

风能的利用

- 2010年，中国成为最大风电国家新增容量18928MW；美国新增5115MW；印度2139MW；欧洲德、英、西各新增月1500MW
- 2009年，中国风电总装机25800MW、超过德国，但仍比美国少10000MW
- 《中国风力发展报告2010》预计：2020年中国风电2.3亿kW—13个三峡，4649亿kWh；
- “十二五”加快海上风电，预计2020年达3200万kW

风能利用的历史

- 公元前17世纪，巴比伦王国汉谟拉比计划—灌溉工程
- 公元前4世纪，梵语经典《政事论》引述了风力提水的发明
- 最早记录：公元前200年，利用风车研磨谷物（波斯）、垂直轴，通过水平支杆连接帆（通常5米长、9米高）
- 帆船
- 1105、1191年，法、英采用水平轴风车
- 风力提水：1850-1930年，近美国安装了600万台以上的水力泵机组
- 1890年，丹麦第一台风力发电机组；同期，美国俄亥俄州大型风电机组，17米长叶片，12kW，运行了20年。
- 蒸汽机导致风车数量剧减

风电价格

- 20世纪80年代开始，风力发电成本迅速下降，近年来降速为每年4%。2012年前后发电成本为4.5美分/度。

- 1990年来，风力发电发展迅速，1996年起连续年装机容量增速超过20%
- 2010年底，全球达19万9520兆瓦，发电量4099亿kWh，占总发电量1.92%

风电价格政策：

固定电价；资金补助；税收优惠；可再生能源配额（绿色可交易证书）；提供公共投资。

美国：
1978年《能源税法案》规定风电投资可抵扣所得税；80年代早期实行投资补贴，占总投资50-55%；1992年《能源政策法》实行电量补贴，《风电生产税减免法》增加生产抵税和生产补助；2005年增加消费税优惠，14个州实行可交易绿色认证。

现在，上网竞价；政府税收抵免0.02美元/kWh，风电免税额1.5美分/kWh。价格水平3.59欧分/kWh。

德国：
 1991年《可再生能源购电法》强制公用电力公司按零售价的90%购买可再生能源电力；2000年《可再生能源法》对可再生能源企业提供补贴，固定电价以发电成本为基础；政府提供税收和贷款优惠；每2年修订上网电价。
 现在，新建风电场前5年8.19欧分/kWh，后20年5.17欧分/kWh；近海项目前9年9.10欧分/kWh，后为6.19欧分/kWh。

丹麦：
 1979年实行30%投资补贴；1984年确定电网按零售价85%收购风电；1992年《风车法》按照电力销售价85%为基本电价，加上碳税返还0.1丹麦盾/kWh，并对私有风电增加0.17丹麦盾/kWh；1998年建立绿色认证交易市场。
 现在，电量补助0.0134欧元/kWh，税收刺激：3.61欧分/kWh + 二氧化碳减排1.2欧分/kWh，第1个12000小时满负荷运行期支付8欧分/kWh。风电占本国总电量25%。



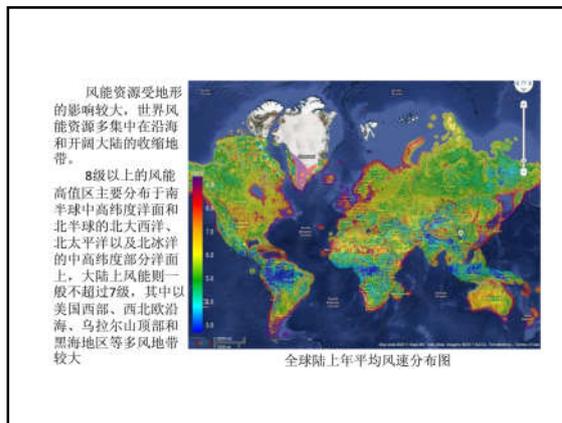
中国：
 1998年前，示范工程，电价以成本核算为主体。
 1998-2003年，风电价格不再由国家确定，实行区域电价，各地价格主管部分自行确定，报中央备案；1999年全国电力过剩，电力市场向自由竞争转变。(1)对大中型风电项目2%财政贴息，对使用国产风电设备项目给予贴息贷款和延长还贷期限；(2)电网公司必须全部购买；(3)在贷款期内电价可考虑还本付息和利润因素来确定，高出电网平均电价部分由全网分担。其中，利用国外设备的项目，投资利润率不得超过贷款利率+3%；利用国产的项目，投资利润率不得超过贷款利率+5%。后来1999年底，有规定风电合理利润和内部收益率不得超过10%。
 这一时期，各地风电价格严重不平衡，低的接近火电，高的超过1元/kWh。
 2003年，特许权招标。大规模风电项目以中标电价为该项目风电价格，承诺按中标价格购买中标电量的风电。
 2005年，对非特许权招标项目风电价格采用固定电价，包括以燃煤发电上网平均价格为参考的标杆电价+补贴0.25元/kWh。



2008年，上调可再生附加，每kWh补贴由0.001元上升为0.002元。

2007年12月1日，广东率先实行风电标杆价，0.689元/kWh。2009年7月发改委规定实行固定区域标杆电价。

区域划分	区域风电价格	区域范围
I类资源区	0.51元/千瓦时	内蒙古自治区除赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市以外其他地区；新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市、伊犁哈萨克族自治州、昌吉回族自治州、克拉玛依市、石河子市
II类资源区	0.54元/千瓦时	河北省张家口市、承德市；内蒙古自治区赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市；甘肃省张掖市、嘉峪关市、酒泉市
III类资源区	0.58元/千瓦时	吉林省白城市、松原市；黑龙江省鸡西市、双鸭山市、七台河市、绥化市、伊春市，大兴安岭地区；甘肃省除张掖市、嘉峪关市、酒泉市以外其他地区；新疆维吾尔自治区除乌鲁木齐市、伊犁哈萨克族自治州、昌吉回族自治州、克拉玛依市、石河子市以外其他地区；宁夏回族自治区
IV类资源区	0.61元/千瓦时	I类、II类、III类资源区以外的其他地区



我国风能分布

类别	年有效风能密度 (W/m ²)	风速超3m/s的年小时数	主要地区	所占比例
丰富区	>200	>5000	东南沿海、台湾岛屿、南海群岛、海南南部、山东辽东沿海、内蒙北部、松花江下游	8%
较丰富区	150~200	4000~5000	东南沿海离岸20~50km、海南东部、渤海沿海、台湾东部、东北平原、内蒙南部、河西走廊、青藏高原	18%
可利用区	50~150	2000~4000	福建沿海离岸50~100km、广东沿海、广西沿海、大小兴安岭山地、辽河流域、苏北、黄河长江中下游、湖南湖北、江西、西北五省部分、青藏东部和南部、川西、云贵北部	50%
贫乏区	<50	<2000	四川、甘南、陕西、鄂西、湘西、贵州、南岭山地、云贵南部、雅鲁藏布江河谷、昌都地区、塔里木盆地西部	24%

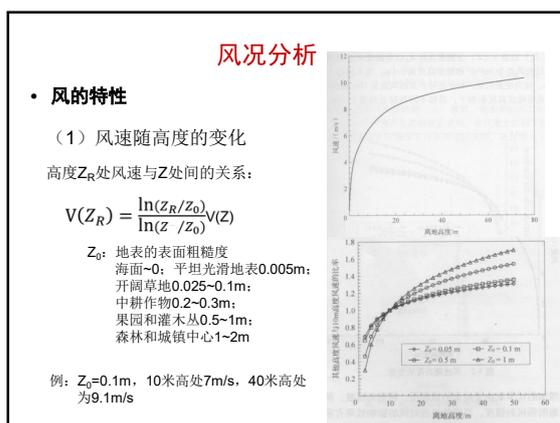
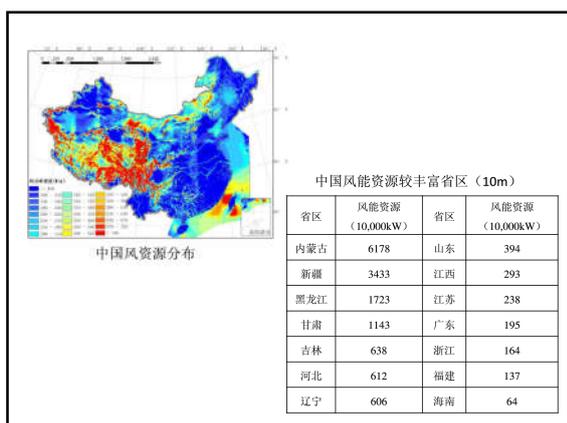
• 叶尖速比 λ

叶轮在某特定风速下能够捕获的功率很大程度上取决于叶轮叶尖速度和风速间的相对速度。

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{2\pi NR}{V} \quad (\Omega: \text{叶轮角速度}; N: \text{叶轮转速})$$

由于 $P_T = T_T \cdot \Omega$, 所以 $C_P/C_T = \lambda$

存在最优叶尖速比, 使得能量转换率最高。



风能转换基本原理

气流质量 m 、速度为 V , 其动能: $E = \frac{1}{2}mV^2$

叶轮扫风面积 A_T , 空气密度 ρ_a , 则单位时间内 $m = A_T \rho_a V$

故 风的功率为: $P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3$

叶轮的功率系数: 叶轮转换的实际功率 P_T / 全部风功率 $C_P = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3}$

叶轮上的理想推力: $F = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^2$

叶轮上的扭矩: $T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^2 R$ (R 为叶轮半径)

叶轮的扭矩系数: 叶轮转换的实际扭矩 T_T / 理想扭矩 $C_T = \frac{2T_T}{\rho_a A_T V^2 R}$

(2) 湍流

湍流减少了可利用的风能, 增大风力机的疲劳载荷。

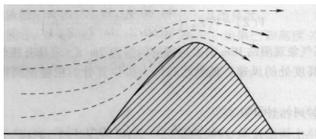
塔架高度要足够: 湍流区域在障碍物前可扩展到其高度的2倍, 在其后可达10~20倍; 在垂直上方, 2~3倍区域仍显著。

(3) 加速效应

光滑山脊会加速流经它的气流，加速程度取决于形状。
 坡度6°~16°，有利于风能开发。
 坡度<3°或>27°，加速效应利用效果差。

山脊的方向：山脊凹面迎风，加速效应更显著；
 三角形山脊比圆形效应更大；
 平顶的山脊可能引起湍流，尤其在山脊下较低区域。

山口是放置风力机的好位置。



(2) 风速分布

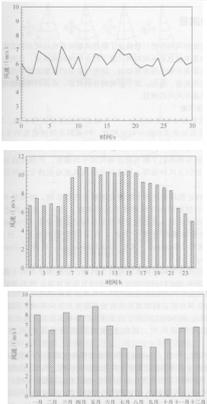
平均风速 $V_m = \left(\frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^{1/3}$ 标准偏差 $\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (V_i - V_m)^2}{\sum_{i=1}^n f_i}}$ (f_i : 频率)

例：风速的月频率分布数据

	速度 (m/s)	每月小时数	累计小时数
1	0~1	13	13
2	1~2	37	50
3	2~3	50	100
4	3~4	62	162
5	4~5	78	240
6	5~6	87	327
7	6~7	90	417

(4) 时变性

注意：风电场的整体输出比单一发电机平滑
 江苏风电场小时变化率大于0.1的概率7.34%，大于0.3的概率0.24%，大于0.4的概率0.07%



8	7~8	78	495
9	8~9	65	560
10	9~10	54	614
11	10~11	40	654
12	11~12	30	684
13	12~13	22	706
14	13~14	14	720
15	14~15	9	729
16	15~16	6	735
17	16~17	5	740
18	17~18	4	744

• 风数据分析

(1) 平均风速

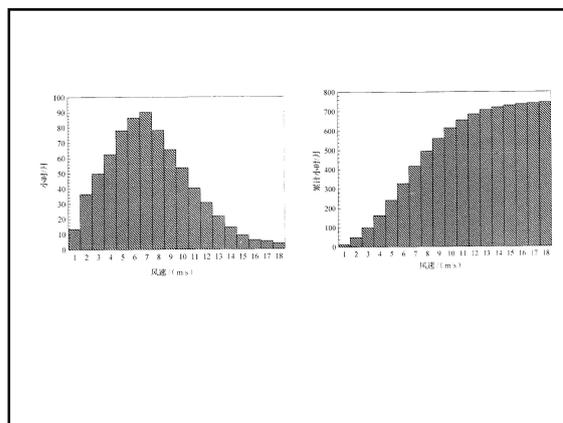
简单平均风速 $V_m = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n V_t$

为了计算风能，应根据顾虑大小加权平均。结果高于简单平均。

$$V_m = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n V_t^3 \right)^{1/3}$$

风力等级

级别	0	1	2	3	5	7	9	11
风速 (m/s)	<0.3	0.3~1.6	1.6~3.4	3.4~5.5	8.0~10.8	13.9~17.2	20.8~24.5	28.5~32.7



(2) 统计模型

威布尔分布

概率密度函数 $f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}$

累积分布函数 $F(V) = \int_0^V f(V)dV = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}$

(k: 形状参数 c: 尺度参数)

瑞丽分布 (k=2): 适用于数据不足时的估算

$f(V) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{V_m^2} e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{V_m}\right)^2}$

$F(V) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{V}{V_m}\right)^2} \quad V_m = c\Gamma(3/2)$

萨温纽斯 (Savonius) 叶轮



凹面推力大于凸面推力 → 叶轮旋转

建造成本低, 效率25-35%

功率系数较低; 实度较大, 启动扭矩大, 叶尖速比低~1。多用于高扭矩、低风速场合, 如风力提水。

风力机分类

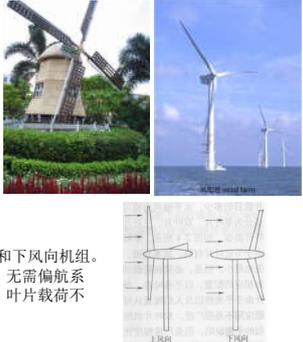
• 水平轴风力机

优点: 低切入风速、易于过载保护

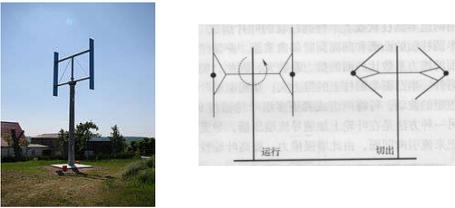
缺点: 齿轮箱复杂、使用尾翼或偏航系统对风

大多数商业化风力发电机为3叶片, 多叶片也有应用。多叶片叶轮也被称为高实度叶轮 (实际扫风面积和叶轮扫风面积比为实度)。

根据迎风方向不同, 分为上风向和下风向机组。前者无塔影效应; 后者对风灵活、无需偏航系统, 但塔影效应可能造成气流旋转、叶片载荷不均。



缪斯格洛夫叶轮 (发明者: Musgrove)



垂直轴升力型、大风时叶轮顺桨。

• 垂直轴风力机

达里厄叶轮 (发明者Georges Jeans Darrieus)

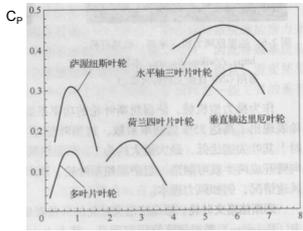


使用升力推动 (优于推力推动), 弯曲应力小、尖速比高无法自启动, 旋转受力变动

• 不同风力机叶轮特性

贝茨Betz极限 (1919年德国阿尔伯特贝茨): 理想升力型风力机最大功率系数为16/27=59.3%。

另外, 推力型风力机的理论最大功率系数为8/27。



叶轮类型	理论最大功率系数 (Cp)
萨温纽斯叶轮	~0.16 (8/27)
水平轴三叶片叶轮	~0.59 (16/27)
荷兰四叶片叶轮	~0.16 (8/27)
垂直轴达里厄叶轮	~0.16 (8/27)
多叶片叶轮	~0.16 (8/27)

风力发电机发展：
容量越来越大
叶片长度越来越大

• 叶轮设计

预期功率 $P_D = \frac{1}{2} C_{PD} \eta_d \eta_g \rho_a A_T V_D^3$
 C_{PD} : 叶轮的设计功率系数; η_d : 动力传动系统效率;
 η_g : 发电机效率; V_D : 设计风速

叶轮半径 $R = \left[\frac{2P_D}{C_{PD} \eta_d \eta_g \rho_a \pi V_D^3} \right]^{1/2}$

$R = \left[\frac{2P_D}{\eta_s \rho_a \pi V_D^3} \right]^{1/2}$
 η_s : 系统总效率

对于一个优良的设计系统, C_{PD} : 0.4~0.45, $\eta_d \eta_g$: 0.9;
 风力发电系统, η_s : 0.25~0.35
 风力泵系统, η_s : 0.12~0.15

风力机空气动力学

$L = C_L \frac{1}{2} \rho_a A V^2$
 $D = C_D \frac{1}{2} \rho_a A V^2$

C_L 、 C_D : 升力和阻力系数

风速V, 叶轮旋转速度 V_T , 合成速度 V_R
 攻角为翼型弦线与 V_R 的夹角
 升力L, 阻力D

叶尖速比 λ_0 的设计

风力泵: 大启动扭矩
 低叶尖速比
 活塞泵连接的风力提水车: 1~2

风力发电: 高转速 >5

叶尖速比越高, 叶片数越少

存在最佳攻角, 使得 C_D/C_L 最小
 合速度 V_R 在叶面不同位置变化

↓

整个叶片沿长度方向扭转

另一影响升力和阻力的因素是雷诺数 $Re = \frac{VC}{\nu}$
 (C: 翼型弦长; ν : 流体运动粘滞系数)
 由于 Re 的影响是二阶的, 初步计算中常被忽略

攻角及相应的升力系数 C_{LD}

$\lambda_r = \frac{\lambda_D r}{R}$ (r : 与叶轮中心距离)

$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r}$

桨距角 $\beta = \phi - \alpha$

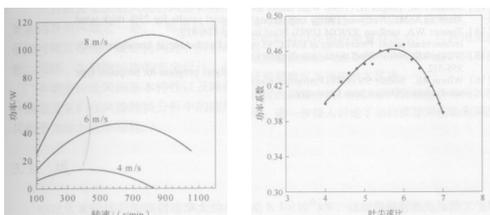
弦长 $C = \frac{8\pi r}{BC_{LD}} (1 - \cos \phi)$

翼型的特性图

NACA(National Advisory Committee for Aeronautics)翼型

叶轮性能

翼型的数据可通过风洞试验获得。

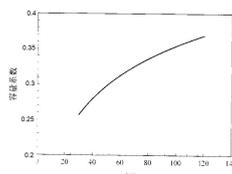


塔架高度的选择:

高度增加----风速及容量系数增大

高度增加----成本增大, 每10m成本大约15000美元 (1999年数据)

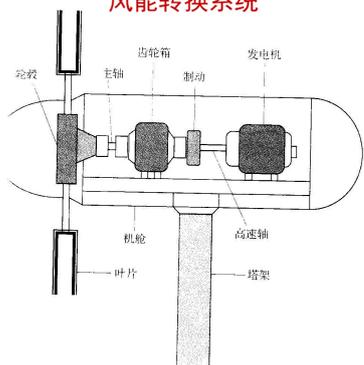
$$成本 c = \frac{C_1}{8760n} \left(\frac{1}{P_R C_F} \right) \left\{ 1 + m \left[\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right] \right\}$$



C_1 : 系统投资资本总额
 n : 预期寿命年限
 P_R : 额定功率
 C_F : 容量系数
 m : 维护费用与初期投资的比例
 I : 资本贴现率

其它因素----地表条件 (树木、障碍), 最大高度受美观限制 (美国 61.4m, 德国100m)

风能转换系统



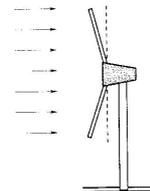
• 叶轮

叶片: 大尺寸趋势: 玻璃钢材料、碳-玻璃纤维复合材料。碳材料设计可减轻25%, 但成本高。

上风向叶轮存在后弯效应----预弯的叶片设计

轮毂: 承受高强度载荷。特殊铁合金 (如: 球墨铸铁)

轴承: 普遍适用滚珠轴承; 混合型陶瓷轴承--防腐性好。



• 塔架

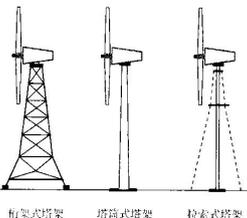
桁架式塔架: 腿架分开, 载荷分布面较大, 所需基础较轻。用材为塔筒式的一半, 重量轻、便宜;

美观较差, 鸟类易栖息--鸟类死亡率高, 维护困难。

塔筒式塔架: 由10-20m圆筒连接而成。MW级大尺寸塔架运输困难。

拉索式塔架: 小型风机应用较多。大型塔架攀爬困难。

混合式塔架: 底部混凝土+塔筒, 适用于大容量系统。

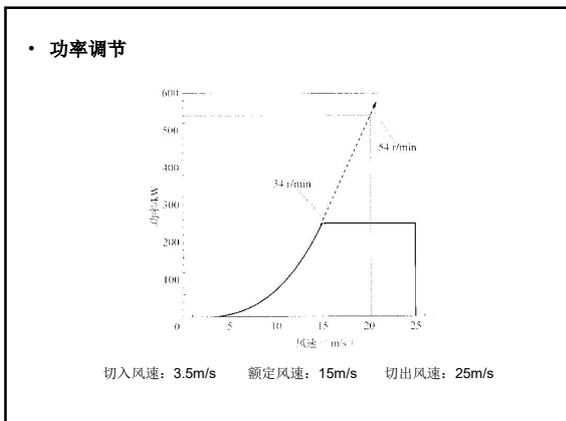


• 齿轮箱

叶轮转速 30~50r/min
 ↓
 齿轮箱升速
 发电机最优转速 1000~1500r/min

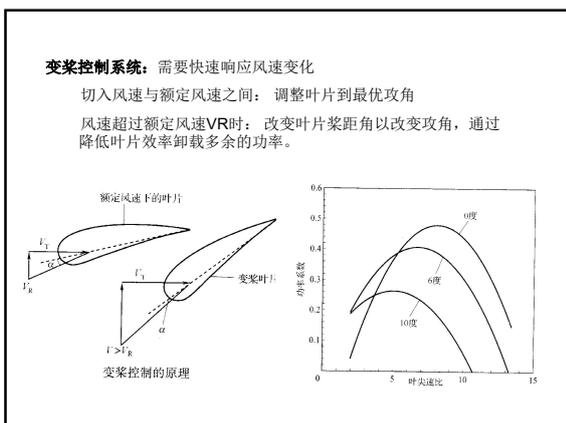
1套齿轮升速比不大于1: 6。

大型风力机采用行星齿和普通齿混装的集成齿轮箱, 通过两级组合达到提速要求。



主动失速控制: 低风速时, 叶片变桨; 额定风速以上, 叶片反向调整进入失速区。在额定风速以上, 可接近额定功率运行。

收帆控制 (或偏航控制): 大风速下偏转叶轮旋转轴; 在切出风速时, 叶轮旋转轴几乎与风向垂直。由于偏航会产生循环应力, 仅用于小型风机。

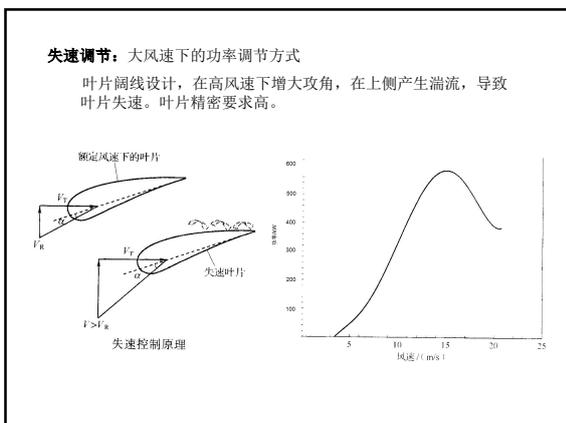


安全制动系统

在极大风速、电力线路故障导致脱网等条件下, 避免飞车状态。

主动制动系统: 空气动力制动形式。对于变桨控制和主动失速控制系统, 整个叶片沿其长度方向轴向旋转90°; 对于失速控制型, 调整叶尖位置, 将叶尖旋转90°。

备用制动系统: 机械制动。可使叶轮完全停止运转; 在维护时还可锁死叶轮。也有采用电力制动。

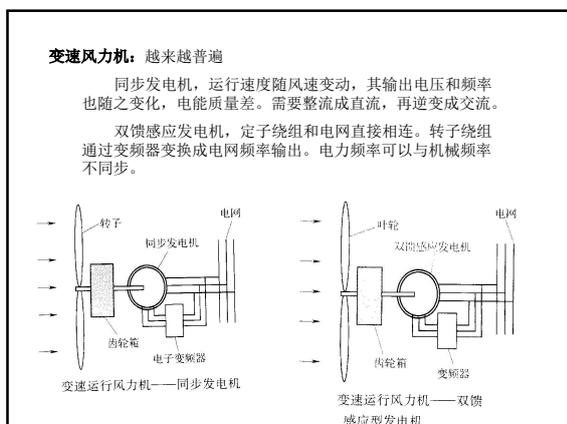


发电机

恒速风力机: 叶轮通过增速齿轮箱偶联感应发电机; 发电机定子绕组直接连接电网。由于从电网获得励磁电力, 为避免电压波动, 可加装电容器。

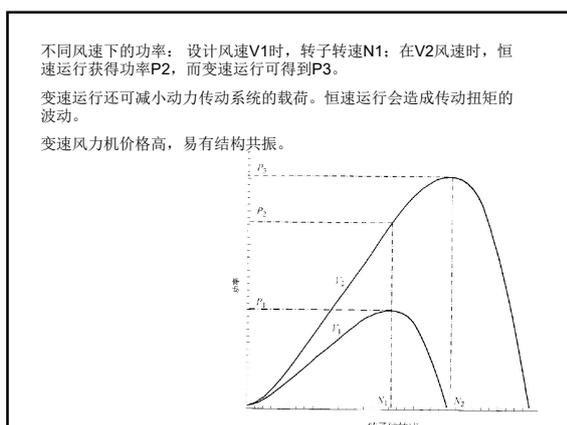
构造简单, 便宜。无法跟踪持续波动的风速, 能量捕获效率较低。

恒速运行风力机



海上风电

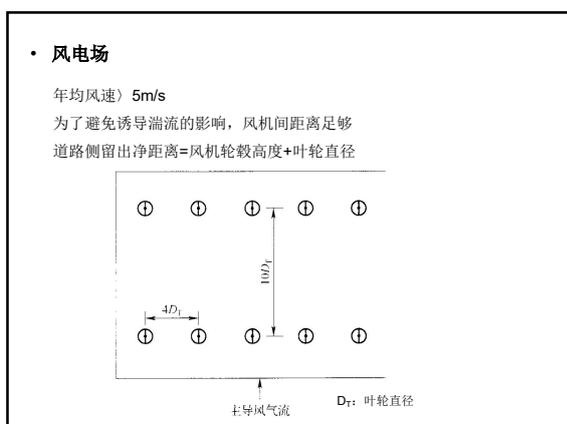
海上风更稳定，湍流更低，降低风机疲劳、延长其寿命；
 离海岸线10-15m处，风速增加20~25%；
 环境影响上，噪声和视觉影响变得不重要。陆上风机为降低噪声，工作时叶尖速比往往小于最优值；不考虑美观，海上可使用两叶片机组。
 目前，海上风电主要限制在水深40m以内区域。需考虑海浪、结冰、防腐等问题。



风电的并网

低电压穿越：面对电网故障或扰动引起并网点电压跌落，要求风电机组能够保持不间断并网运行，并提供一定无功功率，直到电网恢复正常。

换流器：
 电网换相换流器(linecommutated converter, LCC)
 采用晶闸管；只能控制触发角，不能单独控制有功和无功；开关频率低，需要大容量滤波，甩负荷时过电压较大；潮流控制需要电压极性反转；损耗较小（满载时~0.8%）。
 电压源换流器(voltage source converter, VSC)
 采用可关断器件；可独立控制有功和无功；损耗较大（满载时~1.8%）。



风电的传输—高压直流电缆

电力资源分布（煤炭、水力） 电力需求分布总需求的3/4

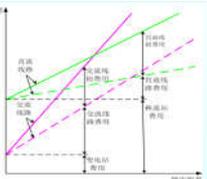
西部、北部 远距离、大容量输电 东部、中部、南部、沿海经济发达地区

城市输电的电缆化建设 新能源规模化接入

海上风电、海上孤岛的唯一输电手段

高压直流输电与高压交流输电相比:

- > 线路走廊更窄——造价低
- > 直流击穿强度高——工作电压约为交流的3倍
- > 输电容量更大
- > 无集肤效应、没有无功损耗——电能损耗低
- > 长距离输电效率不受容性电流影响
- > 网间无需同步运行



高压直流电缆

- 传输容量是交流电缆的2倍
- 输电电能损耗仅为交流电缆的40%
- 输电距离大大加长



我国直流电缆的发展现状:

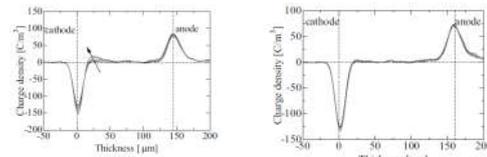
- > 柔性直流输电技术的研究始于2006年，已列入国家电网公司“十二五”科技发展规划中。
- > 一些高校、电缆厂正在研制:
 - 自主电缆料开发（西交、上交、哈理工、华普、万马）
 - 电缆样品试制（华普、江南、远东）
- > 首个柔性直流输电示范工程：上海南汇（±25kV，20MW）
- > 大连、南澳岛示范工程。

高压直流电缆的研制情况

厂家	材料	电压等级	运行状况
ABB	LDPE	320kV	业绩良好
Nexans	LDPE	500kV	无运行经验
Pirelli	XLPE	250kV	电压换流系统
Sagem	LDPE	400kV	无运行经验
Viscas	XLPE	500kV	无运行经验

- 聚乙烯纳米复合材料：纳米MgO、SiO₂性能优异
- 纳米SiO₂掺杂的XLPE通过CIGRE WG D1.24系统的性能测试，并有可能作为未来超高压直流电缆料

直流电缆绝缘的关键问题：抑制空间电荷



纯聚乙烯中：空间电荷积聚
↓
电场畸变
↓
绝缘破坏

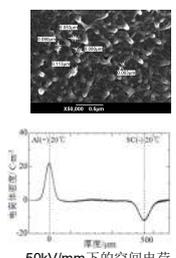
纳米复合材料(MgO, SiO₂)/PE:
无空间电荷积聚

纳米复合材料的空间电荷抑制机理?

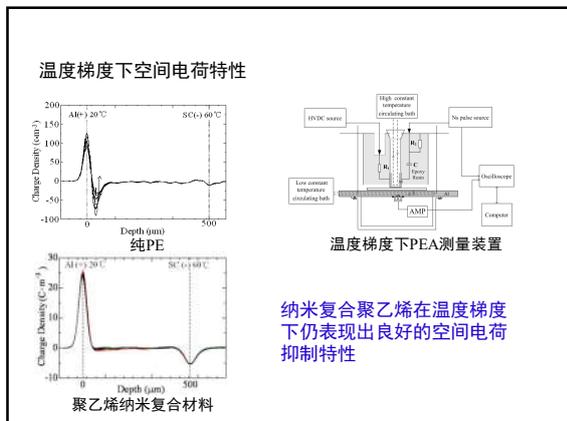
世界上已经投运的高压直流XLPE电缆（截止2011年）

工程名称	所在国家	输送功率 (MW)	电压等级 (kV)	电缆长度 (km)	制造企业	投运或计划投运时间
Gotland	瑞典	60	80	140	ABB	1999
Tjøreborg	丹麦	8	9	9	ABB	2000
Directlink	澳大利亚	180	84	390	ABB	2000
Cross Sound	美国	330	150	84	ABB	2002
Murraylink	澳大利亚	200	150	360	ABB	2002
Toll A	挪威	80	60	68	ABB	2004
Estlink	芬兰-爱沙尼亚	350	150	105	ABB	2006
Borkum2	德国	400	150	390	ABB	2009
Trans-bay	美国	400	200	85	普瑞斯曼	2010
Hokkaido-Honschu3	日本	600	250	44	J-Power	2011

研制出一种纳米SiO₂/XLPE复合材料，经过中试生产，达到高压电缆绝缘料要求

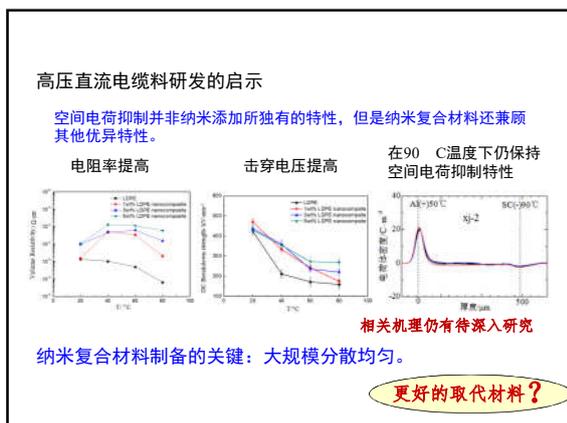


项目	单位	检测结果	标准要求
拉伸强度	MPa	20.32	≥ 13.5
断裂伸长率	%	512	≥ 350
负荷下伸长率	%	55	≤ 80
永久变形率	%	-2.5	≤ 5
拉伸强度变化率	%	5.94	± 20
断裂伸长率变化率	%	8.1	± 20
体积电阻率	Ω·m	1.9×10 ¹⁴	≥ 1×10 ¹⁴
介质损耗因数(针对AC)		5.74×10 ⁻⁴	≤ 8×10 ⁻⁴
介电常数		2.22	≤ 2.35
介电强度(工频,1mm)	kV/mm	43.8	≥ 25



负荷循环试验

- 线路换流型 (LCC)
 - ❑ 负极性8个24h负荷循环 (6h加热、16h冷却)
 - ❑ 正极性8个24h负荷循环
 - ❑ 8个24h负荷循环, 极性反转 (1.45倍电压)
 - ❑ 正极性3个48h负荷循环 (24h加热、24h冷却)
- 电压源型 (VSC)
 - ❑ 负极性12个24h负荷循环
 - ❑ 正极性12个24h负荷循环
 - ❑ 正极性3个48h负荷循环



预鉴定试验中的长期电压试验

线路整流换流器 LCC

试验项目	LC	LC	LC+PR	HL	HL	ZL	LC	LC	LC+PR	S/IMP
循环次数	30	30	20	40	40	120	30	30	20	不适用
电压	+	-		+	-	-	+	-		$U_{P2.0}=1.2U_0$ $U_{P1}=2.1U_0$ (若适用)
	1.45U ₀	1.45U ₀	1.25U ₀	1.45U ₀	1.25U ₀					

LC=负荷循环 HL=高负荷 PR=极性反转 ZL=零负荷 S/IMP=叠加冲击试验

电压源换流器 VSC

试验项目	LC	LC	HL	HL	ZL	LC	LC	S/IMP
循环次数	40	40	40	40	120	40	40	不适用
电压	+	-	+	-	-	+	-	$U_{P2.0}=1.2U_0$ $U_{P1}=2.1U_0$ (若适用)
	1.45U ₀							

LC=负荷循环 HL=高负荷 ZL=零负荷 S/IMP=叠加冲击试验

$U_{P2.0}$ 冲击电压与实际电压反极性时的冲击电压峰值;
 U_{P1} 冲击电压与实际电压同极性时的冲击电压峰值。

高压直流电缆测试技术

- 日本针对±250kV直流XLPE电缆提出了型式试验和预鉴定试验的初步方法, 但对老化寿命指数并未给出确切结果 (1990s)
- CIGRE推荐试验方法提出了250kV以下等级的工厂开发试验的试验条款, 并无详细的方法要求或标准规定, 老化寿命指数仅提供下限参考值 (2003年)
- 针对500kV, 国际大电网组织于2009年再次成立专门的工作组, 技术文件于2012年4月推出 CIGRE 496 "Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500kV"
- IEC TC20, proposal March 2013, "High Voltage Direct Current (HVDC) power transmission cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages up to 320 kV for land applications - Test methods and requirements" (Plan: 1st CD 2014.3)
- 我国上缆所于2012.7年推出500kV以下技术规范

