

文章编号: 1000-2073(2003)01-0035-07

高耸结构考虑风与结构耦合作用的非线性风振响应^{*}

薛松涛^{1,3}, 范存新^{1,2}, 陈 耀¹, 葛晓明²

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 苏州科技学院 土木系, 苏州 215011;
3. 日本近畿大学 理工学部建筑学科, 日本 大坂)

摘 要: 虽然在通常的结构风振计算中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和高耸结构, 风与结构的耦合作用不容忽视. 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, 采用逐步积分法在每一时间步内求解方程, 最后得到结构的风振响应. 算例表明对高耸结构应考虑风与结构的耦合作用.

关键词: 风振响应; 耦合; 非线性

中图分类号: TU311 **文献标识码:** A

0 引言

风灾是几种主要的自然灾害之一, 数据表明, 近年来仅在美国由风灾造成的直接经济损失即达 350 亿美元, 大大超过了地震造成的生命和财产损失. 随着建筑物高度的增加, 其柔性越大, 结构频率越低, 而风的能量集中在低频区, 风对结构的影响也越大, 因此, 高耸结构上的风荷载是结构的重要设计荷载, 对其进行风效应分析是十分必要的.

结构风振响应的分析在理论上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, 这两方面的计算基本上都趋于成熟. 但是, 在目前的风振响应计算中, 由于计算过程复杂, 大多数分析均做了一定的简化, 特别是没有考虑风与结构的耦合作用, 这对结构基频高于 0.5Hz 的悬臂型结构的影响是可以不考虑的; 但对基频较小的高耸结构、超高层建筑来说, 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. 文献[1]利用准定常假定的气动阻尼效应的方法考虑风与结构的耦合作用, 在频域内进行了风振响应计算. 而在本文中, 将对风荷载与结构的相互耦合作用进行分析, 所得结论可作为风振设计时的参考.

在进行风与结构的耦合作用分析时, 由于结构速度与风速的耦合将在运动方程中产生

* 收稿日期: 2002-09-10

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(59925820), 苏州科技学院科研基金资助项目(HB2001-305)

作者简介: 薛松涛(1963-), 男, 上海人, 博士, 教授, 博士生导师

非线性项, 方程难以用振型分解法解耦, 本文的基本思路是首先应在时域内根据风的统计特征, 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, 采用逐步积分法在每一时间步内求解方程, 最后得到结构的风振响应。

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, 从计算角度看, 用其来模拟随机风荷载是非常有效的^[1], p 阶自回归过滤器可用下式表示为

$$u(t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k u(t - k\Delta t) + \sigma_N N(t) \quad (1.1)$$

式中, p 为自回归的阶数; Δt 为时间步长; $N(t)$ 为均值为 0、方差为 1 的正态分布的随机数; Ψ_k 为自回归参数, 由下式确定:

$$R_u(j\Delta t) = \sum_{k=1}^p R_u[(j-k)\Delta t] \Psi_k, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (1.2)$$

而 $R_u(j\Delta t)$ 由下式确定:

$$R_u(j\Delta t) = \int_0^{\infty} S_u(n) \cos(2\pi nj\Delta t) dn \quad (1.3)$$

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 :

$$\sigma_N^2 = R_u(0) - \Psi_k R_u(k\Delta t) \quad (1.4)$$

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

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

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:

$$R_{ij} = \int_0^{\infty} S_{ij}(z_i, z_j, n) dn \quad (1.6)$$

对矩阵 \mathbf{R} 进行 Cholesky 分解, 可得

$$\mathbf{R} = \mathbf{C}\mathbf{C}^T \quad (1.7)$$

式中 \mathbf{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:

$$C_{ij} = \frac{R_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} C_{ik} C_{jk}}{C_{jj}} \quad (1.8)$$

$$C_{ii} = \sqrt{R_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} C_{ik}^2} \quad (1.9)$$

于是顺风向脉动风速向量 $v(t)$ 可以写成

$$\{v_j(t)\} = C\{u_j(t)\}, \quad j = 1, 2, \dots, p \tag{1.10}$$

2 风振响应的非线性时程分析方法

对工程结构来讲, 在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^[2-3]

$$M\{\ddot{x}(t)\} + C\{\dot{x}(t)\} + K\{x(t)\} = \{P(t)\} \tag{2.1}$$

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与风压的关系为

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 \tag{2.2}$$

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^[4]

$$P(t) = \frac{1}{2} \rho C_D A v_r^2 \tag{2.3}$$

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,

$$v_r = v + v(t) - x(t) \tag{2.4}$$

代入(2.3)式中, 略去相对于平均风速 v 为微量的项后可得风荷载为

$$P(t) = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 + \rho C_D A v v(t) - \rho C_D A v x(t) \tag{2.5}$$

式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, 第三项则为考虑结构与风耦合作用时产生的阻力项, 代入运动方程(2.1)后, 将产生非线性项, 无法用简便的振型分解法求解. 为此, 本文采用 Newmark- β 逐步积分法, 在每一时间步内求解方程(2.1), 可以较精确地计算出结构在任一时刻的响应^[5].

3 计算实例

这里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. 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 处有直径为 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^[6], 如图 1 所示, 各段综合抗弯刚度为常量, 其具体的简化计算模型参数见表 1.

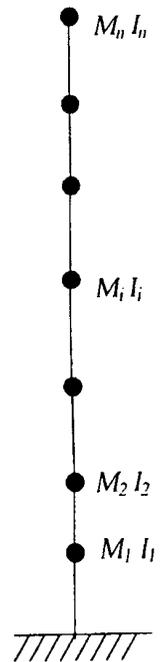


图 1 结构计算简图

由前述方法得到的电视塔主塔楼处的模拟风速如图 2 所示, 此处的平均风速 $\bar{v} = 36.7 \text{ m/s}$.

表 1 电视塔简化计算模型参数表

质点号	标高 /m	单元长度 /m	质量 /kg	惯性矩 /m ⁴	面积 /m ²
1	22.500	22.500	207 682.0	63.129	0.592 91
2	40.000	17.500	61 324.1	29.419	0.267 64
3	55.000	15.000	46 121.1	16.890	0.272 35
4	68.000	13.000	35 165.9	11.348	0.275 90
5	77.386	9.386	26 649.4	8.975	0.276 78
6	86.000	8.614	24 343.3	7.562	0.276 78
7	93.824	7.824	19 681.6	6.581	0.277 37
8	101.252	7.428	15 469.3	3.747	0.175 27
9	108.304	7.052	14 734.1	3.031	0.175 27
10	115.000	6.696	14 021.7	2.812	0.175 27
11	121.392	6.221	13 156.4	2.664	0.175 43
12	127.613	6.221	13 156.4	2.664	0.175 43
13	133.667	6.054	10 766.3	2.523	0.175 43
14	137.620	3.953	18 128.1	2.176	0.158 34
15	141.190	3.570	16 851.8	1.371	0.103 46
16	144.556	3.366	23 154.2	1.328	0.103 46
17	149.300	4.744	45 356.3	1.277	0.103 46
18	155.000	5.700	59 521.5	1.043	0.089 07
19	161.000	6.000	45 177.6	0.984	0.089 07
20	165.839	4.839	21 878.7	0.931	0.089 07
21	170.000	4.161	14 442.5	0.887	0.089 07
22	183.000	13.000	14 074.5	0.434	0.096 00
23	192.000	9.000	13 588.3	0.312	0.069 20
24	204.000	12.000	13 261.5	0.094	0.046 80
25	216.000	12.000	10 022.6	0.094	0.046 80
26	227.000	11.000	6 734.21	0.026	0.026 24
27	237.000	10.000	5 200.51	0.019	0.018 72
28	249.000	12.000	4 400.63	0.0035	0.013 88
29	260.000	11.000	1 202.3	0.0012	0.009 75

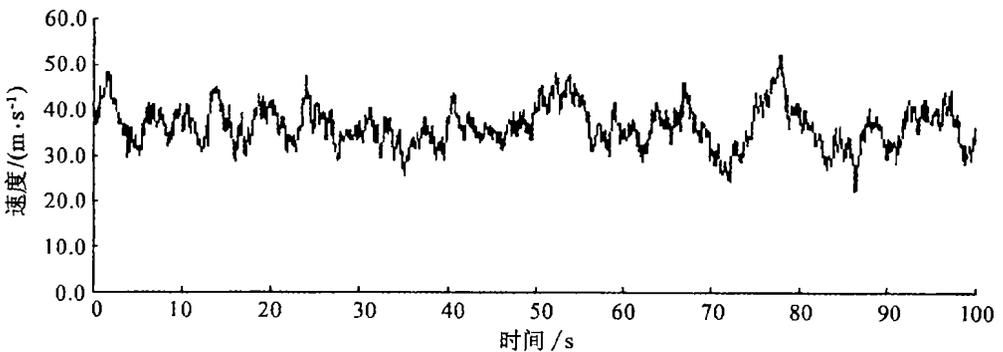


图 2 电视塔主塔楼处模拟风速

对电视塔的阻尼矩阵 C , 采用 Rayleigh 假设:

$$C = aM + bK \quad (3.1)$$

式中, a 、 b 为两个常数, 对钢塔结构可用以下公式:

$$a = \frac{0.02 \omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}$$

$$b = \frac{0.02}{\omega_1 + \omega_2}$$

对电视塔结构的刚度矩阵 K , 可采用多种计算方法得到, 本文利用柔度法, 直接利用虚功原理可得下列计算位移影响系数 δ_j 的公式:

$$\delta_j = \delta_j = \sum_{k=1}^i \frac{l_k}{EI_k} [d_{jk}d_{ik} + \frac{1}{2}l_k(d_{jk} + d_{ik}) + \frac{1}{3}l_k^2] + \sum_{k=1}^i \frac{l_k}{GF_k} \tag{3.2}$$

式中, E 为材料的弹性模量, G 为剪切模量, F_k 为 k 层的截面面积, d_k 为质点间的高度差, 即 $d_k = H_i - H_k$

根据求得的柔度矩阵, 求逆后即可得到结构的刚度矩阵 K .

经计算得到的电视塔前三阶自振特性和广义质量见表 2. 由表中数据可见, 电视塔的基础频为 0.362Hz, 低于 0.5Hz, 在计算中应考虑结构与风荷载的耦合作用. 本文计算了不考虑耦合作用与考虑耦合作用时, 电视塔结构在风荷载作用下的位移响应及加速度响应.

表 2 电视塔自振特性和广义质量

振型	自振周期 T/s	自振频率 (rad/s)	广义质量 l
1	2.764	2.273	36.13
2	1.194	5.258	14.87
3	0.461	13.612	14.65

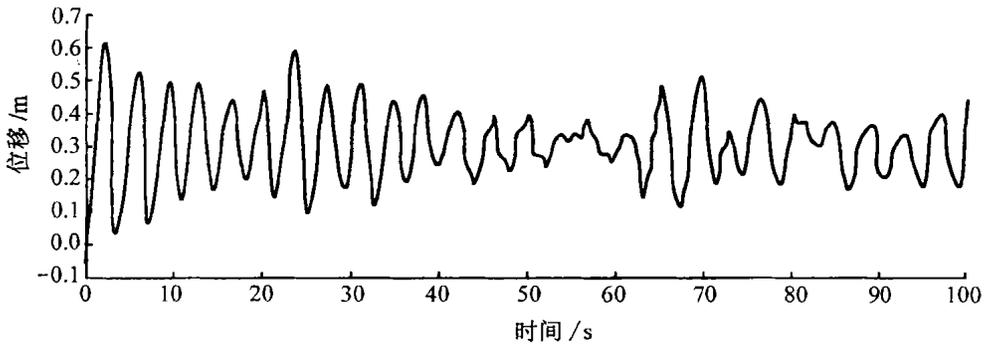


图 3 不考虑耦合作用时塔楼的位移历程

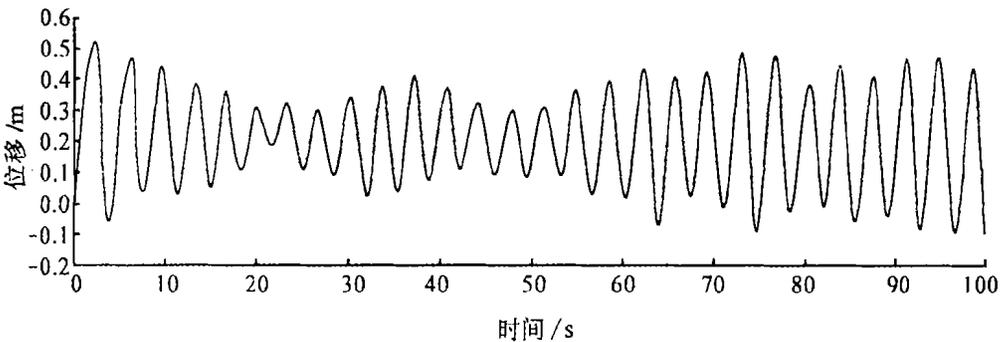


图 4 考虑耦合作用时塔楼的位移历程

图 3 和图 4 分别为电视塔主塔楼处考虑与不考虑风与结构耦合作用时的位移响应, 通过图 3 可见, 不考虑耦合时位移最大值为 0.612m, 当考虑耦合时这一最大值在图 4 中变为 0.521m. 图 5 和图 6 分别为电视塔主塔楼处考虑与不考虑风与结构耦合作用时的加速度响

应, 当不考虑耦合时加速度最大值在图 5 中为 0.869m/s^2 , 当考虑耦合时这一最大值在图 6 中变为 0.789m/s^2 .

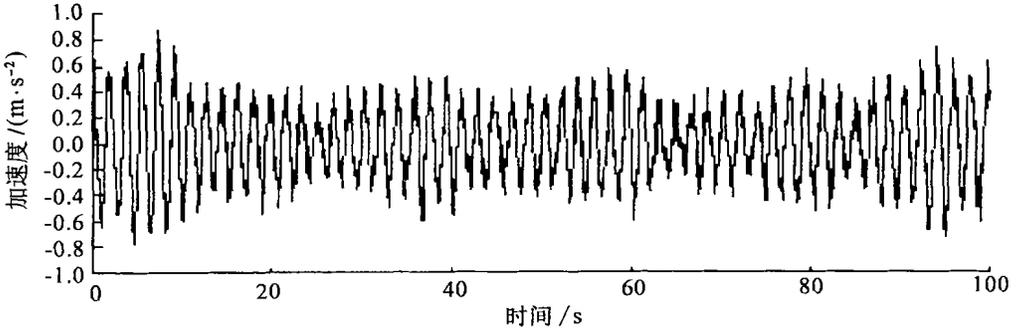


图 5 不考虑耦合作用时塔楼加速度时程

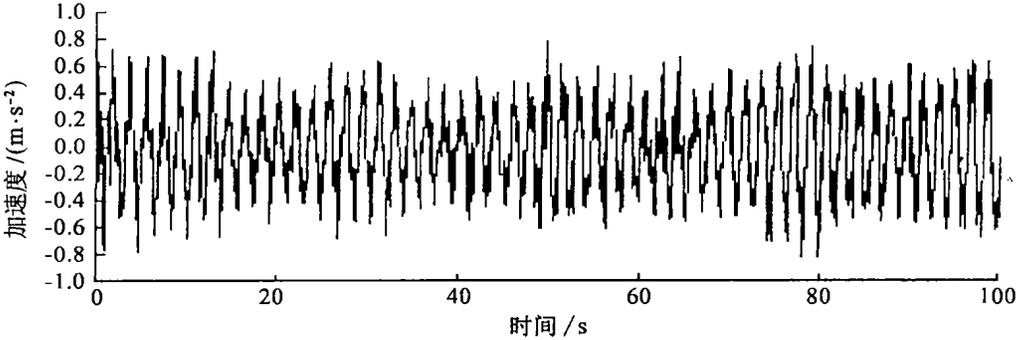


图 6 考虑耦合作用时塔楼加速度时程

4 结论

对于结构基频较低的高耸型塔架结构, 在进行结构风振理论计算时, 应考虑风与结构的耦合作用。

计算表明当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, 算例中为 17.4%, 加速度峰值降低 10.1%。

进一步计算表明, 当计算风速发生变化时, 耦合作用的效果也随之改变, 计算表明风速增大时, 耦合作用的效果也随着增大, 这表明在进行结构抗风设计时, 对灾害性的强风等计算, 更应考虑风与结构耦合作用的影响。

参考文献:

- [1] IANNUAI, SPINELI P. Artificial wind generation and structural response[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(12): 2382—2398.
- [2] KAREEM A. Dynamic response of high rise building to stochastic wind loads[J]. J Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41—44, 1101—1112.

- [3] TSUKAGOSHI H. Response analyses of along-wind and across-wind vibrations of tall buildings in time domain[J] . J Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46- 47: 497- 506.
- [4] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M] . 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [5] 张志强, 李爱群. 合肥电视塔人造脉动风荷载的仿真计算[J] . 东南大学学报, 2001, 31(1): 69- 73.
- [6] 王肇民. 高耸结构振动控制[M] . 上海: 同济大学出版社, 1997.

Nonlinear wind-induced vibration response of high-rise structure considering wind-structure interaction

XUE Song-tao^{1,3}, FAN Cun-xin^{1,2}, CHEN Rong¹, GE Xiao-ming²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji Univ., Shanghai 200092 China; 2. Dept. of Civil Engineering, Suzhou Science-Technology College, Suzhou 215011, China; 3. Dept. of Architecture, School of Science and Engineering, Kinki Univ., Osaka, Japan)

Abstract: Although the wind-structure coupling effect isn't considered in the ordinary calculation of the wind-induced vibration, the wind-structure interaction has the significant effect to the tall buildings and high-rise structures according to the lower first frequent. The basic method 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 step by step solution method considering the coupling effect of wind velocity and structure velocity. From the analysis, it is clear that when wind velocity is considered, the structure response has been reduced.

Key words: wind-induced response; coupling; nonlinear

(责任编辑: 周建兰)