



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT



“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

风力发电机组 故障诊断技术

FENGLI FADIAN JIZU
GUZHANG ZHENDUAN JISHU

杨锡运 郭鹏 岳俊红 等 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”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力发电机组 故障诊断技术

杨锡运 郭鹏 岳俊红 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,随着我国大量风力发电机组并网发电,了解风力发电机组相关部件的故障诊断技术对减少损失,提高效益意义重大。本书介绍了风力发电机组主要部件的结构特点、常用的故障诊断方法、运行维护事项和故障诊断的工程案例,内容包括叶片、齿轮箱、发电机、变桨系统、变流器的故障诊断技术。本书力求理论联系实际,内容通俗易懂,具有较强的针对性和实用性。

本书可作为从事风力发电机组运营、维护和管理的工程技术人员的学习、培训用书,也可作为风电工程领域研发人员和高等院校研究人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组故障诊断技术 / 杨锡运等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015.8
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-3588-6

I. ①风… II. ①杨… III. ①风力发电机—发电机组—故障诊断 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第208947号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力发电机组故障诊断技术
作 者	杨锡运 郭鹏 岳俊红 等 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	北京鑫丰华彩印有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.75印张 278千字
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	58.00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)

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

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

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院

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

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

同济大学

华南理工大学

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主 任 胡昌支 陈东明

副 主 任 王春学 李 莉

成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 邹 昱

张秀娟 汤何美子 王 惠



前 言

当前,人类面临能源危机和环境问题日益突出,能源节约和可再生能源开发利用越来越受到重视。风力发电作为可再生能源发电的主要方式之一,近年来日益蓬勃发展。随着我国风电装机容量快速增加,风电大型机组技术在成熟化和产品商品化同时,也面临提高并网风力发电机组运营效率,减少机组部件故障率的强大市场需求。面对装机容量的快速增长和工程技术从业人员增多,市场上针对并网运营风力发电机组主要部件的故障诊断和维护技术的指导书还很匮乏。作者结合多年来进行风力发电机组故障诊断理论研究和故障诊断工程案例的实践经验编写了此书,以期对从事风力发电机组运营、管理和风电开发的工程技术、研究人员有一定帮助。

本书分6章,分别介绍了风力发电机组常见故障诊断方法、叶片、齿轮箱、发电机、变桨系统、变流器的相关故障诊断技术和知识。由于风力发电机组故障诊断技术涉及多学科内容,为适应不同专业知识背景的读者,本书力求理论联系实际,内容通俗易懂,避免繁琐的数学推导,增强其实用性。

本书第1章由杨锡运编写,全书的所有故障诊断工程案例部分由岳俊红编写,其余部分第2章由郭鹏编写,第3章由杨锡运编写,第4章由杨锡运、郭鹏编写,第5章、第6章由杨锡运编写,全书由杨锡运统稿。在本书的编写过程中,荣兴汉、陈铁、丁显、赵小明、张悦超、宋中波参加了故障诊断工程案例的编写工作,硕士研究生关文渊、崔家文、曹超、迟冰也参加了部分内容的文字整理工作,徐大平教授、柳亦兵教授对本书编写提供了大力支持,在此一并表示感谢。

本书在编写过程中,参考了国内外有关文献资料,在此谨向相关文献资料的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2015年5月7日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风能及特点	1
1.1.1 风能的形成	1
1.1.2 风能的特点	2
1.1.3 风功率密度	3
1.1.4 平均风向	4
1.2 风力发电发展概况	5
1.2.1 风力发电的历史	5
1.2.2 我国风力发电的发展	6
1.3 风力发电机组的结构及特点	7
1.3.1 风力发电机组的分类	7
1.3.2 风力发电机组的基本组成	9
1.4 故障诊断技术概述	11
1.4.1 故障诊断的含义	11
1.4.2 故障诊断系统的性能指标	12
1.4.3 故障诊断的基本方法	13
1.5 风力发电机组故障诊断技术概述	18
1.5.1 风力发电机组故障诊断的目的	18
1.5.2 大型风力发电机组的常见故障	18
1.5.3 风力发电机组故障诊断实施技术	20
1.5.4 发电设备故障诊断系统的构成	21
第 2 章 叶片的故障诊断技术	25
2.1 风轮	25
2.1.1 叶片数	26
2.1.2 风轮直径和风轮扫掠面积	27
2.1.3 轮毂高度	28
2.1.4 锥角	28

2.1.5	仰角	28
2.1.6	风轮的实度	28
2.2	叶片结构	28
2.2.1	基本要求	28
2.2.2	结构形式	29
2.2.3	叶片的分类	33
2.3	叶片的故障原因及类型	35
2.3.1	叶片损伤的原因	35
2.3.2	叶片的主要故障类型	37
2.4	叶片的故障诊断方法	40
2.4.1	无损检测技术	40
2.4.2	基于振动的模态分析损伤识别方法	44
2.4.3	基于智能结构的损伤自识别方法	45
2.5	叶片监测系统	47
2.6	叶片的运行维护	49
2.6.1	操作步骤	49
2.6.2	定期维护内容	49
2.6.3	异常现象及处理方法	50
2.7	叶片故障诊断案例	51
2.7.1	叶片横向裂纹	51
2.7.2	叶片不平衡	54
2.7.3	叶片监测系统	58
第3章	齿轮箱的故障诊断技术	61
3.1	传动系统结构	61
3.1.1	风轮主轴	61
3.1.2	齿轮箱	63
3.2	齿轮箱的主要故障	66
3.2.1	齿轮的主要故障	66
3.2.2	轴承的主要故障	68
3.3	齿轮箱的故障诊断方法	69
3.3.1	基于振动信号分析的故障诊断技术	69
3.3.2	基于油液信号分析的故障诊断技术	73
3.3.3	基于声信号分析的故障诊断技术	78
3.3.4	基于运行数据中的性能参数分析的故障诊断	80
3.3.5	基于不确定信息的贝叶斯网络处理方法	80
3.4	齿轮箱的日常维护及常见故障处理	83
3.4.1	日常保养	84
3.4.2	定期维护	84

3.4.3 常见故障的处理	85
3.5 齿轮箱故障诊断案例	86
3.5.1 行星轮系故障	86
3.5.2 中间轴故障	88
3.5.3 高速轴故障	90
第4章 发电机故障诊断技术	93
4.1 发电机的结构和工作原理	93
4.1.1 基本类型	93
4.1.2 工作原理	95
4.1.3 风力发电机	98
4.2 发电机的故障诊断方法	102
4.2.1 发电机的主要故障类型	102
4.2.2 故障诊断分析方法	105
4.3 发电机的运行维护	111
4.3.1 常见故障及原因	111
4.3.2 日常运行维护	112
4.4 发电机故障诊断案例	112
4.4.1 发电机机械故障	112
4.4.2 发电机电气故障	120
第5章 变桨系统故障诊断技术	130
5.1 变桨系统的结构和原理	130
5.1.1 变桨系统的分类和任务	130
5.1.2 变桨系统的结构	131
5.2 变桨系统故障诊断方法	133
5.2.1 变桨系统常见的故障类型	133
5.2.2 变桨系统的故障诊断方法	134
5.3 变桨系统的运行维护	142
5.3.1 变桨轴承的维修及保养方法	142
5.3.2 变桨电机的维修保养方法	142
5.3.3 变桨齿轮箱(变桨减速机)的维修保养方法	143
5.3.4 变桨控制柜的维修保养方法	143
5.4 变桨系统故障诊断案例	143
5.4.1 MOOG/LUST 变桨系统故障	143
5.4.2 VENSYS 变桨系统故障	148
第6章 变流器的故障诊断技术	155
6.1 变流器的结构及组成	155
6.1.1 直驱永磁同步风力发电机组的变流器	155

6.1.2	带齿轮箱的双馈型风力发电机组的变流器	159
6.2	变流器故障诊断方法	161
6.2.1	常见故障	161
6.2.2	故障诊断方法	162
6.3	变流器故障诊断案例	168
6.3.1	变流器 AD 采样零漂故障	168
6.3.2	变流器机侧网侧 CAN 通信故障	169
6.3.3	变流器母线预充电故障	171
6.3.4	变流器转子漏电流故障	172
6.3.5	变流器并网接触器闭合失败故障	173
	参考文献	175

第1章 绪论

随着世界经济的发展，人类对能源的需求不断增长。目前，煤、石油、天然气为人类社会主要能源，由于这些化石能源不可再生，能源危机日益加剧。为了实现人类社会未来的可持续发展以及解决化石能源带来的环境问题，大力发展新型能源成为世界各国的共识。风是一种自然界中可再生、无污染而且储量巨大的能源，开发利用风力资源对于缓解能源短缺、保护生态环境具有重要意义。风力发电作为可再生能源利用的一种有效方式，在全球受到了极大的关注并获得快速发展。近年来，我国的风电事业蓬勃发展，尤其在2006年《中华人民共和国可再生能源法》颁布后，将可再生能源（风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源）开发利用的科学技术研究和产业化发展列为科技发展与高技术产业发展的优先领域后，我国风电场规模日益扩大，风力发电机组单机容量不断增大；且风力发电机组由原来的引进进口设备，发展到自己生产、设计的国产化风电机组。在我国，风力发电机组技术正朝着增大单机容量、设计低风速区风能利用机型、提高转换效率、开发海上风力发电机组等方向发展；同时，值得注意的是，伴随着风力发电机组种类和数量的不断增加，新机组的不断投运，旧机组的不断老化，风力发电机组在运行中产生了各种故障，出现了各种损坏的部件，严重影响了设备的运行效率。因此，研究和掌握风力发电机组的故障分析和诊断技术具有重要的意义和巨大的市场需求。

1.1 风能及特点

1.1.1 风能的形成

风是空气流动的现象。地球被一个数千米厚的空气层包围着，由于大气中热力和动力的空间不均匀性，形成了空气相对于地球表面的运动。空气有一定的质量，因此空气的流动就具有一定的动能，这就是人类可以利用的风能。动能的物理描述为 $E = \frac{1}{2}mv^2$ ，因此风能的大小与两个重要指标紧密相关：由空气密度决定的空气质量以及风速。

大气运动的能量来自太阳，风能是太阳能的一种转化形式。由于地球上各纬度所接受的太阳辐射度强度不同，其温度也会有所不同。赤道和低纬度地区，太阳高度角大，日照时间长，太阳辐射强度大，地面和大气接收的热量多、温度较高；高纬度地区，太阳高度角小，日照时间短，地面和大气接受的热量少、温度低。这种高纬度和低纬度之间的温度差异，形成了气压梯度，在不均匀的压力下，推动了大气运动形成了风，风的方向从高压吹向低压。



除了气压梯度外，大气运动还受到地转偏向力、摩擦力和惯性离心力的影响。地转偏向力，又称为科里奥氏力，是地球自转产生的力，这种力使北半球气流向右偏转，南半球气流向左偏转。摩擦力是地表面对于气流的拖拽力（地面摩擦力）或气团之间的混乱运动产生的力（湍流摩擦力）。惯性离心力是使气流方向发生变化的力。

1.1.2 风能的特点

了解风的形成，有助于我们科学地利用风能。风能通常具有如下特点：

(1) 不稳定性。风的形成受时间、气候、地理环境的影响，因此每一个时间点和空间点上，风的大小和方向都在变化。风能的这种不稳定性，使利用风能时有许多问题需要解决。

(2) 从地球表面起，风速的大小随着距离地面高度的升高而增大。

在空气相对于地表的运动过程中，靠近地球表面的区域，由于受到地表植被、建筑物等地表摩擦阻力的影响，会使大气流动受阻，风速降低。这就是风力发电机组的轮毂高度都安装在地势相对高的地方的原因，目前我国运行的单机容量 3MW 以下的兆瓦级风电机组的轮毂高度通常在 65~90m。

通常将 2km 以上、远离地面、不受地面摩擦力影响的大气层称为“自由大气层”；将 2km 以内、靠近地区表面、受地表摩擦阻力影响的大气层区域称为“大气边界层”。从工程角度，通常将大气边界层可划分为三个区域：距离地面 2m 以内区域称为底层；距离 2~100m 的区域称为底部摩擦层（也称为常值通量层），该层内湍流黏性力为主导力，风速随高度增长；100~2000m 的区域称为上部摩擦层（也称为艾克曼层），科里奥氏力在该层中很重要，风向随高度增加逐渐向右偏转。底层和底部摩擦层又统称为地面边界层。

垂直于风向的平面内，风速随高度的变化称为风切变（风剪切）。在距地面高度 100m 范围的地面边界层内，计算风速随高度变化规律的经验公式很多，目前多数国家采用指数公式，即

$$\bar{v} = \bar{v}_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha \quad (1-1)$$

式中 \bar{v} ——距地面高度为 z 处的平均风速，m/s；

\bar{v}_1 ——高度为 z_1 处的平均风速，m/s；

z 、 z_1 ——不同距地面高度；

α ——风切变经验指数，它取决于大气稳定性和地面粗糙度，表 1-1 列出不同地面状态下的风切变的经验指数值。

表 1-1 不同地面状态下的风切变经验指数值

地面情况	α	地面情况	α
光滑地面，海洋	0.10	树木多，建筑物少	0.22~0.24
草地	0.14	森林，村庄	0.28~0.30
较高草地，城市地	0.16	城市高建筑	0.40
高农作物少量树木	0.20		

(3) 空气密度随海拔的升高而逐渐减小。当在海拔较高的地区规划风电场时, 尽管风速很高, 但由于空气质量小, 风能并不一定大。

1.1.3 风功率密度

规划建设风电场时, 需要对当地风能资源做出评估。风能资源的丰富程度常用风功率密度表示。

风功率密度 W 是指空气在单位时间 (1s) 内以速度 v 流过单位面积 (1m^2) 产生的动能。

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho v \cdot v^2 = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (1-2)$$

由于风速是随时间变化的, 在风资源评估时, 常用一段时间的平均值 (平均风功率密度 \bar{W}) 来描述。平均风功率密度可用直接计算法和概率计算法求出。

1. 直接计算法

直接计算法求出平均风功率密度为

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho v^3(t) dt = \frac{\sum_{i=1}^n 0.5 \rho v_i^3 t_i}{T} \quad (1-3)$$

$$\sum t_i = T$$

式中 t_i ——在风速 v_i 的持续时间;

n ——时间分段数。

例如, 将某地区一年每天 24h 逐时测得的风速, 按一定间隔 (比如间隔为 1m/s) 分成各风速等级, 如 $v_1=3\text{m/s}$ 、 $v_2=4\text{m/s}$ 、...; 然后根据各等级风速在该年出现的累计小时数 t_1 、 t_2 、... 分别求出各风速下的风功率密度 ($t_i \times \frac{1}{2} \rho v_i^3$); 再将各等级风功率密度求和后除以总时数 T , 即

$$\bar{W} = \frac{\sum 0.5 \rho v_i^3 t_i}{T} \quad (1-4)$$

则求出该地区一年的平均风功率密度。

2. 概率计算法

概率计算法是通过某种概率分布函数拟合风速 v 频率的分布, 进而再计算得到平均风功率密度。

一般风速 v 的概率分布函数可以采用威布尔公式来描述, 即

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1-5)$$

式中 k ——形状参数, 反映风速的分布情况, k 值越大, 说明风速分布越集中;

c ——尺度参数, 与平均风速相关, 平均风速越大, c 值越大。

c 、 k 值可利用风速观测数据, 通过最小二乘法、方差法和最大值法等估计获得。图 1-1 给出了某地的实测风速的直方图和平均风速概率分布曲线。

已知风速的概率分布曲线, 可以用两种方法计算平均风功率密度。一种方法是: 利用

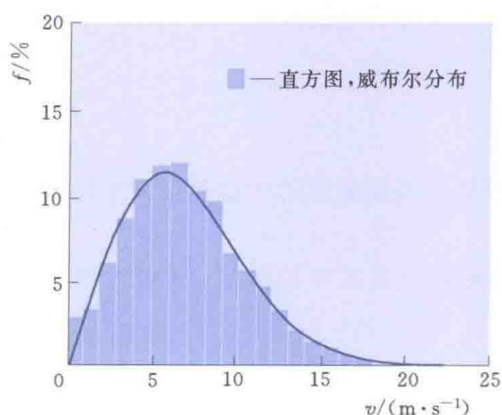


图 1-1 某地的直方图和平
均风速概率分布曲线

平均风速概率分布曲线, 先求出各等级风速 v_i 出现的累计出现的时间 t_i , 各段风速 v_i 该年出现的累计小时数按下式计算: $t_i = 8760 \times f(v_i)$, 其中 8760 的含义是 1 年有 8760h; 然后分别求出各风速下的风功率密度 ($t_i \times \frac{1}{2} \rho v_i^3$); 再将各等级风功率密度求和后除以总时数 T , 即

$$\bar{W} = \frac{\sum 0.5 \rho v_i^3 t_i}{T} = \frac{\sum 0.5 \rho v_i^3 \cdot 8760 f(v_i)}{T} \quad (1-6)$$

则求出该地区一年的平均风功率密度。

另一种方法是: 利用平均风速概率分布曲线, 确定了风速 v 的概率分布函数的数学表达式后, 再采用积分形式的公式方法计算平均风功率密度。

当风速 v 在 $[v_m, v_n]$ 范围内变化, 以风速 v 的概率分布函数 (取威布尔分布) 为例, 采用积分法计算出平均风功率密度:

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \rho \frac{\int_{v_m}^{v_n} \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} v^3 dv}{e^{-\left(\frac{v_m}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_n}{c}\right)^k}} - \left(\frac{v}{c}\right)^k \quad (1-7)$$

风功率密度受风速、风速分布和空气密度的影响, 是风场风能资源的综合指标, 风功率密度等级见表 1-2。

表 1-2 风功率密度等级表

风功率密度等级	距地面高度 10m		距地面高度 30m		距地面高度 50m		应用于并网风力发电
	风功率密度 / (W · m ⁻²)	年平均风速参考值 / (m · s ⁻¹)	风功率密度 / (W · m ⁻²)	年平均风速参考值 / (m · s ⁻¹)	风功率密度 / (W · m ⁻²)	年平均风速参考值 / (m · s ⁻¹)	
1	<100	4.4	<160	5.1	<200	5.6	
2	100~150	5.1	160~240	5.9	200~300	6.4	
3	150~200	5.6	240~320	6.5	300~400	7.0	较好
4	200~250	6.0	320~400	7.0	400~500	7.5	好
5	250~300	6.4	400~480	7.4	500~600	8.0	很好
6	300~400	7.0	480~640	8.2	600~800	8.8	很好
7	400~1000	9.4	640~1600	11.0	800~2000	11.9	很好

注 1. 不同高度的年平均风速参考值是按风切变指数为 1/7 推算的。
2. 与功率密度上限值对应的年平均风速参考值, 按海平面标准大气压及风速频率符合瑞利分布的情况推算。

1.1.4 平均风向

风吹来的方向, 称为风向。风向用角度或方位描述, 取正北方向为基准 (0°), 按顺时针方向确定风向角度。如: 东风对应的风向角度为 90°, 南风的风向角度为 180°, 西风

的风向角度为 270° ，北风的风向角度为 360° 。图 1-2 给出了常用的风向方位图，即把圆周 360° 分成 16 等分，16 个方位的中心如图 1-2 所示，每个方位的范围是 22.5° 。

风向的频率是指在一定时间内，各种风向出现的次数占所有观察次数的百分比。某一风向在一年或一个月中出现的频率常用风向玫瑰图表示。风向玫瑰图是根据风向在各方位上出现的频率值，以相应的比例长度标出，然后把这些点连接起来，绘制的形状宛如玫瑰花朵的概率分布图，如图 1-3 (a) 所示；也可以用风向在 16 个方位上出现的频率表示，如图 1-3 (b) 所示。图 1-3 中各个圆的半径代表一定的频率值。

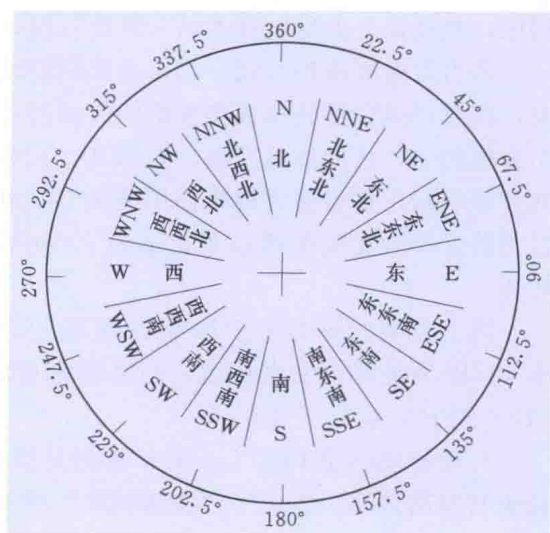


图 1-2 风向方位图

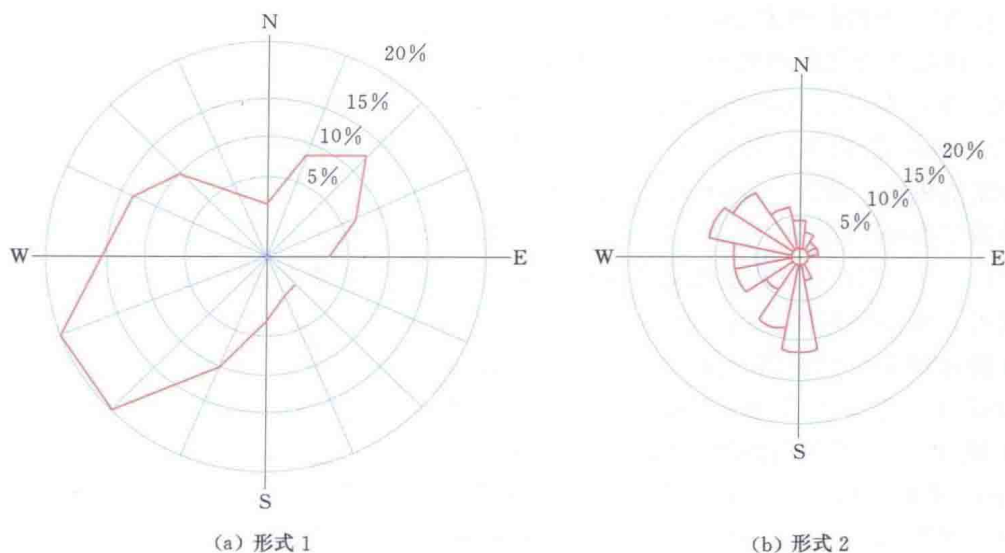


图 1-3 风向玫瑰图

1.2 风力发电发展概况

1.2.1 风力发电的历史

风能利用是将风的动能转换成其他可利用的能量形式。人类利用风能的历史悠久，最早的利用方式是“风帆行舟”。几千年前，古埃及人的风帆船就在尼罗河上航行；中国明代便出现帆船，15 世纪中叶，明朝的航海家郑和使用帆船七下西洋。在蒸汽机出现以前，风力机械是人类的主要动力来源之一。风车使用的起源可追溯到 3000 年前，其用途主要是提水、锯木和推磨等，欧洲一些国家至今仍然保留着许多风车。随着化石能源的开采及

利用,尤其是火力发电技术的大规模应用,风能作为动力逐渐退出历史舞台。

风力发电有两种方式:①小型离网型风力发电机组,即单台独立运行,可为蓄电池充电,再通过逆变器转换成交流电向终端用户供电,通常单机容量较小,主要用于解决用电不方便的小社区的用电问题,如海岛、人烟稀少的牧区等;②并网型风力发电机组,与电网并联运行,是目前大规模使用的风力发电方式,机组单机容量多在兆瓦级以上,如我国目前陆上风力发电机组以单机容量 1.5MW 和 2MW 最为普遍,同时单机容量有增大的趋势。

风力发电的历史起于 19 世纪晚期。1887 年年底,美国人 Charles F. Brush 研制出功率 12kW 直流风力发电机组,用来给家里的蓄电池充电。该机组风轮直径 17m,安装了 144 个叶片,运行了近 20 年。

丹麦物理学家 Poul La Cour 根据其风洞试验研究结果,发现叶片数少、转速高的风轮更具有高效率,提出了“快速风轮”的概念,即叶尖转速高于风速,并于 1891 年建造了具有现代意义的风力发电机组,功率 30kW,输出直流电,用于制氢,供附近小学的汽灯照明,运行至 1902 年。

1919 年,德国科学家 Albert Betz 提出了“贝茨理论”,指出风能的最大利用率为 59.3%,奠定了现代风电机组空气动力学设计的基础。

1925 年,芬兰工程师 Sigurd Savonius 发明了一种阻力型垂直轴风力发电机组类型,称为“Savonius”机组;1931 年,法国工程师 Georges Darrieus 发明了另一种升力型垂直轴风力发电机组,称为“Darrieus (达尔厄) 机组”。

美国工程师 Palmer Cosslet Putnam 首先提出风电并网的设想,并与 S. Morgan Smith 公司合作,于 1941 年制造出风电发展史上单机容量 1250kW 的超大型 Smith-Putnam 风力发电机组,并实现并网发电。该机组两叶片,风轮直径 53.3m,塔架高度 32.6m,每个叶片重量达到 8t。但在当时技术条件下,该机组只运行了 4 年,就发生了叶片折断事故。

1942 年,德国人 Ulrich Huetter 提出“叶素动量理论”,1957 年建成了单机容量 100kW 的 W-34 型风电机组。该机组两叶片,风轮直径 34m,叶片用优化的细长结构。1956 年,丹麦人 Johannes Juul 建造了单机容量 200kW 的三叶片风力发电机组 Gedser,并实现并网发电,运行至 1967 年。该机组采用固定叶片,风轮定速旋转,异步发电机发电,被称为“丹麦概念的风力发电机组”。这两台风电机组的许多设计思想和试验数据对后来的现代大型风电机组的设计产生了重要影响。

1973 年石油危机后,西方各国政府为寻求替代化石燃料的能源,促进了对风力发电的重视,开创了风能利用的新时期,开始建造了一系列示范试验机组。1981 年,美国建造并试验了单机容量 3MW 的新型水平轴风力发电机组,该机组利用液压偏航对风。

进入 20 世纪 90 年代,环境污染和气候变化引起人们注意,在欧洲,如丹麦、德国、西班牙,风力发电开始了商业规模化并网运行。目前,商业化运行的风力发电机组实现了变桨距、变速调节运行,风力发电机组也由陆地走向了海上。

1.2.2 我国风力发电的发展

我国现代风力发电机组开发利用起源于 20 世纪 70 年代,当时设计的 55kW 以下的小



型离网型风力发电机组，解决了边远用户的用电问题。20世纪80年代后，我国开始研究并网型风力发电机组。1986年，中国第一个风电场在山东荣成并网发电，3台单机容量55kW的风力发电机组由丹麦引进，同年，比利时政府赠送的4台单机容量200kW的风力发电机组建成了平潭示范风电场。20世纪90年代，我国已基本掌握单机容量200~600kW的大型风力发电机组制造技术。进入21世纪，在世界范围内，能源和环境问题突出，我国风力发电逐渐进入高速发展时期。

2003年以后，我国风力发电进入了快速发展时期。2006年颁布《中华人民共和国可再生能源法》后，更加促进了我国风电市场的发展。2006年，我国风电累计装机容量已经达到2600MW，在世界上成为发展风力发电的主要市场之一，是全世界第6大市场。2007年我国风电产业规模延续爆发式增长态势。2009年我国成为第一大风电装机市场，新增装机容量13750MW，累计装机容量达到25800MW，超过德国，位列全球第二，兆瓦级风力发电机组占据市场的主导。自2009年以来，我国风电市场在经历多年的快速增长后步入稳健发展期，2013年全国风电新增装机容量16089MW，累计装机容量达到91413MW。据世界风能协会统计，2013年，全球风电装机容量为318GW，中国风电装机容量在全球遥遥领先，达到91.4GW，远高于美国（61.1GW）和德国（34.2GW）。截至2014年6月，中国风电累计装机容量已接近100GW。

1.3 风力发电机组的结构及特点

1.3.1 风力发电机组的分类

风力发电机组是利用风轮将风的动能转换成机械能，再通过轴带动发电机发电、转换成电能的装置。图1-4以并网双馈型风力发电机组为例示出其工作原理图，风能通过叶轮的作用转化成机械能，机械能通过主轴的旋转、增速齿轮箱的增速、带动发电机发电，从而实现了机械能向电能的转换。并网型发电机通过相应的控制设备将满足电网要求的电能接入电网，向电网馈电。

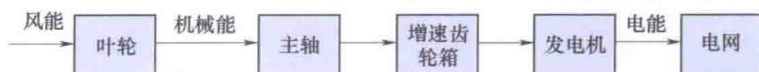


图 1-4 风力发电机组工作原理图

风力发电机组的样式很多，从不同角度出發，对风力发电机组可进行以下分类。

1. 按并网方式分类

(1) 离网型。一般指单台独立运行，所发出的电不接入电网的风力发电机组。通常需配备蓄电池等直流储能环节，通过逆变器可带交流负载。这种机组容量较小，适用于家庭或村落等小用电单位。

(2) 并网型。一般指产生的电能可直接并入电网的风力发电机组。一般以机群布阵成风力发电场，多为大型风力发电机组。

2. 按风轮旋转主轴与地面相对位置分类

(1) 水平轴风力发电机组。即风轮旋转轴与地面平行。水平轴风力发电机组又可分为