

# 风能工程

FENGNENG  
GONGCHENG

刘庆玉 李轶 谷士艳 编著

辽宁民族出版社

# 风能工程

刘庆玉 李 轶 谷士艳 编著

辽宁民族出版社

## 内容简介

能源是人类赖以生存和进行建设的物质基础,能源的合理和有效利用关系到世界的未来。开发新能源和可再生能源,逐步减少化石能源的使用,是保护生态环境、走经济社会可持续发展之路的重大措施。到2020年,世界风电机的装机容量预计将达到12.45亿千瓦,发电量占世界电力消费量的12%。因此,风能将是21世纪最有发展前景的绿色能源,是人类社会经济可持续发展的主要新动力源。本书全面系统地阐述了风能利用的意义、国内外风能开发利用的现状与发展趋势、风能的基本知识、风力机的基础理论、风力机的空气动力学、风力机的系统设计、机械设计和结构设计、风力机选址及风力机在风力提水、风力发电、风力制热等方面的应用。

希望本书对我国风能的教、学、研、开、推、广、应、用和管理产生有益的影响。本书可作为新能源和可再生能源领域相关专业本科生和研究生的教材,并可供从事以上相关专业的高等院校师生、科研和工程技术人员参考。

© 刘庆玉, 李轶, 谷士艳 2008

图书在版编目(CIP)数据

风能工程 / 刘庆玉, 李轶, 谷士艳编著. — 沈阳: 辽宁民族出版社, 2008.5

ISBN 978-7-80722-624-6

I. 风… II. ①刘…②李…③谷… III. 风力能源—资源利用—研究 IV. TK81

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第080096号

---

出版发行者: 辽宁民族出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路25号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳市东实印刷厂

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 13.5

字 数: 355千字

印 数: 1-1000

出版时间: 2008年5月第1版

印刷时间: 2008年5月第1次印刷

责任编辑: 文忠实

封面设计: 杜 江

责任校对: 姚飞天

---

定 价: 30.00元

联系电话: 024—23284348

邮购热线: 024—23284335

E-mail: lnmz@mail.lnpgc.com.cn

如有印装质量问题, 请与承印厂调换。

# 前 言

能源是人类赖以生存和进行经济建设的物质基础,能源的合理和有效利用关系到世界的未来。当今世界正面临着人口与资源、社会与环境保护等多重压力的挑战,而支持社会发展的能源资源(煤、石油、天然气)储量却越来越少。因此,开发新能源和可再生能源,逐步减少化石能源的使用,是保护生态环境、走经济社会可持续发展之路的重大措施。化石能源在 21 世纪是一个从兴盛走向衰落,从基本满足人类的需要走向短缺,从疯狂的开采走向理智开发的过程。因此,在 21 世纪,以化石燃料为主的世界能源系统将转化为太阳能、风能及生物质能等可再生能源为主体的世界能源系统。

中国非常重视环境保护问题,作为一个发展中国家,中国决心不重复某些国家所走过的先污染后治理的道路。中国政府已将环境保护确立为一项基本国策。在 1992 年于巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会期间,李鹏总理代表中国签署了《全球气候变化框架公约》。1994 年中国又率先发表了《中国 21 世纪议程》,提出了中国 21 世纪社会、经济与环境可持续发展的具体方案,能源领域的可持续发展作为一个非常重要的部分被纳入该“议程”之中。风能是太阳能的一种转化形式,是一种不产生任何污染物排放的可再生的自然能源。

风能开发利用已有数千年的历史。受化石能源资源日趋枯竭、能源供应安全和保护环境等的驱动,自 20 世纪 70 年代中期以来,世界主要发达国家和一些发展中国家都重视风能的开发利用。风能在风力提水、风力发电等方面获得了广泛的应用,特别是自 20 世纪 90 年代初以来,现代风能最主要的利用形式——风力发电的发展十分迅速,世界风电装机容量的年平均增长率超过了 30%。与此同时,限制风能大规模商业开发利用的主要因素——风力发电成本在过去的 20 年中有了大幅度的下降,达到和化石能源发电相竞争的水平。

随着风能这一态势的发展,世界风电机的装机容量到 2020 年预计将达到 12.45 亿千瓦,发电量占世界电力消费量的 12%。因此,风能将是 21 世纪最有发展前景的绿色能源,是人类社会经济可持续发展的主要新动力源。

本书在参阅国内外大量资料的基础上,根据编者多年的教学与科研经验,结合当今世界风能研究领域的发展前沿,系统地阐述了风能利用的意义、国内外风能开发利用的现状和发展趋势、风能的基本知识、风力机的基础理论、风力机的系统设计、机械设计和结构设计、风力机选址及风力机在风力提水、风力发电、风力制热等方面的应用。论述了风能开发利用在实现社会经济可持续发展和保护环境中的作用。希望对我国风能的教学、科研、开发、推广、应用和管理产生有益的影响。本书可作为新能源和可再生能源领域相关专业本科生和研究生的教材,并可供从事以上相关专业的高等院校师生、科研和工程技术人员参考。

本书共分 7 章,由沈阳农业大学工程学院的教学人员编写:第 3 章由刘庆玉编写;第 2 章、第 4 章、第 6 章由李轶编写;第 1 章、第 5 章、第 7 章由谷士艳编写;刘庆玉教授统稿。由于水平、时间和条件所限,书中难免有不妥甚至错误之处,欢迎同行和读者批评指正。

编 者  
2008 年 4 月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 风能资源概述</b> .....	1
<b>第一节 风能利用状况与发展趋势</b> .....	1
一、风能利用的意义 .....	1
二、国内、外风能利用状况 .....	2
三、风能利用发展趋势 .....	5
<b>第二节 风能资源</b> .....	6
一、风的形成 .....	6
二、风向 .....	6
三、风速 .....	7
四、风的能量 .....	10
五、风能资源特点 .....	11
<b>第三节 我国的风能资源</b> .....	12
一、影响我国风能资源的因素 .....	12
二、我国风能资源特点 .....	14
三、我国风能资源区划 .....	15
<b>第二章 风力机的基础理论</b> .....	20
<b>第一节 风力机的空气动力学特性</b> .....	20
一、风力机叶片的空气动力学基本知识 .....	20
二、风力机叶片的阻力和升力 .....	21
三、风力机叶片的角度 .....	23
四、风力机叶片的断面形状 .....	24
五、风力机叶片的平面形状 .....	25
<b>第二节 风力机的分类</b> .....	25
一、风力机分类概述 .....	25
二、水平轴风力机 .....	27
三、垂直轴风力机 .....	29
<b>第三节 风力机的组成及工作原理</b> .....	31
一、风力机的组成 .....	31
二、风力机的工作原理 .....	35
<b>第四节 风力机的动力特性</b> .....	36
一、表示风力机性能的指标 .....	36
二、风力机动力特性曲线 .....	41

第五节 风轮叶片理论 .....	47
一、叶素理论 .....	47
二、叶素—动量(BEM)定理 .....	48
三、风轮转矩和功率的确定 .....	50
第三章 风场的选址 .....	51
第一节 风场选址概述 .....	51
一、风场选址的重要意义 .....	51
二、风场选址的基本技术原则 .....	51
三、风场选址时的具体判断分析 .....	53
第二节 小型风力机的选址 .....	58
一、平坦地形的选址 .....	58
二、复杂地形的选址 .....	59
第三节 风电场场址的选择 .....	59
一、宏观选址 .....	59
二、微观选址 .....	60
第四章 风力机的设计 .....	62
第一节 风力机系统设计 .....	62
一、风力机的总体设计 .....	62
二、风轮的动力学设计概述 .....	63
三、系统可靠性设计要求 .....	65
第二节 风力机叶片的设计 .....	66
一、螺旋桨式叶片 .....	66
二、风力机叶片的设计方法 .....	67
三、风力机叶片的优化设计 .....	73
第三节 风力机的机械设计 .....	79
一、风力机的转速控制 .....	79
二、风力机的方向控制 .....	82
三、风力机叶片的材料和结构 .....	85
四、风力机的增速机构 .....	111
第四节 风力机的结构设计 .....	113
一、作用在叶片上的离心力 .....	113
二、叶片的升力 .....	113
三、叶片的阻力 .....	113
四、风轮的正面压力 .....	114
五、风力机的扭矩 .....	115
六、叶片的角动量和尾翼所受的力 .....	116
七、风力机的负荷条件 .....	117
八、风力机的可靠性设计 .....	118
第五节 风力机其他部件的设计 .....	119
一、调桨轴承 .....	119

二、风轮轮毂 .....	121
三、齿轮箱 .....	123
四、发电机 .....	132
五、机械制动 .....	135
六、机舱底盘 .....	140
七、偏航驱动 .....	140
八、塔架 .....	142
九、基础 .....	149
<b>第五章 风力发电系统 .....</b>	<b>152</b>
<b>第一节 风力发电系统概述 .....</b>	<b>152</b>
一、风力发电技术的发展史 .....	152
二、国内外风力发电的现状 .....	152
<b>第二节 离网户用小型风力发电系统 .....</b>	<b>153</b>
一、离网户用小型风力发电概述 .....	153
二、小型风力发电系统的组成、基本结构和特性 .....	157
三、小型风力发电系统的选择和匹配 .....	158
四、风力发电的供电与贮能 .....	163
五、典型的小型风力发电机组简介 .....	166
六、有发展前景的小型风力发电方式 .....	169
七、小型风力发电系统的安装、维护与保养 .....	171
<b>第三节 并网风力发电系统 .....</b>	<b>173</b>
一、并网风力发电发展历程、现状和发展趋势 .....	173
二、风力发电并网运行的条件、连接及运行方式 .....	179
三、风电场工程设计 .....	182
四、风电场运行、维护与管理 .....	185
<b>第六章 风力提水系统 .....</b>	<b>189</b>
<b>第一节 风力提水系统概述 .....</b>	<b>189</b>
一、风力提水的特点 .....	189
二、风力提水机配套水泵 .....	189
<b>第二节 风力提水机的工作特性 .....</b>	<b>192</b>
<b>第三节 风力提水系统主要性能指标 .....</b>	<b>193</b>
一、风力提水系统性能指标 .....	193
二、技术规格 .....	193
<b>第四节 风力机参数的确定与计算 .....</b>	<b>194</b>
<b>第五节 风力提水机风轮的设计 .....</b>	<b>196</b>
一、基本参数的选择 .....	196
二、叶片弦长和安装角的计算 .....	198
三、理想叶片弦长和叶片安装角的线性化处理 .....	200
四、风轮框架的结构设计 .....	201
五、风洞模型试验和风轮结构改进 .....	201

第六节 水泵设计与匹配 .....	203
一、泵的结构参数选取 .....	203
二、扭矩调节器 .....	204
第七章 风力制热及风力机的其他应用 .....	205
第一节 风力制热 .....	205
一、风热转换途径 .....	205
二、风热转换的形式 .....	205
三、国外风力制热举例 .....	206
第二节 风力机的其他应用 .....	207
参考文献 .....	209



# 第一章 风能资源概述

## 第一节 风能利用状况与发展趋势

### 一、风能利用的意义

人类利用风能的历史可以追溯到公元前,但数千年来,风能技术发展缓慢,没有引起人们足够的重视。自 1973 年世界石油危机以来,在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下,风能作为新能源的一部分才重新有了长足的发展。风能作为一种无污染和可再生的新能源有着巨大的发展潜力,特别是对沿海岛屿、交通不便的边远山区、地广人稀的草原牧场以及远离电网和近期内电网还难以达到的农村、边疆,作为解决生产和生活能源的一种可靠途径,有着十分重要的意义。即使在发达国家,风能作为一种高效清洁的新能源也日益受到重视。

迄今为止,以石油、煤炭、天然气为主的一次性化石能源仍然是全球能源的主要来源。然而,资源是有限的,而对无限的经济增长,全球性的能源枯竭问题日益突现。全球化石能源已探明总储量约为 16000 亿 toe(吨油当量),根据政府间气候变化专业委员会(IPCC)的统计,2030 年能源需求量将达到 165 亿~214 亿 toe,2050 年甚至可能突破 300 亿 toe。这表明化石能源的静态储量不足以满足人类下个世纪的使用。

能源的枯竭关系到一个国家的生死存亡,而中国的能源短缺更甚。中国探明石油、天然气和煤炭的储量分别为全球总量的 1.4%、1.2%和 11%,而中国人口密度为全球平均的 3 倍,中国人均拥有的能源总量仅为全球平均水平的 40%,与此对应的是,目前中国依然是一个高能耗国家,资源利用水平低于全球平均水平。例如,2004 年中国能源消费总量占全球的 13.5%,而 GDP 仅占全球的 4%,单位产值的能耗相当于全球平均值的 3.4 倍。同时,中国的能源对外依存度高。例如,预计到 2010 年,石油进口依存度将超过 50%。

解决能源问题的战略主要有扩大能源来源范围、提高开采和利用效率、开发新能源等措施。从长期的能源安全供给考虑,必须依靠包括太阳能、风能等可再生能源的开发,这些能源的供给量理论上可以满足全球对能源不断增长的需要。因此,可以说,可再生能源是缓解现有能源危机和解决能源问题的真正出路。

可再生能源包括太阳能、风能、生物质能等。未来 10 年左右的时间里,在技术进步的推动下可再生能源的绝对成本将迅速降低,同时,化石能源的价格增长将使可再生能源有利可图。在所有的可再生能源中,风能是近十多年来发展最快的可再生能源。目前,风能的综合社会成本已经低于化石能源。

在世界各国重视环保、强调能源节约的今天,风能利用对改善地球生态环境、减少空气污染具有积极的作用。减少二氧化碳排放量是风能利用对环境做出的重要贡献。二氧化碳是产生

温室效应的主要因素,它会导致全球气候变化,引起灾难性气候的发生。风能资源的开发利用,已经成为世界利用可再生能源的主要成分。随着技术的进步,风力设备外观将更具观赏性,可以成为自然景观的补充。预计到 2020 年,风能将可提供世界电力需求的 12%,并在全球范围内减少 100 多亿  $m^3$  的二氧化碳。

## 二、国内、外风能利用状况

### 1. 国外风能利用状况

人类利用风能的历史可以追溯到公元前。公元前数世纪我国人民就利用风力提水、灌溉、磨面、碾米,用风帆推动船舶前进。甲骨文字中就有“帆”字存在。1800 年前东汉刘熙著作中有“随风张幔曰帆”的叙述。唐代有“乘风破浪会有时,直挂云帆济沧海”的诗句。明代的《天工开物》书里有“扬郡以风帆数叶,俟风转车,风息则止”的记载。

公元前 3000 年,古埃及人就学会了驾驶帆船。公元前 2 世纪,古波斯人就利用垂直轴风车碾米。10 世纪伊斯兰人用风车提水,11 世纪风车在中东已获得广泛的应用。13 世纪风车传至欧洲,14 世纪已成为欧洲不可缺少的原动机。在随后的几个世纪中,风车在欧洲被广泛用于排水和研磨谷物。在荷兰,风车先用于莱茵河三角洲湖地和低湿地的汲水,以后又用于榨油和锯木。18 世纪,风车在北美的垦荒过程中发挥了巨大作用。1888 年,美国人查尔斯·布鲁斯(Charles Brush)在克里夫兰建成第一座可以发电的风力发电机。1891 年,丹麦物理学家 Poul La Cour 发现,叶片较少但旋转较快的风力发电机效率高于叶片多但转速慢的风力发电机。应用这一原理,他设计建造了一座 4 个叶片、功率为 25kW 的风力发电机,这奠定了现代风力发电机的基础。

由于蒸汽机的出现,煤炭和石油价格低廉,兴建大电网的工程迅速发展,风力发电被视为一种没有前途的产业而遭到冷落,风车数量急剧减少。1920~1950 年,美国和许多欧洲国家使用风能为偏远地区供电,每台风力发电机的发电能力仅有 2~3kW。

1973 年世界石油危机以后,在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下,风能作为新能源的一部分开始了新发展。当时,风力发电研究者多数为大型军工企业、飞机制造商,研究资金由政府提供,研究重点是大型风力发电机。但随着能源危机的缓解,这期间的主要研究者后来基本上放弃了风力发电这一领域。1990 年之后,空气污染和气候变化逐渐引起人们的关注,风力发电作为一种可持续清洁能源被许多国家加以推广,尤其是在欧洲。

美国早在 1974 年就开始实行联邦风能计划。其内容主要是:评估国家的风能资源;研究风能开发中的社会和环境问题;改进风力机的性能,降低造价;主要研究为农业和其用户用的小于 100 kW 的风力机;为电力公司及工业用户设计的兆瓦级的风力发电机组。在瑞典、荷兰、英国、丹麦、德国、日本、西班牙等国,也根据各自国家的情况制定了相应的风力发电计划。

### 2. 我国风能利用概况

中国是世界上利用风能最早的国家之一。据考证用帆式风车提水已有 1700 多年的历史,这种传统的风车一直用到 20 世纪,在农用灌溉和盐地提水中起到过重要的作用。中华人民共和国成立后,风能开发利用大体可划分为下面几个阶段。

(1)20 世纪 50 年代,在发展传统风车的同时,开始摸索研制风力发电机组。由于当时经济和技术条件的限制,大多数机组在试运行时就损坏了,虽然未能形成产品,但是为后来研制风力发电机组提供了宝贵的经验和教训。

(2)20 世纪 60 年代开始,在传统风车的基础上,重点研制现代风力提水机组,在一些地区

推广应用,取得了良好的效果。

(3)20世纪70年代末,国家科委等有关部委组织全国力量重点对小型风力机组,特别是小型风力发电机组进行科技攻关,促进小型风力发电机组商品化,并在内蒙古等省、自治区组织示范试验和推广应用。这一时期,还成立了全国性的风能学术组织和风能技术开发组织,一些省、自治区还组建了风能研究所和小型风力机组制造厂,对我国风能利用事业的发展起到了积极的促进作用。

(4)从20世纪80年代中期开始,在继续推广应用小型风力机组的同时,重点放在大中型风力发电机组的科技攻关。在消化吸收国外技术基础上自行研制百千瓦级大型风力发电机组。与此同时,开始着手规划风电场的建设,引进国外大型风力发电机组,进行试验示范。为了进一步加快风力机产业化的进程,成立了全国风力机械制造行业协会。一些省、自治区还调整了一些国有大中型企业,着手进行大型风力发电机组的生产。

(5)从20世纪90年代开始,以风力发电为主体的我国风能开发利用进入一个新的时期,风力发电作为一个产业在我国电力工业中逐步占有一席之地。这一时期,我国风电场的建设得到了迅速的发展,与此同时,以200kW为主体的大型风力发电机组的国产化亦迈开了新的步伐。

我国风力提水虽有悠久的历史,但直至20世纪70年代后,在风力提水机组的研制和应用技术方面才得以成熟的发展,并用于农田灌溉、海水制盐、水产养殖、滩涂改造、人畜饮水、草场改良等提水作业,取得了较好的经济效益和社会效益。我国已研制的风力提水机组大致可以分为两大类:一类是低扬程(小于5m)大流量(大于20t/h)型,用于南方抽提地表水;另一类是高扬程(大于10m)小流量(小于8.5t/h)型,用于北方抽提地下水。经过示范试验和推广应用表明,我国研制的风力提水机组结构设计合理,运行稳定可靠,操作维护简便,性能满足需要。其中由中国农业机械科学研究院研制的低扬程大流量风力提水机组和由呼和浩特牧机所研制的高扬程小流量风力提水机组已进入商品化生产。另外,与风力提水机配套的泵,包括旋转式泵和往复式泵,国内都能自行研制和生产。我国在风力提水技术方面的进步得到了国际同行的重视。

我国风力机的发展也取得了一定的成就。在20世纪50年代末是各种木结构的布篷式风车,到60年代中期主要是发展风力提水机。70年代中期以后风能开发利用被列入了“六五”国家重点项目,得到迅速发展。进入80年代中期以后,我国先后从丹麦、比利时、瑞典、美国、德国引进一批大、中型风力发电机组,在新疆、内蒙古、广东等地建立了示范性风力发电场。目前我国已研制出上百种不同型式、不同容量的风力发电机组,并初步形成了风力机产业。我国风力发电起步较晚,但进展较快。小型风力发电机组得到推广应用,大型风力发电机组开始进入商品化,风电场已在电力行业中占有一席之地。风力发电在解决边远地区生活用电和缓解部分地区生产用电紧张方面已取得较好的社会效益、环境效益和经济效益。

我国已研制的风力发电机组主要是水平轴风力发电机组。从国情出发,目前风力发电机组的研制重点是两头,一头是1kW以下独立运行的小型风力发电机组;另一头是100kW以上并网运行的大型风力发电机组。小型风力发电机组从20世纪70年代开始,经过科技攻关、研制开发、示范试验、商品生产和推广应用等阶段,目前已全部国产化。除满足国内需要外,还向国外出口。大型风力发电机组的研制开发是从20世纪80年代真正开始的。“八五”期间,国家将大型风力发电机组列入科技攻关项目。一方面,组织国内科研单位,对大型风力发电机组关键技术进行联合攻关,在此基础上自行研制开发;另一方面,组织国内企业单位引进国外大型风

力发电机组,进行消化吸收,掌握大型风力发电机组制造技术,在此基础上进行组装或合作生产。经过几年的努力,我国大型风力发电机组的研制开发有了长足的进步。

从“六五”开始,国家就将风力发电技术列入重点科技攻关项目,经过“七五”、“八五”和“九五”期间的努力,我国风力发电技术取得了较大的进步。主要反映在下面几个方面:

①风能资源调查 从20世纪70年代末开始,国家气象局气象科学研究所同有关省区合作对我国风能资源作了几次全面的调查。1981年首次公布了我国第一张《全国风能资源分布和区划图》,1987年,又对我国在风能利用方面具有发展前景的东南沿海及三北等地区作了进一步的风能资源的详查,加密了选站的密度,完善了选取资料的代表性,给出了风能利用主要省、自治区的风能密度分布及各等级风速间的累积时数图。与此同时,一些重点的省市对本省市的风能资源亦作了详查,绘制了本地区的风能资源分布图。所有这些成果丰富了对我国风能资源状况的了解,为我国进一步开发和利用风能提供了可靠的依据。

②风力机性能测试 我国风力机性能测试的主要手段有风洞测试和风场测试两种。中国空气动力研究与发展中心有一个大型低速风洞,可进行最大风轮直径为7m的全尺寸小型风力机组性能试验和大型风力发电机组风轮模型性能实验。风场测试主要在北京八达岭测试站中进行。此外,还有内蒙古赛汉塔拉等地亦建有相当规模的测试站,可对风力发电机运行状态、风速、风向、转速及输出电压、功率等10余个参数进行监测,获得风能利用效率和功率特性曲线。此外,还可以进行噪声、振动等非常规性能的测试。

③风力机标准规范 1985年全国风力机标准化技术委员会成立以来,在呼和浩特畜牧机械研究所的组织下,制定风力机国家标准。目前,小型风力发电机组的有关标准已经完成,正在拟定大型风力发电机组和风电场的有关标准。这些标准对保证风力机质量起到了重要的作用。

④风力机设计技术 风力机设计是一门综合技术,涉及空气动力学、结构动力学、气象学、机电工程、自动控制、计算机等专业技术。我国对风力设计技术主要进行了风力机空气动力设计和计算方法、风力机结构动力计算和分析方法、风力机玻璃钢叶片设计方法、风力机变速恒频发电机技术、风力机自动控制技术、风力机调(限)速特性、风力机调向特性、风力机计算机辅助设计和软件包开发等研究工作,取得了较快的进展。

⑤风力机制造技术 随着大、中型风力发电机组国产化进程的加快,我国风力机制造技术也取得了较快的进步。目前,塔架、发电机和齿轮箱等部件的制造技术已基本掌握。叶片和控制系统的制造技术也取得进展和良好的运行效果。

⑥风力机运行技术 随着风电场建设的发展,我国对大型风力发电机组并网运行技术进行了研究,重点放在大型风力发电机组并网后对电网运行的影响。并在《风力发电场并网运行管理规定》中明确,现阶段风电量控制在电网容量的5%以内。

⑦新概念型风能转换装置 新概念型风能转换装置是从如何提高收集风的能量的角度提出来的。从20世纪80年代开始,我国曾先后对旋风型风能转换装置、风能太阳能综合发电装置和扩压引射型风能转换装置进行了可行性研究、概念设计和示范试验,新概念型风能转换装置较之常规的风能转换系统投资大、技术复杂,因此从总体上还处在科研探索阶段。

我国在小型风力发电机组推广应用已取得明显的社会效益。近年来,在风电场示范应用中也取得了较好的经济效益。在我国广大边远地区,有20%以上的农(牧)户没有用上电,由于推广了小型风力发电机组,特别是百瓦级的小型风力发电机组,逐步解决了有风无电地区农(牧)户生活用电的问题。使用独立运用的小型风力发电机组一般配以蓄电池输出直流电或加逆变器输出交流电。

我国风力发电并网运行的方式有三种形式。第一种是将单台中、大型风力发电机组并入电网运行;第二种是将单台或多台中、大型风力发电机组与柴油发电机组组成风/柴系统并入电网运行;第三种是将多台大型风力发电机组组成风电场并入电网运行。目前主要是第三种。

1983年,在山东荣成安装了3台丹麦 Vestas 55kW 风力发电机,建设起了我国第一个风电场。1989年,在新疆达坂城安装了13台丹麦 Bonus 150kW 风力发电机组,在内蒙古朱日和安装了5台美国 Windpower 100kW 风力发电机组,开始了风电场运行示范试验。从这之后,在全国各地陆续引进国外机组建设风电场,装机容量逐年增长,特别是国家计委提出的“乘风计划”、国家经贸委提出的“双加工程”和原电力部提出的到20世纪末装机容量达到100万kW的目标,对推动我国风电场建设起到了重要的作用。在国家发改委、国家经贸委、国家电力公司的规划和组织下,风电场的建设正在稳步健康地发展,并取得了较好的经济效益,为改善我国电力工业的结构打下了良好的基础。

### 三、风能利用发展趋势

面对与全球气候变化进行斗争的紧迫性,也使风能开发利用的需求更为迫切。IPCC(国际组织)预测,在21世纪,全球平均温度将提高5.8℃,随之而来的将是洪水、干旱和气候巨变。大多数国家已经认识到,为了避免环境灾难的发生,必须大幅度降低温室气体的排放量。

根据1997年京都议定书规定,2008~2012年间,全球温室气体排放量要比1990年减少5.2%。风电不像用化石燃料发电和原子能发电那样产生有害物质,也不排放二氧化碳这样的温室气体,这为提高风能在能源利用中的份额提供了良好的机遇。欧盟成员国等国家已经采取了一系列促进风力机市场成长的措施。在过去的10年里,全球风力发电总量增加了10倍。到2020年,将实现风能生产量占全球电力需求总量的12%。

随着技术的发展以及机器规模的增大,风力发电的成本将持续减少。在过去的20年里,风力发电成本从0.8美元/kW·h降至0.4美元/kW·h。风力发电与以煤为燃料的新建电厂相比,已具有竞争力。技术的进一步改进将使风力发电成本再降低30%。随着在经济方面的吸引力越来越突出,风能利用已成为一个很有前途的行业。

风力发电技术将得到进一步发展。为了保证风力产业的未来发展,研究人员正在设计适用于低风速地区的风力机,其塔架更高、材料更轻、转子直径更大、螺旋桨和发电机更有效、控制方案更优化。同时,致力于研究消除技术障碍,包括传输约束、运营政策以及缺乏风能对公共电网影响的认识等。其中关键的技术措施是增大风力机的尺寸和功率。现在一台2000kW风力机生产的电力相当于20世纪80年代200台老型风力机生产的电力。风力机的大型化,使风力机数量比以前少得多,但生产的电却没有减少,而且可以减少占用土地的面积。

现代的风力发电机都具有持续工作、无人监控、少量维护并可以输出具有电网频率的高质量电能的特点。有的可以持续工作20年或者120000h。而一台汽车发动机通常的设计寿命是4000~6000h。

今后将生产供海上风力发电场使用的更大型的风力机。目前5000kW级的大型风力机正在开发。海上风力机具有新的技术要求。海上风力机必须牢牢地固定在海底,各风力机之间不但要有电缆相连,还要一直连接到陆地上,将电力输入公共电网。

风电场的选址是一个将被更加重视的问题。不仅要风力机安装地点的风速进行监控,还要注意避免将风力机安装在考古遗存地、飞机航线地区和候鸟迁徙经过的地区。施工机械的发展将使风力机的安装速度加快。巨型吊车能把风力机塔楼、机身和转子叶片方便地安装到坚固

的混凝土基础。风电场一旦建成投产,可通过计算机对其性能和工作状况不间断地进行远程监控,对风力机的功率也可以控制和调整。

在我国,《可再生能源法》已于2006年1月1日正式生效。《国家中长期科学技术发展规划纲要(2006—2020)》以及国家“十一五”高新技术研究计划和国家科技支撑计划中,都专门设立了有关进行研究大型风力机和风能利用的项目。一系列的政策措施和国家科技支持政策的导向表明,中国的风能利用迎来了新的春天。在21世纪,高效清洁的风能将在我国能源的格局中占有重要的地位。

## 第二节 风能资源

### 一、风的形成

风是地球上的一种自然现象,它是由太阳辐射热引起的。太阳照射到地球表面,地球表面各处受热不同,产生温差,从而引起大气的对流运动形成风。据估计,到达地球的太阳能中虽然只有大约2%转化为风能,但其总量仍是十分可观的。全球的风能约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ ,其中可利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ ,比地球上可开发利用的水能总量还要大10倍。

大气的流动也像水流一样是从压力高处往压力低处流。太阳能正是形成大气压差的原因。

由于地球自转轴与太阳的公转轴存在 $66.5^\circ$ 的夹角,因此对地球上的不同地点,太阳照射的角度是不同的,而且对同一地点1年中这个角度也是变化的。地球上某处所接受的太阳辐射能与该地点太阳能照射角的正弦成正比。地球南北极接受太阳辐射能少,所以温度低,气压高;而赤道接受热量多,温度高,气压低。如果地球表面情况是一样的,而且忽略地球转动的作用,则赤道附近空气受热膨胀向上,流向两极;而两极附近的冷空气沿表面流向赤道。另外地球又绕自转轴每24h旋转一周,温度、气压昼夜变化。这样由于地球表面各处的温度、气压变化,气流就会从压力高处向压力低处运动,而形成不同方向的风,并伴随不同的气象变化,气压差值越大,风也就越大。

地球上各处的地形地貌也会影响风的形成,如海边,由于海水的比热容大,接受太阳辐射能后,表面升温慢,陆地的比热容小,升温比较快。于是在白天,由于陆地空气温度高,空气上升而形成海面吹向陆地的海陆风。反之在夜晚,海水降温慢,海面空气温度高,空气上升而形成由陆地吹向海面的陆海风。

同样在山区,白天太阳使山上空气温度升高,随着热空气上升,山谷冷空气随之向上运动,形成“谷风”;相反到夜间,空气中的热量向高处散发,气体密度增加,空气沿山坡向下移动,又形成所谓“山风”。这些复杂因素造成了地球上不同地区、不同季节里空气的流动是变化多样,因而风向、风速是变化无常的。

### 二、风向

风是一种矢量,它通常用风向和风速两个要素来表示。

风向是指风吹来的方向,如果风是从东面吹来,则称为东风。观测陆地上的风向一般采用16个方位(海上的风向通常采用32个方位),即以正北为零,顺时针每转过 $22.5^\circ$ 为一个方位,如图1—1所示。

在一定的时间范围内,某风向出现的次数占各风向出现的总次数的百分比,称作风向频率,即

$$\text{某风向频率} = \frac{\text{某风向出现次数}}{\text{风向的总观测次数}} \times 100\% \quad (1-1)$$

### 三、风速

风速是表示风的移动的速度,即风在单位时间内流过的距离称为风速,单位是 m/s。

#### 1. 瞬时风速与平均风速

风速是很不稳定的,即使在很短的时间内,它的变化也很大。在某一瞬间(几秒内)测得的风速称为瞬时风速;在某一段时间内,瞬时风速的算术平均值称为平均风速。

假如把一昼夜中每 24h 所测得的风速相加,再除以 24,就得到了一天的平均风速。同理,可求得月平均风速和年平均风速。

#### 2. 风速频率与风速变幅

在一定的时间内,相同风速出现的时数占测量总时数的百分比称作风速频率,即

$$\text{某风速频率} = \frac{\text{某相同风速时数}}{\text{测量风速总时数}} \times 100\% \quad (1-2)$$

在求得平均风速的限定时间内,最大风速与最小风速之差称为风速变幅。对风能利用来说,既希望平均风速较高,又希望风速变幅越小越好,以保证风力机平稳运行和便于控制。

#### 3. 启动风速、切除风速、有效风速

可使风力机启动运行的风速称为启动风速,风力机超速运行的上限风速称为切除风速,大于这个风速时风力机必须停转,否则将有因超速旋转而损坏的危险。风力机常取 3m/s 为启动风速,25m/s 为切除风速,所以把 3~25m/s 的风速称为有效风速。据此计算出来的风速频率和风能分别称为有效风频和有效风能。

#### 4. 风速级别

世界气象组织将风力分为 13 个等级,如表 1-1 所示,在没有风速计时可以根据它来粗略估计风速。

表 1-1 中的风级 B 与风速  $v$  (m/s) 的关系为

$$v = 0.86B^{\frac{3}{2}} \quad (1-3)$$

#### 5. 影响风速的主要因素

(1)垂直高度 从空气运动的角度,通常将 1km 以下的大气层分为三个区域:离地面 2m 以内的区域称为底层;2~100m 的区域称为下部摩擦层,二者总称为地面境界层;从 100~1000m 区域称为上部摩擦层,以上三区域总称为摩擦层(大气境界层)。摩擦层之上是自由大气。

地面境界层内,空气的运动因受紊流黏性和地面摩擦的影响,风向大体一致,而风速则随着垂直高度的增加而增大。关于风速随高度变化的经验公式很多,在离地面 100m 的高度范围内,风速在垂直高度上的变化通常可按(1-4)的指数公式求得:

$$v = v_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^n \quad (1-4)$$

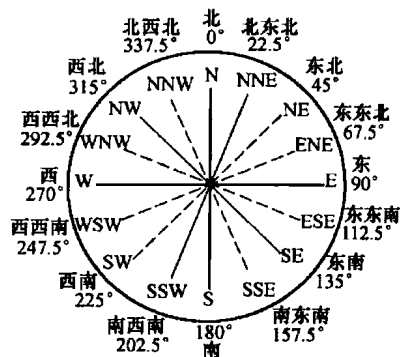


图 1-1 风向的方位

表 1—1 风速级别及其特征

风速级别	风速 /m/s	风级名称	陆地	海上	浪高 /m
0	0.0~0.2	静风	静烟直上	海面如镜	
1	0.3~1.5	软风	烟能表示风向,但风标不能转动	出现鱼鳞似的微波,但不构成浪	0.1
2	1.6~3.3	轻风	人脸部感到有风,树叶微响,风标能转动	小波浪清晰,出现浪花,但并不翻滚	0.2
3	3.4~5.4	微风	树叶和细树枝摇动不息,旌旗展开	小波浪增大,浪花开始翻滚,水泡透明像	0.6
4	5.5~7.9	和风	沙尘风扬,纸片飘动,小树枝摇动	小波浪增长,白浪增多	1
5	8.0~10.7	劲风	有树叶的灌木摇动,池塘内的水面起小波浪	波浪中等,浪延伸更清楚,白浪更多(有时出现飞沫)	2
6	10.8~13.8	强风	大树枝摇动,电线发出响声,举伞困难	开始产生大的波浪,到处呈现白沫,浪花的范围更大(飞沫更多)	3
7	13.9~17.1	疾风	整个树木摇动,人迎风行走不便	浪大,白沫像带子一样随风飘动	4
8	17.2~20.7	大风	小的树枝折断,迎风行走很困难	波浪加大变长,浪花顶端出现水雾,泡沫像带子一样清楚地随风飘动	5.5
9	20.8~24.4	烈风	建筑物有轻微损坏(如烟囟倒塌,瓦片飞出)	出现大的波浪,泡沫呈粗的带子随风对动,浪前倾,翻滚,倒卷,飞沫挡住视线	7
10	24.5~28.4	狂风	陆上少见,可使树木连根拔起或建筑物严重损坏	浪变长,形成更大的波浪,大块的泡沫像白色带子随风飘动,整个海面呈白色,波浪翻滚	9
11	28.5~32.6	暴风	陆上很少见,有则必引起严重破坏	浪大高如山,海面被随风流动的泡沫覆盖。浪花顶端刮起水雾,视线受到阻挡	11.5
12	32.7	飓风	摧毁巨大	空气里充满水泡和飞沫,海面由于溅起的飞沫变成一片白色,影响视线	14

注:本表所列风速是指平地上离地 10m 处的风速值

式中: $v$ ——高度  $H$  处风速;

$v_0$ ——高度  $H_0$  处的风速(气象站风速仪的安装高度一般为 10m,所以  $H_0$  一般为 10m);

$n$ ——地表面摩擦系数,其数值常在 0.1~0.4 之间, $n$  的典型数值可由表 1—2 查出。

表 1—2 地表面典型摩擦系数

地表状态	摩擦系数 $n$
平坦坚硬的地面、湖面或海面	0.1
长满短草的未耕地	0.14
长有 30cm 左右高的草,偶尔有树,平坦的田野	0.16
高大的一行行庄稼,矮树墙,有些树	0.20
许多树,间杂着建筑物	0.22~0.24
乡间树林、小城镇和郊区	0.28~0.30
有高大建筑物的城区	0.4

(2)地形地貌 风速受地形地貌的影响如表 1—3 和表 1—4 所示。公式(1—5)是根据我国几个站得出的山顶、山麓风速比与高差关系的经验公式:

$$k_s = 2 - e^{-\alpha \sqrt{\Delta h}} \quad (1-5)$$

式中 $k_s$ ——山顶山麓风速比;

$\Delta h$ ——山顶山麓相对高差(m);

$\alpha=0.007$ 。



表 1—3 不同地形与平坦地面的风速比值

不同地形	平坦地面的平均风速/m/s	
	3~5	6~8
山间盆地	0.95~0.85	0.85~0.80
弯曲的河谷底	0.8~0.7	0.70~0.60
山背风坡	0.9~0.8	0.80~0.70
山迎风坡	1.1~1.2	1.10
峡谷口或山口	1.3~1.4	1.20

表 1—4 山顶与山麓的风速比值

相对高度/m	50	100	200	300	500	700	1000
比值	1.38	1.50	1.60	1.70	1.80	1.84	1.90

(3) 地理位置 由于陆地表面和海面对风的摩擦阻力不同,造成了海面上的风比岸上风大,沿海的风比内陆风大。变化情况如表 1—5 和表 1—6 所示。

表 1—5 台风登陆后与登陆时的风速比值

距离海岸/km	0	10	25	50	100
比值	1.00	0.97	0.86	0.72	0.55

表 1—6 海岸线外和海岸的风速比值

在海岸线外/km	平均风速/m/s	
	4~6	7~9
25~30	1.4~1.5	1.2
50	1.5~1.6	1.4
>70	1.6~1.7	

(4) 障碍物 风流经障碍物时,会在其后面产生不规则的涡流,致使流速降低,这种涡流随着远离障碍物而逐渐消失。当距离大于障碍物高度 10 倍以上时,涡流可完全消失。所以在障碍物下设置风力机时,应远离其高度 10 倍以上。

## 6. 瑞利分布公式

当某一地点的年平均风速已经知道,可用瑞利分布公式求得在 1 年内任意风速下的小时数。瑞利分布公式为

$$t=8760 \times \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} e^{-k} \quad (1-6)$$

式中:  $t$ ——1 年内某一风速的小时数;

$v$ ——某一风速;

$\bar{v}$ ——该处年平均风速;

$$k=\frac{\pi}{4} \left( \frac{v}{\bar{v}} \right)^2;$$

8760=365×24,即全年小时数。

要说明的是,当年平均风速低于 4.5m/s 时,计算的结果有较大的误差;而当年平均风速低于 3.5m/s 时,此公式则不适用了。