

文章编号: 0258-0926(2014)01-0071-07

核能设施地震动模拟中目标反应谱与功率谱转换方法探讨

邢海灵¹, 赵斌², 卢文胜², 蒋通²

1. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 上海, 201103; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海, 200092

摘要: 针对核能设施地震动模拟中合成人工地震功率谱包络的要求, 比较由反应谱计算功率谱的几种常用方法, 并分析各方法中相关参数对结果的影响。此外, 采用拟合小阻尼反应谱生成人工时程并取各时程功率谱平均值的方法, 可得到与反应谱相对应的功率谱。以 AP1000 和 RG1.60 的反应谱及其对应的目标功率谱为分析对象, 考察由反应谱计算功率谱各种方法的计算精度, 并着重对 Kaul 方法的适用性进行分析。最后给出核能设施地震动模拟时, 获得足够精度功率谱的相关建议。

关键词: 功率谱密度; 反应谱; 人工时程

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A

0 引言

核能设施的抗震分析和抗震性能鉴定工作中, 最基本的也是最困难的是地震动参数的确定。设计地震动参数应包括 2 个水平和 1 个竖向设计反应谱以及不少于 3 组的 3 分量设计加速度时间过程(加速度时程)。我国《核设备抗震鉴定试验指南》为确保试验中施加给试件的能量分布, 规定每个人工加速度时程计算出的功率谱密度(功率谱)曲线在频段 0.3~24 Hz 范围内必须包络由给定反应谱计算出的功率谱密度曲线的 80%。功率谱包络的要求是人工地震动时程是否可用于地震动输入和抗震鉴定工作的判据之一^[1]。

本文首先介绍了几种常用的反应谱和功率谱的近似转换方法, 然后考察各种方法中参数对结果的影响, 以 AP1000 与 RG1.60 的标准反应谱及其对应的目标功率谱为对象, 分析由反应谱计算功率谱时几种方法的适用性。最后通过合成多条人工时程并取其平均功率谱值的方法获得与反应谱相应的功率谱。

1 反应谱与功率谱的近似转换方法

目前反应谱与功率谱之间的近似转换关系是根据随机振动理论, 由单质点体系在平稳随机过程输入下最大反应的概率分布得到。假定单质点体

系响应 $y(t)$ 的方差为 $\sigma_y(t)$, 则在持续时间段 s 内, 不超越概率为 p 的最大反应 $y_{s,p}$ 可表示为^[2-3]:

$$y_{s,p} = r_{s,p} \sigma_y(s) \quad (1)$$

式中, $r_{s,p}$ 为峰值系数。该首次穿越问题^[3]尚没有精确解, 但已有一些良好的近似结果可供使用。根据反应谱的定义, 只要选择适当的峰值系数 $r_{s,p}$, 则自振圆频率为 ω_j 和阻尼比为 ξ 的单质点体系最大反应 $y_{s,p}$ 即为反应谱 $S(\omega_j, \xi)$ 。反应谱和功率谱转换关系的诸多研究中, 应用最为广泛的是 Vanmarcke^[2]和 Kaul^[3]等人的成果, Cacciola 在 Vanmarcke 研究的基础上提出的离散计算方法^[4]也得到了一定的应用。

1.1 Vanmarcke 方法

线性结构在单边功率谱为 $G(\omega)$ 的零均值平稳高斯过程输入下, 响应的均方值为:

$$\begin{aligned} \sigma_y^2 &= \int_0^{\infty} G_y(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} G(\omega) |H(\omega, \omega_j)|^2 d\omega \\ &= \int_0^{\infty} \frac{G(\omega)}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_j^2 \omega^2} d\omega \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ω_j 和 ξ 分别为结构的自振频率和阻尼比;

$H(\omega, \omega_j)$ 为结构的频响函数; $G_y(\omega)$ 为响应的功率谱。

Vanmarcke^[2]假定输入的功率谱在较宽的频带上平缓变化且系统的 ξ 较小, 利用加速度和位移响应均方值的关系, 最终得到加速度响应的均方值为:

$$\sigma_a^2 \approx G(\omega_j) \omega_j \left(\frac{\pi}{4\xi_s} - 1 \right) + \int_0^{\omega_j} G(\omega) d\omega \quad (3)$$

式中, ξ_s 为等效阻尼系数, 用于修正瞬态响应的影 响, $\xi_s = \xi / [1 - \exp(-2\xi\omega_j T_d)]$, 其中 T_d 为强震动持续时间。

强震动持续时间为 T_d 的零均值平稳随机过程, 在不超越概率为 p 时的峰值系数为:

$$r_{T_d, p} = \sqrt{2 \ln \left\{ 2N_y \left[1 - \exp(-\delta_y^{1.2}) \sqrt{\pi \ln(2N_y)} \right] \right\}} \quad (4)$$

$$N_y = \frac{T_d}{2\pi} \Omega (-\ln p)^{-1}$$

$$\delta_y = \sqrt{1 - \frac{\lambda_{1,y}^2}{\lambda_{0,y} \lambda_{2,y}}}; \quad \Omega = \sqrt{\frac{\lambda_{2,y}}{\lambda_{0,y}}}$$

式中, $\lambda_{n,y}$ ($n=0,1,2$) 分别为响应过程的 0 阶、

1 阶和 2 阶谱距: $\lambda_{n,y} = \int_0^\infty \omega^n G_y(\omega) d\omega$ 。将式(3)

与式(4)代入式(1), 并把最大加速度响应作为加速度反应谱 $S_a(\omega_j, \xi)$ 时, 得到其与功率谱的换算关系:

$$G(\omega_j) \approx \frac{1}{\omega_j \left(\frac{\pi}{4\xi_s} - 1 \right)} \left[\frac{S_a(\omega_j, \xi)^2}{r_{T_d, p}^2} - \int_0^{\omega_j} G(\omega) d\omega \right] \quad (5)$$

由上述方法将反应谱转换为功率谱时, 通常使用迭代算法以增加计算精度。首先假定初始的功率谱 $G^0(\omega_j)$, 根据目标反应谱和式(5)算得一个新的功率谱 $G^1(\omega_j)$ 以及与该功率谱相匹配的反应谱 S_a^1 , 若 S_a^1 与目标反应谱 S_A 之间的误差 不满足要求, 则第 $m+1$ 次循环时对功率谱按式(6)进行修正:

$$G^{m+1}(\omega_j) = G^j(\omega_j) \left[S_a^m / S_A \right]^2 \quad (6)$$

1.2 简化的 Vanmarcke 方法

在一些研究中常使用相对简洁的公式计算峰值系数, 其实质上是采用平稳随机过程峰值系数的期望值作为峰值系数^[5]。由功率谱计算加速度反应谱的公式可写为^[6]:

$$S_a(\omega_i, \xi) = \left[\sqrt{2 \ln(\omega_i T_d / \pi)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(\omega_i T_d / \pi)}} \right] \times \left[G(\omega_i) \omega_i \left(\frac{\pi}{4\xi_s} - 1 \right) + \int_0^{\omega_i} G(\omega) d\omega \right]^{1/2} \quad (7)$$

同样可采用式(6)的迭代方法来增加计算的精度。本文将该方法称为 Vanmarcke-S 方法。

1.3 Cacciola 方法

Cacciola^[4]根据 Vanmarcke 的方法, 将峰值系数 $r_{T_d, p}$ 的 2 个参数按式(8)计算:

$$N_y = \frac{T_d}{2\pi} \omega_i (-\ln p)^{-1} \quad (8-1)$$

$$\delta_y = \left\{ 1 - \frac{1}{1 - \xi^2} \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right) \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (8-2)$$

由此得到由功率谱计算加速度反应谱的直接计算公式:

$$S_a^2(\omega_i, \xi) = r_{T_d, p}^2 G(\omega_i) \omega_i \left(\frac{\pi}{4\xi} - 1 \right) + r_{T_d, p}^2 \Delta \omega \left(\sum_{j=1}^{i-1} G(\omega_j) + G(\omega_i) \right) \quad (9)$$

由加速度反应谱计算功率谱的公式为:

$$G(\omega_i) = \frac{4\xi}{\pi \omega_i - 4\xi \omega_i} \left(\frac{S_a^T(\omega_i, \xi)}{r_{T_d, p}^2} - \Delta \omega \sum_{j=1}^{i-1} G(\omega_j) \right) \quad (10)$$

式中, 当 $\omega_i < \omega_0$ 时取 $G(\omega_i) = 0$, ω_0 为起始计算频率。应用中, Cacciola 建议 $p = 0.5$, 积分中频率步取为 $\omega_i = \omega_0 + (i - 0.5) \Delta \omega$ 。同样可以采用式(6)来提高计算精度。

1.4 Kaul 方法

将强震动持续时间为 T_d 的加速度响应视为零均值高斯随机过程, 对其最大值的分布函数进行简化和近似后, Kaul^[3]得出了加速度反应谱值与谱矩在超越概率为 r 时的关系式, 再通过对谱矩作进一步近似后得到了由反应谱直接计算功率谱的近似公式。当采用单边功率谱时 Kaul 的计算公式可表示为:

$$G(\omega) = \frac{2\xi}{\pi\omega} \times \frac{[S_a(\omega, \xi)]^2}{-\ln\{-\pi/(\omega T_d)\} \ln(1-r)} \quad (11)$$

式中, r 为响应的峰值超越反应谱值的概率。

2 参数说明及影响分析

2.1 关于超越和不超越概率的说明

由反应谱近似计算功率谱的关系式中, Vanmarcke 方法中的参数 p 和 Kaul 方法中的参数 r 在文献中通常被称作不超越和超越概率, 这 2 个参数的意义不同, 实际使用中应予以注意。

根据 Vanmarcke 的研究^[7], 在时间段 $(0, s)$ 内平稳随机响应 $|y(t)|$ 的极大值 Y_s 不超过限值 a 的概率分布函数为 $F_{Y_s}(a)$ ($F_{Y_s}(a) = P[Y_s \leq a]$)。反应谱取该时段内不超越概率为 p 的最大值 $y_{s,p}$:

$$p = F_{Y_s}(y_{s,p}) \quad (12)$$

不超越概率为 p 意味着在时段 $(0, s)$ 内 $y(t)$ 第一次穿越限值 a 的概率^[5,7]。 $P=0.5$ 对应的 $y_{s,p=0.5}$ 即为中值。以 AP1000 的标准谱^[8]为例, 其他参数相同的情况下, 不同 p 下用 Vanmarcke 方法由反应谱算得的功率谱如图 1a ($T_d=15$ s, $\xi=0.05$) 所示。由图 1a 可见, 功率谱总体上随 p 的增大而减小, 在低于 2.5 Hz 的频率段参数 p 的影响更为显著。Kaul 根据平稳高斯过程极大值分布的概率理论, 在作了一些假定的基础上, 得到简化的极大值分布函数表达式^[3]。对于强震动持续时间为 T_d 时的加速度响应时程, 将加速度反应谱 $SA(\omega)$ 视为超越概率为 r 的加速度极大值^[3], 换言之, r 表示响应的加速度极大值超过反应谱 $SA(\omega)$ 的概率。具体为: 若 $P_Y(y_m)$ 表示时程 $y(t)$ 极大值 $y_m = \max|y(t)|$ 的概率密度函数, 那么超越概率 r 定义为^[3] :

$$r = \int_{SA(\omega)}^{\infty} P_Y(y_m) dy_m \quad (13)$$

Kaul 建议 r 可取至 0.15。由式 (11) 可以直接看出, 在其他参数相同的情况下, 功率谱随 r 的增大而增大。

尽管 p 和 r 所表示的概率意义不同, 但若将其仅视为数学中的概率变量并取 $r=1-p$ 时, Kaul 的简化计算公式也可由 Vanmarcke 方法得到^[2]。

2.2 强震动持时和阻尼比的影响

反应谱与功率谱的关系公式大都基于平稳随机过程的假定, 随机过程持续时间的长短决定了某频段的地震动能否达到平稳状态。高频地震动可以在较短的时间内达到平稳状态, 而低频成分则需要较长的时间, 因此强震动持续时间对低频的影响相对更大。强震动持续时间定义为 70% 持续时间^[9], 即 $T_d = T_{0.75} - T_{0.05}$, 其中 $T_{0.05}$ 和 $T_{0.75}$ 分

别为累积能量 $E(t) = \int_0^t y^2(\tau) d\tau$ 达到振动总能量

5% 和 75% 的时刻。图 1b ($p=0.5, \xi=0.05$) 为 AP1000 标准谱采用不同 T_d 由 Vanmarcke 方法得到的功率谱结果, T_d 越小, 算得的功率谱越大, 这种现象在低频段更为显著。式 (11) 可更为直接地表现出持续时间对结果的上述影响。反应谱与功率谱的关系公式中, ξ 的影响有 2 个方面:

采用不同 ξ 的反应谱时对结果的影响; 方法本身中对 ξ 的修正带来的影响。就前者而言, 若采用相同地震动而不同 ξ 的反应谱来计算对应功率谱, 理论上应得到相同的结果。但规范中不同 ξ 的反应谱是根据其相互间的经验关系或采用统计方法得到的, 因此会对结果产生一定程度的影响。采用不同 ξ 的 AP1000 反应谱来计算功率谱, 当其他参数完全相同时 Vanmarcke 方法的结果见图 1c ($T_d=15$ s, $p=0.5$)。可见 ξ 变化时得到的功率谱有一定的差异, 在低频段这种差异更为明显。

为了考虑瞬态振动的影响, Vanmarcke 在式 (3) 中采用与持续时间和频率相关的阻尼 ξ_s 。Kaul 考虑到地震动的强震部分持续时间有限, 并非如假定的平稳高斯过程那样持续时间为无限长, 因此建议式 (11) 可采用等效阻尼比 ξ_e :

$$\xi_e = \xi + 2/(\omega T_d) \quad (14)$$

由式 (14) 可见, ξ 修正仅在 ωT_d 较小时有明显的作。AP1000 标准谱在使用 Kaul 方法计算功率谱时, Vanmarcke 和 Kaul 的 ξ 修正方法对结果的影响见图 1d ($T_d=15$ s, $p=0.5, \xi=0.05$)。从图 1d 中可以看出, 强震动持续时间为 15 s 时 Kaul 修正方法对小于 2.5 Hz 的低频段的效果明显, Vanmarcke 修正方法也主要是在低频段有影响, 但相对而言对结果的影响则小很多。

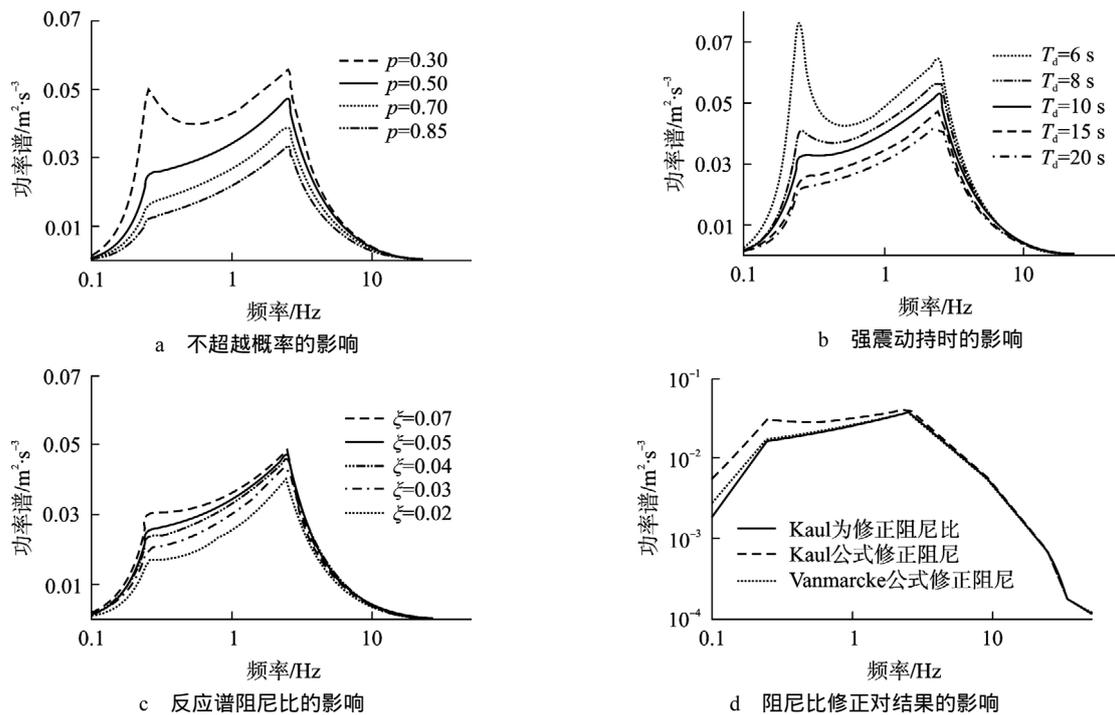


图1 由反应谱计算功率谱时各参数对结果的影响

Fig. 1 Effect of Parameters on Deriving PSD from Response Spectrum

3 计算结果比较

AP1000 设计地震反应谱(简称 AP1000 反应谱)是在 RG1.60 基岩标准谱基础上根据美国中东部地区的地震动特征修正而来的^[8], AP1000 反应谱常用作楼层反应谱且与我国核电厂抗震设计规范及核设备抗震鉴定试验指南中给出的硬土地地的标准反应谱基本一致。文献[8]同时给出了以 $0.3g$ (g 为重力加速度) 标定的 AP1000 反应谱的目标功率谱值(简称 AP1000 功率谱)。该功率谱值是根据美国《标准审查大纲》SRP3.7.1 中

RG1.60 对应的目标功率谱进行调整得到的。选用 ξ 为 0.02 的反应谱作为计算对象,采用前文中各种方法算得的结果以及文献[8]给出的 AP1000 功率谱值在频率为 4~20 Hz 的区段相差不大。在需要关注功率谱的频段(如 0.3~33 Hz)内, Vanmarcke 和 Cocciola 方法的结果和 AP1000 功率谱吻合良好。各种方法计算结果的差异主要表现在低于 4 Hz 的频率段。值得注意的是,使用 Vanmarcke 和 Cocciola 方法由反应谱计算功率谱时,若采用较小的 T_d , 则式(4)根号中的值可能为负数,为避免该问题, Cocciola 建议计算中使用起始计算频率 ω_0 。

采用 Kaul 方法在不进行阻尼比修正时,当 $r=0.5$ 且频率小于 4 Hz 的情况下得到的结果与 Vanmarcke-S 方法的结果基本一致,在该频段总体上小于 AP1000 功率谱值;而在大于 25 Hz 的高频段结果偏于保守。修正阻尼比后的 Kaul 方法在低频段的值明显提高,在低于 0.4 Hz 时的结果略大于 AP1000 功率谱,但在高于 4 Hz 时阻尼比修正的作用便不再明显。另外,当强震动持续时间比较小(如 $T_d < 10$ s)时采用修正阻尼比的 Kaul 方法算得的功率谱在低于 2 Hz 的部分将明显偏大。根据之前对参数研究的结论, Kaul 方法可以通过选取适当的超越概率来得到更为理想的结果。图 2 ($T_d=15$ s, $p=0.5$, $\xi=0.02$) 是使用 Kaul 方法并取 $r=0.85$ 时的结果,图 2 中同时给出了 Vanmarcke 方法的结果。由图 2 可见,在使用较大的 r 值后 Kaul 方法在 0.3~33 Hz 频段内的结果与 AP1000 功率谱吻合较好且与 Vanmarcke 方法的结果相差不大。

此外,本文以标定为 $1.0g$ 的 RG1.60 标准基岩反应谱^[10]为考察对象,使用各种方法算得了功率谱并与 SRP3.7.1 给出的目标功率谱^[11]进行比较。当阻尼比为 2% 时得到的结果与先前对 AP1000 谱的考察结论相似;使用各种方法导出

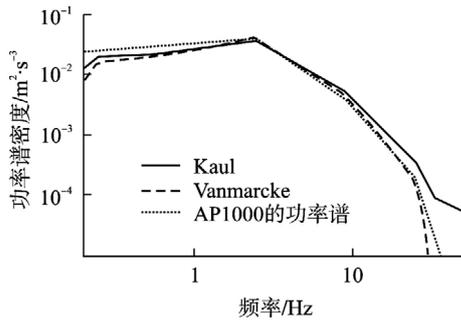


图2 Kaul方法计算结果与AP1000功率谱的比较
Fig. 2 Comparison of AP1000 Response Spectrum Compatible PSD with those Derived from Different Methods

的功率谱在3~16 Hz范围内与SRP3.7.1的目标功率谱吻合良好；各种方法的偏差主要在功率谱低于3 Hz和高于20 Hz的部分。采用Kaul方法取 $r=0.85$ 时的结果见图3($T_d=15$ s, $p=0.5$, $\xi=0.02$)。可以看出, Kaul方法导出的功率谱结果与SRP3.7.1给出的功率谱在0.3~16 Hz范围内吻合良好, 在稍高频段的结果较为保守, 这与先前对AP1000的考察结论基本相同。

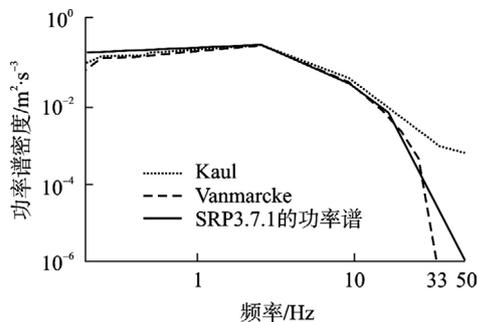


图3 Kaul方法计算结果与SRP3.7.1功率谱的比较
Fig. 3 Comparison between SRP3.7.1 Response Spectrum Compatible PSD and Those Derived from Different Methods

4 基于人工时程的功率谱确定方法

参考NUREG/CR-5347获得与RG1.60反应谱相应功率谱的过程, 与反应谱相一致的目标功率谱可通过下述过程得到: 首先拟合 ξ 为0.02的目标反应谱得到人工时程, 并要求时程的反应谱总体上低于目标反应谱, 然后将该时程的功率谱作为制定目标功率谱的依据。本文取AP1000标准谱作为拟合的目标谱, 根据三角级数法合成拟合反应谱的加速度时程。为消除特定频率下单条时程功率谱值的随机性, 通过合成多条时程, 然后取各时程的平均值作为最终计算结果。采用常

用的三段线时程包络线函数^[5,6,9]合成100条人工时程(时间间隔为0.01 s、 T_d 为15.0 s、总持续时间30.0 s)。当时程反应谱的平均值与AP1000标准反应谱非常接近, 符合NUREG/CR-5347对时程反应谱的要求时, 时程功率谱的平均值与AP1000功率谱基本吻合。使用这种做法, 本文用RG1.60及其对应的功率谱进行校验, 结果与上述AP1000的功率谱基本相同。综上可以判定, 拟合小阻尼比反应谱的多条时程的平均功率谱可作为与反应谱相应的目标功率谱。

5 应用算例

某核电厂机组继电器机架改造抗震试验中, 测得楼层安全停堆地震(SSE)的反应谱曲线($\xi=0.02$)。使用基于人工时程的功率谱方法, 首先以该反应谱为目标谱合成100条人工地震波, 其中人工时程时间间隔0.01 s, 强震持时15.0 s, 总持续时间30.0 s, 并取各人工时程的功率谱平均值。对反应谱计算功率谱的各方法算得的功率谱和时程方法的平均功率谱进行对比后发现, 0.3~24 Hz内由Vanmarcke和Cocciola方法算得的功率谱与时程的功率谱平均值基本吻合。Kaul方法($r \leq 0.5$)的结果在低于10 Hz的部分偏低, 该方法的阻尼修正仅在低频区段产生影响, 在频率高于3 Hz之后便失去作用。故可选用较高的超越概率 r 提高Kaul方法在低频段的计算精度。

图4为Kaul方法在超越概率 $r=0.85$ 时的计算结果。可以看出, 除了在高频段偏于保守之外, Kaul方法在超越概率 $r=0.85$ 时的计算结果与时程平均功率谱吻合良好, 也与Vanmarcke方法的结果相吻合。所以, 对于特定的楼层反应谱, 可以使用Kaul方法计算其对应的目标功率谱。

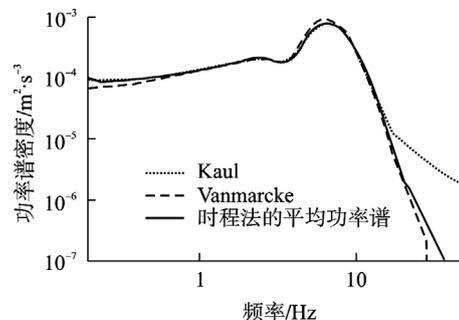


图4 Kaul方法计算结果与时程平均功率谱的比较
Fig. 4 Comparison of Response Spectrum Compatible PSD Derived from Different Methods

6 结 论

反应谱和功率谱的相互转换方法大都基于平稳高斯过程的假定,并加以修正后得到。本文针对几种常见的方法,对其参数进行了说明并考察了参数对功率谱计算结果的影响。以 AP1000 和 RG1.60 的反应谱及其对应的目标功率谱为分析对象,考察了各种方法的适用性。主要结论为:

(1) 用于核能设施的目标功率谱可以通过反应谱与功率谱的相互关系得到。反应谱和功率谱的相互转换方法中,参数取值对结果有显著的影响,当功率谱的精度要求较高时,需要合理选择这些参数方能使得计算结果满足精度要求。

(2) 反应谱和功率谱的相互转换方法中, Kaul 公式最为简单方便,但在高频和低频部分的结果稍有偏差,通过阻尼修正或取用适当的超越概率值,可使低频段的结果达到较为理想的精度,高频部分的结果也偏于安全。当强震持时 $T_d=15$ s 时取 $r=0.85$, Kaul 方法由 AP1000 反应谱算得的功率谱与目标功率谱吻合良好,由 RG1.60 基岩标准谱导出的功率谱与 SRP3.7.1 建议的目标功率谱在所关心的频率范围内也基本一致,高频部分均偏于安全。同时,对于核能设施的楼层反应谱, Kaul 方法由反应谱算得的功率谱与多条时程的平均功率谱基本吻合。使用 Kaul 方法从反应谱导出的功率谱可以满足核电设备抗震鉴定的应用要求。

(3) 当反应谱和功率谱的相互转换的参数难以确定时,可拟合小阻尼反应谱生成多条人工时

程,取各时程功率谱的平均值作为目标功率谱。

致谢:感谢方庆贤老师对本文提出的宝贵意见和悉心指导。

参考文献:

- [1] 徐鸿. 人工地震加速度时程及其可接受性判据[J]. 核动力工程, 1996, 17(1): 51-55.
- [2] Vanmarcke E H. Structure Response to Earthquakes[A]/ C Lomnitz, E Rosenblueth. Seismic risk and engineering Decisions[M]. Elsevier: New York, 1976.
- [3] Kaul M K. Stochastic Characterization of earthquakes Through Their Response Spectrum[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, 6(5): 497-509.
- [4] Cacciola P, Colajanni P, Muscolino G. Combination of Modal Responses Consistent with Seismic Input representation[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(1): 47-55.
- [5] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 1988.
- [6] 赵凤新,刘爱文. 地震动功率谱与反应谱的转换关系[J].地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 30-35.
- [7] Vanmarcke E H. Properties of Spectral Moments with Applications to Random Vibration[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, 1972, 98(EM2): 425-446.
- [8] WEC. AP1000 Design Control Document[R]. Report: APP-GW-GL-700. Cranberry Township, PA: Westinghouse Electric Company, 2007.
- [9] NUREG/CR-5347. Recommendations for Resolution of Public Comments on USI A-40, Seismic Design Criteria [R]. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1989.
- [10] U.S. Atomic Energy Commission. Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Plants[S]. 1973.
- [11] NUREG-0800, U.S. Nuclear Regulatory Commission Standard Review Plan 3.7.1, Seismic Design Parameters[S]. Revision3, 2007.

Relationships between Response Spectra and PSD Functions for Simulation of Artificial Earthquakes for Nuclear Power Plant Design

Xing Hailing¹, Zhao Bin², Lu Wensheng², Jiang Tong²

1. Shanghai Shentong Rail Transit Research & Consultancy, Co. Ltd., Shanghai, 201103, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China

Abstract: The requirements to envelope a target power spectral density (PSD) function compatible with the design response spectra are usually prescribed by seismic codes for generating artificial time series as seismic input. This paper contrasts several methodologies which are most widely used in engineering seismology for defining spectrum compatible PSD. Parameters of these methodologies were analyzed using the RG1.60 and AP1000 design response spectra of safe shutdown earthquake. The emphasis was then placed on the method proposed by Kaul and its applicability was illustrated. Artificial time histories, whose response

spectra were in agreement with 2%-damped design response spectrum, were generated and their average PSD would be the minimum PSD requirements compatible with the spectrum. Numerical examples show the accuracy and applicability of those approaches.

Key words : Power spectral density, Response spectrum, Artificial strong motion

作者简介：

邢海灵(1978—)，男，工程师。2007年毕业于同济大学防灾减灾与防护工程专业，获工学博士学位。现从事工程振动控制方面的研究工作。

赵斌(1967—)，男，教授。1998年毕业于西安建筑科技大学结构工程专业，获工学博士学位。现从事工程结构抗震方面的研究工作。

卢文胜(1967—)，男，教授。2001年毕业于同济大学大学结构工程专业，获工学博士学位。现从事工程结构抗震方面的研究工作。

(责任编辑：孙凯)

(上接第70页)

induced by the diffuse earthquake, and therefore, the NPP construction based on the site specific design ground motion in the area will have higher seismic safety margin; In relatively strong seismicity area, the site specific design ground motion parameters are more likely to be controlled by the calculated results from the probabilistic method, and for some NPP sites, the ground motion parameters from probabilistic method, especially the low frequency spectral accelerations are much bigger than those from the deterministic method; The determination of site specific design ground motion parameters as a whole is very conservative for Chinese NPP sites.

Key words: Nuclear power plant, Design ground motion, Deterministic method, Probabilistic method, Diffuse earthquake

作者简介：

李小军(1965—)，男，研究员。1993年毕业于中国地震局工程力学研究所地震工程与防护工程专业，获博士学位。现从事防灾减灾工程与防护工程研究。

贺秋梅(1978—)，女，助理研究员。2012年毕业于中国地震局地球物理研究所地震工程专业，获博士学位。现从事结构抗震研究。

侯春林(1981—)，女，副研究员。2012年毕业于中国地震局工程力学研究所结构工程专业，获博士学位。现从事核电工程抗震研究。

(责任编辑：黄可东)