

● 新能源应用技术丛书

风力发电机组设计

芮晓明 柳亦兵 马志勇 编著

新能源应用技术丛书

风力发电机组设计

芮晓明 柳亦兵 马志勇 编著



机械工业出版社

本书主要针对大型风电机组的设计需求,阐述相关的理论基础与设计方法。书中讨论了风电机组的设计依据和设计标准等问题,介绍了风电机组设计的相关理论,包括空气动力学、载荷分析、结构分析、疲劳强度设计等;在此基础上,论述了风电机组总体设计方法,并重点针对风轮叶片、传动系统和塔架基础等主要部件设计中的基础性问题进行了分析,给出比较系统且尽可能具体的设计方法;同时,介绍了风电机组动力学设计的基础知识。

本书可供从事大型风电机组设计、运行、维护和管理等方面工作的专业技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业的本科高年级学生和研究生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组设计/芮晓明等编著. —北京:机械工业出版社, 2010. 2

(新能源应用技术丛书)

ISBN 978-7-111-29593-8

I. 风… II. 芮… III. 风力发电机—机组—设计
IV. TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 012498 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:阎洪庆 责任校对:申春香

封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2010 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·351 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-29593-8

定价:35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

经济、能源与环境的协调发展是实现国家现代化目标的必要条件。为了解决化石能源的不断消耗对经济可持续发展和环境的影响问题，我国和一些主要发达国家在未来能源规划中，都明确提出了可再生能源发展的具体目标。在《国家中长期(2006—2020年)科学和技术发展规划纲要》中，将可再生能源规模化利用列为能源可持续发展中的关键科学问题之一。2005年颁布的《中国可再生能源法》进一步明确了包括风能在内的可再生能源的战略地位，为可再生能源的发展提供了法律保证。

风能是一种重要的清洁可再生能源，而风力发电是目前发展最快，且最具规模化开发条件的风能利用技术形式。截止到2008年底，全球风电机组的总装机容量超过了1亿kW，我国经过近几年的快速发展，风电机组总装机容量也达到1200万kW。根据国家发改委2005年的规划，到2020年，全国风电机组装机容量将达到3000万kW。我国的风能资源丰富，2020年以后还将得到持续的发展。因此，风能的规模化利用是国家能源可持续发展的重大需求。

从20世纪80年代并网风电机组问世以来，国内外在风能技术的开发利用方面取得了很大的成就，并形成了相应的风电产业。过去的10年，我国的风电机组装机容量年均增长速度达到45%以上。风力发电已在节约能源、缓解电力供应紧张的形势、降低长期发电成本、减少大气污染和温室气体排放等方面做出了贡献，开始有所作为。

一般而言，在风力发电生产的成本构成中，发电设备所占的比例最多，而运行成本很低。因此，设计研发先进的风电设备是发展风电产业的关键。近年来，随着风电市场需求的扩大，我国风电设备产业得到了快速的发展。据截至2007年底的不完全统计，我国风电设备制造及相关零部件企业已有70多家。然而，由于我国大型风电设备设计研发工作开展较晚，而且相关产业基础相对薄弱，尚难以满足风力发电产业超常规发展的市场需求。在此背景下，我们编写了本书，谨供致力于风电技术及设备开发研究的广大读者参考和使用，并期待能够为风能利用和风电设备产业的进一步发展作出应有的贡献。

本书主要针对并网大型风电机组的设计需求，重点阐述了相关的理论基础与设计方法等。全书共分为7章：第1章为风电机组设计概论，介绍有关风电机组的技术构成和基本设计概念。第2章为风电机组的设计基础，重点讨论风电机组相关设计标准、设计所需的外部条件，以及风电机组设计过程所需的空气动力学、结构分析与计算基础等问题。第3~6章结合风电机组的总体及主要部件设计问题，讨论相关的设计方法或技术。在风电机组总体设计中，重点论述风电机组的总体参数和功能设计与风况条件、风电机组特性等方面的关系，并给出发电机系统选型和风电机组总体布局设计的一般原则。在此基础上，书中针对构成风电机组的主要部件，如风轮叶片、传动系统和塔架基础等，通过对相关设计问题的基础性分析，给出了比较系统和尽可能具体的设计方法。第7章对风电机组的结构动力学分析一些基础性问题进行了介绍，内容涉及叶片结构动力学分析、传动系统动力学分析、塔架结构动力学特性和风电机组整机动力学分析等。在本书的附录中，结合作者的一些研究成果，探讨了几

个与风电机组设计相关的具体问题，并给出部分算例。

本书可供从事大型风电机组设计、运行、维护和管理等方面工作的专业技术人员阅读，也可作为高等院校相关专业的本科高年级学生和研究生的参考书。

本书由华北电力大学芮晓明教授、柳亦兵教授和马志勇副教授合作编写。另外，华北电力大学的研究生李喜梅、唐琨普等人也在本书的撰写过程中做了大量工作。

华锐风电科技有限公司技术总监陈党慧先生对本书进行了审阅，提出了许多重要的修改意见和建议。北京机械工业自动化研究所高级工程师杨彦国先生对本书内容进行了文字等方面的校对。对他们在本书的出版过程中给予的很大帮助谨表示深深的谢意。

本书参考和引用了一些国内外文献著作，在此对其作者表示感谢。

作 者

目 录

前言

第 1 章 风电机组设计概论	1	2.2.2 正常风况	22
1.1 风电机组的基本功能构成 与分类	1	2.2.3 极端外部条件	24
1.1.1 风电机组的基本功能构成	1	2.3 空气动力学基础与数学模型	28
1.1.2 风电机组的分类	2	2.3.1 风能的简单分析	28
1.2 水平轴风电机组的结构特征	4	2.3.2 动量模型	29
1.2.1 风轮	5	2.3.3 叶素理论	31
1.2.2 机舱及其安装部件	6	2.3.4 动量-叶素理论	34
1.2.3 塔架与基础	7	2.3.5 其他理论模型简介	36
1.3 风电设备的技术现状与 发展趋势	7	2.4 风电机组载荷分析基础	37
1.3.1 技术现状	7	2.4.1 载荷的类型	37
1.3.2 发展趋势	8	2.4.2 设计工况与载荷状况	39
1.4 风电机组设计的基本内容 与步骤	10	2.4.3 载荷分析的基本要求	41
1.4.1 确定设计目标	10	2.5 极限状态分析	42
1.4.2 总体设计	10	2.5.1 设计要求	42
1.4.3 风电机组零部件结构设计	12	2.5.2 极限强度分析的安全系数	44
1.4.4 样机测试与设计验证	13	2.5.3 疲劳失效分析的安全系数	44
1.5 风电机组与风电场设计软 件简介	13	2.5.4 稳定性与临界挠度分析的 安全系数	45
1.5.1 风资源评估与风电场设计管 理类软件	13	2.6 疲劳强度分析基础	45
1.5.2 风电机组性能的分析与仿真 软件	14	2.6.1 疲劳强度设计概述	45
1.5.3 风电机组结构的分析与设计 软件	16	2.6.2 疲劳设计的基本方法	46
第 2 章 风电机组的设计基础	18	2.6.3 设计风电机组疲劳强度时需 考虑的问题	50
2.1 风电机组相关设计标准	18	第 3 章 风电机组总体设计	52
2.1.1 国外重要的风电设计标准	18	3.1 风电机组总体参数设计	52
2.1.2 我国主要风电标准	20	3.1.1 风电机组设计风速与功率	53
2.2 风电机组设计的外部条件	22	3.1.2 风轮特性参数及其分析	58
2.2.1 风电机组分级	22	3.2 风电机组的功能设计	61
		3.2.1 风轮功率的调节方式	61
		3.2.2 影响风电机组功率特性的 其他因素	63
		3.2.3 风轮的力学特性	64
		3.3 风电机组发电机系统选型设计	66
		3.3.1 恒速恒频发电系统	67

3.3.2 变速恒频发电系统	67	5.3.2 设计载荷	133
3.4 风电机组总体布局设计	71	5.3.3 结构设计	136
3.4.1 主传动链布局	71	5.3.4 传动效率与噪声	137
3.4.2 变桨距系统布局	73	5.3.5 润滑与冷却	138
3.4.3 机舱与偏航系统布局	75	5.4 变桨距传动设计	139
3.4.4 风电机组制动系统布局	77	5.4.1 变桨距操作装置概述	139
第4章 风轮叶片设计	80	5.4.2 变桨距轴承	139
4.1 设计概述	80	5.4.3 变桨距驱动部件	140
4.1.1 基本设计过程与内容	80	5.4.4 变桨距装置的一般设计原则	141
4.1.2 设计要求	82	5.5 偏航传动系统设计	141
4.1.3 叶片相关术语	84	5.5.1 偏航操作装置概述	141
4.1.4 翼型介绍	86	5.5.2 偏航驱动部件	143
4.2 叶片气动外形设计	90	5.5.3 偏航滚动轴承	144
4.2.1 简化设计方法	90	第6章 塔架与基础	150
4.2.2 葛劳渥方法	91	6.1 设计概述	150
4.2.3 维尔森方法	92	6.1.1 塔架的设计要素	150
4.2.4 气动外形的优化设计	92	6.1.2 塔架的基本结构形式	152
4.2.5 气动外形的逆向设计方法	93	6.2 塔架载荷分析	153
4.2.6 气动外形设计方法的综合 应用算例	94	6.2.1 基本要求	153
4.3 叶片载荷分析	97	6.2.2 极端条件下风轮推力的其他 计算方法	154
4.3.1 计算坐标系	97	6.2.3 载荷的简化	155
4.3.2 几种类型的载荷	98	6.3 塔架的结构设计	155
4.3.3 叶片载荷分析算例	103	6.3.1 基本设计内容与方法	155
4.4 叶片结构设计	109	6.3.2 钢筒塔架的结构方案设计	157
4.4.1 叶片材料选择	109	6.3.3 塔架的强度分析	158
4.4.2 叶片剖面结构	110	6.3.4 塔架的固有频率分析	160
4.4.3 铺层设计	112	6.3.5 塔筒制造的技术要求	161
4.4.4 叶片总体结构	115	6.4 塔架基础	162
4.4.5 叶根设计	117	6.4.1 塔架基本的设计要求	162
第5章 风电机组传动系统设计	119	6.4.2 塔架基础的形式设计	163
5.1 主传动链设计概述	119	6.4.3 塔架基础的设计计算	165
5.1.1 主传动链的方案设计	119	第7章 风电机组结构动力学分析	168
5.1.2 主传动链的主要部件	121	7.1 风电机组动力学问题概述	168
5.2 齿轮传动设计基础	129	7.1.1 机械动力学研究的作用	168
5.2.1 轮系的概念	129	7.1.2 机械动力学的基本概念	169
5.2.2 齿轮传动的设计步骤	131	7.1.3 风电机组结构动力学分析基础	175
5.3 风电机组齿轮箱设计	132	7.2 机械振动分析基础	178
5.3.1 设计标准	132	7.2.1 单自由度系统振动	178

目 录	目 录		
7.2.2 多自由度系统自由振动	180	振动分析	198
7.2.3 分布参数系统自由振动	184	7.5.2 塔架振动的有限元分析	199
7.3 叶片结构动力学分析	185	7.5.3 塔架振动的控制	199
7.3.1 叶片的振动特性分析	185	附录	201
7.3.2 叶片的气动弹性稳定性	187	附录 A 齿轮传动设计的一些相关	
7.4 传动系统动力学分析	189	问题	201
7.4.1 齿轮传动系统的动态激励	191	A.1 行星轮系传动比的设计与计算	201
7.4.2 直齿圆柱齿轮的扭转振动		A.2 轮系构件的配齿设计条件	204
模型	192	A.3 齿轮传动参数计算	207
7.4.3 直齿圆柱齿轮传动耦合振动		A.4 行星传动轮系的载荷	209
模型	194	附录 B 叶片结构设计例	212
7.4.4 行星齿轮传动轮系的纯扭转		附录 C 本书中使用的部分变量与	
动力学模型	195	符号解释	217
7.5 塔架结构动特性分析	197	参考文献	220
7.5.1 采用集中质量模型的塔架			

第 1 章 风电机组设计概论

风力发电是风能利用的主要形式，风力发电机组（简称为风电机组）是将风能转化为电能的机电设备。风力发电可形成独立运行的小型供电系统，多采用 10kW 以下的小型风电机组，主要解决电网还未能送电的局部区域的电力供应问题。对风能的规模化利用，一般采用并网发电的运行方式，即将风电设备作为公共电网的电源使用。目前，并网型风电机组的单机容量多在 500kW 以上，以使此种系统具有较高的性价比。并网型风电系统可以由单一风电机组实现，但典型且经济的方式是由多台风电机组组成规模较大的风力发电场并网。

与当前最主要的电力生产方式——火力发电比较，风力发电的特点主要体现在：

- 1) 以自然风作为一次能源，后续资源充足，运行成本低，电力生产过程清洁，基本不产生对环境的污染；
- 2) 风电机组所产生的电功率与风速密切相关，由于风速随时变化且不可控，会影响所产生电能的稳定性；
- 3) 风电设备所承受的载荷复杂，且需要在野外运行，环境条件变化大，维修不便，对可靠性和自动控制方面的要求高；
- 4) 在利用风能进行发电生产的成本构成中，设备所占的比例最高。

因此，风电产业发展的关键是需要很好地解决相关的设备问题。本书将针对并网大型风电机组的设计需求，重点阐述相关的理论基础与设计方法等。

1.1 风电机组的基本功能构成与分类

1.1.1 风电机组的基本功能构成

风电机组是一种复杂的机电一体化设备。从能量转换角度看，此类设备大致包括图 1-1 所示的几个功能单元。其中，一次能源转换单元的主要功能是将风能转换为旋转机械能；机械能传递单元的主要作用是传动与制动；发电单元将旋转机械能转换为电能，同时提供必要的并网发电功能；控制与安全系统实现对风电机组起、停机和发电等运行过程的控制，并保证风电机组在任何状态下的安全性。

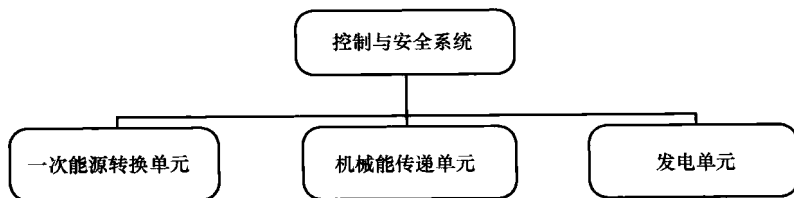


图 1-1 风力发电系统的基本功能构成

(1) 一次能源转换单元

风能是风力发电的一次能源，相应的能量转换单元是风电机组的核心部分，包括风轮、功率控制(调速)等部件。风轮是风电机组能量转换单元的关键部件，一般由具有良好的空气动力外形的叶片、轮毂和相应的功率控制机构组成。一次能源转换单元的主要功能是将风能转换为旋转机械能(转矩)，再通过风轮轴驱动与之连接的机械能传递单元和发电单元。

(2) 机械能传递单元

机械能传递单元也可简称为风电机组的传动链，连接风电机组的一次能源转换单元与发电单元，使之组成发电系统。该单元一般包括与风轮轮毂相连接的主轴、传动和制动机构等。一般大型风电机组的风轮设计转速较低，需要根据发电单元的要求，通过传动链按一定的速比传递风轮产生的扭矩，使输入发电机的转速满足并网风电机组发电单元的需要。同时，机械能传递单元还要设置可靠的制动机构，以保证风电机组的安全运行。

(3) 发电单元

发电单元一般由发电机和必要的电功率转换系统构成。并网风电机组发电单元可采用异步发电机或同步发电机，将风轮产生的旋转机械能转换为电能。发电单元配置的电功率转换系统，应能够满足并网或其他形式发电的需求。

(4) 控制与安全系统

该系统的主要功能可分为风电机组运行控制和状态监测两部分：大型风电机组需要自动控制，既能够在无人值守的条件下，保证风电机组的正常和安全运行；同时又要保证风电机组在非正常情况发生时能可靠地停机，以预防或减轻损失。

此外，风电机组还需要有上述功能部件或子系统的支撑结构，如机舱、塔架等；多数风电机组需要设置对风(也称偏航)装置，以保证风轮能够更好地获取风能。

1.1.2 风电机组的分类

(1) 按额定功率分类

风电机组的形式和种类较多，根据额定功率，一般可将其分为小型、中型和大型风电机组。鉴于各国在经济与技术发展方面的差异，有关功率的机型界限也不尽相同。通常，欧美国家认为额定功率 100 ~ 500kW 的为中型风电机组，大于 500kW 的为大型风电机组。我国以往曾有机型划分的相关标准，但由于近年来风电设备产业的发展迅速，对更适用的标准的研究正在进行中。

(2) 按风轮的结构形式分类

根据风轮结构特征及其在气流中的位置，可以将风电机组划分为水平轴和垂直轴风轮两大类，简称水平轴风电机组和垂直轴风电机组。

1) 水平轴风电机组

此类风电机组的风轮围绕水平的轴线旋转，风轮旋转平面大致与风的人流方向垂直，如图 1-2a 所示。大型水平轴风轮的叶片数一般为 3 片或 2 片，风轮叶片需要与其旋转平面成一定的角度安装。

水平轴风电机组的突出特点表现在：风轮扫掠面积大，风能利用率高；风电机组的结构紧凑，技术比较成熟；可控制风电机组在高风速条件下的功率输出，安全可靠。

水平轴风电机组的缺点：需要通过对风调向(也称偏航)调整风轮旋转平面的方向，使结构比较复杂；传动链和发电机安装在位于塔顶的机舱内，风电机组的安装和维护不便。

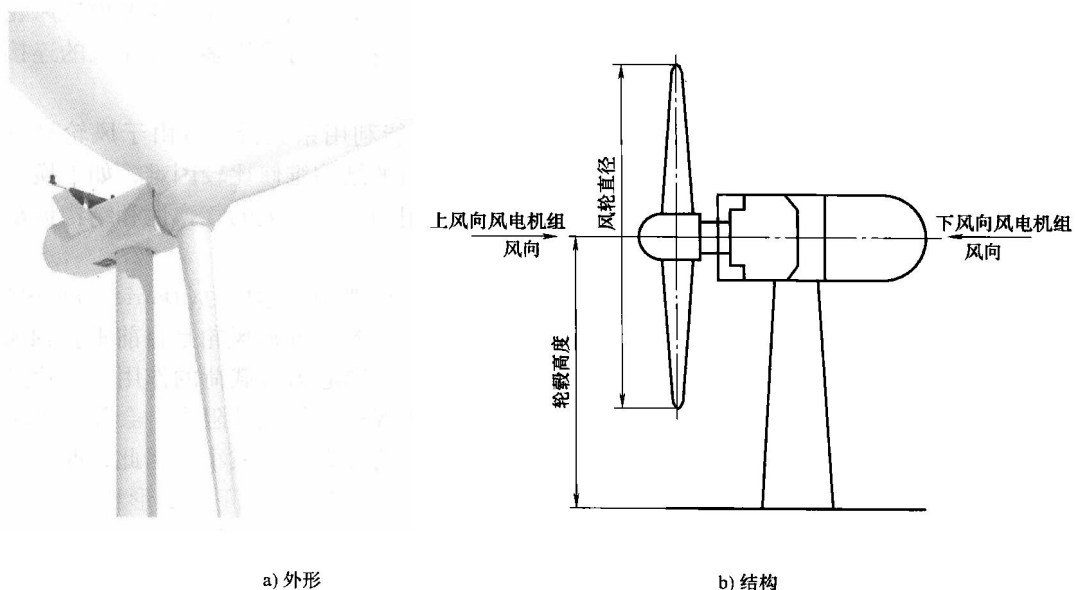


图 1-2 水平轴风电机组

根据风轮与塔架相对位置及其与风向的关系，水平轴风电机组有上风向与下风向之分，如图 1-2b 所示。风轮在塔架前方迎风旋转称之为上风向风电机组，反之则称为下风向风电机组。

一般上风向风电机组需要有相应的对风装置来保持风轮迎风；而下风向风电机组则能够自动对风，简化风电机组的结构。但由于吹向下风向风电机组的部分气流要绕过塔架到达风轮，增加了气流的不均匀性，所谓的“塔影”效应明显，对叶片等构件的疲劳寿命和运行的安全性影响较大。因此，目前大型风电机组一般采用上风向设计，很少采用下风向设计。

2) 垂直轴风电机组

此类风电机组的主要特征是风轮围绕铅垂轴线旋转，如图 1-3 所示。

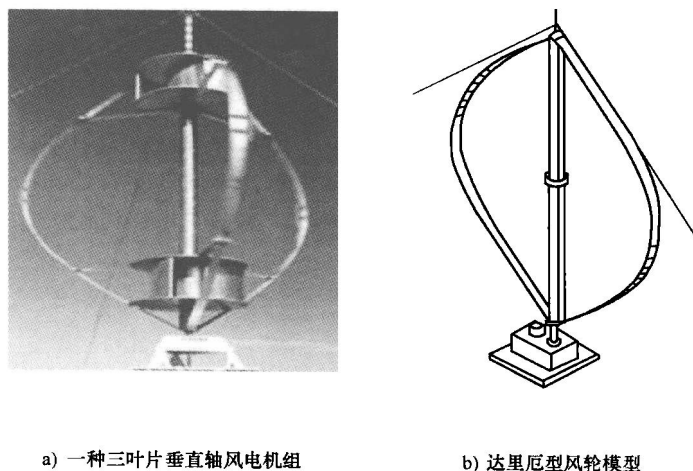


图 1-3 垂直轴风电机组

垂直轴风电机组的主要优点表现在：能够接受任意方向的来风，因而不需要设置风轮的对风装置；传动链和发电机可安装在地面，维护方便；风轮叶片可采用多种与轮毂的连接形式，对改善叶片的载荷情况有利。

但垂直轴风电机组的缺点同样也很突出：主要是风能利用系数低，且由于风轮靠近地面，可利用风能资源有限；风轮难以自行起动；风电机组的结构维修比较困难，如更换主轴承时有时甚至需要将整机解体；对于大型垂直轴风电机组而言，相关的气弹性和结构振动问题往往更为复杂。

比较实用的垂直轴风轮主要利用翼型升力作功，其中最典型是达里厄(Darrieus)型风轮。达里厄型风轮可以演化成多种结构形式，如图1-4所示。H形和 ϕ 形风轮是目前垂直轴风电机组的典型风轮形式。其中，H形风轮的结构简单，但由于离心力等载荷的作用，叶片连接点处的弯曲应力较大。另外，直叶片采用的横杆或拉索支撑产生的气动阻力，会降低风轮效率。 ϕ 形风轮采用弯曲且两端支撑的叶片，可使叶片承受的应力相应减小。因此， ϕ 形叶片相对较轻，能够以更高的速度运行。但在风轮高度和直径相同的条件下， ϕ 形比H形风轮的扫掠面积要小些。同时，由于 ϕ 形风轮采用两端支撑的叶片，可能会给风轮的功率和转速控制机构设计带来不便。

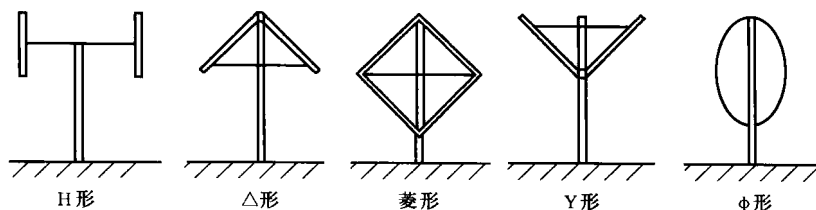


图1-4 几种达里厄型风轮的结构形式

(3) 有关风轮形式的讨论

综上所述，尽管风电机组有水平轴和垂直轴两大类型可供形式设计选择，但需要指出，水平轴和垂直轴风轮的气动与结构设计理论存在较大的差异，而就基础研究和成熟度而言，前者明显占优。事实上，由于水平轴风电机组的技术特点明确，迄今绝大多数并网风电机组选择了此种结构形式。换言之，由于垂直轴风电机组的设计基础和工程技术尚有待完善，在今后较长一段时间内，水平轴风电机组将作为风电设备产业的首选设计方案和典型机型。

有鉴于此，本书将主要讨论水平轴风电机组的相关内容。若未特殊注明，风电机组也将泛指具有水平轴风轮形式的风电机组。此外，近年来，国内外学者还提出了一些新型风能转换装置的概念，因这些装置多处于研究或试验阶段，本书中不再讨论。

1.2 水平轴风电机组的结构特征

水平轴风电机组有多种构成形式，图1-5是一种水平轴风电机组的典型结构。此处所谓典型结构，是指目前被多数风电机组采用的设计结构，其主体由风轮、偏航系统、传动与制动装置、发电机、机舱和塔架等主要部件组成，同时还需要相应的运行控制、安全保障与电源转换系统。

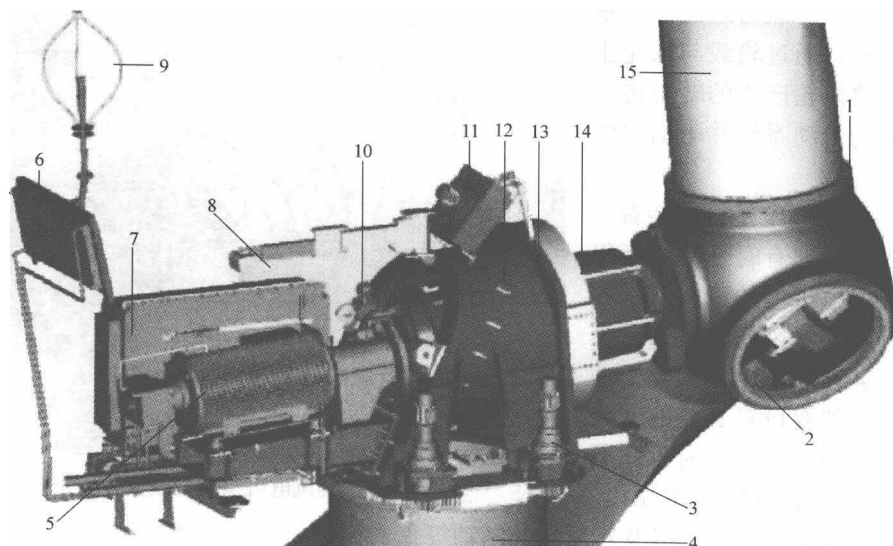


图 1-5 典型风电机组的主体结构

- 1—轮毂 2—变桨距系统 3—偏航系统 4—塔架 5—发电机 6—水冷装置
7—主变频柜 8—起重装置 9—风速仪 10—制动连接装置 11—齿轮箱润
滑冷却装置 12—主机架 13—减噪装置 14—齿轮箱 15—叶片

1.2.1 风轮

风轮是风电机组的核心部件之一，主要由叶片（也称桨叶）、轮毂等组成。

(1) 叶片

风轮的叶片（见图 1-6）多采用高强度纤维复合材料制造，叶片横截面形状呈流线型，上下壳体及其内部的支撑梁是主要承载结构。

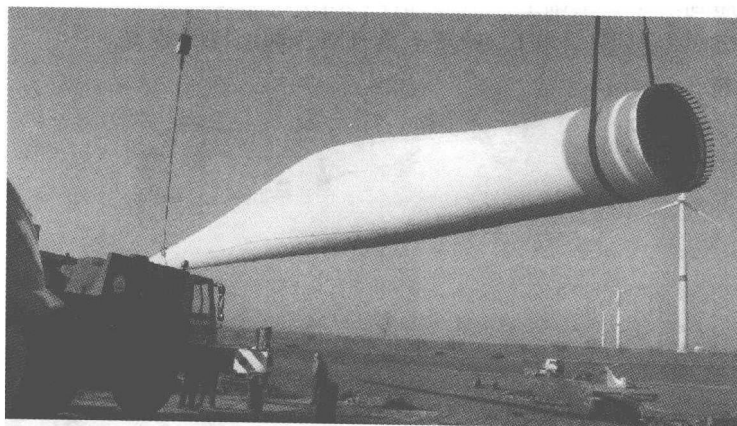


图 1-6 吊装中的风轮叶片

(2) 轮毂

叶片通过一定的连接方式安装在轮毂（见图 1-7）上，从而形成风轮。轮毂是风轮的枢

纽，各叶片产生的载荷通过叶片根部传递给轮毂；通过轮毂与风轮主轴的连接，将风轮产生的转矩传递给风电机组的传动系统并驱动发电机工作。

(3) 风轮的变桨距调节装置

自然界的风速有时变化幅度很大，为保证风电机组的正常工作和安全运行，需要对风轮转速和产生的转矩进行调整和控制。因此，大型风轮系统一般要设置必要的变桨距调节装置。当风速过高时，此类装置可以起到限制风轮功率输出、减小作用在叶片上的载荷，以及对风轮的制动等重要作用。

目前并网发电风电机组风轮的功率调节的主要方法是通过调整叶片翼型与风作用方向之间的关系，改变叶片上作用的气动载荷，进而实现对风轮转矩的控制。风电机组中实现此种控制操作的部件通常被称之为变桨距调节装置。

1.2.2 机舱及其安装部件

如图 1-5 所示，大型风电机组的主要部件多安装于机舱内。同时，需要在机舱的主机架与塔架的连接处设置偏航系统。

(1) 机舱本体

机舱本体一般由主机架、机舱壳体等构件组成。主机架上将安装风电机组的大部分部件，并通过偏航系统实现与塔架的连接。因此，机架实际上承受各主要运动部件的载荷，并且将这些载荷传递到塔架和基础上。机舱壳体(见图 1-8)主要用于机舱的封闭，在其外后部上方装有风速和风向传感器。同时，舱壁上设有隔音和通风等装置。

(2) 偏航系统

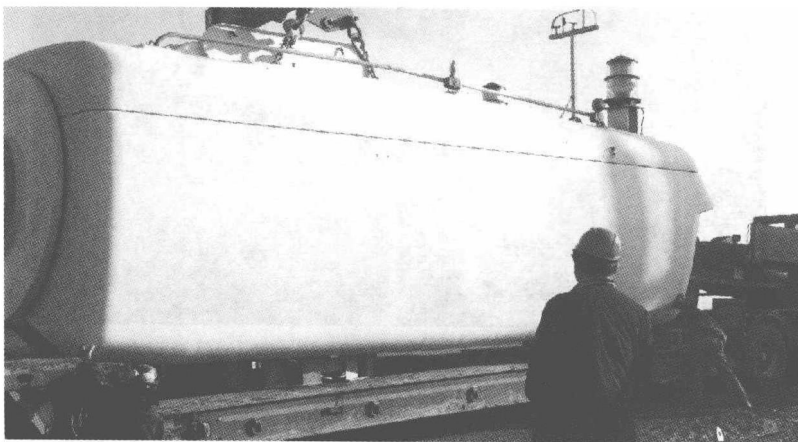


图 1-8 运输中的机舱

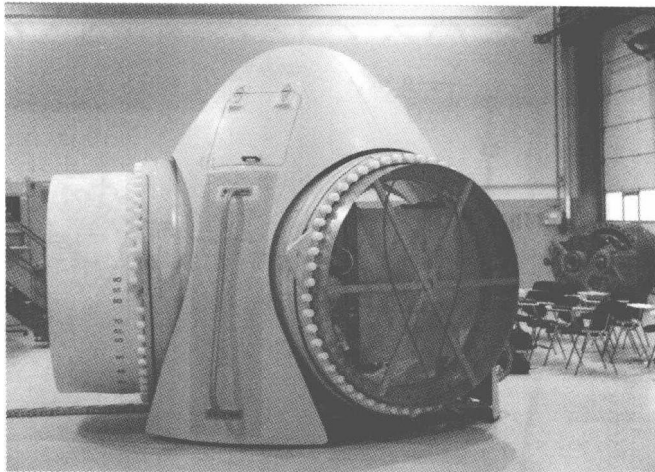


图 1-7 某风电机组的轮毂实体模型

偏航系统的主要功能是驱动机舱围绕塔架旋转,使风轮能够跟踪风向的变化,保证风轮扫掠面与风向大致保持垂直。根据机舱上安装的风向传感器提供的风向变化数据,由偏航控制器发出指令给偏航执行机构使机舱转动,直到风轮对准风向。

(3) 传动系统

风电机组传动系统(也称主传动链)安装在机舱的主机架上(见图1-9)。典型的主传动链一般包括低速轴(风轮轴)、高速轴、增速齿轮箱、联轴器和制动装置等。其中,低速轴连接风轮并作为齿轮箱输入轴,高速轴一般与增速齿轮箱的输出轴连接,并将动力传输给发电机。

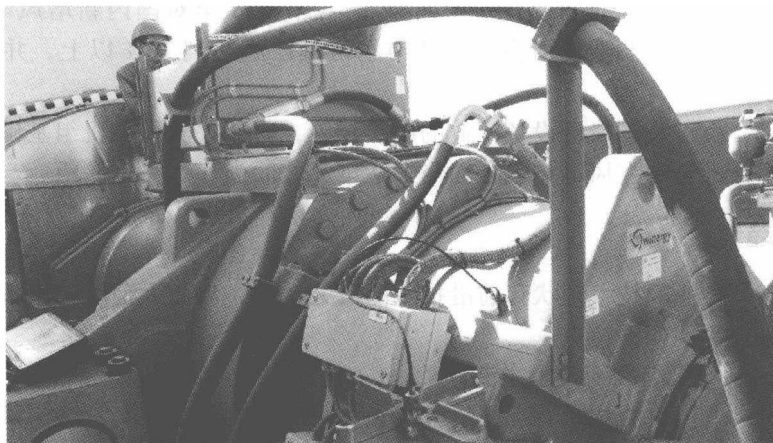


图1-9 风电机组传动与制动系统的检修

应该指出,并不是所有风电机组都必须具备这些传动环节,如一些风电机组设计成无齿轮箱形式,不需要增速齿轮箱等传动部件,可以通过低速轴(风轮轴)将风轮直接连接到发电机上。此类风电机组也被称之为直驱式风电机组,但其发电机系统需要特殊的设计。

1.2.3 塔架与基础

风电机组的塔架部件不仅要承受风压,还要同时承受风电机组运行过程中的全部动、静载荷。塔架结构有钢筒和桁架等形式,目前大型风电机组多采用钢筒塔架。为了运输方便,钢筒塔架一般需要将塔筒分段制造,到现场再组装。在塔架内,需要安装用于敷设风电机组控制和动力电缆的桥架,以及供操作人员上下机舱的扶梯,一些大型风电机组还设有电梯。

塔架的基础一般为钢筋混凝土结构,需要根据风电机组安装所在地的地质情况设计。基础一般需要预置与塔架的连接部件,还要设置防雷击的可靠接地系统。

1.3 风电设备的技术现状与发展趋势

1.3.1 技术现状

进入21世纪后,随着电力电子技术、控制技术和材料技术的不断进步,风电设备设计与制造技术得到了快速发展。近年来,风电机组已经逐渐形成了水平轴、三叶片、上风向、

钢筒塔架的典型设计形式。当前,世界风电设备市场的主流机型的额定功率多为1~3MW。

目前,主流风电机组的风轮设计多采用变速、变桨距运行方式,风轮与发电机之间采用大速比的增速齿轮箱传动。同时,无齿轮增速箱的直驱式风电机组在风电市场上也逐渐受到重视。

近年来,我国的风电设备设计与制造技术取得了长足的进步,初步具备1.5~3MW大型风电机组的整机制造能力。同时,风电机组的主要部件如叶片、电控系统、齿轮箱、发电机、偏航系统等的设计与制造能力也有很大的提高。通过技术引进与消化,国内目前已形成以几大风电整机制造企业为代表的风电设备产业,具备0.75~1.5MW风电机组的整机批量生产能力,并建成了相对稳定可靠的配套产业链。据2008年对国内新增风电机组的统计,我国内资与合资风电机组制造商所占的设备市场份额已经达到70%以上,并具备了一定的国际竞争力。

但总体来说,由于我国风电设备产业的起步较晚,对相关的风电机组基础设计理论和技术方面的研究还很不够,在风电技术方面与发达国家之间尚存在一定差距。

1.3.2 发展趋势

纵观世界风电产业的技术现状和前沿技术的研究情况,目前大型风电设备整机设计与制造技术的发展主要呈现如下特点:

(1) 水平轴风电机组成为技术主流

由于水平轴风电机组的技术特点突出,特别是具有风能利用率高、结构紧凑等方面的优势,使其已成为当前大型风电机组发展的主流技术,并占到95%以上的世界风电设备市场份额。同期发展的垂直轴风电机组则因风能利用率较低,以及起动、停机困难等方面的问题,尚较少得到市场认可和推广应用。但由于垂直轴风电机组的一些技术特点,近年来国内外仍在持续进行相关的研究和开发工作。

(2) 风电机组单机容量持续增大

随着研发力度的加大,风电机组的单机容量和风能利用效率逐步提高。20世纪80年代初,商业化风电机组单机容量多在30kW左右,风轮叶轮直径一般为15m。而目前已经试运行的最大风电机组单机容量达到了6MW,风轮直径超过120m。可见在过去的20多年中,随着风电机组设计与制造技术的快速发展,单机容量增加了约200倍,风轮直径也相应地增加了近10倍。

从目前的发展来看,风电设备大型化的趋势尚未出现关键的技术限制。为进一步提高风电机组性价比,目前单机容量仍有继续增大的趋势。

(3) 变桨距功率调节方式迅速发展

由于变桨距功率调节方式具有载荷控制平稳、安全性高和高效等优点,近年来在大型风电机组设计中得到广泛采用。国内外多数风电设备制造商(包括一些以往以失速型风电机组为主的制造商),基本以可变桨距风电机组作为主要产品。

(4) 变速恒频发电技术快速应用

随着控制技术和电力电子技术的进步,目前许多风电机组采用了变速恒频发电技术。结合变桨距技术应用开发的变速恒频风电机组,使风能转换效率有了进一步提高,同时具有较好的性价比,因而在风电设备市场得到快速推广和应用。

(5) 叶片技术不断改进

对于额定功率 2MW 以下的风电机组，通常可以通过增加塔筒高度和风轮直径提高发电量。但随着更大型风电机组的发展，仅靠这些措施可能会导致运输和安装难度以及成本的大幅度增加。为此，高效叶片的开发研究越来越受到重视。

新型高效叶片的研究可以使其气动特性进一步优化，捕获更多的风能，并且改善了其降噪特性。有鉴于特大型风轮叶片的运输问题，近年来分段式叶片的解决方案也开始受到关注，但其关键点是如何解决分段叶片接合处的刚度与断裂设计等问题，具体的连接技术有待解决。

碳纤维复合材料(Carbon Fibre Reinforced Composites, CFRP)因具有密度低、强度高、刚性稳定、耐高温、耐腐蚀等特性，逐渐被应用于大型叶片的设计与制造。采用 CFRP 材料的主要问题是成本过高，达到玻璃纤维复合材料的数倍。因此，目前 CFRP 材料的应用多限于对叶片的局部加强。但随着复合材料科学和生产工艺的改进与发展，相信其成本有望降低，必将得到进一步的推广应用。

(6) 无齿轮箱直驱式风电机组取得进展

直驱式风电机组能有效地减少由于齿轮箱故障导致的风电机组停机，提高系统的运行可靠性，降低设备的维修成本。直驱式风电机组一般需要采用全功率变流方式并网发电，随着近年来全功率变流并网技术的发展和应用，使风轮和发电机系统的调速范围得以扩大，可以有效地提高风能利用率，改善向电网供电的质量。直驱式风电机组研发的技术关键是发电机系统，随着高性能材料、电机设计技术和电子变流器制作技术的进步，此种机型具有很好的发展前景。目前，全功率变流技术存在的主要问题是电网的“谐波污染”较大，设备成本较高。

(7) 风力发电从陆地向海上拓展

受土地利用、噪声污染、电磁波干扰、电网规模等条件的限制，陆上风电实际可开发量有限。海上的广阔空间和巨大的风能潜力，使风力发电从陆地转向海上成为一种趋势。特别是水深小于 15m 的近浅海的风能利用，更是今后几十年风电技术发展的方向。

海上风力资源比陆地上的丰富。一般认为，海上风速约比沿岸的陆上地区风速高 25%，且海面的粗糙度、风湍流强度较小，有利于减少风电机组构件的疲劳载荷，延长使用寿命。因此，许多欧洲国家已制订了海上风能的规模开发利用计划。一些美国学者甚至认为，海上风电完全可提供全美国所需的电能。

但相对于陆上风电技术的发展，海上风能的开发和利用的起步较晚且进展较慢。从 1989 年世界上第一台海上风电机组(简称 OWTGS)安装以来，全球 OWTGS 装机的容量远低于陆上风电机组，且基本上都在欧洲。

目前，海上风电的关键技术和产业化瓶颈在于海上风电设备的技术开发和产能。由于适宜海上运行的风电机组的叶片设计、结构强度、控制方法、基础问题，以及风电机组的防护等诸多方面与陆上风电机组有较大区别，相关的设计技术理论和方法还有待深入研究。

(8) 标准与规范逐步完善

自 1988 年国际电工委员会(IEC)成立“风力发电技术委员会”(IEC/TC88)以来，已发布了 10 多项风电领域的相关标准，为保证产品质量、规范风电市场、提高风电机组的性能奠定了重要基础。但相对而言，现有的风力发电技术标准与相关设备产业的需求还存在较大