

Wind power technology

风力发电技术



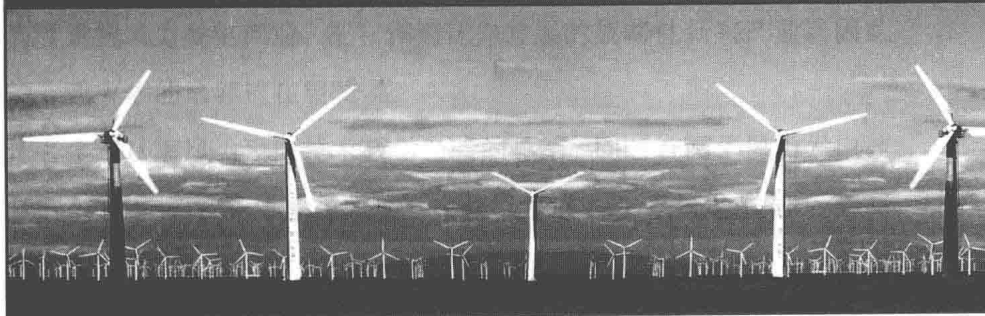
孙 毅 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

Wind power technology

风力发电技术



孙 毅 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术/孙毅编著. —长沙:中南大学出版社,2016. 11

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2524 - 4

I. 风... II. 孙... III. 风力发电 - 高等职业教育 - 教材

IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 268157 号

风力发电技术

FENGLI FADIAN JISHU

孙 毅 编著

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南金太阳印刷有限公司

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 12.5 ☐字数 247 千字

☐版 次 2016 年 11 月第 1 版 ☐印次 2016 年 11 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2524 - 4

☐定 价 68.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

风力发电技术作为目前最成熟且极具发展潜力的新能源发电技术,备受世界关注。我国高度重视风力发电产业,把它作为优先发展的战略性新兴产业。因此风力发电相关专业人才的培养迫在眉睫。

本书是作者多年从事风力发电技术教学经验的总结,同时查阅了风力发电技术的最新文献资料,将教学讲义进行充实、完善,并进一步系统化整理后编写而成。

本书共分三章。第1章 风力发电技术概述,主要包括:风力发电技术的发展概述、风的概念及成因、风能利用的历史、有关风的概念、风能的分布。第2章 风力发电机组的结构,主要包括:风力发电机组的分类、风力发电机组的结构简介、叶轮、传动机构、发电机、偏航机构、塔架。第3章 风力发电机组的运行控制,主要包括:运行控制概述、不同类型风力发电机组的控制。

本书可作为高职高专类学校风力发电类课程的教材,也可作为从事风力发电工作相关人员的参考读物。

本书的编写参阅了许多书籍、论文、网络资料,由于修改次数较多,文中未能全部标印出来,在此一并感谢!由于编者水平有限,书中差错和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

湖南水利水电职业技术学院 孙 毅

2016年5月

目 录

第1章 风力发电技术概述	(1)
1.1 风力发电技术的发展概述	(1)
1.2 风的概念及成因	(3)
1.2.1 全球环流所形成的风带	(4)
1.2.2 季风环流	(10)
1.2.3 局地环流	(12)
1.3 风能利用的历史	(14)
1.4 有关风的几个概念	(16)
1.4.1 大气边界层	(16)
1.4.2 风速	(18)
1.4.3 风切变	(27)
1.4.4 湍流强度	(39)
1.4.5 湍流强度在风力发电中的应用	(43)
1.4.6 风向	(47)
1.4.7 风频	(49)
1.4.8 风能	(49)
1.5 风能的分布	(50)
1.5.1 世界风力资源的分布	(50)
1.5.2 我国的风力资源	(51)
1.5.3 我国风能划分的三级区划指标	(53)
第2章 风力发电机组的结构	(58)
2.1 风力发电机组的分类	(59)
2.1.1 按桨叶的受力方式分类	(59)

2.1.2	按风轮旋转轴的布置方向分类	(61)
2.1.3	按叶片的数量和形状分类	(67)
2.1.4	按额定功率大小分类	(70)
2.1.5	按风力发电机组与电网的关系分类	(70)
2.2	风力发电机组的结构简介	(70)
2.2.1	叶轮	(70)
2.2.2	机舱	(71)
2.2.3	塔架	(73)
2.3	叶轮	(74)
2.3.1	有关叶轮的基本概念	(74)
2.3.2	叶片	(83)
2.3.3	轮毂	(99)
2.3.4	变桨机构	(101)
2.4	传动机构	(102)
2.4.1	主轴	(103)
2.4.2	变速箱	(104)
2.4.3	联轴器	(118)
2.5	发电机	(127)
2.5.1	同步发电机与异步发电机	(127)
2.5.2	双馈发电机	(133)
2.5.3	双速发电机	(135)
2.6	偏航机构	(137)
2.6.1	偏航系统的组成	(137)
2.6.2	偏航系统的工作原理	(137)
2.6.3	风向传感器的工作原理	(139)
2.6.4	偏航驱动机构的组成与运行原理	(142)
2.6.5	解缆原理	(143)
2.7	塔架	(146)
2.7.1	塔架的分类	(147)
2.7.2	锥筒式塔架	(149)
2.7.3	塔架高度的确定	(155)
第3章	风力发电机组的控制	(156)
3.1	风力发电机组运行控制概述	(156)
3.1.1	开机自检	(157)

目 录

3.1.2	运行控制	(157)
3.1.3	控制系统的组成	(159)
3.2	不同类型风力发电机组的控制	(163)
3.2.1	离网型风力发电机的控制	(167)
3.2.2	恒速恒频并网型风力发电机组的控制	(169)
3.2.3	变速恒频风力发电机组的控制	(177)
参考文献		(190)

第1章 风力发电技术概述

1.1 风力发电技术的发展概述

风力发电就是把风的动能通过一定的设备转换成电能,这种设备是通过两个步骤完成风能到电能的转换的。第一步,先把风能转换为机械能,完成这一能量转换的设备,称为风力机;第二步,把风能转换而来的机械能转换为电能,完成这一能量转换的设备称为发电机。整套设备称为风力发电机。在风力发电场工程中,风力发电机常被称为风力发电机组。也就是说,风力发电机组是风力发电机组的同义词。二者也常简称为风机。

近年来,风力发电越来越受到世界各国的重视,其原因在于以燃烧化石燃料发电的火力发电所造成的环境污染日益严重,且所用的化石燃料逐渐减少。而风能是一种无污染、可再生的新能源,而且它取之不尽,用之不竭。

风力发电并不是近年才出现的新的发电技术,早在1890年,丹麦人就研制出了风力发电机组,并在1891年建成了世界上最早的风力发电场。但风力发电一直未被人们重视,到1984年,全世界风力发电装机容量大约才有0.274 GW。

20世纪80年代末期,人们认识到以燃煤为主的能源结构对环境造成严重污染,从而迫使人们去寻找洁净而实用的能源,风力发电才又引起了人们的关注,从而进入了较快的发展时期。20世纪90年代,许多国家制定了激励风力发电发展的优惠政策,为风力发电的发展提供了极为有利的条件,促进了风力发电的发展,这可从世界风力发电的累计装机容量变化情况看出(图1-1)。

由图1-1可知,近20年来,世界风力发电装机容量稳步上升。由图1-2可知,我国的风力发电装机容量近8年来也快速增长,并从2010年起成为世界风力发电第一大装机容量国。由图1-3可知,2015年,我国风力发电装机容量占世界总装机容量的33.6%,继续保持世界第一的位置。

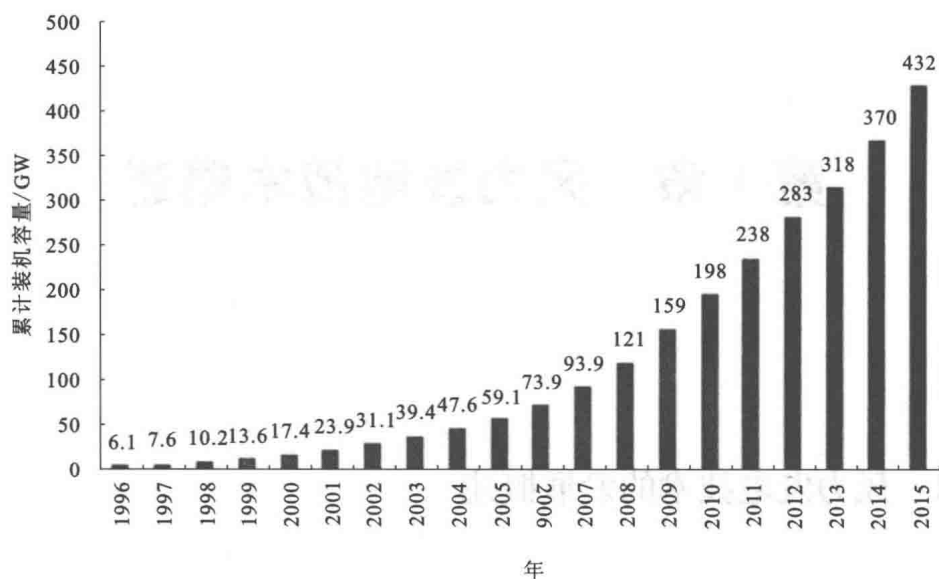


图 1-1 世界风力发电累计装机容量变化情况

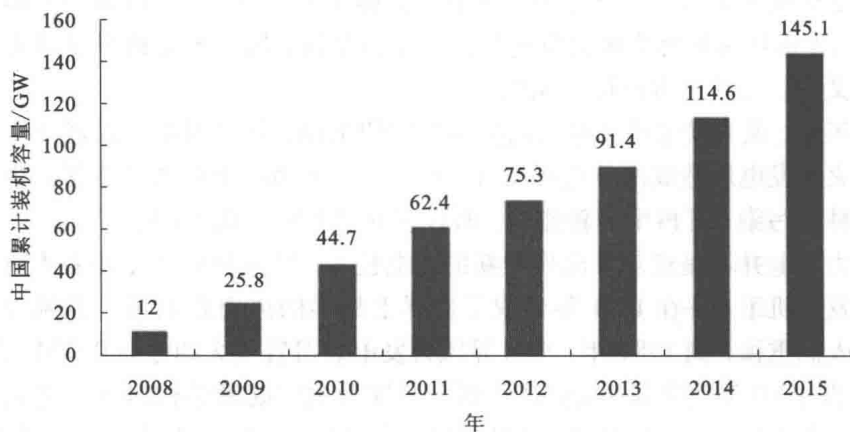


图 1-2 中国风力发电累计装机容量变化情况

虽然我国的风力发电装机容量居世界首位，但仅占我国发电量的 3.3% (2015 年，全国发电量 5.6184×10^{12} kWh，风力发电量为 1.863×10^{11} kWh)，而欧美国家风力发电所占的比例在 8% 以上。我国是风力资源丰富的国家，风力发电仍有较大的发展空间。

目前，我国风力发电发展遇到的问题是，风力丰富的地区大多处于欠发达的

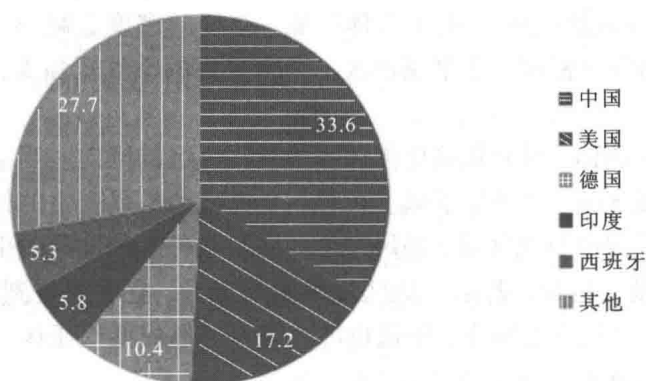


图 1-3 2015 年世界各国风力发电装机容量百分数

边远地区，所建风力发电场发出的电能在本地区节余较多，而又缺乏大型电网送往远处，所以经常出现“弃风限电”的现象。据统计，2013 年，“弃风限电”所弃的电能占当年整个风力发电的 11%。

在“弃风限电”形势的影响下，我国大型风力发电基地建设速度放缓，而并网条件较好的低风速地区的风力发电开发成为热点，许多设备制造商也根据需要研制出低风速型风力发电机组，使得平均风速低于 6 m/s 的地区，也具备了较好的经济可开发潜力。

低风速地区的风力发电场一般规模较小，成本难于分摊，使得单位千瓦投资成本较高，加之风力发电的收益较低和回报周期较长，所以，我国风力发电开发企业主要是国有大型发电集团。

1.2 风的概念及成因

风力发电机组的运行依赖于风能。人们对风能的认识经历了漫长的历程，并且随着科学技术的进步而逐步完善。

风的形成是由于空气的流动而产生的。空气是一种气体混合物，它的主要成分是氮气(N_2)，含量为 78%；其次是氧气(O_2)，含量为 21%；另外还含有 0.9% 的稀有气体[氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)、氡(Rn)]、0.03% 的二氧化碳(CO_2)和微量其他气体[如臭氧(O_3)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)、水蒸气(H_2O)等]。空气是风形成的物质基础。

在标准状况(温度 0°C ，压强 101325 Pa)下，空气的密度为 1.29 kg/m^3 。空气

的密度随温度和压强而变化。温度升高时,由于热胀冷缩现象,空气的密度会减小,反之亦然。压强减小时,由于气体膨胀,空气的密度会减小,反之亦然。所以,高原地区的空气密度小于平原地区。高密度区的空气压强大,低密度区的空气压强小。

空气是一种流体,具有从高压强区流向低压强区的倾向。当空气从高压强区持续流向低压强区时,就产生了风。可见,空气流动是风产生的根本原因。而存在或产生压强不同的空气区域,是风产生的必要条件。最常见的引起空气压强变化的因素是温度。例如,若某一地区连续晴朗无云,空气接收到的太阳能较多,气温就会上升,空气密度减小,压强也随之减小,形成低气压区。而相对高气压区的空气就会向该低气压区流动,从而形成风。

1.2.1 全球环流所形成的风带

全球环流是指从整个地球的宏观方面来考虑,都有哪些因素可以引起空气的大范围流动。

全球环流有两种:一种是由于地球靠近赤道的热带地区温度较高,地球两端的南极、北极地区温度较低,从而引起热带地区的空气受热膨胀而上升,空气密度减小,气压下降;两极温度较低,空气冷却而下降,空气密度增大,气压增大,从而形成从两极地区到热带地区的空气流动。这种全球性的空气流动也可称为热力环流。第二种是由于地球的自转所引起的空气相对运动。法国物理学家科里奥利(图1-4)对这种情况进行了系统的研究。

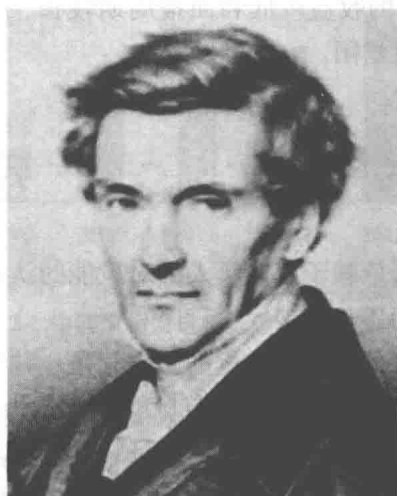


图 1-4 科里奥利

(法国物理学家, 1792—1843)

1. 热力环流的单圈环流模型

首先对模型的概念作出解释。模型是一个多义词，其常用意义是根据实物的形状和结构按比例制成的物体。本书中的模型特指理论模型，是指为解决某一问题而提出的与实际情况相比相对简单的假设。建立模型的目的是为了揭示问题的本质，简化处理问题的方法，方便问题的讨论。

单圈环流模型是假定地球表面结构均匀，也不自转。这样，由于地球是一个类圆体，由于太阳高度角的原因，太阳照射到地球上的能量在赤道处多，两极处少，地球受热情况如图1-5所示。赤道地面由于气温高，空气膨胀上升，赤道地面处就形成了低压区，上空为高压区；极地地面由于气温低，空气收缩下沉，极地地面处就形成了高压区，上空为低压区。这样，在近地表形成了由极地流向赤道的气流；在高空形成了由赤道流向极地的气流。于是就形成了赤道与极地间的单一径向闭合环流圈，通常称之为单圈环流，如图1-6所示。

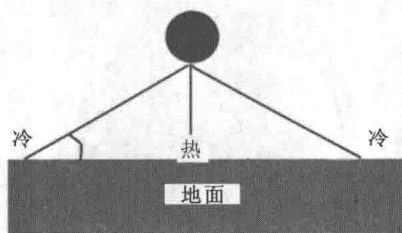


图1-5 地球受热情况

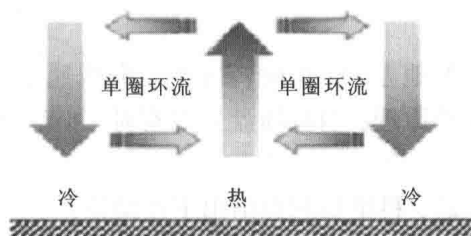


图1-6 单圈环流

上述的这种忽略地球表面附着物对空气流动的影响、忽略地球自转对空气流动的影响而导出的地表空气沿地球经度方向从地球两极流向赤道的现象叫作单圈环流模型。之所以叫作模型，是因为实际的大气环流并不是严格地按地球的经线方向流动，而是有一定方向的偏离，其主要原因是地球自转的影响。

2. 科氏力作用模型

地球上气压水平分布不均匀,造成了空气的水平运动。既然空气受水平气压梯度力的作用,风应沿着水平气压梯度方向吹,即垂直于等压线从高压吹向低压。实际上,风不是沿着水平气压梯度力的方向吹,而是发生偏转。这是由于地球并非静止不动,而是一个不停自旋的球体,地球的自转会产生科氏力,使风向发生偏转。科氏力也称科里奥利力,是对旋转体系中进行直线运动的质点由于受到旋转体系惯性的影响,质点运动偏离直线运动现象的一种描述。科里奥利于1835年提出科氏力的概念。

1835年,科里奥利着手从实验上研究旋转圆盘上的运动问题。他用一个旋转的圆盘,在其中中心放一个圆球[图1-7(a)],并使圆球向圆盘边沿的白点方向滚动。当圆盘逆时针旋转时,从地面观察,情况如图1-7(b)所示。但若从圆盘上观察,则情况如图1-7(c)所示。

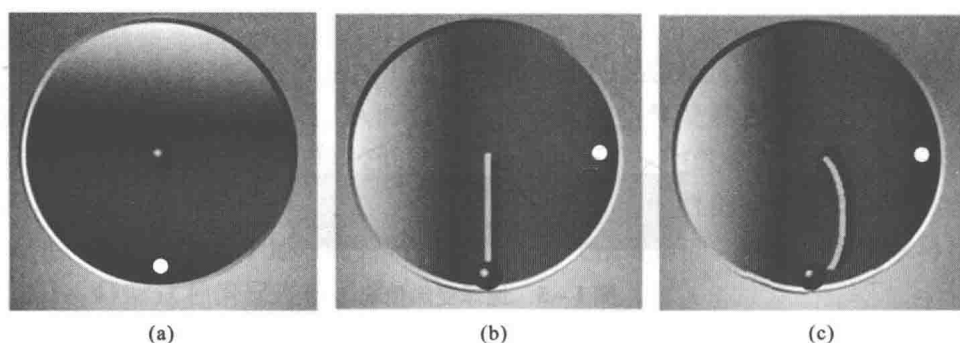


图1-7 科氏力形成的原理

这是因为不同半径的地方,圆盘旋转所产生的线速度不同,越靠近边沿,线速度越大。根据相对运动原理,当在圆盘上观察时,小球在圆盘边沿处偏离白点处半径线的距离就更大。

对此现象进行研究后,科里奥利总结出下述结论:

①在旋转体系中进行直线运动的质点,由于惯性,有沿着原有运动方向继续运动的趋势。在经历了一段时间的运动之后,体系中质点的位置会有所变化,而它的运动方向,如果以旋转体系的视角去观察,就会发生一定程度的偏离。

②当一个质点相对于惯性系做直线运动时,相对于旋转体系,其轨迹是一条曲线。立足于旋转体系,我们认为有一个力驱使质点运动轨迹形成曲线,这个力就是科里奥利力。

根据上述原理,就可以解释大气单圈环流为什么不是沿地球径线方向自两极

垂直流向赤道方向，而是有一定的偏离。地球赤道上空的一点与其他纬度上空上的一点，都会因为地球的自转而相对向西运动，但运动的速度不同。越靠近赤道，速度越快。因此，不同纬度的地方，偏转的程度不同。越靠近赤道，偏转越大。

地球的南、北半球，其地表大气环流的方向不同，科氏力所引起的气流偏转的方向也不同，如图1-8、图1-9所示。

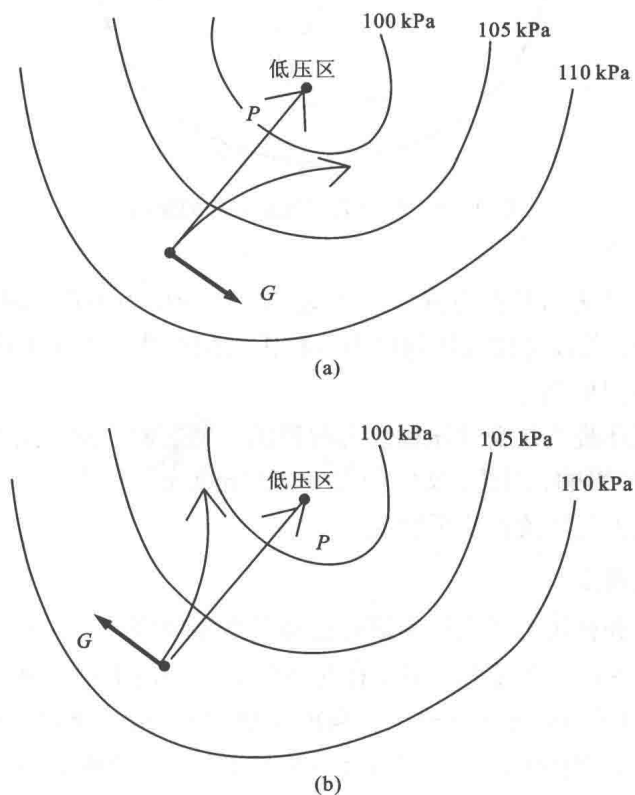


图1-8 气压梯度力与科氏力

图1-8中 G 为科氏力， P 为气压梯度力。图1-8(a)所示的为北半球的情况，在气压梯度力与科氏力的共同作用下，空气沿其合力的方向运动。即在北半球，地表大气环流的方向是从北极到赤道的方向，科氏力的方向是由东到西。因此，在气压梯度力与科氏力的共同作用下，气流流动的方向是从东北到西南。图1-8(b)所示为南半球的情况，地表大气环流的方向是从南极到赤道的方向，即从南到北，科氏力的方向仍是由东到西。因此，若仅考虑气压梯度力与科氏力的作用，南北半球大气环流的方向如图1-9所示。

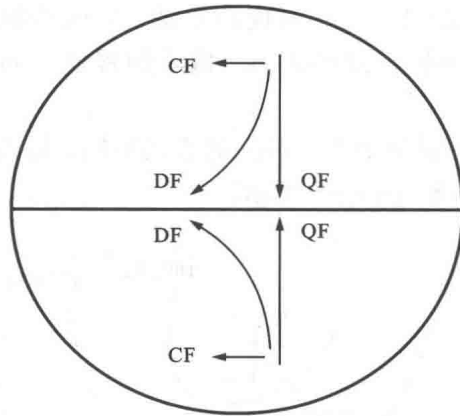


图 1-9 科氏力对气流方向的影响

图 1-9 中 CF 表示科氏力方向, QF 表示气压梯度力方向, DF 表示大气环流方向。也就是说, 若仅考虑气压梯度力与科氏力的作用, 南北半球大气环流的方向如图 1-9 中的 DF 所示。

实际的大气环流不仅受气压梯度力与科氏力的影响, 同时还受地球引力、季节、地形、地貌的影响, 因此, 实际的大气环流比较复杂, 需要用三圈环流模型才能比较好地描述大气环流的实际情况。

3. 三圈环流模型

气压梯度力和科氏力是大气大规模运动的主要原因。

地球赤道地区的气流受热上升, 在北半球大气层的上层向北流动, 大约在北纬 30° 附近, 科氏力阻止大气进一步向前流动, 空气开始下沉, 形成一个高压区 (副热带高压区), 副热带高压下沉气流分为两支: 一支从副热带高压向低纬度流动, 指向赤道。在地转偏向力的作用下, 北半球吹东北风, 南半球吹东南风, 风速稳且不大, 为 3~4 级, 这就是所谓的风向随季节变化的信风, 所以在南北纬 30° 之间的地带称为信风带。这一支气流补充了赤道上升的气流, 构成了一个闭合的环流圈, 称为哈德来 (Hadley) 环流, 也叫作正环流圈, 此环流圈南面上升北面下沉。另一支气流从副热带高压带向高纬度流动, 在地转偏向力的作用下, 北半球吹西风, 且风速较大, 这就是所谓的西风带。在北纬 60° 附近, 西风带气流遇到了由极地向南流来的冷空气, 被迫沿冷空气上面爬升, 在 60° 地面出现一个副极地低压带。副极地低压带的上升气流, 到了高空又分成两股, 一股向南, 一股向北。向南的一股气流在副热带高压带下沉, 构成一个中纬度闭合圈, 与哈德来环流流向相反, 此环流圈北面上升, 南面下沉, 所以叫作反环流圈, 也称费雷尔

(Ferrel) 环流圈。

向北的一股气流，从上升到达极地后冷却下沉，形成极地高压带，这股气流补偿了地面流向副极地地带的气流，而且形成了一个闭合圈，此环流圈南面上升，北面下沉，与哈德来环流相似，也叫作正环流圈。在北半球，近地表，此气流由北向南，受地转偏向力的作用，吹偏东风，在纬度 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ，形成了极地东风带。

于是，在南北半两个球上出现了四个气压带，即：极地东风带、盛行西风带、东北(东南)信风带、赤道无风带。

三个闭合环流圈(三圈环流)：赤道—纬度 30° 环流圈、纬度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 环流圈、纬度 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 环流圈。

这里需要指出的是，所谓三圈环流只是一种理论模型，实际环流比上述情况复杂得多。

由于气压梯度力和科里奥利力的共同作用，形成了南北半球不同纬度地区的盛行风向。三圈环流及全球风带如图 1-10 所示。

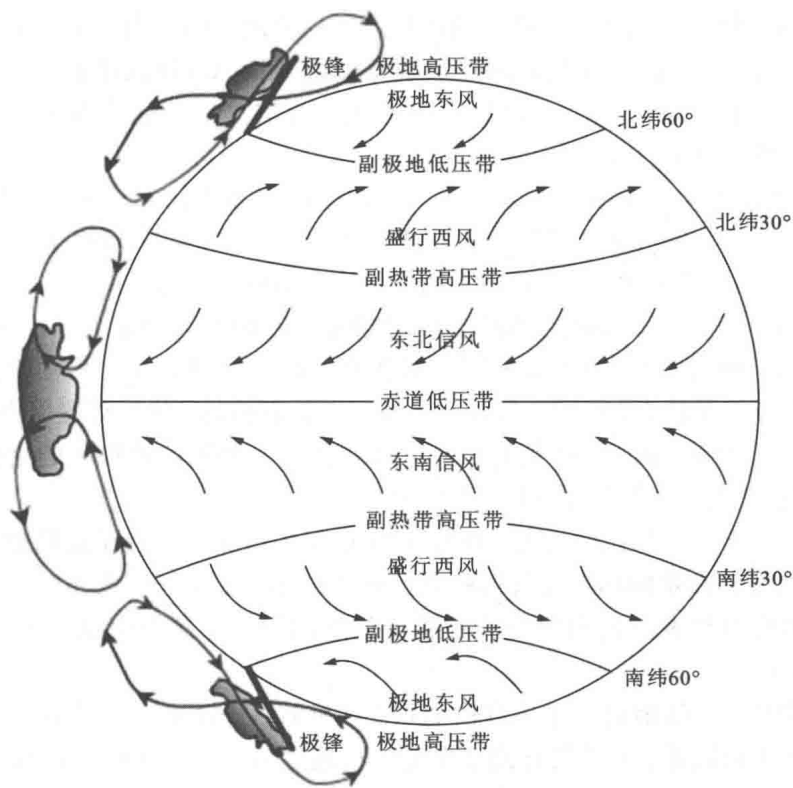


图 1-10 三圈环流及全球风带

1.2.2 季风环流

所谓季风,是指在特定的地区,到了特定的季节,就会刮特定风向的风。这种与季节相关的风称为季风。季风也可表述为:随季节而有规律地改变方向的空气流动。

现在我们已经知道,风是与空气的流动相关的。引起季风的空气流动称为季风环流。在一个较大地区范围内盛行风向或气压系统有明显的季节变化的现象称为季风气候。我国位于亚洲东部,是一个典型的季风气候国家。

季风气候产生的原因是季风环流,而季风环流形成的主要因素是海陆分布的热力差异以及地球风带的季节转换。

1. 海陆比热容不同所引起的季风

产生季风的因素之一是海陆比热容不同。比热容是物体在某一过程中,每升高(或降低)单位温度时从外界吸收(或放出)的热量。它是一个广度量,与物质的量的多少有关。为了比较不同物质吸热、放热能力的大小,引入了比热容的概念。

物质的比热容是指当单位质量的该物质吸收或放出热量引起温度升高或降低时,温度每升高 $1\text{ K} (^{\circ}\text{C})$ 所吸收的热量或每降低 $1\text{ K} (^{\circ}\text{C})$ 所放出的热量,通常以符号 c 表示,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [焦耳/(千克·开尔文)]。比热容是一个强度参数,它与物质的量的多少无关。

海水的比热容为 $3890\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 密度为 $1025\text{ kg}/\text{m}^3$; 空气的比热容为 $1000\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 密度为 $1.29\text{ kg}/\text{m}^3$ 。 1 m^3 海水的比热容是 $3890\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times 1025\text{ kg}/\text{m}^3 = 3.987 \times 10^6\text{ J}$, 1 m^3 空气的比热容是 $1000\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times 1.29\text{ kg}/\text{m}^3 = 1.29 \times 10^3\text{ J}$ 。即 1 m^3 海水的比热容是 1 m^3 空气比热容的 3090 倍。

土壤的比热容为 $938\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 密度为 $2.65 \times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 。但由于土壤是固体,表层孔隙率又较大,热导率较小,且地面上常有植物、建筑等覆盖物,加之比热容是一个广度量,因此,陆地的表面可以看作是一个比热容很小的物体。海陆交界附近的热交换的模型如图 1-11 所示。

冬季,由于海水的比热容大,在夏季时储存的热量多,海洋比陆地热,海洋上空的空气受到海水的加热而气温较高,密度较小;海洋气压低于陆地,在近地表,气压梯度力自大陆指向海洋,风从大陆吹向海洋,冬季海陆交界处风向如图 1-12 所示。

夏季则相反,陆地由于比热容较小而很快变暖,海洋由于比热容较大而变暖较慢,温度相对较低,海洋气压高于陆地,在近地表,气压梯度力由海洋指向大陆,风从海洋吹向大陆,夏季海陆交界处风向如图 1-13 所示。

我国大陆位于西北太平洋沿岸,东、南两面均濒临太平洋,海岸线 18000 多