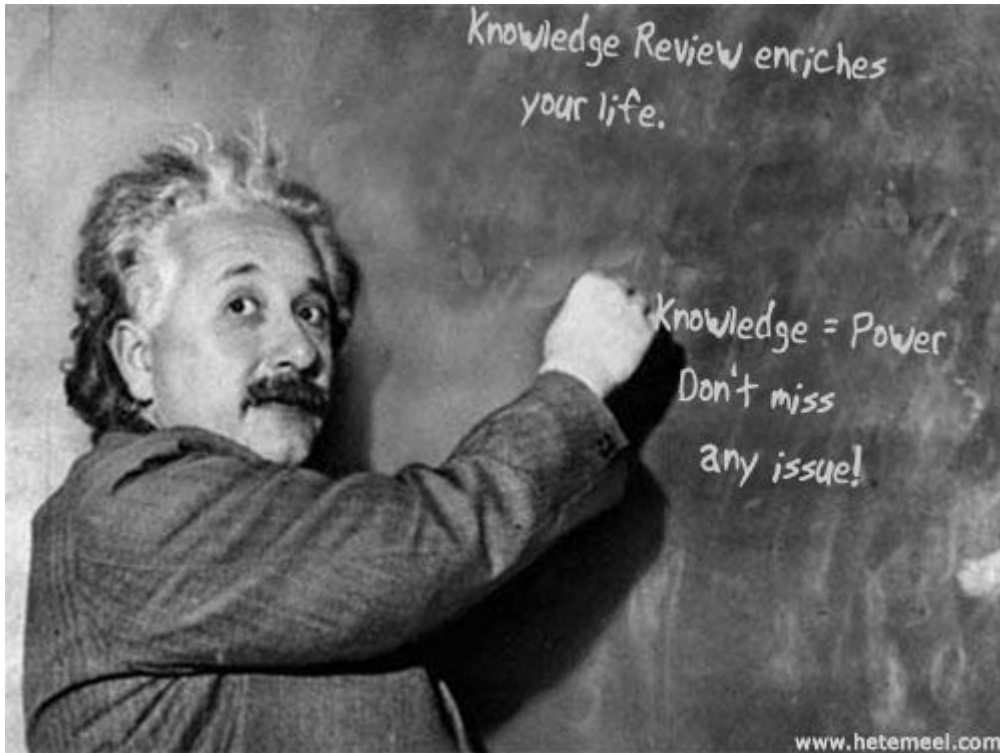


风力发电科普知识（图文版）

目录

什么是风能? -----	4
风能来源于何处? -----	5
风功率如何计算? -----	5
全球风能总量有多大? -----	6
我国风能总量有多少? -----	6
风是怎样形成的? -----	6
大气运动的受力影响是什么? -----	6
地形对风有什么影响? -----	7
什么是海风, 陆风; 山风, 谷风? -----	7
为什么说风能是一种绿色能源? -----	8
发展风力发电具有什么优势? -----	9
人类利用风能的历史 -----	9
什么是风电场? -----	10
中国风力资源分布 -----	11
风力发电的经济性 -----	12
建立风电场的应用考虑有哪些方面? -----	13
风力发电机噪音大么? -----	14
风力发电机组的分类及各自特点 -----	14
风力发电机的功率曲线 -----	19

什么是风力发电机的额定输出功率	20
典型风力发电机各部件介绍	20
风力发电机的工作原理	28
我国现阶段主要风力发电机型的发电过程	29
直驱式风力发电机组的特点	30
什么是电网？	32
风机并网需要考虑哪些方面？	32
并网运行模式的规模划分	32
风力发电机的并网有什么好处？	33
什么是“防孤岛功能”	33
风力发电机并网运行的模式及其特点（根据发电机划分）	33
影响风电项目投资收益的几个因素	36
风电项目开发流程	39
风电项目的投资构成是什么？	40
风力发电项目的度电成本	41
功率曲线与发电量	42
风资源状况的评价指标	43



知识丰富生命！ 知识就是力量！

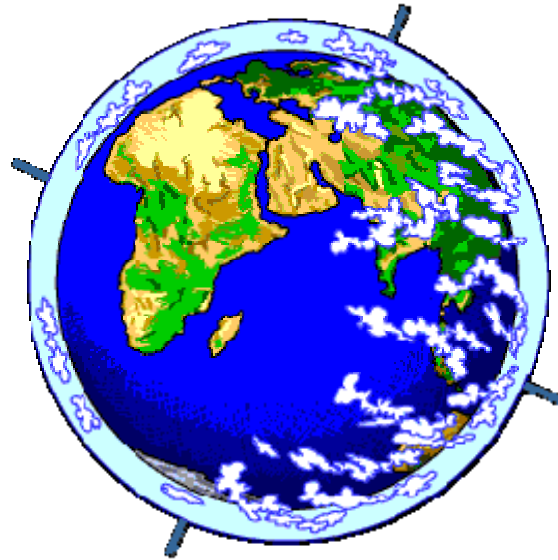
什么是风能？

风能就是空气的动能, 是指风所负载的能量， 风能的大小决定于风速和空气的密度。



风能来源于何处？

风的能量是由太阳辐射能转化来的，太阳每小时辐射地球的能量是 174,423,000,000,000 千瓦，换句话说，地球每小时接受了 1.74×10^{17} 瓦的能量。风能大约占太阳提供总能量的百分之一，二，太阳辐射能量中的一部分被地球上的植物转换成生物能，而被转化的风能总量大约是生物能的 50~100 倍。



风功率如何计算？

风的能量指的是风的动能。特定质量的空气的动能可以用下列公式计算。

$$\text{能量} = 1/2 \times \text{质量} \times (\text{速度})^2$$

吹过特定面积的风的功率可以用下列公式计算。

$$\text{功率} = 1/2 \times \text{空气密度} \times \text{面积} \times (\text{速度})^3$$

其中，功率单位为瓦特；空气密度单位为千克/立方米；面积指气流横截面积，单位为平方米；速度单位为米/秒。在海平面高度和摄氏 15 度的条件下，干空气密度为 1.225 千克/立方米。空气密度随气压和温度而变。随著高度的升高，空气密度也会下降。于上述公式中可以看出，风功率与速度的三次方（立方）成正比，并与风轮扫掠面积成正比。不过实际上，风轮只能提取风的能量中的一部分，而非全部。

全球风能总量有多大？

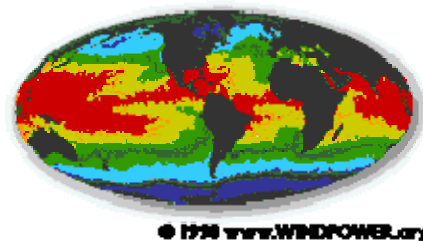
全球的风能约为 2.74×10^9 MW，其中可利用的风能为 2×10^7 MW，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。

我国风能总量有多少？

我国 10 米高度层的风能资源总储量为 32.26 亿千瓦，其中实际可开发利用的风能资源储量为 2.53 亿千瓦。而据估计，中国近海风能资源约为陆地的 3 倍，所以，中国可开发风能资源总量约为 10 亿千瓦。其中青海、甘肃、新疆和内蒙可开发的风能储量分别为 1143 万千瓦、2421 万千瓦、3433 万千瓦和 6178 万千瓦，是中国大陆风能储备最丰富的地区。

风是怎样形成的？

简单的说，太阳的辐射造成地球表面受热不均，引起大气层中压力分布不均；空气沿水平方向运动形成风。风的形成就是空气流动的结果。



大气运动的受力影响是什么？

地球大气运动既受气压梯度力的影响，还要受地转偏向力的影响

由于地球上各纬度所接受的太阳辐射强度不同，在赤道和低纬度地区，太阳高度角大，日照时间长，太阳辐射强度强，地面和大气接受的热量多、温度较高；再高纬度地区太阳高度角小，日照时间短，地面和大气接受的热量小，温度低。这种高纬度与低纬度之间的温度差异，形成了南北之间的气压梯度，使空气作水平运动，风应沿水平气压梯度方向吹，即垂直与等

压线从高压向低压吹。

此外因为地球在自转，使空气水平运动发生偏向，这个力称为地转偏向力，又叫科里奥利力。

（名称来源于法国数学家 Gustave Gaspard Coriolis 1792-1843），这种力使北半球气流向右偏转，南半球向左偏转，所以大气真实运动是这两种力综合影响的结果。

地形对风有什么影响？

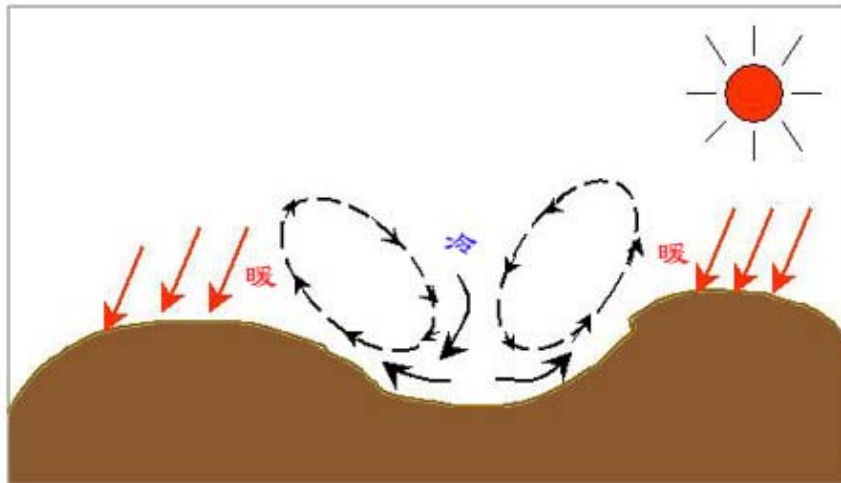
山谷和海峡能改变气流运动的方向，还能使风速增大，而丘陵、山地会因为摩擦而使风速减小，孤立的山峰会因海拔高而使风速增大。

什么是海风，陆风；山风，谷风？

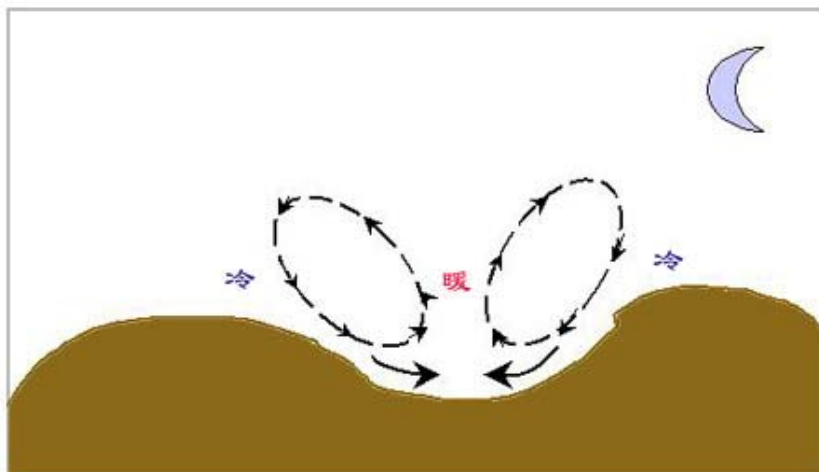
大陆上的气流受热膨胀上升至高空流向海洋，到海洋上空冷却下沉，在近地层海洋上的气流吹向大陆，补偿大陆的上升气流，低层风从海洋吹向大陆，这被称为海风；夜间，情况相反，低层风从大陆吹向海洋，被称为陆风。



白天山坡受热快，温度高于山谷上方同高度的空气温度，坡地上的暖空气从山坡流向谷地上方，谷地的空气则沿着山坡向上补充流失的空气，这时由山谷吹向山坡的风，称为谷风。夜间，山坡因冷却降温速度比同高度的空气快，冷空气沿坡地向下流入山谷，称为山风。



谷风



山风

为什么说风能是一种绿色能源？

风能是一种干净的自然能源，没有常规能源（如煤电，油电）与核电会造成环境污染的问题。平均每装一台单机容量为 1 兆瓦的风能发电机，每年可以减排 2000 吨二氧化碳（相当于种植 1 平方英里的树木）、10 吨二氧化硫、6 吨二氧化氮。风能产生 1 兆瓦小时的电量可以减少 0.8 到 0.9 吨的温室气体，相当于煤或矿物燃料一年产生的气体量。而且风机不会危害鸟类和其它野生动物。在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下，风能作为一种高效清洁的新能源有着巨大的发展潜力。



发展风力发电具有什么优势？

风电技术日趋成熟，产品质量可靠，可用率已达 95%以上，已是一种安全可靠的能源，风力发电的经济性日益提高，发电成本已接近煤电，低于油电与核电，若计及煤电的环境保护与交通运输的间接投资，则风电经济性将优于煤电。风力发电场建设工期短，单台机组安装仅需几周，从土建、安装到投产，只需半年至一年时间，是煤电、核电无可比拟的。

投资规模灵活，有多少钱装多少机。对沿海岛屿，交通不便的边远山区，地广人稀的草原牧场，以及远离电网和近期内电网还难以达到的农村、边疆来说，可作为解决生产和生活能源的一种有效途径。

人类利用风能的历史



人类利用风能的历史可以追溯到公元前。我国是世界上最早利用风能的国家之一。公元前数世纪我国人民就利用风力提水、灌溉、磨面、舂米，用风帆推动船舶前进。埃及尼罗河上的风帆船、中国的木帆船，都有两三千年的历史记载。唐代有“乘风破浪会有时，直挂云帆济沧海”诗句，可见那时风帆船已广泛用于江河航运。到了宋代更是我国应用风车的全盛时代，当时流行的垂直轴风车，一直沿用至今。在国外，公元前 2 世纪，古波斯人就利用垂直轴风车碾米。10 世纪伊斯兰人用风车提水，11 世纪风车在中东已获得广泛的应用。13 世纪风车传至欧洲，14 世纪已成为欧洲不可缺少的原动机。在荷兰风车先用于莱茵河三角洲湖地和低湿地的汲水，其风车的功率可达 50 马力，以后又用于榨油和锯木。到了十八世纪二十年代，在北美洲风力机被用来灌溉田地 and 驱动发电机发电。从 1920 年起，人们开始研究利用风力机作大规模发电。1931 年，在苏联的 Crimean Balaclava 建造了一座 100 KW 容量的风力发电机，这是最早商业化的风力发电机。

什么是风电场？

风力发电场（简称风电场），是将多台大型并网式的风力发电机安装在风能资源好的场地，按照地形和主风向排成阵列，组成机群向电网供电。风力发电机就像种庄稼一样排列在地面上，故形象地称为“风力田”。风力发电场于 20 世纪 80 年代初在美国的加利福尼亚州兴起，现在被全世界大力发展风电的各个国家广泛采用。

风电场的风力发电机相互之间需要有足够的距离，以免造成过强的湍流相互影响，或由于“尾流效应”而严重减低后排风电机的功率输出。为了配合运送大型设备（特别是叶片）到安装现场，须要建设道路。另外亦须要建设输电线，把风电场的输出连接到电网接入点。



中国风力资源分布

东南沿海及其附近岛屿是风能资源丰富地区，有效风能密度大于或等于 200 瓦/平方米，沿海岛屿有效风能密度在 300 瓦/平方米以上，全年中风速大于或等于 3 米/秒的时数约为 7000~8000 小时，大于或等于 6 米/秒的时数为 4000 小时。

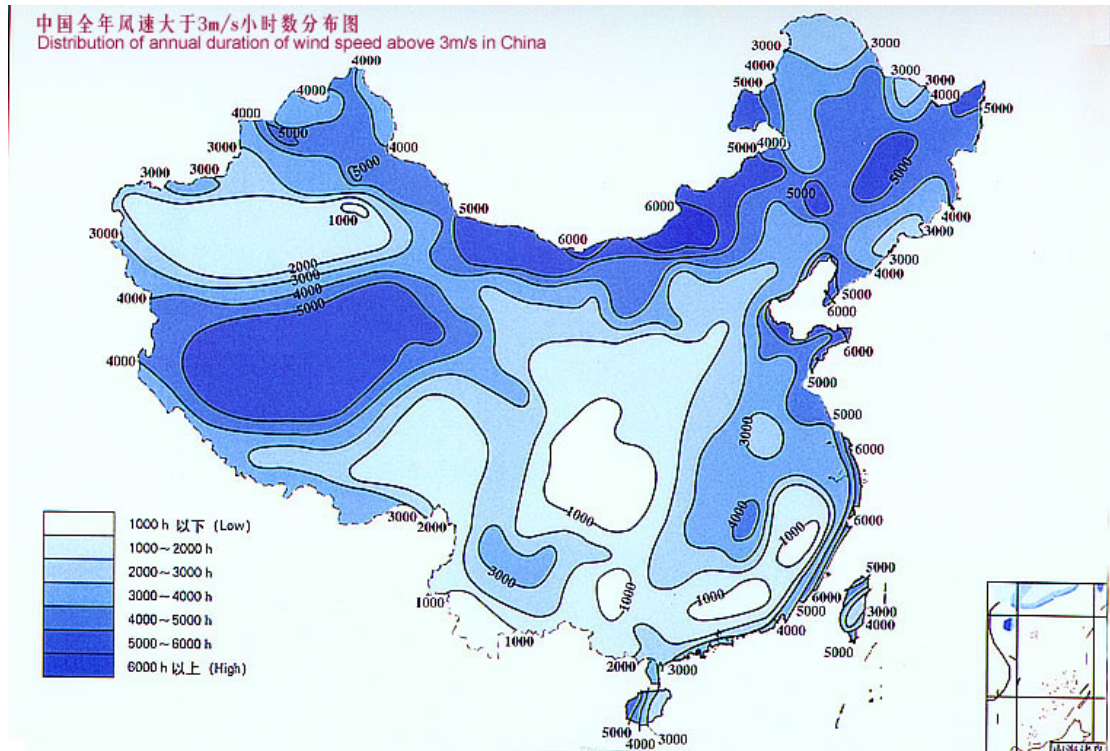
新疆北部、内蒙古、甘肃北部也是中国风能资源丰富的地区，有效风能密度为 200~300 瓦/平方米，全年中风速大于或等于 3 米/秒的时数为 5000 小时以上，全年中风速大于或等于 6 米/秒的时数为 3000 小时以上。

黑龙江、吉林东部、河北北部及辽东半岛的风能资源也较好，有效风能密度在 200 瓦/平方米以上，全年中风速大于和等于 3 米/秒的时数为 5000 小时，全年中风速大于和等于 6 米/秒的时数为 3000 小时。

青藏高原北部有效风能密度在 150~200 瓦/平方米之间，全年风速大于和等于 3 米/秒的时数为 4000—5000 小时，全年风速大于和等于 6 米/秒的时数为 3000 小时；但青藏高原海拔高、空气密度小，所以有效风能密度也较低。

云南、贵州、四川、甘肃、陕西南部、河南、湖南西部、福建、广东、广西的山区及新疆塔里木盆地和西藏的雅鲁藏布江为风能资源贫乏地区，有效风能密度在 50 瓦/平方米以下，全年中风速大于和等于 3 米/秒的时数在 2000 小时以下，全年中风速大于和等于 6 米/秒的时

数在 150 小时以下，风能潜力很低。



风力发电的经济性

由于风电市场的扩大、风电机组产量和单机容量的增加以及技术上的进步，使风电机组每千瓦的生产成本在过去近 20 年中稳定下降。以美国为例，风力发电的成本降低了 80%。上世纪 80 年代安装第一批风力发电机时，每发一度电的成本为 30 美分，而现在只需 4 美分。

另一方面，由于风电机组设计和工艺的改进（如叶片翼型改进等），性能和可靠性提高，加上塔架高度增加以及风场选址评估方法的改进等，使风电机组的发电能力有相当大的增长，每平方米叶轮扫掠面积的年发电量从 80 年代初期的 400-500KW.h 提高到目前的 1000KW.h 以上。一台标准的 600KW 风力发电机，当各种条件都是最佳状态时，每年可发电约 2000 万 KW.h，即每平方米叶轮扫掠面积的年发电量可达 1400-1500kW.h。目前风电场的容量系数（即一年的实际发电量除以装机额定功率与一年 8760 小时的乘积）一般约为 0.25-0.35。

综合上述以及风电场的风力资源、规模、运行维护成本和融资因素（如贷款利率、偿还期等），目前在较好的风场，风力发电的成本约为 4 美分/kW.h 左右，已具备与火电竞争的能

力。

从风电场的造价方面看，中国风电场的造价比欧洲高，基本上是欧洲 5 年前的水平，单位千瓦平均造价为 8500 元/千瓦左右，建设一座装机 10 万千瓦的风电场，成本大约在 8 亿到 10 亿元，而同样规模的火电厂成本约为 5 亿元，水电站为 7 亿元。

当然，独立运行的非并网班车风电系统，由于需要蓄电池和逆变器等，同时容量系数较小，所以发电成本比并网型机组要高。

建立风电场的应用考虑有哪些方面？

1. 由于风力资源随地点而变，因此即使在很相近的两个地点，风力资源特性也会很不相同，因此，对于任何风力发电项目，必须进行实地短期风力测量、长期风力资源预测、风流模拟计算、和产电量估算等等。

2. 如果需要安装超过一台风力发电机，每台风电机在特定风向下都可能成为其他风电机的“障碍物”，造成“尾流效应”。风电场总产电量估算须考虑尾流效应的影响。这可以用电脑软件来做出估算。

3. 根据当地风力特征选择适当的风力发电机。风力资源中等的地方，使用可变速型号比固定速度型号能够有更好的产电量。考虑到部分地区有台风，因此应选择市场上最牢固的风力发电机。国际电工协会标准分级中，1 级风电机可以抵受最高的极端负荷（设计能抵受每秒 70 米的 3 秒阵风）。此外，湍流强度也影响风力发电机的选择。

4. 如果风力发电机由电力公司以外机构所装设，那么便须要向电力公司谘询关于与接驳电网的要求。

须要注意通往安装场地道路的要求（宽度和转弯半径）。这是因为需要运送很长的叶片和其他很重的部件到安装场地，另外还需要运送起重机入场。

须要注意从风力发电机到最近的电网接入点之间架空电缆或地底电缆路线的要求。

须要注意飞行高度限制的要求。

须要注意环境影响评估的要求。

须要注意土地申请的要求。

须要注意航空标志和警告灯的要求。

须要注意对雷达和其他民航及航海设备的影响。



风力发电机噪音大么？

风力发电机转得比较慢，因而噪音相对较低。风力发电机的噪音源有两个，机械转动部位的噪音以及旋转叶片和空气之间的互动的噪音。因为机械部位和电力电子控制设计优良，加上慢速转动，可以把现代风力发电机的噪音尽量减少。

风力发电机组的分类及各自特点

风力发电机组主要由两大部分组成：

风力机部分——它将风能转换为机械能；

发电机部分——它将机械能转换为电能。

根据风机这大部分采用的不同结构类型、以及它们分别采用的技术方案的不同特征，再加上它们的不同组合，风力发电机组可以有多种多样的分类。

1. 如依风机旋转主轴的方向（即主轴与地面相对位置）分类，可分为：

“水平轴式风机”——转动轴与地面平行，叶轮需随风向变化而调整位置；

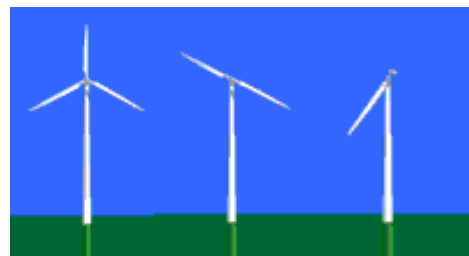
“垂直轴式风机”——转动轴与地面垂直，设计较简单，叶轮不必随风向改变而调整方向。



2. 按照桨叶受力方式可分成“升力型风机”或“阻力型风机”。

3. 按照桨叶数量分类可分为“单叶片”、“双叶片”、“三叶片”和“多叶片”型风机；叶片的数目由很多因素决定，其中包括空气动力效率、复杂度、成本、噪音、美学要求等等。大型风力发电机可由 1、2 或者 3 片叶片构成。

叶片较少的风力发电机通常需要更高的转速以提取风中的能量，因此噪音比较大。而如果叶片太多，它们之间会相互作用而降低系统效率。目前 3 叶片风电机是主流。从美学角度上看，3 叶片的风电机看上去较为平衡和美观。



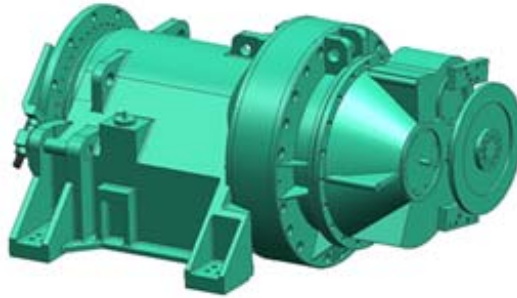
4. 按照风机接受风的方向分类，则有“上风向型”——叶轮正面迎着风向（即在塔架的前面迎风旋转）和“下风向型”——叶轮背顺着风向，两种类型。

上风向风机一般需要有某种调向装置来保持叶轮迎风。

而下风向风机则能够自动对准风向，从而免除了调向装置。但对于下风向风机，由于一部分空气通过塔架后再吹向叶轮，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。

5. 按照功率传递的机械连接方式的不同，可分为“有齿轮箱型风机”和无齿轮箱的“直驱型风机”。

有齿轮箱型风机的桨叶通过齿轮箱及其高速轴及万能弹性联轴节将转矩传递到发电机的传动轴，联轴节具有很好的吸收阻尼和震动的特性，可吸收适量的径向、轴向和一定角度的偏移，并且联轴器可阻止机械装置的过载。



而直驱型风机则另辟蹊径，配合采用了多项先进技术，桨叶的转矩可以不通过齿轮箱增速而直接传递到发电机的传动轴，使风机发出的电能同样能并网输出。这样的设计简化了装置的结构，减少了故障几率，优点很多，现多用于大型机组上。

6. 根据按桨叶接受风能的功率调节方式可分为：

“定桨距（失速型）机组”——桨叶与轮毂的连接是固定的。当风速变化时，桨叶的迎风角度不能随之变化。由于定桨距（失速型）机组结构简单、性能可靠，在 20 年来的风能开发利用中一直占据主导地位。

“变桨距机组”——叶片可以绕叶片中心轴旋转，使叶片攻角可在一定范围内（一般 0 — 90 度）调节变化，其性能比定桨距型提高许多，但结构也趋于复杂，现多用于大型机组上。

7. 按照叶轮转速是否恒定可分为：

“恒速风力发电机组”——设计简单可靠，造价低，维护量少，直接并网；缺点是：气动效率低，结构载荷高，给电网造成电网波动，从电网吸收无功功率。

“变速风力发电机组”——气动效率高，机械应力小，功率波动小，成本效率高，支撑结构轻。缺点是：功率对电压降敏感，电气设备的价格较高，维护量大。现常用于大容量的主力机型。

8. 根据风力发电机组的发电机类型分类，可分为两大类：

“异步发电机型” “同步发电机型”

只要选用适当的变流装置，它们都可以用于变速运行风机。

异步发电机按其转子结构不同又可分为：

(1) 笼型异步发电机——转子为笼型。由于结构简单可靠、廉价、易于接入电网，而在小、中型机组中得到大量的使用；

(2) 绕线式双馈异步发电机——转子为线绕型。定子与电网直接连接输送电能，同时绕线式转子也经过变频器控制向电网输送有功或无功功率。

同步发电机型按其产生旋转磁场的磁极的类型又可分为：

(1) 电励磁同步发电机——转子为线绕凸极式磁极，由外接直流电流激磁来产生磁场。

(2) 永磁同步发电机——转子为铁氧体材料制造的永磁体磁极，通常为低速多极式，不用外界激磁，简化了发电机结构，因而具有多种优势。

9. 如根据风机的输出端电压高低化分，一般可分为：

“高压风力发电机”——风力发电机输出端电压为 10~20kV，甚至 40kV，可省掉风机的升压变压器直接并网。它与直驱型，永磁体磁极结构一起组成的同步发电机总体方案，是目前风力发电机中一种很有发展前途的机型。

“低压风力发电机”——输出端电压为 1kV 以下，目前市面上大多为此机型。

10. 如根据风机的额定功率化分，一般可分为：

微型机：10 k W 以下

小型机：1 0 k W 至 1 0 0 k W

中型机：1 0 0 k W 至 1 0 0 0 k W

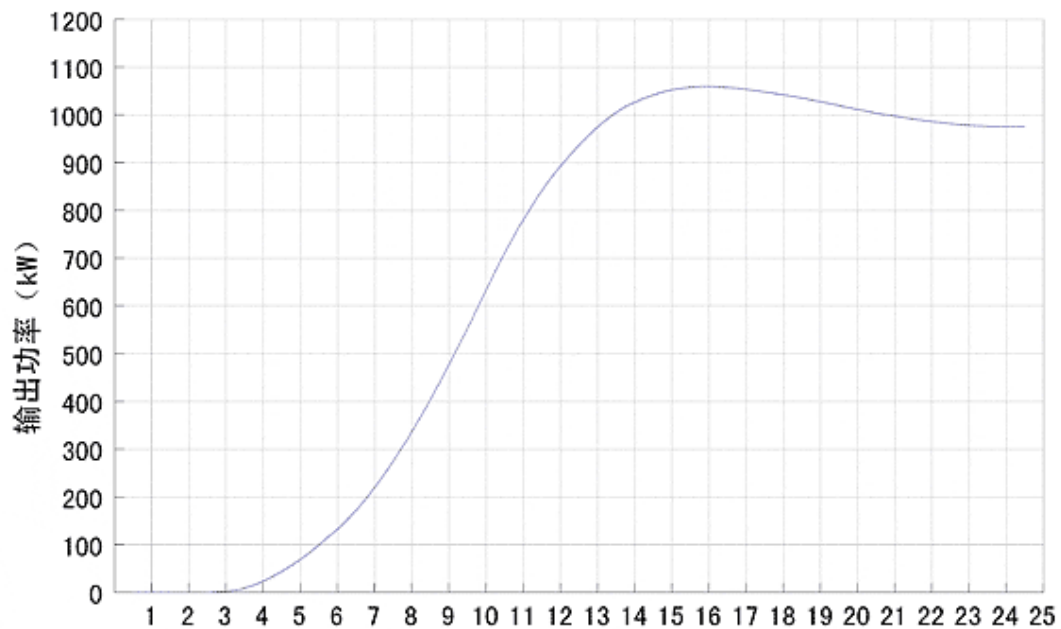
大型机：1 0 0 0 k W 以上 (MW 级风机)



风力发电机的功率曲线

在风速很低的时候，风电机风轮会保持不动。当到达切入风速时（通常每秒 3 到 4 米），风轮开始旋转并牵引发电机开始发电。随著风力越来越强，输出功率会增加。当风速达到额定风速时，风机会输出其额定功率。之后输出功率会保留大致不变。当风速进一步增加，达到切出风速的时候，风机会刹车，不再输出功率，为免受损。

风力发电机的性能可以用功率曲线来表达。功率曲线是用作显示在不同风速下（切入风速到切出风速）风机的输出功率。为特定地点选取合适的风力发电机，一般方法是采用风机的功率曲线和该地点的风力资料以进行产电量估算。

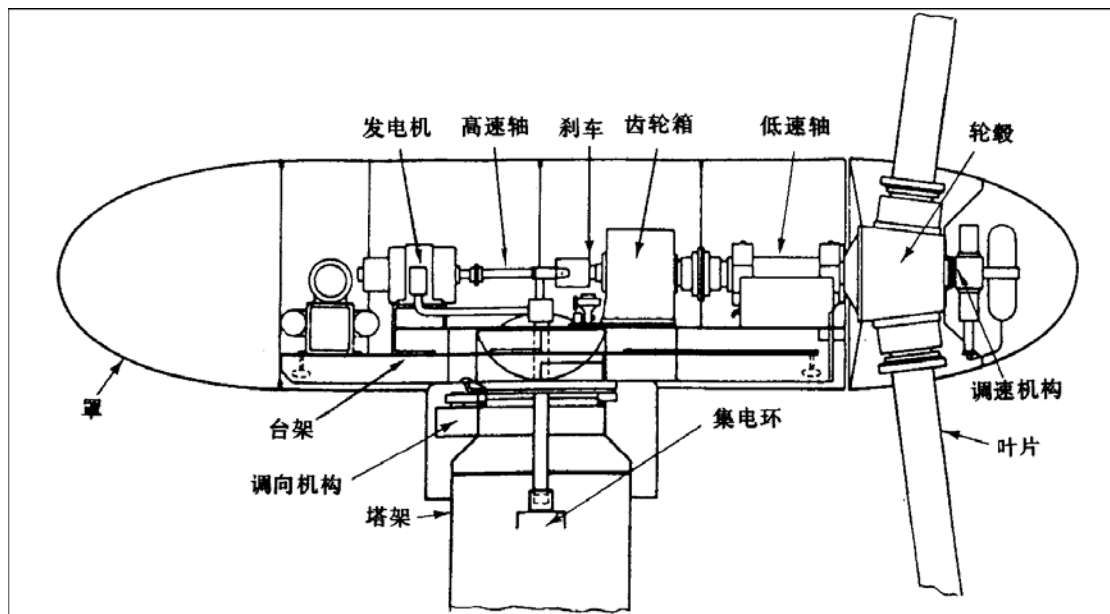


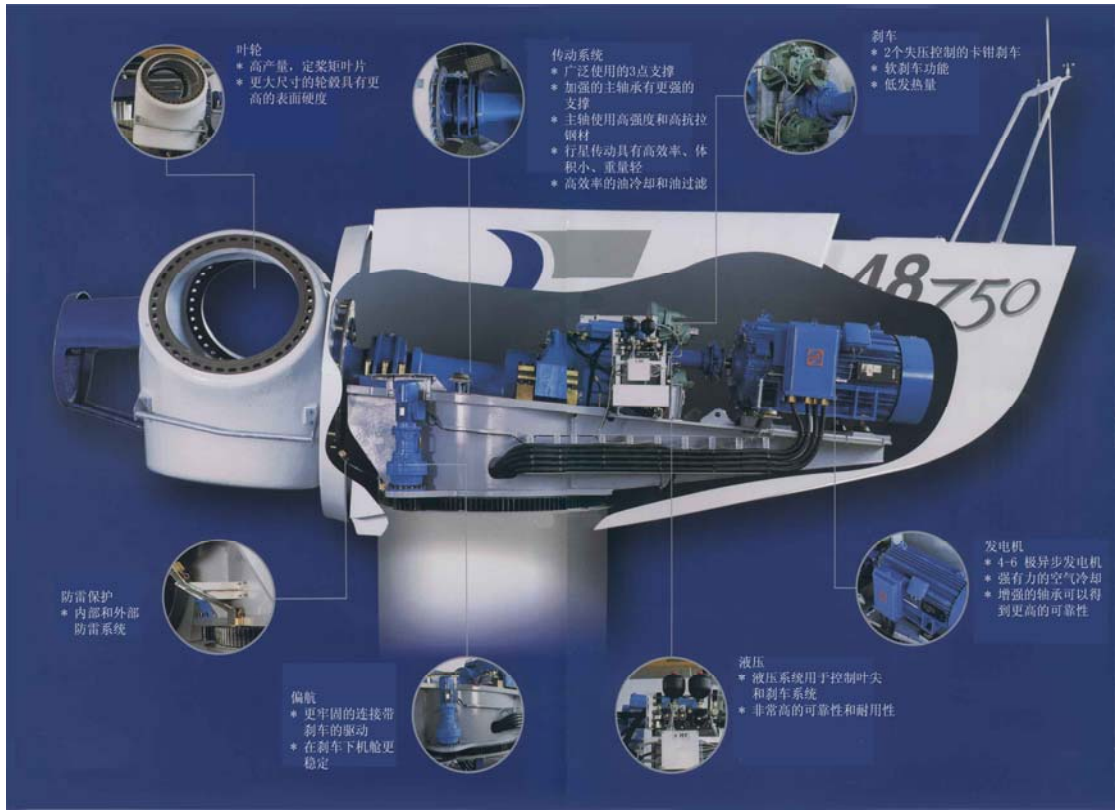
什么是风力发电机的额定输出功率

风力发电机的额定输出功率是配合特定的额定风速设而定的。由于能量与风速的立方成正比，因此，风力发电机的功率会随风速变化会很大。

同样构造和风轮直径的风电机可以配以不同大小的发电机。因此两座同样构造和风轮直径的风电机可能有相当不同的额定输出功率值，这取决于它的设计是配合强风地带（配较大型发电机）或弱风地带（配较小型发电机）。

典型风力发电机各部件介绍



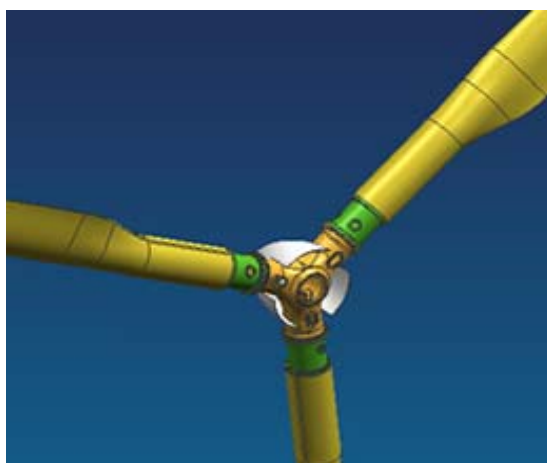


我们以目前使用最为广泛的水平轴风力发电机为例关于其结构作一介绍,它主要由叶轮,调速或限速装置,偏航系统,传动机构,发电机系统,塔架等组成:

叶轮:



风力机区别于其他机械的最主要特征就是叶轮。叶轮一般由 2~3 个叶片和轮毂所组成，其功能是将风能转换为机械能。除小型风力机的叶片部分采用木质材料外，中、大型风力机的叶片都采用玻璃纤维或高强度复合材料制成。风力机叶片都要装在轮毂上。轮毂是叶轮的枢纽，也是叶片根部与主轴的连接件。所有从叶片传来的力，都通过轮毂传递到传动系统，再传到风力机驱动的对象。同时轮毂也是控制叶片桨距(使叶片作俯仰转动)的所在。轮毂的作用是连接叶片和低速轴，要求能承受大的，复杂的载荷。中小型风机常采用刚性连接，兆瓦级风力机常采用跷跷板连接方式。



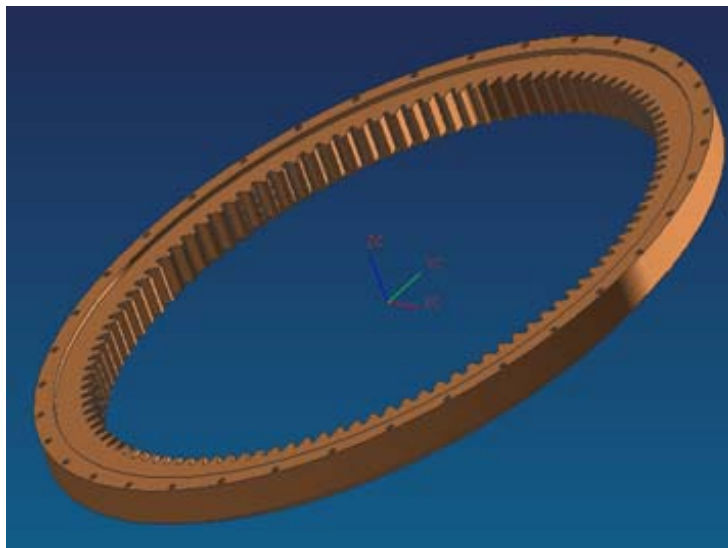
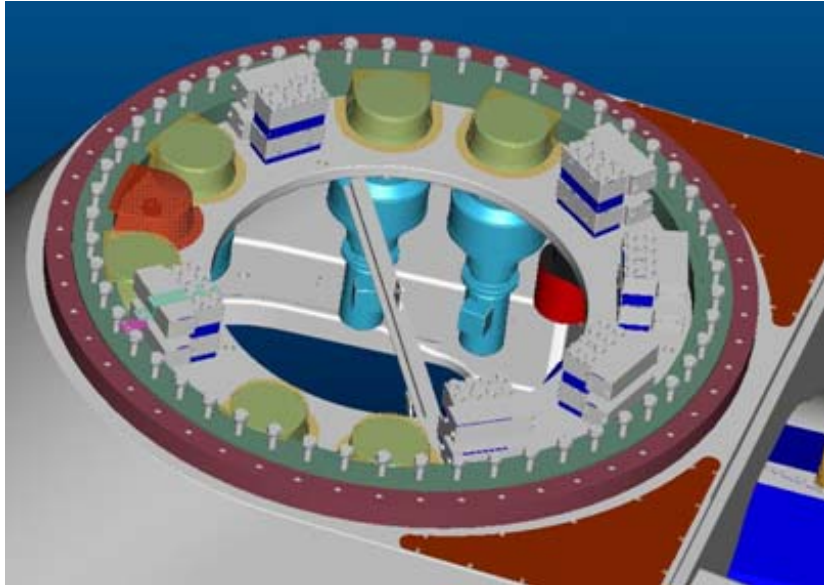
调速或限速装置：

在很多情况下，要求风力机不论风速如何变化转速总保持恒定或不超过某一限定值，为此目的而采用了调速或限速装置。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：一类是使叶轮偏离主风向，另一类是利用气动阻力，第三类是改变叶片的桨距角。

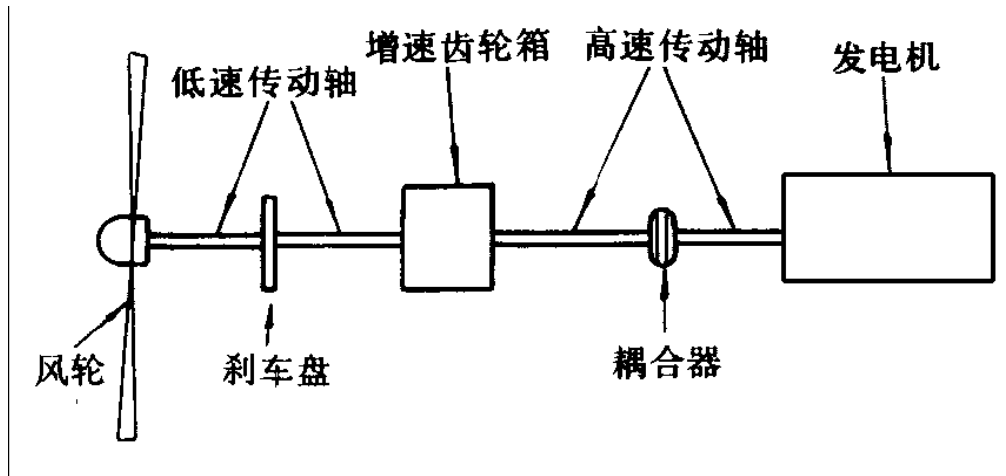
偏航系统：

为了让叶轮能自然地对准风向，通常风机都会采用调向装置，对大型风力发电机组而言，一般采用的是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。

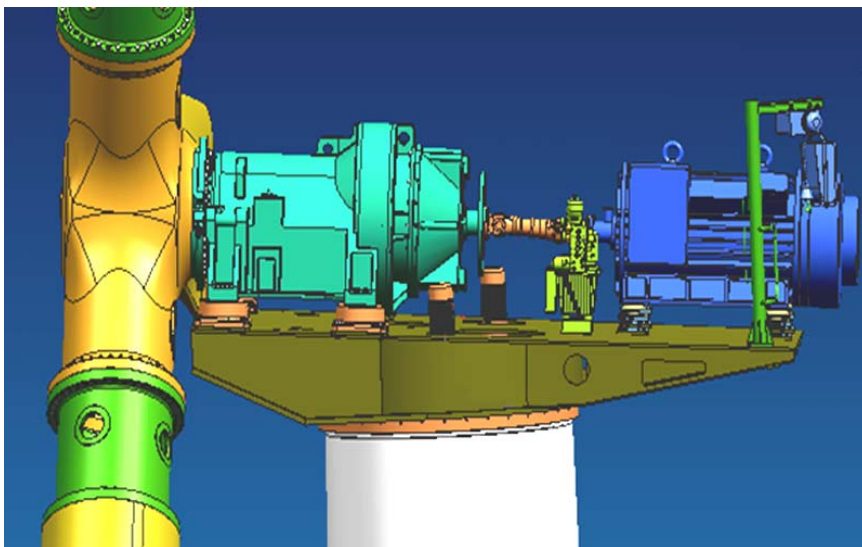




传动系统：



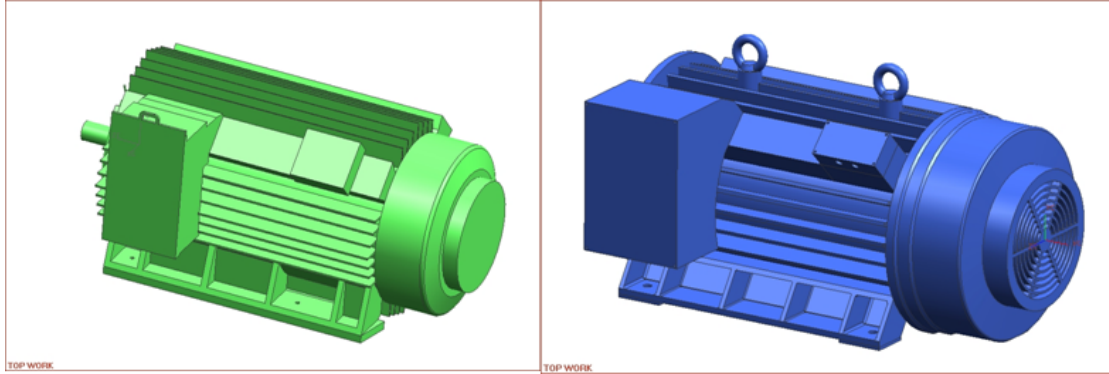
风机的传动系统一般包括低速轴、高速轴、齿轮箱、联轴节和制动器等。但不是每一种风机都必须具备所有这些环节。有些风机的轮毂直接连接到齿轮箱上，不需要低速传动轴。也有一些风机设计成无齿轮箱的，叶轮直接连接到发电机。



叶轮叶片产生的机械能由机舱里的传动系统传递给发电机，它包括一个齿轮箱、离合器和一个能使风力机在停止运行时的紧急情况下复位的刹车系统。齿轮箱用于增加叶轮转速，从20~50转/分到1000~1500转/分，后者是驱动大多数发电机所需的转速。齿轮箱可以是一个简单的平行轴齿轮箱，其中输出轴是不同轴的，或者它也可以是较昂贵的一种，允许输入、输出轴共线，使结构更紧凑。传动系统要按输出功率和最大动态扭矩载荷来设计。由于叶轮功率输出有波动，一些设计者试图通过增加机械适应性和缓冲驱动来控制动态载荷，这对大

型的风力发电机来说是非常重要的，因其动态载荷很大，而且感应发电机的缓冲余地比小型风力机的小。

发电机系统：



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。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，即同步发电机和鼠笼型感应发电机。变速恒频发电机系统是20世纪70年代中期以后逐渐发展起来的一种新型风力发电系统，其主要优点在于叶轮以变速运行，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佳化的最好方法之一，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。

（恒速）同步发电机：

（恒速）同步发电机的优先是励磁系统可控制发电机的电压和无功功率，发电机效率高。同步电机要通过同步设备的整步操作达到准同步并网（并网困难），由于风速变化大，以及同步发电机要求转速恒定，风力机必需装有良好的变桨距调节机构。

（恒速）异步发电机：

异步发电机结构简单，坚固，造价低，异步发电机投入系统运行时，由于是靠转差率来调节负荷，因此对机组的调节精度要求不高，不需要同步设备的整步操作，只要转速接近同步速时就可并网，且并网后不会产生振荡和失步。缺点是并网时冲击电流幅值大，不能产生无功功率。

塔架：

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。水平轴风力发电机的塔架主要分为管柱型和桁架型两类，管柱型塔架可从最简单的木杆，一直到大型钢管和混凝土管柱。小型风力机塔杆为了增加抗弯矩的能力，可以用拉线来加强。中、大型塔杆为了运输方便，可以将钢管分成几段。一般圆柱形塔架对风的阻力较小，特别是对于下风向风力机，产生紊流的影响要比桁架式塔架小。桁架式塔架常用于中小型风力机上，其优点是造价不高，运输也方便。但这种塔架会使下风向风力机的叶片产生很大的紊流。





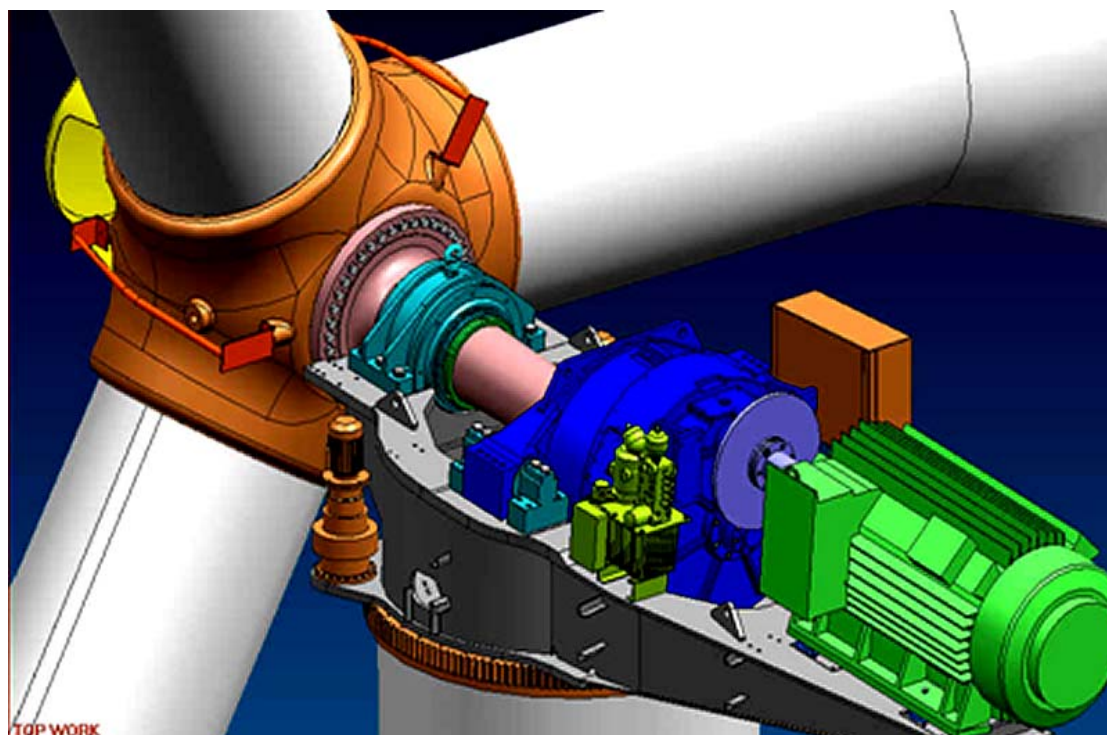
风力发电机的工作原理

现代风力发电机采用空气动力学原理，就像飞机的机翼一样。风并非“推”动叶轮叶片，而是吹过叶片形成叶片正反面的压差，这种压差会产生升力，令叶轮旋转并不断横切风流。风力发电机的叶轮并不能提取风的所有功率。根据 Betz 定律，理论上风电机能够提取的最大功率，是风的功率的 59.6%。大多数风电机只能提取风的功率的 40% 或者更少。

风力发电机主要包含三部分：叶轮、机舱和塔架。大型与电网接驳的风力发电机的最常见的结构，是横轴式三叶片叶轮，并安装在直立管状塔杆上。叶轮叶片由复合材料制造。不像小型风力发电机，大型风电机的叶轮转动相当慢。比较简单的风力发电机是采用固定速度的。通常采用两个不同的速度—在弱风下用低速和在强风下用高速。这些定速风电机的感应式异步发电机能够直接发产生电网频率的交流电。比较新型的设计一般是可变速的（比如 Vestas 公司的 V52-850 千瓦风电机转速为每分钟 14 转到每分钟 31.4 转）。利用可变速操作，叶轮的空气动力效率可以得到改善，从而提取更多的能量，而且在弱风情况下噪音更低。因此，变速的风电机设计比起定速风电机，越来越受欢迎。

机舱上安装的感测器探测风向，透过转向机械装置令机舱和叶轮自动转向，面向来风。叶轮的旋转运动通过齿轮变速箱传送到机舱内的发电机（如果没有齿轮变速箱则直接传送到发电

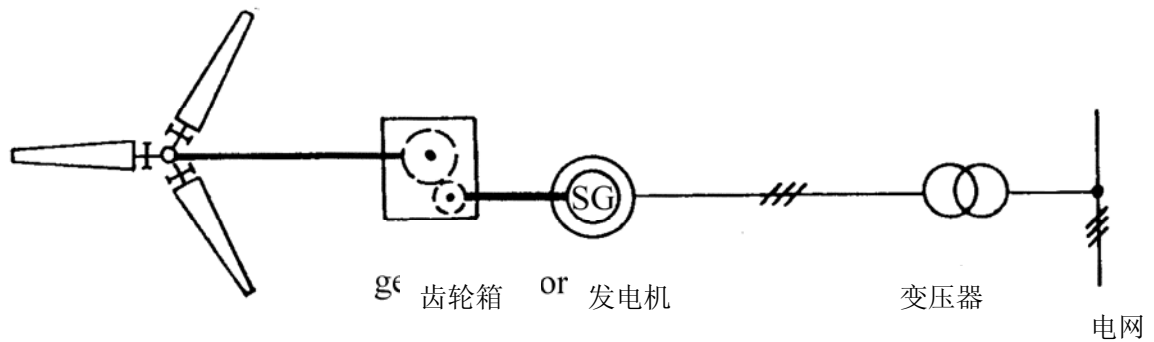
机)。在风电工业中，配有变速箱的风力发电机是很普遍的。不过，为风电机而设计的多极直接驱动式发电机，也有显著的发展。设於塔底的变压器（或者有些设於机舱内）可提升发电机的电压到配电网电压（香港的情况为 11 千伏）。



所有风力发电机的功率输出是随著风力而变的。强风下最常见的两种限制功率输出的方法（从而限制叶轮所承受压力）是失速调节和斜角调节。使用失速调节的风电机，超过额定风速的强风会导致通过叶片的气流产生扰流，令叶轮失速。当风力过强时，叶片尾部制动装置会动作，令叶轮刹车。使用斜角调节的风电机，每片叶片能够以纵向为轴而旋转，叶片角度随著风速不同而转变，从而改变叶轮的空气动力性能。当风力过强时，叶片转动至迎气边缘面向来风，从而令叶轮刹车。

叶片中嵌入了避雷条，当叶片遭到雷击时，可将闪电中的电流引导到地下去。

我国现阶段主要风力发电机型的发电过程



风力发电机工作过程简图

目前，在我国得到广泛使用的风力发电机主要是水平轴式风力发电机，水平轴式风力发电机是目前技术最成熟、生产量最多的一种形式。它由叶轮、增速齿轮箱、发电机、偏航装置、控制系统、塔架等部件所组成。从大的结构划分来说，风力发电机可由叶轮和发电机两部分构成，空气流动的动能作用在叶轮上，将动能转换成机械能，从而推动叶轮旋转。这样就通过叶轮将风能转换为机械能，低速转动的叶轮通过传动系统由增速齿轮箱增速，将动力传递给发电机，然后由高速转动的机械能经过电机转变成电能。在这里齿轮箱可以将很低的叶轮转速（600 千瓦的风机通常为 27 转/分）变为很高的发电机转速（通常为 1500 转/分）。同时也使得发电机易于控制，实现稳定的频率和电压输出。

整个机舱由高大的塔架举起，由于风向经常变化，为了有效地利用风能，还安装有迎风装置，它根据风向传感器测得的风向信号，由控制器控制偏航电机，驱动与塔架上大齿轮啮合的小齿轮转动，使机舱始终对风（注：一般 600 千瓦的风机机舱总重 20 多吨），所以偏航系统的作用就是可以使叶轮扫掠面积总是垂直于主风向。

直驱式风力发电机组的特点

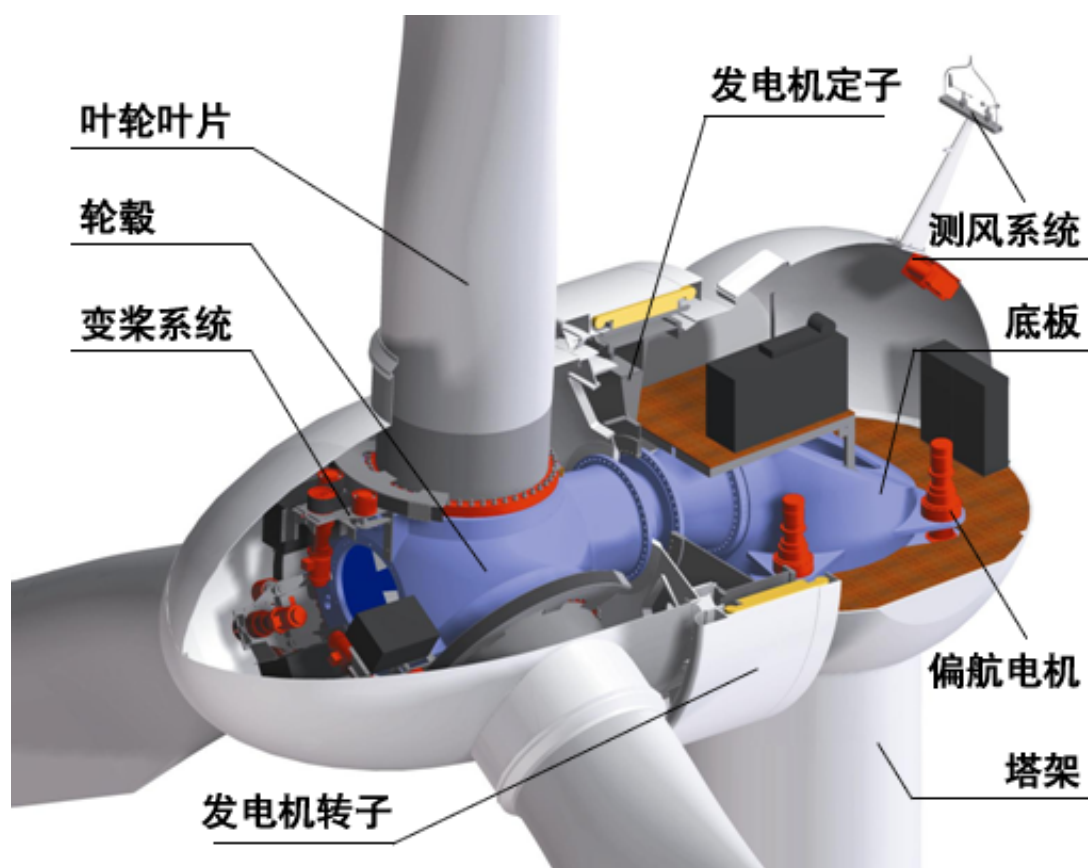
直驱式风力发电机组在我国是一种新型的产品，但在国外已经发展了很长时间。目前我国在直驱式风机中系统的研究相对传统机型较少，但开发直驱式风力发电机组也是我国日后风机制造的趋势之一。

直驱永磁风力发电机取消了沉重的增速齿轮箱，发电机轴直接连接到叶轮轴上，转子的转速随风速而改变，其交流电的频率也随之变化，经过置于地面的大功率电力电子变换器，

将频率不定的交流电整流成直流电，再逆变成与电网同频率的交流电输出。另外一些无齿轮箱直驱风力发电机，沿用低速多极永磁发电机，并使用一台全功率变频器将频率变化的风电送入电网。直接驱动式风力发电机组由于没有齿轮箱，零部件数量相对传统风电机组要少得多。

我国主要的直驱型风力发电机组采用水平轴、三叶片、上风向、变桨距调节、直接驱动、永磁同步发电机并网的总体设计方案，相对于传统的异步发电机组其优点如下：

- (1) 由于传动系统部件的减少，提高了风力发电机组的可靠性和可利用率；
- (2) 永磁发电技术及变速恒频技术的采用提高了风电机组的效率；
- (3) 机械传动部件的减少降低了风力发电机组的噪音；
- (4) 可靠性的提高降低了风力发电机组的运行维护成本；
- (5) 机械传动部件的减少降低了机械损失，提高了整机效率；
- (6) 利用变速恒频技术，可以进行无功补偿；
- (7) 由于减少了部件数量，使整机的生产周期大大缩短。



什么是电网？

电网指的是由变电站、电缆、和架空天线组成的输配电网，其目的是为了从发电厂传输和配送电力到所服务地区的电力用户。



风机并网需要考虑哪些方面？

1. 电力质量 - 无功功率，开关操作时的电压波动（切入开机、切出停机），运行时的电压波动（例如，风速变化）。
2. 低电压过渡 - 电网可能会有瞬间电压下降的现象。在某些国家，低电压过渡要求指定了在某些电压下降值的情况下，风力发电机不可以脱离电网。
3. 电网故障时，风力发电机送出的故障电流。

并网运行模式的规模划分

风能是一种波动不稳定的能源，如果没有储能装置或其他发电装置互补，风力发电装置本身难以提供连续稳定的电能输出。而大型风机与电力网并网运行则可解决此问题。

对应于风力发电机组的规模，通常有三种运行方式：

- A. 大、中型风力发电机组(100 千瓦以上)与电力网并网运行；
- B. 小型风力发电机(10 千瓦到 100 千瓦)与柴油发电机或其他发电装置并联互补运行；

C. 微型风力发电机(10 千瓦以下)主要采用直流发电系统并配合蓄电池储能装置独立运行。所以，与就近的电力网并网，是风电场最常见的运行方式选择。

风力发电机的并网有什么好处？

风力发电其固有的趋势规律很适合并入电网系统，为电力网负载能力曲线起到填谷补偿作用：

1. 适合每日电力消耗的规律：典型的天气模式是晚上风小，白天风比较大；
2. 适合季节性电力消耗的规律：夏天的风通常比冬天的风弱；而电力消耗正好也是一般冬天比夏天来得大。（在寒冷的冬季，电力加热和风能结合是一种理想的方式，因为房屋寒冷降温的状况，是随风的速度变大而严重，而风机电能的产生正好也随风速变大而增加。）

什么是“防孤岛功能”

风场发电系统并网时都应该备有防孤岛功能，当附近一带电网失去主要电力供应时，自动把可再生能源发电系统和电网脱离。

在直接并网的情况下，防孤岛功能的作用，主要是避免风场发电系统继续向已经失去主要电力供应的电网部分提供电力，形成一个脱离主电网的「岛屿」。

在间接并网的情况下，防孤岛功能的作用，主要是避免风场发电系统继续向已经失去主要电力供应的场地配电系统提供电力。亦防止风场发电系统向电网逆向施加电压。防孤岛功能的动作时间要求比较短，为了避免影响到电网里断路器自动开关或者自动重合的动作。

风力发电机并网运行的模式及其特点（根据发电机划分）

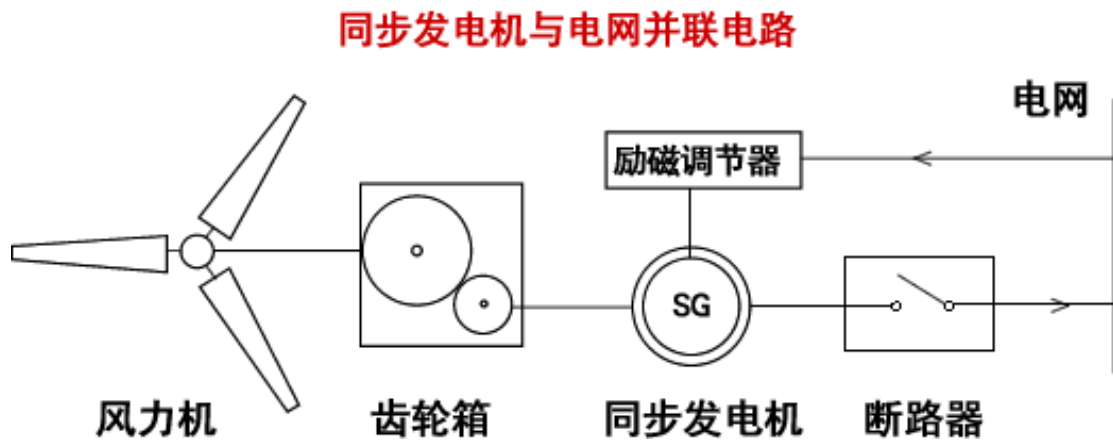
恒速恒频的同步发电机并网运行模式

并网条件：需满足风力发电机的端电压等于电网的电压；风力发电机的频率等于电网的频率；

风力发电机的相序与电网的相序相同才可并网。

运行特点：

1. 并网过程通常可以使用计算机自动检测，操作。对风力发电机的调速装置要求较高，成本较贵。
2. 并网时能使瞬态电流减至最小，从而让风力发电机组和电网受到的电流冲击也最小。
3. 当风力发电机组功率保持不变时，通过调节励磁电流，不仅能向电网发出有功功率，而且能向电网发出无功功率，有助于提高电网的供电能力。
4. 对并网时刻控制要求精确，若控制不当，则有可能产生较大的冲击电流，以致并网失败。

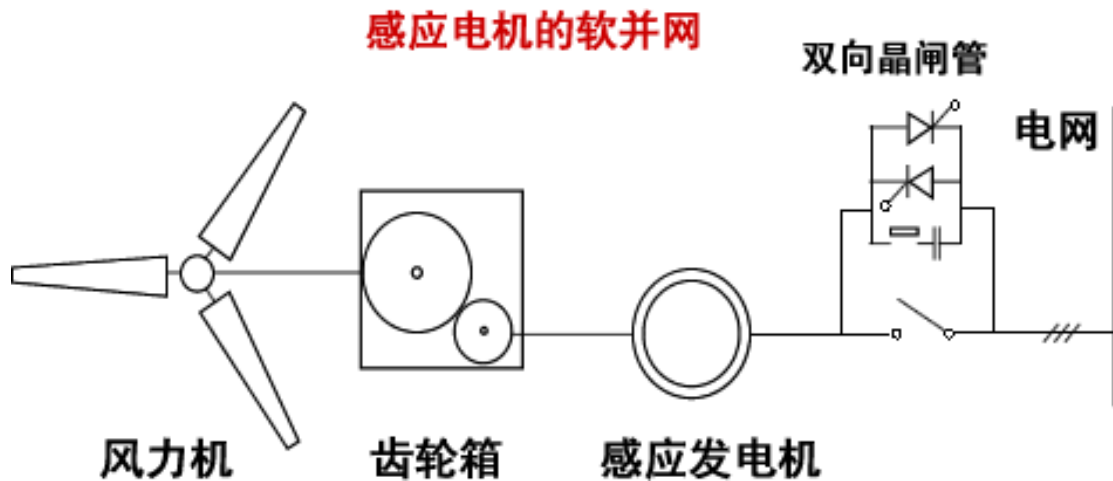


恒速恒频的感应发电机并网运行

并网条件：感应发电机的相序必须和电网相序相同，并网时发电机转速应尽可能接近电网同步转速。（这样冲击电流才能快速衰减）

运行特点：

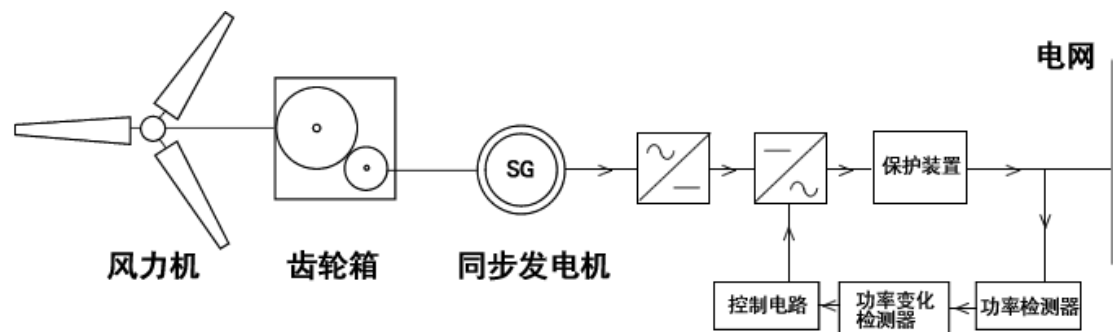
1. 并网过程比较简单，感应发电机并网时自身不产生电压，但是合闸瞬间会流过额定电流值 5~6 倍的冲击电流，一般零点几秒后才转入稳态。
2. 目前在较大型的风力发电机组中，常采用的是双向晶闸管软并网。
3. 通常需要采用电容器进行适当的无功补偿。



变速恒频的同步发电机交—直—交系统并网运行

运行特点：

1. 可以使风力发电机组在很大风速范围内按最佳效率运行,可实现最大功率输出控制。
2. 因为采用频率变换装置进行输出控制,并网时不会对系统造成电流冲击;
3. 同步发电机的工作频率与电网频率是彼此独立的,叶轮及发电机的转速可以变化,不会发生同步发电机的失步问题;
4. 由于频率变换装置采用静态自励式逆变器,会产生高次谐波电流流向电网;



变速恒频的磁场调制发电机系统并网运行

运行特点：可以使风力发电机组在很大风速范围内按最佳效率运行,可实现最大功率输出控制。 输出电压的频率和相位取决于励磁电流的频率和相位,而与发电机轴的转速无关。

变速恒频的双馈发电机系统的并网运行

运行特点:

1. 可以使风力发电机组在很大风速范围内按最佳效率运行, 可实现最大功率输出控制。
2. 发电机定子三相绕组直接与电网相联, 转子绕组经交/交循环变流器联入电网。

风力发电机接近同步转速时, 由循环变流器对电压、频率和相位进行控制, 并网时基本上无电流冲击。

3. 风力发电机的转速可随风速及负荷的变化及时作出相应的调整, 使风力发电机组以最佳叶尖速比运行, 产生最大的电能输出。
4. 通过对励磁电流的频率、幅值和相位的调整。可保证风力发电机在变速运行的情况下发出恒定频率的电力, 调节励磁时不仅调节无功功率, 也可以调节有功功率。

影响风电项目投资收益的几个因素

测风:

在项目开发实践中, 测风时间短, 测风点不具有代表性, 都可能造成业主错误地估计项目点的发电量, 造成经济汇报不能达到预期。

测风时间短: 由于风速通常以年为周期变化, 因此按照规定, 每个项目点的测风时间至少需要测一年。但在实践中, 在我们国家很多地区, 同一项目点的同一测风塔实际年与年之间的测得的风速还是有变化的, 很多地方年与年之间的风速变化甚至超过了 1 米/秒。而 1 米/秒的风速差异造成的一台 600 千瓦的风电机组一年发电量差异达到 20 万千瓦小时。消除这种差异的方式是必须利用其他气象测站的长期数据做相关性分析, 得到常年平均风速。但在实践中, 由于风电场区域往往由于地处偏僻, 周围没有气象站。因此很难得到常年平均风速。而且一些项目往往在没有测满一年的情况下, 仓卒决定上马。这样后期的经济效益更加难以保证。

测风点不具有代表性: 一般要求, 风电场的测风应该在位于风电场中央地势开阔, 比较具有代表性的地方设立测风塔。但是由于一些地形比较复杂的地方, 比如山地, 为了能让测风减少周围地形和障碍物的干扰, 往往会把测风塔设立在山顶上。而实际在排布风电机组时却不可能把风机都排布在山顶上, 这个点测得的风速相对于全场其他位置的风速偏大, 因此直接用这个风速代表整个风电场风速来估算发电量, 显然偏离了实际。



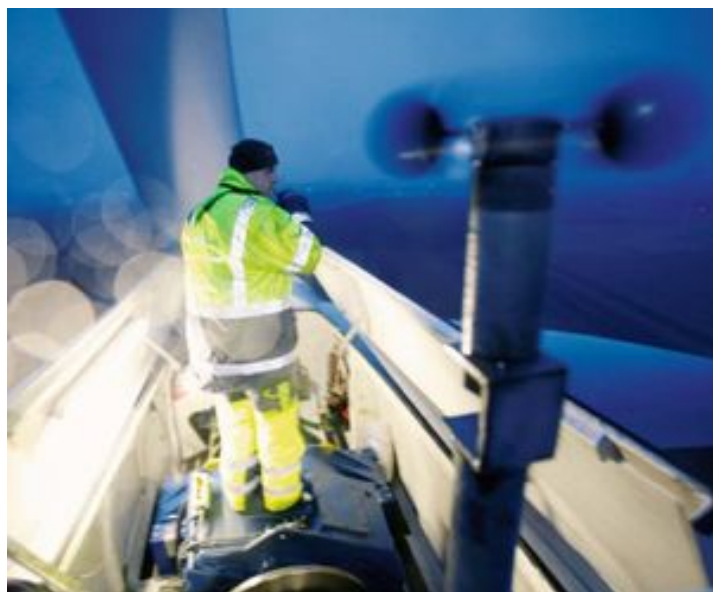
设备选型因素：

通常我们在设备选型中需要考虑很多因素，如设备的价格，技术先进性等等。在实践中，往往由于对风电设备不熟悉，选择了一些不合适的设备，给业主造成了很大的损失。在我国的风电项目中，不但出现了对国外设备厂家不了解，采购回来的风机设备不能用的情况，也出现了合同执行过程中由于设备厂家破产致使合同无法执行的问题。给投资方造成了巨大损失。因此在设备选择过程中，应对设备供应商进行充分考察，选择优秀讲信誉的供应商，同时选择成熟可靠的设备，这样才能在根本上解决投资商的稳定回报。

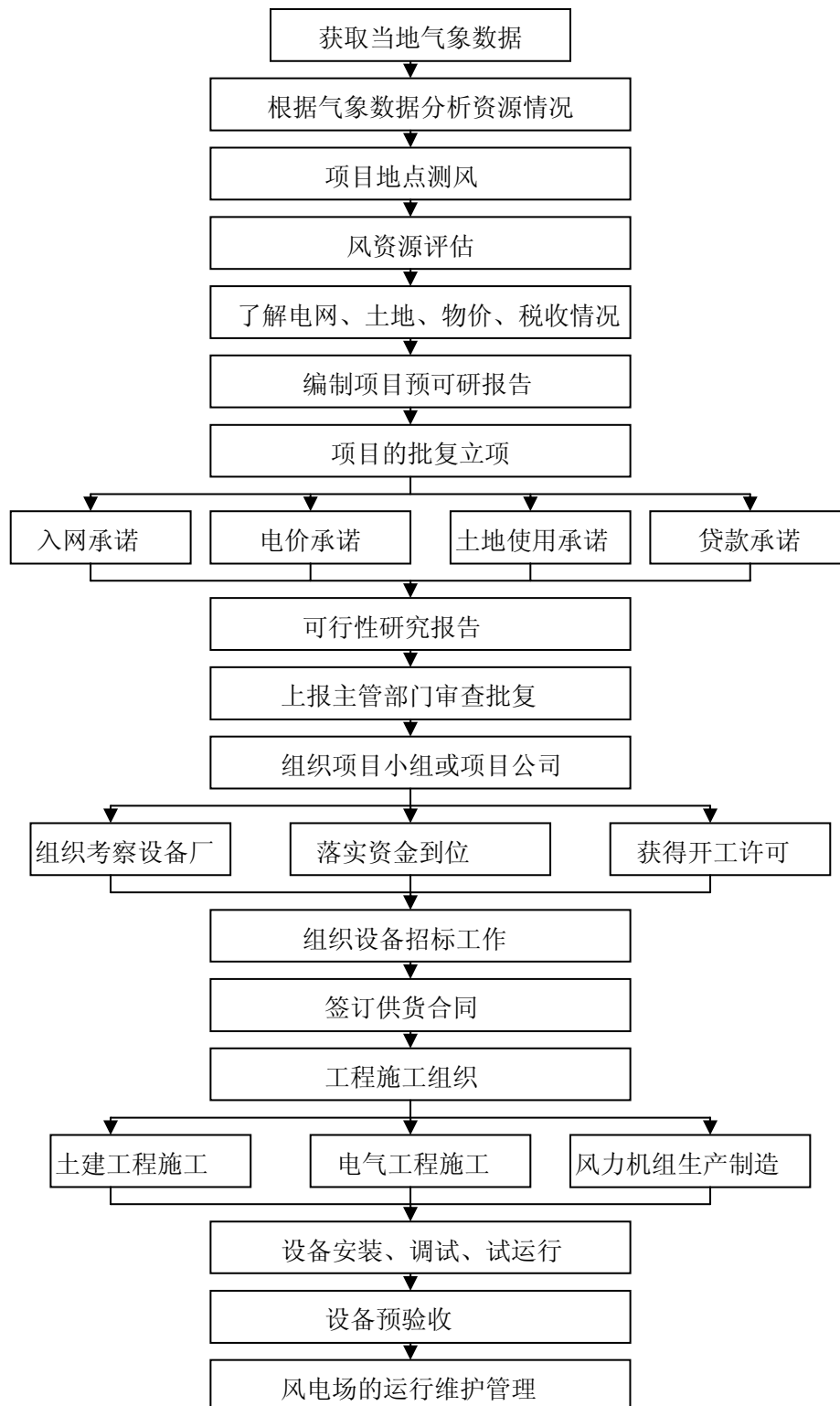
运行维护：

风电项目的投资回收期比价长，往往都在7年以上，很多项目回收期都超过10年，因此在此期间保证设备稳定运行至关重要，除了选择好的设备，运行维护水平也很重要。风电机组长期在恶劣环境中运行，必须进行很好的保养，才能保证设备长期稳定。风电设备涉及的零部件众多，受风机制造商产品更新换代的影响，大多数整机在若干年后都已经停产，其中的

很多零部件都很难继续采购，需要设备运行方去改进更替，以保证设备长期正常运行。如果没有好的运行队伍，必然造成设备长期的运行可靠性，从而影响业主的投资收益。因此风电厂在建设的同时，建立非常专业的运行维护队伍也至关重要。目前在欧洲非常流行的请专业公司代维不失为一种抗风险的好形式，相信这种方式也将在我国得以推广，目前国内已经有一些比较早期进入风电行业的公司开始提供这种服务，取得很好的效果。



风电项目开发流程



风电项目的投资构成是什么？

风电项目的投资主要是由以下部分构成：

风力发电机组

土建工程；

电气工程；

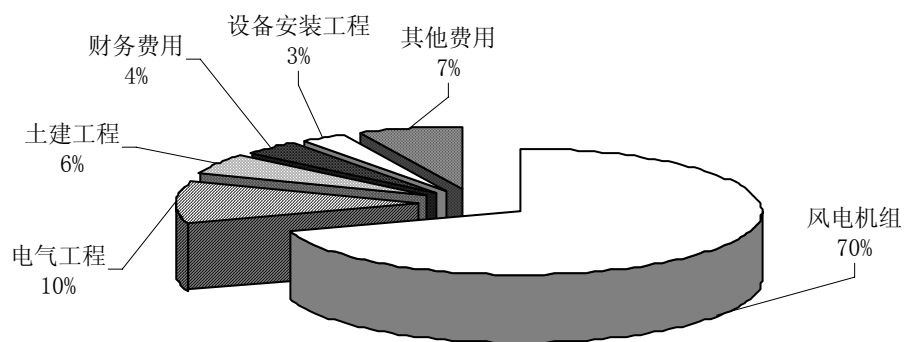
安装工程；

财务成本；

其他（含征地、设计勘测等）

以上各项内容所占比例如下图：

风电项目投资构成比例

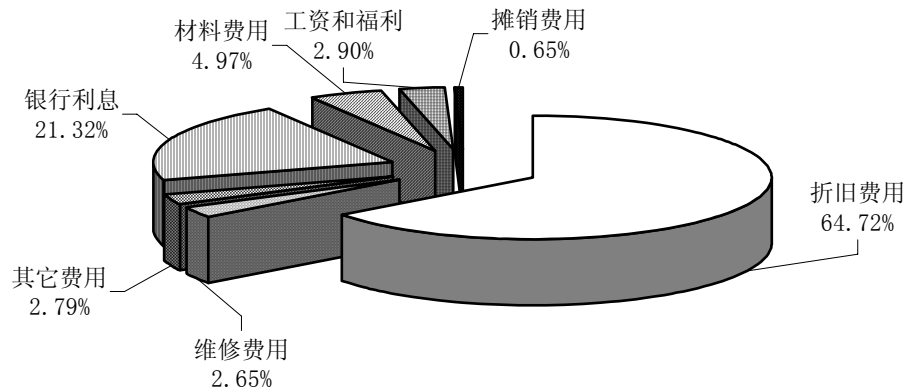


从上图可以看出，风力发电机组对总投资的影响非常大，开发商应予以充分重视。

风力发电项目的度电成本

风力发电项目的发电成本主要包括折旧费用、财务费用、运行维护费用等。上述各项费用所占比例如下图。

风力发电项目电度成本构成比例



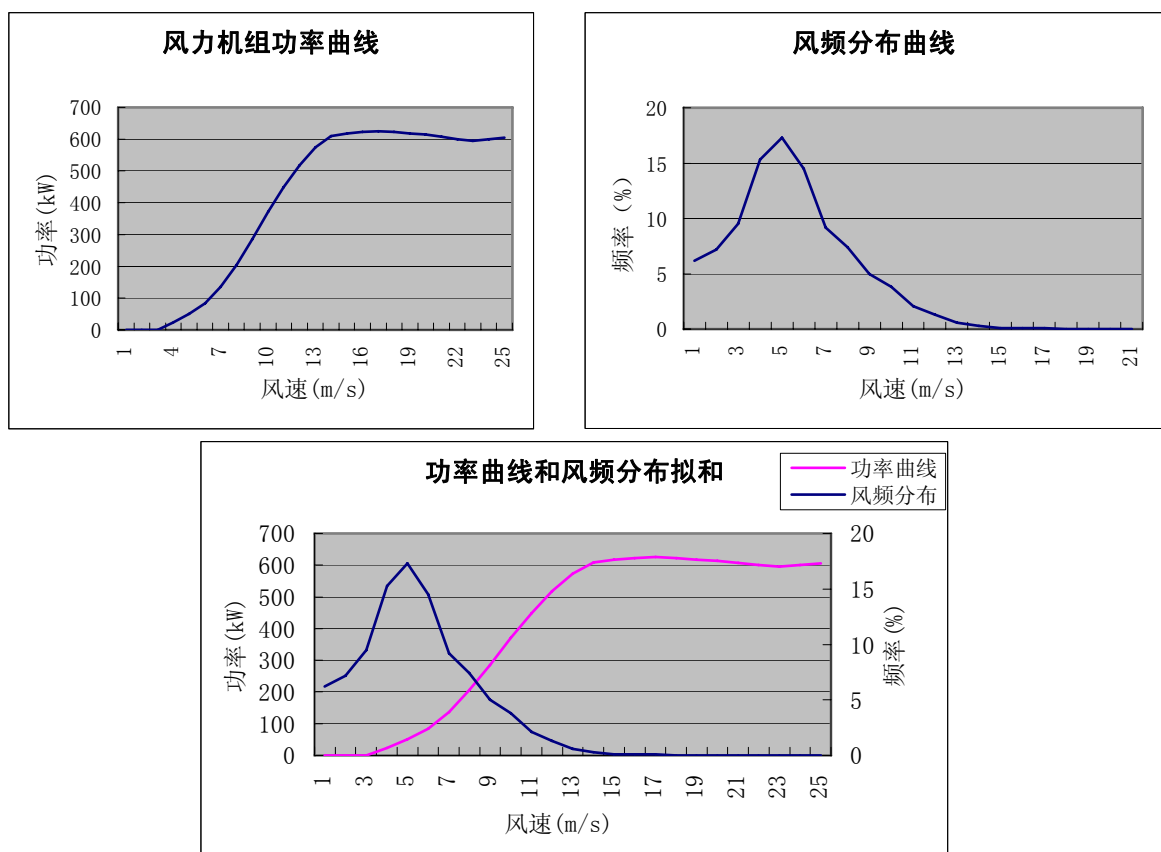
从上图中可以看出：设备折旧费在发电成本中占的比例最大，而折旧费主要来源于总投资中的设备购置和安装。因此对于风力发电这种一次性投资较大的项目，应特别注意控制投资总额。

功率曲线与发电量

功率曲线反映了风力发电机组的功率特性，是衡量机组风能转换能力的指标之一，设备验收时功率曲线往往是被重点考核的对象。其实，评价一种机型功率曲线的好坏不应单纯地只关注那些图表中所给定的“风速—功率”对应值，还应根据现场情况进行具体分析：

风力机组的功率特性关键取决于叶片的气动特性和机组的控制策略。众所周知，叶片的气动设计实际上是一个优化的结果，受其他条件限制，无法达到所有风速工况下效率均最好的目标。而机组实际运行的外部条件可能与设计存在较大差异，因此需要采取技术措施以实现发电量最大。

一般来讲，失速型机组应根据风频分布调整合适的安装角，使风频最高的风速段出力最好。而变桨距机组则应根据湍流等风速特性优化控制策略。因此为了追求发电量优化的目标，实际的功率曲线与理论值会存在一个合理的偏差。



风资源状况的评价指标

定义：

年平均风速：以测量记录的风速计算出的某一高度的年度平均风速。

风功率密度：气流垂直通过单位面积的风的能量，单位：W/m²

年有效风速小时：在一年之中风速在 3m/s-20m/s 之间出现的累积时间。

年有效风能功率密度：根据年有效风速范围内采集到的数据计算出单位垂直面积的风的能量。

表 1：风功率密度等级表

风功率密度等级	10 米		50 米		应用于并网型风力发电
	风功率密度 (W/m ²)	年平均风速参考值 (m/s)	风功率密度 (W/m ²)	年平均风速参考值 (m/s)	
1	<100	4.4	<200	5.6	
2	100-150	5.1	200-300	6.4	
3	150-200	5.6	300-400	7.0	较好
4	200-250	6.0	400-500	7.5	好
5	250-300	6.4	500-600	8.0	很好
6	300-400	7.0	600-800	8.8	很好
7	400-1000	9.4	800-2000	11.9	很好

备注：

- 1) 表中数据，不同高度的年平均风速参考值按风切变指数为 1/7 推算。
- 2) 与风功率密度上限值对应的年平均风速参考值，按标准大气压，按瑞利风频分布进行推算。

表 2：风能区域等级划分表

指标	年有效风能功率密度 (W/m ²)	年有效风速小时 (3m/s-20m/s) (h)	年平均风速 (10 米高) (m/s)
风能丰富区	>200	>5000	>6

风能次丰富区	150-200	4000-5000	5.5 左右
风能可利用区	100-150	2000-4000	5
风能贫乏区	<100	<2000	<4.5

上述表 1 用于小区域内风能资源的评价，主要是指针对实际测风数据进行评估的指标。

表 2 用于大区域内风能资源的评价，针对还未安装测风塔利用气象站数据对一个地区风能资源进行评价时使用。