

受演变随机激励结构响应的增维精细时程积分法

张文首*, 林家浩, 于 晓, 刘 婷婷

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对受非均匀调制演变随机激励结构响应问题进行了研究. 先用虚拟激励法将随机荷载化为确定性荷载, 然后将非均匀调制演变随机模型用状态方程表示. 借助于随机模型的状态方程表达式, 可构造出增维精细时程积分格式, 从而快速精确地求出结构的时变功率谱响应. 同 HPD-M 格式相比, 该方法不仅计算效率有所提高, 而且由于避免了矩阵求逆, 可直接处理具有刚体模态的结构. 最后通过两个算例与 HPD-M 格式的计算效率进行比较, 表明本方法具有显著的优越性.

关键词: 非平稳随机振动; 演变; 精细时程积分; 随机激励; 功率谱
中图分类号: O324 **文献标识码:** A

0 引 言

近 40 年, Priestley^[1]提出的非平稳演变随机激励在工程中得到了广泛的应用. 这种非平稳演变随机激励既考虑了激励强度非平稳性, 又考虑了频率非平稳性, 可恰当地描述地震动及路面对变速车辆的激励. 非平稳演变随机激励的常规算法涉及 Riemann-Stieltjes 积分, 计算非常繁复, 直接影响了其在工程中的应用. 文献 [2] 采用虚拟激励法避免了在实际计算中涉及 Riemann-Stieltjes 积分, 并采用精细积分对非均匀调制演变随机激励的结构进行了计算, 获得了相当满意的结果.

本文在文献 [2] 的基础上, 通过将常见的非均匀调制演变随机模型用状态方程来表示, 给出非均匀调制演变随机激励结构响应的增维精细时程积分法.

1 增维精细逐步积分

非平稳演变随机激励可用 Riemann-Stieltjes 积分表示如下:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k, t) e^{ik_t} dT(k) \quad (1)$$

其中 $T(k)$ 满足关系式

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_t} dT(k) \quad (2)$$

$$E[dT(k_1) dT(k_2)] = S_{xx}(k_1) \delta(k_2 - k_1) dk_1 dk_2 \quad (3)$$

式中: $x(t)$ 是一平稳随机过程, 其自谱为 $S_{xx}(k)$; δ 代表狄拉克函数; $A(k, t)$ 为确定性慢变调制函数, 由于 $A(k, t)$ 包含了振动能量随频率分布的非平稳性, 也称为非均匀调制函数. 如果假定 $A(k, t) = g(t)$, 即只考虑强度非平稳, 则式 (1) 简化为

$$f(t) = g(t) \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_t} dT(k) = g(t) x(t) \quad (4)$$

其中 $g(t)$ 为均匀调制函数^[3~5].

结构受地面加速度激励时的运动方程为

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = -M\ddot{x}_g(t), \quad y(0) = \dot{y}(0) = 0 \quad (5)$$

若 $\ddot{x}_g(t)$ 采用非均匀调制演变随机模型来表示, 则按照虚拟激励法, 如取

$$\ddot{x}_g(t) = A(k, t) S_{xx}(k) e^{ik_t} \quad (6)$$

收稿日期: 2006-05-20; 修回日期: 2007-02-05.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10472023).
作者简介: 张文首* (1963-), 男, 博士, 教授, E-mail: wszhang@dl.cn; 林家浩 (1941-), 男, 教授, 博士生导师.
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

就可将方程 (5) 的随机振动问题转化为下列确定性振动问题来求解。将式 (6) 代入 (5), 得

$$\underline{\underline{M}}\ddot{\underline{\underline{y}}}(t) + \underline{\underline{C}}\dot{\underline{\underline{y}}}(t) + \underline{\underline{K}}\underline{\underline{y}}(t) = - \underline{\underline{M}}\underline{\underline{E}}A(k,t) \times S_{xx}(k) e^{ik_t}, \underline{\underline{y}}(0) = \dot{\underline{\underline{y}}}(0) = \underline{\underline{0}} \tag{7}$$

在初始条件 $\underline{\underline{y}}(0) = \dot{\underline{\underline{y}}}(0) = \underline{\underline{0}}$ 下方程 (7) 进行逐步积分, 得到各种响应量的离散数值解, 则响应量的功率谱为

$$S_{yy}(k,t) = \dot{y}^*(k,t) \dot{y}(k,t) = |\dot{y}(k,t)|^2 \tag{8}$$

如果 $x_g(t)$ 可表示为下列状态方程形式:

$$\dot{\underline{\underline{\Gamma}}}(t) = \underline{\underline{A}}\underline{\underline{\Gamma}}(t), \quad \underline{\underline{x}}_g(t) = S_{xx}(k)\underline{\underline{C}}\underline{\underline{\Gamma}}(t), \underline{\underline{\Gamma}}(0) = \underline{\underline{\Gamma}}_0 \tag{9}$$

则可将方程 (9) 和 (7) 合并写成以下的状态方程:

$$\dot{\underline{\underline{v}}}(t) = \underline{\underline{H}}\underline{\underline{v}}(t), \underline{\underline{v}}(0) = (\underline{\underline{0}} \quad \underline{\underline{0}} \quad \underline{\underline{\Gamma}}_0)^T \tag{10}$$

式中

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{0}} & \underline{\underline{I}} & \underline{\underline{0}} \\ -\underline{\underline{M}}^{-1}\underline{\underline{K}} & -\underline{\underline{M}}^{-1}\underline{\underline{C}} & -\underline{\underline{S}}_{xx}(k)\underline{\underline{E}}\underline{\underline{C}} \\ \underline{\underline{0}} & \underline{\underline{0}} & \underline{\underline{A}} \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{v}}(t) = \begin{bmatrix} \underline{\underline{y}}(t) \\ \dot{\underline{\underline{y}}}(t) \\ \underline{\underline{\Gamma}}(t) \end{bmatrix} \tag{11}$$

式 (10) 的解为

$$\underline{\underline{v}}(t) = e^{\underline{\underline{H}}t} \underline{\underline{v}}_0 \tag{12}$$

其中 $\underline{\underline{v}}_0 = \underline{\underline{v}}(0)$.

对给定的时间步长 Δt , 有

$$\underline{\underline{v}}(\Delta t) = \underline{\underline{v}}_1 = \underline{\underline{T}}\underline{\underline{v}}_0, \underline{\underline{T}} = e^{\underline{\underline{H}}\Delta t} \tag{13}$$

以及递推的逐步积分公式

$$\underline{\underline{v}}_1 = \underline{\underline{T}}\underline{\underline{v}}_0, \underline{\underline{v}}_2 = \underline{\underline{T}}\underline{\underline{v}}_1, \cdots, \underline{\underline{v}}_{k+1} = \underline{\underline{T}}\underline{\underline{v}}_k, \cdots \tag{14}$$

问题归结为精细地计算 $e^{\underline{\underline{H}}\Delta t}$. 由于 $\underline{\underline{v}}_0$ 通常为复数向量, 为避免复数运算, 实际计算时可取 $\underline{\underline{v}}_0$ 为

$$\underline{\underline{v}}_0 = (\text{Re}(\underline{\underline{v}}_0) \quad \text{Im}(\underline{\underline{v}}_0)) \tag{15}$$

其中 $\text{Re}(\underline{\underline{v}}_0)$ 和 $\text{Im}(\underline{\underline{v}}_0)$ 分别为 $\underline{\underline{v}}_0$ 的实部和虚部.

2 常见非均匀调制演变随机模型

对非均匀调制演变随机模型的研究还比较

少, 文献 [2] 建议了一种指数衰减型非均匀调制函数

$$A(k,t) = U(k,t)g(t) = e^{-\frac{Z_0 k_t}{0.0k_a}} g(t) \tag{16}$$

式中: $g(t)$ 为调幅函数; $U(k,t)$ 为调频函数; k_a 和 t_a 是为了将 k 和 t 量纲一化而引入的频率与时间参数; Z_0 为调频因子. 常见的调幅函数如下:

$$g(t) = 1 \tag{17}$$

$$g(t) = \begin{cases} I_0(t^2/t_1^2); & 0 \leq t \leq t_1 \\ I_0; & t_1 \leq t \leq t_2 \\ I_0 e^{-c(t-t_2)}; & t \geq t_2 \end{cases} \tag{18}$$

$$g(t) = r_0(e^{-T_1 t} - e^{-T_2 t}) \quad (T_1 < T_2) \tag{19}$$

$$g(t) = e^{-T_t} \cos U_t \tag{20}$$

$$g(t) = \sin U_t \tag{21}$$

$$g(t) = (r_0 + r_1 t) e^{-T_t} \tag{22}$$

$$g(t) = r_0 e^{-T_t} \tag{23}$$

其中式 (18) 的 $g(t)$ 为分段函数. 对于分段函数, 需要计算出分界点值作为后一分段的起始值, 因此分界点应取为离散时间点. 下面给出主要的几种 $A(k,t)$ 在方程 (9) 中的 $\underline{\underline{A}}$ $\underline{\underline{C}}$ 和 $\underline{\underline{\Gamma}}_0$ 的表达式, 这几种 $A(k,t)$ 包括了常见的式 (17) ~ (23) 形式的调幅函数. 这里假定当 $t < 0$ 时 $g(t) = 0$. 引入记号 $d = \frac{Z_0}{k_a t_a}$, 则式 (16) 可记为 $A(k,t) = e^{-dk_t} g(t)$.

(1) 情况 1

$$A(k,t) = e^{-dk_t} g(t) = e^{-dk_t} e^{-T_t} = e^{-i_t} \tag{24}$$

其中 $i \equiv T_+ dk$.

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -i^2 - k^2 & -2i \end{bmatrix}, \underline{\underline{C}} = (1 \quad 0), \quad \underline{\underline{\Gamma}}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + i \begin{bmatrix} 0 \\ k \end{bmatrix} \tag{25}$$

(2) 情况 2

$$A(k,t) = e^{-dk_t} g(t) = t^2 e^{-dk_t} \tag{26}$$

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k^6(1+d^2)^3 & -6dk^5(1+d^2)^2 & -3k^4(1+d^2)(1+5d^2) & -4dk^3(3+5d^2) & -3k^2(1+5d^2) & -6dk \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T, \quad \Gamma_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \\ -6dk \\ -12k^2(1-d^2) \\ 20dk^3(3-d^2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 6k \\ -24dk^2 \\ -20k^3(1-3d^2) \end{pmatrix} \quad (27)$$

(3) 情况 3

$$A(k,t) = e^{-dk}g(t) = e^{-dk}(e^{-T_1t} - e^{-T_2t}) = \frac{e^{-i_1t} - e^{-i_2t}}{i_1 - i_2} \quad (28)$$

其中 $i_1 \equiv T_1 + dk, i_2 \equiv T_2 + dk$.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -i_1^2 - k^2 & -2i_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -i_2^2 - k^2 & -2i_2 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}^T, \quad \Gamma_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ -i_1 \\ 1 \\ -i_2 \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} 0 \\ k \\ 0 \\ k \end{pmatrix} \quad (29)$$

(4) 情况 4

$$A(k,t) = e^{-dk}g(t) = e^{-dk}e^{-T_1t} \cos Ut = e^{-it} \cos Ut \quad (30)$$

其中 $i \equiv T_1 + dk$.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -i^2 - (k+U)^2 & -2i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -i^2 - (k-U)^2 & -2i \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}^T, \quad \Gamma_0 = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} 1 \\ -i \\ 1 \\ -i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ k+U \\ 0 \\ k-U \end{pmatrix} \right] \quad (31)$$

(5) 情况 5

$$A(k,t) = e^{-dk}g(t) = e^{-dk} \sin Ut \quad (32)$$
$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -d^2k^2 - (k+U)^2 - 2dk & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -d^2k^2 - (k-U)^2 - 2dk & 0 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}^T, \quad \Gamma_0 = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ k+U \\ 0 \\ k-U \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} -1 \\ dk \\ -1 \\ dk \end{pmatrix} \right] \quad (33)$$

(6) 情况 6

$$A(k,t) = e^{-dk}g(t) = (r_0 + t)e^{-dk}e^{-T_1t} = (r_0 + t)e^{-it} \quad (34)$$

其中 $i \equiv T_1 + dk$.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -i^2 + k^2 & -4i(i^2 + k^2) & -6i^2 - 2k^2 - 4i \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T, \quad \Gamma_0 = \begin{pmatrix} r_0 \\ 1 - ir_0 \\ -2i + (i^2 - k^2)r_0 \\ 3i^2 - 3k^2 + 3ik^2r_0 - i^3r_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ kr_0 \\ 2k(1 - ir_0) \\ -6ik + 3i^2kr_0 - k^3r_0 \end{pmatrix} \quad (35)$$

对于其他形式的非均匀调制演变随机模型, 如文献 [6] 提出的分段非均匀调制函数

$$A(k,t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_s(k) \\ I(k) \frac{t^2}{[t_1(k) - t_2(k)]^2}; & t_s(k) < t \leq t_s(k) + t_1(k) \\ I(k); & t_s(k) + t_1(k) < t \leq t_s(k) + t_1(k) + T(k) \\ I(k)e^{c(t-t_2(k))}; & t > t_s(k) + t_1(k) + T(k) \end{cases} \quad (36)$$

显然可分段用式 (24) 和 (26) 处理.

3 $e^{H\Delta t}$ 的精细计算

对给定的 Δt , 引入微小时段

$$f = \Delta t / m, \quad m = 2^N \quad (37)$$

一般取 $N = 20$, 即 $f = \Delta t / 1\,048\,576$. 于是

$$e^{H\Delta t} = [e^{Hf}]^m \approx [I + Hf + (Hf)^2/2 + (Hf)^3/3 + (Hf)^4/4]^m \equiv [I + T_{\Delta}]^m \quad (38)$$

其中 T_{a0} 阵是一个小量. 为避免丧失有效数字, 采用递推公式^[7]

$$T_{ai} = T_{a,i-1} + T_{a,i-1}^2 (i = 1, 2, \cdots, N) \tag{39}$$

可由 T_{a0} 逐次高度精确地算出 T_{ai} , 并得到

$$e^{Ht} = I + T_{aN} \tag{40}$$

式 (38) (39) 和 (40) 便是 e^{Ht} 的精细计算公式. 精细积分是一种 2^N 类算法, 可在较少计算量的情况下达到任意给定的计算精度.

在式 (38) 和 (39) 中, 利用 H 的特点, 采用分块矩阵计算可大大提高计算效率.

4 算 例

例 1 JZ20-2MUQ 平台是 JZ20-2 油气田工程的生活动力平台, 位于渤海辽东湾北部, 见图 1. 平台结构部分参数为钢材的弹性模量 $E = 210$ MPa, 泊松比 $\nu = 0.3$, 质量密度 $d = 7\,800$ kg/m³. 平台上的全部质量平均加在顶层横梁的 4 个节点上 (每个集中质量块质量为 400 t). 平台有 240 个自由度, 基频为 5.47 rad/s, 各阶模态阻尼比皆取为 0.04. 平台受沿 x 方向的水平地面加速度 $\ddot{x}_g(t)$ 的激励, 非均匀调制函数取为

$$A(k, t) = U(k, t)g(t) = e^{-Z_0 \frac{k}{a}} g(t) \tag{41}$$

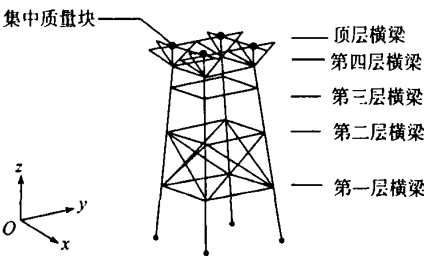


图 1 平台模型简图
Fig. 1 Schematic of platform model

式中: $U(k, t)$ 为调频函数; 调幅函数

$$g(t) = \begin{cases} t^2/t_1^2; & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1; & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)}; & t \geq t_2 \end{cases} \tag{42}$$

其中 $t_1 = 8.0$ s, $t_2 = 20.0$ s, $c = 0.1572$. $\ddot{x}_g(t)$ 的自谱密度取如下形式:

$$S_{xx}(k) = \frac{1 + 4a_g^2(k/k_g)^2}{[1 - (k/k_g)^2]^2 + 4a_g^2(k/k_g)^2} S_0 \tag{43}$$

所用的参数为 $k_g = 15.0$ rad/s, $a_g = 0.65$, $S_0 = 4.65 \times 10^{-4}$ m²/s³. 计算 $t \in [0, 40]$ s 区间所有节点位移方差. 取 $k \in [0, 50]$ rad/s, $\Delta k = 0.05$ rad/s, 时间步长 $\Delta t = 1.0$ s.

由于 k_g 和 t_a 可以任选, 有意义的是值 $\frac{Z_0}{k_a t_a}$. 记 $d = \frac{Z_0}{k_a t_a}$ ($d \geq 0$), 取不同 d 值时平台端帽处的水平位移时变方差见图 2. 从图中看到, d 值大小对时变方差有显著影响. 随着 d 值增大时变方差不仅数值上明显减小, 而且其发生最大值的时间也大大提前. 这可由调频函数 $U(k, t) = e^{-Z_0 \frac{k}{a}}$ 的形式得到解释. 调频函数不仅使响应的高频成分加速衰减, 而且使响应的长时间成分加速衰减. 图 3 为平台端帽处的水平加速度时变方差. 可以看到, d 值对加速度的影响与位移大致相同.

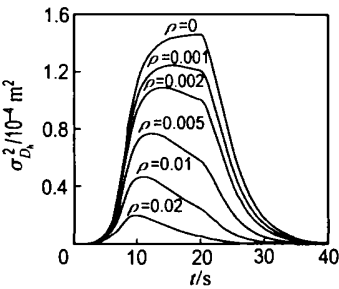


图 2 平台端帽处的水平位移时变方差
Fig. 2 Time-dependent variance of horizontal displacement at the top of platform

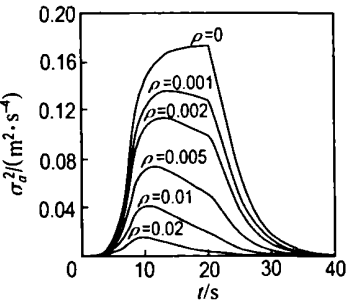


图 3 平台端帽处的水平加速度时变方差
Fig. 3 Time-dependent variance of horizontal acceleration at the top of platform

为了比较计算效率, 对于 $d = 0$ 的情况, 本文也采用 HPD-M 格式^[8] 进行了计算. 两种计算方

法的结果相同,但计算效率不同. HPD-M 方法整个计算过程需 5 877 s,而本文方法只需 2 525 s,仅为 HPD-M 方法所需时间的 43%. 对于 $d \neq 0$ 的情况,本文方法所需计算时间不变. 由于没有相应的 HPD-M 格式,无法比较 $d \neq 0$ 时两种方法的计算效率.

例 2 在图 4 所示的飞行器结构中, $m = 20$ kg, $k = 4\,000$ N/m, 阻尼阵 $C = T M + U K$, $T = 0.01$, $U = 0.015$. 质量 m 上作用有垂直向上的喷气推力 f , 它由平均值和非平稳随机分量两部分组成. 由于平均值部分为确定性动力问题, 这里只讨论其非平稳随机分量部分. 仍采用式 (41) 的 $A(k, t)$ 形式, 但调幅函数 $g(t)$ 和 $f(t)$ 的自谱密度 $S_{ff}(k)$ 分别取为

$$g(t) = (1 + 0.2t)e^{-0.2t} \tag{44}$$

$$S_{ff}(k) = S_0 = 0.15 \tag{45}$$

结构的两个模态为

模态 1 (刚体模态): $k_1 = 0, \varphi_1 = (1 \ 1)^T$;

模态 2 $k_2 = \sqrt{3k/m}, \varphi_2 = (1 \ -2)^T$

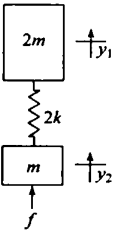


图 4 具有刚体模态的两自由度体系
Fig. 4 Two DOF system with one rigid body mode

本例无相应的 HPD-M 格式求解,因此无法比较两种方法的计算效率. 对于本例刚度阵为奇异的情况,采用本文方法求解比较方便. 因为该方法仅涉及矩阵乘法,不会发生求逆困难或病态的情况. 计算 $t \in [0, 400]$ s 区间的位移方差. 取 $k \in [0, 200]$ rad/s, $\Delta k = 0.05$ rad/s, 时间步长 $\Delta t = 1.0$ s. 刚体位移时变方差曲线见图 5. 由于刚体位移比弹性相对位移大几个数量级,在图 5 中 y_1 和 y_2 是重合的. 图 6 为弹簧力的时变方差. 从图 5 和图 6 中还可以看到 d 值大小对刚体位移时变方差的影响和对弹簧力时变方差的影响程度是不同的,很明显对前者的影响比对后者的影响

小得多.

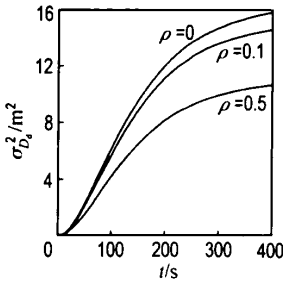


图 5 刚体位移的时变方差
Fig. 5 Time-dependent variance of rigid body displacement

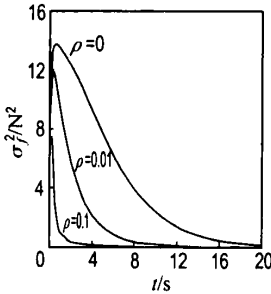


图 6 弹簧力的时变方差
Fig. 6 Time-dependent variance of spring force

5 结 论

本文给出了一个精确、高效求解结构非平稳随机振动响应的计算方法. 该方法总是得到精确的响应谱值而与时间步长的选择无关. 由于不涉及矩阵求逆,可直接处理具有刚体模态的结构. 应用该方法对调频函数的研究表明,调频函数不仅可使响应的高频成分加速衰减,同时也使响应的长时间成分加速衰减,从而改变最大响应发生的时间. 对于调频函数,尚有许多工作要做,将另文探讨.

参考文献:

[1] PRIESTLEY M B. Power spectral analysis of nonstationary random processes [J]. J Sound Vib, 1967, 6: 86-97
[2] 林家浩, 张亚辉, 孙东科, 等. 受非均匀调制演变随机激励结构响应快速精确计算 [J]. 计算力学学报,

- 1997, **14**(1): 2-8
- [3] PRIESTLEY M B. Evolutionary spectra and nonstationary process [J]. *J Roy Stat Soc B*, 1965, **27**(2): 204-347
- [4] 厄格姆 N C. 随机振动概论 [M]. 何成惠, 周鉴如, 陈文良, 等译. 上海: 上海交通大学出版社, 1985
- [5] TO C W S. Response statistics of discretized structures to nonstationary random processes [J]. *J Sound Vib*, 1986, **105**: 217-231
- [6] 钟万勰. 结构动力方程的精细时程积分 [J]. 大连理工大学学报, 1994, **34**(2): 131-136
- (ZHONG Wan-xie. On precise time-integration method for structural dynamics [J]. *J Dalian Univ Technol*, 1994, **34**(2): 131-136)
- [7] 林家浩, 沈为平, 宋华茂, 等. 结构非平稳随机响应的混合型精细时程积分 [J]. 振动工程学报, 1995, **8**(2): 127-135
- [8] 王君杰, 周 晶. 基于演变随机过程模型的合成地震波 [J]. 地震工程与工程振动, 1997, **17**(1): 11-18

Precise time-integration method with augmented matrix for structural responses to evolutionary random excitations

ZHANG Wen shou^{*}, LIN Jia hao, YU Xiao, LIU Ting ting

(State Key Lab. of Struct. Anal. for Ind. Equip., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract The research on the responses of structures subjected to non-uniformly modulated evolutionary random excitations is performed. The random excitations are first transformed into pseudo excitations before the non-uniformly modulated evolutionary random models are expressed by state space equations. The precise time-integration scheme with augmented matrix is derived by using the state space expression of the random models and can quickly and precisely compute the time-dependent power spectral density of structural responses. Comparing with the HPD-M format, the present method is more efficient and can be used to deal with the structures with rigid-body modes since the inverse of a matrix is avoided. Two examples are given to show the advantages of this method over the HPD-M format when computing the time-dependent power spectral densities of the structural responses.

Key words non-stationary random vibration; evolution; precise time-integration; random excitations; power spectrum