



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 3

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第二章 风力发电特性分析

2.1 风力机的能量获取和功率控制

掌握风力机风轮扫掠面上获取能量的公式。

2.2 恒速风电机组的原理

掌握恒速风力发电机的结构和原理。

2.3 变速风电机组的原理

掌握双馈风机和永磁直驱风机的结构和原理。

2.4 大规模风电及海上风电场关键问题

了解大规模风电场的接线形式及聚合技术。

2.1 风力机的能量获取和功率控制

◇ 我国风能资源概况

据中国气象科学院预测，我国经济可开发风能资源为：

- 陆上约**2.53亿**千瓦
- 海上约**7.5亿**千瓦
- 合计约**10亿**千瓦



如果**陆上风电**年上网电量按等效满负荷**2000小时**计，每年可提供**5000亿千瓦时**电量，**海上风电**年上网电量按等效满负荷 **2500小时**计，每年可提供**1.8万亿千瓦时**电量，合计**2.3万亿千瓦时**电量。”如果中国的风力资源能够得到全部开发，相当于每年多出**20个三峡水电站**。

2.1 风力机的能量获取和功率控制

- 风力发电的基本原理

- 风力发电的原理：利用风力带动风轮叶片旋转，再透过增速装置将旋转的速度提升，来促使发电机发电。
- 风力发电机组的结构，包括风轮、塔架和机舱三部分。

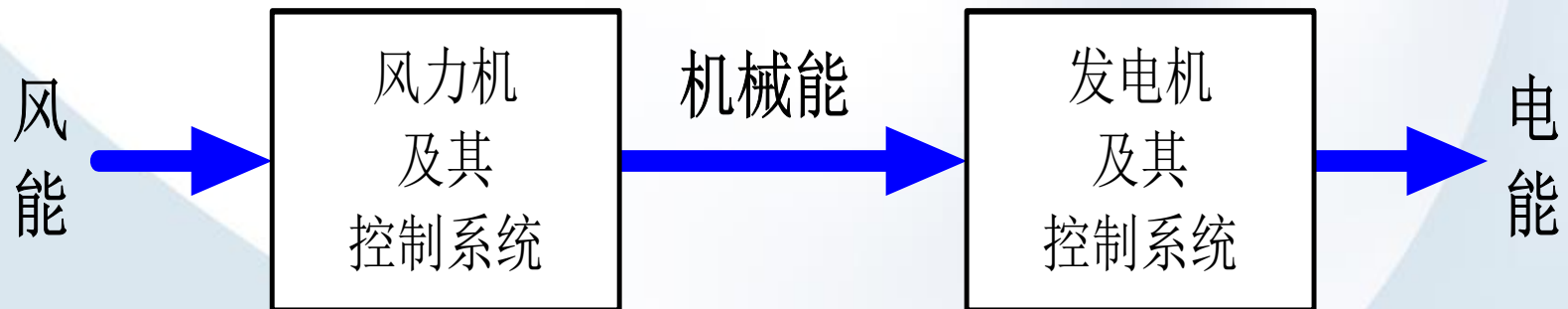
风力发电的能源转换原理是：

- A 风能-太阳能-机械能
- B 热能-风能-机械能
- C 风能-热能-电能
- D 风能-机械能-电能

提交

◆ 风力发电的基本原理

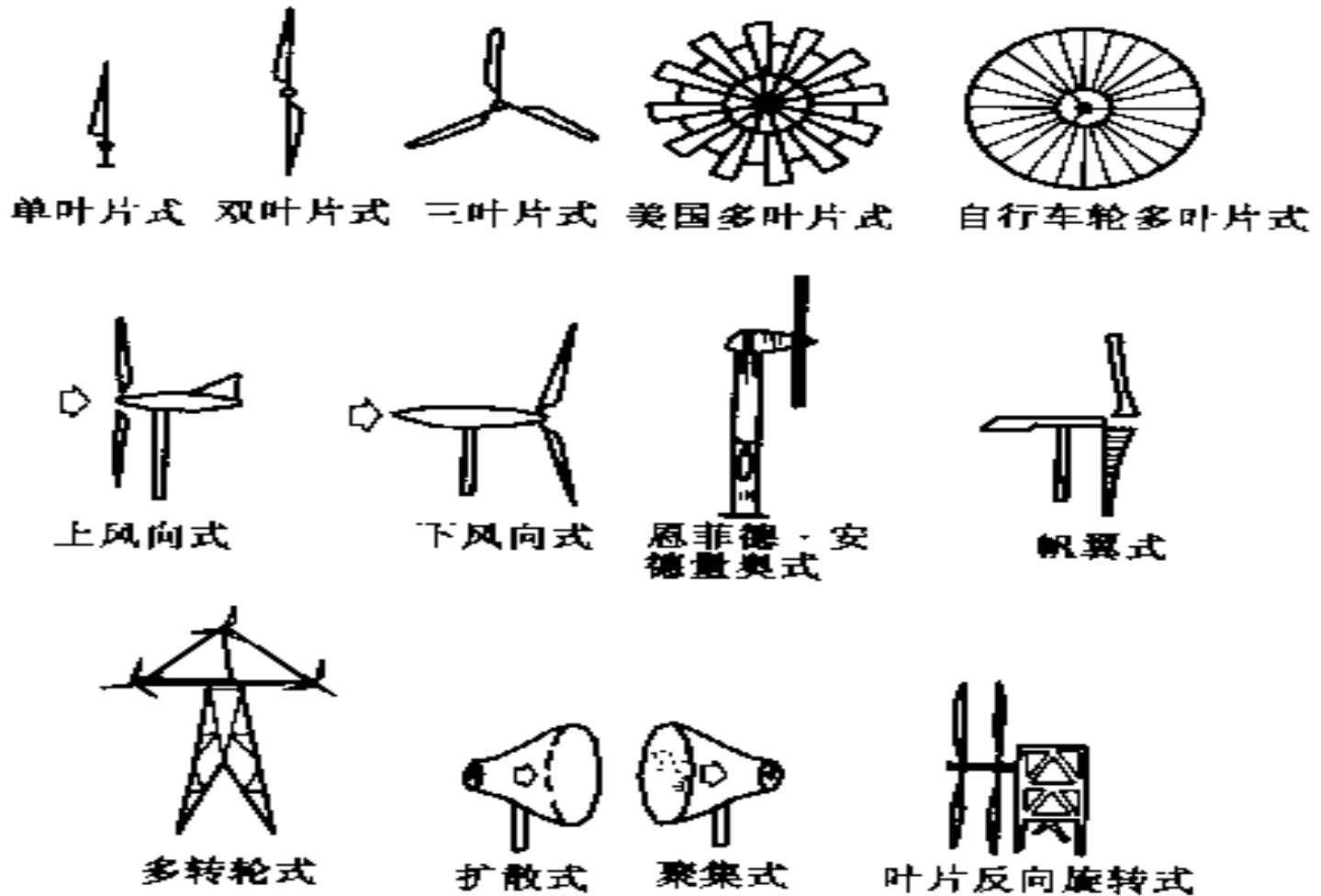
风力发电系统：实现“风能—机械能—电能”转换的系统，称为风力发电系统，是一个非常复杂的能量转换系统，包括多学科的基础知识：**空气动力学、流体力学、机械设计学、结构力学、电机技术、电力电子技术、电网技术、计算机技术、通信技术……**



一、风力机的分类

- 1. 按**转轴与风向的关系**，风力机可分为两类：
 - **水平轴风力机**：**风轮的旋转轴与风向平行**；
 - **垂直轴风力机**：**风轮的旋转轴垂直于地面或气流方向**。

1) 水平轴风力机



2) 垂直轴风力机

虽然目前还没有大量商业化，但它有许多独特优点，如：
不需要塔架、发电机可安装在地面上、维修方便及叶片制造方便等。



垂直轴风力机



高空风电 & 海上风电



一、风力机的分类

- 2.按风轮桨叶分类:

- 失速型:

- 高风速时，因桨叶形状或因叶尖处的扰流器动作，限制风力机的输出转矩与功率；

- 变桨型:

- 高风速时通过调整桨距角，限制输出转矩与功率。

一、风力机的分类

• 3.按风轮转速分类:

— 定速型:

- 风轮保持一定转速运行，风能转换率较低，与恒速发电机对应；

— 变速型:

- (1) **双速型**: 可在两个设定转速运行，改善风能转换率，与双速发电机对应；
- (2) **连续变速型**: 在一段转速范围内连续可调，可捕捉最大风能功率，与变速发电机对应。

一、风力机的分类

- 4.按传动机构分类:

- 齿轮箱升速型:

- 用齿轮箱连接低速风力机和高速发电机；（减小发电机体积重量，降低电气系统成本）

- 直驱型:

- 直接连接低速风力机和低速发电机。（避免齿轮箱故障）

一、风力机的分类

- 5.按风机额定功率（容量）分类：
 - 微型机：10kW以下
 - 小型机：10kW至100kW
 - 中型机：100kW至1000kW
 - 大型机：1000kW以上（MW级）

一、风力机的分类

- 6.按所带动的发电机分类:

- 异步型:

- (1) 笼型单速异步发电机;
 - (2) 笼型双速变极异步发电机;
 - (3) 绕线式双馈异步发电机;

- 同步型:

- (1) 电励磁同步发电机;
 - (2) 永磁同步发电机。

一、风力机的分类

- 7.按发电机的并网方式分类:

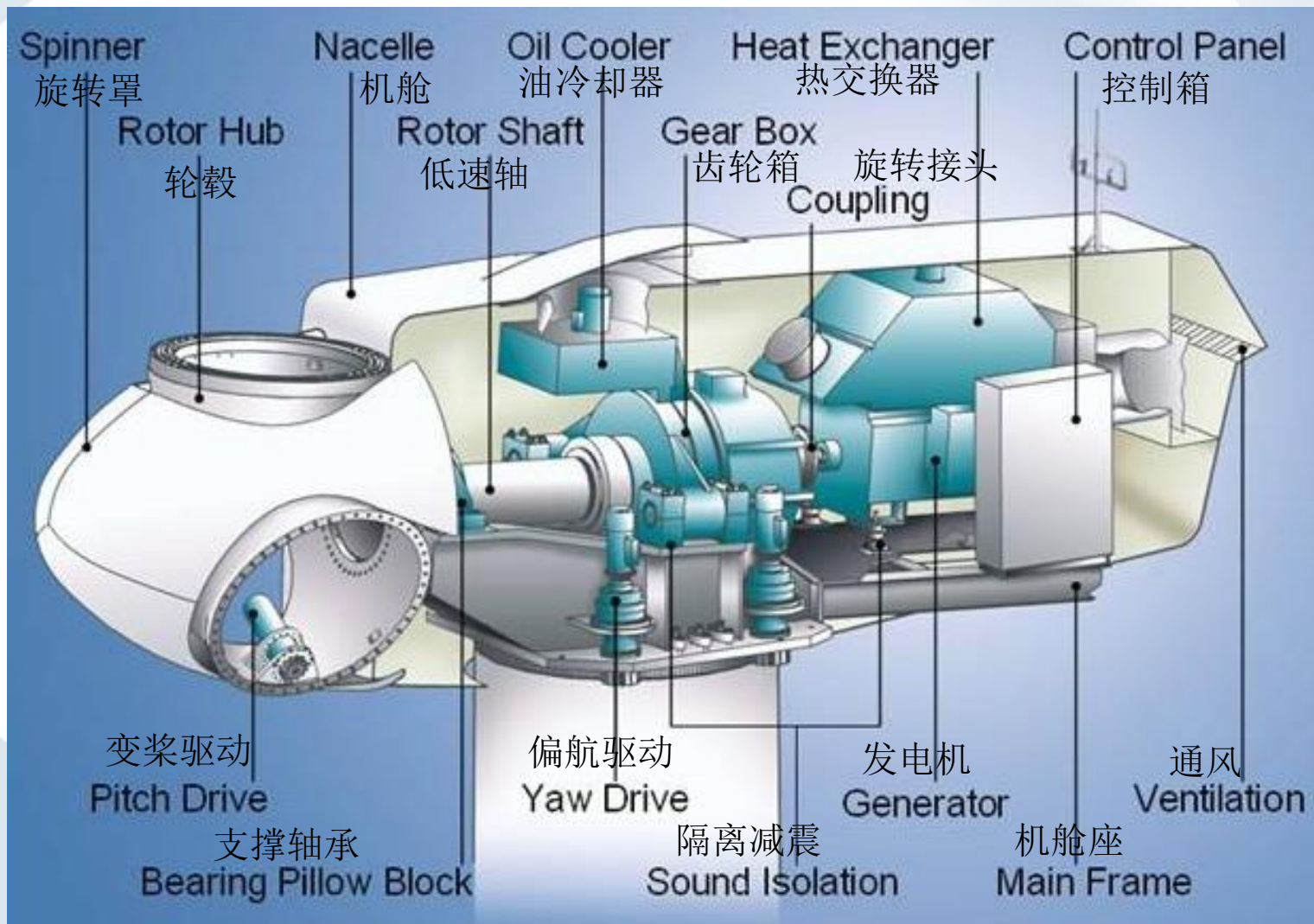
- 并网型:

- 并入大电网，可省却储能环节。

- 离网型:

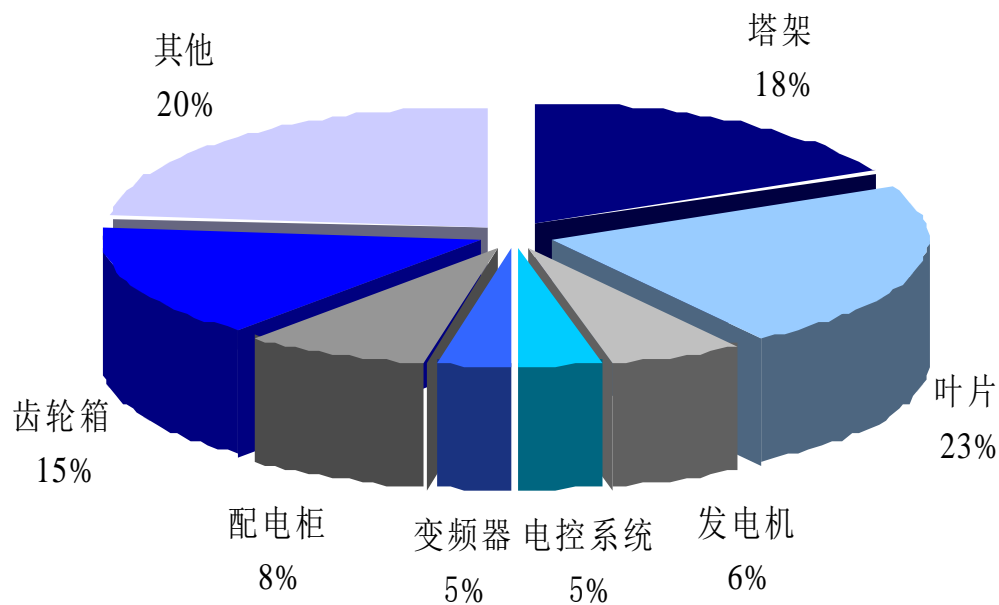
- 一般需配蓄电池等直流储能环节，可带交、直流负载，或与柴油发电机、光伏电池并联运行。

二、风电机组的总体结构



风力发电机视频

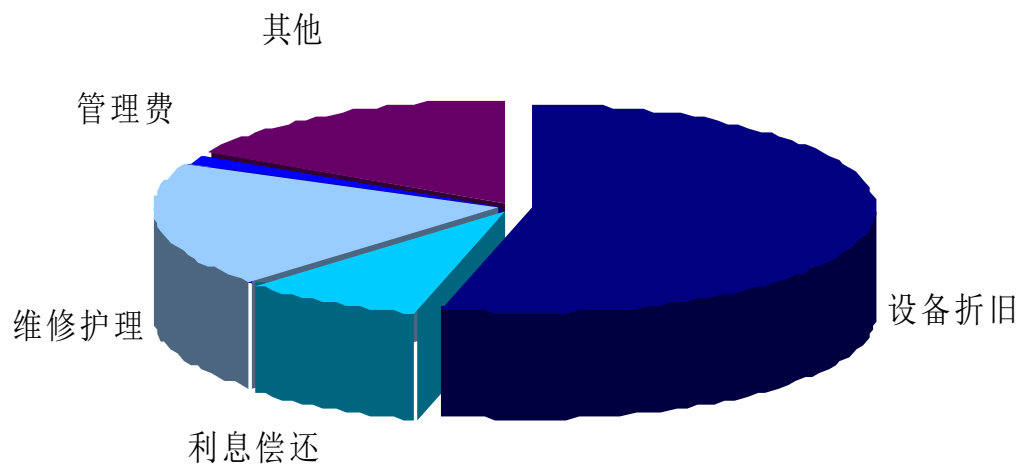
风力发电机组零部件所占成本比例



(以带齿轮箱异步风机为例)

资料来源：中国风能协会，海通证券研究所整理

风力发电成本的一般占比示意图



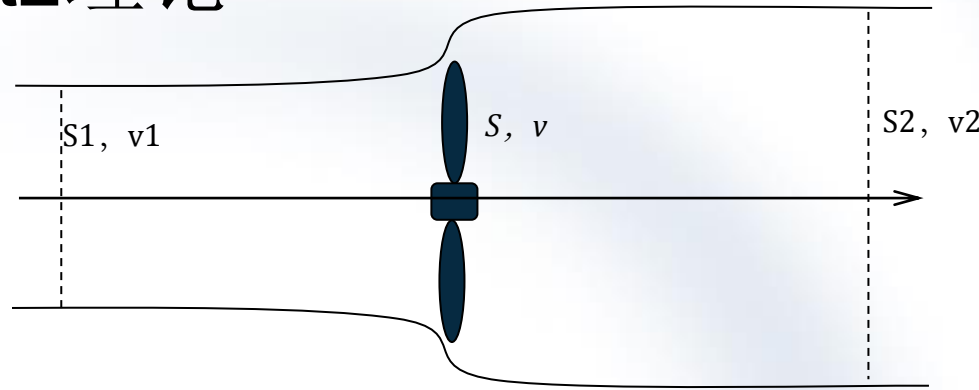
资料来源：中国风能协会，海通证券研究所整理

三、风力机能量转换过程

- 风能基本知识
 - 风能(Wind Energy): 地球表面大量空气流动所产生的动能。
 - 由于地面各处受太阳辐照后气温变化不同和空气中水蒸气的含量不同, 因而引起各地气压的差异, 在水平方向高压空气向低压地区流动, 即形成风。
 - 地球吸收的太阳能有1%~3%转化为风能, 总量相当于地球上所有植物通过光合作用吸收太阳能转化为化学能的50到100倍。

三、风力机能量转换过程

- 贝兹Betz理论



风能经风轮之后的气体体积变化示意图

气流动能为： $E = \frac{1}{2}mv^2$

m ——空气质量；
 v ——气流速度。

气流质量为：
(单位时间)

$$m = \rho V = \rho S v$$

$$E = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

单位时间内的动能，
这里的 E 相当于功率！

- 贝兹Betz理论假设，基于理想风轮，经过风轮前后的空气体积相等。

根据牛顿第二定律，（单位时间内）风轮上的受力及风轮吸收的功率为：

$$F = mv_1 - mv_2 = \rho Sv(v_1 - v_2)$$

$$\rightarrow P = Fv = \rho Sv^2(v_1 - v_2)$$



风轮吸收的功率也等于风轮前后动能（单位时间）的变化：

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho Sv(v_1^2 - v_2^2)$$

令 P 和 ΔE 相等，可推出风机的机械功率 P 表达式：

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \rightarrow \quad P = \frac{1}{4} \rho S(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)$$

- 贝兹极限（理想风力机的理论最大效率）

- 因为风涡轮提取能量，空气减速，导致它在风涡轮附近，并在某种程度上牵制它的旋转。德国物理学家 **Albert Betz**，1919年确定风涡轮可提取流经涡轮的横断面至多59.3%的能量。

- 试问气流经过风轮之后减速至多大的速度 v_2 ，效率最高？

$$\frac{dP}{dv_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_2 = \frac{1}{3}v_1 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad P_{\max} = \frac{8}{27}\rho S v_1^3 \quad \Rightarrow \quad \eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{E} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

美国某公司（**FloDesign**）：在风力涡轮机的叶片周围罩上遮蔽物，引导空气通过叶片并使其加速，增加风机的对风能的利用能力。

四、风力机的主要特性系数

- 1. 风能利用系数 C_p
 - 定义：风力机能够从风气流中吸取的能量，与风轮扫过面积内的全部风能(未受风轮干扰时)之比，称为**风能利用系数**，也称**风能转换系数**；
 - 风能利用系数主要取决于：
 - 风轮叶片的设计（如攻角、桨距、翼型）
 - 风机的制造水平
 - 风轮的转速

四、风力机的主要特性系数

- 1. 风能利用系数 C_p

- 风力机的实际功率： $\longrightarrow P_S = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 C_P$

- C_p 小于 Betz 极限 0.593，一般为 0.15~0.5 之间，高性能的螺旋桨式风力机， C_p 才能达到 0.45 左右。

四、风力机的主要特性系数

- 2.叶尖速比 λ

- 叶片圆周速度与上游未受干扰的风速比：为了表示风轮在不同风速中的状态。

$$\longrightarrow \lambda = \frac{\omega_r R}{v} = \frac{(2\pi n)R}{v}$$

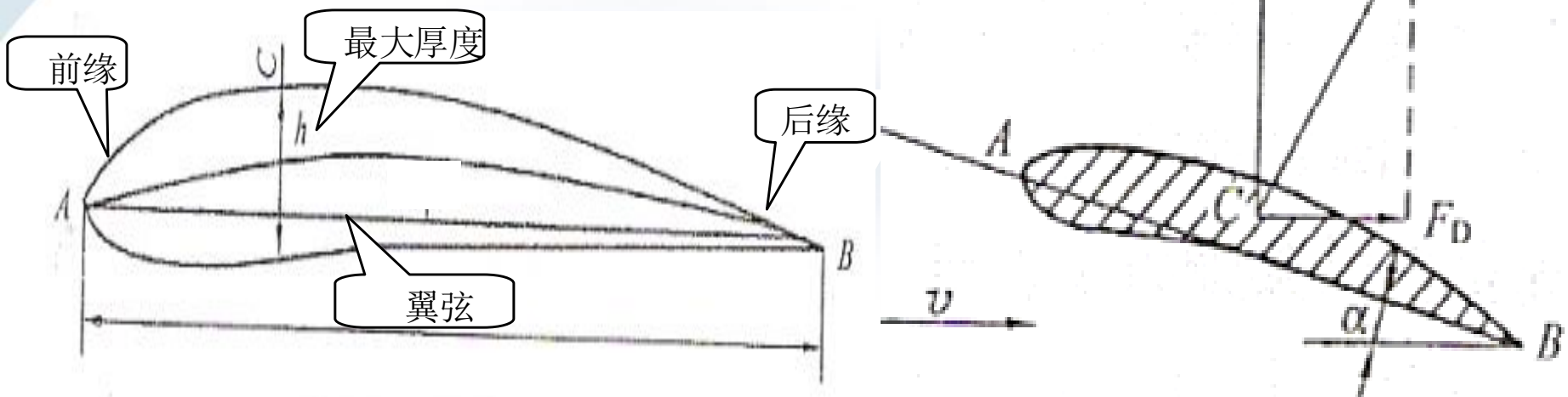
- 当 λ 取某特定值时， C_p 值最大，此时的 λ 称为最佳叶尖速比。
 - 叶尖速比 λ 与风速 v 成反比。

四、风力机的主要特性系数

- 3. 桨距角 θ (Pitch Angle)

- 桨距角 θ 是指风机叶片与风轮平面夹角，也称节距角，或叶片安装角（仅对定桨距风机而言）。
- 变桨距风机在不同风速下调节桨距角以最大利用风能。
- 区别于：攻角、入流角。

水平轴风机的翼型及其受力



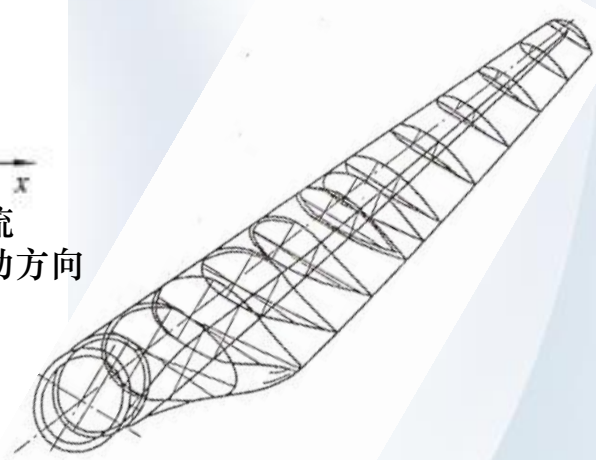
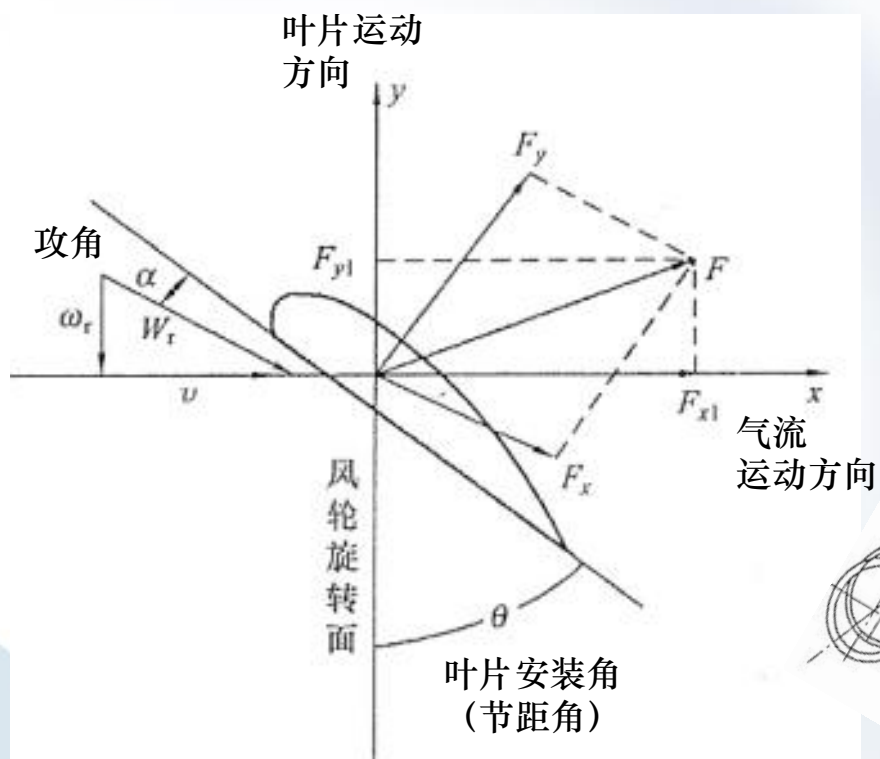
在与飞行器设计有关的空气动力学中， F_L 是促使飞行器飞离地面的力——升力(Lift)， F_D 是垂直于翼弦方向的力——阻力(Drag)，两个力的合力产生转矩。

攻角 α 定义:翼弦与空气来流速度之间的夹角。

当攻角 α 为 0° 时，升力最小。当气流方向与物体表面垂直时，物体受到的阻力最大。

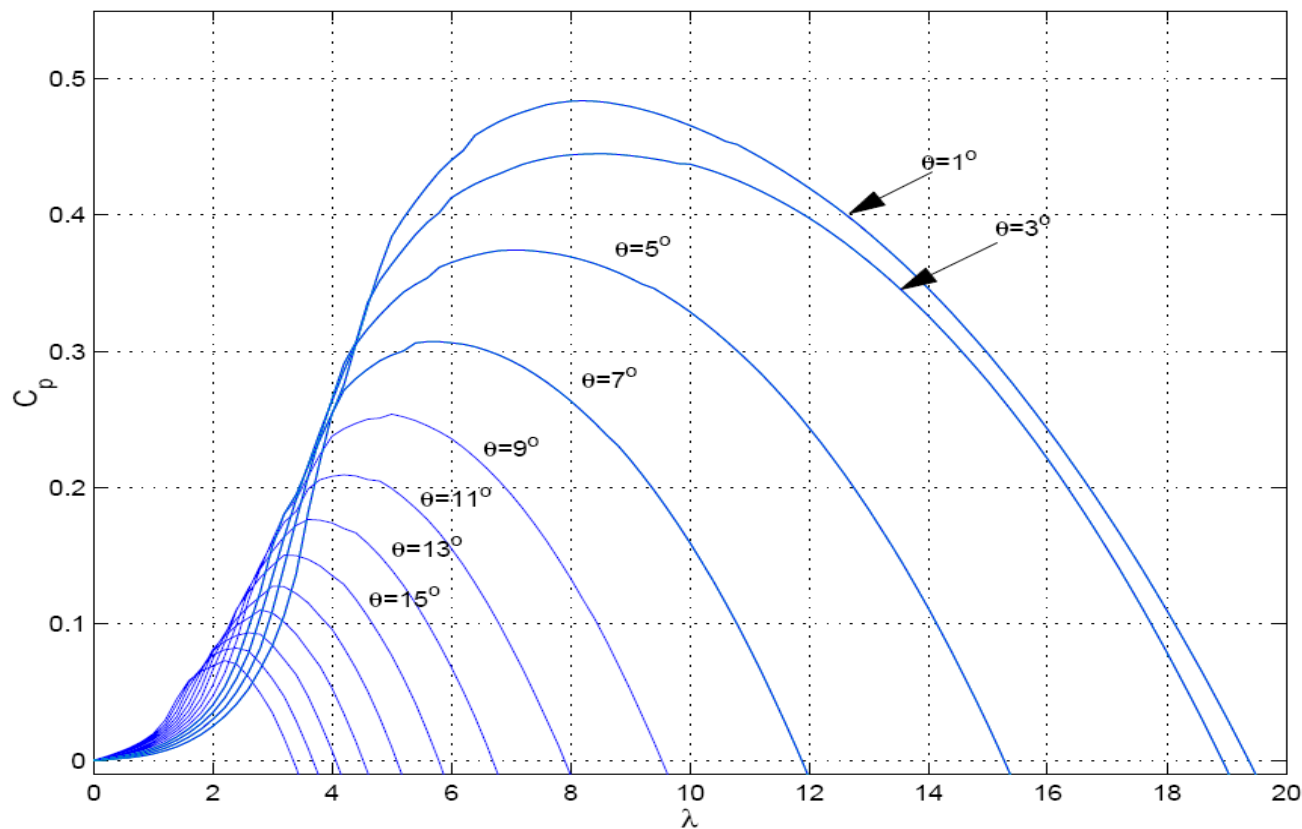
入流角等于攻角加桨距角。

入流角是来流合速度（也就是风速和旋转相对速度的合速度）与旋转平面的夹角。



风能转换系数：与叶尖速比和桨距角的关系

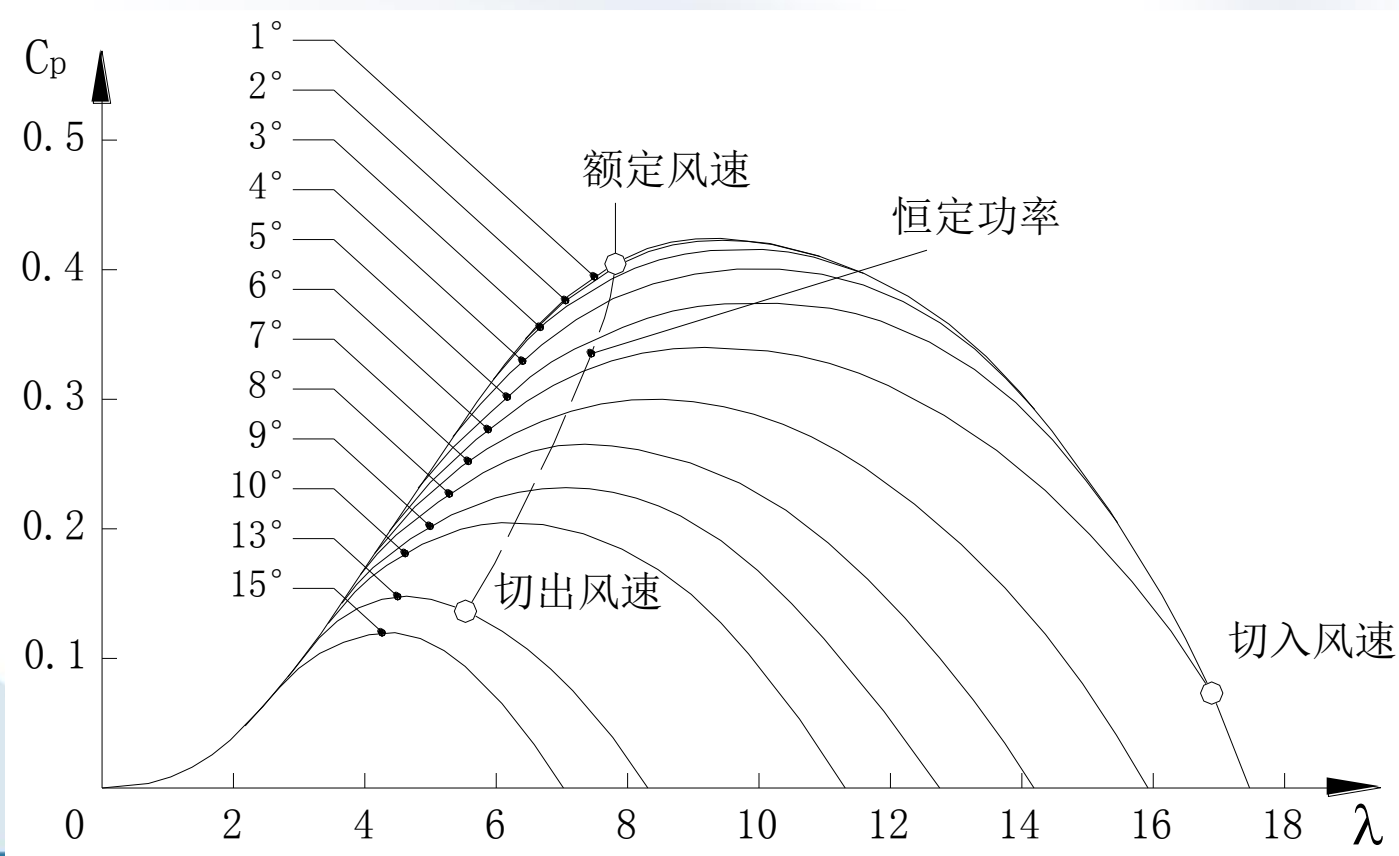
多项式拟合：
$$C_p(\lambda, \theta) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 \alpha_{i,j} \theta^i \lambda^j$$



不同桨距角下典型风能转换系数-叶尖速比曲线

风能转换系数：与叶尖速比和桨距角的关系

- C_p 与切入、额定、切出风速关系（功率运行点）



• 4.风力发电机其它主要技术参数

- 启动风速，一般为3~5m/s，也称切入风速；
- 额定风速，一般为8~20m/s；
- 停机风速，通常为15~35m/s，也称切出风速；

- 输出功率，一般为几百千瓦~几兆瓦；
- 叶片材料，常采用高强度低密度的复合材料；
- 风轮直径，通常风力机的功率越大，直径越大；
- 叶片数目，高速发电用风力机为2~4片，低速风力机多于4片；
- 塔架高度等。

• 5.力矩和转速:

- 风力机的机械功率等于叶片角速度与风作用于风轮的力矩的乘积。

$$P_{mech} = T\omega$$

- 风力机获取的风功率相同时，角速度小，则力矩大；角速度大，则力矩小。
- 低速风力机的输出功率小，扭矩系数大，如用于磨面和汲水的风力机，常采用多叶片风力机；
- 高速风力机效率高、输出功率大，如风力发电常用3个叶片。

1.为什么大型风电场的风力发电机通常采用三个叶片？

作答

2.电力系统为什么采用三相制？

作答

五、风力机的输出特性

- 风电机组的风力机将风能转换为机械能的特性，与机组的类型、风速、叶片设计、风空气密度、桨距角等因素有关。

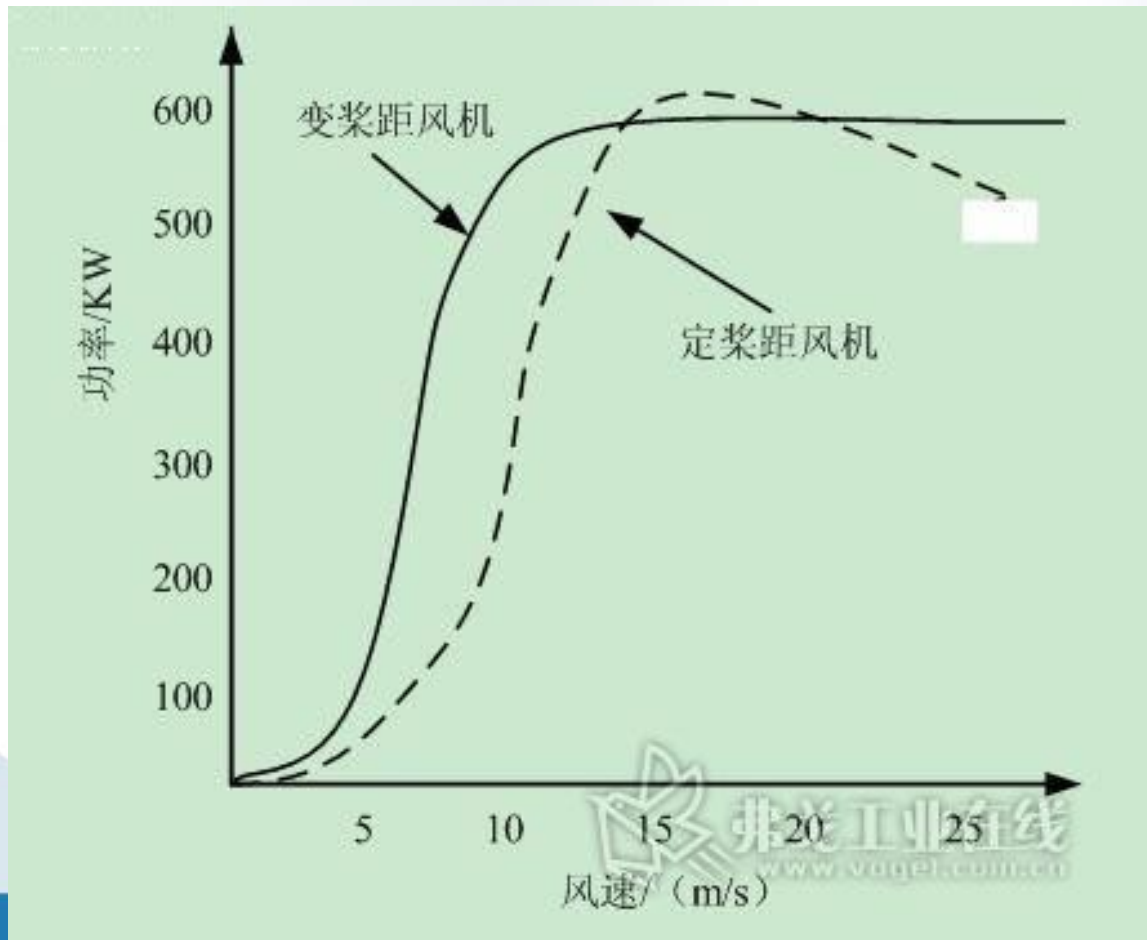
— 风速-机械功率关系：

$$P_{mech} = \begin{cases} 0 & v_w < v_{in} \\ \frac{1}{2} \rho S v_w^3 C_p(\lambda, \theta) & v_{in} \leq v_w < v_{out} \\ 0 & v_{out} \leq v_w \end{cases}$$

ρ ——空气密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； v_w ——风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； v_{in} 、 v_{out} ——风力机的切入风速和切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； $S=\pi R_{ae}^2$ ——风力机叶片的扫风面积/ m^2 ； R_{ae} ——风轮半径/ m ； C_p ——风力机的风能利用系数。

五、风力机的输出特性

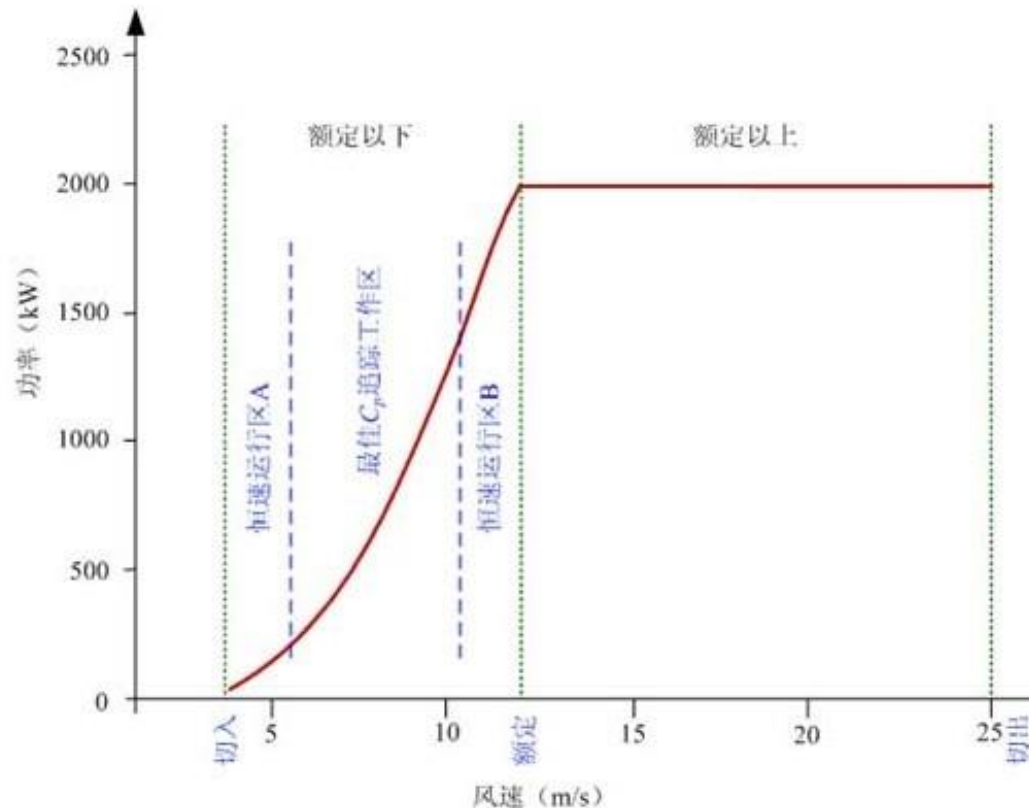
— 不同类型风电机组输出功率曲线：



五、风力机的输出特性

- 变桨距风电机组输出功率曲线

- （注意：也有很多工程应用场合，将风机输出功率的上升段近似以风速的一次函数来表达）



六、风力发电的特点

- 优点：
 - (1) 没有直接污染排放；
 - (2) 没有燃料问题；
 - (3) 不需要水参与发电过程；
 - (4) 经济性好。
- 对环境的负面影响：
 - (1) 风力机的噪声；
 - (2) 风力机的电磁干扰；
 - (3) 视觉影响等等。
- 技术上：风力发电机发电功率较不稳定。



2.2 恒速风电机组的原理

一、恒速风力发电技术原理

- 一般采用鼠笼式异步发电机；
- 当风机带动发电机达到或接近同步速时并网，电机转速基本保持恒定，电压频率恒定；
- 异步发电机转子的转速变化范围很小，转差率一般约为3%~5%，称恒速恒频风力发电机。

2.2 恒速风电机组的原理

一、恒速风力发电技术原理

恒速风机的主要特点：

- 电气系统简单，适合于在野外缺少维护环境下工作，成本低；
- 控制简单，可靠性好；
- 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。

- 恒速风机的两种类型：**定桨距失速型**和**变桨距型**
 - **定桨距失速型风力机**利用风轮叶片翼型的气动失速特性来限制叶片吸收过大的风能，功率调节由风轮叶片来完成，对发电机的控制要求比较简单。这种风力机的叶片结构复杂，成型工艺难度较大。
 - **变桨距风力机**则是通过风轮叶片的变桨距调节机构控制风力机的输出功率。

二、恒速风力发电控制技术

• 1.定桨距失速控制

– 定桨距风力发电机组的主要特点：

- 桨叶与轮毂固定连接，当风速变化时，桨叶的**迎风角度固定不变**；
- 利用**桨叶翼型本身的失速特性**，在高于额定风速下，气流的攻角增大到失速条件，使桨叶的表面产生紊流，效率降低，达到限制功率的目的；
- **控制调节简单可靠**；
- **但**为了产生失速效应，导致叶片重，结构复杂，机组的**整体效率较低，当风速达到一定值时必须停机**。

- 2.变桨距调节方式

- 恒速恒频风力发电系统的工作原理：

- 一般风速情况要维持风力机转速的稳定，这在风速处于正常范围之中时可以通过电气控制而保证。
 - 而在风速过大时，输出功率继续增大可能导致电气系统和机械系统不能承受，因此需要限制输出功率并保持输出功率恒定。通过调节叶片的桨距，改变气流对叶片的攻角，从而改变风力发电机组获得的空气动力转矩。

- 2.变桨距调节方式

- 优点:

- 由于变桨距调节型风机在低风速时，可使桨叶保持良好的攻角，比失速调节型风机有更好的能量输出，因此，**比较适合于平均风速较低的地区安装。**
 - 变桨距调节的另外一个优点是在风速超速时可以逐步变化到无负载的全翼展模式位置，**避免停机，增加风机发电量。**

- 对变桨距调节需要注意：**对阵风的反应灵敏性。**

- 3.主动失速控制

- 1)主动失速调节方式是前两种功率调节方式的组合，吸取了被动失速和变桨距调节的优点。

- 2)风机叶片的设计采用失速特性，调节系统采用变桨距调节，从而优化机组功率的输出。系统遭受强风达到额定功率后，叶片桨距主动向失速方向调节，将功率调整在额定值以下，限制机组最大功率输出。

- 3.主动失速控制

- 3)随着风速的不断变化，叶片仅需微调即可维持失速状态。另外，调节叶片还可实现气动刹车。
- 4)这种系统的优点是既有失速特性，又可变桨距调节，提高机组的运行效率，减弱机械刹车对传动系统的冲击。系统控制容易，输出功率平稳，执行机构的功率相对较小。

三、恒速风力发电的缺点：

- ◆ (1)转速不变，输出功率和转速的控制全靠倾角控制完成，要求控制响应快，动作次数多，调节机构易疲劳损坏；
- ◆ (2)强阵风来时，转速不变，风力机和发电机之间的轴承、齿轮箱将会承受巨大的机械摩擦和疲劳应力，机械承受应力大，要求坚固；
- ◆ (3)异步发电机需要从电网吸收滞后的无功功率以产生旋转磁场，恶化了电网的功率因数；
- ◆ (4)不能从空气中捕获最大风能，影响系统的运行效率。

仅适用于中小功率风电系统，通常不大于1000kW。

