

文章编号 1000-5013(2006)01-0007-05

# 人造地震动合成的研究现状及展望

郭子雄 王妙芳

(华侨大学土木工程学院,福建 泉州 362021)

**摘要** 结合随机过程的模拟方法,对国内外人造地震动的主要合成方法及研究现状进行述评.重点介绍以场地反应谱为目标的间接拟合方法,以及考虑震级、距离、场地及发震断层等综合影响的半经验综合方法的研究进展.最后,指出现有拟合人造地震动存在的主要问题及今后的主要研究方向.

**关键词** 人造地震动,随机过程,地震动特性,研究现状

**中图分类号** P 315.8-1; TU 352.1

**文献标识码** A

在工程结构的抗震设计中,通常以反应谱来描述地面运动,并应用于结构最大地震反应的计算.在结构地震反应时程分析中,合适的地震动加速度时间过程的选用至关重要.虽然,过去的几十年中,实际地震记录的数量已大大增加,但其记录地点的场地条件与我们关心的建筑场地条件可能有很大差异.在地震工程领域研究中,经常需要一组满足相同统计特性的地震动样本,已有的实际地震动数量远远不能满足工程实际需要.人造地震波不可避免的掺入了人为因素,但在实际记录不可能迅速增长的实情下,发展合理的地震动模型显得更为必要和迫切.因此,模拟具有某些特性参数的地面运动,一直是地震工程中的一个重要研究领域.

## 1 地震动的基本特性及拟合方法

受地震震级、震中距、震源深度、地震机制,以及地质条件等因素影响,地震动的各种特性均呈现非常复杂的变化.为了简化,在工程结构的地震反应分析中,一般采用地震动的振幅、持续时间和频谱特性来描述地震动的主要特性.可以认为,结构遭受地震破坏主要是地震动传统三要素综合影响的结果.通过对弹塑性地震反应认识的不断深入,地震动的其他特性,如强度、频率不平稳性和空间多维性等越来越受到重视.

在地震动的传统三要素基础上发展起来的地震动合成方法是基于 FFT 技术的三角级数法,国内外许多学者在这方面进行了大量的研究.他们从不同的角度进行改进,如考虑震源机制、传播机理、场地条件、震级、震中距及其衰减规律等,利用傅氏谱、功率谱、物理谱或演变谱、相位谱或相位差谱等进行人造地震动的尝试,取得了一些可喜的成果.然而令人遗憾的是,这些研究成果大多建立在地震动传统特性的基础上.已有一些研究表明<sup>[1]</sup>,实际地震动所富含的对结构响应,特别是结构非线性响应有重要影响的信息被忽略掉了,如频率非平稳特性、多维相关性等.这就导致目前传统的地震动特性所模拟的地震动与实际记录之间在数据结构存在较大差别,而且在其所引起的结构反应方面都存在较大差别.一个合成地震动模型是否合理的标准是,该模型的合成结果必须能够体现上述地震动的宏观特性,同时也应该满足数值上的精度要求.

考察工程地震动模型化研究的历史与现状,按研究方式可以把地震动模型分为 3 类.(1)地震学模型,即从地震学的角度研究地震动过程.主要考虑震源的断层破裂方式及长度、波传播的方向及传播途

收稿日期 2005-07-22

作者简介 郭子雄(1967-),男,教授,博士,主要从事工程结构抗震的研究. E-mail: guozxey@hqu.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50478120);福建省自然科学基金资助项目(E0410024)

径等一系列震源物理参数和传播介质参数,采用物理模型求取近场地震动的各种参数.这一方法受经验背景的随机性影响较小,但受客观知识的局限性影响较大.(2)工程学模型,即从工程学的角度研究地震动参数.在这一层次上,参数的取值往往不区分地震背景条件,而是依赖于大量强震记录的综合统计平均.(3)工程地震学模型,即将工程学与地震学横向结合.从地震学的角度选取若干主要参数(如震级、震中距等),结合场地条件的分析,建立依赖于震级、震中距、场地条件的地震动衰减规律.

从工程结构抗震应用的角度,人工地震动的拟合方法主要与工程学、工程地震学模型相对应.即仅依赖于场地反应谱为目标的工程方法(包括一般工程方法及改进的工程方法),考虑震级、震中距、场地及震源机制等因素影响的半经验综合方法.

## 2 人工地震动合成的研究现状

### 2.1 人工合成地震动时程的工程方法

2.1.1 以随机脉冲模型为基础的地震动合成 1947年,Housner提出把地面运动看成是大小一定的,随机到达的脉冲的叠加<sup>[2]</sup>,即

$$u(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \mu(t - t_k). \quad (1)$$

在式(1)中, $\mu$ 为常数, $N(t)$ 为在 $[0, T]$ 间到达的脉冲总个数,并假设它服从到达率为 $\lambda$ 的随机泊松过程, $t_k$ 表示脉冲到达的随机时间.当 $\lambda = 0$ 时, $u(t)$ 为平稳白噪声过程;当 $\lambda$ 为时间 $t$ 的函数时, $u(t)$ 为非平稳白噪声过程.1955年,Goodman等<sup>[3]</sup>对Housner模型作了进一步的简化和修正,但生成的时间过程仍为白噪声过程.虽然,在理论上以Housner模型为基础的模型能够考虑到地震动的非平稳性,但由于数学和计算上的复杂性原因,在当时的实际应用中,人们仍主要假设地震动满足平稳假设.尽管地震动的某些特征(如加速度幅值的概率密度函数等)在一定程度上具有高斯特性,线性阻尼结构地震响应的许多重要特征也可以近似用白噪声过程模拟,但是从能量有限性和频率含量的角度看,将地震动过程用白噪声模型来模拟显然是不切实际的.因为实际地震动过程的能量总是有限的,而且各频率含量之间也不可能是完全无关的.过滤白噪声模型和有限带宽白噪声模型,正是基于这两方面对上述白噪声模型进行改进而提出的.1957年,Kanai<sup>[4]</sup>对已有强震记录的频率分量进行研究后认识到地震地面运动具有卓越周期,与白噪声假设有较大的差异,且其卓越周期与场地条件也有很大关系.在此基础上,1960年,Tajimi提出了过滤白噪声模型,即假设基岩的地震动符合白噪声假定,而将基岩上面的覆盖层作为SDOF线性滤波器.滤波器的输出是一个过滤白噪声过程,可作为地面结构的输入.在研究了不同性质的土层对地震动影响的基础上,他提出了著名的地震动功率谱表达式,即K-T谱(金井清-田治见谱).实际上,K-T谱就是具有一定自振频率和阻尼比的振子对白噪声输入的响应过程.这一地震动功率形式后来被工程界普遍采用.

2.1.2 考虑强度和频率非平稳的地震动合成 在分析线性结构的地震响应时,上述平稳模型的输入一般均可达到令人满意的精度.随着震害经验的积累,工程界已广泛认识到强震过程中结构所表现出的非线性行为.为了估计结构的非线性地震响应,在尽可能精确地模型化结构非线性性能的同时,也认识到地震动强非平稳性所产生的显著影响.大量的研究表明,非平稳和平稳地震动模型对于同一非线性结构的地震响应是存在着显著差异的.在侧重于研究刚度或(和)强度退化型结构的响应及非线性结构的累积损伤时,平稳模型往往低估了此类结构的响应.同时,由于结构进入非线性阶段后,其振动特性不断发生变化,地震动时程的频率非平稳特性对结构非线性时程分析结果将产生不可忽视的影响.为了考虑地震动的强度非平稳特性,最直接的方法<sup>[5]</sup>是在上述平稳模型的基础上引入一个随时间变化的强度包线函数 $f(t)$ ,以实现不同的地震动均匀调制过程.地震动记录的强非规则性质,使得不同记录具有各不相同的包线,即便是同一记录采用不同的平稳化方法,也有可能得出不同的包线.工程上所关心的是具有统计意义的包线,常用的主要有两类,一类是采用单峰状的光滑曲线,另一类是具有上升、平稳及衰减段的三段曲线.在适当选定时间强度函数 $f(t)$ 后,人工地震波的合成就转化为平稳加速度随机过程 $u(t)$ 的合成问题.为了考虑实际地震动的频率特性,可以把平稳随机过程 $u(t)$ 看成是不同频率的、具有随机相角的三角级数的迭加,即

$$a(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t - \phi_k). \quad (2)$$

在式(2)中,  $A_k$  为地震动时程的幅值谱值,  $\phi_k$  为地震动时程的相位谱值,  $\omega_k$  为频率. 通过对埃尔森特罗地震加速度记录和日本 49 个地震加速度记录的分析发现, 实际地震的随机相角符合均匀分布假定, 并且  $a(t)$  乘以强度包线  $f(t)$  之后, 其相角仍然保持均匀分布. 因此, 可以把相位谱  $\phi_k$  处理为  $(0, 2\pi)$  内均匀分布的随机变量<sup>[6]</sup>. 从工程应用角度来看, 人工合成地震波一般是以场地的反应谱为目标, 将相位谱处理为  $(0, 2\pi)$  均匀分布的随机变量, 并在此基础上发展了拟合反应谱的人工地震波合成技术. 拟合方法主要有直接法和间接法两种类型. 直接法利用傅氏幅值谱  $A_k$  与无阻尼速度反应谱  $S_v$  之间的近似关系. 假定  $A_k$  等于相同频率点上的规定速度反应谱  $S_v$ , 作为第一次近似. 通过计算反应谱并与目标谱比较, 按照两谱的比值改进  $A_k$ , 不断迭代直至计算反应谱与目标谱达到给定精度为止<sup>[7]</sup>. 间接法则是将反应谱转换为功率谱密度函数, 然后利用傅氏幅值谱与功率谱密度之间的关系, 确定傅氏幅值谱在频率上的分布. 计算由此合成的人工波的反应谱并与目标谱比较, 按两谱的比值对幅值谱反复修正, 使计算反应谱  $S_a(\omega, t)$  向目标反应谱  $S_a^T(\omega, t)$  逼近<sup>[8]</sup>. 文 [9] 指出, 对于按上述间接法求得的平稳地震波, 可以证明它是各态历经的. 其功率谱密度函数恰好等于规定的功率谱密度函数, 且对于非平稳人工地震波, 其平稳段的功率谱密度函数也等于规定的功率谱密度函数. 按直接法产生的傅氏幅值谱 (或零阻尼速度谱) 与规定的速度谱并不相同, 而且必须进行调整和迭代计算. 由于每一条人工地震波的反应谱在给定周期上的值是一个随机变量, 它不可能精确地等于规定的反应谱. 因此, 这种调整究竟应达到何种精度是无法确定的. 工程上一般采用间接法对幅值谱进行调整. 1979 年, 日本学者大崎顺彦最早强调, 加速度记录的相位差的频数分布曲线与加速度时程的强度包线形状在一定程度上具有相似性<sup>[6]</sup>. 大崎顺彦的研究揭示了相位差的频数分布对地震动包线的重要影响, 但还未指出产生这种影响的原因. 一些研究者在此基础上开展了进一步的研究, 提出了考虑相位谱的改进工程方法. 1982 年, Nigam<sup>[10]</sup> 研究了均匀调制的高斯白噪声随机过程的确定性包线同相位谱导数之间的关系. 1990 年, 金星等<sup>[11]</sup> 根据群速度与相速度的关系, 阐明了相位差谱这一综合物理量的含义. 同时, 讨论了它与等效群速度的联系, 并假定地震动加速度时程  $a(t)$  可由强度包线  $f(t)$  乘以均值为 0 的平稳随机过程  $\phi(t)$  构成. 这从理论上论证了地震动强度包线与相位差谱的频数分布函数成正变关系. 1986 年, 胡聿贤等<sup>[12]</sup> 提出了一个新的加速度时程曲线的拟合方法, 以改进现有反应谱拟合精度和原则. 文中对幅值谱修正时, 考虑了傅氏谱各分量对最大反应贡献的正负, 并对用幅值谱修正不能满足要求的顽固点, 提出了相位谱修正的方法. 1990 年, 朱昱等的研究进一步表明, 相位差谱的概率分布可看作是对数正态分布. 采用对数正态分布的相位差谱产生随机数, 其生成人造地震波可以不用叠加强度包络函数就可得到强度、频率含量皆非平稳特征的强震加速度时程. 2002 年, 杨庆山等<sup>[13]</sup> 根据相位差谱对地震动时程非平稳的影响, 考虑反应谱、功率谱和傅里叶幅值谱间的数学关系, 以及加速度时程单谐波分量对反应谱拟合精度和拟合效率的作用, 提出了一种可直接拟合目标反应谱并具有时-频非平稳性的人工地震动的拟合方法.

## 2.2 考虑其他地震参数的半经验综合方法

一般来说, 工程方法不能全面反映震级、距离、场地的综合影响, 也没有考虑震源破裂过程和地震波传播与地震动的联系. 因此, 一些研究者尝试把震级、距离、场地和地震物理机制的有关知识引入到强震加速度的合成中. 1971 年, Trifunac<sup>[14]</sup> 利用层状地球介质模型, 从理论上计算出面波频散曲线, 并将强震加速度的相位角分布分成由面波频散曲线确定的和由不确定因素 (随机数) 贡献的两部分. 然后, 综合利用地震波的频谱、持时、强度特性给出强震加速度过程. 这种强震加速度时程的频率和幅值都是非平稳的. 1978 年, Trifunac<sup>[15]</sup> 根据美国西部 182 个强震记录 (共 546 条地震波), 建立了关于震级和距离的傅氏幅值谱衰减关系. 其中的系数函数为记录回归给出的经验函数. 这种经验不定关系, 本质上属于等效点源模型. 1979 年, Kanamori<sup>[16]</sup> 利用经验格林函数来反映实际传播路径和场地条件对地震动的影响, 并用随机迭加各子震源贡献的方式来模拟走滑断层长周期强震地面运动. 1984 年, Francis 从震源机制和波的传播途径等方面出发, 研究了地震动的模拟.

1988 年, 廖振鹏等<sup>[17]</sup> 利用强震记录建立经验格林函数, 建立了预测地震动加速度时程傅氏谱的半经验模型. 这一模型同时考虑了震源谱函数和断层破裂强度的影响. 用这一方法综合的地震动加速度时

程,是与地震波的频散和衰减的统计特征相一致的非平稳过程,并能考虑场地相对于震源的方式和震源破裂方式的影响。1992年,刘小弟等<sup>[18]</sup>在目前地震反应分析时采用选择天然地震记录和人工拟合地震动相结合的基础上,提出一种既可保留天然地震记录信息,又能满足给定目标谱的人工地震波的合成方法。该方法提取天然地震记录中能够反映时域和频域非平稳的信息,并与前面提到的人工地震波合成方法中拟合反应谱的技术相结合,从而较真实地反映了地震波。同年,刘鹏程等<sup>[19]</sup>将经验格林函数法和人造地震波反应谱拟合技术有机结合起来,提出了一种新的人造地震动方法。其主要思路是利用已有的场地附近的小震记录,合成可能发生的大震地面运动,以此作为人造地震动的初始值。通过反复调整初始加速度的傅氏幅值谱来拟合给定的目标反应谱,以得到满足精度要求的人造地震加速度时程。该方法可以考虑地震环境和局部场地条件对地震动的影响,无需再加入强度包线的规定,所合成的地震加速度时程具有时间强度和频率含量的非平稳特性。

### 3 存在问题及讨论

以工程结构地震反应分析为目标的人造地震动合成,其主要任务是根据地震学的有关知识和地震动区划结果,合成尽可能描述建设场地上具有统计意义,或与未来可能发生地震动相符的人造地震动时程。这就要求人工合成的地震动尽可能全面描述现有强震加速度记录的工程特性,同时也应在满足工程精度前提下,力求简单适用。

在人工地震动合成方面,尚存在5个主要问题和值得进一步研究的方向。

(1) 目前对拟合结果进行幅值调整的方法,一般只能做到与设计地震反应谱曲线上一个或几个谱值点相近,而未能在整个频带上得到满意的拟合结果。该拟合方法对于低频段符合较好,而对于高频段则存在较大的误差,因而一般只适用于高频段影响较小的场地。

(2) 为满足工程结构非线性时程分析的需求,强度和频率非平稳随机模型仍是地震动模型化研究的热点。目前,工程界习惯用幅值、频谱和持时等三要素来描述地震动的工程特性。幅值、持时和强度包线函数描述了地震动的总体时域特征,却无法准确地描述地震动全过程。工程中常用的反应谱、功率谱或傅里叶幅值谱则描述地震动的频域幅值特征,而没有相位谱的任何信息,因而也不能全面地反映地震动的频域特征。由于地震以具有不同频率的各分量谐波释放其能量,具有时-频非平稳特性的地震动合成和工程应用研究,仍将是主要的研究方向。

(3) 在实际工程中所能获取的地震信息比较有限,且应考虑场地影响在数学上的复杂性。根据实际地震记录建立的关于震级和距离的关系,其模型参数目前还只能通过回归分析得到,无法真实反映实际情况。因此,在模型参数上还有待进一步研究,进而建立起更能符合实际工程场地情况的抗震设计用的人造地震动模型。

(4) 地震动的多维相关性将受到越来越多的关注。地震动的时空变化性质对于空间扩展型结构的响应具有显著的影响,而该问题的研究目前还很不完善。研究人员研究时空变化地震动模型,将更多地体现出地震学模型与工程学模型的相互结合。

(5) 建筑结构材料的多样化和消能减震元件的使用,使结构的阻尼特性存在较大差别。对具有不同阻尼比的结构,按照相应阻尼比的反应谱进行抗震设计是一个自然且合理的要求。相应地,在进行结构时程分析时,应采用与各阻尼比反应谱相适应的输入地震波。因此,在人工地震动拟合中,同时满足多阻尼比反应谱的人造地震动合成,将是人造地震动研究领域的一个重要方向。

### 4 结束语

工程结构抗震设计中最主要的不确定因素来自于地震动激励。虽然该不确定性将伴随着强震记录的日益积累,以及人们对地震动认识的不断深入而逐渐降低,但无论如何也发展不到可以用确定性的方法来描述地震动这种复杂的随机过程。现有人工模拟地震动方法存在的另一个问题是,由对地震动特性的认知局限性引起的系统不确定性,一般不能通过常用的随机方法来考虑。这种不确定性对于重大工程的抗震设计十分重要。目前使用的模拟方法的缺点是,对震源和传播途径的影响作了过于简化的假定。

随着强震地震学的发展,地震学的研究成果必将进一步促进地震动工程模拟的研究和发展.

### 参 考 文 献

- 1 章在墉. 地震危险性分析及其应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996. 77 ~ 92
- 2 Housner G W. Characteristics of strong-motion earthquakes[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1947, 37(1): 19 ~ 31
- 3 Goodman L E, Rosenblueth E, Newmark N M. Aseismic design of firmly founded elastic structures[J]. Transaction, ASCE, 1955, 120(1): 782 ~ 802
- 4 Kanai K. Semi-empirical formula for the seismic characteristic of ground[R]. 东京: 东京大学地震研究所汇报, 1957. 35(2): 1 ~ 12
- 5 李 杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992. 68 ~ 74
- 6 Ohaski Y. On the significance of phase content in earthquake ground motions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, 17(5): 427 ~ 439
- 7 Hudson D E. Some problems in the application of spectrum techniques to strong motion earthquake analysis[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1963, 53(2): 8 ~ 20
- 8 Kaul M K. Stochastic characterization of earthquakes through their response spectrum[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, 6(5): 16 ~ 28
- 9 江近仁, 洪 峰. 功率谱与反应谱的转换和人造地震波[J]. 地震工程和工程振动, 1984, 4(3): 1 ~ 10
- 10 Nigam N C. Phase properties of a class of random process[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 10(2): 711 ~ 717
- 11 金 星, 廖振鹏. 地震动强度包线函数与相位差谱频数分布函数的关系[J]. 地震工程与工程振动, 1990, 10(4): 20 ~ 25
- 12 胡聿贤, 何 训. 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, 1986, 6(2): 37 ~ 50
- 13 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
- 14 Trifunac M D. A method for synthesizing realistic strong ground motion[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1971, 61(5): 92 ~ 103
- 15 Trifunac M D. Preliminary empirical model for scaling fourier amplitude spectra of strong ground acceleration in terms of earthquake magnitude, source-to-station distance, and recording site condition[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1978, 66(4): 79 ~ 90
- 16 Kanamori H. A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquakes[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1979, 69(4): 45 ~ 56
- 17 廖振鹏, 魏 颖. 设计加速度图的合成[J]. 地震工程和工程振动, 1988, 8(1): 12 ~ 30
- 18 刘小弟, 苏经宇. 具有天然地震特性的人工地震波研究[J]. 工程抗震, 1992, 6(4): 33 ~ 36
- 19 刘鹏程, 林 皋, 金青山. 考虑地震环境的人造地震动合成方法[J]. 地震工程和工程振动, 1992, 12(3): 9 ~ 15

## State of the Art and Prospect of Artificial Ground Motion

Guo Zixiong Wang Miaofang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** Integrating with the simulation method of stochastic process, the authors present the review of the main synthesis methods and current research on artificial ground motion both domestic and abroad. The indirect synthesis method taking the site response spectrum as objective is mainly introduced, the development of semi-empirical comprehensive method considering seismic magnitude, distance, site and fault causing earthquake is also introduced. The main problems existed in current artificial ground motion synthesis and the research tendencies are pointed out.

**Keywords** artificial ground motion, stochastic process, characteristic of ground motion, state of the art