

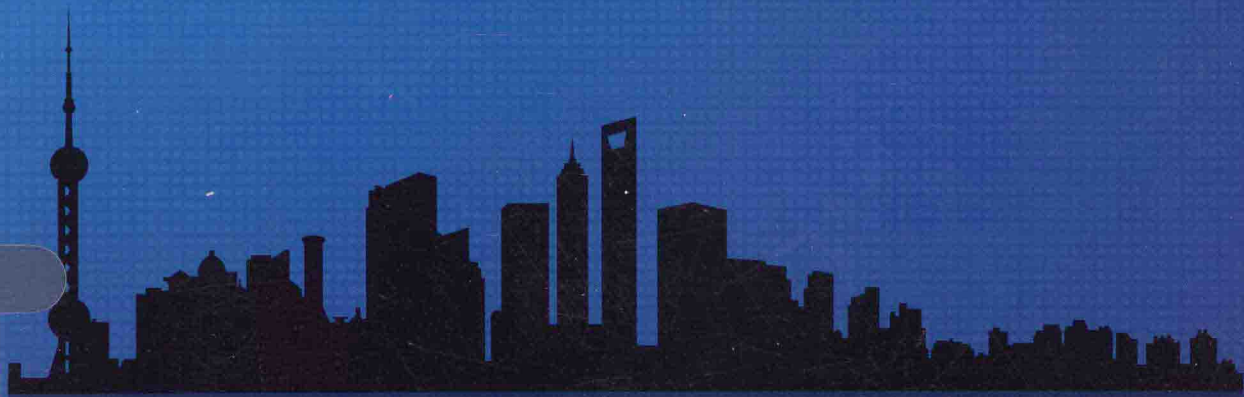
● “十二五”国家重点图书出版规划项目

● 现代土木工程精品系列图书

# 风工程与结构抗风设计

FENGGONGCHENG YU JIEGOUKANGFENG SHEJI

武 岳 孙 瑛 郑朝荣 孙晓颖 编著



哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
现代土木工程精品系列图书

# 风工程与结构抗风设计

武岳 孙瑛 郑朝荣 孙晓颖 编著

哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 提 要

本书首先概括介绍了结构风工程学科的发展与现状,然后重点介绍结构风工程学科的三个基础性问题:大气边界层风特性,结构风荷载特性和结构风振响应特性,详细阐述了相关的基本理论、特征规律和分析方法;结合2012版荷载规范和其他相关规范、规程,详细介绍了高层建筑、高耸结构和大跨度屋盖结构等典型结构形式的抗风设计方法;最后,介绍了结构风工程研究的两种基本手段,风洞试验和计算流体力学方法。为便于读者理解,在附录部分还给出了随机过程和随机振动分析方面的相关基础知识。

本书内容丰富、系统,结合工程实际,反映了作者多年的教学和科研成果,可作为土木工程专业本科及研究生相关课程的教材,也可供房屋设计人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

风工程与结构抗风设计/武岳等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.5

ISBN 978-7-5603-4683-0

I. ①风… II. ①武… III. ①抗风结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU352.204

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第083252号

策划编辑 王桂芝

责任编辑 李长波

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 13.25 字数 306千字

版 次 2014年5月第1版 2014年5月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4683-0

定 价 32.00元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

风灾是工程结构遭受的主要自然灾害之一。特别是近年来,以社会经济发展为需求背景,以结构分析和建造水平进步为技术支撑,工程结构向高、大、柔方向发展的趋势日益明显,从而导致结构风效应更加突出,风灾损失更加严重。在这种情况下,增进土木工程专业人员对结构风工程学科相关知识的认识,培养他们正确进行结构抗风设计的能力是十分必要的。

哈尔滨工业大学土木工程学科(原哈尔滨建筑大学)是国内较早也是较系统开展结构风工程相关理论与教学的高校机构之一。20世纪50年代,王光远院士、李桂青老师就开展了高耸结构风振随机响应分析方法的研究;其后,沈世钊院士在大跨柔性屋盖结构风振分析理论,欧进萍院士在结构风振控制和抗风动力可靠度性分析等方面,都开展了富有成效的研究工作。20世纪80年代末,哈尔滨工业大学在国内率先开设了“风工程与结构抗风设计”研究生课程,2008年又开设了本科生课程。

本书作者均来自于哈尔滨工业大学结构风工程研究团队,并且一直承担风工程相关课程的主讲工作,积累了较为丰富的教学经验和资料。将这些资料汇集整理成教材,一直是作者们的一个心愿和努力目标。由于结构风工程所涉及的知识点较多,而且很多理论和方法尚在不断发展之中,因此如何做到既系统全面,又深入浅出,还能够密切联系工程实践和体现学科前沿发展,是书稿编写过程中着力解决的问题。

本书的特色体现在以下三方面:

(1)综合国内外相关权威著作,并结合土木工程专业本科生和研究生的学习特点,较为系统和全面地阐述结构风工程的基础理论和方法;

(2)强调结构风工程基础理论与工程抗风设计方法相结合,注重培养学生的理论联系实际能力、独立分析能力和动手操作能力;

(3)鉴于结构风工程学科尚处于不断发展阶段,适当介绍了本学科的国内外最新研究动向和研究成果,为学生进一步从事相关科学研究工作奠定基础。

希望通过对本书的学习,使读者了解结构风工程学科的发展概况,熟悉近地风的基本特性及其工程表达方法;理解风荷载的特点和作用规律,掌握平均风压和脉动风压的确定方法;理解结构顺风向和横风向风效应分析的原理与方法;熟悉结构抗风设计规范,能够进行一些典型、常见结构形式的抗风设计;熟悉结构风洞试验和计算流体力学分析方法,能够在教师指导下完成简单结构的试验和分析工作。

本书撰写分工:武岳拟定全书内容和统稿,并具体撰写第1章和第5章部分内容;孙瑛负责撰写第3、4、6章和第5章部分内容;郑朝荣负责撰写第2章、附录和第5章部分内容;孙晓颖负责撰写第7章。

限于作者水平,疏漏和不足之处在所难免,作者热忱欢迎同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2014年2月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 自然界的风	1
1.1.1 风的成因	1
1.1.2 风的类型	3
1.1.3 风力等级	11
1.1.4 风灾害	12
1.2 结构风工程	15
1.2.1 结构风工程的研究内容	15
1.2.2 结构风工程的研究方法	16
1.2.3 结构风工程学科的发展	18
1.3 本书内容及学习方法	20
思考题	21
第 2 章 大气边界层风特性	22
2.1 大气边界层	22
2.2 平均风速特性	23
2.2.1 平均风速剖面	23
2.2.2 基本风速	26
2.2.3 非标准条件下的基本风速换算	29
2.3 脉动风速特性	32
2.3.1 湍流强度	32
2.3.2 湍流积分尺度	33
2.3.3 脉动风速功率谱	34
2.3.4 空间相关性	37
2.4 极值风速	38
思考题	39
第 3 章 风荷载与钝体绕流	40
3.1 钝体空气动力学基础	40
3.1.1 流体运动描述	40
3.1.2 流体控制方程	41
3.1.3 Bernoulli 方程	44

3.2	钝体绕流现象	46
3.2.1	边界层与流动分离	46
3.2.2	雷诺数效应	46
3.2.3	旋涡脱落频率和斯托罗哈数	50
3.3	结构风荷载	52
3.3.1	平均风荷载	52
3.3.2	脉动风荷载	58
	思考题	60
<b>第4章</b>	<b>结构风振响应分析</b>	<b>61</b>
4.1	概述	61
4.1.1	风致振动的类型	61
4.1.2	风振分析方法	61
4.2	顺风向随机风振响应分析	62
4.2.1	风速谱到风压谱的转换	62
4.2.2	风振响应的频域分析方法	64
4.2.3	背景响应与共振响应	68
4.3	横风向涡激共振响应分析	70
4.3.1	横风向涡激振动类型	70
4.3.2	横风向涡激共振分析方法	71
4.4	驰振与颤振分析	76
4.4.1	驰振	76
4.4.2	颤振	80
4.5	等效静风荷载	82
4.5.1	阵风荷载因子法	83
4.5.2	惯性力法	83
	思考题	84
<b>第5章</b>	<b>结构抗风设计</b>	<b>86</b>
5.1	结构抗风设计基本流程与方法	86
5.1.1	风场基本信息确定	86
5.1.2	主体结构抗风设计	90
5.1.3	围护结构抗风设计	94
5.2	高层建筑抗风设计	99
5.2.1	抗风设计要求	99
5.2.2	静力风效应分析	101
5.2.3	顺风向风振分析	104
5.2.4	横风向风振分析	104
5.2.5	扭转风振分析	106

---

5.2.6	风效应组合 .....	108
5.2.7	风振舒适度分析 .....	110
5.3	高耸结构抗风设计 .....	112
5.3.1	抗风设计要求 .....	113
5.3.2	静力风效应分析 .....	113
5.3.3	动力风效应分析 .....	118
5.4	大跨度屋盖结构抗风设计 .....	121
5.4.1	抗风设计要求 .....	121
5.4.2	静力风效应分析 .....	122
5.4.3	动力风效应分析 .....	123
5.5	改善结构抗风性能的措施 .....	124
	思考题 .....	126
<b>第 6 章</b>	<b>风洞与风洞试验 .....</b>	<b>127</b>
6.1	风洞 .....	127
6.1.1	基本构成与分类 .....	127
6.1.2	风洞发展史 .....	129
6.2	相似性理论 .....	130
6.2.1	相似准则 .....	130
6.2.2	风洞试验中的相似条件确定 .....	132
6.2.3	基本试验参数的确定 .....	135
6.3	风洞试验技术 .....	137
6.3.1	大气边界层风场模拟 .....	137
6.3.2	风洞测试设备 .....	140
6.3.3	风洞试验设计要点 .....	144
	思考题 .....	152
<b>第 7 章</b>	<b>计算风工程 .....</b>	<b>153</b>
7.1	概述 .....	153
7.1.1	计算流体动力学的定义及特点 .....	153
7.1.2	计算流体动力学的求解过程 .....	153
7.2	控制方程的离散化方法 .....	154
7.2.1	有限差分法 .....	155
7.2.2	有限体积法 .....	158
7.3	湍流模拟方法 .....	160
7.3.1	雷诺平均湍流模型 .....	161
7.3.2	大涡模拟 .....	165
7.4	计算风工程的应用 .....	168
7.4.1	计算要点 .....	168



7.4.2 计算方法选择与计算条件设定 .....	172
7.4.3 计算结果分析 .....	175
思考题 .....	179
附录 1 随机过程基础 .....	180
附录 2 结构随机振动分析基础 .....	194
参考文献 .....	204

# 第1章 绪论

风是一种常见的自然现象,与人类的生产生活息息相关。但是你真的了解风吗?风是怎样形成的?有哪些主要类型?风对建筑结构会产生哪些影响?如何在结构设计中考虑风的作用?等等。对上述问题的认识和探索构成了结构风工程学科发展的基本脉络。本章将概要介绍风的成因、类型与灾害,以及结构风工程学科的发展与现状,本书主要内容及学习方法等,希望通过这些介绍使读者对风工程与结构抗风设计的相关内容有所了解,为后续各章的学习奠定基础。

## 1.1 自然界的风

### 1.1.1 风的成因

风,简单地讲,就是空气相对于地球表面的运动。空气运动的最直接原因是在其内部的不同区域存在气压差,而这种气压差的产生又往往与热力学因素有关。例如,当某处空气变热,就会因受热膨胀而上升,导致该处的气压降低,周围的冷空气从旁边流过来补充,由此就形成了风。

关于空气流动的热力学原理,汉弗莱(Humphreys)曾于1940年提出一个理想模型,用来说明温度对风形成的影响。设想有两个完全相同的容器A和B,在这两个容器的上部和底部分别用带阀门的管路连通,如图1.1所示。首先在保持阀门1和2打开的状态下在容器A和B中注入温度相同的液体(如水)至高度 $a$ 处,之后关闭阀门1和2;保持容器B内温度不变而提高容器A内温度,由于液体受热膨胀,容器A内的液面会上升至高度 $b$ 处;此时在阀门2处左右两侧的压力是相等的,因为A、B容器中的液体质量并未发生变化;但在阀门1处,由于存在压差( $b-a$ ),因此左侧的压力要大于右侧;如果先打开阀门1,流体将经由上面的管路从A流向B;再打开阀门2,由于容器B内的液体质量增加,容器A内的液体质量减少,导致在阀门2处容器A内的压强小于容器B,因此液体将会通过下面的管路由B流向A;假设容器A和B的温差保持不变,且没有其他能量损失,则这种循环流动会一直进行下去。

我们知道,太阳是地球获取能量的主要来源。太阳辐射到地球的能量有一部分被大气反射回宇宙,有一部分被大气吸收,余下的到达地球表面。地球表面在被加热后,会以地面辐射的形式向外释放热量。大气对太阳短波辐射的直接吸收很少,主要是吸收地球表面长波辐射的热量。由于地球表面受到太阳辐射的能量是不均匀的,受太阳照射角度、大气透明度、云量、海拔高度和地理纬度的影响,此外地球表面的水陆分布也是不均匀的,从而使大气的受热也不均匀,存在温度差和气压差。地球上温差最大的地方是两极和赤道,如果把容器A和B设想为赤道和两极上空的空气柱,则在忽略其他影响因素的条件

下,在地球表面就会存在如图 1.2 所示的大气环流。

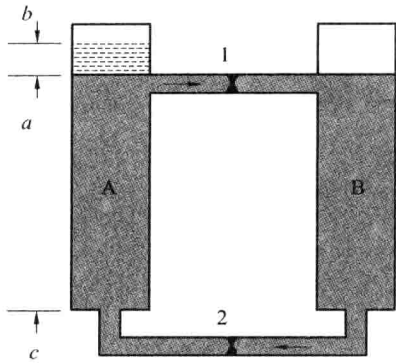


图 1.1 Humphreys 环流模型

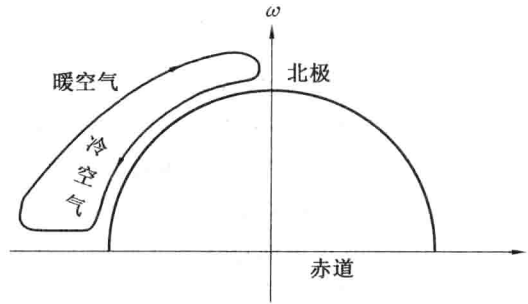


图 1.2 大气环流的简化模型

当然,实际的大气流动要比图 1.2 复杂得多。除了前面介绍的太阳辐射和地表水陆分布外,地球自转偏向力也是一个重要影响因素。所谓地球自转偏向力是指由于地球沿其主轴自西向东旋转而产生的偏向力,使得在北半球移动的物体(包括空气微团)的轨迹会向右偏斜,而在南半球移动的物体的轨迹会向左偏斜。法国物理学家科里奥利(Coriolis)于 1835 年首次详细研究了这种现象,因此此现象也被称为“科里奥利效应”。

地球自转偏向力(也称科里奥利力)的矢量表达式为

$$\mathbf{F}_c = 2m(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}) \quad (1.1)$$

- 其中
- $m$ ——空气微团的质量;
  - $\boldsymbol{\omega}$ ——地球自转角速度矢量;
  - $\mathbf{v}$ ——空气微团相对于地球的速度。

如图 1.3 所示, $\mathbf{F}_c$  垂直于  $\boldsymbol{\omega}$  和  $\mathbf{v}$ , 其方向由矢量乘积(右手)法则确定, 大小为  $2m|\boldsymbol{\omega}||\mathbf{v}|\sin\phi$ , 其中  $\phi$  为  $\boldsymbol{\omega}$  和  $\mathbf{v}$  的夹角。由图 1.3 不难发现, 当空气微团位于赤道附近时,  $\phi$  接近于 0, 科里奥利力最小; 而当位于两极附近时达到最大。

需要说明的是,科里奥利力本质上并不真是力,而是一种惯性作用。设想在一个绕其中心逆时针旋转的平台上,从中心向外滚动一个皮球,如图 1.4 所示。由于平台上离中心越远处的转动切线速度越快,因此当球向外滚时,球下转台的切线速度会逐渐增大,但是由于惯性效应使得球本身的切向线速度总是滞后于其下转台的速度,这相当于使球受到了一个与旋转方向相反的推力,其运行轨迹就会朝顺时针方向弯曲。反之,如果从靠近外缘的一点向中心滚动皮球,球本身的切向线速度总是快于其下转台的速度,相当于使球受到一个与旋转方向相同的推力,其运行轨迹也会朝顺时针方向弯曲。

在日常生活中,我们并没有感觉到科里奥利效应,这是因为人的质量较轻、运动速度较慢,导致科里奥利力很小。即便是一辆重 2 t 的越野车,当其在北纬 45° 附近以每小时 120 km 的速度行驶时,所受到的科里奥利力也不到 1 kg。但是科里奥利效应对于大气环流的影响却是十分显著的。它不仅会使地球上沿南北向流动的气流发生东西向偏转,而且当某处出现低气压时,周围的空气会沿着稍微偏离低气压中心的路径向中心汇聚,从而在局部形成旋涡。这种现象类似于江河海流中的旋涡,因而被称为气旋。夏秋季节,在我

国东南沿海经常出现的台风就是热带气旋发展的结果。

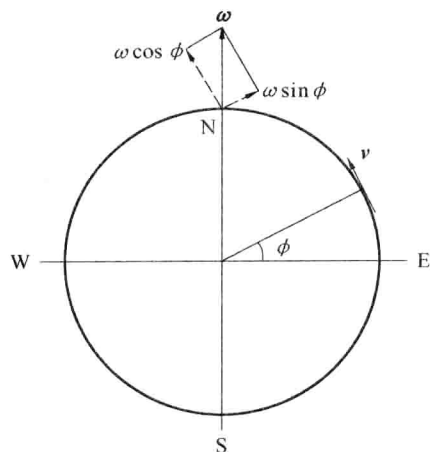


图 1.3 科里奥利力示意图

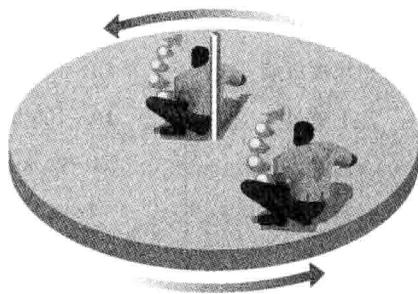


图 1.4 旋转平台上的科里奥利效应

### 1.1.2 风的类型

由于大气中的热力和动力现象存在明显的时空不均匀性,使得大气运动如同一条湍流不息的河流,既有整体流动,也有很多局部的旋涡和激流。在气象学中,将具有一定的温度、气压或风等气象要素空间结构特征的大气运动系统称为天气系统。如低压、高压、气旋、反气旋、冷锋、暖锋等,都是较为常见的天气系统。各种天气系统都有一定的空间范围(也称空间尺度)和一定的生成、发展和消亡过程(也称时间尺度)。不同天气系统的空间尺度和时间尺度差别很大,空间尺度(通常指水平尺度)可以从数百米到数千千米,时间尺度可以从数分钟到数天。对于天气系统的尺度划分,目前尚无统一标准。大致可认为,水平尺度在 400 km 以上的为大尺度系统,而在 4~400 km 之间的为中尺度系统,小于 4 km 的为小尺度系统。表 1.1 为日本学者 Fujita 给出的地面附近不同天气系统的水平尺度与时间尺度的特征。可以看出,水平尺度越大的天气系统对应的时间尺度也越长。

表 1.1 地面附近不同天气系统的水平尺度与时间尺度的特征

天气系统	水平尺度	时间尺度	最大风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
温带气旋	500~2 000 km	3~15 d	55
冷锋	500~2 000 km	3~7 d	25
反气旋	500~2 000 km	3~15 d	10
暖锋	300~1 000 km	1~3 d	15
飓风	300~2 000 km	1~7 d	90
热带气旋	300~1 500 km	3~15 d	33
热带低压	300~1 000 km	5~10 d	17
干锋	200~1 000 km	1~3 d	20

续表 1.1

天气系统	水平尺度	时间尺度	最大风速/( $m \cdot s^{-1}$ )
小型台风	50~300 km	2~5 d	50
中尺度高压	10~500 km	3~12 h	25
阵风锋	10~300 km	0.5~6 h	35
中尺度气旋	10~100 km	0.5~6 h	60
下坡风	10~100 km	2~12 h	55
大暴流	4~20 km	10~60 min	—
微暴流	1~4 km	2~15 min	—
龙卷	30~3 000 m	0.5~90 min	100
抽吸性旋涡	5~50 m	5~60 s	140
沙尘暴	1~100 m	0.2~15 min	40

注:取自 Fujita T. T., 1986

包含强风的天气系统可称为风气候(Wind Climate)。以下介绍一些典型的、对土木工程影响较大的风气候。

### 1. 大气环流

大气环流是指在全球范围由太阳辐射和地球自转作用形成的大尺度的大气运动,它决定了各地区天气的形成与变化。根据罗斯贝(Rossby)提出的三圈环流模型(图 1.5),

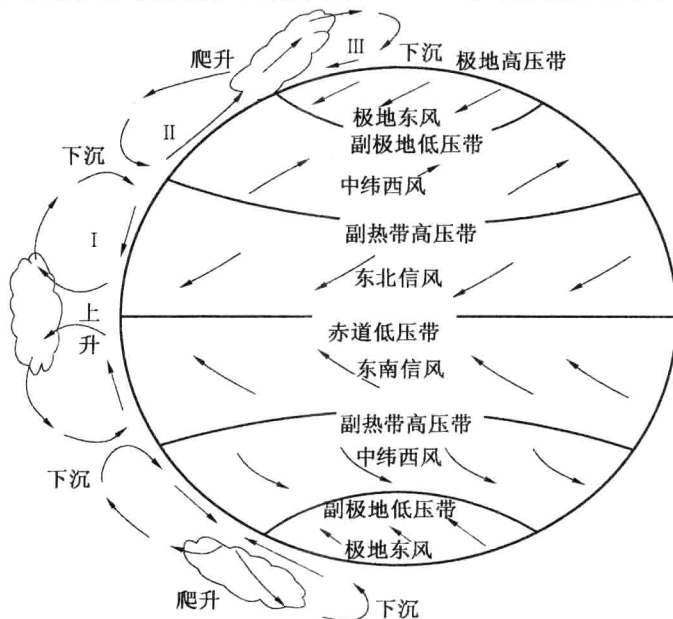


图 1.5 三圈环流理论模型示意图

大气环流由低纬度环流圈、中纬度环流圈和高纬度环流圈组成。这三个环流圈在地面形成了三个风带(即信风带、西风带和极地东风带)及四个气压带(即赤道低压带、副热带高压带、副极地低压带和极地高压带)。三圈环流模型较之图 1.2 所示的单圈环流模型有所进步,较好地反映了大气环流的基本情况,即由太阳辐射差异引起的赤道和两极之间的温差是引起和维持大气环流的根本原因,地球自转运动产生的偏向力使经向环流变为纬向环流;赤道两侧的气流是上升的,因而这里是地球上云、雨最多的地带;30°纬度附近的气流是下沉的,故这一地带少雨而干旱。但该模型是在假设地表均匀的情况下建立的,而实际上地球表面存在海陆和地形的差异。因此,它仍然是一个理想模型,与真实的大气环流存在一定的差异。

季风是由大气环流、海陆分布和大陆地形等多种因素造成的,是以年为周期的一种区域性的大气运动。在夏季,由于海洋比陆地增温慢,因此海洋上的空气比陆地上的冷,此时海洋相当于前面提到的 Humphreys 模型中的容器 B,陆地相当于容器 A,因此近地风从海洋吹向陆地。反之,在冬季,陆地上的空气较海洋上的冷,因此近地风从陆地吹向海洋。由于亚洲大陆的幅员辽阔,所以受季风的影响非常显著,呈现出季节性气候变化特征。图 1.6 所示为我国冬季的季风分布情况。



图 1.6 我国冬季季风分布情况

## 2. 热带气旋

在热带或副热带海洋上产生的强烈的空气旋涡称为热带气旋,其直径通常为几百千米,厚度为几十千米。强烈的热带气旋,不但形成狂风、巨浪,而且往往伴随发生暴雨、风暴潮,造成严重的灾害。热带气旋按中心附近地面最大平均风速划分为六个等级:

- (1)热带低压:风速 10.8~17.1 m/s,即风力 6~7 级。
- (2)热带风暴:风速 17.2~24.4 m/s,即风力 8~9 级。
- (3)强热带风暴:风速 24.5~32.6 m/s,即风力 10~11 级。

- (4) 台风: 风速 32.7~41.4 m/s, 即风力 12~13 级。
- (5) 强台风: 风速 41.5~50.9 m/s, 即风力 14~15 级。
- (6) 超强台风: 风速  $\geq 51.0$  m/s, 即风力 16 级或以上。

热带气旋的能量来源于海洋表面水汽冷凝所释放的潜热, 通常发生在纬度  $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$  之间的热带洋面上。最初, 如果某处洋面比较热, 此处的空气受热上升, 气压变低, 周围的空气就会赶来补充这个低压区域。由于地球自转偏向力的作用, 赶来的空气不会沿径向直达低气压中心, 而是盘旋着靠近中心。于是, 在热带洋面上就形成了一个大规模的旋涡。为了给气旋持续提供能量, 海洋的温度至少要保持  $27^{\circ}\text{C}$  以上。如果条件合适, 这个气旋的能量就会逐渐增强, 直至形成台风。在赤道南北纬  $5^{\circ}$  之间, 海水温度虽高, 但地球自转偏向力极小或为零, 热带气旋无法形成。而在高纬度洋面上, 由于水温较低等原因, 也难以形成热带气旋。只有少数热带气旋能够发展为热带风暴, 能够由热带风暴发展为台风的则更少。

受地球自转偏向力的影响, 北半球的台风绕中心呈逆时针方向旋转, 在南半球则相反。越靠近台风中心, 气压越低, 风速越大, 但在台风中心却是一片风平浪静的晴空区, 即出现所谓的台风眼。这是因为中心附近的风转速很快, 由于离心力的作用反而无法靠近中心。图 1.7 所示为一成熟阶段的台风结构垂直剖面图, 可以看出它主要由五个区组成。其中, I 区是台风中心, 这里的空气比较干燥, 空气在眼壁附近缓慢上升, 然后在其中中心下沉。II 区为旋涡区, 这里存在很强的上升潮湿气流, 气流在上升过程中发生水汽凝结, 产生暴雨并释放出巨大的潜热。气流从 II 区流出进入外流层, 即 III 区。IV 区是涡状区, 气流非常缓慢地下沉到边界层, 即 V 区。

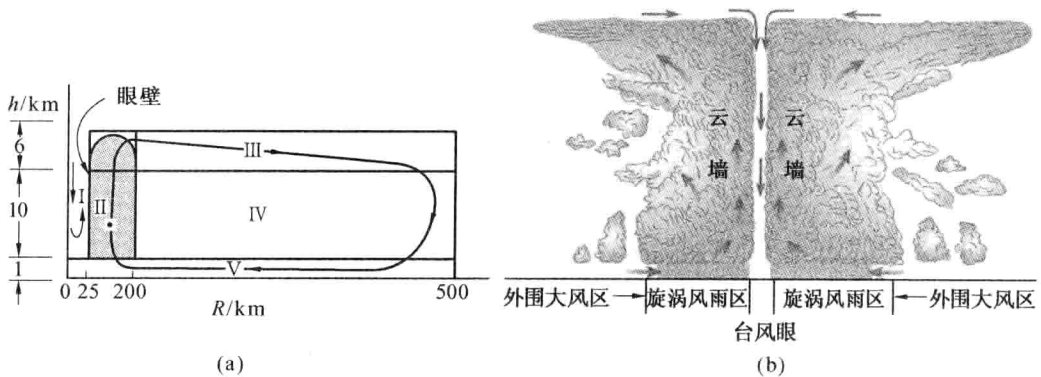


图 1.7 台风的结构

台风在绕自身中心急速旋转的同时, 也随着周围大气整体向前移动。台风的整体平均移动速度为  $5\sim 50$  km/h。图 1.8 为全球范围内的台风移动的平均方向示意图。可以看出, 受大气环流的影响, 台风形成后会向纬度较高的地区运动。但是在台风登陆后, 由于得不到足够的水汽和能量供给, 会很快减弱消失, 因而台风不会运动到纬度太高的地区。

每一个台风都会被编上一个四位数的号码, 其中前两位为年份, 后两位为顺序号。同时, 为了提醒公众对台风危害的注意, 还会给台风起一个名字。20 世纪初, 美国人曾用女

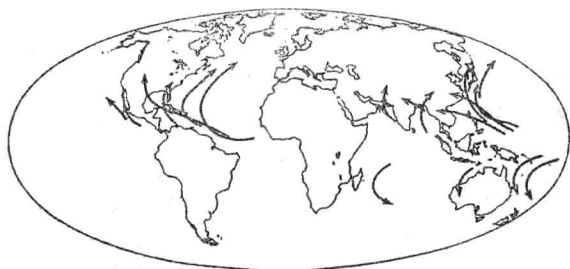


图 1.8 全球范围内的台风移动的平均方向

孩的名字为台风命名。2000年起,台风命名改由国际气象组织中的台风委员会负责。对于西北太平洋及南中国海地区的台风,先由台风委员会的14个成员(包括中国、朝鲜、韩国、日本、柬埔寨、越南等)各提供10个名字,制成包含140个名字的命名表,然后按顺序年复一年地循环重复使用。对于造成特别严重损失的台风,成员可申请将其名字从命名表中永久删去,再补充一个新名字。台风的实际命名工作交由区内的日本气象厅负责。每当日本气象厅将西北太平洋或南中国海上的热带气旋确认为热带风暴强度时,即根据列表给其命名,并同时赋予一个四位数的编号。例如0312,即2003年第12号热带风暴,英文名为KROVANH,中文名为“科罗旺”;0313即2003年第13号热带风暴,英文名为DUJUAN,中文名为“杜鹃”。台风中文名字的命名,由我国大陆气象局与我国香港和澳门的气象部门协商后确定。

此外需要说明的是,出现在西北太平洋和我国南海的强烈热带气旋被称为“台风”,而发生在大西洋、加勒比海和北太平洋东部的强烈热带气旋则被称为“飓风”,这只是称呼习惯上的不同,两者实质是一样的。

### 3. 温带气旋

温带气旋是出现在中高纬度地区具有冷中心性质的近似椭圆形旋涡,直径平均1000 km,小的也有几百千米,大的可达3000 km或以上。温带气旋从生成、发展到消亡一般为2~6 d。其对中高纬度地区的天气变化有重要影响,常伴有多风雨天气,有时还伴有暴雨或强对流天气,近地面最大风力可达10级以上。

温带气旋的形成与沿锋面两侧的气团相互作用有关。所谓气团是指气象要素(主要指温度和湿度)水平分布比较均匀的大范围的空气团。按气团的热力性质不同,可分为冷气团和暖气团。不同气团之间的交界面称为锋面,锋面与地面的交线称为锋线。锋面和锋线可统称为锋。根据锋面向暖空气一侧或冷空气一侧的移动,又可分为冷锋或暖锋,如图1.9所示。由于锋两侧的气团性质上有很大差异,所以锋附近空气运动活跃,在锋中有强烈的升降运动,气流极不稳定。

温带气旋的演变过程,大致可分为初生期、发展期、成熟期及消亡期。在初生期,地面上有一条静止锋,锋北面是冷空气,锋南面是暖空气,冷空气自东向西运动,暖空气自西向东运动(图1.10(a))。这时如果出现一个小扰动,暖空气稍稍上升到冷空气上面,波峰附近的气压就开始下降。在初始扰动发生后,气压分布有利于在波峰附近形成一个气旋环流。冷锋向西行进和暖锋向东撤退,使整个锋面波大致沿着摩擦层以上的暖区气流方向



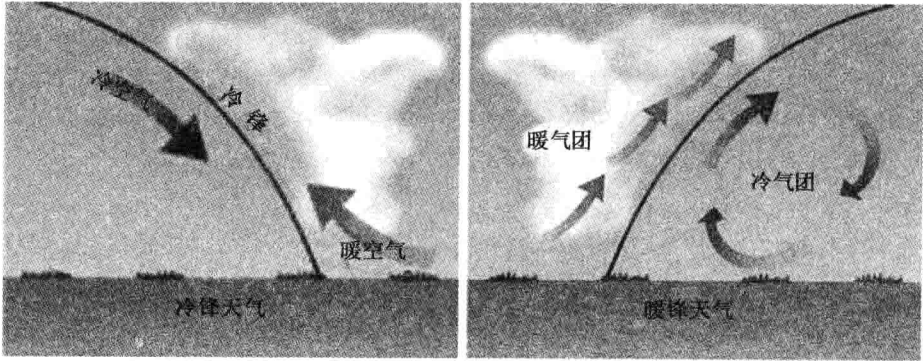


图 1.9 冷锋和暖锋

前进(图 1.10(b))。随着初始扰动的振幅逐渐增大,同时气旋中心的气压不断降低,周围的环流增强,而且冷锋一般比暖锋移动得更快。最后冷锋追上暖锋,暖空气完全从地面抬升到高空。这种过程称为“锢囚”(图 1.10(c))。随着气旋的进一步发展,冷锋追上暖锋的地方(即锢囚锋)离气旋中心越来越远,锢囚的范围扩大,气旋的范围也变大,并转变成对流层下部的一个大冷涡。最后气旋大体上成为一个正压旋涡,丧失了锋的特性,并且由于摩擦作用,气旋逐渐消散,整个过程完结(图 1.10(d))。

温带气旋也可由热带气旋转变而成。当热带气旋北移至温带,受西风槽影响而失去了热带气旋的特性,即转变成温带气旋。

#### 4. 雷暴

雷暴是伴有雷击和闪电的局地强对流天气,通常伴有暴雨和大风,有时也伴有冰雹或龙卷。雷暴的发展可大致分为积云、降水和消散三个阶段,如图 1.11 所示。图 1.11 中的 ft 代表英尺,1 ft=0.304 8 m。在积云阶段,地面暖湿空气上升在高空形成积雨云,在积雨云中悬浮有大量的水滴和冰晶。随着水蒸气的不断凝结,上升气流已不足以托起那些悬浮的水滴和冰晶,从而产生大规模的降雨,并形成很强的下沉冷气流(即下击暴流),气流在地面以壁急流形式扩散,形成向四面铺开的环状涡(图 1.12)。在雷暴消散阶段,由于上升气流逐渐减弱,系统能量来源被切断,雷暴系统消散。雷暴风的水平尺度仅为几百米至几千米,铅直范围 100 m 左右,但特点是突发、风速急剧增大,可达 50~100 m/s,破坏力极强。根据澳大利亚的一项统计,在非台风区大约有一半的强风事件与雷暴有关。图 1.13 为 1983 年 8 月 1 日在美国华盛顿的安德鲁空军基地测得的由雷暴产生的风速记录,可以看到其瞬时最大风速达到 67 m/s,而且在峰值通过前后风向发生了明显的翻转。

#### 5. 龙卷

龙卷俗称“龙卷风”,是一种出现在强对流云内的漏斗状旋涡(图 1.14),具有活动范围小、时间过程短、风速高、破坏性极强的特点。龙卷的直径很小,一般在几米到几百米之间,持续时间一般仅为几分钟到几十分钟。但是其风速最大的可达到 100~200 m/s,且急速旋转,可拔树倒屋,对生命财产破坏性极大。龙卷的移动路径多为直线,平均移动速度约 15 m/s,最快的可达到 70 m/s,移动距离一般为几百米到几千米。所以,龙卷的破坏往往是沿一条线。