

风能及太阳能 发电技术

● 钱显毅 沈明辉 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

风能及太阳能发电技术

钱显毅 沈明辉 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

能源是人类社会和经济发展的物质基础,其消费水平也是各国社会经济发展水平的重要标志,根据目前的研究,在 21 世纪,风能和太阳能将得到广泛的应用。本书主要包括以下内容:风力发电技术现状及趋势、风能及其分布、空气动力学及风力机、风力发电负载调节系统的研究、风力发电系统及并网、风力发电系统的储能、风力机的设计、太阳能及其发电技术、太阳能发电储能、风光互补发电及并网。

本书特别适用于相关工程技术人员解决实际问题时参考,也可以作为卓越工程师、创新型人才、实用型人才的培养用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

风能及太阳能发电技术 / 钱显毅, 沈明辉著. — 北京: 北京交通大学出版社, 2013. 12
ISBN 978 - 7 - 5121 - 1750 - 1

I. ① 风… II. ① 钱… ② 沈… III. ① 风力发电 ② 太阳能发电 IV. ① TM614
② TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 315523 号

责任编辑: 郭碧云

出版发行: 北京交通大学出版社 电话: 010 - 51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印刷者: 北京泽宇印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 × 260 印张: 14.25 字数: 356 千字

版 次: 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 1750 - 1/TM · 53

印 数: 1 ~ 3 000 册 定价: 32.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。
投诉电话: 010 - 51686043, 51686008; 传真: 010 - 62225406; E-mail: press@bjtu. edu. cn。

前言

能源是人类社会和经济发展的物质基础，其消费水平也是各国社会经济发展水平的重要标志。在 21 世纪，世界各国都重视新能源的开发和应用，一些国际组织和研究机构对风能和太阳能进行了深入研究，发表了大量的研究报告，其共同的结论是风能和太阳能将得到广泛的应用。目前，风能发电已经在我国得到了广泛的应用，而我国又是太阳能发电的关键材料——太阳能电池的生产大国，因此，风能和太阳能发电相关技术在我国得到了广泛应用，许多相关专业技术人员和高校科研和教学都急需新能源相关技术资料。

为了扩大本书的适用范围，并考虑到相关工程技术人员参考之用和工程应用型人才的培养需求，在编写过程中，作者参考了《教育部关于实施卓越工程师教育培养计划的若干意见》。

本书具有以下特点。

1. 特色鲜明，实用性强，方便读者自学。相关章节中安排有风能和太阳能发电的阅读材料，方便相关工程技术人员自学，将每个知识点和关键技术与相关学科紧密结合，适用不同基础的相关工程技术人员和学生使用。
2. 重点突出，简明清晰，结论表述准确。对风能和太阳能发电技术涉及的公式不求严格的证明过程，但对其发电原理表述清晰，结论准确，不但有利于帮助学生建立风能和太阳能发电的数理模型，还有利于工程技术人员进行理论分析和解决工程实际问题。
3. 难易适中，适用面广，符合因材施教。适用于不同的工程技术人员学习和参考，也可用于普通高校教学，尤其适用于卓越工程师人才的培养。
4. 系统性强、强化应用、注重动手能力的培养。在确保风能和太阳能发电知识系统性的基础上，调研并参考了相关行业专家的意见，因此本书特别适用于培养创新型、实用型人才。

本书是在常州工学院钱显毅主持江苏省自科项目 10KJD480003 研究和长期从事新能源教学与研究，以及国网河南省电力公司新乡供电公司沈明辉长期从事电力线路维护分析与检测研究的基础上编著而成的。本书第 1～8 章由钱显毅编著、第 9～10 章由沈明辉编著。

由于各方面的原因，书中难免存在错误，欢迎各位同仁多提宝贵意见，如需要交流和科研教学资料，请通过 QQ（QQ 号：1239535278）与作者联系。

作者
于常州工学院
2013 年 10 月

目录

第1章 风力发电技术的发展现状及趋势	(1)
1.1 风力发电技术的发展现状、发展方向	(1)
1.1.1 风力发电	(1)
1.1.2 风力发电技术的发展方向	(1)
1.2 我国风力发电技术的研发及开发应用	(3)
1.2.1 我国风力发电技术的研发与进展	(3)
1.2.2 江苏省风力发电技术的研发与进展	(4)
1.3 前景展望	(5)
第2章 风能及其分布	(6)
2.1 风能	(6)
2.2 风能资源的分布及其计算	(16)
2.3 中国风电的发展前景	(24)
2.3.1 发展风电的必要性	(24)
2.3.2 国家对发展风电的政策支持	(25)
2.3.3 发展风电的展望	(25)
第3章 空气动力学及风力机	(26)
3.1 空气动力学	(26)
3.2 风机原理与结构	(28)
3.3 风力机的功率与效率	(34)
第4章 风力发电负载调节系统的研究	(37)
4.1 最佳功率负载线	(37)
4.1.1 最佳功率负载线	(37)
4.1.2 实际功率负载线的确定及负载调节	(38)
4.2 负载控制器	(39)
4.2.1 分级负载控制器	(39)
4.2.2 负载控制器与变速恒频风力发电	(40)
4.3 电场风资源与风力发电机组的匹配	(41)
4.4 风电输出与电网的匹配	(42)
第5章 风力发电系统及并网	(45)
5.1 风力发电系统的发电机	(45)

5.1.1	独立运行风力发电系统中的发电机	(45)
5.1.2	并网运行风力发电系统中的发电机	(53)
5.2	风力发电系统	(66)
5.2.1	独立运行的风力发电系统	(66)
5.2.2	并网运行的风力发电系统	(69)
5.3	风力发电设备	(80)
5.3.1	风力发电机组设备	(80)
5.3.2	风电场升压变压器、配电线路及变电所设备	(90)
5.4	风力发电机变流装置的研究	(91)
5.4.1	整流器	(91)
5.4.2	逆变器	(93)
第6章	风力发电系统的储能	(96)
6.1	蓄能装置	(96)
6.2	飞轮储能	(98)
6.2.1	飞轮电池的组成与工作原理	(98)
6.2.2	飞轮电池转子的支撑、驱动和控制	(99)
6.2.3	飞轮电池的应用	(103)
6.3	飞轮储能的控制	(103)
6.3.1	飞轮能量转换器	(103)
6.3.2	永磁同步电机数学模型	(106)
6.3.3	永磁同步电机的控制策略	(107)
6.3.4	结论	(108)
6.4	储能的稳定性分析	(108)
6.4.1	引言	(108)
6.4.2	飞轮蓄能系统稳定运转的条件	(108)
6.4.3	阻尼系统的设计	(109)
6.4.4	结论	(110)
第7章	风力机的设计	(111)
7.1	风机叶片的设计	(111)
7.1.1	物理原型、数字原型与虚拟原型的概念	(111)
7.1.2	虚拟原型开发方法的特点	(114)
7.1.3	风力发电风机叶片研究的意义	(114)
7.1.4	建立虚拟原型的主要步骤	(114)
7.1.5	支持虚拟原型的集成框架	(115)
7.1.6	计算机技术在风力发电风机叶片的设计中的应用	(116)
7.1.7	计算机技术在风力发电风机叶片的设计优势	(117)
7.2	叶片的有限元设计方法	(117)
7.2.1	有限元法的基本原理与分析方法	(117)
7.2.2	有限元分析中的离散化处理	(119)

7.2.3	离散化处理	(121)
7.2.4	单元分析	(122)
7.2.5	后置处理	(123)
7.2.6	小结	(124)
7.3	储能飞轮的设计	(124)
7.3.1	数字化功能样机	(124)
7.3.2	多学科设计优化	(125)
7.3.3	虚拟样机技术在飞轮储能设计中的应用	(125)
第8章	太阳能及其发电技术	(127)
8.1	太阳和太阳能	(127)
8.1.1	太阳大气的结构和组成	(127)
8.1.2	太阳的能量	(128)
8.1.3	地球上的太阳能	(129)
8.1.4	我国丰富的太阳能资源	(133)
8.2	太阳能电池及发电系统	(137)
8.2.1	太阳能电池及太阳能电池方阵	(137)
8.2.2	太阳能光伏发电	(147)
8.2.3	太阳能光伏发电系统的设计及实例	(154)
第9章	太阳能发电储能	(169)
9.1	太阳能发电储能控制及逆变	(169)
9.1.1	充、放电控制器	(169)
9.1.2	直流-交流逆变器	(183)
9.2	太阳能电池配电保护系统	(190)
9.2.1	光伏电站交流配电系统的构成和分类	(190)
9.2.2	光伏电站交流配电系统的主要功能和原理	(190)
9.2.3	对交流配电系统的主要要求	(191)
9.2.4	高压配电系统	(193)
第10章	风光互补发电及并网	(194)
10.1	电网对光伏电站接入承载能力	(194)
10.1.1	大规模光伏、风电并网对电网的影响	(194)
10.1.2	区域电网对光伏电站接入承载能力	(195)
10.2	光伏发电并网技术	(202)
10.2.1	并网光伏电站接入系统分析	(202)
10.2.2	光伏发电接入后电网暂态稳定性分析	(204)
10.3	风电并网有关技术要求	(206)
10.4	大规模光伏电站风电场的适应性	(209)
10.4.1	光伏发电并网运行要求	(209)
10.4.2	光伏发电的经济效益和运行成本分析	(212)
参考文献		(216)



第 1 章

风力发电技术的发展 现状及趋势

1.1 风力发电技术的发展现状、发展方向

人类对风能利用已有数千年的历史，在蒸汽机发明之前，风能一直被用来作为碾磨谷物、抽水、船舶航行等机械设备的动力。当今，风能可以在大范围内无污染地用于发电，提供给独立用户或输送到中央电网。由于风能资源丰富、风电技术相当成熟、风电价格越来越具有市场竞争力，故风电是世界上增长最快的能源。近几年来，风电装机容量年均增长超过了 30%，而每年新增风电装机容量的增长率则达到了 35.7%。同时，风电装备制造业发展迅猛，恒速、变速等各类风力发电机组逐步实现了商品化和产业化，而大型风力发电在世界各地进入产业化。

1.1.1 风力发电

风力发电机组由风机和发电机组组成，一般包括叶片（集风装置）、发电机（包括传动装置）、调向器（尾翼）、塔架、限速安全机构和储能装置等构件。风力发电有三种运行方式：一是独立运行方式，通常由风力发电机、逆变器和蓄电池三部分组成，一台风力发电机向一户或几个用户提供电力，蓄电池用于蓄能，以保证无风时的用电；二是混合型风力发电运行方式，除了风力发电机外，还带有一套备用的发电系统，通常采用柴油机，在风力发电机不能提供足够的电力时，柴油机投入运行；三是风力发电并入常规电网运行，向大电网提供电力，通常是一处风电场安装几十台甚至几百台风力发电机，这是风力发电的主要方式。

恒速恒频发电机系统是指在风力发电过程中保持发电机的转速不变，从而得到和电网频率一致的恒频电能。恒速恒频系统一般来说比较简单，所采用的发电机主要是同步发电机和鼠笼式感应发电机，前者运行于由电机极数和频率所决定的同步转速，后者则以稍高于同步转速的速度运行。变速恒频发电机系统是指在风力发电过程中发电机的转速可以随风速变化，而通过其他的控制方式来得到和电网频率一致的恒频电能。

1.1.2 风力发电技术的发展方向

随着科技的不断进步和世界各国能源政策的倾斜，风力发电发展迅速，展现出广阔的前景，未来数年世界风电技术发展的趋势主要表现在如下几个方面。

1. 风力发电机组向大型化发展

21 世纪以前, 国际风力发电市场上主流机型从 50 kW 增加到 1 500 kW。进入 21 世纪后, 随着技术的日趋成熟, 风力发电机组不断向大型化发展, 目前风力发电机组的规模一直在不断增大, 国际上单机容量为 1 ~ 3 MW 的风力发电机组已成为国际主流风电机组, 5 MW 风电机组已投入试运行。2004 年以来, 1 MW 以上的兆瓦级风机占到新增装机容量的 74.90%。大型风力发电机组有陆地和海上两种发展模式, 陆地风力发电, 其方向是低风速发电技术, 主要机型是 1 ~ 3 MW 的大型风力发电机组, 这种模式的关键是向电网输电。近海风力发电, 主要用于比较浅的近海海域, 安装 3 MW 以上的大型风力发电机, 布置大规模的风力发电场。随着陆地风电场利用空间越来越小, 海上风电场在未来风能开发中将占据越来越重要的份额。

风力发电系统中, 发电机是能量转换的核心部分。在风力发电中, 当发电机与电网并联运行时, 要求风电频率和电网频率保持一致, 即风电频率保持恒定, 因此风力发电系统按发电机的运行方式分为恒速恒频发电机系统 (CSCF 系统) 和变速恒频发电机系统 (VSCF 系统)。

2. 风电机桨叶长度可变

随着风轮直径的增加, 风力机可以捕捉更多的风能。直径 40 m 的风轮适用于 500 kW 的风力机, 而直径 80 m 的风轮则可用于 2.5 MW 的风力机。长度超过 80 m 的叶片已经成功运行, 叶片长度每增加 1 m, 风力机可捕捉的风能就会显著增加。和叶片长度一样, 叶片的设计对提高风能利用也有着重要的作用。目前, 丹麦、美国、德国等风电技术发达的国家和一些知名风电制造企业正在利用先进的设备和技术条件致力于研究长度可变的叶片技术。这项技术可以根据风况调整叶片的长度。当风速较低时, 叶片会完全伸展, 以最大限度地产生电力; 随着风速增大, 输出电力会逐步增至风力机的额定功率, 一旦风速超过这一峰点, 叶片就会回缩以限制输电量; 如果风速继续增大, 叶片长度会继续缩小直至最短。风速自高向低变化时, 叶片长度也会作相应调整。

3. 风机控制技术不断提高

随着电力电子技术的发展, 近年来发展的一种变速风电机, 取消了沉重的增速齿轮箱, 发电机轴直接连接到风力机轴上, 转子的转速随风速而改变, 其交流电的频率也随之变化, 经过置于地面的大功率电力电子变换器, 将频率不定的交流电整流成直流电, 再逆变成与电网同频率的交流电输出。由于它被设计成在几乎所有的风况下都能获得较大的空气动力效率, 从而大大地提高了捕获风能的效率。试验表明, 在平均风速为 6.7 m/s 时, 变速风电机要比恒速风电机多捕获 15% 的风能。同时, 由于机舱质量减轻和改善了传动系统各部件的受力状况, 可使风电机的支撑结构减轻, 从而使设施费用得到降低, 运行维护费用也较低。这种技术经济上可行, 有较广泛的应用前景。

4. 风力发电从陆地向海面拓展

海上有丰富的风能资源和广阔平坦的区域。风速大且稳定, 日平均利用小时数可达 20 小时以上。同容量装机, 海上比陆上成本增加 60%, 电量增加 50% 以上。随着风力发电的发展, 陆地上的风机总数已经趋于饱和, 海上风力发电场将成为未来发展的重点。虽然近海风电场的前期资金投入和运行维护费用都要高得多, 但大型风电场的规模经济使大型风力机变得切实可行。为了在海上风场安装更大的机组, 许多大型风力机制造商正在开发 3 ~ 5 MW 的机组, 多兆瓦级风力发电机组在近海风力发电场的商业化运行是国内外风能利用的新趋势。从 2006 年开始, 欧洲的海上风力发电开始大规模起飞, 到 2010 年, 欧洲海上风力发电

的装机容量将达到 10 000 MW。目前,德国正在建设的北海近海风电场,总功率在 100 万千瓦,单机功率为 5 MW,是目前世界上最大的风力发电机,该风电场生产出来的电量之大,可与常规电厂相媲美。

5. 采用新型塔架结构

目前,美国的几家公司正在以不同的方法设计新型塔架,采用新型塔架结构有助于提高风力机的经济可行性。valmount 工业公司提出了一个完全不同的塔架概念,发明了由两条斜支架支撑的非锥形主轴。这种设计比钢制结构坚固 12 倍,能够从整体上降低结构中无支撑部分的成本,是传统筒式风力机结构成本的一半。用一个活动提升平台,可以将叶轮等部件提升到塔架顶部。这种塔架具有占地面积少和容易安装的特点,由于其成本低且无须大型起重机,拓宽了风能利用的可用场址。

1.2 我国风力发电技术的研发及开发应用

1.2.1 我国风力发电技术的研发与进展

我国风电技术的发展是从 20 世纪 80 年代由小型风力发电机组开始,并由小及大的,期间以 100 W 至 10 kW 的产品为主。“九五”期间,我国重点对 600 kW 三叶片、失速型、双速型发电机的风电机组进行了研制,掌握了整体总装技术和关键部件,如叶片、电控、发电机、齿轮辐等的设计技术,并初步掌握了总体设计技术。对变桨距 600 kW 风电机组也研制了样机。“十五”期间,科技部对 750 kW 的失速性风电机组的技术和产品进行攻关,并取得了成功。目前,600 kW 和 750 kW 定桨距失速型机组已经成为经市场验证的、批量生产的主要国产机组。在此基础上,“十五”期间国家 863 计划支持了国内数家企业研制兆瓦级风力发电机组和关键部件,以追赶世界主流机型先进技术。另外,还采取和国外公司合作设计、在国内采购生产主要部件组装风电机组的方式,进行 1.2 MW 直驱式变速恒频风电机组研制项目,第一台样机已经于 2005 年 5 月投入试运行,国产化率达到 25%,第二台样机于 2006 年 2 月投入试运行,国产化率达到 90%。该项目完成后,将形成具有国内自主知识产权的 1.2 MW 直接驱动永磁风力发电机组机型,同时初步形成大型风电机组的自主设计能力以及叶片、电控系统、发电机等关键部件的设计和批量生产能力。

我国对兆瓦级变速恒频风电机组项目的研制,完全立足于自主设计,技术方案采取双馈发电机、变桨距、变速技术,完成了总体和主要部件设计、缩比模型加工制造及模拟试验研究、风电机组总装方案的制订,其中兆瓦级变速恒频风电机组多功能缩比模型填补了我国大型风电机组实验室地面试验和仿真测试设备的空白。首台样机已经于 2005 年 9 月投入试运行。该项目完成后,我国将形成 1 MW 双馈式变速恒频风电机组机型和一套风电机组的设计开发方法,从而为全面掌握风电机组的设计技术提供基础。

在市场的激励下,2004 年以来进入风电制造业的众多企业还自行通过引进技术或通过自主研发迅速启动了兆瓦级风电机组的制造。其中一些企业与国外知名风电制造企业成立合资企业或向其购买生产许可证,直接引进国际风电市场主流成熟机型的总装技术,在早期直接进口主要部件,然后努力消化吸收,逐步实现部件国产化。

总体上看,当前国内众多整机制造企业引进和研制的各种型号兆瓦级机组(容量为 1~2 MW,技术形式包括失速型、直驱永磁式和双馈式),已经于 2007 年投入批量生产。

但是,兆瓦级机组控制系统仍依赖进口。

国内大型风电用发电机的研制生产起始于20世纪90年代初,在国内坚实的电机工业基础上以及国内风电市场的拉动下,目前数家企业已形成750 kW级发电机的批量生产供应能力,并在近两年内研制出了兆瓦级双馈型发电机并投入试运行。大型风电机组叶片一度是我国风电国产化的主要瓶颈。目前,一些企业已掌握了600 kW和750 kW叶片的设计制造技术并实现产业化,形成了研制兆瓦级容量叶片的创新能力,并于2005年研制出了1.3 MW叶片。国内主要的叶片生产企业,其产能已达到约1 000 MW/年。风电机组电控系统是国内风电机组制造业中最薄弱的环节,过去数年我国研发生产电控设备的单位经刻苦攻关,如今600 kW、750 kW风电机组的电控系统技术已经成熟,可批量生产。

地球上的风能资源非常丰富,开发潜力巨大,全球已有不少于70个国家在利用风能,风力发电是风能的主要利用形式。近年来,全球范围内风电装机容量持续较快增长。

到2009年年底,全球风电累计装机总量已超过15 000万千瓦,中国风电累计装机总量突破2 500万千瓦,约占全球风电的1/6。中国风电装机容量增长迅猛,年度新增装机容量增长率连续6年超过100%,成为风电产业增长速度最快的国家。

近年来,风电大开发有力带动了相关设备市场的蓬勃发展。在国家政策支持和能源供应紧张的背景下,中国风电设备制造业迅速崛起,已经成为全球风电投资最为活跃的场所。国际风电设备巨头竞相进军中国市场,Gamesa、Vestas等国外风电设备企业纷纷在中国设厂或与我国本土企业合作。

经过多年的技术积累,中国风电设备制造业逐步发展壮大,产业链日趋完善。风电机组自主化研发取得丰硕成果,关键零部件市场迅速扩张。内资和合资企业在2004年前后还只占据不到三分之一的中国风机市场,到2009年,这一市场份额已超过了6成。

中国对风电的政策支持由来已久,政策支持的对象由过去的注重发电转向了注重扶持国内风电设备制造。随着国产风电设备自主制造能力的不断加强,2010年国家取消了国产化率政策,提升了准入门槛,加快了风电设备制造业结构优化和产业升级,进一步规范了风电设备产业的有序发展。

中国正逢风电发展的大好时机,遍地开花的风电场建设意味着庞大的设备需求。除了风电整机的需求不断增长之外,叶片、齿轮箱、大型轴承、电控等风电设备零部件的供给能力仍不能完全满足需求,市场增长潜力巨大。因此,中国风电设备制造业发展前景乐观。

1.2.2 江苏省风力发电技术的研发与进展

江苏省是我国较早利用风能的地区之一,风能资源较丰富,江苏的风能资源蕴藏量约有238万千瓦。江苏沿海滩涂狭长,风能资源优良,是建设大型海上风电场的理想场区,近海风力发电潜力巨大。

进入21世纪以来,江苏省逐步加大了风能资源的开发力度,对全省风能资源的储量、分布、开发前景进行了深入调研,科学规划了一批风力发电项目。2006年,江苏如东15万千瓦风电场首批风电机组正式并网发电,这是江苏省内风电机组首次并网发电。此后,江苏省如东、响水、滨海、射阳等地陆续启动或获准建设风电项目,海风电场走廊成为江苏沿海近千公里海岸线上的一个新兴产业。

积极开发节能环保的新能源已成为大势所趋。2010年,中国启动海上风电的首轮特许

招标，初步选定在江苏的沿海地区建设两个近海风电和两个滩涂风电项目。其中，近海风电规模定为 30 万千瓦，滩涂风电规模定为 20 万千瓦。江苏风电产业迎来历史性发展机遇。

1.3 前景展望

江苏省内的主要电厂均为燃煤电厂，电源结构形式单一，发电用煤需求量大。但江苏省产煤能力有限，电厂燃煤 80% 需要从外省购进，成本高，电煤供给紧缺，污染严重；水力发电资源极少，核电成本高，且本省没有多少可供建设核电的地形地貌。因此，加快开发风力资源，对江苏能源结构调整有一定促进作用。江苏省有效利用风能资源，大规模发展风电产业，有利于和矿产资源、港口运输、制造业发展相结合，构建包括风机制造、风力发电、与风电有关的盐化工产业与冶金工业、金属和非金属原料的精深加工产业在内的大规模风电产业体系，在长三角地区形成独特的绿色能源利用高地。

第 2 章

风能及其分布

2.1 风 能

1. 大气环流

风的形成是空气流动的结果。而空气流动的原因则是多方面的。

地球绕太阳运转，由于日地距离和方位不同，地球上各纬度接受的太阳辐射强度也就各异，赤道和低纬度地区比极地和高纬度地区太阳辐射强度高，地面和大气接受的热量多，因而温度高，这种温差形成了南北间的气压梯度，在等压面空气向北流动。

地球自转形成了地转偏向力，称科里奥利力，简称偏向力或科氏力。在此力的作用下，在北半球，气流向右偏转，在南半球，气流向左偏转。所以，地球大气的运动，除受气压梯度力的作用外，还受地转偏向力的影响。地转偏向力在赤道为零，并随着纬度的增高而增大，在极地达到最大。

由于地球表面受热不均，引起大气层中空气压力不均衡，因此，形成地面与高空的大气环流。各环流圈伸屈的高度，以赤道最高，中纬度次之，极地最低，这主要是由于地球表面增热程度随纬度增高而降低的缘故。这种环流在地球自转偏向力的作用下，形成了赤道到纬度 30°N 环流圈（哈德来环流）、纬度 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 环流圈和纬度 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 环流圈，这便是著名的三圈环流，如图 2-1 所示。当然，所谓三圈环流乃是一种理论的环流模型，由于地球上海陆的分布不均匀，因此，实际的环流比上述情况要复杂得多。



图 2-1 三圈环流示意图

2. 季风环流

在一个大范围地区内，它的盛行风向或气压系统有明显的季节变化，这种在一年内随着

季节不同有规律转变风向的风，称为季风。季风盛行地区的时候又称季风气候。

亚洲东部的季风主要包括中国的东部、朝鲜、日本等地区的季风。亚洲南部的季风，以印度半岛最为显著，这就是世界闻名的印度季风。

中国位于亚洲的东南部，所以东亚季风和南亚季风对中国天气气候变化都有很大影响。

形成中国季风环流的因素很多，主要是由于海陆差异、行星风带的季节转换及地形特征等综合因素形成的。图 2-2 所示是季风的地理分布。

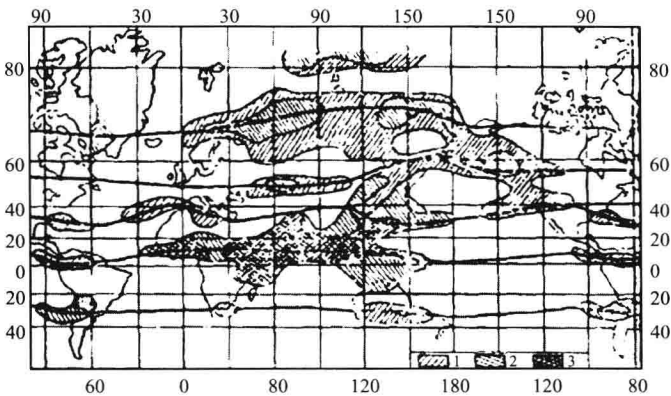


图 2-2 季风的地理分布

1) 海陆分布对中国季风的作用

海洋的热容量比陆地大得多。冬季，陆地比海洋冷，大陆气压高于海洋，气压梯度力自大陆指向海洋，风从大陆吹向海洋；夏季则相反，陆地很快变暖，海洋相对比较冷，陆地气压低于海洋，气压梯度力由海洋指向大陆，风从海洋吹向大陆，如图 2-3 所示。

中国东临太平洋，南临印度洋，冬夏季海、陆温差大，所以季风明显。

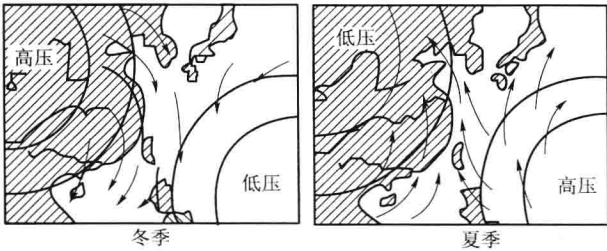


图 2-3 海陆热力差异引起的季风示意图

2) 行星风带位置季节转换对中国季风的作用

地球上存在着 5 个风带，从图 2-1 可以看出，北半球有信风带、盛行西风带、极地东风带，南半球的风带与北半球是对称分布的。这 5 个风带，在北半球的夏季都向北移动，而冬季则向南移动。这样，冬季西风带的南缘地带在夏季可以变成东风带。因此，冬夏盛行风就会发生 180° 的变化。

冬季，中国主要在西风带的影响下，强大的西伯利亚高压笼罩着全国，盛行偏北气流。夏季，西风带北移，中国在大陆热低压控制之下，副热带高压也北移，盛行偏南风。

3) 青藏高原对中国季风的作用

青藏高原占中国陆地面积的四分之一, 平均海拔在 4 000 m 以上, 对应于周围地区具有热力作用。在冬季, 高原上温度较低, 而周围大气温度较高, 这样形成了下沉气流, 从而加强了地面高压系统, 使冬季风增强; 在夏季, 高原相对于周围自由大气是一个热源, 加强了高原周围地区的低压系统, 使夏季季风得到加强。另外, 在夏季, 西南季风由孟加拉湾向北推行, 沿着青藏高原东部南北走向的横断山脉流向中国的西南地区。

3. 局地环流

1) 海陆风

海陆风的形成与季风相同, 也是由大陆和海洋之间的温度差异的转变引起的, 但海陆风的范围小, 以日为周期, 势力也相对薄弱。

由于海陆物理属性的差异, 造成海陆受热不均, 白天, 陆上增温较海洋快, 空气上升, 而海洋上空气温相对较低, 使地面有风自海洋吹向大陆, 补充大陆地区上升气流, 而陆上的上升气流流向海洋上空而下沉, 补充海上吹向大陆的气流, 形成一个完整的热力环流; 夜间, 环流的方向正好相反, 所以风从陆地吹向海洋。将这种白天从海洋吹向大陆的风称海风, 夜间从陆地吹向海洋的风称陆风, 将一天中海陆之间的周期循环环流总称为海陆风, 其形成示意图如图 2-4 所示。

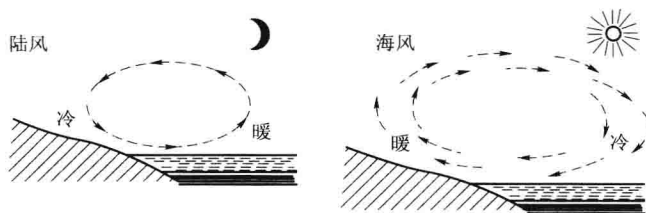


图 2-4 海陆风形成示意图

海陆风的强度在海岸最大, 随着离岸距离的增加而减弱, 一般影响距离为 20 ~ 50 km。海风的风速比陆风大, 在典型的情况下, 风速可达 4 ~ 7 m/s, 而陆风一般仅为 2 m/s 左右。海陆风最强烈的地区, 发生在温度日变化最大及昼夜海陆温差最大的地区。低纬度日照强, 所以海陆风较为明显, 尤以夏季为甚。

此外, 在大湖附近同样日间有风自湖面吹向陆地, 称为湖风, 夜间风自陆地吹向湖面, 称为陆风, 合称湖陆风。

2) 山谷风

山谷风的形成原理与海陆风类似。白天, 山坡接受太阳光热较多, 空气增温较多; 而山谷上空, 同高度上的空气因离地较远, 增温较少。于是山坡上的暖空气不断上升, 并从山坡上空流向山谷上空, 谷底的空气则沿山坡向山顶补充, 这样便在山坡与山谷之间形成一个热力环流。下层风由谷底吹向上坡, 称为谷风。到了夜间, 山坡上的空气受山坡辐射冷却影响, 空气降温较多; 而山谷上空, 同高度的空气因离地面较远, 降温较少。于是山坡上的冷空气因密度大, 顺山坡流入山谷, 谷底的空气因汇合而上升, 并在上空向山顶上空流去, 形成与白天相反的热力环流。下层风由山坡吹向山谷, 称为山风。山风和谷风又总称为山谷风, 其形成示意图如图 2-5 所示。

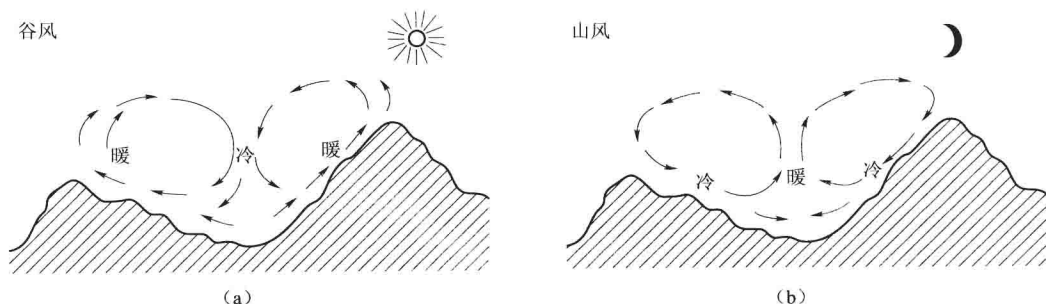


图 2-5 山谷风形成示意图

山谷风风速一般较弱,谷风比山风大一些,谷风速度一般为 $2 \sim 4 \text{ m/s}$,有时可达 $6 \sim 7 \text{ m/s}$ 。谷风通过山隘时,风速加大。山风速度一般仅为 $1 \sim 2 \text{ m/s}$,但在峡谷中,风力还能增大一些。

4. 中国风能资源的形成

风能资源的形成受多种自然因素的复杂影响,特别是天气气候背景及地形和海陆的影响至关重要,风能在空间分布上是分散的,在时间分布上它也是不稳定和不连续的,也就是说风速对天气气候非常敏感,时有时无,时大时小,尽管如此,风能资源在时间和空间的分布上仍存在着很强的地域性和时间性。对中国来说,风能资源丰富及较丰富的地区,主要分布在北部和沿海及其岛屿两个大带里,其他只是在一些特殊地形或湖岸地区呈孤岛式分布。

1) 三北(西北、华北、东北)地区风能资源丰富区

冬季(12月—次年2月份),整个亚洲大陆完全受蒙古高压控制,其中心位置在蒙古人民共和国的西北部,在高压中不断有小股冷空气南下,进入中国。同时还有移动性的高压(反气旋)不时南下,南下时气温较低,若一次冷空气过程中其最低气温在 5°C 以下,且这次过程中日平均气温 48 h 内最大降温达 10°C 以上,则称为一次寒潮,不符合这一标准的称为一次冷空气。

影响中国的冷空气有5个源地,这5个源地侵入的路线称为路径。第一条路径来自新地岛以东附近的北冰洋面,从NW方向进入蒙古人民共和国西部,再东移南下影响中国,称西北1路径,如图2-6中的NW1;第二条源于新地岛以西的北冰洋面,经俄罗斯、蒙古人民共和国进入中国,称西北2路径,如图2-6中的NW2;第三条源于地中海附近,称西路径,东移到蒙古人民共和国西部再影响中国,如图2-6中的W;第四条源于泰梅尔半岛附近北冰洋洋面,向南移入蒙古人民共和国,然后再向东南影响中国,称为北路径,如图2-6中的N;第五条源于贝加尔湖以东的东西伯利亚地区,进入中国东北及华北地区,称为东北路径,如图2-6中的NE。

从图2-6中还可以看到,冷空气从这5条路径进入中国后,分两条不同的路径南下。一条是经河套、华北、华中,由长江中下游入海,有时可侵入华南地区,沿此路径入侵的寒潮可以影响中国大部分地区,出现次数占总次数的60%左右,冷空气经过之地有连续的大风、降温,并常伴有风沙。另一条经过华北北部、东北平原,冷空气路径东移进入日本海,也有一部分经华北、黄河下游,向西南移入西湖盆地。这一条出现次数约占总次数的40%。它常使渤海、黄海、东海出现东北大风,也给长江以北地区带来大范围的大风、降雪和低温

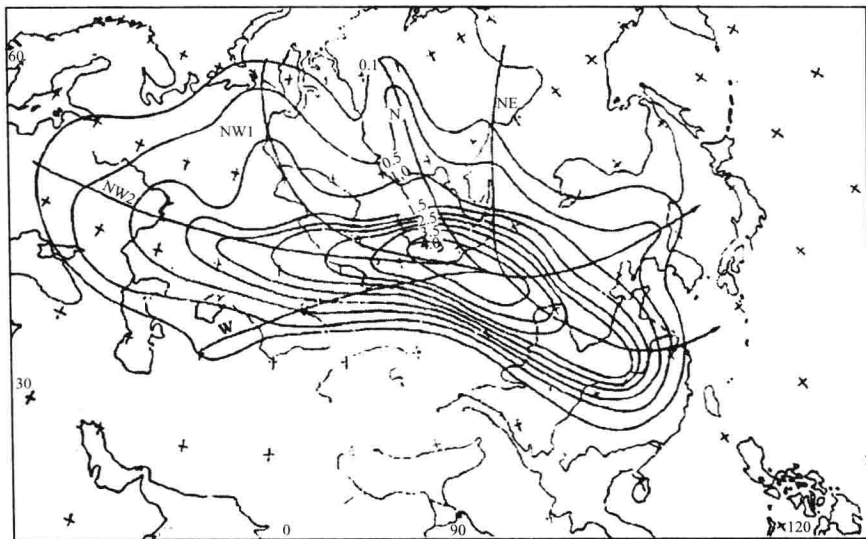


图 2-6 中国寒潮路径图

天气。

这五条路径除东北路径外，一般都要经过蒙古人民共和国，当经过蒙古高压时得到新的冷高压的补充和加强，这种高压往往可以迅速南下，进入中国。每当冷空气入侵一次，大气环流必定发生一次大的调整，天气也将发生剧烈的变化。

亚欧大陆面积广大，北部气温低，是北半球冷高压活动最频繁的地区，而中国地处亚欧大陆南岸，正是冷空气南下的必经之路。三北地区是冷空气入侵中国的前沿地区，一般冷高压前锋称为冷锋，冷锋过境时，在冷锋后面 200 km 附近经常可出现大风，可造成一次 6 ~ 10 级 (10.8 ~ 24.4 m/s) 大风。而对风能资源利用来说，这是一次可以有效利用的高质量风速。强冷空气除在冬季入侵外，在春秋也常有入侵。

从中国三北地区向南，由于冷空气从源地长途跋涉，到达中国黄河中下游再到长江中下游，地面气温有所升高，原来寒冷干燥的气流性质逐渐改变为较冷湿润的气流性质（称为变性），也就是冷空气逐渐变暖，这时气压差也变小了，所以，风速由北向南逐渐减小。

中国东部处于蒙古高压的东侧和东南侧，所以盛行风向都是偏北风，只是其相对蒙古高压中心的位置不同而实际偏北的角度有所区别。三北地区多为西北风，秦岭黄河下游以南的广大地区，盛行风向偏于北和东北之间。

春季（3—5 月份）是冬季到夏季的过渡季节，由于地面温度不断升高，从 4 月份开始，中、高纬度地区的蒙古高压强度已明显减弱，而这时印度低压（大陆低压）及其向东北伸展的低压槽，已控制了中国的华南地区，与此同时，太平洋副热带高压也由菲律宾向北逐渐侵入中国华南沿海一带，这几个高、低气压系统的强弱、消长都对中国风能资源有着重要的影响。

在春季，这几种气流在中国频繁交替。春季是中国气旋活动最多的季节，特别是中国东北及内蒙古一带气旋活动频繁，造成内蒙古和东北的大风和沙暴天气。同样，江南气旋活动也较多，但造成的却是春雨和华南雨季。这也是三北地区风能资源较南方丰富的一个主要原因。