

翻译版 · 原书第2版

结构风荷载

[澳] JOHN D. HOLMES 著

全涌 李加武 顾明 译

Wind Loading of Structures

 **CRC Press**
Taylor & Francis Group



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

时代教育·国外高校优秀教材精选

结构风荷载

(翻译版·原书第2版)

[澳] John D. Holmes 著
全涌 李加武 顾明 译



机械工业出版社

本书译自澳大利亚 John D. Holmes 教授所著《WIND LOADING OF STRUCTURES》(SECOND EDITION), 是“时代教育·国外优秀教材精选”系列之一。

本书主要介绍了与风特性有关的基础知识、钝体空气动力学、共振响应及等效静力风荷载、风致内压理论、风洞试验, 并以专题形式依次介绍了低矮建筑、高层建筑、大跨度屋盖和体育场、塔、烟囱和桅杆、桥梁、输电线以及其他结构的风荷载和风效应特征。

本书通俗易懂, 难度适中, 覆盖面广, 知识更新及时。本书不但可以作为土木工程专业本科生、研究生教材, 也是一本优秀的教师、科研人员和工程技术人员的参考书。

WIND LOADING OF STRUCTURES Second Edition/by John D. Holmes/ISBN: 978-0-415-40946-9

Copyright © 2007 by John D. Holmes.

Authorized translation from English language edition published by Taylor & Francis; All rights reserved;

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2012-6629 号

图书在版编目 (CIP) 数据

结构风荷载: 翻译版: 原书第2版/(澳) 赫尔姆斯 (HOLMES, J. D.) 著; 全涌, 李加武, 顾明译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 8
(时代教育·国外高校优秀教材精选)

书名原文: WIND LOADING OF STRUCTURES

ISBN 978-7-111-51233-2

I. ①结… II. ①赫… ②全… ③李… ④顾… III. ①建筑结构—风荷载—高等学校—教材 IV. ①TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 189413 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李 帅 责任编辑: 李 帅 姜 凤

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.5 印张 · 484 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-51233-2

定价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

译者序

20 世纪 80 年代初以来,我国经济建设和科技发展取得了巨大的进步。土木工程师充分利用新材料新技术,使建筑结构的跨度越来越大,高度越来越高,但这也使得结构的风效应越来越显著,风荷载可能超过地震荷载成为这些结构的控制性设计荷载。结构工程师普遍对结构的抗震问题比较熟悉,但对抗风问题却比较陌生,尚需补充结构抗风方面的基础知识。尽管目前国内可以找到一些结构抗风方面的书籍,但译者在相关专业的本科生及研究生上课时,却发现这些书籍的内容有的知识滞后,未能将最新的研究成果纳入;有的深奥难懂,不适合初学者或者土木工程师;有的内容单一,未能覆盖结构抗风方向各个方面的知识。市面上很难找到一本难度适中、覆盖面广、知识更新及时的教材。为了找到合适的教材,我们将目光对准了国外的相关资料,最后锁定了 John D. Holmes 教授所著《WIND LOADING OF STRUCTURES》(SECOND EDITION)一书。

本书前三章主要介绍了与风特性有关的基础知识;第 4 章介绍了钝体空气动力学相关知识;第 5 章讨论了共振响应及等效静力风荷载问题;第 6 章阐述了风致内压理论;第 7 章讨论了风洞试验的相关问题;其后章节以专题的形式依次介绍了低矮建筑、高层建筑、大跨度屋盖和体育场、塔、烟囱和桅杆、桥梁、输电线以及其他结构的风荷载及风效应特征。最后综述了几个主要国家、地区和国际组织的风荷载规范和标准。

本书通俗易懂,难度适中,覆盖面广,纳入了原著出版时的最新研究成果,适用的读者群广泛。为了便于初学者或非风工程专业的结构工程师理解,原作者在书中尽可能地避免了过多的繁琐晦涩的数学公式。部分关键的数学知识放在附录中,以便需要深入研究的读者查阅。本书不但可以作为土木工程专业本科生、研究生教材,也是一本优秀的教师、科研人员和工程技术人员的参考书。

虽然翻译历时多年,但限于译者的水平,书中难免存在不足。如果读者发现译文不够准确甚至错误的地方,恳请指出,以便再版更正。

译者

2015 年 7 月于同济大学

第2版前言

《结构风荷载》第1版已经出版5年多了。在此期间,大幅增加的灾难性风暴对世界很多地方造成了巨大的影响,结构抗风设计的重要性日趋显著。特别是2004年和2005年在美国南部沿海连续两年发生的前所未有的飓风季,更进一步强调了结构抗风设计的意义。

尽管第2版没有改变第1版各章节的主题,但几乎每一章及每一附录都有所修改。在过去的5年中,风工程研究者越来越深刻地认识到雷暴所致强风的重要性。尽管这方面的工作早在20世纪60~70年代就已经开始了,但本书第1版并没有包含这部分内容。本次再版在第1章和第3章中增加了龙卷风和下击暴流的内容,第5章增加了风致结构瞬态动力响应的内容,第7章增加了龙卷风和内压的风洞实验室模拟。

第8、9、11、12和14章也有所修改或增加,第10、13章未做任何改动,并重新编写了第15章“风荷载规范和标准”。由于第1版涉及的6个主要标准和规范中的4个都在过去5年间进行了较大的修订,其中美国规范ASCE-7还被修订了2次,因此完全重写是很有必要的。不过,这一章很快又会滞后的。

附录D增加了16个国家或地区的极端风基本信息。在此,我对提供这些信息的人深表感谢。

有些大学采用本书的第1版作为研究生教材,感谢他们在教学过程中提出了有益的建议。在第2版中,日本东京工艺大学的Matsui博士提供了图11-6,我的女儿Lucy和Julia提供了大部分新图和索引。感谢Integra软件服务有限公司高效的编辑和出版工作,感谢Taylor&Francis出版社对本书再版的支持,并满足了我的大多数要求。

第1版前言

在过去的30~35年里,许多国家在结构风荷载的研究方面取得了重大进展,在该领域的学术期刊和学术会议中发表了几千篇论文。在许多国家,风荷载是结构设计的控制荷载。虽然这方面资料很多,但具有丰富实践经验的风工程工程师并不多,为什么会这样呢?原因可能有很多。其一,该学科是综合性很强的——涉及概率与统计学、气象学、钝体流体力学和结构动力学,这对于那些擅长静力结构设计的工程师来说无疑是个障碍。其二,大学的设计课程中有时会涉及风荷载的规范和设计标准,但除了大学本科最后一年或者研究生的课程外,一般不会安排风工程学科的内容。其三,像许多其他学科一样,风工程专家和学者所用的专业术语对于外行人来说也是个障碍。

本书是基于我在风工程领域多年的工作经验,针对结构工程师编写的。同时也希望本书能应用于大学的高年级课程中。尽管这个学科中已有一些相关教材,但在本书中我尽力去弥补它们的不足之处:给出了所有结构类型(不仅仅是建筑)的风荷载概述;包含了等效静力风荷载计算方法的细节(主要在第5章),这种处理脉动和动力风荷载的方法得到结构工程师的广泛认可,他们习惯于等效静力分析;较为详细地讨论了内压(详见第6章)。

本书给出了世界范围内的极端风速及设计风速的概况(附录D),这可能是首创的,但却是重要的一步,并且在以后需要进一步发展。如今的项目与设计者经常不在同一个国家,这种需求将随着国际贸易(包括工程服务)的不断发展变得越来越重要。

我尽量少用数学方面的知识,把重点放在物理原理上,但有些章节(如第5章)必须使用一定数量的数学公式,希望这些数学公式没有掩盖其物理原理。在第一遍阅读时,读者可以跳过这些内容。

30多年里,这个领域许多杰出的学者和同行所做的工作也深深地影响着我,无法在此一一列举,但大多数可在每章的参考文献中找到。他们对本书的出版给予了帮助:K. C. S. Kwok教授撰写了15.9节的大部分内容;John Ginger博士、Michael Syme、Ignatius Calderone博士和Jannette Frandsen博士校核了部分手稿;Heather Fordham、Paul Bowditch、Maryjeanne Watt和Harry Fricke绘制了书中的图表;Shob Narayan输入了准入信息,Elizabeth Gray协助整理了索引,对他们的帮助深表感谢!同时感谢E. F. and N. Spon的工作人员耐心等待手稿的交付。

我非常希望收到读者建设性的评论和建议。

John D. Holmes

澳大利亚 Menton

第2版前言

《结构风荷载》第1版已经出版5年多了。在此期间,大幅增加的灾难性风暴对世界很多地方造成了巨大的影响,结构抗风设计的重要性日趋显著。特别是2004年和2005年在美国南部沿海连续两年发生的前所未有的飓风季,更进一步强调了结构抗风设计的意义。

尽管第2版没有改变第1版各章节的主题,但几乎每一章及每一附录都有所修改。在过去的5年中,风工程研究者越来越深刻地认识到雷暴所致强风的重要性。尽管这方面的工作早在20世纪60~70年代就已经开始了,但本书第1版并没有包含这部分内容。本次再版在第1章和第3章中增加了龙卷风和下击暴流的内容,第5章增加了风致结构瞬态动力响应的内容,第7章增加了龙卷风和内压的风洞实验室模拟。

第8、9、11、12和14章也有所修改或增加,第10、13章未做任何改动,并重新编写了第15章“风荷载规范和标准”。由于第1版涉及的6个主要标准和规范中的4个都在过去5年间进行了较大的修订,其中美国规范ASCE-7还被修订了2次,因此完全重写是很有必要的。不过,这一章很快又会滞后的。

附录D增加了16个国家或地区的极端风基本信息。在此,我对提供这些信息的人深表感谢。

有些大学采用本书的第1版作为研究生教材,感谢他们在教学过程中提出了有益的建议。在第2版中,日本东京工艺大学的Matsui博士提供了图11-6,我的女儿Lucy和Julia提供了大部分新图和索引。感谢Integra软件服务有限公司高效的编辑和出版工作,感谢Taylor&Francis出版社对本书再版的支持,并满足了我的大多数要求。

第 1 版前言

在过去的 30~35 年里，许多国家在结构风荷载的研究方面取得了重大进展，在该领域的学术期刊和学术会议中发表了几千篇论文。在许多国家，风荷载是结构设计的控制荷载。虽然这方面资料很多，但具有丰富实践经验的风工程工程师并不多，为什么会这样呢？原因可能有很多。其一，该学科是综合性很强的——涉及概率与统计学、气象学、钝体流体力学和结构动力学，这对于那些擅长静力结构设计的工程师来说无疑是个障碍。其二，大学的设计课程中有时会涉及风荷载的规范和设计标准，但除了大学本科最后一年或者研究生的课程外，一般不会安排风工程学科的内容。其三，像许多其他学科一样，风工程专家和学者所用的专业术语对于外行人来说也是个障碍。

本书是基于我在风工程领域多年的工作经验，针对结构工程师编写的。同时也希望本书能应用于大学的高年级课程中。尽管这个学科中已有一些相关教材，但在本书中我尽力去弥补它们的不足之处：给出了所有结构类型（不仅仅是建筑）的风荷载概述；包含了等效静力风荷载计算方法的细节（主要在第 5 章），这种处理脉动和动力风荷载的方法得到结构工程师的广泛认可，他们习惯于等效静力分析；较为详细地讨论了内压（详见第 6 章）。

本书给出了世界范围内的极端风速及设计风速的概况（附录 D），这可能是首创的，但却是重要的一步，并且在以后需要进一步发展。如今的项目与设计者经常不在同一个国家，这种需求将随着国际贸易（包括工程服务）的不断发展变得越来越重要。

我尽量少用数学方面的知识，把重点放在物理原理上，但有些章节（如第 5 章）必须使用一定数量的数学公式，希望这些数学公式没有掩盖其物理原理。在第一遍阅读时，读者可以跳过这些内容。

30 多年里，这个领域许多杰出的学者和同行所做的工作也深深地影响着我，无法在此一一列举，但大多数可在每章的参考文献中找到。他们对本书的出版给予了帮助：K. C. S. Kwok 教授撰写了 15.9 节的大部分内容；John Ginger 博士、Michael Syme、Ignatius Calderone 博士和 Jannette Frandsen 博士校核了部分手稿；Heather Fordham、Paul Bowditch、Maryjeanne Watt 和 Harry Fricke 绘制了书中的图表；Shob Narayan 输入了准入信息，Elizabeth Gray 协助整理了索引，对他们的帮助深表感谢！同时感谢 E. F. and N. Spon 的工作人员耐心等待手稿的交付。

我非常希望收到读者建设性的评论和建议。

John D. Holmes
澳大利亚 Menton

目 录

译者序		
第2版前言		
第1版前言		
第1章 风暴及风致破坏的特性	1	
1.1 引言	1	
1.2 与气象有关的问题	1	
1.3 风暴的类型	5	
1.4 风灾	12	
1.5 风致残骸	14	
1.6 风灾损失预测	18	
1.7 总结	20	
1.8 后续章节和附录	20	
参考文献	20	
第2章 设计风速和结构安全性预测	22	
2.1 引言	22	
2.2 极值分析原理	22	
2.3 极值风估计的极值I型分布	25	
2.4 阈值法	30	
2.5 风速母体分布	33	
2.6 风荷载与结构安全性	34	
2.7 总结	37	
参考文献	37	
第3章 强风特征及湍流	39	
3.1 引言	39	
3.2 平均风速剖面	40	
3.3 湍流	45	
3.4 风速的地形修正	51	
3.5 地形变化	55	
3.6 其他资料	56	
3.7 总结	56	
参考文献	56	
第4章 钝体空气动力学基础	58	
4.1 钝体周围的绕流	58	
4.2 风压和风力系数	58	
4.3 平板和墙	61	
4.4 矩形柱	65	
4.5 圆柱体	69	
4.6 脉动风力和风压	72	
4.7 总结	79	
参考文献	79	
第5章 共振响应与等效静力风荷载分布	81	
5.1 引言	81	
5.2 共振响应的基本原理	81	
5.3 随机振动或频谱方法	84	
5.4 等效静力风荷载分布	93	
5.5 气动弹性力	97	
5.6 风荷载引起的疲劳	100	
5.7 总结	104	
参考文献	105	
第6章 内压	107	
6.1 引言	107	
6.2 迎风墙上开单个洞	107	
6.3 迎风墙和背风墙开多个洞	111	
6.4 名义上封闭的建筑物	113	
6.5 内压的模拟	114	
6.6 总结	114	
参考文献	114	
第7章 强风及风荷载的实验室模拟	116	
7.1 引言	116	
7.2 风洞	116	
7.3 自然风的模拟	117	
7.4 结构风效应模拟	122	
7.5 局部风压的测量	125	
7.6 结构的整体荷载和响应的模拟	128	
7.7 阻塞效应及其修正	134	
7.8 计算风工程	134	
7.9 总结	135	
参考文献	135	
第8章 低矮建筑	139	
8.1 引言	139	
8.2 研究历史	139	
8.3 低矮建筑风荷载的一般特性	142	

8.4 坡屋盖建筑	148	12.1 引言	209
8.5 多跨建筑	153	12.2 桥梁的基本风力系数	210
8.6 女儿墙对低矮建筑的影响	154	12.3 大跨度桥梁的动力响应特性	212
8.7 建筑长度的影响	154	12.4 风洞试验技术	217
8.8 内压	154	12.5 桥梁拉索的振动	218
8.9 总结	155	12.6 案例研究	221
参考文献	155	12.7 总结	221
第9章 高层建筑	158	参考文献	222
9.1 引言	158	第13章 输电线	224
9.2 研究历史	158	13.1 引言	224
9.3 高层建筑的绕流	160	13.2 结构响应和风荷载计算	224
9.4 覆层风压	161	13.3 输电线系统的风险模型	227
9.5 整体荷载和动力响应	167	13.4 总结	229
9.6 顺风向和横风向响应的组合	170	参考文献	229
9.7 扭转荷载及响应	171	第14章 其他结构	231
9.8 干扰效应	173	14.1 引言	231
9.9 阻尼	174	14.2 墙体和广告牌	231
9.10 个案研究	179	14.3 开敞式屋盖和穹顶	235
9.11 总结	179	14.4 建筑的附属物	237
参考文献	179	14.5 天线	239
第10章 大跨度屋盖和体育场	183	14.6 照明灯架和泛光源	245
10.1 引言	183	14.7 工业综合体和海洋平台	245
10.2 大跨度屋盖结构周围的流场	183	14.8 总结	246
10.3 拱形屋盖和穹顶屋盖	185	参考文献	246
10.4 等效静力风荷载分布	188	第15章 风荷载规范和标准	248
10.5 风洞试验	190	15.1 引言	248
10.6 试验案例	191	15.2 总条款	248
10.7 总结	191	15.3 基本风速或风压	250
参考文献	192	15.4 风速修正因子	251
第11章 塔、烟囱和桅杆	193	15.5 建筑物外压	252
11.1 引言	193	15.6 建筑物内压	254
11.2 研究历史	193	15.7 屋盖风压系数	254
11.3 塔截面的基本阻力系数	194	15.8 其他形状和截面的力系数	260
11.4 细长塔的顺风向动力响应	195	15.9 动力响应计算	261
11.5 细长塔的横风向响应	196	15.10 展望	263
11.6 冷却塔	203	参考文献	263
11.7 拉线桅杆结构	203	附录	265
11.8 风力发电塔	204	附录 A 术语	265
11.9 案例研究	205	附录 B 符号表	267
11.10 总结	206	附录 C 与风工程有关的概率分布	276
参考文献	206	C1 引言	276
第12章 桥梁	209	C2 基本定义	276

C3 母体分布	278
C4 极值分布	280
C5 其他概率分布	281
参考文献	282
附录 D 极值风气候——全球数据	283
D1 强风的强度等级系统	283
D2 各个国家和地区统计数据	283
参考文献	295
附录 E 结构固有频率的一些近似公式	298

参考文献	299
附录 F 等效静力荷载法在简单结构中的应用	300
F1 引言	300
F2 风压数据	300
F3 总升力和总阻力的等效静力荷载	300
F4 讨论	303
F5 结论	303
参考文献	304

第 1 章 风暴及风致破坏的特性

1.1 引言

风荷载与地震荷载是结构物的主要环境荷载。虽然地震的破坏性更强,但发生的次数却比风暴要少,所以从长期来看,两者导致的破坏基本上是相当的。地球上几乎每天都有风暴发生,但许多风暴规模很小,是局部性的。热带海洋上发生的热带气旋,包括飓风和台风,多是强风暴。这些风暴在人口密集的沿海地区登陆时,将引起灾难性的后果。

本章主要从气象学角度介绍了包括强非热带低压产生的狂风、热带气旋、下击暴流、飚线风以及与雷暴有关的龙卷风等多种风暴发生时水平风速的变化;讨论了风灾的历史,尤其是近 30 年的历史,使结构工程师能够从中获得经验教训;概述了强风暴破坏的主要来源——飞行残骸的特性;讨论了保险评估方面的相关问题,包括最近发展起来的基于风暴历史数据的损失模型,风速的空间特征和结构破坏与风速的关系等内容。

1.2 与气象有关的问题

风是指空气相对于地球表面的运动。它由几个不同的力引起,特别是太阳对大气的不均匀加热造成的压力差以及地球自转引起的力。太阳对两极和赤道辐射的不同导致空气的温差和气压差,这些因素与地球自转共同导致水平方向和竖直方向的大规模大气环流。大气环流导致热带和两极地区的主导风向为东风,而温带地区的主导风向为西风。

局部强风可能产生于局部对流作用(如雷暴),也可能由气流过山抬升而导致(如下坡风)。在南北纬 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的热带海洋和沿海地区,强热带气旋会产生极强的风,有些地方称之为飓风或台风。

近地层的摩擦作用或高空气流的剪切作用导致气流的旋涡,使风暴的湍流强度大,阵发性强。图 1-1 揭示了雷暴引起倒灌风的过程和“边界层”类强风暴(如强风或热带气旋)的产生过程。

1.2.1 梯度压力

作用在地球边界层外的上层自由大气的两个最重要的力是梯度压力和科里奥利力。

由流体力学的基本知识可知,在笛卡儿坐标系中,流体中任意一点上 x 方向的压力梯度为 $\partial p / \partial x$,相应单位质量上的梯度压力如下式所示

$$\text{单位质量上的梯度压力} = -\left(\frac{1}{\rho_a}\right) \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1-1)$$

式中 ρ_a ——空气的密度。

梯度压力的方向由高压区指向低压区。

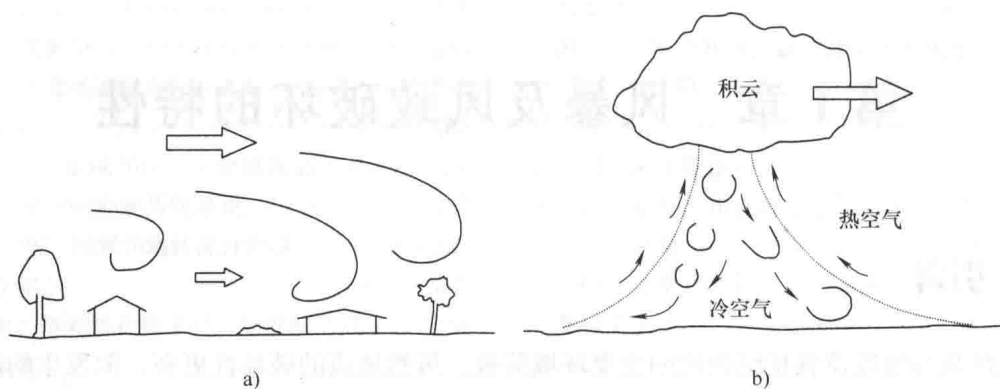
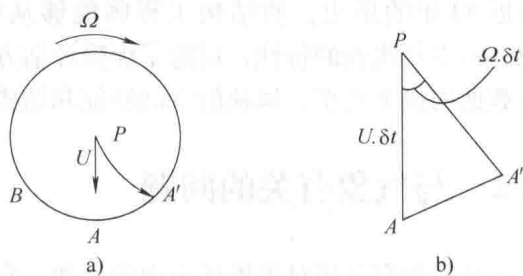


图 1-1 在边界层风和雷暴倒灌风中形成的湍流

1.2.2 科里奥利力

科里奥利力是地球自转引起的一种视在力。在北半球它指向运动方向的右侧，而在南半球它指向运动方向的左侧；赤道地区的科里奥利力为零。如图 1-2 所示为空气微粒从南极向北运动时作用在其上的科里奥利力。

假设一个空气微粒以速度 U 水平远离南极点 P ，向 A 点运动（见图 1-2a）。由于地球以角速度 Ω 顺时针旋转，因此当空气微粒到达 A 点时， A 点已移动到 B 点， A' 点移动到了 A 点。相对于地球表面而言，微粒看起来是沿着 PA' 运动，即经历了连续向左的偏移。同理，在北极则是向右偏移。该偏移可以认为是由作用于微粒上的指向运动速度方向右侧的惯性加速度——科里奥利加速度引起的。

图 1-2 地球自转引起的视在力
(科里奥利力，南半球)

假定时间间隔 δt 很短（见图 1-2b）， AA' 相对于 PA' 很小，因此有

$$AA' = \Omega U (\delta t)^2 \quad (1-2)$$

把科里奥利加速度记作 a 。因为 AA' 是在这个加速度下运动的距离，所以它也可以表示为

$$AA' = \frac{1}{2} a (\delta t)^2 \quad (1-3)$$

由式 (1-2) 和式 (1-3) 可得

$$a = 2U\Omega \quad (1-4)$$

式 (1-4) 给出了南北极点处的科里奥利加速度或单位质量力。

在地球表面的任意一点，角速度变为 $\Omega \sin \lambda$ （ λ 为该点的纬度），此时科里奥利加速度为 $2U\Omega \sin \lambda$ 。对于给定的纬度， $2\Omega \sin \lambda$ 是个常数，称为科里奥利参数，常用 f 表示，科里奥利加速度则等于 fU 。

因此，科里奥利力是视在力，或称为等效力，它的方向在北半球指向运动方向的右侧，在南半球指向运动方向的左侧。赤道地区的科里奥利力为零，一般情况下在赤道附近纬度在 5° 范围内的科里奥利力可以忽略，这也是热带气旋（详见 1.3.2 节）或其他气旋系统不会在

赤道地区形成的原因。

1.2.3 地转风

在大小相等、方向相反的气压梯度力和科里奥利力作用下的稳定气流称为“平衡地转气流”。由式(1-1)给出的单位质量上的梯度压力和单位质量上的科里奥利力 fU 相等可得

$$U = - \left(\frac{1}{\rho_a f} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1-5)$$

式(1-5)给出了地转风速，它和压力梯度 $\partial p / \partial x$ 成正比。

在北半球和南半球，梯度压力的方向、科里奥利力的方向和气流的流动方向如图1-3所示。可以看出，无论在南半球还是北半球，气流的方向都平行于等压线（即压力相等的点连成的线）。在北半球，较高的压力在气流方向的右侧；而南半球则是在气流方向的左侧。这将导致北半球的风绕着低压中心作逆时针转动，而南半球的风则做顺

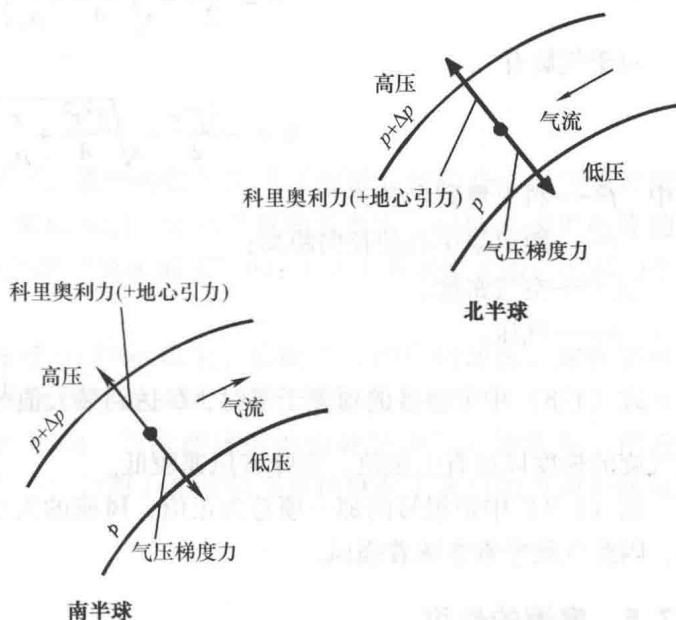


图1-3 南、北半球的平衡地转气流

时针转动。在南、北半球，绕着低压中心的转动（常常导致强风）就是气象学家所说的“气旋”。相应地，绕着高压中心的转动称为“反气旋”。

1.2.4 梯度风

如果等压线有明显的曲率（例如在热带气旋中心附近），则作用在空气微粒上的离心力不能忽略。单位质量的空气所受的离心力大小为 (U^2/r) ，其中 U 是合成风速， r 为等压线的曲率半径。

离心力的方向是背离等压线曲率中心向外的。如果气流的路径是绕高压中心转动（即反气旋），那么离心力的方向就和压力梯度的方向相同，而和科里奥利力的方向相反。相应地，如果气流绕着低压中心旋转（即气旋），则离心力的方向和科里奥利力的方向相同，而和压力梯度的方向相反。

以常速 U 运动的单位质量气流的运动方程如式(1-6)和式(1-7)，分别对应于反气旋和气旋，即

$$\frac{U^2}{r} - |f|U + \frac{1}{\rho_a} \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| = 0 \quad (1-6)$$

$$\frac{U^2}{r} + |f|U - \frac{1}{\rho_a} \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| = 0 \quad (1-7)$$

式(1-6)和式(1-7)对南、北半球都适用，但反气旋的压力梯度 $|\partial p / \partial r|$ 为负值，南半球

f 为负值。这两个等式都是梯度风速 U 的二次方程，每一种情况都有两个理论解，但如果压力梯度等于零，则 U 也必须为零。

对于反气旋有

$$U = \frac{|f|r}{2} - \sqrt{\frac{f^2 r^2}{4} - \frac{r}{\rho_a} \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|} \quad (1-8)$$

对于气旋有

$$U = -\frac{|f|r}{2} + \sqrt{\frac{f^2 r^2}{4} + \frac{r}{\rho_a} \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|} \quad (1-9)$$

式中 f ——科里奥利参数；

r ——距风暴中心的径向距离；

ρ_a ——空气密度；

p ——气压。

式 (1-8) 中带根号的项等于零时， U 达到最大值 $\frac{|f|r}{2}$ ，这时 $|\partial p / \partial r|$ 等于 $\frac{\rho_a f^2 r}{4}$ ，因此，

反气旋的梯度风速有上限值，意味着风速较低。

式 (1-9) 中带根号的那一项总为正值，风速的大小取决于压力梯度，理论上没有上限值，因此气旋常常意味着强风。

1.2.5 摩擦的作用

摩擦力与气流方向相反，它是通过大气边界层内各层空气之间的剪切作用来传递的，越接近地球表面，摩擦力的作用越大。为了达到矢量平衡，气流流动方向与等压线不再平行，但仍指向低压区一侧，图 1-4 给出了大气边界层内新的力平衡。当从高空逐渐靠近地面

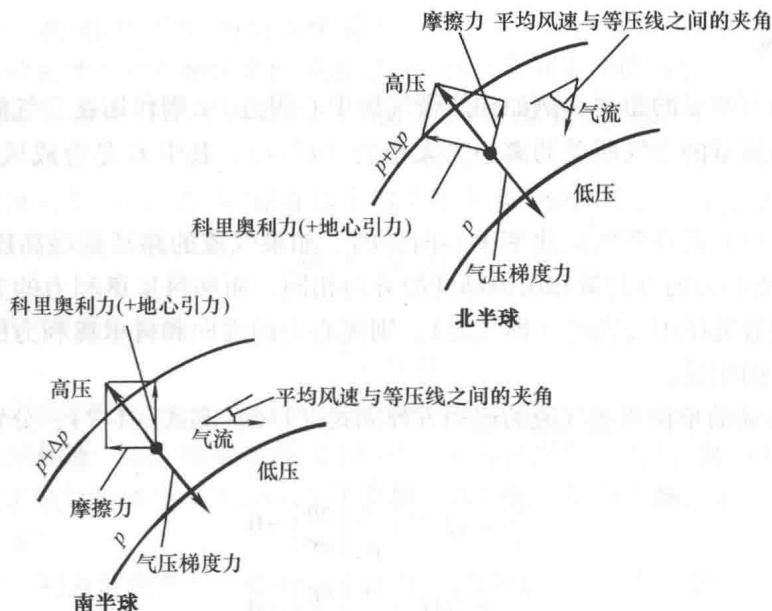


图 1-4 大气边界层中力的平衡

时,随着高度的降低,风向会逐渐指向低压中心,这个现象称为 Ekman 螺旋。从梯度风高度到地球表面,风向变化大约为 30° 。但在大部分高层建筑高度范围内,风向的变化很小。

1.3 风暴的类型

1.3.1 大尺度低压强风

在中纬度(纬度为 $40^\circ \sim 60^\circ$)地区,强烈的低气压或(温带)气旋会引起气象尺度的大风,这也是低纬度风的主要来源。航海家们,尤其是帆船航海家,很熟悉这种咆哮的西风,这种风在北大西洋和合恩角可能是最“臭名昭著”的,1.4.1节阐述了因它引起的冬季强风导致欧洲西北部结构的破坏。

这种风暴空间范围非常广,如绵延 1000km 以上,影响途经的广阔地区,如许多欧洲国家。强风过境时虽然不会一直持续地吹很强的风,但往往也需要数天才平息。这种风暴行进数百公里后,由于摩擦作用的影响,气流在接近地面处呈现很强的湍流。在若干小时的行进过程中,风向可能保持不变,如图 1-5 所示为这种情况下典型的风速和风向时程记录。

1.3.2 热带气旋

热带气旋是一种强烈的气旋性风暴,多发生于夏末和秋季的热带海洋。它由海洋的潜在热能驱动,一般海水温度至少在 26°C 以上才能维持,当它进入陆地或较冷的水域后会迅速消失。在赤道附近纬度 5° 以内的地方一般不会形成热带气旋,要获得足够的强度至少需要在纬度 10° 以上,纬度 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的热带气旋有较大的强度。如果有温暖的洋流,也可能移动到更高的纬度。

最强大的热带气旋一般发生在加勒比地区(被称为飓风)、南中国海(被称为台风)及澳大利亚西北海岸附近。中等强度的热带气旋活动的地区通常在墨西哥海岸外的太平洋东部、印度洋南部、孟加拉湾、南太平洋、日本南部、澳大利亚东部外的珊瑚海以及大西洋东南部。阿拉伯海、泰国海湾、澳大利亚北部沿岸(包括卡奔塔利亚湾)一般发生不太活跃且强度较小的风暴。

成熟的热带气旋具有三维旋涡结构,如图 1-6 所示。前面已经提到过,热带气旋的水平尺寸小于温带气旋或低压,但它们的影响可以绵延数百公里。其环流的径向分量指向“风眼”,其外部是随气流向上螺旋运动的强热对流区。风眼内是一个相对平静的区域,里面的空气缓慢下沉,风眼直径从 8km 到 80km 不等,风眼中常常可以看到晴空。最强的风发生在靠近风眼外沿的区域。

如图 1-7 所示为离地 10m 高度处用风速计捕获的某热带气旋的风速时程。风眼通过测站时,出现了一个特别的现象——非常低的风速持续了约一小时,而旋涡通过的时候,测站处的风向大概变化了 180° 。

风眼以外,随着离风暴中心的距离的不断增大,上部风速逐渐衰减,可由式(1-9)来计算风速的大小。

