

柳夏勃, 俞瑞芳. 2016. 地震动强度非平稳特性参数与结构响应之间的近似定量关系分析. 地震学报, 38(6): 924-933. doi:10.11939/jass.2016.06.012.

Liu X B, Yu R F. 2016. Approximate quantitative relationship between earthquake ground motion and structural responses. *Acta Seismologica Sinica*, 38(6): 924-933. doi:10.11939/jass.2016.06.012.

地震动强度非平稳特性参数与结构响应之间的近似定量关系分析^{*}

柳夏勃 俞瑞芳^{*}

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 本文在对实际地震加速度记录统计分析的基础上, 给出了能够合理描述地震动强度非平稳特性的参数及其取值范围; 然后引入实验设计方法, 建立了适合于地震动强度非平稳特性参数分析的实验设计算法, 用来分析地震动强度非平稳特性参数的变化对结构响应的影响; 最后通过与近似技术相结合, 建立了地震动强度非平稳特性参数与结构响应之间的近似定量关系模型. 结果表明, 本文提出的实验设计方法适合于对地震动强度非平稳特性参数进行分析, 该方法在有效地减小计算量的同时, 获得了结构响应与参数变化之间的对应关系. 基于实验设计方法进行的特性参数方差分析结果表明: 地震动的稳态持时对结构地震响应的影响比较显著; 对于周期较小的结构, 特性参数之间的交互作用对结构地震响应的影响显著, 但当周期大于 1 s 时, 则不显著. 本文建立的近似定量关系模型能够较好地反映不同特性参数、不同周期结构动力响应之间的联系, 为工程实践中基于结构特性合理设置地震动特性参数、合成或挑选地震加速度时程提供理论依据.

关键词 地震动 非平稳特性 实验设计 响应面 参数优化

doi:10.11939/jass.2016.06.012 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Approximate quantitative relationship between earthquake ground motion and structural responses

Liu Xiabo Yu Ruifang^{*}

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: On the basis of the statistical analysis of the actual seismic acceleration records, this paper gives the parameters describing the non-stationary of earthquake ground motion and their value ranges. And the design of experiments (DOE) method is introduced to establish suitable algorithm to analyze the influence of the change in the non-stationary characteristic parameter of ground motion on the structure responses. Furthermore, an approximate quantitative relationship between the non-stationary characteristic parameters of the earthquake ground motion and the structural responses is established by combining

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(51478440)资助.
收稿日期 2016-03-28 收到初稿, 2016-06-13 决定采用修改稿.
[†] 通讯作者 e-mail: yrfang126@126.com



with approximate technology. The results show that: ① The DOE method presented in this paper is suitable for the analyses of non-stationary characteristic parameters of ground motion intensity, and satisfied results can be obtained based on the less amount of calculation. ② Variance analysis of characteristic parameters based on DOE method shows that the steady-state duration of ground motion has significant influence on the seismic response of the structure; for structures with shorter period, the interaction between characteristic parameters has a significant impact on seismic response of structures, but when the period is greater than 1 s, its influence gradually decreases. ③ The approximate quantitative relationship established in this paper can better reflect the relationship between different characteristic parameters and different structural dynamic response, providing the theory basis for engineering practice to setting up reasonable seismic characteristic parameters based on the structural characteristics and synthesize or select earthquake acceleration time history.

Key words: ground motion; non-stationary characteristic; design of experiment; response surface; parameter optimization

引言

从结构响应的角度看,地震动的非平稳特性可以看作是地震动能量在频率和时间上的不均匀分布.已有研究表明,地震动能量如果在频率和时间上分布相对集中,较能量分布相对均匀的地震动会对结构产生更为严重的破坏,因此地震动的非平稳变化对结构的影响不容忽视(Yeh, Wen, 1990; Basu, Gupta, 1997; 杨红等, 2001).曹晖和林学鹏(2006)通过 3 条实际地震记录对一榀钢筋混凝土框架的非线性时程响应影响的分析结果表明,地震动能量在时间上的集中会对结构响应产生不利影响;王佳毅(2011)对高层结构在长周期地震作用下的研究表明,高层结构在长周期地震作用下的基底剪力、层间位移均大于普通地震波作用;俞瑞芳等(2010)通过人工设定具有非平稳特性的地震输入,对国家体育馆双向张弦钢屋盖 1:10 模型进行的试验结果表明,地震动非平稳特性对结构地震响应的影响程度与输入地震动的非平稳程度有关;Yang 等(2002)对比分析了一跨和 24 跨桥梁在不同地震动输入下的响应,结果表明地震动的不连续性对结构响应有显著的影响.然而,现有研究一般都是基于特定的地震输入和特定结构分析得到的结果,虽然普遍认为地震动非平稳特性对结构的弹性及弹塑性响应有一定的影响,但均未明确给出它们之间的关系.因此,基于特定结构给出的成果很难应用于其它地震输入或其它类型结构的分析中,限制了其在工程实践中的应用.

地震动输入与结构响应之间存在着复杂的关系,针对不同类型(如脆性和延性)和动力特性(如线性和非线性)的结构,不同的地震动特性参数对其地震响应影响的灵敏程度不同(Clough, Penzien, 1993).鉴于此,本文拟基于具有普适意义的单自由度体系,建立地震动强度非平稳特性参数和结构响应之间的近似定量关系模型.由于对地震动强度非平稳特性的描述参数及取值较多,且不同参数和取值之间存在交互作用,如果对所有参数和取值进行全面组合,计算量将非常大,为此我们将实验设计(design of experiments, 简称为 DOE)方法引入本文的分析研究中,提出了适合于地震动特性参数分析的 DOE 算法,并通

过与近似技术相结合,建立地震动强度非平稳特性参数与结构响应之间的近似定量关系模型,这将为工程实践中基于结构特性合理设置地震动特性参数和取值、人工合成或挑选地震加速度时程提供理论依据.

1 地震动强度非平稳特性参数及取值范围

应用于工程实践的地震动强度包线可以近似表示地震输入能量在时间上的不均匀分布,其中隐含着对累积能量和持时的规定,因此本文采用普遍应用于工程实践的三段式强度包线函数来描述地震动强度的非平稳特性(霍俊荣等,1991;徐国栋等,2010;刘平等,2013),其表达式为

$$E(t)=\begin{cases}\left(\frac{t}{t_1}\right)^2, & 0<t\leqslant t_1, \\ 1, & t_1<t\leqslant t_2, \\ e^{-c(t-t_2)}, & t_2<t\leqslant t_3, \end{cases}\tag{1}$$

式中, t_1 为上升段持续时间, t_2 为上升段和平稳段的持续时间,定义 $t_s=t_2-t_1$ 为地震动平稳段持时, t_3 为地震加速度的总持时, c 为下降段的衰减系数.

基于美国 NGA(National Geospatial-Intelligence Agency)数据库中的 10 545 条加速度记录对强度包线函数中的参数进行统计分析,按照场地条件(Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ类)、矩震级(M_w)和震中距(R)将地震加速度记录分为 90 组,列于表 1. 其中,Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ类场地的剪切波速的下限值分别取 510, 260 和 150 m/s,每组包含两个水平方向和一个竖向的加速度记录. 此外,为了统计计算方便,本文对每个分组内的地震动下降段持续时间 t_c 进行统一截断,即当 $t_c=-\ln 0.3/c$ 时,则认为地震动停止波动,这样可使每个分组内的地震加速度记录的持续时间保持一致. 根据式(1)所述的包线函数,用非线性最小二乘法对实际加速度记录进行拟合,得到每条地震加速度记录的强度包线函数取值,再对每组中所有加速度记录的特性参数值求解其均方根值(袁美巧等,2010),即可得到按照场地条件、震级和震中距划分的 178 组参数,将其综合分析后的取值范围列于表 2. 可以看出,描述地震动强度非平稳特性的 4 个主要参数的取值范围变化较大.

表 1 按照场地条件、震中距和震级划分的地震记录分组情况

Table 1 Data grouping according to site condition, epicentral distance and magnitude

M_w	$0\leqslant R<20$			$20\leqslant R<40$			$40\leqslant R<60$			$60\leqslant R<80$			$80\leqslant R<100$			$R\geqslant 100$		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
<5.5	85	376	82	47	219	33	33	160	45	18	113	12	31	74	27	12	48	21
$[5.5, 6.0)$	53	255	36	45	219	36	36	233	45	36	140	39	30	75	30	60	189	147
$[6.0, 6.5)$	30	74	9	91	216	34	123	569	128	165	521	171	69	392	114	180	732	384
$[6.5, 7.0)$	49	98	37	72	162	68	45	157	63	39	93	32	53	80	18	36	181	25
$\geqslant 7.0$	30	18		36	95	18	48	87	51	63	235	27	42	168	30	132	782	225

注:Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ为场地条件; R 为震中距,单位为 km; M_w 为矩震级.

表 2 地震动强度非平稳特性参数的取值范围

Table 2 The values range of intensity parameters of earthquake ground motion

上升段持时 t_1/s	平稳段持时 t_s/s	总持时 t_3/s	衰减系数 c
1—25	2—20	30—90	0.08—0.56

2 适合于地震动特性参数分析的实验设计(DOE)方法

由于各特性参数和取值相互影响,因此任何一个参数或取值的变化都将干扰到单个参数对结构地震响应的影响规律(Yang, Wang, 2012; Assimaki, Jeong, 2013),但如果全面考虑所有参数及取值的组合情况,则将面临巨大的计算量,而且也不可能逐一分析每个地震动特性参数、不同取值以及彼此间的交互作用对各种类型结构响应的影响,因此找到一种能考虑多参数(因素)、多取值(水平)和高阶交互效应的高效处理方法,是解决该问题的关键.为此,本文采用 DOE 方法进行参数分析.该方法先讨论如何合理地安排实验、取得数据,再进行综合的科学分析,最终达到快速获得最优方案的目的,也就是说,仅做全面实验中的一部分即可代表全面实验进行实验结果分析以达到实验目的(Meeker, Escobar, 1998; 陈魁, 2005; 刘文卿, 2005; 李云雁, 2008).实验设计方法有很多种,本文基于不同的研究目标,建立了适合于地震动特性参数的 DOE 算法.

首先,对地震动强度非平稳特性参数进行初步分析,以确定各特性参数及其交互作用对结构地震响应影响的显著程度.通过对现有实验方法的比较与分析,采用正交设计来完成此项分析.该设计可以安排 15 个因素 2 个水平的实验,共需要 16 次实验.由于描述地震动强度非平稳特性的各参数间具有一定的关联性,例如,当稳态持时较小时,上升段持时和总持时也较小,而衰减系数较大,所以本文对原有的正交设计方法进行改进后再分析,特性参数的分组取值情况列于表 3.

表 3 特性参数分组取值情况
Table 3 Parameter grouping

特性参数	上升段持时 t_1/s	平稳段持时 t_s/s	总持时 t_3/s	衰减系数 c
第 1 组	1.0—6.3	2—6	30—45	0.354—0.562
第 2 组	6.3—12.5	6—10	45—60	0.185—0.354
第 3 组	12.5—18.7	10—15	60—75	0.134—0.185
第 4 组	18.7—25	15—20	75—90	0.080—0.134

然后,详细分析地震动强度特性参数对结构响应的影响,即对 4 个特性参数的取值水平进行细化(撒细网).按照表 3 所示的分组对每个分组采用均匀设计 $U_8^*(8^5)$,实验主体部分为 8 行 5 列,每列由 8 个数字构成,如表 4 所示. $U_8^*(8^5)$ 设计最多可安排 5 个因素,每个因素取 8 个水平,共需做 8 次实验;使用表中由列号可以看出因素个数不同时需要用哪几列来安排实验; D 越小,表示均匀度越好.按照表 3 给出的参数区域,用表 4 进行参数的实验设计,每组特性参数做 8 次实验,4 组共需 32 次,即有 32 组参数组合;若要进行全面实验,需做 16384 次实验,采用 DOE 方法则大大减少了实验工作量.

表 4 均匀设计表 $U_8^*(8^5)$
Table 4 Uniform design table $U_8^*(8^5)$

实验号	1	2	3	4	5
1	1	2	4	7	8
2	2	4	8	5	7
3	3	6	3	3	6
4	4	8	7	1	5
5	5	1	2	8	4
6	6	3	6	6	3
7	7	5	1	4	2
8	8	7	5	2	1

$U_8^*(8^5)$ 使用表		
s	列号	D
2	1 3	0.1445
3	1 3 4	0.2000
4	1 2 3 5	0.2709

注: s 为因数的总数目, D 为均匀度偏差.

3 基于 DOE 方法的地震动非平稳特性参数分析

为了建立地震动输入特性参数与结构响应之间的近似定量关系, 本文首先对描述地震动强度非平稳特性的 4 个参数(t_1, t_s, t_3, c)进行分析, 设计方案列于表 5. 由于本文主要讨论地震动强度非平稳特性参数变化对结构响应的影响, 因此对所有的地震动拟合均采用同一目标反应谱(阻尼比为 0.05), 每组参数拟合得到 7 条加速度时程; 目标反应谱采用建筑抗震设计规范中的标准谱. 此外, 为了考虑目标反应谱特征周期的选取对分析结果的影响, 采用地震影响系数最大值为 0.9、特征周期分别为 0.35 s 和 0.90 s 的两套谱参数. 将地震加速度时程输入不同周期(0.05 s, 0.2 s 和 1 s)和不同阻尼比(0.02, 0.05, 0.07 和 0.10)的一系列单自由度系统进行弹性响应分析, 选择结构响应为目标参数对地震动特性参数进行分析.

表 5 研究设计方案
Table 5 Research design plan

工况	DOE 方法	参数组合	拟合地震动数量	单自由度体系周期及阻尼比	目标谱参数	目标参数
参数方差分析	正交设计 $L_{16}(2^{15})$	16×4 组	16×4×7×2	周期: 0.05 s, 0.2 s, 1 s	地震影响系数 最大值: 0.9	结构加速度响应均方根值
参数变化对结构响应的影响分析	均匀设计 $U_8^*(8^5)$	8×4 组	8×4×7	阻尼比: 0.02, 0.05, 0.07, 0.10	特征周期值: 0.35 s, 0.90 s	

3.1 特性参数的方差分析

方差分析是指各个特性参数及其交互性对不同单自由度结构弹性响应的影响程度. 为了对比分析不同实验设计的分析结果, 使其更加科学合理, 本文分别按照表 3 所示的分组, 对 4 个特性参数取两个不同水平值进行实验, 基于拟定的设计方案, 分别采用正交设计对地震动特性参数进行组合, 得到 4 个参数(t_1, t_s, t_3, c)及其取值的组合方案共 16×4 组. 基于不同的目标反应谱进行人工地震动拟合, 每组参数拟合得到 7 条加速度时程; 将每条地震加速度时程输入不同周期(0.05 s, 0.2 s 和 1 s)和不同阻尼比(0.02, 0.05, 0.07 和 0.10)的一系列单自由度系统进行结构弹性响应分析. 本文对同一组参数在 7 条不同地震输入下所得到的加速度时程参数进行了比较, 最终选择的目标参数为

$$f_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} [f(t)]^2 dt}, \tag{2}$$

式中, f_{RMS} 为结构加速度响应的均方根值, $f(t)$ 为结构加速度响应时程, t_3 为结构响应总持续时间.

以结构响应的 f_{RMS} 为目标, 采用 SAS(Statistical Analysis System)软件对 4 组参数进行方差分析, 每组 16 次实验, 对不同阻尼比结构的计算结果进行分析. 结果表明: 基于不同阻尼比结构的分析结果基本一致, 平稳段持时 t_s 的变化对不同周期结构响应的影响均比较显著, 其次是衰减系数 c 和总持时 t_3 ; 当结构周期较小时, 地震动特性参数之间的交互作用对结构响应影响比较显著, 但当周期较大时, 则不显著. 需要指出的是, 基于不同的目标谱得到的特性参数的变化规律基本是一致的, 故可认为目标谱对地震动特性参数基本变化规律的影响较小.

3.2 特性参数变化对结构弹性响应的影响分析

经特性参数初步分析后，对各参数的取值水平进行细化(撒细网)来分析特性参数变化对结构弹性响应的影响。按照预先设定的设计方案，对每个分组采用均匀设计 $U_8^*(8^5)$ ，如表 4 所示，即每组特性参数做 8 次实验，共得到 32 组参数组合。同样地，基于给定的目标反应谱进行人工地震动拟合，每组参数拟合得到 7 条加速度时程；将地震加速度时程输入不同周期(0.05 s, 0.2 s 和 1 s)和不同阻尼比(0.02, 0.05, 0.07 和 0.10)的一系列单自由度系统获得结构的弹性响应。同样地，以 f_{RMS} 为目标进行特性参数对响应结果影响的分析结果表明，特性参数对各阻尼比单自由度体的弹性响应影响情况大致相同。以式(2)所示的参数 f_{RMS} 为目标，对 4 个参数变化对结构响应的影响进行分析，进而得到 4 个特性参数对结构响应影响的拟合直线。

图 1 给出了阻尼比为 0.05、不同周期时 4 个特性参数对结构响应的变化情况，对于其它阻尼比而言，其情况也基本相同。可以看出：结构响应的 f_{RMS} 值随 t_1 , t_s 和 t_3 的增加而增加，这与工程实践中得到的结果是一致的，说明本文设计的 DOE 方法是合理的；对于周期较短的结构，其变化的速率较大，当周期大于 1 s 时，参数的变化对结构响应影响较小；随着衰减系数 c 的增加， f_{RMS} 逐渐减小，而对于较长周期的结构，该参数的变化对结构响应的影响较小。

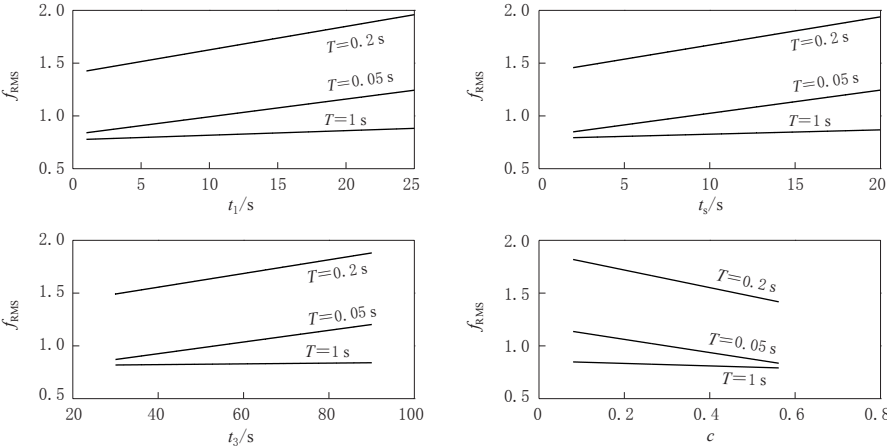


图 1 阻尼比为 0.05，周期 T 为 0.05, 0.2 和 1 s 时特性参数(t_1 , t_s , t_3 , c)对结构响应的影响

Fig. 1 Effect of characteristic parameters (t_1 , t_s , t_3 , c) on the structural responses when the damping ratio is 0.05 and the period T is 0.05, 0.2 and 1 s

4 地震动特性参数对结构响应影响的近似定量关系模型

基于以上均匀设计得到的 32 组参数的分析结果，本文以结构响应的 f_{RMS} 作为目标参数，通过 SAS 软件编程得出了输入特性参数与目标参数之间的拟合曲面(堵丁柱等，2011，王志强，2011)，即

$$f_{\text{RMS}} = L(t_1, t_s, t_3, c) + Q(t_1, t_s, t_3, c) + I(t_1, t_s, t_3, c), \tag{3}$$

式中： f_{RMS} 为弹性响应均方根值； $L(t_1, t_s, t_3, c)$, $Q(t_1, t_s, t_3, c)$ 和 $I(t_1, t_s, t_3, c)$ 均为与输入参数相关的函数，分别为拟合模型的线性(一次项)、二次项和交互影响项，其表达式

分别为

$$\begin{cases} L(t_1, t_s, t_3, c) = l + l_1 t_1 + l_s t_s + l_3 t_3 + l_c c, \\ Q(t_1, t_s, t_3, c) = q_1 t_1^2 + q_s t_s^2 + q_3 t_3^2 + q_c c^2, \\ I(t_1, t_s, t_3, c) = \lambda_{1s} t_1 t_s + \lambda_{13} t_1 t_3 + \lambda_{1c} t_1 c + \lambda_{3s} t_3 t_s + \lambda_{sc} t_s c + \lambda_{3c} t_3 c. \end{cases} \quad (4)$$

按照式(3)所示的回归模型,采用 SAS 软件对不同阻尼比和不同周期的单自由度体实验进行回归分析,表 6—7 给出了阻尼比为 0.05 时的 3 个周期结构回归分析得到的模型参数.分析其它阻尼比结构的结果表明,阻尼比对变化趋势的影响不大,其回归模型的主要特性和变化规律与阻尼比为 0.05 时基本一致.

表 6 模型线性和二次项部分参数取值

Table 6 Model parameters of linear part and quadratic item

周期/s	线性					二次项			
	l	l_1	l_s	l_3	l_c	q_1	q_s	q_3	q_c
0.05	3.786	-0.121	0.096	-0.032	-11.866	0.003	0.010	0.001	13.812
0.2	5.309	-0.170	0.471	-0.096	14.080	-0.005	0.012	0.002	17.617
1	4.870	-0.155	0.233	-0.082	-13.560	0.006	0.010	0.001	14.212

表 7 模型交互影响部分参数取值

Table 7 Model parameters of interaction item

周期/s	λ_{1s}	λ_{13}	λ_{1c}	λ_{3s}	λ_{sc}	λ_{3c}
0.05	-0.0027	0.0004	0.3077	-0.0047	0.1195	-0.0178
0.2	0.0068	0.0024	0.3914	-0.0126	-0.1603	-0.0047
1	-0.0121	0.0007	0.4072	-0.0038	-0.2321	0.0469

从回归分析的结果可以看出:对于不同的周期和阻尼比,方程整体的可信度较高;模型中的线性(一次项)和二次项对方程结果的影响均比较显著;4 个特性参数的交互作用拟合方程的影响随周期的增加略有增大,但总体影响不太显著.由此可知,拟合方程的主要成分还是以线性为主,占总体影响的 90%左右.从 4 个特性参数的 F 检验结果可以看出,当结构的周期较小时, t_s 和 t_3 对拟合方程的影响均比较显著,但当周期大于 1 s 时, t_s 对拟合方程影响的显著性降低.此外,对方程应变量 f_{RMS} 值影响比较显著的还有衰减系数 c .

图 2 给出了周期分别为 0.05 s、0.2 s 和 1 s 时, f_{RMS} 随平稳段持时 t_s 、总持时 t_3 和衰减系数 c 的变化.可以看出:当单自由度体周期为 0.05 s 时, f_{RMS} 随 c 的增加、 t_s 的减小和 t_3 的增加而增加(图 2a);当单自由度体周期为 0.2 s 时, f_{RMS} 在 c 最大、 t_s 最小和 t_s 最大、 t_3 最小时达到最大(图 2b);当单自由度体周期为 1 s 时, f_{RMS} 在 c 最大、 t_3 最大和 t_3 最小、 t_s 最大时达到最大(图 2c).由此可见,基于本文所建立的模型在单自由度体不同周期下特性参数对结构响应的影响情况较为复杂,需要根据工程的实际情况具体分析.另外,本文所建立的模型仅考虑了每两个特性参数之间的交互作用,对于 3 个及以上特性参数之间的交互作用,由于其建模过于复杂,本文尚未加以考虑.

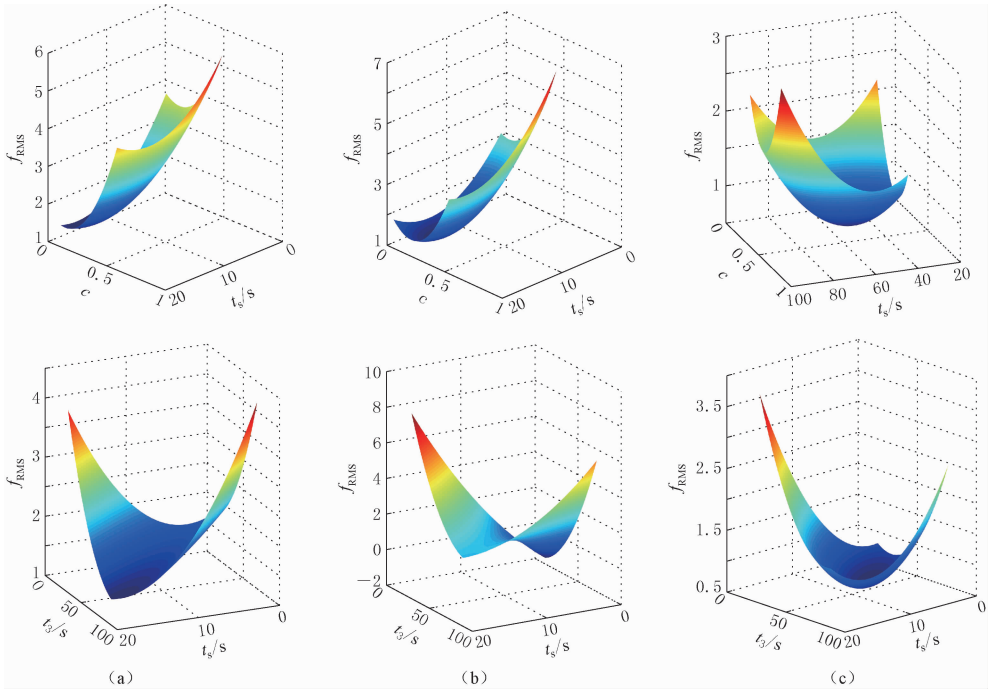


图 2 周期为 0.05 s (a), 0.2 s (b) 和 1 s (c) 时 f_{RMS} 随平稳段持时 t_s , 总持时 t_3 和衰减系数 c 的变化趋势图

Fig. 2 Variation of f_{RMS} along with t_s , t_3 and c when period is 0.05 s (a), 0.2 s (b) and 1 s (c)

5 讨论与结论

本文通过对地震动强度非平稳特性参数及其变化范围的分析, 引入 DOE 方法, 建立了适合于地震动特性参数分析的 DOE 算法, 并对地震动特性参数的变化对结构响应的影响进行了分析, 得出以下结论:

- 1) 采用传统的全面实验进行地震动特性参数的分析所需的实验量非常庞大, 基于 DOE 方法进行实验设计后, 大大减少了实验工作量且能得到满意的分析结果, 因此本文所采用的正交设计和均匀设计适合于地震动强度非平稳特性参数的研究.
- 2) 通过正交设计实验的方差分析可知: 4 个特性参数对结构响应的影响程度有所差异; 与其它 3 个特性参数相比, 稳态持时 t_s 对结构响应的影响比较显著; 而特性参数之间的交互作用对结构响应的影响则与结构周期的大小有关, 当结构周期较小时, 特性参数之间的交互作用对结构地震响应的影响显著, 但当结构周期较大时, 则不显著.
- 3) 通过均匀设计实验对特性参数的取值进行细化, 并拟合得到特性参数与结构响应之间的近似定量关系模型, 拟合得到的响应面由线性(一次项)、二次项和交互项等 3 部分组成. 由特性参数与结构弹性响应 f_{RMS} 值拟合得到的响应面方程主要呈线性, 不仅能够较好地反映不同特性参数、不同周期结构动力响应之间的联系, 而且为工程实践中基于结构特性合理设置地震动特性参数以及合成或挑选地震加速度时程提供理论依据.
- 4) 特性参数对结构响应的影响表明, 地震动强度非平稳特性对不同周期的结构响应的影响是不同的. 对于周期较小的结构, 特性参数对其的影响比较显著; 而对于周期较长

的结构,则影响较小,因此在设计地震动挑选时,可仅考虑场地的地震活动环境。

鉴于地震动本身的复杂性,本文仅分析了地震动强度的非平稳特性参数,在今后的研究中还将基于本文建立的 DOE 方法对地震动的非平稳特性(如频率的非平稳)进行全面分析。

参 考 文 献

- 曹晖,林学鹏. 2006. 地震动非平稳特性对结构非线性响应影响的分析[J]. 工程力学, **23**(12): 30–35.
- Cao H, Lin X P. 2006. The effect of nonstationary characteristic of earthquake ground motion on the structural nonlinear responses[J]. *Engineering Mechanics*, **23**(12): 30–35 (in Chinese).
- 陈魁. 2005. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社: 15–36.
- Chen K. 2005. *Experimental Design and Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press: 15–36 (in Chinese).
- 堵丁柱,葛可一,胡晓东. 2011. 近似算法的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社: 98–112.
- Du D Z, Ge K Y, Hu X D. 2011. *Design and Analysis of Approximation Algorithms*[M]. Beijing: Higher Education Press: 98–112 (in Chinese).
- 霍俊荣,胡聿贤,冯启民. 1991. 地面运动时程强度包络函数的研究[J]. 地震工程与工程震动, **11**(1): 1–12.
- Huo J R, Hu Y X, Feng Q M. 1991. Study on envelope function of acceleration time history[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **11**(1): 1–12 (in Chinese).
- 李云雁. 2008. 试验设计与数据处理[M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社: 20–30.
- Li Y Y. 2008. *Experiment Design and Data Processing*[M]. 2nd edition. Beijing: Chemical Industry Press: 20–30 (in Chinese).
- 刘平,李宁,李忠献,马华,谢礼立. 2013. 考虑天然地震特征的长周期人工地震动合成[J]. 土木工程学报, **46**(12): 43–49.
- Liu P, Li N, Li Z X, Ma H, Xie L L. 2013. The synthetic method of seismic waves for the long period ground motion considering the characteristics of real earthquake records[J]. *China Civil Engineering Journal*, **46**(12): 43–49 (in Chinese).
- 刘文卿. 2005. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社: 36–54.
- Liu W Q. 2005. *Design of Experiments*[M]. Beijing: Tsinghua University Press: 36–54 (in Chinese).
- 王佳毅. 2011. 高层结构在长周期地震动作用下的弹塑性响应[J]. 山西建筑, **37**(16): 39–41.
- Wang J Y. 2011. On elastic-plastic response of high-rise structure under long-period ground motion[J]. *Shanxi Architecture*, **37**(16): 39–41 (in Chinese).
- 王志强. 2011. SAS 软件及其在数理统计上的应用[J]. 技术研发, **18**(6): 128–140.
- Wang Z Q. 2011. SAS software and its application in mathematical statistics[J]. *Technology and Market*, **18**(6): 128–140 (in Chinese).
- 徐国栋,史培军,周锡元. 2010. 基于目标反应谱和包线的地震动合成[J]. 地震工程与工程振动, **30**(1): 1–7.
- Xu G D, Shi P J, Zhou X Y. 2010. Artificial ground motion based on target response spectra and envelope[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **30**(1): 1–7 (in Chinese).
- 杨红,曹晖,白绍良. 2001. 地震波局部时频特性对结构非线性响应的影响[J]. 土木工程学报, **34**(4): 78–82.
- Yang H, Cao H, Bai S L. 2001. Effects of local time-frequency characteristics of earthquake waves on structural nonlinear responses[J]. *China Civil Engineering Journal*, **34**(4): 78–82 (in Chinese).
- 俞瑞芳,樊珂,彭凌云,袁美巧. 2010. 地震动非平稳特性对结构反应影响的试验研究[J]. 土木工程学报, **43**(12): 13–20.
- Yu R F, Fan K, Peng L Y, Yuan M Q. 2010. Effect of non-stationary characteristics of ground motion on structural response[J]. *China Civil Engineering Journal*, **43**(12): 13–20 (in Chinese).
- 袁美巧,俞瑞芳,俞言祥. 2010. 满足时-频统计特性的地震动时程调整[J]. 应用基础与工程科学学报, **18**(S): 162–172.

- Yuan M Q, Yu R F, Yu Y X. 2010. A time history adjusting method meeting the statistical ground motion time-frequency characteristics[J]. *Journa of Basic Science and Engineering*, **18**(S): 162-172 (in Chinese).
- Assimaki D, Jeong S. 2013. Ground-motion observations at Hotel Montana during the *M*7.0 2010 Haiti earthquake: Topography or soil amplification?[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(5): 2577-2590.
- Basu B, Gupta V K. 1997. Non-stationary seismic response of MDOF systems by wavelet transform[J]. *Earthquake Eng & Struct Dyn*, **26**(12): 1243-1258.
- Clough R W, Penzien J. 1993. *Dynamics of Structures*[M]. 2nd editon. New York: McGraw-Hill: 112-120.
- Meeker W Q, Escobar L A. 1998. *Statistical Methods for Reliability Data*[M]. New York: John Wiley & Sons: 105-121.
- Yang D X, Wang W. 2012. Nonlocal period parameters of frequency content characterization of near-fault ground motions [J]. *Earthquake Eng & Struct Dyn*, **41**(13): 1793-1811.
- Yang Q S, Saïidi M S, Wang H, Itani A. 2002. Influence of earthquake ground motion incoherency on multi-support structures[J]. *Earthquake Eng & Eng Vibrat*, **1**(2): 167-180.
- Yeh C H, Wen Y K. 1990. Modeling of nonstationary ground motion and analysis of inelastic structural response[J]. *Struct Safety*, **8**(1/2/3/4): 281-298.