

宫会玲, 王冉, 杜龙. 概率论方法在核电厂地震安全性评价中的应用[J]. 华南地震, 2017, 37(S1): 48–52. [GONG Huiling, WANG Ran, DU Long. Some Reflections on the Utility of the Probability Safety Analysis (PSA) to the Seismic Safety Assessment (SSA) of the Nuclear Power Plant Site [J]. South China journal of seismology, 2017, 37(S1): 48–52.]

## 概率论方法在核电厂地震安全性评价中的应用

宫会玲<sup>1</sup>, 王冉<sup>2</sup>, 杜龙<sup>3</sup>

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 长安大学, 西安 710064; 3. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 510080)

**摘要:** 为遵循和更好地理解概率安全分析技术在核安全领域的应用及相关法规政策, 在核电厂工程场地地震安全性评价领域, 基于地震地质事件的时空分布规律, 讨论了概率论方法在地震安全性评价中的采样代表性、频率和时间序列分析的基本假设, 提出核电厂地震安全性概率论评价方法存在值得进一步思考探讨之处, 可能主要在于概率是相对固定值及其前提存在假设, 可能的发展方向是结合地球动力学将概率当作一个变量处理。

**关键词:** 概率安全分析技术; 核电厂; 地震评价; 探讨

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) S1-0048-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.S1.007

## Some Reflections on the Utility of the Probability Safety Analysis (PSA) to the Seismic Safety Assessment (SSA) of the Nuclear Power Plant Site

GONG Huiling<sup>1</sup>, WANG Ran<sup>2</sup>, DU Long<sup>3</sup>

(1. *Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China*; 2. *Changan University, Xi'an 710064, China*;  
3. *China Nuclear Power Engineering Company, Shenzhen 518000, China*)

**Abstract:** On the seismic safety assessment (SSA) of the nuclear power plant site, in order to comply with and rather understand the code and policy related to the utility of the Probability Safety Analysis (PSA) in nuclear safety field, based on the spatial and temporal distribution of the seismic and geological events, the sampling representative and frequency, time series analysis and basic assumption herein are discussed. It is believed that these conditions yielded a limitation in the utility of PSA to SSA and exhibit that the probability is a relative invariable value. Therefore, imaginabale developments are to combine geodynamics and regard the probability as a random variable.

**Keywords:** Probability Safety Analysis (PSA); Nuclear power plant; Seismic safety assessment

收稿日期: 2017-01-10

作者简介: 宫会玲 (1982-), 女, 工程师, 主要从事构造地质学专业。

E-mail: hngong2012@163.com.

## 0 引言

核电厂工程地震安全性评价属于核电厂工程项目的前期工作, 主要涵盖在工程选址阶段, 核电厂工程选址又包括了厂址普选(含厂址规划、厂址查勘)、厂址初步可行性研究、厂址可行性研究几个阶段。在这些阶段中, 地震安全性评价得出的参数, 即设计基准地震动参数, 直接关系到核电厂的安全可靠性, 而为安全可靠性所进行的工程抗震工作的投入, 又和核电厂的技术可行性和经济合理性挂钩。常常, 抗震技术不能在很短时期内得到突破, 就会形成抗震技术瓶颈, 即使是抗震技术最终可以达到要求, 也可能导致抗震经济费用十分巨大, 形成抗震投资瓶颈。如何实现抗震技术和投资两方面与安全保证方面之间的平衡, 核电厂地震安全性评价得出的设计基准地震动参数便成了关注的焦点, 它对核电厂工程厂址的适宜性具有十分重要的先决作用和意义。

2010年02月, 国家核安全局发布了“《概率安全分析技术在核安全领域中的应用》(试行)”, 目的是为推动概率安全分析在我国核安全领域中的应用, 提高核动力厂安全水平和核安全监管效率<sup>[1]</sup>。概率安全分析(Probability Safety Analysis, PSA)作为与确定论安全分析方法互补的一种技术手段, 已成为一种技术政策, 这已充分说明了PSA的重要价值和意义。

地震安全性评价领域实际上很早就引入了PSA来分析地震事件, 最早的文献见于1968年<sup>[2]</sup>。尔后, PSA在各国地震安评中都得到了应用和广泛关注<sup>[3-7]</sup>, 国际原子能机构IAEA也专门发布相关文件对地震PSA进行介绍<sup>[7]</sup>。然而, 在工程场地的地震危险性的评价工作实践中, 概率法遇到了一些不协调的问题或者困难, 甚至PSA在关键工程地震安评领域应用一度遭受极大的挑战<sup>[8-9]</sup>。本文针对核电厂地震安全性评价概率论方法问题, 试图从概率法应用的前提条件入手, 收集和探讨PSA在地震安全性评价中应用的问题。若能有效地对这些问题进行预防和改进, 则能从工程场地自然条件的地震危险性方面提高对工程建设的安全可靠性的理解和保障。

## 1 地震PSA的基本假设及其与地震认识之间的矛盾

地震安全性评价概率法(以下简称概率法)在

建立之初便交代了一系列假设条件。这可以从其分析步骤的描述中分析得到。

概率法的一般步骤如下<sup>[4]</sup>:

(1) 潜在震源区划分。对潜在震源区的边界进行明确的划分, 这些区域是潜在的地震发生的区域, 区内各处发生某震级地震的可能性相同。

(2) 潜在震源区地震活动性参数的确定。选择合适的衰减关系以估计场点的作为震级、震源到场地的距离和各种场地条件函数的场地地面运动参数。

潜在震源区的地震活动性, 取决于各震级地震在该潜在震源区内的复发关系, 通常以具有一定普适性的 $G-R$ 关系来表述。在特定时段(通常为1年)内各震级地震的发生几率, 取决于该关系。

(3) 估计地震动影响。估计地震的影响, 需要确定地震动参数的衰减关系, 它反映对于某一震级地震, 其产生的地震动参数均值 $A$ 随远离震源而衰减的状况。同时由于衰减关系存拟合误差可以看作是满足正态分布的随机变量, 因此, 该地震对场点的影响大小满足均值为 $A$ , 方差为 $\sigma_2$ 的正态分布

(4) 计算场点的地震危险性。概率法的基本假设:

①地震和地震动特性具有随机性。在目前的科学认识水平下, 地震的发生及地震动特性都具有一定的不可预见性, 必须以概率的方式来表达对未来地震及其地震动的预测。概率论是一门研究随机现象规律的数学分支。因此, 概率法应用于地震安全性评价的最基本的假设是地震和地震动特性具有随机性。核电厂地震安全性评价目的是为核电厂工程设计提供抗震标准, 需对地震现象及其地震动特性的规律的进行认识。概率要预测是大量随机事件的结果在数量上的规律性。对于地震现象, 目前人们尽管揭示了其大致的因果关系, 但尚不能知道其全部过程和机制, 人们正在努力知道地震的成因和机理。

②潜在震源区内地震事件服从泊松分布。试验中出现概率很小的事件被称作稀有事件。如地震、火山爆发等。由泊松定理, 稀有事件出现的次数近似地服从泊松分布。随机时刻相继出现的事件所形成的序列, 叫做随机事件流。若事件流具有平稳性、无后效性、普通性, 则称该事件流为泊松事件流(泊松流)。这也是泊松分布产生的一般条件。泊松分布要求事件在时间轴上是均匀分布的, 事件之间是彼此独立的。

实际上,从这一点上来看,潜在震源区的划分对于确定论方法来说,也是一样的假设效果,因为确定论方法完全不考虑时间。确定论方法通过确定可能影响场地的所有重要潜在震源的位置和特征,对每个潜在震源指定最大可信地震( $M_{CEs}$ )。这样来说,不论是确定论方法还是概率论方法,潜在震源区的划分假设条件都是该区内空间上地震事件是均匀分布的。只不过确定论方法无须考虑时间分布,因此其显得更简单。

然而,我们知道,根据震级-时间关系图( $M-T$ 图),地震总有活跃期和平静期,且是不均一分布的,这表明地震的应变释放在时间上也是不均一的<sup>[8]</sup>。于是有研究者提出许多具有记忆模型,如,更新模型、时间可预测模型、震级可预测模型、马尔可夫模型等。然而,当前大量的概率地震危险性分析实际工作中,泊松分布依然被广泛应用。这主要是因为:一方面,记忆模型通常都是多参数的,在资料有限的状况下,统计拟合上存在较大的困难;另一方面,就工程关心的较大地震而言,通常复发周期较长,工程寿命期相对复发周期而言极其短暂,因此,泊松分布作为对地震发生状况的某种近似,是可以接受的;再者,泊松分布的突出优点是模型简单,在现有的资料条件下模型参数的统计计算通常都易于进行。

该假定的优点是:地震带(地震统计区)在所考虑的未来时间段内,地震活动满足泊松分布,所以仅用能够反映该时段地震活动水平的地震年平均发生率 $\nu$ 一个参数就可以确定地震活动的时间和频度特征。

③ 潜在震源区内地震复发遵循指数关系,其震级分布满足截断的指数分布。

潜在震源区内,地震活动性的定量表现可以表述为单位面积、单位时间内所发生的大于一定震级 $M_s$ 的地震次数。足够大小的统计样本,统计可得到:

古登堡-里克特定律( $G-R$ 定律):

$$\log n = a - bM \quad (1)$$

式(1)中, $n$ 为一定地区和一定时间内发生的震级从 $M$ 到 $M+dM$ 的地震频度。

$G-R$ 定律表明频度的对数与震级成反比。简单地说,就是大地震少,小地震多。这说明了地震震级分布的不均匀性及其指数分布规律。

这种假定的优点是:地震带(地震统计区)内地震震级服从指数分布,所以仅用震级-频度关系系数 $b$ 值一个参数就可以确定地震带(地震统计

区)的震级分布。

④ 不同的潜在震源区内地震发生满足均匀分布,即未来地震发生在不同的潜在震源区内,且某一震级地震在某一个潜在震源区各处发生的可能性相等。

该假定表明:地震带(地震统计区)内地震活动满足空间不均匀分布,以潜在震源区及其地震活动性参数来表述,潜在震源区内地震活动满足均匀分布。

以上分别考虑了地震的时、空、强三要素的统计假设条件。泊松分布考虑的是地震事件的时间分布; $G-R$ 关系考虑的是地震事件某空间范围内的震级分布;均匀分布考虑的是地震事件的空间分布。

实际上,以上假设在某种意义上存在着一系列矛盾。不论是时间上,还是空间上,地震都是非均匀分布的。只有在相当局部的区域内才近似满足地震发生空间均匀性分布假设,其规模大致相当于大型发震构造的局部段落或特殊构造部位。而在这样的局部是难以满足上述的潜在震源区的地震分布的 $G-R$ 关系假设,这种假设只有在更大的区域范围内才能满足。因此,这两个假定面对中国板内地震活动特征出现了难以调和的矛盾,反映出原始概率地震危险性分析方法在我国应用的局限性<sup>[9]</sup>。之后,中国地震局发展了地震PSA方法,研发了CPSHA方法(C代表China),该方法称为“考虑地震活动时空不均匀性的概率地震危险性分析方法”,简称综合概率法。我国现行的地震危险性分析的概率法试图吸取地震预报的成果,给出比概率法更细致的潜在震源图案,并称为综合概率法(例如文献[4])。但是综合概率法要给出比概率法更合理科学的结论需要两方面的支撑。其一是要求预报成果是准确的,其二是综合概率法本身是科学的<sup>[10]</sup>。

如果为了满足地震空间均匀分布假设,当地震统计区仅仅设为某大型发震构造的局部段落或者特殊构造部位时,或者设为地震活动性较弱的地区,存在的问题是显而易见的,此时地震统计资料严重不足,可能存在两种情况:

(1) 有大地震资料,但地震资料很少。这种情况表明地震活动性高但不频繁,虽然少,但也存在,例如四川西部和美国东部,中强地震缺乏,仅有的大震资料往往不能和小震或微震资料产生的高 $b$ 值拟合在一条线上,这样实际上便低估了地震危险性。

(2) 小地震资料多, 大地震资料少。这时,  $b$  线常据低震级地震的资料作图, 并认为它可指示没有资料的大震的发生情况, 但对工程有影响的恰恰是大地震, 因此该法的可靠性问题是关键<sup>[8]</sup>。核电厂工程正是选择在地震活动性较弱的地区, 这些地区发震构造不明显, 且历史地震资料往往不完整, 可靠性也相对较差。尽管这类地区地震活动性较弱, 但在应用概率法时却带来了一定的不确定性因素。这样的情况下, 有时存在这样的做法, 即将  $b$  线延长<sup>[8]</sup>。

另外,  $b$  线受制于资料不精确和断层类型效应, 它也在很大程度上受制于断层破裂机制的差异, 因为这些都强烈影响着地震的重现时间和震级。这些机制上的变化可分为粘滑、控制滑移和热动力滑移。对于中到强震( $M \geq 5.5$ ), 机制变化造成的差异是非常大的, 而这些地震又是工程上非常关心的<sup>[8]</sup>。

反过来说, 如果为了满足地震震级  $G-R$  关系假设, 通常需要扩大地震统计资料的空间范围或者时间范围。这样的扩大, 便不能满足潜在震源区内地震空间上均匀分布的假设。地震震级  $G-R$  关系对大范围的地区具有有效性也被基本承认<sup>[1, 3-5, 7-11]</sup>, 例如, 一些地震活动性高的大区域包括美国西部的加州地区。经典概率文献中, 潜在震源通常有较大的范围, 强调的是概率法危险性分析本来是用于处理地震发生的不确定性的, 不可能对潜在震源作细致的描述<sup>[9]</sup>。核电厂地震安评厂址区域范围应不小于工程场地外延 150 km, 1 个厂址的安评有时会涉及多个地震带。从此种意义上说, 概率法应用于核电厂工程很有可能有不合适的  $b$  值, 或者说  $b$  值的确定具有较大的不确定性。

潜在震源区内地震事件服从泊松分布的假设要求地震在时间上的分布是相互独立的。众所周知, 对地震的研究已经认识的, 地震确实存在前震和余震。前震和余震显然和主震之间在时间上具有相关性, 并不服从泊松分布, 因此, “用于确定  $b$  值和  $\nu$  值的地震资料, 应该删除前震和余震<sup>[5]</sup>”。

综上所述, 基于地震地质事件的时空分布规律, 可见概率论方法在地震安全性评价中的应用困难重重。地震统计区的采样代表性便是一个问题, 似乎很难在现有的如此之短的时长的资料中挑选到真正合适的  $b$  线关系以适应小范围的潜在震源区。时间序列分析方面, 地震的发生显然具有一定的地震序列, 但在流行的概率法中, 这种

关系也被简单地当作泊松事件流来予以处理。

## 2 地震 PSA 中概率的不确定性

概率理论学者其实承认概率法的上述缺点, 但他们又回到另一个他们称之为不确定性的概念<sup>[9]</sup>。本节便来讨论概率的不确定性问题。

如前所述, 在地震危险性概率分析方法中起决定性作用的活动性参数是统计区内大小地震间的比例关系系数  $b$  值。 $b$  值是由实际地震资料统计得出的, 它除了与地震资料的完整性、可靠性、起始震级、震级间隔等因素有关外, 还与  $b$  值统计时间、空间范围的确定有很大的关系。在实际工作中, 由于人们对地震发生、发展规律认识上的差异与局限性, 在划分  $b$  值统计时间、空间范围上也存在着种种方案。这些对  $b$  值的估计都会带来一定的不确定性, 从而影响震级上限的大小, 因此会对场地地震危险性估计带来不确定性。

其它类型的不确定性因素主要来源于潜在震源区的划分, 不同的研究可能划分方案将是多种多样的, 主要由于历史地震记录的存在疑难、发震构造判别存在地质调查精度和地震构造标志等限制、以及衰减关系的选取等各方面的因素。以上的不确定性曾被深入的研究<sup>[4]</sup>。

这里要强调的是, 概率法本身, 也存在着不确定性。既然概率法将地震事件当作随机现象处理。随机现象的特点是: 在条件不变的情况下, 一系列的试验或观测会得到不同的结果, 并且在试验或观测前不能预见何种结果将出现。但我们的概率法表述中往往是给出一个定值, 把概率当作一种固定值来考虑, 这样会有许多局限性。某些条件下, 概率并不是固定的, 也可能是一个变量。实际得出的概率应是一个围绕理论概率的随机分布。这说明在某些条件下概率是不确定的。当我们以不可靠的方式得到某事发生的各自可能的概率分布的时候, 真实概率依然是以理论概率为中心的一个随机分布, 这又增加了随机不确定性。在实际的逻辑推理过程中, 经常会把概率当作定值, 可能是由于: 把某种概率是定值的情况作为基本的前提, 然后认定概率是不变的。

对于地震事件而言, 既然已经产生了对其发生条件的各种各样的认识, 那么概率就可能不同。现实中, 我们得到的条件和信息往往不是十分可靠的, 则真实的概率具有一定的随机性, 因为, 条件和信息不完备, 或者说是不可靠的。可见,

概率是有其的概率分布特征的,即地震事件具有双重不确定性,这对于地震 PSA 结果的可靠性分析有价值。概率法启发了地震安全性评价的不确定性研究,该方法对数据及其关系的简化带来了便利,但是也带来了很大的局限性。

可能主要在于概率是相对固定值及其前提存在假设,可能的发展方向是结合地球动力学将概率当作一个变量处理。

### 3 结语

地震动的估计有三种可能的途径。第一种是通过地震烈度的估计,再利用烈度与地震动的对应关系将烈度换算为地震动设计参数;第二种是根据过去强震观测结果,寻求地震动与地震大小、震源特性、传播介质、场地影响的统计规律,然后直接用此衰减规律来估计地震动;第三种是通过震源机制理论分析,应用动力学原理,计算出地面附近的地震动<sup>[12]</sup>。

目前,采用的途径只有前两种。第一种是过去广泛使用而现在仍为许多国家和地区使用的途径。其优点在于可以充分利用当地历史地震资料得到的地震烈度衰减规律,其缺点在于烈度和地震动的换算关系是极不可靠而过分粗略的。利用衰减规律(第二种途径),其关键在于确定地震动衰减规律。第三种途径还在研究发展中,最近几年进展不小,在美国东部核电站抗震分析中有应用的趋势<sup>[12]</sup>。确定论方法中的构造法实际上就是一种结合地球动力学的方法,目前,一些学者试图利用构造法如结合区域地震活动性、地质构造和地震波传播特点,对过去的确定论方法进行改进<sup>[13]</sup>。

地震 PSA 固然存在着应用对象本身特征以及地震数据难以全部满足方法假设的问题,但这种方法在目前已受到广泛关注和应用,并且取得了大量的成功评价实例。这就要求在实际工作中更多地关注不确定性因素,注重方法本身的应用原则,结合地球动力学将概率法本身及其应用继续完善。假设核电厂地震安全性评价存在较多的不确定性因素,可给出不同的评价方案和不同评价结果,供风险分摊者进行工程决策。这样不仅能保证评价的客观合理性,也能保证风险得到有效指引。

### 参考文献:

- [1] 国家核安全局. 关于发布《概率安全分析技术在核安全领域中的应用》(试行)的通知[A]. 北京:辐射安全管理司核安全管理司,2010.
- [2] CORNELL, C.A.. Engineering seismic risk analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58 (5): 1 583-1 606.
- [3] 胡聿贤. 地震危险性分析中的综合概率法[M]. 北京:地震出版社,1990.
- [4] 潘华. 概率地震危险性分析中参数不确定性研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2000.
- [5] 鄢家全. 地震危险性分析的困惑与希望[J]. 国际地震动态, 2005(6): 14-24.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程场地地震安全性评价 GB 17741-2005 [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [7] 魏陆顺,张永山,孔德睿,等. 核电结构三维隔震研究[J]. 华南地震, 2015, 35(1): 37-42.
- [8] 余成华. 深圳市断层活动性和地震危险性研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [9] Krinitzsky, E.L.. Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures [J]. Engineering Geology, 1995, 40(1-2): 1-7.
- [10] Krinitzsky, E.L.. Epistematic and aleatory uncertainty: a new shtick for probabilistic seismic hazard analysis [J]. Engineering Geology, 2002, 66(1-2): 157-159.
- [11] 沈建文,余湛,邱瑛. 地震安评中地震活动性的统计区域与  $b$  值[J]. 国际地震动态, 2007(3): 1-6.
- [12] Bommer, J.J.. Uncertainty about the uncertainty in seismic hazard analysis [J]. Engineering Geology, 2003, 70 (1-2): 165-168.
- [13] 胡聿贤. 地震工程学. 第二版 [M]. 北京:地震出版社, 2006.
- [14] 王国新,梁树霞. 改进的确定性地震危险性分析方法及其应用[J]. 世界地震工程, 2009, 25(2): 24-29.