

风荷载的CFD数值模拟

——以体育场和膜结构为例

顾磊 潘亮 齐宏拓 编著



CFD Numerical Simulation of Wind Load

——with the Examples of Stadiums and Membrane Buildings



人民交通出版社
China Communications Press

风

要 容 内

CFD数值模拟

——以体育场和膜结构为例

顾磊 潘亮 齐宏拓 编著

CFD Numerical Simulation of Wind Load

——with the Examples of Stadiums and Membrane Buildings



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书以体育场和膜结构为例,详细介绍了用计算流体力学(CFD)数值模拟法来分析计算复杂体型大跨度空间结构的风荷载体形系数方面的内容。全书共分3个部分:第1部分含第1章,介绍了风荷载标准值的计算、湍流特性和计算流体力学CFD基础理论;第2部分含第2章~第4章,进行了4种典型体型体育场罩棚风场的CFD模拟,归纳出风压系数取值图供设计选用,总结了罩棚风压分布规律,分析了罩棚倾角和连接开缝对风荷载的影响,并以奥运网球中心为例进行了详细剖析;第3部分含第5章~第7章,分别是常见的单片膜结构以及它们的组合体的风荷载CFD模拟,归纳出风压系数取值图供设计选用,最后给出了两个复杂膜结构分析实例。

本书可供建筑设计人员、建筑科学研究人员和高等院校土木工程专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

风荷载的CFD数值模拟:以体育场和膜结构为例/
顾磊,潘亮,齐宏拓编著. —北京:人民交通出版社,
2012.9

ISBN 978-7-114-09726-3

I. ①风… II. ①顾… ②潘… ③齐… III. ①体育场
—薄膜结构:抗风结构—结构设计 IV. ①TU245.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第057250号

书 名:风荷载的CFD数值模拟——以体育场和膜结构为例

著 作 者:顾 磊 潘 亮 齐宏拓

责任编辑:陈志敏 温鹏飞

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京交通印务实业公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:9.75

字 数:220千

版 次:2012年9月 第1版

印 次:2012年9月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09726-3

定 价:36.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

复杂体型体育场和膜结构是风敏感大跨度建筑,实际工程中常以风荷载控制设计,风荷载体型系数或者风压系数是结构抗风设计重要的基本参数。因此,对复杂体型大跨度建筑风荷载体型系数进行系统的研究和确定是有理论意义和实际应用价值的。

风荷载体型系数的分析,当前可采用风洞试验法和计算流体力学(CFD)数值模拟法(或称数值风洞法)。由于风洞试验法往往投资大、周期长,而数值风洞法具有快速、精确和经济的优势,且已得到多项工程的验证是可靠的,因此特别对于复杂体型的大跨度建筑采用数值风洞法,求得风压分布规律来提供风载体型系数是行之有效的途径。

本书作者曾设计或参与设计过国家游泳中心“水立方”、奥运会网球中心莲花网球场、惠州体育中心、广州大学城体育馆、深圳沙井体育中心等多项大跨度体育场馆工程,深知风荷载取值的难度。因此萌发了对体型复杂的体育场和膜结构的风荷载体型系数进行系统、深入研究的想法,并采用计算流体力学(CFD)数值模拟法,通过大量的分析计算,提出了4种典型体育场、3种典型单片膜结构及其组合膜结构的风荷载体型系数取值方法,以供设计参考和选用。

综观本书有如下特点:

(1)内容丰富、新颖。本书采用比较新颖的计算流体力学(CFD)数值模拟法来分析计算复杂体型大跨度空间结构的风荷载体型系数。从风荷载标准值,脉动风特性,计算流体力学基础,平均风压系数,典型体型体育场罩棚风场CFD数值模拟,体育场罩棚倾角及连接开缝对风荷载的影响,典型体型单片膜结构及其组合膜结构风荷载数值模拟,一直到一个奥运会网球中心赛场、两个较复杂膜结构共三个风荷载模拟实例都一一作了详细的阐述。

(2)逻辑性好。本书从提出问题、研究问题到解决问题所采用的技术路线、基本理论、计算模型、基本方程、边界条件、求解方法、计算步骤、计算结果的分析对比和归纳整理,一直到提出合理的结论和建议都交待的十分清楚。

(3)实用性强。本书所提出4种典型体育场、3种典型单片膜结构及其组合膜结构的风载体型系数的建议和图表可在工程实践中应用,也可作为我国《建筑结构荷载规范》、《空间网格结构技术规程》和《膜结构技术规程》修订时的重要依据。

(4)可读性好。本书文字简练、文理通顺,可供建筑结构设计人员、建筑科学研究人员

和有关高等院校土木工程专业师生阅读、参考。

本书虽未对所述大跨度空间结构的流固耦合、风致效应和风振分析做进一步说明和研讨,但仍不失为风工程前沿研究领域中一本重要且有所创新的基础性著作,它的出版是有意义和价值的。

最后,我热切期盼有更多、更新的大跨度空间结构方面的论著问世,为我国的空间结构从大国迈向强国添砖加瓦作出贡献。

中国工程院院士
浙江大学教授 董石麟

2012 年春节

风荷载体型系数或者风压系数是结构抗风设计的基本参数之一,对于重要且体型复杂的房屋和构筑物的体型系数,我国《建筑结构荷载规范》(GBJ 50009—2001)要求应由风洞试验确定。

开展风荷载 CFD 数值研究的想法始于笔者在设计单位工作时期,自 2003 年出任国家游泳中心“水立方”钢结构设计负责人以来,笔者参与了奥运网球中心莲花网球场、广州大学城体育馆、惠州体育中心、广州亚运网球中心、天津水上中心“水立方”(未建)、深圳沙井体育中心等一系列体育建筑的设计工作。在这些工程设计中都遇到了风荷载取值的难题,因为初步设计(扩初)阶段,建筑体型可能调整,用于制作实物模型的设计图纸尚未完成,业主不可能在这个阶段就委托风洞试验。另一个工程需求源于笔者接触较多的膜结构设计,由于体型复杂多变,风荷载取值更加困难,一个膜结构项目的造价往往很低,甚至小于风洞试验的费用,业主更加不可能委托风洞试验,然而,膜结构风损事件却时有发生,尤其在沿海地区。由于《建筑结构荷载规范》中的体型系数表无法提供针对性的参考数值,风荷载取值只能靠设计人员根据经验取定,或偏于保守或偏于不安全。

研究风压分布规律对风荷载取值的确定具有非常重要的参考意义。虽然具体工程的风洞试验可以作为单个工程的设计依据,但是若能参照荷载规范的体型系数表,给出某类体型风压分布规律,则会给设计人员带来很大的方便:一则可以在初步设计时直接取用风压系数;二则,风洞试验有时也可能出现错误,掌握了风压分布的一般规律就可以对风洞试验报告的正确性进行评价;其三可以提高抗风概念设计的能力。于是笔者萌发了对典型体型的体育场和膜结构风荷载体型系数进行研究的想法,2006 年笔者进入高校任教,在我的两位研究生的共同努力下,这项工作得以实施。

我们的研究很大程度上受到了《欧洲张力薄膜结构设计指南》的启发,该指南基于模型风洞试验给出了风荷载取值的建议,而我们则采用计算流体力学 CFD 数值模拟这一较为简便、快捷和经济的手段,通过大量的“计算机试验”,来获取更多的“试验结果”。

本书共分 3 个部分:第 1 部分含第 1 章,介绍了风荷载标准值的计算、湍流特性和计算流体力学 CFD 理论基础;第 2 部分含第 2 章~第 4 章,进行了 4 种典型体型体育场罩棚风场的 CFD 模拟,归纳出风压系数取值图供设计选用,总结了罩棚风压分布规律,分析了罩棚倾角和连接开缝对风荷载的影响,并以奥运网球中心的实例进行了详细剖析;第 3 部分含第 5 章~第 7 章,分别是常见的单片膜结构以及它们的组合体的风荷载 CFD 模拟,归纳出风压系数取值图供设计选用,最后给出了两个复杂膜结构分析实例。

本书相关章节引用了多个工程的风洞试验图形进行对比验证,风洞试验报告作为参

考文献列出。第3部分的膜结构分析模型均由深圳欣望角空间膜技术有限公司刘文光董事长和金江江设计师提供。全书由长期从事风工程 CFD 研究工作的徐枫博士进行了审阅。在此表示感谢。

本书并没有涉及流固耦合风振分析等风工程研究前沿,我们的主要目的是通过 CFD 数值模拟研究为典型体型体育场和膜结构设计提供风压系数取值参考,同时介绍 CFD 数值风场模拟的基本方法 and 应用经验。三位作者对风工程研究的时间尚短,成果还很粗浅,水平有限,错误难免,恳请读者批评指正。

顾 磊

2011 年 12 月 6 日

目录

Mulu

1 风荷载和计算流体力学基础	1
1.1 风荷载标准值	1
1.1.1 基本风压	1
1.1.2 风压高度变化系数	2
1.1.3 风荷载体型系数	6
1.1.4 风振系数	7
1.2 脉动风特性	7
1.2.1 脉动风速	7
1.2.2 湍流强度	8
1.2.3 湍流积分尺度	9
1.2.4 湍流相关性	9
1.2.5 湍流功率谱密度	11
1.3 计算流体力学基础	13
1.3.1 描述空气流动的控制方程	14
1.3.2 湍流模型	17
1.3.3 计算区域的离散和方程求解	23
1.4 平均风压系数和风荷载模拟典型算例	24
1.4.1 平均风压系数	24
1.4.2 风压系数模拟算例	25
2 典型体型体育场罩棚风场 CFD 数值模拟	29
2.1 引言	29
2.2 典型体型体育场建模	29
2.2.1 体育场体型	29
2.2.2 网格划分及边界条件处理	29
2.2.3 体育场罩棚分区标准化	31
2.3 马鞍形体育场罩棚表面风压分布	31
2.3.1 0°风向马鞍形体育场罩棚表面风压分布	31
2.3.2 45°风向马鞍形体育场罩棚表面风压分布	33
2.3.3 90°风向马鞍形体育场罩棚表面风压分布	34
2.4 平屋盖矩形体育场罩棚表面风压分布	36

2.4.1	0°风向平屋盖矩形体育场罩棚表面风压分布	36
2.4.2	45°风向平屋盖矩形体育场罩棚表面风压分布	37
2.4.3	90°风向平屋盖矩形体育场罩棚表面风压分布	39
2.5	单侧月牙形罩棚表面风压分布	40
2.5.1	0°风向单侧月牙形体育场罩棚表面风压分布	40
2.5.2	-45°风向单侧月牙形体育场罩棚表面风压分布	41
2.5.3	-90°风向单侧月牙形体育场罩棚表面风压分布	42
2.5.4	135°风向单侧月牙形体育场罩棚表面风压分布	43
2.5.5	180°风向单侧月牙形体育场罩棚表面风压分布	44
2.6	双侧罩棚表面风压分布	45
2.6.1	0°风向双侧看台体育场罩棚表面风压分布	45
2.6.2	-45°风向双侧看台体育场罩棚表面风压分布	47
2.6.3	-90°风向双侧看台体育场罩棚表面风压分布	49
2.7	典型体型体育场罩棚分区风压	50
2.8	罩棚表面分区风压包络线	54
2.9	本章小结	56
3	体育场罩棚倾角及连接开缝对风荷载的影响	57
3.1	引言	57
3.2	罩棚倾角的改变对罩棚表面风压的影响	57
3.2.1	模型和罩棚倾角	57
3.2.2	不同倾角罩棚表面风压分布规律	58
3.3	看台罩棚连接开缝体型与不开缝体型风压对比	64
3.3.1	开缝体型与不开缝体型建模	64
3.3.2	风压分布对比	64
3.4	数值模拟和风洞试验的比较	67
3.5	结论	68
4	奥运网球中心赛场风荷载和风环境数值模拟实例	69
4.1	引言	69
4.2	CFD 数值风洞建模	70
4.3	风压系数计算结果与分析	71
4.3.1	罩棚上表面风压分布	71
4.3.2	罩棚下表面风压分布	73
4.3.3	看台下表面风压分布	74
4.4	罩棚风荷载取值建议	74
4.5	开洞体型与封闭体型的对比	76
4.6	罩棚仰角影响	76
4.7	场内风环境模拟与评价	78
4.8	结论	79

5 典型体型单片膜结构风荷载数值模拟..... 80

5.1 引言..... 80

5.2 典型体型单片膜结构建模..... 80

5.3 网格划分及边界条件处理..... 82

5.4 单片膜风压系数模拟结果分析..... 82

5.4.1 单片膜分区标准化..... 82

5.4.2 鞍形单片膜膜面风压系数模拟分析..... 82

5.4.3 伞形单片膜膜面风压系数模拟分析..... 87

5.4.4 倒伞形单片膜膜面风压系数模拟分析..... 88

5.5 典型体型单片膜分区风压系数取值建议..... 90

5.6 本章小结..... 91

6 膜单元组合体型风荷载的数值模拟..... 93

6.1 引言..... 93

6.2 典型膜结构组合形式的建模..... 93

6.3 鞍形高低膜组合风压系数模拟分析..... 95

6.3.1 鞍形高低膜的标准化分区..... 95

6.3.2 鞍形高低膜结构风压系数分布..... 95

6.4 伞形组合膜结构风压系数模拟分析 101

6.4.1 伞形组合膜结构标准化分区 101

6.4.2 伞形膜组合风压系数分布 101

6.5 倒伞形组合膜结构风压系数模拟分析 113

6.5.1 倒伞形组合膜结构标准化分区 113

6.5.2 倒伞形膜组合风压系数分布 113

6.6 典型膜结构组合风压系数取值建议 124

6.7 本章小结 131

7 复杂体型膜结构的风荷载模拟实例 132

7.1 引言 132

7.2 复杂膜结构建模 132

7.3 两个复杂膜结构风压系数模拟结果分析 133

7.3.1 体育场罩棚膜风压系数模拟结果 133

7.3.2 复杂鞍形组合膜结构风压系数模拟结果分析 137

7.4 本章小结 139

参考文献..... 140

1 风荷载和计算流体力学基础

1.1 风荷载标准值

风荷载是指风(空气流动)在建筑物表面引起的压力或吸力,是结构需要承受的主要荷载之一。风荷载是一种动荷载,由平均风(稳定风)和脉动风组成,因此结构的风效应包括平均风作用下的静力响应和脉动风作用下的动力响应(即风振)。在风工程研究领域,许多学者按照随机振动理论直接输入脉动风来计算结构风振响应,但目前我国和其他多数国家规范均采用等效静力风荷载来考虑风振因素,以方便结构设计。对于主要承重结构,风荷载标准值的表达可有两种形式:一种为平均风压加上由脉动风引起导致结构风振的等效风压;另一种为平均风压乘以风振系数。我国规范采用后者。

《建筑结构荷载规范》(GBJ 50009—2001)给出了主要承重结构计算时,垂直于建筑物表面上的风荷载标准值计算公式:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1-1)$$

式中: w_k ——风荷载标准值(kN/m^2);

β_z ——高度 z 处的风振系数;

μ_s ——风荷载体型系数;

μ_z ——风压高度变化系数;

w_0 ——基本风压(kN/m^2)。

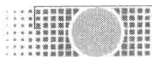
1.1.1 基本风压

风的强度采用风速的大小范围来划分等级,通用的蒲福风力等级表将风自 0 级至 17 级划分为 18 个等级,7 级及以上的风力才会对工程造成影响,12 级及以上的风称为台风(东亚)或飓风(西印度群岛和大西洋一带)。12 级风距地 10m 高处相当风速范围为 $32.7 \sim 36.9 \text{ m/s}$, 17 级风距地 10m 高处相当风速范围为 $56.1 \sim 61.2 \text{ m/s}$ 。由气体动力学研究可知:当气体速度较低时,因流速变化范围不大,所引起的压强变化也不大,这样密度的变化就很小,从而低速气流可以近似地看作不可压缩流体。根据不可压缩理想流体运动的伯努利方程可求出自由气流的风速提供的单位面积上的风压力(压强),公式如下:

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1-2)$$

我国荷载规范规定,基本风压 w_0 是以空旷平坦地面以上 10m 高度处统计所得不同重现期(10 年、50 年、100 年)内 10min 平均年最大风速(m/s)作为当地基本风速 v_0 ,按式(1-2)计算确定。取标准空气密度 $\rho = 1.25 \text{ kg}/\text{m}^3$,则可统一按下式计算基本风压:

$$w_0 = v_0^2 / 1600 (\text{kN}/\text{m}^2) \quad (1-3)$$



世界各国对基本风压的定义不尽相同,主要区别在于用以确定基本风速的标准高度、重现期和平均风计算时距存在较大差异。

标准高度越高,受地面障碍物影响越小,风速随之增大。加拿大、日本等国家和我国规范规定平坦地面以上 10m 为标准高度。气象台站的风速记录须统一换算为离地 10m 高度。

我国规范按标准重现期 50 年的概率确定基本风压,即任一年内风速的超越概率为 1/50;日本按重现期为 100 年的风速确定基本风压,即任一年内风速的超越概率为 1/100。我国《建筑结构荷载规范》(GBJ 50009—2001)附表 D.4 全国各城市的基本风压值,直接给出了重现期为 10 年、50 年、100 年的基本风压供设计人员直接取用。日本风荷载规范给出了不同重现期以 100 年重现期为基准的风速换算系数 $R^{[3]}$:

$$R = 0.54 + 0.1\ln(r) \quad (1-4)$$

式中: r ——设计重现期(年)。

对应的风速换算系数(以 100 年为参考)见表 1-1,风压换算系数(以 50 年为参考)见表 1-2。

重现期风速换算系数 R_v

表 1-1

重现期(年)	5	10	20	30	50	100	200	300
重现期风速换算系数 R_v	0.70	0.77	0.81	0.88	0.93	1.00	1.07	1.11

重现期风压换算系数 R_p

表 1-2

重现期(年)	5	10	20	30	50	100	200	300
重现期风压换算系数 R_p	0.56	0.68	0.87	0.90	1.00	1.15	1.32	1.42

平均风时距越短,对应于这一时距的最大平均风速越大,这是由于在较短时距内集中反映了较大波峰的影响,而较小的波峰未能体现。通过图 1-1 所示的风速时间历程曲线可以发现:在低频带有两个明显的峰值,其变化主要是由大尺度的大气运动产生的,周期为 1 年和 4 天;在高频带有一个很明显的峰值,其变化主要是由微尺度的大气运动产生的,周期为 1min。在低频带与高频带之间,即周期在 10min 至 1h 范围内功率谱曲线比较平坦,如果将平均风速的时距取在这个范围内时,可以忽略天气变化引起的湍流改变,平均风速基本上是一个稳定值。因此,许多国家都在这个范围内取平均风速的时距,如我国和日本规范规定的时距为 10min;加拿大时距取 1h;美国取瞬时阵风风速时距 3s;英国对围护结构取 3s,房屋取 15s。各种不同时距与 10min 时距风速的比值见表 1-3^[3]。

各种不同时距与 10min 时距风速的比值

表 1-3

时距	1h	10min	5min	2min	1min	30s	20s	10s	5s	瞬时
比值	0.94	1.00	1.07	1.16	1.20	1.26	1.28	1.35	1.39	1.50

1.1.2 风压高度变化系数

大气边界层近地层的风是湍流,由于地球表面的摩擦,接近地表的风速随着离地高度的减小而降低,离地 300~500m 以上风速才不受地表的影响,在气压梯度作用下自由流动。自由大气中的风是层流,基本沿等压线以梯度风速流动。以梯度风速流动的起点高度称作梯度风

高度,用 z_G 表示,梯度风速用 v_{z_G} 表示。在大气边界层中,平均风速随高度发生变化,其变化规律称为风剪切或风速廓线,风速廓线可采用对数率分布或指数率分布。

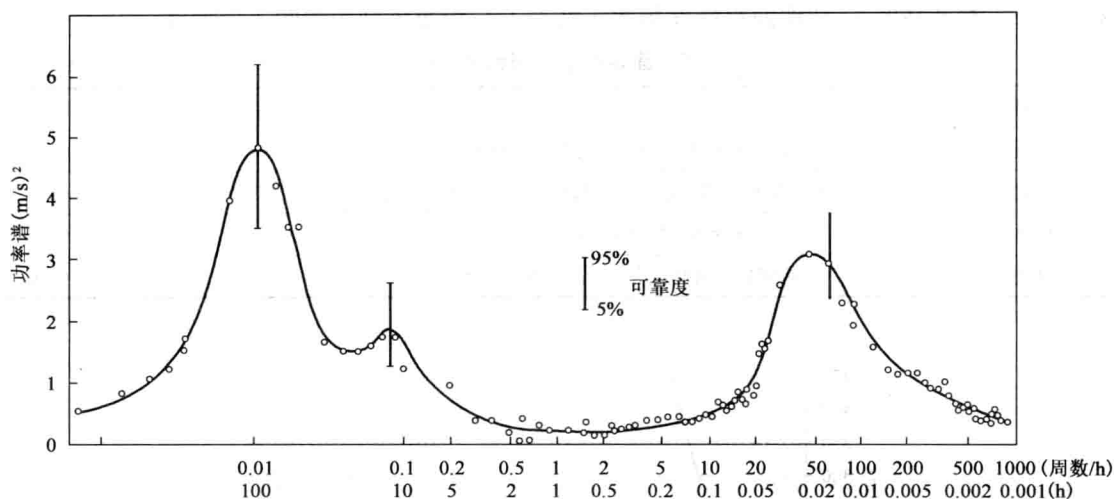


图 1-1 风速和风向时间历程曲线^[2]

(1) 对数率分布

在离地高度 100m 内的表面层中,可以忽略剪切应力的变化,这时风速廓线可采用普朗特(Prandtl)对数率分布来表示^[9]:

$$\bar{v}(z) = \left(\frac{v_*}{\kappa} \right) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1-5)$$

式中: $\bar{v}(z)$ ——离地高度 z 处的平均风速;

v_* ——摩擦速度;

κ ——卡门(Karman)常数,一般近似取 0.4;

z_0 ——地表面粗糙长度,根据地面粗糙度类别由开阔到城市密集区取 0.002~2.0。

(2) 指数率分布

用指数率分布计算风速廓线时比较简便,因此目前多数国家(包括我国)采用经验的指数率分布来描述近地层中平均风速随高度的变化。

加拿大的 A. G. Davenport 根据多次观测资料整理出不同地貌下平均风速沿高度的变化规律,称为指数风剖面,该规律用指数函数描述为:

$$\bar{v} = \bar{v}_b \left(\frac{z}{z_b} \right)^\alpha \quad (1-6)$$

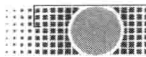
式中: z_b 、 $\bar{v}_b$ ——分别为标准参考高度 z_b (我国取 10m) 和标准参考高度 z_b 处的平均风速;

z 、 $\bar{v}$ ——分别为高度 z 和高度 z 处的平均风速;

α ——地面粗糙度指数。

地面粗糙度指数 α 值与地表面粗糙长度有关。地面粗糙度不同,近地层风速变化快慢也不同,地面粗糙度指数 α 越小的地貌,越快达到梯度风速。地面粗糙度指数 α 除了取决于地表面粗糙长度 z_0 外,还取决于平均风速 $\bar{v}(z_s)$, 其中 z_s 为计算平均风速的参考高度。

$$\alpha = \alpha_0 [1 - 0.55 \times \lg \bar{v}(z_s)], \alpha_0 = (z_0/10)^{0.2} \quad (1-7)$$



地面粗糙度指数 α 值随平均风速的增加而减小,随地面粗糙度长度 z_0 的增加而增加。

《建筑结构荷载规范》(GBJ 50009—2001)将地面粗糙度分为 A、B、C、D 四类,对应的梯度风高度 z_G 、参考高度 z_{ba} 和地面粗糙度指数 α 见表 1-4,指数风剖面如图 1-2 所示。

我国地面粗糙度类别和对应参数

表 1-4

地面粗糙度类别	描 述	z_G (m)	z_{ba} (m)	α
A 类	近海海面 and 海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	300	5	0.12
B 类	田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区	350	10	0.16
C 类	有密集建筑群的城市市区	400	15	0.22
D 类	有密集建筑群且房屋较高的城市市区	450	30	0.30

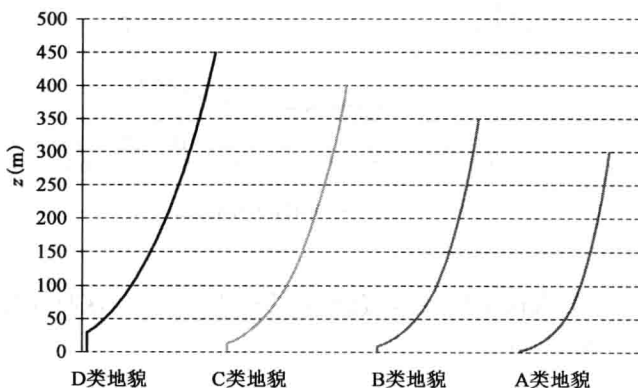


图 1-2 指数风剖面

根据风速风压关系,任一地面粗糙度类别、高度 z 处的平均风压可表示为:

$$w_a(z) = w_{ba} \left(\frac{z}{z_{ba}} \right)^{2\alpha} \quad (1-8)$$

式中: $w_a(z)$ 、 w_{ba} ——分别为任一高度 z 处、参考高度 z_{ba} 处的风压。

风压高度变化系数定义为任意高度处的平均风压 $w_a(z)$ 与当地基本风压的比值:

$$\mu_z = \frac{w_a(z)}{w_0} = \frac{w_{ba}}{w_0} \left(\frac{z}{z_{ba}} \right)^{2\alpha} \quad (1-9)$$

根据梯度风高度 z_G 和地面粗糙度指数 α ,不同地面粗糙度类别的风压高度变化系数计算如下:

$$\mu_z^A = 1.379 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.24} \quad (1-10)$$

$$\mu_z^B = 1.000 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.32} \quad (1-11)$$

$$\mu_z^C = 0.616 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.44} \quad (1-12)$$

$$\mu_z^D = 0.318 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.60} \quad (1-13)$$

不同地面粗糙度类别参考高度 z_{ba} 以下的高度变化系数取常数。《建筑结构荷载规范》

(GBJ 50009—2001)给出了四类地面粗糙度的风压高度变化系数(表 1-5),在参考高度 z_{bs} (A类 5m、B类 10m、C类 15m、D类 30m)以下, μ_z 分布为 1.17、1.00、0.74、0.62; B类为对应于当地基本风压的标准地貌,因此参考高度 10m 处的 $\mu_z = 1$; 在到达各地面粗糙度类别的梯度风高度 z_G 后, $\mu_z = 3.12$ 。

风压高度变化系数

表 1-5

离地面或海 平面高度 (m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.17	1.00	0.74	0.62
10	1.38	1.00	0.74	0.62
15	1.52	1.14	0.74	0.62
20	1.63	1.25	0.84	0.62
30	1.80	1.42	1.00	0.62
40	1.92	1.56	1.13	0.73
50	2.03	1.67	1.25	0.84
60	2.12	1.77	1.35	0.93
70	2.20	1.86	1.45	1.02
80	2.27	1.95	1.54	1.11
90	2.34	2.02	1.62	1.19
100	2.40	2.09	1.70	1.27
150	2.64	2.38	2.03	1.61
200	2.83	2.61	2.30	1.92
250	2.99	2.80	2.54	2.19
300	3.12	2.97	2.75	2.45
350	3.12	3.12	2.94	2.68
400	3.12	3.12	3.12	2.91
≥450	3.12	3.12	3.12	3.12

风速廓线的实测结果表明:用对数率和指数率都能较好地反映风速沿高度的分布规律;用指数率公式计算的风速值与实测值的偏差比对数率计算的风速值与实测值的偏差要小;随高度的增加,用对数率公式计算的风速值与实测值偏差增大。大气稳定度对风速廓线也有影响,一般在低风速时要考虑,在高风速时可以忽略。当风速廓线采用对数率分布时,大气稳定度的影响可以表示为^[5]:

$$\bar{v}(z) = \frac{v_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \chi_s\left(\frac{z}{L_s}\right) \right] \quad (z \gg z_0) \quad (1-14)$$

式中: χ_s ——大气稳定度函数,取决于 z/L_s ;

L_s ——莫宁—奥布霍夫(Monin-Obukhov)稳定长度,它是大气运动所引起的剪切力与热浮力之比。

当大气是中性层结时:

$$\chi_s = 0 \quad (1-15)$$

当大气是不稳定层结时:

$$\chi_s = 4.5 \frac{z}{L_s} \quad (z \leq L_s) \quad (1-16)$$

$$\chi_s = 4.5 \left[1 + \ln \left(\frac{z}{L_s} \right) \right] \quad (z > L_s) \quad (1-17)$$

当大气是稳定层结时:

$$\chi_s = -0.5 \frac{z}{L_s} \quad (z \leq L_s) \quad (1-18)$$

$$\chi_s = -0.5 \left[1 + \ln \left(\frac{z}{L_s} \right) \right] \quad (z > L_s) \quad (1-19)$$

图 1-3 给出了地面粗糙度指数的日变化^[6]。由图 1-3 可知,在晚间大气处于稳定状态时,地面粗糙度指数值最大;在午间大气处于不稳定或中性状态时,地面粗糙度指数值最小。

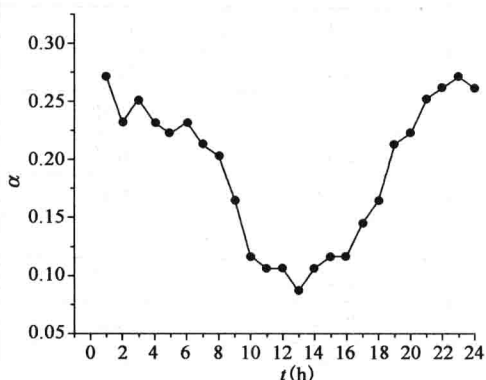


图 1-3 地面粗糙度指数日变化曲线

1.1.3 风荷载体型系数

风荷载体型系数是指风作用在建筑物表面上所引起的实际压力(或吸力)与来流风的速度压的比值,它描述的是表面在稳定风压作用下的静态压力分布规律,主要与建筑物的体型和体量有关,也与周围环境和地面粗糙度有关。风荷载体型系数通过风洞试验确定,试验测得建筑物 i 点净风压 w_i ,将其除以建筑物远前方上游来流风的平均风压 $\frac{1}{2}\rho\bar{v}^2$,即得到该测点的平均风压系数:

$$\mu_{si} = \frac{w_i}{\frac{1}{2}\rho\bar{v}^2} \quad (1-20)$$

式中: μ_{si} —— i 测点平均风压系数;

w_i —— i 测点净风压,为 i 点测得的风压值与远前方上游参考高度处的静压值之差;

$\bar{v}$ ——参考高度平均风速,参考高度可取 10m、建筑物顶标高或梯度风高度;

ρ ——空气密度。

我国规范所称的体型系数是用面上各测点的风压系数 μ_{si} 与该测点所属表面面积 A_i 的乘积取加权平均得到:

$$\mu_s = \frac{\sum_i \mu_{si} A_i}{A} \quad (1-21)$$

A 为所计算表面的总面积。各类体型建筑表面的风荷载体型系数可参考《建筑结构荷载规范》(GBJ 50009—2001)中表 7.3.1。对于重要且体型复杂的房屋和构筑物,体型系数应由风洞试验确定。

建筑物壁面上的平均风压系数与气流绕钝体的流动规律密切相关,风中钝体周围的流场很复杂,由撞击、分离、回流、环绕和涡组成,因而造成建筑物表面复杂的压力和吸力分布。

1.1.4 风振系数

对于高度大于 30m 且高宽比大于 1.5 的房屋和基本自振周期 T_1 大于 0.25s 的各种高耸结构以及大跨屋盖结构,均应考虑风压脉动对结构发生顺风向风振的影响。我国荷载规范采用风振系数 β_z 来考虑顺风向风振,它综合考虑了结构在风荷载作用下的动力响应,其中包括风速随时间、空间的变异性和结构的阻尼等因素。

对于一般悬臂型结构,例如构架、塔架、烟囱等高耸结构,以及高度大于 30m、高宽比大于 1.5 且可忽略扭转影响的高层建筑,均可仅考虑第一振型的影响,结构在 z 高度处的风振系数 β_z 可按下式计算:

$$\beta_z = 1 + \frac{\xi \nu \varphi_z}{\mu_z} \quad (1-22)$$

式中: ξ ——脉动增大系数;

ν ——脉动影响系数;

φ_z ——振型系数;

μ_z ——风压高度变化系数。

对于复杂的高层建筑、高耸结构和大跨屋盖等结构形式,由于结构自振频率比较密集,高阶振型影响不可忽略,不再适用仅考虑第一振型的规范公式(1-22),振型截断个数需特别研究,风振计算应按随机振动理论进行,结构的自振周期应按结构动力学计算。具体工程可委托研究机构进行风振专项分析,提供“静力等效风荷载”便于结构设计采用,“静力等效风荷载”是一种静力荷载,但可以产生动力荷载作用下结构的最大响应。

1.2 脉动风特性

大气运动是湍流运动,是一种随机过程,可以用数理统计的方法来研究脉动风的特性。脉动风中的物理量随时间和空间的变化是一种随机变量。当大气是中性稳定时,大气运动可以看成是平稳的随机过程,这时脉动风的物理量可以用时间平均值来代替统计平均值,即可以用某一空间点上长时间观测的样本进行平均来代表整个脉动风的统计特性。脉动风的统计特性包括湍流强度、湍流积分尺度、相关函数、功率谱密度、阵风系数等,可用来描述大气运动中的湍流结构。

1.2.1 脉动风速

脉动风是指在某个时刻 t , 空间某点上的瞬时风速 $v(t)$ 与平均风速 $\bar{v}$ 的差值:

$$v'(t) = v(t) - \bar{v} \quad (1-23)$$

脉动风速的时间平均值为零,即:

$$\overline{v'(t)} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} v'(t) dt = 0 \quad (1-24)$$