



调频阻尼减振结构 理论与设计

汪大洋 编著



科学出版社

调频阻尼减振结构 理论与设计

汪大洋 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结和阐述了调频阻尼减振结构的理论、方法、技术和工程应用的主要研究成果, 主要内容包括结构灾害与减振控制概述、调频阻尼器的类型与原理、结构振动控制优化理论、调频阻尼减振结构分析、调频阻尼减振结构随机动力可靠度、调频阻尼减振结构设计、调频阻尼减振结构案例分析。

本书可作为从事土木工程、防灾减灾工程及防护工程、交通工程、工程力学、水利工程、材料科学与工程、机械工程、航空航天工程等研究工作的科研人员及工程技术人员的参考用书, 也可供高等院校相关专业的研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

调频阻尼减振结构理论与设计/汪大洋编著. —北京: 科学出版社, 2019.3
ISBN 978-7-03-059322-1

I. ①调… II. ①汪… III. ①阻尼减振-结构分析 ②阻尼减振-设计
IV. ①O328

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 245947 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 320 000

定价: 110.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135927-2014

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

建筑结构技术和新材料的飞速发展,涌现出超高层建筑、复杂场馆建筑、超长跨桥梁等形式多样的建筑体裁,在城市中犹如绽放的花朵争奇斗艳。然而,在其夺目盛开的生命历程中,不得不时刻抵抗着来自外界的不可预知的动荷载激励,如地震荷载、强风荷载、人行荷载、冲击荷载、设备振动荷载等。研究及工程实践表明,结构损伤大多源于动荷载的激励作用,即便有时未造成灾难性事故,但也可能使结构不能按设计所要求的性能正常工作。因此,为确保其在使用阶段能够达到预期的正常使用性能,其在设计阶段就必须进行有效的分析计算,或者增设必要的控制技术,以获得在使用过程中可能遭遇的荷载作用下的动力响应控制,进而使结构预期设计功能得以有效保证。

调频阻尼减振作为抵御外荷载动力激励的一种有效方法,得到了快速发展和应用,并成为比较成熟可靠的动力控制技术。调频阻尼减振控制技术通过在结构顶部关键部位设置惯性质量,并配置弹簧和阻尼器与被控结构相连接,利用共振原理,对被控结构在某些振型(一般为第一振型)下的动力响应进行控制,调频阻尼装置随外荷载激励产生与结构同步、反向的运动,对被控结构施加反作用控制力,从而降低结构振动响应,进而有效改善被控结构的舒适性和安全性。

本书系统地总结和阐述了调频阻尼减振结构的理论、方法、技术及工程应用的主要研究成果。全书共7章,包括结构灾害与减振控制概述、调频阻尼器的类型与原理、结构振动控制优化理论、调频阻尼减振结构分析、调频阻尼减振结构随机动力可靠度、调频阻尼减振结构设计、调频阻尼减振结构案例分析。

本书得到周云教授、张永山教授的鼓励、指导和支持,作者在此表示由衷的感谢!在编写本书的过程中,作者参阅了同行前辈、专家的许多宝贵资料和研究成果,在此谨向他们致以衷心的感谢。同时,袁玲、陈海森、陈瑶、刘轩、龙锦添、王辉、汪天雷等也参与了与本书有关的研究工作,作者对他们的贡献表示衷心的感谢。

在本书编写和出版过程中,亦得到作者所在单位和出版社的大力鼓励和支持,在此亦向关心本书出版的所有专家和单位表示诚挚的谢意。

本书出版之际正值汶川地震10周年,谨以此书纪念汶川地震10周年。

限于作者水平,书中难免有疏漏和不妥之处,衷心欢迎读者提出宝贵意见。

汪大洋

2018年6月·广州大学

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 结构灾害与减振控制概述	1
1.1 风与风致灾害	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 平均风速剖面	2
1.1.3 顺风向风荷载特性	4
1.1.4 横风向风荷载特性	9
1.1.5 风对结构的作用	15
1.1.6 风致灾害	15
1.2 地震与地震灾害	18
1.2.1 地震成因及类型	19
1.2.2 地震波、震级与烈度	23
1.2.3 地震灾害	28
1.3 结构振动控制	32
1.3.1 结构振动控制的概念	32
1.3.2 结构振动控制的分类	33
1.4 调频阻尼减振技术工程案例	39
1.4.1 调频质量阻尼器在中国的应用	39
1.4.2 调频液体阻尼器在各国的应用	46
参考文献	54
第 2 章 调频阻尼器的类型与原理	55
2.1 调频质量阻尼器	55
2.1.1 调频质量阻尼器的类型与性能	55
2.1.2 调频质量阻尼器的原理	63
2.2 调频液体阻尼器	65
2.2.1 调频液体阻尼器的类型与性能	66
2.2.2 调频液体阻尼器的原理	71
参考文献	79

第 3 章 结构振动控制优化理论	83
3.1 主动控制最优算法理论	83
3.1.1 线性最优控制算法	83
3.1.2 瞬时最优控制算法	85
3.1.3 随机最优控制算法	88
3.2 被动控制准最优算法理论	90
3.2.1 最小误差激励法	91
3.2.2 最小范数法	92
3.2.3 等效最优控制特性法	92
3.3 非线性结构体系的最优算法理论	93
第 4 章 调频阻尼减振结构分析	97
4.1 TMD 减振结构体系水平振动分析	97
4.1.1 简谐激励下单自由度体系振动分析	97
4.1.2 基底简谐激励下单自由度体系振动分析	100
4.1.3 随机激励下单自由度体系振动分析	102
4.1.4 基底随机激励下单自由度体系振动分析	103
4.1.5 风荷载作用下多自由度体系振动分析	104
4.1.6 地震荷载作用下多自由度体系振动分析	107
4.2 TMD 减振结构体系竖向振动分析	108
4.2.1 基底简谐激励下单自由度体系振动分析	108
4.2.2 基底地震激励下单自由度体系振动分析	112
4.3 MTMD 减振结构体系振动分析	113
4.3.1 风荷载作用下体系振动分析	113
4.3.2 地震荷载作用下体系振动分析	115
4.4 ATMD 减振结构体系振动分析	117
4.5 AMTMD 减振结构体系振动分析	120
4.6 TLD 减振结构体系振动分析	124
4.7 TLCD 减振结构体系振动分析	127
参考文献	130
第 5 章 调频阻尼减振结构随机动力可靠度	131
5.1 基于首次超越破坏的动力可靠度理论	131
5.1.1 随机过程的交差问题	132

5.1.2	基于泊松分布的时变动力可靠度	133
5.1.3	基于马尔可夫分布的时变动力可靠度	133
5.1.4	结构反应为非平稳过程的情形	134
5.1.5	随机过程与非随机时变界限的交差问题	135
5.1.6	考虑非随机时变界限的动力可靠度	136
5.1.7	考虑随机时变界限的动力可靠度	137
5.2	调频阻尼减振结构风振可靠度分析	137
5.2.1	结构抗风动力随机时变可靠度计算方法	137
5.2.2	基于极值分布的结构抗风动力可靠度计算方法	141
5.2.3	TMD 减振结构抗风动力可靠度案例分析	142
5.3	调频阻尼减振结构地震可靠度分析	144
5.3.1	地震动随机过程模型	145
5.3.2	调频阻尼减振结构地震可靠度分析	146
5.3.3	TMD 减震结构抗震动力可靠度案例分析	147
5.4	调频阻尼减振随机结构动力可靠度分析	149
5.4.1	响应面法基本原理	149
5.4.2	遗传算法基本原理	150
5.4.3	GA 优化 BP 网络响应面法	151
5.4.4	基于改进响应面法的随机结构动力可靠度分析	152
5.4.5	带 TMD 随机结构的动力可靠度案例分析	154
	参考文献	156
第 6 章	调频阻尼减振结构设计	157
6.1	TMD 减振结构设计	157
6.1.1	TMD 参数设计	157
6.1.2	TMD 减振结构优化设计方法	163
6.1.3	TMD 减振结构实用设计方法	166
6.2	TLD 减振结构设计	167
6.2.1	TLD 水运动基本方程	167
6.2.2	圆柱形 TLD 水运动反应及其对结构的控制力设计	169
6.2.3	矩形 TLD 水运动反应及其对结构的控制力设计	175
6.2.4	TLD 参数设计	180
6.3	TLCD 减振结构设计	186
6.3.1	TLCD 对结构控制力设计	186
6.3.2	TLCD 参数设计	187
	参考文献	192

第 7 章 调频阻尼减振结构案例分析	193
7.1 超高层结构调频阻尼减振控制分析	193
7.1.1 工程概况	193
7.1.2 脉动风荷载数值模拟	194
7.1.3 结构无控风振响应计算	198
7.1.4 结构风振控制方案设计	199
7.1.5 结构风振控制动力时程分析	199
7.2 大跨人行桥结构调频阻尼减振控制分析	206
7.2.1 工程概况	206
7.2.2 动力特性分析	208
7.2.3 行人荷载模式	210
7.2.4 人行桥振动舒适度评价标准	212
7.2.5 大跨人行桥结构无控人行激励响应分析	214
7.2.6 大跨人行桥结构有控人行激励响应分析	219
7.3 场馆大悬挂楼盖结构调频阻尼减振控制分析	229
7.3.1 工程概况	229
7.3.2 动力特性分析	230
7.3.3 TMD 参数设计与模型计算工况	230
7.3.4 场馆大悬挂楼盖结构有控人行激励响应分析	231
参考文献	238

主要符号表

c	结构阻尼系数
c_d	TMD 阻尼系数
c_L	TLD 等价系数
C	结构阻尼矩阵
C^*	结构广义阻尼
$\text{erf}(x)$	误差函数
E	弹性模量
f_d	TMD 与主体结构固有频率比
f_L	TLD 与主体结构固有频率比
$f(x)$	概率密度函数
$f_{x\dot{x}}(x, \dot{x})$	联合概率密度函数
$F(\cdot)$	结构极值概率分布函数
F_k	平均风荷载标准值
H	频率响应函数
H_0	建筑屋面高度
$H(\omega)$	传递函数
$\bar{H}$	建筑物平均高度
I	湍流强度
k	结构刚度系数
k_d	TMD 刚度系数
k_L	TLD 等价刚度
K	结构刚度矩阵
K^*	结构广义刚度
m	结构质量
m_d	TMD 质量
m_d^*	TMD 广义质量
m_L	TLD 质量
M	结构质量矩阵
M^*	结构广义质量
$P(t)$	外荷载激励力
$\bar{p}_i$ 、 $\bar{p}_j$	第 i 、 j 点的脉动风荷载

$P_s(n)$	时变动力可靠度
$p_u(t)$	结构与主动调频阻尼器之间的主动控制力
$P(t)$	外荷载激励力向量
$P^*(t)$	广义荷载
P_{TLD}	TLD 控制力向量
P_{TMD}	TMD 控制力向量
r_d	外界激励频率与主体结构固有频率比
R_0	初始抗力
Re	雷诺数
R_n	第 n 年的抗力
$S_f(\omega)$	规格化的脉动风功率谱密度函数
S_p	$n \times n$ 维脉动风荷载向量的功率谱密度函数矩阵
St	斯特劳哈尔数
v_b	标准参考高度处的平均风速
v_{cr}	临界风速
v_H	结构顶部风速
$\bar{v}$	平均风速
v_*	摩擦速度或流动剪切速度
V_p	P 波或纵波波速
V_s	S 波或横波波速
w_0	基本风压
w_k	平均风压标准值
x_d	TMD 运动位移
$\dot{x}_d$	TMD 运动速度
$\ddot{x}_d$	TMD 运动加速度
$\ddot{x}_g$	地面运动加速度
y	结构体系振动位移
$\dot{y}$	结构体系振动速度
$\ddot{y}$	结构体系振动加速度
Y	结构体系振动位移向量
$\dot{Y}$	结构体系振动速度向量
$\ddot{Y}$	结构体系振动加速度向量
z_0	地面粗糙度
z_b	标准参考高度
z_d	零平面位移

z_G	梯度风高度
α	地面粗糙度系数
ϕ	体系振型振幅
ϕ_{ij}	体系第 j 振型第 i 质点的振幅
Φ	振型矩阵
γ_w	风荷载分项系数
μ_d	TMD 与主体结构质量比
μ_f	脉动风压系数
μ_s	风载体型系数
μ_{w_0}	实际场地粗糙度对基本风压的修正系数
μ_z	风压高度变化系数
μ_H	结构顶部风压高度变化系数
ρ_{ij}	脉动风荷载的相干函数
σ_x	响应标准差
σ_x^2	响应方差
ν	泊松比
ω	圆频率
ω_0 / ω_1	结构体系振动圆频率 (ω_0 为单自由度、 ω_1 为多自由度)
ω_d	TMD 自振频率
ω_L	TLD 自振频率
ξ	结构阻尼比
ξ_d	TMD 阻尼比
ξ_L	TLD 阻尼比

第 1 章 结构灾害与减振控制概述

工程结构正朝着高耸、大跨、轻质和高强的方向发展，结构刚度和阻尼相对较小，在动荷载作用下结构动力反应不断增大。传统依靠结构自身的性能，即结构强度和刚度来抵御外荷载侵袭的方法，往往不能满足结构功能和安全性的要求。调频阻尼减振控制系统，因其设置在结构中，与结构同步运动抵御外荷载作用，以调频和降低结构的动力反应，成为工程结构减振控制的优选方案之一，在大跨结构、高层高耸结构中得到了卓有成效的应用。本章将首先介绍工程结构中常见的结构灾害，随后介绍灾害作用下建筑结构的减振控制技术与方法，最后阐述灾害作用下建筑结构采用调频阻尼减振的成功案例工程。

1.1 风与风致灾害

1.1.1 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，不同的季节和时日，同一地区可能有不同的风向。每年强度最大的风对结构的影响也最大，此时的风向常称为主导风向，主导风向可从城市或地区的风玫瑰图中得出。由于风玫瑰图是由气象台给出的，建筑所在地的风向可能与此不同，在结构风工程上，除了某些参数需要考虑风向外，一般都可假定最大风速出现在各个方向上的概率相同，以较偏于安全地进行结构设计。

在风的时程曲线中，瞬时风速包含两种成分：一种是长周期部分，周期常在 10min 以上，工程中常将其定义为平均风（即稳定风）；另一种是短周期部分，周期仅在几秒左右，工程上常将其定义为脉动风（即阵风脉动）。可见平均风是在给定时间间隔内把风对建筑物的作用力的方向、速度及其他物理量都看成不随时间而改变的量，考虑到风的长周期远远大于一般结构的自振周期，因而这部分风虽然其本质上是动力的，但其作用与静力作用相近，因而可以认为其对结构的作用性质也是静力的。脉动风随时间按随机变化，因而其对结构的作用性质完全是动力的，需要依据动力作用分析。

风相对于结构来说，可能有一定的倾角，其与水平方向的夹角范围大致在 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 内变化。因此结构上除水平方向风荷载作用外，还存在上下作用的竖向风荷载。水平风荷载对许多结构体系（高耸结构、高层结构、桥梁、起重机、冷却塔、输电线塔及屋盖等高、细、长、大的结构）而言常常起到较为重要的作用，有时甚至成为结构设计的主要控制荷载。竖向风荷载对细长的竖向结构（如烟囱、塔架等）而

言，一般只引起竖向轴力的变化，因而对这类工程结构来说并不是非常重要。然而，
对大跨度屋盖、桥梁等结构，竖向风荷载对结构内力的影响是十分显著的，在结构抗
风设计计算时需要加以考虑。

1.1.2 平均风速剖面

在大气边界层内，由于空气流动受摩擦力的影响，其流动速度（即风速）随高度
的变化而变化，我们将这种随高度变化的风速称为平均风速剖面，如图 1-1 所示。平
均风速剖面是微气象学研究风速变化的一种主要方法，常用对数律和指数律来描述。

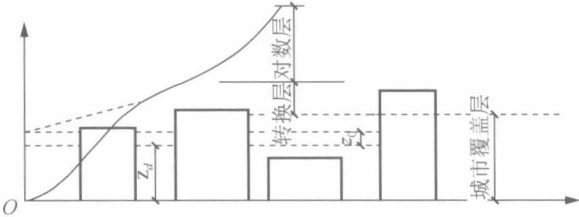


图 1-1 城市覆盖层的上下风速剖面

1. 对数律

利用对数律描述大气边界层平均风速剖面的表达式^[1,2]为

$$\bar{v}(z') = \frac{1}{k} v_* \ln \left(\frac{z'}{z_0} \right) \tag{1.1}$$

式中， $\bar{v}(z')$ 为大气底层 z' 高度处的平均风速； v_* 为摩擦速度或流动剪切速度； k 为
结构刚度系数， $k \approx 0.4$ ； z_0 为地面粗糙度（表 1-1）； z' 为有效高度， $z' = z - z_d$ ，其
中 z 为离地高度， z_d 为零平面位移。

表 1-1 不同地面粗糙度的 z_0 值 (单位：mm)

地面类型	z_0	地面类型	z_0
沙地	0.0001~0.001	矮棕榈	0.10~0.30
雪地	0.001~0.006	松树林	0.90~1.00
割过的草地	0.001~0.01	疏松的市郊	0.20~0.40
矮草地、空旷草原	0.01~0.04	密集的市郊、市区	0.80~1.20
休耕地	0.02~0.03	大城市中心	2.00~3.00
高草原	0.04~0.10	—	—

地面粗糙度 z_0 是地面上湍流旋涡尺寸的度量，由于局部气流的不均性，不同测试
中 z_0 的结果也不相同，文献[3]给出了 z_0 的取值（该取值假设 $z_d = 0$ ，并且是对全尺寸
实测资料经过认真分析而得到的）。

城市中零平面位移 z_d 可由下式计算^[4]为

$$z_d = H_0 - \frac{z_0}{k_g} \quad (1.2)$$

式中, H_0 为城市建筑屋面的一般高度; k_g 为地面阻力系数, 可按下式取值为

$$k_g = \left[k / \ln \left(\frac{10}{z_0} \right) \right]^2 \quad (1.3)$$

在市区, 由于建筑群的增多、增高和增密, 下垫面粗糙度增大, 大大降低了空气水平运动的动能, 局部风速减小, 在城市中一定高度以下风速随高度的变化比较紊乱, 有时并不符合对数规律或其他变化规律。在市区以外, 同样存在着类似的情况。对不同地面粗糙度, 其下垫面的高度也不一样, 则零平面位移 z_d 的取值也不尽相同。当下垫面平坦时, 可取零平面位移 $z_d=0$; 当下垫面的粗糙度比较大时 (如大城市中心、密集建筑群的地方), z_d 可取 20m 和 $0.75 \bar{H}$ 二者的较小者 (其中 $\bar{H}$ 为建筑物平均高度)。

2. 指数律

1916 年, Hellman 提出了水平均匀地形的平均风速剖面——指数律风剖面, 后来由 Davenport 依据多次观测资料整理出不同场地下风速剖面, 并提出了平均风速沿高度变化的规律可用指数函数描述为

$$\bar{v}(z) = v_b \left(\frac{z}{z_b} \right)^\alpha \quad (1.4)$$

式中, z_b 为标准参考高度; v_b 为标准参考高度处的平均风速; z 为任意高度; $\bar{v}(z)$ 为任意高度处的平均风速; α 为地面粗糙度指数。

地面粗糙度指数 α 与梯度风高度 z_G 有关, 且在梯度风高度范围内, α 取常量。文献[5, 6]给出了地面粗糙度指数 α 和梯度风高度 z_G 的取值, 见表 1-2 和表 1-3。表 1-4 给出我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) 规定的地面粗糙度指数和梯度风高度的取值。

表 1-2 文献[5]建议的 α 值

地貌类别	海面	开阔平原	森林或街道	城市中心
α	0.125~0.100	0.167~0.125	0.250	0.333
$1/\alpha$	8~10	6~8	4	3

表 1-3 文献[6]建议的 α 值和 z_G 值

地貌类别	开阔地形	郊区地形	大城市中心
α	0.16	0.28	0.40
z_G	275	400	520

表 1-4 各类地貌下的粗糙度指数和梯度风高度

地貌类别	A	B	C	D
α	0.12	0.16	0.22	0.30
z_G / m	300	350	400	450

1.1.3 顺风向风荷载特性

顺风向风效应是结构风工程必须考虑的效应，一般情况下其对结构的风振设计计算起主导作用。由前面的介绍可知，顺风向的风可分为平均风和脉动风。这两种风的作用特性截然不同：平均风可作为静力作用，因而在平均风作用下结构效应可利用静力分析计算；脉动风的作用是动力性质的，需要按随机振动理论进行结构动力分析。因此，结构顺风向风振需要针对二者的不同特性分别分析。

1. 平均风的特性

(1) 风荷载体型系数

实际结构工程中，建筑物所受风荷载的面积都较大，而且体型各不相同。建筑物迎风面、两侧面和背风面压力不同，且同一面上压力分布也不均匀。各个面上各点的压力不仅同来流的速度和方向有关，而且与建筑物的形状、高度、长度和宽度有关。

对各种建筑物表面风压力的大小和分布的研究，主要通过实验来确定。通常采用无量纲的风压系数 C_p 来表示其压力分布为

$$C_p = \frac{p - p_0}{0.5\rho_0 v_0^2} \quad (1.5)$$

式中， p 为表面压力； p_0 、 ρ_0 和 v_0 分别为大气边界层外缘气流的压力、密度和速度。

目前测量风载体型系数的途径主要是将建筑物做成小尺寸模型，置于风洞中测定模型表面的压力分布。由于风洞的气流可以改变，模型也可以转动方位，可以得到不同的风速、风向条件下结构表面的风载体型系数。

由于近地风的随机性和紊乱性，在风洞中很难真实地模拟实际的风场，风洞试验结果与实际可能会有一定的出入。为此，从 20 世纪 50 年代开始，现场风压实测得到了广泛的重视。但现场实测又只能得到已建结构物表面的风压分布，对于拟建的特殊形状的建筑物表面风压的分布，还需要通过风洞试验解决。

对于通常形状的建筑物而言，表面摩擦应力同压力相比较小，所以对建筑物表面压力加权即可认为等同作用力。将各个面按测压孔位置划分成若干块，将各测点的 C_p 值的相应面积进行加权平均，得到的就是我国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) 中所使用的风载体型系数，即

$$\mu_s = \frac{\sum C_{pi} \Delta A}{A} \quad (1.6)$$

式中， ΔA 为第 i 个测点所对应的面积； A 为建筑物某个面的总面积。

(2) 风压高度变化系数

由于基本风压值是由空旷平坦地面上 10m 高处的风速统计而得到的，地面粗糙度及风速随高度变化的影响还未考虑，对于建筑结构上各高度处的风压，还需建立一个风压高度变化系数 μ_z 。

当结构位于平坦或稍有起伏地形的高层建筑时，其风压高度变化系数应根据地面粗糙度类别按表 1-5 确定；当结构位于山区的高层建筑时，风压高度变化系数除按表 1-5 确定外，还须按《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2012）的有关规定进行修正。

表 1-5 风压高度变化系数

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

(3) 平均风荷载

垂直作用于建筑物表面上的平均风荷载标准值可按下式计算为

$$w_k = \mu_s \mu_z w_0 \tag{1.7}$$

或

$$F_k = \mu_s \mu_z w_0 A_z \tag{1.8}$$

式中， w_k 为平均风压标准值（kN/m²）； μ_z 为 z 高度处风压高度变化系数； w_0 为基本风压（kN/m²）； F_k 为平均风荷载标准值（kN）； μ_s 为风荷载体型系数； A_z 为 z 高度

处垂直于建筑物表面上平均风荷载的受风面积。

2. 脉动风特性

脉动风实际上是三维的风湍流，它包括顺风向、横风向和垂直向的湍流。由于垂直向湍流数值很小，对建筑结构影响可以不计，而横风向湍流也较小，只讨论顺风向湍流对结构的作用。

大气湍流指的是空气质点做随机变化的一种运动状态，这种状态服从某种统计规律。从风的实测结果可知，风速随时间而随机变化，这正是由风气流中的湍流所引起的。因为对结构产生动力作用的脉动风就是由大气湍流引起的，所以在结构工程中，对大气湍流的一些重要特性做进一步的阐述是非常必要的。湍流脉动是各种尺度的涡旋相互叠加和相互作用的表现。另外，风的湍流特性对结构的空气动力特性会产生很大影响，同时也影响实验室中空气动力试验的结果。因此可以认为，大气湍流的特性对风荷载产生很大影响。大气湍流的特性通常是由其湍流整体尺度、湍流强度、湍流脉动风速谱、脉动风压系数、脉动风的空间相关性描述的^[7]。

(1) 湍流整体尺度

通过某一点的气流中的脉动，湍流整体尺度可认为是由平均风运送过来的一系列涡旋相互叠加和作用的结果。每个涡旋可看作在那个点所引起的周期性脉动，其圆频率 $\omega = 2\pi n$ （其中 n 为频率），类似于行进波。若风速为 v ，可定义涡旋波长 $\lambda = v/n$ ，波长 λ 为涡旋尺寸的一种量度。相对一定尺寸的建筑物而言，涡旋的大小对作用于建筑物上的风荷载有较大影响。

(2) 湍流强度

可用湍流强度对大气湍流进行简单描述，它定义为脉动风速的根方差 $\sigma_v(z)$ 与平均风速 $\bar{v}(z)$ 之比， z 高度处的湍流强度为

$$I(z) = \frac{\sigma_v(z)}{\bar{v}(z)} \quad (1.9)$$

无量纲的湍流强度也与地面粗糙度和测量点的高度有关，湍流强度越大，则气流中脉动风成分增加越多。湍流强度随高度增加而减小，靠近地面时一般可达 20%~30%。

(3) 湍流脉动风速谱

目前国际上有很多种风速谱，基本分为沿高度变化和沿高度不变的脉动风速谱。沿高度不变的脉动风速谱有 Davenport 风速谱、Harris 风速谱等，沿高度变化的脉动风速谱有 Kaman 风速谱、Simiu 风速谱、Hino 风速谱等^[1]。

1) Davenport 风速谱：Davenport 根据世界上不同地点、不同高度测得的 90 多次强风记录，认为水平脉动风速谱中，湍流尺度沿高度是不变的，其表达式为