

中国空气动力研究与发展中心系列图书

结构风荷载 理论与Matlab计算

Theory and Calculation of
Wind Loads on Structures

王卫华 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

研究与发展中心系列图书

结构风荷载 理论与 Matlab 计算

王卫华 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

理论计算是结构风工程研究的重要方法之一。本书介绍结构风工程方面基本理论方法,并吸收一些最新研究成果,对应理论方法给出 Matlab 计算程序,并给出大量计算实例。书中除了包括传统理论方法,在大气边界层风场还介绍了脉动风模拟及最大风速估计,在结构风荷载中介绍了本征正交分解及非高斯风压极值估计等内容,在结构风致响应中介绍了虚拟激励法及横风向抖振谱模型等内容,在等效风荷载计算中介绍了三维阵风效应因子等内容。

本书可作为有关高等院校大学生和研究生的参考书,也可作为从事风工程研究和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构风荷载理论与 Matlab 计算 / 王卫华著. —北京:
国防工业出版社, 2018.9
ISBN 978-7-118-11697-7

I. ①结… II. ①王… III. ①Matlab 软件-应用-建
筑结构-风荷载 IV. ①TU312-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 201711 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京虎彩文化传播有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 9½ 字数 190 千字
2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 55.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

这是一本关于结构风工程方面的基本理论介绍,同时加上作者在学习和工作中编写的一些相关计算程序,另外再新增一些计算程序,经修改、整理后汇编成册,使理论与计算程序相对应。出版这样的一本书是有一定风险的,因为程序总可能会存在瑕疵,你对理论方法的理解是否正确,通过程序就等于完全摊在阳光下,一目了然。但我还是要出版这样一本书,不需要教科书式的权威,也不必介意于内容的深度和广度,只是希望能与大家分享一点学习体会,同时抛砖引玉。假如读者能从中获得一点点帮助或启发,那更是实现本书的最大价值。

书中的计算程序采用 Matlab 软件编写。Matlab 是 MathWork 公司出品的一款科学计算软件,广受欢迎。Matlab 是以矩阵为基本数据单元,因而程序表达式简洁明了,非常接近工程数学中的理论公式。程序也不需要专门编译运行,因而特别适合于科学演算。目前市面上已有不少采用 Matlab 辅助的科学实验书籍,受此启发。我作为曾经的初学者,理解面对一堆繁杂公式时的窘迫,如果能把理论公式转化为计算程序,使理论公式与计算程序相对应,这样不仅使抽象的公式具体化,更可以得到实质的分析结果,这对帮助理解和掌握理论方法必定起到事半功倍的效果。

风工程是一门交叉性学科,涉及的内容十分广泛。本书假设读者已了解了结构动力学、结构随机振动、数理统计等课程的基础知识,当然还熟悉 Matlab 软件。全书共分 5 章,第 1 章主要介绍大气边界层风场基本特性,包括平均风剖面、湍流度、脉动风功率谱等,另外包括脉动风场模拟和最大风速估计;第 2 章主要介绍作用在结构上的风荷载,包括平均风荷载、脉动风荷载及其相关性,另外包括脉动风压管路信号畸变修正、脉动风压场 POD 分解与重建、非高斯脉动风压极值估计方法;第 3 章介绍风荷载作用下的结构顺风向响应计算,包括经典的模态叠加法,另外给出频域方法、虚拟激励法以及应用实例等;第 4 章主要介绍结构横风向风荷载及响应,包括基于三维抖振理论的风荷载谱模型及响应计算和采用卢曼方法的涡激共振模型等;第 5 章介绍结构风振的等效静力风荷载,包括惯性力组合、LRC 背景与共振分量组合、风振系数及三维阵风效应因子等;最后附录中给出了部分实用参考程序和全书的主要函数索引。本书内容既包括了结构风工程方面传统理论方法,又吸收了近十几年来发展的一些新理论和方法,

并都给出应用实例,因此在内容上较“新”。同时本书紧贴计算机技术的发展应用,文中大量实例以 Matlab 程序形式给出,而不是采用传统的简化公式,程序稍加修改便可在工程上应用,这是另一个较“新”之处。

书中的每个程序都经过了仔细验证,也给出了大量计算实例对比。计算程序主要以函数形式给出,最后汇集成类似 Matlab 工具箱。程序主要以功能为核心,力求简洁,并注意可读性,但没有进行专门的优化。书中的理论公式除了经验式都尽可能给出推导过程,对一些热点理论方法都尽可能列出或引用较新的参考文献,以便读者查阅和了解现状。

西南交通大学廖海黎教授审阅了全书,李明水教授对本书也提出了宝贵的意见和建议,在此表示感谢。由于作者水平有限,书中的错误和疏漏不可避免,恳请读者批评指正!

作者

2018. 01. 18

目 录

第 1 章 大气边界层风场	1
1.1 平均风速剖面	1
1.1.1 对数律	1
1.1.2 指数律	2
1.2 湍流	4
1.2.1 湍流强度	4
1.2.2 湍流积分尺度	4
1.2.3 脉动风功率谱	5
1.2.4 互谱及相干函数	6
1.2.5 风谱算例	9
1.3 脉动风场模拟	10
1.3.1 线性滤波法	10
1.3.2 谐波合成法	13
1.3.3 风场模拟算例	16
1.4 最大风速统计	21
1.4.1 全风向最大风速	22
1.4.2 考虑风向的最大风速	23
1.4.3 最大风速统计算例	26
参考文献	28
第 2 章 结构上的风荷载	29
2.1 平均风荷载	29
2.2 脉动风荷载	30
2.2.1 结构表面脉动风压	30
2.2.2 结构上的脉动风荷载	32
2.2.3 脉动风荷载谱算例	35
2.3 脉动风压管路信号畸变修正	37
2.3.1 测压管路频响函数	37

2.3.2	管路频响函数算例	40
2.4	脉动风压场 POD 分解与重建	42
2.4.1	POD 基本原理	43
2.4.2	脉动风压 POD 预测算例	45
2.5	非高斯脉动风压极值统计	47
2.5.1	单样本解析方法	47
2.5.2	分段多观测值方法	50
2.5.3	极值风压估计算例	52
	参考文献	55
第 3 章	结构顺风向风致响应	57
3.1	风振响应的模态叠加法	57
3.1.1	分布质量体系	57
3.1.2	多自由度体系	59
3.1.3	计算程序	62
3.2	风振响应的频域计算	68
3.3	风振响应的虚拟激励法	70
3.4	静态响应	73
3.5	结构顺风向风致响应算例	74
3.5.1	算例 1——风振响应谱	74
3.5.2	算例 2——脉动响应根方差	77
3.5.3	算例 3——PEM 与 POD 应用	79
3.5.4	算例 4——静态响应	83
	参考文献	85
第 4 章	结构横风向风振	86
4.1	结构三维抖振力模型	86
4.2	横风向风荷载谱模型	89
4.2.1	湍流激励	90
4.2.2	尾流激励	90
4.2.3	矩形截面结构	93
4.2.4	风振响应算例	96
4.3	涡激共振	102
4.3.1	涡激共振响应及等效荷载	102
4.3.2	涡激共振算例	105
	参考文献	106

第 5 章 等效静力风荷载	108
5.1 模态惯性力组合	108
5.2 背景与共振等效风荷载	111
5.2.1 背景等效风荷载	111
5.2.2 共振等效风荷载	113
5.2.3 背景与共振等效风荷载组合	115
5.3 风振系数	115
5.4 三维阵风效应因子	116
5.5 等效风荷载算例	118
5.5.1 算例 1——分量与组合	118
5.5.2 算例 2——风振系数	123
5.5.3 算例 3——3D GEF	125
参考文献	130
附录 A 部分参考程序	132
附录 B 主要函数索引	142

第 1 章 大气边界层风场

地球表面的物体都要受到大气边界层风场的作用。由于地球表面十分不平坦,存在山丘、河流、农田、树木以及人类各种建筑结构等物体,风吹过地球表面会受到很大的摩擦阻力作用,使近地处风速减缓,到地面附近风速降为零。而随着高度的增加,地表摩擦阻力影响逐渐减弱,风速逐渐增大,到一定高度后几乎不受影响,这个高度称为梯度风高度。梯度风高度以上称为自由大气,在梯度风高度以内就形成了地球特有的大气边界层风场。

大气边界层风场对人类社会的生产、生活产生重要影响,特别是近地层湍流风作用。湍流风是紊乱和随机的,在统计上一般服从正态分布规律。人们通过对大量实测资料分析,总结了大气边界层风场特性参数,包括地表粗糙度影响、平均风速廓线、大气湍流强度、湍流积分尺度以及脉动风功率谱等,这些参数对工程结构的设计应用都十分重要。

1.1 平均风速剖面

1.1.1 对数律

在一段具有均匀粗糙度的水平场地内,大气边界层风场平均风速剖面可以用对数律来描述:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.1.1)$$

式中: z 为高度; κ 为冯·卡门常数,一般取值为 0.4; u_* 为地表摩擦速度或流动剪切速度; z_0 为气动粗糙长度。

考虑到实际粗糙物高度,需要对 z 进行经验修正:定义有效高度 $z = z_g - z_d$, 此处 z_d 称为零平面位移(约为地面物体平均高度 3/4), z_g 为实际离地高度。剪切速度 u_* 表示了地表对气流的平均摩擦剪切力大小 $\tau = \rho u_*^2$ 。 z_0 是反映地表粗糙程度参数,也是地面旋涡尺寸度量,由经验值给出,如在开阔的草地为 0.01 ~ 0.05m,城市郊区为 0.1 ~ 0.5m,密集建筑群的城市中心为 1 ~ 5m。

对数律可以较准确描述大气边界层 100 ~ 200m 高度范围内的平均风速,但

在风工程应用中,常用指数律来近似描述平均风速剖面。采用指数律的优点是简洁、便于积分计算。

1.1.2 指数律

在一定的高度范围内,大气边界层平均风速剖面可近似用如下指数律描述:

$$\frac{U(z)}{U_r} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (1.1.2)$$

式中: z_r 为参考高度; U_r 为参考高度处平均风速; α 为风速剖面指数,不同的地表粗糙类型对应不同的 α 指数。如我国的《建筑结构荷载规范》^[1] (以下简称为荷载规范或规范)中把地表粗糙类型分为 A、B、C、D 四种,对应的风速剖面指数 α 分别为 0.12、0.15、0.22 和 0.3。

随着离地高度增加,地表对气流的摩擦剪切力作用逐渐减弱,平均风速逐渐增大。当达到一定高度后风速几乎不再变化,这个高度即梯度风高度。我国规范中给出不同地表类型的梯度风高度取值,对应 A、B、C、D 四类地形分别为 300m、350m、450m 和 550m。

式(1.1.1)和式(1.1.2)用于表示同一平均风速剖面时,则 α 指数与气动粗糙长度 z_0 有如下的近似对应关系^[2]:

$$\alpha = \frac{1}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)} \quad (1.1.3)$$

其中, z_{ref} 取二者计算平均风速剖面的平均高度或最大高度的 1/2。

下面为最小二乘法拟合两种平均风速剖面及其流场参数的计算程序:

```
1 function WdParal = pow_log(WdPara)
2 % ABL 平均风剖面一对数律与指数律互换
3 % 输入—输出参数为 WdPara 结构体
4 % WdPara 域包括流场主要参数如 alfa, z0, u* 等
5 %
6 WdParal = WdPara;
7 zr = WdPara.zr; % 参考高度
8 ur = WdPara.ur; % 参考风速
9 if ~isfield(WdPara, 'Kappa'), WdParal.Kappa = 0.4; end
10 Kappa = WdParal.Kappa; % 冯卡门常数
11 zz = (1:100)';
12 % 指数律 to 对数律
13 if isfield(WdPara, 'alfa') && ~isempty(WdPara.alfa)
14     WdParal.Uz = ur* (WdParal.z/zr).^WdPara.alfa;
```

```

15 WdPara1.U10 = ur* (10/zr).^WdPara. alfa ;
16 % 拟合 剪切速度 us, 粗糙长度 z0
17 uu = ur * (zz/zr).^ WdPara. alfa ;
18 A = uu * Kappa ;
19 B = [log(zz), -1* ones(size(zz,1),1)];
20 prm = B\A;
21 WdPara1.us = prm(1);
22 WdPara1.z0 = exp(prm(2)/prm(1));
23 % 对数律 to 指数律
24 elseif isfield(WdPara,'z0')&& ~isempty(WdPara.z0)
25     us = ur * Kappa/log(zr/WdPara.z0);
26     WdPara1.us = us;
27     WdPara1.Uz = us/Kappa* log(WdPara1.z/WdPara.z0);
28     WdPara1.U10 = us/Kappa* log(10/WdPara.z0);
29     % 拟合 剖面指数 alfa
30     uu = us/Kappa* log(zz/WdPara.z0);
31     A = log(zz/zr);
32     B = log(uu/ur);
33     WdPara1.alfa = A\B;
34 end
35 return

```

上面程序包括两部分计算,分别执行对数律转指数律和指数律转对数律,按最小二乘法拟合(采用 Matlab 内置反除法)。输入、输出参数为结构体变量,结构体变量的域包括了对流场主要参数计算,以便后续程序调用。图 1.1 显示了计算拟合结果以及按式(1.1.3)计算对数律转指数律的结果。

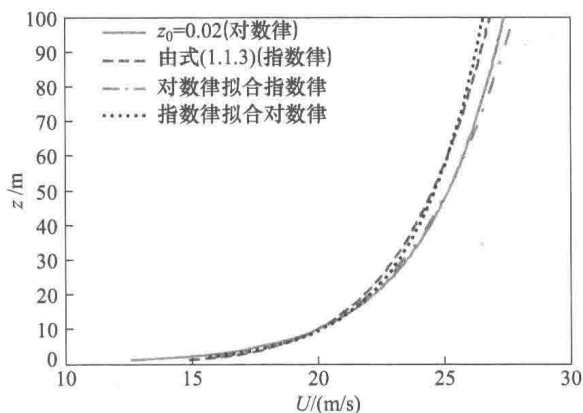


图 1.1 平均风速剖面参数转换

1.2 湍流

1.2.1 湍流强度

大气边界层风场具有很强的湍流特性。把来流瞬时风速减去长周期的平均风(或定常分量)即为短周期的脉动风(或阵风),脉动风可看做是平稳正态随机过程。脉动风速在空间可表示为三维分量,分别用 u, v, w 表示顺风向、横风向和竖向,其统计方差分别表示为 $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$, 则脉动风速的根方差(或均方根)与平均风速的比值定义为湍流强度:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}; I_v = \frac{\sigma_v}{U}; I_w = \frac{\sigma_w}{U} \quad (1.2.1)$$

实际测量结果表明,近地层脉动风速根方差可近似按下式计算^[3]:

$$\sigma_u \approx 2.5u_*; \quad \sigma_v \approx 2.2u_*; \quad \sigma_w \approx 1.35u_* \quad (1.2.2)$$

于是由式(1.1.1)、式(1.2.1)和式(1.2.2)可得湍流强度剖面近似计算式:

$$\begin{aligned} I_u &= 1.0/\log(z/z_0) \\ I_v &= 0.88I_u; \quad I_w = 0.54I_u \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

我国荷载规范中给出 A、B、C、D 四类地貌纵向湍流度剖面的计算式为

$$I_u = I_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha} \quad (1.2.4)$$

式中: α 为风剖面指数; I_{10} 为 10m 高度处的名义湍流度, 对应 A、B、C、D 四类地貌分别取为 0.12、0.14、0.23 和 0.39。

1.2.2 湍流积分尺度

大气湍流是由一系列不同尺度的旋涡叠加而形成的复杂运动, 气流中每个旋涡都可看做是在某一点引起了周期性脉动。设脉动频率为 n , 平均风速为 U , 定义旋涡波长为 $\lambda = U/n$, 则旋涡的波数为 $K = 2\pi/\lambda$ 。旋涡波长即旋涡大小的度量。

湍流积分尺度是气流中平均旋涡尺寸的度量, 对应于顺风向、横风向和竖向脉动速度分量 u, v, w 有关的旋涡尺寸在空间各有三个方向, 因此一共有九个湍流积分尺度。如对应顺风向脉动速度 u 有关的湍流积分尺度为 L_u^x, L_u^y, L_u^z , 分别表示旋涡在纵向、横向和竖向的平均尺寸度量。

湍流积分尺度的估算可采用泰勒“冻结”假说, 估算结果主要取决于分析所使用的数据记录长度和记录平稳程度, 不同的实验结果一般相差都非常大^[3]。

也可以采用经验公式估算,文献[3]中给出了有关经验计算式及相关计算图表。

1.2.3 脉动风功率谱

湍流旋涡作周期性运动,湍流总能量即为气流中每个旋涡的脉动能量之和,湍流运动能量从大涡(低频)逐级传递到小涡(高频)。在大尺度涡范围内,气流惯性力起主导作用,在惯性力作用下能量从大涡传递到小涡,再由小涡传递到更小尺度的涡,到最小尺度涡范围内,空气黏性力起主导作用,湍流运动能逐渐被耗散成内能。这个过程称为能量级联^[4]。

含有湍动能绝大部分能量的大尺度涡范围称为含能尺度,又称为惯性区。只有湍动能耗散的小尺度涡范围称为耗散尺度,又称为 Kolmogorov 尺度。而在远离含能尺度和耗散尺度的中间区域称为惯性子区。在惯性子区内,能量被认为是保持局部平衡。根据 Kolmogorov 假说,对于水平均匀的中性分层大气边界层流场,能量的产生与耗散近似为平衡状态,即处于惯性子区内,于是可导出纵向气流能谱的表达式为^[3]

$$\frac{nS_u(z, n)}{u_*^2} = 0.26x^{-2/3} \quad (1.2.5)$$

式中: n 为频率; $x = n \cdot z / U(z)$ 为无量纲频率或莫宁坐标。

在风工程应用中,已有很多脉动风功率谱经验表达式^[2,3],其中应用较广的主要为与纵向相关的 Davenport 谱、Kaimal 谱、Karman 谱、Harris 谱等;与竖向相关的有 Panofsky 谱,与横向相关的脉动风谱应用相对较少。

Davenport 于 1967 年根据不同地点、不同高度测得的 90 多次强风记录平均结果,给出如下形式的脉动风功率谱经验表达式:

$$\frac{nS_u(z, n)}{u_*^2} = \frac{4x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \quad (1.2.6)$$

式中: $x = 1200n/U(10)$ 。根据式(1.2.2),上式又可写为

$$\frac{nS_u(z, n)}{\sigma_u^2} = \frac{2}{3} \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \quad (1.2.7)$$

Davenport 谱在建筑结构风振分析中应用较多,世界上不少国家的荷载规范,包括我国的荷载规范都采用了 Davenport 谱计算结构风荷载及响应。Davenport 谱是一种与高度无关的谱,为了改进其不足, Kaimal 于 1972 年提出了如下形式的风谱经验表达式:

$$\frac{nS_u(z, n)}{\sigma_u^2} = \frac{100}{3} \frac{x}{(1+50x)^{5/3}} \quad (1.2.8)$$

式中: $x = n \cdot z / U(z)$ 。Kaimal 谱反映了高度对风谱的影响。

Karman 谱是冯·卡门于 1948 年基于湍流各向同性假设提出的风谱经验表达式,后来经 Harris 改进的表达式为

$$\frac{nS_u(z, n)}{\sigma_u^2} = \frac{4x}{(1 + 70.8x^2)^{5/6}} \quad (1.2.9)$$

式中: $x = n \cdot L_u^x / U(z)$, L_u^x 为纵向湍流积分尺度,取 $L_u^x = 100 \sqrt{z/30}$ 。

Karman 谱可应用于低频分量较重要的场合,如在固有振动周期较长的高耸柔性结构风振响应分析中。

Harris 于 1970 年提出的风谱经验表达式为

$$\frac{nS_u(z, n)}{\sigma_u^2} = \frac{2}{3} \frac{x}{(2 + x^2)^{5/6}} \quad (1.2.10)$$

式中: $x = 1800n/U(10)$ 。Harris 谱与 Davenport 谱一样也不反映功率谱随离地高度的变化,但是其改进后相对更符合大气物理规律。

Busch & Panofsky 于 1968 年提出与竖向脉动有关的风谱经验表达式为^[2]

$$\frac{nS_w(z, n)}{\sigma_w^2} = \frac{2.15x}{1 + 11.16x^{5/3}} \quad (1.2.11)$$

式中: $x = n \cdot z/U(z)$ 。Panofsky 谱主要用于大跨度桥梁、大跨屋盖等柔性结构的竖向风振响应分析中。

文献[3]给出如下的横风向脉动风功率谱:

$$\frac{nS_v(n)}{\sigma_v^2} = \frac{3.1x}{(1 + 9.5x)^{5/3}} \quad (1.2.12)$$

式中: $x = n \cdot z/U(z)$ 。式(1.2.12)利用了关系式(1.2.2)。

竖向及横风向脉动风功率谱相对于顺风向谱,谱值相对较小,因此在高层建筑结构风振响应分析中一般应用较少。

1.2.4 互谱及相干函数

空间两点位置的脉动风速互谱可表示为

$$S_c(r, n) = \sqrt{S(p_1, n) \cdot S(p_2, n)} \cdot \text{Coh}(r, n) \quad (1.2.13)$$

式中: r 为 p_1 和 p_2 两点间的距离; $\text{Coh}(r, n)$ 为相干函数(平方根)。

相干函数是频域表示的空间脉动风速相关性。Davenport 给出空间两点的相干函数经验表达式为^[3]

$$\text{Coh}(r, n) = e^{-f} \quad (1.2.14)$$

其中:

$$f = \frac{2n \cdot [C_z^2(z_1 - z_2)^2 + C_y^2(y_1 - y_2)^2]^{1/2}}{U(z_1) + U(z_2)} \quad (1.2.15)$$

式中的衰减系数在多数情况下可取为 $C_y = 16$ 和 $C_z = 10$ 。

式(1.2.15)中相干函数与频率有关,在实际应用中不方便。Shiotani 给出一种与频率无关的竖向和横风向经验相干函数如下^[1]:

$$\text{Coh}(r_z, n) = \exp\left(-\frac{|z_1 - z_2|}{60}\right) \quad (1.2.16)$$

$$\text{Coh}(r_y, n) = \exp\left(-\frac{|y_1 - y_2|}{50}\right) \quad (1.2.17)$$

我国荷载规范中也采用了与频率无关的竖向及横风向相干函数经验式。

下面为脉动风功率谱算例程序,其中主函数 windPxy 包括两个子函数:计算相干函数 Cohx 和归一化风谱函数 WindSpec。

```
1 function wSp = windPxy(Pt,pij,nhz,WdPara,wptype)
2 % 归一化脉动风功率谱——自谱与互谱
3 % 空间点坐标 Pt
4 % 当前计算点号 pij
5 % 频率 nhz
6 % 风场参数 WdPara
7 % 风谱及相干函数类型 wptype
8 %
9 U = WdPara.Uz(pij);
10 U10 = WdPara.U10;
11 P2 = Pt(pij,:);
12 Sn1 = WindSpec(P2(1,3),U(1),U10,nhz,wptype);
13 Sn2 = WindSpec(P2(2,3),U(2),U10,nhz,wptype);
14 Csp = Cohx(P2,U,nhz,wptype);
15 wSp = Csp.*sqrt(Sn1.*Sn2);
16 return
17 %
18 function Rs = Cohx(P2,U,nhz,wptype)
19 % 空间两点脉动相干函数(子函数)
20 % 空间两点坐标 P2
21 % 空间两点平均风速 U
22 % 频率 nhz
23 % 风谱类型(相干函数) wptype
```

```

24 %
25 ds = P2(1,:) - P2(2,:);
26 switch wptype.coh
27 % 脉动风模拟 - 风荷载
28     case {1, 'windfield'} % Simiu & Scanlan
29         Cy = 16; Cz = 10;
30         x1 = sqrt((Cy*ds(2))^2 + (Cz*ds(3))^2);
31         Rs = exp(-2 * nhz * x1 / (U(1) + U(2)));
32 % 荷载规范
33     case {2, 'windload'}
34         % 竖向相关性
35         Rs = exp(-abs(ds(3))/60);
36         % 横向相关性(解析式) % 参见式(2.2.20)
37         c = 50;
38         B1 = P2(1,2); B2 = P2(2,2);
39         if (B1*B2 == 0), return, end % 不计横向相关
40         Ry = 2*c*B1 - c*c*(1 - exp(-B1/c) - ...
41             exp(-B2/c) + exp((B1 - B2)/c));
42         Rs = Rs * Ry / (B1*B2);
43     otherwise
44 end
45 return
46 %
47 function Sn = WindSpec(z, Uz, U10, n, wptype)
48 % 脉动风归一化谱(子函数)
49 % 高度 z
50 % 高度 z 处风速 Uz
51 % 10m 高风速 U10
52 % 频率 n
53 % 风谱类型 wptype
54 %
55 switch wptype.sp
56     case {1, 'Davenport'}
57         x = 1200 * n / U10;
58         Sn = 2/3 * x * x / (n * (1 + x * x)^(4/3));
59     case {2, 'Kaimal'}

```



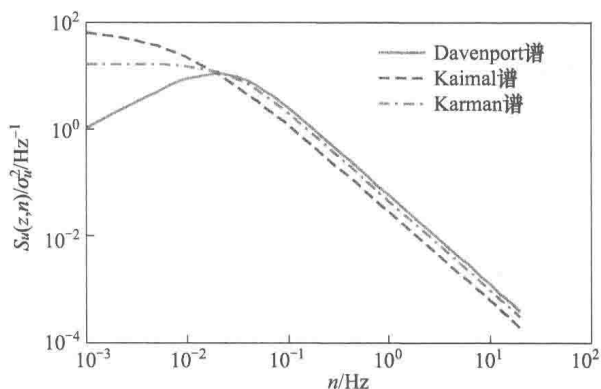
```

60     x = n * z / Uz;
61     Sn = 100 / 3 * x. / (n. * (1 + 50 * x). ^ (5 / 3));
62     case { 3 , 'Karman' }
63         x = n * 100 * sqrt(z / 30) / Uz;
64         Sn = 4 * x. / (n. * (1 + 70.8 * x. * x). ^ (5 / 6));
65     case { 4 , 'Harris' }
66         x = 1800 * n / U10;
67         Sn = 2 / 3 * x. / (n. * (2 + x. * x). ^ (5 / 6));
68     case { 5 , 'Panofsky' } % 竖向谱
69         x = n * z / Uz;
70         Sn = 2.15 * x. / (n. * (1 + 11.16 * x. ^ (5 / 3)));
71     case { 6 , 'across' } % 横风向谱
72         x = n * z / Uz;
73         Sn = 3.1 * x. / (n. * (1 + 9.5 * x). ^ (5 / 3));
74     otherwise
75 end
76 return

```

1.2.5 风谱算例

设风场参数为气动粗糙长度 $z_0 = 0.08\text{m}$, 10m 高度参考风速 $U(10) = 30\text{m/s}$ 。计算风谱位置为空间不同高度的两点: $z_1 = 100\text{m}$ 和 $z_2 = 120\text{m}$ 。利用以上程序, 图 1.2 为计算的归一化风速谱结果, 其中自功率谱曲线在 z_1 高度处, 交叉谱相干函数按式(1.2.14)和式(1.2.15)计算。



(a) 自功率谱曲线