

结构风压和风振计算

张相庭编著

同济大学出版社

结构风压和风振计算

张相庭编著

同济大学出版社

内 容 提 要

风荷载是各种结构特别是高耸结构、高层建筑和大跨度桥梁等的主要设计荷载。由于风的作用,结构承受了风压并产生了风振,遂形成了一门崭新的风工程学科。本书系统地叙述了结构风压和风振计算的基本理论和分析方法。在顺风向,在充分叙述平均风的基础上,着重阐明了脉动风引起的风振计算。在横风向,分析了多种因素引起的振动。对几个风工程中特殊问题也作了论述。

本书结合最新修订的“荷载规范”(1985年出版)内容,提供了较多的实例和图表,以便应用。本书可作为有关高等院校理工科学生和研究生结构风压和风振教材或参考书,也是结构设计和研究人员进行抗风计算的主要参考书。

责任编辑 方 芳
封面设计 徐 繁

结 构 风 压 和 风 振 计 算

张相庭编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.5 字数: 269千字

1985年5月第1版 1985年5月第1次印刷

印数: 1—20,000 科技新书目: 104—269

统一书号: 15335·015 定价: 2.30元

前 言

风荷载是结构的重要设计荷载，特别对于高耸结构（例如电视塔、烟囱、石油化工塔等）、高层建筑结构和大跨度桥梁等，有时甚至起着决定性的作用。

当风以一定的速度向前运动遇到结构阻碍时，结构承受了风压。在顺风向，风压常分成平均风压和脉动风压，前者作用相当于静力，后者则引起结构振动。在横风向，由于旋涡规则或不规则脱落等原因，产生了横风向振动，偏心时还产生扭转振动。因此结构风压和风振的理论和计算，是从事结构抗风设计、计算和研究必须掌握的一门学科。

本书现分九章讲述。第一至第四章，以讲授平均风压为主。结合风压计算，阐述了概率论的基本原理；结合最大风速数理统计的分析，讲述了高斯曲线、皮尔逊Ⅲ型曲线和极值分布曲线；结合结构风压的计算，讲述了风洞试验以及有关参数，俾使在只具有平均风速原始资料或条件改变时也能进行计算和分析。第五至第七章，以讲授顺风向风振为主。结合脉动风压是随机荷载的情况，阐述了随机振动理论的基本原理及其应用。对顺风向振动中可能出现的各种问题，都加以详细的叙述或讨论。第八章则叙述了横风向振动中常遇的几个主要问题。结合该章学习的需要，还简单介绍了空气动力学中几个重要现象和参数。第九章则着重讨论和分析风振计算中几个特殊问题。

在编写本书时，力求系统地完整地叙述基本理论和分析方法。结合“荷载规范”的修订（1985年出版），全面叙述了有关风荷载条文制订的原理、图表及必要说明，以便读者对风工程的内容、理论和应用能得到完整而彻底的了解。又为使读者不需查阅其它专门学科的书籍而能融会贯通地掌握理论和方法，本书结合风资料特性阐述了概率论、随机振动理论以及空气动力学中一些基本概念、原理和方法。为了便于理解应用，在有关章节中提供了足够的计算例题。为了便于阅读对照，开头还编排了符号说明。本书采用最新的有关建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语的国家标准。本书综合应用了国内外有关风工程的科研成果，其中包括笔者近几年在国内外学术会议和刊物上发表的论文，以及笔者参加的“荷载规范”修订组同志们提供的资料和数据。希望通过本书所介绍的理论和方法，能达到掌握风工程的基本理论和方法的目的；并通过它，也能有助于对生产实践中可能遇到的风工程问题作出具体分析和解决。

结构风压和风振计算，涉及多门学科的知识。特别是随机风振的研究，国外从五十年代开始才有重要论文发表，例如 M. Ф. Барштейн 和 A. G. Davenport 的论文。笔者曾在 1984 年第三届国际高层建筑会议上与 Davenport 先生交换过风振有关问题的一些看法，这些看法，一并反映在本书的有关章节中。国内对随机风振发表文章为数甚少，研究尚不充分，特别是其中涉及的许多参数，都是根据现有的有限实测资料得出的，有待于进一步完善和改进。

本书在写作过程中得到很多同志的支持和帮助，朱振德教授对本书作了审阅，还提供了多种参考资料；荷载规范修订组徐传衡、田浦等工程师在风压和体型系数等方面提供了部分资料数据；黄本才、王聪同志参加了部分计算工作，方芳同志参加本书全部制图和出版工作，特比致谢。书中涉及的面较广，限于笔者水平，谬误之处在所难免，敬希读者指正。

张相庭

1984年12月24日

主要符号说明

$\bar{x}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ ……: 字母上一横, 表示平均值。

K^* 、 M^* 、 P^* ……: 字母右上角带“*”号, 表示广义值。

$\tilde{y}$ 、 $\tilde{M}$ 、 $\tilde{P}$ ……: 字母上加“~”, 表示综合值

*

*

*

a : 加速度; 高斯曲线的数学期望; 普氏压力计上动压液柱高度; 指定长度。

a_0 : 普氏压力计上静压液柱高度。

A : 截面积。

A_j : 第 j 个振型的响应函数。

B : 结构的参考尺度。

c : 与结构外形有关的系数。

C : 粘滞阻尼系数; 协方差函数; 不同地面粗糙度的修正系数, 指定系数。

C' : 折算粘滞阻尼系数。

C_T : 与转动相对应的阻尼系数。

C_m : 与移动相对应的阻尼系数。

C_s : 偏差系数。

C_v : 离差系数。

d : 两点间的距离; 平均值与众值之间的距离; 动力的符号。

D : 方差; 直径。

e : 外形尺寸参数。

E : 弹性模量; 数学期望。

E_h : 普氏压力计系数。

f : 脉动风的符号。

$f(t)$: 峰值为 1 的脉动风压时间函数。

$f(x)$: 概率密度函数。

$f_1(x)$: 极值概率密度函数。

$F(t)$: 有限自由度体系单位 (广义) 质量的 (广义) 外干扰。

$F(x)$: 概率分布函数。

$F_1(l)$: 极值概率分布函数。

$h(t)$: 脉动响应函数。

H : 建筑物总高度。

$H_j(i\omega)$: 第 j 振型频率响应 (传递函数)。

H_T : 梯度风高度。

H_z : 赫兹。

i : 点或楼层的序号。
 I : 惯性矩。
 I_r : 极惯性矩。
 j : 振型序号。
 k : 单元刚度矩阵系数; 振型序号; 修正系数。
 K : 总刚度; 表示地面粗糙度的系数。
 l : 跨度。
 l_x : 建筑物迎风面水平长度。
 l_y : 建筑物的深度。
 L : 表示相关性的参数; 湍流的长度尺度; 系统拉格朗日函数。
 m : 单元质量矩阵系数; 线质量; 米。
 M : 总质量; 弯矩; 扭矩; 力矩。
 n : 频率; 自由度; 质点数; 统计资料数; 楼层数。
 n_s : 旋涡脱落频率。
 p : 线荷载。
 p_0 : 不考虑空间相关性时的线荷载。
 p_d : 脉动风引起的线等效静力或风振力。
 p_D : 线阻力。
 p_L : 线升力。
 p_s : 线平均风压的设计最大值。
 P : 点荷载; 力; 概率; 大气压。
 $P_{ii'}(\omega)$: 二点脉动风压积函数。
 q_i : 第 i 点水平方向的线荷载。
 $q_i(t)$: 响应分解后第 j 振型的广义坐标 (时间函数)。
 Q : 剪力; 广义力。
 r_j : 第 j 振型位置系数。
 R : 相关函数; 力的通称; 响应通称。
 R_d : 脉动风引起的响应。
 R_e : 雷诺数。
 R_s : 平均风引起的响应。
 s : 秒; 静力的符号。
 S : 功率谱密度; 面矩。
 S_i : 斯脱罗哈数。
 t : 时间; 温度; 变量。
 T : 周期; 动能; 扭矩。
 T_0 : 重现期 (年); 时间区间。
 u_j : 第 j 振型影响系数。
 v : 风速。
 v_c : 临界速度。

v_f : 脉动风速。
 v_{fp} : 设计最大脉动风速。
 v_i : 瞬时风速。
 v_p : 设计最大风速。
 v_r : 实际作用方向的风速。
 V : 势能。
 $w(x, z)$: 点 (x, z) 处的面荷载。
 w : 作用在建筑物表面的单位面积的风压。
 w_0 : 单位面积上的基本风压 (标准风压)。
 w_f : 单位面积上的脉动风压。
 x : 沿建筑物迎风面水平长度的变量; 随机变量; 指定函数。
 x_p : 设计最大值。
 $X(i\omega)$: $x(t)$ 的傅立叶变换。
 y : y 向的水平位移。
 y_0 : 截面上某一点的 y 向座标。
 y_{0s} : 位移后截面上某一点 y 向的绝对座标。
 z : 沿建筑物高度的变量。
 z_0 : 地面粗糙度。
 z_{0s} : 位移后截面上某一点 z 向的绝对座标。

* * *

α : 地面粗糙度系数; 风速的迎角; 屋面坡度; 倾斜度; 指定系数。
 β : 风振系数。
 γ : 容重; 阻尼系数 (复阻尼理论); 指定系数。
 γ_K : 比重。
 δ : 单元柔度矩阵系数; 单位力作用下产生的位移; 考虑尺寸影响的横向风力折减系数。
 Δ : 荷载作用下产生的位移; 偏差; 区段长度。
 ϵ : 指定函数。
 ϵ_K : 风速管系数。
 ζ : 阻尼比。
 η : 风压空间相关性折算系数; 指定系数。
 θ : 干扰圆频率; 扭转角; 修正系数。
 λ_i : 沿高度无变化结构的第 i 振型影响系数。
 μ : 脉动风的保证系数 (峰因子); 粘性; 指定系数。
 μ_D : 阻力系数。
 μ_{DL} : 由 μ_D 和 μ_L 组成的系数。
 μ_f : 脉动系数。
 μ_L : 升力系数。
 μ_M : 扭矩系数。

目 录

主要符号说明	(I)
第一章 风力的组成	(1)
第一节 风的区分	(1)
第二节 风速风压关系公式	(3)
第三节 风对结构作用的计算	(5)
第二章 概率论基础	(8)
第一节 概率及概率分布函数	(8)
第二节 概率密度函数	(9)
第三节 统计数字特征	(11)
第三章 平均风的概率计算——基本风速和基本风压	(16)
第一节 基本风速和基本风压的标准	(16)
第二节 最大风速的数理统计	(20)
第三节 非标准情况下的风速或风压的换算	(26)
第四章 结构上的平均风压	(31)
第一节 风载体型系数	(31)
第二节 风压高度变化系数	(34)
第三节 结构上平均风压计算公式	(38)
第五章 随机振动理论基础	(40)
第一节 随机振动的基本概念	(40)
第二节 常用的随机过程	(41)
第三节 相关及相关系数、相关函数	(42)
第四节 功率谱密度	(46)
第五节 单自由度体系的随机振动	(49)
第六节 多自由度和无限自由度体系的随机振动	(54)
第六章 脉动风的概率特性	(60)
第一节 脉动风的概率分布	(60)
第二节 脉动风功率谱	(62)
第三节 脉动系数	(68)
第四节 脉动风的空间相关性	(69)

第七章 结构顺风向随机风振响应..... (73)

 第一节 顺风向随机风振响应基本公式..... (73)

 第二节 风振力和风振系数..... (76)

 第三节 沿高度无变化结构的风振计算..... (79)

 第四节 沿高度有变化结构的风振计算..... (84)

 第五节 不同地面粗糙度对风振影响的分析..... (94)

 第六节 高振型对风振影响的分析..... (97)

 第七节 有规则变化结构的风振简化计算..... (99)

第八章 结构横风向平移和扭转风振响应 (104)

 第一节 经细长物体流动而产生的力 (104)

 第二节 旋涡脱落响应分析 (108)

 第三节 横风向驰振 (113)

 第四节 扭转发散振动 (116)

 第五节 平移和扭转耦合振动的稳定性 (117)

第九章 风振计算中几个特殊问题 (120)

 第一节 上下不同材料组成的结构的风振响应 (120)

 第二节 高层结构平移和扭转耦合振动 (126)

附录一 全国基本风压标准值 (132)

附录二 风载体型系数 (136)

附录三 〈工业与民用建筑结构荷载规范〉(1985年送审稿)第五章风荷载条文 ... (152)

主要参考文献 (157)

第一章 风 力 的 组 成

大气从来没有静止过。大气是物质,自然有重量,从地表面一直向上的整个大气柱对它下面的地表面和物体便有压力,单位面积上承受的这种压力,叫做**气压**。各个地方大气压有高有低,例如一个地方上面的空气冷,密度就大,气压也就大些;另一个地方上面的空气暖,密度小些,气压也就小些,这样,空气就从气压大的地方向气压小的地方流动,空气的这种流动,就是风。

风是空气的流动,必然就有速度。气流在建筑物前,由于受阻雍塞,形成高压气幕。速度愈大,对建筑物的压力也愈大。这层高压气幕对后来的气流起着缓冲作用,使得流速降低,建筑物所受压力因而也随之减小。当流速减小到一定程度时,后面接踵而至的气流又继续加强使建筑物前的流速获得新的较大的速度,从而又在建筑物前形成高压气幕。流速一大一小连续不断地变化,使建筑物的压力即风压也因之发生变化,从而使建筑物产生了较大的偏移,并围绕偏移位置作较大的振动。

远在十七世纪,就有人开始研究风压,但到了十九世纪末,由于1879年特(Tay)桥事故,才引起人们的注意和重视。由于不注意风压及风振,引起结构风灾的事故屡见不鲜。1969年3月19日,在英国约克群埃姆莱摩尔地方的高386米的钢管电视桅杆被风吹坏即其一例。

风是建筑物的侧向荷载之一,它与地震荷载一起是建筑物常遇的侧向荷载。对于较高较长的建筑物例如电视塔、烟囱、高层房屋、桥梁等,侧向荷载引起的响应在总荷载中占有相当大的比重,甚至于起着决定性的作用,因而风力特别是风振的研究与高耸结构、高层建筑、大桥梁的分析常常是相互联系的。

专门研究风力作用下结构的反应是五十年代后期逐渐形成的一门新学科。国际上自1963年起以每隔四年的间隔召开了六次有关风对房屋及结构作用的国际性学术讨论会。我国在静力风压上曾作了较多的研究,但对风振还研究得不多,到现在为止公开发表出版的论文只有几篇。

本章对风的组成作了阐述,介绍了风的区分,风速与风压的关系以及结构抗风的计算方法。

第一节 风 的 区 分

为了区分风的大小,以便了解风可能引起的危害和影响程度,常将风划分为13个等级。早期人们还没有仪器来测定风速时,就按照风对海上船只和陆上地面物体的影响程度及其所引起的现象来进行划分。风压的大小和风的速度有着直接的关系,当后来人们可以用仪器测定风速时,就把每级风力加上相当的风速数值,使划分既具体又清楚。风的十三个等级如表1-1所示。这些等级就是我们日常在气象广播中听到的风的等级。

风 的 等 级 表

表 1—1

风力等级	海面状况		海 岸 渔 船 征 象	陆 地 地 面 物 征 象	相 当 风 速		
	浪 高 (m)				公里/时	哩/时	米/秒
	一般	最高					
0	—	—	静	静、烟直上	<1	<1	0—0.2
1	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	0.2	0.3	渔船张帆时, 可随风移行 每小时2—3公里	人面感觉有风, 树叶有微响, 风向标能转动	6—11	4—6	1.6—3.3
3	0.6	1.0	渔船渐觉簸动, 随风移行 每小时5—6公里	树叶及微枝摇动不息, 旌旗展开	12—19	7—10	3.4—5.4
4	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	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	3.0	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	4.0	5.5	渔船停息港中, 在海者下锚	全树摇动, 迎风步行感觉不便	50—61	28—33	13.9—17.1
8	5.5	7.5	近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	30—40	17.2—20.7
9	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
10	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吹毁	89—102	48—55	24.5—28.4
11	11.5	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
12	14.0	—	海浪滔天	陆上绝少, 其捣毁力极大	>117	>63	>32.6

但是, 对于设计一个受风作用的建筑物来说, 由于风的一个等级对应的风速有段范围, 而且没有区分建筑物有关的外形、高度等因素的影响, 这样宽的划分范围对确定风速来说确是太粗了, 因而从结构计算角度来说, 还需要更细一些, 换句话说, 要根据每一具体地区具体建筑物附近的地貌、建筑物的外形及讨论的位置 (高度), 来确定具体的风速, 然后再来确定风压的大小。它们都是一个确定的数值, 而不是对应一个数值范围。

根据大量风的实测资料可以看出, 在风的顺风向时程曲线中, 包含两种成份: 一种是长周期部份, 其值常在 10 分钟以上; 另一种是短周期部份, 常只有几秒左右^[30]。图 1—1 是风的一个时程曲线示意图。根据上述两种成份, 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, 因而其作用性质是动力的, 引起结构的振动。

除顺风向振动以外, 在横风向, 由于升力的作用, 也会引起横向风振, 同时外扭矩还

将引起扭转振动。因而风对结构的作用，在受力方向、作用性质等等都是多方面的，也是十分复杂的。

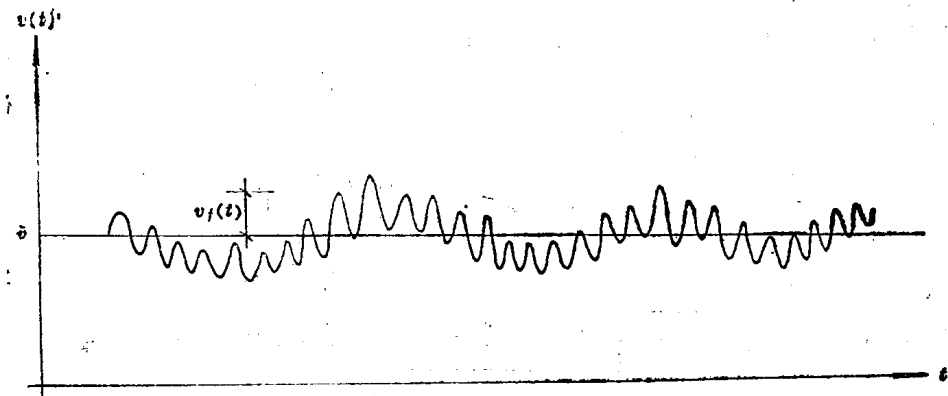


图 1—1 平均风速 $\bar{v}$ 和脉动风速 v_f

一般来说，建筑物愈高，振动的程度也愈厉害。由于建筑物的振动也改变着风的本身结构，引起建筑物表面风压的变化，而风压的变化又反过来影响着建筑物的振动。因而风力和建筑物有着一定的耦合作用，具有相互影响的关系，从而使问题的复杂性大大地增加。

第二节 风速风压关系公式

当风以一定的速度向前运动遇到阻塞时，将对阻塞物产生压力。风压是在最大风速时，垂直于风向的平面上所受到的压力，单位是千牛顿/平方米或 kN/m^2 。

当速度为 v 的一定截面的气流冲击面积较大的建筑物时，由于受阻雍塞，形成高压气幕，使气流外围部份改向，冲击面扩大，因此建筑物承受的压力是不均匀的，而以中心一束所产生的压力强度为最大，我们令它为风压 w ，如图 1—2 a 所示。如果气流原先的压力强度为 w_0 ，在冲击建筑物的瞬间，速度逐渐减小，当中心一束速度消失等于零时，产生最大压力 w_m 。则建筑物受气流冲击的净压力 $w_m - w_0$ 即为所求的风压 w 。

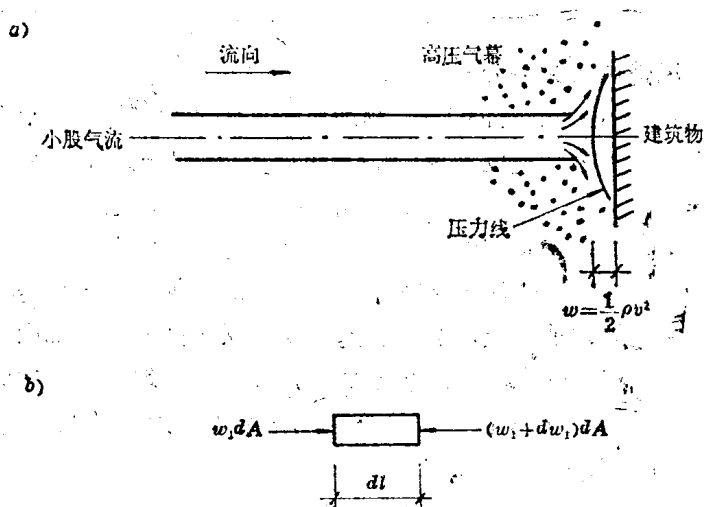


图 1—2 风 速 与 风 压

为了求得 w 与 v 的关系, 设气流每点的物理量不变, 略去微小的位势差影响, 取流线中任一小段 dl , 如图 1—2 b 所示。设 w_1 为作用于小段左端的压力, 则作用于小段右端近高压气幕的压力为 $w_1 + dw_1$ 。

以顺流向的压力为正, 作用于小段 dl 上的合力为:

$$w_1 dA - (w_1 + dw_1) dA = -dw_1 dA$$

它等于小段 dl 的气流质量 M 与顺流向加速度 $a(x)$ 的乘积, 即:

$$-dw_1 dA = Ma(x) = \rho dA dl \frac{dv(x)}{dt}$$

$$\therefore -dw_1 = \rho dl \frac{dv(x)}{dt}$$

式中 ρ 为空气质量密度, 它等于 $\frac{\gamma}{g}$, γ 为空气重力密度 (容重), g 为重力加速度。

$$\therefore d\ell = v(x) dt$$

代入上式得:

$$dw_1 = -\rho v(x) dv(x)$$

$$\therefore w_1 = -\frac{1}{2} \rho v^2(x) + c \quad (1-1)$$

式中 c 为常数, 这个方程称为 **伯努利方程**。可以看出, 气流在运动过程中, 它的压力将随流速变化而变化, 流速加快, 则压力减小, 流速减缓, 则压力增大。这就是伯努利方程的一个特性。

当 $v(x) = 0$, 则 $w_1 = w_m$, 代入上式得:

$$c = w_m$$

当 $v(x) = v$, $w_1 = w_b$, 则 (1—1) 变成:

$$w_b = -\frac{1}{2} \rho v^2 + w_m$$

$$\begin{aligned} \therefore w = w_m - w_b &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} v^2 \end{aligned} \quad (1-2)$$

这即为普遍应用的 **风速风压关系公式**。

设气压为 76 厘米水银柱、常温 15℃ 和绝对干燥的情形下, $\gamma = 0.012018 \text{ kN/m}^3$, 在纬度 45° 处, 海平面上的重力加速度为 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 代入 (1—2) 式得到

$$w = \frac{\gamma}{2g} v^2 = \frac{0.012018}{2 \times 9.8} v^2 \approx \frac{v^2}{1630} \quad (1-3)$$

上式是在标准大气情况下, 满足上述条件后求得的。但由于各地地理位置不同, 因而 γ 和 g 值也就不同。在自转的地球上, 重力加速度 g 不仅随高度的增加而递减, 且随纬度的变化而变化。而空气容重又是气压、气温和湿度的函数。上海地区处于北纬 30°11', 海拔 5m, 重力加速度实测值为 9.7944 m/s^2 ; 气压、气温和湿度与上面标准值亦有差异, 其平均空气容重约为 $\gamma = 0.011248 \text{ kN/m}^3$ 。代入 (1—2) 式得:

$$w = \frac{0.011248}{2 \times 9.7944} v^2 \approx \frac{v^2}{1740} \quad (1-4)$$

对于不同地区的地理环境和气候条件，根据式(1-2)可以得到简化的适合当地的风速风压关系公式，各地风压系数 $\frac{\gamma}{2g}$ 如表1-2所示^[1]。从表中可以看出，大致是东南沿海约为 $\frac{1}{1700}$ 左右，内陆是随高度而减小，一般地区，系数约在 $\frac{1}{1600}$ 左右，高原和高山地区，要取得小些，可减至 $\frac{1}{2600}$ 左右。

风 压 系 数 $(\frac{p}{2} = \frac{\gamma}{2g})$ 之 值 表 1-2

地 区	地 点	海拔高度	$r/2g$	地 区	地 点	海拔高度	$r/2g$
东南沿海	青 岛	77.0	1/1710	内	承 德	375.2	1/1650
	南 京	61.5	1/1690		西 安	416.0	1/1680
	上 海	5.0	1/1740		成 都	505.9	1/1670
	杭 州	7.2	1/1740		伊 宁	664.0	1/1750
	温 州	6.0	1/1750		张 家 口	712.3	1/1770
	福 州	88.4	1/1770		遵 义	843.9	1/1820
	永 安	208.3	1/1780		乌 鲁 木 齐	850.5	1/1800
	广 安	6.3	1/1740		贵 阳	1071.2	1/1900
	韶 关	68.7	1/1760		安 顺	1392.9	1/1930
	海 口	17.6	1/1740		酒 泉	1478.2	1/1890
	柳 州	97.6	1/1750		毕 节	1510.6	1/1950
	南 宁	123.2	1/1750		昆 明	1891.3	1/2040
内 陆	天 津	16.0	1/1670	陆	大 理	1990.5	1/2070
	汉 口	22.8	1/1610		大 华 山	2064.9	1/2070
	徐 州	34.3	1/1660		五 台 山	2895.8	1/2140
	沈 阳	41.6	1/1640		五 茶 卡	3087.6	1/2250
	北 京	52.3	1/1620		昌 都	3176.4*	1/2550
	济 南	55.1	1/1610		拉 萨	3658.0	1/2600
	哈 尔 滨	145.1	1/1630		日 喀 则	3800.0*	1/2650
	长 春	167.1	1/1630		五 道 梁	4612.2*	1/2620
		215.7	1/1630				

* 非实测高度

第三节 风对结构作用的计算

顺风向风力分为平均风和脉动风。平均风亦称稳定风，它对结构作用相当于是静力的，只要知道平均风的数值，可按结构力学方法进行结构计算。脉动风亦称阵风脉动，它对结构作用是动力的，在脉动风作用下结构将产生振动，常简称为结构风振。对于结构抗风的计算，存在着不同的计算方法和从过于简化到较能反映结构实际情况计算的发展过程。

把风荷载作为确定性的荷载，并简化后进行计算的方法，是本学科发展初期所用的方法。E. Baush, 在1933年曾对风荷载作过研究，其研究是以荷兰 Bilt 气象研究所的规范所

作的假定为基础的。风力与时间的关系假定为：开始时突然增加风压直至峰值，在其后保持为常数^[6]，其荷载图式假定如图 1—3 所示。

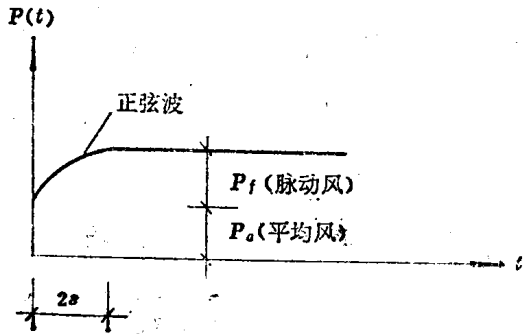


图 1—3

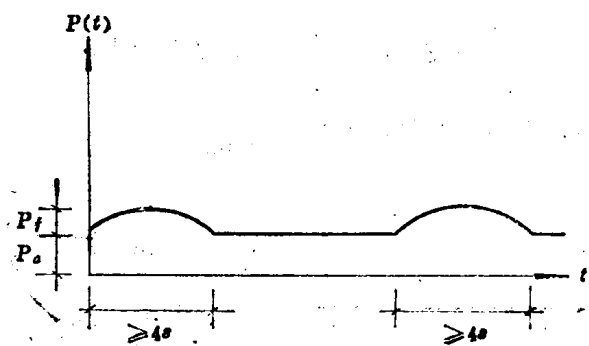


图 1—4

根据结构动力学的分析，动力系数通常在 1~2 之间，并与结构固有频率有关，其值为：

$$\xi = 1 + \psi = 1 + \frac{a}{|a^2 - 1|} \sqrt{1 + a^2 - 2a \sin \frac{\pi}{2a}} \quad (1-5)$$

式中 $a = \frac{\omega}{\omega_1}$ ， ω 为风力频率， ω_1 为固有频率。当风力作用增加比较缓慢以及当建筑物固有频率较高的情况下， $a = 0$ ， $\therefore \psi = 0$ ，所以风力作用缓慢而结构较刚时，其作用相当于静力的，动力系数 $\xi = 1$ ；而当风力作用是阵发性的，房屋的固有频率又是非常低时， $a = \infty$ ， $\therefore \psi = 1$ ，因而动力系数 $\xi = 2$ ；风力阵发性而结构较柔时，动力系数可达最大值。在具体计算时，疾风的周期常取 8sec，假定到达风力峰值的时间为 $\frac{T_w}{4}$ ，即为 2 秒，如图 1—3 所注明。

按上述计算图式，反映不出阵风的屡次作用，因而 J. Schlaich 在 1966 年作了新的假定，每次阵风作用为一半正弦波，阵风周期 T_w 仍为 8 sec，即半周为 4 sec，而第一次阵风与第二次阵风间隔时间为 180 秒钟，在二个大风阵间隔间建筑物处于自振状态，同时对二个阵风之间实际发生的小阵风的可能，不予考虑。它们荷载图式如图 1—4 所示。

根据上述的荷载图式，按结构动力学，又可得到另一个动力系数公式。

上面的这种假定风荷载的方法，显然不能完善地反映风的实际情况，因而逐步过渡到采用实际风力记录来进行计算的方法。这个方法是将记录下来的强风风力，或者将许多记录下来的强风风力经过分析后得到的设计风力，作为动力荷载，进行动力分析。这种方法看起来要比假定风载方法合理些，但是实际强风作用过程的记录极少，即使按某一次强风记录作为设计依据，由于实际结构阻尼的作用反应较为缓慢，实际到达不了计算最大值而风力即已急剧衰减，因而计算所得的值一般偏大。加上这种计算相当复杂，计算的结果也只是针对个别的强风，对一般强风能否适用还不明显。

上述不论那一种方法，实际上都不能反映风荷载的本质。在工程上，荷载有两种类型。一种是确定性荷载，在不同次的作用时荷载的大小和性质都是相同的，另一种是随机荷载，即使在完全相同条件下，在不同次作用时决不会或很难重现原来的荷载的大小和性质的。风荷载并不是确定性的荷载，这次强风规律并不反映过去和将来某次强风的规律，重复性的机会是很小的。因而用上述确定性荷载分析结构得出来的结果不能保证将来结构所具有的安全度。既然风荷载是一随机荷载，因此应该用概率统计法则来分析它的数据，其动力部分应采

用随机振动理论而不是用一般确定性的结构动力分析方法来分析脉动风对结构的动力作用。从五十年代开始，加拿大、苏联等国文献及规范都以随机振动理论和概率统计法则为依据来分析脉动风的动力作用，因而结构风振的计算研究应该以随机振动理论为基础来进行。

在横风向，风流经过结构产生旋涡，并以一个相当明确的频率作周期性的脱落。随着雷诺数的增大，这种周期性脱落变成随机无规则的状况。当雷诺数增大到 3.5×10^5 以上，涡道又重新建立，振动又变成有规则的了。因而在横风向，根据各个范围的不同，有周期性振动，也有随机振动。反映在荷载上，它可能是周期性荷载，可能是随机荷载，根据雷诺数的大小而确定。

综上所述，风对结构作用的计算有三个不同的方面。对于顺风向平均风，采用静力计算方法；对于顺风向的脉动风或横风向的脉动风，则应按随机振动理论计算；对于横风向周期性的风力，或引起扭转振动的外扭矩，通常作为确定性荷载对结构进行动力计算。

第二章 概 率 论 基 础

风荷载是一随机荷载,每时每刻都在不断地变化着。如果以年最大值(如年最大风速)为依据,则每一年的统计值也不相同。它的数值随机变化,不重复出现,而且不能事先知道,因而可作为随机变量来看待。当年最大值统计得足够多时,分布就开始呈现一些规律性。统计数愈多,规律性就愈清楚。因此,个别的随机现象虽然似乎是无规律可循的,但对同类现象作大量统计后却是有统计规律性的。概率论就是一门从数量方面研究随机现象统计规律的科学。风荷载既然是一随机荷载,因此它的变化规律性是受概率法则来支配的。

本章结合风荷载来阐述概率论几个最基本的内容:概率分布函数、概率密度函数及统计数字特征,以作为学习以后几章的基础。一些更详细甚至更严密的说明可参阅概率论的书籍。

第一节 概率及概率分布函数

在某一个随机变量 100 个抽样数据中,符合某一条件的数据有 90 个,不符合的有 10 个,则从这 100 个数据中,任取一个,则该数据符合于这一条件的可能性或频率为 90/100,而不符合的可能性或频率为 10/100。推而广之,如果把随机变量用 x 表示,条件以 x 不大于某值 x_1 来表示,则在 n 个统计数据中,满足该条件的有 n_1 个,则频率可表示为 $\frac{n_1}{n}$ 。当统计数据足够多时,这一分式可作为满足该条件的概率的近似值。当数据无限增多时,该值即为**概率**。在实用上,常把多个资料所得的 $\frac{n_1}{n}$ 作为概率来看待。即

$$F(x_1) = P[x \leq x_1] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_1}{n} \approx \frac{n_1}{n} \tag{2-1}$$

我们以北京 20 年的 10 米高 10 分钟平均最大风速资料(表 2—1)为例来说明。

北 京 1951—1970 年 年 最 大 风 速 表 2—1

年 份	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
年最大风速 (米/秒)	22.9	17.1	19.7	23.8	23.0	18.0	16.7	16.3	20.3	20.0

年 份	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
年最大风速 (米/秒)	17.3	15.0	21.3	15.5	19.3	19.6	16.2	18.6	21.5	18.0