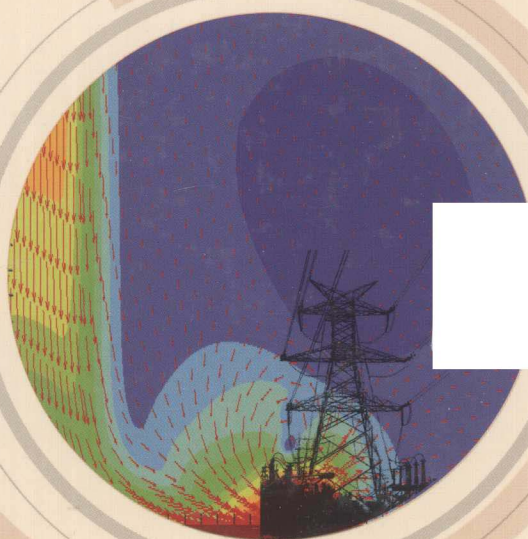


下击暴流的形成与扩散 及其对输电线塔的危害作用

瞿伟廉 吉柏锋 著



科学出版社

下击暴流的形成与扩散 及其对输电线塔的灾害作用

瞿伟廉 吉柏锋 著

国家自然科学基金重点项目(项目编号:50830203)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

下击暴流风荷载及其对输电线塔结构的灾害作用是当前国际风工程领域的研究热点和前沿课题。作者在国家自然科学基金委员会“十一五”有关重点科研项目的支撑下对自己近年来在下击暴流强风和输电线塔结构体系抗风研究方向所取得的成果进行了全面的总结。书中介绍了当前国内外关于下击暴流的研究进展,深入探讨了理想下击暴流的数值模拟方法,理想下击暴流的下沉和扩散过程及理想下击暴流的风剖面特征,创建了实际下击暴流的混合数值模拟方法,提出了下击暴流作用下输电线塔倒塌全过程的分析方法和倒塌的破坏特征。

本书可供广大从事风工程研究的学者和从事风振相关研究、设计、控制的结构工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

下击暴流的形成与扩散及其对输电线塔的灾害作用/瞿伟廉,吉柏锋著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-036049-6

I. ①下… II. ①瞿… ②吉… III. ①风暴-影响-输电铁塔-研究
IV. ①P425.5 ②TM75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 275936 号

责任编辑:祝元志 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:378 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62135763-8228

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

下击暴流为雷暴天气中云下下沉气流猛烈冲击地面并扩散而引起的近地面短时强风的灾害现象。下击暴流中尺度较小的微下击暴流发生的频度很高,如在雷雨天气时微下击暴流发生的概率可达 60%~70%,因此对于雷暴多发地区,下击暴流是一种常见的天气现象。下击暴流在世界范围内已引起了大量高柔结构物的风致破坏,尤其是输电线塔结构的倒塌。它引起供电系统的瘫痪,甚至引发火灾等严重次生灾害,不仅造成重大的经济损失,而且其安全问题还将直接影响到国家的生产建设及人民的生活秩序。据此,研究下击暴流的风场特征、风荷载模拟方法及其对输电线塔等高柔结构的灾害作用,对于了解、分析输电线塔等高柔结构在这种灾害性强风下的动力灾变效应具有重要的理论和现实意义。

目前国内外学者已采取包括现场实测、理论分析、物理试验和数值模拟等多种方法对下击暴流引起的近地强风场特性及其对输电线塔结构的灾害作用展开研究,并取得了许多积极成果。由于下击暴流是一种位置漂移不定、尺度较小、生命史短的天气现象,要通过直接探测来获取其风荷载的样本是十分困难的,目前全世界也仅有有限的几条实测样本。而现有的下击暴流解析模型又对其真实物理过程进行了过多简化,且为使模型和现有的数量不多的实测数据相吻合,几乎所有的模型都做了相应的经验性调整。因此,严格意义上讲,这些模型只能称之为半经验的解析模型。虽然物理试验的过程和测量可以在实验室内精确控制,但现有的技术和试验条件还无法模拟出包含众多微物理过程的下击暴流,下击暴流的物理试验大多仅停留在理解下击暴流的风场结构和风场特征的层面。为此,寻找新的建立下击暴流风荷载模型的方法成了下击暴流的研究能否走向工程应用的关键。

在国家自然科学基金重点项目(项目编号:50830203)和面上项目(项目编号:50978209)的支持下,本书作者在下击暴流的风场特征、风荷载模拟方法及其对输电线塔结构的灾害作用等方面进行了较为深入的研究。作者提出的包含中尺度、云尺度和近地风尺度并以气象雷达实测资料作为初始化资料的下击暴流形成与扩散的混合数值模拟方法为建立下击暴流风荷载模型提供了新的途径。全书共分八章:第一章,介绍了下击暴流的基本特征、下击暴流及输电线塔结构抗下击暴流研究的现状,概述了下击暴流及其对输电线塔结构灾害作用研究的发展史;第二章,叙述了理想下击暴流的数值模拟方法,并简要介绍了基于计算流体动力学方法的下击暴流数值模型;第三章和第四章,详细叙述了理想下击暴流形成、下沉与扩散过程的数值模拟方法,探讨了下击暴流冲击地面前后的微观风场特征、并讨论了理

想下击暴流的风剖面特征;第五章,介绍了产生下击暴流的中尺度天气背景,叙述了采用中尺度 ARPS 模式和三维积云模式以及中尺度-云模式嵌套方法对实际下击暴流案例的模拟过程;第六章,叙述了三维积云模式与计算流体动力学方法结合的混合数值模拟方法,并给出了三个实际下击暴流案例的混合模拟过程;第七章,叙述了基于混合模拟结果提取特征参数后利用改进的下击暴流解析模型方法模拟下击暴流风荷载时程样本的方法;第八章,在上述已建立的下击暴流风荷载模型的基础上,通过提出塔身主杆弹塑性失稳的有限元模型、塔身钢管主杆法兰拼装节点的有限元模型和结构节点区精细有限元模型及其相容边界条件,建立了输电线塔结构在下击暴流作用下考虑节点大位移的多尺度有限元时程分析方法,讨论了下击暴流作用下输电线塔结构倒塌全过程的分析结果和破坏特征。

本书总结了作者多年来在下击暴流风场特征、风荷载模拟方法及其对输电线塔结构的灾害作用等方面的研究成果,并概括了国内外学者近期在此领域内所作的部分工作,是国内第一本系统地介绍下击暴流的风场特征、风荷载模拟方法及其对输电线塔结构的灾害作用的专著。

应该看到,下击暴流正日益引起广大风工程学者和结构工程师们的重视,该研究方向业已成为国际风工程领域的研究热点和前沿领域,新的研究成果不断涌现。作者近年来所作的一些研究工作通过本书有一个较好的总结。希望通过对下击暴流及其对输电线塔结构灾害作用的介绍,起到抛砖引玉的作用。

限于作者水平,书中不足之处难免,敬请广大读者指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 雷暴强风	1
1.2 下击暴流的发现、定义和分类	6
1.3 下击暴流的基本特征	11
1.3.1 尺度特征	11
1.3.2 速度特征	12
1.3.3 随机特征	16
1.3.4 风压特征	16
1.4 下击暴流的研究现状	17
1.4.1 下击暴流现场实测	17
1.4.2 下击暴流解析模型	21
1.4.3 下击暴流物理模拟	22
1.4.4 下击暴流数值模拟	26
1.4.5 下击暴流风荷载模拟	34
1.4.6 下击暴流风荷载规范	35
1.5 输电线塔结构的抗下击暴流研究现状	36
1.5.1 下击暴流的强灾害性	36
1.5.2 输电线塔结构的抗下击暴流研究	40
参考文献	41
第 2 章 理想下击暴流的数值模拟方法	52
2.1 CFD 与 CWE	52
2.2 流体动力学控制方程	53
2.2.1 质量守恒方程	53
2.2.2 动量守恒方程	53
2.2.3 能量守恒方程	55
2.2.4 控制方程的通用形式	55
2.3 湍流运动的数值模拟	55
2.3.1 湍流的基本方程	56
2.3.2 湍流的数值模拟方法	56

2.3.3	湍流模型	59
2.3.4	近壁区的湍流模拟	63
2.3.5	数值求解方法	66
2.3.6	数值计算流程	69
2.4	下击暴流的数值模型	71
2.4.1	风场模型	71
2.4.2	边界条件	72
2.4.3	湍流模型与网格	73
	参考文献	74
第3章	理想下击暴流的形成、下沉与扩散过程	77
3.1	计算模型与计算参数	77
3.1.1	风场模型	77
3.1.2	边界条件	78
3.1.3	湍流模型与网格	78
3.2	形成、下沉与扩散过程	79
3.2.1	下击暴流形成、下沉与扩散过程的速度云图	79
3.2.2	下击暴流形成、下沉与扩散过程的湍动能云图	80
3.3	冲击地面前后的风场特征	81
3.3.1	下击暴流冲击地面前后的风速云图和矢量场	81
3.3.2	下击暴流冲击地面前后的瞬时风速分布	83
3.4	下击暴流的瞬态风速特征	84
3.4.1	水平风速的瞬态分布	84
3.4.2	竖向风速的瞬态分布	87
第4章	理想下击暴流的风剖面特征	91
4.1	稳态风剖面	91
4.1.1	水平风速的稳态分布	91
4.1.2	竖向风速的稳态分布	93
4.2	下击暴流与大气边界层风的风剖面特征比较	97
4.2.1	相关参数	98
4.2.2	竖直风剖面	99
4.2.3	径向风剖面	100
4.3	初始出流条件对风剖面的影响	102
4.3.1	初始出流直径的影响	106
4.3.2	初始出流高度的影响	109
4.3.3	初始出流速度的影响	113

4.3.4 初始出流倾角的影响	116
4.3.5 初始初流条件研究小结	121
参考文献	122
第5章 实际下击暴流形成的气象模式数值模拟	124
5.1 对流单体结构及对流云特征	124
5.1.1 对流单体结构	124
5.1.2 对流云特征	125
5.2 下击暴流的中尺度天气背景	127
5.2.1 多单体雷暴	129
5.2.2 超级单体雷暴	130
5.2.3 飚线	132
5.2.4 中尺度对流复合体	132
5.3 基于中尺度 ARPS 模式的实际下击暴流模拟	133
5.3.1 中尺度 ARPS 数值模式	133
5.3.2 实例模拟	137
5.4 基于三维积云模式的实际下击暴流模拟	151
5.4.1 三维完全弹性冰雹云数值模式	151
5.4.2 实例模拟	172
5.5 基于中-云尺度气象模式嵌套模拟实际下击暴流	178
参考文献	183
第6章 实际下击暴流风场的多尺度混合数值模拟	186
6.1 混合数值模拟方案	186
6.2 武汉“7·27”下击暴流风场的混合数值模拟	188
6.2.1 高分辨率积云模式模拟及结果分析	188
6.2.2 混合数值模拟及结果分析	191
6.3 武汉“6·22”下击暴流风场的混合数值模拟	199
6.3.1 高分辨率积云模式模拟及结果分析	199
6.3.2 混合数值模拟及结果分析	203
6.4 广州“7·21”下击暴流风场的混合数值模拟	210
6.4.1 高分辨率积云模式模拟及结果分析	210
6.4.2 混合数值模拟及结果分析	213
6.5 下击暴流的多尺度混合数值模拟与理想数值模拟比较	222
6.5.1 模拟方法	222
6.5.2 近地风场特征	223
6.5.3 风剖面特征	224

参考文献	226
第 7 章 下击暴流风荷载模拟	228
7.1 下击暴流风荷载的基本表达	228
7.2 下击暴流的风荷载模型	229
7.3 下击暴流平均成分的数值模拟	230
7.3.1 基于竖直风剖面和时间函数的时变平均风速模拟方法	230
7.3.2 基于改进的 OBV 模型的时变平均风速模拟方法	233
7.4 下击暴流脉动成分的数值模拟	237
7.4.1 脉动风速模型	237
7.4.2 脉动风速模拟的谐波叠加法	238
7.5 下击暴流风荷载的模拟检验	239
7.5.1 AAFB 风速记录	239
7.5.2 数值参数	240
7.5.3 模拟方法	241
7.5.4 结果与分析	242
参考文献	244
第 8 章 下击暴流作用下输电线塔结构的倒塌响应全过程分析	246
8.1 下击暴流作用下输电线塔结构的响应特征	246
8.1.1 两种风力作用下输电线塔结构的荷载效应	247
8.1.2 输电线塔结构截面的抗弯抗力	251
8.1.3 两种风力作用下输电线塔结构截面抗风能力的比较	252
8.1.4 下击暴流作用下输电线塔结构的响应特征	257
8.2 下击暴流作用下输电线塔有限元时程分析中的几个问题	257
8.2.1 输电线塔结构有限元时程响应分析的多尺度问题	258
8.2.2 整体尺度有限元分析时结构节点的大位移问题	258
8.2.3 整体尺度有限元分析的压杆失稳问题	258
8.2.4 结构节点尺度的精细有限元分析及两种尺度的位移和力学边界协调 条件问题	259
8.3 下击暴流作用下输电线塔考虑节点大位移求解的共转法	259
8.3.1 基本思路	259
8.3.2 采用共转法求解三维梁单元内力	260
8.3.3 整体切线刚度矩阵	263
8.3.4 增量有限元求解	264
8.4 塔身主杆弹塑性失稳的有限元模型	265
8.4.1 主杆失稳的“弯矩-轴力-轴向刚度”关系	265

8.4.2 主杆失稳的有限元模型	268
8.5 塔身主杆法兰螺栓联结拼装节点的等效梁单元	269
8.5.1 法兰螺栓联结节点等效梁单元参数的求取方法	270
8.5.2 法兰螺栓联结节点(包括有螺栓脱落)的精细有限元模型	271
8.5.3 法兰螺栓联结节点(包括有螺栓脱落)等效梁单元的参数	271
8.6 结构节点的精细有限元模型及位移和力学边界协调条件	273
8.6.1 结构节点区的精细实体有限元模型	273
8.6.2 位移与力学的边界相容条件	274
8.6.3 结构节点区动应力场和焊缝裂纹萌生累积疲劳损伤的计算实例	276
8.7 下击暴流作用下输电线塔的倒塌响应分析	285
8.7.1 输电线塔倒塌破坏的关键部位	286
8.7.2 输电线塔塔身关键部位杆件失稳的顺序及其对倒塌的影响	290
8.7.3 塔身主杆法兰拼装节点螺栓脱落损伤对倒塌的影响	291
8.7.4 结构节点焊缝裂纹萌生累积疲劳损伤对倒塌的影响	292
参考文献	293
附录 单元坐标系的单位矢向量推导	294

第 1 章 绪 论

1.1 雷暴强风

风是空气相对于地面的运动。由于太阳对地球上大气加热和温度上升的不均匀性使得在地球上相同高度的两点之间产生压力差,进而使不同压力差的地区产生了趋于平衡的空气流动,这样就形成了常见的大气边界层风^[1]。

风灾是自然灾害的主要类型之一。根据慕尼黑再保险公司发布的 2009 年全球自然灾害评估报告^[2],在记录的 860 起自然灾害中,风灾所造成的损失占全部损失总额的 66%。在包括地震、洪水、海啸、冰冻、风灾等各种灾害类型在内的 2009 年全球 50 起特大自然灾害中,风灾占 25 起,共造成超过 2638 人死亡,财产损失超过 2903.5 亿美元。表 1.1.1 列出了在 2009 年全球 50 起特大自然灾害中的 25 起风灾情况。从表 1.1.1 中可以看出,在上述 25 起特大风灾中,雷暴天气发生的强风暴(下击暴流、龙卷风)占了 11 起,台风 5 起,冬季风暴 3 起,热带气旋 3 起,飓风、雹暴和热带风暴各 1 起。

表 1.1.1 2009 年列入全球 50 大自然灾害的特大风灾情况

序号	时间	风灾类型	发生地	死亡人数	总损失/百万美元
1	1 月 24 日至 1 月 27 日	冬季风暴(克劳斯)	法国、西班牙、意大利	26	5100
2	2 月 10 日至 2 月 13 日	强风暴、龙卷风	美国	15	2500
3	3 月 25 日至 3 月 26 日	强风暴、雹暴、龙卷风	美国	未知	1500
4	4 月 9 日至 4 月 11 日	强风暴、龙卷风	美国	9	1700
5	4 月 24 日至 4 月 28 日	强风暴、龙卷风、雹暴	美国	6	450
6	5 月 7 日至 5 月 8 日	热带气旋(赞坎)	菲律宾	60	130
7	5 月 7 日至 5 月 9 日	强风暴、龙卷风	美国	7	850
8	5 月 25 日至 5 月 27 日	气旋(艾拉)	孟加拉国、不丹、印度	320	500
9	6 月 5 日至 6 月 8 日	强风暴、龙卷风、雹暴	美国	未知	700
10	6 月 10 日至 6 月 18 日	强风暴、龙卷风	美国	1	2000
11	6 月 21 日至 6 月 22 日	热带风暴(莲花)	中国台湾	1	50
12	7 月 7 日至 7 月 10 日	强风暴、龙卷风	美国	未知	600
13	7 月 16 日至 7 月 17 日	雹暴	法国	未知	300

续表

序号	时间	风灾类型	发生地	死亡人数	总损失/百万美元
14	7月20日至7月21日	强风暴、雹暴、龙卷风	美国	1	1100
15	7月23日至7月24日	强风暴、雹暴	奥地利、瑞士、德国	11	1800
16	7月24日至7月25日	强风暴、雹暴	美国	未知	310
17	8月1日至8月5日	热带气旋(戈尼)	中国、菲律宾、中国台湾	20	10
18	8月7日至8月10日	台风(莫拉克)	中国、菲律宾、中国台湾	614	4600
19	9月26日至9月30日	台风(凯萨娜)	菲律宾、老挝、越南	694	1300
20	10月3日至10月14日	台风(帕尔马)	菲律宾、中国台湾、中国	469	600
21	10月8日至10月9日	台风(茉莉)	日本	4	1000
22	10月30日至11月3日	台风(美丽川)	菲律宾、越南、柬埔寨	159	285
23	11月4日至11月13日	飓风(井田)	萨尔瓦多、尼加拉瓜、墨西哥、美国	204	1500
24	12月8日至12月9日	冬季风暴	美国	17	310
25	12月15日至12月15日	冬季风暴	俄罗斯	未知	150

注：表中数据根据慕尼黑再保险公司发布的 2009 年全球自然灾害评估报告^[2]整理。

另据文献[3],2008 年美国观测到的雷暴强风事件大约有 36 000 次,共造成超过 105 亿美元的保险损失。图 1.1.1 是美国在 1980~2008 年间由雷暴强风所造成的投保财产的损失总额。

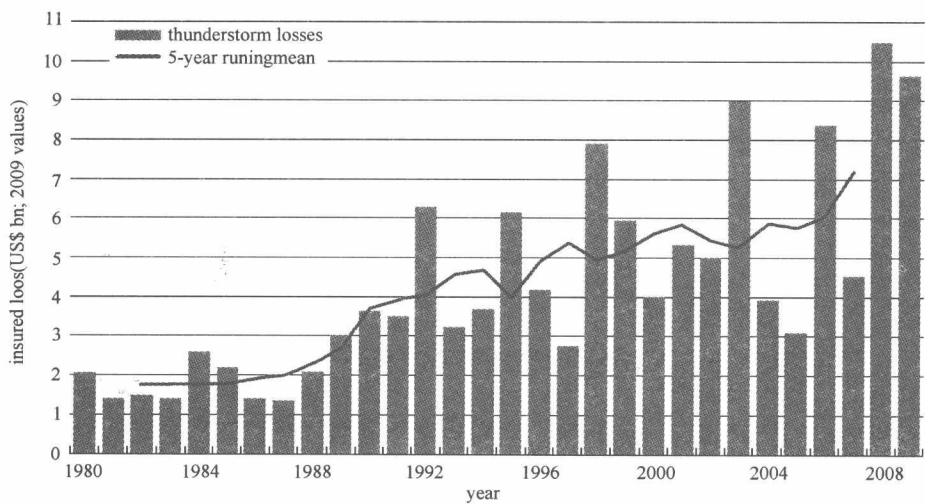


图 1.1.1 美国 1980~2008 年间雷暴强风所造成的财产损失^{[3]①}

① 书中部分图来源于外文资料,为了保证读者对原图更准确理解,图中的部分外文说明没有译成中文。下同。

由此可以看出,风灾是所有自然灾害中发生最频繁且破坏力极强的灾害之一,而雷暴天气导致的强风灾害又是风灾中发生频度最高的风灾类型。

那么,什么是雷暴强风呢?

Battan^[4]描述了雷暴生命周期的三个形成阶段,包括积云阶段、成熟阶段和消散阶段,如图 1.1.2 所示。

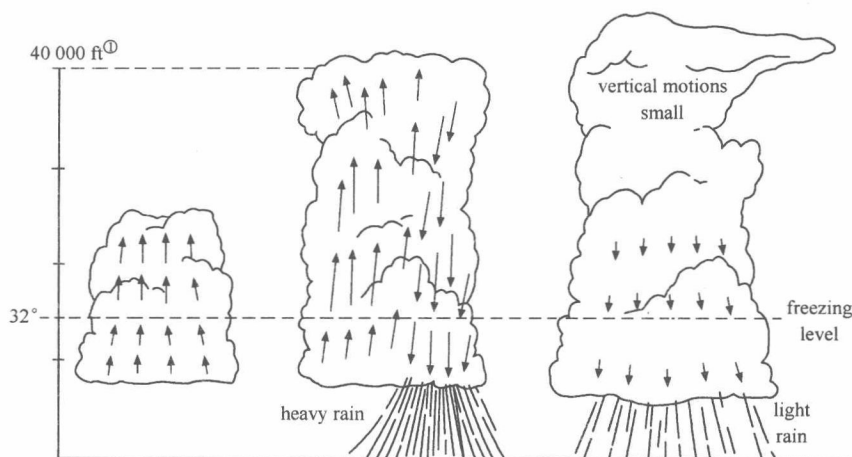


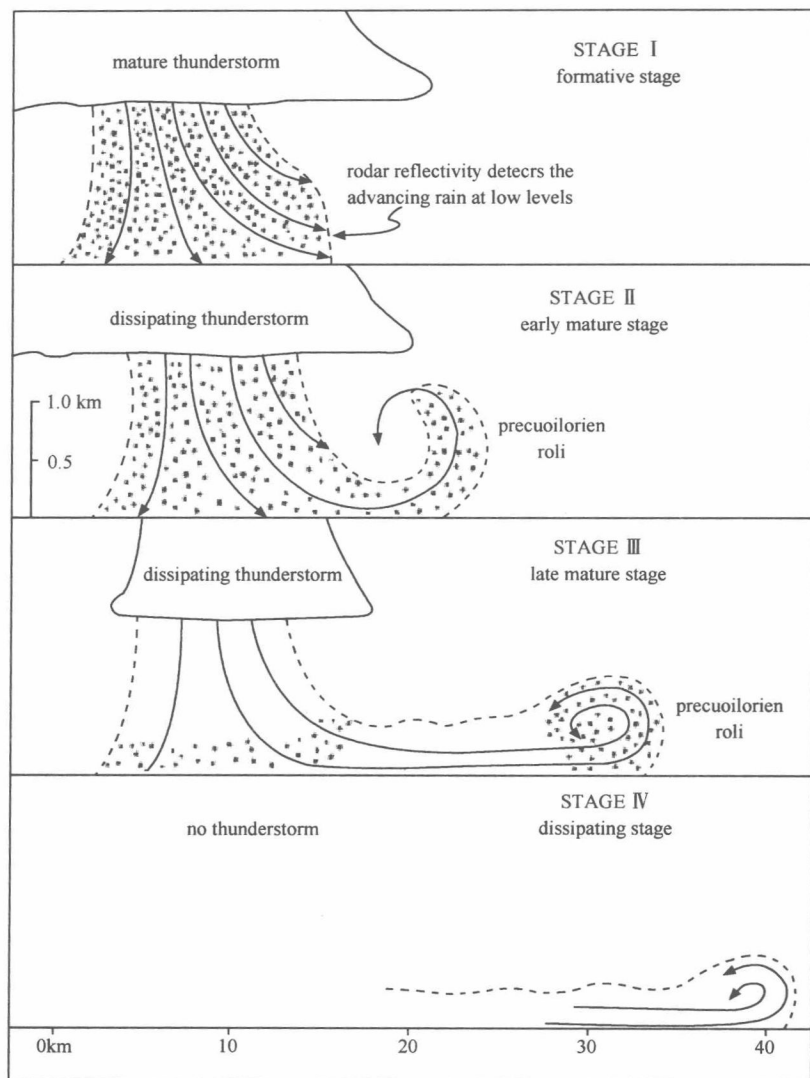
图 1.1.2 雷暴的生命周期:积云阶段(左)、成熟阶段(中)和消散阶段(右)

从图 1.1.2 中可以看出,在积云阶段,数个小的积云结合形成一个单体,这是一种内含悬浮降水的较强上升气流,在上升过程中周围空气渗透进入该上升的单体。这个阶段单体的温度大于环境温度,并且由于冷凝和冻结的降水产生了第一个雷达回波。单体底部第一滴降雨的出现则标志着雷暴进入了成熟阶段。降雨的产生意味着雨滴已经超过了上升气流所能提供的最大悬浮作用,结果就是下沉气流开始形成。在单体生命周期结束的消散阶段,上升气流已经完全停止,整个单体都呈现出下击气流现象。需要指出的是,这种三阶段式的生命周期模型是真实雷暴过程的一个简化模型,实际中在整个过程的各个阶段可能包含多个单体。

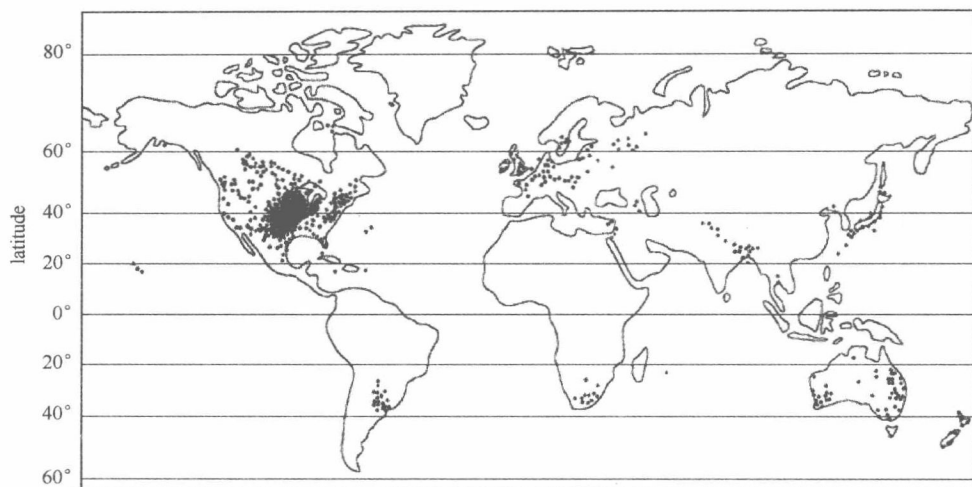
在雷暴下沉气流冲击地面之后,则产生雷暴出流现象。Wakimoto^[5]给出了雷暴出流的四个阶段,即形成阶段、早期成熟阶段、后期成熟阶段和消退阶段,如图 1.1.3 所示。

雷暴出流冲击地面并沿地面传播,则形成了雷暴强风。同热带气旋相比,雷暴强风的水平分布尺度较小,但是它却能通过形成龙卷风和下击暴流而产生强风^[6]。

① 1ft=0.3048m,下同。

图 1.1.3 雷暴出流的四个阶段示意图^[5]

龙卷风为一种水平尺度很小,但破坏力很强的小尺度天气系统,是和强烈对流云相伴出现并具有垂直轴的小范围强烈涡旋。大多数龙卷风出现在强雷暴天气中,突发性强,产生和消退迅速,时间短、速度快、直径小、能量相对集中在很小区域,因此破坏性很大^[6]。文献^[7]总结了一个平均四年期的世界各地的龙卷风分布图,如图 1.1.4 所示。

图 1.1.4 四年期平均的世界龙卷风分布^[7]

从图 1.1.4 中可以看出,龙卷风在南北半球都有出现,主要发生在拥有大面积平原的大陆国家,如美国、阿根廷、俄罗斯和南非等国家,且主要分布在美国。根据美国国家海洋和大气管理局对 1950~2004 年间美国每年的龙卷风总数的统计,美国平均每年发生 1200 次龙卷风,而在中国每年则大约发生 10~100 次龙卷风^[8]。由此可见,尽管龙卷风是一种破坏性很强的灾害雷暴强风,但其主要分布在美国大陆,而在我国很少发生。

下击暴流作为雷暴强风的另一种产生形式,在世界各地发生的频度都很高,其中作为下击暴流中尺度较小的微下击暴流在雷雨天气发生的概率可达 60%~70%^[9]。因此对于雷雨多发地区,下击暴流是一种常见的天气现象。

1964 年,Whittingham^[10]对澳大利亚的极端风速进行统计后发现,雷暴强风在澳大利亚极风气候中非常普遍。1969 年,Thom^[11]对美国的阵风风速的分析表明,多达三分之一的阵风发生在雷暴天气中。1972 年,澳大利亚学者 Melbourne^[12]开展了用结构模型评估风效应的工作,最后指出雷暴大风作为结构设计风荷载的重要性。1976 年,Gomes 等^[13]专门研究了澳大利亚悉尼的雷暴大风情况。1979 年,Oliver^[14]对风暴产生的危害研究表明,在澳大利亚悉尼和布里斯班,50%的极值阵风都是由雷暴产生的。1992 年,Twisdale^[15]在雷暴大风的设计参数研究中发现,美国几个气象站的大风重现期都由雷暴强风控制。对南非、阿根廷类似的分析^[16]和澳大利亚各地的电力公司的灾害调查^[17-19]都证实雷暴强风是导致结构破坏的重要风荷载类型。2001 年,美国开发并分析了用于评估雷暴长期波动的数据库,进一步证实雷暴强风在导致重大破坏的极端风事件中占主导地位^[20]。Homles^[21]对记录的澳大利亚区域边界层 10m 高度处的强风风速进行统计再分析