



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



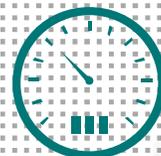
PART 02

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

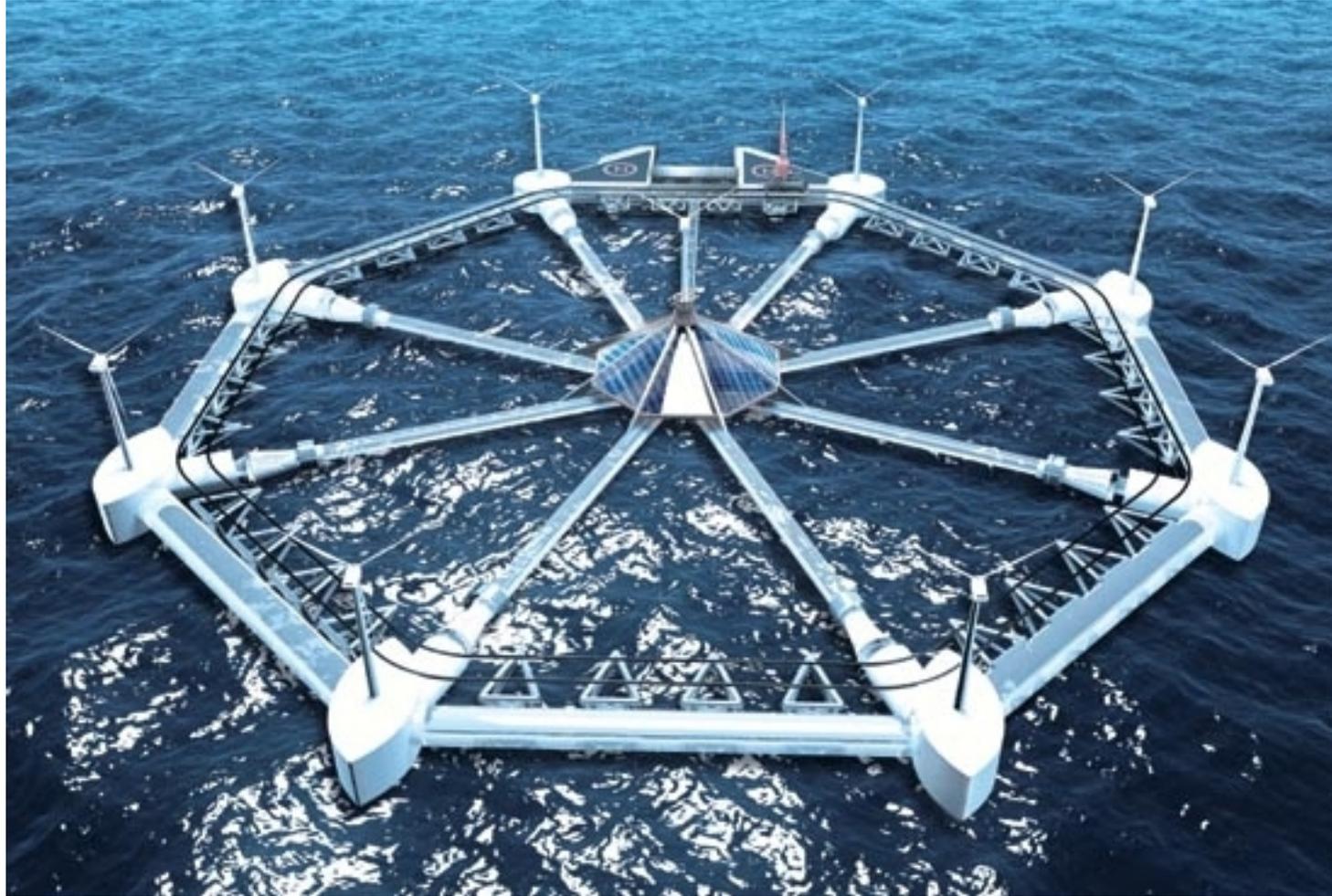
水平轴风力机 (*Horizontal Axis Wind Turbine Picture*)

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。

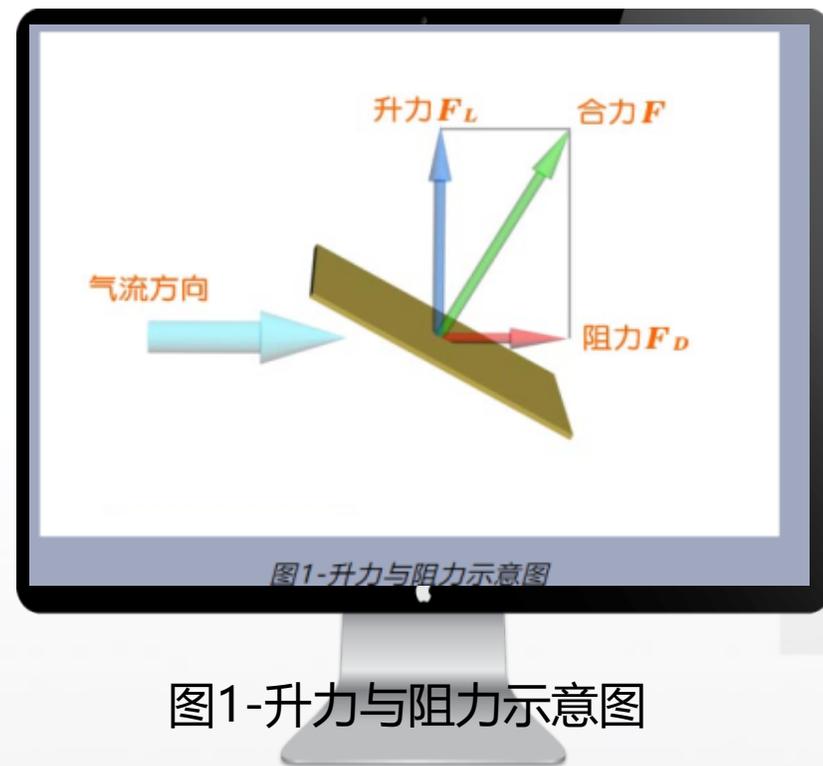


图1-升力与阻力示意图

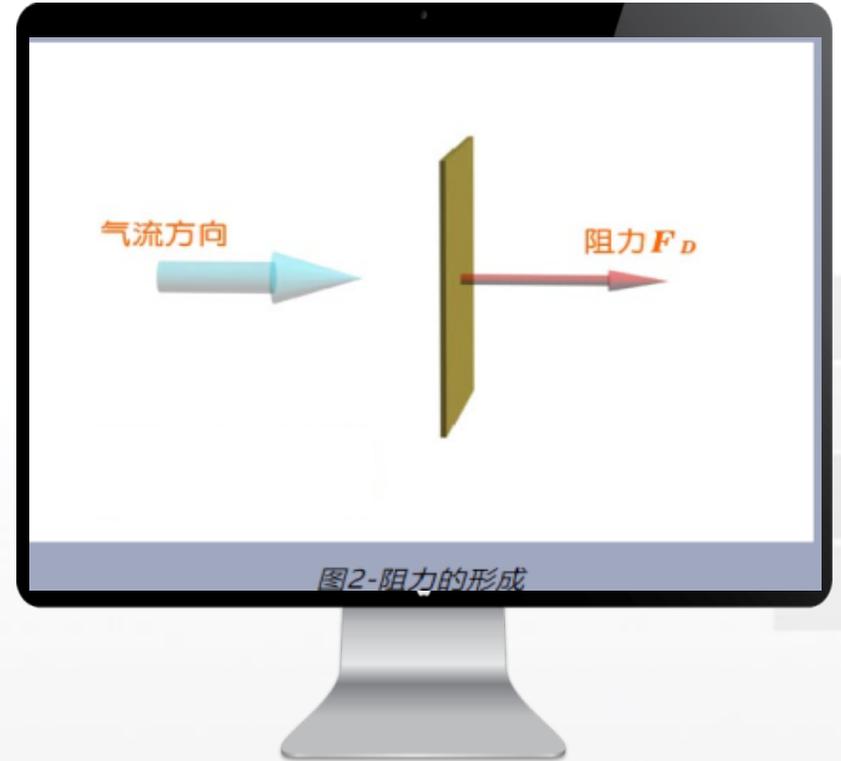
风力机空气动力学基础知识

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。

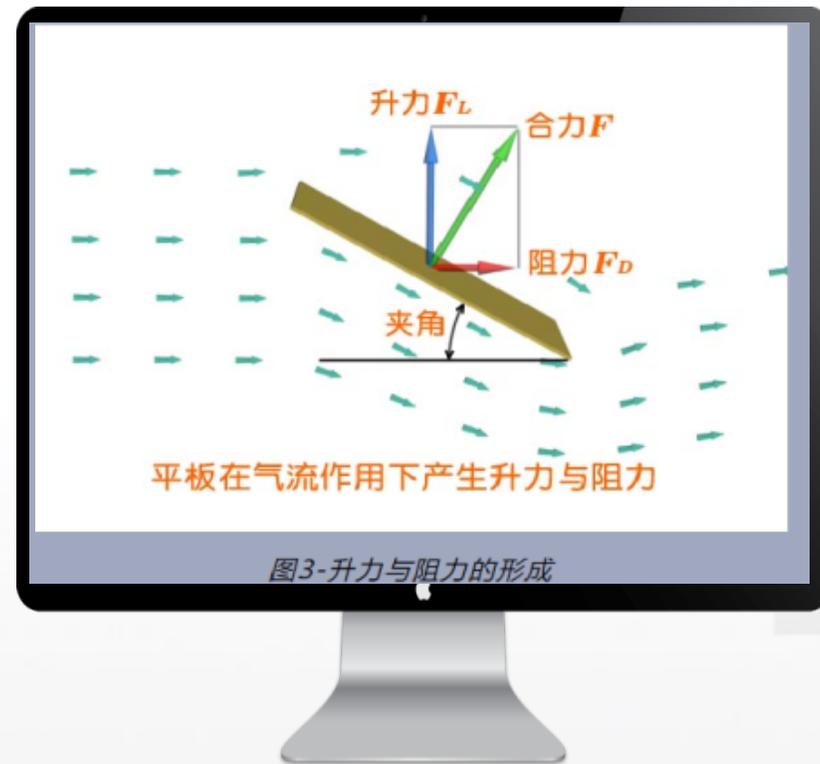
平板与气流方向垂直时的情况，见图2，此时平板受到的阻力最大，升力为零。当平板静止时，阻力虽大但并未对平板做功；当平板在阻力作用下运动，气流才对平板做功；如果平板运动速度方向与气流相同，气流相对平板速度为零，则阻力为零，气流也没有对平板做功。一般说来受阻力运动的平板当速度是气流速度的20%至50%时能获得较大的功率，阻力型风力机就是利用叶片受的阻力工作的。



风力机空气动力学基础知识

升力与阻力

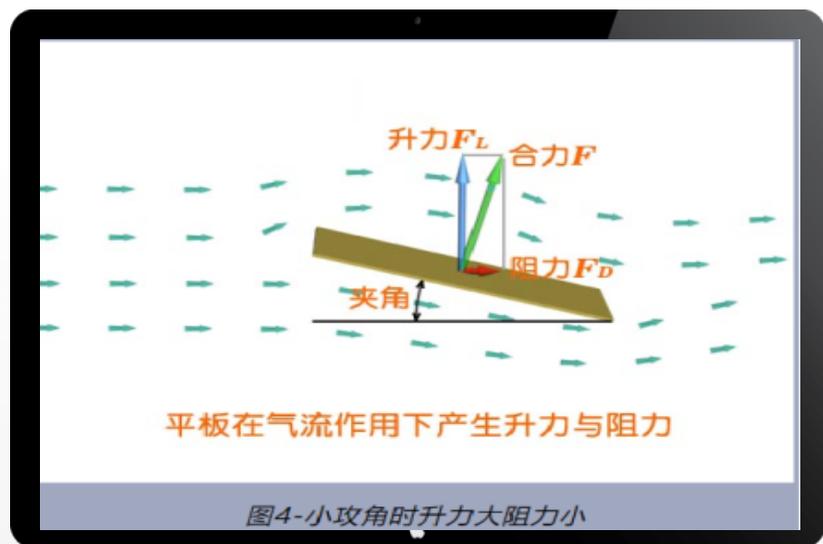
当平板与气流方向平行时，平板受到的作用力为零（阻力与升力都为零）。当平板与气流方向有夹角时（见图3），气流遇到平板的向风面会转向斜下方，从而给平板一个压力，气流绕过平板上方时在平板的下风面会形成低压区，平板两面的压差就产生了侧向作用力 F ，该力可分解为阻力 F_D 与升力 F_L 。



风力机空气动力学基础知识

升力与阻力

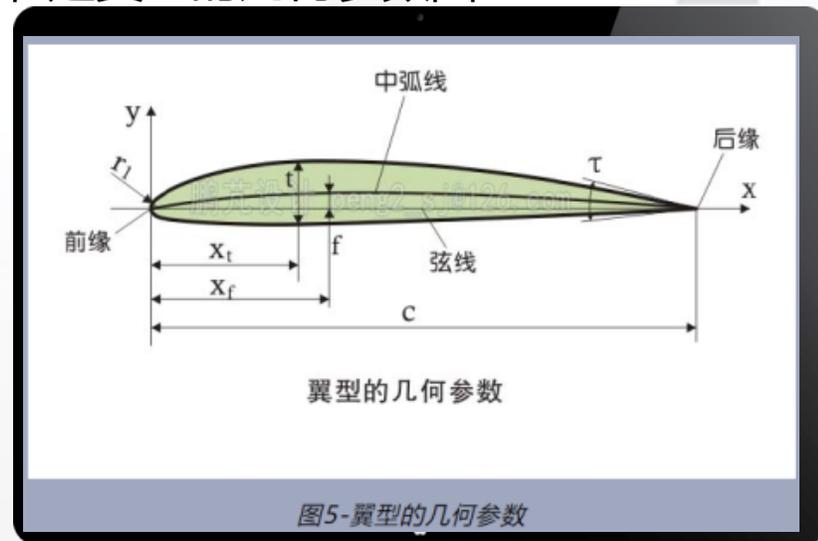
薄平板与气流方向的夹角称为攻角，当攻角较小时，平板受到的阻力 F_D 较小；此时平板受到的作用力主要是升力 F_L ，见图4。



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 τ 表示。

对称翼型的弯度 f 为0， $t_1 = t_2$ ，上下表面对称。

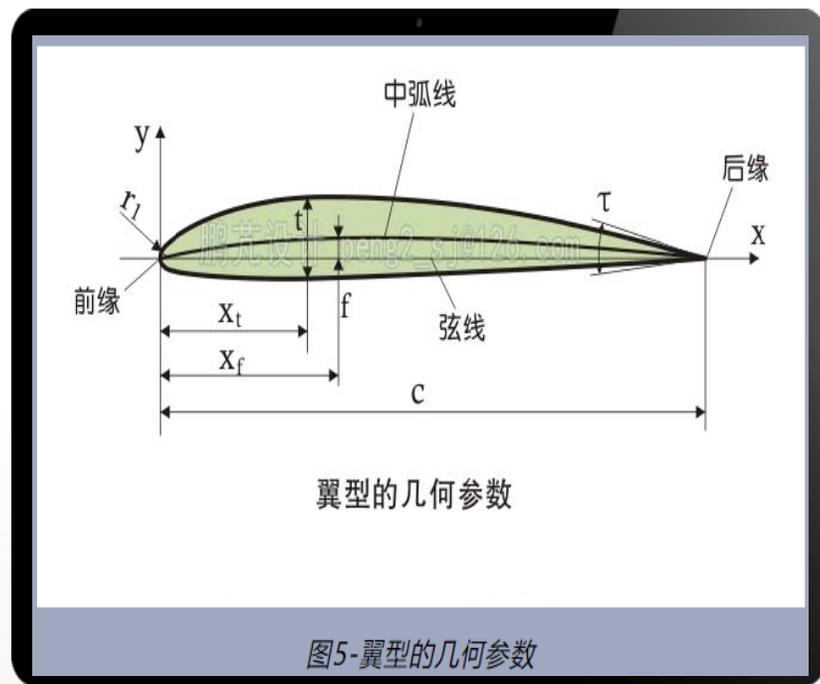


图5-翼型的几何参数

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。

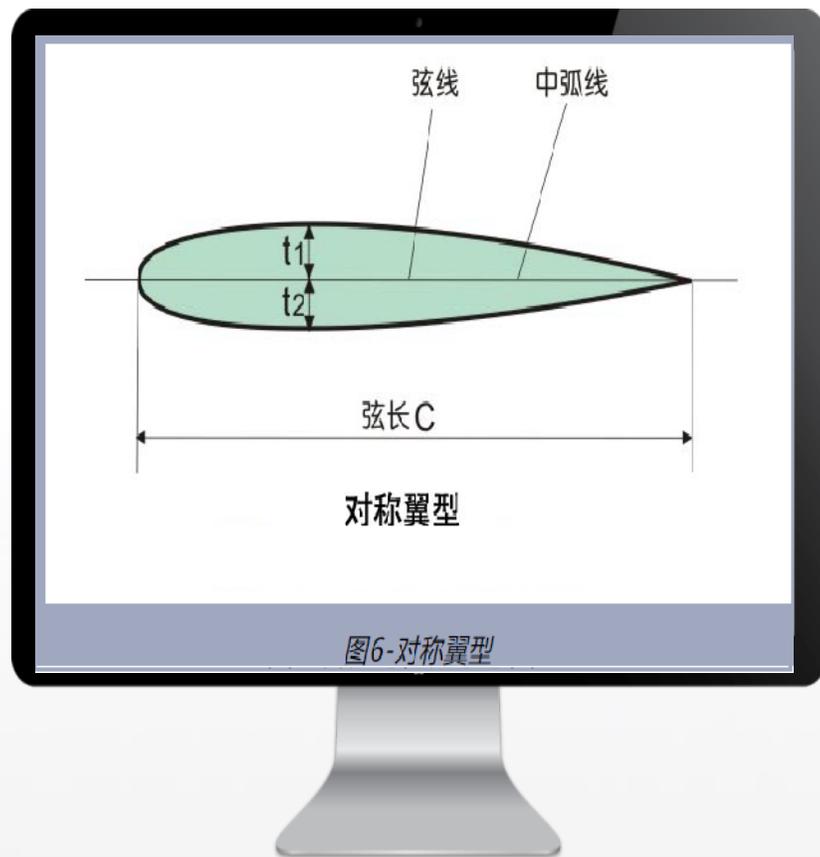
(5) 前缘半径

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 τ 表示。

对称翼型的弯度 f 为0， $t_1 = t_2$ ，上下表面对称。



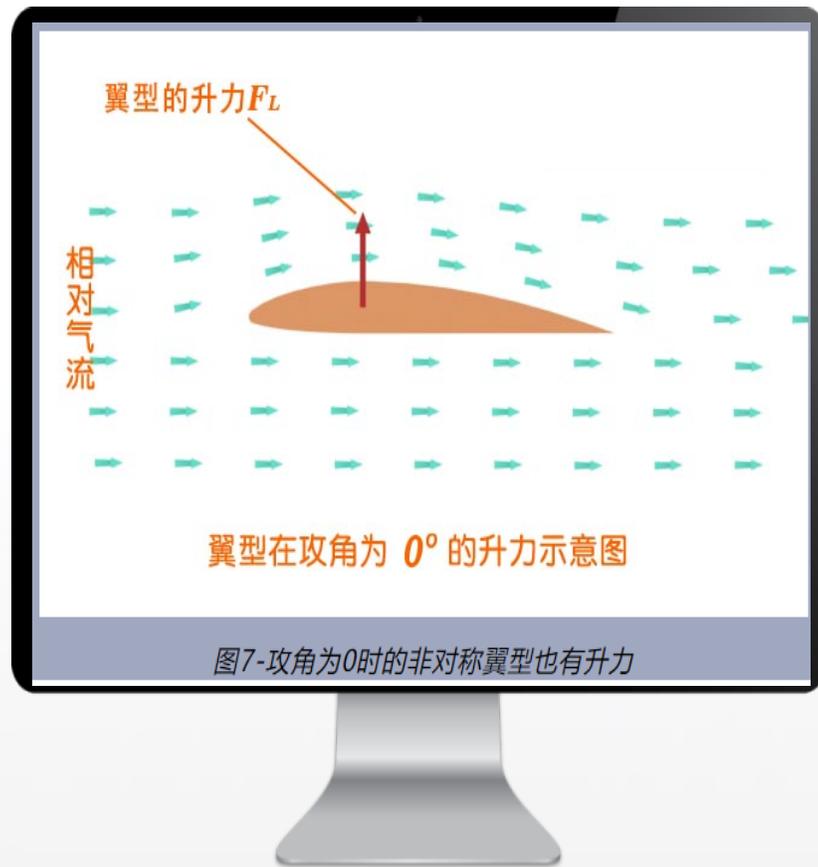
风力机空气动力学基础知识

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。

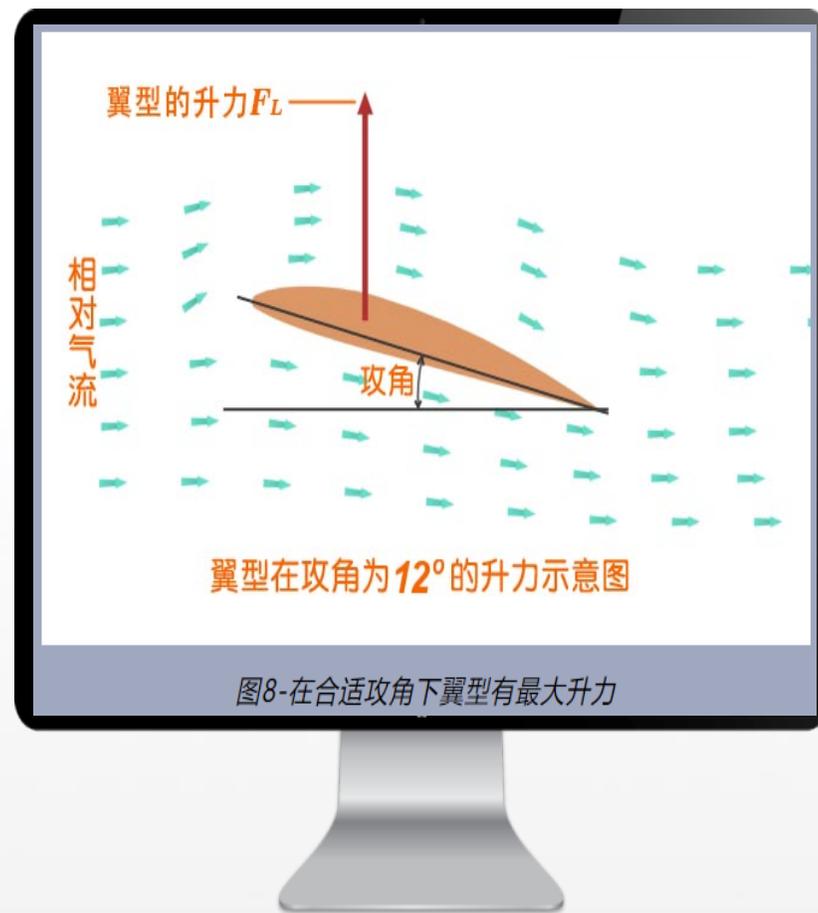


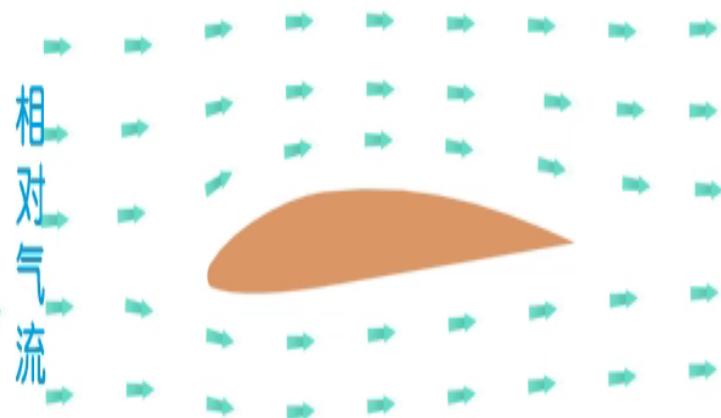
图8-在合适攻角下翼型有最大升力

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。

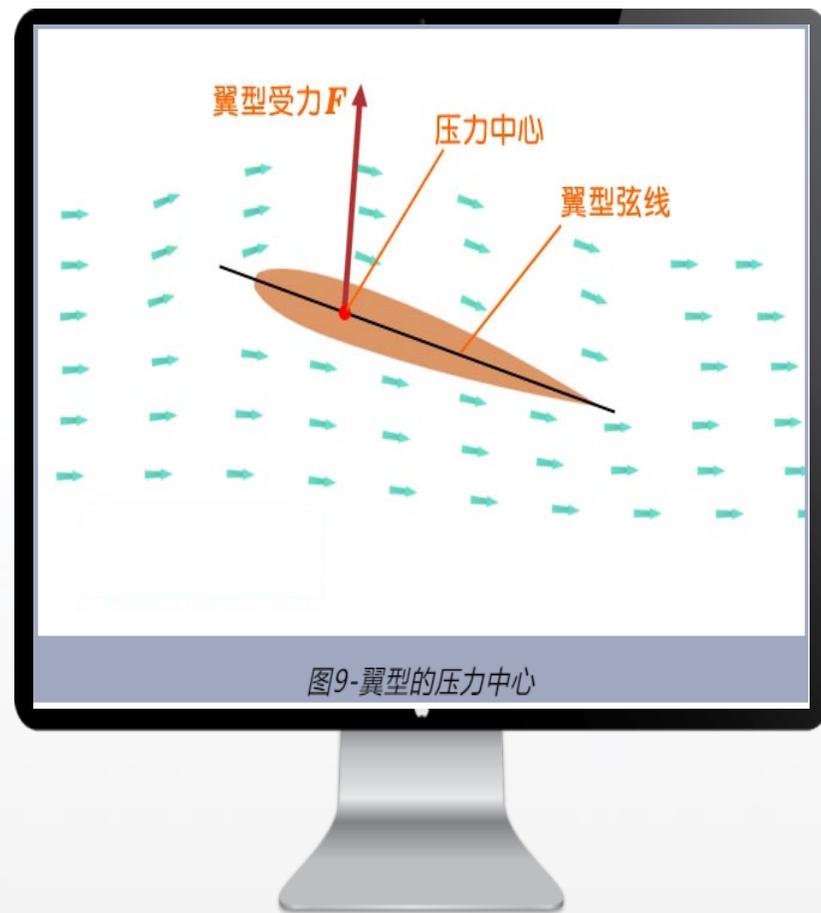
翼型的攻角为某一负值时升力为0，称该攻角为零升攻角；此时阻力很小。



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 ρ ——流体密度； V ——流场中的特征速度； L ——特征长度； μ ——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 ν 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 ρ 随气温上升而减小、空气的粘度 μ 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。

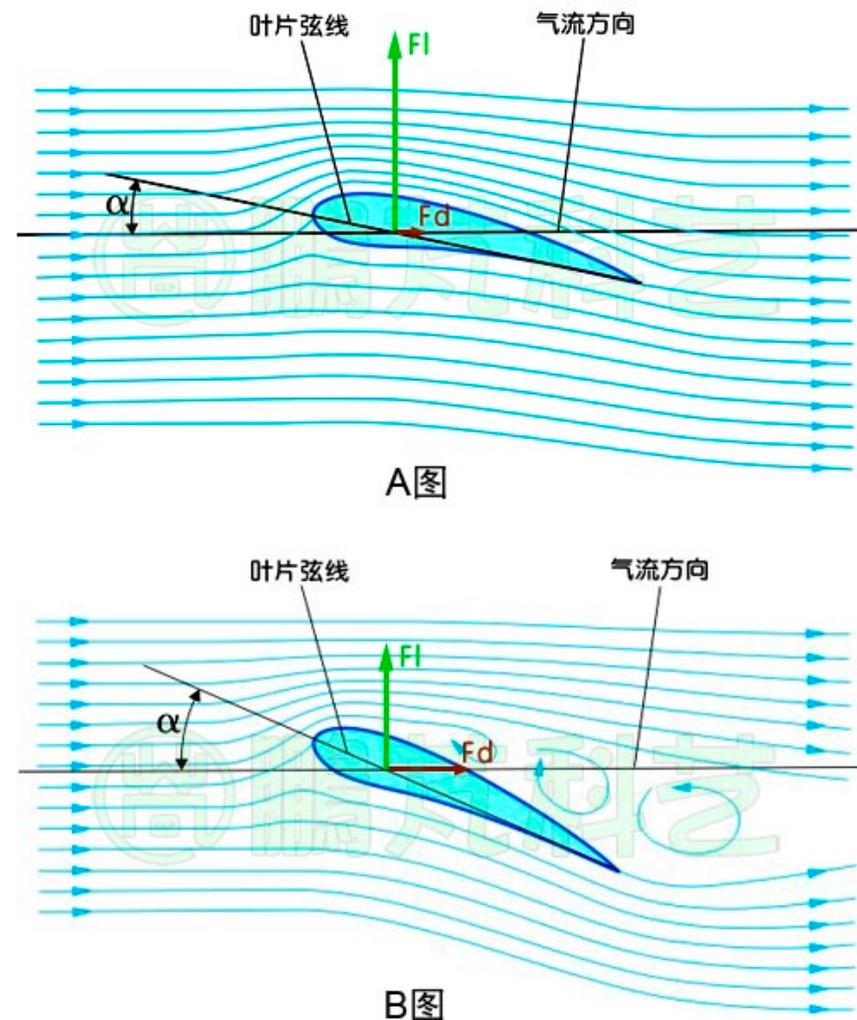


图10-攻角超过失速迎角就会失速

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 6m/s 的空气流，通过 1 平方米所具有的功率为 129.6W 。

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

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

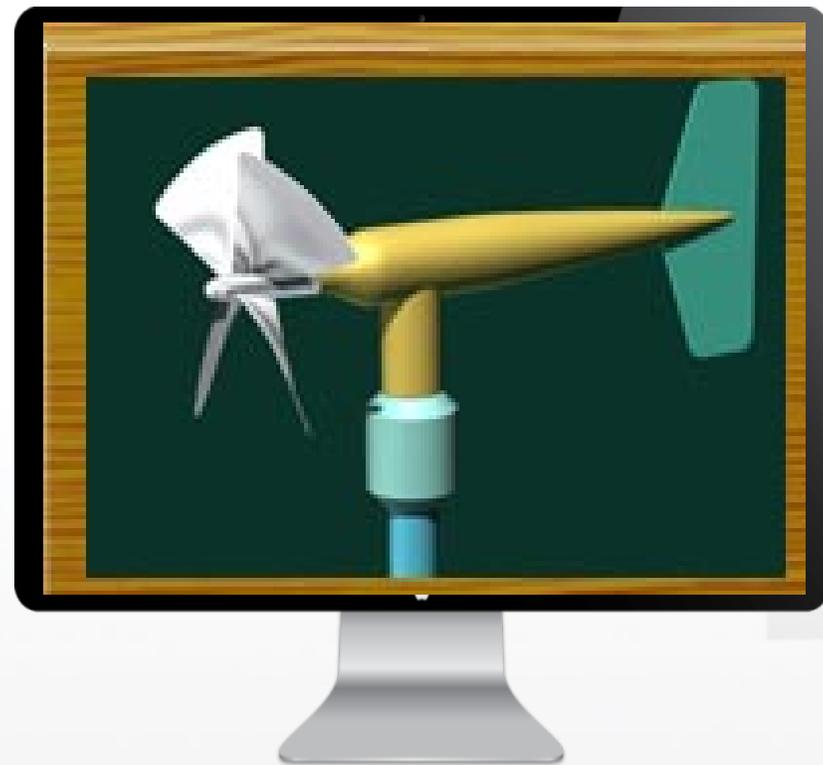
风能利用系数也称为功率系数，有关风能利用系数更多知识见[风能与风功率](#)章节。

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%。

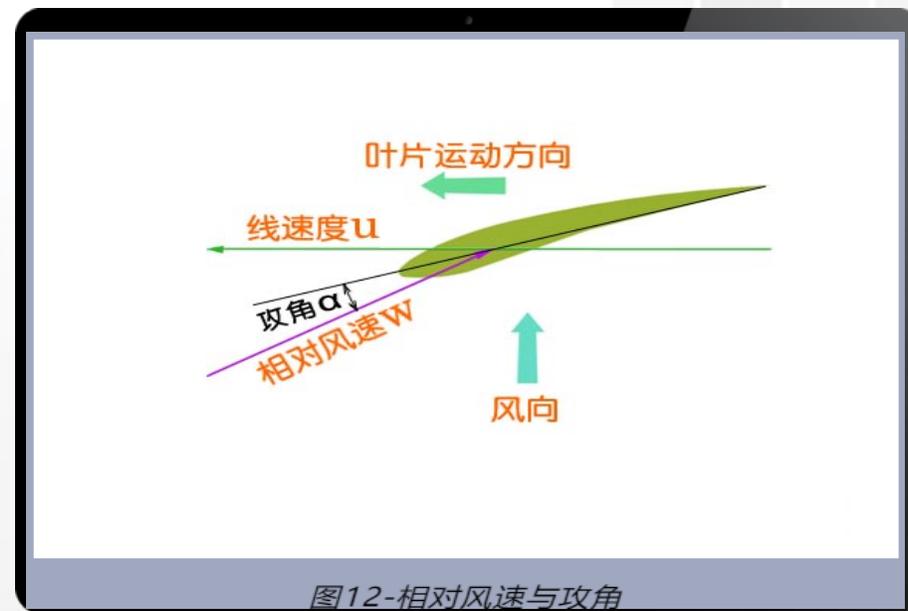
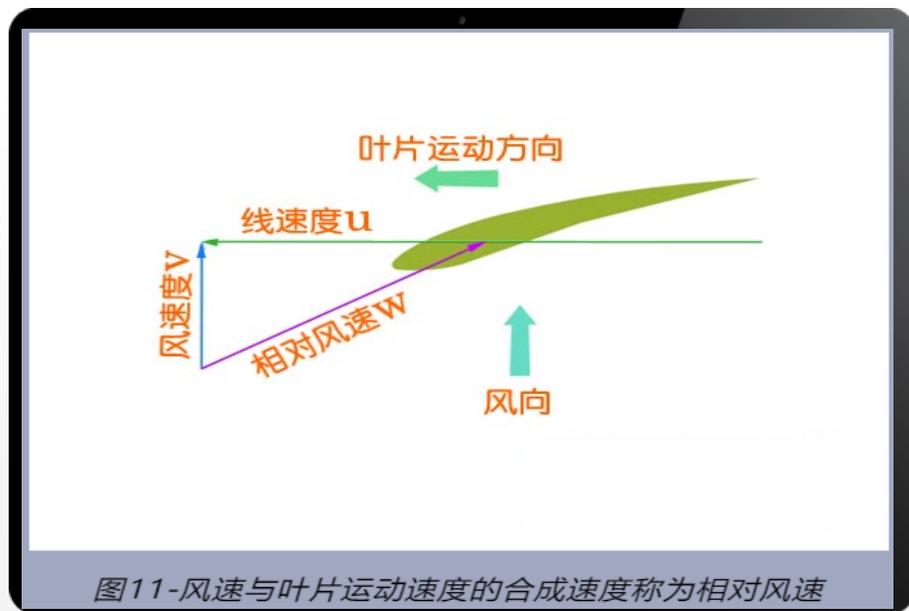


风力机空气动力学基础知识

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 α ，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 λ 。 $\lambda = u/v$

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。



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， σ 为实度比，

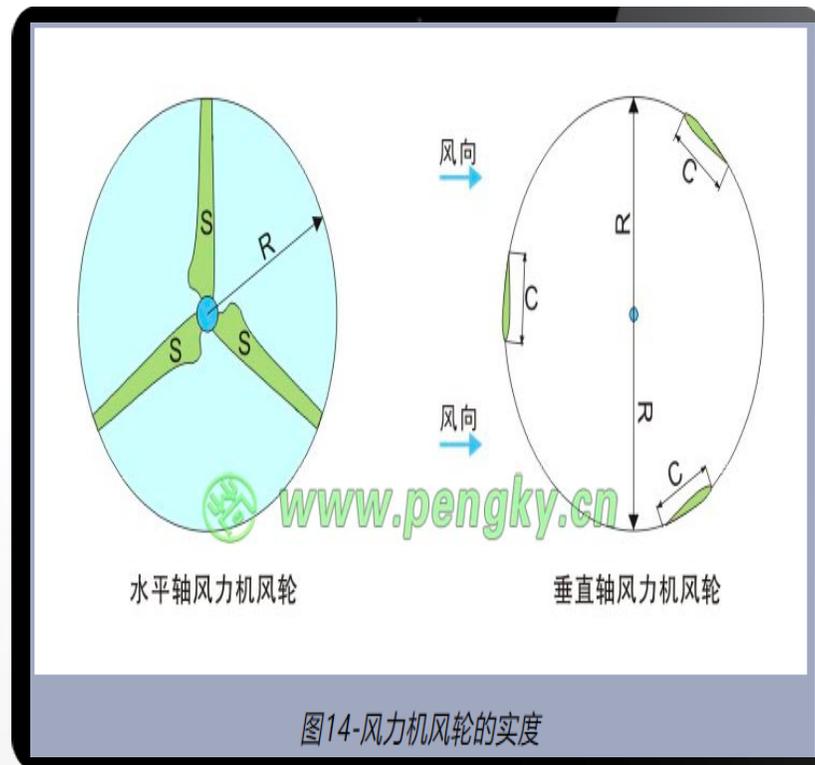
$$\sigma = BS/\pi R^2$$

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， σ 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



02

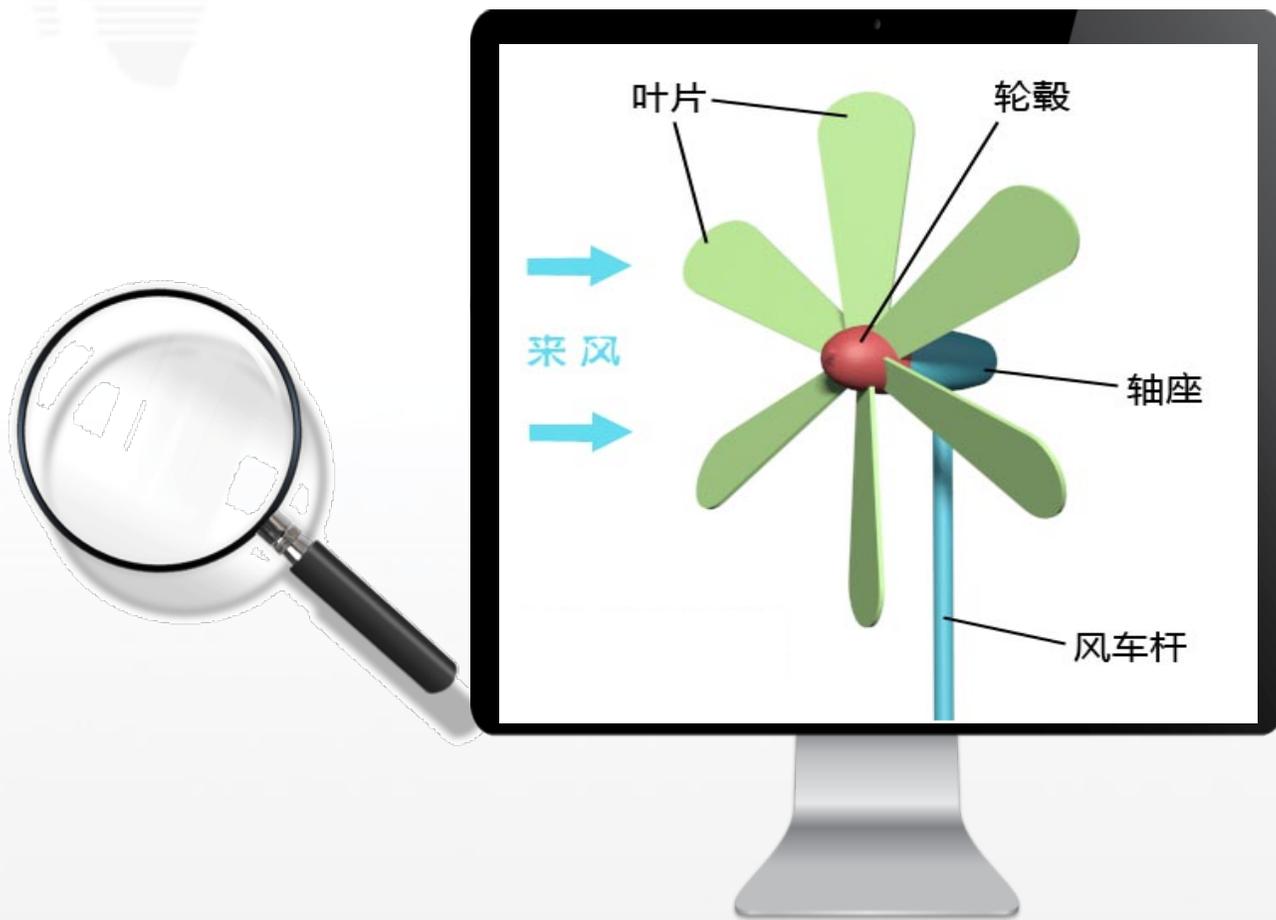
风的测量

风的测量(Wind Measurements)

概述

风是由空气流动引起的一种自然现象，风主要指空气的水平方向流动，**太阳辐射热**是造成空气压力变化的主要原因，典型风类有**海陆风**、**山谷风**、**季风**、**信风**等。风的主要参数是大小与方向。

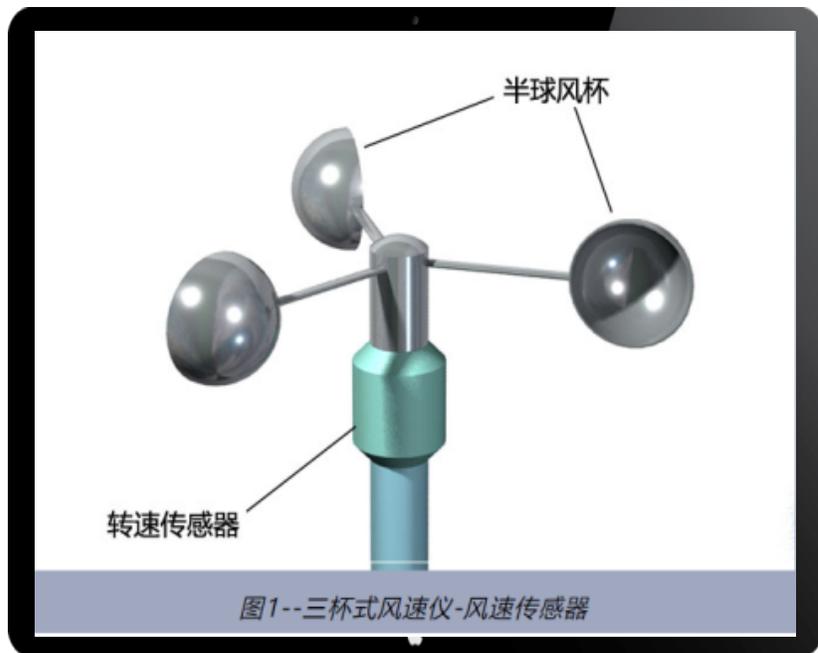
可通过仪器来测量风力的大小与方向。根据测量原理主要有以下几类：**机械式**、**超声波式**、**声振荡**、**压力式**与**热线式**、**激光雷达**、**微波雷达**等，在一般场合用得较多的是机械式与超声波式，特别是在风力发电机中使用广泛。在风力发电中也称这些仪器为**风速传感器**与**风向传感器**。



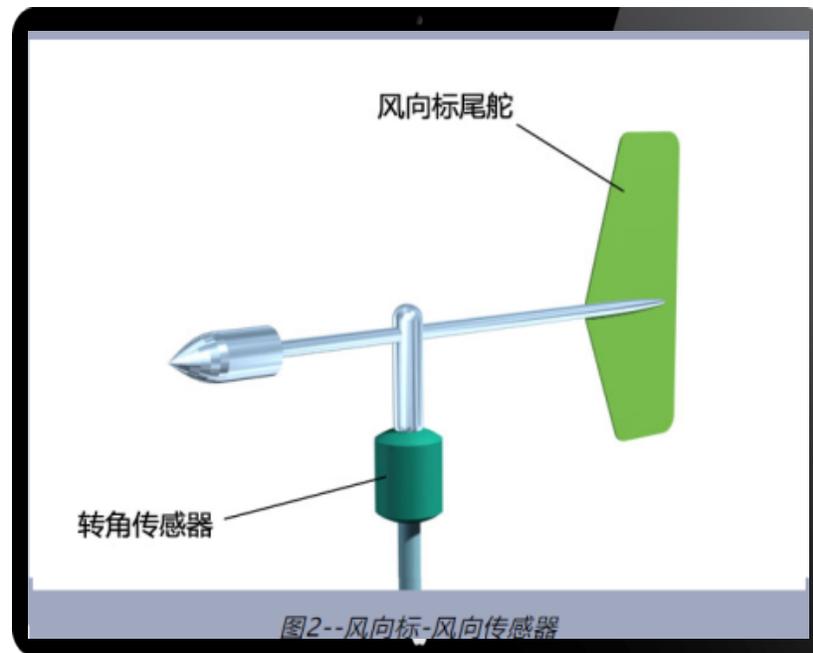
风的测量

机械式测风仪

风速测量仪器也叫风速传感器，最简单又常见的风速测量是三杯式风速仪，三个风杯由于阻力差而旋转，风力大则转速高，仪器内的转速传感器把风杯转速变为电信号输出。图1就是三杯式风速仪外形图。



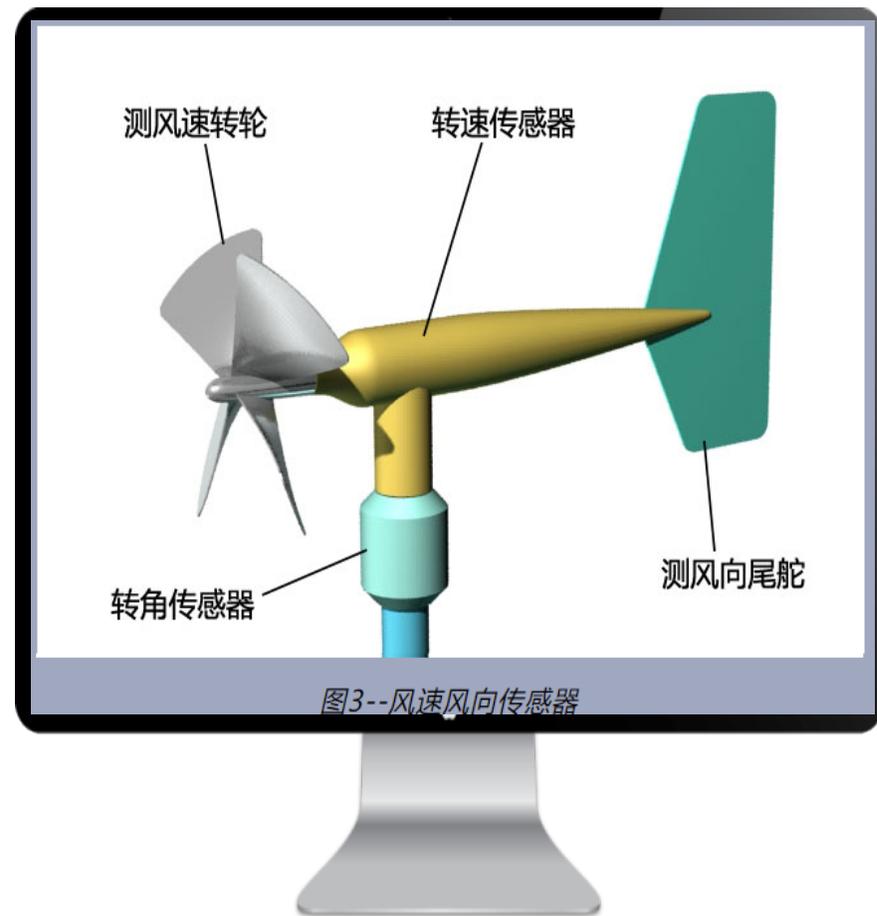
最简单又常见的风向测量是风向标，也叫风向传感器，其原理不言而喻。其指向的角度由仪器内的角度传感器转变为电信号输出。图2就为风向标外形图。



机械式测风仪

图3是一种同时可测量风速与风向的仪器，仪器前方有测量转速的浆叶，浆叶随风速加大而增高，仪器后方有随风而摆的翼片，仪器内有转速传感器与角度传感器分别把风速与风向转换为电信号输出。图3就是该种仪器的外形图。

机械式测风仪结构简单、价格低廉；缺点是有旋转件，存在磨损损耗，易被风沙磨损，冰冻雨雪会影响运行，需定期维护。



超声波式风速风向仪

超声波风速风向仪也叫超声波风速风向传感器，有多种测量计算方法，其中传播时差法简单也用得较多。时差法通过超声波在空气中的传播速度来测量风速，顺风传播速度快，逆风传播速度慢，风速为零时双向速度一样。图4就是一个超声波风速风向仪，在上方有四个超声波探头，每个探头即可发送超声波也能接受超声波，相对的两个探头是一组。每一组探头可测出相对方向的风速，两组探头联合则可测出具体的风速与风向。

超声波式风速风向仪最大优点是无机械磨损，缺点是尺寸大些，雨、雪、霜、雾、沙尘会影响测量，使输出误差加大。采用探头加热技术，可防止冰雪对传感器造成的影响，以适合在恶劣天气条件下使用。

大型风力机都安装有风向与风速测量传感器，风向传感器向风力机偏航控制器实时提供信号，控制器驱动偏航电机保证风力机准确对风；风速传感器向风力机控制器提供风速信号，控制器根据风速、负荷调整桨距角，使风力机运行在最佳状态。

近些年激光测风雷达技术进展较快，开始在风力发电机组安装应用。



图4--超声波风速风向传感器

03

风力机的原理与组成

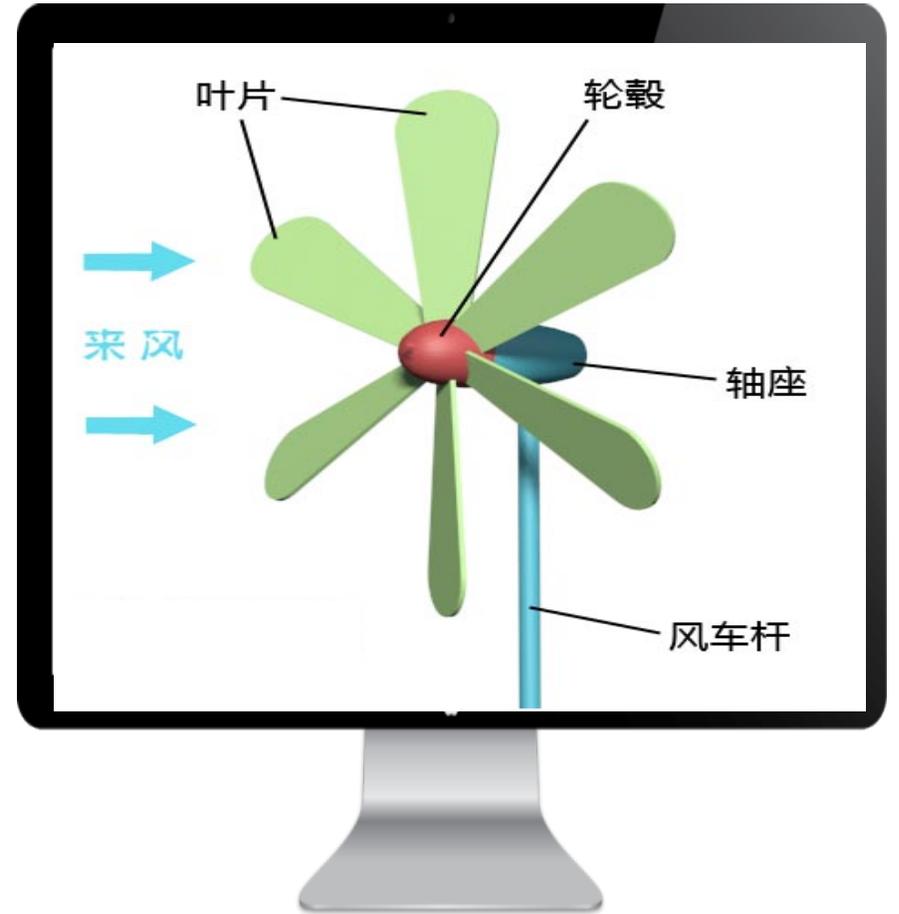
风力机的原理与组成 *(Horizontal Axis Wind Turbine Composition and Form)*

水平轴风力机的工作原理与结构形式

薄板叶片的玩具风车

水平轴风力机的风轮旋转轴是水平方向的，和地面与风向基本平行。图1是一个玩具风车，在风车杆上固定有轴座，轴座前方有轮毂，两者通过风车轴相连，轮毂可绕风车轴自由旋转。风车有6个叶片，叶片固定在轮毂上，叶片与风车轴垂直，叶片之间的夹角是60度，6个叶片与轮毂组成风轮，每个叶片相对于风轮平面有25度（或相近角度）的倾斜角度。当风车轴与来风平行时，风轮就会旋转起来。

图1 薄板叶片的玩具风车



风力机的原理与组成

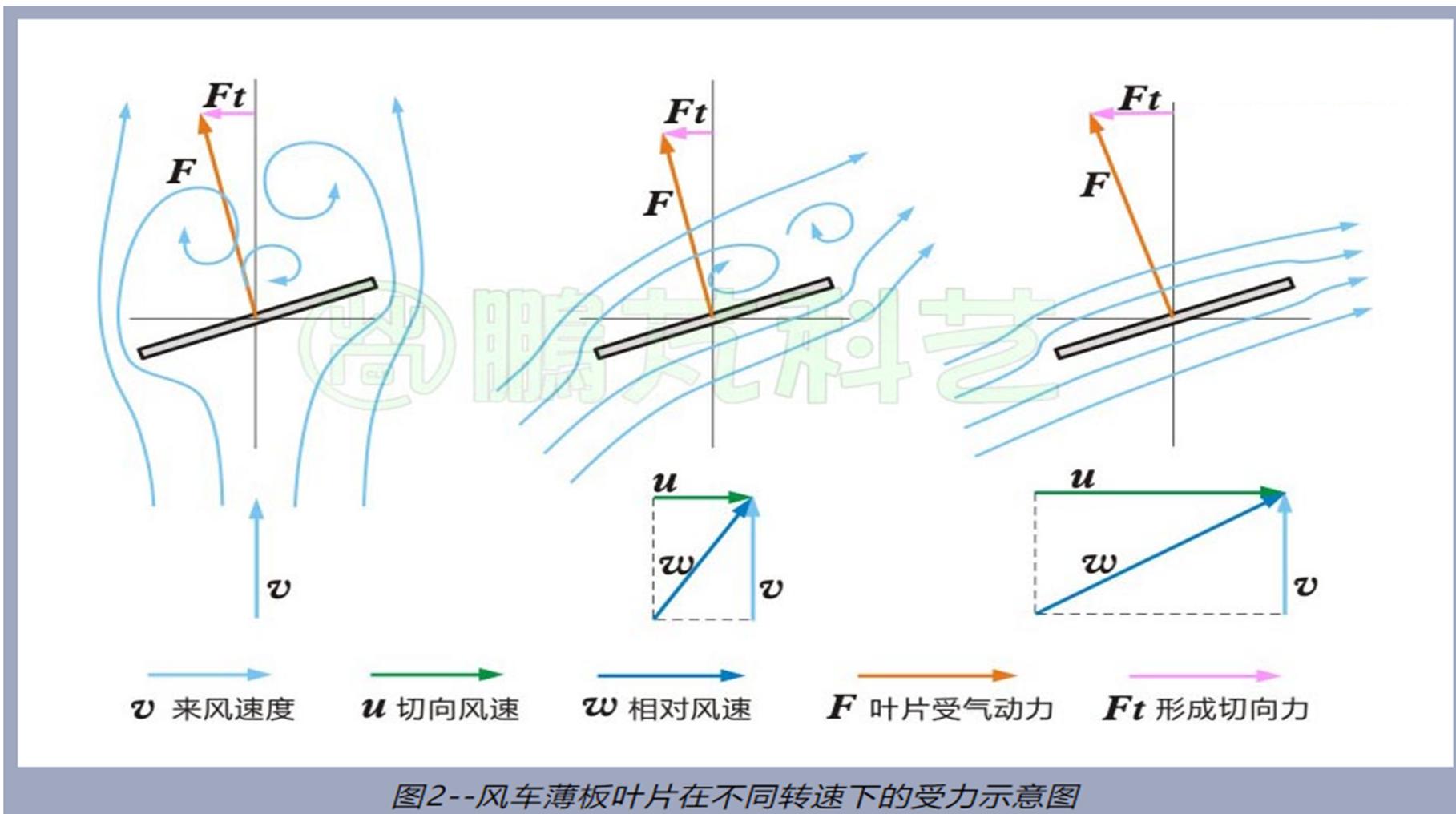
水平轴风力机的工作原理与结构形式

图2左图是风车还未转动时的气流状态，此时气流从薄板叶片两边绕过，并在叶片后方形成涡流，叶片前方（相对画面是下方）与后方会有较大的压差，由于叶片并非垂直于风向，气流在叶片上产生的压差合力 F 与风轮转轴间有一个角度，该角度使 F 在叶片运动方向产生分力 F_t ， F_t 与此处风轮圆周相切，推动叶片向左方转动，于是风车开始转动， F_t 也称为切向力。

图2中图是风车以中等速度转动时的气流状态，此时的风速仍为 v ，由于风车已经转动，薄板叶片该截面处的线速度为 u ，方向向左，于是叶片受到的来风除了 v 外还有来自左方的气流 u ， v 与 u 的合成风速为 w ，见下方矢量合成图，相对风速 w 是薄板叶片受到的真正来风方向。图的上方表示叶片此时的气流状态，由于来风 w 的方向与叶片还有较大夹角，见下方矢量图中的 w 与上方叶片的夹角，气流流经叶片时在叶片后方产生有涡流，叶片工作在失速状态，虽有一定的升力但阻力也较大，其合成力为 F ， F 在叶片运动方向产生分力 F_t ， F_t 推动叶片向左方运动。

风力机的原理与组成

水平轴风力机的工作原理与结构形式



风力机的原理与组成

水平轴风力机的工作原理与结构形式

采用薄板叶片的荷兰风车

像小风车这样采用薄板叶片的风力机很早就得到应用，典型的是荷兰风车，早在13世纪荷兰人就广泛使用风力机进行抽水、辗磨谷物、加工大麦等工作。十八世纪末，荷兰全国的风车约有一万二千座，高高耸立的抽水风车，使荷兰从大海中取得近乎国土三分之一的土地，这是古代风力机应用创造的伟大奇迹，当然这也得益于荷兰一年四季盛吹西风，才有如此动力。后来蒸汽机、内燃机和电动机的发明与应用逐渐淘汰了大部分风车，目前荷兰还有两千余架各式各样的风车，由于利用的是自然风力，没有污染，其中许多仍在发挥作用。图3是网络上荷兰风车的照片。



图3--荷兰风车

风力机的原理与组成

水平轴风力机的工作原理与结构形式

翼型叶片

薄板叶片失速角小，容易进入失速状态，现代实际应用的叶片是流线型的，叶片截面如同机翼截面，称为翼型。翼型有一定厚度，强度大、升力大、阻力小。

图5是翼型叶片在不同转速下的受力示意图，图中翼型是叶片在风轮某圆周上的截面，图中风轮转轴相对画面是垂直方向，所以叶片的运动方向相对画面是水平方向，来风的方向相对画面是向上，风速为 v 。

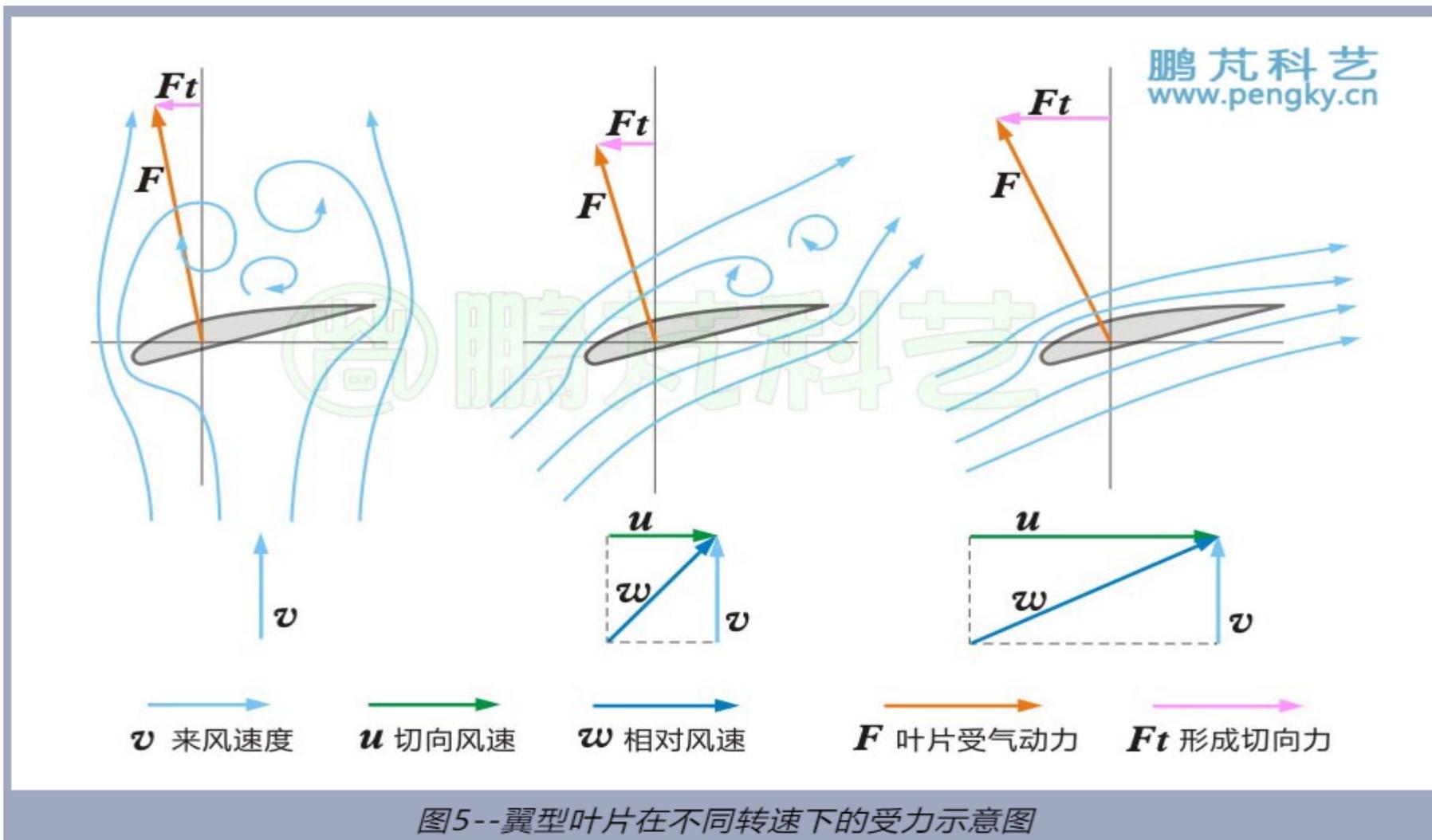
图中有3个工作状态，左图是风轮静止时的状态，中图是风轮转速较低时的状态，右图是风轮以额定转速旋转时的状态。三个状态的气流与受力分析状况与图2薄板叶片基本相同，



图4--国内早期的卧轴风车

风力机的原理与组成

水平轴风力机的工作原理与结构形式



风力机的原理与组成

水平轴风力机的工作原理与结构形式

现代的风力机大多数是水平轴风力机，水平轴风力机主要由叶片与轮毂、机舱与塔架构成。常见的风力机有三个叶片，叶片安装在轮毂上构成风轮，风吹风轮旋转带动机舱内的发电机发电，塔架是整个风力机的支撑，见图6。

风力机的叶片数目

风轮除了三叶片的还有双叶片的，甚至单叶片的



风力机的原理与组成

风力机的对风形式

风轮要正面对着来风方向才能最好的接受风能，面对风向，风轮在塔架前方的称为迎风式风力机，风轮在塔架背风方向的称为顺风式风力机，见图7。

使风力机自动朝向风向称为对风（偏航）功能。小型风力机普遍采用尾舵对风，风把尾舵吹向风力机后方使风轮面向风，图8中的迎风式风力机就是带尾舵的风力机。顺风式风力机勿需任何装置即可自动对风，称之为自由偏航。大中型风力机采用专门的偏航装置对风，在后面的章节有相关介绍。



图7 8--迎风式风力机与顺风式风力机

风力机的原理与组成

机舱内的主要设备

在风力机的机舱底盘上安装有主轴承、齿轮箱、发电机、偏航装置、风向风速测量、控制柜等，发电机是风力机产生电能的设备，由于发电机转速高，风轮转速低，风轮需通过齿轮箱增加转速后才能使发电机以正常转速工作；控制柜控制风力机的对风、风轮转速等；风向标测量风向发出信号给控制柜；偏航装置按控制柜的信号推动风力机进行对风。多个风力机组成风电场，

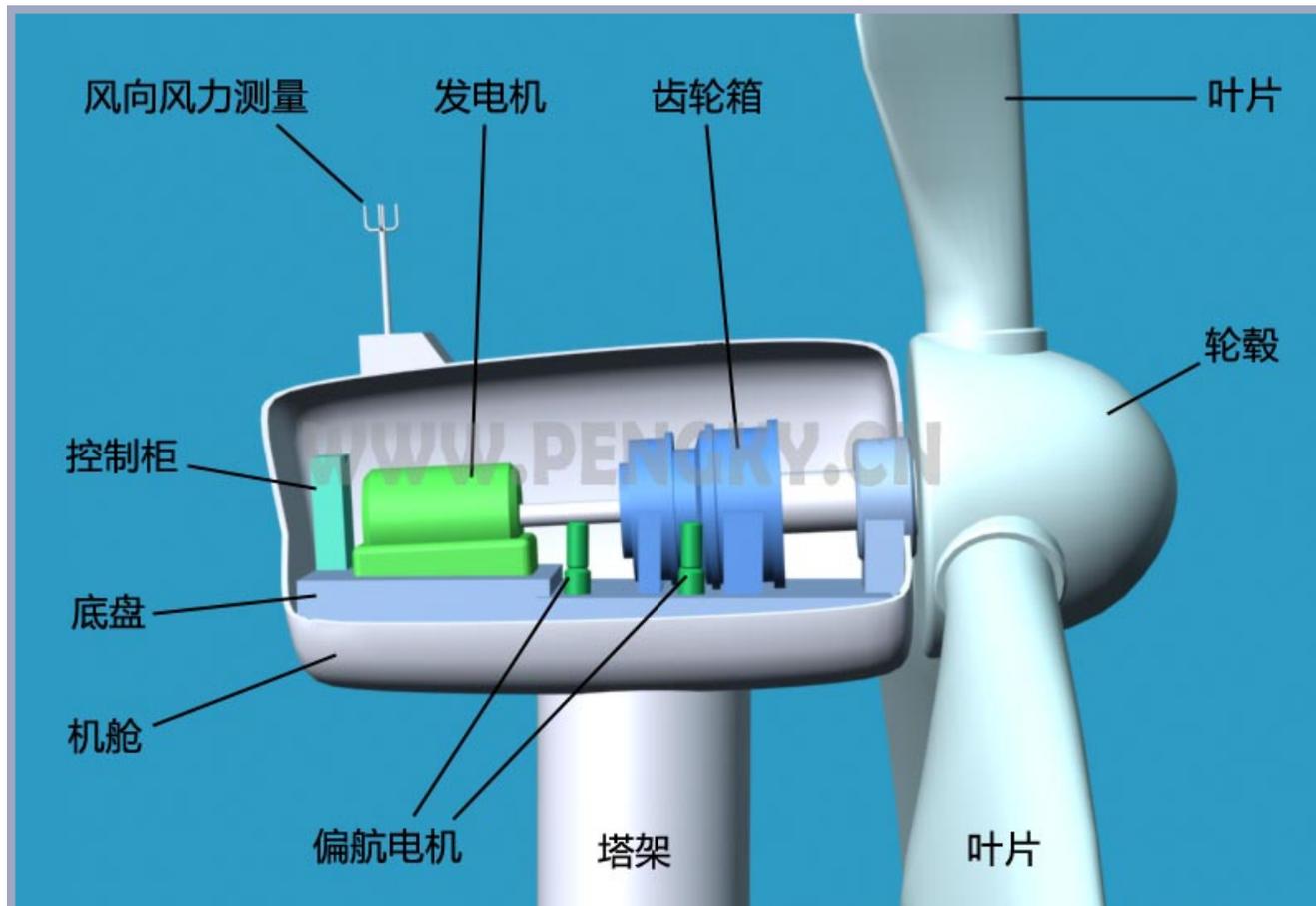


图9 --机舱主要设备示意图



04

叶片的气动特性与结构

叶片的气动特性与结构(Aerodynamics the Blades)

叶片的升力与失速

在风力机基础知识一节中介绍过叶片的升力与阻力，本节就水平轴风力机叶片的气动特性作进一步介绍。

图1是一个运行中的叶片截面气流图，我们称这个截面为翼型，翼型弦线与气流方向的夹角（攻角）为 α ，正常运行时气流附着翼型表面流过，靠近翼型上方的气流速度比下面的气流速度快，根据流体力学的伯努利原理，翼型受到一个上升的力 F_L ，当然翼型也会受到气流的阻力 F_D 。

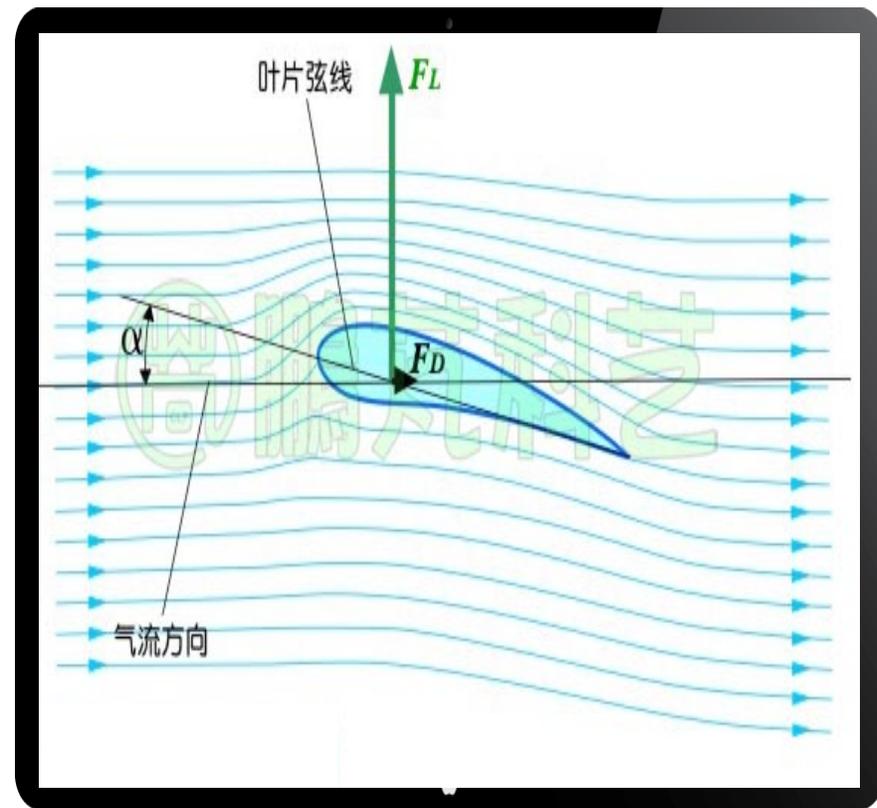


图1--翼型的攻角

叶片的气动特性与结构

这是正常的工作状态，有较大的升力且阻力很小。但翼型并不是在任何情况下都能产生大的升力。如果攻角 α 大到一定程度，气体将不再附着翼型表面流过，在翼型上方气流会发生分离，翼型前缘后方会产生涡流，导致阻力急剧上升而升力下降，这种情况称为失速，发生转变的临界角度称之为临界迎角或失速迎角，见图2。

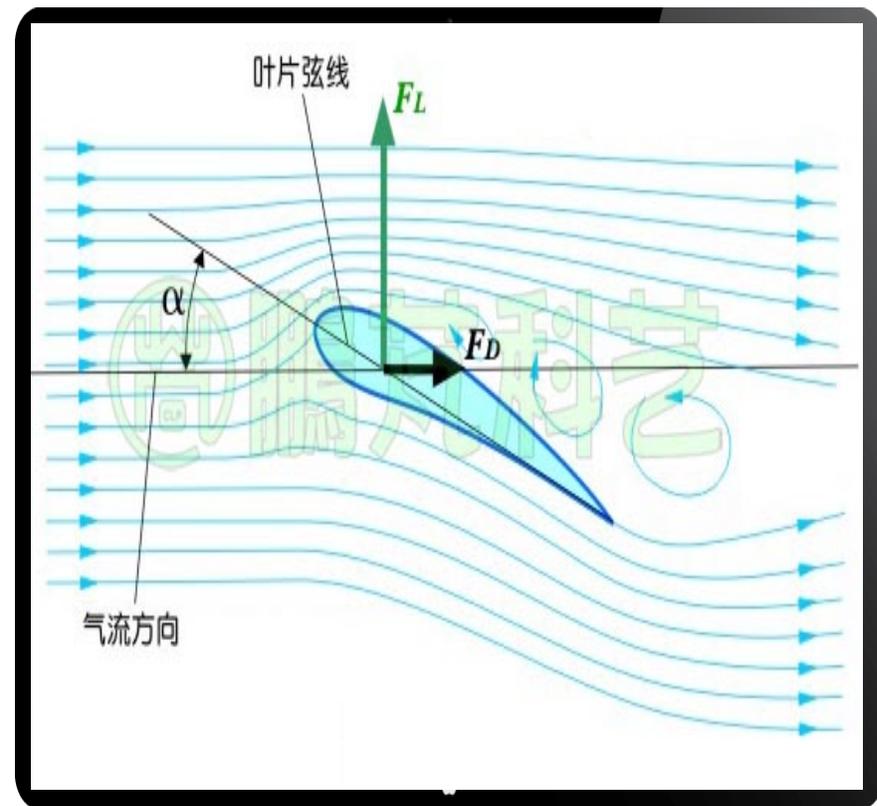


图2--攻角超过失速迎角后翼型开始失速

叶片的气动特性与结构

翼型什么时候开始失速，图3是一种翼型的升力系数与阻力系数随攻角的变化曲线，这是工作在理想状态下的曲线，与多数薄翼型较接近，图中绿色的是升力曲线、棕色的是阻力曲线。在曲线中可看出，攻角 α 在15度以下时升力随 α 增大而增大，当攻角 α 大于15度时开始失速，升力骤然下降，阻力大幅上升，在 α 等于45度时升力与阻力基本相等。

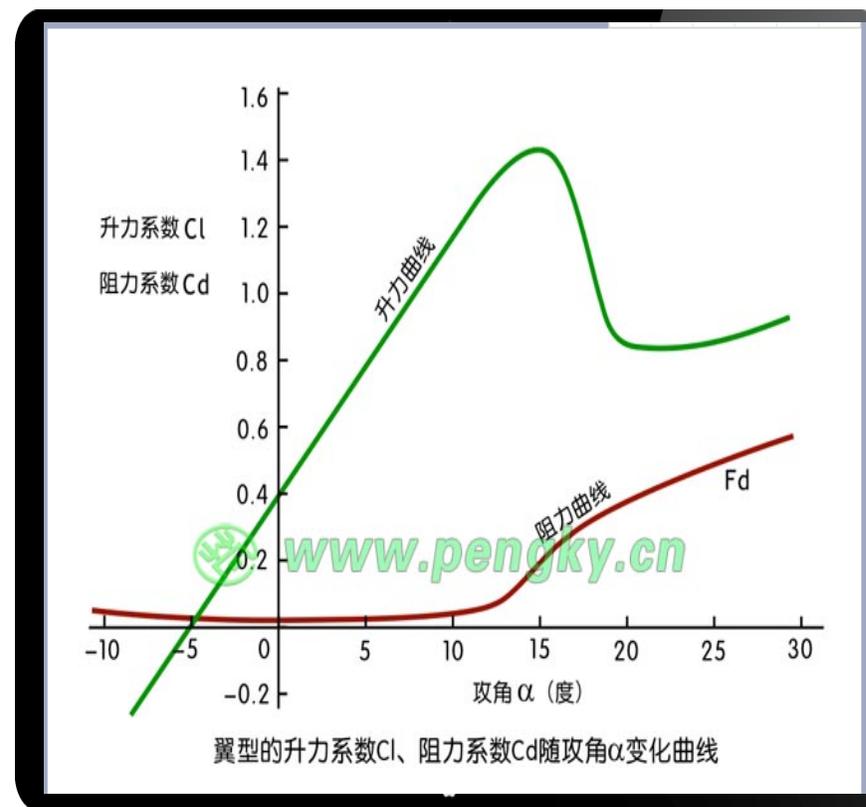


图3--翼型的升力曲线与阻力曲线

叶片的气动特性与结构

风力机的翼型

早期风力机多采用NACA系列翼型，但风力机是大型旋转机械，其叶片与飞机翼有许多不同，为保证机械强度，叶片靠根部附近的厚度要大，但阻力又不能太大；对整个叶片要求就是最大升力系数大、升阻比高、失速时气动性能稳定、气动性能对叶片前缘表面粗糙变化敏感性低等。于是20世纪80年代中期开始，一些风能技术发达的国家研究开发了各自的风力机专用翼型系列，其中代表性的有美国的NREL S翼型系列、丹麦的RISO翼型系列、瑞典的FFA-W翼型系列、荷兰的DU翼型系列，国内也开发了WA系列。

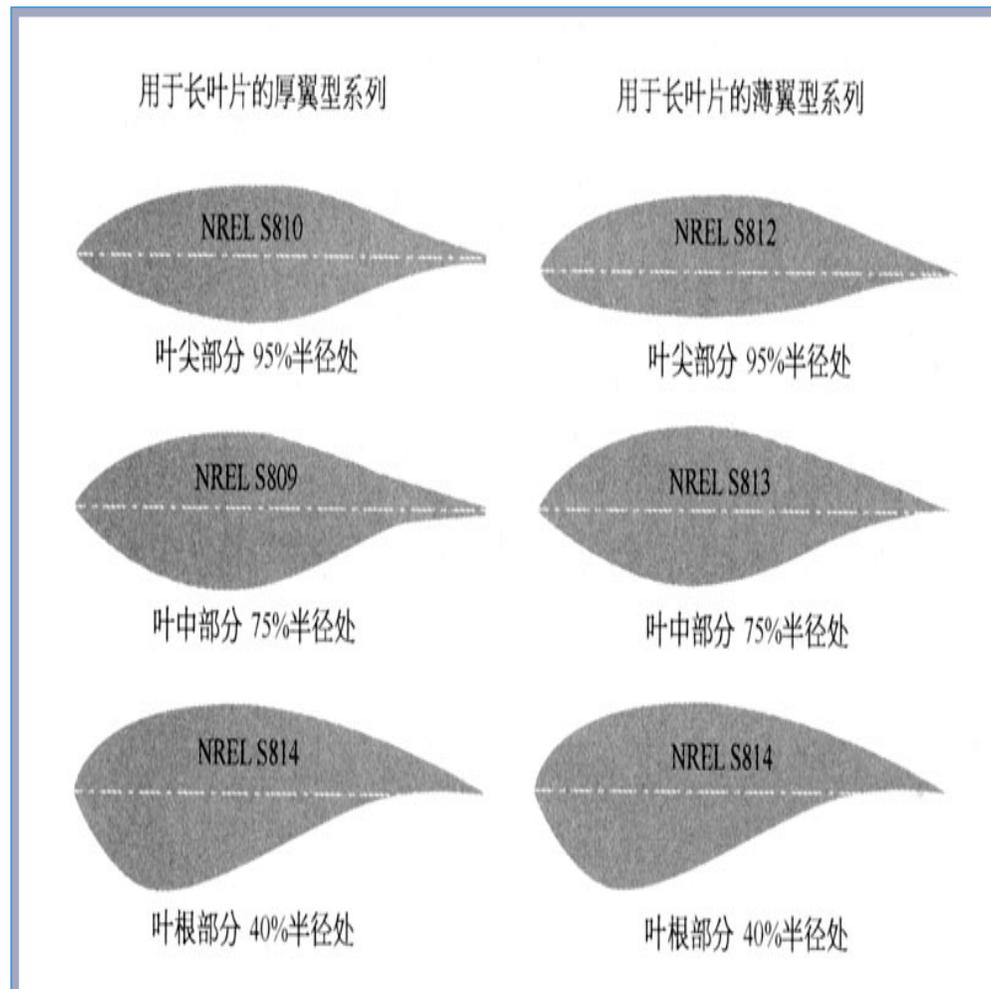


图4--风力机的专用翼型

叶片的气动特性与结构

叶片的结构

在图5中的翼型弦线与翼型前进方向有一固定的夹角 β 称为桨距角，相对翼型的风速是外来风速 v 与翼型线速度 u 合成的相对风速 w ，相对风速 w 与翼型弦线间的夹角 α 是翼型的攻角。要尽量让翼型工作在失速前的攻角以获得最大的升力与较小的阻力。对于一定的风速 v 与一定的线速度 u 选择合适的翼型桨距角 β 以获得最合适的攻角 α 。

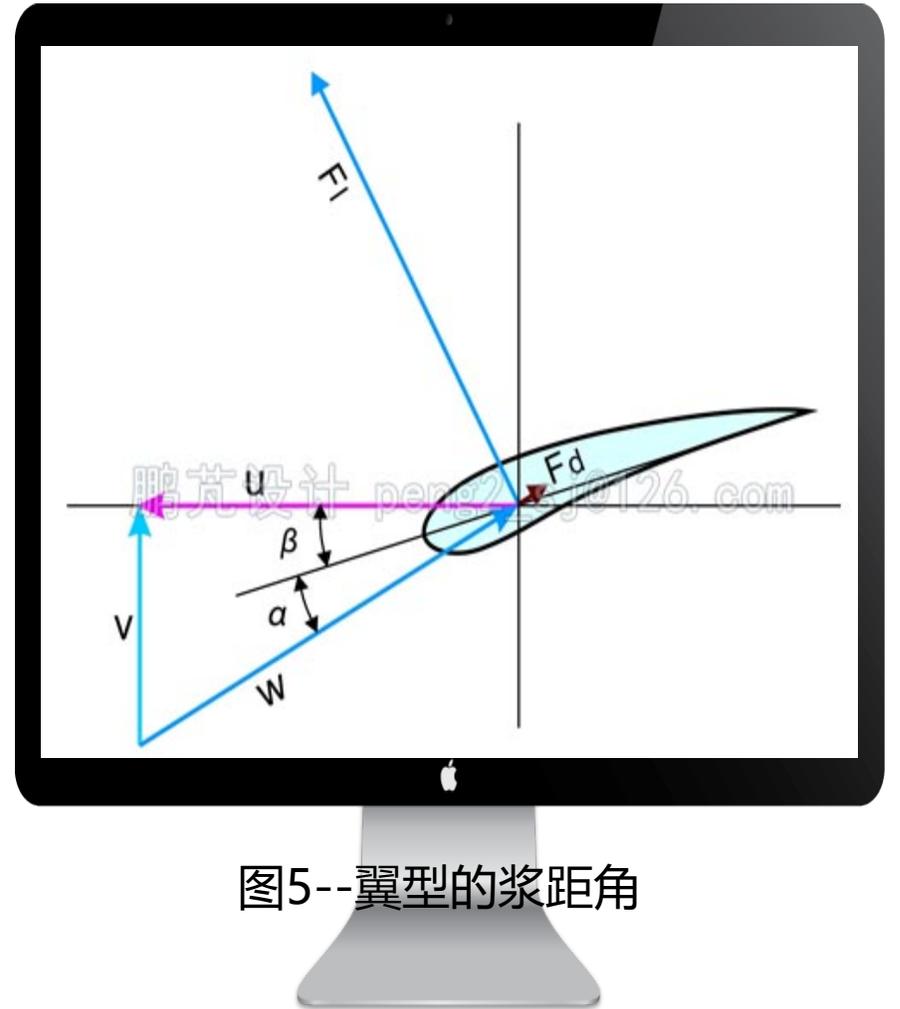


图5--翼型的桨距角

叶片的气动特性与结构

实际的叶片是绕轴旋转运动的，沿叶片长度方向不同截面的线速度 u 是不同的，叶尖处最快、靠叶根处最慢。对于同样的风速 v ，在叶尖处相对风速与风轮平面夹角最小、在叶根处相对风速与风轮平面夹角最大，为了使叶片各段都能工作在较好的攻角，叶片必须做成扭转的。图6是一个风力机叶片，叶片上绘有各段的截面（浅绿色），每个截面两端有该截面弦线的延长线（橙红色），以叶片端截面弦线为水平（水平线为白色），可看出各截面弦线与水平面的夹角，在靠叶根处的夹角最大。

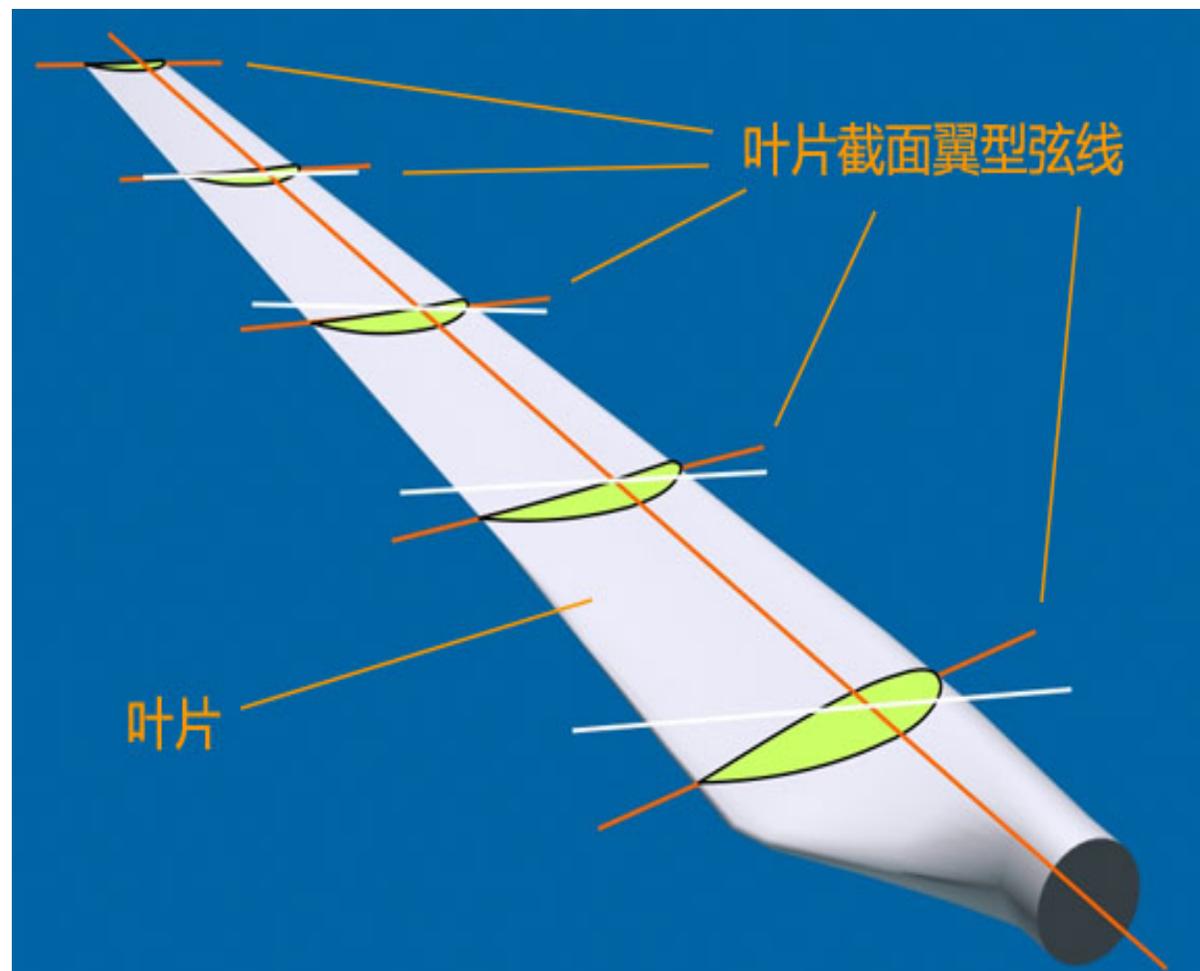


图6--风力机叶片不同部位截面图

叶片的气动特性与结构

叶片在风轮上的安装角度在靠叶尖处与风轮旋转平面的夹角最小，在靠叶根处的夹角最大，见图7。

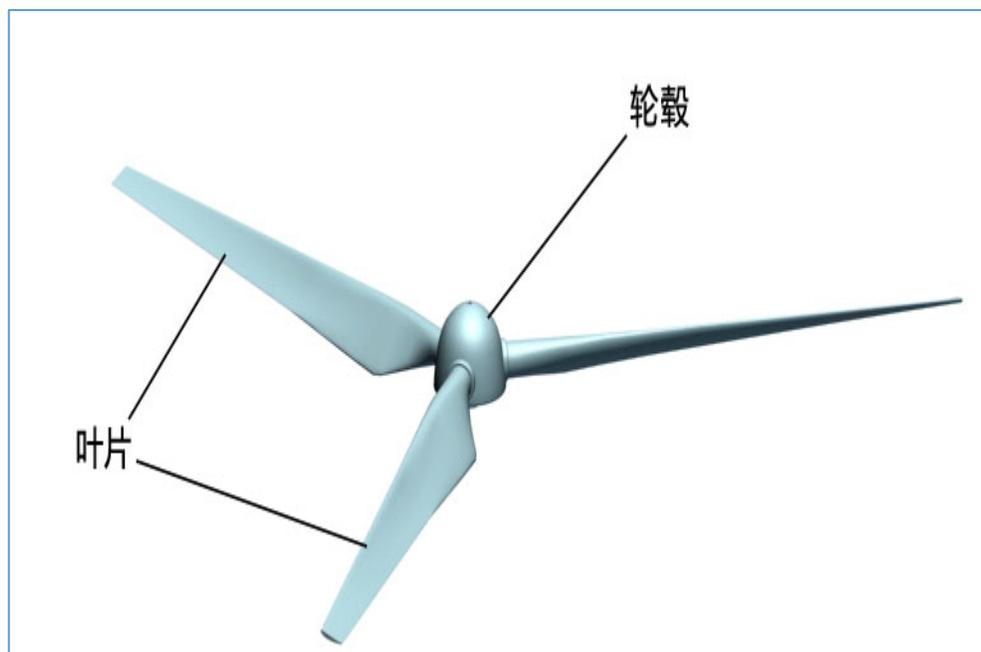


图7--有三个叶片的风轮

叶片扭转角

半径 (m)	扭转角 (°)	半径 (m)	扭转角 (°)
2.802	16.0	13.176	2.72
4.877	11.2	15.251	1.44
6.952	8.4	17.325	0.56
9.026	6.24	19.400	0.00
11.101	3.32		

这个扭转角有多大，对于不同的风力机与叶片的值不同，但对于大中型风力机相差不大。下面附表的数据来自《风力机设计、制造与运行》一书，表中数据是一个半径约40m的风轮，其叶片在不同半径处的扭转角。该角度是最佳运行风速为8m/s时的设计优化值。

叶片的气动特性与结构

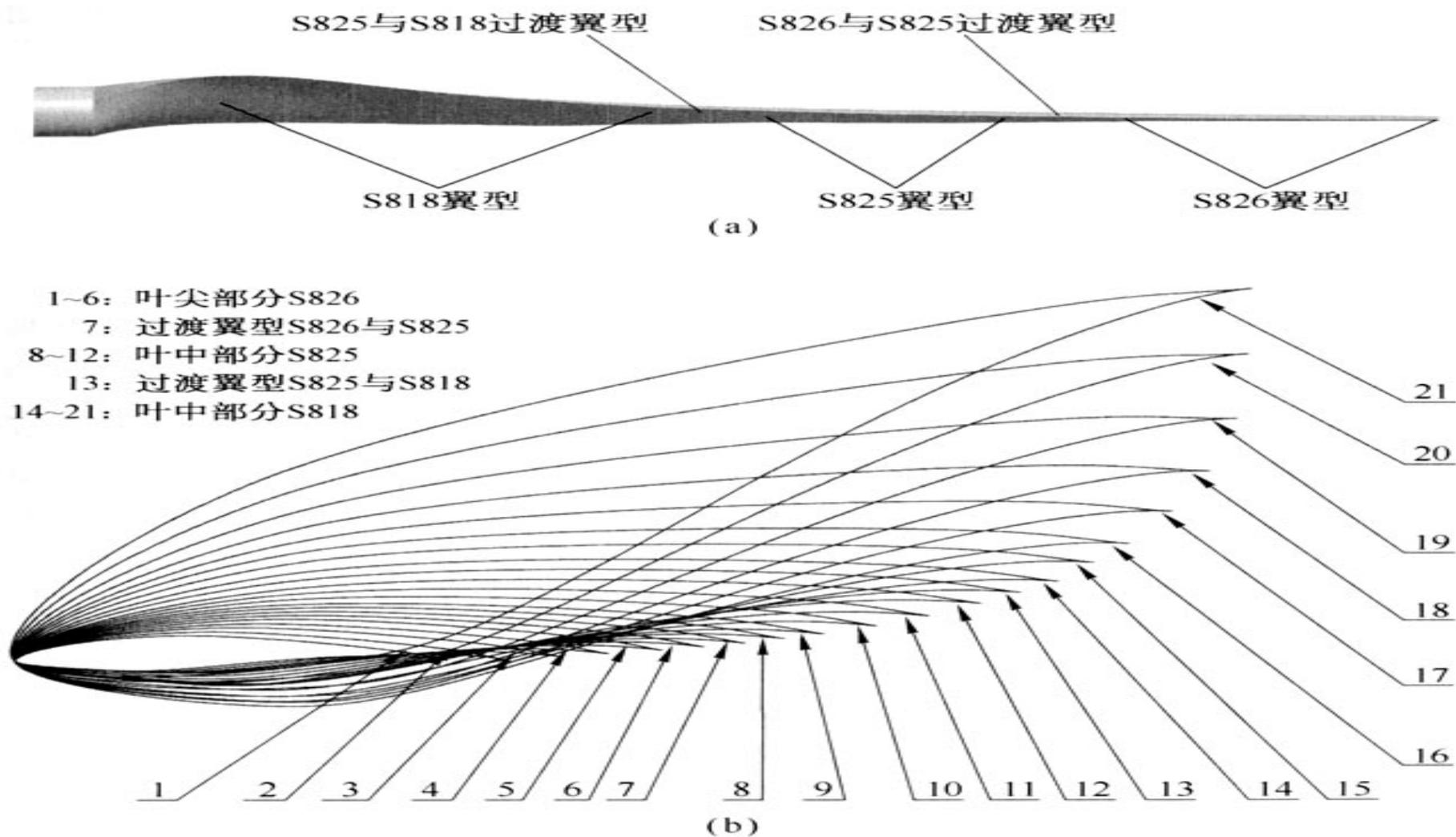


图 5 - 22 叶片弦长变化及扭转规律示意图



本课程结束

制作单位：湖南电气职业技术学院