



新能源系列 —— 风能专业规划教材

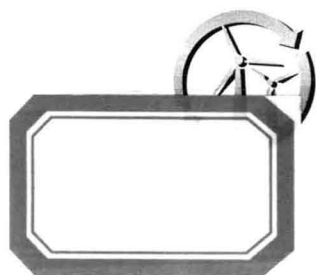
FENGDIAN
SHEBEI
JICHU

风电设备基础

马宏革 王亚非 主编



化学工业出版社

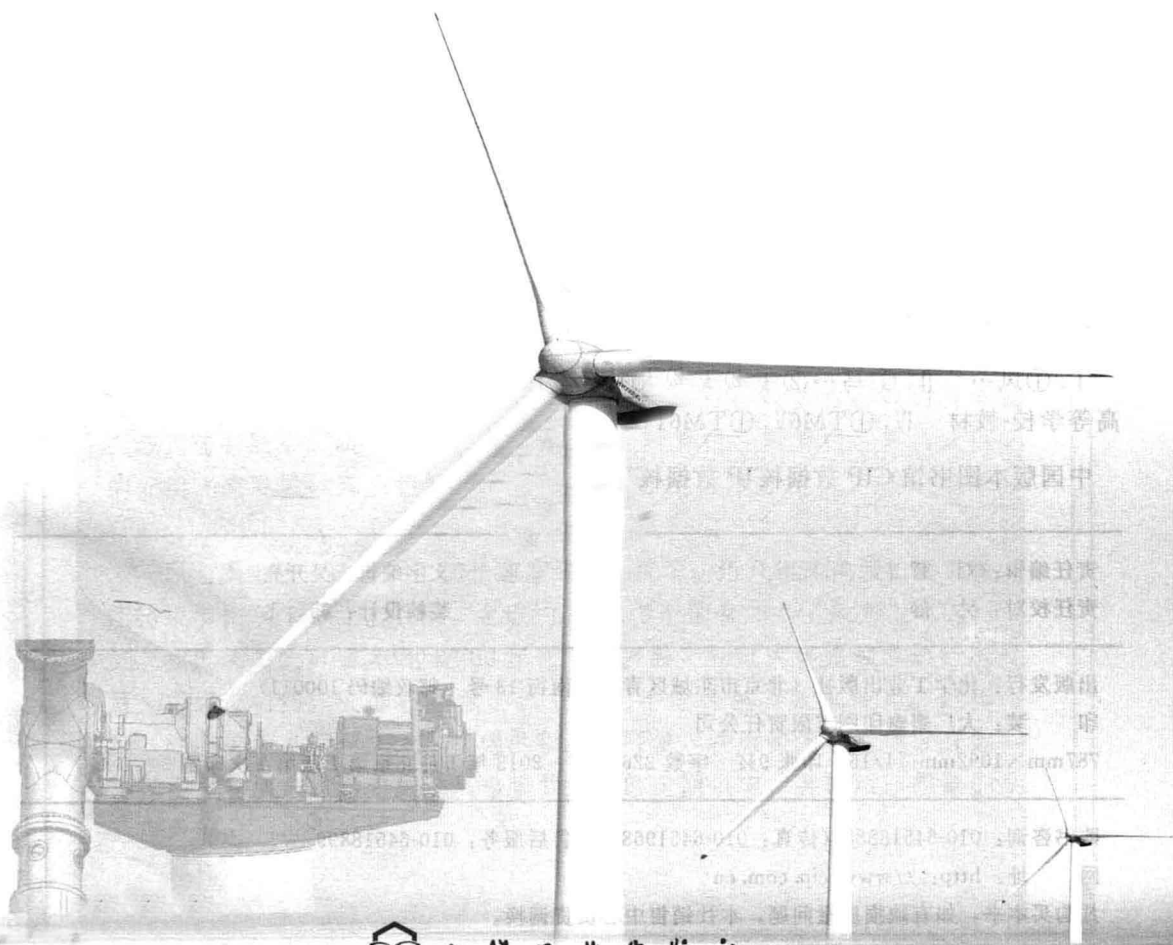


新能源系列 —— 风能专业规划教材

FENGDIAN
SHEBEI
JICHU

风电设备基础

马宏革 王亚非 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面系统地介绍了风力发电设备的基本结构和工作原理, 具体内容包括风轮系统、传动系统、偏航系统、液压系统、刹车系统、发电机和电气设备、控制系统和安全保护系统、塔架和基础等。

全书内容通俗简练, 系统翔实, 图文并茂, 可作为高等学校风电专业及风电相关专业课程的教材, 也可供风力发电、电气自动化技术等专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

风电设备基础/马宏革, 王亚非主编. —北京: 化学工业出版社, 2012. 8

新能源系列——风能专业规划教材

ISBN 978-7-122-15009-7

I. ①风… II. ①马…②王… III. ①风力发电-电气设备-高等学校-教材 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 173720 号

责任编辑: 刘 哲

文字编辑: 吴开亮

责任校对: 吴 静

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 226 千字 2013 年 1 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>

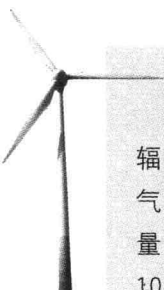
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究



前言



风能是一种可再生的自然能源，是太阳能的一种转化形式。太阳的辐射造成地球表面受热不均匀，引起大气层中压力分布不均匀，从而使空气沿水平方向运动，空气流动形成风能。据估计，地球上的风能理论蕴藏量约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ ，可开发利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ ，是地球水能的 10 倍，只要利用地球上 1% 的风能就能满足全球能源的需要。

风能是人类利用历史最悠久的能源和动力之一。在风力发电之前，风能主要用于风帆助航、风车提水、风力磨坊等。1745 年荷兰人 Edmund Lee 发明了旋转机头，获得了专利，并成功地应用于荷兰风力磨坊；1887 年冬，美国人布拉什 (Brush) 安装了第一台自动运行的风力发电机组；1891 年丹麦的 P L Cour 教授设计建造了世界上第一座风力发电试验站。这些人可以说是风力发电领域的先驱，也正是这些人开创了风力发电的新纪元。

风力发电历经创始期、徘徊发展期和迅猛发展期，如今，风力发电领域正随着航空、航天技术和空气动力学的发展以及计算机、复合材料的使用飞速发展，风力机结构日趋完善，可靠性不断提高，技术不断创新。

风力发电是目前世界上增长速度最快的能源。近几年风电装机容量每年持续增长 20% 以上。目前，全球约有 50 多个国家加入了风力发电的行列。我国风力发电在 20 世纪 80 年代开始发展，初期大多是独立运行的百瓦级风电机组，安装在边远、孤立的无电地区供农牧民使用。近年来，随着大型并网风力发电机组的引入和开发，在风资源丰富地区开始出现由多台风电机组组成的风电场并入地区电网供电，并以难以想象的速度发展。

前言

尽管我国近几年风力发电每年都大幅增长，但装备制造水平与装机总容量和发达国家相比还有较大差距，我国风力发电装机容量仅占全国电力装机的很小的一部分。风力发电发展潜力十分巨大。

正是在这种风力发电大发展的时代背景下，我们编写了本教材，希望对我国的风力发电人才培养乃至风力发电领域的广大工程技术人员有所帮助。

本书分为十章。其中第一、二、四、七、八、九章由马宏革、王亚非、陈淑英编写；第五、六章由李一默、周彦云、周建刚编写；第三、十章由张伟、巩真、王海静、赵继龙编写。书中的部分插图由周彦云绘制。


本书在编写过程中得到了包头轻工职业技术学院能源工程学院许多老师的大力支持和帮助，在此深表谢意！本书参阅了大量的文献、网上资料等相关资料，在此对其作者一并表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者
2012年8月



目 录



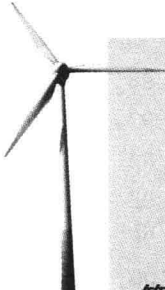
| | |
|-------------------------------|----|
| 第一章 风力发电机组工作原理概述 | 1 |
| 第一节 风力发电原理 | 1 |
| 一、风力发电原理概述 | 1 |
| 二、风力发电机组的分类 | 2 |
| 第二节 风力发电机组的组成 | 3 |
| 第三节 风力发电机组的性能评价 | 7 |
| 第二章 风轮系统 | 10 |
| 第一节 风轮的空气动力性能 | 10 |
| 一、风轮的空气动力性能参数 | 11 |
| 二、叶片的空气动力性能参数 | 13 |
| 三、叶片翼型的空气动力特性 | 14 |
| 第二节 叶片 | 15 |
| 一、叶片制造材料和主体结构 | 16 |
| 二、叶片的类型 | 20 |
| 三、叶片的运行 | 20 |
| 四、借助于风轮叶片的风力机功率调节 | 22 |
| 五、叶片的防雷保护 | 26 |
| 第三节 轮毂 | 27 |
| 一、轮毂结构 | 27 |
| 二、轮毂的安装和维护 | 29 |
| 第三章 机组传动系统 | 30 |
| 第一节 风力发电机组传动系统概述 | 30 |
| 一、风力发电机组总体传动形式 | 31 |
| 二、风力发电机组传动链形式 | 31 |
| 第二节 主轴及主轴承 | 33 |
| 第三节 联轴器 | 35 |

目 录

| | |
|---------------------------|-----------|
| 一、刚性胀套式联轴器 | 35 |
| 二、挠性联轴器 | 37 |
| 第四节 齿轮箱 | 38 |
| 一、风力发电机组齿轮箱的工作特性 | 38 |
| 二、风力发电机组齿轮箱 | 38 |
| 三、齿轮箱的主要零部件 | 40 |
| 四、齿轮箱的使用及其维护 | 48 |
| 第四章 机组液压传动系统 | 52 |
| 第一节 液压传动的工作原理 | 52 |
| 一、液压传动的基本工作原理 | 52 |
| 二、液压传动系统的组成 | 53 |
| 三、液压传动的优缺点 | 54 |
| 第二节 液压系统的基本组成 | 55 |
| 一、执行装置——液压泵 | 55 |
| 二、执行装置 | 56 |
| 三、控制调节装置 | 56 |
| 第三节 定桨距风力发电机组的液压系统 | 59 |
| 第四节 变桨距风力发电机组的液压系统 | 60 |
| 一、比例控制技术 | 61 |
| 二、液压系统图 | 63 |
| 三、液压泵站 | 65 |
| 四、变桨距控制 | 65 |
| 五、制动机构 | 67 |
| 第五章 机组偏航系统 | 68 |
| 第一节 偏航系统的技术要求 | 68 |
| 第二节 偏航系统的组成 | 70 |



目 录



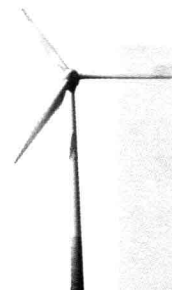
| | |
|------------------------------------|-----------|
| 一、偏航轴承 | 71 |
| 二、驱动装置 | 71 |
| 三、偏航制动器 | 72 |
| 四、偏航计数器 | 73 |
| 五、纽缆保护装置 | 73 |
| 第六章 机组刹车系统 | 74 |
| 第一节 空气动力刹车机构 | 74 |
| 一、叶尖扰流器 | 75 |
| 二、变桨距机构的空气刹车作用 | 76 |
| 第二节 主轴刹车机构 | 76 |
| 第三节 偏航制动器 | 77 |
| 第七章 风力发电机组的发电机及其他电气设备 | 79 |
| 第一节 发电机 | 79 |
| 一、发电机结构及基本工作原理 | 79 |
| 二、交流感应发电机 | 81 |
| 三、风力发电机特殊的工作条件 | 86 |
| 四、风力发电机的使用维护 | 88 |
| 五、风力发电机的常见故障 | 90 |
| 第二节 风力发电机组的其他电气设备 | 90 |
| 一、变频器 | 90 |
| 二、整流器 | 91 |
| 三、变频器中的中间环节 | 91 |
| 四、逆变器 | 92 |
| 第八章 机组控制系统 | 94 |
| 第一节 控制系统简介 | 94 |
| 第二节 风力发电机组控制系统的组成 | 96 |

目 录

| | |
|--------------------------------|------------|
| 一、控制系统输入信号 | 96 |
| 二、控制系统输出信号 | 97 |
| 第三节 控制系统的控制内容 | 98 |
| 一、风力发电机组的控制目标 | 98 |
| 二、正常运行的控制内容 | 98 |
| 三、风力发电机组的自动控制功能 | 100 |
| 四、控制系统工作流程 | 100 |
| 第四节 风力发电机组的现场信号采集 | 101 |
| 一、电量信号 | 101 |
| 二、温度信号 | 102 |
| 三、风向 | 102 |
| 四、风轮转速 | 103 |
| 五、风速 | 104 |
| 第九章 机组系统安全与安全保护系统 | 105 |
| 第一节 系统安全 | 105 |
| 一、系统设计中的系统安全 | 106 |
| 二、风力发电机组运行中的系统安全 | 106 |
| 三、控制系统的安全保护措施 | 108 |
| 四、控制系统安装和维护的技术要求 | 109 |
| 第二节 风力发电机组安全保护系统 | 111 |
| 一、机组控制运行安全保护系统 | 111 |
| 二、电气接地保护系统 | 112 |
| 三、微控制器抗干扰保护系统 | 113 |
| 四、多重保护安全系统 | 114 |
| 第十章 塔架与基础 | 118 |
| 第一节 塔架 | 118 |



目 录



| | |
|---------------------------------|-----|
| 一、塔架的结构与类型..... | 118 |
| 二、塔架的受力..... | 119 |
| 三、塔架设计需要注意的因素..... | 120 |
| 第二节 基础..... | 120 |
| 一、基础的结构与类型..... | 120 |
| 二、风力发电机组基础设计的前期准备工作及有关注意事项..... | 121 |
| 三、风力发电机组对基础的要求及基础的受力状况..... | 122 |
| 附录 某风电场检修规程 | 124 |
| 参考文献 | 145 |



第一章

风力发电机组工作原理概述

第一节 风力发电原理

风能利用就是将风的动能转化为机械能，再转化为其他能量形式。从古至今，风能利用有多种形式，古老而直接的形式是风帆船、风力磨坊、风车提水等。在今天的现代社会里，风能利用的主要形式是风力发电，当然也保存着一些古老的风能利用形式。风力发电利用的主要设备一般被称为风力发电机组。风力发电就是通过风力发电机组中的风轮和传动系统带动发电机发电，发出的交流电供给负载。当负载需用直流电时，可用直流发电机发电或者用整流设备将交流电转换成直流电。

一、风力发电原理概述

在蒸汽机出现之前，风力机械是动力机械的一大支柱。其后随着煤、石油、天然气的大规模开采和廉价电力的获得，各种曾经被广泛使用的风力机械，由于成本高、效率低、使用不方便等原因，无法与蒸汽机、内燃机和电动机等相竞争，渐渐被淘汰。但是，近半个世纪的实践表明，风力发电在解决偏远地区无电居民的用电方面起到了重要的作用。特别是 20 世纪 70 年代以后，由于几次世界范围的能源危机和环境污染问题，使人们对风能利用又重新重视起来，利用风力发电更是进入了一个蓬勃发展的阶段，在世界不同地区建立了许多大中型的风电场。

一般而言，风力发电的基本原理就是：风的流动驱动风力发电机组的风轮系统旋转，带动风力发电机组的传动系统，然后进一步带动风力发电机旋转产生电能，这样将风的动能转化为电能。风力发电的基本原理如图 1-1 所示。

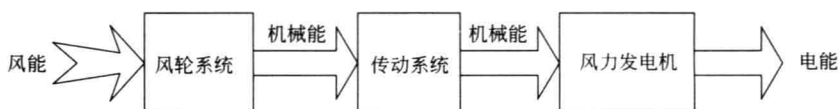


图 1-1 风力发电的基本原理

二、风力发电机组的分类

1. 水平轴式和垂直轴式风力发电机组

按照不同的分类标准，可以将风力发电机组分为不同的类型。如果根据风力机旋转主轴的布置方向，即主轴与地面相对位置来分类，可分为水平轴式风力机（图 1-2）和垂直轴式风力机。

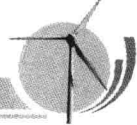


图 1-2 风电场中的水平轴式并网型风力发电机组

2. 离网型和并网型风力发电机组

如果按照风力发电机组发出电能的输送渠道，风力发电机组分为并网型风力发电机组和离网型风力发电机组。离网型风力发电机组一般容量比较小，结构相对简单，将不作为本书的主要内容。本书主要将并网型风力发电机组的结构及各部分的工作原理作为主要内容。

并网型风力发电机组的功能是将风中的动能转换成机械能，再将机械能转换为电能，输送到电网中。对并网型风力发电机组的基本要求是在当地风况、气候和电网条件下能够长期安全运行，取得最大的年发电量和最低的发电成本。但是，要想达到这一要求并不是轻而易举就能做到的，因为风的速度和方向是不断变化的，有时甚至非常激烈。而风中蕴含的能量与风速的立方成正比，也就是说，风速稍有变化，风能的变化就非常大。风能的变化会引起风能发电的主要承接设备——风力发电机组的各个部件承受快速变化的交变载荷，从而引起



这些部件的疲劳。所以疲劳强度是影响机组寿命的主要因素，因此如何利用现有手段，尽量减轻机组部件的疲劳程度是一个必须要解决的问题。所以风力发电机组对材料、结构、工艺和控制策略都提出了很高的要求。

3. 风力发电机组及其他风能利用机组

根据风力机本身用途分，可分为风力发电机组、风力提水机组和风力制热机等。这些种类的风力机，其共同之处就在于以风力为原动力驱动发电机、提水机械和制热机械。其实质都是把风能转化为各种形式的能量加以利用，或者储存起来。

4. 各种功率容量的风力发电机组

根据风力机额定功率大小分类，有4种类型，即微型（1kW以下）、小型（1~10kW）、中型（10~100kW）和大型（100kW以上）。目前，风力发电行业备受关注的是大型兆瓦级（1000kW以上）风力发电机组。无论是海上还是陆上，风力发电场使用的都是大型风力发电机组，而且有风力发电机组单机容量越来越大的发展趋势。但是小型乃至微型风力发电机组依然有它们的用武之地，这在后面的章节中会涉及。

按照各种不同的分类标准（如叶片的个数、形式、材质等），还可以将风力机组分为不同的类型，如按叶片的个数可将风力机组分为单叶片、双叶片、三叶片及多叶片风力机等。

第二节 风力发电机组的组成

现代并网型风力发电机组一般由风轮系统、机舱、塔架、传动系统、偏航系统、液压系统、刹车制动系统、发电机、控制与安全系统等组成。机组的类型不同，具体的组成也有所不同。图1-3和图1-4所示为大中型风力发电机组基本结构和实物图。

1. 风轮系统

风轮系统是获取风中能量的关键部件，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，通过轮毂将扭矩输入到传动系统。

风轮系统按叶片数可以分为单叶片、双叶片、三叶片和多叶片风轮。其中，三叶片风轮由于稳定性好，在并网型风力发电机组上得到广泛应用。按照叶片能否围绕其纵向轴线转动，可以分为定桨距风轮系统和变桨距风轮系统。

定桨距风轮系统叶片与轮毂固定连接，结构简单，但是承受的载荷较大。在风轮转速恒定的条件下，当风速增加超过额定风速时，气流与叶片分离，叶片将处于“失速”状态，风轮输出功率降低，发电机不会因超负荷而烧毁。变桨距风轮的叶片与轮毂通过轴承连接，虽然结构比较复杂，但能够获得较好的性能，而且叶片承受的载荷较小，重量轻。

另外，按转速的变化又可以分为定转速风轮系统和变转速风轮系统。变转速风轮系统的转速随风速变化，可以使风轮保持在最佳效率状态下运行，获取更多的能量，并减小因阵风引起的载荷。但是变转速发电机的结构复杂，需要通过交-直-交变流装置与电网频率保持同步，又消耗了一定的能量。

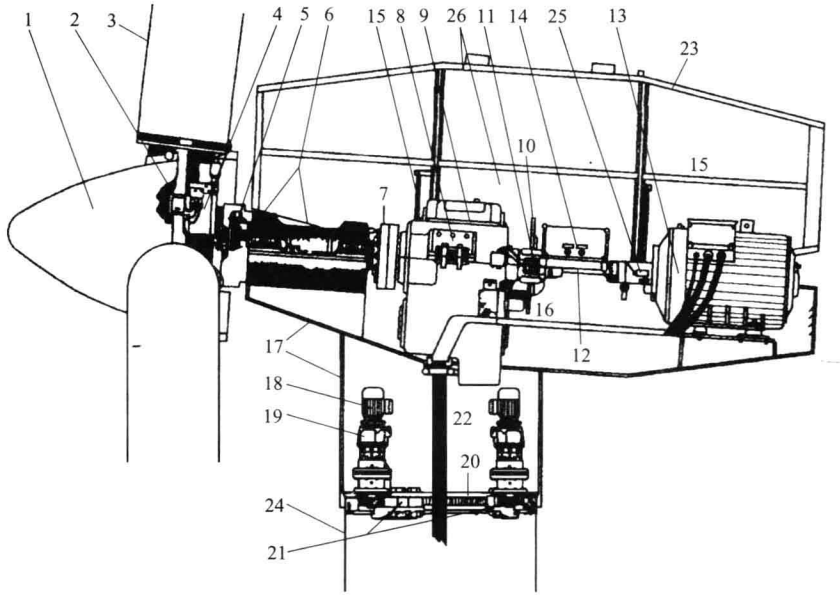


图 1-3 大中型风力发电机组基本结构

- 1—导流罩；2—轮毂；3—叶片；4—叶尖刹车控制系统；5—集电环；6—主轴；7—收缩盘；
 8—锁紧装置；9—齿轮箱；10—刹车片；11—刹车片厚度检测器；12—万向联轴器；
 13—发电机；14—安全控制箱；15—舱盖开启阀；16—刹车气缸；17—机舱；
 18—偏航电动机；19—偏航齿轮；20—偏航圆盘；21—偏航锁定；22—主电缆；
 23—风向风速仪；24—塔筒；25—振动传感器；26—舱盖

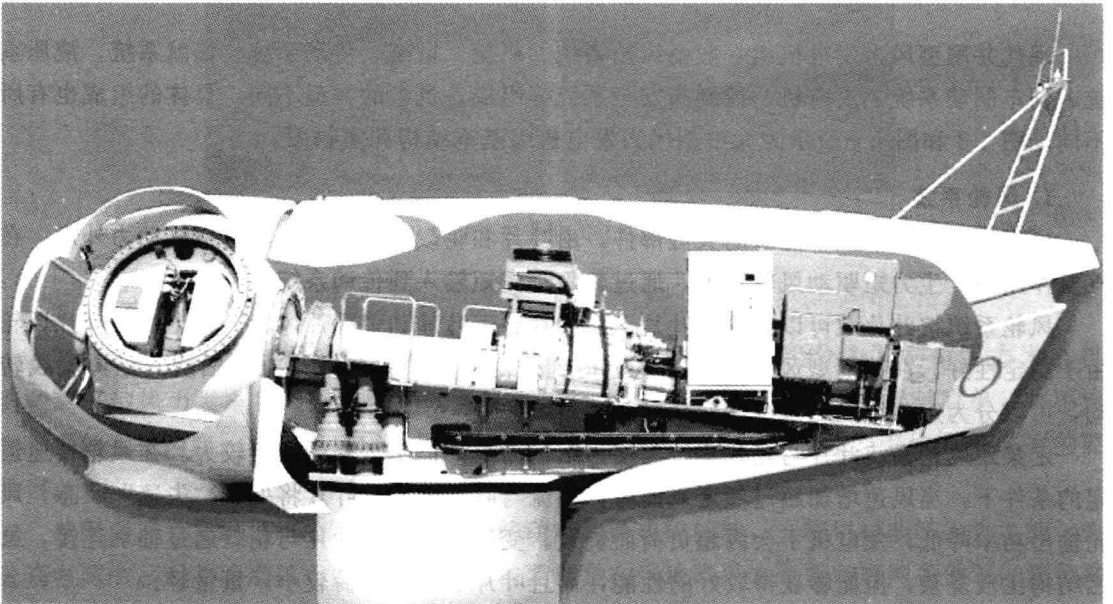


图 1-4 大中型风力发电机组基本结构实物图

2. 机舱

机舱由机舱底座（盘）和机舱罩组成，如图 1-5 所示。一般兆瓦级以上的风力发电机组

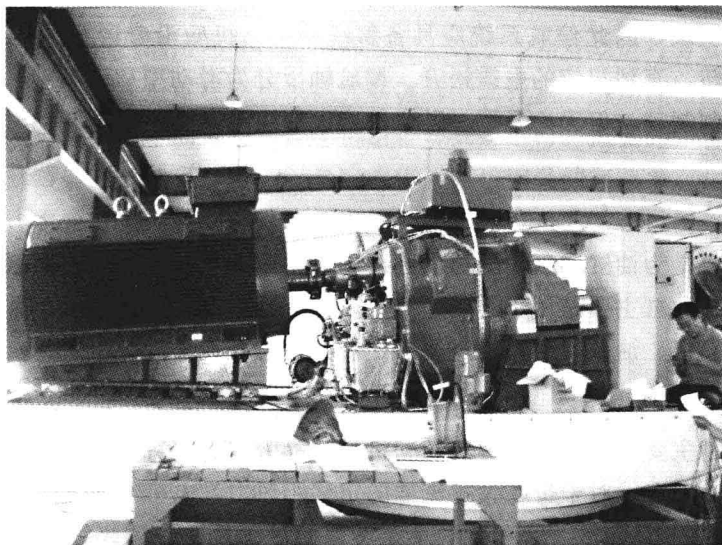


图 1-5 风力发电机组机舱部分

机舱底座（盘）上安装有齿轮箱、发电机、偏航系统、本地控制箱等机组重要部件。机舱罩后部的上方装有风速和风向传感器，舱壁上有隔音、通风装置，照明装置，小型起重设备等。

3. 塔架（筒）和基础

塔架（筒）的作用是支撑机舱达到所需要的高度。塔架（筒）内部安置位于机舱内的发电机、控制器和位于塔架（筒）底部电气设备（如变压器）之间的动力电缆、控制和通信电缆，还装有供操作人员上下机舱的扶梯。有的大型机组还设有电梯。塔架结构有筒形和桁架两种形式，所以，有时塔架也称为塔筒。

塔架（筒）的下部为风力发电机组的基础部分。基础为钢筋混凝土结构，根据当地地质情况设计成不同的形式。其中心预置与塔架连接的基础部件，保证将风力发电机组牢牢固定在基础上。基础周围还要设置预防雷击的接地系统。

4. 传动系统

一般地，传动系统包括主轴、齿轮箱和联轴器。轮毂与主轴固定连接，将风轮的扭矩传递给齿轮箱。有的风力发电机组将主轴与齿轮箱的输入轴合为一体。大型风力发电机组风轮的转速一般在 $10\sim 30\text{r/min}$ 范围内，通过齿轮箱增速到发电机的同步转速为 1500r/min （或 1000r/min ），经齿轮箱的高速输出轴、联轴器驱动发电机旋转。

5. 偏航系统

由于风向经常改变，如果风轮扫掠面和风向不垂直，则不但功率输出减少，风力发电机组各部件尤其是风轮系统和塔架部分承受的载荷比正常工作时更加巨大。偏航系统的功能就是跟踪风向的变化，驱动机舱围绕塔架中心线旋转，使风轮扫掠面与风向保持垂直。风向标是偏航系统的传感器，将风向信号发给控制系统，经过与风轮的方位进行比较后，发出指令给偏航电动机或液压马达，驱动偏航系统的小齿轮沿着与塔架顶部固定的大齿圈移动，经过偏航轴承使机舱转动，直到风轮对准风向后停止。

机舱在反复调整方向的过程中,有可能发生沿着同一方向累计转了许多圈,造成机舱与塔架之间的电缆扭绞,因此偏航系统应具备解缆功能,机舱沿着同一方向累计转了若干圈后,必须反向回转,直到扭绞的电缆松开。偏航轴承分为滑动型和滚动型,有的具备自锁功能,有的设置强制制动。但无论是哪一种,都应设置阻尼,满足机舱转动时平稳不发生振动的要求。

6. 液压系统

液压系统主要是为油缸和制动器提供必要的驱动压力,有的强制润滑型齿轮箱也需要液压系统供油润滑。油缸主要是用于驱动定桨距风轮的叶尖制动装置或变桨距风轮的变距机构等。液压站由电动机、油泵、油箱、过滤器、管路及各种液压阀等组成。

7. 刹车制动系统

刹车制动系统主要分为空气动力制动和机械制动两部分,有的风力发电机组只有机械制动,没有空气动力刹车。对于带叶尖扰流器的定桨距风力发电机组,定桨距风轮的叶尖扰流器旋转约 90° ,或变桨距风力发电机组,变桨距风轮处于顺桨位置,均是利用空气阻力使风轮减速或停止,属于空气动力制动。在主轴或齿轮箱的高速输出轴上设置的盘式制动器,属于机械制动。通常大型风力发电机组运行时,需要让机组停机,首先要采用空气制动,使风轮减速,再采用机械制动使风轮停转。

8. 发电机

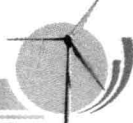
发电机将风轮的机械能转换为电能,分为异步发电机和同步发电机两种。异步发电机的转速取决于电网的频率,只能在同步转速附近很小的范围内变化。当风速增加使齿轮箱高速输出轴转速达到异步发电机同步转速时,机组并入电网,向电网送电。风速继续增加,发电机转速也略为升高,增加输出功率。达到额定风速后,由于风轮的调节,稳定在额定功率不再增加。反之风速减小,发电机转速低于同步转速时,则从电网吸收电能,处于电动机状态,经过适当延时后应脱离电网。

有的风力发电机组为了充分利用低风速时的风能,降低风轮转速,采用了可变极数的异步发电机,如从4极1500r/min变为6极1000r/min,但是这种发电机仍然可以看作是基本上恒定转速的。

普通异步发电机结构简单,可以直接并入电网,无需同步调节装置,缺点是风轮转速固定后效率较低,而且在交变的风速作用下,承受较大的载荷。为了克服这些不足之处,相继开发出了高滑差异步发电机和变转速双馈异步发电机。

同步发电机的并网一般有两种方式:一种是准同期直接并网,这种方法在大型风力发电机组中极少采用;另一种是交-直-交并网。近年来,由于大功率电子器件的快速发展,变速恒频风力发电机组得到了迅速的发展,同步发电机也在风力发电机中得到广泛的应用。

为了减少齿轮箱的传动损失和发生故障的概率,有的风力发电机组采用风轮直接驱动同步多极发电机,又称无齿轮箱风力发电机组。其发电机转速与风轮相同,而且随着风速变化,风轮可以转换更多的风能,所承受的载荷较小,减轻部件的重量。缺点是这种发电机结构复杂,制造工艺要求很高,需要变流装置才能与电网频率同步,经过转换又损失了能量。



9. 控制系统

控制系统包括控制和监测两部分，控制部分又分为手动和自动运行方式。当机组处于手动运行方式时，运行维护人员可在现场根据需要进行手动控制，自动控制应该在无人值守的条件下实施运行人员设置的控制策略，保证机组正常安全运行。监测部分将各种传感器采集到的数据送到控制器，经过处理作为控制参数或作为原始记录储存起来，在机组控制器的显示屏上可以查询，也要送到风电场中央控制室的计算机监控系统。通过网络或电信系统，现场数据还能传输到业主所在城市的办公室。

10. 安全保护系统

安全保护系统要保证机组在发生非正常情况时立即停机，预防或减轻故障损失。一般地，风力发电机组的关键部件都采用了“失效-保护”的设计原则。如制动系统的叶尖制动片在运行时是利用液压系统液压油的压力克服弹簧的作用使叶尖制动片与叶片外形组合成一个整体，同时保持机械制动器的制动钳处于松开状态，一旦发生液压系统失灵或电网停电（此时，风力发电机组需要紧急停车），液压系统液压油失去压力，叶尖制动片和制动钳将在弹簧作用下立即使叶尖制动片旋转约 90° ，使风轮因气动刹车（叶尖制动片的作用）迅速减速，同时制动钳变为夹紧状态，风轮在两种制动装置的同时作用下被制动停止旋转。

第三节 风力发电机组的性能评价

1. 风轮直径 D

风轮直径是指风轮在旋转平面上投影圆的直径。

风力发电机组最主要的参数是风轮直径（或风轮扫掠面积）和额定功率，为产品型号的组成部分。风轮直径（或风轮扫掠面积）说明机组能够在多大的范围内获取风中蕴含的能量，是机组能力的基本标志。

2. 额定功率 P_N

风力发电机组额定功率指的是正常工作条件下，风力发电机组能够达到的最大连续输出功率。

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。

3. 功率曲线

在风力发电机组产品样本中都有一个功率曲线图，如图 1-6 所示，横坐标是风速，纵坐标是机组的输出电功率。功率曲线主要分为上升和稳定两部分。机组开始向电网输出功率时的风速称为**切入风速**。随着风速的增大，输出功率上升，输出功率大约与风速的立方成正比，达到额定功率值时的风速称为**额定风速**。此后风速再增加，由于风轮的调节，功率保持不变。定桨距风轮因失速有个过程，超过额定风速后功率略有上升，然后又下降。如果风速