

# 高层建筑结构地震响应的辛精细积分方法\*

侯平兰<sup>1</sup>, 邓子辰<sup>2</sup>

(1. 陕西省建筑职工大学, 西安 710068;  
2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

(本刊编委邓子辰来稿)

**摘要:** 高层建筑结构在地震作用下的动响应分析一直是土木工程结构设计中的难点问题.采用同时具有高精度和长时间数值稳定性的辛精细积分方法开展了高层建筑结构的地震时程分析,得到了结构弹性/弹塑性时程分析结果,并将分析结果与当前流行的商业软件分析结果进行对比,验证了采用辛精细积分方法进行高层建筑结构地震时程分析的可行性与有效性.

**关键词:** 辛精细积分方法; 地震响应; 高层建筑结构; 时程

**中图分类号:** O241.4      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.21656/1000-0887.380123

## 引言

着眼于数值积分方法的长时间稳定性, Feng(冯康)先生基于辛几何理论创立了针对有限维 Hamilton 系统的辛算法<sup>[1]</sup>, 其良好的长时间数值稳定性源于辛算法数值积分每一步都能精确保持系统辛结构.这一开创性的研究成果开辟了计算数学保结构分析新领域, 因此, 冯康先生及其研究团队荣获 1997 年国家自然科学一等奖.此后, 多种辛离散方法逐渐完善被证明, 辛几何算法理论体系也逐渐被完善<sup>[2-3]</sup>.

在此后 30 多年的发展过程中, 计算数学界对辛几何算法的追捧几近狂热, 但这种狂热也仅仅限于计算数学界, 对于力学工作者而言, 辛几何是遥不可及的数学理论, 其应用的前提是对系统对称性的深刻认识<sup>[4]</sup>.为此, 钟万勰院士倡导“辛破茧”——破除辛的神秘性<sup>[5]</sup>, 创立了具有极高数值精度的精细积分方法<sup>[6]</sup>, 这一开创性的研究工作被公认为是近年来计算力学领域最重要的研究成果之一, 并成功应用于动力学与控制领域、弹性力学领域等诸多力学问题的求解过程<sup>[7-8]</sup>.精细积分方法容易被力学工作者接受的根本原因在于它回避了辛几何理论中复杂的数学理论.也正因为如此, 精细积分方法能否保辛引起了学术界的研究兴趣, 从数值结果上看, 钟万勰院士认为精细积分方法是近似保辛的.为了更好地解决精细积分保辛问题, Huang(黄永安)和 Deng(邓子辰)等将辛几何原理引入精细积分方法, 提出了辛精细积分方法<sup>[9]</sup>, 使得精细积分方法在保证数值计算精度的同时, 能够长时间保持系统辛结构.

高层建筑结构在地震作用下的动响应分析一直是结构设计的难点问题之一.本文将针对

\* 收稿日期: 2017-05-05; 修订日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(11432010)

作者简介: 侯平兰(1978—), 女, 讲师, 硕士(E-mail: 10810376@qq.com);

邓子辰(1964—), 男, 教授, 博士生导师(通讯作者. E-mail: dweifan@nwpu.edu.cn).

高层建筑结构地震动响应问题,采用辛精细积分方法进行分析,得到弹性/弹塑性时程响应结果,验证了辛精细积分方法应用于地震工程的可行性和有效性。

## 1 辛精细积分方法回顾

考察矩阵形式的动力学控制方程:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{H}_0 \mathbf{z} + \mathbf{H}_1(\mathbf{z}), \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{H}_0$  为常数矩阵,非线性项作为非齐次项处理,在时间区段  $[t_k, t_{k+1}]$  内,令

$$\mathbf{H}_1(\mathbf{z}) = \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_1(t - t_k). \quad (2)$$

首先求解齐次方程:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{H}_0 \mathbf{z}. \quad (3)$$

Hamilton(哈密尔顿)矢量场有一个重要性质,即对于足够小的时间间隔  $t$ ,  $\exp(\mathbf{H}_0 \cdot t)$  一定是一个正则映射.也就是说,  $\exp(\mathbf{H}_0 \cdot t)$  应能够精确保持 Hamilton 系统的辛结构,即  $\exp(\mathbf{H}_0 \cdot t)$  为一个辛映射。

回顾精细积分法的全过程,不难发现:精细积分法的高数值精度来源于一系列的乘法变换.然而,在辛空间内,两个辛矩阵的求和计算并不能保辛,即加法不能保辛,但是两个辛矩阵的乘积结构还是辛矩阵,即乘法是保辛的.辛矩阵的这一性质为构造辛精细积分算法提供了一条思路,将指数矩阵函数  $\exp(\mathbf{H} \cdot \Delta t)$  进行合理的辛近似,得到的指数矩阵函数  $\exp(\mathbf{H} \cdot \tau)$  就会具有辛算法的性质,能够实现系统的近似保辛.实现这一思想的关键问题在于用数值方法精确地计算变换矩阵  $\exp(\mathbf{H} \cdot \tau)$ 。

利用有理 Padé 逼近,  $\exp(\mathbf{H} \cdot \tau)$  的 Padé 逼近具体形式如下<sup>[9]</sup>:

$$\exp(\mathbf{H} \cdot \tau) \approx \frac{\mathbf{n}_{lm}(\mathbf{H}_0 \cdot \tau)}{\mathbf{d}_{lm}(\mathbf{H}_0 \cdot \tau)} = \mathbf{\Omega}_{lm}(\mathbf{H}_0 \cdot \tau), \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{n}_{lm}(\mathbf{H}_0 \cdot \tau) = \sum_{k=0}^m \frac{(l+m-k)! m!}{(l+m)! k! (m-k)!} (\mathbf{H}_0 \cdot \tau)^k,$$

$$\mathbf{d}_{lm}(\mathbf{H}_0 \cdot \tau) = \sum_{k=0}^m \frac{(l+m-k)! m!}{(l+m)! k! (m-k)!} (-\mathbf{H}_0 \cdot \tau)^k.$$

下面不加证明地给出能够保证式(4)近似保辛定理<sup>[10]</sup>。

**近似保辛定理<sup>[10]</sup>** 设  $\mathbf{H}$  是无穷小的辛阵,对于充分小的  $|t|$ ,  $\mathbf{g}_{lm}(\mathbf{H} \cdot \tau)$  是辛阵,当且仅当  $l = m$ , 即  $\mathbf{\Omega}_{ll}(x)$  是对 Padé 对角逼近的。

依据上述定理,可以通过选择  $l = m = 2, 3, \dots$ , 就可以使得式(4)近似保辛.同时,不难证明,  $l, m$  取值越大,逼近效果越好.为了方便说明构造辛精细积分算法,选取  $l = m = 2$ , 则

$$\mathbf{z}_{n+1} = \mathbf{z}_n + \frac{\tau \mathbf{H}_0}{2} (\mathbf{z}_n + \mathbf{z}_{n+1}) + \frac{\tau^2 \mathbf{H}_0^2}{12} (\mathbf{z}_n - \mathbf{z}_{n+1}). \quad (5)$$

从而得到传递函数形式:

$$\mathbf{z}_{n+1} = \mathbf{\Omega}(\mathbf{H}_0 \cdot \tau) \cdot \mathbf{z}_n, \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{\Omega}(\mathbf{H}_0 \cdot \tau)$  是一个具有固定精度的数值格式,以四阶精度格式为例<sup>[9]</sup>(经验证明,四阶精度是足够的),其具体表述式为

$$\Omega(\mathbf{H}_0 \cdot \tau) = \frac{\mathbf{I} + \frac{\mathbf{H}_0 \cdot \tau}{2} + \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \tau)^2}{12}}{\mathbf{I} - \frac{\mathbf{H}_0 \cdot \tau}{2} + \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \tau)^2}{12}}. \quad (7)$$

利用精细积分思想,可以得到矩阵函数  $\exp(\mathbf{H}_0 \cdot \tau)$  的逼近公式:

$$\exp(\mathbf{H}_0 \cdot \tau) = [\exp(\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m)]^m = \Phi(\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m)^m \approx \left[ \frac{\mathbf{I} + \frac{\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m}{2} + \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m)^2}{12}}{\mathbf{I} - \frac{\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m}{2} + \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m)^2}{12}} \right]^{2N} = \frac{(\mathbf{I} + \mathbf{T}_a)2^{(N-1)}(\mathbf{I} + \mathbf{T}_a)2^{(N-1)}}{(\mathbf{I} + \mathbf{T}_b)2^{(N-1)}(\mathbf{I} + \mathbf{T}_b)2^{(N-1)}}, \quad (8)$$

$$\text{其中 } \mathbf{T}_a = \frac{\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m}{2} + \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m)^2}{12}, \mathbf{T}_b = -\frac{\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m}{2} + \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \tau/m)^2}{12}.$$

对于任意的小量矩阵  $\mathbf{T}_c, \mathbf{T}_d$ , 存在如下的恒等式:

$$(\mathbf{I} + \mathbf{T}_c) \times (\mathbf{I} + \mathbf{T}_d) = \mathbf{I} + \mathbf{T}_c + \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_c \times \mathbf{T}_d. \quad (9)$$

式(8)在计算机中可以由代码 (for(iter=0; iter<N; iter++)) 实现:

$$\mathbf{T}_a = 2\mathbf{T}_a + \mathbf{T}_a \times \mathbf{T}_a, \mathbf{T}_b = 2\mathbf{T}_b + \mathbf{T}_b \times \mathbf{T}_b. \quad (10)$$

当循环结束之后, 就可以得到

$$\Omega(\mathbf{H} \cdot \tau) = \frac{\mathbf{I} + \mathbf{T}_a}{\mathbf{I} + \mathbf{T}_b}. \quad (11)$$

联立式(2), 就可以得到非齐次方程解的迭代格式为

$$\mathbf{z}_{n+1} = \Omega[\mathbf{z}_n + \mathbf{H}_0^{-1}(\mathbf{r}_0 + \mathbf{H}_0^{-1}\mathbf{r}_1)] - \mathbf{H}_0^{-1}(\mathbf{r}_0 + \mathbf{H}_0^{-1}\mathbf{r}_1 + \tau\mathbf{r}_1), \quad (12)$$

这就是非齐次方程的时程积分公式<sup>[9]</sup>. 本文对式(12)的线性化处理过程采用显式格式<sup>[9]</sup>.

## 2 高层建筑结构的简化运动增量方程

高层建筑结构地震响应问题一直是建筑设计中的难点问题之一<sup>[11-14]</sup>. 当前, 高层建筑结构简化建模方法主要是采用集中质量模型, 建模过程中, 首先将高层建筑结构每层的质量、阻尼和抗弯刚度都集中到楼面位置, 就可以得到本来连续模型的离散时变质量、时变刚度和时变阻尼, 认为以上结构参数时变主要是基于某些商业软件中由于考虑结构的大变形, 导致结构参数时变的现象. 随后, 针对每一个集中质量, 基于 Newton(牛顿)第二定律建立其在地震载荷输入条件下的动力学方程. 最后将多个质量块的振动方程集成起来, 写成矩阵方程形式, 就构成了高层建筑结构动力学模型.

针对建立的动力学模型, 无论是弹性时程分析过程还是弹塑性时程分析过程, 其基本思想是相近的, 即以任意时刻  $t$  为起点, 在此后很短的时间间隔  $\Delta t$  内, 忽略由于建筑结构变形引起的结构质量矩阵、结构阻尼矩阵和结构刚度矩阵的变化, 即认为在  $[t, t + \Delta t]$  时段内, 结构质量矩阵  $\mathbf{M}(t)$ 、结构阻尼矩阵  $\mathbf{C}(t)$  和结构刚度矩阵  $\mathbf{K}(t)$  是定常的, 利用数值积分手段求解该时段内多质点体系运动微分方程:

$$\mathbf{M}(t)\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}(t)\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t). \quad (13)$$

经过增量时间  $\Delta t$  后, 上式变为

$$\mathbf{M}(t + \Delta t)\ddot{\mathbf{x}}(t + \Delta t) + \mathbf{C}(t + \Delta t)\dot{\mathbf{x}}(t + \Delta t) +$$

$$\mathbf{K}(t + \Delta t)\mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{F}(t + \Delta t). \quad (14)$$

将以上两式相减得

$$\mathbf{M}(t)\Delta\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}(t)\Delta\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(t)\Delta\mathbf{x} = -\mathbf{M}(t)\mathbf{I}\Delta\ddot{\mathbf{x}}_g. \quad (15)$$

式(15)即为结构运动的增量方程。

直接对方程(15)进行辛精细积分的难点在于其众多的时变系数矩阵,因此,忽略结构弹塑性变形对结构质量分布、阻尼分布的影响,即认为在整个积分区间内,质量矩阵  $\mathbf{M}(t)$  和阻尼矩阵  $\mathbf{C}(t)$  是定常的。

由此,得到建筑结构弹塑性条件下简化的运动增量方程:

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(t)\Delta\mathbf{x} = -\mathbf{M}(t)\mathbf{I}\Delta\ddot{\mathbf{x}}_g. \quad (16)$$

采用辛精细积分方法计算结构弹塑性地震反应的关键是确定任意  $t$  时刻的总体楼层侧移刚度矩阵  $\mathbf{K}(t)$ 。为此,可根据  $t$  时刻结构受力和变形状态,采用结构构件滞回模型,先确定  $t$  时刻各构件的刚度,再按照一定结构分析模型确定  $\mathbf{K}(t)$ 。图 1 为确定结构任意总刚度矩阵  $\mathbf{K}(t)$  的流程图。通常可采用两种分析模型确定  $\mathbf{K}(t)$ ,一种是层模型,另一种是杆模型。层模型适用于砌体结构和强梁弱柱型结构,杆模型则适用于任意框架结构。一般层模型自由度少,而杆模型自由度高,但计算精度高。本文为了提高分析精度,采用杆模型,依照图 1 的流程,分析结构刚度。

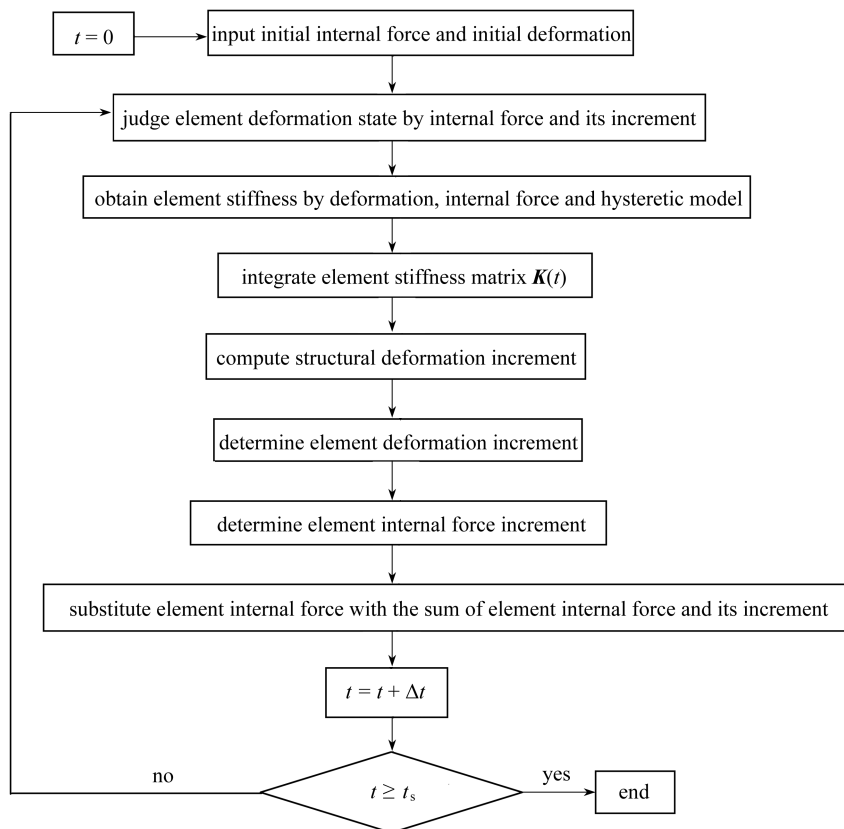


图 1 结构总刚度  $\mathbf{K}(t)$  计算流程图

Fig. 1 The flow chart for the computation of  $\mathbf{K}(t)$

相较于刚度矩阵,质量矩阵和阻尼矩阵的集成就简单得多了。对于高层建筑结构的集中质

量模型,其质量矩阵是一个对角阵,每个对角元素即是该层的集中质量.在简化分析中,高层建筑结构的阻尼矩阵可以简单地采用三对角对称阵,在这种简化中,认为当前层的阻尼只与下一层的阻尼有关,即

$$\mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} c_1(t) + c_2(t) & & -c_2(t) & & & & & & \\ & -c_2(t) & c_2(t) + c_3(t) & & -c_3(t) & & & & \\ & & -c_3(t) & c_3(t) + c_4(t) & & -c_4(t) & & & \\ & & & -c_4(t) & c_4(t) + c_5(t) & & -c_5(t) & & \\ & & & & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ & & & & & \dots & \dots & \dots & \ddots \end{bmatrix}.$$

### 3 数值算例

以西安天地源地产开发有限公司开发的位于科技六路南侧的某小区 3#楼为例,其与地震时程分析相关的工程背景资料如下:

- ① 该建筑所在地区抗震设防为 8 度,设计地震动参数为  $\alpha_{\max} = 0.16, T_g = 0.30 \text{ s}$ ;
- ② 该建筑总层数 28 层(各层层高见表 1,不计地下层),建筑总高度 87.100 m;
- ③ 其他与地震荷载相关的信息见表 2.

表 1 建筑层高表

Table 1 Storey heights of the building

level number $N_L$	1	2	3	4~25	26	27	28
floor height $H/\text{m}$	3.4	4.5	4.2	3	3.6	1.25	4.15

表 2 地震荷载相关信息

Table 2 Relevant information of the earthquake load

item	value	item	value
modal combination method	coupling	maximum impact coefficient of common earthquake $\alpha_{\max}$	0.16
total number of vibration modes $N_{\text{total}}$	18	maximum impact coefficient of rare earthquake $\alpha_{\text{rmax}}$	0.90
seismic intensity $M_{\text{es}}$	8.00	seismic grade of the frame $N_{\text{skj}}$	3
site classification $S_L$	2	seismic grade of the shear wall $N_{\text{sq}}$	2
design earthquake group $N_g$	1	mass reduction factor of live load $\gamma_q$	0.50
eigenperiod $T_g/\text{s}$	0.35	periodic reduction factor $T_c$	0.95
consider accidental partiality?	no	consider bidirectional seismic torsion effect?	yes
damping ratio of the structure $\zeta/\%$	5.00	additional seismic number	0

#### 3.1 弹性时程分析结果

在多遇地震作用下,建筑结构不允许有过大开裂,结构构件处于弹性变形阶段.对结构进行弹性时程分析目前经常采用的分析步骤是先以特征根法或 Rayleigh-Ritz(瑞利-里兹)法等方法计算出结构的前  $N$  阶振型,再以振型迭加法或其他方法进行数值积分,迭代求解.本文在此方法的基础上,在求出结构前  $N$  阶振型后,采用辛精细积分算法进行数值积分.

采用特征值法计算结构前 18 阶振型结果见表 3.

随后,需要选择输入的地震波.为了简单起见,分别选取 ECFlong 波、TJFlong 波和一条人工波作为输入的地震波.采用辛精细时程积分算法步骤,得出各层位移、速度和加速度时程曲线,由于层数较多,在此只给出 ECFlong 波输入情况下得到的顶层的时程变化曲线如图 2~4 所示.为了检验算法的有效性,表 4 给出了辛精细积分(简称为 SPI)算法(取  $\tau = 0.2 \text{ s}, N = 20$ )

和采用专业进行结构弹性时程分析和弹塑性时程分析的 EPDA 商业软件计算分析(简称为 EPDA)得到的结构顶层最大位移、速度和加速度值。从表中可以看出,利用辛精细积分方法得到的结果与采用商业软件计算得到的结果非常接近,这说明了将辛精细积分算法用于高层建筑结构弹性时程分析的有效性。

表 3 结构前 18 阶振型参数结果

Table 3 The first 18-order vibration modes

vibration mode $N$	period $T/s$	angle $\alpha / (^\circ)$	translation coefficient $\alpha_{\chi+\gamma}(\alpha_{\chi} + \alpha_{\gamma})$	torsion coefficient $\alpha_n$
1	1.925 6	43.86	0.99(0.51+0.48)	0.01
2	1.871 9	135.04	0.96(0.48+0.48)	0.04
3	1.424 8	92.68	0.08(0.02+0.06)	0.92
4	0.592 3	14.49	1.00(0.93+0.07)	0.00
5	0.555 0	104.80	0.96(0.07+0.89)	0.04
6	0.451 6	81.28	0.10(0.02+0.08)	0.90
7	0.317 4	12.93	0.98(0.93+0.05)	0.02
8	0.299 4	103.55	0.89(0.05+0.84)	0.11
9	0.264 1	94.81	0.32(0.01+0.31)	0.68
10	0.240 3	129.42	0.34(0.14+0.20)	0.66
11	0.224 8	53.02	0.83(0.31+0.52)	0.17
12	0.206 8	156.84	0.74(0.59+0.15)	0.26
13	0.174 0	39.06	0.69(0.41+0.28)	0.31
14	0.164 9	103.35	0.73(0.05+0.68)	0.27
15	0.158 0	163.37	0.58(0.52+0.06)	0.42
16	0.130 5	18.11	0.96(0.86+0.10)	0.04
17	0.120 1	103.95	0.87(0.06+0.81)	0.13
18	0.118 0	123.26	0.22(0.08+0.14)	0.78

表 4 采用辛精细积分算法与 EPDA 商业软件分析结果对比(ECFlong 波输入)

Table 4 Comparison of the results between the SPI method and the EPDA method(ECFlong wave)

	$(x_{28})_{\max} / \text{m}$	$(\dot{x}_{28})_{\max} / (\text{m/s})$	$(\ddot{x}_{28})_{\max} / (\text{m/s}^2)$
SPI method	0.537 761	0.182 419	0.129 685
EPDA software	0.537 760	0.182 421	0.129 685

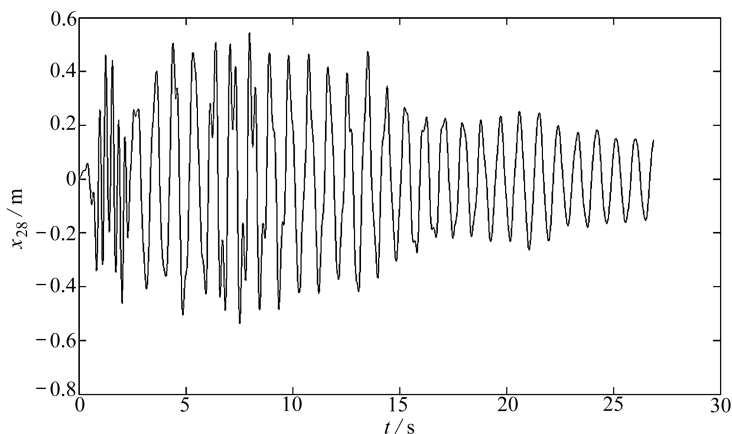


图 2 顶层位移时程曲线(ECFlong 波输入)

Fig. 2 The time-history curve of the top floor displacement (ECFlong wave)

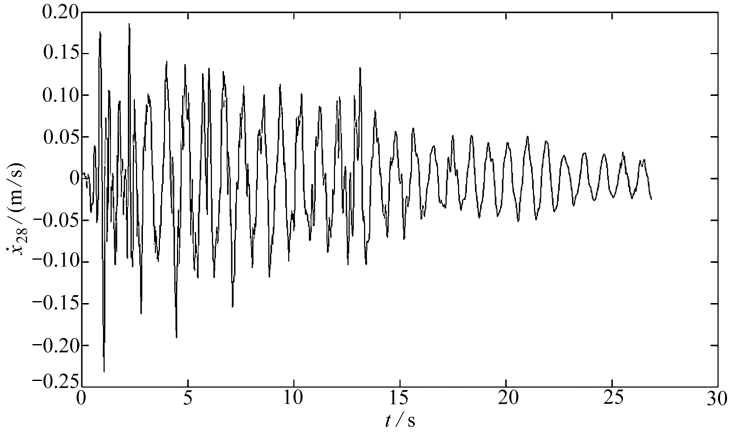


图3 顶层速度时程曲线(ECFlong波输入)

Fig. 3 The time-history curve of the top floor speed (ECFlong wave)

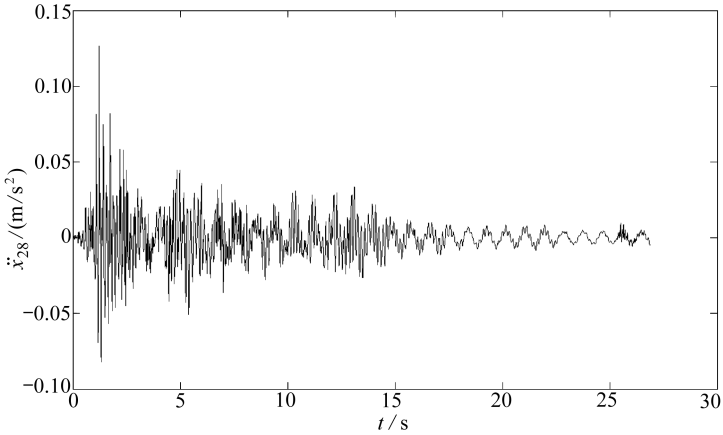


图4 顶层加速度时程曲线(ECFlong波输入)

Fig. 4 The time-history curve of the top floor acceleration (ECFlong wave)

### 3.2 弹塑性时程分析结果

结构弹塑性时程分析是对弹性时程分析的补充,通过弹塑性动力时程分析,可以计算出在地震波输入时段内结构地震响应的全过程,得到每一时刻结构的位移、速度、加速度以及构件的变形和内力.与弹性时程分析过程不同,弹塑性时程分析过程针对的是“大震不倒”这一设计要求,因此需要考虑结构构件的弹塑性形变以及由此带来对结构承载力等的其他影响.

同样分别选取 ECFlong 波、TJFlong 波和一条人工波作为输入的地震波,采用辛精细时程积分算法进行弹塑性时程分析,得出各层位移、速度和加速度时程曲线,此处只给出 TJFlong 波作为地震输入时得到的顶层位移、速度和加速度时程曲线如图 5~7 所示.

为了检验算法求解弹塑性时程方面的有效性,表 5 给出了辛精细积分(简称为 SPI)算法(取  $\tau = 0.2 \text{ s}$ ,  $N = 20$ )和采用专业进行结构弹性时程分析和弹塑性时程分析的 EPDA 商业软件计算分析(简称为 EPDA)得到的结构顶层最大位移、速度和加速度值.从表中数据结果的对比同样可以得出结论:辛精细积分方法得到的结果与采用商业软件计算得到的结果非常接近,该结论进一步说明了将辛精细积分算法用于高层建筑结构弹塑性时程分析的有效性.

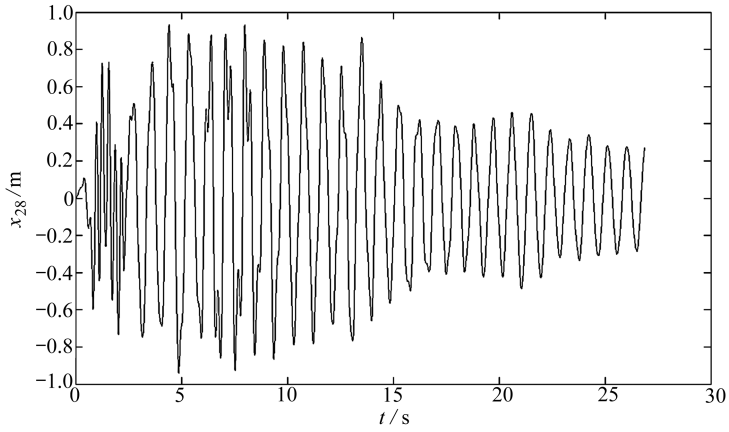


图 5 顶层位移时程曲线(TJFlong 波输入)

Fig. 5 The time-history curve of the top floor displacement (TJFlong wave)

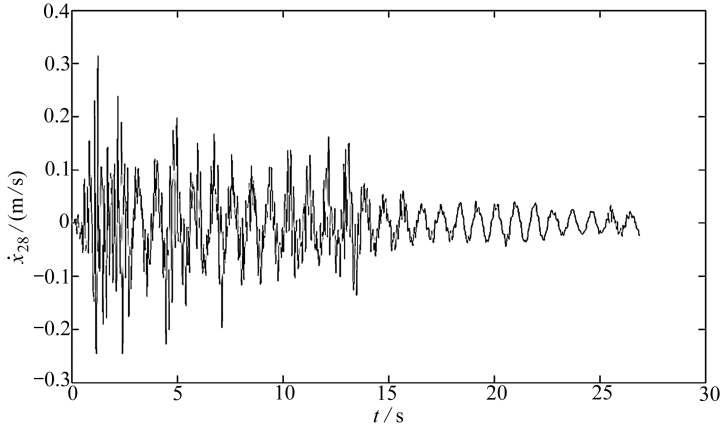


图 6 顶层速度时程曲线(TJFlong 波输入)

Fig. 6 The time-history curve of the top floor speed (TJFlong wave)

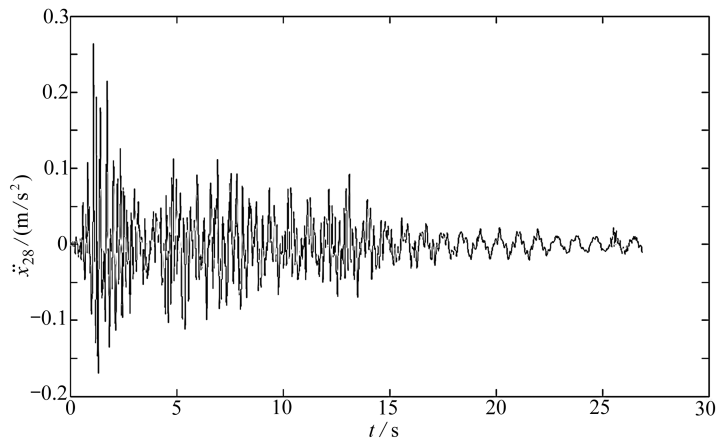


图 7 顶层加速度时程曲线(TJFlong 波输入)

Fig. 7 The time-history curve of the top floor acceleration (TJFlong wave)



表 5 采用辛精细积分算法与 EPDA 商业软件分析结果对比(TJFlong 波输入)

Table 5 Comparison of the results between the SPI method and the EPDA method(ECFlong wave)

	$(x_{28})_{\max} / \text{m}$	$(\dot{x}_{28})_{\max} / (\text{m/s})$	$(\ddot{x}_{28})_{\max} / (\text{m/s}^2)$
SPI method	0.972 566	0.326 971	0.261 138
EPDA software	0.972 567	0.326 973	0.261 138

## 4 结 论

本文结合辛算法在通过保持动力学系统辛结构提高数值分析长时间数值稳定性的优点和精细积分方法在提高数值计算精度方面的优势,采用辛精细积分方法开展了高层建筑结构地震作用下的时程分析计算,给出了采用辛精细积分方法进行复杂结构在动荷载作用下时程分析的一般方法,为高层建筑结构设计计算提供了新的途径。

通过将辛精细积分方法得到的数值结果与目前流行的结构地震响应分析 EPDA 商业软件得到的分析结果进行对比,发现辛精细积分方法得到的结果与商业软件得到的结果非常接近,从而验证了辛精细积分方法应用于高层建筑结构地震时程分析的可行性与有效性。

## 参考文献(References):

- [1] FENG Kang. On difference schemes and symplectic geometry[C]//*Proceedings of the 1984 Beijing Symposium on Differential Geometry and Differential Equations*. Beijing: Science Press, 1984: 42-58.
- [2] 冯康, 秦孟兆. Hamilton 动力学体系的 Hamilton 算法[J]. 自然科学进展: 国家重点实验室通讯, 1990, 2: 102-112.(FENG Kang, QIN Mengzhao. Hamilton algorithm for Hamilton mechanics systems[J]. *Progress in Natural Science: State Key Laboratory of Communications*, 1990, 2: 102-112.(in Chinese))
- [3] 冯康, 秦孟兆. 哈密尔顿系统的辛几何算法[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2002.(FENG Kang, QIN Mengzhao. *Symplectic Geometry Algorithm for Hamilton Systems*[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [4] MARSDEN J E, RATIU T S. *Introduction to Mechanics and Symmetry*[M]. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [5] 钟万勰, 高强, 彭海军. 经典力学辛讲[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2013.(ZHONG Wanxie, GAO Qiang, PENG Haijun. *Classical Mechanics: Its Symplectic Description*[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2013.(in Chinese))
- [6] ZHONG Wanxie. On precise integration method[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2004, 163(1): 59-78.
- [7] ZHONG Wanxie, LIN Jiahao, GAO Qiang. The precise computation for wave propagation in stratified materials[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 60(1): 11-25.
- [8] GAO Q, LIN J H, ZHONG W X, et al. A precise numerical method for Rayleigh waves in a stratified half space[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(6): 771-786.
- [9] HUANG Yong'an, DENG Zichen, YAO Linxiao. An improved symplectic precise integration method for analysis of the rotating rigid-flexible coupled system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 299(1/2): 229-246.
- [10] 钟万勰. 应用力学的辛数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.(ZHONG Wanxie. *Symplec-*

- tic Solution Methodology in Applied Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))
- [11] LIU Tielin, JIANG Yingchun, LUAN Yu. A method for earthquake response analysis of tall flexible structure[J]. *Earthquakes and Structures*, 2013, **4**(2): 133-155.
- [12] GUEGUEN P, COLOMBI A. Experimental and numerical evidence of the clustering effect of structures on their response during an earthquake: a case study of three identical towers in the city of Grenoble, France[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, **106**(6): 2855-2864.
- [13] TAKEWAKI I, MURAKAMI S, FUJITA K, et al. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, **31**(11): 1511-1528.
- [14] PAN T C, MEGAWATI K, GOH K S. Response of high-rise buildings in Singapore due to a potential giant earthquake in the Sumatran Megathrust[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2011, **15**: 90-106.

## A Symplectic Precise Integration Method for Seismic Responses of Tall Buildings

HOU Pinglan<sup>1</sup>, DENG Zichen<sup>2</sup>

(1. *Architecture Zabor University of Shaanxi Province, Xi'an 710068, P.R. China;*

2. *School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P.R.China)*

(Contributed by DENG Zichen, M. AMM Editorial Board)

**Abstract:** The response analysis of tall buildings under earthquake action is a difficult task in civil engineering design. With the symplectic precise integration method, which has advantages of high precision of the precise integration method and excellent long-time numerical stability of the symplectic method, the seismic response analysis of a tall building was performed and the elastic/elasto-plastic time-history results of the structure were obtained. Comparison of the numerical results between the symplectic precise integration method and the EPDA software shows the feasibility and the effectiveness of the symplectic precise integration method for seismic response analysis of tall buildings.

**Key words:** symplectic precise integration method; seismic response; tall building; time history

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(11432010)

---

引用本文/Cite this paper:

侯平兰, 邓子辰. 高层建筑结构地震响应的辛精细积分方法[J]. *应用数学和力学*, 2018, **39**(4): 442-451.

HOU Pinglan, DENG Zichen. A symplectic precise integration method for seismic responses of tall buildings[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(4): 442-451.