

拟合水工设计反应谱的人工地震波的生成 与 Huang 变换校正

姚艳华, 彭 刚, 陈灯红

(三峡大学土木水电学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:根据非平稳输入下建立的功率谱与均值反应谱之间的关系, 合成基于水工设计反应谱的人工地震波, 并对其幅值进行修正, 降低了高频区误差作用。为了解决加速度时程积分后的速度、位移时程的零线漂移现象, 利用 Huang 变换得到加速度时程的固有模态函数, 这种最低频率固有模态函数分量通常情况下代表原始信号的趋势或均值; 再对去掉均值后的加速度时程进行积分, 得到的速度、位移时程不存在零线漂移问题。

关键词:人工地震波; 功率谱; 幅值谱; Huang 变换; 固有模态函数

中图分类号: TU435; P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)03-0255-06

Synthesis and Huang Transform Correction of Simulated Earthquake Wave for Hydraulic Design Response Spectrum

YAO Yan-hua, PENG Gang, CHEN Deng-hong

(College of Civil & Hydropower Engineering, China Three Gorges Univ., Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: A method that can simulate earthquake wave based on the hydraulic design response spectrum and the relationship of power spectrum and mean response spectrum in the non-stationary input is presented. It can be used to modify the initial wave and reduce the error of high frequency. In order to solve the shift of velocity and displacement obtained by integrating acceleration, the Huang transform is used to obtain the intrinsic mode functions of acceleration. The lowest frequency intrinsic mode function is generally the mean value or trend of signals. The velocity and displacement obtained by Integrating the acceleration which is deducted trend don't have the shift problem.

Key words: Simulated earthquake wave; Power spectrum; Amplitude spectrum; Huang transform; Intrinsic mode functions

0 引言

人工合成或模拟满足某些特定工程特性的地震动时程(即人造地震动或设计地震动)是地震工程学中一个重要的研究领域。在进行非线性结构随机地震反应的蒙特卡罗分析时, 在结构抗震理论分析中为了研究某一参数的影响, 需要保持其它参数不变时以及在进行结构模型试验时, 都需要具有同一统计特征的一组地震动过程。由于地震是小概率事件, 目前获得的实际地震波极其稀少, 只有通过人工

模拟方法生成等效地震波, 从而满足实际工程数值计算的需要。

目前大多是基于 Kaul^[1]提出的反应谱与功率谱经验关系合成人工地震波。这一关系是基于平稳随机过程假定导出的, 并作了一定程度的近似。我国学者基于用等效平稳输入的最大反应分布来求取非平稳输入的最大反应的思想, 提出了非平稳输入下反应的近似最大反应分布, 并利用此分布确立了

收稿日期: 2007-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90510017); 中国博士后科学基金(20060390832)

作者简介: 姚艳华(1984-), 女, 湖北潜江人, 硕士研究生, 主要研究方向为水工结构数值计算。

功率谱与均值反应谱之间的关系^[2]。本文利用该关系来合成人工地震动。在结构的抗震计算中,除了需要地震加速度时程外,还要输入地震动的速度、位移时程,然而在人工地震动合成计算中,人们往往比较注重对加速度时程的研究,而对速度时程、位移时程的研究较少,仅仅是将地震加速度时程进行简单积分后得到地震动速度与位移时程^[3]。然而直接积分获得的速度时程和位移时程往往存在着明显的零线漂移现象,这对需考虑地震位移输入的大尺度空间结构地震动分析影响是很大的。而且随着结构尺度的增大,输入地震速度和位移时程的零线漂移可能导致沿结构-地基交接面各点输入的地震动幅值和相位差别逐渐增大,进而由地震动位移差造成的结构拟静位移响应也会越大^[4]。这将导致错误的结构总体响应,对结构控制产生不良的影响。本文在利用反应谱合成地震波的过程中,除了修正功率谱和幅值谱外,还进行了 Huang 变换^[5]校正,从而能够得到有效的速度、位移记录。

1 基本理论

Scalan 和 Sachs^[6]提出了用三角级数叠起来来模拟地震动加速度,即用一组三角级数的和构造一个近似的平稳高斯过程,然后乘以强度包络函数,以得到非平稳的地面运动加速度时程。

近几十年来人们普遍认识到地震动的峰值、频谱特性和持续时间这三个要素对结构反应有重要影响,因此在地面运动模拟中,一般要求控制三个要素,即加速度峰值 $\alpha_{\max}$, 加速度放大倍数反应谱 $\beta(\omega)$, 强度包线 $f(t)$ 。常用的模型是

$$\ddot{X}_g = f(t) \cdot \alpha(t) \quad (1)$$

工程上最常用的包线函数形式为

$$f(t) = \begin{cases} t^2/t_1^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_1)} & t_2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

式中, c 控制下降段衰减强度的快慢, t_1 、 t_2 分别控制平稳段的首末时刻, 这些参数决定了 $f(t)$ 的形状, 也即决定着合成人工波的形状; T 为分析时段总长。

按照式(1)的模型, 首先要构造一个平稳的高斯过程:

$$\alpha(t) = \sum_{k=0}^n C_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (3)$$

式中,

$$\begin{cases} C_k = [4S(\omega_k \Delta\omega)]^{1/2} \\ \Delta\omega = 2\pi/T \\ \omega_k = 2\pi k/T \end{cases} \quad (4)$$

式中, φ_k 为 $(0, 2\pi)$ 区间内均匀分布的随机相位角; C_k 与 ω_k 分别为第 k 个频率分量的幅值和频率。

1984 年, 我国学者江近仁等^[2]基于用等效平稳输入的最大反应分布来求取非平稳输入的最大反应的思想, 提出了非平稳输入下反应的近似最大反应分布, 并利用此分布确立了功率谱与均值反应谱之间的关系

$$S_\alpha(\omega) = \frac{\frac{4\xi}{\pi\omega} \bar{S}_\alpha(\omega, \xi)}{M(\sqrt{2\ln\nu\tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln\nu\tau}})} \quad (5)$$

$$M = \frac{t_2 - 0.3t_1}{\tau} + \frac{1}{2\xi\omega\tau}(e^{-2\xi\omega t_2} - e^{-2\xi\omega t_1}) + \frac{1}{ct}[1 - e^{c(\tau + \frac{t_1}{2} - t_2)}] \quad (6)$$

式中, τ 为强度超过峰值 50% 的持续时间, 根据以上强度包络函数, 得出 $\tau = t_2 + \frac{\ln 2}{c} - \frac{t_1}{\sqrt{2}}$; ν 为反应过程的零交差期望值, 约为 ω/π 。

2 初始波的修正

由反应谱与功率谱的近似转换关系, 按上述方法得到的初始地震波, 其反应谱与目标反应谱之间必然存在着较大的误差, 这就需要采用某种方法对初始波进行修正, 使其反应谱逐步逼近目标反应谱。通用的方法是按下式调整式(3)中的傅氏幅值谱:

$$C^{(i+1)}(\omega_k) = \frac{S_T(\omega_j, \xi)}{S_\alpha(\omega_j, \xi)} C^{(i)}(\omega_k), N_{1j} < k \leq N_{2j} \quad (7)$$

式中, $C^{(i)}(\omega_k)$ 和 $C^{(i+1)}(\omega_k)$ 分别为第 i 和 $i+1$ 次迭代的结果; $S_T(\omega_j, \xi)$ 和 $S_\alpha(\omega_j, \xi)$ 分别为第 j 个频率控制点 ω_j 处的目标谱和计算反应谱。采用上述方式对幅值谱调整仅局限在控制频率 ω_j 附近的 $N_{2j} - N_{1j}$ 个傅立叶分量。与 N_{1j} 和 N_{2j} 对应, ω_{1j} 和 ω_{2j} 按下述方法选取:

$$\omega_{1j} = \frac{1}{2}(\omega_{j-1} + \omega_j), \omega_{2j} = \frac{1}{2}(\omega_j + \omega_{j+1}) \quad (8)$$

$$N_{1j} = \frac{\omega_{1j}}{\Delta\omega}, N_{2j} = \frac{\omega_{2j}}{\Delta\omega} \quad (9)$$

对于第一个频率控制点 ω_1 有 $\omega_{11} = \omega_1$; 对于最后一个频率控制点 ω_N 有 $\omega_{2N} = \omega_N$ 。

频段 $[\omega_{1j}, \omega_{2j}]$ 被称为 ω_j 的主控频段。对于目标谱控制点 ω_j , 迭代运算时只改变主控频段的幅值谱, 这是因为在整个频段中由于共振原理主控频段频率分量的改变对 ω_j 处反应谱的变化最为敏感。另

一方面,调整幅值谱时应尽量将幅值谱变化的影响局限在特定的控制频率 ω_j 附近,以避免在拟合 ω_j 频率处目标反应谱时对其邻近控制频率处的反应谱带来过大的影响^[7]。对 $X_g(t)$ 的幅值谱进行多次迭代修正,即可使其反应谱向目标谱逼近。

由图1、2可以看出,初始人工地震波的反应谱在高频段与标准反应谱拟合误差较大。按照上述修正方法,迭代8次,相对误差控制在10%以内,修正结果见图3、4。

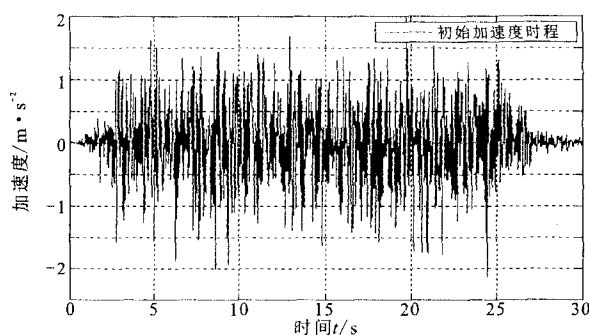


图1 初始人工地震波

Fig. 1 Initial artificial earthquake wave.

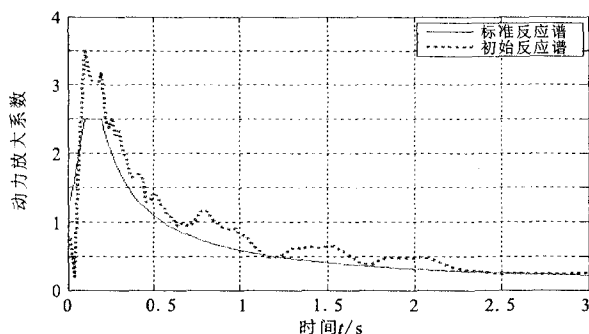


图2 初始人工地震波反应谱与标准反应谱

Fig. 2 The spectrum of initial artificial earthquake wave and standard spectrum.

3 地震波的校正

尽管对初始地震波进行修正后人工地震波的反应谱能够和目标谱拟合良好,但是如果直接对该波进行积分求得速度时程、位移时程,仍然是不行的。因为在加速度时程合成计算中尽管采取了一定的修正手段,一些长周期分量仍会残留下来。它们虽然不会导致加速度时程的漂移,但是却会对积分后的位移时程产生严重的漂移,用这样的位移时程进行计算将会导致计算结果的失真^[8]。许多学者已经对此进行了广泛的研究,认为加速度时程中的少量长周期分量是导致位移时程漂移的主要原因。因此

采用什么方式滤掉这些长周期分量,便是解决该问题的关键。

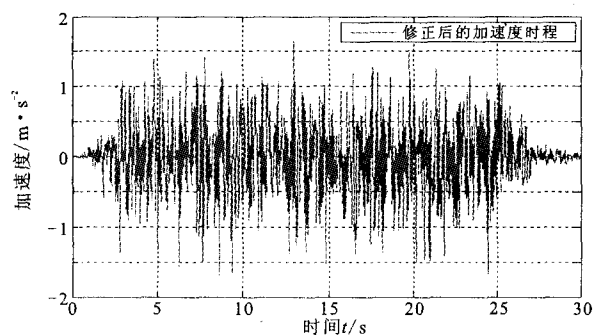


图3 修正后的人工地震波

Fig. 3 Modified artificial earthquake wave.

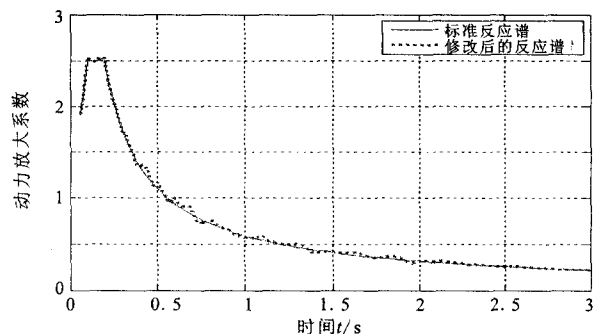


图4 修正后的人工地震波反应谱与标准反应谱

Fig. 4 The spectrum of modified artificial earthquake wave and standard spectrum.

Huang 变换^[5]是近年发展起来处理非平稳数据的信号处理方法。由 Huang 变换方法得到的最低频率固有模态函数分量通常情况下代表原始信号的趋势或均值。从这个意义上讲,Huang 变换方法可以有效地提取一个信号的趋势或去掉该信号的均值。实际上,大量的实验表明 Huang 变换方法是当前提取信号趋势或均值的最好方法^[10]。本文利用这种变换来提取加速度时程的均值,然后对去掉均值后的加速度时程积分得到速度时程、位移时程。分析表明,速度时程、位移时程没有明显的漂移现象。

3.1 Huang 变换

Huang 变换是基于以下3个假设:①数据中至少有两个极值点一个极大值和一个极小值;②特征时间尺度是由两个相邻极值点的时间间隔所决定;③如果数据没有极值点而只有拐点,那么可以通过一次或几次微分得到极值点最后可以把各模态分量进行积分复原。固有模态函数需满足以下两个条件:①对整个时间序列来说,极值的个数与穿过零点的个数相同或其差值为1;②在任何一点极大值的

包线与极小值的包线的均值为零。对任意一条时程曲线都可按下述方法进行 Huang 变换: 首先, 确定时程曲线 $X(t)$ 的所有峰值点然后用三次样条函数曲线循序连接所有的最大值, 得到时程曲线 $X(t)$ 的上包络线, 采用同样的方法循序连接所有的最小值, 得到时程曲线 $X(t)$ 的下包络线, 循序连接上、下包络线的均值可得一条均值线 $m_1(t)$, 于是可得

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t) \quad (10)$$

如果 $h_1(t)$ 满足固有模态函数所需的条件, 则 $h_1(t)$ 即为第一阶固有模态函数。一般地说, 它并不满足条件, 此时将 $h_1(t)$ 看成新的时间曲线, 重复上述方法, 可得

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \quad (11)$$

式中, $m_{11}(t)$ 是 $h_1(t)$ 的上、下包络线。按上述方法重复 k 次, 直到 $h_{1k}(t)$ 满足固有模态函数的条件为止, 此时 $h_{1k}(t)$ 就是第一阶固有模态函数, 记作 $c_1(t)$ 。第一阶固有模态函数 $c_1(t)$ 包含着时程 $X(t)$ 的频率最高的成分。从 $X(t)$ 中减去高频成分 $c_1(t)$, 得到频率较低的残差为

$$r_1(t) = X(t) - c_1(t) \quad (12)$$

将 $r_1(t)$ 看成一组新的数据, 重复上述经验模态分离过程。经过多次运算可以按下式得到

$$r_{j-1}(t) - c_j(t) = r_j(t), \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

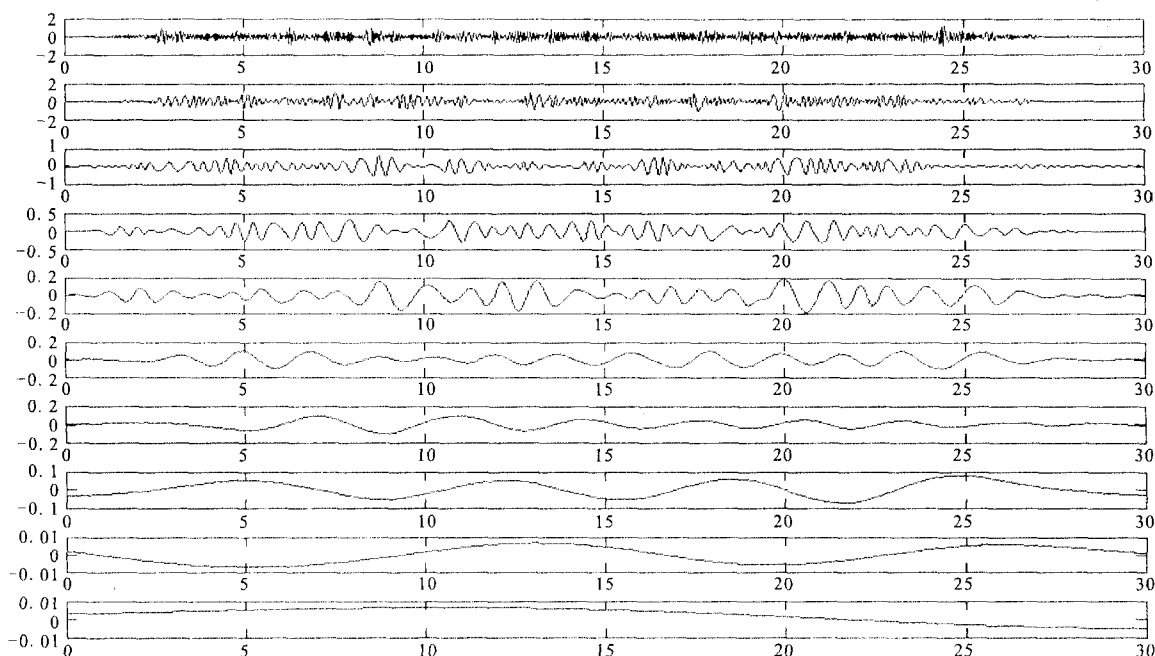


图5 人工地震波的模态分解

Fig. 5 Mode decompose of artificial earthquake wave.

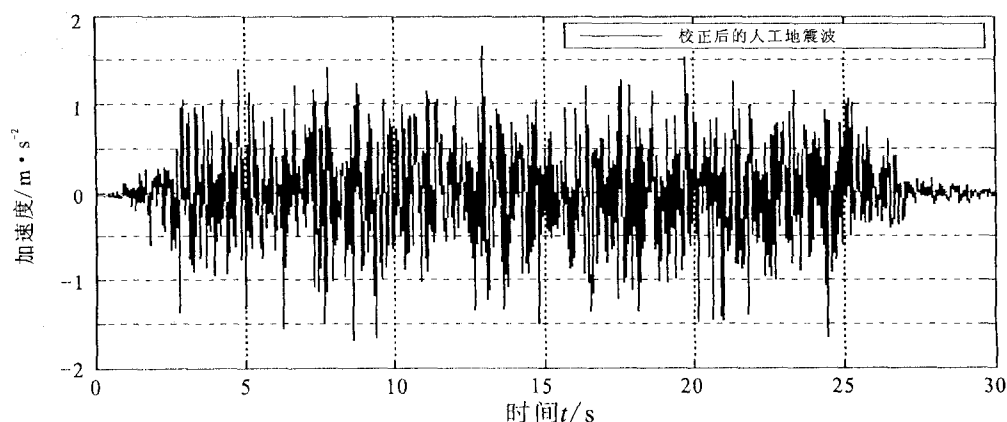


图6 校正后的人工地震波

Fig. 6 Revised artificial earthquake wave.

当满足以下两个条件之一时,整个振型分离过程可以终止。(1) $c_n(t)$ 或 $r_n(t)$ 小于预定的误差;(2) 残差 $r_n(t)$ 成为一单调函数,此时不可能再从中提取固有模态函数。最后时程曲线 $X(t)$ 可以按下式表示成 n 阶固有模态函数和第 n 阶残差之和

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (14)$$

3.2 人工地震波的校正

将生成的人工地震波进行 Huang 变换,得到其模态分解,结果如图 5 所示。最后一阶模态函数是人工地震波信号的均值或趋势,去掉该均值得到的地震波时程能很好的解决速度时程、加速度时程的漂移问题(见图 6、7)。图 8 为修正后的人工地震波

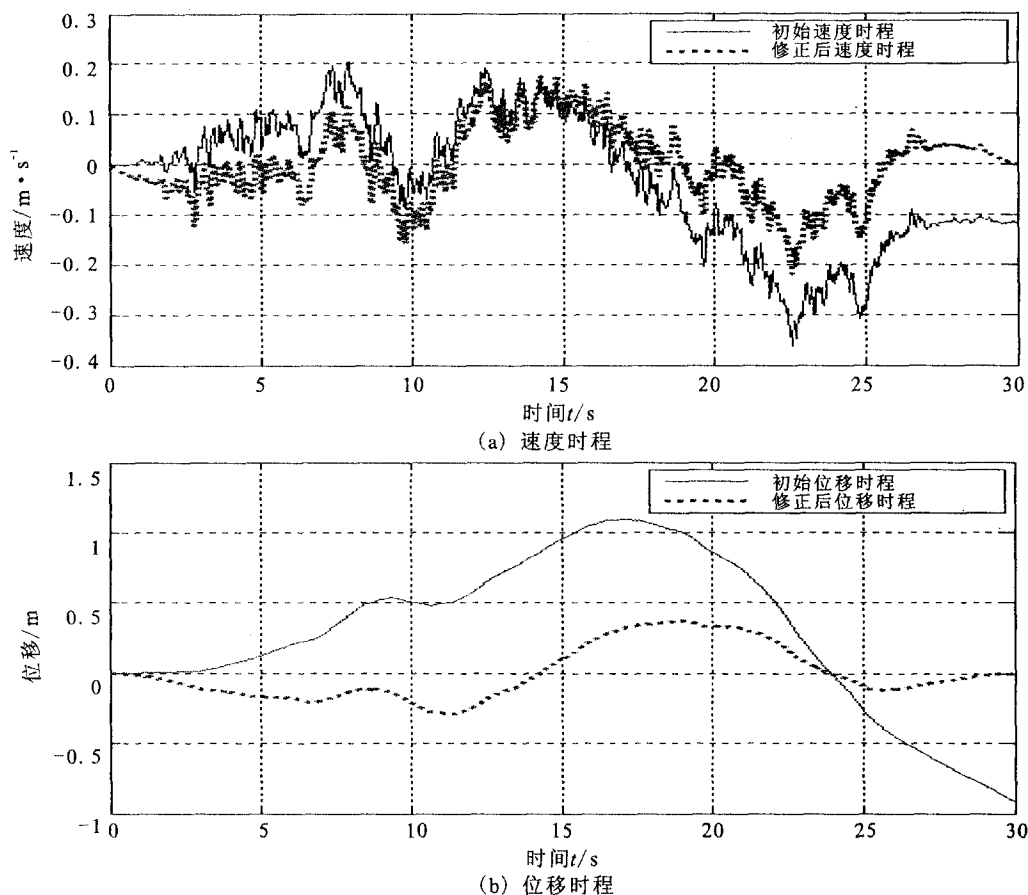


图 7 校正前后的速度时程和位移时程比较

Fig. 7 Comparison of velocity histories/displacement histories before and after the modifying.

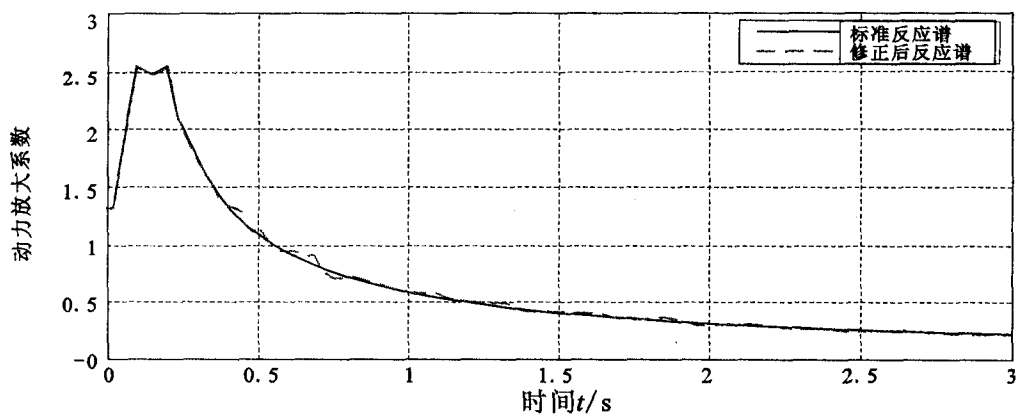


图 8 修正后的人工地震波反应谱与标准反应谱

Fig. 8 The spectrum of modified artificial earthquake wave and standard spectrum.

反应谱与设计反应谱的比较,可知经过 Huang 变换,人工地震波的反应谱与设计反应谱更逼近了。

4 结语

(1) 利用幅值谱修正能降低高频区误差作用,进行幅值谱修正的同时,还通过 Huang 变换对人工地震波进行了校正,有效地纠正了位移时程的漂移,这种方法拟合精度较高。

(2) 利用 Huang 变换法校正后的加速度时程仍具有原人工地震动的反应谱性质,表明校正方法是合理的、可行的。

(3) Huang 变换方法可以去掉信号中的长周期分量,但可能会丢掉宽频带记录中的长周期信号,这方面还需要进一步研究。

按照上述方法编制的人工地震波程序,方便地获取了有效的加速度、速度、位移时程,对结构抗震计算中,输入地震波的获取带来了方便。

[参考文献]

- [1] Kaul M K. Stochastic Characterization of Earthquakes Through Their Response Spectrum[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1978, 6(5):497-509.
- [2] 江近仁,洪峰. 功率谱与反应谱的转换和人造地震波[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(3): 1-11.
- [3] 范留明,黄润秋. 光滑强度包络线模型及其工程应用[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 369-373.
- [4] Clough R W, Penzien J. Dynamic of Structures[M]. New York: McGraw - Hill Inc., 1975.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-station time series analysis[J]. Proc. R. Soc, 1998, A454: 903-995.
- [6] Scanlan R H, Sachs K. Earthquake Time History and Response Spectra[J]. J. of Eng. Mech. Div., ASCE, 1974,100(4).
- [7] 胡聿贤,何训. 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, 1986, 6(2): 37-51.
- [8] 牛志国,李同春,崔绍峰,等. 基于水工标准反应谱的人工地震动合成及其校正[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2006, 28(6): 513-517.
- [9] 董娣,桑向国,刘锐,等. 震源机制对近场地震动反应谱的影响[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 6-10.
- [10] 刘鲁波,陈晓非,王彦宾. 切比雪夫伪谱法模拟地震波场[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 18-25.
- [11] 石春香,罗奇峰,郭忠印. Huang 变换在地震波信号纠偏中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(7): 895-899.
- [12] 董娣,刘锐,桑向国. 随机方法模拟地震动的应用研究[J]. 西北地震学报, 2006, 28(4): 298-302.
- [13] 李英,张淑贞,许康生. 小波降噪方法在地震信号处理中的应用[J]. 西北地震学报, 2006, 28(2): 159-162.