



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

建筑内部风荷载的理论评估和 设计取值

徐海巍 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

建筑内部风荷载的理论评估和 设计取值

徐海巍 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

风致建筑内压是结构抗风设计中重要的荷载组成部分。针对这一现状,本书将理论、试验和工程案例相结合,从多角度介绍建筑内部风压的响应特点,并提供多种评估方法。全书共9章,第1~4章主要介绍风致建筑内压的响应机理、理论评估方法和风洞试验模拟策略;第5~7章结合实际工程深入分析内压的取值规律、影响因素和简化预测方法;第8章提供一种基于流体动力学理论的内压数值模拟技术,以拓宽抗风设计的手段;第9章从设计角度出发,建立一套适合规范应用的内压设计值计算方法。

本书可供高等院校结构工程、土木工程等相关专业的教师和研究生参考,也可从事建筑结构抗风设计与研究的设计师及科研人员提供参考和帮助。

图书在版编目(CIP)数据

建筑内部风荷载的理论评估和设计取值/徐海巍著. —北京:科学出版社, 2018.2

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-056545-7

I. ①建… II. ①徐… III. ①建筑物-内部-风载荷-研究 IV. ①TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 025854 号

责任编辑:张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张克忠 / 封面设计:熙 望

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 2 月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:350 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年,在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下,我国建立了博士后制度,同时设立了博士后科学基金。30多年来,在党和国家的高度重视下,在社会各方面的关心和支持下,博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中,博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分,专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助,对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说,适逢其时,有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神,是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大,但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤,博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才,“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年,为提高博士后科学基金的资助效益,中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作,通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作,收入《博士后文库》,由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望,借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌,激励博士后研究人员潜心科研,扎实治学,提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年,国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》(国办发〔2015〕87号),将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段,这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信,我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用,促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才,为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

通常封闭的情况下,建筑的内部风压是由外部气流通过建筑自身存在的缝隙或通风孔进入其内部而产生的。然而,当建筑由于使用功能的要求(如开合屋盖)或者在强风作用下门窗破坏时,会出现墙面或屋面局部开洞的情况,此时大量气流会涌入建筑内部,从而使其内部风荷载显著增大,甚至可能超过外部风压的作用。大量的风灾调查显示,建筑围护结构的严重破坏是其受内外表面的风荷载共同作用产生的。在合适的开洞大小和外部风压激励下,建筑内压具有明显的共振特性,从而导致其脉动响应得到放大,当其与外部风压叠加时会大大增加结构的破坏风险。对于我国沿海台风高发地区,各类低矮建筑和大跨屋盖结构(如厂房、体育场等)的抗风安全是结构设计所要考虑的重要因素。而作为设计风荷载的重要组成部分,了解内压响应特性并对其进行准确合理的评估将有助于提高各类建筑的抗风性能,从而减少恶劣环境下的经济损失和人员伤亡。尽管内压对结构抗风设计十分重要,但与外部风荷载相比,对风致内压响应的研究起步较晚且认识也不够充分,这就直接导致各国规范对建筑内压设计取值的规定相对较为简单,难以满足各类复杂工程的抗风设计需求。针对这一研究现状,作者多年来对风致建筑内部风压的响应特性和取值进行了深入的理论和试验研究,并从设计角度出发提炼出相应的内压抗风设计方法。

本书在深入揭示内压响应理论的基础上,结合工程实例介绍如何采用理论公式、风洞试验和数值模拟等多种途径进行内压评估,并最终回归到规范应用,提出内压的设计取值方法。全书共9章,第1章对边界层风场的基本理论知识,内压的研究背景、现状以及各国规范针对内压的相关规定进行介绍;第2、3章介绍各类墙面开洞情况下风致内压响应的特性,以及相应的理论评估方法和相关计算参数的取值;第4章介绍开洞结构内压的风洞试验模拟方法以及相关注意事项;第5章探讨单开洞建筑脉动内压响应的影响因素及简化预测方法;第6章描述某开洞超高单层厂房的内外压分布特征及屋盖的风振响应特点;第7章以实际工程为背景展示屋面开洞时建筑内压的取值特性;第8章探索建筑内部风效应的数值模拟技术及其效果;第9章在前面各章研究的基础上给出建筑内部风荷载的设计取值方法。本书的主要特色是将理论与工程实际以及规范设计紧密结合,使读者不仅能够从机理的角度清晰地认识内压的特性,而且能从设计应用的角度掌握内压的取值评估方法。

本书的完成得到了同行专家及家人的支持和鼓励。感谢浙江大学建筑工程学

院结构风工程课题组的楼文娟教授对书稿的评阅和建议,感谢我的父母和我的姨妈,你们一如既往的支持和鼓励,使我能够潜心研究并顺利完成本书的撰写。

本书相关研究得到了国家自然科学基金青年科学基金项目(51508502、50908208)和中国博士后科学基金(2015M581938)的支持,在此一并表示感谢!

限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬希广大读者指正!

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 建筑风致内压的研究和设计现状	1
1.1 边界层风特性	1
1.1.1 平均风特性	1
1.1.2 脉动风特性	4
1.1.3 风谱特性	5
1.1.4 脉动风空间相关性	6
1.2 建筑风致内压的危害	7
1.3 开孔建筑风致内压的研究进展	9
1.3.1 突然开孔内压的瞬态响应	9
1.3.2 迎风面单一开孔建筑风致内压响应	10
1.3.3 考虑背景泄漏的建筑内部风效应	13
1.3.4 开孔建筑风致内压和柔性屋盖的耦合响应	15
1.3.5 其他开孔形式风致内压响应的研究	18
1.4 建筑内压的研究方法	20
1.5 各国规范对内压设计的相关规定	22
1.6 本书的研究背景及主要内容	24
1.6.1 研究背景	24
1.6.2 主要内容	26
参考文献	27
第 2 章 内压响应的机理与理论方程	34
2.1 单一开孔结构内压传递方程的适用性	34
2.1.1 内压传递方程的研究现状	34
2.1.2 基于动量定理和层流边界层理论的内压传递方程	38
2.1.3 试验验证	40
2.2 迎风面多开孔结构内压响应特性	43
2.2.1 迎风面多开孔结构内压预测理论	44
2.2.2 迎风面多开孔结构风洞试验研究	46
2.2.3 单、双开孔内压动力特性比较	50

2.3 开孔双空腔结构风致内压响应特性	53
2.3.1 开孔双腔结构风致内压响应理论	54
2.3.2 开孔双腔结构的风洞试验研究	56
2.4 存在背景泄漏的内压响应	62
2.4.1 背景泄漏的单开孔内压响应理论	63
2.4.2 背景泄漏的开孔双腔内压响应理论	65
2.5 柔性开孔结构的内压响应	66
2.5.1 柔性开孔结构内压控制方程	67
2.5.2 考虑背景孔隙的柔性开孔结构内压响应	70
2.6 本章小结	72
参考文献	74
第3章 孔口特征参数的识别研究	77
3.1 孔口特征参数的定义	77
3.2 基于扬声器激振试验的参数识别	80
3.2.1 正弦荷载激振下参数识别	80
3.2.2 外部荷载特性对特征参数的影响	81
3.2.3 随机荷载激振下参数识别	85
3.3 基于风洞试验的参数识别	88
3.3.1 风洞试验工况	88
3.3.2 惯性系数的风洞试验研究	89
3.3.3 损失系数的风洞试验研究	95
3.4 本章小结	101
参考文献	101
第4章 开孔建筑内压响应的风洞试验方法	104
4.1 风致内压的风洞试验方法	104
4.1.1 内压风洞试验方法的理论依据	105
4.1.2 试验装置改装和试验验证	106
4.2 内压风洞试验注意事项	111
4.2.1 模型底部连通孔的大小	111
4.2.2 补充容器的深度	112
4.2.3 柔性开孔模型	116
4.3 本章小结	117
参考文献	118
第5章 单开孔结构内压脉动的试验研究	120
5.1 单开孔结构内压脉动影响因素的研究	120

5.1.1 风洞试验工况	121
5.1.2 来流湍流强度和风速的影响	125
5.1.3 开孔位置和深度的影响	127
5.1.4 模型内部干扰的影响	130
5.2 内压的涡激共振响应	131
5.2.1 内压涡激共振机理	131
5.2.2 内压涡激共振试验研究	133
5.3 单一开孔结构内压脉动预测方法的适用性分析	140
5.3.1 内压脉动的简化预测方法	140
5.3.2 不同方法的适用性研究	142
5.4 本章小结	145
参考文献	146
第6章 开孔超高单层厂房的风洞试验研究	148
6.1 开孔超高厂房风洞试验概况	148
6.1.1 厂房试验模型	149
6.1.2 试验流场和数据采集	150
6.1.3 试验数据处理	151
6.2 开孔厂房纵墙的风荷载分布	153
6.2.1 开孔对纵墙外表面风压分布的影响	153
6.2.2 开孔对纵墙内表面风压分布的影响	156
6.2.3 风压体型系数沿建筑纵墙的分布	162
6.2.4 厂房排架的水平受风	164
6.3 开孔厂房屋盖的风荷载分布	166
6.3.1 屋面风荷载分布	166
6.3.2 屋面分块局部体型系数	174
6.4 开孔厂房屋盖的风振响应	177
6.4.1 等效静力风荷载基本理论	177
6.4.2 风振响应时程分析方法	181
6.4.3 结构动力特性和荷载输入	184
6.4.4 屋盖的风振响应分析	186
6.5 内压峰值因子研究	188
6.5.1 风致内压的非高斯特性	188
6.5.2 内压的峰值因子取值	190
6.6 本章小结	194
参考文献	196

第7章 屋盖开孔结构内压的风洞试验研究	199
7.1 风洞试验概况	201
7.1.1 试验模型和工况	201
7.1.2 试验流场和数据采集	202
7.2 屋盖外风压分布情况	204
7.2.1 屋盖外荷载分布	204
7.2.2 外压的非高斯特性	207
7.3 屋盖开孔的内压响应	210
7.3.1 内压响应的特点及影响因素	210
7.3.2 墙面或屋面开孔内压响应的区别	213
7.3.3 建筑周边干扰对内压响应的影响	215
7.3.4 屋盖开孔内压响应的峰值因子	216
7.4 本章小结	219
参考文献	220
第8章 开孔厂房纵墙风荷载的数值模拟	222
8.1 CFD 数值模拟的基本理论	223
8.1.1 基本控制方程	223
8.1.2 湍流模型	225
8.1.3 边界条件及近壁面处理方法	228
8.1.4 控制方程的离散化与求解	231
8.2 厂房数值模拟分析	233
8.3 数值模拟结果及分析	236
8.4 本章小结	240
参考文献	241
第9章 建筑内部风荷载的设计取值研究	244
9.1 平均内压设计取值	245
9.1.1 平均内压的计算方法	245
9.1.2 内压与外压的组合系数	249
9.2 极值内压设计取值	252
9.2.1 极值内压的计算方法	253
9.2.2 极值内压的分布	255
9.2.3 极值内压的设计参数取值	259
9.3 本章小结	260
参考文献	261
后记	265
编后记	267

第 1 章 建筑风致内压的研究和设计现状

1.1 边界层风特性

风是空气相对于地球表面的运动。太阳辐射的不均匀性使得地球表面受热不均从而产生大气的压差,加之地球自转效应造成了大气的流动,这就是风的成因。大量的风速实测研究表明,风速时程包含一种长周期分量(周期长度在 10min 以上)和一种短周期分量(通常为几秒)。据此,实际工程应用中可以将风速时程分解为平均风和脉动风。平均风具有长周期的特点,可以认为是一种不随时间变化的静态作用力,而脉动风具有随机时变性,故将其当成一种动态的作用力。因此,对于顺风向来流,其风速时程 $U(t)$ 可以表示为

$$U(t) = \bar{U}(t) + \tilde{U}(t) \quad (1.1)$$

式中, $\bar{U}(t)$ 为来流的平均风速, m/s; $\tilde{U}(t)$ 为来流的脉动风速, m/s。

由此产生的相应动态风压力为

$$\begin{aligned} W(t) &= \frac{1}{2} \rho_a U(t)^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho_a \bar{U}(t)^2 + \frac{1}{2} \rho_a (2\bar{U}(t)\tilde{U}(t) + \tilde{U}(t)^2) \\ &= \bar{W}(t) + \tilde{W}(t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中, ρ_a 为空气密度, kg/m³; $\bar{W}(t)$ 为平均风压, Pa; $\tilde{W}(t)$ 为脉动风压, Pa。

为了便于设计应用,《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[1](全书以下简称《荷载规范》)规定,取平坦地貌下 10m 高度处 50 年重现期的 10min 平均风速作为基本设计风速,而由此计算得到的风压作为基本设计风压。下面将分别对大气边界层的平均风和脉动风的特性进行介绍,该部分内容也是本书后续研究的理论基础。

1.1.1 平均风特性

水平流动的空气由于受到近地面地表摩擦的影响而产生边界层效应,即在近地面处的气流流速将会有明显衰减,随着高度增加该衰减作用将逐渐减弱。边界层的高度又称为梯度高度。在梯度高度以下,风速随着高度的增加而增加,而在梯度高度以上,风速将不再增加,且气流呈现出层流流动的特征。在自然条件下,除雷暴风和龙卷风等罕见风气象外,大部分的常态风均符合上述边界层的分布特点。

为了反映风速的这一分布特征,工程上采用平均风速剖面来进行描述。目前,近地风剖面主要有对数率和指数率两种形式,以下分别对其进行介绍。

1. 对数率风剖面

对数率风剖面基于平板边界层理论,是强风条件下较为准确的数学表达形式。根据该理论, z 高度处的平均风速 $\bar{U}_z$ 可以表示为

$$\bar{U}_z = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.3)$$

式中, u_* 为摩擦风速, m/s; k 为卡门常数,其试验的经验值为 0.4; z_0 为粗糙长度, m, 是用于衡量地表粗糙程度的参数。

其中,摩擦风速又可以表示为

$$u_*^2 = \kappa \bar{U}_{10}^2 \quad (1.4)$$

式中, κ 为地表阻力系数; $\bar{U}_{10}$ 为 10m 高度处的平均风速, m/s。

对于式(1.3),取 $z=10$ 并将其代入式(1.4),可以得到

$$\kappa = \left[\frac{k}{\ln(10/z_0)} \right]^2 \quad (1.5)$$

根据文献[2],表 1.1 给出了不同地貌类型下粗糙长度和地表阻力系数。

表 1.1 不同地貌类型下粗糙长度和地表阻力系数

地貌类型	粗糙长度/m	地表阻力系数
平坦地貌(雪地、沙漠)	0.001~0.005	0.002~0.003
开阔地貌(草地、少量树木)	0.01~0.05	0.003~0.006
郊区地貌(建筑平均高度 3~5m)	0.1~0.5	0.0075~0.02
密集城市(建筑平均高度 10~30m)	1~5	0.03~0.3

对于城市或者森林等地表粗糙度较大的区域,式(1.3)中的高度 z 通常用有效高度 $(z-z_b)$ 来代替,因此,式(1.3)又可以表示为

$$\bar{U}_z = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-z_b}{z_0}\right) \quad (1.6)$$

其中, z_b 为零平面位移, m, 一般可以取为建筑屋盖高度的 3/4 和 20m 这两者中的较小值。

尽管对数率风剖面具有严谨的理论基础,但它是由各向同性地貌下完全发展的风场推导而出,这一理想的情况在实际工程中是很少见的。此外,由式(1.6)可知,当 $z-z_b < z_0$ 时,将得到不合理的负风速,并且该式也不能用来估算高度低于 z_b 处的风速。为了避免以上问题,指数率风剖面应运而生,这也是我国《荷载规范》所采用的风速剖面形式。

2. 指数率风剖面

指数率风剖面假定平均风速沿高度方向按照指数形式分布：

$$\overline{U}_z = \overline{U}_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (1.7)$$

式中, 指数 α 反映了地表粗糙度的影响, 其取值根据地貌类型来确定。

《荷载规范》根据研究对象所在范围内建筑的平均高度(h)将地貌划分为四类: A类为近海地貌、B类为乡村($h \leq 9\text{m}$)、C类为城市($9\text{m} < h < 18\text{m}$)、D类为大城市中心($h \geq 18\text{m}$)。与之对应的地貌指数 α 分别取为 0.12、0.15、0.22 和 0.30。地表粗糙程度的差异导致边界层的厚度也有所不同。针对《荷载规范》给出的四类地貌, 其梯度风高度分别为 300m、350m、450m 和 550m。图 1.1 给出了四类地貌下平均风速剖面的比较。可以看出, 风速剖面的增速随着地表粗糙度的增加而减缓。同一高度下, A类地貌的风速比其他地貌要高。

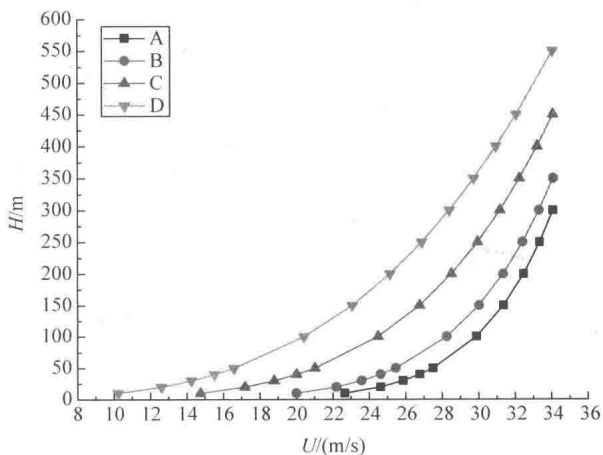


图 1.1 四类地貌下平均风速剖面比较^[1]

了解边界层流场平均风特性是为了获得建筑所受的平均风作用力。与国外规范通常采用风压系数和参考点风压乘积的计算方法不同,《荷载规范》采用风压高度变化系数和体型系数来共同确定建筑物所受的平均风压, 计算式如下:

$$W_p = \mu_s \mu_z W_0 \quad (1.8)$$

式中, μ_s 为体型系数, 代表建筑表面风压与相同高度处来流平均风压的比值; μ_z 为风压高度变化系数, 体现了不同高度处平均风压与标准地貌(《荷载规范》规定为 B类地貌)下 10m 高度处平均风压的比值。

由式(1.2)和式(1.7)可以推出标准地貌下风高系数的计算式为

$$\mu_z = \left(\frac{z}{10} \right)^{2\alpha} \quad (1.9)$$

而对于其他地貌类型,需要对式(1.9)乘以相应的修正系数。其中,对于 A、C、D 类地貌,该修正系数分别为 1.284、0.544 和 0.262。

1.1.2 脉动风特性

边界层风场中的脉动风特性通常通过湍流强度、湍流积分尺度以及风速谱等参量来表征。其中,湍流强度是某一方向下风速的脉动均方值与其均值之比:

$$I_x = \frac{\sigma_x}{\bar{U}_x} \quad (1.10)$$

式中, σ 代表某一方向下的脉动风速均方根, m/s。其中,下标 x 可以代表顺风向(u)、横风向(v)或者竖直方向(w)。湍流强度与地表的粗糙度和离地高度有关。

考虑到一般情况下风速的脉动均方根随高度增加而减少,而平均风速随高度的增加而增大。因此,湍流强度将呈现随高度增加而降低的分布特性。《荷载规范》采用指数率来描述湍流强度沿高度方向的分布,即 z 高度处的湍流强度 I_z 可以表示为

$$I_z = I_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha} \quad (1.11)$$

式中, I_{10} 为 10m 高度处的名义湍流强度,对应《荷载规范》的 A~D 四类地貌分别取 0.12、0.14、0.23 和 0.39。

脉动风速对建筑围护结构的抗风安全有十分重要的作用,所以在围护结构设计时,需要评估其所受的极值风荷载。首先需要确定极值风速的大小。假定顺风向来流服从高斯随机过程,那么极值风速 $\hat{U}_z$ 就可以表示为

$$\hat{U}_z = \bar{U}_z + g\sigma_u \quad (1.12)$$

由式(1.12)可以得到阵风风速的放大因子 G :

$$G = \frac{\hat{U}_z}{\bar{U}_z} = 1 + gI_u \quad (1.13)$$

式中, g 为峰值因子; I_u 为顺风向来流的湍流强度。

由式(1.13)可知,当考虑顺风向来流的阵风效应时,作用在围护结构上的极值风压与平均风压之比为

$$\frac{\hat{W}_z}{\bar{W}_z} = 1 + 2gI_u + (gI_u)^2 \quad (1.14)$$

由于式(1.14)等号右边的平方项为微量,因此忽略该项后得到的比值系数即为《荷载规范》在计算围护结构极值风压中所建议的阵风因子 β_{gz} 。

除了湍流强度,湍流积分尺度也是表征脉动风速特性的重要指标。风场中某一点的脉动速度可以认为是由平均风所输运的理想涡旋的相互叠加而形成的。如果定义涡旋的波长为旋涡大小的量度,那么湍流积分尺度则是湍流涡旋平均尺寸

的量度。通常湍流积分尺度会随着高度的增加而增大。日本荷载规范^[3]给出了有关顺风向湍流积分尺度 L_u 的经验公式:

$$L_u = 100 \left(\frac{z}{30} \right)^{0.5} \quad (1.15)$$

1.1.3 风谱特性

脉动风速谱是反映脉动风速大小和能量分布的重要指标,是脉动风速的频域特性表征。风速时程的脉动均方根 σ_u 与其风速的功率谱密度函数 $S_u(f)$ 之间存在以下关系:

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(f) df \quad (1.16)$$

在气象学和风工程领域有许多关于顺风向脉动风速 $S_u(f)$ 的经验表达式。Davenport^[4]根据多次强风实测得到的风速数据,在假定湍流积分尺度 L_u 随高度保持不变的情况下,提出了无量纲化的经验风谱:

$$\frac{f S_u(f)}{U_{10}^2} = \frac{4k^* x^2}{(1+x^2)^{3/4}} \quad (1.17)$$

式中, $x = \frac{L_u f}{U_{10}}$, L_u 可以取为常数 1200^[4]; k^* 为地表粗糙度系数。

Davenport 归纳了几种地貌情况下粗糙度系数的取值。例如,河湾地区, $k^* = 0.003$; 有少量树木存在的草地, $k^* = 0.005$; 市镇, $k^* = 0.30$ 。

Simiu 等^[6]提出了不同的风速谱:

$$S_u(f) = 200u_*^2 \frac{x}{f(1+50x)^{5/3}} \quad (1.18)$$

式中, $x = \frac{zf}{U_{10}(z/10)^2}$ 。

Kaimal 等^[6]虽然采用了与 Simiu 谱形式相同的风谱,但是却定义了不同的无量纲参数 x :

$$x = \frac{zf}{U_z} \quad (1.19)$$

von Karman^[7]也提出了一种广泛应用的顺风向风速谱,其无量纲化后的形式为

$$\frac{f S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4x}{(1+70.8x^2)^{5/6}} \quad (1.20)$$

式中, $x = \frac{L_u f}{U_z}$ 。

与 Davenport 风谱不同的是, Karman 谱认为湍流积分尺度 L_u 是随着地表粗

糙度和高度变化的参数。

对于大多数建筑,顺风向风谱是抗风设计最为关心的。但是对于桥梁等大跨度的水平结构,竖向脉动风的作用同样影响着结构的抗风安全性。Busch 等^[8]给出了一种常用的竖向风速谱的数学表达形式:

$$\frac{f S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{2.15x}{1 + 11.16x^{5/3}} \quad (1.21)$$

式中, x 的定义同式(1.19)。

当已知顺风向脉动风速谱后,相应的脉动风压谱可以采用以下形式来表示^[9]:

$$S_w(f) = \chi_a(f) \rho_a^2 \mu_z^2 \mu_s^2 U_{10}^2 S_u(f) \quad (1.22)$$

式中, $S_w(f)$ 为脉动风压谱; $\chi_a(f)$ 为气动导纳函数。

1.1.4 脉动风空间相关性

作用在结构空间上相距为 d 的某两点的脉动风速和脉动风压一般不会同时达到最大值,而且随着两点间距离的增加,同时达到极值的可能性降低,我们将这种现象称为脉动风的空间相关性。假定空间中有 a_1 和 a_2 两个点,其脉动风速时程分别为 $U(a_1, t)$ 和 $U(a_2, t)$,则两点间脉动风速的协方差函数可以表示为

$$\overline{\tilde{U}(a_1, t) \tilde{U}(a_2, t)} = \frac{1}{T} \int_0^T (U(a_1, t) - \bar{U}(a_1, t))(U(a_2, t) - \bar{U}(a_2, t)) dt \quad (1.23)$$

当 $a_1 = a_2$ 时,式(1.23)则变为脉动风速的方差。根据式(1.23)可以进一步得到两点间脉动风速的相关性系数:

$$\rho_{12} = \frac{\overline{\tilde{U}(a_1, t) \tilde{U}(a_2, t)}}{\sigma_u(a_1) \sigma_u(a_2)} \quad (1.24)$$

式中, ρ_{12} 为 a_1 和 a_2 两点间脉动风速的相关性系数。当 a_1 和 a_2 的位置十分接近时,相关性系数趋近于1,说明两者脉动风是近似同步的。而当两者距离很远时,其相关性可能趋向于0,表示两点间风速不相关。对于高耸建筑结构和大跨越的水平结构(如输电线路、桥梁),风荷载分布往往并不均匀,研究不同位置间风速的相关性以及由此引起的空间风速折减效应将有利于更精细化地进行抗风设计,工程应用价值显著。风速相关性系数的经验表达式可以用指数衰减函数来近似描述:

$$\rho_{12} = \exp(-C|a_1 - a_2|) \quad (1.25)$$

式中, C 为经验系数。除了相关性系数,脉动风的相关性也可以从频域的角度出发,采用空间相干函数来进行描述:

$$\text{Coh}(a_1, a_2, f) = \frac{S_u(a_1, a_2, f)}{\sqrt{S_u(a_1, f) S_u(a_2, f)}} \quad (1.26)$$