

风能是我国目前开发利用比较成熟的一种新能源，风电事业正在我国蓬勃发展。为了帮助读者了解风力发电知识，我们请长期从事风力发电研究工作的中国科学院电工研究所倪受元研究员撰写了《风力发电》讲座，以飨读者。

——编者

风力发电讲座

第二讲 风力机的工作原理和气动力特性

倪 受 元

1 空气动力学的基本知识

1.1 升力和阻力

物体在空气中运动或者空气流过物体时，物体将受到空气的作用力，称为空气动力。通常空气动力由两部分组成：一部分是由于气流绕物体流动时，在物体表面处的流动速度发生变化，引起气流压力的变化，即物体表面各处气流的速度与压力不同，从而对物体产生合成的压力；另一部分是由于气流绕物体流动时，在物体附面层内由于气流粘性作用产生的摩擦力。将整个物体表面这些力合成起来便得到一个合力，这个合力即为空气动力。

风轮叶片是风力机最重要的部件之一。它的平面形状与剖面几何形状和风力机空气动力特性密切相关，特别是剖面几何形状即翼型气动特性的好坏，将直接影响风力机的风能利用系数。

气流绕风轮叶片的流动比较复杂，是一个空间的三元流动。当叶片长度与其翼型弦长之比(展弦比)较大时，可以忽略气流的展向流动，而把气流绕叶片的流动简化为绕许多段叶片元(即叶素)的流动，叶素之间互相没有干涉。当每个叶素的展向长度趋向无穷小时，叶素就成了翼型，空气绕叶素的流动就成了绕翼

型的流动，也就成了二元流动或平面流动。

图 2-1 示出空气流过一块平板的情形，平板面与气流方向形成一个夹角 α ， α 称为攻角。由于平板上方和下方的气流速度不同(上方速度大于下方速度)，因此平板上、下方所受的压强也不同(下方压强大于上方压强)，总的合力 F 即为平板在流动空气中所受到的空气动力，其方向垂直于板面。此力可分解为两个分力：一个分力 F_y 与气流方向垂直，它使平板上升，称为升力；另一个分力 F_x 与气流方向相同，称为阻力。升力和阻力与叶片在气流方向的投影面积 S 、空气密度 ρ 及气流速度 V 的平方成比例，可以下式表示：

$$F_y = \frac{1}{2} c_y \rho S V^2$$

$$F_x = \frac{1}{2} c_x \rho S V^2$$

$$F = \frac{1}{2} c_r \rho S V^2$$

式中， c_y 称为升力系数； c_x 称为阻力系数； c_r 称为总的气动力系数。

所以

$$c_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (2-1)$$

$$c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (2-2)$$

升力系数与阻力系数之比称为升阻比，以 K 表示。则

$$K = \frac{c_y}{c_x} \quad (2-3)$$

升力是使风力机有效工作的力，而阻力则形成对

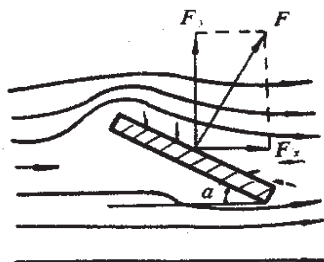


图 2-1 平板在流动空气中所受到的空气动力

风轮的正面压力。为了使风力机很好地工作，就需要叶片有这样的翼型断面，使其能得到最大的升力和最小的阻力，也就是要求具有很大的升阻比 K 。

1.2 影响升力系数和阻力系数的因素

1.2.1 翼型的影响 图 2-2 给出三种不同截面形状的翼型在相同攻角下的升力和阻力，不难看出，具有流线型截面的翼型所产生的升力远较平板翼型的升力大。这是因为当攻角不大时，流线型截面几乎不产生涡流，而方形平板在前沿则产生巨大的涡流，从而减弱了升力而增大了阻力。

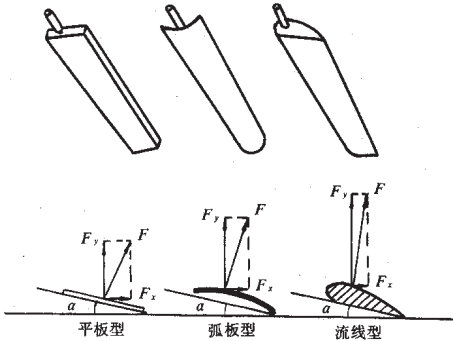


图 2-2 不同叶片截面形状的升力和阻力

1.2.2 攻角的影响 对于流线型叶片来说，它的前缘点 O 与后缘点 B 之间的连线 OB 称为翼弦，翼弦与前方来流速度方向之间的夹角即为攻角，如图 2-3 所示。

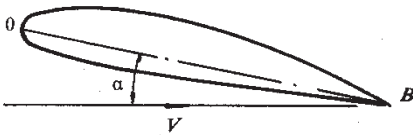


图 2-3 流线型叶片的翼型及攻角

图 2-4 给出了一种流线型叶片升力系数和阻力系数随攻角变化的曲线。从图中可以看出，随着攻角 α 由零逐渐增大， c_y 由某一数值开始随之增大，基本上呈线性变化。当攻角增至某一临界攻角 α_{cT} 时，升力系数达到最大值 $c_{y\max}$ 。当 $\alpha > \alpha_{cT}$ 时， c_y 开始随攻角增加而下降，故 α_{cT} 也称为失速攻角。在负攻角的情况下，即 $\alpha = -\alpha_0$ 时，翼型剖面上的升力系数为零。阻力系数曲线的变化与升力系数曲线有所不同，它有两个特征参数，即最小阻力系数 $c_{x\min}$ 和与其对应的攻角 $\alpha_{x\min}$ 。通常，阻力系数 c_x 是攻角 α 的二次方函数。

图 2-5 示出翼型升力系数对阻力系数的变化曲线，这个曲线称为极曲线。极曲线上的每一点对应一个攻角状态，从原点 O 至曲线上任意点 A 的连线 OA

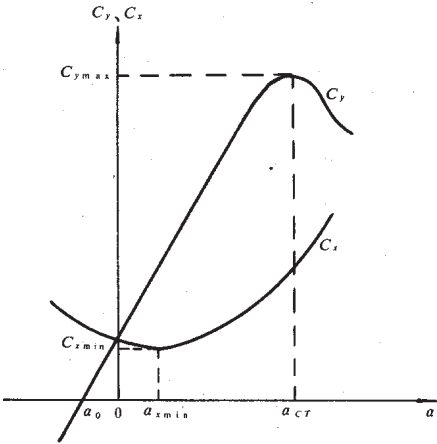


图 2-4 翼型的升力特性和阻力特性曲线

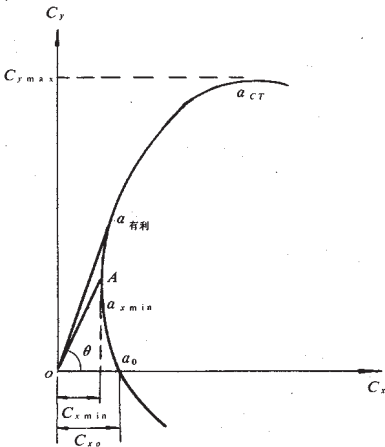


图 2-5 翼型极曲线

代表与某一攻角相应的总气动力系数 c_r ，直线 OA 的斜率 $\lg \theta = c_y / c_x$ ，即为该攻角下的升阻比。当 OA 与该曲线相切时（此时 A 点为切点），升阻比最大。

1.2.3 雷诺数的影响 c_y 、 c_x 不但与翼型及其在气流中的位置有关，也与阻滞空气流动的粘性力（即摩擦力）有关。这种粘性力可以用雷诺数 Re 表示：

$$Re = \frac{VL}{\nu} \tag{2-4}$$

式中， L 为弦长； ν 为空气的动粘度系数。 $\nu = \mu / \rho$ ，这里 μ 为粘性系数。

雷诺数是一个无量纲数。雷诺数愈小的流动，粘性作用愈大；雷诺数愈大的流动，粘性作用愈小。雷诺数增加，由于翼型附面层气流粘性减小，最大升力系数增加，最小阻力系数减小，因而升阻比增加。

1.2.4 翼型表面粗糙度的影响 翼型表面由于材料加工以及环境的影响，不可能绝对光滑，总有些凹凸不平。我们把凹凸不平的波峰与波谷之间高度的平均值称为粗糙度，记作 k_s 。翼型表面的粗糙度，特别是前缘附近的粗糙度，对翼型空气动力特性有很大影响。一般情况下，粗糙度增大使 c_x 增加，而对 c_y 影响不大。实际情况中，真正的气动光滑表面是不存在的。工程上只要表面粗糙度足够小，隐匿在附面层底部，一般就不会引起摩擦阻力的增加。这种粗糙度称为允许粗糙度，记作 k_{s0} 。

$$k_s < \frac{100\nu}{V} = \frac{100L}{Re} \quad (2-5)$$

2 风力机的工作原理

2.1 风轮在静止情况下叶片的受力情况

风力机的风轮由轮毂及均匀分布安装在轮毂上的若干桨叶所组成。在安装这些桨叶时，必须对每支桨叶的翼片按同一旋转方向，以桨叶自身轴为轴转过一个给定的角度，即使每个叶片的翼弦与风轮旋转平面（风轮旋转时桨叶柄所扫过的平面）形成一个角度 φ ， φ 称为安装角。图 2-6 示出风轮的起动原理。设风轮的中心轴位置与风向一致，当气流以速度 V 流经风轮时，在桨叶 I 和桨叶 II 上将产生气动力 F 和 F' 。

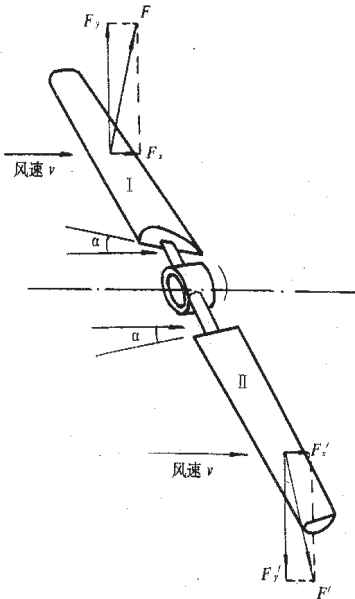


图 2-6 风力机起动时的受力情况

将 F 及 F' 分解成沿气流方向的分力 F_x 和 F'_x （阻力）及垂直于气流方向的分力 F_y 和 F'_y （升力），阻力 F_x 和 F'_x 形成对风轮的正面压力，而升力 F_y 和 F'_y 则对风轮中心轴产生转动力矩，从而使风轮转动起来。

2.2 风轮在转动情况下叶片的受力情况

下面分析风轮起动后以某种速度稳定旋转时叶片的受力情况。若风轮旋转角速度为 ω ，则相对于叶片上距转轴中心 r 处的一小段叶片元（叶素）的气流速度 W_r 将是垂直于风轮旋转面的来流速度 V 与该叶片元的旋转线速度 ωr 的矢量和，如图 2-7 所示。可见这时以角速度 ω 旋转的桨叶，在与转轴中心相距 r 处的叶片元的攻角，已经不是 V 与翼弦的夹角，而是 W_r 与翼弦的夹角了。

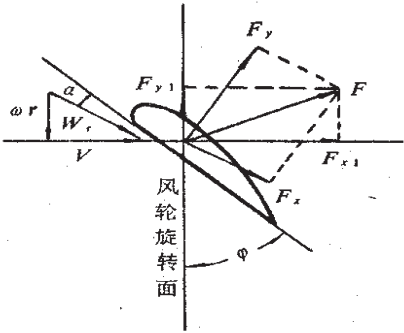
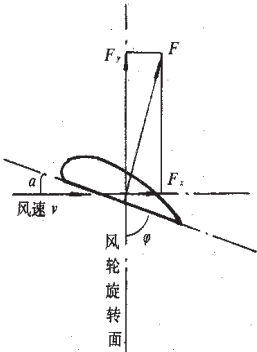


图 2-7 旋转桨叶的气流速度及受力情况

以相对速度 W_r 吹向叶片元的气流，产生气动力

F ， F 可分解为垂直于 W_r 方向的升力 F_y 及与 W_r 方向一致的阻力 F_x ，也可以分解为在风轮旋转面内使桨叶旋转的力 F_{y1} 及对风轮正面的压力 F_{x1} 。

由于风轮旋转时叶片不同半径处的线速度是不同的，因而相对于叶片各处的气流速度 W 在大小和方向上也都不相同，如果叶片各处的安装角都一样，则叶片各处的实际攻角都将不同。这样除了攻角接近最佳值的一小段叶片升力较大外，其它部分所得到的升力则由于攻角偏离最佳值而不理



想。所以这样的叶片不具备良好的气动力特性。为了在沿整个叶片长度方向均能获得有利的攻角数值,就必须使叶片每一个截面的安装角随着半径的增大而逐渐减小。在此情况下,有可能使气流在整个叶片长度均以最有利的攻角吹向每一叶片元,从而具有比较好的气动力性能。而且各处受力比较均匀,也增加了叶片的强度。这种具有变化的安装角的叶片称为螺旋桨型叶片,而那种各处安装角均相同的叶片称为平板型叶片。显然,螺旋桨型叶片比起平板型叶片来要好得多。

尽管如此,由于风速是在经常变化的,风速的变化也将导致攻角的改变。如果叶片装好后安装角不再变化,那么虽在某一风速下可能得到最好的气动力性能,但在其它风速下则未必如此。为了适应不同的风速,可以随着风速的变化,调节整个叶片的安装角,从而有可能在很大的风速范围内均可以得到优良的气动力性能。这种桨叶叫做变桨距式叶片,而把那种安装角一经装好就不再能变动的叶片称为定桨距式叶片。显然,从气动性能来看,变桨距式螺旋桨型叶片是一种性能优良的叶片。

还有一种可以获得良好性能的方法,即风力机采取变速运行方式。通过控制输出功率的办法,使风力机的转速随风速的变化而变化,两者之间保持一个恒定的最佳比值,从而在很大的风速范围内均可使叶片各处以最佳的攻角运行。

3 风力机的气动力特性

3.1 贝兹(Betz)理论

前面说过,风轮的作用是将风能转换为机械能。由于流经风轮后的风速不可能为零,因此风所拥有的能量不可能完全被利用。也就是说只有风的一部分能量可能被吸收,成为桨叶的机械能。那么风轮究竟能够吸收多少风能呢?为讨论这个问题,贝兹假设了一种理想的风轮,即假定风轮是一个平面桨盘(没有轮毂,叶片无穷多);通过风轮的气流没有阻力;且整个风轮扫掠面上的气流是均匀的;气流速度的方向在通过风轮前后都是沿着风轮轴线的。图 2-8 所示为气流流过理想风轮旋转面 A 所形成的近似形状。图中示出空气流经桨叶的流线和风轮前后的速度及压力变化。由于风轮在旋转,使气流产生落差,在靠近风轮处及在风轮后某一距离处的气流速度均有所降低,如图中(b)所示。与此同时,靠近风轮处的空气压力增高,通过风轮后压力急剧下降,形成某种程度的真空,随后真空程度逐渐减弱,直到恢复原来的压力,如图中(c)所示。

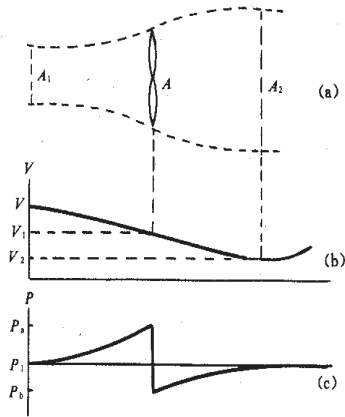


图 2-8 空气流过风轮旋转截面及其前后的状况
(a)空气流线 (b)速度变化 (c)压力变化

设 V 为风轮前方远处的风速, V_1 为通过风轮截面 A 的实际速度, V_2 为风轮后方远处的风速,通过风轮的气流在风轮前方的截面为 A_1 ,在风轮后方的截面为 A_2 ,风轮远处的压力为 p_1 ,风轮前后的压力为 p_a 和 p_b 。显然,在单位时间内,从风轮前到风轮后气流动能的变化量就是为风轮所吸收并使风轮旋转的风能 E ,即

$$E = \frac{mV^2}{2} - \frac{mV_2^2}{2} = \frac{1}{2}\rho AV(V^2 - V_2^2) \quad (2-6)$$

式中, m 为单位时间内流过风轮截面的空气的质量, $m = \rho AV_1$ 。

风轮在单位时间内所接收的动能也可用风作用在风轮上的力与风轮截面处的风速之乘积来表示,即

$$E = FV_1 \quad (2-7)$$

将式(2—6)与式(2—7)合并,则得

$$F = \frac{1}{2}\rho A(V^2 - V_2^2) \quad (2-8)$$

根据流体的动量方程,风作用在风轮上的力等于单位时间内通过风轮旋转面的气流动量的变化,即

$$F = mV - mV_2 = \rho AV_1(V - V_2) \quad (2-9)$$

将式(2-9)与式(2-8)合并,则得

$$V_1 = \frac{V + V_2}{2} \quad (2-10)$$

将式(2-10)代入式(2-6),得到

$$E = \frac{1}{4}\rho A(V + V_2)(V^2 - V_2^2) \quad (2-11)$$

通常速度 V 是已知的,所以 E 可以看成是 V_2 的函数,求其导数 dE/dV_2 ,并使之为零,则得

$$V_2 = \frac{V}{3} \quad (2-12)$$

将式(2-12)代入式(2-11)，得到风轮可能吸收到的最大风能为

$$E_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V^3 \quad (2-13)$$

这个最大能量只有在工作中毫无损失的风轮即理想风轮中才能得到，并转变为风轮的机械功。

我们取单位时间内风轮所吸收的风能 E 与通过风轮旋转面的全部风能 E_{in} 之比为风能利用系数 C_p ，即

$$C_p = \frac{E}{E_{\text{in}}} \quad (2-14)$$

式中， $E_{\text{in}} = \frac{1}{2} \rho A V^3$ 。当 $V_2 = \frac{V}{3}$ 时，得到

$$C_{p\max} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (2-15)$$

式(2-15)给出理想风轮的最大理论效率，这就是贝兹极限。

3.2 风能利用系数

实际风轮的风能利用系数如图 2-9 所示，在实际应用中常用风能利用系数 C_p 对叶尖速比 λ 的变化曲线表示该风轮的空气动力特性。

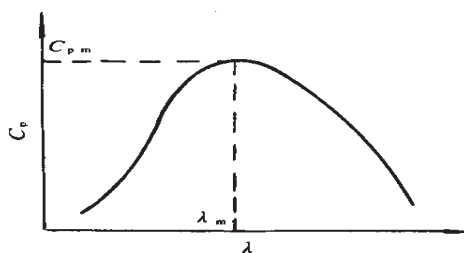


图 2-9 一种典型的风能利用系数与叶尖速比的关系曲线

风轮的叶尖速比 λ 是风轮叶片的叶尖速度与风速之比，它是风力机的一个重要设计参数：

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2-16)$$

式中， R 是风轮的半径。从图 2-9 可以看出，风力机的风能利用系数也即风轮将风能转变为机械能的效率与叶尖速比是密切相关的。风能利用系数 C_p 只有在叶尖速比 λ 为某一定值 λ_m 时最大。在恒速运行的风力机中，由于风力机转速不变，而风速经常在变化，因此 λ 不可能经常保持在最佳值（即使是采用变桨距叶片）， C_p 值往往与其最大值相差很多，使风力机常常运行于低效状态。而变速运行的风力机，通过适当控制输出功率的办法，有可能使风力机在风轮叶尖速

度与风速之比为恒定的最佳值的情况下运转，从而使 C_p 在很大的风速变化范围内均能保持最大值，风能转换为机械能的效率问题有可能得到最佳解决。

4 风力机的输出功率

前面讨论了理想风力机的功率输出，对一台实际的风力机，其机械输出功率 P_m 可以下式表示：

$$P_m = C_p P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p = \frac{\pi}{8} \rho D^2 V^3 C_p \quad (2-17)$$

式中， P_w 是通过风轮扫掠面积的风的功率， D 是风轮直径。风能利用系数 C_p 不是一个常数，它随风速、风力机转速以及风力机叶片参数如攻角、桨距角等而变化。

风力机的叶片有定桨距的，也有变桨距的。对于定桨距的风力机，除了采用可控制的变速运行外，一般恒速运行的风力机，在额定风速以下的风速范围内， C_p 常常偏离其最佳值，使输出功率有所降低；超过额定风速后，通过采取偏航控制或失速控制等措施，使输出功率限制在额定值附近。对于变桨距的风力机，通过调节桨距可使 C_p 在额定风速以下具有可能较大的值，从而得到较多的能量输出；超过额定风速后，通过改变桨距减小 C_p ，使输出功率保持在它的额定值 P_{mR} ，如图 2-10 所示。

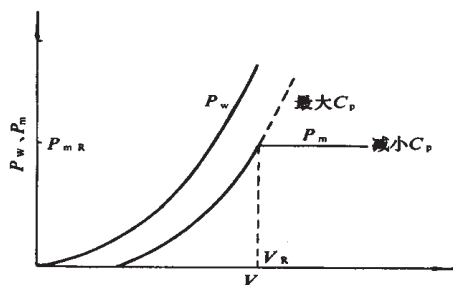


图 2-10 变桨距风力机的轴功率输出

由于制造和控制的局限性，利用节距控制保持 C_p 不变是不实际的，即使对于恒速运行的变距叶片， C_p 也会随风速而变化。

中、大型风力机一般以固定转速运转，适当设计风力机的 C_p 与 λ 的关系曲线，使它的功率输出具有自限制特性，对于定桨距风力机的运行，具有十分重要的意义。另外，改变额定转速时风力机运行有影响。额定转速以及与之相应的额定风速的选择取决于风力机所在场址的风况，平均风速为 9m/s 的场地选择额定转速为 52.5r/min 是合适的，但对于平均风速 6m/s 的场地选择这样的转速可能就不合适了。