

考虑风与结构耦合作用时电视塔结构的风振响应^{*}

范存新¹, 薛松涛^{2,3}, 陈 , 唐和生²

(1. 苏州科技学院, 江苏 苏州 215011; 2. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092;

3. 日本近畿大学工学部建筑学科, 日本 大坂)

摘要:目前在通常的结构风振响应的计算中,一般并不考虑风荷载与结构的耦合作用,但是对基频较低的高层建筑或高耸结构,风与结构的耦合作用不容忽视。本文根据风的统计特征,将风速模拟成时间的函数,然后在结构的运动微分方程中考虑风速与结构速度的耦合作用,并提出采用傅立叶变换—时频迭代法来求解结构的运动微分方程,最后得到结构的风振响应。计算结果表明对电视塔结构应考虑风与结构的耦合作用。

关键词:电视塔结构;耦合;非线性;风振响应

中图分类号: TU311

文献标识码: A

在目前的风振响应计算中,理论分析大多数集中在结构的顺风向响应上,在分析方法上一般可分成在频率域范围内以及在时间域范围内这两个方面进行,虽然这两方面的计算基本上都趋于成熟,但是由于计算过程的复杂,大多数结构风振响应分析均作了一定的简化,特别是没有考虑风与结构的耦合作用,对基频较小的高耸结构、特别是电视塔结构来说,考虑与不考虑结构速度对风速的耦合作用,将产生不同的结构响应特征。由于结构速度与风速的耦合将在运动方程中产生非线性项,方程难以用常规的振型分解法解耦,文献^[1]在应用准定常假设后,建立了考虑风与结构耦合作用的风振响应模态分析方法,采用拟单自由度法,确定了不同风速下风与结构耦合作用所产生的气动阻尼,在频域内求解问题。我们曾在文献^[2]中也考虑了风荷载与结构的相互耦合作用,并采用逐步积分法在时间域内求解问题。上述文献虽然均考虑了风荷载与结构的相互耦合作用,但在具体风荷载的计算中还是忽略了一些风速与结构速度的耦合项,而本文则进一步提出采用傅立叶变换—时频迭代法来求解该问题,其基本思路是应用风速的模拟结果,利用傅立叶变换法求解结构的运动微分方程,进行傅立叶逆变换后将频域结果变换到时域,在荷载项中直接考虑风速与结构速度的耦合作用,再次进行傅立叶变换求解并迭代,直到收敛。这样做的优点是不必在结构抗风分析中做许多的数学模型的简化工作,全面考虑了风速与结构速度的耦合作用,比文献^[1-2]的求解更为精确。

1 风荷载的随机时程模拟

在用时程分析法计算结构的风振响应时,首先要进行风荷载的时程模拟,时程模拟的主要方法有谐波叠加法和线性滤波器法。其中线性滤波器法利用 p 阶自回归过滤器技术来产生脉动风速时程具有计算量小的优点, p 阶自回归过滤器可用下式表示^[3-4]

$$u(t) = \sum_{k=1}^p \Psi_{ku}(t - k\Delta t) + \sigma_N N(t) \quad (1)$$

式中, p —— 自回归的阶数;

Δt —— 时间步长;

* 收稿日期: 2005-03-12

作者简介: 范存新(1968-),男,博士,副教授,主要研究方向为结构振动。

基金项目: 建设部科技项目(编号 04-2-042); 苏州市科技项目(编号 SS0511)

$N(t)$ ——均值为0方差为1的正态分布的随机数;

Ψ_k ——自回归参数。由下式确定:

$$R_u(j\Delta t) = \sum_{k=1}^p R_u[(j-k)\Delta t] \Psi_k \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

而 $R_u(j\Delta t)$ 由下式确定:

$$R_u(j\Delta t) = \int_0^{\infty} S_u(n) \cos(2\pi nj\Delta t) dn \quad (3)$$

这里的 $S_u(n)$ 即是脉动风速谱, 由(3)式求出自回归参数后, 可由下式求出 σ_N :

$$\sigma_N^{-2} = R_u(0) - \Psi_k R_u(k\Delta t) \quad (4)$$

由以上各式求出的脉动风速时间序列 $u(t)$ 只考虑了风速的自谱密度函数, 还没有考虑在空间上的相关性, 即考虑风场的互谱密度。为此, 需要将 N 个统计无关的随机过程 $u_j(t)$ 转化为 N 个具有特定相关性的随机过程 $v(t)$, 其转换过程如下:

假定脉动风为具有零均值的高斯平稳随机过程, 因而对于多变量风速时程的模拟, 其协方差矩阵为互相关矩阵, 即

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵中的元素可由脉动风的功率谱密度函数通过数值积分而求得, 即

$$R_{ij} = \int_0^{\infty} S_{ij}(z_i, z_j, n) dn \quad (6)$$

对矩阵 $[R]$ 进行 Cholesky 分解可得

$$[R] = [C][C]^T \quad (7)$$

式中 $[C]$ 为一下三角矩阵, 矩阵中的元素可用如下的递推公式得到:

$$C_{ij} = \frac{R_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} C_{ik}C_{jk}}{C_{jj}} \quad (8)$$

$$C_{ii} = \sqrt{R_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} C_{ik}^2} \quad (9)$$

于是顺风向脉动风速向量 $v(t)$ 可以写成

$$\{v_j(t)\} = [C] \{u_j(t)\} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (10)$$

2 风振响应的傅立叶变换 - 时频迭代法

电视塔结构采用合适的有限单元离散后, 可作为一个具有 n 个自由度的结构体系, 其运动方程为^[5-9]

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{P(t)\} \quad (11)$$

式中 $[M]$ 为集中质量矩阵, $[C]$ 为阻尼阵, 一般采用 Rayleigh 阻尼, 而 $[K]$ 为结构刚度矩阵, $\{P(t)\}$ 为脉动风引起的抖振力向量。

由伯努利方程可得风速风压的关系为

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (12)$$

考虑到结构与风之间的耦合作用, 采用相对速度来计算抖振力, 则风荷载可表示为

$$P(t) = \frac{1}{2} \rho C_D A v_r^2 \quad (13)$$

式中, ρ 为空气密度, C_D 为风压分布系数, A 为迎风面面积, v_r 为相对速度。

$$v_r = v + v(t) - x(t) \quad (14)$$

代入(13)式中可得风荷载为

$$P(t) = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 + \rho C_D A v v(t) - \rho C_D A v x(t) + \frac{1}{2} \rho C_D A v^2(t) + \frac{1}{2} \rho C_D A x^2 t - \rho C_D A v(t) x(t) \quad (15)$$

式(15)中的第一项为平均风荷载, 为静荷载, 第二项为一般计算时采用的脉动风荷载, 第三项及以后各项则因为简化计算的原因在一般的风振计算中略去了。文献^[1]将第三项视为结构的气动阻尼, 考虑了风与结构的耦合作用, 但还是略去了第四项及以后的各项。文献^[2]采用逐步积分法求非线性方程, 也仅多考虑了第三项, 略去了第四项及以后的各项。本文的计算中则全面考虑风与结构的耦合作用, 直接采用式(15)作为荷载项代入运动方程式(11), 对产生的非线性项, 本文提出采用傅立叶变换—时频迭代法来求解该问题, 具体过程如下。

首先在方程的荷载项表达式中不考虑风速与结构速度的耦合关系, 即荷载的表达式为

$$P(t) = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 + \rho C_D A v v(t) + \frac{1}{2} \rho C_D A v^2(t) \quad (16)$$

式中的 $v(t)$ 采用风速模拟方法产生, 其中风速谱密度函数采用 Davenport 风速谱, 然后即开始采用傅立叶变换—时频迭代法求解运动方程^[7], 其步骤如下:

(1) 利用傅立叶变换对方程(11)进行变换, 得

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]) \{X(\omega)\} = \{P(\omega)\} \quad (17)$$

式中, $p(\omega)$ 为 $p(t)$ 的傅利叶变换, 即

$$p(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt$$

(2) 求解上式, 即可得结构的位移传递函数 $X(\omega)$ 。

(3) 通过傅立叶逆变换, 可得时域中的解为

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) p(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (18)$$

(4) 由速度、加速度与位移之间的关系, 可得在时域中的速度、加速度响应分别为

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i\omega X(\omega) p(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (19)$$

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -\omega^2 X(\omega) p(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (20)$$

将求出的结构速度响应式(19)代入式(15)的荷载表达式中, 并代入到式(11), 得到新的考虑风与结构相互耦合作用的运动方程, 再重复过程(1)至(4), 即可得到由前面式(18)所表示的位移, 其可视为耦合作用问题的第一次近似解, 用 $x^{(1)}(t)$ 表示。得到由式(19)表示的速度响应后再代回方程并求解, 又可得到第二次近似解 $x^{(2)}(t)$ 。如此不断地经过傅立叶变换—时域迭代一直到两个相邻的解组 $x^{(i-1)}(t)$ 和 $x^{(i)}(t)$ 在整个所要求的时间段内一致或其误差的绝对值之和小于某一规定的允许误差 ϵ 为止, 即

$$\sum_j |x^{(i)}(t_j) - x^{(i-1)}(t_j)| < \epsilon \quad (21)$$

3 计算实例

本文以洛阳电视塔为例来计算考虑高耸结构与风荷载耦合作用的风振响应, 以便进行对比。该塔地处 B 类地区, 基本风压为 0.35 kN/m^2 , 为钢结构空间桁架结构。洛阳电视塔总高度为 260m, 标高 170m 以上为天线部分。标高 22.5m 以下为一九边形单斜杆空间桁架体系。标高 133.7m 处有九个小球形塔楼, 标高 155m 处为直径为 24m 的主塔楼。根据电视塔的高柔特性可将其简化为 29 个集中质量的计算模型, 各段综合抗弯刚度为常量, 其具体的简化计算模型参数请参见文献^[2]。

由前述方法得到的电视塔小型球形塔楼处的模拟风速见图 1, 此处的平均风速 $\bar{v} = 35.8 \text{ m/s}$ 。

为检验前述方法得到模拟风荷载的有效性, 对电视塔小型球形塔楼处的风荷载样本进行了精度检验, 产

生的脉动风速时程样本为等间隔的离散数据值序列 $\{X_i\} (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 。

样本均值为

$$u_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i = 0.042$$

样本方差为

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - u_x)^2 = 0.063$$

经与目标谱比较, 即与规格化的

Davenport 风速谱比较, 样本均值和方差

与理论值比较接近, 进一步考察脉动风速

样本的自功率谱密度函数与目标谱的自功率谱密度函数, 以及 29 维脉动风速样本间部分质点处的互功率谱密度函数与目标谱的互功率谱密度函数, 均有满意的结果。

采用上述方法对塔楼处的位移时程及加速度时程进行了对比计算, 计算结果见图 2~图 5。其中图 2 与图 3 分别显示了电视塔塔楼处考虑与不考虑风与结构耦合作用时的位移响应时程, 通过图 2 可见, 不考虑耦合时位移最大值为 0.7642m, 当考虑耦合时这一最大值在图 3 中变为 0.6611m。图 4 与图 5 分别显示了电视塔塔楼处考虑与不考虑风与结构耦合作用时的加速度响应时程, 在图 4 中, 不考虑耦合时加速度最大值为 0.9321m/s^2 , 当考虑耦合时这一最大值在图 5 中变为 0.8529m/s^2 。

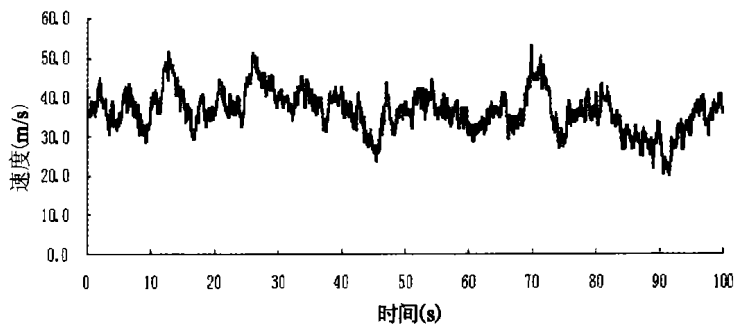


图 1 电视塔小型球塔楼处模拟风速

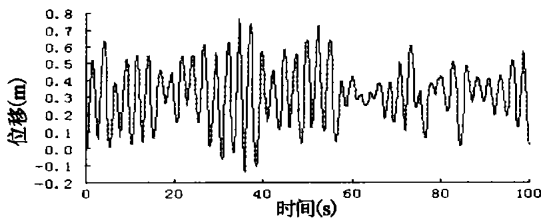


图 2 不考虑耦合作用时塔楼的位移时程

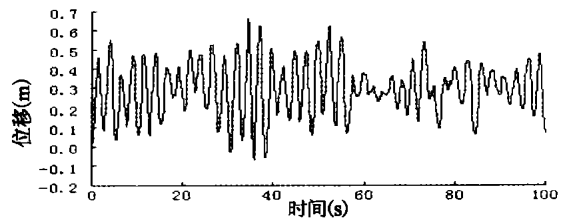


图 3 考虑耦合作用时塔楼的位移时程

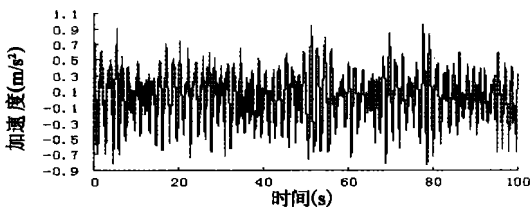


图 4 不考虑耦合作用时塔楼加速度时程

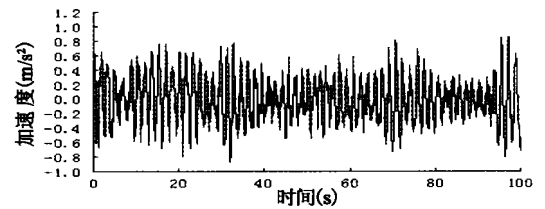


图 5 考虑耦合作用时塔楼加速度时程

4 结语

计算表明对结构基频较低的电视塔结构, 在进行结构风振计算时, 应考虑风与结构的耦合作用。

考虑风与结构耦合作用时, 结构位移与加速度的峰值均有所降低, 其中位移峰值降低较大, 算例中约为 13.6%, 加速度峰值约降低 8.5%。这一结论与文献^[1-4]所得结论相似, 但本文方法全面考虑了风与结构的耦合作用, 荷载项中具有全部的耦合项, 因而更为精确。

本文采用的傅立叶变换—时域迭代法较好地解决了考虑风与结构耦合作用的风振响应计算问题, 可以在运动方程中全面考虑风速与结构速度的耦合问题。

参考文献

[1] 楼文娟, 孙炳楠. 风与结构的耦合作用及风振响应分析[J]. 工程力学, 2000, 17(5).

[2] 薛松涛, 范存新, 陈 磊等. 高耸结构考虑风与结构耦合作用的非线性风振响应[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2003, (1).

Research on Mechanism of High-accuracy Ultrasonic Grinding for Ultrathin Crystal Chips

CHEN Huan, RUI Yan-nian, YUAN Zeng-yan, ZHAO Kui, CHEN Ye-xiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: Some problems in ultrathin crystal chips grinding, such as processing efficiency, surface damage, warping deformation, always torment the researchers and workers. This paper takes use of the features of ultrasonic grinding which can make the macroscopic force, stress and calory in grinding lower, and then utilizes relevant abrasive in the ultrasonic grinding. On the basis of studying the working mechanism, we carried out the experiment to research the ultrasonic grinding for ultra thin crystal chips, then optimized its working parameters, and obtained satisfied result, established the theory and experiment foundation for the practical application of this technology.

Key words: high-accuracy ultrathin crystal chips; the ultrasonic grinding; research on mechanism

(上接第30页)

- [3] Attilio Iannuzzi, Paolo Spinelli. Artificial wind generation and structural response[J]. Journal of Structural Engineering 1987, 113(12).
- [4] 王修琼, 张相庭. 混合回归模型及其在高层建筑风响应时域分析中的应用[J]. 振动与冲击 2000, 19(1).
- [5] Ahsom Kareem. Dynamic response of high-rise building to stochastic wind loads[J]. J Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992.
- [6] H Tsukagoshi, et al. Response analyses of along-wind and across-wind vibrations of tall buildings in time domain[J]. J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993.
- [7] 俞载道, 陈, 付公康. 固定式海洋平台的扰震分析[J]. 同济大学学报, 1984, (4).

Wind-induced Vibration Response of TV-tower Structure Considering Wind-structure Interaction

FAN Cun-xin¹, XUE Song-tao^{2,3}, CHEN Rong², Tang He-shen²

(1. University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China;

2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Department of Architecture, School of Science and Engineering, Kinki University, Osaka, Japan)

Abstract: In the ordinary calculation of the wind-induced vibration, the wind-structure coupling effect is not considered. The wind-structure interaction has the significant effect to the tall buildings and high-rise structures with the lower first frequent. The basic method of this paper is to simulate wind velocity as a function of time according to the statistics character of wind firstly. Then the differential equations of structural system are solved by using the Fourier transform-time domain iteration method considering the coupling effect of wind velocity and structure velocity. From the analysis, it is clear that more attention should be paid to the wind-structure coupling effect to the TV-Tower structure.

Key words: TV-Tower; coupling; wind-induced response