

工程结构风荷载理论 和抗风计算手册

张相庭 编著

同济大学出版社

Δ : 荷载作用下产生的位移;弦长改变量;偏差;区段长度
 ε : 影响系数
 ξ : 阻尼比
 η : 风压空间相关性折算系数;经验系数
 η_x : x 向风压空间相关性折算系数(无 x 向振型)
 η_{xj} : 第 j 振型 x 向风压空间相关性折算系数
 θ : 干扰圆频率;扭转角;外形变化修正系数
 λ : 柯尔莫洛夫准则中的参数
 μ : 脉动风的保证系数(峰因子);粘性
 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(横向力系数)
 μ_M : 扭矩系数
 μ_s : 风载体型系数
 μ_{sl} : 背风面的风载体型系数
 μ_{sv} : 迎风面的风载体型系数
 μ_z : 风压高度变化系数
 ν : 动粘性;影响系数
 ξ : 脉动增大系数
 ρ : 相关性系数;密度
 σ : 根方差
 τ : 风速时距
 φ : 振型函数;挡风系数
 ψ : 平均风的保证系数
 ω : 圆频率
 ω' : 有阻尼的圆频率
 ω_s : 旋涡脱落圆频率

内 容 简 介

风荷载是各种工程结构设计的主要荷载之一,本书着重结合我国即将颁布的各种规范的风荷载,对其计算列出应用公式和图表,并简要地阐明其理论。通过本书可以掌握各种工程结构风荷载计算的全过程。

本书共分10章,其内容有:风力和基本风压;风工程的基本理论和计算公式;高层结构的抗风计算;高耸结构的抗风计算;桅杆的抗风计算;冷却塔的抗风计算;桥梁结构的抗风计算;起重机的抗风计算;索和管的抗风计算;屋盖的抗风计算。本书可供大、专院校的师生和科研工作者、工程技术人员使用和参考。

责任编辑 冯时庆

封面设计 李志云

工程结构风荷载理论和抗风计算手册

张相庭 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

浙江上虞科技外文印刷厂排版

新华书店上海发行所发行

启东市印刷三厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张 14 字数: 406千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数: 1—4300 定价: 8.20元

ISBN 7-5608-0587-6/TU·71

前 言

风灾是自然灾害中影响最大的一种。据西德慕尼黑保险公司对资本主义国家损失 1 亿美元以上的自然灾害统计分析结果表明,由于风的发生频次高、次生灾害大,风灾的次数占总次数的 51.4%,经济损失占 40.5%。据估计,全球每年由于风灾的损失达 100 亿美元,平均死亡人数 2 万人以上。因而风灾是给人类生命财产带来巨大损失的自然灾害。

风荷载是结构的重要设计荷载,特别对于高耸结构(如烟囱、塔架、桅杆等)、高层房屋、大跨度桥梁、冷却塔、屋盖等,有时甚至起到决定性的作用,因而抗风设计是工程结构中的重要课题。国际上每四年召开一次国际会议,讨论风工程研究和计算中的重大学术问题,至今已召开了七次。我国以结构风效应为题的全国会议也已开过三次,今年正准备召开第四届学术会议。

鉴于风的重要性,我国在荷载规范、高耸结构设计规范、高层建筑设计规定、铁路桥涵设计规范、起重机设计规范等对风荷载都作了专门的条文规定,世界各国也相继修订了有关风荷载的规范。设计工作者很希望能得到一册既有风的基本理论叙述又密切结合工程实践的工程结构风荷载计算手册,对各种工程结构都能有所专门的叙述。在鉴于此,笔者以现有的国内外风工程最新研究理论为基础,结合我国制订的各种工程结构有关风荷载的规范,并结合我国的工程实践,编写了这本手册。手册中很多研究成果是笔者在国内外学术会议和学报上发表的论文资料,笔者参加国内几本规范制订讨论时所用的原始资料、数据都一并反映在书中,希望通过本书的介绍,使读者既能掌握目前风工程中的最新动态,又能结合工程实际应用,了解当前各种规范的背景材料,以助于风工程问题的分析解决。

本书共分 10 章。第 1 章介绍风的基本知识,重点介绍基本风压的定义及确定方法,第 2 章介绍风工程的基本理论,第 3 至 10 章则分别介绍高层结构、高耸结构(烟囱、塔架、桅杆等)、冷却塔、桥梁、起重机、缆索和管道、屋盖等工程结构的抗风计算,结合我国制订的规范和实践加以叙述。上述这些结构已覆盖绝大部分工程结构,对于其他特殊的工程结构,读者不难应用介绍的理论和方法来解决它的具体问题。

本书采用的符号和计量单位与 GBJ 83-85《建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语》中所规定的相同,但遇到个别国外引进的图表和资料中有非法定计量单位时,由于换算后重新制作图表十分困难,所以我们仍保留了原来的计量单位,但对非 SI 制计量单位与 SI 制法定计量单位之间的换算关系我们作出了相应的说明,请阅读时注意区别和理解。

为了便于阅读,本书在正文前列出了主要符号说明和取材于国家规范及其它设计实用资料中的重要图表目录。在正文后列出了几个涉及风荷载较多的规范的条文和参考文献,供读者查阅和参考。

本书由朱振德教授审阅,王肇民教授为第 5 章提供了宝贵的资料,邓维正先生协助计算了第 5 章的例题,朱伊德先生完成了第 10 章表 10.1 的计算,冯时庆先生为本书的出版做了大量工作,对此表示深切的感谢。书中涉及的工程结构的面很广,限于笔者水平,谬误之处在所难免,敬请读者批评指正。

张相庭

1989 年 8 月 21 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

A : 截面积

B : 结构的参考尺度

C : 粘滞阻尼系数;常数

C' : 折算粘滞阻尼系数

C_1 : 与转动相对应的阻尼系数

C_m : 与移动相对应的阻尼系数

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 : 弹性模量;数学期望

f : 脉动风的符号;索的垂度

$f(t)$: 峰值为 1 的脉动风压时间函数

$F(t)$: 有限自由度体系单位(广义)质量的(广义)外干扰

H : 建筑物总高度;水平反力

H' : 索中弦向反力

$H_j(i\omega)$: 第 j 振型频率响应(传递函数)

H_T : 梯度风高度

i : 点或楼层的序号

I : 惯性矩

I_0 : 极惯性矩

j : 振型序号

k : 单元刚度矩阵系数;振型序号

K : 总刚度;表示地面粗糙度的系数
 l : 跨度
 l_x : 建筑物承风面水平长度
 l_y : 建筑物的深度
 L : 表示相关性的参数;系统拉格朗日函数;索长;表示升力或
 横向力方向的符号
 m : 单元质量矩阵系数;线质量
 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,活荷载
 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(线横向力)
 P : 点荷载;力;概率
 $P_{ii}(\omega)$: 二点脉动风压积函数
 q : 线荷载、恒载
 $q_j(t)$: 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 : 位置系数;半径;指定函数
 R : 响应通称;反力
 R_d : 脉动风引起的响应
 Re : 雷诺数
 R_s : 平均风引起的响应
 s : 静力的符号
 S : 功率谱密度;面矩;索的张力;内力
 S_t : 斯脱罗哈数
 t : 时间;温度;变量
 T : 周期;动能;扭矩

T_k : 西奥多森数
 T_0 : 重现期(年)
 u_j : 第 j 振型影响系数
 U : 势能; 位移向量
 v : 风速
 v_c : 临界速度
 v_f : 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; 竖向反力; 体积
 w : 作用在建筑物表面的面荷载; 法向位移
 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
 W : 外力功
 x : 沿建筑物承风面水平长度的变量; 风谱中的变量
 X : x 向力
 y : y 向的水平位移
 y_0 : 截面上某一点的 y 向坐标
 y_{0s} : 位移后截面上某一点 y 向的绝对坐标
 Y : y 向力。
 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 向的绝对坐标
 Z : z 向力

* * *
 α : 地面粗糙度; 风速的迎角; 屋面坡度; 修正系数
 β : 风振系数
 γ : 容重; 阻尼系数(复阻尼理论)
 δ : 单元柔度矩阵系数; 单位力作用下产生的位移

目 录

第 1 章 风力和基本风压	
1.1 风、风力、风速和风压	1
1.2 基本风速和基本风压	8
1.3 非标准情况下风速或风压的换算	24
第 2 章 风工程的基本理论及计算公式	
2.1 结构的风力及风效应	36
2.2 顺风向弯曲响应	41
2.2.1 顺风向平均风下的弯曲响应	41
2.2.2 顺风向脉动风下的弯曲响应	92
2.2.3 顺风向平均风和脉动风引起的总弯曲响应—— 风振系数	115
2.3 考虑结构与风耦合作用时的顺风向弯曲风振计算 理论	119
2.4 横风向弯曲响应	124
2.5 风力作用下结构的总响应	133
2.6 风力下的失稳式效应	135
2.6.1 横风向弯曲驰振	135
2.6.2 扭转驰振	138
2.6.3 横风向弯曲和扭转耦合振动的稳定性	140
2.7 结构动力特性计算理论	144
2.7.1 结构自振频率和振型	144
2.7.2 结构阻尼比	165
第 3 章 高层结构抗风计算	
3.1 高层结构受力情况分析	176
3.2 高层建筑的顺风向弯曲响应	177

3.2.1	顺风向平均风作用下的弯曲响应	177
3.2.2	顺风向脉动风作用下的弯曲响应	179
3.2.3	顺风向风力作用下的总弯曲响应——风振系数	182
3.3	顺风向风振系数的简化表达式	186
3.4	风力作用下的弯扭耦合响应	194
3.5	风力作用下的鞭梢效应	200
3.6	风力作用下的舒适度分析	203
3.6.1	弯曲振动	203
3.6.2	扭转振动	209
3.7	风力下位移限值及按位移限值设计计算	210
3.8	高层结构的自振周期	215
3.8.1	高层结构的变形特征	216
3.8.2	框剪结构按无限自由度体系的自振周期计算	217
3.8.3	框剪结构按能量法的自振周期计算	222
3.8.4	考虑非承重砖墙影响的周期折减系数	223
3.8.5	自振周期经验公式	223
第4章 高耸结构(烟囱、塔架)的抗风计算		
4.1	高耸结构(烟囱、塔架)受力情况分析	225
4.1.1	烟囱	225
4.1.2	塔架	226
4.2	高耸结构顺风向弯曲响应及风振系数	227
4.2.1	顺风向平均风作用下的弯曲响应	227
4.2.2	顺风向脉动风作用下的弯曲响应	229
4.2.3	顺风向风力作用下的总弯曲响应——风振系数	233
4.3	顺风向风振系数计算的简化表达式	237
4.4	有大的附加质量和迎风面积结构的折算法	241
4.5	高耸结构横风向共振响应	243

4.6	位移限值及按位移限值设计	246
4.7	极限风荷载的计算	247
4.7.1	以顺风向受力为主结构的极限风荷载	248
4.7.2	以横风向共振响应为主结构的极限风荷载	250
4.7.3	顺横两方向均需考虑的结构极限风荷载	250
4.8	高耸结构(烟囱、塔架)的自振周期	255
4.8.1	高耸结构的变形特征	255
4.8.2	高耸结构按无限自由度体系的自振周期计算	259
4.8.3	高耸结构按有限自由度体系的自振周期计算	259
4.8.4	考虑上部结构与地基基础共同作用的自振频率或 周期的计算	263
4.8.5	高耸结构按能量法计算自振周期	265
4.8.6	自振周期经验公式	268
第5章 高耸结构(桅杆)的抗风计算		
5.1	桅杆结构受力情况分析	270
5.2	桅杆的风力响应	271
5.2.1	顺风向风力响应	272
5.2.2	横风向共振响应	291
5.3	桅杆结构的位移限值及极限风荷载	292
5.4	桅杆的自振周期计算	293
5.4.1	按集中质量有限自由度体系计算	294
5.4.2	经验公式	296
第6章 冷却塔的抗风计算		
6.1	冷却塔的受力情况分析	297
6.2	双曲冷却塔风响应的计算	298
6.3	双曲冷却塔的极限风荷载	307
6.4	双曲冷却塔的自振周期	310
6.4.1	双曲冷却塔自振周期的经验值	310
6.4.2	各项因素对自振频率的影响	312
第7章 桥梁结构的抗风计算		

7.1	桥梁结构受力情况分析	314
7.2	桥梁结构的顺风向(横向)风荷载	316
7.3	桥梁的颤振(失稳式效应)计算	332
7.3.1	弯扭颤振	332
7.3.2	纯扭转颤振	337
7.4	桥梁的自振频率和周期	341
7.4.1	按有限自由度或无限自由度体系计算	341
7.4.2	经验公式	343
第 8 章 起重机的抗风计算		
8.1	起重机结构受力情况分析	346
8.2	工作状态下起重机的风力计算	348
8.3	非工作状态下起重机的风力计算	353
第 9 章 索和管的抗风计算		
9.1	索和管的受力情况分析	355
9.2	圆截面的索和管的顺风向响应	356
9.3	圆截面的索和管的横风向共振响应	364
9.4	圆截面的索和管在裹冰情况下的风振	365
9.4.1	裹冰荷载	365
9.4.2	顺风向振动	367
9.4.3	横风向驰振	367
9.5	索和管的自振特性计算	368
9.5.1	索的静力计算	369
9.5.2	索的动力特性计算	374
第 10 章 屋盖结构的抗风计算		
10.1	屋盖结构受力情况分析	377
10.2	屋盖结构的风激响应计算	379
10.2.1	水平风力	379
10.2.2	竖向风力	380
10.2.3	在水平和竖向风力作用下的总响应	383
10.3	屋盖结构自振特性计算	384

10.3.1	解析方法	384
10.3.2	能量法	393
10.3.3	近似计算方法	394
附录一	建筑结构荷载规范 (GBJ9-87) 第六章风荷载条文	397
附录二	高耸结构设计规范第三章荷载第二节风荷载条文	401
	主要参考文献	413

重要图表目录

表 1.1	蒲福风力等级表	2
表 1.2	福基达龙卷风风力等级表	5
表 1.3	各种风速及风压单位换算关系表	8
表 1.4	极值 I 型耿贝尔曲线的保证系数 ψ 值表	13
表 1.5	适合度检验函数 $P(\lambda)$ 数值表	14
表 1.8	全国基本风压标准值	17
表 1.10	地面粗糙度 z_0 值	25
表 1.12	我国规范的地貌分类及其对应的 α, H_T 值	27
表 1.14	标准高度为 a (m) 时的基本风压换算系数	28
表 1.16	海面和海岛的基本风压及调整系数	30
表 1.17	山区基本风压和调整系数 μ_t	31
表 1.18	各种不同时间距与 10 分钟时间距风速的平均比值	31
表 1.19	不同重现期的风压比值 μ_r	32
表 2.1 a	单体建筑风载体型系数 μ_s	47
表 2.1 b	群体建筑风载体型系数 μ_{sm} 建议值	81
表 2.2	风压高度变化系数 $\mu_z(z)$	84
图 2.7	山坡顶或悬崖边 B 点的风速或风压高度变化修正 系数	86
表 2.3	脉动增大系数 ξ	104
表 2.4	风压脉动系数 $\mu_f(z)$	106
图 2.18	横向风力分区示意图及横向设计风力	127
表 2.8	各种截面在稳定流动中的 $\mu'_{DL}(0)$ 值	137
表 2.9	围绕几何中心旋转的长方形截面 $\mu'_M(0)$ 值	140
图 2.24	等截面悬臂弯曲型结构前三个频率和振型	146

图 2.25	等截面悬臂剪切型结构前三个频率和振型	147
表 2.10	等截面悬臂弯剪型结构前三个振的型 $k_a H$ 值	148
表 2.11	各种阻尼值的换算关系	170
表 2.12	上部等截面(钢)下部外形连续变化(钢筋混凝土)结构的换算阻尼比 ζ_1	173
表 3.1	等截面高层建筑第 1 振型系数	178
表 3.2	等截面高层建筑 ν_{s1} 计算用表	178
表 3.3	高层结构风压空间相关性的折算系数 η_{zs1}	180
表 3.4	等截面高层结构的 ν_1 值表	181
表 3.6	等截面高层钢结构风振系数 β_z (荷载)	188
表 3.7	等截面高层钢筋混凝土结构风振系数 β_z (荷载)	189
表 3.8	等截面高层结构位移风振系数 β_y	192
表 3.10	高层钢筋混凝土结构鞭梢效应系数 μ_{wh}	207
图 3.5	弯曲振动加速度限值	209
表 3.11	风力作用下高层结构 $\frac{y(H)}{H}$ 的限值	212
表 3.12	风力作用下高层结构 $\frac{y(h_i)}{h_i}$ 的限值	213
图 3.8	框剪体系自振周期系数	220
表 4.1	高耸结构第 1 振型系数	228
表 4.2	等截面高耸结构 ν_{s1} 计算用表	228
表 4.3	高耸结构考虑风压空间相关性的折算系数 η_{z1}	230
表 4.4	等截面高耸结构的 ν_1 值表	230
表 4.5	高耸结构宽度、深度沿高度作同一规律变化时的 θ_v 值	233
表 4.6	考虑风压脉动和风压高度变化的影响系数 ε_1	239

表 4.7	考虑振型和结构物外型的影响系数 e_2	240
表 4.9	沿高度直线变化结构的振型和频率	256
图 5.1	纤绳的荷载	273
图 5.3	桅杆上的风荷载	279
表 6.1	双曲冷却塔环向系数 $\nu_{\theta\theta}$ 值表	304
表 6.2	双曲冷却塔环向风压空间相关性折算系数 $\eta_{n\theta 1}$ 值 表	304
图 6.4	双曲冷却塔固有频率沿环向谐波 n 的变化	311
表 7.1	地形,地理条件调整系数 μ_t	317
表 7.2	桥梁结构风压高度变化系数 μ_s	318
表 7.3	单跨桥梁风压空间相关性折算系数 μ_{z1}	321
图 7.3	部分流线箱型和开式桁架桥面截面的 H_1^*, H_2^*, H_3^* 和 A_1^*, A_2^*, A_3^*	334
表 7.4	桥梁截面的斯脱罗哈数和西奥多森数	338
表 7.5	ECCS 规范确定桥梁颤振临界风速的 η 值经验系数 表	340
图 7.4	两端简支及固定、二至三跨两端简支等截面梁的自 振频率系数和振型	343
表 8.1	起重机挡风系数 φ	349
表 8.2	起升物体迎风面积的近似值	349
表 8.3	起重机计算风压 (kN/m^2)	350
表 8.4	起重机单片结构的体型系数 μ_s	351
表 9.1	斜索或管的 x 向风压空间相关性折算系数 η_x	358
表 9.2	等截面斜索或管的影响系数 ν_{z1} 表	359
表 9.3	等截面斜索或管的静力影响系数 ν_{s1} 表	359
表 9.4	单跨水平结构风压空间相关性折算系数 η_{x1}	361
表 9.6	导线(直径 < 1.5 英寸)每英尺的冰重(磅)的统 计值	365
表 9.7	与构件直径有关的裹冰厚度修正系数 α_1	366

表 9.8	裹冰厚度的高度递增系数 α_2 ·····	367
表 10.1	钢结构垂直脉动增大系数 ξ_s ·····	382
表 10.2	钢筋混凝土结构垂直脉动增大系数 ξ_c ·····	383