

# 土木工程结构抗风设计

张丽芳 陈娟 吴瑾 夏逸鸣 编著



科学出版社

# 土木工程结构抗风设计

张丽芳 陈娟 编著  
吴瑾 夏逸鸣

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书共十章, 主要内容包括: 绪论、结构上的静力风、结构上的脉动风、高层建筑结构抗风设计、高耸结构抗风设计、大跨屋盖结构抗风设计、桥梁结构上的风荷载及风振响应、桥梁结构抗风设计、结构风振控制及风洞试验等。

本书可作为高等学校土木工程专业本科生的教材, 也可作为土木工程专业研究生或工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构抗风设计/张丽芳等编著. —北京: 科学出版社, 2017.3  
ISBN 978-7-03-052321-1

I. ①土… II. ①张… III. ①土木工程—抗风结构—结构设计  
IV. ①TU352.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 052806 号

责任编辑: 余 江 张丽花/责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟/封面设计: 迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年3月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年3月第一次印刷 印张: 15

字数: 356 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

国内外统计资料表明,在所有自然灾害中,风灾造成的损失为各种灾害之首。因此,土木工程结构抗风研究和设计已成为防灾与减灾中的热点问题。土木工程结构抗风研究的重要基础是风工程,而风工程正是南京航空航天大学的优势学科,其风洞实验室是国内最早建成的风工程实验室之一,在国内外享有盛誉,已完成大量土木工程风洞试验,在建筑物风场模拟技术、建筑物的动态和静态风载测量技术、大型桥梁的振动及抗风稳定性、高层建筑的风阻特性方面已形成自己的特色和优势。另外,国防重点学科——流体力学也为土木工程结构抗风研究和教学提供了重要的学科资源。因此,南京航空航天大学土木工程专业把结构抗风设计作为人才培养的特色之一,在本科生中开设“土木工程结构抗风设计”课程,作为专业拓展课。该课程是校级精品课程,本书是精品课程建设的成果。

本书在编写过程中,充分吸取了近几年来该课程改革的经验,力求体现研究型大学本科教学的要求,本书特点如下:

(1)着重讲清基本概念和基本理论,体现专业拓展课的要求。

(2)与其他相关课程(如建筑结构设计、桥梁工程等)教学内容相配合和衔接,避免重复。

(3)教材内容、例题和习题的选择及编排,体现以学生为中心、以学习为中心,便于学生开展自主研究型学习,力求体现研究型大学课程建设的要求。

本书原版于2007年出版,结合多年使用反馈及规范更新,编者深感再版之必要,本版内容在原版基础上有了扩充。本书主要内容包括绪论、结构上的静力风、结构上的脉动风、高层建筑结构抗风设计、高耸结构抗风设计、大跨屋盖结构抗风设计、桥梁结构上的风荷载及风振响应、桥梁结构抗风设计、结构风振控制和风洞试验等。

参加本书编写的有:南京航空航天大学吴瑾(第1章、第2章、第6章)、夏逸鸣(第3章、第4章、第5章)、张丽芳(第7章、第8章、附录1、附录2)、陈娟(第9章、第10章)。

限于编者水平,书中疏漏之处难免,希望读者提出批评意见。

编 者

2016年11月于南京

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 风的特性	1
1.1.1 气象特性	1
1.1.2 风的基本概念	1
1.1.3 风强度的表示方法	3
1.1.4 风速与风压关系	5
1.2 土木工程结构风灾	6
1.2.1 台风灾害	6
1.2.2 大风及飓风灾害	7
1.2.3 龙卷风灾害	7
1.2.4 重要结构物风毁典型事例	7
1.3 风对结构的作用及设计要求	9
1.3.1 风对结构的作用	9
1.3.2 抗风设计	9
1.3.3 抗风设计要求	11
思考与练习	13
第 2 章 结构上的静力风	14
2.1 基本风速和基本风压	15
2.1.1 基本风速	15
2.1.2 基本风压	20
2.2 结构上的静力风荷载	28
思考与练习	34
第 3 章 结构上的脉动风	36
3.1 概述	36
3.2 随机振动中的几个基本概念	36
3.2.1 随机过程的概念	36
3.2.2 随机过程的类型	37
3.2.3 相关系数和相关函数	39
3.2.4 谱密度函数	41
3.3 单自由度线性体系的随机振动	42

3.4	多自由度线性体系的随机振动	45
3.5	脉动风及结构响应	47
3.5.1	脉动风的概率分布	47
3.5.2	脉动风速功率谱函数	48
3.5.3	脉动风压功率谱函数	49
3.5.4	紊流度和脉动系数	50
3.5.5	脉动风频域空间的相关性	51
3.5.6	结构顺风向的风振响应	52
3.5.7	结构横风向的风振响应	58
3.5.8	风力作用下结构的总响应	64
3.5.9	风力下空气动力失稳	64
3.5.10	横风向弯曲驰振	65
	思考与练习	67
<b>第4章</b>	<b>高层建筑结构抗风设计</b>	<b>68</b>
4.1	高层建筑的动力特性	68
4.1.1	高层建筑的振型和频率	68
4.1.2	高层建筑自振周期的经验公式	70
4.2	高层建筑的顺风向响应	70
4.2.1	高层建筑顺风向静力位移计算	70
4.2.2	高层建筑顺风向动力响应与风振系数	72
4.3	高层建筑的横风向响应	76
4.4	高层建筑的扭转风振响应	80
4.5	高层建筑风载下的舒适度验算	81
	思考与练习	84
<b>第5章</b>	<b>高耸结构抗风设计</b>	<b>85</b>
5.1	高耸结构的自振周期	85
5.1.1	按无限自由度体系计算自振周期	85
5.1.2	按有限自由度体系计算自振周期	86
5.1.3	自振周期的经验公式	88
5.2	高耸结构风作用下的弯曲响应	89
5.2.1	顺风向平均风作用下的弯曲响应	89
5.2.2	顺风向脉动风作用下的弯曲响应	90
5.2.3	高耸结构的横风向风振响应	93
5.2.4	高耸结构安全度、适用度与极限风荷载	95
	思考与练习	97
<b>第6章</b>	<b>大跨屋盖结构抗风设计</b>	<b>98</b>
6.1	屋盖结构的自振周期	98

6.1.1	解析法	98
6.1.2	能量法	100
6.1.3	其他近似方法	103
6.2	屋盖结构的风振响应	104
6.2.1	水平风力	106
6.2.2	竖向风力	106
6.2.3	水平和竖向风力的总响应	107
	思考与练习	107
<b>第7章 桥梁结构上的风荷载及风振响应</b>		<b>108</b>
7.1	概述	108
7.2	基本风速和设计基准风速	109
7.2.1	基本风速	109
7.2.2	设计基准风速	112
7.3	桥梁结构上的静力风荷载及其组合	114
7.3.1	静阵风风速	114
7.3.2	桥梁构件上的静阵风荷载	115
7.3.3	桥梁静力风荷载组合	120
7.4	桥梁结构风致振动响应	120
7.4.1	颤振	121
7.4.2	驰振	122
7.4.3	抖振	124
7.4.4	涡振	126
7.5	本章小结	128
	思考与练习	128
<b>第8章 桥梁结构抗风设计</b>		<b>129</b>
8.1	概述	129
8.2	桥梁结构抗风概念设计	130
8.3	桥梁结构动力特性	132
8.3.1	按结构动力学计算	132
8.3.2	按经验公式计算	134
8.3.3	桥梁的阻尼	138
8.4	桥梁结构抗风稳定性验算	139
8.4.1	桥梁风致静力稳定验算	139
8.4.2	驰振稳定性验算	141
8.4.3	颤振稳定性验算	143
8.5	桥梁结构风振响应验算	145
8.5.1	抖振	146



8.5.2	涡振	147
	思考与练习	149
<b>第 9 章</b>	<b>结构风振控制</b>	<b>150</b>
9.1	概述	150
9.1.1	结构动态系统	150
9.1.2	结构振动控制类型	151
9.1.3	结构风振控制装置位置的选择	151
9.1.4	最优控制理论基础	152
9.2	主动控制	152
9.2.1	实时最优振型控制算法	153
9.2.2	随机最优控制算法	156
9.3	被动控制	158
9.3.1	准最优控制算法	159
9.3.2	传递函数算法	160
9.4	风振控制的计算机模拟	162
9.5	高层建筑结构风振控制	164
9.5.1	TMD 的组成及其工作原理	166
9.5.2	TMD 对结构风振响应的控制	167
9.5.3	TMD 对结构风振控制的优化	171
9.5.4	TMD 对结构风振控制的实例	172
9.6	桥梁结构风振控制	175
9.6.1	风振控制措施分类	175
9.6.2	主梁	176
9.6.3	桥塔和高墩	178
9.6.4	拉索和吊杆	178
	思考与练习	181
<b>第 10 章</b>	<b>风洞试验</b>	<b>182</b>
10.1	概述	182
10.2	建筑工程风洞试验	183
10.2.1	试验基本要求	184
10.2.2	风荷载试验	187
10.2.3	风环境试验	191
10.2.4	特殊试验	194
10.3	桥梁结构风洞试验	195
10.3.1	试验基本要求	195
10.3.2	静力三分力试验	199
10.3.3	节段模型试验	199



10.3.4 桥塔模型试验	200
10.3.5 全桥气动弹性模型试验	200
10.4 风洞试验实例	201
10.4.1 高层建筑风洞试验	201
10.4.2 桥梁结构风洞试验	204
思考与练习	207
附录 1	208
附录 2	218
参考文献	229

风洞试验中，风洞模型与原型桥塔的比例尺为  $1:100$ ，试验中测得模型桥塔在风荷载作用下的最大位移为  $10\text{mm}$ ，求原型桥塔在风荷载作用下的最大位移。

解：根据相似原理，风洞模型与原型桥塔在风荷载作用下的最大位移之比等于它们的长度之比，即  $10\text{mm} / 100 = 0.1\text{mm}$ 。因此，原型桥塔在风荷载作用下的最大位移为  $0.1\text{mm}$ 。

风洞试验中，风洞模型与原型桥塔的比例尺为  $1:100$ ，试验中测得模型桥塔在风荷载作用下的最大位移为  $10\text{mm}$ ，求原型桥塔在风荷载作用下的最大位移。

解：根据相似原理，风洞模型与原型桥塔在风荷载作用下的最大位移之比等于它们的长度之比，即  $10\text{mm} / 100 = 0.1\text{mm}$ 。因此，原型桥塔在风荷载作用下的最大位移为  $0.1\text{mm}$ 。

风洞试验中，风洞模型与原型桥塔的比例尺为  $1:100$ ，试验中测得模型桥塔在风荷载作用下的最大位移为  $10\text{mm}$ ，求原型桥塔在风荷载作用下的最大位移。

解：根据相似原理，风洞模型与原型桥塔在风荷载作用下的最大位移之比等于它们的长度之比，即  $10\text{mm} / 100 = 0.1\text{mm}$ 。因此，原型桥塔在风荷载作用下的最大位移为  $0.1\text{mm}$ 。

### 1.4.2 风荷载

风荷载是指风对建筑物表面产生的作用力。风荷载的大小与风速、空气密度、建筑物表面形状等因素有关。风荷载的计算公式为：
$$F = C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$
其中， $F$  为风荷载， $C_d$  为风荷载系数， $\rho$  为空气密度， $v$  为风速， $A$  为建筑物迎风面积。

风荷载的计算公式为：
$$F = C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$
其中， $F$  为风荷载， $C_d$  为风荷载系数， $\rho$  为空气密度， $v$  为风速， $A$  为建筑物迎风面积。

风荷载的计算公式为：
$$F = C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$
其中， $F$  为风荷载， $C_d$  为风荷载系数， $\rho$  为空气密度， $v$  为风速， $A$  为建筑物迎风面积。

风荷载的计算公式为：
$$F = C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$
其中， $F$  为风荷载， $C_d$  为风荷载系数， $\rho$  为空气密度， $v$  为风速， $A$  为建筑物迎风面积。

风荷载的计算公式为：
$$F = C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$
其中， $F$  为风荷载， $C_d$  为风荷载系数， $\rho$  为空气密度， $v$  为风速， $A$  为建筑物迎风面积。

# 第1章 绪 论

## 1.1 风的特性

### 1.1.1 气象特性

风是相对地面的空气运动，它是由不同的压力驱动的，主要原因是大气压强的差异。这种差异是由于太阳对地表不同区域的照射不同而产生的，其原因是地球自转产生的。太阳辐射在地球极地和赤道间的差异，产生了温度和压强的差异。这些差异在与地球自转共同作用下，建立了大气大循环系统，这种循环存在于水平和垂直方向。这些循环导致了热带和近极地处的主要风向偏向于东，而西风主要存在于温带地区。

强风也有可能由当地的对流效应，或山脉中的大量空气的抬升而产生。强烈的热带气旋，因地区不同分成飓风和台风，都表现为笼罩在部分热带洋面及沿岸地区的特大风，它们主要存在于南北半球纬度为  $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$  的区域。

对结构安全产生影响的是强风，它通常由大气旋涡剧烈运动产生，可分为热带低压、热带风暴、台风或飓风、雷暴、寒潮风暴、龙卷风等。

所有强风暴都是短期且爆发性的。气流与地平面相互摩擦以及在同高度上空气对流的剪切产生了漩涡，这些漩涡导致了强风的阵风性和爆发性。

### 1.1.2 风的基本概念

风是空气从气压大的地方向气压小的地方流动而形成的。风在行进中遇到结构，就形成风压力，而使结构产生变形和振动。风荷载是各种工程结构的重要设计荷载。对于超高层建筑、桥梁、高耸结构(如塔、烟囱、桅杆等)、起重机、冷却塔、输电线、屋盖等，风荷载常起着控制的作用。

风有倾斜性、季节性和随机性三个特点。

#### 1. 倾斜性

一般来说，风是有一定倾角的，相对于水平方向，一般风倾角的变化范围为  $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ，因此，结构上作用的风力就有水平和垂直方向两个分量。一般来说，对高层结构，大多是细长型的，竖向风对其的作用力是轴向作用力，所以，这种情况竖向风力影响可以忽略不计。但对于桥梁结构和大跨度屋盖结构，竖向风压和振动效应就非常显著，在这类结构中要着重考虑。

#### 2. 季节性

在同一地点，在每年不同的季节和日期，风向也可以不尽相同，结构在不同时期受到风的影响也随之不同。一年中强度最大的且对结构影响最大的风向称为主导风向。为了较便于安全地进行结构设计，一般都假定最大风出现在各个方向上的概率相同。

### 3. 随机性

在风的顺风向时程曲线中，一般包含有平均风和脉动风两部分，平均风是在给定时间间隔内，风力大小、方向等不随时间而改变的量，脉动风则随时间按随机规律变化，要用随机振动理论来处理，风的模拟主要是针对脉动风而言。作用于结构上任一点坐标为 $(x, y, z)$ 的风速 $v(x, y, z, t)$ 为平均风速 $\bar{v}(z)$ 和脉动风速 $v_f(x, y, z, t)$ 之和，如图 1.1 所示。

$$v(x, y, z, t) = \bar{v}(z) + v_f(x, y, z, t) \quad (1.1)$$

平均风是在约定的时间间隔内，把风对建筑物的作用力的速度、方向以及其他物理量都看成不随时间而改变的量，考虑到风的长周期远大于一般结构的自振周期，这部分风虽然其本质是动力的，但其作用与静力作用相近，因此可认为其作用性质相当于静力。平均风速沿高度变化的规律可用指数函数式或对数函数式来近似，将在第 2 章介绍。

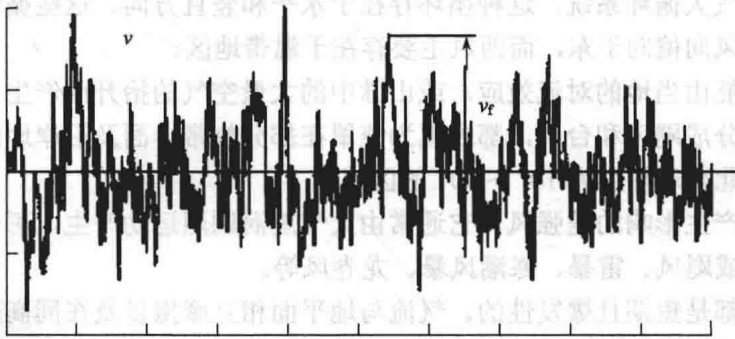


图 1.1 瞬时风速  $v$  与平均风速  $\bar{v}$ 、脉动风速  $v_f$

脉动风是由于风的不规则性引起的，它的强度是随时间按随机规律变化的。由于它周期较短，因而应按动力来分析，其作用性质完全是动力的。

结构的抗风分析方法主要分为频域法和时域法。对重要的高层建筑，除了进行频域内的分析外，还应进行时域内的分析，以了解结构风振反应的实际情况，从而确定结构在受力过程中的薄弱环节。对结构进行时域内的风振分析，首先要确定结构的风荷载。

由于风力在空间上的分布变化及时间上的强度变化，风对结构的作用显得非常复杂和多样。影响结构上风荷载的因素很多，不同地区各类地面条件的差异，结构本身条件的变化，同一建筑物不同区域内形状、表面粗糙度等的不同都会导致结构上风荷载的改变。在风荷载作用下，结构将产生一定的运动，这种运动反过来又会引起结构表面风压的变化，再加上邻近建筑之间的相互影响，这些都使得确定结构上风荷载的大小变得相当复杂。近年来，随着计算机技术的日益发展，人工模拟结构的随机输入得到了广泛应用。人工模拟风荷载可以考虑场地、风谱特征、建筑物的特点等条件的任意性，使模拟得到的风荷载尽量接近结构的实际风力。目前，随机过程的模拟方法一般分为两类，即谐波叠加法和线性滤波器法。由于谐波叠加法在进行多变量模拟时，需要在每个频率上进行大量运算，因此比较费时，运算效率低，而线性滤波器法则占用内存少，计算快捷。

研究表明，脉动风的影响与结构周期、风压、受风面积等有直接影响，这些参数越大，影响也越大，兼之结构上还有平均风作用，因而对于高、柔、大跨等结构，风的影响起着

很大的甚至决定性的作用。

### 1.1.3 风强度的表示方法

不同的风有不同的特征，但它的强度常用风速来表达，最常用的有两种。

#### 1. 范围风速

将风的强度划分为等级，一般用风速范围来表达，常用的有以下几种。

##### 1) 蒲福风速表

英国人蒲福 (F. Beaufort) 于 1805 年拟定了风级，根据风对地面 (或海面) 物体影响程度而定出，称为蒲氏风级。蒲氏风级自 0 至 12 共分 13 个等级。自 1946 年以来，风力等级又做了某些修改，并增加到 18 个等级，如表 1.1 所示。风力等级的判断常根据地方的海面状况、海岸渔船征象、陆地物征象、距地 10m 高处相当风速等条件。其中前 13 个等级就是我们在气象广播中所听到的的风的等级。

表 1.1 蒲福风力等级表

风力等级	名称	海面状况		海岸渔船征象	陆地物征象	距地 10m 高处相当风速		
		浪高/m				km/h	n mile/h	m/s
		一般	最高					
0	静风	—	—	静	静，烟直上	<1	<1	0~0.2
1	软风	0.1	0.1	寻常渔船略觉摇动	烟能表示风向，但风向标不能转动	1~5	1~3	0.3~1.5
2	轻风	0.2	0.3	渔船张帆时，可随风移行 2~3km/h	人感觉有风，树叶有微响，风向标能转动	6~11	4~6	1.6~3.3
3	微风	0.6	1.0	渔船渐觉簸动，随风移行 5~6km/h	树叶及微枝摇动不息，旌旗展开	12~19	7~10	3.4~5.4
4	和风	1.0	1.5	渔船满帆时倾于一方	能吹起地面灰尘和纸张，树的小枝摇动	20~28	11~16	5.5~7.9
5	清劲风	2.0	2.5	渔船缩帆 (即收去帆之一部)	有叶的小树摇摆，内陆的水面有小波	29~38	17~21	8.0~10.7
6	强风	3.0	4.0	渔船加倍缩帆，捕鱼需注意风险	大树枝摇动，电线呼呼有声，举伞困难	39~49	22~27	10.8~13.8
7	疾风	4.0	5.5	渔船停息港中，在海上下锚	全树摇动，迎风步行感觉不便	50~61	28~33	13.9~17.1
8	大风	5.5	7.5	进港的渔船皆停留不出	微枝折毁，人向前行，感觉阻力甚大	62~74	34~40	17.2~20.7
9	烈风	7.0	10.0	汽船航行困难	烟囱顶部及平瓦移动，小屋有损	75~88	41~47	20.8~24.4

续表

风力等级	名称	海面状况		海岸渔船征象	陆地物征象	距地 10m 高处相当风速		
		浪高/m				km/h	n mile/h	m/s
		一般	最高					
10	狂风	9.0	12.5	汽船航行颇危险	陆上少见, 见时可使树木拔起或将建筑物摧毁	89~102	48~55	24.5~28.4
11	暴风	11.5	16	汽船遇之极危险	陆上很少, 有时必有重大损毁	103~117	56~63	28.5~32.6
12	台风(飓风)	14.0	—	海浪滔天	陆上极少, 其捣毁力极大	118~133	64~71	32.7~36.9
13	—	—	—	—	—	134~149	72~80	37.0~41.4
14	—	—	—	—	—	150~166	81~89	41.5~46.1
15	—	—	—	—	—	167~183	90~99	46.2~50.9
16	—	—	—	—	—	184~201	100~108	51.0~56.0
17	—	—	—	—	—	202~220	109~118	56.1~61.2

热带气旋是发生在热带海洋上的大气旋涡, 是热带低压、热带风暴、台风或飓风的总称。直径一般几百千米, 最大可达 1000km。热带气旋区域内的风速, 以近中心为最大。按蒲福划分的风力等级, 各类风相对应的等级如下。

(1) 低压区平均最大风力小于 8 级;

(2) 热带低压区为热带气旋中心位置能确定时, 但中心附近的平均最大风力小于 8 级的风区;

(3) 热带风暴为热带气旋中心附近的平均最大风力为 8~9 级;

(4) 强热带风暴热带气旋中心附近的平均最大风力为 10~11 级;

(5) 热带气旋中心附近的平均最大风力为 12 级或 12 级以上的, 在东亚称为台风, 在西印度群岛和大西洋一带称为飓风。

台风中心称台风眼, 半径多为 5~30km, 气压很低, 风小浪高, 云层裂开变薄, 有时可见日月星光, 其四周附近则是高耸的云壁, 狂风暴雨均发生在台风眼之外。台风形成后, 它一边沿逆时针方向快速旋转, 同时又受其他天气系统(如副热带高压等)气流引导或靠本身内力朝某一方向移动, 从而形成台风移动的路径或轨迹。通常自东向西或西北方向移动, 速度一般为 10~20km/h, 当进入中纬度的西风带后, 即折向东或东北移动, 这称为台风转向。袭击我国的台风, 常发生在 5~10 月, 以 7~9 月最为频繁。台风的破坏力很大, 它不但可以吹倒或损害陆上各种工程结构, 而且还大量损害海上物体。台风袭击的地区常有狂风暴雨, 沿海岸则多有高潮、巨浪。

## 2) 福基达龙卷风风力等级表

龙卷风是范围小而时间短的强烈旋风。直径约从几米到几百米不等, 中心气压很低, 风速通常可达每秒几十米到 100m 以上。龙卷风移动速度每小时约数十千米。所经路程, 短的只有几十米, 长的可超过 100km, 持续时间可达几分钟到几小时。与热带气旋相比, 龙卷风的特征可归纳为范围小、风力大、寿命短, 并且运动直线, 发生概率远低于热带气

旋。美国芝加哥大学藤田哲也(T. T. Fujita)教授曾于1971年提出龙卷风按最大风速划分为6个等级,其计算公式为

$$v_F = 6.30 \times (F + 2)^{1.5} \quad (1.2)$$

到现在为止,记录到龙卷风级别未到6级。根据式(1.2),1~6级范围风速如表1.2所示。从表1.2中可以看出,0级龙卷风实际上就在蒲福风力等级表范围之内,是与蒲福风力等级表相呼应的。由于龙卷风作用时间短,因而在同样风速下破坏程度没有一般风严重。

表 1.2 藤田龙卷风风力等级表

等级	名称	征象	距地 10m 高处的风速 / (m/s)
$F_0$	轻龙卷	考虑 $v=20\sim 32.2\text{m/s}$ , 有轻度破坏。烟囱、标志牌有一定损坏, 树枝刮断, 跟前树木被刮倒	$<32.2$
$F_1$	中龙卷	有中度破坏。屋顶表层被掀起, 活动房屋被刮倒, 行驶中车辆被刮得偏离道路	$32.7\sim 50.2$
$F_2$	大龙卷	有相当程度破坏。屋顶被刮飞, 活动房屋被摧毁, 铁路闷罐车被刮翻, 大树被连根拔起, 产生轻物体的飞掷物	$50.4\sim 70.2$
$F_3$	强龙卷	有严重破坏。牢固的屋顶和部分墙壁被刮走, 火车被刮翻, 森林大部分树木被连根拔起, 重型车辆被抛起	$70.4\sim 92.4$
$F_4$	毁灭性龙卷	有毁灭性破坏。牢固的房屋被整体刮倒。地基不牢的结构被掀飞, 汽车被抛起, 产生重物物体飞掷物	$92.6\sim 116.4$
$F_5$	非常龙卷	有非常程度破坏。牢固的房屋被整体掀起。树木搬家, 汽车大小的物体被抛入空中飞行达 100m 之远	$116.7\sim 142.3$
$F_6$	极值龙卷	有极为惊人的破坏。目前尚未有这样的最大风速	$142.6\sim 169.8$

虽然龙卷风破坏力大,但由于范围小、寿命短等特点,风灾损失中最多的还是热带气旋,其中尤以台风最为严重。应该把较大的注意力集中在热带气旋所引起的风力上。

上述风的强度由于存在一段范围,不便于工程计算,常用于气象工作中。

## 2. 工程风速

为了进行结构风工程计算,需要的不是某一范围的风速,而要某一确定的风速。由于风工程中结构不但要承受过去某一时日或今日的风是安全可靠的,还要保证某一规定期限内结构能安全可靠,而风的记录又是随机的,不同时间、月、年都有不同的值和规律,具有明显的非重现性的特征。因而必须根据数理统计方法来求出计算风速,将在第2章具体分析它的计算方法。

### 1.1.4 风速与风压关系

对工程结构设计计算来说,风力作用的大小最好直接以风压来表示。风速越大,风压力也越大。为此需导出风速与风压的关系式。

低速运动的空气可作为不可压缩的流体看待。对于不可压缩理想流体质点作稳定运动的伯努利方程,当它在同一水平线上运动时的能量表达式为



$$w_a V + \frac{1}{2} m v^2 = C \quad (1.3)$$

式中,  $w_a V$  为静压能;  $\frac{1}{2} m v^2$  为动能;  $C$  为常数;  $w_a$  为单位面积上的静压力 ( $\text{kN/m}^2$ );  $V$  为空气质点的体积 ( $\text{m}^3$ );  $v$  为风速 ( $\text{m/s}$ );  $m$  为运动流体质点的质量 ( $\text{t}$ );

式(1.3)两边除以  $V$ , 因为  $m = \rho V$ ,  $\rho$  为空气质点密度 ( $\text{t/m}^3$ ), 则伯努利方程为

$$w_a + \frac{1}{2} \rho v^2 = C_1 \quad (1.4)$$

由式(1.4)可知, 由自由气流的风速提供的单位面积上的风压力为

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} v^2 \quad (1.5)$$

即为普遍应用的风速风压关系公式。  $\gamma$  为单位体积的重力 ( $\text{kN/m}^3$ )。

## 1.2 土木工程结构风灾

由于风灾发生频繁, 持续时间长, 产生的灾害大。因此, 在所有自然灾害中, 风灾造成的损失为各种灾害之首。例如 1999 年, 全球发生严重自然灾害共造成 800 亿美元的经济损失, 其中, 在被保险的损失中, 飓风造成的损失占 70%。下面主要介绍涉及与结构损坏有关的风灾事例。以进一步引起对结构抗风灾的防御和结构抗风设计的重视。

### 1.2.1 台风灾害

#### 1. 2004 年 14 号强台风“云娜”

2004 年 8 月 12 日, 14 号强台风“云娜”在浙江省温岭市石塘镇登陆, 台风登陆时中心气压 950hPa, 台州椒江大陈最大风速达 58.7m/s, 大大超过 12 级台风 36.9m/s 的上限, 台州市所有市县区都观测到 12 级大风, 10 级风圈达 180km, 其风速之大, 杀伤力之强, 为浙江省历史上所罕见。直接经济损失 181.28 亿元。黄岩江口粮库屋顶, 路桥区金清、蓬街两镇 2.7 万亩蔬菜大棚被掀翻, 驱车城乡不时可见被掀翻的房屋和倒塌的广告牌。

#### 2. 2002 年 16 号台风

2002 年 9 月 7 日中午 12 时, 平阳县南鹿岛出现了 56.7m/s 的大风, 洞头和乐清也分别出现了 43m/s 和 38m/s 的当地最大风速。从 9 月 7 日凌晨到晚上 11 时, 温州平均降雨量达到 137.4mm, 苍南县马站镇降雨量超过 250mm。金乡镇全镇还有 30 多间房屋和两间厂房倒塌, 初步估算损失超过 3000 万元。房子屋顶被台风掀翻, 坍塌部位在楼梯间, 从四楼到一楼露出一个大洞。几乎所有出事房子都是近几年建造的新房, 台风中死亡 5 人。

#### 3. 台风袭击广州

海珠区一间汽车修理厂的屋顶被刮倒, 屋内一名正在看电视的年轻男子当场被砸死。一阵狂风从屋外刮进来, 将屋顶吹得鼓了起来, 接着又迅速压下来, 铁屋顶在压回原状的



过程中猛地倒塌下来。

## 1.2.2 大风及飓风灾害

### 1. 河南省体育馆遭 9 级风破坏

河南省体育馆东罩棚中间位置最高处铝塑板和固定槽钢被风撕裂并吹落 100m，三副 30m<sup>2</sup> 的大型采光窗被整体吹落，雨篷吊顶吹坏。而且大部分破坏都是由于负风压所引起的，屋面板被掀起，主体结构好像没破坏。根据当初的设计要求，河南省体育馆应能抵抗 10 级以下大风。按照当天气象局一观测点的观测，通过观测点的大风最高时速达 24.7m/s。

### 2. 1989 年 9 月 4 日美国南加利福尼亚遭受 Hugo 飓风

本次风期实地调查结果表明，49% 的建筑物有屋面受损，但损害的情形各异，有局部的屋面覆盖物或屋面桁架被吹走或破坏，甚至整个屋面结构被吹走。从破坏部位来看，大多数屋面风致破坏发生在屋面转角、边缘和屋脊等部位。

## 1.2.3 龙卷风灾害

全球遭受龙卷风袭击的次数每年高达 1000 次以上，因此近年来各国对此均有所重视。

上海近郊的龙卷风灾害亦呈上升趋势，据 1951~1990 年间的不完全统计，上海出现了 74 次龙卷风。例如，1986 年 7 月 11 日午后，上海市东郊沿海地带发生了一次强龙卷风，先后出现了 4 次龙卷，袭击了南汇、原川沙、奉贤县 11 个乡、1 个镇，共死亡 25 人，损坏房屋 4800 余间，14 家工厂、11 所中小学及幼儿园，6 个畜牧场严重坍塌，造成直接经济损失 2600 余万元；1987 年 7 月 28 日，上海市嘉定县的龙卷风也造成了严重的损失，这次龙卷风是伴随着 8707 号台风而来的。

龙卷风的影响范围虽有一定的限度，但其毁灭性的破坏力也给人们造成一定的恐惧心理。因此，在龙卷风多发地区做城市规划或小区规划时，应充分考虑龙卷风的影响，以期达到理想的经济效益和社会效益。

## 1.2.4 重要结构物风毁典型事例

### 1. 屋盖破坏

图 1.2 所示为英国一座独立主看台悬挑钢屋盖，当大风从开阔的地面吹来时，由于屋盖下部强大的压力和屋盖上部的吸力，屋盖覆面结构(石棉板)在固定点处损坏，从而大片覆面结构被掀掉，而屋盖钢结构基本保持完好，最后调换所有覆面结构，为此花费了 26000 英镑。

2003 年 8 月 2 日下午 1 时 15 分左右，雷暴雨中突如其来的旋风，居然把上海大剧院的屋顶掀去了一大块。掠过上海大剧院，把剧院东侧顶部中间的一大块钢板屋顶生生卷起，移动约 20m，又砸在剧院顶部中间的高平台上。屋顶东侧中部已露出了约 25m<sup>2</sup> 的一个大“窟窿”。卷起的这一大块钢板屋顶，被旋风撕裂成两段，已揉成皱褶不堪的纸团一

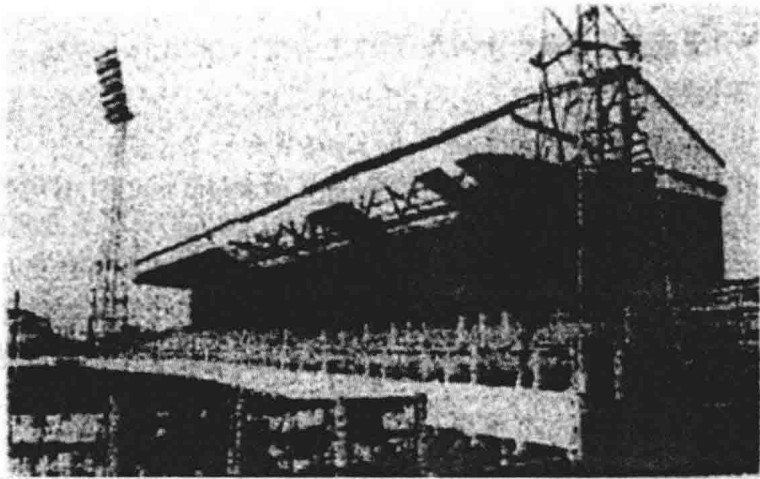


图 1.2 体育场主看台屋盖覆面结构损坏

般，20 多名工作人员合力搬动，也难以移动，如图 1.3 所示；3cm 宽的避雷钢带，已卷成了麻花形；顶楼平台上直径达 10cm 粗的不锈钢防护栏，也有 10 多米被旋风扭曲。

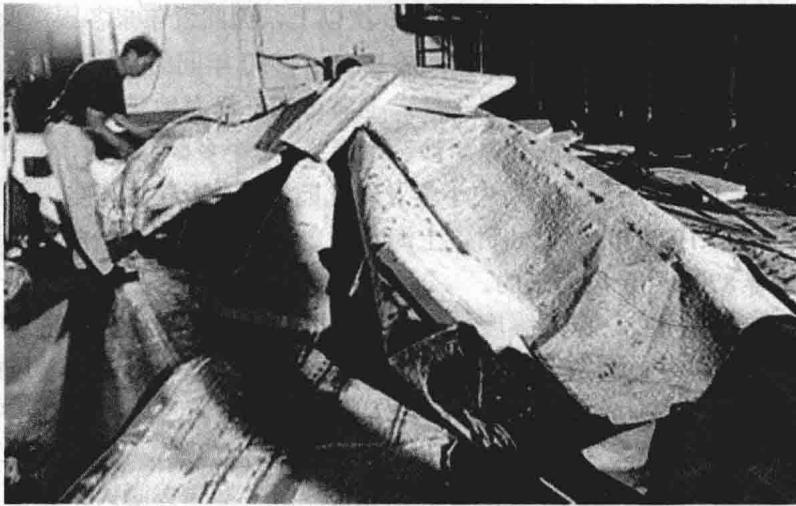


图 1.3 上海大剧院部分屋顶险被揉成“纸团”

## 2. 桥梁结构破坏

1940 年，美国华盛顿州塔科马 (Tacoma) 海峡建造的塔科马悬索桥，主跨 853m，建好不到 4 个月，就在一场风速不到 20m/s 的灾害下产生上下和来回扭曲振动而倒塌了。当时有一位新闻电影摄影师正巧在场，他拍下了该桥倒塌的情形。图 1.4 为塔科马悬索桥的扭转振动。

## 3. 建筑物和构筑物破坏

1926 年，美国佛罗里达州的一次飓风使一座 17 层的大楼的两个横框架出现 0.6m 与 0.2m 的水平塑性变形，这座大楼的玻璃等围护结构几乎完全破坏，隔墙也严重开裂。1965