



风力发电技术丛书

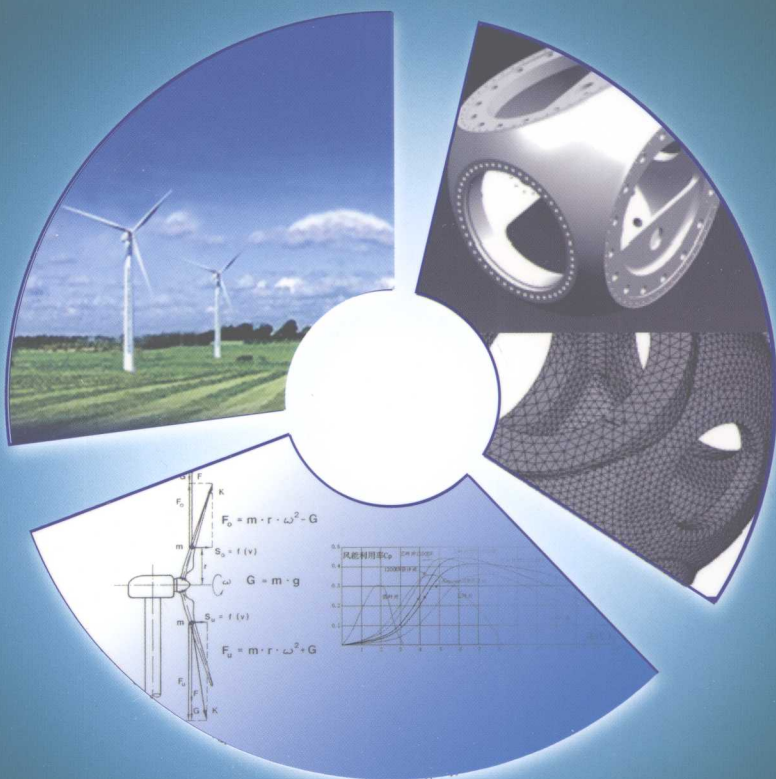


FENGLIJI  
SHEJI ZHIZAO YU YUNXING

# 风力机

## 设计、制造与运行

何显富 卢霞 杨跃进 刘万琨 编著



化学工业出版社



本书是《风力发电技术丛书》的一个分册。

本书介绍了风和风能的基本知识及各种风能发电技术,详细介绍了风轮机设计、设计优化、风轮机动态分析和风轮机安全性设计及风轮机的数值模型和数值计算技术;风轮叶片和各主要部件轮毂、齿轮箱、变桨距、增速箱、发电机、机舱、塔架和基础的结构设计和制造技术,以及风力机的安装、调试、运行、维护、故障分析和故障诊断技术。还简要介绍了几种新型的风力机,供有兴趣的读者参考。

本书是一本有关风能发电的技术参考书,适合从事风能发电产品设计、制造和风电场风力机运行的工程师、工程技术管理人员和设计院风电场工程设计参考使用,也适合高等院校热物理和动力专业师生作为教学参考书,对想了解风能发电的读者也是一本极好的科技读物。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力机设计、制造与运行/何显富等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2009.9  
(风力发电技术丛书)  
ISBN 978-7-122-06193-5

I. 风… II. 何… III. ①风力发电机-设计②风力  
发电机-制造③风力发电机-电力系统运行 IV. TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第127080号

---

责任编辑: 郑宇印  
责任校对: 凌亚男

装帧设计: 韩 飞

---

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 装: 化学工业出版社印刷厂  
720mm×1000mm 1/16 印张19¼ 字数404千字 2009年10月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

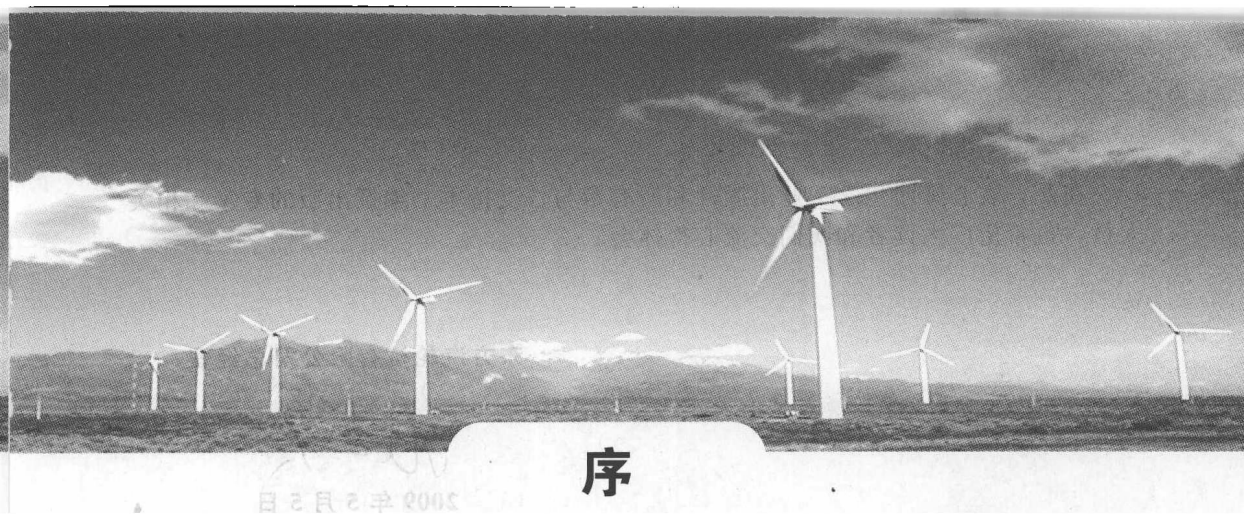
网 址: <http://www.cip.com.cn>

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: 58.00元

版权所有 违者必究



## 序

风能是太阳能的一种转换形式，是取之不尽、用之不竭的绿色可再生能源。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。风能发展潜力巨大，前景广阔。

随着全球气候变暖和化石能源日趋枯竭，受能源供应安全和保护环境的驱动，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在加紧对风能的开发和利用，减少二氧化碳等温室气体的排放，保护人类赖以生存的地球。风能将是 21 世纪最主要的绿色动力之一。

风力发电是一种主要的风能利用形式，风力发电相对于太阳能、生物质等可再生能源技术更为成熟、成本更低，对环境破坏更小。风力发电是世界电力发展的潮流和趋势。

我国风力资源丰富，总资源量达 20 亿千瓦。陆地加上近海的风力资源有 15 亿千瓦以上，海上可开发利用的风能储量约 7.5 亿千瓦。截至 2008 年底，我国累计的风电装机容量达到 1324 万千瓦。风电产业前景光明。

位于四川德阳的东方汽轮机有限公司秉承“绿色动力，造福人类”的企业宗旨，把发展风电产业作为企业经济增长和可持续发展的重要战略。2004 年开始与德国 REPOWER 公司合作，研发 1.5 兆瓦风电机组，2005 年研制出首台风电机组，正式进入国内风电产业市场。目前已累计制造风电机组 1400 台，已有 500 余台在全国各地投运，实现了风电产品规模化生产。企业将进一步完成 1MW、2.5MW 等新型风电产品的研制，成为国内最好的风电研发和制造基地之一。

顺应国内风电发展的大好形势和风电产品开发的需要，化学工业出版社组织了一批有风电开发实践经验的专家编撰了这套《风力发电技术丛书》，是非常及时和十分必要的。

《风力机设计、制造与运行》是《风力发电技术丛书》的一个分册。是根据我们的设计制造运行实践经验，介绍风力机的设计、制造和运行技术。这本书理论清晰、叙述浅显、技术性强、可读性好，希望对风电设计制造运行人员有所帮助，也希望对风力发电技术有兴趣的读者喜爱。

在此，衷心感谢化学工业出版社和所有参与、支持本书编撰出版的专家和相关人员，也希望广大读者和我们交流心得体会。

东方汽轮机有限公司总经理

Handwritten signature in black ink, reading '张志强' (Zhang Zhiqiang).

2009年5月5日



# 前言

科学出版社 北京

风力机塔架承载风力发电机组的全部载荷，是另一个重要的部件。塔架应用有限元进行结构的线性和非线性分析。风力机塔架一般有空间系杆钢结构和锥筒形结构两种。

安装风力发电机组应有可靠的基础。风力发电机的基础是用以支撑整个风力发电机的重量，要承担转动叶片给予塔架的各种弯矩（扭矩）、强风的推力和风力发电机叶片缺失的弯矩。中、大型风力发电机基础应采用钢筋混凝土，基础要深到冻土层以下，以防冻、防化造成基础倾斜。大型风电场的土建工程、风力发电机组的基础应由专业土建设计部门设计。

风力机维护的概念包括定期性检修、临时性检修及大修理。大修是在规定的较长时间，对全部零件、系统进行维护修理和更换。

风力机故障分析和故障诊断可以减少排除故障的时间，防止多发性故障发生次数，减少停机时间，提高设备完好率和可利用率。

因此，风力发电机组与一般的发电机组，如化石燃料汽轮机、燃气轮机、核电汽轮机等有很大的不同，在设计、制造、安装、运行、维护和故障诊断等各方面都有不同的难点。设计原则比一般的动力机械要严格得多，设计中应考虑环境、电气和土壤参数的影响。目前还没有一本这样的专业科技参考书，而风电事业的发展又急需此类书，因此我们结合工作编写了这本书，希望对读者有所帮助。

本书共分10章。第1章描述风和风电场的特性，这是风力发电的基础；第2章介绍恒速/恒频、变速/恒频等不同的发电技术；第3、5、6三章内容是风轮机、叶片和主要部件的设计特点和设计方法；第4章是介绍风轮机主要部件的数值模型和分析技术；第7、8、9三章介绍风力机的安装、调试、运行、维护和设备故障和故障诊断。第10章简要介绍几种新型风力机，如直接驱动式风力机、低温式风力机、海上风力发电式风力机和太阳能烟囱热能风力发电式风力机。典型风力机设计数据对风力机设计极具参考价值，在附录中介绍。

本书的编写承东方汽轮机厂有关部门大力协助以及产品开发处麻爱梅、温玉霞绘图师的帮助，在此表示感谢！

编写本书参阅了大量文献资料，在此向这些文献的作者一并表示感谢！

还要特别感谢为本书编写提供资料和建议的同事、朋友们，没有他们的帮助也就没有本书的出版。

编者  
2009年5月



# 目录

8

风电场基本设计 18



2.3.1	风力机变转速技术	39
2.3.2	变速/恒频发电系统	41
2.3.3	变速运行的发电机	42
2.4	小型直流发电系统	46
2.4.1	离网型风力发电机电系统	46
2.4.2	小型直流发电系统	47
<b>第3章</b>	<b>风轮机设计</b>	<b>48</b>
3.1	风轮机设计的基本原则	48
3.1.1	基本参数的定义	48
3.1.2	部件设计强度分析步骤	49
3.1.3	部件应力分析数学模型	49
3.2	风轮机设计条件	49
3.2.1	外部条件	50
3.2.2	风轮机等级	50
3.2.3	风况	50
3.2.4	其他环境条件	56
3.2.5	电网条件	57
3.3	载荷的计算	58
3.3.1	载荷	58
3.3.2	设计工况和载荷状态	58
3.3.3	载荷计算	60
3.3.4	载荷的安全系数	61
3.4	风轮机部件设计	61
3.4.1	设计参数	62
3.4.2	设计参数的选定	62
3.4.3	机舱偏航系统	64
3.4.4	传动系统	66
3.4.5	额定风速和额定转速	68
3.4.6	发电机设计	69
3.4.7	齿轮箱设计	71
3.5	风轮机工程设计方法	73
3.5.1	风能计算	73
3.5.2	风轮机典型设计参数	73
3.5.3	主要参数与技术经济指标举例	75
3.5.4	贝茨 (Betz) 基本理论	75
3.5.5	风轮机工程设计	77
3.6	风轮机设计优化	81
3.6.1	叶轮优化设计法	81

3.6.2	叶片数、直径、转速及翼型优化	82
3.6.3	叶轮叶片各截面弦长优化	83
3.6.4	叶轮叶片各截面扭转角优化	84
<b>第4章</b>	<b>风轮机数值分析技术</b>	<b>85</b>
4.1	风电场数值模型	85
4.1.1	流体力学控制方程	85
4.1.2	流场解的补充方程	87
4.1.3	边界条件	87
4.1.4	控制方程组离散和有限差分	87
4.2	风电场数值计算软件包	89
4.2.1	GH Bladed 软件包数值模型和功能	89
4.2.2	AREVA T&D /E-terra wind 软件	120
4.2.3	Garrad Hassan(GH) 综合软件包	120
4.2.4	风电场设计优化和风资源预测评估软件	123
4.3	风力机设计与研究	124
4.3.1	软件包开发、模块和数据库	124
4.3.2	风力机空气动力学研究	125
4.3.3	风力机动态测试方法的研究	125
4.3.4	储能方法的研究	126
4.3.5	小型风电场规划方法的研究	127
4.4	转子/机舱/塔架系统耦合响应分析	127
4.4.1	系统坐标系	127
4.4.2	系统建模	129
4.4.3	计算方法与结果分析	132
4.5	风轮机数值分析实例	134
<b>第5章</b>	<b>风轮机叶片设计</b>	<b>139</b>
5.1	风轮机叶片数据库	139
5.1.1	叶片剖面翼型	139
5.1.2	风轮叶片尺寸确定	145
5.1.3	风轮机叶片设计典型数据	147
5.2	风轮机叶片型线设计方法	148
5.2.1	计算机 CAD 设计扭曲叶片	148
5.2.2	某中型风力机叶片设计计算表例 (表 5-7、图 5-11~图 5-17)	149
5.3	风轮机叶片强度振动设计	156
5.3.1	桨叶片数值方程	156
5.3.2	计算结果分析	158
<b>第6章</b>	<b>风力机主要部件结构设计和制造技术</b>	<b>161</b>
6.1	叶片结构设计、材料和制造	161

6.1.1	叶片结构 .....	161
6.1.2	叶片结构设计要点 .....	162
6.1.3	叶片材料和结构 .....	163
6.1.4	典型叶片结构介绍 .....	164
6.1.5	叶片的制造工艺 .....	165
6.2	轮毂结构设计和材料 .....	167
6.2.1	轮毂结构形式 .....	167
6.2.2	轮毂与主轴的连接方式 .....	168
6.3	变桨距结构设计和材料 .....	168
6.3.1	变桨距风力机组的特点 .....	168
6.3.2	电机驱动的变桨距系统 .....	170
6.3.3	独立变桨距系统电机及控制 .....	171
6.4	增速箱结构设计和材料 .....	172
6.4.1	齿轮箱设计要考虑的问题 .....	173
6.4.2	齿轮箱设计要求 .....	173
6.4.3	齿轮箱结构 .....	174
6.4.4	齿轮箱的主要零部件 .....	174
6.5	发电机结构设计和材料 .....	178
6.5.1	发电机的结构 .....	178
6.5.2	交流发电机的分类 .....	179
6.5.3	常用交流发电机 .....	180
6.6	机舱结构设计和材料 .....	184
6.6.1	机舱材料 .....	184
6.6.2	底板与机舱盖 .....	184
6.7	塔架设计 .....	185
6.8	风力机基础设计 .....	186
6.8.1	微、小型风力机的基础 .....	186
6.8.2	中、大型风力机的基础 .....	187
<b>第7章 风力机现场安装和调试 .....</b>		<b>189</b>
7.1	风电场风力机布置 .....	189
7.2	风力机现场安装技术 .....	190
7.2.1	微、小型风力机的安装 .....	191
7.2.2	中、大型风力机的安装 .....	191
7.2.3	典型的安装程序 .....	192
7.3	风力机安装后的调整和试车 .....	193
7.3.1	风力机安装后的调整 .....	193
7.3.2	风力机的试车 .....	193
7.3.3	风力机组并网与脱网 .....	194

7.3.4	大、小发电机的软并网程序 .....	195
7.3.5	发电机间的切换 .....	195
7.3.6	电动机启动 .....	196
<b>第8章</b>	<b>风力机运行与维护 .....</b>	<b>197</b>
8.1	风力机运行技术 .....	197
8.1.1	风力发电机组运行状态 .....	197
8.1.2	运行数据统计分析 .....	198
8.1.3	风电场的监控系统 .....	199
8.1.4	运行过程中的主要参数监测 .....	199
8.1.5	风力参数监测 .....	200
8.1.6	机组状态参数检测 .....	201
8.1.7	各种反馈信号的检测 .....	202
8.1.8	增速器油温的控制 .....	202
8.1.9	发电机温升控制 .....	202
8.1.10	发电机功率控制 .....	202
8.1.11	风力发电机组退出电网 .....	203
8.1.12	变桨距风力发电机组的运行状态 .....	204
8.2	风力机维护技术 .....	205
8.2.1	风力机的日常检修维护 .....	205
8.2.2	风力机的定期检修维护 .....	206
8.2.3	紧急状况停机 .....	207
8.2.4	重要零部件的维护 .....	207
8.2.5	风力机对自然灾害的防护 .....	211
<b>第9章</b>	<b>风力机故障和故障诊断 .....</b>	<b>219</b>
9.1	风力机叶片故障分析 .....	219
9.1.1	风力机叶片逐年受损状况 .....	219
9.1.2	声音辨别叶片受损技巧 .....	219
9.1.3	沿海和干旱地区叶片对比 .....	220
9.1.4	风力机叶片目测技巧 .....	220
9.2	增速箱故障分析 .....	220
9.2.1	齿轮箱常见故障及预防措施 .....	220
9.2.2	齿轮箱故障诊断 .....	222
9.3	发电机故障分析 .....	223
9.4	风力机迎风装置及故障分析 .....	224
9.4.1	迎风装置的组成 .....	224
9.4.2	偏航电机过负荷故障原因 .....	225
9.5	塔架故障分析及塔筒防腐 .....	225
9.5.1	动载荷对塔架的影响 .....	225

9.5.2	风力机内外塔筒防腐 .....	225
9.6	风力机部件故障诊断技术 .....	226
9.6.1	叶片故障分析 .....	226
9.6.2	小型风力机剧烈抖动 .....	228
9.6.3	风力机调向不灵 .....	229
9.6.4	风力机异常杂音 .....	229
9.6.5	发电机不发电 .....	229
9.6.6	风轮转速明显降低 .....	230
9.6.7	发电机输出电压低 .....	230
9.6.8	蓄电池输出电容不足 .....	230
<b>第 10 章</b>	<b>新型风力机</b> .....	<b>231</b>
10.1	直接驱动式风力机 .....	231
10.1.1	直接驱动式风力机原理 .....	231
10.1.2	离网型低速永磁发电机 .....	233
10.1.3	变速直驱永磁发电机控制系统 .....	235
10.2	低温式风力机 .....	240
10.2.1	低温环境对风力发电机组的影响 .....	240
10.2.2	低温对风轮叶片的影响 .....	241
10.2.3	高原环境对风力发电的影响 .....	243
10.2.4	风力机在恶劣环境下的可靠性研究 .....	247
10.2.5	热带气旋对风电场安全性的影响 .....	250
10.3	海上风力发电式风力机 .....	251
10.3.1	海上风电场 .....	251
10.3.2	海上风力发电技术 .....	252
10.3.3	国内海上风电场建设 .....	255
10.3.4	大功率浅海风电场风投资概算 .....	255
10.3.5	丹麦的海上风力发电 .....	256
10.3.6	漂浮式海上风电场 .....	258
10.3.7	近海风电场建设关键技术 .....	259
10.4	太阳能烟囱热能风力发电式风力机 .....	265
10.4.1	太阳能发电 .....	265
10.4.2	太阳能烟囱热发电 .....	267
10.4.3	太阳能烟囱发电系统理论基础 .....	272
10.4.4	热能风力涡轮机设计 .....	275
10.4.5	太阳能烟囱电厂热能风力涡轮机方案 .....	277
<b>附录</b>	<b>典型风力机设计数据</b> .....	<b>279</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>295</b>



# 第1章 风和风电场的特性

风是由于太阳辐射不均匀加热地球表面造成的。温度不均匀的地球表面使大气层空气温度不均匀，导致大气层中空气的压力分布不均匀。空气在不均匀压力的作用下，沿水平方向运动就形成风。空气流动所形成的动能称为风能，因此，风能本质上是太阳能的一种转化形式。

风速和风向是风特性的两个最重要参数。“风向”是指风吹来的方向，从北方吹来的风称为北风。实际的风速是随时间在不断变化的量，因此风速一般用瞬时风速和平均风速来描述。瞬时风速是短时间发生的实际风速，也称有效风速。平均风速是一段较长时间内瞬时风速的平均值。

## 1.1 风和风的特性

### 1.1.1 风的形成和分类

#### 1. 风的形成

(1) 太阳辐射与空气压力 风能利用主要是将大气运动时所具有的动能转化为其他形式的能。风是水平运动的空气，空气产生运动，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。在赤道和低纬度地区，太阳高度角大，日照时间长，太阳辐射强度高，地面和大气接受的热量多，温度较高；在高纬度地区，太阳高度角小，日照时间短，地面和大气接受的热量小，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，使空气作水平运动，风应沿水平气压梯度方向吹，即垂直与等压线从高压向低压吹。

地球在自转，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，南半球向左偏转，所以地

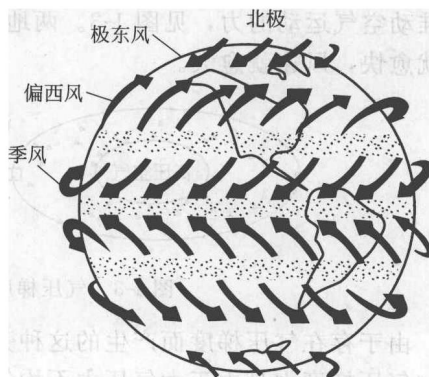


图 1-1 地球表面风的形成和风向

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，见图 1-1。

(2) 风的形成 大气运动和驱使它运动的原因是错综复杂的，水平风、垂直升降气流、不规则的紊流运动，都各有复杂的成因。

根据各地气压与风的观测资料，可画出气压与风向风速的分布图。这种图显示了风是从气压高的区域吹向气压低的区域，而且还表明风的行进路线并不直接从高压区吹向低压区，而是有一个向右偏斜的角度。由此总结出一套完整的气压与风的关系理论。风的风向、风速是由空气气压高低、气温冷暖等内部矛盾运动规律支配的，从而解释风的起因和预测风的特性。

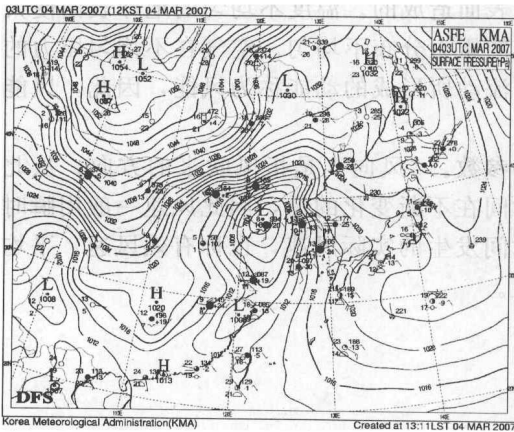


图 1-2 等气压线分布图

(3) 气压与风 风向、风速和风向右偏斜与气压分布特性有关。等气压线分布如图 1-2 所示。

图 1-2 是一张某一时刻的海平面和大陆的等气压分布图。曲曲弯弯的线是等压线，同一条等压线上，气压都是相等的。闭合等压线地区如果气压高于周围，称为高压区；若气压低于周围，则称为低压区。而从高压区伸展出来的部分称为高压脊，从低压区伸展出来的部分称为低压槽。高压脊和低压槽好比山峰和谷底，高压脊和低压

槽犹如山脊和山坳，气压等压线就像表示海拔高度的地形等高线。

等压线的分布有疏有密，这种等压线的疏密程度表示了单位距离内气压差的大小，称为气压梯度。等压线愈密集，表示气压梯度愈大。

各地的气压如果发生高低差异，两地之间存在气压梯度时，气压梯度就会把两地间的空气从气压高的一边推向气压低的一边，于是空气流动产生风。气压梯度力是推动空气运动的力，见图 1-3。两地间气压差愈大，也即气压梯度愈大，空气流得就愈快，风速就愈大。

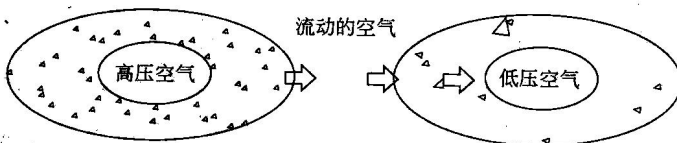


图 1-3 气压梯度力是推动空气流动的力

由于存在气压梯度而产生的这种旁压力称为气压梯度力，如图 1-4 所示。

气压梯度力是由于大气压力不均匀而作用在空气质点上的压力，其方向由高压指向低压，垂直于等压面。气压梯度力也可以分解成水平气压梯度力和垂直气压梯

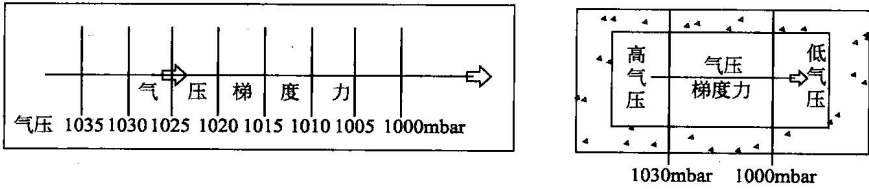


图 1-4 气压梯度力  
(1mbar=10<sup>2</sup>Pa, 下同)

度力，大小和气压梯度成正比。空气的流动是由气压梯度力推动的，气压梯度力的大小决定风的大小。

(4) 热极生风 夏天雷雨大风之前，空气往往热得出奇；而在冬天天气回暖，热得反常的时候，也会有冷空气大风来临。这就是“热极生风”，即热得太厉害，就会产生大风。

空气受热膨胀引起该区空气密度减小，结果使得单位面积上承受的空气柱重量也减小，气压降低。相反，地区空气受冷气压就升高。可见两地间如果发生了冷热的差异，就会相应地引起气压的差异。冷热差异越大，气压差异也越大，见图 1-5。

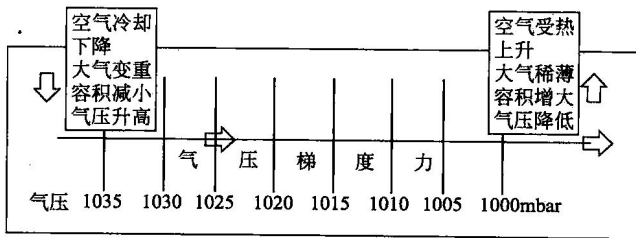


图 1-5 冷热空气产生气压差

两地间气压差加大，气压梯度力就增加，风也越刮越大。雷雨大风和冷空气大风就是因为雷雨地区、冷空气地区与暖空气地区之间发生了很大的温度差，从而引起很大的气压差和很大的气压梯度力产生的。这样，空气冷和热的矛盾运动，通过气压高低最后又转化为风的流动，热分子运动转化成为风的宏观机械运动。

然而，这种矛盾运动的转化过程还没有完结：风刮起来以后，川流不息到处奔走，从南方刮到北方，又从北方刮到南方，从暖的地区刮到冷的地区（图 1-6）。又从冷的地区刮到暖的地区，使冷暖空气来来往往，这样风就成为传送热量的介质。风每刮一次，就会引起经过地区温度的改变，从而使各地之间的温度差发生变化。于是风的机械运动又转化为冷与热的分子运动。然后，冷与热的分子运动又可通过空气气压高低转化为风的宏观机械运动，……。转化过程循环往复，直至温度差消失。

(5) 地转风 地转风是指大气中空气的水平、等速直线运动，是无加速度、惯



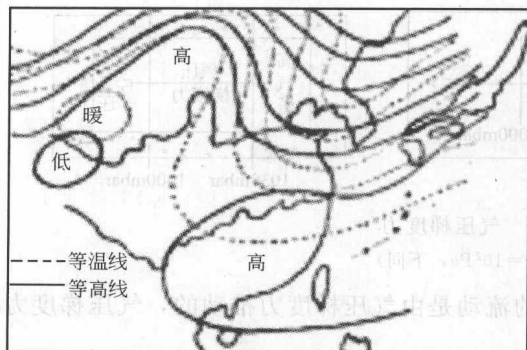


图 1-6 高空天气等压面图

性离心力不起作用的一种空气运动。在这种运动中，只有水平气压梯度力和地转偏向力起作用。地转风是大气中水平气压梯度力和地转偏向力相平衡时的空气的水平运动。

地转风是平衡运动，它受到的合外力等于零，没有加速度。空气运动平行于等压线，如果人背风而立，高压在右，低压在左，这就是北半球地转风的规则。地转风平行

于等压线流动，这是由于地转偏向力作用的结果。有气压梯度后，空气从高压向低压流，风运动后，就会受到地转偏向力的作用，使运动方向向右偏转（北半球）。随着运动方向的改变，偏向力的方向也会改变，偏向力的方向永远垂直于运动方向所指的右方。

(6) 梯度风 是地转风的一种，在一定条件下，地转风转化成一种大尺度的系统风，称为梯度风。当地转风处在圆形的气压场中时，风作等速圆周运动。作等速圆周运动，物体会受到离心惯性力，所以处在圆形的气压场中地转风在运动时，除受梯度力、偏向力作用外，还要受到离心惯性力的作用。三个力作用平衡时，有效分力为零，风沿等压曲线作惯性等速曲线运动，这就是梯度风（图 1-7）。

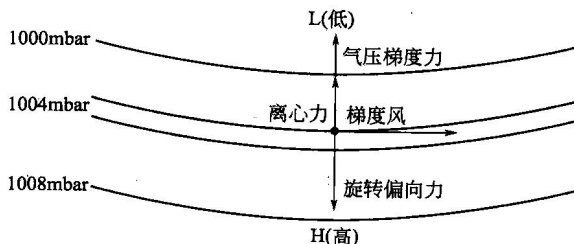


图 1-7 梯度力、偏向力和离心惯性力平衡

(7) 地球自转和风的偏向

风在气压梯度力的作用下并不朝气压梯度力的方向从高压侧直接向低压侧，而是不断地偏转方向。在北半球向右偏转，在南半球则向左偏转。使风发生偏转的力就是地转偏向力，是因为地球自转引起的。不停地旋转的地球上受地转偏向力作用的不仅是风，一切相对地面运动的物体都受到它的作用，一般较小。人们发现，在北半球，沿着水流的方向河流的右岸往往比左岸陡峭；在南半球，河流的左岸比右岸陡峭。这就是地转偏向力存在的一个见证，是亿万年长期冲刷形成的。

地球以南北极为轴心，像一些大小不同的圆盘一样，在不停地转动。从北极上空往下望，这些大圆盘以逆时针方向在运转；从南极上空往下望，这些大圆盘运转的方向则是顺时针的。风之所以发生偏向，就是由于风与转动的地面发生了相对运动。

风在气压梯度力作用下被推向低气压一侧，风吹起向前，立刻产生地转偏向