

高层建筑与高耸结构 抗风计算及 风振控制

gaocengjianzhu
yugaocong
jiegoukangfengjisuan
jifengzhenkongzhi

胡卫兵 何建 编著

中国建材工业出版社

高层建筑与高耸结构 抗风计算及风振控制

胡卫兵 何建 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑与高耸结构抗风计算及风振控制/胡卫兵,何建编著. —北京:中国建材工业出版社,2003.6

ISBN 7-80159-441-X

I. 高… II. ①…②何… III. 高层建筑—抗风结构—结构设计
IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 033660 号

高层建筑与高耸结构抗风计算及风振控制

胡卫兵 何建 编著

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市海淀区三里河路 11 号

邮 编:100831

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:850mm×1168mm 1/32

印 张:8.25

字 数:222 千字

版 次:2003 年 6 月第 1 版

印 次:2003 年 6 月第 1 次

印 数:1~3000 册

书 号:ISBN 7-80159-441-X/TU·212

定 价:18.00 元

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)68345931

前 言

高层建筑和高耸结构的抗风计算和风振控制作为固体力学、结构力学、流体力学、优化理论、自动控制、计算机、材料与测试等多学科的交叉,是工程领域中一门新兴的学科分枝和高新技术,有着重要的应用价值和发展前景。特别是随着科学技术和国民经济的发展,高层建筑与高耸结构的建设在我国呈现出迅猛发展的趋势。高层建筑和高耸结构的抗风计算和风振控制的研究也就成了防灾减灾工程和结构工程的研究热点之一,国内许多学者开展了大量的研究工作,据我们所知,至今还没有一本较全面系统地介绍与论述这方面研究的专著。近年来我们在这一领域进行了一些探索性研究,取得了一些阶段性成果,并概括了国内外学者的研究成果,整理成书,以飨读者。

我们的研究工作得到了国家自然科学基金、陕西省自然科学基金和陕西省教育厅专项基金等支持,在此对他们的支持表示衷心的感谢。同时得到了许多老教授的教诲和指导,本书中还引用了国内外同行专家学者的研究成果,在此一并表示感谢。

本书在介绍建筑空气动力学基本理论的基础上,结合我国规范阐述了结构抗风计算方法,并重点介绍了高层建筑和高耸结构抗风计算方法和风振控制理论。全书共九章,第一章为引论,主要介绍风及风对建筑物的作用和振动控制的一些基本概念。第二章为结构上的静力风荷载,主要结合我国的一些规范要求介绍结构上的静力风荷载的计算方法;第三章为结构上的脉动风荷载,先介绍了随机振动基础,给出了结构上的脉动风荷载和结构上的尾流旋涡干扰计算方法。第四章为结构的风效应,主要介绍了结构的静力风效应、结构顺风向的风振响应、结构横风向的风振响应、结构扭转风振响应、结构在风力作用下的自激振动。第五章为高层建筑结构抗风计算,主要介绍了高层建筑和高耸结构的动力特性、高层建筑和高耸结构的顺风向响应、高层建筑和高耸结构的横风

向风振响应、高层建筑和高耸结构风荷载作用下的舒适度分析。第六章为结构风振控制的基本原理,介绍了结构风振控制的概念、最优控制理论基础、几种风振控制算法、结构风振控制的计算机模拟。第七章为主动控制控制律设计中其他问题,主要介绍了控制律设计中一些实际问题的解决方法。第八章为粘弹性阻尼器对结构风振控制,系统地介绍了粘弹性阻尼器及其在风振控制中的应用。第九章为主动控制的近期进展;主要介绍了主动控制中现在开展的一些研究方向。

高层建筑和高耸结构的抗风计算和风振控制的研究涉及面广,各项内容起点高度不一,要在有限的篇幅内全面系统地论述与介绍这方面的研究也很困难。书中列入的参考文献可给读者提供一些信息,以便读者进一步研究。且限于作者的水平,错误之处难免,敬请读者批评和指正。

作者 二〇〇三年·西安

内容简介

本书在介绍建筑空气动力学基本理论的基础上,结合我国规范阐述了结构抗风计算方法,并重点介绍了高层建筑和高耸结构抗风计算方法。同时介绍了风对结构的作用机理及高层建筑和高耸结构抗风设计要求、高层建筑和高耸结构风振控制的基本概念、高层建筑和高耸结构的几种典型风效应计算方法、结构风振控制设计的基本原理及结构风振控制的计算机模拟。本书基础内容与我国现行的建筑结构荷载、设计规范一致,同时又力求反映近年来结构抗风方面的最新成果。本书可供土木工程专业研究生和大学教师参考,也可供结构工程设计人员及风工程和地震工程的研究人员使用和参考。

目 录

第一章 引 论	(1)
1.1 风的概述	(1)
1.2 风灾给人类带来的损害.....	(14)
1.3 风对建筑结构的作用及抗风设计要求.....	(16)
1.4 振动控制的任务与实现的途径.....	(19)
1.5 振动控制的分类.....	(20)
1.6 结构振动控制.....	(22)
1.7 土木工程中的风振控制.....	(24)
第二章 结构上的静力风荷载	(26)
2.1 概率论基础.....	(26)
2.1.1 概率分布函数.....	(26)
2.1.2 概率密度函数.....	(27)
2.1.3 随机变量的数字特征.....	(28)
2.2 风压计算公式.....	(30)
2.3 基本风速与基本风压.....	(31)
2.4 非标准情况下风速与风压.....	(35)
2.4.1 非标准高度换算.....	(35)
2.4.2 非标准地貌的换算.....	(36)
2.4.3 不同时距的换算.....	(38)
2.5 结构上的静力风荷载.....	(38)
2.5.1 风压高度变化系数.....	(38)
2.5.2 重现期调整系数.....	(40)
2.5.3 结构体型系数.....	(41)
2.5.4 静力风荷载计算.....	(44)

第三章 结构上的脉动风荷载	(46)
3.1 随机振动基础.....	(46)
3.1.1 随机振动的基本概念.....	(46)
3.1.2 两类常用的随机过程.....	(47)
3.1.3 相关系数和相关函数.....	(48)
3.1.4 功率谱密度.....	(50)
3.1.5 单自由度体系的随机振动.....	(52)
3.1.6 多自由度体系的随机振动.....	(57)
3.1.7 连续体的随机振动.....	(59)
3.2 结构上的脉动风荷载.....	(60)
3.2.1 脉动风的概率分布.....	(60)
3.2.2 脉动风速功率谱函数.....	(61)
3.2.3 脉动风压功率谱函数.....	(63)
3.2.4 紊流度和脉动系数.....	(64)
3.2.5 脉动风的频域空间相关性.....	(66)
3.3 结构上的尾流旋涡干扰.....	(67)
3.3.1 圆形截面结构的尾流旋涡干扰.....	(68)
3.3.2 矩形截面结构的尾流旋涡干扰.....	(70)
第四章 结构的风效应	(72)
4.1 结构的静力风效应.....	(72)
4.2 结构顺风向的风振响应.....	(74)
4.2.1 顺风向动力位移根方差和设计位移计算.....	(75)
4.2.2 顺风向加速度响应、风振力	(78)
4.2.3 脉动增大系数、脉动影响系数和风振系数	(78)
4.3 结构横风向的风振响应.....	(80)
4.3.1 圆形截面细高结构的旋涡干扰风振响应.....	(81)
4.3.2 旋涡随机脱落干扰横风向风振响应.....	(85)
4.4 结构扭转风振响应.....	(86)
4.5 结构在风力作用下的自激振动.....	(86)
4.5.1 结构的横风向驰振.....	(87)

4.5.2 结构的颤振·····	(92)
第五章 高层建筑结构抗风计算 ·····	(95)
5.1 高层建筑的动态特性·····	(95)
5.1.1 高层建筑结构的变形特点·····	(95)
5.1.2 连续化高层建筑的振型与频率·····	(96)
5.1.3 离散化高层建筑的振型与频率·····	(97)
5.1.4 自振周期的折减系数和经验公式·····	(98)
5.2 高层建筑的顺风向响应·····	(99)
5.2.1 高层建筑顺风向静力位移计算·····	(99)
5.2.2 高层建筑顺风向动力响应与风振系数·····	(101)
5.3 高层建筑的横风向风振响应·····	(105)
5.4 高层建筑的扭转风振响应·····	(106)
5.5 高层建筑风荷载作用下的舒适度分析·····	(111)
5.6 高耸结构的动态特性·····	(112)
5.6.1 连续化的高耸结构·····	(113)
5.6.2 离散化的高耸结构·····	(113)
5.6.3 高耸结构自振周期经验公式·····	(114)
5.7 高耸结构的顺风响应·····	(115)
5.7.1 顺风向平均风作用下的响应·····	(115)
5.7.2 顺风向脉动风作用下的动力响应与风振 系数·····	(116)
5.8 高耸结构的横风向风振响应·····	(123)
5.9 高耸结构安全度、适用度校核与极限风荷载·····	(126)
第六章 结构风振控制的基本原理 ·····	(130)
6.1 结构风振控制的概念·····	(130)
6.1.1 结构风振振型控制·····	(130)
6.1.2 结构风振控制装置设置位置的选择·····	(131)
6.1.3 结构风振控制计算方法·····	(132)
6.2 最优控制理论基础·····	(134)
6.2.1 线性系统状态空间方程·····	(135)

6.2.2	系统的性能指标	(136)
6.2.3	线性最优控制系统设计原理	(137)
6.2.4	按最优控制规律进行最优控制器装置的设计	(142)
6.3	主动控制的实时最优振型控制算法	(142)
6.4	主动控制的随机最优控制算法	(147)
6.4.1	广义动力风荷载的成型滤波器	(147)
6.4.2	结构风振振型控制的扩展状态方程和观察方程	(150)
6.4.3	随机最优控制的分离	(151)
6.5	被动控制的准最优控制算法	(153)
6.5.1	准最优控制的最小误差激励法	(154)
6.5.2	准最优控制的最小范数法	(156)
6.5.3	准最优控制的等效最优控制特性法	(156)
6.6	被动控制的传递函数算法	(158)
6.6.1	结构受控风振反应传递函数的计算	(158)
6.6.2	结构受控风振反应的减振系数	(160)
6.6.3	控制装置参数的优化设计	(162)
6.7	结构风振控制的计算机模拟	(163)
6.7.1	结构受控风振反应模拟计算的积分法	(164)
6.7.2	控制力的模拟计算	(165)
6.7.3	广义脉动风荷载的模拟计算	(166)
第七章	主动控制控制律设计中的其他问题	(170)
7.1	模型降阶	(170)
7.1.1	代价分析法	(171)
7.1.2	平衡降阶法	(173)
7.2	溢出	(175)
7.2.1	观测溢出与控制溢出	(175)
7.2.2	稳定性分析	(176)
7.2.3	溢出抑制	(177)

7.3	传感器与作动器的定位	(180)
7.4	鲁棒性	(184)
7.5	时滞	(184)
7.5.1	时滞的影响	(185)
7.5.2	时滞补偿	(186)
7.6	控制律的设计途径	(189)
7.6.1	高阶受控对象—低阶受控对象—低阶控制器 ...	(190)
7.6.2	高阶受控对象—高阶控制器—低阶控制器	(190)
7.6.3	高阶受控对象—低阶控制器	(192)
第八章	粘弹性阻尼器对结构风振控制	(193)
8.1	国内外研究状况和发展趋势	(193)
8.2	粘弹性阻尼器及其在结构控制中的应用	(197)
8.2.1	粘弹性材料(VEM)	(197)
8.2.2	粘弹性阻尼材料动态力学性能	(198)
8.2.3	VED 的构造	(202)
8.2.4	VED 的耗能机理	(203)
8.2.5	VED 的力学性能和特点	(203)
8.2.6	VED 对结构控制的计算	(204)
8.2.7	VED 参数的设计	(205)
8.2.8	安装 VED 的结构设计	(206)
8.2.9	VED 在结构控制中的实际应用	(206)
8.3	粘弹性阻尼器的各种计算模型	(207)
8.4	粘弹性阻尼材料的分数导数模型的对比分析	(210)
8.5	粘弹性阻尼器对结构风振控制的设计方法	(223)
8.5.1	粘弹性阻尼器的设置	(223)
8.5.2	粘弹性阻尼器对结构的控制力	(224)
8.5.3	结构受粘弹性阻尼器控制的风振计算	(225)
8.5.4	粘弹性阻尼器数量及参数优化设计	(227)
8.6	粘弹性阻尼器参数对结构风振控制的影响	(228)
8.7	其他耗能构件	(230)

第九章 主动控制的近期进展	(231)
9.1 受控对象与控制器的联合优化设计	(231)
9.2 新型作动器及其他主动元件	(232)
9.2.1 反作用式作动器	(232)
9.2.2 压电式作动器	(233)
9.2.3 形状记忆材料作动器	(234)
9.2.4 磁致伸缩材料作动器	(234)
9.2.5 电流变流体	(235)
9.3 智能结构	(236)
9.4 神经网络在振动主动控制中的应用	(237)
附录一 蒲福风力等级表	(238)
附录二 全国基本风压标准值	(240)
附录三 风压高度变化系数	(242)
附录四 高耸结构沿高度直线变化结构的振型和频率	(243)
参考文献	(244)

第一章 引 论

1.1 风的概述

自从 17 世纪出现了气压表,指出空气有重量因而有压力这个事实以后,为人们寻找风的奥秘提供了新的途径。19 世纪初,有人根据各地气压与风的观测资料,画出了第一张气压与风的分布图。这种图不仅显示了风从气压高的区域吹向气压低的区域,而且还指明了风的行进路线并不直接从高压区吹向低压区,而且有一个向右偏斜的角度。

100 多年来,人们抓住气压与风的关系这一条从实践中得来的线索,进一步深入探究,总结出一套比较完整的关于风的理论。风朝什么地方吹?为什么风有时候刮起来特别迅猛有劲,而有时候却懒散无力、销声匿迹?这完全是由气压高低、气温冷暖等大气内部矛盾运动的客观规律在支配着的。人们不但用这种规律来解释风的起因,而且还用这些规律来预测风的行踪。

地球大气层内空气的流动就产生风。大气层内空气的流动是由于各地的气压不同而发生的,在大气层中气压是由空气的重量引起的,单位体积内的空气的重量随着空气的气温变化而变化。当一个地方上面的气温高,空气暖,空气的密度就小,气压也就小,空气就从相对气温低、空气冷、空气密度大、气压大的地方流动过来,从而就形成了风。

从能量的角度来分析,空气流动所形成的动能称为风能。风能是太阳能的一种转化形式。太阳的辐射造成地球表面受热不均,引起大气层中压力分布不均,空气沿水平方向运动形成风。风就是水平运动的空气,空气之所以产生运动,主要是由于地球上各

纬度所接受的太阳辐射强度不同而形成的。在赤道和低纬度地区,太阳高度角大,日照时间长,太阳辐射强度强,地面和大气接受的热量多、温度较高;在高纬度地区太阳高度角小,日照时间短,地面和大气接受的热量小,温度低。这种高纬度与低纬度之间的温度差异,形成了南北之间的气压梯度,使空气作水平运动,风应沿水平气压梯度方向吹,即垂直于等压线从高压向低压吹。

地球在自转,使空气水平运动发生偏向的力,称为地转偏向力,这种力使北半球气流向右偏转,南半球向左偏转,所以地球大气运动除受气压梯度力外,还要受地球自转偏向力的影响。大气真实运动是这两力综合影响的结果。实际上,地面风不仅受这两个力的支配,而且在很大程度上受海洋、地形的影响,山谷和海峡能改变气流运动的方向,还能使风速增大,而丘陵、山地因摩擦大使风速减少,孤立山峰却因海拔高使风速增大。因此,风向和风速的时空分布较为复杂。

根据风的形成机理,一般可将地球上的风分成下述几种类型:

(1)全球角度来讲,地球赤道附近的空气受热上升,高纬度地区较冷的空气在气压作用下向赤道流动,这样形成的风称为信风,这种风风速通常不大,约为 $6\sim 8\text{m/s}$;

(2)由于内陆和海洋空气温差变化而造成对气流运动的影响,在冬季,大陆比海洋冷,大陆气压比海洋高,风从大陆吹向海洋。夏季相反,大陆比海洋热,风从海洋吹向内陆。这种随季节转换的风,我们称为季风。季风现象,在中国、印度及阿拉伯海沿岸一带,早在古代就已经引起人们的广泛注意。现在西文中的“季风”一词(如英语中的 monsoon,德语中的 Monsun,俄文中的 Myccoh,等),来源于古代阿拉伯字 Mausim,它的意思即为气候。季风,在我国古代有各种不同的名称,如信风,黄雀风,落梅风。在沿海地区又叫舶风,所谓舶风即夏季从东南洋面吹至我国的东南季风。由于古代海船航行主要依靠风力,冬季的偏北季风不利于从南方来的船舶驶向大陆,只有夏季的偏南季风才能使它们到达中国海岸。因此,偏南的夏季风又被称作舶风。当东南季风到达我

国长江中下游时,这里具有地区气候特色的梅雨天气便告结束,并开始了夏季的伏旱。

至于季风现象是否明显,则与大陆面积大小、形状和所在纬度位置有关系。大陆面积大,由于海陆间热力差异形成的季节性高低压差就强,气压梯度季节变化也就大,季风也就越明显。北美大陆面积远远小于欧亚大陆,冬季的冷高压和夏季的热低压都不明显,所以季风也不明显。欧亚大陆形状呈卧长方形,从西欧进入大陆的暖气流很难达到大陆东部,所以大陆东部季风明显。北美大陆呈竖长方形,从西岸进入大陆的气流可以到达东部,所以大陆东部也无明显季风。大陆纬度低,无论从海陆热力差异,还是行星风带的季风移动,都有利于季风形成,欧亚大陆的纬度位置较低,北美大陆则主要分布在纬度 30°C 以北,所以欧亚大陆季风比北美大陆明显。季风是大气层中出现最为频繁的风,风速不大,一般不会引起灾难性后果。

(3)在海滨地区,只要天气晴朗,白天,风总是从海上吹向陆地;到夜里,风则从陆地吹向海上。从海上吹向陆地的风,叫做海风;从陆地吹向海上的风,称为陆风。气象上常把两者合称为海陆风。海陆风和季风一样,都是因为海陆分布影响所形成的周期性的风。不过海陆风是以昼夜为周期,而季风的风向却随季节变化,同时海陆风范围也比季风小。那么海陆风是如何形成的呢?白天,陆地上空气增温迅速,而海面上气温变化很小。这样,温度低的地方空气冷而下沉,接近海面上的气压就高些;温度高的地方空气轻而上浮,陆地上的气压便低些。陆地上的空气上升到一定高度后,它上空的气压比海面上空气压要高些。因为在下层海面气压高于陆地,在上层陆地气压又高于海洋,而空气总是从气压高的地区流到气压低的地区,所以,就在海陆交界地区出现了范围不大的垂直环流。陆地上空气上升,到达一定高度后,从上空流向海洋;在海洋上空,空气下沉,到达海面后,转而流向陆地。夜间情况变得恰恰相反,陆地上空气很快冷却,气压升高;海面降温比较迟缓(同时深处较温暖的海水和表面降温之后的海水可以交流混

合),因此比起陆面来仍要温暖得多,这时海面是相对的低气压区。但到一定高度之后,海面气压又高于陆地。因此,在下层的空气从陆地流向海上,在上层的空气便从海上流向陆地。在这种情况下,整个垂直环流的流动方向,也变得和前面海风里的垂直环流完全相反了。在这个完整的垂直环流的下层,从陆地流向海洋,方向大致垂直海岸的气流,便是陆风。

一般海风比陆风要强。因为白天海陆温差大,加上陆上气层较不稳定,所以有利于海风的发展。而夜间,海陆温差较小,所波及的气层较薄,陆风也就比较弱些。海风前进的速度,最大可达 $5\sim6\text{m/s}$,陆风一般只有 $1\sim2\text{m/s}$ 。滨海一带温差大,海陆风强度也大,随着远离海岸,海陆风便逐渐减弱。海陆风发展得最强烈的地区,是在温度日变化最大,以及昼夜海陆温度差最大的地区。所以在气温日变化比较大的热带地区,全年都可见到海陆风;中纬度地区海陆风较弱,而且大多在夏季才出现;高纬度地区,只有夏季无云的日子里,才可以偶尔见到极弱的海陆风。我国沿海的台湾省和青岛等地,海陆风很明显,尤其是夏半年,海陆温差及气温日变化增大,所以海陆风较强,出现的次数也较多。而冬半年的海陆风就没有夏半年突出,出现机会比较少。

海风与陆风的范围小。以水平范围来说,海风深入大陆在温带约为 $15\sim50\text{km}$,热带最远不超过 100km ,陆风侵入海上最远 $20\sim30\text{km}$,近的只有几公里。以垂直厚度来说,海风在温带约为几百米,热带也只有 $1\sim2\text{km}$,只是上层的反向风常常要更高一些。至于陆风则要比海风浅得多了,最强的陆风,厚度只有 $200\sim300\text{m}$,上部反向风仅伸达 800m 。在我国台湾省,海风厚度较大,约为 $560\sim700\text{m}$,陆风为 $250\sim340\text{m}$ 。

(4)住在山区的人都熟悉,白天风从山谷吹向山坡,这种风叫谷风;到夜晚,风从山坡吹向山谷,这种风称山风。山风和谷风总称为山谷风。谷风的形成原理跟海陆风类似。白天,山坡接受太阳光热较多,空气增温较多;而山谷上空,同高度上的空气因离地较远,增温较少。于是山坡上的暖空气不断上升,并在上层从山坡

流向谷地,谷底的空气则沿山坡向山顶补充,这样便在山坡与山谷之间形成一个热力环流。下层风由谷底吹向山坡,称为谷风。到了夜间,山坡上的空气受山坡辐射冷却影响,空气降温较多;而谷地上空,同高度的空气因离地面较远,降温较少。于是山坡上的冷空气因密度大,顺山坡流入谷地,谷底的空气因汇合而上升,并从上面向山顶上空流去,形成与白天相反的热力环流。下层风由山坡吹向谷地,称为山风。谷风的平均速度约每秒 $2\sim 4\text{m}$,有时可达每秒 $7\sim 10\text{m}$ 。谷风通过山谷的时候,风速加大。山风比谷风风速小一些,但在峡谷中,风力加强,有时会吹损谷地中的农作物。谷风所达厚度一般约为谷底以上 $500\sim 1000\text{m}$,这一厚度还随气层不稳定程度的增加而增大,一天之中,午后的伸展厚度为最大。山风厚度比较薄,通常只有 300m 左右。

在晴朗的白天,谷风把温暖的空气向山上输送,使山上气温升高,促使山前坡岗区的植物、农作物和果树早发芽、早开花、早结果、早成熟;冬季可减少寒意。谷风把谷地的气带到上方,使山上空气湿度增加,谷地的空气湿度减小,这种现象,在中午几小时内特别显著。如果空气中有足够的水汽,夏季谷风常常会凝云致雨,这对山区树木和农作物的生长很有利;夜晚,山风把水汽从山上带入谷地,因而山上的空气湿度减小,谷地空气湿度增加。山谷风还可以把清新的空气输送到城区和工厂区,把烟尘和漂浮在空气中的化学物质带走,有利于改善和保护环境。工厂的建设和布局要考虑有规律性的风向变化问题。山谷风风向变化有规律,风力也比较稳定,可以当作一种动力资源来研究和利用,发挥其有利方面,控制其不利方面。值得重视的是,我国除山地以外,高原和盆地边缘也可以出现与山谷风类似的风:风向风速有明显的日变化。出现在青藏高原边缘的山谷风,特别是与四川盆地相邻的地区,对青藏高原边缘一带的天气有着很大的影响。在水汽充足的条件下,白天在山坡上空凝云致雨,夜间在盆地边缘造成降水。

(5)据观测,在离地面约 1500m 以上的高空,空气的流动速度几乎不变(高山地区除外),风呈现出一种稳定而均匀的状态空气