

## 风力发电的空气动力学原理

风机叶片在空气中的受力特性与飞机的机翼在空气中的受力相类似，所以对风机叶片的空气动力学研究很多是借鉴了对飞机的翼型的空气动力学的研究技术以及飞机翼型的制造技术。

飞机在空气中运动所引起的作用于飞机上的空气动力取决于空气的物理属性，飞机的几何形状、飞行姿态以及飞机与空气之间的相对速度，因此在讨论空气动力的产生及其变化规律之前，首先来研究空气的基本属性。

空气动力学是关于气流特性的学说，相对于固体而言气体的特性。空气动力学定律，尤其是旋涡、推力、正面阻力和升力使得飞机可以飞行。相同的定律对于滑翔也很重要。空气动力学是一门复杂的科学。并非在每种具体情况下都可以通过假设计算对特定现象作数字上或理论上的精确说明，因而要利用风洞试验结果。所以空气动力学也是一门以经验为依据的科学。

气体和液体统称为流体。气体和液体同固体相比较，分子间引力较小，分子运动较强烈，分子没有一定的排列规律，这就决定了气体和液体具有共同的特性，不能保持一定形状，而具有流动性。

从力学性质来看，固体具有抵抗压力、拉力和切力的能力。因而在外力作用下，通常发生较小的变形，而且到了一定程度后变形就停止。流体由于不能保持一定形状，所以它不能抵抗切力。当他受到切力作用时，就要发生连续不断变形（即流动）。这就是流体同固体在力学性质上的显著区别。

气体和液体除了具有上述的共同特性外，还有如下的不同特性：

液体的分子跟分子的有效直径差不多是相等的，当对液体加压时，由于分子距离稍有缩小，出现强大的分子斥力来抵抗外压力，这就是说：液体的分子距离很难缩小，可以认为液体具有一定体积，因此通常成液体为不可压缩流体。

一般来说，气体分子间距离很大，例如常温常压下空气的分子距离为  $3 \times 10^{-7}$ ，其分子有效直径的数量级为  $10^{-8}$  厘米。可见分子距离比分子有效直径大得很多。这样，当分子距离缩小很多时，才会出现分子斥力。因此，通常称气体为可压缩流体。又因为分子距离很大，分子引力很小，而分子热运动起决定性作用，这就决定了气体既没有一定形状也没有一定体积。

当所研究的问题并没有涉及到压缩性时，所建立流体力学规律既适用于液体也使用于

气体。当计及压缩性时，气体和液体就必须分别处理。气体虽然是可压缩的，但在气流速度  $V$  远小于音速  $a$ （如速度  $V$  小于  $0.3a$ ）时，可以忽略气体的压缩性，即把气体看作不可压缩的流体。往往把忽略空气压缩特性的空气动力学，称为流体动力学。

## 4.1 流体的伯努力方程

在流场中把空气作为不可压缩流体来处理，并认为是理想流体，即忽略粘性影响。所以，对于在同一条流线或一根流管上，做定常运动的不可压缩的理想流体，在我们所考虑的范围没有热或功能进出，也没有流体产生和消失，伯努力根据质量守恒定律，由牛顿第二定律与加速度的平衡关系经过数学推导得出伯努力方程式：

$$\frac{1}{2g}V^2 + \frac{p}{\rho g} + z = \text{常数} \quad (1)$$

对于气体在流动过程中高度变化不大时， $z$  项可以略去，所以气体的伯努力方程通常又可写成：

$$\frac{\rho}{2}V^2 + p = \text{常数} \quad (2)$$

式（1）中右边的常数，成为伯努力常数。这个常数是指沿一条流线或一根流管是常数值，一般情况下，对于不同流线或流管；常数值是可以不同的。

伯努力公式虽然是从牛顿第二定律的力与加速度的平衡关系推导而来，但是经过积分之后，式中各项都具有能量的量纲。以式（1）为例，它的第一项表示单位重量的流体所具有的动能（ $V^2/2g$ ）。第三项表示单位重量流体的位能（ $z$ ）。第二项与第三项、第一项并列，在量纲上必然也是能量，相当于压力对于单位重量流体所具有的位能，我们称之为压力能（ $p/\rho g$ ），式（1）可以说是流体沿流管或流线上每一点的动能、压力能和位能三者的守恒式。常数  $C$  则表示为总机械能。所以式（1）又可称为不可压一维流的能量方程。

式（2）说明，在一条流线（或同一条流管）上，气流速度增大，则压强下降，反之则相反。

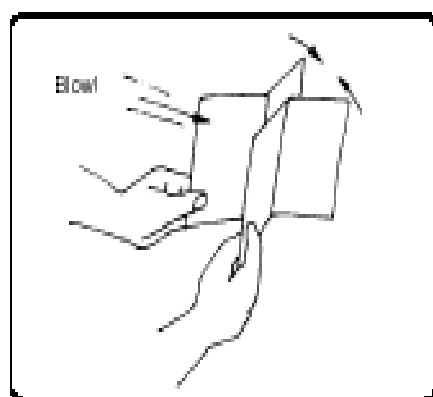
由（2）式知，在不考虑摩擦时，沿流管的总能量不变。

## 4.2 风轮的空气动力学特性

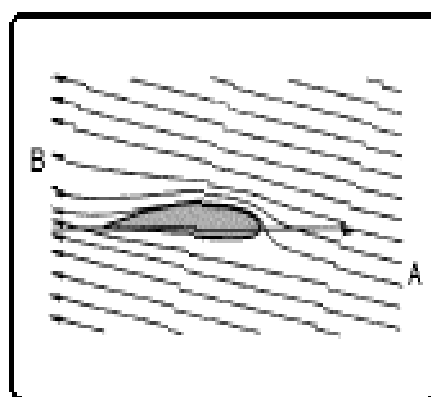
风机叶片的上侧比下侧弯曲幅度大，或者前部边缘向上翻掀(正攻角)，叶片上侧比叶片

下侧的气流速度要大，这就导致叶片两侧产生压力差。根据气体的伯努力方程知叶片上侧是低压区，叶片下侧是高压区。叶片获得垂直于气流方向的升力。

事实上，不仅仅是翼型，而是所有置于均匀气流中的物体都受到一个力的作用，而该力的方向一般与来流的方向不同。这一点很关键，他解释了为什么升力分量垂直与来流，另一部分阻力分量平行与来流的原因。



An experiment with Bernoulli's Law



Air flow around an aerodynamic profile

### 4.2.1 风轮的转速

风轮在风的作用下旋转，旋转速度用风轮转速  $\Omega$  表示。

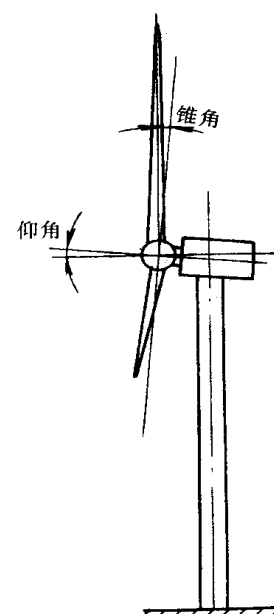
### 4.2.2 风轮的尖速比

风轮尖速比是风轮的一个重要参数，它指的是风轮叶片叶尖线速度与来流风速的比值。

$$\lambda = (\Omega R) / V$$

### 4.2.3 作用在风轮上的力和力矩

1. 翼型的受力示意图翼型空气动力特性好坏直接影响风力发电机组的性能。以前风轮叶片常采用飞机翼型，当前也有专用于风力发电机组的专用翼型。风轮工作条件和飞机有较大区别。一方面风轮叶片工作时，其迎角变化范围大；另一方面风轮叶片是在低雷诺数情况下工作。我们在设计风力发电机组时，总希望得到高的风能利用系数，使风轮的能量损失尽可能小，此时即阻力尽可能地小。要求选择的翼型具有高的升力系数，从飞机机翼理论中我

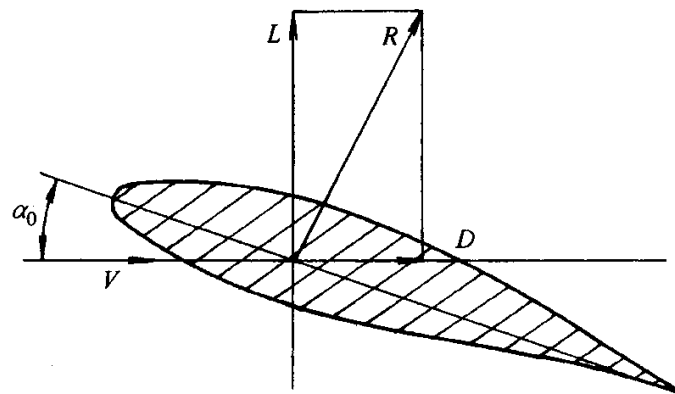


们知道升阻比( $CI/Ct$ )的概念,一般流线翼型的升阻比在 150~170 之间,某些特殊翼型的理论升阻比可达到 400 左右。一般来说,随着雷诺数增加,翼型升阻比越好。

近年来,采用新翼型制造的叶片不多,主要是由于新翼型的开发研制投入比较大。设计者通常都比较保守,采用具有公开数据而性能优良的翼型是比较明智的选择,如选用 NACA632xx、NACA634xx 系列低阻层流翼型等。由于失速计算不准确,这是限制翼型选择的另一个因素。

应根据以下规则选择翼型:对于低速风轮,由于叶片数较多,不需要特殊的翼型升阻比;对于高速风轮,由于叶片数较少,应当选用在很宽的风速范围内具有较高升阻比和平稳失速特性的翼型,对粗糙度不敏感,以便获得较高的功率系数;另外要求翼型的气动噪声低。

作用在翼型上的力的物理机理是由于环绕翼型面流体流速的变化。如下图所示,上翼型面流速比下翼型面快,结果上面压力低于下面压力,于是产生了气动力  $R$ 。气动力  $R$  可以分解为一个平行于来流的阻力分量  $D$  和一个垂直于来流的升力  $L$  分量。升阻力不但与来流的速度有关还与它的角度(迎角)有关。



翼型剖面受力图

在描述不同翼型的升阻特性时,常常用无量纲的升力系数和阻力系数作基准,它们的定义如下:

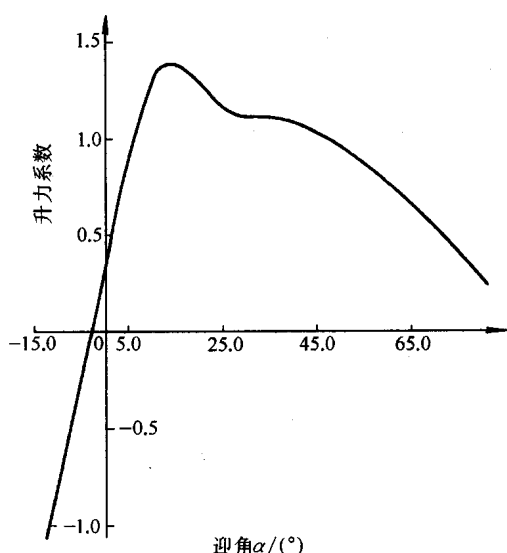
$$\text{升力系数} \quad C_L = L / (1/2 \rho V^2 A)$$

$$\text{阻力系数} \quad C_D = D / (1/2 \rho V^2 A)$$

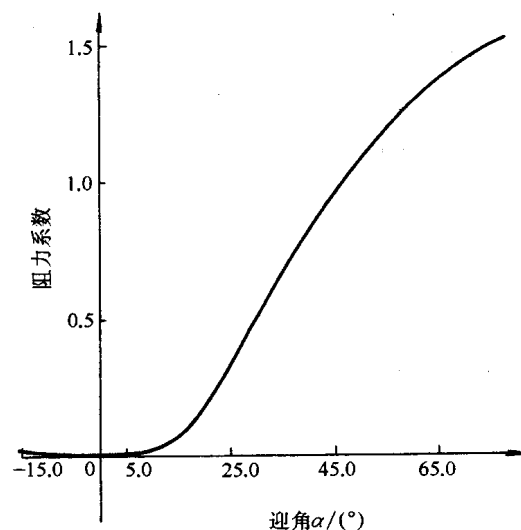
式中:  $\rho$  ——空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

$V$  ——未扰动来流风速 ( $\text{m/s}$ );

$A$  ——叶片投影面积 ( $\text{m}^2$ )。



翼型升力系数曲线

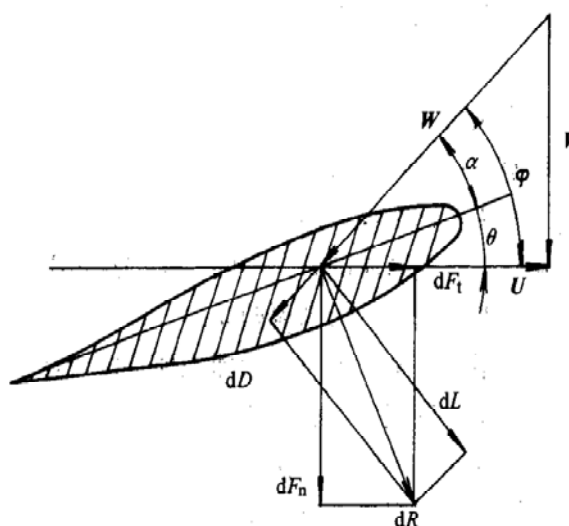


翼型阻力系数曲线

这些无量纲的升力和阻力系数是在风洞中对不同的迎角测试而获得的。这些数据是二维的，在实际使用时要进行三维修正。

## 2. 叶素受力示意图

右图是风轮叶片剖面叶素不考虑诱导速度情况下的受力分析。在叶片局部剖面上， $W$  是来流速度  $V$  和局部线速度  $U$  的矢量和。速度  $W$  在叶片局部剖面上产生升力  $dL$  和阻力  $dD$ ，通过把  $dL$  和  $dD$  分解到平行和垂直风轮旋转平面上，即为风轮的轴



力图

向推力  $dF_n$  和旋转切向力  $dF_t$ 。轴向推力作用在风力发电机组塔架上，旋转切向力产生有用的旋转力矩，驱动风轮转动。

上图中的几何关系式如下：

$$W = V + U \quad (\Omega R)$$

$$\psi = \theta + \alpha$$

$$dF_n = dD \sin \psi + dL \cos \psi$$

$$dF_t = dL \sin \psi - dD \cos \psi$$

$$dM = r dF_t = r (dL \sin \psi - dD \cos \psi)$$

作用在风轮叶片上的力和力矩，可以由作用在风轮叶片各剖面叶素上的力和力矩积分

来确定。

### 4.3 风轮轴功率

风轮轴功率大小是评价风轮启动特性优劣的主要参数。它取决于风的能量和风轮的风能利用系数，即风轮的气动效率。

1、风的能量 单位体积的空气动能为  $1/2 \rho V^2$ ，因此单位面积的风能为

$$E/S = \rho V^3/2$$

式中  $V$ ——风速；

$\rho$  ——空气密度；

$S$ ——风轮扫掠面积

2、风能利用系数 $C_P$  风能利用系数是评定风轮气动特性优劣的主要参数。风的能量只有部分可被风轮吸收成为机械能，因此风能利用系数定义为

$$C_P = P_U / (1/2 \rho V^3 S)$$

$$P_U = \Omega M$$

式中  $C_P$ ——风能利用系数；

$P_U$ ——风轮的轴功率；

$\Omega$ ——风轮转速

$M$ ——风轮扭矩

3、风力发电机组的输出功率与风速的大小、空气密度、风轮直径、风轮功率系数、传动效率和机械效率有关，其关系用计算公式表示为

$$P = \frac{1}{8} \pi \rho D^2 v^3 C_P \eta_t \eta_g$$

式中  $P$ ——风力发电机的输出功率，kW；

$\rho$ ——空气密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$D$ ——空气发电机风轮直径，m；

$v$ ——场地风速，m/s；

$C_P$ ——风轮的功率系数，一般在 0.2~0.5 之间，最大为 0.593；

$\eta_t$ ——风力发电机传动装置的机械功率；

$\eta_g$ ——发电机的机械效率。

理论上,从风中含有的气流能量中最大可以获取 59.3%。从风中获取的功率与风中包含的功率之间的比例关系值被称为贝茨功率系数( $C_{p, \text{Betz}}$ ),是阿尔伯特·贝茨于 1926 年计算出来的。这一事实从现象和原理上都能够得到解释: 如果从风的气流中获取能量, 风速会减缓。但由于气体流量必须保持不变, 在气流从各个方向涌来的风能设备上, 风会扩散, 因为在设备背后风速减慢的情况下, 还是要有相同数量的空气流动。基于这个原因, 通过风能设备不可能将风能全部转换为旋转能量。否则就意味着风能设备后面的空气静止不动, 气流就会被阻挡住。

和所有的机器一样, 这里也不可能达到理论上的最大值。好的风能设备会有 0.4 到 0.5 的功率系数。设备的空气动力效率可以通过机器的功率系数与贝茨功率系数之间的比例表示。

不同类型的风轮其风能利用系数是不同的, 并网型风力发电机组的风能利用系数一般都在 0.4 以上。

#### 4.4 利用风轮的空气动力特性进行功率调节

风力发电机组必须有一套控制系统用来限制功率和转速, 使风力发电机组在大风或故障过载荷时得到保护。随着风力发电机组容量增大, 相应的安全系统的费用提高, 结构过载的范围也就越小。只有在这些保护功能的作用下, 才能输出良好的电能, 如避免功率波动以及产生与电网一致的频率。

当风速达到某一值时, 风力发电机组达到额定功率。自然风的速度变化常会超过这一风速, 在正常运行时, 不是限制结构载荷的大小, 而是发电机超载后过热的问题。风力发电机组制造商一般会给出发电机过载的能力。控制系统允许发电机短时过载, 但绝不能长时间或经常过载。

由于风速和功率是三次方的关系, 当风力发电机组达到额定功率以后, 必须有相应的功率调节措施, 使机组的输出功率不再增加。

目前主要有两种调节功率的方法, 都是采用空气动力方法进行调节的。一种是定桨距(失

速)调节方法；一种是变桨距调节方法。

### (一) 失速控制

失速控制主要是通过确定叶片翼型的扭角分布，使风轮功率达到额定点后，减少升力提高阻力来实现的。

失速控制是一种很好的功率调节方法，因为它无需任何附加转动部件，叶片刚性固定在轮毂上，因此，其造价比较低。

在一般运行情况下，风轮上的动力来源于气流在翼型上流过产生的升力。由于风轮转速恒定，风速增加叶片上的迎角随之增加，但迎角大到一定程度（一般情况下迎角在  $15^\circ \sim 16^\circ$  左右升力系数最大，超过  $15^\circ \sim 16^\circ$  左右时升力下降，阻力上升）后阻力上升，直到最后气流在翼型上表面分离而产生脱落，这种现象称为失速，就像下图所示的那样。一旦迎角达到失速点，叶素将进入失速区， $C_L$ 减小， $C_D$ 增加，这两个变化导致扭矩减小，功率也跟着减小。但由于阻力项的增加，作用在机组上的力是增加的。

应注意的是失速不总是在同一迎角下，而与迎角变化有关(如阵风)，是一个动态变化过程。在失速与气流恢复到正常流动之间，有滞后现象存在，造成叶片受力变化很大，机组发生过发电现象。

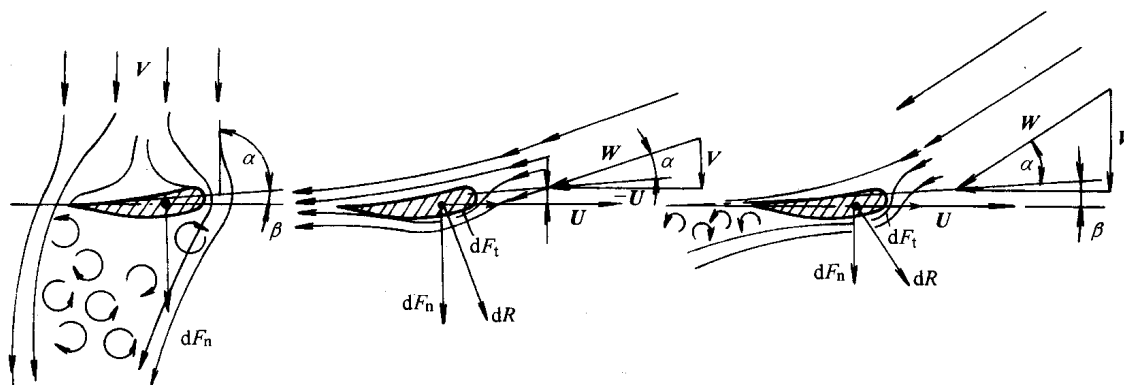
失速型机组对安装角比较敏感，叶片的安装角要尽量达到最佳，以免影响机组额定出力。另外失速型机组受空气密度的影响也比较大，在高海拔地区有可能达不到其额定输出。

失速控制型机组的起动特性比较差，在风轮静止时，出现气流的扰动，那么起动力矩很小，主要是由于在叶片的表面上的流动气流变化而造成的。并网型失速控制机组一般在起动时，发电机作电动机来运行，这时从电网吸收的电能不多，风轮会很快加速到同步转速自动地由电动状态变为发电状态。

失速控制的一个难题是如果风力发电机组脱网，风轮将加速，在这种情况下，迎角将减小，叶片将脱离失速区，导致风轮上的扭矩增加，这将加剧风轮超速的程度，因此，相对定桨距风力发电机组来说，在设计失速型风力发电机组的刹车系统时，更应注意其安全性。

失速控制风力发电机组风轮气流特性图，如下图所示。





动态失速时气流连续变化图

与变桨距机组相比，当超过额定风速时，迎角进入失速区，气动阻力变得很大，轴向推力随着风速增加而增加；因此，失速型风轮产生的轴向推力，随着风速继续增加时推力会增加，而且当功率恒定或稍微下降时也会这样。这样失速控制型机组的各个部件与变桨距控制机组比所承受的载荷要大。

失速控制机组必须有可靠的刹车系统，以保证风轮能停下来，这样在刹车机构和风轮上的载荷都要比变桨距机组大得多。

功率的变化范围取决于何时开始失速。当气流速度变化越快时，瞬间迎角很大而很快叶片产生失速，部分的短时失速，当功率超过额定值时功率也有相应的变化。

叶片失速后，阵风对功率波动影响不大，因为失速时升力变化不大。这一范围内产生的功率波动变化不大，与变桨距机组一样，气流失速就像变桨距机组的功率调节。当风速变化时瞬时功率变化在失速时相对很小，而变桨距机组只有当变距速度很快时才能达到功率变化小的目的。失速控制型风轮的优缺点如下。

优点：

- 1) 叶片和轮毂之间无运动部件，轮毂结构简单，费用低；
- 2) 没有功率调节系统的维护费；
- 3) 在失速后功率的波动相对小。

缺点：

- 1) 气动刹车系统可靠性设计和制造要求高；
- 2) 叶片、机舱和塔架上的动态载荷高；
- 3) 由于常需要刹车过程，在叶片和传动系统中产生很高的机械载荷；
- 4) 起动性差；
- 5) 机组承受的风载荷大；

6) 在低空气密度地区难于达到额定功率。

## (二) 变桨距控制

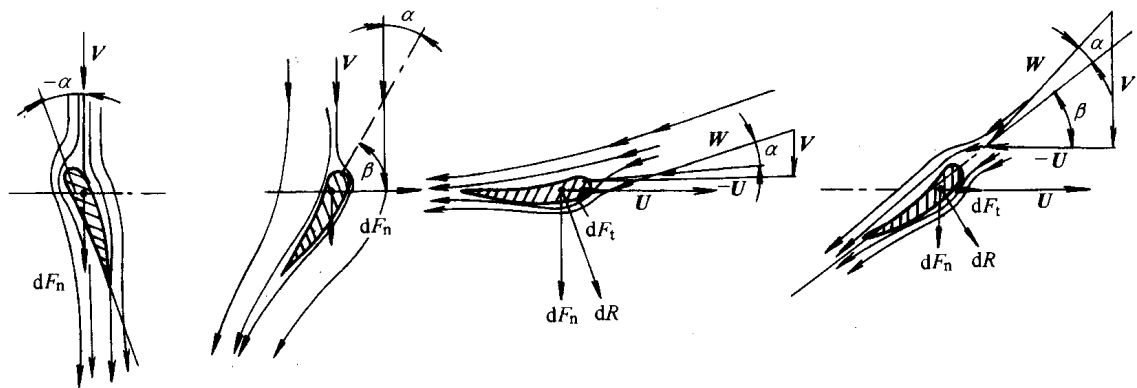
变桨距控制主要是通过改变翼型迎角变化，使翼型升力变化来进行调节的。变桨距控制多用于大型风力发电机组。

变桨距控制是通过叶片和轮毂之间的轴承机构转动叶片来减小迎角，由此来减小翼型的升力，以达到减小作用在风轮叶片上的扭矩和功率的目的。变桨调节时叶片迎角可相对气流连续的变化，以便得到风轮功率输出达到希望的范围。在  $90^\circ$  迎角时是叶片的顺桨位置。在风力发电机组正常运行时，叶片向小迎角方向变化而限制功率。一般变距范围为  $90^\circ \sim 100^\circ$ 。从起动角度  $0^\circ$  到顺桨，叶片就像飞机的垂直尾翼一样。

除此之外，还有一种方式，即主动失速又称负变距，就像失速一样进行调节。负变距范围一般在  $-5^\circ$  左右；在额定功率点以前，叶片的桨距角是固定不变的，与定桨距风轮一样；在额定功率以后(即失速点以后)，由于叶片失速导致风轮功率下降，风轮输出功率低于额定功率，为了补偿这部分损失，适当调整叶片的桨距角，来提高风轮的功率输出。

变桨距叶片变距时气流变化过程和叶片角度变化示意图，如下图所示。

当达到最佳运行时，一般已达到额定功率，就不再变桨了。70%~80%的运行时间在零至额定功率之间这段范围内桨距处于非最佳状态，这样会产生很大的能量损失，而且确定最佳迎角由测量风速来决定，而风速测量往往不准确，反而产生负作用。由于阵风时，风轮叶片变桨反应滞后会产生能量损失，以至于最佳迎角在部分负载运行时，无法达到稳定的调节。



变桨距叶片变距时气流连续变化图

功率调节的好坏，与叶片变距速度有关。叶片变距速度应很快，以产生很小的风轮回转质量惯性力矩，且调节质量保持不变。变桨距控制风轮的优缺点如下。

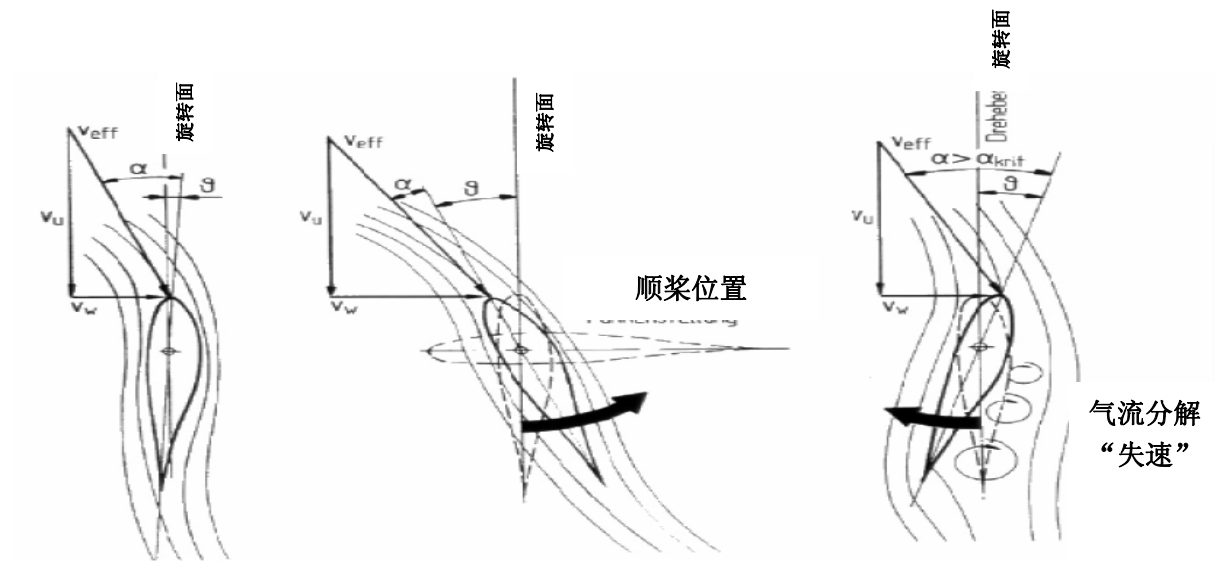
优点：

1) 起动性好；

- 2) 刹车机构简单，叶片顺桨后风轮转速可以逐渐下降；
- 3) 额定点以前的功率输出饱满；
- 4) 额定点以后的输出功率平滑；
- 5) 风轮叶根承受的静、动载荷小。

缺点：

- 1) 由于有叶片变距机构、轮毂较复杂，可靠性设计要求高，维护费用高；
- 2) 功率调节系统复杂，费用高。



通过向顺桨位置或者失速方向调节叶片功率输入

