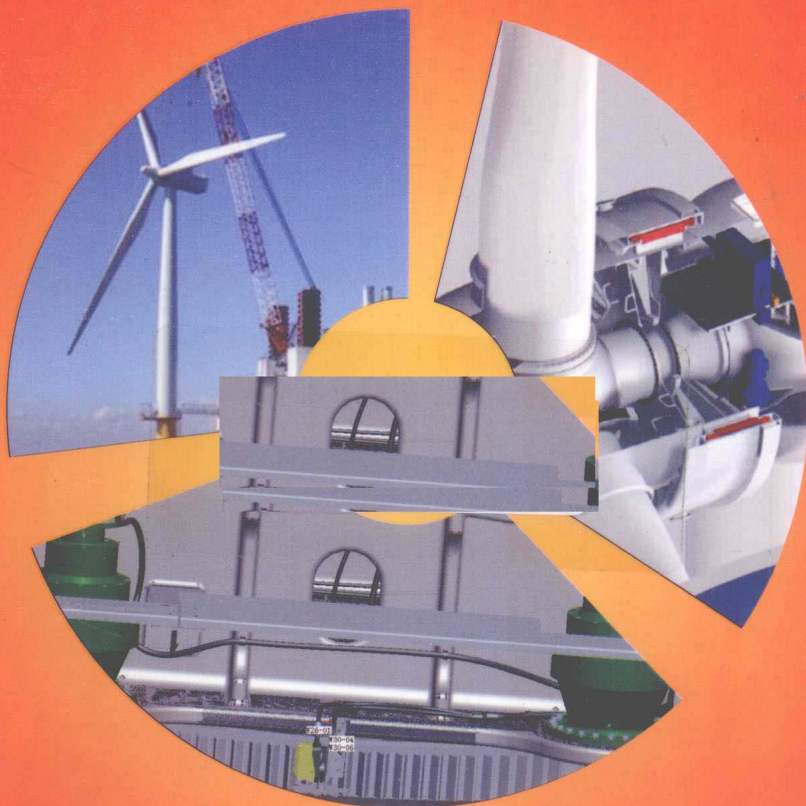


风力发电技术丛书

吴佳梁 胡 杰 陈修强 等编著



化学工业出版社



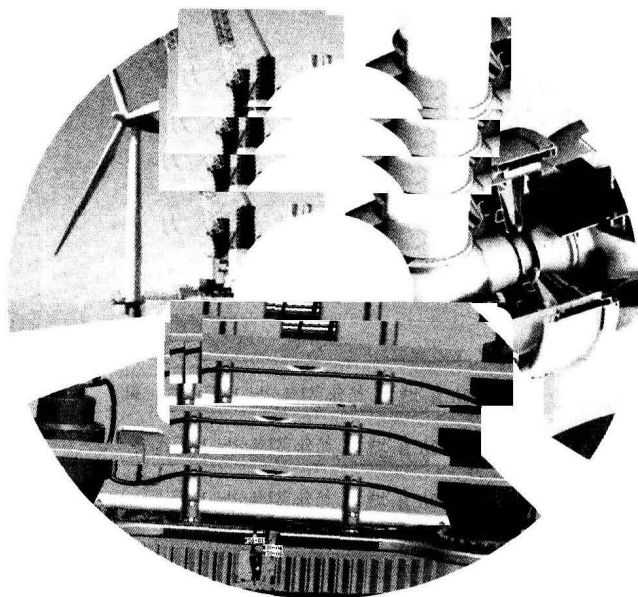
风力发电技术丛书

>>>>>>>>>>>> FENGLIJI  
ANZHUANG WEIHU YU GUZHANG ZHENDUAN

# 风力机

## 安装、维护与故障诊断

吴佳梁 胡 杰 陈修强 等编著



 化学工业出版社

· 北 京 ·

本书概括介绍了风力发电技术的发展情况、主要机型特点；重点介绍了风力发电机组的运输安装方法，试验检测方法、步骤，风场试验调试常用仪器和工具的使用方法，风力机 240h 无故障运行试验验收项目及验收步骤；详细介绍了风力发电机组运行维护的关键项目内容、遵循的维护原则规范，关键零部件的维修保养方法以及风力机的常见故障、状态监测和故障诊断处理方法。

本书内容翔实，图文并茂，实用且具有极强的指导性，适合从事风电安装施工、维护保养、维修和风力机应用管理的工程师和技术人员阅读参考，也可作为从事风电设计、风电培训的工程技术人员的参考工具书，对各高等院校相关专业师生也是一本很好的参考读物。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

风力机安装、维护与故障诊断/吴佳梁等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2011. 2  
ISBN 978-7-122-10274-4  
(风力发电技术丛书)

I. 风… II. 吴… III. ①风力发电机-安装②风力  
发电机-维修③风力发电机-故障诊断 IV. TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 262849 号

---

责任编辑: 郑宇印  
责任校对: 边 涛

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: 化学工业出版社印刷厂  
710mm×1000mm 1/16 印张 13 字数 269 千字 2011 年 4 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: 39.00 元

版权所有 违者必究



## 前 言

随着世界经济的发展、能源紧张的问题日趋严峻，世界各国都在研究开发能够替代传统化石能源的可再生清洁能源。风能储量巨大，可再生无污染，大规模开发具有得天独厚的优势。风力发电最具市场潜力、最适合风能的大规模开发利用。目前，风力发电机组已遍布世界各地，装机容量每年都以很高的比例在持续增长。特别是中国，近几年每2年新增装机容量就翻一番，2009年总装机容量已达到2500万千瓦，居世界第二。中国已成为开发潜力最大、风力发电机组主机厂商最看好的市场之一。

然而，装机容量的快速增长和工程技术从业人员的增多，针对工程施工安装人员和风力机维护人员、工程技术人员学习培训的指导书还很匮乏，风力机市场急需风电机组安装、运行维护和故障诊断方面的技术指导书或培训教材。因此，我们以研究各种机型的安装施工为基础，结合多年来的风力机工程安装、运行维护和故障诊断处理的实践经验编写了此书，以期对从事风电开发与应用的工程技术人员有一定帮助。

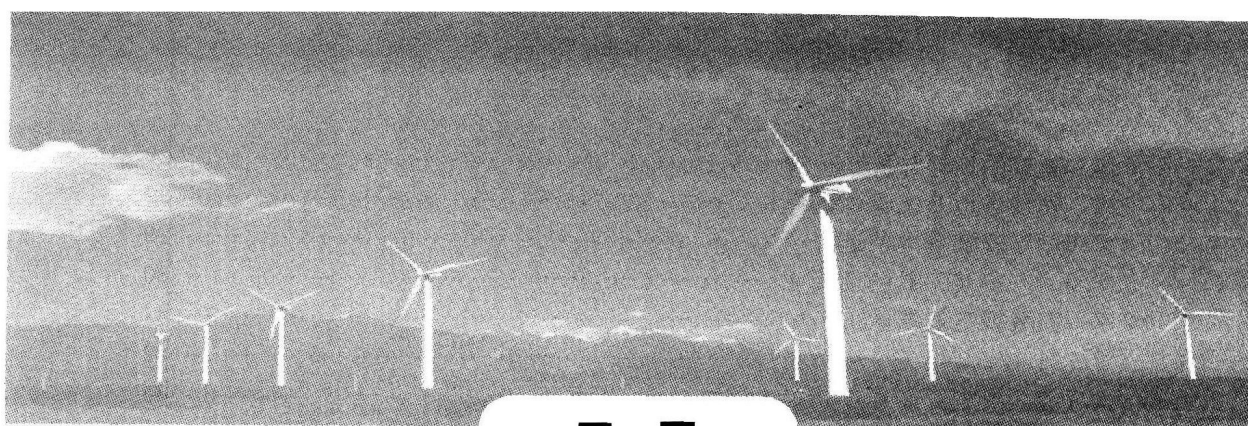
本书分为7章，全面介绍了风力发电机组的运输安装、运行维护和故障诊断的相关技术和知识。

参加本书编写的主要人员有吴佳梁、胡杰、陈修强、缪瑞平、丁涛。此外，张新玉、姚军锋等同事也参与了部分书稿的编写工作，全书由陈修强负责统稿。在本书的编写过程中，得到了三一电气有限公司领导和同事的大力支持，提出了宝贵的修改意见和建议，在此表示感谢。

本书的编写参阅了大量参考文献，在此对其作者一并致谢！

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，诚请广大读者批评指正。

编者  
2010年11月



# 目 录

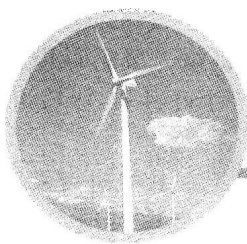
|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>第 1 章 风力发电简介</b>   | 1  |
| 1.1 风力发电机组发展概述        | 1  |
| 1.1.1 风力发电的特点         | 1  |
| 1.1.2 风电发展史与现状        | 1  |
| 1.1.3 中国风力发电的发展       | 3  |
| 1.2 风力机的结构特点          | 4  |
| 1.2.1 风力发电机组的组成       | 4  |
| 1.2.2 主流风力机的结构特点      | 5  |
| 1.3 风力机的运行环境          | 8  |
| 1.3.1 风能资源分布          | 8  |
| 1.3.2 风力机运行环境         | 12 |
| 1.4 海上风电              | 13 |
| 1.4.1 海上风能的特点和风电开发的优势 | 13 |
| 1.4.2 海上风电开发面临的制约因素   | 13 |
| 1.4.3 海上风电场选址原则       | 19 |
| <b>第 2 章 风力机运输和安装</b> | 21 |
| 2.1 风力机运输相关法规及行业要求    | 21 |
| 2.1.1 道路运输相关法规        | 21 |
| 2.1.2 风力机运输道路要求       | 22 |
| 2.1.3 风力机通用运输工具的选择    | 24 |
| 2.1.4 运输路线选择问题        | 24 |
| 2.2 风力机部件运输及要求        | 25 |
| 2.2.1 部件在运输过程的要求      | 25 |
| 2.2.2 风力机部件运输         | 25 |
| 2.3 风力机运输成本的控制        | 27 |
| 2.4 风力机运输方案实例         | 28 |

|            |                                 |           |
|------------|---------------------------------|-----------|
| 2.5        | 基础的设计与施工                        | 29        |
| 2.6        | 安装场地及工具的选择                      | 29        |
| 2.6.1      | 安装场地的选择                         | 29        |
| 2.6.2      | 安装工具的选择                         | 30        |
| 2.7        | 安装规范及要求                         | 32        |
| 2.7.1      | 安装规范                            | 32        |
| 2.7.2      | 典型安装程序                          | 34        |
| 2.8        | 风力机部件现场吊装与安装                    | 36        |
| 2.8.1      | 塔筒的吊装与安装                        | 36        |
| 2.8.2      | 机舱的吊装与安装                        | 40        |
| 2.8.3      | 风轮的吊装与安装                        | 43        |
| 2.8.4      | 电气设备的安装                         | 47        |
| 2.8.5      | 安装验收                            | 51        |
| 2.8.6      | 风场安装计划                          | 51        |
| 2.9        | 海上风力机的运输安装                      | 52        |
| 2.9.1      | 海上风力机的运输                        | 52        |
| 2.9.2      | 海上风力机安装特点                       | 52        |
| 2.9.3      | 海上风力机安装方式                       | 53        |
| <b>第3章</b> | <b>风力发电机组的出厂调试和试验</b>           | <b>57</b> |
| 3.1        | 风力发电机调试、试验的组织和准备                | 57        |
| 3.1.1      | 工厂阶段调试的组织和准备                    | 57        |
| 3.1.2      | 现场调试的组织和准备                      | 58        |
| 3.2        | 调试、试验常用仪器设备介绍                   | 59        |
| 3.2.1      | 带刀剥线钳使用说明                       | 59        |
| 3.2.2      | 端子压线钳使用说明                       | 60        |
| 3.2.3      | 球形内六角扳手使用说明                     | 60        |
| 3.2.4      | 棘轮开口梅花两用扳手使用说明                  | 60        |
| 3.2.5      | 电热吹风枪使用说明                       | 61        |
| 3.2.6      | 兆欧表使用说明                         | 62        |
| 3.2.7      | 手枪钻使用说明                         | 63        |
| 3.2.8      | FLUKE 15B 型万用表使用说明书             | 65        |
| 3.3        | 变桨系统调试（以常见 LUST/SSB 及类似变桨系统为例）  | 67        |
| 3.3.1      | 测试前准备                           | 67        |
| 3.3.2      | 测试内容及操作步骤                       | 68        |
| 3.4        | 主控 I/O 通道测试（以常见 MITA 和类似控制系统为例） | 74        |
| 3.4.1      | 绝缘电阻的测量                         | 74        |
| 3.4.2      | 通信测试                            | 75        |
| 3.4.3      | 安全链功能试验                         | 76        |

|            |                     |            |
|------------|---------------------|------------|
| 3.4.4      | 软件操作                | 77         |
| 3.4.5      | 润滑系统功能试验            | 80         |
| 3.4.6      | 液压系统功能试验            | 82         |
| 3.4.7      | 偏航功能试验              | 83         |
| 3.4.8      | 发电机设备功能试验           | 85         |
| 3.4.9      | 齿轮箱设备功能试验           | 86         |
| 3.4.10     | 传感器测试               | 88         |
| 3.5        | 主控与传感器通信测试          | 90         |
| 3.5.1      | 振动传感器测试             | 90         |
| 3.5.2      | 空载拖动试验              | 96         |
| <b>第4章</b> | <b>风力发电机组试运行与验收</b> | <b>103</b> |
| 4.1        | 风力发电机组进行试运行条件       | 103        |
| 4.1.1      | 风力发电机组进行试运行的条件      | 103        |
| 4.1.2      | 功能性检验               | 103        |
| 4.2        | 240h 无故障运行          | 104        |
| 4.2.1      | 组织和管理               | 104        |
| 4.2.2      | 一般考核标准              | 105        |
| 4.3        | 试运行期间的风力机检测         | 111        |
| 4.4        | 风力发电机组验收            | 112        |
| 4.4.1      | 验收应具备的条件            | 113        |
| 4.4.2      | 风力发电机组验收内容          | 113        |
| 4.4.3      | 质保期                 | 114        |
| 4.5        | 最终验收                | 115        |
| <b>第5章</b> | <b>风力发电机组的运行和维护</b> | <b>116</b> |
| 5.1        | 风电场的运行和维护           | 116        |
| 5.1.1      | 风电场运行工作的主要内容        | 116        |
| 5.1.2      | 风电场维护工作的主要方式        | 117        |
| 5.2        | 机组常规巡检和故障处理         | 118        |
| 5.3        | 风力发电机组的例行维护         | 120        |
| 5.3.1      | 例行维护的主要内容和要求        | 120        |
| 5.3.2      | 年度例行维护周期            | 121        |
| 5.3.3      | 维护计划的编制             | 122        |
| 5.3.4      | 年度例行维护的组织与管理        | 122        |
| 5.3.5      | 检修工作总结              | 123        |
| 5.4        | 风力发电机组的非常规维护        | 123        |
| 5.5        | 运行维护记录的填写           | 124        |
| 5.6        | 风力发电机组的润滑系统维护       | 124        |
| 5.6.1      | 风力发电机组的工作环境及基本润滑要求  | 125        |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 5.6.2      | 油品的选择 .....              | 125        |
| 5.6.3      | 油品使用中需要注意的问题 .....       | 127        |
| 5.6.4      | 润滑油(脂)的几项指标及意义 .....     | 129        |
| 5.7        | 风力机维护项目汇总 .....          | 129        |
| 5.8        | 风力机维护的原则 .....           | 137        |
| 5.9        | 海上风力机维护 .....            | 139        |
| 5.9.1      | 海上风电场维护难度大 .....         | 139        |
| 5.9.2      | 海上风电场维护费用昂贵 .....        | 140        |
| <b>第6章</b> | <b>主要部件的维修保养方法 .....</b> | <b>142</b> |
| 6.1        | 叶片的维修保养方法 .....          | 142        |
| 6.2        | 轮毂的维修保养方法 .....          | 143        |
| 6.3        | 变桨轴承的维修保养方法 .....        | 144        |
| 6.4        | 变桨电机的维修保养方法 .....        | 144        |
| 6.5        | 变桨减速机的维修保养方法 .....       | 144        |
| 6.6        | 变桨控制柜的维修保养方法 .....       | 145        |
| 6.7        | 主轴及主轴承的维修保养方法 .....      | 146        |
| 6.8        | 增速箱的维修保养方法 .....         | 146        |
| 6.9        | 高速轴刹车的维修保养方法 .....       | 147        |
| 6.10       | 高速轴联轴器的维修保养方法 .....      | 148        |
| 6.11       | 发电机的维修保养方法 .....         | 149        |
| 6.12       | 机舱底架的维修保养方法 .....        | 150        |
| 6.13       | 偏航系统的维修保养方法 .....        | 150        |
| 6.14       | 塔架的维修保养方法 .....          | 152        |
| 6.15       | 机舱罩与导流罩的维修保养方法 .....     | 153        |
| 6.16       | 液压系统的维修保养方法 .....        | 153        |
| 6.17       | 控制系统的维修保养方法 .....        | 154        |
| 6.18       | 塔架基础的维修保养方法 .....        | 155        |
| 6.19       | 变电站的维修保养方法 .....         | 155        |
| 6.20       | 监控计算机的维修保养方法 .....       | 155        |
| 6.21       | 机组的非正常状态处理及复位方法 .....    | 155        |
| 6.22       | 废品处理 .....               | 156        |
| 6.23       | 机组维护与维修记录 .....          | 156        |
| <b>第7章</b> | <b>风力发电机组的故障诊断 .....</b> | <b>158</b> |
| 7.1        | 风力机故障诊断概述 .....          | 158        |
| 7.1.1      | 风力机故障诊断的任务 .....         | 158        |
| 7.1.2      | 风力机故障诊断的主要步骤 .....       | 159        |
| 7.1.3      | 风力机状态监测和故障诊断技术概述 .....   | 159        |
| 7.2        | 风力机电气故障案例 .....          | 160        |

|                            |                                                  |     |
|----------------------------|--------------------------------------------------|-----|
| 7.2.1                      | 电控系统故障案例（表 7-1） .....                            | 160 |
| 7.2.2                      | 变桨系统故障案例（以常见 LUST \ SSB 电变桨系统为例，<br>表 7-2） ..... | 163 |
| 7.2.3                      | 变流系统故障案例（主要以 ABB，ACS800 系列变流器为例） ...             | 163 |
| 7.3                        | 风力机机械故障案例 .....                                  | 170 |
| 7.3.1                      | 振动检测分析风力机机械故障的一般方法 .....                         | 170 |
| 7.3.2                      | 典型风力机机械故障的振动分析与诊断 .....                          | 175 |
| <b>附录 风电专业术语汉英对照</b> ..... |                                                  | 185 |
| <b>参考文献</b> .....          |                                                  | 197 |



# 第1章 风力发电简介

## 1.1 风力发电机组发展概述

### 1.1.1 风力发电的特点

风力发电是利用风能来发电，而风力发电机组是将风能转换为电能的机械。通过风轮将风能转换为机械能，再通过发电机将机械能转换为电能。风轮由桨叶和轮毂组成，是风力发电机组最主要的部件。桨叶具有良好的空气动力外形，在气流作用下能产生空气动力使风轮旋转，将风能转换成机械能。在理论上，风轮可以将 59.3% 的风能转换为机械能。现代风力发电机组风轮的效率已经可达到 48%。

风功率与风速的 3 次方成正比，可见风力发电的功率与风频分布有极大的关系。

由于风速的变化和不稳定，因此风力发电机组承受着十分复杂恶劣的交变载荷。目前风力发电机组的设计寿命是 20 年，要求能经受住 50 年一遇强大暴风袭击，机组的可利用率要达到 95% 以上。

风力发电的运行方式主要有两类。一类是离网型风力机，即单台机组独立运行作为蓄电池充电，再通过逆变器转换成交流电向终端电器供电，单机容量为 100kW 以下，可解决小的社区用电问题。另一类是并网型风力机，与电网并联运行，是目前大规模使用的风力发电方式，机组单机容量范围在 100kW 以上，目前主流的并网型风力机的单机容量多在兆瓦级以上，尤以 1.5MW 和 2.0MW 最为普遍，同时机组的单机容量有进一步增大的趋势，预计 2012 年后，3.0MW 以上的海上型风力机将成为主流。

风电的突出优点是环境效益好，不排放任何有害气体和废弃物。风电场虽然占了大片土地，但是风力发电机组基础使用的面积很小，不影响农田和牧场的正常生产。

### 1.1.2 风电发展史与现状

19 世纪末，丹麦首先研制出风力发电机组。直到 20 世纪 70 年代以前，只有小型充电用风力机达到实用阶段。美国在 20 世纪 30 年代还有许多电网未通达的地区，独立运行的小型风力发电机组在实现农村电气化方面起了很大作用，当时的机

组多采用木制叶片、固定轮毂和侧偏尾舵调速，单机容量的范围为 0.5~3kW。

对于如何将风力发出的电送入常规电网，曾经做过许多尝试来研制并网风力发电机组。1941 年 10 月，美国制造的 1250kW 风力发电机组，风轮直径为 53m，安装在佛蒙特州，实现了作为常规电站并入电网，后因一个叶片在 1945 年 3 月脱落而停止运行。

另外，法国、前苏联和丹麦也研制过百千瓦级的机组，其中对后来风力发电机组技术发展产生过重要影响的是丹麦 Gedser 200kW 风力发电机组，从 1957 年运行到 1966 年，平均年发电量为 45 万千瓦，设计者采用异步发电机、定桨距风轮和叶片端部有制动翼片，这种结构方式后来成为丹麦风力发电机组的主流，在市场上获得巨大成功。

1973 年发生石油危机以后，美国、西欧等发达国家为寻求替代化石燃料的能源，投入大量经费，动员高科技产业，利用计算机、空气动力学、结构力学和材料科学等领域的新技术研制现代风力发电机组，开创了风能利用的新时期。

20 世纪 70 年代到 80 年代中期，美国、英国和德国等国政府投入巨资开发单机容量兆瓦级风力发电机组，如美国波音公司研制了 2500kW 和 3200kW 的机组，风轮直径约 100m，塔高为 80m，英国的宇航公司和德国的 MAN 公司分别研制了 3000kW 的机组，所有这些巨型机组都未能正常运行，因其发生故障后维修非常困难，经费也难以维持，没有能够发展成商业机组，未能形成一个适应市场需求的风力发电机组制造产业。

丹麦的中小企业，尤其是农机制造商，如 Vestas 和 Bonus 等，积极开发风力发电机组产品，当时丹麦的产品继承了 Gedser 200kW 风力发电机组的设计理念，在新样机测试过程中研究人员对失速调节功率理论进行深入探讨，还就测试时发现问题提出了解决办法，并帮助厂商改进。丹麦风力发电机组制造商既得到科研机构的支持，又积累了丰富的现场运行经验，而且有机会从稳定的风电市场上连续接到订单，不断对产品进行完善，单机容量逐步从小到大，直到 1000kW 以上的兆瓦级机组，在市场上建立了产品性能好、可靠性高的信誉。

此后，德国和西班牙等欧洲国家也相继出台了激励风电发展的政策，其核心是以长期固定的较高电价收购风电，使这些国家成为风力发电机组市场扩展最快的地区，丹麦的制造商也在有关国家建立了合资公司，生产丹麦品牌的机组，在 2000 年世界前十名风力发电机组制造商的市场份额中占到 90%。

风力发电机组技术的发展经历了从多种结构形式逐步向少数几种过渡的过程。20 世纪 80 年代初期，市场上有上风向式和下风向式；风轮主轴有水平的和垂直的；风轮叶片数有三个、两个、甚至一个的；叶片材料有木头的和玻璃钢的。到现在只剩下以水平轴、上风向、三叶片的机组为主，其中又有定桨距和变桨距风轮，定转速和变转速发电机，有齿轮箱和无齿轮箱等几种。

此外，值得注意的是，风力发电机组的技术正沿着增大单机容量、减轻每单位容量的自重、提高转换效率的方向发展。

在欧洲，因为风能资源丰富的陆地面积有限，过多安装巨大的风力发电机组会

影响自然景观,而海岸线附近的海域风能资源丰富,面积辽阔,适合更大规模开发风电。20世纪90年代中期,丹麦在海上建立了两个示范风电场并获得成功,表明技术上是可行的。2000年开始建设商业化海上风电场的示范工程,每个风电场的规模为4万千瓦到十几万千瓦。随着海上风电场的建设,需要单机容量更大的机组,2.5MW的机组已经投入运行,正在研制3~5MW的巨型机组。

2009年全球风电产业在去年全球经济危机的冲击下逆势上涨31%,新增装机容量为3.75万兆瓦,将总装机容量推升至15.79万兆瓦。全球风电装机总量预计在未来五年增加两倍至44700万千瓦,且可能在十年内扩大至近100000万千瓦。

2009年,中国的涨幅引领全球风电产业,其新增装机容量超过100%,从2008年的1.2万兆瓦上涨到2009年底的2.51万兆瓦,新增装机容量达到1.3万兆瓦。同年,美国风电产业的涨势也强劲,其新增装机容量上涨39%,约为1万兆瓦,总装机容量达到3.5万兆瓦。欧洲新增装机容量上涨1.053万兆瓦,达到7.61万兆瓦。其中,西班牙新增容量达到2460MW,德国达到1920MW。

### 1.1.3 中国风力发电的发展

中国现代风力发电机技术的开发利用起源于20世纪70年代初。经过初期发展、单机分散研制、示范应用、重点攻关、实用推广、系列化和标准化几个阶段的发展,无论在科学研究、设计制造,还是试验、示范、应用推广等方面均有了长足的进步和很大的提高,并取得了明显的经济效益和社会效益。截至2000年底,全国累计生产离网型风力发电机组10万多台。

1986年4月,中国第一个风电场在山东荣成并网发电,3台55kW机组是由航空部和山东省由丹麦引进的,同年10月作为国际科技合作项目,利用比利时政府赠送的4台200kW机组建成平潭示范风电场。从1989年起全国各地陆续利用外国政府赠款或优惠贷款引进机组建设风电场,装机容量逐年增长,2000年底全国共有26个风电场,装机容量达到34.3万千瓦。

1997年当年装机超过10万千瓦,达到一个高峰。

2003年以后中国风力机进入了快速发展时期。

2009年中国成为第一大风电装机市场,新增装机容量为1375万千瓦,增长率连续6年超过100%,成为增长速度最快的国家。累计装机容量达到2580万千瓦,超过德国,位列全球第二。

2009年我国的兆瓦级风力机占据了市场的主导。2008年新增装机的单机平均容量为1.2MW,而2009年的数字变成了1.3MW,并且去年兆瓦级风力机的市场份额占到了86%,其中67%在1.5MW以上。

尽管遭遇金融危机,但去年全球新增风电装机容量达创纪录的3.75万兆瓦,而中国独占三分之一强。

截至2009年底,我国风电并网总容量达1613万千瓦,同比增长92.26%。其中,2009年风电电量为269亿千瓦时,同比增长105.86%,占总电量的0.75%。我国已建立起了二百余个风电场,风电场的迅速发展带动了风能产业的发展和风能

技术的进步,我国已能自行研制兆瓦级风力发电机组,最大功率达到 3.0MW,并且开始规划海上风电项目。

中国的风电发展已经成为最为成熟的可再生能源,无论是装机容量还是产业发展,我们都保持行业持续高速发展的态势。如果说改革开放的 30 年是中国风电快速发展的开拓期,那么,2009 年则是中国风能行业腾飞的标志年。

通过大规模开发,促进技术进步和产业发展,实现设备制造国产化,尽快使风电布局具有市场竞争力。到 2020 年,将在新疆、甘肃、内蒙古、河北、东北以及江苏沿海等地建立 6 个千万千瓦风电基地,在河北、内蒙古、辽宁等地建立若干百万千瓦风电基地。

2009 年中国成为第一大风电装机市场,装机容量新增 1375 万千瓦。而且三家中国风力机供应商跻身全球风力机制造商排名前十位,见表 1-1。

表 1-1 2009 年全球十大风力机供应商

| 排 名 | 公 司     | 国 别 | 全球市场份额/% |
|-----|---------|-----|----------|
| 1   | Vestas  | 丹麦  | 12.5     |
| 2   | 通用电气    | 美国  | 12.4     |
| 3   | 华锐风电    | 中国  | 9.2      |
| 4   | Enercon | 德国  | 8.5      |
| 5   | 金风科技    | 中国  | 7.2      |
| 6   | Gamasa  | 西班牙 | 6.7      |
| 7   | 东方电气    | 中国  | 6.5      |
| 8   | Suzlon  | 印度  | 6.4      |
| 9   | 西门子     | 德国  | 3.4      |
| 10  | RePower | 德国  | 3.4      |
|     | 其他      |     | 18.5     |

## 1.2 风力机的结构特点

### 1.2.1 风力发电机组的组成

风力发电机组用于把风能转换为电能,并按照供电公司的指标给其电网进行供电的设备。以双馈机组为例介绍风力发电机组的结构,见图 1-1。

如图 1-1 所示,叶片 4 通过变桨轴承被安装到轮毂 1 上,共同组成风轮。风轮吸收风能并转换成风轮的旋转机械能。机械能通过连接在轮毂上的主轴 5 传入增速箱 6。增速箱把风轮输入的大扭矩、低转速能量通过两级行星一级平行轴转换成小扭矩、高转速的形式后,通过联轴器 8 传递给发电机 9。增速箱通过减震装置被固定在前机舱底架 13 上。增速箱与前机舱底架、增速箱与减震装置之间均有弹性部件,此结构可以大大吸收风轮和增速箱所产生的震动,降低震动对系统的破坏。而且联轴器 8 是柔性联轴器,它本身可以吸收震动,并且可以补偿两平行性偏差和角度误差。在增速箱的输出轴上装有高速轴制动器 7,用于紧急情况下使用制动系

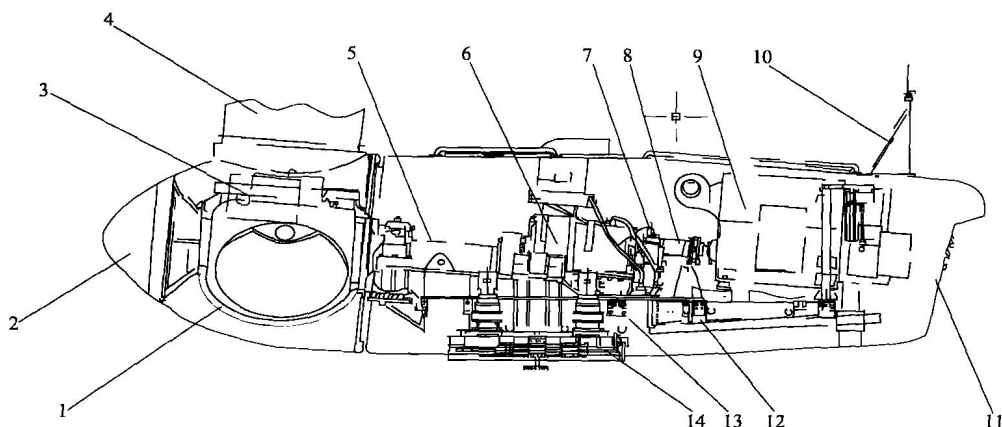


图 1-1 风力发电机组总图

- 1—轮毂；2—导流罩；3—变桨系统；4—叶片；5—主轴；6—增速箱；7—高速轴制动器；  
8—联轴器；9—发电机；10—风向风速仪及防雷装置；11—机舱罩；  
12—后机舱底架；13—前机舱底架；14—偏航系统

统。发电机安装在机舱的尾部，它将机械能转变成电能并被供到电网上。由于其工作环境的特殊，限制了发电机的体积和重量。发电机的极对数要少，因此需要的转速较高。变速恒频双馈机组采用了双馈感应发电机的形式，发电机的定子直接连接到三相电源上，转子和变流器相连。

风是随机的，风向时时刻刻在变化，为使风力发电机组的风轮始终处于迎风状态，充分利用风能，提高风力发电机组的发电效率，风力发电机组设有偏航机构。通过风向风速仪 10，系统采集到风向信号，经处理后控制系统发出偏航信号，系统驱动 4 个偏航驱动电机使机舱围绕塔筒转动，实现偏航。导流罩 2 和机舱罩 11 组成一个密封体保护设备不受环境影响，且减少噪声排放。

变速机组可在变化的风况条件下，变化的转速运行状态中获取最大的能量，当风速处于  $3\sim 25\text{m/s}$  时便可以进行发电。当风速跃升时，发电机通过控制电机转矩的方法把能量储备起来，在低负荷状态下把阵风能量转换为电能。变速恒频双馈机组把一个双馈异步发电机和一个具有最新 IGBT 技术的变流器相融合，实现了机组不受风向、风速约束。采用以上技术可确保从该系统中输出电能平稳地输送到电网。

### 1.2.2 主流风力机的结构特点

风力发电机机型很多，长期的应用实践证明，水平轴风力发电机因其风能利用效率高、控制方便等诸多优点，逐渐成为现代风力发电机的主流机型。

目前，水平轴风力发电机组均采用了上风向、水平轴、三叶片结构，该种类型的机组技术成熟，可靠性较高，在世界各地得到了广泛的运用。水平轴风力发电机根据传动结构的不同，在机型方面又可以分为双馈型、直驱型和混合型；混合型风力机也称为半直驱风力机。

### 1.2.2.1 双馈型

采用“风轮+多级增速机+联轴器+发电机”的结构，风轮通过增速机多级变速驱动双馈异步电机，这是目前市场上的主流产品。其优点是技术成熟、市场配套能力好、制造成本低；缺点是整体方案轴向尺寸长，结构分散，增速机采用多级增速，速比一般在 $1:100$ 左右，增速机速比大、转速高，对增速机轴承、齿轮的寿命来说是个严峻考验。

双馈型风力机的代表厂商有国外的 Vestas、Gamesa、GE、Suzlon、Repower、Siemens；国内主要有三一电气、大连华锐、东方汽轮机厂、上海电气、浙江运达、北重、广东明阳、重庆海装等，见图 1-2、图 1-3。



图 1-2 三一电气 SE7715 双馈风力发电机组

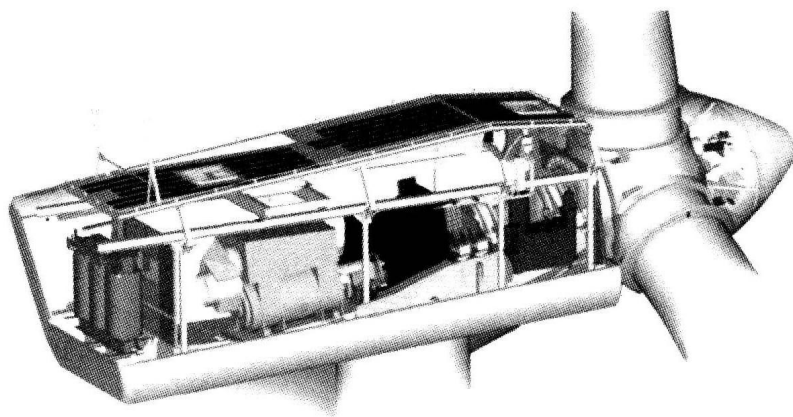


图 1-3 Vestas V80/2.0MW 风力机

### 1.2.2.2 直驱型

采用“风轮+发电机”的结构，风轮直接驱动多级同步发电机。直驱式风力机具有转速低、传动链损失小、正常维护费用低的优点，但多级直驱发电机极数多、体积大、需要大型加工设备、综合成本高。若采用永磁发电机存在消磁、退磁风险，国内技术还不太成熟。

1.5MW 直驱式发电机直径达到 5m 左右, 需要大型加工设备, 加工成本高, 难度大; 庞大的直径导致运输尺寸严重超宽, 陆路运输会产生额外的费用, 由于发电机体积超大、重量超重, 还给兆瓦级大型风力发电机组的生产发展带来严重制约。

直驱型风力机按风轮直接驱动发电机旋转部位的不同, 可以分为外转子式和内转子式; 按发电机励磁方式的不同, 又可以分为永磁式和交流励磁式。

直驱型风力机的代表厂商有: 国外有 Enercon、Vensys、Clipper; 国内主要有金风科技、湘电风能等, 见图 1-4、图 1-5。

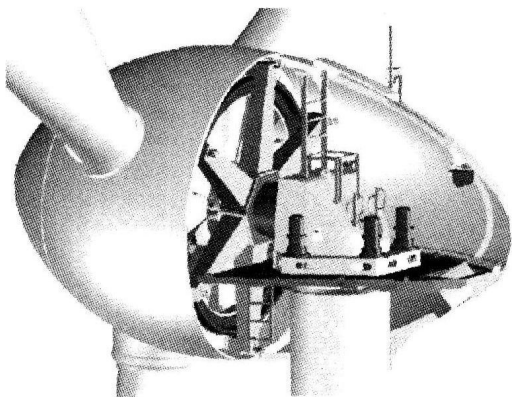


图 1-4 Enercon 内转子式风力机

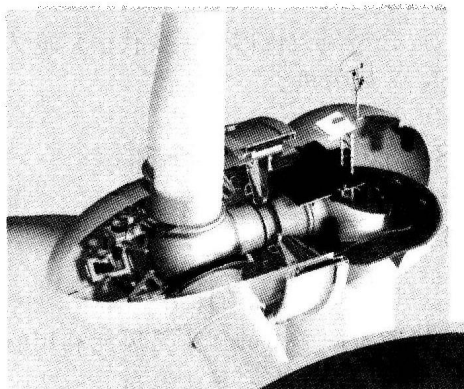


图 1-5 金风外转子式风力机

### 1.2.2.3 混合型

采用“风轮+增速机+发电机”的结构, 增速机和发电机依靠法兰紧密连接在

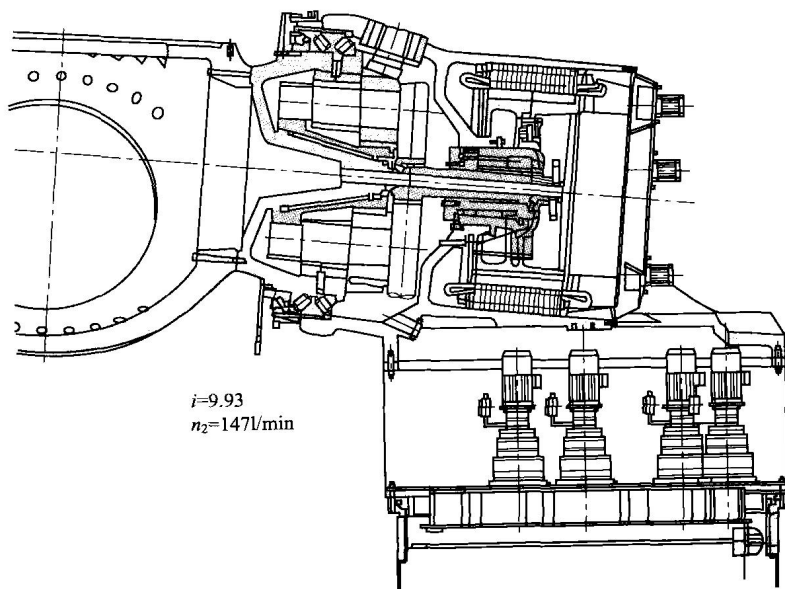


图 1-6 Multibrid 5MW 风力机

一起,一般采用一级行星增速,速比在 1:10 左右。

混合型风力机的特点是增速机采用单级行星式,速比小、发电机极速多。该机型介于双馈型和直驱型之间,旨在融合两者的优点而避免其缺点;既解决双馈型风力机增速机速比大、转速高、易出故障的问题,又能避免直驱型发电机体积大、超重、需超大型加工设备、成本费用高的缺点。

混合型风力发电机组的增速机和发电机同轴直联,结构非常紧凑。但实际应用中,维修极其不方便、重心位置严重前倾,带来整体受力不好的缺点,因此实际应用比较少。

混合型风力机国外主要代表厂商为:Multibrid、Aerodyn。图 1-6 为 Multibrid 的 5MW 风力机。

## 1.3 风力机的运行环境

### 1.3.1 风能资源分布

#### 1.3.1.1 风能资源的评估

风能资源潜力的多少是风能利用的关键。收集能量的成本是由风力发电机组设备的成本、安装费用和维修费等与实际的产能量所确定的,因此选择一种风力发电机组,不但要考虑节省基本投资,而且要根据当地风能资源选择适当的风力发电机组,使风力发电机组与风能资源两者相匹配,才能获得最大的经济效益。

根据风的气候特点,需要有 10 年以上的观测资料才能比较客观地反映一地的真实状况。为此,计算了全国 900 余个气象台站 10 年平均风能密度值,绘制成全国年平均风功率密度分布图。

由于风吹过单位截面积的风能转换装置后,必须经过前后左右各 10 倍直径距离后才能恢复到原来的速度,所以将图上的  $10\text{W}/\text{m}^2$ 、 $25\text{W}/\text{m}^2$ 、 $50\text{W}/\text{m}^2$ 、 $100\text{W}/\text{m}^2$ 、 $200\text{W}/\text{m}^2$  和大于  $200\text{W}/\text{m}^2$  的各风功率密度等值线间的面积分别乘以各等级风功率密度值,求和后再除以 100,即得到风能总储量。

据测算,在 10m 高我国风能理论资源储量为  $322.6 \times 10^{10} \text{W}$ ,即 32.26 亿千瓦。实际可供开发的量按  $322.6 \times 10^{10} \text{W}$  的 1/10 估计;则可开发量为  $322.6 \times 10^9 \text{W}$ ,即 3.226 亿千瓦。考虑到风力发电机组风轮的实际扫掠面积为圆形,对于 1m 直径风轮的面积为  $0.25 \times \pi = 0.785 \text{m}^2$ 。因此,再乘以面积系数 0.785,即为经济可开发量。由此得到全国风能经济可开发量为  $2.53 \times 10^{10} \text{W}$ ,即 2.53 亿千瓦。

我国有效风功率密度和可利用小时数见图 1-7 和图 1-8,它们代表了风能资源丰欠的指标值。如果年利用小时数按 2000~5000h 计,风电的发电量可达 5060 亿~6325 亿千瓦时。

#### 1.3.1.2 风能资源的分区

我国幅员辽阔,海岸线长,风能资源比较丰富。据国家气象局估算,全国风能密度为  $100\text{W}/\text{m}^2$ ,风能资源总储量约  $1.6 \times 10^5 \text{MW}$ ,特别是东南沿海及附近岛屿、