

工程抗风设计计算手册

张相庭 编著

中国建筑工业出版社

由于风工程研究处在不断发展之中，工程中不断出现新课题和特殊问题，引起了国内外学术界的密切注意和关注，这些新的研究成果也势必在不久将引入规范之中。作者将在适当时间出版风工程最新发展专著，并希望本书再版时不断引入新内容和补充条文，使广大读者能迅速适应这一变化，获取最新讯息，并热诚希望读者在使用过程中，不吝提出宝贵意见和建议。

张相庭

1997.3

(京) 新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工程抗风设计计算手册/张相庭编著. -北京: 中国建筑工业出版社, 1997

ISBN 7-112-03382-9

I. 工… II. 张… III. ①抗风结构-结构设计-手册②抗风结构-计算方法-手册 IV. TU352.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 16132 号

工程抗风设计计算手册

张相庭 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 7¼ 字数: 192 千字

1998 年 1 月第一版 1998 年 1 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-112-03382-9

TU·2618 (8527)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

风荷载是各种工程特别是高、大、细、长等柔性工程结构的主要设计荷载。由于全世界风灾引起的损失每年达100亿美元以上,我国又是风灾严重国家,而工程损伤和破坏又是风灾损失的重要成分,因而工程抗风设计计算合理和全面与否是工程安全和抗风防灾的重要因素。本书以作者负责制订的、有风荷载内容的国家标准或各种工程规范及其最近修订本为基础而编写,并扩大到规范上未列出的工程上又需要的风工程内容和图表,具有较强的实用性。

本书共分十二章,前七章为风工程的基本概念及其基本计算公式,它适用于未加条件限制的一般情况下的各种工程抗风计算,第八至第十一章分别针对高耸结构、高层建筑桥梁、屋盖结构列出一般公式和图表,也列入一些扩大内容和图表,第十二章介绍美、日风荷载规范内容及计算方法,以期能进行计算比较和引起注意。本书可供工程设计、科研工作者以及大专院校师生使用和参考。

前 言

风荷载是高、大、细、长等柔性结构重要设计荷载，它可造成工程结构损伤和破坏，可给人民生命财产带来重大的损失，是风灾损失的主要成分。据德国 1961~1980 年二十年间对损失 1 亿美元以上自然灾害统计，风灾造成的损失占总自然灾害损失 40.5%。随着生产和建设的发展，风灾损失与其他损失一样，每年递增。美国华盛顿世界观察社报导，整个 80 年代，因气候变化造成的损失也只 540 亿美元，而 90 年代前 5 年，已造成 1620 亿美元的损失，暴增 6 倍。如按德国统计资料推算，则世界风灾造成每年损失达 137.7 亿美元。但资料显示，实际风灾损失已远远超过上述数值，单单 1992 年安德鲁飓风横扫美国佛罗里达州，把面积达 100 多万平方英里的地方夷为平地，损失达到 300 亿美元，7 家保险公司因无法承受赔债而倒闭。实际上，除美国外，其他国家的风灾损失也是十分惊人的。1991 年孟加拉国风灾造成 14 万人丧生，损坏或摧毁 100 万间民房，造成 30 亿美元损失，相当于孟加拉国国民总产值的 10%；而 1994 年孟加拉国二次风灾又造成 44 万人死亡，损失更加惊人。在我国，风灾损失也是十分惊人的，1994 年 9415 号这一次台风袭击浙江，就造成倒塌和损坏房屋 80 多万间，倒掉通信电杆 2397 公里，死亡 1000 多人，机场屋盖也被吹坏，99m 高的通讯铁塔也被狂风刮倒。直接经济损失达 108 亿人民币，加上间接损失，总数达 177.6 亿人民币，约合 20 多亿美元。

风灾损失的主要部分为工程结构的损坏和倒塌。特别是高、大、细、长的柔性工程结构，抗风设计计算的合理和全而与否是工程安全的重要关键。与此相应，国际上每四年召开风工程学术

会议，地区性的如亚太、欧洲等的风工程学术会议则更频繁。我国以结构风效应为名的学术会议，每二年召开一次，以风工程与工业空气动力学为名的学术会议，则每四年召开一次，说明风工程的研究以及在工程设计计算中的应用已得到很大的重视。

鉴于风在抗灾防灾上的重要性，我国很多国标和市标规范如建筑结构荷载规范、高耸结构设计规范、高层建筑设计规定，公路桥梁抗风设计指南、铁路桥涵设计规范等都对风荷载作了整章或整本的专门的条文规定。特别是，由于我国的建设正处在蓬勃发展阶段，大量出现的新工程均需进行合理全面的抗风设计计算，国际上发达国家的风荷载规范也在不断变化之中。我国规范为了适应这一形势，也对某些条文作了新的变化和调整，如对风工程有重要影响的地面粗糙度类别的划分，由原来的三类改为四类，基本上与美、英规范及国际 ISO 标准一致，仅这一点就引起规范条文和图表一系列变化。在这种形势下，工程设计人员及研究工作者迫切需要一本与这一变化相适应的、计算上又较为全面合理的、能与规范一致的、并在一些地方作出补充的工程抗风设计计算手册。有鉴于此，作者根据参加负责制订的有关规范及其修订所掌握的材料，以及作者参加国内外有关风工程会议发表的论文资料，也包括一些其他作者的资料，编写了这本工程抗风设计计算手册。

本书共分十二章，前七章为工程抗风设计计算的基本概念和基本计算方法，可以适应各种工程的一般情况，深入了解风工程基本概念和计算方法，可以解决一些规范上尚未言明或应用条件不符的一般情况的工程抗风设计计算；第八至第十一章为针对具体工程又密切结合规范的抗风设计计算内容，其中第八章为高耸结构；第九章为高层建筑；第十章为桥梁建筑；第十一章为大跨度屋盖；由于工程建设中有大量国外资金投入，也由于我国对其他国家工程进行涉外设计，并且有些重大工程设计者也需用发达国家规范进行对比计算，需要有一些发达国家风荷载规范计算的对比资料，因而最后一章即第十二章，介绍了美国、日本的风荷载规范及计算方法，可供对比参考。

目 录

第一章 风工程的基础知识及风荷载公式	1
第一节 风的基本概念	1
第二节 风力强度表示法	3
一、范围风速	3
二、工程风速	9
第三节 风速风压关系	9
第四节 风对结构的作用	11
一、结构的风力	11
二、结构的风效应	13
第五节 结构抗风分析计算和风荷载公式	16
一、顺风向响应	16
二、空气动力失稳	18
第二章 基本风速或风压及非标准情况的换算	19
第一节 基本风压的定义及确定方法	19
第二节 全国基本风压标准值表及分布图	24
第三节 非标准情况的分析和换算	31
第三章 风压高度变化系数	40
第一节 任一地貌任一高度风压计算基本公式	40
第二节 风压高度变化系数	42
第三节 我国荷载规范有关参数取值	42
第四节 特殊地形下的计算	44
第四章 风载体型系数	49
第一节 风载体型系数及压力系数和力系数	49
第二节 单体建筑风载体型系数	50
第三节 群体建筑风载体型系数	52
第四节 局部风压体型系数	74
一、外表面	74

二、内表面	74
第五章 顺风向风振系数、阵风系数和荷载效应组合	76
第一节 风振力、位移及风振系数公式	76
第二节 常用结构频率、周期和振型公式	82
一、基础理论	82
二、实用公式	83
三、我国规范采用的公式及用表	85
第三节 阵风系数	86
第四节 荷载效应组合	87
一、承载能力极限状态	87
二、正常使用极限状态	89
第六章 横风向旋涡脱落风振及共振响应	91
第一节 基本概念	91
第二节 横风向风力图	91
第三节 横风向等效共振荷载及共振响应	93
第四节 考虑横风向共振荷载时的总响应	98
第七章 风力下空气动力失稳	100
第一节 基本概念	100
第二节 横风向弯曲驰振	100
第三节 扭转驰振	103
第四节 横风向弯扭耦合颤振	105
第八章 高耸结构抗风设计计算	106
第一节 顺风向沿高度规则变化的高耸结构抗风计算	106
第二节 顺风向风振系数计算的简化	112
第三节 高耸结构周期或频率常用计算用表及经验公式	116
一、直线变化高耸结构前三阶频率和振型	116
二、经验公式	116
第四节 横风向涡流脱落共振响应	121
第五节 空气动力失稳	124
第六节 工程实例	124
第九章 高层建筑抗风设计计算	127
第一节 顺风向等截面高层结构抗风计算	127

第二节	顺风向风振系数计算的简化	132
第三节	频率或周期、振型常用公式及经验公式	136
一、	按结构动力学求出的频率振型公式	136
二、	自振周期经验公式	139
第四节	风力作用下的舒适度分析	142
一、	弯曲振动	142
二、	扭转振动	143
第五节	工程实例	145
第十章	桥梁结构抗风设计计算	147
第一节	顺风向(横向)风荷载	147
第二节	桥梁空气动力失稳计算	161
第三节	桥梁自振频率(或周期)和振型	166
一、	按结构动力学计算	166
二、	经验公式	168
第四节	工程实例	172
第十一章	屋盖结构抗风设计计算	175
第一节	屋盖结构风致响应计算	175
第二节	自振频率和振型计算	179
第三节	工程实例	182
第十二章	美国、日本风荷载规范	185
第一节	美国国家标准 ANSI 规范(风荷载部分)	185
一、	设计风压 p (相当我国 w_r) 及风力 F (点风荷载)	
公式		185
二、	速度压力 q	187
三、	阵风响应系数 $\bar{G}$ 、 G_h 及 G_z (构件及维护结构用)	191
四、	压力系数 C_p 、力系数 C_f	196
五、	荷载组合	198
第二节	日本建筑荷载规程(风荷载部分)	205
一、	风荷载公式	205
二、	速度压力 q	205
三、	风力系数 C_f	208
四、	结构用阵风影响系数 G_f	208
参考文献		216

第一章 风工程的基础知识 及风荷载公式

第一节 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。气流一遇到结构的阻塞，就形成高压气幕。风速愈大，对结构产生的压力也愈大，从而使结构产生大的变形和振动。结构物如果抗风设计不当，或者产生过大的变形会使结构不能正常的工作，或者使结构产生局部破坏，甚至整体破坏。

风荷载是各种工程结构的重要设计荷载。对于高层房屋、高耸结构（如塔、烟囱、桅杆等）、桥梁、起重机、冷却塔、输电线、屋盖等，常常起着主要的作用。因而风力的研究，对工程结构，特别是对上述工程结构，是设计计算中必不可少的一部分。

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、寒潮风暴、飓风、龙卷风等。

不同的季节和时日，可以有不同的风向，给结构带来不同的影响。每年强度最大的风对结构影响最大，此时的风向常称为主导风向，可从该城风玫瑰图上得出；但在结构风工程上，除了某些参数需考虑风向在下面有关章节加以注明以外，一般都假定最大风出现在各个方向上的概率相同，从而较偏于安全地进行结构设计。

风可以有一定的倾角，它相对于水平一般可在 $+10^\circ$ 到 -10° 内变化。这样，结构上除水平风力外，还存在上下作用的竖向风力。竖向风力对细长的竖向结构，例如烟囱等，只产生竖向轴力，

因而对这类工程来讲并不重要，只有像大跨度屋盖和桥梁结构中，竖向风力才应该引起我们的注意。但其值也较水平风力为小，但属于同一数量级。

根据大量风的实测资料可以看出，在风的时程曲线中，瞬时风速 v 包含两种成分：一种是长周期部分，其值常在 10 分钟以上；另一种是短周期部分，常只有几秒左右。图 1-1 是风的一个时程曲线示意图。根据上述两种成分，实用上常把风分为平均风（即稳定风）和脉动风（常称阵风脉动）来加以分析。平均风是在给定的时间间隔内，把风对建筑物的作用力的速度、方向以及其他

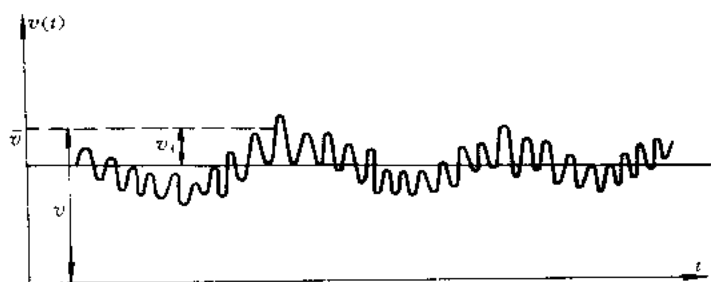


图 1-1 瞬时风速 v 与平均风速 $\bar{v}$ 和脉动风速 v_1

物理量都看成不随时间而改变的量，考虑到风的长周期大大地大于一般结构的自振周期，因而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。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。

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，这些参数愈大，影响也愈大，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。

第二节 风力强度表示法

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。

一、范围风速

将风的强度划分为等级，用一般风速范围来表达。常用的有：

(一) 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的，称为蒲氏风级。由于根据地面 (或海面) 物体对风的影响程度比较笼统，以后逐渐采用以风速的大小来表示风级，几经修改，自 0 至 12 共分 13 个等级。自 1946 年以来，风力等级又作了某些修改，并增加到 18 个等级，如表 1-1 所示。其中前 13 个等级就是我们在气象广播中所听到的风的等级，可以看出，7 级或 7 级以上的风力才能对生活或工程结构造成不便或威胁，直至结构倒塌。

热带风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。直径一般几百公里，最大可达 1000km，热带气旋区域内的风速，以近中心为最大。国际上常以近中心最大风速作为分类的标准。通常我们把热带气旋中心位置不能精确确定时，平均最大风力小于 8 级的风称为低压区；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 级的风称为热带低压区；热带气旋中心附近的平均最大风力为 8 至 9 级的称为热带风暴；热带气旋中心附近的平均最大风力为 10 至 11 级的称为强热带风暴；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

蒲 福 风 力 等 级 表

表 1-1

风力等级	名称	海面状况			海岸渔船征象	陆地地面物征象	距地 10m 高处相当风速		
		浪高(m)		最高			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	轻风	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,可随风移行每小时 2~3km	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	渔船渐觉摇动,随风移行每小时 5~6km	树叶及微枝摇动不息,旗帜展开	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)	有叶的小树摇荡,内陆的水面有小波	29~38	17~21	8.0~10.7	

续表

风力等级	名称	海面状况			海岸渔船征象	陆地地面物征象	距地 10m 高处相当风速		
		浪高(m)		最高			km/h	n mile/h	m/s
		一般	最高						
6	强风	3.0	4.0	4.0	渔船加倍缩帆,捕鱼须注意风险	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	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	7.5	近港的渔船皆停留不出	微枝折断,人向前行,感觉阻力甚大	62~74	30~40	17.2~20.7
9	烈风	7.0	10.0	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
10	狂风	9.0	12.5	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吹毁	89~102	48~55	24.5~28.4
11	暴风	11.5	16.0	16.0	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

风 力 等 级	名 称	海面状况			海岸渔船征象	陆地地面物征象	距地 10m 高处相当风速		
		浪高(m)		最高			km/h	n mile/h	m/s
		一般	最高						
12	台风 (飓风)	14.0	—	海浪滔天	陆上绝少,其摧毁力极大	118~133	64~71	32.7~33.9	
13	—	—	—	—	—	134~149	72~80	37.0~38.1	
14	—	—	—	—	—	150~166	81~89	41.3~46.1	
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	

注:13~17级风力是当风速可以仪器测定时用。

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。

(二) 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风旋。美国芝加哥大学福基达(T. T. Fujita)教授曾于1970年提出龙卷风按最大风速划分为7个等级,其计算公式为

$$v_F = 6.30 \times (F + 2)^{1.5} \quad (1-1)$$

到现在为止,记录到龙卷风级别未到6级。根据上式,1至6级范围风速如表1-2所示。从表中可以看出,0级龙卷风实际上就在蒲福风力等级表范围之内,因而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。

福基达龙卷风风力等级表

表 1-2

等级	名称	征 象	距地10m 高处的 风速 (m/s)
F ₀	轻龙卷	考虑 $v=20\sim32.2\text{m/s}$, 有轻度破坏。 烟囱、标志牌有一定损坏,树枝刮断,根 浅树木被刮倒	<32.2

续表

等级	名称	征 象	距地 10m 高处的 风速 (m/s)
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	32.7~50.2
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	50.4~70.2
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, 重型车辆被掀起	70.4~92.4
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	92.6~116.4
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	116.7~142.3
F_6	极值龙卷	有极为惊人的破坏。目前尚未有这样高的最大风速	142.6~169.8

虽然龙卷风破坏力大, 但由于范围小寿命短等特点, 风灾损失中最多还是热带气旋, 其中尤以台风最为严重。德国慕尼黑保险公司 1982 年资料中, 35 个自然灾害损失 1 亿美元以上的项目中, 风灾项目占 18 个, 占 51.4%, 而 18 个风灾项目中, 只有一个龙卷风, 热带气旋等风灾项目数占 94.4%, 而经济损失则占 94.6%。因而主要是热带气旋等所引起的损失, 所以我们应该把较大的注意力集中在热带气旋所引起的风力上。