

拟合多阻尼比目标反应谱的高精度地震动调整方法

谢异同¹, 盛涛², 袁俊³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 3. 西北电力设计院, 陕西 西安 710075)

摘要:基于地震动调整效果的衡量指标比较了时域合成法和时频分析法的优缺点,在推导阿里亚斯强度与绝对加速度反应谱定量关系的基础上,将时域叠加小波函数法和时频小波分析调整法相结合,提出了一种能保留地震动强非平稳特性、对真实地震动相位差谱改动较少、能同时拟合多阻尼比目标反应谱的高精度地震动调整方法,并通过拟合美国规范 D-V-A 联合谱的算例证明了该方法的精度和通用性。

关键词:多阻尼比目标反应谱;地震动;时域合成法;时频分析法;D-V-A 联合谱

中图分类号: P315.913 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)03-0223-05

A Modification Method of Earthquake Ground Motion with High Precision from Fitting the Multi-damping-ratio Target Spectrum

XIE Yi-tong¹, SHENG Tao², YUAN Jun³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an 710055, China)

Abstract: According to the measure index for modification effect of ground motion, both advantages and disadvantages of two methods which called Time Domain Synthesis (TDS) and Time-Frequency Analysis (TFA) are compared. Based on the calculation of quantitative relationship between Arias Intensity and absolute acceleration response spectrum, a new method combined TDS and TFA is proposed for fitting multi-damping-ratio design target spectrum. The results indicate that the new method can retain the strong non-stationary characteristic of earthquake ground motion and decrease the change of real phase difference spectrum. The simulation results of D-V-A combined spectrum shows the new method is practicable and takes precedence over the traditional methods in accuracy.

Key words: Multi-damping-ratio target spectrum; Earthquake ground motion; Time domain synthesis method; Time-frequency analysis method; D-V-A combined spectrum

0 引言

按照特定算法合成满足目标反应谱和幅值、频谱、持时等工程特性的地面运动时程一直是人造地震动研究领域的热点问题。国内外许多学者对此展开了大量的研究,所采用的方法可以分为两大类:时域合成法^[1-4]和时频分析调整法^[4-6]。其中的相位差

谱主要是基于对数正态分布律的人工生成法^[4]和采用真实地震动相位差谱的方法^[7]。

由于地震动的非平稳特性对结构非线性响应的影 响较大^[8-9],调整后得到的地面运动时程需要具有 较高的拟合精度、强非平稳特性及较为真实的相位

收稿日期:2011-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目面上工程(50478045)

作者简介:谢异同(1956-),男(汉族),湖北潜江人,博士,副教授,主要从事地震工程及建筑结构抗震研究。

差谱^[2,3];出于通用性的考虑,往往还需同时拟合多阻尼比目标反应谱及相应的峰值^[4]。本文基于地震调整效果的衡量指标分析时域合成法和时频分析调整法的优缺点,期望在此基础上提出一种能够保留原始地震动的强非平稳特性、对其相位差谱改动较少、能同时拟合多阻尼比目标反应谱的地震动调整方法,再通过算例验证其拟合精度和可行性。

1 地震动调整效果的衡量指标

赵凤新、胡聿贤等^[10]的研究成果表明:当相位差谱的统计特性依赖于频率时,非平稳性决定了能量在时域内集中部位和程度。本文将 $[0, T]$ 时间段内的阿里亚斯强度 $I_A(T)$ 作为衡量地震动时程 $a(t)$ 非平稳性变化的主要指标:

$$I_A(T) = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt \quad (1)$$

式中 g 为重力加速度,这主要是考虑到阿里亚斯强度百分比能表征能量在时域内的集中部位和程度^[1]。

由傅立叶变换可知地震动信号的阿里亚斯强度 I_A 与能量 E 之间存在如下定量关系:

$$E = \int_0^T a(t)^2 dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega = \frac{2g}{\pi} I_A(T) \quad (2)$$

式中的 $|F(\omega)|^2$ 为 $[0, T]$ 内地震动信号的傅立叶幅值谱,又称为能量谱 $\epsilon(\omega)$ 。将有限时间能量信号的能量谱与功率谱之间的转换关系式: $S(\omega) = \epsilon(\omega)/T$ 代入式(2)后,通过傅立叶逆变换即可得到阿里亚斯强度与功率谱之间的定量关系为

$$\begin{cases} S(\omega) = 4TgI_A(\omega) \\ I_A(T) = \sum_{\omega=-\infty}^{+\infty} I_A(\omega) \end{cases} \quad (3)$$

将上式代入 Vanmarke(1976)^[11]提出的反应谱和功率谱之间的量化关系,即可得到阿里亚斯强度与反应谱之间的定量关系:

$$S_a^2(\zeta, \omega_0) = \left\{ \left(\frac{2\pi\omega_0 T_d \cdot g}{\zeta} \right) \cdot \left[2 \lg \left(-\frac{\pi}{\omega_0 T_d} \cdot \lg P \right) \right]^{-1} \right\} \cdot I_A(\omega_0) \quad (4)$$

式中的 P 为反应谱值超越概率。由上式可知:在相同反应谱值情况下, ω_0 越小, I_A 值越大;在相同频率情况下,反应谱值越大,则 I_A 值也越大。因此可以由 I_A 值衡量地震动的谱坐标与目标谱之间的拟合精度及引入信号与原始信号间的比例关系。

2 两类地震动调整方法对比

时域合成法主要是基于 Duhamel 积分原理,在真实地面运动时程的基础上叠加一定量的时程函数使其与目标反应谱相兼容,保留了地震动的非平稳特性和持时^[5],通过改进还能拟合峰值速度、峰值位移^[2,11]等。但不足之处体现在随着叠加时程函数的“积少成多”,会较大程度的改变原始的能量分布状况,对原始信号的相位差谱、非平稳特性等构成较大的影响^[12]。

另一种途径则是时频分析调整法,如:短时傅立叶变换法(STFT)^[6],小波变换法^[6]等。主要思路是将真实信号分解到各个频带,通过对各频带分量作幅值调整以改变相应周期段的反应谱值,达到拟合目标反应谱的目的^[6]。其优点是概念清晰,与设计反应谱结合时能模拟真实地震波在介质中传播规律,具有一定的物理意义^[13];且由于使用的是自身的相位差谱,对能量分布的改变相对于时域合成法要小很多,因此具有很高的实用价值。其主要不足体现在由于各分量之间的频带重叠而造成的拟合精度不高^[6];且由于扩大了低频成分会造成积分时程的漂移^[12];另外还不能同时拟合多阻尼比目标反应谱及峰值速度、峰值位移等。这些都成为了限制其发展的“瓶颈”。

综上所述,将理想的调整方法应具有的性质及上述两种调整法的优缺点归纳于表1中。通过对比提供了一个很好的思路:由于时域合成法精度颇高,因此可以用作小幅度修正,而前期的大幅度调整则采用时频分析法,这样不仅最大限度保留其非平稳特性和真实的相位差谱,还能充分应用时域合成法的诸多优点。

3 理想地震动调整方法的实现及其程序设计

上述思路的具体的实现方法是先采用谢异同等^[6]提出的时频小波分析法调整真实地震动,最大限度的拟合目标谱和相应的峰值,再采用 Hancock、J 等^[12]提出的时域叠加正、余弦小波函数法对其作小幅度调整拟合多阻尼比目标反应谱,以提高其拟合精度,其中正、余弦小波函数的表达式如下:

$$a_j(t) = \begin{cases} e^{-\beta_j \omega_j (t-t_j+\Delta t_j)} \sin(\omega_j (t-t_j+\Delta t_j)) \\ e^{-|\beta_j \omega_j (t-t_j+\Delta t_j)| \psi_j} \cos(\omega_j (t-t_j+\Delta t_j)) \end{cases} \quad (5)$$

式中: Δt_j 是用于协调小波函数的峰值时刻 t_j 与单自由度体系动力反应的峰值发生时刻; β_j 为阻尼比; ψ_j 用于协调小波函数在时域内的衰减快慢。

将具体步骤绘制成程序设计流程图如图1所

示,再采用 C 语言完成整个程序设计。

表 1 时域合成法和时频分析调整法的性能比较及理想的调整方法

	叠加时程的平稳性	能量分布的改变	相位差谱的改变	拟合目标谱精度	是否能拟合多阻尼	能否拟合峰值速度
时域合成法	平稳	较大	大	极高	能	能
时频调整法	非平稳	较小	小	较低	否	否
理想方法	非平稳	较小	小	较高	能	能

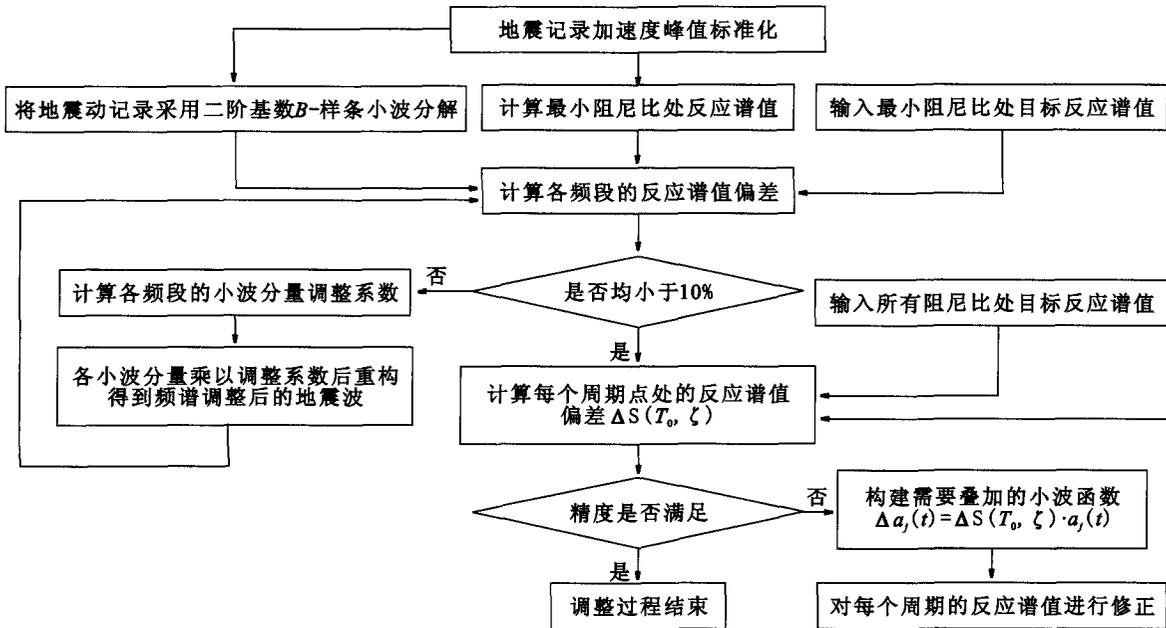


图 1 地震动调整的程序设计流程图

Fig. 1 Flow chart of program design for ground motion modification.

4 算例分析

选用 EL-Centro NS ($PGA=0.31\text{ g}$) 的地面运动时程作为范例,拟合美国规范硬土地条件下阻尼比为分别为 5%、10%、20% 的弹性 D-V-A 联合谱。该谱建议当地面峰值加速度取为 $\ddot{u}_{g0}=1\ 000\text{ gal}$, 相应的峰值速度及峰值位移为 $\dot{u}_{g0}=124.80\text{ cm/s}$, $u_{g0}=93.60\text{ cm}$ 。标准的弹性 D-V-A 联合谱的概念见文献[1]。将该谱乘以 0.31 得到本例的目标反应谱。

在拟合目标谱之前,需要先将伪速度谱转换为伪加速度谱,拟合伪加速度谱后,再转换为伪速度谱与目标谱进行比较以确定拟合精度。

将 EL-Centro NS 波采用二阶基数 B-样条作 7 层小波分解,最后一个小波分量的周期范围为: [5.12 s, 10.24 s]; 经过 12 次时频小波分析调整后各频段上的反应谱平均偏差 $Misfit(T)_{ave}$ 的最大值、最小值及整个频段上的平均偏差分别为 6.75%、6.73%、7.73%, 可见整体偏差及各频段上的最大平均偏差均小于 10%, 此时的峰值加速度为 0.

31 g; 然后再对上述调整后的地震波采用时域叠加小波函数法对各频率点进行修正,同时对多阻尼比目标反应谱进行拟合。

经过上述调整后的地面运动加速度时程及 D-V-A 联合谱如图 2、图 3 所示。其中在三个阻尼比条件下每个周期点处的最大偏差、最小偏差及平均偏差分别为 3.5%、0%、0.84%, 具有很高的拟合精度。

由于时频小波分析调整过程中使用的是地震动自身小波分量的相位差谱,而后来叠加上的小波函数却很难具有与真实地震动相位差谱相同的统计特性,且由于小波函数只是谐振信号,出于对真实性的考虑叠加上的小波函数也应该越少越好。因此做出调整前后波形的 Arias 强度及其百分比如图 4 所示。由图 4(a)可知,经过时频小波分析调整后的 Arias 强度由原始记录的 0.71 增加到了 0.90,而直接采用叠加小波函数和采用本文的方法最后得到的 Arias 强度均为 1.15。由式(4)可知两种方法的精度相同,而采用本文的方法叠加上的小波函数的强度值仅为 0.25,为时域合成法叠加上的 55%。由图

4(b)可知,由于小波分析法调整后拟合精度已经较高,之后叠加上的小波函数对能量分布的二次影响已经变得极其微小,尽管时频小波分析调整法对相位差谱的改变随着调整次数的增加而增加,但是该

过程中使用的是其自身小波分量的相位差谱,当与叠加小波函数法联合使用时,相对于单独叠加小波函数而言改变量减少了近50%,这也进一步验证了该方法的实用性和通用性。

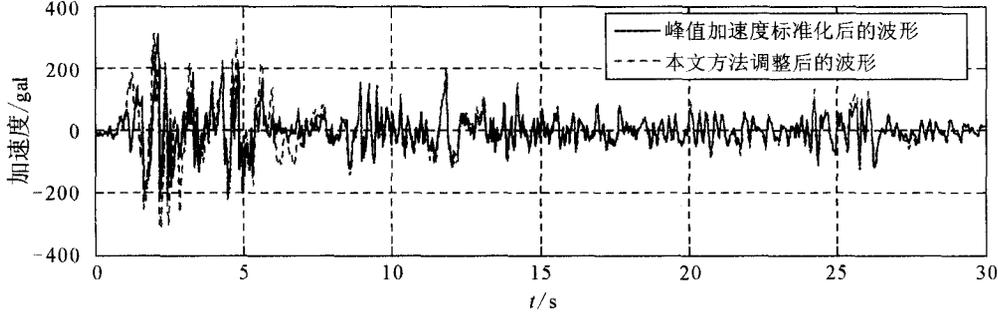


图2 调整前后的EL-Centro NS波形

Fig. 2 The EL-Centro NS waveform before and after the modification.

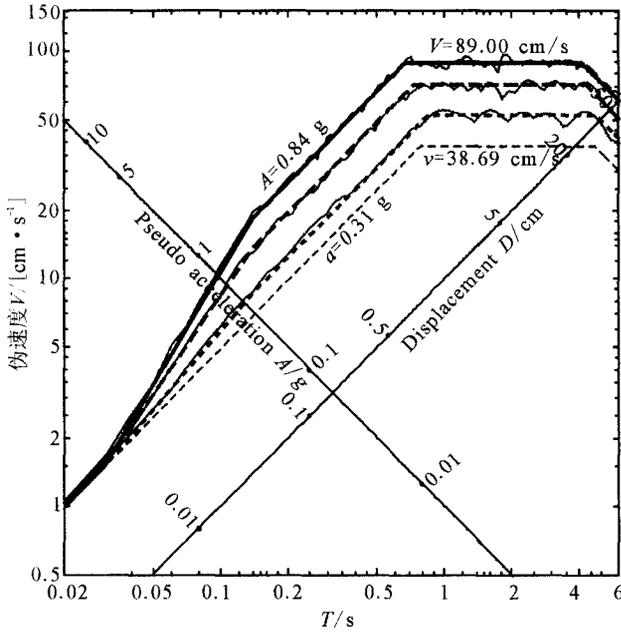
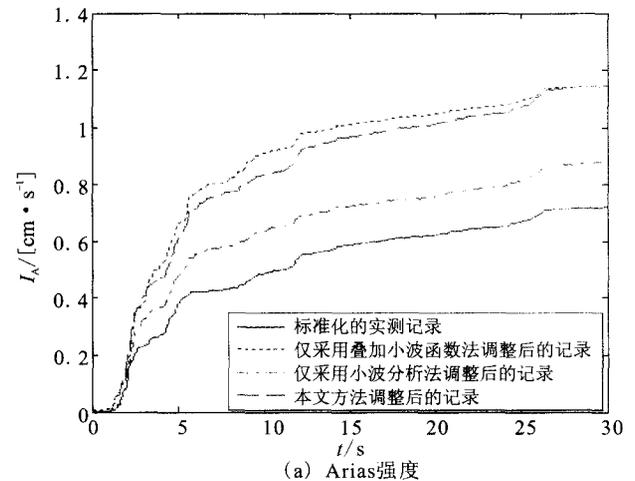


图3 调整后的反应谱与标准D-V-A联合谱(由上至下阻尼比:5%,10%,20%)

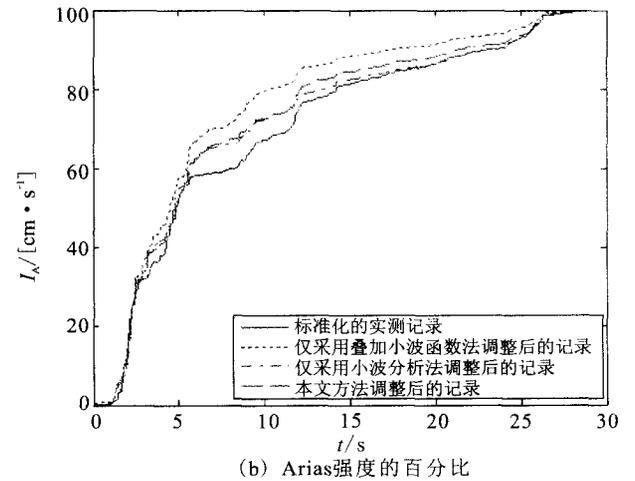
Fig. 3 The pseudo velocity spectrum after adjustment and the D-V-A combined spectrum (damping ratio:5%, 10%, 20%).

5 结论

本文通过对时域合成法和时频分析调整法并行比较分析,提出了一种高精度的多阻尼比地震动调整方法以克服传统方法的不足。其首先采用时频小波分析对地震动作前期调整,通过控制平均偏差与最大偏差以最大限度逼近目标反应谱,再采用时域叠加小波函数法作后期小幅度调整,并通过阿里亚斯强度控制叠加上的小波函数的比例,这样不仅最



(a) Arias强度



(b) Arias强度的百分比

图4 调整前后的阿里亚斯强度变化

Fig. 4 The variation of Arias Intensity before and after the modification.

大限度的保留了地震动的非平稳特性、相位差谱等真实信息,且能很好的应用时域合成法拟合多阻尼

比目标反应谱。

通过对 EL-Centro NS 地震波的调整以拟合美国规范硬土地条件下多阻尼比 D-V-A 联合谱,验证了该方法的可行性和通用性,为该方法的改进以同时拟合峰值加速度、峰值速度和目标反应谱奠定了基础。

[参考文献]

- [1] 胡聿贤. 地震工程学(第二版)[M]. 北京:地震出版社,2006.
- [2] Lihanand K, Tseng W S. Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multi-damping design spectra[A]//9WCEE Organizing Committee. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering II [C]. Tokyo Japan: [s. n.],819-824.
- [3] 蔡长青,沈建文. 人造地震动的时域叠加法和反应谱整体逼近技术[J]. 地震学报,1997,19(1):71-78.
- [4] 田玉基,杨庆山. 多阻尼比设计反应谱的非平稳地震动场拟合[J]. 振动与冲击,2010,29(1):43-48.
- [5] 贺瑞,秦权. 产生时程分析用的高质量地面运动时程的新方

法[J]. 工程力学,2006,8(8):12-19.

- [6] 谢异同,张同亿,吴敏哲. 时程分析中设计地震动调整的小波分析方法[J]. 地震工程与工程振动,2002,3(6):19-23.
- [7] 刘小弟,苏经宇. 具有天然地震特征的人工地震波研究[J]. 工程抗震,1992,(3):33-36.
- [8] 王君杰,周晶. 地震动频谱非平稳性对结构非线性反应的影响[J]. 地震工程与工程振动,1997,17(2):16-20.
- [9] 施卫星,刘凯雁,王立志. 网架减震球型钢支座减震性能振动台试验研究[J]. 西北地震学报,2009,31(4):344-347.
- [10] 赵凤新,胡聿贤. 地震动的非平稳性与幅值谱和相位谱的关系[J]. 地震工程和工程振动,1994,2(2):1-6.
- [11] Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A, et al. An improved method of matching response spectra of record earthquake ground motion using wavelets[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2006,10(1):67-89.
- [12] Zhao F-x, Zhang Y-s. Artificial ground motion compatible with specified peak velocity and target spectrum[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006,19(4):461-471.
- [13] 廖振鹏,魏颖. 设计地震加速度图的合成[M]. 北京:地震出版社,1989.

(上接 222 页)

[参考文献]

- [1] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1956,28(2):168-191.
- [2] Zienkiewicz O C, Shiomi T. Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1984,8(1):71-96.
- [3] Prevost J H. Wave propagation in fluid-saturated porous media: an efficient finite element procedure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,1985,4(4):183-202.
- [4] 赵成刚,王进廷,史培新等. 流体饱和两相多孔介质动力反应分析的显式有限元法[J]. 岩土工程学报,2001,23(2):178-182.
- [5] 王进廷,杜修力,赵成刚. 液固两相饱和和介质动力分析的一种显

式有限元法[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(8):1199-1204.

- [6] 廖振鹏,刘晶波. 离散网格中的弹性波动[J]. 地震工程与工程振动,1986,6(2):1-16.
- [7] 王进廷,杜修力,张楚汉. 瑞利阻尼介质有限元离散模型动力分析的数值稳定性[J]. 地震工程与工程振动,2002,22(6):18-24.
- [8] 景立平. 波动有限元方程显式逐步积分格式稳定性分析[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(5):20-26.
- [9] 刘祥庆,刘晶波,丁桦. 时域逐步积分算法稳定性与精度的对比分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(Supp. 1):3000-3008.
- [10] 邱启荣. 矩阵理论及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2008.