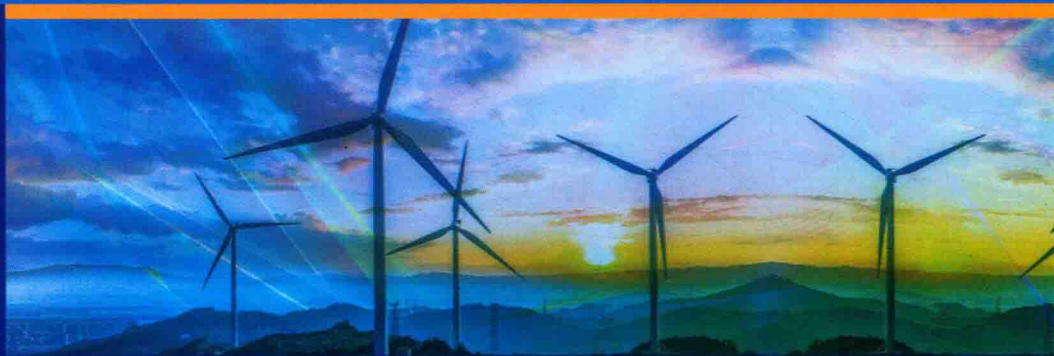


江苏高校品牌专业建设工程资助项目

飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材

普通高等教育“十三五”规划教材



# 结构风工程概论

柯世堂 王同光 编著



科学出版社

飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材  
普通高等教育“十三五”规划教材

# 结构风工程概论

柯世堂 王同光 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以结构风工程学科框架为主体,结合现阶段学科的主要研究方向,致力于构建开放而有力的教材体系,提高学生的基本学科素养。通过学习本书,读者可以了解结构风工程学科的发展概况,熟悉近地风的基本特性,理解结构风荷载的特点和作用规律,掌握结构风效应分析的原理和方法,运用结构抗风设计规范,并为结构抗风分析和设计打下基础。

本书采用“理论-应用-规范”的鼎式结构,结合实际工程对学科研究方向进行阐述,是对目前结构抗风安全相关研究内容的归纳和提炼。本书既可作为土木工程专业高年级学生的教学用书,也可作为结构抗风设计和结构风工程研究的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

结构风工程概论/柯世堂,王同光编著. —北京:科学出版社,2018.6

(飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材·普通高等教育“十三五”规划教材)

ISBN 978-7-03-055881-7

I. ①结… II. ①柯… ②王… III. ①风洞-高等学校-教材 IV. ①V211.74

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第305538号

责任编辑:许健/责任校对:谭宏宇

责任印制:黄晓鸣/封面设计:殷靓

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年6月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:350 000

定价:56.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材

编  
委  
会

名誉主任：赵淳生 聂 宏

主 任：夏品奇

副 主 任：姚卫星 高存法 蒋彦龙

委 员：（按姓名笔画排序）

王立峰 王华明 邓宗白 史治宇

刘先斌 闫再友 余雄庆 陆志良

陈仁文 陈仁良 金栋平 周储伟

郑祥明 裘进浩

## 丛 书 序

飞行器是现代最快速的交通工具，是现代战争最重要的空中平台和武器装备，是人类探索宇宙的重要工具，因此，飞行器在军民两用和人类发展中都具有十分重要的地位，飞行器技术已成为现代高科技的重要标志。飞行器的核心技术是飞行器设计，随着科学技术的不断发展和对飞行器需求的不断增加，飞行器设计呈现出快速发展的趋势，同时也面临着许多挑战，飞行器设计的基础是工程力学，以飞行器为背景的工程力学伴随着飞行器设计技术的发展而发展，两者相辅相成，互相促进，共同发展。

南京航空航天大学飞行器设计与工程、工程力学两个本科专业，以航空宇航科学与技术、力学两个一级学科国家重点学科为依托，以航空航天事业的建设者和开拓者为人才培养目标，持续不断地进行教育教学改革，为国家培养了一大批飞行器设计创新人才，校友中涌现出许许多多国家重点飞行器型号的设计师，在校生中涌现出许许多多国内外大学生创新竞赛的冠军，已成为国家级特色专业。

近年来，随着教育教学改革的不断深入，本专业进一步注重基础、创新、实践、国际“四位一体”的培养，加快推进专业建设和人才培养。2015年，江苏省启动了“江苏高校品牌专业建设工程（一期）”，南京航空航天大学飞行器设计与工程、工程力学两个专业双双入选江苏省品牌专业建设(A类)，又为本专业建设和人才培养注入了新动力，乘此契机，编写出版“飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材”具有十分重要的意义。

该系列教材将突出飞行器设计的专业基础和专业知识系统性，突出飞行器设计的传统经典理论与现代技术方法的结合，突出南京航空航天大学飞行器设计与工程、工程力学两个专业“围绕航空航天高科技、注重理工融合、突出工程实践”的特色。

希望该系列教材能成为我国飞行器设计的特色教材，能为我国飞行器设计创新人才的培养做出重要贡献。同时，也希望大家对该系列教材提出宝贵意见，使之更加完善。

编委会

2016年8月

# 前 言

风灾是工程结构最易遭受的自然灾害之一，其造成的结构破坏和经济损失十分严重。随着我国超大跨度空间结构、超高层建筑和特大跨度桥梁的陆续新建，作用在结构上的风荷载及其引起的风效应问题日益突出，由风灾事故造成的人员伤亡和经济损失日益引起人们的普遍关注。

结构风工程是一门研究和解决结构设计中风荷载和风效应问题的学科，具有很强的理论性和应用性，是目前土木工程领域的研究热点之一，也是风工程学者和结构工程师之间联系的桥梁。其研究内容是结构抗风设计的指南，已成为土木工程专业最重要的专业基础课程之一，结构风工程的学习对于培养土木工程专业人员的抗风设计能力十分必要。

本书以结构风工程学科框架为主体，结合现阶段学科主要研究方向，致力于构建开放而有力的教材体系，提高学生的基本学科素养。本书采用“理论-应用-规范”的鼎式结构，结合实际工程对学科研究方向进行阐述，教材内容是对目前结构抗风安全相关研究内容的归纳和提炼。本书设置了部分提高章节，以※标识，可供学有余力的学生选修学习。通过本书的学习，读者可以了解结构风工程学科的发展概况，熟悉近地风的基本特性，理解结构风荷载的特点和作用规律，掌握结构风效应分析的原理和方法，运用结构抗风设计规范，为结构抗风分析和设计打下基础。

全书共7章。第1章介绍风和风灾的基本概念，以及结构风工程学科的主要内容、研究方法和学科发展；第2章阐述大气边界层中风的基本概念和特性；第3章概述结构风工程的基本理论；第4章介绍结构风荷载的基本概念和计算方法，并给出部分实际工程算例供读者参考；第5章阐明结构风效应的基本概念和相关理论；第6章和第7章介绍目前结构风工程领域常用的两种研究方法——风洞试验技术和计算风工程，在阐述理论的同时加入部分实际应用案例。附录总结归纳中国、美国、日本等国家与地区的风荷载相关规范和注解，并简要介绍南京航空航天大学风洞实验室基本概况。

本书作者均来自南京航空航天大学结构风工程研究团队，团队成员一直承担风工程相关课程的教学工作和国家及省部委结构风工程相关课题的研究工作，积累了较为丰富的教学经验和研究成果。

本书在撰写过程中得到了同济大学葛耀君教授和赵林教授、南京航空航天大学艾军教授与常州工学院杨青等专家学者的指导及审阅。同时要特别感谢作者的研究生王浩、杜凌云、余玮、余文林、徐璐、孙捷、王晓海、朱容宽、董依帆、梁俊和朱鹏等的大力支持与帮助，在内容章节编排和文字校核等方面提出了诸多宝贵的意见。正是在他们的通力协作下，本书才得以与各位读者见面，在此表示衷心的感谢。

感谢国家重点基础研究发展计划（973计划，2014CB046200）、国家自然科学基金国际合作项目（5171101042）、国家自然科学基金面上项目（U1733129）、国家自然科学基金青年科学基金项目（51208254）、中国博士后科学基金（2013M530255、2015T80551）、

江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20160083)、江苏省自然科学基金青年基金(BK2012390)和江苏省博士后科学基金(1202006B)的联合资助,同时感谢南京航空航天大学学术著作出版基金的资助。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,谨盼各界人士予以指正,再版时加以修正。

编 者

2017年11月

# 目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪言	1
1.1 风的基本概念	1
1.1.1 风的成因	1
1.1.2 风力等级	2
1.2 自然风分类	2
1.2.1 季风	3
1.2.2 热带气旋	3
1.2.3 温带气旋	5
1.2.4 龙卷风	5
1.2.5 雷暴	7
1.3 风致灾害	7
1.3.1 基本情况	7
1.3.2 典型案例	7
1.4 风对结构的作用	13
1.4.1 风速风压关系	13
1.4.2 结构风效应	13
1.5 结构风工程	16
1.5.1 研究内容	16
1.5.2 研究方法	17
1.5.3 学科发展	19
思考题	20
第 2 章 大气边界层风特性	21
2.1 大气边界层简介	21
2.2 平均风剖面	22
2.2.1 对数律	22
2.2.2 指数律	23
2.2.3 幂函数律	24
2.3 特异风剖面*	25
2.3.1 台风	25
2.3.2 雷暴风	26
2.3.3 龙卷风	26



2.4 层流和湍流	27
2.4.1 雷诺数效应	27
2.4.2 分类描述	28
2.5 湍流流动特性	29
2.5.1 湍流强度	30
2.5.2 湍流积分尺度	31
2.5.3 湍流功率谱	32
2.5.4 空间相关性	33
2.5.5 阵风因子	34
2.6 不同地面粗糙度划分标准	34
2.6.1 变化规律	35
2.6.2 计算方法	37
2.7 风速地形修正	38
2.7.1 地形影响	39
2.7.2 地形修正系数	39
2.7.3 地形对特异风的影响	41
2.7.4 算例分析	41
思考题	44
<b>第3章 结构风工程基础知识</b>	<b>45</b>
3.1 结构动力学基础	45
3.1.1 基本方程	45
3.1.2 单自由度体系振动	45
3.1.3 多自由度体系振动	49
3.2 随机振动基础	52
3.2.1 随机变量	52
3.2.2 随机过程	55
3.2.3 单自由度体系随机振动	58
3.2.4 多自由度体系随机振动	61
3.3 流体力学基础	62
3.3.1 流体基本知识	62
3.3.2 流体运动描述	64
3.3.3 流体与流动分类	65
3.3.4 流体力学基本方程	66
3.4 结构抗风安全性和可靠度	68
3.4.1 结构安全性指标	68
3.4.2 结构可靠指标	69
3.4.3 结构可靠度计算方法	71
3.4.4 中国标准可靠指标	76
3.4.5 抗风可靠指标简化算法	77

思考题 .....	77
第 4 章 结构风荷载 .....	78
4.1 平均风荷载 .....	78
4.1.1 基本风速和基本风压 .....	78
4.1.2 平均风荷载 .....	80
4.2 脉动风荷载 .....	86
4.2.1 准定常假定 .....	86
4.2.2 非定常假定 .....	88
4.2.3 风速功率谱 .....	90
4.2.4 空间相干函数 .....	93
4.3 极值风荷载* .....	94
4.3.1 极限分布原理 .....	94
4.3.2 极值分布 .....	97
4.3.3 风速母体分布 .....	99
4.3.4 阈值法 .....	101
4.3.5 非高斯风压特征 .....	102
4.3.6 极值风压算法 .....	103
4.4 算例分析 .....	105
4.4.1 算例 1 .....	105
4.4.2 算例 2* .....	112
思考题 .....	118
第 5 章 结构风效应 .....	119
5.1 静力风效应 .....	119
5.1.1 静力风荷载与三分力系数 .....	119
5.1.2 风致静力失稳模型 .....	122
5.2 风致振动 .....	124
5.2.1 风振类型 .....	124
5.2.2 风振分析方法 .....	124
5.3 顺风向抖振 .....	124
5.3.1 风振系数 .....	125
5.3.2 位移响应 .....	126
5.3.3 背景响应与共振响应* .....	127
5.4 横风向涡激共振 .....	130
5.4.1 涡激共振分类 .....	131
5.4.2 判定标准 .....	131
5.4.3 分析方法 .....	133
5.5 自激振动 .....	134
5.5.1 驰振 .....	135
5.5.2 颤振 .....	137

5.6	等效静风荷载*	139
5.6.1	基本概念	139
5.6.2	计算方法	139
5.6.3	算例分析	144
5.7	风致疲劳*	145
5.7.1	计算方法	145
5.7.2	算例分析	147
	思考题	149
<b>第6章</b>	<b>风洞试验技术</b>	<b>150</b>
6.1	风洞与风洞试验概况	150
6.1.1	风洞基本构成	150
6.1.2	风洞分类	151
6.1.3	风洞发展史	153
6.2	相似性理论	154
6.2.1	相似准则	154
6.2.2	相似条件确定	155
6.2.3	基本试验参数的确定	157
6.3	风洞试验设备与流场模拟	159
6.3.1	风洞测量设备	159
6.3.2	大气边界层模拟	161
6.4	建筑模型风洞试验	162
6.4.1	建筑模型风洞试验类型与用途	162
6.4.2	刚体模型测压试验	163
6.4.3	高频天平测力试验	164
6.4.4	气动弹性测振试验	166
6.5	算例分析	168
6.5.1	电视塔高频天平测力试验	168
6.5.2	超高层建筑刚体模型测压试验	171
6.5.3	桥梁气动弹性测振试验	174
	思考题	177
<b>第7章</b>	<b>计算风工程</b>	<b>178</b>
7.1	计算风工程理论基础	178
7.1.1	计算流体动力学概述	178
7.1.2	计算流体力学基本方程	179
7.2	湍流数值模拟方法及物理模型	183
7.2.1	模拟方法介绍	183
7.2.2	RANS 湍流模型分类	186
7.2.3	模型的选择与应用	193
7.3	网格划分技术	194

7.3.1 网格划分简介	194
7.3.2 结构与非结构网格	194
7.3.3 壁面与近壁面网格处理	195
7.3.4 网格质量评价标准	196
7.4 边界条件与求解设置	197
7.4.1 边界条件类型与设定	197
7.4.2 计算参数求解设置	200
7.4.3 数值模拟稳态计算策略	202
7.5 算例分析	205
7.5.1 大型风力机	205
7.5.2 超高层建筑	209
思考题	212
参考文献	213
附录 A 各国规范主要参数对比	216
I. 地貌类别	216
II. 设计风速	220
III. 体型系数	220
IV. 风振系数	222
附录 B 南京航空航天大学风洞实验室简介	225
I. 概述	225
II. 试验设备	226
III. 风洞分类	226
IV. 研究领域	226
V. 已承担的抗风研究课题与项目	227

# 第1章 绪 言

“忽如一夜春风来，千树万树梨花开”，风与人类活动息息相关。但如何科学地描述自然界风场的形成原因？风与建筑结构会产生哪些相互作用？如何避免风致灾害的发生？上述问题的探索推动了结构风工程这门新的交叉学科的产生与发展。本章通过介绍风的基本概念、自然分类、风致灾害和风对结构的作用，归纳结构风工程的主要研究内容、研究方法和学科发展，使读者对结构风工程的相关内容有所了解，为本书后续学习奠定基础。

## 1.1 风的基本概念

### 1.1.1 风的成因

风是由空气流动引起的一种自然现象，是由地球上各纬度所接受的太阳辐射强度不同而形成的。在赤道和低纬度地区，太阳高度角大、日照时间长，地面和大气接受的热量多、温度高；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少、温度低。这种高纬度与低纬度地区之间的温度差异，形成了南北之间的气压梯度，使空气做水平运动。

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。地球大气运动除受气压梯度力外，还要受地转偏向力的影响，大气的真实运动是两者综合作用的结果。

此外，近地面大气运动还在很大程度上受海洋和地形的影响，山隘和海峡的峡谷效应、孤立山峰的海拔效应均使风速增大，丘陵和山地的地表摩擦使风速减小。由于上述多种原因，自然风的风向和风速时空分布较为复杂。

在山区由热力原因引起的，白天由谷地吹向平原或山坡的风称为谷风，夜间由平原或山坡吹向谷地的风称为山风，如图 1-1 所示。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。夜间，山坡的降温速度比同高度的空气快，冷空气沿坡地向下流入山谷。此外，不同的下垫面对风也有影响，如城市、森林、冰雪覆盖地区等都有相应的影响。

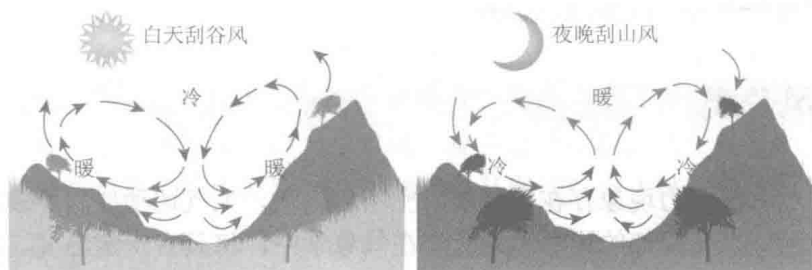


图 1-1 谷风和山风的形成

## 1.1.2 风力等级

一般, 根据风吹到地面或水面的物体上时产生的各种现象, 把风力的大小分为 18 个等级, 最小是 0 级, 最大为 17 级。相邻地区气压差越大, 风速越大, 风的力量自然也越大, 通常以风速来表示风力的大小。

目前, 通用的风力等级划分方法是由蒲福根据风速和风对地(海)面物体的影响程度制定的, 共分为 13 个风力等级。中国气象局将蒲氏风力等级划分的 12 级以上的台风补充到 17 级。其中, 12 级台风的风速定为 32.7~36.9m/s, 13 级为 37.0~41.4m/s, 14 级为 41.5~46.1m/s, 15 级为 46.2~50.9m/s, 16 级为 51.0~56.0m/s, 17 级为 56.1~61.2m/s。表 1-1 给出了现行通用的风力等级。

表 1-1 风力等级

等级	名称	风速/(m/s)	陆地地面物像	海面波浪
0	无风	0.0~0.2	烟直上	平静
1	软风	0.3~1.5	烟示风向	微波峰无飞沫
2	轻风	1.6~3.3	感觉有风	小波峰未破碎
3	微风	3.4~5.4	旌旗展开	小波峰顶破裂
4	和风	5.5~7.9	吹起尘土	小浪白沫波峰
5	清风	8.0~10.7	小树摇摆	中浪折沫峰群
6	强风	10.8~13.8	电线有声	大浪白沫离峰
7	劲风	13.9~17.1	步行困难	破峰白沫成条
8	大风	17.2~20.7	折毁树枝	浪长高有浪花
9	烈风	20.8~24.4	小损房屋	浪峰倒卷
10	狂风	24.5~28.4	拔起树木	海浪翻滚咆哮
11	暴风	28.5~32.6	损毁重大	波峰全呈飞沫
12	台风	32.7~36.9	路上极少	海浪滔天
13	轻微龙卷风	37.0~41.4	摧毁极大	海浪滔天
14	中等龙卷风	41.5~46.1	摧毁极大	海浪滔天
15	超大龙卷风	46.2~50.9	摧毁极大	海浪滔天
16	极大龙卷风	51.0~56.0	摧毁极大	海浪滔天
17	强台龙卷风	56.1~61.2	摧毁极大	海浪滔天

注: 本表所列风速均指离地(海)面 10m 处的风速值。

## 1.2 自然风分类

由于大气中热力和动力现象存在明显的时空不均匀性, 大气运动如同一条湍流不息的河流, 既有整体流动, 也有局部的旋涡和激流。在气象学中, 将具有一定温度、气压或风等气象要素的大气运动系统称为天气系统。例如, 低压、高压、气旋、反气旋、冷锋和暖锋等, 都是较为常见的天气系统。

各天气系统均有特定的空间范围（也称空间尺度）和特定的生成、发展及消亡过程（也称时间尺度）。空间尺度（通常指水平尺度）可以从数百米到数千千米，时间尺度可以从几分钟到数天。水平尺度在400km以上的为大尺度系统，而在4~400km的为中尺度系统，小于4km的为小尺度系统。表1-2为日本学者Fujita（1986）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值，水平尺度越大的天气系统对应的时间尺度通常也越长。

表 1-2 地面附近不同天气系统的水平尺度与时间尺度

天气系统	水平尺度/km	时间尺度	最大风速/(m/s)
温带气旋	500~2 000	3~15d	55
冷锋	500~2 000	3~7d	25
反气旋	500~2 000	3~15d	10
暖锋	300~1 000	1~3d	15
飓风	300~2 000	1~7d	90
热带气旋	300~1 500	3~15d	33
热带低压	300~1 000	5~10d	17
干锋	200~1 000	1~3d	20
小型台风	50~300	2~5d	50
中尺度高压	10~500	3~12d	25
阵风锋	10~300	0.5~6d	35
中尺度气旋	10~100	0.5~6d	60
下坡风	10~100	2~12d	55
大暴流	4~20	10~60min	—
微暴流	1~4	2~15d	—
龙卷风	30~3 000	0.5~90min	100
抽吸性旋涡	5~50	5~60s	140
沙尘暴	1~100	0.2~15min	40

注：取自Fujita（1986）。

下面介绍几种典型的、对土木工程结构影响较大的自然风。

## 1.2.1 季风

一年之中，大陆和海洋受热与冷却程度不均匀导致两者之间产生的大范围、风向随季节有规律改变的风称为季风。季风是由地球表面热力性质的差异、海陆分布、大气环流和大陆地形等因素造成的。冬季高纬度海陆所受的影响大，陆地冷高压中心位置在较高纬度上，海洋上为低压，风从大陆吹向海洋，称为冬季风。夏季低纬度海陆所受的影响大，陆地热低压中心位置偏南，海洋副热带高压位置向北移动，风从海洋吹向大陆，称为夏季风。

## 1.2.2 热带气旋

热带气旋是发生在热带、亚热带地区海面上的气旋性环流，是地球物理环境中最具破坏

性的天气系统之一。强烈的热带气旋不但形成狂风巨浪，通常还伴随暴雨和风暴潮，将造成严重的灾害。热带气旋在印度洋和西太平洋地区直接命名为热带气旋或台风，在西大西洋和墨西哥湾称为飓风。

根据中国气象局《热带气旋等级》(GB/T 19201—2006)，热带气旋按底层中心附近最大风速划分为六个等级，台风仅是其中之一，主要分类如下：

- (1) 热带低压，底层中心附近最大平均风速 10.8~17.1m/s，风力 6~7 级。
- (2) 热带风暴，底层中心附近最大平均风速 17.2~24.4m/s，风力 8~9 级。
- (3) 强热带风暴，底层中心附近最大平均风速 24.5~32.6m/s，风力 10~11 级。
- (4) 台风，底层中心附近最大平均风速 32.7~41.4m/s，风力 12~13 级。
- (5) 强台风，底层中心附近最大平均风速 41.5~50.9m/s，风力 14~15 级。
- (6) 超强台风，底层中心附近最大平均风速  $\geq 51.0$ m/s，风力 16 级及以上。

热带气旋(图 1-2)的分级与其造成的破坏程度并没有必然关系，对热带气旋的分级只考虑风速大小。较弱的热带气旋可能会造成更大的破坏，这主要取决于其他外在因素，如受影响区域的地形、热带气旋带来的总雨量等。例如，2006 年太平洋台风季的强烈热带风暴碧利斯，尽管强度较弱，但在登陆我国后引起内陆地区广泛而持续的强降水，并造成 244.48 亿元的直接经济损失。



图 1-2 热带气旋

对我国造成影响的热带气旋多发生于西北太平洋的热带洋面上，在离源地后向偏北、西北、偏西或东北方向移动。大部分热带气旋可达台风强度，其中，在我国登陆的台风占整个西北太平洋台风总数的 35%。

热带气旋在北半球沿逆时针方向旋转，在南半球沿顺时针旋转。热带气旋是太气循环的一个组成部分，能够将热能从赤道地区带往较高纬度地区。热带气旋的生成与发展需要海温、大气环流和大气层三方面因素的结合，它的能量来自水蒸气凝结时放出的潜热，其形成条件至今尚在研究之中。热带气旋的生成需具备以下 6 个条件，但也可能在这 6 个条件不完全具备的情况下生成。

- (1) 海水表面温度不低于  $26.5^{\circ}\text{C}$ ，且水深不少于 50m。此类海洋条件易形成不稳定大气环境，维持对流和雷暴。
- (2) 大气温度随高度迅速降低，容许潜热释放，而这些潜热是热带气旋的能量来源。
- (3) 潮湿的空气，尤其在对流层的中下层，大气湿润有利于天气扰动的形成。



(4) 需在离赤道超过五个纬度的地区生成, 否则科里奥利力的强度不足以使吹向低压中心的风偏转并围绕其转动, 环流中心便不能形成。

(5) 垂直风切变, 若垂直风切变过强, 反而会阻碍热带气旋对流发展, 使其正反馈机制未能启动。

(6) 预先存在且拥有环流及低压中心的天气扰动, 对流层中层的大气不能太干燥, 相对湿度必须大于 40%。

### 1.2.3 温带气旋

温带气旋, 又称为温带低气压或锋面气旋, 是活跃在温带高纬度地区的一种近似椭圆形的斜压性气旋。从结构上讲, 温带气旋是一种冷心系统, 即温带气旋的中心气压低于四周。从尺度上讲, 温带气旋的尺度一般较热带气旋大, 直径从几百千米到几千千米不等, 平均直径达到 1 000km。温带气旋常伴随着锋面的出现而产生, 同一锋面上有时会接连形成多个温带气旋, 移动前进, 称为“气旋族”。温带气旋从生成、发展到消亡为 2~6 天。图 1-3 给出了冷锋和暖锋示意图。

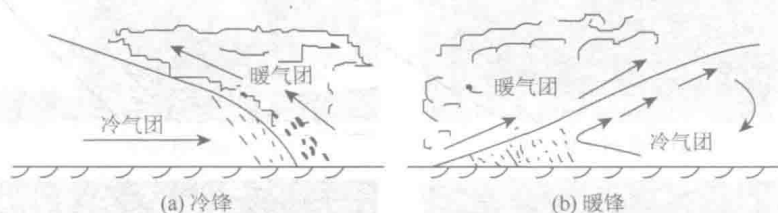


图 1-3 冷锋和暖锋示意图

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, 原先地面上有一条静止锋, 锋北面是冷空气, 锋南面是暖空气。最初, 冷空气自东向西运动, 暖空气自西向东运动, 当冷空气向南插入锋下时, 暖空气向北抬升, 并出现 1 或 2 条闭合等压线。在此期间, 温带气旋在可见光卫星云图上表现为锋面云带变宽, 向冷区凸起。随着波动的发展, 气压进一步下降, 闭合等压线增加, 冷空气进一步向南推进。此时冷锋附近出现阵雨或阵雪, 暖锋前也出现降水, 且降水区域扩大。进入温带气旋的发展期, 随着气旋的发展, 低层扰动逐渐向高层发展, 气流做螺旋式上升, 高空低槽也逐步加深。在成熟期, 气旋发展至最盛, 自地面到气压为 500mbar (1mbar=100Pa) 的高度处均已成为圆形闭合环流。地面冷锋逐渐追上暖锋, 并将地面暖空气上抬, 气旋开始锢囚。这时, 云雨范围最大, 强度加强, 风力增大, 天气变化最剧烈。但由于地面已被冷空气所占据, 成为冷性旋涡, 因此气旋开始减弱。在气旋发展的最后阶段, 暖空气仅残留在地面东南角, 低层整个气旋中心辐合加强, 地面加压, 变为冷性旋涡, 低压中心部位开始被堵塞。从地面到气压为 500mbar 左右的高度处的闭合环流减弱, 上升运动已消失, 气旋减弱, 以至消亡。

温带气旋也可由热带气旋转变而成, 当后者向北移动至温带地区时, 受西风槽影响, 将失去其作为热带气旋的特性, 进而转变为温带气旋。

### 1.2.4 龙卷风

龙卷风是大气中最强烈的旋涡现象, 是从雷雨云底伸向地面或水面的一种范围很小而风