

doi: 10.3969/j.issn.1007-855x.2011.02.006

索桁式玻璃幕墙风荷载时程模拟及风振响应

王莺歌¹ 李正农²

(1. 广东嘉应学院 土木工程系 广东 梅州 514015; 2. 湖南大学 土木工程学院 湖南 长沙 410082)

摘要: 在利用时域分析法研究索桁式玻璃幕墙在脉动风荷载作用下的响应情况时,需要得到其表面脉动风压时程数据.以随高度变化的风速谱(Simiu谱)为基础,通过自回归线性滤波法,模拟出空间多结点相关脉动风压时程随机序列;由模拟结果计算出的功率谱与目标功率谱吻合良好.将所得时程数据加载在索桁式玻璃幕墙的有限元模型上进行瞬态计算,对位移结果做统计分析,获得适用于结构设计使用的风振系数.

关键词: 索桁式玻璃幕墙; 风压时程序列; 自回归法; 风压功率谱; 风振系数

中图分类号: TU383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2011)02-0026-06

Fluctuating Wind's Simulation and Wind-Induced Response Analysis of Cable Truss Supporting Glass Curtain

WANG Ying-ge¹, LI Zheng-nong²

(1. Department of Civil Engineering, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015 China;

2. Department of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The data of surface fluctuating wind pressure time interval is necessary in researching cable truss supporting glass curtain wall's response to fluctuating wind load. Based on wind velocity spectrum (the Simiu spectrum) changed with height, the random sequence of relevant spatial multi-nodes' fluctuating wind pressure time interval is simulated by Autoregression method of linear filtering. The calculated power spectrum according to simulation tallies fit well with the target one. Through adding the calculated data of time interval to the finite element model of the cable truss supporting glass curtain wall to compute the transient state, and analyzing the displacement result, the wind vibration coefficient is finally obtained.

Key words: cable truss supporting glass curtain; wind pressure time series; Autoregression method; wind pressure power spectrum; wind vibration coefficient

0 引言

玻璃幕墙是一种常见的围护结构,对于该种结构来说,风荷载是其主要承受的荷载形式.风荷载包含长周期的平均风荷载和短周期的脉动风荷载.我国对于玻璃幕墙风荷载的取值有着明确的规定^[1],平均风荷载作为静力荷载处理,而脉动风荷载的效应则利用阵风系数来考虑,可根据建筑结构荷载规范确定^[2].但阵风系数 β_{gz} 只与离地高度及地面粗糙度有关,没有考虑到结构自身的动力特性.国际风工程规范建议利用动态响应系数来计算脉动风的影响^[3],究其本质与我国规范是一致的.为了研究受结构本身影响的脉动效应,需要进行结构响应分析.结构响应研究方法主要分为时域分析法和频域分析法.其中频域分析法是利用风压谱,通过动力传递系数得到反应谱,再由随机理论对反应谱积分计算出结构动力响应

收稿日期:2010-10-11. 基金项目:国家自然科学基金(50978094);“十一·五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ06B05-5);梅州市自然科学基金项目(2009KJ24).

作者简介:王莺歌(1976-),女,在读博士,副教授.主要研究方向:结构抗风与抗震. E-mail: ummerc29@126.com

值,该方法广泛应用于高层、大跨结构的风振响应计算中^[4-6].国内学者曾利用模态叠加法对单索幕墙结构进行了风振响应频域分析^[7],但是这种方法的缺点是不能够考虑结构的非线性,计算结果具有一定的近似性.时域分析法则直接运用风洞实验的风压时程或计算机模拟的风压时程作用于结构计算模型上,通过动力计算直接得到结构的动力响应.时域分析法能够得出自然风产生的结构动力响应与时间的关系,还能够考虑到结构的非线性影响,在结构风工程研究中有着重要意义^[8].时域分析法对于计算玻璃幕墙这样的非线性柔性结构具有一定的优越性,江勇等人通过风模拟而生成一系列准静态荷载,结合有限元方法,对点支式玻璃幕墙进行分析^[9],得到了可靠的结果.

当没有风洞实验数据时,利用数值模拟来获得风荷载时程是行之有效的方法.在风荷载的各种数值模拟方法中,平稳高斯随机过程的模拟方法可以分为两大类:谐波叠加法和线性滤波法.谐波叠加法基于三角级数求和,也称为频谱表示法,包括 CAWS 法、WAWS 法等^[10].线性滤波法^[11-12],即时间系列法,就是基于线性滤波技术,将均值为零的白噪音随机序列通过滤波器,使其输出具有指定谱特征的随机过程.包括自回归(AR)法、滑动平均(MA)法、自回归滑动平均(ARMA)法等.其中 AR 法计算量小,速度快,广泛应用于随机振动分析中.

索桁结构支撑的玻璃幕墙具有典型的非线性特性,利用时域法分析其动力响应更为合适.本文采用自回归线性滤波法模拟出索桁式玻璃幕墙表面多点风压时程,进行非线性有限元瞬态分析,计算结构的动力反应,得到工程计算中使用的风振系数.

1 脉动风荷载模拟

1.1 脉动风压功率谱

脉动风具有随机性,随时间和空间变化,通常被认为是具有零均值的平稳高斯随机过程.脉动风速可以通过其功率谱来描述.脉动风速功率谱主要反映了脉动风中各个频率段所对应的能量分布强度,从频率角度描述过程统计特征的数字特征.脉动风速谱由强风观测记录处理得出,常见的风速谱有:不考虑湍流积分尺度随高度变化的 Davenport 谱、Harris 谱等;与考虑湍流积分尺度随高度变化的 VonKarman 谱、Simiu 谱等.

本文使用考虑了高度影响的顺风向风速 Simiu 谱^[13],其函数形式为:

$$\frac{fS_v(z, f)}{u_*^2} = \frac{200fz/\bar{v}}{[1 + 50(fz/\bar{v})]^{5/3}} \quad (1)$$

式中: $S_v(z, f)$ 为风速谱; z 为测点高度; f 为脉动风速频率; u_* 为摩擦风速; \bar{v} 为 z 高度的平均风速.

鉴于风压 w 与风速 v 的关系 $w = \frac{\rho v^2}{2g}$, ρ 为空气密度, g 为重力加速度,根据脉动风速的功率谱可以求出脉动风压的功率谱,得到:

$$S_w(y, z, f) = \frac{4\bar{w}^2 S_v(z, f)}{\bar{v}^2} \quad (2)$$

式中: $S_w(y, z, f)$ 为脉动风压功率谱函数; y 为横向坐标; \bar{w} 为 z 高处的平均风压.

1.2 脉动风压空间相干函数与相关函数

空间各点的脉动风压是相互影响的,其空间相关性可用相干函数(Coherence Function)表示.这里使用 Davenport 建议的频率域相关系数公式,并且将其扩展到三维^[14].

$$r_{ij}(f) = \exp \left\{ \frac{-f \sqrt{C_x^2(x-x')^2 + C_y^2(y-y')^2 + C_z^2(z-z')^2}}{\frac{1}{2}[\bar{v} + \bar{v}']}} \right\} \quad (3)$$

式中: $r_{ij}(f)$ 为空间两点脉动风压的相关系数; C_x, C_y, C_z 分别为空间两点各方向的衰减系数; x, y, z 和 x', y', z' 分别为空间两点的坐标; \bar{v} 和 \bar{v}' 为两点的平均风速.

n 维脉动风压的自功率谱密度函数可利用风压功率谱密度函数直接推导得出.互功率谱密度函数

$S_{ij}(f)$ 需要考虑空间两点的相关性, 已知 i, j 点自谱密度 S_{ii} 和 S_{jj} 可由下面公式计算^[15]:

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \cdot r_{ij}(f) \tag{4}$$

利用维纳 - 辛钦(Wiener - Khintchine) 公式计算相关函数^[15]:

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^\infty S_{ij}(f) \cos(2\pi f\tau) df, \quad i, j = 1, \dots, n \tag{5}$$

式中: $R_{ij}(\tau)$ 为 i, j 点相关函数; τ 为相关函数的自变量.

1.3 AR 法风压时程的模拟

文献[16]中提出脉动风压向量可由下式表示:

$$w(t) = Cu(t) \tag{6}$$

式中: C 是由 n 维脉动风压时程相关函数矩阵 R_N 的 Cholesky 分解下三角阵; $u(t)$ 为 n 个不相关的高斯随机过程向量. 根据 Iwatani 提供的扩展自回归模型, 可以生成 n 个随机过程;

$$R_N = CC^T \tag{7}$$

$$u(t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k u(t - k\Delta t) + N(t) \tag{8}$$

式中: p 为 AR 模型选用的阶数; Δt 为最小时间间隔; Ψ 为 AR 法模型系数矩阵, 可由式(10) 计算; $N(t)$ 为独立随机过程向量, 可由式(12) 求得. 根据有时滞的互相关矩阵, 由 Yule - Walker 方程得到:

$$R(k\Delta t) = \sum_{k=1}^p \Psi_k R[(m - k)\Delta t] \quad m = 1, \dots, p \tag{9}$$

利用高斯消去法求出所需参数:

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(0) & R(\Delta t) & \cdots & R[(p - 1)\Delta t] \\ R(\Delta t) & R(0) & \cdots & R[(p - 2)\Delta t] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R[(p - 1)\Delta t] & R[(p - 2)\Delta t] & \cdots & R(0) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R(\Delta t) \\ R(2\Delta t) \\ \vdots \\ R(p\Delta t) \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中 R_N 可以根据式(11) 求出, 对 R_N 进行 Cholesky 分解能够得到下三角阵 C .

$$R(0) = \sum_{k=1}^p \Psi_k R(k\Delta t) + R_N \tag{11}$$

$$N(t) = C \cdot n(t) \tag{12}$$

式中: $n(t)$ 为一组相互独立的具有零均值和单位方差的随机序列.

2 玻璃幕墙结构风荷载模拟

2.1 工程简介

需要计算的索桁式玻璃幕墙结构布置形式如图 1 所示. 结构整体高度和宽度都为 10.8 m, 其支撑体系由两榀纵向刚性桁架与纵、横向的索桁体系组成, 位于某图书馆一侧 2 ~ 4 楼, 楼层层高 3.6 m. 钢桁架的立管采用 $\Phi 65 \times 3$ 钢管, 支管和索桁架的支撑腹杆采用 $\Phi 48 \times 3$ 钢管, 拉索采用 $\Phi 20$ 钢芯拉索, 墙面为 0.016 m 厚的钢化玻璃.

2.2 玻璃幕墙脉动风荷载

进行风压时程模拟时, 包含了大量的参数, 各参数是否合理非常重要. 一部分参数可以根据具体工程情况选取; 另一部分如采样频率, 时间间隔, AR

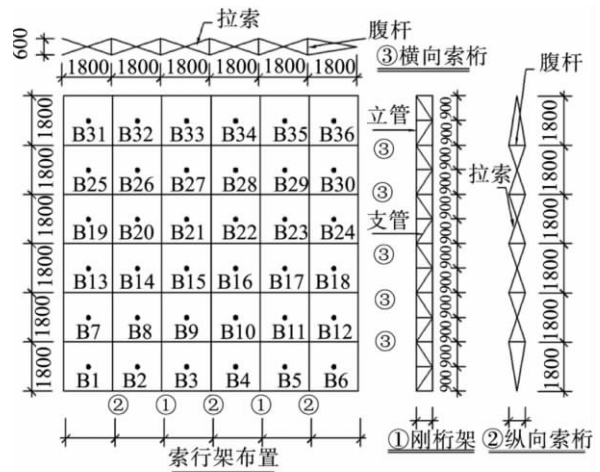


图1 玻璃幕墙结构布置
Fig.1 Structure of glass curtain wall

计算阶数等参数并不是非常直观,而这些参数往往影响到计算速度、模拟精度等,甚至有的时候直接决定模拟过程能否进行.一般来说采样频率越高,则模拟的越精确,但同时以计算量增大为代价.最小时间间隔 Δt 的取值不宜过小,建议不小于 0.1 s,否则将出现错误. AR 计算阶数取两相邻模型间残差平方和变化不显著时的阶数,一般在 4~6 间.计算频率的截取范围不宜过大,尤其是在较高频率所包含的能量已经非常少了.有研究表明截取频率上限取到 3 以后,已经能够包含总能量的 95% 以上,没有必要再扩大计算频率的范围.

根据上文阐述的方法,编制 Matlab 程序,模拟玻璃幕墙表面脉动风压.玻璃幕墙由 36 块钢化玻璃板组成,板的编号参见图 1.选取每块玻璃板的几何中心作为模拟点坐标位置.按照《建筑结构荷载规范》^[2]取某地区 50 年一遇标准风压 0.5 kN/m^2 ,10 m 高度处的平均风速 20 m/s; B 类地貌,地面粗糙度指数 $\alpha = 0.16$; 采样频率 100 Hz; 模拟时间长度 120 s; 时间间隔 0.2 s; AR 阶数取 3.

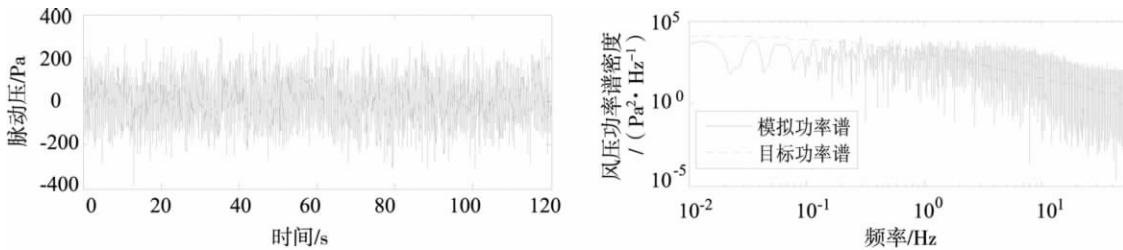


图2 B1模拟脉动风压时程和功率谱曲线
Fig.2 Time series & PSD curves of B1's simulated wind pressure

图 2 分别给出了 B1 板的脉动风压时程曲线以及模拟脉动风压功率谱与目标功率谱的对比结果.脉动风压是一个随机过程,其正确性需要通过统计意义上的检验,常用的检验方法是求生成的时程序列的功率谱,将其与目标功率谱相比较.从图 2 中可以看出模拟风压时程的功率谱与目标谱拟合得较好.

3 结构动力特性和响应计算

3.1 有限元模型及动力特性

本文采用 ANSYS 有限元计算软件,建立模型(图 3)并进行非线性瞬态计算.模型中的索单元采用 link10,这种单元具有单向张拉特性,适合模拟索的只能承受拉力的工作性能;桁架采用 beam44 单元,该单元适合模拟压弯构件受力;玻璃幕墙采用 shell63 单元;玻璃板、桁架、拉索依靠连接处共有的节点耦合在一起,保证各构件具有相同的位移.

表 1 中是该结构的前 16 阶自振频率,可以看出结构自振频率的分布非常密集,并且有频率对出现.图 4 为结构前 4 阶振型.其中第一阶振型以整体振动为主,其余各阶振型呈现出局部振动特性.

3.2 响应计算方法

对于多自由度结构,其在风荷载作用下的运动方程可表示为^[17]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (13)$$

$[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构的质量、阻

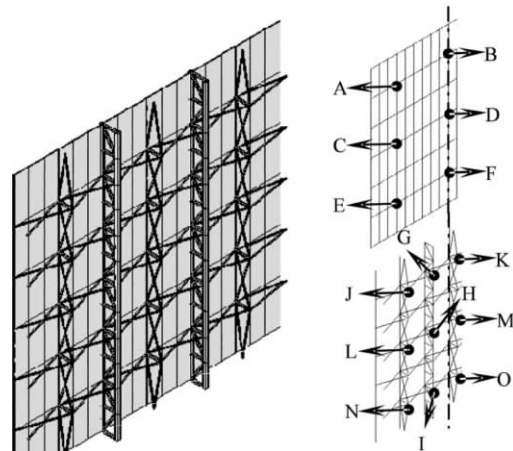


图3 玻璃幕墙有限元模型
Fig.3 Finite element model of glass curtain wall

表 1 结构自振频率

Tab. 1 The frequencies of structure

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	9.84	5	13.04	9	14.83	13	15.52
2	12.88	6	13.36	10	14.92	14	15.60
3	12.94	7	14.55	11	14.97	15	15.74
4	13.01	8	14.69	12	15.17	16	15.86

尼和刚度矩阵, $\{u\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{\ddot{u}\}$ 为结构加速度、速度、位移矩阵, $\{F(t)\}$ 为脉动风荷载时程.采用 Newmark 逐

步积分法对运动方程求解. Newmark 法利用有限差分公式对结构状态向量进行递推. 计算中的阻尼采用粘滞性阻尼 Rayleigh 阻尼矩阵, 表达式为:

$$[C] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K] \tag{14}$$

α, β 可以根据一、二阶角频率和阻尼比计算.

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\zeta_i\omega_j - \zeta_j\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \tag{15}$$

$$\beta = \frac{2(\zeta_j\omega_j - \zeta_i\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \tag{16}$$

式中: ω_i, ω_j 分别为第 i 和 j 阶模态对应的圆频率 ζ_i, ζ_j 为第 i 和 j 阶模态的阻尼比.

3.3 响应结果

提取玻璃板、桁架、拉索等构件上结点的位移, 所提取结点分布如图 3 所示. 图 5 分别给出了玻璃板中心结点 D 和桁架上结点 G 的位移时程变化. 图 6 是这两个结点位移的功率谱曲线. 可以看出两结点在第一阶频率附近都出现了强烈的共振反应. 桁架上的结点在某些高阶频率上也有微弱的共振峰值.

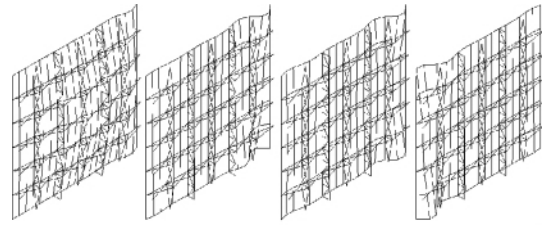


图 4 前 4 阶振型
Fig. 4 The first 4 mode

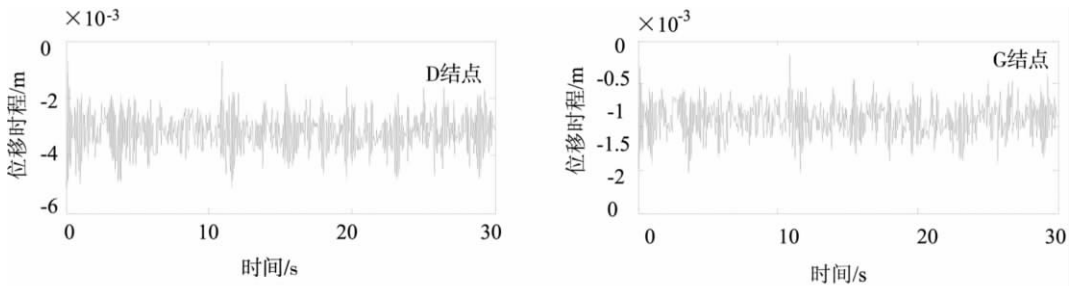


图 5 结点位移时程
Fig.5 Time series of nodal displacement

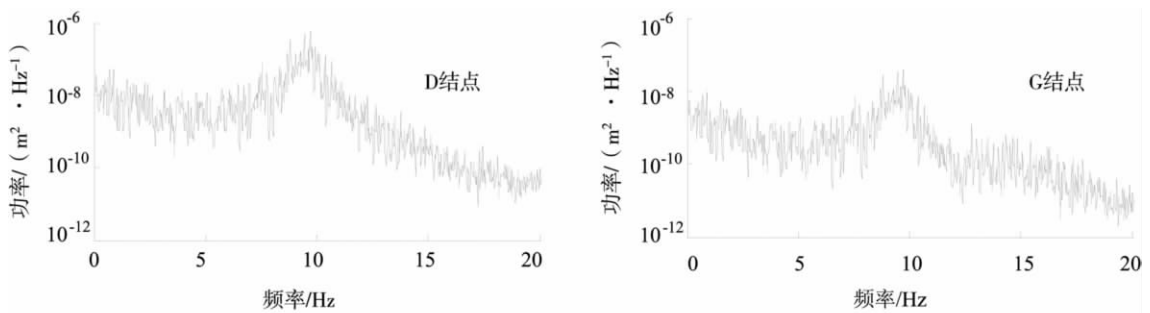


图 6 结点位移功率谱
Fig.6 PSD of nodal displacement

对所观察的结点位移进行统计分析, 将结果列于图 7 中, 其中最大平均位移和位移方差都出现在跨中, 分别达到 3.17 mm 和 0.71 mm.

进行结构动力反应分析归根结底是要得到动力风荷载对结构的影响规律, 进一步将其转化为方便实用的设计荷载. 在玻璃幕墙工程技术规范(JGJ102 - 2003)^[1]中对于风荷载随时间的变化都是通过采用阵风系数来解决的, 但采用阵风系数无法考虑到结构自身的特性. 随着大跨度玻璃幕墙的广泛应用, 结构的风致响应也越来越明显, 使用风振

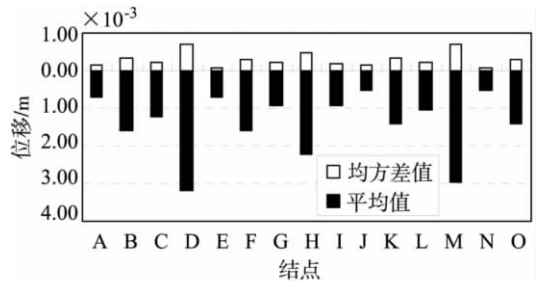


图 7 结点位移平均值与方差
Fig.7 Mean & rms nodal displacement

系数则更加能够反映结构在脉动风荷载作用下的实际状态. 风振系数包括荷载风振系数和位移风振系数. 结构上的荷载风振系数随所处部位不同而变化, 位移风振系数相对较稳定, 可对整个区域采用同一风振系数. 工程上常将风荷载的总响应与平均风产生的静位移之比定义为位移风振系数^[18].

$$\beta = \frac{U_{\max}}{U_s} = 1 + \frac{U_d}{U_s} \quad (17)$$

式中: U_s 为风平均荷载引起的位移; U_d 为脉动风荷载引起的位移响应, 是通过将风压的均方根乘以峰值因子得到的. 峰值因子取值可在 2.5 ~ 4 之间取值, 这里取具有 99.95% 保证率的 3.5. 已有研究表明, 采用位移风振系数取代规范中的荷载风振系数, 最终得到的内力基本一致.

表 2 列出了各观测点的风振系数, 以及按规范计算得到的阵风系数. 其中最大风振系数出现在拉索与腹杆交点 J 点, 达到 1.91; 而板上跨中的风振系数约为 1.78. 总体上拉索和桁架上节点的风振系数略大于同平面位置板上节点的. 可以看出对于幕墙墙面使用阵风系数能够满足结构安全要求, 但在较高位置的支撑节点上使用阵风系数将过低地估计了风荷载的脉动影响, 是偏于不安全的.

表 2 结点风振系数及阵风系数

Tab. 2 Wind vibration coefficients & gusty coefficients of nodes

结点编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
风振系数	1.68	1.74	1.61	1.78	1.44	1.68	1.80	1.75	1.71	1.91	1.83	1.72	1.83	1.59	1.77
阵风系数	1.75	1.75	1.80	1.80	1.87	1.87	1.75	1.80	1.87	1.75	1.75	1.80	1.80	1.87	1.87

4 结论

1) 通过计算可知, AR 法可以有效地模拟空间多点随机风荷载过程, 且能考虑其空间相关特性. 计算速度快, 精度高.

2) 利用模拟脉动风压时程对索桁式点支玻璃幕墙进行瞬态分析, 能够合理地考虑非线性行为, 得到其动力响应.

3) 玻璃幕墙在风荷载作用下做强迫振动, 并且可能会产生剧烈的共振反应. 利用统计结果可得到其风振系数, 为结构设计提供参考依据.

4) 索桁式玻璃幕墙支撑构件结点上的风振系数大于墙面的, 在设计时需提高设计标准.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. JGJ102 - 2003 玻璃幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 中华人民共和国建设部. GB50009 - 2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] Davenport A G. Proposed New International (ISO) Wind Load Standard - Recent Advances in Wind Engineering [C]. Proceedings of the Second Asia - Pacific Symposium Wind Engineering. Beijing China. 1989 2: 1100 - 1214.
- [4] Thepmongkorn S, Kwok K C S. Wind - induced responses of tall buildings experiencing complex motion [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002 90: 515 - 526
- [5] Li Q S, Wu J R, Liang S G, et al. Full - scale measurements and numerical evaluation of wind - induced vibration of a 63 - story reinforced concrete tall building [J]. Engineering Structures, 2004 26: 1779 - 1794
- [6] 顾明, 周垣毅, 黄鹏. 大跨屋盖结构风致抖振响应研究 [J]. 土木工程学报, 2006 39(11): 37 - 42
- [7] 武岳, 冯若强, 沈世钊. 单层平面索网幕墙结构的风振响应分析及实用抗风设计方法 [J]. 计算力学学报, 2007 24(5): 633 - 637.
- [8] Chen L, Letchford C W. Parametric study on the along - wind response of the CAARC building to downbursts in the time domain [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004 92: 703 - 724.
- [9] 江勇, 王之宏, 王肇民. 柔性支承点支式玻璃幕墙的抗风设计与分析 [J]. 建筑结构, 2006 36(10): 91 - 94.
- [10] 王之宏. 风荷载的模拟研究 [J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44 - 52.

(下转第 37 页)

