



新能源工程应用系列丛书

FENGGUANGHUBUFADIANSHIYONGJISHU
GONGCHENG SHEJI ANZHUANGTIAOSHI YUNXINGWEIHU

风光互补发电实用技术

——工程设计 安装调试 运行维护

◎ 周志敏 纪爱华 编 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



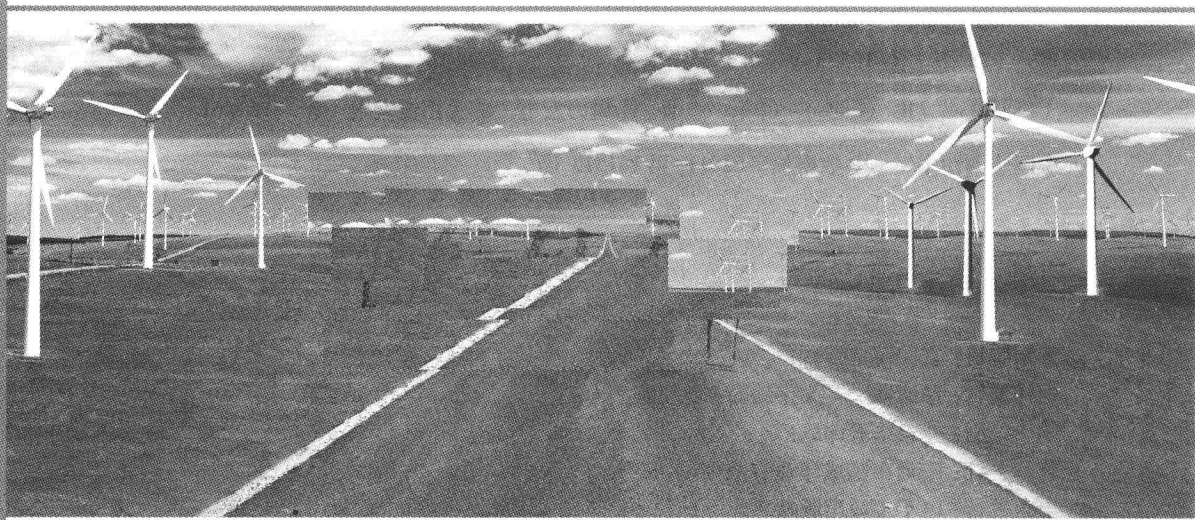
新能源工程应用系列丛书

FENG GUANG HU BU FA DIAN SHI YONG JI SHU
GONG CHENG SHE JI AN ZHUANG TIAO SHI YUN XING WU HU

风光互补发电实用技术

——工程设计 安装调试 运行维护

◎ 周志敏 纪爱华 编 著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合我国能源规划的方针政策和国内风光互补发电技术的发展现状,以风光互补发电技术为本书的核心内容,全面系统地阐述了风光互补发电技术的最新应用技术,包括风光互补发电基础知识、风力发电机与太阳能电池、风光互补发电系统、风光互补发电系统设计实例、风光互补发电系统安装与调试、风光互补发电系统运行维护与故障处理等内容。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值,是从事风光互补发电技术研发、应用和维护的工程技术人员必备读物。

本书可供农村乡镇、工矿企业、各级政府从事风光互补发电技术推广和应用的工程技术人员及高等职业技术学院的师生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

风光互补发电实用技术:工程设计 安装调试 运行维护/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社, 2011.9

(新能源工程应用系列丛书)

ISBN 978-7-121-14533-9

I. ①风… II. ①周… ②纪… III. ①风力发电 ②太阳能发电 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 181513 号

策划编辑:富 军

责任编辑:谭丽莎 文字编辑:王凌燕

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:473.6 千字

印 次:2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言



能源与环境问题已成为可持续发展面临的主要问题，日益引起国际社会的广泛关注。太阳能、风能作为一种重要的可再生能源，其具有清洁、无污染、安全、储量丰富的特点，受到世界各国的普遍重视。自《中华人民共和国可再生能源法》颁布实施以来，包括太阳能、风能、生物质能等在内的可再生能源利用事业进入了新的历史发展时期。《中华人民共和国可再生能源法》中明确规定：“国家扶持在电网未覆盖的地区建设可再生能源独立电力系统，为当地生产和生活提供电力服务。”这为我国可再生能源利用事业的进一步发展指明了方向。

目前，随着人们对风光互补发电技术认识的日渐提高和风光互补发电技术的不断成熟，其应用领域也越来越广泛，如独立运行于无电地区的集中风光互补供电系统（村落电站）和户用风光互补系统，离网风光互补方式相当广泛地应用于电网无法覆盖边远山区、牧区及通信基站、气象站、高速公路/铁路监控、森林防火等的监测站、部队边防哨所、航标灯、油田、教学示范等的供电服务。

风光互补发电技术是一个崭新的能源技术，在我国发展时间不长，尤其是可再生能源离网独立发电系统，从设计人员到实际操作人员，都有许多亟须解决的实用技术问题。为此，本书针对离网风光互补发电系统实际应用中，工程技术人员和用户大量的需要解决的实际问题，介绍了离网风光互补发电技术的基本原理、离网风光互补发电系统集成设计、工程设计、安装、调试、运行和维护及故障分析等实用知识。本书在写作中尽量做到针对性和实用性，在保证科学性的同时，注意通俗性。力求做到通俗易懂和结合实际工程应用，以便读者掌握离网风光互补发电系统工程的设计方法和离网风光互补发电的最新工程应用技术。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、纪达安、纪和平、刘淑芬。本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内外的专业学者和同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间短，加之作者水平有限，书中难免有不当之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录



第1章 风光互补发电基础知识	1
1.1 风力发电系统	1
1.1.1 风力发电技术	1
1.1.2 我国风能资源	7
1.1.3 风力发电技术	12
1.2 太阳能光伏发电系统	19
1.2.1 太阳能及光伏技术	19
1.2.2 太阳能光伏发电原理及优势	21
1.2.3 太阳能光伏发电系统构成	24
第2章 风力发电机组与太阳能电池	30
2.1 风力机与风力发电机组	30
2.1.1 风力机	30
2.1.2 风力发电机组	35
2.1.3 小型风力发电机组	40
2.1.4 风力发电机组技术参数	50
2.2 太阳能电池原理及发展	53
2.2.1 太阳能电池原理	53
2.2.2 晶体硅太阳能电池发展	59
2.2.3 太阳能电池的分类	65
2.2.4 太阳能电池板组件	72
第3章 风光互补发电系统	79
3.1 风光互补发电技术	79
3.1.1 风能和太阳能的互补性	79
3.1.2 风光互补发电系统的应用前景	84
3.1.3 风光互补发电系统的结构	86
3.2 胶体铅酸蓄电池	89
3.2.1 胶体铅酸蓄电池的结构及优缺点	89
3.2.2 胶体电解质的特性及结构	92
3.2.3 两类阀控密封式铅酸蓄电池的比较	94
3.3 风光互补发电控制与逆变技术	98
3.3.1 风光互补发电控制技术	98
3.3.2 风光互补发电系统逆变技术	108

3.4	风光互补 LED 照明系统	113
3.4.1	风光互补 LED 照明技术	113
3.4.2	风光互补路灯	115
第4章	风光互补发电系统设计实例	123
4.1	风光互补发电系统的设计方案	123
4.1.1	风光互补发电系统设计原则及方法	123
4.1.2	光伏发电部分设计方法	126
4.1.3	风力发电部分设计	134
4.1.4	蓄电池组设计	137
4.2	离网风光互补发电系统设计方法与实例	140
4.2.1	离网风光互补发电系统设计方法	140
4.2.2	离网风光互补发电系统设计实例及典型配置方案	145
4.3	风光互补路灯设计与实例	155
4.3.1	风光互补 LED 路灯设计	155
4.3.2	风光互补路灯系统设计实例	158
4.3.3	风光互补 60W LED 路灯主要技术参数	160
4.3.4	风光互补路灯系统典型配置方案	162
4.4	风光互补发电系统防雷接地设计	168
4.4.1	风光互补发电系统防雷设计	168
4.4.2	风光互补发电系统接地设计	171
第5章	风光互补发电系统安装与调试	180
5.1	风力发电机选址及地基要求	180
5.1.1	风力发电机选址	180
5.1.2	地基要求	185
5.2	风力发电机安装	187
5.2.1	风力发电机安装步骤	187
5.2.2	单体桁架塔风力发电机安装	194
5.2.3	太阳能电池组件的安装	199
5.2.4	蓄电池的安装与线路连接	201
5.2.5	风光互补路灯安装与调试	205
第6章	风光互补发电系统运行维护与故障处理	218
6.1	风光互补发电系统运行维护	218
6.1.1	风光互补发电系统运行方式与操作	218
6.1.2	风光互补发电系统使用与维护	222
6.1.3	蓄电池的正确使用与维护	225
6.2	风光互补发电系统故障处理	231
6.2.1	风机叶片维护与故障分析	231
6.2.2	塔架锈蚀的原因及维修	237
6.2.3	风力发电机故障分析	238

6.2.4	阀控密封式铅酸蓄电池早期失效故障分析	242
6.2.5	阀控密封式铅酸蓄电池自放电故障分析	245
6.3	阀控密封式铅酸蓄电池典型物理故障分析	246
6.3.1	阀控密封式铅酸蓄电池变形故障分析	246
6.3.2	阀控密封式铅酸蓄电池发生爆炸故障分析	249
6.3.3	阀控密封式铅酸蓄电池漏液故障分析	250
6.3.4	阀控密封式铅酸蓄电池胀裂故障分析	253
6.4	阀控密封式铅酸蓄电池典型化学故障分析	254
6.4.1	阀控密封式铅酸蓄电池失水及干涸失效故障分析	254
6.4.2	阀控密封式铅酸蓄电池极板硫化故障分析	261
6.4.3	阀控密封式铅酸蓄电池热失控故障分析	266
6.4.4	阀控密封式铅酸蓄电池极板典型故障分析	269
6.4.5	阀控密封式铅酸蓄电池组均匀性差故障分析	274
6.4.6	阀控密封式铅酸蓄电池达不到设计使用寿命故障分析	278
6.4.7	蓄电池部件的故障及其排除方法	283
参考文献		285

第1章 风光互补发电基础知识



1.1 风力发电系统

1.1.1 风力发电技术

1. 风的形成

风是一种自然现象，地球表面的空气水平运动称为风，风是地球外表大气层由于太阳的热辐射而引起的空气流动。太阳辐射对地球表面不均匀性加热是形成风的主要原因。太阳对地球的辐射，透过厚厚的大气层，到达地球表面，地球表面各处（海洋和陆地；高山岩石和平原土壤；沙漠、荒原和植被、森林地区）吸收热量不同；由于地球自转、公转、季节、气候的变化和昼夜温差的影响，使地表各处散热情况也各不相同，散热多的地区靠近地表的空气受热膨胀，压力减小，形成低气压区，这时空气从高压区向低气压区流动，就产生了风，也就是说风能最终还是来自太阳能。地形、地貌的差异，地球自转、公转的影响，更加剧了空气流动的力量和流动方向的多变性，使风速和风向的变化更加复杂。简单地说，太阳的辐射造成地球表面受热不均，引起大气层中压力分布不均，空气沿水平方向运动形成风，风的形成就是空气流动的结果。

大气压差是风产生的根本原因，由于大气层中的压力分布不均，从而使空气沿水平方向运动，空气流动所形成的动能称为风能。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。地球上全部风能估计约为 $2 \times 10^{17} \text{ kW}$ ，其中，可利用的约为 $2 \times 10^{10} \text{ kW}$ ，这个能量是相当大的。它是地球水能的10倍。因此也可以说风能是一种取之不尽、用之不竭的可再生能源。

2. 风的种类

1) 贸易风

在地球赤道上，热空气向空间上升，分为流向地球南北两极的两股强气流，在纬度 30° 附近，这股气流下降，并分别流向赤道与两极。在接近赤道地区，由于大气层中大量的空气环流，形成了固定方向的风，自古以来，人们利用这种定向风，开展海上远洋贸易，所以称为贸易风。由于地球自西向东旋转的原因，贸易风向西倾斜，此时北半球产生了东北风，而南半球则产生了东南风。

2) 旋风和反旋风

在由地球南北两极流向赤道的冷空气气流与由赤道流向两极的热空气气流相遇处（在纬度 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 附近）构成了涡流运动，形成旋风和反旋风。

3) 地区性风

由于地形的差异（如陆地、海洋、山岳、森林、沙漠），使空气在同一纬度上受到不同程度的加热，因而产生了地区性风。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，山坡因冷却降温速度比同高度的空气快，冷空气沿坡地向下流入山谷，称为山风。山谷能改变气流运动的方向，还能使风速增大，而丘陵、山地会因为摩擦而使风速减小，孤立的山峰会因海拔高而使风速增大。

4) 轻风

由于昼夜之间的温度变化而产生的沿海岸风称为轻风，在有太阳时，陆地所接受的热量较海洋强烈，因而陆地上空的空气较轻，于是陆地上空的空气向上升，冷空气力图自海洋流向沿岸陆地，于是产生了海风。陆地上的热空气则流向海洋，到离海岸某一距离处下降。而在夜间，陆地上的空气比海洋上的空气冷却较快，因此，陆地上的下层空气流向海洋，而上层空气则由海洋流向陆地，形成了与白昼相反的风向，称为陆地风。轻风方向的更换决定于地形条件。海风通常自上午 9~10 时开始，陆地风则在日落以后开始。轻风仅在沿海岸才遇到，流动的距离约为在海洋和陆地两方各 40km 之间。

5) 季节风

陆地上每年的温度变化较海洋大，同样也引起与轻风相似，但具有季节性的气流循环，它的强度大于轻风的气流循环强度，这种风称为季节风。

6) 平原和山岳风

山岳地区在一昼夜间有周期性的风向变换，与轻风相似，平原风每日上午自 9~10 时至日落沿山岳的坡度向高处流动，在夜间则与此相反，气流自山岳流向平原，形成了山岳风。如果平原处于海岸处，则会引起特别强劲的风，因为在夜间，山岳风被陆地风增强了，而在日间，平原风被海风增强。夜间的山岳风是由于山顶的冷空气具有较大密度，流向平原，形成夜间山岳风。平原风的产生则是由于日照山岳斜面上的空气较平原上的空气热，因此地势低处的空气膨胀，引起空气流动。

3. 风的变化

1) 风随时间变化

在一天内，风的强弱是随机变化的。在地面上，白天风大，而夜间风小；相反，在高空却是夜间风大，白天风小。在沿海地区，由于陆地和海洋热容量不同，白天产生海风（从海洋吹向陆地）；夜间产生陆风（从陆地吹向海洋）。在不同的季节，太阳和地球的相对位置也发生变化，使地球上存在季节性温差，因此，风向和风的强度也会发生季节性变化。在我国，大部分地区风的季节性变化规律是：春季最强，冬季次强，秋季第三，夏季最弱。

2) 风随高度变化

由于空气的黏性和地面摩擦的影响，风速随高度变化因地面的平坦度、地表粗糙度及风通道上的气温变化不同而异。特别是受地表粗糙度的影响程度最大。从地球表面到 10000m

高空层内, 空气的流动受到涡流、黏滞和地面摩擦等因素的影响, 风速随着高度的增加而增大。通过实验, 常用的计算风速随高度变化的公式有如下两个。

指数公式

$$v = v_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^n \quad (1-1)$$

对数公式

$$v = v_1 \cdot \frac{\lg \frac{h}{h_0}}{\lg \frac{h_1}{h_0}} \quad (1-2)$$

式中 v_1 ——高度 h_1 处的风速;

h_1 ——高度 (一般为 10m);

v ——待测高度 h 处的速度;

h ——待测点离地高度;

h_0 ——风速为零的高度;

n ——指数, 取决于地面的平整度 (粗糙度) 和大气的稳定度, 取值范围为 $1/8 \sim 1/2$ 。在开阔、平坦、稳定度正常的地区, n 值取 $1/7$ 。粗糙度大的大城市 n 常取 $1/3$, 一般上下风速差较小, n 较小, 反之, n 值取大。

3) 风变化的随机性

自然风是一种平均风速与激烈变动的瞬间紊乱气流相重合的风, 气流紊乱主要与地面的摩擦有关, 除此之外, 当风速与稳定层是垂直分布时会产生重力波, 在山风下侧也会产生山岳波。这种紊乱气流不仅影响风速, 也明显影响风向。如果按时间区分, 可将风向的变化区分为:

(1) 一年或一个月内风向的趋势。

(2) 短时间内变动的紊乱气流。

(3) 介于两者之间的平均风向。

对于第一种风向的变化状况, 如制成风向玫瑰图 (风向频度), 便可清楚地看出风向的大致趋势, 如图 1-1 所示。一般采用年平均风速时间曲线 (表示一地方一年中各种风速小时数) 来进行记录风速, 如图 1-2 所示。

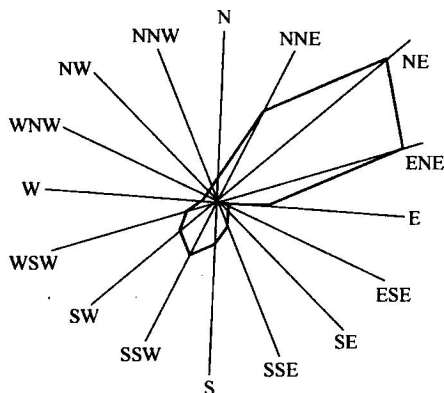


图 1-1 风向玫瑰图

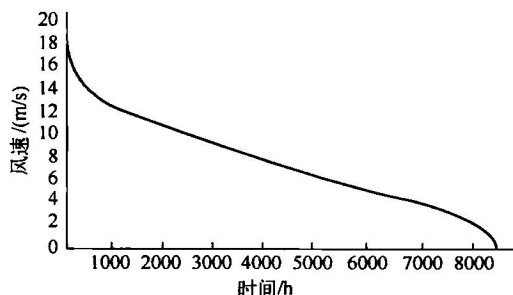


图 1-2 年平均风速时间曲线

4. 风的特性

风作为一种自然现象，有它本身的特性。通常采用风速、风频等基本指标来表述。

1) 风速

风的大小常用风的速度来衡量，风速是单位时间内空气在水平方向上移动的距离。专门测量风速的仪器有旋转式风速计、散热式风速计和声学风速计等。风速的单位常以 m/s 、 km/h 、 mile/h 等来表示。例如，空气在 1s 内运动了 3m ，那么风速就是 3m/s 。由于风是不断变化的，通常所说的风速是指一段时间内各瞬时风速的算术平均值，即平均风速。

2) 风频

风频分为风速频率和风向频率。

(1) 风速频率：指各种速度的风出现的频繁程度。对于风力发电的风能利用而言，为了有利于风力发电机平稳运行，便于控制，希望平均风速高、风速变化小。

(2) 风向频率：指各种风向出现的频繁程度。对于风力发电的风能利用而言，总是希望某一风向的频率尽可能的大。

5. 风能

风能就是空气的动能，是指风所负载的能量，风能的大小取决于风速和空气的密度。风的能量是由太阳辐射能转化来的，太阳每小时辐射地球的能量是 $174\,423\,000\,000\,000\text{kW}$ ，换句话说，地球每小时接受了 $1.74 \times 10^{17}\text{W}$ 的能量。风能占太阳提供总能量的 $1\% \sim 2\%$ ，太阳辐射能量中的一部分被地球上的植物转换成生物能，而被转化的风能总量大约是生物能的 $50 \sim 100$ 倍。著名的风能公式为：

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

式中 ρ ——空气密度 (kg/m^3)；

v ——风速 (m/s)；

t ——时间 (s)；

S ——截面面积 (m^2)。

它是风能利用中常用的公式，由风能公式可以看出，风能主要与风速、风所流经的面积、空气密度 3 个因素有关，其关系如下：

(1) 风能 (E) 的大小与风速的三次方 (v^3) 成正比，也就是说，影响风能的**最大因素是风速。

(2) 风能 (E) 的大小与风所流经的面积 (S) 成正比。对于风力发电机来说，就是风能与风力发电机的风轮旋转时扫过的面积成正比。由于通常用风轮直径作为风力发电机的主要参数，所以风能大小与风轮直径的平方成正比。

(3) 风能 (E) 的大小与空气密度 (ρ) 成正比。空气密度是指单位体积 (m^3) 所容纳空气的质量 (kg)。因此，计算风能时，必须要知道空气密度 ρ 值。空气密度 ρ 值与空气的湿度、温度和海拔高度有关，可以从相关的资料中查到。

空气运动具有动能，如果风力机风轮叶片旋转一圈所扫过的面积为 A ，风速为 v 的空气在单位时间内流经风轮时，该空气传递给风轮的风能功率（一般称为风能）为

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot A v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1-4)$$

式中 ρ ——空气密度 (kg/m^3);

A ——风力机叶片旋转一圈所扫过的面积 (m^2);

v ——风速 (m/s);

P ——每秒空气流过风力机风轮断面积的风能, 即风能功率 (W)。

如果风力机的风轮直径为 D , 则

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1-5)$$

则

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 \quad (1-6)$$

若有效风速时间为 t , 则在时间 t 内的风能为

$$E = P \cdot t = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 t \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可知, 风能与空气密度 ρ 、风轮直径的平方 D^2 、风速的立方 v^3 和风持续时间 t 成正比。一般来说, 一定高度范围内的空气密度可以认为是一个常数。因此, 当风力机的风轮越大, 有效风速时间越长, 特别是风速越大, 则风力机所能获得的风能就越大。

表征一个地点的风能资源, 要视该地区常年平均风能密度的大小。风能密度是单位面积上的风能, 对于风力机来说, 风能密度是指风轮扫过单位面积的风能, 即

$$W = \frac{P}{A} = 0.5 \rho \times v^3 (\text{W}/\text{m}^2) \quad (1-8)$$

式中 W ——风能密度 (W/m^2);

ρ ——空气密度 (kg/m^3);

v ——风速 (m/s)。

常年平均风能密度为

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho v^3 dt \quad (1-9)$$

式中 $\bar{W}$ ——平均风能密度 (W/m^2);

T ——总的时间 (h)。

在实际应用时, 常用下式来计算某地年 (月) 风能密度, 即

$$W_{\text{年(月)}} = \frac{W_1 t_1 + W_2 t_2 + \cdots + W_n t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n} \quad (1-10)$$

式中 $W_{\text{年(月)}}$ ——年 (月) 风能密度 (W/m^2);

$W_i (1 \leq i \leq n)$ ——各等级风速下的风能密度 (W/m^2);

$T_i (1 \leq i \leq n)$ ——各等级风速在每年 (月) 出现的时间 (h)。

不考虑风力机的机械利用系数, 单位面积获得的风能功率称为风能密度 (W/m^2), 并以此表征某地风能的大小

$$W = 0.5 \rho v^3 \quad (1-11)$$

推动风力机运转的风能功率是

$$P_1 = 0.5\rho v^3 A \quad (1-12)$$

式中 ρ ——空气质量密度 (kg/m^3);

v ——风速 (m/s);

A ——风力机叶轮扫过的面积 (m^2)。

由于实际上风力机不可能将桨叶旋转的风能全部转变为轴的机械能, 因而风轮的实际功率为

$$P = 0.5\rho v^3 A C_p \quad (1-13)$$

式中, C_p 为风能利用系数, 即风轮所接收风的动能与通过风轮扫掠面积 A 全部风的动能比值。

以水平轴风力机为例, 理论上最大风能利用系数为 0.593 左右, 但再考虑到风速变化和桨叶空气动力损失等因素, 风能利用系数能达到 0.4 就相当高了。风能密度有直接计算和概率计算两种方法。近年来在各国风能计算中, 大多采用概率计算中的韦伯尔 (Weibull) 分布来拟合风速频率分布方法计算风能密度。

风力机要根据当地的风况确定一个风速来设计, 该风速称为“设计风速”或“额定风速”, 它与“额定功率”相对应。由于风的随机性, 风力机不可能始终在额定风速下运行。因此风力机就有一个工作风速范围, 即从切入风速到切出风速, 称为工作风速, 即有效风速。依此计算的风能密度称为有效风能密度。

6. 风力等级

根据理论计算和实践结果, 把具有一定风速的风, 通常是指 $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的风作为一种能量资源加以开发, 用来做功 (如发电), 把这一范围的风称为有效风能或风能资源。因为风速低于 $3\text{m}/\text{s}$ 时, 它的能量太小, 没有利用的价值, 而风速大于 $20\text{m}/\text{s}$ 时, 它对风力发电机的破坏性很大, 很难利用。世界气象组织将风力分为 17 个等级, 在没有风速计的时候, 可以根据它来粗略估计风速。风力等级如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 0~12 级

风 级	名 称	风速 (m/s)	风速 (km/h)	陆地地面物象	海面波浪	浪高 (m)	最高 (m)
0	无风	0.0~0.2	<1	静, 烟直上	平静	0.0	0.0
1	软风	0.3~1.5	1~5	烟示风向	微波峰无飞沫	0.1	0.1
2	轻风	1.6~3.3	6~11	感觉有风	小波峰未破碎	0.2	0.3
3	微风	3.4~5.4	12~19	旌旗展开	小波峰顶破裂	0.6	1.0
4	和风	5.5~7.9	20~28	吹起尘土	小浪白沫波峰	1.0	1.5
5	劲风	8.0~10.7	29~38	小树摇摆	中浪折沫峰群	2.0	2.5
6	强风	10.8~13.8	39~49	电线有声	大浪白沫离峰	3.0	4.0
7	疾风	13.9~17.1	50~61	步行困难	破峰白沫成条	4.0	5.5
8	大风	17.2~20.7	62~74	折毁树枝	浪长高有浪花	5.5	7.5
9	烈风	20.8~24.4	75~88	小损房屋	浪峰倒卷	7.0	10.0
10	狂风	24.5~28.4	89~102	拔起树木	海浪翻滚咆哮	9.0	12.5
11	暴风	28.5~32.6	103~117	损毁重大	波峰全呈飞沫	11.5	16.0
12	飓风	>32.6	>117	摧毁极大	海浪滔天	14.0	—

表 1-2 13~17 级

风 级	风速 (m/s)	风速 (km/h)
13	37.0 ~ 41.4	134 ~ 149
14	41.5 ~ 46.1	150 ~ 166
15	46.2 ~ 50.9	167 ~ 183
16	51.0 ~ 56.0	184 ~ 201
17	56.1 ~ 61.2	202 ~ 220

风所具有的能量是很大的, 风速为 $9 \sim 10\text{m/s}$ 的 5 级风, 吹到物体表面上的力约为 10kg/m^2 ; 风速为 20m/s 的 9 级风, 吹到物体表面上的力约为 50kg/m^2 ; 风所含的能量比人类迄今为止所能控制的能量要大得多。

7. 风能的优点和局限性

风能是非常重要并储量巨大的能源, 它安全、清洁、充裕。目前, 利用风力发电已成为风能利用的主要形式, 受到世界各国的高度重视, 而且发展速度最快。风能与其他能源相比, 具有明显的优点, 但也有其突出的局限性。

1) 风能的优点

(1) 蕴藏量大。风能是太阳能的一种转换形式, 是取之不尽、用之不竭的可再生能源。根据计算, 太阳至少还可以像现在一样照射地球 60 亿年左右。

(2) 无污染。在风能转换为电能的过程中, 不产生任何有害气体和废料, 不污染环境。

(3) 可再生。风能是靠空气的流动而产生的, 这种能源依赖于太阳的存在。只要太阳存在, 就可不断地、有规律地形成气流, 周而复始地产生风能, 可永久持续利用。

(4) 分布广泛、就地取材、无需运输。在边远地区如高原、山区、岛屿、草原等地区, 由于缺乏煤、石油和天然气等资源, 给生活在这一地区的人们带来诸多不便, 而且由于地处偏远、交通不便, 即使从外界运输燃料也十分困难。因此, 利用风能发电可就地取材、无需运输, 具有很大的优越性。

(5) 适应性强、发展潜力大。我国可利用的风力资源区域占全国国土面积的 76%, 在我国发展小型风力发电, 潜力巨大、前景广阔。

2) 风能的向限性

(1) 能量密度低。由于风能来源于空气的流动, 而空气的密度很小, 因此风力的能量密度很小, 只有水力的 $1/816$ 。

(2) 不稳定性。由于气流瞬息万变, 风时有时无、时大时小, 日、月、季、年的变化都十分明显。

(3) 地区差异大。由于地形变化, 地理纬度不同, 因此风力的地区差异很大。两个邻近区域, 由于地形的不同, 其风力可能相差几倍甚至几十倍。

1.1.2 我国风能资源

我国的风能资源十分丰富, 仅次于俄罗斯和美国, 居世界第三位。根据国家气象局气象

研究院的估算,我国 10m 高度层的风能资源总储量为 32.26 亿千瓦,其中实际可开发利用的风能资源储量为 2.53 亿千瓦。而据估计,我国近海风能资源约为陆地的 3 倍,所以,我国可开发风能资源总量约为 10 亿千瓦,其中,陆地上风能储量约 2.53 亿千瓦(陆地上离地 10m 高度资料计算),海上可开发和利用的风能储量约 7.5 亿千瓦。

1. 可利用的风能

风虽然随处可见,但是也有可利用和不可利用之分,它与风速有直接关系。年平均风速小于 2m/s 的地区,目前是没有利用价值区;年平均风速在 $2\sim 4\text{m/s}$ 的地区,是风能可利用区,在这一区域内,年平均风速在 $3\sim 4\text{m/s}$ 的地区,利用价值较高,有一定的利用前景,但从总体考虑,该地区的风力资源仍是不高;年平均风速在 $4\sim 4.5\text{m/s}$ 的地区基本相当于风能较丰富区;年平均风速大于 4.5m/s 的地区,属于风能丰富区。

由此可见,除去一些破坏性极大的风(如台风、龙卷风等),绝大多数风速在 2m/s 以上的风能都是对人类有用的风能。目前,国内外一般选择年平均风速为 6m/s 或以上的高风速区(即风能资源丰富区),安装并网型风力发电机组,即大型风力发电机组。在这些机组中,我国一般选用单机容量 600kW 以上的机组建设风电场。这样才能保证机组多发电,经济效益才能显著。独立运行的小型风力发电机组启动风速较低,一般为 3m/s 以上就能发电,这些地区分布区域广,我国有相当部分农耕区、山区和牧区都属于这种地区。

2. 风能资源开发的判断依据

从风能公式可以看到,影响风能资源的主要因素是风速,风能欠缺区由于平均风速很低,没有开发价值。另外,因功率不同的风力发电机对风速的要求是不同的,因此判断某一地区的风能资源是否值得开发,还要考虑采用的风力发电机的功率大小和机型。

(1) 大型风力发电机(100kW 以上)可能发展的地区,其年平均风速大约为 6m/s 以上,在全国范围内,仅局限于几个地带,就陆地而言,大约占全国总面积的 $1/100$ 。

(2) 中型风力发电机(10kW 级及以上)可能发展的地区,其年平均风速大约为 4.5m/s 以上。在全国范围内,可以发展中型风力发电机的地区,大约占全国陆地总面积的 $1/10$ 。

(3) 小型风力发电机(10kW 级及以下)可能发展的地区,其年平均风速大约为 3m/s 以上。在全国范围内,可以发展小型风力发电机的地区范围较大,大约占全国陆地总面积的 40% 以上。

3. 我国风力资源区划

我国地域辽阔、海岸线长,风能资源比较丰富。据国家气象局估算,除少数省份年平均风速比较小以外,大部分省、市、自治区,尤其是西南边疆、沿海和三北(东北、西北、华北)地区,都有着极有利用价值的风能资源。风能分布具有明显的地域性规律,这种规律反映了大型天气系统的活动和地形作用的综合影响。根据全国有效风能密度、有效风力出现时间百分率及大于等于 3m/s 和 6m/s 风速的全年累积小时数,将全国风能资源划分为 4

个大区（30 个小区），如表 1-3 所示。

表 1-3 风能区划标准

指标 \ 区	丰 富 区	较 丰 富 区	可 利 用 区	贫 乏 区
年有效风能密度 (W/m)	≥ 200	200 ~ 150	150 ~ 50	≤ 50
风速 $\geq 3\text{m/s}$ 的年小 时数 (h)	≥ 5000	5000 ~ 4000	4000 ~ 2000	≤ 2000
占全国面积/%	8	18	50	24
包括的小区	A34a—东南沿海及 台湾岛屿和南海群岛 秋冬特强压型； A21b—海南岛南部夏 春强压型；A14b—山 东、辽东沿海春冬强 压型；B12b—内蒙古 北部西端和锡林郭勒 盟春夏强压型； B14b—内蒙古阴山到 大兴安岭以北春冬强 压型；C13b—c—松 花江下游春秋强中压 型；东南沿海及其岛 屿，为我国最大风能 资源区	D34b—东南沿海 (离海岸 20 ~ 50km) 秋冬强压型；D14a— 海南岛东部春冬特强 压型；D14b—渤海沿 海春冬强压型； D34a—台湾东部秋冬 特强压型；E13b—东 北平原春秋强压型； E14b—内蒙古南部春 冬强压型；E12b—河 西走廊及其邻近春夏 强压型；E21b—新疆 北部夏春强压型； F12b—青藏高原春夏 强压型；内蒙古和甘 肃北部，为我国次大 风能资源区；黑龙江 和吉林东部及辽东半 岛沿海，风能也较大	G43b—福建沿海 (离海岸 50 ~ 100km) 和广东沿海秋冬强压 型；G14a—广西沿海 及雷州半岛春冬特强 压型；H13b—大小兴 安岭山地春秋强压型； I12c—辽河流域和苏 北春夏中压型； I14c—黄河、长江中 下游春冬中压型； I31c—湖南、湖北和 江西秋春中压型； I12c—西北五省的一 部分及青藏的东部和 南部春夏中压型； I14c—川西南和云贵 的北部春冬中压型； 青藏高原、三北地区 的北部和沿海，为风 能较大区	J12d—四川、甘南、陕 西、鄂西、湘西和贵北春夏 弱压型；J14d—南岭山地以 北冬春弱压型；J43d—南岭 山地以南冬秋弱压型； J14d—云贵南部春冬弱压 型；K14d—雅鲁藏布江河谷 春冬弱压型；K12c—昌都地 区春夏中压型；L12c—塔里 木盆地西部春夏中压型；云 贵川，甘肃、陕西南部，河 南、湖南西部，福建、广 东、广西的山区

4. 我国风能资源的特点

我国风能资源分布有以下特点。

1) 季节性的变化

我国位于亚洲大陆东部，濒临太平洋，季风强盛，内陆还有许多山系，地形复杂，加之青藏高原耸立在我国西部，改变了海陆影响所引起的气压分布和大气环流，增加了我国季风的复杂性。冬季风来自西伯利亚和蒙古等中高纬度的内陆，那里空气十分严寒干燥，冷空气积累到一定程度，在有利高空环流引导下，就会爆发南下，俗称寒潮，在此南下的强冷空气的影响下，形成寒冷干燥的西北风侵袭我国北方各省（直辖市、自治区）。每年冬季总有多次大幅度降温的强冷空气南下，主要影响我国西北、东北和华北，直到次年春夏之交才会消失。

夏季风是来自太平洋的东南风、印度洋和南海的西南风，东南季风影响遍及我国东半部，西南季风则影响西南各省和南部沿海，但风速远不及东南季风大。热带风暴是太平洋西部和南海热带海洋上形成的空气涡旋，是破坏力极大的海洋风暴，每年夏秋两季频繁侵袭我国，登陆我国南海之滨和东南沿海，热带风暴也能在上海以北登陆，但次数很少。

2) 地域性的变化

我国地域辽阔，风能资源比较丰富。特别是东南沿海及其附近岛屿，不仅风能密度大，

年平均风速也高,发展风能利用的潜力很大。在内陆地区,从东北、内蒙古,到甘肃走廊及新疆一带的广阔地区,风能资源也很好。华北和青藏高原有些地方也有能利用的风能。

东南沿海的风能密度一般在 $200\text{W}/\text{m}^2$,有些岛屿达 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上,年平均风速 $7\text{m}/\text{s}$ 左右,全年有效风时 6000 多小时。内蒙古和西北地区的风能密度也在 $150\sim 200\text{W}/\text{m}^2$,年平均风速 $6\text{m}/\text{s}$ 左右,全年有效风时 $5000\sim 6000\text{h}$ 。青藏高原的北部和中部,风能密度也有 $150\text{W}/\text{m}^2$,全年 $3\text{m}/\text{s}$ 以上风速出现时间 5000h 以上,有的可达 6500h 。

青藏高原地势高亢开阔,冬季东南部盛行偏南风,东北部多为东北风,其他地区一般为偏西风,冬季大约以唐古拉山为界,以南盛行东南风,以北为东至东南风。

我国幅员辽阔,陆疆总长达 2 万多千米,还有 18000 多千米的海岸线,边缘海中有岛屿 5000 多个,风能资源丰富。我国现有风电场场址的年平均风速均达到 $6\text{m}/\text{s}$ 以上。一般认为,可将风电场分为三类:年平均风速 $6\text{m}/\text{s}$ 以上时为较好; $7\text{m}/\text{s}$ 以上为好; $8\text{m}/\text{s}$ 以上为很好。可按风速频率曲线和机组功率曲线,估算标准大气状态下该机组的年发电量。我国年平均风速 $6\text{m}/\text{s}$ 以上的地区,在全国范围内仅限于较少数几个地带。就内陆而言,大约仅占全国总面积的 $1/100$,主要分布在长江到南澳岛之间的东南沿海及其岛屿,这些地区是我国最大的风能资源区及风能资源丰富区,包括山东、辽东半岛、黄海之滨,南澳岛以西的南海沿海、海南岛和南海诸岛,内蒙古从阴山山脉以北到大兴安岭以北,新疆达坂城,阿拉山口,河西走廊,松花江下游,张家口北部等地区及分布各地的高山山口和山顶。中国沿海水深在 $2\sim 10\text{m}$ 的海域面积很大,而且风能资源好,靠近我国东部主要用电负荷区域,适宜建设海上风电场。

我国风能丰富的地区主要分布在西北、华北和东北的草原或戈壁,以及东部和东南沿海及岛屿,这些地区一般都缺少煤炭等常规能源。在时间上,冬春季风大、降雨量少,夏季风小、降雨量大,与水电的枯水期和丰水期有较好的互补性。

5. 影响中国风能资源的因素

1) 大气环流对中国风能分布的影响

东南沿海及东海、南海诸岛,因受台风的影响,最大年平均风速在 $5\text{m}/\text{s}$ 以上。东南沿海有效风能密度大于等于 $200\text{W}/\text{m}^2$,有效风能出现时间百分率可达 $80\%\sim 90\%$ 。风速 $v\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风全年出现累积小时数为 $7000\sim 8000\text{h}$;风速 $v\geq 6\text{m}/\text{s}$ 的风有 4000h 。岛屿上的有效风能密度为 $200\sim 500\text{W}/\text{m}^2$,风能可以集中利用。福建的台山、东山及台湾的澎湖湾等,有效风能密度都在 $500\text{W}/\text{m}^2$ 左右,风速 $v\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风累积为 8000h ,换言之,平均每天有 21h 以上时间的风速 $v\geq 3\text{m}/\text{s}$ 。但在一些大岛,如台湾和海南,又具有独特的风能分布特点。台湾风能南北两端大,中间小;海南西部大于东部。

内蒙古和甘肃北部地区,高空终年在西风带的控制下。冬半年地面在蒙古高原东南缘,冷空气南下,因此,总有 $5\sim 6$ 级以上的风速出现在春夏和夏秋之交。其气旋活动频繁,当每一气旋过境时,风速也较大。它的年平均风速在 $4\text{m}/\text{s}$ 以上,有效风能密度为 $200\sim 300\text{W}/\text{m}^2$,风速 $v\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风全年累积小时数在 5000h 以上,是中国风能连成一片的最大地区。

云南、贵州、四川、甘南、陕南、豫西、鄂西和湘西风能较小,这一地区因受西藏高原的影响,冬半年高空在西风带的死水区,冷空气沿东亚南下很少影响这里。夏半年海上来的