

前 言

大力推进风电关键技术和核心装备研发,加快构建清洁低碳和安全高效的新型能源体系,是实施能源安全新战略的关键环节,是实现“双碳”目标的重要途径。当前,风电已进入高质量跃升发展新阶段。作为可再生能源的重要组成部分,风电技术呈现出大型化、智能化、绿色化特征,产业发展呈现出基地化、规模化、集群化特征。2024 年 1 月至 7 月,全国风电平均利用率为 96.3%,能源“含绿量”显著提升。截至 2024 年底,全国风电累计装机容量约为 5.2 亿 kW,全球第一。

传动链是风力发电机组传递功率的关键核心传动装备,是风力发电机组服役性能的重要支撑。目前,陆上新增机组功率达 10MW 及以上,海上新增机组功率达 20MW 及以上。为满足大型化发展需求,风力发电机组传动链高扭矩密度构型、以滑代滚等新技术路线不断涌现,研发具有高可靠性、高效率、高精度、强承载能力和易维护性的传动链,保障风力发电机组的高效稳定运行,降低运维成本,已成为风电行业亟待解决的关键问题。

本书凝聚作者 20 余年深耕风力发电机组传动链领域的研发与生产经验,从设计、制造、试验全流程视角解析风力发电机组传动链核心技术体系,系统介绍传动链分类、当前主流传动链工作原理及其结构形式,重点阐述齿轮箱传动方案设计、关键零部件选型与参数设计及计算,详细介绍主轴、齿轮、滑动轴承等关键零部件制造技术、齿轮箱和传动链等系统装配技术,最后重点介绍传动链及关键零部件试验测试技术,实现从构型、设计、分析、制造及试验全流程阐述风力发电机组传动链设计开发关键技术。

全书共 7 章。第 1 章和第 5 章由谭建军执笔;第 2 章由朱才朝执笔;第 3 章和第 7 章由高斯执笔;第 4 章和第 6 章由袁包钢执笔。6.4.1 节由高扭矩密度风电传动技术重庆市工业和信息化重点实验室柏厚义提供关键资料;7.5 节由湖南崇德科技股份有限公司张亚宾提供关键资料;3.2.3 节、4.3.2 节和 6.4.2 节由重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室张荣华博士、李浩博士提供关键资料。金风科技股份有限公司李会勋、刘俊珺、李倩、俱英翠提供传动链国内外现状和设计方面的部分资料;斯凯孚(中国)销售有限公司曾纪勇提供滚动轴承方面的部分资

料。全书由朱才朝负责总体设计和统稿。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，诚请广大读者批评指正。

作 者

2025 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电的背景和意义	1
1.1.1 风力发电的背景	1
1.1.2 风力发电的意义	2
1.1.3 风力发电的前景	3
1.2 风力发电机组发展历史与现状	3
1.2.1 人类早期对风能的利用	4
1.2.2 人类近现代对风能的利用	6
1.2.3 风力发电机组发展现状	11
1.3 风力发电机组传动链型式与特点	12
1.4 风力发电机组传动链的研究现状	14
1.4.1 传动链构型设计	14
1.4.2 传动链动力学分析	16
1.4.3 传动链试验测试	17
1.4.4 目前存在的问题	18
1.5 风力发电机组传动链的发展趋势	19
第 2 章 风力发电机组传动链类型	21
2.1 风力发电机组分类	21
2.1.1 按叶轮轴方向分类	21
2.1.2 按传动型式分类	22
2.1.3 按部件相对位置分类	23
2.1.4 按环境温度分类	25
2.1.5 按发电机类型分类	25
2.2 风力发电机组传动链分类	26
2.2.1 有齿轮箱传动链	28
2.2.2 无齿轮箱传动链	35
2.3 风电齿轮箱构型	38
2.3.1 三级圆柱齿轮传动	40

2.3.2	一级行星二级圆柱齿轮传动	40
2.3.3	二级行星一级圆柱齿轮传动	41
2.3.4	NW 行星一级圆柱齿轮传动	42
2.3.5	封闭行星一级圆柱齿轮传动	42
2.3.6	其他构型	50
第 3 章	风力发电机组传动链设计	52
3.1	风力发电机组传动链构型设计	52
3.1.1	设计一般要求	55
3.1.2	设计技术要求	56
3.2	主轴系统设计	59
3.2.1	主轴设计	61
3.2.2	主轴轴承座设计	62
3.2.3	主轴轴承设计	65
3.3	高速联轴器分类与设计	75
3.3.1	高速联轴器分类	75
3.3.2	高速联轴器设计分析	76
3.4	制动系统设计	80
3.5	弹性支承系统设计	82
3.5.1	轴瓦式橡胶弹性支承系统设计	82
3.5.2	液压弹性支承系统设计	84
第 4 章	风电齿轮箱设计	86
4.1	齿轮箱传动系统构型设计	87
4.2	齿轮箱传动系统设计分析	90
4.2.1	齿轮设计分析	90
4.2.2	轴类零部件设计分析	103
4.2.3	收缩盘设计分析	115
4.3	齿轮箱轴承选型计算	117
4.3.1	滚动轴承选型计算	118
4.3.2	滑动轴承选型计算	129
4.4	齿轮箱结构件设计分析	138
4.4.1	箱体设计分析	138
4.4.2	行星架设计分析	145
4.5	齿轮箱润滑与密封设计	149
4.5.1	润滑设计	149
4.5.2	密封设计	156

4.6	常见齿轮箱结构图	159
第 5 章	风力发电机组传动链动力学分析	162
5.1	传动链动力学建模	162
5.1.1	多柔体动力学建模	162
5.1.2	传动链激励载荷	171
5.1.3	传动链动力学模型	175
5.2	传动链固有特性分析	177
5.2.1	传动链模态分析	177
5.2.2	共振点甄别	178
5.3	传动链动态特性分析	183
5.3.1	时域分析	183
5.3.2	频域分析	184
5.4	传动链动态特性优化	185
5.4.1	多目标优化	185
5.4.2	优化效果分析	192
第 6 章	风力发电机组传动链制造装配技术	197
6.1	传动链制造工艺特点	197
6.2	主轴制造技术	197
6.3	齿轮箱齿轮制造技术	200
6.3.1	齿轮热处理	200
6.3.2	齿轮机加工	202
6.4	滑动轴承制造技术	203
6.4.1	齿轮箱滑动轴承制造	203
6.4.2	主轴滑动轴承制造	207
6.5	齿轮箱结构件制造技术	210
6.5.1	箱体制造	210
6.5.2	行星架制造	214
6.6	传动链系统及部件装配技术	220
6.6.1	齿轮箱装配	220
6.6.2	传动链装配	224
第 7 章	风力发电机组传动链试验技术	227
7.1	试验台介绍	227
7.1.1	传动链试验台	227
7.1.2	齿轮箱试验台	232
7.1.3	主轴轴承试验台	235

7.2 传动链试验技术	236
7.2.1 空载试验	237
7.2.2 负载试验	238
7.2.3 鲁棒性试验	239
7.2.4 电网相关性能试验	239
7.2.5 硬件在环仿真试验	240
7.3 齿轮箱试验技术	241
7.3.1 空载试验	242
7.3.2 负载试验	244
7.3.3 鲁棒性试验	253
7.4 主轴轴承试验技术	256
7.5 滑动轴承试验技术	257
参考文献	260

第 1 章 绪 论

1.1 风力发电的背景和意义

目前人们对风能的利用形式主要可划分为以下两类：一类是传统的机械能转化方式，例如，风力用于驱动抽水设备和磨面机；另一类是通过风力发电，将风能转化为电能并入电网，后者现已成为风能利用的主流形式。随着技术的不断进步和成本的下降，风力发电的应用范围持续扩展。风能开发主要分为陆上风能和海上风能两大类。陆上风力发电技术已经十分成熟，全球装机容量稳步增长。而近年来，海上风能的发展尤为迅速，海上风速较为稳定且风力较强，海上风能逐渐成为风能利用的重点领域。据预测，到 2040 年，全球海上风能装机容量有望增长近十倍。同时，混合能源系统的应用也在扩展，尤其是风能与太阳能等其他可再生能源的结合，能够通过多种能源的互补提升电力供应的稳定性和效率。在技术层面，储能技术和电网集成是当前风能应用的关键挑战。随着电池储能和氢能存储技术的进步，以及智能电网管理系统的完善，风能的间歇性问题正逐步得到解决。此外，风力发电机组的设计、材料和制造技术也在不断创新，以提高发电效率并降低维护成本。

总而言之，风力发电作为全球可再生能源转型的重要一环，正在技术进步和政策支持的推动下，向更大规模和更广泛的应用方向不断发展。

1.1.1 风力发电的背景

能源又称能量资源或能源资源，是指可产生各种能量(如热量、电能、光能和机械能等)或可做功的物质的统称，包括能够直接取得或通过加工、转换而取得有用能的各种资源，如煤炭、原油、天然气、煤层气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源，以及其他新能源和可再生能源。

据挪威能源咨询公司睿咨得能源在 2024 年发布的预测数据，全球可采石油储量约 1.5 万亿桶。由此推算，世界石油产量的顶峰将在 2030 年出现。由于剩余储量开采难度增大，石油产量会快速下降；2024 年底，世界煤炭探明可采储量约为 10718 亿 t，按当前的消费水平，最多也仅能维持 250 年；2025 年底，世界天然气探明储量约为 220.3Tm³，如果年开采量维持在 4.1Tm³，则天然气将在 54 年内枯竭。

同时,化石能源的开发利用给环境带来了一系列的问题。煤炭开采破坏了地壳内部原有的力学平衡状态,煤矸石是煤炭生产过程中产生的废弃物,堆积形成矸石山。废水渗入地下,将对地下水资源造成严重污染,污染人类生活用水并危害身体健康。人类过去对煤的利用方式主要是直接燃烧,严重污染大气环境,煤炭燃烧过程中向环境释放了大量二氧化硫(SO_2)、氮氧化物、挥发性有机化合物(volatile organic compound, VOC)、悬浮颗粒物等大气污染物和二氧化碳(CO_2)等温室气体,诱发酸雨、雾霾、光化学污染和温室效应等,如图 1.1 和图 1.2 所示。在海上开采过程中,海床的岩土遭到破坏,影响底栖生物的生存环境。在钻井过程中,带有原油的泥浆从岩土底层被抽取,部分进入附近海域,泥浆的物理化学特性会改变周围环境;钻井液、水下切割、油漆、平台的阴极保护会对周围环境产生污染;开采、运输、存储等过程的原油泄漏所造成的污染,将对生态造成毁灭性的破坏。

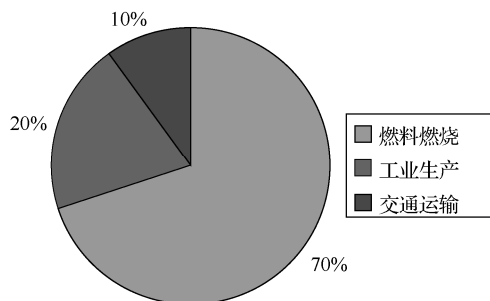


图 1.1 大气污染物的主要来源



图 1.2 化石能源的污染

为此,世界各国对新能源的探索越来越深入。作为新能源的主力军,全球风能的蕴藏量巨大,约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$,其中可利用的风能达 $2 \times 10^7 \text{ MW}$,比地球上可开发利用的水能总量多 10 倍。因此,世界各国均将目光转到风电的发展,风电产业由此孕育而生!

1.1.2 风力发电的意义

风力发电是当前既能获得能源又能减少二氧化碳排放的主要途径之一。截至 2023 年底,在我国的电源结构中,煤电发电量占总发电量的比重接近四成,且污染排放严重。因此,增加风电等清洁能源的比重刻不容缓,对减少二氧化碳等温室气体排放、缓解全球气候变暖具有重要意义。

世界能源委员会的计算显示,按照不同化石燃料的二氧化碳排放水平估计,风电平均每提供 $1 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电量便能减少 600t 二氧化碳的排放。截至 2024 年底,我国风电累计装机容量约为 5.2 亿 kW,全球第一。2022 年全国因环境污

染造成的经济损失为 16999.8 亿元，占当年国内生产总值(gross domestic product, GDP)的 1.41%。2023 年生态环境部的统计结果表明，中国环境对导致酸雨的二氧化硫的最大容量是 1200 万~1400 万 t，如不加以控制，无论对环境，还是对人民健康，都将是一场灾难。显然，发展风电可以在一定程度上减少这些有害气体的排放，提高能源利用效率，减轻社会负担。目前，常规能源发电直接成本较低、电价低，但其社会成本包括运输、环境、资源等，比风力发电的成本高出大约 40%。由于基本没有以环境污染和资源消耗为代价的外部成本，风力发电社会成本较小。对于整个社会来说，使用风电比使用常规能源发电更加经济。同时，风力发电已经被证明具有广泛的社会效益，这些效益除了环境效益还有就业效益和脱贫致富等社会综合效益。具有风能资源的地区特别是风能资源丰富的地区，一般情况下自然条件都比较恶劣，当地居民发展经济的条件很差，风力发电很有可能是当地脱贫致富的重要途径。

当前全球的政治局势和战争对风电发展产生了重要影响。地缘政治和能源供应的不确定性，特别是在化石燃料领域，已成为各国能源战略调整的核心。这一变化凸显了风电在能源安全中的关键作用，使各国更加重视本地化、可再生的能源供应，避免受国际政治紧张局势的干扰，能源安全问题正日益成为全球政治的重要议题。风电资源丰富、可再生且不受特定地域限制，通过大力发展风电，许多国家能够减少对进口能源的依赖，降低围绕能源引发的冲突风险。

1.1.3 风力发电的前景

2024 年，全球风电累计装机容量达到 1136GW，新增装机容量创下历史新高，达到 117GW。虽然随着市场逐渐成熟，风电累计装机容量的增长率有所放缓，但 2015 年以来，全球风电的年复合增长率仍保持强劲。中国、美国、德国、巴西和印度继续引领全球风电市场，尤其是中国在 2023 年新增 75.9GW 的装机容量。此外，全球海上风电也呈现快速增长的趋势，年增速达到 24%，截至 2023 年底，全球海上风电累计装机容量达到 75.2GW。展望未来，风电行业将继续稳步扩展，到 2028 年全球风电总装机容量将增加 791GW。

1.2 风力发电机组发展历史与现状

风力发电机组的发展历程始于 19 世纪后期，从早期用于取水灌溉和磨面的风车，一直发展到现在用于发电的大型风力发电机组，人类对风能的利用在历史发展的过程中从未停止。随着 20 世纪能源需求的增长和技术的进步，风力发电机组逐渐从实验性设备演变为实际应用。20 世纪 70 年代的能源危机推动了现代风力

发电技术的快速发展,尤其是欧美国家加大了对风能的投资。此后,风力发电机组的设计和效率不断提升,从陆上向海上拓展,从几十千瓦的小型风力发电机组到如今的 26MW 及以上的超大型风力发电机组。现代风力发电机组的叶片长度达到 100m 以上,采用先进的变速技术和永磁直驱等新技术,极大地提高了发电效率。全球风电市场的龙头企业主要包括丹麦维斯塔斯、西门子歌美飒、中国金风科技等。

展望未来,随着全球对清洁能源需求的增加,风力发电机组将继续向大功率、高可靠性方向发展,并更加注重智能化和数字化,以降低成本并提升发电效率。

1.2.1 人类早期对风能的利用

早在 4000 多年前的美索不达米亚地区(亚洲西南部底格里斯河和幼发拉底河两河流域间的古王国),当地居民立起了人类历史上第一台风车,如图 1.3 所示。1000 年以后,在中国、希腊和波斯也出现了风车,如图 1.4~图 1.6 所示。直到 7 世纪,荷兰才出现了风车,如图 1.7 所示。早期的风车大约在 17 世纪达到发展的高潮,而当时的风车绝大多数用于灌溉和磨面。

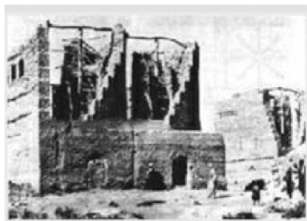


图 1.3 人类历史上第一台风车



图 1.4 中国早期风车



图 1.5 希腊早期风车

当人们开始用汽轮机和水轮机发电时,就有人建议利用风能进行发电,把原有的风车改造成可用于发电的风力发电机组。把风车改造成风力发电机组的道路是曲折的,其中包含了大量的技术和现实问题,这些问题既包括驱动力和发电机的问题,也包括风力发电机组的传动、控制及电流的存储和传输等诸多问题。1887 年,苏格兰教授 Blyth 为了给用于照明的蓄电池充电而建立了人类历史上第一台用于发电的风力发电机组,如图 1.8 所示,该风力发电机组属于垂直轴型风力发电机组,高为 10m,叶轮直径为 8m。

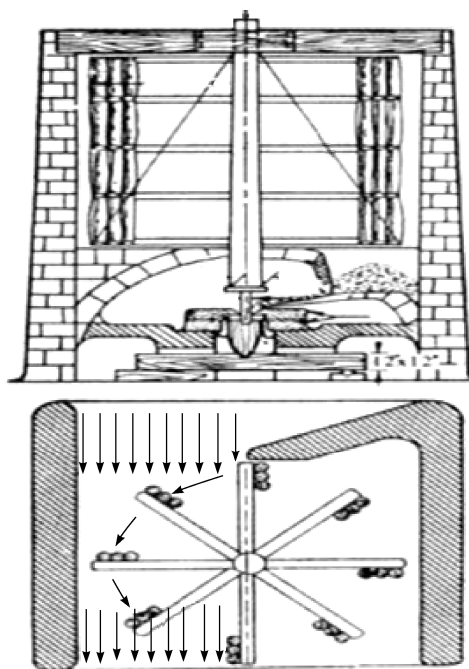


图 1.6 波斯早期风车结构



图 1.7 荷兰早期风车

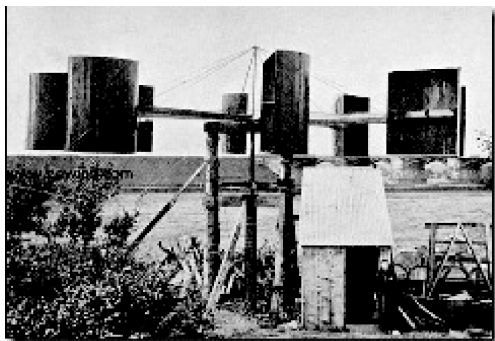


图 1.8 Blyth 风力发电机组

几乎在同一时间，克利夫兰市(美国俄亥俄州东北部城市)的 Brush 采用当时在美国广泛使用的 Westermill 风力水泵概念建造了非常先进的风力发电机组，该风力发电机组高为 20m，叶轮直径为 17m，有 144 个由雪松木制作的叶片，通过二级皮带传动带动一个 12kW 的直流发电机，如图 1.9 所示。其安全系统确保发电机在任何转速下电压不超过 90V，控制系统控制发电机的输出电压保持在 70V 左右。发电机产生的电能通过蓄电池存储起来，Brush 不仅是风力发电技术的先驱，也是美国电气工业的奠基人之一，有着杰出的成就。Brush 风力发电机组解

决了很多令人头疼的问题,它不仅实现了自动控制,而且运行了 20 年。由于 Brush 本人对空气动力学缺乏充足的认识,加之当时的空气动力学还没有形成比较完备的理论体系,其设计的风力发电机组虽有较好的扭矩输出,但是能量转换效率较低。

1891 年,丹麦的 Cour 将气动翼型理论引入到风力发电机组领域,并建造了一台只有 4 个叶片的直流风力发电机组,如图 1.10 所示,该风力发电机组拥有相对较高的能量转换效率。Cour 采用电解水的方法获得氢气,将氢气提供给燃气灯来照明,实现能量的转化与储存。他还创办了世界上第一本有关风力发电技术的学术期刊 *Tidsskrift for Vind-Elektricitet*。到 1918 年第一次世界大战结束时,丹麦已建造了 120 台 Cour 风力发电机组,总装机容量达到 3MW,发电量占丹麦电力总消耗的 3%。Cour 风力发电机组的叶轮直径约为 20m,功率为 20~35kW,最大风能利用系数在 20%以上。

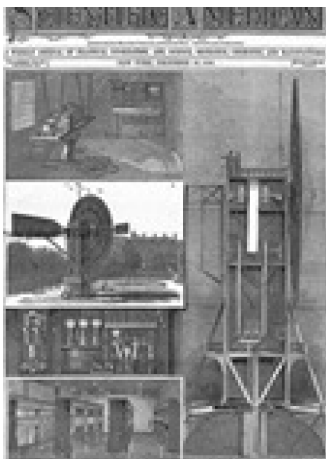


图 1.9 Brush 风力发电机组

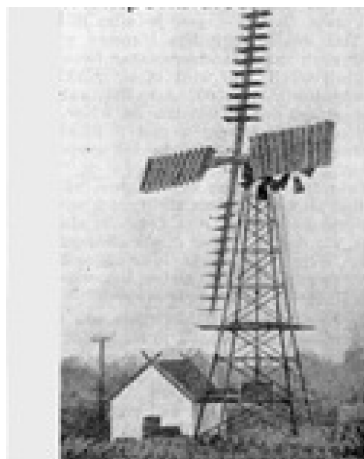


图 1.10 Cour 风力发电机组

1.2.2 人类近现代对风能的利用

在第一次世界大战之后,气动理论及相关技术发展到了了一定的水平,所积累的大量经验促进了风力发电技术的进一步发展和理论的成熟。1920 年,德国 Betz 提出了风力发电机组从风中获得最大能量的物理学准则,1926 年,他借鉴空气动力学中的翼型理论对风力发电机组叶片的外形进行优化设计,并由此得出了一种简便的设计方法。在这之后的时间里,研究者在风力发电机组的叶片、结构、控制准则等方面不断地进行发展和研究,进一步推动了风力发电技术的发展。

在第二次世界大战期间, 欧洲各国因战争影响, 风力发电机组技术的发展一度放缓甚至中止。处于北欧的丹麦, 由于能源相对匮乏, 风力发电技术得到了相对持续的发展。丹麦人在大量实践的基础上所设计的风力发电机组逐渐形成自己的特色, 发展出了“丹麦型”风力发电机组。1941 年, 丹麦 FLSmith 公司建造了一些双叶片和三叶片风力发电机组, 这些风力发电机组配备的还是直流发电机。20 世纪 50 年代, 丹麦工程师 Juul 等开发了世界上第一台交流发电机 Vester Egesborg。1956 年, Juul 为 SEAS 公司设计建造了著名的 Gedser 风力发电机组, 该风力发电机组为三叶片上风向风力发电机组, 装有额定功率为 200kW 的异步交流发电机, 采用电动偏航和定桨失速控制, 如图 1.11 所示。为了避免过大的转速和载荷, 叶片尖端特别设计了气动制动装置, 该风力发电机组在没有重大维护的前提下自动运行了 11 年。该款风力发电机组的出现标志着“丹麦型”风力发电机组理论的完全形成, 其主要特征为异步并网发电机、失速型叶片和尖端气动制动。1975 年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)为了其风能研究项目需要重新测量 Gedser 风力发电机组的相关运行数据, Gedser 风力发电机组又被重新整修, 试运行几年后被拆除。目前, 它的机舱和叶片陈列在丹麦 Bjerringbro 电力博物馆。



图 1.11 Gedser 风力发电机组

德国在同一时期的风力发电技术以 Hütter 风力发电机组为代表, 如图 1.12 所示。1957 年, Hütter 建成了原型机, 该风力发电机组的叶轮直径为 34m, 两叶片、功率为 100kW, 采用下风向自动偏航设计。在此后的十多年里德国建造的许多风力发电机组都采用了相似的设计理念, 包括之后的 GROWIEN 风力发电机组, 如图 1.13 所示, 而且该风力发电机组首次采用了由玻璃纤维复合材料制造的叶片。由于这种材料具有良好的机械性能和耐疲劳性能, 该类型叶片得到了迅速的推广和使用, 这也极大地促进了风力发电技术的发展。

1941 年, 美国 S.Morgan Smith 公司建造了由工程师 Putnam 设计的大型风力发电机组(Smith-Putnam 风力发电机组, 如图 1.14 所示)。该风力发电机组的叶轮直径为 53m, 逆风偏航设计, 配有额定功率为 1.25MW 的同步发电机, 其两个巨大的叶片由不锈钢制成, 通过连杆与主轴连接。为了实现转速调节和功率控制, 该风力发电机组装备了液压变桨距系统。该风力发电机组是当时空气动力学研究和机械工艺技术有效结合的产物, 它代表了当时的技术发展水平。该风力发电机组于 1945 年因一只叶片折断而停止运行。



图 1.12 Hütter 风力发电机组



图 1.13 GROWIEN 风力发电机组

第二次世界大战后的初期，化石能源的价格曾一路走低，风力发电在经济上毫无优势可言，加上欧洲大陆各个国家刚刚摆脱战争的阴影，使风力发电技术的发展进一步放缓。但在美国一些急需电力的边远地区，小型风力发电机组却得到了快速发展。Jacobs 兄弟开发了著名的 Jacobs 小型风力发电机组，如图 1.15 所示，这种风力发电机组直径约为 4m，三个叶片，通过叶轮直接驱动直流发电机。1920~1960 年，美国生产了上万台 Jacobs 风力发电机组，功率为 1.8~3kW。



图 1.14 Smith-Putnam 风力发电机组



图 1.15 Jacobs 风力发电机组

20 世纪 70 年代连续出现的两次能源危机使得化石原料的价格一路上涨，加上日益严重的环境问题，各个国家开始重新考虑对可再生能源的利用。在美国、

丹麦、德国、英国、瑞典等国家项目的推动下,许多叶轮直径超过 60m 的风力发电机组由国家投资建立起来用于相关技术的研究和试验验证,具有代表性的有德国的 GROWIAN 风力发电机组(叶轮直径为 100m,额定功率为 3MW)、瑞典的 WTS 3 风力发电机组(叶轮直径为 78m,额定功率为 3MW,如图 1.16 所示)、瑞典的 AEOLUS WTS 7 风力发电机组(叶轮直径为 75m,额定功率为 2MW,如图 1.17 所示)、美国的 BOEING MOD-2 风力发电机组(叶轮直径为 91m,额定功率为 2.5MW)、GE MOD-1 风力发电机组(叶轮直径为 61m,额定功率为 2MW,如图 1.18 所示)。由于缺乏相关的风力发电机组建造和运行管理经验及相关的技术,最后这些风力发电机组没有一个真正长期运行下来的。但在这个过程中,大量的技术和经验被积累下来,为以后的发展奠定了基础。20 世纪 80 年代中后期,欧洲和美洲都继续着大型风力发电机组的研发,而以欧洲取得的成就最大。



图 1.16 WTS 3 风力发电机组



图 1.17 AEOLUS WTS 7 风力发电机组



图 1.18 GE MOD-1 风力发电机组

在大型风力发电机组技术探索和发展的同时,成熟的小功率风力发电机组(55kW)率先开始大规模应用,最具标志性的是 20 世纪 80 年代开始的美国加利福尼亚州风电潮。在美国的政策支持下,成千的风力发电机组被密密麻麻地布置在加利福尼亚州的山坡上,蔚为壮观,如图 1.19 所示。然而,这次风电潮并没有持续多久,自 1985 年美国的支持计划终止后,大规模的风场建设便逐渐停止了。

大型风力发电机组的商业化阶段在 20 世纪 80 年代后逐渐来临。大规模的商业应用首先出现在北欧(这与该地区的其他能源相对缺乏有关,以丹麦为代表),各种不同概念的风力发电机组相继出现,各种商业公司纷纷推出各自的产品,整个市场在群雄逐鹿的过程中成熟起来。伴随着各种优势资源的整合,许多著名的风电厂商在竞争中逐渐胜出,三叶片水平轴风力发电机组更是成为了商业应用的绝对主流。



图 1.19 美国加利福尼亚州风电潮

风力发电技术已经曲曲折折地发展了一百多年。在这一百多年里，充满了各式各样的尝试和创新，或成功，或失败。经过了百年的洗礼，风力发电技术才逐渐成熟应用起来。如今，德国、丹麦、美国等风力发电技术先进的国家，无论是在风力发电机组设计技术上还是在风力发电机组运行方面都积累了丰富的经验。各种技术路线还在不断地互相借鉴并不断地改进和完善，各种新的概念和技术仍在不断地推出并应用于风电领域。陆上风电资源已经开发完的德国等风电大国已经开始开发海上风电，如图 1.20 所示。



图 1.20 海上风力发电机组

我国的风力发电始于 20 世纪 50 年代后期，初始主要是为了解决海岛和偏远农村牧区的用电问题，重点在于离网小型风力发电机组的建设。

20 世纪 70 年代末，我国开始进行并网风电的示范研究，并引进国外风电，建造示范风电场。由于风电的不稳定性及技术要求高，我国并未开始大规模建造风电场。一开始的风力发电机组多为外国公司为开辟中国市场援助中国建造的，如新疆的达坂城、广东的南澳等，还有几家中外合资的风力发电机组制造商，但未坚持多久均破产倒闭。1998 年，新疆新风科工贸有限责任公司(现为金风科技