

基于长周期谱值特征的人工地震波初筛与预校正研究

李建波*, 牛 翔, 林 皋

(大连理工大学 建设工程学部 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 动力计算过程巨大的求解工作量,使得工程人员倾向于采用总持时较短的人工地震波,然而如此在某些状况下容易出现人工波生成效率与精度低下的问题.从地震动过程主要控制参数与目标反应谱间的匹配关系着手,尤其关注强震段持时的影响,从数值原理上分析了传统人工波生成失败或者精度低的原因.提出了以长周期谱值能否达到要求的初筛准则,据此提出了以长周期谱值作为控制依据的快速预校正算法,给出了具体算法框图.最后以算例的形式,验证了本算法的有效性,结果显示该算法从源头上有效地提高了人工波拟合的成功率与精度.

关键词: 人工地震波;反应谱;长周期;持时

中图分类号: TV641.44;X945 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201602003

0 引言

当前,人工波拟合技术是获得有效地震荷载记录的重要途径之一,广泛应用于水利工程抗震、核电工程抗震等领域,如场地谱人工波、楼层谱人工波拟合等.其中,尤以核电楼层反应谱形状特征更为复杂,体现在“峰多谷深”等特征,给高精度的人工波拟合技术带来了困难.现实工程领域中,数值分析人员往往倾向于让地震动持时较短,以节省结构动力分析的时间,而不是从持时与震级关系的角度确定人工波总持时,因而就容易产生较短持时与目标反应谱匹配的问题.经常发现,一些对于长周期谱值要求较高的加速度反应谱,短持时条件下的人工波计算反应谱往往难以达到良好的拟合精度,主要体现在难以达到指定的长周期反应谱值.

目前,人工波拟合领域,研究仍多集中于反应谱拟合效率和精度的提高,而在人工波目标谱与时程控制参数之间匹配方面的研究较少.在人工波拟合的随机波行程的初始阶段提供一定的初筛原则,并对筛选结果提供一定的预校正建议,可有效地排除一些理论上就难以达到拟合要求的人工初始波,从而对提高拟合的整体效率有着积极作

用.这一背景下,本文从人工波反应谱值的基本概念出发,关注高频与极低频长周期人工波谱值特征研究,尤其是强震持时与长周期反应谱值的数值关系^[1],提出随机人工波的初筛原则,并对异常初始波的时长参数提出校正建议.最后,以算例的形式验证本文方法的有效性,以推广于各类人工拟合算法中.

1 基本原理

1.1 拟合目标反应谱的人工波长周期控制条件

人工波生成主要是基于三角函数的叠加,由于初始相位角的任意性,直观来看人工波时程结果是随机的.随机性带来了许多不确定的特征,需要从统计的角度来讨论,但一些频谱特征是确定的.

从反应谱的基本定义可知,极高频处即零周期处的反应谱值等于加速度时程的峰值.据此,在人工波拟合过程中,只要调节人工波的峰值即可容易地满足极高频处目标反应谱的拟合要求.而从极长周期或极低频处的反应谱来看,加速度时程的反应谱值是趋向于零的.实际工程应用中,各类抗震规范多指定了低频的截止周期,如水工规范取为3 s,工民建抗震规范取为6 s,核电站抗震

规范取为 10 s. 由前述分析可知, 通常情况下这些长周期处的计算反应谱值比峰值反应谱值会有较大的降低, 即使比零周期处的谱值也小许多, 并不直接受长周期目标反应谱的控制, 于是容易在人工波拟合过程中, 出现长周期处计算反应谱无法达到较高目标反应谱值要求的情况.

容易看出, 如人工波拟合过程中, 能首先在零周期极高频处, 以及长周期截止频率处满足目标反应谱的要求, 通俗地说就是可以“捏住两头”, 那么后续中间频率段的计算反应谱迭代调整将只是个精度问题, 不会出现某些随机参数条件下造波失败的情况. 而对比极高频, 以及长周期截止频率两个控制条件, 其中低频长周期更为难以控制.

而在诸多人工波时程控制参数中, 包线函数^[1]的引入对削减低频长周期计算谱值有着最为显著的影响. 随机人工波一般来源于平稳随机过程, 此时从统计学角度, 其计算反应谱在各频率处将围绕着目标反应谱曲线摆动. 而为表征出地震波的非平稳过程, 如式(1)所示的非平稳包线函数往往被引入(如抛物线形的初始上升段, 指数线形的末尾下降段):

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

式中: $0\sim t_1$ 为峰值的上升段, $t_1\sim t_2$ 为峰值的平稳段, T 为总持时, c 为指数线形下降段的衰减系数. 针对强度包线对加速度反应谱的影响, 周宝峰^[2]提出若总持时 T 固定不变(如 5 s), 衰减系数 c 和 t_1 保持固定不变, 逐渐增大 t_2 , 随着平稳段时间长度的增加, 计算反应谱的峰值不断增大. 反应谱的峰值由单峰点向峰值平台过渡, 如图 1 所示.

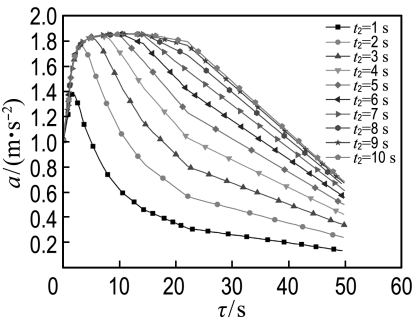


图 1 不同包线函数模型的人工地震动时程的加速度反应谱

Fig. 1 Acceleration response spectrum of artificial ground motion with various envelope functions

显然从本文关注的角度来看, 图 1 也反映出, 随着平稳段时间长度的增大, 低频长周期处的反应谱值有大幅提升. 换言之, 包线函数的引入, 会大幅削弱初始人工波在长周期处的反应谱值, 从而导致低频长周期计算反应谱有时难以达标的问题.

当然无限地增大 t_2 , 则必然导致上升段与末尾衰减段时间的相对减少, 使人工波波形奇异, 往往工程人员亦会对这一表达产生异议. 因而, 在人工波拟合领域, 需要兼顾目标反应谱的拟合精度与地震动时程波形合理性两方面的因素.

1.2 人工波长周期谱值持时影响的数值验证

持时、频谱、峰值是地震动的三要素. 那么, 增加持时相对于改变包线将是一种更为方便且合理的手段. 谢礼立等^[3]认为, 震级的大小是决定地震动加速度长周期分量大小的决定性因素. 在其他因素确定的前提下, 震级越小, 地震动加速度长周期分量越小; 震级越大, 地震动加速度长周期分量越大. 一般在人工波拟合中, 震级的大小主要反映在地震动的总持时要求上, 如震级与持时的统计关系^[4]可取为 $\log \hat{t}=0.33\times M-0.87$ (其中 t 为时间, M 为震级). 地震动的总持时越长, 地震动积累的能量越大, 则震级就越大.

但由于目标反应谱的来源不定, 往往由上式确定的总持时, 或工程人员臆断确定的总持时仍嫌不足. 在人工波拟合中, 需要一定的定量关系, 来保证长周期段能量成分的充分表达, 也可为人工波拟合中, 长周期低频段计算谱值控制条件的确定提供参考^[5].

以 $\sin(2\pi t)$ 的正弦波(周期为 1 s)为例, 分别取 1、2、4、8、12、16 s 的总持时计算反应谱值, 计算中阻尼比取 0.05. 结果如图 2 所示.

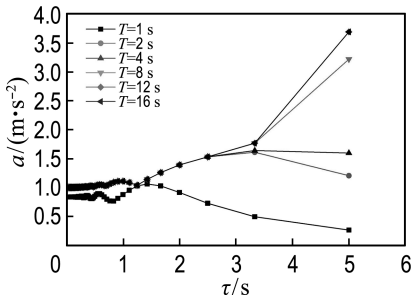


图 2 不同总持时情况下的反应谱
Fig. 2 Response spectrum with various total duration time

计算结果显示, 当 $T\geq 2$ s 后, 随着总持时的增加, 低于 2.5 s 周期点的相对高频段的反应谱

值增至稳定状态,而低频长周期段的反应谱值仍继续变换;当 $T \geq 4$ s 之后,随着持时的增加,5 s 周期点处的反应谱值较峰值下降趋势才消除.该算例表明,为了使低频地震分量的效应能在人工波中充分反映,达到目标反应谱的要求,稳态强震持时应达到一定的长度.

2 人工波初筛策略与预校正算法

如前所示,人工波拟合中长周期处计算反应谱值受人工波拟合参数的影响显著,其能否满足目标反应谱值的要求,可作为一个基本的筛查策略.据此,本文提出了一种快速且有效的人工波初筛策略,可有效提升人工波的成功生成效率,避免不必要的迭代调整浪费于某些特定随机状况中.具体做法是:

(1)通过三角级数叠加的传统算法快速生成多条平稳加速度初始时程,叠加强度包线,并比例调节时程峰值到设计地震动值(保证零周期处的计算谱值满足要求).

(2)采用传统频域反应谱迭代调整法^[6],快速调整 10 次,实现预校正,此过程将十分快速,且此时人工波的反应谱值将趋于总体稳定.

(3)计算各条初始波在规范要求的最长周期的反应谱值,并判定其是否达到目标谱要求的 90%.

若某条不满足,则将该初始波剔除.

若均不满足,则按前述原理,建议增加人工波控制参数持时或强震段持时,并按上述步骤重新计算判定,直到长周期反应谱值满足要求.

经过上述过程,人工波时程的计算反应谱将在高低频段两头达到目标反应谱的要求,从而再经细致的反应谱拟合精度调整,可保证获得最终的人工波.

3 算例分析

3.1 核电站抗震规范下的反应谱拟合算例

以核电站抗震设计中的 Rg1.60 标准谱为目标反应谱,阻尼比取 0.05,人工波总持时控制参数分别取 5、10、20、40、60、80 s,各采用本文策略算法快速生成 5 条初始人工波,比较规范建议的最长截断周期点(5 s)处的反应谱值(实际运用中,为避免孤点跌跃现象,建议采用规范建议的最长周期的两个控制点平均值).本例中分别取长周期控制点处目标反应谱的 85%、90%、95%为标

准,来判定人工波在极长周期处的计算反应谱是否达标.Rg1.60 标准谱在 5 s 周期处的目标反应谱值为 0.166g,则判定标准分别取 0.141g、0.149g、0.158g.统计结果如表 1 所示.

表 1 核电站抗震规范下不同持时状况下最长周期控制点处反应谱值统计结果

Tab.1 Statistical result of response spectral values at the longest period with various duration time in the nuclear power plant seismic norms

T/s	加速度/g			以 85%为	以 90%为	以 95%为
	最小值	最大值	平均值	标准达 标个数	标准达 标个数	标准达 标个数
5	0.023	0.074	0.055	0	0	0
10	0.067	0.149	0.102	1	1	0
20	0.111	0.154	0.130	2	1	0
40	0.116	0.200	0.142	2	2	1
60	0.121	0.180	0.152	3	3	2
80	0.142	0.215	0.173	5	4	3

表 1 中,随着人工波控制参数总持时的增加,拟合出的初始地震动时程无论是长周期段的反应谱值,还是达标个数,都表现出一种上升的态势.表 1 中显示,当总持时取 20 s 时,达到目标反应谱的 90%判定标准的地震波为 1 条.若以目标反应谱的 85%为判定标准,虽然总持时为 10 s 时,已可筛选出达标的初始人工波,但显然 10 s 人工波持时要求过于宽松.综合各因素,建议以长周期处目标反应谱值的 90%作为判定标准.

图 3 为总持时取 20 s 时,本例中达标的某条初始人工波的反应谱比较图.

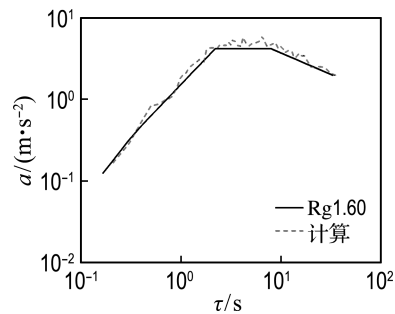


图 3 核电站抗震规范下持时 20 s 的初始人工波反应谱比较

Fig.3 Comparison of the response spectrum for one 20 s initial artificial wave in the nuclear power plant seismic norms

3.2 水工抗震规范下的反应谱拟合算例

以水工抗震规范中的某类场地条件下的重力

坝设计反应谱为目标反应谱,阻尼比取 0.05,人工波总持时控制参数分别取 5、10、20、30 s,采用本文策略算法快速生成 5 条初始人工波. 在本重力坝设计反应谱中,最长阶段周期点取在 2.5 s 处,该点处的目标反应谱值为 0.08g,仍分别取其值的 85%、90%、95%,则判定标准分别为 0.068g、0.072g、0.076g. 本算例的统计结果如表 2 所示.

从表 2 中可以看出,本文提出的策略算法同样适用于水工抗震规范下人工波的拟合. 与核电站抗震设计中人工波拟合不同的是,由于水工抗震设计反应谱最长截止周期取为 2.5 s,远低于核电站抗震设计规范的要求,因而相对较短持时即可满足要求.

表 2 水工抗震规范下不同持时状况下最长周期控制点处反应谱值统计结果

Tab.2 Statistical result of response spectral values at the longest period with various duration time in the hydraulic seismic norms

T/s	加速度/g			以 85% 为	以 90% 为	以 95% 为
	最小值	最大值	平均值	标准达 标个数	标准达 标个数	标准达 标个数
5	0.018	0.039	0.026	0	0	0
10	0.030	0.075	0.050	2	1	0
20	0.066	0.092	0.075	3	2	2
30	0.074	0.111	0.089	5	5	4

3.3 筛选算法对结构动力响应的影响

按本文算法,分别采用筛选与不筛选两种策略,用 Rg1.60 核电标准反应谱生成人工波,拟合精度如图 4 所示. 其中未经筛选人工波在长周期段明显低于目标反应谱值要求. 将该人工波输入 AP1000 核电结构,求解动力响应,观察三代核电结构安全水箱处的时程响应(局部振动频率 0.35 Hz),见图 5、6,不难看出,相对位移时程幅值在未

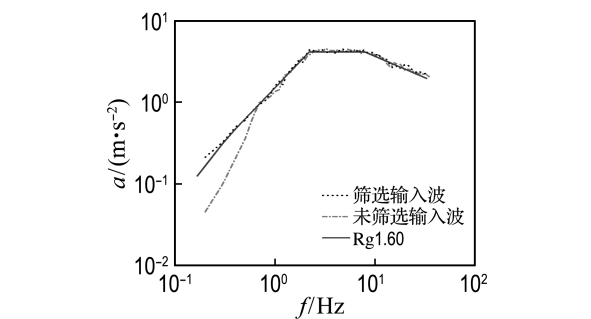


图 4 总持时为 10 s 的不同输入波的反应谱比较

Fig.4 Comparison of the response spectrum of different input waves with total duration time of 10 s

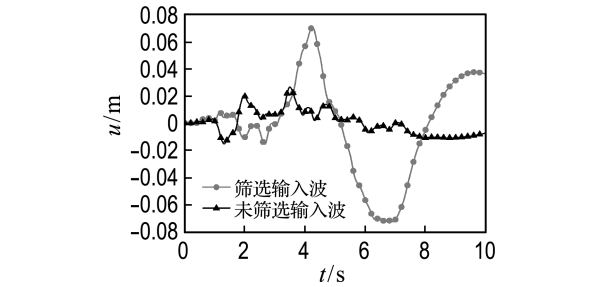


图 5 相对位移时程响应

Fig.5 Time-history response of relative displacement

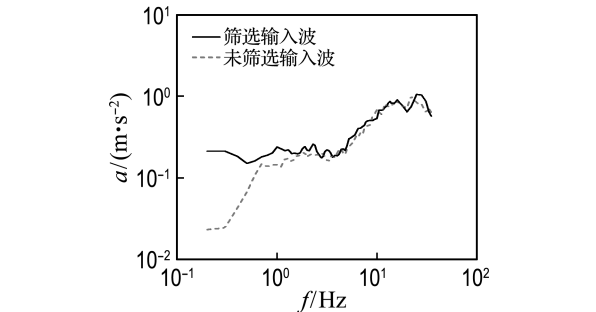


图 6 安全水箱处的绝对加速度反应谱

Fig.6 Absolute acceleration spectrum of PCS

筛选波输入条件下明显低估,而图 6 的绝对加速度反应谱也反映了这一问题,值得在结构设计中重视.

4 结 语

从保证人工波拟合成功率的角度出发,对比分析了初始人工波在零周期及极长控制周期处的计算反应谱值的特点,提出以长周期谱值能否达到要求作为初筛的准则,可有效提高人工波的拟合成功率. 从数值分析的角度,探讨了总持时与强震持时对长周期谱值的影响,建议筛选标准取为长周期处目标谱值的 90%,并在文中以算例的形式验证了其有效性.

强震持时的必要要求,使得低频地震分量的能量可有效体现. 这点对具有长周期自振特征的结构抗震分析更为重要.

在实际人造地震动拟合过程中,尤其是工程人员倾向于采用较短的人工波总持时的状况下,本文方法具有较好的应用前景,可有效提升人工波的拟合成功率,亦可有效减少后期结构抗震分析步骤.

参考文献:

[1] 霍俊荣,胡聿贤,冯启民. 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, 1991, **11**(1): 1-12.
- HUO Jun-rong, HU Yu-xian, FENG Qi-min. Study on envelope function of acceleration time history [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1991, **11**(1): 1-12. (in Chinese)
- [2] 周宝峰. 强度包线对人造地震动影响的研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2008.
- ZHOU Bao-feng. Study on the influence of intensity envelope on the synthetic ground motion [D]. Harbin:Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)
- [3] 谢礼立,周雍年,胡成祥,等. 地震动反应谱的长周期特性[J]. 地震工程与工程振动, 1990, **10**(1):1-20.
- XIE Li-li, ZHOU Yong-nian, HU Cheng-xiang, *et al*. Characteristics of response spectra of long-period earthquake ground motion [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1990, **10**(1):1-20. (in Chinese)
- [4] 李顺群,张吉明,朱朝艳,等. 考虑持时作用的地震能量表达式[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, **23**(3):306-308.
- LI Shun-qun, ZHANG Ji-ming, ZHU Chao-yan, *et al*. Expression for earthquake energy with duration action taken into account [J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2004, **23**(3): 306-308. (in Chinese)
- [5] 李建波,陈健云,林 皋. 相互作用分析中地震动输入长周期校正研究[J]. 大连理工大学学报, 2004, **44**(4):550-555.
- LI Jian-bo, CHEN Jian-yun, LIN Gao. Study of long-period correction of seismic accelerogram for dynamic interaction analysis [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2004, **44**(4):550-555. (in Chinese)
- [6] 杨庆山,姜海鹏. 基于相位差谱的时-频非平稳人造地震动的反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, 2002, **22**(1):32-38.
- YANG Qing-shan, JIANG Hai-peng. Generation of response-spectrum-compatible ground motions based on phase-difference spectrum [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, **22**(1):32-38. (in Chinese)

Research on initial screening and pre-correcting artificial seismic waves based on long-period spectral values characteristics

LI Jian-bo*, NIU Xiang, LIN Gao

(Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Due to the huge computational workload of dynamic computation, engineering and technical personnel tend to apply artificial seismic wave with shorter total time duration, which easily leads to a low efficiency and accuracy of the numerical generation of artificial waves in some cases. To overcome this problem, the matching relationship is analyzed between the main control parameters of ground motion history and the target response spectrum, especially for the effects of ground motion duration on the response spectrum. The basic numerical reasons are analyzed for the failure or low accuracy of traditional artificial wave generation. Based on the above discussion, an initial screening criterion for the long-period spectral values is proposed, and a rapid pre-correcting algorithm using long-period spectral values as control standard is further brought out with detailed algorithm block diagram. Finally, the proposed algorithm is validated by numerical examples, which shows that it effectively improves the accuracy and success rates of the artificial wave fitting technique from the source.

Key words: artificial seismic wave; response spectrum; long-period; time duration