

# 利用数字强震仪记录实时 仿真地动位移<sup>\*</sup>

金 星<sup>1,2)</sup> 马 强<sup>1)</sup> 李山有<sup>1)</sup>

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

2) 中国南京 210009 南京工业大学

**摘要** 随着现代强震仪及通讯技术的发展,强震动观测资料的应用范围愈来愈广,强震观测可以拓展到地震观测领域,强震数据的实时仿真是这一拓展的基础.为适应这一发展趋势,在笔者曾经提出的单自由度系统地震反应递归公式的基础上,本文提出了一套基于地震仪原理,及长周期单自由度系统地震动力反应原理的由宽频带强震动记录仿真位移记录的新方法.研究表明此方法是有效的,可广泛应用于地震监测.

**关键词** 强震动记录 单自由度系统 位移 仿真

**中图分类号**: P315.9

**文献标识码**: A

## 引言

以往的强震动观测,一方面为地震工程研究以及制定各种工程结构的抗震设计规范提供基础数据,另一方面也为地震学研究震源破裂过程提供重要信息.随着强震动观测技术的发展,尤其是大动态、宽频带、高分辨率、智能化、实时传输的新一代强震仪的发展,传统的强震动观测已拓展应用到地震监测、地震动强度(烈度)速报、地震预警、震害快速评估、地震应急响应与智能控制等领域.地动位移的恢复是强震动观测数据处理中的重要一环,但传统的数据处理方式难以适用于实时处理,为此发展快速实时的强震动观测数据处理方法与技术已势在必行.

对于地动位移的计算,既可以在时域内进行也可以在频域内进行,在频域进行计算的最大缺点是不能进行实时仿真.因此,在时域中追求高精度实时算法是世界各国在强震动观测数据快速处理中必须解决的关键问题. Kanamori 等(1999)应用一数字高通滤波器,提出了解决基线漂移的方法,进而利用数值积分方法构造的高通滤波器由加速度时程积分求速度和位移,这也是传统方法的基本思路.这套方法得到的速度和位移时程具有速度快、模拟幅值谱相对精度较高的特点,不足之处是仍有低频基线漂移的趋势和低频相移,而且这套方法要经过 3 次高通滤波才能得到位移时程.许多学者曾对单自由度的地震反应时域算法进行过研究,其中, Newmark(1959)方法是地震动力反应数值计算常用的方法之一. Lee(1984, 1990)根据 Z 变换方法也研究了同一问题,提出了相应计算相对位移、相对速

\* 国家自然科学基金项目(50378086),国家科技部基础条件平台项目(2003DIB2J099)和中国地震局“十五”重点科研项目共同资助.

2003-10-20 收到初稿, 2004-03-03 收到修改稿, 2004-04-12 决定采用.

度、相对加速度地震反应的递归公式. Nigam 和 Jennings (1969) 以及 Beck 和 Dowling (1988) 利用 Duhamel 积分, 假定地震动时程在离散间距范围内呈线性变化, 也得到了一套复杂的计算地震反应的递归公式. 金星等 (2003) 曾经对单自由度地震反应进行过研究, 并提出了一套单自由度地震动力反应递归公式. 此套公式可以方便地应用于实时计算, 具有较高的精度, 利用此套公式可由输入加速度时程直接计算相对位移反应. 由于地震仪的原理等价于一个单自由度系统的地震反应计算, 这说明由宽频带强震记录仿真位移可以看成计算单自由度系统的相对位移反应. 对单自由度体系的地震动力反应, 如果系统的自振周期非常大, 则单自由度体系的位移反应趋于地震动位移. 故可用长周期的单自由度地震动力反应来恢复一定频带范围内的地动位移. 本文依据地震仪原理, 在此套公式的基础上, 对从宽频带数字强震仪记录实时仿真恢复地动位移进行研究.

## 1 地动位移的仿真

### 1.1 单自由度系统相对位移反应递归公式

金星等 (2003) 在比较研究现有单自由度地震反应计算方法的基础上, 提出了一套能较精确模拟单自由度系统位移理论传递函数的时域计算相对位移递归公式

$$x_j = b_1 x_{j-1} + b_2 x_{j-2} - S_0 (\Delta t)^2 [\delta a_j + (1 - 2\delta) a_{j-1} + \delta a_{j-2}] \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} b_1 = 2e^{-\zeta\omega_0\Delta t} \cos[\omega_d\Delta t] \\ b_2 = -e^{-2\zeta\omega_0\Delta t} \\ S_0 = (1 - b_1 - b_2) / (\omega_0\Delta t)^2 \\ \omega_d = \omega_0 \sqrt{(1 - \zeta^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $a_j = -a_j^*$ ,  $a_j^*$  表示  $j$  点时刻的加速度输入,  $x_j$  表示  $j$  点时刻的位移输出,  $\zeta$  表示单自由度系统的阻尼比,  $\omega_0$  表示单自由度系统的自振圆频率,  $\Delta t$  为采样间隔. 式中系数  $\delta$  为控制式 (1) 的传递函数更好的逼近理论传递函数的系数, 它与  $\zeta$  和  $\Delta t/T_0$  有关.  $a_j = -a_j^*$  的物理意义在于惯性力的方向与地震加速度方向, 亦即地动位移的方向相反.

对于给定的  $\zeta$  和  $\Delta t$ , 对式 (1) 应用时移定理做傅立叶变换 (郑治真, 1979) 可得到传递函数

$$H_x(\omega, \Delta t, T_0) = \frac{X(\omega)}{A(\omega)} = \frac{-S_0(\Delta t)^2 [\delta + (1 - 2\delta)e^{-i\omega\Delta t} + \delta e^{-2i\omega\Delta t}]}{1 - b_1 e^{-i\omega\Delta t} - b_2 e^{-2i\omega\Delta t}} \quad (3)$$

$T_0$  为单自由度系统的自振周期 ( $T_0 = 2\pi/\omega_0$ ). 其中  $X(\omega)$  和  $A(\omega)$  分别为输出位移时程和输入加速度时程的傅立叶谱.

应用递归公式 (1), 选择适当的  $\delta$  值可以使传递函数式 (3) 更好地模拟单自由度系统动力平衡方程的理论传递函数.

根据马强等 (2003) 的研究, 计算  $\delta$  的公式如下

$$\delta = d_1 + d_2(\Delta t/T_0) + d_3(\Delta t/T_0)^2 + d_4(\Delta t/T_0)^3 \quad (4)$$

式中, 系数  $d_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) 的取值如表 1 所示, 在阻尼比 0.005 ~ 0.1 范围内的拟合公式为

$$\begin{cases} d_1 = 0.091\ 08 \\ d_2 = 0.019\ 45 - 0.046\ 79\zeta \\ d_3 = -0.009\ 89 + 0.380\ 22\zeta \\ d_4 = 0.506\ 17 - 0.974\ 76\zeta \end{cases} \tag{5}$$

系数  $d_i(i = 1, \cdots, 4)$  在阻尼比  $0.1 \sim 0.9$  范围内的值由表 1 给出. 因此, 对于给定的  $\zeta$  和  $\Delta t$ , 由式(1) 所表述的数字滤波器只有一个待定参数  $T_0$ . 所以, 要解决的问题是选取多大的自振周期  $T_0$ , 可以使得在指定的频带范围内由数字递归滤波器计算得到的相对位移, 与地面运动位移在给定的精度范围内一致.

表 1 系数  $d_i(i=1, \cdots, 4)$  随阻尼比( $\zeta$ )变化的关系

$\zeta$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$\zeta$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
0.01	0.091 06	0.018 53	-0.002 28	0.486 37	0.1	0.091 12	0.014 32	0.031 44	0.399 90
0.02	0.091 06	0.018 51	-0.001 68	0.484 06	0.2	0.091 25	0.004 13	0.113 98	0.178 69
0.03	0.091 07	0.018 08	0.000 98	0.478 77	0.3	0.091 38	-0.005 84	0.190 80	-0.063 63
0.04	0.091 07	0.017 67	0.003 69	0.472 12	0.4	0.091 44	-0.011 80	0.228 57	-0.248 75
0.05	0.091 08	0.017 34	0.007 14	0.463 22	0.5	0.091 45	-0.012 71	0.213 44	-0.334 25
0.06	0.091 08	0.017 01	0.009 82	0.455 43	0.6	0.091 4	-0.009 17	0.149 70	-0.318 00
0.07	0.091 09	0.016 38	0.015 62	0.441 11	0.7	0.091 34	-0.004 21	0.059 89	-0.232 73
0.08	0.091 10	0.015 76	0.019 97	0.429 79	0.8	0.091 3	-0.000 11	-0.036 94	-0.110 64
0.09	0.091 11	0.015 15	0.025 53	0.414 86	0.9	0.091 27	0.002 41	-0.130 03	0.0257 80

1.2 仿真地动位移的理论基础

从加速度直接积分到位移时, 其理论传递函数为

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{A(\omega)} = \frac{1}{(i\omega)^2} \tag{6}$$

定义  $G(\omega)$  为式(5) 传递函数与理论传递函数(6) 之比, 即

$$G(\omega) = \frac{H_x(\omega, \Delta t, T_0)}{H(\omega)} \tag{7}$$

在进行仿真计算时总是希望  $G(\omega)=1$ , 这相当于单自由度体系的自振周期应该无限大, 但是这一般是无法实现的, 这就要求选择适当长的周期. 由式(4)可以看出, 由于出现了  $1/(i\omega)^2$  项, 对于较低频率会出现不稳定的情况, 即低频的漂移. 对于单自由度系统的计算, 如选定自振周期, 在固定周期处会出现共振并出现窄频带反应. 为了消除窄频带反应, 就需要增大单自由系统的阻尼比, 本研究中阻尼比取 0.707. 为了显示低频滤波的效果, 我们以单自由度系统地震反应作为恢复地震位移仿真系统, 计算了不同周期(100 s、50 s、20 s、10 s)的仿真系统传递函数与理论传递函数的幅值谱、幅值谱比及相位谱差(图 1~3). 从图中可以看出, 所应用的仿真系统的传递函数, 通过选择适当的自振周期, 可以滤去低频信号, 从而消除低频漂移. 对公式(1)中的  $\delta$  值, 由于在位移仿真中所取的一定为长周期单自由度系统, 故  $\delta$  值统一取为 0.091 3, 在  $0 \sim 1/2$  Nyquist 频率内, 其传递函数与理论传递函数相对误差小于 5%.

1.3 仿真系统的有效频带

为了得到仿真系统的低频截止频率, 我们取大于或等于 0.8 的幅值谱谱比为有效值, 计算得到了位移记录的低频截止频率与所取仿真单自由度系统自振周期的对应关系. 所取

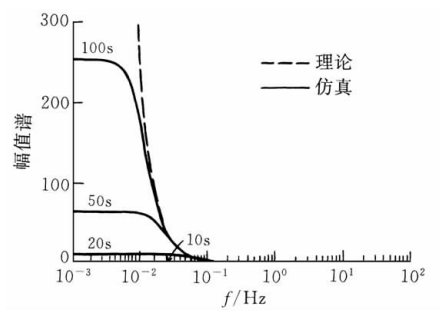


图 1 仿真数值递归滤波器幅值谱与理论幅值谱比较( $\Delta t=0.01$  s)

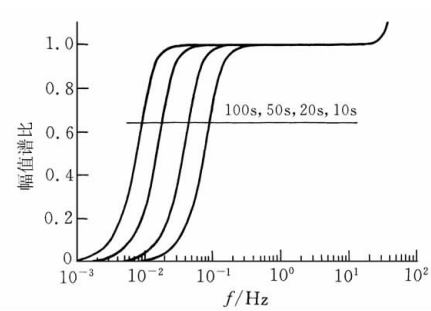


图 2 仿真数值递归滤波器幅值谱与理论幅值谱谱比( $\Delta t=0.01$  s)

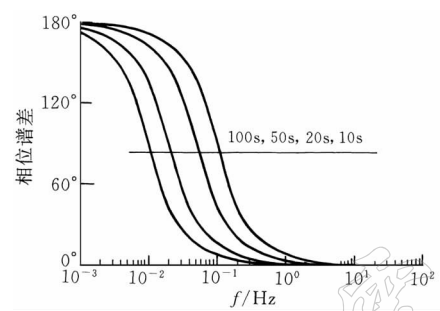


图 3 仿真数值递归滤波器相位谱与理论相位谱谱差( $\Delta t=0.01$  s)

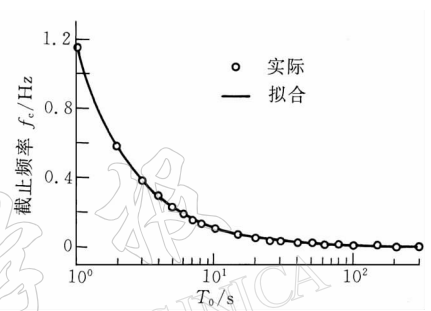


图 4 阻尼比为 0.707 时截止频率  $f_c$  与自振周期  $T_0$  的关系

的自振周期与低频截止频率的对应关系，可通过数据拟合由下式表示：

$$f_{Lc} = a \times (T_0)^b \tag{8}$$

随着阻尼比的变化，系数  $a, b$  由表 2 确定. 图 4 为阻尼比为 0.707 时截止频率与单自由度系统自振周期  $T_0$  的关系.

表 2 阻尼比( $\zeta$ )取不同值时系数  $a, b$  的值

$\zeta$	0.6	0.7	0.707	0.8	0.9
$a$	0.960 9	1.141 4	1.152 6	1.389 8	1.680 8
$b$	-0.997 7	-1.001 9	-1.001 4	-0.999 8	-0.997 6

众所周知，离散地面运动的采样间隔为  $\Delta t$ ，则高频截至频率为  $f_{Hc} = 1/(2\Delta t)$ . 这样，通过选择仿真单自由度系统的自振周期  $T_0$  由公式(8)得到的仿真地面位移的有效频带为  $(f_c, f_{Hc})$ .

2 算例

我们选取了 2002 年 11 月 3 日美国 Alaska 一次 7.9 级地震，由 K2 强震仪在 Anchorage 获得的一条南北分量记录，对加速度记录进行了仿真处理. 该记录的采样间隔为 0.01 s. 美国 USGS 对此记录用 4 阶巴特沃斯滤波器进行了带通滤波，频带范围为 0.013 ~ 20 Hz. 我们取  $T_0=20$  s, 50 s, 88 s, 100 s, 对这次地震的加速度记录依照本研究所提

出的方法进行了处理，得到相应的仿真位移时程如图 5c~f 所示。由于美国记录在处理时的低频截止频率为 0.013 Hz，由式(7)计算得到的仿真单自由度系统的自振周期应为 88 s。仿真得到的地面位移的有效频带为 0.013~50 Hz，这与美国计算得到的地面位移频带不一致。为了在同一频带内比较，我们对仿真后的位移记录进行低通滤波，得到 0.013~20 Hz

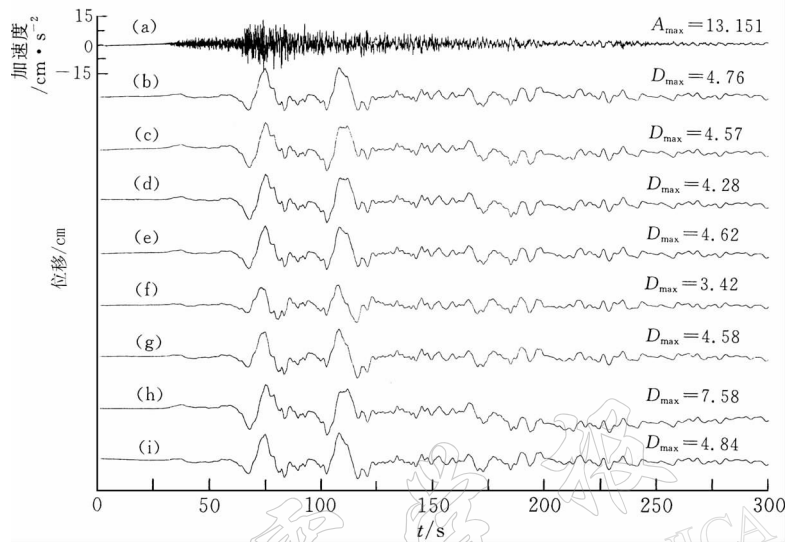


图 5 原始加速度记录及仿真位移结果

(a) 原始加速度记录；(b) 美国 USGS 处理后位移时程；(c)~(f) 分别为使用原始加速度记录用 100 s，88 s，50 s，20 s 自振周期仿真得到的位移时程；(g) 使用美国 USGS 基线校正后加速度记录用 88 s 自振周期仿真得到的位移时程；(h) 使用原始加速度记录用 Kanamori 方法滤波积分得到的位移时程；(i) 使用校正后加速度记录用 Kanamori 方法滤波积分得到的位移时程

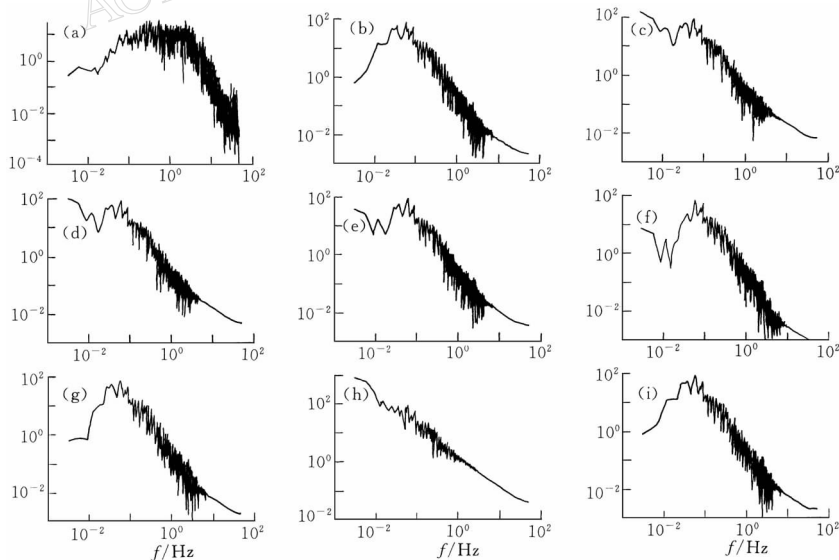


图 6 对应于图 5 时程的傅里叶幅值谱

(a) 图纵坐标单位为  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；(b)~(i) 图纵坐标单位为  $\text{cm} \cdot \text{s}$

的地面位移. 由于对位移时程高频成分极少, 故高频对位移波形的影响是极小的. 因为在仿真计算中我们没有考虑加速度时程的基线校正, 对基线校正后加速度时程的仿真计算如图 5g 所示. 为了便于比较, 用 Kanamori(1999)方法所求得的位移如图 5h, i 所示, 其中时域滤波器的低频截止频率在 0.013 Hz 左右. 为了比较仿真后的频率成分, 图 6 是对应于图 5 的傅里叶幅值谱. 从图中可以看出, 本文方法是可行的.

### 3 结语

在以往研究的基础上, 本研究提出了一套利用数字强震仪记录实时计算地动位移的方法, 其要点可归纳如下:

1) 假定阻尼比为 0.707 的单自由度系统为仿真系统, 已知采样间隔为  $\Delta t$  的地面加速度时程为  $a_j^*$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ). 若希望得到的地动位移的低频截止频率为  $f_L$ , 则由式(7)计算得到对应仿真系统的自振周期为  $T_0$ .

2) 取  $a_j = -a_j^*$ , 按式(1)计算阻尼比为 0.707、自振周期为  $T_0$  的仿真系统位移反应. 注意  $a_j = -a_j^*$  的物理意义在于惯性力的方向与地震加速度方向, 亦即地动位移的方向相反.

3) 用该方法计算得到的地动位移的有效频带为  $(f_L, 1/2\Delta t)$ .

4) 由于计算采用时域递归格式, 可对加速度时程进行实时处理, 得到相应的地动位移.

5) 此方法与传统方法的最大差别是应用了地震仪原理. 由加速度时程直接仿真得到地动位移时, 避免了由加速度求速度、再求位移的中间过程, 从而提高了精度, 控制了低频飘移.

应用本研究方法, 也可仿真得到某一特定周期和阻尼仪器响应的地动位移. 数值计算试验和对比分析表明, 本研究方法精度高、速度快, 可广泛应用于地震观测.

### 参 考 文 献

- 金星, 马强, 李山有. 2003. 四种计算地震反应数值方法的比较研究[J]. 地震工程与工程震动, **23**(1):18~30
- 马强, 金星, 李山有. 2003. 单自由度系统地震动力反应的实时计算方法[J]. 地震工程与工程震动, **23**(5): 61~68
- 郑治真. 1979. 波谱分析基础(第一版)[M]. 北京: 地震出版社, 21~32
- Beck J L, Dowling M J. 1988. Quick algorithms for computing either displacement, velocity or acceleration of an oscillator[J]. *Earthquake Eng Struct Dyn*, **16**: 245~253
- Kanamori H, Maechling P, Hauksson E. 1999. Continuous monitoring of strong motion parameters[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**(1):311~316
- Lee V W. 1984. A new fast algorithm for the calculation of response of a single-degree-of-freedom system to arbitrary load in time[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **3**(4): 191~199
- Lee V W. 1990. Efficient algorithm for computing displacement, velocity and acceleration responses of an oscillator to arbitrary ground motion[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **19**(6): 288~300
- Newmark N M. 1959. A method of computation for structural dynamics[J]. *J Eng Mech Div, ASCE*, **85**(EM3): 67~94
- Nigam N C, Jennings P C. 1969. Calculation of response spectra from strong motion earthquake records[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **59**: 909~922

## REAL-TIME SIMULATION OF GROUND DISPLACEMENT BY DIGITAL ACCELEROGRAPH RECORD

Jin Xing<sup>1, 2)</sup> Ma Qiang<sup>1)</sup> Li Shanyou<sup>1)</sup>

1) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

2) *Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China*

**Abstract:** With the development of accelerograph, strong ground motion data can be widely applied to many fields. Especially, it is an important milestone for strong motion observation to expand application fields into earthquake monitoring that real-time simulation of ground displacement can be obtained by strong motion records for determining three earthquake parameters. For the purpose of application, on the basis of principle of seismic response of single-degree-of-freedom (SDOF) system, this paper presents a suit of formula of simulating ground displacement records by using strong ground motion records with the help of simulator of SDOF system. The research results show that the technique is very efficient and can be widely applied to earthquake monitoring.

**Key words:** strong motion record; SDOF system; displacement; simulation