

第一章

1、大气静力学方程： $dp = -\rho g dz$

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

2、**气压**：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。

气压阶（单位气压高度差）：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。 $h = -\frac{dz}{dP} = \frac{1}{\rho g}$

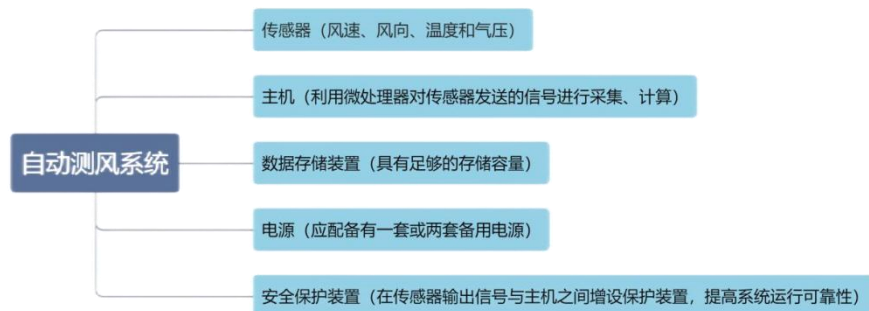
3、**风能公式**：如果风力发电机叶轮的断面积为 A ，则当风速为 v 的风流经叶轮时，单位时间内风传递给叶轮的风能 $P = \frac{1}{2} \rho A v^3 = \frac{\pi}{8} \rho d^2 v^3$

风能密度：叶轮扫过单位面积的风能，即 **风能密度** $W = \frac{1}{2} \rho v^3$

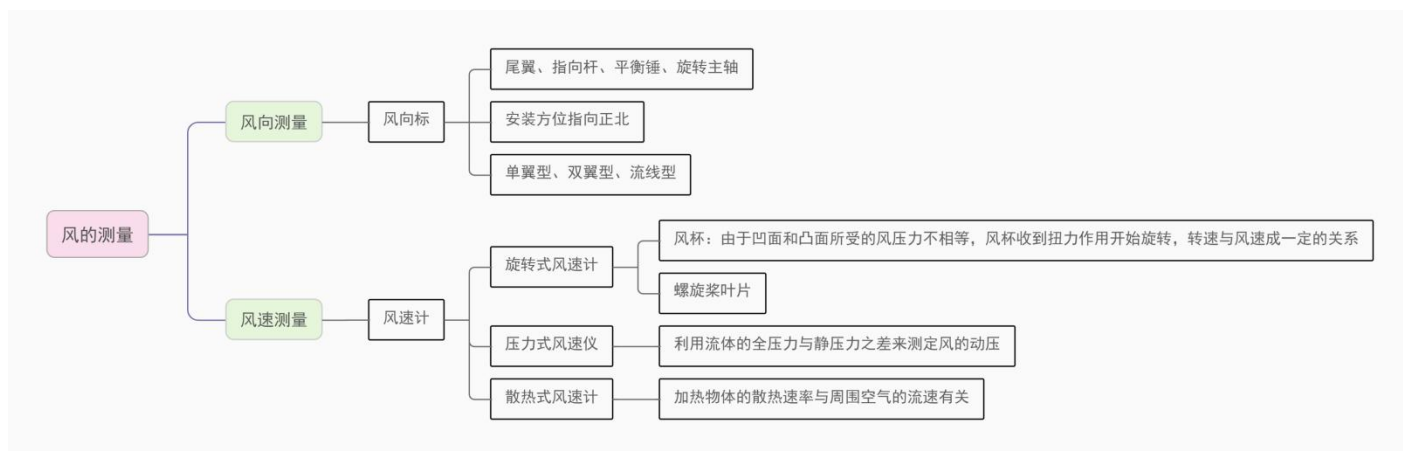
有效风能：对于风能转换装置而言，可利用的风能是在“切入风速”到“切出风速”之间的风速段，这个范围的风能即“有效风能”，该风速范围内的平均风能密度即“有效风能密度”。

4、**风力等级**：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。0~17 级

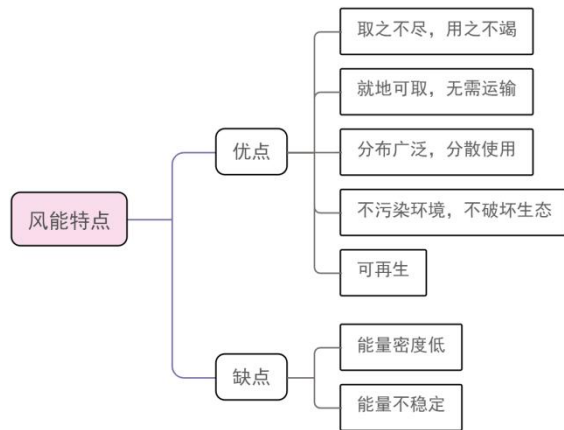
5、



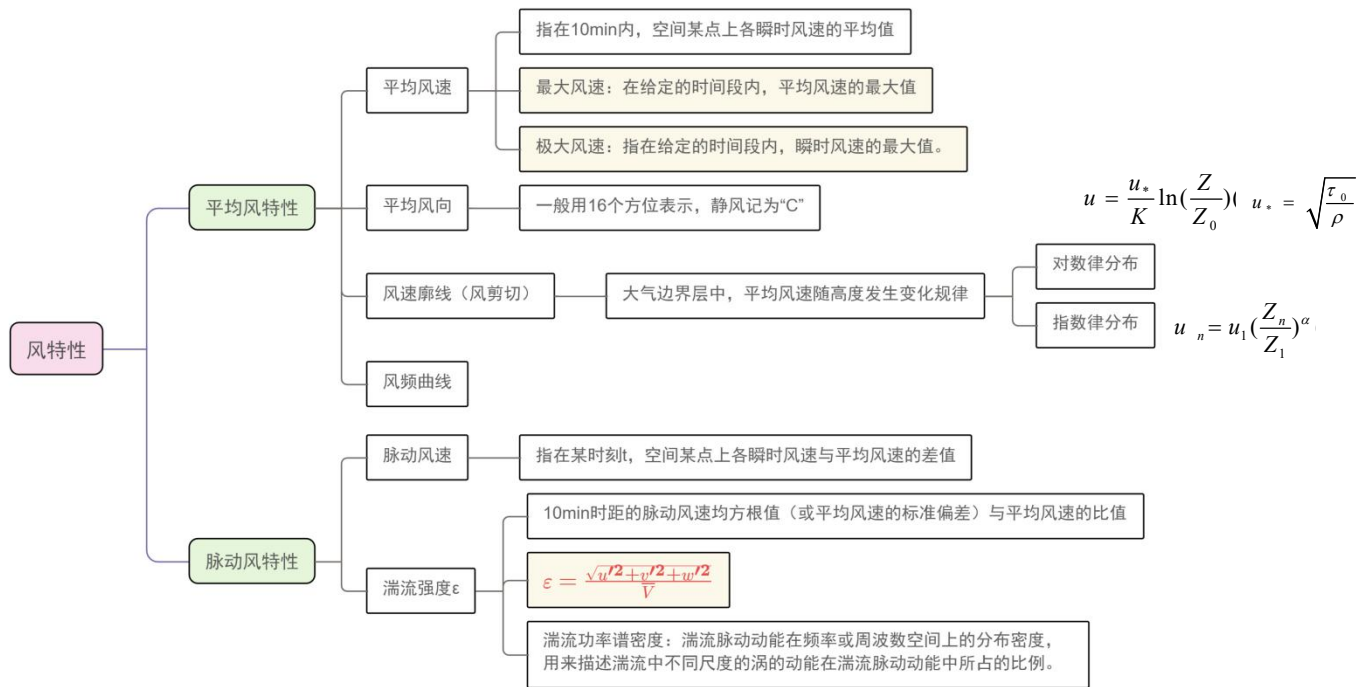
6、风速风向仪一般安装在离地 10m 的高度上



7、



8、



9、风速的统计特性：

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：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：威布尔分布、瑞利分布、对数正态分布等。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。

10、风能资源

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。

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 ~ 5000h； $6\sim 20\text{m}/\text{s}$ 的为 1500 ~ 2000h； $8\sim 20\text{m}/\text{s}$ 的为 500~1000h。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 ~ 50km 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。

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 2000~3000h； $6\sim 20\text{m}/\text{s}$ 的为 500~1500h。集中分布在 3 个地区。

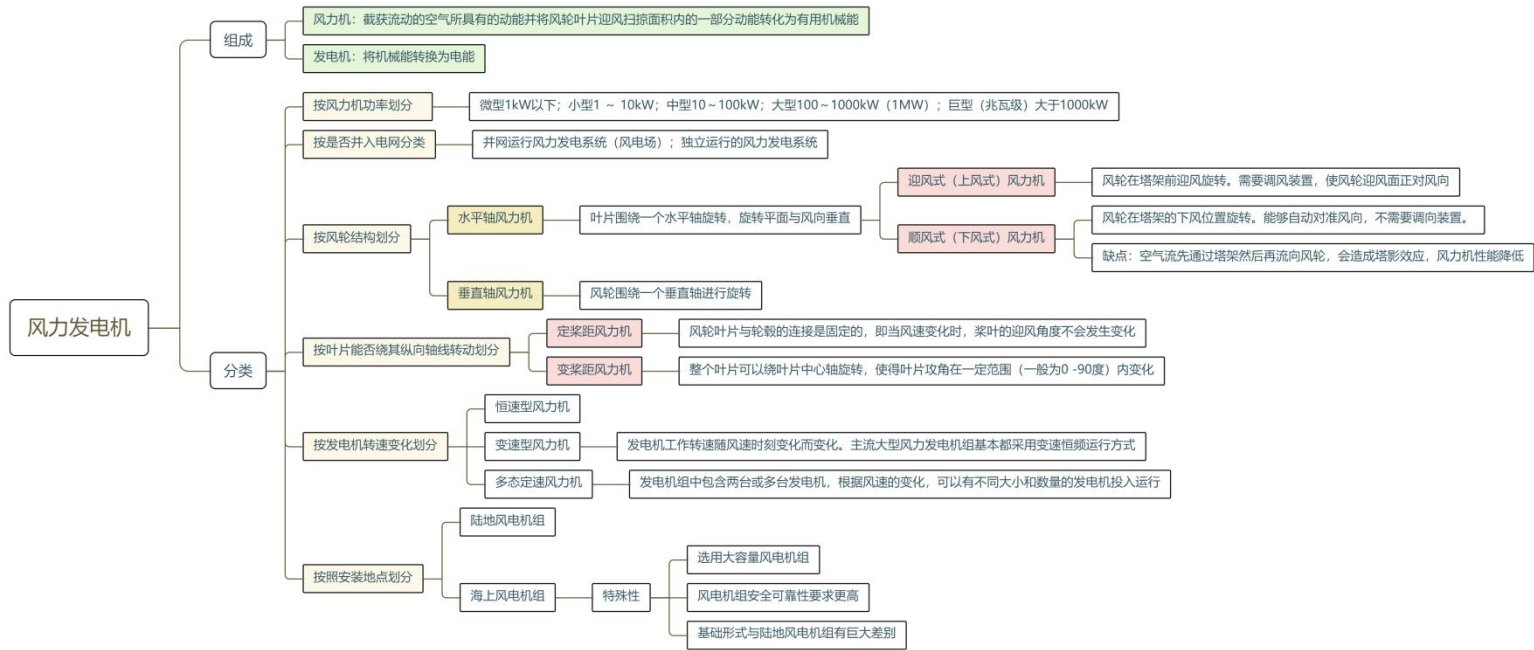
- (1) 两广沿海，在南岭之南，包括福建沿岸 50 ~ 100km 的地带。
- (2) 大、小兴安岭山地。
- (3) 三北中部。

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 2000 h 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。

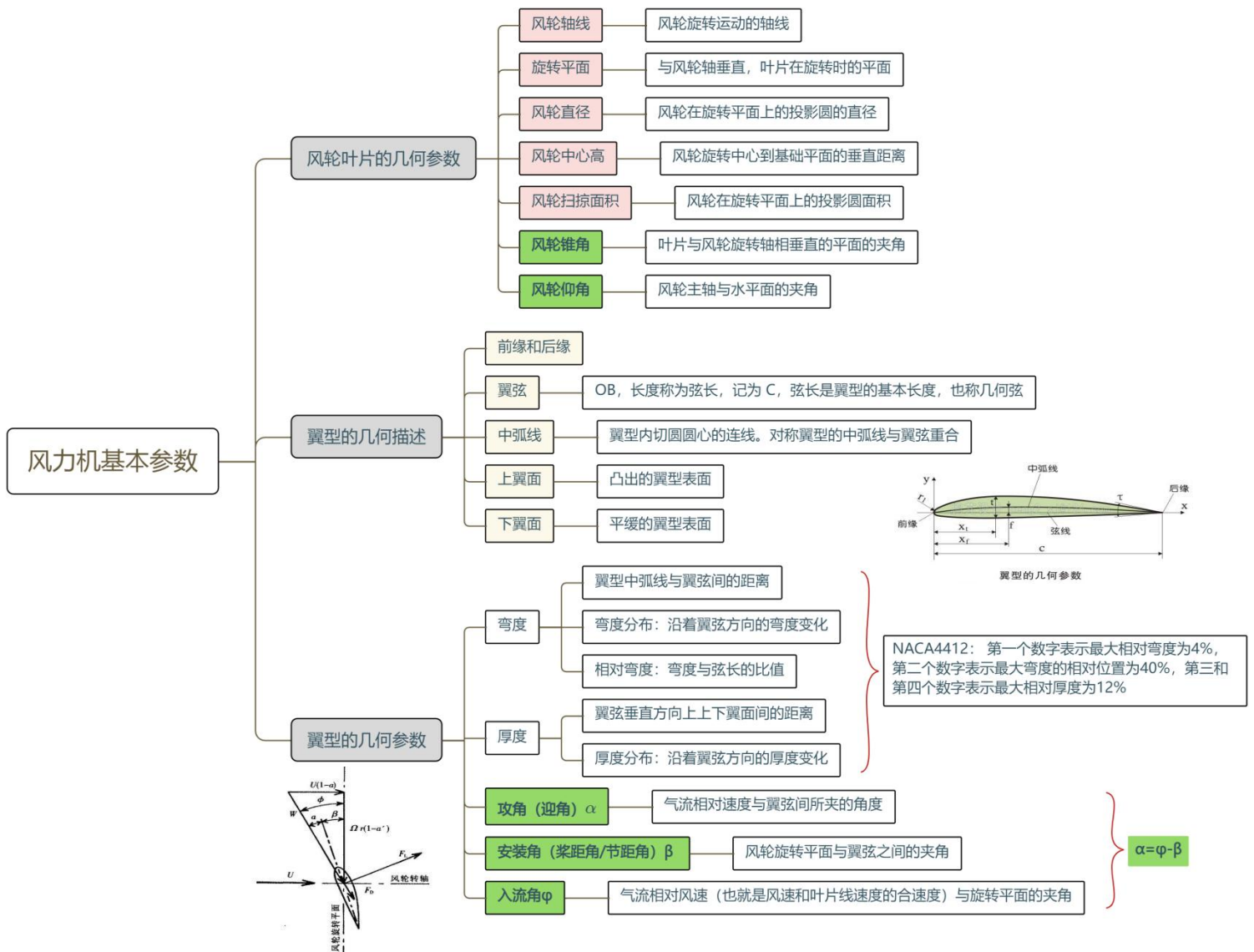
- (1) 以四川为中心的地区。
- (2) 雅鲁藏布江河谷。
- (3) 塔里木盆地西部。

第二章

1、风力发电机的组成和分类



2、风力机的基本参数



3、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。

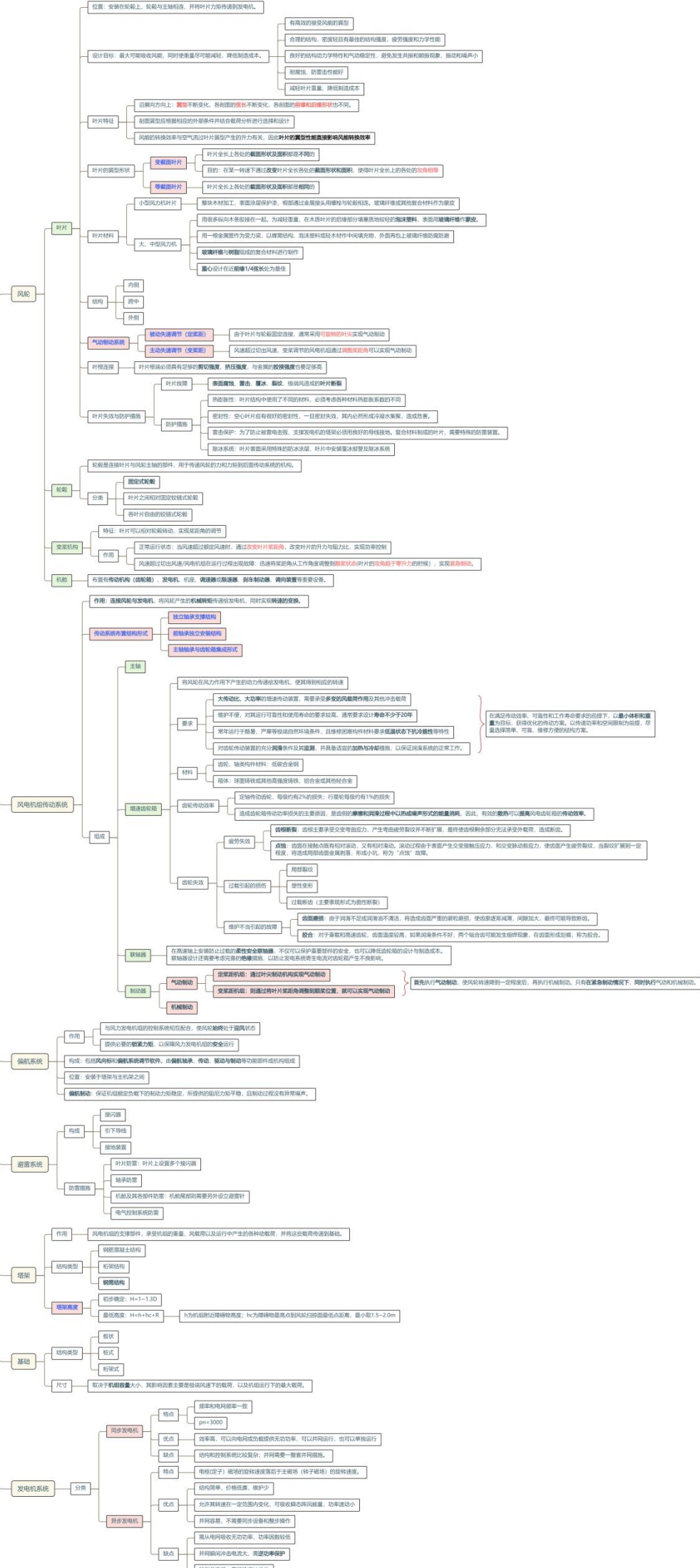
风轮主轴经传动系统带动发电机转子旋转，进而将旋转机械能转换成电能。

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。

风力发电机基本组成



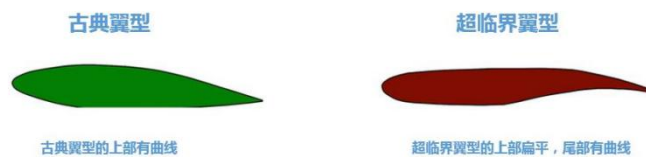
第三章：风力机动力学基础

1、基本概念

气体质点：体积无限小的具有质量和速度的流体微团。

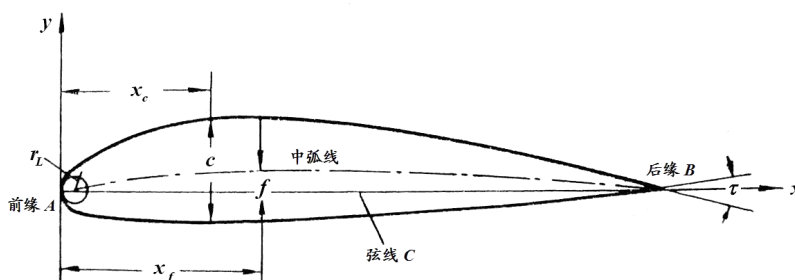
流线：

- 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，各流线彼此不相交。
 - 4、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。
 - 5、流线的疏密程度可以视风速大小而定：风速大、流线密
- 流线簇**：流场中众多流线的集合



2、翼型的气动特性

①翼型的几何描述



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：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

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。

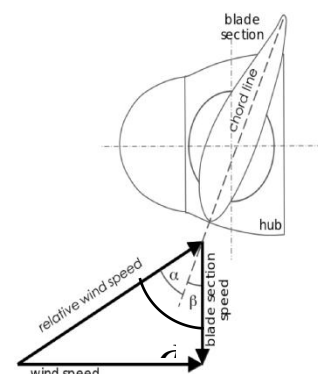
零升力角：升力（升力系数）为零时的迎角

③作用在机翼上的力

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。



合力 F: 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。

$$F^2 = F_D^2 + F_L^2$$

$$C_r^2 = C_D^2 + C_L^2$$

F 可用下式表示： $F = \frac{1}{2} \rho C_r S_y V^2$ (C_r 为空气动力系数， S_y 为叶片面积)

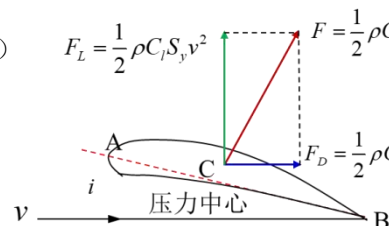
$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L S_y V^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D S_y V^2$$

阻力 F_D : 合力 F 在翼弦上的投影 (或分解在相对风速方向的一个力)

升力 F_L : 合力 F 在垂直于翼弦方向上的投影 (或垂直于阻力 F_D 的力)。

气动力矩 M (扭转力矩): 合力 F 对其他点的力矩。



④翼型的升阻力特性

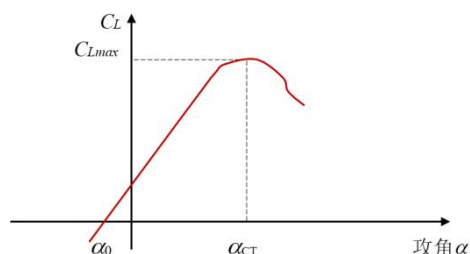
(1) 升力特性

$$\text{升力系数 } C_L = \frac{2F_L}{\rho S_y V^2}$$

升力特性曲线: 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

α_{CT} 称为**临界攻角**或**失速攻角**。

α_0 称为**零升力角**，对应零升力线。



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。

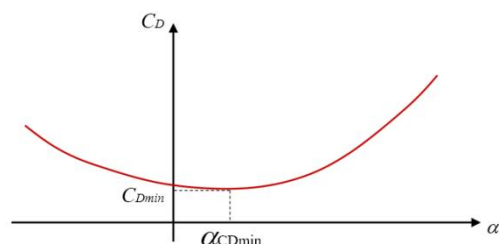
当 $\alpha = \alpha_{CT}$ 时， C_L 达到最大值 C_{Lmax} 。当 $\alpha > \alpha_{CT}$ 时， C_L 将下降，气流变为**紊流**。

当 $\alpha = \alpha_0 (< 0)$ 时， $C_L = 0$ ，表明无升力。

(2) 阻力特性

$$\text{阻力系数 } C_D = \frac{2F_D}{\rho S_y V^2}$$

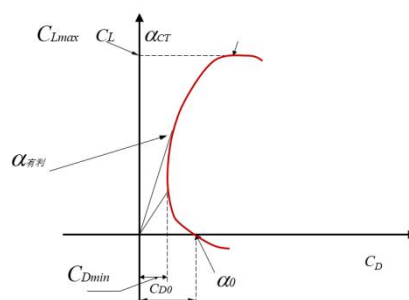
阻力特性曲线: 翼型剖面的阻力特性用阻力系数 C_D 随攻角 α 变化的曲线



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

(3) 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

为了得到最佳升阻比，可**从原点作极曲线的切线**，由于此时的夹角 θ 最大，故**切点处的升阻比 $C_L/C_D = \tan \theta$ 最大**，对应的攻角为**最有利攻角 $\alpha_{有利}$** 。



⑤影响升力系数 CL、阻力系数 CD 的因素

攻角：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。

弯度：弯度加大，升阻比有所下降。（弯度加大，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。升力和阻力都将显著增加，但阻力比升力的增加更快）

前缘：前缘抬高，负攻角，阻力变化不大；前缘低垂，负攻角，阻力迅速增加

表面粗糙度：翼型下翼面后缘增加粗糙度，会提升升阻比。

雷诺数：雷诺数增加，升力曲线斜率增加，最大升力系数增加，失速临界攻角增加；升/阻比增加。最小阻力系数减小。

3、风力机基本理论

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。

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 。

②贝茨极限理论

理想风轮

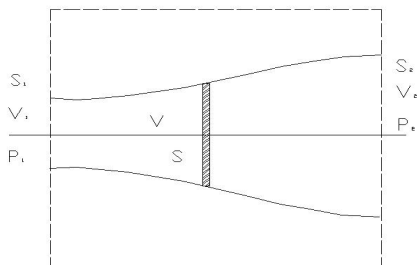
风轮叶片全部接受风能（没有轮毂），叶片无限多，对空气流没有阻力；

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均匀；

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



设：风轮前方的风速为 v_1 ， v 为实际通过风轮的风速， v_2 是叶片扫掠后的风速，

通过风轮叶片前风速面积为 s_1 ，叶片扫掠面的风速面积为 s ，扫掠后风速面积为 s_2 。

风吹到叶片上所做的功等于将风的动能转化为叶片转动的机械能，则必有 $v_1 > v_2$ ， $s_2 > s_1$ 。

$$\text{最大功率 } P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \quad (v_2 = \frac{1}{3} v_1 \text{ 取到})$$

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} = \frac{(8/27) \rho S v_1^3}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

③叶素理论

叶素：将叶片沿展向分成若干微段；

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。

4、风力机性能参数

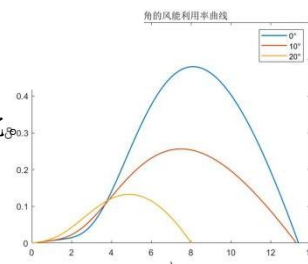
①**风能利用系数 C_P** ：风力机的风轮能够从自然风获得的能量与风轮扫掠面积内的未扰动气流所含风能的百分比。即**风力机从自然风能中吸收能量的大小程度**。用下式表示：

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V^3}$$

P ---风力机实际获得的轴功率，W；
 ρ ---空气密度，kg/m³；
 S ---风轮的扫掠面积，m²；

②**叶尖速比 λ （高速性系数）**：风轮**叶片尖线速度**与**来流风速**之比。

$$\lambda = \frac{u}{V} = \frac{R\omega}{V} = \frac{2\pi Rn}{60V} = \frac{\pi Rn}{30V}$$



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，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**。

最佳叶尖速比：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。

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**升阻比**：风在叶片翼型上产生的升力 F_L 与阻力 F_D 之比。用 L/D 来表示。翼型的**升阻比越高**，风力发电机组的**效率越高**。

$$\frac{L}{D} = \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D}$$

④**实度**：实度 $\sigma = NS/\pi R^2$ （ 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）

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。

⑤**力矩系数 C_M** $C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho S V^2 R}$ （力矩 M ：使风力机旋转的转矩（旋转力））

⑥**推力系数 C_T** $C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho S V^2 R}$ （推力 T ：风向后推风力机的力）

⑦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**。

⑧**系统效率（总体效率） η ：**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） $\eta = C_p \eta_i \eta_k$ （ η_i 为传动装置效率； η_k 为做功效率）

例题 1：以 1.5MW 风电机组为例，三叶片风轮，直径 77m，额定风速 12m/s 为例。粗略估算风轮的额定转速。

设三叶片风轮对应的最佳叶片速比约为 7，风轮的额定转速约为

$$n = \frac{60 \lambda V}{2 \pi R} = \frac{60 \times 7 \times 12}{2 \times \pi \times 38.5} = 20.84 \text{ r/min}$$

实际风电机组的风轮转速范围的确定，还要考虑其他多种因素，如所列机组的实际转速范围约在 11~20r/min 之间。

风轮转速除了影响风能吸收特性以外，还对风轮的机械转矩产生影响。当风电机组的额定功率和风轮直径确定后，风轮转速增加，则风轮转矩减小，因而作用在传动系统上的载荷也相应减小，并使齿轮箱的增速比降低。

例题 2：有一个螺旋桨式水平轴风力机，其在额定风速 17m/s 时的额定功率为 3MW，风轮直径为 60m，风力机的传动效率 $\eta_i = 0.9$ ，做功效率 $\eta_k = 0.9$ ，空气密度 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ，试求该风力机的功率系数（风能利用系数）。

■ 解：根据风功率的定义推出

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 = \frac{1}{2} \times 1.29 \times \frac{\pi \times 60^2}{4} \times 17^3 = 8955.3 \text{ (KW)}$$

■ 风力机的功率为 3MW，推得风力机的总效率为

$$\eta = \frac{3 \times 10^6}{8955.3 \times 10^3} = 0.335$$

■ 风力机的功率系数为

$$C_p = \frac{\eta}{\eta_i \eta_k} = \frac{0.335}{0.9 \times 0.9} = 0.414$$

第四章：风力机的功率输出及功率调节

1、风力机功率输出

①

$$P_{\text{出}} = UI$$

$$P_{\lambda} = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p$$

$$\text{效率 } \eta = \frac{UI}{\frac{1}{2} \rho S V^3 C_p}$$

②影响风力机功率输出的因素

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。

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。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。（但是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。）

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）

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

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。

功率调节的方式

2、风力机功率调节方式

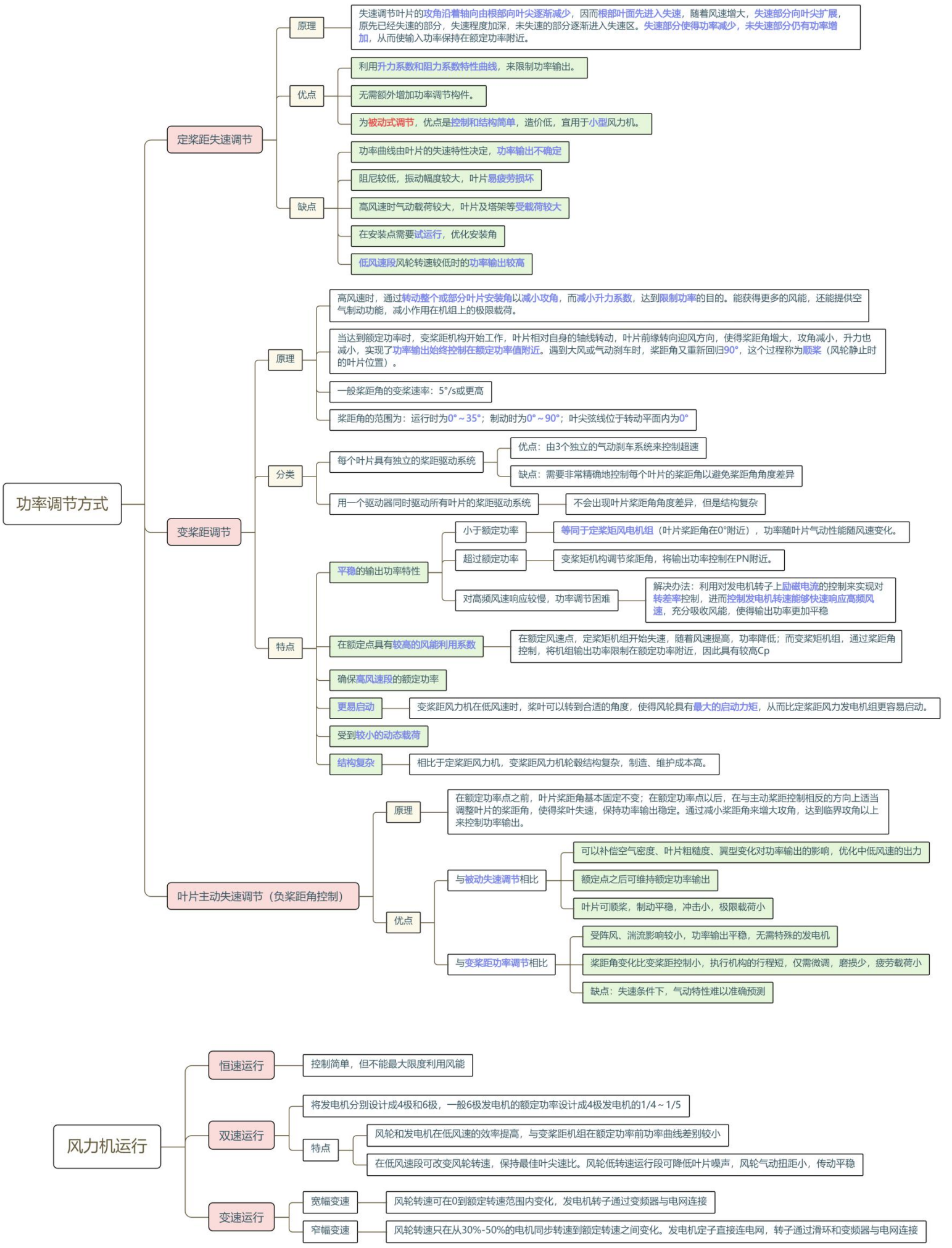
在**超过额定风速（12-16m/s）**后由于部件机械强度和发电机、电力电子容量等物理性能的限制，**必须降低风轮的能量捕获**，使功率输出保持在额定值附近，减少叶片承受负荷和整个风力机受到的冲击，保证风力机不受损害。

调节装置

使风力机在**大风、运行发生故障**和**过载**时得到**保护**（首要任务）

使风力机在**启动时顺利切入**运行

风速有较大幅值变化和波动时，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；为用户提供良好的能量。



风力机制动装置

空气动力制动（主制动器）



机械制动



第五章：风力发电系统及其控制

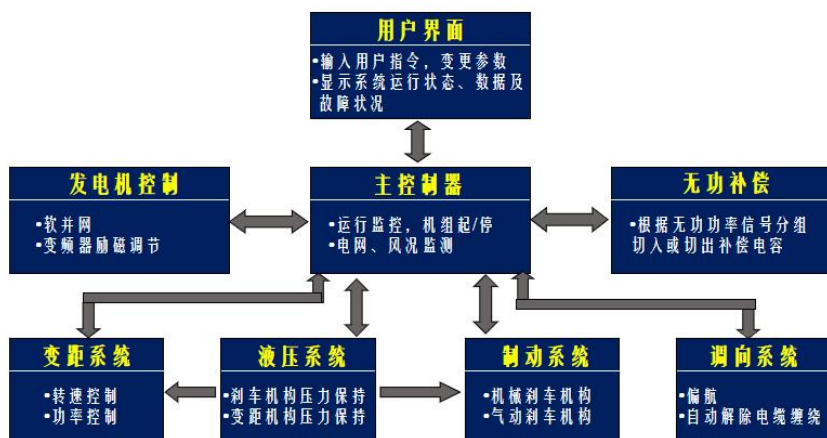
1 风力发电系统的主要**控制目标**：**系统可靠运行、能量利用率最大、良好电力质量、延长机组寿命**

两大核心系统：风力机系统、发电机系统
一个灵魂：系统控制器

2 风力发电系统的主要**控制要求**



■ 风力发电机组的控制系统基本结构

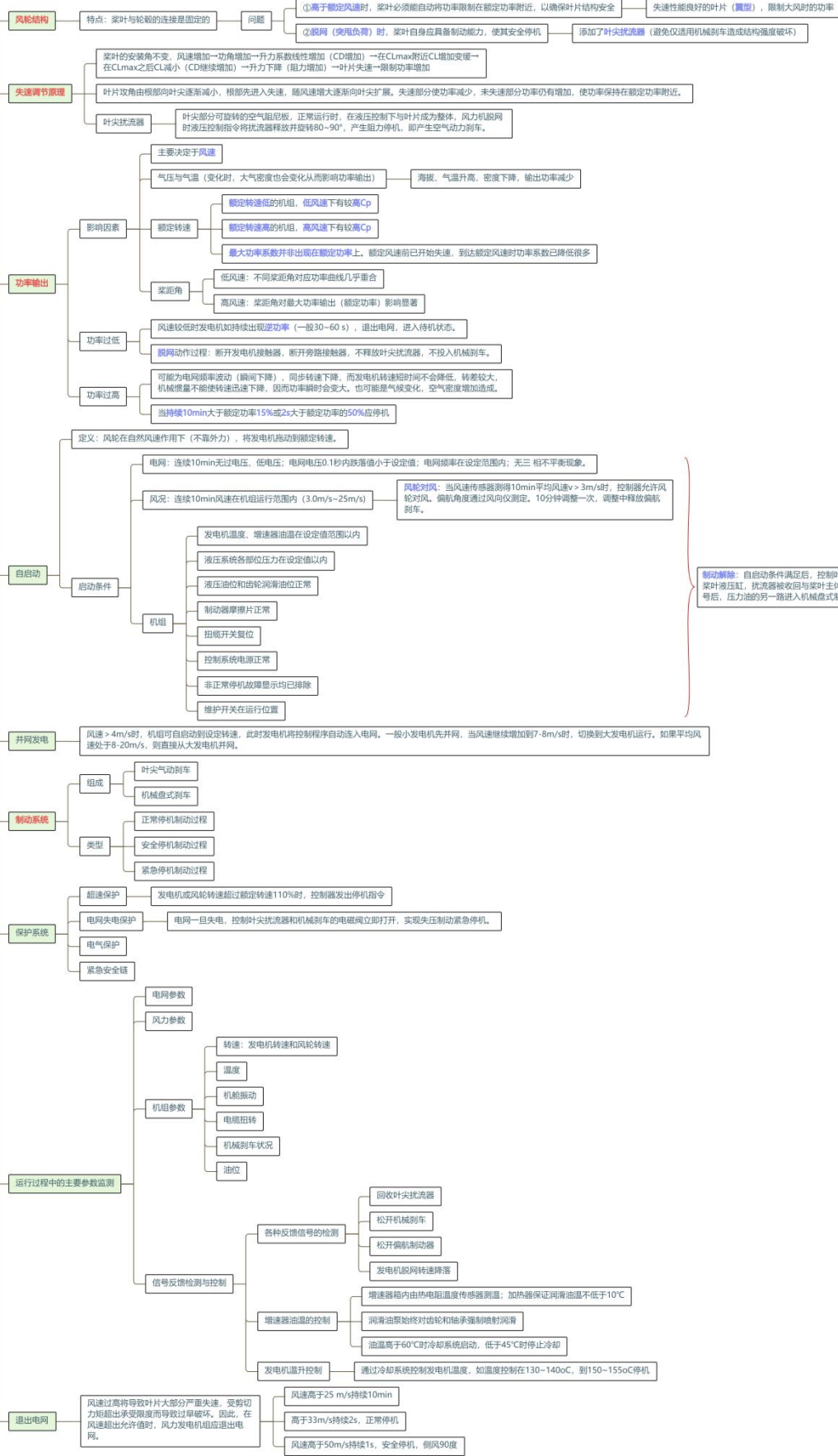


■ 5.3.7 风力发电机组的各种状态

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）	

风力发电机组

定桨距风力发电机组



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桨机构的不灵敏区，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。

变桨距风力发电机组



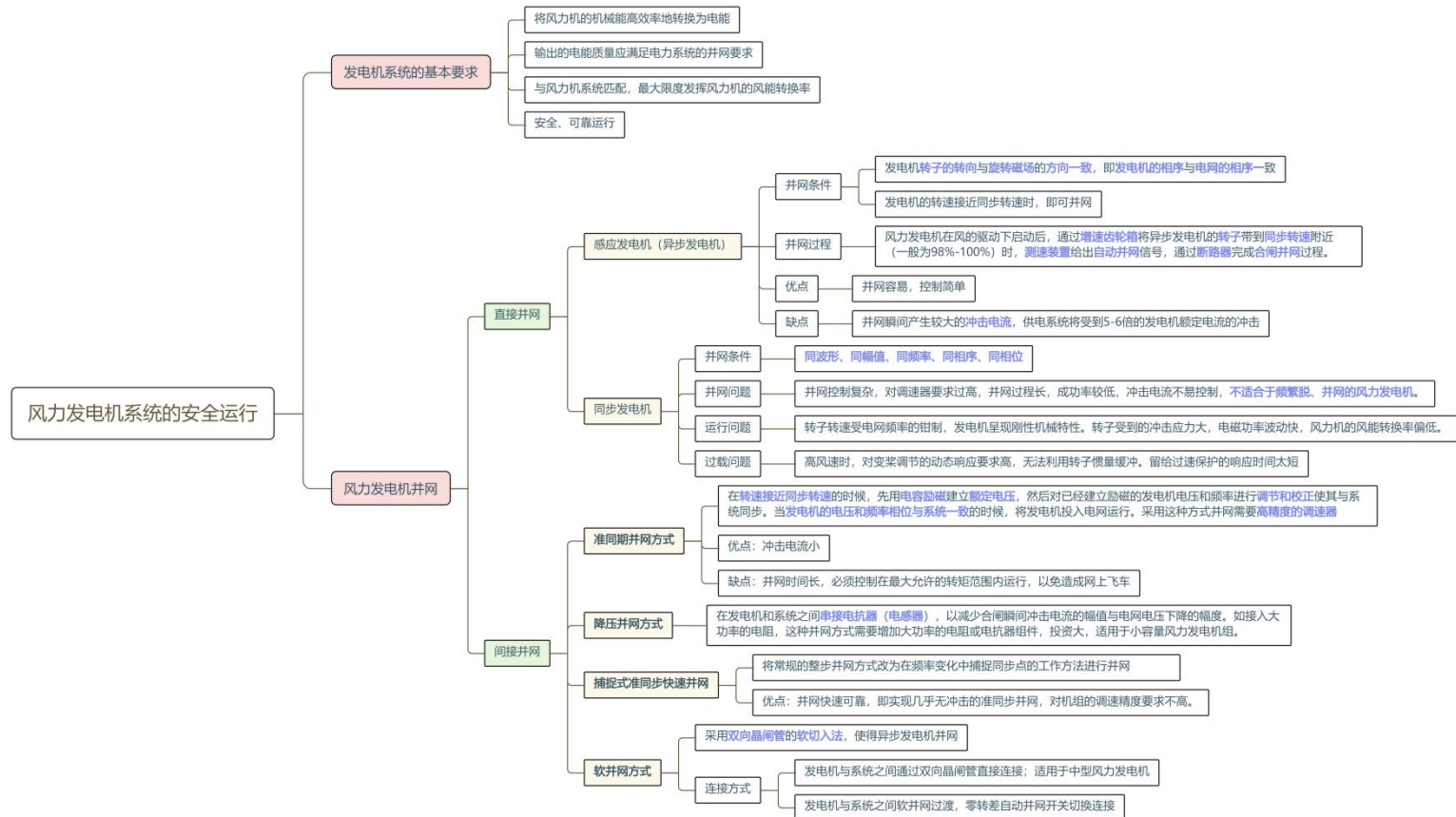
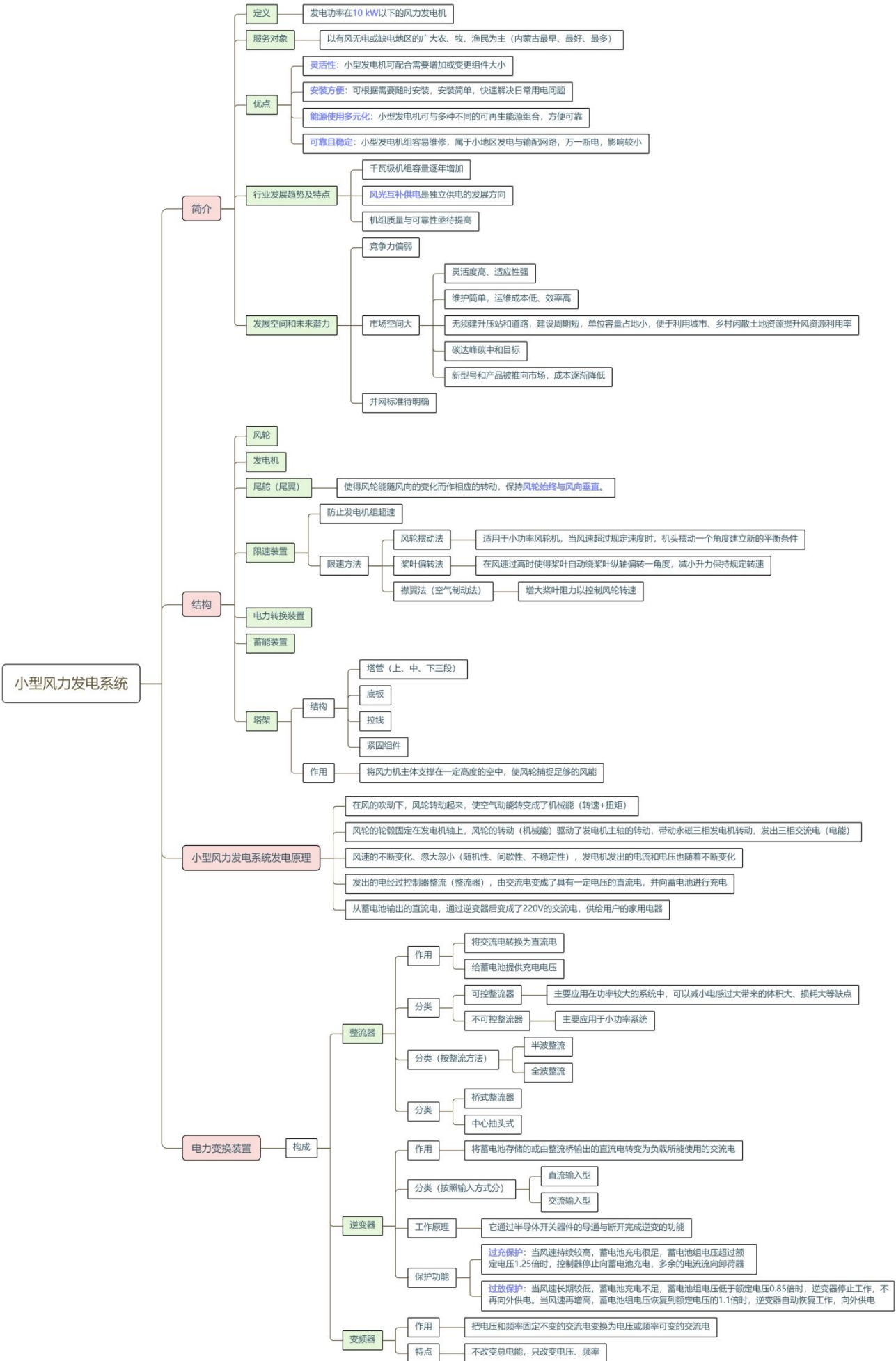


表 5-1 感应发电机与同步发电机的比较

感应发电机的优点		
项目	感应发电机	同步发电机
结构	定子与同步发电机相同,转子为鼠笼型,结构简单,牢固	转子上有励磁绕组和阻尼绕组,结构较复杂
励磁	由电网取得励磁电流,不需要励磁装置及励磁调节装置	需要励磁装置及励磁调节装置
尺寸及重量	无励磁装置,尺寸较小,重量较轻	有励磁装置,尺寸较大,重量较重
并网	强制并网,不需要同步装置	需要同步装置
稳定性	无失步现象,运动时只需适当限制负荷	负载急剧变化时有可能失步
维护检修	定子的维护与同步发电机相同,转子基本不需要维护	除定子外,励磁绕组及励磁装置都需要维护
感应发电机的缺点		
功率因素	功率因素由输出功率决定,不能调节,由于需要电网供给励磁的无功功率,导致功率因数下降	功率因素可以很容易地通过励磁调节装置予以调整,既可以在之后的功率因数下运行,也可以在超前的功率因数下运行
冲击电流	强制并网,冲击电流大,有时需要限流措施	由于同步装置,并网冲击电流很小
单独运行及电压调节	单独运行时电压、频率调节比较复杂	单独运行时可以很方便地调节电压

第六章小型风力发电系统



第七章蓄电池

7.1 蓄电池的种类及型号

- 1. 定义与作用
 - 化学能源，储存直流电能（化学能↔电能），用于独立风力发电系统稳定供电。
- 2. 分类
 - 按使用性能：一次性电池（不可充电） vs. 二次电池（可充电，如铅酸、镍氢、锂电池）。
 - 按化学成分：铅酸（主流）、碱性、胶体、硅能、燃料电池。
- 3. 型号解读
 - 示例：3-GFM-500
 - 3：单体数（总电压=单体数×2V）；
 - GFM：固定型、阀控式、密封；
 - 500：容量（500A·h）。

7.2 蓄电池的主要性能参数

- 1. 电压
 - 理论电压（开路电压）、工作电压（受放电方法、温度影响）、充电电压（>开路电压）、终止电压（最低放电电压）。
- 2. 容量（A·h）
 - 定义：完全充电下，按一定条件放电到终止电压所释放的电量。
 - 放电率：C10（10小时率容量为额定容量）、C2（放电电流=容量/时间，如10A·h/2h=5A）。
 - 影响因素：极板厚度/面积、放电率、温度（25℃最佳）、电解液浓度（密度↑容量↑，但过高会内阻↑）。
- 3. 能量与功率
 - 能量（kWh）= 容量×电压；功率（kW）= 能量/时间。
- 4. 效率
 - 输出电能/输入电能，新电池90%，旧电池60%-70%。损失来源：电解水、局部放电、内阻发热。
- 5. 使用寿命
 - 普通2-3年，优质阀控式4-6年。影响因素：温度（25℃最佳）、过度放电/充电、浮充电（阳极钝化）。

7.3 铅酸蓄电池

- 1. 组成
 - 正极（PbO₂）、负极（Pb）、隔板（防短路，多孔材料）、电解液（稀硫酸）、壳体（耐酸材料）。
- 2. 工作原理
 - 放电总反应：
$$\text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$$
 - 充电：反应逆向，恢复Pb和PbO₂。
- 3. 分类与特点
 - 固定式：通信/离网系统，寿命5-8年；
 - 阀控式（VRLA）：AGM（玻璃纤维隔板）或胶体电解质，免维护，寿命5-8年；
 - 汽车启动用：寿命短（1-3年），需维护。

4. 存在问题与解决

- **水损失**：氧复合不足、安全阀失效→控制充电电压；
 - **负极硫酸化**：避免深度放电，定期均衡充电；
 - **早期容量损失 (PCL)**：优化极板工艺、添加Sn/Sb；
 - **热失控**：改善散热、温度补偿充电。
-

7.4 其他种类蓄电池

1. **碱性蓄电池**：镉镍电池（高倍率放电、低温性能好）、铁镍电池。
 2. **胶体电池**：硫酸电解液胶体化，减少分层。
 3. **硅能蓄电池**：复合硅盐电解质，无腐蚀气体。
-

7.5 蓄电池组的串并联

- **串联**：电压相加，容量不变（如 $3 \times 12\text{V}/500\text{A}\cdot\text{h} \rightarrow 36\text{V}/500\text{A}\cdot\text{h}$ ）。
 - **并联**：容量相加，电压不变（如 $3 \times 12\text{V}/500\text{A}\cdot\text{h} \rightarrow 12\text{V}/1500\text{A}\cdot\text{h}$ ）。
 - **实例**：48V/48kWh系统需24个2V/500A·h串联（48V）→ 两组并联（总1000A·h）。
-

7.6 蓄电池组的容量选择与计算

1. **年能量平衡法**：全年发电量 > 负荷用电量，剩余电能储存。
 2. **无效风时法**：按最长连续无效风速小时数计算（例：102h缺电 → 容量=日耗电×天数 / 电压×效率）。
 3. **风电盈亏法**：统计短缺电量，按平均缺电计算。
 4. **基本负荷法**：按用户基本负荷需求+裕量计算。
-

7.7 其他蓄能装置

1. **飞轮储能**：动能存储，响应快，寿命长。
 2. **超导蓄能**：磁场储能，效率高（96%），功率密度大。
 3. **超级电容**：高功率密度，充放电快，免维护。
 4. **压缩空气**：地形依赖，低谷储能，高峰发电。
 5. **抽水蓄能**：
 - **功能**：调峰（填谷）、调频（快速响应）、调相（稳定电压）、事故备用。
 - **原理**：低谷抽水蓄能，高峰放水发电，综合效率75%。
-

课堂作业3-1

- 例：某系统需要直流电压48V，蓄电池能存储电量48kW·h，用一组2V/500A·h的蓄电池如何实现？

解：将24个2V/500A·h的蓄电池串联，组成一个48V/500A·h的电池串。然后，再把同样的两组串联的蓄电池组并联，构成了一个满足系统要求的蓄电池组。

电压： $2V \times 24 = 48V$

容量： $500A \cdot h \times 2 = 1000A \cdot h$

总存储电量： $48V \times 1000A \cdot h = 48000A \cdot V \cdot h = 48kW \cdot h$

共需要2V/500A·h的蓄电池48个。

课堂作业3-2

- 例：某户安装100W风力发电机组，年发电量为260kW·h，扣除损耗功率，全年剩余电能约为15kW·h。其中1-5月份和10-12月份共富余电能21.4kW·h，而6-9月份共亏电能7.0kW·h。已知风力发电机组的输出电压为24V，若完全保证6-9月份不中断供电，求配备的蓄电池容量？

解：蓄电池容量应为： $C = \frac{\Delta E}{U} = \frac{7000}{24} = 292(A \cdot h)$

式中，C-蓄电池容量，A·h；

U-蓄电池输出电压，V。

因此，蓄电池的容量选用300A·h。

- 例：100W风力发电机组，运行风速为3-15m/s。当地风速小于3m/s共3361h，共计54次，平均为62h，其中最长无效风速为102h。根据用户负荷日耗电为0.493kW·h，求蓄电池组容量？

- 解：蓄电池组容量为： $C = \frac{ED}{U\eta_b} = \frac{493 \times \frac{102}{24}}{24 \times 0.8} \approx 109(A \cdot h)$

式中，E-用户日耗电量，W·h；

D-最长连续无效风速天数，为102/24天；

U-用电器电压，24V；

η_b -蓄电池组效率，取0.8，

考虑适当的裕度，蓄电池组的容量选用120A·h。

- 例：某村落安装的独立运行风力发电系统，统计出系统总的短缺电量为77508kW·h，无效风速小时为3639h。小时最大短缺量为76.6kW·h，小时平均缺电量为21.3kW·h。供电处端电压为440V，蓄电池放电率为0.1，求蓄电池组容量？

- 解：通常以小时平均缺电量来计算蓄电池容量，计算公式为：

$$C = \frac{\Delta E}{K_c U} = \frac{21.3}{0.1 \times 0.44} \approx 484(A \cdot h)$$

式中， ΔE -小时平均缺电量，单位kW·h；

U -蓄电池平均放电端电压，单位V；

K_c -蓄电池放电率。

考虑适当裕度，蓄电池组容量取500A·h为宜。

- 例：某用户生活负荷为15.4kW，供电处端电压为440V。考虑用户用电量的增长，留20%裕度，即按18.5kW·h计算。求蓄电池组容量（ K_c 按照0.125计算）？

- 解： $C = \frac{\Delta E}{K_c U} = \frac{18.5}{0.125 \times 0.44} \approx 336(A \cdot h)$

同样考虑裕度，取蓄电池组容量为400A·h，完全可以满足用户要求。

第八章

一、风能资源评价三阶段

1. 区域初步甄选（宏观选址）

- 目标：筛选风能资源丰富的区域。
- 原则：
 - 年平均风速 $>5\text{m/s}$ ，风功率密度 $>150\text{W/m}^2$ （10m高度）。
 - 盛行风向稳定，湍流强度 <0.25 。
 - 避开灾害性天气频繁区、生态敏感区。
- 方法：
 - 参考已建风电场数据、气象部门资料、地形图（隘口、海岸、高原等）。

2. 区域风能资源测量与评估

- 测风塔布置：
 - 平坦地形：1座测风塔；复杂地形：分片布置。
 - 测风塔高度：至少70m，安装三层传感器（10m、轮毂高度、其他整数倍）。
- 测量参数：
 - 风速、风向、温度、大气压力，采样间隔 ≤ 3 秒。
 - 数据要求：完整率 $>90\%$ ，连续测量至少1年。
- 评估方法：
 - 使用软件（如WAsP）分析风能分布、发电量估算。

3. 微观选址

- 目标：优化风机布置，减少尾流效应，提高发电效率。
- 原则：
 - 主导风向明显时，风机按行列式排列；多风向时采用梅花形布置。
 - 间距一般为5~9倍叶轮直径。

二、风电场建设对风功率密度的基本要求

- 宏观选址标准：
 - 年平均风速 $\geq 5\text{m/s}$ （轮毂高度）。
 - 风功率密度 $\geq 150\text{W/m}^2$ （10m高度）。
 - 风功率密度等级：需达到3级以上（ $\geq 200\text{W/m}^2$ ）才具备开发价值。

三、测风数据处理（验证与订正方法）

1. 数据验证

- 完整性检验：数据数量与时间顺序是否符合预期。
- 合理性检验：
 - 范围检验：风速（0~40m/s）、风向（0°~360°）。
 - 相关性检验：不同高度风速相关性应合理。
 - 趋势检验：风速变化符合当地气候规律。
- 无效数据处理：剔除异常值，用备用数据填补缺失值。

2. 数据订正

- 目的：将短期测风数据修正为反映长期平均的代表年数据。
- 方法：
 - 代表年订正：选择气象站近30年平均风速对应的年份作为基准。
 - 扇区相关法：
 - 将数据按风向划分为16、8或4扇区，建立风速相关曲线（如线性方程 $y = kx + b$ ）。
 - 计算各扇区风速差值，调整测风数据。

四、风电场对周边环境的不利影响

1. 噪声污染

- 来源：机械噪声（齿轮箱、发电机）、空气动力学噪声（叶片湍流）。
- 控制：优化叶片设计、增大风机与居民区距离、吸声处理。

2. 电磁辐射与电波干扰

- 来源：发电机、输电线路。
- 影响：干扰电视、无线电信号。

3. 光影闪烁

- 成因：旋转叶片在特定光照下投射阴影。
- 缓解：避开居民区或调整叶片转速。

4. 废弃物污染

- 类型：生活污水（约175t/年）、废油（0.6t/年）、生活垃圾（1.05t/年）。

5. 生态影响

- 鸟类迁徙：风机可能阻碍路径或导致碰撞死亡。
- 植被破坏：施工期基础建设对土壤和植被的扰动。

6. 视觉景观

- 影响：风机群可能破坏自然景观协调性。

第九章

1. 风电场大规模并网对电能质量的主要问题

- 电压偏差：
 - 风电机组并网时需吸收大量无功功率，导致风电场母线及附近电网电压降低，尤其在薄弱电网中更为显著。
- 电压波动与闪变：
 - 风机出力随机波动、塔影效应、风速变化及启停操作引起电压幅值波动（额定值的90%~110%），导致白炽灯闪烁、电机转速脉动等问题。
 - 电网线路的 X/R 比影响波动幅度，合适的 X/R 比可减少有功功率波动对电压的影响。
- 谐波污染：
 - 主要来源于风电机组的电力电子装置（如变频器）及电容器组与线路电抗的谐振，导致电网波形畸变，影响设备寿命和继电保护功能。

2. 风电场无功损耗的组成部分及功能

- 箱式变压器：
 - 将风机出口电压（690V）升压至10kV/35kV，无功损耗主要来自空载电流和短路电压。
- 集电线路：
 - 将升压后的电力汇集至风电场升压站，导线电抗导致无功损耗。
- 升压变压器：
 - 将集电线路电力进一步升压至110kV/220kV，无功损耗由空载电流和短路电压决定。
- 送出线路：
 - 将风电电力输送至主网，长距离输电线路的电抗导致显著无功损耗。

3. 无功补偿装置计算方法

- 计算公式：
 - 箱式变压器损耗：

$$\Delta Q_T = \frac{I_0\% \cdot S_e}{100} + \frac{U_k\% \cdot S_e \cdot (P^2 + Q^2)}{100 \cdot S_e^2}$$

- 集电线路损耗：

$$\Delta Q_L = \frac{P^2 \cdot X_L}{U_e^2}$$

- 送出线路损耗（近似）：

$$\Delta Q_{\text{送出}} = \frac{P^2 \cdot X_{\text{线路}}}{U_e^2}$$

- **补偿原则：**

- 总无功补偿容量需覆盖满发时送出线路损耗及空载时充电功率（如 Q/GDW 392-2009 规定），一般占风电装机容量的30%~50%。

4. 谐波污染解决方法

- **无源滤波器：**

- 通过 LC 电路滤除固定次谐波（如5、7次），成本低但易与系统谐振。

- **有源滤波器（APF）：**

- 主动检测并生成反向谐波电流抵消污染，动态性能好，可应对多频次谐波。

- **混合滤波器：**

- 结合无源与有源技术，兼顾成本与性能，适用于复杂谐波场景。

5. 低电压穿越（LVRT）定义及我国要求

- **定义：**

- 风机在电网电压跌落时保持并网，并向电网提供无功支撑以帮助恢复电压，避免大规模脱网加剧故障。

- **我国要求：**

- 依据《风电场接入电网技术规定》（Q/GDW 392-2009）：
 - 电压跌至20%额定电压时，风机需保持并网至少625ms；
 - 在电压恢复期间提供动态无功支撑，确保电网暂态稳定性。
-

第十章 海上风电简介

1. 海上风能利用特点

- 风速高且稳定（比陆上高约25%）。
- 湍流强度低，机组疲劳负荷小，寿命更长。
- 风切变小，塔架可更短。
- 环境限制少（噪声、景观、鸟类等影响小）。
- 不占用陆地资源，适合沿海人口密集地区。

2. 海上风电场的分类

- **潮间带/潮下带风电场**：水深 ≤ 5 米。
- **近海风电场**：水深5~50米。
- **深海风电场**：水深 > 50 米，需漂浮式基础。

3. 近海风电场基础类型及适用范围

- **桩基式**（单桩/多桩）：适用于水深5~20米，地质条件复杂区域（如淤泥质土）。
- **重力式**：浅海平坦海床，依赖自重稳定。
- **导管架式**：水深20~50米，多腿支撑结构。
- **三角架式**：中等水深，三腿支撑。
- **负压桶式**：软黏土或砂性土，通过吸力固定。

4. 远海漂浮式基础

- **单立柱式 (Spar)**：水深 ≥ 100 米，稳定性好，但制造难度大。
 - **张力腿式 (TLP)**：水深 ≥ 50 米，运动性能好，成本随水深增加。
 - **半潜式 (SEME)**：适用广，可拖拽安装，但垂向运动较大。
-

第十一章 分布式发电技术

1. 分布式发电定义

- 在用户附近或配电侧安装中小型发电设备（如光伏、风电），就近供电。
- 特点：建设灵活、能源效率高（综合利用率70%~90%）、污染少。

2. 分布式供电系统组成

- **分布式电源**：光伏、风电、燃气轮机等。
- **储能设备**：蓄电池、超级电容器等。
- **供电网络**：交流或直流系统。
- **控制中心**：监控发电、储能、负荷平衡。
- **并网接口**：逆变器/整流器，实现与大电网互联。

3. 储能装置的作用

- **平衡发电与用电**：调节供需波动。
 - **备用电源**：应对突发断电或发电不足。
 - **改善可控性**：稳定电能质量，辅助调频调压。
 - **提供辅助服务**：如峰谷电价调节、紧急功率支持。
-

第十二章 风能的其他应用

1. 风力提水机组的适用范围

- **高扬程小流量型**（扬程20~200m，流量0.5~5m³/h）：提取深层地下水（北方草原牧区）。
- **中扬程中流量型**（扬程10~20m，流量15~25m³/h）：提取地下水（技术难度高，应用较少）。
- **低扬程大流量型**（扬程0.5~3m，流量50~100m³/h）：地表水或浅层地下水（南方农田排灌、盐场）。

2. 风能致热的主要方式

- **搅拌液体致热**：风力机带动搅拌器摩擦生热（效率高，结构简单）。
- **压缩空气致热**：利用空气压缩后释放热能。
- **固体摩擦致热**：摩擦片生热加热液体（需定期维护）。
- **涡电流致热**：切割磁力线产生感应电流生热。

3. 风力直接致热的优点

- 总效率高（可达30%）。
 - 风轮特性与致热器匹配性好（功率曲线相近）。
 - 适应性强，对风速变化不敏感。
 - 无需额外超速保护装置（搅拌器可制动）。
-