

文章编号：0258-0926(2016)02-0051-03；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.02.0051

核电厂地震风险量化方法

王金凯，林模倮

中广核工程设计有限公司，广东深圳，518172

摘要：核电厂地震风险评价应该采用合适的数据处理方法和分析技巧。自主开发地震量化软件，采用蒙特卡洛抽样方法，对地震发生频率及设备失效条件概率进行模拟，并结合地震事故序列对电厂地震风险水平进行评价。该方法弥补了传统概率安全评价（PSA）建模软件在处理地震风险评价方面的不足。与国外同类型软件相比，在不确定性方法的处理上更合理，功能上更完善。

关键词：概率安全评价（PSA）；危害性；易损度；蒙特卡洛
中图分类号：TL364.5 **文献标识码：**A

Quantification Method for Nuclear Power Plant Seismic Risk

Wang Jinkai, Lin Modi

China Nuclear Power Design Company, Inc., Shenzhen, Guangdong, 518172, China

Abstract: In the seismic risk analysis for the nuclear power plant, the appropriate data processing method and analytical technique are required. In this study, seismic risk quantification software is developed independently for the first time in China. It uses Monte Carlo sampling method to simulate the seismic frequencies and component conditional failure probabilities, and integrates with accident sequences to assess the plant seismic risk. This method overcomes the shortcomings of the traditional probabilistic risk assessment modelling software in the seismic risk evaluation. Compared with the similar software abroad, this software is more reasonable in the uncertainty process.

Key words: Probabilistic Safety Analysis (PSA), Hazard, Fragility, Monte Carlo

0 前言

核电厂的地震概率安全评价（PSA）为核电厂可能采取的应对措施提供建议，以满足国家核安全法规和公众对核电厂抗震的要求。地震 PSA 主要包括：地震危害性分析、构建筑物系统和设备（SSC）易损度分析、系统分析及建模、风险量化分析。国外软件存在着不确定性分析方法处理不足，缺乏割集、重要度等计算信息，计算误差较大等不足。为此，本文提出了新的地震 PSA 量化方法。

1 地震 PSA 流程

根据国外标准^[1-2]，地震 PSA 工作可分为如下 4 步：

（1）地震危害性分析：地震危害性以指定峰值地面加速度的年超越频率来表示。针对不同厂

址，将该厂址在指定的时间间隔内，不同峰值地面运动加速度下发生的年超越频率作出其地震危害性曲线。由于地震发生的随机性以及人们对地震机理认识的不确定性，地震危害性曲线通常以一簇包含不同置信度的曲线系列反映出来。

（2）地震 SSC 易损度分析：对电厂安全重要相关的 SCC 进行不同地震条件下的失效模式及失效概率分析，最后得出不同置信度下的一系列易损度曲线。

（3）事故序列分析和电厂易损度计算：利用 PSA 建模软件，通过构建系统故障树和事件树，得出地震可能导致堆芯损坏的事故序列及电厂易损度。通过定量化整合地震始发事件频率和地震设备条件失效概率可以得出地震事件序列的发生频率。电厂损伤状态的频率通过对相关的事件序列频率进行数值处理而得出。

(4) 地震风险量化分析：通过编制专用的地震量化分析软件，将不同置信度的地震危害性曲线与电厂易损度曲线进行整合，通过蒙特卡洛抽样处理，得出地震导致的堆芯损坏频率 (P_{SCDF})。

2 地震量化分析方法

2.1 地震危害性分析方法

在不同地震动加速度 a 下的地震发生频率 $\Phi(a)$ 可以用一条曲线表示。由于地震发生频率有很大的不确定性，通常地震危害性曲线用一系列带有不同置信度的曲线表示^[3] (图 1)。

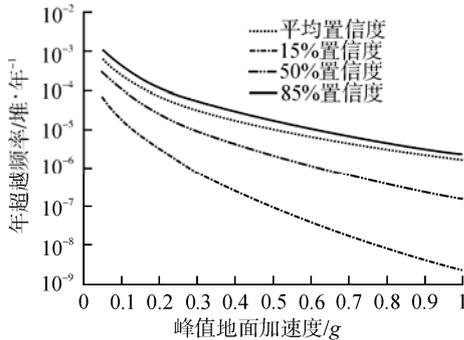


图 1 地震危害性曲线

Fig. 1 Seismic Hazard Curves

在 a 下发生地震的频率密度函数 $\phi(a)$ 及累计分布函数 $\Phi(a)$ 关系如下：

$$\phi(a) = -d\Phi(a)/da \quad (1)$$

如果将地震谱中的峰值地面加速度分为 n 个区间段，在加速度 $[a_{k-1}, a_k]$ 区间地震频率为：

$$\Phi_k(a) = - \int_{a_{k-1}}^{a_k} \phi(a) da, \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

2.2 SSC 易损度分析方法

根据美国电力研究协会 (EPRI) 的易损度分析技术导则^[4]，在 a 下地震引起的 SSC 失效概率 $F(a)$ 可用双对数正态分布模型估算，如下：

$$F(a) = f \left[\frac{\ln(a/A_m) + \beta_U f^{-1}(Q)}{\beta_R} \right] \quad (3)$$

式中， A_m 为 SSC 抗震能力中值； β_U 为不确定性对数标准偏差； β_R 为 SSC 抗震能力不确定性参数； Q 为表示该 SSC 在 a 下的地震失效概率小于 $F(a)$ 的置信度； f 为标准正态累积分布函数； f^{-1} 为 f 的反函数。

SSC 的抗震能力具有较大不确定性，通常也用一系列不同置信度的曲线来表示 ($A_m=0.92 g$, $\beta_R=\beta_U=0.32$)，见图 2。

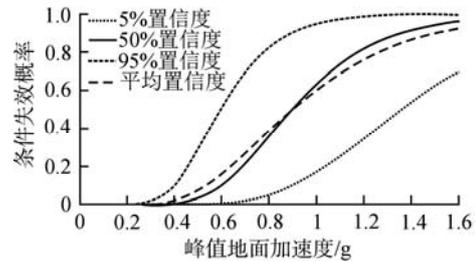


图 2 地震 SSC 易损度曲线

Fig. 2 Seismic SSC Fragility Curves

为简化分析，对同厂家制造，布置在同一楼层的同类设备采用同一失效事件处理。SSC 随机失效一般采用同 PSA 建模软件中相同的随机抽样方法来处理。

2.3 地震 PSA 建模及电厂易损度分析方法

通过地震 PSA 建模软件 RISK SPECTRUM，将地震导致的安全相关设备 SSC 失效事件添加到相应的地震 PSA 故障树和事件树中，可得出在不同地震条件下 SSC 失效导致堆芯损坏的事故序列布尔逻辑等式。该处理过程包含地震始发事件的识别、地震 SSC 失效、随机 SSC 失效、人因失效。根据不同事故序列的布尔等式将设备易损度曲线整合得到堆芯损坏的条件概率 F_c ，即在该地震条件下电厂的易损度。

电厂的易损度曲线是根据事故序列中的布尔等式，通过逐个合并整理 SSC 的易损度曲线而得到。假设每个 SSC 易损度用 n 条曲线表示，则在制定的地震加速度下对应有 n 个地震失效概率。对于最小割集中的 2 个互相独立的地震失效事件，则有 n^2 条易损度曲线。这 n^2 条曲线最后再合并成 n 条曲线。如果这 2 个失效基本事件是完全相关的，则最后也要合并为 n 条曲线。接着，再将这新合并产生的 n 条曲线与割集中下一个带有 n 条曲线的 SSC 合并。以此类推，通过处理，每个布尔等式会得到 n 条经过处理的易损度曲线。最后的电厂易损度曲线也有 n 条曲线。

2.4 地震风险整合及量化方法

地震导致的堆芯损坏频率 P_{SCDF} 为 $\phi(a)$ 与该等级下 $F_c(a)$ 乘积的积分：

$$P_{SCDF} = \int_0^{\infty} [-d\phi(a)/da] F_c(a) da \quad (4)$$

假设地震危害性不确定性分布与地震易损度不确定性分布是完全独立的。地震危害性曲线由 k 条曲线构成的曲线簇来表示，而电厂易损度曲

线有 n 条, 则对于某一给定的地震区间, 通过以上公式可以得到 kn 个失效频率值。通过对这些频率值进行排序及求和等处理, 可以得到电厂在该地震条件下的 P_{SCDF} 平均值及不确定性分布情况。

3 计算结果分析

为了完成量化分析数据处理, 编制了地震量化分析软件。该地震量化分析软件采用 C++ 语言编写, 主要的信息输入包括: 地震危害性曲线分布表; 地震 SSC 失效易损度参数表 (A_m, β_U, β_R); 随机失效事件分布表 (包含分布类型、失效概率等参数); 最小割集表 (从 RISK SPECTRUM 直接导出)。

主要输出信息包括: SSC 易损度表及分布曲线; 电厂易损度表及分布曲线; 地震堆芯损坏频率及分布; 最小割集排序表; SSC 重要度排序表 (重要度 FV, 风险增进值 RAW)。地震 PSA 量化分析软件的输入信息采用 MICROSOFT EXCEL 电子表格形式读取。对于相同的输入信息, 如果蒙特卡洛抽样计算的循环次数和初始种子相同, 就会得到相同的计算结果。

为了验证软件计算结果的正确性, 将软件计算结果与 MICROSOFT EXCEL 计算结果做了比较。其中 EXCEL 中的随机抽样计算采用 CRYSTAL BALL 工具进行处理。

为了便于与手工计算结果进行比较, 考虑到计算时间及手工计算的方便性, 特选取某核电厂前 100 位虚拟化的最小割集作为分析对象 (该割集仅用于软件验证, 并不是真实的电厂信息)。这些最小割集具有广泛的代表性, 既有地震失效事件, 也有随机失效事件 (含地震人因失效), 也包含各个地震水平区间段 (共分 10 段) 的地震始发事件。这些割集通过 RISK SPECTRUM 软件导出, 由软件读取。

由于地震危害性曲线及 SSC 易损度曲线分布均具有较大的不确定性, 计算结果必然也具有很大不确定性。通过对地震发生频率、SSC 易损度、随机失效易损度等数据的分布进行大量的蒙特卡洛随机抽样和迭代计算, 就可以比较合理地得到地震 PSA 堆芯损坏频率的分布情况。

通过本软件对 100 个割集进行分析处理。当循环次数达到 10^4 次时, 本软件计算所得的 P_{SCDF} 值为 1.30×10^{-6} (堆·年), 与循环 50000 次的结果相

比, 相对变化值为 0.7%, 在 3% 以内。当循环次数为 3000 次时, EXCEL 计算的 P_{SCDF} 为 1.29×10^{-6} (堆·年), 本软件的计算结果为 1.26×10^{-6} (堆·年), 两者非常接近, 相差在 3% 范围以内。

图 3 为本软件计算得出的各地震水平区间的平均 P_{SCDF} 。地震对堆芯损坏的可能主要发生在地震峰值加速度 0.3 ~ 0.8 g 之间, 约占总 P_{SCDF} 的 90%。对于小于 0.2 g 的地震, 由于低于核电厂设计的安全停堆地震 (SSE) 水平, 核电厂具有一定的抗震能力, 该等级地震对 P_{SCDF} 的影响极小。当地震水平大于 0.8 g 后, 其对堆芯损坏的风险也很低, 主要是由于发生该水平的地震频率本身就已经很低。本软件也得出了 SSC 的 FV 和 RAW 以及最小割集对 P_{SCDF} 的作用值。通过这些信息可以掌握对堆芯损坏频率起主要影响的设备失效事件, 也可以为核电厂运营者针对核电厂抗震能力提升的改进措施提供参考。

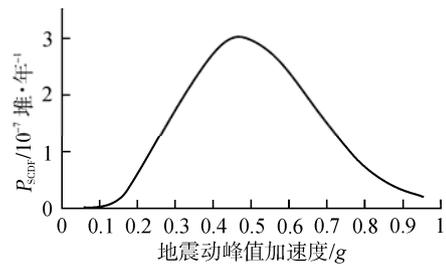


图 3 地震 PSA 量化分析结果
Fig. 3 Seismic PSA Quantification Result

4 结论

开发了地震风险量化计算软件完成了地震风险分析。通过与 EXCEL 计算结果对比, 显示本软件计算结果正确, 能满足地震 PSA 的量化分析工作。这为核电厂地震 PSA 工作提供了可靠的分析平台。

参考文献:

- [1] ASME/ANS RA-Sb-2013. Standard for level 1/large early release frequency probabilistic risk assessment for nuclear power plant applications[S]. New York, 2013.
- [2] EPRI, TR-3002000709, Seismic Probabilistic risk assessment implementation guide[S]. Palo Alto, CA, 2013.
- [3] NUREG-CR-6607. Guidance for performing probabilistic seismic hazard analysis for a nuclear plant site: example application to the southeastern united states[S]. 2002.
- [4] EPRI, TR-1002988. Seismic fragility application guide [S]. Palo Alto, CA, 2002.

(责任编辑: 王中强)