

# 风力发电机组设计、制造及 风电场设计、施工

苏绍禹 苏刚 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS





苏绍禹，男，1946年生。1970年毕业于大连理工大学，高级工程师。

主要技术业绩

**1. 在学术方面：**

- (1) 著作《风力发电机设计及运行维护》（中国电力出版社，2003.1）
- (2) 著作《永磁发电机机理、设计及应用》（机械工业出版社，2012.4）
- (3) 发表《渣浆泵过流部件破坏的原因分析》、《中国西部区的特点及开发对策》等30余篇论文

**2. 在科技成果及专利方面：**

- (1) “NBJ-70泥钵机的研制” 1982年获林业部科技成果三等奖
- (2) “SSWZ300重型万向联轴器” 1994年获吉林省优秀新产品开发三等奖
- (3) “SSWQ(Z)万向联轴器” 2004年获全国职工技术创新成果三等奖、吉林省一等奖
- (4) 专利“有止推轴承的联轴器”（专利号95223268.5）及专利“高效永磁交流发电机”（专利号98211145.2）

**3. 2003年获吉林省“五一”劳动奖章**



苏刚，男，1974年生。1997年毕业于黑龙江商学院电子工程系，2002年长春理工大学金属材料硕士研究生毕业。1997年至2002年在佛吉亚消声器有限公司任现场自动化设备维护工程师；2002年至2010年在奥托立夫汽车安全系统有限公司任自动化设备主管工程师；2010年至今在北京万源瀚德汽车密封系统有限公司任设备部经理。

# 风力发电机组设计、制造及 风电场设计、施工

苏绍禹 苏 刚 编著



机械工业出版社

本书给出了传统式、混合式和直驱式风力发电机组的结构,各部件的材料、制造及其强度、刚度的校核,也给出了风力发电的机理。总结国内外风力发电机组的结构特点,提出并实践了利用“价值工程”对风力发电机组独立的调速、调向功能的合并,利用调向系统实现调速和调向。同时,也创造性地提出了风力发电机组效率提高的途径以及额定风速的确定对风力发电机组经济效益的影响。

本书阐述了发展风电的意义和风电及风力发电机组的发展趋势。在对各式风力发电机组比较的基础上,提出了混合式和直驱式风力发电机组是未来最有发展前景的结构形式。

本书也给出了风速计算及风电场风速实测、风电场选址、可行性研究和风电场的设计。在总结风力发电机组倒塌原因的基础上,提出了风力发电机组塔架基础设计、计算及施工的新思路。

本书是作者继2003年出版的著作《风力发电机设计与运行维护》十年之后关于风力发电机组设计、制造及风电场设计、施工等方面的一部新著,可为从事风力发电机组设计、研发、制造方面和在风电场从事风力发电机组运行、管理和维护的工程技术人员提供参考,也可作为高等院校机械设计、制造、机电一体化等专业的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组设计、制造及风电场设计、施工/苏绍禹,苏刚编著.  
—北京:机械工业出版社,2013.3

ISBN 978-7-111-41423-0

I. ①风… II. ①苏…②苏… III. ①风力发电机-发电机组-设计  
②风力发电机-发电机组-制造③风力发电-发电厂-设计④风力发电-  
发电厂-工程施工 IV. ①TM315②TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第025343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:江婧婧 责任编辑:江婧婧

版式设计:张薇 责任校对:刘怡丹

封面设计:路恩中 责任印制:

北京京丰印刷厂印刷

2013年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.25印张·524千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-41423-0

定价:59.80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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

风能，是无污染、可再生、不分国界、不用花钱就可以得到的并且取之不尽用之不竭的清洁能源。利用风能发电，始于第一次世界大战之后。一战之后，工业复苏，能源短缺，丹麦仿造飞机的螺旋桨制造了二叶、三叶的风力发电机组用来并网发电，虽然装机容量不足 5kW，但却开创了风能发电的先河。

二战之后，百废待兴，能源短缺，工业发达国家开始重视风能发电。20 世纪的 40 ~ 60 年代，诸如美国、德国、丹麦、荷兰等工业发达国家研发了很多形式的风力发电机组，并在实践的基础上不断总结、改进，使风力发电机组得到了快速发展。但由于风力发电机组的发电成本比廉价的煤炭、石油类能源发电的成本高，风力发电机组没有得到应有的发展。

1973 年，世界范围内爆发了石油危机，世界上很多工业发达国家又开始重视风力发电并率先制造风力发电机组并网发电。经过几十年的研究、实践、改进和发展，一些工业发达国家的风力发电机组在 20 世纪 80 年代之后技术基本成熟，并且实现了水平轴风力发电机组的商品化生产。

由于煤炭、石油等化石类能源不可再生，储量有限，不可能无限制地开采利用，同时煤炭、石油等化石类能源在近百年里支持着人类的发展和进步，它们在燃烧的过程中放出了大量的  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$ 。 $\text{CO}_2$  的温室效应在不断地改变地球的局部气候，催生了一年甚似一年的洪涝、干旱、飓风、冰川消融等重大自然灾害； $\text{SO}_2$  形成酸雨，摧毁了很多森林，危害了很多农作物，腐蚀掉很多的钢铁材料和建筑物。为此，全世界都在开发可再生、无污染的新能源并提倡节能减排。进入 21 世纪，风电每年以 20% 以上的增容速度发展着，风电成为诸能源中发展最快的能源。

20 世纪 90 年代，中国开始购入世界工业发达国家的风力发电机组，建风电场并网发电。经过十几年的引进、消化、吸收，也逐渐可以自行制造风力发电机组。

中国是发展中的大国，人口超过 13 亿。GDP 每年以 9% 以上的速度快速增长着，需要强大的电力支持。中国电力每年以 12% 的增长速度支持 9% 的 GDP 的增长和人民日益提高的生活质量对电力的需求。至 2011 年，中国石油对外的依存度达到 57%，仍需大量进口煤炭和天然气以支持火电的发展。中国电力供应 75% 是火电，减少  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  排放，改变以煤炭为主的能源消耗结构，开发无污染、可再生能源——风电和太阳能发电已是势在必行。

十年前，作者写了《风力发电机设计与运行维护》一书由中国电力出版社出版，当时很多人认为，风电是可有可无的补充能源。但作者认为，风电是非常有发展前景的清洁能源。开发风电不仅会减少  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  的排放，对改变中国以煤炭为主的不合理能源结构起到积极促进作用，而且风力发电机组的制造将会造就新兴的机械制造业，将会为数以万计的人提供就业岗位。开发风电是造福子孙后代的伟大事业。

斗转星移，十年过去了。中国风电由 2000 年装机容量 2970MW 发展到 2011 年的 52800MW；风力发电机组的制造成本由 2000 年的 1 万元/kW 以上下降到 2011 年 (0.5~0.6) 万元/kW；风电成本由 2000 年的 1.2 元/kWh 降到 2011 年的 (0.4~0.6) 元/kWh，接近中国长江以南的火电水平。中国的风电得到了长足的发展。

风电已不再是可有可无的补充能源，它已成为具有巨大商业价值和潜在发展前途并具有光明发展前景的能源。十年间，中国风电的长足发展催生了一大批诸如新疆“金风”、四川“东方汽轮”、上海“上电”、浙江“运达”、沈阳“华创”、保定“惠腾”等 600 余家新兴机械制造、发电机制造及风力发电机组零部件制造企业，为数以万计的人提供了就业岗位，为中国国民经济发展做出了贡献。

中国地域辽阔、风能资源丰富，不计南海的风能资源已达到 25 亿 MW 之多，具有极其可贵的发展潜力。虽然风力发电机组还存在着这样或那样的不足之处，但作者相信，未来的风力发电机组不仅是中国制造，更是中国创造，今后十年、二十年，中国风电达到供电能力的 12%，甚至达到供电能力的 20% 的时候，每年不仅会减少大量的 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 的排放，更会为中国国民经济的可持续发展提供清洁地可持续支持国民经济发展的电力。

作者每到风电场去，看到巍然耸立在风电场上的风力发电机组时，真是心旷神怡，由衷地感到欣慰。

清风徐徐风轮转，  
风能变成电能源，  
省煤节油不排碳，  
山青水绿天更蓝。

日月星辰，光阴如梭，十年过去了。时代在前进，技术在进步，为了适应风力发电机组的发展，机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长、江婧婧编辑鼓励作者写了《风力发电机组设计、制造及风电场设计、施工》这本书，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免挂一漏万，有这样或那样的错误，贻笑大方，敬请读者批评指正，作者不胜感谢。

作 者  
2012 年 4 月于长春

# 目 录

前言	
主要符号	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 风能利用的历史及发展 .....	1
第二节 风力发电的意义和风电的未来 .....	2
第三节 风电及风力发电机组尚存在的一些有待解决的问题 .....	4
<b>第二章 风力发电机组及其应用</b> .....	6
第一节 现代风力发电机组 .....	6
第二节 风力发电机组的应用 .....	17
<b>第三章 风力发电机机理</b> .....	21
第一节 风力机的理论 .....	21
第二节 叶片形式与叶片方面概念 .....	24
第三节 叶片翼型 .....	29
第四节 叶片的空气动力学 .....	37
第五节 风力发电机的效率及与效率相关的参数 .....	40
<b>第四章 风力发电机组的分类及结构</b> .....	44
第一节 风力发电机组的分类 .....	44
第二节 微、小型风力发电机组结构 .....	47
第三节 国内外中、大型水平轴传统式风力发电机组结构 .....	49
第四节 水平轴直驱式和混合式风力发电机组结构 .....	59
第五节 垂直轴风力发电机组结构 .....	62
第六节 风力发电机组的防雷、计算机控制、塔架基础和并网 .....	63
<b>第五章 风力发电机组设计程序及主要参数</b> .....	68
第一节 风力发电机组的设计程序 .....	68
第二节 风力发电机组设计用到的参数 .....	71
<b>第六章 风力发电机组的总体设计和结构布局</b> .....	76
第一节 风力发电机组的综合性能和技术参数的设计、计算 .....	76
第二节 离网微、小型风力发电机组的总体结构布局 .....	80
第三节 传统式和混合式并网风力发电机组的总体结构布局 .....	84
第四节 直驱式水平轴并网风力发电机组的总体结构布局 .....	86
第五节 用“价值工程”设计实现用调向系统达到调向和调速两个功能 .....	88
<b>第七章 风力发电机组叶片设计、制造和受力分析及强度计算</b> .....	92
第一节 关于风力发电机组叶片的概念或术语 .....	92
第二节 风力发电机组叶片设计的总体要求 .....	93

第三节	风力发电机组叶片参数和尺寸的计算、确定 .....	96
第四节	垂直轴达里厄风力发电机组叶片参数 .....	102
第五节	水平轴风力发电机组叶片结构、材料和制造 .....	104
第六节	风力发电机组叶片受力 .....	109
第七节	风力发电机组叶片的强度、刚度 .....	113
第八节	叶片尺寸设计举例 .....	122
<b>第八章</b>	<b>风力发电机组风轮轴、增速器及联轴器的设计、制造及选择 .....</b>	<b>127</b>
第一节	离网直驱式风力发电机组风轮轴的受力分析及危险轴径的确定 .....	127
第二节	离网直驱式风力发电机组风轮轴的材料、制造和强度校核 .....	130
第三节	并网直驱式风力发电机组风轮轴的结构、材料及制造 .....	133
第四节	并网直驱式风力发电机组风轮轴的强度校核 .....	138
第五节	传统式并网风力发电机组风轮轴的材料与制造及受力分析 .....	140
第六节	传统式并网风力发电机组风轮轴最危险轴径的确定和强度校核 .....	143
第七节	传统式并网风力发电机组的增速器和轴承的选择 .....	146
第八节	传统式和混合式并网风力发电机组联轴器的选择 .....	150
<b>第九章</b>	<b>风力发电机组轮毂和机舱底座梁的设计 .....</b>	<b>156</b>
第一节	风力发电机组轮毂的形式、材料和制造 .....	156
第二节	轮毂的受力分析和强度校核 .....	158
第三节	机舱底座梁的设计 .....	161
<b>第十章</b>	<b>风力发电机组用发电机的设计 .....</b>	<b>168</b>
第一节	感应异步发电机与并网 .....	168
第二节	风力发电机组用永磁发电机结构及并网 .....	171
第三节	风力发电机组用永磁发电机设计给定数据和参数计算 .....	174
第四节	永磁发电机主要尺寸的确定 .....	176
第五节	永磁发电机的气隙磁密、线负荷和利用系数及发热系数 .....	180
第六节	永磁发电机的功率 .....	183
第七节	永磁发电机的效率 .....	185
第八节	永磁发电机转子的平衡 .....	189
第九节	永磁发电机设计举例 .....	191
<b>第十一章</b>	<b>风力发电机组调速、调向和制动机构设计 .....</b>	<b>202</b>
第一节	离网风力发电机组调向、调速机构的设计 .....	202
第二节	传统式水平轴叶尖扰流调速、调向和制动 .....	210
第三节	变桨距水平轴风力发电机组的调速、调向和制动 .....	213
第四节	风力发电机组的调向力矩、制动力矩和主制动力矩 .....	215
第五节	调向齿轮的接触强度与弯曲强度 .....	219
<b>第十二章</b>	<b>风力发电机组塔架和塔架基础的设计及制造 .....</b>	<b>224</b>
第一节	塔架的结构形式和受力分析 .....	224
第二节	塔架的强度和刚度的校核 .....	228
第三节	塔架塔筒壁厚的初估与塔架的制造 .....	233

第四节	塔架的振动、防雷击及防腐处理 .....	235
第五节	风力发电机组塔架基础的重要性 .....	236
第六节	塔架基础的倾覆力矩及平衡 .....	238
第七节	塔架与基础的连接及基础配筋的估算 .....	243
<b>第十三章</b>	<b>提高风力发电机组经济效益的途径 .....</b>	<b>247</b>
第一节	风力发电机组的功率及效率对风力发电机组经济效益的影响 .....	247
第二节	提高风力发电机组的利用率是提高其经济效益的有效途径 .....	252
第三节	风力发电机组运行的安全性、可靠性和使用寿命对其创造经济效益的影响 .....	256
<b>第十四章</b>	<b>水平轴并网风力发电机组未来发展趋势 .....</b>	<b>257</b>
第一节	现代国内外水平轴并网风力发电机组的结构及特点 .....	257
第二节	传统式、混合式和直驱式水平轴并网风力发电机组的比较 .....	258
第三节	风力发电机组未来发展趋势 .....	260
<b>第十五章</b>	<b>中国的风能资源及风能评估 .....</b>	<b>263</b>
第一节	中国陆地型和海洋型风能资源区的大体分布 .....	263
第二节	地理、自然条件对风能利用的影响 .....	267
第三节	年平均风速、风功率密度和风能利用区的划分 .....	268
第四节	风能评估及风速估算 .....	271
第五节	风的实测与实测风场的风能评估 .....	276
第六节	风能资源评估 .....	279
<b>第十六章</b>	<b>风电场的设计及风力发电机组的安装和调试 .....</b>	<b>282</b>
第一节	风电场的设计程序 .....	282
第二节	风电场风能资源的调查和风电场的选址 .....	283
第三节	风电场建设项目的“项目建议书” .....	284
第四节	建设风电场项目的可行性研究 .....	286
第五节	风电场的设计 .....	290
第六节	风力发电机组的安装和调试 .....	293
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>300</b>
附录 A	叶片翼型目录 .....	300
附录 B	中国及 IEC (国际电工委员会) 标准目录 .....	301
附录 C	钕铁硼永磁体性能 .....	302
附录 D	漆包圆铜线与厚绝缘聚酯漆包扁铜线常用数据表 .....	304
附录 E	电工用热轧硅钢薄板强磁场条件下磁感应强度及最大铁损 (GB/T 5212—1985) .....	306
附录 F	冷轧取向和无取向电工钢带 (片) .....	307
附录 G	部分导磁材料的磁化曲线及铁损曲线表 .....	310
附录 H	国产可用于制造风力发电机组塔架的钢板 .....	316
附录 I	可以做风力发电机组轮毂的球墨铸铁和可锻铸铁 .....	319
附录 J	JB/T 10300—2001 的附录 D 简化设计载荷 .....	319
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>326</b>

## 主要符号

- $A$ ——永磁发电机线负荷, 单位为  $A/cm$
- $A$ ——电流单位, 安培
- $A_j$ ——永磁发电机发热系数, 单位为  $A/cm \cdot A/mm^2$
- $a$ ——绕组并联支路数
- $a_m$ ——永磁体磁极面短边长, 单位为  $mm$
- $B_\delta$ ——永磁发电机气隙磁密, 单位为  $T$
- $B_1$ ——定子齿磁密, 单位为  $T$
- $B_j$ ——定子轭磁密, 单位为  $T$
- $B_r$ ——永磁体标称的剩磁, 单位为  $T$  或  $G$
- $B_m$ ——永磁体磁极表面磁感应强度, 单位为  $T$
- $b$ ——塔架塔筒两面壁厚, 单位为  $mm$
- $b_0$ ——定子槽口宽, 单位为  $mm$
- $b_p$ ——极弧长度, 单位为  $mm$
- $b'_p$ ——极弧系数
- $b_m$ ——永磁体矩形磁极极面长边的长度, 单位为  $mm$
- $C$ ——永磁发电机的利用系数
- $C_a$ ——空气密度高度修正系数
- $C_b$ ——空气密度温度修正系数
- $C_L$ ——叶片翼型升力系数
- $C_D$ ——叶片翼型阻力系数
- $C_M$ ——叶片翼型俯仰力矩系数
- $C_r$ ——空气动力系数
- $C_c$ ——叶片形状参数
- $C_p$ ——贝茨 (Betz) 系数, 风能利用系数,  $C_p = 0.593$
- $L/C$ ——叶片翼型的升阻比
- $D$ ——风轮轮毂直径, 单位为  $m$
- $D$ ——塔筒底部外径, 单位为  $m$
- $D_{i1}$ ——定子内径, 单位为  $m$  或  $mm$
- $D_1$ ——定子外径, 单位为  $m$  或  $mm$
- $D_2$ ——转子外径, 单位为  $m$  或  $mm$
- $d$ ——塔筒底部内径, 单位为  $m$
- $d$ ——风轮轮毂内径, 单位为  $m$
- $E$ ——材料弹性模量, 单位为  $N/mm^2$
- $E$ ——发电机的相电动势, 单位为  $V$

- $e$ ——偏心距  
 $F$ ——力，单位为 N  
 $F_t$ ——风吹在叶片上使叶片受到的推力，单位为 N  
 $F_n$ ——使叶片旋转的力，单位为 N  
 $F_{Dt}$ ——形成风轮反转矩的力，单位为 N  
 $F_l$ ——叶片自重和其离心力的代数和，单位为 N  
 $F_g$ ——一个叶片旋转的离心力  
 $F_2$ ——机舱及机舱内所有设备的重力，单位为 N  
 $F_L$ ——叶片升力，单位为 N  
 $F_D$ ——叶片阻力，单位为 N  
 $F_L^n$ ——升力使风轮旋转的力，单位为 N  
 $F_L^t$ ——升力在垂直于风轮旋转面与风向相同的分力，单位为 N  
 $F_D^t$ ——阻力在垂直于风轮旋转面与风向相同的分力，单位为 N  
 $F_D^n$ ——阻力在风轮旋转方向的分力，单位为 N  
 $f$ ——电流频率，单位为 Hz  
 $f_L$ ——滚动轴承的寿命系数  
 $f_n$ ——滚动轴承的速度系数  
 $f_F$ ——滚动轴承的载荷系数  
 $f_T$ ——滚动轴承的温度系数  
 $f_T$ ——风对叶片的推力使塔架形成的挠度，单位为 mm  
 $f'_T$ ——塔架自身受风推力形成的挠度，单位为 mm  
 $f_{\max}$ ——塔架最大挠度，单位为 mm  
 $G$ ——重力，单位为 N  
 $G$ ——材料的剪切弹性模量，单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$   
 $G_1$ ——塔架重心，单位为 N  
 $G_2$ ——回填土重力，单位为 N  
 $G_3$ ——塔架钢筋混凝土重力，单位为 N  
 $G_{Fe}$ ——发电机定子铁心重量，单位为 kg  
 $G_{Fej}$ ——定子轭重，单位为 kg  
 $G_{Fet}$ ——定子齿重，单位为 kg  
 $H$ ——轮毂中心高，单位为 m  
Hz——频率单位  
 $h_j$ ——定子轭高，单位为 mm  
 $h$ ——定子槽深，单位为 mm  
 $h_m$ ——永磁体两个极面之距，单位为 mm  
 $h$ ——塔架高，单位为 m  
 $I$ ——极惯性距，单位为  $\text{mm}^4$  或  $\text{m}^4$   
 $I_N$ ——电流，单位为 A  
 $J_a$ ——电流密度，单位为  $\text{A}/\text{mm}^2$

- $J$ ——极惯性矩, 单位为  $\text{mm}^4$   
 $K$ ——叶片数  
 $K$ ——载荷系数, 工况系数  
 $K_1$ ——安全系数  
 $K_2$ ——应力集中系数  
 $K_3$ ——材料不均匀系数  
 $K'$ ——叶片密实度  
 $K_L$ ——升力曲线平均斜率  
 $K_d$ ——绕组分布系数  
 $K_p$ ——绕组短距系数  
 $K_{dp}$ ——绕组基波系数  
 $K_m$ ——永磁体端面系数  
 $K_{Nm}$ ——气隙磁场波形系数  
 $K_n$ ——万向联轴器转速系数  
 $K_\beta$ ——万向联轴器轴线折角系数  
 $L$ ——叶片长, 单位为  $\text{m}$   
 $L$ ——叶片弦长, 单位为  $\text{m}$   
 $L_m$ ——叶片平均弦长, 单位为  $\text{m}$   
 $L$ ——滚动轴承额定寿命, 单位为  $\text{h}$  或  $10^6 \text{r}$   
 $L_R$ ——滚动轴承可靠度为  $R$  时的轴承寿命, 单位为  $\text{h}$  或  $10^6 \text{r}$   
 $L_n$ ——以  $\text{h}$  计的滚动轴承寿命, 单位为  $\text{h}$  或  $10^6 \text{r}$   
 $L_{ef}$ ——发电机定子有效长度, 单位为  $\text{m}$  或  $\text{mm}$   
 $M_w$ ——弯矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$   
 $M_t$ ——风轮推力所形成的弯矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$   
 $M'_n$ ——叶片的反转矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$   
 $M_T$ ——风对塔架的推力对塔架形成的弯矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$   
 $M_n$ ——转矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$   
 $m$ ——永磁发电机的相数  
 $m$ ——叶片质量, 单位为  $\text{kg}$   
 $m$ ——齿轮模数, 单位为  $\text{mm}$   
 $m_t$ ——齿轮端面模数, 单位为  $\text{mm}$   
 $N$ ——发电机每相串联导体数  
 $N_s$ ——发电机每槽导体数  
 $n_N$ ——发电机同步转速, 单位为  $\text{r}/\text{min}$   
 $N_e$ ——风力发电机组额定功率, 单位为  $\text{W}$  或  $\text{kW}$   
 $n$ ——转速, 单位为  $\text{r}/\text{min}$   
 $P$ ——功率, 单位为  $\text{W}$  或  $\text{kW}$   
 $P_n$ ——风的单位面积的推力  
 $P_{Fe}$ ——发电机定子铁损, 单位为  $\text{W}$  或  $\text{kW}$

- $P_{\text{Fej}}$ ——发电机定子轭铁损, 单位为 W 或 kW  
 $P_{\text{Fet}}$ ——发电机定子齿铁损, 单位为 W 或 kW  
 $P_{\text{cu}}$ ——定子绕组铜损, 单位为 W 或 kW  
 $P_{\text{hej}}$ ——定子轭铁损系数, 单位为 W/kg  
 $P_{\text{het}}$ ——定子齿铁损系数, 单位为 W/kg  
 $P_{\text{f}}$ ——轴承损耗, 单位为 W 或 kW  
 $P$ ——发电机极对数  
 $Q$ ——剪力, 单位为 N  
 $q$ ——发电机每极每相槽数  
 $R$ ——电阻, 单位为  $\Omega$   
 $R$ ——轴承可靠度  
 $R_0$ ——塔架塔筒圆环的中性半径, 单位为 m  
 $R_{75}$ ——定子绕组在 75℃ 时的电阻, 单位为  $\Omega$   
 $R$ ——达里厄风轮转动半径, 单位为 m  
 $R$ ——水平轴风轮半径, 单位为 m  
 $R_o$ ——轮毂半径, 单位为 m  
 $R_z$ ——展弦比  
 $S$ ——面积, 单位为  $\text{m}^2$   
 $S_m$ ——永磁体磁极面积, 单位为  $\text{mm}^2$   
 $S^*$ ——截面对中性轴的静矩, 单位为  $\text{m}^3$   
 $S_y$ ——叶片面积, 单位为  $\text{m}^2$   
 $S_{\text{f}}$ ——槽满率 (%)  
 $S$ ——定子槽面积, 单位为  $\text{mm}^2$   
 $S$ ——风轮扫掠面积, 单位为  $\text{m}^2$   
 $T_n$ ——扭矩, 单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$   
 $t$ ——定子齿距, 单位为 mm  
 $t$ ——塔架塔筒壁厚, 单位为 mm  
 $t_1$ ——定子齿宽, 单位为 mm  
 $U_N$ ——发电机线电压, 单位为 V  
 $V$ ——叶片尖端线速度, 单位为 m/s  
 $V$ ——发电机电压, 单位为 V  
 $V_w$ ——叶片的相对风速, 单位为 m/s  
 $v$ ——风速, 单位为 m/s  
 $W_n$ ——抗扭截面模量, 单位为  $\text{mm}^3$   
 $W_w$ ——抗弯截面模量, 单位为  $\text{mm}^3$   
 $y$ ——定子绕组节距  
 $Y_{\text{F}}$ ——齿形系数  
 $Z$ ——定子槽数  
 $\alpha$ ——叶片迎角, 单位为 ( $^\circ$ )

- $\alpha_0$ ——叶片翼型零升力的迎角，单位为 ( $^\circ$ )  
 $\alpha'_p$ ——极弧系数  
 $\widehat{\alpha'_p}$ ——极弧长度，单位为 mm  
 $\alpha_1$ ——齿轮分度圆压力角，单位为 ( $^\circ$ )  
 $\beta$ ——万向联轴器轴线折角，单位为 ( $^\circ$ )  
 $\beta$ ——发电机绕组节距比， $\beta = y/mq$   
 $\delta$ ——厚度，单位为 mm  
 $\delta$ ——发电机气隙长度，单位为 mm  
 $\sigma$ ——漏磁系数  
 $\sigma_w$ ——弯曲应力，单位为  $N/mm^2$   
 $[\sigma_w]$ ——许用弯曲应力，单位为  $N/mm^2$   
 $\sigma_L$ ——拉应力，单位为  $N/mm^2$   
 $[\sigma_L]$ ——许用拉应力，单位为  $N/mm^2$   
 $\sigma_n$ ——扭转应力，单位为  $N/mm^2$   
 $\tau$ ——剪应力，单位为  $N/mm^2$   
 $[\tau]$ ——许用剪应力，单位为  $N/mm^2$   
 $\tau_n$ ——扭转应力，单位为  $N/mm^2$   
 $[\tau_n]$ ——许用扭转应力，单位为  $N/mm^2$   
 $\theta$ ——转角，单位为 ( $^\circ$ )  
 $[\theta]$ ——许用转角，单位为 ( $^\circ$ )  
 $\theta$ ——叶片安装角，单位为 ( $^\circ$ )  
 $\lambda$ ——尖速比  
 $\lambda$ ——发电机尺寸比  
 $\phi$ ——叶片翼型相对风向角，单位为 ( $^\circ$ )。 $\phi = \alpha + \theta$   
 $\phi$ ——永磁发电机每极磁通，单位为 Wb  
 $\tau$ ——永磁发电机磁距，单位为 mm  
 $\eta$ ——效率 (%)  
 $\eta_1$ ——风力发电机组机械传动效率 (%)  
 $\eta_2$ ——发电机效率 (%)  
 $\eta_y$ ——液力效率 (%)  
 $\mu$ ——摩擦系数  
 $\rho$ ——空气密度，单位为  $kg/m^3$

# 第一章 绪 论

风，空气的流动就形成风。地球上的风是由于地球自转和地球纬度温差形成的。流动的空气所具有的动能称作风能。风能是无污染、可再生、不分国界、不用花钱就可以得到的取之不尽用之不竭的清洁能源。

## 第一节 风能利用的历史及发展

人类很早就开始利用风能了，在公元前 200 年就有人类利用风能的记载。人类最早利用风能是用风车提水、碾米、磨面及船的风帆助航。中国、伊拉克、埃及都是最早利用风能的国家。

人类利用风能，经历了一个漫长而曲折的历程。19 世纪以前，社会生产力很低，风能得到广泛利用。进入 19 世纪，北欧及美国对风能的利用还占有其总能耗的 30% 左右。随着蒸汽机的发明和广泛使用，由于风能没有蒸汽机那么方便和廉价，风能的利用退到了蒸汽机之后。

第一次世界大战之后，能源短缺，丹麦仿造飞机的螺旋桨制造了二叶、三叶高速风力发电机用来并网发电，虽然装机容量不足 5kW，但却开创了人类利用风能发电的先河。

第二次世界大战之后，工业复苏，能源短缺，风力发电又被重新重视起来。自 20 世纪 40 ~ 60 年代，丹麦研制了 10 ~ 100kW 的多种型号的风力发电机组并网发电；美国 1941 年研制 1 台 1250kW 的二叶片“伯能”风力发电机；法国自 1958 ~ 1966 年间先后研制了贝斯·罗曼尼 (best Romani) 风力发电机组，额定功率 800kW，尼尔必克 (Neypic) 风力发电机组，额定功率 132kW 及 1000kW；联邦德国自 1957 ~ 1968 年间研制了 10 ~ 100kW 风力发电机组，叶片采用复合材料，试验成功，为后来世界各国风力发电机组采用复合材料叶片奠定了基础，做出了贡献。

由于内燃机的发明和广泛应用，其燃料来自廉价的石油，而风力发电机组的发电成本比内燃机发电成本高，不具有竞争力，使风力发电机的发展又迟缓下来。

1973 年，世界发生了石油危机，世界上的很多工业发达国家又重新重视风力发电，并率先并网发电。丹麦在 1975 年用旧材料制造了一台功率为 2000kW、风轮直径为 54m 的三叶德文特 (Tvind) 大型风力发电机；1976 年，联邦德国研制格鲁威恩 (Growian) 3000kW 大型风力发电机组，其风轮直径达 100m 并成功地用复合材料做叶片；美国 1975 年研制成功功率 100kW 的 MOD-0 型及风轮直径 61m、功率 2000kW 的 MOD-1 型大型风力发电机组，而后又研制了风轮直径 91.5m、功率 2500kW 的 MOD-2 型大型风力发电机组。1985 年，美国又研制了功率 7500kW、风轮直径 122m 的 MOD-5 型大型风力发电机组。

《中国微》小型风力发电机的制造始于 20 世纪 80 年代，功率 50 ~ 1000W，主要为内蒙、青海的牧民蒙古包照明、收音机及牧民提水饮畜提供电力，并有少量出口。但中国在大、中型风力发电机组研发起步较晚，首台 18kW 水平轴三叶片是在 1977 年研制的中型风

力发电机组，叶片采用退役直升机桨叶，半导体励磁恒压三相同步发电机，安装在浙江嵊泗岛蔡园子镇的山上。

自 20 世纪 90 年代中国购入工业发达国家的风力发电机组建风电场。20 世纪 40 ~ 80 年代是风力发电机组研究、制造、试验、总结、改进时期，经过 60 余年的发展，风力发电机组技术日臻成熟，为风力发电机组商品化生产及风电场的建立奠定了基础。

自 20 世纪 90 年代以来，风力发电机组经历了 70 余年的研究、试验，技术日趋成熟，水平轴大型并网风力发电机组已经商品化生产。世界工业发达国家涌现出诸如德国 Nordex、Enercon、Repower、dewind，丹麦的 Vestas，西班牙的 Gamesa 等一大批风力发电机组制造商。

中国自 20 世纪 90 年代后期开始引进技术，经过消化、吸收，也自行生产了大型水平轴并网风力发电机组、先后涌现出新疆“金风”、浙江“运达”、四川“东方汽轮”、上海“上电”、沈阳“华创”、保定“惠腾”等 600 余家风力发电机组制造、发电机制造、叶片制造、风力发电机组部件生产制造企业。

进入 21 世纪，由于石油价格飞涨，煤炭、石油等化石类能源支持人类一百余年的发展，排放的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  给地球环境造成严重的危害，化石类不可再生能源也面临枯竭，世界各国都在节能减排，开发可再生无污染的清洁能源，风电已成为首选开发的能源之一。

进入 21 世纪，风电每年以 20% 的增容速度发展着。至 2006 年，世界风电总装机容量为 74221MW。其中德国 26622MW，占世界风电总装机容量的 27.9%；西班牙 11615MW，占 15.6%；美国总装机容量 11603MW，占 15.6%；印度总装机容量 6270MW，占 8.4%；中国总装机容量 2604MW，占 3.5%，居世界风电装机容量的第 6 位。

至 2008 年，世界风电总装机容量达到 1.2 亿 kW，平均年增长 28.8%。新增装机容量 27000MW，同比增长 36%。

至 2010 年，中国风电新增装机容量 16000MW，累计风电装机容量 41827MW，相当于每年可替代燃煤消耗 3129 万 t，减少 9000 万 t  $\text{CO}_2$  排放、3.3 万 t 悬浮颗粒物、6.4 万 t  $\text{SO}_2$  和 6 万 t 氮氧化物的排放。

至 2011 年，中国风电总装机容量 52800MW，成为世界第一风电大国。根据“新兴能源产业发展规划”，中国到 2015 年风电总装机容量可达到 90000MW，其中海上风电 5000MW；到 2020 年，中国风电装机容量将达到 1.5 亿 kW，其中海上风电将达到 3000 万 kW。

风电，已不再是可有可无的补充能源，它已成为具有巨大商业价值和潜在发展前景的能源，是改善地球环境、为民造福的能源，是人类赖以生存的不可缺少的主要能源之一。

## 第二节 风力发电的意义和风电的未来

### 1. 风力发电的意义

电是国民经济发展和民生不可缺少的能源。但是，电能不是第一能源。电是由火电、水电、核电、风电及太阳能发电构成的。火电是由燃烧煤炭、天然气类化石类能源转换来的，水电是由水的势能和动能转换来的，核电是由核反应放出的热量转换来的。

煤炭、石油等化石类能源支持世界各国一百余年的发展和进步，但燃烧煤炭和石油等化石类能源放出的  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  也给人类造成了严重的灾害。不计后果的碳排放，使全球气候发生了不正常的变化，催生了一年甚似一年的洪涝、干旱、飓风等灾害，摧毁了家园、夺走了生

命。南、北极的冰山逐年消融，造成海平面不断上升，正威胁着一些岛国的未来生存；气候的变化和人类对自然界的破坏又致使物种不断地灭绝，人类再也不能不计后果地燃烧化石类能源来满足经济发展和民生需求了，并且化石类能源是不可再生的能源，也面临枯竭的可能。

水电是利用水的势能和动能发电。水的势能和动能是无污染可再生的清洁能源，但是，全世界的水利资源有限，再度开发利用已十分有限。

核能发电，至2010年，世界上有的工业发达国家核电已占其供电能力的20%~30%。核能发电是利用核反应放出的热加热水，使水变成蒸汽驱动汽轮发电机发电，是核反应的部分核能转换成电能。核能，既不是无污染也不是可再生的能源。核反应的废料——乏燃料是极难处理的，它还在进行核反应，会污染环境，造成危害。在核电站的运行中，一旦发生核泄漏事故将会导致核灾难。人们不会忘记前苏联切尔诺贝利核电站一个核反应堆发生核爆炸造成20多万人死伤及核污染的可怕后果。也不会忘记2010年3月12日日本福岛核电站在9级地震及海啸的冲击下造成的核泄漏致使周边的环境受到核辐射的污染，几十万人不得不背井离乡躲避核辐射。日本福岛核泄漏或许需要十年甚至二十年才能治理好。核电由于核事故导致的核灾难引起了全世界有核国家的强烈关注，使得这些国家不得不重新审视如何安全发展核电，并重新制定防止核电引发的核灾难的安全措施。

核电不仅不是无污染可再生的能源，而且投资大，核电成本也远比水电、火电、风电的成本高。

面对经济发展和民生需求，对电力的需求逐年增加。而化石类能源会排放CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>给地球环境造成危害，而且在化石类能源面临枯竭的情况下，能源困局不仅仅是中国一国之事，而是世界性问题。因而世界各国开发利用无污染、可再生的能源已是大势所趋、迫在眉睫。

据估算，到2020年，世界对电力的需求量将比2000年增长70%以上。到2030年，全世界新增电力装机容量预计将达到48亿kW，其中发展中国家将新增20亿kW以上。火电难以废止，到2030年全球碳排放的45%~50%来自火电。

中国是发展中大国，人口拥有13.4亿之众。进入21世纪国民经济每年以9%以上的增长速度发展着，需要每年增加12%以上的电力支持才能满足国民经济的发展和人民生活日益提高的需求。中国化石类能源储量有限，到2010年，中国石油对外的依存度已达到57%，仍需进口大量的煤炭和天然气支持火电。到2020年，中国石油进口将达到2.2~3.6亿t，对外的依存度达到57%~68%，天然气进口将达到相当于4~5亿t标煤的数量。

到2020年，全国电力装机容量将达到10亿kW。按2002年电结构和电力耗煤388g/kWh计算，中国火电耗煤将达到14亿t，能源总量将达到30亿t标煤。按火电耗煤14亿t标煤计算，每年要排放CO<sub>2</sub>达到8亿t，SO<sub>2</sub>排放量将达到2100万t，这可能是中国承受排放CO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>污染和破坏的极限。由此可以看到，中国开发无污染、可再生能源已势在必行。无污染、可再生的清洁能源，诸如风能、太阳能、海流能、生物质能等，开发风能发电为当今世界的首选。

中国风电发展很快，至2010年新增装机容量16000MW，累计装机容量达到41827MW。至2011年，中国风电累计装机容量达到了62000MW。据中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会和国际环保绿色和平组织预测，到2020年中国风电可达到2.3亿kW，相当于13个三峡电站，总发电量可达4649亿kWh，相当于取代200个年发电量23.245亿kWh的火电厂。