



“十二五” “十三五” 国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电机组 检测技术

FENGDIAN JIZU
JIANCE JISHU

邢作霞 赵丽军 陈雷 李媛 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五” “十三五” 国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电机组 检测技术

邢作霞 赵丽军 陈雷 李媛 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，主要介绍了风电机组及检测技术概述，测量误差与不确定度，传感器原理与应用，风能资源测量与评估，风电电能质量及电网适应性测试，风电机组功率特性测试，风电机组低电压穿越测试，风电机组载荷测试，风电机组噪声和振动测试等方面的内容。

本书适合作为高等院校相关专业的教学、参考用书，也可为风力发电的专业人员在风力发电机组检测方面的学习提供参考。

图书在版编目（C I P）数据

风电机组检测技术 / 邢作霞等编著. — 北京：中国水利水电出版社，2017.3
（风力发电工程技术丛书）
ISBN 978-7-5170-5506-8

I. ①风… II. ①邢… III. ①风力发电机—发电机组—检测 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第126912号

书 名	风力发电工程技术丛书 风电机组检测技术
作 者	FENGDIAN JIZU JIANCE JISHU 邢作霞 赵丽军 陈雷 李媛 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
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 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	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19.25印张 456千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价	76.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

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)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强 孙志禹

李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚 陈 澜

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

丛书总策划 李 莉

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

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院

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

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司

华北电力大学

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源有限公司

华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心

浙江运达风电股份有限公司



前言

风电机组检测技术对风电运行、检修、故障诊断和产品认证有重要意义。主要体现在两个方面：一方面，风电是一种间歇性电源，具有短期波动性，风电大规模接入电网会对电网产生影响，这就要求接入电网的风电机组必须符合标准，尤其是电气特性必须符合相关技术标准的要求，对产品设计、新机型的开发，也需要对设计参数指标进行检测和认证；另一方面，针对风电运行情况和数据积累，开展风电机组检测，可以为解决风电机组故障提供技术支持，便于分析故障原因，优化风电机组控制策略，保证风电机组在不同场地条件和不同风况条件下都保持良好的运行状态，提供最大可能的发电量，对风电机组和风电场的智能运维起到重要作用。因此风电机组检测技术作为风电设计和运行的一门核心主干专业课程，在风电专业中将占据越来越大的重要的地位。

风电机组检测技术包括测量与误差、不确定性评定、传感器原理、风电传感器种类、风能资源测量、风电机组功率曲线评估、电能质量测试、低电压穿越测试、风电机组设计载荷评估、风电机组噪声测试等内容。本书从传感器原理、测量方法、数据统计方法等方面讲述风电检测相关内容。通过本课程的学习，使学生了解和掌握风电相关的各种传感器应用及测量方法，应用于本科和研究生教学，培养学生具备解决风电机组实际检测问题的能力。

本书一共有 9 章，各章的概述如下：

第 1 章 风电机组及检测技术概述。本章对风电机组的组成结构和分类方法，测试技术概念及特点、现代测试系统组成等内容进行了概要阐述。建立了风电检测的基本内容和知识体系框架。

第 2 章 测量误差与不确定度。本章对测量技术包括的测量方法和相关的数据处理方法进行了系统阐述。对测量不确定度的分类和评定方法进行了全

面介绍,并给出计算实例。

第3章 传感器原理与应用。本章对传感器的原理、结构组成、使用方法、基本特征、应用领域和前景等进行基本概述,对应变式传感器、压电式传感器、温度传感器等从原理、测量电路等方面进行测量原理和应用方法的介绍,并对风电系统所涉及的相关传感器进行介绍。

第4章 风能资源测量与评估。本章对气象测风方法进行介绍,描述测风塔的结构和分类,风电场中测风塔的布置方法等,最后对测风系统的组成、风能资源数据的测量、数据处理和风能资源评估计算方法进行了详细论述。

第5章 风电电能质量及电网适应性测试。本章介绍了风电电能质量标准和测试用相关电气设备,针对风电并网要求的电网适应性要求和相应的测试方法进行了描述。

第6章 风电机组功率特性测试。本章介绍了风电机组功率特性测试的过程及方法,场区评定,有效测风扇区计算,数据回归和数据采集与处理、不确定度评定等相关知识。

第7章 风电机组低电压穿越测试。本章介绍了低电压穿越基本概念和并网导则要求,内容包括低压穿越的原理,相关参数测量所用的设备,参数的选取和低压穿越能力的认证,以及具体的测量要求,最后介绍了低压穿越控制和测量的软、硬件系统。

第8章 风电机组载荷测试。本章对载荷测量的要求和测量目的进行了介绍,说明 Bladed 软件对载荷进行计算的过程,载荷测量传感器及布置布局方法,测试硬件系统的设计和软件功能,载荷测量的标定和相关数据验证处理等内容。

第9章 风电机组噪声和振动测试。本章说明了噪声产生的原理,噪声的测量方法和检测的标准。对风电机组机械传动振动的测量和评定方法进行了论述,介绍了振动监测系统和相关风电机组故障的评定过程。

本书由沈阳工业大学电气工程学院邢作霞担任主编,赵丽军担任副主编,陈雷、李媛两位老师参与书中重要章节的编写,董丽萍、郑伟两位老师负责本书校核工作。在此向所有帮助和支持过我们的朋友表示感谢。在编写过程中参考和引用了国内外很多书籍和网站的相关内容,部分图片的素材和个别实例的初始原型也来源于网络,由于涉及的网站和网页太多,没有一一列举,在此一并予以感谢。最后特别感谢中国水利水电出版社为本书出版所做出的努力。

作者

2017年1月



目 录

前言

第 1 章 风电机组及检测技术概述	1
1.1 相关基本概念	1
1.1.1 结构框图及基本原理	1
1.1.2 构成和分类	2
1.2 检测技术的相关概念	6
1.2.1 测试技术	6
1.2.2 现代测试系统	8
1.2.3 现代测试技术的应用	14
1.2.4 现代测试技术的发展趋势	15
1.3 风电机组检测技术的相关概念	16
1.4 风电机组检测技术的发展前景	18
第 2 章 测量误差与不确定度	19
2.1 检测技术基础	19
2.1.1 测量技术	19
2.1.2 测量数据的估计和处理	22
2.2 测量不确定度	36
2.2.1 概述	36
2.2.2 测量不确定度的评定步骤	40
2.2.3 各分量标准不确定度的评定	42
2.2.4 合成标准不确定度的计算	45
2.2.5 扩展不确定度的评定	49
2.2.6 自由度	52
2.2.7 测量结果及其不确定度的表示与报告	54
2.2.8 测量不确定度的评定实例	56

第 3 章 传感器原理与应用	59
3.1 传感器概述	59
3.1.1 定义与组成	59
3.1.2 分类	59
3.1.3 基本特性	60
3.1.4 应用领域及其发展	64
3.1.5 正确选用	66
3.2 应变式传感器	67
3.2.1 金属电阻应变式传感器	67
3.2.2 测量电路	73
3.3 压电式传感器	77
3.3.1 压电效应	77
3.3.2 压电式传感器的测量电路	80
3.3.3 压电式传感器的应用	81
3.4 温度传感器	82
3.4.1 热电阻式传感器	83
3.4.2 热电偶式传感器	92
3.5 风电机组中的传感器	99
3.5.1 风电控制系统组成	99
3.5.2 发电机系统	100
3.5.3 变桨距控制系统	100
3.5.4 偏航系统	103
3.5.5 液压系统	105
第 4 章 风能资源测量与评估	117
4.1 测风步骤	117
4.2 测风塔	118
4.3 测风系统	121
4.3.1 技术要求	121
4.3.2 组成	121
4.3.3 风向测量	122
4.3.4 风速测量与记录	123
4.3.5 其他气象参数测量	126
4.3.6 测风仪器选择	127
4.3.7 测风设备安装	128
4.3.8 现场调试	129
4.3.9 文档记录	130
4.3.10 测风运行管理	130

4.4	测风数据处理	130
4.4.1	数据验证	130
4.4.2	缺测数据订正	133
4.4.3	数据计算处理	134
4.4.4	代表年风速数据的获取	134
4.4.5	测风数据用于风能资源的评估	135
4.5	风能资源统计计算	135
4.5.1	风况	135
4.5.2	风功率密度	146
4.6	风能资源评价	150
第5章	风电电能质量及电网适应性测试	151
5.1	风电机组电能质量检测技术	151
5.1.1	电能质量研究现状	151
5.1.2	电能质量测量标准	153
5.1.3	电能质量要求	154
5.1.4	电能质量测量	156
5.1.5	电能质量检测设备	162
5.2	电网适应性测试	164
5.2.1	定义	164
5.2.2	内容	164
5.2.3	设备	167
5.2.4	方法	168
第6章	风电机组功率特性测试	173
6.1	概述	173
6.2	标准	173
6.3	准备及设备安装	173
6.3.1	场地评估	173
6.3.2	气象桅杆的安装位置	176
6.3.3	有效测量扇区的计算	177
6.3.4	测风塔与测试系统的安装	178
6.3.5	风速仪的选用、等级及评估	183
6.3.6	数据采集装置	185
6.4	测试数据的处理与不确定度分析	186
6.4.1	测试数据的收集	186
6.4.2	测试数据的预处理	187
6.4.3	数据的筛选	187
6.4.4	数据回归	188

6.4.5	功率曲线的绘制	188
6.4.6	年发电量的计算与外推	189
6.4.7	功率系数的计算	190
6.4.8	测量误差估算方法——不确定度的计算	190
第7章	风电机组低电压穿越测试	197
7.1	低电压穿越的概念及其测试	197
7.1.1	概念	197
7.1.2	测试	197
7.2	IEC 61400—21 的相关要求及电网导则	198
7.2.1	IEC 61400—21 关于低电压穿越测试的要求	198
7.2.2	我国电网导则的相关规定	199
7.2.3	国外电网导则对低电压穿越的要求	200
7.3	风电机组低电压穿越测试原理及相关要求	202
7.3.1	原理	202
7.3.2	设备	202
7.3.3	测试中相关参数的选择	205
7.3.4	能力认证测试及具体测试要求	206
7.4	风电机组低电压穿越现场测试程序	207
7.4.1	前期准备及其注意事项	207
7.4.2	测试程序	208
第8章	风电机组载荷测试	211
8.1	载荷分类及坐标轴系	211
8.1.1	载荷分类	211
8.1.2	载荷坐标系	212
8.2	风电机组运行条件	214
8.2.1	风电机组等级	214
8.2.2	正常风条件	214
8.2.3	极端风条件	215
8.3	风电机组载荷计算过程	219
8.3.1	载荷计算	219
8.3.2	Bladed 软件载荷的输出	222
8.3.3	载荷分析	223
8.4	载荷测试标准	228
8.5	载荷测试目的	228
8.6	风电机组基本载荷测量方法	229
8.6.1	所需测量的物理量	229
8.6.2	测量方法研究	231

8.7 硬件系统设计	238
8.7.1 机械载荷测试方案概述	238
8.7.2 机械载荷测试硬件系统结构设计	239
8.8 软件系统功能	241
8.8.1 测试系统介绍	241
8.8.2 测试系统功能及应用	242
8.9 载荷标定方法及数据验证	245
8.9.1 叶片载荷标定方法	245
8.9.2 主轴载荷标定方法	247
8.9.3 塔筒标定方法	249
8.10 载荷数据的分析及处理	250
8.10.1 疲劳分析主要研究内容	250
8.10.2 疲劳分析的一些基本概念	250
8.10.3 雨流计数法	251
8.10.4 非零平均应力的等效转换	252
8.10.5 疲劳载荷谱的编制	252
8.10.6 利用载荷谱进行疲劳分析和寿命预测	253
8.10.7 材料的 $S-N$ 曲线	254
8.10.8 疲劳累积损伤估算	255
8.10.9 等效载荷	256
第9章 风电机组噪声和振动测试	258
9.1 噪声测试	258
9.1.1 噪声产生机理及特性分析	258
9.1.2 噪声及其基本测量方法	260
9.1.3 噪声检测的标准	265
9.1.4 噪声测试方案的设计	266
9.2 振动、冲击测试	267
9.2.1 振动与冲击	267
9.2.2 振动测试与分析	269
附录 A 热电偶分度表	278
附录 B 报告格式样本	281
附录 C 风电机组测试相关实验	284
参考文献	290

第 1 章 风电机组及检测技术概述

1.1 相关基本概念

1.1.1 结构框图及基本原理

1. 结构框图

风电机组结构框图如图 1-1 所示。在机组中存在着两种物质流：一种是能量流，另一种是信息流。图 1-1 中的风轮、主传动系统、制动装置、发电系统和变压器部分构成机组的能量流，用实线描述；而图 1-1 中的控制系统、变桨距系统、偏航系统及测风系统部分承担机组的控制任务，构成机组的信息流，用虚线表述。

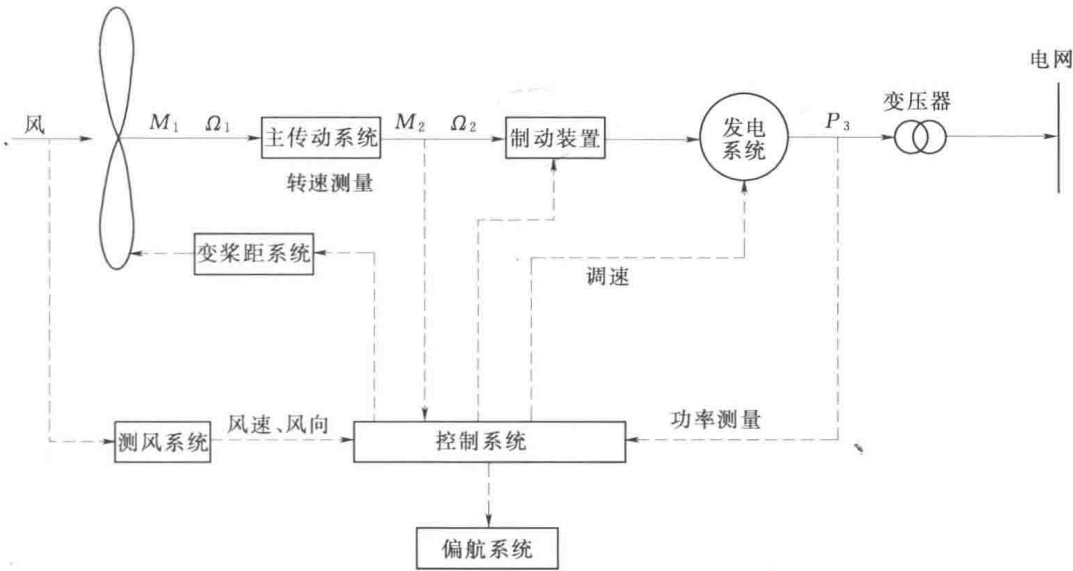


图 1-1 风电机组结构框图

2. 能量流能量传递原理

当风以一定的速度吹向风电机组时，在风轮上产生的力矩驱动风轮转动。将风的动能变成风轮旋转的动能，两者都属于机械能。风轮的输出功率为

$$P_1 = M_1 \Omega_1 \tag{1-1}$$

式中 P_1 ——风轮的输出功率，W；

M_1 ——风轮的输出转矩，N·m；

Ω_1 ——风轮的角速度，rad/s。

风轮的输出功率通过主传动系统传递。主传动系统可能使转矩和转速发生变化，于



是有

$$P_2 = M_2 \Omega_2 = M_1 \Omega_1 \eta_1 \quad (1-2)$$

式中 P_2 ——主传动系统的输出功率, W;

M_2 ——主传动系统的输出转矩, N·m;

Ω_2 ——主传动系统的角速度, rad/s;

η_1 ——主传动系统的总效率。

主传动系统将动力传递给发电机系统, 发电机把机械能变为电能。发电机的输出功率为

$$P_3 = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N = P_2 \eta_2 \quad (1-3)$$

式中 P_3 ——发电系统的输出功率, W;

U_N ——定子三相绕组上的线电压, V;

I_N ——流过定子绕组的线电流, A;

$\cos \varphi_N$ ——功率因数;

η_2 ——发电系统的总效率。

并网型风电机组发电系统输出的电流经过变压器升压后, 即可输入电网。

3. 信息流信息控制路线

信息流的传递是围绕控制系统进行的。控制系统的功能是过程控制和安全保护。过程控制包括启动、运行、暂停、停止等。在出现恶劣的外部环境和机组零部件突然失效时应紧急停机。

风速、风向、风电机组的转速、发电功率等物理量等作为输入信息通过传感器变成电信号传递给控制系统, 控制系统随时对输入信息进行加工和比较, 及时地发出控制指令, 这些指令是控制系统的输出信息。

对于变桨距风电机组, 当风速大于额定风速时, 控制系统发出变桨距指令, 通过变桨距系统改变风轮叶片的桨距角, 从而控制风电机组的输出功率。在启动和停止的过程中, 也需要改变叶片的桨距角。

对于变速型风电机组, 当风速小于额定风速时, 控制系统可以根据风的大小发出改变发电机转速的指令, 以便使风电机组最大限度地捕获风能。

当风轮的轴向与风向偏离时, 控制系统发出偏航指令, 通过偏航系统校正风轮轴的指向, 使风轮始终对准来风的方向。

当需要停机时, 控制系统发出停机指令, 除了借助变桨距制动外, 还可以通过安装在传动轴上的制动装置实现制动。

实际上, 在风电机组中, 能量流和信息流组成了闭环控制系统。同时, 变桨距系统、偏航系统等也组成了若干闭环的子系统, 实现相应的控制功能。应该指出, 由于各种风电机组组成结构的不同, 其工作原理也有差异, 这里介绍的是一种比较常用的典型情况。

1.1.2 构成和分类

1. 构成

从整体上看, 风电机组可分为风轮、机舱、塔架和基础几个部分, 风电机组外观如图



1-2 所示。风轮由叶片和轮毂组成。叶片具有空气动力外形，在气流作用下产生力矩驱动风轮转动，通过轮毂将转矩输入到主传动系统。机舱由底盘、整流罩和机舱罩等组成，底盘上安装除主控制器以外的主要部件；机舱罩后部的上方装有风速和风向传感器；舱壁上有隔音和通风装置等。底部与风轮直径决定风电机组能够在多大的范围内获取风中蕴含的能量。额定功率是正常工作条件下风电机组设计要达到的最大连续输出电功率。风轮直径应当根据不同的风况与额定功率匹配，以获得最大的年发电量和最低的发电成本，配置较大直径风轮供低风速区选用，配置较小直径风轮供高风速区选用。

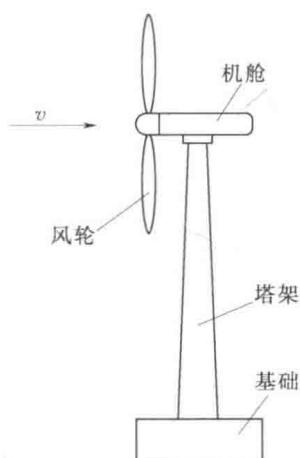


图 1-2 风电机组的外观

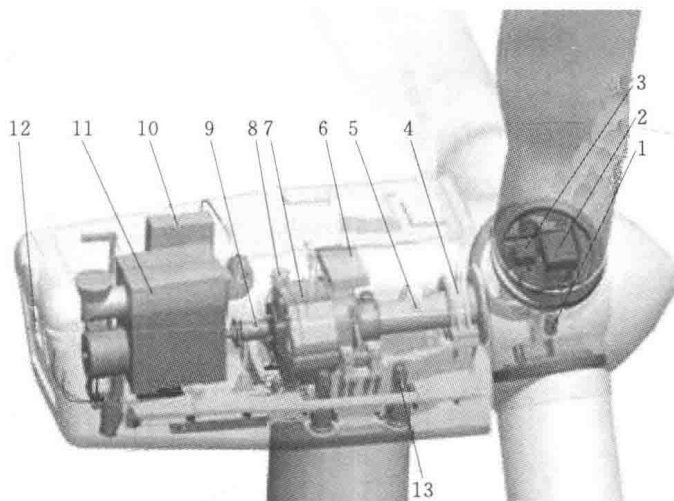


图 1-3 一种变桨变速型风电机组内部结构

1—变距电机；2—变桨控制器；3—电池盒；4—主轴承；5—主轴；
6—冷却风扇；7—齿轮箱；8—液压站；9—高速轴；10—电控
柜；11—发电机；12—机舱通风扇；13—偏航装置

一种变桨（即叶片可以绕自身轴线旋转，又简称变距）变速型风电机组内部结构如图 1-3 所示。对它的一些关键部分介绍如下：

(1) 机舱。机舱有风电机组的关键设备，包括齿轮箱、发电机。维护人员可以通过风电机组塔架进入机舱。机舱前端是风电机组转子，即转子叶片和轴心。

(2) 转子叶片。其作用是捕获风并将风力传送到转子轴心。在 600kW 级别的风电机组上，每个转子叶片的测量长度大约为 20m；而在 5MW 级别的风电机组上，叶片长度可以达到近 60m。叶片的设计类似飞机的机翼，制造材料却大不相同，多采用纤维而不是轻型合金。大部分转子叶片用玻璃纤维强化塑料制造。采用碳纤维或芳族聚酰胺作为强化材料是另外一种选择，但这种叶片对大型风电机组来说是不经济的。尽管目前在这一领域的研究已经有了发展，但木材、环氧木材或环氧木纤维合成物尚未用于制造叶片，钢及铝合金分别存在重量及金属疲劳等问题，目前只用在小型风电机组上。实际上，转子叶片设计师通常将叶片最远端的部分横切面设计得类似于正统飞机的机翼。但是叶片内端的厚轮廓，通常是专门为风电机组设计的。为转子叶片选择轮廓需要考虑很多方面，诸如可靠的运转与延时特性。叶片的轮廓设计应满足，即使在表面有污垢时，叶片也可以运转良好。

(3) 轴心。转子轴心附着在风电机组的低速轴上。



(4) 主轴(低速轴)。风电机组的低速轴将转子轴心与变速齿轮箱连接在一起。在一般的风电机组上,转子转速相当慢,为 $19\sim 30\text{r/min}$ 。轴中有用于液压系统的导管,可以用来激发空气动力闸的运行。

(5) 齿轮箱。齿轮箱是连接低速轴和高速轴的变速装置,它可以将高速轴的转速提高至低速轴的 50 倍。

(6) 高速轴及机械闸。高速轴以超过 1500r/min 运转,并驱动发电机。它装备有紧急机械闸,用于空气动力闸失效或风电机组维修时的制动。

(7) 发电机。风电机组的发电机将机械能转化为电能。风电机组上的发电机与普通电网上的发电设备不同,风电机组的发电机需要在波动的机械能条件下运转。通常使用的风电机组发电机是感应发电机或异步发电机,目前已经开始使用永磁同步发电机。迄今世界上单机最大电力输出超过 6000kW (德国 Enercon 的 E-112/114 型发电机)。

(8) 偏航装置。偏航装置借助电动机转动机舱,以使转子叶片调整达到风向的最佳切入角度。偏航装置由电子控制器操作,电子控制器可以通过风向标来探知风向。通常,在风向改变时,风电机组一次只会偏转几度。值得注意的是,小功率的风电机组都是通过统一的偏航装置调整所有叶片的角度,而最新的风电机组大都是每个叶片设置单独的偏航系统。

(9) 电子控制器。一般使用一台或多台不断监控风电机组状态的计算机,用于控制偏航装置。一旦风电机组发生故障(例如齿轮箱或发电机的过热),该控制器可以自动停止风电机组的转动,并通过网络信号通知风电机组管理中心。

(10) 变桨系统。变桨系统通过变桨控制器驱动变桨电动机,从而改变转子叶片的角度来控制风轮的转速,进而控制风电机组的输出功率。

(11) 液压系统。液压系统用于重置风电机组的空气动力闸。

(12) 冷却系统。发电机在运转时需要冷却。在大部分风电机组上,发电机被放置在管内,并使用大型风扇进行空冷,除此之外还需要一个油冷元件,用于冷却齿轮箱内的油;还有一部分制造商采用水冷。水冷发电机更加小巧,而且电效高,但这种方式需要在机舱内设置散热器,来消除液体冷却系统产生的热量。一些新型风电机组也采用水冷和风冷并用的系统(德国 Multibrid 的 M5000 系统)。

2. 分类

风电机组机型分类表见表 1-1,风电机组类型分类主要从两个方面进行:一方面是按装机容量来分;另一方面是按结构型式来分。

(1) 按装机容量分类如下:

- 1) 小型风电机组 $0.1\sim 1\text{kW}$ 。
- 2) 中型风电机组 $1\sim 100\text{kW}$ 。
- 3) 大型风电机组 $100\sim 1000\text{kW}$ 。
- 4) 特大型风电机组 1000kW 以上。

(2) 按风轮轴方向分类如下:

1) 水平轴风电机组。水平轴风电机组是风轮轴基本上平行于风向的风电机组。工作时,风轮的旋转平面与风向垂直。



表 1-1 风 电 机 组 机 型 分 类

结构型式 装机容量	风轮轴方向		功率调节方式			传动形式			转速变化		
	水平	垂直	定桨距	变桨距		有齿轮箱		直接驱动	定速	多态定速	变速
				普通变距	主动失速	高传动比	中传动比				
0.1~1kW 小型风电机组	有， 常见	有， 不常见	有， 常见	无	无	无	无	有	有	无	无
1~100kW 中型风电机组				有	有	有	无	无	有	有	有， 不常见
100~1000kW 大型风电机组				有， 常见	有， 不常见	有， 常见	有， 不常见	有， 不常见	有	有	有， 常见
1000kW 以上特大型 风电机组			有， 不常见				有， 不常见	有， 常见	有， 不常见	有， 不常见	有， 常见

水平轴风电机组随风轮与塔架相对位置的不同而有上风向与下风向之分。风轮在塔架的前面迎风旋转，叫做上风向风电机组，如图 1-2 所示。风轮安装在塔架后面，风先经过塔架，再到风轮，则称为下风向风电机组。上风向风电机组必须有某种调向装置。但对于下风向风电机组，由于一部分空气通过塔架后再吹向风轮，这样塔架就干扰了流过叶片的气流而形成所谓的塔影效应，影响风电机组的出力，使性能有所降低。

2) 垂直轴风电机组。垂直轴风电机组是风轮垂直于风向的风电机组，如图 1-4 所示。其主要特点是可以接收来自任何方向的风，因而当风向改变时无需对风。由于不需要调向装置，因此结构简化。垂直轴风电机组的另一个优点是齿轮箱和发电机可以安装在地面上。但是由于垂直轴风电机组需要大量材料，占地面积大，目前商用大型风电机组较少采用。

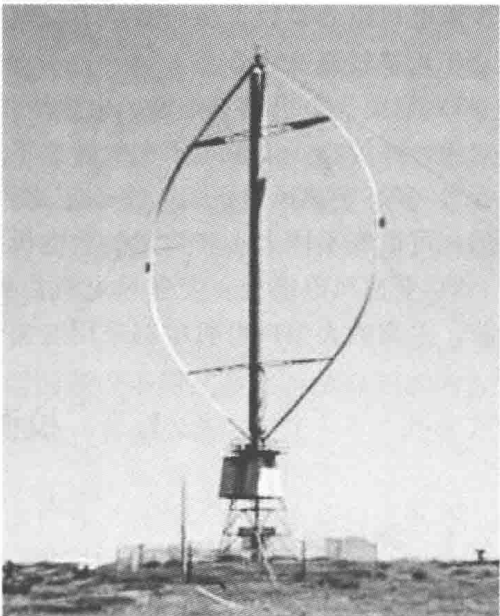


图 1-4 垂直轴风电机组

(3) 按功率调节方式分类如下：

1) 定桨距风电机组。叶片固定安装在轮毂上，角度不能改变，风电机组的功率调节完全靠叶片的气动特性。当风速超过额定风速时，利用叶片本身的空气动力特性减小旋转力矩（失速）或通过偏航控制维持输出功率相对稳定。

2) 普通变桨距型（正变距）风电机组。这种风电机组当风速过高时，通过减小叶片翼型上合成气流方向与翼型几何弦的夹角（攻角），改变风电机组获得的空气动力转矩，使功率输出保持稳定。同时，风电机组在启动过程也需要通过变桨距来获得足够的起动转矩。采用变桨距技术的风力发动机组还可使叶片和整机的受力状况大为改善，这对大型风电机组十分有利。