

大型超高层建筑的随机风振响应分析

卜国雄¹, 谭平², 张颖³, 周福霖²

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 深圳 518055, Buguoxiong@126.com; 2. 广州大学 教育部工程抗震减震与结构安全重点实验室, 广州 510405; 3. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: 大型超高层建筑结构具有自由度数庞大、小阻尼及振型密集等特点, 针对传统方法在处理大型复杂实际结构受多点随机激励中存在计算效率比较低或精确性不高等不足, 提出了基于虚拟激励法的复杂超高层建筑结构的随机风振响应分析方法. 运用虚拟激励法将脉动风荷载作用下的多点激励转化为简谐虚拟激励向量, 并根据平稳随机理论推导出相应风振响应的表达式, 自动计入了多点风激励的空间相关性和振型间的相关性. 以目前在建的深圳第一高楼——深圳金基大厦为算例, 分析结果验证了方法的有效性和准确性, 可以提高多点随机激励响应的计算效率和精确度, 在大型高层实际工程风振响应计算分析中有较强的实用价值.

关键词: 虚拟激励法; 大型超高层结构; 风致响应; 多点激励; 耦合性

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)02-0175-05

Random wind-induced response analysis of a large-scale and high-rise building

BU Guo-xiong¹, TAN Ping², ZHANG Ying³, ZHOU Fu-lin²

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China, Buguoxiong@126.com; 2. Key Laboratory of Earthquake Resistance and Absorption Engineering & Structure Safety of Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China; 3. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Considering the shortages of traditional methods in calculating a large-scale and complex structure with multiple-point wind excitations, the random wind-induced response analysis of large-scale and high-rise structures based on pseudo excitation method is presented. The multiple-point fluctuating wind loads are changed into harmonic pseudo-excitation vector by using the pseudo-excitation method, then the expression of wind-induced response can be derived according to the stationary stochastic theory which can automatically take the space correlation of multiple-point wind-excitations into account. The highest building under construction in Shenzhen city, Jin-Ji Tower, is employed as a numerical example. Results show that this method exhibits high accuracy and efficiency, and it is valuable in the analysis of stochastic wind-induced response of real complex and high-rise tower structures.

Key words: pseudo excitation method; large-scale and high-rise building; wind-induced response; multiple-point excitations; coupling

近年来大型高层建筑向着更高、更柔的方向发展, 结构的自振周期更接近风荷载的卓越周期, 结构的风致振动(抖振)更加激烈, 特别是脉动风

荷载作用^[1]. 持续的振动除造成结构的疲劳损伤外, 还会引起居住者的不舒适感. 因此, 有必要对这种大型超高层建筑进行脉动风荷载下的动力响应分析, 以利于更好地把握结构的动力性能.

目前进行风振响应分析的方法主要是 CQC 法和 SRSS 法. CQC 方法较好地考虑了密集振型间的强耦合性, 是目前公认的最精确解. 但是, 由于大型复杂工程结构的自由度数非常多, 直接采

收稿日期: 2009-02-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50608021); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20061078001).

作者简介: 卜国雄(1981—), 男, 博士研究生;

周福霖(1939—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

用 CQC 方法存在计算量巨大的问题,影响了它的工程适用性,因此工程计算中普遍采用近似 SRSS 法. SRSS 方法以忽略振型的交叉项为代价,当结构振型频率分离较好时,可以得到良好的计算精度. 对于大型超高层结构,其动力特性具有自振周期长、频率密集和阻尼较小的特点,采用 SRSS 法计算的结果或偏于保守或偏于危险. 林家浩^[2-3]提出了一种适用于大型复杂结构随机振动分析的高效精确算法——虚拟激励法(简称 PEM). PEM 法和传统 CQC 算法都为理论上的精确解,而计算效率却提高 2~4 个数量级. 由于其大大地提高了精确分析大型结构随机振动的效率,得到较为广泛的应用^[4-5]. PEM 方法主要用于结构的抗震分析^[6],近年来结构抗风领域也有不少应用^[7-8].

本文将虚拟激励法引用到大型超高层建筑的风振反应分析中来,既很好地考虑这种复杂高耸结构阻尼小和密集振型之间的耦合性,又能大大提高计算效率和精确度,为大型复杂高层结构的风振动力响应分析提供了一种新的方法. 最后,以深圳金基大厦为算例,进行了基于虚拟激励法的风致抖振分析,结果表明了方法的有效性.

1 随机响应虚拟激励法的原理

虚拟激励法^[9]的基本思想是当线性系统受到功率谱密度为 $S_{xx}(\omega)$ 的平稳随机激励 $x(t)$ 时,对应响应 y 的功率谱 $S_{yy}(\omega)$ 可表示为

$$S_{yy}(\omega) = |H|^2 S_{xx}(\omega). \tag{1}$$

式中: H 为频率响应函数. 即当随机激励被单位简谐激励 $e^{i\omega t}$ 代替时,相应的简谐响应为 $y = He^{i\omega t}$. 则若在激励 $e^{i\omega t}$ 前乘以常数 $\sqrt{S_{xx}}$,即构造了一虚拟激励:

$$x(t) = \sqrt{S_{xx}} e^{i\omega t}, \tag{2}$$

则相应虚拟响应量 \bar{y}_1 和 \bar{y}_2 的自谱密度和互谱密度可表示为

$$\bar{y}_1^* \bar{y}_1 = |H|^2 S_{xx} = S_{yy}, \tag{3}$$

$$\bar{y}_1^* \bar{y}_2 = H_1^* \sqrt{S_{xx}} e^{i\omega t} \cdot H_2 \sqrt{S_{xx}} e^{i\omega t} = S_{y_1 y_2}. \tag{4}$$

2 基于虚拟激励法的复杂高层结构风振响应分析

脉动风荷载作用在高层结构上引起的振动,可看成是多点平稳随机激励下结构的随机振动问题,其动力微分方程为

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{P(t)\}. \tag{5}$$

式中: $[M], [C], [K]$ 分别为结构层的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{y\}, \{\dot{y}\}, \{\ddot{y}\}$ 分别为结构层的位移、速度和加速度向量; $\{P(t)\}$ 为作用在结构上的脉动力风荷载向量.

根据振型分解法,并近似假定结构的阻尼矩阵也具有正交性,可将位移展开为

$$\{y(t)\} = [\Phi]\{u(t)\} = \sum_{j=1}^q u_j \{\phi\}_j. \tag{6}$$

式中: q 为所选取的振型数; u_j 为第 j 阶振型的广义位移.

根据规范,一般取 Davenport 脉动风速谱作为激励谱 S_{ff} ,其不随高度变化. 当知道了结构各点高度处的平均风速 V_j , 风荷载体型系数 U_s 及迎风面面积 A_j 后,就可以得出自荷载谱:

$$S_{pp} = U_s V_j A_j S_{ff}. \tag{7}$$

如果考虑各随机激励之间的相关性,则引入相关系数 ρ ,便可形成荷载功率谱矩阵 $S_{pp}(\omega)$. 显然, $S_{pp}(\omega)$ 为非负的 Hermite 矩阵,因此可以对其进行 LDL* 分解

$$S_{pp}(\omega) = LDL^*. \tag{8}$$

式中: L 为对角元素均为 1 的下三角矩阵, D 为实对角矩阵. 取 $d = \sqrt{D}$,则有:

$$S_{pp}(\omega) = L \cdot d \cdot d \cdot L^* = (Ld)^2, \tag{9}$$

所以,构造的 n 个(原来荷载列向量的个数)虚拟激励向量为

$$\{\bar{x}(t)\} = L \cdot d \cdot e^{i\omega t}. \tag{10}$$

于是求得结构的虚拟位移

$$\{\bar{y}(t)\} = \sum_{j=1}^q \gamma_j \{\phi\}_j H_j \sqrt{S_{xx}} = \sum_{j=1}^q \gamma_j H_j L \cdot d \cdot e^{i\omega t}. \tag{11}$$

结构的位移方差可通过对自功率谱密度的积分得到:

$$\sigma_y^2 = \int_0^\infty S_{yy} d\omega = \int_0^\infty \{\bar{y}(t)\}^* \{\bar{y}(t)\}^T d\omega. \tag{12}$$

将式(12)的右端中响应 y 的功率谱矩阵展开,可得

$$S_{yy} = \{\bar{y}(t)\}^* \{\bar{y}(t)\}^T = \left(\sum_{j=1}^q \gamma_j \{\phi\}_j H_j \sqrt{S_{pp}} \right)^* \left(\sum_{k=1}^q \gamma_k \{\phi\}_k H_k \sqrt{S_{pp}} \right) = \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^q \gamma_j \gamma_k \{\phi\}_j \{\phi\}_k^T H_j^* H_k S_{pp}(\omega). \tag{13}$$

式中: γ_j, γ_k 为第 j, k 振型参与系数; $\{\phi\}_j, \{\phi\}_k$ 分别为第 j, k 振型向量; H 为频率响应函数; H^* 代表其复共轭转置.

式(13)右端跟传统的(CQC法)精确计算公式的结构位移响应功率谱矩阵完全一样.当 n 和 q 都很大时,按上式计算工作量很大.简化计算,工程中一般将振型交叉项忽略掉,而得到以下近似的SRSS公式:

$$[S_{yy}] \approx \sum_{j=1}^q \gamma_j^2 \{\phi\}_j \{\phi\}_j^T |H|_j^2 S_{pp}. \quad (14)$$

比较上面 3 个式子得知,基于虚拟激励法来求解复杂高层结构的风振响应,跟传统的 CQC 方法在数学上是等价的,是理论上的精确解,但是计算效率却提高了 2~4 个数量级.

4 响应极大值

脉动风荷载下结构的响应 $y(t)$ 可以看成均值为零的高斯平稳随机过程,假设水平超越率服从泊松分布^[10],则峰值因子 g 的均值和方差分别为

$$u_p = (2\ln v_0^+ T)^{0.5} + \frac{\gamma}{(2\ln v_0^+ T)^{0.5}},$$

$$\sigma_p = \frac{\pi^2}{6(2\ln v_0^+ T)}.$$

式中: T 为风荷载持时; v_0^+ 为响应 $y(t)$ 在单位时间内以正斜率与零线交差的次数; γ 为欧拉常数.

则相应的响应 $y(t)$ 的极大值为

$$y_{\max}(t) = g \cdot \sigma_y.$$

5 工程算例

金基大厦坐落于深圳市,总高度 439 m,建筑面积约 20 万 m^2 ,结构总质量约为 43.7 万 t,为未来深圳市的标志性建筑.该建筑有限元模型共由 12 629 个节点单元,91 530 个杆件单元,23 269 个壳单元组成,是典型的大型复杂超高层建筑,而且其基本周期达到了 7.5 s 多,对风荷载非常敏感,因此有必要进行风荷载下的动力响应分析.

考虑到金基大厦结构的高柔特性,将三维有限元模型简化成为 28 个质点共 84 个自由度(每个质点含 2 个平动和 1 个绕竖向轴转动自由度)的糖葫芦串模型,如图 1 和图 2 所示.

对简化的三维串联多质点系模型在 MATLAB 中进行模态分析,振型描述以及振型图如表 1 和图 3 所示.

该建筑所处地貌为 C 类,根据 GB5009-2001《建筑结构荷载规范》,平均风剖面指数和梯度风高度别取 $\alpha = 0.22$ 和 $H_c = 400$ m.按 100 年重现期,深圳地区的基本风压取 0.9 kN/m^2 ,选取 Davenport 脉动风速谱为标准风速谱.

对结构进行频域分析,分别得到关键点的位移功率谱曲线和加速度功率谱曲线,如图 4~7 所示.由图 4 和图 5 可知,主体顶部的位移以第一、二阶振型的反应为主,即分别为弱轴一弯和强轴一弯,前 4 阶振型几乎占了 95% 以上,余下的振型贡献非常小;而主塔顶部加速度功率谱的能量覆盖的频率范围相对较广,前 20 阶振型对加速度的影响都比较大,不可忽略,见图 6 和图 7.



图 1 金基大厦的三维有限元模型

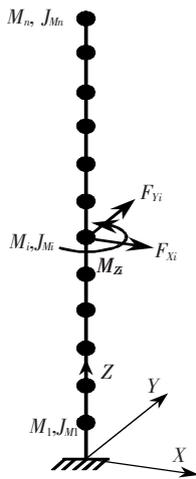


图 2 简化的串联多质点模型

表 1 前四阶振型的动力特性

振型阶数	周期/s	频率/Hz	圆频率/(rad · s ⁻¹)	振型描述
1	7.513	0.133	0.836	塔体弱轴一弯
2	7.283	0.137	0.863	塔体强轴一弯
3	2.300	0.435	2.731	塔体弱轴二弯
4	1.957	0.511	3.210	塔体强轴二弯

选取最不利的风荷载(攻风角为 90°),运用虚拟激励法对结构进行随机风振响应分析,分别得出整个结构在 10 年重现期脉动风荷载下各个节点处的位移根方差及加速度根方差,如图 8 及图 9 所示.

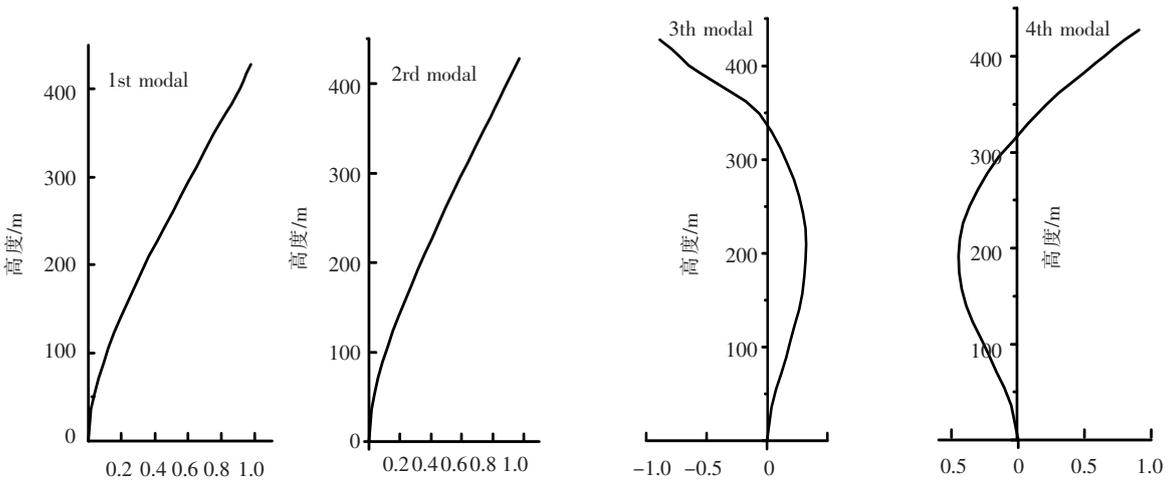


图 3 前 4 阶振型图

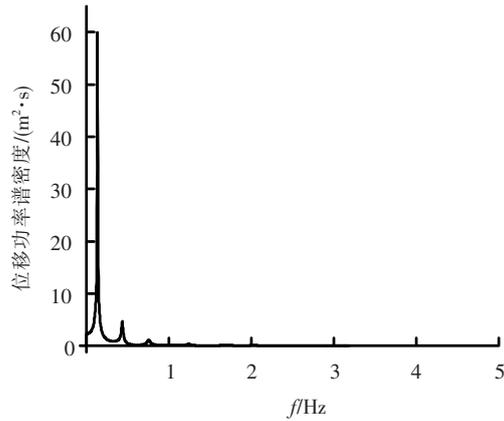


图 4 主体顶(439 m) X 方向位移功率谱曲线

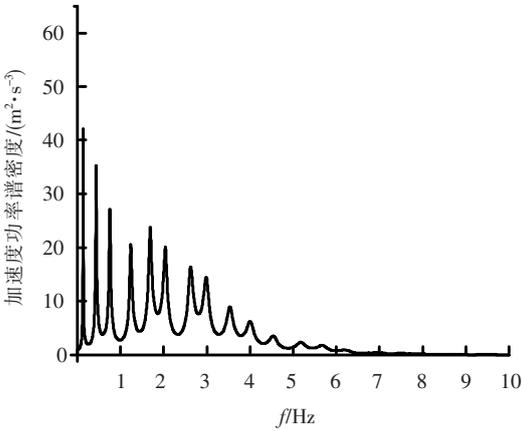


图 5 主体顶(439 m) X 方向加速度功率谱曲线

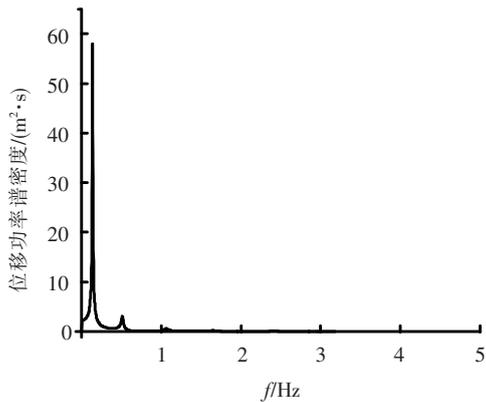


图 6 主体顶(439 m) y 方向位移功率谱曲线

根据前面极大值的推导过程,取风荷载的响应持时为 500 s,可以求得结构响应的峰值因子 $g = 3.12$,便可求出结构的最大响应值.表 2 为 PEM 法算出的顶部的最大位移和加速度响应与风洞试验结果的比较.从表中可以看出,风洞试验的结果稍偏大.出现这种情况的原因主要是由于风洞试验中的峰值因子取值为 3.5.

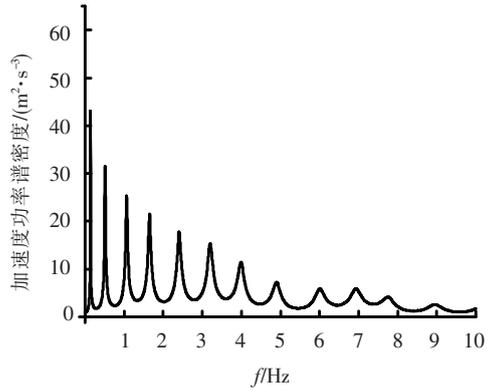


图 7 主体顶(439 m) y 方向加速度功率谱曲线

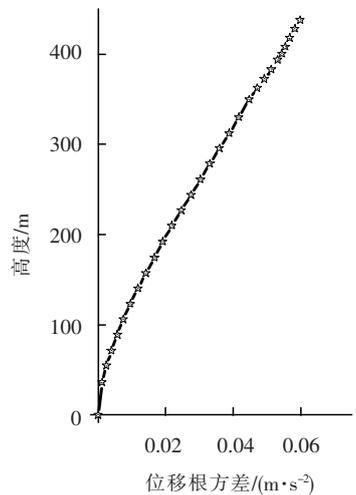


图 8 主体顶部位移均方差

本算例采用虚拟激励法来求解高耸结构的风致抖振分析,较好地考虑了密集振型间的耦合性,

在数学上跟 CQC 方法等效,同样是精确解.但是在计算效率上却相差很大,当考虑 10 阶振型时,PEM 法的计算时间只需 8 s,而 CQC 法却需要 400 多秒;当考虑 80 阶振型时,PEM 法只需 80 s 左右,而 CQC 法却耗时 2 个多小时;如果再增加振型的话,CQC 法计算耗时无法忍受.

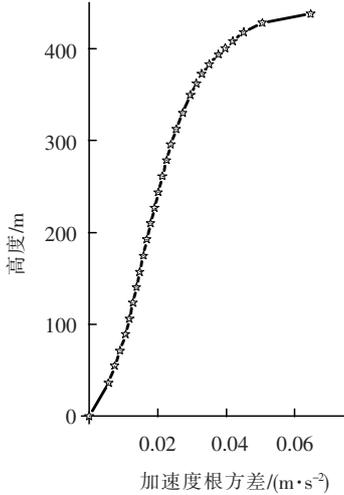


图9 主体顶部加速度均方差

表2 虚拟激励法与风洞试验结果比较

项目	顶部位移极值/m	顶部加速度极值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
FEM 法	0.188 6	0.201 9
风洞试验	0.221 0	0.236 7

6 结 论

复杂大型超高层结构具有自由度多,动力特性复杂的特点,传统的 CQC 法在分析风振响应时计算量巨大,难以在实际工程上运用.本文进行了基于虚拟激励法的复杂高耸结构的风致响应分析,既很好地考虑这种复杂高耸结构阻尼小和密集振型之间的耦合性,又能大大提高计算效率和精确度,是未来大型高层建筑结构的风致抖振分析的发展方向.以在建的工程项目——深圳金基大厦为工程算例,证明了所提出的振型相对密集度的正确性及方法的有效性.

参考文献:

- [1] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering [M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [2] 林家浩. 随机地震响应的确定性算法[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1): 89-93.
- [3] LIN Jiahao. A fast CQC algorithm of PSD matrices for random seismic responses [J]. Computers & Structures, 1992, 44 (3): 683-687.
- [4] LIN Jiahao, ZHANG Wenshou, LI Jianjun. Structural response to arbitrarily coherent stationary random excitations [J]. Computers & Structures, 1994, 50 (5): 629-634.
- [5] LIN Jiahao, ZHANG Wenshou, LI Jianjun. Structural response to arbitrarily coherent stationary random excitations [J]. Computers & Structures, 1994, 50 (5): 629-634.
- [6] 薛素铎,曹资,王雪生,等. 多维地震作用下网壳结构的随机分析方法[J]. 空间结构, 2002, 8 (1): 44-51.
- [7] 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[J]. 应用力学学报, 2007, 24(2): 263-266.
- [8] XU Youlin, ZHANG Wenshou, KO J M, et al. Pseudo-excitation method for vibration analysis of wind-excited structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aero Dynamics, 1999, 83:443-454.
- [9] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [10] DAVENPORT A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961: 28:87-96.

(编辑 赵丽莹)