

刘帅, 潘超, 周志光. 2018. 对人造地震动反应谱求解及拟合的几个相关问题探讨. 地震学报, 40(4): 519–530. doi: 10.11939/jass.20170226.
Liu S, Pan C, Zhou Z G. 2018. Discussions on the response spectral solution and fitting of spectrum-compatible artificial seismic waves. *Acta Seismologica Sinica*, 40(4): 519–530. doi: 10.11939/jass.20170226.

对人造地震动反应谱求解及拟合的 几个相关问题探讨*

刘 帅^{1),†} 潘 超²⁾ 周志光³⁾

1) 中国杭州 310018 浙江理工大学建筑工程学院

2) 中国山东烟台 264005 烟台大学土木工程学院

3) 中国上海 200092 同济大学结构工程与防灾研究所

摘要 为更高效合理地生成与设计反应谱相符的人造地震动信号, 本文基于自主开发的地震动信号处理软件 EQSignal 对人造地震动生成过程中涉及的几个问题进行了探讨, 并通过对单自由度简谐共振体系的响应分析, 提出了具体的解决建议: ① 反应谱求解时应该对高频段和低频段分别采用频域传递函数法和逐步积分法求解; ② 反应谱周期控制点的分布模式也应分段处理, 短周期段宜采用对数平均分布, 长周期段宜采用线性平均分布, 反应谱总周期控制点不宜少于 120 个; ③ 人造地震动反应谱与设计反应谱拟合的过程中, 使用频域方法与时域方法相结合可兼顾效率与收敛性.

关键词 人造地震动 反应谱 高频响应 谱拟合 地震信号处理

doi: 10.11939/jass.20170226 中图分类号: P315.3, TU352.1 文献标识码: A

Discussions on the response spectral solution and fitting of spectrum-compatible artificial seismic waves

Liu Shuai^{1),†} Pan Chao²⁾ Zhou Zhiguang³⁾

1) School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2) School of Civil Engineering, Yantai University, Shandong Yantai 264005, China

3) Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In order to generate design-spectrum-compatible artificial seismic waves more efficiently and rationally, three problems that arise during the procedure of artificial seismic signals generation are studied and discussed in this paper by the aid of an earthquake signal processing software named EQSignal which is developed by the authors, and through the response analysis of harmonic resonance system with single degree of freedom, the corresponding suggestions to solve these questions are also provided. It is suggested that transfer function method should be adopted within the high-frequency segment of a response spectrum, and step-by-step integration

* 基金项目 国家自然科学基金(51778491)、浙江省自然科学基金(LQ17E080014)和山东省自然科学基金(ZR2018BEE033)联合资助.

收稿日期 2017-12-27 收到初稿, 2018-01-24 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: sliu_2008@163.com



method can be used within the low-frequency segment. There should be more than 120 period points in a seismic response spectrum, and the period points should be log-uniformly distributed at short-period segment and uniformly distributed at long-period segment. During seismic spectrum fitting, both the two iterative methods in frequency domain and time domain are recommended to use in order to give consideration to both efficiency and convergence.

Key words: artificial seismic wave; response spectrum; high-frequency response; spectral fitting; seismic signal processing

引言

工程结构抗震设计和性能分析过程中经常需要进行结构动力时程分析(Clough *et al.*, 1990; 胡聿贤, 2006; Chopra, 2007), 地震动输入的选用和确定是结构动力时程分析能否得出合理结果的前提和关键因素之一. 天然地震动资料的缺乏, 尤其是工程场地所在地的天然地震动记录几乎不可能获得, 致使完全采用天然地震动输入不太现实, 也不尽合理(胡聿贤, 何训, 1986), 因此需要生成一些与设计反应谱相符的人造地震动(Tsai, 1972; Rizzo *et al.*, 1975; 郭子雄, 王妙芳, 2006)来作为动力时程分析的输入. 人造地震动的生成过程主要涉及地震波反应谱的求解和拟合两个关键因素(胡聿贤, 2006; 大崎顺彦, 1980), 不足之处就是对于本文分析的几个问题均没有给出定量的参数取值要求和具体的算法选用策略. 鉴于此, 本文拟针对两个关键因素衍生出的反应谱高频段响应的求解、反应谱周期点的分布模式和常用的两种反应谱拟合方法的比较与选用等问题进行探讨, 并给出相关的建议. 本研究所涉及的计算分析均借助于自主开发的地震动信号处理软件EQSignal(Pan, Zhang, 2016; Pan *et al.*, 2017), 并且提出的相关建议均已在该软件中实现, 以便于合理、高效、快速地生成与设计反应谱相符的人造地震动.

1 反应谱高频段响应求解算法

生成与设计反应谱相符的人造地震动的关键因素之一就是采用精确合理的反应谱求解方法(Housner *et al.*, 1953), 而反应谱的求解方法最终要归结到单自由度体系响应的求解方法. 若单自由度体系响应的求解方法选择不当, 势必会造成响应计算结果的不稳定或不准确, 对人造地震动反应谱的拟合带来不利影响(Clough *et al.*, 1990). 故本节将对几种常用单自由度体系响应的求解方法进行探讨并提出具体的反应谱求解建议.

对单自由度体系进行振动响应分析的常用数值方法主要包括时域逐步积分法和频域传递函数法(Clough *et al.*, 1990), 其中时域逐步积分法由于求解效率高、适用范围广, 可用于求解非线性系统. 采用该方法求解时, 时间步长是影响计算稳定性、准确性的关键因素之一. 通常认为计算时间步长 Δt 应该明显小于结构基本周期和激励中有意义的最高频率成分所对应的周期中的较小者(记为 T_c , 其对应频率记为 f_c , 一般 $\Delta t \leq T_c/10$), 才能保证逐步积分法的数值稳定性, 计算结果才能达到一定高精度(Chopra, 2007). 例如, 对于时间间隔 $\Delta \bar{t} = 0.02$ s的地震动信号, 根据采样定理(徐科军, 2001)可知, 原信号有效的最高频率为25 Hz时, 即可认为地震激励的最小有效周期为0.04 s, 若 $\Delta t \leq T_c/10$ 时计算结果才有效, 当取时间步长 $\Delta t = \Delta \bar{t} = 0.02$ s来计算该地震波的反应谱时, 0.04—0.2 s这一周期范围内(高频段, $\Delta t > T_c/10$)的结果是不可靠的. 最常用的解决方法是对原地震动信号进行线性插值, 使插值后地震动信

号的时间间隔满足稳定性精度的要求(如 $\Delta t \leq T_c/10$)。线性插值能够保证求解的数值稳定性,但由于线性插值信号重构的能力较弱,因此该方法对提高高频响应求解精度的作用有限。本文将以一个承受简谐激励的单自由度共振体系(即激励最小周期、自振周期为同一值)为例来讨论不同求解方法的精度。

假定地震动信号有意义的最小周期由奈奎斯特(Nyquist)频率 f_N (徐科军, 2001)决定,定义参数相对频率 \hat{f} 为

$$\hat{f} = \frac{f_c}{f_N} = \frac{2f_c}{f_s} = \frac{2\Delta t}{T_c}, \tag{1}$$

式中, f_s 为采样频率, Δt 为采样时间间隔。

相对频率 \hat{f} 在 0.05—0.9 之间变化时,采用纽马克(Newmark)- β 法(对激励信号考虑不插值、20 倍线性插值、50 倍线性插值、20 倍 Sinc 插值等情形)、龙格-库塔法(Runge-Kutta, 信号不插值)和频域传递函数法(对信号进行快速傅里叶变换后乘传递函数再进行快速傅里叶逆变换)这几种求解方法,分析其计算精度。

由于承受简谐激励的单自由度共振体系存在精确的解析解,故求解完成后,不同求解方法的计算结果的精度可使用数值解与精确解的加速度时程响应的相关系数 C 以及数值解与精确解的加速度时程响应的峰值之比 P 来评价,两参数越接近 1.0,表明该算法的计算精度越高。

图 1 给出了相对频率 \hat{f} 变化时几种算法的求解精度变化,可见:当相对频率 $\hat{f} < 0.1$ 时(对应反应谱的长周期段),几种算法的 C 和 P 均接近于 1.0,表明其均具有较高的求解精度;当相对频率 $\hat{f} \geq 0.1$ 时(对应反应谱的短周期段),随着相对频率的增加,单位周期内的采样点逐步减少,各类算法的求解精度开始下降,其中:不进行插值处理的纽马克- β 法的精度下降幅度最大;龙格-库塔法由于具有 4 阶求解精度,故其结果优于不插值的纽马克- β 法;

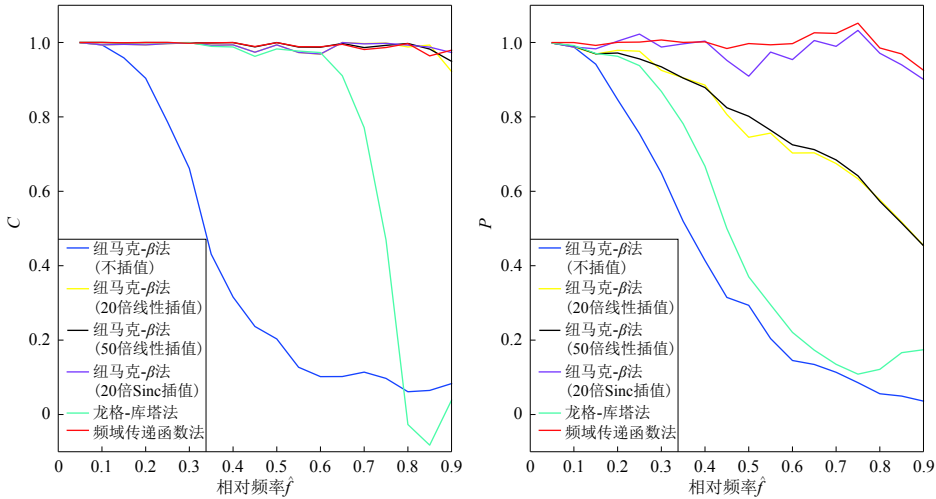


图 1 不同算法求解单自由度体系共振响应的加速度时程响应精度对比

(a) 数值解与精确解的相关系数 C ; (b) 数值解与精确解的峰值比 P

Fig. 1 Accuracy comparison of acceleration history by different algorithms for solution of resonant response of a single-degree-of-freedom system

(a) Correlation coefficient between numerical and exact solutions; (b) Peak ratio to numerical and exact solutions

对输入信号的插值处理可缓解相对频率增加所造成的求解精度下降,对于纽马克- β 法线性插值而言,50 倍插值并未比 20 倍插值有明显的改善效果,表明其信号重构能力有限;由于 Sinc 插值对周期信号具备较强的重构能力,因而得到了比线性插值精度更高的计算结果,但 Sinc 插值已经包含频域分析的成分(由于时域 Sinc 插值低效,本文的 Sinc 插值是基于快速傅里叶变换实现的);频域传递函数法是所有算法中受相对频率影响最小的算法,直到相对频率超过 0.8 时,精度才呈现较明显的下降,但其结果与精确解的相关系数和峰值比均处于 1.0 ± 0.1 的范围内. 为更形象地表现各算法在相对频率变化时求解精度的变化情况,图 2 依次列出当相对频率 \hat{f} 为 0.1, 0.3 和 0.5 时单自由度体系的共振位移响应时程曲线.

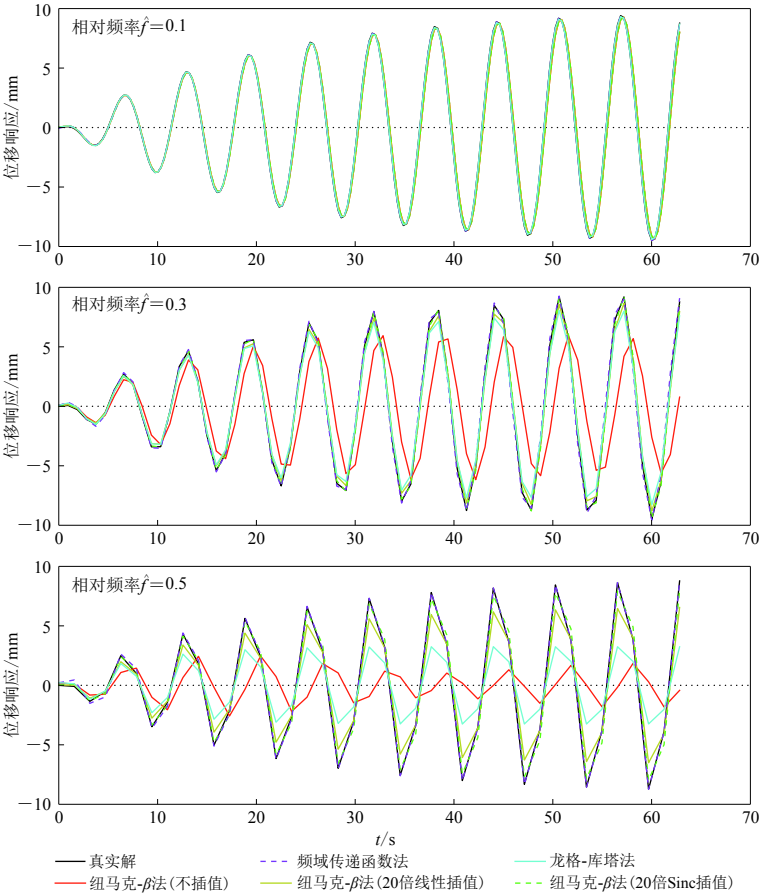


图 2 单自由度体系的共振响应时程曲线

Fig. 2 Time history curves of resonant response of a single-degree-of-freedom system

通常在输入信号长度相同的前提下,频域传递函数法在求解时由于涉及大量的复数运算而导致其计算效率要低于逐步积分法(计算时间最多可相差一个数量级),但对于高频段,由于逐步积分法要对信号进行插值而使得计算量成倍增加,此时逐步积分法的效率优势将不复存在. 而对于频域求解的核心算法——快速傅里叶变换,目前已存在高度优化的数值库,可通过多核并行计算进一步提高其求解效率. 为兼顾计算精度与效率,本文提出如下建议:对于弹性反应谱的高频段(约 $\hat{f} > 0.1$, 相当于 $T_c < 20\Delta t$)宜采用频域传递函数法求解;对

于弹塑性反应谱的高频段响应, 由于无法应用频域方法, 则宜采用插值后的加速度时程来计算. 另外, 由于傅里叶变换过程中“环状效应”(大崎顺彦, 1980)的存在, 频域法在求解响应时需要在信号末尾补充足够的“零点”才能得到合理的结果, 而体系的频率越低, 所需补充的“零点”越多, 因此对于反应谱的低频段不建议采用频域法求解.

综上所述, 本文在程序 EQSignal 中设置了一种自适应的反应谱求解方法, 当 $T_c < 20\Delta t$ 时采用频域传递函数法求解(为使用快速傅里叶变换, 求解时补充零点使得信号长度由 n 变为 $2^{\text{ceiling}(\log_2 n)+1}$), 当 $T_c \geq 20\Delta t$ 时则采用逐步积分法(不插值的纽马克- β 法)求解.

2 反应谱周期点分布模式

地震动信号的随机性造成了反应谱曲线上临近周期点处的谱值可能相差很大, 然而实际应用中反应谱只能在有限个周期控制点处获得, 这样在绘制反应谱曲线时很容易漏掉关键的特征点, 所以适当地设置反应谱周期控制点也是反应谱求解时要面对的关键问题, 本文将从周期控制点分布模式和周期控制点个数两个方面来对此深入探讨.

图 3 对比了周期点分别采用线性分布模式和对数分布模式的反应谱曲线(线性刻度是工程上常用, 对数刻度为了更明显看出高频段的特征), 可以看出: 相对于长周期(低频)段而言, 短周期(高频)段反应谱值的波动现象更为显著, 即短周期段需要更多的周期控制点; 周期控制点数相同的情况下, 周期对数分布模式较线性分布模式能更有效地描述反应谱曲线的真实情形. 虽然长周期段不需要太多的控制点, 但由于大部分中、高层建筑的周期均处于此范围内, 因此长周期段的控制点个数也不宜过少. 权衡各方面因素, 可采用“组合”分布模式, 即短周期(约 $T < 1$ s)段采用对数分布, 长周期段则采用线性分布, 且两周期范围的点数应大致相等.

从理论上讲, 周期控制点的数量越多, 越能反映出反应谱的真实状态, 从美国太平洋地

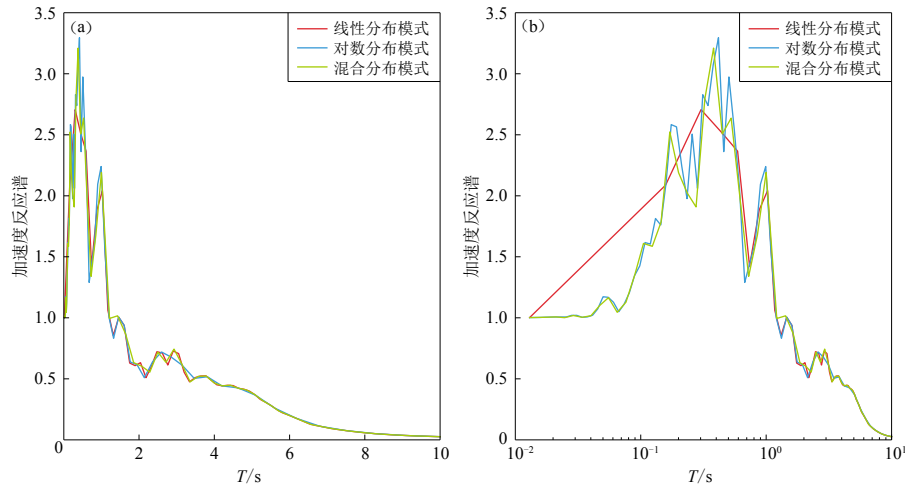


图 3 不同反应谱周期控制点分布模式下加速度反应谱的对比

(a) x 轴刻度为线性刻度; (b) x 轴刻度为对数刻度

Fig. 3 Comparison of acceleration response spectrum on the condition of distribution patterns of different period controlling points

(a) x axis is linear scale; (b) x axis is logarithmic scale

震工程研究中心强震记录数据库中选取天然地震动 CHICHI04-CHY039-E 和 CHICHI-ILA004-N 的时程,以 960 个控制点的反应谱曲线作为反应谱“真实”的基准形状,然后依次对比 30, 60, 90, 120 个周期控制点的反应谱曲线,如图 4 所示.可以看出,周期控制点越多,曲线形状越接近基准形状,但当控制点少于 90 时并不能保证点数多比点数少的反应谱曲线更“真实”,因此建议地震动反应谱的周期控制点(周期范围为 $2\Delta t-10.0\text{ s}$)不宜少于 120 个.

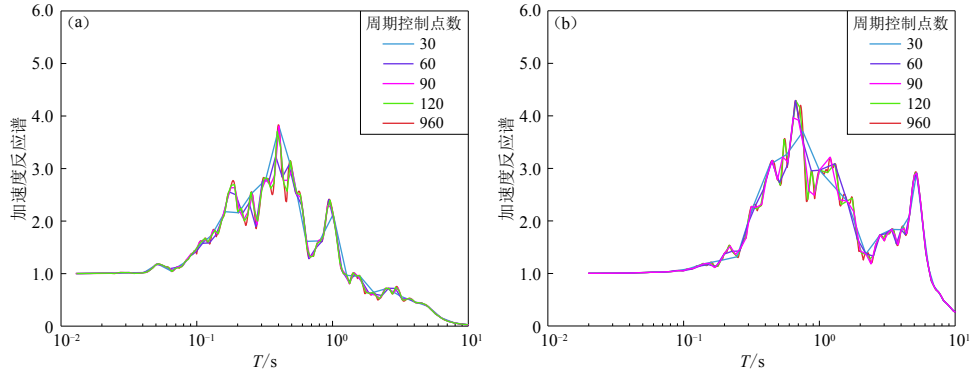


图 4 周期控制点数量对 CHICHI04-CHY039-E (a)和 CHICHI-ILA004-N (b)时程的反应谱曲线的影响
Fig. 4 Influence of period controlling point counts on the shape of response spectrum curve of the histories CHICHI04-CHY039-E (a) and CHICHI-ILA004-N (b)

周期控制点数量对反应谱曲线的影响可以更为显著地体现在地震动谱的拟合过程中.如图 5 所示.当周期控制点较少时,对周期控制点处的谱值进行拟合后,该处的谱值与目标谱基本吻合,此时将周期控制点加密为原来的两倍后再绘制反应谱曲线后可见,拟合时未考虑的周期点处反应谱值与目标谱仍有明显差距(图 5a, b).若采用如此拟合所得地震动时程进行建筑结构的抗震分析,则可能会得到不合理的分析结果.增加周期控制点可以有效地改善拟合效果,进行 2 倍加密检验时反应谱曲线上也不会出现明显的突兀点(图 5c),这表明采用更多的周期控制点会使拟合结果的可靠性提高.

为进一步探讨周期控制点数量对反应谱拟合结果可靠性的影响,本文取周期范围为 $2\Delta t-10.0\text{ s}$,设置拟合容差为平均相对误差不超过 2%,最大相对误差不超过 6%,以前文所述“组合”分布模式设置 30 个周期控制点对地震动反应谱进行拟合,然后分别计算当周期控制点数为 30, 60, 90, 120 和 150 时地震动反应谱与目标谱之间的相对误差;逐次增大拟合所用周期控制点数至 60, 90, 120 和 150 后重复前述步骤,最终所得结果列于表 1. 为了更直观地表达表 1 中的数值,图 6 以表 1 中的数值为基础,以拟合所用周期点数为横坐标,误差分析所用周期点数为纵坐标绘制了二维云图,从图中可清楚地观察到,随着周期控制点的增多,变化周期控制点所造成的误差变化幅度大致呈减小趋势,当周期控制点数超过 120 时,这种误差的变化幅度趋于稳定.因此本文建议进行反应谱拟合时,周期控制点不宜少于 120 个,而且在拟合完成后尚需改变反应谱周期控制点数进行拟合结果的检查,以确保结果的合理性与可靠性.然而,周期控制点的增加意味着相邻周期控制点间隔的减小,这会导致邻近周期点间振动响应的相关性增强,从而增大了谱拟合的难度,致使拟合精度降低.因此进行反应谱拟合时,周期控制点也不宜设置过多,一种较为可行的方法是仅在所关注的频段内(如结构的自振周期附近,设计反应谱的平台段等)增设周期控制点.

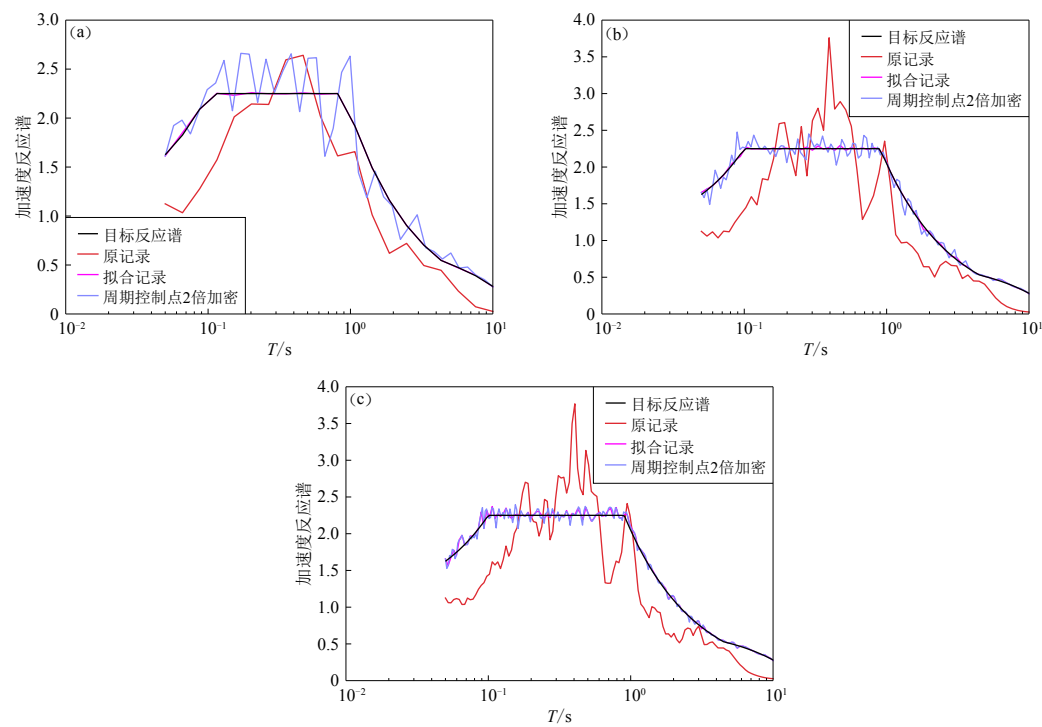


图 5 周期控制点加密前后反应谱对照图

(a) 20 个拟合控制点; (b) 60 个拟合控制点; (c) 120 个拟合控制点

Fig. 5 Comparison of response spectra before and after increasing the number of period controlling points

(a) Period point counts 20; (b) Period point counts 60; (c) Period point counts 120

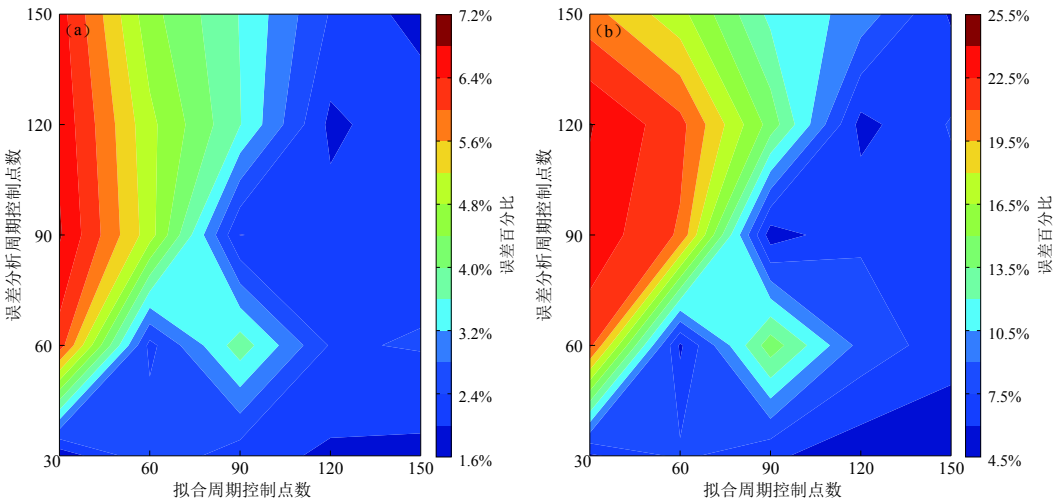


图 6 反应谱拟合所用周期控制点数对拟合结果可靠性的影响

(a) 平均误差; (b) 最大误差

Fig. 6 Influence of period controlling point count used in response spectral fitting on the reliability of fitting results

(a) Average error; (b) Maximum error

表 1 反应谱拟合所用周期控制点数对拟合结果的影响

Table 1 Influence of period controlling points number on fitting results of the response spectrum

| <i>N</i> | 反应谱拟合平均误差 | | | | | 反应谱拟合最大误差 | | | | |
|----------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | <i>M</i> =30 | <i>M</i> =60 | <i>M</i> =90 | <i>M</i> =120 | <i>M</i> =150 | <i>M</i> =30 | <i>M</i> =60 | <i>M</i> =90 | <i>M</i> =120 | <i>M</i> =150 |
| 30 | 1.7% | 6.2% | 6.9% | 6.7% | 6.6% | 5.7% | 21.5% | 23.5% | 24.1% | 20.1% |
| 60 | 2.7% | 2.3% | 5.0% | 4.9% | 4.5% | 7.8% | 5.7% | 20.8% | 21.5% | 17.0% |
| 90 | 2.2% | 3.8% | 2.0% | 3.6% | 3.6% | 6.3% | 14.4% | 5.2% | 14.4% | 11.6% |
| 120 | 1.9% | 2.4% | 2.2% | 1.9% | 2.4% | 5.0% | 8.5% | 7.3% | 5.5% | 9.9% |
| 150 | 1.9% | 2.4% | 2.2% | 2.3% | 1.8% | 4.9% | 6.6% | 6.8% | 7.6% | 5.8% |

注: *M* 表示误差分析周期控制点数, *N* 表示反应谱拟合周期控制点数.

3 反应谱拟合两种常用方法的比较

反应谱拟合是人工地震动生成过程中最关键的环节. 常见的反应谱拟合方法主要有两种, 即频域方法和时域方法(全伟, 李宏男, 2008). 频域方法是经典的拟合方法, 在许多地震工程学的论著和教材中均有提及(Rizzo *et al*, 1975; 胡聿贤, 2006), 其主要过程是: 将地震动信号进行傅里叶变换; 对各频率成分分别进行调整; 通过傅里叶逆变换对信号进行重构, 得到更接近目标反应谱的地震动时程, 调整系数则根据对应频率处原信号反应谱与目标谱(设计反应谱)之间的关系来确定. 频域方法的原理简单, 在快速傅里叶变换算法的支持下,

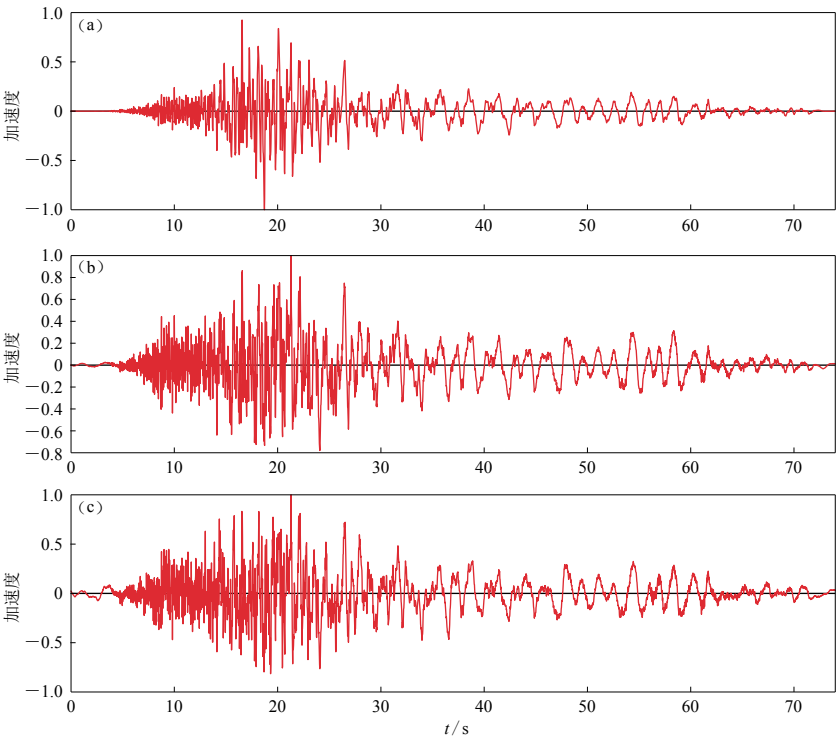


图 7 频域反应谱拟合过程中的时程波形变化

(a) 原始信号; (b) 5 次迭代后的波形; (c) 20 次迭代后的波形

Fig. 7 Variation of time-history waveform during frequency-domain response spectral fitting

(a) Original signal; (b) Waveform after five iterations; (c) Waveform after 20 iterations

其计算效率也较高,但仍存在一些问题:①在迭代拟合过程中,假定单自由度体系在地震动激励下的响应由共振响应决定,忽略了除共振频率外其余频率成分对体系响应的影响,因此拟合精度较低,且容易出现迭代顽固点(特别是在高频段);②由于傅里叶变换或逆变换过程中频率泄露、迭代过程中存在顽固点等的影响,频域拟合后的时程曲线将出现一定程度的失真现象,即时程包络曲线发生改变,如图 7 所示,变化最明显的位置为时程曲线的起始和结尾部分,原始信号反应谱与目标谱之间的差异越大,这种失真现象则越显著,而且迭代次数的增加也会加重这一现象。

时域拟合方法(Al Atik, Abrahamson, 2010; Gao *et al.*, 2013; Hancock *et al.*, 2006)的核心思想为:在原时程记录的基础上叠加一系列调整时程,以使得叠加后所得信号的反应谱与目标谱相近。该方法考虑了不同频率成分间的相互作用,使得拟合过程目的性更强,收敛速度更快,可能达到的拟合精度也更高;如图 8 所示,时域拟合所叠加时程与原时程记录相比,其幅值较小、持续时间亦较短,因此对原时程的时域波形影响也较小。时域法避免了上述频域法的不足,是一种更为有效的反应谱拟合方法。然而,时域法的进行过程中由于要进行大量的响应分析,其计算耗时要远远高于频域拟合(相同迭代次数的时域法耗时约为频域法的 100 倍)。此外,采用频域法对原始信号进行调整时,仅对其傅里叶谱的幅值进行了改变(图 9a 和图 9b),可保留原记录的相位角信息(拟合过程中的峰值调整、基线校正等操作会稍微改变相位角信息),而相位角是地震动随机性信息的重要组成部分;相比之下,时域法将会

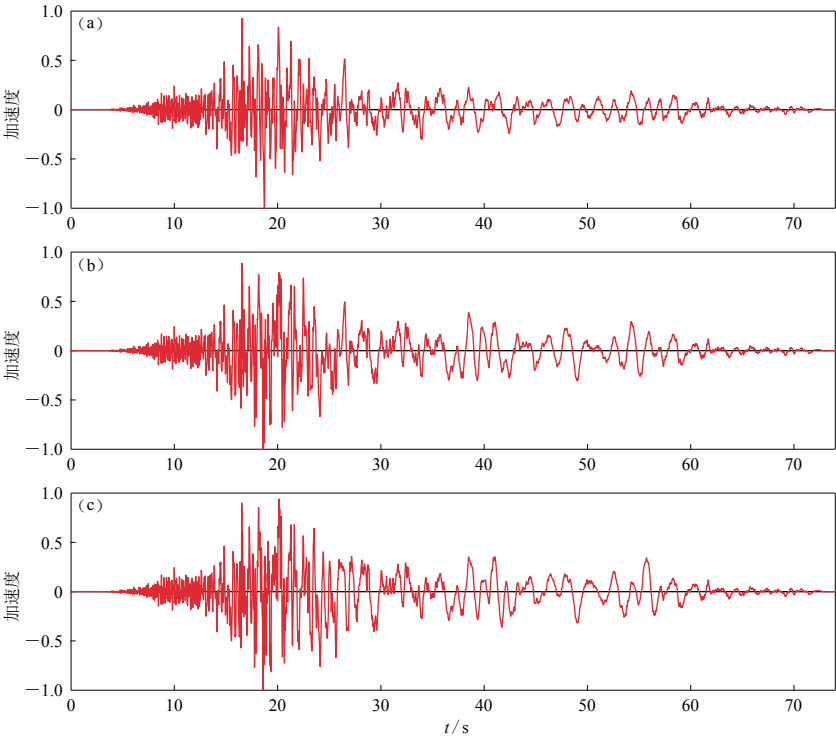


图 8 时域反应谱拟合过程中的时程波形变化

(a) 原始信号; (b) 5 次迭代后波形; (c) 20 次迭代后波形

Fig. 8 Variation of time-history waveform during time-domain response spectral fitting

(a) Original signal; (b) Waveform after five iterations; (c) Waveform after 20 iterations

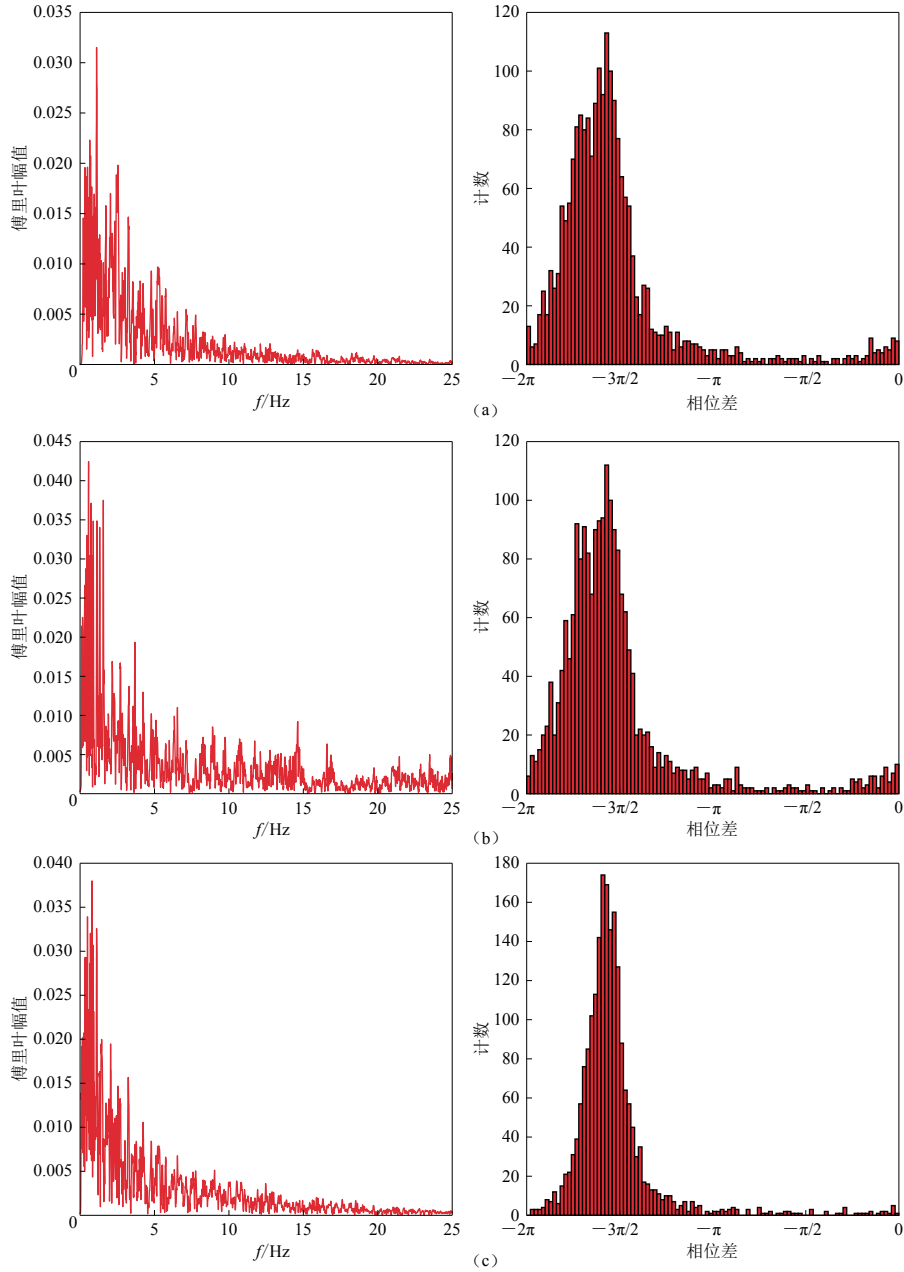


图 9 反应谱拟合前后的傅里叶幅值谱(左)和相位差谱(右)

(a) 原始信号; (b) 频域拟合结果; (c) 时域拟合结果

Fig. 9 Fourier amplitude spectrum (left) and phase difference spectra (right) before and after response spectral fitting

(a) Original signal; (b) Frequency-domain fitting result; (c) Time-domain fitting result

在拟合过程中同时改变原记录傅里叶谱的幅值和相位(图 9a 和图 9c), 这使得最终拟合结果中“人造”成分所占比例更大. 故本文建议反应谱拟合时, 可先使用频域方法进行初步拟合, 然后再使用时域方法进行微调.

本文在美国太平洋地震工程研究中心强震数据库中选择了几组天然地震动信号作为实例,借助 EQSignal 软件处理,分别采用频域法和时域法对其进行反应谱拟合处理,拟合所用目标谱为 GB 50011—2010 (中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010)中规定的抗震设计反应谱,特征周期为 0.9 s, 阻尼比为 0.05, 周期范围为 $2.5\Delta t$ — 10.0 s (Δt 为采样时间间隔), 周期控制点为 90 个, 其中周期小于 0.9 s 的有 40 个(对数均匀分布), 周期大于 0.9 s 的有 50 个(线性均匀分布), 拟合收敛准则为平均相对误差不大于 2% 且最大相对误差不超过 5%. 拟合运算过程的相关信息及拟合结果如表 2 所示, 从中可清楚地看出时域方法在拟合效果上的优势以及在运行时间上的劣势. 本文在拟合分析的过程中还积累了可以提高拟合精度的经验: 单独使用某一拟合方法无法达到拟合精度要求时, 可交替使用时域、频域法进行迭代拟合计算, 在多数情况下均能进一步提高拟合精度; 但周期控制点较多使得拟合迭代计算难以收敛时, 可尝试先减少周期控制点, 当迭代计算收敛后再逐步增加周期控制点.

表 2 地震动信号利用频域法(F)和时域法(T)进行反应谱拟合的实例对比

Table 2 Response spectral fitting examples of seismic waves by using frequency-domain method (F) and time-domain method (T)

| 地震动信号 | 迭代次数 | | 运算耗时/s | | 最大误差 | | | 平均误差 | | | 是否收敛 | |
|-------------------|------|----|--------|-------|--------|-------|-------|--------|------|------|------|---|
| | F | T | F | T | 拟合前 | 拟合后 | | 拟合前 | 拟合后 | | F | T |
| | | | | | | F | T | | F | T | | |
| CHICHI04-CHY039-E | 30 | 23 | 0.52 | 49.4 | 90.6% | 5.9% | 4.4% | 47.2% | 1.8% | 0.7% | 否 | 是 |
| CHICHI04-CHY039-N | 30 | 30 | 0.50 | 64.1 | 122.4% | 8.6% | 7.4% | 49.9% | 2.5% | 1.8% | 否 | 否 |
| LOMAP-A10090 | 30 | 24 | 0.31 | 26.4 | 94.5% | 12.4% | 4.5% | 49.0% | 3.2% | 1.2% | 否 | 是 |
| LOMAP-A10000 | 30 | 15 | 0.29 | 16.5 | 72.0% | 8.4% | 3.9% | 42.8% | 2.6% | 1.7% | 否 | 是 |
| MORGAN-A01310 | 30 | 29 | 0.29 | 30.8 | 98.1% | 11.4% | 4.7% | 68.3% | 2.8% | 1.6% | 否 | 是 |
| MORGAN-A01040 | 30 | 23 | 0.30 | 24.9 | 97.1% | 24.7% | 4.8% | 67.3% | 6.6% | 1.4% | 否 | 是 |
| YOUNTVL-0436c090 | 30 | 23 | 0.46 | 46.7 | 111.7% | 16.3% | 3.9% | 73.2% | 3.7% | 1.5% | 否 | 是 |
| YOUNTVL-0436a360 | 30 | 11 | 0.45 | 22.2 | 97.0% | 15.5% | 4.5% | 69.9% | 3.8% | 1.3% | 否 | 是 |
| CHICHI-ILA004-W | 30 | 19 | 1.09 | 118.1 | 431.7% | 9.4% | 4.2% | 128.4% | 1.5% | 1.6% | 否 | 是 |
| CHICHI-ILA004-N | 30 | 23 | 1.10 | 142.0 | 485.6% | 7.0% | 4.2% | 136.6% | 1.5% | 1.4% | 否 | 是 |
| LOMAP-A02133 | 30 | 30 | 0.29 | 32.3 | 91.6% | 13.6% | 5.3% | 65.4% | 4.6% | 1.3% | 否 | 否 |
| LOMAP-A02043 | 30 | 30 | 0.30 | 33.1 | 105.5% | 7.3% | 12.8% | 63.3% | 2.5% | 3.1% | 否 | 否 |
| LOMAP-MEN360 | 30 | 26 | 0.27 | 26.9 | 91.3% | 15.9% | 4.7% | 58.8% | 4.8% | 1.4% | 否 | 是 |
| LOMAP-MEN270 | 30 | 30 | 0.28 | 31.6 | 82.1% | 5.6% | 8.9% | 46.6% | 1.9% | 2.9% | 否 | 否 |

4 讨论与结论

人造地震动生成过程中有很多细节因素会影响所生成人造地震动的合理性, 本文认为高频响应求解算法、反应谱周期点分布模式和反应谱拟合方法等选用是否得当是其中比较重要的 3 个因素, 因此本文通过对人造地震动生成过程中的这几个细节因素进行了一系列的探讨与研究, 得出了以下几点结论与建议:

- 1) 对激励信号进行线性插值处理可以保证逐步积分法分析高频结构时的稳定性, 但是计算精度的提高效果非常有限;
- 2) 地震波反应谱在相对高频段(周期小于采样间隔的 20 倍, 即 $T < 20\Delta t$) 应采用频域传递函数法进行响应求解, 而在相对低频段 ($T > 20\Delta t$) 宜采用逐步积分法(如纽马克- β 法)进行响应求解;

3) 地震波反应谱周期控制点宜按下述“组合”分布模式设置:短周期(约 $T < 1$ s)段采用对数分布,长周期段采用线性分布,两段周期范围内的点数应大致相等, $2\Delta t - 10.0$ s 周期范围内的反应谱周期控制点不宜少于 120 个;

4) 地震波反应谱拟合的过程中,建议使用频域迭代方法与时域迭代方法相结合的方式以兼顾计算效率与拟合收敛性。

参 考 文 献

- 郭子雄,王妙芳. 2006. 人造地震动合成的研究现状及展望[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 27(1): 7-11.
- Guo Z X, Wang M F. 2006. State of the art and prospect of artificial ground motion[J]. *Journal of Huaqiao University: Natural Science*, 27(1): 7-11 (in Chinese).
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社: 8-12.
- Hu Y X. 2006. *Earthquake Engineering*[M]. Beijing: Seismological Press: 8-12 (in Chinese).
- 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.
- Hu Y X, He X. 1986. Phase angle consideration in generating response spectrum-compatible ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6(2): 37-51 (in Chinese).
- 全伟,李宏男. 2008. 调整已有地震动拟和规范反应谱人造地震动方法比较[J]. 防灾减灾工程学报, 28(1): 91-97.
- Quan W, Li H N. 2008. Comparison of methods of generation of spectrum-compatible artificial earthquake through the modification of available records[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 28(1): 91-97 (in Chinese).
- 徐科军. 2001. 信号处理技术[M]. 武汉:武汉理工大学出版社: 5-127.
- Xu K J. 2001. *Signal Processing Technology*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press: 5-127 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2010. GB 50011—2010 建筑结构抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社: 33-35.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. 2010. GB 50011—2010 *Code for Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Building Industry Press: 33-35 (in Chinese).
- 大崎順彦. 1980. 新・地震動のスペクトル解析入門[M]. 東京都:鹿島出版会.
- Ozaki N. 1980. *Introduction to Spectral Analysis of Seismic Ground Motion*[M]. Tokyo: Kashima Press (in Japanese).
- Al Atik L, Abrahamson N. 2010. An improved method for nonstationary spectral matching[J]. *Earthquake Spectra*, 26(3): 601-617.
- Chopra A K. 2007. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*[M]. 3rd edition. New Jersey: Prentice Hall: 1-812.
- Clough R W, Penzien J, Griffin D S. 1990. *Dynamics of Structures*[M]. New Jersey: Prentice Hall.
- Gao Y, Wu Y, Li D. 2013. An improved method for the generating of spectrum compatible time series using wavelets[J]. *Earthquake Spectra*, 30(4): 1467-1485.
- Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A, Bommer J J, Markatis A, McCoy E, Mendis R. 2006. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets[J]. *J Earthq Eng*, 10(S1): 67-89.
- Housner G W, Martel R R, Alford J L. 1953. Spectrum analysis of strong-motion earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 43(2): 97-119.
- Pan C, Zhang R F. 2016. EQSignal: A useful tool to process and generate earthquake signals[EB/OL]. [2016-08-01]. www.eqsignal.com.
- Pan C, Zhang R F, Luo H, Shen H. 2017. Target-based algorithm for baseline correction of inconsistent vibration signals[J]. *Journal of Vibration and Control*, 24(12): 2562-2575.
- Rizzo P C, Shaw D E, Jarecki S J. 1975. Development of real/synthetic time histories to match smooth design spectra[J]. *Nucl Eng Des*, 32(1): 148-155.
- Tsai N C. 1972. Spectrum compatible motions for design purposes[J]. *J Eng Mech Divis*, 98(2): 345-356.