

高职高专新能源类专业规划教材

风力发电机组 运行与维护

◆ 邹振春 赵丽君 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件
及模拟试卷等

高职高专新能源类专业规划教材

风力发电机组运行与维护

主 编 邹振春 赵丽君
参 编 雷辉云 马沙沙
主 审 邢作霞

常州大学图书馆
藏书章



机械工业出版社

国内外风力发电行业发展迅猛,需要大批的专业技术人才。为培养风力发电行业所需的专业技术人才,特编写此书。本书依据风力发电行业相关就业岗位能力的要求,选取的内容与风力发电行业密切结合,旨在培养风力发电技术紧缺人才。本书较全面地涵盖了风力发电机组运行与维护的相关技术知识,主要包括风轮、传动系统与制动系统、发电系统、偏航系统、液压系统、变桨距系统、控制系统、安全保护系统、支撑系统以及风力发电机组的安装、调试、运行及维护相关技术知识。

本书可作为高职高专院校及应用型本科院校的风力发电工程技术、风电系统运行与维护及相关专业的教材,也可作为风力发电技术人员的培训教材和自学参考书。

为方便教学,本书提供免费微课视频、电子课件及习题参考答案。凡选用本书作为授课用教材的学校,均可来电索取,咨询电话:010-88379375; Email: cmpgaozhi@sina.com。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组运行与维护/邹振春,赵丽君主编. —北京:机械工业出版社,2017.1

高职高专新能源类专业规划教材

ISBN 978-7-111-55816-3

I. ①风… II. ①邹…②赵… III. ①风力发电机-发电机组-运行-高等职业教育-教材②风力发电机-发电机组-维修-高等职业教育-教材
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第002840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:于宁 责任编辑:于宁 高亚云

责任校对:樊钟英 封面设计:陈沛

责任印制:李昂

河北鑫宏源印刷包装有限责任公司印刷

2017年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.25印张·270千字

0001-1900册

标准书号:ISBN 978-7-111-55816-3

定价:26.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前言

风力发电起源于20世纪70年代,技术成熟于80年代,自90年代以来进入了大发展阶段,成为新能源中的佼佼者。风能作为一种清洁的可再生能源,对于解决能源紧张和环境污染等问题有积极作用,越来越受到世界各国的重视。

目前我国的风力发电行业正处于高速发展阶段,风力发电行业从业人员紧缺,满足风力发电行业安装、运行、维护及生产等专业人员需求的图书较少,本书兼顾教学及工程应用需要,注重学用结合,紧密结合风电行业所需的基础知识,力求由浅入深,通俗易懂,注重应用。

本书依据职业岗位能力的要求,从应用角度出发,系统地介绍了现代风力发电机组的风轮、传动系统与制动系统、发电系统、偏航系统、液压系统、变桨距系统、控制系统、安全保护系统和支撑系统的结构、工作原理、生产工艺、调试、运行、维护及风力发电机组的安装、调试、运行及维护等相关知识。每章后均附有小结及习题。

本书由承德石油高等专科学校邹振春、赵丽君担任主编。参加编写的还有中电(三都)新能源有限公司雷辉云、北京金风科创风电设备有限公司马沙沙。其中,邹振春负责编写绪论、第1章、第3章和第8章,赵丽君负责编写第2章、第5章和第7章,雷辉云负责编写第4章和第6章,马沙沙负责编写第9章和第10章。全书由邹振春统稿。本书由沈阳工业大学邢作霞副教授主审,她对本书的内容、结构及文字方面提出了许多宝贵的建议,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不足和错漏之处,恳请读者批评指正。

编者

前言		2.4 制动系统	35
绪论	1	2.4.1 空气动力制动系统	35
0.1 风力发电机组的结构	2	2.4.2 机械制动系统	38
0.2 风力发电机组的运行	4	2.4.3 风力发电机组制动器	39
0.3 风力发电机组的维护	5	2.5 传动系统与制动系统的维护	41
第1章 风轮	6	2.5.1 传动系统的维护	41
1.1 风轮的基本参数	6	2.5.2 制动系统的维护	42
1.2 叶片的基本结构	8	本章小结	43
1.2.1 国内外典型叶片	8	习题	43
1.2.2 叶片结构	10	第3章 发电系统	44
1.2.3 附属装置	12	3.1 发电机	44
1.3 叶片的几何参数	13	3.1.1 发电机的分类	44
1.4 叶片的生产工艺	14	3.1.2 风力发电用发电机的特殊性	44
1.4.1 叶片的载荷	14	3.2 异步发电机	45
1.4.2 叶片的材料	15	3.2.1 异步发电机的结构	45
1.4.3 叶片的制造工艺	15	3.2.2 异步发电机的工作原理	46
1.4.4 叶片的检验	17	3.2.3 异步发电机的并网方式	46
1.5 轮毂	19	3.3 双馈异步发电机	49
1.5.1 轮毂的结构	19	3.3.1 双馈异步发电机的工作原理	49
1.5.2 轮毂与叶片的连接	20	3.3.2 双馈异步发电机的运行状态	51
1.5.3 轮毂材料与工艺	20	3.3.3 双馈异步发电机的特性	51
1.6 风轮的维护	21	3.4 同步发电机	52
本章小结	21	3.4.1 同步发电机的结构	52
习题	22	3.4.2 同步发电机的工作原理	53
第2章 传动系统与制动系统	23	3.4.3 同步发电机的特性	54
2.1 主轴	23	3.4.4 同步发电机的并网方式	54
2.1.1 主轴的结构	23	3.5 永磁同步发电机	56
2.1.2 主轴的加工工艺	24	3.5.1 永磁同步发电机的结构	56
2.1.3 主轴的参数	25	3.5.2 永磁同步发电机的特点	58
2.2 齿轮箱	27	3.6 风力发电用发电机的选型	58
2.2.1 齿轮箱的组成	27	3.7 发电系统的维护	59
2.2.2 齿轮传动系统	29	本章小结	60
2.2.3 齿轮的材料和加工工艺	32	习题	60
2.3 传动系统中的联轴器	32	第4章 偏航系统	61
2.3.1 低速轴联轴器	33	4.1 偏航系统概述	61
2.3.2 高速轴联轴器	34	4.1.1 偏航系统的组成	61



4.1.2 偏航系统的运行条件	62	7.2.2 变桨距风力发电机组的控制 系统	107
4.2 偏航检测	63	7.2.3 变速风力发电机组的控制系统	114
4.2.1 对风装置	63	7.3 风电场的监控和通信系统	119
4.2.2 偏航测量及驱动	65	7.3.1 风电场的监控系统	119
4.3 机械传动	66	7.3.2 典型风电场的通信网络结构	124
4.3.1 偏航电动机	66	7.4 控制系统的维护	130
4.3.2 偏航减速机构	66	本章小结	131
4.3.3 偏航小齿轮及偏航齿圈	67	习题	132
4.3.4 偏航制动机构	68	第8章 安全保护系统	133
4.4 扭缆保护装置	69	8.1 安全保护系统简介	133
4.5 偏航系统的运行与维护	70	8.2 雷电安全保护	133
4.5.1 偏航系统的运行	70	8.2.1 机舱的雷电安全保护	134
4.5.2 偏航系统的维护	71	8.2.2 叶片的雷电安全保护	135
本章小结	72	8.2.3 控制系统的雷电安全保护	136
习题	72	8.3 运行安全保护	136
第5章 液压系统	73	8.4 控制系统保护	137
5.1 定桨距风力发电机组的液压系统	73	8.4.1 紧急停机安全链保护	137
5.1.1 液压系统的组成	73	8.4.2 微机抗干扰保护	137
5.1.2 液压系统的工作过程	75	8.4.3 电网掉电保护	140
5.2 变桨距风力发电机组的液压系统	76	8.5 接地保护	140
5.2.1 比例控制技术	76	8.5.1 接地	140
5.2.2 液压系统的工作过程	78	8.5.2 机组的接地保护	141
5.3 液压系统的维护	80	8.6 过速保护	141
本章小结	82	本章小结	142
习题	82	习题	142
第6章 变桨距系统	83	第9章 支撑系统	143
6.1 变桨距系统的工作原理及组成	83	9.1 塔架	143
6.1.1 变桨距控制的工作原理	83	9.1.1 塔架的结构与类型	143
6.1.2 变桨距系统的组成	84	9.1.2 塔架的参数	144
6.2 液压变桨距系统	85	9.1.3 塔架的制造工艺	145
6.3 电动变桨距系统	87	9.1.4 塔架的防腐	146
6.4 变桨距系统的维护	91	9.2 基础	146
本章小结	92	9.3 机舱与机舱座	148
习题	93	9.3.1 机舱	148
第7章 控制系统	94	9.3.2 机舱座	151
7.1 风力发电机组的控制系统	94	9.4 支撑系统的维护	153
7.1.1 控制系统的基本组成	94	本章小结	154
7.1.2 控制系统的功能	95	习题	154
7.1.3 风力发电机组的控制要求	96	第10章 风力发电机组的安装、调试、 运行及维护	155
7.2 典型风力发电机组的控制系统	98	10.1 风力发电机组的安装	155
7.2.1 定桨距风力发电机组的控制 系统	98		



10.1.1 风力发电机组的装配	155	10.3.3 维护工作注意事项	165
10.1.2 典型风力发电机组的安装	157	10.3.4 运行维护记录的填写	166
10.1.3 风力发电机组的调试	159	10.4 机组的常见故障及故障排除	166
10.2 风电场的运行	160	本章小结	171
10.3 风电场的维护	161	习题	172
10.3.1 机组的常规巡检	161	参考文献	173
10.3.2 年度例行维护	163		

绪 论

近 20 年来,发达国家在风力发电技术领域已取得巨大的成就。并网运行的风力发电机组单机容量从最初的数十千瓦级发展到兆瓦级;控制方式从基本单一的定桨距失速控制向变桨距和变速恒频发展,预计在最近的几年内将推出智能型风力发电机组;运行可靠性从 20 世纪 80 年代初的 50%,提高到目前的 98% 以上,并且在风电场运行的风力发电机组已全部可以实现集中控制和远程控制。从今后的发展趋势来看,风电场将从内陆移到海上,其发展空间将更加广阔。

风力发电机组是将风能转化为电能的装置,按其容量不同,可分为小型、中型和大型风力发电机组;按其主轴与地面的相对位置不同,又可以分为水平轴风力发电机组和垂直轴风力发电机组。

近 10 年来,风力发电机组的主流机型主要有三种,即定桨距失速型机组、变桨距机组(如图 0-1 所示)和基于变速恒频技术的变速机组。

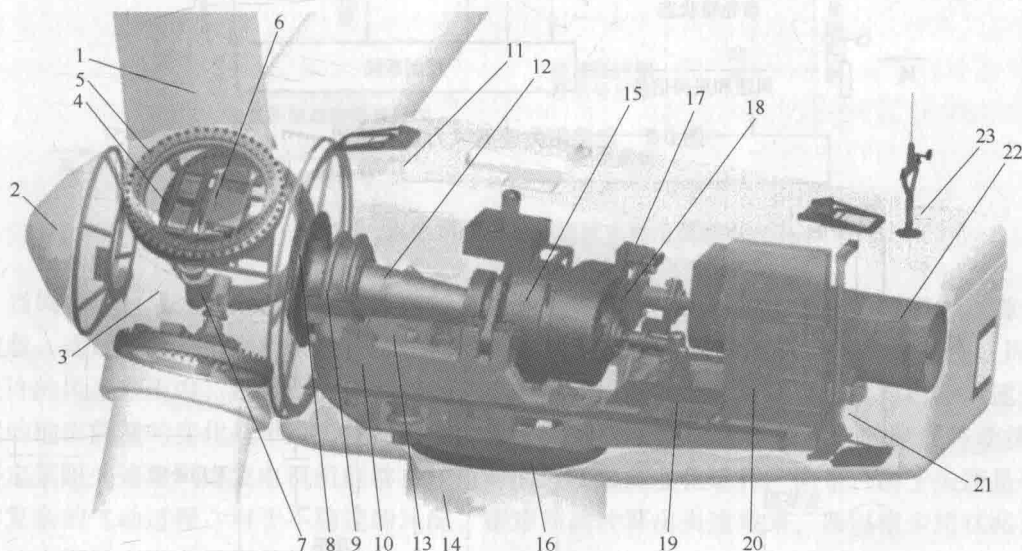


图 0-1 典型风力发电机组结构

- 1—叶片 2—导流罩 3—轮毂 4—变桨距电源 5—叶片轴承 6—变桨距控制柜 7—变桨距电动机
8—风轮锁定盘 9—主轴轴承座 10—机舱底盘 11—机舱罩 12—主轴 13—偏航电动机
14—塔架 15—齿轮箱 16—偏航轴承 17—高速轴刹车 18—联轴器 19—液压站
20—主控柜 21—提升机 22—发电机 23—风速风向仪

主流的各种机型风轮均采用水平轴、三个叶片,上风向布置,额定转速约为 27r/min ;舱内机械采用沿轴线布置的结构;控制系统均使用微处理器,前两种机组采用了晶闸管恒流



软切入技术。定桨距失速型机组用叶尖扰流器作为气动制动。

0.1 风力发电机组的结构

风力发电机组是实现由风能到机械能和由机械能到电能两个能量转换过程的装置。风轮系统实现了从风能到机械能的能量转换，发电系统则实现了从机械能到电能的能量转换过程。

大中型风力发电机组结构复杂，定桨距失速型风力发电机组的结构原理如图 0-2 所示，变桨距风力发电机组的结构原理如图 0-3 所示，双馈异步变速恒频风力发电机组的结构原理如图 0-4 所示，永磁同步变速恒频风力发电机组的结构原理如图 0-5 所示。

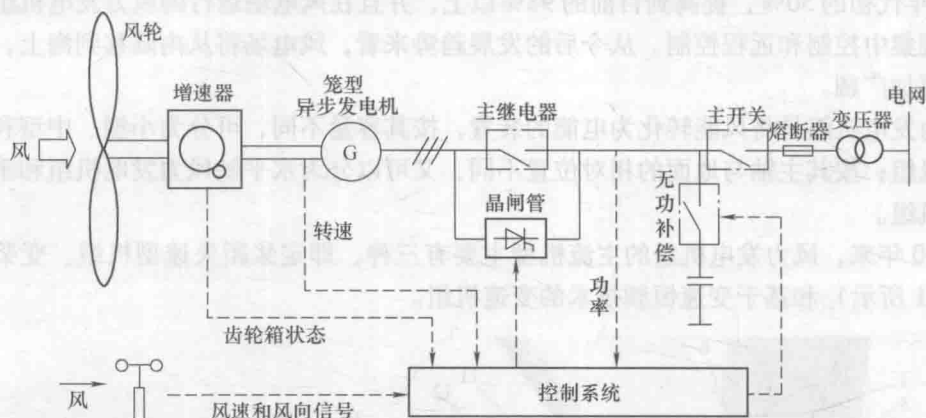


图 0-2 定桨距失速型风力发电机组

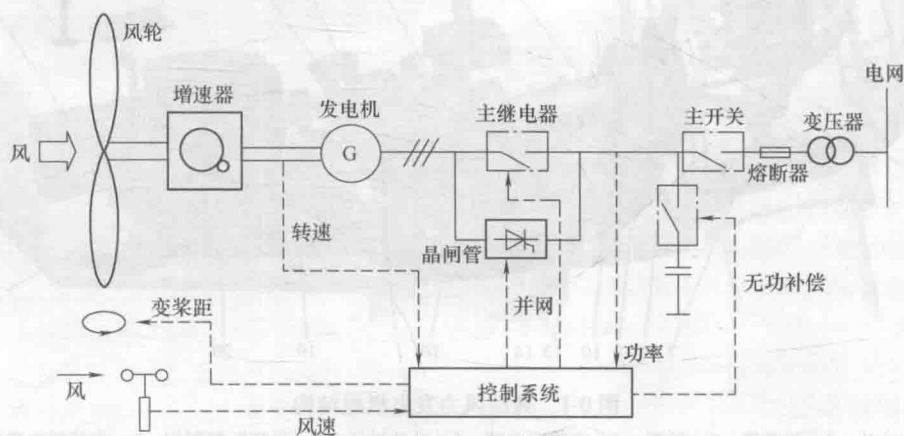


图 0-3 变桨距风力发电机组

1. 定桨距失速型风力发电机组

定桨距失速型风力发电机组的基本原理是利用叶片翼型本身的失速特性，主要解决风力发电机组的并网问题和运行安全性与可靠性问题，采用了软并网技术、空气动力制动技术、偏航与自动解缆技术。

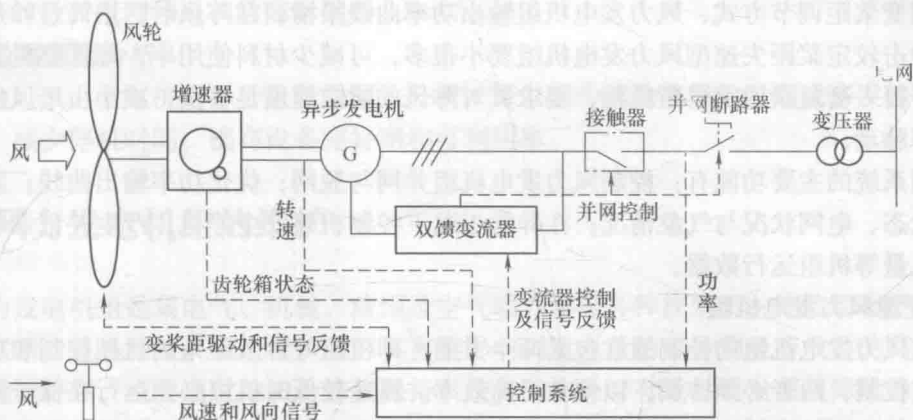


图 0-4 双馈异步变速恒频风力发电机组

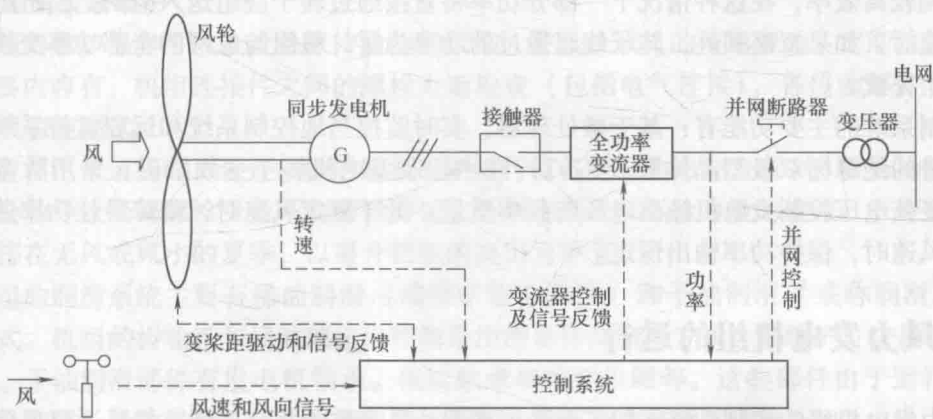


图 0-5 永磁同步变速恒频风力发电机组

当风速超过风力发电机组额定风速时, 为确保风力发电机组输出功率不再增加, 避免机组过载, 通过空气动力学的失速特性, 使叶片发生失速, 从而控制机组的功率输出。因此, 在允许的风速范围内, 定桨距失速型风力发电机组的控制系统在运行过程中对由于风速变化引起的输出能量的变化是不进行任何控制的, 大大简化了控制技术和相应的伺服传动技术, 使得定桨距失速型风力发电机组能够在较短时间内实现商业化运行。但是, 由于失速是一个非常复杂的气动过程, 对于不稳定的风况, 很难精确计算出失速效果, 所以很少用在兆瓦级以上的大型风力发电机组的控制上。

控制系统的主要功能有: 控制风力发电机并网与脱网; 自动相位补偿; 监视机组的运行状态、电网状况与气象情况; 在异常工况下控制机组安全停机; 产生并记录风速、功率、发电量等机组运行数据。

2. 变桨距风力发电机组

变桨距调节从空气动力学角度考虑, 当风速超过风力发电机组额定风速时, 为确保机组输出功率不再增加, 避免机组过载, 通过改变叶片节距角和利用空气动力学的失速特性, 使叶片吸收风功率减少或者发生失速, 从而控制机组的功率输出, 使输出功率保持稳定。



采用变桨距调节方式,风力发电机组输出功率曲线平滑,在阵风时,塔筒、叶片及基础受到的冲击较定桨距失速型风力发电机组要小很多,可减少材料使用率,降低整机重量。其缺点是需要一套复杂的变桨距机构,要求其对阵风的响应速度足够快,减小由于风的波动引起的功率脉动。

控制系统的主要功能有:控制风力发电机组并网与脱网;优化功率输出曲线;监视机组的运行状态、电网状况与气象情况;在异常工况下控制机组安全停机;产生并记录风速、功率、发电量等机组运行数据。

3. 变速风力发电机组

变速风力发电机组的控制通常包括两个方面,即机组叶片节距角的机械控制和功率变流器的电气控制,两者必须协调,以便获得高效率。风速较低时机组必须运行在低于同步转速的状态才能达到较高效率,为维持发电机机械转矩与电磁转矩的平衡,转子绕组从电网吸收一定数量的功率再通过定子绕组送回电网;风速较高时机组需要运行在高于同步转速的状态才能达到较高效率,在这种情况下一部分功率将直接通过转子绕组送入电网;当机组运行在同步转速时,如果忽略损耗,转子绕组通过的功率为零,机组与电网的全部功率交换都通过定子绕组完成。

控制系统的主要功能有:基于微处理器,实时监控当地控制系统和远程监控系统,以及利用先进的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)技术控制发电机转子变频励磁;采用脉宽调制技术产生正弦电压控制发电机输出电压与频率质量;低于额定风速时,跟踪最佳功率曲线;高于额定风速时,保持功率输出恒定。

0.2 风力发电机组的运行

风力发电机组的控制系统采用工业微处理器,自身抗干扰能力强,并且通过通信线路与计算机相连,可进行远程控制,降低了运行的工作量。所以风力发电机组的运行工作就是进行远程故障排除、运行数据统计分析及故障原因分析。

1. 远程故障排除

风力发电机组的大部分故障可以进行远程复位控制和自动复位控制。机组运行状态和电网质量好坏是息息相关的,为了进行双向保护,机组设置了多重保护故障,如电网电压高、低,电网频率高、低等,这些故障是可自动复位的。由于风能的不可控制性,过风速的极限值故障也可自动复位。过温度的限定值故障也可自动复位,如发电机温度高,齿轮箱温度高、低,环境温度低等。

除了自动复位的故障以外,其他可远程复位控制的故障的引起原因有:①风机控制器误报;②各检测传感器误动作;③控制器认为风机运行不可靠。

2. 运行数据统计分析

对风电场设备在运行中发生的情况进行详细的统计分析是风电场管理的一项重要内容。通过运行数据的统计分析,可对运行维护工作进行考核量化,也可为风电场的设计、风资源的评估及设备选型提供有效的理论依据。

每个月的发电量统计报表是运行工作的重要内容之一,其真实可靠性直接和经济效益挂钩。其主要内容有:机组的月发电量,场用电量,机组的设备正常工作时间,故障时间,标



准利用小时数, 电网停电、故障时间等。

3. 故障原因分析

通过对风力发电机组各种故障的深入分析, 可以减少排除故障的时间或多发性故障的发生次数, 减少停机时间, 提高设备完好率和可利用率。

0.3 风力发电机组的维护

风力发电机组是集电气、机械、液压及空气动力学等各种技术于一体的综合产品, 各部分紧密联系, 息息相关。机组维护的好坏直接影响到发电量的多少和经济效益的高低; 机组本身性能的好坏, 也要通过维护检修来保持, 维护工作及时有效可以发现故障隐患, 减少故障的发生, 提高风机效率。

风力发电机组的维护可分为定期检修维护和日常排故维护两种方式。

1. 定期检修维护

定期的维护保养可以让设备保持最佳的状态, 并延长风机的使用寿命。定期检修维护工作的主要内容有: 机组连接件之间的螺栓力矩检查 (包括电气连接), 各传动部件之间的润滑和各项功能测试。

机组在正常运行时, 各连接件的螺栓长期运行在各种振动的合力当中, 极易松动, 为了避免因松动导致局部螺栓受力不均而被剪切, 必须定期进行螺栓力矩的检查。一般螺栓力矩检查安排在无风或风小的夏季, 以避开机组的高出力季节。

机组的润滑系统主要有稀油润滑 (或称矿物油润滑) 和干油润滑 (或称润滑脂润滑) 两种方式。机组的齿轮箱和偏航减速齿轮箱采用的是稀油润滑方式, 其维护方法是补加和采样化验。干油润滑部件有发电机轴承、偏航轴承和偏航齿圈等。这些部件由于运行温度较高, 极易变质, 导致轴承磨损, 定期检修维护时, 必须每次都对其进行补加。

定期检修维护的功能测试主要有超速测试、紧急停机测试、液压系统各元件定值测试、振动开关测试及扭缆开关测试, 还可以对控制器的极限定值进行一些常规测试。定期检修维护还要检查液压油位, 各传感器有无损坏, 传感器的电源是否可靠工作, 闸片及闸盘的磨损情况等方面。

2. 日常排故维护

风力发电机组在运行当中, 也会出现一些必须到现场去处理的故障, 因此需进行常规现场维护。首先要仔细观察风机内的安全平台和梯子是否牢固, 有无连接螺栓松动, 控制柜内有无糊味, 电缆线有无位移, 夹板是否松动, 扭缆传感器拉环是否磨损破裂, 偏航齿圈的润滑是否干枯变质, 偏航齿轮箱、液压油及齿轮箱油位是否正常, 液压站的表计压力是否正常, 转动部件与旋转部件之间有无磨损, 各油管接头有无渗漏, 齿轮油及液压油的过滤器的指示是否在正常位置等。其次是听, 听控制柜里是否有放电的声音, 若有声音则可能是有接线端子松动或接触不良, 须仔细检查; 听偏航时的声音是否正常, 有无干磨的声响; 听发电机轴承有无异响; 听齿轮箱有无异响; 听闸盘与闸垫之间有无异响; 听叶片的切风声音是否正常。最后, 清理工作现场, 并将液压站各元件及管接头擦净, 以便今后观察有无泄漏。

风力发电机组的核心部件是风轮（叶轮），风轮是将风能转变为机械能的核心装置，主要由叶片、轮毂及其连接件组成，此外还有相关的控制机构。风轮的作用是把风的动能转换成风轮的旋转机械能。风轮应尽可能设计得最佳，以提高其能量转换效率。静止状态的风轮和以非常高的转速旋转的风轮都不会产生功率，在这两种极端情况之间，有一个使风力发电机组获得最大功率的转速。

本章首先介绍风轮的基本参数，其次认识叶片的基本结构和几何参数、了解叶片的生产工艺，最后认识轮毂的结构和材料，了解风轮的维护。

1.1 风轮的基本参数

风力发电机的空气动能主要表现为风轮的空气动力性能，风轮的空气动力性能主要取决于它的气动设计。气动设计时，必须先确定总体参数（如图 1-1 所示）。

1. 叶尖速比 λ

叶尖速比 λ 是风轮的叶尖线速度与额定风速之比，是风轮气动设计的一个重要参数，与叶片数及实度有关。叶尖速比在 5~15 时，风能利用率较高。实际用于风力发电的 λ 通常取 6~8。

2. 叶片数

风轮叶片数是组成风轮的叶片个数，用 B 表示。风轮的叶片数取决于风轮的叶尖速比，具体对应关系见表 1-1。

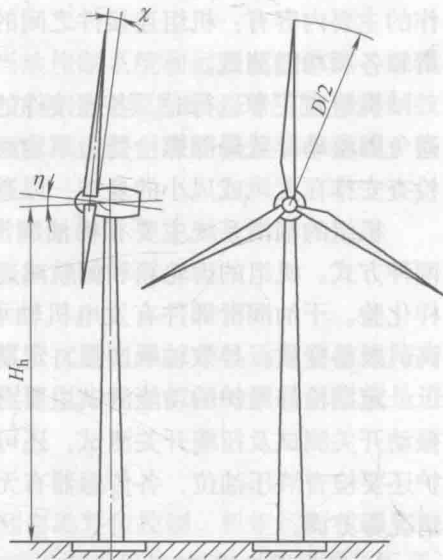


图 1-1 三叶片风轮几何参数

表 1-1 叶片数与叶尖速比的关系

叶尖速比	叶片数	风力发电机组类型
1~2	4~20	低速
3~4	3~8	中速
5~8/9~15	2~4/1~2	高速

一般来说，要得到很大的输出转矩就需要较大的风轮实度，如美国早期的多叶片风力提水机。现代风力发电机组风轮实度较小，一般只需要 1~3 个叶片。叶片数多的风力发电机组在低叶尖速比运行时有较高的风能利用率，即有较大的转矩，而且起动风速低，因此适用



于提水。而叶片数少的风力发电机组则在高叶尖速比运行时有较高的风能利用率，但起动风速高，因此适用于风力发电。

从经济角度考虑，一叶片、两叶片风轮比较合适，但三叶片风轮的平衡简单，风轮的动态载荷小，机组系统运行平稳，基本上消除了系统的周期载荷，输出转矩稳，受力平衡好，轮毂简单。两叶片风轮噪声大、运转不平稳、为稳定风轮运转配套设备成本高，与三叶片风轮相比气动效率降低 2% ~ 3% 左右，轮毂也比较复杂。

3. 风轮直径

风轮直径是风轮旋转时的风轮外圆直径，用 D 表示。风轮直径主要取决于两个因素：风力发电机组输出功率和额定风速。

4. 风能利用率

风力发电机组从自然风能中吸取能量的大小程度用风能利用率 C_p 表示

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v^3 S} \quad (1-1)$$

式中， P 是风力发电机组实际获得的轴功率，单位为 W； ρ 是空气密度，单位为 kg/m^3 ； S 是风轮的扫风面积，单位为 m^2 ； v 是来流风速（或上游风速），单位为 m/s 。

不同类型的风轮 C_p 值是不同的，并网型风力发电机组的 C_p 值一般都在 0.4 以上。

5. 风轮面积

风轮面积一般指的是风轮扫掠面积，用 A 表示

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (1-2)$$

式中， D 是风轮直径。

6. 转轴

转轴即为风轮的旋转轴。

7. 回转平面

回转平面为垂直于转轴线的平面，叶片在该平面内旋转。

8. 风轮锥角

风轮锥角是叶片与旋转轴垂直的平面的夹角（如图 1-2 所示），用 χ 表示。风轮锥角的作用是在风轮运行状态下，减少离心力引起的叶片弯曲应力和防止叶片梢部与塔架碰撞。

9. 风轮倾角

风轮倾角（仰角）是风轮旋转轴与水平面的夹角（如图 1-2 所示），用 η 表示。风轮倾角的作用是防止叶片梢部（叶尖）与塔架碰撞。

10. 叶片轴线

叶片轴线指的是叶片纵轴线。围绕它，可使叶片一部分或全部相对于回转平面倾斜变化。

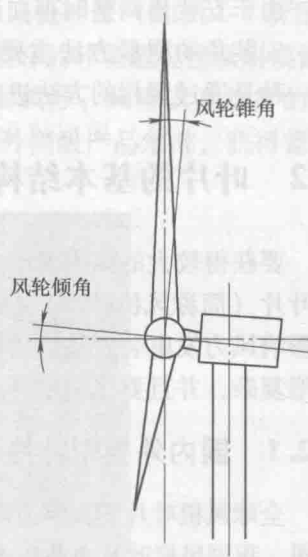


图 1-2 风力发电机组的角度



11. 风轮偏航角

风轮偏航角是指风轮旋转轴线和风向在水平面上投影的夹角。风轮偏航角可以起到调速和限速的作用。

12. 风轮实度

风轮实度是叶片在风轮旋转平面上投影面积的总和与风轮扫掠面积的比值,用 σ 表示,风轮实度大小取决于叶尖速比

$$\sigma = \frac{BA_b}{A} \quad (1-3)$$

式中, B 是风轮叶片数, A 是风轮面积, A_b 是每个叶片对风向的投影面积。

13. 风轮中心高度(轮毂高度)

风轮中心高度是指风轮轮毂中心的离地高度(也可以说是风轮旋转中心到基础平面的垂直距离),用 H_h 表示。

从理论上讲,风轮中心高度越大越好,根据风剪切特性,离地面高度越高,风速梯度影响越小,风轮实际运行过程中,作用在风轮上的波动载荷越小,可以提高机组的疲劳寿命;从另一方面考虑,随着高度增加,平均风速也相应增加,能够提高发电量,特别是对于风资源条件较差的地区,可通过增加轮毂高度来提高发电量。但从实际经济意义考虑,风轮中心高度不可能太高,否则不但塔架成本太高,安装难度及成本也大幅度提高。一般风轮中心高度与风轮直径接近。

14. 安装角

安装角(节距角,桨距角) β 为半径 r 处旋转平面与翼弦之间的夹角,调整安装角最终的效果也就是增大或是减少攻角(即来流速度方向与翼弦间的夹角,其中攻角 $i = l - \beta$ 。 l 为来流速度方向与旋转平面间的夹角,称为倾斜角),通过改变攻角的大小来调整机组的出力。

影响安装角的主要因素有:空气密度、风速和地形地貌。

由于安装角调整时存在读数误差和操作误差,因此安装角调整值与实测值存在一定的误差。安装角的测量方法主要有两种,一种是采用水平角度(利用水平仪)的方法来测量,另一种是通过照相的方法进行测量。

1.2 叶片的基本结构

要获得较大的风力发电功率,其关键在于要具有能轻快旋转的叶片。所以,风力发电机组叶片(简称风机叶片)技术是风力发电机组的核心技术,叶片的翼型设计、结构形式直接影响风力发电装置的性能和功率,是风力发电机组中最核心的部分。风机叶片的尺寸大、外形复杂,并且要求精度高、表面粗糙度低、强度和刚度高、质量分布均匀性好等。

1.2.1 国内外典型叶片

全球风机叶片三大制造商是丹麦的LM公司、Vestas风力系统公司和德国的Enercon GmbH公司。我国风机叶片企业以连云港中复连众复合材料集团有限公司(中复连众)、中材科技风电叶片股份有限公司(中材科技)、中航惠腾风电设备股份有限公司(中航惠腾)为代表。



1. LM 公司风电机组叶片系列产品

艾尔姆风能叶片制品有限公司（LM 公司）是世界上处于领先地位的风机叶片（如图 1-3 所示）制造商，在世界风电行业中处于领先的地位。目前，全世界正在运转的风机叶片中有三分之一以上是 LM 公司的产品，在全球占有较大市场。LM 公司的风机叶片系列产品见表 1-2。



图 1-3 LM 公司的风机叶片（61.5m）

表 1-2 LM 公司风机叶片系列产品

叶片类型	LM37.3 P	LM 40.3 P	LM 40.0 P	LM 38.8 P	LM 61.5 P
转子直径/m	77	82.5	82	80	126.3
风电机组功率/kW	1500	1500	2000	2500	5000
机组控制	变桨距	变桨距	变桨距	变桨距	变桨距
叶片长度/m	37.25	40.0	40	38.8	61.5
叶片质量/kg	5530	5780	6290	8700	17700

2. LZ77-1.5MW 风电机组叶片

连云港中复连众复合材料集团有限公司生产的 LZ77-1.5MW 风机叶片（如图 1-4 所示）总长度是 37.5m，最大弦长是 3.2m，标准质量是 5880kg，具有极好的环境适应性及耐候性，可以稳定工作在 -20 ~ 50℃，叶片表面高性能涂层可以有效抵御风沙、风雪以及盐雾的侵蚀。在空气动力学特性、高强度轻量化结构设计等方面均达到国外同级产品水准，获得德国 GL 权威认证。

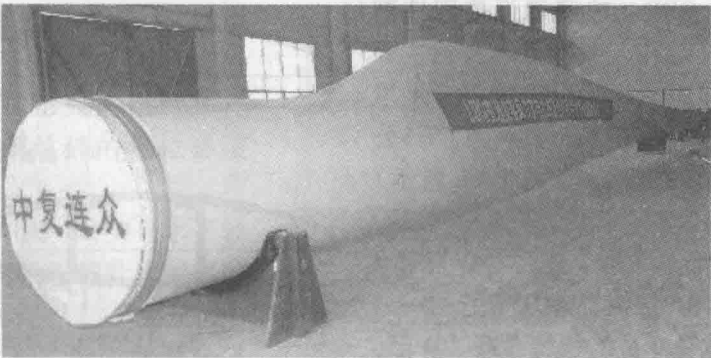


图 1-4 LZ77-1.5MW 风机叶片



连云港中复连众复合材料集团有限公司兆瓦级风机叶片规模位列亚洲第一，功率为1.25~6MW，长度为31~75m，共有9个系列近60个型号。产品批量出口阿根廷、英国、日本等国家。

1.2.2 叶片结构

叶片（如图1-5所示）是接受风能的主要部件，具有空气动力形状，使风轮绕其旋转轴转动。

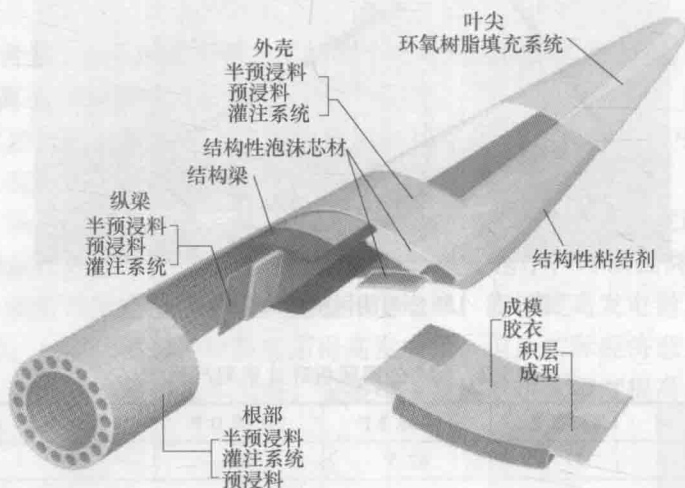


图1-5 叶片的结构图

以水平轴升力型风力发电机组为例，其叶片的结构可分为三个部分：纵梁、壳体和根部。叶片的纵梁（大梁）俗称龙骨、加强肋或加强框。叶尖类型多种多样，有尖头、平头、钩头和带襟翼的尖部等。壳体一般为玻璃钢薄壳结构。根部材料一般为金属结构，用于与轮毂相连接。

（1）叶片纵梁 叶片纵梁的作用是保证叶片长度方向和横截面上的强度和刚度。叶片纵梁多为两条，其在叶片内的布置方式有平行式、垂直式和不规则式三种。

1) 纵梁采用 GRP（玻璃增强热固性塑料，或称玻璃钢）结构，并作为叶片的主要承载部件。这种形式的叶片以丹麦 Vestas 风力系统公司（如图1-6a所示）和荷兰 CTC 公司（由德国 NOI 公司制造，如图1-6b所示）制造的叶片为代表。

纵梁常用 D 形、O 形、矩形、C 形和 I 形等形式，蒙皮 GRP 结构较薄，仅 2~3mm，主要保持翼型和承受叶片的扭转负载。D 形、O 形和矩形纵梁在缠绕机上缠绕成型，在模

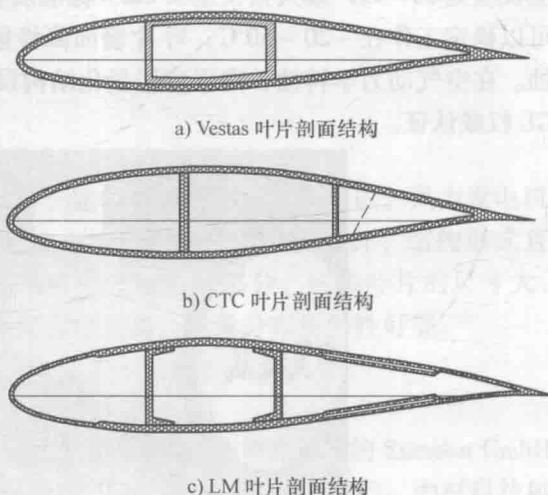


图1-6 叶片的剖面结构