



**新能源与环保技术**

NEWENERGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY

**国家级职业教育教师教学创新团队共同体**

**风力发电工程技术专业**

**课程拓展资源**

**湖南电气职业技术学院**



在内蒙、甘肃、河北、吉林、新疆、江苏、山东等省区建设大型风电基地



# 基本知识风力发电机 (1)

制作单位：湖南电气职业技术学院

制作时间：2022年9月

# 目录 Contents



PART 01

**风力机基础知识**



PART 02

**风的测量**



PART 03

**风力机的原理与组成**



PART 04

**叶片的气动特性**



PART 05

**风轮实度**



PART 06

**机舱设备与塔架**



PART 07

**风力机对风装置**



PART 08

**风力机调速方式**



PART 09

**独立变桨距系统**



PART 10

**齿形带传动变桨**



# 目录 Contents



PART 11

统一变桨驱动机构-1



PART 12

统一变桨驱动机构-2



PART 13

直驱式风力发电机



PART 14

双馈风力发电机组



PART 15

扩散放大器风力机



PART 16

高空风筝风力发电机



PART 17

圆柱齿轮增速箱



PART 18

行星齿轮增速箱



PART 19

风力发电机的轴承



PART 20

水平轴风力机图片



## 水平轴风力机 (*Horizontal Axis Wind Turbine Picture*)



早成功应用的水平轴风力机——荷兰风车



陆地水平轴风力发电机



海岸水平轴风力发电机

水平轴风力机  
(*Horizontal  
Axis Wind  
Turbine  
Picture*)



海上水平轴风力发电机01

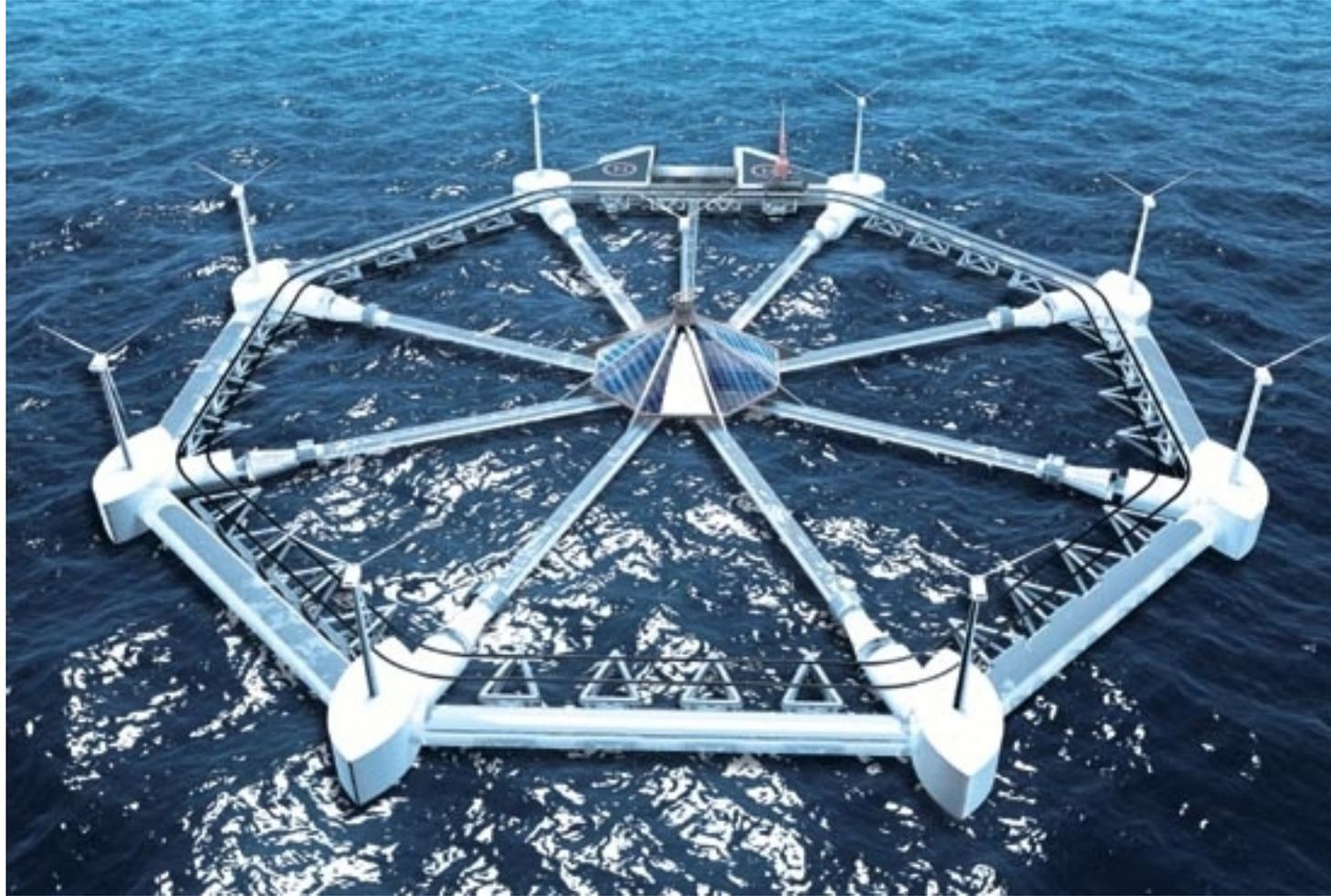
水平轴风力机 (*Horizontal Axis Wind Turbine Picture*)

水平轴风力机  
(*Horizontal  
Axis Wind  
Turbine  
Picture*)



海上水平轴风力发电机02

# 水平轴风力机 (Horizontal Axis Wind Turbine Picture)



漂浮的海上水平轴风力发电站

# 水平轴风力机 (*Horizontal Axis Wind Turbine Picture*)



2叶片下风式水平轴风力发电机



2叶片水平轴风力发电机



# 水平轴风力机 (*Horizontal Axis Wind Turbine Picture*)

离心力调整桨距角的下风式水平轴风力发电机

01

# 风力机基础知识

# 风力机空气动力学基础知识(*Wind Turbine Basics*)

## 升力与阻力

风能曾是蒸汽机发明之前最重要的动力，数千年前就有了帆船用于交通运输，后来有了风车用来磨面与抽水等。近年来，由于传统能源逐渐枯竭、对环境污染严重，风能作为清洁的新能源得到人们的重视。为方便风力机技术知识的学习，下面介绍一些风力机空气动力学的基础知识。

风就是流动的空气，一块薄平板放在流动的空气中会受到气流对它的作用力，我们把这个力分解为阻力与升力。图1中 $F$ 是平板受到的作用力， $F_D$ 为阻力， $F_L$ 为升力。阻力与气流方向平行，升力与气流方向垂直。

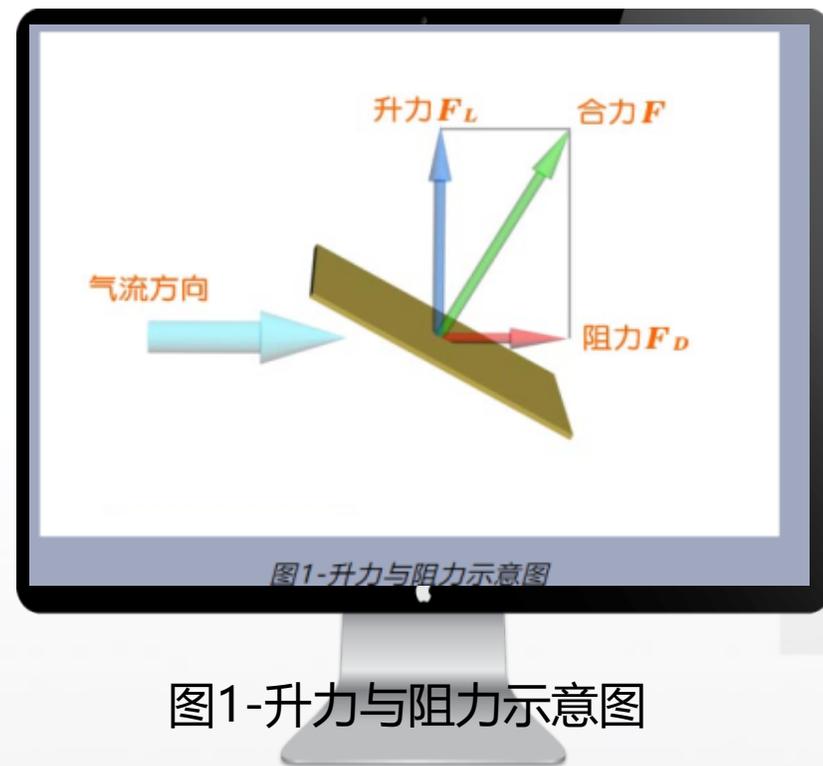


图1-升力与阻力示意图

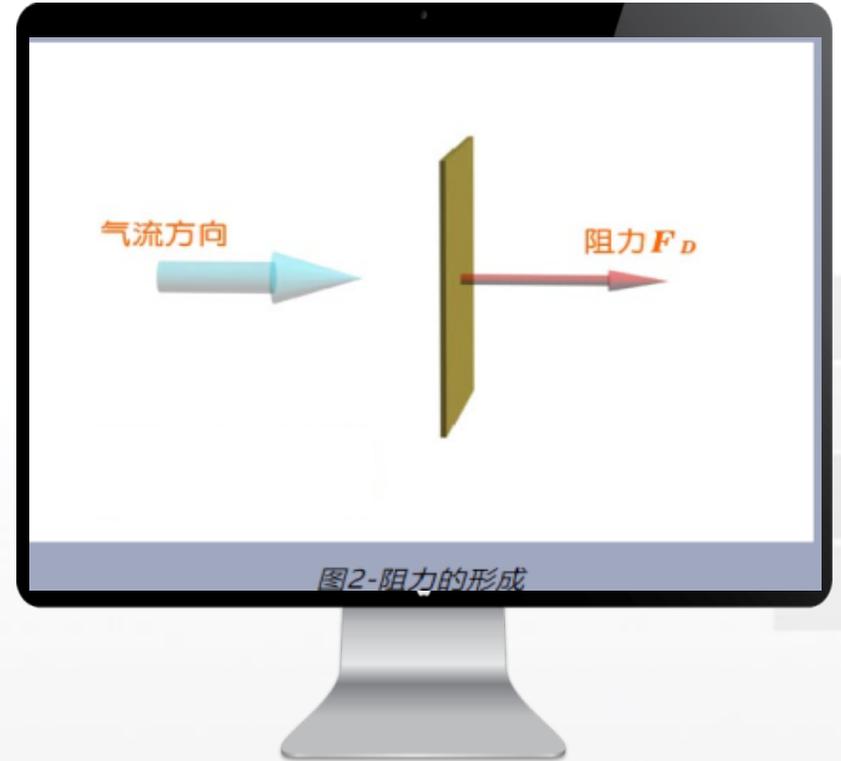
# 风力机空气动力学基础知识

## 升力与阻力

平板与气流方向垂直时的情况，见图2，此时平板受到的阻力最大，升力为零。当平板静止时，阻力虽大但并未对平板做功；当平板在阻力作用下运动，气流才对平板做功；如果平板运动速度方向与气流相同，气流相对平板速度为零，则阻力为零，气流也没有对平板做功。一般说来受阻力运动的平板当速度是气流速度的20%至50%时能获得较大的功率，阻力型风力机就是利用叶片受的阻力工作的。

平板与气流方向垂直时的情况，见图2，此时平板受到的阻力最大，升力为零。当平板静止时，阻力虽大但并未对平板做功；当平板在阻力作用下运动，气流才对平板做功；如果平板运动速度方向与气流相同，气流相对平板速度为零，则阻力为零，气流也没有对平板做功。一般说来受阻力运动的平板当速度是气流速度的20%至50%时能获得较大的功率，阻力型风力机就是利用叶片受的阻力工作的。

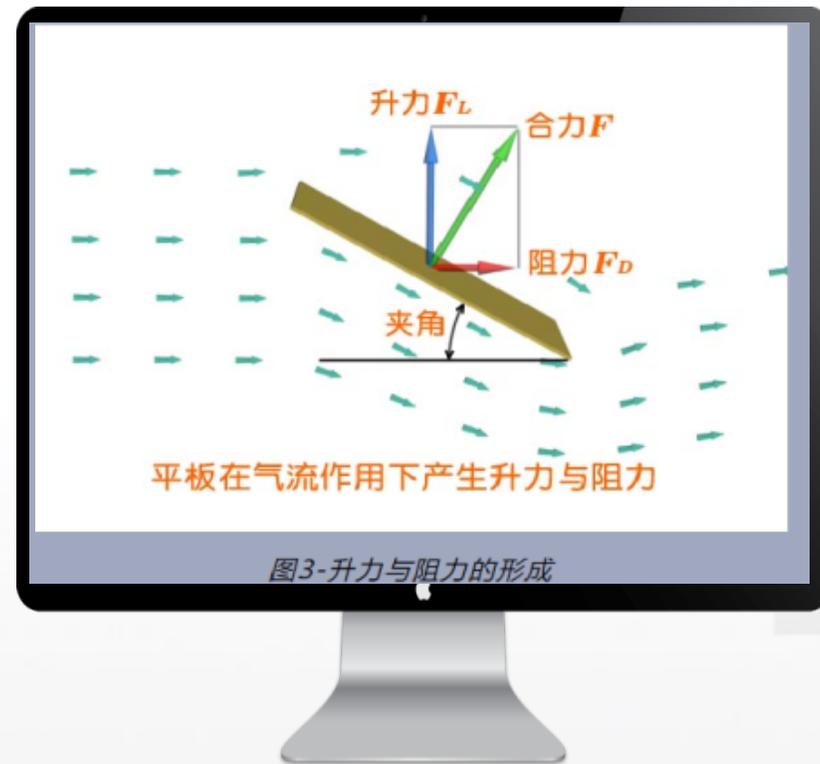
平板与气流方向垂直时的情况，见图2，此时平板受到的阻力最大，升力为零。当平板静止时，阻力虽大但并未对平板做功；当平板在阻力作用下运动，气流才对平板做功；如果平板运动速度方向与气流相同，气流相对平板速度为零，则阻力为零，气流也没有对平板做功。一般说来受阻力运动的平板当速度是气流速度的20%至50%时能获得较大的功率，阻力型风力机就是利用叶片受的阻力工作的。



# 风力机空气动力学基础知识

## 升力与阻力

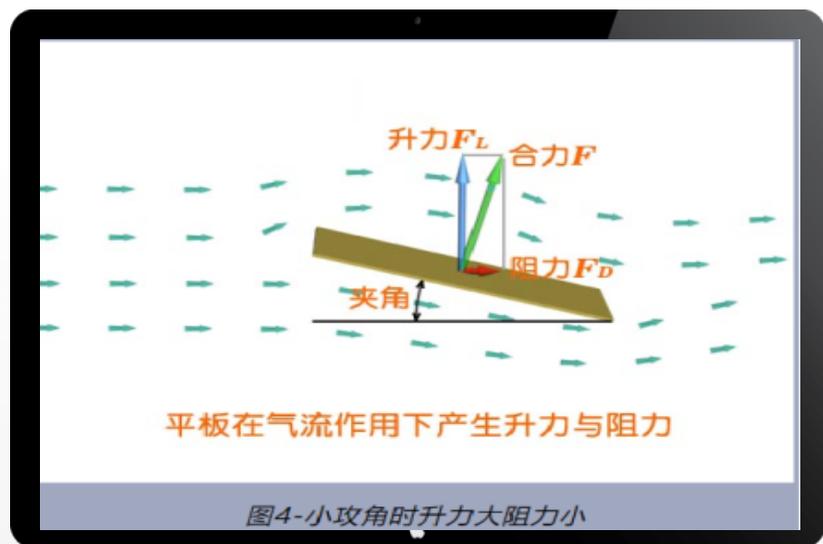
当平板与气流方向平行时，平板受到的作用力为零（阻力与升力都为零）。当平板与气流方向有夹角时（见图3），气流遇到平板的向风面会转向斜下方，从而给平板一个压力，气流绕过平板上方时在平板的下风面会形成低压区，平板两面的压差就产生了侧向作用力 $F$ ，该力可分解为阻力 $F_D$ 与升力 $F_L$ 。



# 风力机空气动力学基础知识

## 升力与阻力

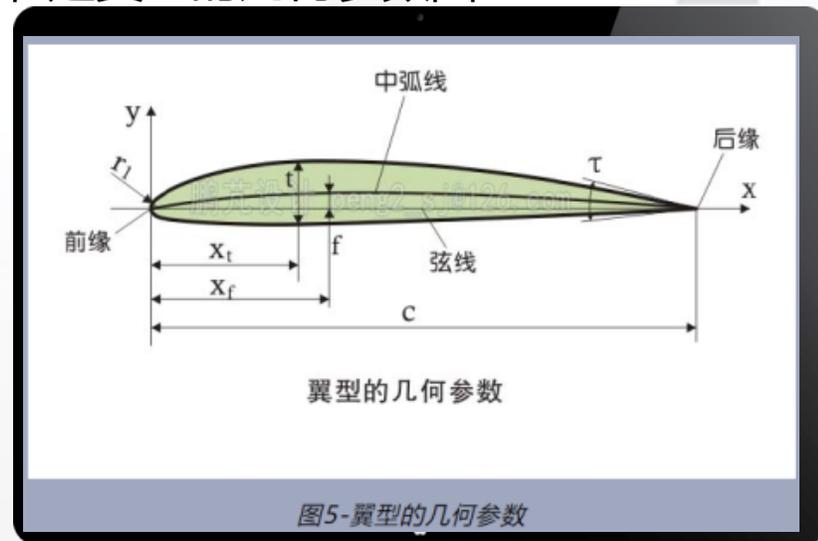
薄平板与气流方向的夹角称为攻角，当攻角较小时，平板受到的阻力 $F_D$ 较小；此时平板受到的作用力主要是升力 $F_L$ ，见图4。



飞机、风筝能够升到空中就是依靠升力，升力型风力机就是靠叶片受到的升力工作的。

## 翼型

翼型本是来自航空动力学的名词，是机翼剖面的形状，翼型均为流线型，风力机的叶片都是采用机翼或类似机翼的翼型，图5是翼型的几何参数图



# 风力机空气动力学基础知识

## 升力与阻力

与翼型上表面和下表面距离相等的曲线称为中弧线，翼型通过以下参数来描述：

### (1) 前缘、后缘

翼型中弧线的最前点称为翼型的前缘，最后点称为翼型的后缘。

### (2) 弦线、弦长

连接前缘与后缘的直线称为弦线；其长度称为弦长，用 $c$ 表示。弦长是很重要的数据，翼型上的所有尺寸数据都是弦长的相对值。

### (3) 最大弯度、最大弯度位置

中弧线在 $y$ 坐标最大值称为最大弯度，用 $f$ 表示，简称弯度；最大弯度点的 $x$ 坐标称为最大弯度位置，用 $x_f$ 表示。

### (4) 最大厚度、最大厚度位置

上下翼面在 $y$ 坐标上的最大距离称为翼型的最大厚度，简称厚度，用 $t$ 表示；最大厚度点的 $x$ 坐标称为最大厚度位置，用 $x_t$ 表示。

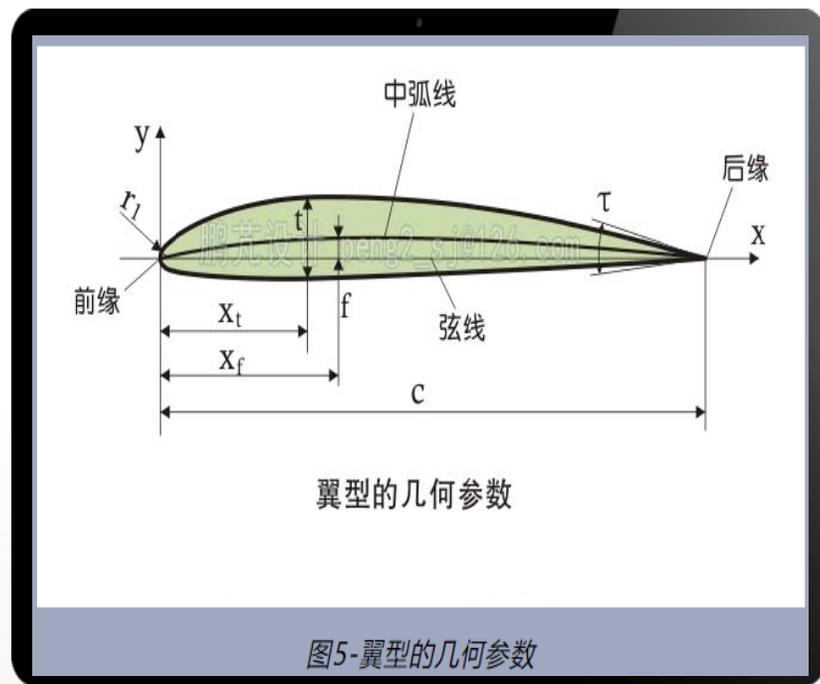
### (5) 前缘半径

翼型前缘为一圆弧，该圆弧半径称为前缘半径，用 $r_1$ 表示。

### (6) 后缘角

翼型后缘上下两弧线切线的夹角称为后缘角，用 $\tau$ 表示。

对称翼型的弯度 $f$ 为0， $t_1 = t_2$ ，上下表面对称。



# 风力机空气动力学基础知识

## 升力与阻力

与翼型上表面和下表面距离相等的曲线称为中弧线，翼型通过以下参数来描述：

### (1) 前缘、后缘

翼型中弧线的最前点称为翼型的前缘，最后点称为翼型的后缘。

### (2) 弦线、弦长

连接前缘与后缘的直线称为弦线；其长度称为弦长，用 $c$ 表示。弦长是很重要的数据，翼型上的所有尺寸数据都是弦长的相对值。

### (3) 最大弯度、最大弯度位置

中弧线在 $y$ 坐标最大值称为最大弯度，用 $f$ 表示，简称弯度；最大弯度点的 $x$ 坐标称为最大弯度位置，用 $x_f$ 表示。

### (4) 最大厚度、最大厚度位置

上下翼面在 $y$ 坐标上的最大距离称为翼型的最大厚度，简称厚度，用 $t$ 表示；最大厚度点的 $x$ 坐标称为最大厚度位置，用 $x_t$ 表示。

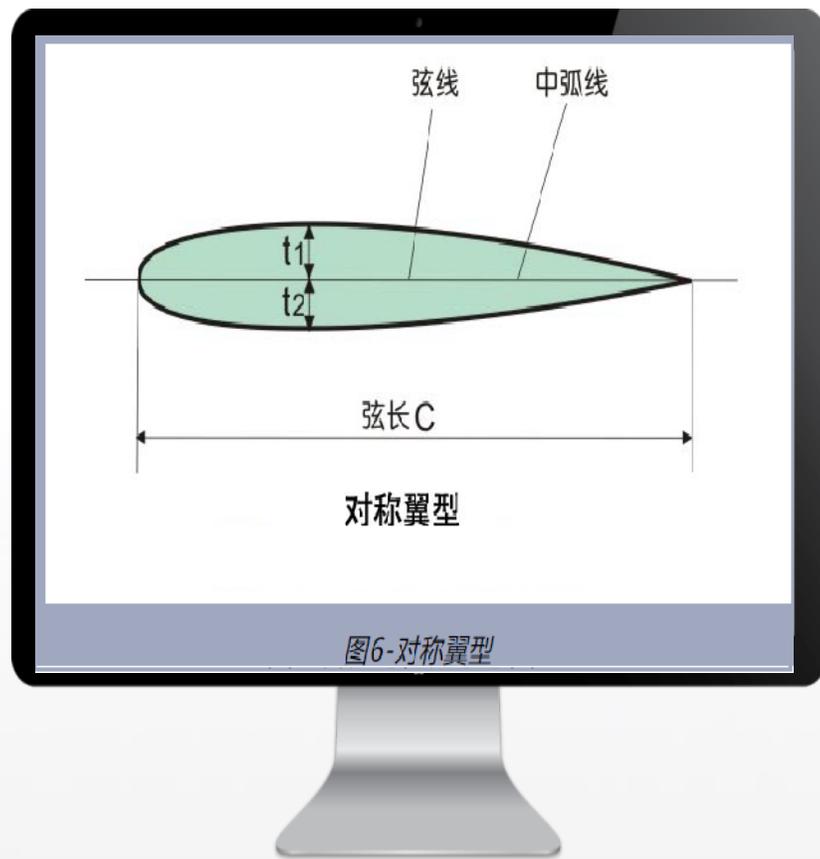
### (5) 前缘半径

翼型前缘为一圆弧，该圆弧半径称为前缘半径，用 $r_1$ 表示。

### (6) 后缘角

翼型后缘上下两弧线切线的夹角称为后缘角，用 $\tau$ 表示。

对称翼型的弯度 $f$ 为0， $t_1 = t_2$ ，上下表面对称。



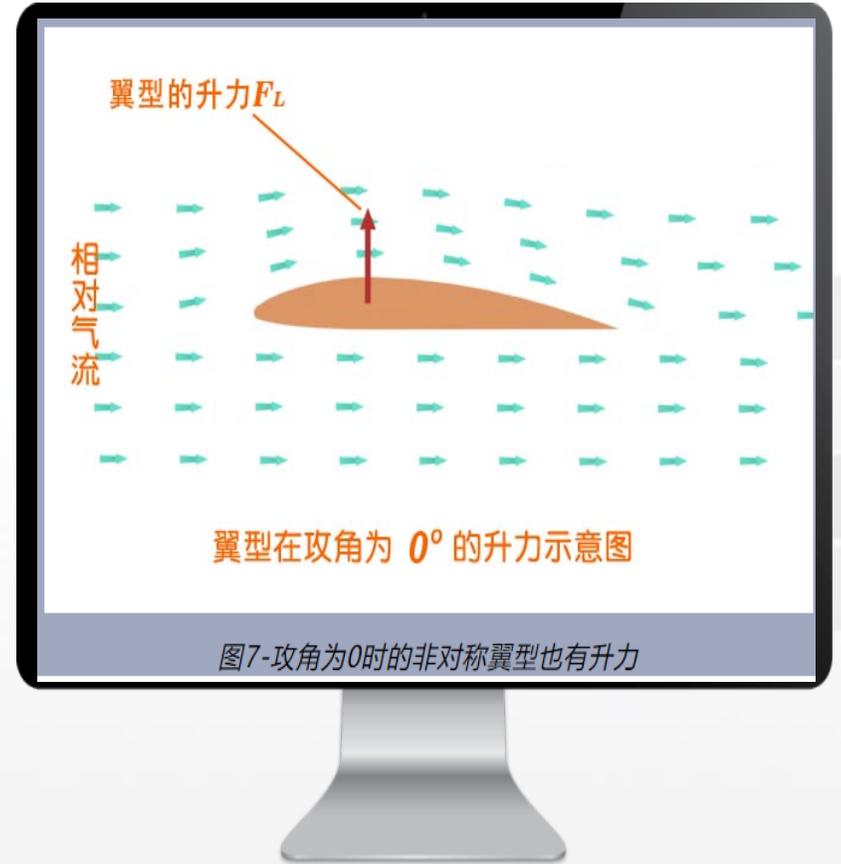
# 风力机空气动力学基础知识

## 翼型的升力与阻力

民航飞机机翼的截面是常用的翼型，能产生较大的升力，且对气流的阻力很小，常用的飞机翼型上表面弯曲，下表面平直，是有弯度翼型（不对称翼型），见图7，即使叶片弦线与气流方向平行也会有升力产生，这是因为绕过翼型上方的气流速度比下方气流快许多，跟据流体力学的伯努利原理，上方气体压强比下方小，翼片就受到向上的升力 $F_L$ 。

民航飞机机翼的截面是常用的翼型，能产生较大的升力，且对气流的阻力很小，常用的飞机翼型上表面弯曲，下表面平直，是有弯度翼型（不对称翼型），见图7，即使叶片弦线与气流方向平行也会有升力产生，这是因为绕过翼型上方的气流速度比下方气流快许多，跟据流体力学的伯努利原理，上方气体压强比下方小，翼片就受到向上的升力 $F_L$ 。

民航飞机机翼的截面是常用的翼型，能产生较大的升力，且对气流的阻力很小，常用的飞机翼型上表面弯曲，下表面平直，是有弯度翼型（不对称翼型），见图7，即使叶片弦线与气流方向平行也会有升力产生，这是因为绕过翼型上方的气流速度比下方气流快许多，跟据流体力学的伯努利原理，上方气体压强比下方小，翼片就受到向上的升力 $F_L$ 。



## 翼型的升力与阻力

翼型的弦线与来流方向的夹角称为攻角或迎角，当攻角增大时，翼型受到的升力会增大，有攻角的翼型能受到较大的升力，在来流不变时翼型受到的升力随攻角的增大而增大，阻力虽有增加但很小，与升力相比可忽略不计。图8是攻角为12度时的气流与升力图。

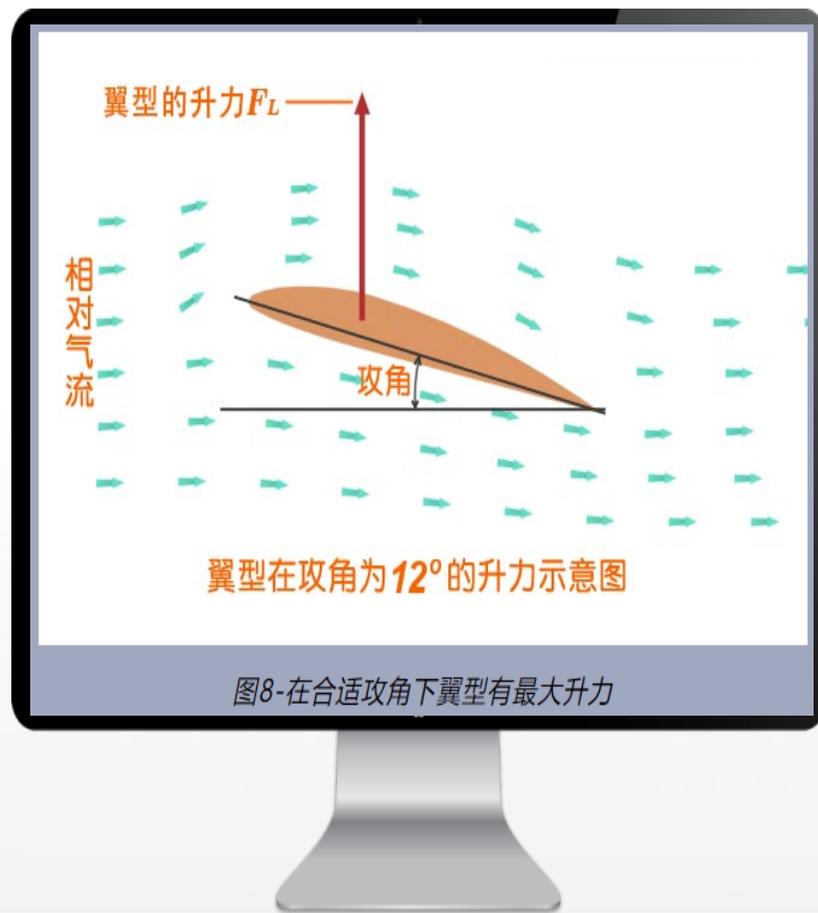
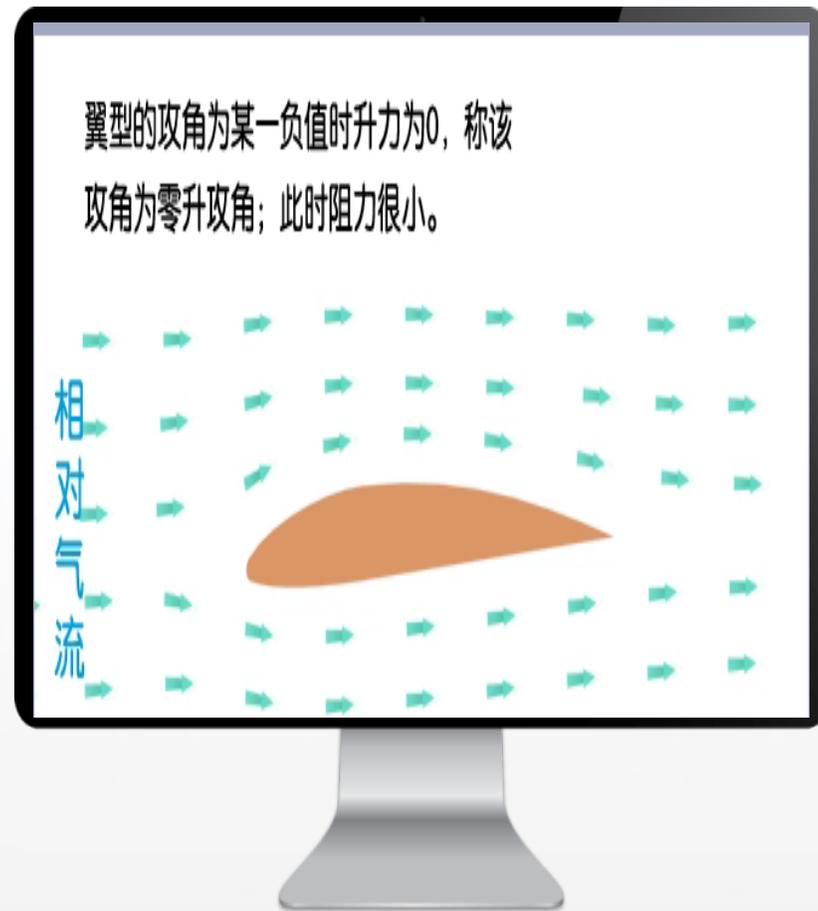


图8-在合适攻角下翼型有最大升力

## 翼型的升力与阻力

有弯度翼型在攻角为某一负值时，升力为0，称该攻角为零升力攻角（零升力角）。虽然翼型受到的升力随攻角的增大而增大，但攻角增大到某个临界角度后，翼型上方气流会发生分离，产生涡流，升力会迅速下降，阻力会急剧上升，这一现象称为失速。对于不同的翼型这个角度也不同，一般为10至15度，

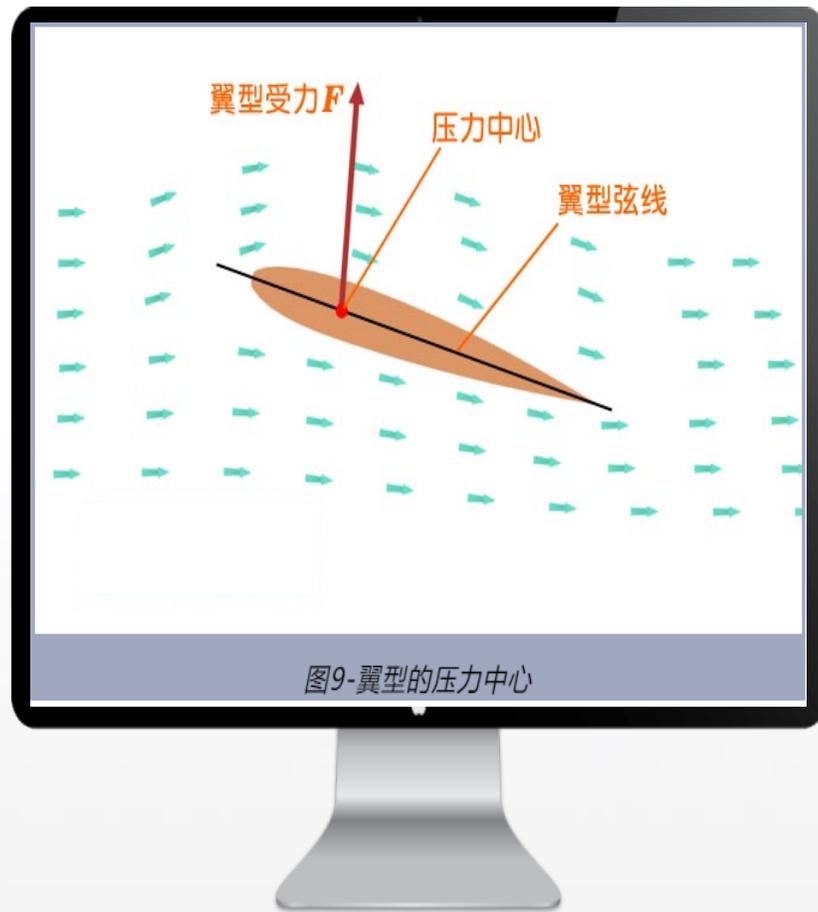
风力发电用风力机有阻力型与升力型两种，水平轴风力机基本都是升力型，垂直轴风力机有升力型结构也有多种阻力型结构，一些实度比很高的风力机（水平轴或垂直轴）会工作在升力与阻力状态。



## 压力中心

正常工作的翼型受到下方的气流压力与上方气流的吸力，这些力可用一个合力来表示，该力与弦线（翼型前缘与后缘的连线）的交点即为翼型的压力中心。对称翼型在不失速状态下运行时，压力中心在离叶片前缘1/4叶片弦长位置（见图9）。

运行在不失速状态下的非对称翼型，在较大攻角时压力中心在离叶片前缘1/4叶片弦长位置，在小攻角时压力中心会沿叶片弦长向后移。



## 雷诺数

雷诺数是衡量作用于流体上的惯性力与粘性力相对大小的一个无量纲参数，雷诺数用 $Re$ 表示，

$$Re = \frac{\rho}{\mu} v L$$

式中 $\rho$ ——流体密度； $V$ ——流场中的特征速度； $L$ ——特征长度； $\mu$ ——流体的粘度，流体的粘度主要随温度变化，空气的粘度随气温升高加大；而液体则相反，温度升高粘度减小。

定义 $\nu$ 为流体的运动粘度， $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  于是  $Re = \frac{vL}{\nu}$

由于空气的密度 $\rho$ 随气温上升而减小、空气的粘度 $\mu$ 随气温上升而增加，所以雷诺数 $Re$ 随气温上升而减明显减小。

在研究翼型的气动特性时， $V$ 取翼型的运动速度， $L$ 取翼型的弦长，得到的就是该翼型的雷诺数。

雷诺数对翼型气动特性影响较大，一般翼型的失速迎角随雷诺数的增大而增大、最大升力系数也随失速攻角的增大而增大；阻力系数在总体上会有降低。

# 风力机空气动力学基础知识

## 失速迎角

当翼片运行较小迎角时，翼片处在正常升力状态，翼片上方与下方的气流都是平顺的附着翼型表面流过，见图10中的A图，此时有较大的升力且阻力很小。如果将翼片迎角变大，当超过某个临界角度时，翼片上表面气流会发生分离，不再附着翼型表面流过，翼型上方会产生涡流，导致阻力急剧上升而升力下降，这种情况称为失速。见图10中的B图，在翼型受来流产生升力与阻力动画中后部分也有翼型失速时气流动画。

发生转变的临界角度称之为临界迎角或失速迎角，对于不同的翼型不同的气流速度失速迎角也不同，普通翼型多在10度至15度，一般薄翼型失速迎角稍小，厚翼型失速迎角要大一些；对于同一个翼型影响失速迎角的是翼片运行时的雷诺数与翼片的光洁度。对于薄平板来说失速迎角较小，且阻力略大，攻角稍大就会失速。

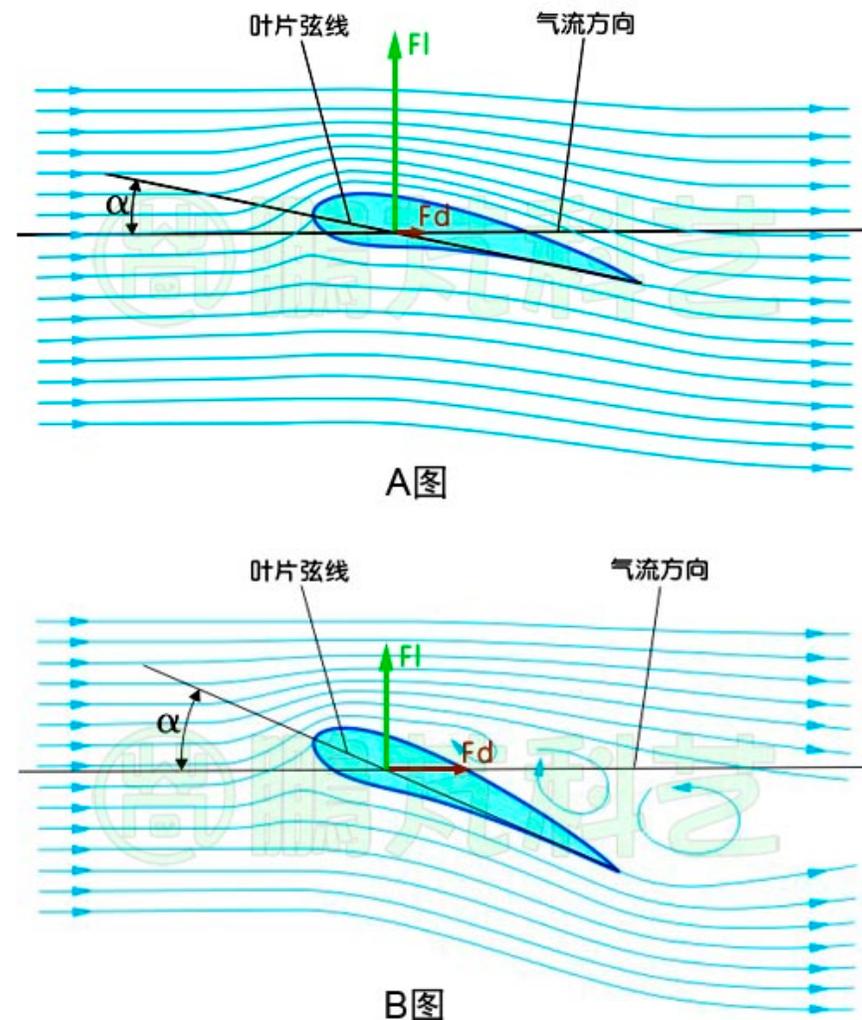


图10-攻角超过失速迎角就会失速

## 风能与风能利用系数

风能就是空气运动的动能，当风速为 $v$ 时每秒通过面积为 $S$ 的空气流的动能为

$$E = 0.6Sv^3$$

由于是每秒的动能， $E$ 也就是功率，称为风功率，例如，风速为 $6\text{m/s}$ 的空气流，通过 $1$ 平方米所具有的功率为 $129.6\text{W}$ 。

风在通过风轮时推动风轮旋转，把它的动能转变为风轮旋转的能量，但经过风轮做功后的风速不会为零，仅仅是减小，故风只能把一部分能量转交给风轮，若流过风力机叶片扫掠面积的风功率为 $E$ ，风力机获得的功率定为 $P$ ，则风能利用系数为 $C_p$

$$C_p = \frac{P}{E}$$

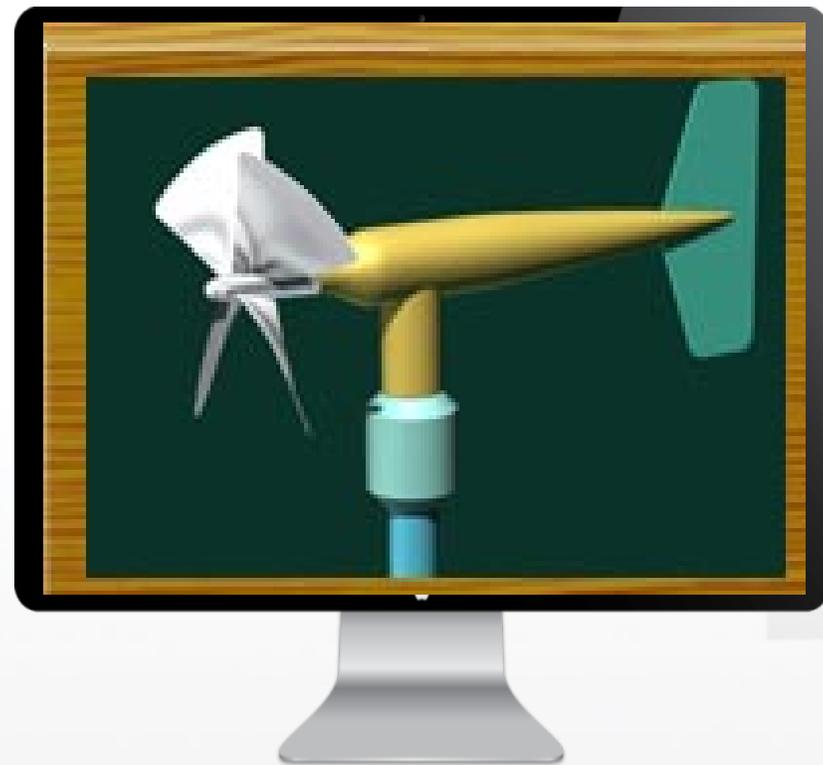
风能利用系数也称为功率系数，有关风能利用系数更多知识见[风能与风功率](#)章节。

## 贝茨极限

风能就是空气运动的动能，风在通过风轮时推动风轮旋转，把它的动能转变为风轮旋转的能量，但经过风力机风轮做功后的风速不会为零，仅仅是减小，故风只把一部分能量转交给风轮。

那么风能把多大的能量转交给风轮呢，1927年德国人贝茨从理论上计算出最大值为59.3%，如果在风轮前方的风速是 $v$ ，计算认为通过风轮的风速为 $2v/3$ ，通过风轮远离位置的风速为 $1v/3$ 。

59.3%称为贝茨极限，是风力发电机组的风能利用系数的最大值。目前高性能的风力发电机组风能利用系数一般为40%至45%。

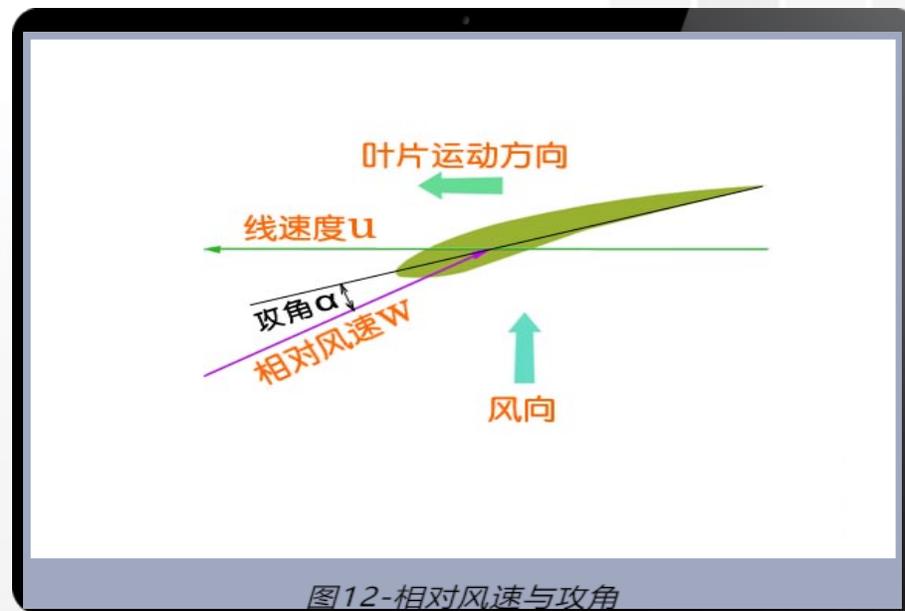
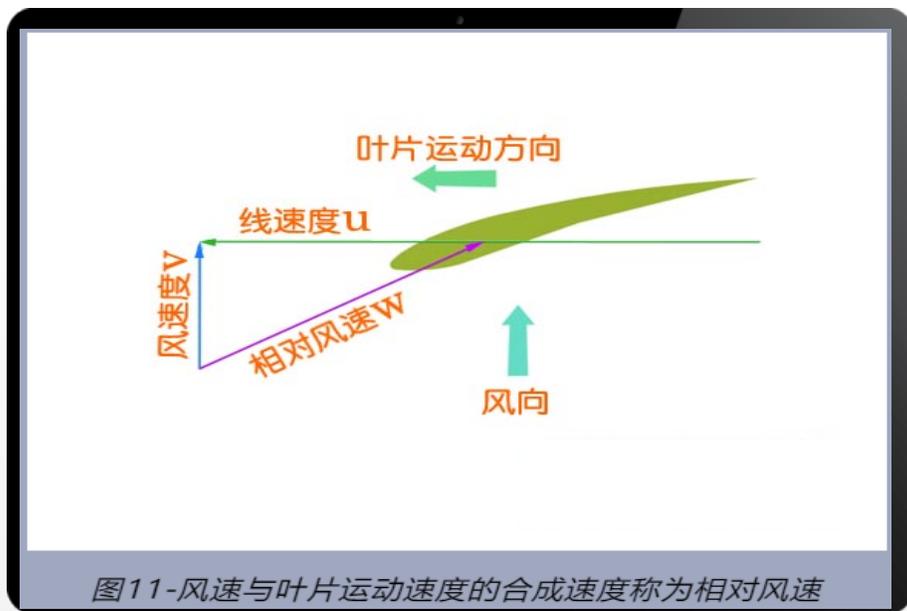


# 风力机空气动力学基础知识

## 相对风速

风力机叶片运动时所感受到的风速是实际风速与叶片运动速度的合成速度，称为相对风速。图11是一个风力机的叶片截面，当叶片运动时，叶片感受到的相对风速为 $w \rightarrow$ ，它是叶片的线速度（矢量） $u \rightarrow$ 与风进叶轮前的速度（矢量） $v \rightarrow$ 的合成矢量。 $w \rightarrow = u \rightarrow + v \rightarrow$

相对风速与叶片弦线之间的夹角就是叶片的攻角 $\alpha$ ，见图12。



## 叶尖速比

风轮叶片尖端线速度与风速之比称为叶尖速比。图13是一个风力机的叶轮， $u$ 是旋转的风力机风轮外径切线速度， $v$ 是风进叶轮前的速度， $v$ 与风轮平面垂直，叶尖速比 $\lambda$ 。 $\lambda = u/v$

阻力型风力机叶尖速比一般为0.3至0.6，升力型风力机叶尖速比一般为3至8。

在升力型风力机中，叶尖速比直接反映了相对风速与叶片运动方向的夹角，即直接关系到叶片的攻角，是分析风力机性能的重要参数。



图13-叶尖速比

# 风力机空气动力学基础知识

## 实度比

风力机叶片的总面积与风通过风轮的面积（风轮扫掠面积）之比称为实度比（容积比），是风力机的一个参考数据。图14左图为水平轴风力机叶轮， $S$ 为每个叶片对风的投影面积， $B$ 为叶片个数， $R$ 为风轮半径， $\sigma$ 为实度比，

$$\sigma = BS/\pi R^2$$

图14右图为升力型垂直轴风力机叶轮， $C$ 为叶片弦长， $B$ 为叶片个数， $R$ 为风轮半径， $L$ 为叶片长度， $\sigma$ 为实度比。目前垂直轴风力机叶轮的扫掠面积有两种算法，一种认为是风轮的迎风面积，对于H型风轮，即 $2RL$ ，于是 $\sigma = BCL/2RL = BC/2R$

另一种认为是叶片运行的圆周与叶片长度的乘积，即 $2R\pi L$ ，于是 $\sigma = BCL/2R\pi L = BC/2R\pi$

为简化目前一些资料中直接认为  $\sigma = BC/R$

多叶片的风力机有高实度比，适合低风速、低转速大力矩的风力机，其效率较低。风力发电机多采用少叶片与窄叶片的低实度比风力机，可以较高转速运行，效率也较高

