

基于水工设计反应谱的人工地震波合成

牛志国¹ 李同春¹ 王亚莉²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 ;2.滕州市水务局,山东 滕州 277500)

摘要 :在水工建筑物的抗震设计中 ,为了得到满足工程要求的地震波 ,在已有的人工地震波合成研究的基础上 ,介绍了根据水工标准反应谱合成人工地震波的方法和参变量的选取 ,以及强度包络函数模型的确定、初始波的修正与改进方法 .以溪洛渡拱坝为例 ,应用该方法合成人工地震波 ,结果表明该方法具有简单、易于掌握、计算精度高、收敛快等特点 .
关键词 :人工地震波 ;设计反应谱 ;强度包络函数 ;幅值谱 ;功率谱
中图分类号 :P631.4⁺14 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)03-0262-05

我国是个多地震国家 ,地震的强度和频度都很高 ,全球已发生的 3 000 多起破坏性地震($M > 5$) ,其中 35% 的强震($M > 7$)发生在中国 .因此 ,修建高坝大库时 ,抗震分析尤为重要 .
自 1947 年 Housner 首次合成人工地震波^[1]至今 ,已有多种人工地震波的合成方法 ,可归纳为 3 种 :自然回归法、随机脉动法和三角级数法^[2] ,它们都能产生满足给定功率谱的平稳地面运动 .由于快速傅立叶变换技术的发展 ,使三角级数法在工程上得到了广泛应用 ,经过诸多学者的不断研究^[3] ,该方法日臻完善 ,但仍有许多问题 ,比如收敛速度、不收敛点等 ,因此对该方法的研究仍是重要课题 .本文在水工结构抗震分析中 ,采用改进的初始波修正方法 ,编制人工地震波程序 ,合成了满足工程精度的人工地震波 .

1 基本理论

合成人工地震动常用的方法是把地面加速度时程看成非平稳随机过程^[4] ,表示如下 :
$$a(t) = f(t)a_s(t) \tag{1}$$
式中 : $f(t)$ ——考虑非平稳性的外包线函数 ; $a_s(t)$ ——具有零均值和(单边)功率谱密度函数的高斯平稳随机过程 .

按照式(1)模型 ,先构造一个平稳的高斯过程 :
$$a_s(t) = \sum_0^N C_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \tag{2}$$
其中 , φ_k 为(0 , 2π)内均匀分布的随机相位角 ,三角级数的各幅值分量 C_k 通过反应谱和功率谱密度函数给定 ,其相互关系为

$$\begin{cases} C_k = [4S(\omega_k)\Delta\omega]^{1/2} \\ S(\omega_k) = \frac{\xi}{\pi\omega_k} [S_d^T(\omega_k)] \frac{1}{\ln\left[\frac{-\pi}{\omega_k T_d} \ln(1-P)\right]} \\ \Delta\omega = 2\pi/T_d \\ \omega_k = \Delta\omega k \quad (k = 1, 2, 3, \dots, N) \end{cases} \tag{3}$$

式中 : $S_d^T(\omega_k)$ ——给定的目标加速度反应谱 ; ξ ——阻尼比 , P ——反应超过反应谱值的概率 , $P \leq 15\%$; $S(\omega_k)$ ——式(2)平稳高斯过程的密度函数 ; T_d ——随机过程 $a(t)$ 的总持续时间 .按上述方法得到的人工地震波的反应谱与给定的目标反应谱有一定差距 ,为了提高精度 ,通常还需要进行多次迭代调整 .上述方法是

地面运动模拟的常规方法,它具有原理简单、计算速度快、对反应谱的拟合较好等特点.

2 人工合成地震动的工程方法及相关参变量选取

2.1 确定加速反应谱及其参数

按照工程要求,根据 SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》,确定加速反应谱及其参数.如图 1 所示的标准反应谱,其场地特征周期 T_g 、反应谱最大值 $\beta_{\max}$ 的取值规范中均有说明,地面峰值加速度 $a_{\max}$ 如果没有给出,可选取 SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》中提供的水平地震加速度代表值.

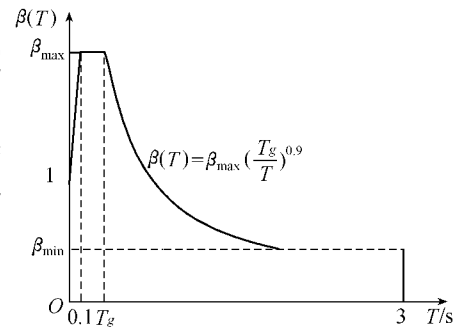


图 1 水工设计反应谱

Fig.1 Hydraulic design response spectrum

根据 $\beta(T) = \frac{S_a^T(T)}{|\alpha_{\max}|}$, 可以确定目标加速度反应谱 $S_a^T(T)$.

$$S_a^T(T) = \beta(T) |\alpha_{\max}| \tag{4}$$

2.2 反应谱拟合(控制点)及三角级数项数的确定

由上述可知,按普通级数求和的方法,完全可以生成拟合反应谱的人工地震波,为了提高计算效率,通常采用快速傅立叶变换(FFT)技术.用三角级数直接求和计算 $a(t)$ 时,频率增量和时间增量的确定是完全独立的,而在利用 FFT 时,离散时间点总数和离散频率点是相等的,存在着——对应的关系^[5].

频率间距 $\Delta\omega$ 的确定:生成的人工地震波成功与否,关键看该波的加速度反应谱和标准加速度反应谱的拟合程度.理论上讲,可采用无限多个周期控制点(或称拟合点)进行拟合,但为了控制拟合精度和迭代次数,国际上一般采用 40~60 个周期控制点,这些拟合点要包含目标谱的主要特征,并且在目标谱的特征点附近适当加密.为了使迭代不出现重复, $\Delta\omega$ 应取足够小,使每一个周期控制点两侧有足够数量的三角级数,提高频率分辨率,例如, $T_{40} = 3.0\text{ s}$, $T_{39} = 2.7\text{ s}$, ..., $T_2 = 0.08\text{ s}$, $T_1 = 0.05\text{ s}$, 则相应的圆频率分别为: $\omega_{40} = 0.33\mathfrak{X}(2\pi)$, $\omega_{39} = 0.37\mathfrak{X}(2\pi)$, ..., $\omega_2 = 12.5\mathfrak{X}(2\pi)$, $\omega_1 = 20\mathfrak{X}(2\pi)$, 要使 2 周期控制点之间不少于 2 项三角级数,则 $\Delta\omega \leq 0.012\mathfrak{X}(2\pi)$.

在采用 FFT 时,三角级数的项数 N 为

$$N = \frac{T_d}{\Delta t} = \frac{2\pi}{\Delta\omega\Delta t}$$

式中 Δt 为时间步长,它由动力分析的稳定性所决定,从理论上讲 Δt 越小,算法稳定性越好,但过小的时间步长会使动力分析的时间大大增加,一般认为 Δt 小于或等于结构基本周期的十分之一即可^[6].同时,FFT 算法要求三角级数项的个数 N 往往是 2 的整数次幂,即 $N = 2^L$.

2.3 强度包络函数模型的确定

2.3.1 函数形状

地震动时程强度包络函数,体现了模拟地震地面运动的时间变化特征,其特性是基于地震记录由上升经持续平稳到下降这 3 个阶段的特性进行研究的,大致形状可分为以下两类.

a.单峰状的连续函数.单峰状的连续函数见图 2(a),如胡聿贤和周锡元模型^[7]:

$$f(t) = W_0[\exp(-at) - \exp(-bt)] \tag{5}$$

由 a 和 b 值的不同组合构成不同峰点和形状的包络线,lyengar^[8]提出的模型:

$$f(t) = (a + bt)\exp(-ct) \tag{6}$$

由 a 控制初始强度值, c 控制峰值点两侧强度变换快慢, a, b, c 的组合控制峰值点的位置,在模拟大震远场长持时时,由于平稳段持续时间较长,单峰包络函数不能体现,故可采用多个包络线组合的形式,但这样会增加模型参数及其复杂性.

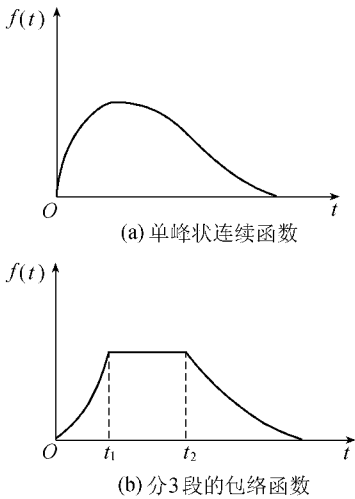


图 2 地震动时程强度包络函数模型

Fig.2 Time history of intensity envelope function model of earthquake

b.直接分 3 段的包络函数 ,函数形状见图 2(b).

$$f(t)=\begin{cases}(t/t_1)^2 & t < t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \exp(-\alpha(t-t_2)) & t_2 < t \leq t_3\end{cases}\tag{7}$$

其中 , α 控制衰减段的衰减快慢 ; t_1 和 t_2 分别控制平稳段的首末时刻 ; t_3 是地震动的持时 ,通常 $T_d = t_3$,为了提高频率分辨率 ,往往使 $T_d > t_3$, $f(t)$ 在 $t_3 \sim T_d$ 设置加零段 ,即 $f(t) = 0, t_3 \leq t \leq T_d$.

式(7)可简便地模拟时程强度包络线随时间的变化规律 ,对于不同长短的平稳持时或不同的快慢衰减只需 3 个基本参数便能确定了 ,式(7)已被工程界广泛应用.

2.3.2 包络函数参数的确定

在选取包络线函数参数时 ,如果没有震源资料(震级、震中距等) ,可根据有关文献提供的参数选取^[9] ,如表 1 所示.

表 1 不同持续时间的函数参数

Table 1 Function parameters for different time durations

持续 时间/s	相关系数			
	t_1/s	t_2/s	t_3/s	衰减系数 c
5	0.5	4	5	1.50
10	1.0	7	10	1.15
20	2.0	16	20	0.80
30	3.0	25	30	0.64

如果有相关震源资料 ,参数 t_1, t_2, c 的计算可采用霍俊荣^[10]

基于强震动观测资料统计建立的回归公式 :

$$\begin{cases} \lg t_1 = -1.074 + 1.005 \lg(D + 10) \\ \lg t_s = -2.268 + 0.3262M + 0.5815 \lg(D + 10) \\ \lg c = 1.941 - 0.2871M - 0.567 \lg(D + 10) \end{cases}\tag{8}$$

式中 : M ——等效地震震级 ; D ——等效震中距 ; t_s ——地震平稳段持续时间 , $t_2 = t_1 + t_s$.

3 初始波的修正

由于反应谱与功率谱的近似转换关系 ,初始波的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.

1986 年 ,胡聿贤等在对幅值谱修正时 ,考虑了傅氏谱各分量对最大反应贡献的正负 ,并对幅值谱修正不能满足要求的顽固点 ,采用了相位谱修正方法 ,取得了较好的拟合结果^[11] .但相位谱的调整比较复杂 ,不易掌握 .1995 年翟希梅等^[12]利用功率谱修正降低高频区误差 ,先进行功率谱修正 ,然后再进行幅值谱修正 ,人工波反应谱与标准反应谱拟合结果良好 ,该方法计算精度高、迭代简单、易于掌握.

设 ω_k 为某一指定拟合点的频率 ,其对应的人工波计算反应谱值为 $S_a(\omega_k)$,对应目标反应谱值 $S_a^T(\omega_k)$,则相对误差为

$$E(\omega_k)=\left|\frac{S_a(\omega_k)-S_a^T(\omega_k)}{S_a^T(\omega_k)}\right|\tag{9}$$

幅值调整系数 :

$$R(\omega_k)=\frac{S_a^T(\omega_k)}{S_a(\omega_k)}$$

当 $E(\omega_k)$ 大于容许误差 ϵ 时 ,就要对第 k 个拟合点的功率谱和幅值谱进行修正.

功率谱的修正 :

$$S^{i+1}(\omega_k)=S^i(\omega_k)\left[\frac{S_a^T(\omega_k)}{S_a(\omega_k)}\right]^2\tag{10}$$

式中 , i 表示功率谱迭代的次数 ,对第 k 个控制点周围的非拟合点(非控制点)采用线性插值的方法进行修正^[9] .

幅值谱的修正 :第 k 个控制点周围点对应的幅值修正为

$$C'_i=C_i[R(\omega_i)]^q\tag{11}$$

式中 , C'_i 为第 k 个控制点周围点(包括第 k 点)对应的幅值 , q 取值 1 或 -1 ,具体取值方法见文献[3] .

4 人工地震波程序的编制及工程算例

4.1 程序的主要参变量

程序用 FORTRAN 语言编写,采用 SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》的设计反应谱作为目标谱,在程序的编制过程中,考虑了反应谱与目标谱拟合过程的误差控制,容许误差 ϵ 取 5%。在前人工作的基础上,笔者在初始波的修正方面,做了如下的改进 (a)采用翟希梅等提出的幅值谱和功率谱联合修正的迭代方法对初始波进行调整 (b)对每个周期控制点附近的所有非控制点进行修正,以提高迭代效率。传统的修正方法,只对每个周期控制点附近几个非控制点进行修正,从而降低了迭代效率 (c)适当增加低周期控制点,低周期点的增加可有效地减小初始波在中、高周期段内的相对误差,减少迭代次数 (d)长周期分量的处理利用 FFT 技术,得到的 $a(t)$ 中含有许多长周期分量,这些长周期分量的存在,对结构破坏影响很小,却导致加速度时程出现零线漂移,因此在 $a(t)$ 中滤掉 $T > 3\text{ s}$ 的分量,既有效纠正了加速度的零线漂移又减少了非周期控制点的个数。

通过以上 4 方面的改进,使初始人工地震波的修正方法具有计算效率高、收敛精度高的优点,只需迭代十几次,人工地震波的反应谱与标准反应谱即可拟合得相当好。程序中主要参变量 (a)设计烈度,考虑 7、8、9 度 3 类地震。(b)场地类别,场地类别主要考虑规范中的 I、II、III、IV 4 类场地。(c)建筑物类型,包括重力坝、拱坝、水闸和进水塔、其他混凝土建筑物。

4.2 工程实例

溪落渡电站位于四川省和云南省之间的溪落渡峡谷中段,是一座以发电为主,兼有拦沙、防洪、航运等综合利用的大型水电站。大坝为双曲拱坝,坝高 278 m,坝址基本地震烈度为 8 度,设计基岩水平峰值加速度为 0.321 g ,基本周期 0.8 s 左右。

按现行 SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》的要求确定相关参数。根据场地类别和结构自振周期 T ,标准反应谱的右端周期 T_g 取 0.20 s , $\beta_{\max}$ 取 2.5。根据本文的人工地震波合成方法,得到溪落渡电站大坝的初始人工波见图 3。根据本文的修正方法对初始波进行修正,得到修正后的人工地震波见图 4。

由图 5 可以看出,初始人工波的反应谱在高频段与标准反应谱拟合误差很大,迭代 15 次,进行功率谱和幅值谱修正后,相对误差控制在 5% 以内,修正后的结果见图 6。

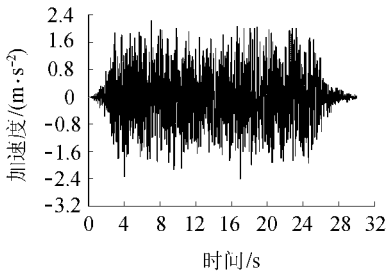


图 3 初始人工地震波

Fig.3 Initial simulated earthquake wave

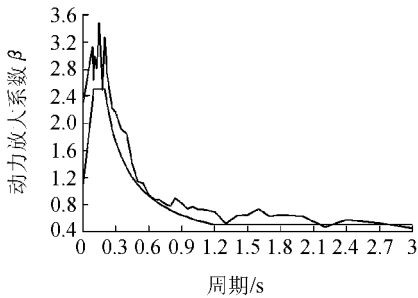


图 5 初始人工波反应谱与设计反应谱

Fig.5 Initial simulated wave response spectrum and design response spectrum

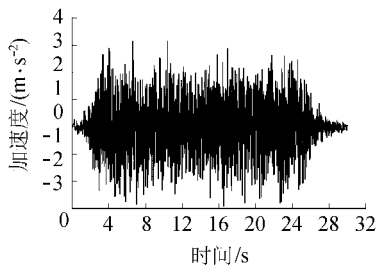


图 4 修正后的人工地震波

Fig.4 Modified simulated earthquake wave

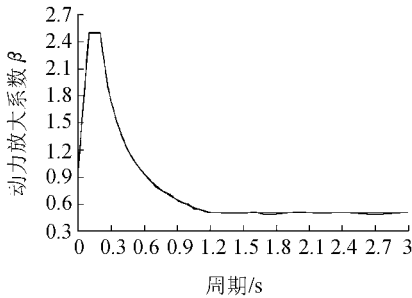


图 6 修正后的人工波反应谱与设计反应谱

Fig.6 Modified simulated wave response spectrum and design response spectrum

5 结 语

以工程结构抗震分析为目标的人造地震波合成技术,其主要任务是根据地震学的有关知识和地震动区划结果,合成尽可能描述建设场地上具有统计意义,或与未来可能发生地震动相符的人造地震动时程.这就要求人工合成的地震动尽可能全面地描述现有强震加速度记录的工程特性,同时也应在满足工程精度前提下,力求简单、适用.本文采用三角级数法,结合改进的初始波修正方法,利用功率谱修正降低高频区误差,进行功率谱调整和幅值谱调整,得到了很好的拟合效果,满足了工程要求.该方法简单明了,易于掌握和编程,便于在抗震工程中推广.

参考文献:

[1] HOUSNER G W. Characteristics of strong-motion earthquakes[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1947, 37(1):19-31.
[2] 黄朝光, 彭大文. 人工合成地震波的研究[J]. 福州大学学报, 1996, 24(4):82-88.
[3] 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.
[4] 杜修力, 陈厚群. 地震动随机模拟及其参数确定方法[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(4):1-12.
[5] 吴育才, 黄宗明, 王金海. 单层厂房震例及其应用[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991: 63-66.
[6] 杨庆山, 姜海鹏. 基于相位差谱的时-频非平稳人工地震动的反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1):22-23.
[7] 胡聿贤, 周锡元. 弹性体系在平稳和平稳化地面运动下的反应:地震工程研究报告集(第一集)[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 33-50.
[8] IYENGAR A. Stationary random process model for earthquake accelerogram[J]. BSSA, 1969, 59(3):19-30.
[9] 陈永祁. 拟合标准反应谱的人工地震波[J]. 建筑结构学报, 1981, 2(4):34-42.
[10] 霍俊荣. 近场强地面运动的衰减规律[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1989.
[11] 郭子雄, 王妙芳. 人工地震动合成的研究现状及展望[J]. 华侨大学学报, 2006, 27(1):8-9.
[12] 翟希梅, 吴知丰. 人工地震波反应谱拟合技术的改进[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(6):130-133.

Synthesis of simulated earthquake waves based on
hydraulic design response spectrum

NIU Zhi-guo¹, LI Tong-chun¹, WANG Ya-li²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Tengzhou Water Affairs Bureau, Tengzhou 277500, China)

Abstract On the basis of the former research on the synthesis of simulated earthquake waves, the method to obtain the earthquake wave based on hydraulic standard response spectrum was introduced, which could satisfy the requirement of the engineering specification in aseismic design of hydraulic structures. Some related problems were discussed in detail, including the methods for selection of correlative variables, the determination of intensity envelope function model, and the modification and improvement of initial waves. The application of the method to Xiluodu Arch Dam project shows that the method is simple and easy to be used, and it is of high precision and fast convergence speed.

Key words simulated earthquake wave; design response spectrum; intensity envelope function; amplitude spectrum; power spectrum