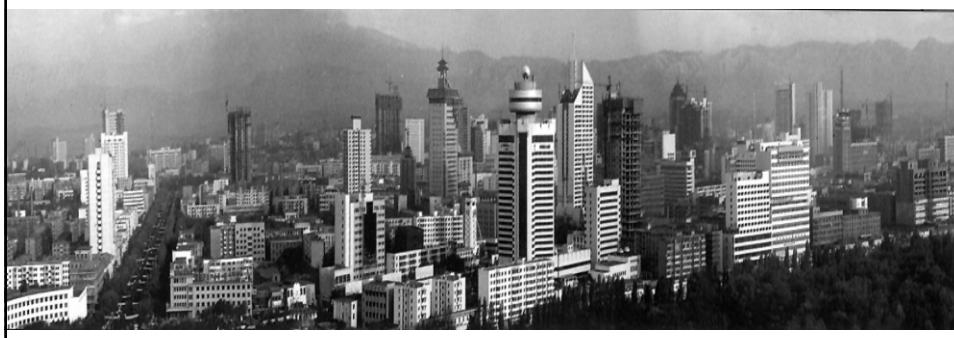


风力发电技术基础

崔新维

国家风力发电工程技术中心

2005. 5.



授课内容

内 容	学时数
1、风力发电机组概论	(2)
2、风资源概述	(2)
3、空气动力学基础	(4)
4、风力发电机方案设计	(4)
5、机组零部件	(4)

1、 概论

1.1. 风力发电机简介

1.2. 风力发电机设计总论

1.2.1. 设计过程

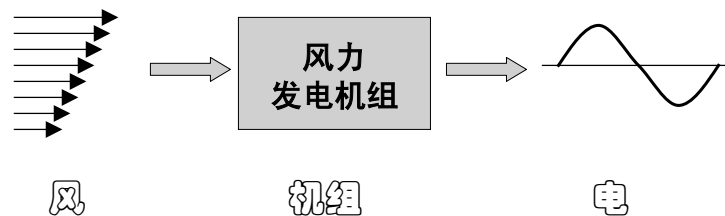
1.2.2. 风力发电机组结构形式

1.2.3. 机组载荷

1.1. 风力发电机简介

1) 风力发电机

能量转换装置：风能→电能



• 几点说明：

1. 风力发电机和风车

风能 → { 电能——风力发电机 (Wind turbine)
 机械能——风车(windmill)

2. 风力发电机和电网

风力发电机总是连接着某种电网：

——蓄电池电路

——民用电网

——独立电网

——大型公用电网：现代大型风力发电机并入

几点说明：

3. 风力发电机与风

(叶轮) (发电机)

——风能 → 机械能 → 电能——二次转换

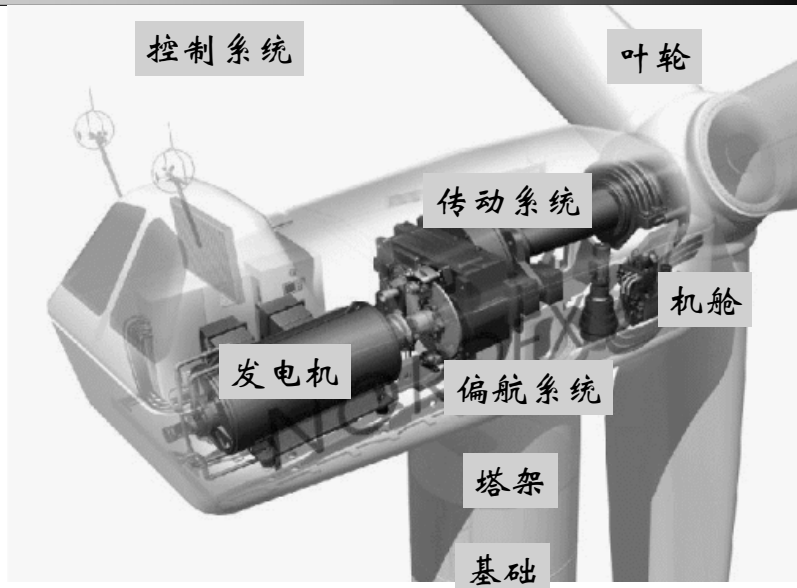
——不能储存风

——风电的波动性和断续 (不可调度)

——风不能被传送，风电只能就地产生。



2)、风力发电机的组成



动画演示

- 叶轮——机舱——塔架
- 机舱内部
- 整机

风力发电机的组成（续）

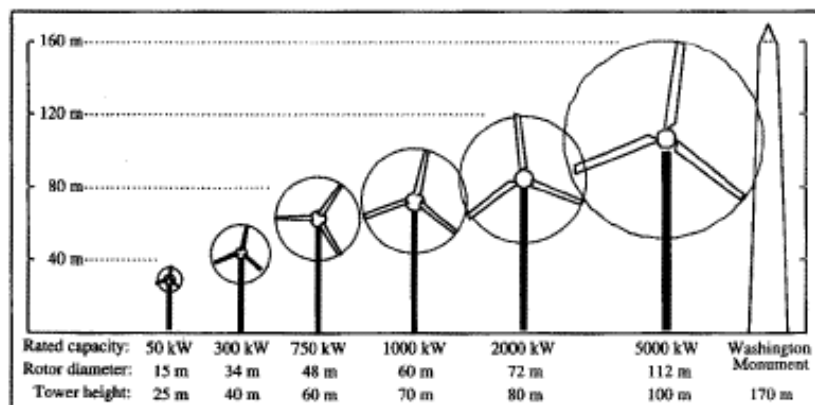
- 风力发电机组的主要组成部分：
 - 叶轮：将风能转变为机械能。
 - 传动系统：将叶轮的转速提升到发电机的额定转速
 - 发电机：将叶轮获得的机械能再转变为电能。
 - 偏航系统：使叶轮可靠地迎风转动并解缆。
 - 其它部件：如塔架、机舱等
 - 控制系统：使风力机在各种自然条件与工况下正常运行的保障机制，包括调速、调向和安全控制。

3)、风力发电机组的分类

- 根据额定功率分为小、中、大型机组。但由于各个国家和地区经济技术发展水平不同，界限不尽相同。

	欧洲	美国	中国
微型机			1 kW以下
小型机	小于 100 kW		1至 10 kW
中型机	100 kW ~ 500 kW	100 kW~ 1000 kW	10 kW~ 100 kW
大型机	大于500 kW	大于1000 kW	大于100 kW

机组的容量、叶轮直径和塔架高度



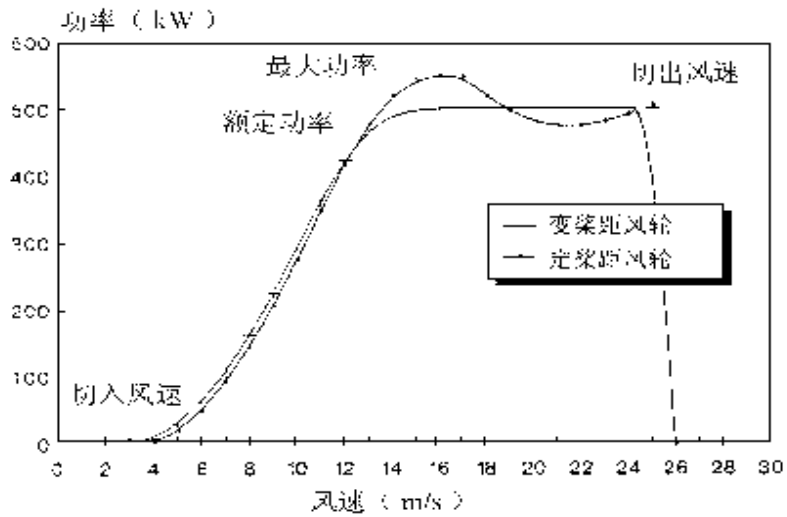
4)、风力发电机的主要机型

- 按功率调节方式分：
 - 定桨距（失速型）机组
 - 变桨距机组
 - 按叶轮转速是否恒定分：
 - 定速风力机
 - 变速风力机
 - 其它机型
 - 主动失速型
 - 无齿轮箱型
 - 海上机组
- 组合成多种机型

海上机组



风力发电机功率曲线



5) 基本技术特征及发展趋势

- 基本技术特征
水平轴、上风式、三叶片
- 机型的发展趋势
 - 定桨距 → 变桨距
 - 定速型 → 变速型
 - Kw级 → MW级
 - 有齿轮箱式 → 直接驱动式

6) 主要零部件简介

叶轮

- 由叶片和轮毂组成
- 是机组中最重要的部件：决定性能和成本
- 目前多数是上风式，三叶片；也有下风式，两叶片。
- 叶片与轮毂的连接：固定式，可动式。
- 叶片多由复合材料（玻璃钢）构成。

传动系

- 由风力发电机中的旋转部件组成。主要包括低速轴，齿轮箱和高速轴，以及支撑轴承、联轴器和机械刹车。
- 齿轮箱有两种：平行轴式和行星式。大型机组中多用行星式（重量和尺寸优势）。
- 有些机组无齿轮箱。
- 传动系的设计按传统的机械工程方法，主要考虑特殊的受载荷情况。

机舱与偏航系统

- 包括机舱盖，底板和偏航系统。
- 机舱盖起防护作用，底板支撑着传动系部件。
- 偏航系统的主要部件是一个连接底板和塔架的大齿轮。
- 上风式采用主动偏航，由偏航电机驱动，由偏航控制系统控制。
- 偏航刹车用来固定机舱位置。
- 自由偏航通常用于下风式机组。

发电机

- 主要有感应电机和同步电机两种，两者都能在并网时定速或近似定速运行。
- 感应电机由于可靠、廉价、易于接入电网而得到更多的使用。
- 变速运行时，电气系统的将更复杂和昂贵。
- 选用适当的变流装置，感应电机和同步电机都可以用于变速运行。

塔架与基础

- 塔架有钢管、桁架和混凝土三种。
- 塔架高度通常为叶轮直径的1~1.5倍。
- 塔架的刚度在风力机动力学中是主要因素。
- 对于下风式机型，必须要考虑塔影效应、功率波动和噪声问题。

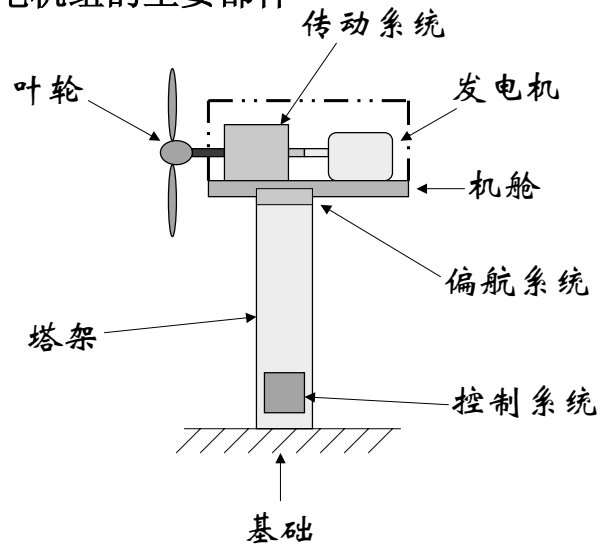


控制

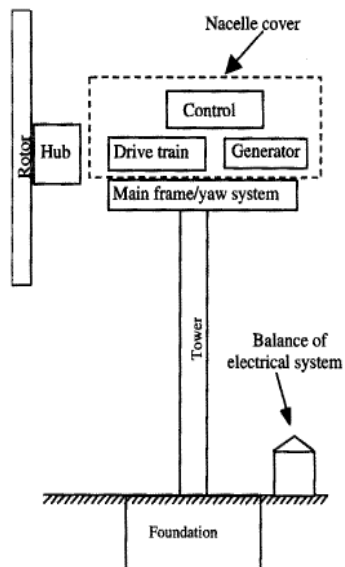
- 控制系统主要控制机组的运行和功率的产生。
- 控制系统主要包括：
 - 传感器：转速、位置、气流、温度、电流、电压等；
 - 控制器：机构、电路和计算机。
 - 功率放大器：开关、电气放大器、液压泵和阀。
 - 致动器：电机、液压缸、磁铁、电磁线圈。
- 控制系统的设计可采用控制工程的方法。主要包含：
 - 限定扭矩和功率；
 - 使疲劳寿命最大化；
 - 使能量产生最大化。

1.2. 风力发电机设计总论

- 风力发电机组的主要部件



Major Components



风力发电机的主要部件

- 典型的水平轴风力发电机：
 - 叶轮 包括叶片和轮毂
 - 传动系 除叶轮之外的旋转部件，主要有：
 主轴、齿轮箱、联轴器、机械刹车和发电机
 - 机舱 包括机舱罩、底板和偏航系统
 - 塔架和基础
 - 控制系统
 - 电气系统 包括电缆、开关装置、变压器，以及变流器

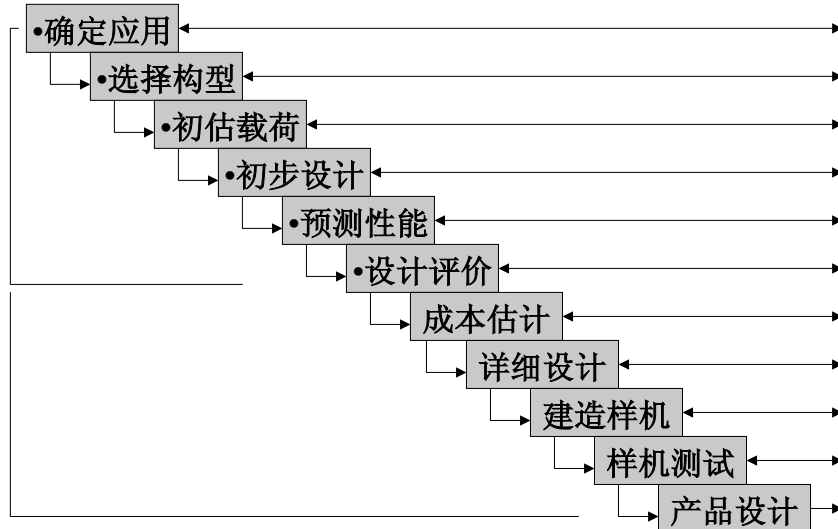
• 风力发电机设计的主要内容

- 叶片数目（2或3个）
- 叶轮的方位：上风式或下风式
- 叶片材料、结构和外形
- 轮毂设计：刚性或铰接
- 功率控制：失速或变桨距
- 定速或变速运行
- 主动偏航或自由偏航
- 同步电机或异步电机
- 有齿轮箱或直接驱动

1.2.1. 设计要求与过程

- 经济性是风力发电机设计要考虑的基本问题。设计的基本目标的使机组的能量成本最低。
- 能量成本受许多因素影响，但主要有两个：
 - 机组本身的成本（机器、安装、运行、维护等）；
 - 年发电量（设计和风资源）。
- 设计的基本要求：
 - 单个零部件的成本最低，重量尽可能轻；
 - 足够的强度承受可能的极限载荷；
 - 运行可靠，最低的维护费用；
 - 足够的疲劳寿命。

•设计过程



1.2.2. 风力发电机总体布局

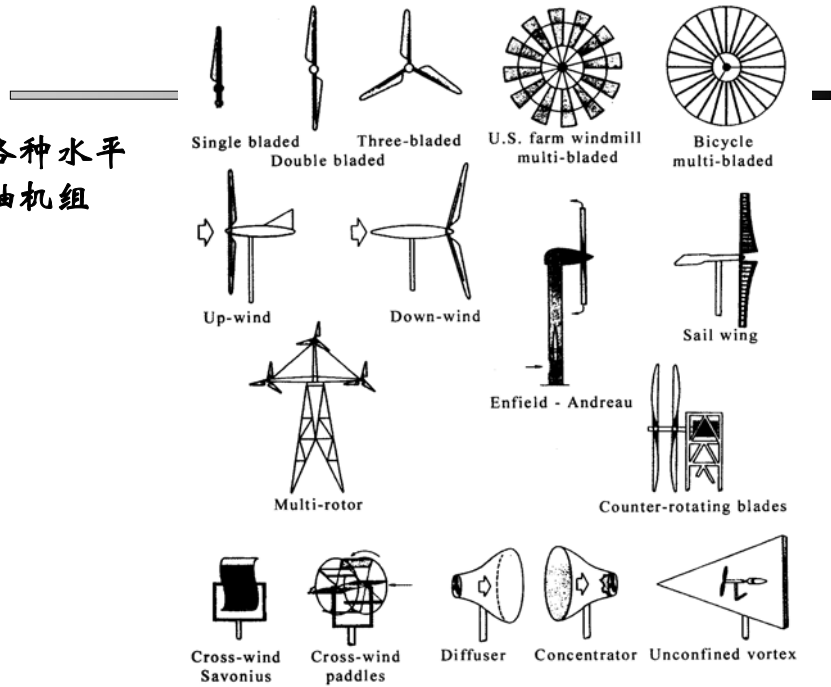
- 风力机总体布局中的选项：
 - 叶轮轴线的方位：水平或垂直；
 - 功率控制：失速，变桨距；
 - 叶轮的方位：上风式或下风式；
 - 偏航控制：主动偏航，自由偏航或固定偏航；
 - 叶轮转速：定速或变速；
 - 轮毂类型：固定式或可动式；
 - 叶片的数量。

1)、 叶轮轴线的方位：水平或垂直

- 大多数现代机是水平轴（平行或近似平行于到面）——HAWT。
- 水平轴机组有两个主要优势：
 - 实度较低，进而能量成本低于垂直轴机组。
 - 叶轮扫略面的平均高度可以更高，利于增加发电量。
- 垂直轴机组的优势：
 - 无需偏航。
 - 叶片定弦长，无扭曲。
 - 传动系位置可降低。

各种水平轴机组

Horizontal axis turbines

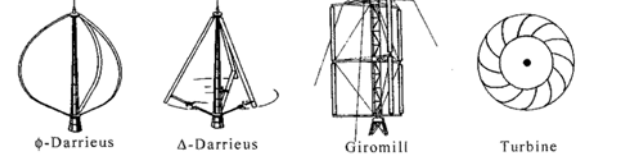


各种垂直轴机组

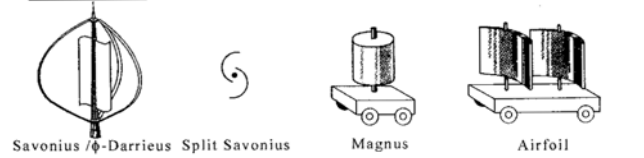
Primarily drag-type



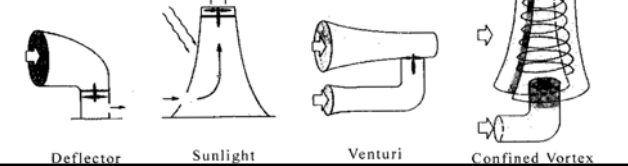
Primarily lift-type



Combinations



Others



2)、叶轮功率控制：失速、变桨距

● 失速控制方式

- 功率控制方式简单，成本较低；
- 叶片与轮毂的连接简单；
- 叶轮转速需单独控制（通常是用感应电机）；
- 在较高风速下达到最大功率；
- 传动系的设计偏安全；

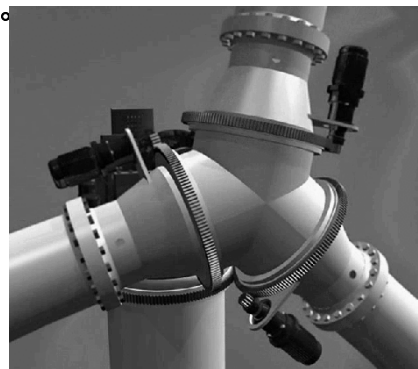
2)、叶轮功率控制：失速、变桨距

● 变桨距控制方式

- 易于控制；
- 变桨距轴承使轮毂结构较复杂；
- 增加变桨距驱动装置。

● 其它控制方式

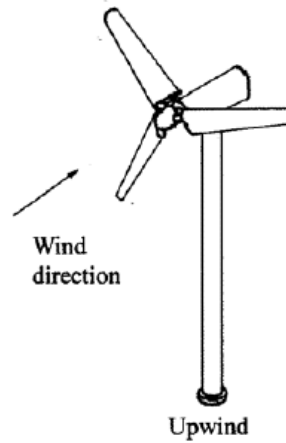
- 气动表面控制；
- 偏航控制。



3) 叶轮方位：上风式或下风式

- 上风式：

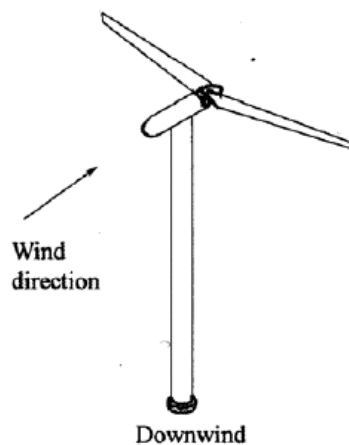
- 须主动偏航；
- 塔影效应小；
- 叶根弯曲应力大。



叶轮方位：上风式或下风式

- 下风式：

- 可自由偏航；
- 减少或消除叶根弯曲应力。
- 有塔影效应（气动力减小、叶片疲劳、噪声）。



4) 偏航：自由式或主动式

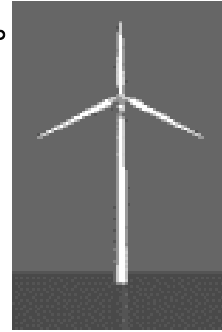
水平轴机组必须考虑偏航问题。

- 下风式机组

- 多用自由式偏航；
- 施加偏航阻尼，以限制偏航角速度和叶片中的陀螺力。

- 上风式机组

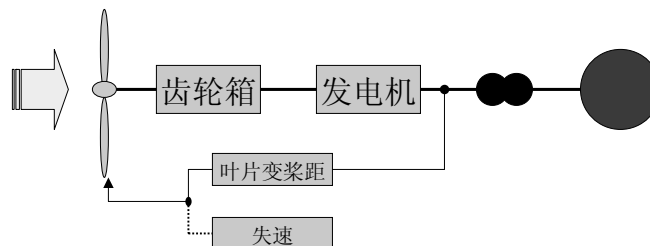
- 通常采用主动偏航，其中含有偏航电机、齿轮和刹车，
- 要求塔架能承受偏航扭矩。



5) 叶轮转速：定速或变速

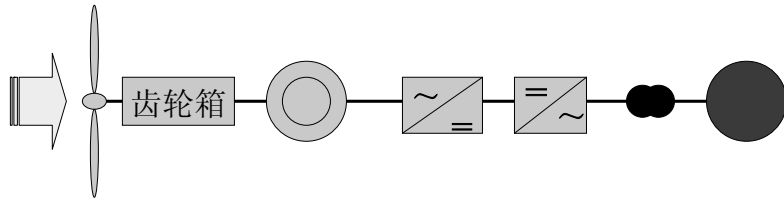
- 定速机型：

- 发电方式简单，造价低；
- 对电网依赖程度高。



叶轮转速：定速或变速

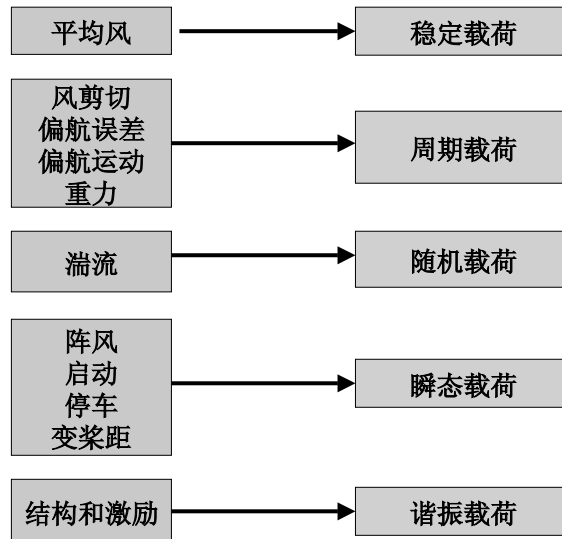
- 变速机型：
 - 电气设备价高；
 - 电能品质好。



1.2.3、机组载荷

- 总体布局完成后，必须考虑载荷，使机组能够承受得住。
- 载荷以力或力矩的形式表示。
- 机组零部件的设计考虑两种载荷：
 - 极限载荷（最大载荷乘安全系数）；
 - 疲劳载荷。
- 作用在风力机上的载荷分为五类：
 - 稳定载荷（包括静载荷）；
 - 周期载荷；
 - 随机载荷；
 - 瞬态载荷；
 - 谐振载荷。

• 载荷及其来源



• 设计载荷

- 设计风力机必须使其满足一系列条件：
 - 正常运行条件；
 - 极限条件；
 - 疲劳条件。
- 设计过程中对载荷的考虑
 - 确定风的条件范围；
 - 选定关注的设计载荷情况；
 - 计算设计载荷情况对应的载荷；
 - 验算应力条件是否满足。
- 国际或机构标准（IEC、GL等）

本章完

第二章 风资源概述

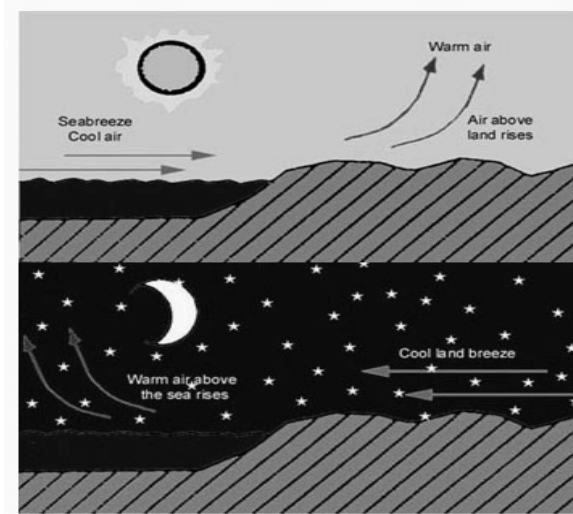
- 风的一般知识
 - 风的形成
 - 风向与风速
- 风的统计学
 - 风向频率
 - 风速频率
- 风的能量

§ 2.1 风的一般知识

一、风的形成

- 地球表面上，受太阳加热的空气较轻，上升到高空；冷却的空气较重，倾向于去补充上升的空气。这就导致了空气的 流动——风。
- 全球性气流、海风与陆风、山谷风的形成大致都如此。
- 风能是太阳能的一种表现形式。

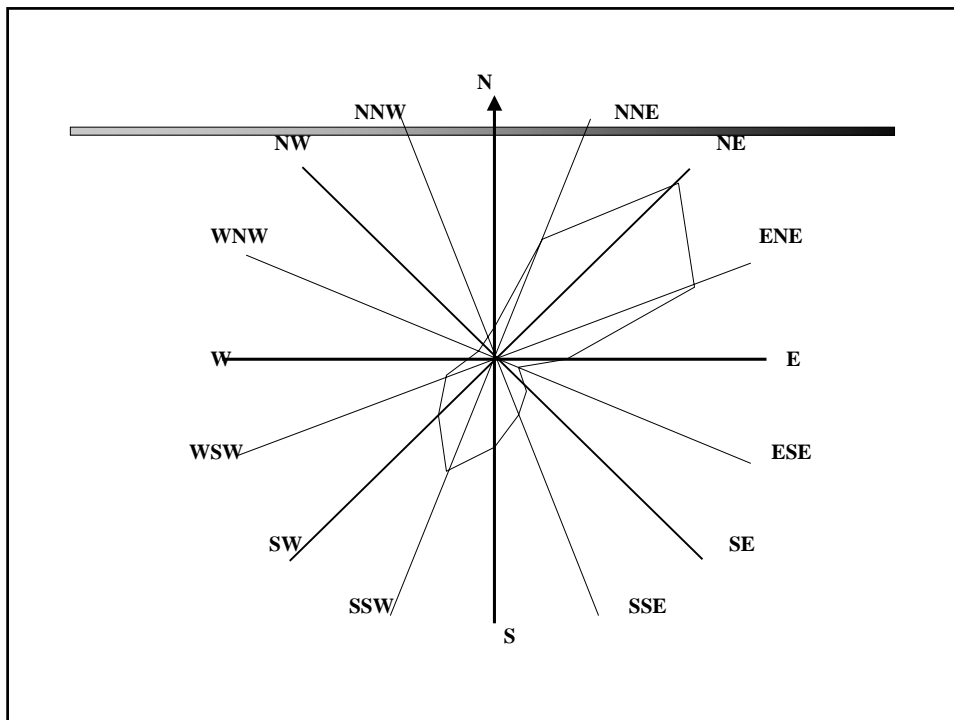
局部加热与冷却——形成风



二、风向与风速

—风向：

- 风向——来风的方向。通常说的西北风、南风等即表明的就是风向。
- 陆地上的风向一般用16个方位观测。即以正北为零度，顺时针每转过 22.5° 为一个方位。
- 风向的方位图图示如下。



—风速:

- 风速——空气流动的速度。
 - 用空气在单位时间内流经的距离表示；
 - 单位: m/s或km/h;
 - 是表示风能的一个重要物理量;
 - 风速和风向都是不断变化的。
- 瞬时风速——任意时刻风的速度。
 - 具有随机性因而不可控制。
 - 测量时选用极短的采样间隔, 如 $<1s$ 。
- 平均风速——某一段时间内各瞬时风速的平均值。
如
日平均风速、月平均风速等。

1、风速的周期性变化

- 风速的日变化:

一天之中，风速的大小是不同的。

—地面（或海拔较低处）一般是白天风速高，夜间风速较低。

—高空（或海拔较高处）则相反，夜间风强，白天风弱。

其逆转的临界高度约为100~150m。

- 风速的季节变化:

一年之中，风的速度也有变化。

在我国，大部分地区风的季节性变化规律是：春季最强，冬季次之，夏季最弱。

2、影响风速的主要因素

- 垂直高度:

由于风与地表面摩擦的结果，越往高处风速越高。定量关系常用实验式表示：

$$V(z)=V_r(z/z_r)^\alpha$$

V —高度 z 处的风速。

V_r —参考高度 z_r 处的风速，测得。

α —地表摩擦系数，或地表面粗糙度。

取值范围：0.1（光滑）~0.4（粗糙）。

- 地形地貌

不同地形与平坦地面的风速比值

不同地形	平坦地面的平均风速 (3~5 m/s)
山涧盆地	0.95~0.85
山背风坡	0.9~0.8
山迎风坡	1.10~1.20
峡谷口或山口	1.30~1.40

- 地理位置

海面上的风比海岸大，沿海的风比内陆大得多。

- 障碍物

风流经障碍物后，将产生不规则的涡流，使风速降低。但随着远离物体，这种涡流逐渐消失。当距离大于10倍物体高度时，涡流可完全消失。

启示：在障碍物附近设置风力机或多排设置风力机时的位置。

§ 2.2 风的统计理论

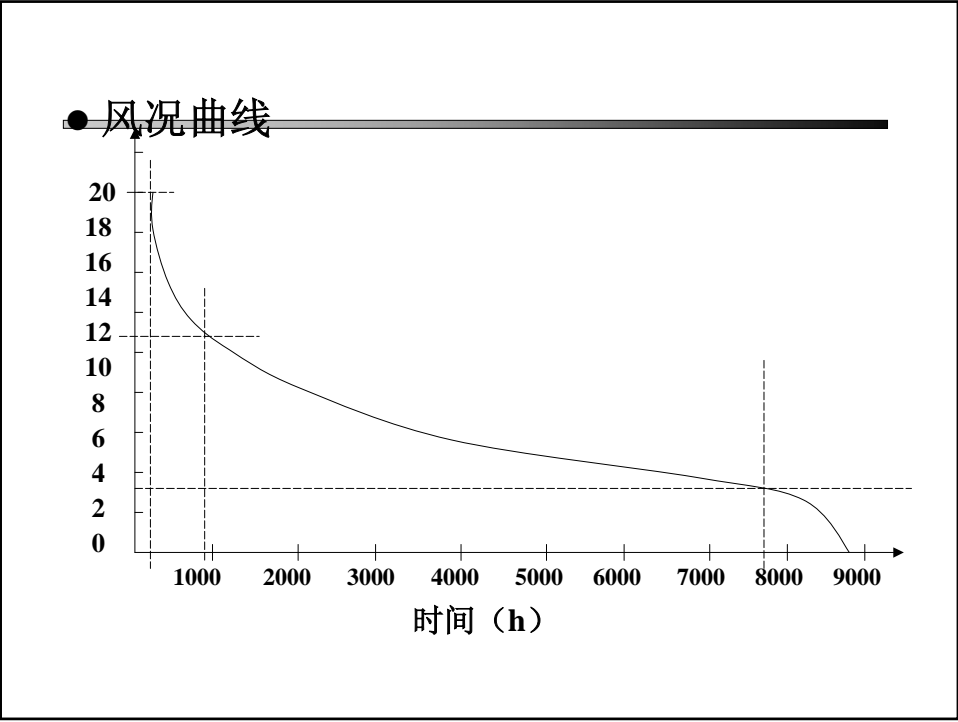
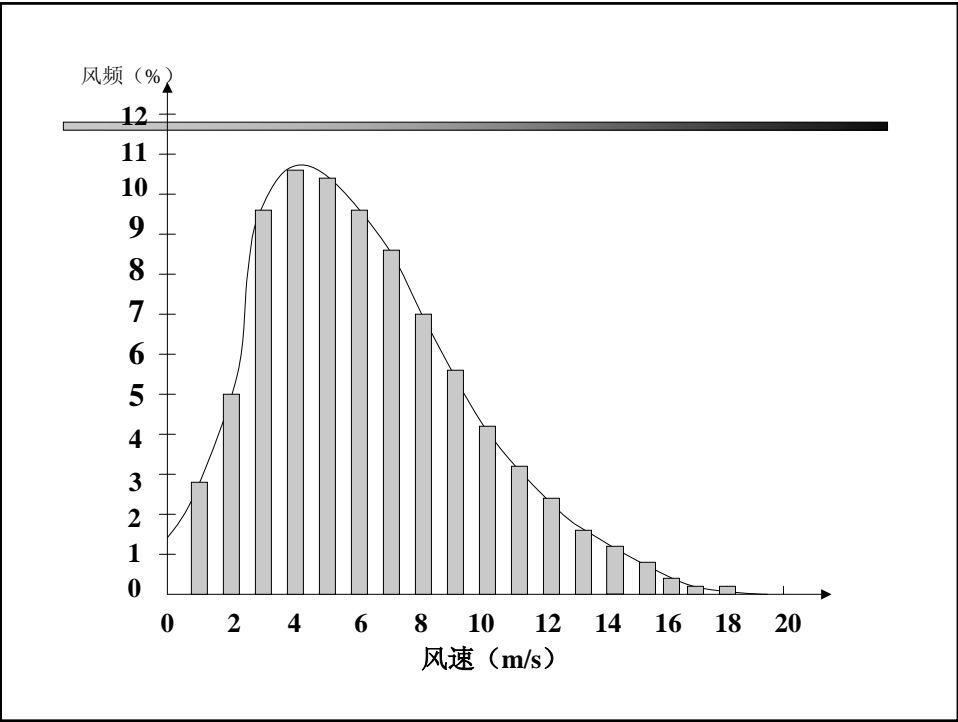
一、风向频率

- 任意点处的风向时刻都在改变。但在一定时间内（月、季、年）多次测量，可以得到每一种风向出现的频率。
- 风向频率的计算方法
 - 选择观测的时间段，如月、季、年；
 - 记录每个风向出现的次数 n_i ，及总观测次数 n ；
 - 某风向的风向频率= $n_i/n \times 100$

二、风速频率

对于风力机的安置处，有两个重要的描述风资源的参数：风速频率和年平均风速。

- 风速在某一时间段内平均，如10分钟；
- 在计算风速频率时，通常把风速改变的间隔定为1m/s，如4.5~5.5m/s，5.5~6.5m/s；
- 按风速的大小，落到哪个区间，哪个区间的累加值加1。
- 把各个区间出现的次数除以总次数即得风速频率。



根据风况曲线通常可以看出：

1. 一年之中有多少时间低于启动风速而无法启动？
2. 取多大的切出风速较合适？
3. 有多少小时可以达到额定出力？
4. 全年的有效风速的有多少小时？

可见，风频特性和风况曲线是开发风能的重要原始资料和依据。

● 风速的Weibull(威布尔)分布

由于实测风速数据极为繁杂，且统计整理的工作量又很大，人们便用数学方式来描述风速分布情况。目前Weibull分布函数用得最广。

Weibull分布函数有两特征参数：形状参数 K 和尺度参数 C 。对风频曲线用概率密度函数描述：

$$p(V) = \frac{K}{C} \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K}$$

上述的风况曲线用累计分布函数表达：

$$P(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K}$$

§ 2.3 风能及其度量

一、概述

- 风能是地球表面空气移动时产生的动能，即风的动能。
- 风能资源是可供人类开发利用的风能

基本公式： $E=1/2 mV^2$

式中 $m=\rho AV$ ，为单位时间内的流量质量。

- 单位时间内的能量—功率：

$$W=1/2 \rho A V^3 (W)$$

- 风能的大小用风功率密度 P 来度量：

$$P=1/2 \rho V^3 (W/m^2)$$

- 有效风能—切入风速到切出风速之间（有效风速）的风能。这是由于风电机受到各种条件限制不可能全部截取风的理论可用能量，只能利用有效的风能资源。

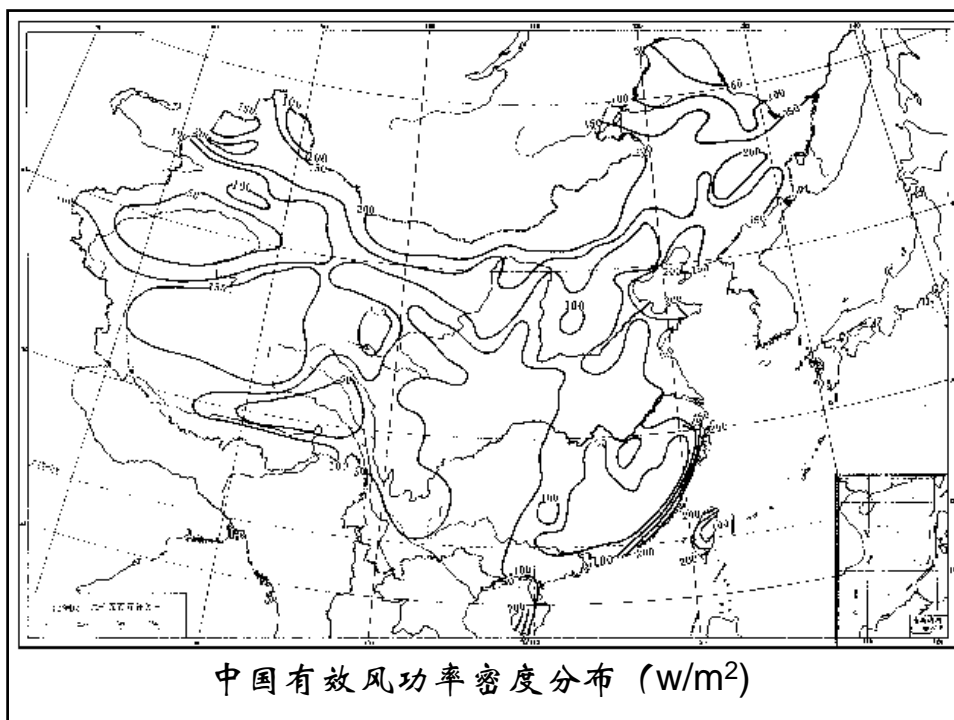
二、中国的风能资源及其分布

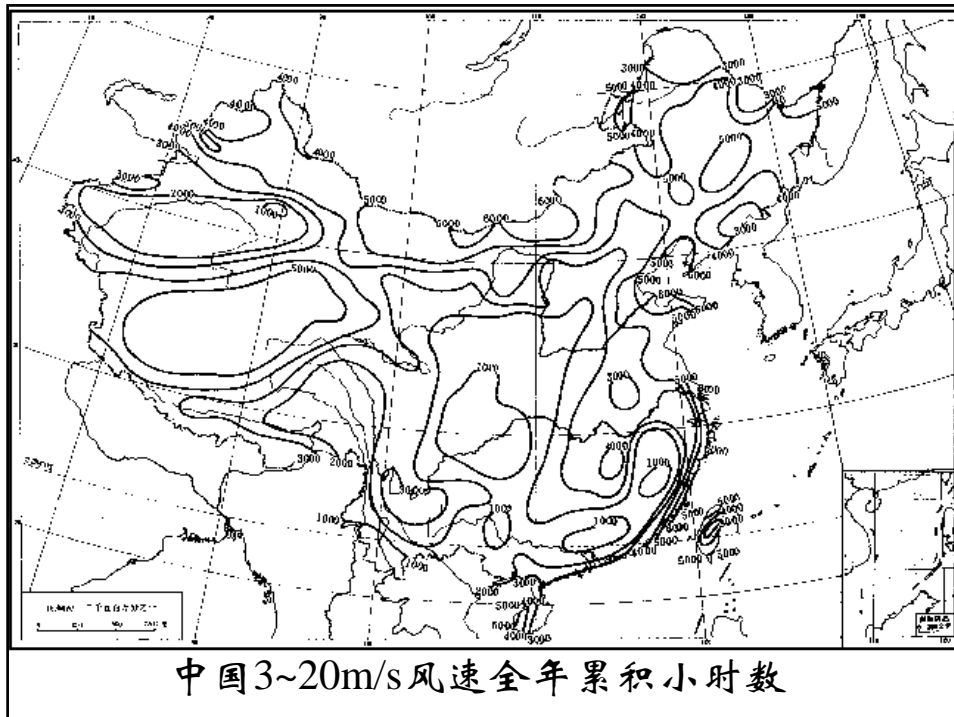
1、风能资源的特点

- 太阳辐射的能量在地球表面约有 2%转化为风能，估计全球风能资源总量为 1.3 万亿 kW。
- 风能资源的优越性是可以再生、不污染环境、就地可取和分布广泛。但它的能量密度低、不稳定，并且受地形影响大。

2. 全国风能资源分布状况

- 由于风速是一个随机性很大的量，必须通过长时间的观测计算出平均风功率密度。根据风的气候特点，一般选取十年风速资源中年平均风速最大、最小和中间的三个年份为代表年份，分别计算该三个年份的风功率密度然后加以平均，其结果可以作为当地长年平均值。
- 中国气象科学研究院计算了全国 900 余个气象站的年平均风功率密度值，反映出全国风能资源分布状况，以及各个地区风能资源潜力的多少。





3、中国风能资源开发前景

- 中国 10 m 高度层的风能总储量为 32.26 亿 kW, 这个储量称作“理论可开发总量”。
- 实际可供开发的量按上述总量的 1 / 10 估计, 并考虑风能转换装置风轮的实际扫掠面积, 再乘以面积系数 0.785 (即 1 m 直径的圆面积是边长 1 m 的正方形面积的 0.785), 得到中国 10 m 高度层实际可开发的风能储量为 2.53 亿 kW。
- 这个数量比 1996 年全国发电总装机容量还大, 说明中国风能资源丰富, 但是可供经济开发的风能储量有多少尚需进一步查明。

中国风能资源丰富的省区

省区	风能资源 (万 kW)	省区	风能资源 (万 kW)
内蒙古	6178	山东	394
新疆	3433	江西	293
黑龙江	1723	江苏	238
甘肃	1143	广东	195
吉林	638	浙江	164
河北	612	福建	137
辽宁	606	海南	64

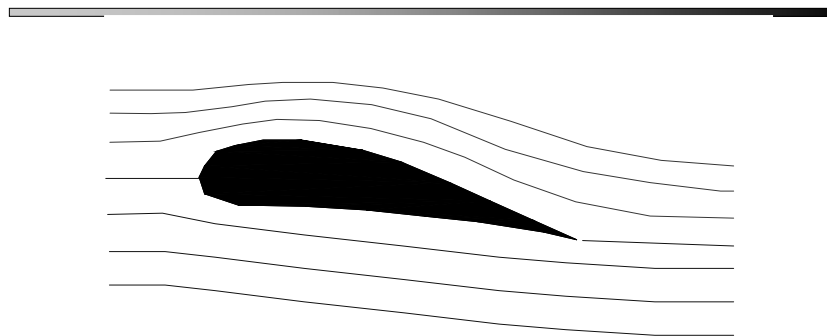
第三章 风力机空气动力学基础

- 叶片的空气动力特性
- 叶轮的空气动力模型

§ 3.1 空气动力学的基本概念

一、流线

- 气体质点：体积无限小的具有质量和速度的流体微团。
- 流线：
 - 在某一瞬时沿着流场中各气体质点的速度方向连成的一条平滑曲线。
 - 描述了该时刻各气体质点的运动方向：切线方向。
 - 流场中众多流线的集合称为流线簇。一般情况下，各流线彼此不会相交如图所示。



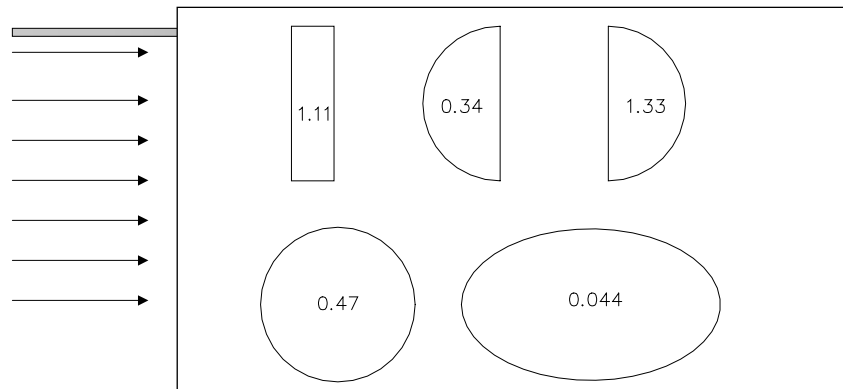
绕过物体的流线簇

- 绕过障碍物的流线:

当流体绕过障碍物时，流线形状会改变，其形状取决于所绕过的障碍物的形状。

- 不同的物体对气流的阻碍效果也各不相同

考虑几种形状物体，它们的截面尺寸相同，但侧面形状各异，对气流的阻碍作用（用阻力系数度量）不同。



侧面形状不同的几种物体

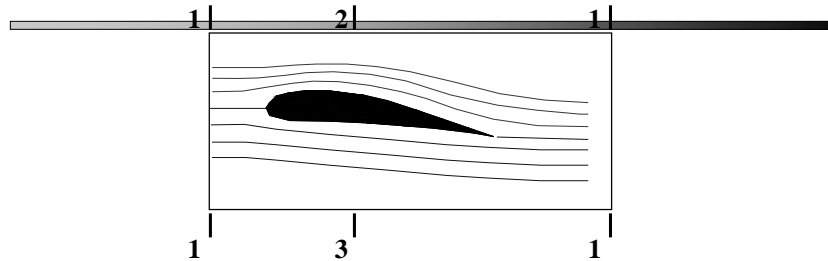
二、阻力与升力

- 阻力:

当气流与物体有相对运动时，气流对物体的平行于气流方向的作用力。

- 升力:

先定性地考察一番飞机机翼附近的流线。当机翼相对气流保持图示的方向与方位时，在机翼上下表面流线的疏密程度是不尽相同的。



—根据流体运动的质量守恒定律，有连续性方程

$$A_1V_1 = A_2V_2 + A_3V_3$$

其中：A、V分别表示截面积和速度。

下标1、2、3分别代表前方或后方、上表面和下表面处。

—根据伯努利方程:

$$P = P_i + 1/2 * \rho V_i^2$$

即: 气体总压力=静压力+动压力=恒定值

考察翼型剖面气体流动的情况:

① 上翼面突出, 流场横截面面积减小, 空气流速大, 即 $V_2 > V_1$ 。而由伯努利方程, 必使: $P_2 < P_1$, 即静压力减小。

② 下翼面平缓, $V_3 \approx V_1$, 使其几乎保持原来的大气压, 即: $P_3 \approx P_1$ 。

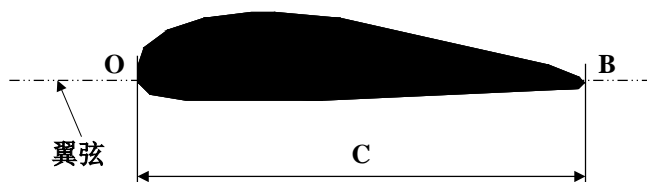
结论:

由于机翼上下表面所受的压力差, 使得机翼得到向上的作用力——升力。

三、翼型的气动特性

1、翼型的几何描述

- 前缘与后缘:



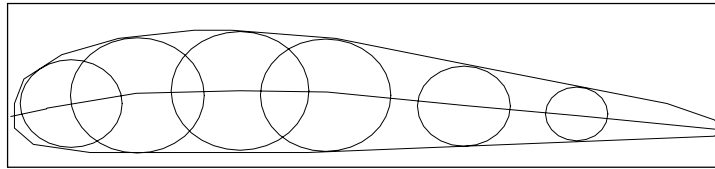
- 翼弦:

OB , 长度称为弦长, 记为 C 。

—弦长是翼型的基本长度, 也称几何弦。

—此外, 翼型上还有气动弦, 又称零升力线。

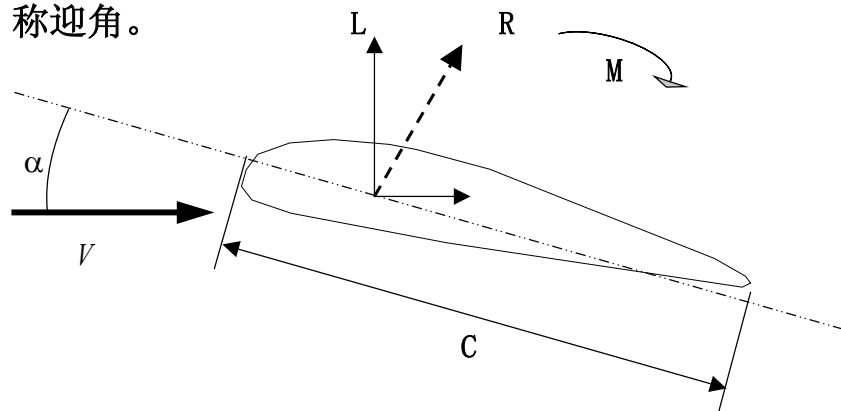
- 上翼面：凸出的翼型表面。
- 下翼面：平缓的翼型表面。
- 中弧线：翼型内切圆圆心的连线。对称翼型的中弧线与翼弦重合。
- 厚度：翼弦垂直方向上上下下翼面间的距离。
—厚度分布：沿着翼弦方向的厚度变化。
- 弯度：翼型中弧线与翼弦间的距离。
—弯度分布：沿着翼弦方向的弯度变化。



2、作用在翼型上的气动力

重要概念：攻角

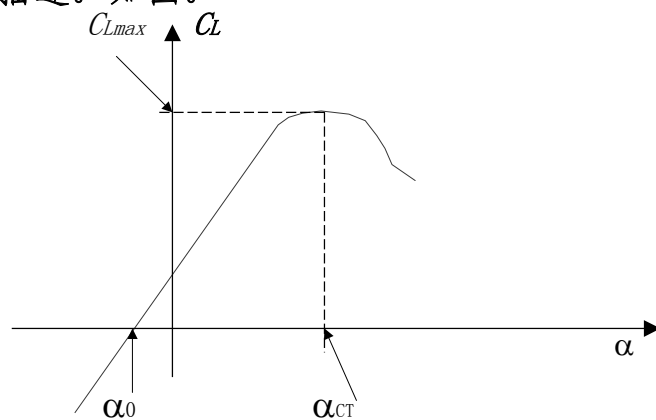
气流速度与翼弦间所夹的角度，记做 α ，又称迎角。



- 由于机翼上下表面所受的压力差，实际上存在着一个指向上翼面的合力，记为 R 。
—阻力与升力： R 在风速方向的投影称为阻力，记为 D ；而在垂直于风速方向上的投影称为升力，记为 L 。
—气动力矩：合力 R 对（除自己的作用点外）其它点的力矩，记为 M 。又称扭转力矩。
- 为方便使用，通常用无量纲数值表示翼剖面的气动特性，故定义几个气动力系数：
升力系数： $C_L=L / (1/2 \rho V^2 C)$
阻力系数： $C_D=D / (1/2 \rho V^2 C)$
气动力矩系数： $C_M=M / (1/2 \rho V^2 C^2)$
此处， L 、 D 、 M 分别为翼型沿展向单位长度上的升力、阻力和气动力矩。

3、翼剖面的升力特性

用升力系数 C_L 随攻角 α 变化的曲线（升力特性曲线）来描述。如图。

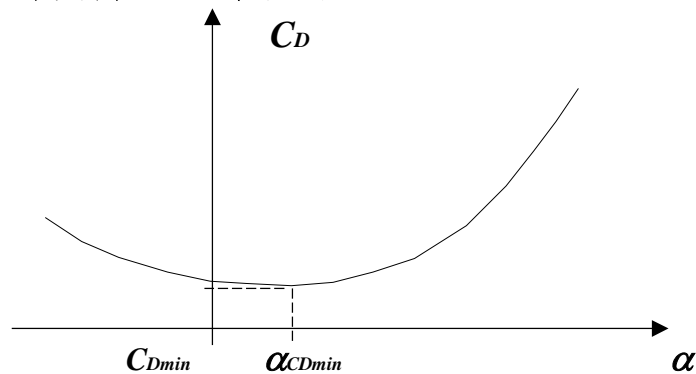


说明:

- 在 $\alpha_0 \sim \alpha_{CT}$ 之间, C_L 与 α 呈近似的线性关系表明随着 α 的增加, 升力 L 逐渐加大。
- 当 $\alpha = \alpha_{CT}$ 时, C_L 达到最大值 C_{Lmax} 。 α_{CT} 称为临界攻角或失速攻角。当 $\alpha > \alpha_{CT}$ 时, C_L 下降。
- 当 $\alpha = \alpha_0 (< 0)$ 时, $C_L = 0$, 表明无升力。 α_0 称为零升力角, 对应零升力线。

4. 翼剖面的阻力特性

用阻力特性曲线来描述。

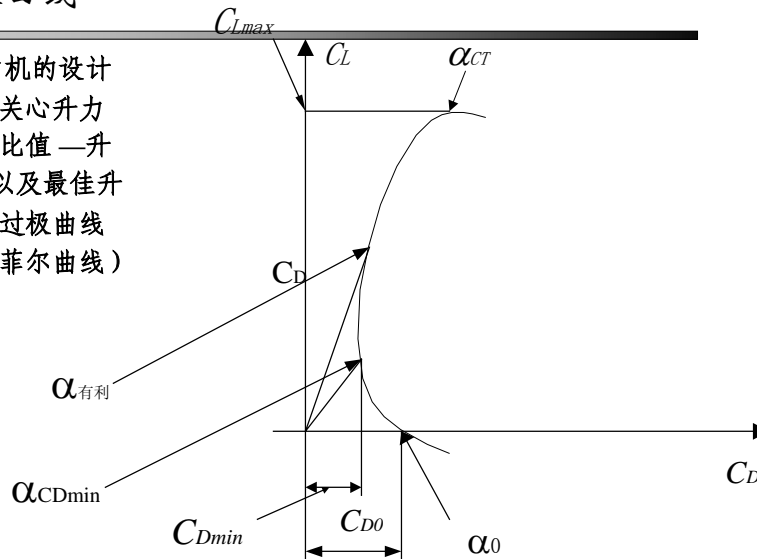


两个特征参数:

最小阻力系数 C_{Dmin} 及对应攻角 α_{CDmin} 。

五、极曲线

在风力机的设计中往往更关心升力和阻力的比值——升阻比 L/D 以及最佳升阻比。通过极曲线（又称艾菲尔曲线）来讨论。



说明:

- 极曲线上的每一点对应一种升阻比及相应的攻角状态，如 α_0 、 α_{CDmin} 、 α_{CT} 等。
- 为了得到最佳升阻比，可从原点作极曲线的切线，由于此时的夹角 θ 最大，故切点处的升阻比 $CL/CD = \tan \theta$ 最大，对应的攻角为最有利攻角 $\alpha_{有利}$ 。

六、压力中心

压力中心：气动合力的作用点，为合力作用线与翼弦的交点。

—作用在压力中心上的只有升力与阻力，而无力矩。

—压力中心的位置通常用距前缘的距离表示，约在0.25倍弦长处。

七、雷诺数对翼型气动力特性的影响

- 关于雷诺数

- 层流与紊流：两种性质不同的流动状态。

雷诺数是用来界定两种状态的判据。

- 雷诺数的表达形式： $Re=VC/v$

- 临界雷诺数 Re_{cr} ： $Re < Re_{cr}$ 层流
 $Re > Re_{cr}$ 紊流

- 雷诺数的物理意义：惯性力与粘性力之比。

- 雷诺数的影响

考虑对NACA翼型升力曲线和阻力曲线的影响。随着雷诺数的增加：

- 升力曲线斜率，最大升力系数与失速攻角均增加；

- 最小阻力系数减小；

- 升阻比增加。

§ 3.2 叶轮空气动力学基础

叶轮的作用：将风能转换为机械能

一、叶轮的几何描述

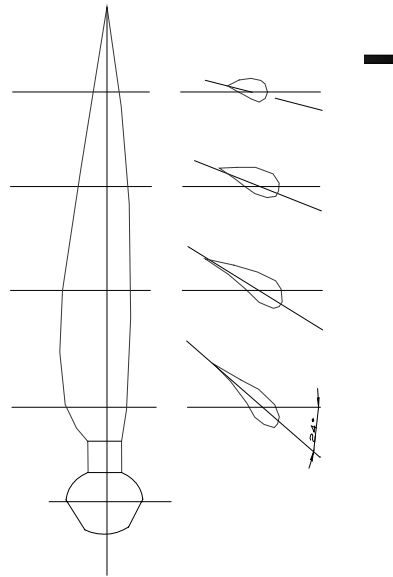
- 叶轮轴线：叶轮旋转的轴线。

- 旋转平面：桨叶扫过的垂直于叶轮轴线的平面。

- 叶片轴线：叶片绕其旋转以改变相对于旋转平面的偏转角——安装角（重要概念）。

- 半径 r 处的桨叶剖面：距叶轮轴线 r 处用垂直于叶片轴线的平面切出的叶片截面。

- 安装角：桨叶剖面上的翼弦线与旋转平面的夹角，又称桨距角，记为 β 。



- 半径 r 处叶片截面的几何桨距：在 r 处几何螺旋线的螺距。

可以从几个方面来理解：

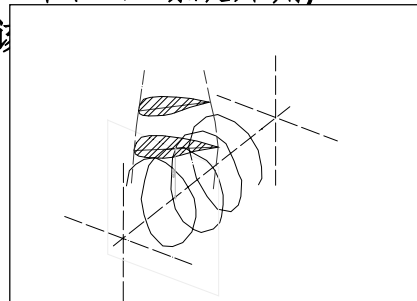
— 几何螺旋线的描述：半径 r ，螺旋升角 β 。

— 此处的螺旋升角为 β 。

— 该几何螺旋线与 r 处翼剖面的弦线相切。

— 桨距值：

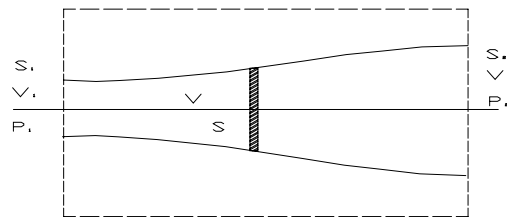
$$H = 2\pi r \tan \beta$$



二、贝兹理论

1. 贝兹理论中的假设

- 叶轮是理想的;
- 气流在整个叶轮扫略面上是均匀的;
- 气流始终沿着叶轮轴线;
- 叶轮处在单元流管模型中, 如图。
- 流体连续性条件: $S_1V_1 = SV = S_2V_2$



2. 对叶轮应用气流冲量原理

- 叶轮所受的轴向推力:

$$F = m (V_1 - V_2)$$

式中 $m = \rho SV$, 为单位时间内的流量质量

- 叶轮单位时间内吸收的风能——叶轮吸收的功率为:

$$P = FV = \rho SV^2 (V_1 - V_2)$$

3. 动能定理的应用

- 基本公式： $E=1/2 mV^2$ (m同上)

单位时间内气流所做的功——功率：

$$P'=1/2 mV^2=1/2 \rho SV V^2$$

- 在叶轮前后，单位时间内气流动能的改变量：

$$\Delta P'=1/2 \rho SV (V_1^2 - V_2^2)$$

此既气流穿越叶轮时，被叶轮吸收的功率。

因此： $\rho SV^2(V_1-V_2)=1/2 \rho SV (V_1^2 - V_2^2)$

整理得： $V=1/2 (V_1+V_2)$

即穿越叶轮的风速为叶轮远前方与远后方风速的均值。

4. 贝兹极限

- 引入轴向干扰因子进一步讨论。

令： $V = V_1(1 - a) = V_1 - U$

则有： $V_2 = V_1(1 - 2a)$

其中： a —轴向干扰因子，又称入流因子。

$U = V_1 a$ —轴向诱导速度。

- 讨论：

—当 $a \cong 1/2$ 时， $V_2 \cong 0$ ，因此 $a < 1/2$ 。

又 $V < V_1$ 且 $V > 0$ ，有 $1 > a > 0$ 。

a 的范围： $1/2 > a > 0$

—由于叶轮吸收的功率为

$$P = \Delta P' = 1/2 \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \\ = 2 \rho S V_1^3 a (1 - a)$$

令 $dP/da=0$ ，可得吸收功率最大时的入流因子。

解得： $a=1$ 和 $a=1/3$ 。取 $a=1/3$ ，得

$$P_{max} = 16/27 (1/2 \rho S V_1^3)$$

注意到 $1/2 \rho S V_1^3$ 是远前方单位时间内气流的动能—功率，并定义风能利用系数 C_p 为：

$$C_p = P / (1/2 \rho S V_1^3)$$

于是最大风能利用系数 C_{pmax} 为：

$$C_{pmax} = P_{max} / (1/2 \rho S V_1^3) = 16/27 \approx 0.593$$

此乃贝兹极限。

三、叶素理论

1、基本思想

- 将叶片沿展向分成若干微段—叶片元素—叶素；
- 视叶素为二元翼型，即不考虑展向的变化；
- 作用在每个叶素上的力互不干扰；
- 将作用在叶素上的气动力元沿展向积分，求得作用在叶轮上的气动扭矩与轴向推力。

2、叶素模型

• 端面：

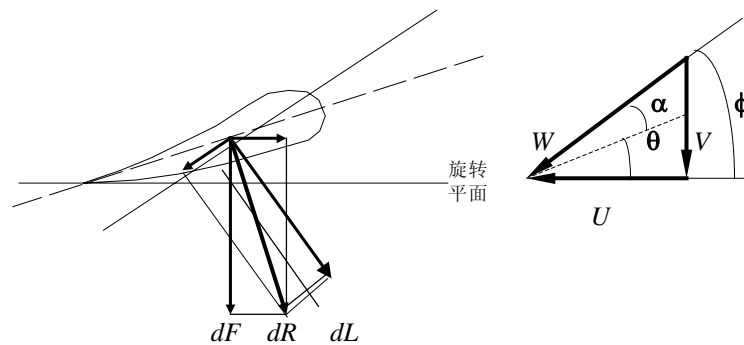
—桨叶的径向距离 r 处取微段，展向长度 dr 。

—在旋转平面内的线速度： $U=r\omega$ 。

• 翼型剖面:

— 弦长 C , 安装角 θ 。

— 设 V 为来流的风速, 由于有线速度 U , 气流相对于桨叶的速度应是两者的合成, 记为 W 。



— 定义 W 与叶轮旋转平面的夹角为入流角, 记为 ϕ , 则有叶片翼型的攻角为:

$$\alpha = \phi - \theta。$$

3、叶素上的受力分析

- 在 W 的作用下, 叶素受到一个气动合力元 dR , 可分解为平行于 W 的阻力元 dD 和垂直于 W 的升力元 dL 。
- 另一方面, dR 还可分解为推力元 dF 和扭矩元 dT , 由几何关系可得:

$$dF = dL \cos \phi + dD \sin \phi$$

$$dT = r(dL \sin \phi - dD \cos \phi)$$

-
- 由于可利用阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 分别求得 dD 和 dL :

$$dL = 1/2 \rho C_L W^2 C dr$$

$$dD = 1/2 \rho C_D W^2 C dr$$

故 dF 和 dT 可求。

- 将叶素上的力元沿展向积分，得：
 - 作用在叶轮上的推力： $\mathbf{F} = \int d\mathbf{F}$
 - 作用在叶轮上的扭矩： $\mathbf{T} = \int d\mathbf{T}$
 - 叶轮的输出功率： $\mathbf{P} = \int d\mathbf{T}\omega = \omega \mathbf{T}$