# 摘　要


伴随着社会和科技的发展，新工艺、新技术、新材料、新设计方法的使用，新一代建筑物规模、功能、造型越来越大型化、复杂化和多样化。对于这些大跨、高层、高耸结构，风荷载往往起主要甚至决定作用，因此对于这些复杂结构在风荷载作用下的响应研究越来越受到科研工作者的重视。频域分析方法因其概念清晰、计算简便而在线性结构风振响应分析中得到了广泛应用。目前工程中多采用忽略模态间耦合效应的SRSS方法，对于模态分布较为密集等大型结构其计算结果往往会存在较大的误差。

本文以随机振动、有限单元法和数值分析为结构风振响应分析理论基础，重点应用同时考虑风荷载互谱的实部和虚部以及模态间耦合效应的CQC方法进行风振响应分析。主要工作有以下几个方面：

概述了随机振动理论在结构风工程中的应用以及目前结构风振响应的分析方法，并阐述了频域分析方法的研究历史与现状。

以FORTRAN为软件平台，按照改进的周期图方法编写了脉动风压谱的计算程序。该程序能采用了分段交叠方式和加窗技术，能同时获取所需测点的自谱以及互谱的实部、虚部。并对正弦波和Davenport谱进行采样，分析其谱密度，检验所用谱程序的正确性。

编制了CQC方法、SRSS方法风振响应计算程序。CQC方法中考虑了脉动风压互谱实部、虚部，无穷积分段采用简单有效的复合梯形公式进行数值计算。

以同步测压风洞实验数据为基础，分别应用SRSS方法和考虑互谱实部与虚部的CQC方法对一典型高层建筑算例进行风振计算，尝试将本文的研究成果应用于对复杂结构算例进行风振分析。计算过程中采用稀疏矩阵进行存储与计算以节省计算时间。并对SRSS方法与CQC方法计算结果进行了比较分析。


关键词：脉动风荷载，风压谱分析，随机振动，CQC方法，风振响应

# Abstract

In line with the social and technological development, engineering structures are becoming larger and more complicated. For the large-span, high-rise and towering structures, the wind loads are usually the major factors which control the security of the structures. Therefore, wind induced dynamic response of the complicated structures is paid more and more attention to. To the engineering application, resisting wind analysis of structures carries on almost within frequency domain. It is well-known that the application of the Square-Root-of-Sum-of-Squares (SRSS) method in wind-induced effects analysis for combining modal maxima can cause significant errors.

based on the theory of random vibration 、 finite element method and numerical analysis， As a method of model combination ， in this paper, CQC(Complete Quadratic Combination)method is used to calculate the wind-induced effects, the real and imaginary part of power Spectra of wind Loads are considered at the same time.

The main works include the following aspects:

The paper summarizes methods to describe fluctuating wind pressure, and adopts random vibration theory in the calculation of wind-induced responses within frequency domain。

The amended periodogram method presented by Welch is used to estimate the auto-spectrum and the cross-spectrum with the real and imaginary part of the disturbing wind pressures. Overlap mode and window function are considered. Related research is performed via program on Fortran platform. And two examples are given to test that the program is effective and correct.

The programs of CQC and SRSS method of wind-induced response are prepared, the imaginary part of the cross-spectrum of the fluctuating wind loads is considered. Infinite integral is replaced by simple but effective composite trapezoidal formula.

Based on the wind tunnel data ,the wind-induced effect on a classic high-rise building has been analyzed by CQC and SRSS method. The sparse matrix is used to reduce the calculation time. Finally the results from CQC method and SRSS method are discussed and compared.

**Key words**: fluctuating wind pressure, wind load spectrum, random vibration, CQC method, wind-induced vibration

# 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：唐娟

2008 年 3 月 20 日

# 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：唐娟

2008年 3 月 20日

# 第1章 绪论

## 1.1 结构风工程研究综述

### 1.1.1 引言

风是一种普遍的自然现象。由于太阳对地球大气层的不均匀加热，在地球相同高度的两点间形成了压力差，从而产生使压力趋于平衡的空气流动，就形成了风[1]。

风灾是人类面临的三大自然灾害之一，对人类的生命财产造成了巨大损失。美国对 1952-1996 年间主要自然灾害的经济损失统计比较后发现，风灾（包括飓风与龙卷风）是自然灾害中影响最大的一种[2]。

1926 年美国佛罗里达州的一次飓风使一座 17 层高大楼的两个框架出现了 0.6m 与 0.8m 的水平塑性变形，这座大楼的玻璃等维护结构几乎完全破坏，隔墙也严重开裂[3]；1969 年英国约克郡 386m 高的钢管电视塔桅杆被风吹坏[1]；英国一座主看台悬挑钢屋盖结构，屋面上强大的向上净风力导致屋面大片覆面结构被掀掉，最后花费修复费用达 26000 英磅[1]；1992 年 8 月 24 日在美国佛罗里达州登陆的“安德鲁”飓风，受灾面积达 100 多万平方英里，经济损失高达 200 多亿美元[4]；2002 年 10 月 1 日，日本 21 号台风造成茨城县 10 基高压输电塔连续倒塌的严重事故[5]。

中国位于西北太平洋沿岸，是世界上少数几个受台风影响最严重的国家之一，历史上就是台风重灾区，并且近年来风灾害造成的直接经济损失呈明显上升趋势。1992 年，16 号台风所造成的风暴潮灾害先后波及福建、浙江、上海、江苏、山东、河北、天津、辽宁等省市，受灾人口达 2000 多万，死亡 193 人，直接经济损失达 90 多亿元；1994 年 9415 号台风袭击浙江，造成房屋倒塌和破坏 80 万间，死亡 1000 多人，直接经济损失达 108 亿人民币；2005 年 6 月 14 日，国家“西电东送”和华东、江苏“北电南送”的重要通---江苏泗阳 500kV 任上 5237 线发生风致倒塌事故，一次性串倒 10 基输电塔，造成大面积的停电[6]。

根据建筑物遭受风灾破坏的统计分析，风力对建筑物产生的破坏现象主要

有[7]：

1) 风力使建筑物产生抖振和颤振、驰振，从而发生倒塌或严重破坏；
2) 风力使结构开裂或留下较大的残余变形，有些高耸结构甚至被风吹倒；
3) 风力使结构内墙开裂，使外墙、玻璃幕墙、外装饰物等损坏；
4) 风力使结构产生振动，大幅振动使居住者和工作人员产生不适；
5) 频繁的风力作用会使建筑物的一些构件产生疲劳破坏，导致结构的破坏。

伴随着社会和科技的发展，新工艺、新技术、新材料、新设计方法的使用，新一代建筑物规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化。马来西亚建成的 PetronasTower 高达 450m 高，我国上海金茂大厦也高达 421m；日本的名古屋穹顶，跨度 187m，是当今世界上跨度最大的单层球面网壳；发达国家已将各种空间网格结构和张拉式悬索/薄膜结构成功地用于尺度达 200m 以上的建筑物。建筑结构柔度大、阻尼小、重量轻等特点因而更为突出，风荷载越来越重要以至于成为其结构设计中的控制性荷载。

### 1.1.2 结构风工程概述

风工程(Wind Engineering)是研究大气边界层内的风与人类在地球表面的活动及所创造的物体之间的相互作用，是空气动力学与气象学、气候学、结构动力学、建筑工程、桥梁工程、能源工程、车辆工程和环保工程等相互渗透和相互促进而形成的一门边缘科学[8]。主要包括三个方面的分支[9]，即：

1) 结构风工程：研究风和结构的相互作用，亦称结构风效应问题，特别是动力风效应，即风致振动问题。
2) 车船风工程：研究除航空航天飞行器以外的运载工具如汽车、船舶在高速运行时所受到的空气动力作用(广义地可包括体育运动中的风工程问题， 如自行车、滑雪、标枪、铁饼)。
3) 环境风工程：研究风引起的质量(气体、液体或固体)迁移(如污染、扩散、风沙、风雪等)问题。

1940 年美国塔科马悬索桥在不到 $20m/s$ 的八级大风作用下发生强烈风致振动破坏的严重风毁事故，以此为起点发展形成了新的边缘学科——风工程学；而结构风工程问题作为学科发展的起源，始终处于核心的地位[9]。结构风工程的

核心问题是空气动力学与结构动力学。结构的风致振动是一个空气弹性力学问题，以区别于研究固定物体绕流的空气动力学问题。钝体空气动力学由 Bailey 于 1933 年在英国国家物理实验室的风洞中进行了一座铁路车库的模型实验开始得到研究。1952 年 Liepmann 在关于抖振问题的经典论文中首先研究了结构对大气湍流产生力的响应共振放大；1961 年 Davenport 提出了表征近地湍流风的模型并建立了估算高层建筑顺风向响应的方法，并于 1962 年在准定常气动理论的基础与随机振动理论的基础上发展了用于计算房屋建筑的紊流风响应。

结构风工程研究结构风致振动问题。风是三维流场，对于浸没在其中的物体的作用机理是相当复杂的。对于建筑结构来说，结构风效应主要包括以下几个方面[1]：

1) 与风向一致的脉动风引起的结构物的顺风向振动：
2) 结构物背后的旋涡引起的结构物的横风向(与风向垂直)振动：
3) 由别的建筑物尾流中的气流引起的振动；
4) 由空气负阻尼引起的失稳式振动。

经过半个多世纪的研究与发展，结构风工程研究已经取得了许多成果，为结构的抗风设计奠定了理论基础，提供了基本的参数和近似的风载和风振分析手段。目前结构风荷载特性及风致响应计算研究方法[1][10][11][12]主要有：

1) 现场实测；
2) 风洞实验；
3) 理论分析；
4) 数值模拟；

这四种方法相互补充，互相印证，相互促进。现场实测是最直接的研究方法，结果最为真实可靠，并可用来对其他方法进行工程模拟得到的结果进行验证。但现场测试需要花费大量的人力、物力和时间，同时对于气象条件和地形条件等难以控制和改变。

风洞实验是现阶段工程结构抗风主要研究方法，它以相似性理论为基础，即要求满足几何相似、运动相似、动力相似、以及边界条件相似等条件，借助风洞实验来确定结构表面的脉动风压和结构动态响应信息。其优点是试验条件、试验过程可以人为地控制、改变和重复；实验室条件下测试方便，数据精确，是目前最为行之有效的方法。但不足之处是费用较高、周期较长等。风洞试验方法的这些不足在一定程度上限制了风洞试验在工程实践中的应用。

理论研究是基于结构振动理论，在对现象作适当简化的基础上，对结构进行受力分析，获得结构风荷载及其响应。方法主要分为频域分析方法和时域分析方法。从大量实测记录可以看出，风速可以看作两部分的组合：第一部分是长周期部分，称为平均风部分；另一部分是短周期部分，为平均风基础上的脉动，其周期一般在几秒到几十秒之间，称为脉动风部分。因此在研究结构的风致振动问题时，风工程界一致认为风荷载是一类随机荷载，一般把风荷载表示为一个平稳随机过程。根据风荷载的随机性质，按照随机振动理论分析结构响应。

数值模拟-----计算风工程(Computational Wind Engineering, CWE)从二十世纪 80 年代末期得到广泛重视才算是这门学科的正式开始，并在过去三十年中逐步发展起来。它的优点是适用范围较广，能计算理论流体力学所不能求解的复杂几何形状和复杂流动问题；所需时间和费用也要比风洞试验少得多；可以构造与实际结构尺寸相同的计算模型；可以完全控制流体的性质，且对于流动参数的选择具有巨大的灵活性，因而便于进行各种参数分析。缺点是方程数值解的稳定性和收敛性难以保证；高 Reynolds 数下的湍流模拟技术尚不成熟。因此，尽管目前 CFD 数值模拟技术的应用十分广泛，但主要还是集中在方案阶段的比较和检验上。

## 1.2 结构风工程中的结构动力学方法概述

随机振动理论、有限单元法和数值分析理论是结构风振响应计算的有效理论工具，结构风振响应的分析方法一般可分为以直接积分法为基础的时域分析方法和以振型分解法为基础的频域分析方法两类。

### 1.2.1 时域分析方法

时域分析方法是一种直接动力方法，通过将随时间变化的风荷载作为计算的输入数据，直接进行运动微分方程求解而得到结构的风振响应。结构增量动平衡方程为：

$$[M]\{\Delta\ddot{x}(t)\}+[C]\{\Delta\dot{x}(t)\}+[K]\{\Delta x(t)\}=\{\Delta p(t)\} \tag{1.1}$$

式中， $[M]$—结构质量矩阵;

$[C]$—结构阻尼矩阵;

$[K]$—结构的刚度矩阵;

$\{\Delta\ddot{u}(t)\}$、$\{\Delta\dot{u}(t)\}$、$\{\Delta u(t)\}$—分别表示加速度、速度和位移增量向量；

$\{\Delta p(t)\}$—荷载增量向量。

由动平衡方程可以看出：时程分析法的精度和运算稳定性依赖于所选取的时间增量 $\Delta t$ 的大小。选取 $\Delta t$ 时应考虑以下因素：1) 结构特性；2) 荷载特性；3) 结构刚度与阻尼的复杂程度。

时程分析法有显式积分和隐式积分两大类，最常用的显示积分法是中心差分法[11]，隐式积分法有 Wilson $\theta$ 法、Newmark 法等[13]。

采用时程分析方法求解结构风振响应时，需进行多个风荷载随机样本分析，然后对计算结果统计分析得到动力响应的均值响应和均方响应，能相对客观的反映强风的规律性。通常误差会逐步积累，计算工作量往往很大。为实现上述非线性动力方程的高精度数值计算，出现了精细积分算法。还有的学者针对上述求解方法提出并行算法[14] [15]，较好处理了显式与隐式直接积分求解动力响应问题。

与频域分析方法相比，时域法较少受限于频域方法中的各种假设，可以考虑结构中的非线性因素；可以获得比频域法更多的有关可能发生疲劳问题的信息；此外在缺乏实测或试验资料的情况下，时域法作为较准确的方法可以与频域法进行比较验证。其不足之处在于其分析计算过程较频域法复杂、费时，在计算机不发达的初期，这一缺点限制了它的发展。因此，目前风振分析仍以频域法计算为主。

### 1.2.2 频域分析方法

目前脉动风响应的频域求解主要是直接基于随机振动理论的模态叠加法。其基本思想是将系统的响应统计量表示成各模态响应统计量的加权和，利用传递函数建立位移响应功率谱与广义风荷载功率谱之间的关系式，从而得到结构的均方响应。

频域法求解的运动微分方程可以用如下的矩阵方程表达

$$[M]\{\ddot{x}(t)\}+[C]\{\dot{x}(t)\}+[K]\{x(t)\}=\{p(t)\} \tag{1.2}$$

$\{\ddot{x}(t)\}$、$\{\dot{x}(t)\}$、$\{x(t)\}$—分别表示加速度、速度和位移向量。

由于模态叠加法是以线性化假定为前提的，在计算过程中结构刚度、阻尼性质保持不变，不能考虑结构的非线性效应，仅限于线性结构的振动问题。但由于将频域方法用于结构风振动力响应分析时概念清晰、计算简便，因此在线性结构风振响应中得到了广泛的应用。

1965 年出现了快速傅里叶变换（FFT）[17]- - 一种用计算机计算离散傅立叶变换的方法。 该算法主要通过将原始序列划分成许多较短的序列，只需算出这些较短序列的 DFT（离散付里叶变换），代替计算原始序列的 DFT，然后以蝶形图的方式将这些短的序列组合起来，给出整个序列的 DFT。FFT 算法将原来需要 $N^2$ 次的运算量降低为 $N\log_2 N$ 次的运算量，大大减少了计算机的处理时间，而且还能增加精度。它在效率和功能方面的优点，使得频域分析方法在工程上的应用比时域分析方法更为广泛。

由线性随机振动理论可以计算线性结构任意位置上的响应，经典的方法便是完全二次型组合（CQC）方法。然而，过去由于大型的工程结构均有非常大的自由度，直接采用 CQC 方法存在计算量巨大的问题，影响了它的适应性，因此实际工程中多采用 SRSS 方法(Root-Sum-Square Method)进行计算[18]，但该方法以忽略模态的交叉项的影响为代价的。

星谷胜指出 SRSS 方法计算结构响应满足三个条件[19]：固有频率值互不接近，各振型阻尼比很小，荷载为具有宽带谱的平稳随机过程。伴随着各国经济和文化的不断发展，世界各国都纷纷筹建更高、更大、更长的各种超大型复杂结构物，此时 SRSS 方法计算所需满足的三个条件往往难以得到满足，其计算结果往往会存在较大的误差。同时随着计算机的普及，计算手段得到很大改善，SRSS 的改进方法以及 CQC 方法的研究重新成为研究热点。

Wilson（1981）等[20]在地震分析的响应谱法采用 CQC 法，给出了比 SRSS 方法明显改善的结果；Kiureghian（1992）等[21]、Ernesto（1994）等[22]分别针对多点地震支座运动激励下结构响应问题，给出了具体算式；林家浩[23]-[25]提出了结构随机响应分析的“虚拟激励法（PEM)”，将随机激励转化为虚拟激励而不需要寻求各种转换函数的显示表达，计算效率较传统 CQC 方法有较大提高；并

在后来的研究中将此方法引入风工程，用于求解大型复杂结构抖振响应；Yasui(1997) [26]等基于风洞试验数据，开展模态时间系列响应分析并讨论高阶模态振动对单元位移和应力的影响。王国砚(2002)[27]认为应基于 CQC 法计算大跨度屋盖结构的风振响应，忽略模态间耦合效应的 SRSS 法是不正确的，并指出目前有些方法虽然是采用 CQC 方法进行风振分析，但仅将风荷载谱处理为实函数，因此不能认为是真正意义上的 CQC 方法，应用 CQC 方法进行风振响应分析时应同时计算风荷载互谱的实部和虚部；张昕、黄本才(2004)[28]提出了采用背景与共振分量形式表达的动力响应计算；周晅毅等(2004)[29]在结构振动方程 CQC 解法的基础上，提出了可考虑模态耦合效应的共振响应分量近似形式，并基于此得出用于计算风振响应共振分量的修正 SRSS 方法，并在上海南站工程屋面结构的共振响应分析中验证了其合理性；顾明等(2005)[30]采用考虑多模态及模态间耦合效应的 CQC 法计算北京首都机场 3 号航站楼结构风振响应，并以此为基础应用阵风荷载因子法计算了静力等效风荷载。谢壮宁（2006）[31]从周期图方法计算随机信号功率谱密度出发，提出了一种不需要进行谱矩阵分解即可进行结构随机振动分析的快速算法—谐波激励法。汪丛军、黄本才（2007）[32]从数值计算效率的角度，采用稀疏矩阵格式对振动方程的 CQC 解法进行高效率精度计算；并将 CQC 法分离成背景和共振两个分量，提出完全背景与共振分量响应方法。

计算机技术发展成熟以后，有限元方法得到迅速发展。有限单元法的不断完善发展奠定了复杂大型跨度空间结构分析计算的坚实理论基础。

## 1.3 本文的研究内容

由 1.2 所述，大型复杂建筑结构的风振响应计算已取得了很多成果，但是目前的研究尚未见分别考虑风荷载不同分量之间互谱实部和虚部的 CQC 方法。

本课题以结构风工程，随机振动理论和方法，数字信号处理为理论基础，根据 CQC 方法的基本思想，对复杂结构进行风振响应计算。CQC 方法中同时考虑风压互谱的实部与虚部，并进行分开计算。

本文主要包括以下三个方面的内容：

第一部分：系统介绍了随机过程的一些基本概念及主要的统计特征，包括概率分布函数和数字特征，主要是相关函数及功率谱密度；同时介绍了脉动风的基本特性；按照周期图方法估计脉动风荷载功率谱密度程序，能同时获取所

需测点的自谱、互谱的实部与虚部，并对所用程序的正确性进行了检验。

第二部分：基于随机振动理论，并结合结构风工程实际应用情况，分析了同时考虑风荷载互谱实部和虚部 CQC 方法风振响应算法及简化得到的 SRSS 方法计算 公式，并编制了两种方法的计算程序模块。

第三部分：将本文所用的 CQC 风振响应计算方法应用于一典型的高层结构算例。以所获取同步测量风压系数时程数据为基础，设计了一个与风洞实验刚性模型外形一致的高层建筑结构算例。通过大型通用计算软件 ANSYS 对该高层结构进行模态分析与静力分析，再分别用 CQC 方法和传统 SRSS 方法进行风振响应计算，以检验同时考虑互谱实部与虚部的 CQC 方法与简化的 SRSS 方法所获取的结果之间的差异。

# 第2章 脉动风荷载谱分析

## 2.1 随机过程基本理论[17] [33][34][35][36]

### 2.1.1 随机过程基本概念

随机过程的基本思想就是把概率论中的随机变量的概念推广到时间函数。设E是随机试验，$S=\{e\}$是它的样本空间，如果对于每一个$e\in S$，总可以依某种规则确定一时间$t$的函数$X(e,t),(t\in T)$，与之对应($T$是时间$t$的变化范围)，于是，对于所有的$e\in S$来说就得到一族时间$t$的函数，则称此族时间$t$的函数为随机过程，记作$X(t)$。例如图 2.1

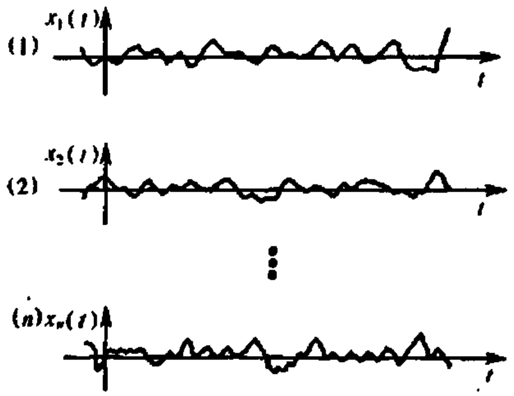



图 2.1 N 部通信机的输出记录

随机过程$X(t)$包含两层含义:

1. 随机过程$X(t)$在任一时刻$t$都是随机变量;

2. 随机过程$X(t)$是大量样本函数的集合。

工程结构分析中，常采用随机过程来研究风荷载、雪荷载、地震作用以及

钢筋混凝土结构的疲劳等；在实际计算中，又将随机过程用极大值或极小值分布转化为随机变量进行分析计算。

## 2.1.2 随机过程的概率统计特征

### 2.1.2.1 分布函数

一般，当时间 $t$ 取任意 $n$ 个数值 $t_1,t_2\cdots\cdots,t_n$，$n$ 维随机变量 $\left[X_1(t_1),X_2(t_2),\cdots\cdots,X_n(t_n)\right]$ 的分布函数[31]记为：

$$F_n\left(x_1,x_2,\cdots\cdots,x_n;t_1,t_2,\cdots\cdots,t_n\right)=$$

$$P\left\{X_1(t_1)\le x_1,X_2(t_2)\le x_2,\cdots\cdots,X_n(t_n)\le x_n\right\} \tag{2.1}$$

称为随机过程 $X(t)$ 的 $n$ 维分布函数。

如果存在函数 $f_n\left(x_1,x_2\cdots\cdots,x_n;t_1,t_2\cdots\cdots,t_n\right)$，使：

$$F_n\left(x_1,x_2\cdots\cdots,x_n;t_1,t_2\cdots\cdots,t_n\right)=$$

$$\int_{-\infty}^{x_1}\int_{-\infty}^{x_2}\cdots\cdots\int_{-\infty}^{x_n}f_n\left(x_1,x_2\cdots\cdots,x_n;t_1,t_2\cdots\cdots,t_n\right)dx_n\cdots\cdots dx_2dx_1 \tag{2.2}$$

成立，则称 $f_n$ 为随机过程 $X(t)$ 的 $n$ 维联合概率密度。

分布函数能完整地描述随机变量的统计特征，但在工程结构问题中，求其分布往往费时费力，有时只需要知道反映随机过程的某些数字特征。

### 2.1.2.2 数字特征

随机过程在各个孤立时刻描述统计特性的重要数字特征有均值函数和方差函数。它们都是随机过程的一维数字特征。设 $X(t)$ 是一随机过程，则

$$\mu_X(t_1)=E\left[X(t_1)\right]=\int_{-\infty}^{+\infty}x_1f_1(x_1,t_1)dx_1 \tag{2.3}$$

$\mu_X(t_1)$ 称为随机过程 $X(t)$ 的均值函数或均植。可以将它看成随机过程所有样本函数在时刻 $t_1$ 的函数值的平均，通常称为集平均。$\mu_X(t_1)$ 是反映随机过程的平均水平的一种指标。

其次，把随机变量 $X(t)$ 的二阶原点矩记作 $\psi_x^2(t)$，即：

$$\psi_x^2(t)=E\left[X^2(t)\right] \tag{2.4}$$

称为随机过程$X(t)$的均方值。而二阶中心矩记作$D\left[X(t)\right]$或$\sigma_X^2(t)$即：

$$D\left[X(t)\right]=\sigma_X^2(t)=E\left\{\left[X(t)-\mu_X(t)\right]^2\right\} \tag{2.5}$$

称为随机过程$X(t)$的方差函数。方差的平方根$\sigma_X^2(t)$称为随机过程$X(t)$的均方差函数，它表示随机过程$X(t)$在时刻$t$对于均值函数$\mu_X(t_1)$的偏离程度。

为了描绘随机过程在两个不同时刻状态之间的联系还需要利用二维数字特征。设$X(t_1)$和$X(t_2)$是随机过程$X(t)$在任意两个时刻$t_1$和$t_2$时的状态，二阶原点混合矩：

$$R_{XX}(t_1,t_2)=E[X(t_1)X(t_2)]=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}x_1x_2f_2(x_1,x_2;t_1,t_2)dx_1dx_2 \tag{2.6}$$

为随机过程$X(t)$的自相关函数。

同样，对于两个不同的平稳随机过程$X(t)$和$Y(t)$，互相关函数$R_{XY}(\tau)$，$R_{YX}(\tau)$为：

$$R_{XY}(\tau)=E[(X(t)Y(t+\tau))] \tag{2.7}$$

$$R_{YX}(\tau)=E[(Y(t)X(t+\tau))] \tag{2.8}$$

对于二阶中心混合矩：

$$C_{XX}(t_1,t_2)=E\left\{[X(t_1)-\mu_X(t_1)][X(t_1)-\mu_X(t_1)]\right\} \tag{2.9}$$

称为随机过程$X(t)$的自协方差函数。

对于随机过程$X(t)$，如果它的均值是常数而自相关函数只依赖于时间差，则称该过程是广义平稳的，否则称为广义非平稳的。平稳性反映在观测记录上，即样本曲线方面的特点是：随机过程的所有样本曲线大体都在某一水平直线周围随机地波动。

#### 2.1.2.3 谱密度

平稳随机过程$X(t)$是无限继续下去的，无法满足进行傅立叶积分的条件，

因此难以直接通过对样本函数本身进行傅立叶变换得到频率组成信息。为了解决这个问题，可以通过对样本函数的相关函数作傅立叶分析。

$$S_X(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_X(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \tag{2.10}$$

$$R_X(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}S_X(\omega)e^{i\omega\tau}d\omega \tag{2.11}$$

其中$S_X(\omega)$称为随机过程$X(t)$的谱密度，它是圆频率$\omega$的函数。以上两式即为著名的维纳—辛钦（Wiener-Khintchine）公式，是联系频域与时域的基本关系式。由上式可以得到：

$$R_X(\tau=0)=\int_{-\infty}^{\infty}S_X(\omega)d\omega \tag{2.12}$$

又由$R_X(\tau)$的基本定义，有：

$$E\left(X^2\right)=\int_{-\infty}^{\infty}S_X(\omega)d\omega \tag{2.13}$$

因此，平稳随机过程$X(t)$的均方值由谱密度$S_X(\omega)$对$\omega$的曲线下的面积来确定，从而$S_X(\omega)$更完全的名称是均方谱密度[15]。由此可见$S_X(\omega)$代表$X(t)$的均方值、方差沿频率$\omega$的分布。通常将对应$S_X(\omega)$的峰值的频率$\omega_0$称为卓越频率，此频率及其邻域对$S_X(\omega)$均方值、方差的贡献最大。

互谱密度为互相关函数的傅立叶变换：

$$S_{XY}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_{XY}(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \tag{2.14}$$

$$S_{YX}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_{YX}(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \tag{2.15}$$

可推得$S_{XY}(\omega)$和$S_{YX}(\omega)$只是虚部的符号相反，即$S_{XY}(\omega)$和$S_{YX}(\omega)$互为共轭，记为：

$$S_{XY}(\omega)=S_{YX}^{*}(\omega) \tag{2.16}$$

$$S_{YX}(\omega)=S_{XY}^{*}(\omega) \tag{2.17}$$

定义相干函数为

$$Coh(r,n)=\frac{\left|S_{u_1u_2}(r,n)\right|^2}{S_{u_1}(l,n)S_{u_2}(k,n)} \tag{2.18}$$

若完全相干时，相干函数$\rho_{XY}(\omega)=1$，毫不相干时，$\rho_{XY}(\omega)=0$。

由于互相关函数是非对称的，既非偶函数，亦非奇函数，故互谱密度不像自谱密度一样为偶函数，一般是复数的形式，其中实部称为共象谱，为偶函数；虚部称为正交谱，为奇函数。

### 2.1.3 各态历经性

如果任何一个样本的概率分布都相同，即可以用一个样本函数就能推算出母函数的概率分布时，就称该随机过程称为各态历经过程。也就是说，其中任意一条样本曲线基本上包含了该随机过程所具有的所有统计特性。因而各态历经过程一定是平稳随机过程，但平稳随机过程不一定就是各态历经过程。假设$X_S(t)$为随机过程$X(t)$的一个样本，若对于$X_S(t)$有：

$$E\left[X(t)\right]=\left\langle X(t)\right\rangle=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T X_S(t)dt \tag{2.19}$$

和

$$E\left[X(t)X(t+\tau)\right]=\left\langle X(t)X(t+\tau)\right\rangle=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T X_S(t)X_s(t+\tau)dt \tag{2.20}$$

则称随机过程$X(t)$具有各态历经性，$X(t)$称为各态历经过程。采用以上两式可以根据随机过程的一个样本来计算其均值及相关函数。因此对于这类随机过程，只需测量到一条实测曲线，就可以由它得到所需的各种统计参数。

在工程应用中，通常不加证明的采用各态历经性质和假设，或者说主要根据过程的物理性质来判断其是否具有各态历经性。而实际的振动问题严格说来都不是各态历经的，但如果能得到充分的观测记录，考虑到几乎所有它的振动状态都已经充分表现出来，一般就假定它是各态历经过程。

目前的风工程理论认为脉动风速本身具有各态历经性，可采用具有零均值的高斯平稳随机过程来模拟。因此实际计算中，可以利用一个充分长的脉动风压记录，取其时间的平均来代替大量样本的集合平均，方便地求出相对于平均风速位置处的脉动风速幅值的概率密度函数等统计特征。

## 2.2 脉动风基本特性[1] [18][37][38]

### 2.2.1 脉动风速功率谱

要采用频域方法进行风振响应计算，需要研究脉动风速其在频率域内的功率谱密度函数。脉动风速的功率谱主要反映脉动风中各种频率成分对应的能量分布规律，主要可通过两种途径获得：一种是把强风观测记录经过相关分析，获得风速的相关曲线，建立相关曲线的数学表达式相关函数，然后通过傅立叶变换求得功率谱的数学表达式；另一种是把强风记录通过超低频滤波器，直接测出风速的功率谱曲线，建立数学表达式。两种途径都是建立在对风的实测资料的统计、归纳的基础上的。

风速谱按方向可划分为：水平阵风功率谱、竖向阵风功率谱和横向阵风功率谱。目前应用考虑较多的是水平阵风功率谱，许多风工程专家通过对水平阵风的研究得到了不同形式的风速谱表达式。按是否考虑湍流积分尺度随高度变化可分为两大类：一类是不考虑湍流积分尺度随高度的变化，如 Davenport 谱，Harris 谱等；另一类是考虑随高度的变化，如 Simiu 谱、Kaimal 谱等。

(1) Davenport 谱：

$$\frac{nS_v(n)}{\bar{V}_{10}^2}=\frac{4kx^2}{n\left(1+x^2\right)^{4/3}} \tag{2.21}$$

式中，$x=\dfrac{1200n}{\bar{V}_{10}}$，k 为反映地面粗糙度的系数，$n=\omega/(2\pi)$为脉动风频率，$\bar{V}_{10}\,(m/s)$为离地 10 米高处的平均风速。我国和加拿大建筑规范均采用了 Davenport 谱。

(2) 美国 Simiu 谱：

$$S_v(z,n)=200u_*^2\frac{f}{n\left(1+50f\right)^{5/3}} \tag{2.22}$$

式中：$f=\dfrac{zn}{\bar{V}_{10}\left(z/10\right)^2}$；

当 $f>0.2$，$S_v(z,n)=0.26u_*^2\frac{1}{nf^{2/3}}$

$u_*$,为摩擦速度或剪切速度；

(3) 日本盐谷、新井 Hino 谱：

$$S_v(z,n)=6k\bar{v}_{10}^{-2}\frac{k_1x_1}{\left(1+x_1^2\right)^{5/6}} \tag{2.23}$$

式中，$k=0.4751$，$x_1=5344.341\dfrac{k^{3/\alpha}\left(\frac{z}{10}\right)^{1-4\alpha}n}{\alpha^3\bar{v}_{10}}$；

(4) Kaimal 谱

Kaimal 谱是我国“桥梁抗风规范”建议的功率谱，其数学表达式为：

$$S_v(n)=200u_*^2\frac{x}{n(1+50x)^{5/3}} \tag{2.24}$$

式中，$x=\dfrac{nz}{\bar{v}_z}$，$\bar{v}_z$-$z$ 高度处的平均风速；

(5) 英国 Harris 谱

$$S_v(n)=4u_*^2\frac{x}{n\left(1+x^2\right)^{5/6}} \tag{2.25}$$

式中：$x=\dfrac{1800n}{\bar{V}_{10}}$，其余符号同前；

顺风向振动是由自然风中的湍流引起的，横风向振动是由风的湍流和建筑物尾流中的旋涡共同引起的，旋涡的特性受建筑物的形状和风的特性影响。因此与顺风向脉动风荷载相比，横风向脉动风荷载其表现形式和对结构的作用要更加复杂。当建筑物的高宽比$H/\sqrt{BD}>3$时，在来流风的作用下，横风向振动加速度可能会超过顺风向的相应值。横风向脉动风压谱函数不能由求顺风向脉动风压谱的类似公式来求得，某些国外建筑规范如日本规范已经规定了计算方法。

垂直功率谱较水平功率谱小,对高层和高耸结构一般仅考虑水平谱影响。

### 2.2.2 脉动风空间相关性

空间不同位置上的脉动风速存在一定的关系，这种关系就称为脉动风速的空间相关性，在频域上反映为两点脉动风速谱的相干函数。

按随机过程理论，在$l$点和$k$点测得的随机过程 $u_1(t)$和$u_2(t)$，也即$l$点和$k$点两个脉动分量的连续记录的数学期望为时域内的互相关函数，用$R_{u_1u_2}(\tau)$ 表示，相应的互谱密度函数$S_{u_1u_2}(r,n)$，在目前的风工程计算领域，相干函数一般定义为：

$$Coh(r,n)=\frac{\left|S_{u_1u_2}(r,n)\right|^2}{S_{u_1}(l,n)S_{u_2}(k,n)} \tag{2.26}$$

$S_{u_1}(l,n)$ ，$S_{u_2}(k,n)$分别为$l$点和$k$点的脉动风速自功率谱。

大量文献讨论了相关函数的经验公式，针对不同的结构形式，经验公式也有所差别。Davenport 在强风观测中发现空间两点处脉动风速的相关性随着两点间距离的增大而减小，其衰减形式表现为指数规律，于是提出了反映空间相关性的相干函数：

$$Coh(r,n)=R_{xz}(x,x',z,z',n)=e^{-c} \tag{2.27}$$

$$c=\frac{n\left[c_x^2(x-x')^2+c_z^2(z-z')^2\right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{v}_{10}}$$

或

$$c=\frac{n\left[c_x^2(x-x')^2+c_z^2(z-z')^2\right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}\left[\bar{v}(z)+\bar{v}(z')\right]}$$

式中，$(x,z),(x',z')$分别为迎风面上$l$点和$k$点的坐标，$\bar{v}_{10},\bar{v}(z),\bar{v}(z')$分别为10m，$z,z'$高度处的平均风速；n 为脉动风的频率（Hz）。$c_x$，$c_z$分别为垂直向和顺风向衰减系数，建议取 10 和 16。

日本盐谷得到和风频率无关的相干函数经验公式，其垂直向与横风向的分量如式：

$$Coh(z,z')=\exp\left[\frac{|z-z'|}{L_z}\right] \tag{2.28}$$

$$Coh(y,y')=\exp\left[\frac{|y-y'|}{L_y}\right] \tag{2.29}$$

建议$L_y$，$L_z$分别取50和60。

由以上相关计算公式可得知，现在使用的相干函数均为实数形式，而自谱本身也为实部，因而通过上面给出的相干函数以及两点的脉动风速谱只能获取两点间脉动风速互谱的模。

关于风压谱的分析国内外很多学者做了大量研究[39]-[44]，目前的研究认为：大气边界层中脉动风压互谱虚部与实部之比很小，因此都将其忽略。本文以风洞实验数据为基础，在进行风振响应计算时同时考虑脉动风荷载谱的实部与虚部。

## 2.3 脉动风荷载互谱分析

### 2.3.1 脉动风荷载互谱计算方法

经典谱估计有两种方法，直接法（周期图法）和间接法。本文使用直接法中将加窗处理与平均处理相结合起来的韦尔奇方法[45]。把由风洞实验所测量得到的 N 点观察数据$X(n)$，利用快速傅立叶变换 (FFT) 方法进行计算，获取风荷载功率谱，结构物上两点之间的脉动分量互谱同时考虑了实部与虚部，并将实部与虚部进行分开保存与计算。

早期的统计学者曾利用周期图法从大量的数据中寻找隐藏的周期性的规律。周期图是信号功率谱的一个有偏估值；随着所取的信号序列长度的不同，所得到的周期图也不同，这种现象称为随机起伏。为了减小随机起伏，M.S.巴特利特提出平均周期图法，即先把信号序列分为若干段，对每段分别计算其周期图，然后取各个周期图的平均作为功率谱的估值。但是，如果信号序列不是足够长，由于每段序列长度变短，功率谱估值对不同频率成分的分辨能力也随之下降。另一种改进方法是将周期图用适当的频域窗函数进行处理，从而对周期图产生平滑作用，以减小随机起伏，但同时也会使周期图的分辨能力下降。P.O.韦尔奇提出一种把加窗处理与平均处理结合起来的方法。先把分段的数据乘以窗函数(进行加窗处理)，分别计算其周期图，然后进行平均。

本文采用常用的韦尔奇方法进行脉动风荷载互（自）谱分析。为了得到较好的功率谱，使用了加窗和分段平均处理，以减小随机起伏和保证有足够的谱分辨率两个方面。

为了降低对计算机的内存需求，减少计算时间，计算过程中采用快速傅立叶变换（FFT）算法直接从原始时间系列进行风压谱计算。FFT 方法可以将原本需要 $N^2$ 次乘法的离散傅立叶变换（DFT）的计算简化到 $N\log_2 N$ 次。其具体做法是通过将序列 $\{x_r\}$ 划分成许多短的序列，取代计算原始序列的 DFT，只要计算这些短序列的 DFT。然后 FFT 通过"蝴蝶图"算法将它们组合在一起从而给出整个序列 $\{x_r\}$ 的 DFT[17]。

采用"韦尔奇"方法进行计算时，首先将需求的两点的实数风压时程序列 $pre\_tap1(j)$，$pre\_tap2(j)$，$j=1,\cdots\cdots,N$ 进行有重叠的分段，每段数据长度为 M，每相邻两段重叠 $M/2$。然后在每段内将两点实数序列分别作为一复数序列的实部与虚部：

$$pre(j)=pre\_tap1(j)+i\times pre\_tap1(j), j=1,\cdots\cdots,M \tag{2.30}$$

$i$ 为虚数的标志。作 FFT 变换时，$pre\_tap1(j)$ 作为实部数组，$pre\_tap2(j)$ 作为虚部数组，将数据重排后按照 FFT 中的"蝴蝶图"方法计算。整个计算进程的逻辑路线是从一行蝴蝶到下一行蝴蝶依次进行，设数据长度为 $N=2^n$，$N$ 的值为大于等于 $M$ 的第一个 2 的整数次幂的数，当 $M$ 不为 2 的整数次幂时，通过加零将 $pre\_tap1(j)$，$pre\_tap2(j)$ 记录长度扩展成 $N$。在每一个蝴蝶计算中将 $pre(j)$ 与乘子波动因子 $W_m^r=\cos\frac{\pi r}{k}-i\sin\frac{\pi r}{k}$（$m=1,2,\cdots,n$，$m$ 为行数，$k=2^{m-1}$）相乘的一系列运算[17]。FFT 完成之后，通过相应的乘积，便可得到两点间风压互谱的实部与虚部。

### 2.3.2 风荷载谱分析程序编制

本文以韦尔奇方法为理论基础，采用快速傅立叶变换计算方法，根据风洞实验数据特点及风振计算所需，使用 FORTRAN 语言在文献[46]提供的基本程序上进行改编，计算所需受载节点的自谱及风压互谱。在程序中将实部与虚部进行分别处理和运算，最后同时获取所需要的风荷载的自谱、互谱的实部与虚部。

需要输入的参数：

与所取风荷载相关的参数：参考高度 H，H 处风速$V_H$，相关测点数 NUM，采样频率 FS；需要进行谱密度计算的测点 NTAP1、NTAP2，及计算互谱密度时相关测点 NBEGIN、NEND，可通过测点循环进行多测点自、互谱同时计算。

谱计算相关参数：将每一测点时程数分为若干段时每段的大小 M，窗函数 IWIN、窗的长度 L、及求功率谱的快速傅立叶变换（FFT）长度 NFFT；

数据处理包括根据相似理论由采样频率转化为风场实际频率，以及由风压系数转化为风荷载。

窗函数选项提供了四种常用的窗函数[47]

①矩形窗；②汉宁窗；③汉明窗；④布莱克曼窗

1.矩形窗 Boxcar

矩形窗(Rectangular Window)函数的时域形式可以表示为：

$$w(n)=R_N(n)=\begin{cases}1, & 0\le n\le N-1\\ 0, & 其他\end{cases} \tag{2.31}$$

矩形窗设计的过渡带最窄，但阻带最小衰减也最差，仅-21dB;布莱克曼窗设计的阻带最小衰减最好，达-74dB,但过渡带最宽，约为矩形窗设计的三倍。

2.汉宁窗（Hanning，升余弦窗）

汉宁窗函数的时域形式可以表示为：

$$w(k)=0.5\left(1-\cos\left(2p\frac{k}{n+1}\right)\right),k=1,2,\cdots,N \tag{2.32}$$

三部分矩形窗频谱相加，使旁瓣互相抵消，能量集中在主瓣，旁瓣大大减小，主瓣宽度增加 1 倍。

3.汉明窗（Hamming，改进的升余弦窗）

汉明窗函数的时域形式可以表示为

$$w(k)=0.54-0.46\cos\left(2p\frac{k}{N-1}\right),k=1,2,\cdots,N \tag{2.33}$$

对汉宁窗的改进，在主瓣宽度（对应第一零点的宽度）相同的情况下，旁瓣进一步减小，可使 99.96%的能量集中在主瓣内。

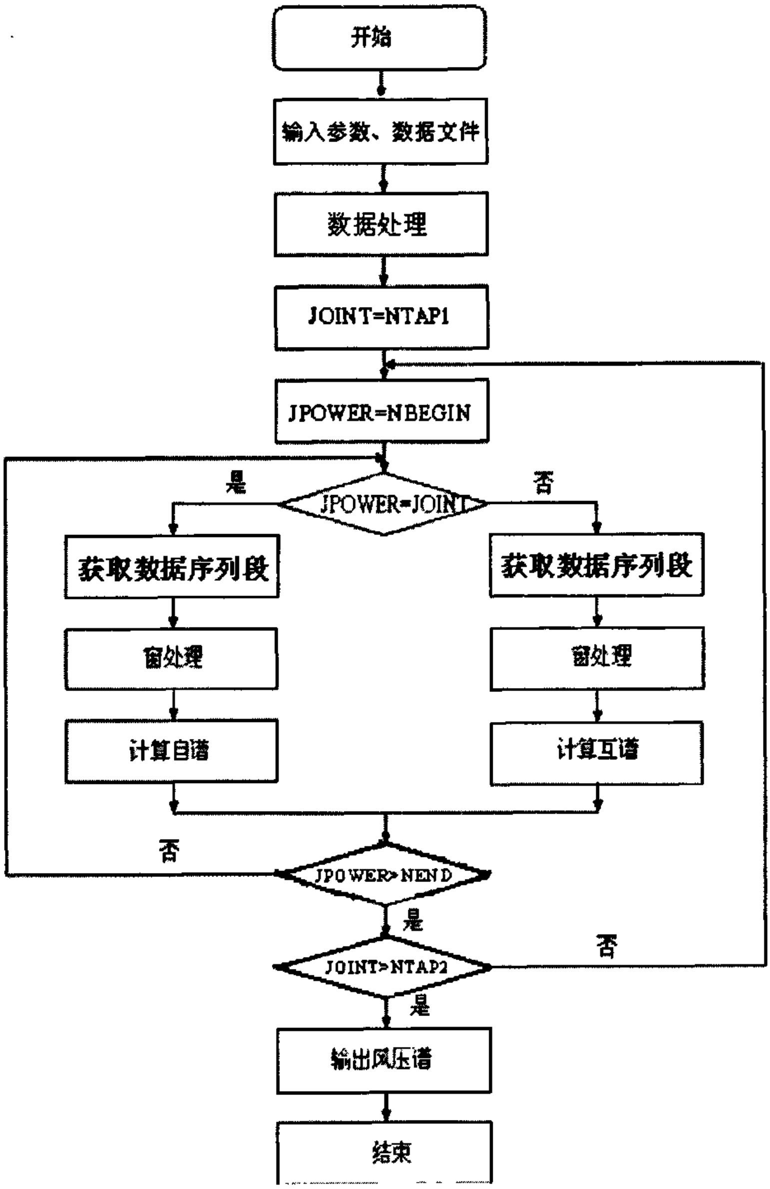
4. 布莱克曼窗（Barlett，三阶升余弦窗）

布莱克曼窗函数的时域形式可以表示为：

$$w(k)=0.42-0.5\cos\left(2p\frac{k-1}{N-1}\right)+0.08\cos\left(4p\frac{k-1}{N-1}\right),k=1,2,\cdots,N \qquad (2.34)$$

增加一二次谐波余弦分量，可进一步降低旁瓣，但主瓣宽度进一步增加 N 可减少过渡带。

输出数据文件包括风压谱实部数据文件，风压谱虚部数据文件、对数谱数据文件。下面通过两个算例来验证此程序的正确性，为便于比较分析，计算结果均采用对数谱。



开始
输入参数、数据文件
数据处理
JOINT=NTAP1
JPOWER=NBEGIN
是
JPOWER=JOINT
否
获取数据序列段
窗处理
计算自谱
获取数据序列段
窗处理
计算互谱
否
JPOWER>NEND
是
JOINT>NTAP2
否
是
输出风压谱
结束


图 2.2 谱分析程序框图

## 2.4 脉动风荷载谱分析程序验证

### 2.4.1 两正弦序列验证互谱

为了验证本文谱程序的正确性，现先针对可以获得解析解两个正弦波进行分析计算。设此两正弦波频率为常数$\omega_0$、相位差为定值$\phi$：

$$x(t)=x_0\sin(\omega_0 t+\theta) \tag{2.35}$$

$$y(t)=y_0\sin(\omega_0 t+\theta-\phi) \tag{2.36}$$

计算得相关函数及功率谱分别为：

$$R_{xy}(\tau)=\frac{1}{2}x_0 y_0\cos(\omega_0\tau-\phi) \tag{2.37}$$

$$\begin{aligned} S_{xy}(\omega)=\frac{1}{4}x_0 y_0\Big\{&\cos\phi\left[\delta\left(\omega-\omega_0\right)+\delta\left(\omega+\omega_0\right)\right] \\ &+i\times\sin\phi\left[\delta\left(\omega+\omega_0\right)-\delta\left(\omega-\omega_0\right)\right]\Big\} \end{aligned} \tag{2.38}$$

现假设$x_0$，$y_0$为1，$\theta$和$\phi$为$\pi/2$，$\omega_0=2\pi f_0=2\pi\times1000$时，采样频率FS为10000.0HZ，对应的解析解为：

$$R_{xy}\left(\tau\right)=\frac{1}{2}\sin\left(2000\pi\tau\right) \tag{2.39}$$

$$S_{xy}(2\pi f)=\frac{1}{4}i\left[\delta\left(2\pi f+2\pi f_0\right)-\delta\left(2\pi f-2\pi f_0\right)\right]\Big\} \tag{2.40}$$

对这样两个正弦波进行采样，则由下式获取时程序列：

$$x(n)=\cos(2\pi n/10),n=1,2\cdots\cdots N \tag{2.41}$$

$$y(n)=\sin(2\pi n/10),n=1,2\cdots\cdots N \tag{2.42}$$

将产生的时间序列读入程序中进行相关函数和谱密度计算，并对使用不同窗函数及数据长度所得的结果进行比较分析，如下图：

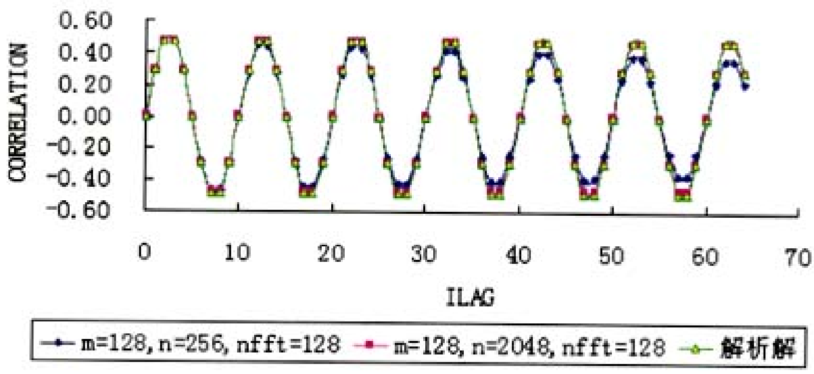



图 2.3 相关函数比较

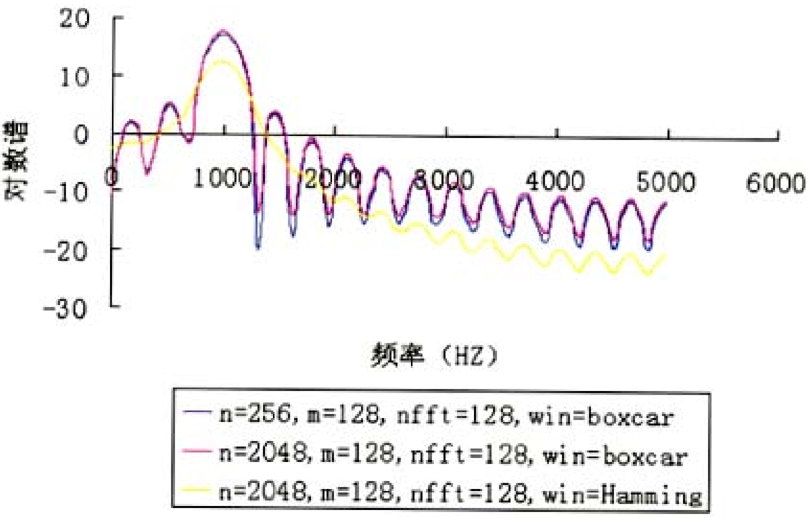



图 2.4 两正弦波序列互谱比较

由图（2.3）可知，程序相关函数结果与解析解拟合效果较好，增加数据长度可以获取更好的结果，说明计算该程序相关函数的结果有可信性。由公式（2.46）知，相位差$\phi$为$\pi/2$时，两正弦序列功率谱密度实部为 0，只剩下虚部且谱峰位于频率$f_0=1000Hz$处。由图（2.4）知功率谱谱值峰线对应的频率为1000Hz，与解析解所得的谱峰所处位置同。当增加数据长度，对谱的形状有所

改善；矩形窗相当于无窗，利用汉明窗改善了谱的形状，但增加了有效带宽，并稍降低了谱估计值。通过比较分析，本文后绪计算中，窗函数都选取的汉明窗，以保证所得到的谱是渐近无偏估计及改善边瓣较大所产生的谱失真。

### 2.4.2 Davenport 谱模拟

采用谐波叠加法(harmony superposition method)模拟 Davenport 谱单点风压时程曲线以检验该程序自谱计算，其基本思想是采用以离散谱逼近目标随机过程的模型的一种离散化数值模拟方法。

观察$n$个具有零均值的平稳高斯过程，其谱密度函数矩阵为：

$$S(\omega)=\begin{bmatrix} s_{11}(\omega) & s_{12}(\omega) & \cdots & s_{1n}(\omega) \\ s_{21}(\omega) & s_{22}(\omega) & \cdots & s_{2n}(\omega) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ s_{n1}(\omega) & s_{n2}(\omega) & \cdots & s_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

将$S(\omega)$进行 Cholesky 分解，有：

$$S(\omega)=H(\omega)\cdot H^{*}(\omega)^{T} \tag{2.44}$$

其中，$H(\omega)$为下三角矩阵

$$H(\omega)=\begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \cdots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \tag{2.45}$$

$H^{*}(\omega)^{T}$为$H(\omega)$的共轭转置。

对于一组$m$个$n$维多维随机过程$v_j(t)(j=1,2,\cdots,m)$，模拟风速具有如下形式[48]：

$$v_j(t)=\sum_{k=1}^{j}\sum_{l=1}^{N}\left|H_{jk}(\omega_l)\right|\cdot\sqrt{2\Delta\omega}\cdot\cos\left[2\pi\omega_l t+\psi_{jk}(\omega_l)+\theta_{kl}\right], j=1,2,3...,m \tag{2.46}$$

其中，风谱在频率范围内划分成$N$个相同部分，$\Delta\omega=(\omega_u-\omega_k)/N$为频率

增量，$\omega_l=\omega_k+\left(l-\frac{1}{2}\right)\Delta\omega, l=1,2,\cdots,N$；$\omega_u$，$\omega_l$ 为截取频率的上限和下限；$\left|H_{jk}(\omega_l)\right|$为上述下三角矩阵的模，$\psi_{jk}(\omega_l)$为两个不同作用点之间的相位角，$\theta_{kl}$为介于 0 和 $2\pi$ 之间均匀分布的随机数，是频域的递增变量。

只作单点模拟时，可简化为：

$$v(t)=\sum_{l=1}^{N}\left|H(\omega_l)\right|\cdot\sqrt{2\Delta\omega}\cdot\cos\left[2\pi\omega_l t+\theta_l\right] \tag{2.47}$$

Davenport 水平脉动风速谱：

$$\frac{nS_v(n)}{\bar{v}_{10}^2}=\frac{4kx^2}{n\left(1+x^2\right)^{4/3}} \tag{2.48}$$

式中，$x=\frac{1200n}{\bar{V}_{10}}$

$S_v(n)$——脉动风速功率谱；

$n$——脉动风频率(Hz)；

$k$——地面粗糙度系数，取 0.005；

$\bar{v}_{10}$——标准高度为 10m 处的风速(m/s)，此处为 16m。

所取时间步长为 0.1s，总采样时间为 100s。获得风速时程及本程序所计算得到的对数谱与 Davenport 谱比较如图：

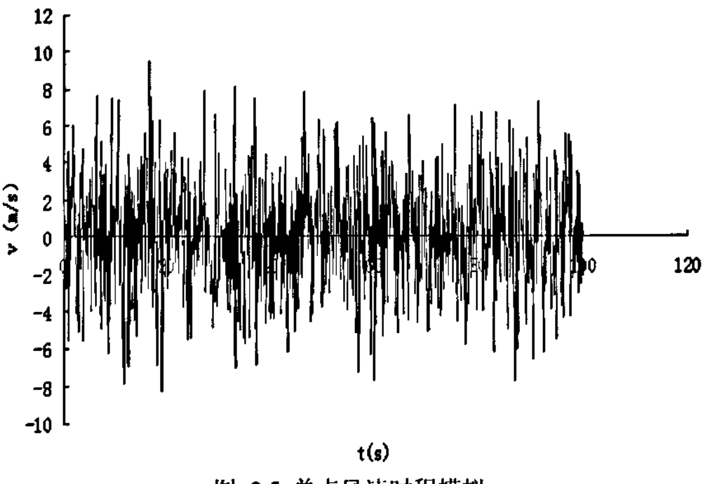



图 2.5 单点风速时程模拟

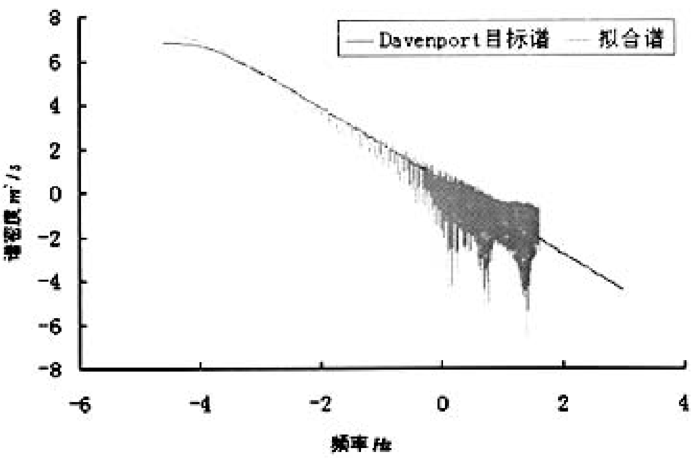



图 2.6 拟合谱与目标谱（对数自谱）对比

## 2.5 本章小结

本章主要介绍了以下几方面的内容：

从近地风的特性可知，风是由平均风(稳定风)和脉动风(阵风脉动)组成，第一部分于静力性质;而第二部分属动力作用，且属随机的动荷载。因而介绍了随机过程的一些基本概念及主要的统计特征，包括概率分布函数和数字特征，主要是相关函数及功率谱密度。

进行风振计算首先要了解脉动风的概率分布特性和功率谱密度函数，本章主要介绍了脉动风的特性有：脉动风速谱和脉动风的空间相关性等概念。

按照周期图方法估计脉动风荷载功率谱密度程序，能同时获取所需测点的自谱、互谱的实部与虚部。对样本采用交叠方式分为若干段进行计算以提高结果的精度，应用了加窗技术以防止谱泄漏。

分别对正弦波和 Davenport 谱进行采样，然后将采样得到的数据代入所编制的程序进行计算，以检验所用谱程序的正确性。

# 第3章 CQC方法计算结构风致响应

## 3.1 随机振动理论概述

由第二章关于脉动风基本特性介绍可知，风速可以看作两部分的组合：平均风部分和脉动风部分。脉动风周期一般在几秒到几十秒之间，其变化周期往往和结构物的自振周期比较接近，因而被当作随机荷载处理。因而风作用在结构上引起的结构响应也具有随机性，所以需要用到随机振动理论进行分析。

按照确定性结构系统是线性还是非线性划分，随机振动理论可以分为线性随机振动理论和非线性随机振动理论。迄今为止，线性随机振动理论已发展成熟。一个线性系统受到随机荷载的激励时，系统的响应(位移、速度、加速度、应力等)也将是随机振动。该理论的核心是：从随机激励的数值特征出发，利用结构系统的脉冲响应函数或频率响应函数，计算获得结构随机响应的数值特征：均值、方差、相关函数和功率谱密度等。

常用的线性随机振动计算方法有：振型叠加法、传递矩阵法、虚拟激励法等。目前工程中广泛应用的振型叠加法有各振型响应的平方总和开方法（SRSS法）以及考虑振型间相关性的完全二次型组合法（CQC法）。虽然目前关于CQC方法已有很多研究，但还没有见到明确将互谱实部与虚部分别给出而进行风振响应分析的研究。

1965年出现了快速傅立叶变换（FFT）- - 一种用计算机计算离散傅里叶变换的方法，大大减少了计算机的处理时间，而且还能增加精度，使得随机振动得到很大发展。

在非线性随机振动理论的研究方面，由于系统的输出不再是高斯分布，因此非线性系统的输出特性不可能仅取决于平均值与方差，需要研究高阶矩。因为求精确解存在较大困难，常常采用近似解法。两个广泛使用的近似方法是：等价线性化和摄动（小参数）法[49]。

本文主要涉及线性结构，重点研究CQC方法计算结构风致响应。

## 3.2 CQC方法计算结构风致响应

根据随机振动理论，在频域内求解结构风振响应时，其主要步骤为：输入脉动风压谱密度，通过传递函数作用，获取输出位移及加速度谱密度，最终输出位移及加速度等响应均方根。因此计算时需要将风压时程数据通过傅立叶变换获取脉动风压谱，虽然目前已有很多方法和程序在做这一工作，但还没有见到明确将互谱实部与虚部分别给出的工作。

本文主要根据风洞实验数据计算各节点间互谱，并且互谱的实部与虚部分别给出，进而利用同时考虑互谱实部与虚部的CQC算法进行风振响应分析。

### 3.2.1 实验源数据处理

本文基于风洞实验时程数据进行CQC方法及SRSS方法进行计算时，应先将实验所得数据进行相应的转化，在此基础上进行风压谱分析。其中包括实际结构采样频率的计算，以及由实验所得各测点的风压系数时程数据计算实际结构各计算节点所承担的平均风压与脉动风压，具体计算过程如下所述。

若想严格采用CQC法，则所有测点数据必须完全严格同步测试。

为把模型上测出的风压系数时程数据换算为实物的风压系数时程，模型与实物之间必须严格遵循相似性要求。设原型与模型的几何相似比为：$L_{scale}$，风速相似比为：$V_{scale}$，由相似定律，原型与模型的采样频率相似比为：

$$f_{scale} = V_{scale} / L_{scale} \tag{3.1}$$

由此可根据风洞实验模型所给的缩尺比及模型与实际结构参考点处的风速比得到实际结构计算时的采样频率。

风洞实验中常选一个不受建筑模型影响、且离风洞洞壁足够远的位置作为试验参考点，测取参考风压。用于计算各测点上与参考点高度有关但与试验风速无关的无量纲风压系数。风压系数时程值$C_p$定义为：

$$C_{p_i} = 2p_i / \rho u_0^2 \tag{3.2}$$

式中：$p_i$为第i测点风压；$\rho$为空气密度（$1.225 kg \cdot m^{-3}$）；$u_0$为建筑物顶部参考点的风速。

因为风压系数$C_p$为无量纲量，因此其值在原型和模型时相等。

本文在计算风压系数计算实际结构的风压值时，首先计算各节点平均风压系数$\bar{C}_{p_i}$和脉动风压系数$C'_{p_i}$，然后通过风压系数与实际结构相应参考点风速获取平均风压及脉动风压，计算公式如下：

平均风：

$$\bar{C}_{p_i}=\left(\sum_{j=1}^{N}C_{p_{ij}}\right)/N \tag{3.3}$$

$$\bar{P}_i=\bar{C}_{p_i}\times\rho u_0^2/2=\bar{C}_{p_i}\times u_0^2/1600 \tag{3.4}$$

脉动风：

$$C'_{p_i}=\sqrt{\sum_{j=1}^{N}\left(C_{p_{ij}}-\bar{C}_{p_i}\right)C'^{\,2}_{p_i}/\left(N-1\right)} \tag{3.5}$$

$$P'_i=C'_{p_i}\times\rho u_0^2/2=C'_{p_i}\times u_0^2/1600 \tag{3.6}$$

$\bar{P}_i$，$P'_i$分别为节点的平均风压、脉动风压，$\bar{C}_{p_i}$，$C'_{p_i}$为对应节点平均风压系数、脉动风压系数；$u_0$为实际结构场地处的参考风速。风压单位为$KN/m^2$，风速单位为$m/s$。再根据测压点所分担的X,Y,Z各方下的投影面积，便可求得风力。

由于风洞实验模型只能布置有限的测点，得出有限点的风压系数时程。实际工程设计时，需要利用这些有限点的风压系数来反映整个结构的风压分布，并且能够简单地应用到实际结构中去。这就涉及到如何由测点的风压时程数据得到结构计算时各节点风压的问题。

若风洞实验数据完全同步，可以在每个时间步上插值得到节点荷载瞬态数据，通过保证插值函数在试验点处的风压值与试验所测数据相同来确定待定参数，得出风压系数的插值函数，但要避免出现“龙格”现象即插值多项式随节点增多而振动更多反而不能更好地接近被插函数；李本悦，楼文娟等[50]曾针对大跨屋盖结构提出利用二元函数和多元函数的分段低次插值方法求出风压系数分布的插值函数，避免高阶插值方法带来的“龙格”现象；同时利用外插技术处理边缘部位和不规则的平面形状；也可以采用本征正交分解（POD）法：把多维的随机过程进行低维的近似描述(即将随机场用最佳级数展开)，进而大大减小用于重现随机场时所需存储的数据量。若不完全同步，则处理起来需要技巧，一种方式是采用POD法处理荷载，另外一种方式为近似方法，由于结构上各点的荷载谱和相干函数有一定相似性，可通过测点上的瞬态数据拟合得到自谱和相干函

数，然后直接用到节点上，即所有节点采用相同的自谱和相干函数。这种方法在工程上应用较多。

本文计算时对于结构边缘部位则根据最小距离取临近测点的风压值，其它部分应用线性插值。

最后由脉动风压时程数据进行风压谱分析，力谱矩阵的每个对角元$S_{P_iP_i}$由一个脉动风压时程进行自功率谱密度函数分析所得，非对角元元素$S_{P_iP_j}$由两个不同的风压离散数据序列进行互功率谱密度函数分析而得。

### 3.2.2 CQC方法计算公式

完全的二次型组合法（CQC方法）和平方总和开方法（SRSS法）是目前振型叠加法中在工程上得到广泛应用的两种方法。SRSS 方法是CQC方法的简化形式，因计算简便而得已广泛应用。但只适用于结构的各振型间的固有频率值互不接近，各振型阻尼比很小，荷载为具有宽带谱的平稳随机过程的情况，此时各振型交叉项引起的响应可忽略不计。结构的最大响应的平方近似于各振型相应最大响应的平方和。显然对各种超大型复杂结构物，引用SRSS方法求得的结果往往会引入较大的误差，本文所取CQC方法[27]考虑了各振型响应之间的相关性，同时考虑了脉动风压互谱的实部与虚部，以期待得到更合理结果。

设结构的节点数为S，自由度数为N，取前M阶振型，则在结构随机风振响应计算用如下的矩阵方程表达

$$[M]\{\ddot{x}(t)\}+[C]\{\dot{x}(t)\}+[K]\{x(t)\}=\{P(t)\} \tag{3.7}$$

式中：$[M]_{N\times N}$，$[C]_{N\times N}$，$[K]_{N\times N}$分别为振动系统质点、阻尼、刚度矩阵；

$\{\ddot{x}(t)\}_{N\times 1},\{\dot{x}(t)\}_{N\times 1},\{x(t)\}_{N\times 1}$分别为系统的加速度、速度、位移向量；

$\{P(t)\}_{N\times 1}$为作用在振动系统上的随机激励向量，此处为脉动风压；其功率谱函数矩阵为$[S_{PP}(n)]_{N\times N}$，$n$为频率（Hz）。

根据振型分解法，位移按振型展开：

$$\{x(t)\}=[\phi]\{q(t)\} \tag{3.8}$$

式中$[\phi]=[\{\phi_1\},\{\phi_2\}\cdots\cdots\{\phi_m\}]$为$N\times m$的模态矩阵，它的诸列$\{\phi\}_k=[A_{1k},A_{2k}\cdots A_{Nk}]$

是各振型的模态列，并假定其已对质量矩阵实现归一化。$q=\{q_1(t),q_2(t)\cdots q_m(t)\}^T$ 由振型对于质量矩阵$[M]$和刚度矩阵$[K]$的正交性，并假定振型对于阻尼矩阵质量矩阵$[C]$也具有正交性，即

$$\{\phi\}_i^T[C]\{\phi\}_j=0,(i\neq j) \tag{3.9}$$

将式(3.8)代入运动方程(3.7)并左乘$[\phi]^T$,则可将方程(3.8)用m维振型坐标表

示的一系列已经解耦的单自由度系统运动微分方程组：

$$\{\ddot{q}\}+[\beta]\{\dot{q}\}+[\omega_0^2]\{q\}=\{f_j(t)\} \tag{3.10}$$

式中$[\beta]=diag[2\varsigma_j\omega_j]$，$[\omega_0^2]=diag[\omega_j^2](j=1,2,\cdots,m)$均为$m\times m$阶的对角阵，$\varsigma_j$和$\omega_j$分别为第$j$阶振型的阻尼比和固有频率，$\{f(t)\}_{m\times 1}=[\phi]^T\{P(t)\}$为振型激励向量。由于运动方程(3.10)可以逐个独立地求解，使得振型叠加法具有很大的优越性，因而它已成为结构动力学中一个应用最广泛的分析方法。

对于大多数类型的动载荷，各个振型的响应是不同的，但由于一般的土木工程结构体量较大，因而惯性大，所以通常只有较低频率的振动可以被激发出来，一般是频率最低的振型响应最大，高频振型的响应则趋向减小，因而在叠加过程中只需要计及频率较低的若干项，若得到的响应已达到精度要求，就可舍弃频率较高的各项，从而可以大大减少计算工作量。

由随机振动理论，得出振动系统位移响应的相关矩阵为：

$$[R_{xx}(\tau)]=[\phi]\cdot\int_{-\infty}^{\infty}[H(in)][S_{ff}(n)][H^*(in)]dn\cdot[\phi]^T \tag{3.11}$$

$[H(in)]_{m\times m}$是结构的传递函数矩阵，$[H^*(in)]_{m\times m}$为其共轭矩阵；$[S_{ff}(n)]_{m\times m}$为振型激励向量的谱密度矩阵，且$[S_{ff}(n)]=[\phi]^T[S_{PP}(n)][\phi]$，$[S_{PP}(n)]$为风压谱矩阵。脉动风压为零均值，由随机振动理论，响应也为零均值。从而得到结构位移响应协方差矩阵：

$$[R_{xx}(0)]=[\phi]\cdot\int_{-\infty}^{\infty}[H(in)][S_{ff}(n)][H^*(in)]dn\cdot[\phi]^T \tag{3.12}$$

上式即为结构位移响应协方差精细计算的基本算式。当$m=N$时，上式即为CQC算式。本文CQC方法同时考虑互谱的实部与虚部，即没有忽略虚部的影响，得结构位移响应各分量的根方差$\sigma_{x_i}$为：

$$\sigma_{x_i}^2=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\phi_{ik}\phi_{il}\int_{-\infty}^{\infty}H_k(in)H_l^*(in)S_{f_kf_l}(n)dn \tag{3.13}$$

其中$H_k(in)$、$H_l^*(in)$、和$S_{f_kf_l}(n)$都是n的复函数；

$$H_k(in)=\frac{1}{\left((2\pi n_k)^2-(2\pi n)^2\right)+i\left(8\pi^2\xi_kn_kn\right)} \tag{3.14}$$

$$H_l^*(in)=\frac{1}{\left((2\pi n_l)^2-(2\pi n)^2\right)-i\left(8\pi^2\xi_ln_ln\right)} \tag{3.15}$$

$$S_{f_kf_l}(n)=\sum_{s=1}^{N}\sum_{t=1}^{N}\phi_{sk}\phi_{tl}S_{P_sP_t}(n) \tag{3.16}$$

将式(3.14)(3.15)(3.16)代入(3.13)，同时将传递函数，风压谱的实部与虚部分别进行计算，令

$$H_k(in)H_l^*(in)=H_{kl}^R(n)-iH_{kl}^I(n) \tag{3.17}$$

$$S_{f_kf_l}(n)=S_{f_kf_l}^R(n)+iS_{f_kf_l}^I(n) \tag{3.18}$$

其中：

$$H_{kl}^R(n)=\frac{1}{16\pi^4}\frac{\left(n_k^2-n^2\right)\left(n_l^2-n^2\right)+\left(2\xi_kn_kn\right)\left(2\xi_ln_ln\right)}{\left(\left(n_k^2-n^2\right)^2+\left(2\xi_kn_kn\right)^2\right)\left(\left(n_l^2-n^2\right)^2+\left(2\xi_ln_ln\right)^2\right)} \tag{3.19}$$

$$H_{kl}^I(n)=\frac{1}{16\pi^4}\frac{\left(n_l^2-n^2\right)\left(2\xi_kn_kn\right)-\left(n_k^2-n^2\right)\left(2\xi_ln_ln\right)}{\left(\left(n_k^2-n^2\right)^2+\left(2\xi_kn_kn\right)^2\right)\left(\left(n_l^2-n^2\right)^2+\left(2\xi_ln_ln\right)^2\right)} \tag{3.20}$$

$$S_{P_kP_l}(n)=S_{P_kP_l}^R(n)+iS_{P_kP_l}^I(n) \tag{3.21}$$

$$S_{f_kf_l}^R(n)=\sum_{s=1}^{N}\sum_{t=1}^{N}\phi_{sk}\phi_{tl}S_{P_sP_t}^R(n) \tag{3.22}$$

$$S_{f_kf_l}^I(n)=\sum_{s=1}^{N}\sum_{t=1}^{N}\phi_{sk}\phi_{tl}S_{P_sP_t}^I(n) \tag{3.23}$$

由以上可知，$H_{kl}^R(n)$、$S_{P_sP_t}^R(n)$、$S_{f_kf_l}^R(n)$为n的偶函数，$H_{kl}^I(n)$、$S_{P_sP_t}^I(n)$、$S_{f_kf_l}^I(n)$

为n的奇函数了。因此可将(3.13)整理成为

$$\sigma_{x_i}^2=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\phi_{ik}\phi_{il}\int_{-\infty}^{\infty}\left[H_u^R(n)S_{f_kf_l}^R(n)+H_u^I(n)S_{f_kf_l}^I(n)\right]dn \tag{3.24}$$

### 3.2.3 SRSS方法计算公式：

由式(3.13)，当不考虑模态耦合时，该式可简化为：

$$\sigma_{x_i}^2=\sum_{k=1}^{m}\phi_{ik}^2\int_{-\infty}^{\infty}H_k(in)H_k^*(in)S_{f_kf_k}(n)dn \tag{3.25}$$

$$H_k(n)H_k^*(n)=\frac{1}{16\pi^4}\frac{1}{\left(n_k^2-n^2\right)^2+\left(2\xi_kn_kn\right)^2} \tag{3.26}$$

$$S_{f_kf_k}(n)=\sum_{s=1}^{n}\sum_{t=1}^{n}\phi_{sk}\phi_{tk}S_{P_sP_t}(n) \tag{3.27}$$

$H_k(n)H_k^*(n)$、$S_{P_sP_t}^R(n)$为n的偶函数，$S_{P_sP_t}^I(n)$为n的奇函数，因此式（3-16）可简化为：

$$S_{f_k}(n)=\sum_{s=1}^{n}\sum_{t=1}^{n}\phi_{sk}\phi_{tk}S_{P_sP_t}^R(n) \tag{3.28}$$

得到工程上常用的SRSS法计算公式：

$$\sigma_{x_i}^2=\sum_{k=1}^{m}\phi_{ik}^2\int_{-\infty}^{\infty}\left|H_k(in)\right|^2S_{f_k}(n)dn \tag{3.29}$$

由此式可以看出，而在SRSS方法计算时，在积分以后的表达式中只含有风压互谱的实部，而按CQC方法进行计算时，所用到的来自于风洞试验时程资料的风压互谱（按实部、虚部分别考虑），按前面第二章介绍的方法计算而得。

## 3.3 CQC风振计算程序

根据上述算法，本文编制了频域上的CQC方法和SRSS方法风振响应计算程序，该程序能给出各节点自由度的风振位移响应值。

通过结构动力学知识，对结构进行模态分析，可以得到结构的各阶自振频率及主振型。同时引入振型阻尼比，并用第二章所采用的风荷载谱分析的方法

对由风洞实验或者数值模拟得到的风（压）速时程进行处理，进而得到模态力谱。将这些数据文件读入风振响应计算程序，便可以计算结构各节点自由度的风振位移响应。

用公式(3.24)(3.29)计算结构风振响应时，会涉及到对频率的无穷积分运算，但由于风速谱卓越频率较低，高频处的功率谱密函数值已经非常小，贡献不大，一般情况下最大频率不需要太大也可以得到较为精确的结果。本文积分上限由风洞实验数据来确定。因为被积函数复杂，得不到解析解，所以采用数值积分法计算。

用数值积分法计算上述积分部分时，首先需将其离散化，即将频域划分为若干个频率带，计算每个离散点上的频率响应函数及功率谱密度函数。本文所考虑的风压谱直接根据风洞实验或数值风洞数据计算而来，则频率离散点可由谱计算时得到。

假定积分上限为$n_s$，则$\Delta n = n_s / N$，$n_i = i\Delta n\left(i = 1,2,\cdots,N\right)$。

本文采用复合梯形公式，通过在$\left[0,n_s\right]$上用分段线性插值函数进行数值积分计算，CQC方法位移根方差可化为：

$$G(n_i) = H_{kl}^R\left(n_i\right)S_{f_kf_l}^R\left(n_i\right) + H_{kl}^I\left(n_i\right)S_{f_kf_l}^I\left(n_i\right) \tag{3.30}$$

$$\sigma_{x_i}^2 = \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\phi_{ik}\phi_{il}\left(\frac{\Delta n}{2}\left[G(n_1) + G(n_s) + 2\sum_{i=2}^{N-1} f\left(n_i\right)\right]\right)$$

SRSS 方法可化为：

$$\sigma_{x_i}^2 = \sum_{k=1}^{m}\phi_{ik}^2\left(S_{f_k}\left(n_1\right)\left|H_k\left(in_1\right)\right|^2 + S_{f_k}\left(n_S\right)\left|H_k\left(in_S\right)\right|^2 + \sum_{i=2}^{i=N-1} S_{f_k}\left(n_i\right)\left|H_k\left(in_i\right)\right|^2\right) \tag{3.31}$$

复合梯形公式算法简单，同时避免了在区间上采用高次插值而采用分段低次插值的办法近似求积函数，这样既可以提高求积公式的精度，又可以保证其数值稳定性。

## 3.4 程序的正确性验证

为了验证该风振响应计算程序的正确性，本文选择了一个 3 自由度模型同时进行手算与程序计算，通过手算检验以程序的正确性。手算的是要据风洞试

验数据处理和模态力谱等已通过计算机得出的基础上进行；即此处只是检验CQC方法和SRSS方法结构计算程序部分的正确性。

例题3.1：所取结构模型为一钢高耸结构，等截面，H=90m，在z=60m高度处有一平台，致使该处质量猛增。质量分三段，如图3.1a)所示。取M=350t，迎风面宽度$L_x=50m$，阻尼比为0.01。

按结构动力学，求得$T_1=1s, T_2=0.142s$；$f_1=1Hz, f_2=7.0422535Hz$。第1和第2阶振型如图3.1b)所示。

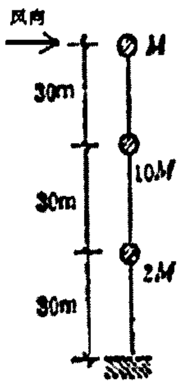



图 3.1 悬臂梁模型

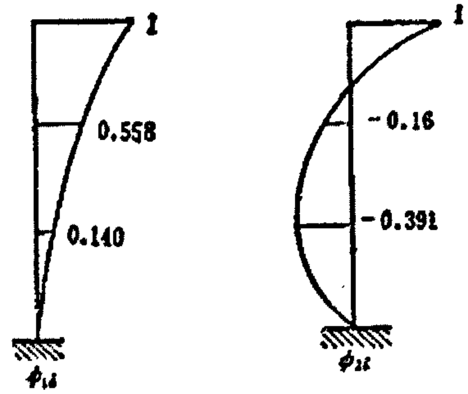



图 3.2 结构第一、二阶模态

经过计算得到结构的正则化振型矩阵：

$$A=\begin{bmatrix} 0.00367 & -0.01672 \\ 0.01469 & -0.02609 \\ 0.02623 & 0.04277 \end{bmatrix}$$

所取实验数据为一典型高层建筑等效高度处风速时程曲线，风压谱由第二章所述方法进行分析。

分别用CQC完整算式以及SRSS方法进行计算，各质点在脉动风荷载作用下的顺风向位移标准差计算结果如下表：

表 3.1 悬臂梁模型位移根方差

| 质点号<br>方法 | 质点 1 | 质点 2 | 质点 3 |
|---|---|---|---|
| 完整 CQC 方法程序计算 | 0.0050904 | 0.0197440 | 0.0353952 |
| 完整 CQC 方法手算 | 0.0050904 | 0.0197440 | 0.0353952 |
| SRSS 方法程序计算 | 0.0050849 | 0.0197334 | 0.0354164 |
| SRSS 方法手算 | 0.0050849 | 0.0197334 | 0.0354164 |

该简单的算例通过手算检验是正确的。由于该结构属较典型的一维杆系结构，第一振型响应占优，且振型交叉项贡献较小，故完整 CQC 算法、SRSS 方法所计算的结果相差不大。下一章将通过一个更真实的复杂模型进一步检验这两种方法及其差异。

## 3.5 本章小结

本章在简单介绍随机振动基本理论的基础上，重点分析了分别考虑脉动风压互谱实部与虚部的 CQC 算法。

考虑到风压谱能量主要集中在低频段，因而采用简单有效的复合梯形公式对无穷积分段进行数值计算，并编制了 CQC 方法以、SRSS 方法风振计算相关程序。

最后分别应用二种方法：完整的 CQC 方法及常用的 SRSS 方法分析了一个简单算例，验证计算程序的正确性。

# 第4章 基于CQC方法的典型高层建筑风振算例

高层建筑结构的显著特点之一是侧向荷载在结构设计中起着决定性的作用，除了地震作用外，主要的侧向荷载是风荷载。随着城市化速度的加快，局部地区人口密度的急剧增加，为了在较小的面积上获得更多的使用面积，高层建筑的建筑高度不断攀升。近几十年来，形成了世界性的高层建筑热潮，其固有频率更加接近强风的卓越频率，风荷载作用下的结构响应进一步加剧，风荷载已成为高层、高耸结构的主要设计荷载之一。而目前高层建筑结构设计规范中各个侧面仅给出了一个整体体型系数，而实际上高层建筑风荷载的体型系数是沿着高度变化的，并且规范仅对圆截面结构横风向风振做了规定，而对于非圆截面结构建议通过风洞实验来确定。

本章直接根据风洞实验各测点风压系数时程数据为基础，利用上一章所介绍的同时考虑风压谱实部与虚部的CQC方法对一幢外形与所用风洞实验数据的刚性模型一致的典型高层建筑结构算例进行风振分析。该方法可以方便地对任意体型高层建筑顺风、横风及扭转风振响应进行较为准确的分析。

## 4.1 风洞实验数据

CQC算法不仅要求测量模型表面每个测点的脉动压力，还要求测量各测点间风压的相关性，所以测点的风压必须同步测量。

本文的实测数据取自“美国国家标准技术研究所(NIST)”[51]提供的同步测压风洞试验资料。该风洞实验刚性模型全尺度模型为30.48×45.72×182.88*m* 的矩形柱体，迎风面宽度为B，顺风向深度为D，H为模型高度，表面平整，无任何附属物，截面如图4.1。

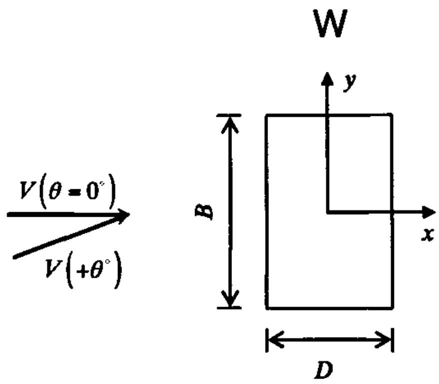
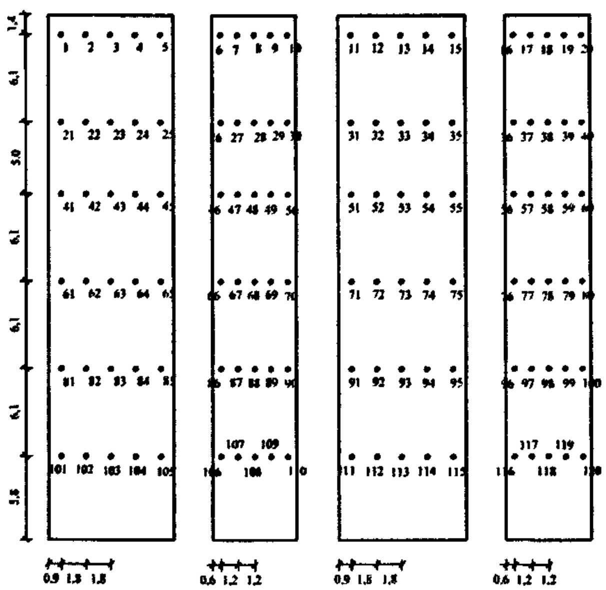



图 4.1 建筑物截面与风力作用方向



从左到右依此为立面： the South (S), East (E), North (N), and West (W) 。

图 4.2 模型测点布置图

风洞试验模型的几何缩尺比为 1：500，结构表面共布置了 120 个测点，图（4.2）中分别为南立面、东立面、北立面和西立面测点布置图。

风洞实验的参数：(1)地貌类型：B 类；(2)计算风速，模型顶部测压点参考风速：22.2$m/s$；实际结构顶部参考风速：66.6$m/s$；模型采样频率为 250Hz，

每个测点采样样本长度为7504个数据，对应采样时间为 30.016s。本文所取为$0^0$风向角下时的数据。

## 4.2 有限元模型的建立

对应于计算所应用的NIST提供的实验数据，NIST有与刚性模型对应的具体的结构模型，但未提供具体的结构资料。本文利用大型通用有限元程序ANSYS自行设计了一个外形与风洞实验模型一致、第一阶频率与NIST的结构基频0.17Hz基本一致的框筒结构，如图4.3（单位：m）。整个模型由外圈框筒柱、主梁、内部筒体等主结构、部分次结构及混凝土楼板组成，所用材料为C30及C40。结构平面规则、对称。有限元模型层高3m，共60层，长边布置7跨，短边5跨，柱底刚性连接。所有ANSYS分析统一采用标准单位：位移：m；力：N；时间：s；质量：kg

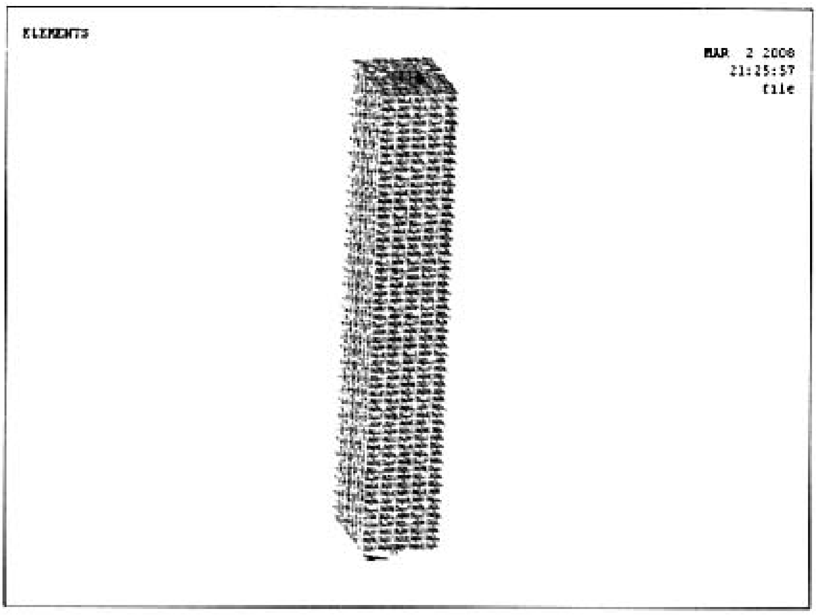



图 4.3 ANSYS有限元模型

ANSYS 建模过程中，采用梁单元中的BEAM188来模拟结构中的梁与柱；用壳单元SHELL63模拟筒体和楼板，楼板厚度取200mm，筒体厚度取350mm。

BEAM188 是基于铁木辛柯(Timoshenko)梁理论的，并考虑了剪切变形的影响，是一个二节点的三维线性梁。并具有显示单元横截面的优点，可以据此判断单元方向是否正确。SHELL63 为弹性壳，具有弯曲能力和薄膜特性，可以承受平面内荷载和法向荷载；每个节点 6 个自由度：X，Y，Z 方向的平动和绕节点坐标系 X、Y、Z 轴的转动；应力刚化和大变形能力已考虑在其中；在大变形分析（有限转动中）可以采用不变的切向刚度矩阵。

模型划分为 9882 个节点（不包含梁单元的方向节点），每个节点考虑三个自由度,即总自由度数为 29646 个。

## 4.3 风振响应计算

### 4.3.1 动力特性分析

模态分析用于确定设计结构的振动特性，即结构的固有频率及振型，它们是受动荷载结构设计中的重要参数，同时也是谱分析的前期分析过程。

ANSYS 提供了 7 种模态提取方法：子空间法、分块 Lanczos 方法以、动力学方法、缩减法、非对称法、阻尼法及 QR 阻尼法。子空间法使用了迭代技术，采用了完整的质量和刚度矩阵，精度很高，但计算速度较慢。对于高层建筑，低阶振型起控制作用，对位移和内力的贡献较大， 一般不需要求得结构的各阶特征值，只需要计算起控制作用的前几阶，所以本文在结构分析中采用计算精度很高的子空间迭代法，提取结构前 10 阶振型。

模态分析所得各阶固有频率如表（4.1）：

表 4.1 结构前十阶自振频率

| 阶数 | 频率 | 周期 |
|---|---|---|
| 1 | 0.17075 | 5.8565215 |
| 2 | 0.18752 | 5.332765 |
| 3 | 0.42041 | 2.37863 |
| 4 | 0.70509 | 1.418259 |
| 5 | 0.7994 | 1.250938 |
| 6 | 1.2571 | 0.795482 |
| 7 | 1.6236 | 0.615915 |
| 8 | 1.8664 | 0.535791 |
| 9 | 2.0841 | 0.479823 |
| 10 | 2.4659 | 0.405531 |
| 11 | 2.6724 | 0.374195 |
| 12 | 2.7548 | 0.363003 |

由表可知，所设计的结构算例的第一阶自振频率 0.17075 与 NIST 的结构模型基本一致。

为了方便应用前面的 CQC 和 SRSS 计算公式，模态分析过程已实现对质量矩阵归一化，即所得振型为主振型。各阶振型如图：

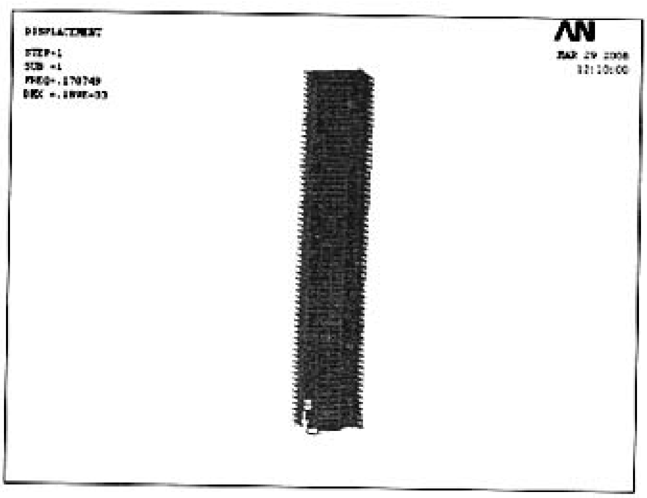



图 4.4 结构第一阶振型

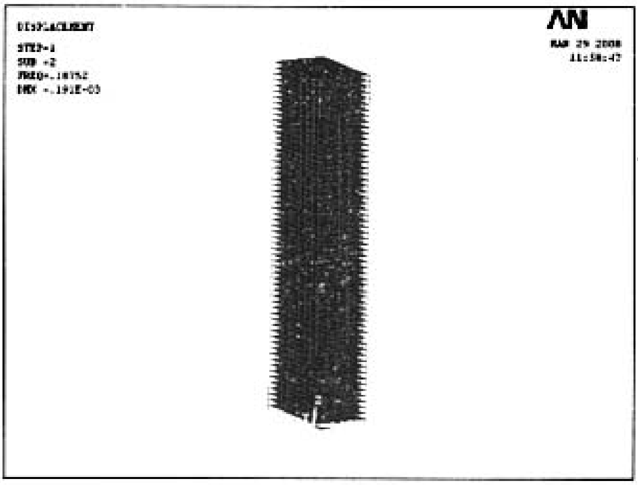



图 4.5 结构第二阶振型图

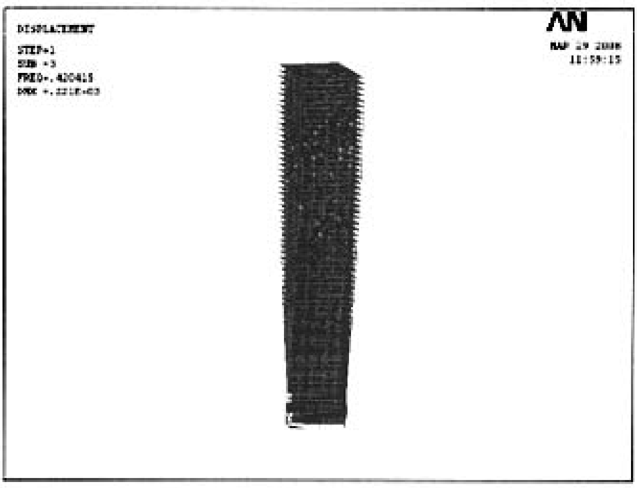



图 4.6 结构第三阶振型图

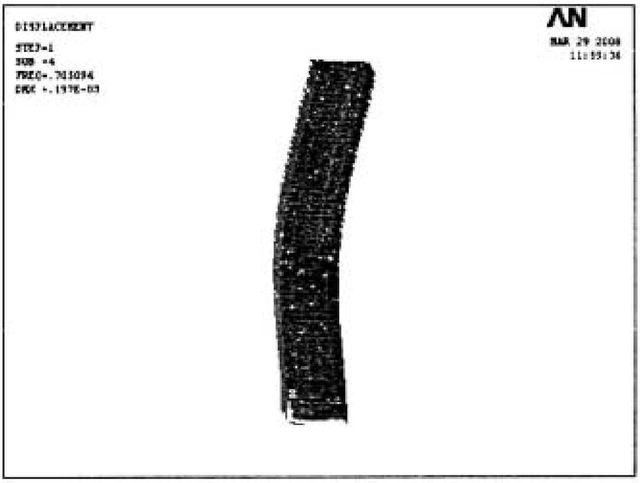



图 4.7 结构第四阶振型图

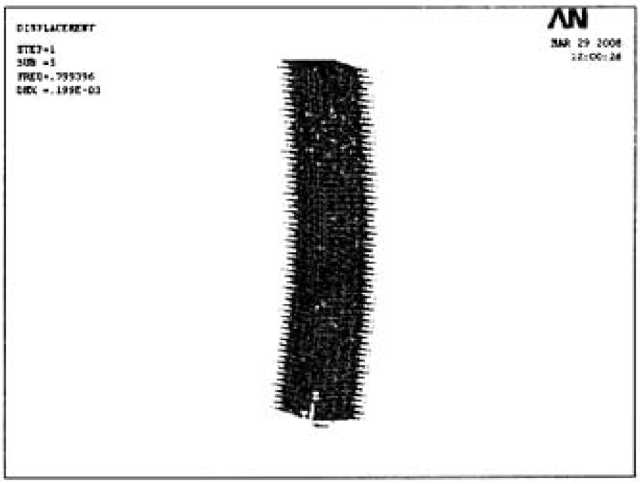



图 4.8 结构第五阶振型

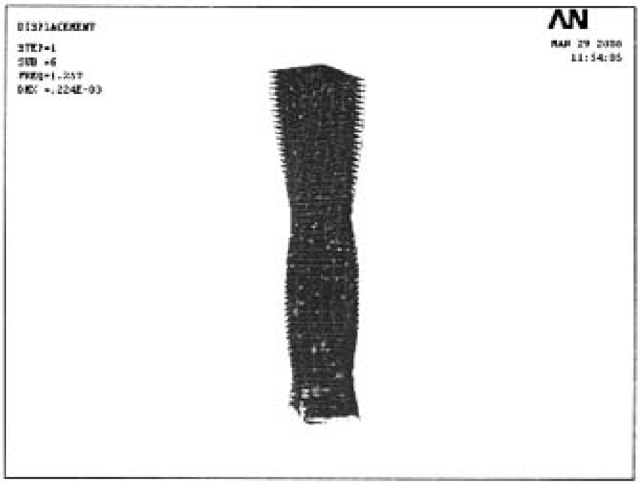



图 4.9 结构第六阶振型

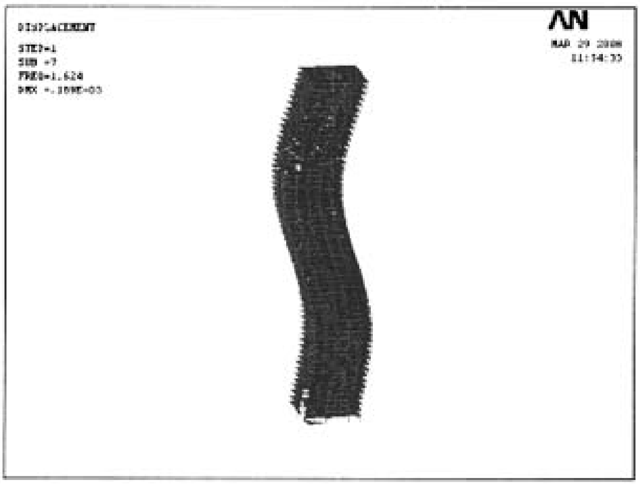



图 4.10 结构第七阶振型

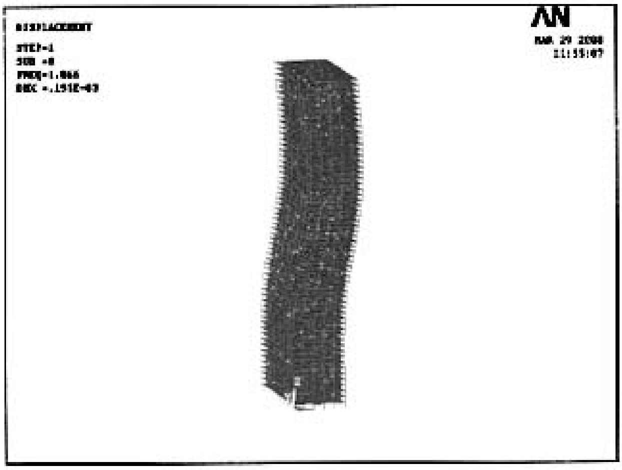



图 4.11 结构第八阶振型

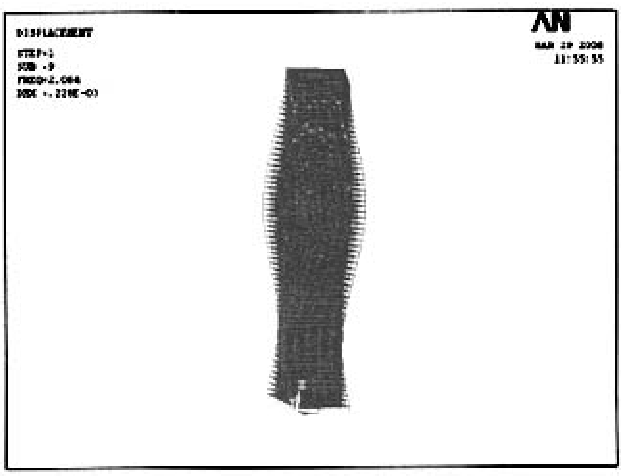



图 4.12 结构第九阶振型

由上图可知， 第一、二振型分别为顺风向与横风向的平动，第三振型为扭转，即前三个振型只代表了三个位移分量的第一阶振动（两个平移，一个扭转）。为了考虑振型相关性，计算时取前 9 阶振型，即考虑各个位移分量的前三阶振

型。

### 4.3.2 阻尼参数的确定

在上一章所用到的CQC方法和SRSS方法的公式进行风振响应计算时，除了利用了质量与刚度矩阵的正交性条件，还假设不同振型对阻尼矩阵的正交性条件。显然，若没有关于阻尼矩阵的正交性假设，则动力平衡的基本方程组仍是联立的而不可能得到简化。本文采用目前通用的瑞雷阻尼假设[33]：

$$[C]=a[M]+b[K] \tag{4.1}$$

其中，a，b为两个待定常数。

由于振型向量对质量矩阵和刚度矩阵的正交性条件，可知由式（4.1）得到的阻尼矩阵也满足正交性条件。待定常数a，b与振型阻尼比为

$$\varsigma_j=\frac{C_j^*}{2\omega_j M_j^*}=\frac{\{\phi\}_j^T[C]\{\phi\}_j}{2\omega_j M_j^*} \tag{4.2}$$

由$K_j^*=\omega_j^2 M_j^*$可得

$$\varsigma_j=\frac{1}{2}\left(\frac{a}{\omega_j}+b\omega_j\right) \tag{4.3}$$

为了确定a，b值，通常通过结构的第一、二两个振型的阻尼比值$\varsigma_1$，$\varsigma_2$以及相应的频率$\omega_1$，$\omega_2$，分别代入（5.3.3），联立求解得：

$$a=\frac{2\omega_1\omega_2\left(\varsigma_1\omega_2-\varsigma_2\omega_1\right)}{\omega_2^2-\omega_1^2} \tag{4.4}$$

$$b=\frac{2\left(\varsigma_2\omega_2-\varsigma_1\omega_1\right)}{\omega_2^2-\omega_1^2} \tag{4.5}$$

对于此结构，将$f_1=0.17Hz$，$f_2=0.18Hz$，对于高层建筑结，其阻尼比分布在0.01-0.02之间，此处取阻尼比$\varsigma_1=\varsigma_2=0.015$，代入计算得$a=0.0164788966$；$b=0.0136418523$。

从而计算得此结构的各阶阻尼比如下表：

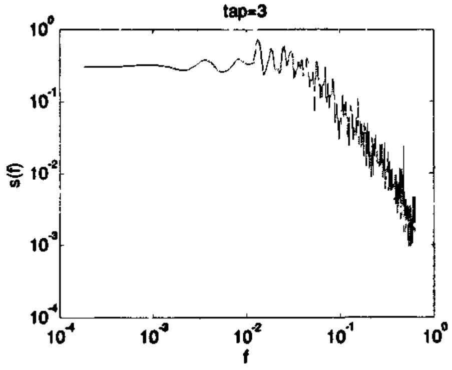
表 4.2 结构阻尼比

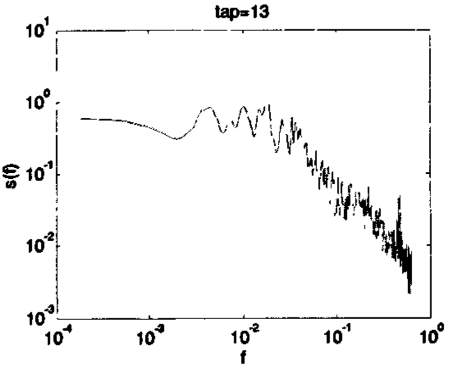
| 振型号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阻尼比 | 0.015 | 0.015 | 0.021 | 0.032 | 0.036 | 0.055 | 0.070 | 0.081 | 0.090 | 0.106 |

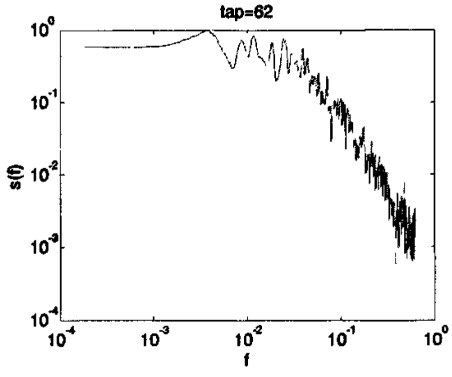
### 4.3.3 脉动风压谱分析

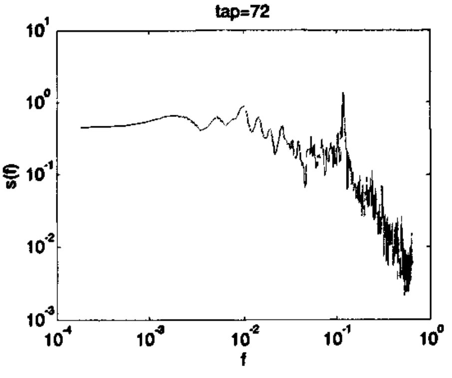
平均风荷载以集中力的方式施加在 ANSYS 有限元模型相应的荷载输入点上；脉动风荷载部分所对应的结构位移响应计算经过风荷载互谱分析得到风压谱，并且将互谱的实部与虚部分别进行计算，进而用第四章所编 CQC 方法和 SRSS 方法程序计算其响应根方差。

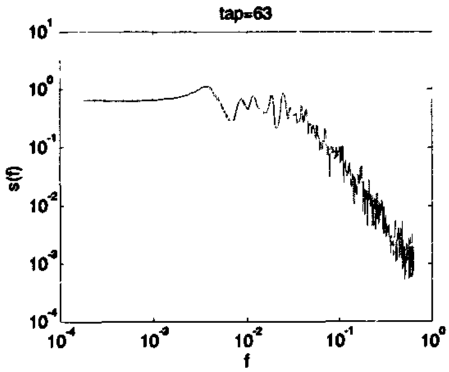
本节分别在迎风面、背风面、两侧面各选取三个测点进行风压自谱分析，各点脉动风压谱密度分布见下图：





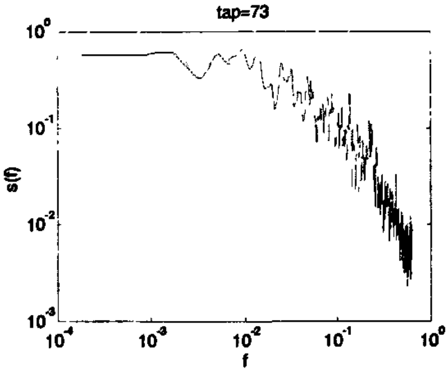
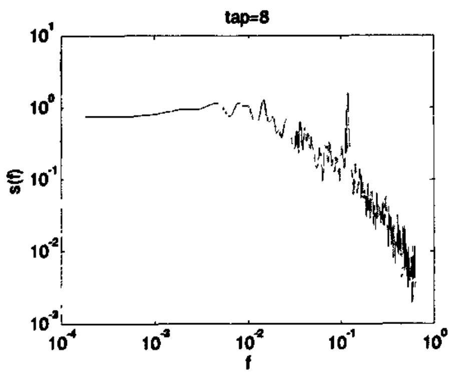
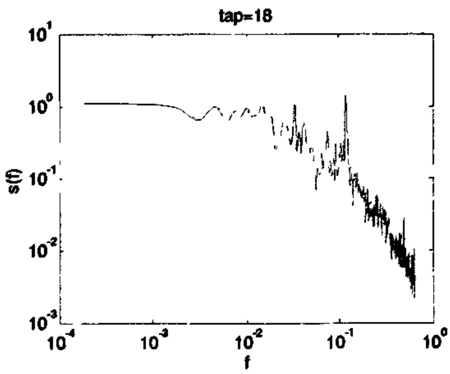
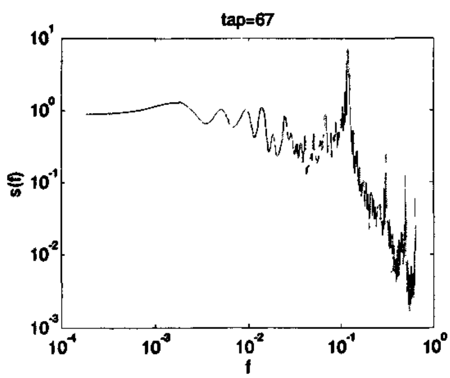



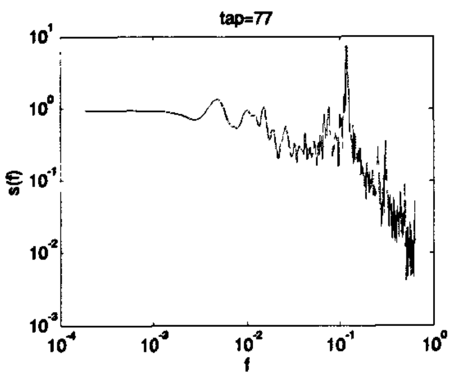

图 4.13 迎风面上各测点风压自谱曲线图

图 4.14 背风面上各测点风压自谱曲线图



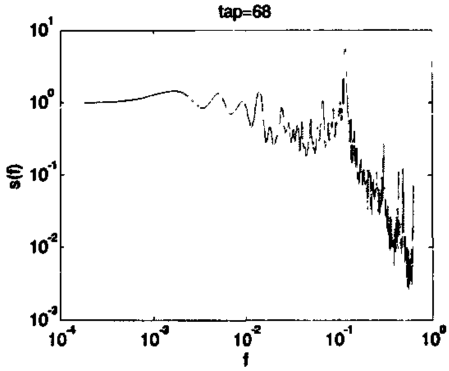



图 4.15 东侧面上各侧点风压自谱曲线

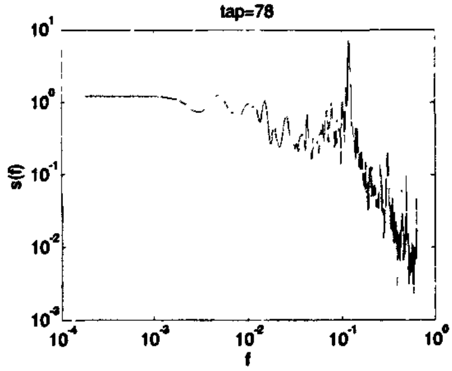



图 4.16 西侧面上各侧点风压自谱曲线

### 4.3.4 风振响应分析

本文在风振反应分析中，同时考虑顺、横两个方向的作用力引起的位移响应。

平均风荷载以集中力的方式施加在 ANSYS 有限元模型相应的荷载输入点上，通过静力分析便得到平均风下各节点位移；脉动风荷载所对应的结构位移响应计算经过风荷载谱分析得到风压谱，并且将互谱的实部与虚部分别进行计算，进而用第四章所编 CQC 方法和 SRSS 方法程序计算其响应根方差。

风振位移计算时，会产生大量随机点荷载，并且考虑到各荷载之间的相关性，计算量非常大。本文通过采用稀疏矩阵格式存取力指示矩阵，将风洞试验测压点的物理编号与计算模型中的加载节点编号联系起来，对于由风洞实验数据计算得到的脉动风压谱矩阵，计算时采用矩阵的特征值分解即本征正交分解进行计算，以降低内存需求，减少计算时间。

振动分析时，所有节点参与计算，但结果分析只针对少数节点。各节点位置坐标如下表：

表 4.3 结果分析所取节点的坐标 (单位：m)

| 节点号 | X 坐标 | Y 坐标 | Z 坐标 |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 24.384 | 30.48 |
| 2 | 0 | 24.384 | 60.96 |
| 3 | 0 | 24.384 | 91.44 |
| 4 | 0 | 24.384 | 121.92 |
| 5 | 0 | 24.384 | 152.4 |
| 6 | 0 | 24.384 | 182.88 |

表 4.4 各节点平均风下位移（单位：m）

| 节点号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 顺风向位移 | 0.02702 | 0.08161 | 0.14669 | 0.21202 | 0.27243 | 0.32724 |
| 横风向位移 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00003 | -0.00003 | -0.0001 | -0.0002 |

位移结果分析主要针对前三阶振型和前九阶振型，分别给出了使用CQC方法和SRSS方法计算的部分节点顺风向和横风向位移响应均方根。其中CQC方法一表示只考虑互谱实部的通常作法，CQC方法二表示同时考虑互谱实部与虚部的影响，即本文所采用的计算方法。

当只考虑前三阶振型时，其实质只考虑了分别代表三个位移分量第一阶振动的影响，部分节点位移响应根方差结果如表表 4.5 和表 4.6 ：

表 4.5 SRSS 与 CQC 法计算的顺风向位移响应根方差（单位：m）

| 节点号 | CQC 方法二 | CQC 方法一 | SRSS 方法 |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.00450 | 0.00451 | 0.00451 |
| 2 | 0.01419 | 0.01419 | 0.01418 |
| 3 | 0.02640 | 0.02641 | 0.02639 |
| 4 | 0.03911 | 0.03911 | 0.03910 |
| 5 | 0.05134 | 0.05135 | 0.05133 |
| 6 | 0.06258 | 0.06259 | 0.06257 |

表 4.6 SRSS 与 CQC 法计算的横风向位移响应根方差（单位：m）

| 节点号 | CQC 方法二 | CQC 方法一 | SRSS 方法 |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.00490 | 0.00490 | 0.00490 |
| 2 | 0.01578 | 0.01578 | 0.01578 |
| 3 | 0.02977 | 0.02977 | 0.02977 |
| 4 | 0.04449 | 0.04448 | 0.04448 |
| 5 | 0.05893 | 0.05893 | 0.05893 |
| 6 | 0.07262 | 0.07265 | 0.07262 |

当考虑结构前九阶振型时，即考虑三个位移分量的前三阶振型，计算结果如表4.7和表4.8：

表 4.7 SRSS与CQC法计算的顺风向位移响应根方差（单位：m）

| 节点号 | CQC方法二 | CQC方法一 | SRSS方法 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 0.00491 | 0.00485 | 0.00460 |
| 2 | 0.01487 | 0.01480 | 0.01434 |
| 3 | 0.02714 | 0.02697 | 0.02648 |
| 4 | 0.03919 | 0.03926 | 0.03913 |
| 5 | 0.05097 | 0.05109 | 0.05138 |
| 6 | 0.06221 | 0.06224 | 0.06265 |

表 4.8 SRSS与CQC法计算的横风向位移响应根方差（单位：m）

| 节点号 | CQC方法二 | CQC方法一 | SRSS方法 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 0.00532 | 0.00542 | 0.00498 |
| 2 | 0.01658 | 0.01678 | 0.01586 |
| 3 | 0.03054 | 0.03077 | 0.02991 |
| 4 | 0.04481 | 0.04492 | 0.04452 |
| 5 | 0.05865 | 0.05857 | 0.05894 |
| 6 | 0.07168 | 0.07137 | 0.07267 |

由表4.5、表4.6、表4.7和表4.8可以看出，当只考虑结构的前三阶振型时，由于各阶振型为三个位移分量（两个平移，一个扭转）的第一阶振型，因此CQC方法与SRSS方法几乎不存在差异。当考虑前九阶振型时，位移响应根方差结果与考虑三阶振型时，差别不大，这是因为对于高层建筑而言，往往是低阶振型占优。

在此风力作用下，该超高层建筑横风向振动效应比顺风向更为显著，并且结构的顺风向振动与横风向振动位移响应根方差结果同时显示：在结构的中部，SRSS方法与CQC方法结果最为接近；在结构底部，CQC计算结果略大于SRSS方法；在结构顶部，CQC方法结果略小于SRSS方法。

CQC方法二计算的结构位移响应根方差与CQC方法一结果比较表明，当考虑互谱虚部时，顺风向脉动风作用下底部位移响应略大于不考虑虚部时的结果，而顶部位移响应前者略小于后于；横风向刚好则相反。相对于不考虑互谱虚部的CQC方法一和SRSS方法之间的差值而言，考虑互谱虚部的CQC方法二与CQC方法一的差值大约在它的10%到30%之间。

由于此高层建筑算例还是低阶振型占优，模态分布并不密集，振型交叉项

影响不强，即便考虑高阶振型，CQC 方法与 SRSS 方法计算结果差异并不是非常明显，因此本文所述的考虑互谱虚部的 CQC 方法有待在模态分布密集的大跨屋盖等复杂结构上进行进一步研究。

## 4.4 本章小节

考虑到严格采用上一章所述的 CQC 法，则所有测点数据必须完全严格同步测试。本文由于实验数据及实际结构的缺乏，未能对模态分布密集的大跨屋盖结构进行方法的验证。本章在获取 NIST 提供的同步测压数据基础上，自行设计了一外形与 NIST 实验模型完全一致的高层建筑结构算例。

计算首先利用大型通用软件 ANSYS 对此典型高层建筑结构进行模态分析，以获取其自振频率与振型，为接下来的风压谱分析及风振响应计算奠定基础。

两节点间互谱的计算对实部与虚部分别进行考虑，采用稀疏矩阵和谱分解法进行数据存储与计算，以降低对计算机的内存需求，减少计算时间。

通过 SRSS 法与 CQC 法计算结果对比可看出，对于该超高层建筑，忽略模态耦合项的 SRSS 方法与 CQC 方法结果存在较小差异。由于高层建筑模态分布相对比较稀疏，导致位移响应差异并不明显。因此此方法有待在模态分布密集的大跨屋盖上进行进一步的研究。

# 第5章 结论与展望

## 5.1 本文工作总结

结构抗风分析的理论方法主要有频域分析法和时域分析法，频域分析方法因其概念清晰、计算简便而在线性结构风振响应中得到了广泛的应用。

本文首先对结构风工程中的结构动力学方法主要是频域分析方法的发展历史与研究现状进行了概述，并简要介绍了随机振动基本理论及脉动风的基本特性。采用韦尔奇方法编制了同时计算风压自谱与互谱的计算程序，在获取风压自谱、互谱实部与虚部的基础上，编制了考虑了模态间耦合效应的 CQC 方法进行风振响应分析。主要工作有以下几个方面：

(1) 以 FORTRAN 为软件平台，按照韦尔奇方法估计脉动风压谱，通过参数化设置，程序可以方便地获取任意所需测点的自谱及测点间的互谱的实部、虚部。程序中对样本采用交叠方式分为若干段计算以提高结果的精度，应用了加窗技术以防止谱泄漏。对正弦波和 Davenport 谱进行采样，分析其谱密度，检验了所用计算谱程序的正确性。

(2) 本文采用 CQC 方法进行风振响应计算，此 CQC 方法不忽略互谱虚部的影响，将脉动风压互谱实部与虚部分别进行考虑。

(3) 编制了 CQC 方法、SRSS 方法风振响应计算程序。无穷积分段采用简单有效的复合梯形公式进行数值计算。并通过一个简单的例子证明了程序的正确性。

(4) 通过对一典型高层结构算例进行风振响应计算，验证了 SRSS 方法与 CQC 方法在计算大型结构风振响应计算时结果之间存在差异，建议对模态分布密集的大型复杂结构应采用考虑模态耦合效应的 CQC 算法计算风振响应以减少计算误差。

## 5.2 进一步研究的建议

由于大跨屋盖模态密集的特点较高层建筑更为突出，更不能忽略模态交叉项对结构风振响应的影响。本文所述的 CQC 方法有待于进一步应用于大跨屋盖结构。

应结合更多大型结构的试验数据对风压互谱虚部进行分析研究，以期待能用经验函数进行表达，更加方便地使用本文所述的 CQC 方法进行风振响应分析。

本文使用 FORTRAN 编制的 CQC 方法等计算结构风振响应程序，有待于将算法流程与数据组织通过 ANSYS 等软件的接口与 ANSYS 核心求解器联系起来，使计算更为方便顺畅。

本文所取算例是基于风洞实验数据进行位移响应分析，但由风洞实验所获取的数据是否能合理反映实际结构各点风荷载的空间相关性还有待进一步研究。

# 致 谢

本论文是在导师王国砚教授的悉心指导下完成的。导师严谨的治学态度、广博的学识、敏锐的学术洞察力及开放的学术作风让我受益匪浅，使我在学习能力、独立科研能力等方面得到了很好的锻炼。在论文完成之际，对导师在学习与生活上所给予的关心与帮助表示由衷的感谢。

感谢黄本才教授在我写论文期间给予了耐心而细致的指导与帮助。

感谢朱小平博士、张继峰博士、汪丛军博士、史益军同学在我的论文遇到困难时给予的帮助。

感谢同济大学力学实验楼研究生学习室的全体同学，和你们一起度过的学习时光，是我生命中美好的回忆，

特别要感谢我的家人，他们一如既往地支持我，是我永远的精神支柱和前进的动力。在此我对他们表示深深的谢意。

2008 年 3 月

# 参考文献

[1] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用.同济大学出版社. 2001
[2] AAWE. Wind Engineering Research and outresearch plan to reduce losses due to wind harzards[J]. American Society of Civil Engineers. 2004
[3] 国外高层建筑抗风译文集. 上海:上海科学技术文献出版社，1979
[4] 梁必骐. 自然灾害的影响与防范. 广东气象. 2007.Vol.29（3）39-41
[5] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策.自然灾害学报. 2006,Vol.15(4),1-6
[6] 谢强,张勇,李杰. 华东电网 500kV 任上 5237 线飑线风致倒塔事故调查分析.电网技术，2006, Vol.30 (10), 59-63, 89
[7] 葛楠. 高层建筑风振问题的研究. 中国建筑科学研究院博士论文. 2006
[8] 贺德馨. 我国风工程研究现状与展望. 力学与实践. 2002,Vol.24:10-19
[9] 项海帆. 结构风工程研究的现状和展望. 振动工程学报.1997.Vol.10(3):258-263
[10] 杨伟. 于 RANS 的结构风荷载和响应的数值模拟研究. 同济大学博士论文. 2004
[11] Tetsuro Tamura. Reliability on CFD estimation for wind-structure interaction problems, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.1996,8 vol1(11) :7-143
[12] 秦云,张耀春,王春刚. 计算流体动力学在建筑风工程中的应用. 哈尔滨工业大学学报,2003,Vol.35(8):977-981
[13] DOKAINISH M A,SUBBARAJ K. A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics—I. Explicit methods[J] Computers& Structures. 1989, 32(6): 1371—1386.
[14] DOKAINISH M A，SUBBARAJ K. A survey of direct time—integration methods in computational structural dynamics—Ⅱ. Implici t methods[J]. Computers& Structures，1989, 32(6):1387—1401.
[15] ZHONG W X, WILLIAMS F W. A precise time step integration method[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1994,208: 427—430.
[16] 李渊印,金先龙,李丽君,李根国. 结构动力响应精细时程法的一种并行算.计算力学学报.2005.Vol.22(5):575-577
[17] [英]纽兰. 随机振动与谱分析概论.机械工业出版社. 1978 年
[18] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海：同济大学出版社, 1990
[19] 星谷胜. 随机振动分析[M]. 北京: 地震出版社, 1977
[20] E L Wilson, et, A replacement for the SRSS method in seismic analysis[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1981,Vol.9: 187-194
[21] Der Kiureghian, Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic exaitations. Earthquake Engineering and Structure Dynamics.1992,Vol.21：713-740
[22] Ernesto H Z , Vanmarcke E H. Seismic random-vibration analysis of multisupport-structural systems. ASCE.Journal of Engineering Mechanics.1994.120(5) :1107-1128
[23] Lin JH, Williams FW, Zhang WS. A new approach to multi-excitation stochastic seismic response. Micro Computers in Civil Engneering,1993,Vol.8(4): 283-290
[24] 林家浩,钟万勰. 关于虚拟激励法与结构随机响应的注记.计算力学学报.1998.Vol.5
[25] 孙东科,林家浩等. 复杂结构的风激随机振动分析. 机械工程学报, 2001, Vol.37(3),55-61

[26] Yasushi Uematsua, et. Takeshi Hongod Wind-induced dynamic behavior and its load estimation of a single-layer latticed dome with a long span. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2001. Vol.89: 1671–1687

[27] 王国砚, 黄本才,林颖儒,徐晓明. 基于 CQC 方法的大跨屋盖结构随机风振响应计算. 空间结构.2003.Vol.12: 22-26

[28] 张昕,黄本才等. 体育场悬挑屋盖空间风激动力响应和等效风荷载实用计算. 建筑结构学报. 2005. Vol.26(2): 40-45

[29] 周晅毅.大跨屋盖结构风荷载及风致响应研究. 同济大学博士论文. 2004

[30] 顾明,黄鹏.北京首都机场3号航站楼风荷载和响应研究.土木工程报.2005.Vol.38(1):40-44

[31] 谢壮宁. 风致复杂结构随机振动分析的一种快速算法-谐波激励法.应用力学学报. 2007.Vol.24(2):263-266

[32] 汪丛军. 体育场环状悬挑屋盖风荷载特性及风振分析. 同济大学博士论文. 2007

[33] 张相庭,王志培,黄本才,王国砚. 结构振动力学. 同济大学出版社.2005

[34] 赵国潘,曹居晚, 张宽权. 工程结构可靠度. 水利电力出版社.1984

[35] 李桂青,曹宏,李秋胜,霍达. 结构动力可靠性理论及其应用.地震出版社 1993

[36] 张相庭. 结构风压和风振计算. 同济大学出版社.1985

[37] 张相庭. 工程抗风设计计算手册. 中国建筑工业出版社.1998

[38] (美)埃米尔·希缪,（美）罗伯特·H·斯坎伦著.风对结构的作用. 同济大学出版社.1992.3

[39] R.H.Barnard. Predicting dynamic wind loading on cantilevered canopy roof structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2000 Vol.85:47-57

[40] J.G. Zhao, K.M. Lam. Characteristics of wind pressures on large cantilevered roofs:effect of roof inclination. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002 Vol.90:1867-1880

[41] N.Lakshmanan, S.Arunachalam, S.Selvi Rajan, G.Ramesh Babu, J.Shanmugasundaram. Correlations of aerodynamic pressures for prediction of across wind response of structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002.Vol.90:941-960

[42] Correlations of aerodynamic pressures for prediction of across wind response of structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2002. Vol.90:941–960

[43] P. Biagini, C. Borri_, M. Majowiecki, M. Orlando, L. Procino.BLWT tests and design loads on the roof of the new olympic stadium in Piraeus.Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2006 Vol.94:293–307

[44] 赵臣,张小刚,吕伟平.具有空间相关性风场的计算机模拟.空间结构.1996.Vol.2(2):21-25

[45] 胡广书. 数字信号处理—理论.算法与实现. 清华大学出版社, 1997.

[46] E.O.Brigham, The Fast Fourier Transform and its Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1988. M

[47] 赵红怡,张常年. 数字信号处理及其 MATLAB 实现[M] 北京：化学工业出版社, 2002

[48] 刘锡良,周 颖.风荷载的几种模拟方法.工业建筑.2005.Vol.35(5):81-84

[49] 俞载道. 结构动力学基础. 上海: 同济大学出版社. 1987

[50] 李本悦,楼文娟,邓华.大跨度屋面风压分布的插值计算方法.空间结构.2003.Vol.9(4):17-21

[51] http://www.nist.gov/winds

# 攻读硕士期间发表的文章

唐娟，王国砚. 复杂体型高层建筑风压分布及群体干扰效应数值模拟研究，第十三届全国结构风工程学术会议论文集. 2007 年 10 月。

唐娟，王国砚. 复杂体型高层建筑风压分布及干扰效应数值研究，结构工程师. 2008 年第 2 期。