

结构风荷载作用



[丹麦] 克萊斯·迪爾比耶 著
斯文·奧勒·漢森
薛素铎 李雄彦 译

WIND LOADS ON STRUCTURES

Claes Dyrbye and Svend O. Hansen

中国建筑工业出版社

结构风荷载作用

[丹麦] 克萊斯·迪爾比耶 著
斯文·奧勒·漢森
薛素铎 李雄彥 译

中國建築工業出版社

著作权合同登记图字：01—2005—5895 号

图书在版编目 (CIP) 数据

结构风荷载作用/ (丹麦) 迪尔比耶, 汉森著;
薛素铎, 李雄彦译. —北京: 中国建筑工业出版社,
2006

ISBN 7-112-08476-8

I. 结... II. ①迪... ②汉... ③薛... ④李...
III. 建筑结构—风荷载 IV. TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 082006 号

Copyright © 1997 by John Wiley & Sons, Ltd.

Chinese Translation Copyright © 2006 China Architecture & Building Press

All rights reserved. This translation published under license.

Wind Loads on Structures/Claes Dyrbye, Svend Ole Hansen

本书由 John Wiley & Sons, Ltd. 出版社授权翻译、出版

结构风荷载作用

[丹麦] 克雷斯·迪尔比耶 著
斯文·奥勒·汉森
薛素铎 李雄彦 译

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

北京永峰印刷有限责任公司制版

世界知识印刷厂印刷

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 14 字数: 290 千字

2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月第一次印刷

定价: 46.00 元

ISBN 7-112-08476-8

(15140)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书涵盖了风荷载链的五个主要环节：全球风气候、场地风特性、气动响应、结构风致响应和设计标准。主要包括风气候、大气边界层的自然风、静风荷载、单自由度结构顺风向风振响应、钝体风振响应、旋涡脱落引起的横向风振、桥梁风荷载作用、弛振及风洞试验方面的基本理论和计算方法；此外，在附录中还给出了与风荷载及结构风响应计算相关的数理统计知识和数学计算方法。上述内容使读者能全面了解风工程研究的基本理论和方法。

本书章节简繁有致，注重基本概念和基本公式的阐述和推导，对相关理论知识 and 研究方法详尽阐释，将理论分析与规范应用相结合，适用范围广。该书既可作为结构抗风设计和风工程研究的参考书，也可作为高等院校土木工程专业高年级学生或研究生的教材。

* * *

责任编辑：刘瑞霞 董苏华

责任设计：赵明霞

责任校对：张树梅 关 健

序 言

本书旨在为咨询工程师提供结构抗风设计方面的指导，同时也可作为高等院校土木工程高年级学生或研究生的教材或参考书。

本书英文版源于作者 1989 年在丹麦出版的著作《Vindlast på bæcerende konstruktioner》，然而，本书在丹麦版的基础上又有较大的调整和补充，力臻内容完善。我们对丹麦建筑研究院积极支持该书英文版的问世表示感谢。

作者在手稿准备过程中得到了大量的帮助，位于特隆赫姆（Trondheim）的挪威科技大学的埃里克·约尔特·汉森（Erik Hjorth-Hansen）教授、英国的弗林特与尼尔（Flint & Neill）土木与结构咨询工程师合伙企业的资深合伙人布赖恩·W·史密斯（Brian W. Smith）先生及丹麦斯文·奥勒·汉森（Svend Ole Hansen）咨询公司的拉尔斯·T·托尔贝克（Lars T. Thorbek B. Sc.）咨询工程师提供了目前该领域内最新的研究成果。丹麦气象和风能局的里瑟（Risø）国家实验室提供的相关场地风速测量历史资料为本书写作提供了诸多方便。

埃斯特·马滕斯（Esther Martens）夫人绘制了大量插图，本书的手稿大部分由英厄·瑟伦森（Inge Sørensen）夫人录入，埃伦·笛尔贝（Helen Dyrbye）女士纠正了本书的不少语法错误，在此一并对她们的帮助致谢。

符 号

$a(t)$	stochastic amplitude function	随机振幅函数
A	area	面积
A	scale parameter	缩尺参数
A^*	aerodynamic derivatives	气动导数
b	length of horizontal structure or bridge-deck width	结构水平宽度或桥板宽度
B	spectral bandwidth	谱带宽
c_d	dynamic coefficient	动力系数
c_e	exposure coefficient	开敞系数
c_f	force coefficient	力系数
c_{pe}	external pressure coefficient	外部压力系数
c_{pi}	internal pressure coefficient	内部压力系数
c_t	topography coefficient	地形系数
C	shape factor	形状系数
C	decay constant	衰减常数
Coh	coherence	相关
$\bar{C}_L$	standard deviation of the normalized lift force C_L	标准化升力 C_L 的标准差
d	width of structure	结构宽度
$E\{\}$	expected value	期望值
f	non-dimensional frequency	无量纲频率
f_c	Coriolis parameter	科里奥利参数
F	wind load	风荷载
Fr	Froude number	弗劳德数
g	acceleration of gravity	重力加速度
$g()$	effect influence function	效应函数
h	height of structure	结构高度
$H()$	frequency response function	频率响应函数
H^*	aerodynamic derivatives	气动导数
I	mass moment of inertia	质量惯性矩
$I_R()$	response-influence function	响应影响函数
I_u	turbulence intensity	湍流强度
J_b^2	non-dimensional response variance	无量纲响应方差
Je	Jensen number	杰森数
$ J() ^2$	joint acceptance function	联合接纳函数

k	structural stiffness	结构刚度
k	turbulence factor	湍流系数
$k()$	co-influence function	交叉影响函数
k_p	peak factor	峰值系数
k_T	terrain factor	场地系数
K	reduced frequency	折算频率
$K_S()$	size reduction function	尺寸折算函数
l	length	长度
L	integral length scale	积分尺度
m	mass	质量
n	frequency in Hz	频率, 单位: 赫兹
n_e	natural frequency	特征频率
n_s	frequency of vortex shedding	旋涡脱落频率
p	pressure	压力
p	probability of exceedance	超越概率
q	velocity pressure	速度压
$Q()$	generalized fluctuating load	广义脉动荷载
r	separation	距离
R	response	响应
Re	Reynolds number	雷诺数
R_N	non-dimensional power spectral density function	无量纲功率谱密度函数
s	non-dimensional distance	无量纲距离
$S()$	spectrum	谱
Sc	Scruton number	斯克拉顿数
St	Strouhal number	斯特哈尔数
t	time	时间
T	time interval	时间间隔
T	time scale	时间尺度
u	fluctuating wind velocity in the wind direction	顺风向的脉动风速
u^*	friction velocity	摩擦速度
U	10-minute mean wind velocity	10min 内平均风速
U_{bas}	reference wind velocity with return period of 50 years	重现期为 50 年的基准风速
U_r	reduced wind velocity	折算风速
v	fluctuating wind velocity in the lateral direction	横向脉动风速
w	fluctuating wind velocity in the vertical direction	竖向脉动风速
x	axis in wind direction	风向轴
y	horizontal axis normal to the wind direction	垂直于风向的水平轴
z	vertical axis	竖轴

z_0	roughness length	地面粗糙度
α	exponent in power law profile	幂律剖面指数
α	angle	角度
α ()	torsional mode shape	扭转模态
α_{def}	angular rotation of structure	结构转角
γ	Euler's constant	欧拉常数
γ_1	non-dimensional, normalized mass moment of inertia	无量纲标准质量惯性矩
γ_m	non-dimensional, normalized mass	无量纲标准质量
γ_ω	frequency ratio	频率比
δ	logarithmic decrement	对数衰减
ζ	damping ratio	阻尼比
θ	factor concerning response	响应相关系数
κ	von Kármán's constant	卡曼常数
λ	non-dimensional length parameter	无量纲长度参数
μ	mean value	均值
ν	frequency and kinematic viscosity of air	频率或空气动力黏滞
ξ ()	flexural mode shape	弯曲模态形状
ξ_{def}	deflection of structure	结构变形
ρ	density of air	空气密度
ρ ()	correlation function	相关函数
σ	standard deviation	标准差
τ	time lag	滞时
φ	gust factor	阵风系数
ϕ	non-dimensional parameter	无量纲系数
χ^2 ()	aerodynamic admittance function	气动导纳函数
ψ	normalized co-spectrum	标准相关谱
ω	angular frequency	角频率

下 标

a	aerodynamic	气动
ALT	altitude	海拔高度
b	background	背景
c	critical flutter	临界抖振
crit	critical vortex shedding	临界旋涡脱落
d	damping	阻尼
d	design value	设计值
div	divergence	发散
D	aerodynamic drag	气动阻力

DIR	direction	方向
e	equivalent	平衡
geo	geostrophic	地转的
gr	gradient	梯度
L	aerodynamic lift	气动升力
m	motion-induced	运动产生的
max	characteristic	特征值
min	minimum	极小值
M	aerodynamic moment	气动矩
p	pressure	压力
q	mean wind load pressure	平均风压
r	resonance	共振
red	reduced	折算
ref	reference	基准
R	response	响应
s	structure	结构
t	turbulence	湍流
tot	total	总计
TEM	temporary (seasonal)	临时的 (季节的)
u	longitudinal turbulence component	纵向湍流分量
v	vortex shedding or lateral turbulence component	旋涡脱落或横向湍流分量
w	vertical turbulence component	竖向湍流分量
x	longitudinal	纵向
y	lateral	横向
z	vertical	竖向
α	rotation	转角
ξ	deflection	变形

目 录

第1章 绪论	1
第2章 风气候	4
2.1 气象分类	4
2.2 全球大气环流	7
2.3 地转风和梯度风	10
2.4 热力第二循环(台风)	13
2.5 局部性气候	14
第3章 大气边界层的自然风	17
3.1 湍流风	17
3.2 平均风速——风剖面	21
3.3 非平坦场地	28
3.4 极值风	30
3.5 湍流风	35
3.5.1 湍流风分量的标准差	35
3.5.2 时间尺度和积分长度尺度	36
3.5.3 功率谱密度函数	37
3.5.4 两点间湍流的相关性	40
3.5.5 欧洲规范1中关于湍流风的规定	43
第4章 静风载	45
4.1 极值静风荷载	45
4.2 作用在建筑物上的风荷载	46
4.3 结构表面上点风荷载的数学描述	51
4.4 作用在结构上的总风载——达文波特模型	52
4.5 气动导纳函数	56
4.5.1 面压力标准相关谱	56
4.5.2 细长区域	57
4.5.3 矩形区域	60
4.6 高斯过程的峰值系数	61
4.7 内部风荷载	63
4.8 欧洲规范1中的静风载	64

4.8.1 风压	64
4.8.2 总体风荷载	65
4.8.3 尺寸效应系数	68
第5章 单自由度结构顺风向风振响应	69
5.1 等效静力荷载与动力响应	69
5.2 点状结构的风荷载作用	70
5.3 大型结构的风荷载作用	71
5.4 阵风响应系数	72
第6章 钝体顺风向响应	73
6.1 计算假设	73
6.2 联合接纳函数与缩尺函数	74
6.3 结构极值响应	75
6.4 细长结构的响应	76
6.4.1 平均响应	77
6.4.2 背景湍流响应	77
6.4.3 湍流共振响应	80
6.5 板状结构的响应	84
6.5.1 平均响应	84
6.5.2 背景湍流响应	85
6.5.3 共振湍流响应	87
6.5.4 常号模态	88
6.5.5 变号模态	89
6.6 设计方法	90
6.6.1 常号模态结构的设计方法	91
6.6.2 变号模态的设计方法	95
6.6.3 具有复杂模态的结构	98
6.7 欧洲规范1的讨论	99
第7章 旋涡脱落引起的横向风振	102
7.1 物理背景	103
7.2 拟静态结构上的旋涡脱落	105
7.3 由结构运动产生的横向风荷载	109
7.4 以谱模型为基础的旋涡脱落响应	113
7.4.1 旋涡脱落谱响应	113
7.4.2 加拿大规范 NBC 1990	116

7.4.3	CICIND 模型规范	118
7.4.4	混凝土烟囱的计算响应与观测响应比较	119
7.5	基于旋涡共振模型的旋涡脱落响应	120
7.5.1	旋涡脱落共振响应	120
7.5.2	欧洲规范 1	122
7.5.3	钢结构测算响应与观测响应的对比	124
7.6	设计	127
7.7	旋涡振动的减振	128
7.8	例题: 60m 高的钢烟囱	130
第 8 章	桥梁风荷载作用	135
8.1	桥板上的平均风荷载	137
8.2	结构运动引起的风荷载	139
8.2.1	桥板截面	139
8.2.2	模态荷载	141
8.2.3	气动导数	142
8.2.4	风荷载作用下结构的固有频率和阻尼比	144
8.3	抖振	146
8.4	耦合颤振	152
8.5	悬索桥施工期间的颤振	157
8.6	欧洲规范 1 中关于桥梁的条文	163
第 9 章	弛振	164
第 10 章	风洞试验	167
10.1	模型规律	167
10.1.1	弗劳德模型规律	169
10.1.2	雷诺模型规律	170
10.1.3	杰森模型规律	172
10.2	风洞技术	175
附录 A	随机变量与随机过程	178
A.1	一维随机变量	178
A.2	二维随机变量	181
A.3	随机过程	182
A.4	界限值交叉点和极值	189
附录 B	重积分的计算	193

附录 C 线性结构的振动	196
C.1 模态的正交性	196
C.2 运动方程	197
C.3 外荷载响应	198
附录 D 求解颤振方程	200
参考文献	202
译后记	209

第 1 章 绪论

风荷载对房屋建筑及其他土木工程结构设计具有重要影响。许多结构由于设计时对风荷载作用考虑不足，导致其在使用阶段产生整体或局部破坏。

风荷载的讨论涉及面很广，本书很难面面俱到。因此建议读者可同时参阅其他相关文献，以便对某些专题有更深入细致的了解。本书的某些章节篇幅较大，主要是由于问题本身的难度较大，或是为了补充一些有用的相关知识。

风及风效应

A·G·达文波特 (A. G. Davenport) 提出了风荷载链概念 (图 1.1)。其中的每一环节在计算风作用及其效应时都是必不可少的。风荷载链概括了设计者的主要工作，其概念特征表明应以各环节的最低可靠度作为整体设计过程的可靠度。图 1.1 同时也反应了风荷载链中各环节间的一些相互关系。

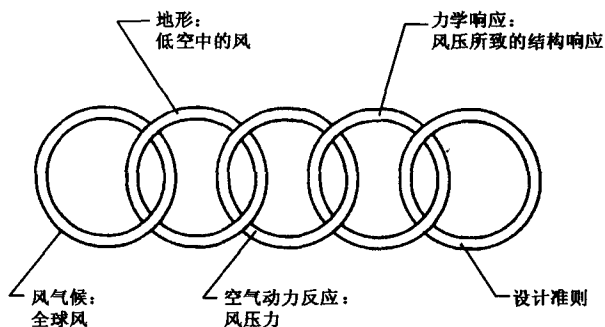


图 1.1 风荷载链 (转载经由丹麦建筑研究院许可)

风荷载链的每个环节都涉及随机参数，因此应采用统计学的方法来处理。附录 A 中给出了包括随机过程在内的部分统计学概念。

风气候

风气候是指不同地域的一般风环境，第 2 章将简要介绍与之相关的内容。此处风气候概念仅指周期不小于 10min 的平均风速变化，基准风速主要取决于这种风气候。

地形条件

地面粗糙度是风的主要影响因素。平均风速会受地面粗糙度影响而变小,同时风的湍流成分增大,变得更难以描述。平均风速随距离地面高度的增加而增大。

一般情况下,地形只能以一种较粗略的方式描述,即通过引入不同的场地类别,然后根据所谓的地面粗糙度 z_0 进行场地类别判断。由于以场地范围内结构物为特征的场地类别可能发生变化,例如场地范围内建筑物的建造和拆除,这些变化也许在结构的使用期内出现,因而会影响风荷载。

第3章将讨论地形对风荷载的影响。

风荷载

结构体型对风荷载有重要影响,这种影响很容易通过风洞试验来量测,参见第10章。由于许多结构都有风洞试验数据记录,因此大部分问题可通过参考相关文献获得,如库克在1985年出版的著作。有关静力风荷载的计算将在第4章讨论。

作用在结构表面的风荷载随时间和空间而变化,动力分析中,例如要考虑结构的质量和加速度的乘积,即惯性力的影响,因此比静力分析复杂得多。如果一种等效的静力法能够成立,则将简化分析过程。对于振动结构,风荷载还与结构自身的运动状态有关。结构气动响应,即风速向风荷载的转化,可能受结构运动的影响很大。上述内容参阅第7章至第9章。

力学响应

在风工程中,力学响应是指结构在风荷载作用下产生的响应。刚弹性结构在风荷载作用下会出现多种振动形式。例如,顺风向的振动称为抖振,它的产生与湍流风有关。抖振现象将在第5章和第6章中讨论。

细长结构极易产生由旋涡脱落而导致的横向风振。在一定的风速范围内,与风向垂直的风荷载会使结构产生共振。横向风振将在第7章中介绍。

悬索桥及其他一些结构可能由于竖向运动与扭转运动耦合而产生振动,这种现象称为经典颤振。经典颤振只会出现在高风速下出现。颤振会导致结构整体坍塌,因此对可能发生颤振的桥梁必须进行风洞试验。由风引起的桥梁振动将在第8章中讨论,该章值得特别注意的内容是悬索桥施工,因为在其他参考书中未曾有过相关论述。

设计

虽然设计在风荷载链与其他环节同样重要,但不属于本书的讨论范畴。

规范

现行规范已体现了风荷载作用的重要性,1995年欧洲准规范《结构上的作用——风作用》已在全欧出版发行,其正式名称为欧洲准规范 ENV1991—2—4。为方便起见,本书中使用它的常用名称——欧洲规范1。按计划它将被1998年出版的新规范所替代。

欧洲规范1很注重结构风荷载作用,为欧洲的结构抗风设计提供了依据。为了能够正确、合理使用该规范,我们需要理解各项条文的基本原理。本书的目的之一就是为读者提供相关的背景知识。

第2章 风气候

为按实际情况预测风荷载在结构上的作用，需要了解一些气象学的知识，尤其是强暴风的成因和持时。

本章介绍了一些最重要的气象现象。

2.1 气象分类

大气运动通常是在时间和空间上相互独立的不同模式运动的组合。图 2.1 给出了大气的运动模式，从湍流（特征尺度在几米范围内，时间尺度在几分钟之内的空气旋涡）到区域性气候系统和特征尺度覆盖整个地球、时间尺度为几天的大行星波。这种现象在气象学中被定义为微尺度、中尺度和天气尺度（图 2.1）。

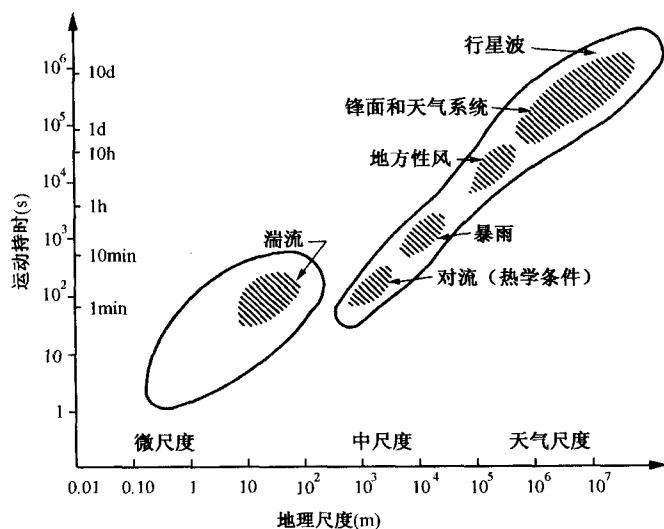


图 2.1 不同形式的大气运动在空间时间上的量级序列图 [源于福尔塔克 (Fortak) (1982)，此转载经由迪特里希·赖默·费尔拉格 (Dietrich Reimer Verlag) 许可]

风速自谱是描述微尺度和天气尺度的有力工具，自谱表示以频率为函数的风速在不同频率处方差，见附录 A.3。自谱反映了微尺度的高频段与天气尺度的低