模拟技术,分析了常用典型垂直轴风力机翼型的气动及功率特性,并以 NACA0012 翼型为基础对其进行改进,在一定程度上提高了垂直轴风力机的风能利用率. 另外,还有一些学者探讨了利用数值模拟方法来研究直线翼垂直轴风力机的气动特性[10-11],对垂直轴风力机的研究方法提供了很好的探索.

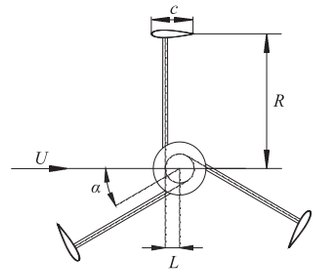
与上述研究不同的是,文中从改善风轮结构的角度出发,提出一种具有偏心结构的直线翼垂直轴风力机风轮,即叶片不是与转轴对心安装,而是让叶片与转轴有一定的偏心量,通过改变叶片产生气动力作用在转轴上的位置来改变风轮的整体受力情况,从而改善风力机的起动特性以及输出功率特性. 为研究该种方法的有效性,对具有 NACA0018 翼型的 3 叶片直线翼垂直轴风力机进行数值模拟,研究不同偏心量对于风力机的静态起动力矩特性和动态输出功率气特性的影响规律.

1 偏心风轮设计

图 1 为常规的直线翼垂直轴风力机风轮结构和文中提出的偏心风轮结构示意图. 通常,直线翼垂直轴风力机的叶片通过横梁连接在法兰盘上,从而将叶片产生的气动力传递到转轴上. 然而由于叶片产生的气动力是随着风轮方位角度而变化的,造成了在某些角度下气动力很小,形成不了有效转矩,会导致风力机难以起动或者产生动态失速降低输出特性. 为此,提出了偏心风轮结构,如图 1b 所示,横梁与法兰不是对心安装,而是设置了一定的偏心量,以求增加叶片产生气动力的作用半径,提高风轮的气动特性.



(a) 常规风力机风轮结构



(b) 偏心风轮结构

图 1 常规与偏心风轮结构示意图

Fig. 1 Diagram of normal and eccentric rotor structure

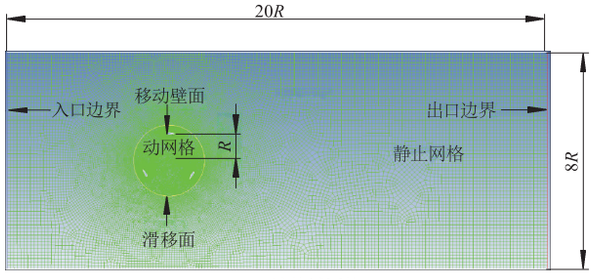
计算模型的直线翼垂直轴风力机风轮的几何尺寸制定原则是参照东北农业大学的低速风洞试验段尺寸(1 m×1 m)而定,以其后续与试验结果进

行对比. 计算风轮几何参数如下：U 为设计风速，10 m/s；H 为风轮高度，0.5 m；R 为风轮半径，0.4 m；N 为叶片数，3；叶片翼型为 NACA0018（对称翼型）；c 为叶片弦长，0.125 m. 定义了横梁轴线与风力机主轴中心之间的垂直距离为偏心量 L，文中共计算了 6 种偏心量，分别为 0，10，20，30，40，50 mm. 另外，定义了风轮相对于来流的方位角为 α，用于计算风轮在一个旋转周期内的转矩，0°～120°（间隔 5°）.

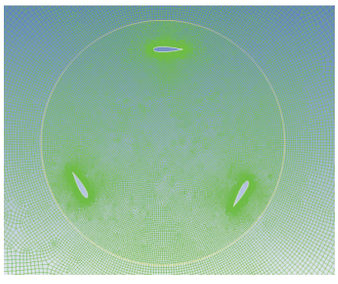
2　数值模拟方法

2.1　计算模型

由于直线翼垂直轴风力机在高度方向具有相同的截面形状，根据以往研究结果[12-13]，文中采用二维数值模拟计算. 计算网格模型如图 2 所示，选用计算精度较高的四边形网格，为了保证计算结果的准确性同时控制好适当的计算时间，对风力机附近的网格进行加密处理，中间的圆形区域为动网格区域，其余为静止网格区域，在动网格与静网格的交界面为滑移面.



(a) 计算域网格



(b) 网格加密

图 2　网格划分

Fig. 2　Mesh generation

风力机外围的计算域为长方形，宽为风轮半径的 8 倍、长为风轮半径的 20 倍. 因为来流在经过风力机之前相对较稳定，而经过风力机之后其流场发生了很大的变化，因此在计算域中风力机的位置离出口边界较远，这样有助于观察风力机后方的流场变化. 来流从图中左侧流入，计算风速为 10 m/s；右侧为压力出口；矩形上下两边为静止的滑移壁面边；叶片壁面为移动壁面. 计算采用 SST $k-\omega$ 湍流模型，该模型综合了 $k-\omega$ 模型在近壁模拟和 $k-\omega$ 模型在外部区域计算的优点，具有较好的精度. 基于压力的隐式 Couple 算法求解二维雷诺时均 N－S 方程，对具有不同偏心量 L 的风力机流场采用动网格技术进行瞬态计算.

2.2　计算方法验证

为验证该计算方法以及模型的可靠性，将同一参数的 2 叶片不带偏心量的风力机数值模拟与风洞试验结果进行对比. 试验系统、装置与方法采用参考文献[8]进行. 图 3 为不同尖速比下风力机的功率特性. 数值计算结果与风洞试验结果在趋势上有较好的一致性，计算结果一定程度上高于试验结果，主要原因是二维模型计算忽略了叶片两端的损失，同时简化的模型没有考虑到连接风力机叶片的横梁和主轴的影响，忽略了试验系统中存在的摩擦、损耗等因素. 总体上，文中采用的计算方法具有可行性.

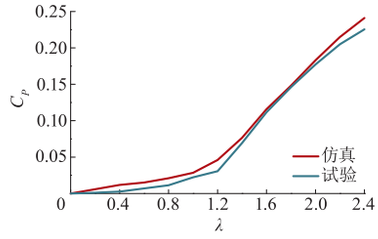


图 3　风力机功率系数计算与试验结果

Fig. 3　Simulated and experimental power coefficients of wind turbine

3　结果与分析

3.1　偏心风轮结构对风力机静态起动力矩影响

图 4 为在 10 m/s 风速下，具有不同偏心量的风力机的静态力矩系数（C_{Ts}）与方位角之间的关系曲线. 由于是 3 叶片风力机，其旋转周期是 120°，因此只需要研究该范围内的静态力矩特征即可. 静态起动力矩系数 C_{Ts} 计算公式为

$$C_{Ts}=\frac{T_s}{\frac{1}{2}\rho ARU^2}, \tag{1}$$

式中：T_s 为静力矩，N·m.

从图 4 可以看出，这 6 种不同偏心量的风力机 C_{Ts} 的最大值均出现在 40°附近，具有偏心量的风轮的 C_{Ts} 要高于无偏心量的风轮；C_{Ts} 最小值出现在

70°～80°,其中无偏心量($L=0$)和 $L=10$ mm 的风力机在75°附近的 C_{Ts} 为负值,这说明风力机在该位置无法起动,甚至有风轮反向旋转的趋势. 但对于偏心量 $L=20,30,40$ 和 50 mm 的风力机在75°方位角时的 C_{Ts} 值仍然为正值,并且偏心量越大 C_{Ts} 值越高,这说明了偏心风轮结构对起动力矩较大和较小的方位角处的气动特性改善效果较好. 然而,在0°～30°以及90°～120°内随着偏心量的增大,风力机的 C_{Ts} 值呈现减小趋势,说明偏心量的存在也在一些方位角处起到负面效果,偏心量并非越大越好,其影响跟风力机所处方位角密切相关.

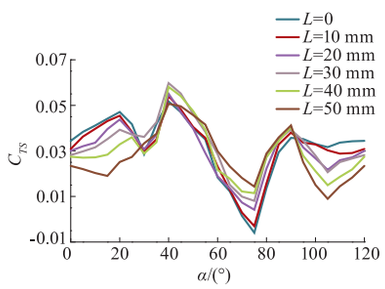


图4 风力机静态力矩系数特性

Fig. 4 C_{ts} as function of azimuth angle at different eccentricities

对图4中的计算结果进一步计算可以获得如图5所示的风力机静态起动力矩波动范围与最大值,用来考察具有不同偏心量风轮的整体起动特性.

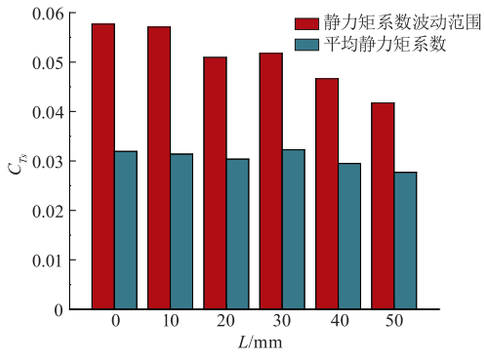


图5 风力机静态力矩系数波动范围与最大值

Fig. 5 Variation range and maximum value of C_{ts}

通过设置偏心量对风力机旋转周期内的平均静态力矩系数影响不大,但明显改变了力矩系数波动范围. 随着偏心量的增加其波动范围处于减小趋势,说明偏心量的存在使风力机在旋转周期内的静态力矩系数趋于平滑,风力机整体起动性能提高.

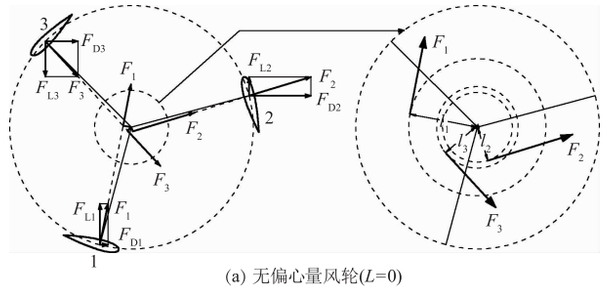
3.2 偏心风轮结构工作原理

由上述分析可知,在不同方位角下偏心风轮结构对直线翼垂直轴风力机的静态起动力矩影响也不同. 在此,以75°和105°这2个典型方位角为例,对具有偏心量 $L=30$ mm 和无偏心($L=0$)的风力机的静态受力进行分析,探究偏心结构风轮工作原理及对风力机起动性的影响.

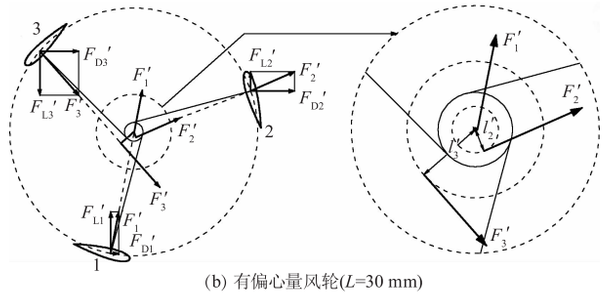
图6,7分别给出了在75°和105°方位角下的有无偏心量风轮的静态受力分析示意图. 图中风力机模型大小按照比例缩放,各个矢量箭头的长度和方向代表力的大小和方向,其数值和方向均由数值模拟计算得出. 叶片产生的升力和阻力分别为 F_L 和 F_D,二者的合力为叶片所产生的气动合力 F. 为了区别每个叶片产生的气动力,用 F_1,F_2 和 F_3 分别表示1号叶片、2号叶片和3号叶片的气动力. 同时,为了更清晰直观地描述各叶片产生的气动力作用在风轮旋转中心处的影响,在图中将叶片气动合力 F 的作用点按照其延长线方向移动至风轮中心,并将中间区域放大至右图表示. 单个叶片对风力机产生的转矩为

$$T=Fl, \tag{2}$$

式中:l 为该作用力与风轮旋转中心之间的力臂.



(a) 无偏心量风轮($L=0$)



(b) 有偏心量风轮($L=30$ mm)

图6 有无偏心量风力机在方位角75°时静态受力

Fig. 6 Static force on blades for ordinary and eccentric rotors at $\alpha=75°$

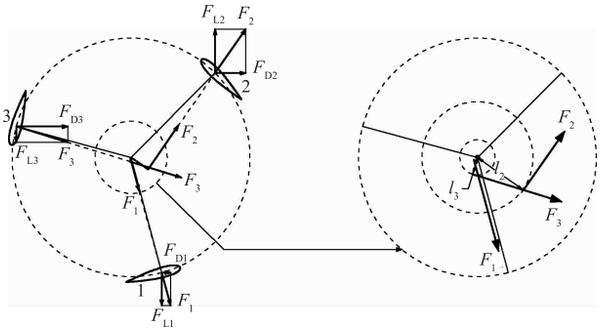
如图6a所示,对于无偏心量风力机,F_1 的作用点在风轮中心左侧,方向斜向右上方,其作用点与风轮中心之间有力臂 l_1,因此 F_1 会对风力机提供顺时针方向转矩,但风力机正常转动方向为逆时针,因此该叶片受到的气动力会阻碍风力机起动. F_2 的作用点在风轮中心下方,方向斜向右上方,其作用点与风轮中心之间有力臂 l_2,因此 F_2 会对风力机提

供逆时针方向的转矩,这与风力机正常转动方向相同,即该叶片产生的气动力会促使风力机正常起动;同理,F_3 的作用点在风轮中心的左下方,其方向斜向右下方,其作用点与风轮中心之间有力臂 l_3,因此 F_3 也会对风力机提供逆时针方向的转矩,也会促使风力机正常起动,但是由于 F_1 提供的顺时针转矩要略大于 F_2 和 F_3 提供的逆时针转矩,因此在此位置,无偏心量风力机的静态力矩系数为负值,有向相反的方向转动趋势.

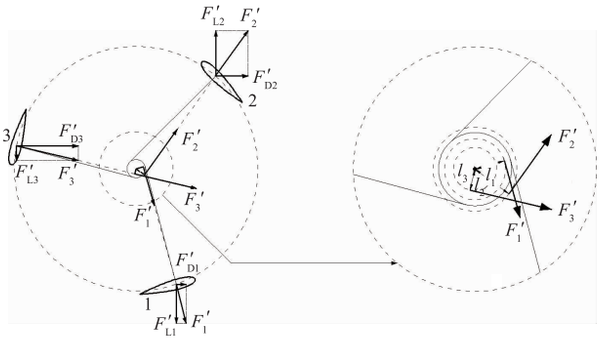
如图 6b 所示,由于偏心量的存在,改变了原有各叶片产生气动力的作用点位置,对于 F_1',其作用点几乎与风轮中心重合,因此 F_1'对风轮中心力臂很小,可以忽略不计. F_2'的作用点在风轮中心下方,其方向斜向右上方,其作用点与风轮中心之间有力臂 l_2',因此 F_2'会对风力机提供逆时针方向转矩,这与风力机正常转动方向相同;同理,F'_3的作用点在风轮中心的左下方,其方向斜向右下方,其作用点与风轮中心之间有力臂 l_3',也会对风力机提供逆时针方向的转矩,也会促使风力机正常起动,因此在 75°方位角下,具有偏心量 $L=30$ mm 的风力机的静态力矩系数为正值,风力机叶片受到的气动力会促使风力机正常起动.

由图 7a 可以看出,在 105°方位角下,F_1 的方向是斜向右下方,对于无偏心量的风力机 F_1 的作用点几乎与风轮中心重合,因此 F_1 对风轮中心的力臂很小,可以忽略不计. F_2 的作用力在风轮中心右下方,其方向斜向右上方,其作用点与风轮中心之间有力臂 l_2,因此 F_2 会对风力机提供逆时针方向的转矩,这与风力机正常转动方向相同;同理,F_3 的作用点在风轮中心的左下方,其方向斜向右下方,其作用点与风轮中心之间有力臂 l_3,也会对风力机提供逆时针方向转矩,使风力机正常起动,由于力臂 l_2 较大,因此在该位置处,无偏心量风力机的叶片产生的气动力能够提供正向转矩.

如图 7b 所示,由于偏心量的存在,F_1'的作用点位于风轮中心的右侧,方向斜向右下方,作用点与风轮中心有力臂 l_1',因此 F_1'会对风力机提供顺时针方向转矩,而风力机正常转动方向为逆时针,因此该叶片受到的气动力会阻碍风力机起动;F_2'的作用点风轮中心右下方,其方向斜向右上方,作用点与风轮中心有力臂 l_2',因此 F_2'会对风力机提供逆时针方向的转矩,这与风力机正常转动方向相同;同理,F_3'的作用点在风轮中心左下方,其方向斜向右下方,作用点与风轮中心之间有力臂 l_3',也会对风力机提供逆时针方向转矩,会促使风力机正常起动. 对于偏心量的风力机,F_1'阻碍风力机起动,F_2'和 F_3'虽然能促使风力机起动,但是对风力机产生的总的转矩要小于无偏心量的风力机转矩,因此,在此位置,具有一定偏心量的风力机的静态力矩系数要小于无偏心量的风力机的静态力矩系数.



(a) 无偏心量风轮(L=0)



(b) 有偏心量风轮(L=30 mm)

图 7　有无偏心量风力机在方位角 105°时静态受力

Fig. 7　Static force on blades for ordinary and eccentric rotors at $\alpha=105°$

3.3　偏心风轮结构对风力机输出功率影响

在研究了偏心风轮结构对直线翼垂直轴风力机的起动特性影响的基础上,研究其对风力机输出功率特性的影响. 图 8 为具有不同偏心量风力机在风速 10 m/s 时的输出功率 C_P 与叶尖速比 λ 之间的关系. C_P 与 λ 的定义为

$$C_P=\frac{P}{\frac{1}{2}\rho AU^3},\tag{3}$$

$$\lambda=\frac{\omega R}{U},\tag{4}$$

式中:P 为实际输出功率,W;ρ 为空气密度,kg/m^3.

从图 8 中可以看出,不同的偏心量对风力机功率系数有较大影响. 具有偏心量风力机的功率系数在各减速比下都较无偏心量的风力机有不同程度的提高. 例如,在尖速比 $\lambda=1.0$ 时,偏心量 $L=30$ mm 和 $L=50$ mm 的 C_P 比无偏心量风力机高出

90%和120%. 说明偏心风轮结构在低转速下仍然可以发挥较好的作用. 在高尖速比时,具有不同偏心量的风力机的最大功率系数均出现在尖速比为1.8附近,且所有具有偏心量的风力机的C_P均比无偏心量风力机的C_P高,具有偏心量$L=30$ mm的风力机的最大功率系数最高,较无偏心量风力机高出12%. 因此可以说,偏心风轮结构可有效提高风力机输出功率特性,但偏心量要适当,不宜过小也不能过大.

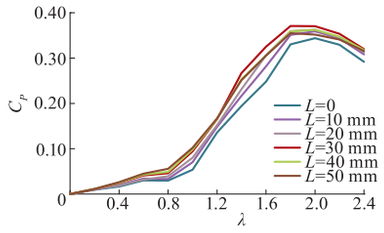


图8 风力机功率系数

Fig. 8 Power coefficient of wind turbine

图9为尖速比$\lambda=1.8$时,具有不同偏心量风力机在一个旋转周期内的力矩系数变化情况.

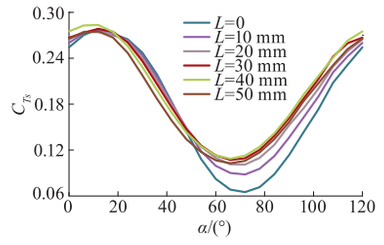


图9 1.8尖速比时风力机力矩系数特性

Fig. 9 Torque coefficient of wind turbine at 1.8 tip speed ratio

从整体上看,相对于静态力矩系数曲线,旋转状态下的风力机力矩系数变化比较平滑. 在方位角0°~50°内,具有偏心量风轮的力矩系数普遍低于无偏心量风力机,而在这之后,随着角度增大,具有偏心量风力机的力矩系数均高于无偏心量风力机,尤其是在70°方位角附近,在无偏心量风力机的力矩系数最低处,偏心风轮的力矩系数改善效果也最好. 由此可见,偏心风轮结构发挥作用主要是在风轮旋转周期的后半段. 再通过如图10所示来分析在此尖速比下一个周期内的力矩系数波动范围与最大力矩系数,可知与静止状态相同,旋转状态下具有偏心风轮结构的风力机的力矩波动仍然较无偏心风轮要小,这对于风力机的平稳运转十分有利. 而平均力矩系数也是逐渐随偏心量增大而增大,$L=30$,40 mm的偏心风轮效果最好,而当偏心量增大到$L=50$ mm时,改善效果降低. 这说明偏心量并非越大越好. 后续需要对风轮结构参数与偏心量关系进行深入研究.

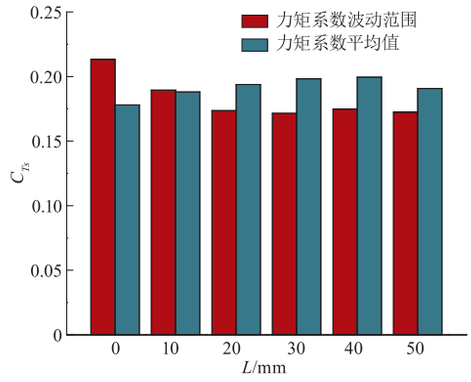


图10 尖速比为1.8时风力机力矩系数特性

Fig. 10 Peak torque coefficient of wind turbine at 1.8 tip speed ratio

4 结 论

提出了一种具有偏心风轮结构的直线翼垂直轴风力机,利用数值模拟计算了具有不同偏心量风力机的静态起动力矩和输出功率系数,主要结论如下:

1)文中所提出的偏心风轮结构可在一定程度上有效改善直线翼垂直轴风力机的静态起动特性和输出功率特性. 说明了仅从风轮结构优化上也可提升该种风力机的性能,为今后风力机的设计开发提供了新的思路.

2)对于风力机静态起动特性,适当的偏心量可以消除风力机在某些方位角处的反向力矩,提高静态力矩系数,同时使静态力矩系数波动变得平滑. 但偏心量对风力机静态力矩的影响与方位角密切相关,在一些方位角处也起到负面效果. 其影响机理主要是由于偏心结构改变了叶片气动力作用在旋转中心的位置造成的. 因此,偏心量要适当,不能过小也不宜过大.

3)对于风力机输出功率特性,适当的偏心量可有效提高风力机的输出功率系数,在文中设置的6种偏心量风轮中,最大功率系数可较无偏心风轮提高12%. 同时,在旋转周期内的力矩波动范围也变得平滑,有利于风力机平稳运行.

参考文献(References)

[1] 刘希昌, 莫秋云, 李帅帅,等. 小型垂直轴风力发电

机的气动噪声数值模拟与试验验证[J]. 流体机械, 2016, 44(6):11 - 16.
LIU Xichang, MO Qiuyun, LI Shuaishuai, et al. Numerical simulation and analysis of aerodynamic noise based on small vertical axis wind turbine [J]. Fluid machinery, 2016, 44(6):11 - 16. (in Chinese)

[2] 李春曦, 李新颖, 叶学民. 垂直轴风力机结构及性能改进的研究进展[J]. 风机技术, 2013(1):67 - 73.
LI Chunxi, LI Xinyin, YE Xuemin. Reviews on improved structure and performance of vertical axis wind turbines [J]. Compressor, blower & fan technology, 2013 (1): 67 - 73. (in Chinese)

[3] 杨从新, 李寿图, 王秀勇. 低风速下 H 型垂直轴风力机气动性能[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10): 888 - 893.
YANG Congxin, LI Shoutu, WANG Xiuyong. Aerodynamic performance of H type vertical axis wind turbine under condition of low wind speed[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(10): 888 - 893. (in Chinese)

[4] 杨从新, 巫发明, 王立鹏, 等. 设计参数对直叶片垂直轴风力机功率系数的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(5):47 - 50.
YANG Congxin, WU Faming, WANG Lipeng, et al. Effect of design parameters on power coefficient of a straight - bladed vertical - axis wind turbine[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(5): 47 - 50. (in Chinese)

[5] 徐璋, 霍玉雷, 陈勇, 等. 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, 43(3): 261 - 264.
XU Zhang, HUO Yulei, CHEN Yong, et al. Optimum design and study on the properties of a new combined type vertical axis wind turbine[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, 43(3): 261 - 264. (in Chinese)

[6] 李岩, 赵守阳, 曲春明, 等. Savonius 风力机静态流场 PIV 可视化试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(2): 159 - 165.
LI Yan, ZHAO Shouyang, QU Chunming, et al. PIV visualization experiment on static flow field of Savonius wind turbine[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2018, 36(2): 159 - 165. (in Chinese)

[7] 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.
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, 2018, 36(2): 154 - 158. (in Chinese)

[8] 姚激, 黄剑峰, 彭明军, 等. 变攻角垂直轴风力机三维定常流场数值模拟[J]. 机械与电子, 2011(7): 21 - 24.
YAO Ji, HUANG Jianfeng, PENG Mingjun, et al. Numerical simulation on 3D steady for different angles of attack of vertical axis wind turbine[J]. Machinery & electronics, 2011 (7): 21 - 24. (in Chinese)

[9] 舒超, 蔡新, 潘盼, 等. 垂直轴风力机改进翼型气动及功率特性研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 162 - 165.
SHU Chao, CAI Xin, PAN Pan, et al. Research on aerodynamic and power characteristic for improved airfoils of vertical axis wind turbine[J]. Water resources and power, 2015, 33(1): 162 - 165. (in Chinese)

[10] 姚激, 黄剑峰, 袁伟斌, 等. 安装角变化下垂直轴风力机气动性能的研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 148 - 150.
YAO Ji, HUANG Jianfeng, YUAN Weibin, et al. Study on aerodynamic performance of vertical axis wind turbine with different installation angle[J]. Water resources and power, 2012, 30(2): 148 - 150. (in Chinese)

[11] 王颖达, 吴国庆, 倪佩佩, 等. 垂直轴风力机二维流场数值模拟[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2013, 12(4): 42 - 46.
WANG Yinda, WU Guoqing, NI Peipei, et al. Two-dimensional flow field numerical simulation for vertical axis wind turbines[J]. Journal of Nantong University (natural science edition), 2013, 12(4): 42 - 46. (in Chinese)

[12] 陈亚伟. 基于 Fluent 轴流风叶的气动性能分析[J]. 流体机械, 2016, 44(10):51 - 54.
CHEN Yawei. Aerodynamic performance analysis of axial fan based on Fluent[J]. Fluid machinery, 2016, 44(10): 51 - 54. (in Chinese)

[13] 孙海涛, 熊鹰, 时立攀. 螺旋桨流固耦合特性的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 23 - 29.
SUN Haitao, XIONG Ying, SHI Lipan. Numerical simulation of fluid - structure interaction characteristics for propeller[J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2015, 36(1): 23 - 29. (in Chinese)

(责任编辑　谈国鹏)