

文章编号:0254-0096(2020)10-0323-09

# 可变偏心距风力机功率调节方法实验验证

包道日娜, 刘旭江, 王小雪, 李常春, 王帅龙, 刘嘉文

(内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 分析可变偏心距风力机工作机理, 给出偏转角与偏心距以及来流风速之间的关系, 推导风轮侧偏状态下风轮和尾翼受力及力矩公式, 并分析风轮侧偏过程中失速效应及陀螺力矩的影响。通过对 1.5 kW 水平轴可变偏心距风力机测试样机进行风洞实验, 验证可变偏心距风力机在超额定风速工况下可通过调节偏心距使风轮发生侧偏, 有效降低风能利用率, 当风速升到 15 m/s 时, 左、右偏心工况下对应的风能利用系数可分别降至 0.190 和 0.193, 在这过程中功率调控误差不超过 10%。结果证明了变偏心距功率调节方法的可行性, 可为该调节方式进一步电控部分的设计以及成品的研制方面奠定理论和实验基础。

**关键词:** 功率控制; 风功率; 气动力; 小型风力机; 风洞实验; 偏心距; 风轮侧偏

**中图分类号:** TK83

**文献标志码:** A

## 0 引言

由于机械强度和发电机容量等的限制, 中小型风力机在超过额定风速后输出功率值会不断上升, 因此需采取有效措施控制输出功率值, 以确保风力发电机不受损害<sup>[1]</sup>。在国外, 多伦多大学的 Bystryk 等<sup>[2]</sup>根据现场采集的风数据和计算机仿真数据建立起计算机模型, 对小型风力发电机在间歇风中的功率控制策略进行分析; 日本琉球大学的 Senju 等<sup>[3]</sup>提出利用俯仰角控制风力发电机输出功率, 并通过实际的风电系统模型进行仿真, 验证了方法的有效性; 美国北卡罗莱纳大学的 Bikdash 等<sup>[4]</sup>对具有侧偏机构风力机进行研究, 实验发现风轮侧偏后风力机输出功率明显下降, 在高风速时所对应的平均功率远低于额定功率。在国内, 沈阳化工大学的李兆晨等<sup>[5]</sup>设计出一种能够自动调整迎风面大小的抗强风小型风力发电机, 通过让风轮上仰一定角度来改变扫掠面积, 最终控制风力发电机功率; 清华大学的谢伟等<sup>[6]</sup>提出水平轴风力机伞式转子的概念并对其模型进行测试, 结果表明伞式转子能有效调节折叠叶片的功率输出。

本文针对新提出的小型风力机变偏心距功率调节方法, 通过对可变偏心距风力机工作机理进行分析并且对 1.5 kW 水平轴可变偏心距风力机测试样机进行稳态风的功率输出特性实验, 完善可变偏心距风力机理论方面研究, 得到可变偏心距风力机在不同工况下功率输出

特性, 验证变偏心距方法作为一种小型风力机功率调节方式具备可行性。

## 1 可变偏心距风力机设计思想及功率调节原理

### 1.1 设计思想

可变偏心距风力机是基于中小型风力发电机组功率控制的方向设计出的一种具有功率调节功能的水平轴风力发电机。风力机可在风速和偏心距的共同作用下使风轮产生侧偏, 进而改变风轮的正对风面积, 最终控制风力机的输出功率。其工作原理可简述为: 在风力发电机安全运行的前提下, 当功率超过额定值时, 驱动装置驱动风轮和发电机相对尾翼中心线发生左右偏移, 空气对风轮产生的气动力使风轮向侧面偏转, 在尾舵对风的过程中形成新的平衡, 使风力机可在某一侧偏角下稳定运行, 达到调节风力发电机输出功率的目的。

### 1.2 功率调节原理

可变偏心距风力发电机主要由风轮、发电机、尾翼及塔架等部件组合而成。如图 1 为风力机在未发生偏心和偏心一定距离以后的结构示意图。图中  $V_1$ 、 $V_2$  为不同来流风速;  $\theta$  为偏转角, 即来流风速和风轮轴线之间的夹角;  $e$  为偏心距, 即风轮轴线与尾翼中心线之间的左、右相对距离。

收稿日期: 2019-11-16

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化项目(CGZH2018131)

通信作者: 包道日娜(1976—), 女, 博士、教授, 主要从事风能利用方面的研究。bdm125@163.com

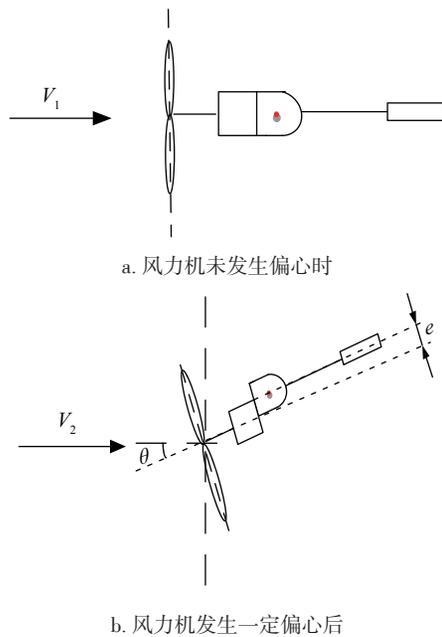


图1 可变偏心距风力机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of variable eccentricity wind turbine

当来流风速  $V_1$  低于额定风速时,风力机风轮能够正对风向旋转,风轮轴线与尾翼中心线相互重合,整机不会发生任何方向的偏转,如图 1a 所示。当来流风速  $V_2$  超过额定风速后,可通过调节发电机与尾翼之间的左右偏心距离,使风轮在风速和偏心距的共同作用下发生侧面偏转,形成风轮侧偏力矩和尾翼气动力矩,当二者平衡时,风力机稳定运行在某一侧偏角下,从而改变风轮的正对风面积,最终确保风力机的输出功率控制在额定功率附近,如图 1b 所示。其中所涉及到的左右方向是指塔架及尾翼部分固定不动,从尾翼向风轮方向看时风轮的左右偏移。

## 2 工作机理分析

Glauert 理论可用于估算风轮在侧偏状态下推力的大小,Glauert 认为从风轮流出的尾涡受到自身诱导速度的影响导致在风轮后面产生向下方倾斜,因此通过风轮的诱导速度是不均匀的<sup>[7]</sup>。

### 2.1 风轮侧偏状态下推力分析

在圆盘的合成速度  $W$  具有接近风轮平面的方向,所以升力  $L$  与垂直于风轮平面的推力  $T$  几乎完全相同,因此 Glauert 理论给出的垂直于风轮平面的诱导速度为:

$$u = \frac{2T}{\pi(2R)^2 \rho W} \quad (1)$$

式中,  $T$  ——风轮表面推力,  $N$ ;  $R$  ——风轮半径,  $m$ ;  $\rho$  ——空气密度,  $kg/m^3$ ;  $W$  ——圆盘处的合成速度,  $m/s$ 。

风轮表面推力为:

$$F_T = 2u\rho A_D \cos \theta W \quad (2)$$

式中,  $A_D$  ——风轮表面积,  $m^2$ 。

合成速度  $W$  为:

$$W = \sqrt{V_\infty^2 \sin^2 \theta + (V_\infty^2 \cos \theta - u)^2} \quad (3)$$

式中,  $V_\infty$  ——来流风速,  $m/s$ 。

如图 2,当风轮发生侧偏时,来流风作用于风轮表面的推力  $F_T$  可分解为沿风轮表面  $F_T \sin \theta$  和垂直于风轮表面  $F_T \cos \theta$ 。这 2 个力分别对风轮产生轴向力矩  $M_T$  和侧向力矩  $M_s$ :

$$M_T = F_T \cos \theta e \quad (4)$$

$$M_s = F_T \sin \theta L_1 \quad (5)$$

式中,  $e$  ——偏心距,  $m$ ;  $L_1$  ——风轮扫略面与回转中心轴线距离,  $m$ 。

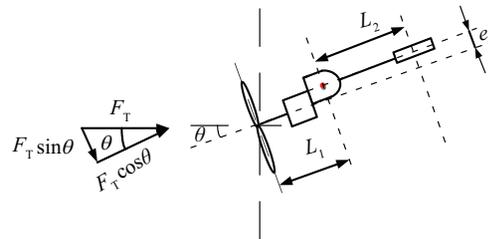


图2 风轮侧偏状态下推力示意图

Fig. 2 Thrust schematic in lateral state of wind wheel

### 2.2 尾翼气动力分析

对于可变偏心距风力机,当来流风流经风轮时在偏心距的作用下使风轮发生侧偏,致使来流风与尾翼形成一夹角即气流相对于尾翼面上的攻角  $\alpha$ ,如图 3 所示<sup>[8]</sup>。

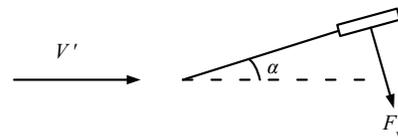


图3 尾翼力矩示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tail gas power

当来流风流经尾翼时,考虑到尾翼附近尾流的影响,作用在尾翼上的风速  $V'$  为:

$$V' = V_\infty(1 - a) \quad (6)$$

式中,  $V'$  ——流经尾翼的风速,  $m/s$ 。

气流作用在尾翼上产生的气动力  $F_v$  为:

$$F_v = \frac{1}{2} C_N \rho (1-a)^2 V_\infty^2 A_v \quad (7)$$

式中,  $C_N$ ——法向系数;  $A_v$ ——尾翼面积,  $\text{m}^2$ 。

法向系数  $C_N$  与气流攻角  $\alpha$  之间的关系如图 4 所示<sup>[9]</sup>。因为可变偏心距风力机尾翼与发电机之间属于刚性连接, 所以尾翼偏转角度  $\alpha$  等于风轮侧偏角  $\theta$ 。

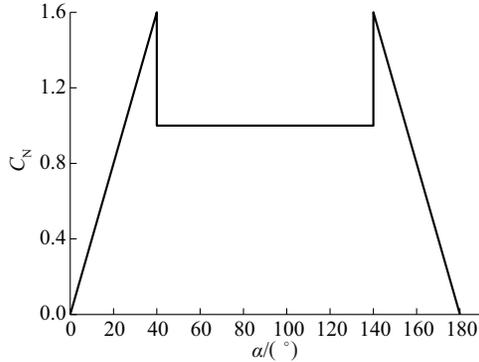


图4 法向力系数  $C_N$  与气流攻角  $\alpha$  的关系

Fig. 4 Relationship between normal force and coefficient of air flow angle of attack

尾翼上产生的气动力矩为:

$$M_v = \frac{1}{2} C_N \rho (1-a)^2 V_\infty^2 A_v L_2 \quad (8)$$

式中,  $L_2$ ——尾翼风压中心到旋转中心距离,  $\text{m}$ 。

### 2.3 风轮侧偏状态下平衡方程的建立

无论是风轮左偏还是右偏, 风轮轴向力矩与侧向力矩方向一致且与尾翼气动力矩方向相反, 所以建立力矩平衡关系:

$$M_T + M_S = M_v \quad (9)$$

即:

$$2uA_D \cos \theta \sqrt{V_\infty^2 \sin^2 \theta + (V_\infty^2 \cos \theta - u)^2} \cdot (e \cos \theta + L_1 \sin \theta) = \frac{1}{2} C_N (1-a)^2 V_\infty^2 A_v L_2 \quad (10)$$

分析式(10), 对于某一特定的可变偏心距风力机, 其尾翼面积  $A_v$ 、风轮面积  $A_D$ 、扫略面至旋转中心轴线距离  $L_1$  以及尾翼风压中心至回转中心距离  $L_2$  均为定值, 那么风轮的侧偏角  $\theta$  将由来流风速  $V_\infty$  以及偏心距  $e$  来决定。这也验证了可变偏心距风力机的工作机理即其在来流风速和偏心距的共同作用下使风轮产生侧偏, 改变风轮扫掠面积最终达到控制功率的效果。

## 3 可变偏心距风力机输出功率分析

对于风轮侧偏状态下的风力机, 可采用轴向动量定理估算其输出功率。

### 3.1 风轮侧偏时功率输出

如图 5 所示, 对于可变偏心距风力机在风轮侧偏角度为  $\theta$  时输出功率的分析, 可以根据动量定理: 无穷远处来流风在侧偏风轮转轴方向的分量为风速  $V_\infty \cos \theta$ , 通常认为致动盘引起气流速度变化, 该诱导速度在转轴方向上的分量为  $-aV_\infty$ , 在圆盘上转轴方向的净速度  $V_d$  为:

$$V_d = V_\infty (\cos \theta - a) \quad (11)$$

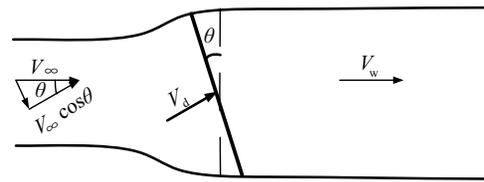


图5 风轮侧偏状态下的动量定理示意图

Fig. 5 A schematic view of rotor momentum theorem cornering state

气流流经圆盘时速度发生变化, 定义风轮远后方的尾流风速为  $V_w$ , 速度总变化量为  $V_\infty - V_w$ , 动量变化量等于速度变化量乘以质量流量。引起动量变化的力完全来自于流过制动盘前后的压力差, 所以:

$$(p_d^+ - p_d^-) A_D = (V_\infty - V_w) \rho A_D V_\infty (\cos \theta - a) \quad (12)$$

式中,  $p_d^+$ ——风轮前的静压,  $\text{Pa}$ ;  $p_d^-$ ——风轮后的静压,  $\text{Pa}$ 。

对流管中垂直于致动盘的上游和下游剖面分别使用伯努利方程可得风轮轴功率为:

$$P = 2\rho A_D V_\infty^3 a (\cos \theta - a)^2 \quad (13)$$

当风轮转轴与风向夹角为  $\theta$  时, 根据贝兹理论此时风力机输出功率  $P_\theta$  为<sup>[10]</sup>:

$$P_\theta = P' \cos^3 \theta \quad (14)$$

式中,  $P_\theta$ ——风轮在某一偏转角下输出功率,  $\text{W}$ ;  $P'$ ——风轮未偏转时理论输出功率,  $\text{W}$ 。

### 3.2 风能利用效率的变化

对于可变偏心距风力机, 当来流风速  $V_1$  小于额定风速时, 其入流角为  $\phi_1$ , 桨距角为  $\beta$ , 此时的攻角  $\alpha_1 = \phi_1 - \beta$ 。一般情况下,  $\alpha_1$  稍稍小于所选翼型的临界攻角  $\alpha_n$ 。当来流风速  $V_2$  大于额定风速时, 风轮在来流风与偏心距的共同作用下发生侧偏, 偏转角为  $\theta$ , 此时入流角  $\phi_2 > \phi_1$ , 而桨距角  $\beta$  不变, 所以气流的攻角  $\alpha_2 > \alpha_1$ , 如图 6 所示<sup>[11]</sup>。当攻角  $\alpha_2$  大于临界攻角  $\alpha_n$  之后, 翼型表面会形成涡流, 从而导致气流阻力增大, 升力下降, 气动效率下降。

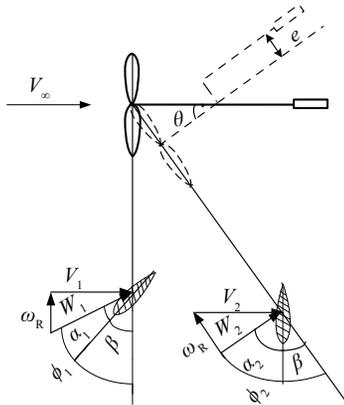


图6 攻角变化示意图

Fig. 6 Diagram of angle of attack change

因此,在可变偏心距风力机工作过程中,通过增大偏心距使风轮侧偏角 $\theta$ 增大,风轮在来流风方向上的扫掠面积减小,输出功率随之减小;另一方面,因风轮侧偏角 $\theta$ 的增大会使入流角随之增大,攻角 $\alpha$ 也随之增大,当超过临界攻角后会使风轮的失速效应加重,可有效降低风能利用效率。

#### 4 陀螺力矩的影响

根据可变偏心距风力机的工作原理,当风速超过额定风速时,通过改变偏心距来改变风轮扫略面积,降低输出功率,最终达到功率控制、保护风力机的目的。因此在风轮偏转过程中,风轮一方面绕轮毂中心旋转,另一方面还绕回转中心发生偏转。在这一过程中,风力机轴承系统还会产生附加的陀螺力矩,其主要作用是在风轮发生侧偏的过程中阻碍风轮发生侧偏,所以陀螺力矩会影响风力机运行的稳定性及安全性,非常有必要对其进行分析。陀螺力矩的表达式为:

$$M_d = 2J_b \Omega \omega \sin \Omega t \quad (15)$$

式中, $J_b$ ——风轮的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $\omega$ ——风轮绕回转中心侧偏的角速度,  $\text{r}/\text{min}$ ;  $\Omega$ ——风轮的旋转角速度,  $\text{r}/\text{min}$ 。

通过陀螺力矩的表达式,结合陀螺力矩的性质可知,陀螺力矩只产生于风轮侧偏的过程中。在这一过程中,由于风轮绕轮毂中心的旋转角速度 $\Omega$ 和绕回转中心侧偏的角速度 $\omega$ 不同,产生的陀螺力矩大小也不同<sup>[12]</sup>。当陀螺力矩值大于风轮侧偏力矩时,会使风轮向偏转角减小的方向偏转,而在此过程中陀螺力矩又逐渐减小,当其小于风轮侧偏力矩时,风轮会继续向偏转角增大的方向偏转。

## 5 实验验证

为了研究可变偏心距风力机的输出特性,对一台1.5 kW 五叶片可变偏心距风力机进行风洞试验。具体参数见表1。

表1 风力机参数

Table 1 Parameters of wind turbine

参数	数值	参数	数值
风轮直径/m	3	切入风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3
叶片数量	5	切出风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	20
风轮锥角	0	额定风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	12
风轮倾角	0	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	610
尾翼面积/ $\text{m}^2$	0.2	额定功率/ $\text{kW}$	1.5
$L_1/\text{m}$	0.26	$L_2/\text{m}$	1.0

### 5.1 实验设备

#### 5.1.1 低速风洞

本次测试实验在山东汇丰公司所提供的大型多用途回流式风洞中完成。风洞边界长度为300 m,中心线长度为230 m,最高高度为16 m。实验选用6 m×6 m 开口实验段,实验段长度28 m,最大风速可高于30 m/s,动力段最大功率500 kW,动压稳定性优于0.004。

#### 5.1.2 测试样机

测试样机通过对广州红鹰公司生产的型号为HY-1500 五叶片水平轴风力发电机进行改造后组装而成,如图7所示。由于风力机中发电机与尾翼固定相连,且风轮轴线与尾翼中心线相互重合,为了能够实现“偏心”效果,需用到2块自制的连接部件——偏心板,通过偏心板之间的左右移动,进而改变风轮轴线与尾翼中心线之间的水平相对距离。



a. 风力机整机

b. 偏心调节机构

图7 实验测试样机

Fig. 7 Experiments test wind turbine

#### 5.1.3 数据采集系统

对于可变偏心距风力机的功率测试系统还需包含模拟负载、测试机箱等重要组成部件。通过测试系统能够实时收集、监测和处理风力机运行时所涉及的不同参

数,如表2所示。

表2 测试仪表的参数

Table 2 Parameters of test instruments

测试参数	测试仪表	选用型号	测量范围
输出电压/V	电压传感器	WBV124U02-0.2	0~500
输出电流/A	电流传感器	WBI 224S-0.2	0~100
大气压力/kPa	压力变送器	JQYB-1B	0~110
大气温度/°C	温度变送器	DWB-BP	-50~70
偏转角度/(°)	角度传感器	KTJV010B	0~360
旋转频率/Hz	频率变送器	WBF324aS2	0~100

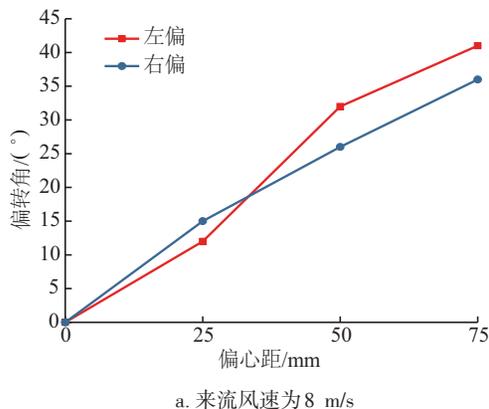
## 5.2 实验内容

通过测试风力机在不同偏心距对应不同来流风速下风力机的偏转角度以及输出功率值,验证理论计算结果的准确性。

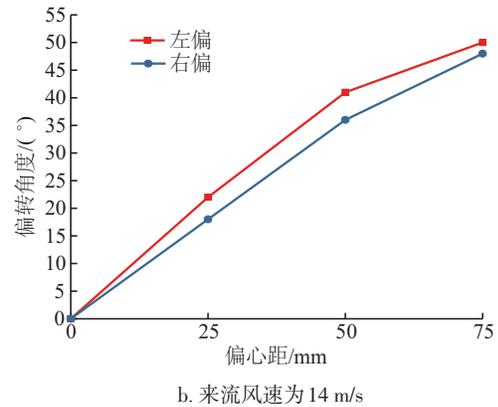
## 5.3 实验结果及分析

### 5.3.1 偏心距和来流风速对偏转角的影响

由式(10)可知,风轮偏转角度是由偏心距和来流风速共同决定的。首先验证偏心距对偏转角的影响,测试来流风速分别为8和14 m/s,对应偏心距分别为0、25、50、75 mm,分析风轮偏转角随偏心距的变化关系。由图8可知,在同一风速下,随着偏心距的增加,无论风轮向左偏移还是向右偏移,偏转角度都会增加,但是向左、向右偏转时其偏转角度不同,这是由于可变偏心距风力发电机的叶片选用翼型为NACA4412非对称翼型,左、右偏心时来流风作用在风力机叶片翼型上产生的升阻比不同导致的。其次验证来流风速对偏转角的影响,图9为相同偏心距下来流风速与偏转角的关系图,选取偏心距分别为25和50 mm,对应来流风速分别为8、10、12、14、16 m/s。由图9可知,在同一偏心距下来流风速增大,无论风轮向左或向右偏转,其偏转角度



a. 来流风速为8 m/s

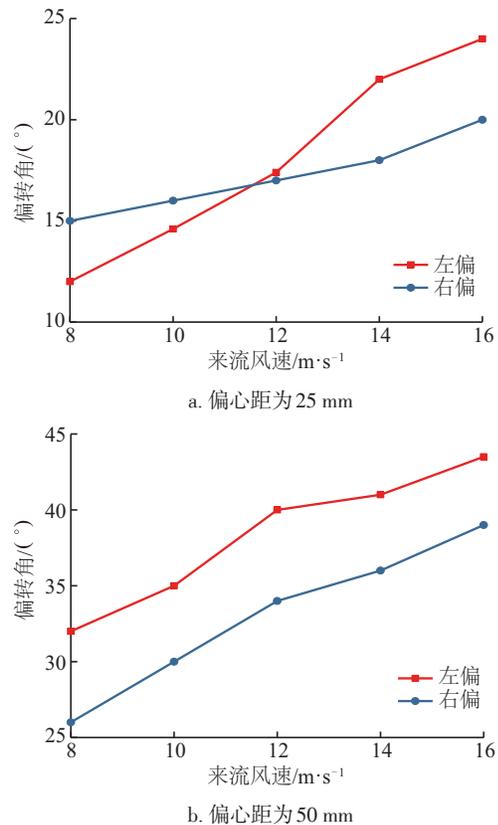


b. 来流风速为14 m/s

图8 偏转角随偏心距的变化关系

Fig. 8 Relationship between deflection angle and eccentricity

都随之增大。主要因为来流风速越大风轮表面推力越大,所以侧向力矩越大,导致风力机偏转角度越大。风轮向左或向右所偏转的角度不同是由于所受气动力不同造成的。



a. 偏心距为25 mm

b. 偏心距为50 mm

图9 偏转角随来流风速变化关系

Fig. 9 Relationship between deflection angle and incoming wind speed

由此可知,可变偏心距风力机风轮侧偏角度是由偏心距和来流风速共同决定的,在同一偏心距下,随着来流风速的增大偏转角增大。在同一来流风速的

情况下,偏心距越大风轮偏转角度越大,这也验证了式(10)结论的正确性。

### 5.3.2 输出功率与偏转角的关系

在风轮偏转角为 $\theta$ 时,对应的输出功率由式(14)给出。但很多学者给出了不同见解,对于输出功率与偏转角度的关系 $P_{\theta}=P'\cos^n\theta$ ,有些学者<sup>[13]</sup>认为 $n\in(2,3)$ 。为了验证风力机输出功率 $P_{\theta}$ 与偏转角 $\theta$ 的关系,分别测试偏心距为0、25、50、75 mm时在不同风速下输出功率和偏转角度,选择向右偏转的工况,选取来流风速为低于额定风速的8 m/s和高于额定风速的14 m/s工况进行分析,其结果基本可以验证公式 $P_{\theta}=P'\cos^n\theta$ 的正确性。当来流风速低于额定风速时,如图10a所示,测试输出功率与偏转角的关系更接近于 $P_{\theta}=P'\cos^3\theta$ ,当来流风速高于额定风速时,如图10b所示,二者关系更接近于 $P_{\theta}=P'\cos^2\theta$ 。

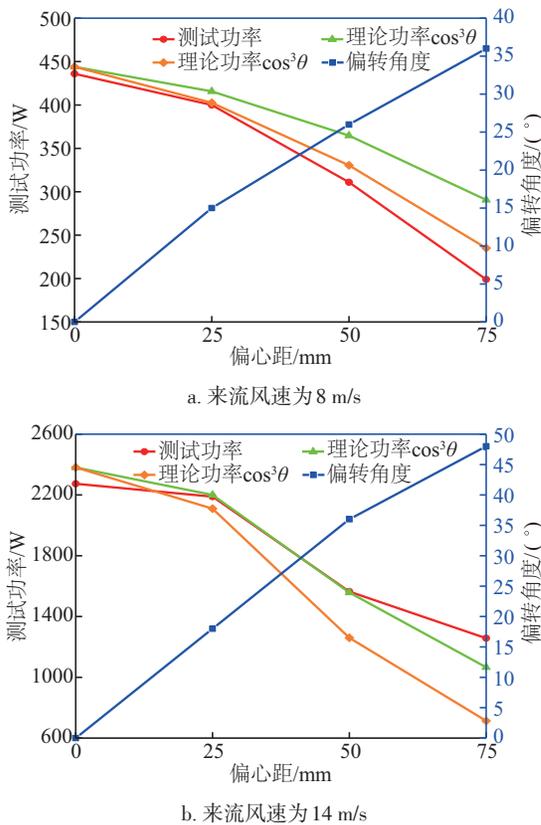


图 10 输出功率与偏转角关系图

Fig. 10 Output power and deflection angle diagram

### 5.3.3 变偏心距方法调节功率可行性验证

结合可变偏心距风力发电机的工作原理,要使风力机输出功率保持在额定功率附近,需准确掌握来流风速与偏心距离二者之间的对应关系。对实验数据进行分析可知:当风速为额定值12 m/s时,风力机不发生偏

转;当风速达到13 m/s时,为了对风力机的功率进行控制,发电机与尾翼之间需要分别向左、右偏心25 mm;风速为14和15 m/s的情况下,风力机的偏心距离分别为向左、右偏心50和75 mm,可使风力机输出功率保持在额定值1500 W附近,输出功率曲线如图11所示。

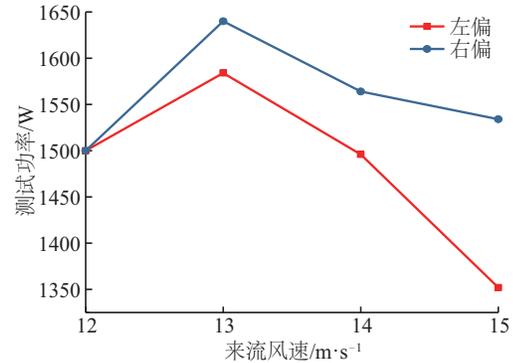


图 11 左、右偏心时输出功率对比曲线

Fig. 11 Power contrast when left and right eccentricity

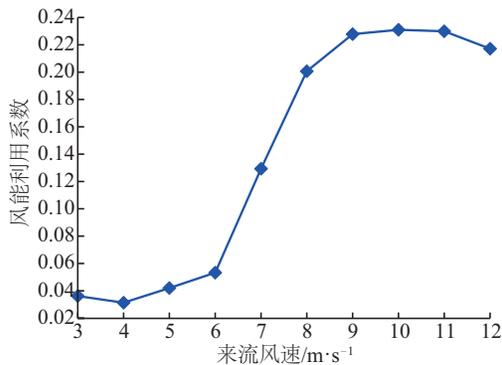
由实验结果可知,当风速为额定值12 m/s时,左右偏转2种工况下实验功率均在1500 W附近;当风速增大到13 m/s时,风力机的偏心距离为25 mm,2种偏心工况功率值都在上升,这是由于风力机刚发生偏心时风轮偏转的角度不大,功率控制效果不是很明显;但当风速从13 m/s继续上升到15 m/s时,由于偏转角度的增大使实验功率出现不同程度的下降。实验结果显示:对于向左偏心的工况,在风速为15 m/s、风力机向左偏移75 mm时测试功率值与额定功率值相差最大为148 W,调控最大误差约为9.86%。对于风力机向右偏心的工况,当风速为13 m/s、风力机向右偏移25 mm时实验功率为1640 W,与额定功率值相差最大为140 W,调控最大误差约为9.33%。

通过对比分析风力机实验功率变化特点可发现:当来流风速超过额定风速时,无论风力机向左或向右偏转,风力机输出功率大小均控制在额定功率附近,调控误差在允许范围之内,足以验证可变偏心距风力机设计的合理性以及功率调节方法的可行性及可靠性。

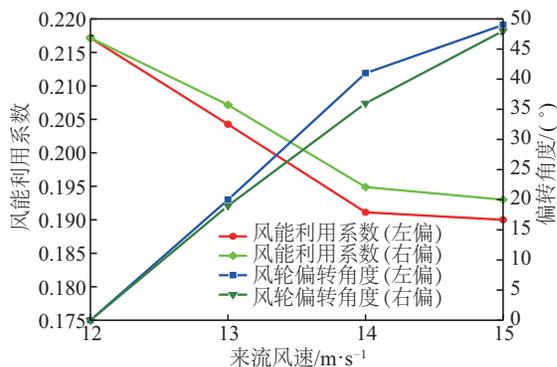
### 5.3.4 风力机发生不同方向偏心时风能利用系数随偏转角及风速的变化关系

风能利用系数可直观地反映出风力机对风能转换效率的高低。从图12可看出,可变偏心距风力机在额定风速以前正常工作时,风能利用系数出现先上升再持平最后略有下降的变化趋势。而处于额定风速以后,风力机的风能利用系数随风速的递增逐渐减小。当风速为12 m/s时,风能利用系数最大可达0.217,风速从12 m/s

增至 15 m/s 的过程中, 风力机无论从左右哪个方向偏移, 风能利用系数都下降。当风速到 15 m/s 时, 左右偏移情况下对应的风能利用系数降至 0.190 和 0.193。而风力机偏转角度随风速的变化趋势却截然相反, 即随着风速的递增, 偏转角度逐步变大, 风轮侧偏成功减小了风轮的正对风面积, 偏转角越大风轮转换的风能则越少, 风力机的风能利用系数越低。



a. 额定风速前



b. 额定风速后

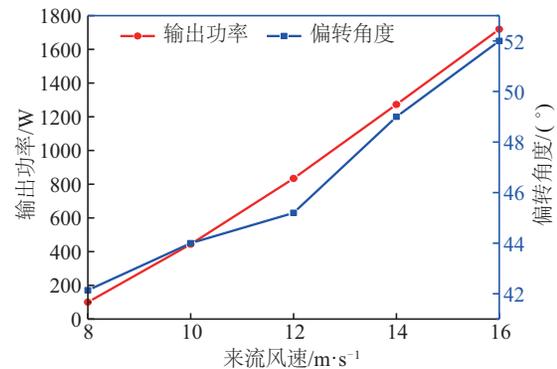
图 12 风能利用系数和偏转角随风速的变化曲线

Fig. 12 Curve of wind energy utilization coefficient and deflection angle with wind speed

### 5.3.5 陀螺力矩对可变偏心距风力机的影响

实验过程中还测试了偏心距为 100 mm 时可变偏心距风力机输出特性, 当风轮向右偏转时可稳定运行, 其输出功率与偏转角随来流风速的变化如图 13a 所示。但风力机向左偏转 100 mm 时, 当风速从 10 m/s 开始, 风力机在偏转到最大偏转角后开始向偏转角减小的方向回转, 且在这个过程中转速逐渐减小。当风轮回到某一偏转角度后再继续向最大偏转角方向偏转, 且持续这样往复动作, 如图 13b 所示。造成这一现象的主要原因是风轮偏转的过程中, 到某一刻产生的陀螺力矩会大于侧偏力矩, 造成风轮往回偏转, 当风轮回到到某一位置时风轮侧偏力矩又大于陀螺力矩, 使得风轮再向偏转

角增大的方向偏转。由于陀螺力矩大小时刻在变, 所以风轮会一直做此往复运动。



a. 右偏 100 mm 时不同风速下输出功率与偏转角变化



b. 左偏 100 mm 时风轮发生来回偏转

图 13 偏心距为 100 mm 时风力机输出状态图

Fig. 13 Eccentricity of 100 mm, output status diagram of wind turbine

## 6 结论

1) 可变偏心距风力机风轮偏转角是由来流风速和偏心距共同决定的。对于同一偏心距, 来流风速越大偏转角度越大; 对于相同来流风速, 偏心距越大风轮偏转角度越大。

2) 对于风轮发生侧偏时的输出功率情况, 当来流风速低于额定风速时, 输出功率与偏转角近似为  $P_0 = P' \cos^3 \theta$  的关系, 当来流风速高于额定风速时, 二者近似于  $P_0 = P' \cos^2 \theta$  的关系。

3) 通过实验验证了变偏心距作为中小型风力机功率调控方法的可行性, 在超额定风速工况下风轮向左、向右偏转调控功率最大误差分别为 9.86% 和 9.33%。

4) 在额定风速以前风能利用系数随风速的增大先上升再持平最后略有减小。在额定风速以后偏转角随风速的递增逐步增大, 而风能利用系数却逐渐减小。

5) 陀螺力矩会影响风力机运行的稳定性, 风速的变化较复杂时, 可变偏心距风力机风轮侧偏的速度也要有

相应的调整,否则会造成风轮轴承系统和主动侧偏控制系统的损伤。

### [参考文献]

- [1] 路阳. 风力发电系统的变桨距控制[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
LU Y. Variable pitch control of wind turbine system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [2] BYSTRYK J, SULLIVAN P E. Small wind turbine power control in intermittent wind gusts [J]. *Journal of wind engineering*, 2011, 99(5): 624-637.
- [3] ENJYU, KANEKO T, UEHARA A. Output power control for large wind power penetration in small power system [J]. *Renewable energy*, 2009, 34: 2334-2343.
- [4] BIKDASH M, CHEN D, HARB M, et al. A hybrid model of a small auto furling wind turbine [J]. *Journal of vibration and control*, 2001, 7(1): 127-148.
- [5] 李兆晨, 郭奕彤, 冯博. 一种抗强风小型风力发电机 [J]. *科技视界*, 2014(15): 93.  
LI Z C, GUO Y T, FENG B. A strong wind of small wind turbine [J]. *Science & technology*, 2014(15): 93.
- [6] XIE W, ZENG P, LEI L P. Wind tunnel testing and improved blade element momentum method for umbrella type rotor of horizontal axis wind turbine [J]. *Energy*, 2017, 119: 334-350.
- [7] 伯顿, 詹金斯, 夏普, 等. 风能技术 [M]. 武鑫, 译. 北京: 科学出版社, 2014: 130-136.  
BURTON T, JENKINS N, SHARPE D, et al. *Wind energy technology* [M]. WU X, Translation. Beijing: Science Press, 2014: 130-136.
- [8] 刘雄飞, 汪建文, 孙丰, 等. 微小型风力机重力调速机构侧倾角优化分析 [J]. *太阳能学报*, 2017, 38(7): 1929-1934.  
LIU X F, WANG J W, SUN F, et al. Optimization analysis of the inclination angle of the gravity speed regulating mechanism of the wind turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2017, 38(7): 1929-1934.
- [9] 孙丰. 风力机重力调速机构原理及倾角组合优化分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2017.  
SUN F. The principle of the gravity speed regulating mechanism of the wind turbine and the optimization analysis of the inclination angle combination [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2017.
- [10] 李常春, 包道日娜, 冯国英, 等. 小型水平轴变偏心距风力机功率调节方法研究 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(9): 2530-2535.  
LI C C, BAO D R N, FENG G Y, et al. Research on power regulation method of small horizontal axis wind turbine with variable eccentricity [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2018, 39(9): 2530-2535.
- [11] 萧占俊. 小型风力发电机组风轮侧偏调速的原理新解 [C]//中国农业机械工业协会风力机械分会, 北京, 2013.  
XIAO Z J. A new principle of speed regulation of small scale wind turbine by side-slip of wind turbine [C]// China Agricultural Machinery Industry Association Wind Machinery Branch, Beijing, 2013.
- [12] 郭军, 张锁怀. 变桨和偏航运动对风力发电机桨叶轴承载荷的影响 [J]. *机械与电子*, 2009(10): 56-60.  
GUO J, ZHANG S H. Research on the influence of loads of variable propeller and yaw of blade bearing of the wind turbine [J]. *Mechanical & electronic*, 2009(10): 56-60.
- [13] WHALE J, MCHENRY M P, MALLA T A, et al. Scheduling and conducting power performance testing of a small wind turbine [J]. *Renewable energy*, 2013, 55: 55-61.

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF POWER REGULATION METHOD FOR VARIABLE ECCENTRICITY WIND TURBINE

Bao Daorina, Liu Xujiang, Wang Xiaoxue, Li Changchun, Wang Shuailong, Liu Jiawen

*(School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)*

**Abstract:** On the basis of previous study results, the working mechanism of variable eccentricity wind turbine is analyzed. The relationship between deflection angle, eccentricity and incoming wind speed is given. The functions of rotor and tail derived force and torque are deduced under the wind wheel cornering state. The stall effect and the influence of gyroscopic moment in the process of wind turbine sidetracking are analyzed. Taking a 1.5 kW variable eccentricity wind turbine as the test sample, a wind tunnel experiment was carried out. The results indicate that the variable eccentricity wind turbine can adjust the eccentricity to drive the wind wheel cornering under eccentricity over-rated wind speed conditions. When the wind speed reaches to 15 m/s, the power coefficient corresponding left and right eccentric conditions can be reduced to 0.190 and 0.193, the power regulation error in this process is less than 10%. The results demonstrate the feasibility of variable eccentricity power regulation method, which provides the theoretical and experimental basis for the design of the electronic control part and development of the final product.

**Keywords:** power control; wind power; aerodynamic; small wind turbine; wind tunnel experiments; eccentricity; wind turbine yaw