

复习提纲 (1)

• 第一章 绪论

• 1.1 大气静力学方程相关概念(气压阶)

• 大气静力学方程

$$dp = -\rho g dz$$

- 式中, p ----- 大气压力, Pa; ρ -----空气密度, kg/m³; z -----海拔高度, m; g -----重力加速度,m/s²

- 分析静力学方程如下:

- (1) 当 $dz > 0$ 时, $dp < 0$, 即气压是随着高度的增加而减小的;
- (2) g 接近常数, 故气压随高度增加而减少的快慢主要取决于空气的密度 ρ
- (3) 将大气静力学方程从 P_1, z_1 到 P_2, z_2 进行积分得

$$P_2 - P_1 = - \int_{z_1}^{z_2} \rho g dz$$

- 压力差等于该层空气的重量。如果令 z_2 趋于大气上界, 可得: 某一高度 z_1 上的气压等于从该高度到大气上界的单位截面积空气柱的重量。这就是大气静力学的气压定义。
- 单位气压高度差, 也称气压阶。
 - 定义为在垂直气柱中, 每改变单位气压 (通常指1hPa) 时所对应的高度差, 以 h 表示, 即

$$h = - \frac{dz}{dp}$$

$$h = \frac{1}{\rho g}$$

- 可以看出单位气压高度差 h 主要随密度的改变而改变。
- 高空的单位气压高度差比低空的单位气压高度差大

• 1.2 风的测量(风速和风向)

• 1.测风系统

- 风电场在微观选址时, 需要用高精度的自动测风系统进行风的测量。
- 风的测量包括风向测量和风速测量。
- 自动测风系统主要由5部分组成。包括
 - 传感器 (风速、风向、温度和气压) ;

- **主机**（利用微处理器对传感器发送的信号进行采集、计算）；
- **数据存储装置**（具有足够的存储容量）；
- **电源**（应配备有一套或两套备用电源）；
- **安全保护装置**（在传感器输出信号与主机之间增设保护装置，提高系统运行可靠性）

• 2.风速测量

• 风速计

• （1）旋转式风速计

- 有**风杯**和**螺旋桨叶片**两种类型。最常用的传感器是**风杯**。杯形风速计一般由3个或4个半球形或抛物锥形的空心杯壳组成。由于凹面和凸面所受的风压力不相等，风杯收到扭力作用开始旋转，转速与风速成一定的关系。

• （2）压力式风速仪

- 利用风的压力测定风速。利用**流体的全压力与静压力之差**来测定**风的动压**。

• （3）散热式风速计

- **加热物体的散热速率与周围空气的流速**有关，利用这种特性来测量风速。
- 风速大小与风速计安装高度和测量时间有关。一般都以10m高度处观测为准，取多长时间不统一，有取1min，2min、10min平均风速，1h平均风速，也有取瞬时风速的。

• 3.风向测量

- **风向标**是测量风向最通用的装置，有**单翼型、双翼型和流线型**等。
- 风向标一般由**尾翼、指向杆、平衡锤及旋转主轴**4部分组成的**首尾不对称**的平衡装置。
- 安装方位指向**正北**。
- 风速风向仪一般安装在离地10m的高度上。

• 1.3 脉动风速、瞬时风速、平均风速、湍流强度、风速廓线等概念

• 1.2.1 风特性

- 风是一种随机的**湍流运动**
- 分为**平均风特性**和**脉动风特性**研究
- 平均风特性包括**平均风速、平均风向、风速廓线**和**风频曲线**；

• 1.平均风速和风向

• 1) 平均风速

- **瞬时风速**由**平均风速**和**脉动风速**组成，即

$$V(t) = \bar{V} + V'(t)(1-5)$$

- 式中， $v(t)$ ---瞬时风速，指在某时刻 t ，空间某点的真实风速； $\bar{v}$ ---平均风速，指在某个时距内，空间某点上各瞬时风速的平均值； $v'(t)$ ---脉动风速，指在某时刻 t ，空间某点上各瞬时风速与平均风速的差值。

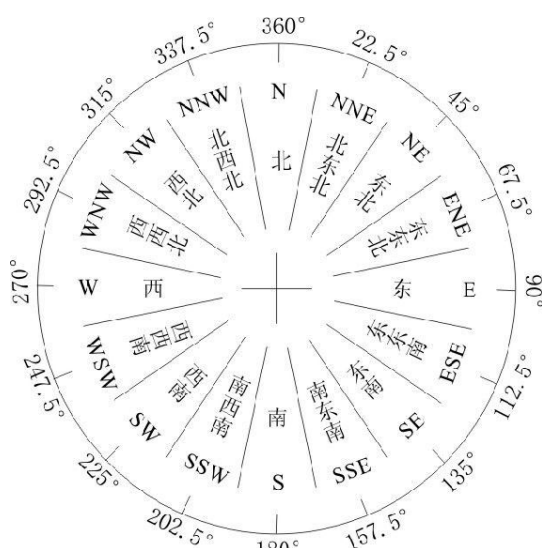
- 平均风速可以表示为下式：

$$\bar{V} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (1-6)$$

- 由 (1-6) 式可知，采用不同时距 ($t_2 - t_1$)，其值是不同的。一般在 **10min至1h范围**内，风速变化比较平缓，故都在这个范围内取平均风速的时距，我国规定的时距是**10min**。
- **最大风速**，指在给定的时间段内，平均风速的最大值。
- **极大风速**，指在给定的时间段内，瞬时风速的最大值。

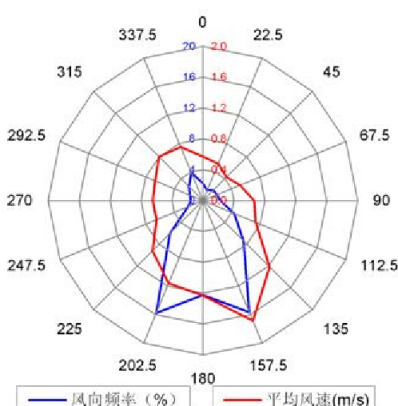
• 2) 平均风向

- 一般用16个方位表示，**静风记为“C”**。
- 也可用角度表示，以正北为基准，顺时针旋转，东风为90°，如下图所示。
- 风向是风电场选址的一个重要因素。若欲从某一特定方向获得所需的风能，则必须**避免此气流方向上有障碍物**。



• 2.平均风速和风向表示

- **风向和风速玫瑰图**，它是根据某一地区多年平均统计的各个风向和风速的**百分数值**，并按一定比例绘制，由于形状酷似玫瑰花朵而得名。



- 脉动风特性包括脉动风速、湍流强度等

- 1.脉动风速

- 脉动风速指在某时刻 t ，空间某点上各瞬时风速与平均风速的差值，即

$$V'(t) = V(t) - \bar{V} \quad (1-7)$$

- 脉动风速的时间平均值为零，即

$$\overline{V'} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} V'(t) dt = 0 \quad (1-8)$$

- 1)湍流强度

- 湍流强度是描述风速随时间和空间变化的程度，反映风的脉动强度，是确定结构所受脉动风荷载的关键参数。
- 定义湍流强度 ε 为10min时距的脉动风速均方根值（或平均风速的标准偏差）与平均风速的比值。

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/3}}{\sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}}} = \frac{\sqrt{(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/3}}{\bar{V}} \quad (1-9)$$

- 式中， u, v, w ---纵向、横向和竖向3个正交风向上的瞬时风速分量；
 u', v', w' ---对应的3个正交方向上的脉动风速分量； $\bar{V}$ ---平均风速
- 3个正交方向上的瞬时风速分量的湍流强度分别定义为

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{V}} \quad \varepsilon_v = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{\bar{V}} \quad \varepsilon_w = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{\bar{V}} \quad (1-10)$$

- 在大气边界层的地表层中，3个方向的湍流强度是不相等的，一般有

$$\varepsilon_u > \varepsilon_v > \varepsilon_w$$

- 在地表层上面，3个方向的湍流强度逐渐减小，并随着高度的增加趋于相等。
- 在风工程研究中，主要考虑与平均风速方向平行的纵向湍流强度

- 2) 湍流功率谱密度

- 湍流功率谱密度是湍流脉动动能在频率或周波数空间上的分布密度，用来描述湍流中不同尺度的涡的动能在湍流脉动动能中所占的比例。

- 1.4 风速廓线的对数律分布和指数律分布

- 3.平均风速随高度变化

- 大气边界层中，平均风速随高度发生变化，其变化规律称为风剪切或风速廓线，风速廓线可采用对数律分布或指数律分布。

• 1)对数律分布

- 在近地层中，风速随高度有显著变化
- 原因有动力因素和热力因素
- 动力因素来源于地面的摩擦效应，即地面的粗糙度
- 热力因素主要表现与近地层大气垂直稳定度的关系
- 当大气层结为中性（气块运动既不加速，也不减速，处于平衡状态）时，紊流将完全依靠动力原因来发展风速随高度的变化服从普朗特经验公式

$$u = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (1-11)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

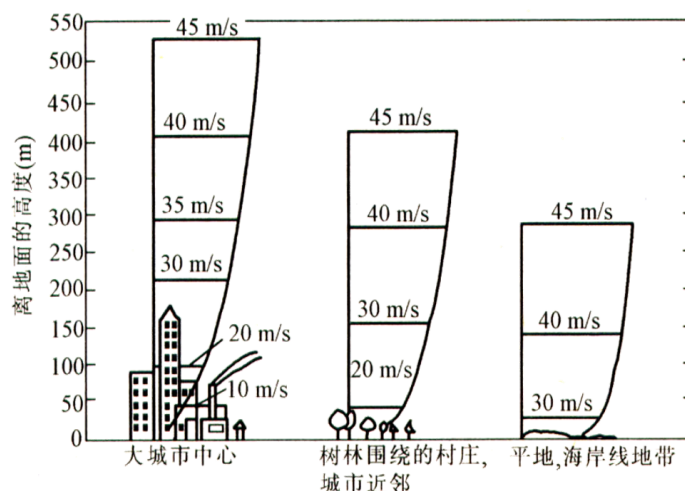
- 式中 u ---离地面高度 Z 处的平均风速，m/s； K ---卡门常数，其值为0.4左右； u_* ---摩擦速度，m/s； ρ ---空气密度（kg/m³），一般取1.225 kg/m³； τ_0 ---地面剪切应力，N/m²； Z_0 ---粗糙度参数（m）

• 2) 指数律分布

- 用指数分布计算风速廓线时比较简便，因此很多国家采用经验的指数律分布描述近地层中平均风速随高度的变化，风速廓线的指数律分布表示为

$$u_n = u_1 \left(\frac{Z_n}{Z_1}\right)^\alpha \quad (1-12)$$

- 式中 u_n ---离地高度 Z_n 处平均风速，m/s； u_1 ---离地参考高度 Z_1 处平均风速，m/s； α ---风速廓线指数
- α 值的变化与地面粗糙度有关，不同的地面粗糙度下风速随高度变化差异很大。
- 我国建筑结构荷载规范中将地貌分为A、B、C、D四类：



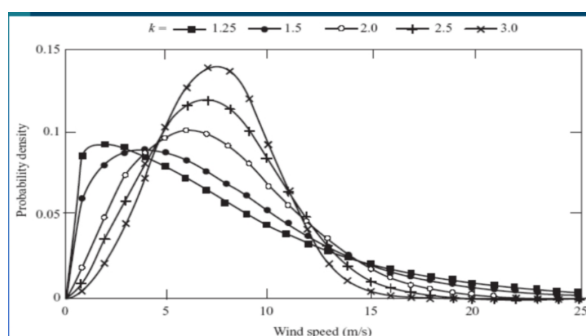
- A类指近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区，取 $\alpha_A=0.12$ ；
- B类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的中小城镇和大城市郊区，取 $\alpha_B=0.16$ ；
- C类指密集建筑物群的城市市区，取 $\alpha_C=0.20$ ；
- D类指有密集建筑群且建筑面较高的城市市区，取 $\alpha_D=0.30$ 。
- 粗糙的表面比光滑的表面更易在近地层中形成湍流，使得垂直混合更为充分，混合作用加强，高空较高风速的动量更快传递到近地面，近地层风速梯度(风速随高度的变化率)就减小，而梯度风的高度就较高。
- 梯度风高度是指地表摩擦对风速影响可忽略的高度
- 1.5 常用拟合风速频率分布的线型(威布尔分布、瑞利分布、对数正态分布)

2. 风速的统计特性

- 风的随机性很大，因此需要各地区风的统计特性数据。
- 反映风的统计特性的一个重要形式是风速的频率分布，其中年度风速频率分布曲线最有代表性。
- 风速频率分布即指某个期间（一个月或一年），发生相同风速的时数占这段时间刮风总时数的百分比。
- 用于拟合风速分布的线型很多，常用的有威布尔分布、瑞利分布、对数正态分布等。
- 威布尔分布是一种单峰，两参数的分布函数簇，其概率密度函数可表示为

$$P(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (1-13)$$

- 式中 k ---为形状参数（或形状因子）； c ---为尺度参数（或比例因子）
- 当 $C=1$ 时，称为标准威布尔分布
- 形状参数 k 的改变对分布曲线的型式有很大影响， $k=1$ 时，分布呈指数型， $k=2$ 时为瑞利分布



- 尽管威布尔分布适用性很好，但是需要知道幅度参数 c 和形状参数 k 。
- 瑞利分布只需要知道风速，可以推算出风速频率分布
- 瑞利分布概率密度函数可表达为

$$P(x) = \frac{x}{u^2} \exp\left[-\frac{x^2}{2u}\right] \quad (1-14)$$

- 1.6 风能和风功率密度定义及具体公式

- 1.2.2 风能公式

- 1.空气密度

- 在近地层中，空气密度 ρ 的量级为 10^0 ，而风速 V 的量级为 $10^2 \sim 10^3$ ，因此，风速在风能计算中，具有决定性的意义。由于我国地形复杂，空气密度的影响也要加以考虑。空气密度 ρ 是气压、气温的函数，计算公式为

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366t} \frac{(p - 0.378e)}{1000} \quad (1-12)$$

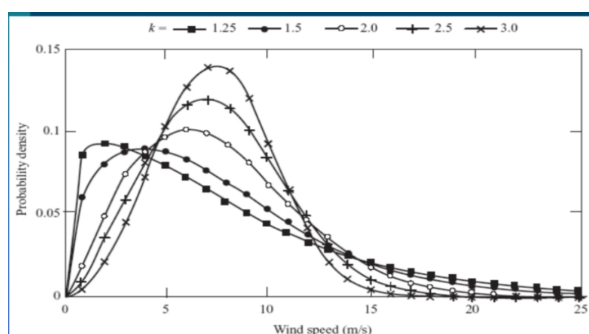
- 式中 p ---气压，hPa； t ---气温， $^{\circ}\text{C}$ ； e ---水汽压，hPa。

- 2.风速的统计特性

- 风的随机性很大，因此需要各地区风的统计特性数据。
 - 反映风的统计特性的一个重要形式是**风速的频率分布**，其中**年度风速频率分布曲线**最有代表性。
 - 风速频率分布即指**某个期间（一个月或一年），发生相同风速的时数占这段时间刮风总时数的百分比。**
 - 用于拟合风速分布的线型很多，常用的有威布尔分布、瑞利分布、对数正态分布等。
 - **威布尔分布**是一种单峰，两参数的分布函数簇，其概率密度函数可表示为

$$P(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (1-13)$$

- 式中 k ---为形状参数（或形状因子）； c ---为尺度参数（或比例因子）
 - 当 $C=1$ 时，称为**标准威布尔分布**
 - 形状参数 k 的改变对分布曲线的型式有很大影响， $k=1$ 时，分布呈指数型， $k=2$ 时为瑞利分布



- 尽管威布尔分布适用性很好，但是需要知道幅度参数 c 和形状参数 k 。
 - **瑞利分布**只需要知道**风速**，可以推算出风速频率分布
 - 瑞利分布概率密度函数可表达为

$$P(x) = \frac{x}{u^2} \exp\left[-\frac{x^2}{2u}\right] \quad (1-14)$$

- 3.风能公式

- 风能指风所具有的动能。如果风力发电机叶轮的断面积为A，则当风速为v的风流经叶轮时，单位时间内风传递给叶轮的风能为

$$P = \frac{1}{2} m v^2 (1-15)$$

- 其中，单位时间质量流量

$$m = \rho A v$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v \bullet v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 (1-16)$$

- 式中ρ---空气密度，kg/m³；v---风速，m/s；A---风力发电机叶轮旋转一周所扫过的面积，m²；P---每秒空气流过风力发电机叶轮断面面积的风能，即风能功率，W。
- 若风力发电机的叶轮直径为d,则

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

- 那么有

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{8} \rho d^2 v^3 (1-17)$$

- 若有效时间为t，则在时间t内的风能为

$$E = P \bullet t = \frac{\pi}{8} \rho d^2 v^3 t (W \bullet h) (1-18)$$

- 从式（1-18）可知，风能与空气密度ρ，叶轮直径的平方d²，风速的立方v³和风速的持续时间t成正比

- 4.平均风能密度（风功率密度）和有效风能密度

- 对于某地的**风能资源潜力**，要视该地常年平均风能密度的大小而定。
- 风能密度是单位面积上的风能，对于风力发电机而言，风能密度是指**叶轮扫过单位面积的风能**，即

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3 (1-19)$$

- 式中W---风能密度，W/m²；ρ---空气密度，kg/m³；v---风速，m/s
- 常年平均风能密度为

$$\overline{W} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho v^3 dt (1 - 20)$$

- 式中 $\overline{W}$ ---平均风能密度, W/m^2 ; T ---总时间, h 。
- 实际应用时, 一般用下式来计算某地年(月)风能密度, 即

$$W_{y(m)} = \frac{W_1 t_1 + W_2 t_2 + \cdots + W_n t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n} (1-21)$$

式中 $W_{y(m)}$ ---年(月)风能密度, W/m^2 ;

$W_1, W_2, \cdots, W_n$ ---各等级风速下的风能密度, W/m^2 ;

$t_1, t_2, \cdots, t_n$ ---各等级风速在每年(月)出现的时间, h 。

- 对于风能转换装置而言, 可利用的风能是在“切入风速”到“切出风速”之间的风速段, 这个范围的风能即“有效风能”, 该风速范围内的平均风能密度即“有效风能密度”, 其计算公式为

$$\overline{W}_e = \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{2} \rho v^3 P'(v) dv (1-22)$$

式中: v_1 ---切入风速, m/s ; (一般为 3m/s)

v_2 ---切出风速, m/s ; (一般为 25m/s)

$P'(v)$ ---有效风速范围内风速的条件概率分布密度函数, 其关系为

$$P'(v) = \frac{P(v)}{P(v_1 \leq v \leq v_2)} = \frac{P(v)}{P(v \leq v_2) - P(v \leq v_1)}$$

• 第二章 风力机

• 2.1 风力发电机定义和基本组成

• 2.1 风力发电机概念

• 组成:

- 风力机: 将风能转换为机械能
 - 风力机是一种能截获流动的空气所具有的动能并将风轮叶片迎风扫掠面积内的一部分动能转化为有用机械能的装置
- 发电机: 将机械能转换为电能

• 2.2 风力发电机的分类

• 2.2 风力发电机的分类

• 按风力机功率划分

- 微型风力机: 功率在 1kW 以下
- 小型风力机: 功率在 $1 \sim 10\text{kW}$
- 中型风力机: 容量为 $10 \sim 100\text{kW}$

- 大型风力机：容量为100~1000kW（1MW）
- 巨型（兆瓦级）风力机：容量大于1000kW
- 特点：单机容量越大，桨叶越长。2MW风力机叶片的直径已经达到72m，风力机的叶片随着机组容量的增加会更长。
- 按是否并入电网分类
 - 并网运行风力发电系统（风电场）
 - 独立运行的风力发电系统
- 按风轮结构划分：按照风轮结构及其在气流中的位置：
 - 水平轴风力机：叶片围绕一个水平轴旋转，旋转平面与风向垂直（多数）
 - 垂直轴风力机：风轮围绕一个垂直轴进行旋转
- 按叶片能否绕其纵向轴线转动划分
 - 定桨距风力机
 - 定桨距风力发电机的风轮叶片与轮毂的连接是固定的，即当风速变化时，桨叶的迎风角度不会发生变化
 - 变桨距风力机
 - 变桨距风力发电机是指整个叶片可以绕叶片中心轴旋转，使得叶片攻角在一定范围（一般为0-90度）内变化
- 按发电机转速变化划分
 - 恒速型风力机：发电机转速恒定不变，不随风速的变化而变化。
 - 变速型风力机：发电机工作转速随风速时刻变化而变化。主流大型风力发电机组基本都采用变速恒频运行方式。
 - 多态定速风力机：发电机组中包含两台或多台发电机，根据风速的变化，可以有不同大小和数量的发电机投入运行。
- 按照安装地点划分
 - 陆地风电机组
 - 海上风电机组
 - 沿海风场风况和环境条件与陆地风场存在差别，海上风电机组具有一些特殊性：
 - 1)适合选用大容量风电机组
 - 海上风速通常比沿岸陆地高，风速比较稳定，不受地形影响，风湍流强度和风切变都比较小，并且具有稳定的主导风向。在相同容量下，海上风电机组的塔架高度比陆地机组低。
 - 2)风电机组安全可靠要求更高
 - 强阵风、台风和巨浪等极端恶劣天气条件都会对机组造成严重破坏。海上风电场与海浪、潮汐具有较强的耦合作用，使得风电机组运行在海浪干扰下的随机风场中，载荷条件比较复杂。

- 海上风电机组长期处在含盐湿热雾腐蚀环境中，加之海上风电机组安装、运行、操作和维护等方面都比陆地风场困难。因此，海上风电机组结构，尤其是叶片材料的耐久性问题极为重要。
- **3)基础形式与陆地风电机组有巨大差别**
 - 由于不同海域的水下情况复杂、基础建造需要综合考虑海床地质结构、离岸距离、风浪等级、海流情况等多方面影响，因此海上风电机组复杂，用于基础的建设费用也占较大比例。
- 海上风电在风资源评估、机组安装、运行维护、设备监控、电力输送等许多方面都与陆地风电存在差异，技术难度大、建设成本高。

复习提纲 (2)

• 第二章 风力机

- 2.3 风力机的基本参数(翼型的几何参数如厚度、弯度等, NACA4412后面数字代表的含义), 桨距角和攻角、入流角的定义及关系

- 2.3 风力机的基本参数

- 1) 风轮叶片的几何参数

- ①风轮轴线

- 风轮旋转运动的轴线

- ②旋转平面

- 与风轮轴垂直, 叶片在旋转时的平面

- ③风轮直径

- 风轮在旋转平面上的投影圆的直径

- ④风轮中心高

- 风轮旋转中心到基础平面的垂直距离

- ⑤风轮扫掠面积

- 风轮在旋转平面上的投影圆面积

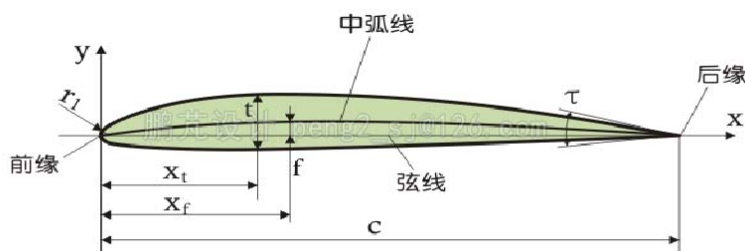
- ⑥风轮锥角和风轮仰角

- 风轮锥角: 叶片与风轮旋转轴相垂直的平面的夹角。

- 风轮仰角: 风轮主轴与水平面的夹角。

- 叶片为细长柔性体结构, 在其旋转过程中, 受风载荷和离心载荷的作用, 叶片发生弯曲变形, 风轮锥角和仰角的主要作用是防止叶片在发生弯曲变形状态下, 其叶尖部分与塔架发生碰撞。

- 2) 翼型的几何描述



翼型的几何参数

- 翼的前缘和后缘

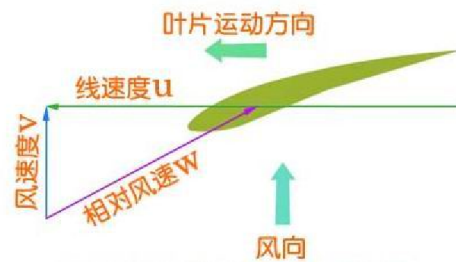
- 翼弦: 长度称为弦长, 记为 c 。弦长是翼型的基本长度, 也称几何弦

- 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。

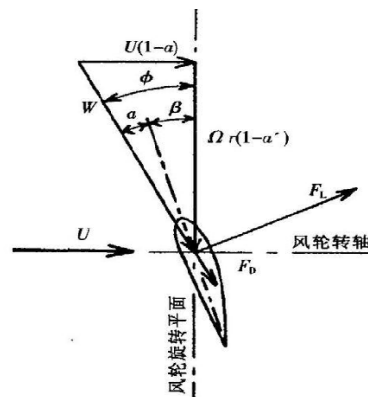
- 上翼面: 凸出的翼型表面

- 下翼面: 平缓的翼型表面

- **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
 - 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xf表示。**弯度与弦长的比值为相对弯度**。
- **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
 - 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；**最大厚度与翼弦之比为相对厚度**，最大厚度点的x坐标称为**最大厚度位置**，用xt表示。
 - **NACA4412**，第一个数字表示**最大相对弯度为4%**，第二个数字表示**最大弯度的相对位置为40%**，第三和第四个数字表示**最大相对厚度为12%**
- **攻角**：**气流相对速度与翼弦**间所夹的角度，记做 α ，又称**迎角**。
 - 风力机叶片运动时所感受到的风速是外来风速与叶片运动速度的合成速度，称为相对风速。上图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，它是叶片的线速度（矢量）u与风进叶轮前的速度（矢量）v的合成矢量。



- **安装角 β** ：**风轮旋转平面与翼弦之间**的夹角称为安装角，也称为**桨距角或节距角**。
 - 桨距角与攻角之间的关系
 - 桨距角即叶片弦线即翼弦与旋转平面的夹角，如图中的 β 角；**入流角**是气流相对风速（也就是风速和叶片线速度的合速度）与旋转平面的夹角，如图中的 ϕ 角；攻角为气流相对速度与翼弦间的夹角，即图中的 α 角，且 **$\alpha = \phi - \beta$** 。

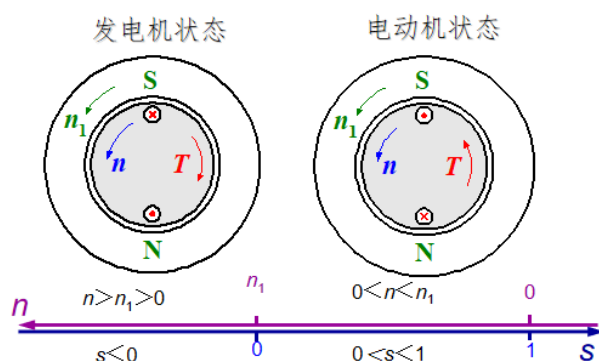


- 2.4 大型水平轴风力发电机的各部分组成名称及功能(如偏航系统、变桨距系统、传动系统等)

- 见第二章 风力发电机 (2)

• 2.5 异步发电机转差率的概念

- 异步发电机既可作为电动机运行，也可作为发电机运行。
- 转差率 s 为定子旋转磁场转速 n_1 与转子转速 n 的差与 n_1 的比值。

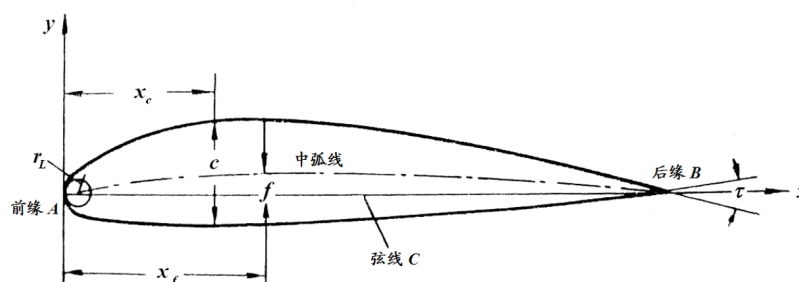


• 第三章 空气动力学

• 3.1 翼型的气动特性(升力和阻力特性),影响升力系数和阻力系数的因素

• 3.1.2 翼型的气动特性

• (1) 翼型的几何描述



- 通常翼型几何外形由下列参数决定：

- 翼型前缘A：翼型的前部A为圆头；
- 翼型后缘B：翼型的尾部B为尖型；
- 翼型弦线C：翼型前缘与后缘的连线称为翼型弦线，弦线长度就是翼型的弦长 c ，弦长 c 是翼型的特征尺寸
- 中弧线：翼型内切圆圆心的连线称为翼型的中弧线，对称的翼型中弧线与翼弦重合；
- 上翼面：凸出的翼型表面；下翼面：平缓的翼型表面。
- 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。

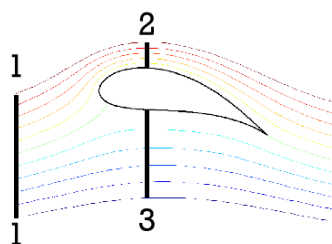
• (2) 升力和阻力

- 升力和阻力试验

- 当手抓着风筝奔跑时，前缘稍稍向上，会感到一种向上的力，如果前缘朝下一点，会感到一个向下的力，在向上和向下的力之间有一个角度，不产生升力，称为**零升力角**。
- 在处于零升力角时，会产生很小的阻力。**升力和阻力是同时产生的**，将风筝的前缘从零升力角开始慢慢地向上抬起，开始时升力增加，阻力也增加，但升力比阻力增加快得多，感觉风筝明显受到向上的升力作用；到达某一角度后，升力突然下降，但阻力明显增加，感觉风筝明显受到向后的阻力作用。
- 水平轴风力机的叶片受力情况与风筝类似

• 产生原理

- **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簇的**疏密程度是不尽相同的**。



考察二维翼型气体流动的情况。根据流体运动的

1、**质量守恒定律**，有连续性方程：

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 + A_3 V_3$$

其中 A 、 V 分别表示截面积和速度。

下标1、2、3分别代远前方或远后方、上表面和下表面处。

2、**伯努利方程**：（对于气体，可忽略重力）

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{常数}$$

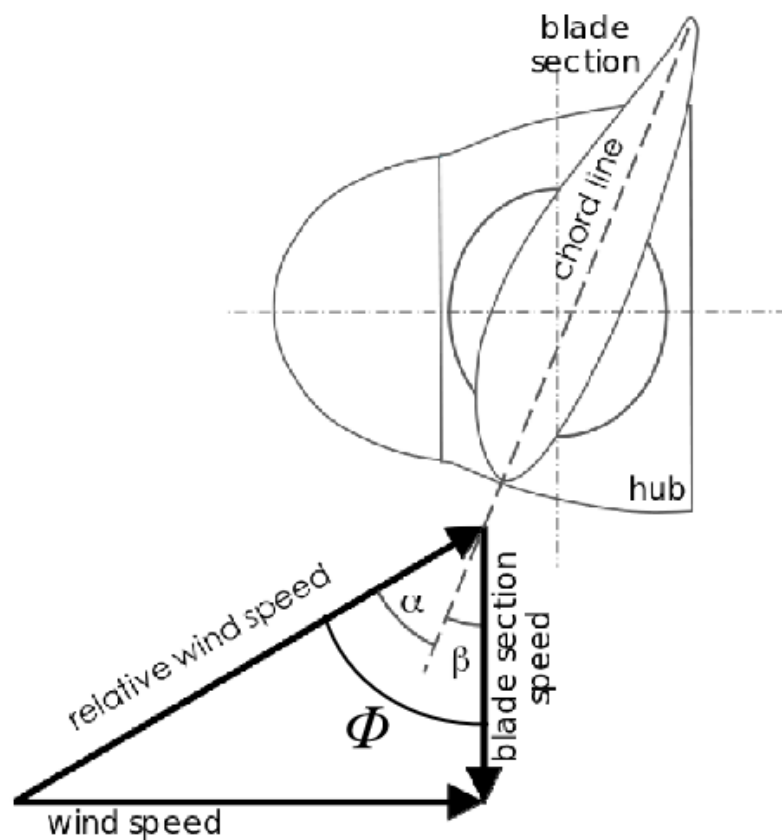
其中： P_0 ——气体总压力； P ——气体静压力。

——上翼面突出，流场横截面面积减小，空气流速增大，即 $V_2 > V_1$ 。而由伯努利方程，必使：

$P_2 < P_1$ ，即压力减小。

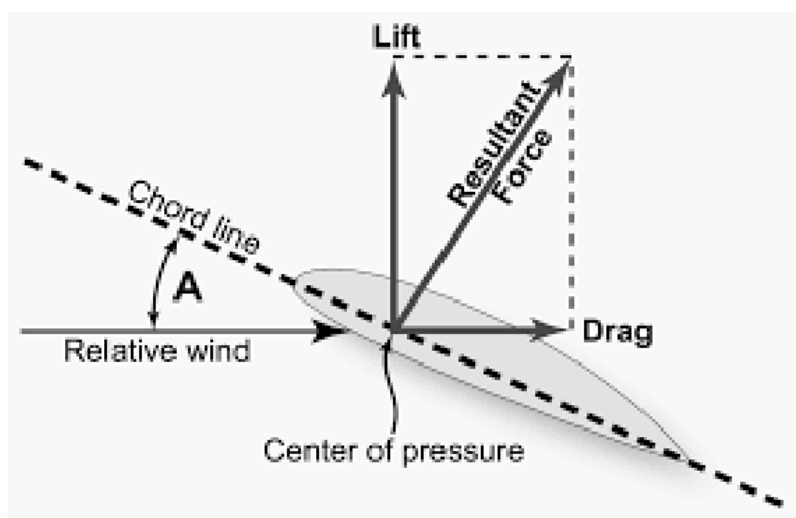
——下翼面变化较小， $V_3 \approx V_1$ ，使其几乎保持原来的大气压，即： $P_3 \approx P_1$ 。

- 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。
- **重要角度**($\Phi = \alpha + \beta$)



- **翼型攻角 α** : 翼面上来流 V 与弦线 C 之间的夹角, 又称为迎角。
- **安装角 β** : 桨叶剖面上的翼弦线与旋转平面的夹角, 又称桨距角。
- **入流角 Φ** : 实际入流速度 (相对速度) 与旋转平面的夹角。
- **作用在机翼上的力**
 - 设风的速度如图所示, 风吹过叶片时在翼型面上产生压力, 上翼面压力为负, 下翼面压力为正。由于存在压力差, 实际上存在一个**指向上翼面的合力 F** , 叶片受到合力 F 作用开始转动。 F 可用下式表示:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_r S_y V^2 \quad (3-1)$$



式中, ρ ---空气密度;
 C_r ---空气动力系数;
 S_y ---叶片面积。

- 合力F在翼弦上的投影（或分解在相对风速方向的一个力）称为**阻力FD**；而在垂直于翼弦方向上的投影（或垂直于阻力FD的力），称为**升力FL**。合力F对其他点的力矩，记为**气动力矩M**，又称**扭转力矩**。

F_D 和 F_L 可分别表示为

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D S_y V^2 \quad (3-2)$$

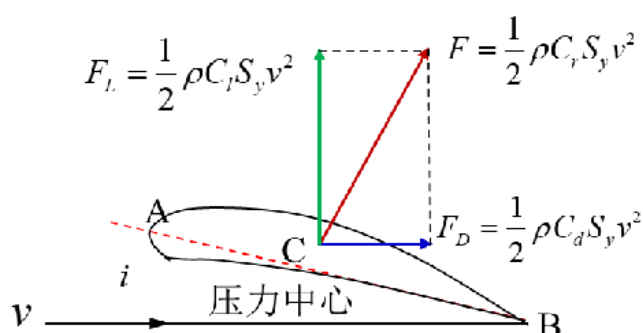
$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L S_y V^2 \quad (3-3)$$

式中, C_D --- 阻力系数; C_L --- 升力系数。

因为 F_D 和 F_L 是相互垂直的两个分量，有

$$F^2 = F_D^2 + F_L^2 \quad (3-4)$$

$$C_r^2 = C_D^2 + C_L^2 \quad (3-5)$$



• 翼型的升阻力特性

升力系数 C_L 可用式(3-6)表示：

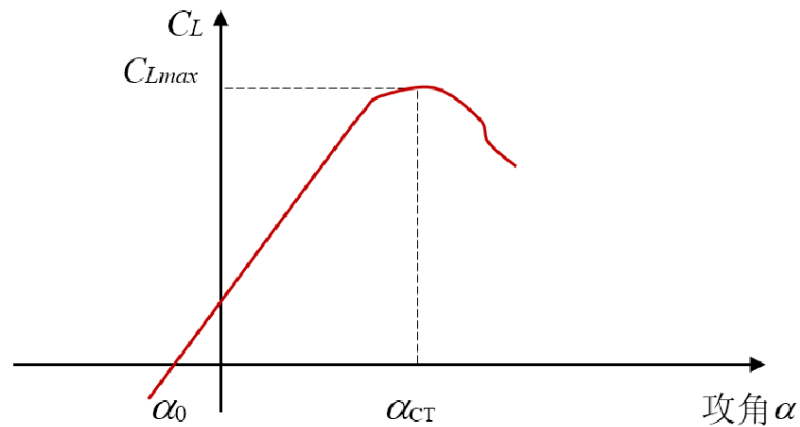
$$C_L = \frac{2F_L}{\rho S_y V^2} \quad (3-6)$$

阻力系数 C_D 可用式(3-7)表示：

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho S_y V^2} \quad (3-7)$$

• 升力特性

- 翼型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：



当 $\alpha=0^\circ$ 时, $C_L>0$, 气流为层流。

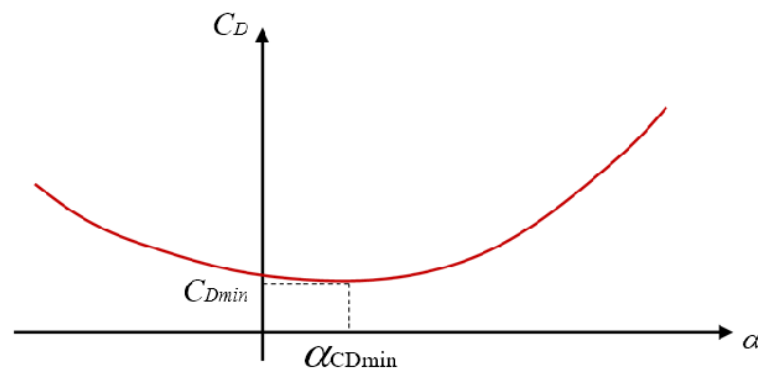
在 $\alpha_0 \sim \alpha_{CT}$ 之间, C_L 与 α 呈近似的线性关系, 即随着 α 的增加, 升力 F_L 逐渐加大。

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 将下降, 气流变为紊流。

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。

- 阻力特性

- 翼型剖面的阻力特性用阻力系数 C_D 随攻角 α 变化的曲线 (**阻力特性曲线**) 来描述, 如图:



✓ 两个特征参数: 最小阻力系数 C_{Dmin} 及对应攻角 α_{CDmin} 。

当 $\alpha>\alpha_{CDmin}$ 时, C_D 随 α 的增加而逐渐增大; 在 $\alpha=\alpha_{CDmin}$ 时, C_D 达最小值

- 影响升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 的因素

- 1、攻角的影响:

升力系数 C_L 随攻角 α 的变化是: 在负攻角时, C_L 呈曲线状, 有一个最小值 C_{Lmin} ; 正攻角时, 升力系数 C_L 随攻角增加先增加而后减小。

阻力系数整体呈下凹曲线形, 当攻角达到某个值后, C_D 随攻角 α 增加而增加。

当攻角 α 超过某个临界值 ($10^\circ \sim 16^\circ$ 之间时), 升力急剧减小而阻力增大。

- 2、弯度的影响：

弯度加大，导致压力差加大，使得升力增加；同时，上弧流速加大，摩擦阻力上升，且由于迎流面积加大，故压差阻力也加大，导致阻力上升。因此，升力和阻力都将显著增加，但阻力比升力的增加更快，使得升阻比有所下降。

- 3、前缘的影响：

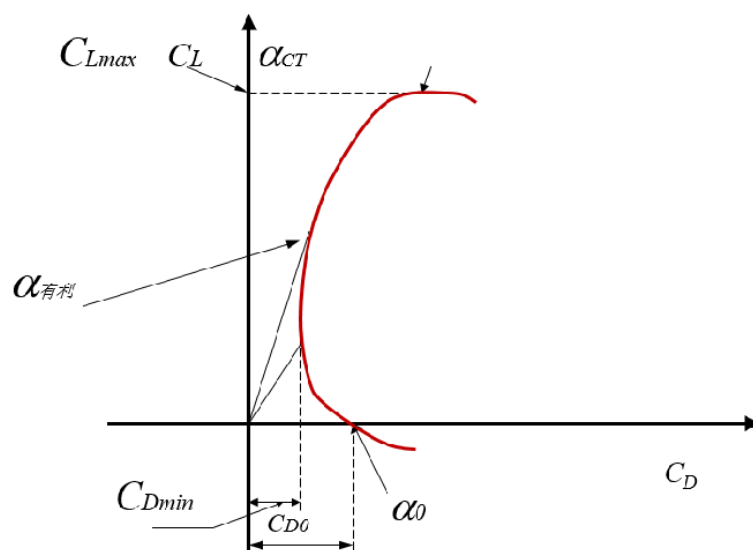
试验表明，当翼型的前缘抬高时，在负攻角情况下阻力变化不大。前缘低垂时则在负攻角时导致阻力迅速增加。

- 4、表面粗糙度和雷诺数的影响

- 翼型下翼面后缘增加粗糙度，会提升翼型的升阻比。随着雷诺数的增加，升力曲线斜率增加，最大升力系数增加，失速临界攻角增加；最小阻力系数减小；随着雷诺数的增加，升/阻比也增加。

- 极曲线

- 以升力系数为纵坐标，阻力系数为横坐标得到的翼型剖面特性曲线为极曲线；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。



说明：

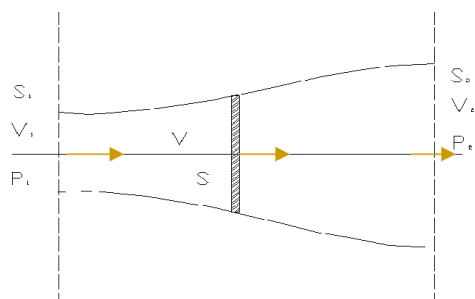
- 极曲线上的每一点对应一种升阻比及相应的攻角状态，如 α_0 、 α_{CDmin} 、 α_{CT} 等。
- 为了得到最佳升阻比，可从原点作极曲线的切线，由于此时的夹角 θ 最大，故切点处的升阻比 $C_L/C_D = \tan \theta$ 最大，对应的攻角为最有利攻角 $\alpha_{有利}$ 。

- 3.2 贝茨理论(建立在理想风轮基础上的几个假定，推导过程)

- 3.2.2 贝茨极限理论 (1919年德国A·Betz)

- 理想风轮

- 风轮叶片全部接受风能（没有轮毂），叶片无限多，对空气流没有阻力；
- 气流是连续的、均匀的、不可压缩的，气流在整个叶轮扫略面上是均匀的；
- 风轮旋转时无摩擦阻力，风轮前后气流静压相等；
- 作用在风轮上的推力是均匀的；
- 叶轮处在单元流管模型中，气流速度的方向不论在叶片前还是流经叶片后都是平行于风轮轴线的。
- 推论：



- 穿越风轮扫风面的风速等于风轮远前方与远后方风速和的一半

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3-15)$$

- 风力机的理论最大效率（理论风能利用系数）为：

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} = \frac{(8/27) \rho S V_1^3}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (3-20)$$

- 上式即为贝茨理论的极限值。风力机的实际风能利用系数往往更低，小于0.593。

• 3.3 叶素上的受力分析

• 叶素上的受力分析

在 W 的作用下，叶素受到一个气动合力 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 还可分解推力元 dF_n 和旋转切向力元 dF_t ，由几何关系可得：

$$\begin{aligned} dF_n &= dL \cos \phi + dD \sin \phi \\ dF_t &= dL \sin \phi - dD \cos \phi \end{aligned}$$

扭矩元 dT 为：

$$dT = r dF_t = r(dL \sin \phi - dD \cos \phi) \quad (3-21)$$

由可利用阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 分别求得 dD 和 dL :

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

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

故 dR 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： $R = \int dR$

——作用在叶轮上的扭矩： $T = \int dT$

——叶轮的输出功率： $P = \int dT \omega = \omega T$

• 3.4 风力机性能参数(风能利用系数(功率利用系数) C_p ,叶尖速比、升阻比、风力机系统效率等)

• 3.3 风力机性能参数

• 3.3.1 风能利用系数 C_p

- 风能利用系数（功率系数） C_p 是指风力机的风轮能够从自然风获得的能量与风轮扫掠面积内的未扰动气流所含风能的百分比。即风力机从自然风能中吸收能量的大小程度。用下式表示：

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V^3} \quad (3-21)$$

式中 P ---风力机实际获得的轴功率，W；

ρ ---空气密度，kg/m³；

S ---风轮的扫掠面积，m²；

V ---风速，m/s。

- 一般并网运行的风力发电机组的风能利用系数在0.4以上

• 3.3.2 叶尖速比 λ

- 风轮叶片尖线速度与来流风速之比称为叶尖速比 λ 。下图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。叶尖速比可用下式表示：

$$\lambda = \frac{u}{V} = \frac{R\omega}{V} = \frac{2\pi Rn}{60V} = \frac{\pi Rn}{30V} \quad (3-22)$$

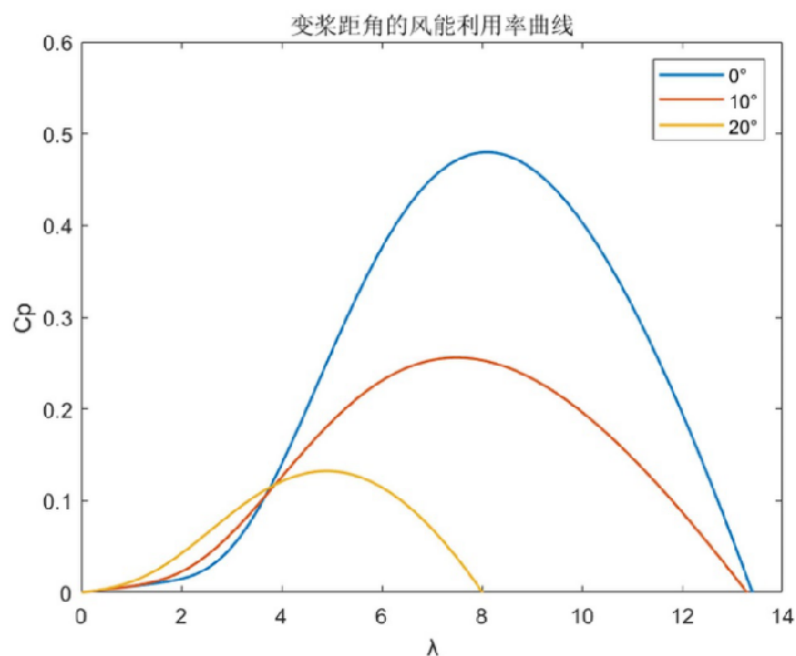
式中 ω ---风轮角速度，rad/s；

R ---风轮半径，m；

n ---风轮转速，r/min。



- 升力型风力机叶尖速比一般为3至8。叶尖速比表征了风力机在一定风速下运转速度的高低，故亦称**高速性系数**。
- 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。
- **最佳叶尖速比：**
 - 对于特定的风轮形式，其功率系数与叶尖速比的关系曲线确定，形状如同一个山包。在某一叶尖速比值处，功率系数达到最大值，此时，风轮吸收的风能最多，对应的叶尖速比值称为**最佳叶尖速比**。



- 风电机组风轮的一个主要设计目标是尽可能多地吸收风能，因此在低于额定风速的区域，**希望使风轮尽可能工作在最大功率系数附近**，即风轮转速与风速的比值尽可能保持在最佳叶尖速比附近。由于风速是连续不断变化的，因此需要对风轮的转速进行控制，使之与风速变化匹配。

• 3.3.3 升降比

- 风在叶片翼型上产生的升力 F_L 与阻力 F_D 之比称为翼型的升阻比，用 L/D 来表示。
即

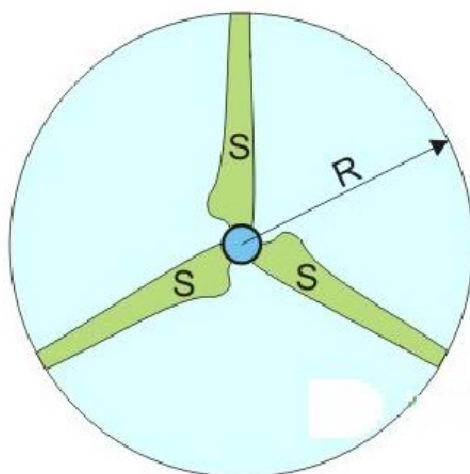
$$\frac{L}{D} = \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D} \quad (3-23)$$

- 翼型的升阻比越高，风力发电机组的效率越高。

• 3.3.4 叶片/风轮几何参数

- (1) 叶片长度 B ：叶片径向上的最大长度。
- (2) 叶片面积 S ：叶片面积通常定义为叶片旋转平面上的投影面积，即等于弦长 c 乘以叶片长度 B 。
- (3) 实度：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。图为水平轴风力机叶轮， S 为每个叶片对风的投影面积， N 为叶片个数， R 为风轮半径，实度为

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



水平轴风力机风轮

- 多叶片的风力机有高实度比，适合低风速、低转速的风力机，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，可以较高效率高转速运行。风力发电机实度一般在5~20%之间。

• 3.3.5 力矩系数

- 使风力机旋转的转矩（旋转力），称为力矩 M ， C_M 称为力矩系数。

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho S V^2 R} \quad (3-24)$$

- 力矩系数是衡量在由风所产生的旋转力中，**风力机到底能从中获得多少可以作为力矩来利用**的性能指标。

• 3.3.6 推力系数

- 风向后推风力机的力称为推力T，CT称为推力系数。

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho S V^2 R} \quad (3-25)$$

- 推力系数是衡量在由风所产生的力中有多少是作为将风力机向后推的推力来作用的性能评价指标。

• 3.3.7 几个“风速”

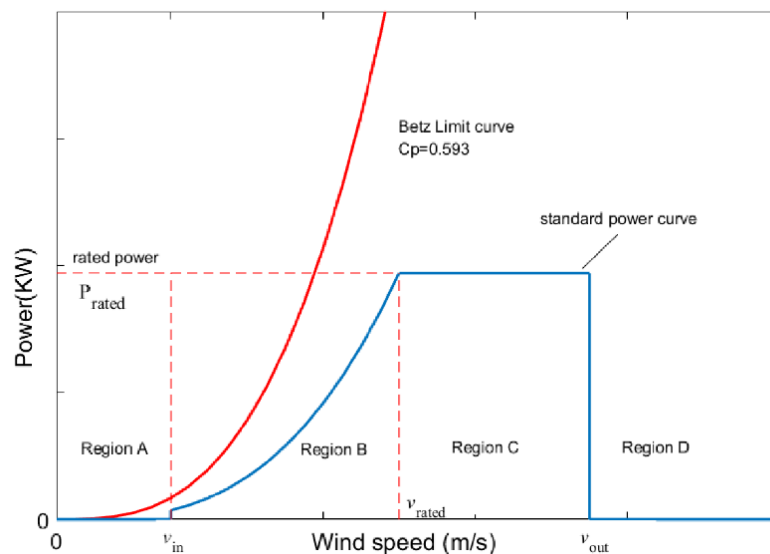
- **启动风速**：风轮由静止开始转动并能连续运转的最小风速。
- **切入风速**：风力发电机对额定负载开始有功率输出时（即风力发电机开始发电时），轮毂高度处的最低风速为切入风速（通常为3~4 m/s）。
- **切出风速**：风电机组正常运行最大风速，称为切出风速。
- **设计（额定）风速**：风力发电机达到额定功率输出时规定的风速叫额定风速。
- **安全风速**：风力发电机组结构所能承受的最大设计风速。

• 3.3.8 工作风速范围与两个“功率”

- **工作风速范围**：风力发电机组有功率输出的风速范围。
- **额定功率**：风力发电机组对应于额定风速时的输出功率值。
- **最大功率**：风力发电机组在工作风速范围内能输出的最大功率值。

• 3.3.9 功率曲线

- 风力机组的输出功率随风速的变化曲线称为功率曲线。如下图所示。



• 3.3.10 风电机组系统效率

- 风通过风轮、传动装置和做功装置后最后得到的风电机组的系统效率（总体效率） η 为

$$\eta = C_p \eta_i \eta_k$$

- η_i 为传动装置效率； η_k 为做功效率。

• 第四章 风力机功率输出和功率调节

• 4.1 风力机功率调节的主要任务

- 功率调节是风力发电关键技术之一。
- 在超过额定风速后（12-16m/s）由于部件机械强度和发电机、电力电子容量等物理性能的限制，必须降低风轮的能量捕获，使功率输出保持在额定值附近，减少叶片承受负荷和整个风力机受到的冲击，保证风力机不受损害。
- 风力机必须有一套控制系统用来调节、限制它的转速和功率。调节装置的首要任务是使风力机在大风、运行发生故障和过载时得到保护；其次，使它在启动时顺利切入运行，并在风速有较大幅值变化和波动的情况下，使风力机运行在其最佳功率系数所对应的叶尖速比值附近；最后，使它能为用户提供良好的能量。

复习提纲 (3)

• 第四章 风力机功率输出和功率调节

• 4.2 三种功率调节方式的工作原理

• 4.2.2 功率调节方式

- 1) 定桨距失速调节：这种调节方式最简单，利用高风速时升力系数的降低和阻力系数的增加，限制功率在高风速时保持恒定。

- 失速调节原理

- 失速调节叶片的攻角沿着轴向由根部向叶尖逐渐减少，因而根部叶面先进入失速，随着风速增大，失速部分向叶尖扩展，原先已经失速的部分，失速程度加深，未失速的部分逐渐进入失速区。
- 失速部分使得功率减少，未失速部分仍有功率增加，从而使输入功率保持在额定功率附近。

- 优点

- 利用升力系数和阻力系数特性曲线，来限制功率输出。
- 无需额外增加功率调节构件。
- 这种实际上为被动式的调节，优点是控制和结构简单，造价低，宜用于小型风力机。

- 缺点

- 功率曲线由叶片的失速特性决定，功率输出不确定；
- 阻尼较低，振动幅度较大，叶片易疲劳损坏；
- 高风速时气动载荷较大，叶片及塔架等受载荷较大；
- 在安装点需要试运行，优化安装角；
- 低风速段风轮转速较低时的功率输出较高。

- 2) 变桨距调节：通过转动桨叶片安装角以减小攻角，高风速时减小升力系数，以限制功率。

- 概述

- 高风速时，通过转动整个或部分叶片安装角以减小攻角，而减小升力系数，达到限制功率的目的。能获得更多的风能，还能提供空气制动功能，减小作用在机组上的极限载荷。
- 一般桨距角的变桨速率： $5^\circ/\text{s}$ 或更高
- 桨距角的范围为：运行时为 $0^\circ \sim 35^\circ$ ；制动时为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ；叶尖弦线位于转动平面内为 0°
- 设计变桨距叶片时，既可以设计为叶片全程都能变桨距，也可以设计为叶片端部约15%的部分能变桨距。

- 对于这种变桨距机组，**变桨距执行机构负载明显降低**，有效地减小了叶片上载荷的波动。但是它也有缺点，如叶尖附近增加了额外的重量，叶尖转轴承受很高的转矩，**叶片外形与变桨距执行机构之间在物理上很难相互匹配**，维护困难等等。目前以**全程变桨距控制**占主导地位。
- 变桨距驱动系统可以分为**每个叶片具有独立的桨距驱动系统**以及**用一个驱动器同时驱动**所有叶片的桨距驱动系统两类。
 - 前者的优点是它由3个独立的气动刹车系统来控制超速，缺点是它需要非常**精确地控制**每个叶片的桨距角以避免桨距角角度差异。后者有一个变桨距驱动器，**不会出现叶片桨距角角度差异**，但是**结构复杂**。

• 原理

- 风轮的**桨叶在静止时**（**叶尖桨距角为 90°** ），这时气流对桨叶不产生转矩，整个桨叶实际上是一块阻尼板。当风速达到启动风速时，桨叶向 0° 方向转动，直到**气流对桨叶产生一定的攻角**，风轮开始转动。
- 当**叶尖桨距角转为 0°** 时，风力机正常运转，发电机的输出功率此时还小于额定功率时，风力机应尽可能地捕捉较多的风能，这时没有必要改变桨距角（**变桨距风力机等同于定桨距风力机**），功率输出完全取决于风速及桨叶的气动性能。此阶段风力机工作在**欠功率状态**，整机功率未达到最大。
- 随着风速增大，风力机功率逐渐增大，**当达到额定功率时**，变桨距机构开始工作，叶片相对自身的轴线转动，**叶片前缘转向迎风方向，使得桨距角增大，攻角减小，升力也减小**，实现了功率输出始终控制在额定功率值附近。
- 遇到**大风或气动刹车**时，桨距角又重新回归 90° ，这个过程称为**顺桨**（风轮静止时的叶片位置）。若转动过程是后缘转向迎风方向，则称为**主动失速变桨**。

• 特点

- **平稳的输出功率特性**
 - **小于额定功率**：等同于定桨距风电机组（叶片桨距角在 0° 附近），功率随**叶片气动性能**随风速变化。
 - **超过额定功率**：变桨距机构调节桨距角，将输出功率控制在PN附近。
 - 变桨距风力发电机组**对高频风速的响应比较慢**，因此对高频风速条件下的功率调节存在困难。
 - 解决办法：利用对发电机转子上**励磁电流的控制**来实现对**转差率**控制，进而控制发电机转速能够快速响应高频风速，充分吸收风能，使得输出功率更加平稳。
- **在额定点具有较高的风能利用系数**
 - 在额定风速点，定桨距机组开始失速，随着风速提高，功率降低；而变桨距机组，通过桨距角控制，将机组输出功率限制在额定功率附近，因此具有较高Cp
- **确保高风速段的额定功率**

- 桨矩角的调节仅受控于输出功率的反馈信号，而不受气流密度变化的影响在气流变化条件下（海拔、温度等），变桨距系统都能通过调整叶片角度，进而获得额定功率输出。
- 更易启动
 - 变桨距风力机在低风速时，桨叶可以转到合适的角度，使得风轮具有最大的启动力矩，从而比定桨距风力发电机组更容易启动。
- 受到较小的动态载荷
 - 变桨距风机叶片、机舱以及塔架受到的动态载荷较小
- 结构复杂
 - 相比于定桨距风力机，变桨距风力机轮毂结构复杂，制造、维护成本高。
- 3) 叶片主动失速调节（负桨距角控制）：利用桨距调节，在中低风速区可优化功率输出。
 - 在额定功率点之前，叶片桨距角基本固定不变；在额定功率点以后，在与主动桨距控制相反的方向上适当调整叶片的桨距角，使得桨叶失速，保持功率输出稳定。通过减小桨距角来增大攻角，达到临界攻角以上来控制功率输出。
 - 利用桨距调节，在中低速区可优化功率输出，在高风速区维持额定功率输出。
 - 在临界失速点，通过桨距调节跨越失速不稳定区。
 - 与被动失速调节（4.2.2.1）相比，主动失速调节的优点
 - ①可以补偿空气密度、叶片粗糙度、翼型变化对功率输出的影响，优化中低风速的出力；
 - ②额定功率点之后可维持额定功率输出；
 - ③叶片可顺桨，制动平稳，冲击小，极限载荷小。
 - 与变桨距功率调节相比，主动失速调节的特点
 - ①受阵风、湍流影响较小，功率输出平稳，无需特殊的发电机；
 - ②桨距角变化比变桨距控制小，执行机构的行程短，仅需微调，磨损少，疲劳载荷小。
 - 主要缺点：失速条件下，气动特性难以准确预测

• 4.3 风力机的制动装置

• 4.3 风力机制动装置

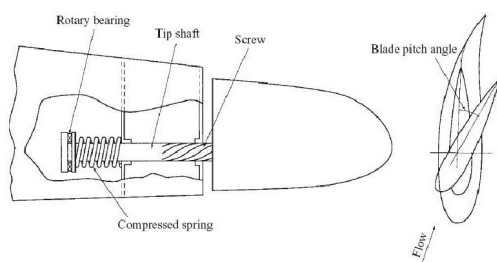
• 4.3.1 概述

- 制动装置是使得风力发电机在遇到大风或需要维修时，使风轮达到静止或空转状态的系统，也称为刹车。
- 风力发电系统通常采用两套独立的制动装置，即空气动力制动和机械制动。两套系统功能各异，相互补充。
 - 空气动力制动依靠叶片形状的改变使得通过风轮的气流受阻，从而对叶片产生阻力，降低风速；机械制动是利用摩擦力使得风轮制动。

• 4.3.2 空气动力制动

- 是风力发电机组的**主制动器**，空气动力制动装置具有对风力传动系统**无冲击、无机械磨损**等优点。
- 但是空气制动不能使得风轮完全停止转动，只能使其转速限定在允许范围内，需要机械制动配合使用。
- 空气制动方法主要有**叶尖扰流器**、**扰流板**、**主动变桨距**、**自动偏航**等。

• 叶尖扰流器



- 对于**定桨距风机**而言，空气制动通常是通过叶片上的叶尖扰流器来实现的。叶尖扰流器安装在叶尖转轴上，长度大约**占叶片总长度**的15%。
- 风力发电机组**正常运行**时，在液压缸活塞杆的拉力作用下，抵消叶尖转动时的离心力，使叶尖和叶片主体部分合为一体，成为完整的叶片，此时叶尖是吸收风能的主要部分。
- 在风力机**需停机**时，液压系统按控制系统发出的指令，释放液压缸压力，**叶尖扰流器在离心力作用下向外飞出**，并通过转轴带动螺杆，进而带动叶尖旋转80-90度形成**阻尼板**；因叶尖处于距离轴最远点，使扰流器产生的**气动阻力相当高**，足以使风力发电机组在几乎没有任何磨损的情况下迅速减速。
- 控制系统的正常指令能够使液压力释放，而使叶尖扰流器发挥制动作用，若是**液压系统出现故障**，导致液压油路失去压力，同样也会导致叶尖扰流器制动。因此，**叶尖扰流器不仅是正常制定的制动装置，也是液压系统出现故障时的一种保护装置**。

• 扰流板

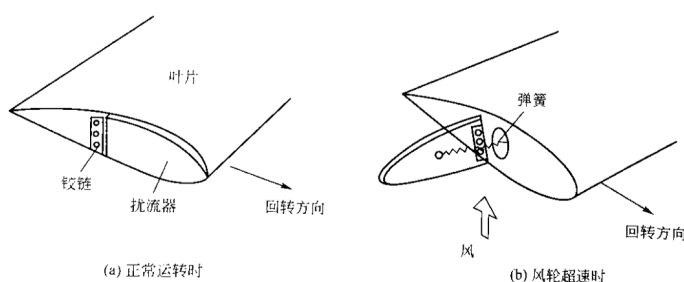


图 4.39 利用扰流板产生空气动力制动

- 扰流板制动原理与叶尖扰流器原理相似，将扰流板用铰链连接在叶片端部，并同时与弹簧相连。
- 风力机**正常运转**时，**弹簧拉力大于扰流板离心力**，使得扰流板紧贴叶片，不干扰叶片正常运转。

- 当风轮超速时，扰流板离心力大于弹簧拉力而伸展开，形成阻尼板，降低风轮转速。
- 这种装置过去使用过，由于其能否使得风轮充分减速，导致其广泛使用还有待进一步测试。
- 主动变桨
 - 变桨距风机主要采用这种方式，叶片变桨改变叶片攻角，减小升力，利用风力来降低叶片转速。
- 自动偏航
 - 遇到大风情况，风力机的机头偏离主风向，向左右侧面扭头旋转90度使风轮平面与主风向平行，而尾翼仍然平行于风向，这样当机头偏离主风向后，吸收风能的效率自然降低，从而有效保护风力发电机。

• 4.3.3 机械制动

- 空气制动并不能使风机完全停住，在风力发电机速度降低之后，必须依靠机械制动系统才能使风机完全停止。
- 利用摩擦力使得运动部件减速或直至静止的装置，盘式制动器利用成对的制动块压紧产生的摩擦力对制动盘进行制动。
- 由制动圆盘和制动夹钳组成。制动圆盘一般固定安装在齿轮箱高速轴上，随高速轴一起旋转（制动力矩相对而言较小），制动夹钳固定安装在齿轮箱箱体上。
- 制动过程
 - 制动夹钳有一个预压的弹簧制动力，液压力通过油缸中的活塞将制动夹钳打开。需要制动时，释放液压力，进而释放预压的弹簧制动力，压制中间的制动圆盘，从而使齿轮箱的高速轴制动，直至其停止转动。
 - 制动装置总是处于准备工作状态，可以随时对机组进行制动，或是由液压系统解除制动。
 - 但在正常停机的情况下，液压力并不完全释放，即在制动过程中只作用了一部分弹簧力。为此，在液压系统中设置了一个特殊的减压阀和蓄能器，以保证在制动过程中不完全提供弹簧的制动力。
 - 为了监视机械制动机构的内部状态，制动夹钳内部装有温度传感器和指示制动片厚度的传感器。
 - 定桨距风力机的机械制动器用于配合风力机进行停机操作。正常停机时，叶尖扰流器先工作，当风轮转速下降到大约额定转速的一半时，机械制动器工作，制动停机。在紧急停机情况下，机械制动和空气制动同时工作。
 - 变桨距风力机的机械制动器在正常停机时一般不工作，在紧急停机情况下配合空气制动器进行制动停机。风力机停机时，优先选择空气制动。

• 第五章 风力发电系统控制

- 5.1 运行过程中的主要参数监测(电网、机组、风况)
 - 5.3.4 运行过程中的主要参数监测
 - 1、电网参数

- 电网三相电压、发电机输出的三相电流、电网频率、发电机功率因数等。用来判断风力发电机组的启动条件、工作状态和故障情况，还可以用于统计风力发电机组的有功功率、无功功率和总发电量。
- 可以根据电力参数如发电机有功功率和功率因数，确定补偿电容的投入与切出。发电机功率与风速有着固定的函数关系，两者不符可作为机组故障判断的依据。
- 2、风力参数
 - 风速：每秒采集一次，10分钟计算一次平均值。用于判别启动风速 ($v > 3\text{m/s}$) 和停机风速 ($v > 25\text{m/s}$)。
 - 风向：测量风向与机舱中心线的偏差，一般采用两个风向标进行补偿。控制偏航系统工作，风速低于 3m/s 偏航系统不会工作。
- 3、机组参数
 - 转速：发电机转速和风轮转速两个测点。控制发电机并网和脱网、超速保护。两者可以相互校验，如不符，则提示风力发电机组故障。
 - 温度：增速器油温、高速轴承温度、发电机温度、前后主轴承温度、机舱温度以及环境温度。
 - 机舱振动：振动传感器。
 - 电缆扭转：齿轮记数传感器，用于停机解缆操作。
 - 机械刹车状况：装有刹车片磨损指示器。刹车片磨损到一定程度时控制器显示故障信号，必须更换刹车片才能启动风力发电机组。
 - 油位：润滑油和液压系统油位。
- 4、信号反馈检测与控制
 - 各种反馈信号的检测：控制器在发出指令后的设定时间内应收到的反馈信号包括回收叶尖扰流器、松开机械刹车、松开偏航制动器、发电机脱网转速降落；否则故障停机。
 - 增速器油温的控制：增速器箱内由热电阻温度传感器测温；加热器保证润滑油温不低于 10°C ；润滑油泵始终对齿轮和轴承强制喷射润滑；油温高于 60°C 时冷却系统启动，低于 45°C 时停止冷却。
 - 发电机温升控制：通过冷却系统控制发电机温度，如温度控制在 $130\sim 140^{\circ}\text{C}$ ，到 $150\sim 155^{\circ}\text{C}$ 停机。
- 5.2 变桨距风力发电机组的三种运行状态及采取的控制方式
 - 5.4.2 变桨距风力发电机组的运行
 - 三种运行状态：启动状态（转速控制）；欠功率状态（不控制）；额定功率状态（功率控制）。
 - 1、启动状态
 - 变桨距风轮的桨叶在静止时，节距角为 90° ，这时气流对桨叶不产生转矩，整个桨叶相当于是一块阻尼板。当风速达到启动风速时，桨叶向 0° 方向转动，直到气流对桨叶产生一定的攻角（升力↑），风轮开始转动。

- 在发电机并网之前，节距角给定值由**发电机转速信号控制**，转速控制器按一定的速度上升斜率给出速度参考值，**变桨距系统**根据给定的速度参考值，**调整节距角**，进行所谓的速度控制。

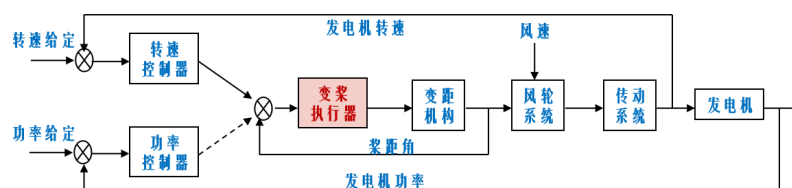
- 转速反馈控制，速度给定加升速率限制有利于并网**

2、欠功率状态

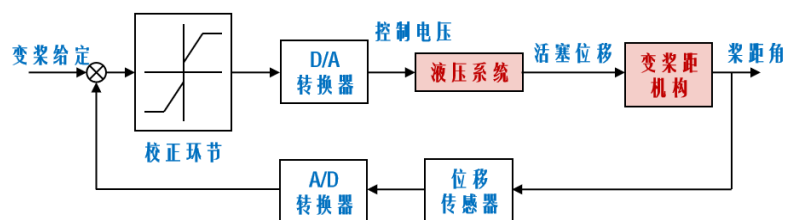
- 指发电机并入电网后，**由于风速低于额定风速，发电机在额定功率以下的低状态运行**。一般对于这种情况，不加控制，这时的变桨距与定桨距相同，功率输出完全取决于桨叶的气动性能（变速机组可通过追求最佳叶尖速比提高风机效率）。
- 近年来，以Vestas为代表的新型变桨距风力发电机组，为了改变低风速时桨叶的气动性能，采用了所谓Optitip技术，即可以根据风速的大小调整发电机转差率，使其尽量运行在最佳叶尖速比上，以优化功率输出。

3、额定功率状态

- 当风速达到或超过额定风速后，风电机组进入额定功率状态。传统的变桨距控制方式，将转速控制切换到功率控制，变桨距系统开始根据发电机的功率信号进行控制，控制信号的给定值即额定功率。**将功率反馈信号与给定值相比，当功率超过额定功率时，桨叶节距就向迎风面积减小的方向转动一个角度，反之则向迎风面积增大的方向转动一个角度。**



- 变桨距执行系统是一个随动系统，即桨距角位置跟随变桨指令变化。



- 校正环节（节距控制器）是一个非线性比例控制器，具有**死区补偿和变桨限制**功能。死区用来补偿液压及变距机构的不灵敏区，变桨限制防止超调。
- 变桨距的执行机构是**液压系统**，节距控制器的**输出信号**经过D/A转化后变成**电压信号**控制比例阀（或电液伺服阀）**驱动液压缸活塞**，推动**变桨距机构**，使得桨距角变化。活塞的**位移反馈信号**由位移传感器测量，经A/D转换后返回到系统中。
- 液压系统**由**液压比例伺服阀、液压回路、液压缸活塞**等组成。

第六章 小型风力发电系统

6.1 小型风力发电系统的基本组成及功能

6.2 小型风力发电系统的结构组成

- 一般由**风轮、发电机、尾舵、限速装置、电力转换装置、蓄能装置、塔架**等组成。

- **风轮**：风轮是风力发电机最重要的部件之一;将**风能转化为机械能**;风轮的设计性能好坏，影响整台风力发电机组的效率。
- **发电机**：发电机是将**风能转变成电能**的设备；风轮一般与发电机之间多采用**直接连接**，**省去增速装置**；发电机主要采用**交流永磁发电机**，感应式发电机和直流发电机。
 - **1)交流永磁发电机**：永磁发电机无励磁损耗，效率较高。制造工艺简单，可做成多磁极（8极以上），便于与风轮直连。交流永磁发电机的定子与普通交流发电机相同，由定子铁心和定子绕组组成，转子采用永磁材料励磁，没有励磁绕组。（见课本p150页）
 - **2)直流发电机**：可以产生直流电，给蓄电池充电，不需要整流装置
- **尾舵（也称尾翼）**：小型风力发电机多采用尾舵达到**对风**的目的。尾舵的作用是使得风轮能随风向的变化而作相应的转动，保持**风轮始终与风向垂直**。
 - 尾翼调向结构简单，调向可靠。能自然对准风向，不需要特殊控制。**尾翼必须具备一定的尺寸条件**才能获得满意的对风效果。如下式：

$$A' = 0.16A \frac{e}{l}$$

式中 A' ——尾翼面积；
 A ——风轮扫掠面积；
 e ——转向轴与风轮旋转平面间的距离；
 l ——尾翼中心到转向轴的距离(图 4.27)。

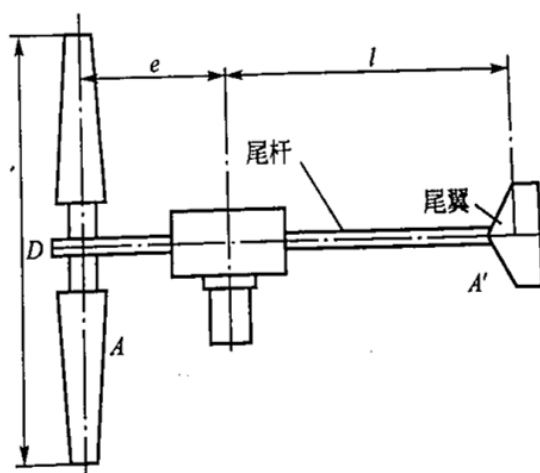


图 4.27 尾翼调向

- **限速装置**：为防止发电机组**超速**，必须有限速装置，使得风轮转速不超过规定的范围。常用的限速方法有三种。
 - **1、风轮摆动法** 适用于小功率风轮机，当风速超过规定速度时，机头摆动一个角度建立新的平衡条件。

- 2、**桨叶偏转法** 利用适当机构在风速过高时使得桨叶自动绕桨叶纵轴偏转一角度，减小升力保持规定转速。
- 3、**襟翼法** 通过**增大桨叶阻力**以达到控制风轮转速的目的，也称为空气制动法
- **塔架**：塔架由**塔管（上、中、下三段）**、**底板**、**拉线**和**紧固组件**构成；塔架将风力机主体支撑在一定高度的空中，使风轮**捕捉足够的风能**；定期检查塔架**拉线的张紧度**，用调节螺栓使各拉线保持一致，并**保持塔架垂直于地面**。

• 6.2 风力发电系统发电原理框图及发电原理

• 6.3 小型风力发电系统的发电原理

- 小型风力发电系统一般将发电机发出的电能用**储能设备（蓄电池）**储存起来，需要时再提供给负载。**蓄电池输出的是直流电**，为了满足人们日常生活和生产需要，需要把**直流电变为交流电**，实现这一转变的装置为**逆变器**。

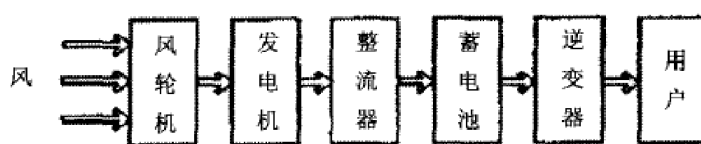


图1 小型风力发电系统框图

- 在风的吹动下，风轮转动起来，使**空气动能转变成了机械能（转速+扭矩）**；
- 风轮的轮毂固定在发电机轴上，风轮的转动（**机械能**）驱动了发电机主轴的转动，带动永磁三相发电机转动，发出三相交流电（**电能**）；
- 风速的不断变化、忽大忽小（**随机性、间歇性、不稳定性**），发电机发出的电流和电压也随着不断变化；
- 发出的电经过**控制器整流（整流器）**，由**交流电**变成了具有一定电压的**直流电**，并向蓄电池进行充电；
- 从蓄电池输出的**直流电**，通过**逆变器**后变成了220V的**交流电**，供给用户的家用电器。

复习提纲 (4)

• 第六章 小型风力发电系统

• 6.3 主要的电力转换装置整流器、逆变器的功能

• 6.4 小型风力发电系统的电力变换装置

- 由于风能的随机性、波动性，发电机所发出电能的频率和电压都是**不稳定的**；
- 蓄电池只能存储**直流电**，无法为交流负载直接供电；
- 因此，为了给负载**提供稳定、高质量的电能和满足交流负载用电**，需要在发电机和负载之间加入电力变换装置。电力变换装置主要由**整流器、逆变器、变频器**等组成。
 - **整流器**：把**交流电转化为直流电**的装置。独立运行的小型风力发电系统中，有风轮驱动的交流发电机，需要配以适当的整流器，才能对蓄电池充电。
 - **主要功能**：1、将交流电转换为直流电；2、给蓄电池提供充电电压。
 - 整流器分为**可控与不可控**两种。可控整流器主要应用在功率较大的系统中，可以减小电感过大带来的体积大、损耗大等缺点；不可控整流器主要应用于小功率系统中。
 - 根据所采用的整流器件，整流器可分为**机械式、电子管式和半导体式**。其中最简单的、最常用的是**二极管整流器**。
 - 按照整流的方法，可分为**半波整流、全波整流**。
 - **1) 半波整流**：利用二极管单向导通特性，在输入标准正弦波的情况下，输出获得正弦波的正半部分，负半部分则损失掉；或者相反。这样，只有一半的输入波形会形成输出。
 - **2) 全波整流**：全波整流可以把完整的输入波形转成同一极性来输出。可以分为**桥式和中心抽头式**。
 - **(1) 桥式整流器**
 - 如课本p98页图4.51所示，工作原理如下： u_2 为正半周时，对D1、D2加正向电压，D1、D2导通；对D3、D4加反向电压，D3、D4截止。电路中构成 u_2 、D1、RL、D2通电回路，在RL上形成上正下负的半波整流电压。 u_2 为负半周时，对D3、D4加正向电压，D3、D4导通；对D1、D2加反向电压，D1、D2截止。电路中构成 u_2 、D3、RL、D4通电回路，同样在RL上形成上正下负的半波整流电压。如此重复下去，结果在RL上便得到全波整流电压。
 - **(2) 中心抽头式**
 - 输出波形与桥式整流器相同，均为全波波形。见课本p99页图4.52
 - **逆变器**：与整流器的功能相反，主要作用是将蓄电池存储的或由整流桥输出的**直流电**转变为负载所能使用的**交流电**。
 - 独立运行的风力发电系统发出的电虽然是交流电，但它是电压和频率一直在变化的**非标准交流电**，**不能直接用来驱动负载**。另外，风能是随机波动的，

不可能与负载的需求完全匹配，所以需要储能设备，然后在利用逆变器转变为可以使用的交流电。目前独立运行小型风电系统的逆变器多数为**电压型单相桥式逆变器**。

- 按照输入方式逆变器可分为两种：

- **(1) 直流输入型**：逆变器输入端直接与电瓶连接的产品；
- **(2) 交流输入型**：逆变器输入端与风电机组的发电机交流输出端连接的产品，即**控制、逆变一体化**的产品。
- 其他分类见课本p100页

- 基本原理

- 逆变器由**主逆变电路、输入电路、输出电路、控制电路、辅助电路和保护电路**等组成。其中逆变开关电路是逆变器的核心，简称为逆变电路。
- 它通过**半导体开关器件的导通与断开**完成逆变的功能。
- 逆变器的种类很多，具体的工作原理、工作过程不尽相同，但是最基本的逆变过程是相同的。
- 以最简单的逆变电路-**单相桥式逆变电路**为例，具体说明逆变器的“逆变”过程。如课本p101页图4.54所示。
 - 输入直流电压为 E ， R 代表逆变器的纯电阻性负载。当开关 K_1 、 K_3 接通后， K_2 、 K_4 断开，电流流过 K_1 、 R 和 K_3 时，负载 R 上的电压极性是左正右负；当开关 K_1 、 K_3 断开， K_2 、 K_4 接通后，电流流过 K_2 、 R 和 K_4 ，负载 R 上即可得到波形为方波，频率为 f 的交变电压 U_R 。逆变的基本原理就是用一个有6个线头的开关，有两根线接负载，有4根线接电源，开关有两种状态，不停地切换开关，使负载的电源极性不停地对换，50Hz的电源每秒切换开关100次。简单的只能输出矩形的波形，复杂的可输出正弦波或准正弦波。
- **正弦波逆变器**输出的是正弦波交流电,而方波逆变器输出的则是质量较差的方波交流电,对负载及逆变器本身造成剧烈的不稳定影响且负载能力差，仅为额定负载的40%-60%。
- **准正弦波逆变器**的输出波形从正向最大值到负向最大值之间有一个时间间隔，性能优于方波逆变器，成为主流产品。
- 逆变器的保护功能有：
 - **(1) 过充保护**：当风速持续较高，蓄电池**充电很足**，**蓄电池组电压超过额定电压1.25倍时**，控制器停止向蓄电池充电，多余的电流流向**卸荷器**；
 - **卸荷器**的主要作用是防止蓄电池过充，卸荷器通过增大负载量，把多余的电卸载掉，一定的限速的作用。直接刹车风机停止工作，而配套卸荷器风机可以继续转动工作。
 - **(2) 过放保护**：当风速长期较低，蓄电池**充电不足**，**蓄电池组电压低于额定电压0.85倍时**，逆变器停止工作，不再向外供电。当风速再

增高，**蓄电池组电压恢复到额定电压的1.1倍时**，逆变器自动恢复工作，向外供电。

- **逆变器使用注意事项**

- 机器的外壳正确接地。正、负极连接正确；直流电压要一致；逆变器输出功率要大于电器的使用功率；逆变器摆放位置应在通风、干燥的地方，使用环境不得高于40度；充电与逆变不能同时进行（逆变器将直流转交流、充电是将电能存储到电池中，电流冲突或电压不稳）；两次开机间隔时间不少于5秒；连接蓄电池时，需确认手中没有其他金属物，以免发生蓄电池短路。

- **逆变器其他控制器——变频器**

- 作用是**把电压和频率固定不变的交流电变换为电压或频率可变的交流电**的装置。
- 特点：**不改变总电能，只改变电压、频率**。
- 为了使风力发电机适应风速的特点变转速运行，需要用到变频器。
- 变频器是应用**变频技术与微电子技术**，通过改变电机工作电源的频率和电压，**控制交流电机转速**的电力传动元件。
- 变频器的类型
 - 按照变换的环节分类：
 - **(1) 交-直-交变频器（间接式变频器）**：先把交流电经整流器**整流成直流电**，中间电路对整流电路的输出进行**平滑滤波**，再经过**逆变器把直流电转化成频率和电压都可变的交流电**。
 - **(2) 交-交变频器**：将交流电**直接变换成频率、电压可调的交流电**，又称直接式变频器。
 - 其他分类详见课本p103页。、
 - **基本工作原理**：变频器主要由主电路（整流器、中间直流电路、逆变器）和控制电路组成。**整流器**将交流电转化成直流电；**中间直流电路**对整流电路的输出进行平滑滤波；**逆变器**将直流电再转变成交流电；**控制电路**完成对主电路的控制
 - 变频器的维护保养（见课本P105）

- **第七章 蓄能装置**

- **7.1 蓄电池额定容量、放电率的定义**

- 完全充电状态下,按一定放电条件,放电到所规定的终止电压时,所释放的电量，**用安时(A·h)表示**，是放电电流(A)和放电时间(h)的乘积。**通常取温度为25℃时，10小时率容量作为蓄电池的额定容量**。
- 最常见的**放电率**有20h、10h、2h放电率，对应的电池容量分别写作**C20、C10、C2**，其中C表示电池容量，下标数字表示该类电池以某种强度的电流放电到设定电压（终止电压）

的时间 (h) , 用容量除以时间即可得出额定放电电流。例: 一辆电动自行车的电池容量 10 A·h、放电时率为2h, 它的额定放电电流为 $10\text{ A}\cdot\text{h}/2\text{ h}=5\text{ A}$ 。

- 蓄电池放电能力的大小以放电率表示, 放电率有以下两种表示方法:
- A、**小时率** (时率) 以一定的电流值放完电池的额定容量所需时间
- B、**电流率** (倍率), 放电电流值相当于电池额定容量的倍数。如容量为100 A·h的蓄电池, 以 $100\times0.1=10\text{ A}$ 电流放电, 电流率为0.1C₁₀,若以100A电流放电, 1h将全部电量放完, 电流率为1 C₁₀(nC_h,n乘以容量即为电流)
- 一般规定**10h放电率**的容量为固定型蓄电池的**额定容量**。若以低于10h放电率的电流放电, 则可得到高于额定值的电池容量, 相反, 则得到比额定容量小的电池容量。

• 7.2 影响蓄电池容量的主要因素, 影响蓄电池寿命的主要因素

- 蓄电池的**容量**不是一个固定的参数, 它是由设计、工艺和使用条件综合因素决定的, 它的影响因素主要有以下几点:
 - 1) **构造因素的影响**
 - (1)极板**厚度越薄**, 活性物质的利用率就越高, 容量就越高。
 - (2)板**面积越大**, 同时参与反应的物质就越多, 容量就越大。
 - (3)同性极板**中心距越小**, 蓄电池内阻越小, 容量越大。
 - 2) **放电率的影响**
 - 蓄电池放电能力的大小以放电率表示, 放电率有以下两种表示方法:
 - A、**小时率** (时率) 以一定的电流值放完电池的额定容量所需时间
 - B、**电流率** (倍率), 放电电流值相当于电池额定容量的倍数。如容量为100 A·h的蓄电池, 以 $100\times0.1=10\text{ A}$ 电流放电, 电流率为0.1C₁₀,若以100A电流放电, 1h将全部电量放完, 电流率为1 C₁₀(nC_h,n乘以容量即为电流)
 - 一般规定**10h放电率**的容量为固定型蓄电池的**额定容量**。若以低于10h放电率的电流放电, 则可得到高于额定值的电池容量, 相反, 则得到比额定容量小的电池容量。
 - 3) **电解液温度影响**
 - 电解液温度高, **离子运动速度加快**, 获得的动能增加, 因此**渗透力增强**, 使得电池**内阻减小**, 扩散速度加快, **电化学反应加强**, 蓄电池容量增大; 电解液温度下降则相反使用注意事项:寒冷地区注意蓄电池的保温。
 - 4) **电解液浓度 (密度) 及层化的影响**
 - 在电解液浓度范围内, **增加电解液的浓度**就等于增加了反应物质, 因此**蓄电池的容量也随着增加**。a. 电解液密度 $\rho\uparrow$ 电动势 $E\uparrow$, 电解液渗透能力 $\uparrow$, 参加反应的活性物质 $\uparrow\rightarrow C\uparrow$ b. ρ 过高时, 粘度 $\uparrow$, 内阻 $\uparrow$, 极板硫化 $\uparrow\rightarrow C\downarrow$ 冬季使用的电解液, 在不致结冰的条件下, 一般取1.26-1.30g/cm³
 - 电解液的**层化**是由于电池在充放电时, 其**反应往往是集中在极板的上部靠近电流的输出端**, 致使位于极板上部的电解液浓度低于下部电解液浓度, 即产生了**浓度差**。由于电解液浓度的差异, **很容易造成极板上的活性物质得不到完全的、均匀的转化**, 影响到蓄电池的容量和寿命。

- 影响蓄电池寿命的因素主要有以下几个方面

- 1) **环境温度** 过高的环境温度是影响蓄电池寿命的主要因素。要求环境温度在15-25度，超过25度，温度每升高10度，蓄电池的使用寿命大约减少一半。温度过低，低于0度有效容量也将下降。
- 2) **过度放电** 是影响使用寿命的另外一个重要因素。主要发生在交流停电后，蓄电池为负载供电期间。
- 3) **过度充电** 极板腐蚀是影响蓄电池使用寿命的重要原因。
- 4) **浮充电** 目前，蓄电池大部分都处于长期的浮充电状态，只充电，不放电。这样会使蓄电池的阳极极板钝化，内阻增大。

- 7.3 铅酸蓄电池的主要构成、铭牌含义，双极硫酸盐化理论(正极、负极反应以及副反应)，蓄电池组的串并联计算

- 7.3.1 铅酸蓄电池的组成

- 法国人普兰特于1859年发明铅酸电池 (VRLA)
- 铅酸蓄电池主要构成如下：
 - **正（阳）极板** (二氧化铅 .PbO₂)---> 活性物质
 - **负（阴）极板** (海绵状铅 .Pb) ---> 活性物质
 - **隔板**
 - **电解液 (稀硫酸)** ---> 硫酸 (H₂SO₄) + 水 (H₂O)
 - **电池外壳**
 - 其它 (液口栓 、 盖子等)

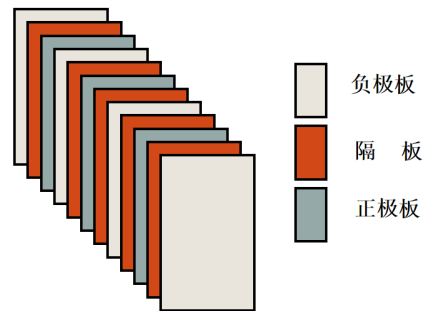
- 1、极板

- 极板是蓄电池的核心部分，蓄电池充、放电的化学反应主要是依靠极板上的**活性物质与电解液**进行的。极板分**正极板和负极板**，由**栅架和活性物质**组成。
 - 栅架的作用**固结活性物质**。栅架一般由**铅锑合金**铸成，具有良好导电性、耐腐蚀性和一定机械强度。铅占94%，锑占6%。加入锑是为了**改善力学强度和浇铸性能**。为了增加耐腐蚀性，加入0.1%~0.2%的砷（钙），提高硬度与机械强度，增强抗变形能力，延长蓄电池使用寿命。
 - 正极板上活性物质是**二氧化铅 (PbO₂)**，呈棕红色；负极板上活性物质海绵状**纯铅 (Pb)**，呈青灰色。将正、负极板各一片浸入电解液中，**可获得2V左右的电动势**。为了增大蓄电池的容量，常将**多片正、负极板分别并联，组成正、负极板组**，在每个单格电池中，**正极板的片数要比负极板少一片**，每片正极板都处于两片负极板之间，可以使正极板两侧放电均匀，避免因放电不均匀造成极板拱曲。
 - 国产蓄电池正极板2.2mm，负极板1.8mm，国外大多采用薄型极板。

- 2、隔板

- 隔板插放在正、负极板之间，**防止正、负极板互相接触造成短路**。隔板还可防止极板的**弯曲和变形**，防止活性物质的脱落。隔板耐酸、具有多孔性，以利于电解

液的渗透。常用的隔板材料有**木质**、**微孔橡胶**和**微孔塑料**等。**微孔塑料**隔板孔径小、孔率高、成本低，因此广泛采用。



• 3、电解液

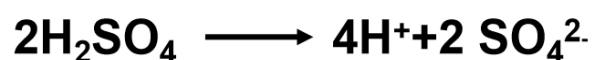
- 电解液在蓄电池的化学反应中，起到**离子间导电**的作用，并参与蓄电池的化学反应。电解液（**稀硫酸**）由**纯硫酸（H₂SO₄）**与**蒸馏水**按一定比例配制而成，其密度一般为1.24~1.31g/cm³。电解液的纯度对蓄电池的电气性能和使用寿命有重要影响，一般**工业用硫酸和普通水**中，含有铁、铜等有害杂质，绝对不能加入到蓄电池中，否则自行放电，损坏极板。

• 4、壳体

- 壳体用于盛放电解液和极板组，应该**耐酸、耐热、耐震**。壳体多采用**硬橡胶**或**聚丙烯塑料**制成，为整体式结构，底部有凸起的肋条以搁置极板组。壳内由间壁分成3个或6个互不相通的单格，各单格之间用**铅质联条串联**起来。

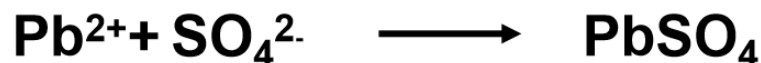
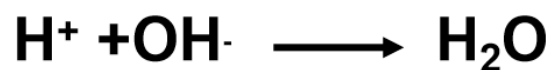
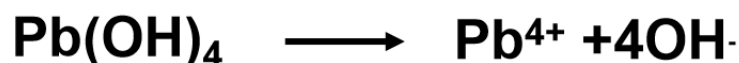
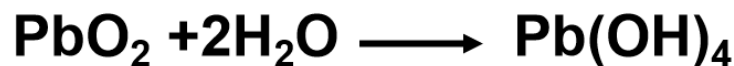
• 7.3.2 铅酸蓄电池的工作原理

- **双极硫酸盐化理论**：1882年由Tribe和Gladstone提出，简称双硫化理论，该理论的含义是：
 - 蓄电池在放电时，正、负极都生成硫酸铅；
 - 正极： $\text{PbO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
 - 负极： $\text{Pb} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}^+$
 - 充电时反应逆向，即又恢复为原来的铅和氧化铅。
 - **放电过程**
 - **负极板**：一方面铅板有溶于电解液的倾向，因此有少量铅进入溶液生成Pb²⁺（被氧化）而在极板带负电；另一方面，由于Pb²⁺带正电荷，极板带负电荷，正、负电荷又要相互吸引，这时Pb²⁺离子有沉附于极板的倾向。这两者达到动态平衡时，负极板相对于电解液具有负电位，其电极电位约为-0.1V。Pb²⁺和电解液中解离出来的SO₄²⁻发生反应，生成PbSO₄，且PbSO₄的溶解度很小，所以生成后从溶液中析出，附着在电极上，反应式为：



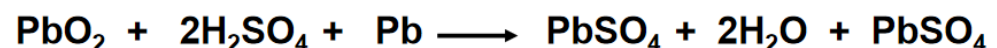


- **正极板：**正极放电时有少量PbO₂进入电解液与H₂O发生作用，生成Pb(OH)₄；而它不稳定，又很快电解成为Pb⁴⁺和OH⁻，Pb⁴⁺沉附在正极板上，使正极板具有正电位，达到动态平衡时，其电极电位约为+2.0V。当Pb⁴⁺沉附到正极板上时，这时通过外线路来的2个电子被Pb⁴⁺俘获，生成Pb²⁺又与电解液中的SO₄²⁻发生反应，变为PbSO₄，这些PbSO₄以固体形式被吸附在正极板上。电解液中存在的H⁺和SO₄²⁻在电场的作用下分别移向电池的正负极，在电池内部产生电流，形成回路，使蓄电池向外持续放电。所以正极上的反应为：

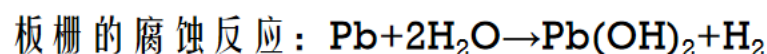
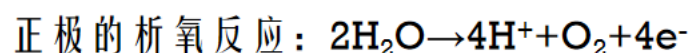
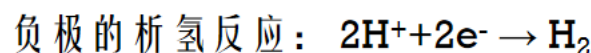


- **放电过程总反应**

正极活性物 电解液 负极活性物 正极生成物 电解液生成物 负极生成物



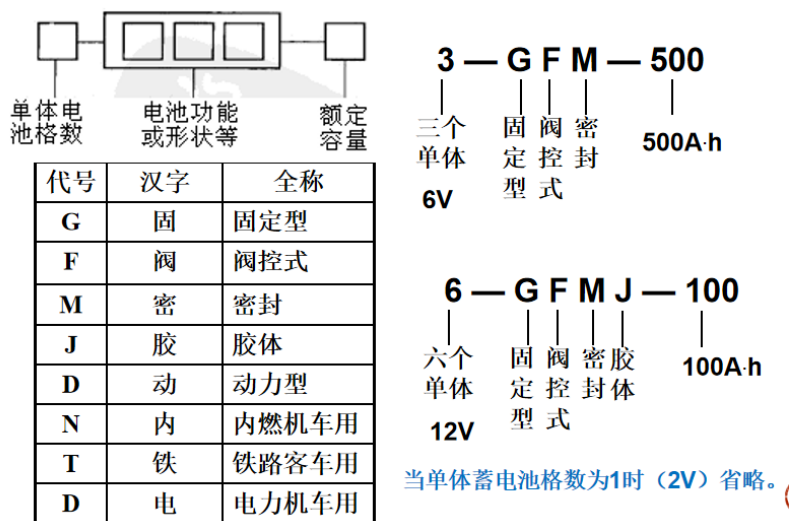
- 放电过程是化学能变成电能的过程，这时正极的活性物质PbO₂变为PbSO₄，负极的活性物质海绵铅变为PbSO₄，电解液中H₂SO₄分子不断减少，逐渐消耗生成H₂O，H₂O分子相应增加，电解液的相对密度降低。
- **副反应：**主要包括充电时负极的析氢反应、正极的析氧反应以及板栅的腐蚀反应



- **7.5 蓄电池组的串并联**

- 为了满足系统对储能和电压的要求，需要将蓄电池进行串联或并联。

- 相同型号的蓄电池串联，串联后的电压等于它们各个蓄电池电压之和。如：3个12V/500A·h的蓄电池串联之后的电压是36V，输出电流和单个蓄电池一样，电量是500A·h。
- 相同型号的蓄电池并联，并联之后的电压不变，电量是各并联蓄电池电量之和。如：3个12V/500A·h的蓄电池并联之后的电压是12V，电量是1500A·h。
- 铭牌含义



第八章 风电场

8.1 风能资源评价包括三阶段

- 风能资源评价包括三个阶段：1、区域的初步甄选（相当于宏观选址）；2、区域风能资源测量和评估；3、微观选址。

8.2 风电场建设对风功率密度的基本要求

- 风功率密度一般应大于150W/m²（10m高度处）

8.3 测风数据处理(包括验证、订正方法)

测风数据处理

- 测风数据处理包括对数据的验证、订正，并计算评估风能资源所需要的参数。
- 数据验证目的：数据验证或检验是检查风场测风获得的原始数据，对其完整性和合理性进行判断，检验出不合理的数据和缺测的数据，经过处理，整理出至少连续一年完整的风场逐小时测风数据。

1 完整性检验

- a) 数量：数据数量应等于预期记录的数据数量。b) 时间顺序：数据的时间顺序应符合预期的开始、结束时间、中间应连续。

2 合理性检验

- a) 范围检验，主要参数的合理范围参考值见表

主要参数	合理范围
平均风速	0m/s≤小时平均风速<40m/s
风向	0≤小时平均值<360°
平均气压（海平面）	94kPa≤小时平均值≤106kPa

- b) **相关性检验**，主要参数的合理相关性参考值见表

主要参数	合理相关性
50m/30m高度小时平均风速差值	<2.0m/s
50m/10m高度小时平均风速差值	<4.0m/s
50m/30m高度风向差值	<22.5°

- c) **趋势检验**，主要参数的合理变化趋势参考值见表

主要参数	合理变化趋势
1h平均风速变化	<6m/s
1h平均温度变化	<5℃
3h平均气压变化	<1kPa

- **3 不合理数据和缺测数据的处理**

- a)、检验后列出所有不合理的数据和缺测的数据及其发生的时间。
- b)、对不合理数据再次进行判别，挑出符合实际情况的有效数据，回归原始数据组。
- c)、将备用的或可供参考的传感器同期记录数据，经过分析处理，替换已确认为无效的数据或填补缺测的数据。
- d)、计算测风有效数据的完整率，有效数据完整率应达到90%。有效数据完整率按下式计算：

$$\text{有效数据完整率} = \frac{\text{应测数目} - \text{缺测数目} - \text{无效数据数目}}{\text{应测数目}} \times 100\%$$

式中：应测数目——测量期间小时数；
缺测数目——没有记录到的小时平均值数目；
无效数据数目——确认为不合理的小时平均值数目。

- e)、验证结果：经过各种检验，剔除掉无效数据，替换上有效数据，整理出至少连续一年的风场实测逐小时风速风向数据，并注明这套数据的有效数据完整率。编写数据验证报告，对确认为无效数据的原因应注明，替换的数值应注明来源。
- **数据订正目的**：数据订正是根据风场附近长期测站的观测数据，将验证的风场测风数据订正为一套**反映风场长期平均水平**的代表性数据，即风场测风高度上代表年的逐小时风速风向数据。
 - 当地长期测站宜具备以下条件才可将风场短期数据订正为长期数据：a) 同期测风结果的相关性较好；b) 具有30年以上规范的测风记录；c) 与风场具有相似的地形条件；d) 距离风场比较近。
 - 代表年确定方法：根据气象站近30年各年平均风速，选择**年平均风速等于或接近30年年平均风速**的年份，定义为**平均风速年**，即**代表年**。
 - 方法：十六扇区相关性分析
 - 大风年（测风年>代表年）：**负订正**；小风年（测风年<代表年）：**正订正**
 - 将风场短期测风数据订正为代表年风况数据的方法如下：

- 1) 作风场测站与对应年份的长期测站各风向象限的风速相关曲线：某一风向象限内风速相关曲线的具体作法是：
 - 1、建一直角坐标系，横坐标轴为长期测站风速，纵坐标轴为风场测站的风速；
 - 2、取风场测站的该象限内的某一风速值（某一风速值在一个风向象限内一般有许多个，分别出现在不同时刻）为纵坐标，找出长期测站各对应时刻的风速值（这些风速值不一定相同，风向也不一定与风场测站相对应），求其平均值作为横坐标即可定出相关曲线的一个点，对风场测站在该象限内的其余每一个风速重复上述过程，就可作出这一象限内的风速相关曲线；
 - 3、对其余各象限重复上述过程，可获得16个风场测站与长期测站的风速相关曲线。
- 2) 对每个风速相关曲线，在横坐标轴上标明长期测站多年的年平均风速，以及与风场测站观测同期的长期测站的年平均风速，然后在纵坐标轴上找到对应的风场测站的两个风速值，并求出这两个风速值的代数差值（共有16个代数差值）。
- 3) 风场测站数据的各个风向象限内的每个风速都加上对应的风速代数差值，即可获得订正后的风场测站风速风向资料。

• 数据订正的方法

- 1) $y=ax+b$ ；2) 订正值 $\Delta=a$ （ V 代表年- V 测风年）；3) 代表年=测风年+订正值 Δ

- 数据处理目的：将订正后的数据处理成评估风场风能资源所需要的各种参数，包括不同时段平均风速和风功率密度、风速频率分布和风能频率分布、风向频率和风能密度方向分布、风切变指数和湍流强度等。

- 1、平均风速和风功率密度：月平均、年平均；各月同一钟点（每日0点至23点）平均、全年同一钟点平均风功率密度：

$$D_{wp} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\rho)(v_i^3)$$

- 季节变化明显：冬春季较大，夏秋季较小日变化：白天较小，晚上较大（不同地方，变化规律不同）
- 用各月的风速（或风功率密度）日变化曲线图和全年的风速（或风功率密度）日变化曲线图，与当地同期的电网日负荷曲线对比；风速（或风功率密度）年变化曲线图，与当地同期的电网年负荷曲线对比，两者相一致或接近的部分越多越好，表明风电场发电量与当地负荷相匹配，风电场输出电力的变化接近负荷需求的变化。
- 2、风速频率和风能频率分布：以1m/s为一个风速区间，统计每个风速区间内风速和风能出现的频率。每个风速区间的数字代表中间值，如5m/s风速区间为4.6m/s到5.5m/s。

- **3、风向频率及风能密度方向分布：**计算出在代表16个方位的扇区内风向出现的频率和风能密度方向分布。风能密度方向分布为全年各扇区的风能密度与全方位总风能密度的百分比。风能密度表达式为：

$$D_{WE} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (\rho)(v_j^3) t_j$$

- 风电场内机组位置的排列取决于风能密度的方向分布和地形的影响。在风能玫瑰图上最好有一个明显的主导风向，或两个方向接近相反的主风向。在山区主风向与山脊走向垂直为最好。
- **4、风切变指数和湍流强度等：**推荐用幂（指数）定律拟合，风切变幂律公式如下：

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{\alpha}$$

- 风切变指数 α 用下式计算：

$$\alpha = \frac{\lg(v_2/v_1)}{\lg(z_2/z_1)}$$

- 如果没有不同高度的实测风速数据，风切变指数 α 取1/7（0.143）作为近似值。注：近地层任意高度的风速，可以根据风切变指数和仪器安装高度测得的风速推算出来。估算风力发电机组发电量时需要推算出轮毂高度的风况。
- **5、湍流强度：**10min湍流强度按下式计算：

$$I_T = \frac{\sigma}{V}$$

- **6、50年一遇最大风速（用来确定风机等级）**

$$V_{50\max} = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\ln \left(\frac{50}{50-1} \right) \right]$$

风力机等级	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	由设计者规定各参数
A $I_{\text{ref}}(-)$	0.16			
B $I_{\text{ref}}(-)$	0.14			
C $I_{\text{ref}}(-)$	0.12			

表中：各数值应用于轮毂高度。

V_{ref} 表示参考风速 10 分钟的平均值，

A 表示较高湍流特性级，

B 表示中等湍流特性级，

C 表示较低湍流的性级

I_{ref} 表示在 15m/s 时湍流密度的期望值。

- 通过对风电场测风塔一年测风数据的分析处理，采用参考气象站系列资料评价风资源数据的代表性，并推算代表年各风能要素。以测风塔为代表的风电场场址风能资源评价结论如下：
 - 一、经过代表年订正后的测风塔各高度全年**平均风速**分别为 m/s；相应的**风功率密度**分别为 W/m2。**风电场风功率密度**等级 ， 风能资源较好，具有开发价值。
 - 二、风场区域代表年70m全年**主导风向**，频率%， **风能密度分布最大方向**，频率%
 - 三、风电场址海拔高度在 m之间， **空气密度**为 kg/m3。
 - 四、测风塔代表年70m高度3m/s～25m/s全年**有效风速小时数**分别为 h， 占总数的%
 - 五、风电场轮毂高度处**50年一遇最大风速**为 m/s。风速15m/s的**湍流强度**较小。根据国际电工协会IEC61400-1（2005）标准判定本风电场工程可以选择 类风力发电机组。

8.4 风电场对周边环境的不利影响

- 不利影响：**噪声，废弃物，电磁辐射，光影，生态环境破坏，对鸟类迁徙影响
 - 1、噪声：**风力机噪声来源主要包括**机械噪声、空气动力学噪声和电磁性噪声**。机械噪声主要有齿轮箱和发电机等部件发出的噪声，此外还有冷却风扇、偏航系统等噪声。空气动力学噪声分为流入湍流与叶片相遇使得空气动力学负荷变化产生的噪声、湍流边界层与叶片后缘相遇产生的噪声、叶片后缘引起涡流分离产生的噪声；电磁性噪声有发电机、电气设备发出的电磁噪声
 - 噪声的表示用源噪声级别Lw和接受声音处的噪声级别LP来描述。单位都为分贝（dB） 。其中：

$$L_W = 10 \lg \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

W – 声源的声强水平；

W_0 – 参考声强水平，一般取 $10^{-12}W$

$$L_P = 10 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

P – 声压

P_0 – 参考声压，一般取 $2 \times 10^{-5} Pa$

- **噪声的控制方法：**噪声系统由三个要素构成：**声源、传播途径、接受者**。
 - 1、从声源上根治噪声。合理选择材料和改进机械设计来降低噪声；2、在传播途径上降低噪声。如利用噪声源的指向性合理布置声源位置，噪声源指向无人或对安静要求不高的地区；3、在噪声接受点采取防护措施。可进行吸声处理。
- **2、电磁辐射：**一切电气设备在运行时都会产生电磁辐射 对风力发电机组而言，辐射源有发电机、变电所、输电线路等部分
- **3、电波干扰：**风力发电会对住家电视无线电波产生干扰，包括屏蔽干扰、反射干扰以及电视图像振颤。
- **4、光影影响：**风电机组不停地转动的叶片，在太阳入射方向下，投射到居民住宅的玻璃窗户上，即可产生一种闪烁的光影，即**风机光影影响**。风电机组的光影影响范围取决于**太阳高度角**的大小，**太阳高度角越大，风机的影子越短**，太阳高度角越小，风机的影子越长。
- **5、废弃物：**废水：由于风电场自动化程度较高，运行和维修人员较少，假设，风电场现场每天按4人或5个值班。每人按120L/天生活用水计，其排放量按用水量的80%计算，生活污水量约为175t / 年。固体废物：固体废物主要为少量的生活垃圾，产生量约为1.05t / 年。废油：变压器油定期更换时(通常更换周期为3—5年)，将有少量的废弃油产生，产生量约为0.6t / 年。
- **6、对周围植被、土壤的污染：**风电机在初装、调试及日常检修中要进行拆卸、加油清洗等，此时如不注意就会造成漏油、滴油、油布乱扔等现象，对植被、土壤形成污染；风电场在建设中风机基座、铁塔基座及道路施工和建设都要对土壤及植被造成一定的破坏。
- **7、对鸟类等生态系统的影响：**影响候鸟迁徙路径；鸟类与风力发电机组冲撞致死；涉及繁殖、获取食物所经过路径的中断或阻碍。

复习提纲 (5)

• 第九章 风电大规模并网带来的问题及对策

• 9.1 风电场大规模并网给电能质量带来的主要问题

• 2. 电能质量

- 风能因具有**随机性、间歇性和不可调度性**的缺点，随着风电机组单机容量和风电场规模的增大，并网后风电机组功率连续波动和本身产生电力脉动给电力系统的**电能质量**带来负面影响，需要研究风电的特性和评估其对电能质量的影响。
- **风力机输出功率**随着**风速**随机变化，风电场注入电网的有功功率和吸收的无功功率也会有所改变，引起**风电场母线及附近电网电压的波动**；同时，风力发电机组并网和脱网、补偿电容器的投切等操作时对电网电压造成冲击。
- **2.1 电压偏差**：风力发电机组在其并网运行时需要从系统中吸收大量无功功率，所以风电场的电压往往很低，特别是当地方电力系统电压等级较低和系统容量较小时尤为严重，**机端需要并联电容器，进行无功补偿**。
 - 大型并网风电机组：**动态无功补偿装置**
 - 风电场的无功损耗主要由4部分组成：1、**箱式变压器**，将风力机的电压从690V升压到10kV或35kV；2、**集电线路**，风力机的电力经过箱式变压器升压后通过集电线路将电力送至风电场升压站；3、**升压变压器**，风电场升压站内升压变压器将集电线路送来的电力升压后送出；4、**风电场送出线路**，升压变压器将风电电力升压后经送电线路接入电力系统
 - 风电场无功补偿计算方法
 - 电网中的电力负荷如电动机、变压器等，大部分属于感性负荷，在运行过程中需向这些设备提供相应的无功功率。
 - 在电网中安装**并联电容器等无功补偿设备**以后，可以提供**感性负载**所消耗的**无功功率**，减少了电网电源向感性负荷提供、由线路输送的无功功率，由于减少了无功功率在电网中的流动，因此可以降低线路和变压器因输送无功功率造成的电能损耗，这就是**无功补偿**。
 - 电网基本元件：电阻性质的电器：电阻丝、加热和发光装置；电感性质的电器：电动机、变压器等；电容性质的电器：电容器、电缆等
 - 无功补偿基本概念
 - **1、功率、功率因数**：电网中，功率分为**有功功率、无功功率和视在功率**。交流电网中，由于有阻抗和电抗的同时存在，所以电源输送到电器的电功率并不完全做功。有一部分电功率（电感和电容所储存的电能）仍旧回输到电网。因此，**凡实际为电器（电阻性质）所吸收的电功率称为有功功率P**（单位为W）；**电感和电容所储的电能回输到电网，这部分功率在电源与电抗之间进行交换不消耗，称为无功功率Q**（单位为乏Var）如电磁元件建立磁场占用的电能，电容器建立电场所占的电能

- **视在功率S即电流与电压的乘积**，单位为VA或kVA。在交流电路中，电压与电流之间的相位差(Φ)的余弦叫做功率因数，用符号 $\cos\Phi$ 表示，在数值上，功率因数是有功功率和视在功率的比值，即 $\cos\Phi=P/S$ 。
- 如用户负载的功率因数较小，视在功率较大，为了满足用户的用电需求，需要增大供电线路和变压器的容量，增加了供电投资和线路网损；负载的功率因数过低，供电设备的容量不能充分利用，在一定的电压下向负载输送一定的有功功率时，通过输电线路的电流增大，导线电阻的能量损耗和导线阻抗会造成电压下降。
- 风电场的无功补偿在很多标准中均有规定如《风电场接入电网技术规定Q/GDW392-2009》中规定：通过风电汇集升压站接入公共电网的风电场，其配置容性无功补偿容量能够补偿风电场满发时送出线路上的无功损耗；其配置感性无功补偿容量能够补偿风电场空载时送出线路上的充电功率。《电力系统无功补偿配置技术原则（Q/GDW212-2008）》中规定：风电场无功补偿装置容量总和不小于风电装机容量的30%~50%，风电场内集中无功补偿容量不低于风电场无功补偿装置容量的40%~60%，或经计算分析得出。
- **无功补偿装置的作用**：1、提高线路输电稳定性；2、维持受电端电压，加强系统电压稳定性；3、补偿系统无功功率，提高功率因数；4、谐波动态补偿，改善电能质量；5、抑制电压波动和闪变；6、抑制三相不平衡。
- 风电场的无功补偿容量不足，会从电网中吸收无功造成电压降低，同时由于功率因数问题，风电场也会受到电网的罚款；风电场的无功补偿容量特别是动态无功补偿容量过大，会造成风电场的运行费用高或者设备长期闲置，容易锈蚀老化。
- 目前常用的无功补偿装置主要有：**磁控式电抗器**(Magnetic Control Reactor, MCR)**静止无功补偿器**(Static Var Compensator, SVC)**静止同步补偿器**(Static Synchronous Compensator, STATCOM)三种补偿装置的基本功能相似，但其在技术原理、性能指标、实施效果上有较大区别。
 - 磁控式电抗器MCR属于第二代无功补偿装置，其基本原理是**调节**磁控电抗器的**磁通**来调节其输出无功电流，仅采用**少量**的**晶闸管**器件。
 - 其优点是：由于仅采用少量的晶闸管，其成本相对较低；关键器件为磁控电抗器，可直挂35kV电网。
 - 其缺点是：响应速度较慢（通常为秒级），输出谐波含量较大且波动范围较大，实际损耗较大（一般大于2%）。MCR产品在国内出现于上世纪90年代，由于其电抗器制造难度较大、损耗大等缺点，在国内没有得到大规模的推广
 - 静止无功补偿器SVC也属于第二代无功补偿装置，其基本原理是**调节**晶闸管的**触发角度**来调节串联电抗器的输出感性无功电流，

其输出的容性无功电流需要通过并联电容器来解决。

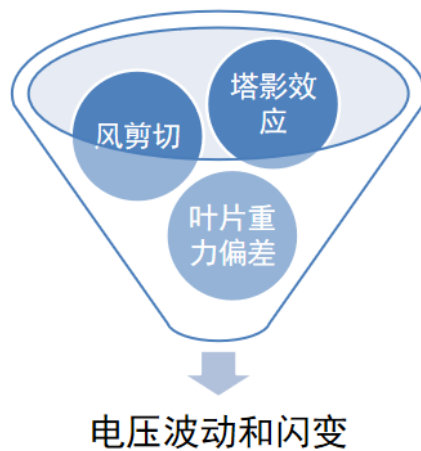
- 其优点是：技术稍先进，因采用晶闸管器件（半控型器件），响应速度较快，能够迅速连续调节系统无功功率，具有较强的动态无功补偿的能力。
- 其缺点是：需要采用大量的晶闸管元件，成本较高；谐波含量大且波动范围大，因此需要加装不同次的滤波装置，易与系统发生谐振造成电容器爆炸或电抗器烧毁事件，大量应用易造成系统不稳定；占地面积大，施工周期较长。
- 静止同步补偿器STATCOM属于国际上最新的第三代无功补偿装置，其基本原理是以电压型逆变器为核心的一个电压、相位和幅值均可调的**三相交流电源**，可发出感性或容性无功功率。
 - 其优点是：技术先进，因采用IGBT件（绝缘栅双极晶体管）响应速度较快，能够迅速连续调节系统无功功率，能够抑制电压波动和闪变；对系统电压跌落不敏感，可在低电压下稳定运行，具有较强的低电压穿越能力；谐波含量很小，且不与系统发生谐振，不需要加装滤波装置；占地面积小且施工周期短；运行损耗小（1%左右）。
 - 其缺点是：需要采用大量的IGBT元件（其价格高于晶闸管），成本较高。

• 2.2电压波动和闪变

- **电压波动**：电压幅值在一定范围内（通常为额定值的90%~110%）有规律或随机地变化。
- 软并网方式，启动时冲击电流



- 闪变对并网点短路电流水平和电网的阻抗比十分敏感。
- 风电机组的固有特性也可能会引起电压波动和闪变。电压波动和闪变是风力发电对电网电能质量的主要负面影响之一，电压波动和闪变通常会引起许多电工设备不能正常工作，如影响电视画面质量、使电动机转速脉动、使电子仪器工作失常、影响自动控制设备的正常工况、使白炽灯光发生闪烁等。



- 合适的 X/R 比可以使有功功率引起的电压波动被无功功率引起的电压波动补偿掉，使平均闪变值有所降低。电网线路的 X/R 比是影响风电机组引起的电压波动和闪变的重要因素。



- 影响并网风力发电机组输出功率的波动因素：风况；风力发电机组类型；控制系统；电网状况（短路容量、线路 X/R 比和负荷特性）
- 在运行过程中的电压闪变是由功率波动引起的，而功率波动主要源于风速的变动、塔影效应影响和风力机机械特性等。在切换操作过程中也产生闪变，典型的切换操作是风电机组的启动、停机和发电机切换，输出功率发生一定的变化，将导致公共连接点的电压变化，而电压变化将产生闪变。

9.2 风电场的无功损耗的组成部分及各部分的功能，无功补偿装置的计算方法

- 风电场无功损耗构成：主要由 4 部分构成：

- ① 箱式变压器：箱式变压器将风机的电压由690V 升压到10kV 或 35KV，一台风机对应一台箱式变压器，750KW 的风机一般选择800KVA 的箱变

1、变压器工作原理

- 1.1 变压器的电压变换：变压器的基本原理是利用电磁感应现象实现一个电压等级的交流电能到另一电压等级交流电能的变换。变压器的核心部件是铁心和绕组，铁心用于提供磁路，缠绕于铁心上的绕组构成电路。与电源相连的一侧为一次绕组（输入端），与负荷相连的一侧为二次绕组（输出端）。一次绕组和二次绕组一般没有电气上的连接，而是通过铁心中的磁场建立联系。

- 对于理想变压器，感应电压、电流和绕组匝数之间 有如下关系：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

- 每台变压器可以长期流过的最大功率，规定为它自身的**额定容量**，以kVA来标定。
- 1.2 变压器的结构：大多数电力变压器均为**油浸式变压器**，即以油作为绝缘和冷却介质，所用的油一般为**矿物油**。油浸式变压器由其核心部件（即实现电磁转换的**铁心和绕组**）、用于调整电压变化的分接头和分接开关以及**油箱和辅助设备**构成
 - **铁心**：变压器铁心的作用是**为经过一次绕组和二次绕组的磁通提供低磁阻的磁路**。当磁通的大小和方向发生变化时，铁心材料的分子重新排布需要消耗一定的能量，这部分损耗与铁心的磁滞现象有关，称为**磁滞损耗**。磁通变化时，铁心自身也像绕组一样，会感应出一定的电压和电流，由于这种电流只在铁心的各个小局部循环，因此被称为**涡流**。涡流会在铁心材料（具有电阻）上形成有功损耗，称为**涡流损耗**。铁心中的磁滞损耗和涡流损耗统称为**铁心损耗**，简称**铁损**。为了降低损耗和噪声，目前**常用的铁心材料**为晶粒取向电工钢片、高导磁电工钢片、磁畴细化的电工钢片、非晶合金、微晶钢片等高导磁低损耗材料。**为了防止铁心内的涡流循环**，铁心叠片上一般带有高质量的**绝缘涂层**，也可采用附加绝缘层。为了充分利用圆形绕组的内部空间结构，常将**电工钢带叠积成尽可能接近圆形截面的铁心柱**。
 - **绕组**：常用的三相心式铁心的变压器，其**高低压绕组同心缠绕于铁心柱上**。考虑到和铁心的绝缘，以及分接绕组一般都接于高压绕组，**一般将低压绕组靠近铁心布置**。低压绕组通常都绕制在由绝缘材料（合成树脂粘结纸板）制成的硬纸筒上；**高压绕组**的导线截面积比低压绕组的导线截面积要小得多，但高压绕组的匝数却可能是低压绕组匝数的很多倍。高压绕组一般绕制成**饼式结构**。变压器绕组绝大多数用**铜**制成，也有部分采用**铝**作为导体材料。对于所有**容量大于几千伏安**的变压器，其绕组导线截面都为**矩形**。在绕组每匝导线内部的**单股导线之间必须相互绝缘**，每匝导线也要**与邻近的线匝绝缘**。这种绝缘就是在导线上沿螺旋方向连续包扎的绝缘纸带，并且至少要包两层绝缘纸，以便外面一层绝缘纸能够覆盖里面一层绝缘纸的接缝间隙。
 - **调压方式与分接开关**：很多变压器在运行时，可以实现电压的调整。调压的方式有**无励磁调压(无负载调压)**和**有载调压**。**无励磁调压**需要在变压器停电以后，通过螺栓来实现绕组连接位置的变换。**有载调压方式**则可

以在变压器带电运行时通过有载分接开关实现对电压的调整。大部分电力变压器**将分接线设置在高压绕组上**：**因为**(1)设置分接线的目的是为了补偿外施电压的变化，对于除发电机变压器以外的大多数电力变压器而言，其外施电压都是加在高压绕组上的。(2)由于高压绕组内流过的电流较小，因而需要的分接线尺寸也较小，相应分接开关本身通过的电流也小。调压的实现，依赖于**绕组匝数的变化**，也就是**利用分接绕组来调整原边和副变的匝数比**。在有载调压中，分接位置的变化，需要依靠**分接开关**来实现。要求在分接变换过程中，不切断负荷电流；绕组的任何部位都不出现短路现象

- **变压器油**：油浸式变压器的变压器油主要用于**散热和充当绝缘介质**。变压器的有效冷却很重要。对大多数变压器来说，矿物油是吸收铁心、绕组热量，并将其热量传递给自冷或风冷外表面的最有效介质，有时要借助强迫油循环方式。
- **油箱、储油柜与附属设备**：变压器油箱绝大部分采用**钢板制造**，其**顶盖可以拆除**，箱盖通常用箱沿固定，**箱盖通常与水平面有1°的斜度**，以防箱盖外表面积聚雨水。油箱上必须设置**用于注油或放油的阀**，在需要时还要增设油样阀。在油箱上还要设计适量的可拆卸的小盖板。变压器油箱必须设有一个或多个**安全装置**，以便释放突然升高的内部压力。在使用储油柜的结构中，可以将变压器主油箱的**油注到顶盖位置**，从而在需要时可以在顶盖上安装套管。使用储油柜最重要的特点在于，它可以**减小变压器油与大气的接触面积**，从而减小油的氧化速度和氧气在油中的溶解程度，而溶解在油中的氧气能缩短油的绝缘寿命。带储油柜的变压器还可以使用**气体继电器**。气体继电器通常安装在**储油柜通向油箱的连管上**。**套管是将油箱内部的电气连接引出的部件**。
- **其它附件**：在箱盖上设置一个（或几个）**温度计座**用于测量变压器顶部油温度；**一块接线牌或铭牌**用于详细标示变压器基本参数；**一个接地端子**用于变压器主油箱接地。

• 2、大型风电场中常采用**二级或三级升压**的结构

- 在风电机组出口装设满足其容量输送的变压器将690V电压提升至10kV或35kV；在汇集后送至风电场中心位置的升压站，经过升压站中的升压变压器变换为110KV或220kV送至电力系统。如果风电场装机容量更大，达到几百万千瓦的规模，可能还要进一步升压到500kV或更高，送入电力主干网。
- **风机出口的变压器**一般归属于风电机组，需要**将电能汇集后送给升压站**，也称为**集电变压器**
- **升压站中的升压变压器**，其功能是将**风电场的电能送给电力系统**，因此也被称为**主变压器**
- 为**满足风电场和升压站自身用电需求**，还设置有**场用变压器或所用变压器**
- ② **集电线路**：风机的电力经过箱式变压器升压后通过集电线路将电力送至风电场升压站，一般一个50MW的风电场要通过3回以上的35KV线路将电力送至升压站主变压器的低压侧。

- ③ **升压变压器**：风电场升压站内升压变压器将集电线路送来的电力升压后送出，66kV 和110KV 主变一般选用50MVA、100MVA 的变压器，220kV主变一般选用100MVA、150MVA，330kV 主变一般选用240MVA。
- ④ **风电场送出线路**：升压变压器将风电电力升压后经送电线路接入电力系统。
- 风电场无功损耗计算示例：以华能阜新阜北风电场为例进行无功损耗计算。阜新阜北风电场总装机容量为300MW。风电场采用大连重工起重集团公司生产的单机容量1.5MW风电机组，装机200台，风机功率调节采用变速、变桨方式，发电机类型采用双馈异步发电机。阜北风电场建设两个220KV升压站，分别为中心升压站和东区升压站，两个升压站用一回11.5Km(LGJ-300)型号的220KV送电线路连接，然后经过50Km220KV送点线路接入松涛220KV变电站。
- **1、箱式变压器的无功损耗**：1.5MW 的风力发电机组，机端电压为690V，经过1600KVA 的箱式变压器升压升至35KV，变压器的空载电流I₀%为0.9，变压器的短路电压U_k%为4.5。箱式变压器的损耗用下列公式计算

$$X_T = \frac{U_e^2}{S_e} \times \frac{U_k\%}{100}$$

$$\Delta Q_T = \frac{1}{n} \times \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X_T + n \times \frac{I_0\%}{100} \times S_e$$

式中：X_T为变压器电抗的有名值；

ΔQ_T为变压器的无功损耗；S_e为变压器额定容量；

U_e为额定电压；P和Q分别为通过变压器的有功功率和无功功率；

n为变压器并列运行的台数，本例中n为1。

计算风机满发情况下箱式变压器的损耗，P=1500KW，Q=0kVar，U_e=35kV，S_e为1.6MVA，I₀%=0.9，U_k%=4.5，经过计算风机满发时，单台箱式变压器的无功损耗为77.68KVar。

阜北风电场总计200台1500KW的风力发电机，200台箱式变压器的总无功损耗为15.536MVar。

$$\Delta Q_T = \frac{1}{1} \times \frac{1500^2 + 0^2}{35^2} \times \frac{35^2}{1600} \times \frac{4.5}{100} + 1 \times \frac{0.9}{100} \times 1600 = 63.28 + 14.4 = 77.68(\text{Kvar})$$

- **2、35kV集电线路损耗**：阜北风电场35kV集电线路总共18回，总长度61.2km，见表1所示。

表 1 35kV 集电线路统计表

序号	风机编号	台数	长度/km
第 1 回	1~10、12、14、16	13	2.16
第 2 回	11、13、15 和 17~24	11	0.48
第 3 回	25~28、30~32、33~38	13	1.80
第 4 回	29、49~55、39~42	12	0.36
第 5 回	56~59、43~48	10	1.32
第 6 回	87~99	13	2.64
第 7 回	82~86、100~106	12	0.36
第 8 回	72~74、76~81、71、69	11	3.36
第 9 回	60~68、70、75	11	0.12
第 10 回	126~133	8	3.36
第 11 回	115~125	11	0.12
第 12 回	107~114	8	5.88
第 13 回	134~143、160~162	13	0.36
第 14 回	147~159	13	1.2
第 15 回	144~146、173~178、180、181	11	2.16
第 16 回	163~172	10	1.32
第 17 回	182~188、179	8	0.12
第 18 回	189~200	12	5.04
总计		200	61.2

表注：导线截面均为 LGJ-120/25。

- 对于一个50MW 的风电场来说，如果送电线路3~5回35 k V集电线路可以精确计算每条集电线路的损耗，而对于一个百万或者千万基地的风电场，精确计算每条集电线路的无功损耗过于烦琐，这里介绍无功损耗的估算方法。
- 阜北风电场共18回集电线路，每回集电线路平均输送有功功率16.67MW，总长为61.2km,每回集电电路平均长度为3.4 k m。

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (4)$$

P =16.67MW，Q取0，X为3.4km 35 k V 导线截面为 LGJ-120 型导线的电抗，X =1.29Ω（通过查找电气工程电气设计手册-可以得到）。
经过计算每回集电线路的平均无功损耗为 0.293MVar，阜北风电场的集电线路总计无功损耗为 5.27MVar。

3、升压变压器无功损耗

- 东区升压站内 1 台 120MVA主变压器下连100.5MW的风电机组，中心升压站内 1 台100MVA 主变压器下连 99MW 的风电机组，另一台 100MVA 主变压器下连 100.5MW的风电机组。

$$X_T = \frac{U_e^2}{S_e} \times \frac{U_k\%}{100}$$

$$\Delta Q_T = \frac{1}{n} \times \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \times X_T + n \times \frac{(I_0\%)}{100} \times S_e \quad (3)$$

- 升压变压器的无功损耗计算与箱式变压器的无功损耗计算相同，见公式（2）和（3），其中升压变压器的空载电流 $I_0\%$ 为 0.19、变压器的短路电压 $U_k\%$ 为 9。

经过计算，在风电满发状态下 3 台主变压器的无功损耗分别为7.8，9.0，和9.3MVar，合计为26.1MVar。

$$\Delta Q_T = \frac{100.5^2 + 0}{(220 \times 10^{-3})^2} \times \frac{(220 \times 10^{-3})^2}{120} \times \frac{9}{100} + \frac{0.19}{100} \times 120 = 7.8$$

风电场两个升压站用一回11.5KmLGJ-300 型号的 220KV 送电线路连接，无功损耗用公式（4）计算，查表得220KV ,LGJ-300 型号导线的单位Km电抗为0.427Ω，经过计算无功损耗为1.02MVar。

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (4)$$

式中 $P = 100.5 \text{ MW}$ ， $Q = 0 \text{ MVar}$ ， $U = 220 \text{ KV}$

• 4、风电场送出线路无功损耗

阜北风电场的 220kV 中心升压站以一回 220kV 送电线路接入松涛 220kV 变电站，线路为 LGJ — 400 × 2 导线，线路长度 50 km。风电送出线路的无功损耗计算见公式（4）。

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (4)$$

$P = 300 \text{ MW}$ ， $Q = 0 \text{ MVar}$ ， $U = 220 \text{ KV}$ ，查表的单位Km的 X 为 0.303，故 50Km 的 $X = 15.2 \Omega$ ，经过计算风电场送出线路的无功损耗为 28MVar。

故风电场的总的无功损耗为 $15.536 + 5.27 + 26.1 + 1.02 + 28 = 75.9 \text{ MVar}$ 。

在阜北风电场并网设计时，按风机功率因数为 1.0 进行考虑，考虑补偿箱式变压器、集电线路、升压变压器的无功损耗以及送出线路无功损耗的一半，阜北风电场安装了 3 组 20MVar 动态无功补偿装置。

• 9.3 谐波污染解决方法

• 解决谐波污染的方法

- 不借助外部设备消除谐波，而是通过不同风机种类的合理排列并网来削弱谐波。通过不同风机型号以及发电机类型产生不同频率、相位的谐波来互相抑制谐波。但这种方法不能彻底消除谐波问题，而且需要对不同型号的风电机组做好建模，并预先进行谐波潮流计算，以确定如何选配风电机组的排列。

- 在变频器两侧安装滤波器，或在风力发电机网侧安装相应滤波装置

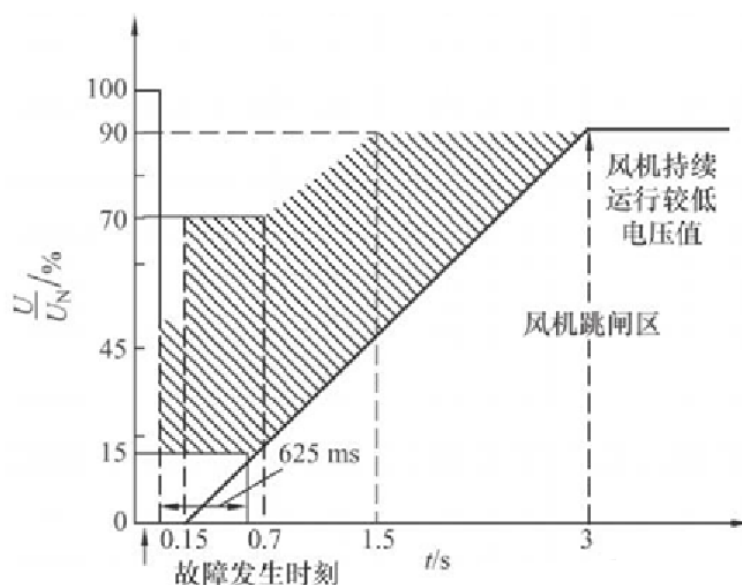
• 无源滤波器：

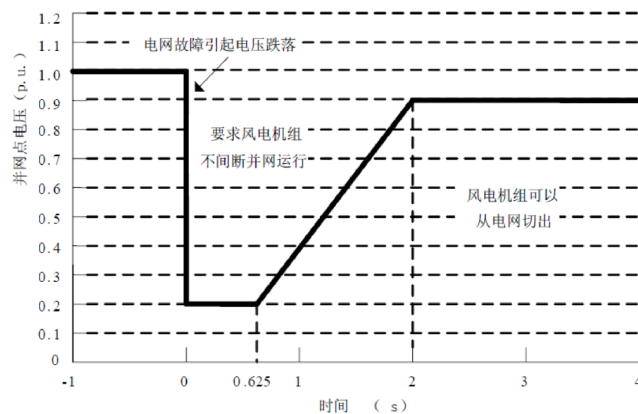
- 通过电容、电感和电阻等元件串联或并联；结构简单，价格低廉，运行可靠；可对某一特定频率的谐波呈低阻抗，为负载谐波电流提供较低的阻抗通道，使得大部分该频率的谐波电流流入滤波器而不流入电网。只能滤去固定次数的谐波，受系统阻抗影响严重，存在谐波放大和共振的危险，补偿效果随负载的变化而变化

• 有源滤波器：

- 有源滤波器采用电力电子元件，是一种能够弥补无源滤波器不足的新型谐波抑制设备，是一种用于动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置，它可对大小变化的谐波以及变化的无功进行补偿。
- 它的基本原理是从补偿对象中检测出谐波电流，由补偿装置产生一个与该谐波大小相等但相位相差 90° 的补偿电流，从而抵消谐波。它为主动检测负载电流，并主动产生和负载谐波电流大小相同、方向相反的谐波电流，实现谐波补偿。可动态滤除各次滤波；不受负载变化影响。

- 无源可以看成额外吸收谐波的负载，被动的吸收谐波，有源可以看成电源，主动的生成反向谐波，从而抵消电网中的谐波。有些情况下，采用有源滤波器和无源滤波器组合而成的混合型滤波器，由电容吸收高次谐波，而有源滤波器提高滤波性能，具有较好的性价比。
- 9.4 低电压穿越设备的定义及我国的基本要求、
 - 风电机组低电压穿越能力问题：
 - 低电压穿越(Low voltage ride through, LVRT)： 指在风机并网点电压跌落的时候风机能够保持并网，甚至向电网提供一定的无功功率，支持电网恢复电压，直到电网恢复正常，从而“穿越”这个低电压时间。
 - 当风电在电网中所占比例较低时，若电网出现故障，风机就实施被动式自我保护而立即解列，不用考虑故障的持续时间和严重程度，从而最大限度地保障风机安全，这种情况是可以被接受的。
 - 当风电在电网中所占比例较大时，若风机在系统发生故障时仍采取被动保护式解列方式，则会增加整个系统的恢复难度，甚至可能加剧故障，最终导致系统其他机组全部解列，此时对风电机组必须要求风电机组具有相应的低电压穿越能力，且必须采取有效的低电压穿越措施，以维护风场电网的稳定。
 - 不同国家和地区所提出的低电压穿越要求不尽相同。仅当电网电压在时间或数值上处于图中曲线下方时，风机才允许解列；而处于曲线以上区域时，风机应保持并网，等待电网恢复。且当电压位于图中阴影区域时，还要求风机向电网提供无功功率支撑，帮助电网恢复。





风电机组应具有在并网点电压跌至 20% 额定电压时能够维持并网运行 625ms 的低电压穿越能力。

风电场并网点电压在发生跌落后 2s 内能够恢复到额定电压的 90% 时，风电机组应具有不间断并网运行的能力。

• 第十章 海上风电简介

• 10.1 海上风能特点

• 10.1.1、海上风能的利用特点

- 1、海上风况优于陆地，海面粗糙度小，离岸10km的海上风速通常比沿岸陆上高约 25%；
- 2、海上风湍流强度小，具有稳定的主导风向，机组承受的疲劳负荷较低，使得风机寿命更长；
- 3、风切变小，因而塔架可以较短；
- 4、在海上开发利用风能，受噪声、景观影响、鸟类影响、电磁波干扰等问题的限制较少；
- 5、海上风电场不占陆上土地，不涉及土地征用等问题；
- 6、对于人口比较集中，陆地面积相对较小、濒临海洋的国家或地区较适合发展海上风电。
- 与陆地相比，海上风能具有自身的显著特点：
 - ①高度上的风速梯度小。
 - ②风湍流强度较低。
 - ③整体风速较高。
- 总的来说，海上风电的质量远高于陆地风电。

• 10.2 海上风电场的分类

- 海上风电分为三类，分别为潮间带和潮下带滩涂风电场、近海风电场和深海风电场。
 - 潮间带和潮下带滩涂风电场,指在沿海多年平均大高潮线以下至理论最低潮位以下5米水深内的海域开发建设的风电场。
 - 近海风电场,指在理论最低潮位以下5米~50米水深的海域开发建设的风电场，包括在相应开发海域内无居民的海岛和海礁上开发建设的风电场。

- 深海风电场,指在**大于理论最低潮位以下50米水深**的海域开发建设的风电场, 包括在相应开发海域内无居民的海岛和海上开发建设的风电场。

• 10.3 近海风电场基础类型及适用范围

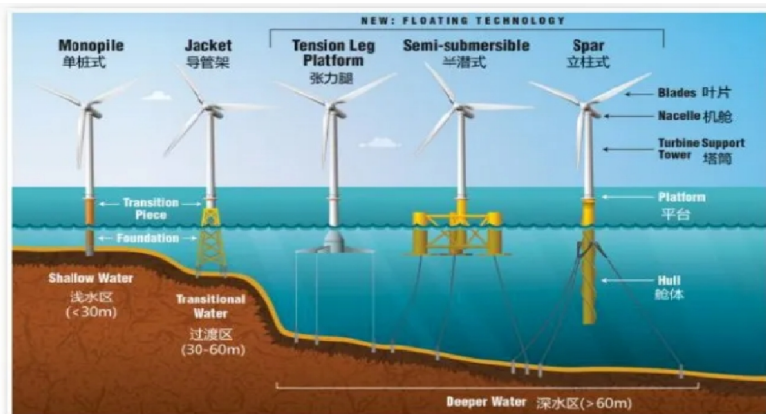
- **基础类型**: 目前研究和应用较多的海上风力发电机组的基础型式主要有**桩基式、重力式、三脚架式、导管架式、负压桶式**。
 - **1、桩基式基础**: 根据桩的数量可以分为单桩基础和多桩基础。单桩基础可由焊接钢管组成,也可采用预制桩。多桩式基础主要有混凝土桩、钢管桩。
 - 桩基础为海上风电采用最多的基础形式之一, 施工方法通常分为两种: 、
 - **1、钻孔灌注**: 该种方式对桩径、桩深限制小, 可施工大直径、大深度桩, 可获得较高的单桩承载力。需要搭设临时水上工作平台, 增加了现场海上作业时间, 采用钻孔灌注桩时需要使用长钢套管护壁, 增加了造价和施工难度。
 - **2、锤击沉桩**: 施工速度快, 成桩质量稳定。常用桩型有PHC桩(预应力高强度混凝土管桩)和钢管桩两种。
 - **2、重力式基础**: 采用混凝土浇筑, 基础体积较大, 适合于海床平坦的浅海
 - **3、三脚架式基础**: 采用三腿支撑结构, 由圆柱钢管构成。
 - **4、导管架式基础**: 典型的导管架式基础为三腿或四腿结构, 由圆柱钢管构成。
 - **5、负压桶式基础**: 形似一个底部敞开、倒置于海底的钢制筒。通过将沉箱中的水抽出形成吸力, 借助水柱的重力压入海床, 适用于砂性土及软粘土。

• 10.4 远海风电机组(飘浮式)采用的基础

- **基础结构—漂浮式(浮体式)**:
 - 漂浮式结构是海上风电机组基础结构的深水结构形式, 主要用于**50 m 以上水深海域**。因此, 一些近海浅水海域风能资源不足的国家, 如美国和日本, 发展浮式结构是利用海上风能资源的唯一选择。相较于近海风电, 深远海域风资源条件更优、限制性因素更少、能通过规模化开发降本增效, 未来开发潜力巨大。
 - 漂浮式: 海上大型漂浮式风电机组最早由美国马萨诸塞大学安默斯特分校的Heronemus教授于1972年提出, 但由于其开发难度远远大于陆地风电机组, 直至20世纪90年代才有一些国家开始尝试, 目前正处于发展的早期阶段, 但有望快速增长, 在未来十年多一点的时间内实现完全商业化。
 - **优点**:
 - 现今的底座式技术被限制在了水深浅于50m的水域, 在更深的水域当中, 支持部分需要有更复杂的结构, 而与之不同的是, 浮体式的支持结构是一种完全不受水深以及海床状况影响的结构, 这类结构可以被安装在远海, 在这些地方, 更高的风速允许更高效、更经济的风机的应用。浮体式支持结构已经被用于例如海上油田等领域, 此类应用在近些年来激励了专为大型风机设计的支持结构。
 - 2021年7月, 我国首个漂浮式海上风电平台, 搭载全球首台抗台风型漂浮式海上风电机组, 组成“**三峡引领号**”, 在广东阳江海上风电场顺利安装漂浮式海上风电机组及平台位于南海海域, 单机容量5.5兆瓦, 由三峡能源牵头, 联合三峡集团上海勘测设计研究院等科研机构以及国内风机厂商自主研发。2024年7月3日, 全球单体容量最大

的漂浮式风电平台“**明阳天成号**”在中国船舶黄埔文冲正式完成安装；10月10日，中国自主研发的全球最大功率漂浮式风电机组在江苏射阳成功下线。

- 漂浮式海上风电基础形式主要有**单立柱式(Spar)**、**张力腿式基础(TLP)**、**半潜式平台(SEME)**等型式



图说：适应不同水深的海上风电基础结构示意图

- **①单立柱式基础（Spar结构）**

- **适用条件：**水深100m及以上。
- **优点：**适用海域较深，稳定性好，可移动和重复利用，可提高漂浮式风机的整体性能，保证平台的稳定性。
- **缺点：**垂向运动小，水线面小，基础纵/横摇运动受波浪影响明显。其整体长度过大，给制造和安装提出了巨大挑战。

- **②张力腿式基础（TLP）**

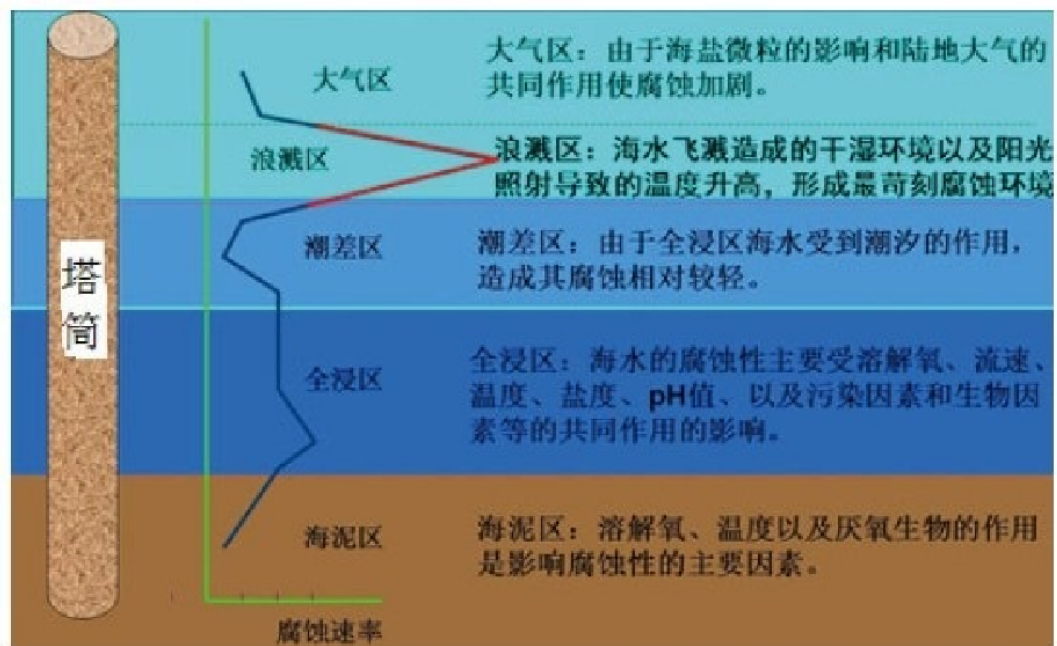
- **适用条件：**适用水深50m及以上。
- **优点：**水线面较大，运动性能好，可移动和重复利用。
- **缺点：**稳定性一般，上部结构易与系泊系统共振，系泊系统复杂，安装费用高。随着水深的增加，张力腿式基础的建造成本会急剧增加，不太适合深海区域。

- **③半潜式平台(SEME)**

- **适用条件：**适用水深50m及以上。
- **优点：**适用水深范围广，吃水小，水线面较大，稳性好，可移动和重复利用。安装方便，可在近岸调试好后拖到风电场利用锚链（悬链线）定位。
- **缺点：**垂向运动较大，基础水平运动受波浪影响较大

- **塔筒腐蚀**

- 目前广泛采用的是管塔式塔架，即通常所说的塔筒。管塔式塔架用钢板卷制焊接而成，具有结构紧凑、安全可靠、维护方便、外形美观等，但也存在比较严重的腐蚀问题。



海洋环境腐蚀倾向



不同海洋带塔筒防腐保护技术

• 第十一章 分布式发电技术

• 11.1 分布式发电定义

- **分布式发电:** 在一定的地域范围内, 由**多个**甚至**多种形式**的发电设备共同发电, 以**就地满足**较大规模的用电要求。

• 11.2 分布式供电系统的组成

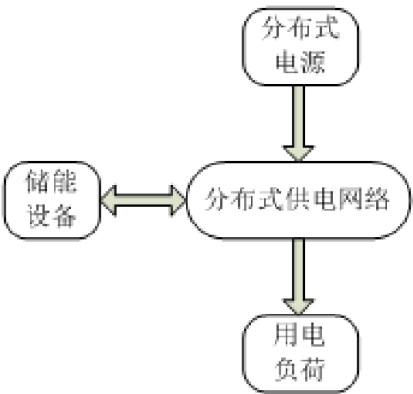
- **分布式供电系统**一般由**分布式电源**、**储能设备**、**分布式供电网络及控制中心**和**附近的用电负荷**构成, 如果与公共电网联网运行就还包括并网接口。
 - **分布式电源**可以是分布式电源的任何一种或几种, 电力输出可能是交流电 (如风力发电、微燃机), 也可能是直流电 (如太阳能光伏电池和燃料电池)。

- **储能设备**，是在发电量过大时储存系统中剩余的能量，或在发电不足时释放能量补充缺额。
- **分布式供电网络**可以是交流系统，也可以是直流系统。其中的控制中心用于监控整个分布式供电系统的工作情况，包括电源的发电情况、负荷的用电情况、储能设备的能量控制以及分布式供电网络中的电压、电流等是否正常。
- 由于分布式电源、用电负荷以及储能设备都有可能是交流电气设备，也可能是直流电气设备，因此需要有电力变化设备，包括**整流器 (AC/DC)** ,**逆变器 (DC/AC)**
- 分布式供电系统的并网接口也是某种形式的电力变换设备，如逆变器。并网接口可能不止一个，可能是每个分布式电源都通过一个并网接口与电网相连。不同容量的分布式电源并网，适用的电压等级可参照下表确定：

分布式电源容量范围	并网电压等级
几千瓦至几十千瓦	4KV
几百千瓦至9MW	10KV、35KV
大于9MW	35KV、66KV、110KV

11.3 储能装置在分布式供电系统中的作用

- 储能装置在分布式系统中的作用



- (1) **平衡发电量和用电量**
- (2) **充当备用或应急电源**
 - 某些分布式电源受自然条件影响而减少甚至不能供电时，储能系统就像**备用电源**，可临时维持供电。此外，基于**系统安全性**的考虑，分布式发电系统也可以保存一定数量的电能，用以应付突发事件。
- (3) **改善分布式系统的可控性**
 - 储能系统可调节分布式系统与大电网的能量交换，将难以准确预测和控制的分布式电源，整合为能够按计划输出电能的系统，使其成为可以调度的发电单元，从而减轻对大电网的影响，提高大电网对分布式电源的接受程度。
- (4) **提供辅助服务**
 - 通过功率波动的抑制和快速的能量吞吐，可明显改善分布式发电系统的电能质量。
 - 增强了分布式发电系统可控性，在用电高峰时分担负荷，在发生局部故障时提供紧急功率支持，等等。

- 可见，储能装置在分布式发电系统中是非常重要的。

- 第十二章 风能的其他应用

- 12.1 几种风力提水机组的适用范围

- 1、风力直接提水

- 又可以分为高扬程小流量型、中扬程中流量型和低扬程大流量型。

- 1、高扬程小流量型风力提水机组

- 多采用往复式水泵
 - 由低速多叶片立轴风力机与活塞水泵相匹配组成提水机组。
 - 风轮直径一般小于6m，扬程为20-200m，流量为0.5-5m³/h。
 - 主要用于提取深层地下水，适用于北方地区（见书p217页图9.2），如草原牧区。
 - 风力机部分由风轮、机头、尾翼、塔架和刹车机构等组成。
 - （1）风轮由轮毂、轮臂、内外支承圈、叶片托板和叶片等构成。叶片一般为16-24片。
 - （2）机头也叫传动箱，包括箱体、风轮轴、大小减速齿轮、连杆、导轨、丁字头、滚轮等零部件。作用是把风轮的旋转运动变为拉杆的上下往复运动。拉杆与活塞泵的泵杆相连，带动活塞往复运动进行提水。
 - （3）尾翼通过倾斜的销轴和拉筋与机头传动箱上的斜销孔铰接。
 - （4）塔架支撑着机头上的所有部件。通常采用三棱形桁架结构。
 - （5）刹车采用蜗轮蜗杆传动。
 - 配套水泵由护网、进水接头、上活塞总成、下活塞总成、泵管、泵缸和泵杆等部件组成。
 - （1）护网在泵的最底部，起过滤作用。
 - （2）进水接头时泵与护网之间的连接件的内孔采用锥面。
 - （3）上活塞总成与泵杆相连，和泵缸是水泵的主要工作部件。
 - （4）下活塞总成由阀座、阀门、皮碗和下活塞等零件构成
 - 工作原理：当风轮在风力作用下转动后，动力经过传动箱带动风力机拉杆向上运动，与拉杆相连的泵杆和上活塞也随之向上移动。此时上活塞的阀门被关闭，上下活塞之间形成具有一定真空度的空腔。由于压力差的作用，下活塞的阀门被打开，井水通过护网进入空腔；风轮继续转动，带动风力机拉杆向下运动时，泵杆和上活塞也随之进入下行程，上下活塞之间的空腔容积减少。在水的压力之下，下活塞阀门关闭，上活塞的阀门被打开，空腔里的水就通过上活塞阀门进入到泵管中。
 - 2、中扬程中流量型风力提水机组
 - 由高速桨叶匹配容积式水泵组成提水机组，主要用来提取地下水。
 - 风轮直径一般为5-8m，扬程为10-20m，流量为15-25m³/h。

- 由于中扬程、中流量这两个参数难以兼顾，对设备技术要求高，加工有难度，故国内产品较少。

- **3、低扬程大流量型风力提水机组**

- 多采用旋转式水泵，一般由低速或中速风力机与链式水车或螺旋泵相匹配组成提水机组。可以提取河水、湖水或海水等地表水和浅层地下水。
- 适用于南方地区，用于农田排灌和盐场制盐、水产养殖提水。
- 风轮直径一般5-7m，扬程为0.5-3m,流量为50-100m³/h。
- 具体见课本p219页图9.3。
- 风力机部分由风轮、机头回转体、传动系统、尾翼、侧翼、配重机构、塔架等部件组成。 配套水泵可采用龙骨水车、钢管水车和螺旋泵等旋转式提水机具。
- **工作原理：**当风轮在风的作用下转动起来后，产生的动力由传动系统传递给水泵动力输入轴带动水泵旋转，进行抽水。

- **2、风力发电提水**

- 主要有两种：一种为风力发电→储能→电泵提水；
- 另外一种为风力发电机在有效风速范围内发电,由控制器来调节电动泵的工作状态,直接驱动电动泵提水。

- **12.2 风能致热的几种主要方式**

- 固体摩擦致热
- 搅拌液体致热
- 挤压液体致热
- 压缩空气致热
- 其他类型的致热（如：涡电流致热、电热致热）

- **12.3 风力直接致热的优点**

- **风力直接致热的优点**

- 1、系统总效率高。直接制热可达30%。
- 2、风轮工作特性与致热器工作特性匹配较理想。致热器的功率-转换特性曲线可呈2次或3次方关系变化，与风轮工作特性的变化曲线比较接近。
- 3、系统对风况质量要求不高，对不同的风速变化频率、不同的风速范围适应性较强。