

可再生能源——风能

学习目标

- (1) 了解风能。
- (2) 认识风能的核心特点和优势。
- (3) 熟悉风能利用的主要形式及产业链。
- (4) 掌握风能的应用场景。

5.1 风能的发展概述

人类利用风能的历史可以追溯到古埃及、古印度时期,他们使用风能来满足日常需求。18 世纪末,英国科学家发明了风力发电机,但是由于技术和材料的不成熟,以及电力市场尚未发展,风力发电未能得到大规模使用。20 世纪初,美国发明家使风力发电机技术得到了进一步完善,但仍然受到技术和材料的限制,无法大规模使用。20 世纪 60 年代,美国和欧洲开始研究风力发电技术,并开始进行实验性应用。20 世纪 70 年代,英国和欧洲开始大规模应用风力发电技术。20 世纪 80 年代,全球风力发电技术得到了进一步发展,并开始投入商业应用。20 世纪 90 年代以后,全球风力发电技术进入爆炸性发展阶段,大规模应用于电力市场,成为可再生能源发电的重要来源。

20 世纪 50 年代以来,风能发展一直是中国政府推动可再生能源发展的重要组成部分。近年来,随着能源需求的不断增长和环境污染的加剧,中国政府积极推动风能发展,把风能作为可再生能源之一。

2019 年,中国新增风电并网容量达到 794 万千瓦,增长态势十分可观。当前中国

风电新增装机容量和累计装机容量已经长期位居世界首位,风力发电占全部发电量的 5%,风轮的直径也逐渐增大^[1]。中国政府还将进一步推动风能发展,计划到 2030 年,风能装机容量将达到 4500GW,占全球可再生能源装机容量的 50%,风能发电利用率提高到 30%。此外,中国政府还将着力推动风电行业的科技创新和产业升级,提高风能发电的效率和可靠性,以满足未来可持续发展的需求。

5.2 风能的特点

风能特点主要体现在可再生、可利用、成本低廉、使用安全、环境友好等方面^[2]。

1. 可再生

风能是一种可再生能源,不会消耗矿物质,不会排放有害物质,可以持续利用,为将来的发展提供了可能性。

2. 可利用

与其他可再生能源相比,风能的可利用性更强,可以在更多地方利用。

3. 成本低廉

风能发电的成本比其他发电方式低得多,且没有发电运营成本,一般发电成本比煤电低 1/5,比核电低一半以上。

4. 使用安全

风能的发电过程比较安全,没有放射性污染,不会产生有害废气,没有火灾爆炸的危险,是一种安全的发电方式。

5. 环境友好

风能的发电没有污染,对环境友好,是当今世界可持续发展的新型发电方式。

5.3 风能的核心技术及原理

5.3.1 风能的核心技术

风能的核心技术包括风机设计、风力发电机技术、风力发电系统设计、风力发电控制系统设计、风力发电网络技术、环境影响评价等技术。

1. 风机设计

风机是将风能转化为机械能的机械设备,它的设计决定了发电的效率和可靠性。

2. 风力发电机技术

风力发电机是将风能转换为电能的核心设备,设计时需要考虑发电效率、可靠性等因素。

3. 风力发电系统设计

风力发电系统是将风能转换为电能的完整系统,设计时需要考虑发电效率、可靠性、安全运行等因素。

4. 风力发电控制系统设计

风力发电控制系统是风力发电系统的核心技术,设计时需要考虑风力发电系统的安全运行和发电效率等因素。

5. 风力发电网络技术

风力发电网络技术是将风力发电系统与电网连接的技术,设计时需要考虑电网的安全性、可靠性、发电质量等因素。

6. 环境影响评价

环境影响评价是风能发电系统的重要组成部分,其目的是评估风力发电系统对环境的影响,以确保风力发电系统的可持续发展。

虽然风能主要用于发电,但是风能还可以转换成其他形式的能源,如热能。

5.3.2 风能技术的原理

风能技术利用风力通过风力发电机发电。当风吹过叶片时,叶片会因风力的作用而旋转,为发电机提供动力,从而产生电能,可以直接用于照明、温控等,也可以用于发电站,再发送到电网中。

风能技术的关键是叶片的设计,必须具备足够的强度、刚度和灵活性,以抵抗风力的影响。在风力发电机的设计中,空气动力学原理是利用风力发电的关键。

风力发电还可以利用风力发电机联合汇流箱等,在发电机发出的电流中,将不同线圈的电流汇集到一起,从而提高发电量。

5.4 海洋风能

5.4.1 海洋风能资源的蕴藏量与分布

受大气气压和海上季风活动的影响,在近海海面会形成丰富的风力资源,一般在水深 10m 且距离海岸线 10km 左右的近海大陆架上才具备开发的價值。海洋风能资源总量巨大,全球可开发利用的总量约为 710 亿千瓦,大部分风能资源集中在深远海。欧洲的海上风能资源最为丰富,其大部分区域的平均风速为 $9\sim 12\text{m/s}$,其次是美国,平均风速为 $8\sim 10\text{m/s}$ ^[3]。全球海域的年平均风能资源分布:^[4]全球海域风能密度的大值区分布于南北半球西风带,南半球西风带大于北半球西风带,南半球西风带的风能密度为 $800\sim 1600\text{W/m}^2$,北太平洋西风带海域为 $500\sim 1000\text{W/m}^2$,北大西洋西风带为 $500\sim 1300\text{W/m}^2$ 。中低纬海域的风能密度为 $200\sim 500\text{W/m}^2$,而赤道中东印度洋、赤道西太平洋、赤道东太平洋附近海域的风能密度基本都在 200W/m^2 以内。

中国近海风能资源丰富,可开发利用的风能储量为 7.5 亿千瓦,是陆上风能资源的 3 倍,长江到南澳岛之间的东南沿海及其岛屿是我国最大的风能资源区,资源丰富区包括山东、辽东半岛、黄海之滨,南澳岛以西的南海沿海、海南岛和南海诸岛^[5]。中国海上风速高,大部分近海区域平均风速为 $7\sim 9\text{m/s}$,很少有静风期,适合建设有效利用风能的海上风电场。建设海上风电场,是缓解能源、环境压力、促进经济社会可持续发展的有效措施。风力发电场正从内陆及大陆沿海逐步向海上发展,海上风能未来将成为我国风能的发展方向 and 制高点。

5.4.2 海上风力发电

1. 海上风力发电的技术原理

目前海上风力发电技术是基于空气动力学和电磁发电的原理,利用风力带动风力涡轮机的叶片旋转,将风的动能捕获为装置的机械能,再通过齿轮变速箱将旋转的速度提升,使电磁发电机发电,实现机械能向电能的转化^[6]。图 5-1 是带有齿轮变速箱的现代水平轴风力涡轮机基本组件的示意图,由风力涡轮机叶片、低速轴、高速轴、传动系统、风速计、风塔、发电机、偏航机构、液压系统、电控系统等部件组成^[7]。现代大型风力涡轮机通常采用切入速度为 $3\sim 4\text{m/s}$ 的转子从风中提取能量,风力涡轮机随着风速增加发电量增加,直到达到其额定功率水平,此时风速通常为 $11\sim 15\text{m/s}$ 。在更高的风速下,控制

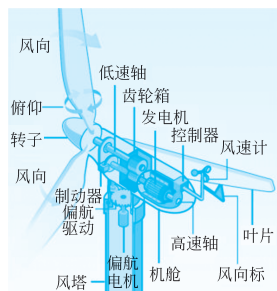


图 5-1 带有齿轮变速箱的现代水平轴风力涡轮机基本组件的示意图

制系统通过失速控制、桨叶俯仰或两者结合来限制功率输出以防止风力涡轮机过载。大多数涡轮机在风速为 $20\sim 25\text{m/s}$ (切断速度) 时停止发电,以限制转子的载荷,防止涡轮机结构部件的损坏,通常使用的是感应或异步发电机。

典型的海上风力发电厂如图 5-2 所示,主要通过风力发电机组发电,再通过输电系统将电输送到变电站^[8]。每个风力涡轮机都安装在具有基础支撑的塔顶上。海上风电机组的基础结构通常是单桩或导管架结构,需要将桩打入海床以锚定结构,或者由“负压桶”锚或放置于海底的宽而重的重力基座来支撑,这两种结构分别运用在浅水(水深 $< 30\text{m}$) 和中等水深(水深 $30\sim 50\text{m}$)。对于更深的水域(水深 $> 50\text{m}$),如西海岸

和缅甸湾附近,需要浮动的基础结构,通过系泊线连接到海床用于锚定。通常,我们需要用到各种大型专业施工船来驱动基础桩、在塔顶安装风力涡轮机及铺设电缆。例如,12MW 风力涡轮机的风力发电厂需要配备的涡轮机安装船要能够提升 500ft 高、500t 重的部件并能够处理超过 300ft 长的风力涡轮机叶片。海上风力涡轮机组的安装方式主要有三种:千斤顶安装、半沉式安装和漂浮式安装,这主要取决于海水深度、起吊机的能力和驳船的载重量。

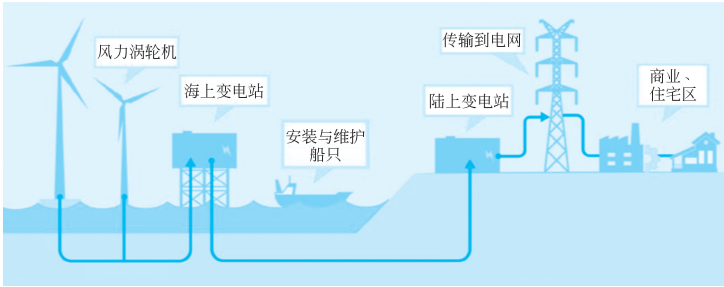


图 5-2 典型的海上风力发电厂示意图

风力涡轮机组将风能转化成电能之后,通过阵列电缆将电力从每个风力涡轮机输送到海上变电站,再利用高压输出电缆将电力从变电站输送到陆地^[8]。输出电缆通常被埋在海底进行保护,如果某些部分无法埋设,可用岩石或混凝土垫覆盖。在电缆与陆地相接的地方,可以将其铺设在沟渠中,或者使用水平定向钻孔技术来避免在海岸线上挖沟带来的施工影响。之后,陆上变电站从风力发电厂接收电力并将其传输到电网,输送到商业和住宅区。

2. 海上风力发电装置的研究现状

世界上第一座拥有 11 台海上风电机海上风电场于 1991 年在丹麦的 Vindby 建成并实现并网运行^[9],自此,全球海上风电一直以较快的速度发展,海上风电场的数量不断增加、规模不断扩大。截至 2020 年底,全世界已投运的海上风电场装机容量达到了 32.66GW,其中欧洲装机容量最大(25.15GW),其次是亚洲(7.48GW)和美洲(0.04GW)^[10]。在欧洲,英国和德国在发展海上风电场方面占据主导地位,两国的总装机容量占欧洲的 72.06%。在亚洲,中国处于显著的领先地位,海上风电总装机容量占亚洲的 94.36%。美洲大陆只有美国建设有海上风电场,总装机容量为 0.04GW。2011—2020 年全球累计海上风电装机容量,以及 1995—2020 年间不同时间段投入运

行的海上风电场的平均装机容量和平均风机数量^[10]，如图 5-3 所示。从图中可以看到，全球累计海上风电装机容量增长迅速，10 年间增幅达到 900% 以上，此外，海上风电场中的风机数量和装机容量显著增加，逐渐朝着大型化和规模化方向发展。2020 年，在英国并网的霍恩锡一号工程风电场已包含 174 台风机，总装机容量达到了 1.218GW^[10]。当前，世界上已经建成并投入运营的海上风电场有 200 多个，而我国已累计建设约 50 个海上风电场，装机容量超过 7GW。这意味着海上风电逐步进入“清洁能源”赛道。

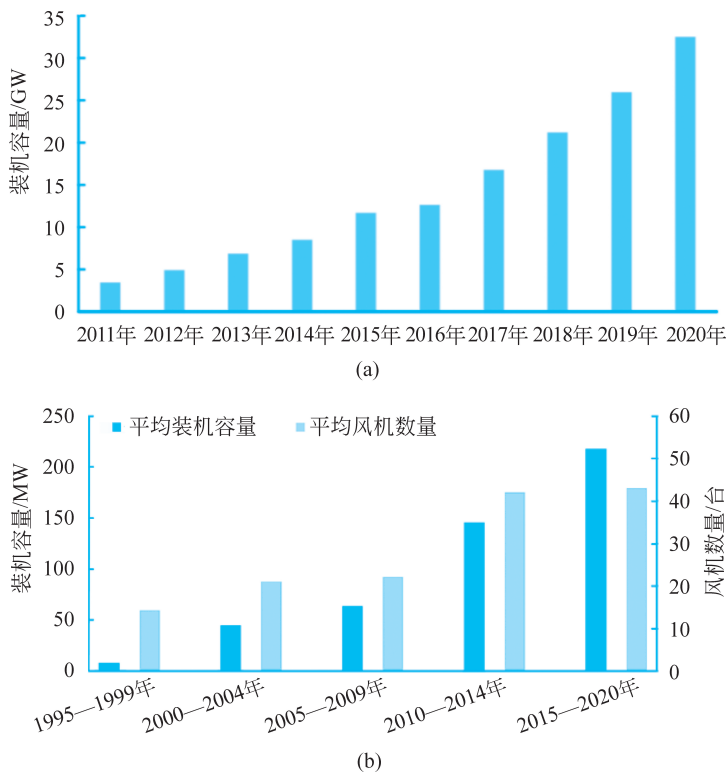


图 5-3 全球海上风电装机情况

(a) 2011—2020 年全球累计海上风电装机容量；

(b) 1995—2020 年间不同时间段投入运行的海上风电场的平均装机容量和平均风机数量

海上风力发电涡轮机的种类很多，分类标准也不同。按机组容量可分为小型、中型、大型和巨型风力涡轮机。按运行特性和控制方式可分为变速恒频和恒速恒频风力涡轮机。根据运行模式，可分为离网型和并网型风力发电系统。按输出功率调控方式

可分为变桨距和定桨距风力涡轮机。根据结构特点,可分为水平轴风力涡轮机、垂直轴风力涡轮机、交叉轴风力涡轮机和球形风力涡轮机^[11],如图 5-4 所示。

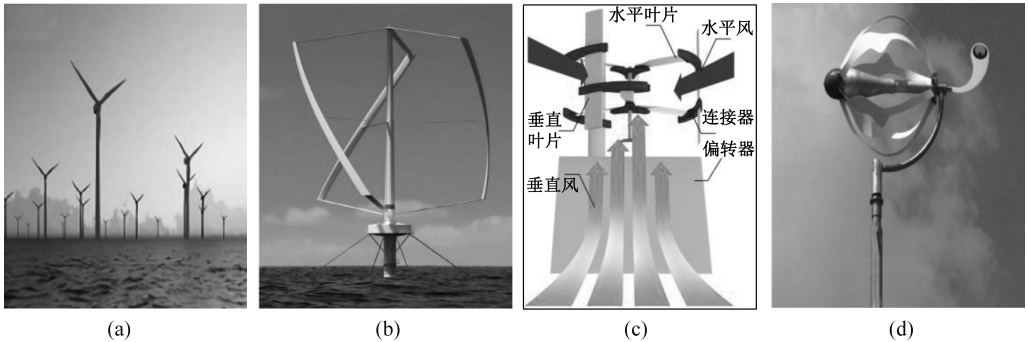


图 5-4 海上风力涡轮机的结构

(a)水平轴; (b)垂直轴; (c)交叉轴; (d)球形

水平轴风力涡轮机的风轮旋转主轴平行于迎面的风向,目前世界上最大的水平轴风力涡轮机是西门子歌美飒推出的 SG 14-222 DD 和通用电气提供的升级的 Haliade-X 风力涡轮机,额定功率为 14MW^[9]。水平轴涡轮机由于其结构特征而存在一些缺点,重力和惯性力的共同作用使得叶片旋转过程中重力方向保持不变,但惯性力方向不断变化,因此,叶片承受的是交变载荷而不是恒定载荷,这对叶片抗疲劳性能不利。许多研究人员已经开展了相关工作对风力涡轮机的叶片进行了优化,例如,恒住纳等通过改变叶片宽度和内外端的俯仰角来优化涡轮机^[12]。垂直轴风力涡轮机的旋转叶片主轴垂直于地面或迎面风向,根据风轮的工作原理可分为拖曳式和升降式。与水平轴风力涡轮机相比,垂直轴风力涡轮机单位容量成本可节省近一半,使用寿命长,操作和维护简单,但它们的功率系数低,并具有循环空气动力载荷引起的疲劳问题,因而垂直轴风力涡轮机的大规模应用不具有经济吸引力。交叉轴风力涡轮机仍处于概念和设计阶段^[13],类似于交叉轴风力涡轮机的原理,一些学者开发了一种球形涡轮机,可以接受多个风向并以低速运行,尤其适合于湍流^[14]。

根据风机的大小、杆塔尺寸、离岸距离和水深等建设条件的不同,海上风力涡轮机已发展出了不同的基础结构类型,主要有重力式基础、单桩基础、高桩承台基础、三脚桩基础、导管架基础、负压桶基础和浮式基础等类型^[15],如图 5-5 所示。海上风力涡轮机的基础结构类型特点如表 5-1 所示。单桩基础是应用最为广泛的风机基础,采用单桩基础的风机占全部海上风机的 75.38%。然而,随着海上风电向深水区

海发展,单桩基础不能很好地适应更深水域的要求。对于 20~50m 水深的海域,可以采用三脚桩基础和导管架式基础来提供更好的稳定性和基础强度;对于 50m 以上的深水海域,可以采用浮式基础。^[10]2021 年 7 月,我国首台抗台风型漂浮式海上风电机组在广东阳江海域成功安装,单机容量达 5.5MW,为我国大规模开发深远海风能资源奠定了基础。

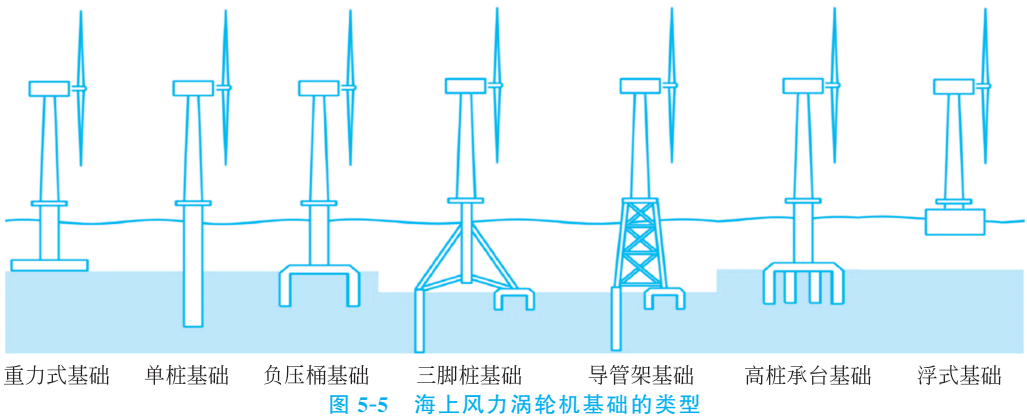


表 5-1 海上风力涡轮机的基础结构类型特点

基础类型	适用深度/m	平均水深/m	占比	特 点
重力式基础	<10	9.54	4.68%	结构简单,成本较低,抗风浪性能好;施工周期长,安装不易,对地质条件要求较高
单桩基础	0~30	19.29	75.38%	结构简单,安装难度低,成本低且适应性强;海床较为坚硬时,钻孔难度大,成本较高
高桩承台基础	0~20	6.25	6.25%	造价低,施工可靠方便,适应不同地质条件;桩基相对较长,总体结构偏于厚重
三脚桩基础	10~30	37.63	3.28%	稳定性和可靠性高,对海床条件要求不高,适用范围大;总质量大,不利于制作和运输
导管架基础	25~50	22.45	9.37%	基础强度高,安装技术成熟,质量轻;需要大量的钢材,制造周期长,成本较高
负压桶基础	0~25	25.18	0.62%	节省钢材,海上施工时间短,可重复利用;沉箱放置、调平难度大
浮式基础	>50	74.89	0.43%	成本低,安装灵活,易移动拆卸;基础不稳定,只适用于风浪小的海域

3. 海上风力发电的发展趋势

海上风力发电是目前最成熟、最具大规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一。与陆上风电相比,由于海洋环境的特殊性,海上风电的开发仍然存在一些问题,如施工难度大、运营维护困难及成本更高等^[10]。但海上风电的优点也同样明显:海上风速通常较陆上风速更高,因而同等条件下发电量要高于陆上;海上很少有静风期,具有更高的利用时长;海上的环境简单,更均匀的风速对设备损坏更小;不需要占用土地资源,更适宜大规模开发;更靠近负荷中心,可以减少输电损失,电力的消纳也有保障。凭借这些优点,海上风力发电将成为未来风电技术研究的重心和前沿,并成为未来能源系统的重要组成部分。据全球风能理事会的研究统计,到2025年,全球海上风电每年新增装机容量将突破20GW,到2030年将突破30GW,未来10年新增海上风电装机容量将超过205GW^[16]。由于近海资源有限,全球海上风电大概率将以漂浮式为主要发展方向。

5.5 陆地风能

5.5.1 陆地风能资源的蕴藏量与分布

陆地风能资源的蕴藏量与分布取决于地形、气候、土壤、植被等特征。众所周知,地形是影响风能分布的重要因素,特别是山脉、河流和海岸线,它们都会影响风的流动方向和强度。气候也是影响风能资源的一个因素,湿润的气候会增加风的强度,而热带气候则会减少风的强度。土壤和植被也会影响风的流动,植物会减小风的强度,土壤则会改变风的方向。因此,要想确定陆地风能资源的蕴藏量和分布,需要根据当地的地形、气候、土壤和植被等特征进行测量和分析。

全球陆地风能资源主要集中在欧洲、美洲、亚洲、非洲北部和南部及澳大利亚沿海地区。全球陆地风能资源分布情况可以概括为:美洲东部有比较丰富的风能资源,美洲西部则相对较少;欧洲大部分地区都有较为丰富的风能资源,中东地区则较少;亚洲有较丰富的风能资源,其中中国南部地区最为丰富;非洲有较丰富的风能资源,其中南