

29-37

风力机, 叶片, 荷载计算



风力机叶片荷载计算

上海玻璃钢研究所 陈余岳 TK8

摘 要

本文是简化文献[1]的方法,采用准静态方法计算叶片荷载。在叶片偏航和旋转运动时各剖面速度和加速度公式基础上,建立了叶片静态气动和惯性荷载公式。考虑了锥角、侧风、风剪和塔影的影响。给出了小攻角时气动荷载的简化公式。应用本文的方法计算了变桨距FD-200kW风力机叶片和定桨距失速控制FD-30kW风力机叶片荷载并进行讨论,提出了一些结论。

一、引 言

叶片荷载主要有气动、惯性和重力荷载,这些荷载是随时间变化的,气动荷载因受阵风或风向变化是随机变化的。精确计算叶片荷载,要进行动力学分析,即进行动力响应和稳定分析。对于大型风力机叶片,进行动力学分析是很重要的。然而叶片动力学方程很复杂,程序编制也较复杂。在叶片初设阶段,或对于中小型风力机叶片,一般是采用准静态方法简化计算叶片荷载。关于准静态方法计算叶片荷载,有关风力机设计的书均有介绍,但大多忽

略了偏航运动引起的气动荷载和惯性荷载的变化。对于小型风力机,偏航率并不小,偏航对荷载的影响应该计及。在气动荷载计算方面,一般采用组合叶素和动量定理的理论,采用迭代计算方法得到各剖面诱导速度,从而可求出各剖面的气动分布荷载。诱导速度沿叶片展向是变化的,但作为近似计算,可假定诱导速度沿展向为常数,采用动量定理可导出诱导速度与风轮功率的关系,知道了风轮的功率,就可方便地求出诱导速度^{〔2〕}。

在叶片偏航和旋转运动时的各剖面速度和加速度公式基础上,建立了准静态气动和惯性荷载公式,考虑了锥角、侧风、风剪、塔影影

五、结 论

该偏航控制系统在实验室做了模拟试验,试验结果表明,整个偏航控制系统工作正常,各种功能都达到了预期的效果。试验时设置最小风向角变化为 10° 和 5° ,最大允许的偏航误差为 $\pm 1^\circ$,偏航阻尼时间为1分钟和30秒。该系统在实际运行中,还可根据实际工作的需要调整最小偏航风向角(U_0),最大允许的偏航误差(ϵ),和偏航阻尼时间。

该偏航控制系统是为10kW风力发电机组设计的,它是10kW微机自动监控风力发电机组的一个子系统,也可供中、大型风力发电机组参考。

参 考 文 献

- 〔1〕路平《小型风力田微机监控系统管理系统的研究》,哈尔滨工业大学,硕士论文,1989,1。
- 〔2〕孔昌平,路平,“小型风力田的微机监控系统”《风力发电》1989年第2期。
- 〔3〕孔昌平,《电机学》,哈尔滨工业大学出版社,1990,12。

响。对于小攻角情况，给出了气动荷载的显式表达式。在计算气动荷载时，采用了诱导速度为常数的假设，应用动量定理求出诱导速度。应用本文的方法，计算了变桨距FD-200kW风力机叶片和定桨距失速控制FD-30kW风力机叶片荷载，并对计算结果进行了讨论，提出了一些结论。

二、叶片运动学分析

详细的分析可参阅文献[1]。为叙述方便，仅给出必要的公式。

1. 坐标系

风轮运动包括偏航和旋转。为描述叶片运动，需建立一组坐标系。固定坐标系 $(xyz)_1$ ， z_0 轴通过塔中心，向上为正，旋转轴 y_1 与未偏航时风轮转轴一致。风轮偏航和旋转运动后，坐标系分别为 $(xyz)_1$ 和 $(xyz)_2$ 。叶片有一锥角 (β) ，坐标系 $(xyz)_2$ 转动 β 角得到叶片坐标系 (xyz) ，坐标原点在叶根处， z 轴通过叶剖面重心，这一点与文献[1]不同，文献[1]中 z 轴是通过剖面扭转中心的。座标变换公式：

$$S_1 = T_+ S, \quad S_2 = T_+ S_1, \quad S = T_p S_2 \quad (1)$$

式中 S_i 表示 i 坐标系。 T_+ 、 T_+ 、 T_p 分别表示偏航、旋转和锥角引起的座标旋转变换。

2. 量级分析

在推导叶片速度和加速度公式时，需对叶片一些无量纲参数进行量级分析。

$$\bar{z} \cdot \phi \sim O(1)$$

$$\bar{q} \sim O(\epsilon^{\frac{1}{2}})$$

$$a, e, \beta \sim O(\epsilon)$$

式中无量纲参数 $\bar{z} = z/R$, $\bar{q} = q/\omega$, $a = a/R$, $e = e/R$, R 为叶片半径, q 为偏航率, a 为偏航轴至风轮平面距离, e 为轮毂中心至叶根距离。与文献[1]不同，在推导速度和加速度时保留 ϵ^2 阶量。

3. 速度和加速度

以叶片、坐标系 (xyz) 为动坐标系，则在动坐标系中叶片轴线上任一点速度和加速度为：

$$v_b = \dot{r}_b + \bar{\Omega} \times r$$

$$a_b = \dot{r}_b + \bar{\Omega} \times r + \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times r) \quad (3)$$

式中 \dot{r}_b 、 r_b 分别为动坐标系原点的速度和加速度， $\bar{\Omega}$ 为叶片转动矢量， r 为叶片轴线上任一点矢量。通过矢量运算，可得速度和加速度。

$$\begin{aligned} \bar{v}_b = & [-q(a+z\beta)\cos\psi + r\omega]i \\ & + r q \sin\psi j - a q \sin\psi k \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_b = & [-q^2 r \cos\psi \sin\psi + 2q\omega z \beta \sin\psi]i \\ & + [-q^2(a+z\beta)\cos^2\psi + 2q\omega r \cos\psi \\ & + r\omega^2\beta]j + [-zq^2 \sin^2\psi + 2q\omega z \beta \cos\psi \\ & - r\omega^2]k \end{aligned} \quad (5)$$

三、叶片荷载

1. 风输入

组合风剪和塔影影响，风速可表达为：

$$v_s = v_s [1 + W_1(\psi) - T(\psi)] \quad (6)$$

$$W_1(\psi) = m_1 \frac{r}{h} \cos\psi = k_1 r \cos\psi$$

$$T(\psi) = \begin{cases} \frac{A}{2} [1 + \cos 12(\psi - \psi_0)] & \psi_0 - \psi_1 \leq \psi \leq \psi_1 + \psi_0 \\ 0 & \text{其余区域} \end{cases} \quad (7)$$

式中 v_s 为轮毂处风速， m_1 为风剪指数， h 为轮毂处高度， $A = 0 \sim 1$ ， ψ_0 为塔影半角， ψ_1 为塔影位置参数，本文 $\psi_1 = 180$ 度，风向有一侧偏角，则风速在叶片坐标系中为：

$$\bar{v} = T_p T_+ T_+ \begin{Bmatrix} 0 \\ v_s \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

2. 气动荷载

叶素风速为：

$$U_p = \bar{v}_r - v - v_s |j U_T = -(\bar{v}_r - v_s) i \quad (9)$$

式中 v 为轴向诱导速度，为简化计算，假定 v 沿叶片展向为常数，可采用动量定理求出^[2]。作用在叶素上的力和扭矩为：

$$\begin{aligned} dA_L &= \frac{1}{2} \rho \cdot b W (C_L U_p - C_D U_T) \\ dA_D &= \frac{1}{2} \rho \cdot b W (C_L U_T + C_D U_p) \\ dA_t &= dA_L X_t - \frac{1}{2} \rho \cdot b^2 W^2 C_{M0} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 W 为合成风速， C_L 、 C_D 分别为升力和阻力系数， ρ 为空气密度， b 为弦宽， X_t 为气

动中心至扭转中心距离, C_{w_0} 为俯仰力矩系数。有了上述公式, 我们就可方便地求出叶片各剖面气动力产生的剪力、弯矩和扭矩。当小风速时, 叶片各剖面攻角较小, 我们可得到简化气动力公式。令:

$$W \approx U_r \quad \alpha = \frac{U_r}{U_r} + \theta$$

$$C_L = C_{L_1} \alpha \quad C_D = 0 \quad (11)$$

式中 θ 为安装角, C_{L_1} 为升力线斜率。并假定叶片无扭角且等弦宽的, 则叶根处气动推力和拍动弯矩为:

$$\begin{aligned} S_y = & \frac{1}{2} \gamma I_b \omega^2 \left[\frac{\lambda}{2} + \frac{\theta}{3} \right. \\ & \left. + \bar{v} k_1 \left(\frac{\bar{u}_0}{4} + \frac{\bar{u}_1}{6} \right) \right] + \cos \psi \left[\frac{\bar{v} k_1}{3} \right. \\ & \left. - u_1 \left(\lambda + \theta \right) - u_1 \left(\frac{\lambda}{2} + \frac{2}{3} \theta \right) \right] \\ & - \frac{\bar{q}}{3} \sin \psi + \cos 2\psi \left(\frac{\bar{u}_0}{4} + \frac{\bar{u}_1}{6} \right) \bar{v} k_1 \\ & + \sin 2\psi \left(\frac{\bar{u}_1}{4} + \frac{u_1}{6} \right) \bar{q} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_x = & \frac{1}{2} \gamma I_b \omega^2 \left[\frac{\lambda}{3} + \frac{\theta}{4} \right. \\ & \left. + \bar{v} k_1 \left(\frac{\bar{u}_0}{6} + \frac{\bar{u}_1}{8} \right) \right] \\ & + \cos \psi \left[\frac{\bar{v} k_1}{4} - \bar{u}_0 \left(\frac{\lambda}{2} + \frac{2}{3} \theta \right) \right. \\ & \left. - \bar{u}_1 \left(\frac{\lambda}{3} + \frac{\theta}{2} \right) \right] - \frac{\bar{q}}{4} \sin \psi \\ & + \cos 2\psi \left(\frac{\bar{u}_0}{6} + \frac{\bar{u}_1}{8} \right) \bar{v} k_1 \\ & + \sin 2\psi \left(\frac{\bar{u}_1}{6} + \frac{\bar{u}_1}{8} \right) \bar{q} \quad (13) \end{aligned}$$

式中:

$$\gamma = \frac{1}{2} \rho_a b R^4 C_{L_1} \quad I_b = \int m \bar{X}^2 dz$$

$$\bar{u}_0 = \bar{a} q$$

$$\bar{u}_1 = \beta \bar{q}$$

$$\bar{v} = v_b / R \omega$$

$$\lambda = (v_b - u) / R \omega \quad (14)$$

式中 m 为叶片单位长度质量。文献(2)中给出了气动荷载的一次谐波分量, 本文给出了二次谐波分量。一般弦向方向气动力较小, 这

里就不给出了。

3. 惯性荷载

由式(5)加速度公式, 可方便地导出叶根处惯性荷载:

$$M_i^0 = q^2 (a S_b + I_b \beta \cos^2 \psi) - 2q \omega I_b \cos \psi - \omega^2 I_b \beta$$

$$M_i^1 = q^2 I_b \cos \psi \sin \psi - 2q \omega I_b \beta \sin \psi$$

$$M_i^2 = -q^2 (a S_b + I_b \beta \cos^2 \psi) + 2q \omega I_b \cos \psi + \omega^2 I_b \beta \quad (15)$$

上式 M_i^0 、 M_i^1 、 M_i^2 分别为惯性力产生的拍动弯矩、弦向弯矩和扭矩, 其中一些参数如下:

$$I_x = \int m z x_1 dz \quad S_x = \int m z dz$$

$$S_x = \int m x_1 dz \quad (16)$$

式中 x_1 为叶剖面扭转中心至重心距离。

4. 重力荷载

重力在叶片坐标系中为:

$$P_i = T_i, \quad T_i = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{Bmatrix} \quad (17)$$

式中 g 为重力加速度。重力产生的根端弯矩和扭矩为:

$$M_i^0 = g S_b \beta \cos \psi$$

$$M_i^1 = g S_b \sin \psi$$

$$M_i^2 = -g S_b \beta \cos \psi \quad (18)$$

上式 M_i^0 、 M_i^1 、 M_i^2 分别为拍动弯矩, 弦向弯矩和扭矩。

四、结果与讨论

实例1 为变桨距 FD-200kW 风力机叶片荷载计算。风轮下风向布置, 主要参数:

$\beta = 7^\circ$, $R = 16\text{m}$, $h = 28.4\text{m}$, $\omega = 41\text{r/min}$, $q = \frac{1}{2} r / \text{min}$, $X_1/b = 0.03$, $X_2/b = 0.04$, $I_b = 30730\text{kgm}^2$, $I_x = 150\text{kgm}^2$, $S_b = 4158\text{kgm}$, $m_1 = 0.25$, $A = 0.6$ 。各剖面叶厚不同, 叶剖面升阻曲线不同, 为简化计算, 各剖面均采用如下升、阻系数和俯仰力矩系数:

$$\alpha \leq 13^\circ, C_{L_1} = 2\pi, C_D = 0.05, C_{w_0} = 0.1,$$

$$13^\circ < \alpha \leq 20^\circ, C_{L_1} = 1.3, C_D = 0.1, C_{w_0} = 0.1$$

$$20^\circ < \alpha < 90^\circ \quad C_{L1} = 1.14 \sin 2\alpha$$

$$C_D = 1.08(1 - \cos 2\alpha)$$

$$C_{M0} = 0.248(1 - \cos 2\alpha)$$

计算风速 $v_b = 14\text{m/s}$, 诱导因子 $v = 0.3$ 。塔影对气动荷载的影响, 在文献[1] 中已讨论过, 这里不再重复, 故令 $A = 0$ 。图 1~3 为风向侧偏角 $\phi = 0, \pm 20^\circ$ 时叶根气动荷载, 图 1 为重力和惯性力产生的叶根荷载。由图 1~3 可见, 当 $\phi = 0$ 时, 气动弯矩为余弦形式。侧偏航率 (q) 较小, $q = \frac{1}{3} r/\text{min}$ 时, 引起的风速变化很小。最大拍动弯矩为 137kNm , 最小为 90kNm , 交变幅值为平均值的 20% 左右。考察风向侧偏对气动力的影响, 当 $\phi = \pm 20^\circ$ 时, 最大拍动弯矩没有增加, 主要原因: 当侧偏角为负值时, 叶片在上方, 合成风速增大, 但攻角减小, 而当叶片朝下时, 合成风速和攻角变化与此相反, 当小攻角时, 升力系数与攻角成正比, 这样合成风速增大与攻角减小对气动力影响几乎抵消, 反之也一样。因气动力不增加。侧偏角为正时也同样。气动扭矩主要是俯仰力矩系数 C_{M0} 一项。本例叶片攻角较小, C_{M0} 为常数, 合成风速变化将引起气动扭矩变化。风向侧偏角为 20° 时, 最大气动扭矩为 1.37kNm , 增加了 37% 左右。

由图 2 可知, 气动力产生的弦向方向弯矩很小, 可以忽略。重力产生的弦向弯矩为正弦形式, 对称交变, 交变幅值为 40kNm , 是产生根端疲劳的一个主要根源。重力产生的拍动弯矩、扭矩很小。拍动惯性力主要由两部分: 离心力产生的拍动弯矩 $l_b \omega^2 \beta$ 和陀螺力矩 $2q \omega l_b \cos \psi$ 。本例前者弯矩为 -68kNm , 后者为 $\pm 9\text{kNm}$, 对称交变。拍动方向惯性力与气动力迭加, 则最大拍动弯矩为 79kNm 左右。由于叶片锥角减小了叶片荷载, 对于大型风力机叶片设置叶片锥角是有利的。大型风力机侧偏航率一般不大, 陀螺力矩对叶片影响不大。

由图 4 可见, 最大惯性扭矩为 0.4kNm , 由两部分组成: 离心扭矩 0.336kNm , 方向与气动扭矩相反, 陀螺力产生的扭矩 0.045kNm , 相对来说是较小的。

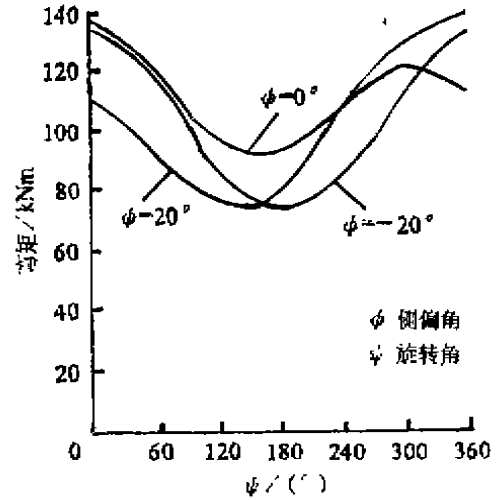


图 1 板端拍动气动弯矩

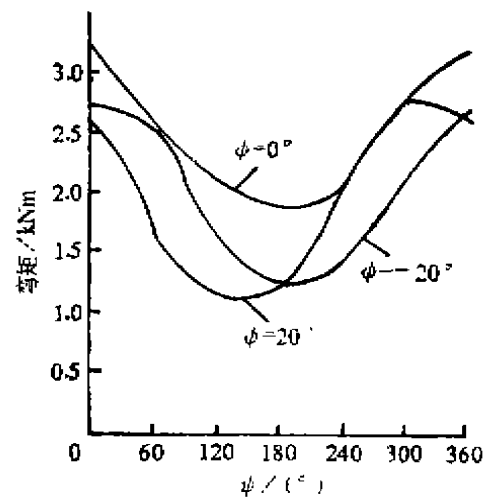


图 2 根端弦向气动弯矩

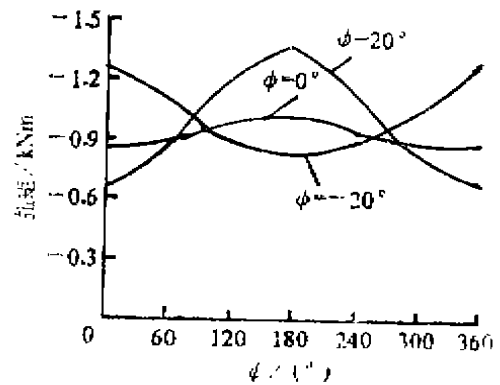


图 3 根端气动扭矩

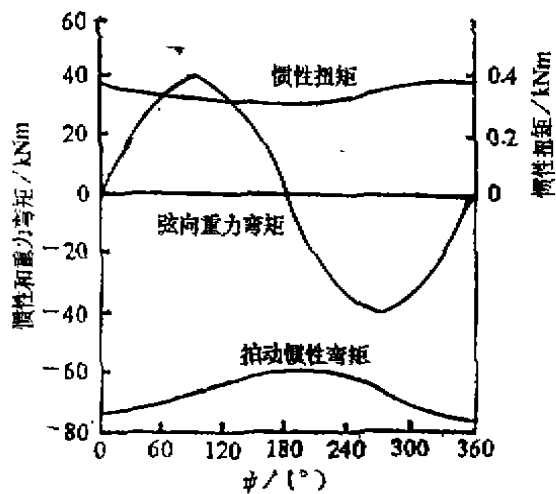


图4 根端荷载

实例2 为考察大攻角失速情况下荷载，我们计算了FD—30kW失速控制风力机玻璃钢叶片气动荷载。该风力机工作风速4.5~20m/s，额定风速12m/s时达到功率30kW，超过额定风速后，由于叶片的失速性能，功率基本保持在30kW左右。主要计算参数如下： $\beta=0$ ， $R=5.6\text{m}$ ， $\omega=72\text{r/min}$ ， $x_1/b=0.03$ ， $x_2/b=0.04$ ， $I_b=271\text{kgm}^2$ ， $I_s=2.3\text{kgm}^2$ ， $S_b=112\text{kgm}$ ， $m_1=0$ ， $v_{ts}=18\text{m/s}$ 。由于计算风速大，叶片各剖面均失速，需采用失速后升阻系数。为简化气动力计算，仍采用前例的气动系数曲线。

我们计算了风向侧偏角为 $\phi=0\sim 40$ 度5种情况气动荷载。这里仅给出拍动方向气动荷载计算结果，如图5所示。由于不计风剪及塔影影响，且 $\beta=0$ ，负侧偏角气动荷载变化情况与正侧偏角同，只不过相位相差180度，图5为 $\phi=0\sim 40$ 度时根端最大和最小拍动弯矩。最大弯矩发生在方位角为180度。

五、结 论

1. 本文从叶片偏航和旋转运动出发，建立了叶片气动、惯性和重力荷载公式，考虑了锥角、风剪、塔影、侧风等因素。本文方法较简单，避免了复杂的动力学计算，适合于叶片初

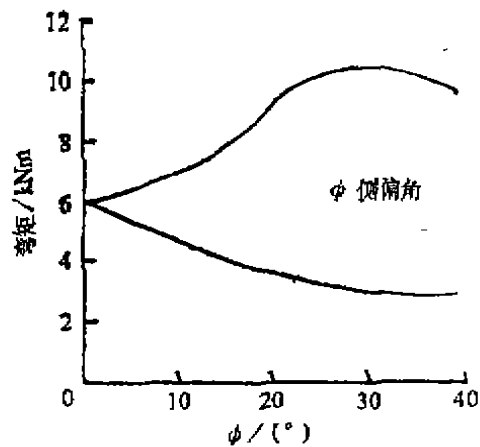


图5 根端拍动气动弯矩

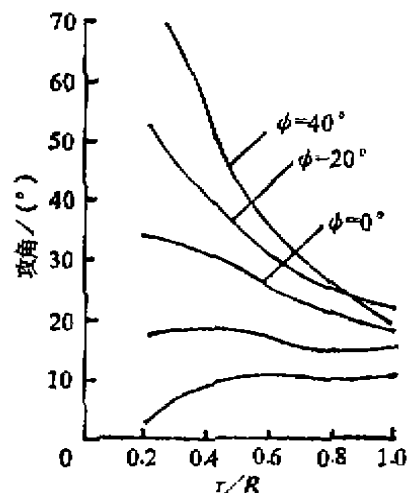


图6 最大最小攻角

步方案设计。

2. 对于大型风力机叶片，风剪和塔影将引起交变荷载。

3. 当风速较小，叶片处于小攻角状态，风向侧偏对气动荷载影响不大，而当大风速时，叶片处于大攻角失速状态，风向侧偏加深叶片失速，并引起较大的交变气动荷载。

4. 大型风力机叶片重力将产生较大的弦向方向交变荷载，也是一个主要的疲劳荷载。

5. 风力机叶片设置锥角，将使离心力产生的拍动弯矩和扭矩方向与气动力产生的相反，故可降低叶片的拍动弯矩和扭矩，大型风力机偏航率较小，偏航产生的陀螺力矩不大，可以不计。

⑩
34-38

风力发电, 水泵, 风力机

国外风电

风力发电水泵

(美) F. C. Vosper R. N. Clark

Vosp., FC 李力 TM614

摘 要

由于常规燃料能源的枯竭, 人们对独立的可替代能源系统的兴趣正在增加, 许多固定的农用负荷都位于电网到达不了或者输电设备安装非常不经济的地区, 灌溉水泵便是这样的例子, 需要装在边远的地区, 能量消耗高, 而且还需要自备的功率源。

在独立运行的水泵系统中, 带有一个永磁交流发电机的风力机用来产生可变电压和可变频率向标准三相感应电动机提供电力, 电压81~210V时, 变速发电机的频率为30~65Hz, 电压频率比的变化为2.7~3.2。电动机与水泵的总效率为37%~54%, 即相当于公用电网提供的电力。风速高于3.5m/s时系统开始运行, 我们认为此种风能转换系统提供的电力可以满足独立运行的抽水系统。

引 言

独立运行风力机在农业上有许多具体的应用, 因为负荷常常位于电源不能达到或不经济的地区。风能转换系统产生的机械能要比产生的电能实用性高, 但在负荷匹配容量和灵活性方面, 发电系统更加实用, 风能系统需配有调节设备以便适应不断变化的风源情况。

美国农业部、农业研究服务机构一直在研究风力发电在农场和乡村的应用。规划的一个目的便是开发抽水灌溉系统即独立的电力装置。这个风能转换系统必须具有向不同负荷提

供动力的能力, 以便于风电可在全年内持续利用。在这个项目中, 使用造价低廉的感应电动机向带有永磁发电机的风力提水系统提供电力。所有部件都可买到。

合理性探讨

风力机产生电力的两种方法是:(a)使用感应电机,(b)使用连接到同步变换器上的交流电机。感应电机滑差小, 但必须在固定的转速下运行, 这样便能引起运行中的风力机有一个变化中的叶尖速比(叶尖速度比风速)。风力机的功率系数(C_p)是叶尖速比的函数, 感应电机

参 考 文 献

[1] 陈余岳, “风力机叶片结构动力学分析”《风力发电》, 1991年第3期, 42~46。

[2] D. M. Eggleston, F. S. Stoddard, “Wind Turbine Engineering Design”, New York, 1987.