

第一章 绪论

• 1.1 风的形成

• 1.1.1 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

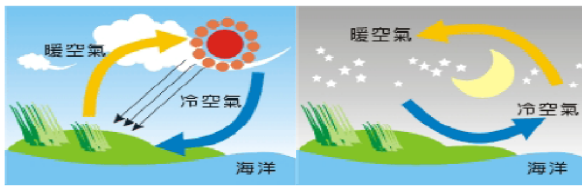
$$P_2 - P_1 = - \int_{z_1}^{z_2} \rho g dz$$

- 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
- 1.1.2 风的定义: 空气的流动现象称为风
 - 风是空气由于受热或受冷而导致的从一个地方向另一个地方的移动
 - 1、大气环流: 指大范围的大气运动状态。地球上由于地球表面受热不均, 引起大气层中空气压力不均衡, 形成了地面与高空的大气环流。
 - 2、季风环流: 一年内随着季节不同有规律转变风向的风, 称为季风。
 - 3、局地环流: 局部势能差将产生局地环流, 主要有海陆风和山谷风。



- 1.1.3 风力等级：

- 风力等级是**风速的数值等级**，它是表示风强度的一种方法。风越强，数值越大。
- 国际上采用的风级是**英国人蒲福**（Beaufort）于1805年所拟定的。当时为13级，自1946年后风力等级又有所修订，由13级变为17级。1947年第12届国际气象台长会议上被正式承认。

- 1.1.4 风的测量：

- 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。

• 1.1.5 风能特点：

- 优点
 - 1、取之不尽，用之不竭
 - 2、就地可取，无需运输
 - 3、分布广泛，分散使用
 - 4、不污染环境，不破坏生态
 - 5、周而复始，可以再生
- 缺点
 - 1、能量密度低
 - 空气的密度：1.29kg/m³(标准状况下)
 - 在3m/s的风速时，其能量密度仅为0.02kW/m²
 - 2、能量不稳定

• 1.2 风能的数学描述

• 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

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

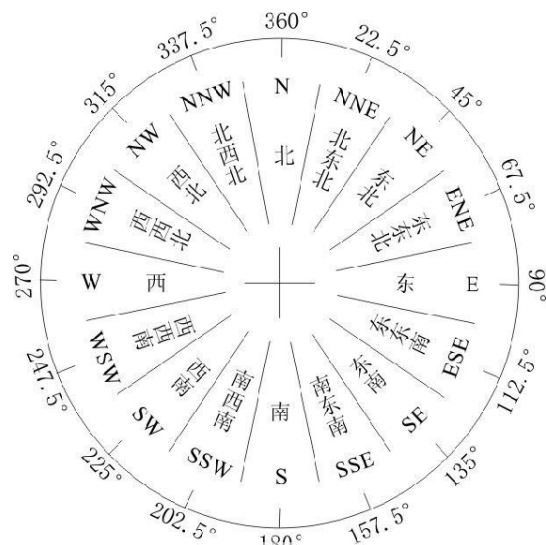
- 式中，v(t)---瞬时风速，指在某时刻t，空间某点的真实风速；v---平均风速，指在某个时距内，空间某点上各瞬时风速的平均值；v'(t)---脉动风速，指在某时刻t，空间某点上各瞬时风速与平均风速的差值。
- 平均风速可以表示为下式：

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

- 由（1-6）式可知，采用不同时距（t₂-t₁），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。

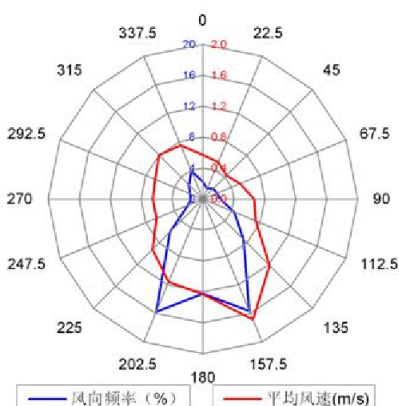
- 2) 平均风向

- 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。



- 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

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

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

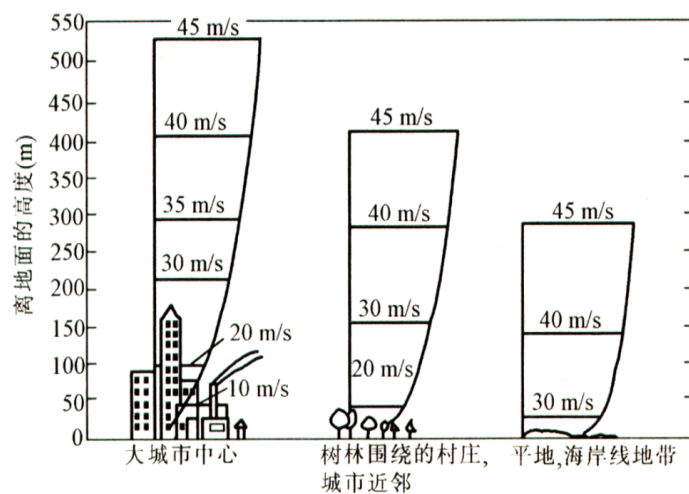
- 式中 u ---离地面高度 Z 处的平均风速, m/s; K ---卡门常数, 其值为0.4左右; u_* ---摩擦速度, m/s; ρ ---空气密度 (kg/m³), 一般取1.225 kg/m³; τ_0 ---地面剪切应力, N/m²; Z_0 ---粗糙度参数 (m)

• 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

- 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。

- 1.2.2 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

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

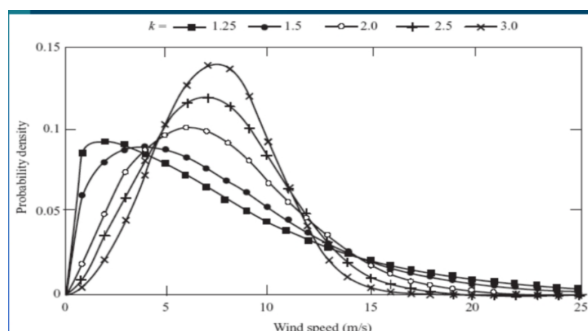
- 式中 p ---气压，hPa； t ---气温， $^{\circ}\text{C}$ ； e ---水汽压，hPa。

• 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 d^2 ，风速的立方 v^3 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 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

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

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

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

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

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

• 1.3风能资源

- 主要考虑风况和风功率密度

• 1) 风况

• ①年平均风速

- 建设风电场时, 一般要求当地在 $10m$ 高处的年平均风速在 $6m/s$ 左右

• ②风速年变化

- 风速在一年内的变化。
- 我国一般春季风速大, 夏、秋风速小。

• ③风速日变化

- 风速在一日之内的变化。
- 有陆、海两种基本类型。
- 陆地白天午后风速大, 夜间风速小。
- 海洋风速与陆地相反

• ④风速随高度变化

- 在近地层中, 风速随高度的增加而增大。

• ⑤风向玫瑰频率图

- 可以确定主导风向，对于风电场机组位置排列起到关键作用。
- 我国风能资源可分为四大区域：东部沿海及岛屿地区、三北（东北、华北、西北）地区、内陆局部地区和海上风能区。
 - **1.风能丰富区**
 - 风能密度大于 $200\text{W}/\text{m}^2$ ， $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ ；风速的年累积小时数大于 5000h ； $6 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 大于 2200h ； $8 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 大于 1000h 。主要集中在3个地区。
 - （1）东南沿海、山东和辽东半岛沿海及其岛屿。
 - （2）内蒙古和甘肃北部。
 - （3）松花江下游地区。
 - **2.风能较丰富区**
 - 该区风能密度为 $150 \sim 200\text{W}/\text{m}^2$ ， $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ ；风速的年累积小时数为 $3000 \sim 5000\text{h}$ ； $6 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的为 $1500 \sim 2000\text{h}$ ； $8 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的为 $500 \sim 1000\text{h}$ 。主要集中在3个地区。
 - （1）沿海地区，包括从汕头海岸向北沿东南沿海的 $20 \sim 50\text{km}$ 地带（是丰富区向内陆的延展）到东海和渤海沿岸。
 - （2）三北的北部地区。
 - （3）青藏高原中部和北部地区。
 - **3.风能可利用区**
 - 该区有效风能密度为 $50 \sim 150\text{W}/\text{m}^2$ ， $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 风速的年累积小时数为 $2000 \sim 3000\text{h}$ ； $6 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的为 $500 \sim 1500\text{h}$ 。集中分布在3个地区。
 - （1）两广沿海，在南岭之南，包括福建沿岸 $50 \sim 100\text{km}$ 的地带。
 - （2）大、小兴安岭山地。
 - （3）三北中部。
 - **4.风能欠缺地区**
 - 该区有效风能密度为 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下， $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 风速的年累积小时数为 2000h 以下； $6 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的为 300h 以下， $8 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 在 50h 以下。集中分布在四面环山的3个地区。
 - （1）以四川为中心的地区。
 - （2）雅鲁藏布江河谷。
 - （3）塔里木盆地西部。

第二章 风力发电机（1）

• 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

• 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 ~ 10kW

• 中型风力机：容量为10~100kW

• 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。

- **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**

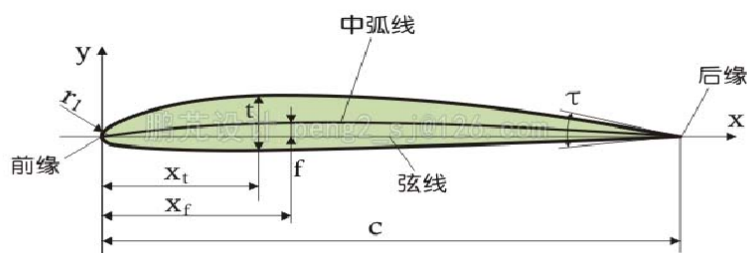
- 风轮在旋转平面上的投影圆面积

- **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

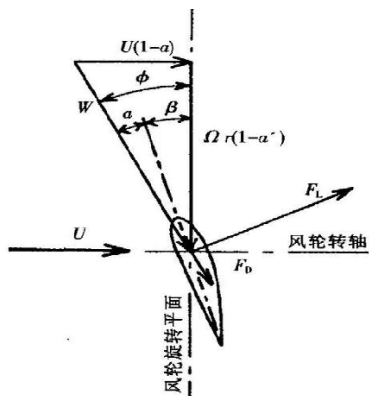
- **翼的前缘和后缘**
- **翼弦**：长度称为弦长，记为 c 。弦长是翼型的基本长度，也称几何弦
- **中弧线**：翼型内切圆圆心的连线。对称翼型的中弧线与翼弦重合。
- **上翼面**：凸出的翼型表面
- **下翼面**：平缓的翼型表面
- **弯度**：翼型中弧线与翼弦间的距离
 - 弯度分布：沿着翼弦方向的弯度变化
 - 中弧线在 y 坐标最大值称为**最大弯度**，用 f 表示，简称弯度；最大弯度点的 x 坐标称为**最大弯度位置**，用 x_f 表示。**弯度与弦长的比值为相对弯度**。
- **厚度**：翼弦垂直方向上上下下翼面间的距离
 - 厚度分布：沿着翼弦方向的厚度变化
 - 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 x_t 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 $\alpha = \phi - \beta$ 。



第二章 风力发电机 (2)

• 2.4 水平轴风力机基本构成

- 水平轴风力机的叶片围绕一个水平轴旋转，旋转平面与风向垂直。
- 风轮叶片数目视风力机用途而定，用于风力发电的风力机的叶片数一般取3片，用于风力提水的风力机叶片数一般取12~24片。
- 按照风轮与塔架相对位置的不同划分

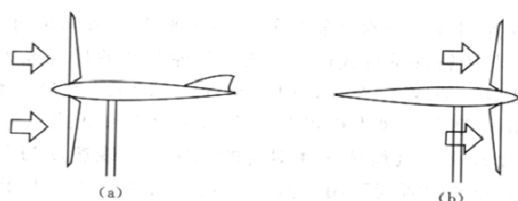


图2-2 水平轴风力机风轮与塔架的两种关系
(a) 迎风式；(b) 顺风式

• 迎风式（上风式）风力机

- 以空气流向作为参考，风轮在塔架前迎风旋转的风力机为迎风式风力机。需要调风装置，使风轮迎风面正对风向。

• 顺风式（下风式）风力机

- 风轮在塔架的下风位置旋转的风力机。能够自动对准风向，不需要调向装置。
- 缺点：空气流先通过塔架然后再流向风轮，会造成**塔影效应**，风力机性能降低。

• 主要构造：

- 叶片、机舱、轮毂、高速轴、低速轴、增速齿轮箱、发电机、调向装置、传动机构、机械刹车装置和塔架等。
- 风电机组主要由**风轮**、**机舱**、**塔架**和**基础**等部分组成。
 - 风轮和机舱置于塔架顶端，机舱内包括风轮主轴、传动系统、发电机等部件。
 - 风轮是实现风能转换成机械能的部件，其上安装若干个叶片，叶片根部与轮毂相连。风以一定速度和攻角作用于叶片上，使叶片产生转矩，驱动风轮主轴旋转，将风能转换成旋转机械能。风轮主轴经传动系统带动发电机转子旋转，进而将旋转机械能转换成电能。机舱内的所有部件安装在主机架上，主机架通过轴承与塔架顶端相连接，可以在偏航系统的驱动下，相对于塔架轴线旋转，使风轮和机舱随着风向的变化调整方向。塔架固定在基础上，将作用于风轮上的各种载荷传递到基础上。机组通过控制系统实现在各种条件下的运行控制。
- **叶片**：风轮叶片主要实现风能的吸收，其形状决定了空气动力学特性，设计目标是最大可能吸收风能，同时使重量尽可能减轻，降低制造成本。
 - 1. 叶片几何形状及翼型
 - 叶片长度很长，旋转过程中，不同部位的圆周速度相差很大，导致来风的攻角相差很大，因此风电机组叶片沿展向各段处的几何尺寸及剖面翼型都发生变化。
 - 叶片特征：

- 沿展向方向上，翼型不断变化，各剖面的弦长不断变化，各剖面的前缘和后缘形状也不同。
- 叶片的剖面翼型应根据相应的外部条件并结合载荷分析进行选择和设计。
- 风能的转换效率与空气流过叶片翼型产生的升力有关，因此叶片的翼型性能直接影响风能转换效率。
- 叶片的翼型形状可分为**变截面叶片**和**等截面叶片**两种。
 - 变截面叶片在叶片全长上各处的截面形状及面积都是不同的，等截面则相反。变截面叶片设计的初衷在于，**在某一转速下通过改变叶片全长各处的截面形状和面积，使得叶片全长上的各处的攻角相等**。制造工艺较复杂。
- 2. 叶片材料
 - 早期：
 - **小型风力机叶片**最早常用**整块木材**加工而成，表面涂层保护漆，根部通过金属接头用螺栓与轮毂相连。有的采用玻璃纤维或其他复合材料作为蒙皮，使叶片具有更佳的耐磨性能。
 - **大、中型风力机**采用木质叶片时，不用整块木料进行制作，而是采用很多**纵向木条**胶接在一起。为减轻重量，在木质叶片的后缘部分填塞质地较轻的泡沫塑料，表面用玻璃纤维作蒙皮。采用泡沫塑料的优点**不仅可以减轻质量，而且能使翼型重心前移**，重心设计在近前缘1/4弦长处为最佳，可以减轻叶片的质量。
 - 为减轻叶片的质量，有的叶片用一根金属管作为受力梁，以蜂窝结构、泡沫塑料或轻木材作中间填充物，外面再包上玻璃纤维防腐防磨
 - 目前：大型风力机的叶片较长，如3MW风力机叶片达到50m左右，承受的风载荷较大，因此叶片设计要保证一定的强度和刚度要求。
 - 目前，**大中型风力机的叶片**都采用**玻璃纤维与树脂组成的复合材料**进行制作。
 - **树脂类**作为**基体材料**，具有均衡载荷和保护增强体纤维的作用，包括不饱和聚酯树脂、环氧树脂和乙烯基树脂等热固性树脂，其中**环氧树脂**由于具有优良的力学性能、优异的耐腐蚀性和耐久性及优良的介电性能，是目前风机叶片的主要基体材料。
 - **玻璃纤维**作为风机叶片的**增强材料**，用于提升其整体机械性能。
 - 风机叶片从根部到叶尖由3部分组成，分别为**内侧、跨中和外侧**。
 - 风机叶片材料中**玻璃纤维含量最高，其次为树脂类材料**
 - 随着风力机的功率的增加，叶片朝着大型化和轻量化的方向发展，**碳纤维**复合材料逐渐开始得到应用。
- 3. 气动制动系统
 - 由于风轮在旋转过程中，转动惯量很大，所以当风速超过切出风速时，**变桨调节**的风电机组通过**对桨距角的调整**可以实现气动制动。对于**失速控制**的风电机组，由于叶片与轮毂固定连接，通常采用**可旋转的叶尖**实现气动制动。

- 在风轮运行时，叶尖部分和其他部分方向一致，形成一个整体。当需要制动时，叶尖部分绕叶片轴向旋转90°，实现制动功能。
- 4. 叶根连接
 - 叶片所受的各项载荷，无论是拉力还是弯矩、转矩、剪力都在根端达到最大值，如何把整个叶片上所承受的载荷传递到轮毂上去，关键在于叶片的**根端连接设计**。
 - 叶片根端必须具有足够的**剪切强度、挤压强度**，与金属的**胶接强度**也要足够高，这些强度均低于其拉弯强度，因此叶片的根端是危险的部位，设计应予以重视。
 - 如果不注意**根端连接设计**，严重时将导致整个叶片飞出，使整台风电机组毁坏。
- 5. 叶片失效与防护措施
 - 常见的叶片故障类型包括表面腐蚀、雷击、覆冰、裂纹以及极端风造成的叶片断裂等。
 - 叶片故障主要对叶片的气动性能、主轴不平衡以及振动和噪声状态产生影响。
 - 防护措施
 - **热膨胀性**：叶片结构中使用了不同的材料，所以必须考虑各种材料热膨胀系数的不同，以免因温度变化而产生附加应力，从而破坏叶片。
 - **密封性**：空心叶片应有很好的密封性，一旦密封失效，其内必然形成冷凝水集聚，造成危害。
 - 可在叶尖、叶根各预开一个小孔，以使叶片内部空间进行适当的通风，并排除积水。需要注意的是小孔尺寸要适当，过大的孔径将气流从内向外流动，产生功率损失，还将伴随产生噪声。
 - **雷击保护**：为了防止被雷电击毁、支撑发电机的塔架必须用良好的导线接地。复合材料制成的叶片，需要特殊的防雷装置。风力机叶片的防雷设计一般有4种。
 - 大型复合材料叶片上预防措施最好是在叶尖处沿整个翼型外围做一个金属的尖帽，从叶尖向内延伸8~10cm。通过安装在叶片内部的金属导线连接到叶根部的柔性金属板上，并经过塔架内的接地系统，将雷击电流接地。
 - **除冰系统**：叶片除冰系统主要针对容易造成叶片覆冰的地区。如叶片表面采用特殊的防冰涂层、叶片中安装覆冰报警及除冰系统等。图为两种叶片除冰系统的设计示意图。
- 轮毂：
 - 轮毂是**连接叶片与风轮主轴**的部件，用于**传递风轮的力和力矩到后面传动系统**的机构。
 - 分类：固定式轮毂、叶片之间相对固定铰链式轮毂和各叶片自由的铰链式轮毂。
 - 1. 固定式轮毂

- 特点：形状有球形和三角形两种。安装、使用和维护较简单，目前应用最为广泛。不存在铰接叶片的磨损问题；叶片上全部力和力矩都经轮毂传递到后续部件。
- 通常采用球墨铸铁制成，浇注方法容易成形与加工，球磨铸铁抗疲劳性能高。
- 2. 叶片之间相对固定铰链式轮毂（早期应用，应用于单叶片和双叶片）
 - 铰链使两叶片之间固定连接，轴向相对位置不变，但可绕铰链轴沿风轮拍向在设计位置做正负 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的摆动，类似跷跷板。
 - 当来流速度在叶轮扫风面内上下有差别或阵风出现时，叶片的载荷使得叶片离开设计位置，若位于上部的叶片向前，则下方的叶片向后。由于两叶片在旋转过程中的驱动力矩变化很大，因此叶轮会产生很高的噪声。
 - 叶片被悬挂的角度与风轮转速有关，转速越低，角度越大。具有这种铰链轮毂式的风轮具有阻尼器的作用。当来流速度变化时，叶片偏离原悬挂角度，其安装角也发生变化，一片叶片因安装角的变化升力下降，而另一片升力提高，因而产生反抗风向变化的阻尼作用。
- 3.各叶片自由的铰链式轮毂（理论上采用这种铰链结构可保持恒速运行）
 - 轮毂的每个叶片之间互不依赖，在外力作用下，可单独做调整运动。这种调整不但可做成仅具有拍向椎角的形式，还可以做成拍向、挥向角度均可以变化的方式。
- 变桨机构：
 - 现代大型并网风电机组多数采用变桨距机组，其主要特征是叶片可以相对轮毂转动，实现桨距角的调节。
 - 主要作用：
 - 在正常运行状态下，当风速超过额定风速时，通过改变叶片桨距角，改变叶片的升力与阻力比，实现功率控制。
 - 当风速超过切出风速时，或者风电机组在运行过程出现故障状态时，迅速将桨距角从工作角度调整到顺桨状态(叶片的攻角趋于零升力的时候)，实现紧急制动。
 - 叶片变桨距系统主要由叶片与轮毂间的变桨驱动机构、变桨轴承、控制系统等组成。变桨距系统的硬件安装在轮毂内部
- 机舱：
 - 机舱内，布置有传动机构（齿轮箱）、发电机、机座、调速器或限速器、刹车制动器、调向装置等重要设备。
 - 机舱通常采用重量轻、强度高、耐腐蚀的玻璃钢制作。
 - 机舱装配时需要注意，从风轮到负载各部件之间的联轴器要精确对中。由于所有的力、力矩、振动通过风轮传动装置作用在机舱结构上，反过来机舱结构的弹性变形又作为相应的耦合增载施加在主轴、轴承、机壳上。
 - 为减少这些载荷，建议使用弹性联轴器。
- 风电机组传动系统：

- 传动系统用来连接风轮与发电机，将风轮产生的机械转矩传递给发电机，同时实现转速的变换。
- 包括风轮主轴（低速轴）、增速齿轮箱、联轴器（齿轮箱输出轴）及机械刹车制动装置等部件。整个传动系统和发电机安装在主机架上。

- 主轴轴承

- 主要功能是支撑机械旋转体，用以降低设备在传动过程中的机械载荷摩擦系数。
- 主轴的前轴承需要承受风轮产生的弯矩和推力，通常采用双列滚动轴承作为径向与轴向支撑。

- 增速齿轮箱

- 功能是将风轮在风力作用下产生的动力传递给发电机，使其得到相应的转速

- 特点

- 风电齿轮箱的设计条件比较苛刻，同时也是机组的主要故障源之一。
- 传动条件：风电齿轮箱属于大传动比、大功率的增速传动装置，且需要承受多变的风载荷作用及其他冲击载荷；由于维护不便，对其运行可靠性和使用寿命的要求较高，通常要求设计寿命不少于20年；设计过程往往难以确定准确的设计载荷，而结构与载荷谱的匹配问题也是导致其故障的重要诱因。
- 运行条件与环境：风电齿轮箱常年运行于酷暑、严寒等极端自然环境条件，且安装在高空，维修困难。因此，除常规状态机械性能外，对构件材料还要求低温状态下抗冷脆性等特性。由于风电机组长期处于自动控制的运行状态，需考虑对齿轮传动装置的充分润滑条件及其监测，并具备适宜的加热与冷却措施，以保证润滑系统的正常工作。
- 设计与安装条件：齿轮箱的体积和重量对风电机组其他部件的载荷、成本具有影响，减小其设计结构和减轻重量显得尤为重要。
- 其他：一般需要在齿轮箱的输入端（或输出端）设置机械制动装置，配合风轮的气动制动实现对机组的制动功能。但制动产生的载荷对传动系统会产生不良影响，应考虑防止冲击和振动措施，设置合理的传动轴系和齿轮箱体支撑。其中，齿轮箱与主机架间一般不采用刚性连接，以降低齿轮箱产生的振动和噪声。
 - 风电齿轮箱的总体设计目标很明确，即在满足传动效率、可靠性和工作寿命要求的前提下，以最小体积和重量为目标，获得优化的传动方案。
 - 齿轮箱的结构设计过程，应以传递功率和空间限制为前提，尽量选择简单、可靠、维修方便的结构方案。

- 齿轮传动概述

- 齿轮传动具有传动比恒定、结构紧凑、传递功率大、传动效率高、零部件使用寿命长等优点，其缺点是制造和安装的成本高、吸振性差等。

- 通过主动齿轮与从动齿轮的啮合，实现运动和转矩的传递。主动齿轮与从动齿轮的转速比称为**齿轮的传动比**，取决于从动齿轮与主动齿轮的节圆半径之比，或从动齿轮与主动齿轮的齿数比，即

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1} = -\frac{z_2}{z_1}$$

- n 、 r 、 z 分别表示转速、齿轮节圆半径和齿数，下标1、2分别表示主、从动齿轮。
- 齿轮传动输出轴转矩与输入轴转矩的关系为

$$M_2 = \frac{n_1}{n_2} M_1$$

- 对于增速齿轮， $n_2 > n_1$ ，则有 $M_2 < M_1$ 。即**齿轮箱实现增速的同时，也降低了输出转矩**。
- 对于风电机组而言，传动系统中的增速齿轮箱，使发电机转子转矩下降，**增速比越大，转矩降低越多**，这样发电机转子直径可以减小，此外将机械制动盘安装在齿轮箱输出轴上，制动力矩也比较小。
- 由于受结构和加工条件限制，单级齿轮传动的传动比不能太大，而每个齿轮的齿数也不能太少。因此，在需要大传动比的场合，采用**多级齿轮**构成的轮系实现传动，轮系传动分为**定轴轮系**传动和**周转轮系**传动。
 - 定轴轮系中，所有齿轮的轴线位置不变，如果各轴线相互平行，则称为**平面定轴轮系**，或平行轴轮系。
 - 周转轮系中，至少有一个齿轮的轴线可以绕其他齿轮轴线转动。其中只有一个齿轮轴可以绕其他齿轮轴转动的轮系称为**行星轮系**。
 - 其中轴线可动的齿轮称为**行星轮**，位于中间的齿轮称为**太阳轮**，行星轮与太阳轮及外部的内齿圈啮合，太阳轮和内齿圈的轴线不变，其中内齿圈固定不动，行星轮即绕自身轴线转动，同时其轴线还绕太阳轮转动。
 - 行星轮系具有**结构紧凑，传动比大，传动效率高、运动平稳，抗冲击和振动的能力强**等优点，但是其结构复杂，制造和维护困难。
- 在风电齿轮箱通常需要多级齿轮传动。大型风电机组的增速齿轮箱的典型设计，多采用定轴轮系和行星轮系，构成**组合轮系**，这样可以在获得较高传动比的同时，使齿轮箱结构比较紧凑。
- 多级行星轮结构壳可以获得更加紧凑的结构，但也使齿轮箱的设计、制造与维护难度和成本大大增加。
- 齿轮材料**
 - 由于传动构件的运转环境和载荷情况复杂，要求所设计采用的材料除满足常规机械性能条件外，还应具有极端温差条件下的材料特性，如**抗低**

温冷脆性、极端温差影响下的尺寸稳定性等。

- 齿轮、轴类构件材料一般采用**低碳合金钢**，毛坯的制备多采用锻造工艺获得，以保证良好的材料组织纤维和力学特征。

- **齿轮箱的箱体结构**

- 箱体要承受风轮的作用力和齿轮传动过程产生的各种载荷，必须具有足够的强度和刚度，以保证**传动的质量**。
- 箱体的设计一般应依据主传动链的布局需要，并考虑加工、装配和安装条件，同时要便于检修和维护。批量生产的箱体一般采用铸造成型，常用材料有**球墨铸铁**或其他高强度铸铁。用铝合金或其他轻合金制造的箱体，可使其重量较铸铁降低20%-30%。
- 齿轮箱在机架上的安装一般需考虑弹性减振装置，最简单的弹性减振器是用**高强度橡胶**和钢结构制成的弹性支座块。

- **齿轮传动效率与噪声**

- 齿轮传动的效率一般比较高，与传动比、齿轮类型及润滑油粘度等因素有关。
- 对于定轴传动齿轮，每级约有2%的损失，而行星轮每级约有1%的损失。在很多情况下，造成齿轮箱传动功率损失的主要原因，是齿侧的摩擦和润滑过程中以**热或噪声形式的能量消耗**，因此，有效的**散热**可以提高风电齿轮箱的传动效率。
- 采用紧凑结构设计型齿轮箱需要考虑的主要问题，除了**表面冷却装置**外，一般还应该配备相应的**润滑冷却系统**。
- 设计标准对齿轮箱的传动噪声也有相应要求，而噪声与齿轮箱传动构件的设计和制造质量密切相关。齿轮箱设计通常应提供传动噪声的声压级别，根据DIN(德国的标准化主管机关)标准的测试条件，1m距离测得的声压值，通常希望控制在表所示的范围内。

- **齿轮箱及轴承故障**

- 齿轮在运行过程中，齿面承受**交变压应力、交变摩擦力以及冲击载荷**的作用，将会产生各种类型的损伤，导致运行故障甚至失效。

- **交变载荷引起的疲劳损伤**

- 齿轮啮合过程中，齿面和齿根部均受周期交变作用，在材料内部形成交变应力，当应力超过材料疲劳极限时，将在表面产生疲劳裂纹，随着裂纹不断扩展，最终导致**疲劳损伤**。这类损伤通常由小到大，由某个（几个）轮齿局部到整个齿面逐渐扩展，最终导致齿轮**失效**，失效过程通常会持续一定的时间。
 - 疲劳失效主要表现为**齿根断裂和齿面点蚀**。
 - **齿根断裂**：齿根主要承受交变弯曲应力，产生弯曲疲劳裂纹并不断扩展，最终使齿根剩余部分无法承受外载荷，造成断齿。

- **点蚀**：齿面在接触点既有相对滚动，又有相对滑动。滚动过程由于表面产生交变接触压应力，和交变脉动剪应力，使齿面产生疲劳裂纹，当裂纹扩展到一定程度，将造成局部齿面金属剥落，形成小坑，称为“点蚀”故障。随着齿轮工作时间加长，点蚀故障逐渐扩大，各点蚀部位连成一片，将导致齿面整片金属剥落，齿厚减薄，造成轮齿从中间部位断裂
- **过载引起的损伤**
 - 如果设计载荷过大，或齿轮在工作承受严重的瞬时冲击、偏载，使接触部位局部应力超过材料的设计许用应力，导致轮齿产生突然损伤，轻则造成**局部裂纹、塑性变形或胶合**现象，重则造成轮齿断裂。
 - 对于风电机组，由于瞬时阵风、变桨操作、制动、机组起停以及电网故障等作用，经常会发生传动系统载荷突然增加，超过设计载荷的现象。
 - 过载断齿主要表现为**脆性断裂**，通常断面粗糙，有金属光泽。
- **维护不当引起的故障**
 - 主要有**齿面磨损和胶合**，其他故障包括电蚀、腐蚀等。
 - **齿面磨损**：由于润滑不足或润滑油不清洁，将造成齿面严重的磨粒磨损，使齿廓逐渐减薄，间隙加大，最终可能导致断齿。
 - **胶合**：对于重载和高速齿轮，齿面温度较高，如果润滑条件不好，两个啮合齿可能发生熔焊现象，在齿面形成划痕，称为胶合。
 - 齿轮失效的主要形式包括**断齿、齿面变形**等。根据制造、安装、操作、维护、润滑、承载大小等方面的条件不同，故障发生的时间程度有很大差异。
- **齿轮箱的润滑与冷却**
 - 风电机组齿轮箱的失效形式与设计 and 运行工况有关，但**良好的润滑**是保证齿轮箱可靠运行的必备条件。需要配备可靠的**润滑油和润滑系统**。可靠的润滑系统是齿轮箱的重要配置，风电机组齿轮箱通常采用强制润滑系统，可以实现传动构件的良好润滑。同时，为确保极端环境温度条件的润滑油性能，一般需要考虑设置相应的**加热和冷却**装置。
 - 齿轮箱还应设置对润滑油、高速端轴承等温度进行实时监测的传感器、空气过滤器，以及雷电保护装置等附件。
- **轴的连接与制动**
 - 为实现机组传动链部件间的转矩传递，传动链的轴系需要设置必要的连接构件（如联轴器等）。
 - **高速轴联轴器**

- 联轴器是用来联接不同机构中的两根轴（主动轴和从动轴）使之共同旋转以传递扭矩的机械零件。
- 齿轮箱高速轴与发电机轴的连接构件一般采用**柔性**联轴器，以弥补机组运行过程轴系的安装误差，解决主传动链的轴系不对中问题。同时，柔性联轴器还可以增加传动链的系统阻尼，减少振动的传递。
- 齿轮箱与发电机之间的联轴器设计，需要同时考虑对机组的安全保护功能。采用在高速轴上**安装防止过载的柔性安全联轴器**，不仅可以保护重要部件的安全，也可以降低齿轮箱的设计与制造成本。
- 联轴器设计还需要考虑完备的绝缘措施，以防止发电系统寄生电流对齿轮箱产生不良影响。

• 机械制动机构

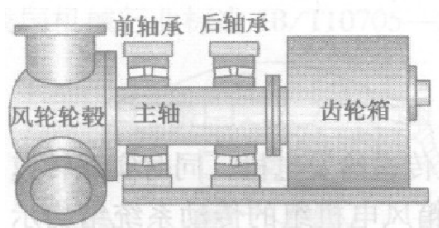
- 当遇有破坏性大风、风电机组运转出现异常或者需要对机组进行保养维修时，需用制动机构使风轮静止下来。
- 大型风电机组的制动机构均由**气动制动**和**机械制动**两个部分组成，在实际制动操作过程中，**首先执行气动制动**，使风轮转速降到一定程度后，**再执行机械制动**。只有在**紧急制动**情况下，**同时执行气动和机械制动**。
- 定桨距机组通过叶尖制动机构实现气动制动，变桨距机组则通过将叶片桨距角调整到顺桨位置，就可以实现气动制动。
- 制动机构一般采用**盘式结构**，制动盘安装在齿轮箱输出轴与发电机轴的弹性联轴器前端，机械制动时，液压制动器抱紧制动盘，通过摩擦力实现制动。

- 作用在风轮上的各种气动载荷和重力载荷通过主机架及偏航系统传递给塔架。

• 传动系统布置结构形式

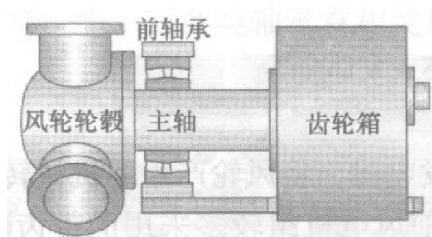
- 风轮主轴一端连接风轮轮毂，另一端连接增速齿轮箱的输入轴，用滚动轴承支撑在主机架上。风轮主轴的支撑结构形式与增速齿轮箱的形式密切相关。
- 按照支撑方式不同，主轴可以分为三种结构形式。

• 独立轴承支撑结构



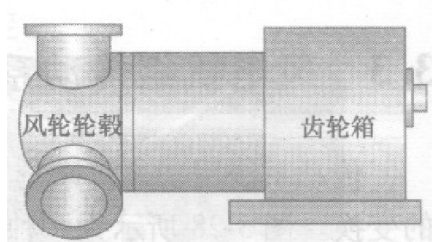
- 主轴由前后**两个**独立安装在主机架上的轴承支撑，共同承受悬臂风轮的重力载荷，轴向推力载荷由前轴承（靠近风轮）承受，只有风轮转矩通过主轴传递给齿轮箱。
- 由于前轴承为主要承载部件，通常为减小悬臂风轮重力产生的弯矩，前轴承支撑尽可能靠近轮毂，并通过增加前后轴承的间距调整轴承的载荷。因而此种**主轴结构相对较长**，制作成本较高。但由于齿轮箱与主轴相对独立，便于**采用标准齿轮箱和主轴支撑构件**。

- 前轴承独立安装结构



- 主轴前轴承独立安装在机架上，后轴承与齿轮箱内轴承做成一体，前轴承和齿轮箱两侧的扭转臂形成对主轴的三点支撑，故也称为三点支撑式主轴。
- 这种主轴支撑结构形式在现代大型风电机组中较多采用，其优点是，主轴支撑的结构趋于紧凑，可以增加主轴前后支撑轴承的距离，有利于降低后支撑的载荷，齿轮箱在传递转矩的同时承受叶片作用的弯矩。

- 主轴轴承与齿轮箱集成形式



- 主轴的前后支撑轴承与齿轮箱做成整体，其主要优点是，风轮通过轮毂法兰直接与齿轮箱连接，可以减小风轮的悬臂尺寸，从而降低了主轴载荷。此外主轴装配容易、轴承润滑合理。主要问题是难于直接选用标准齿轮箱，维修齿轮箱必须同时拆除主轴

- 从齿轮箱维修角度看，主轴单独支撑，既便于与齿轮箱分离，又能减轻齿轮箱的承载，大大降低维修费用，较为合理。
- 制造主轴的材料一般选择碳素合金钢，毛坯通常采用锻造工艺。由于合金钢对应力集中的敏感性较高，轴结构设计中注意减小应力集中，并对表面质量提出要求。
- 各种热处理、化学处理及表面强化处理，可显著提高主轴的机械性能

- 偏航系统:

- 偏航系统的主要作用有两个：其一是与风力发电机组的控制系统相互配合，使风轮始终处于迎风状态；其二是提供必要的锁紧力矩，以保障风力发电机组的安全运行。
- 下风向风力机的风轮能自然地对准风向，因此一般不需要进行调向控制（对大型的下风向风力机，为减轻结构上的振动，往往也采用对风控制系统）。
- 上风向风力机则必须采用偏航系统进行调向，以使风力机正面迎风。
- 大型风电机组主要采用电动机驱动的偏航系统。该系统的风向感受信号来自装在机舱上面的风向标。通过控制系统实现风轮方向的调整。

- 偏航系统基本构成

- 偏航系统是水平轴风电机的重要组成部分。偏航操作装置主要由偏航轴承、传动、驱动与制动等功能部件或机构组成。
- 偏航操作装置安装于塔架与主机架之间，采用滑动轴承实现主机架的定位与支撑；
- 用四组偏航电动机主轴轴承与齿轮箱集成形式的风电机组主机架与塔架固定连接的大齿圈，实现偏航的操作。
- 在主机架上安装主传动链部件和偏航驱动装置，通过偏航滑动轴承实现与大齿圈的连接和偏航传动。
- 当需要随风向改变风轮位置时，通过安装在驱动部件上的小齿轮与大齿圈啮合，带动主机架和机舱旋转使风轮对准风向。
 - 偏航驱动部件
 - 采用电力拖动的偏航驱动部件一般由电动机、大速比减速机和开式齿轮传动副组成，通过法兰连接安装在主机架上。
 - 偏航驱动电动机一般选用转速较高的电动机，以尽可能减小体积。但由于偏航驱动所要求的输出转速又很低，必须采用紧凑型的大速比减速机，以满足偏航动作要求。偏航减速器可选择立式或其他形式安装，采用多级行星轮系传动，以实现大速比、紧凑型传动的要求。
 - 偏航轴承
 - 偏航轴承是保证机舱相对塔架可靠运动的关键构件，采用滚动体支撑的偏航轴承虽然也是一种专用轴承，但已初步形成标准系列。可参考机械行业标准JB/T 10705-2007进行设计或选型。图为偏航轴承制造实例。
 - 偏航制动
 - 为保证机组运行的稳定性，偏航系统一般需要设置制动器，多采用液压钳盘式制动器。
 - 对偏航制动器的基本设计要求，是保证机组额定负载下的制动力矩稳定，所提供的阻尼力矩平稳（与设计值的偏差小于5%），且制动过程没有异常噪声。
 - 偏航调节系统包括风向标和偏航系统调节软件。
 - 风向标对应每一个风向有一个相应的脉冲输出信号，通过偏航系统软件确定其偏航方向和角度，然后将偏航信号放大传送给电动机，通过减速机构传动风力机平台，直到对准风向为止。
 - 若机舱在同一个方向偏航超过3圈以上时，则纽缆保护装置工作，执行解缆。
- 避雷系统：
 - 雷电对风机的危害方式有直击雷、雷电感应和雷电波侵入。外部防雷系统由接闪器、引下导线、接地装置三部分组成。
 - 1) 接闪器
 - 直接接受雷击，以及用作接闪的器具、金属构件和金属层面等，称为接闪器。

- 功能：把接引来的雷电流，通过引下导线和接地装置向大地中泄放，保护风力机免受雷害。
- 常用的接闪器有：避雷针、避雷线、避雷带、避雷网等。
- **2) 引下导线**
 - 连接接闪器与接地装置的金属导体称为引下导线。引下线要镀锌或涂漆，在腐蚀性较强的场所，应加大截面积或采取其他防腐措施。
- **3) 接地装置**
 - 将电子、电气及电力系统的某些部分与大地相连接称为接地。
- **部件防雷措施**
 - **1) 叶片防雷：**接闪器和引下导线
 - **2) 轴承防雷：**一般在轴承前端设置一条与其平行的低阻通道，对于沿轴传来的雷电，用导体滑环、铜质电刷和放电器等进行分流。另外可采用旁路分流和阻断隔离相结合的方式。
 - **3) 机舱及其各部件防雷：**前述叶片防雷也可对机舱提供一定的防雷保护，而对于机舱尾部则需要另外设立避雷针
 - **4) 电气控制系统防雷：**风力发电机组电控系统的控制元件分别在机舱电气柜和塔筒底部电控柜中：电气柜的屏蔽、供电电源系统的防雷保护

第二章 风力发电机（3）

- 塔架与基础

- 塔架是风电机组的支撑部件，承受机组的重量、风载荷以及运行中产生的各种动载荷，并将这些载荷传递到基础。
- 大型并网风力发电机组塔架高度一般超过几十米，甚至超过百米，重量约占整个机组重量的一半左右，成本占风力发电机组制造成本的15%-20%。由于风电机组的主要部件全部安装在塔架顶端，因此塔架一旦发生倾倒垮塌，往往造成整个机组报废。因此塔架和基础对整个风电机组的安全性和经济性具有重要影响。
- 对塔架和基础的要求是，保证机组在所有可能出现的载荷条件下保持稳定状态，不能出现倾倒、失稳或其他问题。

- 塔架

- 结构类型

- 钢筋混凝土结构、桁架结构和钢筒结构三种
 - 钢筋混凝土塔架：钢筋混凝土结构可以现场浇注，也可以在工厂做成预制件，然后运到现场组装。
 - 主要特点：刚度大，一阶弯曲固有频率远高于机组工作频率，因而可以有效避免塔架发生共振。早期的小容量机组中曾使用过这种结构。但是随着机组容量增加，塔架高度升高，钢混结构塔的制造难度和成本均相应增大，因此在大型机组中很少使用。
 - 桁架塔架：结构与高压线塔架相似。桁架塔架的耗材少，便于运输；但需要连接的零部件多，现场施工周期较长，运行中还需要对连接部位进行定期检查。
 - 在早期小型风电机组中，较多采用这种类型塔架结构。随着高度的增大，这种塔架逐渐被钢筒塔架结构取代。但是，在一些高度超过100m的大型风电机组塔架中，桁架结构又重新受到重视。因为在相同的高度和刚度条件下，桁架结构比钢筒结构的材料用量少，而且桁架塔的构件尺寸小，便于运输。对于下风向布置形式的风电机组，为了减小塔架尾流的影响，也多采用桁架结构塔架。
 - 钢筒塔架：是目前大型风电机组主要采用的结构形式，从设计与制造、安装和维护等方面看，这种形式的塔架指标相对比较均衡。
 - 钢筒塔架制造、运输及安装
 - 随着风电机组容量逐渐加大，塔架的高度、重量和直径相应增大。大型兆瓦机组塔架高度超过100m，重量超过100t。
 - 高度超过30m的锥形钢筒塔，通常分成几段进行加工制造，然后运输到现场进行安装，用螺栓将各段塔筒连接成整体。每段长度一般不超过30m。
 - 塔筒通常采用宽度为2m、厚度为10~40mm的钢板，经过卷板机卷成筒状，然后焊接而成。当钢板厚度小于40mm时，可以采用常规卷板设备进行

行加工。而当厚度超过40mm时，常规卷板设备不能加工，需要特制的卷板设备。

- **结构特征**

- 风电机组的额定功率取决于**风轮直径**和**塔架高度**，随着风电机组不断向大功率方向发展，风轮直径越来越大，塔架也相应地越来越高。为了降低造价，塔架的重量往往受到限制，塔架的结构刚度相对较低。因此细长、轻质塔架体现了风电机组塔架的主要结构特征。

- **塔架高度**

- 塔架高度是塔架设计的主要因素，塔架高度决定了塔架的类型、载荷大小、结构尺寸以及刚度和稳定性等。塔架越高，需要材料越多，造价高，同时运输、安装和维护问题也越大。因此在进行塔架设计时，首先应对塔架高度进行优化。在此基础上，完成塔架的结构设计和校核。
- 塔架高度H与风轮直径D具有一定的比例关系，在风轮直径D已经确定的条件下，可按照下式初步确定塔架高度：

$$H = (1 \sim 1.3)D$$

- 确定塔架高度时，应考虑风电机组附近的地形地貌特征。对于同样容量的风电机组，在陆地和海上的塔架高度不同。陆地地表粗糙，风速随高度变化缓慢，需要较高的塔架。而海平面相对光滑，风速随高度变化大，因此塔架高度相对较小。塔架最低高度可以按下式确定：

$$H = h + h_c + R$$

- 式中，h为机组附近障碍物高度；为障碍物最高点到风轮扫掠面最低点距离，最小取1.5~2.0m；R为风轮半径。

- **塔架刚度**

- 刚度是结构**抵抗变形**的能力。钢筒塔架是质量均匀分布的细长结构，塔顶端安装占机组约1/2重量的风轮和机舱，质量相对集中。
- 塔架结构的固有频率取决于塔架的刚度和质量，刚度越低，固有频率越低。机组运行时，塔架承受风轮旋转产生的周期性载荷，如果载荷的频率接近甚至等于塔架的固有频率，将会产生共振现象，使塔架产生很大的振动。
- 对于刚度较低的塔架结构，振动问题是塔架设计考虑的主要因素之一。为保证作用在塔架上的周期性载荷的频率（如风轮旋转频率、叶片通过频率及其谐振频率等）避开塔架结构弯曲振动的固有频率，要求塔架具有合适的刚度。
- 按照整体刚度不同，塔架结构形式可以分为两类：
 - **刚性塔架**：刚度较高，塔架的一阶弯曲振动固有频率高于叶片通过频率。例如钢筋混凝土塔架结构。其优点是可以有效避免共振，缺点是使用材料多，成本高，现代大型风电机组很少采用这类刚性塔架结构。
 - **柔性塔架**：整体刚度较低，塔架的一阶弯曲振动固有频率低于叶片通过频率。

- 塔架的一阶弯曲振动固有频率介于风轮旋转频率和叶片通过频率之间的塔架称为**柔性塔架**。
- 一阶弯曲振动固有频率低于风轮旋转频率的塔架称为**超柔性塔架**。

- **塔筒内部布置**

- 塔筒内部布置包括工作人员攀登到机舱用的扶梯、用于起吊维护维修机具的小型卷扬机、机舱上设备的动力线及信号线以及位于塔架底部的控制柜等。对于大型机组，也有将变压器放在塔架底部。

- **陆上风电机组的基础**

- 塔架基础通常采用**钢筋混凝土**结构。混凝土的重量应能够平衡整个机组的倾翻力矩。影响因素首先应考虑极端风速条件下的叶片产生的推力载荷，以及机组运行状态下的最大载荷。
- 应使基础满足以下**基本设计条件**：
 - 要求作用于地基上的载荷不超过地基容许的承载能力，以保证地基在防止整体破坏方面有足够的储备。
 - 控制基础的沉降，使其不超过地基容许的变形值，以确保机组不受地基变形的影响。
- **基础形式**
 - 塔架基础均为现浇钢筋混凝土独立基础，根据风电场场址工程地质条件和地基承载力以及基础荷载、结构等条件有较多设计形式。从结构的形式看，常见的有**板状**、**桩式**和**桁架式**等基础。
 - **板状基础**：板状基础结构适用于岩床距离地表面比较近的场所。轴向截面形状以圆形为理想状态，但是考虑到搭建圆形混凝土浇注模板比较复杂，经常使用多边形作为替代，如八角形，甚至方形的，可以简化浇注挡板和基础内的钢筋布置。
 - **桩基础**：当地表条件较差时，采用桩基础比板层基础可以更有效地利用材料。
- **基础尺寸**
 - 基础的结构尺寸取决于机组容量大小，其影响因素主要是极端风速下的载荷，以及机组运行下的最大载荷。
 - 影响基础的载荷主要是叶片产生的推力。不同类型机组产生的推力不一样，例如变桨机组的叶片最大推力发生在额定风速处，而失速机组的叶片推力在额定风速以上仍有可能增加。此外由于失速机组不能顺桨，因此在极端风速下，即使机组处在静止状态，仍会产生很大推力。基础设计主要考虑风电机组承受的静载荷，一般不考虑疲劳载荷。设计**安全系数取1.2**。
 - 基础面积不能太小，以避免对土壤造成太大压力。要进行基础最大压力计算，以确定土壤支撑面承载能力、土壤允许压强，保证机组不会下沉。

- **2.5 发电机**

- **风力发电机系统的分类：**

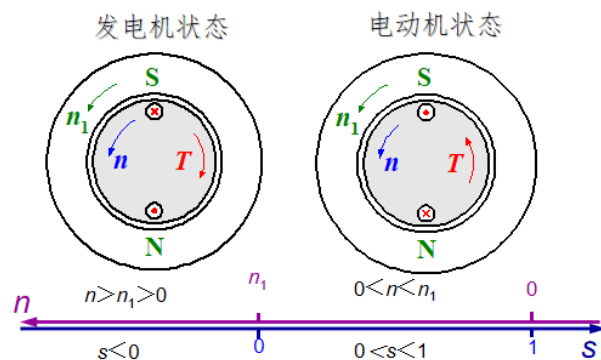
- **恒速/恒频风力发电机系统**
 - (1) 同步发电机系统
 - (2) 笼型异步发电机系统

- (3) 绕线转子异步发电机系统
- 恒速恒频发电系统指发电机的转速不变，得到和电网频率一致的恒频电能。
- 变速/恒频风力发电机系统
 - (1) 变速恒频鼠笼异步发电机系统（高速）
 - (2) 变速恒频双馈异步发电机系统（高速）
 - (3) 变速恒频电励磁同步发电机系统（中、低速）
 - (4) 变速恒频永磁同步发电机系统（中、低速）
 - (5) 变速恒频横向磁通发电机系统（中、低速）
 - 变速恒频是指发电机的转速随风速变化，发出的电流通过适当的变换，使得输出频率与电网频率相同。
- 同步发电机：
 - 同步发电机是根据电磁感应原理而制成的。一般分为转场式同步发电机和转枢式同步发电机，最常用的为转场式同步发电机。一部分线圈绕在一个导磁性能良好的
 - 金属片叠成的圆筒内壁的凹槽内，这个圆筒固定在基座上，称为定子。定子内的线圈可输出感应电动势和感应电流，所以又称其为电枢。另一部分线圈则绕在定子圆筒内的一磁导率强的金属片叠成的圆柱体的凹槽内，称为转子。
 - 定子铁心上的槽内嵌有均匀分布的在空间彼此相隔120度角的三相电枢绕组。转子上装有磁极和线圈（即励磁绕组），当励磁绕组通以直流电流 I_f 后形成直流恒定磁场。
 - 转子被风力机带动旋转，则直流恒定磁场也随之旋转，与定子三相绕组之间有相对运动，因而直流恒定磁场的磁力线切割定子三相绕组，在定子三相绕组中感应出3个幅值相同，彼此相隔120度角的交流电势。这个交流电势的频率 f 决定于电机的极对数 p 和转子转速 n ，即

$$f = \frac{p}{60} n$$
 - 转子及其恒定磁场被风力机带动旋转时，在转子与定子之间的间隙中形成一个旋转的励磁磁场，称为转子磁场或主磁场。
 - 间隙的厚度和形状对磁场的分布和电机性能有重大影响。
 - 工作时，发电机的定子线圈即电枢都接有负载，定子线圈被磁力线切割以后产生的感应电动势通过负载形成感应电流，此电流流过定子线圈也会在间隙中产生一个磁场，称为定子磁场或电枢磁场。
 - 间隙中就形成两个磁场，这两个磁场相互作用构成一个合成磁场。发电机就是由合成磁场的磁力线切割定子线圈而发电的。
 - 由于定子磁场是由转子磁场引起的，而且它们之间总是保持着一先一后并且同速的同步关系，所以这种发电机称为同步发电机。即所谓的同步就是转子的转速等于定子旋转磁场的转速。
 - 同步发电机的频率和电网频率一致。我国电网的频率为50Hz,故有

$$pn = 3000$$

- 由上式可知，要使得发电机供给电网50Hz的工频电能，发电机的转速必须为某些固定值，这些固定值称为**同步转速**。
- 例如：2极电机（ $p=1$ ）的同步转速为3000r/min，4极电机（ $p=2$ ）的同步转速为1500r/min。
- 只有运行于同步转速，同步电机才能正常运行，这也是同步电机名称的由来。
- 表征同步发电机性能的主要是**空载特性**和**负载运行特性**。
- 发电机不接负载时，电枢电流为零，称为空载运行，此时电机定子的三相绕组只有励磁电流 I_f 感生出的空载电动势。
- 反映**空载电动势与励磁电流 I_f 关系的曲线称为同步发电机的空载特性**。
- 负载运行特性指**发电机接上对称负载后发电机的运行特性**。
- **同步发电机的主要优点：**
 - 效率高，可以向电网或负载提供无功功率，可以并网运行，也可以单独运行。
- **同步发电机的主要缺点：**
 - 结构和控制系统比较复杂；并网需要一整套并网措施。
- **异步发电机：**
 - 异步发电机又称为**感应**发电机，其电枢(定子)磁场的旋转速度落后于主磁场（转子磁场）的旋转速度。
 - **优点：**
 - 结构简单，价格低廉，维护少；
 - 允许其转速在一定范围内变化，可吸收瞬态阵风能量，功率波动小；
 - 并网容易，不需要同步设备和整步操作
 - 异步发电机只要频率接近电网频率就可以并网，但是当频率低于电网频率时，异步发电机成了电动机，由电网的电力驱动发电机转动，此种现象称为**逆功率**，故并网时需要安装逆功率切换装置。
 - **异步发电机的运行状态**
 - 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**。



• 异步发电机的主要类型

• 笼型感应发电机

- 笼型感应发电机的定子铁心和定子绕组的结构与同步发电机相同，转子采用鼠笼型结构。
- 并网运行的感应发电机的电压和频率与电网相同，感应发电机的并网不需要设置同步、整步装置。但是并网瞬间有很大的冲击电流。
- 风力发电机由于受风速变化影响，绝大部分时间处于轻载状态，要求发电机的效率曲线平坦，在中低负载区效率较高。**可考虑在轻载区，将定子绕组由角接改为星接，降低铁耗。**
- 笼型感应发电机的选择时的注意事项：
 - (1) 选择风力发电机时，**不宜用同容量的电动机来替代**降低设备成本，原因之一在于电动机电压较低，会引起励磁电流大幅增加，功率因数降低；另外，按电动机设计时，为了提高电机的效率，总是最大可能地减少电机转子铜耗，电机的转差率一般比较小，而风力发电机运行时，考虑到提高发电机输出功率的稳定性，希望发电机有较大的转差率；
 - (2) 发电机的铁心材料应选择损耗小、导磁性能强的**冷轧硅钢板**；
 - (3) 定子绕组应为低谐波含量的**对称均匀绕组**，尽最大可能地增加每极每相槽数；
 - (4) 发电机转子可以采用铜条转子，也可以采用铸铝转子，**优先选择铜条转子**；
 - (5) 发电机定转子槽配合选择时，建议选择**无不良电磁噪声、振动和轴电流的槽配合**；
 - (6) 选择发电机轴承时，要考虑到电机运行发热后引起**轴膨胀的影响**，要允许电机轴能向非转动端膨胀；
 - (7) 发电机结构要注意能保证在任何状态下，**内外气压平衡**，必要时可在机座上钻气压平衡孔；
 - (8) 发电机转子要经**动平衡校正**；
 - (9) 发电机必须有**安全接地螺栓**；

- (10) 发电机的**磁路设计**要合理，磁密不宜取得太高，定子齿部、轭部磁密一般不要超过1.65T，空气隙磁密不超过0.85T，定子电密不超过5.0A/mm²。
- **绕线转子异步发电机**
 - 绕线型转子绕组通常采用**Y联结**
- **双馈式感应发电机**
 - 构造与传统的绕线式感应发电机类似，由于其定子、转子都能够向电网馈电，故简称双馈电机。具有以下特点
 - (1) 绕线型转子三相异步发电机的一种；
 - (2) 定子绕组直接接入交流电网；转子绕组端接线由三只滑环引出，接至一台双向功率变换器；
 - (3) 转子绕组通入受控的变频交流励磁电流；
 - (4) 转子转速低于同步转速时也可运行于发电状态；
 - (5) 定子绕组端口并网后始终发出电功率；但转子绕组端口电功率的流向取决于转差率；
 - 双馈异步发电机的**运行原理** — **转子交流励磁**
 - (1) 转子电流的频率为**转差频率**，跟随转子转速变化；
 - (2) 通过调节转子电流的**相位**，控制转子磁场领先于由电网电压决定的定子磁场，从而在转速高于和低于同步转速时都能保持发电状态；
 - (3) 通过调节转子电流的**幅值**，可控制发电机定子输出的无功功率；
 - (4) 转子绕组参与**有功和无功功率**变换，为转差功率，容量与转差率有关（约为全功率的0.3倍， $|s| < 0.3$ ）
 - **系统特点：**
 - (1) 连续变速运行，风能转换率高；
 - (2) 部分功率变换，变频器成本相对较低；
 - (3) 电能质量好（输出功率平滑，功率因数高）；
 - (4) 并网简单，无冲击电流；
 - (5) 降低桨距控制的动态响应要求；
 - (6) 改善作用于风轮桨叶上机械应力状况；
 - (7) 双向变频器结构和控制较复杂；
 - (8) 电刷与滑环间存在机械磨损。
 - **双馈异步风力发电系统：双馈异步风力发电机 + 变流器**
 - 双馈风力发电机组的控制核心是**通过变流器对双馈发电机转子电流(频率、幅值、相位)的控制**，以达到与风电机组机械部分运行特性匹配、提高风能的利用效率及改善供电质量的目的。

- 发电机常见故障：

- 1) 发电机过热

- 可能原因：发电机的三相负荷电流不平衡；风道被积尘堵塞，通风不良；进风或进水温度过高冷却器有堵塞现象；轴承磨损或轴承加润滑油脂过多或过少；定子铁心绝缘损坏，引起片间短路；定子绕组的并联导线断裂

- 2) 发电机中性线对地有异常电压

- 可能原因：发电机绕组有短路或对地绝缘不良；三相不平衡会引起空载时中性线对地无电压，而有负荷时出现电压

- 3) 发电机电流过大

- 可能原因：负荷过大；输电线路发生相间短路或接地故障

- 4) 发电机端电压过高

- 可能原因：与电网并列的发电机电网电压过高；励磁装置的故障引起过励磁

- 5) 功率不足

- 即发电机端电压低于电网电压，送不出额定无功功率
 - 可能原因：励磁装置电压源复励补偿不足，不能提供电枢反应所需的励磁电流；

- 6) 定子绕组绝缘击穿、短路

- 可能原因：定子绕组受潮；绕组本身缺陷或检修工艺不当，造成绕组绝缘击穿或机械损伤；绕组过热；绝缘老化；发电机内部进入金属异物；过大电压击穿；

- 7) 铁心片间短路

- 可能原因：铁心叠片松弛；铁心片个别地方绝缘受损伤或铁心局部过热，使绝缘老化；铁心片边缘有毛刺或检修时受机械损伤；有焊锡或铜粒短接铁心；绕组发生弧光短路

- 8) 发电机失去剩磁，启动时不能发电

- 可能原因：励磁机磁极所用的材料接近软钢，剩磁较少；发电机的磁极失去磁性

- 9) 发电机启动后，电压升不起来

- 可能原因：励磁回路断线，电压升不起来；剩磁消失；励磁机的磁场线圈极性相反；发电机检修时误操作讲磁场线圈通以反向直流电，导致剩磁消失或反向

- 10) 发电机的振荡失步

- 可能原因：系统发生短路故障；发电机大幅度甩负荷

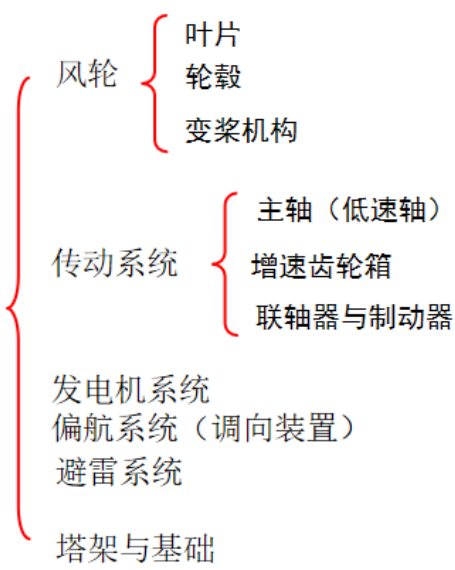
- 11) 发电机振动

- 可能原因：转子不圆或平衡未调整好；转轴弯曲；联轴节连接不正；结构部件共振；励磁绕组层间短路；供油量或油压不足（或相反）；定子铁心装配松动；轴承密封过紧

- 控制系统

- 风电机组核心系统，对机组在整个起动停机、并网运行、变频调速、变桨偏航、安全保护、紧急制动等各个环节进行监控，保证机组安全高效运行。

风力发电机基本组成



第三章 风力机空气动力学基础

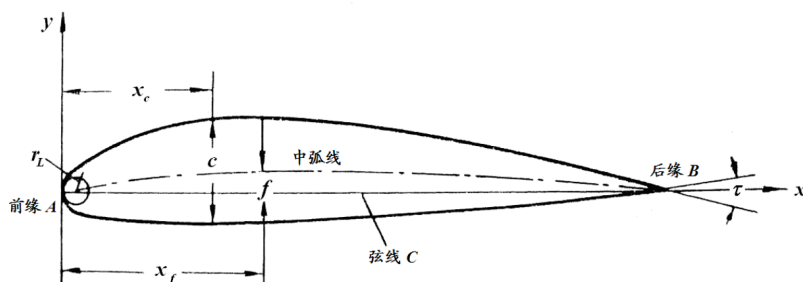
• 3.1 空气动力学的基本概念

• 3.1.1 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：
 - 1、某一瞬时，各气体质点的速度方向连成的一条平滑曲线；
 - 2、描述了该时刻各气体质点的运动方向，即曲线切线方向。
 - 3、一般情况下，各流线彼此不会相交。
 - 4、流场中众多流线的集合称为流线簇、流线的疏密程度可以视风速大小而定：风速大、流线密；反之。
 - 5、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，不同形状的物体对气流的阻碍效果也不相同。

• 3.1.2 翼型的气动特性

• (1) 翼型的几何描述

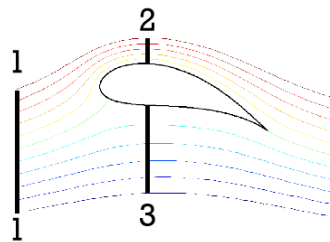


- 通常翼型几何外形由下列参数决定：
 - 翼型前缘A：翼型的前部A为圆头；
 - 翼型后缘B：翼型的尾部B为尖型；
 - 翼型弦线C：翼型前缘与后缘的连线称为翼型弦线，弦线长度就是翼型的弦长C，弦长C是翼型的特征尺寸
 - 中弧线：翼型内切圆圆心的连线称为翼型的中弧线，对称的翼型中弧线与翼弦重合；
 - 上翼面：凸出的翼型表面；下翼面：平缓的翼型表面。
 - 厚度：翼弦垂直方向上上下下翼面间的距离。
 - ——厚度分布：沿着翼弦方向的厚度变化。
 - 弯度：翼型中弧线与翼弦间的距离。
 - ——弯度分布：沿着翼弦方向的弯度变化。
- (2) 升力和阻力
 - 升力和阻力试验

- 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。

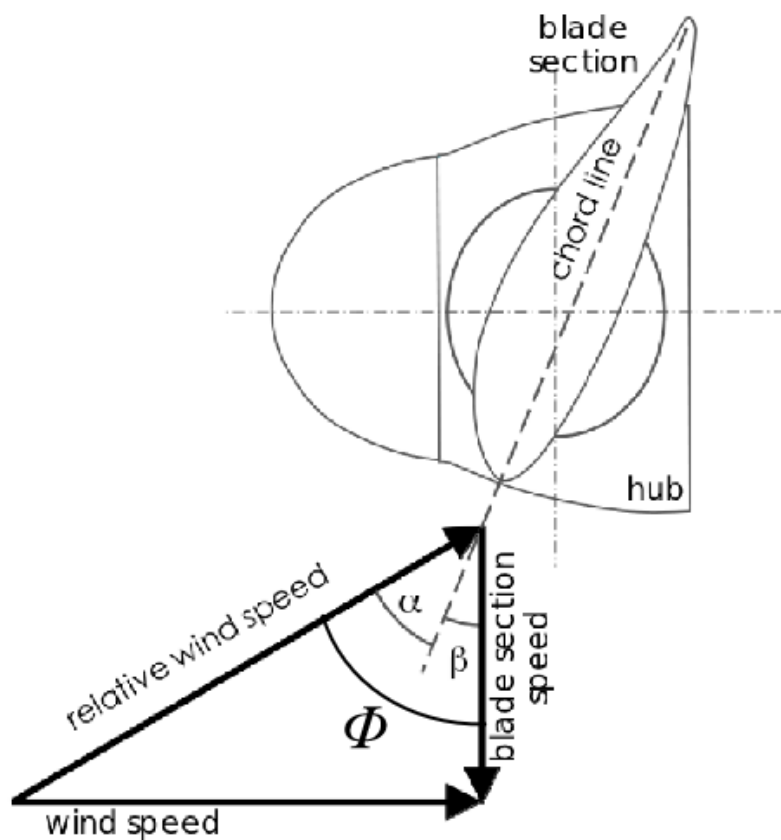
——上翼面突出，流场横截面面积减小，空气流速增大，即 $V_2 > V_1$ 。而由伯努利方程，必使：

$P_2 < P_1$ ，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： $P_3 \approx P_1$ 。

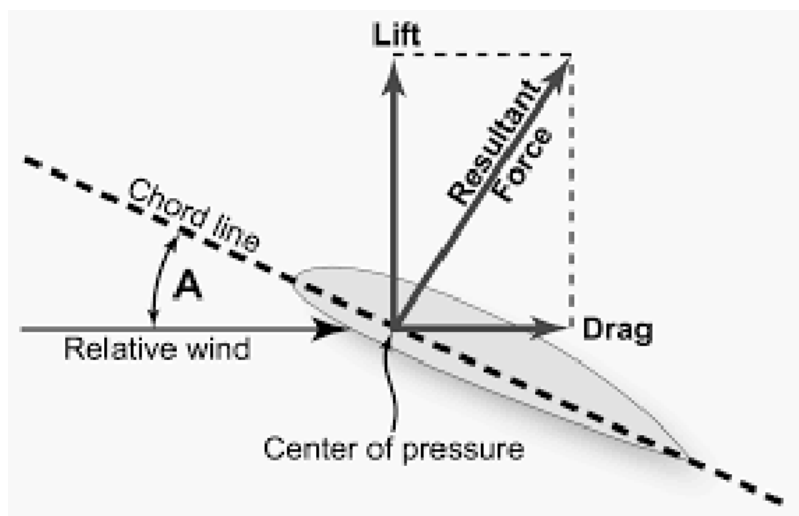
- 由于机翼上下表面所受的压力差，使得机翼得到向上的作用力——升力。

• 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 F_D** ；而在垂直于翼弦方向上的投影（或垂直于阻力 F_D 的力），称为**升力 F_L** 。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

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

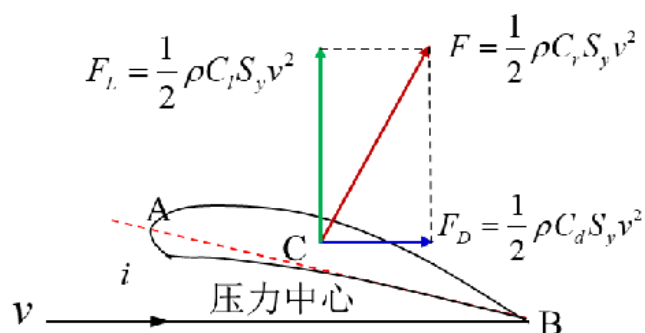
$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L S_y V^2 \quad (3-3)$$

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：

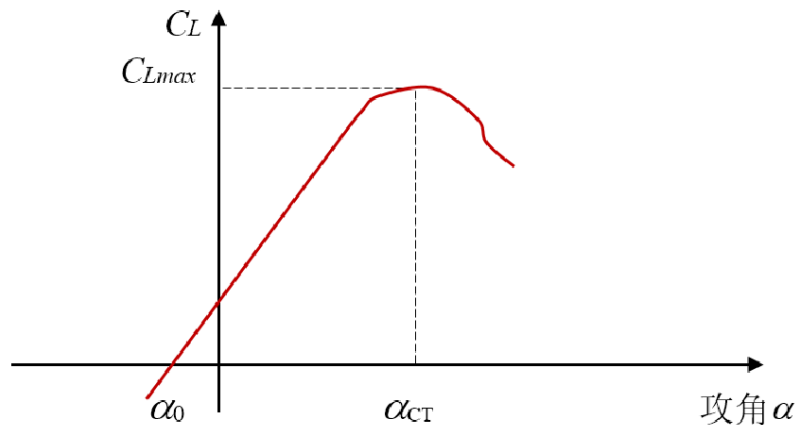
$$C_L = \frac{2F_L}{\rho S_y V^2} \quad (3-6)$$

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。

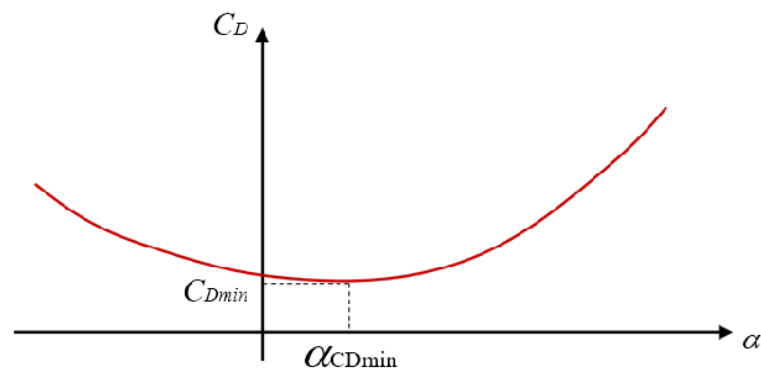
在 $\alpha_0 \sim \alpha_{CT}$ 之间， C_L 与 α 呈近似的线性关系，即随着 α 的增加，升力 F_L 逐渐加大。

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：

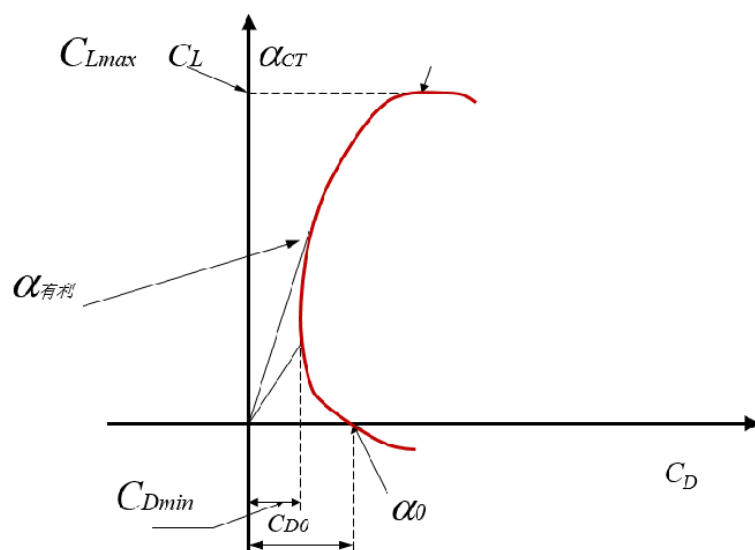
试验表明，当翼型的前缘抬高时，在负攻角情况下阻力变化不大。前缘低垂时则在负攻角时导致阻力迅速增加。

- 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的攻角 $\alpha_{有利}$ 。

- 3.2 风力机基本理论

- 3.2.1 几何描述

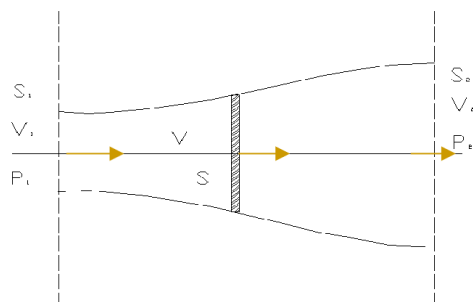
- 叶轮轴线：叶轮旋转的轴线。

- **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 。

• 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**。

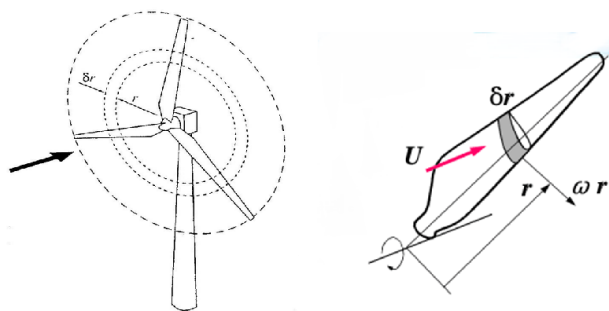
• 3.2.3 叶素理论

• 基本思想

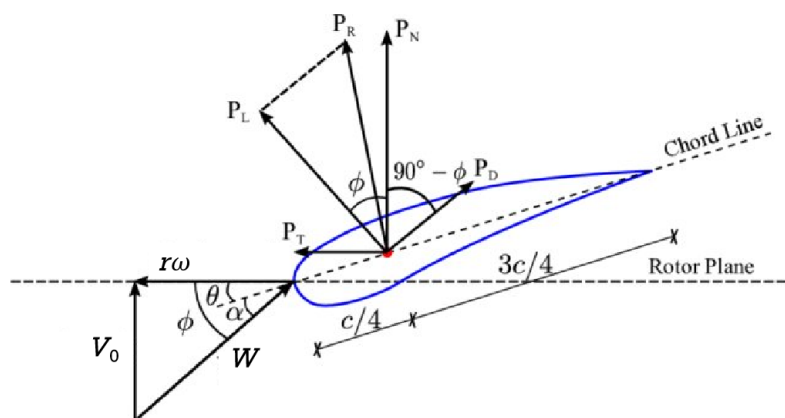
- 将叶片沿展向分成若干微段—**叶片元素**—**叶素**；
- 视叶素为**二元翼型**，即不考虑展向的变化；
- 作用在每个叶素上的力互不干扰；
- 将作用在叶素上的气动力元沿**展向积分**，求得作用在叶轮上的**气动扭矩与轴向推力**。

• 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：**



- **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：

$$dT = r dF_t = r(dL \sin \phi - dD \cos \phi) \quad (1)$$

由可利用阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 分别求得 dD 和 dL ：

$$\begin{aligned} dD &= \frac{1}{2} \rho C_D W^2 C dr \\ dL &= \frac{1}{2} \rho C_L W^2 C dr \end{aligned}$$

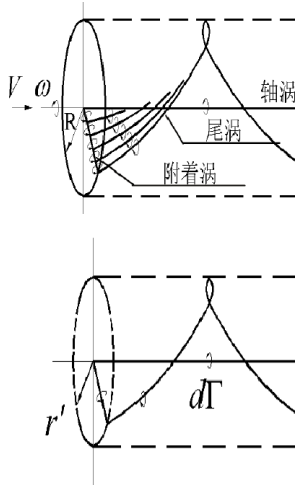
故 dR 和 dT 可求。

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： $P = \int dT \omega = \omega T$ (2)

- **3.2.4 动量定理**

气流在风轮产生转矩时，也受到了风轮的反作用力，因此，在风轮后的尾流气流发生与叶片旋转方向相反的旋转。



气流在风轮产生转矩时，也受到了风轮的反作用力，因此，在风轮后的尾流气流发生与叶片旋转方向相反的旋转。

由动量方程得出 $d\mathbf{r}$ 圆环上的轴向力可表示为

$$dT = dm(v_1 - v_2)$$

dm 为单位时间内流经平面圆环上的空气流量

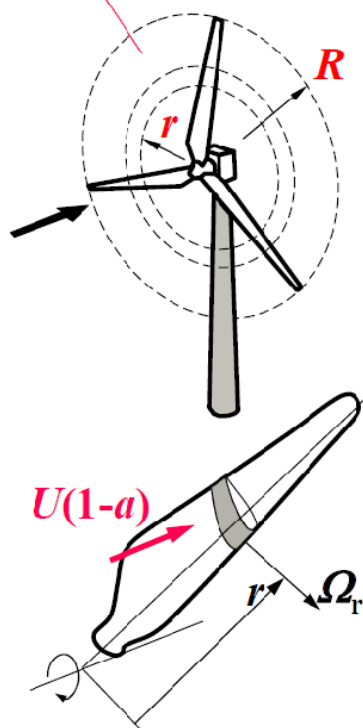
$$dm = \rho v dA = 2\pi\rho v r dr$$

$$\text{则 } dT = 4\pi\rho v_1^2 r a(1-a) dr$$

作用在风轮上的中轴向力可表示

$$T = \int dT = 4\pi\rho v_1^2 r \int_0^R a(1-a) dr$$

风轮旋转平面



风轮轴功率是风轮转矩与风轮角速度的乘积：

$$P = \int dP = 4\pi\rho\Omega^2 v_1 \int_0^R a'(1-a)r^3 dr$$

定义风轮的叶尖速比： $\lambda = \frac{R\Omega}{v_1}$,

风轮扫风面积 $A = \pi R^2$

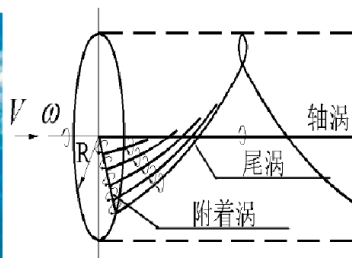
则风能利用系数

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3} = \frac{8\lambda^2}{R^4} \int_0^R a'(1-a)r^3 dr$$

考虑风轮后尾流旋转时，风轮轴功率有损失，风轮利用系数减少。

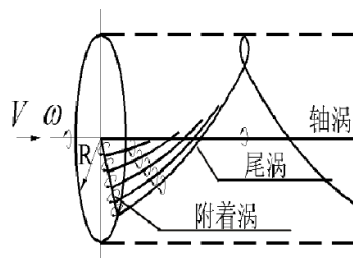
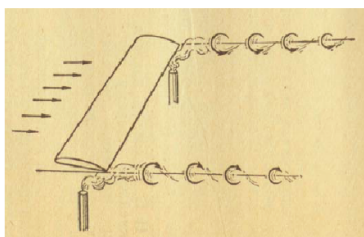
• 3.2.5 涡流理论

• 1) 涡流系统



风轮的涡流系统

1. 轴涡只诱导周向诱导速度。
2. 附着涡的诱导速度相互抵消(反对称)
3. 螺旋涡只诱导轴向诱导速度)



风轮的涡流系统

1. 中心涡(轴涡)。
2. 附着涡
3. 叶尖部的螺旋我

• 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/m^3 ；
 S ---风轮的扫掠面积， m^2 ；
 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

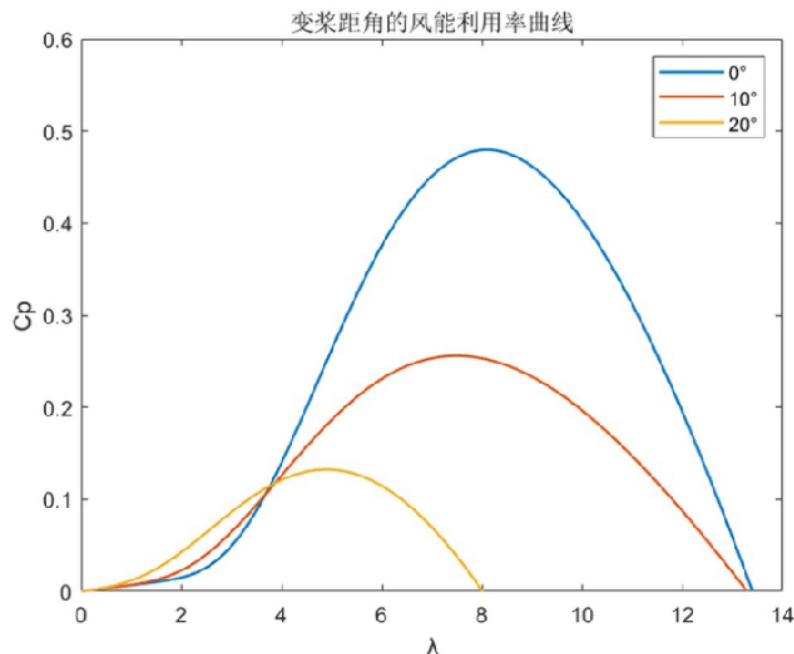
- 风轮叶片尖线速度与来流风速之比称为叶尖速比 λ 。下图是一个风力机的叶轮， u 是旋转的风力机风轮外径切线速度， v 是风进叶轮前的速度。叶尖速比可用下式表示：

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

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 升阻比

- 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

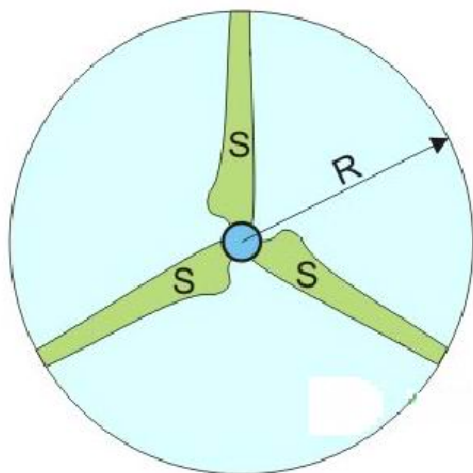
$$\frac{L}{D} = \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D} \quad (3-23)$$

- 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，CM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。

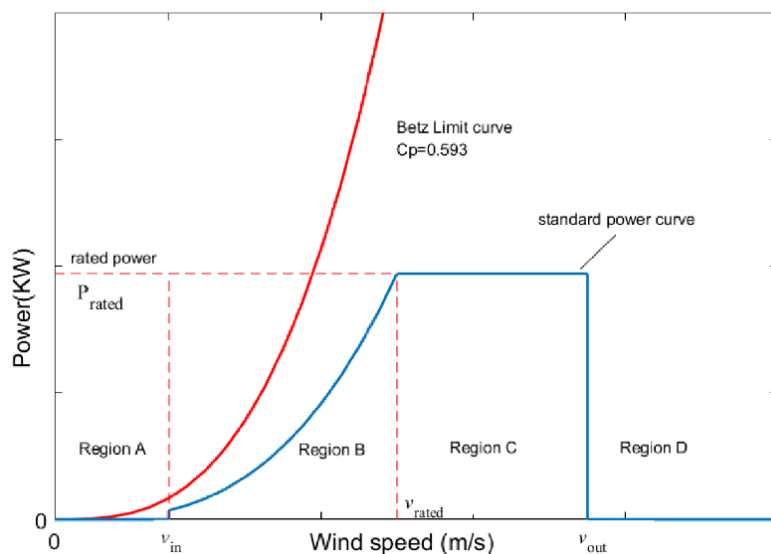
- 安全风速：风力发电机组结构所能承受的最大设计风速。

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。

3.4 风能利用过程的数值模拟

(1) 流体力学基本概念

- 理想流体与粘性流体/可压流体与不可压流体/定常与非定常流动/层流与湍流/对流与扩散

(2) 流体力学的基本方程

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{\text{div}(\rho\phi\bar{\mathbf{u}})}_{(2)} = \underbrace{\text{div}(\Gamma \cdot \mathbf{grad}\phi)}_{(3)} + \underbrace{S_\phi}_{(4)}$$

- (1)：瞬态项——流场的非定常性对物理量的影响
- (2)：对流项——流体的宏观运动对物理量的影响
- (3)：扩散项——流体中微观粒子运动对物理量的影响
- (4)：源项——其他所有因素(外力等)对物理量的影响

(3) 应用

- 算例1 实验室尺度风力机尾涡结构模拟
- 算例2 理想布局情形下风力机阵列尾流
- 算例3 真实地形下风电场的尾流模拟
- 算例4 相邻风电场的尾流效应
- 算例5 复杂地形下风力机的场址模拟
- 算例6 森林覆盖的复杂地形风电场尾流
- 算例7 大规模海上风电尾流及运行特性

第四章 风力机的功率输出及功率调节

• 4.1 风力机功率输出

• 4.1.1 风力机功率输出

- 功率输出指的是风力机在某一具体时刻的实际功率输出，即输出电压与电流的乘积（ $P_{\text{出}} = UI$ ）。
- 而

$$P_{\lambda} = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_P (4-2)$$

- 式（4-2）是功率输入公式，故效率为

$$\eta = \frac{U I}{\frac{1}{2} \rho S V^3 C_P} (4-3)$$

• 4.1.2 影响风力机功率输出的因素

- （1）叶片
 - 不同翼型吸收风能的能力不同：
 - 平板的等截面翼型吸收风能较差，功率输出少；
 - 弯曲的变截面翼型则要高不少。
 - 叶片长度大，吸收风能多，输出功率也多。
- （2）安装高度（轮毂高度）
 - 提高风力发电机的安装高度能够获得更多的风能。
 - 风力机离地面越高越能有效避开地形地貌及建筑物、植物等对风的扰动。在发电机功率足够的前提下提高其安装高度可以大幅度地增加发电机的功率输出。
 - 风力发电机安装过高会带来安装、运输以及维修或维护的不便。安装高度过高承受的风压更大，对发电机组、塔架、地基的强度要求会大大提高，增加成本。将提高安装高度而增加的功率输出收益抵消掉。
- （3）风轮自身气动性能
 - 不同风速下风力机输出功率随转速变化的特性，风轮自身的气动性能好，则功率输出多。
- （4）发电机效率随功率变化的特性
 - 发电机效率越高，则功率输出越大
- （5）系统控制风轮对风的准确程度
 - 即调向装置的灵敏度，越灵敏，则效率越高。
- （6）功率调节的方式

- 该因素对功率输出的影响将在下面讨论

• 4.2 风力机功率调节（控制）方式

• 4.2.1 概述

- 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。

• 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°/s或更高
- 桨距角的范围为：运行时为0°~35°；制动时为0°~90°；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 C_p
- 确保高风速段的额定功率
 - 桨距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
- 4.2.3 恒速与变速运行
 - 风力机采用恒速运行，控制简单，但不能最大限度利用风能。
 - 如用定桨距机组，在低风速运行时效率较低，由于转速恒定，而风速是变化的（运行风速在3-25m/s），如果设计低风速时效率过高，叶片会过早失速。
 - 发电机在低负荷时效率也有问题，当 $P>30\%$ 的额定功率时，效率 $>90\%$ ，但 $P<25\%$ 的额定功率时，发电机效率将急剧下降。

- 解决的办法有采用**双速运行和变速运行**两种。

- **双速运行**

- 将发电机分别设计成4极和6极，一般6极发电机的额定功率设计成4极发电机的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ 。例如：600kW的风力机：6极发电机功率为150kW，4极发电机功率为600kW；1300kW的风力机：6极发电机功率为250kW，4极发电机功率为1300kW。
- **变极对数发电机特点**：风轮和发电机在低风速的效率提高，与变桨距机组在额定功率前功率曲线差别较小。
- **双速双极对数发电机的优点**：在低风速段可改变风轮转速，保持最佳叶尖速比。风轮低转速运行段可降低叶片噪声，风轮气动扭矩小，传动平稳。

- **变速运行**

- **宽幅变速**：风轮转速可在**0到额定转速**范围内变化，发电机转子通过**变频器**与电网连接。
- **窄幅变速**：风轮转速只在**从30%-50%的电机同步转速到额定转速**之间变化。发电机**定子直接连电网**，转子通过**滑环和变频器**与电网连接。
- 变速运行需要风力机有一套控制系统用来限制功率和转速，使风力机在大风或故障过载荷时得到保护。
- **转速控制与功率控制不同**：调节功率或功率固定，相应的转速不会变，发电机频率由电网直接控制。
- 滑差可调异步电动机的功率调节
 - 单纯依靠变桨距调节风力机的功率输出，不能实现发电机输出功率的稳定性；
 - 利用**具有转子电流控制器**的滑差可调异步发电机与变桨距风力机配合，共同完成发电机输出功率的调节，则能实现输出功率的稳定调节。

- **4.3 风力机制动装置**

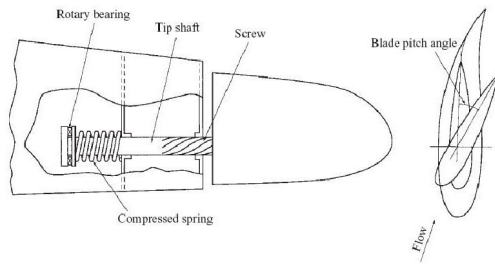
- **4.3.1 概述**

- 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

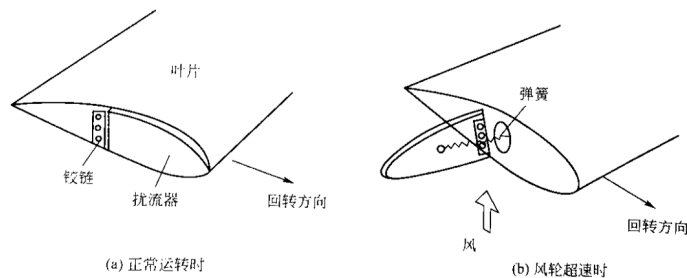


图 4.39 利用扰流板产生空气动力制动

- 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。

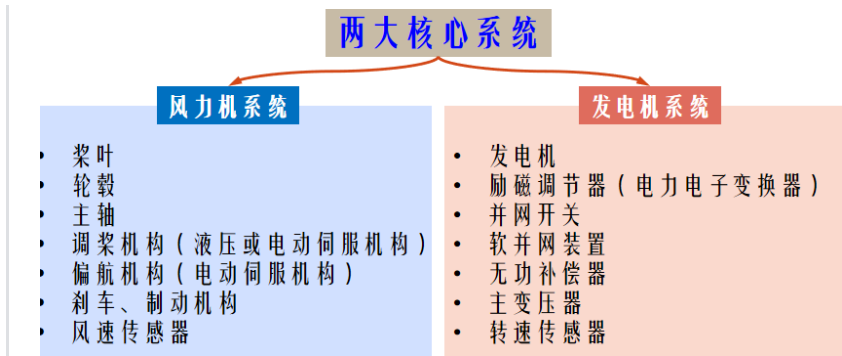
• 制动过程

- 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 风力发电系统及其控制(1)

5.1 风力发电系统的主要控制目标

5.1.1 概述



5.1.2 执行机构

- 液压油供给系统/变桨系统/叶轮机械制动系统/偏航制动系统

5.1.3 控制目标

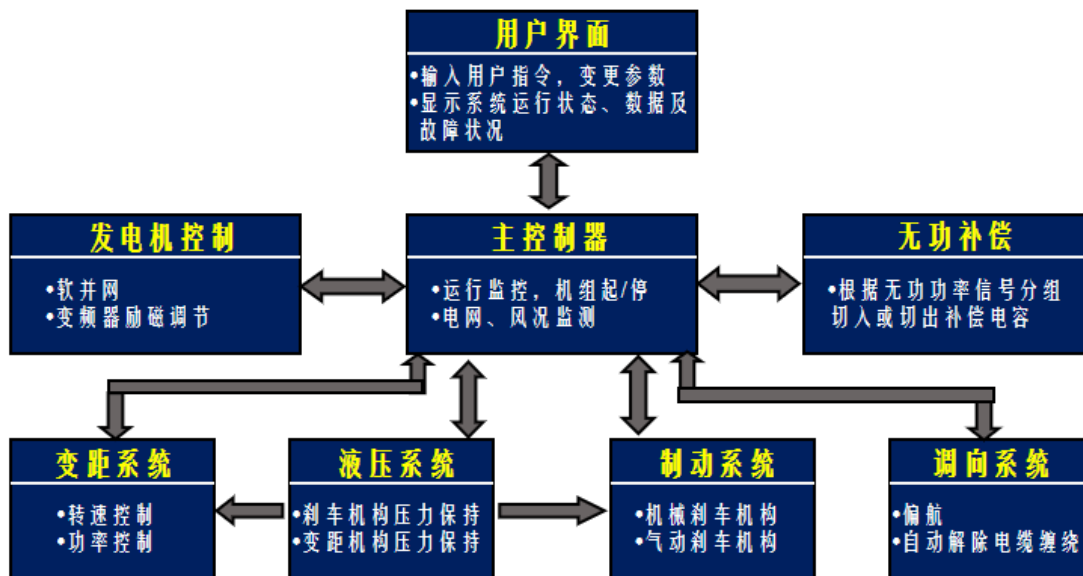


5.2 风力发电系统的主要控制要求

控制系统基本功能

- 1、根据风速信号自动进入启动状态或从电网切出
- 2、根据功率及风速大小自动进行转速和功率控制
- 3、根据风向信号自动对风
- 4、根据功率因数自动投入（或切出）相应的补偿电容
- 5、当发电机脱网时，能确保机组安全停机
- 6、机组运行过程能对电网、风况和机组的运行状况进行监测和记录；对出现的异常情况能够自行判断并采取相应保护措施；能够根据记录的数据，生成各种图表，反映风力发电机组的各项性能指标
- 7、对在风电场运行的风力发电机组还应具备远程通信的功能

风力发电机组的控制系统基本结构



5.3 定桨距风力发电机组

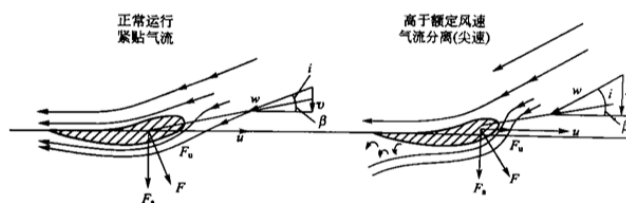
5.3.1 定桨距风力发电机组的特点

1、风轮结构

- (1) 主要特点：桨叶与轮毂的连接是固定的。
- (2) 上述特点带来的亟需解决的两个问题：
 - ① **高于额定风速时**，桨叶必须能自动将功率限制在额定功率附近，以确保叶片结构安全；
 - ② **脱网（突甩负荷）时**，桨叶自身应具备制动能力，使其安全停机。
- 失速性能良好的叶片（翼型），限制大风时的功率；添加了叶尖扰流器（避免仅适用机械刹车造成结构强度破坏）

2、定桨距叶片的失速调节原理

(1) 桨叶的安装角不变，风速增加→功角增加→升力系数线性增加（ C_D 增加）→在 C_{Lmax} 附近 C_L 增加变缓→在 C_{Lmax} 之后 C_L 减小（ C_D 继续增加）→升力下降（阻力增加）→叶片失速→限制功率增加



- (2) 叶片攻角由根部向叶尖逐渐减小，根部先进入失速，随风速增大逐渐向叶尖扩展。失速部分使功率减少，未失速部分功率仍有增加，使功率保持在额定功率附近。

3、叶尖扰流器

- 叶尖部分可旋转的空气阻尼板，正常运行时，在液压控制下与叶片成为整体，风力机脱网时液压控制指令将扰流器释放并旋转80~90°，产生阻力停机，即产生空气动力刹车。

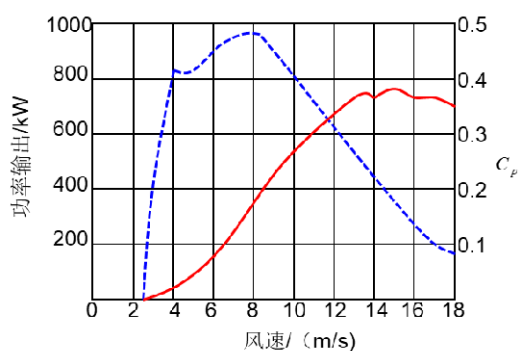
- 空气动力刹车是按失效思想设计，即起到液压系统故障时的机组停机保护。（控制系统正常指令or液压系统故障）

• 4、功率输出

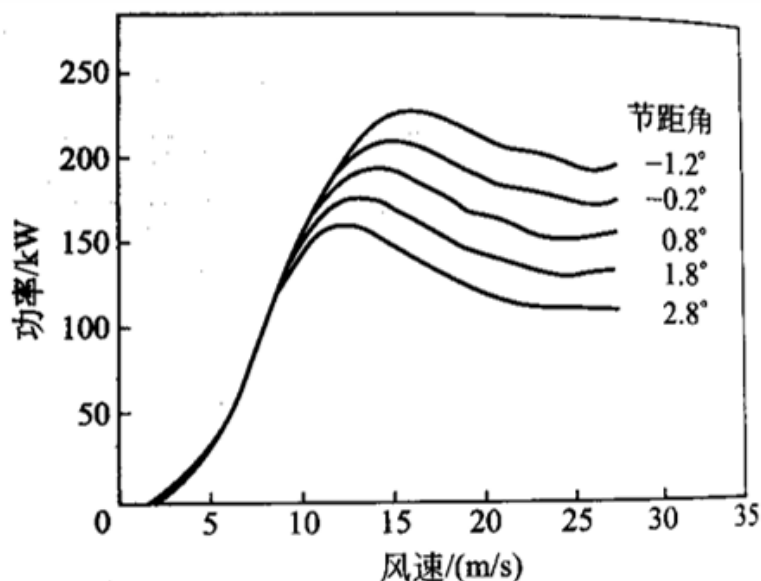
- 功率输出主要决定于风速，但气温、气压和气流扰动等均影响功率输出。特别地，叶片功率曲线是在标准空气密度 $\rho=1.225\text{kg/m}^3$ 测出的。
- 气压与气温变化时，大气密度也会变化：一般温度变化 $\pm 10^\circ\text{C}$ ，空气密度变化 $\pm 4\%$ 。因此气温升高，密度下降，输出功率减少。750kW机组可能会出现30~50kW的偏差。
- 海拔、气温升高，密度下降，输出功率减少。

• 主动失速型定桨距风电机组

- 由于桨距角和转速都是固定不变的，使机组功率曲线上只有一点有最大功率系数，这一点对应于某一个叶尖速比。当风速变化时，功率系数也随之改变。而要在变化的风速下保持最大的功率系数，必须保持转速与风速之比不变，即风力发电机组的转速要能够跟随风速的变化。
- (1) 额定转速对功率输出的影响：
 - 额定转速低的机组，低风速下有较高CP；额定转速高的机组，高风速下有较高CP。额定转速的设定：最大功率系数并非出现在额定功率上。额定风速前已开始失速，到达额定风速时功率系数已降低很多。



- (2) 桨距角对功率输出的影响：
 - 提高低风速时功率系数和考虑高风速时的失速性能。
 - 桨距角究竟如何影响功率输出
 - 低风速：不同桨距角对应功率曲线几乎重合；
 - 高风速：桨距角对最大功率输出（额定功率）影响显著。
 - 桨距角改变桨叶对气流的失速点（桨距角越小，失速点越高，最大功率输出越高）



• 5.3.2定桨距风力发电机组的基本运行过程

• 1、待机状态

- 风速 $v > 3\text{m/s}$ 但没达到切入转速，风机开始转动并进入发电状态，但没有并网的自由转动状态。控制系统做好切入电网的准备；机械刹车已松开；叶尖阻尼板已收回；风轮处于迎风状态；液压系统压力保持在设定值；风况、电网和机组的所有状态参数检测正常，一旦风速增大，转速升高，即可并网。

• 2、风力发电机组的自启动及启动条件

- **自启动：**风轮在自然风速作用下（不靠外力），将发电机拖动到额定转速。**正常启动前10min，机组控制系统需对电网、风况和机组状态进行检测，需具备的条件为：**
 - **电网：**连续10min无过电压、低电压；电网电压0.1秒内跌落值小于设定值；电网频率在设定范围内；无三相不平衡现象。
 - **风况：**连续10min风速在机组运行范围内（ $3.0\text{m/s} \sim 25\text{m/s}$ ）。
 - **机组：**发电机温度、增速器油温在设定值范围以内；液压系统各部位压力在设定值以内；液压油位和齿轮润滑油位正常；制动器摩擦片正常；扭缆开关复位；控制系统电源正常；非正常停机故障显示均已排除；维护开关在运行位置。
 - 上述条件满足时，按控制程序，机组开始执行“风轮对风”与“制动解除”指令。

• 3、风轮对风&制动解除

- **（1）风轮对风：**当风速传感器测得10min平均风速 $v > 3\text{m/s}$ 时，控制器允许风轮对风。偏航角度通过风向仪测定。10分钟调整一次，调整中释放偏航刹车。
- **（2）制动解除：**自启动条件满足后，**控制叶尖扰流器**的电磁阀打开，压力油进入桨叶液压缸，**扰流器被收回与桨叶主体合为一体**。控制器收到扰流器回收信号后，压力油的另一路进入机械盘式制动器液压缸，**松开盘式制动器**。

• 4、并网发电

- 当平均风速 $> 3\text{m/s}$ 时，风轮逐渐启动；风速 $> 4\text{m/s}$ 时，机组可**自启动到设定转速**，此时发电机将控制程序自动连入电网。一般小发电机先并网，当风速继续增加到7-

8m/s时，切换到大发电机运行。如果平均风速处于8-20m/s，则直接从大发电机并网。

- 发电机的并网过程，是通过三相主电路上的**三组晶闸管**完成的。
- 当发电机过渡到稳定发电状态后，与晶闸管电路平行的**旁路接触器**合上，机组完成并网过程，进入稳定运行状态。

• 5.3.3定桨距风力发电机组的制动与保护系统

• 1、定桨距风力发电机组的制动系统

- **(1) 叶尖气动刹车：**液压系统提供的压力由经旋转接头进入桨叶根部的压力缸，压缩扰流器机构中的弹簧，使叶尖扰流器与桨叶主体平滑连为一体。当风力机停机时，液压系统释放压力油，叶尖扰流器在离心力作用下，按设计轨迹转过90°。
- **(2) 机械盘式刹车：**作为辅助刹车装置被安装在高速轴上，液压驱动。因风力机转矩很大，作为主刹车将会使刹车盘直径很大，改变了机组结构。大型风机一般有两部机械刹车。
- **制动系统按失效保护原则设计，一旦失电或液压系统失效即处于制动状态。**
- **风力发电机组几种制动过程：**
 - **正常停机制动过程：**电磁阀失电释放叶尖扰流器、发电机降至同步转速时主接触器动作与电网解列、转速低于设定值时第一部刹车投入、如转速继续上升第二部刹车立即投入、停机后叶尖扰流器**收回**。
 - **安全停机制动过程：**叶尖扰流器释放同时投入第一部刹车、发电机降至同步转速时主接触器跳闸同时第二部刹车立即投入、叶尖扰流器**不收回**。
 - **紧急停机制动过程：**所有继电器断电、接触器失电；叶尖扰流器和两部机械刹车**同时起作用**；发电机同时与电网解列。

• 2、超速保护

- 发电机或风轮转速超过额定转速110%时，控制器发出停机指令。
- 叶尖扰流器制动液压系统设有独立超速保护装置，风轮超速时，液压缸压力迅速上升，受压力控制的“突开阀”打开，压力油被泄掉，叶尖扰流器迅速打开，使得在控制系统失效时停机。

• 3、电网失电保护

- 电网一旦失电，控制叶尖扰流器和机械刹车的电磁阀立即打开，实现失压制动紧急停机。电网原因引起的停机，控制系统在电网恢复后10分钟自动恢复运行。

• 4、电气保护

- **过电压保护：**控制器对通过电缆进入控制柜的冲击电压具有自我保护能力；
- **感应瞬态保护：**晶闸管、计算机的过电压屏蔽，传感器、通信电缆的隔离。
- **雷击保护：**提供便捷的接地通道释放雷电。

• 5、紧急安全链

- 计算机系统的最后一级保护措施，原理是将对风力发电机组造成致命伤害的故障节点串联在停机回路中，任何一个故障都可紧急停机。如：紧急停机按钮、控制器看门

狗、叶尖扰流器液压继电器、扭缆传感器、振动传感器、控制器DC24V电源失电。**紧急停机后安全链只能手动复位。**

• 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。

• 5.3.5 功率过高或过低的处理

- **功率过低**：风速较低时发电机如持续出现逆功率（一般 $30\sim 60\text{s}$ ），**退出电网，进入待机状态**。脱网动作过程如下：断开发电机接触器，断开旁路接触器，不释放叶尖扰流器，不投入机械刹车。

- **功率过高**：可能为**电网频率波动**（瞬间下降），同步转速下降，而发电机转速短时间不会降低，转差较大，机械惯量不能使转速迅速下降，因而功率瞬时会变大。也可能是气候变化，空气密度增加造成。**当持续10min大于额定功率15%或2s大于额定功率的50%应停机。**

● **5.3.6 风力发电机组退出电网**

- 风速过高将导致叶片大部分严重失速，受剪切力矩超出承受限度而导致过早破坏。**因此，在风速超出允许值时，风力发电机组应退出电网。**
- 一般有以下几种情况：
 - 1) 风速高于25 m/s持续10min；
 - 2) 高于33m/s持续2s，正常停机；
 - 3) 风速高于50m/s持续1s，安全停机，侧风90度。

● **5.3.7 风力发电机组的各种状态**

运行状态	暂停状态	停机状态	紧急停机状态
机械刹车松开	机械刹车松开	机械刹车松开	机械刹车与气动刹车同时动作
机组并网发电	风力发电机组空转		计算机处于监测状态，输出信号被旁路
机组自动调向	机组调向保持工作状态	调向系统停止工作	紧急电路开启，即安全链开启
液压系统保持工作压力	液压系统保持工作压力	液压系统保持工作压力	计算机仍旧运行和测量所有信号
叶尖阻尼板回收（或变桨处于最佳角度）	叶尖阻尼板回收（或变桨距角在90°）	叶尖阻尼板弹出（或变距系统失去压力）	

● **5.4 变桨距风力发电机组**

● **5.4.1 变桨距风力发电机组的特点**

- 高于额定风速——改变攻角——保持功率恒定；
- 启动时控制驱动转矩——控制转速。
- **特点：**
 - 1、改善机组的受力，优化功率输出（粗调，与发电机转差率调节配合）
 - 2、比定桨距风力机额定风速低、效率高；且不存在高于额定风速的功率下降问题
 - 3、功率反馈控制使额定功率不受海拔、湿度、温度等空气密度变化影响
 - 4、启动时控制气动转矩易于并网；停机气动转矩回零避免突甩负荷
- 变桨控制系统包括三个主要部件，**驱动装置—电机，齿轮箱和变桨轴承。**
- 从额定功率起，通过控制系统将叶片以精细的变桨角度向顺桨方向转动，实现风机的功率控制。如果一个驱动器发生故障，另两个驱动器可以安全地使风机停机。
- 变桨轴承安装在轮毂上，通过外圈螺栓把紧。其内齿圈与变桨驱动装置啮合运动，并与叶片联接。
- 当风向发生变化时，通过变桨驱动电机带动变桨轴承转动从而改变叶片对风向的迎角，使叶片保持最佳的迎风状态，由此控制叶片的升力，以达到控制作用在叶片上的扭矩和

功率的目的。

- 变桨驱动装置通过螺柱与轮毂配合联接。变桨齿轮箱前的小齿轮与变桨轴承内圈啮合，并要保证啮合间隙应在0.2~0.5mm之间，间隙由加工精度保证，无法调整。

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

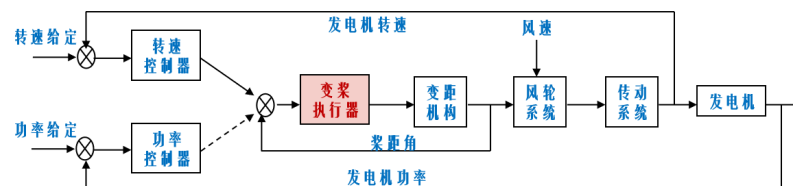
- 变桨距风轮的桨叶在静止时，节距角为90度，这时气流对桨叶不产生转矩，整个桨叶相当于一块阻尼板。当风速达到启动风速时，桨叶向0度方向转动，直到气流对桨叶产生一定的攻角（升力↑），风轮开始转动。
- 在发电机并网之前，节距角给定值由发电机转速信号控制，转速控制器按一定的速度上升斜率给出速度参考值，变桨距系统根据给定的速度参考值，调整节距角，进行所谓的速度控制。
- 转速反馈控制，速度给定加升速率限制有利于并网

2、欠功率状态

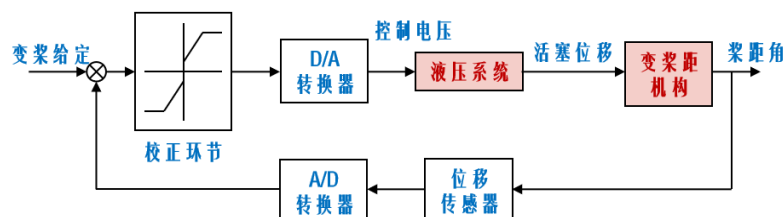
- 指发电机并入电网后，由于风速低于额定风速，发电机在额定功率以下的低状态运行。一般对于这种情况，不加控制，这时的变桨距与定桨距相同，功率输出完全取决于桨叶的气动性能（变速机组可通过追求最佳叶尖速比提高风机效率）。
- 近年来，以Vestas为代表的新型变桨距风力发电机组，为了改变低风速时桨叶的气动性能，采用了所谓Optitip技术，即可以根据风速的大小调整发电机转差率，使其尽量运行在最佳叶尖速比上，以优化功率输出。

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。

• 5.5 风力发电机的安全运行

• 5.5.1 风电机组对发电机系统的基本要求

- (1) 将风力机的机械能高效率地转换为电能:转速、转矩、效率、电压、电流、体积、重量
- (2) 输出的电能质量应满足电力系统的并网要求:频率、有功、无功、波形畸变率、三相不平衡度、 并网冲击、电压跌落跨越
- (3) 与风力机系统匹配，最大限度发挥风力机的风能转换率:有无齿轮箱（直驱）、变速（MPPT）、变桨（恒功）
- (4) 安全、可靠运行:过压、过流、过速、过热等状态监测与保护

• 5.5.2 风力发电机类型

- (1) 感应发电机（异步发电机）：强制并网，不需要同步装置
 - 感应发电机是一种定、转子间靠**电磁感应**作用，在转子内感应电流以实现**机电能量转换**的电机。感应发电机具有**结构简单、牢固、体积小、重量轻、辅助设备少、运行维护方便**等优点，尤其是感应发电机可独立运行的特点使其非常实用于电网覆盖不到的边远山区或缺电的城镇乡村或作为应急后备电源。
- (2) 同步发电机：需要同步装置
 - 同步发电机，即**转子（通直流电>固定磁场）**转速与定子旋转磁场的转速相同的交流发电机。按结构可分为旋转电枢和旋转磁场两种。
 - 同步发电机组转子带磁极，异步的不带，这样相当于靠磁极省下了励磁电能，所以同步发电机效率高。

• 5.5.3 发电机的直接并网

- (1) 异步发电机的并网
 - **并网条件**：发电机转子的转向与旋转磁场的方向一致，即**发电机的相序与电网的相序一致**；发电机的转速接近同步转速时，即可并网。
 - 风力发电机在风的驱动下启动后，通过增速齿轮箱将**异步发电机的转子带到同步转速附近**（一般为98%-100%）时，**测速装置给出自动并网信号**，通过断路器完成**合闸并网**过程。
 - **优点**：并网容易，控制简单；
 - **缺点**：并网瞬间产生较大的冲击电流，供电系统将受到5-6倍的发电机额定电流的冲击。（国产的FD-32-200型风力发电机在做并网实验的时候系统电压由410V下降到230V左右）
- (2) 同步发电机的并网
 - 为防止过大电流冲击和转矩冲击，发电机输出的三相交流电压与电网电压瞬时值完全一致，即应满足5个条件：“**同波形、同幅值、同频率、同相序、同相位**”

- **同波形**：由发电机设计、制造和安装保证
- **同幅值**：由励磁调节器自动保证
- **同频率**：由调速器保证，桨距调节可用作并网调速器
- **同相序**：由正确的旋转方向保证
- **同相位**：由调速器微调实现
- **并网问题**：并网控制复杂，对调速器要求过高，并网过程长，成功率较低，冲击电流不易控制，不适合于频繁脱、并网的风力发电机。
- **运行问题**：转子转速受电网频率的钳制，发电机呈现刚性机械特性。转子受到的冲击应力大，电磁功率波动快，风力机的风能转换率偏低。
- **过载问题**：高风速时，对变桨调节的动态响应要求高，无法利用转子惯量缓冲。留给过速保护的响应时间太短。

• 5.5.4 发电机的间接并网

• (1) 准同期并网方式

- 在转速接近同步转速的时候，先用电容励磁建立额定电压，然后对已经建立励磁的发电机电压和频率进行调节和校正使其与系统同步。当发电机的电压和频率相位与系统一致的时候，将发电机投入电网运行。采用这种方式并网需要**高精度的调速器**
- **优点**：冲击电流小
- **缺点**：并网时间长，必须控制在最大允许的转矩范围内运行，以免造成网上飞车。

• (2) 降压并网方式

- 在发电机和系统之间串接电抗器（电感器），以减少合闸瞬间冲击电流的幅值与电网电压下降的幅度。如接入大功率的电阻，这种并网方式需要增加大功率的电阻或电抗器组件，投资大，适用于小容量风力发电机组。

• (3) 捕捉式准同步快速并网

- 将常规的整步并网方式改为在频率变化中捕捉同步点的工作方法进行并网
- **优点**：并网快速可靠，即实现几乎无冲击的准同步并网，对机组的调速精度要求不高。

• (4) 降压并网方式

- 采用双向晶闸管的软切入法，使得异步发电机并网。一般有两种连接方式。
 - 1) 发电机与系统之间通过双向晶闸管直接连接；适用于中型风力发电机
 - 2) 发电机与系统之间软并网过渡，零转差自动并网开关切换连接

• 5.5.5 风力发电机的安全运行

• 1) 提高使用、维护、管理人员的技术能力

- ①对单机使用的用户应进行技术培训。风力发电机是综合性很强的风能发电设备，涉及多门学科（机械、电机、电控、液压机械及计算机等），风电机制造企业应对用户进行培训。
- ②对风电场的员工进行培训。

• 2) 风力发电机对自然灾害的防护

- ①风力发电机应安装避雷装置
- ②防止台风、强风暴对风力发电机的袭击
- ③风力发电机应防止风雪的袭击
- ④风力发电机的防腐蚀
- ⑤由微机控制的风力发电机应注意防干扰
- ⑥防止发电机叶片断裂

- **3) 安全保护措施**

- ①防雷击保护
- ②超速保护
- ③机组振动保护
- ④发电机过热保护

- **控制系统的安全运行才能保证机组安全运行**

- 1) 控制系统安全运行的必备条件：见课本p180
- 2)风电机组工作参数的安全运行范围：风速、转速、功率、温度、电压、频率、压力或电压等要求（p180）
- 3)系统的接地保护安全要求：具体要求见课本p181
- 4) 控制与安全系统运行的检查：课本p181

- **5.6 风力发电机的维护和常见故障分析**

- 5.6.1 风力发电机的维护

第五章 风力发电系统及其控制(2)

5.6 风力发电机的维护和常见故障分析

5.6.1 风力发电机的维护

- 主要部件设计寿命为20-30年。
- ①风力发电机转动部分的轴承每隔3个月要加一次润滑油或脂，
- ②增速器内的润滑、冷却用油，每月应检查1次是否缺油、漏油。1年更换一次
- ③有刷励磁的发电机，每周应检查1次碳刷、滑环是否打火烧出坑
- ④制动器的刹车片每月都应检查1次，调整间隙，确保制动刹车
- ⑤每月应检查1次液压系统是否漏油
- ⑥每月应检查1次所有紧固件是否松动
- ⑦对于发电机输出用集电环和碳刷，每月应检查1次碳刷和集电环是否接触良好
- ⑧单机使用的风力发电机经整流（或直接）给蓄电池充电，再经蓄电池到逆变器的，应每天检查1次蓄电池的充、放电情况及联锁开关是否正常。
- ⑨每天检查电控系统是否正常

5.6.2 风力发电机的常见故障和排除方法

风力发电机常见故障及故障排除的方法			
序号	故障现象	故障原因	故障排除方法
1	风轮转动时发出异常声响	1. 机舱罩松动或松动后碰到转动件 2. 风轮轴承座松动或轴承损坏 3. 增速器松动或齿轮箱轴承损坏 4. 制动器松动 5. 发电机松动 6. 联轴器损坏	有异常声响应停机检查 1. 重新紧固机舱罩紧固螺栓 2. 重新调整风轮轴和增速器的同轴度，将固定螺栓拧紧、紧固牢靠；若轴承损坏应更换轴承，重新安装轴承座 3. 调整增速器的同轴度，重新紧固其固定螺栓；拆下增速器，更换轴承及油封，重新安装增速器 4. 重新固定制动器及调整刹车片间隙 5. 重新调整发电机的同轴度并将紧固螺栓紧固牢靠 6. 更换联轴器
2	风速达到额定风速以上，但风轮达不到额定转速，发电机不能输出额定电压	1. 调速器卡滞，停留在一个位置上 2. 发电机转子和定子接触摩擦 3. 增速器轴承或风轮轴轴承损坏 4. 刹车片回位弹簧失效致使刹车片处在半制动状态 5. 微机调速失灵 6. 变桨距轴承坏 7. 变桨距同步器坏	1. 扭头、仰头、离心飞球、空气动力调速的平衡弹断或拉力(压力)变化应更换或调整；找出变桨距驱动系统的卡滞位置，消除卡滞现象；液压驱动变桨距的油缸卡死或漏油，更换油缸或解决漏油 2. 发电机轴承损坏，应拆下更换；发电机轴弯，拆下转子进行校直或更换 3. 拆下更换，重新调整同轴角度安装好 4. 更换弹簧，重新调整刹车片间隙 5. 检查微机输出信号，控制系统故障，排除；微机可能受干扰而误发指令，排除干扰接受部位，屏蔽好；或速度传感器坏，更换 6. 更换轴承 7. 更换或修理变桨距同步器

3	调向不灵或不能调向	1. 下风向或尾舵调向的阻尼器阻力太大 2. 扭头、仰头调速的平衡弹簧拉力小或失效 3. 调向电机失控或带病运转或其轴承坏；风速计或测速发电机有误 4. 调向转盘轴承进土且润滑不良，阻力太大或转盘轴承坏，不能转动 5. 微机指令有误，调向失灵	停机修理 1. 将阻尼器弹簧压力调小 2. 将平衡弹簧调整额定风速以上扭头或仰头，弹簧失效更换 3. 启动调向电机电控坏，更换或更换电机轴承，重新安装调向电机；调向电机定子部分短路或开路，拆下检查，重新布线，修好后重新安装；检查风速计和测速发电机，坏者更换 4. 检查转盘轴承，进土应清除，清洗注油，更换油封；转盘轴承坏，需要拆下机舱更换，此时应进行一次大修，更换所有轴承，更换润滑油等 5. 检查微机各芯片，检查程序，检查控制用磁力启动器或放大器。芯片坏，更换；程序有误重新输入正确程序；启动器坏或放大器坏，更换；有屏蔽坏，重新屏蔽好；传感器失效，更换
			控制用磁力启动器或放大器。芯片坏，更换；程序有误重新输入正确程序；启动器坏或放大器坏，更换；有屏蔽坏，重新屏蔽好；传感器失效，更换
4	风轮时快时慢（风速变化不大）	1. 扭头、仰头调速弹簧失效 2. 调速油缸有气或液压管路有气，密封圈磨损漏油 3. 调速电机电压波动太大 4. 叶片变桨距轴滚键 5. 微机调速输出失灵	停机检修 1. 更换调速弹簧 2. 更换油缸密封圈，找出管路接头漏油进气点更换密封垫，将管路气体排除，消除液压油缸活塞摆动现象 3. 查出电压波动原因，消除电压波动 4. 拆下叶片，更换新轴、键，重新安装 5. 检查微机程序，检查微机输出，驱动芯片坏，更换；驱动模块坏，更换；接触器触点烧坏，更换
5	风轮转动而发电机不发电（无电压）	1. 发电机不励磁 1) 励磁路断或接触不良 2) 电刷与滑环接触不良或碳刷烧坏 3) 励磁绕组断线 4) 晶闸管不起励 5) 发电机剩磁消失 6) 晶闸管烧毁 7) 励磁发电机转子绕组短路、断路 8) 发电机定子绕组断、短路 9) 直流发电机转子绕组断、短路 2. 定子或转子输出断、短路	停机检修 1) 励磁回路断线或接触不良，查出接好 2) 有刷励磁应检查电刷、滑环，接触不良应调整刷握弹簧。刷表面烧坏应更换，对滑环表面应清洗、磨圆 3) 找出重新接好 4) 检查触发线路，修理；晶闸管击穿或断路，更换 5) 重新用直流电源励磁，待发电机正常发电再切除直流电源 6) 更换晶闸管 7) 拆下发电机，再从发电机上拆下励磁机修理好再安装上 8) 拆下发电机，重新下定子绕组，重新安装发电机 9) 更换新发电机或修理转子，重新下线、焊接铜头（换向器） 2. 检查，排除，重新更换线圈

6	发电机电压振荡	1. 电网电压振荡 2. 发电机励磁电流小 3. 电刷跳动 4. 发电机输出线松动 5. 集电环和碳刷跳动 6. 谐波引起的电压振荡	1. 向电网管理部门报告，待电压稳定后再合闸送电 2. 增加励磁电流，若励磁电压低，应全面检查励磁系统，查出故障，即行排除 3. 调整刷握弹簧，消除电刷跳动 4. 拧紧螺栓 5. 调整刷握弹簧，消除跳动，同时检查碳刷，表面跳火出坑，更换 6. 更换整流管、滤波电容、消除振荡
7	发电机组正常运转，输出电压	1. 励磁电流不足 2. 无刷励磁的整流器处在半击穿状态	1. 调整励磁电流，使发电机达到额定输出电压 2. 停机，拆下励磁机，检查整流器，更
	低	3. 负荷重	换 3. 减轻负荷
8	发电机过热	1. 负载太重 2. 发电机轴承损坏或磨损严重，定子碰到转子 3. 散热不良	1. 减轻负荷 2. 更换轴承，重新安装发电机 3. 冷却空气不流通，清洗
9	发电机机舱振动	1 风轮轴承座松动 2 可变桨距轴承损坏 3 转盘上推轴承间隙太大	1 停止检查，拧紧风轮轴承座固定螺栓 2 停机检查，调整转盘上推轴承间隙使之减小，消除振动
10	塔架振动或频繁晃动	塔架基础地脚螺母松动	拧紧地脚螺母

(1) 风力发电机组常见的机械故障及处理方法

故障	原因	诊断	处理方法
风力发电机剧烈抖动	(1) 拉索松动; (2) 尾翼固定螺丝松动; (3) 定桨距风轮叶片变形 (4) 定桨距风轮叶片有卡滞现象。		(1) 紧固拉索; (2) 拧紧松动部位; (3) 更换桨叶; (4) 拆卸、润滑保养, 重新安装
风轮转速明显降低	(1) 风电机长久不润滑保养; (2) 发电机轴承损坏; (3) 风轮叶片损坏		(1) 润滑、保养; (2) 更换轴承; (3) 修复和更换叶片
调速、调向不灵	(1) 机座回转体内油泥过多; (2) 机座回转体内有沙土等异物; (3) 风力发电机曾经倒塌, 塔架上端变形		(1) 润滑、保养 (2) 清除异物, 润滑、保养 (3) 校正塔架上端
异常杂音	(1) 各紧固件有松动之处 (2) 发电机轴承部位松动 (3) 发电机轴承损坏 (4) 发电机扫膛		(1) 放倒风力发电机, 检查并采取相应措施 (2) 更换轴承, 重新安装端盖 (3) 更换轴承 (4) 更换或修复轴承部位
风轮不平衡, 引起风力机转动时轻微来回摆动, 风力机每转一周都发出‘砰砰’或‘咔咔’声, 尤其是在低速时	(1) 导流罩松动 (2) 发电机轴承磨损 (3) 叶片结冰或损坏	(1) 检查导流罩的紧固件是否松动、螺栓孔是否变大 (2) 检查轴承密封周围是否有过量的润滑脂或密封圈是否损坏 (3) 有规律的噪声表明轴承滚珠缺油或磨损	(1) 拧紧或调换零件 (2) 如果导流罩的螺栓孔是否变大, 则可用环氧树脂把垫圈粘到螺孔上 (3) 拆下发动机, 调换轴承, 之后重新装上发电机
机身有大块油渍	漏油	检查所有含油部件	修理或调换相关部件

(2) 风力发电机组常见电气与系统故障机处理办法

故障	原因	诊断	处理方法
电池电压太高	控制器调节电压值设定得太高	电池过充电，控制器电压表指示出电池电压，将检测值与使用说明书给出值进行对照	与生产厂家售后服务部门取得联系，了解调压步骤
电池达不到充满电状态	(1) 控制器调节电压值设定得太低 (2) 负载太大	(1) 用密度计检查电池组的密度，再与制造商提供的推荐值进行比较 (2) 拆除最大的负载。如果电池组达到较高充电状态，则可断定为系统负载太大	与生产厂家售后服务部门取得联系，咨询解决办法
风轮转动，但控制器上表明正常工作的指示灯不亮	控制器电路出现故障	(1) 按照说明书检查控制器电路板上的电压输出点有无电压输出 (2) 检查电压输入点有无电压输入，此电压应与蓄电池电压相同	测试后与生产厂家售后服务部门取得联系，进行诊断与处理
风轮转动，但控制器上的黄指示灯不亮	(1) 隔断开关断开 (2) 控制器出现故障	(1) 按照说明书检查隔断开关是否可靠接通 (2) 按照说明书检查控制器的输入交流电压，如果此时风速高于6.7m/s，而有交流电压，则表明控制器不工作	关掉开关，与生产厂家售后服务部门取得联系，进行诊断与处理
风轮转动，但控制器上表明蓄电池已满的指示灯亮	蓄电池充满	按照使用说明书，用万用表检查蓄电池电压是否达到最高调节电压	与生产厂家售后服务部门取得联系，处理故障

第六章 小型风力发电系统

• 6.1 简介

- 一般把发电功率在10 kW以下的风力发电机称为小型风力发电机
- 服务对象主要以有风无电或缺电地区的广大农、牧、渔民为主
- 内蒙古是我国推广应用小型风力发电机组最早、最好、最多的地区
- 6.1.1 小型风力发电机组的优点
 - 灵活性：小型发电机可配合需要增加或变更组件大小；
 - 安装方便：可根据需要随时安装，安装简单，快速解决日常用电问题；
 - 能源使用多元化：小型发电机可与多种不同的可再生能源组合，方便可靠；
 - 可靠且稳定：小型发电机组容易维修，属于小地区发电与输配网路，万一断电，影响较小。
- 6.1.2 小型风力发电机组发展现状
- 6.1.3 行业发展趋势及特点
 - 自2008年开始小型风电销售范围出现亮点：城乡公路风电或风光互补路灯的快速发展；国外分布式发电系统推广应用；移动通讯边远基站采用风力发电或风光互补发电供电方式。
 - 千瓦级机组容量逐年增加。
 - 2008年小型风力发电机组单机容量仍以200,300,500W为主，但单机1kW以上的机组增加较快，产量达到19139台，机组总容量为65435kW，占年总容量的89.8%，平均每台机组容量为3.42kW。用户用电量逐步增加，要求购买功率大的风电机组，除了满足生活用电外，同时还需要解决部分生产用电。
 - 风光互补供电是独立供电的发展方向。
 - 传统单一的风力发电机组供电远远不能满足农牧民的用电需求。为保证不间断供电，依据“因地制宜，多能互补”原则，充分利用当地风能和太阳能，采用“风光互补”发电系统发电是最有效的方法。采用“风光互补”发电的明显优势是可以保护蓄电池。
 - 机组质量与可靠性亟待提高。
 - 用户除了对风电机组外观、设计匹配要求合理外，对机组的寿命及可靠性提出了更高要求。主要需要进一步提高逆变控制器和蓄电池的质量，保证逆变控制器具有完善的超压、过荷、短路和过热保护等性能，具有报警系统及泄荷功能；蓄电池尽量采用阀控密封铅酸蓄电池。
- 6.1.4 小型风力发电发展空间和未来潜力
 - 在大兆瓦风机、超长叶片成为风电行业主流的当下，小型风电还有发展空间吗？未来的发展潜力又在哪里？
 - （1）竞争力偏弱

- **小风电企业规模萎缩**，从2000年的500多家（设计、生产、销售、服务一体化）降到目前的50家以内（设备研制）
- **市场需求**：设备采购->系统采购以及多能互补智能系统提供
- **受制于产业规模和收益率**，研发投入偏少
- 30米高度以下长期测风塔**数据稀缺**和缺少针对复杂城区风资源的**精准测算方法**（复杂湍流环境）

• (2) 市场空间大

- **灵活度高、适应性强**：岛屿、边防、村落、山区、企业园区等诸多场景均可安装小型风电；
- 维护简单，**运维成本低**、效率高；可采用先进的传感器技术和互联网技术，实现远程监测和智能控制，提高系统效率和可靠性；
- **无须建升压站和道路**，建设周期短，单位容量占地小，便于利用城市、乡村闲散土地资源提升风资源利用率；
- 在**碳达峰碳中和目标**下，中小型风电成为重要元素，这给中小型风电行业发展奠定了基础。“中小型风力发电在通讯行业、牧民和边防哨所、局域网并网、石油行业已开始示范应用，短期将释放50亿元左右的设备市场空间，进而可撬动风光互补系统千亿以上的市场规模。”
- 截至2022年底，**全球中小型风力发电装机容量已经超过1.3万兆瓦**。其中，欧洲和北美是中小型风力发电的主要市场，中国、印度、巴西和非洲一些国家和地区的市场也在不断发展。在可再生能源政策的推动下，中小型风力发电系统的技术不断发展，越来越多的新型号和产品被推向市场，同时成本也在逐渐降低。

• (3) 并网标准待明确

- 小型风机国标和行标大部分已颁布，仍存在虚标或乱标风机技术参数情况，扰乱市场秩序。目前，**中小风电并网无标准可依**，亟需相关部门尽快制定标准。
- 参考分布式光伏发展经验，允许中小风电机组**按照自发自用、余量上网模式并网**，并在部分试点区域给予一定补贴；**简化乡村风电项目核准流程**，建立简便高效规范的核准管理工作机制，实现审批手续“一站式”服务。
- 可加强乡村中小风电与电动汽车充电桩、5G基站等领域的**绿电转化研发合作**，结合“沙戈荒”、农业、养殖等领域特点和需求，**创造新合作业态**。

• 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)。

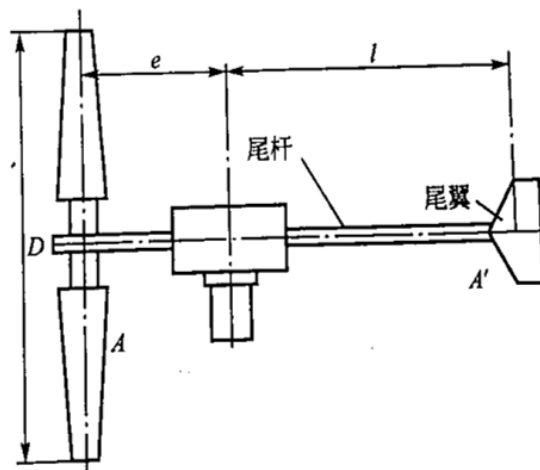


图 4.27 尾翼调向

- 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。

6.3 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**。

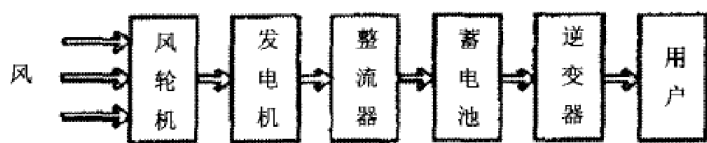


图1 小型风力发电系统框图

- 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。
- #### 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
- **基本工作原理**
 - 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有一个有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为了防止蓄电池过充，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）

- 6.5 小型风力发电系统的安装及选址原则

- 1、地基本准备
- 2、塔架试安装
- 3、风轮安装（注意旋转方向）

- 4、风力发电主机安装：（1）将发电机组电缆从塔管内贯穿；（2）发电机+回转体总成与塔架连接；（3）风轮与发电机轴连接；（4）尾翼总成与回转体连接；（5）风力发电机主机的竖起与拉索固定。
- 小型风力发电机电气系统的接线：-接线前的准备-蓄电池预充电-蓄电池组的放置与连接-逆变控制器与卸荷器的安置-发电机输出线三相短路-关闭所有开关（停车开关除外）-蓄电池组正负极电缆线连接，蓄电池组与控制逆变器相应接口连接-发电机输出线与逆变控制器响应接口连接-卸荷器与逆变器相应接口连接-用电器总线与逆变器相应接口连接
- 小型风力发电机的应用常识
 - 认真阅读小型风力发电机、逆变器和蓄电池的使用说明书。正确选配用电器的功率。由于自然风速是不断变化的，风力机大部分时间不在额定风速下运行。因此，**配套用电器的总功率应为风力机额定功率的75%左右**。例如：一台300W的风力机，其用电器的总功率应为225W以内；一套400W的风光互补系统，其用电器总功率应在320W以内。
 - **初次使用前**，检查风力机安装是否完整，电气系统接线是否正确、牢固，蓄电池电压是否在允许使用范围之内。关闭风力机逆变器的所有开关。
 - **使用时**，先打开风力机开关，风力机开始运行发电并向蓄电池充电；再打开逆变器开关，系统开始提供220V交流电；接着打开用电器开关，系统处于带负荷工作状态。
 - **停机时**，先关闭用电器开关，在关闭逆变器开关，最后关闭风力机开关（或打开停车开关）。
 - **风力资源丰富期使用要点：**
 - 可适当增加用电时间
 - 多个用电器同时使用
 - 注意检查卸荷器温度（必要时暂时停车）
 - **风力资源贫乏期使用要点：**
 - 适当减少用电时间
 - 减少同时使用的用电器的数量（功率）
 - 注意检查蓄电池电压（必要时将蓄电池充电）
 - **灾害风速到达前的防护措施：**
 - 接到气象消息后，按顺序停车或者关机
 - 使风轮旋转面与尾翼平行
 - 放倒风机或拆下风轮（台风）
 - **小型风力发电机的选择和选址**
 - **选择原则：适用性、经济性和可靠性**
 - 既要适应当地的风能资源也要适应用户的用电需要。首先，了解当地风资源状况（包括风速、风向，日平均吹刮小时数等），算出风电机组发电量，确定所选风力发电机是否适宜。同时，考虑家用电气的用电量来评估所选用的风电机组能否满足用户需求。
 - 小型风力发电系统的选址，往往是已经有了居住的房屋等，再选择场地安装风力机，在这种条件限制下选择小型风力机安装场地应注意以下几点：

- 确定当地的**主风向**，风力机应安装在主风向的上风头。例：内蒙古大部分地区盛行西北风，那么风力机应安装在房屋的西北方向，以减少房屋对风的遮挡作用。
- 风力机的上风头尽量**没有**其他房屋或树木等**障碍物**的存在。尽量避免风的紊流的影响，风力机应安装在相对开阔**无遮挡**地方，离开房屋一定距离。
- 应选择合适的风力机安装**高度**。

第七章 蓄能装置

7.1 蓄电池的种类及型号

- 由于风力的不稳定性和随机性，风力发电系统的输出功率和能量时刻在波动，用户负载无法获得连续稳定的电能供应。因此，独立运行的风力发电系统需要一定的储能装置。储能装置一般采用蓄电池。
- 蓄电池是一种化学能源，可以将直流电能转换为化学能储存起来，需要时再将化学能转换为电能。
- 根据电池的使用性能，可分为一次性电池和二次电池。蓄电池属于二次电池。可以充电的电池，如汽车用的铅蓄电池、收音机等使用的镍氢电池，手机、笔记本电脑用的锂电池。
- 根据蓄电池的化学成分，可分为铅酸蓄电池、碱性电池、胶体电池、硅能蓄电池、燃料电池。其中铅酸蓄电池应用最为广泛，尤其是密封性的铅酸蓄电池，是独立运行的供电系统储能设备的主流。

单体电
池格数

电池功能
或形状等

额定容
量

3 — G F M — 500

三个 固 阀 密 500A·h
单体 定 控 封
6V 型 式

6 — G F M J — 100

六个 固 阀 密 胶 100A·h
单体 定 控 封 体
12V 型 式

7.2 蓄电池的主要性能参数

- 包括蓄电池的电压、容量、能量、功率、效率、使用寿命等
 - 1、电压
 - 蓄电池的电压包括理论充放电电压、工作电压、充电电压、终止电压
 - 理论充电电压与理论放电电压相同，等于电池的开路电压；
 - 电池的工作电压为电池的实际放电电压，它与蓄电池的放电方法、使用温度、充放电次数等有关；
 - 蓄电池的充电电压大于开路电压，充电过程会发生化学反应，电流流过正负极，为确保有效充电，需要克服电池内部电阻极化效应造成的电压损失，所以必须高于开路电压；
 - 蓄电池的终止电压是指电池在放电过程中，电压下降到不宜再继续放电的最低工作电压（终止电压不是固定不变的，随着放电电流的增大而降低）。
 - 2、蓄电池的容量

- 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 A·h/2h=5A。
- 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100×0.1=10A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(nCh,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。

- 3、蓄电池的能量

- 蓄电池的能量是指在一定的放电条件下,可以从单位质量(体积)电池中获得的能量(电能),单位kWh(度)。

- 4、蓄电池的功率

- 蓄电池的功率是指在一定的放电条件下，单位时间内电池输出的电能，单位为W或kW。

- 5、蓄电池的效率

- 为蓄电池放出的电能(功率×时间，即电压×电流×时间)与相应输入电能之比。
- 影响蓄电池效率的**电能损失**主要来自以下几方面：
 - 1、充电末期产生**电解作用**，将水电解为氢和氧而消耗电能；
 - 2、蓄电池的**局部放电作用**（或漏电）消耗了部分电能；
 - 3、蓄电池的**内阻产生热损耗**而损失电能。
 - 蓄电池的效率随使用时间而变化的。新的蓄电池效率可以达到90%，旧的蓄电池效率仅有60%-70%。蓄电池的效率是指25℃条件下的效率

- 6、蓄电池的使用寿命

- 普通蓄电池的使用寿命为2-3年，优质阀控式铅酸蓄电池使用寿命为4-6年。
- 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

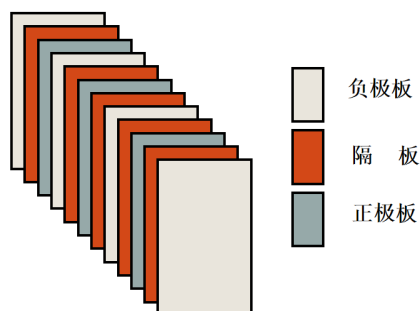
- 7.3.1 铅酸蓄电池的组成

- 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

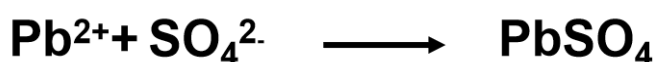
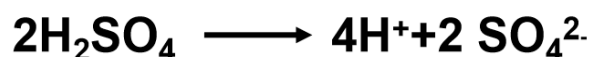
- 壳体用于盛放电解液和极板组，应该**耐酸、耐热、耐震**。壳体多采用**硬橡胶或聚丙烯塑料**制成，为整体式结构，底部有凸起的肋条以搁置极板组。壳内由间壁分成3个或6个互不相通的单格，各单格之间用**铅质联条串联**起来。

• 7.3.2 铅酸蓄电池的工作原理

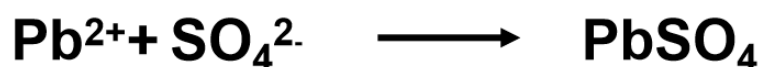
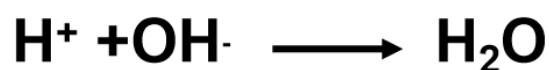
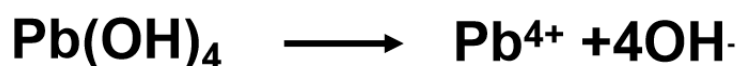
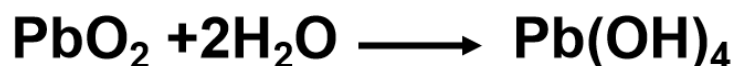
- **双极硫酸盐化理论**：1882年由Tribe和Gladstone提出，简称双硫化理论，该理论的含义是：
 - 蓄电池在放电时，正、负极都生成硫酸铅；
 - 正极： $\text{PbO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
 - 负极： $\text{Pb} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}^+$
 - 充电时反应逆向，即又恢复为原来的铅和氧化铅。

- 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 Pb^{2+} (被氧化)而在极板带负电；另一方面，由于 Pb^{2+} 带正电荷，极板带负电荷，正、负电荷又要相互吸引，这时 Pb^{2+} 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。 Pb^{2+} 和电解液中解离出来的 SO_4^{2-} 发生反应，生成 $PbSO_4$ ，且 $PbSO_4$ 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：

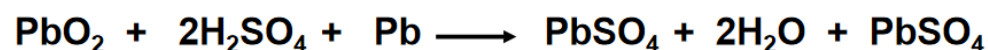


- **正极板**：正极放电时有少量 PbO_2 进入电解液与 H_2O 发生作用，生成 $Pb(OH)_4$ ；而它不稳定，又很快电解成为 Pb^{4+} 和 OH^- ， Pb^{4+} 沉附在正极板上，使正极板具有正电位，达到动态平衡时，其电极电位约为+2.0V。当 Pb^{4+} 沉附到正极板上时，**这时通过外线路来的2个电子被 Pb^{4+} 俘获**，生成 Pb^{2+} 又与电解液中的 SO_4^{2-} 发生反应，变为 $PbSO_4$ ，这些 $PbSO_4$ 以固体形式被吸附在正极板上。电解液中存在的 H^+ 和 SO_4^{2-} 在电场的作用下分别移向电池的正负极，在电池内部产生电流，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 PbO_2 变为 $PbSO_4$ ，负极的活性物质海绵铅变为 $PbSO_4$ ，电解液中 H_2SO_4 分子不断减少，逐渐消耗生成 H_2O ， H_2O 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

负极的析氢反应： $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

正极的析氧反应： $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

板栅的腐蚀反应： $\text{Pb} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Pb}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$

7.3.3 铅酸蓄电池的历史



7.3.4 铅酸蓄电池的特点与分类

1、铅酸蓄电池的优缺点

- 优点：寿命长；价格低；存储性能好，容量大、放电电流大、内阻小
- 缺点：铅污染；能量密度低，过于笨重（铅板）；耐低温性能差；长时间不使用易亏电（硫化、正负脉冲还原恢复）

2、铅酸蓄电池的分类

- 根据铅酸蓄电池结构与用途的不同，可分为四大类：

- 1) 固定式铅酸蓄电池：多用于通信、渔村、部队、村落等而建设的风力发电系统、光伏发电系统以及各种互补系统中，使用时需要经常维护，价格适中，寿命5-8年。
- 2) 小型密封铅酸蓄电池：大多数为2V、6V和12V的组合蓄电池，常用于户用离网发电系统，使用寿命3-5年。
- 3) 工业型密封铅酸蓄电池：又称为“**阀控式蓄电池**”，主要用于通信、军事等的供电系统中。所需维护工作量极小，价格适中，使用寿命5-8年。

- 阀控式铅酸蓄电池(Valve Regulated Lead-Acid Battery, VRLA)，广泛使用的一种铅酸蓄电池，主要特点是：

- 电解质吸附于**AGM（玻璃纤维）隔板**中或者变成胶体状态，内部无游离酸
- 每个单体有一个**安全阀**，大部分时间处于密封状态，**内压过大时开阀排气降压**
- 目前主要有**AGM技术和GEL技术**两种

- **AGM电池**：主要采用AGM(玻璃纤维)隔板，**电解液被吸附在隔板孔隙内**。**GEL电池**：主要采用PVC—SiO₂隔板，电解质为已经**凝胶的胶体电解质**。

性能特点	GEL电池	AGM电池
浮充性能	由于电解质富余，散热性好，没有热失控发生，浮充寿命长	散热性差，热失控现象时有发生
循环性能	100%DOD循环600次以上	100%DOD循环150次以上
自放电	自放电率2%/月，常温下存2年	自放电率2~5%/月，存放期超6个月需充电
气体复合效率	初期复合效率低，但循环数次后可达到95%	复合效率99%
电解液分层现象	无硫酸浓度分层现象，电池可以竖直和水平安装	有电解液分层现象，高型电只能水平放置

- **阀控式铅酸蓄电池**：**通过安全阀排出内部生成的多余气体**的铅酸蓄电池

- **外壳**：一般是塑料外壳如ABS，PP等，也有外部再加钢壳的
- **正极**：主要是红棕色氧化铅(PbO₂)
- **负极**：主要是海绵状的金属铅(Pb)
- **端子**：铅或铜质，铜端子更常见
- **隔膜**：AGM或胶体，吸附硫酸水溶液
- **安全阀**：内部气体溢出通道，一般加防爆石和滤酸器
- 高端电池有时配备排气孔和导气管，保证电池柜内氢气的零积累

- **4) 汽车、摩托车启动用铅酸蓄电池**：价格便宜，寿命较短，仅为1-3年，需要加水 and 经常维护，而且有酸雾污染。

- **7.3.5 铅酸蓄电池目前存在的主要问题**

- **1、水损失**
 - 原因：① 氧复合（气体复合率）不能达到100%；② **安全阀失效或频繁开启，向外排气导致失水**；③ 电池**泄漏**和外壳材料选择不当导致水的渗透；④ **正极板栅的腐蚀**而导致水的转化。
 - 后果：电池会因水损失干涸而失效，严重影响寿命
- **2、负极硫酸化**
 - 铅酸蓄电池在正常工作中，**负极板上PbSO₄颗粒小**，充电时很容易恢复为绒状铅。在充电不足或经常进行深度放电，变成难以还原的大颗粒硫酸铅，称为**硫酸盐化**。导致内阻大大增加，甚至电池失效。
- **3、早期容量损失（Premature Capacity Loss, PCL）**
 - 主要表现为:电池在使用期间，**过早的出现容量衰退**，使电池不能继续使用，并且在充电时容量也难以恢复。
 - **3种模式**：**突然容量损失(PCL-1)**，**缓慢容量损失(PCL-2)**和**负极无法再充电(PCL-3)**。
 - PCL-1:表现为电池在**最初的10~50次循环内**，电池性能快速下降从而引起容量突然下降。主要是接触原因导致的，解决了**板栅与活性物质之间的结合力和导电**

性，就解决了PCL-1。

- PCL-2:认为正极的导电性限制了电池容量。这是由于在循环使用过程中**正极PbO₂的膨胀**而引起活性物质颗粒之间连接的破坏，从而影响导电性。放电越深越快，**放电速率越大，活性物质膨胀和容量损失的趋势就越大。**
- PCL-3: 负极再充电不足导致**负极板底部硫酸盐化**，从而影响负极导电与单体电池电压。这是一种仅在VRLA电池才有的早期容量损失模式，一般在200~250个循环时发生。

- **预防PCL可采取措施:**

- 高温、高湿固化**正极板**，形成4PbO·PbSO₄**铅膏**。
- 在电池充电放电过程中采取**高倍率充电**。
- 在正板栅合金中加入添加剂Sn（锡）、Sb（锑）或活性物质中加入SnSO₄和Sb₂O₃化合物。加入SnSO₄和Sb₂O₃活性物质**更易于生成凝胶区**。Sn、Sb加入板栅铸造，可改善**界面的电导率**，同时也改善板栅的**机械性能**。
- 在极板制造和电池运行中，通过制造工艺形成合适的腐蚀层结构。

- **4、板栅的腐蚀**

- 在过充电状态下，正极由于**析氧反应**，水被消耗，H⁺浓度增加，板栅腐蚀加速。板栅腐蚀使**电池的容量降低**，最后失效。在遭受腐蚀的同时板栅**产生变形**，甚至于个别筋条断裂，最终导致整个电池损坏。
- **减缓正极板栅的腐蚀方法:**
 - 增加**正极板栅的厚度**。
 - 采用**良好的合金材料**。
 - 在电池设计上采用**玻璃棉**紧装配等结构，防止板栅延伸变形，**提高板栅的机械支撑力**。

- **5、热失控**

- 是指蓄电池在**恒压充电时充电电流和电池温度**发生一种**累积性的增强作用**，并逐步损坏蓄电池。
- **热量来源:**其内部存在氧循环，即氧与负极反应形成氧化铅的过程是一个**放热反应**；且散热条件差。
- **为避免热失控，应注意如下问题:**
 - 通过适当的**设计避免热失控**。例如电池灌酸量的设计一般要能达到14mL / (A·h)。
 - 改进**安装设计**，改善电池与环境媒介的**热交换**。
 - 选择合适**排气阀**的开阀压力，使析出气体适当排出，以减少电池内部的热积累。
 - 按照温度变化进行**温度补偿性充电**。

- **6、VRLA电池的自放电**

负极： $\text{Pb} + \text{HSO}_4^- \longrightarrow \text{PbSO}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$

$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$

正极： $\text{PbO}_2 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

$\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

- 自放电损耗正负极活性物质，影响电池寿命。
- VRLA电池的自放电要求损失平均每天为0.2%左右。
- 减少自放电的主要途径：严格选择合金材料与控制各种材料的有害杂质含量，并选择合适的电解液浓度

• 7、AGM隔膜失效

- 更换AGM隔膜

• 7.4 其他种类蓄电池

- 1、碱性蓄电池:按照极板材料，可分为镉镍蓄电池、铁镍蓄电池等。镉镍蓄电池是以镉和铁的混合物作为负极活性物质，以氧化镍作为正极活性物质。电解液为氢氧化钾溶液。具有放电倍率高、低温性能好、循环寿命长等特点。
- 2、胶体电池：胶体电池是在铅酸蓄电池的基础上发展起来的，在硫酸中添加胶凝剂，使硫酸电解液变为胶态。
- 3、硅能蓄电池：采用复合硅盐代替硫酸液作电解质，不会产生腐蚀性气体。

• 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。

• 7.6 蓄电池组的容量选择与计算

- 计算和选择蓄电池容量时应遵循以下原则：
 - 1、年能量平衡法（计算简单，但计算结果偏大。尤其是在低风月份，蓄电池会经常处于充电不足状态，影响其使用寿命。）
 - 是通过分析风力发电机组一年中的发电量与负荷耗电量之间的电能平衡关系，来确定蓄电池容量。选择风力发电机组容量时，一般规定机组的全年发电量必须大于负荷用电量。系统中的蓄电池尽可能地利用这部分剩余电力。风力发电机组、蓄电池组和负荷三者实际上是在发电量、蓄能和耗电量之间寻求一种平衡。
 - 2、无效风时能量平衡法（提供风速的月变化曲线，对于户用型独立运行风力发电系统用户来说比较难以得到，一般只可通过年平均风速相似的典型分布曲线来获取。）
 - 无效风时，即当地风速小于风力发电机组发电运行的时间。无效风速时间，负荷只能依靠蓄能装置提供电能。采用无效风速小时数来选择和计算蓄电池容量有两种方法。
 - 连续最长无效风速小时算法：在一年的风速小时变化曲线中，可以统计出不同时段的无效风速小时数，确定最长无效风速小时数。

- **平均连续无效风速小时算法**：在统计的无效风速小时数中，将1h的无效风速小时数删去（假定为13次），然后以求出的**年平均无效小时数**作为计算天数D。
- **3、风电盈亏平衡算法**（适用于村落性独立运行风力系统。在安装设备之前进行当地风资源测量，可做出比较完整的风速小时变化曲线。以这种方法计算出的蓄电池容量数据是可靠的。）
 - 独立运行的风力发电系统，**如果不设置蓄能装置，风电与负荷之间经常会处于风电过剩或短缺的不平衡状态，即风电盈亏。**
- **4、基本负荷连续供电保障小时算法**（是一种最简单的计算方法，适用于户用型，也适用于村落型。根据当地风况，通过和用户协调，提出合理的基本负荷连续供电保障小时数。）
 - 由于蓄电池投资大，运行费用高，独立运行发电系统有时采用基本负荷连续供电保障小时算法。

• 7.7 其他形式的蓄能装置

- **1、飞轮储能**：是一种新型的机械储能系统，即在风力发电机的轴系上安装一个飞轮，**利用飞轮旋转时的惯性蓄能装置，当风力强时，风能以动能的形式存储在飞轮中；当风力弱时，存储在飞轮中的动能释放出来驱动发电机发电。**
- **2、超导磁场蓄能**：利用超导体制成的线圈储存磁场能量，**功率输送时无需能源形式的转换，具有响应速度快(ms 级)，转换效率高(96%)、比容量(1~10 Wh/kg)/比功率(104~105 kW/kg)大等优点，可以实现与电力系统的实时大容量能量交换和功率补偿。**
- **3、超级电容蓄能**：超级电容器既具有静电电容器的高放电功率优势又像电池一样具有较大电荷储存能力，单体的容量目前已经做到万法拉级。同时，超级电容还具有**循环寿命长、功率密度大、充放电速度快、高温性能好、容量配置灵活、环境友好免维护**等优点。
- **4、压缩空气蓄能**：需要特定的地形条件，即需要有挖掘的地坑或是废弃的矿坑或地下的岩洞。当风力强或用电负荷少时，将**风力发电机发出的多余电能驱动空气压缩机，将空气压缩后存储在地坑内**；而在无风期或用电负荷增大时，则将**存储在地坑内的压缩空气释放出来，形成高速气流，从而推动涡轮机转动，并带动发电机发电。**
- **5、抽水蓄能**：在地形合适的地区可以采用。是一种**水能与风能互补发电**的形式。抽水蓄能电站就是为了解决电网高峰、低谷之间供需矛盾而产生的，是间接储存电能的一种方式。

• 工作原理

- 利用下半夜（**低谷**）**过剩**的电力驱动水泵，将水从下水库抽到上水库储存起来，然后在次日白天和前半夜（**高峰**）将水放出发电，并流入下水库。在整个运作过程中，虽然部分能量会在转化间流失，但相比之下，使用抽水蓄能电站仍然比增建煤电发电设备来满足**高峰用电而在低谷时压荷、停机**这种情况来得便宜，效益更佳。
- 抽水蓄能电站还担负**调频、调相和事故备用**等动态功能。抽水蓄能电站**既是电源点，又是电力用户**；并成为电网运行管理的重要工具，是确保电网安全、经济、稳定生产的支柱。
- 抽水蓄能电站有**发电和抽水**两种主要运行方式。

• 主要功能

- **发电功能**

- 常规水电站最主要的功能是发电，即向电力系统提供电能，通常的年利用时数较高，一般情况下为3000—5000h。蓄能电站本身不能向电力系统供应电能，它只是将系统中其他电站的低谷电能和多余电能，通过抽水将水流的机械能变为势能，积蓄于上水库中，待到电网需要时放水发电。蓄能机组发电的年利用时数一般在800~1000h之间。蓄能电站的作用是实现电能的时间上的转换。经过抽水和发电两种环节，它的综合效率为75%左右。
- 调峰功能
 - 具有日调节功能的常规水电站，通常在夜间负荷低谷时不发电，而将水量储存于水库中，待尖峰负荷时集中发电，即通常所谓待尖峰运行。
 - 蓄能电站是利用夜间低谷时其他电源(如火电、核电水电站和风电场)的多余电能，抽水至上水库储存起来，待尖峰负荷时发电。因此，蓄能电站抽水时相当于一个用电大户，其作用是把日负荷曲线的低谷填平了，即实现"填谷"。"填谷"的作用使火电出力平衡，可降低煤耗，从而获得节煤效益。
- 调频功能
 - 调频功能又称旋转备用或负荷自动跟随功能。常规水电站和蓄能电站都有调频功能，但在负荷跟踪速度(爬坡速度)和调频容量变化幅度上蓄能电站更为有利。
 - 常规水电站自起动到满载一般需数分钟。而抽水蓄能机组在设计上就考虑了快速起动和快速负荷跟踪的能力。现代大型蓄能机组可以在一两分钟之内从静止达到满载，增加出力的速度可达每秒1万kW，并能频繁转换工况。
- 调相功能
 - 调相运行的目的是为稳定电网电压，包括发出无功的调相运行方式和吸收无功的进相运行方式。常规水电机组的发电机功率因数为0.85~0.9，机组可以降低功率因数运行，多发无功，实现调相功能。
 - 抽水蓄能机组在设计上有更强的调相功能，无论在发电工况或在抽水工况，都可以实现调相和进相运行，并且可以在水轮机和水泵两种旋转方向进行，故其灵活性更大。
 - 抽水蓄能电站通常比常规水电站更靠近负荷中心，故其对稳定系统电压的作用要比常规水电机组更好。
- 事故备用功能：有较大库容的常规水电站都有事故备用功能。
- 黑启动功能：黑启动是指出现系统解列事故后，要求机组在无电源的情况下迅速起动。
- 抽水蓄电站是电力系统中的“巨型电池”，在用电低谷时从电网“充电”，在用电高峰时向电网“放电”，并为整个电力系统承担调频、调相和紧急事故备用等任务，是电力系统的“稳定器”“调节器”“平衡器”，能够保障大电网安全稳定运行。

第八章 风电场

- 8.1.风电场概念

- 风电场概念于20世纪70年代在美国提出。
- 风电场是在某一特定地区区域内建设的所有风力发电设备及配套设施的总称。
- 风力发电场属于大规模利用风能的方式，其发出的电能全部经变电设备送往大电网。
- 建设风电场最基本的条件是要有能量丰富、风向稳定的风能资源。

- 8.2.我国风电场现状

- 目前，我国约有4000多个风电场。
- 世界上最大的“风车场位于加利福尼亚州旧金山东部的阿尔塔蒙特山口，这里207.2平方千米的区域内有7000多台2MW风力涡轮机，该“风车场”每年生产100万兆瓦小时的电能，足以满足金山这样的大城市需要。

- 8.3.风电场建设前期工作（风能资源测量和评估）

- 1、风能资源评价（带有政府行为）

- 风能资源评估是风电资源开发的前提，是风电场建设的关键。
- 评估的目的主要是摸清风能资源，确定风电场的装机容量，为风力发电机组选型及布置等提供依据。
 - 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。
 - 1、区域的初步甄选（宏观选址）
 - 基本原则
 - (1)、风能资源丰富，风能质量好
 - 年平均风速一般应大于5m/s，风功率密度一般应大于150W/m2（10m高度处）。尽量有稳定的盛行风向（一般要求有一个或两个盛行主风向），以利于机组布置。风速的日变化和季节变化较小，降低对电网的冲击。
 - 风速变化小，风力发电机高度范围内风垂直切变小，以利于机组的运行，减少机组故障。湍流强度较小，尽量减轻机组的振动、磨损，延长机组寿命。湍流强度超过0.25，建风电场就要特别慎重。
 - 避开灾害性天气频繁出现地区，如果不可避免，在设计时要采取相应措施。
 - (2)、符合国家产业政策和地区发展规划
 - 场址是否已作其它规划，或和规划中的其它项目有矛盾。
 - (3)、满足电网连接和规划要求
 - 联网是风电场实现销售收入的必要条件。应尽量靠近电网，减少线损和送出成本。根据电网的容量、结构，确定建设规模与电网是否匹

配。

- (4)、具备交通运输和施工安装条件

- 港口、公路、铁路等交通运输条件应满足风电机组、施工机械和其它设备、材料的进场要求。场内施工场地应满足设备和材料的存放、风电机组吊装等要求。

- (5) 避开极端天气及地质灾害区域

- 灾害天气包括强暴风（雪）、雷电、沙暴、冰雹等，如不可避免，在风机设计时需采取有效措施。

- (6)、满足环境保护的要求

- 避开鸟类的迁徙路径、候鸟和其它动物的停留地或繁殖区。和居民区保持一定距离，避免噪声、叶片阴影扰民。减少耕地、林地、牧场等的占用。

- (7) 满足投资收益率要求

- 根据项目容量、拟选机型、发电量估算、建设条件、成本估算等项目收益率进行初步估算，判断项目是否满足投资收益率最大的要求。

- 方法步骤

- 1、备选场址的确定

- 在一个较大范围内，如全国或一个省，一个县或一个电网辖区内，确定几个可能建设风电场的区域。
- 寻找备选场址的**第一种途径**：全国已经建成了很多风电场。有些风电场附近还有未开发的区域。根据已建风电场的发电情况，判断新风电场的开发前景。这是寻找备选场址的捷径。
- 寻找备选场址的**第二种途径**：有些地区已进行过风能资源的调查。可向有关部门如发改委、气象部门、电力部门或建设经验丰富的人士咨询。
- 寻找备选场址的**第三种途径**：中国气象科学研究院和部分省区的有关部门绘制了全国或地区的风能资源分布图，按照风功率密度和有效风速出现小时数进行风能资源区划，标明了风能丰富的区域，可用于指导宏观选址。
- 中国气象科学研究院朱瑞兆等利用1961—1970年的气象资料，根据有效风能密度和利用小时数等指标，结合天气气候特点、自然地形和水体等，将全国风能划分为4个大区和30个类型区。
 - 其中东南沿海、山东、辽东沿海及其海上岛屿区，内蒙古北部、松花江下游区为**风能丰富区（Ⅰ）**；东南沿海沿岸和渤海沿海区，三北的北部区，青藏高原区为**风能较丰富区（Ⅱ）**；两广沿海区，大小兴安岭山地区，东北长白山向西经华北平原到我国西端是**风能可利用区（Ⅲ）**。云贵川和南岭地区，雅鲁藏布江和昌都地区，塔里木盆地西部地区为**风能欠缺区（Ⅳ）**。

- 上述分区，仅为全国范围对陆地的宏观划分，没有把海域考虑进去。由于当时利用的是气象站10米高的风速数据，而现在的风电场一般远离气象站，机组的轮毂高度至少也在40米以上，所以某一风电场场址的风能资源不一定严格符合上述分区。就一个省或更小的范围选址来讲，更多的是要借助地形图。
- 从地形图上可以判别发生较高平均风速的典型特征是：—走向和主风向平行的隘口和峡谷；—高原和台地；—比较突出的山脊和山峰；—海岸；—岛屿的迎风和侧风角。
- 为了核实场址条件，应该尽快组织对场址的实地考察。考察的内容主要是风能的大小，同时至少包括：·土地的可用性·地形地貌、地质·交通运输·电网情况·初步确定测风塔的位置
 - 考察风能的大小，主要通过：咨询当地气象部门，并搜集相关气象资料。听取当地居民的描述察看有无风成地貌
- 风成地貌例子：“**旗形树**”。植物因长期被风吹而导致枝干偏向一边。主风向明显地区的树的变形程度与年平均风速相关性较强。地表物质会因风而移动和沉积，形成**干盐湖、沙丘和其他风成地貌**，表明附近存在固定方向的强风。如山的迎风坡岩石裸露，山的背风坡砂砾堆积。
- 通过考察以后，综合风能资源和其它建设条件，排除那些不具备一项或多项建设条件的地点，如风能很小、接入系统造价很高甚至无法解决等，即可确定若干个备选场址，转入下一步工作：风能资源测量。
- **2、区域风能资源测量和评估**
 - 风能资源测量是一项很重要的工作。主要指导文件为GB/T18710-2002 **《风电场风能资源评估方法》**，需要注意的是：
 - (1) 必须在测风阶段给予足够的投入。立足够数量的测风塔。安装足够数量的传感器。测量足够长的时间。测风塔数量依风场地形复杂程度而定：对于较为简单、平坦地形，可选一处安装测风设备；对于地形较为复杂的风场，要根据地形分片布置测风点。
 - (2) 测风塔的位置和数量一定要在地形图上先确定，再到现场调整并最终确定。否则容易可能造成测风塔之间的位置疏密不一。测风塔要立于安装风机较多的地方，如地形较复杂要分片布置立测风塔
 - 测风塔不能立于风速分离区和粗糙度的过渡线区域，即测风塔附近应无高大建筑物、地形较陡、树木等障碍物，与单个障碍物**距离应大于障碍物高度的3倍**，与成排障碍物距离应保持在**障碍物最大高度的10倍以上**。测风塔位置应选择在风场**主风向的上风向位置**。
 - (3) 提高测量数据的完整性和可靠性。要经常检查数据，经常到现场检查仪器，及时发现问题。传感器装上以后，经常会因为

缺电、沙尘、积冰、支撑杆弯曲甚至断裂等造成数据的丢失或失真。用无线方式接收数据的，还要保证及时向通讯公司交费。安排责任心强、接受过培训的人员负责这项工作，是重要的保证措施之一。

• 测风塔

- 根据《风电场风能资源测量和评估技术规范》测风塔数量应满足风电场风能资源评价的要求，并依据风场地形复杂程度而定。对地形比较平坦的大型风电场，一般在场址中央选择有代表性的点安装1个70m高测风塔。
- 在测风塔应安装三层风速、风向传感器，其中两层在10m以及拟安装风力发电机组的轮毂高度处，另外一层选择10m高度的整数倍高度安装。
- 测量参数
 - 1、风速参数采样时间间隔应不大于3秒，并自动计算和记录每10分钟的平均风速，每10分钟的风速标准偏差，每10分钟内极大风速及其对应的时间和方向，单位为m/s。
 - 2、风向参数采样时间间隔应不大于3秒，并自动计算和记录每10分钟的风向值。风向采用度来表示；也可以采用区域表示，区域共分为16等分，每个扇形区域含22.5°。
 - 3、温度参数应每10分钟采样一次并记录，单位为℃。
 - 4、大气压力参数应每10分钟采样一次并记录，单位为kPa。

• 具体步骤

- A、对测风资料进行三性分析，包括代表性，一致性和完整性；
- B、测风时间至少一年，风资料有效数据完整率大于90%；
- C、通过对测风塔的数据进行分析，得出代表年50m~80m高度的年平均风速、风功率密度。根据国标判断风功率密度等级，一般来说，风功率密度达到3级以上，风电场才有开发价值；(具体对数据处理方法见后续ppt)
- D、利用专业风资源评估软件（WAsP、WindFarmer等）绘制风电场预装风电机组轮毂高度风能资源分布图，结合风电机组功率曲线计算各风机的发电量；
- E、根据风电场65~85m轮毂高度处50年一遇最大风速，风电场风机轮毂高度处15m/s风速区间的湍流强度，判定风电场工程可以选择的风力发电机组等级。

• 测风数据要求

- 1、风场附近气象站、海洋站等长期测站的测风数据；
 - a) 有代表性的连续30年的逐年平均风速和各月平均风速
 - b) 与风场测站同期的逐小时风速和风向数据

- c) 累年平均气温和气压数据
- d) 建站以来记录到的最大风速、极大风速及其发生的时间和风向、极端气温、每年出现雷暴日数、积冰日数、冻土深度、积雪深度和侵蚀条件（沙尘、盐雾）等
- 注：逐小时风速、风向、温度和气压数据分别是每个小时的平均风速、出现频率最大的风向、平均温度和平均气压。
- 2、风场测风数据；按照GB/T 18709-2002《风电场风能资源测量方法》的规定进行测风，获取风场的风速、风向、气温、气压和标准偏差的实测时间序列数据，极大风速及其风向。

• 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 $\Delta=a(V_{\text{代表年}}-V_{\text{测风年}})$; 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：

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

- 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。

（场址比选）

- 根据DL/T5067-1996《风力发电场项目可行性研究报告编制规程》，应比较以下内容：
 - （1）风能资源和相关气象条件：相关气象条件要提出气温、沙尘、盐雾、雷电、冰雹、雨（雾）凇、台风对风电机组、发电量、工程施工等的影响。还应初步选择一种机型，比较各场址的年发电量。
 - （2）地形和交通条件：地形平坦单一，有利于减小湍流强度，有利于风电机组的场内运输、摆放，有利于吊装机械和其它施工机械的作业。复杂多变的地形则正好相反。交通条件主要比较风电机组的运输条件和运输距离，同时要考虑施工机械的进场、有无桥涵需要加固，有无道路或弯道需要加宽、改造。比较解决交通所需的工程量。
 - （3）工程地质条件：比较基础处理的难易程度。在风电场选址时，应尽量选择较场址稳定，地震烈度小，工程地质和水文地质

条件较好的场址。作为风电机组基础持力层的岩层或土层应厚度较大、变化较小、土质均匀、承载力能满足风电机组基础的要求。

- (4) 接入系统条件：比较各场址和现有变电站的距离，是否需要新建、改建变电站，线路的电压等级，电网的结构、容量。
- 除上述因素外，还应考虑：（1）当地政府和居民对在该地区建风电场的态度。（2）用地方面：当地是否已将场址规划为其它用途，或附近有无和建风电场冲突的项目。是否涉及到建筑物拆迁，鱼塘、耕地、林地的占用，地下有无矿产。（3）环保方面：是否涉及到自然保护区、文化遗产、风景名胜，对动植物、居民有无不良影响。（4）总装机容量：较大的装机容量可以摊低道路、接入系统等固定成本。（5）投资：初步做出各场址的投资估算。（6）电价：预计项目能够争取到的电价。
- 以上因素，要定量分析和定性分析相结合，**以定量分析为主**。对各场址进行综合技术经济比较，可以综合评分，但最好作出初步的财务评价，然后对各场址进行综合排序，确定开发策略和开发步骤。

• 3、微观选址

- 风电场微观选址即风电机组位置的选择。通过对若干方案的技术经济比较，确定风电场风电机组的布置方案，使风电场获得较好的发电量。
- **基本原则**

尽量集中布置

- 可以减少风电场的占地面积，充分利用土地，在同样面积的土地上安装更多的机组
- 可以减少电缆和场内道路长度，降低工程造价，降低场内线损

在风功率密度高的点布置风机

- 产能最大化
- 最简单考虑
- 风能好的地形（复杂地形）
 - 与盛行风向走向一致的河谷（狭管效应）
 - 与盛行风向相切的山丘两侧上半部以及山丘顶部

尽量减小风电机组之间尾流影响

- 对单台风电机组，在距风轮 $2D-3D$ 的顺风中心线处，风速减少 $35\%-45\%$
- 在距风轮 $8D$ 处，风速减少 10%
- 对于行距为 $8-11D$ ，列距为 $2-3D$ 的布置，第二排的能量损失在 10 m/s 时为 $8-20\%$
- 在平坦地区进行的7行布置的风电场的测量，其行距为 $9D$ ，列距 $2D$ ，第七排比第一排能量约损失 20%

避开障碍物的尾流影响区

- 障碍物是指针对某一地点存在相对较大的物体
- 在障碍物的下游会形成尾流扰动区，在尾流区，不仅风速会降低，而且还会产生很强的湍流，对风力发电机组运行十分不利。因此在设置风力发电机组时必须注意避开障碍物的尾流区
- 风力发电机组安装高度至少应高出地面2倍障碍物高度
- 由于障碍物的阻挡作用，在上风向和障碍物的外侧也会造成湍流涡动区。如果风力发电机组安装地点在障碍物的上风方向，应距障碍物有 $2\sim 5$ 倍障碍物高度的距离

■ 满足风电机组的运输条件和安装条件

- 平坦地形，很容易满足
- 在山区等复杂地形，经常有难度。要根据所选机型需要的运输机械和安装机械的要求，机位附近要有足够的场地能够作业和摆放叶片、塔筒，道路有足够的坡度、宽度和转弯半径使运输机械能到达所选机位

■ 视觉上要尽量美观

- 在与主风能方向平行的方向成列，垂直的方向上成行
- 行距大于列距发电量较高，但等距布置在视觉上较好
- 在经济效益和美观上，要有一定的平衡

■ 条件

- 机组的型号、数量和场地已知的情况下

■ 考虑因素

- 地形地貌对风速的影响
- 风力发电机组尾流效应影响

■ 目的

- 风力发电场的年发电量最大，主要的问题是减少尾流效应对机组风速的影响

布置总原则

- 综合考虑地形、地质、运输、安装和联网等条件，最大限度地利用风能，并保证风力发电机组间相互干扰最小化

布置原则

- 对平坦地形，盛行主风向为一个方向或两个方向且相互为反方向时
 - 单排或多排布置（梅花形）
 - 排列方向与盛行风向垂直
 - 多排布置时，后排风力发电机组位于前排两台风力发电机组之间
 - 盛行风向即行间距为5~9倍风轮直径，垂直于盛行风向上即列间距为3~5倍风轮直径

布置原则

- 盛行风向不是一个方向的风电场
 - 对行排列布置
 - “田”字行布置
 - 风力发电机组间的距离应相对大一些，通常取10-12 倍风轮直径或更大

布置原则

- 复杂地形条件
 - 根据实际地形，测算各点的风力情况后，经综合考虑各方因素如安装、地形地质等，选择合适的地点进行风力发电机组安装

借助于WASP和WindFarmer软件

- 1、确认风电场可用土地的界限
- 2、结合地形、地表粗糙度和障碍物等，利用经过订正的（风电场测站）测风资料，在风电场范围内绘制出一定轮毂高度的风能资源分布图
- 3、根据微观选址的基本原则和风电场的风能资源分布图，拟定若干布置方案，并用软件对各方案进行优化
- 4、对各方案的发电量、尾流影响、投资差异及其它相关因素进行经济技术综合比较，确定最终的布置方案，绘制风电机组布置图

• WASP:

- 1. WASP: WASP(Wind Atlas Analysis and Application Program)软件由丹麦国家实验室风能及大气物理部于1987年开发出来的，是基于比较平坦的地形设计的，可以由一个测风塔推算周围100km²范围内的风能资源分布。WasP软件对风能资源评估适用于区域面积小，地形相对平坦地区。WASP是目前计算风电场发电量最主要的工具之一。
- 2. WASP的主要功能如下:(1)原始测风数据的统计分析;(2)风功率密度分布图的生成;(3)风气候评估;(4)风力发电机组年发电量计算;(5)风电场年总发电量计算。
- 3. WASP的输入数据:(1)气象数据输入。最少1年的风观测的统计数据，包括风速、风向、当地标准大气压、温度及海拔等(2)地表面粗糙度的数据输入。地面粗糙度是随地面的粗糙程度变化的常数，不同的地面粗糙度下风速随高度变化差异很大。(3)地面障碍物数据输入。WASP通过极坐标的方式来描述障碍物(4)复杂地形数据输入。该输入坐标网可以是直角坐标或极坐标，或者是等高线地图(5)计算系数。输入除了上述4项输入数据外，还要输入各种计算系数，如换算系数、场地参考坐标等(6)各种型号风力发电机组标准功率曲线数据输入。这个是估算各种型号风力发电机组发电量所需的数据
- 4. WASP的输出数据:(1)拟合Weibull分布的参数值；(2)平均风速；(3)0-17m/s风速段风向、风速频率图；(4)输入数据、障碍物、山形对某一给定点风速、风向的影响程度；(5)给定点风频图；(6)给定点平均风速；(7)给定点风功率密度；(8)风向玫瑰图；(9)风能玫瑰图（表示各风向上所占风能量的大小）；(10)给定点风力发电机组年发电量；(11)风电场年总发电量
- WindFarmer是有效的风电场设计优化软件工具。它综合了各方面的数据处理、风电场评估，并集成在一个程序中快速精确地计算处理。用户可以自动有效地进行风电场布局优化，使其产能最大化并符合环境、技术和建造的要求。可生成高质量风电场环境影响评估文档，包括噪音、阴影闪烁（shadow flicker）、视觉影响、雷达、累积影

响。风电场的视觉影响可以通过采用动态或静态视觉图像、虚拟漫游（Fly-through）或集锦照片的方式演示。

- 2、风电场工程规划（带有政府行为）

- 3、预可行性研究（在工程规划基础上进行）

- 企业申请风电场开发权的报告的附件就是风电场的预可行性研究报告。

- 4、可行性研究（在风电场工程预可行性研究工作的基础上进行，是政府核准风电项目建设的依据）

- 项目可行性研究报告共分十五章节

- 1) 综合说明：
- 2) 风能资源：各种参数如年平均风速、风功率密度、年有效风速小时数、风向玫瑰图和风能玫瑰图等
- 3) 工程地质：评价场址的稳定性，边坡的稳定性，需判别岩土体的容许承载力
- 4) 项目任务和规模：
- 5) 风电机组选型、布置及风电场发电量估算：第一步：绘制风电场风能资源分布图，目的是确定初次布机的方案；第二步：对各机型进行初步布置、简单优化后计算出理论发电量、风电机组和配套设备的投资，**列出各机型技术经济比较表**，然后初步选定机型；第三步：绘制出推荐机型的最终布置图；第四步：计算推荐机型的各风电机组标准状态下的理论年发电量；第五步：考虑各种发电量折减因素，估算风电场年上网电量、年等效满负荷小时数、容量系数等。
 - **容量系数**：风电场容量系数 C_f 定义为**风力发电机组年平均输出功率 P_{year} 与额定功率 P_{rate} 之比**，该参数反映风电机组的能量输出情况，是考核风电场运行的重要指标。 $C_f = P_{year} / P_{rate}$ 也可以定义为**风电场年满负荷利用小时数与8760之比**。 $C_f = \text{风电场年满负荷利用小时数} / 8760 \times 100\%$
 - 一般而言，满负荷利用小时超过3000h为优秀场址；在2000-3000h之间为良好场址；在2000-2500h之间为及格场址；**低于2000h**的场址不具备开发价值。我国风电场的容量系数一般在0.25到0.35之间。
- 6) 电气：本章分电气一次、电气二次、通信、采暖、通风与空气调节专业。
 - (1) 电气一次：
 - a. 说明风电场升压变电所接入电网的电压等级、出线回路数、计费点的位置等。
 - b. 风电场集电线路方案
 - c. 升压变电所主接线
 - d. 主要电气设备选择
 - (2) 电气二次：按 GB 14285—93《继电保护和安全自动装置技术规程》配置；
 - (3) 通信：通信分为升压变电所通信和风电场内的通信；
 - (4) 采暖、通风与空气调节专业：在风电场工程中，主要采用空调来调节室内温度，如果是北方地区，在冬天还采用锅炉取暖方式。
- 7) 消防：分为以下几方面：主要场所及主要机电设备消防设计安全疏散通道和消防通道消防给水设计消防电气消防监控系统
- 8) 土建工程：包括：基础设计（风电机组基础和变电站基础）；确定升压变电所主要建筑物的等级、规模、结构型式、建筑标准进行建筑物设计，并提出工程量；如经地质灾害危险性评估有地质灾害应提出配套建设地质灾害治理工程的设计。

- 9) 施工组织设计：包括施工条件、施工总布置、施工交通运输、工程征用地、主体工程施工、施工总进度；以及必要的附表和附图；
- 10) 工程管理设计：根据风电场工程的具体情况和业主对风电场工程运行和管理的要求，进行机构设置和人员编制
- 11) 环境保护和水土保持方案设计：环境保护设计和对主要不利影响采取的对策措施，并提出采取环境保护措施所需投资的概算；对水土保持方案的设计需预测工程建设可能造成的水土流失，并分析其危害；提出水土流失主要产生地段的防治措施；提出水土保持措施所需投资概算；
- 12) 劳动安全与工业卫生：提出实际的具体防护措施，保障风电场职工在生产过程中的安全与健康要求，同时确保工程建筑物和设备本身的安全；从管理角度对业主、工程承包商和工程监理部门提出安全生产管理要求，确保施工人员生命及财产的安全。
- 13) 工程投资概算：工程投资概算是确定和控制基本建设投资、编制施工设计预算或项目招标标底的依据。根据各专业提出的设备清单及其安装工程量，土建工程量等资料，按照工程投资概算价格水平进行概算的编制。如有跨年度施工还需编制分年度投资概算表。
- 14) 财务评价：对项目进行财务效益分析，考察项目的盈利能力、清偿能力等财务状况，以判断其在财务上的可行性；根据风电场项目工程的投入和产出测算本风电场的上网电价；对于不确定因素，如上网电量、固定资产投资、上网电价等的变化，计算其变化引起财务内部收益率的改变，分析风力发电工程的抗风险能力。
- 15) 社会效益评价：风电场建成后，风电机组每年可为电网提供可再生的发电量，每年可为国家节约标煤。相应每年可减少多种有害气体排放：如二氧化硫、二氧化碳排放量，减少烟尘排放量、一氧化碳和碳氢化合物等。因此，从节约煤炭资源和环境保护角度来分析，风电场工程的建设具有明显的社会效益及环境效益。
- **可行性报告的重点：** 1、从技术经济比较，选择了适合于本风电场的风力发电机组机型，并进行合理的和优化的风力发电机组布机方案； 2、优选了接入电力系统、电气主接线方案和集电线路方案； 3、并从施工角度推荐了使工程早见成效的施工方式； 4、经过工程投资概算和财务分析，测算并评价工程可能取得的经济效益、业主可能获得的回报率。
- **项目核准：**总装机容量50MW以下（不包括50MW）风电项目由各省（区、市）发改委核准，总装机容量50MW及以上风电项目由国家发改委核准，并附上项目所在地省级政府投资主管部门的意见。
 - **核准程序：**
 - （1）企业投资建设项目向国家发改委或省级发改委（以下简称发改委）提交项目申请报告；（2）发改委如认为申报材料不齐或者不符合有关要求，应在收到项目申请报告后5个工作日内一次告知项目申报单位，要求项目申报单位澄清、补充相关情况和文件，或对相关内容进行调整。项目申报单位按要求上报材料齐全后，发改委应正式受理，并向项目申报单位出具受理通知书；（3）项目核准机关在4个工作日内委托有资格的咨询机构进行评估。（4）发改委在进行核准审查时，如涉及其他行业主管部门的职能，应征求相关部门的意见。相关部门应在收到征求意见函（附项目申请报告）后7个工作日，向发改委提出书面审核意见。

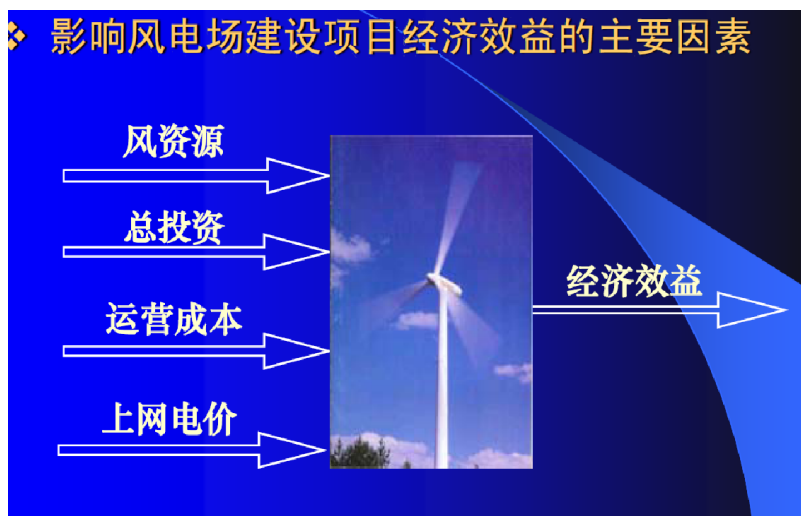
见。（5）对公众利益造成重大影响的项目，发改委在进行核准审查时应采取适当方式征求公众意见。（6）发改委应在受理项目申请报告后20个工作日内，做出对项目申请报告是否核准的决定并向社会公布，或向上级发改委提出审核意见。（7）对同意核准的项目，发改委应向项目申报单位出具项目核准文件，同时抄送相关部门和下级发改委；对不同意核准的项目，应向项目申报单位出具不予核准的理由，并抄送相关部门和发改委。（8）项目申报单位对项目核准机关的核准决定有异议的，可依法提出行政复议或行政诉讼。

- **项目核准内容：**

- 提交申请风电场工程建设项目核准报告，并出具以下文件和附件：（1）项目申报单位情况；（2）与电网部门草签的并网协议；（3）省级或国家级国土资源部门对风电场工程建设项目用地预审通过的意见；（4）环境保护部门对建设项目环境影响评价文件的审批意见；（5）使用银行贷款项目需出具银行同意提供贷款的承诺函；（6）当地政府批复上网电价初步意见，以后风电场上网电价由价格主管部门根据各地的实际情况，按照成本加收益的原则分地区测算确定；（7）风电设备国产化率要达到70%以上的措施，不满足设备国产化率要求的风电场不允许建设，进口设备海关要照章纳税；（8）组建项目公司的协议书等；（9）提交风电场可行性研究报告及图纸。如果上述文件缺少，或没有批准的就不能核准或不批准建设该项目。

- **8.4.风电场建设经济性评价：** $\text{风电运行价值（经济效益）} = \text{风电收益} - \text{风电成本} - \text{辅助服务成本} + \text{环境价值}$

❖ **影响风电场建设项目经济效益的主要因素**







影响各风电项目单位千瓦投资不同的原因

- ❶ 风机设备价格有所差别：即使相同额定容量的风机，由于具有不同的设计参数（切入风速、切出风速、额定风速、叶片直径等），设备价格也不同
- ❷ 风电场风资源不同、地质状况不同、并网条件不同，导致风机设备、基础设施、道路建设、土地征用、联网送电等费用不同。
- ❸ 风电场建设规模不同、选用风机单机容量不同，使风机价格和风电场辅助设施费用有很大差别。

影响总投资的主要因素及分析

(2) 建设期贷款利息

❶ 贷款利率

❷ 贷款期限

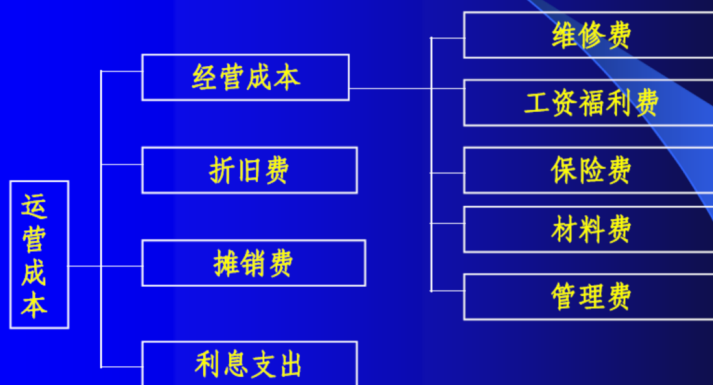
❖ 如何控制并降低项目总投资

- ✓ 设备采购招投标
- ✓ 尽可能采用本地化设备
- ✓ 进口设备要防范汇率风险
- ✓ 优选风电场场址
- ✓ 争取优惠的贷款利率和还款条件

3. 风电场建设项目运营成本分析

- 运营成本的构成
- 成本费用的计算方法
- 运营成本对经济效益的影响

❖ 风电场建设项目运营成本构成



❖ 主要成本费用的计算方法

折旧费=固定资产价值*综合折旧率

维修费=固定资产价值*修理费率

工人工资及福利费=职工年工资*编制定员* (1+14%+27%)

管理费=单位千瓦固定费用

保险费=固定资产价值*保险费率

摊销费=无形及递延资产/摊销年限

利息费=各项利息支出的总和

❖ 运营成本对经济效益的影响

经营成本=运营成本-折旧费-摊销费-利息支出

发电利润=发电收入-运营成本-销售税金附加

税后利润=发电利润-所得税

总之，评价项目盈利能力的各项指标均与运营成本有关系

4. 风电场建设项目上网电价分析

- 全国已建风电场上网电价分析
- 影响风电电价的主要因素
- 对未来风电电价的预测和建议

❖ 影响风电电价的主要因素

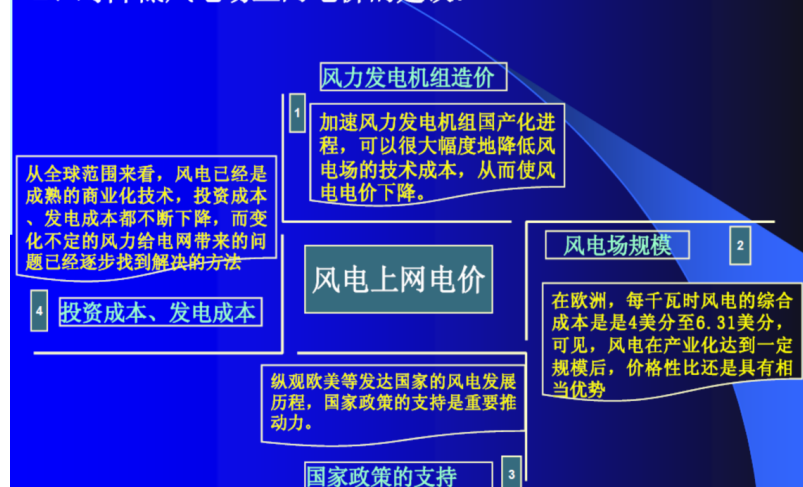
- 风力发电机组进口会产生较高的设备费、安装费和维修费。
- 与煤电、水电项目相比，风电项目国内贷款的还贷期较短
- 风力发电项目没有特别的进口税收优惠政策

❖ 对未来风电电价的预测和建议

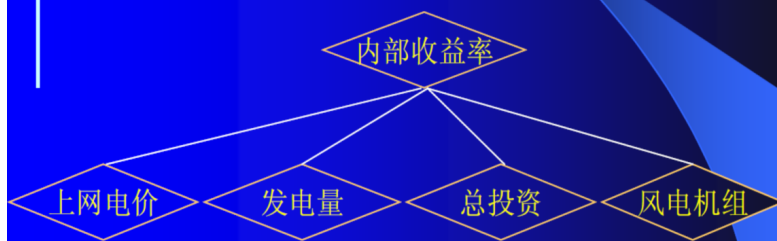
1、未来风电电价的发展趋势预测：

- ❖ 风力发电机组本地化的形成，风电成本会逐步下降；
- ❖ 随着项目业主对风电场建设前期工作的重视、深入和完善，将会使风电场的经济效益不断提高；
- ❖ 风电市场的不断扩大，形成规模效应，也会使风电投资成本降低；
- ❖ 随着风电项目业主运营管理经验的增加，也将会使风电运营成本逐步降低；
- ❖ 随着国家扶持风电发展的政策如《可再生能源法》、《京都议定书》的相继颁布实施，将会产生积极的推动作用；
- ❖ 特许权项目的实施，将会使风电电价下降。

2、对降低风电场上网电价的建议：



❖ 影响财务评价的主要因素及分析



注：因风力发电机组在总投资中所占比例较大，其变化对风电场项目内部收益率的影响幅度较大，即对经济效益比较敏感，因此，在此单列。

❖ 如何提高项目的财务指标

- 尽可能准确地进行风资源分析
- 科学合理的微观选址
- 尽可能准确的发电量估算
- 通过招标的形势确定技术经济方案最优的风电机组
- 尽可能控制建设项目总投资
- 提高自有资金的利用率，充分利用银行贷款
- 提高运营管理水平，降低运营成本
- 争取合理的上网电价

- **财务评价**：在国家现行财税制度和价格体系的基础上，对项目进行财务效益分析，考察项目的盈利能力、清偿能力等财务状况，以判断其在财务上的可行性。
- **国民经济评价**：在合理配置国家资源的前提下，从国家整体的角度分析计算项目对国民经济的净贡献，以考察项目的经济合理性。
- 财务评价和国民经济评价结论都可行的可以通过，反之否定。国民经济文化合作结论不可行的项目，一般应予以否定。某些国计民生急需的项目，如国民经济评价结论好，但财务评价不可行，应重新考虑方案。

● 8.5.风电场建设环境评价

- 主要体现在不排放任何有害气体和不消耗水资源，从而减少因燃烧煤而造成的污染和危害健康的有害气体。风电的环境效益取决于**所避免的火电电量的污染**。
- 例：设每kW·h消耗380g标准燃煤，评估装机容量10万kW，年发电量2.3亿kW·h的风电场环境效益：每年可节约标准燃煤8.74万吨，大约相当于原煤18万吨，可减排烟尘1150吨，灰渣2.76万吨，二氧化硫1403吨，氮氧化物1035吨，二氧化碳26.5万吨。若每kW·h风电可避免的污染成本成本量为0.18元，则上述10万KW的风电场的环境效益估计每年约4000万元。
- 风电场对周围环境可以分为有利影响和不利影响两种：
 - **有利影响**：(1)充分利用风能资源，减少常规能源的消耗，符合国家能源改革的方向。而且风能又是可再生能源。取之不尽，用之不竭。(2)风力发电场无污染物向大气排放，对保护大气环境有积极作用。(3)风力发电场比燃煤电厂可节省大量淡水资源，减少水环境

污染。(4)在沿海及旅游区风力机群也是一道风景线，可在一定程度上反映经济、文化、环境相融洽的程度。(5)通过实物教育，可增强公众开发自然资源、保护环境意识。

● **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 L_w 和接受声音处的噪声级别 L_p 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。

• 8.6.风电场运行管理现状及对策

- **我国风电运行管理特点及现状：**风电装机规模快速增加，80%机组都在近几年内投运；多数风电场安全生产管理借鉴火电模式，经验不足，有些风电场也在探索；安全生产规范、标准有待完善，进一步系统化；
 - 1、风电场缺乏有经验的运行、检修技术人员，一些质保合同不利于现场人员在两年质保期中掌握运行技术；
 - 2、核心技术能力欠缺，机组优化运行能力不足，发电效率有进一步提升空间，安全生产及投资收益存在一定风险。
- **面临的形势与挑战**
 - 1、大批量国产机组进入3—5年缺陷高发期，事故/缺陷的预防监测手段、消缺措施均要提早准备；2、安全生产偏重行政管理，技术监督、技术管理手段需健全完善；3、送出瓶颈仍会有2—3年，保电工作异常艰巨；4、未来几年大量机组出质保期，验收把关工作急待规范完善；
- **对策：**
 - 人员准入与培训：培训；理解规则；学习技术；基本技能；故障处理；部件识别；质量保证；安全和健康
 - 建立安全生产信息化系统：风电场实时监视系统、生产报表系统、设备台帐系统、备件管理等系统
 - 1、提高运检重要性认识，完善制度体系建设；2、提高设备消缺及时性，加强可用系数测算与考核；3、探索状态检修，降低事故/一类障碍发生率；4、备件联合储备，建立合理的基本定额，通过国产化、同类型替代，拓宽采购渠道，提高供应及时性；5、研究机组控制策略，结合功率曲线验证，联合开展运行优化；6、差异性风电场（复杂地形、高海拔、低温、大风、结冰等）机组运行模式研究；7、探索风电技术监督项目、监督周期、实施办法等。
 - 规范移交生产程序：1、提高相关规范的可操作性2、达标投产验收3、基建阶段，生产人员早期介入，强化施工管理
 - 防范安全生产事故：1、人身伤害2、设备损失

第九章 风电大规模并网带来的问题及对策

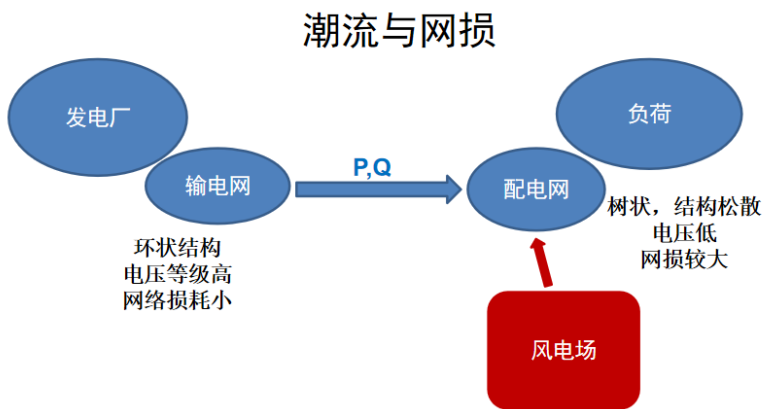
9.1我国风电并网发展现状

（一）我国风电并网发展现状

- **作用：**采用风力发电机与电网连接，由电网输送电能的方式，是克服风的随机性而带来的蓄能问题的最稳妥易行的运行方式，同时可达到节约矿物燃料的目的。
- **应用：**10kw以上直至Mw级的风力发电机组皆可采用这种方式。
- 并网运行又可分为两种不同的方式：
 - ①**恒速恒频方式**，即风力发电机组的转速不随风速的波动而变化，始终维持恒转速运转，从而输出恒定额定频率的交流电。这种方式目前已普遍采用，具有简单可靠的优点，但是对风能的利用不充分。
 - ②**变速恒频方式**，即风力发电机组的转速随风速的波动作变速运行，但仍输出恒定频率的交流电。这种方式可提高风能的利用率，但将导致必须增加实现恒频输出的电力电子设备，同时还应解决由于变速运行而在风力发电机组支撑结构上出现共振现象等问题。
- 我国风能资源主要集中在“三北”地区，大多远离负荷中心。我国积极推进大基地大电网的风电开发模式，8个千万千瓦级风电基地已在规划建设（甘肃酒泉、新疆哈密、河北、吉林、内蒙古东部、内蒙古西部、江苏、山东等风能资源丰富地区），2012年起，有关部门制定黑龙江和山西千万千瓦级风电基地的规划。我国千万千瓦风电基地从目前的8个增至10个。

（二）风电大规模并网带来的问题及对策

1.潮流与网损



- 风电场接入配电网以后，减少了输电网向该地区输送的电力，既缓解了电网的输电压力，一般也会降低系统的网损。
- 电力系统在运行时，在电源电势激励作用下，电流或功率从电源通过系统各元件流入负荷，分布于电力网各处，称为**电力潮流**。
- **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。
- 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以下关系：

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

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

- 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Uk%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。

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

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。

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

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

- 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 I₀%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 50km。风电送出线路的无功损耗计算见公式（4）。

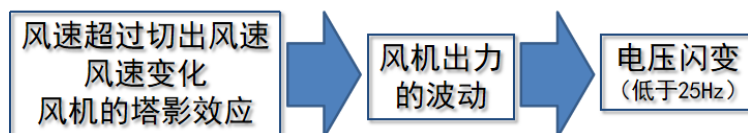
$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (4)$$

$P = 300\text{MW}$ ， $Q = 0\text{MVar}$ ， $U = 220\text{KV}$ ，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 $15.536 + 5.27 + 26.1 + 1.02 + 28 = 75.9\text{MVar}$ 。

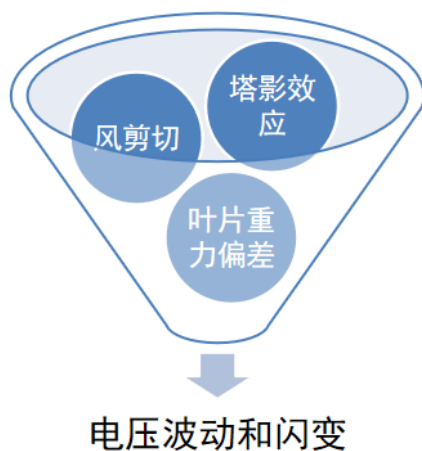
在阜北风电场并网设计时，按风机功率因数为 1.0 进行考虑，考虑补偿箱式变压器、集电线路、升压变压器的无功损耗以及送出线路无功损耗的一半，阜北风电场安装了 3 组 20MVar 动态无功补偿装置。

• 2.2电压波动和闪变

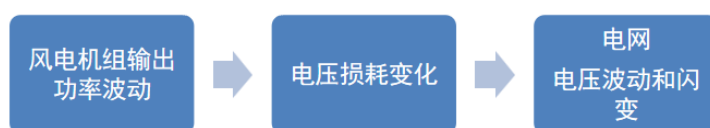
- **电压波动：**电压幅值在一定范围内（通常为额定值的90%~110%）有规律或随机地变化。
- 软并网方式，启动时冲击电流



- 闪变对并网点的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。

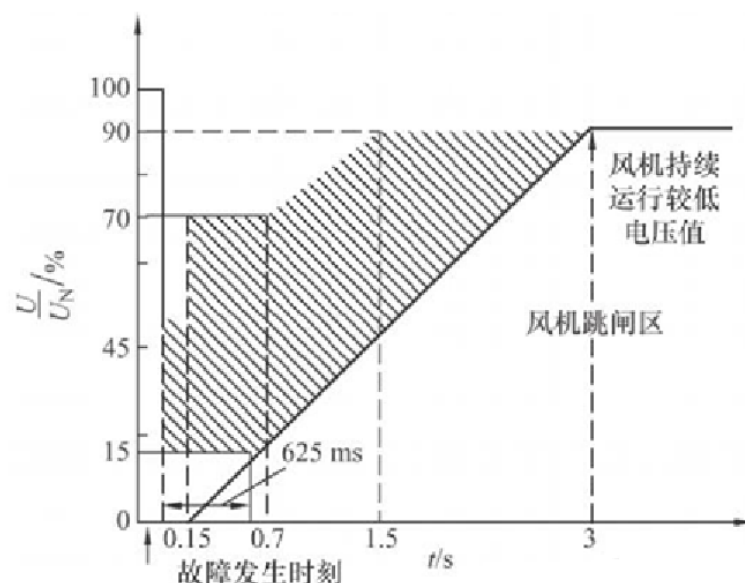


- 影响并网风力发电机组输出功率的波动因素：风况；风力发电机组类型；控制系统；电网状况（短路容量、线路 X/R 比和负荷特性）
- 在运行过程中的电压闪变是由功率波动引起的，而功率波动主要源于风速的变动、塔影效应影响和风力机机械特性等。在切换操作过程中也产生闪变，典型的切换操作是风电机组的启动、停机和发电机切换，输出功率发生一定的变化，将导致公共连接点的电压变化，而电压变化将产生闪变。
- 风电引起的谐波污染问题：
 - 谐波是指电流中所含有的频率为基波的整数倍的电量。一般是指对周期性的非正弦电量进行傅里叶级数分解，其余大于基波频率的电流产生的电量。
 - 在电力系统中，谐波产生的根本原因是由于非线性负载所致，如电力电子元件、开关电源及电容器组等。当电流流经负载时，与所加的电压不呈线性关系，就形成非正弦电流，产生谐波。其与基波电流相叠加，使原有波形畸变，形成非正弦电流，对电能质量产生影响。
 - 风电给系统带来谐波的途径主要有两种：
 - 风力发电机本身配备的电力电子装置，可能带来谐波问题
 - 是风力发电机的并联补偿电容器可能和线路电抗发生谐振
 - 谐波对电力网的危害：
 - 增加了电网的供电损耗；
 - 干扰电网的保护装置与自动化装置的正常运行；
 - 影响仪表正确计量；
 - 用电设备发热增加，影响其使用寿命；

- 继电保护、自动装置不能正常动作
- 谐波是正弦波，每个谐波都具有不同的频率，幅度与相角，但其频率都是**基波的整数倍**。根据法国数学家傅立叶 (M. Fourier) 分析原理证明，任何重复的波形都可以分解为含有基波频率和一系列为基波倍数的谐波的正弦波分量。根据谐波频率的不同，可以分为奇次谐波和偶次谐波，奇次谐波是指频率为工频奇数倍的谐波一般讲，**奇次谐波引起的危害比偶次谐波更多更大**。
- 在电力系统中，电压波型是中心对称的，基本上不含有偶次谐波，主要存在奇次谐波，而三、九次谐波可以通过变压器的 Δ 绕组进行隔离。而11、13次以上高次谐波由于其频率比较高，在线路传输过程中衰减比较快，在电网中所占的比重也不大。往往**5次谐波和7次谐波成分较多**。
- 基频与奇次谐波两者的波峰、波谷的对应位置是**峰对峰、谷对谷**；谐波将会抵消掉，偶次谐波得到了抑制
- 恒速风电机组在运行过程中没有产生谐波电流，但当其在投入时，往往采用软并网可控硅装置并网，势必造成谐波电流注入电网，由于投入过程较短，发生的次数也不多，谐波电流注入实际上是可以忽略的。变速恒频风电机组通过整流和逆变装置接入系统，如果电力电子装置的切换频率恰好在产生谐波的范围内，则会产生很严重的谐波问题。随着电力电子器件的不断改进，这个问题正在逐步得到解决。
- **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。可动态滤除各次谐波；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。
- 风能属于清洁的可再生能源，因其随机波动性会对并网点附近电能质量带来一定影响，尤其是接入薄弱电网，需要通过计算分析后评估影响程度，分析风电并网对电能质量带来的影响的原因，必要时采取一定的措施抑制电压波动与闪变、谐波污染等，降低风能对电网的影响。
- 3.稳定问题
 - 3.1大规模风电并网的影响及风电场电压控制
 - 3.2大规模风电接入对电网暂态稳定性的影响
 - 3.3风电机组低电压穿越能力
 - 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。



• 4.发电计划与调度

• 4.1对电网调度运行的影响

- 发电计划与调度：传统的发电计划基于电源的可靠性以及负荷的可预测性，以这两点为基础，发电计划的制定和实施有了可靠的保证。但是，如果系统内含有风电场，因为风电场出力的预测水平还达不到工程实用的程度，发电计划的制定变得困难起来。如果把风电场看做负的负荷，不具有可预测性；如果把它看做电源，可靠性没有保证。
- 风力发电并网以后，如果电力系统的运行方式不相应地做出调整和优化，系统的动态响应能力将不足以跟踪风电功率的大幅度（高频率）的波动，系统的电能质量和动态稳定性将受到显著影响，这些因素反过来会限制系统准入的风电功率水平，因此有必要对电力系统传统的运行方式和控制手段做出适当的改进和调整，研究随机的发电计划算法，以便正确考虑风电的随机性和间歇性特性。
- 对电网调度运行的影响：
 - 一般而言，我国风能资源丰富地区经济不甚发达，无法消纳大规模的风电电力；且地区负荷特性往往与风电场风电功率特性相反，或称之为风电的反调峰特性，导致大规模风电接入后往往会增加电网调度的难度，需要电网留有更多的备用电源和调峰容量，这必将给电网带来附加的经济投入，增加电网运行的费用。

• 4.2风电功率预测的必要性

- 风能资源有着间歇性和随机性的特点，以及风电机组/风电场的性能不同于同步发电机组/常规发电厂，因此大规模的风电并入电网将对电网的规划建设、运行调度、分析控制、经济运行和电能质量等产生一定的影响。风电场的大规模建设，给电网规划和运行都带来了巨大挑战，需要电力系统研究机构与电网运行部门密切合作，深入研究，高度重视大规模风电并网问题，提出合理有效的技术方案，以确保大规模风电并网后电力系统运行的安全性与稳定性。

• 9.2风电大规模并网带来的问题及对策

- 电网的电压稳定极限限制了风电场最大的装机容量，在电网规划没有与风电规划协调发展时，往往电网接纳风电的能力不能适应风电规划的发展,接入的风电场容量受到电网自身条件的限制。风电场运行过度依赖系统无功补偿，限制了电网运行的灵活性。
- **局部电网接入能力不足：**风电场大多处于电网末梢，大规模接入后，风电大发期大量上网，电网输送潮流加大，重载运行线路增多，热稳定问题逐渐突出。甘肃酒泉地区2007年以来风电、小水电快速发展，送出矛盾加剧，尽管采用了过负荷切机以及变电站分裂运行等措施来提高输送能力，但风电场弃风问题仍然长期存在。2008年瓜州，玉门地区风电受限幅度分别达到20%，40%。
- **风机抗扰动能力差，影响电网安全运行：****一是扩大事故范围。**在系统发生小扰动时，风电机组退出运行，使电网承受第二次冲击，导致事故扩大。2008~2009年吉林白城电网风电场相邻10千伏和66千伏配电系统故障时，风电机组均发生大面积脱网，多次造成220千伏母线电压及省间联络线潮流越限，给系统运行带来了较大冲击。**二是增加了电网遭受冲击的频次。**甘肃捡财塘和河南清源风电场自投产运行以来，受电铁和冶金等大型用户的影响，频繁因三相电压不平衡（未超过国家标准限值）保护动作发生风电机组跳闸停机，使电网频繁遭受冲击。
- **增加电网稳定风险：**风电的间歇性，随机性增加了电网稳定运行的潜在风险。一是风电引发的潮流多变，增加了有稳定限制的送电断面的运行控制难度；二是风电发电成分增加，导致在相同的负荷水平下，系统的惯量下降，影响电网动态稳定；三是风电机组在系统故障后可能无法重新建立机端电压，失去稳定，从而引起地区电网的电压稳定破坏。
- 实际运行过程中，在风电功率波动大、无功需求量大且变化相对较快时，可能单依靠电容器组快速投切不能满足控制的要求，这时就需要在风电场内安装能够在风速波动时提供快速的无功支撑，有利于电网和风电场的无功电压调节的动态无功补偿装置。
- 如果地区电网足够强，则系统发生故障后风电机组在故障清除后能够恢复机端电压并稳定运行，地区电网的暂态电压稳定性便能够得到保证；如果地区电网较弱，则风电机组在系统故障清除后无法重新建立机端电压，风电机组运行超速失去稳定，就会引起地区电网暂态电压稳定性的破坏。此时，需利用风电场或风电机组的保护将风电场或风电机组切除以保证区域电网的暂态电压稳定性；或者通过在风电场安装**动态无功补偿装置**、及利用变速风电机组的动态无功支撑能力在暂态过程中及故障后电网的恢复过程中支撑电网电压，保证区域电网的暂态电压稳定。
- **9.3风电并网技术的新进展**
 - **目前：恒速风机；趋势：变速风机，**最大限度地提高风能的利用效率
 - 使用变速风机的几种方案：采用通过电力电子装置与电网相连的同步电机，如果进一步采用多极同步电机，甚至有可能取消风机上常用的变速齿轮箱，减少风机的故障率；采用双馈感应电机，实现风机以最佳叶尖比运行，比变桨距控制的实现更简单、更经济。
 - 在系统的规划阶段及风场项目的可研阶段需要开展并网研究,以保证将来电网和风电场稳定可靠运行。风电并网需考虑的因素有：①风电场无功容量；②风电场并网点调节方式(功率因数调节或电压调节)；③系统故障时风电场保持并网的能力；④有功功率变化率。
 - 从并网方面开展上述分析的目的在于：①评估风电场在不同的运行条件、控制方式和故障方式下,风电场对电网的影响；②识别风电对当地电网引起的潜在问题；③识别可能引起风电场

可靠运行的潜在问题；④使电网可有效地接纳风电,在满足电网安全运行要求下将风电输送到电网。

- 9.4国内外的相关情况

- 我国风电布局特点
 - 1) 集中在三北（华北、西北、东北）偏远地区和东南沿海地区，且可开发地区集中在一定区域范围内；
 - 2) 风电可开发地区绝大部分处于电网末端，经济发展水平有限，负荷相对较小，原理负荷中心
- 国外成功开发风电的经验启示
 - 不断加强电网网架
 - 配套充足的调峰电源
 - 搭建强大的市场平台
 - 加强风机技术研发，严格入网检测

- 9.5结论

- 1.统筹兼顾，逐一解决问题，实现科学发展
- 2.合理安排风电开发建设时序，实现有序发展
- 3.电网、常规能源、风电要统一规划、统一审批、分步实施
- 4.风电与火电等其他电源按照一定比例配套发展，打捆外送
- 5.通过坚强电网及外送通道，实现更大范围内的资源优化配置参照成功案例，逐步建立风电全国消纳平台
- 6.规范风电并网管理，推广应用风电运行控制新技术

第十章 海上风电简介

• 10.1、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、海上风力发电机组的发展

- **欧洲**一直以来引领世界海上风电产业发展。近10年来，欧洲海上风电装机容量快速增长，平均每年新增300兆瓦，2011年新增装机容量已经达到866兆瓦，是2001年的17倍。欧洲海上风电场建设向大型化、离岸化、深水化方向发展，部分在建的海上风电场离岸距离已经达到100千米，水深达到40米。随着欧盟提出到2020年可再生能源占欧盟总能源消费的20%，欧洲海上风电呈现更加快速发展趋势。
- 中国在2020年实现了3 GW以上的海上风电新增并网，连续第三年成为**全球最大的海上风电市场**。欧洲市场保持稳定增长，荷兰以近1.5 GW的新增装机排在全球第二位，比利时位列第三（706 MW）
- **丹麦起步较早、世界领先，政策支持、自主发展**。丹麦是全球风电行业的先驱和领袖，也是海上风电产业规模化发展的奠基者。**丹麦Vindeby风电场是世界上第一个海上风电场**，于1991年建成。截至2011年底，丹麦海上风电累计装机容量达到857.5兆瓦，占欧洲累计装机容量的五分之一。借助于强有力的政策支持，丹麦形成了自主发展的风电设备制造业，成为海上风电产业发展的重要支柱。风电机组制造商Vestas公司拥有欧洲海上风电装机数量的39%。
- **英国快速发展、后来居上，资源丰富、前景广阔**。相比于丹麦，英国海上风电产业发展较晚，2000年底才建成本国第一个海上风电场。尽管产业发展较晚，英国的海上风电发展很快。经过2000年至2001年第一轮和2002年至2003年第二轮海上风电开发后，英国海上风电产业初具规模。2008年英国又启动了第三轮海上风电开发。截至2011年底，英国已建成18个海上风电场，安装了636台海上风电机组，累计装机容量达到2093.7兆瓦，位居世界第一。英国海上风力资源占欧洲总资源比例相当大。据相关研究报告估计，英国海上风能接近1000亿千瓦时，相当于该国全年总用电量的几倍。被认定是**全球海上风电最佳市场**，未来具有良好的发展前景。

- **德国风电大国、海上崛起，财政资助、法规保障。**德国是世界风电大国，2006年风能发电量接近全国当年用电量的6%，陆上风电的成功开发已经饱和，使得政府转向海上风电的开发建设。德国非常重视海上风电产业的发展，制定了《德国政府关于海上风能利用战略》，并联合丹麦开展了一系列关于海上风电的拓展性研究，在推进哥本哈根海上风电战略进程中发挥了重要作用。从70年代开始，德国政府就向本国风电技术研究项目提供财政资助，资助金额居欧盟各国之首，同时政府与银行合作，为国内大型风电项目提供低息贷款。德国2000年开始实行《可再生能源法》，强制实行风电上网，并规定了最低价格，保障了风电项目建成后顺利运转。
- **中国风能大国、前景广阔，起步较晚、发展迅速。**我国拥有发展海上风电的天然优势，海岸线长达1.8万公里，可利用海域面积300多万平方公里，海上风能资源丰富。第三次风能资源普查数据表明，我国陆上风能资源技术可开发量约 $2.5 \times 10^8 \text{ kW}$ ，而海上风能储量是陆上风能资源的3倍左右。相比陆上风电，我国海上风电发展历程短，装机容量小，海上风电在我国整个风电市场中的占比很小，截止到2014年底，占总装机容量的约0.6%。2021年，我国海上风电装机规模位居**世界首位**。中国“十四五”海风发展战略为优化近海海上风电布局，开展深远海海上风电规划，推动近海规模化开发和深远海示范化开发，重点建设**山东半岛、长三角、闽南、粤东、北部湾**五大海上风电基地集群。
- 2009年9月4日，我国**第一大型海上风电场——东海大桥海上风电场**示范项目首批3台机组正式并网发电。2010年9月28日我国乃至全球首个潮间带风电场国电龙源潮间带试验风场全部投产发电。

• 10.3、海上风电场和陆上风电场的比较

- 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。
- **海上风电与陆上风电成本比较**
 - **海上风电场成本：**海上风电场成本包括了常规的工程建设成本，除此之外，由于其建设位置的特殊性，海上风电场通常还要考虑防腐、防盐雾、前期测风塔设立、大型船舶租用等成本，在其工程建设成本中，其设备投资与建筑安装投资所占的比重也与陆上风机不同。
 - 海上风电机组带来的成本增加：一方面，海上风电机组从设计上需要考虑冰冻、台风、腐蚀等特殊的海上环境因素，提高了技术难度，增加了**制造成本**；另一方面，我国大功率海上风电机组目前还处于样机试验阶段，已经建好的海上机组还没有长期的海上运行经验，**不具备规划化生产的条件**，故障率难以评估。
 - **设备成本增加：**①机组防腐除湿②测风塔、输电线成本③承载基础④专用建设检修船舶⑤工程勘探费用
 - **运营成本增加：**①远离陆地，工作时间短②可靠性、预防性维护要求高③交通设备管理④维修管理人员投入

- 降低成本方法：

- 海上风电要实现经济性就需要加大建设规模（降低平均安装成本）；加大风机单体的最大功率，当前陆上风机的最大功率多介于2-5兆瓦之间，而海上风机一般在6-8兆瓦之间，甚至更大。

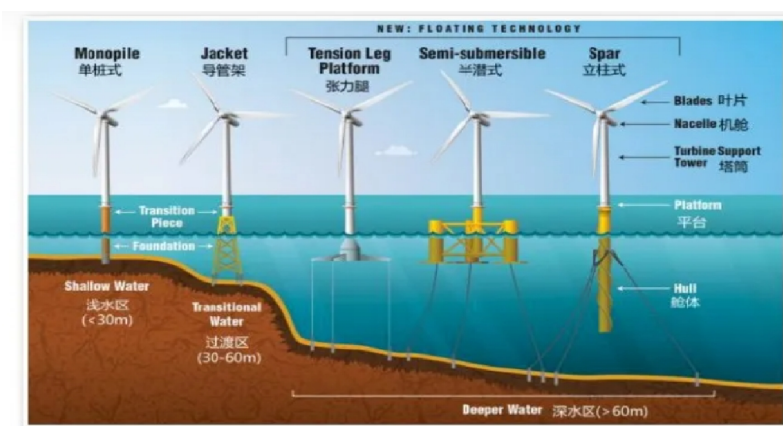
- 10.4、海上风力机的基本构成

- 海上风力发电系统的结构组成与陆地相似，包括风能捕获、能量转换、能量传输和控制系统部分。但海上风场要克服强风载荷、腐蚀、波浪冲击等特殊环境的影响，故还需要在风场基础建设等方面进行特殊设计。
- 风机机舱&叶片：
 - 海上风机机舱的结构与陆地风机基本一致，但在细节方面仍存在一定差异
 - 1.在永磁体发动机的设计方面，由于海风及水雾等的腐蚀作用，海上风机常采用内置式磁极以加强密封性。
 - 2.为了减小腐蚀和适应海面高风度等特点，风机叶片可考虑采用环氧碳纤维树脂，玻璃钢等材料。
 - 3.机舱的冷却系统常采用密封结构设计，所采用冷却介质一般也比传统陆上风机具有更好传热能力。

- 10.5、海上风电机组基础

- 概述：风机基础约占近海风电项目总投资的20%-30%。海上风机基础结构的设计要充分考虑海床的地质结构情况、离岸距离、海上风和浪的载荷特性以及海流等影响。需要根据风机所处位置、环境条件，从经济、技术、施工能力等方面综合比较而定。欧洲海上风电场地基多为砂层或砂质土层，承载条件较好，多采用单桩和四桩基础型式。我国黄海和东海的近海大多数都为淤泥质土。持力层约在海床以下20多米。
- 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。
- 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。

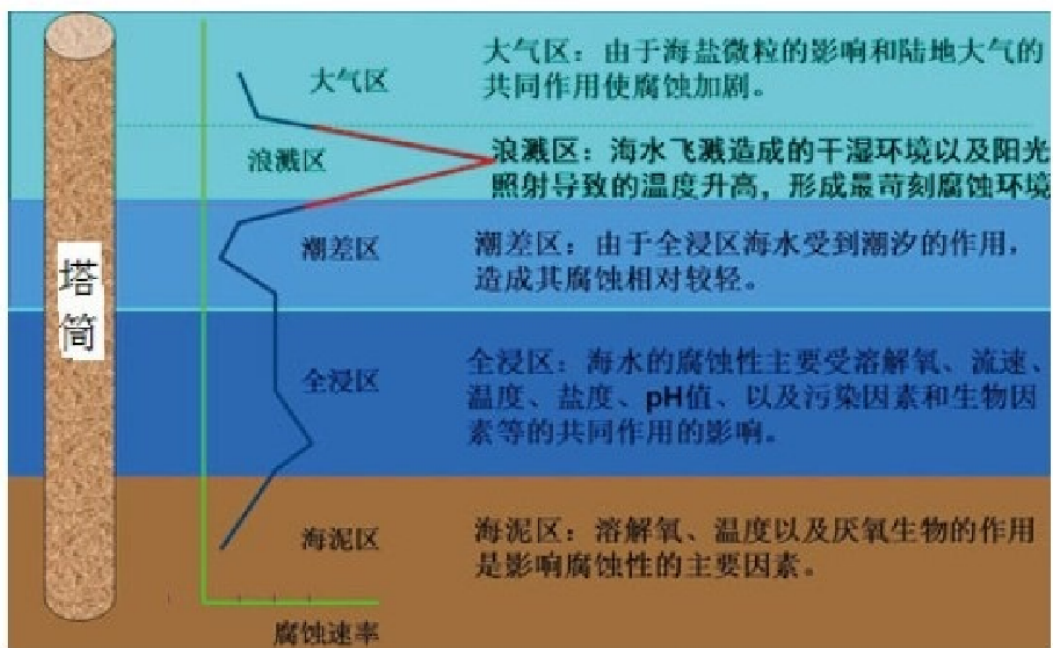
- **优点：**水线面较大，运动性能好，可移动和重复利用。
- **缺点：**稳定性一般，上部结构易与系泊系统共振，系泊系统复杂，安装费用高。随着水深的增加，张力腿式基础的建造成本会急剧增加，不太适合深海区域。

• ③半潜式平台(SEME)

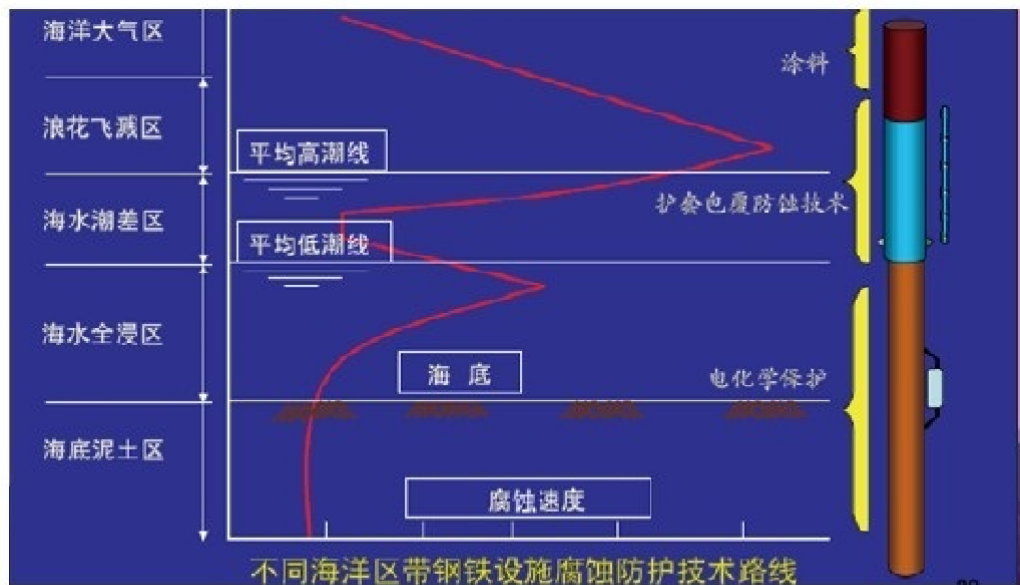
- **适用条件：**适用水深50m及以上。
- **优点：**适用水深范围广，吃水小，水线面较大，稳性好，可移动和重复利用。安装方便，可在近岸调试好后拖到风电场利用锚链（悬链线）定位。
- **缺点：**垂向运动较大，基础水平运动受波浪影响较大

• 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

• 10.6、近海风电场选址

• 1、近海风电场的宏观选址

- **A、近海风能资源的特点：**我国海岸线长，近海地区风能资源丰富，海上风资源特性相差大，北部的渤海及黄海地区受冬季冷气压控制较多，南部的南海、东海海域受热带气压影响较大；北部海域风能资源全年分布较为平均，长江口以南地区则受台风影响较大，具有离岸距离越远，风能资源越优的特点。由于近海风能资源的特点，风电场多选用**抗台风等级较高的风机**。
- **B、近海风电场宏观选址主要影响因素：**近海风电场宏观选址指风电场整体场区在海域的宏观位置，主要受以下因素影响。
 - **(1) 当地环境：**包括拟开发区域的社会经济概况、电网结构、用电量情况、电力需求和其他相关的外围条件。风电场建设需要当地良好的社会经济状况作为支撑。海上风电应符合附近陆上区域能源电力发展现状和规划，与地区电网建设相匹配，尽可能就近消纳。
 - **(2) 风力条件：**海上风电开发区域既要风速较大，比较稳定，又要避开台风活动区域。我国沿海地区台风活动频繁，尤其是南海、东海，如2006年在浙江登陆的“桑美”中心最大风速达到了68m/s，而黄海及东海长江口以北地区，破坏性大的台风发生概率相对较小。台风资料的整编对海上风电场选址、风险评估及风机基础设施设计等具有重要的影响。
 - **(3) 水深与工程地质条件：**大多数国家将水深15m划为浅海，已建成海上风电场的水深大部分小于10m(一般为5-10m)。地质条件主要包括**地震烈度和区域地质**两部分。地震烈度直接影响风电场的设计，甚至需要采取特殊的基础及结构处理手段；区域地质包括地形地貌、地基土的构成和特征，如砂土作为地基土为好，淤泥质地基将大大增加基础工程量。
 - **(4) 避让渔场、鸟类保护区：**尽量减少对生态的影响，需要事先了解规划区及附近的渔场和鸟类保护区。

- **(5) 海洋功能区划：**与海洋功能区划相符合，避开港口、航道、锚地、规划围垦区、矿产资源利用区、海底管线、军事区域及其他用海等各方面制约因素。
- 综上所述，近海风电场的宏观选址应符合区域现规划，根据风电场建设条件择优选择建设条件好、投资风险低、国家政策鼓励的区域。

• 2、近海风电场的微观选址

• A、近海风电场微观选址主要考虑的因素

- **(1) 海上风电场的尾流影响：**大多数情况下，海上风电场的整体尾流影响应控制在6%之内，单台海上风机的尾流影响不宜超过8%。
- **(2) 水深的影响：**水深不仅影响到风机基础型式及施工方法，还是风机设备的运输方式和吊装方式的一个主要因素。 应尽量避免水深发生大幅度变化，尽量保持基础型式、施工工艺的一致性。
- **(3) 航线、管道的影响：**微观选址时应预留渔船的航线、小岛间的航线，海底光缆、管道应预留安全距离。
- **(4) 其他影响因素：**应考虑避开礁石、海底障碍物、航标灯等其他影响因素。

• B、风机排列位置

- 近海风电场布置一般在主风能方向间距取较大值，次风能方向间距取较小值，一般沿着海岸线方向进行排布。 通常情况下，主风能方向，风机间距控制在10-15D之间，在次风能方向，风机间距控制在6-8D之间。

• C、其他影响因素的处理

- 微观选址时，应尽量避免区域内其他因素的影响，在不影响其他现有因素的正常功能外，使得风电场的发电效益最大化。

• 10.7、近海风资源评估

- 海上风资源评估所使用的数据类型和分析评估方法与陆上存在一定差异。
- 海上风资源具有自己的特点，在进行风资源评估时需要考虑以下因素的影响：

- 1、气温、水温对近海风速的影响范围；
- 2、潮位变化对风速垂直分布的影响；
- 3、尾流的影响距离和范围；
- 4、昼夜海风的变化规律；
- 5、水深分布对风速的影响。

• 近海风资源评估方法有以下几种：

- **1、利用沿岸陆地气象观测数据：**该方法最为常用，即利用海上一段时期内的观测资料与岸边同步气象观测到的风速进行对比分析，求得海-陆风速相关关系。
- **2、利用船舶报数据：**船舶报数据直接来自于海上观测，资料历史悠久，但是观测点不固定，分布不均，航线上 资料密集，非航线上海域资料稀少，故只能在航线海域采用该评估方法。
- **3、利用气压数据：**是一种不直接依赖于陆地及海面气象观测数据预测海上风能资源分布状况的方法。如可由平均海平面气压梯度计算出地转风分量，再利用WAsP软件将地转风

换算到海面，估算出海面某高度上的年、月平均风资源数据。

- **4、海面风场数值模拟：**通过建立风场数值模型模拟计算出区域内风场分布的海上风能资源评估方法。如美国研究人员利用MESO公司开发的中尺度动力诊断模式进行海上风电场的模拟。目前模拟结论大多是初步的。
- 我国现阶段近海风资源评估通常采用短期（1-2年）风电场实测数据与滩涂（或陆上）长期气象资料进行对比、相关性分析后，进行近海风电场的风资源评估

- 海上测风塔选址

- **海上测风需要考虑的因素**

- （1）海上测风塔的建造成本远高于陆上，测量费用非常高昂，故在能够满足海上风电场风资源评估基本要求的情况下应尽可能减少海上测风塔的数量。
- （2）海面比较平坦，海上风不受地形的影响，风的分布情况随空间变化较小，可以适当增加海上风资源的代表距离。
- （3）海上环境恶劣，仪器长期处于潮湿、盐雾的环境下，且海上出现极端气候条件的几率大，维护困难，要求所有传感器和设备具备高可靠性，海上测试设备必须专门设计。
- （4）海上数据采集比陆上困难，要求所有测量参数能够长距离无线传输；
- （5）海上测风塔多为自立式塔架，断面尺寸通常较大，需要消除塔影效应对测量结果的影响；
- （6）海平面受潮位、波浪的影响，应分析不同高度处的测风数据与潮位、波浪的关系。

- **测风塔型式选择**

- 陆上测风塔多为拉线式结构型式，海上测风塔由于海洋环境复杂、附近常有船只通过，对通航安全要求高。可分为两类：
 - **1、移动式测风塔：**为可移动式平台结构，由沉浮平台、测风塔架、缆索、缆索支架和抗浮锚索等几部分组成。
 - 沉浮平台：直径约10m，高约4m（根据水深选择）的圆形钢结构；测风塔架结构型式为常截面或变截面的四边形、三角形桁架结构，测风塔架根据需要布置缆索，下端与缆索支架相连；测风塔在测风点就位后，通过预留的锚索孔进行抗浮锚索施工，锚索采用钢绞线。
 - **2、固定式测风塔：**由基础，施工平台以及塔架三部分组成。
 - 基础：桩基础、重力式基础以及桶型基础等；施工平台：钢结构平台或钢筋混凝土平台；塔架：轻型钢管焊接桁架结构。
 - 移动式平台与固定式平台相比，优点在于塔架的组装、安装等大部分施工都可以在陆地完成，不需要海上的运输、起重和施工设备，可以重复利用。固定式测风塔，结构型式可靠，整体稳定性强，抵抗风浪、地震等极端工况的能力较强，缺点在于施工、安装需要海上作业，受到海浪、大风等自然因素的约束较多，施工周期较长
- **海上测风塔的塔架结构特点**
 - 属于高耸结构建筑物，具有高、柔以及所处环境恶劣的特点，需要考虑以下问题：

- 1、**风荷载**。对于高耸结构，风荷载起主要作用。风荷载对结构作用的大小，取决于塔架结构布置、尺寸、构件截面形状等。塔架进行结构设计时，首先应进行试算，获取结构布置和尺寸，然后计算风荷载，求解结构内力，验算构件强度、刚度和稳定性。
- 2、海上塔架长期处于盐雾、潮湿的环境，受严重的腐蚀威胁，设计时应针对不同部位的**塔架防腐方案**进行详细的论证、分析。
- 3、**测风塔结构较高**，应考虑分段制作、运输、高空安装和拼接等施工方案。
- 4、海上测风塔需要设置**航空障碍标志**，还必须设置船舶航行警戒标志，所用标志均需进行专门设计。

- **塔架结构的选型和构造**

- **1、塔架立面廓线与截面型式**

- **塔架立面廓线通常以抛物线最为理想**。但是会给塔架材料加工、构件安装、现场连接等带来不便，在实际工程常用的塔架立面廓线多为上小、下大的斜直线形或折线形。海上测风塔基础部分造价占比较大（70%以上），应选择方便、造价低以及施工简单的结构，综合考虑，立面廓线选取直线形。截面型式可选用三角形、四边形、六边形、八边形等。一般而言，**截面型式选用四边形**。腹杆型式选择常用的有：单斜杆式、十字交叉式、菱形、K式、再分式等。**一般选用十字交叉式**，具有风阻小、刚度大、结构轻巧等特点。

- **2、塔架构件截面选择和连接方式**

- 测风塔塔架构件截面型式可选用钢管、角钢、圆钢及其组合构件。海上测风塔一般采用**无缝钢管**作为主要塔架构件。塔架构件连接方式主要有：**法兰连接、圆钢管拼接及插接**等方式，一般采用**法兰连接**。
 - **塔架的设计计算**：测风塔塔架属于钢桁架三维结构，承受的风荷载随高度变化，且塔架构件截面尺寸应根据载荷分区确定，首先采用结构静力学分析进行简单试算，确定尺寸、基本参数后再采用有限元法进行详细计算。

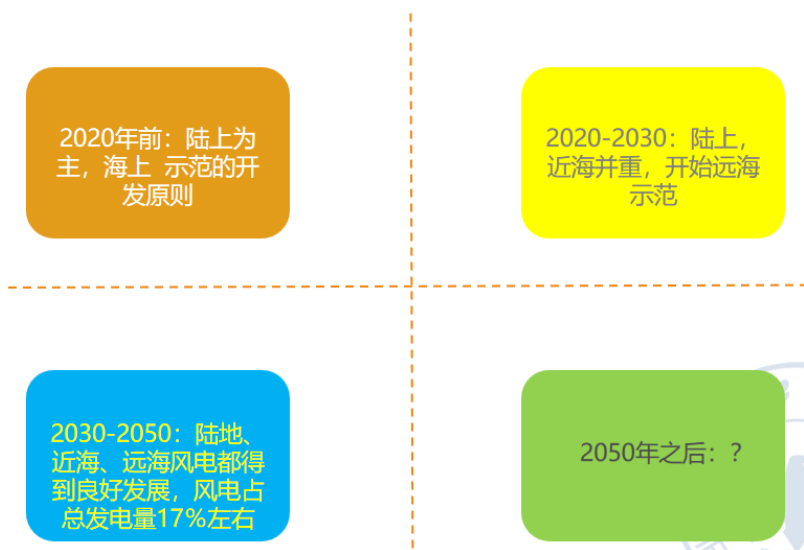
- **10.8、海上风电前景**

- **海上风电的发展取决因素**

- ① **技术的成熟**。主要是风电机组可靠性要求较高，这对于投资收益有较大影响。
 - ② **国家政策支持**。海上风电相比陆上风电，投入高、风险高。
 - ③ **海洋工程**。海上风电基础设计、施工，风电机组运输、吊装等，都与陆上风电不同，这对制造商来说是个比较新的领域。
 - ④ **海上风电场运营管理**。海上风电场的可利用率一方面取决于机组可靠性，另一方面也取决于机组的可达性。

- **海上风电前景**

海上风电前景（根据《中国风能路线图》得到）



- 1、规模持续扩大
- 2、向深远海进军
 - 自然资源部印发的通知要求新增海上风电项目应在离岸 30 千米以外或水深大于 30 米的海域布局。深远海的风速通常更高，风能资源更稳定，且海域面积广阔，适合大规模开发，能减少对近海环境和渔业的影响。
- 3、集群化开发
 - 鼓励海上风电集中集约布局、集群式开发，避免大面积零散分布，以保障海上风电基地建设，提高海域资源利用效率，同时有利于配套设施的建设和运维管理。
- 4、机组大容量化
 - 东方电气自主研发的 26 兆瓦级海上风电机组，是目前全球单机容量最大的海上全国产化风电机组，机组的关键部套技术均达到世界领先水平。
- 5、技术创新升级
 - 漂浮式风电技术的发展，适用于更深海域；新型送出技术的研发，如柔性直流输电技术，可提高输电效率和稳定性，降低传输损耗。此外，在风电机组设计与研发、海上并网与输电、风电场规划设计与建安、海上风电运维等环节，也将不断进行技术创新和升级。
- 6、融合发展多元化
 - 海上风电与海洋牧场、制氢、光伏等的融合发展推进试点示范，形成“水下牧场、水面风电”等立体开发格局，构建多能互补体系，实现“一海多用”，提高海域资源综合利用效益。

第十一章 分布式发电技术

• 1.分布式发电的概念

• 分布式发电简介

- **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。
- 相对于集中发电的大型机组而言，其总的发电能力由分布在不同位置的多个中小型电源来实现；相对于过去的小型独立电源而言，其容量分配和布置有一定的规律，满足特定的整体要求。

• 三个概念的区别：

- **DG (Distributed Generation)**,分布式发电，是指在用户附近或电力系统的配电侧，安装相对较小规模的发电设备，如光伏发电、风力发电等。
- **DP (Distributed Power, DP)**,分布式电力，一般指配电功率，主要涉及到电力系统中配电环节的功率分配和传输。关注的是如何将高压电能通过配电网络，以合适的电压等级和功率水平分配到各个用户终端，以满足用户的用电需求。
- **DER (Distributed Energy Resources, DER)**，分布式能源资源，是指分布在用户端的能源生产与存储设施，包括分布式发电、分布式储能以及需求侧响应资源等。
- DER、DP和DG的关系。DG是DER的一个重要组成部分，主要侧重于发电方面。DER则更为广泛，除了DG外，还包括分布式储能系统以及通过需求侧管理措施实现的虚拟能源资源（如用户根据电价信号调整用电行为等）。而DP与DER、DG的关系是，DP所涉及的配电网络是DG和其他DER接入电力系统并向用户供电的通道，配电系统需要合理规划和运行，以适应DER（包括DG）的接入，确保电力的可靠分配和系统的稳定运行。
- 分布式发电一般独立于公共电网而靠近用电负荷，可以包括任何安装在用户附近的发电设施，而不论其规模大小和一次能源的种类。一般来说，分布式电源是集成或单独使用的、靠近用户的小型模块化发电设备。容量多为50MW以下的小型发电机组。
- **分布式发电的特点**
 - **(1) 建设容易，投资**：少单机容量和发电规模都不大，不需要建设大电厂和变电站、配电站，土建和安装成本低，工期短，投资少。
 - **(2) 靠近用户，输配电简单，损耗小**：靠近电力用户，一般可直接就近向负荷供电，而不需要长距离的高压输电线，输配电损耗小，建设简单廉价。
 - **(3) 污染少，环境相容性好**：可充分利用可再生清洁能源。
 - **(4) 能源利用效率高**。可结合冷热电联产，将发电的余热回收用于供热和制冷，科学合理地实现能源的梯级利用。此外，距离用电负荷较近，各种电能和热量损失小，综合能源利用率可达70-90%。
 - **(5) 运行灵活，安全可靠有保障**。小机组的启动和停运快速，灵活。可作为备用电源。

- (6) 联网运行，有提供辅助性服务的能力：可与电网联合运行，互为补充，既能提高本身的供电可靠性，还能为大电网提供辅助性的服务。
- 传统能源与分布式能源供电模式对比

图表3：传统能源供电模式与分布式能源供电模式对比

	传统能源	分布式能源
输配成本	必须通过输配电网，才能将生产的电能供给用户。随着电网规模扩大，电能输配成本在总成本中占的比例越来越大。	不需要或只需要很短的输送线路，电能的输配成本几乎为零。
投资	大型电厂和大电网需要大量的资金和较长的建设周期。	小型化、模块化的分布式能源系统可以在几周或几天内实现。
调峰性能	火力发电出力的变动率最大为5%/min，调节范围窄，所需时间长。	工作流程简单，参与运行的系统少，因而升、降负荷或启、停速度较快。
供电安全性	火电厂由于生产规模、设备使用等原因容易导致安全隐患导致供电不稳定。	分布式能源相互独立，用户可自行控制，与大电网配合，可大大地提高供电可靠性，在电网崩溃和意外灾害情况下，可维持重要用户的供电及供电的可靠性。
环保性能	利用煤炭发电的火力发电对环境污染较大，新兴水电及风电环境污染较小。	分布式能源系统利用风能、太阳能等可再生能源生产电能几乎对环境没有污染。
特殊场所的需求	火电厂、水电厂等大规模发电厂对建设环境要求很高。	分布式能源系统可按需要方便、灵活安置在各种用户及特殊场所附近，满足各种需求。
梯级利用	集中供能方式能量形式相对单一，当用户不仅仅需要电力，而且需要其它能量形式如冷能和热能的供应时，仅通过电力来满足上述需要难以实现能量的综合梯级利用。	分布式能源系统以其规模小、灵活性强等特点，通过不同循环的有机整合可以在满足用户需求的同时实现能量的综合梯级利用，实现电、冷、热三联供，具有较高的能源利用效率。

资料来源：前瞻产业研究院整理

@前瞻经济学人APP

- 分布式发电对电网的辅助性服务
 - 夏季和冬季用电高峰期，冷热电联供可满足季节供热或制冷需要，并节省电力，从而减轻供电压力。小知识：南方雪灾时小机组的作用小知识：美加大停电后，投资改造的抉择(2003年北美历史上最大范围的停电)
- 分布式发电的适用场合
 - 分布式发电系统的运行模式：
 - 独立运行多用于大电网覆盖不到的边远地区、农牧区。
 - 联网运行多用于电网中负荷快速增长的区域和某些重要的负荷区域，共同向负荷供电。
 - 联网运行将是分布式发电系统未来发展的主要方向。
- 2.分布式电源的主要形式
 - 分布式电源就是分散的小规模电源，容量<50MW。
 - 常利用基于可再生能源的分布式电源。按照动力装置可以分为燃气轮机、内燃机、微燃机发电技术；光伏(Photo-Voltaic，PV)发电技术；燃料电池(FuelCell)发电技术；生物质(Biomass)发

电技术；风力发电技术；海洋能发电；地热能发电

- 燃气轮机、内燃机、微燃机发电技术

- 燃气轮机、内燃机、微燃机发电技术是以天然气、煤层气或沼气等为常用燃料，以燃气轮机(Gas Turbine或Combustion Turbine)、内燃机(Gas Engine或Internal Combustion Reciprocating Engines)和微燃机(Micro-Turbine)等为发电动力的发电系统

- 燃气轮机

- 燃气轮机 (Gas Turbine) 是一种以连续流动的气体作为工质、把热能转换为机械功的旋转式动力机械。
 - 包括压气机 (Compressor) 、燃烧室 (Combustor) 和燃气透平 (Turbine) 这三大部件。
 - 燃气初温和压气机的压缩比，是影响燃气轮机效率的两个主要因素。提高燃气初温，并相应提高压缩比，可使燃气轮机效率显著提高。
 - 燃气轮机的工作原理
 - 燃气轮机的工作过程是，压气机(即压缩机)连续地从大气中吸入空气并将其压缩；压缩后的空气进入燃烧室，与喷入的燃料混合后燃烧，成为高温燃气，随即进入燃气涡轮机推动涡轮旋转，把燃气的化学能转化成机械能。同时涡轮叶轮带着压气机叶轮一起旋转；加热后的高温燃气的做功能力显著提高，因而燃气涡轮在带动压气机的同时，尚有余功作为燃气轮机的输出机械功。燃气轮机由静止启动时，需用起动机带着旋转，待加速到能独立运行后，起动机才脱开。

- 内燃机

- 内燃机 (Internal combustion engine) 是将液体或气体燃料与空气混合后直接输入汽缸内部的高压燃烧室燃烧爆发产生动力。即通过使燃料在机器内部燃烧，并将其放出的热能直接转换为动力的热力发动机。

- 微燃机

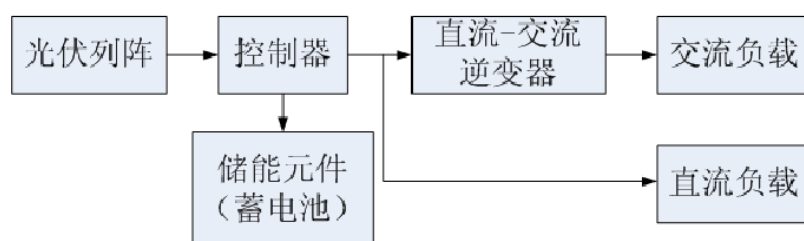
- 微型燃气轮机是一类新近发展起来的小型热力发动机，是以天然气、汽油、柴油等为燃料的超小型燃气轮机。微型燃气轮机体积小，重量轻，功率在100~200千瓦。成本高于相同功率的柴油发电机组，但维护费用低廉，总体运行费用低。
 - 结构相对简单紧凑。它一般采用单轴结构，将压气机、燃烧室和涡轮集成在一个轴上，整体体积较小。多采用空气轴承，减小机械摩擦，不需要润滑系统。

- 微燃机与燃气轮机的区别主要有以下四点:

- (1)微燃机输出功率较小,其轴净输出功率一般低于200kW。
 - (2)微燃机使用单级压气机和单级径流涡轮。
 - (3)微燃机的压比是3:1~4:1,而不是燃气轮机的13:1~15:1。
 - (4)微燃机转子与发电机转子同轴,且尺寸较小。

- 光伏(Photo-Voltaic, PV)发电技术

- 光伏发电技术是一种将太阳光辐射能通过光伏效应、经光伏电池直接转换为电能的发电技术，它向负荷直接提供直流电或经逆变器将直流电转变成交流电供人们使用。光伏发电系统换、控制与保护以及能量储存等环节。



- **燃料电池(FuelCell)发电技术**

- 燃料电池主要包括碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池。

- **生物质(Biomass)发电技术**

- 生物质发电系统是以生物质能为能源的发电工程总称，包括沼气发电、薪柴发电、农作物秸秆发电、工业有机废料和垃圾焚烧发电等，这类发电的规模和特点受生物质能资源的制约。可用于转化为能源的主要生物质能资源包括薪柴、农作物秸秆、人畜粪便、酿造废料、生活和工业的有机废水及有机垃圾等。

- **风力发电技术**

- 我国自20世纪50年代开始发展风力发电，最初是用于农村和牧区的家庭自用小风力发电机，之后在新疆、内蒙古、吉林、辽宁等省区建立了一些容量在10kW以下的小型风电场，还在西藏、青海等地建立了一些由小型风力发电、光伏发电和柴油机发电共同构成的联合发电系统。

- **海洋能发电**

- 海洋能包括潮汐能、波浪能、盐差能等，整体处于发展初步阶段，相对而言，潮汐能应用规模最大、技术最成熟。
- 潮汐发电按照能量利用形式可以分为两种：
 - 1、利用潮汐时流动的海水所具有的动能驱动水轮机再带动发电机发电，称为潮流发电；
 - 2、在河口、海湾处修筑堤坝形成水库，利用水库与海水之间的水位差所蓄积的势能来发电，称为潮位发电。

- **地热能发电**

- 地热发电的基本原理与常规的火力发电类似，都是利用高温高压的蒸汽驱动汽轮机，再带动发电机工作。
- 地热发电直接利用地热蒸汽或利用地热能加热其他工作流体所产生的蒸汽。

- **3.分布式供电系统和微电网**

- 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）。

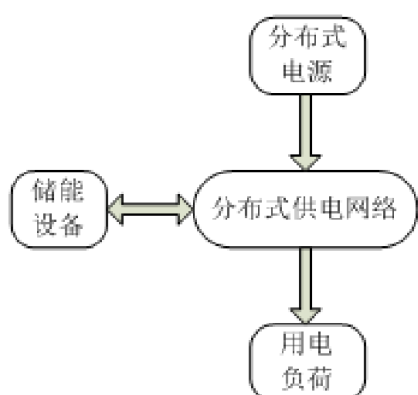
- **储能设备**，是在发电量过大时储存系统中剩余的能量，或在发电不足时释放能量补充缺额。
- **分布式供电网络**可以是交流系统，也可以是直流系统。其中的控制中心用于监控整个分布式供电系统的工作情况，包括电源的发电情况、负荷的用电情况、储能设备的能量控制以及分布式供电网络中的电压、电流等是否正常。
- 由于分布式电源、用电负荷以及储能设备都有可能是交流电气设备，也可能是直流电气设备，因此需要有电力变化设备，包括**整流器 (AC/DC)** ,**逆变器 (DC/AC)**
- 分布式供电系统的并网接口也是某种形式的电力变换设备，如逆变器。并网接口可能不止一个，可能是每个分布式电源都通过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

- **微电网 (micro-grid)**定义：是由**负荷和为其供电的微型电源**（即各种小型分布式电源）共同组成的小型局部电网。微电网与分布式供电系统的概念类似，可以理解为**微电网是能够独立运行或作为一个整体与公共电网联网的分布式供电系统**。
 - 将分布式发电系统以微电网的形式接入到公共大电网运行，互为补充和支撑，是发挥其效能的最有效方式。
 - 对于大电网：微电网可以视为电网中的一个**可控单元**；
 - 微电网可看作大电网中的一个可控单元，而不再是多个分散的电源和负荷。微电网和大电网的连接处，称为**公共连接点 (Point of Common Coupling)**：公共连接点处的微电网模式控制器，可实现并网运行与独立运行的转换。
 - 对于用户：满足特定需求，增加本地供电可靠性，降低线路损耗。

• 4.分布式系统的储能

- 当分布式发电以独立或孤岛方式运行时，储能系统是必不可少的，因此电能储存技术和设备正越来越多受到人们的关注。分布式储能技术主要包括蓄电池、飞轮、超级电容器、超导储能等。
- **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。

• 5.分布式发电的发展应用

- 1970s就有了分布式能源的概念，美国公共事业管理政策法规公布后，正式得以推广，并很快被其它国家接受。“9·11”后，出于对供电安全的考虑，美国等加快分布式供电系统研究和建设的步伐，在很多国家已颇具规模。
- 上海、北京、广州等大城市，10多年前就尝试分布式供电，已有成功范例。2005年，**我国首个分布式电力技术集成工程中心落户广州**，标志着我国分布式供电技术进入实质性发展阶段。**冷热电三联供技术**应用最广泛，发展前景较好，我国大部分地区的住宅、商业大楼、医院、公用建筑、工厂等，都有供电、供暖及制冷需求，而且很多地方配有自备发电设备，这些都为冷热电三联供提供了市场。

• 6.分布式冷热电联供系统

• 分布式冷热电联供系统

冷热电联供系统（CCHP, Combined Cooling, Heating and Power）是分布式能源系统中前景最为明朗，也是最具实用性和发展活力的系统。

它是在热电联产系统基础上发展起来的一种总能系统，直接面向用户需求供电、供冷、供热、生活热水等。

分布式冷热电联供系统（D_C-CCHP），即“第二代能源系统”，集燃气轮机、燃气内燃机、蒸汽轮机、吸收式冷热水机、压缩式冷热水机、热泵、吸收式除湿机和能源综合控制体系等高新技术和设备为一体，对输入能量及内部能流根据热能品味进行综合梯级利用，来达到更高能源利用率，减少二氧化碳及有害气体排放。

• 优点

- (1)适合多种能源，适用领域广

适合多种能源:

天然气: 586亿m³(2006年, 3%), 超过2000亿m³ (2020年, 9.8%)

可再生能源: 秸秆、沼气、太阳能、地热等

煤层气: 24亿m³(2005年), 100亿m³(2010年)

焦炉气: 200亿m³

适用领域:

工业: 炼焦、化工等过程; 电子、食品、制药等工业园区

建筑: 宾馆、商业建筑、医院、机场等

其他: 边远城市、社区、农村



- (2)可以综合解决高效、环保、安全可靠、能源结构的问题

小型、冷热电联产、临近用户的先进供能系统

综合解决高效、环保、安全可靠、能源结构的问题

是

不是

✓能源综合梯级、高效

✓冷热电联供、先进总能系统

✓可靠安全, 多重保障冷热电

✓高环保, NO_x (9~25ppm)

✓经济性良好, 投资回收5~8年

✗简单循环的小型电厂

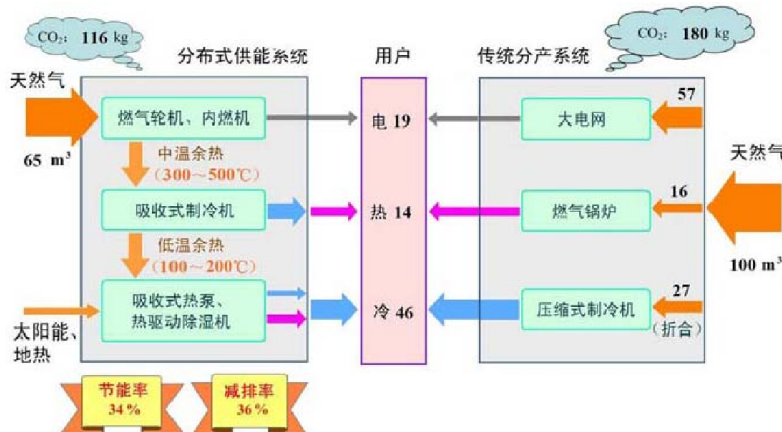
✗功能单一的热力过程

✗紧急备用电源

✗燃气锅炉, NO_x (200ppm)

✗价格昂贵

- (3)“十二五”节能指标已下达, 到2015年末, 每万元GDP能耗为0.869标煤, 比2010年末降低16%。分布式冷热电联供系统的节能率可以达到20~40%。



应用

- (1)

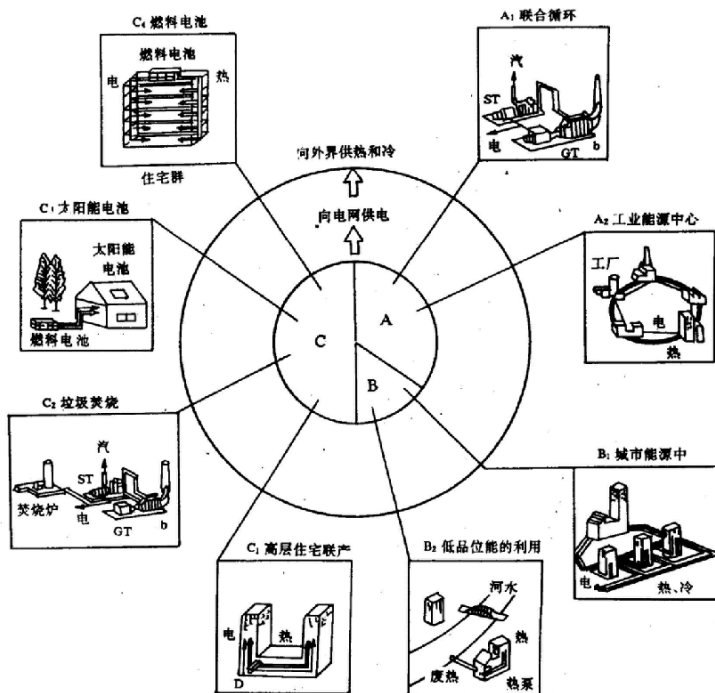


图1 各种形式的热电冷三联供示意图

A—工业领域 B—城市发展 C—民用场合 D—活塞发动机 b—锅炉 ST—汽轮机 GT—燃气轮机

• (2) 适用的条件

1、人口密度比较大，单位面积用电、冷热负荷较高；

2、具有相对比较匹配的热（冷）、电负荷，通常电与热（冷）的比例在0.5~2.5之间，这样的比例与现有的系统设备的技术特性相一致。

3、年有效利用时间较长，通常认为系统年利用时间在3500~4000h以上才能够比较快速的回收投资；

4、建筑密度较大，使得管网的初投资和冷热介质的输送费用较低。

• 国外分布式冷热电联供系统的发展

美国	日本	欧洲
➢ 1999年提出“CCHP创意”和“CCHP2020年纲领”； ➢ 至2003年，美国DES/CCHP总装机容量为56000MW，占全美电力总装机容量的7%； ➢ DES/CCHP可以帮助美国实现CO₂减排19%的目的。	➢ 截止2004年，日本全国DES/CCHP总装机容量达到了7.78GW； ➢ 日本规定热电联产的上网电价高于火力发电，鼓励发展热电联产； ➢ 燃气轮机冷热电联供和汽轮机驱动压缩式制冷设备是日本冷热电联供的主要形式。	➢ 英国对热电联产项目免除气候变化税、商务税 ➢ 丹麦政府给予热电联产项目投资补贴和调度优先。 ➢ 德国规定对于总效率达到70%以上的电厂免征天然气税，对分布式能源系统予以长期的补贴。

• 我国分布式冷热电联供系统的发展

- 我国的DES/CCHP 技术的研究尚处于起步阶段, 国家四部委《关于发展热电联产的规定》中明确规定：“鼓励发展热、电、冷联产技术和热、电、煤气联供”。

- 如果利用分布式能源发电来满足2021年前的电力需求增长可节省大约40%的资金成本，同时零售电价可降低28%，CO₂可减排56%。
- DES/CCHP 系统是一个开放的、灵活组合的系统,其中可以包括多项新技术,如燃料电池、微型涡轮机、先进的内燃机、吸收式制冷机、热泵、干燥和能源回收系统、蓄热和蓄冷技术、智能建筑的热电控制和系统集成技术等。以DES/CCHP 为核心,发展DES/CCHP 可以带动多项能源相关产业和技术的发展,具有十分重要的发展前景。
- **并网问题**是目前我国发展冷热电联产技术的主要障碍之一。

• 分布式冷热电联供系统的分类

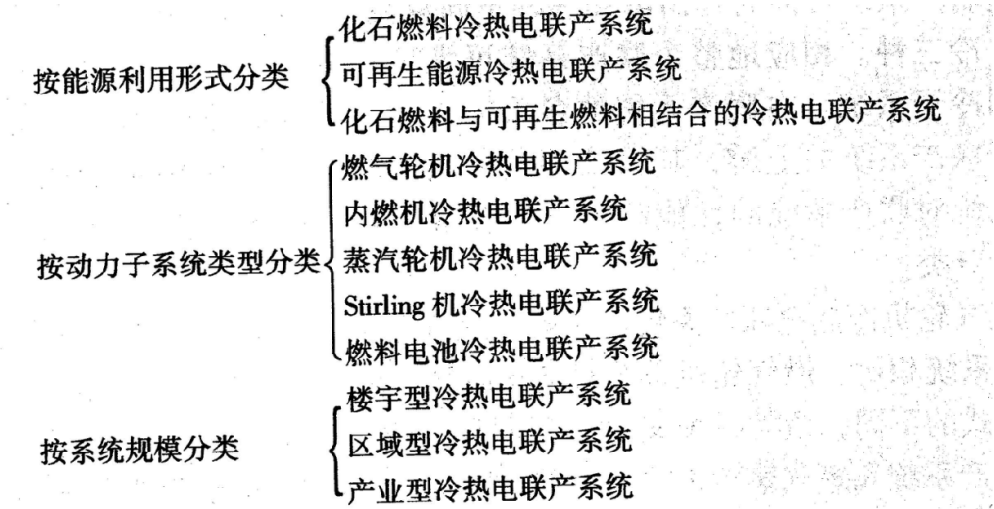


表 1 冷热电联产系统方案

方 案	主要能源	供冷、供热方式	备 注
冷热电三联产	蒸 汽	夏季:热电厂蒸汽+吸收式制冷 冬季:热电厂蒸汽+汽水热交换	适用于已建电厂的区域
冷热电三联产	热 水	夏季:热电厂蒸汽+吸收式制冷 冬季:热电厂蒸汽+汽水热交换	适用于已建电厂的区域
直燃式冷热水机组	燃气(油)	夏季:直燃式冷热水机组制冷 冬季:直燃式冷热水机组供热	适用于中小规模
燃气冷热电三联产	燃 气	夏季:燃气透平发电+余热锅炉+吸收式制冷 冬季:燃气透平发电+余热锅炉+汽水热交换	
电制冷+锅炉采暖	燃气(油)	夏季:电制冷 冬季:蒸汽+汽水热交换	
电动水源热泵	电	夏季:电动水源热泵制冷 冬季:电动水源热泵供热	有满足温度条件的水源
空气源热泵	电	夏季:空气源热泵制冷 冬季:空气源热泵供热	用于单幢或数幢建筑

• 按系统规模分类

楼宇型冷热电联产系统

- 单一建筑，需紧随负荷变化，对系统的全工况性能要求高

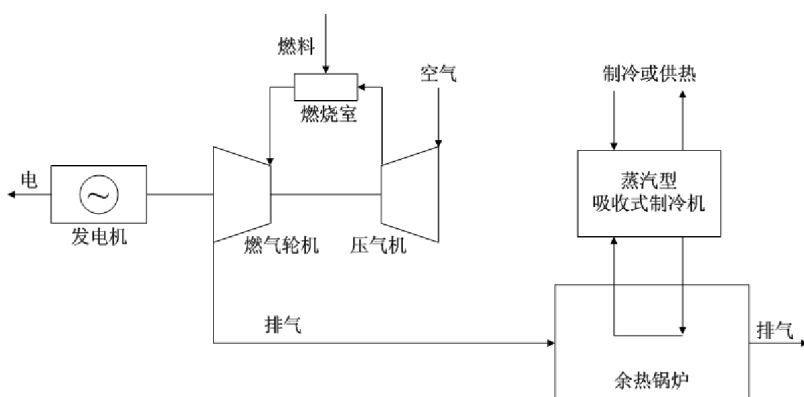
区域型冷热电联产系统

- 需要考虑负荷的同时使用系数，应合理布置联产系统的位置

产业型冷热电联产系统

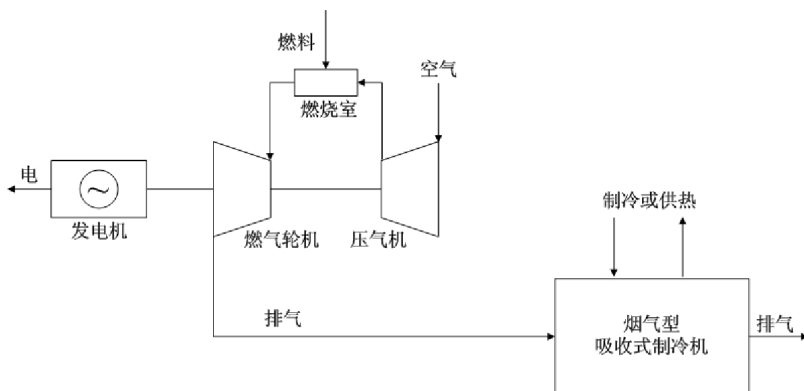
- 用户负荷具有很大的相似性，应充分考虑多台机组并联的灵活配置

• 燃气轮机冷热电联供系统-蒸汽型



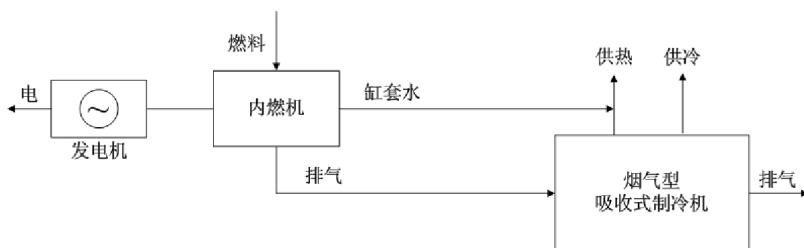
- 以蒸汽作热媒，系统实现相对容易，蓄热也方便，应用较广泛

• 燃气轮机冷热电联供系统-烟气型



- 溴化锂机组出口烟气温度一般不低于170度

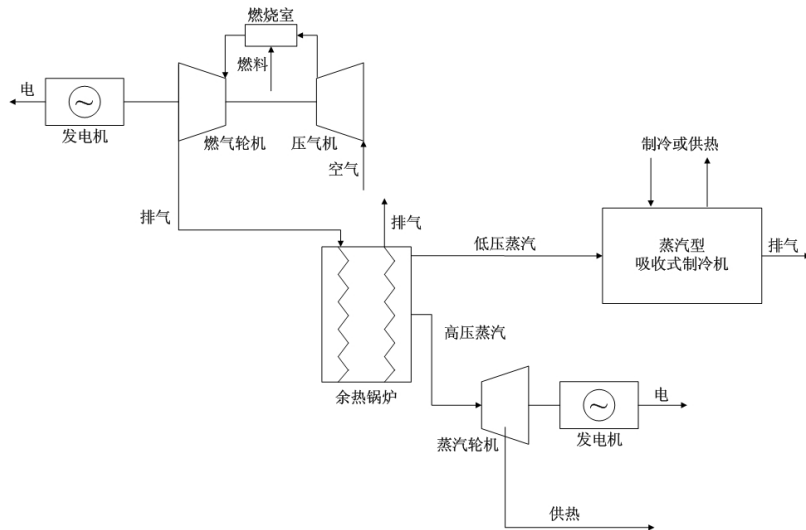
• 内燃机冷热电联供系统



- 排烟温度低，主要与烟气型吸收式机组配套或用于生产热水来驱动热水型制冷系统
- 侧重于供热

- 氮氧化物排放较高

• 蒸汽轮机冷热电联供系统



- 通常采用蒸汽型溴化锂吸收式机组
- 系统较复杂，不适合中小型用户使用
- 多用于工业领域

• 典型案例分析：奥运主场馆

- 2008年奥运主场馆分布式能源系统研究目标定位与方案总体思路
- 方案设计目标

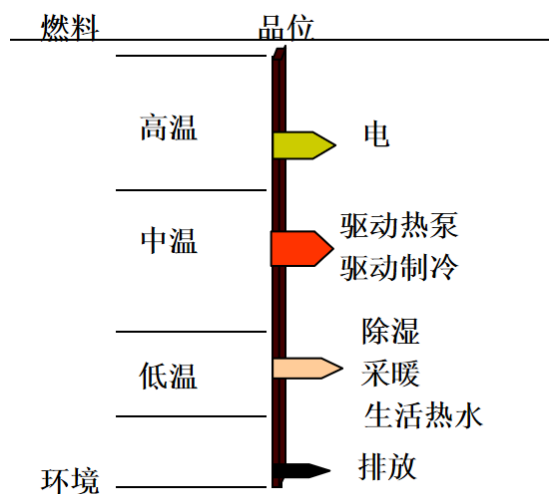
- 实现传统能源与可再生能源的联合使用，形成有机的整体
- 根据负荷变化和各能源品种的特点，灵活、高效、合理地调配
- 多能源输入与多能源输出
- 多功能的分布式能源系统

• 方案定位：追求国际领先水平

- 实现多种能源互补，充分利用可再生能源（包括太阳能、水源、地源、风源）；
- 系统高度集成：能量梯级利用，特别是中低温余热的利用；
- 冬季热泵方式供热
- 夏季吸收机回收排热，提供生活热水，同时提高机组效率
- 低温余热除湿（夏季）、采暖（冬季）
- 能源系统与建筑功能的有机结合。

• “奥运能源展示中心”（Energy Park）

- 目的：采用国际上最新的分布式能源技术，综合利用天然气、太阳能和地热等能源，先进、高效、智能、清洁、可靠的能源系统。
- 任务：国家体育场、游泳中心、信息大厦全部空调、采暖和生活热水，部分电力。
- 特点1：能源的梯级利用



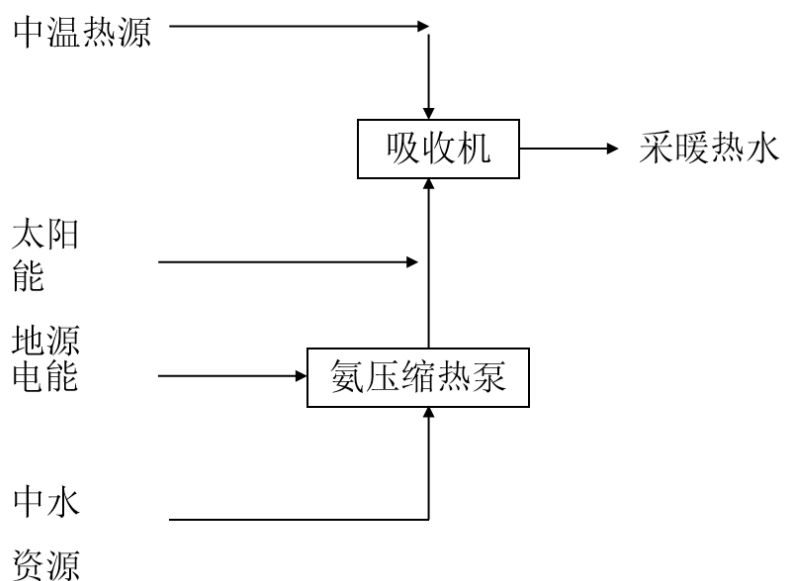
● 特点2：中温热源利用

- 冬季：热泵方式供热
 - 传统方案：中温余热锅炉
 - 设计方案：吸收式热泵供热
- 夏季：吸收机冷凝器排热回收（50~70%）
 - 传统方案：环境排放，冷却水消耗
 - 设计方案：产生活热水、泳池加温、机组效率提高

● 特点3：低温热源的利用

- 传统方案：排弃（约10%）
- 设计方案：
 - 夏季：游泳馆除湿
 - 空调负荷下降约40%
 - 提高制冷机的制冷效率
 - 冬季：采暖、生活热水

● 特点4：天然气与可再生能源、资源互补的能源系统



- 冷热电联产系统
- 太阳能光热利用
- 地源热泵技术

- 地源热泵是一种利用地下浅层地热资源既能供热又能制冷的高效节能环保型空调系统。地源热泵通过输入少量的高品位能源（电能），即可实现能量从低温热源向高温热源的转移。在冬季，把土壤中的热量“取”出来，提高温度后供给室内用于采暖；在夏季，把室内的热量“取”出来释放到土壤中去，并且常年能保证地下温度的均衡。

- 中水的利用

- 结论

- 提出了奥运能源系统研究方案的总体思路及追求国际领先的水平定位；研究方案在节能率、环保、可靠性等方面充分体现“科技奥运”、“绿色奥运”的精神，并对我国城市能源建设和分布式能源系统本身的发展，具有展示性和标志性作用。

第十二章 风能的其他应用

• 12.1 风力提水

- 风力提水是人类有效利用风能的主要方式之一
- 20世纪50年代我国还拥有几十万台各式风力提水机
- 欧洲16世纪荷兰大量使用风车排水
- 风力提水广泛应用的主要原因：
 - 1、风力提水机结构简单，成本低，制造容易，操作和维护简单；
 - 2、储水问题容易解决；
 - 3、风力提水机对风速要求不高，在低速下工作性能好；
 - 4、风力提水效益明显。
- 根据提水方式的不同分为两类：
 - 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**是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风力致热**

- 风力致热（制热）是将风能转换成热能。目前**有三种转换方法：**
 - 一是风力发电，再将电能通过电阻丝变成热能。即**风能 机械能 电能 热能**。
 - 二是由风力机将风能转换成空气压缩能，再转换成热能。即**风能 机械能 空气压缩能 热能**。
 - 三是利用风力机直接转换成热能。即**风能 机械能 热能**。
 - 最简单的方法是**搅拌液体制热**，即风力机带动搅拌器转动，从而使液体变热。

- **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。

- **风力致热的方式**

- **固体摩擦致热**

- 基本工作原理是**风力机输出轴驱动一组摩擦片，利用摩擦生热加热液体**。当传动轴达到一定转速时,摩擦块在离心力作用下,压靠在摩擦缸体的内壁上,产生一定的正压力，也产生一定的摩擦力。随着传动轴转速增加,摩擦块离心力增大,正压力上升,摩擦力增加,摩擦产生的热量由水箱中的水吸收。这种致热装置**结构简单，维护方便**，不足之处在于摩擦过程中**摩擦块磨损较大，需要定期更换或维护致热元件**。

- **搅拌液体致热**

- 基本原理：通过**风力机驱动搅拌器转子转动**，转子叶片搅拌液体容器中的载热介质（水或其他液体），使之与转子叶片及容器摩擦、冲击，液体分子间产生不规则碰撞及摩擦，提高液体分子温度，可加热外侧水的温度。
 - 主要优点如下：
 - 1、风力机直接带动搅拌器，对风速无要求；
 - 2、能做到与风轮工作特性的合理匹配；
 - 3、结构简单，容易制造，可靠性高；
 - 4、搅拌器可以作为风力机天然的制动器，风力机系统可不单独另外设超速保护装置。

- **挤压液体致热**

- 液压式致热装置由液压泵和阻尼孔组合起来直接进行风能-热能能量转换的致热装置。
 - 工作原理：**风力机带动液压泵**，将工作液体加压，把机械能转换为液体压力能，使得受压液体**从阻尼孔高速喷出**，这样在短时间内液体压力就能转换成液体动能。由于阻尼孔尾流管中充满液体，当**高速液体冲击低速液体**时，液体动能就能通过液体分子间的冲击和摩擦转换为热能。

- **压缩空气致热**

- 工作原理：风力机主轴直接驱动油泵1。高压油通过管路驱动安装在地面上的液压马达2,液压马达驱动双缸水冷活塞式压缩机3（电动机4 带动油泵5向主流路补充油液），由空气压缩机压出的热空气进入蓄热器10，该蓄热器利用氢化合金蓄热。该致热装置，有两个控制系统，一个是转矩控制系统，即控制空压机的吸入流量（阀11），阀11开口大小决定最佳转矩值，使之与风力功率特性相匹配。另一个是排出压力控制（阀12），控制致热温度。

- **其他类型的致热（如：涡电流致热、电热致热）**

- **涡电流致热**

- 传动轴1 由风力机驱动,在轴1上固定着园盘2和3随着传动轴一起转动。园盘2和3上镶装永久磁铁,磁铁极性是相异的,数目由风力机功率和园盘尺寸确定。发热盘4是

由铜(或铝)制成的空心筒,开有进出水口,固定在支架上不动。带有永久磁铁的圆盘2和3相对发热盘4回转,即切割磁力线,在发热盘4上产生感应电流(涡电流)而生热。该热量被流过发热盘中空部分的流体所吸收并向外输出。

• 12.3风力致热技术实际应用实例

• 沼气池的增温加热

- 通过风力发电机将风能转换成电能,再驱动电动机通过传动轴带动沼气池加热器的搅拌器转动,均匀加热发酵液,使料液充分发酵,从而提高产气率。

• 在水产养殖方面的应用

- 养殖场的鱼苗过冬,新虾产卵,幼虾生长都需要加热、保温,不允许有大幅度的温度变化。由于被加热物体是水,其自身热容量大,对输出热负荷变化的反映不灵敏,因此应用风——热系统加热较为理想。养殖场要求水温13~28℃,用电升温成本太高,且供电不稳定,烧煤需增添设备。东北地区冬季受西伯利亚气压带的影响,北风大而持久,风力资源丰富,发展风力致热技术很有前途。

• 在农副产品加工、温室采暖等方面的应用

- 谷物、果品、水产品的干燥需要大量的热能,农副产品就地精加工往往也离不开加热、保温,风力致热在这些领域也有广泛的用途。日光温室的作物栽培在冬季需要辅助加热,采用烧煤加热保温,能耗指标高,污染严重。如果能推广应用风力致热技术,将会取得明显的经济效益。

• 风炉

- 适用于北方农村地区,见课本p226页图9.8。冬季房屋取暖、融化庭院积雪、提供家庭洗浴热水等都是风力致热技术良好的发展空间。

• 风力驱动的热泵空调系统

- 1)风力驱动的压缩式热泵可以分为四类:
 - 1、完全由风力发电机驱动热泵压缩机;
 - 通常结合蓄电池储热或低温辐射采暖与吊顶冷却结合实现制冷和制热。可以用来进行风电峰值负荷调节
 - 2、风力机通过传动机构驱动热泵压缩机;
 - 采用导向伞齿轮组将风力机水平旋转方向转变为竖向旋转,驱动发电机和压缩机工作,发电机为换热器风扇电机提供电能,压缩机通过四通阀与室外和室内换热器连接,实现制冷和制热。见课本P226-227
 - 3、风力机与交流电机并联驱动热泵压缩机;
 - 风力机和交流电机都有传动机构与压缩机相连,由转换器控制。
 - 4、风力机与市电、蓄电池并联驱动热泵压缩机。
 - 该系统除了风力发电机、蓄电池组以及热泵之外,还包括风电控制器,主要作用是根据室内温度设计要求计算需要的压缩机功率大小,并判断风力发电机发电是否满足要求。如满足,则由风力发电机直接为压缩机供电,多余电量供给蓄电池组;若不能满足要求,则由蓄电池为其供电,如蓄电池电量不足则由市电供电。
- 2)风力驱动的吸收式制冷(热泵)机组

- 该系统在控制器作用下，利用风力发电机为冷剂泵和溶液泵提供动力，多余的发电量用于加热水，为吸收式制冷机组提供热源，当热水温度低于热源要求时，由锅炉补充热量；当热水温度超过热源要求时，将多余热量存储在蓄电池内或通过泄荷器泄掉。如系统中没有锅炉，风力不足时可由市电提供泵及加热水所需电量。(见课本P229-230)

- 3)机动车风力空调

- 在机动车的顶部或者前部迎风位置设置进风口，利用行驶过程中的进风口进风驱动风力发电机发电，并在充电控制器调控下为蓄电池组充电，经逆变器转变为交流电后供空调工作，原理图如下所示(见课本P230):

- **风力致热展望**

- 风力致热与风力发电、风力提水相比，具有**热转换效率高**的特点。在风力资源丰富的地区发展风力发电技术，用于生活供暖及农业生产等方面，对缓解我国能源压力，减轻环境污染具有重要意义。