



风力发电技术丛书

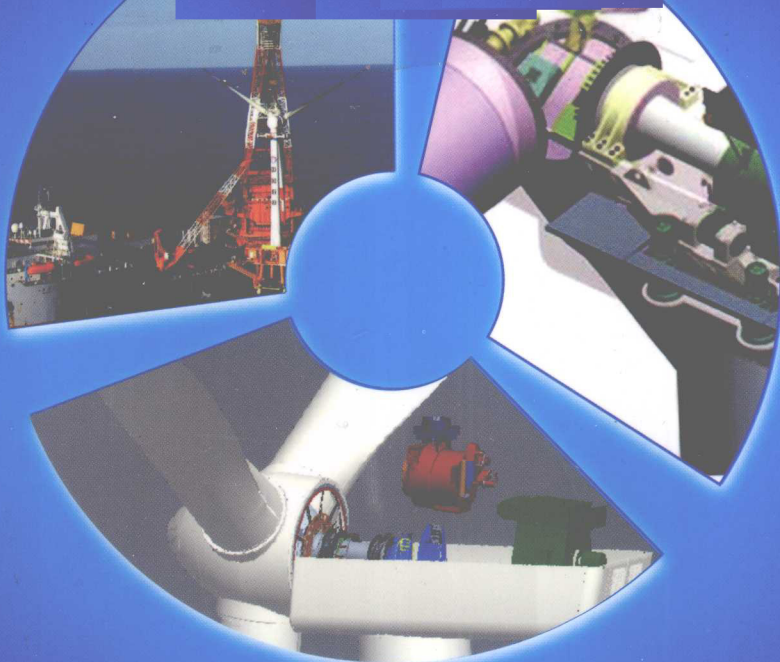


HAISHANG
FENGLI FADIAN JISHU

海上

风力发电技术

吴佳梁 李成锋 编著



化学工业出版社



风力发电技术丛书

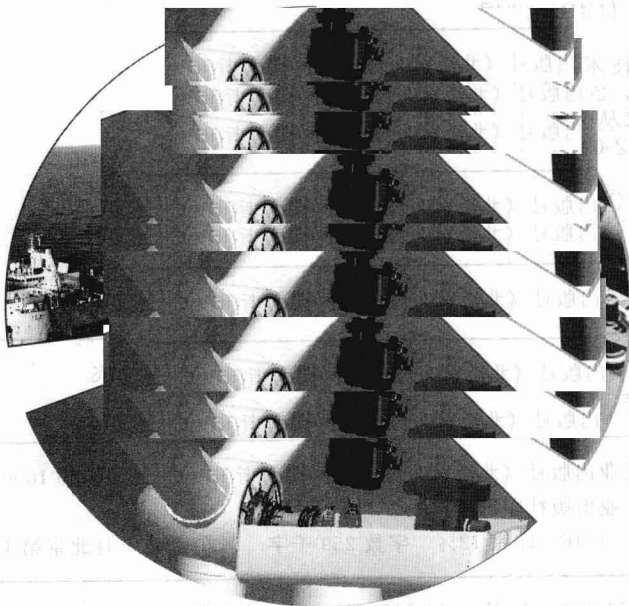


HAISHANG
FENGLI FADIAN JISHU

海上

风力发电技术

吴佳梁 李成锋 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了海上风力发电技术的基础知识和技术,对比分析了开发海上风电的优势,重点剖析了海上风电开发的制约因素。针对海上风力机常见的盐雾腐蚀、台风破坏等自然环境影响,提出了对风力机加强设计的解决思路和措施,具体分析了基础的设计形式和施工方法,对海上风力机提出了进行发电能力优化、可靠性设计及可维护性设计的系统解决方案,详细介绍了海上风力机的相关标准及认证。

本书适合从事海上风电领域工作的工程师和技术人员阅读参考,也适合作为高等院校相关专业通用教材,对想了解海上风力发电的读者也是一本极好的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

海上风力发电技术/吴佳梁,李成锋编著. —北京:
化学工业出版社, 2010.6
(风力发电技术丛书)
ISBN 978-7-122-08322-7

I. 海… II. ①吴…②李… III. 海上-风力发电
IV. TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第071812号

责任编辑:郑宇印
责任校对:王素芹

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:化学工业出版社印刷厂
720mm×1000mm 1/16 印张12½ 字数259千字 2010年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究



前 言

随着东海大桥海上风电场的建成并投入使用，中国拉开了开发海上风电资源的序幕。我国海洋面积辽阔，海上风资源丰富，可利用的风资源是陆地的3倍，高达700GW。加之我国政府出台了大量优惠措施支持海上风电发展，各大电力公司纷纷规划建设大型海上风电场，同时各大风力机设备供应商积极研发大功率风力发电机组来推动海上风电事业的发展。

然而，海洋比陆地的环境复杂，我国在风电领域尤其是海上风电领域的技术比较薄弱，缺少相应的海上风电技术图书成为海上风电发展的限制之一。因此，我们在研究海上风力发电技术和实施海上风力发电项目的基础上编写了此书，以期成为海上风电发展的指导书，能对从事海上风电开发的工程设计人员有一定的帮助。

本书分为9章，全面介绍了海上风力发电技术。

第1章主要分析海上风能的特点、欧洲及中国海上风力发电发展现状。通过分析海上风能特点和探讨欧洲海上风电开发的历史和经验，剖析我国海上风力发电的现状，对我国的海上风力发电提出了新的对策。

第2章主要介绍海上风电开发的优势和海上风电开发面临的制约因素。重点分析开发海上风电需要解决的重大课题，介绍盐雾腐蚀、台风、撞击对海上风力机的影响，突出海上风电场建设、运行和维护的艰巨性。

第3章是在综合海上风力机运行环境的基础上，针对海上风电开发的制约因素，从海上风力机技术路线选择、风力机基础多样化设计、风力机防腐密封设计、风力机基础防撞击设计四方面介绍海上风力机的设计方法。

第4章主要分析台风的破坏机理及相应的海上风力机抗台风设计手段，提出的解决方案将对我国海上风力机的设计思路产生重要影响。

第5章主要分析海上风力机优化设计的方法和设计流程。

第6章主要介绍海上风力机的可靠性设计，从机械部件裕度设计、紧固连接件防松防锈、电气系统冗余设计、电气元件降额设计、电控柜体设计、发电机冷却方式、变流器可靠性增强设计等方面进行了详细介绍。

第7章主要讲述海上风力机的维护方法和可维护性设计思想，提出可维护性风

力机结构设计方法、专用维护工装设计及大部件维修工艺流程。

第8章主要分析海上风力机标准和海上风力机的认证。对于风力机标准，横向比较了风力机的各种标准，分析海上和陆上风力机设计标准的差异性。关于认证，详细介绍了型式认证和项目认证的相关内容。

第9章讲述了对未来海上风电开发与风力机制造技术发展的展望。

在本书的编写过程中，得到了三一电气公司整体项目部领导的大力支持，提出了宝贵的修改意见和建议，在此表示感谢。张建海、赵德钊、王兴、叶凡等同事也参与了部分编写工作。

本书的编写参阅了大量参考文献，在此对其作者一并致谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处诚请广大读者批评指正。

编著者
2010年3月



目 录

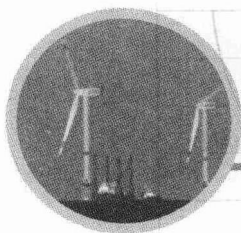
第 1 章 海上风资源与海上风力发电发展现状	1
1.1 海上风能与风电开发	1
1.1.1 海上风能的特点	1
1.1.2 海上风力发电机组的发展现状	4
1.1.3 海上风力发电机组应具备的特点	6
1.2 欧洲海上风力发电发展现状	7
1.2.1 欧洲海上风电技术的发展回顾	8
1.2.2 欧洲目前和近期开发的海上项目	9
1.2.3 欧洲开发海上风电的潜力	10
1.2.4 欧洲发展海上风电的经验	11
1.3 中国海上风力发电发展现状	14
1.3.1 中国发展海上风电的自然环境	14
1.3.2 中国风电场的发展现状	16
1.3.3 中国海上风电发展面临的问题	18
1.3.4 中国发展海上风电的对策	19
第 2 章 海上风电开发的优劣势分析	24
2.1 海上风电场建设	24
2.1.1 海上风电场选址原则	24
2.1.2 海上风电场的配置	25
2.1.3 海上风电场的成本	26
2.2 海上风电开发的优势	27
2.2.1 高质量的海上风资源	27
2.2.2 更多可以借鉴的经验	28
2.3 海上风电开发面临的制约因素	28
2.3.1 盐雾腐蚀对风力机的影响	29
2.3.2 台风的影响	31
2.3.3 海浪的载荷	34

2.3.4	撞击的风险	38
2.3.5	海上风电场建设的困难	39
2.3.6	运行与维护	50
第3章	海上风力机区别于陆上风力机的特殊性	53
3.1	海上风力机技术路线选择	53
3.1.1	风力机故障分析	53
3.1.2	主要的技术路线	57
3.2	风力机基础多样化设计	60
3.2.1	基础设计条件要求	60
3.2.2	常见的基础形式	61
3.2.3	几种基础方案比较	69
3.2.4	基础设计流程	70
3.3	基础的施工	72
3.3.1	重力式基础施工	72
3.3.2	单桩式基础施工	73
3.3.3	三角架式基础施工	75
3.3.4	导管架式基础施工	76
3.3.5	群桩基础施工	77
3.4	风力机防腐密封设计	81
3.4.1	主要的防腐蚀措施	81
3.4.2	海上风力机防腐措施	83
3.4.3	海上风力机密封措施	85
3.4.4	密封圈性能比较	85
3.5	风力机基础防撞击设计	86
第4章	海上风力机防台风加强设计与应对策略	88
4.1	台风破坏的分析	88
4.1.1	台风的形成	88
4.1.2	台风的分布规律	89
4.1.3	台风浪的形成和传播	90
4.1.4	台风的主要特点及其对海上风力机的影响	90
4.1.5	台风破坏的原因分析	91
4.1.6	台风影响等级划分三维坐标体系	93
4.1.7	抗台风加强设计总体思路	94
4.2	传动链增强设计	94
4.3	机舱罩的加强设计	97
4.3.1	加强机舱罩连接部位	97
4.3.2	舱内设置钢板加强筋	98
4.4	风速风向仪选取	98

4.4.1	灾难性气候对风电机组的破坏	98
4.4.2	测风仪的分类及特点	99
4.4.3	风力机风向仪的故障原因及设计原则	99
4.5	测风仪应急预案	101
4.6	台风期间控制策略	102
4.7	质量阻尼器减振设计	102
4.7.1	阻尼器的分类	102
4.7.2	结构上使用阻尼器的特点	103
4.7.3	阻尼器的安置形式	104
4.7.4	海上风力机使用阻尼器的作用	106
第5章	海上风力机发电能力优化设计	108
5.1	风力机转速的优化	108
5.1.1	控制过程概述	108
5.1.2	控制目标	109
5.1.3	控制策略分析	109
5.2	优化模型因数分析	112
5.3	优化设计流程	112
第6章	海上风力机可靠性设计	114
6.1	机械部件裕度设计	114
6.2	紧固连接件防松防锈	114
6.2.1	紧固连接件总体设计原则	114
6.2.2	紧固连接件松动的原因	115
6.2.3	防松设计基本原则	115
6.2.4	防松措施	116
6.2.5	防锈	117
6.3	电气系统冗余设计	118
6.4	电气元件降额设计	118
6.5	电控柜体设计	118
6.5.1	变桨系统运行环境及影响	118
6.5.2	变桨柜设计原则及措施	119
6.5.3	海上环境对控制系统的影响	120
6.5.4	主控柜设计原则及措施	121
6.6	发电机冷却方式	121
6.6.1	冷却系统的结构和组成	121
6.6.2	冷却系统的防护	123
6.6.3	两种方式维护及运行对比	125
6.7	变流器可靠性增强设计	126
6.7.1	环境要求	126

6.7.2	可靠性影响因素	128
6.7.3	可靠度分配	130
6.7.4	可靠性增强措施	131
第7章	海上风力机的维护与可维护性设计	132
7.1	海上风力机的维护	133
7.1.1	安全	133
7.1.2	叶片的维修保养	133
7.1.3	轮毂的维修保养	134
7.1.4	变桨轴承的维修保养	134
7.1.5	变桨电机的维修保养	135
7.1.6	变桨减速机与变桨小齿轮的维修保养	136
7.1.7	变桨控制柜的维修保养	136
7.1.8	主轴及主轴承的维修保养	136
7.1.9	增速箱的维修保养	137
7.1.10	高速轴刹车的维修保养	139
7.1.11	高速轴联轴器的维修保养	142
7.1.12	发电机的维修保养	142
7.1.13	机舱底架的维修保养	143
7.1.14	偏航系统的维修保养	144
7.1.15	塔筒的维修保养	144
7.1.16	机舱罩与导流罩的维修保养	145
7.1.17	机组的非正常状态处理及复位方法	146
7.1.18	废品处理	146
7.2	可维护的风力机结构设计	147
7.2.1	拆卸中存在的主要问题	147
7.2.2	可维护性结构设计准则	147
7.2.3	可维护性结构设计流程	147
7.2.4	结构设计	148
7.3	大部件维护专用吊装设备	149
7.4	维修用工装设计	149
7.5	大部件维修工艺流程	150
第8章	海上风力机标准及认证	157
8.1	海上风力机各种标准的对比	157
8.1.1	IEC 61400-3	157
8.1.2	GL 海上风电指南	158
8.1.3	丹麦建议书	158
8.1.4	DNV-OS-J101	158
8.1.5	IEC WT01	159

8.1.6	GL 指南和 IEC 标准对风力机载荷的对比	159
8.2	海上风力机标准与陆上风力机标准的比较	160
8.2.1	陆上风力机标准	161
8.2.2	海上风力机标准	162
8.3	海上风力机认证	164
8.3.1	型式认证	164
8.3.2	项目认证	166
第 9 章	海上风电开发与风力机制造技术发展趋势	171
9.1	海上风电场建设与风电开发利用的发展趋势	171
9.2	海上风力机制造技术展望	173
9.2.1	机组功率趋向大型化	173
9.2.2	碳纤维叶片	173
9.2.3	高翼尖速度	176
9.2.4	高压直流 (HVDC) 技术和机组无功功率输出可控技术	176
9.2.5	单位扫掠面积的成本曲线降低	176
9.2.6	智能电网	176
附录	风电专业术语汉英对照	178
参考文献	190



第1章 海上风资源与海上风力发电发展现状

风能是可再生能源的重要组成部分，积极地开发风能对于改善能源系统结构、缓解能源危机、保护生态环境具有深远意义。早期的风电能源开发主要集中在陆上，陆上的风资源开发已经比较成熟。海上风电场具有高风速、低风切变、低湍流、高产出等显著优点，加之对人类的影响较小，且可充分借鉴陆上的风电技术经验，海上风电在未来的风电产业中将占越来越重要的地位，它将为风力发电在未来的能源结构中扮演重要角色做出积极的贡献。

海上风资源的丰富程度直接决定了各国海上风电的发展态势，资源丰富的地区和国家如欧洲和中国高度重视海上风电的发展，不仅在政策上积极扶持，而且开辟海上风电试验场，为海上风电产业的发展提供技术支持和项目经验，吸引各大风电投资商纷纷转向海上风电行业，推动了海上风电的快速发展。

本章主要分析海上风能、欧洲海上风力发电发展现状以及中国海上风力发电发展现状。

1.1 海上风能与风电开发

1.1.1 海上风能的特点

海上年平均风速明显大于陆地，研究表明，由于海面的粗糙度较陆地小，离岸10km的海上风速比岸上高25%以上。

1.1.1.1 风随高度的变化特性

海面的粗糙度要较陆地小得多，通常在安装风力机所关注的高度上，风速变化梯度已经很小了，因此通过增加塔高的方法增加风能的捕获在某种程度上不如陆地有效。海上风边界层低，在某种程度上海面上塔高可以降低。陆地与海上风速剖面比较如图1-1所示。

从空气运动的角度，通常将不同高度的大气层分为三个区域（图1-2）。离地面2m以内的区域称为底层；2~100m的区域称为下部摩擦层，二者总称为地面境界层；100~1000m的区段称为上部摩擦层，以上三区域总称为摩擦层。摩擦层之上是自由大气层。



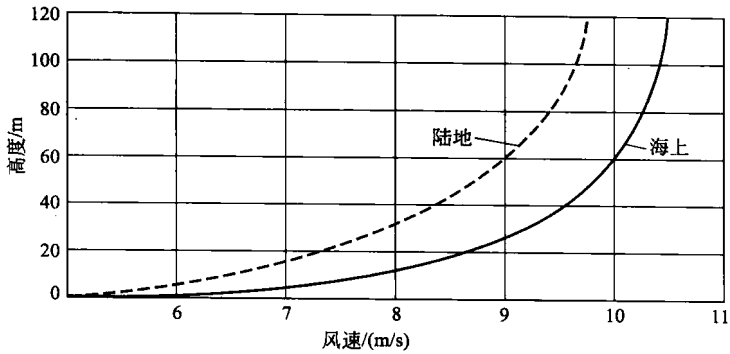


图 1-1 陆地与海上风速剖面图比较

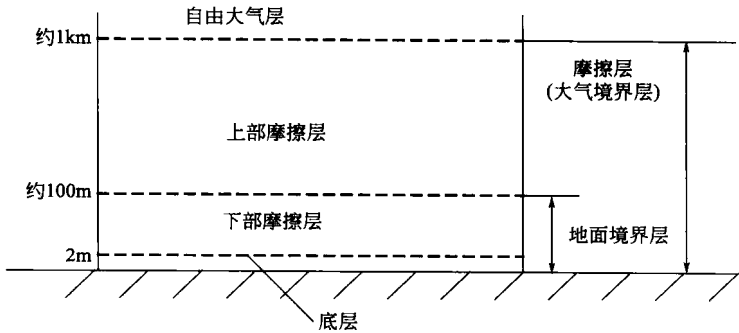


图 1-2 大气层的构成

地面境界层内空气流动受涡流、黏性和地面植物及建筑物等的影响，风向基本不变，但越往高处风速越大。各种不同地面情况下，如城市、乡村和海边平地，其风速随高度变化如图 1-3 所示。

风速随高度的变化情况及其大小因地面的平坦度、地表粗糙度以及风通道上的气温变化情况的不同而有所差异。

风速随高度而变化的经验公式很多，通常采用指数公式，即

$$v = v_i \left(\frac{h}{h_i} \right)^\alpha$$

式中 v ——距地面高度 h 处的风速，m/s；

v_i ——高度为 h_i 处的风速，m/s；

α ——风切变指数，它取决于大气稳定性和地面粗糙度，其值约为 $1/8 \sim 1/2$ 。

对于地面境界层，风速随高度的变化则主要取决于地面粗糙度，这时一般取地面粗糙度作为风速指数。不同地面情况的地面粗糙度 α 如表 1-1 所示。

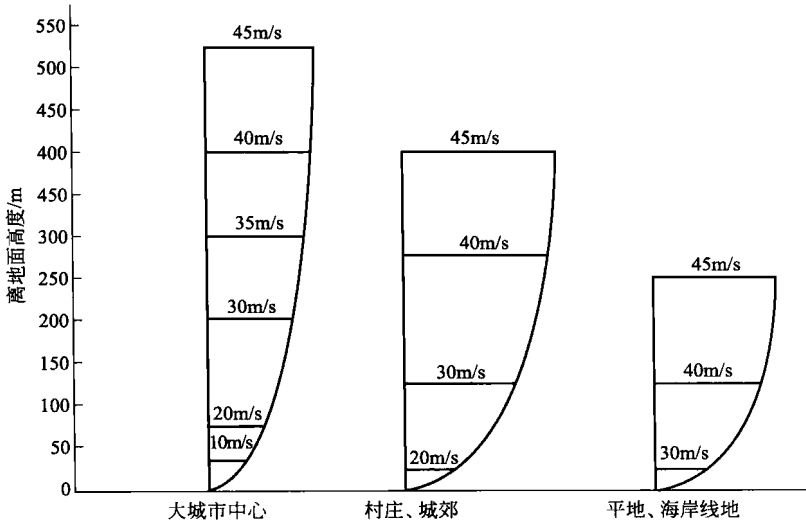


图 1-3 不同地面风速随高度的变化

表 1-1 不同地面情况的地面粗糙度 α

地面情况	粗糙度 α	地面情况	粗糙度 α
光滑地面,硬地面,海洋	0.1	树木多,建筑物少	0.22~0.24
草地	0.14	森林,村庄	0.28~0.30
城市平地,有较高草地,树木极少	0.16	城市有高层建筑	0.4
高的农作物,篱笆,树木少	0.2		

1.1.1.2 风湍流特性

湍流度描述的是风速相对于其平均值的瞬时变化情况，可以表示为风速的标准方差除以一段时间（通常为 10min）风速的平均值。自由风湍流特性对风力机的疲劳载荷大小影响很大。由于海上大气湍流度较陆地低，所以风力机转动产生的扰动恢复慢，下游风力机与上游风力机需要较大的间隔距离，即海上风场效应较大。通常岸上湍流度为 10%，海上为 8%。海上风湍流度开始时随风速增加而降低，随后由于风速增大、海浪增高导致其逐步增加，如图 1-4 所示。除此之外，湍流度还随高度增加而几乎呈线性下降趋势，如图 1-5 所示。

1.1.1.3 风速的主要影响因素

(1) 垂直高度 由于风与地表面摩擦的结果，风速是随着垂直高度的增加而增强，只有离地面 300m 以上的高空才不受其影响。

(2) 地形地貌 比如，山口风速比平地大多少，则要视风向与谷口轴线的夹角以及谷口前的阻挡而定；河谷风速的大小又与谷底的闭塞程度有关。又如，在同一山谷或盆地中，不同位置的风速也不尽相同，此时往往是地形与高度较多地影响着风速，有时以前者为主，有时又以后者为主，要视具体地形而定。

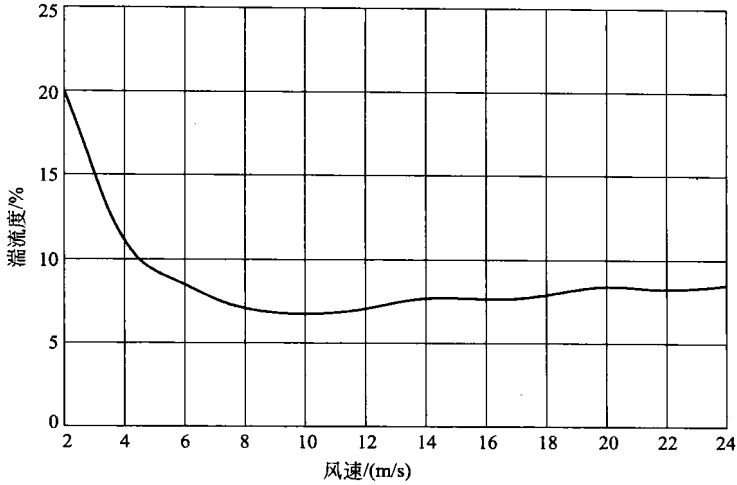


图 1-4 海上风速与湍流度的关系

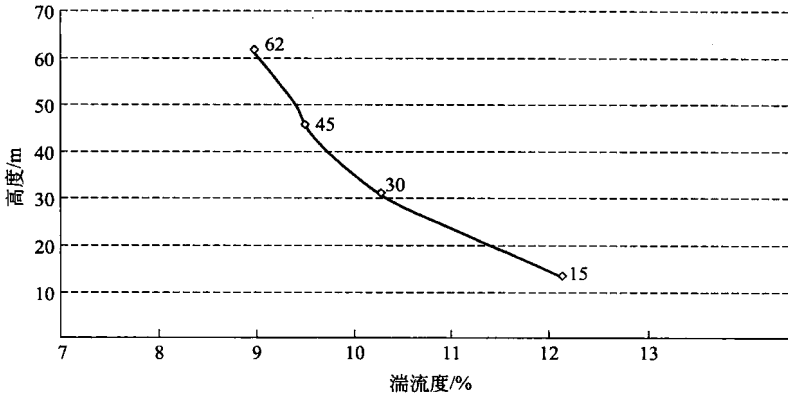


图 1-5 海面上高度与湍流度的关系

(3) 地理位置 由于地表摩擦阻力的作用，海面上的风比海岸大，而沿海的风要比内陆大得多。比如，台风登陆后 100km，其风速几乎衰减了一半，又如，在平均风速为 4~6m/s 时，海岸线外 70km 处的风速要比海岸大 60%~70%。

(4) 障碍物 风流经障碍物时，会在其后面产生不规则的涡流，致使流速降低，这种涡流随着远离障碍物而逐渐消失。当距离大于障碍物高度 10 倍以上时，涡流可完全消失。所以在障碍物下侧布置风力机时，应远离其高度 10 倍以上。海平面上障碍物较少，风速相对较大。

1.1.2 海上风力发电机组的发展现状

(1) 单机容量 MW 化 1980 年商业化风力机的单机容量仅为 30kW，叶轮直径为 15m，而目前世界最大风力机的单机容量达到了 6MW，叶轮直径为 127m。

在过去的 20 多年里,随着风力机技术的快速发展,单机容量增加了 200 倍,叶轮直径也增加了近 10 倍。据报道,国外已经开始设计开发 8~10MW 的风力机。从目前的发展来看,风力机设备的大型化还没有出现技术限制,即单机容量将继续增大。从 1990~2004 年间,风力机叶轮直径平均每年增加 5m,如果继续保持这种速度,到 2020 年叶轮直径将达到 200m,相应的单机容量将达到 15MW。

(2) 由浅海向深海发展 浅海区域的风电场具有安装维护方便、成本较低的特点,早期的风电场一般选择在浅海区域。然而,随着海上风电技术的发展,浅海域风电场的建设远远不能满足风能发展的要求,风电场向深海的发展成为一种必然趋势。这样会极大丰富海上风能,迅速提高海上风电的供电能力。

(3) 液压变桨和电气变桨并存 液压变桨的优点是液压变桨的低温性能好,响应速度快,对系统的冲击小,缓冲性能较好,成本较低,并且备品备件较少,故障率较低;电气变桨的优点是不存在液压油泄漏,对环境友好,技术成熟。国内普遍采用电气变桨技术,而国外主要采用液压变桨技术。

(4) 直驱系统的市场迅速扩大 齿轮箱是发电机组很容易出现故障的零部件,而直驱系统的特点是没有齿轮箱,采用了风轮与发电机直接耦合的传动方式,从而减少了对齿轮箱的设计,降低了风电机组的故障发生率,降低了生产成本,进一步提高了可靠性和效率。同时发电机多采用多极同步电机,通过全功率变频装置并网。

(5) 传动系统设计的不断创新 传动系统结构的发展演变是风力机技术进步的集中体现。传统风力机的传动设计为叶片连接的主轴通过三级变速的齿轮箱与异步发电机相连,丹麦风力机制造企业最先采用这一设计,因此被冠以‘丹麦型’,从 20 世纪 80 年代到 90 年代中后期一直在风力机制造中占据着绝对主导地位。随着风力机单机容量的增大,齿轮箱的高速传动部件故障问题日益突出,于是没有齿轮箱而将主轴与低速多极同步发电机直接相接的直驱式布局应运而生。但是,多极发电机因绕组布置空间的要求导致重量和体积的大幅增加。为此,采用折中理念的半直驱布局在大型风力机设计中得到应用。半直驱式风力机大规模推广应用的主要障碍是价格昂贵,但通过集成化设计以及规模化生产,其竞争力将越来越强。

目前,在特大型风力机的设计制造上依然以传统的丹麦型传动技术为主,但是更多地应用创新技术。例如,沿袭丹麦型传动系统设计的 5M 风力机采用了空心传动轴,目的就是减少整个传动系统重量。从中长期来看,直驱式和半直驱式传动系统将逐步在特大型风力机中占有更大比例。另外,在传动系统中采用集成化设计和紧凑型结构是未来特大型风力机的发展趋势。

(6) 叶片技术的不断改进 对于 2MW 以下风力机,通常通过增加塔筒高度和叶片长度来提高发电量,但对于特大型风力机,这两项措施可能大大增加运输和吊装难度以及成本,为此,开发高效叶片越来越受到风力机制造企业和叶片生产企业的重视。新型高效叶片的气动特性在设计中不断得到优化,使得湍流受到抑制,发电量提高,并且改善其降噪特性。另外,特大型风力机叶片长,运输困难,分段式叶片是一个很好的解决方案,但难点是如何解决两段叶片接合处的刚性断裂问题。

碳纤维复合材料 (CFRP) 因具有密度小、强度高、刚性稳定、耐高温耐蚀等特性, 越来越多地应用在大型叶片制造中。目前 CFRP 制造成本是玻璃纤维复合材料的 10 倍以上, 但是随着生产工艺的改进和规模化生产有进一步下降趋势。越来越多的夹层结构被应用到叶片设计当中, 而且有愈演愈烈的趋势。这种设计的应用使得叶片的坚固性、疲劳特性以及防腐性等均得到提高。

由于海上风电场不受噪声和视觉影响的限制, 在海上风力机设计中, “两叶片” 风力机越来越受到关注, 优点显而易见, 减少叶片数量和轮毂设计的复杂性, 并且安装方便, 有利于减少台风等破坏性风速对风力机的影响。但从可靠性角度出发, 采用传统“跷跷板” 结构的两叶片风力机的运行记录并不令人满意, 因此, 只有解决可靠性问题, 才会大规模应用“两叶片” 设计。

(7) 永磁同步发电机的更多应用 永磁同步发电机不从电网吸收无功, 无需励磁绕组和直流电源, 也不需要滑环碳刷, 结构简单且技术可靠性高, 对电网运行影响小。在大功率变流装置技术和高性能永磁材料日益发展完善的背景下, 大型风力机越来越多地采用永磁同步发电机。目前, 正在研制直驱式风力机专用的新型永磁同步发电机, 主要特点是直径小、重量轻 (为现有产品重量的 20%~30%)、采用非金属定子。

通常, 同步发电机与全容量变流器结合可以显著改善电能质量, 减轻对低压电网的冲击, 保障风电并网后的电网可靠性和安全性。与双馈式风力机 (通常变流器容量为 1/3 的风力机额定功率) 相比, 全容量变流器可以更容易实现低电压维持运行等功能, 满足电网对风电并网日益严格的要求。

(8) 总装机容量迅速增加 如图 1-6 所示, 最近几年全球海上装机容量有了很大的增加。截至 2008 年 12 月底, 全球海上风电场累计装机容量达到 148.52 万千瓦, 与 2007 年相比增加了 37.5%。随着中国东海大桥的第一个风电项目的建设开发, 中国海上风电产业从此拉开帷幕后, 全国掀起一股海上风电投资热潮, 这必将大大促进中国乃至世界海上风电产业的发展, 为全球海上风力机总装机容量做出突出贡献。

1.1.3 海上风力发电机组应具备的特点

降低风力机离岸产生的额外成本是海上风能技术发展面临的主要挑战, 其中海底电缆和风力机基础成本占主要部分, 它受水深和离岸距离影响大, 而受风力机尺寸影响不大。因此对额定功率的风场应采用大功率风力机以减少风力机个数, 从而减少基础和海底电缆的成本。目前一般认为海上风场装机容量在 100~150MW 是比较经济的。

海上风力机是在现有陆地风力机基础上针对海上风环境进行适应性“海洋化”发展起来的。海上风力机具有以下特点。

(1) 高翼尖速度 陆地风力机更多的是以降低噪声来进行优化设计的, 而海上则以更大发挥空气动力效益来优化, 高翼尖速度、小的桨叶面积将给风力机的结构和传动系统带来一些设计上的有利变化。

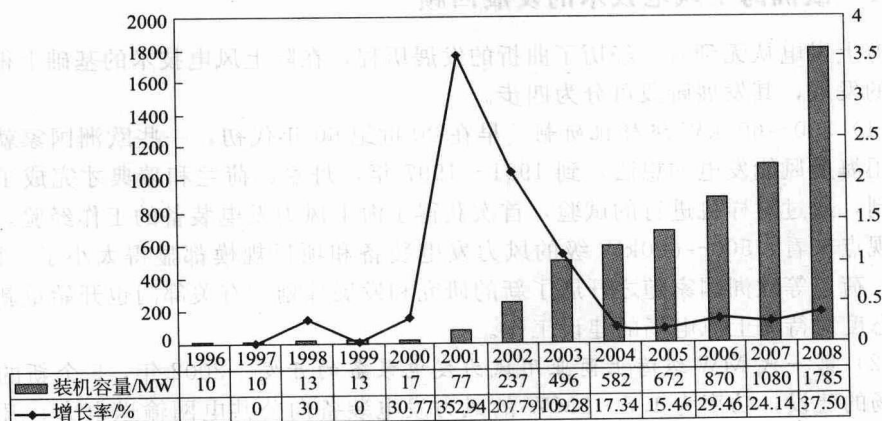


图 1-6 1996~2008 年全球海上风力机总装机容量及增长率

(2) 变桨速运行 高翼尖速度桨叶设计可提高风力机起始工作风速并带来较大的气动力损失,采用变桨速设计技术可以解决这个问题,它能使风力机在额定转速附近以最大速度工作。

(3) 减少桨叶数量 现在大多数风力机采用 3 桨叶设计,存在噪声和视觉污染。采用 2 桨叶设计会带来气动力损失,但可降低制造、安装等成本,也可以作为研究的一个方向。

(4) 高效型发电机 研制结构简单、高效的发电机,如直接驱动同步环式发电机、直接驱动永磁式发电机、线绕高压发电机等。

(5) 海洋环境下风力机其他部件 海洋环境下要考虑风力机部件对海水和高潮湿气候的防腐问题;塔中具有升降设备满足维护需要;变压器和其他电器设备可安放在上部吊舱或离海面一定高度的下部平台上;控制系统要具备岸上重置和重新启动功能;备用电源用来在特殊情况下置风力机于安全停止位置。

1.2 欧洲海上风力发电发展现状

欧洲大陆海岸线长 37900 万千米,是世界上海岸线最曲折的一个洲。多半岛、岛屿和港湾,半岛和岛屿的总面积约占全洲面积的 1/3 (其中半岛面积约 240 万平方千米,约占全洲面积的 24%;岛屿面积约 75 万平方千米,约占全洲总面积的 7%),此外还有许多深入大陆的内海和海湾。

欧洲绝大部分地区气候具有温和湿润的特征,除北部沿海及北冰洋中的岛屿属寒带、南欧沿海地区属亚热带外,几乎全部都在温带,是世界上温带海洋性气候分布面积最广的一个洲。这些优越的地理和气候条件为发展海上风电提供了良好的基础。