

统一光滑反应谱及其在人工地震动合成中的应用

何浩祥, 韩恩圳, 王小兵

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 目前的抗震设计加速度反应谱一般均采用分段式函数的形式, 其精度及统计特征在不同周期段有一定差异, 且经规准化及经验化后的分段式设计谱不能足够精确地反映真实反应谱的整体变化特征, 以其为目标谱合成的人工地震动的低阶谱在频谱特性方面也与真实谱的统计特性有差异。针对目前分段式设计谱的不足, 提出采用唯一函数形式表示的统一光滑反应谱, 数据分析结果表明该谱具有形式简单、各周期段精度均较高等优点, 且在函数形式、多阶谱、弹塑性谱精度及多维性等方面具备统一性。在此基础上提出基于光滑谱并考虑多阶谱的人工地震动合成方法, 由此得到的地震动信号能够更综合准确地满足加速度谱、速度谱和位移谱的频谱特性需求, 精度较高。

关键词: 反应谱; 地震动; 抗震设计谱; 光滑; 人工地震动合成

中图分类号: TU 315. 95; TU 311. 3

UNIFIED SMOOTH RESPONSE SPECTRUM AND APPLICATION ON GROUND MOTION SIMULATION

HE Haoxiang, HAN Enzhen, WANG Xiaobing

(Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: The current acceleration seismic design spectra generally adopt the forms of piecewise function, its precision and the statistics features in different period stage have obvious differences. The piecewise design spectrum with standardization and modification with experience does not have the enough accuracy to reflect the overall tendency and rules of real response spectrum. Hence, if the piecewise design spectrum is assumed as the target spectrum to simulate ground motions, the spectrum characteristics of the low-order spectrum based on the artificial signals mismatch the real statistics characteristics. In view of the current deficiencies in piecewise design spectrum, the unified smooth spectrum which adopts unique function is presented. The analysis results indicate that the smooth spectrum has the advantages such as simple form, high accuracy for all the period stages, and the unity of the smooth spectrum is represented as the function form, the spectrum characteristics on multiple orders, elasto plasticity and multiple dimensions. A new ground motion simulation method is proposed based on unified smooth response spectrum and taking into account the low-order spectrum, and the achieved earthquake signals can fulfill the requirement of the spectrum characteristic about acceleration spectrum, velocity spectrum and displacement spectrum with high integrity and precision.

Key words: response spectrum; ground motion; seismic design spectra; smooth; artificial ground motion simulation

0 引言

结构抗震设计理论的发展经历了静力理论、反应谱理论、动力时程分析和基于性能的设计理论四个阶段。对于一般性结构, 目前大多数国家仍将抗震设计反应谱作为估计结构在使用年限内可能遭受的地震作用水平的主要依据和手段。

基金项目: 国家自然科学基金(51108009, 50878010);高等学校博士学科点专项科研基金(20111103120022)

作者简介: 何浩祥(1978-), 男, 副研究员, 主要研究方向:从事结构抗震理论和健康监测研究. E-mail: hhx7856@bjut.edu.cn

45 地震反应谱是指单质点体系在给定阻尼及地震动作用下的最大反应随其自振周期变化的曲线。抗震设计反应谱是以地震反应谱特性为依据,在获取大量地震动的反应谱基础之上加以统计分析和平滑处理并结合经验判定确定的曲线。由于地震动是典型的时频非平稳随机振动,影响地震动反应谱的因素丰富且复杂,获得适用性强的抗震加速度设计谱十分困难。目前各国或地区基本上均采用分段函数的形式并通过反应谱平台值(我国规范采用地震影响

50 系数最大值)和特征周期 2 个特征参数来表征反应谱的基本形状,但这些抗震设计反应谱在形状及周期控制点等方面不仅存在明显差异,而且普遍存在大量的不确定性。各国或地区抗震设计反应谱的不同导致了其抗震设计水平及结构的抗震性能也存在较大差异性,消除这种差异有利于结构抗震设计水平的提高。

此外,抗震设计规范中的反应谱一般都是指某种标准化的绝对加速度谱,并没有直接给出相对速度谱和相对位移谱。实际上,对于复杂地震动或长周期结构,地震动的速度和位移时程对结构的动力反应也具有显著的作用,如果直接利用与实际谱特征有较大差异的加速度设计反应谱并简单地根据拟谱关系确定相对速度谱(等效能量谱)和相对位移谱等低阶谱,将进一步放大这种误差。因此,不能完全保证仅通过绝对加速度谱生成的人工地震波在频谱特性等方面与实际地震动的统计特性完全相似,在某些情况这些误差可能会严重影响结构抗震

60 减震的分析结果和设计水平。

综上所述,针对抗震设计反应谱目前的研究不足,提出新型的反应谱函数形式从而提高其适用性,并确保其低阶谱的频谱特征能够与相应的真实谱值接近,进而能够合成更精确的人工地震波是十分必要的。本文提出了统一光滑反应谱的概念,并对其精度、简便性和适用性进行了对比及验证,最后提出了基于光滑反应谱并考虑低阶谱的人工地震动合成方法。

65 1 设计反应谱谱形的讨论

1934 年 Biot 提出了地震动反应谱的基本理论,其反应谱形式为具有明显尖端点的连续曲线。20 世纪 40 年代 Housner^[1]对多条地震动反应谱进行规范化再取平均获得了用连续型曲线形式表示的抗震设计谱,此后反应谱理论逐渐得到推广和应用。20 世纪 60 年代末, Newmark 等^[2]认为反应谱的高频、中频和低频段分别与地震动的加速度、速度和位移幅值相关,设计谱应该用规准谱分别乘以相应的地震动幅值用直线段来表示,进而提出了三联坐标系下直线分段式设计谱模型。Newmark 提出的设计谱带有明显的经验化特征,首先设计谱的形状与几个固定周期有关,其次各区段谱值与地震动幅值均成固定比例。尽管分段式设计谱模型的精细度略差,但其仍以众多优点被研究者普遍接受并在绝大部分国家或地区的抗震设计规范中加以沿用和推广,而有关连续光滑型反应谱的研究日渐式微。

70

75 目前,绝大部分国家或地区抗震设计规范中的设计谱采用的是分段表达式^[3-6]。设计谱的加速度控制段一般由上升斜直线段和平台段组成;速度控制段主要由指数衰减曲线表达,也有用斜直线下降段表达的情况;位移控制段的表达主要有指数衰减曲线、平台段或斜直线下降段几种形式。设计谱由斜直线上升段、平台段和指数衰减曲线段组成,可表示为

$$S_a(T) = \begin{cases} \alpha_m + \alpha_m(\beta_m - 1)(T/T_0) & 0 < T \leq T_0 \\ \alpha_m \beta_m & T_0 < T \leq T_g \\ \alpha_m \beta_m (T_g/T)^\gamma & T_g < T \leq T_l \\ \alpha_m \beta_m (T_g/T)^\gamma (T_l/T)^\nu & T_l < T \end{cases} \quad (1)$$

80 式中, α_m 为地震动加速度峰值、 β_m 为规准设计谱平台幅值或反应最大放大倍数、 T_0 、

T_g 、 T_l 分别表示第一拐点周期、第二拐点周期(特征周期)和第三拐点周期, γ 为曲线下降一段的衰减指数, ν 为曲线 j 下降二段的调整指数。各国抗震设计规范中相应参数取值各有不同^[7-8], 美国规范 NEHRP2003 和欧洲规范 Eurocode8 均采用了上式形式, 且 ν 为 1。日本抗震设计规范中谱曲线的下降一段和二段是光滑连续的, 即 ν 为 0。中国抗震设计规范反应谱的前三段符合上式, 但下降二段采用了直线形式。

分段式设计谱的各段函数虽然相对准确地体现了结构在不同频域内的频谱特性, 但是各段函数的连接处是连续但不光滑的, 这些局限导致分段式设计谱存在以下严重不足: (1)不同频段的分段式设计谱具有不同的统计特征及离散性; (2)分段式设计谱在不同周期拐点处的谱值与统计结果偏差较大; (3)分段式设计谱的形状不能与反应谱的整体变化特征完全吻合; (4)高阶分段式设计谱的谱形略有偏差就可能导致低阶谱形严重偏离实际特征。因此在对传统的分段式设计谱的特性继续深入研究的基础上, 有必要追根溯源, 通过详细比较和分析不同国家或地区规范设计反应谱不足和局限, 对抗震设计谱的最优谱形及基本模式进行探讨和改进^[9]。

从自然界发生的现象及其普遍规律来看, 各种物理量的变化往往是连续的, 由此衍化的参数或性能表征在数学形式上也应该是光滑函数而不是简单生硬的多拐点函数。众多研究成果表明, 对大量地震动数据进行计算得到的加速度反应谱的均值曲线是典型的光滑曲线, 并没有明显的平台和拐点。因此, 在充分考虑大量地震动的统计特征及变化规律的基础上, 提出具有普适性的统一光滑设计谱对地震动及抗震设计反应谱研究均有重大的理论意义及应用价值。

事实上, 对光滑反应谱的研究虽然少见, 但仍然长期存在。胡聿贤^[10]曾对 32 个国家或地区的 40 个加速度设计谱进行了统计, 结果表明只有智利于 1972 年颁布的抗震设计规范曾采用光滑反应谱, 其函数形式如下

$$S_a = 0.2\alpha_m T T_g / (T_g^2 + T^2) \quad (2)$$

由上式确定的反应谱在中长周期段与实际地震动的均值谱差异较大, 适用性差。1996 年智利在抗震规范 NCh433 中规定的抗震设计反应谱的计算公式如下^[11]

$$S_a = \frac{I\alpha_m}{R^*} \frac{1 + 4.5(T_n/T_g)^p}{1 + (T_n/T_g)^3} \quad (3)$$

式中, I 为与结构相关的系数, R^* 为与结构周期相关的衰减因子, T_n 为结构第 n 阶振型对应的周期, 对于 I 类和 II 类场地, p 分别取 2.0 和 1.5, 对于 III 类和 IV 类场地, p 均取 1.0。上述的反应谱谱形虽然是光滑的, 但其形式复杂, 应用不便, 更重要的是由其变换得到的低阶谱误差仍然较大。上述缺陷限制了对该谱的肯定及推广。

2001 年美国 AEC 颁布了新的核电指导标准 NUREG/CR 6728^[12]。NUREG 设计谱的确定以大量强震记录为基础, 参考了岩石场地概率地震危险性分析结果, 并采用了曲线函数表达如下

$$\ln[S_a(f)/\alpha_m] = \frac{c_1}{\cosh(c_2 f^{c_3})} + c_4 \left[\frac{\exp(c_5 f)}{f^{c_6}} \right] \quad (4)$$

式中, f 为结构频率, α_m 为地震动加速度峰值, $c_1 \sim c_5$ 为与震级和震中距有关的参数。NUREG 设计谱的重要特点是其谱形考虑了地震危险性分析的结果, 且与地震动平均反应谱的变化趋势相近。但该谱在表达形式上与传统的抗震设计谱差异较大, 参数较多, 且采用了

对数坐标, 转换到自然坐标后数值浮动较大。

综上所述, 目前仍然没有普适性的统一光滑设计谱, 寻找与传统规范设计谱在参数及表
达形式上相类似的光滑谱是十分必要的, 本文将对此进行研究。

2 统一光滑地震反应谱

对于坐落在刚性地基上的单质点弹性体系, 应用数值积分方法可求得地震激励下的具有
不同频率或周期下的结构响应最大值, 从而可先后获得相对位移反应谱 S_d 、相对速度反应
谱 S_v 、绝对加速度反应谱 S_a 。当地震动过程足够长时, 一般认为可以忽略响应解析表达式
中关于阻尼系数的高次项并将正弦函数与余弦函数等价, 得到位移反应谱与拟速度反应谱
 S_{pv} 、拟加速度反应谱 S_{pa} 的关系^[13-14]

$$S_a \approx S_{pa} \approx \omega S_{pv} \approx \omega S_v \approx \omega^2 S_d \quad (5)$$

由于将正弦函数与余弦函数等价的假定比较粗略, 很多地震作用下的拟速度反应谱在低
频段与相对速度反应谱的差别比较明显。但由相对位移反应谱 S_d 反推获得的拟加速度反应
谱 S_{pa} 与绝对加速度反应谱 S_a 的偏差可以忽略不计。鉴于 S_a 属于高阶谱, 其变化规律相对
复杂, 可以考虑从研究 S_d 的频谱特性入手获取高阶光滑谱。在地震反应谱中, S_d 的规律最
为明显和简单, 众多研究成果表明: 考虑了场地条件和结构阻尼比影响后, 一般认为相对位
移反应谱可以近似地用线性模型来表示

$$S_d = a_d T + b_d \quad (6)$$

值得指出的是, 上式是具有完全项一次多项式, 而多项式是最简单的光滑曲线, 且具有
无限可微的特性。考虑到式(5)中 S_d 与 S_v 的关系以及 $\omega=2\pi/T$, 并从函数表达式的完备性上考
虑, 可构建拟速度反应谱为如下的完全项多项式

$$S_{pv} = \frac{a_v T + b_v}{c_v T + d_v} \quad (7)$$

纵观式(6)和式(7), 虽然式(6)不能展现相对位移反应谱的全部特性, 但通过设定式(7)使
其成为具有完全项的多项式, 从而使得通过式(7)和式(5)换算回相对位移反应谱时, 得到的
表达式比式(6)更丰富细致, 弥补了原有缺陷。依此方法, 可获得拟加速度反应谱和绝对加
速度反应谱的完全项表达式为

$$S_a = S_{pa} = \frac{aT + b}{cT^2 + dT + e} \quad (8)$$

上式为光滑曲线, 且形式简单, 通过合理地设置参数可以较准确地反映加速度谱的变化规律。

为了验证本文提出的光滑加速度反应谱的优点, 参考美国抗震设计规范中对场地类型的
划分要求, 本文利用太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库, 针对每类场地分别选取了世
界范围内的 70 条典型地震记录, 采用 Runge-Kutta 法进行数值计算并进行统计分析, 获得
了各类场地的弹性加速度反应谱, 其阻尼比取为 5%。根据不同规范中的加速度反应谱函数,
采用 Levenberg-Marquardt 优化算法对不同场地的均值反应谱进行非线性拟合。其中 C 类场
地的拟合结果如图 1 和图 2 所示。

从图中可看出, 各国或地区规范采用的分段式设计谱由于受规定的特征周期及分段谱函
数的所限, 在特征周期之内与真实谱的偏差较大; 在特征周期之外, 欧洲规范谱具有较高的
精度, 但其他规范谱仍有一定偏差。光滑谱不存在明显的特征周期, 但在各个周期段上均有
良好的逼近性, 最接近于真实谱数据。

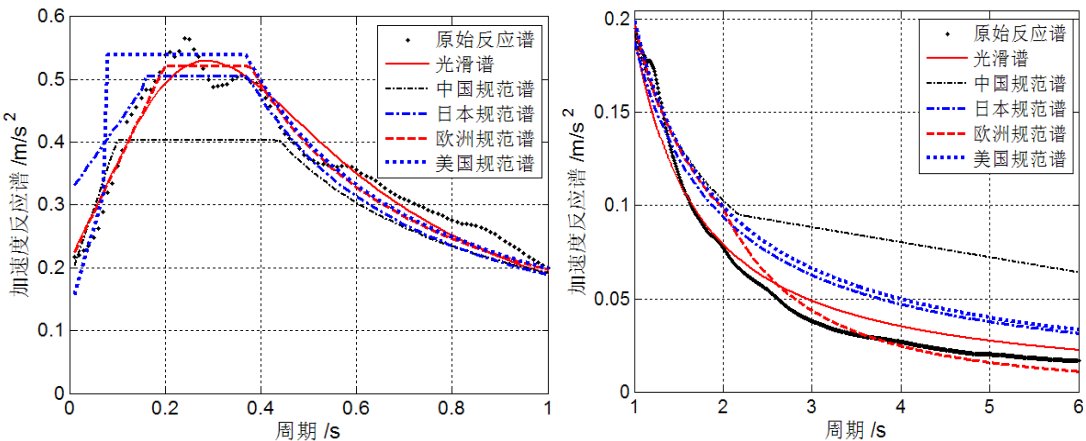


图 1 不同加速度反应谱拟合结果对比(0s-1s) 图 2 不同加速度反应谱拟合结果对比(1s-6s)

Fig.1 Comparison of different fitted spectra (0s-1s) Fig.2 Comparison of different fitted spectra (1s-6s)

进一步验证了光滑谱的精确性。不同场地下各谱的加速度反应谱拟合残差绝对值和见表 1。C 类场地下各反应谱的残差绝对值（实际谱值与拟合谱值之差的绝对值）如图 3 所示。

表 1 不同加速度反应谱拟合残差和
Table 1 Sum of the fitted residual error of different acceleration response spectra

拟合残差 (m/s ²) 场地土类别	光滑谱	中国规范谱	日本规范谱	欧洲规范谱	美国规范谱
A	0.0142	0.0320	0.0130	0.0285	0.0135
B	0.0058	0.0540	0.0201	0.0154	0.0213
C	0.0104	0.0442	0.0212	0.0096	0.0233
D	0.0091	0.0421	0.0202	0.0098	0.0235
E	0.0135	0.0444	0.0256	0.0095	0.0243
平均值	0.0106	0.04334	0.0200	0.0146	0.0212

结果表明，对于所有场地类别，光滑谱均表现出了优越的拟合性能，适合作为设计反应谱的参考形式。此外可以看出，欧洲规范谱也具有较好的精度，日本及美国规范虽然有一定偏差，但偏于保守，而中国规范谱在短周期和长周期段的残差均较大，需要考虑进行适当调整或修正。

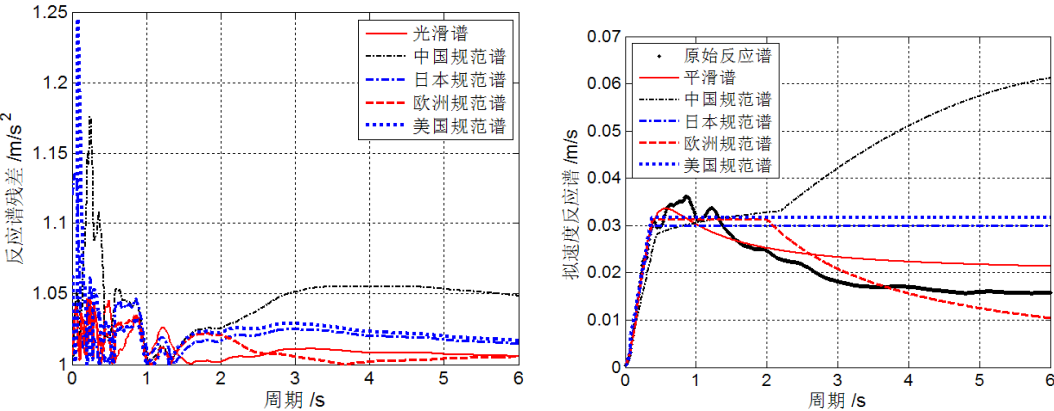


图 3 C 类场地下各反应谱的残差绝对值 图 4 不同加速度反应谱对应的拟速度谱

Fig.3 Fitted residual error of different response spectra Fig.4 Comparison of different velocity response spectra

根据公式(5)将各加速度谱转换为拟速度谱和拟位移谱分别如图 4 和图 5 所示。与规范

反应谱换算得到的结果相比可认为由加速度光滑谱获得的低阶光滑谱仍然具有较高的精度。

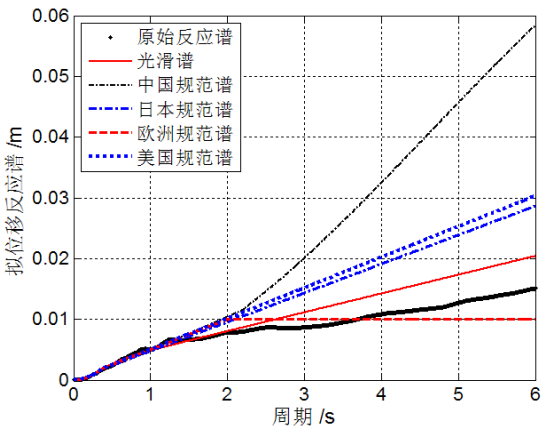


图 5 不同加速度反应谱对应的拟位移谱
Fig.5 Comparison of different displacement spectra

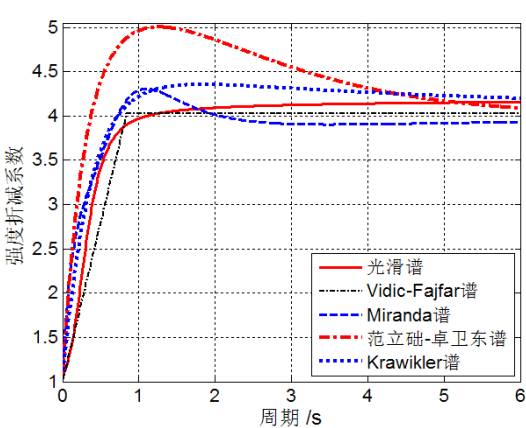


图 6 C 类场地地下各强度折减系数曲线对比
Fig.6 Different strength reduction factor curves in site C

式(8)中,不同参数均能影响加速度光滑反应谱的幅值。此外,调整 b 还可以改变反应谱的初始值,调整 c 、 d 和 e 可以影响峰值部分谱形的宽窄。不同场地条件下归一化后的加速度光滑反应谱的拟合参数见表 2,可见除 a 之外的参数的变化具有明显的规律性。

表 2 不同场地条件下归一化加速度光滑反应谱拟合参数
Table 2 Comparison about the fitted parameter of smooth response spectra with different site conditions

拟合参数 场地土类别	拟合参数				
	a	b	c	d	e
A	32.62	4.29	96.54	-14.53	10.14
B	19.19	4.44	95.35	-31.50	11.35
C	20.57	4.81	94.76	-31.88	12.79
D	23.64	8.15	93.13	-32.66	17.58
E	21.25	8.39	87.00	-45.48	23.37

综合考虑各参数的作用及目前分段式设计谱的参数选取原则,建议加速度光滑设计谱可采用如下的形式

$$S_a = \frac{\alpha_m(a_c T + b_c)}{\alpha_m c_c T^2 + d_c T + e_c T_g} \tag{9}$$

式中, $a_c \sim e_c$ 为调整后的参数。
弹性加速度光滑谱可以通过适当调整转化为弹塑性加速度光滑谱。已有的研究成果表明,根据等位移准则,长周期段结构的强度折减系数 R 与延性系数 μ 相等^[15]。本文根据上述规律,同时考虑光滑谱的系数调整特性,构建弹塑性加速度光滑谱的函数表达如下

$$S_{at} = \frac{S_a}{R} \approx \frac{S_a}{\mu} \approx c_m \frac{aT/\sqrt{\mu} + b}{c\sqrt{\mu}T^2 + dT + e} \tag{10}$$

式中, $a \sim b$ 等参数与式(8)中的取值相同, c_m 为修正系数,取值范围为 1.0~1.1。
根据式(8)和式(10)的比值可获得光滑的强度折减系数 R ,将其与国内外建立的典型等延性强度折减系数谱拟合公式进行对比^[16-19]。在 C 类场地地下各强度折减系数曲线如图 6 所示,不同延性下的光滑弹塑性谱如图 7 所示。结果表明光滑强度折减系数曲线与其他模型的变化规律一致,且取值比较均衡。由式(10)获得的光滑弹塑性谱在中长期周期段内具有足够精度。

综上所述,光滑地震反应谱具有机理明确、形式简单、拟合精度高等优点,可以在今后的反应谱研究中加以进一步验证、应用并推广。光滑地震反应谱的统一性主要表现为以下四个方面:(1)函数统一性,将传统的加速度分段式设计反应谱统一表示为一个光滑连续的多项式函数,避免出现拐点及不必要误差,简明实用;(2)多阶谱精度统一性,在拟位移谱和拟速度谱等低阶量上也具有良好的拟合精度,具有较高的协调性;(3)弹塑性谱统一性,能够通过简单的参数设定转换为弹塑性反应谱,同时能确保在中长期周期段内具有足够的精度;(4)多维谱统一性,一般认为竖向加速度反应谱的谱形与水平加速度反应谱的近似,因此光滑谱也同样适合竖向反应谱。此外,根据文^[20]的结论,转动反应谱可以根据视波速和平动反应谱获得,因此光滑转动反应谱可由光滑平动反应谱经过简单换算直接获得,最终多维地震动反应谱均可表示为光滑函数形式。

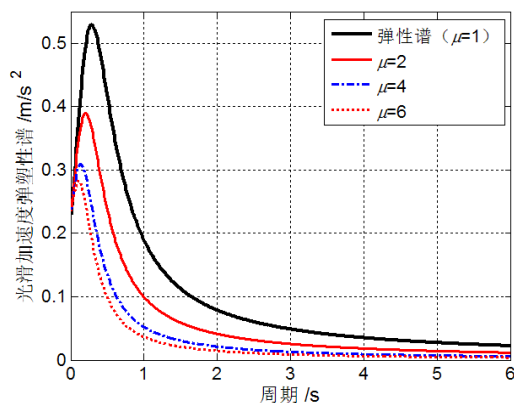


图7 不同延性下的光滑弹塑性谱

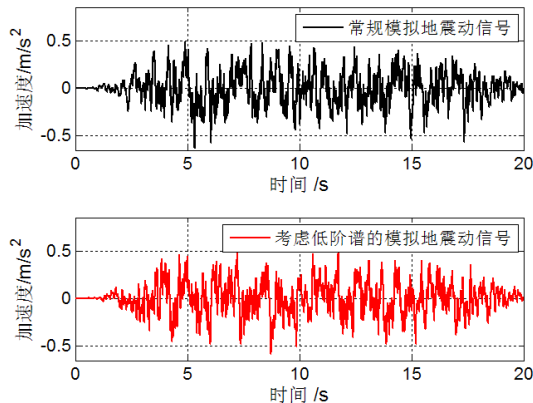


图8 人工合成的加速度信号

3 基于光滑谱并考虑多阶谱的地震动合成

从大量已有研究成果及前文分析结果可以看出:相对于其他国家的设计加速度反应谱,中国抗震设计规范采用的加速度反应谱的谱值在短周期和中长周期较小,而在长周期部分明显增大甚至反超,因此关于中国抗震设计谱在长周期段的精度及适用性一直存在争鸣^[21]。

虽然这在客观上促进了关于设计谱谱形及阻尼比折减系数等问题的研究,但不断完善抗震设计谱仍是十分必要和迫切的。设计谱的演变是一个随着震害经验和强震记录的积累以及对地震动反应谱特性的不断认识而逐渐深入的过程,我国建筑抗震规范大致经过了五次演变,主要体现在对反应谱的特征周期以及反应谱谱值的不断修正上。在多次演变之后,设计反应谱过于强调经验化,而在一定程度上忽略了精确化和平均化,其主要问题表现为:在早期的设计谱基础上多次修改后,设计谱的谱形与实际均值谱或概率谱仍然存在差异,在某些情况下,这种差异甚至被放大了;为了保证长周期结构的抗震设计具备保守性,人为地增大了长周期段的谱值,而这种方法既不能完全保证对大型复杂结构进行振型组合后得到结构响应的合理性,又导致设计谱在低频段的谱特性失真且各频段之间不协调,生成的人工地震动不能充分反映真实地震动的频谱统计特性,最终将影响时程分析结果和抗震设计方案的科学制定。因此,除了针对目前设计谱的不足进行改进之外,也应探讨更有效的人工地震动合成方法。

目前人工地震动合成最常用的方法为基于功率谱的合成法,该法按照相关抗震规范并根据地震烈度、场地类别及持时等设计参数确定加速度设计反应谱及功率谱,再由功率谱得到的 Fourier 幅值谱附加随机相位作 Fourier 逆变换,最后乘以确定性的强度包线函数得到近似人工地震动。该法具有一定的精度和效率,基本满足工程需求,但也存在如下的不足:(1)

235 仅由加速度谱生成地震动并不能完全保证该加速度时程换算成速度和位移时程后仍符合相关低阶谱的频谱形式及精度需求；(2)由于目前各国抗震规范基本采用分段式设计谱，由此生成的功率谱也是分段式函数形式，存在拐点，不利于拟合过程的迭代和收敛，影响计算效率和精度。

240 有鉴于此，本文提出了基于统一光滑谱并考虑多阶谱的人工地震动合成方法，其基本思想是利用统一光滑谱的特点，采用交替迭代的方法对人工地震动的加速度谱和速度谱进行同时修正，最终获得同时满足以上两种目标谱的地震动信号。该方法的主要流程如下：

(1) 通过目标加速度反应谱 $S_a(\omega)$ 与加速度功率谱的近似关系式求出功率谱

$$G_a(\omega) \approx -\frac{\xi}{\pi\omega} [S_a(\omega)]^2 / \ln\left(\frac{-\pi}{\omega T_d} \ln p\right) \quad (11)$$

245 式中， ξ 为结构阻尼比， ω 为结构圆频率， T_d 为地震动持时， p 为计算反应谱的平均幅值不超过目标反应谱幅值的概率系数，一般大于 0.85。将地震动视为平稳过程，结合目标速度反应谱和式(8)计算速度功率谱

$$G_v(\omega) = \omega^2 G_a(\omega) \quad (12)$$

由加速度功率谱计算加速度 Fourier 幅值谱

$$A_a(\omega) = [4G_a(\omega)\Delta\omega]^{1/2} \quad (13)$$

250 其中， $\Delta\omega$ 为频率间隔。类似可得到速度 Fourier 幅值谱

$$A_v(\omega) = [4G_v(\omega)\Delta\omega]^{1/2} \quad (14)$$

(3) 计算目标加速度反应谱的脉冲响应函数向量，通过 Fourier 变换求加速度反应谱传递函数向量；

255 (4) 将 Fourier 幅值谱和随机相位谱 $\Phi(\omega)$ 转换成 Fourier 变换的实部和虚部，并进行 Fourier 逆变换，可得到近似的人工地震动加速度时程

$$a(t) = FFT^{-1} \{A_a(\omega) \exp[i\Phi(\omega)]\} \quad (15)$$

(5) 将上式乘以强度包络函数 $g(t)$ 得到幅值非平稳地震动时程

$$a_g(t) = a(t)g(t) \quad (16)$$

260 (6) 对非平稳地震动时程进行 Fourier 变换并将其与反应谱传递函数向量的乘积的逆变换做卷积运算，计算 $a_g(t)$ 的反应谱 $S_{ak}(\omega)$ ($k=1,2,3,\dots$)。

(7) 用目标加速度反应谱与计算反应谱的比值修改 Fourier 幅值谱

$$A_{ak+1}(\omega) = A_{ak}(\omega) \frac{S_a(\omega)}{S_{ak}(\omega)} \quad (17)$$

(8) 将 $A_{ak+1}(\omega)$ 代入式(15)，对新的人工地震动加速度时程进行积分 Fourier 变换，对其 Fourier 分量进行积分获得速度分量，并最终获得其速度时程 $v(t)$ 。

265 (9) 计算目标加速度反应谱的脉冲响应函数向量，通过 Fourier 变换求速度反应谱传递函数向量。

(10) 对速度时程 $v(t)$ 进行 Fourier 变换并将其与反应谱传递函数向量的乘积的逆变换做卷积运算计算 $v_g(t)$ 的反应谱 $S_{vk}(\omega)$ ($k=1,2,3,\dots$)。

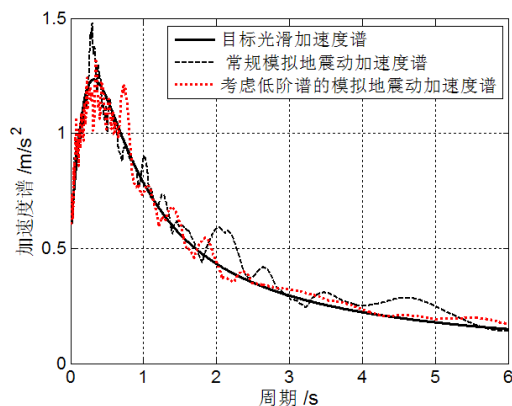
(11) 用目标速度反应谱与计算反应谱的比值修改 Fourier 幅值谱

270

$$A_{vk+1}(\omega) = A_{vk}(\omega) \frac{S_v(\omega)}{S_{vk}(\omega)} \quad (18)$$

(12) 对新的人工地震动速度时程进行微分, 最终获得新的加速度时程, 代入式(15), 并重复步骤(4)~(11)的运算, 循环迭代, 直到加速度及速度的目标反应谱与计算反应谱各频率成分幅值比均接近 1, 并满足允许误差要求为止。

275 为了验证上述方法的有效性, 本文假定某地震动位于 II 类场地土, 抗震设防烈度为 8 度, 多遇地震, 设计地震分组为第 2 组, 阻尼比为 0.05, 目标反应谱为相应的光滑谱。人工合成地震动的持时为 20s, 式(11)中 p 取为 0.85, 采样频率为 400Hz, 迭代次数为 70 次, 包络线的上升段和下降段线形均为抛物线。按照上述方法及常规功率谱法合成的加速度信号如图 8 所示, 相应的加速度、速度和位移反应谱曲线见图 9-图 11。



280 图 9 人工合成地震动的加速度反应谱对比
Fig.9 Comparison of simulated acceleration spectra

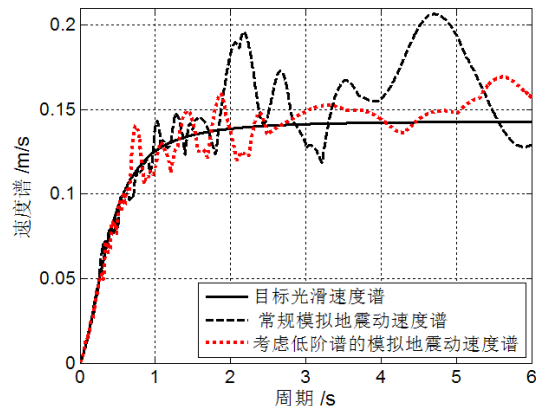
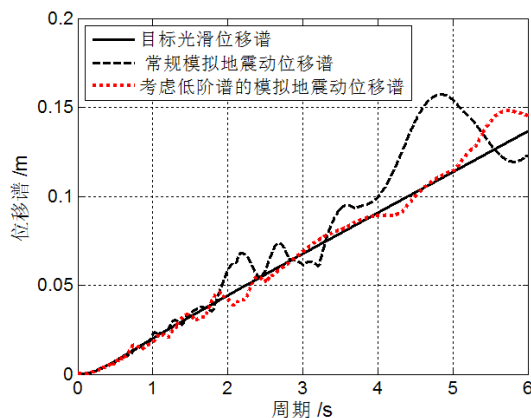


图 10 人工合成地震动的速度反应谱对比
Fig.10 Comparison of simulated velocity spectra

图中结果表明, 基于统一光滑谱并考虑多阶谱的人工地震动反应谱与目标谱十分吻合, 其精度远大于用常规方法获得的地震动反应谱。而常规地震动合成方法由于未兼顾多阶谱的需求, 其反应谱在长周期段与目标谱偏离较大, 这种现象在速度谱和位移谱中表现更为明显。
285 如果将中国抗震设计规范建议的加速度反应谱作为目标谱进行人工地震动合成, 其速度谱如图 12 所示。从中可以看出, 由于规范设计谱本身存在两个明显拐点, 且其长周期段需求相对发散, 导致即使考虑多阶谱的地震动合成结果也差强人意, 而常规方法获得的地震动信号不能完全满足速度谱乃至位移谱的频谱需求。可见, 目标谱的连续性和精确性直接影响合成地震动频谱特征的真实性和准确性, 今后有必要对中国规范设计谱的谱形进行修正。



290 图 11 人工合成地震动的位移反应谱对比
Fig.11 Comparison of simulated displacement spectra

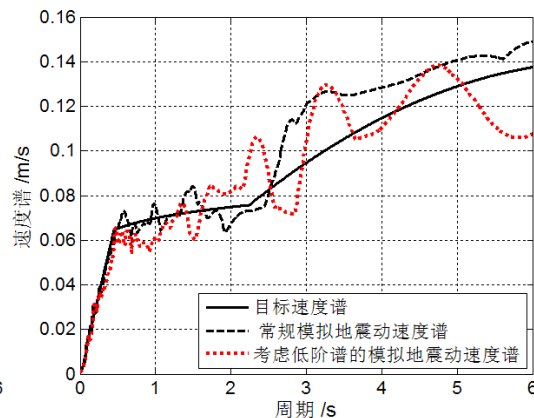


图 12 由规范反应谱合成的速度反应谱
Fig.12 Simulated velocity spectra based on design code

4 结束语

抗震设计谱是通过原始地震反应谱进行平均化、规准化、平滑化和经验化之后得到的,过程中产生误差在所难免,精确性和适用性强的加速度设计谱应该能够兼顾各周期段的谱值变化规律和精度,同时简便实用,这样不仅能够确保加速度谱与平均反应谱吻合,还能保证其低阶谱不失真。目前绝大部分国家或地区均采用分段式设计谱的形式,而分段式设计谱由于在规准化和平滑化过程中存在不足,导致其精度尚需进一步完善。同时,过度经验化的设计谱可能放大局部周期段的谱值而导致整体的精度和协调性变差。以上不足均可能导致由设计谱合成的人工地震动的频谱特性与真实统计特性不符,对抗震计算及设计造成不利影响。

本文基于反应谱的基本原理及各阶反应谱的特性提出了统一光滑反应谱的概念,其谱函数为多项式商,实现了用唯一函数表示整个谱形的功能,且其精度较高。统一光滑反应谱的统一性具体体现在函数统一性、多阶谱统一性、弹塑性谱统一性及多维谱统一性等四个方面。

本文提出的基于光滑谱并考虑多阶谱的人工地震动合成方法能够更准确地符合加速度谱、速度谱和位移谱的频谱特性需求,精度较高。

统一光滑反应谱尚需更深入的研究。地震动是复杂的近地表多维波动,统一光滑反应谱在 6s 之外的长周期是否仍能保持足够的精度,能否充分考虑近场的脉冲效应以及远场的衰减现象都需要进行专项研究。统一光滑反应谱在实际结构抗震设计中的应用效果也应将进一步开展研究。

[参考文献] (References)

- [1] Housner G W. Calculating the Response of an Oscillator to Arbitrary Ground Motion[R]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1941, 31(5): 143-149.
- [2] Newmark N M, Hall W J. Procedures and criteria for earthquake resistant design on building research series No.46[R]. Washington: U. S. Dept of Commerce National Bureau of Standards, 1973:209-236.
- [3] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范(GB5001-2010) [M]. 北京:中国建筑工业出版社.2010
- [4] 日本建筑中心. 建筑物的构造规定-建筑基准法施行令第 3 章的解说与运用[M]. 日本建设省建筑研究所, 1997.
- [5] BSSC.2003 Edition NEHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings[S].FEMA440, 2003.
- [6] CEN/TC250/SC8/N33s.Pren199-1 Eurocode B: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings [S]. 2003.
- [7] 余湛, 石树中, 沈建文等. 从中国、美国、欧洲抗震设计规范谱的比较探讨我国的抗震设计反应谱[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(2): 136-144.
- [8] Yu Zhan, Shi Shuzhongz, Shen Jianwen. Discussing the Seismic Response Spectrum of China from the Comparison of Seismic Codes of China, American and Europe [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(2): 136-144.
- [9] 王段. 结构抗震反应谱的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [10] Wang Duan. Study on response spectrum based on seismic design of structure [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010.
- [11] 徐龙军, 谢礼立, 胡进军. 抗震设计谱的发展及相关问题综述[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 46-57.
- [12] XU Longjun, XIE Lili, HU Jinjun. The review of development and certain problems in seismic design spectra[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(2): 46-57.
- [13] 胡聿贤. 地震工程学(第二版)[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [14] HU Yu-xian. Earthquake engineering (Second Edition) [M]. Beijing: Earthquake Press, 2006.
- [15] Earthquake Resistant Design of Buildings (NCh433) [S]. Standardization Department of the Instituto Nacional de Normalizacion, 1996.
- [16] US-NUREG/CR 6728. Regulatory guidance on design ground motions [S]. Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 2001.
- [17] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures. New York: McGraw-Hill Inc, 1993.
- [18] CHOPRA A K, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, New Jersey: Prentice-Hall, 1995.
- [19] VIDIC T, FAJFAR P, FISHINGER M. Consistent inelastic design spectra: strength and displacement [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(5): 507-521.

- 345 [16] Krawinkler H, Rahnama M. Effects of soil on design spectra [C]. Proceeding of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid, Spain, 1992: 5841-5846.
- [17] Miranda E, Bertero V. Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design [J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(2): 357-379.
- [18] 卓卫东, 范立础. 结构抗震设计中的强度折减系数研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 84-88.
- 350 ZUO Weidong, FAN Lichu. Studies on strength reduction factors in seismic design of structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 84-88.
- [19] CUESTA I, ASCHHEIM A, FAJFAR P. Simplified R-factor relationships for strong ground motions [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(1): 25-45.
- [20] 王君杰, 江近仁. 地震动旋转分量的反应谱估计[J]. 地震工程与工程振动, 1993, 13(11): 7-16.
- 355 WANG Junjie, JIANG Jinren. Estimation of response spectrum for rotational ground motions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1993, 13(11): 7-16.
- [21] 曹加良, 施卫星, 何文福. 新抗震规范反应谱的适用性研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 79-84.
- CAO Jialiang, SHI Weixing, HE Wenfu. Study on applicability of response spectra stipulated in Chinese Code (GB 50011-2010) [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 79-84.
- 360