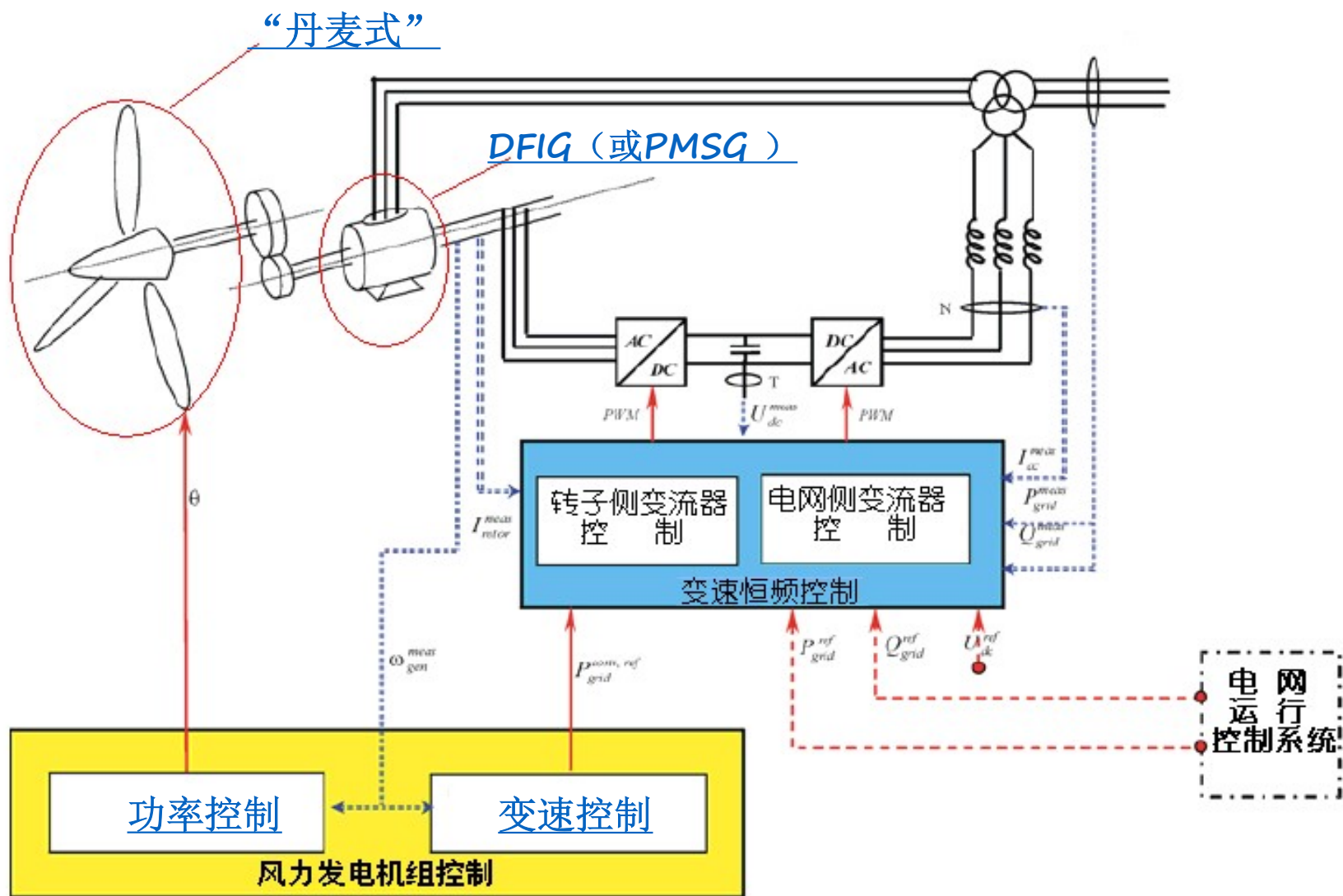


主要内容

- 风力发电概述
- 风电机组组成
- 风电机组控制
- 风电预测与并网
- 海上风力发电

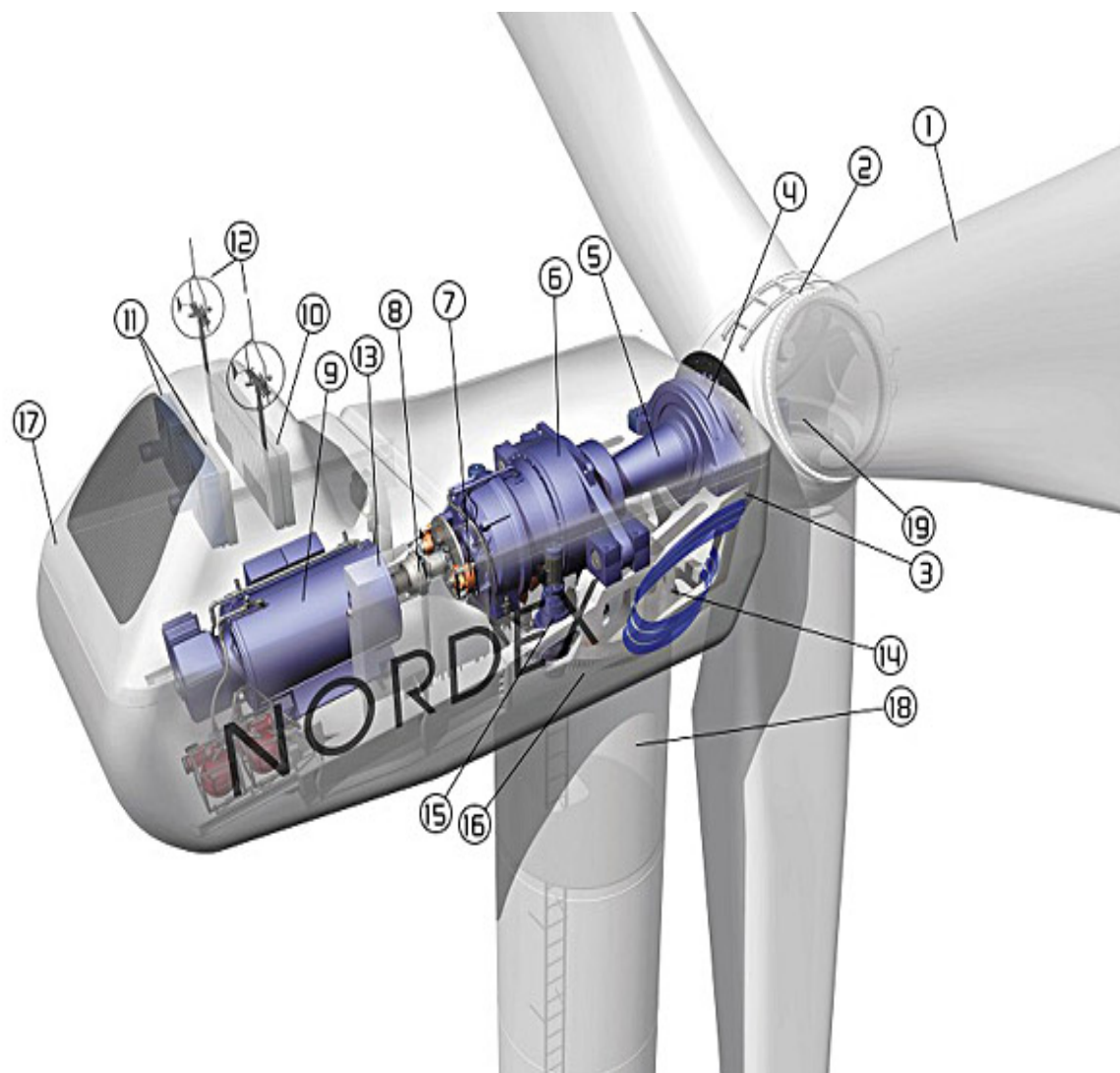
2. 风电机组的构成



2.1 风力机的构造和气动力特性

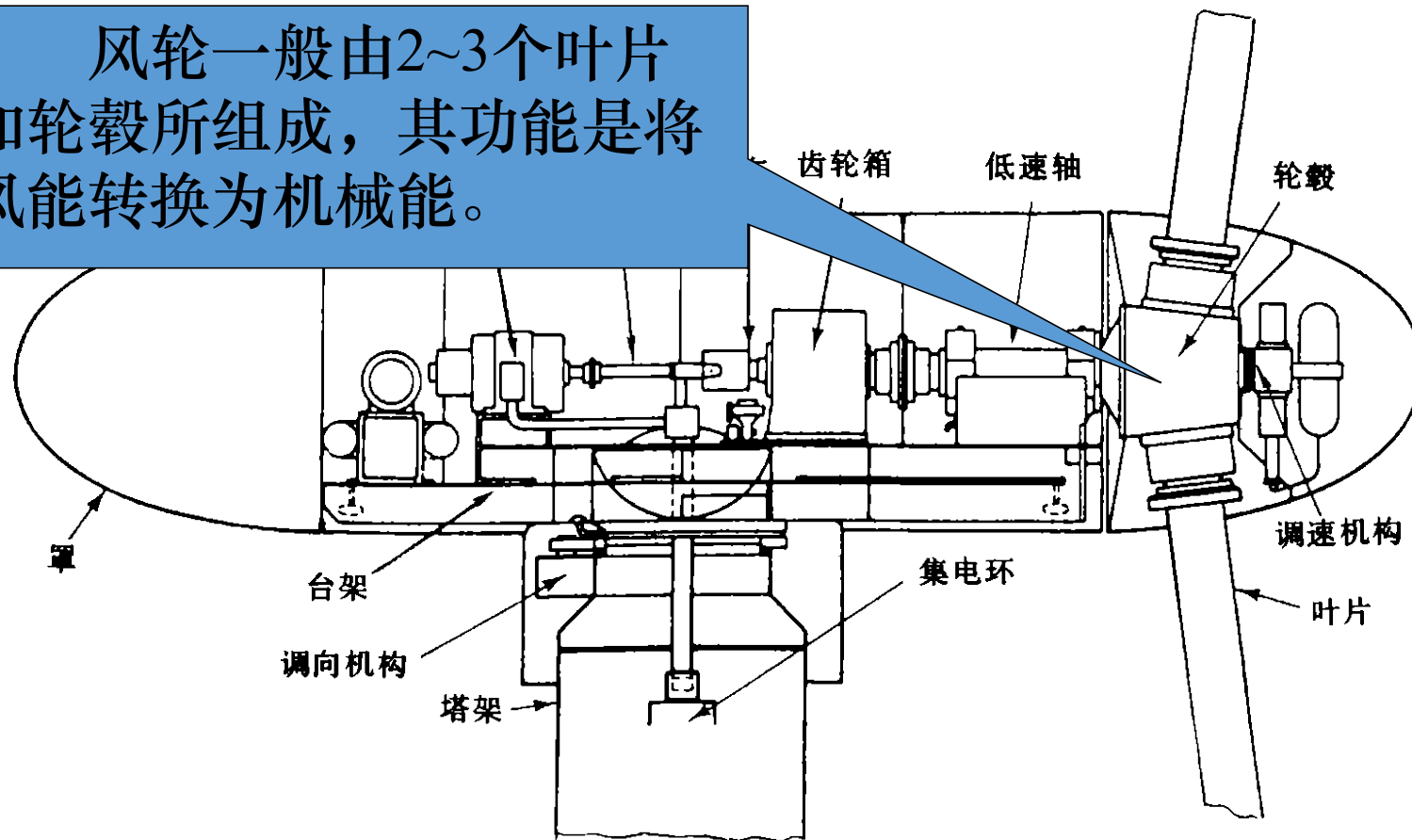
2.1.1 风力机的结构和组成

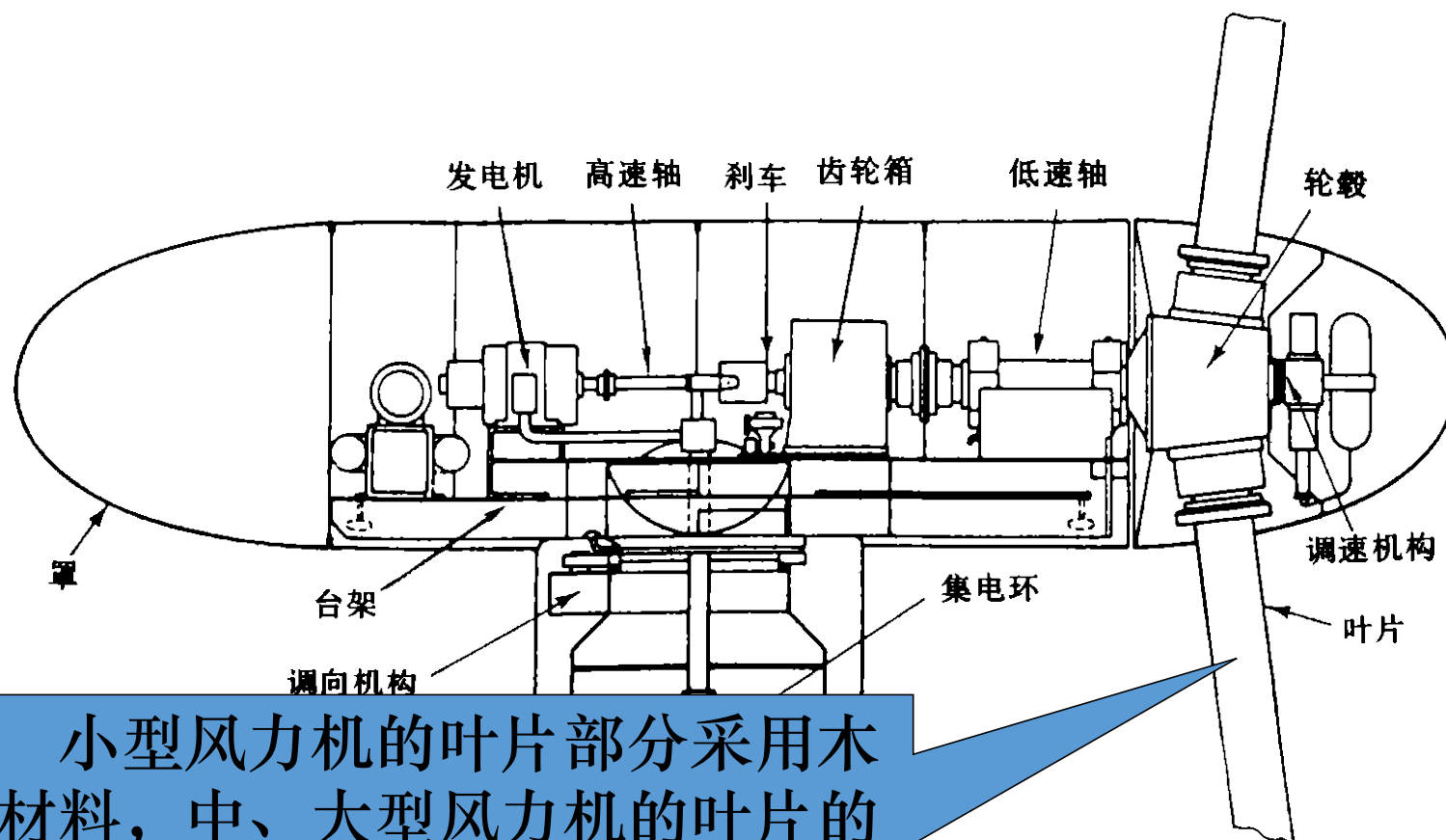
NORDEX 80/2500kW型



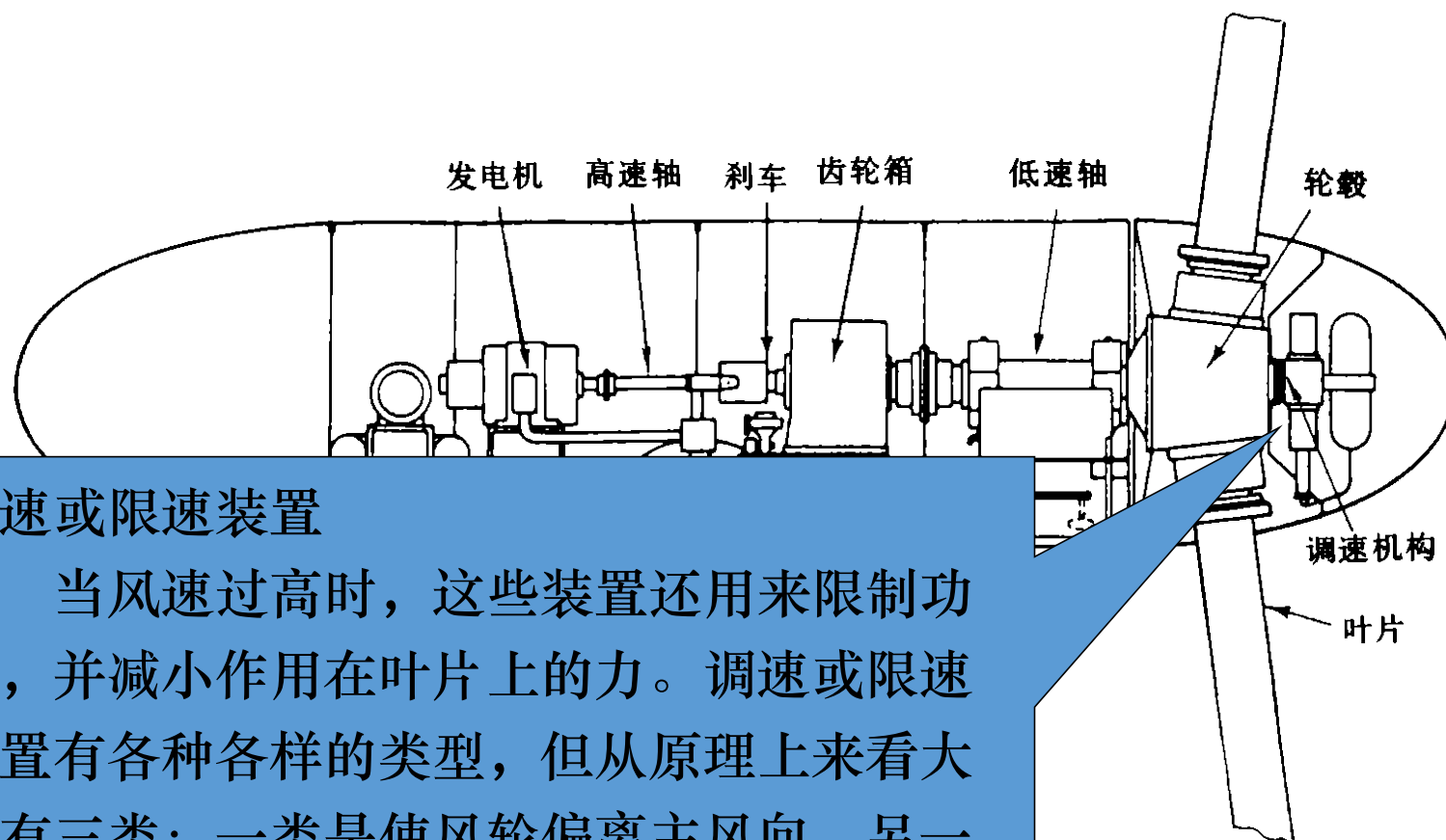
- 1、叶轮
- 2、轮毂
- 3、机舱内框架
- 4、叶轮轴与主轴连接
- 5、主轴
- 6、齿轮箱
- 7、刹车盘
- 8、发电机的连接
- 9、发电机
- 10、散热器
- 11、冷却风扇
- 12、风测量系统
- 13、控制系统
- 14、液压系统
- 15、偏航驱动
- 16、偏航轴承
- 17、机舱盖
- 18、塔架
- 19、变桨距部分

风轮一般由2~3个叶片和轮毂所组成，其功能是将风能转换为机械能。





小型风力机的叶片部分采用木质材料，中、大型风力机的叶片的趋势都倾向于采用玻璃纤维或高强度复合材料。



调速或限速装置

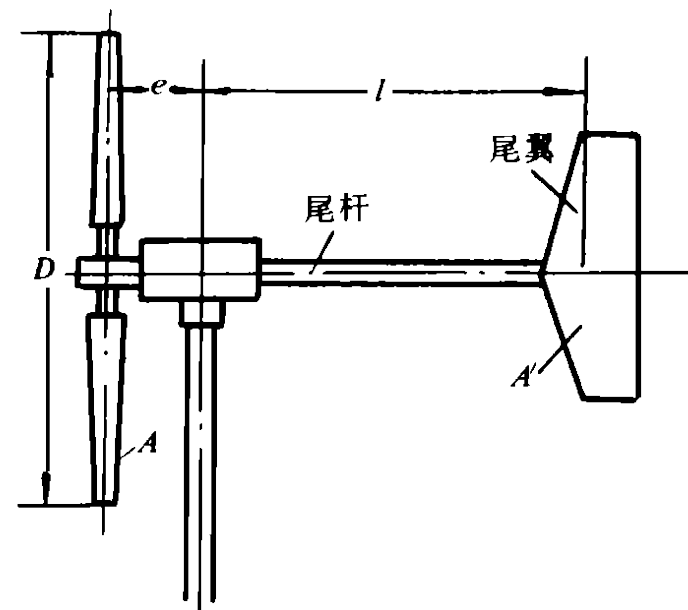
当风速过高时，这些装置还用来限制功率，并减小作用在叶片上的力。调速或限速装置有各种各样的类型，但从原理上来看大致有三类：一类是使风轮偏离主风向，另一类是利用气动阻力，第三类是改变叶片的桨距角。

调向装置

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调向装置，常用的有以下几种：

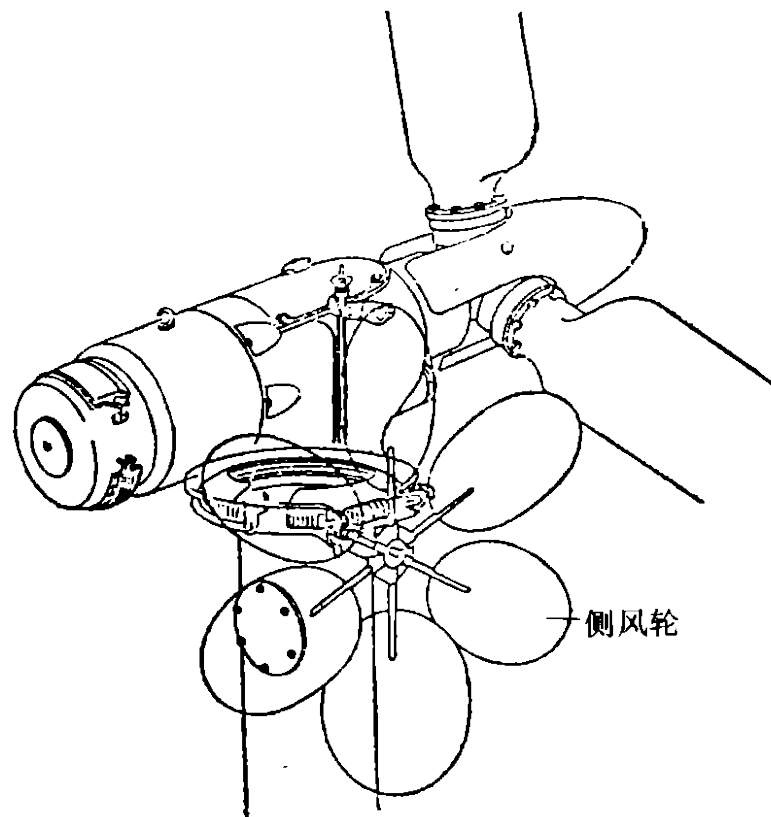
(1)尾舵

主要用于小型风力发电机，它的优点是能自然地对准风向，不需要特殊控制。



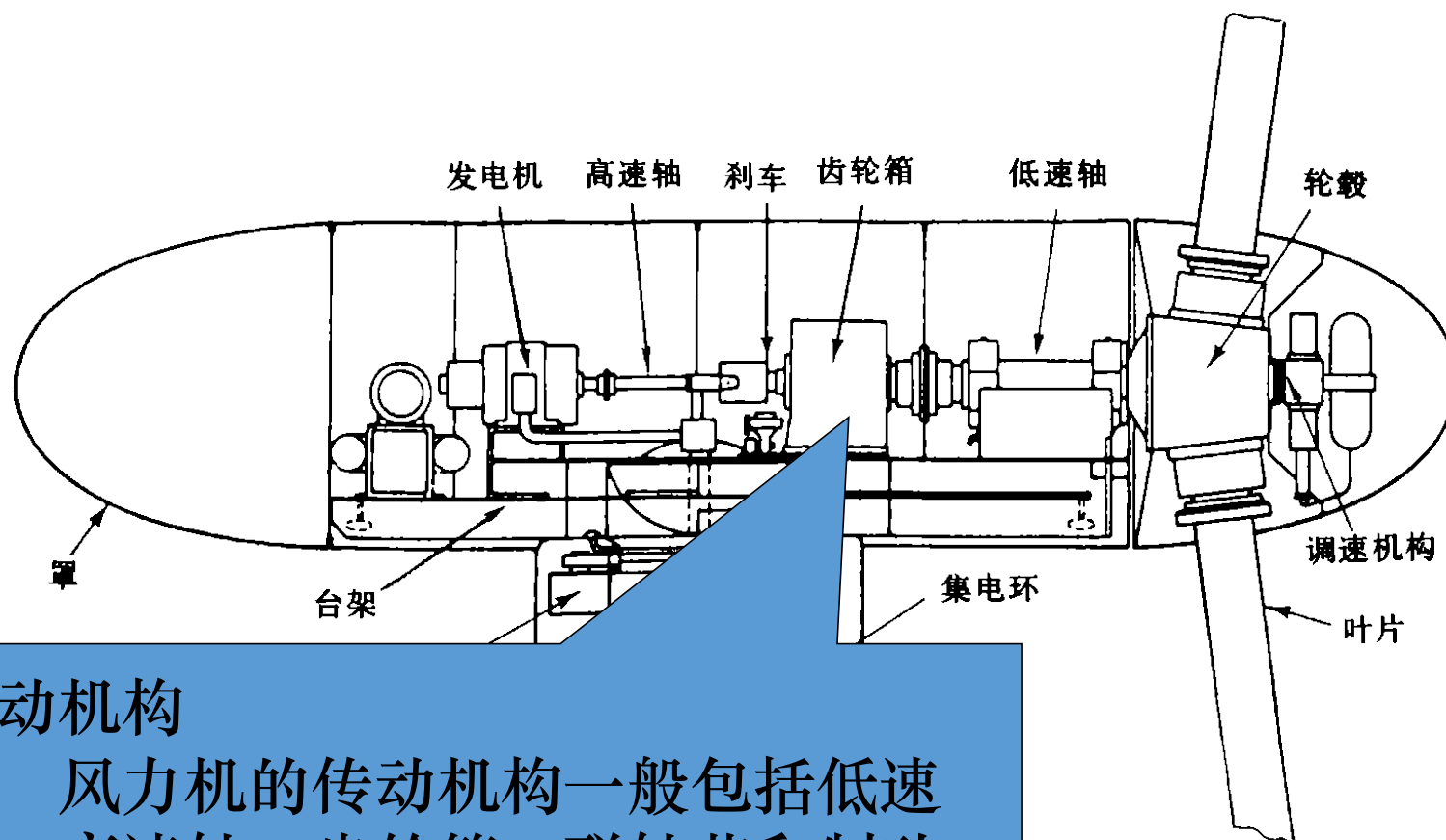
(2)侧风轮

在机舱的侧面安装一个小风轮，其旋转轴与风轮主轴垂直。如果主风轮没有对准风向，则侧风轮会被风吹动，产生偏向力，通过蜗轮蜗杆机构使主风轮转到对准风向为止。



(3)电动机驱动的风向跟踪系统

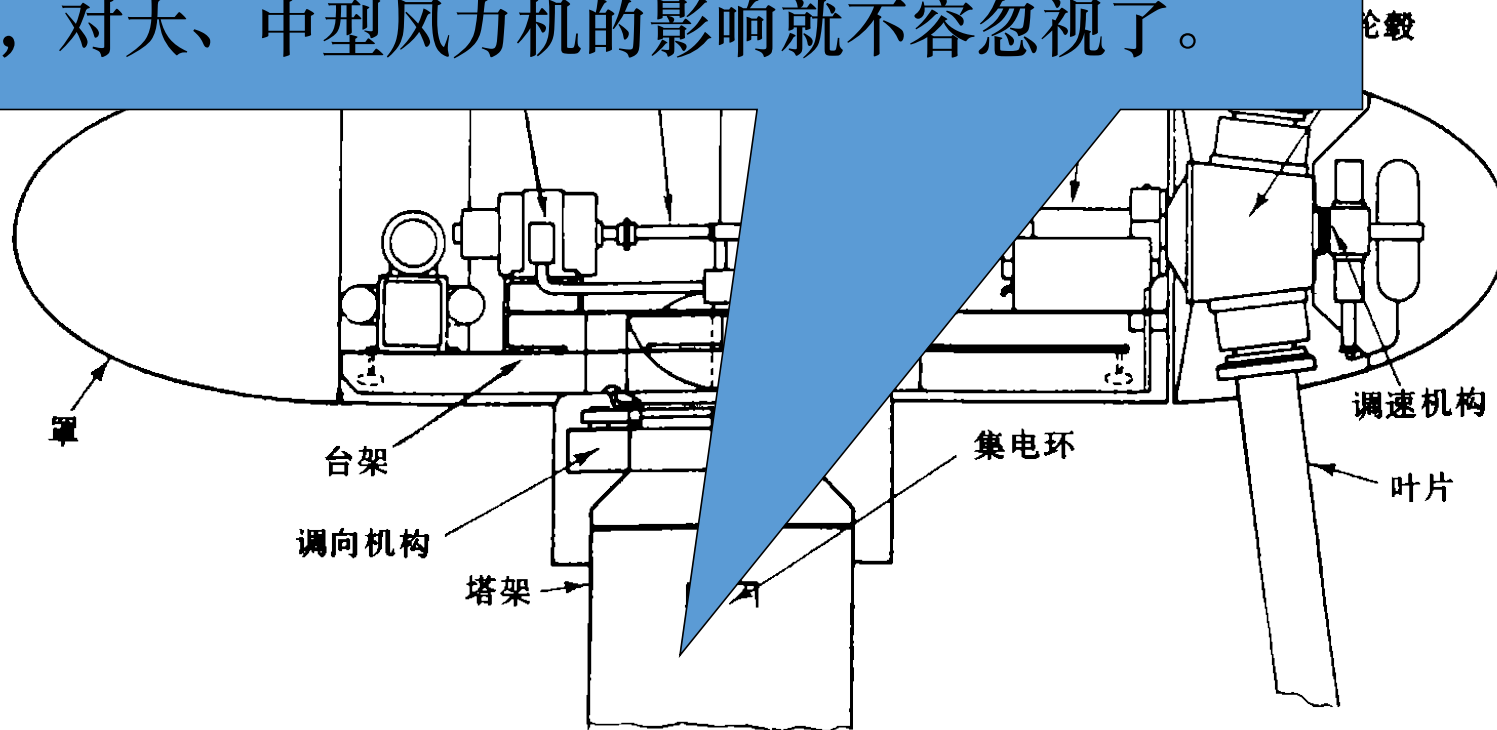
对大型风力发电机组，一般采用电动机驱动的风向跟踪系统。整个偏航系统由电动机及减速机构、偏航调节系统和扭缆保护装置等部分组成。偏航调节系统包括风向标和偏航系统调节软件。风向标对应每一个风向都有一个相应的脉冲输出信号，通过偏航系统软件确定其偏航方向和偏航角度，然后将偏航信号放大传送给电动机，通过减速机构转动风力机平台，直到对准风向为止。



传动机构

风力机的传动机构一般包括低速轴、高速轴、齿轮箱、联轴节和制动器等。但不是每一种风力机都必须具备所有这些环节

风力机的塔架除了要支撑风力机的重量，还要承受吹向风力机和塔架的风压，以及风力机运行中的动载荷。它的刚度和风力机的振动有密切关系，如果说塔架对小型风力机影响还不太大的话，对大、中型风力机的影响就不容忽视了。



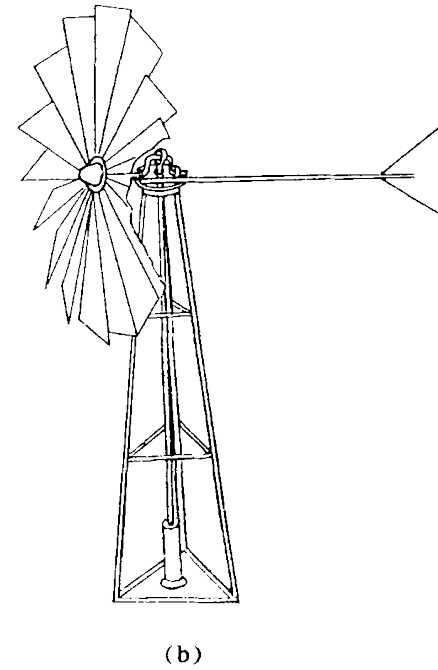
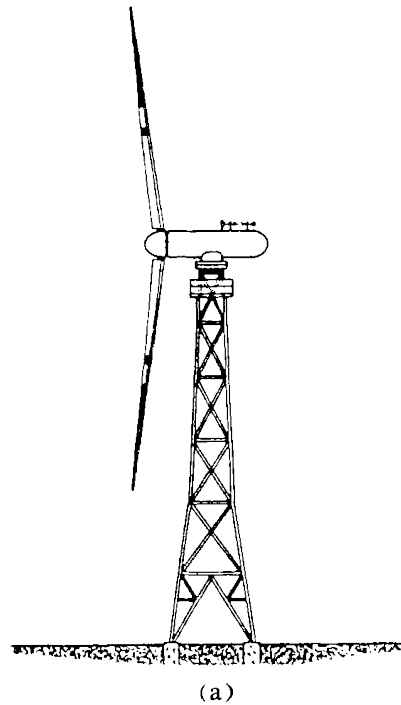
2.1.2 风力机的类型

从能量转换的角度看，风力发电机组由两大部分组成。其一是风力机，它的功能是将风能转换为机械能；其二是发电机，它的功能是将机械能转换为电能。风力机类型包括：

- (1) 水平轴风力机，
- (2) 垂直轴风力机

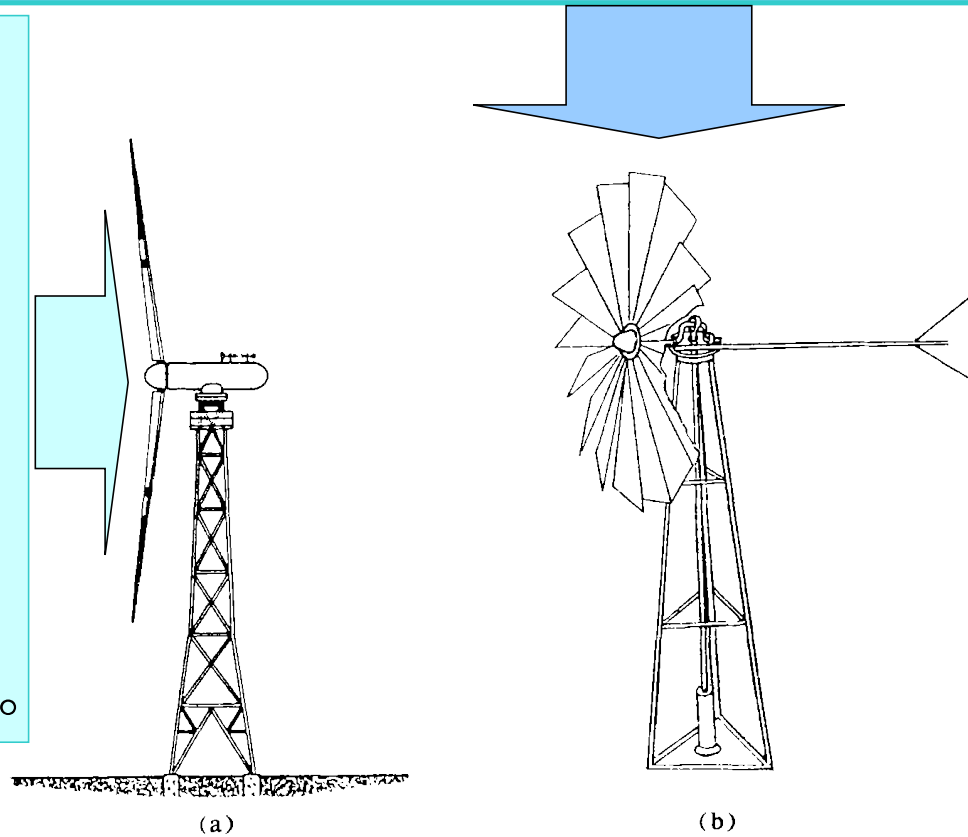
(1) 水平轴风力机

水平轴风力机的风轮围绕一个水平轴旋转，工作时，风轮的旋转平面与风向垂直，风轮上的叶片是径向安置的，与旋转轴相垂直，并与风轮的旋转平面成一角度-安装角。



叶片数多的风力机通常称为低速风力机，它在低速运行时，有较高的风能利用系数和较大的转矩。它的起动力矩大，起动风速低，因而适用于提水。

叶片数少的风力机通常称为高速风力机，它在高速运行时较高的风能利用系数，但起动风速较高。由于其叶片数很少，在输出同样功率的条件下比低速风轮要轻得多，因此适用于发电。



水平轴风力机随风轮与塔架相对位置的不同而有上风向与下风向之分。

上风向：风轮在塔架的前面迎风旋转，叫做上风向风力机。上风向风力机必须有某种调向装置来保持风轮迎风。

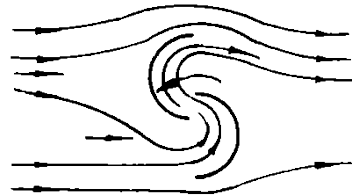
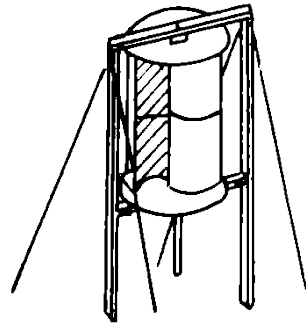
下风向：风轮安装在塔架的下风位置的，则称为下风向风力机。而下风向风力机则能够自动对准风向，从而免除了调向装置。但对于下风向风力机，由于一部分空气通过塔架后再吹向风轮，这样塔架就干扰了流过叶片的气流而形成所谓塔影效应，使性能有所降低。

(2) 垂直轴风力机

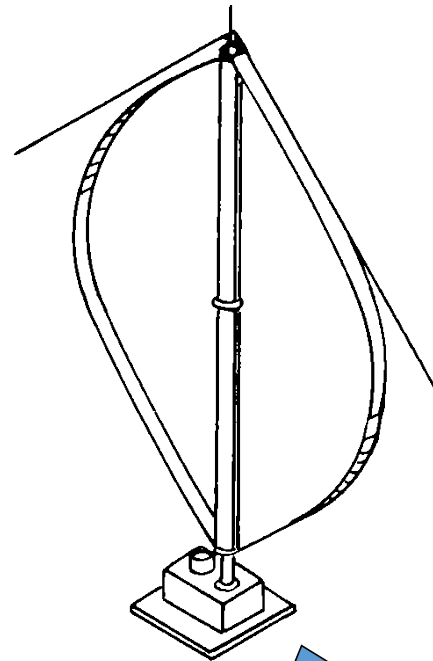
垂直轴风力机的风轮围绕一个垂直轴旋转。



S型风轮



(a)



(b)

达里厄型风力机

(2) 垂直轴风力机

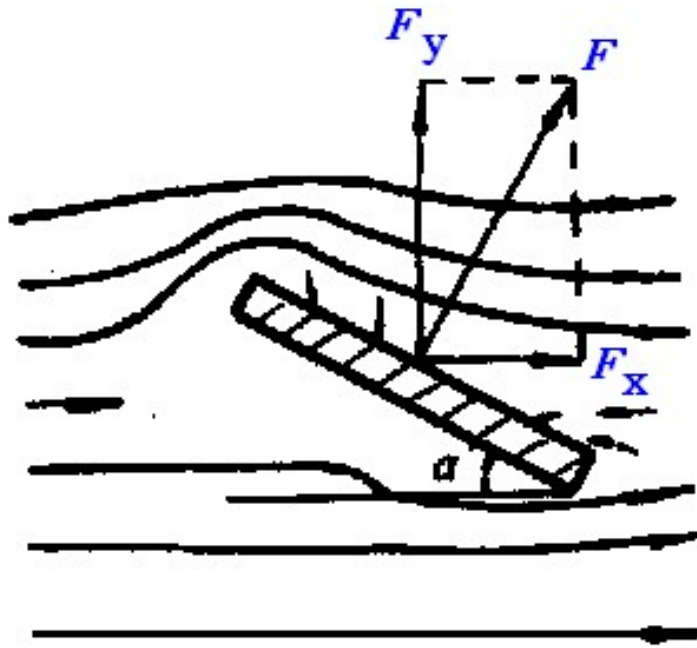
垂直轴风力机的主要优点是可以接受来自任何方向的风，因而当风向改变时，无需对风。由于不需要调向装置，使它们的结构设计简化。垂直轴风力机的另一个优点是齿轮箱和发电机可以安装在地面上，这对于一个往往需要在一片呼啸的大风中为一台离地面几十米高的水平轴风力机进行维修服务的人员来说，无疑是一个值得高度评价的特点。

垂直轴风力机可分为两个主要类别：

一类是利用空气动力的阻力做功，典型的结构是S型风轮。它由两个轴线错开的半圆柱形叶片组成，其优点是起动转矩较大，缺点是由于围绕着风轮产生不对称气流，从而对它产生侧向推力。对于较大型的风力机，因为受偏转与安全极限应力的限制，采用这种结构形式是比较困难的。S型风力机风能利用系数低于高速垂直轴或水平轴风力机，在风轮尺寸、重量和成本一定的情况下提供的功率输出较低，因而用作发电缺乏竞争力。

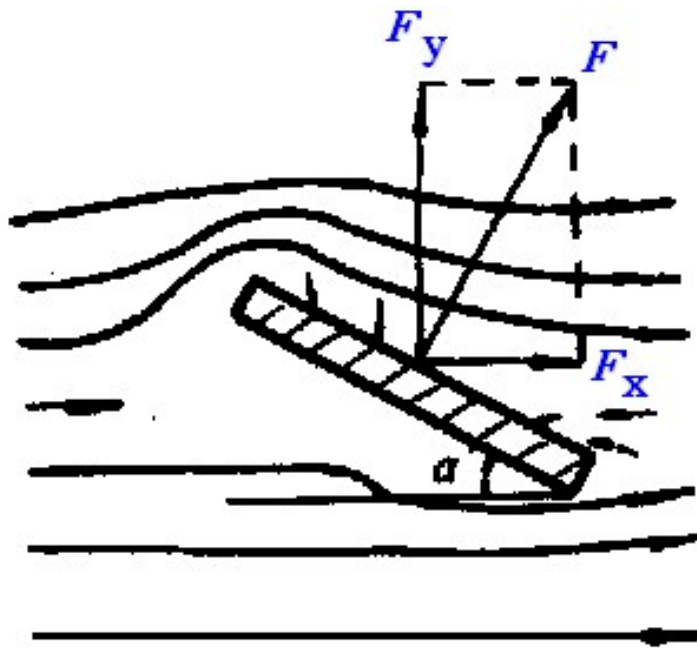
2.1.3 风力机气动特性（专题1）

空气动力：



- (1) 是由于气流绕物体流动时，在物体表面处的流动速度发生变化，引起气流压力的变化，即物体表面各处气流的速度与压力不同，从而对物体产生合成的压力；
- (2) 是由于气流绕物体流动时，在物体附面层内由于气流粘性作用产生的摩擦力。

2.1.3 风力机气动特性

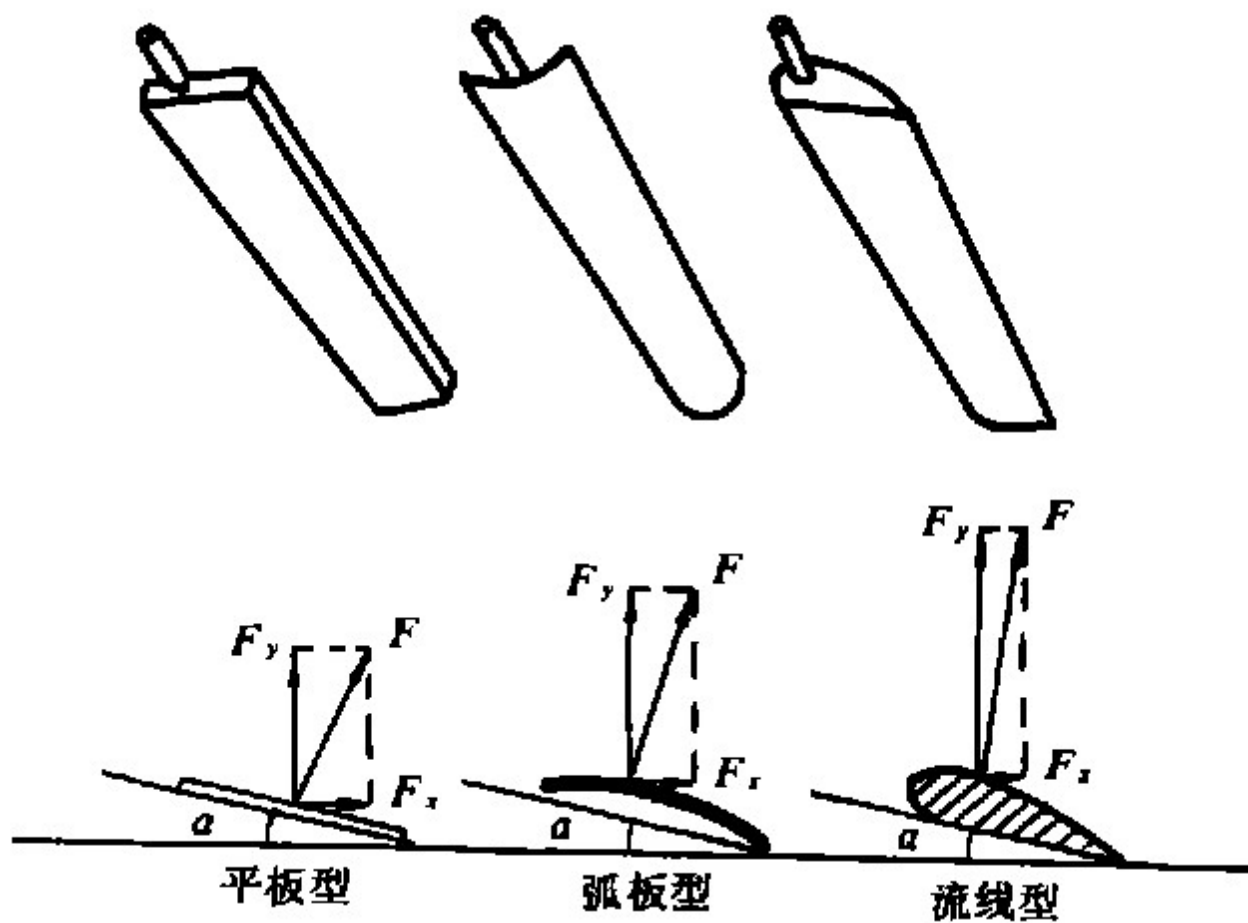


升力和阻力：

- 1) 上升 F_y 与气流方向垂直，它使平板上升
- 2) 阻力 F_x 与气流方向相同
- 3) 升力是使风力机有效工作的力，而阻力则形成对风轮的正面压力。为了使风力机很好地工作，就需要叶片具有这样的翼型断面，使其能得到最大的升力和最小的阻力

影响升力系数和阻力系数的因素

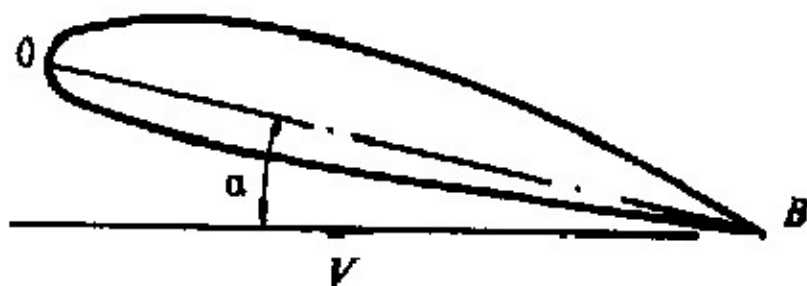
翼型的影响：



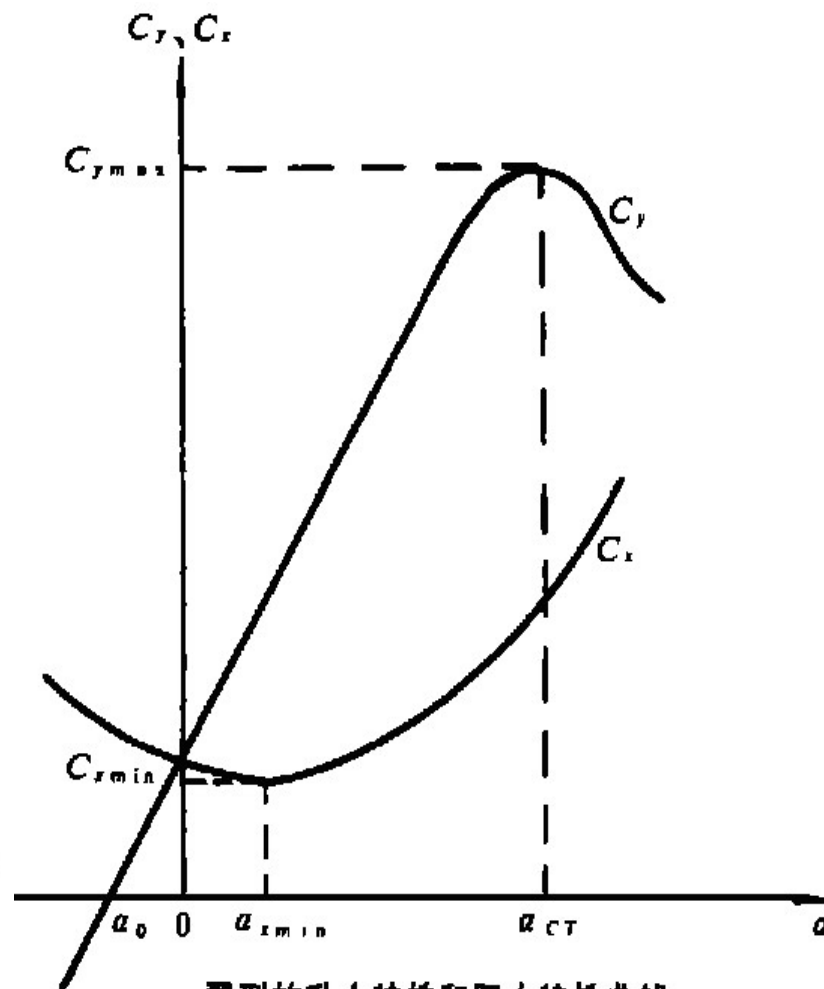
影响升力系数和阻力系数的因素

攻角的影响：

一种流线型叶片升力系数和阻力系数随攻角变化的曲线。



流线型叶片的翼型及攻角



翼型的升力特性和阻力特性曲线

由于风轮旋转时叶片不同半径处的线速度是不同的，因而相对于叶片各处的气流速度 W 在大小和方向上也都不相同，如果叶片各处的安装角都一样，则叶片各处的实际攻角都将不同。这样除了攻角接近最佳值的一小段叶片升力较大外，其它部分所得到的升力则由于攻角偏离最佳值而不理想。所以这样的叶片不具备良好的气动力特性。

解决办法：使叶片每一个截面的安装角随着半径的增大而逐渐减小，可使气流在整个叶片长度均以最有利的攻角吹向每一叶片元，从而具有比较好的气动力性能。而且各处受力比较均匀，也增加了叶片的强度。这种具有变化的安装角的叶片称为螺旋桨型叶片。

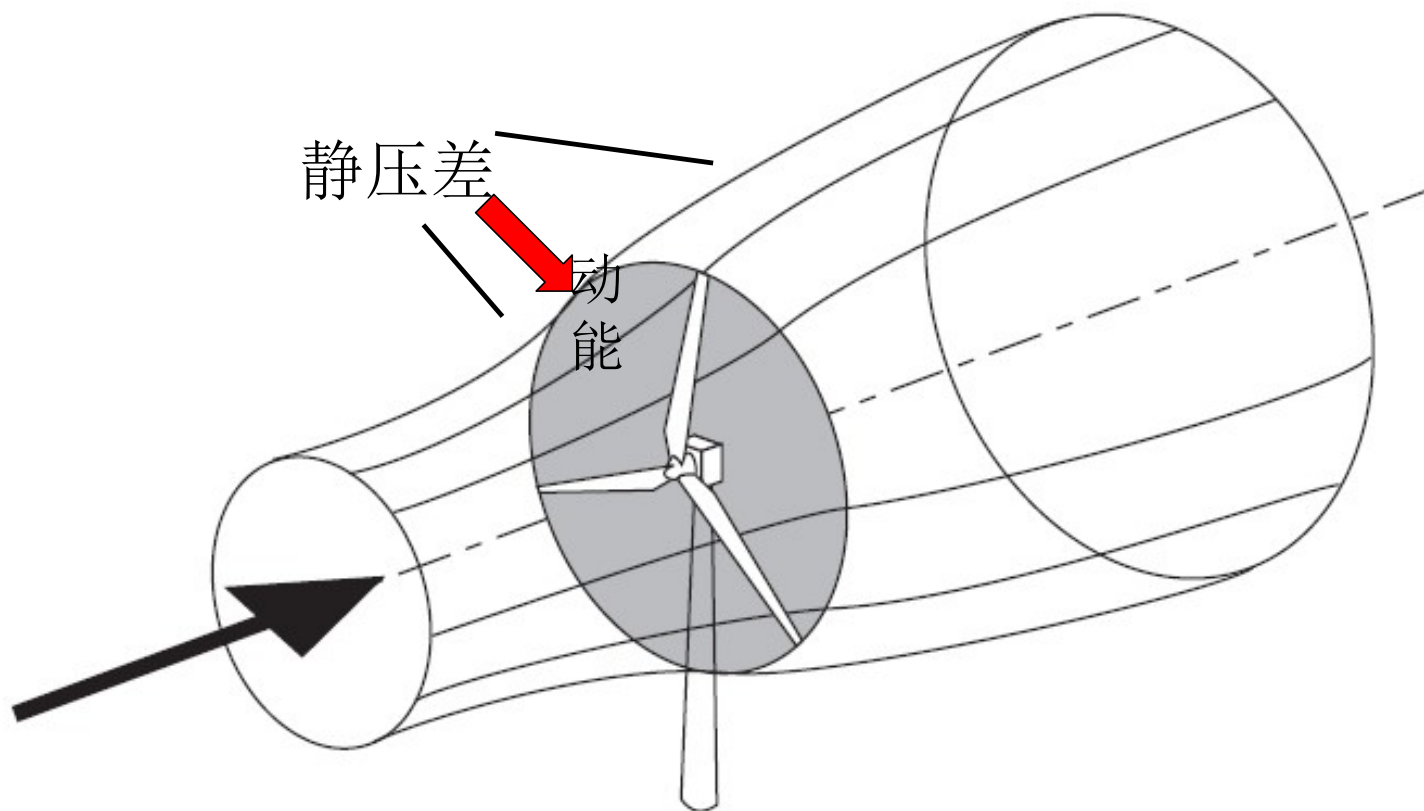
由于风速是经常变化的，风速的变化也将导致攻角的改变。如果叶片装好后安装角不再变化，那么虽在某一风速下可能得到最好的气动力性能，但在其它风速下则未必如此。

解决办法：为了适应不同的风速，可以随着风速的变化，调节整个叶片的安装角，从而有可能在很大的风速范围内均可以得到优良的气动力性能。这种桨叶叫做**变桨距**式叶片，而把那种安装角一经装好就不再能变动的叶片称为**定桨距**式叶片。显然，从气动性能来看，变桨距式螺旋桨型叶片是一种性能优良的叶片。

风力机的气动力特性

(专题2: 贝兹(Betz)理论)

动能捕获装置



➤主要结论

✓风力机输出功率：
$$P_m = C_p P_w = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p$$

✓风能利用系数：
$$C_p = \frac{P_m}{\frac{1}{2} \rho S V^3}$$

✓最大风能利用系数（贝兹极限）：

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

➤ 风力机的特性系数

✓ 风能利用系数:
$$C_p = \frac{P_m}{\frac{1}{2} \rho S V^3}$$

✓ 叶尖速比:
$$\lambda = \frac{2\pi R n}{V} = \frac{\omega R}{V}$$

✓ 转矩系数和推力系数:
$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho S V^2 R} = \frac{2T}{\rho S V^2 R}$$

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = \frac{2F}{\rho S V^2}$$

2.2 风力发电中的发电机

2.2.1 对发电机及发电系统的一般要求

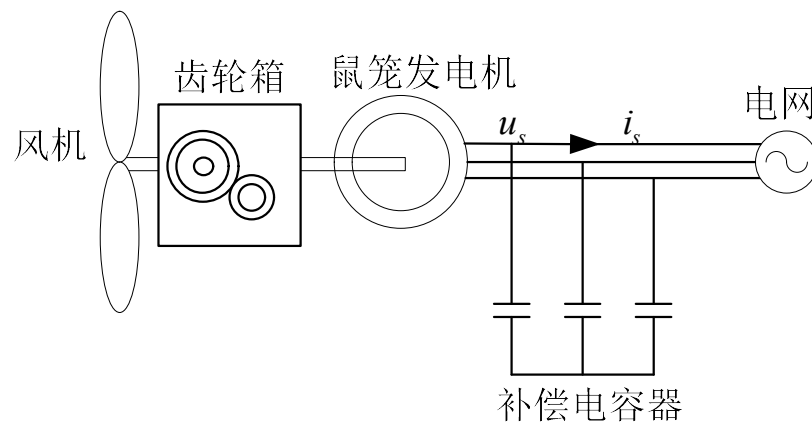
风力发电包含了由风能到机械能和由机械能到电能两个能量转换过程，发电机及其控制系统承担了后一种能量转换任务。

- (1) 高质量地将不断变化的风能转换为频率、电压恒定的交流电或电压恒定的直流电。
- (2) 高效率地实现上述两种能量转换，以降低每度电的成本。
- (3) 稳定可靠地同电网、柴油发电机及其他发电装置或储能系统联合运行，为用户提供稳定的电能。

2.2.2 恒速恒频发电机系统

恒速恒频发电机系统一般来说比较简单，所采用的发电机主要有两种：

- 1) 同步发电机，运行于由电机极数和频率所决定的同步转速；
- 2) 鼠笼型感应发电机，以稍高于同步速的转速运行。



感应发电机与同步发电机的比较

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。	需要同步合闸装置。
稳定性	无失步现象，运行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机相同，转子基本上不需要维护。	除定子外，励磁绕组及励磁调节装置需要维护。

2.2.3 变速恒频发电机系统

变速恒频发电机系统的主要优点在于风轮以变速运行，可以在很宽的风速范围内保持近乎恒定的最佳叶尖速比，从而提高了风力机的运行效率，从风中获取的能量可以比恒速风力机高得多。此外，这种风力机在结构上和实用中还有很多的优越性。利用电力电子学是实现变速运行最好方法之一，虽然与恒速恒频系统相比可能使风电转换装置的电气部分变得较为复杂和昂贵，但电气部分的成本在中、大型风力发电机组中所占比例不大，因而发展中、大型变速恒频风电机组受到很多国家的重视。

变速发电技术

特点：

- 可获得实时较优的风能利用系数
- 减少动态载荷
- 使得叶轮获得更好的气动效应
- 需使用变流器，成本增加，效率有所损失
- 控制系统更为复杂
- 对稳定性要求更高

变速运行的风力发电机有不连续变速和连续变速两大类。

(1) 不连续变速系统

一般说来，利用不连续变速发电机可以获得连续变速运行的某些好处，但不是全部好处。主要效果是比以单一转速运行的风电机组有较高的年发电量，因为它能在一定的风速范围内运行于最佳叶尖速比附近。但它面对风速的快速变化（湍流）实际上只是一台单速风力机，因此不能期望它像连续变速系统那样有效地获取变化的风能。更重要的是，它不能利用转子的惯性来吸收峰值转矩，所以这种方法不能改善风力机的疲劳寿命。

- 1) 采用多台不同转速的发电机通常是采用两台转速、功率不同的感应发电机，在某一时间内只有一台被联接到电网，传动机构的设计使发电机在两种风轮转速下运行在稍高于各自的同步转速。
- 2) 双绕组双速感应发电机 这种电机有两个定子绕组，嵌在相同的定子铁心槽内，在某一时间内仅有一个绕组在工作，转子仍是通常的鼠笼型。电机有两种转速，分别决定于两个绕组的极数。比起单速机来，这种发电机要重一些，效率也稍低一些，因为总有一个绕组未被利用，导致损耗相对增大。它的价格当然也比通常的单速电机贵。

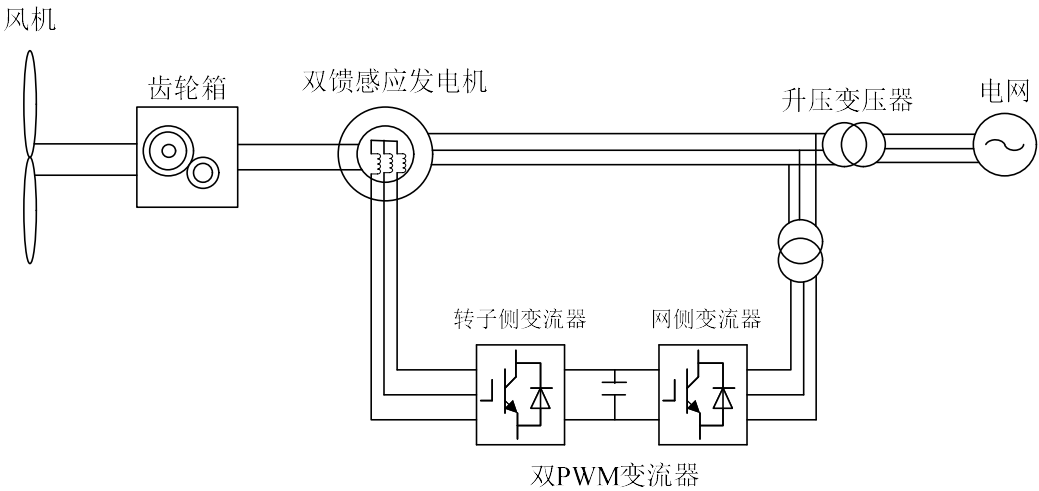
(2) 连续变速系统

连续变速系统可以通过多种方法来得到，包括：

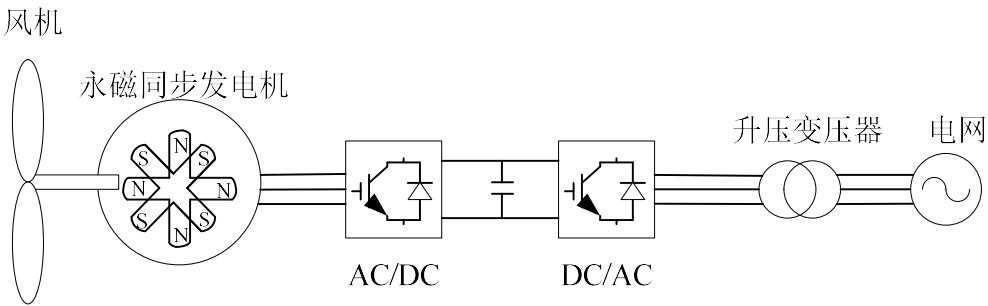
- ◆机械方法：用变速比液压传动或可变传动比机械传动
- ◆电/机械方法：采用定子可旋转的感应发电机
- ◆电气方法：高滑差感应发电机或双定子感应发电机
- ◆电力电子学方法：

发电机可以是市场上已有的通常电机如同步发电机、鼠笼型感应发电机、绕线型感应发电机等，也有近来研制的新型发电机如磁场调制发电机、无刷双馈发电机等

双馈式风力发电机组：

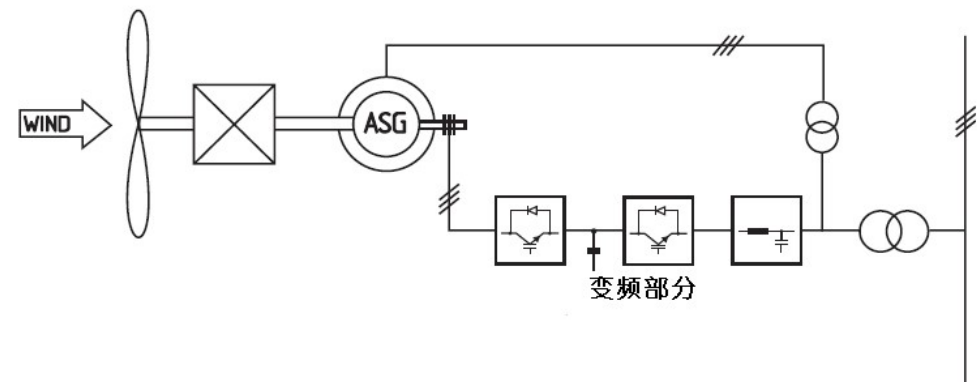
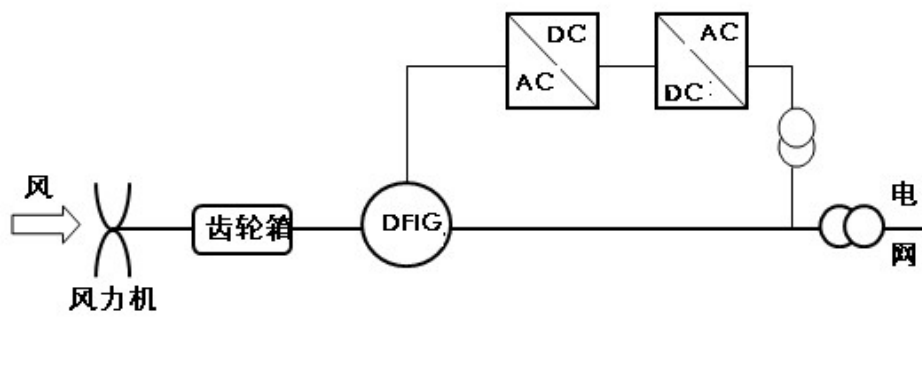


直驱永磁风力发电机组：

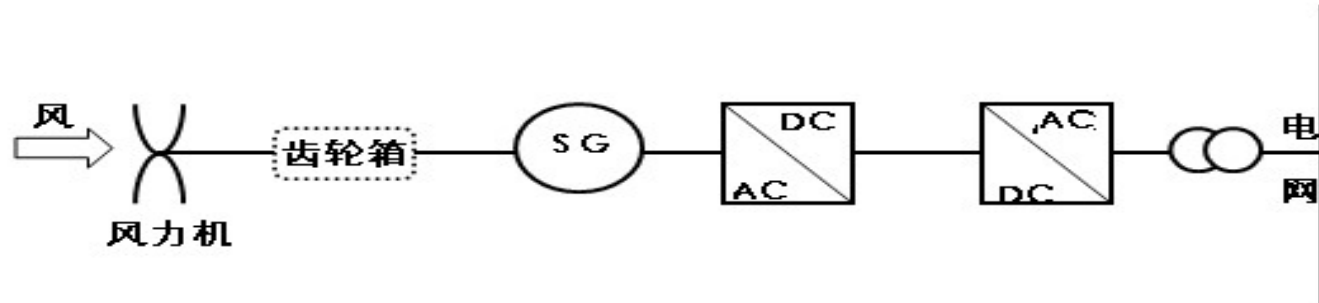


变速发电系统（双馈感应发电机）

- 实现发电机超同步和次同步工况
- 控制转子电流幅值和相位，发电机可运行于任何期望的功率因数
- 变流器产生的频率叠加于转子旋转频率，总合成恒定，变速范围由馈送到转子的频率决定，目前可达到**30%**
- 变流器容量相对较小
- 控制系统更为复杂



变速发电系统（同步发电机）



- 发电机速度完全与电网解耦
- 发电机转矩由直流联络线控制
- 通过去除阻尼绕组可以加速控制，减小不期望的低频拍频振荡
- 通过PWM技术可改善谐波
- 变流器容量至少等于发电机容量
- 例如：永磁同步发电机