

蓝色海洋与绿色能源的交响

撰文/卢纯

历史上的大国崛起都反复证明了一个定律：背海而弱、向海则兴。党的十九大明确提出，要加快建设海洋强国，并将其作为建设现代化经济体系的重要组成部分。推动我国实现由海洋大国向海洋强国的历史跨越，体现了以习近平同志为核心的党中央“以海兴国”的民族史观，实施这一重大战略部署，对推动新时代中国特色社会主义经济社会持续健康发展，对维护国家主权、安全和发展利益，对决胜全面建成小康社会目标、进而实现中华民族伟大复兴中国梦具有重大深远的意义。

随着科学技术的进步，人类对海洋的认识已不再局限于“兴渔盐之利，通舟楫之便”，我们认识到，占地球表面积71%的蓝色水体将是提供21世纪人类文明发展资源和发展空间的“新大陆”。开发利用海洋清洁能源，是推进能源生产和消费革命，解决能源危机、环境危机和发展困局，构建清洁低碳的能源体系，进而实现人与自然和谐相处的重要途径，是新时代我国能源发展的总体目标。

海上风电是开发利用海洋清洁能源的重大科技成果。一台5兆瓦的海上风力机理论上可提供1万户家庭1年的用电量，是未来替代化石燃料的重要替代性能源。海上风电是清洁的可再生能源，资源储量丰富、不占用土地、靠近沿海电力负荷中心、风功率密度大、发电利用小时数高，已在全球快速发展。自上世纪末首台海上风力发电机在丹麦投运以来，近年来英国、德国等欧洲发达国家明确提出将海上风电作为未来能源的主要发展方向，预计到2030年，海上风电将承担起欧洲7%~11%的社会用电量。目前，英国是世界上最大的海上风电市场，其装机规模约占全球的40%，中国暂位列第三，约占全球装机规模的11%，发展势头和竞争优势十分

明显。

海上风电也是发展海洋经济的重要组成部分。通过规模化开发海上风电，不仅可以为沿海城市群提供稳定、低价、清洁的发展动能，更有利于培育若干世界级先进制造业集群，促进我国海上风电产业迈向全球价值链中高端；有利于推动海洋勘测、海洋船舶、海洋运输、海洋施工、海洋渔业等传统海洋产业的转型升级，优化我国海洋经济布局。

我国大陆海岸线广阔，海上风能源资源丰富，仅在5~25米水深海域的海上风电潜在开发量就超过2亿千瓦，装机相当于10个三峡电站。随着水深和离岸距离增加，还有更为广阔的开发空间，将对我国能源供给结构和海洋经济产业产生重大变革。背靠共和国富饶的万里海疆资源，以中国三峡集团为代表的中国企业正在按照党中央指示要求，加快集中规模化开发海上风电资源，通过建设百万千瓦级海上风电场，进一步降低开发成本，推动海上风电真正成为可以不依赖国家补贴的电源形式。同时，我们秉承打造中国海上风电全产业链的使命，通过引进消化吸收再创新，推动实现中国海上风电建设、管理、技术、标准、人才、品牌等六个方面实现全球引领，进一步增强我国海洋产业和清洁能源产业的国际竞争力，为建设海洋强国和清洁能源强国贡献力量。

数千年来，人类文明最执着的探索莫过于仰望星空和征服海洋，而我们对海洋的了解还不及38.9万千米之外的月球，神秘的海洋仍然蕴藏着人类远未认知和开发的宝藏。我们有充足的理由相信，21世纪是属于海洋的世纪，是属于清洁能源的世纪，蓝色海洋和绿色能源将共同演奏出和谐、美丽的交响！



卢纯

中国长江三峡集团董事长、党组书记，国务院三峡工程建设委员会副主任。兼任中德经济顾问委员会委员，中国电力企业联合会副理事长。历任国务院三峡工程建设委员会移民开发局计财司副司长、司长，局办公室主任，机关党委副书记，国务院三峡工程建设委员会移民开发局党组成员、纪检组组长，国务院三峡工程建设委员会办公室党组成员、副主任，国务院三峡工程建设委员会办公室党组副书记、副主任。

海上风电



尖端科技打造的可再生能源 矗立在海上的绿色发电厂

总策划：毕亚雄 沙先华 秦海岩

顾问：徐建中

特约专家：白勇 杨骏 张明明 林毅峰 宋强

编写人员：李洋 张磊 张险峰 雒德宏 李霞 陈海元 高占辉 陈蓉 张一楠 漆召兵 韩承臻 吴冠宇

支持单位：中国科学院工程热物理研究所 中国可再生能源学会风能专业委员会 中国长江三峡集团公司

鸣谢：孙强 王武斌 樊建军 李斌 李小冬 董秀芬 王益群 雷增卷 吕鹏远 王锋 严斐 夏云峰 王伦辉

王靖 孙荣刚 蔡东 何俊生 杨一行 中国三峡新能源公司 福建能投公司 三峡国际能源投资集团有限公司

响水长江风力发电有限公司 上海勘测设计院有限公司 金风科技公司 通用电气公司（GE） 中交三航局 三峡发展公司 江苏中天科技股份有限公司

从夜色中的万家灯火，到快捷方便的电子商务，再到驰骋南北的高速铁路，我们每时每刻都在享受着能源带来的便利。目前，支撑现代社会的核心资源仍然是石油、煤、天然气等化石能源。但其产生的大量二氧化碳已经深刻改变了大气的组成，进而导致了气候变化。在2015年巴黎气候大会上，世界各国为了未来的美好世界，确定将合力消减二氧化碳的排放。使用清洁的可再生能源成为人类发展的必经之路。

今天，大力发展可再生能源的中国，在水电、风电、太阳能等领域的发电规模均已达世界第一，而其中风电以其技术可靠、成本低廉的优势尤为受到关注。海上蕴含着巨大的风能，随着陆地风电的逐步开发，海上风电技术也得到了快速发展。自2009年上海东海大桥海上风电场并网发电以来，我国陆续在江苏、福建、广东、山东、辽宁等地的近海建设多座海上风电场。在不远的未来，来自海上的电能将会成为支撑国家发展的重要力量。接下来，就让我们看看先进的海上风电技术，探访一下方兴未艾的中国海上风电建设吧。

海上风力机

海上风力发电机组自上而下可分为由叶片和中间的轮毂构成的吸纳风能的风轮，内置将机械能转化为电能的发电设备的机舱，支撑机舱与风轮并提供人员、线缆通道的塔筒，以及连接塔筒和海床、承载风力机重力的基础。

本图为美国东北部布洛克岛海上风电场的通用（GE）赫利阿德（Haliade）6兆瓦永磁直驱式风力机（采用导管架式基础）。每台机组额定功率6.0兆瓦，切入风速3米/秒，切出风速25米/秒，风轮直径150米。















德国梅尔海上风电场

梅尔（Meerwind）海上风电场位于德国北海海域、黑尔戈兰岛（Helgoland）以北23千米处，距离欧洲大陆海岸直线最短距离53千米，场址面积42平方千米，水深22~26米。风电场共安装3.6兆瓦风力机80台，总装机容量28.8万千瓦。风电场内轮毂高度年均风速可达9.8米/秒，一年内风能资源分布较平均，破坏性天气罕见。

梅尔海上风电场于2015年2月全部并网发电，年均发电量约12亿千瓦时，年可利用小时数4200。它

是目前德国最大的已投产海上风电项目之一，能够为36万户家庭提供绿色电力。

2016年6月13日，在中德两国总理李克强、默克尔的见证下，三峡集团与美国黑石集团、德国稳达风电公司共同签署了《关于德国海上风电项目投资合作协议》，三峡集团收购了梅尔海上风电场80%股权。这是我国首次控股境外已投运的海上风电项目，有助于我国吸收欧洲的海上风电开发技术经验，加速国内海上风电开发体系建设和标准规范制定。

永不枯竭的风能

风，是我们每天都习以为常的自然现象。在公园的游船上，总能体会到清风徐来、水波不兴的逸兴；而当身处远洋的海轮时，可能就是阴风怒号、浊浪排空的恐惧。不知你可曾想过，如此变化多端的风是怎么来的呢？

追根溯源的话，风和我们所利用的绝大部分能量一样，都来自于太阳。地表各处吸收的太阳辐射能量不同，加热其上方空气的能力便会有差异。冷暖不一的空气形成了不均匀的气压，在水平方向上从高气压向低气压流动，就形成了风。太阳辐射到地球上的能量中，大约有2%转化为了风能，造就了对人类而言极其庞大的可再生能源。整个地球的风能约为2.74万亿千瓦，其中能够利用的差不多有200亿千瓦，是当今全球电力装机总量的3倍多。根据测算，中国可开发利用的风能资源有10亿千瓦，其中陆地有2.5亿千瓦，近海地区有7.5亿千瓦，是世界上风能资源较为丰富的地区。

人类利用风能的历史

虽说今天把风能称作一种新能源，

但风其实是人类最早利用的能源之一。我们小时候常玩的风车，就是一种将风能转化为机械能的工具。

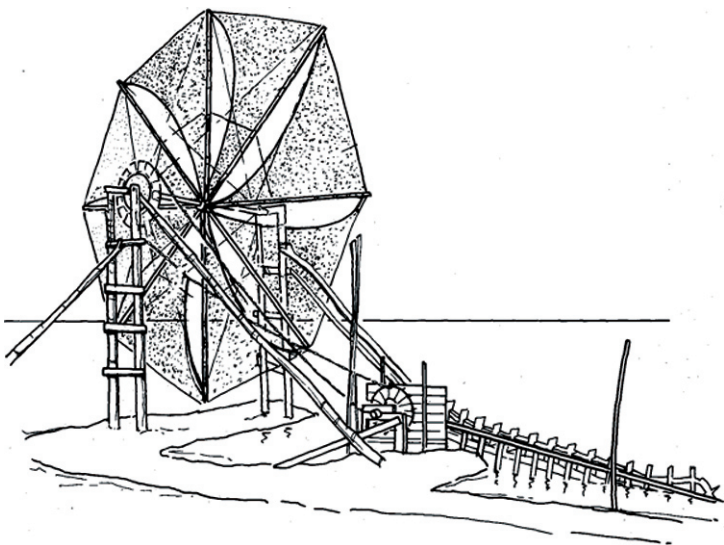
利用风能最古老的方式，大概是用风帆来推动船只。古埃及人早在数千年前，便在尼罗河上驾驶帆船了。太平洋上的波利尼西亚人，更是用风帆独木舟征服了西及马达加斯加、东至复活节岛的广大海域。我国殷商时期的甲骨文中，就发现了帆的象形文字，战国时期铜鉴的船纹上也有风帆。明朝时郑和率领风帆舰队七下西洋，最远直抵东非。半个世纪后，欧洲人的风帆舰队开启了地理大发现时代，将全球连成一体。虽说在以蒸汽机为动力、螺旋桨为推进器的轮船出现后，帆船已经不再是水上运输的主力，但时至今日，帆船仍然葆有着独特的魅力。

将多个风帆绑在一根轴上，借助风力循环运动，就成为了风车。早在公元前，波斯人便已经开始利用垂直轴风车碾米。在10~11世纪，中东地区广泛使用风车来提水。13~14世纪风车传到欧洲，随后成为文艺复兴时期欧洲不可缺

少的动力设备。18世纪，荷兰曾利用近万座风车将海堤内的水排干，造出的良田相当于其国土面积的1/3，成为了著名的风车之国。19世纪中晚期，美国大规模开发当时荒凉的西部。为了解决人畜饮水问题，人们利用风车驱动活塞泵用于提水，在这些美国风车农场里，风车数量高达600万台。

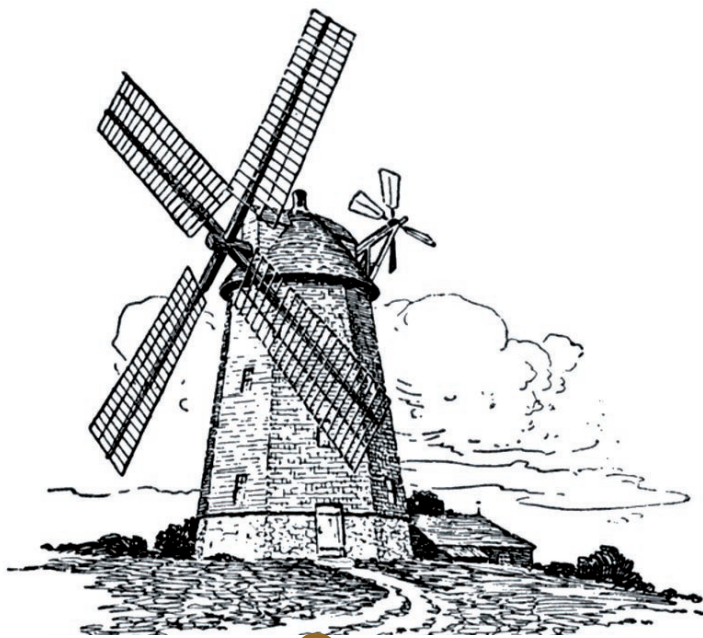
我国利用风车的历史也很早，在东汉时期的壁画上，就有了风车的图形。到宋元时期，诗词中出现了利用风力推动磨盘来磨面的场景。明朝则大规模利用风车来提水灌溉及提海水制盐。当时使用的风车是将8个帆编在一个直立的杆上的立帆式垂直轴风轮，也称为走马灯式风车。这种风车一直使用到20世纪50年代，仅在江苏沿海利用风力提水的设备便曾高达20万台。

在蒸汽机出现之前，风力机是动力机械的一大支柱，但随着化石能源的大规模开采和廉价电力的获得，风能的劣势相形之下更为凸显。首先，风功率密度很低，虽说全球来看风能非常可观，但难以收集起来集中利用。其次，风时



13世纪

东亚利用风车提水灌溉



16世纪

欧洲利用风车排水和磨面

大时小、时有时无，利用风能相当于靠天吃饭，这对需要稳定能源供给的工业来说是非常不利的。最后，风能的分布很不均匀，也无法运输，需要能量的地方不一定富有风。最终，传统的风力机械逐渐被蒸汽机、内燃机、火力发电机等替代了。

风电的兴起

随着第二次科技革命的展开，电力成为了工业的中心。如果将风能转化为电能传输，就可以规避其分布不均匀的缺点。

1887~1888年冬，美国俄亥俄州的查尔斯·布拉什（Charles Brush）安装了第一台自动运行的用于发电的风力机。它是个庞然大物——风轮直径为17米，有144个由雪松木制成的叶片。这台风力机的功率仅为12千瓦，运行了约20年，用来给他家地窖里的蓄电池充电。此后，欧洲的丹麦投入了风力发电研究。1908年，丹麦研制出首批72台单机容量在5~25千瓦的风力发电机组（风力机）。到20世纪60年代，丹麦风力机的容量已经达到了200千瓦，并接入电网发电。美国从20世纪20年代开始研究风力发电设备，主要用在电网无法接入的偏远农民家中，功率不超过数千瓦。1941

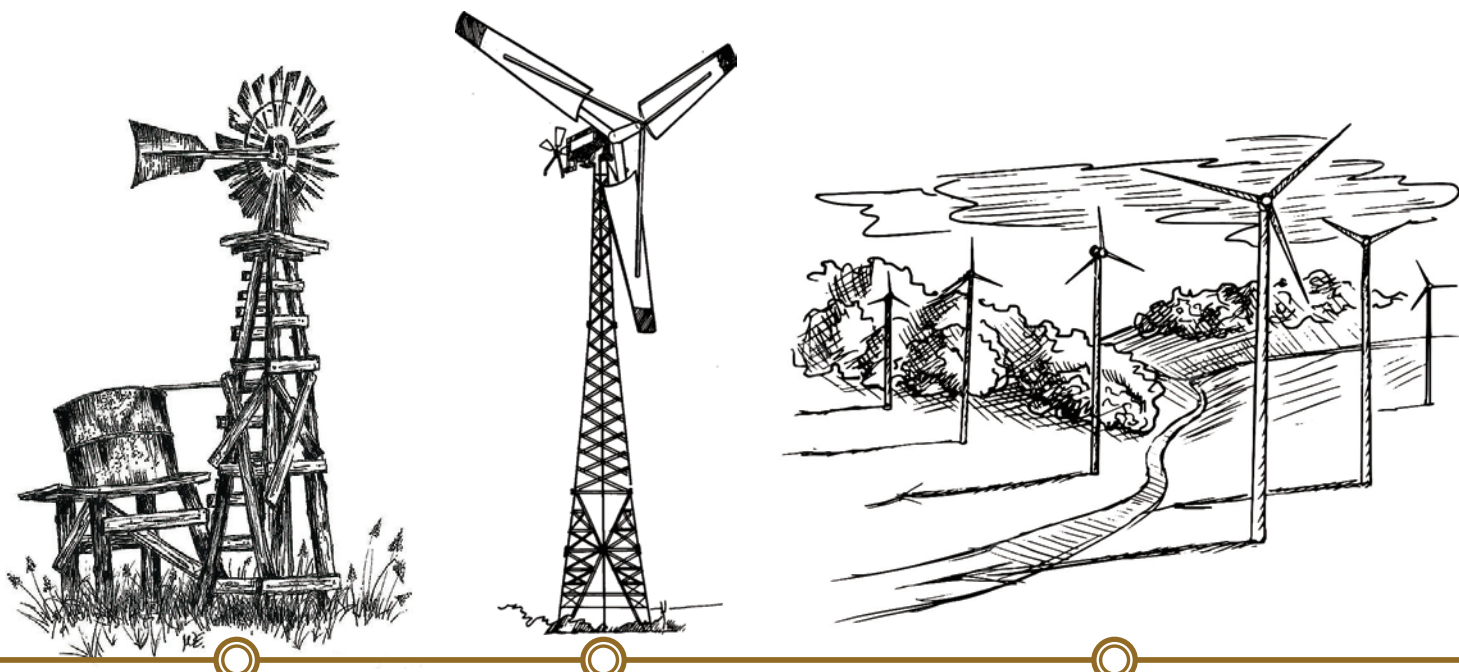
年，美国工程师设计出了兆瓦级（1.25兆瓦，等于1250千瓦）的巨型双桨叶风力发电机组，其风轮的直径达到53.3米，在1支叶片失效前成功运行了1100小时。可是在此后约40年间，都没人重复这个大胆的实验。

风力发电真正得到世界各国的重视，是在1973年石油危机以后。这时人们终于意识到化石能源终有一天会消耗殆尽，同时燃料燃烧引起的空气污染和气候变化问题也逐步得到了重视。风能作为一种取之不尽、用之不竭的清洁能源重新回到了主流工业界的视野，并得以快速发展。自1980年以后，风力发电叶片不断加长，单机容量不断增大，从80年代的100千瓦，到90年代200千瓦，再到新世纪的兆瓦，目前最新的主流机组已经达到了5~6兆瓦左右。随着风力发电机技术逐步走向成熟，大规模风电场开发和商业化并网发电也逐步成为了现实。美国在2016年的风电总发电量达到2260亿千瓦时，全国发电量的5.5%来自于风电。同时，根据美国能源部于2017年发布的年度《风能技术市场报告》，风电已经成为美国价格最低的电力来源，发电成本在2~4美分（相当于0.13~0.27元人民币）每千瓦时，仅相当于天然气发电厂的一半。

我国风力发电的研究与世界基本同步，自20世纪70年代以来，在内蒙古、甘肃、青海及东南沿海的海岛上安装了许多单机容量在50~500瓦左右的微型风力机，用来给牧民和岛民提供照明、提水、娱乐、畜群电栅栏、饲料粉碎等服务。到了80年代，我国开始研制大、中型风力发电机组，在新疆、内蒙古的风口及山东、浙江、福建、广东的岛屿建立了8座示范性风力发电场，到1992年装机容量已达8000千瓦。

2006年1月1日，《中华人民共和国可再生能源法》正式实施，风电迎来了飞速发展的历史机遇，当年年底，全国风电装机总量便达到260万千瓦，成为继德国、西班牙、美国、印度和丹麦之后风力发电的主要国家之一。到2011年底，中国风电装机总量达到6236.4万千瓦，占全国发电装机总量的5.99%，风电装机总量位居世界第一位。到2016年底，中国累计风电并网装机总量1.49亿千瓦，当年发电2410亿千瓦时，提供了全国4%的电力。

经过四十多年的现代化发展，快速发展的风力发电以其技术可靠、成本低廉的优势，已被公认为最实用的可再生电力来源。而方兴未艾的海上风电由于其巨大的商业潜力和环保效益，也已引发了世界各国的关注。



19世纪

北美利用风车给农场泵水

20世纪初

小型风力机用于偏远地区发电

20世纪80年代

建设大规模风电场

利用海上风能

目前，世界上绝大部分风电设备都安装在陆地上，但人们早已把目光投向了海洋。1990年，瑞典安装了第一台试验性的海上风电机组，离岸350米，水深6米，单机容量220千瓦。1991年，丹麦在波罗的海的洛兰岛西北沿海建成了世界上第一个海上风电场，拥有11台450千瓦风力机，能为2000~3000户居民供电。自2000年起，兆瓦级风力机开始用于海上，从而让海上风电项目初步具备了商业化应用价值。2002年，丹麦在北海海域建成了世界上第一座大型海上风电场，安装2兆瓦风力机80台，装机容量16万千瓦。随后，瑞典、德国、英国、爱尔兰、荷兰、比利时、法国等诸多欧洲国家都陆续投入了海上风电场的建设。在欧洲之外，目前中国也在大规模建设海上风电场。2007年，首台1.5兆瓦海上风电机组安装于渤海，接入海上油田的独立电网。2010年，上海东

海大桥建成第一个并网发电的海上风电场，共有34台3兆瓦机组，装机容量10.2万千瓦。

海上风电的优势

在大海上开发风电有着显而易见的劣势：施工难度大，维护困难，成本较高。一般认为，海上风电的开发成本比陆上风电要高出50%。那我们为何要建设海上风电场呢？

风力发电最关键的因素就是风的大小，而海上风况普遍优于陆上，离岸10千米的海上风速通常比沿岸要高出20%。风力机的发电功率与风速的三次方成正比，因而同等条件下海上风力机的年发电量比陆上高70%。同时海上很少有静风期，因此风力机的发电时间更长。通常来说，陆上风力机的年发电利用小时数大约是2000小时，而海上风力机往往能达到3000

多小时。

对风电设备而言，陆地地形复杂、粗糙度高，不同高度的风速常常相差很大，导致风切变与湍流，使得风轮上下受力不均衡，可导致叶片振动、疲劳乃至断裂，同时传动系统也容易损坏。而海上就很少有此类风险，海面通常都很平坦，不同高度的风速相差不大，风向也相对不易变化，因此海上的风能很平稳。

我国的经济中心和用电中心都集中在东部沿海地区，但陆上风电最丰富的地区却位于地广人稀的“三北地区”。这些地区大量发出的风电，难以在本地电网消纳，造成了严重的“弃风”浪费。而海上风电大多建设在距海岸数十千米处，接近用电中心，基本没有弃风之虞。

同时，陆地土地资源十分稀缺，建设大规模风电场面临复杂的所有权争执和严峻的用地矛盾。而海上海床的所有权都属于国家，便于建设大规模风电场。随着风力机的容量越来越



我国首座海上风电场——上海东海大桥海上风电场

上海东海大桥海上风电项目是全球第一个位于欧洲以外的海上风电并网项目，也是中国第一个国家海上风电示范项目。该项目位于东海大桥东侧的上海市海域，距离岸线8~13千米，平均水深10米，采用华锐风电的34台3兆瓦海上风力机，总装机容量10.2万千瓦，年发电量可达2.6亿千瓦时，所发电能将通过海底电缆输送回陆地，可供上海20多万户居民使用，相当于每年节约燃煤10

万吨，每年减排二氧化碳20万吨。

东海大桥海上风电场采用了自主研发的3兆瓦离岸型机组，标志着我国大功率海上风力机的装备制造水平跻身世界先进行列；在我国第一次采用海上风力机整体吊装工艺，大大缩短了海上施工周期；在世界上第一次使用高桩承台基础，有效解决了高耸风机承载、抗拔、水平移位的技术难题。

大，叶片的长度也随之剧增。60米以上乃至上百米的叶片在陆上非常难以运输，但在海上可以直接从叶片工厂海运至风电场。

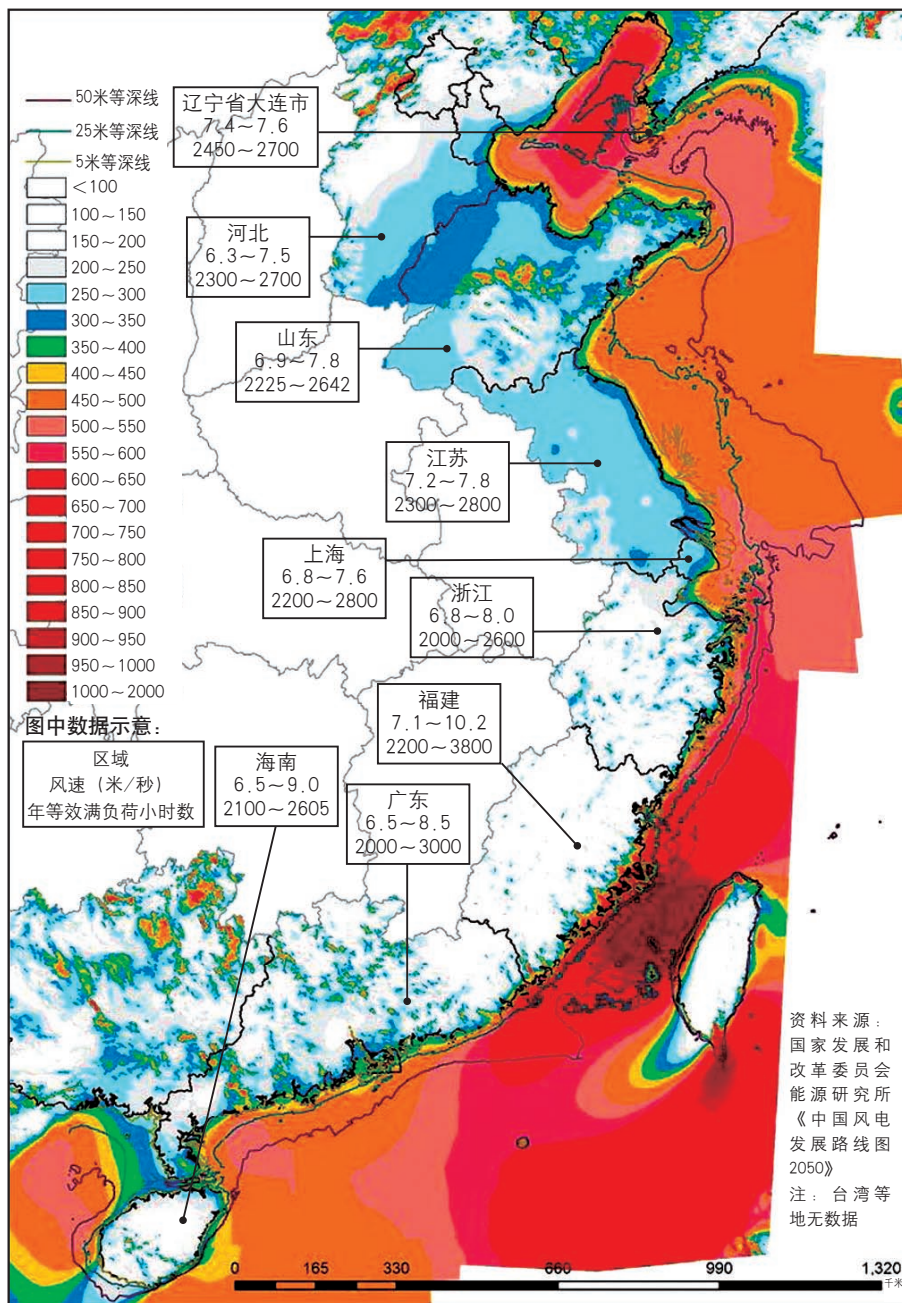
随着陆地优质风能资源的逐步开发，海上风电作为发展趋势已是可以预见的将来。由于海上风电需要更专业的技术，具有更广的适用性，在未来的全球能源供应体系中，海上风电的前景将比陆上风电更为广阔。

我国海上风能资源状况

我国海岸线长约一万八千多千米，岛屿六千多个，相对于陆地，我国近海风能资源更为丰富。根据中国气象局近期对我国风能资源的详查和评价结果，我国近海100米高度层5~25米水深区风能资源技术开发量约为2亿千瓦，5~50米水深区约为5亿千瓦。风能资源数值模拟（右图）表明，台湾海峡是中国近海风能资源最丰富的地区。海峡以南的广东、广西、海南近海风能资源亦较好。从福建省往北，近海风能资源逐渐减小，到渤海湾又有所增强。不过，福建、浙江南部、广东和广西近海风能资源丰富的原因与台风等热带气旋活动有关，开发时需要考虑灾害天气的影响。

海上风能资源是我国国家能源发展战略的重要组成部分。国家风电“十三五”规划提出到2020年建设海上风电1500万千瓦（包括建成500万千瓦，在建1000万千瓦）。各沿海省份在国家规划指导下陆续编制了本省海上风电中长期规划，总规划容量为7422万千瓦，其中规划千万千瓦以上规模的省份有山东、江苏、福建和广东。

我国沿海各区域风能资源分布图



为什么海上的风更大？

虽然工程师们已将风力机越造越大，但目前轮毂（风轮的中心）高度仍然不到100米。也就是说，我们所用风能都来自于贴近地表的气流。所以在预测风能资源时，只需统计高度100米以内的情况。

地表风会受到地表摩擦阻力的影响，因此风速总是小于高空风。在此高度上，陆地上的丘陵、山地、森林和建筑物都会增加摩擦力；一望无际的开阔海洋对风的阻力相当小；而一些特殊的地形，如山谷、垭口、海峡甚至高层建筑间的狭缝，则能收束气流，增加风速，被称为“狭管效应”。这和捏扁橡胶水管，便可加速水流是相同的原理。

除了表面粗糙度低的因素之外，海洋的另一个优势在于其储存的巨大热能易于驱动大气。同样的热量能驱动沙子升温5℃的话，只能让等质量的海水升温1℃。也就是说，海水的比热容远大于陆地。当热量从海水转移到空气中时，空气的温度升高、体积膨胀、气压降低，于是和周边地区形成了压力差。而空气从高压区域流向低压区域所形成的气流就是风。加热1升海水所需的能量足以加热3600升的空气达到相同的温度。

具体到近海与滨海，其风速高于陆地的另一个原因在于海陆风。海陆风指的是由海洋和陆地的温差引起的以昼夜为周期改变风向的

风。白天受到太阳照射时，陆地升温比海洋快。于是陆地上的空气升温明显，密度减小，上升至高空流向海洋，到海洋上空则冷却下沉。这就在陆地表面形成低压区、海洋表面形成高压区，海上的空气向陆地方向运动，形成海风。

晚上则与此相反，由于没有太阳照射，陆地失温比海水快，于是陆上的空气向海洋方向移动，形成陆风。一般来说，海风会比陆风更大。

海陆风的成因与控制我国东部的季风气候相似，不过季风是由冬夏温差而非昼夜温差驱动的，因此规模更大、更为复杂。

快速发展的海上风电

欧洲迅猛发展

自1991年全球第一座海上风电场在丹麦开始运行以来，海上风电发展已经走过了二十余年。早期海上风电发展速度缓慢，2008年以后，随着风电技术的进步以及投资者对海上风能资源认识的不断加深，已经有多个国家将海上风电作为未来风电发展的主要方向，海上风电保持了持续增长的良好势头。

欧洲海上风能资源丰富，一直以来，欧洲海上风电发展也最为迅速，引领着世界海上风电发展。截至2016年底，欧洲海上风电累计装机容量1260万千瓦，占全球海上风电总装机的88%。英国是世界上最大的海上风电市场，装机容量占全球的近36%；其次是德国占29%。2016年，中国海上风电装机量占全球装机量的11%，取代了丹麦，位居第三。接着是丹麦占8.8%，荷兰7.8%，比利时5%，瑞典1.4%。此外还包括芬兰、爱尔兰、西班牙、日本、韩国、美国和挪威等市场，共同促进了整个海上风电的发展。

欧洲在海洋资源综合利用、能源政策制定、环境保护、项目审批等方面形成了一整套促进海上风电产业发展的管理制度和开发理念，具备专业技术一流、产业链完整、开发模式先进、运行经验丰富的海上风电产业优势。目前，欧洲在运风电场的平均单机容量为4.8兆瓦，并准备大规模安装6兆瓦以上大容量机组，包括通用（阿尔斯通）6兆瓦、西门子7兆瓦、三菱重工-维斯塔斯8兆瓦风力机等，首台8兆瓦风力机已在海上并网。

从欧洲海上风电场规模、水深和离岸距离来看，都在呈现不断增加的趋势，截至2016年底，并网海上风电场平均规模为38万千瓦，相比2015年增加了12.3%。并网风电机组的平均水深为29.2米，最深已突破60米；平均离岸距离为43.5千米，最远已突破100千米。据英国皇家财产局编制的《成本下降监测框架》(CRMF)显示，随着技术的进步、规模效应的显现，预计到2025年，欧洲海上风电投资成本将

在2015年的基础上下降35%~40%，海上风电将逐步成为英、德、法等欧洲主要国家未来新能源开发的重点之一。

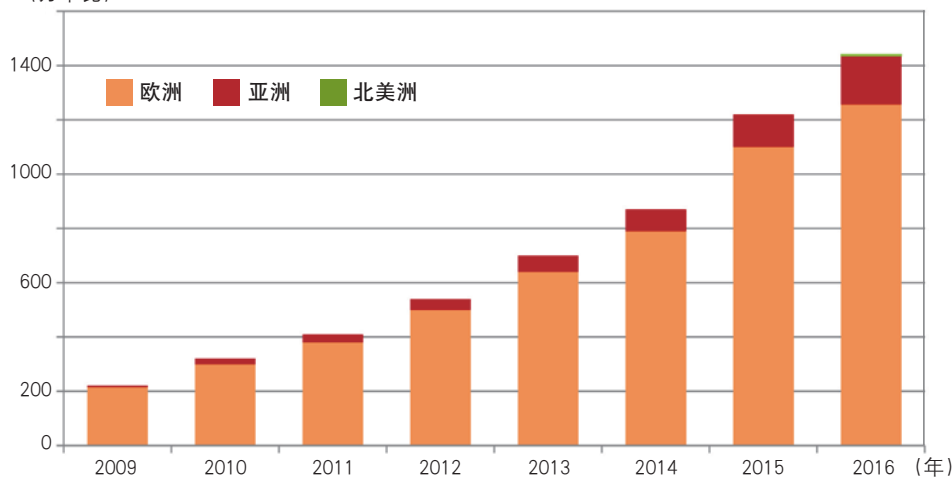
中国快步跟进

自2010年首个海上风电并网项目上海东海大桥海上风电场建成投产以来，在此后的3年里，江苏如东3万千瓦和15万千瓦潮间带试验、示范风电场及其扩建工程陆续建成。2012年底，我国海上风电累计装

机接近40万千瓦；受各种因素影响，2013年海上风电发展显著减缓；自2014年以来，我国海上风电装机迅速增加，当年新增并网容量约20万千瓦，全部位于江苏省；2015年新增装机容量为36万千瓦，主要分布在江苏省和福建省；2016年新增装机154台，容量达到59万千瓦。截至2016年底，我国已建成海上风电累计装机容量162万千瓦，在全球仅次于英国与德国。我国海上风电占全国风电总装机容量的比重由2011年的0.42%上升至2016

全球历年海上风电累积装机容量

(万千瓦)



资料来源: REN 21 Global Status Report

美国海上风电开始起步

美国有着漫长的海岸线，同时也具有巨大的海上风能潜力。据美国国家可再生能源实验室 (NREL) 估计，美国拥有超过40亿千瓦的潜在海上风能，这相当于已安装的常规发电厂容量的4倍。有关技术资源潜力的数据显示，在美国海岸和五大湖区的州以及联邦水域，潜藏着超过20亿千瓦的风能资源。

在过去10年中，美国能源部资助海上风电技术开发近2亿美元，而该项投资的成效也开始在一系列令人兴奋的项目中显现出来。2016年12月，耗资3亿美元的美国第一个海上风电场布洛克岛风电场 (Block Island Wind Farm) 开始向新英格兰电网供电，这可谓美国可再生能源发展的一个重要里程碑。

然而，如果没有联邦气候和可再生能源政策的持续刺激，海上风电的潜力仍然无法实现。在美国“清洁电力计划”下，美国将有义务制定计划，通过投资低碳基础设施来减少能源生产排放。美国国会在2015年批准延长了两

项支持可再生能源发展的税收优惠政策——可再生能源发电税收抵免和联邦商业能源投资税收抵免，这对海上风电技术开发至关重要，这就意味着所有2019年前上马的可再生能源项目都将有资格获得上述税收抵免。

这些政策将需要得到美国政府以及由共和党控制的国会的支持。现任美国总统唐纳德·特朗普 (Donald Trump) 曾表示希望复兴煤炭行业；他提名支持化石能源且怀疑气候变化的里克·佩里 (Rick Perry) 为能源部长，可能会阻碍海上风电行业的发展。特朗普曾用“面目可憎”来形容风电行业，他的当选让美国风电业界开始坐不住了。有640家企业和投资者在2017年2月签署了一封联名信，要求特朗普继续投资清洁能源。

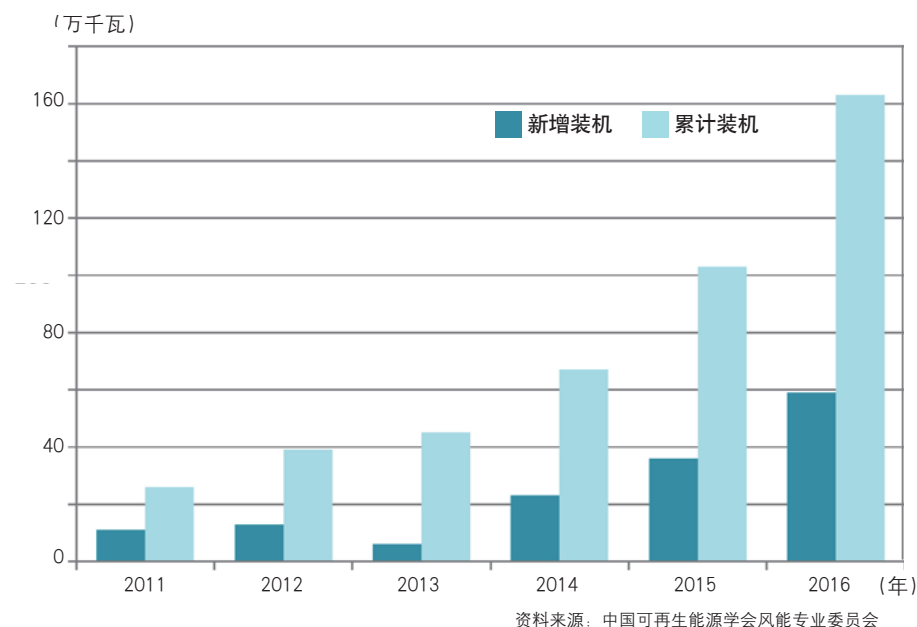
不论短期的政策如何变化，我们有充分的理由相信，美国在未来将循着与欧洲与中国相同的道路接受海上风电，并把海上风电作为推动低碳发电的一股助力。

年的0.96%。

目前在我国所有吊装的海上风力机中，单机容量为4兆瓦的机组最多，累计装机容量达到74万千瓦，占45.5%；其次是3兆瓦机组，占比为14%。我国海上风力机供应商共10家，其中，累计装机容量达到15万千瓦以上的有上海电气、远景能源、华锐风电、金风科技，这4家企业海上风力机装机量占总量的90.1%，其中上海电气以58.3%的占比位于首位。

中国海上风电发展对全球海上风电带来的重大贡献之一就是有效地降低了海上风电场的建设成本。巨大的市场需求带动了海上风力机的迅猛发展，伴随着风力机技术的提升，国内厂家竞争越来越激烈；另外，海上升压站、高压海缆等的造价随着产业化发展有明显的下降趋势；随着施工技术成熟、建设规模扩大化、施工船机专业化，海上风电的施工成本也有所降低。于2015年和2016年并网的东海大桥二期海上风电场和响水近海风电场，与早期的东海大桥一期海上风电场相比，工程成本降低了约20%。

中国海上风电新增和累计装机容量



如今，我国业界甚至已经开始进军海上风电的发源地——欧洲。2016年7月，中广核欧洲能源公司与法国合作方公司组成的联合体成功中标法国首批漂浮海上风电先导项目格鲁瓦（Le Groix）项目，

该项目将由4台单机容量6兆瓦的漂浮式海上风力机组组成。2017年9月，中国长江三峡集团和葡萄牙电力公司成功中标英国莫里（Moray）海上风电项目，该项目装机容量为95万千瓦。

亚洲最大海上风电项目——江苏如东八仙角海上风电场

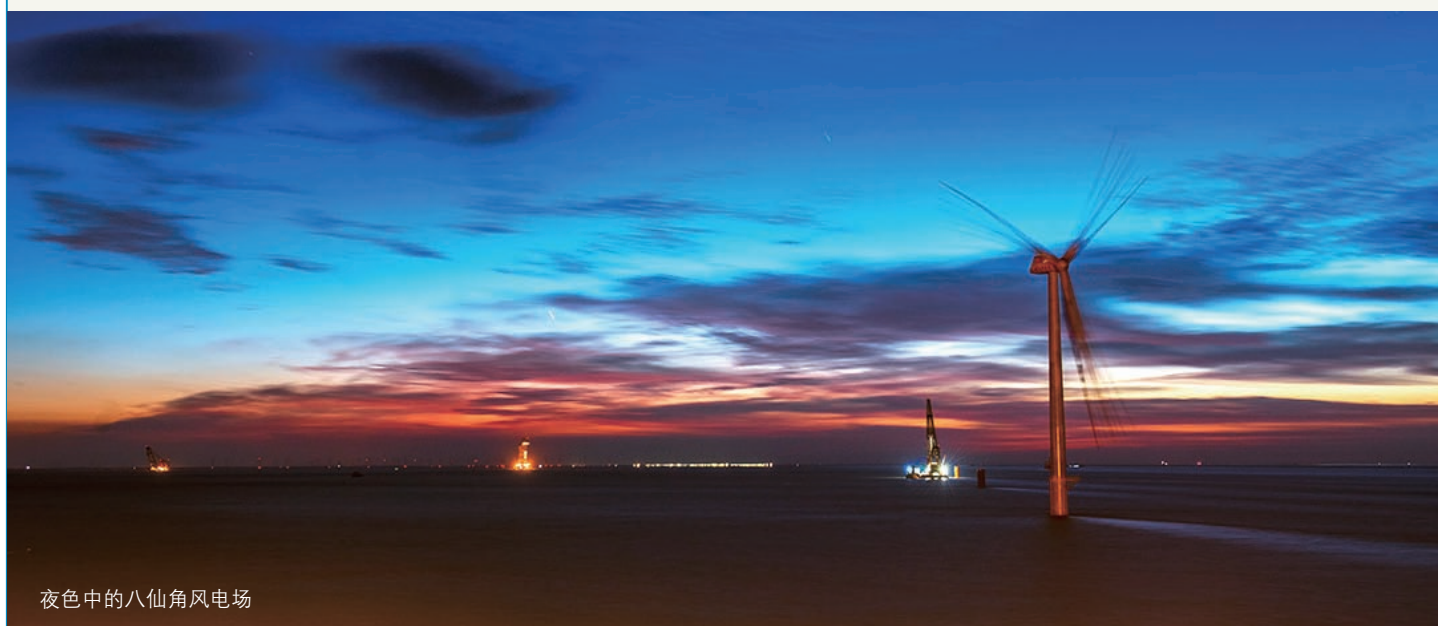
2017年9月30日，江苏如东八仙角海上风电场完成240小时试运行，进入商业运营阶段。这标志着我国乃至亚洲最大的海上风电场正式建成。

八仙角海上风电场距陆地23千米，场区海域东西长约10千米，南北宽约8千米，面积

约为82平方千米。场内共安装38台上海电气4兆瓦、12台远景能源4.2兆瓦以及20台重庆海装5.0兆瓦风力机，装机容量达30.24万千瓦。其中，4兆瓦与4.2兆瓦风力机采用单桩基础，首次在国内大规模使用的5兆瓦风力机采用高桩承台基础。配套建设海上升压站2

座，分别位于风电场南区 and 北区。

八仙角风电场计划年发电量7.6亿千瓦时，按照火电每千瓦时消耗320克标准煤测算，相当于年替代23.7万吨标准煤，减排二氧化碳65.77万吨，减少灰渣10万吨，节约用水240万立方米。



夜色中的八仙角风电场

风力机的组成

风力发电就是利用风能（风的动能）带动风力发电机组的叶片旋转，通过一系列内部轴承带动发电机发电。与火力、水力或者核能转化为电能的原理一样，人们对风能的利用也是逐级转化能量的过程。在这个过程中，风能先转变为机械能，再转化为电能。

现代风力机

20世纪30年代以后，人们用现代科学理论开始设计和制造风力机。当提到现代风力机时，主要包括两类：水平轴和垂直轴风力机。

我们一般见到的都是水平轴风力机，顾名思义，它的主轴是和地面大致平行的。这种风力机根据自身测量到的风速、风向信息，自动控制偏航机构，来使风轮对准来风的方向，尽可能

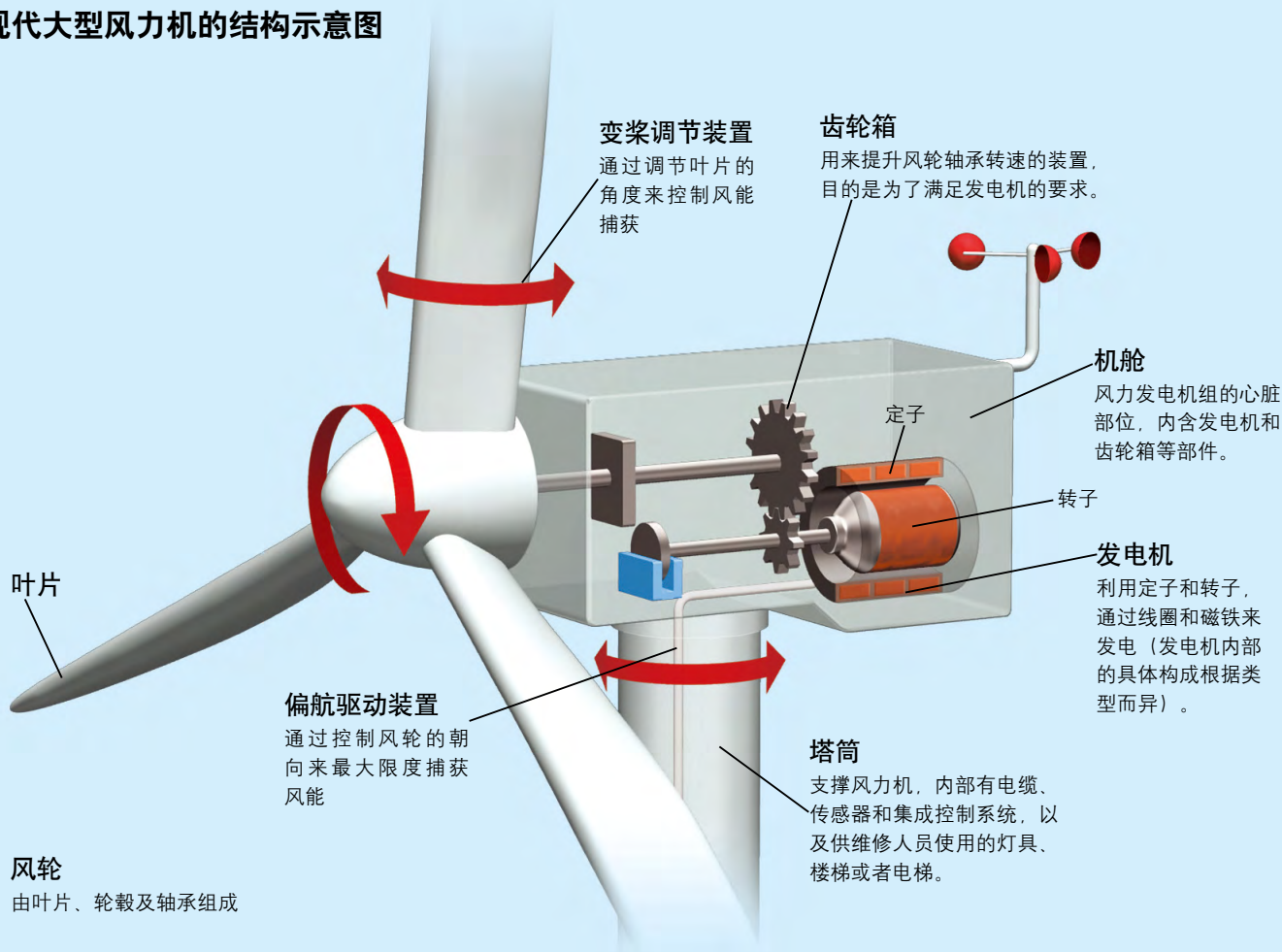
地捕获风能。偏航机构由一些小型电动机和齿轮箱组成，可以使风力机组向左或向右转动一定的角度。

垂直轴风力机比较少见，目前唯一商业运行的是达里厄（Darrieus）风力机，看起来就像一个竖直放置的打蛋器。垂直轴风力机的主轴垂直于地面，叶片可以接受“八面来风”，因此不用考虑如何对准风向的问题。这种风力机没有塔筒，而是采用周围拉缆的办法来固定，因此，风轮主轴比较矮。这意味着它只能使用经过地面干扰后的较慢的风，这也造成了垂直轴风力机的效率较低。这种风力机还有工作时振动较大的缺点。因此只用于小规模的风力发电以及提水等。

海上风力机

海上风电属于风电行业中的高端产业，并非简单地将陆

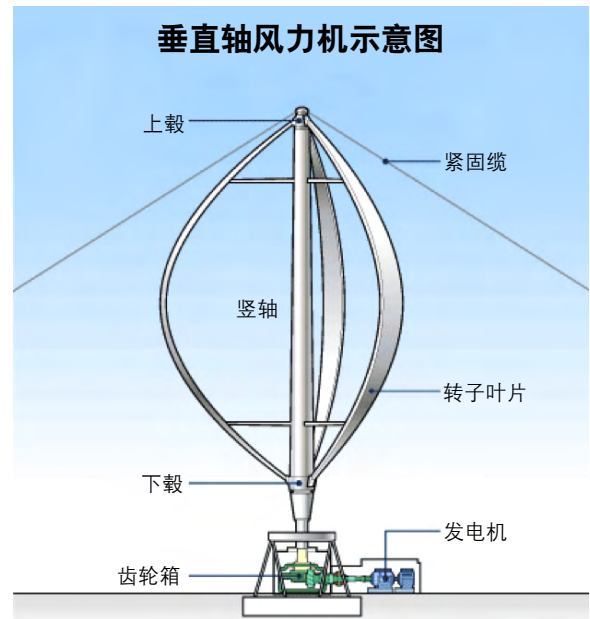
现代大型风力机的结构示意图






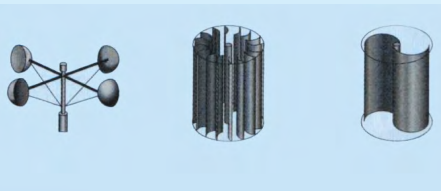
上风力机“移植”到海上就可以了。这是因为海上风电技术远比陆地风电复杂，在设计和制造海上风力机的时候，不得不考虑海上恶劣的自然环境条件带来的影响，如盐雾腐蚀、海浪载荷、海冰冲撞、季节性的高温天气、台风破坏等制约因素。

此外，海上风电场的建设安装周期都比较长，吊装和材料要求普遍比陆上风力机高，维修也都需要特种船只参与。针对海洋环境的特点，考虑到成本和收益的问题，海上风力机要求具有更高的可靠性，需要更少的维护，在设计和制造过程中就需要采用密封、防腐、除湿、散热等方案，以适应海上独特的环境。

由于海上的风力资源通常比陆地的要好，因此，采用大功率的风力机已成为趋势。目前，我国安装在近海的海上风力机中，单台机组功率为4~5兆瓦的风力机已成为主流机型。



风力发电机种类繁多

	<p>升力型</p> <p>与飞机的机翼类似，叶片采用上下不对称的流线型设计，利用风对其上下两面的压力差来产生升力，并且借助升力实现风轮旋转。随着风速的增加，叶片受到的升力也会增大。所以，只有风速达到一定的值以上，叶片才开始旋转发电。</p>	<p>阻力型</p> <p>叶片因受到风的推力而旋转，而且叶片尖端的速度不会超过风速。低速且旋转力强的阻力型风力利用设备自古就有，经常用于碾磨谷物或者提水等。</p>
<p>水平轴型</p> <p>适合于大型风力发电机组。发电时，装有发电机等重要部件的沉重的机舱必须安装在风力发电机组的顶部。另外，叶片的旋转面还需要面向当地的主风向（或使用可改变迎风方向的装置）。</p>	 <p>三叶片型 两叶片型</p>	 <p>荷兰型 帆翼型 多叶型</p>
<p>垂直轴型</p> <p>机舱一般是安装在地面，而且具有可以利用各个方向的风能的优点。因为需要保证其长轴的稳定性，不利于风力发电机组的大型化。</p>	 <p>直达里厄型 达里厄型</p>	 <p>划桨型 横流型 萨沃尼斯型</p>

风力机的空气动力学



风力机的叶片翼型与飞机的机翼具有相似的设计

具有扭角的叶片



风力机的叶片存在扭角，图为从叶尖向叶根看去的样子。叶尖是主要利用风能的位置，在实际工作过程中要与来流风速保持 10° 左右的攻角。而叶根附近位置由于厚度较大，气流在此处的分离程度较高，因此要尽可能地保持叶根位置的攻角较小。这样叶尖和叶根的攻角就存在角度差，即叶片的扭角。

人类对风能的利用尽管已有上千年的历史，但直到20世纪初，才从科学理论上对“如何利用风能”的问题给出了完备的解释。叶片设计是风力机研制最核心的步骤之一，直接决定了风力机捕获风能水平的高低。

风力机的叶片从机翼演变而来

风力机的叶片形状看起来和飞机的机翼很相似，因为它基于飞机机翼设计理论而发展出来的一系列专用的翼型^{*}，属于“升力型叶片”。叶片工作时的实际空气流速要比风速大很多。因为流经叶片的风速和叶片切向速度进行矢量相加后，得到的叶片工作时的实际空气流速（矢量三角形中的斜边）总比风速大，可达风速的10倍甚至更高。

从叶根到叶尖，叶片的翼型从圆形逐渐变为前缘圆滑、后缘纤细的薄翼。对风力机来说，约占叶片长度 $1/3$ 的叶尖部分在工作中起主要作用，靠近叶根部分的翼型主要负责支撑叶片结构。叶根通过螺栓与轮毂相连，传递叶片的负荷。叶片扭角的设计使得流过的空气更平稳，起着导流的作用。

风是如何推动叶片转动的

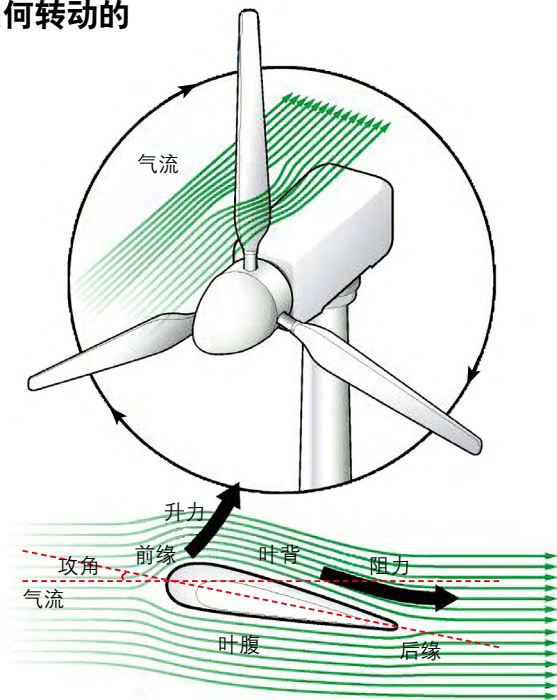
让我们以叶片中的某一个翼型（叶片的截面）为例，看看空气和叶片是如何相互作用的。

当风以一定的攻角（叶片的前缘和后缘的连线与风速的

夹角) 流经叶片的时候, 叶片背面气流速度比较快, 叶片腹面气流速度较慢。根据流体力学中的伯努利定理可知, 叶片背面的空气压力较低, 叶片腹面的空气压力较高。由于存在压力差, 表现为指向叶片背面的“升力”, 这个力就是推动叶片转动的原因(右图)。

风力机可以通过变桨机构改变叶片的攻角来控制风的输入功率, 将叶片的转速控制在安全范围内。在风力机不发电的时候, 叶片呈保护状态, 叶片的攻角为 90° (顺桨), 即不管风有多大, 叶片都不转动。当需要发电的时候, 变桨机构调节叶片角度, 使叶片前缘与来风方向呈合适的攻角。风速达到一定程度, 便可推动叶片转动, 从而带动发电机发电。

风力机是如何转动的



为什么风力机大多是3支叶片?

只要风力足够强, 无论有1支、2支、3支甚至十几支叶片, 风力机都可以转动。为什么我们看到的大部分风力机都是3支叶片呢?

从风能利用率来分析。三叶片式的风能利用系数已经达到了最高水平, 约为 $0.48 \sim 0.49$, 经过对形状的优化设计, 甚至能达到 0.5 以上。随着叶片数量的增加, 风能利用系数也在增加。但是从三叶到四叶、五叶时的增加幅度比单叶到两叶、三叶的增加小得多。而叶片数越多, 成本越高。从成本上讲, 这是得不偿失的。

多叶片的优势在于较大的力矩转化率。但从能量转化率来说, 四叶和五叶的效率却低于三叶式风力机。多叶片的风力机由于阻力较大, 造成了相当多的湍流, 干扰叶片旋转, 从而降低了能量转化率。

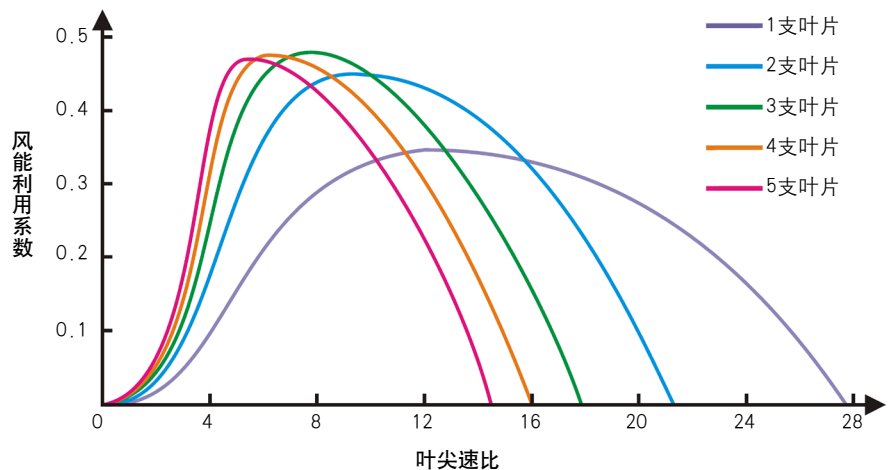
在同等风速的条件下, 单叶片、两叶片的风力机转速明显大于三叶片风力机。因此, 会产生很大的噪声。此外, 单叶片和两叶片的结构, 更容易偏离正常风向和产生摇摆, 当叶片上下的力不平衡, 或受

到风速变化等干扰时, 会对塔筒产生不良影响。而三叶片互成 120° , 转动比较平稳, 振动明显减弱。若要减弱单叶片和两叶片风力机的振动和控制转子的动平衡, 需要投入更多的成本。

由此可见, 三叶式风力机受力相对均匀、风能利用系数较高、经济性明显, 是风力机最好的选择。

※ 翼型指的是垂直于叶片的延展方向, 截取叶片而得到的一个个截面形状, 每个部位的形状都不尽相同。

多支叶片效率曲线图



注: 叶尖速比是风轮叶尖的线速度与进风轮之前的风速之比, 是叶片设计制造中的一个重要参数。风能利用系数是风力机获得的功率与通过风力机扫掠面积的风功率的比值。

打造最强风力机

海上风力发电机组自出现以后，发展趋势体现为大型化。随着风力机的大型化，带来整机功率的提升。那么，风力机是没有最大，只有更大吗？风力机的效率究竟有没有上限呢？

风力机的最大效率有多少？

风能到电能的转换效率，因风力发电机（叶片）种类的不同而有很大差别。在风力机领域，相关的研究理论有许多种。其中，德国物理学家阿尔伯特·贝茨（Albert Betz）在1922~1925年发表了“贝茨理论”，即动量理论，研究了经过风轮的风能有多少可以被转化为机械能。他首先假设在这个过程中没有能量损失，风都是理想气流，风轮能够吸收气流所有的能量。但是，如果风轮将风速降为0，后面的风就刮不过来了。因此，经过风轮的气流必须仍具有一定速度。也就是说，100%利用风能的风力机是不可能的。综合考虑，贝茨算出理想风轮的最大利用系数为0.593，即理论上最多只有59.3%的风能可以被风轮转化为机械能。

实际上，在现实中根本不存在这样的“理想风力机”，因此，风能利用系数也无法达到那么高的数值。除此之外，设计

风力机还要考虑其他的能量损失：

翼型损失：由翼型对空气产生的阻力引起的损失。

叶尖损失：在叶片尖部，气流从叶腹向叶背绕流，由此使升力消失。由于叶尖的绕流和来流互相影响，就产生了随气流不断扩散的涡流。由于叶尖损失，实际相当于风力机的直径减小了，功率也减小了。

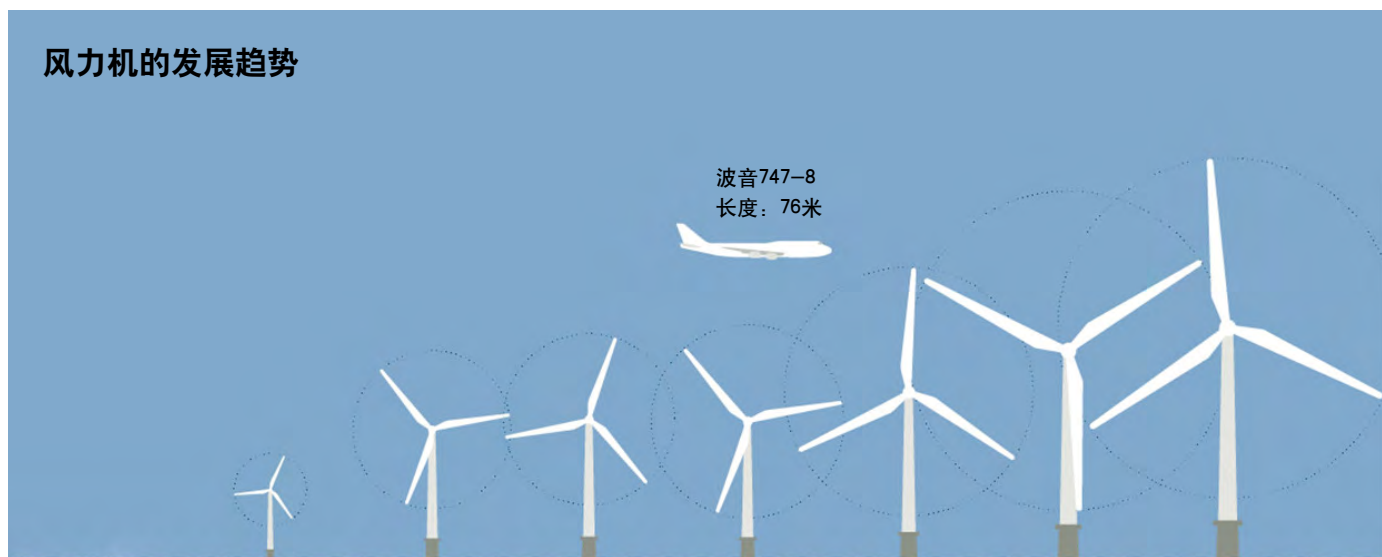
旋转损失：流过风轮的气流仍然沿轴向流动。按照作用力和反作用力原理，推动风轮后，气流会发生旋转，由此造成旋转损失。

能量在转换过程中，或多或少都伴随着损失。从空气动力学的角度来分析，就有约50%的能量损失。此外，齿轮等传动装置以及发电机的损耗大约有10%。最终，只有20%~40%的风能可以被转化为电能。

没有最大，只有更大？

从整体趋势上看，风力机组确实在向着更大、更强的方向迈进。风力发电机具有更大的单机容量，在同样的面积内，就能够建设更大容量的风电场，更加充分地利用风能资源。同

风力机的发展趋势



年份	1991	2000	2003	2009	2012	2014	2016
风轮直径（米）	35	76	82.4	93	120	154	164
轮毂高度（米）	35	64	69	68	82	102	113
单机容量（兆瓦）	0.45	2.00	2.30	2.30	3.60	6.00	8.00

随着单机容量的增大，机组的叶片长度也随之加长了。目前，世界最大的海上风力机的风轮直径达到160米以上，是世界上最大型客机空客A380翼展长度的2倍。

资料来源：www.offshorewindindustry.com

时，大功率风力机能够降低风电场单位千瓦造价。由于单机容量变大，机位数相应减少，运输、施工、运维成本都会降低，综合下来计算，能够降低风电场的成本。

叶片越长的话，风轮的扫风面积也越大。一般来讲，扫风面积越大，在发电机功率不变的情况下，启动风速越小，这就意味着在小风时可以持续获得电能。同时带来的另一个问题就是，

大型风轮带来更高的载荷，这也意味着塔筒要承受更大的力。

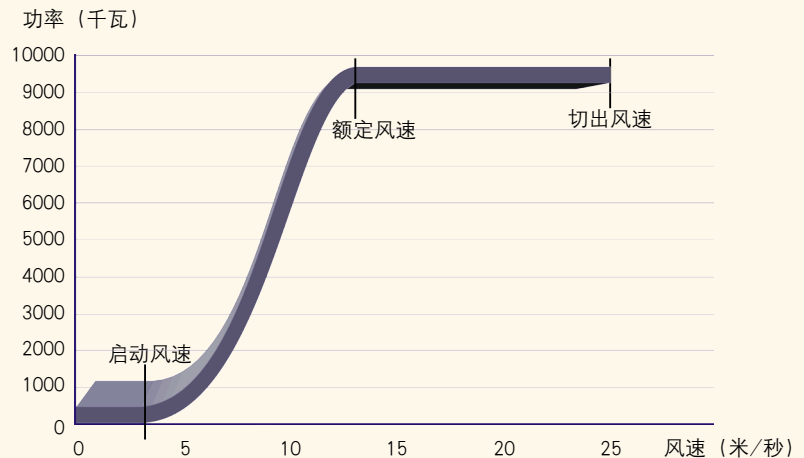
但是大功率风力机也有一些明显的缺点制约着前进的步伐。比如风力机的零部件成本增高，吊装以及大部件运维都需要大型设备施工，对装备不断地有升级需求。而且大功率风力机一旦出现故障停机，损失的电量会更大，这也对机组的可靠性提出了更高的要求。

世界上最大容量的风力发电机组



V164-9.5兆瓦海上风力机组风速与发电功率关系

2017年6月6日，三菱重工-维斯塔斯（MHI Vestas）推出了V164-9.5兆瓦海上风力机组。叶片长度为80米，每支重35吨，扫风面积21124平方米。机舱长20.7米，宽8.8米，重390吨，轮毂高度105米。转速在4.8~12.1转/分（rpm）之间。2016年9月，安装在丹麦奥斯特利尔德（Osterild）试验风场的V164-9兆瓦样机，曾创造了24小时内单机发电量21.6万千瓦时的世界纪录。



风电场选址

当具备了合适的风力机之后，下一步需要考虑的问题就是，我们应该在哪里建设海上风电场呢？

经济因素

在开展所有具体调查工作之前，首先需要明确的是哪里需要海上风电场。海上风电场的建设耗资巨大，需要当地良好的社会经济状况作为支撑。同时，发出的电力，又依赖当地电网与用电户的消纳。因此，海上风电的布局应当以满足当地电力的发展要求为先，与地区电网的建设匹配。这样方能高效利用资源，防止“弃风”现象的发生。这也是为什么核心经济区位位于海岸线附近的欧洲与中国，成为了全球海上风电发展最迅猛的地区。

气候条件

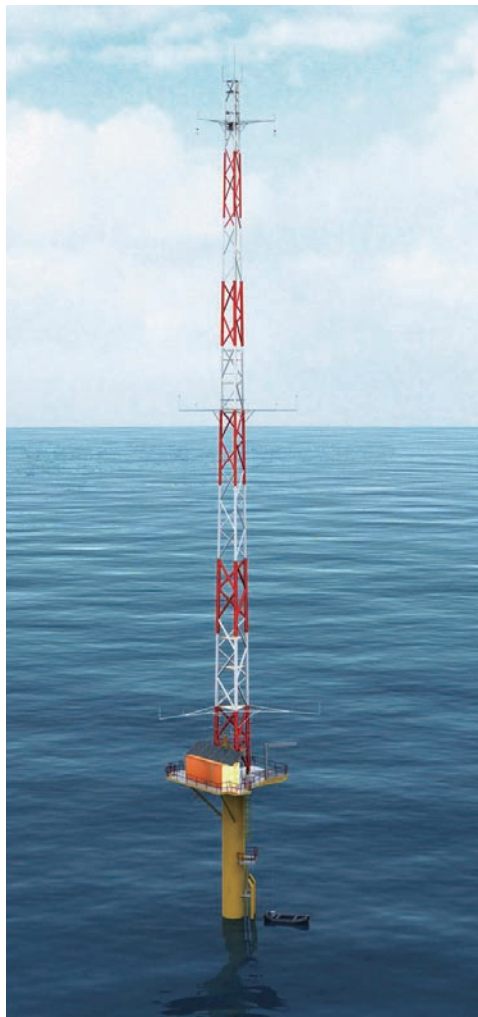
其次，风能属于“靠天吃饭”的可再生能源，气候条件决定了发电效益及项目的可行性，是风电场选址的核心环节。

我国绵长的海岸线基本沿南北向分布，海上风能资源特性相差较大。北部的渤海及黄海海域受冬季冷高压控制较多，南部的南海、东海海域受热带低气压影响较大。北部海域风能资源全年分

布较为平均，南部海域则受台风影响。理想的海上风电场要求风速大而平稳，避开台风多发区域。例如江苏近海出现10级台风的频率为年均1~2次，通常不具有破坏性，因而我国首批海上风电场集中分布在该区域。

具体的平均风速、有效风速出现小时数和有效风功率密度等风力资料，是评估海上风电场位置、确定风电场规模、预测发电量时必不可少的资料。当平均风速从6米/秒增加到10米/秒（增长67%），发电量能够增加134%。但是，通常而言，气象站都建在陆地上，海上的情况只能通过陆地数据外推，或是借助卫星、石油钻井平台和船只的观测资料，带有很大的不确定性。为了精确估计场址风能资源情况，了解具体的各高度风速及其波动情况，便需要在预期场址建设海上测风塔。

海上测风塔高度通常在50~100米，观测时间不短于1年。例如为了评估江苏响水海上风电场的风能资源条件，前期建设了两座距岸4.5~6千米的测风塔以及两座位于滩涂的测风塔。测风塔高70米，可监测10~70米高度的实时风速和风向情况。分析1年的实测数据，发现响水外海



海上测风塔效果图，在不同高度均布有测风仪。

海上风电场与环境

一个大型海上风力发电场的面积可达数十平方千米，除了自然因素，风电场选址还需要考虑对自然环境、社会经济和文化的影响。避开港口、航道、规划围垦区、渔场、鸟类保护区、矿产资源利用区和地震高发区等。因此必须进行环境影响评估。

一方面，海上风电场在施工期会污染破坏海洋生物的栖息地，在运行中水下噪声和电磁场会干扰海洋生物的生存与繁殖。另一方面，风力机建设产生的人工礁可能对海洋生物有利，并由于禁止捕捞使风电场附近的海洋生物得以安居。由于评估海洋生物影响的复杂性，目前研究尚处于初级阶段，对

海洋生物的数量、洄游、产卵繁衍、生长等的影响还需要进一步研究。尽管如此，海上风电场可以通过远离海洋生物的栖息地、繁殖地、产卵地以及洄游线路，合理布置风力机，降低叶片和发电机噪音等手段减少对海洋生物的可能干扰和伤害。

海上风电场可能会对鸟类产生影响。在规划时，需要调查鸟类飞行路线和栖息范围，评估风场的位置及风力机高度是否对鸟类存在碰撞的风险。在鸟类密集活动区域或候鸟迁徙路线一般不建设海上风电场。还可采取特设候鸟安全飞行通道，在风力机上加设灯光、叶片尖端采用警示色，使用非反

光涂料等手段加强对鸟类的保护。英国乃至世界最大的风电场“伦敦阵列”（London Array），为保护红喉潜鸟的越冬，将原方案中的271台风力机缩减到了175台。

海上风电场在选址时要充分考虑到审美的因素，避免干扰原有的海景，影响到人们对优美景观的欣赏。需要尽量利用现有地形遮掩风力发电机，或将海上风力发电场建在海岸较远地方。不过，也可以将开发风能资源和旅游结合起来，将风电场建成旅游景点。例如丹麦荷斯韦夫1（Horns Rev 1）海上风电场将风力机每20台呈一弧形排布，成为当地靓丽的风景线。

的风向随季节变化，主要风能方向为北或北北西。冬春季节风速最大，12月风速可达7.5米/秒。夏秋季风速较小，8月风速平均为5米/秒。70米高度年平均风速为6.32米/秒，平均风速大于3米/秒的有效小时数超过7500小时，风能资源较为丰富，具有开发价值。

除了风力资料外，测风塔还能获得气温、气压、降水量、湿度、灾害性天气日数（雷暴、暴雨、大风、冰雹、台风、龙卷风）等气象资料的准确信息，这对风电场的建设与运行都很有帮助。此外，海上风电场的寿命为20~30年，实际上还需要考虑全球气候变化对风能资源的影响。例如，北欧地区在20世纪90年代建设海上风电场时，主要以80年代中期的气象资料为依据，可是由于北大西洋涛动（NAO）的影响，90年代时风速在不停地增长，对风电场的发电量影响很大，而进入21世纪后风速又开始减弱。

地形地质

目前已建成的海上风电场中，绝大多数风力机需要通过基础结构连接到海床。因此，海床的地形与地质条件往往决定了风电场的建设成本与施工难度。这就需要详尽的海上勘测资料。

在详细调查过去地质图、勘探数据、已建工程资料、水文地理、空中摄影和卫星信息的基础上，海上勘测首先应当使用声纳计全面测量场址不同位置与送出电力的海底电缆所经处的水深，绘制等水深地图。而后调查场址内海床表层的土壤情况，并在特定区域（如风力机预定点位附近）开展20~40米的钻孔勘测，获得海床剖面信息。最后现场测量波浪、潮汐、水位和海流等数据。

实地勘测最重要的目的是为风力机基础施工提供依据。对风力机基础而言，海床以砂质为好，淤泥质或岩石海床将大大增加工程量。我国黄海南部与东海近海海床多为淤泥质，几乎不能持力，因此基础通常需要打至海床以下20余米的持力层。

风机排布

在场址勘测的基础上，需要综合风速风向，选择最合理的风机排列方式，来保证形成规则尾流场，使海上风力发电场的发电量最大化。这被称为风电场的微观选址。

海上风电场地形简单，因此微观选址相对于陆上更为方便。为了让风力机发出更多的电量以获得最佳的经济效益，海上风电场布置一般在主风向选取较大值，次风向取最小值，通常沿海岸线方向进行排布。在主风向，风机间距控制在10~15倍风轮直径之间，在次风向控制在6~8倍风轮直径之间。风力机

排列方式一般为垂直于主风向的矩阵式分布，分为前后两排错开的“梅花型”或者一一对齐的“对行型”。

大型海上风电场受尾流的影响比较大，据估计能造成10%~20%的能量减少。通过合理的风机排布方式，有可能将风电场整体的尾流影响控制在6%以内，单台风力机受到的尾流影响不超过8%。

为了保证基础类型、工艺的一致性，风力机所处位置的水深应避免发生大幅变化。此外微观选址还需要规避礁石、海底障碍物、航标灯、航线及海底光缆、管道等设施。

什么是尾流？

风力机需要从风中吸收能量发电。吹过机组后，风的速度一定比之前降低，同时还会因风轮的扰动而形成湍流。因此，在风力机的后方，总是会形成风速减缓、湍流增加的尾流，就像船舶身后形成的加速水流那样。由于尾流的影响，在第一排之后的风力机所面对的风速要小于前方的风力机，导致发电量减小；而湍流的增加又会增加风力机的疲劳载荷。由于尾流的存在，风力机之间必须保持一定的距离。这既是出于提高发电量的考虑，也是为了使风力机能够安全运行。对风电场尾流效应的研

究是风力机排布优化的关键之一。

海上风电场通常规模较大，风力机的叶片也较长，加之海面糙度低，湍流不显著，使得低速空气重新获得能量的速度更慢。也就是说，海上的尾流相比于陆上往往传得更远。研究人员设计了多种模型来预测和分析风电场的尾流，希望能够改进风力机的排布，来获得更大的能量利用率或者减少建设成本（在输出功率相当的情况下减少风力机数量）。随着海上风电的大规模发展，在未来，不仅风电场内部的尾流效应将得到重视，还将需要考虑相邻风电场之间的尾流传播。



海上风电场水汽作用下的可视化尾流

在大海中安装基础

确定了海上风电场的选址后，接着便是安装一台台的风力机。很明显，风力机并不能直接站立在海面上，它们需要下部基础来固定在海床上。这就是海上风电与陆上风电的最大不同：陆上风力机只需要一块足够厚重的混凝土板就能够支撑；而海上风电需要结构复杂的基础来连接海床。

基础（也称支撑结构）为风力机塔筒

底部往下直至进入海床部分的末端位置，是与地基接触的承重构件，作用是将上方的结构载荷传递给地基，需要在20~30年的生命周期中支持上部风力机的安全运行。受海上强风、海水腐蚀、波浪及海流冲击等因素，海上风力机的基础施工难度大、建设成本高，通常占整个风电场工程成本的20%~30%。

针对于不同的海床深度、地质条件、

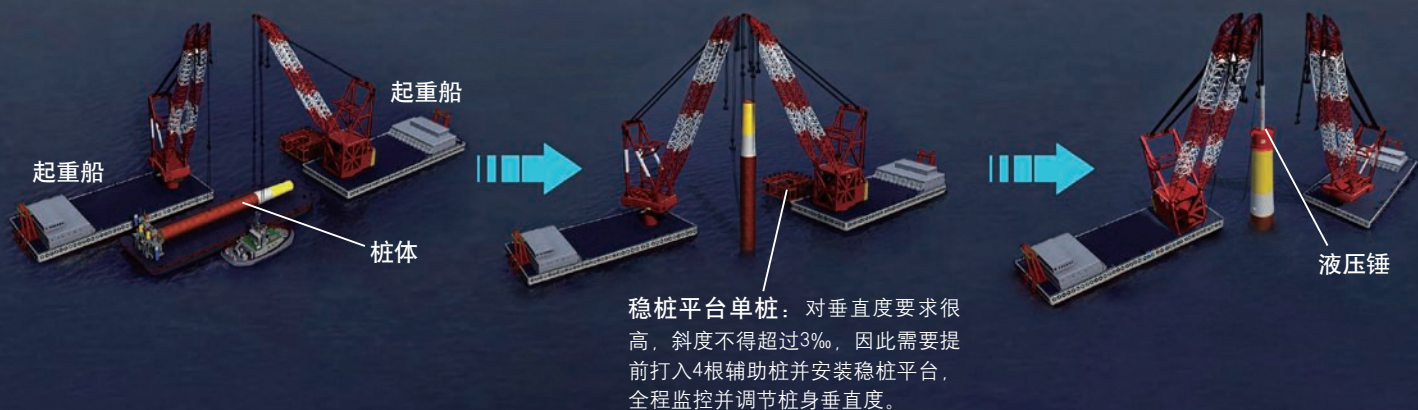
风力条件、水文环境与风力机规模等，工程师们设计出了多种不同的基础形式。以欧洲海上风电场为例，截至2016年共计安装了4152个基础，其中单桩式基础是绝对主流，数量达到3354个（占80.8%）；其次是重力式基础（313个，7.5%）；随后依次为导管架（272个，6.6%）、三脚架（132个，3.2%）和三桩式（80个，1.9%）以及1个漂浮式基础。在我国风电

单桩基础施工示意图

1. 采用两艘大型起重船抬吊

2. 两台起重机配合使桩体直立，移入稳桩平台

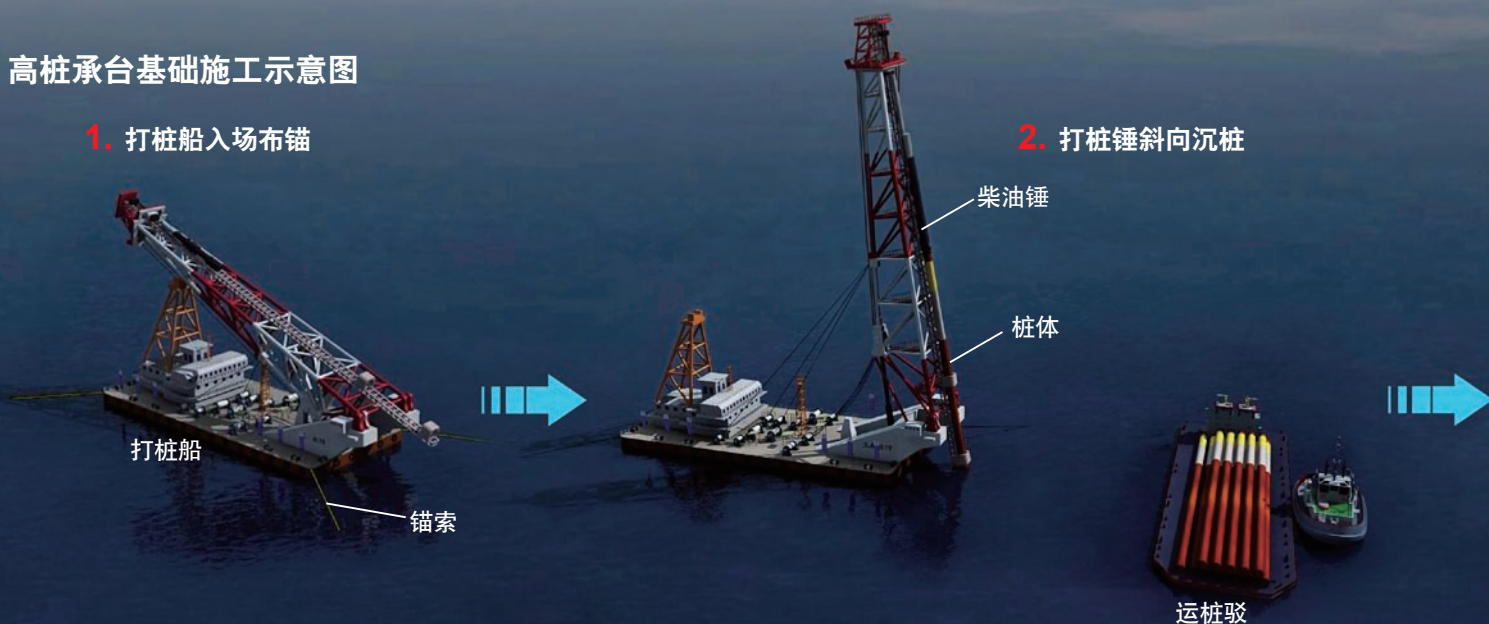
3. 起重船换液压锤，锤击沉桩



高桩承台基础施工示意图

1. 打桩船入场布锚

2. 打桩锤斜向沉桩



场的施工中，目前采用最多的是单桩基础与高桩承台基础。下图即以江苏响水海上风电场的施工为例，描述了这两种基础的建设过程。

单桩基础

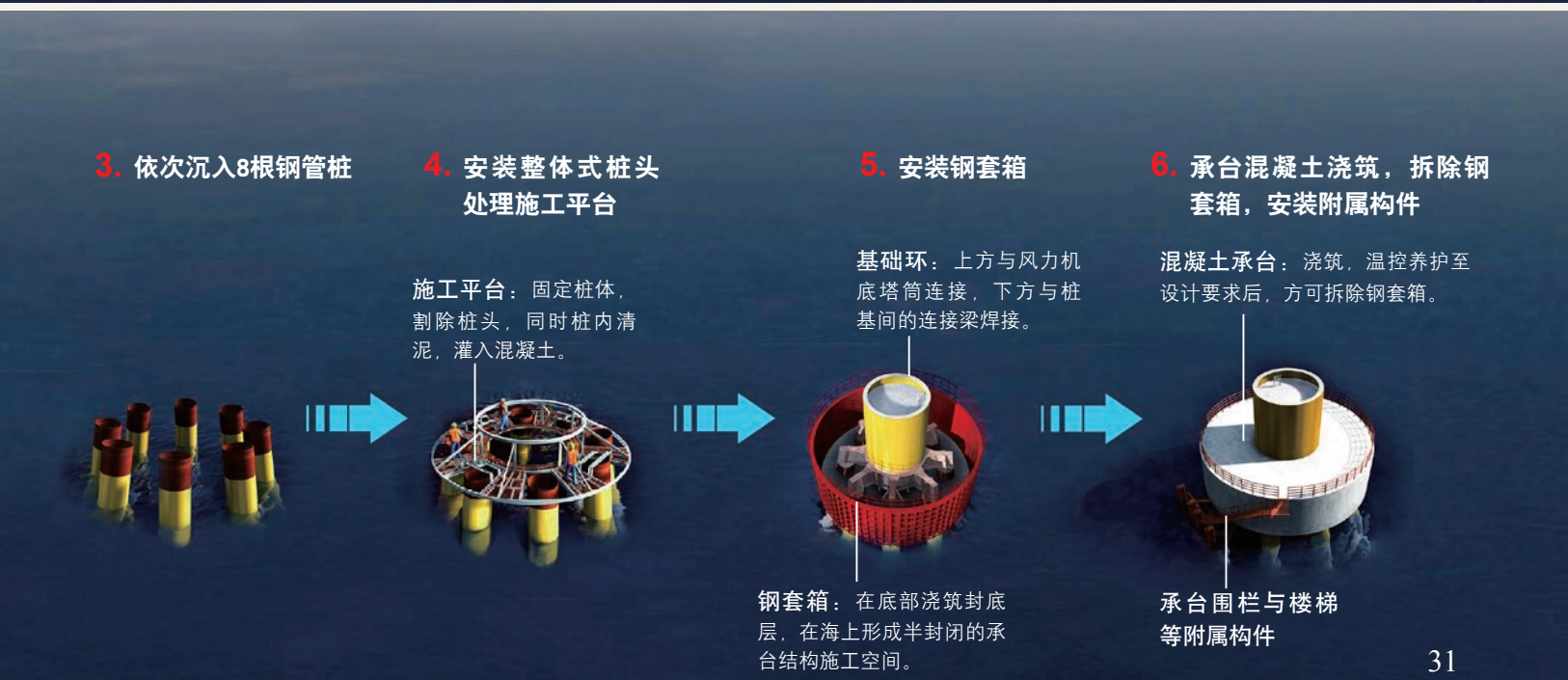
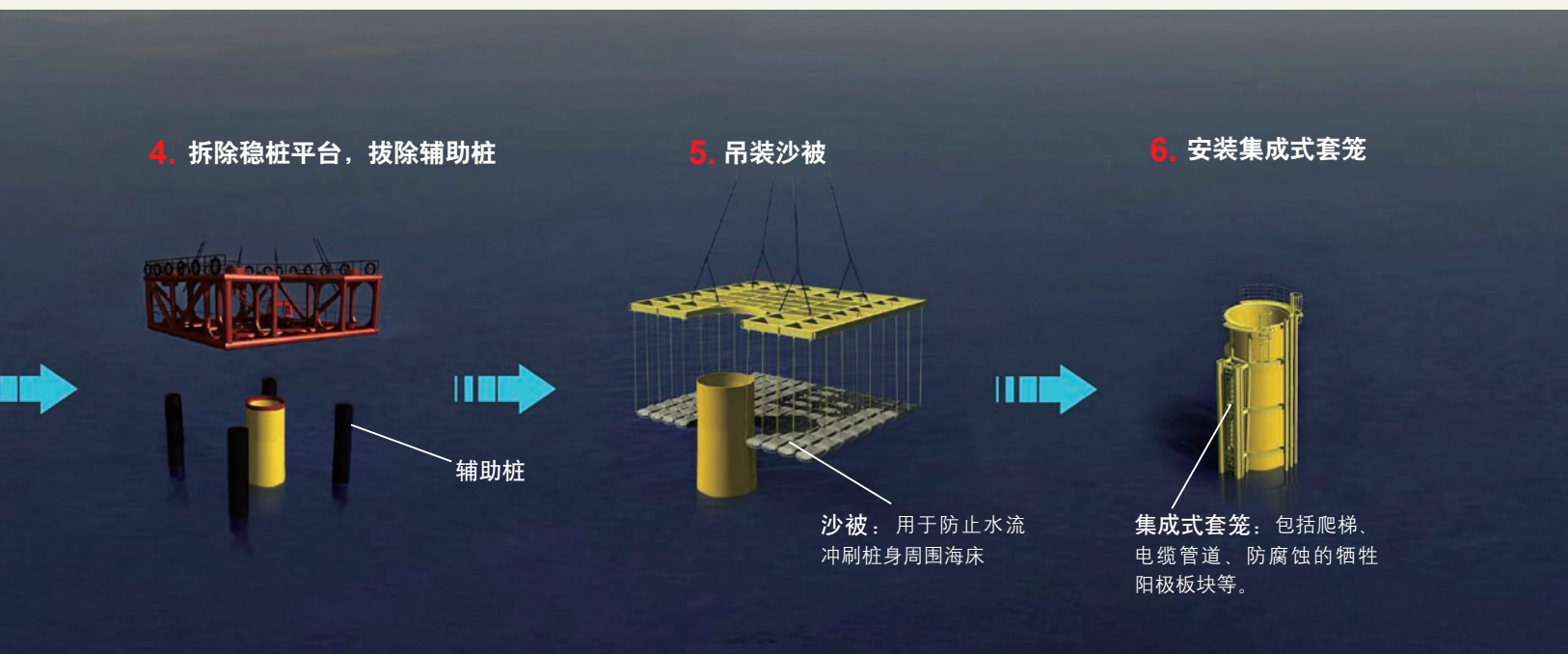
单桩基础是指将一根大直径钢管桩通过打桩机打入海床。由于其不需要进行海底施工，因而具有制造简单、安装方便、节约材料等优势，成为目前应用最广泛的基础形式。单桩由钢板卷制而成的焊接钢管构成，受打桩机尺寸限

制，直径一般在5.5~7米左右，适用于单机容量6.5兆瓦以下的风力机。由于单桩基础对横向荷载的抵抗能力较差，一般应用在水深小于25米、海床较为平坦的海域。其缺点在于受海底地质条件的影响很大，不适合淤泥质海床。安装时需要专用的设备，施工安装费用较高。对海水的冲刷很敏感，需要在海床与基础的连接处设计冲刷防护设备。

高桩承台基础

高桩承台基础是指将多根直径较细的

桩打入海床，并在其上方安装连接风力机塔筒的混凝土承台。桩型可分为混凝土桩与钢管桩，我国上海东海大桥海上风电场与江苏响水海上风电场均采用了8根钢管桩。多根细桩可倾斜打入，对横向荷载抵抗力强，混凝土承台有较高的抵抗波浪、水流的能力。高桩承台基础工艺成熟、适合20米以内水深的多种海底地质条件。同时配合缓冲软着陆装置，有利于风力机的整体吊装。其缺点在于海上施工工序较为复杂。



第3部分 如何建设海上风电场

重力式基础

重力式基础由钢筋混凝土浇筑，是所有基础中体积和重量最大的，通常超过2500吨，依赖自身重力保持稳定。通常在海边的干船坞中制作，之后将其运至安装地点。海床需预先处理平整并铺上一层碎石。然后再将预制好的基础放于碎石之上。重力式基础结构简单、稳定可靠、造价低廉，海上工作量小。

适用于海床平坦的水深15米以内的浅海，特别是滩涂与潮间带。由于其不能打入海床，因此不能用在软质海底。

重力式基础的缺点在于制造用时较长、需占用陆上土地、沉放前需进行海床平整等大量水下工作、结构抗震性较差、对各种填料需求量很大、适应水深小等。目前在我国并无使用。



在岸边等待运输的重力式基础

三脚架和三桩式基础

三脚架基础由三个可插入海床的钢桩通过斜撑结构支撑着中心轴。中心轴的作用类似于单桩，提供对风力机塔筒的支撑，三脚架则增强了结构的稳定性，形成了抗弯曲能力好的最小结构形式。三脚架基础在陆地制作完成后，即可运至安装地点建设，不需要海床准备与冲刷防护。其适用于水深10~40米的海床较为坚

硬的海域，不适合软质以及有石块的海底。

三桩基础则由三个打入海底的钢桩通过斜撑结构连接，支撑与风力机塔筒连接的钢结构承台。其与三脚架结构的区别在于没有中心轴。三脚架和三桩基础的缺点在于受海床地质条件约束，不适合过浅与过深的水域。



装驳运输的三脚架基础



陆上运输中的三桩基础

导管架式基础

导管架基础是由三根或四根圆柱钢管及大量细钢管组成的格架结构，类似陆上的无线电塔。每一根主钢管都稍稍倾斜，之间用较细的钢管对角与横向连接，以加强结构刚度。需要先在地上将钢管焊接好，再运至安装地点，将其打入海床。导管架基础原本是为海上石油平台而开发的，质轻而结实，结构稳定性较好。可用于大容量风力机及最深可达100米深海海域，同时对海床地质条件要求不高。

导管架基础的缺点在于钢管需要人工焊接、费时费力，随着水深增加造价升高很快，同时在寒冷海域抗冰能力较差。



装驳中的导管架式基础

负压筒式基础

负压筒式基础形似一个底部敞开、倒置于海底的钢制筒。通过将沉箱中的水抽出形成吸力，借助水体的重力压入海床，适合砂性土及软黏土。其优点是材料用量少，施工时间短，生产和安装成本低，运输较便捷。丹麦腓特烈港（Frederikshavn）海上风电场首次采用了这种基础，大大节省了钢材用量和海上施工时间。我国江苏响水海上风电场两台3兆瓦机组采用此类基础形式，并在全球首次与风力机一体化安装，将基础施工、风机运输、整机安装三合一。能够像“种树”一样，在海上“栽种”即插即用的风力机。目前，该技术尚处于探索阶段。



在码头起吊的负压筒式基础

不同基础的适用条件

基础	适应水深	海床条件	制造	施工	主要优点	主要缺点
单桩	3~25米	不适合软质海床与岩层	制造方便快捷	海上安装简单，无需海床准备，需专用打桩设备。	在浅海经济性好	需要打桩设备，施工后需要防冲刷保护。
高桩承台	0~20米	无特殊要求	制造简单，仅需要小直径钢管与混凝土。	海上作业复杂，混凝土需要一定养护时间。	基础与塔筒连接方便，易于风力机整体安装。	需要打多根斜桩，现场施工复杂，海上工作时间长。
重力式	3~15米	不适合软质海床	在陆地批量预制，造价低。	需要前期海床准备工作，对运输和起吊要求高。	在潮间带与浅海经济性好	海床准备复杂，体积和重量大，需要防冲刷保护。
三架与三脚桩	10~40米	不适合软质海床与岩层	在陆地批量预制，结构简单。	需要较高的吊装运输能力，打桩设备小。	适用水深广，结构刚度大	制造运输占据大量空间，钢材用量大。
导管架	10~50米	无特殊要求，如通过岩层需要钻井设备。	结构复杂，需要大量焊接工作，建造地点常远离海岸。	重量较轻，易于安装，打桩设备小。	结构刚度大，适用于水深较深地区，适用大容量风力机。	制造时间长，造价昂贵。
负压筒	0~50米	适合较软海床，不适用于坚硬的沙质海床与岩层。	钢筒需要高精度焊接工作	海上安装简单快捷，可与风力机一体式安装。	适用水深广，安装与拆除方便。	安装时对倾斜控制难度大，技术尚不成熟。



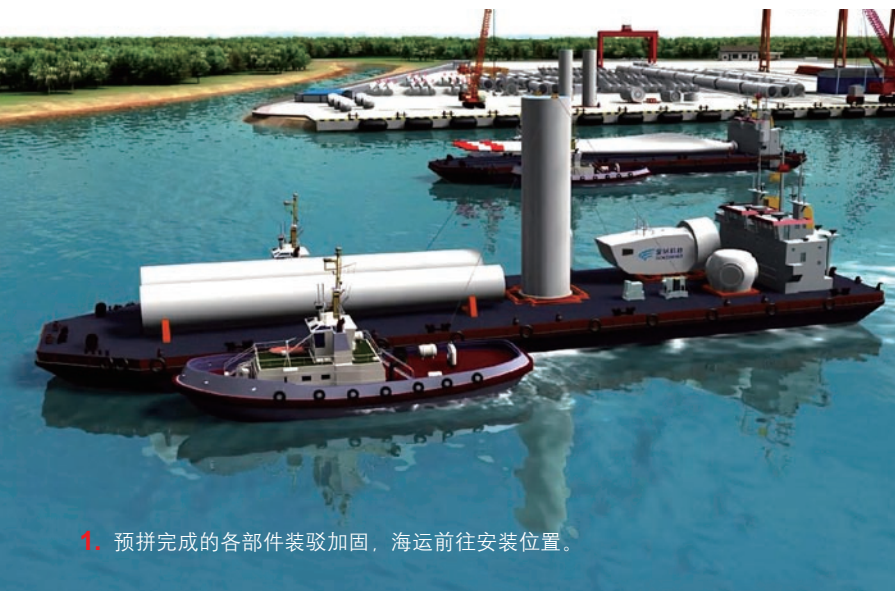
负压筒式基础与风力机一体化安装施工

分体安装

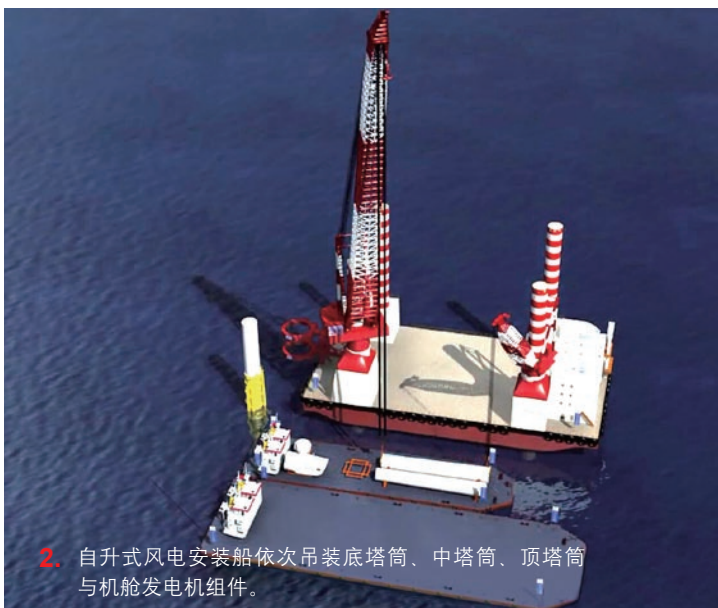
建设好基础之后，接下来就可以安装风力机了。一台风力机很明显能够分为3部分：由3节钢管构成的塔架；安装在塔架上的机舱；由连接机舱的轮毂及与其相连的3支叶片组成的风轮。这些超重或超长的部件在安装时还需要在空中从水平位置变成垂直状态。它们之间是用螺栓连接的，风力机安装的要点就是要以毫米为精度对准螺栓，这在波涛汹涌的海上难以做到。为了解决这一困难，工程师们开发出分体安装与整体安装两种安装工艺。

顾名思义，分体安装就是在海上分别安装各部件。为了避免海浪对高精度安装的影响，通常需要专门的带自升支腿的平台或船只。安装时，其支腿下降至海床，支撑平台或船体上升，形成稳定的作业区。分体安装过程中迎风面积小，较整体安装而言更容易保证安全度。目前欧洲海上风电场中绝大部分采用这一安装方式。

下面以江苏响水海上风电场的金风科技3兆瓦直驱式风力机的安装为例，介绍海上分体安装。首先，各海运陆运组件均集中到响水海工基地，完成预拼。底塔筒竖直装驳，中塔筒、顶塔筒水平装驳，机舱与直驱式发电机组拼后装驳，轮毂装驳并全部加固。3支叶片另船装驳加固（1）。海上安装使用了自升式安装船“三航风华”号与坐底式安装船“辽河一号”（后者作业水深6~7.5米）。自升式安装船立体定位后插入支腿，顶升船体离开高潮水面以上。依次在单桩基础上安装3节塔筒以及机舱发电机组件（2）。最后吊装风轮，完成安装（3、4）。根据作业面积、时间等因素，风轮可采取多种安装方法：下图展示了在甲板上安放轮毂并拼装叶片，然后整体吊装风轮；或者依次吊装轮毂与3支叶片；也可在驳船上预拼轮毂与2支叶片形成类似“兔耳”的形状，在海上分别吊装“兔耳”与第3支叶片。



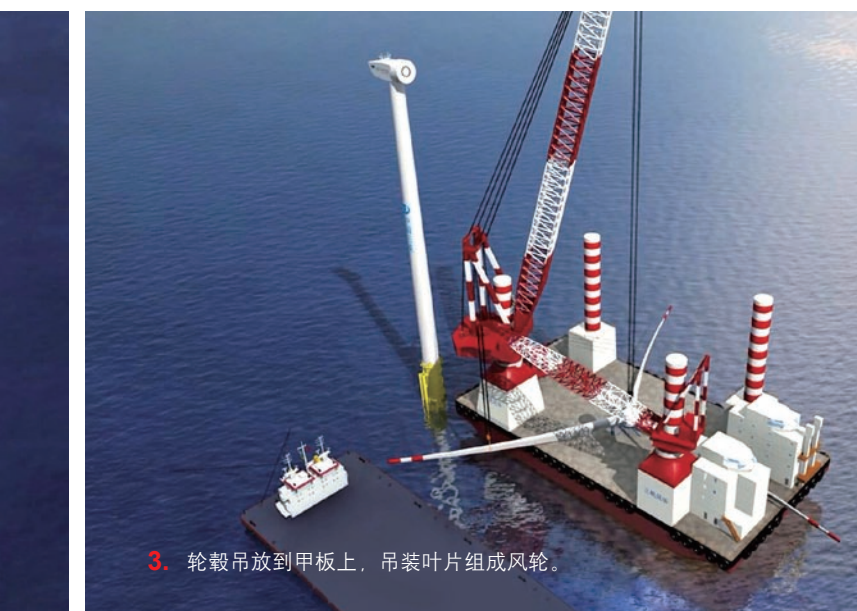
1. 预拼完成的各部件装驳加固，海运前往安装位置。



2. 自升式风电安装船依次吊装底塔筒、中塔筒、顶塔筒与机舱发电机组件。



分体吊装机舱发电组件 摄影/孙荣刚



3. 轮毂吊放到甲板上，吊装叶片组成风轮。



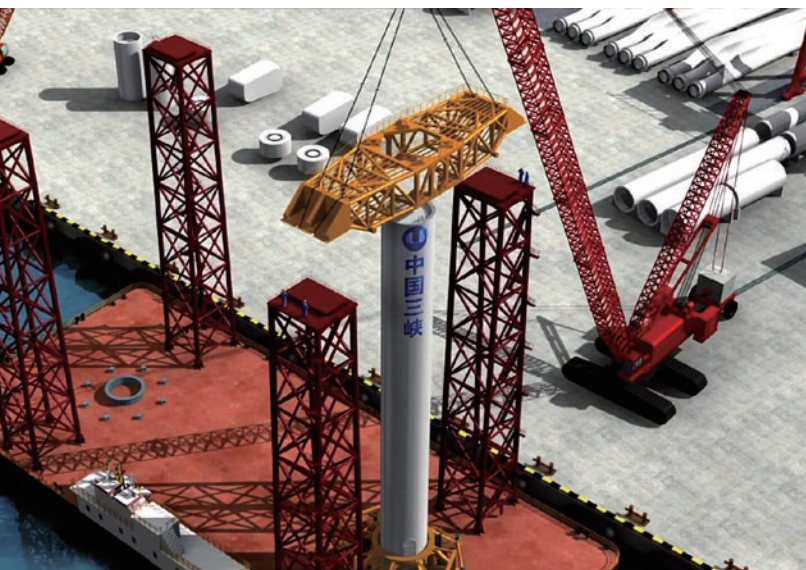
4. 吊装风轮

整体安装

既然在远海高精度安装很困难，那把需要精密操作的步骤移到稳定的陆上或者岸边不就行了吗？风力机整体安装便是如此。整体安装时，风力机各部件像搭积木一样，在码头完成拼装，再用大型起重机整体吊到运输驳船上，或者也可以直接在停靠于码头的运输驳船上拼装。驳船由拖轮拖至安装位置，再由起重船一次性将风力机整体吊装到基础上。由于风力机只需在海上吊装一次即可完成作业，因此大大减少了海上安装的时间与风险。但需要大型运输驳船和大型海上起重船等设备。目前我国海上风电场采用这一安装方式的较多。

下面以江苏响水海上风电场的西门子4兆瓦风力机的安装为例，介绍风力机的海上整体安装。首先，各海运陆运组件均集中到响水海工基地，完成预拼。在驳船的塔座上安装底塔筒、缓冲软着陆装置上部吊架、中塔筒，用平衡梁固定（1）。而后吊装顶塔筒与预拼的机舱和轮毂，依次吊装3支叶片，并旋转至适合海上运输、安装的角度（2）。整体运输到安装位置后，由大型起重船“三航风范”号吊起平衡梁，整体起吊风力机至基础承台上方（3）。

基础承台预先安装缓冲软着陆装置下部就位系统。此时，上部装置伸出的储能油缸在下部的冲击平台上缓冲着陆，同步顶升托举风力机。随着顶升油缸的下降，风力机自重逐步从吊装船的起重机转移至顶升油缸。同时精定位油缸自动调节，使得上下螺孔精确对准（4）。紧固全部螺栓后，拆除吊具及缓冲系统，风力机整体安装完成。





风力机整体吊装



3. 整体海上运输至安装位置，起重船吊起平衡梁。



4. 吊装至基础上软着陆，缓冲软着陆装置精确定位。

海上风电场面临哪些考验？

安装并非是海上风电场唯一的难点。海上风电场的设计寿命长达20~30年，其工作环境比陆地恶劣得多。期间一旦发生故障需要维修的话，所需经费更是远大于陆上风电。如何保证风力机在复杂海洋环境和不同运行条件下的安全运转，并经受台风、严寒、腐蚀、雷暴的考验？这是海上风力机制造厂家和基础设计施工单位必须考虑的问题。

台风来了，风电场还能运行吗？

台风是我国东南沿海常见的灾害天气，其影响范围广、平均风速大、湍流强度高、风向变化快、持续时间长，对风电场有着惊人的破坏力。可导致叶片断裂、塔筒折断、机舱罩倾覆等。

目前我国在台风多发的南部海域建设的海上风电场较少，从陆上风电场的情况来看：2003年第13号台风“杜鹃”于9月2日在广东汕尾登陆，登陆时中心附近最大风力达12级，登陆点附近的风电场测得极大风速为57米/秒，其25台风力机中的13台受到不同程度的损坏；2006年第8号台风“桑美”8月10日在浙江苍南登陆，登陆时中心附近最大风力为17级，导致位于苍南的鹤顶山风电场28台风力机全部受损，其中5台倒塌；2014年第9号台风“威马逊”7月18日登陆广东湛江，登陆时中心附近最大风力为17级，导致徐闻的勇士风电场33台风机中的13台风力机倒塌，5

台风力机完全损坏。

位于台风频繁海域的海上风力机需要采用抗台风设计：增加质量阻尼器，减少台风对风力机的振动；加强机舱罩，确保在台风期间机舱完好；加强风速风向仪的固定，使其在台风期间能够正常运行。当预报有强台风到来时，需控制风力机停机，叶片变桨至顺桨角度，并进入自动偏航模式实时以风轮正面对准风向，保证台风对风轮的载荷最小。台风过后，需检查叶片、机舱罩等是否出现损坏、发电机构是否能正常工作。即使没有台风预报，风力机自身的控制系统也能在风速过大（大于25米/秒）时切出，并停机顺桨进入防风状态。

不过，包括台风在内的热带气旋带来的大风，在不超过一定强度时可以给风电场带来较长的满发时段（风力机在额定风速与切出风速之间满负荷运行发电，大致为10~25米/秒），这是对风电场运营有利的一面。据统计，登陆我国的台风平均每年有6.6个是能够创造良好发电效益的“好台风”，3.5个是对风电场有威胁的“坏台风”。

极寒会对风电场有影响吗？

高纬度地区的海上风电场还面临着严寒的威胁。严寒会产生海冰，破坏风力机基础；水气（雨、雪、霜及海雾等）冻结在风力机叶片等部件上，影响风轮旋转；



遭台风袭击破坏的勇士风电场

低温还会让风力机中各种材料（金属、橡胶与复合材料）和润滑油的性能下降。

我国的海冰出现在冬季的渤海与北黄海沿岸，渤海的冰期一般超过3个月（12月~翌年3月）。在冰期中，辽东湾北部海域覆盖有10~40厘米厚的海冰，漂流速度最大为0.5米/秒。大面积海冰会挤压冲击基础，并引起基础震动。水位变化时，海冰还会对基础产生上拔或下压效应。渗入混凝土基础表层的海冰在结冰时会产生膨胀压力，反复冻融会破坏混凝土。为此，位于结冰海域的基础必须设计抵御海冰的措施。

海上湿度较大，在严寒时叶片可能结冰，造成风力机发电能力下降，积冰严重时甚至可能导致叶片断裂。在高纬度地区，寒冷的冬季通常也是取暖用电高峰，而叶片结



面临海冰威胁的海上风力机



用直升机为叶片除冰

冰会损失年发电量1%~10%，极端地区甚至能达到20%~50%。为此，工程师们开发出了多种除冰方法，其中被动除冰是在叶片表面涂以特殊涂料，目前应用最广的是超疏水涂层，可降低叶片与水、冰之间的黏结性。而黑色烤漆可在白天借助阳光的热量除冰。此外，还有能够渗出可降低结冰点的抑制剂的概念涂层等尚处于实验室阶段的技术。主动除冰则是在叶片表面安装热电阻元件或加热叶片内部空气，使叶片温度处于0℃以上。高纬度地区的风力机一般需要结合主动加热和被动涂层的除冰能力。

低温还会让风力机各材料的性能下降。如果没有任何防护，风力机的最低操作温度一般是-20℃，而停机温度是-30℃。如果采用了抗低温的合金钢、密封的机舱以及各部件加热设备，则能让风力机在-30℃也能正常工作，停机温度可低至-40℃以下。不过，我国近海海域很少有如此之低温。

在大海上如何防腐呢？

海上风力机及其基础通常由大量钢结构构成，对钢而言，海水是具很强腐蚀性的天然电解质溶液。海水对钢结构的腐蚀从本质上来讲是一种电化学反应：钢是铁元素和渗碳体的混合物，构成阳极的铁元素被氧化形成铁锈，构成阴极的渗碳体发生氧的还原。保护钢结构同样要靠电化学，这就是让铁的电位处于相对高值成为阴极的阴极保护法。可以用还原性比铁更强的金属与钢结构连在一起，使其成为牺



牲阳极遭到腐蚀，而作为阴极的钢结构得到保护。常用的牺牲阳极有镁合金、锌合金、铝合金等。还可以在回路中接入外加直流电源，将电流通向钢结构，使其成为阴极。

避免腐蚀的另一种常用方法是在钢结构表面施以由环氧树脂构成的防腐涂层来隔绝海水。目前，海上风电的防腐常将这两种方法结合起来，在涂料中加入大量锌粉或铝粉，成为牺牲阳极。一旦涂层的阻隔作用削弱，就用牺牲阳极来保护。

在海洋上方的大气中，离海面越近，空气的湿度和氯化物含量越高，容易形成悬浮在空气中的含氯化物的细微液滴，即盐雾。当盐雾与金属接触时，也会形成电化学腐蚀。也就是说，海上风力机的腐蚀并不局限在基础和塔筒下方与海水接触的

区域，而可能发生在任何接触到海上空气的地方。这就是为何海上风力机的核心——机舱需要采取密封措施，避免外界空气进入。在陆上风力机中，机舱里齿轮箱和发电机的冷却系统依赖空气的流动。而在海上风力机里，其冷却所用的内部空气通过再循环来实现热交换，不与外界混合。同时还需要在机舱和塔筒内安装除湿装置，使得内部环境的湿度低于钢材料的腐蚀界限。

遇到雷暴怎么办？

近海地区强对流天气多发、空气湿润，容易形成雷暴。海上风力机矗立在平坦的海面上，同时水气和盐雾又会在叶片表面聚集，使得风力机易于遭到雷电袭击。最可能被雷击损害的部件是位于风力机最高点的叶片；风力机内部控制系统被雷电流干扰，会导致风力机不能动作或做出错误动作；雷电流还会在机舱内部金属间隙产生火花，引起火灾和爆炸。

风力机防雷最常用的方法是在叶片尖端及其下安装多个金属接闪器，让雷击时电流通过接闪器和叶片内置的引下导体传递至叶片根部及轮毂，引下导体继而连接机舱和塔筒，最后通过接地装置泄入海洋。为了避免电气设备被雷电流干扰，可以采用过电压保护、屏蔽措施和等电位连接方法。机舱内部各部件则需通过螺栓连接到底部的金属支撑架上，不与底盘相连的部件都与接地电缆相连，以尽可能防止火花。



被海水腐蚀的基础



修补腐蚀位置

风力机发电

风电场建设完成后，接下来要做的便是发电与传输。

在发电机的内部有定子和转子，固定的部分叫做定子，其上安装了成对的主磁极，由直流电励磁给发电机提供工作磁场；旋转部分叫做转子，其上安装了电线绕组。风轮捕获的动力通过轴承传送到发电机的转子上。发电机的工作原理是电磁感应。因为转子与定子的相对运动，即产生电场和磁场的相对运动，引起线圈磁通量发生变化造成了电动势，这是发电机发

电的基本原理。

如果此时发电机的电线连着用电负载的话，电流就会流动。海上风力机组的发电机发出的电压为690~900伏三相交流电，经过机组上安装的升压单元升至35千伏，再通过电缆输出。

齿轮箱增加转速，将能量输入发电机

如果你看到过工作中的风力发电机，会发现它们的叶片每

变桨系统

有气动刹车，根据风力调节转速，可用备用电池驱动。

叶片

塔筒

偏航系统

电动机驱动齿轮组，将机舱整体向左或向右偏转一定的角度。

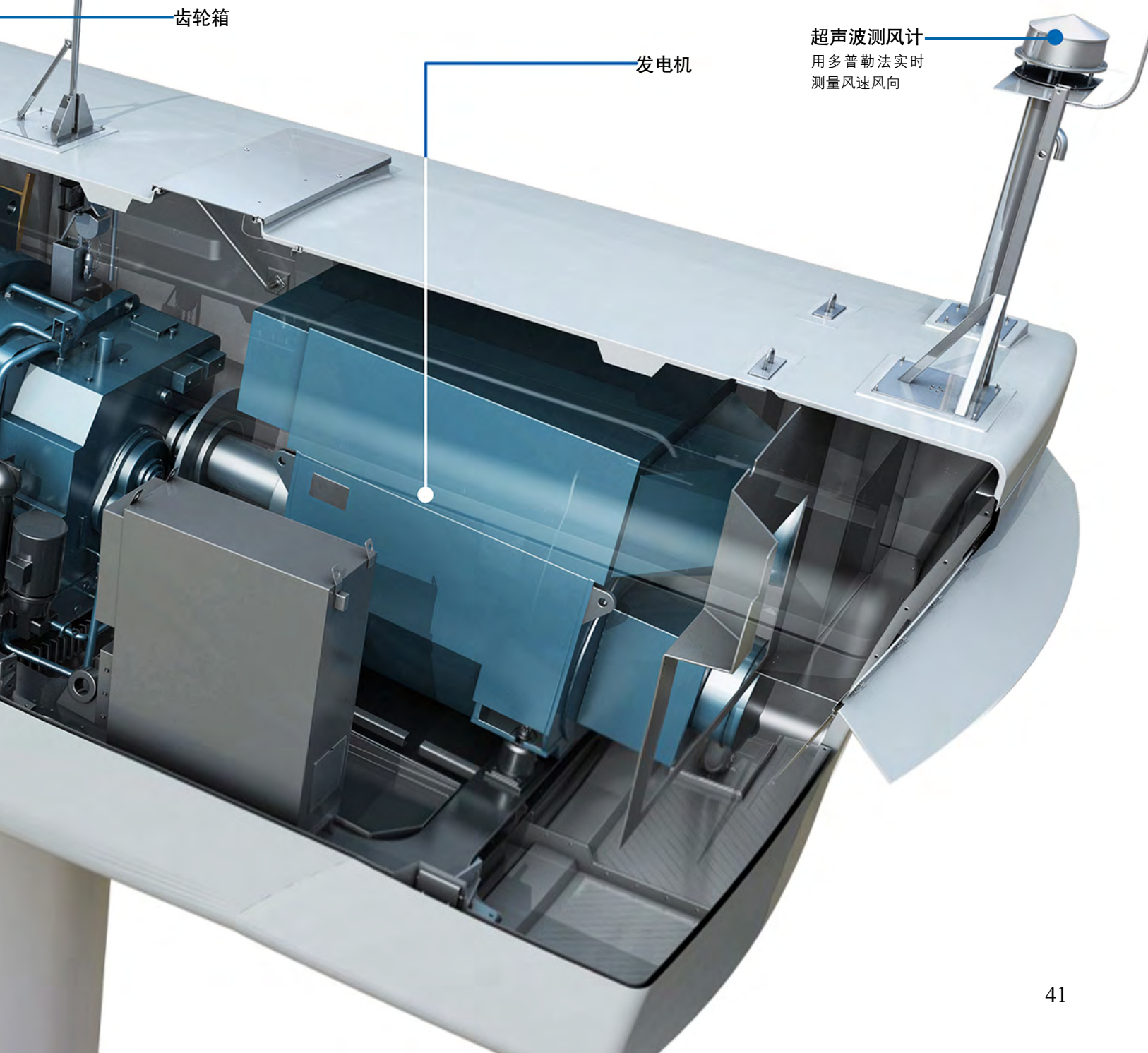
分钟只有十几转，这不禁令人发出疑问：这么慢的转速真的能发电吗？

现在常用的风力机有两种技术路线，即直驱式和双馈式。从诞生时间看，这两种风力机几乎是同时出现的，直驱技术的出现要比双馈技术还更早些。它们的本质区别在于，双馈式风力机是带齿轮箱的，而直驱式风力机是不带齿轮箱的。

风力机组的风轮转速一般都很低，远远达不到双馈式发电机所需要的转速。起增速作用的齿轮箱是一个重要的机械传动部件，它的内部由复杂的固定式平行齿轮组和行星齿轮组组合而成，担负着不同功能的齿轮精巧搭配、互相咬合。它的主要

功能是将风轮的机械能传递给发电机，并逐级增加转速，以达到发电的需要。在高转速的双馈式风力机中，额定状况下，转子的转速可达1800转/分。

早期的齿轮箱常常因为齿轮磨损、润滑油泄漏问题出现故障，如今的齿轮箱已经变得越来越可靠。齿轮箱安装在狭小的机舱中间，一旦发生故障，修复非常困难。因此，对齿轮箱的可靠性和使用寿命都提出了很高的要求。除了常规状态下要有优秀的机械性能外，在酷暑和严寒天气来临时，也要保证齿轮箱平稳工作。目前，有齿轮箱的双馈式风力机组的装机数量占据主流。



齿轮箱

发电机

超声波测风计

用多普勒法实时
测量风速风向

永磁直驱式机组

如果让发电机组省去齿轮箱，让风轮的动力直接传到发电机中，能量转化效率就能进一步提高。这也意味着发电机在比较慢的转速下也要能正常发电，即需要研发一套特殊的发电机。

由于直驱机组的发电机转速就是其风轮转速，风轮转速一般是每分钟十几转。这就要求线绕组在很短的时间内切割更多的磁力线，才能满足发电需要。永磁直驱式发电机的设计方式是：增加磁极对数，从而使得电机的额定转速下降，这样就不需要用于增速的齿轮箱了。

永磁式交流发电机的定子与普通交流电机相同，由定子铁芯和定子绕组组成，在定子铁芯槽内安放有三相绕组。转子采

用永磁材料——钕磁铁来励磁。由于发电机在工作时会散发热量，必须保持转子的温度在永磁体最高允许工作温度之下。为了有利于永磁体散热，永磁式风力机常做成外转子型。定子则固定在发电机的中心位置。当风力带动转子旋转时，绕转的磁场切割定子绕组，在定子绕组中产生感应电动势，继而产生交流电输出。定子绕组中的交流电流建立的旋转磁场转速与转子的转速同步。

永磁发电机的转子上没有励磁绕组，因此没有励磁绕组的铜损耗，发电机的效率高。由于省略了齿轮箱，减小了机械噪声和机组体积，从而提高了系统的整体效率和运行可靠性。

发电机

永磁直驱发电机，更少的传动部件，意味着可靠性和可利用率增加，能量损耗更少，同时降低维护成本。

轮毂

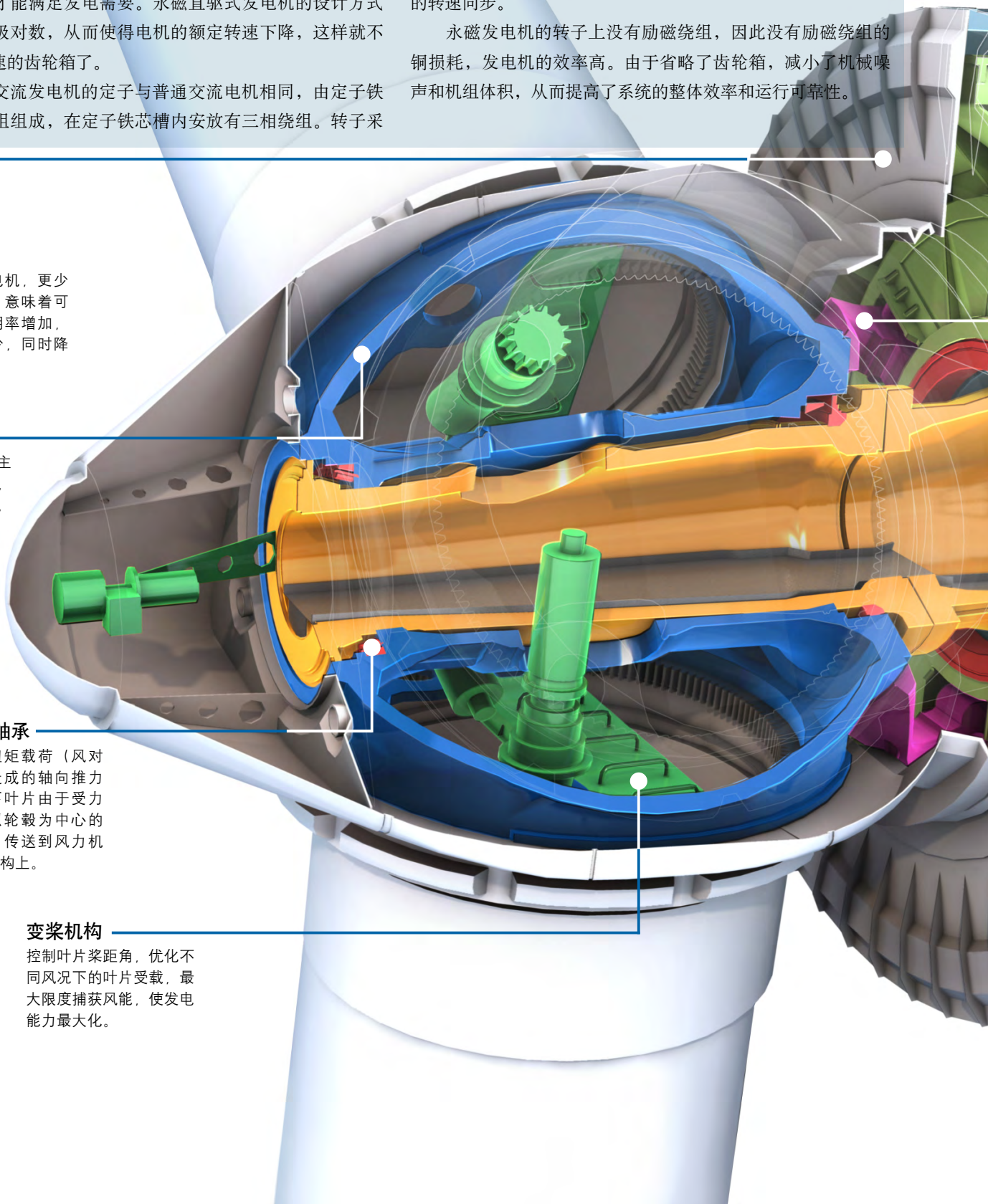
支撑风轮，与主轴连接在一起，内置变桨系统。

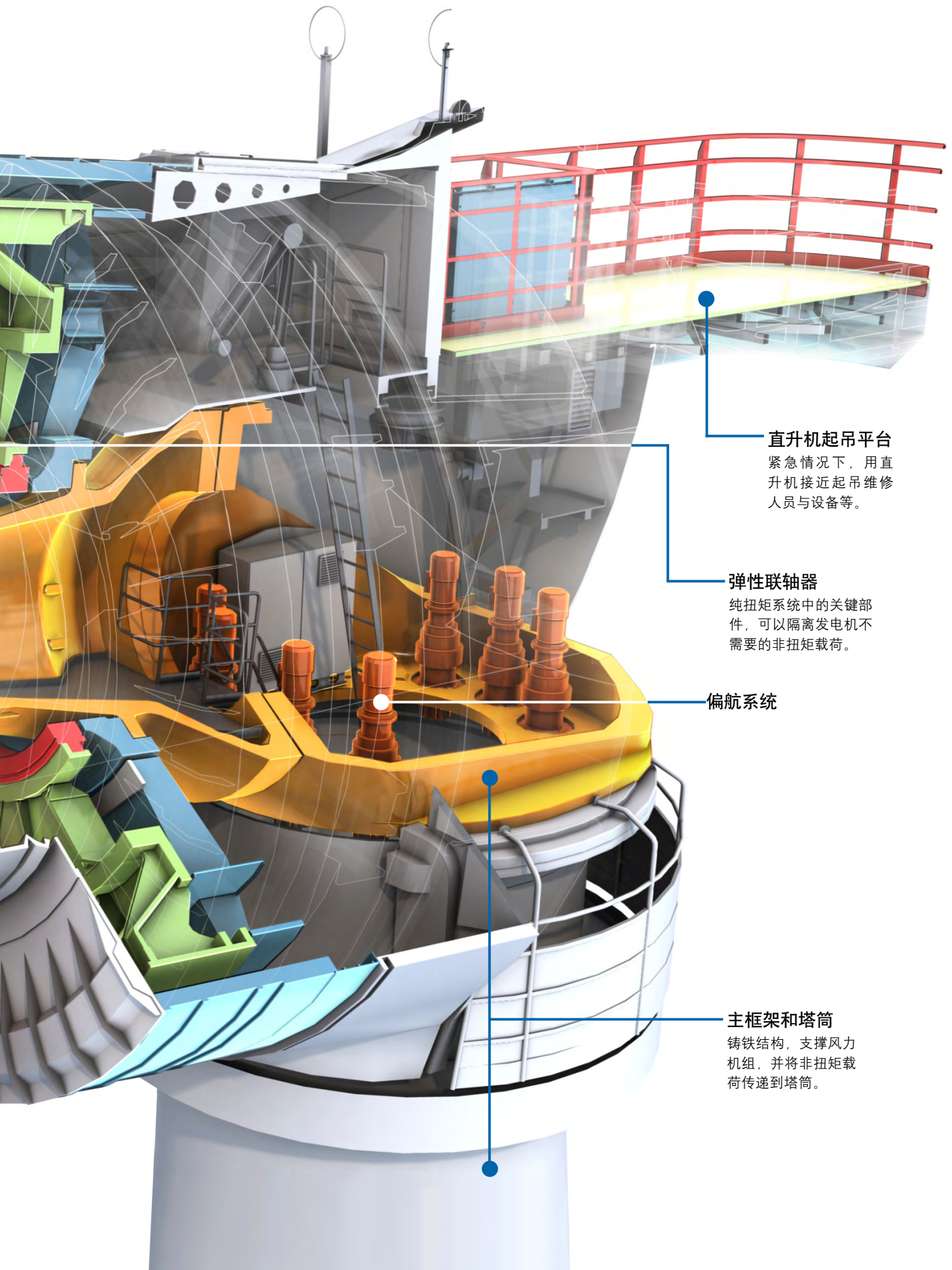
风轮轴承

将非扭矩载荷（风对风轮造成的轴向推力和上下叶片由于受力不均以轮毂为中心的摆动）传送到风力机主体结构上。

变桨机构

控制叶片桨距角，优化不同风况下的叶片卸载，最大限度捕获风能，使发电能力最大化。





直升机起吊平台
紧急情况下，用直升机接近起吊维修人员与设备等。

弹性联轴器
纯扭矩系统中的关键部件，可以隔离发电机不需要的非扭矩载荷。

偏航系统

主框架和塔筒
铸铁结构，支撑风力机组，并将非扭矩载荷传递到塔筒。

海上风电场的“血管”和“神经”：海缆

为了传输海上风力机组发出的电能，大要用到一种特制的电缆，它将电缆和光缆的功能综合在一起，称为复合海缆。

海缆在整个风电场的运行结构中同时扮演着“血管”和“神经”的角色，除了汇集、传输电能外，其内部还有光纤单元，作为风电场通信及海缆监测信号的通道。功能“二合一”的海缆一方

面节约了海底电缆敷设通道资源，大大节省了工程成本；另一方面，这种集合式的结构使纤弱的光缆得到了更好的保护，增强了可靠性。

电力和信息同时传送

海上风电场所用的海缆通常可分为两种：一种是35千伏的集电线路海缆，另一

种是220千伏的输电线路海缆。我国早期建设的海上风电场普遍采用35千伏海缆连接风力机直接登陆，经过陆上上升压站，向外送出电能。随着近年来风电场建设规模越来越大，离岸距离越来越远，用这种方式的话，海缆数量多、电力损耗大的缺点尤其突出，越来越不适合海上风电的送出。自从江苏响水海上风电场中在国内首次应用220千伏电压等级海缆以后，国内近期建设的海上风电项目大多也采用这种海缆。

海缆的线路布局

在海上风电场中，一般是遵循最大限度利用风能资源的原则来进行布置风力机的，同时还要尽量减小风力机之间的尾流影响。与之配套的海缆在布设的时候，要设计出合理的连接方式（链形、环形、星形等），尽量缩短风力机组之间的海缆长度，以降低配套工程投资和场内输变电损耗。

在响水近海风电场中，共有8个联合单元（即8个回路）汇总到海上上升压站。每8~9台风力机组组成1个联合单元，由35千伏集电线路海缆以链形（局部为星形）连接起来汇集电能。8根联合单元的电能可在升压站汇集、升压至220千伏，再通过220千伏输电线路海缆传输至陆上集控中心，进而输送至电网。

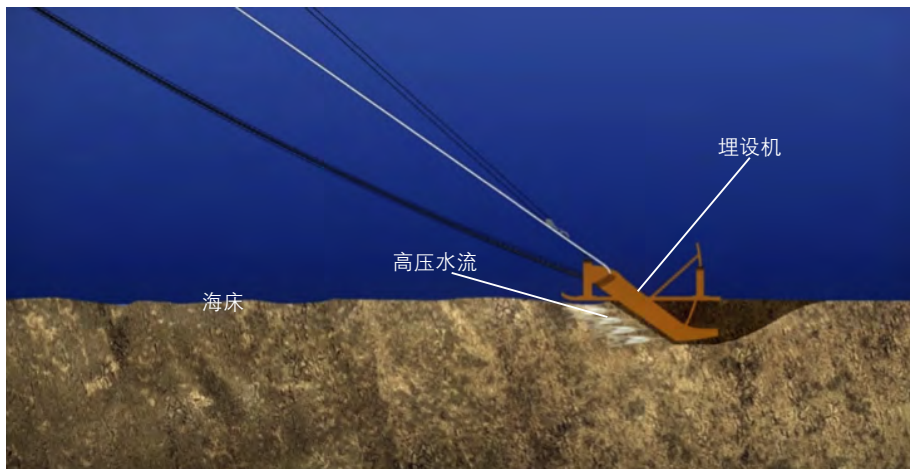
如何敷设海缆？

敷设海缆时，有专用的敷缆船。这种敷缆船不会“随波逐流”，而是利用动力定位系统精确定位在海上的位置、前进和纠偏，可极大提高敷设的精度以及敷缆船在复杂海况下的施工能力。

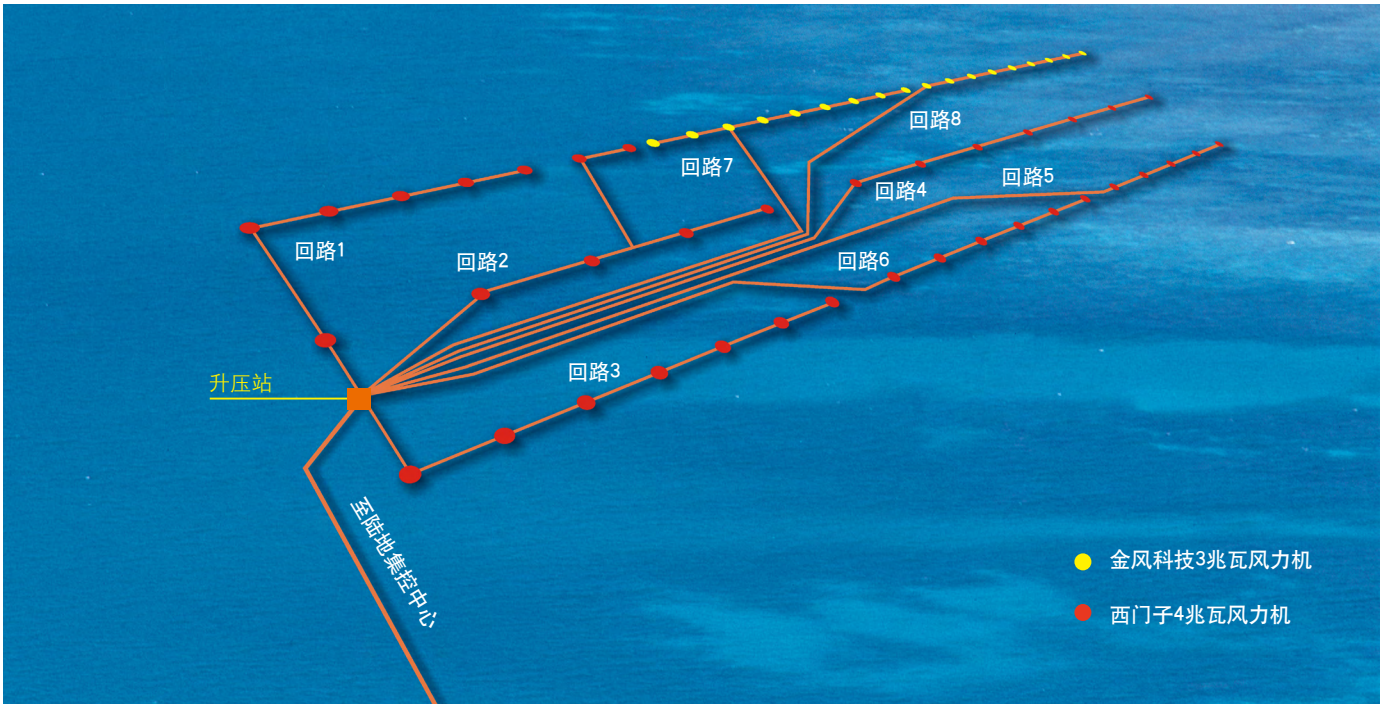
向海底敷埋海缆作业时，将海缆放入埋设机腹部后，将埋设机吊入水中，搁置在海床面上。然后，启动其自带的高压水泵及埋深监测系统，开始敷埋作业。埋设



敷设中的国内首条三芯220千伏的海缆（图中黑色粗缆） 摄影/孙荣刚



埋设机在海床之下的底泥中喷出高压水流，冲击出一条壕沟，同时敷设海缆。

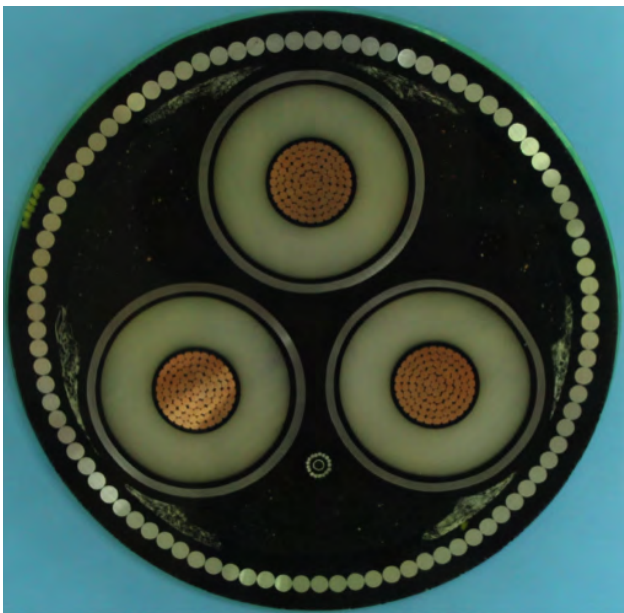


江苏响水近海风电场通过8根35千伏海缆汇集风力机发出电能，传输到海上升压站，再通过220千伏海缆输送至陆地集控中心，并入电网。

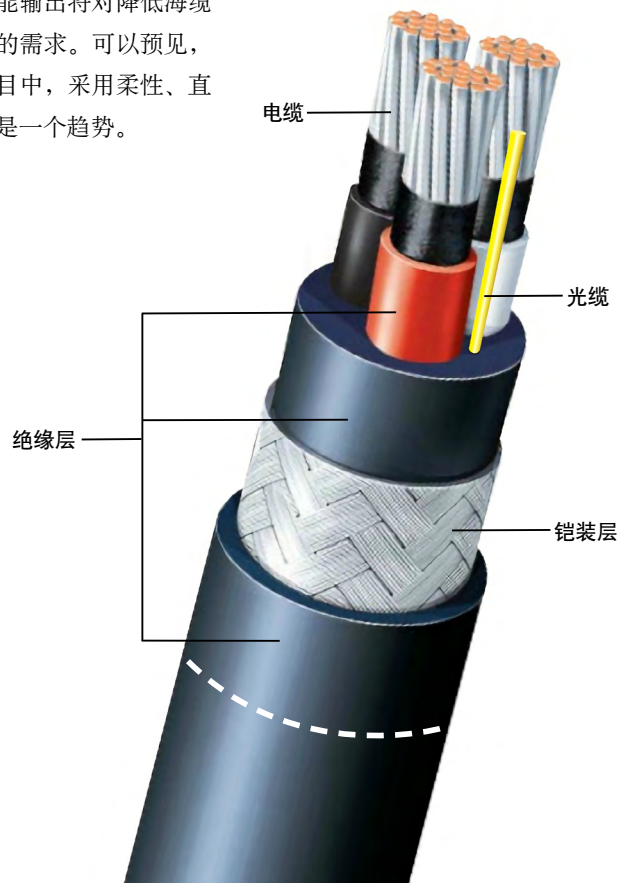
机随船的拖动而水平移动，喷出的高压水流冲击海底淤泥，二者的联合作用形成初步的断面，同时敷设海缆，随着周围的淤泥坍塌，将海缆埋入海床中。

未来，随着近海风能资源的开发逐渐饱和以及风电上网电价下降成必然趋势，

海上风电势必朝着远海化、规模化发展，长距离、大规模的电能输出将对降低海缆上的电能损耗提出新的需求。可以预见，在未来的海上风电项目中，采用柔性、直流的电缆送出方式将是一个趋势。



三芯海缆的横截面，包含3条电缆和1条信号缆。每根电缆直径50毫米，海缆外径250毫米。



海上风电场的“心脏”：海上升压站



位于响水风电场的亚洲首座220千伏海上升压站

如果把海缆类比作海上风电场的血管和神经，那么，海上升压站则可以比作整个风电场的“心脏”。所有的风力发电机发出的电能在此汇集，通过送出海缆连接到陆地上的电网，输送给千家万户。

作为海上风电场的电能汇集中心，海上升压站是其中输变电的关键设施，同时是整个海上风电场成败的关键。海上升压站电气设备如果出现问题，小则一条回路上的风力机停运，严重时整个风电场将瘫痪。

风电场主要的能量传递和转换设备是变压器。风力发电机出口侧的低电压（690~900伏不等，随型号不同有差异），经内部的升压单元升至35千伏，由35千伏海缆将能量送至海上升压站，再升

至220千伏后，向陆地输送。这样一系列的升压过程可以有效地减少能量于传输过程中在电缆上的损耗。

先整体建造，再整体吊装

为了使整个风电场区的集电线路长度最短、线路输电损失最小，海上升压站需布置在风电场中央以及靠近陆地的地方。如果风电场靠近自然保护区等特殊地带，海上升压站位置及送出海缆的走向都要进行调整。

由于海上升压站比较复杂，总重量很大，一般采用在陆地上整体建造，再由工程船运到海上一体化安装的操作模式。以响水海上风电场的海上升压站为例，上部平台分4层，主体平面尺寸约25米×28

米，高约25米，总重约2000吨。

无人值守的升压站

响水海上升压站采用无人值守方式运行，由陆上的集控中心对海上风电场远程实时集控及各类数据的统一管理。

海上升压站平台上的各个设备室均采用了暖通系统，用通风除湿系统将各个室内压力保持在大于1个大气压（微正压），防止海上的潮湿空气流进。

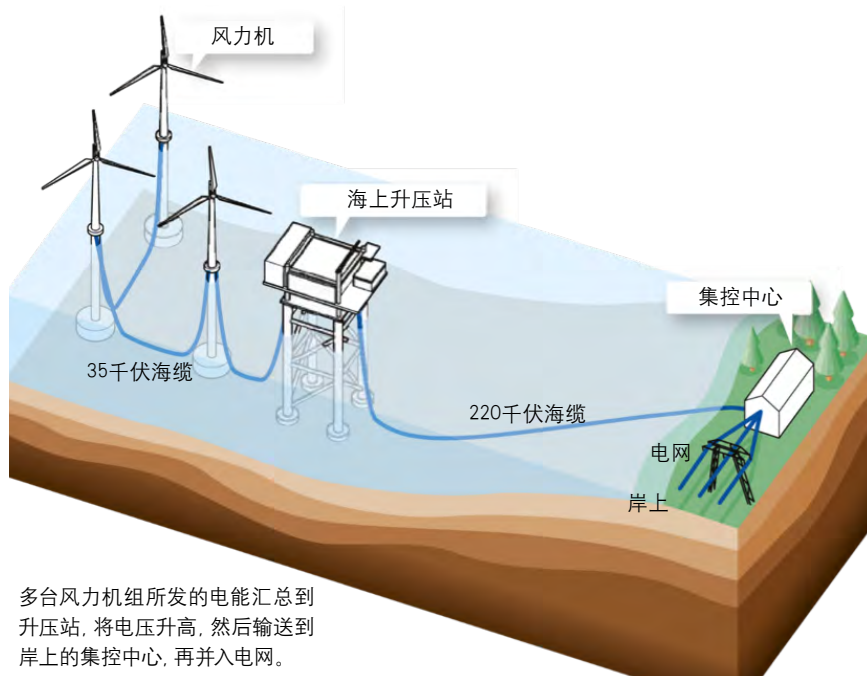
海上升压站自动消防系统采用高压细水雾灭火系统，利用纯水作为灭火介质，采用特殊的喷头，能向保护对象或空间喷射细水雾，扑灭或控制火灾，具有高效、经济、适用范围广等特点。

海上风电场的“大脑”：集控中心

作为海上风电场的“大脑”，集控中心在陆地上远程监控着所有的风电机组和管理整个风电场的运行。来自一台台风力发电机组和海上升压站以及连接的海缆等设施的信息，都要传输到集控中心进行分析处理。同时，从这里向末端设备发出详细的调度指令，因此，集控中心是个不折不扣的“司令部”。

集控中心能极大地提高风电场安全管理水平和驾驭大风电的能力，推进了集约化管理，使风电生产运营模式更加科学合理。不仅实现了集中管控，现场无人值班、少人值守，区域检修的风电管理模式，同时也降低了风电场运营和维护成本。远程监控系统可根据风功率预测，准确地预测出负荷变化趋势，为其状态检修提供可靠依据。

集控中心通过运用现代信息和通信技术，实时收集、分析并报告风电场的风力状况和机组、风电场运行状况的监测数据。其通常配置有风力发电机组数据采集及监控系统（SCADA）、电站综合自动化监控系统、海缆监测系统、风力发电机组振动监控系统、视频监控系统和天气预报预测系统等。通过这些监控系统，集控中心可以随时掌握风电场设备运行和环境监测数据，对数据进行分析并通过网络向



多台风力机组所发的电能汇总到升压站，将电压升高，然后输送到岸上的集控中心，再并入电网。

风电场发送控制指令，实现对设备的遥控和维护。如果风电机组和输变电设施有一点“头痛脑热”，集控中心都能随时心中有数。

集控中心除了监控风电场的实时数据，还保存了风电场的历史数据，包括风力机、测风塔、海上升压站、风电场功率、数值天气预报等数据。通过对历史数据的分析，我们就可以研究发电损失等生产指标的深层次原因，还可以为调节电力

生产计划和维修计划提供参考。

无论是在风电场建设期间还是运营期，集控中心都是整个风电场的唯一调度指挥中心。它可以24小时、全天候、全覆盖监视着风机、变电设施、厂站设备的运行情况，把握着风力机并网、发电、输电状况。设备能否安全可靠地运行，出现故障时能否快速排除，都是对集控中心监控分析能力、调度指挥能力的全面考验。

我国首个商业化运营示范项目—江苏响水海上风电场



三峡集团江苏响水近海风电场位于响水县外侧海域，离岸距离10千米，沿海岸线方向长约13.4千米，面积约34.7平方千米。场区水深8~12米。场内共安装37台单机容量为4兆瓦和18台单机容量为3兆瓦的风力机，总装机容量20.2万千瓦，以及一座海上升压站和一座陆地集控中心。风电场于2015年4月开始海上施工，2016年10月主体工程

并网发电，年上网电量约为5.1亿千瓦时。

作为我国首个商业化运营示范项目，响水海上风电场在建设过程中积极探索技术创新并推进国产化，投运国内首条220千伏三芯海缆，建成亚洲首座220千伏电压等级海上升压站，并在全球首次整体吊装4兆瓦风力机，以及复合筒型基础与风力机同步安装。

风电并网



电力系统包括发电、变电、传输、配电的整个过程。

风力发电机所发的电能输送上岸后，距离我们的现实生活还有一步之遥，那就是不得不面对的“风电并网”问题，即如何才能汇入可供我们直接使用的电网中。

广义上讲，“风电并网”中的“网”指的是包含发电、变电、传输的整个电力系统。

电网要保证“实时平衡”

电力系统是人类创造的最复杂、最庞大的能量系统。它将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电能，接着，通过密集的电网，将能量输送到每个工厂、每个家庭，为我们的生活带来了各种高效和便利。但由于目前尚没有经济、高效的电能存储方式，所以，调节发电量与用电量“实时平衡”，是保证它能正常平稳运行的核心要求。

电力系统的作用就像一个天平：一端是发电，另一端是用电。一旦实时平衡被打破，其后果可能是灾难性的。为了达到这个目标，电力系统在各个环节都设置了控制系统，对接入其中的各类电能的生产过程进行管理。为了保证电力系统的安全可控，自然希望一切接入电网的电源都是可检测、可预报、可调控的。

根据电力部门测算，每个城市的电力负荷随时间变化的波动曲线有很确切的规律，预测误差在5%之内。在已知需求量的前提下，电力系统通过调节发电厂的发电量来满足用户的

需求。要保证电力系统的正常运行，就要保证电力的频率、相位、电压等质量参数保持稳定。

接入电网要安全可控

作为一种清洁的可再生能源，风力发电优点众多，可是在实际应用中并非一帆风顺。由于风能、太阳能等新能源的波动性和预测的不确定性，占比越来越高的新能源接入电网后，将存在一定的运行风险。这也是全球新能源产业面临的共同挑战。

由于电网运行中可能出现一些意外的事故，会造成短时（100~200毫秒）的参数波动。面对这种小波动，风力机需要具备一定的抗干扰能力，才能继续保持稳定供电。然而在我国的风力发电历史上，在2008~2011年曾经发生过一些大规模风电脱网事故。经过对事故的分析调查，发现主要原因是风力机的低电压穿越*能力不合格。

低电压穿越是风电并网中最难以实现的核心技术，早期的新能源发电设备大多数都过不了这一关。以前我国风力发电机的装机量少，即使偶尔有几台风力机脱网也不会对电网造成多大的影响，并未引起重视。然而，在短短几年中，我国的风电事业发展势头迅猛，装机量越来越多，发电量开始在电网中占有一定的比例了，可是这种能力却没有及时跟上。一旦大规模脱网，就会造成严重的后果。这好比十个人一起抬一根木头，若中途有一个人撒手，其余的人还能扛过去。如果有五个人同时撒手，剩下的人就

都抬不动了。

为此，国家能源局、国家电力监管委员会分别制定了多种防范措施，于2011年6月发文要求之前建造的不具备低电压穿越能力的风电场必须在一年之内完成改造，使其符合安全并网运行的要求，并取得检测认可。新的风力发电机必须具有低电压穿越能力的检测认可，才允许安装。

高效消纳风力发电

近年来，风电机组的装机量屡创新高。如何更高效地消纳风电，成为风电业界关心的焦点。

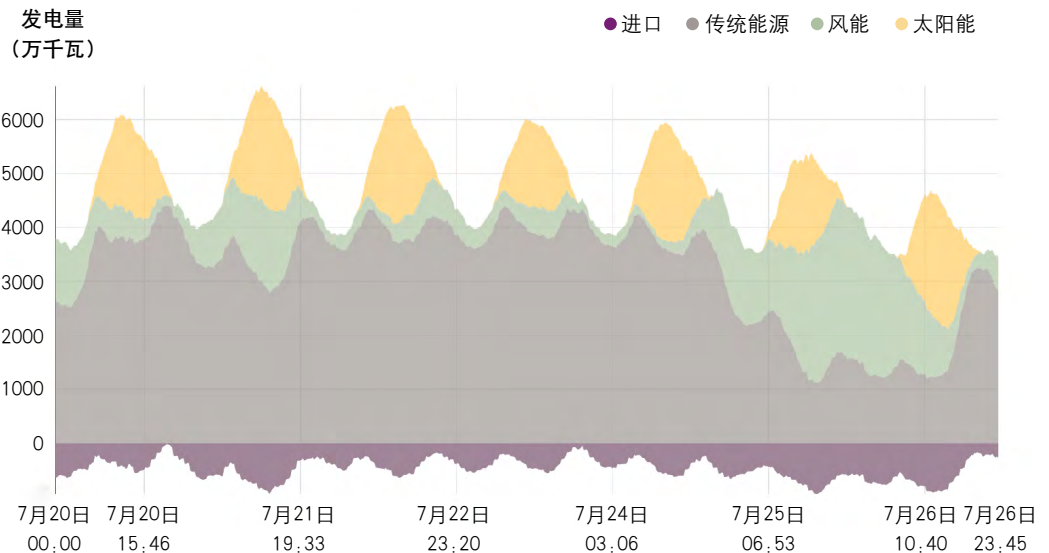
以前，人们对风电的利用充满了随机性，完全处于“等风来”的状态，非常被动。风力发电自身的波动性和不确定性会给电网的安全稳定运行带来不利的影响，而风功率预测技术正是解决这一挑战的有效工具。风功率预测技术是根据风电场基础信息、运行数据、气象参数以及数值天气预报等数据，建立数学模型，对单个场站或区域场群于未来一段时间的输出功率进行预测的技术。它将未来的风电出力在一定程度上量化，为“实时平衡”提供决策依据，有效支撑电网的调度。

中国电力科学院建立了国内首个面向电力生产运行的电力气象预报与发布中心，与气象领域的国际机构建立了长期的合作关系，针对风电场所在区域地形和气候特征，定制了高精度的数据产品。目前，风电工程师研发了次日0~72小时内的中长期风功率预测，和0~4小时的超短期功率预测系统，分辨率为15分钟。风电并网实现了初步的可预报、可调控，能为电力系统实时调度提供依据。

储能技术有待开发

尽管目前还没有一种经济有效的方法来储存电能，但是为了扩大新能源的使用范围，世界各国都在积极探索更好的储能技术。假如风电场之外的电网发生故障，储能技术可以在最短的时间内提供电压的支撑，从而有效地保证电网运行的平稳性。

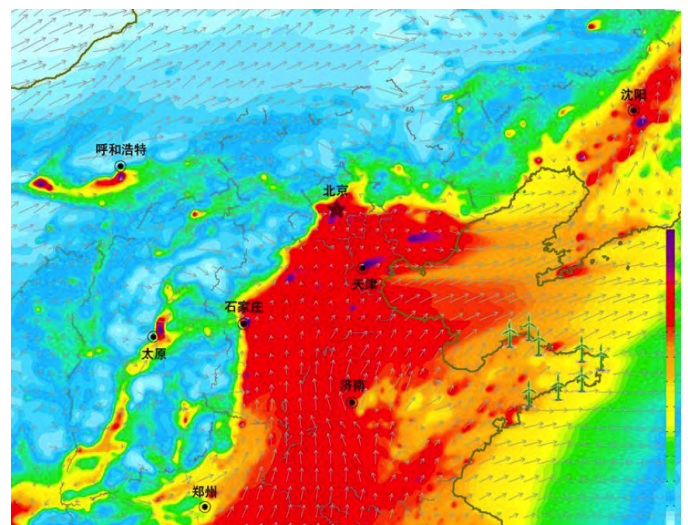
如果风力发电、太阳能发电等新能源不直接接入电网，而是间接接入储存能量的设施中，就不用考虑与用电负荷实时



2015年第30周德国的电力生产情况，可以看出每日用电负荷的波动。太阳能只能在白天生产，而风能有很大的不确定性。大规模使用新能源时，仍然需要传统能源保证电网的稳定。或者，我们需要建设更多抽水蓄能电站等储能设施。

平衡的调度问题了。当需要能量的时候，便能由储能设备立刻输出能量。在近些年技术发展中，储能技术的发展也越来越快，逐渐发展出几条主要的储能路线：超级电容器储能、超导储能、蓄电池储能、压缩二氧化碳储能、氢燃料罐电池储能、抽水储能等技术。以上每种储能技术的优缺点各不相同，目前还处于积极地探索之中。

※ 低电压穿越，是指当电力系统发生故障导致风电场的并网点电压降低的时候，风电机组仍然能够保持并网运行，并能在故障时期对电网提供无功电流支持。



风预测系统可以对风电场的发电功率作出短期至中长期的预报，为电力系统实时调度提供依据。

大步前行的中国海上风电

我国在国家战略层面，已将包括海上风电在内的可再生能源作为新时期能源发展的主攻方向，计划到2020、2030年非化石能源消费占一次能源消费的15%、20%。“十三五”时期，我国能源发展总体目标是“建设绿色低碳、安全高效的现代能源体系”，围绕能源生产和消费革命，大幅增加可再生能源在能源生产和消费中的比重。大规模发展海上风电将成为国家能源结构调整和节能减排目标实现的重要途径之一。

近年来，为鼓励促进海上风电的发展，国家在海上风电规划建设 and 价格机制等方面出台了一系列政策。2006年1月，《中华人民共和国可再生能源法》颁布实施，要求通过减免税收、鼓励发电并网、优惠上网价格、贴息贷款和财政补贴等激励性政策来鼓励发电企业和消费者积极参与可再生能源发电。

2009年1月，国家能源局印发《海上风电场工程规划工作大纲》，海上风电发展逐步成为热点。

2014年被称为我国海上风电元年。当年6月，国家发改委下发《关于海上风电上网电价政策的通知》，规定2017年以前投运的潮间带风电项目含税上网电价为0.75元/千瓦时，近海风电项目含税上网电价为0.85元/千瓦时。电价激励着我国海上风电步入规模化发展的快车道。在2017年8月，我国共有19个海上风电项目正在开工建设，它们的总装机容量达到480万千瓦。

国产设备技术水平大幅提高

在经过了多年的发展探索后，我国海上风电技术取得了长足的进步，通过一些样机及示范风电场的开发、建设、运行和维护，国内海上风电机组技术、风电场勘测设计能力、施工装备和安装能力、建设管理水平均得到了较大提升，海上风电行业标准体系也在逐步地完善。

风力机设备方面，国内主要设备制造企业的2.5~4兆瓦海上风电机组技术已经成熟，5~6兆瓦机组的设计制造能力已经具备，处于样机试验阶段；施工和运维船

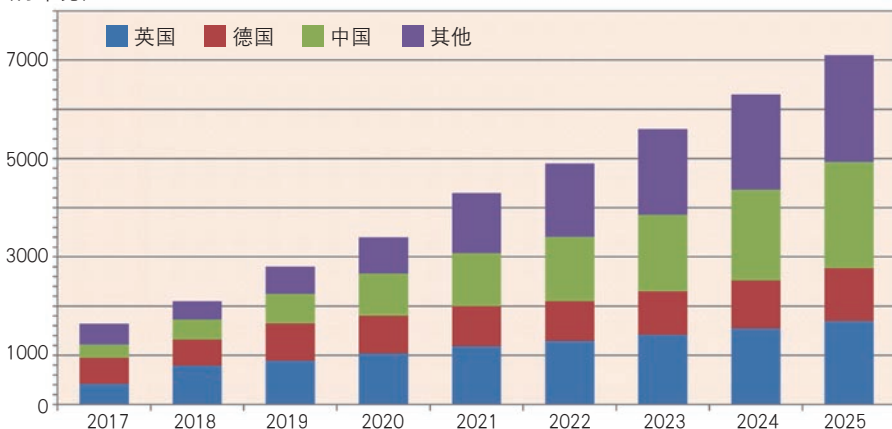
舶方面，国内施工企业和造船企业都积极研发制造适应海上风电施工、安装、运输的装备船舶，具备了大直径桩基沉桩、风力机整体与分体安装能力，高压海缆敷设船只及专业运维船只也在不断地创新改进；勘测设计方面，科研院所通过不同区域的工程设计和国家及地方科研项目，初步具备了海上风电勘测设计能力和关键技术研究能力；标准制定方面，国家标准化委员会和国家能

源局标准化委员会通过学习、借鉴国际标准，总结国内海上风电建设经验，制定了一些海上风电标准、规范。

如今，我国海上风电规划蓝图已基本完成，海上勘察设计、风电机组、施工安装等关键技术不断进步，有效地降低了海上风电场的建设成本，为海上风电规模化发展奠定了基础。随着国家能源结构调整和政策的支持以及“一带一路”倡议的引领下，中国的海上风电已具备走出国门的底气和核心竞争力。

2017~2025年全球海上风电装机预测

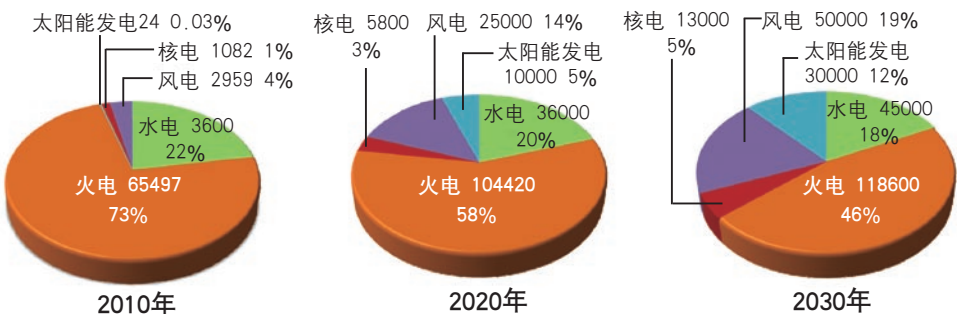
(万千瓦)



资料来源：彭博社

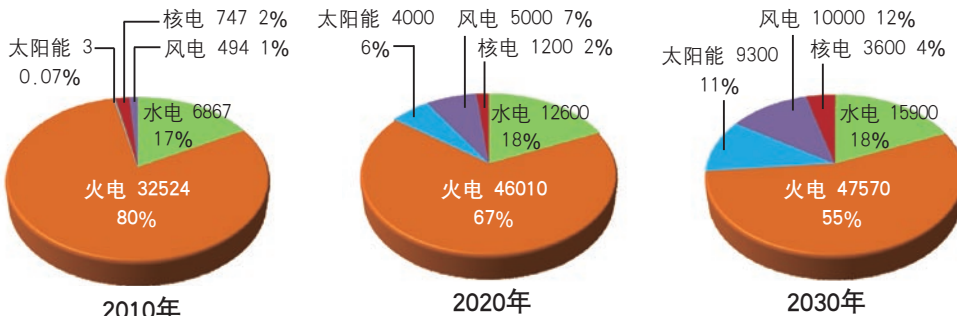
中国2010年电力装机容量与2020~2030年电力装机容量预测

单位：万千瓦



中国2010年发电量与2020~2030年发电量预测

单位：亿千瓦时



资料来源：吴敬儒《2015~2030年电力工业发展展望》

争力，具备了全球发展的实力。

建设亚洲风能资源的明珠

台湾海峡是我国乃至亚洲海上风能资源最好的地区，位于海峡一侧的福建省海上风能资源十分丰富。特别是在福州、莆田、泉州一带的福建中部海域，受台湾海峡的狭管效应影响，海上风电平均风速普遍处于8~10米/秒。同时台湾岛又对台风进行了非常有效的天然阻挡，使得上述海域的风电年利用小时数基本处于3500~5500之间，开发潜力十分可观。

根据福建省海上风电规划，长乐远海、莆田平海湾、漳浦六鳌等场址规划装机为145万~350万千瓦，符合国家能源局“鼓励实力较强的企业连片规模开发、发挥规模效益、带动产业发展、降低发电成本”的政策。三峡集团正在上述4个场址开展前期工作，探索百万千瓦级海上风电场项目建设之路。

海上风力机的“奥林匹克”赛场

为了选出适合福建海上风电规模化建设的下一代海上风力机，三峡集团正在福建省福清市兴化湾北部建设国际上首个大功率海上风电样机试验风电场。试验风场计划安装金风科技、通用电气、西门子、中国海装、太原重工等8家国内外厂商的14台5~6.7兆瓦风力机，让它们同台竞技，从中选出质量可靠、性能、技术先进且适合福建海况的机型。并邀请相关风力机厂家入驻产业园，提升我国海上风电装备制造水平。

试验风电场于2016年11月5日动建，现场10个风机基础主同时施工。兴化湾场址区属于浅覆盖层，海床下基岩面坡度起伏大。因此需要多种基础形式，并采用嵌岩工艺。同时地处台风地区，水文方面潮差较大，最大达到9米左右。加之边界限制条件较多。这都给风电场建设带来了考验。2017年7月25日，样机试验风电场首台风力机吊装。9月29日，首批风力机成功并网发电。

在首台机组吊装过程中，海上风电一体化移动作业平台“福船三峡”号完成首秀。其起吊能力、甲板工作面积及载荷均为国内之最。得益于此，海上风机吊装时间大大缩短。

全球首个海上风电国际产业园

福建三峡海上风电国际产业园位于福清市江阴工业区，为“立足福建、面向沿海、辐射全球”的大规模综合性的海上风电研发中心和海上风电设备生产制造基地。产业园计划引进3家风力机制造厂、1家叶片制造厂、1家钢结构制造厂以及风力机配套厂入园。在2019年12月落成后，预计年生产5兆瓦以上风力机150万千瓦，年产值超过100亿元。目前，金风科技、江苏中车、西安风电、艾尔姆公司和通用电气公司已签署入园协议或意向协议。

针对海上风电建设与维护面临的技术、质量、施工、抗台风、可靠性等多

方面的挑战。三峡集团与福船集团、中铁大桥局共同组建了中铁福船海洋工程公司，主要从事海上风电工程安装、救援，海洋工程设备建造、维修、租赁等。

三峡集团还与福船投资、永福工程、一帆新能源等合资成立福建新能海上风电研发中心有限公司，开展福建海域环境、施工技术和海上风电运维等方面研究。当前，福建省正与三峡集团共同建设福建海上风电研发、检测、认证等三个中心，立足自主创新，带动设备制造、施工安装等海上风电产业链发展和技术进步，提高海上风电技术及成本的竞争力，打造海上风电开发新模式，推动中国海上风电装备“走出去”。



正在福建兴化湾吊装5兆瓦风力机的“福船三峡”号

“福船三峡”号是针对福建海域复杂的地质条件、多台风影响、作业窗口期短等情况设计的新一代海上风电一体化作业移动平台，兼具海上风力机整体式和分体式的流水线安装作业能力。4根85米长桩腿直径4米，可支撑平台在50米深的海域作业。平台作业面积大于2500平方米，可携带5兆瓦风力机3台或7兆瓦风力机两台。

走向深海

从诞生至今，海上风电的历史还不到30年，其技术革新之迅猛令人印象深刻。如果以这种速度发展下去，未来的海上风电将会呈现怎样的景象呢？

最明显的趋势，是风力机的进一步大型化。现今叶片制造技术以及传动系统性能的持续改善，使得风力机可以使用更大型的叶片，相应地提高了单机容量。目前主流海上风力机的单机容量已经达到6兆瓦，风轮直径达150米。运用更大型的机组，能够通过提高可靠性以及在同功率情况下缩减基础制造与吊装成本，来获得更好的经济性。预计到本世纪20年代，单机容量为10兆瓦的海上风力机将会投入商业化应用，而到30年代，单机容量为15兆瓦的机组将能够面市。

当今我国乃至世界上建成的海上风电场绝大多数为近海风电场。未来，海上风电势必会向深远海发展，因为深远海范围更广，风能资源更丰富，风速更稳定，也不会与海上渔场、航线等发生冲突。前文介绍的风力机基础都需要与海床结合起来提供承载力，而深海风力机要是仍然使用这一形式，其基础的尺寸和造价将随着水深急剧增加。也就是说，深海风力机将只能选择用海水的浮力来负担载荷的方法，即漂浮式基础。

漂浮式基础的使用，能让风力机摆脱不同海床条件的束缚，使基础的设计标准化，最大限度地减少海上作业。同时它将具有良好的机动性，在需要维修或是躲避台风时，可以轻易地解除固定的锚索返回港口。2017年10月，全球首个商业化运行的大型海上漂浮式风电项目——海温德苏格兰（Hywind Scotland）漂浮式风电场已在英国海域投入运行，这个风电场拥有5台6兆瓦风力机，每座风力机通过长达100余米的漂浮式基础与3条连接海底的锚索矗立，总重量高达11200吨。我国也已经着手漂浮式风力机的研究，计划在2019年开建首个海上漂浮式风电项目。

目前，即使是建设中的距岸45千米的江苏大丰海上风电场，仍然计划使用连接简单、成本较低的高压交流电向陆上供电。但随着大规模深远海风电的开发，交流输电便会受到输送距离的限制，直流输电将成为海上风电远距离送出的发展方向，特别是可自动调整电压、频率、功率的柔性高压直流（VSC-HVDC）将具备经济优势。例如，德国距岸130千米的博尔温1（BorWin1）海上风电场（装有80台5兆瓦风机），先通过海上升压站将电压升至155千伏，再通过海上换流站转换为150千伏直流电输往大陆。我国南澳示范工程在国内首次使用柔性直流输送技术，将位于南澳岛上的多个风电场接入距离40千米的陆上电网，并保留未来接入海上风电场的能力。

国际可再生能源机构认为，到2030年，全球海上风电的装机总量将达到1亿千瓦。到那时，或许巨大的风车将成为孩子们对海洋的第一印象。

漂浮的“巨无霸”风车

图片为漂浮式海上风力机的示意图。目前，漂浮式风力机还处于验证阶段，全球仅有几例。我国计划在2020年建造3台漂浮式大容量海上风电机组。

宛如高楼的风车

叶片长度接近100米，甚至超出了大型喷气式客机的翼展。输出功率约为10兆瓦。在提高密闭度的同时，还进行了严格的防水、耐盐处理。使用钢材超过5000吨，与建造一座50层高楼所需的钢材一样多。

在海上必须建造大型风车，以免被大浪冲倒。一般来说，海面上空的风速较强，风轮越大越利于发电。

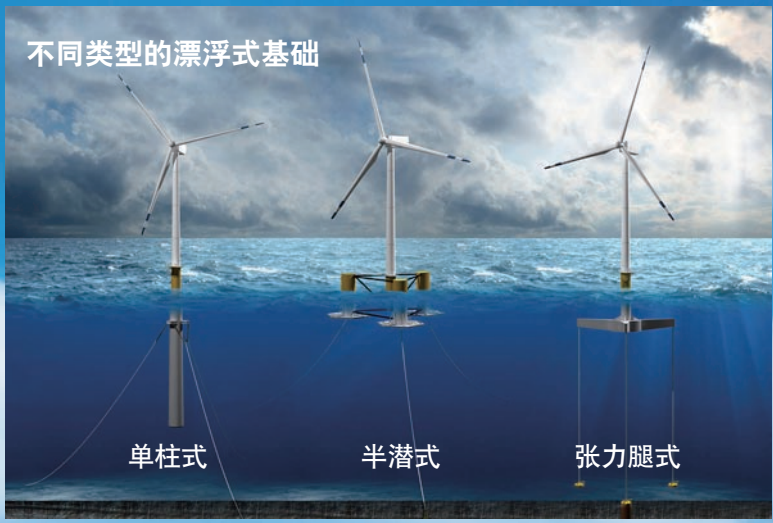


V型半潜式浮体：

由位于水下的浮体提供浮力，平台稳定性好。

锚索

中间浮标



不同类型的漂浮式基础

单柱式

半潜式

张力腿式

海上升压换流站

连接风力机和陆上换流站，可将交流电转换为柔性高压直流电，通常建有直升机场和观测塔。

连接到陆上换流站

单柱式浮体：

由重心低于浮心的大型圆桶构成，海温德苏格兰海上风电场即使用了类似基础。

水深100~120米的海域

在水深超过50米的海域，能否成功建造浮力机式风车是普及海上风力发电的关键。

漂浮式海缆

深远海的海缆同样需要悬浮在海中，因此带有浮标，部分向上升起（提升管）。当浮体晃动时，可避免线缆在海底被来回拉拽而破损。

中间浮标

与其他风力机连接

锚索

海上风电新时代



严思·阿舒华 (Jens Assheuer)

德国稳达风电公司首席执行官，海事系统专家及海上技术专家。参与了世界上首个导管架式和三脚架式海上风电基础结构的建设。2008年8月成为德国稳达风电公司的首席执行官，管理梅尔海上风电项目的规划、实施和运营。该项目自2014年开始运行，是德国北海第一个也是最大的海上风电项目之一。自2016年稳达公司并入中国长江三峡集团后，他致力于海上风电场的运营、维护与优化，注重中国产业研究，积极促进德中双方在协同发展中的深度融合。

组，总量约63万千瓦。到2017年6月底，德国总共有约460万千瓦装机容量的海上风电投入运行。放眼全球，拥有近500万千瓦装机容量的英国仍然占据世界首位，在英德之后，便是装机容量超过150万千瓦的后起之秀——中国。

为了获取投资者和用户在经济上的长期信任，很显然，不仅仅需要足够多的扩建数量，还需要可持续的增长，以及有效益的规模化发电（海上风电场需达到70万千瓦乃至更大）。此外，也需要在可再生能源方面有持续更新的法律规定。

过去几年，海上风电装机量的爆发式增长和设备的扩充，大大降低了相关的设备开发、制造、物流和安装的费用。自2016年以来，海上风电国家补贴的降低也令人欣喜。为了保证海上风电发展的活力，这两者是同样必要的。

如果参考海上风电在丹麦、荷兰和德国的发展情况就会发现，自2012年以来，海上风电的补贴已经减少了50%。根据欧洲最新的招标情况，每千瓦时（度）电力的补贴大概在5~7.3欧分（约合人民币0.39~0.56元）左右。

如此快速的成本降低的基础是正在生产的更大规模的风力机。这些风力机拥有更大的额定功率且数量更多，需要风电场的运营者在建造、经营和维护上进一步学习与改变。一个巨大的经济挑战是：为了在将来能够生产足以收回成本的风电，风力机的单机功率需要达到13~15兆瓦。这意味着，发电设备在未来数年内，需要从当前7~8兆瓦的额定功率翻倍增长。只有出现长期稳定的用户以及足够的负荷量，才能够促进更高效的产能。

生产能量的地方，并不一定是使用能量的地方。在一些国家，工业产区和电力设施仍然远离海岸线，因此有必要重新考虑海岸到内陆的输电网络，并升级现有的设施。这些工作应该优先开展，如此就能

如果不是福岛核泄漏事故加速了德国联邦政府出台放弃核电的决定，很多人还意识不到，未来人类所需的能源不能再像从前那样通过污染环境（如煤和天然气）或者可能造成长期不良影响（如核能）的方式来获取了。如今，我们能很明显地感受到气候的变化。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的报告，大气中超过90%的二氧化碳来自于化石能源的燃烧。

在2015年的巴黎气候大会上，欧盟提出计划到2050年将减少80%~95%二氧化碳排放（以1990年为基础）。这一雄心勃勃的目标推动了全球能源从传统的煤炭、石油和天然气等化石能源向可再生能源的积极转变。就这方面来说，由德国提出的“能量过渡计划”概念成为当今世界的一个流行语。如果我们希望给我们的孩子、孩子的孩子们留下一个美好的世界，并让这个世界在很多年以后依旧能保持美丽和自然，那从现在开始，我们就必须从根本上作出改变。

来自社会主流的意愿和共识一直以来都在促使德国从立法层面约束各种行为的合理性及合法性，其结果是制定并深化了多部有关推广使用可再生能源的法律法规。德国的《可再生能源法》（EEG）包括其所有的修订、更新和附件成为热门话题不是没有理由的。它为全球各国相关法律和利益的调整、国家补贴的制定以及海

上风力发电的输送优先权提供了范本。

经过十多年的技术发展和市场开拓，目前，通过海上风力生产的可持续的、不会污染环境的电力能源的价格已经基本上与天然气发电、煤炭发电和核电处在差不多的水平上。未来，相对于需要分离二氧化碳的煤炭和天然气发电，海上风力发电的价格优势将会更加明显。

在德国、在欧洲乃至全世界，海上风电和其他可再生能源比如陆上风电、生物质能和太阳能一起，扮演着保护资源、保护环境的绿色能源角色。未来能源产业的支柱一定会是高度互补的风能和太阳能。

和陆地生产的风电相比，海上风电有一个巨大的优势：由于发电设备距离遥远，普通民众基本看不到海上发电厂，因此他们对这种电力资源的接受程度非常高。此外，海上风电场全负荷工作的时间几乎是陆地风电场的两倍。

海上风电的全球发展正积极向前迈进，在成为全球能源生产的重要组成部分的道路上前进了一大步。从海上风电装机量的年度增长来看，自2010年以来，扩张的速度明显增加，2015年增长峰值超过300万千瓦。目前，全球已有超过1400万千瓦的海上风电机组并网运行。

在德国，2016年安装海上风电机组共80多万千瓦。2017年的头6个月，德国已经安装了差不多110台新型风力发电机

发展海上风电仍需迈过几道坎



秦海岩

中国可再生能源学会风能专业委员会秘书长,国际电工委员会可再生能源认证互认体系副主席,北京鉴衡认证中心主任。积极参与我国风电、光伏发电以及太阳能热水器等可再生能源行业标准制修订工作,研究建立了我国风力发电机组、太阳能热水器及光伏产品认证体系。主持可再生能源发展和节能领域的相关国际合作项目11项,主持或参与国家科技支撑(攻关)计划课题4项,主持863计划课题1项,主持国家公益性科研专项项目1项。研究形成技术规范三十多项,指导了我国可再生能源产品的认证,为我国可再生能源行业健康快速发展提供重要支撑。

当下,进行能源转型、走绿色发展道路已经成为全球共识,海上风电则是推动这一战略早日落地的重要力量。对中国来说尤其如此,我国沿海11个省份的GDP约占全国的一半,总能耗也占全国的一半左右。要完成我国的能源结构调整,上述经济发达地区必须做出示范。对于这些地区而言,海上风能资源丰富,电力消纳能力强,大力发展海上风电将是加快能源转型进程的重要手段。

近两年,我国海上风电发展呈现加速趋势,一系列利好消息不断提振业界信心。在政策层面,国家能源局于2016年11月16日印发的《风电发展“十三五”规划》确定了“开工建设规模达到1000万千瓦,累计并网容量达到500万千瓦以上”的2020年发展目标,而国家能源局和国家海洋局2016年12月29日下发的《海上风电开发建设管理办法》则以简政放权为抓手,优化了海上风电项目的管理制度。在技术创新上,国内风电企业纷纷增加研发投入,一批重要成果相继面世。比如,金

风科技推出了6.X兆瓦平台,远景能源则研发了4.5兆瓦机型,明阳智能和中国海装分别发布了5.5兆瓦、5兆瓦机型。此外,施工建设能力也得到显著提升,最新制造的施工船已经达到世界先进水平。在项目开发方面,江苏、福建、浙江、辽宁、河北等地的一批海上风电场实现并网发电,还有多个项目获得核准或者进入施工阶段。其中,仅三峡集团在国内建成投产的项目装机容量就超过了21万千瓦,在建和核准拟建的项目装机容量则达到68万千瓦左右。

在有利条件的刺激下,2016年,我国海上风电新增装机59.2万千瓦,并以162.7万千瓦的累计装机一举超越丹麦,成为全球第三大海上风电市场。未来一段时间,这一市场还有望进一步提速。这种情况下,要保障我国海上风电又快又好地发展,仍有一些隐忧必须尽快排除。

第一是政策环境需要优化。首先,海上风电开发涉及多个政府部门,彼此间协调困难,造成审批手续复杂、时间长,增

加了不必要的成本。其次,相关的国家或行业标准还不完善,难以为工程勘察、施工、安装、运行管理和维护方面等工程全过程提供有效指导,给海上风电建设带来潜在风险。

第二是必须强化创新力度。一方面,我国海洋环境复杂多样,虽然目前整机以及施工配套等方面已经取得突破,但仍然难以真正满足下一阶段大规模开发的需要。另一方面,我国海上风电开发成本依然偏高,面临着巨大的降本压力。因此,必须加强全产业链的创新,借助数字化技术等手段提升整机性能和可靠性,提高施工、运维和管理效率。

第三是需要高度重视样机测试、认证工作。对于海上风电而言,一旦批量安装后出现问题,将会付出惨重的代价。因此,必须扎实推进前期工作,遵循先安装样机再批量安装的原则,做好认证测试。三峡集团在这方面做了很好的探索,由其建设的全球首个国际化大功率海上风电试验场——福建福清兴化湾样机试验风电场目前已经投运,为国内外整机企业开展样机测试和综合性能评价提供了一个很好的平台。

任何工作在起始阶段都很难做到万事俱备,经验需要在实践中不断积累。就海上风电来说,我国基本具备了大规模开发海上风能资源的能力,目前最需要的是逐步完善相关政策,通过实践不断做大做强产业链。这些工作既要做得扎实,又不能过于保守;既需要严谨科学的态度,也离不开开拓进取的魄力。■

责任编辑/孙天任、闫凯 版式设计/李晴、董曼

在短期内将海上生产的大量能量输送到需要的地方去。除了电网的建设,储存能源的创造性解决方案也是必需的,因为海上风电并不能根据需求生产电力(风不是一直在刮)。

如今,海上风电已经成为了经济发展的明星,为减少对环境的破坏作出了重要贡献。作为建立一个全新产业的突破点,海上风力发电是最好的证明,证明生态和经济并非彼此限制,而是能够相互支持、

协调一致地发展。

为了有更多的人能够享受这种新能源,使价格更具竞争力,我们必须继续努力工作,让海上风电这种既环保又高效的技术在社会各阶层都受到欢迎。