

考虑增量时程贡献趋向和误差排序的 多阻尼目标反应谱拟合*

张伟明^{1,2}, 孙晓丹^{1*}, 李东航¹, 王 豪¹, 万珂羽¹

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 2. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 在目前的多阻尼反应谱拟合的时程调整法中, 由于各阻尼、各控制周期点之间的交叉影响, 拟合误差容易出现“此消彼长”的现象, 进而降低拟合精度和收敛速度。基于现有单阻尼反应谱拟合的时域调整方法, 探讨了增量加速度时程引起的最大地震动反应的正负向及阻尼-周期调整顺序对拟合精度和收敛速度的影响, 并提出了考虑增量加速度时程的最大反应贡献趋向和按误差排序的改进思路。将改进后的时域调整法应用于核电厂多阻尼目标反应谱拟合上, 选取不同时-频特征的天然地震动时程作为“种子”进行拟合, 探讨“种子”时程的选取对拟合结果的影响, 并提出针对不同工程结构进行目标反应谱拟合时, 应根据结构物的动力特性选取初始的“种子”时程。

关键词: 增量加速度时程; 多阻尼目标反应谱; 误差排序; 种子时程

中图分类号: P315.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)01-0144-11

0 引言

地震动时程是进行结构动力时程分析以及场地土非线性响应分析的必要条件, 在缺失与工程场地条件完全一致的强震记录的情况下, 会选取相似场地条件的强震记录或者人工波作为输入(刘伟等, 2015; 钟菊芳等, 2019)。影响地面运动反应谱的因素很多(杨向东, 1993), 因而天然地震记录往往难以满足《核电厂抗震设计规范》(GB50267-97)中给定反应谱的要求, 常需要以规范中的标准反应谱为目标反应谱, 通过不断调整天然地震记录以拟合目标反应谱, 最终生成地震动时程。基于天然地震记录的人工地震动时程生成方法主要有时域调整法、频域调整法和时-频调整法。时域调整法是在天然地震动时程上叠加一系列特定的时程函数, 使其反应谱逐渐逼近目标反应谱。Lilhanand 和 Tseng (1988) 最早提出了单位脉冲函数调整法; Hancock 等 (2006) 提出在时域上叠加正、余弦小波函数法; 赵凤新和张郁山 (2007) 提出窄带时程叠加法; 侯春林

(2012) 提出将拟合误差收敛问题看成是最大最小优化问题, 按相应约束条件进行求解; 张郁山和赵凤新 (2014) 提出消除基线漂移的增量时程函数; 陈胜 (2016) 探讨了多阻尼目标反应谱拟合中的时域调整法。频域调整法是在频域内直接调整种子时程的傅里叶幅值谱 (Rizzo, 1975; Gasparini, 1976; 胡聿贤, 何训, 1986; 谢异同等, 2002), 但该方法容易出现“顽固点”, 特别对于多阻尼、多条反应谱的拟合问题困难较大。时-频调整法则是结合时域调整法和频域调整法, 比如对不同频段采取不同的调整方法 (蔡长青, 沈建文, 1997) 以及时频小波分析法等 (谢异同等, 2011)。虽然上述几种方法, 都可实现拟合目标谱生成人工地震动时程, 但难以满足某些特殊工程的需求, 比如核电厂的抗震分析, 要求地震动输入时程在多阻尼条件下均需贴近目标反应谱。在多阻尼条件下, 时域调整法相对其他2种方法更为灵活, 但由于各阻尼、各控制点之间的交叉影响, 拟合误差容易出现“此消彼长”的现象, 使拟合效率不高, 甚至出现不收敛。本文从多阻尼反应谱拟合时的控制点排序出发, 并在调整中考虑增

* 收稿日期: 2019-07-09.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51878578) 资助.

✉ 通讯作者: 孙晓丹 (1980-), 女, 副教授, 主要从事工程地震危险性研究. E-mail: sunxd@swjtu.edu.cn.

量时程函数对原始时程最大反应值的贡献趋向，对现有的时域调整法进行改进。

1 单阻尼时域调整法

Lilhanand 等 (1988) 提出了采用单位脉冲反应函数调整地震动时程的方法，认为在时域上对时程进行微小调整不会影响加速度反应最大值出现的时间。基于这一思路，后来又逐渐出现了以增量谐波函数、增量小波函数等作为调整函数的时域调整方法。但在加速度时程上叠加增量时程可能引起位移时程和速度时程的漂移。因此，张郁山和赵凤新 (2014) 提出零基线漂移的增量位移时程为：

$$\Delta d(t) = \Psi(t - t_0) \sin[2\pi f(t - t_0)] \quad (1)$$

以及增量加速度时程为：

$$\Delta a(t) = \frac{d^2}{dt^2} \Psi(t - t_0) \sin[2\pi f(t - t_0)] + 2 \times \frac{d}{dt} \Psi(t - t_0) 2\pi f \cos[2\pi f(t - t_0)] - \Psi(t - t_0) \sin[2\pi f(t - t_0)] (2\pi f)^2 \quad (2)$$

式中： f 为所构造增量地震动时程的中心频率； t_0 为初始地震动时程作用下最大加速度反应出现的时间；函数 $\Psi(t)$ 为：

$$\Psi(t) = \begin{cases} \exp(-t^2/c_1), & t \leq 0 \\ \exp(-t^2/c_2), & t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $c_1 = -(t_0 - t_1)^2 / \ln \varepsilon$ ； $c_2 = -(t_2 - t_0)^2 / \ln \varepsilon$ ； ε 一般取 10^{-6} ； t_1 和 t_2 分别取值为 $t_0 - n_1 T_j$ 和 $t_0 + n_2 T_j$ ； T_j 为反应谱的控制周期； n_1 和 n_2 限定了增量加速度时程的有效区间。

假设初始地震动时程 $a_{g0}(t)$ 引起的阻尼比为 ζ 、周期为 T_j 时的绝对加速度反应时程为 $a_{a0}(t)$ ，其最大反应出现在 $t_{m,g}$ 时刻，则 $a_{g0}(t)$ 引起的 (ζ, T_j) 处的反应谱幅值为 $S_{a0}(T_j, \zeta) = |a_{a0}(t_{m,g})|$ 。同样假设增量加速度时程 $\Delta a_g(t)$ 引起的 (ζ, T_j) 处的绝对加速度反应时程为 $\Delta a_a(t)$ ，其最大反应出现在 $t_{m,\Delta}$ 时刻。若 $t_{m,\Delta} \neq t_{m,g}$ ，则可根据二者之间的时间差 Δt 平移增量加速度时程，保证增量加速度时程最大反应出现的时间与初始地震动时程最大反应出现的时间一致。同时根据增量时程反应值与目标反应谱差值之间的大小，对增量加速度时

程进行线性调幅：

$$\Delta a_{g-aft}(t) = \frac{\Delta S(T_j, \zeta)}{|\Delta a_a(t_{m,\Delta})|} \Delta a_{g-bef}(t - \Delta t) \quad (4)$$

式中： $\Delta S(T_j, \zeta)$ 为 $S_{a0}(T_j, \zeta)$ 与目标反应谱值的差值； $\Delta t = t_{m,g} - t_{m,\Delta}$ ； Δa_{g-bef} 和 Δa_{g-aft} 分别是调整前和调整后的增量加速度时程。将调整后的增量加速度时程叠加到初始时程 $a_{g0}(t)$ 上，则叠加后的时程为：

$$a_{g1}(t) = a_{g0}(t) + \text{sgn}[a_{a0}(t_{m,g})] \Delta a_{g-aft}(t) \quad (5)$$

式中： $\text{sgn}[x]$ 在 $x < 0$ 时为 -1 ， $x > 0$ 时为 1 。

为逐渐减少增量加速度时程的叠加对周围控制点反应谱值的影响，实际拟合过程中常常需要进行多次迭代。若能满足最大相对误差值 $|e_r|_{\max}$ 小于控制值，则可认为达到拟合精度，拟合完成：

$$e_r(T_n, \zeta) = \frac{S_r(T_j, \zeta) - S_{a,i}(T_n, \zeta)}{S_r(T_j, \zeta)} \quad (6)$$

式中： $S_{a,i}(T_j, \zeta)$ 为第 i 次迭代后得到的时程 $a_{gi}(t)$ 对应的反应谱值。

2 考虑最大加速度反应贡献趋向的改进

为确保时程的叠加可以使原始地震动更趋近目标反应谱，在叠加增量加速度时程时，本文考虑增量加速度时程引起的最大加速度反应对趋向目标反应值的贡献情况，即式 (5) 可转换为：

$$a_{g1}(t) = a_{g0}(t) + \text{sgn}[a_{a0}(t_{m,g}) \times \Delta a_a(t_{m,\Delta})] \Delta a_{g-aft}(t) \quad (7)$$

若初始时程最大反应 $a_{a0}(t_{m,g})$ 与增量时程最大反应 $\Delta a_a(t_{m,\Delta})$ 同向，则增量加速度时程的贡献是正向的， $\text{sgn}[x] = 1$ ；反之，增量加速度时程的贡献是反向的， $\text{sgn}[x] = -1$ 。

若经过 i 次迭代调整后的时程引起的加速度反应为：

$$a_{a(i+1)}(t) = \omega_d \int_0^t a_{g(i+1)}(\tau) e^{-\zeta \omega(t-\tau)} \times \left[\left(1 - \frac{\zeta}{1 - \zeta^2} \right) \sin \omega_d(t - \tau) + \frac{2\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cos(t - \tau) \right] d\tau \quad (8)$$

将每一次迭代时式 (7) 得到的 $a_{gl}(t)$ 带入式 (8), 并令:

$$H(t-\tau) = e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \times \left[\left(1 - \frac{\zeta}{1-\zeta^2} \right) \sin\omega_d(t-\tau) + \frac{2\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos(t-\tau) \right] \quad (9)$$

则式 (8) 可以简化为:

$$a_{a(i+1)}(t) = a_{ai}(t) + \omega_d \int_0^t \operatorname{sgn} \left[a_{a0}(t_{m,g}) \times \Delta a_{a(t_{m,\Delta})} \right] \frac{\Delta S(T_n, \zeta)}{|\Delta a_a(t_{m,\Delta})|} \Delta a_g(\tau - \Delta t) H(t - \tau) d\tau \quad (10)$$

根据 Lilhanand 等 (1988) 的研究, 在时程中叠加一个幅值较小的脉冲函数, 不影响结构动力反应最大值出现的时刻, 可认为 $a_{a(i+1)}(t)$ 与 $a_{a(i)}(t)$ 最大值出现的时刻相同。因此可令 $t = t_{m,g}$, 则有:

$$a_{a(i+1)}(t_{m,g}) = a_{a(i)}(t_{m,g}) + \operatorname{sgn} \left[a_{a(i)}(t_{m,g}) \times \Delta a_a(t_{m,\Delta}) \right] \frac{\Delta S(T_n, \zeta)}{|\Delta a_a(t_{m,\Delta})|} \Delta a_a(t_{m,\Delta}) \quad (11)$$

$$\Delta S(T_n, \zeta) = S_T(T_n, \zeta) - S_{a,i}(T_n, \zeta) \quad (12)$$

$$S_{a,i}(T_n, \zeta) = |a_{ai}(t_{m,g})| \quad (13)$$

若期望下一次迭代时收敛, 则有:

$$|a_{a(i+1)}(t_{m,g})| = S_T(T_n, \zeta) \quad (14)$$

则可将式 (12) 和 (13) 代入式 (11), 可得:

$$a_{a(i+1)}(t_{m,g}) = \operatorname{sgn}[a_{a(i)}(t_{m,g})] \times S_T(T_j, \zeta) \quad (15)$$

可见, 考虑增量时程最大反应谱贡献趋向可以保证迭代更快贴近目标谱值 $S_T(T_j, \zeta)$ 。

图 1 中以 El-Centro 波 NS 分量为初始地震动时程, 对比考虑增量时程反应趋向的改进前、后对同一目标谱的拟合速度。从图中可以看出, 改进前, 经过 20 次迭代后最大相对误差仍在 30% 左右, 改进后, 20 次迭代就可使最大相对误差降到 5% 以下。

利用改进方法对初始地震动时程进行调整后,

得到加速度、速度和位移时程曲线, 如图 2 所示。由图可以看出, 改进方法能保证地震动速度时程的基线不出现漂移, 仅在地震动位移时程尾部可见小幅基线偏移。

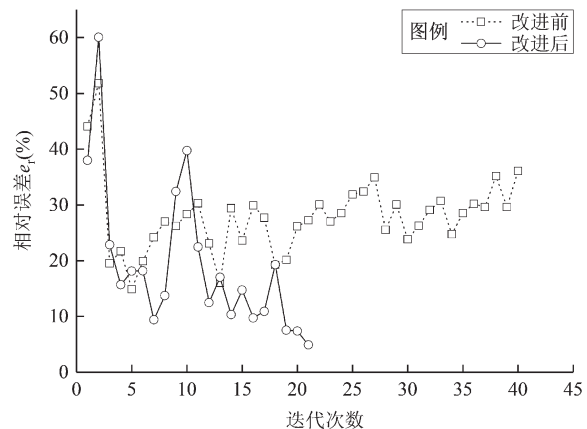


图 1 改进前、后拟合精度与迭代次数之间关系的对比

Fig. 1 Comparison of relative error and iteration numbers before and after improvement

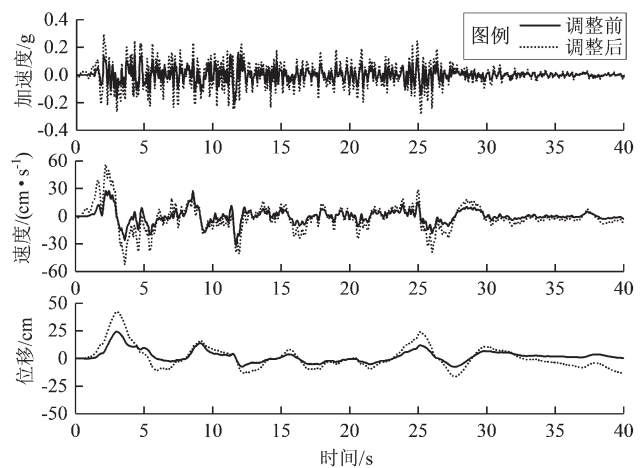


图 2 调整前、后 E1-Centro 波 NS 分量地震动加速度、速度及位移时程对比图

Fig. 2 Comparison of the ground motion acceleration, velocity and displacement curves of NS component of E1-Centro wave before and after modification

3 考虑误差排序的改进

在每一轮迭代时, 需根据各控制点误差大小进行针对性地调整。以集集地震中 TCU052 台站的 2 个水平分量记录以及汶川地震卧龙 (WCW) 台站的 2 个水平分量记录作为初始时程, 以《核

电厂抗震设计规范》(GB50267—1997)的多阻尼标准反应谱为目标,拟合地震动时程。在拟合时采用2种思路:第一种是传统的控制点按照周期从小到大且阻尼从小到大的顺序进行拟合,得到最小的相对误差为 e_{rD} ;第二种是根据每一轮调整后各 (ζ, T_j) 处的误差值,按从小到大进行排序,作为下一轮调整的顺序,得到的最小相对误差为 e_{rE} 。则在迭代的某一时刻2种思路给出的误差之差为:

$$\Delta e_r = e_{rD} - e_{rE} \quad (16)$$

式(3)中参数 n_1 和 n_2 的取值会影响增量加速度时程的作用区间,为研究不同增量加速度时程下2种拟合思路的差别,此处取 $n_1 = 2, 3, 4, \dots, 8$ 和 $n_2 = 2, 3, 4, \dots, 8$,共49种组合,对 (n_1, n_2) 每一种组合形成的增量加速度时程,都按2种拟合思路进行调整并计算 Δe_r ,然后统计出49组增量时程的 Δe_r 值,如图3所示。从图中可以看出,对于绝大多数增量加速度时程来说, Δe_r 都是正值,即 $e_{rD} > e_{rE}$,表明在相同的迭代次数下按误差变序的拟合思路在绝大多数情况下都可以给出更高的拟合精度。

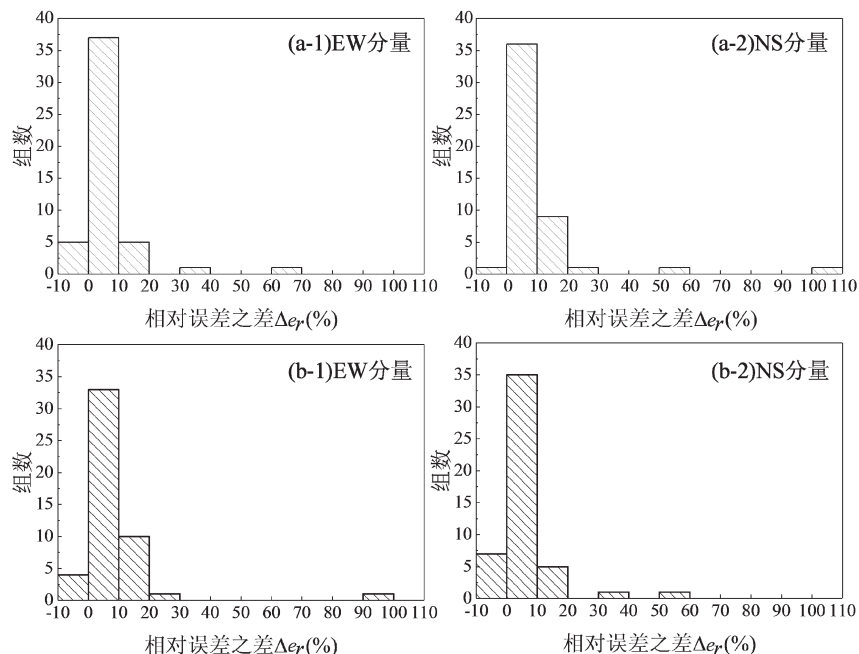


图3 集集地震(a)和汶川地震(b)地震动时程按2种拟合思路调整后最小相对误差之差直方统计图

Fig. 3 Histogram of the difference of minimum relative error between two adjustment methods of the Chichi earthquake (a) and the Wenchuan earthquake (b).

4 工程应用

为验证本文提出的改进后的时域调整法的有效性,以EI-Centro波NS分量为初始地震动时程,以《核电厂抗震设计规范》(GB50267—1997)多阻尼设计反应谱作为目标谱,利用上文提出的2种改进思路,进行人工地震动时程的生成。调整初始地震动时程前,首先将初始地震动的峰值加速度标定到所选目标反应谱对应的峰值加速度水

平(0.3g)。图4为调整前、后的EI-Centro波多阻尼反应谱。从图中可以看出,调整后的人工地震动时程的反应谱可以在全部阻尼上很好地吻合目标反应谱。

表1中列出了最后一轮迭代后不同 (ζ, T_j) 对应的反应谱值与目标反应谱值之间的误差。由表1可知,在所有控制点中最大的相对误差为4.85%,满足《工程场地地震安全性评价》(GB17741—2005)的规定,说明本文提出的方法是有效可行的。

表 1 调整后地震动反应谱与多阻尼目标反应谱之间的相对误差

Tab. 1 Errors between ground motions response spectrum and multi-damping target spectrum

T_j/s	ξ_k					T_j/s	ξ_k				
	2%	4%	5%	7%	10%		2%	4%	5%	7%	10%
0.03	-3.42	-2.72	-2.64	-3.22	-4.85	0.217	-0.37	0.75	1.15	3.93	3.48
0.032	-2.50	2.03	1.18	0.54	-0.17	0.227	0.08	3.97	3.44	1.57	-0.21
0.036	-0.03	0.56	0.64	1.03	-0.34	0.238	-0.15	1.19	-0.40	-1.03	-1.04
0.04	0.62	-1.20	-1.34	-0.93	0.02	0.25	0.06	0.73	0.06	0.56	1.92
0.044	-1.54	0.34	0.13	-0.19	-1.00	0.263	1.29	-3.47	-2.71	-0.52	0.38
0.046	-0.91	0.67	-0.37	0.09	0.46	0.278	-3.93	-0.21	-1.46	-2.55	-3.68
0.05	-0.55	1.16	1.60	2.15	2.36	0.29	0.01	-0.44	-0.55	1.04	-0.53
0.056	-2.74	-1.25	-0.05	2.05	2.28	0.303	-0.32	1.38	1.42	2.43	0.95
0.059	-3.44	-1.11	-0.93	-0.41	-0.80	0.317	-1.19	3.33	1.22	-0.22	-1.72
0.063	-2.54	-0.11	0.44	1.19	0.36	0.333	-0.07	1.11	-0.35	-0.87	-1.24
0.067	1.12	3.61	3.55	2.10	-0.66	0.345	-0.37	-1.17	-0.49	1.75	2.57
0.069	0.24	4.42	4.62	3.64	0.50	0.357	-1.25	3.05	2.29	1.87	0.21
0.071	-0.06	1.87	2.45	2.45	0.28	0.37	-0.55	2.01	-0.49	-2.18	-3.17
0.074	-1.48	-1.93	-1.52	-0.53	0.69	0.385	0.78	-1.66	-2.01	-1.89	-3.13
0.077	-2.08	-0.30	0.07	0.70	0.84	0.4	-2.57	0.31	0.50	-1.04	-1.83
0.08	1.79	-0.42	0.16	2.19	3.53	0.417	-2.99	0.48	0.26	-0.25	-1.58
0.083	0.25	2.72	1.97	2.34	2.73	0.435	-4.01	-3.77	-2.59	0.81	0.88
0.087	0.44	1.53	1.38	1.57	0.77	0.455	0.12	-0.94	0.02	2.82	1.85
0.091	0.23	1.95	1.71	0.98	-0.76	0.476	-1.35	0.28	0.64	1.25	1.23
0.095	0.81	1.31	0.77	0.65	-0.28	0.5	-2.78	1.67	-0.18	-0.67	0.03
0.1	-0.02	-2.81	-2.53	-0.87	-0.66	0.526	1.84	0.25	0.36	1.34	1.88
0.105	-0.15	1.22	1.20	1.24	-0.82	0.556	1.34	-1.13	-3.56	-4.61	-4.83
0.111	-0.09	1.05	0.82	0.83	-0.84	0.588	-2.77	-1.00	-0.68	-0.12	-1.19
0.118	-1.78	-0.05	-0.74	-1.31	-2.70	0.625	-2.44	-0.86	0.09	1.07	-0.03
0.125	-0.81	-0.05	0.43	-0.90	-4.20	0.667	-1.73	0.16	-2.04	-2.90	-1.53
0.129	-1.29	1.60	-0.10	-1.67	-3.45	0.714	-1.34	-0.42	0.03	2.44	-0.62
0.133	0.03	2.27	3.30	3.93	1.62	0.769	-0.62	2.06	1.48	1.11	0.37
0.138	-1.34	2.61	2.99	3.44	0.20	0.833	-1.28	0.80	-0.55	-1.16	-1.16
0.143	-0.68	-1.06	-1.64	-1.06	-0.99	0.909	-0.91	-0.27	-0.33	0.40	-0.33
0.148	-1.87	-1.06	-0.76	0.28	-1.54	1	-0.62	-0.76	-0.50	1.99	-0.64
0.154	-4.52	-3.55	-2.46	-1.33	-2.45	1.111	-1.77	1.97	0.70	0.21	-0.86
0.16	-1.20	2.45	3.62	3.23	-1.25	1.25	-1.70	-1.16	-1.44	0.96	-0.92
0.167	0.68	3.62	2.60	2.13	0.58	1.429	-0.13	-2.14	-2.50	0.44	-0.66
0.174	1.35	0.07	0.84	3.08	0.12	1.667	-2.53	-2.03	-2.23	0.35	-0.20
0.182	0.36	3.77	3.47	3.83	1.88	2	0.26	1.93	1.43	1.98	-0.21
0.19	0.28	0.38	-0.49	-0.48	-0.05	2.5	3.80	0.67	-0.92	-0.69	-0.15
0.2	0.14	1.90	0.32	0.06	0.24	3.333	1.06	0.16	-1.42	-0.48	-0.94
0.208	0.15	1.50	0.56	1.28	2.82	4	-1.31	-0.46	-1.45	0.02	-0.54

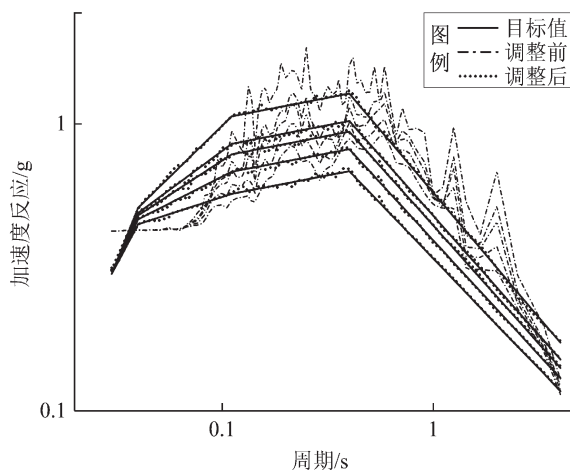


图4 调整前、后的 El-Centro 波
NS 分量的多阻尼反应谱

Fig. 4 Muti-damping spectra of NS component of
El-Centro wave before and after adjustment

5 初始“种子”时程选取的影响

多阻尼目标反应谱的拟合会对地震动的波形和傅里叶谱产生较大影响。选取 5 条天然地震动时程作为“种子”，其基本信息见表 2。图 5 为 5 条“种子”时程的加速度曲线和傅里叶谱幅值图。

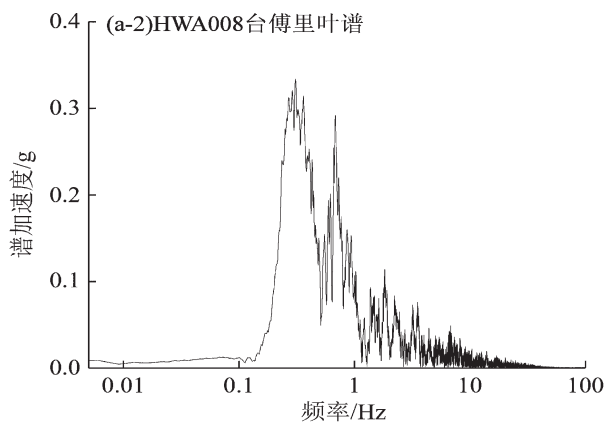
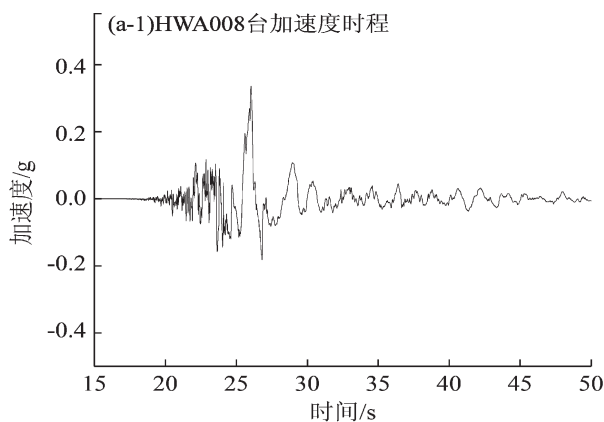
表 2 5 条“种子”时程的基本信息

Tab. 2 Information for selected seed records

地震	台站	震级	PGA/g
2018 年 2 月 6 日中国台湾花莲地震	HWA008	6.5	0.336
	ILA050	6.5	0.432
	HWA191	6.5	0.403
2008 年 5 月 12 日汶川地震	汶川卧龙	8.0	0.9577
	汶川卧龙	8.0	0.652851

从图 5 可以看出，汶川卧龙（WCW）台站的 2 个水平分量时程中有 2 个明显的波包，指示着震源破裂过程中可能存在 2 次明显主破裂，其傅里叶幅值谱也显示 WCW 台时程中含有丰富的高频成分，且高频段加速度幅值比其它“种子”时程大。而花莲地震中 HWA008 台和 HWA191 台时程表现出明显的长周期脉冲特征，其傅里叶幅值谱也体现了 1 Hz 以下长周期段的显著能量；ILA050 台时程则更符合通常工程抗震分析中应用的地震动时程特征，主要能量分布在 3~10 Hz。

使用本文提出的改进后的多阻尼目标反应谱拟合方法对 5 条“种子”时程进行调整，调整后的“种子”时程多阻尼反应谱与目标反应谱的对比如图 6 所示。由图可见，本文改进的方法可以保证不同“种子”时程与多阻尼目标反应谱吻合，拟合的相对误差均能控制在 5% 以内。但对比调整后的时程及傅里叶幅值谱（图 7）发现，不同“种子”时程在调整后虽然能够与多阻尼目标反应谱吻合，但一定程度上仍然保留了初始时程的一些特性。比如，调整后 WCW 台时程在时域上依然存在 2 个明显的波包，PGA 出现的时刻也接近初始地震动时程；仍然可以在 HWA008 台和 HWA191 台，时程尾部观察到较为明显的长周期分量；只有 ILA0505 台时程调整前后的波形差别比较大，特别是在持时变化上，显著持时有 5 倍以上的拉长。对比各“种子”时程的傅里叶幅值谱也可以看出，在高频段的能量分布上，WCW 台时程相对其他时程仍显著，且主频段的加速度幅值也明显大于其它时程。这不仅表明采用不同“种子”仍可以保证与同一组目标反应谱吻合，而且调整后的地震动时程也会保留一部分原有的地震动特性。已有研究表明，较大面积的



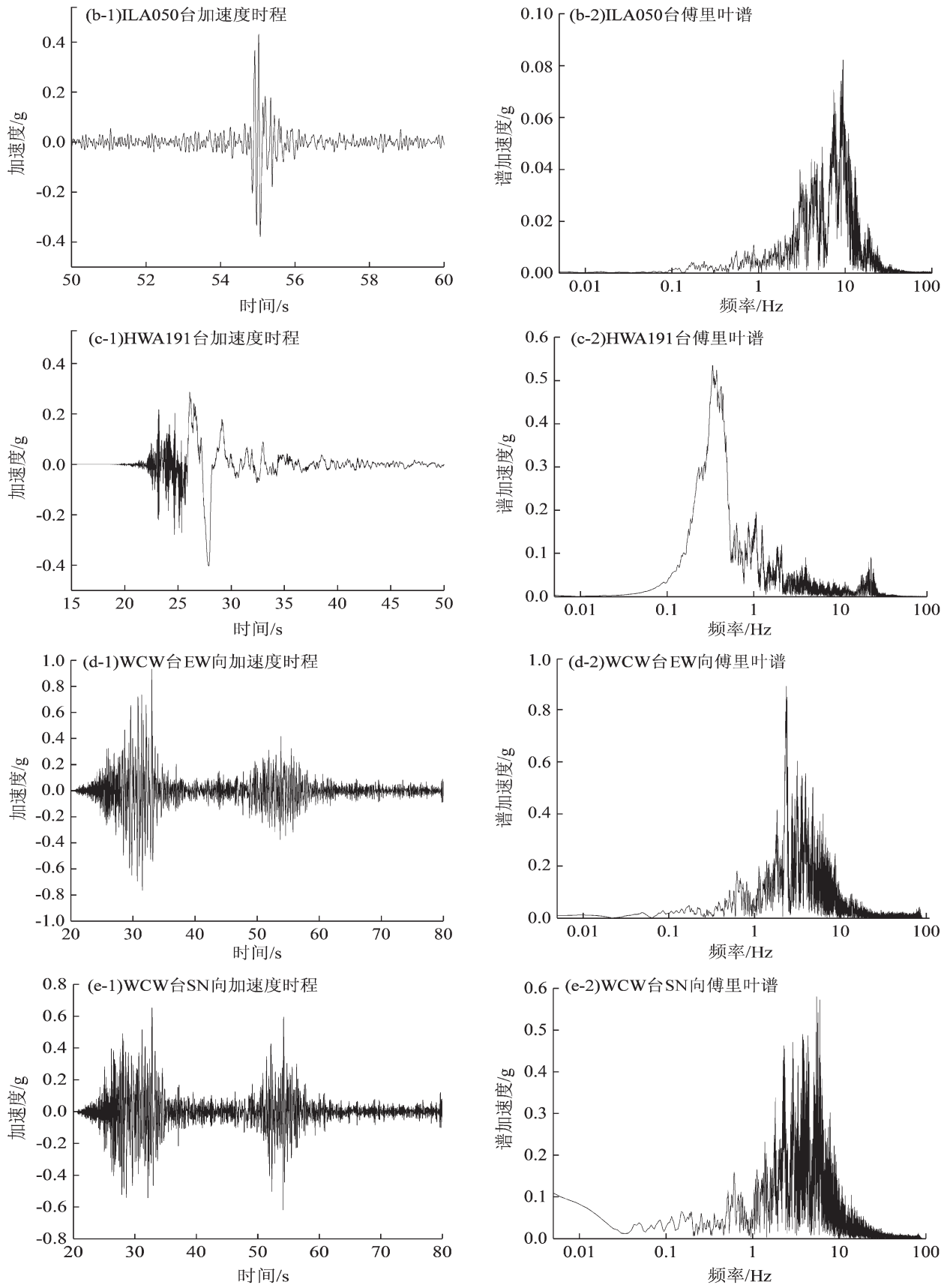


图5 “种子”地震动加速度时程曲线和傅里叶谱幅值图

Fig. 5 Time history and Fourier amplitude spectrum for seed record

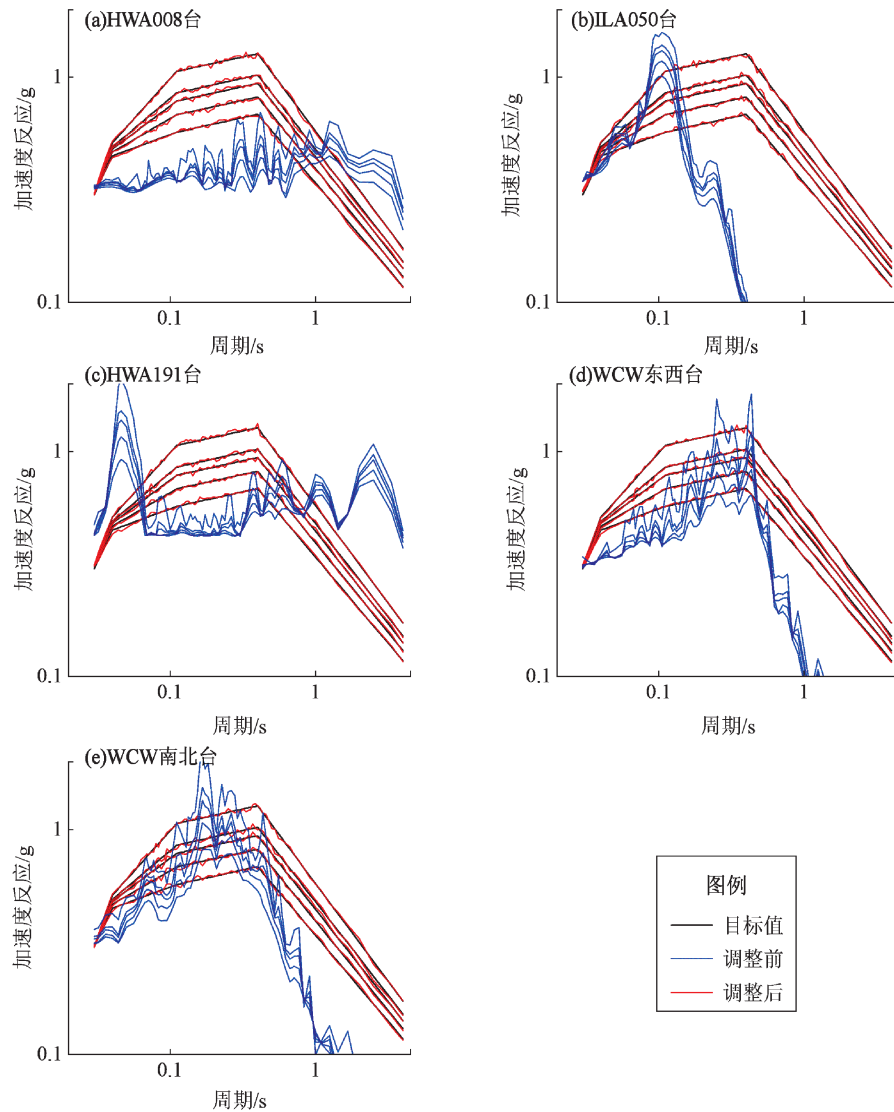
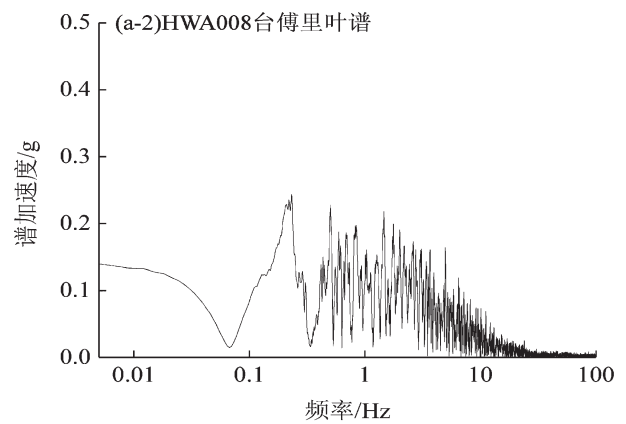
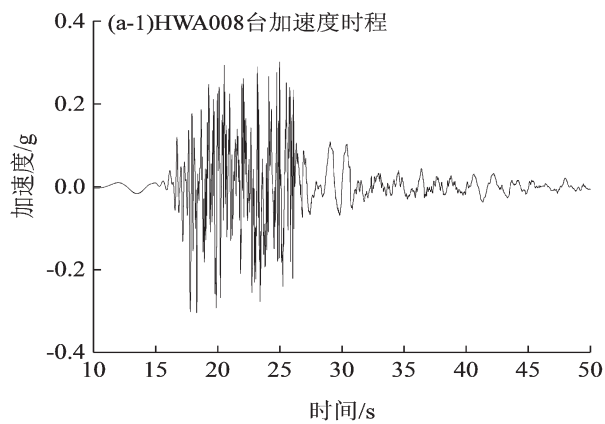


图 6 调整前、后不同“种子”地震动时程的多阻尼反应谱与目标反应谱

Fig. 6 The target spectra spectra and the multi-damping response spectra of different seed ground motion before and after modifications



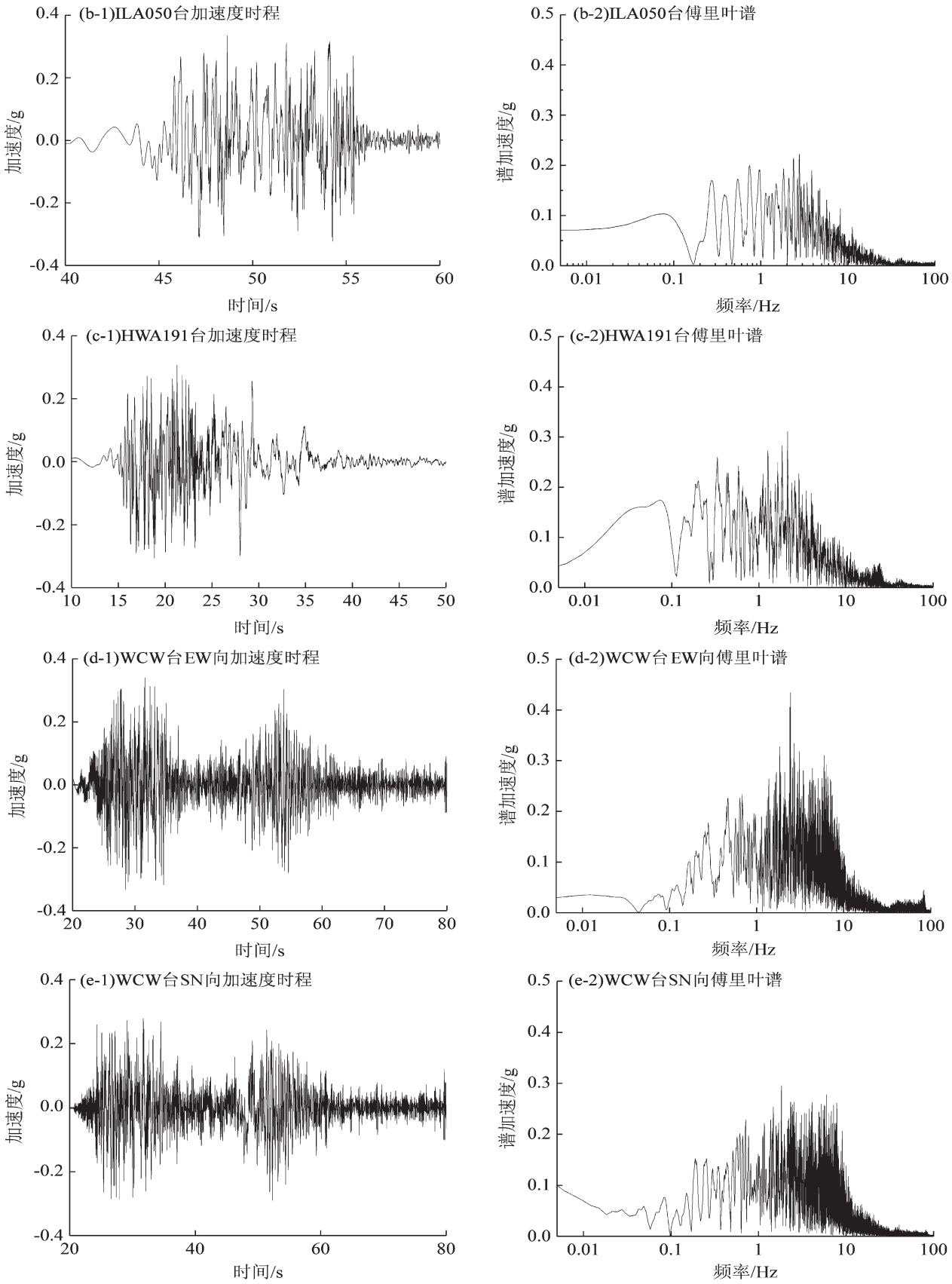


图7 不同“种子”时程对应的调整后的地震动时程及其傅里叶反应谱

Fig. 7 Time history and Fourier amplitude spectrum of modified ground motion for different seed record

脉冲个数对结构最大弹塑性位移反应有较明显的影响(陈永祁,1984);远场长周期地震动对超高层建筑、大跨度桥梁以及输电线路等结构自振周期较长的结构破坏比较大(贾鹏,2016);对于同一结构物不同刚度的地基,其地震反应谱亦不相同(李伟鑫等,2016)。因此,在选择“种子”时程时,需将“种子”时程特征与工程需求相结合,如应更多考虑后续抗震分析中结构位移反应、结构动力特性及工程场地条件。

6 结论

本文借助时域调整法进行多阻尼目标反应谱拟合,并基于现有的时域调整法提出2种改进思路,借助El-Centro波的工程应用,利用改进后的时域调整法对5条典型的天然地震动时程进行调整,对比分析调整前后的地震动时程在时域和频域特性上的差异。结果表明:虽然采用不同“种子”时程可以保证与同一多阻尼目标反应谱相吻合,但是调整后的地震动时程仍会保留部分原有的地震动特性。因此,“种子”时程的选择时应更多考虑后续抗震分析时的结构物动力特性。若期望为大跨度桥梁等柔性构筑物提供抗震分析的地震动输入,那么在“种子”时程选择时就应偏重长周期特征明显的地震动记录。反之,若期望为核电站等刚性构筑物提供输入,则选择“种子”时程应尽可能考虑高频成分显著的天然地震记录,以保证利用调整后的地震动时程进行抗震反应分析时,仍能够更大可能地获取构筑物的共振反应。

参考文献:

蔡长青,沈建文.1997.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,19(1):71-78.
陈胜.2016.一种多阻尼反应谱拟合的时域叠加方法[J].土工基础,30(6):658-661.
陈永祁.1984.地震地面运动时域特征对结构弹塑性反应的影响[J].地震研究,7(5):561-572.

侯春林.2012.核电厂结构抗震分析中不同规范要求引起的差异及影响研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
胡聿贤,何训.1986.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,6(2):37-51.
贾鹏.2016.远场长周期地震动特性及对结构响应分析[D].重庆:重庆大学.
李伟鑫,尹训强,王桂萱.2016.考虑桩-土-结构动力相互作用的土质地基条件下核岛厂房地震响应分析[J].地震研究,39(1):40-45.
刘伟,宋成科,夏峰,等.2015.地震动加速度时程一致性评价方法研究[J].地震研究,38(2):285-291.
谢异同,盛涛,袁俊.2011.拟合多阻尼比目标反应谱的高精度地震动调整方法[J].西北地震学报,33(3):223-227.
谢异同,张同亿,吴敏哲.2002.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,22(3):27-31.
杨向东.1993.设计地震反应谱的双参数标定方法及其应用[J].地震研究,16(2):178-186.
张郁山,赵凤新.2014.基于小波函数的地震动反应谱拟合方法[J].土木工程学报,47(1):70-81.
赵凤新,张郁山.2007.人造地震动反应谱拟合的窄带时程叠加法[J].工程力学,24(4):87-91,45.
钟菊芳,袁峰,邱卓.2019.模拟汶川地震动持时的空间分布规律研究[J].地震研究,42(4):483-492.
Gasparini D A, Vanmarcke E H.1976. Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra[R]. MIT publication No. R76-4, Evaluation of seismic safety of buildings.
Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A, et al. 2006. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets[J]. Journal of Earthquake Engineering, 10(S1):67-89.
Lilhanand K, Tseng W S. 1988. Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple-damping design spectra[C]. Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering, 819-824.
Rizzo P C, Shaw D E, Jarecki S J. 1975. Development of real/synthetic time histories to match smooth design spectra[J]. Nuclear Engineering and Design, 32(1):148-155.
Zhang Y, Zhao F. 2010. Artificial ground motion compatible with specified peak ground displacement and target multi-damping response spectra[J]. Nuclear Engineering and Design, 240(10):2571-2578.
GB 17741—2005,工程场地地震安全性评价[S].
GB 50267—1997,核电厂抗震设计规范[S].

Generation of Multi – Damping – Response – Spectrum – Compatible Ground Motions Considering Contribution of Increment Time History and Error Sorting

ZHANG Weiming^{1,2}, SUN Xiaodan¹, LI Donghang¹, WANG Hao¹, WAN Keyu¹

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

(2. China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp. LTD, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract

Based on the existing time – domain adjustment method, the contribution of the maximum response of increment time history and the sequence of damping – period for adjustment are discussed. An improvement that consider the contribution trend of the maximum response of increment time history and the error sorting are presented. The improved time – domain adjustment method is then applied to the multi-damping target response spectrum fitting for nuclear power plants. Five ground motion records with different temporal and spectral characteristics are selected as seed to investigate the influence of seed selection on generated ground motions. It is suggested that the selection of seed record should consider the dynamic characteristics of the structure to be analyzed.

Keywords: incremental time history; multi-damping response spectrum; error sorting; seed record