

FENG NENG YU

FENGLI FADIAN JISHU



风能与 风力发电技术

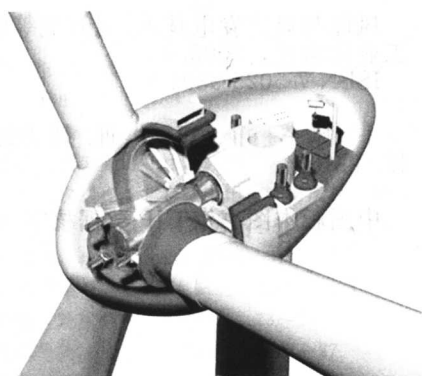
刘万琨 张志英 李银凤 赵萍 编著



化学工业出版社

FENG NENG YU

FENG LI FADIAN JISHU



风能与 风力发电技术

刘万琨 张志英 李银凤 赵萍 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

风能与风力发电技术/刘万琨等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 9
ISBN 7-5025-9391-8

I. 风… II. 刘… III. 风力发电-基本知识
IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 113178 号

风能与风力发电技术

刘万琨 张志英 李银凤 赵 萍 编著

责任编辑: 郑宇印 戴燕红

责任校对: 王素芹

封面设计: 胡艳玮

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 15¼ 字数 285 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9391-8

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前言

太阳辐射能量的大约 20% (20 万亿瓦) 被地球大气层吸收, 大气被加热对流形成风。据估计, 世界风能总量约 200 亿瓦, 相当全世界总发电量的 8 倍, 比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。

风力机是将风能转换为机械功的一种动力机械。广义地说, 风力机是以太阳为热源、以大气为工质的热能转换的叶片式发动机。风车就是最早的一种风力机械, 最早出现在波斯。中国利用风车大约在 13 世纪中叶, 曾建造了各种形式的简易风车, 用于碾米、磨面、提水灌溉和制盐。18 世纪末期以后, 风车的结构和性能都有了很大的提高, 已能采用手控和机械式自动控制机构来改变叶片桨距, 调节风轮转速。风力机用于发电的设想, 始于 1890 年丹麦的一项风力发电计划。1918 年, 丹麦已拥有风力发电机 120 台。第一次世界大战后, 出现了现代高速风力机。1931 年, 苏联采用螺旋桨式叶片建造了一台大型风力发电机。随后, 各国相继建造了一大批大型风力发电机。

目前, 风能的利用形式主要是发电, 风力发电在新能源和可再生能源行业中增长最快, 年增长达到 35%。德国、丹麦及西班牙是世界上风能利用发展最好的三个国家, 德国风电已占总发电量的 3%, 丹麦风电已超过总发电量的 10%。全球风电机组供应商市场份额统计前十位的有 Vestas(丹麦)、GE 风能(美国)、Enercon(德国)、Gamesa(西班牙)、NEG Micon(丹麦)、Bonus(丹麦)、REpower(德国)、MADE(西班牙)、Nordex(德国)、MHI(日本)。

到 2005 年底, 世界累计的风力发电设备总装机容量为 6800 万千瓦, 欧洲占 60%。预计到 2007 年底, 风力发电总能力累计将达到 8300 万千瓦, 其中 5800 万千瓦在欧洲。

我国风能资源丰富, 储量为 32 亿千瓦, 可开发的装机容量约 2.5 亿千瓦, 居世界首位。目前, 全国累计安装小型风力发电机近 20 万台, 在广东、福建、内蒙古、新疆等地已建成 26 个风电场, 总装机容量近 50 万千瓦。尽管我国近几年风力发电年增长都在 50% 左右, 但装备制造水平与装机总容量与发达国家相比还有较大差距。我国风力发电装机容量仅占全国电力装机的 0.11%, 风力发电发展潜力巨大。

风力机的最主要部件——风轮机, 与汽轮机有很多相似点: 如都是叶片

机械、都是基于机翼的升力理论；最主要的性能参数都是速比，风力机的叶尖速度比 λ 是叶尖周速与风速之比，是风力机风能利用系数最重要的参数。汽轮机的速比 U/C_0 ，是叶片圆周速度与级理想速度之比，是决定级轮周效率最重要的参数；两种机械的特性都与来流角度强相关，有正攻角工况、负攻角工况和失速工况、颤振工况等；还有动态共振特性等。正是由于这些共同点，由汽轮机制造厂来自主开发风力机是最合适的。

然而，风力机由于是低能头转换机械，它又有很多与汽轮机不同的特点。例如，风力机都是单级，叶片数目特别少，比如只有两片、三片、四片等，而汽轮机是多级（30~40级）多叶片（每级100~200片）；风力机转速低，只有10~30r/min，而汽轮机的转速有1500r/min、1800r/min、3000r/min、3600r/min几种，因此，风力机必须有高增速比的齿轮箱，而汽轮机一般都不用齿轮箱；还有，风力机的叶片特别长，最长的已达到50~60m长，而汽轮机的叶片最短的为25mm，最长的也不过1~2m。其他的不同点还有：叶片用非金属材料；露天运行，工况恶劣；必须远程遥控；不消耗燃料，不用锅炉等化学能转换器等。因此，汽轮机厂要自主开发风力机，就首先要弄清这些不同点，专门立项研究。正是在此思考下，我们编写了此书，希望对汽轮机厂自主开发风力机有所帮助。

本书共分9章，第1章是有关风与风能的基本知识；第2~3章是风能发电与风力发电技术，重点是与汽轮机发电不同的特点；第4~5章专门讲风轮机的工程设计方法和数值计算，是全书的重点；第6章介绍世界上最典型风力机的一些设计数据，可供设计风力机时参考；第7章介绍了风力机的发电系统，重点是介绍它们与化石燃料汽轮机发电系统的不同；第8~9章介绍世界和我国的风能资源和风电场的概况，通过这两章就可对世界风电市场一目了然。这是编者的研究心得，抛砖引玉，希望得到专家们的指正。一些有关风力机的基础资料，例如风力等级、风力机技术标准等放在附录，供大家参考。

本书的编著承东方汽轮机厂风电处大力协助，提供最新资料，提出修改意见和建议；以及厂产品开发处温玉霞、麻爱梅绘图师等的帮助，在此表示感谢。

本书的编著参阅了大量参考文献和网上资料，在此对其作者一并致谢！

再次感谢帮助过本书编著的同事、朋友们，没有他们的帮助也就没有本书。

编者
2006年9月

目 录

第 1 章 风与风能·····	1
1.1 风·····	1
1.2 风能·····	3
1.3 风电场选址·····	24
第 2 章 风能发电·····	28
2.1 风力机的型式·····	28
2.2 风能发电·····	32
2.3 并网风力发电的价值分析·····	33
2.4 风力发电装置·····	36
2.5 大中型风电场设计·····	41
2.6 风力发电设备的优化分析·····	48
2.7 风轮机与航空安全·····	51
2.8 风力机安全运行·····	52
第 3 章 风力发电技术·····	58
3.1 功率调节·····	58
3.2 变转速运行·····	60
3.3 发电机变转速/恒频技术·····	62
3.4 风轮机迎风技术·····	63
3.5 风电品质·····	65
3.6 风力机结构和空气动力学·····	65
3.7 风力机控制技术·····	66
3.8 风电场优化·····	67
3.9 影响风电发展的其他因素·····	67
第 4 章 风轮机设计·····	70
4.1 风轮机的基本理论·····	70
4.2 风轮机工程设计方法·····	77
4.3 风轮机模化设计方法·····	80
4.4 风轮机工程设计图例·····	82
4.5 风轮机的设计与制造·····	85
4.6 风轮机材料·····	120
4.7 风力机优化和设计风速·····	129

第 5 章 风轮机和风电场数值计算	140
5.1 风电场数值模型	140
5.2 风轮机设计软件	144
5.3 风电场数值计算软件包	148
5.4 风力机设计软件包的开发	152
第 6 章 典型风力机设计数据	157
6.1 德国 Repower 公司 5M 风力机典型数据	157
6.2 德国 Nordex 公司 S70/S77 风力机设计数据	158
6.3 德国 Nordex 公司 N80、N90 风力机设计数据	160
6.4 1200kW 风力机设计数据	162
6.5 新疆金风科技风力机数据	163
6.6 广东南澳风力机数据	164
6.7 国产小型风力机数据	164
第 7 章 风力机发电系统	166
7.1 风力机对发电机及发电系统的一般要求	166
7.2 恒速/恒频发电机系统	167
7.3 变速/恒频发电机系统	169
7.4 小型直流发电系统	173
第 8 章 国外风电场及发展	175
8.1 概况	175
8.2 世界主要风电场国家介绍	178
8.3 世界知名风力机供货商介绍	180
8.4 国外风能发电展望	184
第 9 章 国内风电场及发展	187
9.1 国内风电场概况	187
9.2 国内部分省份主要风电场介绍	190
9.3 国内主要风电设备供货商简介	194
9.4 风电发展展望	195
9.5 国内开发的 FD70A/FD77A 风力机	200
9.6 风电发展前景	209
附录	211
附录一 风力等级表	211
附录二 叶轮式风力机技术术语标准定义 (GB 8974—88)	211
附录三 风力发电装置国家和国际标准	215
附录四 风力发电上网电价例	217

附录五	1998~2002 年全国风电场装机概况	217
附图 1	中国风能分布图	230
附图 2	风速大于 3m/s 的有效风功率密度分布图	230
附图 3	全年风速大于 3m/s 的小时数分布图	231
附图 4	全国已建和拟建的风电场分布图	231
附图 5	中国风电历年装机图	232
参考文献		233

第 1 章 风与风能

风是人类最熟悉的一种自然现象，风无处不在。太阳辐射造成地球表面大气层受热不均，引起大气压力分布不均。在不均压力作用下，空气沿水平方向运动就形成风。风能是一种最具活力的可再生能源，它实质上是太阳能的转化形式，因此是取之不尽的。

世界风能总量为 $2 \times 10^{13} \text{ W}$ ，大约是世界总能耗的 3 倍。风能在时间和空间分布上有很强的地域性，要选择品位高的风电场场址，除了利用已有的气象资料外，还要利用流体力学原理，研究大气流动的规律。风电场场址直接关系到风力机的设计或风力机型的选择。

本章主要分析风的形成、风的种类、风能的定量描述方法和风的地域特征，以及风电场的优化选址方法。

1.1 风

1.1.1 风的形成

地球被一个数公里厚的空气层包围着，地球上的气候变化是由大气对流引起的。大气对流层相应的厚度约可达 12km，由于密度不同或气压不同造成空气对流运动。水平运动的空气就是风，空气流动形成的动能称为风能，风能是太阳能的一种转化形式。太阳辐射造成地球表面受热不均，引起大气层中压力分布不均，在不均压力作用下，空气沿水平方向运动就形成风。风的形成是空气流动的结果。

空气运动主要是由于地球上各纬度所接受的太阳辐射强度不同形成的。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，地面和大气接受的热量多、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。这种高纬度与低纬度之间的温度差异，形成了南北之间的气压梯度，使空气做水平运动，风沿垂直于等压线的方向从高压向低压吹。地球自转，使空气水平运动发生偏向的力，称为地转偏向力。这种力使北半球气流向右偏转，南半球气流向左偏转，所以地球大气运动除受气压梯度力外，还要受地转偏向力的影响。大气真实运动是这两种力综合影响的结果。如图 1-1 所示。

地面上的风不仅受这两种力的支配，而且还受海洋、地形的影响。山坳和海

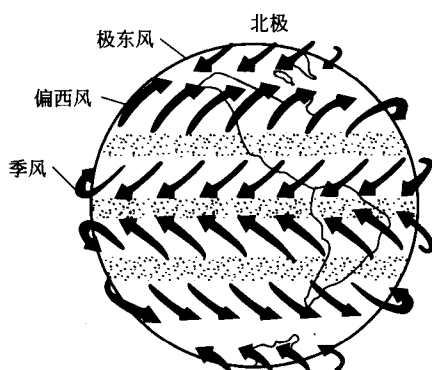


图 1-1 地球表面风的形成和风向

峡能改变气流运动的方向，还能使风速增大；而丘陵、山地摩擦大，使风速减小；孤立山峰因海拔高而使风速增大。

由于地球自身产生的复合向心加速度的阻碍作用，也产生从高向低压区的对流。这种加速度由地球的自转产生，而且它在地球表面开始，垂直于运转方向，北半球向右，南半球向左。从卫星云图的旋涡云图可看出，气体对流是沿一个螺旋轨道旋转运行的。

风在高空中，气压相等的线（等压线）相互平行，而近地层由于地表摩擦，风速下降，复合向心加速度的作用变得很小。地面上风向随着高度的变化大约是 30° ，地转风向左旋转。由于海面平滑，摩擦力小，方向的偏转也就小，降低到约 10° 。不同气压产生的对流，主要反映为地面偏转风。海面涡流图可以表示出其涡流较长，比陆地风速高，特别情况时出现涡流暴，达到极点而产生相当大的风速。

不仅这种高度空间上的对流产生可利用的风，而且由于地区受热不同，也产生地区风，典型的情况是山谷风。由于山谷与山脊受热不同，即加热与冷却速度不同，也会产生风。海平面与陆地之间的加热和冷却速度不同，也产生海陆风。

在有海陆差异的地区，海陆差异对气流运动也有影响。冬季，大陆比海洋冷，大陆气压比海洋高，风从大陆吹向海洋；夏季相反，大陆比海洋热，风从海洋吹向内陆。这种随季节转换的风，称为季风。

有海陆差异的地区，白昼时，大陆上的气流受热膨胀上升至高空流向海洋，到海洋上空冷却下沉，在近地层海洋上的气流吹向大陆，补偿大陆的上升气流，低层风从海洋吹向大陆，称为海风；夜间（冬季）时，情况相反，低层风从大陆吹向海洋，称为陆风。

在山区，由于热力原因引起的白天由谷地吹向平原或山坡，称为谷风；夜间由平原或山坡吹向谷地，称为山风。这是由于白天山坡受热快，温度高于山谷上方同高度的空气温度，坡地上的暖空气从山坡流向谷地上方，谷地的空气则沿着山坡向上补充流失的空气，这时由山谷吹向山坡的风，称为谷风。夜间，山坡因辐射冷却，其降温速度比同高度的空气较快，冷空气沿坡地向下流入山谷，称为山风。

局部地区，例如，在高山和深谷，白天，高山顶上空气受到阳光加热而上升，深谷中冷空气取而代之，因此，风由深谷吹向高山；夜晚，高山上空气散热

较快，于是风由高山吹向深谷。如在沿海地区，白天由于陆地与海洋的温度差而形成海风吹向陆地；反之，晚上陆风吹向海上。

1.1.2 风向与风速

风向和风速是描述风特性的两个重要参数。风向是指风吹来的方向，如果风是从北方吹来，就称为北风；风从东方吹来，就称为东风。风速是表示风移动的速度，即单位时间空气流动所经过的距离。

风向和风速随时、随地都不同，风随时间的变化包括每日的变化和各季节的变化。季节不同，太阳和地球的相对位置就不同，地球上的季节性温差，形成风向和风速的季节性变化。我国大部分地区风的季节性变化情况是，春季最强，冬季次之，夏季最弱。当然也有部分地区例外，如沿海温州地区，夏季季风最强，春季季风最弱。

风随高度变化的经验公式很多，通常采用指数公式

$$V_w(h) = V_{wi} \left(\frac{h}{h_i} \right)^n \quad (1-1)$$

式中 $V_w(h)$ ——距地面高度为 h 处的风速，m/s；

V_{wi} ——高度为 h_i 处的风速，m/s；

n ——经验指数，它取决于大气稳定度和地面粗糙度，其值约为 $1/2 \sim 1/8$ 。

地球上风的方向和速度的时空分布随时都在变，非常复杂。

1.2 风能

1.2.1 21 世纪的最主要能源

地球上可供人类使用的化石燃料资源是极有限和不可再生的。据联合国能源署报告，按可开采储量预计，煤炭资源可供人类用 200 年、天然气资源可用 50 年、石油资源可用 30 年。科学家预计，21 世纪的最主要能源将是核能、太阳能、风能、地热能、海洋能、氢能和可燃冰。

(1) 核能 核能发电（特别是核聚变能发电）是人类最现实和有希望的能源方式。核能是可裂变原子核（例如铀 235）在减速中子轰击下产生链式反应释放出来的能量（热反应堆发电站）。1kg 铀 235 裂变时放出的能量相当于 2000t 汽油或 2800t 标准煤的能量。但是天然铀中铀 235 的含量仅占 0.7%，其余 99.3% 为铀 238。而铀 238 为非裂变元素，不能直接作为热堆核燃料。因此，用热中子反应堆发电，地球上有的核燃料资源将不能供应很长时间。

快堆（增殖堆）可将一部分非裂变元素铀 238 转变为可裂变元素钚 239 (^{239}Pu)。每消耗一定数量的可裂变原子核，会产生更多的可裂变原子核，此过程称为增殖，这种反应堆称为增殖反应堆。这种堆型中轰击原子核的中子不经减速，是高能快中子，所以又称为快中子增殖堆（快堆）。快中子增殖堆是扩大核燃料资源的最重要途径。

未来的核能源将主要依靠核聚变获得。聚变反应是较轻原子核（如氘）聚合成较重原子核的反应。将氢的同位素氘和氚加热到很高的温度 ($1\times 10^8\text{K}$)，使它们发生燃烧而聚合成较重的元素，可释放出巨大的能量。核聚变燃料氘可直接从海水中提取，1kg 海水中大约含有 0.03g 氘。地球上约有海水 $1\times 10^{21}\text{kg}$ ，氘含量达 $1\times 10^{17}\text{kg}$ ，可释放出能量 $1\times 10^{31}\text{J}$ 。海水中的氘的热核聚变能将可供人类使用几百亿年，而最终解决人类的用能问题。

(2) 地热能 地壳层（约厚 60km）的温度约为 500°C ，地核（2900~6371km）中心温度可达约 5000°C ，可见地球是一个巨大的热库。10km 以内的地壳表层的热量就有 $125\times 10^{26}\text{J}$ ，相当全世界储煤发热量的 2000 倍。如果人类能源全部用地下热能，则 4100 万年后地球温度也只降低 1°C 。

地热资源指蕴藏在地层岩石和地热流中的热能，地热能是由地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变产生的，地下水的深处循环和来自极深处的岩浆沁入到地壳后，把热量从地下深处带至近表层。地热能虽不是一种“可再生的”资源，但其储量极其巨大，是人类可长期依靠的能源方式。地热能的特点是品位低、分散，要大规模应用较困难。

(3) 太阳能 太阳是炙热的气体，直径 $139\times 10^4\text{km}$ ，是地球直径的 110 倍。太阳表面温度约 6000°C ，中心温度为 $(800\sim 4000)\times 10^4^{\circ}\text{C}$ ，压力约 $2\times 10^{11}\text{ata}$ ($1\text{ata}=98066.5\text{Pa}$ ，下同)，在这样的高温高压条件下，太阳内部持续不断地进行数种热核聚变反应，最重要的是氢聚合成氦的核聚变反应，产生数百万度的高温。热核聚变反应产生的热量是太阳向宇宙空间辐射出巨大能量的源泉。这种聚变反应还可以维持数千亿年（宇宙从大爆炸逐渐扩展到今天的寿命不过 200 亿年）。可见，太阳是一个真正取之不尽、用之不竭的大能源。

地球距离太阳十分遥远，约 $1.5\times 10^8\text{km}$ ，是地球直径的 11800 倍，实际上地球从太阳获得的能量只是太阳能极少的一部分。即使是这样，地球从太阳中获得的能量也是地球上其他各种能量总和的上万倍。中午 12 点，太阳能的平面辐射热流密度最大可达 $940\text{W}/\text{m}^2$ ，量级与风能密度相当，经聚焦后的辐射热流密度可达 $500\text{kW}/\text{m}^2$ 。

太阳能的利用有两种：①利用光-热效应，产生热水供热和产生蒸汽发电，太阳能发电有塔式水、液体钠双工质循环电站；②利用光-电效应，用硅电池可以直接由光能转换为电能。

在地面上利用太阳能要受大气层衰减的影响,还要受阴晴天、日出日落、地理位置等影响,利用率很低。一种设想是在高空卫星上建太阳能电站,能量转换效率要比地面高得多。在卫星电站上,太阳能通过光电池直接转换为电能,用微波技术将电能转换为微波,以集束形式把微波发射到地面接收站,接收站再将微波转换为电能。由许多卫星组成卫星站网,就能为人类提供源源不断的电力。这种设想要实用还要克服很多技术上的困难,是比较遥远的事。

地球上的能源,除了核能外,太阳能是各种能量(化石燃料能、生物质能、风能、水能、海洋能等)的来源,可见,太阳辐射能是人类最基本的能量来源。

(4) 海洋能 地球表面海洋面积约占 71%。海洋能包括潮汐能、海流能、波浪能和温差能。海洋能是太阳能、太阳和月亮引力能产生的。世界潮汐能总量约 10 亿千瓦,储量不大,品位低、分散,供人类应用是有限的。

(5) 氢能 氢是宇宙中普遍存在的元素,约占宇宙质量的 75%,主要以化合物的形态储存在水中。高效率制氢的基本途径是利用太阳能,太阳能制得的氢能将成为人类用之不竭的一种优质、干净燃料。

(6) 可燃冰 是一种天然气水合物,是水和天然气在中高压和低温条件下混合时产生的晶体状物质。可燃冰在自然界分布非常广泛,海底以下 0~1500m 深的大陆架或北极等地的永久冻土带都有可能存在。资料显示,海底的天然气水合物可满足人类 1000 年的能源需要。

(7) 风能 世界风能总量为 2×10^{13} W, 大约是世界总能耗的 3 倍。如果风能的 1% 被利用,则可以减少世界 3% 的能源消耗;风能用于发电,可产生世界总电量的 8%~9%。

风能是一种无污染的可再生能源,它取之不尽,用之不竭,分布广泛。随着人类对生态环境的要求和能源的需要,风能的开发日益受到重视,风力发电将成为 21 世纪大规模开发的一种可再生清洁能源。

风能是一种最具活力的可再生能源,它实质上是太阳能的转化形式,因此可以认为是取之不尽的。风能的利用将可能改变人类长期依赖化石燃料和核燃料的局面。到 2002 年底,世界总的风力发电设备有 61000 台,总装机容量为 3200 万千瓦。风力发电技术在不断成熟,单机容量由 500~750kW 量级增大到 1000~2000kW 量级,目前已研制成功单机 5000kW 的风力机。

据预测,2002~2007 年的 5 年中,风力发电设备的总需求量为 5100 万千瓦,年均增长 11.2%。2002 年底,世界风电总装机为 3200 万千瓦,欧洲占 75%,美国占 15%,其余国占 10%。到 2007 年底,全世界风力发电总装机将达到 8300 万千瓦,其中 5800 万千瓦将装在欧洲,占总装机的 70%。到 2007 年后,预计年增长率还将加速,到 2012 年,其年增加装机容量可望达到 2400 万千

瓦, 总的风力发电能力将达到 $1.77 \times 10^8 \text{ kW}$, 占世界总电力市场的 2%。预计到 2020 年风力发电能力占世界总电力将可能达到 12%。

1.2.2 风能密度

风能可用“风能密度”来描述。空气在 1s 时间里以速度 v 流过单位面积产生的动能称为“风能密度”。

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

风能密度与平均风速 v 的三次方成正比, 平均风速为 10m/s 时, 风能密度为 600 W/m^2 ; 平均风速为 15m/s 时, 风能密度为 2025 W/m^2 。 ρ 是空气的密度值, 随气压、气温和湿度变化。

1.2.3 风能密度计算方法

可用直接计算法和概率计算法计算平均风能密度。

(1) 直接计算法 将某地一年(月)每天 24h 逐时测到的风速数据, 按某间距(比如间隔为 1m/s)分成各等级风速, 如 $v_1(3\text{m/s})$, $v_2(4\text{m/s})$, $\dots$, $v_i(i+2\text{m/s})$, 然后将各等级风速在该年(月)出现的累积小时数 $n_1, n_2, \dots, n_i$, 分别乘以相应各风速下的风能密度 $\left(n \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_i^3\right)$, 再将各等级风能密度相加之后除以年(月)总时数 N , 即

$$E_{\text{平均}} = \frac{\sum 0.5 n_i \rho v_i^3}{N} \quad (1-3)$$

则可求出某地一年(月)的平均风能密度。

(2) 概率计算法 概率计算法就是通过某种概率分布函数拟合风速频率的分布, 按积分公式计算得到平均风能密度。一般采用威布尔公式, 其风速 v 的概率分布函数为

$$f(v) = \frac{K}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K} \quad (1-4)$$

式中, K 为形状参数; C 为尺度参数。

利用风速观测数据, 通过最小二乘法、方差法和最大值法等三种方法可以确定 C 、 K 参数的值。将 C 、 K 值代入式(1-4), 计算出各等级风速的频率, 然后求出各等级风速出现的累积时间, 再按直接计算公式计算风能密度。另外, 当 C 、 K 值确定后, 也可以利用风能密度的直接计算公式推导出积分形式的公式。当风速 v 在其上、下限分别为 a 、 b 的区域内, f 为 v 的连续函数, 则积分形式的风能密度计算公式为

$$\bar{E} = \frac{\rho}{2} \frac{\int_a^b \left[\frac{K}{C} \left(\frac{v}{C} \right)^{K-1} e^{-\left(\frac{v}{C} \right)^K} \right] v^3 dv}{e^{-\left(\frac{a}{C} \right)^K} - e^{-\left(\frac{b}{C} \right)^K}} \quad (1-5)$$

1.2.4 地球上风能资源分布

根据米里乔夫的估计, 每年来自外层空间的辐射能为 $1.5 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$, 其中的 2.5%, 即 $3.8 \times 10^{16} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的能量被大气吸收, 产生大约 $4.3 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的风能。这一能量是 1973 年全世界电厂 $1 \times 10^{10} \text{ kW}$ 功率的约 400 倍。

风能利用是否经济取决于风力机轮毂中心高处最小年平均风速。这一界线值目前取在大约 5 m/s , 根据实际的利用情况, 这一界线值可能高一些或低一些。由于风力机制造成本降低以及常规能源价格的提高, 或者考虑生态环境, 这一界线值有可能会下降。图 1-2 为全世界风速分布图。从图 1-2 可见, 高风速从海面向陆地吹, 由于地面的粗糙度, 使风速逐步降低。在沿海地区, 风能资源很丰富, 向陆地不断延伸。相等的年平均风速随高度变化, 其趋势总是向上移动。

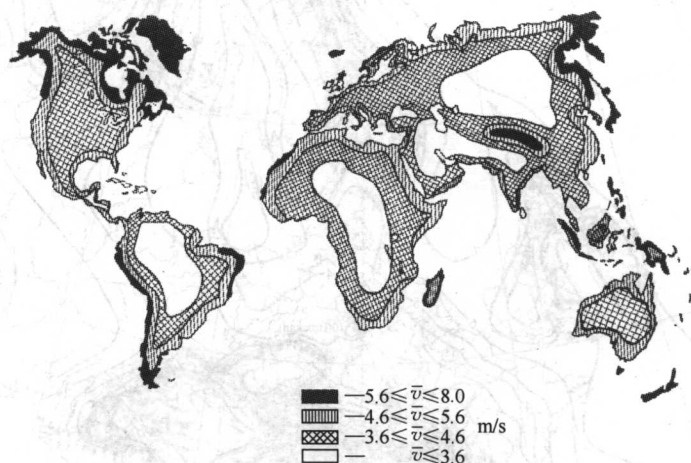


图 1-2 全世界风速分布图

德国北-南地区等风速线图见图 1-3, 风能最好的地方是大西洋西海岸, 特别是英国和爱尔兰地区, 风更大一些。德国地区的较好风资源地区在北海岸, 其次是中高山区的山上。

欧洲风能分布见图 1-4。

风能图是风力机选点最必需的风资源特性资料。图 1-4 是由 50 个气象站的数据得出的简图, 主要是由蒲田风级表用误差修正法对风速的估计值。而且风能图上的风速值是在 10 m 高处测得的数据, 年平均风速不是每年相同的, 但偏差不大。通过对不同气象站数据的计算得出, 在相当长时间里的年平均风速的最大

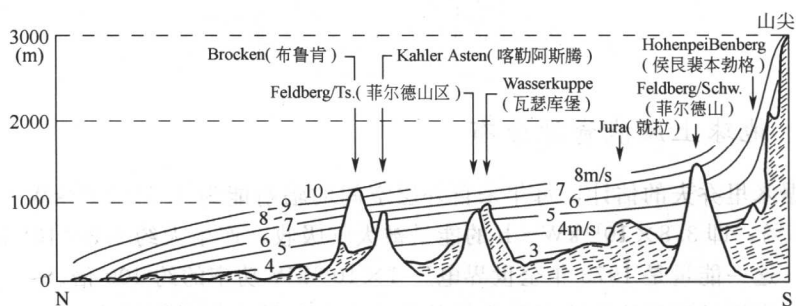


图 1-3 德国北-南地区等风速线图



图 1-4 欧洲风能分布图 (等风速线图)

偏差, 小风车时为 1m/s , 大风车时为 1.3m/s , 其中 50% 的气象站的这种误差在 0.2m/s 以下。图 1-5 是前西德 4m/s 以上风资源图。

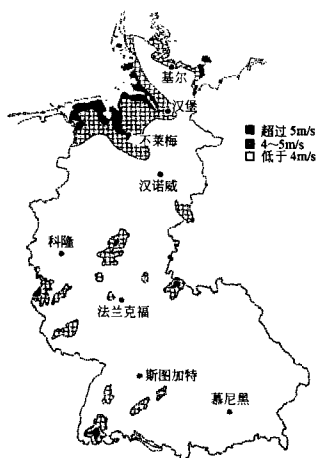


图 1-5 前西德 4m/s 以上风资源图

1.2.5 我国风能资源分区

我国风能资源可划分为如下几个区域。

(1) 最大风能资源区 东南沿海及其岛屿。这一地区，有效风能密度大于等于 $200\text{W}/\text{m}^2$ 的等值线平行于海岸线，沿海岛屿的风能密度在 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上，有效风力出现时间百分率达 $80\%\sim 90\%$ ，大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 的风速全年出现时间约 $7000\sim 8000\text{h}$ ，大于等于 $6\text{m}/\text{s}$ 的风速也有 4000h 左右。但从这一地区向内陆，则丘陵连绵，冬半年强大冷空气南下，很难长驱直下，夏半年台风在离海岸 50km 时风速便减小到 68% 。所以，东南沿海仅在由海岸向内陆几十公里的地方有较大的风能，再向内陆则风能锐减。在不到 100km 的地带，风能密度降至 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下，反为全国风能最小区。但在福建的台山、平潭和浙江的南麂、大陈、嵊泗等沿海岛屿上，风能却都很大。其中，台山风能密度为 $534.4\text{W}/\text{m}^2$ ，有效风力出现时间百分率为 90% ，大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 的风速全年累积出现 7905h 。换言之，平均每天大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 的风速有 21.3h ，是我国平地上有记录的风能资源最大的地方之一。

(2) 次最大风能资源区 内蒙古和甘肃北部。这一地区终年在西风带控制之下，而且又是冷空气入侵首当其冲的地方，风能密度为 $200\sim 300\text{W}/\text{m}^2$ ，有效风力出现时间百分率为 70% 左右，大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 的风速全年有 5000h 以上，大于等于 $6\text{m}/\text{s}$ 的风速有 2000h 以上，从北向南逐渐减少，但不像东南沿海梯度那么大。风能资源最大的虎勒盖地区，大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 和大于等于 $6\text{m}/\text{s}$ 的风速的累积时数分别可达 7659h 和 4095h 。这一地区的风能密度虽较东南沿海为小，但其分布范围较广，是我国连成一片的最大风能资源区。