

人造地震动的时域叠加法和反应 谱整体逼近技术^{*}

蔡长青^{1) * *} 沈建文²⁾

1) 中国合肥 230031 安徽省地震局

2) 中国上海 200062 上海市地震局

摘要 介绍了两种新的人造地震动的加速度反应谱拟合方法：其一是时域叠加法，该方法通过在时程上叠加一谐波时程来调整某一反应谱控制点的值。其特点是交叉干扰小，计算量小且能兼顾强度包线的要求；其二是反应谱整体逼近法，其特点是在调整某一由幅值谱 A_k 及其相位谱 φ_k ($k=0, 1, 2, \dots, n$) 决定的时程 $R_a(t)$ 时，用反应谱与目标谱在各个控制点上相对误差 E_j ($j=1, 2, 3, \dots, M$) 的均方根值 $V_r = (\sum_{j=1}^M E_j^2 / M)^{1/2}$ 是否减小来判定一幅值谱 A_k 调整的方向。本文指出，由于 E_j 及 V_r 均是 A_k 及 φ_k 的函数，所以，合成加速度时程中的反应谱拟合问题可变成寻找 V_r 极小点的数学问题。时域叠加法受最高截止频率的限制，不适用于反应谱高频部分的拟合。反应谱整体逼近法受 FFT 算法频率分布特征的限制，使反应谱低频部分的控制点密度不能太大。大量的试算结果表明，以上两种方法相互补充，可取得良好的拟合效果。文中还指出，由于有了较好的反应谱拟合方法，可在反应谱拟合的同时，对加速度时程的峰值加速度及峰值速度进行拟合。

主题词 拟合 反应谱 峰值加速度 峰值速度 逼近

引言

随着工程地震工作的广泛深入开展，地震动加速度时程的使用越来越普遍。在重要结构的设计工作中，建筑抗震设计规范规定用加速度时程进行动力分析。在地震小区划工作中，基岩面地震加速度时程在土层反应计算中已被广泛使用。由于强震记录有限，加上概率模型本身的特点，人们很难找到一条满足实际计算需要的天然地震加速度时程。所以，人工合成地震加速度时程技术得到了迅速发展。目前较为引人注目的有用随机振动模拟加速度时程的拟合技术和考虑地震动产生及传播过程的半经验拟合技术。在我国，前者突出的有胡聿贤和何训(1986)提出的考虑相位的人造地震动反应谱拟合方法；后者突出的有廖振鹏和魏颖(1989)提出的设计地震加速度图的合成。

本文采用随机振动法与胡聿贤和何训(1986)的类似，用一组三角函数的叠加结果来模

* 国家地震局合同项目。

1995-08-15 收到初稿，1995-10-23 决定采用。

* * 现在地址：上海市地震局。

拟地震动加速度时程。本文的特点在于：① 提出用时域叠加拟合反应谱的调整方法；② 提出反应谱整体逼近方法，把合成加速度时程中的反应谱拟合问题变成寻找某一函数极小点的数学问题；③ 采用分段调整的方法，结合上述两种技术的优势，取得了极佳的拟合效果。在本文介绍的方法中，由于加强了幅值谱的调整能力，频域中不再借助于相位调整，以保持加速度时程强度包线的特征不变。

1 现有反应谱拟合技术及本文的时域叠加法

已有的用随机振动法拟合加速度时程包含以下几个方面的工作：

(1) 根据待拟合的加速度反应谱——目标谱 $S_T(T_j)$ ($j=1, 2, 3, \dots, M$, T_j 为反应谱第 j 个控制点的周期, 单位为 s)、峰值加速度 Agmax 等合成一平稳随机过程

$$Ra'(t) = \sum_{k=0}^n C'_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi'_k) \quad (1)$$

式中, $\omega_k = k \cdot \Delta\omega = k \cdot 2\pi/T$ 为第 k 次谐波分量的角频率; φ'_k 为 $0 \sim 2\pi$ 间均匀分布的随机相角; T 为加速度时程的持续时间; C'_k 可任意给定, 亦可由反应谱与功率谱在概率意义上的转换关系确定, 即

$$C'_k = 2 \sqrt{\frac{-\zeta}{k\pi \{ \ln[-\ln(1-p)] - \ln(2k) \}}} \cdot S_T(2\pi/\omega_k) \quad (2)$$

式中, $S_T(2\pi/\omega_k)$ 是目标谱在周期 $2\pi/\omega_k$ 处的值。 P 是反应谱在周期 $2\pi/\omega_k$ 处的值超过目标值 $S_T(2\pi/\omega_k)$ 的概率(常取 15%), ζ 是计算反应谱时用的阻尼比(常取 5%)。

(2) 对时程 $Ra'(t)$ 在时域进行包线调整, 使其变成在 $\pm Agmax \cdot f(t)$ 间波动的曲线 $Ra(t)$ 。再对上述调整后的时程进行 FFT 变换, 得到其幅值谱 C_k 及相位谱 φ_k , 即

$$Ra(t) = f(t) \cdot Ra'(t) = \sum_{k=0}^n C_k \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (3)$$

其中, $f(t)$ 常取以下形式：

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leqslant t < t_1 \\ 1 & t_1 \leqslant t < t_2 \\ \exp(-c(t-t_2)) & t_2 \leqslant t < T \end{cases} \quad (4)$$

t_1 , t_2 , T 及 c 是强度包线 $f(t)$ 的 4 个参数。

图 1 给出了强度包线 $f(t)$ 的形状。横轴为时间, 以 s 为单位。纵轴为加速度, 以 Agmax 为单位。 $Ra(t)$ 即是胡聿贤和何训(1986)建议的初始加速度时程, 其中, 相位谱 φ_k 反应了强度包线 $f(t)$ 的特征($k=1, 2, 3, \dots, n$)。

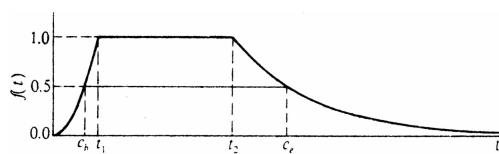


图 1 基岩地震动强度包线

(3) 根据时程 $Ra(t)$ 的反应谱在某一控制点 T_j 处的值 $S_A(T_j)$ 与目标值 $S_T(T_j)$ 的离差, 调整初始加速度时程的幅值谱 C_k 及相位谱 φ_k , 使调整后的时程在该控制点 T_j 处的反应谱的值与目标值靠近。对各控制点反复进行上述调整直至所有控制点上的反应谱的值与目标值的相对误差均小于限差。

(4) 检查时程的外包线. 若不满足要求, 则进行强度包线调整. 若调整后的时程在某控制点的反应谱与目标值的相对误差大于限差, 则重复第3步的工作; 否则, 反应谱拟合完毕.

上述方法存在以下不足: ① 在调整时程使其反应谱在某一控制点 T_j 的值 $S_A(T_j)$ 满足目标值 $S_T(T_j)$ 时, 首先必须在频域中寻找周期与 T_j 相同或相近的谐波分量. 由于 $Ra(t)$ 离散后经 FFT 得到的谐波分量的周期为 $T/1, T/2, T/3, \dots, T/k, \dots, T/n$. 在低频段, 若控制点稍密, 就会导致一个谐波分量对应多个反应谱控制点而使调整彼此相联; ② 若对应谐波分量幅值较小, 相位调整收效不大; ③ 由于对应谐波分量的周期一般不会准确对准 T_j , 所以, 不能将时程的调整量降至最小, 从而不利于减小调整时的交叉干扰; ④ 由于所有周期大于 T_j (角频率 ω_k 小于 $2\pi/T_j$) 的谐波分量对 T_j 处的反应谱的贡献均不可忽略(参见图2), 当周期在 T_j 附近的谐波分量的幅值均较小时(频域中的幅值谱调整常会出现这样的时程), 反应谱在控制点 T_j 处的值 $S_A(T_j)$ 仍可能较大. 若 $S_A(T_j)$ 大于 $S_T(T_j)$, 则调整角频率 $\omega_k < 2\pi/T_j$ 的谐波分量往往效果较好. 而以前的拟合, 缺乏相应的调整手段.

针对上述前3个问题, 笔者建议采用时域叠加的方法. 即在调整 $S_A(T_j)$ 时, 在原时程上叠加一谐波时程 $y(t)$, 使时程 $Ra(t)+y(t)$ 的反应谱在 T_j 点的值 $S_{A_n}(T_j)$ 靠近目标谱. $y(t)$ 由下式确定:

$$y(t) = A_j \cdot \cos(2\pi \cdot (t/T_j) - \varphi_j) \quad (5)$$

式中, $t \in (0, t_j)$; t_j 是当 $Ra(t)$ 输入自振周期为 T_j 的单质点系后产生最大加速度反应的时刻; φ_j 是为保证当 $y(t)$ 输入自振周期为 T_j 的单质点系后在 t_j 时刻产生最大加速度反应且使 $S_{A_n}(T_j)$ 向 $S_T(T_j)$ 靠拢而引入的初始相角. A_j 是由 $S_A(T_j) - S_T(T_j)$ 决定的谐波振幅.

上述方法克服了常规方法的不足, 是一种较为合理的调整方法. 由于该方法一直在时域中工作, 所以, 可随时监视并处理强度包线的变化, 又避免了频繁的 FFT 调用, 节约了大量的机时. 此外, $y(t)$ 仅在 0 到 t_j 间有定义, 在 $t > t_j$ 时, 其值为 0, 减小了 $y(t)$ 对其它反应谱控制点的影响. 时域叠加法的缺点是当 T_j 和采样步长 Δt 相当时, 由于最高截止频率的影响, 用时域叠加法会带来不利的后果. 实践表明, 本方法适用于 T_j 大于 10 倍 Δt 的场合. 这时, 每一谐波周期内至少有 10 个采样点.

2 反应谱整体逼近技术

我们知道, 反应谱拟合的目的是使时程的反应谱曲线“充分靠近”目标谱曲线. 反映两条曲线“充分靠近”有多种指标, 常规方法选定反应谱与目标谱的最大相对误差作指标. 在反应谱整体逼近法中, 我们采用均方根相对误差作指标(为与常规方法使用的标准相同, 我们仍以最大相对误差作迭代结束的标准). 均方根相对误差定义为

$$V_r = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{S_A(T_j) - S_T(T_j)}{S_T(T_j)} \right]^2} \quad (6)$$

式中, M 为反应谱控制点数.

显然, 若 $V_r = 0$, 则在各控制点上反应谱与目标谱均相等(两曲线在各控制点上重合). 在拟合过程中, $S_T(T_j)$ 是常数, $S_A(T_j)$ 是时程幅值谱 C_k 及相位谱 φ_k 的函数. 所以, V_r 亦是 C_k 及 φ_k 的函数. 在 φ_k 不变的条件下, 将 C_k 看作变量, 求出 V_r 的最小值. 与 V_r 的最小点相

应的时程即是最佳拟合结果。下面讨论求 V_r 的最小点的基本方法。

首先，我们考察加速度反应谱的定义。所谓某时程 $Ra(t)$ 的加速度反应谱，指的是当该时程分别输入阻尼比为 ζ 而自振周期不同的一系列单质点系后，单质点系产生的最大加速度反应的大小与单质点系的自振周期 T_j （或自振频率）的关系。

设 $Ra(t)$ 输入到自振周期为 T_j 的单质点系后，单质点系在 t_j 时刻产生最大加速度反应，其大小计为 $S_A(T_j)$ ，则反应谱在 T_j 控制点的值可写成

$$S_A(T_j) = \left| \sum_{k=0}^n C_k \cdot H(t_j, T_j, \omega_k, \varphi_k) \right| \quad (7)$$

式中， $H(t_j, T_j, \omega_k, \varphi_k)$ 是频率为 ω_k 的单位谐波 $\cos(\omega_k \cdot t + \varphi_k)$ 输入单质点系后，其在 t_j 时刻的加速度反应。

在零初始条件下，单位谐波在 t_j 时刻的加速度反应

$$\begin{aligned} H(t_j, T_j, \omega_k, \varphi_k) = & \{(2\zeta^2 - 1) \cdot \omega_j^2 \cdot [A_k \cdot \sin(\omega_d \cdot t_j) + B_k \cdot \cos(\omega_d \cdot t_j)] - \\ & 2\zeta \cdot \omega_j \cdot \omega_d \cdot [A_k \cdot \cos(\omega_d \cdot t_j) - B_k \cdot \sin(\omega_d \cdot t_j)]\} \exp(-\xi \cdot \omega_j \cdot t_j) - \\ & \omega_k^2 \cdot [G_1 \cdot \sin(\omega_k \cdot t_j + \varphi_k) + G_2 \cdot \cos(\omega_k \cdot t_j + \varphi_k)] + \\ & \cos(\omega_k \cdot t_j + \varphi_k) \end{aligned} \quad (8)$$

式中， $\omega_j = 2\pi/T_j$ ； $G_1 = 2 \cdot \zeta \cdot \beta \cdot C$ ； $G_2 = (1 - \beta \cdot \beta) \cdot C$ ； $\beta = \omega_k/\omega_j$ ； $\omega_d = \omega_j \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}$ ； $C = -\frac{1}{\omega_j^2} \cdot \frac{1}{(1 - \beta^2)^2} \cdot (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2$ ； $A_k = [\zeta \cdot \omega_j \cdot B_k - \omega_k \cdot (G_1 \cdot \cos \varphi_k - G_2 \cdot \sin \varphi_k)]/\omega_d$ ； $B_k = -G_1 \cdot \sin \varphi_k - G_2 \cdot \cos \varphi_k$ 。
为讨论方便，令

$$V = V_r^2 \cdot M = \sum_{j=1}^M \left[\frac{S_A(T_j) - S_T(T_j)}{S_T(T_j)} \right]^2 \quad (9)$$

显然， V 及 V_r 有相同的极小点。 V 称为平方和相对误差。将式(7)代入式(9)后对 C_k 进行全微分并顾及

$$S_A(T_j) = S_s(T_j) \cdot \sum_{k=0}^n C_k \cdot H(t_j, T_j, \omega_k, \varphi_k) \quad (10)$$

当各谐波分量的幅值 C_k 均有一微小改变 $\Delta C_k (k=0, 1, 2, \dots, n)$ 时，在 t_j 不变的条件下，平方和相对误差 V 的增量

$$\Delta V = \sum_{k=0}^n 2 \cdot \Delta C_k \cdot \sum_{j=1}^M B(T_j) \cdot H(t_j, T_j, \omega_k, \varphi_k) \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} B(T_j) = \frac{S_A(T_j) - S_T(T_j)}{S_T(T_j)^2} \cdot S_s(T_j) \\ S_s(T_j) = \begin{cases} -1 & \text{当 } t_j \text{ 处的加速度反应为负} \\ 0 & \text{当 } t_j \text{ 处的加速度反应为 0} \\ +1 & \text{当 } t_j \text{ 处的加速度反应为正} \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

显然，只要对所有谐波分量， ΔC_k 满足

$$\operatorname{sign}(\Delta C_k) \cdot \sum_{j=1}^M B(T_j) \cdot H(t_j, T_j, \omega_k, \varphi_k) < 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

则用 $C_k + \Delta C_k$ 代替式(3)中的 C_k 而合成的加速度时程 $Ra''(t)$ 的反应谱按式(9)算得的平方

和相对误差 V 将比原时程 $Ra(t)$ 的小. 即 $Ra''(t)$ 的反应谱比 $Ra(t)$ 更靠近目标谱.

式(13)中, sign 为符号函数, 其定义为

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & \text{当 } x < 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } x = 0 \text{ 时} \\ +1 & \text{当 } x > 0 \text{ 时} \end{cases}$$

由式(11)和式(8)可看出, 改变 φ_k 同样可使 $\Delta V < 0$. 但考虑到其含有时程强度包线的信息, 且仅调整 C_k 收敛效果已很好, 故本文在整体逼近法中不借助相位调整.

由前面讨论的结果, 我们可确定使 V 减小的幅值谱增量的正负. 为合理地分配幅值谱增量的大小, 我们进行了大量的试算, 总结出下列确定 ΔC_k 的经验公式:

$$\Delta C_k = - \left\{ \text{sign} \left[\sum_{j=1}^M B(T_j) \cdot H(t_j, T_j, \omega_k, \varphi_k) \right] \right\} \cdot P_k \cdot L \quad (14)$$

式中, P_k 是反映各幅值谱增量的相对比例关系的权系数. L 是为保证 t_j 不因加入 ΔC_k 而改变(要求 ΔC_k 尽可能地小), 但又能提供较快的收敛速度(要求 ΔC_k 尽可能地大)而引入的不随谐波分量的不同而改变的比例因子. 负号保证由 ΔC_k 引起的 ΔV 为负(V 为负增量). 至此, 问题归结为如何确定 P_k 及 L .

确定 P_k 的宗旨是: 在保持与目标谱相对误差已经较小的控制点的反应谱基本不变的前提下, 将与目标谱相对误差较大的控制点的反应谱调向目标谱. 图 2 给出了角频率 ω_k 不同的一系列谐波的标准反应谱在同一控制点 T_j 处的值 $Xa(T_j)$. 由于加速度时程由一系列谐波叠加而成, 所以, 图 2 可看成是不同频率的谐波分量幅值改变一个单位时, 在控制点 T_j 处的反应谱的最大变量. 图 2 具有 3 个特点: ① 在以角频率 $\omega_j = 2\pi/T_j$ 为中心的一个频率区间内 $Xa(T_j)$ 较大, 在 ω_j 处最大, 即调整该频率区间内的谐波分量的幅值对 $S_A(T_j)$ 的影响较大; ② 角频率在 $0 \sim \omega_j$ 间的所有谐波的 $Xa(T_j)$ 均大于 1. 即调整该频率区间内的谐波分量的幅值对 $S_A(T_j)$ 均有不可忽视的影响; ③ 角频率比 ω_j 高的谐波的 $Xa(T_j)$ 随角频率的增加而减小. 角频率比 ω_j 高得多的所有谐波的 $Xa(T_j) \approx 0$, 即调整频率比 ω_j 高得多的谐波分量的幅值对 $S_A(T_j)$ 的影响可忽略不计.

根据上述特点, 我们给出确定 P_k 的 3 条原则: ① 设 $S_A(T_j)$ 的相对误差较大, 则周期在 T_j 附近的谐波分量的 P_k 较大; ② 在相对误差相同时, 低频谐波分量的 P_k 较大(保证反应谱的低频段优先收敛); ③ 频率在相对误差明显小于限差的反应谱控制点频率附近的谐波分量的 $P_k = 0$.

本文建议用如下公式确定 P_k :

$$P_k = S_k \cdot (A - B \cdot \omega_k) \cdot F \quad (15)$$

式中, S_k 是根据谐波频率 ω_k 在反应谱相对误差绝对值曲线上内插得到的与 ω_k 相应的相对误差. A, B 均为大于零的系数. 当在 ω_k 前后的控制点上反应谱的相对误差均小于限差的

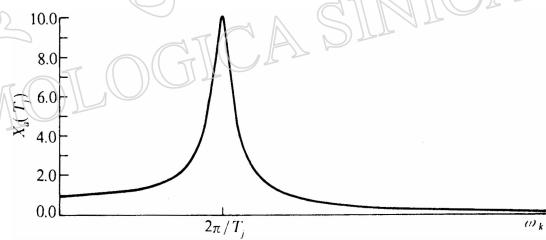


图 2 不同频率的谐波标准反应
谱在周期 T_j 处的值

50% 时, $F=0$; 否则, $F=1$.

L 在程序中根据 V 的收敛情况确定. 一般做法是: L 由一较大的值开始(如由使 ΔC_k 的最大值为各谐波分量幅值均值的 0.5 倍的值开始), 当 V 不收敛或收敛较慢时, 减小 L , 重新进行幅值调整.

以上讨论的是在频域中调整各谐波分量幅值, 以寻找平方和相对误差的极小点的方法. 以后, 称其为频域整体逼近法. 事实上, 若时程 $Ra(t)$ 的反应谱为 $S_A(T_j)$, K 为一与时间 t 无关的常数, 则 $K \cdot Ra(t)$ 的反应谱为 $K \cdot S_A(T_j)$. 相应地, 其平方和相对误差

$$V = \sum_{j=1}^M \left[\frac{K \cdot S_A(T_j) - S_T(T_j)}{S_T(T_j)} \right]^2 \quad (16)$$

对 K 求 V 的极小点得

$$K = \frac{\sum_{j=1}^M S_A(T_j)/S_T(T_j)}{\sum_{j=1}^M S_A^2(T_j)/S_T^2(T_j)} \quad (17)$$

该方法对校正初始时程的系统偏差作用明显. 以后, 称该方法为时域整体逼近法.

频域整体逼近法充分考虑了任一谐波分量对各反应谱控制点的影响, 通过引入均方根相对误差(或平方和相对误差), 将拟合反应谱工作抽象为求函数极小点的数学问题. 实践表明, 对于合理的目标谱, 只要各反应谱控制点附近有若干个谐波分量, 该方法一般都能得到较好的效果. 与其它常规方法一样, 该方法的不足之处是仍受 FFT 的限制, 使反应谱低频段的控制点密度不能太大, 但该不足可由上节介绍的时域叠加法来弥补. 时域整体逼近法的不足之处是仅对时程的系统偏差(如反应谱普遍大于或小于目标谱)起作用, 且对强度包线影响较大, 在用时域整体逼近法调整后, 一般需进行包线调整, 故该调整方法一般只对初始时程使用.

综上所述, 本文提出的时域叠加法和整体逼近法可以相互补充, 从而取得良好的收敛效果.

顺便指出, 时程的峰值速度主要取决于加速度时程的低频部分. 时程的峰值加速度主要取决于加速度时程的高频部分. 由于有了有效反应谱拟合方法, 我们可以在拟合反应谱的同时, 对时程峰值速度及峰值加速度进行拟合. 关于峰值速度及峰值加速度的拟合问题, 超出本文的范围, 在此不作进一步叙述.

3 编程方法及算例

利用上述原理, 我们编制了人造地震动程序 RZDZD. 图 3 是主程序框图. 图 4 是频域中整体逼近法框图. 为较真实地反应 RZDZD 的拟合效率, 我们用表 1 给出的目标谱、峰值加速度等拟合参数, 用 1 024 个时程采样点、0.02 s 的采样步长, 在要求峰值加速度的相对误差、加速度反应谱的最大相对误差均小于 5% 的同时, 要求与不考虑峰值速度的相对误差小于 5% 的条件下, 用 RZDZD 程序分别合成了 50 条加速度时程, 其迭代次数的统计结果是: 在仅要求峰值加速度的相对误差及加速度反应谱的最大相对误差小于 5% 时, 则平均用整体逼近法调整 5.3 次, 时域叠加法调整 7.3 次; 若同时要求峰值速度的相对误差亦小于 5%, 则平均需用整体逼近法调整 6.4 次, 时域叠加法调整 9.1 次.

为更进一步考查 RZDZD 的拟合效率,我们将峰值加速度及加速度反应谱的最大相对误差的限差改为 1%,在不考虑峰值速度的条件下进行拟合,图 5 给出了拟合的部分中间

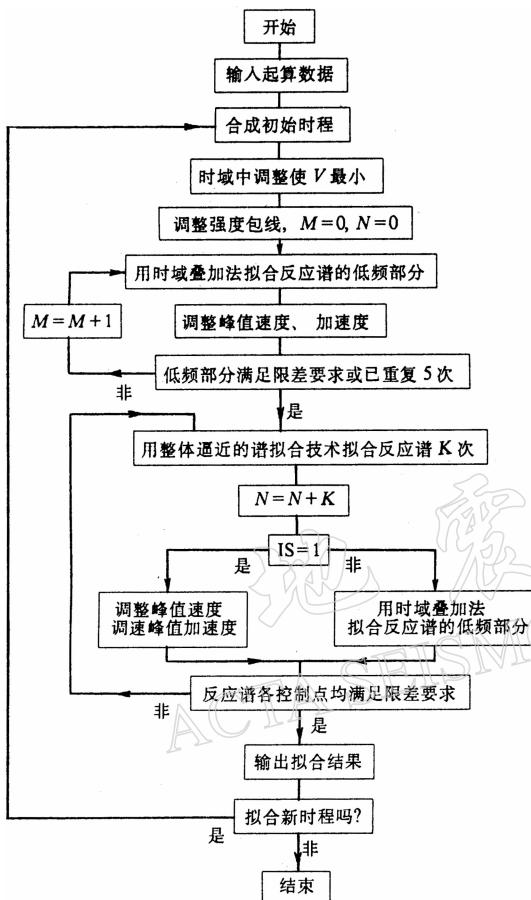


图 3 主程序框图

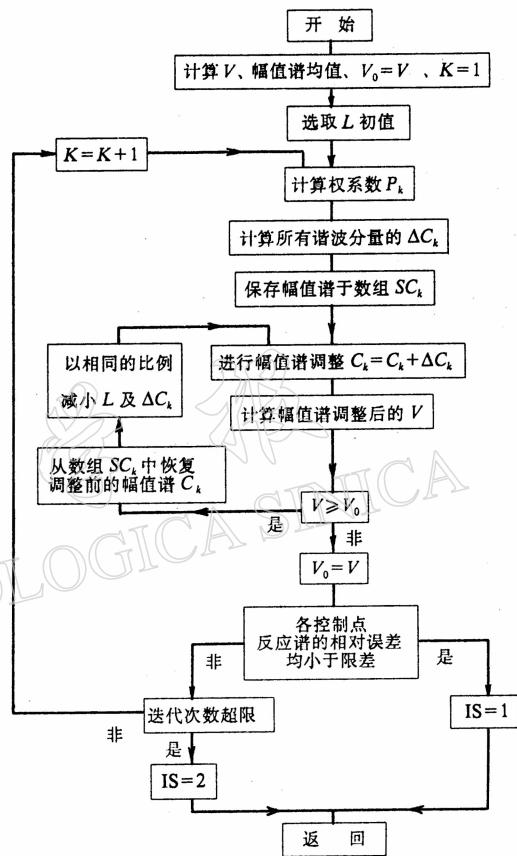


图 4 频域整体逼近法框图

表 1 目标反应谱

| 序号 | 周期值 | 目标值 | 序号 | 周期值 | 目标值 | 序号 | 周期值 | 目标值 | 序号 | 周期值 | 目标值 |
|----|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|
| 1 | 0.040 | 1.176 | 2 | 0.045 | 1.310 | 25 | 0.550 | 1.497 | 26 | 0.600 | 1.372 |
| 3 | 0.050 | 1.443 | 4 | 0.055 | 1.577 | 27 | 0.650 | 1.266 | 28 | 0.700 | 1.176 |
| 5 | 0.060 | 1.711 | 6 | 0.065 | 1.841 | 29 | 0.750 | 1.098 | 30 | 0.800 | 1.029 |
| 7 | 0.070 | 1.972 | 8 | 0.075 | 2.102 | 31 | 0.850 | 0.968 | 32 | 0.900 | 0.915 |
| 9 | 0.080 | 2.232 | 10 | 0.090 | 2.488 | 33 | 0.950 | 0.867 | 34 | 1.000 | 0.823 |
| 11 | 0.100 | 2.744 | 12 | 0.120 | 2.744 | 35 | 1.200 | 0.686 | 36 | 1.500 | 0.549 |
| 13 | 0.150 | 2.744 | 14 | 0.180 | 2.744 | 37 | 1.800 | 0.457 | 38 | 2.000 | 0.412 |
| 15 | 0.200 | 2.744 | 16 | 0.220 | 2.744 | 39 | 2.500 | 0.329 | 40 | 3.000 | 0.274 |
| 17 | 0.250 | 2.744 | 18 | 0.280 | 2.744 | 41 | 3.500 | 0.274 | 42 | 4.000 | 0.274 |
| 19 | 0.300 | 2.744 | 20 | 0.320 | 2.573 | 43 | 5.000 | 0.274 | 44 | 10.000 | 0.274 |
| 21 | 0.350 | 2.352 | 22 | 0.400 | 2.058 | 峰值加速度 | | 1.078 | 峰值速度 | | 0.500 |
| 23 | 0.450 | 1.829 | 24 | 0.500 | 1.646 | | | | | | |

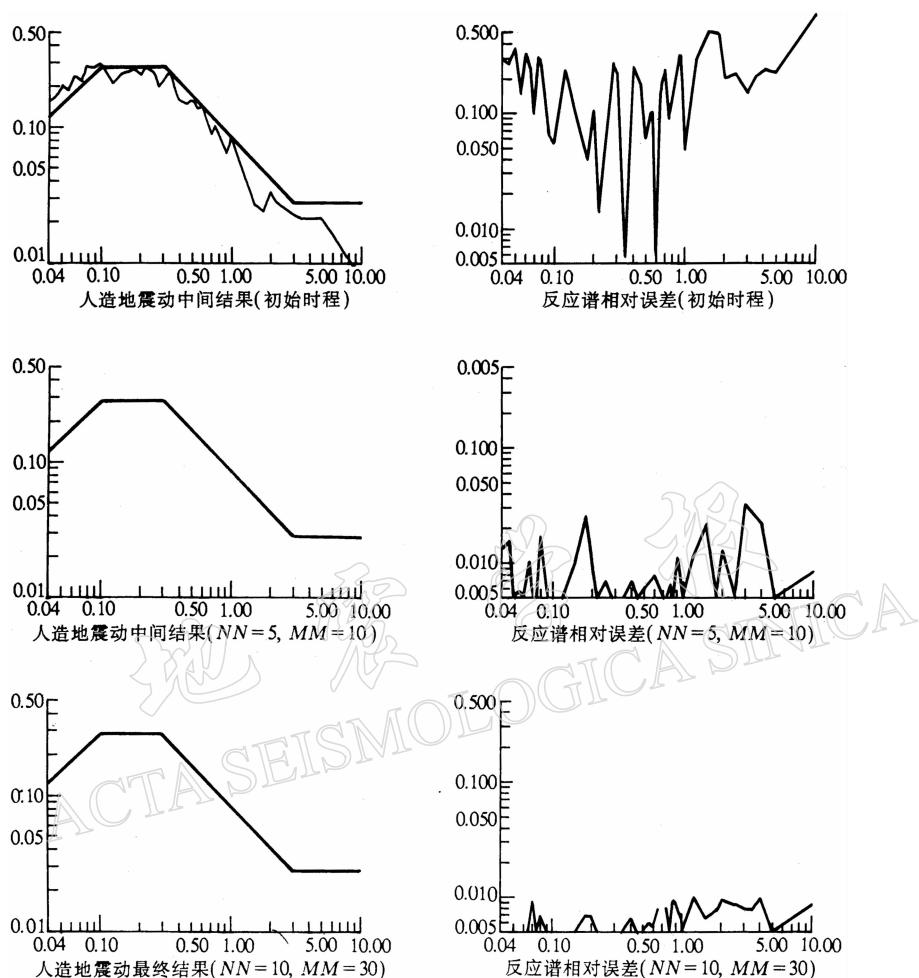


图5 反应谱拟合中间结果

结果。由图可见，初始时程的最大相对误差大于 50%，用时域叠加法调整 10 次，整体逼近法调整 5 次之后，最大相对误差下降为 3.5%，大部分点的相对误差小于 2%；再用时域叠加法调整 20 次，整体逼近法调整 5 次之后，全频段内反应谱最大相对误差达到小于 1% 的要求。

本文所述的反应谱拟合方法，得到国家地震局工程力学研究所廖振鹏和袁一凡研究员的鼓励和帮助。特别根据廖振鹏研究员的指导，对反应谱采用分段拟合的方法，取得了很好的效果，在此表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- 胡聿贤, 何训, 1986. 考虑相位的人造地震动反应谱拟合. 地震工程与工程振动, 6(2): 37~51
 廖振鹏, 魏颖, 1989. 设计地震加速度图的合成. 见: 廖振鹏主编, 地震小区划理论与实践. 北京: 地震出版社. 106~