



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力发电机 叶片

FENGLI FADIANJI
YEPIAN

蔡新 潘盼 朱杰 顾荣蓉 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



014037849

“十二五”国家重点图书出版规划项目

TM315

34

风力发电工程技术丛书

风力发电机 叶片

蔡新 潘盼 朱杰 顾荣蓉 编著



TM315
34



中国水利水电出版社



北航

C1725886

内 容 简 介

本书是《风力发电工程技术丛书》之一。本书详细介绍了风力发电机叶片的结构特点、受力特点及工作性态。主要内容包括风力机叶片翼型、风力机空气动力学、风力机叶片载荷、风力机叶片材料及制造工艺、风力机叶片结构设计、风力机叶片结构动力学、风力机叶片疲劳寿命、风力机叶片最优体型设计、风力机叶片运行调控与维护等。

本书可供从事风力发电技术领域科研、设计、施工及运行管理的工程技术人员阅读参考,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机叶片 / 蔡新等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 1

(风力发电工程技术丛书)

ISBN 978-7-5170-1564-2

I. ①风… II. ①蔡… III. ①风力发电机—叶片
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第311553号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力发电机叶片
作 者	蔡新 潘盼 朱杰 顾荣蓉 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

王丰绪 王永虎 尹廷伟 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙志禹 李同春

李 炜 李承志 李 莉 李健英 杨建设 吴敬凯

汪明元 张云杰 张燎军 陈 刚 陈党慧 林毅峰

易跃春 周建平 郑 源 赵生校 赵显忠 胡立伟

胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙 祝立群 袁 越

黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰 游赞培 蔡 新

糜又晚

丛书主编 郑 源 张燎军

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

华北电力大学

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

上海勘测设计研究院

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院有限公司

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主 任 胡昌支

副 主 任 王春学 李 莉

成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 单 芳

白 杨 汤何美子



前言

随着世界性能源危机日益加剧和全球环境污染日趋严重,推进新能源与可再生能源的开发利用已是大势所趋。风能具有就地可取、分布广、无污染、清洁、可再生等优点,已成为新能源发展的重要方向。作为世界上的风能大国,我国目前独立开发兆瓦级大型风力发电机(简称风力机)的能力较弱,迄今为止国内已投入运行的风力机绝大部分依赖于进口。设计水平是其中主要的制约因素,与此相关的基础研究、实验研究和新技术的应用等与国外也存在较大的差距。风力机叶片是风力发电机组的最关键零部件,叶片的翼型、结构型式直接影响风力发电装置的功率和性能。叶片的设计是一个复杂的多目标优化问题,理想的叶片不仅能获得较好的气动性能和提高能量转换效率,还能使风电机组的整体性能得到改善。因此,研究风力机结构体系合理的分析计算方法,掌握风力机结构体系的结构特点、受力特点及工作性态,选择合适的叶片材料,对叶片进行优化设计、疲劳寿命及运行维护等研究,将有效地提高我国的风力发电机设计水平和设计能力,推进我国风力发电机的国产化。

本书主要由蔡新、潘盼、朱杰、顾荣蓉编著,蔡新教授任主编并统稿定稿。郭兴文、江泉参加了本书有关的研究工作和部分编写。参加研究工作的还有何斌、傅洁、张建新、张灵熙、舒超、刘勇敢、张羽、江敏敏等。本书稿团队在研究及书稿定稿出版过程中得到了首届国家级教学名师、清华大学博士生导师范钦珊教授的指导和帮助,特此致谢。该书的部分研究成果为江苏高校首批“2011计划”(沿海开发与保护协同创新中心,苏政办发[2013]56号)。

限于作者水平及研究深度,书中难免有不妥和谬误之处,恳请读者批评指正。

蔡新

2013年12月于南京



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风与风能利用	1
1.2 风力机	8
1.3 风力机叶片	14
第 2 章 风力机叶片翼型	19
2.1 翼型的起源	19
2.2 翼型几何参数	22
2.3 翼型空气动力学	24
2.4 翼型设计及优化方法	33
2.5 叶片专用翼型设计及发展	37
第 3 章 风力机空气动力学	43
3.1 一维动量理论和 Betz 极限	43
3.2 理想水平轴风力机旋转尾迹模型	46
3.3 动量叶素理论	50
3.4 叶片涡理论	55
3.5 现代风力机叶片外形设计	60
3.6 CFD 法在叶片设计中的应用	62
第 4 章 风力机叶片载荷	70
4.1 叶片载荷分类	70
4.2 载荷来源	71
4.3 叶片设计与认证标准	88
第 5 章 风力机叶片材料及制造工艺	97
5.1 叶片材料	97
5.2 叶片制造工艺	108

5.3 叶片成本分析	113
第 6 章 风力机叶片结构设计	116
6.1 叶片结构型式	116
6.2 叶片复合材料铺层设计	119
6.3 叶片根部连接设计	123
6.4 叶片结构分析	125
第 7 章 风力机叶片结构动力学	139
7.1 叶片频率及振型	139
7.2 叶片气动弹性	151
7.3 叶片气动剪裁设计	154
第 8 章 风力机叶片疲劳寿命	158
8.1 叶片复合材料疲劳损伤	158
8.2 恒幅疲劳寿命	160
8.3 载荷谱下的疲劳寿命	165
第 9 章 风力机叶片最优体型设计	175
9.1 叶片优化设计理论及方法	175
9.2 叶片气动外形优化设计	178
9.3 叶片结构优化设计	183
9.4 叶片整体最优体型设计	188
第 10 章 风力机叶片运行调控与维护	192
10.1 叶片运行调控技术	192
10.2 叶片运行维护技术	197
10.3 风力机运行其他主动调控技术	202
参考文献	207

第1章 绪 论

全球能源危机和环境污染,助推了新能源与可再生能源的开发利用。风能作为一种清洁的可再生能源,已成为世界各国新能源发展的重要方向。利用风力发电对于调整能源结构、减轻环境污染、解决能源危机等有着非常重要的意义。

本章主要介绍风与风能利用、风力机结构、风力机叶片及其设计技术与发展趋势。

1.1 风与风能利用

风是大气层中高、低压区间的空气流动,是由太阳对地表的不均匀加热引起的。当上层空气由于受热而温度上升,形成一个低压区,周围压力高的空气在压力梯度作用下向低压区域流动,从而形成了风,因此风能也被称为“间接太阳能”。地球大气运动除受气压梯度影响外,还受到由于地球自转引起的地转偏向力的影响,大气的真实运动是这两种力综合影响的结果。除此之外,地球上的风还受到地表的影响。山坳和海峡能改变气流的运动方向,还能使风速增大;而丘陵、山地具有较大的摩擦阻力,使风速下降;孤立的高海拔山峰使流经的风速变大。

1.1.1 风能特点

风能与其他能源相比较,既有其突出的优点,又存在明显的局限性。

1. 优点

(1) 风能的储量巨大。据世界气象组织估计,地球上可利用的风能约为 200 亿 kW。全世界每年燃烧煤炭获得的能量还不到风力在同一时间内所提供能量的 1%。

(2) 分布广。风无处不在,只要有空气的地方就会有风的存在。

中国气象局利用 2386 个气象站 30 年的历史资料进行了第三次风能资源评估,其结果如下:在陆地离地 10m 高度处,全国风能资源总储量为 42.65 亿 kW,技术可开发量为 2.98 亿 kW,潜在技术可开发量为 0.78 亿 kW。

我国陆地风能密度大于 $150\sim 200\text{W}/\text{m}^2$ 的地区占 26%,风能密度为 $50\sim 150\text{W}/\text{m}^2$ 的地区占 50%。技术可开发的面积约为 20 万 km^2 。

(3) 可再生,无污染。风能主要来自太阳辐射,会源源不断地在大气层中生成。

(4) 利用方式简单。风能利用机械简单,易操作。在新能源利用中,风力发电成本较之于太阳能发电低廉。

2. 缺点

(1) 风具有不稳定性。主要表现在以下方面:



1) 风随时间不断变化。风随时间的变化包括每天的变化和季节的变化。通常一天之内风的强弱呈现周期性特征。例如,在地面上,夜间风很弱,白天较强;在100~150m的高空,正好相反。太阳和地球相对位置发生变化,使得地球上存在季节性的温差,因此风向和风的强度也会发生季节性变化。

2) 风随高度不断变化。地面上的空气流动受到涡流、地貌及建筑物等因素影响,近地层风速较小,但越往高处风速越大。各种不同的地表情况,如城市、乡村和海边平地粗糙度不同,风速随高度变化,即风速廓线变化也不同。对于接近地面的位置,风速随高度的变化主要取决于地表粗糙度。粗糙度越大的地面,风速越慢。不同地形下的风速廓线如图1-1所示, z 为垂直于地表高度。

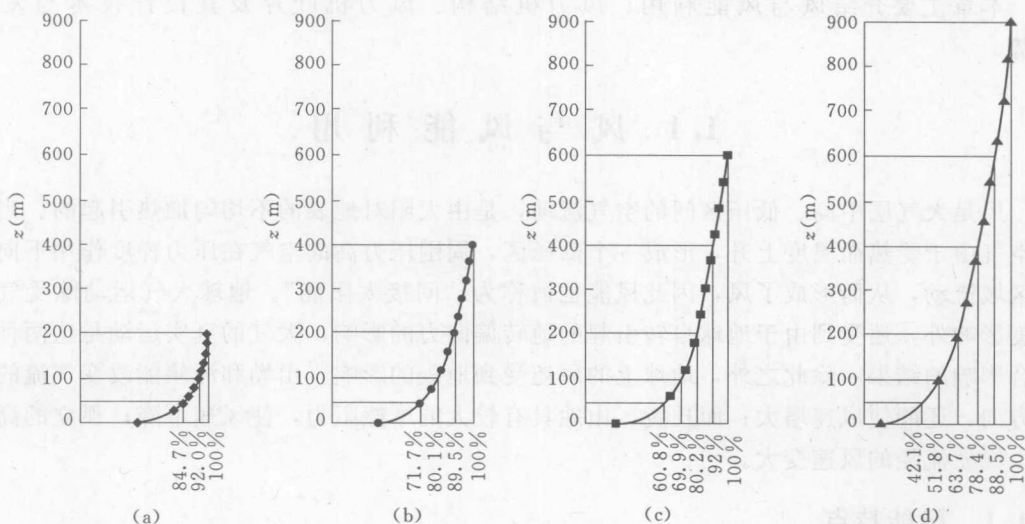


图 1-1 不同地形下的风速廓线图

- (a) 近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区; (b) 田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的中小城镇和大城市郊区; (c) 有密集建筑群的城市市区; (d) 有密集建筑群且建筑较高的城市市区

3) 风的变化具有随机性。一般所说的风速是指平均风速。通常自然风是一种平稳的气流与瞬间激烈变化的紊乱气流相互交叠的风。紊流所产生的瞬时高峰风速也叫做阵风风速。

(2) 能流密度低。这是风能的一个重要缺陷。由于风能源于空气的流动,然而空气的密度很小,因此风力的能流密度也很小,只有水力的1/816。各种新能源的能流密度见表1-1。

表 1-1 各种新能源的能流密度表

能源方式	能流密度/(kW·m ⁻²)	能源方式	能流密度/(kW·m ⁻²)
风能(风速3m/s时)	0.02	潮汐能(潮差10m时)	100
水能(流速3m/s时)	20	太阳能	晴天平均1.0, 夜间平均0.16
波浪能(波高2m时)	30		



(3) 地区差异大。由于地形的影响,风力的地区差异十分明显。两个邻近的区域,有利地形下的风力往往是不利地形下的几倍,甚至是几十倍。

1.1.2 风能利用方式

自古以来,人类对风的利用和风的破坏作用就有了深远认识。远在 1800 年前,中国就已利用风帆进行航运。有文字记载“随风张幔曰帆”,以后又发明了帆式风车,在《天工开物》一书中就有“杨郡以风帆数页俟风转车,风息则止”的论述。在国外,公元前 2 世纪,古波斯人利用垂直轴风车进行碾米;10 世纪时,阿拉伯人利用风车来提水;11 世纪风车在中东已获得广泛的应用,图 1-2 为阿富汗地区早期的垂直轴风车图。13 世纪时,风车传至欧洲,以后便成为欧洲不可缺少的原动机。在荷兰,风车先在莱茵河三角洲地区用于汲水,以后又用于榨油和锯木。现今,风能利用的主要形式是风力发电。

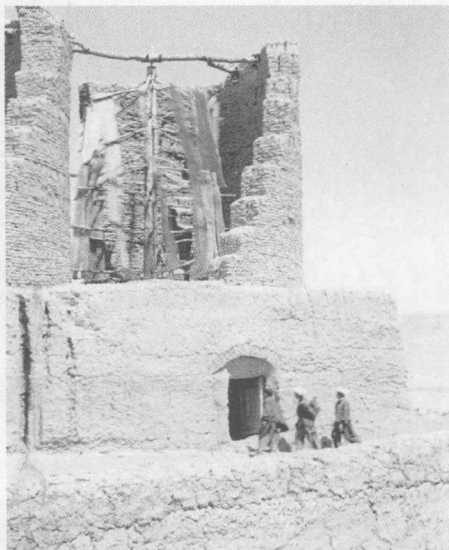


图 1-2 阿富汗地区早期的垂直轴风车图

1. 风力提水

风力提水由古至今一直得到了广泛的应用。至 20 世纪下半叶,为了解决农村、牧场的生活以及灌溉和牲畜的饮水问题,同时为了节约能源,风力提水机得到了很大程度地开发。现代风力提水机用途可分为两类:①是高扬程小流量的风力提水机,它与活塞泵相匹配,提取深井地下水,主要用于草原、牧区,为人畜提供饮用水;②为低扬程大流量的风力提水机,它与螺旋泵相匹配,提取河水、湖水或海水,主要用于农田灌溉、水产养殖或制盐。图 1-3 为一个完整的高扬程小流量风力提水系统。

2. 风帆助航

在机动船舶发展的今天,为了节约燃油和提升航程、航速,古老的风帆助航也得到了发展。航运大国日本已在万吨级货船上采用电脑控制的风帆助航,节油率达到 15%。

3. 风力制热

随着人民生活水平的提高,家庭用能中的热能需求量越来越大,特别是在高纬度的欧洲、北美地区,取暖、煮水等用途占耗能较大比例。为解决家庭及低品位工业热能的需求,风力制热有了较大的发展。

风力制热是将风能转换为热能。目前有三种转换方法:①风力机发电,将电能转换为热能;②由风力机将风能转换为空气压缩能,再换成热能,即由风力机带动离心压缩机对空气进行绝热压缩而放出热能;③风力机直接转换出热能。最简单的方式是搅拌液体制热,即风力机带动搅拌器转动,使液体变热;液体挤压致热,即用风力机带动液压泵,使工作液体加压后再从狭小的阻尼小孔中高速喷出而使工作液体加热;此外,还有固体摩擦

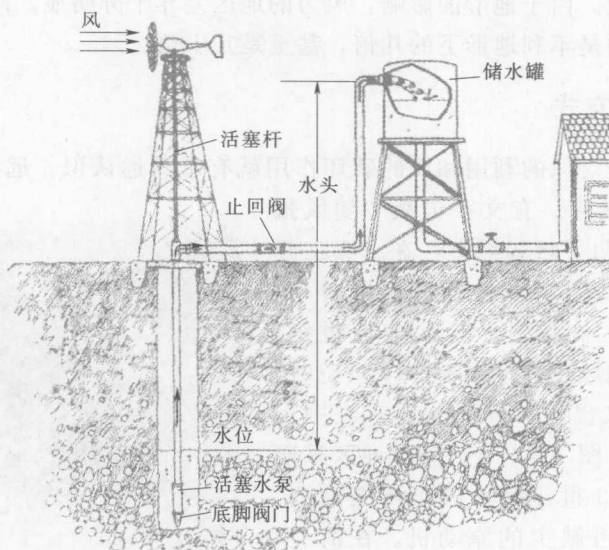


图 1-3 高扬程小流量风力提水系统图

致热和涡电流致热等方法。

4. 风力发电

风力发电已越来越成为风能利用的主要方式，受到世界各国的高度重视，而且发展速度很快。风力发电的运行方式有：①独立运行方式，通常是一台小型风力机向一户或几户提供电力，配备蓄电池蓄能，保证无风时用电；②风力发电与其他发电方式（如柴油机发电）相结合，向一个单位或一个村庄或一个海岛供电；③风场风力发电并入电网运行，向大电网提供电力。这是风力发电的主要发展方向。

由于传统风力机存在较大的噪声，有时会导致蝙蝠和鸟类意外撞击死亡，目前国外相关机构开发了一种“风力茎秆”的风力发电方式。该发电方式由大量碳纤维制成的茎秆密集树立在面积较小的空地构成。每根茎秆高 60m，带有一个直径为 11~22m 的混凝土底基，风力茎秆顶端直径约为 5cm，根部直径为 0.33m。每根茎秆都包含着电极和压电材料制成的陶瓷盘的交替层，当受到压力时会产生电流。对于风力茎秆而言，当竖直茎秆受到风力的摇摆作用后，就会源源不断产生电流。图 1-4 为风力茎秆发电场的效果图。

1.1.3 风力机的应用及发展

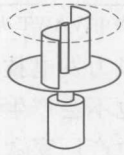
风力机即为将风能转换为旋转机械功的动力机械，又称风车。广泛地说，它是一种以太阳为热源，以大气为介质的热能利用发动机。多个世纪以来，它同水力机械一样，作为动力源替代了人力、畜力，对生产力的发展发挥了重要作用。

风力机最早出现在波斯，起初是垂直轴翼板式风车，后来又出现了水平轴风力机。随着工业技术的发展，风力机的结构和性能都有了极大的提高，已经采用手控和机械式自控机构改变叶片的桨距角来调节风轮转速。表 1-2 统计了风力机的发展及用途。



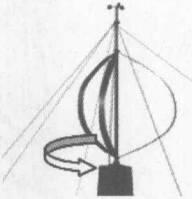
图 1-4 风力茎杆发电场效果图

表 1-2 风力机发展及用途表

风力机名称	风力机类型	用 途	驱动类型	风能转换率峰值	结 构 简 图
Savonius 风轮	VAWT	早期的波斯风车, 目前被用于通风设备	阻力型	16%	
风杯式风轮	VAWT	风速计	阻力型	8%	
美国农场风车	HAWT	18 世纪以来被用于汲水、磨面	升力型	31%	
Dutch 风车	HAWT	16 世纪起被用于磨面	升力型	27%	



续表

风力机名称	风力机类型	用 途	驱动类型	风能转换率峰值	结 构 简 图
Darrieus 风力机	VAWT	20 世纪中期, 被用于发电	升力型	40%	
现代水平轴风力机	HAWT	风力发电	升力型	43% (叶片数为 1) 47% (叶片数为 2) 50% (叶片数为 3)	

注: 表中 VAWT 为 Vertial Axis Wind Turbine 的简写; HAWT 为 Horizontal Axis Wind Turbine 的简写。

风力发电技术是一项多学科、可持续发展、绿色环保的综合技术, 因为它不需要燃料、也不会产生辐射或空气污染, 所以已在世界上形成了热潮, 发展速度很快。各地的风力机生产厂家数量也迅速增加, 新技术的革新促进了风力机叶片的发展。

从 2007 年以来, 全球风电产业一度成为世界上增长速度最快的产业, 在相当长一段时间内保持着近 30% 的高增长率。尽管 2008 年金融危机以及之后的经济危机所带来的滞后反应减缓了风电发展步伐, 但根据全球风能理事会 (Global Wind Energy Council, 简称为 GWEC) 统计数据显示, 2012 年全球新增风电装机容量达到 44537MW, 这一新的增长量使全球风电装机容量达到 282587MW。图 1-5 为全球风电累计和新增装机容量变化趋势图。

为了有效节约风电场土地, 降低并网成本和单位功率的造价, 从风力机建造伊始, 机组单机容量就不断扩大。叶片的长度从早期的 7.5m 左右发展到当前主流风力机叶片的 50m 以上。此外, 随着海上风资源的逐步开发, 风电场需要单机容量更大的机组。与此同时, 风电场维护成本和发电成本都有所降低。图 1-6 为自 1985 年以来, 风力机单机机组尺寸发展历程图。

海上风电相对于陆地具有多方面优势: 海面粗糙度小, 离岸 10km 的海上风速通常比沿岸上高约 25%; 海上风湍流强度小, 具有稳定的主导风向; 机组承受的疲劳载荷较低, 使得风力机发电机组寿命更长; 风切变小, 因而塔架可设计得较短; 在海上开发利用风能, 噪声、景观、生态和电磁波干扰问题较少; 海上风电场不占陆上土地资源, 对于靠近海洋的国家或地区较适合发展海上风电。因此海上风力开发是风电产业发展的趋势。

世界上对海上风电的研究与开发始于 20 世纪 90 年代, 经过 10 多年的发展, 海上风电技术正日趋成熟, 并开始进入大规模开发阶段。目前, 在全球范围内已有诸多生产海上

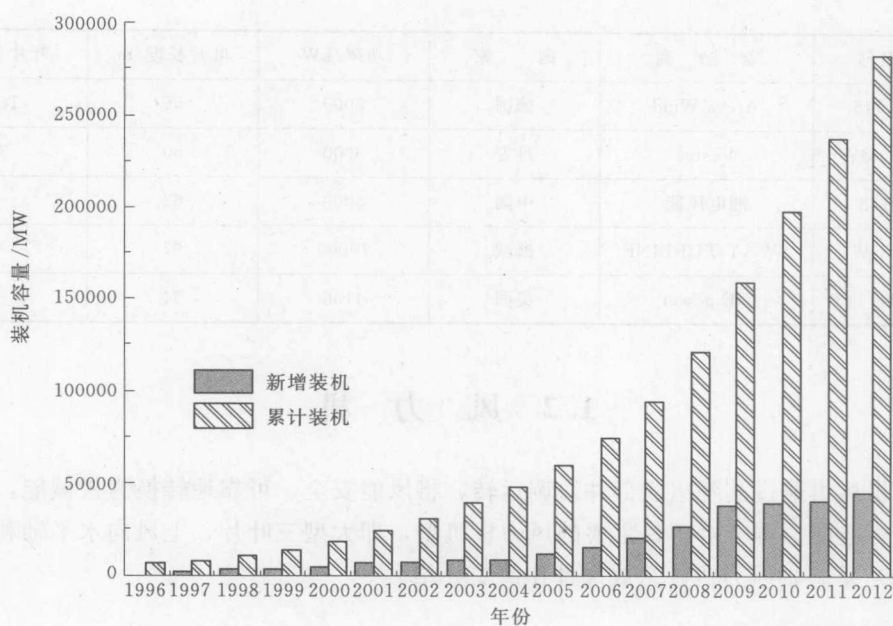


图 1-5 全球风电累计和新增装机容量变化趋势图

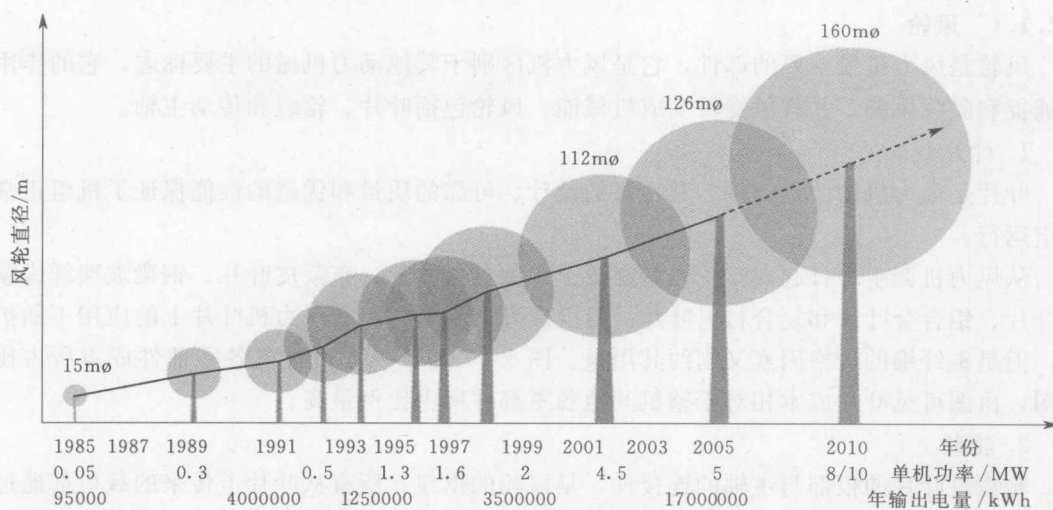


图 1-6 风力机单机机组尺寸发展历程图

风力发电设备的厂家，表 1-3 列举了部分型号的大型海上风力机叶片及其相关技术参数。

表 1-3 部分海上风力机叶片及技术参数表

风力机名称	制 造 商	国 家	功率/kW	叶片长度/m	叶片重量/t
Haliade 150	Alstom	法国	6000	73.5	—
Repower 5M	Repower	德国	5000	61.5	19.5



续表

风力机名称	制 造 商	国 家	功率/kW	叶片长度/m	叶片重量/t
M5000-116	Areva Wind	德国	5000	56	16.5
V164-8.0MW	Vestas	丹麦	8000	80	35
XE/DD128	湘电风能	中国	5000	62	—
Sway 10MW	SWAY TURBINE	挪威	10000	67	—
Energy4.1-113	GE power	美国	4100	54	—

1.2 风 力 机

风力机机组通过其各组成部件协调运转,将风能安全、可靠地转换为机械能,再将机械能转换为电能。本节对两种主要的风力机机型,即大型三叶片、上风向水平轴和达里厄(Darrieus)垂直轴风力机各组成部件作简要介绍。

1.2.1 水平轴风力机

大型水平轴风力机的基本结构组成包括风轮、机舱及其部件、塔架和基础。

1.2.1.1 风轮

风轮是风力机最主要的部件,它是风力机区别于其他动力机械的主要标志,它的作用是捕捉和吸收风能,并将风能转变成机械能。风轮包括叶片、轮毂和传动主轴。

1. 叶片

叶片是风力机的关键部件,其良好的设计、可靠的质量和优越的性能保证了机组正常运行。

从风力机诞生之日起,叶片先后经历了木制材料叶片、布蒙皮叶片、钢梁玻璃纤维蒙皮叶片、铝合金叶片和复合材料叶片。目前碳纤维复合材料在风力机叶片上的应用不断扩大,但是碳纤维的价格因素又制约其用量。图1-7为某风力机整机各零部件成本所占比例图,由图可见叶片成本相对于整机其他各零部件所占比例最高。

2. 轮毂

轮毂是叶片的根部与主轴的连接件,是风轮的枢纽。所有从叶片上传来的载荷都通过轮毂传递至机舱内的传动系统,再传至发电机转子。同时,轮毂也是控制叶片桨距的关键所在。图1-8为水平轴风力机轮毂透视图,内含叶片变桨距装置。

轮毂通常是由铸钢或钢板焊接而成。铸钢在加工之前需要对其进行探伤,决不允许有夹渣、缩孔、砂眼、裂纹等缺陷。对焊接的轮毂,其焊缝必须经过超声波检测,并且按照风力机叶片可能承受的最大离心载荷确定钢板的厚度。此外,还需要严格控制交变疲劳应力引起的焊缝损伤变化。

3. 传动主轴

传动主轴,也被称为低速转轴,被安装在风轮和齿轮箱之间。前端通过螺栓与轮毂刚

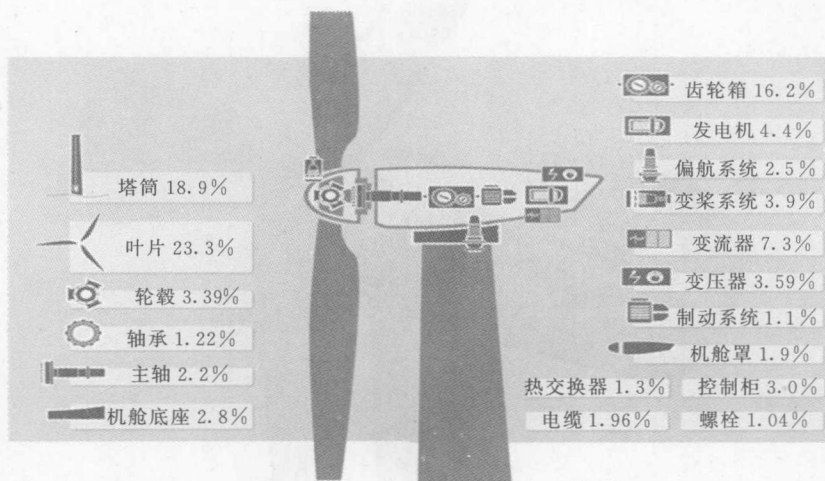


图 1-7 兆瓦级风力机主要部件及成本所占比例图

性连接，后端通过齿轮与齿轮箱进行啮合。传动主轴作为风力机的关键零部件，在整个系统中承担着支撑轮毂处传递过来的各种负载的作用，将扭矩传递给增速齿轮箱，并将轴向推力、气动弯矩传递给机舱和塔架。

风力机组常年位于野外或海上，运行工况比较恶劣，温度、湿度和风载荷变化很大，因此，要求主轴具有良好的耐冲击、耐腐蚀和长寿命等性能。

1.2.1.2 机舱及其部件

机舱由机舱底座和机舱罩组成。

机舱底座支撑塔架上方所有装置及附属部件，它的牢固与否将直接关系到风力机的安危与寿命。微小型风力机塔架上方的设备较轻，其机舱底座一般是由钢板直接焊接而成，可根据设计要求在底板上焊接加强肋。

对于中大型风力机而言，机舱底座必须进行精密设计，通常由以纵、横梁为主，再辅以台板、腹板、肋板等焊接而成。焊接质量要求高，台板面需刨平，安装孔的位置要求精确。

机舱内部通常布置有偏航系统、传动系统、制动系统、发电机和控制系统。图 1-9 为某兆瓦级水平轴风力机机舱部件布置示意图。

1. 齿轮箱

通常风轮的转速很低，远达不到发电机发电要求的转速，必须通过齿轮箱齿轮副的增速作用来实现，故也将齿轮箱称之为增速箱。因此，在齿轮箱的作用下，风轮转子上的较低转速、较高转矩被转换为用于发电机上的较高转速、较低转矩。

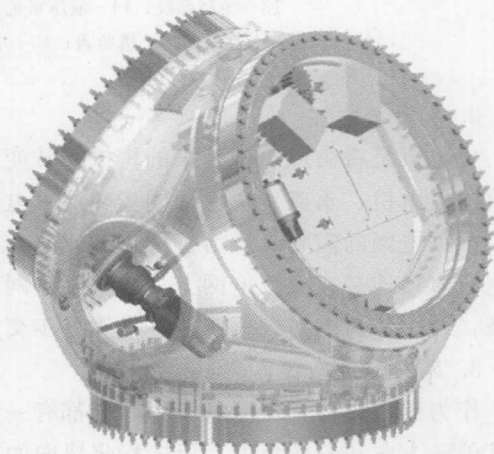


图 1-8 水平轴风力机轮毂透视图