

FENG NENG YU
FENGLI FADIAN JISHU

风能与

风力发电技术

第二版

张志英 赵萍 李银凤 刘万琨 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

第二版

张志英 赵萍 李银凤 刘万琨 编著



化学工业出版社

·北京·

本书介绍了有关风力发电的基本知识和技术,通俗地分析了风的形成、风的分类和风能定量评估。详细阐述了风轮机的基本工作原理、工程设计方法和风轮机优化设计;对风轮机的结构、空气动力学特性、安全运行、风力机发电系统及风轮机材料等进行了说明和分析。对风轮机的一些特殊问题,例如变速/恒频技术、迎风调节、风轮叶片材料和制造、风电场优化分析、风资源对性能的影响等搜集了大量的数据资料供参考查询。

本书第二版除全部订正了和时间相关的数据外,还增加了风力机设计要求、大型风力机设计和特殊用途风力机(海上风力机、低温风力机、高原风力机和直接驱动式风力机)等内容,使本书更具工程参考价值,对风电从业人员更加适用。

本书适合于从事风电领域内工作的工程师和技术人员阅读参考,也适合作为高等院校热动力专业的教学参考书,对想了解风能发电的读者也是一本极好的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

风能与风力发电技术/张志英等编著. —2版. —北京:化学工业出版社, 2010.4
ISBN 978-7-122-07796-7

I. 风… II. 张… III. 风力发电 IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 031555 号

责任编辑:郑宇印

装帧设计:张辉

责任校对:周梦华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张20¼ 字数404千字 2010年5月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

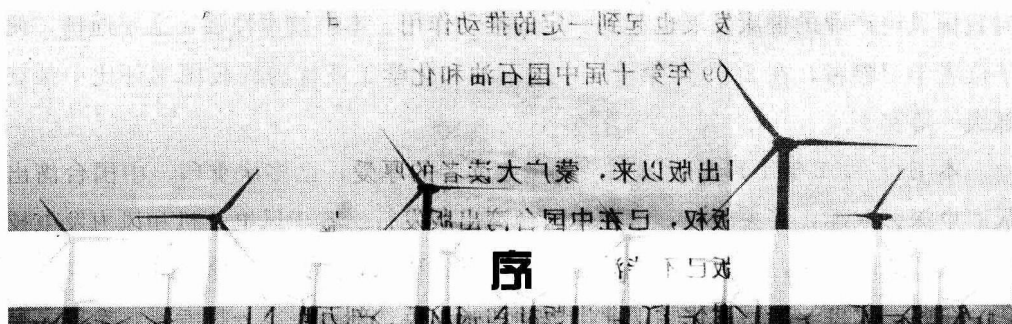
售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究



国家对新能源开发高度重视，在“新能源中长期规划”之后，又重新制定了“新能源振兴发展规划”。振兴规划规定，到 2020 年，新能源总投资将达 4.5 万亿元人民币，对风电发展也做了大幅度调整。到 2020 年，风电总装机规模从中长期规划的 2000 万千瓦提高至 1.5 亿千瓦，比中长期规划目标提高了 7.5 倍。

2008 年全球开发的风电总装机为 1.21 亿千瓦，美国总装机容量达到 2517 万千瓦，位居世界第一。德国总装机容量为 2390 万千瓦，位居世界第二。西班牙总装机容量为 1674 万千瓦，位居世界第三。中国总装机容量为 1221 万千瓦，位居世界第四。第五～十位顺次是印度、意大利、法国、英国、丹麦、葡萄牙。加拿大位居第十一位，日本位居第十三位。至 2010 年，中国风电总装机将达 3000 万千瓦，总装机容量将跃居世界第二位。

到 2010 年，在江苏、河北、内蒙古、甘肃和吉林将建立多个百万千瓦级的风电基地。到 2020 年，将在甘肃、内蒙古、河北、东北以及江苏沿海等地建立千万千瓦级的风电基地。

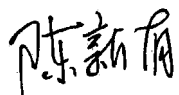
自 2006 年 1 月 1 日《中华人民共和国可再生能源法》实施以来，可再生能源的开发利用得到了很大的发展。风能是可再生能源的最重要组成部分，国家已把风力发电作为可再生能源的重要发展方向。东方汽轮机厂作为我国发电设备制造业的重点骨干企业，长期以来致力于发电设备的研究和制造，在成功研制大功率、高参数、各种冷却方式的火力发电机组，F 级燃气-蒸汽联合循环机组，百万千瓦等级全转速、半转速核电机组的基础上，又进入了大型风力发电设备的引进消化、研究和批量生产阶段。

为加快东汽大型风电机组的研制，以张志英、刘万琨同志为代表的一批专家，在收集大量资料的基础上，结合工厂 1500kW 风电机组技术的消化吸收，编辑出版了《风能与风力发电技术》。本书的出版，不仅加快了工厂的自主研发和技术进步，

对我国风电产业的健康发展也起到一定的推动作用。本书技术性强，文字通畅，便于读者学习参考，在 2009 年第十届中国石油和化学工业优秀科技图书评比中荣获部级一等奖。

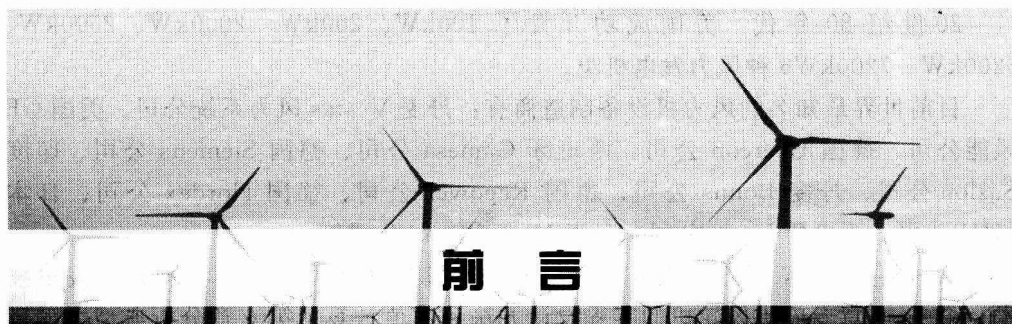
本书自 2007 年 1 月出版以来，蒙广大读者的厚爱，已多次重印。中国台湾出版商也深感兴趣，买去版权，已在中国台湾出版发行。鉴于风电装机和风力发电技术突飞猛进的发展，原版已不能满足广大读者的要求，为此决定修订的再版发行。

在此，我再一次感谢化学工业出版社和张志英、刘万琨等一批专家，希望大家共同推进我国风电产业快速发展。



四川省德阳市市长

2010 年 1 月



太阳的辐射总能量约 $3.75 \times 10^{26} \text{ W}$ (3750 万万万亿千瓦)，它不断向宇宙空间传播，其中 20 亿分之一的能量到达地球的大气层。经大气层反射、吸收，最后有 8×10^{13} 千瓦 (80 万亿千瓦) 太阳能到达地球表面。到达地球表面的太阳辐射能量约有 2% 转化为风能。估计全球风能总量约 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ (2.74 万亿千瓦)，其中可利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ (200 亿千瓦)，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。按目前太阳质量消耗率计，太阳能可供地球用 6×10^{10} (600 亿) 年。可见，太阳能和风能可以说是取之不尽、用之不竭的能量。

我国风能资源丰富，总储量为 32 亿千瓦。陆地上可开发利用的风能资源为 2.53 亿千瓦，加上近海的风能资源，全国可开发利用的总风能资源约 10 亿千瓦以上，居世界首位。

风力机是将风能转换为机械能的一种动力机械，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。

人类利用风能的历史可以追溯到公元前。公元前 2 世纪，古波斯人就利用垂直轴风车碾米。公元前数世纪，中国人就开始利用风力来提水灌溉、磨面、舂米，用风帆推动船舶等。欧洲第一台风力机出现在公元 1100 年左右，用于磨面和抽水。18 世纪末期，随着工业技术的发展，风车的结构和性能都有了很大提高，已能采用手控和机械式自控机构改变叶片桨距来调节风轮转速。

风力机用于发电的设想最早始于 19 世纪末。1887 年，美国人 Brush 建造了第一台发电用风力机，可为 350 盏白炽灯和 3 个发动机提供电力。到 1918 年，丹麦已拥有风力发电机 120 台，额定功率为 5~25kW 不等。

第一次世界大战后，飞机螺旋桨技术和近代气体动力学理论为风轮叶片的设计创造了条件，出现了现代高速风力机。第二次世界大战前后，欧洲国家和美国相继建造了一批大型的风力发电机。1941 年，美国建造了一台双叶片、风轮直径达 53.3m 的风力发电机，风速为 13.4m/s 时，输出功率达 1250kW。

1957 年，Juul 建造的风力机已初具现代风力机雏形，风力机由 1 个发电机和 3 个旋转叶片组成。

20 世纪 80 年代, 美国成功开发了 100kW、200kW、2000kW、2500kW、6200kW、7200kW 6 种风力发电机组。

目前世界最知名的风力机设备制造商有: 丹麦 Vestas 风力系统公司、美国 GE 风能公司、德国 Enercon 公司、西班牙 Gamesa 公司、德国 Siemens 公司、印度 Suzlon 公司、丹麦 Bonus 公司、德国 Repower 公司、德国 Nordex 公司、日本 MHI 公司、西班牙 Made 公司、丹麦 NEG Micon 公司等。

本书共分 8 章, 第 1 章是有关风与风能的基本知识; 第 2~3 章是风力发电技术; 第 4~5 章专门讲风轮机的工程设计方法和数值计算; 第 6 章分析典型大型风力机的设计技术, 可供风力机设计参考; 第 7 章介绍了风力机的发电系统, 重点是系统, 介绍它们与化石燃料汽轮机发电系统的不同; 第 8 章简要介绍了几种特殊用途的风力机, 例如海上风力机、低温地区风力机、高原地区风力机和免齿轮箱直接驱动式风力机等。它们与一般风力机大同小异, 只是根据使用地点环境不同, 加入一些特殊措施。本章就是在分析这些不同点的基础上着重介绍这些措施。

风轮机的优化设计和设计风速的确定问题放在第 4 章。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。

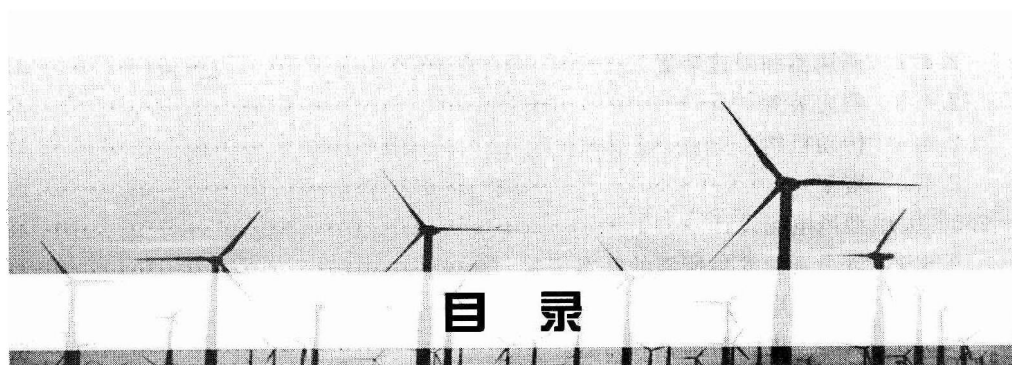
本书自 2007 年 1 月出版以来, 承蒙广大读者的厚爱, 很快销售一空, 五次印刷还不能满足读者的要求。我国台湾出版商和读者也深感兴趣, 买去了版权, 已在中国台湾地区出版发行。本书修订版章节和内容都做了大的改动, 将以最新的面目与读者见面, 帮助读者对风力发电和风力机设计的最新技术有较全面地认识。

东方汽轮机厂是目前国内最大的风力机制造商之一, 已完成 1500kW 风力机引进批量生产和投运, 以及 1000kW、2000kW、2500kW、5000kW 等风力机设计, 1000kW 已经树起样机, 2500kW 风力机正在试制。2008 年产出 813 台 1500kW 风力机, 2009 年产出 1500kW 风力机 1400 台。2008 年东汽的风力机产量位居全国前三。

本书的再版又查阅了大量参考文献, 订正更新了与时间相关的数据资料, 并增加了许多最新资料。在此再次对文献作者致谢!

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。

编著者
2010 年 1 月 15 日



第 1 章 风与风能	1
1.1 风	1
1.1.1 风的形成	1
1.1.2 风向与风速	3
1.2 风能	5
1.2.1 21 世纪的最主要能源	5
1.2.2 风能密度	8
1.2.3 风能密度计算方法	8
1.2.4 地球上风能资源分布	9
1.2.5 我国风能资源分区	11
1.2.6 风能的三级区划指标体系	12
1.2.7 风资源描述的基本理论	14
1.3 风电场选址	25
1.3.1 风电场选址的技术原则	26
1.3.2 风电场现场位置选择对策	27
1.4 风电场风能资源评估	28
1.4.1 风电场风能资源测量方法	28
1.4.2 风电场风能资源评估方法	31
第 2 章 风能发电	36
2.1 风力机的型式	36
2.1.1 水平轴式风力发电装置	37
2.1.2 垂直轴式风力机	38
2.2 风能发电	39
2.3 并网风力发电的价值分析	41
2.3.1 并网风力发电的价值分析	41
2.3.2 风电项目可行性研究	43
2.4 风力发电装置	44
2.4.1 风轮	44

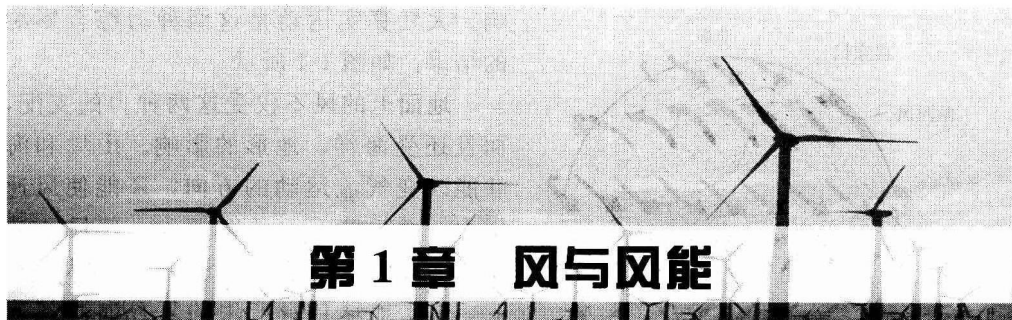
2.4.2	调速器和限速装置	45
2.4.3	调向装置	47
2.4.4	传动机构	48
2.4.5	塔架	48
2.5	大中型风电场设计	48
2.5.1	风力资源评估所需的基本资料	48
2.5.2	风力发电场址的选择	49
2.5.3	风力发电机组选型和布置	50
2.5.4	风力发电机布置和风能计算	52
2.5.5	风力发电机基础	53
2.5.6	风力发电场的经济效益和社会效益评价	54
2.6	风力发电设备的优化分析	55
2.6.1	优化选型因素分析	55
2.6.2	财务预测结果	57
2.7	风力机安全运行	58
2.7.1	风力机运行流程	58
2.7.2	正常运行过程	59
2.7.3	运行安全性	61
2.7.4	安全性方针	62
2.7.5	风力机载荷设计	62
2.7.6	风轮机与航空安全问题	63
第3章	风力发电技术	65
3.1	功率调节	65
3.1.1	定桨距失速调节	65
3.1.2	变桨距角调节	67
3.1.3	混合调节	67
3.2	变转速运行	67
3.2.1	影响风力机功率的因素	67
3.2.2	变转速运行的特点	68
3.3	发电机变转速/恒频技术	69
3.3.1	并网运行风力机频率恒定问题	69
3.3.2	变转速/恒频风力机用发电机	70
3.4	风轮机迎风技术	71
3.4.1	风轮机风向跟踪原理	71
3.4.2	风轮机风向跟踪方法	71
3.5	风电品质	72
3.6	风力机结构和空气动力学	72

3.7 风力机控制技术	73
第4章 风轮机设计	75
4.1 风轮机的基本理论	75
4.1.1 风性能描述	75
4.1.2 风能和风的能量密度	76
4.1.3 风能利用系数	77
4.1.4 风轮机的桨叶设计	79
4.1.5 风轮机的空气动力特性	81
4.2 风力机设计要求	82
4.2.1 风力机设计安全等级	82
4.2.2 一般等级风力机的安全系数和强度分析	83
4.2.3 风力机设计要求	85
4.2.4 风力机整机技术要求	106
4.2.5 齿轮箱技术要求	107
4.2.6 塔架技术要求	108
4.2.7 风轮叶片技术要求	109
4.3 风轮机工程设计	113
4.3.1 风轮机工程设计方法	113
4.3.2 风力机的各种设计方案	118
4.4 风轮机优化设计	119
4.4.1 风轮机优化设计原理	119
4.4.2 风轮机优化设计举例	120
4.5 风轮机模化设计	123
4.5.1 风轮机模型及特性	123
4.5.2 风轮机模化设计方法	124
4.6 风轮机工程设计图例	124
4.7 风轮机的设计与制造	128
4.7.1 功率设计	128
4.7.2 风轮设计	132
4.7.3 齿轮箱和刹车机构	140
4.7.4 电器系统和发电系统设计	142
4.7.5 机舱和对风控制	146
4.7.6 塔架设计	149
4.7.7 弹性体系统动态振动设计	151
4.7.8 功率和转速调节	155
4.7.9 风力机成本分析	162
4.8 风轮机材料	162

4.8.1	风轮机用材料	162
4.8.2	各种风轮机材料	165
4.9	风力机设计风速问题	167
4.9.1	设计风速问题	167
4.9.2	风电场优化	170
第5章	风轮机和风电场数值计算	173
5.1	风电场数值模型	173
5.1.1	流体力学的控制方程	173
5.1.2	守恒形式的控制方程组	174
5.1.3	补充方程	175
5.1.4	边界条件	175
5.1.5	控制方程离散-有限差分法	175
5.2	风轮机设计软件	177
5.2.1	软件计算举例	177
5.2.2	计算结果及分析	178
5.3	风电场数值计算软件包	181
5.3.1	典型风电场数值计算软件包	181
5.3.2	Bladed 软件包计算功能	182
5.4	风力机设计软件包的开发	185
5.4.1	风力发电机设计软件包	185
5.4.2	软件包模块和数据库	185
5.4.3	风力机空气动力学研究	185
5.4.4	风力机动态测试方法的研究	186
5.4.5	储能方法的研究	187
5.4.6	小型风电场规划方法的研究	188
5.5	风力机可靠性数值研究	188
5.5.1	风力机在恶劣环境下的可靠性研究	188
5.5.2	风力机抗台风设计	192
第6章	大型风力机设计	196
6.1	250~1200kW 风力机系列	196
6.1.1	S 系列风力机技术参数	196
6.1.2	NA 系列风力机技术参数	197
6.2	1000kW 级风力机设计	198
6.2.1	FD60A 型风力机设计	198
6.2.2	V52-850kW 风力机设计	214
6.2.3	1200kW 级风力机设计	216
6.3	1500kW 级风力机设计	217

6.3.1	FD70A/FD77A 风力机设计	217
6.3.2	S70/S77 风力机设计	224
6.3.3	V82-1650kW 风力机设计	228
6.4	2000kW 级风力机设计	231
6.4.1	R82/2000kW 风力机设计	231
6.4.2	V90-1800/2000kW 级风力机设计	233
6.4.3	V80-2000kW 风力机设计	235
6.5	2500 kW 级风力机设计	237
6.5.1	FD90/2500kW 型风力机设计	237
6.5.2	N80、N90 风力机设计	241
6.6	3000kW 级风力机设计	245
6.6.1	W90/3000kW 风力机设计	245
6.6.2	V90-1-3000kW 风力机设计	245
6.6.3	V112-1-3000kW 风力机设计	247
6.7	5000kW 级风力机设计	249
6.7.1	FC/5000/126-136 风力机设计	249
6.7.2	R-5M 风力机设计	251
6.7.3	R 系列大型风力机	253
第 7 章	风力机发电系统	255
7.1	风力机对发电系统的一般要求	255
7.1.1	风力机发电系统的特殊性	255
7.1.2	一般要求	255
7.2	恒速/恒频发电机系统	256
7.2.1	同步发电机	256
7.2.2	感应发电机	256
7.3	变速/恒频发电机系统	258
7.3.1	不连续变速系统	258
7.3.2	连续变速系统	259
7.4	小型直流发电系统	262
7.4.1	交流永磁发电机	262
7.4.2	无刷爪极自励发电机	263
第 8 章	特殊用途风力机设计	264
8.1	海上用风力机设计	264
8.1.1	近海风电场技术	266
8.1.2	浅海风电场投资概算	272
8.1.3	海上风力发电技术	273
8.1.4	漂浮式海上风电场	275

8.1.5 海上风力机	277
8.2 低温地区风力机设计	283
8.2.1 低温环境对风力发电机组的影响	283
8.2.2 低温对风轮机叶片的影响	284
8.3 高原高寒地区风力机设计	286
8.3.1 高原环境空气密度对风力发电的影响	286
8.3.2 高原环境大气温度对风力发电的影响	287
8.3.3 高原雷暴的影响	287
8.3.4 其他因素的影响	288
8.3.5 高原风力机设计改进措施	288
8.4 免齿轮箱式直接驱动型风力机设计	290
8.4.1 直接驱动式风力机原理	290
8.4.2 变速直驱永磁发电机控制系统	292
8.4.3 离网型低速永磁发电机	297
8.4.4 直接驱动型风力机组	299
附录	302
附录一 风力等级和风压计算	302
附录二 小型风力机技术数据	303
附录三 叶轮式风力机技术术语标准定义 (GB 8974—88)	304
附录四 风力发电装置国家和国际标准	308
附图 1 中国风能分布图	310
附图 2 风速大于 3m/s 的有效风功率密度分布图	310
附图 3 中国全年风速大于 3m/s 的小时数分布图	311
参考文献	312



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

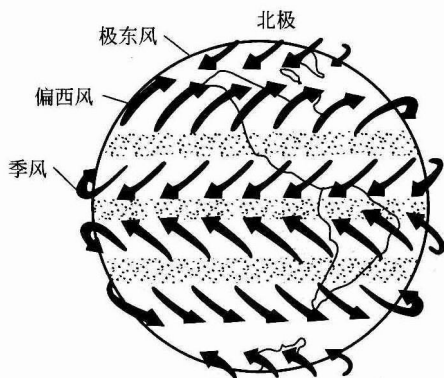


图 1-1 地球表面风的形成和风向

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，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。

(1) 风廓线和风切变律 风速随地面高度变化的曲线称为风廓线，变化规律称为风切变律。风随高度变化的经验公式很多，通常采用“对数公式”（对数风廓线）和“指数公式”（指数风廓线），见式（1-1）和式（1-2）。

$$\text{对数风廓线} \quad V(Z) = V(Z_r) \times \frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_r/Z_0)} \quad (1-1)$$

$$\text{指数风廓线} \quad V(Z) = V(Z_r) \times \left(\frac{Z}{Z_r}\right)^n \quad (1-2)$$

式中， $V(Z)$ 为高度 Z 处风速； Z 为离地面高度； Z_r 为用于拟合风廓线的离地面标准高度； Z_0 为粗糙长度； n 为风切变指数，经验指数，它取决于大气稳定性和地面粗糙度，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。

(2) 平均风速的分布 平均风速的分布是用数学概率分布来描述的。它有两种表达方式：一种是概率密度分布，可用来描述平均风速的概率分布；另一种是累积分布函数，可用来描述平均风速的累积分布。此处仅对累积分布函数进行说明，对分布函数求导，就能得出相应的概率密度函数。对于平均风速的累积分布，一般采用威布尔（Weibull）和瑞利（Rayleigh）分布。通常应用瑞利累积分布函数 $P_R(V_0)$ 和威布尔累积分布函数 $P_W(V_0)$ 。

威布尔累积分布函数：

$$P_W(V_0) = 1 - \exp[-(V_0/C)^k] \quad (1-3)$$

这里 k 和 C 分别为尺度参数和形状参数， $C = V_0/\Gamma(1+1/k)$

当 $k=2$ 时， $C=2/\sqrt{\pi}$ 时，即为瑞利累积分布函数：

$$P_R(V_0) = 1 - \exp[-\pi(V_0/2)^2] \quad (1-4)$$

式中， $P(V_0)$ 为累积概率函数，也即 $V < V_0$ 的概率； V_0 为风速（平均风速）； Γ 为伽马函数。

(3) 风力机设计要求的风况 风力机应设计成能安全承受相应等级定义的风

况。风况的设计值需在设计文件中明确规定。

根据载荷和安全条件,风况可分为正常工作期间频繁出现的标准风况和一年或50年一遇的极端风况两种。在所有情况下,都要考虑平均气流与水平面夹角达 8° 时的影响。

①正常风况

a. 风速概率分布特性。风场的风速分布对风力机的设计至关重要,它决定各级载荷出现的频率。对标准等级的风力机,计算设计载荷时,10min平均风速按福利分布计算。此时轮毂中心高处风速分布的累计概率分布为:

$$P_R(V_{hub}) = 1 - \exp[-\pi(V_{hub}/2V_{ave})^2] \quad (1-5)$$

b. 正常风廓线模型。风廓线 $V(Z)$ 表示平均风速随地高度 Z 变化的函数关系。对标准级风力机,正常风廓线函数按下式计算:

$$V(Z) = V_{hub}(Z/Z_{hub})^a \quad (1-6)$$

式中,指数 a 假定为0.2。

c. 正常湍流模型。“风湍流”表示10min内平均风速的随机变化。标准级风力机风湍流值由随机风矢量场能谱强度 $S_1(f)$ 表示。湍流纵向分量能谱强度 $S_1(f)$ 由下式表示出:

$$S_1(f) = 0.05(\sigma_1)^2(\Lambda_1/V_{hub})^{-2/3}f^{-5/3} \quad (1-7)$$

式中, σ_1 为纵向风速分量标准偏差特性值,由下式给出:

$$\sigma_1 = I_{15}(15\text{m/s} + aV_{hub})/(a+1) \quad (1-8)$$

湍流尺度参数 Λ_1 由下式计算:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7Z_{hub} & Z_{hub} < 30\text{m} \\ 21\text{m} & Z_{hub} \geq 30\text{m} \end{cases} \quad (1-9)$$

②极端风况 极端风况用于确定风力机的极端风载荷。这种风况包括由暴风造成的风速峰值及风向和风速的变化值。这种极端状况含有湍流潜在影响,在设计计算中仅考虑其中确定的因素。

a. 极端风速模型。50年一遇和1年一遇极端风速 V_{e50} 和 V_{e1} ,应根据参考风速 V_{ref} 确定。在标准级风力机的设计中, V_{e50} 和 V_{e1} 是高度 Z 的函数,分别用式(1-9)和(1-10)计算:

$$V_{e50}(Z) = 1.4V_{ref}(Z/Z_{hub})^{0.11} \quad (1-10)$$

$$V_{e1}(Z) = 0.75V_{e50}(Z) \quad (1-11)$$

式中, Z_{hub} 为轮毂中心高,假定与平均风向的短期偏离为 $\pm 15^\circ$ 。

b. 极端工作阵风。标准级的风力机 N 年一遇轮毂高处阵风值 V_{gustN} 由式(1-12)给出:

$$V_{gustN} = \beta \left[\frac{\sigma_1}{1 + 0.1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right] \quad (1-12)$$