

陈三红, 张郁山, 赵凤新. 2017. 拟合加密控制点反应谱的地震动时程合成. 地震学报, 39(6): 910-920. doi:10.11939/jass.2017.06.009.

Chen S H, Zhang Y S, Zhao F X. 2017. Synthesis of ground motion history compatible with the response spectrum with densified controlling points. Acta Seismologica Sinica, 39(6): 910-920. doi:10.11939/jass.2017.06.009.

拟合加密控制点反应谱的地震动时程合成^{*}

陈三红^{*} 张郁山 赵凤新

(中国北京 100029 中国地震灾害防御中心)

摘要 在传统地震动反应谱频域拟合方法的基础上, 提出了拟合加密控制点目标反应谱的地震动合成方法, 并在此基础上利用实际算例与传统方法进行了对比. 本文方法在每次迭代调整过程中均考虑了对地震动加速度强度包络函数的模拟, 并且对调整后的地震动进行了基线校正, 从而确保最终合成的地震动时程既能以一定精度拟合加密目标反应谱, 又能满足目标包络函数的要求, 同时保证积分所得位移曲线不产生基线漂移. 数值算例分析结果表明, 本文方法与传统非加密控制点目标谱拟合方法相比, 在地震动时程曲线合成、反应谱拟合精度以及收敛速度等方面均具有一定的优势.

关键词 地震动合成 三角级数 基线校正 相位谱

doi:10.11939/jass.2017.06.009

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Synthesis of ground motion history compatible with the response spectrum with densified controlling points

Chen Sanhong^{*} Zhang Yushan Zhao Fengxin

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on traditional frequency-domain response-spectrum-compatible method of ground motion, this paper proposes a synthesized method that can generate ground motion which is compatible with the target response spectrum with densified controlling points, and further compares the method with the classical one compatible with target response spectra of ground motion. This method takes into account the simulation of the acceleration envelope of the ground motion during each iteration adjustment for the initial non-stationary artificial ground motions generated by the trigonometric series superposition method, and the resulting ground-motion acceleration after the each iteration will undergo the baseline correction. Therefore, the synthesized ground motion generated by the proposed method can not only match the densified target spectrum with certain precision, but also satisfy the requirement of the envelope function of acceleration time history, and the integrated displacement curve does not present any baseline drift. Numerical results show that this method can not

^{*} 基金项目 地震行业科研专项(201408020)资助.

收稿日期 2017-02-23 收到初稿, 2017-05-08 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: YatrCH@163.com



only match the target spectrum with relatively high convergence speed, but also fit the target envelope function with high precision. In addition, this method can realize baseline correction for the initial ground motion.

Key words: seismic motion synthesis; trigonometric series; baseline correction; phase spectrum

引言

地震动反应谱的拟合, 即调整给定初始地震动的加速度时程使其反应谱逼近目标地震动反应谱, 是地震工程中重要的研究课题(胡聿贤, 2006). 对于重大工程的场地地震安全性评价, 拟合概率地震危险性计算得到基岩地震动反应谱, 所得的基岩地震动时程即为后续场地非线性地震反应分析的输入(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2005); 而对于重大工程结构的抗震分析, 拟合设计地震动反应谱得到的设计地震动时程, 则是结构地震反应时程分析的输入(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010; U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2014).

地震动反应谱的拟合方法基本上可分为时域方法和频域方法(陈天红等, 2010). 频域方法可分为基于傅里叶变换和基于小波变换的方法(曹晖等, 2002; 全伟, 李宏男, 2007), 其中, 基于傅里叶变换的方法是经典的地震动反应谱拟合方法, 该方法的一个主要优点在于其能够保留初始地震动的相位谱. 美国核管理委员会颁布的标准审查大纲(standard review plan, 简称为 SRP)3.7.1(U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2014)中规定, 对于需要开展非线性动力分析(如考虑土-结构动力相互作用效应的分析)的核岛结构, 所合成的设计地震动时程应保留初始天然地震动(SRP3.7.1 称其为“种子”地震动, seed recorded ground motion)的相位. 因此, 尽管时域方法在拟合精度、收敛性以及初始地震动非平稳特性的保留等方面优于频域方法(张郁山, 赵凤新, 2014), 但是从工程需求而言, 频域方法目前仍具有时域方法无法替代的作用.

另一方面, 在进行地震动反应谱拟合时, 考虑到拟合精度和迭代收敛等问题, 当前实际工程中目标谱控制点之间的间距相对较大. 例如, 我国现行《工程场地地震安全性评价》规定, 在合成基岩地震动时程时, 要求目标谱控制周期不低于 50 个并且在对数坐标下均匀分布(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2005); 根据 SRP3.7.1 中第一种单组时程法的规定(U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2014), 合成核电站设计地震动时程时, 在周期范围 0.03—4.0 s 之间, 目标谱控制点总数达到 76 个即可满足要求. 尽管如此, 实际工程所需的地震动时程也对具有加密控制点的目标地震动反应谱的拟合提出了需求. SRP3.7.1 规定的第二种单组时程法中, 为确保位于核岛楼面上核电设备抗震分析的保守性, 用于核岛抗震分析的设计地震动时程需要包络具有加密控制点的目标谱, 要求在每个十进制频带(frequency decade, 如 0.1—1.0 Hz, 1.0—10 Hz 等)内控制点数目不低于 100 个. 因此, 拟合加密目标地震动反应谱具有实际的工程意义.

本文拟在经典的基于傅里叶变换的频域拟合方法的基础上, 提出拟合加密目标谱的地震动合成方法. 该方法合成的地震动加速度时程不仅能够工程所需频带范围内的每个傅

里叶频率点上以一定精度拟合目标反应谱, 而且能够保证加速度曲线满足给定强度包络线的要求, 同时, 对其积分所得位移曲线不存在基线漂移问题.

1 频域拟合方法

传统三角级数叠加法(以下简称传统方法)首先利用反应谱与功率谱之间的转换关系, 确定与目标反应谱相匹配的傅里叶幅值谱, 傅里叶相位谱则取 $[0, 2\pi]$ 范围内均匀分布的随机变量, 从而获得频率平稳的高斯过程, 将其乘以确定性的地震动强度包络曲线 $\Psi(t)$ 后即可得到强度非平稳的初始地震动加速度时程 $a_0(t)$. 通过 $a_0(t)$ 的反应谱与目标谱的比较, 对于不满足精度要求的控制点, 调整初始时程与该控制点所控制频带范围内的傅里叶幅值谱; 经过多次迭代调整后, 所得时程能够按照一定精度拟合目标谱; 若迭代调整过程中同时考虑相位的影响则可以加快迭代运算的收敛速度(胡聿贤, 何训, 1986). 针对给定控制频率点 ω_j 处反应谱的拟合, 传统方法调整的是 ω_j 控制频段内的傅里叶幅值谱, 并且该频段内所有频率分量的幅值均按照相同的方式加以调整, 调整公式如下:

$$A^{(i+1)}(\omega) = \frac{S_T(\omega_j)}{S_a^{(i)}(\omega_j)} A^{(i)}(\omega), \quad \omega_{1,j} < \omega \leq \omega_{2,j}, \quad (1)$$

式中, $A^{(i)}(\omega)$ 和 $A^{(i+1)}(\omega)$ 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次迭代所对应的傅里叶幅值谱, ω 为傅里叶谱对应的圆频率, ω_j 为反应谱的第 j 个控制圆频率($=2\pi/\text{控制周期}$), $S_a^{(i)}(\omega_j)$ 为第 i 次迭代时程的反应谱, $S_T(\omega_j)$ 为目标反应谱, $\omega_{1,j}$ 和 $\omega_{2,j}$ 为 ω_j 处主控频带的起始频率点, 且有

$$\omega_{1,j} = \frac{\omega_{j-1} + \omega_j}{2}, \quad \omega_{2,j} = \frac{\omega_j + \omega_{j+1}}{2}. \quad (2)$$

在上述传统方法的基础上, 本文提出拟合加密控制点目标反应谱的地震动合成方法. 该方法在工程所需的频带范围内, 针对每一个傅里叶谱分量对应的频率点调整加速度傅里叶谱幅值, 使合成地震动时程的加速度反应谱拟合该频率所对应的目标反应谱, 具体步骤如下:

1) 确定目标反应谱的频率范围 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$.

2) 确定离散加速度时间序列的离散时间步长 Δt 和总离散点数 N_{FFT} , N_{FFT} 为2的整数次幂, 则离散频率步长 $\Delta f = 1/(N_{\text{FFT}} \Delta t)$, $\Delta \omega = 2\pi \Delta f$, 总离散频率点数为 $N_{\text{fold}} = N_{\text{FFT}}/2 + 1$, 位于目标谱频率范围 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 内的频率点数 $N_{\text{fit}} \leq N_{\text{fold}}$.

本文拟合方法所采用的目标反应谱控制点总数取决于目标反应谱控制频率范围、离散时间步长以及离散时间点数. 针对本文所研究算例采用的离散点数 $N_{\text{FFT}} = 4096$ 和离散时间步长 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$, 可以确定离散频率步长 $\Delta f = 1/(N_{\text{FFT}} \Delta t) = 0.0244 \text{ Hz}$, 总离散频率点数 $N_{\text{fold}} = 2049$, 因而在目标反应谱控制周期范围 $[0.03 \text{ s}, 4 \text{ s}]$ 内的总拟合点数为1356个.

3) 在频段 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 内的 N_{fit} 个频率点上确定目标反应谱 $S_T(\omega_j)$, $\omega_j = 2\pi(j-1)\Delta f$, 且 $\omega_{\min} \leq \omega_j \leq \omega_{\max}$.

4) 设定地震动的相位谱为

$$\varphi_j = \varphi(\omega_j), \quad j = 1, 2, \dots, N_{\text{fold}}, \quad (3)$$

式中, φ_j 为离散频率 $\omega_j (=2\pi(j-1)\Delta f)$ 所对应的地震动相位谱. 在传统方法中, φ_j 假定为 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机变量, 针对给定的随机数种子, 利用通用的随机数数值生成算法即可生成 φ_j . 除采用该方法外, 在本文方法中, φ_j 还可以取为实际强震动加速度记录的傅

里叶相位谱. 由于地震动傅里叶相位谱包含着地震动时程波形的基本信息, 因此, 采用保留初始地震动相位的方法所生成的地震动时程能够保留强震动记录时域波形的基本特征. 如果采用均匀分布随机相位的方法, 还需给出地震动加速度的强度包络函数 $\Psi(t)$, 目前工程中普遍采用如下函数形式:

$$\Psi(t) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_1}\right)^2, & t \leq t_1, \\ 1, & t_1 < t \leq t_2, \\ \exp[-c(t-t_2)], & t > t_2, \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_1 和 t_2 分别为地震动加速度时程强震平稳段的起始和终止时刻, c 为强度包络线下降段的衰减系数. t_1 , t_2 和 c 与地震环境和场地条件有关, 可利用经验统计关系来确定(霍俊荣, 1991).

5) 利用功率谱与反应谱之间的转换公式

$$P(\omega_j) = \frac{\zeta}{\pi\omega_j} \frac{S_T^2(\omega_j)}{-\ln\left(-\pi\ln\frac{1-r}{\omega_j T_d}\right)} \quad (5)$$

确定与目标反应谱相匹配的功率谱, 式中, $P(\omega_j)$ 为功率谱, $S_T(\omega_j)$ 为目标反应谱, ζ 为目标反应谱的阻尼比, r 为超过目标反应谱值的概率. 这样, 利用功率谱确定地震动加速度时程的初始傅里叶幅值谱为

$$A_j^{(0)} = A^{(0)}(\omega_j) = \sqrt{2\pi\Delta f P(\omega_j)}, \quad (6)$$

式中, $A_j^{(0)}$ 为离散频率 ω_j 对应地震动的初始傅里叶幅值谱.

6) 迭代调整傅里叶幅值谱以逼近目标谱, 具体步骤如下: ① 设第 i 次迭代对应的傅里叶幅值谱为 $A_j^{(i)} = A^{(i)}(\omega_j)$, $i=0, 1, 2, \dots$. 对于 $i=0$, $A_j^{(0)}$ 即为式(6)所确定的初始傅里叶幅值谱. ② 确定第 i 次迭代所对应的地震动加速度时程 $a^{(i)}(t)$. 若相位为 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机变量, 则

$$a^{(i)}(t) = \Psi(t) \sum_{j=1}^{N_{\text{FFT}}} A_j^{(i)} \cos(\omega_j t + \varphi_j); \quad (7)$$

若相位取为实际强震动记录的相位, 则

$$a^{(i)}(t) = \sum_{j=1}^{N_{\text{FFT}}} A_j^{(i)} \cos(\omega_j t + \varphi_j). \quad (8)$$

式(7)与式(8)的区别在于是否乘以强度包络函数 $\Psi(t)$. 若相位为 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机变量, 则式(7)中, 求和符号计算得到的时程为频率和强度均平稳的时程, 必须将其乘以强度包线以反映地震动加速度时程的强度非平稳特性; 若相位为实际地震动记录的相位, 则其包含着天然地震动时程的基本信息; 式(8)计算所得时程不仅具有天然地震动的强度非平稳特性, 还具有其频率非平稳特性, 因此无需乘以强度包络函数. 式(7)和式(8)均可利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, 简称为 FFT)算法进行计算. ③ 对时程 $a^{(i)}(t)$ 进行基线校正处理. ④ 计算校正后时程 $a^{(i)}(t)$ 的反应谱 $S_a^{(i)}(\omega_j)$, 并确定 $S_a^{(i)}(\omega_j)$ 与目标谱 $S_T(\omega_j)$ 之间的相对误差. 若该相对误差满足精度要求, 则退出迭代调整; 否则, 进行下面步骤操作. ⑤ 针对离散频率 $\omega_j = 2\pi(j-1)\Delta f$, 且 $\omega_j \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$, 按照

$$A^{(i+1)}(\omega_j) = \frac{S_T(\omega_j)}{S_a^{(i)}(\omega_j)} A^{(i)}(\omega_j) \quad (9)$$

调整傅里叶幅值谱. ⑥ 令 $i=i+1$, 重复上述步骤②—⑤, 直到满足拟合精度要求为止. 这样就能够实现合成时程的反应谱控制频率范围内的以 Δf 为间距的所有频率点的幅值对目标反应谱幅值的拟合.

2 基线校正方法

本文提出的拟合方法在处理初始地震动以拟合目标反应谱时, 假定初始地震动不存在基线漂移问题. 但是, 在对其进行调整的过程中, 由于调整导致其傅里叶幅值谱发生变化, 从而造成调整后地震动出现基线漂移现象. 针对此问题, 本文提出叠加加速度脉冲的时域基线校正方法, 在每一次迭代调整后, 均对所得地震动进行基线校正处理, 从而确保最终合成地震动的速度、位移不会产生基线漂移, 并且仍能满足对目标反应谱的拟合精度要求. 本文基线调整方法的主要步骤如下:

1) 设定需要进行线性拟合的地震动时间序列的离散点数 N_{reg} .

2) 将第 i 次迭代所得加速度时程 $a^{(i)}(t)$ 积分两次得到位移时程 $d^{(i)}(t)$. 取离散时间变量 $t_k (= (k-1)\Delta t)$ 和离散位移序列 $d_k^{(i)} (= d^{(i)}(t_k))$ 尾部 N_{reg} 个数据分别作为自变量 x 和函数 y 的观测值, 即

$$x_k = t_{N_{\text{FFT}}-N_{\text{reg}}+k}, \quad y_k = d_{N_{\text{FFT}}-N_{\text{reg}}+k}^{(i)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N_{\text{reg}}. \quad (10)$$

3) 基于最小二乘原理, 采用线性模型 $y = Ax + B$ 拟合式(10)所确定的离散数据, 得到拟合系数 A 和 B , 进而可以确定该直线与时间轴的交点 $t_0 = -B/A$.

4) 在加速度时程上叠加脉冲时程 $a_c(t)$, 即

$$a^{(i)}(t) = a^{(i)}(t) + a_c(t), \quad (11)$$

其中

$$a_c(t) = \begin{cases} -A \left[1 - \cos \frac{2\pi}{T_p} (t - t_0) \right], & t_0 \leq t \leq t_0 + T_p, \\ 0, & \text{其它,} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中的 A 即为线性模型 $y = Ax + B$ 的拟合系数 A , $t_0 = -B/A$, T_p 为添加脉冲时程的周期. 为降低叠加脉冲对原始地震动的影响, 本文取 $T_p = 1$ s.

基线校正的具体过程如图 1 所示. 图 1a 中灰色实线为初始地震动加速度时程曲线, 对其积分得到的速度时程曲线如图 1b 中灰色实线所示, 对速度积分得到的位移时程曲线如图 1c 中灰色实线所示. 可以看出, 位移时程曲线出现了明显的基线漂移. 取其尾部 $N_{\text{reg}} = 1024$ 个数据点进行最小二乘拟合, 得到拟合系数 $A = 0.56$ 和 $B = -10.827$, 拟合直线如图 1c 中蓝色直线所示, 其与位移 $d = 0$ 轴的交点时刻 $t_0 = 18.836$ s. 利用式(12)计算所得加速度 $a_c(t)$ 如图 1d 所示, 将其叠加在初始加速度时程上所得校正加速度时程曲线如图 1a 中红色点线所示, 积分所得速度和位移时程曲线分别如图 1b 和 1c 中红色点线所示. 可以看出, 上述校正对加速度和速度时程曲线影响很小(图 1a, b), 但所得位移时程曲线已消除了基线漂移问题(图 1c).

校正前后地震动反应谱的对比如图 2 所示. 可以看出, 上述基线校正对地震动的反应

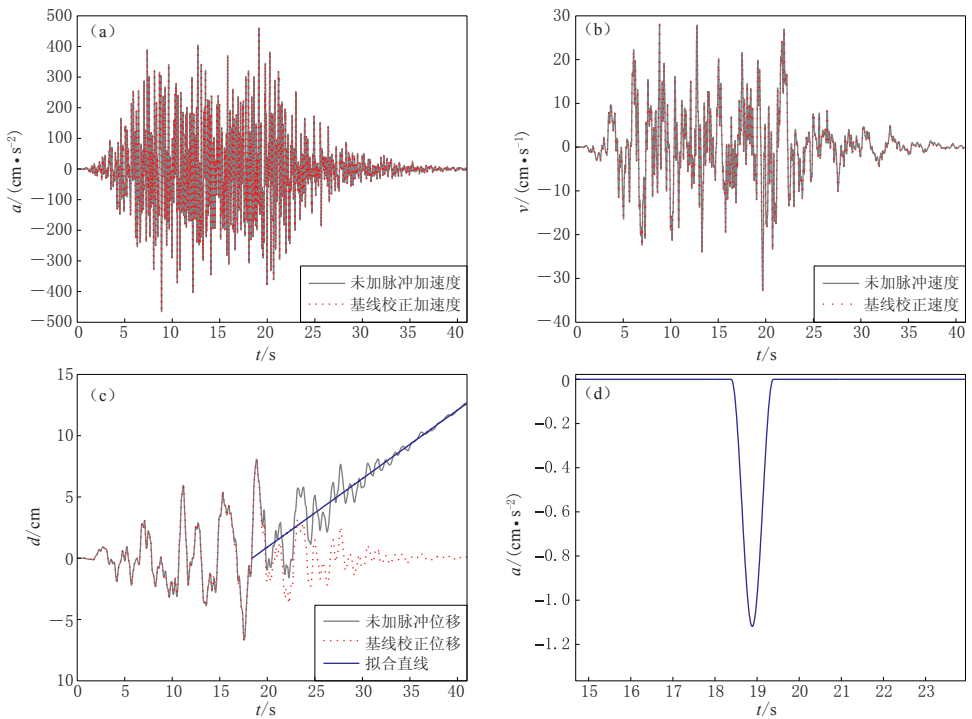


图 1 一次迭代中加入脉冲前后地震动加速度(a)、速度(b)和位移(c)时程曲线及加速度脉冲时程(d)
Fig. 1 The time-history curves of acceleration (a), velocity (b) and displacement (c) and acceleration pulse duration (d) of the ground motion before and after the pulse are added to the iteration

谱影响非常小. 因此, 本文所提出的校正方法能够有效地消除利用传统方法合成的加速度时程所造成的积分位移基线漂移现象, 且经过校正后的加速度时程反应谱几乎无变化, 从而保证了基线校正对反应谱拟合的精度和收敛速度不会产生较大影响.

3 算例

本文算例所用目标地震动加速度反应谱如图 3 所示, 其控制点最小周期为 0.03 s, 最大周期为 4 s, 目标地震动峰值加速度为 500 cm/s^2 . 本文所拟合的加密地震动反应谱的控制点数为 1356, 满足美国核管理委员会 SRP3.7.1 关于传统方法采用的控制点总数为 76 个的规定.

3.1 人工地震动的目标反应谱拟合

以三角级数叠加法生成的地震动加速度作为初始时程, 分别利用传统方法和本文方法, 针对图 3 所示目标反应谱进行地震动合成, 两种方法得到的地震动特性分别如图 4 和图 5 所示.

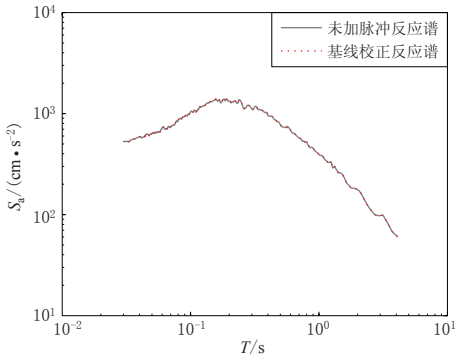


图 2 基线校正对地震动反应谱的影响
Fig. 2 Influence of baseline correction on response spectrum of ground motion

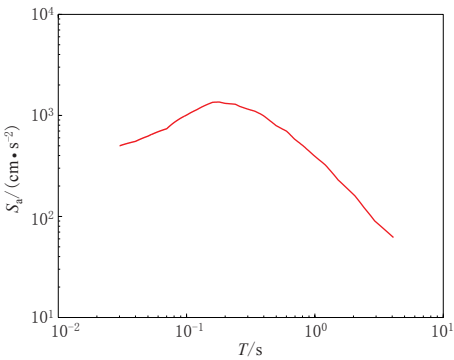


图 3 目标地震动加速度反应谱

Fig. 3 Target ground motion acceleration response spectrum

本文方法在每一次迭代调整的过程中均乘以地震动加速度强度包络函数,而传统方法仅在迭代调整前乘一次强度包络函数,后续的迭代调整就会导致最终所得地震动加速度时程曲线无法满足强度包络的要求.因此,相比传统方法得到的地震动加速度时程曲线,本文方法所得曲线能够很好地满足强度包络要求(图 5a),而传统方法得到的曲线在其起始部分和尾部均超出了强度包线(图 4a);更为严重的是,该时程曲线在起始时刻的加速度值并不为零,这与实际情况不相符.另一方面,传统方法所得的位移曲线会产生较大的基线漂移(图 4c),而利用

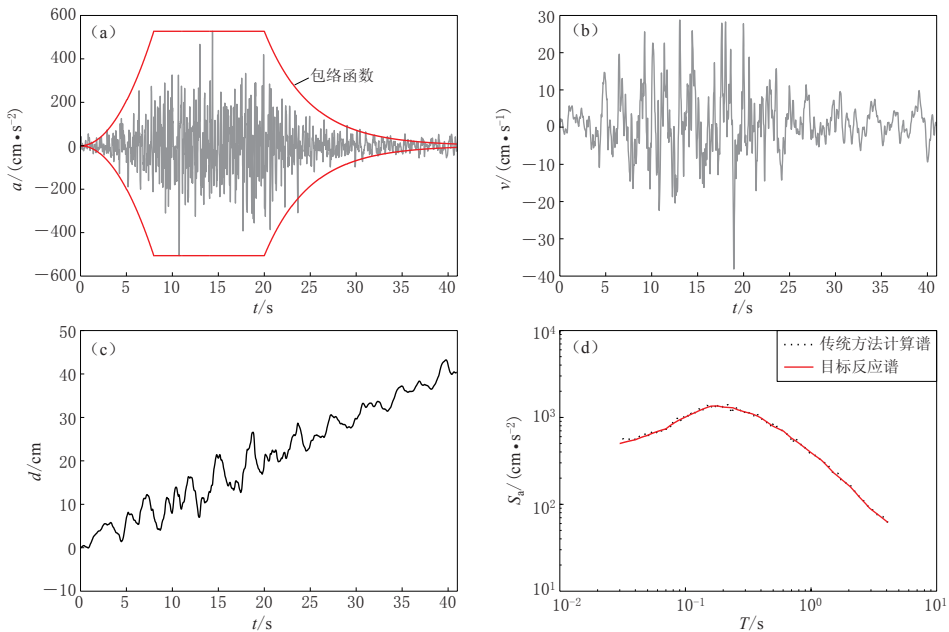


图 4 传统方法合成的地震动加速度(a)、速度(b)和位移(c)时程曲线以及反应谱拟合情况(d)

Fig. 4 The acceleration (a), velocity (b) and displacement (c) time-history curves and response spectrum fitting (d) of the synthetic ground motion by conventional non-encrypted method

本文方法得到的位移曲线不产生基线漂移(图 5c).

本文方法与传统方法合成的地震动除了位移基线校正方面不同以外,对目标反应谱拟合的控制点个数、强度非平稳的考虑也有所不同,大量的拟合算例分析结果显示,这两个因素会影响地震动反应谱拟合迭代算法的收敛速度.考虑以下 4 种计算工况的计算收敛问题:

1) 工况 1: 目标反应谱的控制周期点采用传统的非加密的 76 个控制点,在迭代调整前乘一次强度包络函数;

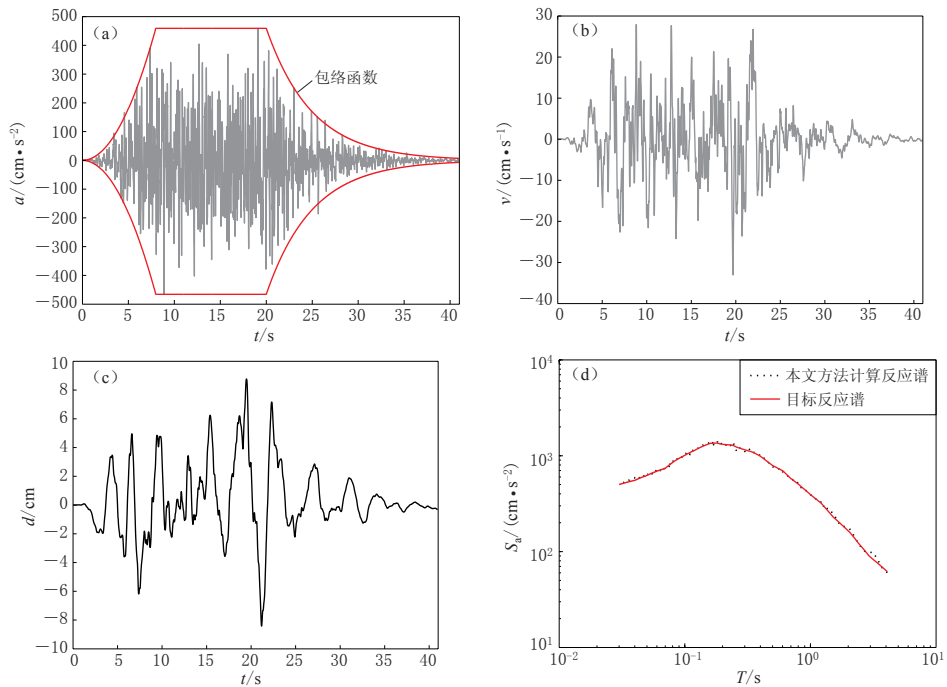


图 5 本文方法合成的地震动加速度(a)、速度(b)和位移(c)时程曲线以及反应谱拟合情况(d)
Fig. 5 The acceleration (a), velocity (b) and displacement (c) time-history curves and the response spectrum fitting (d) of the synthetic ground motion by the encrypted method proposed in this paper

- 2) 工况 2: 目标反应谱的控制周期点采用加密控制点, 在迭代调整前乘一次强度包络函数;
- 3) 工况 3: 目标反应谱的控制周期点采用传统的非加密的 76 个控制点, 在每一次迭代调整过程中均乘以强度包络函数;
- 4) 工况 4: 目标反应谱的控制周期点采用加密控制点, 在每一次迭代调整过程中均乘以强度包络函数.

在上述 4 种计算工况下, 地震动反应谱与目标谱之间相对误差的最大值与迭代次数之间的关系如图 6 所示, 可以看出: 在同等条件下, 加密目标谱的控制点能够加快迭代收敛的速度, 但是大量算例分析表明, 加密控制点也会出现少数收敛速度减慢的情况; 在同等条件下, 在迭代过程中乘以强度包络函数也能够加快迭代收敛的速度. 同时, 由工况 3 与 1 的比较也可得到, 即使本文方法退化为 76 个控制点, 其收敛速度仍比传统方法快. 更为重要的是, 本文方法在

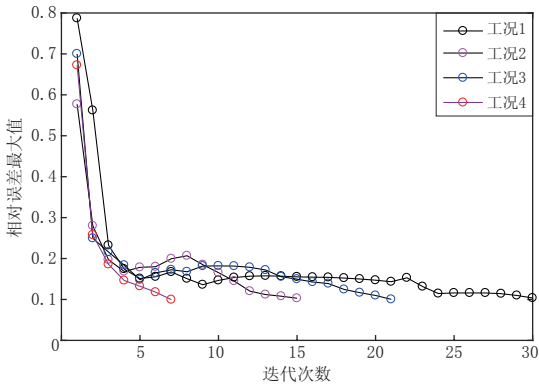


图 6 加密控制点和迭代包络对迭代运算的收敛速度的影响
Fig. 6 The effect of the encrypted control point and iterative envelope on the convergence speed of iterative operation

迭代过程中乘以强度包络函数能够保证最终所得地震动加速度时程曲线的合理性(图 5a).

3.2 保留天然地震动相位的目标反应谱拟合

关于保留天然地震动相位的目标谱拟合, 本文同样对利用非加密目标谱的传统方法与利用加密谱的本文方法进行比较. 首先提取天然地震动(1940 年 5 月 18 日 Imperial Valley 地震, El-Centro 波 NS 方向记录)的相位作为傅里叶相位谱, 并与由目标反应谱转换得到的傅里叶幅值谱相结合, 通过傅里叶逆变换得到初始时程. 利用传统方法的拟合过程为调整初始时程的傅里叶谱幅值, 直到能够以一定精度拟合目标反应谱, 调整过程相位保持不变, 且目标反应谱为非加密谱; 本文方法的拟合过程为调整初始时程的傅里叶谱幅值, 拟合加密的目标反应谱, 并在迭代拟合过程中通过调整傅里叶谱幅值大小来确保拟合时程不产生基线漂移, 应特别注意的是, 此时本文方法在迭代拟合过程中并未加入包络曲线, 因此, 该拟合方法同样能够确保相位不变. 图 7d 和 8d 分别为传统方法和本文方法的合成时程对目标反应谱的拟合, 可以看出两种方法均能够以一定精度拟合目标谱, 并且由图 9 所示的相位谱可以看出, 利用传统方法与本文方法所得的合成时程均保留了天然地震动的相位特征, 但是两种方法合成的时程在其它特性方面却不尽相同(图 7, 8).

比较图 7a 与图 8a 可见, 本文方法合成的地震动时程与天然地震动波形更为相近, 而且本文方法合成的地震动不会产生基线漂移(图 8c). 因此, 可以认为在保留天然地震动相位进行目标反应谱的拟合时, 由加密控制点方法合成的地震动时程更符合天然地震动特征, 更加符合工程实践要求. 同时, 通过对其它天然地震动的拟合调整可知, 保留天然地

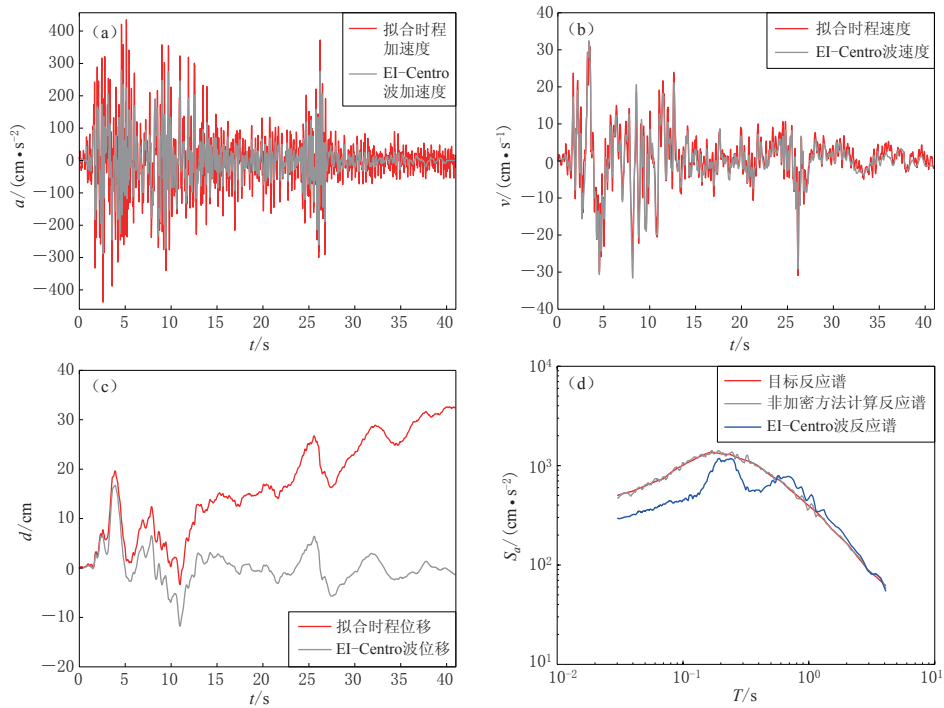


图 7 传统非加密方法合成地震动的加速度(a)、速度(b)、位移(c)时程曲线和加速度反应谱(d)

Fig. 7 The acceleration (a), velocity (b) and displacement (c) history curves and response spectra (d) of synthetic ground motion by conventional non-encrypted method

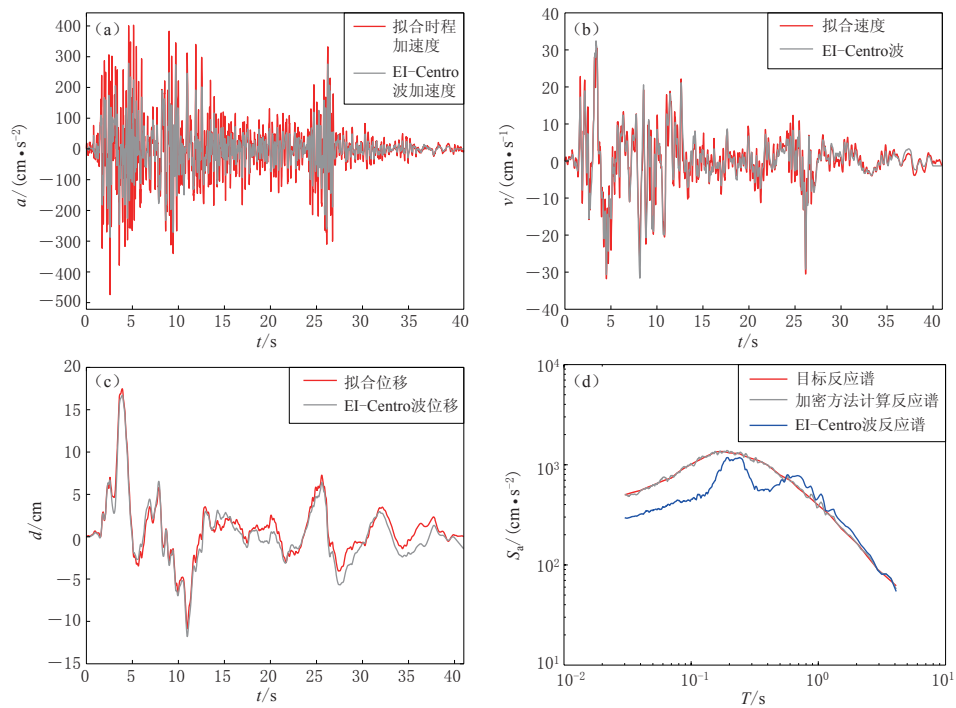


图 8 本文加密方法合成地震动的加速度(a)、速度(b)、位移(c)时程曲线和加速度反应谱(d)
Fig.8 The acceleration (a), velocity (b) and displacement (c) history curves and response spectrum (d) of synthetic ground motion by encrypted method proposed in this paper

震动相位拟合方法的拟合精度和收敛速度会受到天然地震动反应谱与目标谱相似程度的影响。

4 讨论与结论

本文提出的地震动合成方法与传统方法的不同之处在于：

1) 控制点密度不同. 本文提出的方法在每一个傅里叶频率点上拟合目标反应谱, 相比传统方法, 控制点密度得到极大提高, 并且大量的算例分析表明, 通过对目标谱频率范围内各频率分量幅值的调整, 收敛速度明显提高。

2) 强度非平稳的考虑方法不同. 对于“人工”时程(即将相位假定为 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机变量所得到的时程)的合成, 传统方法仅在迭代调整前将平稳时程乘以强度包络得到初始时程, 然后在迭代过程中反复调整该时程的傅里叶谱, 使其逼近目标谱; 而本文方法则在每个迭代步骤内调整傅里叶幅值谱, 之后将其与设定相位组合得到平稳时程, 进而将该时程乘以强度包络得到强度非平稳

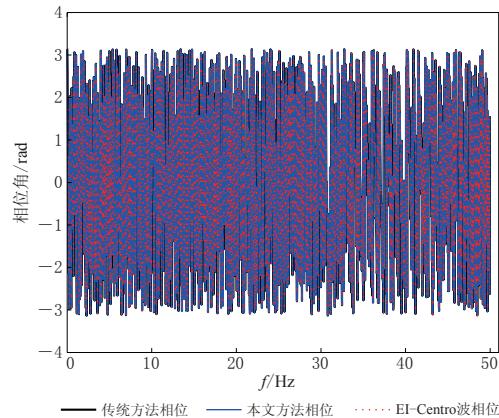


图 9 合成时程与初始时程相位谱比较
Fig.9 Comparison of phase spectra of synthetic time history with those of the initial time history

时程。因此,本文方法在每个迭代调整的步骤内均将所得平稳时程乘以强度包络。

3) 地震动位移时程曲线的形态不同。在地震动合成过程的每一个迭代调整步骤内,考虑到频域调整方法引起的基线漂移,本文方法对所得地震动均进行基线校正处理,因此,本文方法最终所合成的地震动不存在基线漂移问题。

本文改进的方法简单明了,不涉及复杂的公式运算,计算量小,迭代收敛快,合成地震动合理且能够很好地拟合目标反应谱,便于工程应用,对工程实践具有一定意义。

需要指出的是,本文方法在某些计算条件下由于控制点数目的增多,也会出现迭代收敛速度减慢的问题,关于控制点数目对拟合精度的影响尚需通过增加算例进一步研究。对于保留相位谱的地震动合成,初始地震动的选取也会影响合成时程的拟合精度,因此还需要继续讨论由地震环境及场地条件确定的初始地震动的选取方法,以满足对目标反应谱的拟合精度。

参 考 文 献

- 曹晖,赖明,白绍良. 2002. 基于小波变换的地震地面运动仿真研究[J]. 土木工程学报, **35**(4): 40–46.
- Cao H, Lai M, Bai S L. 2002. Study on the simulation of earthquake ground motions based on wavelet transform[J]. *China Civil Engineering Journal*, **35**(4): 40–46 (in Chinese).
- 陈天红,张伯艳,谢清荣,谭海滨. 2010. 人工合成地震波研究[J]. 四川建筑科学研究, **36**(2): 201–203.
- Chen T H, Zhang B Y, Xie Q R, Tan H B. 2010. Study on the generation of artificial earthquake wave[J]. *Sichuan Building Science*, **36**(2): 201–203 (in Chinese).
- 胡聿贤,何训. 1986. 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, **6**(2): 37–51.
- Hu Y X, He X. 1986. Phase angle consideration in generating response spectrum-compatible ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **6**(2): 37–51 (in Chinese).
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 第二版. 北京:地震出版社: 125–127.
- Hu Y X. 2006. *Earthquake Engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press: 125–127 (in Chinese).
- 霍俊荣,胡聿贤,冯启民. 1991. 地面运动时程强度包络函数的研究[J]. 地震工程与工程振动, **11**(1): 1–12.
- Huo J R, Hu Y X, Feng Q M. 1991. Study on envelope function of acceleration time history[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **11**(1): 1–12 (in Chinese).
- 全伟,李宏男. 2007. 基于小波变换的拟合规范反应谱多维地震动模拟[J]. 地震工程与工程振动, **27**(4): 103–108.
- Quan W, Li H N. 2007. Generation of spectrum-compatible multi-dimensional artificial ground motions via wavelet transform[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **27**(4): 103–108 (in Chinese).
- 张郁山,赵凤新. 2014. 基于小波函数的地震动反应谱拟合方法[J]. 土木工程学报, **47**(1): 70–81.
- Zhang Y S, Zhao F X. 2014. Matching method of ground-motion response spectrum based on the wavelet function[J]. *China Civil Engineering Journal*, **47**(1): 70–81 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2005. GB 17741—2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京:中国标准出版社: 78–84.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Commission. 2005. *GB 17741—2005 Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites*[S]. Beijing: Chinese Standard Press: 78–84 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社: 31–35.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. *GB 50011—2010 Code for Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Architecture and Building Press: 31–35 (in Chinese).
- U. S. Nuclear Regulatory Commission. 2014. NUREG-0800, *Standard Review Plan 3. 7. 1: Seismic Design Parameters* [S]. Revision 4. Rockville: Nuclear Regulatory Commission: 7–12.