
目录

1	程序原理	3
1.1	风荷载动力分析方法简介	3
1.2	风速时程模拟的 AR 法	4
1.2.1	AR 模型.....	4
1.2.2	AR 模型模拟风速时程的基本过程.....	5
1.3	风时程生成程序实现.....	7
1.4	风时程生成程序特点.....	9
1.5	风时程生成程序局限性说明	10
2	参数说明	11
2.1	顺向脉动风速功率谱密度函数 $S_v(n)$	11
2.2	脉动风空间相干函数 r_{ij}	13
2.3	地面粗糙系数 k (紊流度)	14
2.4	平均风速 \bar{v}	14
2.5	风压力时程 $F_w(x, y, z, t)$	16
2.6	数值计算的参数	17
3	操作说明	18
3.1	制作空间点信息表格 (*.csv)	18
3.2	导入表格及输入参数.....	19
3.3	计算风时程	20
3.4	显示计算结果	20
3.5	输出时程结果及分析代码.....	21
3.6	接力 SAP2000 进行时程分析.....	21
3.7	接力 ETABS 进行时程分析.....	22
3.8	SAP2000 与 ETABS 的分析代码例子	23
3.8.1	ETABS 分析代码.....	23

3.8.2	SAP02000 分析代码:	24
4	计算实例	25
4.1	操作步骤	25
4.2	24 层框架风振分析结果分析	29
4.2.1	风速时程结果	29
4.2.2	风振分析计算结果与按现行《荷载规范》得出的结果对比.....	31
4.2.3	风振分析的顶点加速度计算与按《高钢规》手算结果对比.....	32
5	关于风振时程分析的若干建议	34
5.1	分析参数设置	34
5.2	输出结果处理	34
6	参考文献	36

1 程序原理

1.1 风荷载动力分析方法简介

风荷载是作用在结构上的重要动力荷载之一，尤其对于高层、高耸及大跨结构来说，设计中必须考虑风荷载的作用。计算高层、大跨、悬索桥以及塔架结构的动力风振相应的一个有效方法是 Monte Carlo 法。即根据某些既定的统计参数产生一系列的时程样本，再对每个样本函数进行线性或非线性的结构分析。通过对结构不同单元在样本函数下的时程响应的统计分析，计算整个结构是否安全。在结构特定点上的风速通常认为是稳定的随机过程，其特性可完全由谱密度函数确定。目前，通常对于风敏感复杂结构的风振响应分析和风振系数的求解主要有以下 4 种方法：（1）频域分析法、（2）时域分析法、（3）风洞试验法、（4）数值风洞技术。其中，本程序采用时域分析法对结构进行风荷载的动力分析。

时域分析法直接运用风洞试验的风压时程或计算机模拟的风压时程作用于屋面结构进行风振响应时程分析。然后通过动力计算得到结构的动力响应，统计结构动力响应从而算得结构的风振系数。采用时域分析法，可以考虑自然风的时间相关性和结构非线性影响，更精确地反映结构的耦合风振情况。

由于风荷载可分解为平均风和脉动风，如图 1-1，对于脉动风部分，借助经验公式给出的各种功率谱函数，可以从频域和时域两方面来分析。

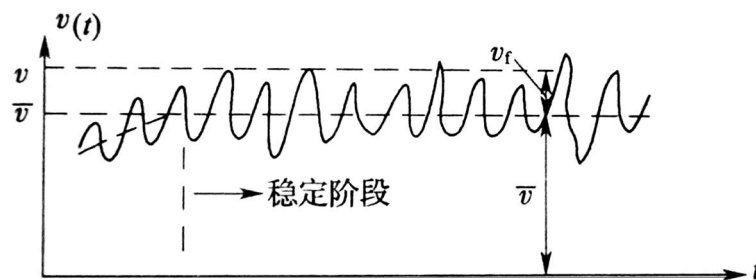


图 1-1 脉动风速 v_f 、瞬时风速 v 和平均风速的关系 \bar{v}

基于线性迭加的频域分析方法概念清晰、简便，因此在工程中应用广泛。但不能给出反应的相关函数、瞬态反应，不能进行非线性结构分析，且对于大跨结构，由于其频率密集，因此在计算中应取多少阶模态，怎样补偿模态截断的能量损失，仍是一个问题。而时域分析法与之相比较，其优点表现为：时域法能进行较精确的非线性分析；响应量值如位移、力或加速度的最大值可以直接求出；在缺乏实测或试验资料的情况下，各种简化计算方法可以与

精确的时域分析方法进行比较验证；通过时域的信息可以获得幅值域及频域的信息。因此，研究时域模型一直是随机过程模拟的重要内容，时域模拟就是要通过已知的频域信息重现时程样本。

主要的时域模拟方法有：（1）线性滤波法模拟、（2）谐波叠加法模拟、（3）逆 Fourier 变换法模拟、（4）小波分析。

1.2 风速时程模拟的 AR 法

近年来，线性滤波法中的自回归（Auto-Regressive，简称 AR）模型因其计算量小、速度快，广泛用于随机振动和时间系列分析中。该模型将均值为零的白噪声随机系列通过线性滤波器，使其输出为具有指定谱特征的平稳随机过程。本程序采用线性滤波法的自回归模型计算。

1.2.1 AR 模型

任何平稳随机信号 $x(n)$ 都可以看成由白噪声 $w(n)$ 激励一个因果稳定的可逆系统 $H(z)$ 产生的输出。AR 模型将均值为零的白噪声随机系列通过线性滤波器，使其输出为具有指定谱特征的平稳随机过程。

自回归(AR)模型的系统函数 $H(z)$ 为:

$$H(z) = \frac{G}{1 + \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}} \quad (1-1)$$

式中， G 为系统增益，可取为 1； a_1, a_2, \dots, a_p 为待定参数。

AR 模型的系统函数只有极点没有零点，故 AR 模型又称为全极点模型。模型的阶由分母多项式的阶 p 决定。如果在白噪声 $w(n)$ 激励下的输出为 $x(n)$ ，则模型输入、输出关系的时域表达式为:

$$x(n) + \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) = Gw(n) \quad (1-2)$$

上式为 AR 模型的差分方程。

AR 模型的一个重要特性是输出的自相关函数具有递推特性，这个递推关系便可表

示为:

$$R_x(m) = \begin{cases} -\sum_{i=1}^p a_i R_x(m-i), m=1, 2, \dots, p \\ -\sum_{i=1}^p a_i R_x(i) + G^2, m=0 \end{cases} \quad (1-3)$$

上式就是 AR 模型的正则方程, 也叫 Yule-Walker 方程。

1.2.2 AR 模型模拟风速时程的基本过程

在满足工程计算精度要求的前提下, 可对风速时程作以下假定: (1) 任意一点处平均风速不随时间改变; (2) 脉动风速时程是零均值平稳随机过程; (3) 风速时程间具有空间相关性, AR 法模拟风速时程的基本过程。

采用 AR 法推广到模拟多维风速时程的技术, M 个点空间相关脉动风速时程 $V(x, y, z, t)$ 列向量的 AR 模型可表示为:

$$V(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^p \psi_k V(x, y, z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (1-4)$$

式中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$, $y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$, $z = [z_1, z_2, \dots, z_M]^T$, (x_i, y_i, z_i) 为空间第 i 点坐标, $i=1, 2, \dots, M$; p 为 AR 模型阶数; Δt 是模拟风速时程的时间步长; ψ_k 为 AR 模型自回归系数矩阵, 为 $M \times M$ 阶方阵, $k=1, \dots, p$; $N(t)$ 为独立随机过程向量;

$$N(t) = L \cdot n(t) \quad (1-5)$$

式中, $n(t) = [n_1(t), \dots, n_M(t)]^T$, $n_i(t)$ 为均值为 0、方差为 1 的正态分布随机过程, $i=1, \dots, M$ 。

随机风过程的协方差 R 与回归系数 ψ 之间的关系可写成矩阵形式:

$$R \cdot \psi = \begin{bmatrix} R_N \\ O_p \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

$$\psi = [I, \psi_1, \dots, \psi_p]^T \quad (1-7)$$

$$R_N = R_0 + \sum_{k=1}^p \psi_k R(k\Delta t) \quad (1-8)$$

式中， ψ 为 $(p+1)M \times M$ 矩阵， I 为 M 阶单位矩阵； O_p 为 $pM \times M$ 阶矩阵，其全部元素为 0； R 为 $(p+1)M \times (p+1)M$ 阶自相关 Toeplitz 矩阵，形式如下：

$$R = \begin{bmatrix} R_{11}(0) & R_{12}(\square t) & R_{13}(2\square t) & \cdots & R_{1(p+1)}(p\square t) \\ R_{21}(\square t) & R_{22}(0) & R_{23}(\square t) & \cdots & R_{2(p+1)}[(p-1)\square t] \\ R_{31}(2\square t) & R_{32}(\square t) & R_{33}(0) & \cdots & R_{3(p+1)}[(p-2)\square t] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{(p+1)1}(p\square t) & R_{(p+1)2}[(p-1)\square t] & R_{(p+1)3}[(p-2)\square t] & \cdots & R_{(p+1)(p+1)}(0) \end{bmatrix}_{(p+1)M \times (p+1)M}$$

其中， $R_{ij}(m\square t)$ 是 $M \times M$ 阶矩阵， $i=1, \dots, p+1$ ； $j=1, \dots, p+1$ ； $m=0, \dots, p$ 。

功率谱密度与相关函数（协方差）之间符合维纳—辛钦（Wiener-Khintchine）公式，即：

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^{\infty} S_{ij}(f) \cos(2\pi f \cdot \tau) df, i, k = 1, \dots, M \quad (1-10)$$

式中， f 是脉动风速频率； $S_{ij}(f)$ 在 $i=j$ 时为脉动风速自谱密度函数，在 $i \neq j$ 时脉动风速互谱密度函数，可由脉动风速自谱密度函数 $S_{ii}(f)$ 和相关函数 $r_{ij}(f)$ 确定。

$$S_{ij}(\tau) = \sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \cdot r_{ij}(f) \quad (1-11)$$

$$r_{ij}(f) = \exp \left[\frac{-2n \sqrt{C_x^2(x-x')^2 + C_y^2(y-y')^2 + C_z^2(z-z')^2}}{\bar{v}(z) + \bar{v}(z')} \right] \quad (1-12)$$

$$\bar{v}(z) = \bar{v}(10) \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (1-13)$$

式中， $\bar{v}(10)$ 可根据《建筑结构荷载规范》GB50009-2001 规定的当地基本风压值反算出来：

$$\bar{v}_{10} = \sqrt{2g\omega_{10} / \rho} \quad (1-14)$$

式（1-11）中的 $S_{ij}(f)$ 、 $S_{ii}(f)$ 功率谱可采用 Davenport 谱、Simiu 谱、Hino 谱、Kaimal 谱、Harris 谱等形式。本程序采用采用 Davenport 谱。

求解（1-8）给出的线性方程组，可以得到回归系数矩阵 ψ 。

解方程可采用高斯约当法，求解结果稳定。

随机过程 $N(t)$

对由式 (1-10) 确定的 R_N 进行 Cholesky 分解:

$$R_N = L \cdot L^T \quad (1-15)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ L_{12} & L_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{M1} & L_{M2} & \cdots & L_{MM} \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

$$L_{ij} = \frac{R_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik} L_{jk}}{L_{ij}} \quad (i, j = 1, \dots, M) \quad (1-17)$$

$$L_{ii} = \sqrt{R_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik}^2} \quad (i, j = 1, \dots, M) \quad (1-18)$$

则可求出 $N(t)$ 。

由式 (1-4) 可得:

$$\begin{bmatrix} v^1(j \square t) \\ \vdots \\ v^M(j \square t) \end{bmatrix} = - \sum_{k=1}^p \psi_k \cdot \begin{bmatrix} v^1[(j-k) \square t] \\ \vdots \\ v^M[(j-k) \square t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N^1(j \square t) \\ \vdots \\ N^M(j \square t) \end{bmatrix}, \quad \left(\begin{array}{l} j \square t = 0, \dots, T \\ k \leq j \end{array} \right) \quad (1-19)$$

计算时, 假定初始时刻之前的风速为 0, 即 $t \leq 0$ 时, $V(t) = 0$ 。

最终的人工风速时程为

$$V(t) = \bar{v}(z) + v(t) \quad (1-20)$$

1.3 风时程生成程序实现

根据 1.2 所述的 AR 法模拟风速时程的方法, 通过面向对象的程序语言 Borland Delphi 7.0 编制具有前后处理及图形功能的风时程生成程序 WINDHIST PRODUCER v1.0, 通过程序可以模拟空间点的脉动风速时程, 总风速时程, 风压时程等。程序操作框图如图 1-2 所示, 程序总流程图如图 1-3 所示。

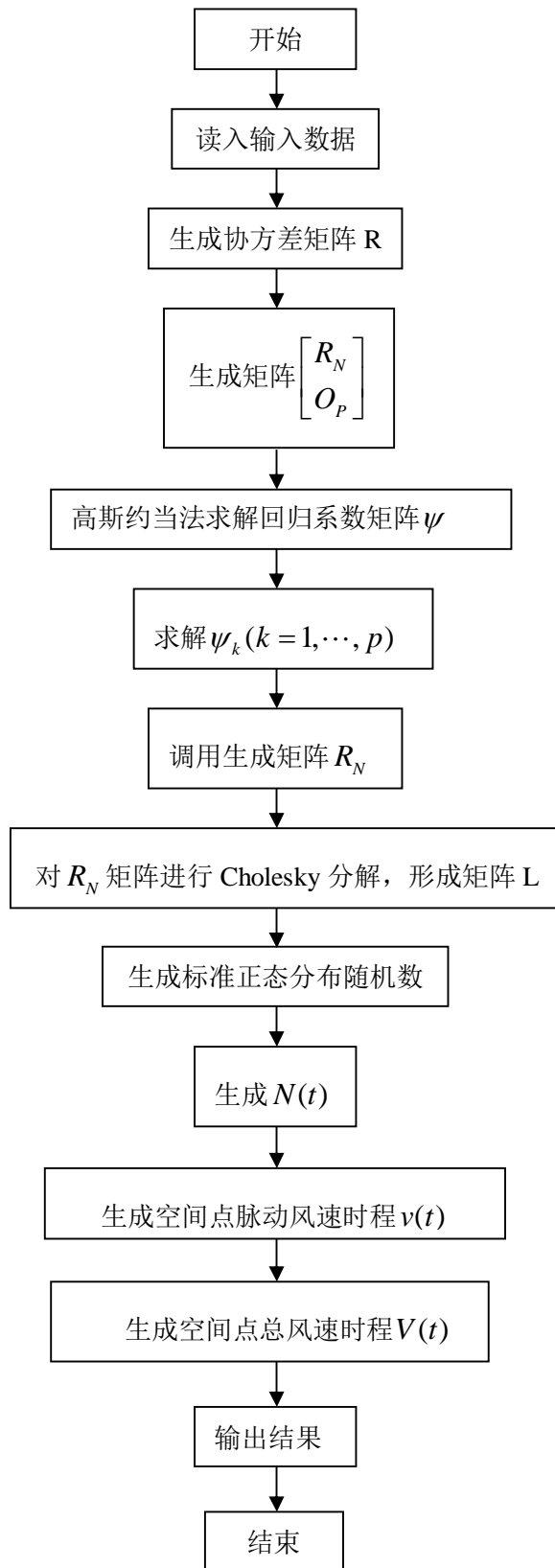


图 1-2 程序计算核心框图

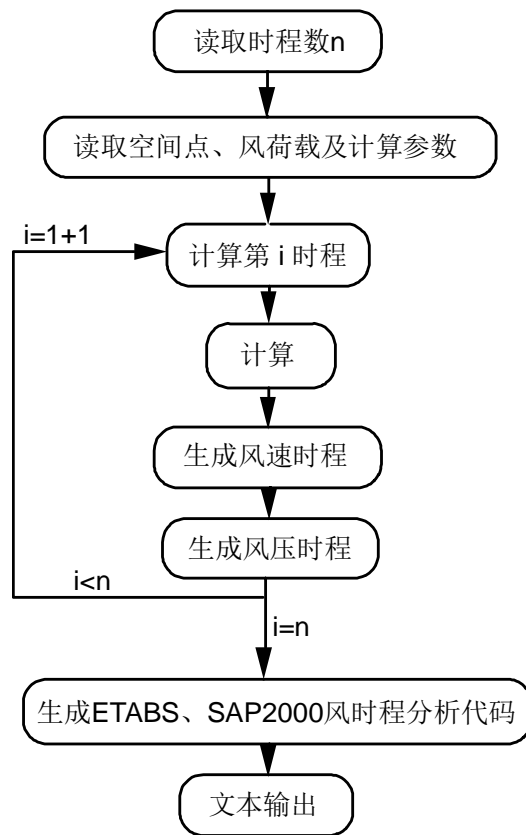


图 1-3 程序实现框图

1.4 风时程生成程序特点

WINDHIST PRODUCER V1.0 是由面向对象的程序语言编制，具有以下特点：

1. 对于基于 Matlab 程序的二次开发的 AR 法风时程生成方法，具有速度快、稳定性好及界面友好的特点；
2. 对计算核心中的计算参数可以手动调整，提高对计算的控制，如阶次、积分计算，频率范围等的控制；
3. 实时图形显示及输出，有利于观察生成风时程的特点，计算并输出最值及均值；
4. 快速文本输出风时程时程文本；
5. 批量生成多个风速时程，用于多时程动力分析；
6. 支持表格 (*.csv) 格式的输入，方便对空间点信息的修改编辑；
7. 生成 SAP2000 及 ETABS 的时程动力分析代码，接力分析软件时行批量风时程分析；

-
8. 程序既结合中国风荷载规范，又适用于一般情况。

1.5 风时程生成程序局限性说明

1. 本程序没有考虑气动阻尼，工程师必须判断被忽略的气动阻尼对时程分析结果的影响。一般情况下忽略气动阻尼是偏于保守的，但对于悬索桥、斜拉桥一类的大跨度结构，忽略气动阻尼可能导致偏于不安全；
2. 暂时未考虑横风效应，将在下一版本予以考虑；
3. 特殊结构的体型系数应由风洞试验确定。

2 参数说明

2.1 顺向脉动风速功率谱密度函数 $S_v(n)$

国内外一些学者采用不同的方法，对强风记录资料进行了研究，得出了各种风速谱的公式。第一类风速谱是对强风观测记录进行相关的分析，获得相关曲线和相关函数，再通过超低频滤波器，直接测出风速的功率谱曲线，拟合出风速谱的数学表达式。该方法避免了第一类方法在理论计算过程中的误差，所求的风速谱公式里意义清晰，明确。风压谱是由风速谱与空气导纳函数之积换算出来的，它们都是风速脉动频率 n 的函数，脉动风与相关函数，风速谱、风压谱、风压谱及其概率分布统计量之间的关系，如图 2-1 所示。

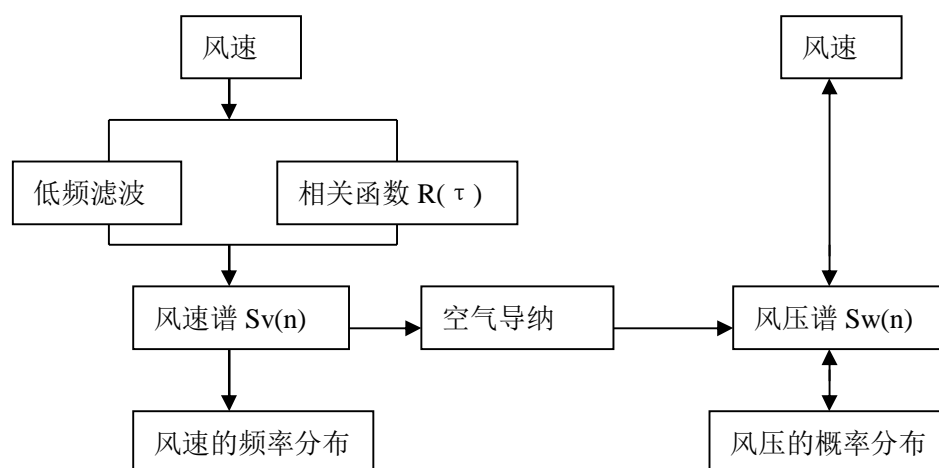


图 2-1 脉动风与相关函数，风速谱、风压谱、风压谱及其概率分布统计量之间的关系

表 2-1、两类风速功率谱密度函数表达式

类别	发表者	风速谱的数学表达式
A 类	A.G.Davenport	$S_v(n) = 4k\bar{v}_{10}^2 \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}}, x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}}$
	Harris	$S_v(n) = 4k\bar{v}_{10}^2 \frac{x}{n(2+x^2)^{5/6}}, x = \frac{1800n}{\bar{v}_{10}}$
	西安热工所	$S_v(n) = \frac{1.611k\bar{v}_{10}^2}{n} \exp\left[-\frac{(\lg x - 0.61)^2}{0.5408}\right], x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}}$
	Shiotani	$S_v(n) = \frac{v^3}{3} \cdot \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}}, x = \frac{1800n}{\bar{v}}$ 或 $S_v(n) = 0.238 \cdot \bar{v}^2 \frac{x}{n(1+x^2)^{5/6}}, x = \frac{1400n}{\bar{v}}$
B 类	Emil Simiu	$S_v(n) = 200k\bar{v}_{10} \cdot \frac{x}{n(1+50x)^{5/3}}, x = \frac{ny}{\bar{v}}, x \leq 0.2$ $S_v(n) = 0.26k\bar{v}_{10} \cdot \frac{1}{nx^{2/3}}, x = \frac{ny}{\bar{v}}, x > 0.2$
	Hino	$S_v(\omega) = 18.0k\bar{v}_{10}^2 \cdot \frac{x}{\omega(1+x^2)^{5/6}}, x = 850.578 \frac{k^{3/2} (\frac{y}{\bar{v}_{10}})^{1-4\alpha} \cdot W}{\alpha^3 \bar{v}_{10}}$

$S_v(n), S_v(\omega)$ ——风速谱

n, ω ——分别为频率、圆频率

k ——表征地面粗糙度的系数

\bar{v}_{10} ——为离地面 10m 高度处的平均风速值

y, x ——高度值、无量纲频率

表 2-1 中 A 类风速谱的特点为：谱形式与高度无关，紊流尺度沿高度不变；B 类风速谱则相反，其特点是：不同高度处风速谱形式不同，随着高度的增加，谱的峰值减小，峰值频率下降。图 2-2 所示为不同脉动风速谱的比较。

Davenport（译名：达文波特）根据世界上不同地点、不同高度测得到 90 多次的强风记录，并假定水平阵风谱中的湍流积分尺度 L 沿高度不变，取常数值 1200m，并取脉动风速谱为不同离地高度实测值的平均值，建立了经验数学表达式如表 2-1 所示。

我国规范及在风工程应用中一般采用 Davenport 脉动风速谱。由图 2-2 看出，Davenport 谱比其它谱偏大，而谱值偏大的范围正好是风频率与结构物自振频率接近的地方，影响较大，

故 Davenport 风速谱可能会高估结构的动力响应，其结果可能会偏于保守，但是在结构抗风的设计角度而言，却提高了结构的安全度。

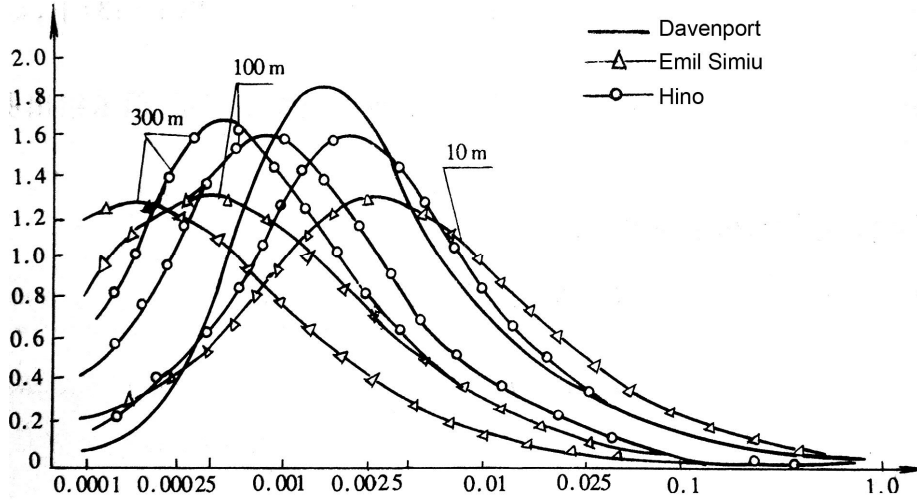


图 2-2 不同风速功率谱曲线对比图

2.2 脉动风空间相干函数 r_{ij}

当结构上一点 i 的脉动风压达到最大时，与 i 点距离为 r 的 j 点的脉动风压一般不会同时达到最大值，在一定的范围内，离开 i 点越远，脉动风压同时达到最大值的可能性越小，这种性质称为脉动风的空间相关性。

程序采用以下相关系数公式：

在顺风向，对于像高层建筑那样的高度和宽度方向的尺度需同时考虑的建筑物，一般考虑水平(x, y 方向)和竖向 (z 方向)的相关，对此，Davenport 提出了指数形式的经验公式：

$$r_{ij} = Coh(r, n) = R_{xyz}(x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j, n) = e^{-c} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 中

$$c = \frac{-2n\sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\bar{v}(z) + \bar{v}(z')} \quad (2-2)$$

其中 C_x, C_y, C_z 分别是 x, y, z 三个方向的空间衰减系数，Davenport 建议取值为

$$C_x = C_y = 16, C_z = 10$$

其它形式的相关系数表达式，这里不一一列举。

2.3 地面粗糙系数 k (紊流度)

根据我国可靠指标的规定的数值，我国规范保证系数（峰因子） μ 的取值在 2.2（保证率在 98.61%）左右，并常以带有保证系数（峰因子） μ 和脉动风压实测数据的脉动系数来表达。

如果采用 Davenport 谱，由于它是由实测得来的，因而根据 Davenport 谱可以求出脉动系数、紊流度和风速根方差之间的关系式（详细推导请参考《结构风工程 理论.规范.实践》）：

$$\mu_f(z) = \mu \sqrt{24k} \frac{\bar{v}_{10}}{\bar{v}} = \mu \sqrt{24k} \mu_z^{-\frac{1}{2}}(z) = 2\mu I(z) \quad (2-3)$$

$$I(z) = \sqrt{6k} \frac{\bar{v}_{10}}{\bar{v}} = \sqrt{6k} \mu_z^{-\frac{1}{2}}(z) \quad (2-4)$$

参考我国《荷载规范》附录 G 的风荷载说明（第 166 页），脉动系数 μ_f 是根据国内实测数据，并参考国外规范资料取：

$$\mu_f = 0.5 \times 35^{1.8(\alpha-0.16)} \left(\frac{z}{10}\right)^{-\alpha} = 0.5 \times 35^{1.8(\alpha-0.16)} \mu_z^{-\frac{1}{2}}(z) \quad (2-5)$$

因此，按我国规范公式推导出地面粗糙系数 k 为：

$$k = 0.002152 \times 35^{3.6(\alpha-0.16)} \quad (2-6)$$

式中， α 为地面粗糙度系数，按《荷载规范》由 A、B、C、D 类地面可得 α 为 0.12、0.16、0.22、0.30。按式可得各种地面的地面粗糙系数 k：

表 2-2 不同类地面的地面粗糙系数 k 取值

地面粗糙度类别	A	B	C	D
地面粗糙系数 k	0.00129	0.00215	0.00464	0.01291

2.4 平均风速 \bar{v}

根据《荷载规范》所述，在大气边界内，风速随离地面高度而增大。当气压场随高度不变是，风速随高度增大的规律，主要取决于地面粗糙度和温度垂直梯度。通常认为在离地面高度为 300~500m 时，风速不再受地面粗糙度的影响，也即达到所谓“梯度风速”，该高度称

之梯度风高度。地面粗糙度等级低的地区，其梯度高度比等级高的地区低。下表是不同地面情况的梯度风高度：

表 2-3 不同类地面的梯度风高度 H_G (m) 取值

地面粗糙度类别	A	B	C	D
梯度风高度 H_G (m)	300	350	400	450

根据地面粗糙度指数及梯度风高度，即可得到出风压高度变化系数如下：

$$\begin{aligned}\mu_z^A &= 1.379\left(\frac{z}{10}\right)^{0.24} \\ \mu_z^B &= 1.000\left(\frac{z}{10}\right)^{0.32} \\ \mu_z^C &= 0.616\left(\frac{z}{10}\right)^{0.44} \\ \mu_z^D &= 0.318\left(\frac{z}{10}\right)^{0.60}\end{aligned}\quad (2-7)$$

由风压与风速的关系式如式 (2-8) 得平均风速高度变化系数为公式 (2-9)：

$$\omega = \frac{\gamma}{2g} v^2 = \frac{0.012018}{2 \times 9.8} v^2 \approx \frac{v^2}{1600} \text{ kN/m}^2 \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned}\mu_z^A|_v &= \sqrt{1.379}\left(\frac{z}{10}\right)^{0.12} \\ \mu_z^B|_v &= \sqrt{1.000}\left(\frac{z}{10}\right)^{0.16} \\ \mu_z^C|_v &= \sqrt{0.616}\left(\frac{z}{10}\right)^{0.22} \\ \mu_z^D|_v &= \sqrt{0.318}\left(\frac{z}{10}\right)^{0.30}\end{aligned}\quad (2-10)$$

算例 2-1：结构位于地面粗糙度等级为 C 的地区，基本风压为 0.5kN/m^2 ，位于 10m 和 20m 处的空间点的平均风速为多少？

解： $\bar{v}_{10} = \sqrt{1600\omega_{10}} = \sqrt{1600 \times 0.616 \times 0.5} = 22.2\text{m/s}$

$$\bar{v}_{20} = \bar{v}_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha = 22.2 \times \left(\frac{20}{10}\right)^{0.22} = 25.86\text{m/s}。$$

2.5 风压力时程 $F_w(x, y, z, t)$

通过 AR 法计算可得到空间点的模拟总风速时程 $V(x, y, z, t) = \bar{v}(z) + v(x, y, z, t)$ ，按《荷载规范》引入空间点的体型系数可得风压动力荷载计算公式：

$$\bar{F}_w(x, y, z, t) = \frac{V^2(x, y, z, t)}{1600} \times (\sum \mu_{sx} \bar{A}_x + \sum \mu_{sy} \bar{A}_y + \sum \mu_{sz} \bar{A}_z) \quad (2-11)$$

式中， μ_{sx} ， μ_{sy} ， μ_{sz} 分别为空间点 yz 受风面、xz 受风面和 xy 受风面体型系数， A_x ， A_y ， A_z 分别为空间点 yz 受风面、xz 受风面和 xy 受风面的面积。如图 2-3 所示。

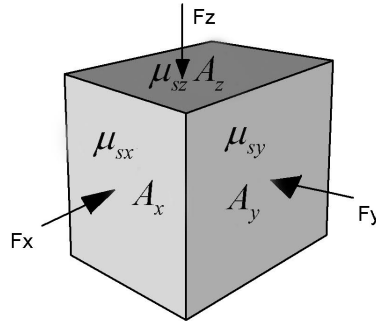


图 2-3 空间点的体型系数、受风面积与风压力的关系

算例 2-2: 已知空间点 i 处 x 方向受风面积为 $A_x = 36m^2$ ，y 方向受风面积为 $A_y = 27m^2$ ，z 方向没有受风面，x 方向风荷载作用下，体型系数为 $\mu_x|_{windx} = 1.4$ ， $\mu_y|_{windx} = 0.2$ ，y 方向风荷载作用下，体型系数为 $\mu_x|_{windy} = 0.1$ ， $\mu_y|_{windy} = 1.3$ ，现风荷载角度是与 x 方向成 30° ，风速为 $V(t)$ ，风压力为多少？

$$\begin{aligned} \text{解: } F_{wx}(t) &= \frac{V^2(t)}{1600} \times (\sum \mu_{sx} A_x) = \frac{V^2(t)}{1600} \times (36 \times 1.4 \times \cos 30^\circ + 36 \times 0.1 \times \sin 30^\circ) \\ &= 0.0284 \cdot V^2(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{wy}(t) &= \frac{V^2(t)}{1600} \times (\sum \mu_{sy} A_y) = \frac{V^2(t)}{1600} \times (27 \times 1.3 \times \sin 30^\circ + 27 \times 0.2 \times \cos 30^\circ) \\ &= 0.0139 \cdot V^2(t) \end{aligned}$$

程序将 $\frac{V^2(t)}{1600}$ 部分作为风压时程文本输出，将 $(\sum \mu_{sx} \bar{A}_x + \sum \mu_{sy} \bar{A}_y + \sum \mu_{sz} \bar{A}_z)$ 作为静

力荷载输入 SAP2000 或 ETABS 作用于结构，再将这个静力荷载通过时程放大，实现风压力时程的加载。

2.6 数值计算的参数

运算阶次 p 是 AR 模型的阶次，详细请查看 1.2.2 的说明。

计算时间步长 Δt 是风速时程的时间系列的单位，为了使计算稳定建议取值为 0.1~0.25s。

计算步数 $tsteps$ ，风时程总时间为 $tsteps \times \Delta t$ ，自回归模型中建议取值不大于 3000 步。

缓冲步数是在输入时程文本时为了使风压力时程开始阶段不产生荷载的突然施加使结构的加速度产生突变，在施加风压力时，荷载从零增加到初始风压力时程荷载的步数，建议缓冲步数大于 30 步。

在 AR 模型计算时，产生 R 矩阵之前必须通过式 (1-10) 对自功率谱密度进行数值积分，程序积分方法采用可控的复化梯形积分公式。其中积分的积分域与积分段数可供输入可以控制精度与计算速度。

fa: 频区始值 (单位是 Hz);

fb: 频始终值 (单位是 Hz);

n: 复化梯形积分的分段数。

建议取值为: fa=0.001Hz, fb=10Hz, n=500。积分参数示意图如下:

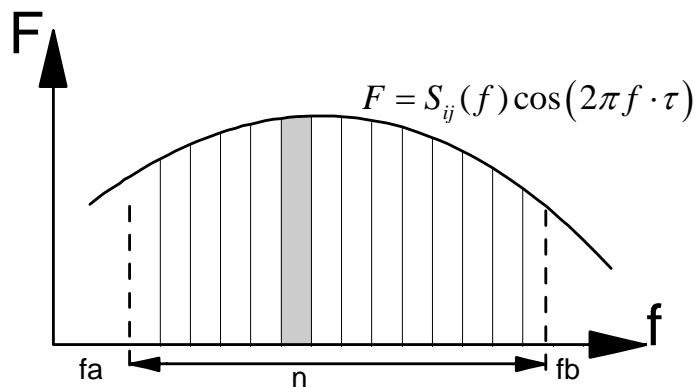


图 2-4 积分参数示意图

3 操作说明

3.1 制作空间点信息表格 (*.csv)

打开程序目录下的 sample.xls 表格文件，这是个空间点信息的标准输入格式如表 3-1:

表 3-1 标准空间点信息输入格式表格

Num	x	y	z	Ax	Ay	μ_{xx}	μ_{yx}	μ_{xy}	μ_{yy}	Az	μ_z	Pnt
54	0	0	3000	36	36	1.3	0	0	1.3	0	0	54
55	0	0	6000	36	36	1.3	0	0	1.3	0	0	55
56	0	0	9000	36	36	1.3	0	0	1.3	0	0	56
57	0	0	12000	36	36	1.3	0	0	1.3	0	0	57
58	0	0	15000	36	36	1.3	0	0	1.3	0	0	58

表格表头的信息内容如下:

Num——SAP2000 点号; ETABS 层号;

Pnt——SAP2000 点号; ETABS 平面点号;

x, y, z——空间点坐标, 单位是 (mm);

Ax, Ay, Az——空间点三个方向受风面积, 单位是 (m^2);

μ_{xx} ——x 方向风荷载作用下, x 方向受风压的体型系数, (表示风压与风速方向一致);

μ_{xy} ——y 方向风荷载作用下, x 方向受风压的体型系数, (表示风压与风速方向一致);

μ_{yx} ——x 方向风荷载作用下, y 方向受风压的体型系数, (表示风压与风速方向一致);

μ_{yy} ——y 方向风荷载作用下, y 方向受风压的体型系数, (表示风压与风速方向一致);

μ_z ——z 方向受风压的体型系数, 表示风压与风速方向一致。

体型系数定义请参考图 3-1 所示。

Csv 表格可以通过 Microsoft Office Excel 来编辑制作后, 另存为*.csv 文件即可。

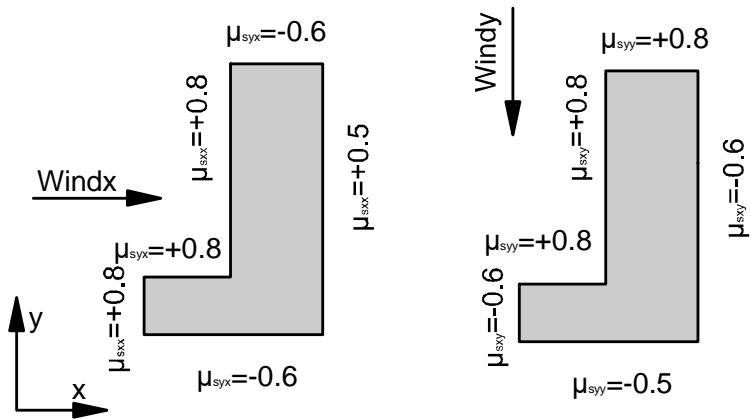


图 3-1 体型系数取值示意图

3.2 导入表格及输入参数

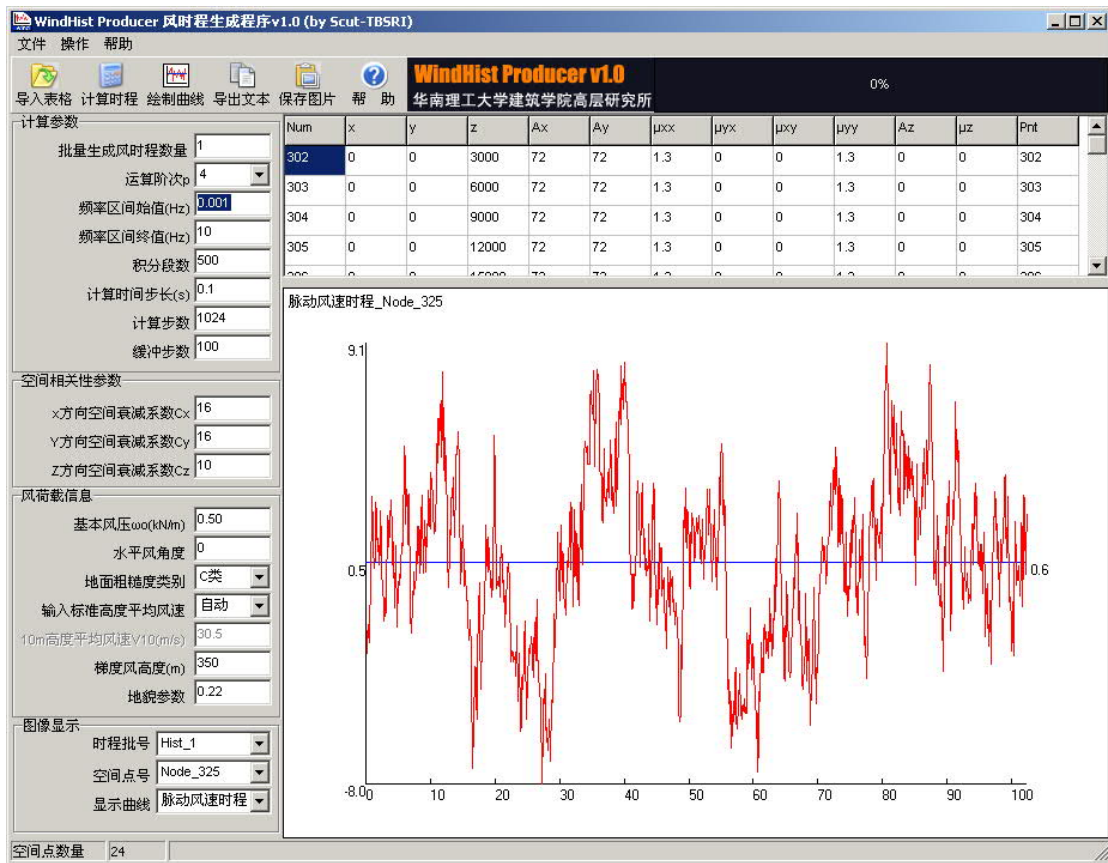



图 3-2 程序主界面图

图 3-2 为程序主界面。分为菜单栏、工具栏、参数栏、进度条、表格和图形区。

制作好空间点的信息表格后，按工具栏中按钮  **导入表格**，导入 CSV 表格。导入成功后，

表格区自动更新 CSV 表格。

然后在参数栏输入计算参数、空间相关性参数和风荷载信息，其中参数的意义请参加第 2 部分的参数说明。其中风荷载水平风角度是与 x 方向的顺时针夹角，单位是°。

3.3 计算风时程


在检查输入信息无误后，按工具栏中按钮，程序自动批量 n 个风时程，在计算过程中可以通过观察进度条来检查程序计算时度，如图 3-3。



图 3-3 计算进度显示

3.4 显示计算结果

在计算完成后，选择参数栏底部的显示图像的选框如图 3-4，可实时查看全部风时程的计算结果，包括脉动风速时程、总风速时程和总风压时程。

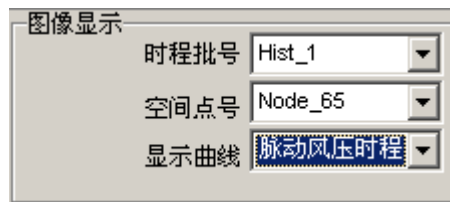


图 3-4 图像显示对话框

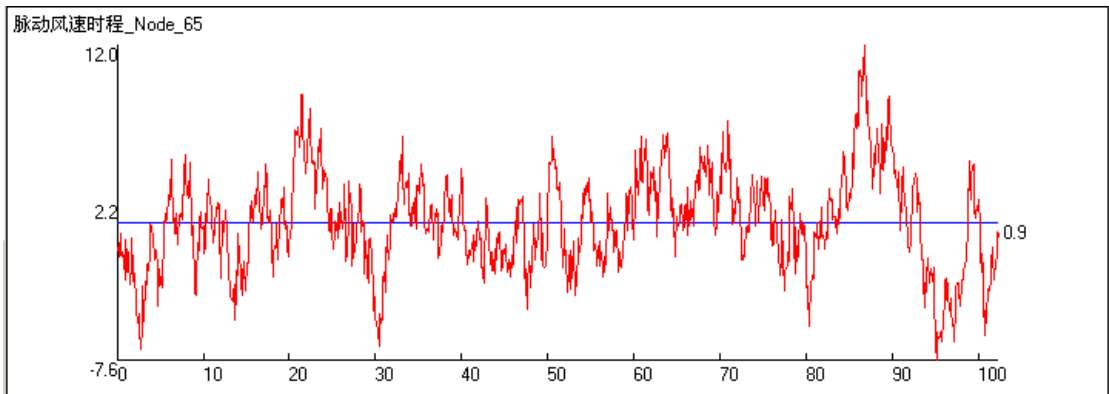



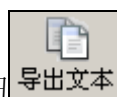
图 3-5 风时程显示图像

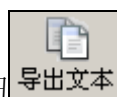
如图 3-5，图形显示区显示内容是红色线代码时程值，蓝色线是平均值线，左边轴线上从上往下分别是最大正值，中值，最大负值或零。蓝线的右边数据是平均值，水平刻度是时间（单位是 sec），纵向刻度是风速（单位是 m/s）或风压（单位是 kN/m²）。



点击  可将图形区显示的曲线保存为 bmp 文件。

3.5 输出时程结果及分析代码



在计算时程完成后，点击工具栏中的按钮 ，弹出保存文件对话框，确定文件保存文件夹以后，填写文件名后，程序自动保存全部风速时程，风压时程，ETABS 时程分析代码与 SAP2000 时程分析代码在同一文件夹里。

文件命名为：

etabs.e2k——ETABS 时程分析代码

sap2000.s2k——SAP2000 时程分析代码

VV (a) _b.dat——第 a 批点号（层号）为 b 的风速时程

W (a) _b.dat——第 a 批点号（层号）为 b 的风压时程

注：在 SAP2000 默认时程分析的模态分析工况取“Modal”工况。

3.6 接力 SAP2000 进行时程分析



打开 SAP2000 软件 。

点击菜单中的 File/Imporr/sap2000 v8/v9/v10.s2k Text File。弹出对话框如图 3-6 所示。

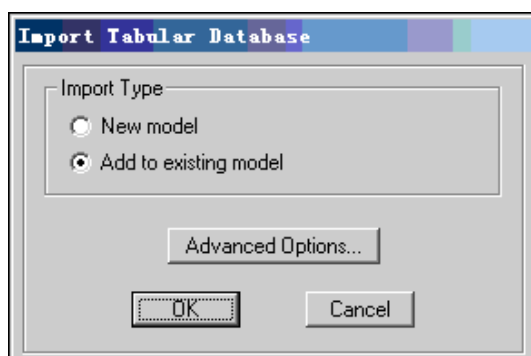


图 3-6 SAP2000 导入对话框

选择 Add to existing model 这一项，选择 3.5 步导出的 sap2000.s2k 文件即可。
导入成功后便可以在 sap2000 下进行结构批量风振时程分析。

3.7 接力 ETABS 进行时程分析



1. 打开 ETABS 软件
2. 点击菜单中的 File/Export/Save model as Etabs.e2k Text file，成功导出未加风时程的 ETABS 的 e2k 文本文件；
3. 打开输出的 e2k 文本文件，在文件中找到代码如下：

```
$ LOG  
STARTCOMMENTS
```

4. 这代码前，空白处粘贴风时程输出的 ETABS.e2k 的全部代码进去，保存文件退出；
5. 点击菜单中的 File/Import/Etabs.e2k Text file，把修改后的 e2k 文件导入 ETABS，检查模型无误后可以进行结构的批量风振时程分析。

3.8 SAP2000 与 ETABS 的分析代码例子

3.8.1 ETABS 分析代码

```
$ FUNCTIONS
FUNCTION "W(1)54" FUNCTYPE "HISTORY" FILE "D:\风速时程研究_0314\haha\W_(1)54.dat" DATATYPE "EQUAL" DT 0.10
FUNCTION "W(1)54" POINTSPERLINE 1 FORMAT "FREE"
FUNCTION "W(1)55" FUNCTYPE "HISTORY" FILE "D:\风速时程研究_0314\haha\W_(1)55.dat" DATATYPE "EQUAL" DT 0.10
FUNCTION "W(1)55" POINTSPERLINE 1 FORMAT "FREE"
FUNCTION "W(1)56" FUNCTYPE "HISTORY" FILE "D:\风速时程研究_0314\haha\W_(1)56.dat" DATATYPE "EQUAL" DT 0.10
FUNCTION "W(1)56" POINTSPERLINE 1 FORMAT "FREE"
FUNCTION "W(1)57" FUNCTYPE "HISTORY" FILE "D:\风速时程研究_0314\haha\W_(1)57.dat" DATATYPE "EQUAL" DT 0.10
FUNCTION "W(1)57" POINTSPERLINE 1 FORMAT "FREE"
FUNCTION "W(1)58" FUNCTYPE "HISTORY" FILE "D:\风速时程研究_0314\haha\W_(1)58.dat" DATATYPE "EQUAL" DT 0.10
FUNCTION "W(1)58" POINTSPERLINE 1 FORMAT "FREE"
FUNCTION "W(1)59" FUNCTYPE "HISTORY" FILE "D:\风速时程研究_0314\haha\W_(1)59.dat" DATATYPE "EQUAL" DT 0.10
FUNCTION "W(1)59" POINTSPERLINE 1 FORMAT "FREE"
$ STATIC LOADS
LOADCASE "F54" TYPE "OTHER" SELFWEIGHT 0
LOADCASE "F55" TYPE "OTHER" SELFWEIGHT 0
LOADCASE "F56" TYPE "OTHER" SELFWEIGHT 0
LOADCASE "F57" TYPE "OTHER" SELFWEIGHT 0
LOADCASE "F58" TYPE "OTHER" SELFWEIGHT 0
LOADCASE "F59" TYPE "OTHER" SELFWEIGHT 0
$ POINT OBJECT LOADS
POINTLOAD "54" "STORY54" TYPE "FORCE" LC "F54" FX 46.8000 FY 0.0000 FZ 0.0000
POINTLOAD "55" "STORY55" TYPE "FORCE" LC "F55" FX 46.8000 FY 0.0000 FZ 0.0000
POINTLOAD "56" "STORY56" TYPE "FORCE" LC "F56" FX 46.8000 FY 0.0000 FZ 0.0000
POINTLOAD "57" "STORY57" TYPE "FORCE" LC "F57" FX 46.8000 FY 0.0000 FZ 0.0000
POINTLOAD "58" "STORY58" TYPE "FORCE" LC "F58" FX 46.8000 FY 0.0000 FZ 0.0000
POINTLOAD "59" "STORY59" TYPE "FORCE" LC "F59" FX 46.8000 FY 0.0000 FZ 0.0000
$ TIME HISTORY CASES
THCASE "WIND_HIST(1)" TYPE "LINEAR" NSTEPS 1024 DTOUT 0.10 DAMP 0
THCASE "WIND_HIST(1)" RFTOL .00001 RETOL .00001 MAXITER 100 MINITER 2 CONVFACT 1
THCASE "WIND_HIST(1)" LOAD "F54" FUNC "W(1)54" SF 1
THCASE "WIND_HIST(1)" LOAD "F55" FUNC "W(1)55" SF 1
THCASE "WIND_HIST(1)" LOAD "F56" FUNC "W(1)56" SF 1
THCASE "WIND_HIST(1)" LOAD "F57" FUNC "W(1)57" SF 1
THCASE "WIND_HIST(1)" LOAD "F58" FUNC "W(1)58" SF 1
THCASE "WIND_HIST(1)" LOAD "F59" FUNC "W(1)59" SF 1
```

3.8.2 SAP02000 分析代码

```

TABLE: "PROGRAM CONTROL"
  ProgramName=SAP2000  Version=10.0.7  ProgLevel="Advanced I"  LicenseOS=Yes  LicenseSC=Yes  LicenseBR=Yes
LicenseHT=No  CurrUnits="KN, m, C"  SteelCode="Indian IS:800-1998"  ConcCode="Indian IS 456-2000"  AlumCode="AA-ASD 2000" _
  ColdCode=AISI-ASD96  StiffCase=None

TABLE: "FUNCTION - TIME HISTORY - FROM FILE"
  Name=W(1)54  Time=0.00  Value=0.000000  HeaderLines=0  PrefixChars=0  PtsPerLine=1  DataType="Equal Interval"
FormatType=Free  Interval=0.10  FileName="D:\风速时程研究_0314\haha\W(1)_54.dat"
  Name=W(1)55  Time=0.00  Value=0.000000  HeaderLines=0  PrefixChars=0  PtsPerLine=1  DataType="Equal Interval"
FormatType=Free  Interval=0.10  FileName="D:\风速时程研究_0314\haha\W(1)_55.dat"
  Name=W(1)56  Time=0.00  Value=0.000000  HeaderLines=0  PrefixChars=0  PtsPerLine=1  DataType="Equal Interval"
FormatType=Free  Interval=0.10  FileName="D:\风速时程研究_0314\haha\W(1)_56.dat"
  Name=W(1)57  Time=0.00  Value=0.000000  HeaderLines=0  PrefixChars=0  PtsPerLine=1  DataType="Equal Interval"
FormatType=Free  Interval=0.10  FileName="D:\风速时程研究_0314\haha\W(1)_57.dat"
  Name=W(1)58  Time=0.00  Value=0.000000  HeaderLines=0  PrefixChars=0  PtsPerLine=1  DataType="Equal Interval"
FormatType=Free  Interval=0.10  FileName="D:\风速时程研究_0314\haha\W(1)_58.dat"
  Name=W(1)59  Time=0.00  Value=0.000000  HeaderLines=0  PrefixChars=0  PtsPerLine=1  DataType="Equal Interval"
FormatType=Free  Interval=0.10  FileName="D:\风速时程研究_0314\haha\W(1)_59.dat"

TABLE: "LOAD CASE DEFINITIONS"
LoadCase=F54  DesignType=Other  SelfWtMult=0
LoadCase=F55  DesignType=Other  SelfWtMult=0
LoadCase=F56  DesignType=Other  SelfWtMult=0
LoadCase=F57  DesignType=Other  SelfWtMult=0
LoadCase=F58  DesignType=Other  SelfWtMult=0
LoadCase=F59  DesignType=Other  SelfWtMult=0

TABLE: "JOINT LOADS - FORCE"
Joint=54  LoadCase=F54  CoordSys=GLOBAL  F1=46.8000  F2=0.0000  F3=0.0000  M1=0  M2=0  M3=0
Joint=55  LoadCase=F55  CoordSys=GLOBAL  F1=46.8000  F2=0.0000  F3=0.0000  M1=0  M2=0  M3=0
Joint=56  LoadCase=F56  CoordSys=GLOBAL  F1=46.8000  F2=0.0000  F3=0.0000  M1=0  M2=0  M3=0
Joint=57  LoadCase=F57  CoordSys=GLOBAL  F1=46.8000  F2=0.0000  F3=0.0000  M1=0  M2=0  M3=0
Joint=58  LoadCase=F58  CoordSys=GLOBAL  F1=46.8000  F2=0.0000  F3=0.0000  M1=0  M2=0  M3=0
Joint=59  LoadCase=F59  CoordSys=GLOBAL  F1=46.8000  F2=0.0000  F3=0.0000  M1=0  M2=0  M3=0

TABLE: "ANALYSIS CASE DEFINITIONS"
Case=WIND_HIST(1)  Type=LinModHist  InitialCond=Zero  ModalCase=MODAL  RunCase=Yes

TABLE: "CASE - MODAL HISTORY 1 - GENERAL"
Case=WIND_HIST(1)  HistoryType=Transient  OutSteps=1024  StepSize=0.10  DampingType=Constant  ConstDamp=.05

TABLE: "CASE - MODAL HISTORY 2 - LOAD ASSIGNMENTS"
Case=WIND_HIST(1)  LoadType=LoadPattern  LoadName=F54  Function=W(1)54  LoadSF=1  TimeFactor=1  ArrivalTime=0
Case=WIND_HIST(1)  LoadType=LoadPattern  LoadName=F59  Function=W(1)59  LoadSF=1  TimeFactor=1  ArrivalTime=0
Case=WIND_HIST(1)  Type=LinModHist  InitialCond=Zero  ModalCase=MODAL  RunCase=Yes

END TABLE DATA

```


4 计算实例

下面以如图 4-1 所示的 24 层框架为实例，介绍用 WINDHIST PRODUCER 与 SAP2000、ETABS 分析结构的风振反应。详细参数如表 4-1 所示。

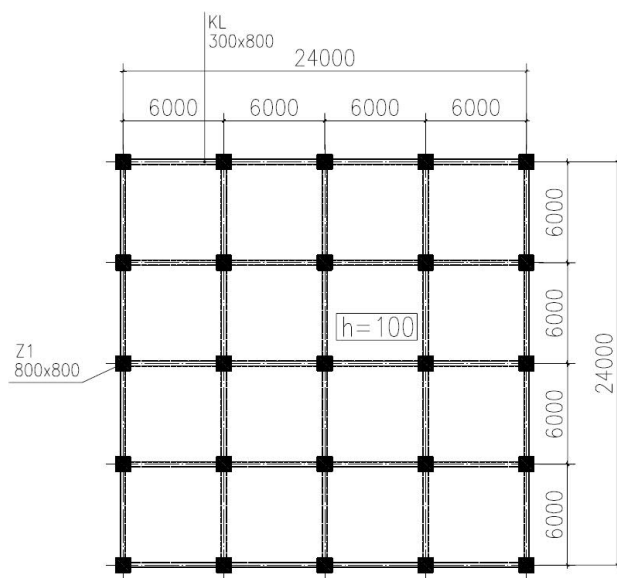


图 4-1 24 层框架结构平面布置图

表 4-1 24 层框架结构各种参数

层数	24	楼板	SLAB100
层高	3000	柱截面	C800X800
跨长	6000	梁截面	B300X800
梁截面	B300X800	恒载	3.0kN/m ²
混凝土材料	C30	活载	3.5kN/m ²

4.1 操作步骤

1. 打开 SAP2000 进行结构的建模及恒活载的施加，完成建模后的截图如图 4-2 所示。

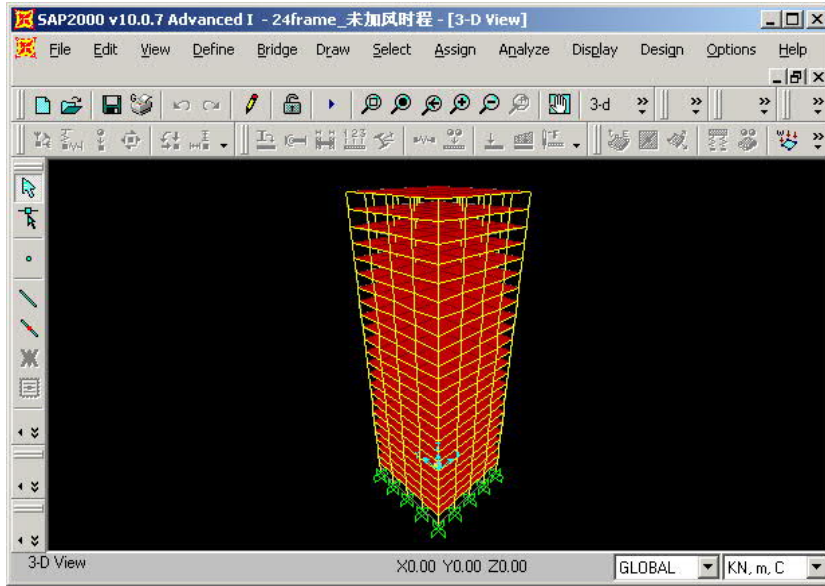


图 4-2 结构未加风时程的模型

2. 点选每层加载点，模型取中心点为加载点，选取后按 Ctrl+C，复制结点到新建的 Excel 表格，会得到如下图所示的信息。

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Type	Name	X	Y	Z	USER		
2	POINT	302	0	0	3	N		
3	POINT	303	0	0	6	N		
4	POINT	304	0	0	9	N		
5	POINT	305	0	0	12	N		
6	POINT	306	0	0	15	N		
7	POINT	307	0	0	18	N		
8	POINT	308	0	0	21	N		
9	POINT	309	0	0	24	N		
10	POINT	310	0	0	27	N		
11	POINT	311	0	0	30	N		
12	POINT	312	0	0	33	N		
13	POINT	313	0	0	36	N		

图 4-3 粘贴到 Excel 表的 sap2000 空间点的信息

3. 参考 3.1 所述的方法编辑如图 4-3 的 Excel 表格，得到空间点信息输入表格形式，在这个过程中需要计算空间点的受风面，输入查阅规范或参考风洞试验得到的体型系数。通过 Excel 的计算与编辑，输出*.csv 文件，如下表所示。

表 4-2 空间点信息输入表格

Num	x	y	z	Ax	Ay	μ_{xx}	μ_{yx}	μ_{xy}	μ_{yy}	Az	μ_z	Pnt
302	0	0	3000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	302
303	0	0	6000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	303
304	0	0	9000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	304
305	0	0	12000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	305
306	0	0	15000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	306
307	0	0	18000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	307
308	0	0	21000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	308
309	0	0	24000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	309
310	0	0	27000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	310
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
324	0	0	69000	72	72	1.3	0	0	1.3	0	0	324
325	0	0	72000	36	36	1.3	0	0	1.3	0	0	325

4. 打开 WINDHIST PRODUCER V1.0 程序，按第 3 部分的操作说明所示，计算风时程。计算风时程的相关参数如下表所示，其它按默认。

表 4-3 风时程生成计算的相关参数

批数	10	基本风压	0.5kN/m^2
阶数	4	地面分类	C 类
步长	0.1s	计算步数	1024
频区终值	5Hz	缓冲步数	100

5. 点击工具栏的计算时程按钮，计算完成后，程序自动绘制风时程曲线如下图。

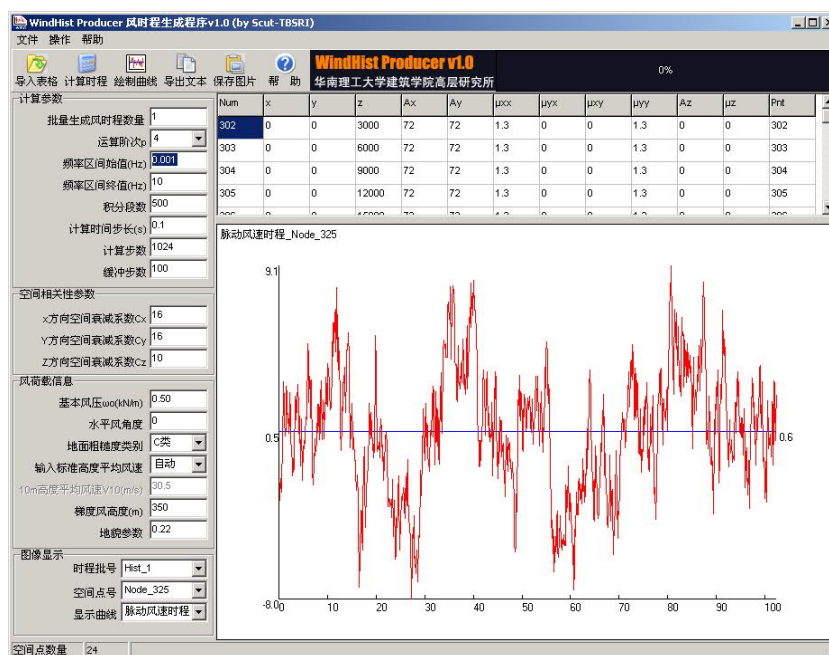


图 4-4 计算完成时程序的截图

- 计算完成后，导出计算结果与 SAP2000 的分析代码，点击工具栏中的导出文本，程序自动生成 SAP2000 和 ETABS 的分析代码。创建目录如名为“windhist”，将计算结果存放于文件夹里。
- 打开 SAP2000 的计算模型，按 3.6 所述方法导入 SAP2000 的时程分析代码，注意需选择 Add to existing model 这一项。导入完成后，弹出如图 4-5 对话框表示导入成功。

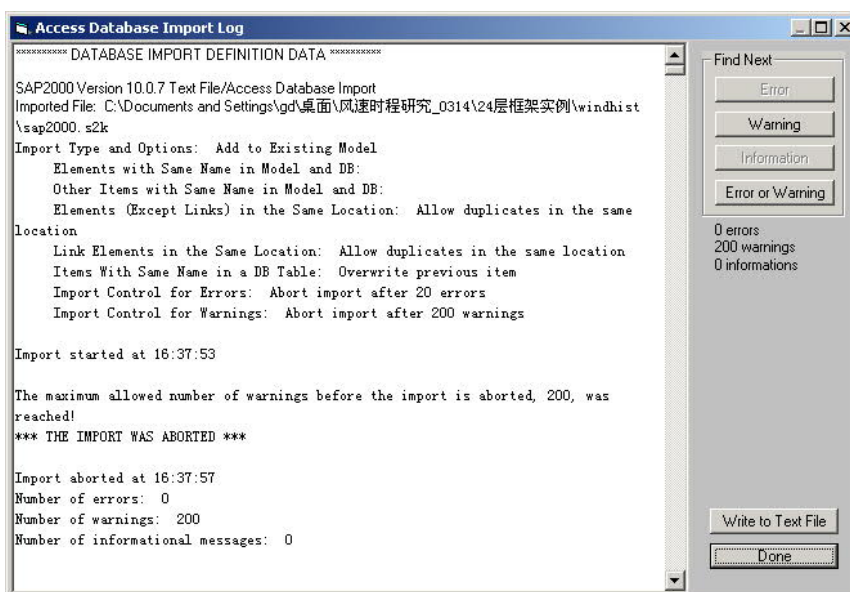


图 4-5 SAP2000 导入报告对话框

8. 打开 SAP2000 的计算模型，按 3.6 所述方法导入 sap2000 的时程分析代码，注意需选择 Add to existing model 这一项。导入完成后，弹出如图 4-5 对话框表示导入成功。

注：在导入时程分析代码前，将单位制设为 kN-m-C。

9. 检查 SAP2000 的导入情况，如静力 F，时程 W，时程分析工况 WINDHIST 等等。检查无误后，进行 SAP2000 的风振时程运算。

4.2 24 层框架风振分析结果分析

4.2.1 风速时程结果

抽样取出第 1 批结果中，空间点 305，312，325 的脉动风速时程作 Matlab 的 PSD 功率谱密度转化进行与目标谱的对比。空间点 305，312，325 的脉动风速时程图如下：

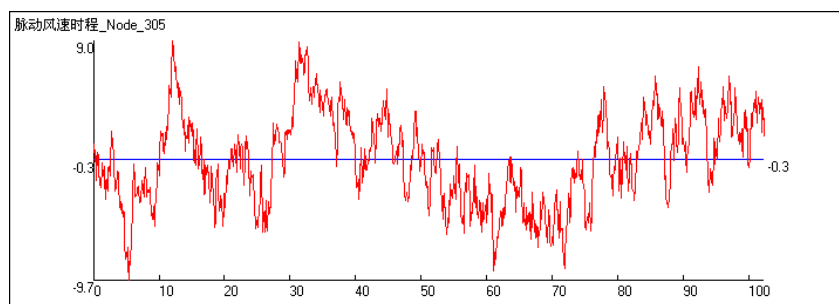


图 4-6 空间点 305 脉动风速时程曲线

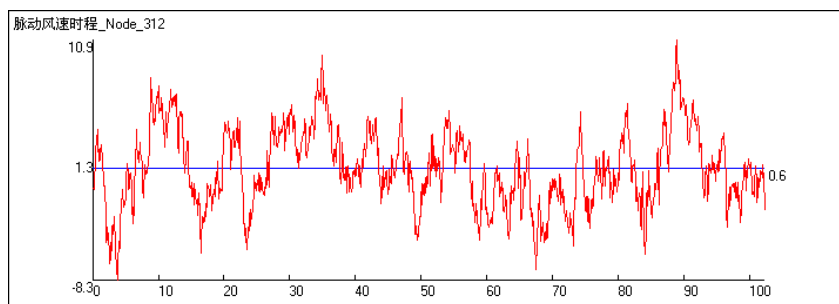


图 4-7 空间点 312 脉动风速时程曲线

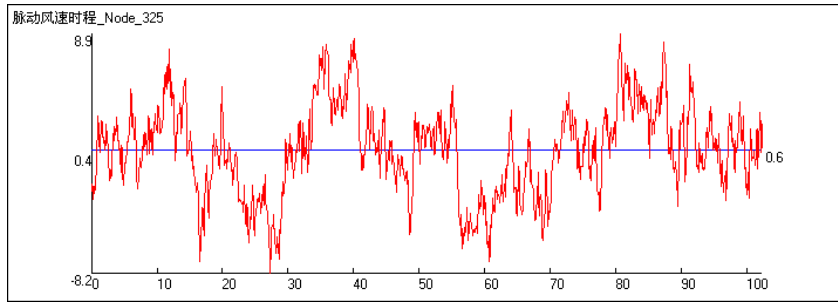


图 4-8 空间点 325 脉动风速时程曲线

调用 Matlab 的功率谱密度计算功能 PSD 对上述三点脉动风速进行计算,得到如下结果:

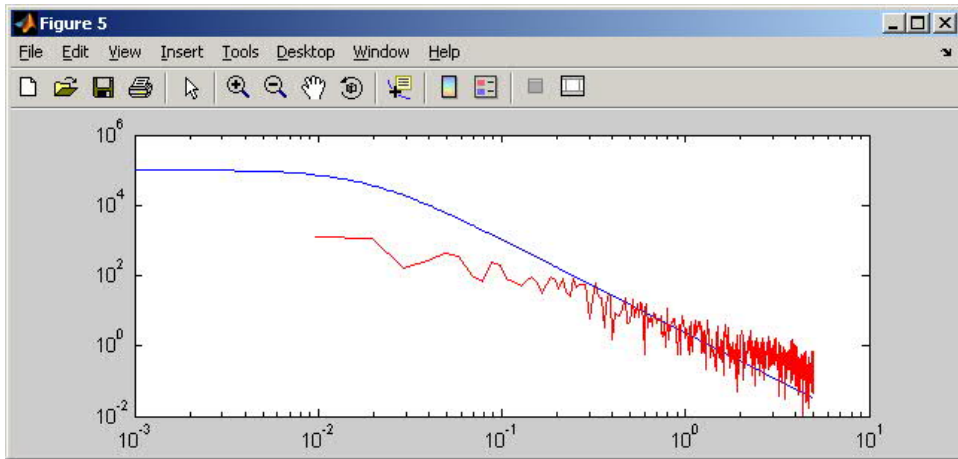


图 4-9 空间点 305 的 PSD 曲线与目标谱对比

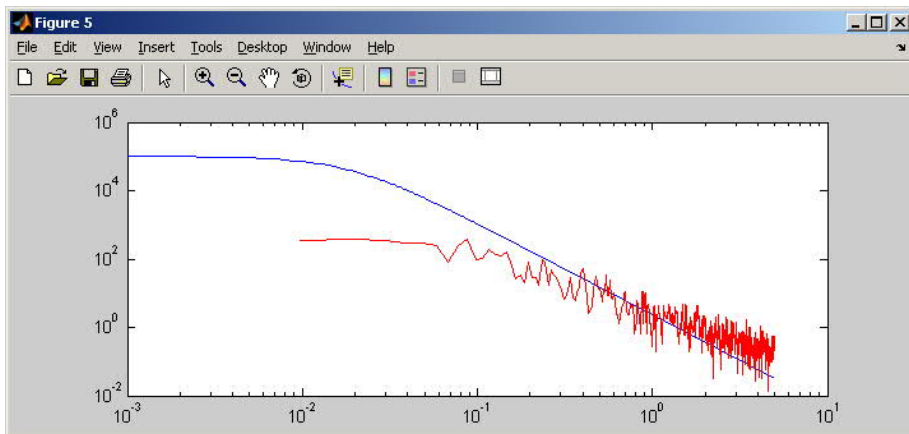


图 4-10 空间点 312 的 PSD 曲线与目标谱对比

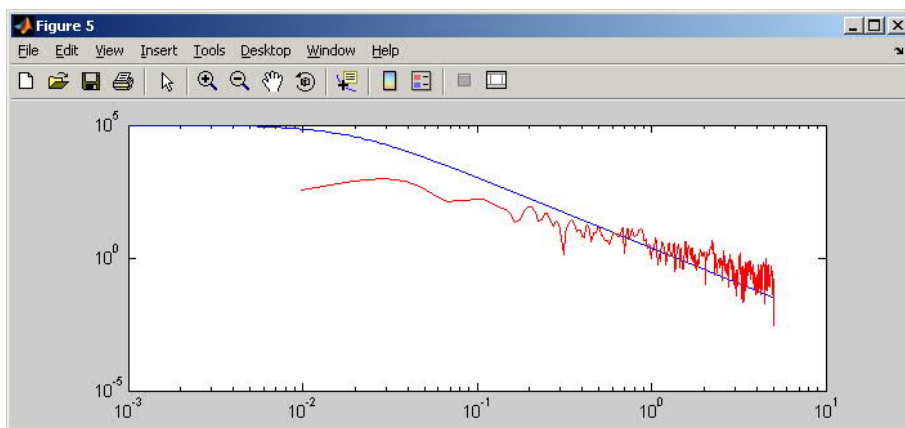


图 4-11 空间点 312 的 PSD 曲线与目标谱对比

由 Matlab 的计算结果图可见，用 AR 法模拟出来的风速时程与目标谱要求的基本吻合，虽然在低频率有所偏离，但是在结构自振频率附近相当吻合。

4.2.2 风振分析计算结果与按现行《荷载规范》得出的结果对比

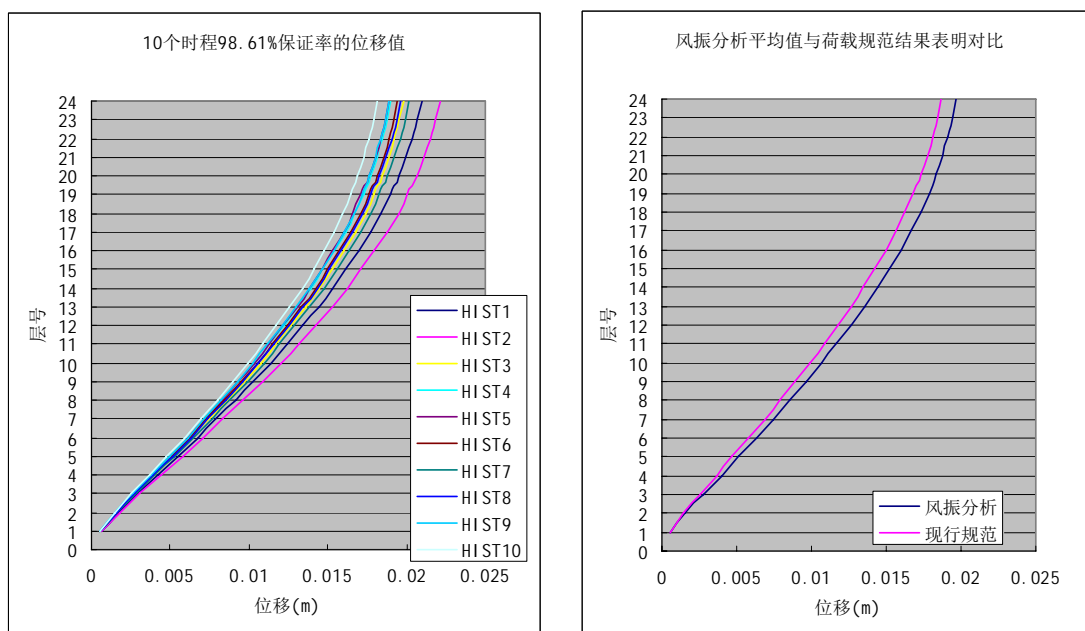


图 4-12 风振分析计算结果与按现行《荷载规范》得出的结果进行对比图

由图可见，风振分析的计算结果与《荷载规范》的计算结果基本吻合，稍有所放大。注图中 10 个时程的位移值是引入峰值调整系数 2.2（保证率为 98.61%）计算得到。

4.2.3 风振分析的顶点加速度计算与按《高钢规》手算结果对比

表 4-4 10 次时程分析得到顶点加速度最大值与按《高钢规》计算的结果对比表

时程号	最大加速度 (m/s ²)
1	0.0451
2	0.0449
3	0.0370
4	0.0361
5	0.0407
6	0.0359
7	0.0553
8	0.0360
9	0.0371
10	0.0390
加速度平均值	0.0407
按《高钢规》计算	0.0494

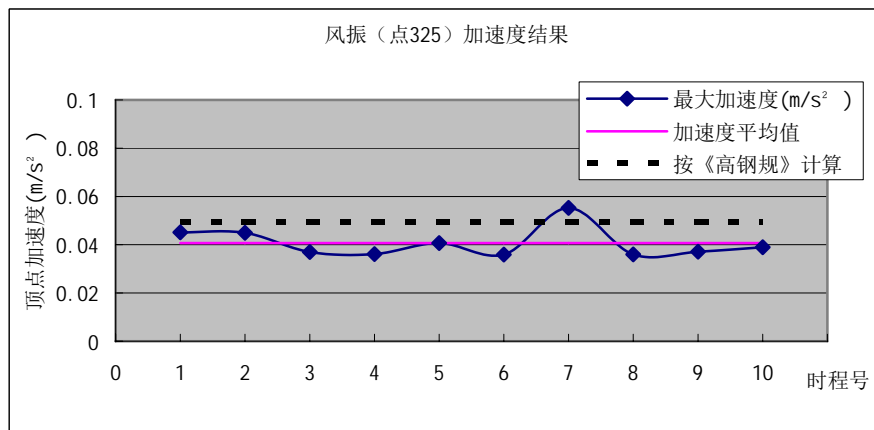


图 4-13 10 次时程分析得到顶点加速度最大值与按《高钢规》计算的结果对比图

按《高钢规》风振顶点加速度最大值手算过程如下：

已知： $w_0 = 0.5kN/m^2$ ， $T_1 = 2.249s$ ，地面粗糙分类为 C 类；

$0.62 \cdot w_0 T^2 = 0.62 \times 0.5 \times 2.249^2 = 1.568$ ，查《荷载规范》得： $\xi = 1.497$ ；

$H=72m$ $B=24m$ $H/B=72/24=3.0$ $A=1728m^2$ ，查《荷载规范》得 $\nu = 0.49$ ；

读取 SAP2000 的总质量得 $m_{tot} = 16680.93t$ ；

体形系数 $\mu_s = 1.3$ ；

按《高钢规》公式得：

$$a_w = \xi v \frac{\mu_s \mu_r w_0 A}{m_{tot}} = 1.497 \times 0.49 \times \frac{1.3 \times 1.0 \times 0.5 \times 1728}{16680.93} = 0.0494 m/s^2。$$

由上述可得，用风振时程分析得到的顶点加速度的最大值与手算结构基本吻合。

5 关于风振时程分析的若干建议

5.1 分析参数设置

本程序中的风压时程是基于风速功率谱通过线性滤波法的自回归模型计算出来的随机荷载的一个样本，所以在结构的风振分析时必须对结构施加多个风压时程荷载，才能反映荷载在随机风荷载作用下的反应。建议批量生成 10 个以上风荷载时程进行时程分析。

时程分析工况的设置如下：

1. 时程类型建议采用 振型 ；
2. 时程运动类型，建议采用 瞬态 ；
3. 时间步建议设为 风时程步数 ，时段大小设为 风时程时段 ；
4. 振型阻尼，如果不考虑气动阻尼作用，设为默认值 0.05 ；如果考虑气动阻尼作用时，工程师应判断其影响大小对振型阻尼进行增减。
5. 使用从工况得到的振型（SAP2000 属性），程序生成代码默认为 MODAL 。

5.2 输出结果处理

SAP2000 或 ETABS 对结构进行批量的风时程分析的将得出海量的数据结果，如果对全部时程的计算结果进行统计分析处理再进行内力配筋，工作量巨大。

建议采用的处理方法如下：

位移：输出结构每个考察点 i 的 n 个位移时程序列，对每个位移时程序列进行统计分析，求出平均值 $\bar{\Delta}(i, n)$ 与标准差 $\sigma_{\Delta}(i, n)$ ，再考虑峰值调整因子 $\mu = 2.2$ （保证率为 98.61%），得出到每个时程样本下在结构每个考察点 i 的位移代表值 $\Delta(i, n) = \bar{\Delta}(i, n) + \mu \cdot \sigma_{\Delta}(i, n)$ ，再将 $\Delta(i, n)$ 取平均得出各点在风时程作用下的位移代表值 $\Delta(i)$ 。

加速度：输出结构每个考察点 i 的 n 个加速度时程序列，对每个加速度时程序列取包络值 $a_{\max}(i, n)$ ，对 n 个时程的包络值 $a_{\max}(i, n)$ 取平均值得出各点在风时程作用下的加速度代表值 $a(i)$ 。

内力：对每个时程分析的结果进行包络处理，用组合工况计算出 n 个时程的包络值的平均值，再乘以统计特征修正系数 β 得出用于设计的风时程作用下内力代表值（标准值），

统计特征修正系数 $\beta = \frac{\Delta(i_{\text{顶点}})}{\bar{\Delta}_{\text{max}}(i_{\text{顶点}})}$ ，其中 $\Delta(i_{\text{顶点}})$ 为顶点在风时程作用下的位移代表值，

$\bar{\Delta}_{\text{max}}(i_{\text{顶点}})$ 为顶点在风时程作用下的位移包络值的平均值。

6 参考文献

- [1] 北京金土木软件技术有限公司、中国建筑标准设计研究院，SAP2000 中文版使用指南，人民交通出版社，2006
- [2] 黄本才编著，结构抗风分析原理及应用，同济大学出版社，2000
- [3] 张相庭编著，结构风工程—理论·规范·实践，中国建筑工业出版社，2006
- [4] Claes Dybye、Svend O.Hansen[丹麦]，Wind Load On Structures，中国建筑工业出版社，2006
- [5] 管前乾，重庆地区风速极值分布研究及不同风速谱下高层建筑顺风效应分析，重庆大学硕士学位论文，2006
- [6] 李楠，大跨度空间结构风荷载数值模拟及风振控制研究，天津大学硕士学位论文，2006
- [7] 建筑结构荷载规范 GB50009-2001（2006 年版）

撰 写： 陈学伟

2007 年 3 月 18 日