

## 发电工程设计项目经理（设总）培训课题

### 第四部分：相关设计技术

## 第二章 风力发电基础知识



华北电力设计院工程有限公司

2012年8月 北京

编写：田景奎 孙 培

## 目 录

1. 新能源 .....	1
2. 新能源发展面临的主要问题 .....	2
3. 中国风电发展现状 .....	2
4. 风电行业和供应链 .....	4
5. 风电开发商 .....	5
6. 风电价格 .....	6
7. 风电基地 .....	6
8. 价格支持机制 .....	7
9. 风电项目建设的主要环节 .....	8
10. 海上风电 .....	9
10.1 海上风电发展历程 .....	10
10.2 海上风电前景 .....	12
10.3 海上风电区域规划与项目准备 .....	12
10.4 海上风电项目特许权招标 .....	14
10.5 海上风电工程要点 .....	16
10.6 海上风电工程场址数据测量 .....	17
11. 风电场设计难点 .....	22
12. 中国风电发展的相关问题 .....	24
13. 2011 中国风电机组情况 .....	25
14. 大规模风电的输送实例 .....	26
15. 风电机组在不同气候环境条件下的适应性 .....	27
16. 风电机组吊装 .....	28
17. 国内风机事故实例 .....	30
18. 国外风机事故实例 .....	54
19. 新能源发展趋势——风光储互补 .....	58
19.1 风光互补 .....	58

19.2 风光储互补.....	58
20. 2011 年中国风机新增装机容量统计 .....	64

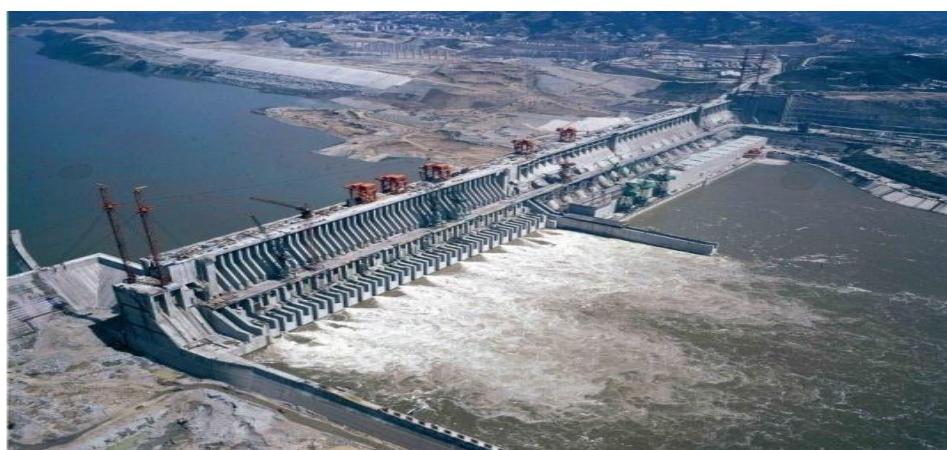
## 1. 新能源

一般是指在新技术基础上加以开发利用的可再生能源，包括太阳能、生物质能、水能、风能、地热能、波浪能、洋流能和潮汐能，以及海洋表面与深层之间的热循环等；此外，还有氢能、沼气、酒精、甲醇等。而已经广泛利用的煤炭、石油、天然气、水能、核电等能源，称为常规能源。随着常规能源的有限性以及环境问题的日益突出，以环保和可再生为特征的新能源越来越得到各国的重视。

目前在中国，可以形成产业的新能源主要包括水能（主要指小型水电站）、风能、生物质能、太阳能、地热能等，是可循环利用的清洁能源。新能源产业的发展既是整个能源供应系统的有效补充手段，也是环境治理和生态保护的重要措施，是满足人类社会可持续发展需要的最终能源选择。

可再生能源的特点：

- (1) 取之不尽、清洁环保、可永续利用；
- (2) 目前大部分可再生能源技术不够成熟，开发利用成本高，需要采取措施支持其发展；
- (3) 世界各国日益重视可再生能源发展；
- (4) 欧盟提出的目标是：到 2020 年，可再生能源在总能源消费中达到 20%，到 2050 年达到 50%；
- (5) 以风电、太阳能发电为代表的新能源产业快速发展；
- (6) 全球风电装机容量年均增长 30%，太阳能光伏发电年均增长 40%以上。



## 2. 新能源发展面临的主要问题

技术和经济性仍是可再生能源发展的最大制约因素。在现有技术水平和产业基础之上，除了水电、太阳能热水器外，大多数可再生能源产业还处于规模化发展的成长阶段，尽管技术进步明显，产业实力有所提升，但总的开发利用成本仍然较高，加上资源分散、规模小、生产不连续等特点，可再生能源在现有市场条件下缺乏竞争力，必须依靠政策扶持等非市场手段才能支撑其进一步发展。总的输出比单个输出平稳。

市场机制和管理体系不适应可再生能源规模化发展需要。可再生能源需要逐步融入到传统能源体系当中，当前的电价机制、电力管理体制等，还存在不利于可再生能源发展的因素。如电价形成机制缺乏市场因素，电网输配电价格与销售电价的一体化，不利于鼓励电网消纳风电等可再生能源电力，影响了电网消纳风电的积极性；电力调度运行机制不利于城市太阳能分布式发电的顺利并网等。

尚未建立能形成核心竞争力的技术创新体系。我国的可再生能源产业，主要是在技术引进的基础上，经过消化吸收和再创新，才出现了跨越式发展，形成了现在的产业能力。但我国缺乏国家级的可再生能源技术研究机构，从事基础研究和技术开发、解决产业发展关键和共性技术问题的能力薄弱，影响了行业整体创新能力的提高。同时，我国可再生能源的人才培养机制还不够完善，相关的人才总量和结构还不能满足行业创新发展的需要，不利于行业核心竞争力的长期塑造与培养。

## 3. 中国风电发展现状

中国国土辽阔，海岸线绵长，风力资源丰富。研究表明，中国风能利用的潜力巨大，陆地和海上风能的可开发装机总容量达到大约 7~12 亿 kW。其他最新评估报告提出的数据甚至可达 25 亿 kW 以上。因此，风电具有雄厚的资源基础，足以支撑其成为中国未来能源结构的重要组成部分。比较研究现有的五大风电强国，中国的风力资源量接近于美国，大大超过印度、德国和西班牙。国东南沿海地区、沿海的岛屿以及北方地区（东北、华北和西北）的风力资源尤其充足。另外，一些内陆地区也拥有丰富的风力资源。海上风力资源也很可观。

但是，风力资源的地理分布与电力负载之间并不匹配。中国的沿海地区电力负载巨大，但是风力资源贫乏。另一方面，中国北方的风力资源丰富，但是电力负载较小。这给风电开发的经济性方面带来了困难。

## 风电规划建设目标

2009 年，中国风电行业成为全球领头羊，其装机容量增速超过 100%，累计装机容量全球第二，新增装机容量全球排名第一。中国的设备产能也在全球拔得头筹。中国的新增装机容量和风机产量均占到全球总数的大约 1/3。

2010 年亚洲市场增长强劲，中国市场不再持续翻倍增长，但新增装机达到了 18.9GW，以占全球新增市场的 48% 的姿态领跑全球风电市场，累计装机超过美国，跃居世界第一。

到 2010 年底，中国风电并网装机容量已达到 3000 多万千瓦，实际吊装容量超过 4000 万千瓦，海上风电建设开始起步，上海东海大桥 10 万千瓦海上风电投产运营。

2011 年，中国（不包括台湾地区）新增安装风电机组 11409 台，装机容量 1763 万 kW，累计安装风电机组 45894 台，装机容量 6236 万 kW，年增长 39.4%。



酒泉风电基地



金风酒泉风电机组总装车间

#### 4. 风电行业和供应链

中国的风机设备产能迅速增长，其产业集中度进一步提高。如今国内制造商已经占据中国供应市场的超过 85%，并开始出口海外。

风电设备制造行业明显地分为三个梯次：华锐风电（Sinovel）、金风科技（Goldwind）和东方电气（Dongfang Electric）（均属于全球风机制造商十强之列）属于第一梯队；明阳风电（Mingyang）、国电联合动力（United Power）和湘电集团（XEMC）属于第二梯队；其他较小的风机制造商属于第三梯队。

受到海上风电提速的刺激，世界大型风电装备制造商开始开发用于海上的大型风机，目前，瑞能的 5MW 和 6MW，阿海珐与德国 Bard 的 5MW，安耐康的 4.5MW 和 6MW 风机已经开始批量生产、并投入运行，西门子风电 3.6MW、华锐风电 5 MW 风电机组也已宣布下线。此外，维斯塔斯也宣布其 6MW 风电机组将在明年下线，美国 Clipper 甚至已开始了 10MW 风机的研发，而中国如金风科技、湘电等一批企业也接踵而至，纷纷进入风机大型化的竞争行列。



风力发电机吊装

## 5. 风电开发商

2010 年中国国电集团新增风电装机 3490.45MW（含龙源电力 2 493.8MW，国电电力 996.7MW），累计装机 8941.09MW，继续保持风电场装机容量第一的位置。华能集团

则以新增装机 3171.15MW，累计装机 6330.98MW 的业绩，超过大唐排在第二位，大唐退居第三位，但与排名第四位的企业仍保持较大领先优势。

2010 年，除五大发电集团及国华、中广核以外，华润电力、新天绿色能源、天润、三峡集团、中国风电、中海油、中水顾问、中水建等都有不俗的表现。但从市场份额来看，五大发电集团仍然占据 56% 的比例，比 2009 年的 55% 还略有上升。更多开发商的积极参与，虽尚未撼动五大发电集团的领先优势，但无疑将给中国风电场开发建设带来新的增长点和注入更多的活力及财力。

## 6. 风电价格

自 2004 年中期开始，高涨的风电市场需求使风机的价格一路飙升，这是因供不应求的卖方市场所致，这种情况一直持续到 2007 年。设备价格上涨的另一主要原因是原材料价格的上涨，然而这一影响因素在 2008 年发生了变化，原材料价格和油价的急剧下降，使得陆上风机的价格开始趋于平稳。到 2009 年，信贷危机和经济低迷的状况使欧洲与美国能源需求下滑，从卖方市场到买方市场的过渡，使得风机制造商间在成本和质量上的竞争日益激烈，这一趋势在 2010 年得到了持续。

由于规模不断扩大、效率逐步提高以及风机制造产能过剩，2010 年主要风电市场的陆上风机价格均出现大幅下降。以中国的情况为例，风机制造业的价格战已令风电机组（不含塔架和施工投资）的报价自 2008 年以来降低了三分之一，达到 3700~4000 元/kW 水平，逼近平均制造成本。风机价格下降也许是风机制造商不愿意看到的，但从风电发展的长远角度看，成本降低会大大加强风电的竞争力，使其在与天然气、煤炭发电竞争时拥有更多主动权。但是随着全球能源需求的恢复，以及待开发项目难度越来越大，风机价格将会在近两年内企稳回升。

## 7. 风电基地

中国政府关于风电发展的承诺中一项重要的组成部分是建设七大“千万千瓦级风电基地”。这七大风电基地，每个都具有至少千万千瓦装机容量的潜力，位于内蒙古东部和西部、新疆哈密、甘肃酒泉、河北、吉林西部和江苏沿岸及近海地带。

2008 年在国家能源局的领导下，这些风电基地的开发规划开始启动，目前进展迅速。根据该规划，各大基地到 2020 年将实现总装机容量 1.38 亿 kW，但是前提是建成配

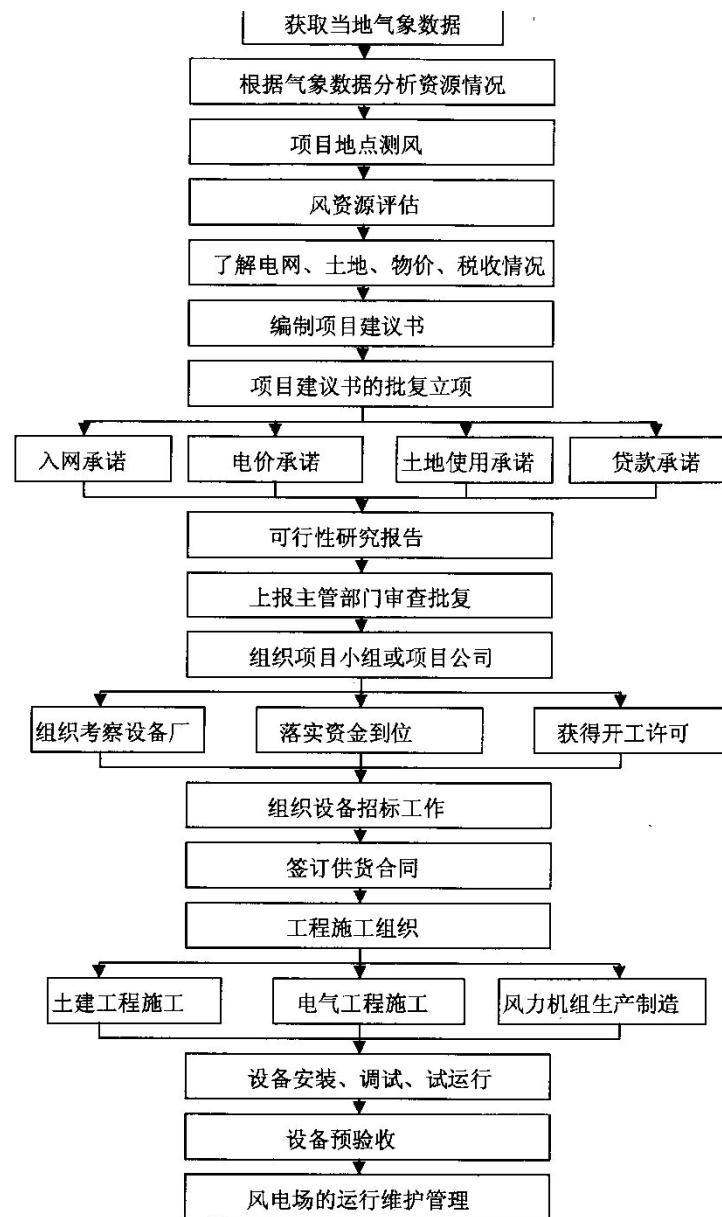
套电网。这些基地大多位于电网传输能力较弱的边远地区，远离中国的主要电力负载中心，这成为一个突出的要解决的问题。还有一个问题是大量的具有波动性的风电如何与受调峰能力差的燃煤电厂主导的电网网络相互协调。

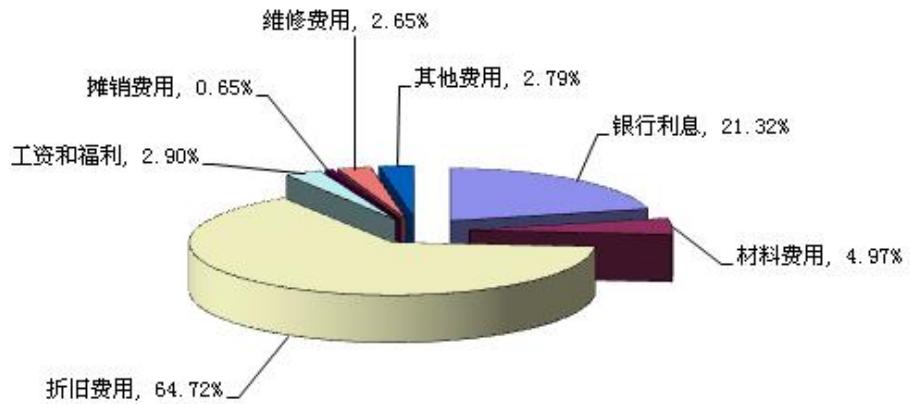
## 8. 价格支持机制

价格政策是影响开发商投资和市场增长水平的关键因素。中国风电的支持机制已经从以资本回报率为价格和通过风场开发合同的竞争性招标制度实现的平均价格逐步改革，最终实现了根据风能资源的差异性进行调整的固定电价制度。

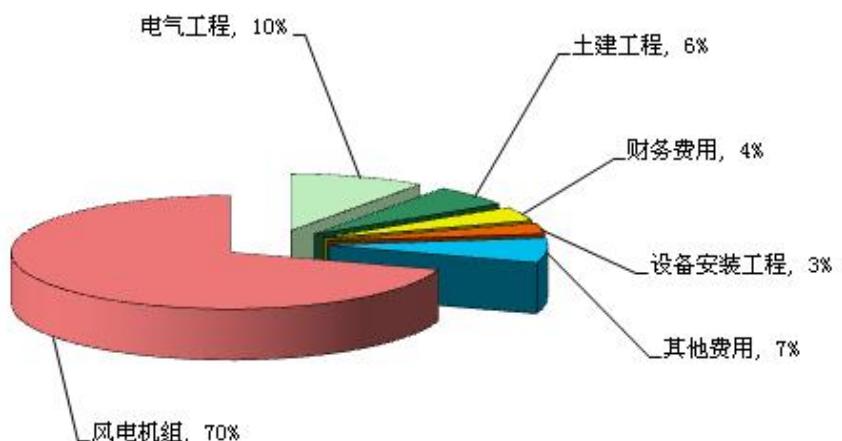
2009 年开始，通过将全国划分为四类风能资源区域，固定电价制度确立了陆上风电的基准价格。区域性固定电价政策的引入无疑是中国风电开发的一项积极步骤，并对更强劲的增长提供了激励。

## 9. 风电项目建设的主要环节





风力发电项目度电成本构成比例



风电项目投资构成比例

## 10. 海上风电

中国正在对海岸线上的海上风电开发前景进行细致的调研。

2010 年，首批海上风电项目—上海东海大桥 10 万 kW 已经完成组装，安装了 34 台华锐 3MW 风机。

根据沿海省份编制的规划，海上风电的装机容量预计将在 2020 年达到 3,280 万 kW。

依据全球风能理事会的数据，截至 2011 年，全球新装机海上风电场主要集中在中  
国与欧洲，全球海上风电总装量达到 3980 兆瓦，其中，中国海上风电总装机为 209.9  
兆瓦。2011 年全球海上风电新增装机 470 兆瓦，其中中国新增 107.9 兆瓦，占比达  
22.96%。

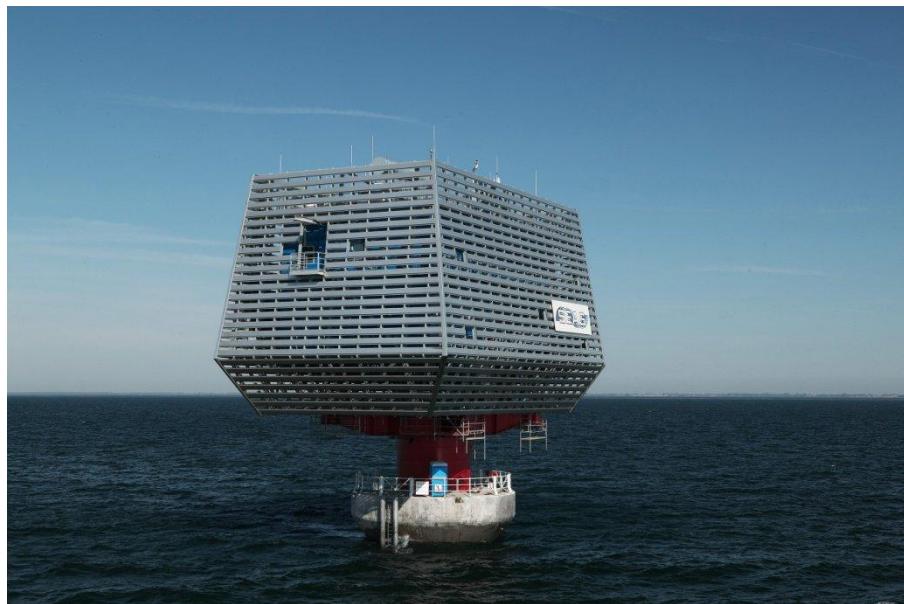
## 10.1 海上风电发展历程

1991年，丹麦建立世界上第一座海上风电站。但世界海上风电的发展一直踟蹰不前，主要原因是技术复杂，安装、运行、维护的成本高。

欧洲和美国在海上风电技术的研发一直没有停滞，海上风电的技术难关不断地被攻破。同时随着欧洲，特别是丹麦、德国等国家的陆地风电资源基本开发完毕，减排和提高可再生能源比例的要求，使得海上风电的发展被提上议程。



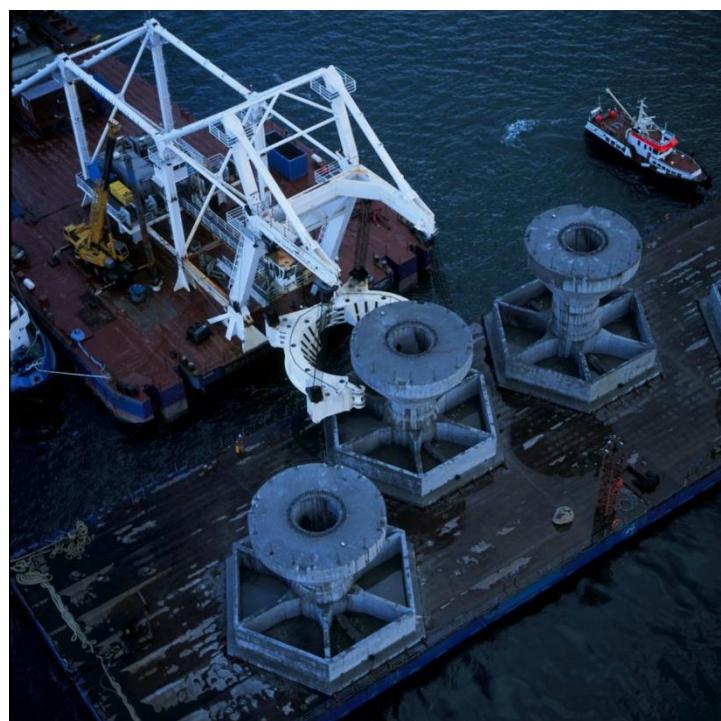
国外海上风电场



国外海上集控站

德国 Enercon 公司的 E-122 型 6MW 风机已研制成功，并在德国的 Guxhaven 和 Emden 的试验点进行测试。美国 GE 公司也正加紧 7MW 风电机组的设计开发研究。

德国 REpower 公司 5MW 风机已成功地安装在苏格兰的 Beatrice 海上示范风电场，该风机风轮直径 126m，安装在水深 40~44m 的海域。



重力式海上风机基础

2008 年起，世界海上风电开始有了新的飞跃，2008 和 2009 连续两年海上风电新增容量超过了 50 万 kW，两年的安装量超过了过去累计装机容量的总和。

海上风机是在现有陆地风机基础上针对海上风资源环境进行适应性“海洋化”发展起来的，对海上风电设备特殊运行条件的认识也逐步深入，但是严格说来海上风电目前所处的阶段还仅是将陆上风机装在海里。

为降低海上风电开发成本，海上风机功率较大，已投入商业化运行的海上风电机组的单机容量多为 1.5~3.6MW，风叶直径为 65~120m。



## 10.2 海上风电前景

中国第一个海上风力发电场——上海东海大桥海上风电场项目，位于临港新城至洋山深水港的东海大桥两侧 1,000m 以外沿线，最北端距离南汇嘴岸线近 6km，最南端距岸线 13km，全部位于上海市境内。由中电国际、中国大唐、中广核、上海绿色能源组建的项目公司——上海东海风力发电有限公司进行风电场的建设、管理及运行维护工作。

2009 年 3 月 20 日，由华锐风电科技有限公司自主研发的我国第一台海上风电机组在上海东海大桥海上风电场，完成整体吊装。整个工程在 2010 年世博会之前已完成全部 34 台机组安装和调试，并投入运营。东海大桥海上风电场项目总投入为 30 亿元安装 34 台 3MW 风力发电机组，总装机容量为 10.2 万 kW，年上网电量 2.5851 亿 kW·h，将满足上海约 20 万户普通家庭一年的用电量。

## 10.3 海上风电区域规划与项目准备

为了加快沿海地区大型风电基地建设前期工作，国家能源局统一组织开展沿海地区大型风电基地建设前期工作。

明确了风电场分为陆上风电场和海上风电场两类。其中，海上风电场包括潮间带和

潮下带滩涂风电场、近海风电场和深海风电场。

(1) 陆上风电场：指在陆地和沿海多年平均大潮高潮线以上的潮上带滩涂地区开发建设的风电场，包括在有固定居民的海岛上开发建设的风电场。

(2) 潮间带和潮下带滩涂风电场：指在沿海多年平均大潮高潮线以下至理论最低潮位以下 5m 水深内的海域开发建设的风电场。

(3) 近海风电场：指在理论最低潮位以下 5m~50m 水深的海域开发建设的风电场，包括在相应开发海域内无固定居民的海岛和海礁上开发建设的风电场。

(4) 深海风电场：指在大于理论最低潮位以下 50m 水深的海域开发建设的风电场，包括在相应开发海域内无固定居民的海岛和海礁上开发建设的风电场。

海上风电场的场址选择遵循下述原则：

- (1) 场址区域具有丰富的风能资源；
- (2) 场址区域具有较好的水文地质、接入系统、交通运输等建设条件；
- (3) 规划场址范围满足海洋功能区划的要求；
- (4) 场址规划与城市规划、岸线和滩涂开发利用规划等相协调；
- (5) 场址选择符合环境和生态保护的要求，尽量减少对鸟类、渔业的影响；
- (6) 场址选择应避开航道、锚地、禁航区，尽量减少对航路的影响；
- (7) 场址选择应避开通信、电力、油气等海底管线的保护范围；
- (8) 尽量避开军事设施涉及的范围；
- (9) 不影响其它已明确的特殊用海，如科研活动、教学实习、灾害观测、导航设施等。
- (10) 考虑基础施工条件和施工设备要求，提高风电场建设的经济性，场址区域水深条件一般控制在 5m~15m。

海上风电场测风塔可选择在近海的海岸或近海的海上，海岸测风塔造价低，测量风能资源状况不能完全反映海上风电场的状况，海上测风塔测量数据，能够真实反映其场址的风能资源状况，但造价较高。

海上测风塔选址遵循如下原则：

- (1) 与海上风电场建设规划紧密结合，选择近期规划建设海上风电场的区域；
- (2) 海上测风塔所选位置的风况应基本代表海上风电场场址的风况，每座测风塔的风资源资料有效控制半径不超过 10km；
- (3) 海上测风塔位置选择，宜在规划海上风电场主方向的上风向位置；

- (4) 海上测风塔位置选择宜兼顾现有陆上、海上相关测站位置，位置分布宜有利于分析海上风资源分布及沿程变化，有利于推算海上风资源储量；
- (5) 海上测风塔位置不影响今后海上风电场的施工建设。

## 10.4 海上风电项目特许权招标

2010年5月18日，国家海上风电特许权招标项目对外开标。本期特许权招标包括四个项目，均位于江苏省，分别为滨海海上风电场（30万kW）、射阳海上风电场（30万kW）、大丰海上风电场（20万kW）和东台海上风电场（20万kW），总装机容量100万kW。这次风电特许权招标，是我国首批海上风电场示范项目的招标。本次招标对投标人资格、业绩的要求包括：

- (1) 投标人应具有独立法人资格；
- (2) 投标人可以是单个体，也可以是联合体。如为单个体投标，投标人应为中资企业或中资控股（50%以上股权且绝对控股）的中外合资企业；如为联合体投标，牵头人应满足前述要求。
- (3) 截止2010年9月9日，投标人拥有的在建或已建风电场容量应不低于所投项目规模。如为联合体投标，牵头人应满足该业绩要求。

根据招标工作进度安排，于6月中旬进行现场考察，8月上旬召开标前会，9月10日正式开标，9月下旬确定中标单位。中标后三年时间内完成施工建设。



海上风电场

2010年5月，国家第一批海上风电特许权项目招标启动(项目均在江苏省)  
滨海 近海风电场项目 30万kW；  
射阳 近海风电场项目 30万kW；

东台 潮间带风电场项目 20 万 kW;

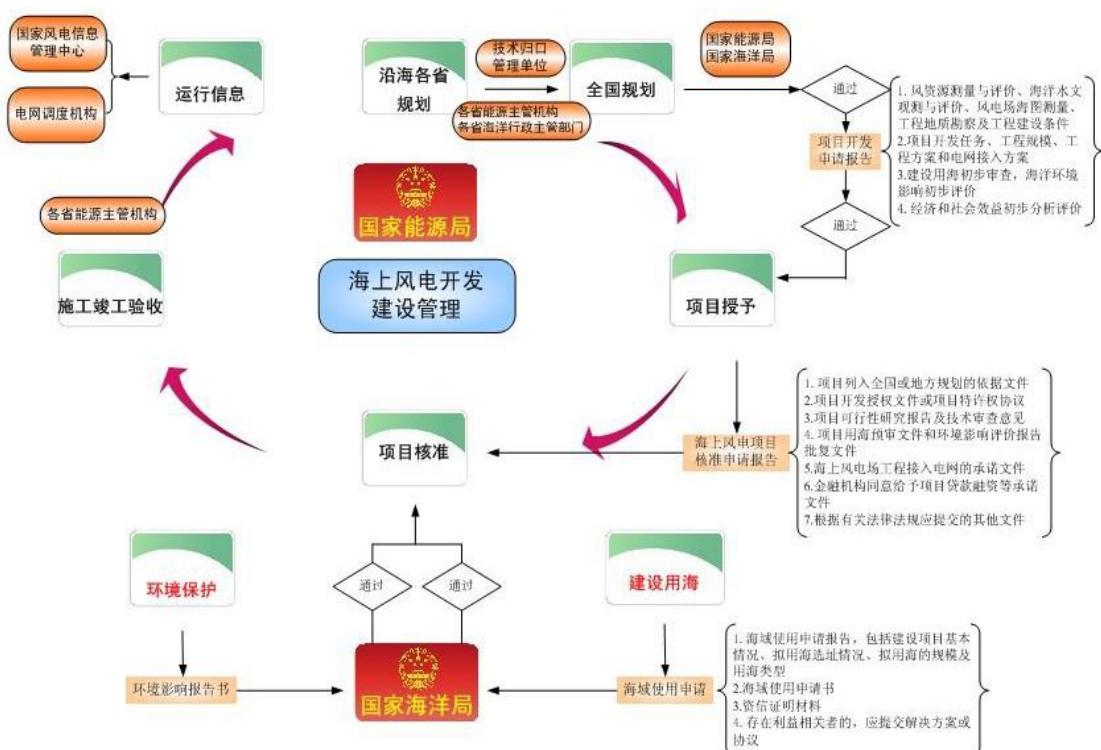
大丰 潮间带风电场项目 20 万 kW

总规模 100 万 kW，其中近海 60 万 kW，潮间带 40 万 kW。

2010 年 9 月开标，按建设方案和投标电价确定项目开发企业，在四年内建设完成。

海上风电开发建设的管理依据：《海上风电开发建设管理暂行办法(国能新能[2010]29 号)》

国家能源主管部门负责全国海上风电开发建设管理；沿海各省(区、市)能源主管部门负责本地区海上风电开发建设管理；海上风电技术委托全国风电建设技术归口管理单位(水电总院)负责管理；国家海洋行政主管部门负责海上风电开发建设海域使用和环境保护的管理和监督。



中国海上风电建设管理流程简图



中海油 36-1 海上风机



3MW 海上机组整体运输

## 10.5 海上风电工程要点

为了承受海上的强风载荷、海水腐蚀和波浪冲击等，海上风电机组的基础远比陆上的结构复杂、技术难度大、建设成本高，一般来讲基础结构约占海上风电开发成本的 1/3

左右。

海上风电机组基础由塔架和海底地基组成，按结构类型划分，目前在实践中已经应用的有单桩结构、重力结构和多桩结构，还有处于研发阶段的悬浮式结构。

各种结构的优缺点有互补性，基础选型要综合考虑各项因素的影响，主要是水深、土壤和海床条件、环境载荷、建设方法、安装和成本几个方面。

目前，世界上的海上风机多数采用重力混凝土和单桩钢结构基础设计方案。应用最为广泛的单桩钢结构是通过钻孔将直径 3~5m 的钢管植入海床下 15~30m 深的位置。这种基础的优点是不要求修建海底地基，而且制造相对简单，但是安装相对困难且海水较深时柔性大。

重力式一般为钢或混凝土结构，依靠基础的重力抵抗倾覆力矩。海床的清理准备工作对该结构很重要，由于对海浪的冲刷较敏感，只适用于海上风电水深较浅、不适合钻孔的场址，运输安装也比较困难，对环境的影响较大。

多桩式基础结构曾用于试验机组，目前处于试运行阶段，还没有应用于商业化风电场。一般为三脚架结构，主要采用小直径管状钢结构，通过填塞或成型连接，适合较深的水域。缺点是船只难以接近，并增加了结冰的可能性。

沉箱结构是靠重力将钢箱结构插入海床，抽出箱内海水以产生压力，以用于海上平台安装的锚泊固定，目前处于可行性研究阶段。漂浮式结构的好处是可选择的概念较多，成本与海底固定的方式接近，在建设和安装步骤上有较大的弹性，且容易移动或拆卸，并且在挪威取得成功，但目前还处于试验阶段。

在海上风电设备安装上，被广泛应用的方案是起重式和锚泊系统，根据海水深度、起吊机的能力和驳船的载重量的不同，具体技术方案的选择有所不同。

## 10.6 海上风工程场址数据测量

当开发商选定的区域后，就可以着手采集现场特性数据。这些数据有助于更深入了解预期收益、风电机组基础设计、风电机组适应性、电力输出、资本成本和运营成本、降低财务及环境风险和风电机组载荷分析：

**重力载荷：**风电机组重量通过塔筒基础传递到海床，因此海床需要在风电场生命周期中保持稳定。

**空气动力载荷：**来自于风对风电机组的外力，包括对塔筒的弯曲载荷，由于湍流和风切变不平衡使叶片、塔筒震动和弯曲造成的疲劳载荷。

**水动力载荷：**源于潮流和波浪对风电机组基础和过渡段的外力。海冰也会对塔筒带来载荷，包括固定冰和浮冰。

**积冰载荷：**在一些海岸线有一种特殊的气候现象——冰暴。冰暴现象的产生是当下雨时，温度迅速下降，在雨水落下的地方结冰，在风电机组上可能导致几厘米的积冰。

**船舶直升机载荷：**运营维护人员上下风电机组带来的载荷。

#### 10.6.1 测风与场址特性

测量海上气象参数的仪器均安装在测风塔上。遥感技术如激光雷达测风技术在欧洲市场的应用也不断增加。桁架式测风塔通常采用圆形管架制成的三角形结构，塔架受风载荷较小。避雷器和抗浪涌保护装置的安装可以保护仪器设备不受雷击破坏。测风塔还应安装导航系统，包括导航灯、雷达反射器、雷达应答机(雷达信标)或雷达目标增强器。建议测风塔的高度应至少超过选用风电机组轮载高度的 3/4。

欧洲风电场开发大多选用单桩方案安装测风塔。普遍来说由于基础施工及测风塔安装船舶费用较高，保证施工安装时间最短是最有效的成本控制手段。

海床条件影响测风塔设计和施工。单桩基础是桩式结构的首选，特别在浅水区。但在深水区单桩结构在几何上并不合理，一般采用其他三脚架或导管架结构。三脚架结构通常包括中心直径较大的钢管和三根独立打入海床直径相对较小的支撑管，这类结构已在石油天然气行业用作二次安装。但由于工艺复杂以及需要开发抗疲劳连接，在浅水区的应用竞争力不如单桩式基础。

海上单桩基础的施工通常采用千斤顶驳船，它为施工工作提供平稳的工作平台。单根钢管固定在海床上有两种方法，一是将单桩放入预先挖好的孔内，灌入水泥固定；另一种方法是用打桩锤将钢管打入海床。在使用预钻孔办法时，孔壁上部软性不稳定部分应采用导线或钢管护套支撑。当使用打桩锤时，千斤顶驳船通常备有抱桩器，可以在施工过程中固定和指引钢管并在结束后放开。

通信设备和测量仪器的供电通常采用组合供电形式，来源于太阳能光伏和小部分风能供给的电源储备系统。

在典型的测风塔配置中，每一个数据记录仪都有单独的光伏和电源储备系统供电。数据记录仪 12V 的电池由太阳能光伏供电，并且该电池只需要在通信调制解调器打开时每天使用一小时。数据记录仪电池和太阳能光伏系统可以使用好多年。导航装备系统应当有独立的光伏和电池储备系统，可以维持雾角和航标灯至少工作 96 小时。

#### 10.6.2 风能资源测量

风能资源测量需要以下参数：风速、风向、温度、气压、相对湿度。测量时间最少一年，记录季节性变化。更长时间的测风可以降低能效预测的不确定性。

在测风塔的不同高度安装风杯风速计或螺旋桨式测风仪，其优势是其测量平均风速准确度高，价钱便宜，同时对能源供给要求低。但是他们仍然存在自身固有的局限，主要与下列相关：

- 相对于风轮扫过的大片空气体积，风杯风速计只能测量单一固定点的风速。
- 对垂直方向的风速不敏感。
- 由于机械摩擦或风杯的形状，导致风杯风速计校准非线性以及校准会变化。

测风仪的位置会严重影响风数据的质量，在海上影响更为严重，因为测风仪安装在体积较大的和架塔上，桁架将影响风速测量。在海上，风速和波浪具有十分复杂的反馈机制，因此必须在不受近海面影响的高度测量，同时要了解风速随高度的变化。考虑以上因素，成功的部署海上测风塔的测风仪安装位置应遵循如下一些原则：

- 各层风速计安装高度应至少相差 10 m。
- 由于海上风较大，测风仪器维修困难并且维修费用高。在同一高度安装两套传感器，以保证每一个测量高度在某一仪器损坏时仍有完整数据。
- 传感器应固定在和架结构测风塔直径的 5.7 倍以上的横臂上。
- 传感器应安置在横臂上方，至少 15 倍于横臂纵切面直径的高度上。
- 横臂最理想为圆形横截面。

超声风速仪可以准确的测量风的三维( $u$ 、 $v$ 、 $\omega$ ) 脉动量，是湍流分析计算的最佳数据。目前比较通用的是美国 Campbell 公司的 CSAT3 型超声风速仪和英国 GILL 公司的 WindMaster 超声风速仪。GILL 公司的 WindMaster 超声风速仪价格适中，并且具有在雨中和恶劣气候环境中正常运行的特点；Campbell 公司的 CSAT3 型超声风速仪观测精度较高，但价格也较高，缺点是观测信号容易受到降雨的影响。

激光雷达测风仪作为一种成熟的遥感技术已成功地应用于风能领域当中。激光雷达测风仪发射激光束，测量被风携带的微小颗粒反射回来的光的多普勒频移，由此获得风在光束方向上的速度。合成多个方向上的风速就可获得风的速度矢量。激光雷达测风仪的数据记录仪存储所有测量数据，并以微波、卫星或移动通信形式与岸上的服务器联络。激光雷达测风仪可以安置在海上平台上，相对于海上测风塔，海上平台的基础较小也较便宜。

### 10.6.3 海况测量

海况是海上风电场开发的另一重要因素，它的影响包括：

- 基础设计
- 施工成本和进度
- 维护船舶进入

因此，需要对水位（潮位）、水体不同深度出的潮流、波浪、冲刷等情况进行测量。

潮位会对海上风电项目以下方面设计方案造成影响：

- 基础设计
- 风电机组过渡段的大小和高度
- 访问风电场方案
- 针对浅水区船舶驶入和泊位

获得风电场开发场址处准确的潮流和余流(一种非周期性的海流)数据对下列问题尤为重要：

- 量化潮流对风电机组基础的水平载荷
- 识别沉积物冲刷的危险验证水文模型
- 评估对施工及船舶进入的影响

获取波浪参数的观测数据有助于研究下列因素：

- 载荷
- 施工条件
- 运行维护可进入性过渡段高度

冲刷是由于水流，通常是潮汐流，使海床表面沉积物受到侵蚀。这一作用会带走沉积物形成冲刷坑。对于管状结构如单根钢管，冲刷深度可以达到管直径的 2.5 倍，这可能危及基础的坚固和稳定，故在设计中应予以考虑。在海床上采取防冲刷保护十分普遍，如在波浪潮汐运动强烈的地方堆放足够大的石块来稳定沉积物防止冲刷。

#### 10.6.4 海床现场勘测

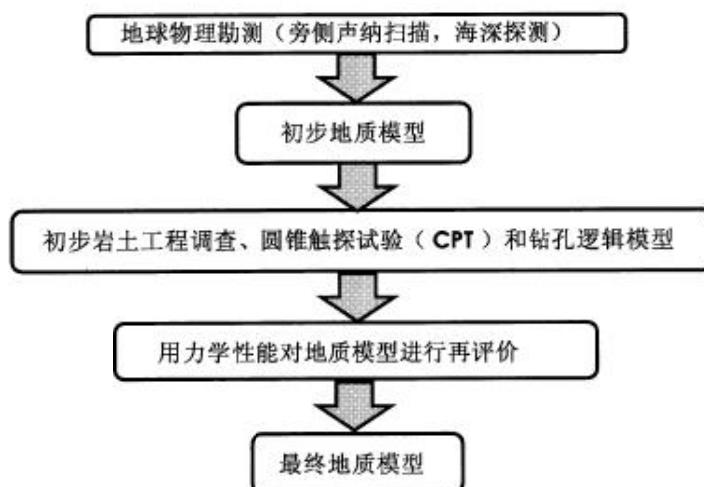
对潜在海上风电场开发场址进行海床勘测十分必要，可以确保正确设计基础和布线。

海床勘测包括一系列从海床表面沉积物不断往地质结构深处钻孔取样，这一过程分为以下几个步骤：

- 海深探测(测量水深)
- 旁侧扫描测量(观测表面特性)
- 地球物理勘测
- 地震探测
- 初步地质模型
- 岩土勘察、圆锥触探试验、钻孔
- 用力学性能对地质模型进行再评价
- 最终地质模型

水深测量需要在整个潜在风电场场址和电缆路线进行。现代测深技术采用多波束测深仪。多波束测深仪发射超声波脉冲宽波束，每个波束的时间间隔和独特回波信号同 GPS 全球卫星定位系统相连，生成覆盖勘测船舶行进方向某侧的三维海深数据集，扫描分辨率大多为 1m 。扫描宽度稍微重叠以保证全面覆盖扫描区并检查测量误差。回波信号强度也可用来推测沉积物特性，因此可以大致了解该地区的沉积物体系。

旁侧声纳系统由船舶船尾拖曳，发射呈大角度扇形的超声波脉冲，扫描一定宽度的海床。基于从海床反射信号强度，所有海底地貌、沙纹、障碍物、沉船遗骸、管道、暗礁等都能一览无遗，尽收眼底。声纳探测图像对识别海床地貌和障碍物帮助很大，但需要经过大量处理和解译获得有意义的数据。



生成地质模型过程流程图

## 11. 风电场设计难点

### 11.1 风电机组地基基础处理与设计

海上风电机组基础建设有很多类型可供选择，具体选择哪一种决定于风电场址的水深、地质和海床条件以及所选风电机组的大小及质量。目前最常见的基础类型是钢制单桩式结构。此种类型基础已经成功使用在单机容量为 3.6MW，机舱和叶片质量达到 220t 的风电机组安装上。对于单机容量在 5MW，机舱和叶片联合质量 300t 或以上的风电机组，因为机舱的重量以及叶片直径增大所带来的弯矩，传统的单桩式基础可能不再适用。

#### 11.1.1 重力沉箱基础

重力沉箱基础是 20 世纪 90 年代第一批海上风电机组所采用的基础类型。比利时 Thornton Bank 海上风电场六台 Repower 5 MW 风电机组竖立在混凝土重力沉箱基础上。

这些基础通常由混凝土浇筑而成，因为它们的重量使得风电机组固定在海床上。这种基础一般水深不超过 10 m，如果超出这个深度，混凝土浇筑就变得非常昂贵。不过，Thornton Bank 海上风场的水深在 12~27m 之间，原因是 5MW 风电机组比 2MW 和 3MW 重很多，单桩基础不再适用，重力沉箱基础显得更经济可行。

#### 11.1.2 单桩基础

2003 年以来，单桩基础是海上风电场多兆瓦级风电机组基础最常见的类型，单桩基础的优势在于它能够在水深 25 --;30 m 的地方安装，并且对海床表面的处理比重力沉箱基础要少。需要额外的装备，例如打桩锤。在深水区使用单桩基础比重力沉箱基础的成本要低。

对于 3MW、重量接近 320t 的风电机组，单桩基础已经在水深达到 20m 的地方安装。单机容量为 5 MW 的风电机组，其重量约 620t，这需要更大的单桩，但这样大直径的桩很难打入海床中，因此典型的 5 MW 风电机组，通常使用其他的基础设计，如导管架基础，或者像 Thornton Bank 项目使用重力沉箱基础。

#### 11.1.3 三脚架基础

这是为 Multibrid 5MW 风电机组设计的基础，三脚架将风电机组的重量通过三条腿和横梁转移到海床，同海床有三点接触。每一条腿被 35 到 45 个桩固定住，结构平衡，一个钢法兰将塔的底部融入到底层构造中。

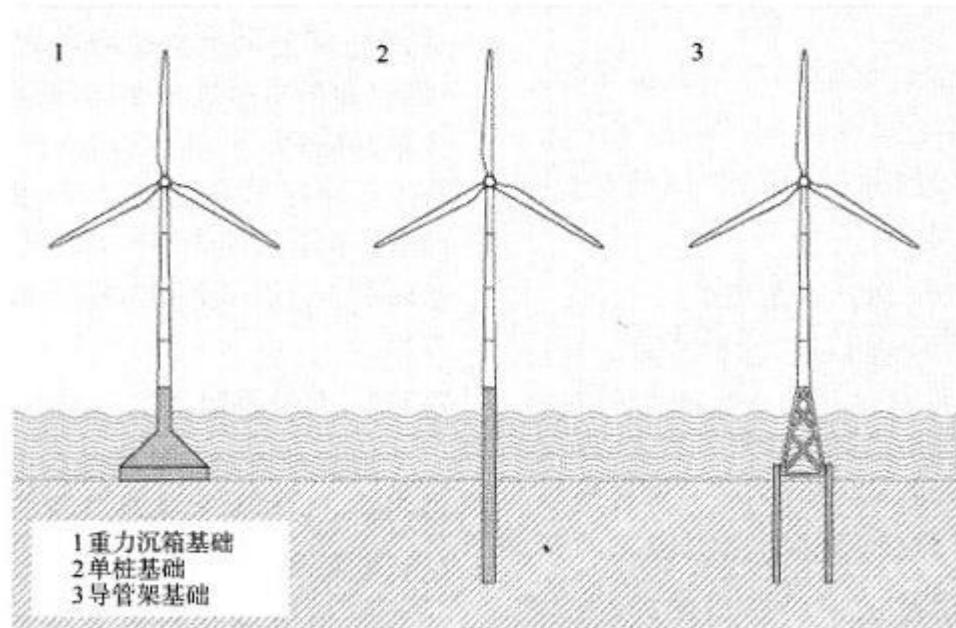
#### 11.1.4 三桩基础

巴德工程有限公司已经开发出一种"tripile"的基础，使用三个桩，每个桩的直径大约3m；三个桩呈三角形分布，顶部用一个转换导管接头相连，转换导管接头位于三脚型的中心，上面要放置风电机组。

### 11.1.5 导管架基础

导管架的结构是一些固定在海底的桩。目前使用导管架基础的是两台 REpower 5MW 风电机组，在苏格兰 Moray 河口的 Beatrice 风电场，水深大于 40m。当水深很深，或者风电机组单机容量过大，导管架基础是唯一可行的。英国 Ormonde 风电场，30 台 5MW 的风电机组将使用这种基础。

导管架基础比单桩基础昂贵得多。这是因为制造导管架更复杂，安装成本也很高。



海上风机基础类别示意图

## 11.2 风机的微观选址与选型

### 11.2.1 风机的微观选址

通常陆上风电项目风电机组沿主风向布置间隔介于4和7倍于风轮直径，垂直于主风向为3至5倍于风轮直径。海上风电场，由于海面粗糙度低，尾流效应衰减需要更长的距离。理论上，为使尾流损失最小化，风电机组间距应尽可能的大，尤其是在主风向上的风机布置间隔。然而，这必须兼顾考虑所增加布线成本，交通成本和可用面积的限制。综合考虑，海上风电场建议使用 $11 \times 9$ 倍叶轮直径间距，实际间距可以根据风玫瑰图的形状优化。

## 11.2.2 风机机组选型

微观选址设计取决于使用的风电机组型号。因为最终选定机型由风电机组对机位的适用性、风电机组可利用率、价格等因素所决定。一个可行的办法是根据风场所计划的装机量，利用不同容量的风电机组，设计几个风电机组布局方案。目前海上风电项目最常用的单台风电机组容量为2MW、3MW、3.6MW，5MW和6MW。

海洋和陆地的风电机组组成部分大致相同，不同之处在于海上风电机组在腐蚀性环境中需要得到更多的保护，并包括其他接入设备。

风电机组制造商倾向于生产功率更大的机组，安装在更深和离岸更远的海上。因为风电机组叶片尺寸增加，使得重量和长度比率逐渐接近的临界值，风电机组厂商因此会对他们的设计做更多的创新。另外，如发电机和齿轮箱的尺寸，风电机组的总重量都影响着未来的风电机组设计。

## 12. 中国风电发展的相关问题

### (1) 清洁发展机制

清洁发展机制（CDM）是根据《京都议定书》规定设计的一项方法，旨在促进相对贫穷的发展中国家中的清洁能源项目得到富裕国家的资金支持。中国企业已经充分利用了这一机制。

### (2) 电网接入

作为一个间歇性、多变化的电源，大型的风电开发势必会面临如何顺利接入电网的挑战。中国的风电场主要位于远离负载中心的地区，并且当地的电网设施相对较差，因此当前的电网设计对于风电的发展构成了限制。这一点已经成为中国今后风电发展面临的最大问题。

关于电网接入，四项问题是未来需要解决的。

- 首先是电网设施自身的落后。专门建设长途电力传输线路以满足大规模的风电和光电发展，如今已经成为中国能源基础设施中不可或缺的关键组成部分。
- 第二个问题是电网企业不愿意接纳风电上网。中国的《可再生能源法》明文规定要求电网企业收购与日俱增的可再生能源发电量，目标是要在2020年达到可再生能源发电量比重占总发电量的8%。然而这一规定并不具有可操作性。电网企业不接纳接受可再生能源发电并没有得到应有惩罚，对于风电企业受到的损失也没有补偿，因此电网

企业既并没有压力、也没有动力积极接纳包括风电在内的可再生能源电力上网。

- 第三个问题是风电与电网技术要求之间的兼容性
- 中国需要效仿其他拥有大量可再生能源的国家的做法，实施可再生能源发电接入电网的技术标准和规定。风电输出预测，增加天然气发电、抽水蓄能电站、建立必要的储能设施和发展电动汽车等都应当考虑为有效利用风电的措施。

### (3) 风电的定价政策

风电的定价政策并不能公正地反映其目前所面临的电网接入的困难，常常导致实际接入电网的电量达不到事先约定的数量。现有的风电价格确定机制和电力调度的规则也无法充分反映发电企业在电网安全运行过程中发挥的作用，如调峰和备用电源的使用。风电开发也受到了国家增值税制度的最新修改和来自 CDM 收入减少的不利影响。

## 13. 2011 中国风电限电情况

近年来，由于电网调度限制风电场发电出力导致的风电发电量损失现象已经成为影响风电产业健康、可持续发展和国家非化石能源消费战略目标完成的主要制约因素之一。

2011 年部分省区风电限电出力损失统计表

省份	期末容量 (MW)	总应发电量 (亿千瓦时)	限出力损失电量 (亿千瓦时)	限出力比例 (%)
甘肃	2102.6	43.33	10.94	25.25
内蒙古	7647.25	142.25	32.87	23.10
吉林	1187	22.60	4.75	21.02
黑龙江	1551.2	31.17	4.48	14.39
辽宁	2181	37.32	3.90	10.45
新疆	597.3	13.39	0.70	5.20

## 14. 大规模风电的输送实例

风电与风电火电“打捆”远距离输电

±800kV 特高压直流输电，甘肃酒泉 - 江苏泰州

输电距离 2400km，最大输电功率 720 万 kW (7.2GW)

风电最大出力按装机容量 95% 考虑，不参与受端电网调峰。

火电标杆电价：

送端甘肃-0.2765 元/kWh，受端江苏-0.4358 元/kWh。

输电价：

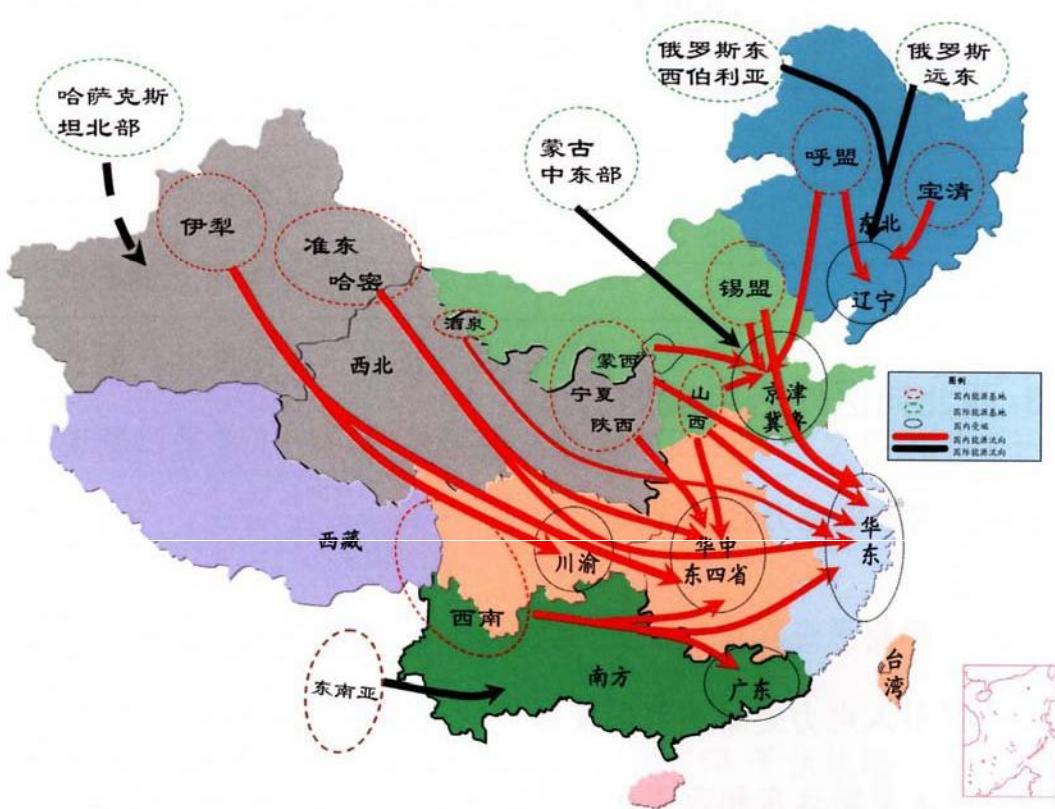
纯送风电-0.3094 元/kWh，

风火“打捆”-0.1247 元/kWh (当输电利用小时数为 5400)。

落地电价：

纯送风电-0.5859 元/kWh，比江苏风电标杆电价 0.61 元/kWh 低。

风火“打捆”-0.4012 元/kWh，比江苏火电标杆电价低 0.0241 元/kWh。



我国未来电力流向示意图

## 15. 风电机组在不同气候环境条件下的适应性



抗台风



抗低温



抗腐蚀



抗雷击

## 16. 风电机组吊装



海上风机吊装



陆上风机吊装

## 17. 国内风机事故实例

### (1) 鹤顶山风电场遭遇台风损坏



位于鹤顶山顶的风电场有 3 台 600KW 风机钢塔被折断、2 台刚完成吊装的国产 750KW 风机连基础被拔出、5 台风机机舱盖被吹坏、11 台风机叶片被吹断。

被吹倒的测风仪留下的最后数据显示，山顶上风电场的瞬时风速 85 米/秒。是中国风电界至今为止遭受到的最大破坏。



2台连基础被拔出的国产750KW风机，断面为的塔筒预埋段底部小平台，预埋段未深入到大基础平台下。从被拉断的钢筋看，垂直方向的钢筋不仅太细，而且分布很稀少，径向间距竟达60cm，环向间距也达40cm。在基础混凝土浇灌时还有二次浇灌的可能。因此基础设计或施工明显有问题。

风机倒塔、叶片损坏：



浙江鹤顶山风电场 750kW 机组被超强台风“桑美”吹倒，暴露基础缺陷。





浙江鹤顶山风电场几乎所有叶片被超强台风“桑美”吹坏。





叶片损坏照片

浙江鹤顶山风电场多个塔筒被超强台风“桑美”吹倒，显示出薄弱环节。

## 风电机组塔筒倒塌





螺栓剪断



塔筒弯折

浙江鹤顶山风电场机组风后现状



赛罕北方龙源风电场：

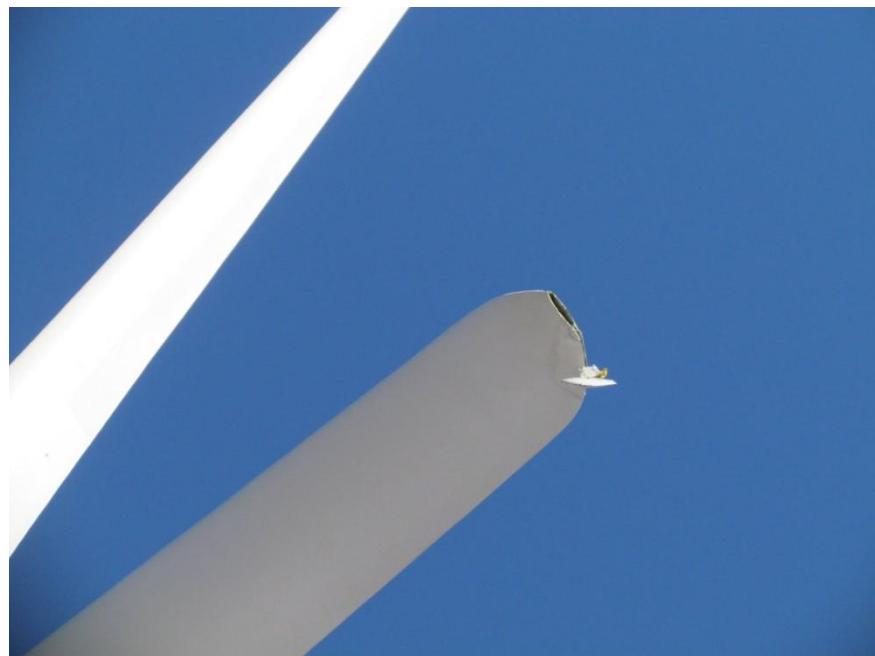


山西左云风电场：



叶片损坏案例：





风雨损坏案例：



围墙倒塌



35KV 线杆倒塌

风电机组火灾:







风电机组齿轮箱问题：



冰雪灾害中的风力发电机组：

(1) 2011.10 丰宁冰雪灾害

70m 高度瞬间风速 59.27m/s,

线路覆冰厚度 300mm





(2) 湖南江华县沱江 1650kW 机组







(3) 浙江括苍山 600kW 机组







## 18. 国外风机事故实例

(1) 2009年底，美国棕榈泉某风场被洪水冲刷，扩展基础出现倾覆倒塌



- P&H 基础未出现任何的破坏





(2) 欧洲某风场风机倾覆





(3) 2009 年 12 月纽约某风场风机倒塌



## 19. 新能源发展趋势——风光储互补

### 19.1 风光互补

风电、太阳能发电两者有一定的错峰效应，风光互补是未来的新能源发展趋势，风光互补后的整体出力更为平稳。采用风光互补的方式可以达到 2 个目的：

- 1) 提高输变电设备的利用率
- 2) 总的输出比单个输出平稳



### 19.2 风光储互补

- (1) 通过引入储能，来缓冲风光互补之后的间歇性、随机性；
- (2) 通过引入储能，将超发的电能暂时储存；
- (3) 通过储能配合风功率、光功率预测，达到高准确度的出力预测。



### 储能的发展趋势

制约因素：

- (1) 目前储能造价较高；
- (2) 无相应的发电端应用支持政策；

展望：

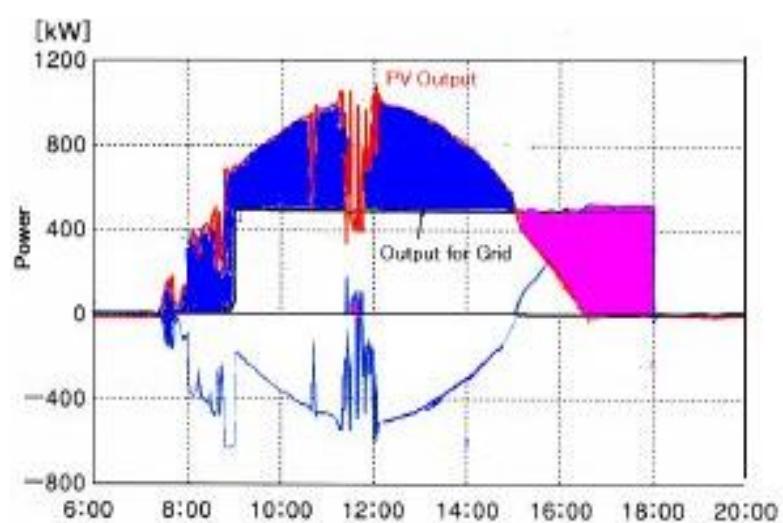
- (1) 以新能源汽车用锂电池的梯级利用是一个重要方向；
- (2) 钒电池的产业化速度在加快。

提出问题的具体化：

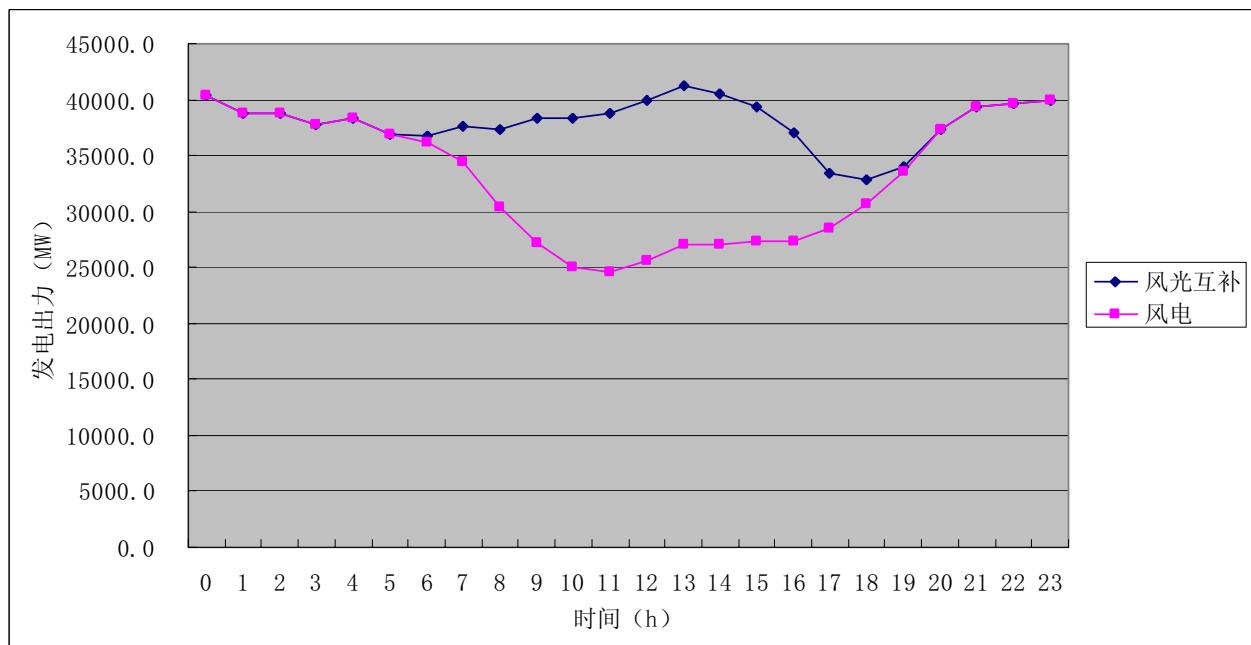
- (1) 综合考虑风电场出力特性、光热发电设备选型的可行性及光热发电经济性等因素；
- (2) 风电场与光热电站（不带储能）容量如何匹配，达到输出相对稳定和尽可能地利用风电场原有的输变电设备。



图 6-6 使用钠硫电池储能的风电场（美国）

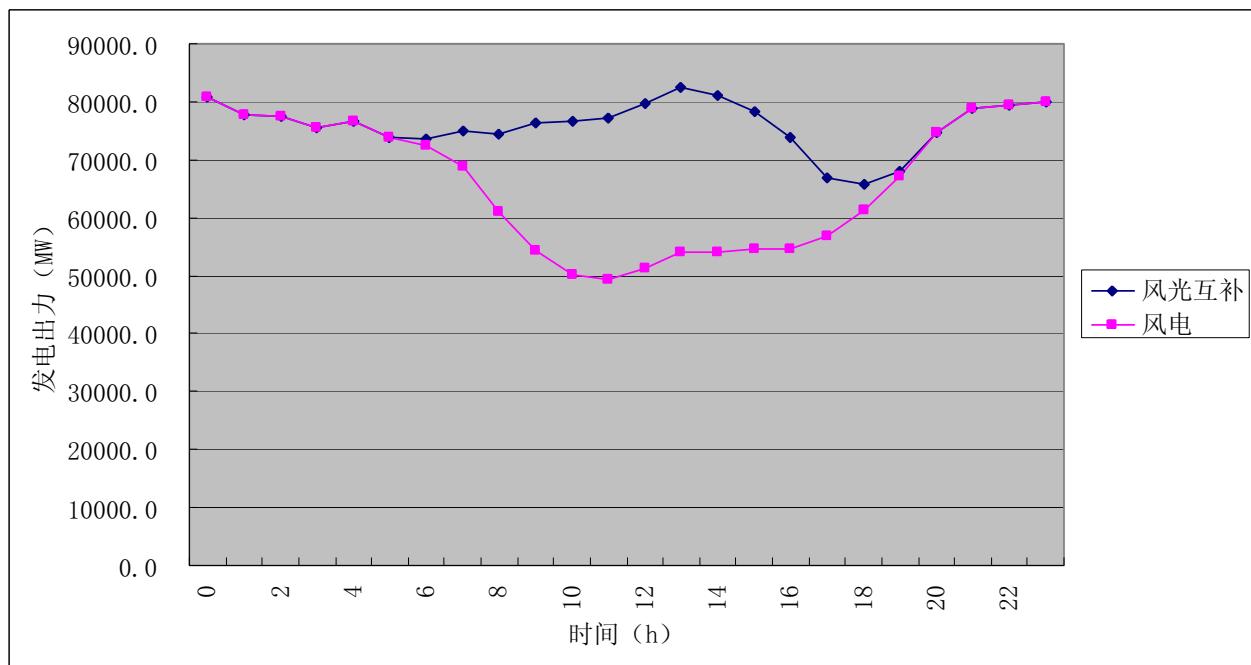


### 风光互补后的平稳效果 (100+25)



风电、风光互补全年典型日出力曲线

### 风光互补后的平稳效果 (200+50)



风电、风光互补全年典型日出力曲线

## 风光互补总体投资

- 目前风电项目单位千瓦造价约为 8000 元/kW；
- 槽式太阳能光热项目目前在我国尚处于初期，目前造价较高，约为 20000~35000 元/kW。
- 风光互补项目组成比例为：100MW 风电和 25MW 太阳能热发电时，单位造价约为 12500 ~ 13500 元/kW。



未来的智能电网

风电、光伏发电具有随机性、波动性和间歇性的发电特性，改善其发电特性是国际上新能源开发利用技术的研究热点。

目前，国外已开展了风/储和小规模光/储研究与示范应用，但尚未有大规模风光互补或风光储输联合发电工程的范例。

国外已建成工程概况表

项目地点	新能源规模	储能规模	示范特点
日本 青森六所村	51MW 风电	34MW 钠硫电池储能	储能白天辅助风电按计划曲线出力，目标偏差 <2%； 夜间存储风电。
日本 北海道苦前	30MW 风电	4MW 液流电池储能	储能将风电场出力波动抑制在 15%，以满足接 入点的频率偏差小于 0.2HZ 要求。
日本 北海道稚内	5MW 光伏	1.5MW 钠硫电池储能	储能辅助光伏按计划曲线出力
德国柏林 younicos 公司	200k 光伏、 1MW 燃气轮机	1MW 钠硫电池	开展微网联合示范
美国 新墨西哥州	1MW 光伏	1MW 钠硫电池	开展微网联合示范

风光互补存在的问题：

1. 风、光互补并不能解决输出随机性和间歇性的问题；但有一定程度的缓解。
2. 风、光互补在不增加输变电容量的情况下，会造成一定的发电量损失，但量极少。
3. 风、光互补之后准确预测出力仍较难。
4. 光热发电若选择的汽轮机组容量较小在一定程度上将影响光热电站的整体发电效率。

## 20. 2011 年中国风机新增装机容量统计

2011 年中国(不包括台湾地区)新增安装风电机组 11409 台, 装机容量 17630. 9MW,  
累计安装风电机组 45894 台, 装机容量 62364. 2MW, 年增长 39. 4%。

### 2011 年中国新增风电装机前 20 机组制造商

(单位: MW) 序号	制造商	新增装机容量	市场份额
1	金风	3600. 0	20. 4%
2	华锐	2939. 0	16. 7%
3	联合动力	2847. 0	16. 1%
4	明阳	1177. 5	6. 7%
5	东汽	946. 0	5. 4%
6	湘电风能	712. 5	4. 0%
7	上海电气	708. 1	4. 0%
8	Vestas	661. 9	3. 8%
9	华创	625. 5	3. 5%
10	南车风电	451. 2	2. 6%
11	GE	408. 5	2. 3%
12	重庆海装	396. 0	2. 2%
13	运达	375. 0	2. 1%
14	Gamesa	361. 6	2. 1%
15	远景能源	348. 0	2. 0%
16	银星能源	221. 0	1. 3%
17	三一电气	179. 5	1. 0%
18	许继风电	166. 0	0. 9%
19	华仪	151. 0	0. 9%
20	Suzlon	96. 2	0. 5%
其他		259. 4	1. 5%
总计		17630. 9	100%