

# 新版 IAEA 安全导则《核电厂 地震危险性评价》的分析与评述<sup>1</sup>

潘 华 吴 健

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要** 本文分析了国际原子能机构新颁布的安全导则“Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants (NS-G-3.3)”与前版导则相比在内容、方法上的一些显著的变化;同时,结合我国核电厂厂址地震安全性评价的方法和实践,对该新版导则在中国的引进和应用中应该注意的问题,进行了评述。

**关键词:** IAEA 安全导则 核电厂 厂址 地震危险性评价

## 引言

为了指导和帮助其成员国在以和平利用为目的的核能开发与应用中,有效地保护健康、生命和财产,国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)建立了一套较为完整的核安全标准体系。根据 IAEA 安全标准的性质,分为安全基本法则(Safety Fundamentals, 代码 F)、安全要求(Safety Requirements, 代码 R)和安全导则(Safety Guides, 代码 G),内容涵盖核安全(代码 NS)、辐射安全(代码 RS)、运输安全(代码 TS)、废物安全(代码 WS)和一般安全(即涉及上述所有安全领域)(代码 GS),涉及核设施的选址、设计、建造、调试、运行或退役等方面的安全规定。这些核安全标准对其成员国并没有法律约束,但成员国可以根据自己的意愿和需要,采纳或改进这些标准,以应用于规范和指导本国核能开发与应用。

核电厂选址中的厂址地震危险性评价,是 IAEA 安全标准体系中核安全(NS)评价要求的重要内容之一。IAEA 自 1979 年以来,颁布过 3 个涉及核电厂厂址地震危险性评估的安全导则。1979 年首次颁布了安全导则“Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Sitting”(核电厂厂址选择中的地震问题)(Safety Guide No.50-SG-S1),之后于 1991 年对该版本导则进行了修订,并颁布修订版安全导则(Safety Guide No.50-SG-S1 (Rev.1)),标题没有变化;2002 年又新颁布了安全导则(Safety Guide No.NS-G-3.3),标题改

1 中国地震局地球物理研究所论著 06AC 2008

【收稿日期】2006-03-02

【作者简介】潘华,男,生于 1966 年。博士,硕士研究生导师。主要研究领域:工程地震。E-mail: panhua@126.com

为“Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants”(核电厂地震危险性评价), 替代了 1991 年版安全导则。3 个版本的安全导则内容均有较大的变化, 反映出核电厂厂址选择中地震问题评价的实践和理论的发展, 以及相关法规要求的变化。

2002 年颁布的新安全导则 (NS-G-3.3) (以下简称新导则) 与 1991 年版安全导则 (50-SG-S1, Rev. 1) (以下简称原导则) 相比, 在大的框架上两者差别并不大, 但是新导则在一些方面出现了比较重大的修改, 反映了国际上对核电厂选址地震危险性评价工作新的趋势。

由于 IAEA 的安全标准多源自于核能开发先进国家的实践经验和成熟标准, 因此, 对于核能利用刚刚起步或尚未积累足够丰富经验的国家, 具有很强的可借鉴价值。我国曾以 IAEA 颁布的 1979 年版和 1991 年版安全导则为基础, 结合我国地震活动的特点, 分别于 1987 年和 1994 年颁布过我国的安全导则《核电厂厂址选择中的地震问题》(1987 年版没有核安全法规编号, 1994 年版核安全法规编号为 HAF0101(1), 1998 年更改为 HAD101/01) (国家核安全局、国家地震局, 1987; 1994)。随着 IAEA 新导则的颁布, 我国的核安全导则也将以此为基准进行相应的调整修订, 因此, 需要对新导则出现的新变化有所了解, 以合理地吸收、反映在未来我国的新安全导则中。

本文的目的是对 IAEA 新导则中的新动态及导致这些变化的原因进行研究。同时, 结合我国核电厂地震安全性评价工作特点和具体实践经验, 对该安全导则在我国的应用时应重点关注的问题进行分析, 希望能对我国相关核安全导则的修订有所帮助。

## 1 IAEA 新导则概况

### 1.1 新导则发布的背景

在 IAEA 的核安全标准规划中, 将以新的 2003 年版“安全要求: 核设施的厂址评价 (No.NS-R-3)”替代 1988 年版的“核动力厂安全法规: 选址 (No.50-C-S (Rev.1))”。而本新安全导则是为满足上述新的安全要求 (Safety Requirements) 文件, 专门针对核电厂选址中地震危险性评价的行为、条件和过程方面的指南和推荐程序, 它用于替代 IAEA 的 1991 年版安全导则 (50-SG-S1, Rev. 1)。

新导则的编写中, 综合考虑了以下方面的重要进展:

①对过去数 10 年中完成的核设施地震研究进行回顾检查而获得的大量的经验反馈。IAEA 在 1990—1999 年间, 对 95 项核设施的地震研究工作进行了回顾检查, 涉及 26 个国家的 34 个厂址, 5 种类型的核设施。由此获得了大量的经验反馈, 并在新安全导则的编写中加以反映 (A. Gurpinar, 2002);

②新建和已建核设施的外部事件的概率安全性评估 (PSA) 对于地震危险性曲线的需要;

③由新近发生的大地震中得到的关于地震影响方面新的认识积累;

④地震危险性分析方法的新进展。

### 1.2 新导则目标

新导则规定其主要目标是提供两个方面的建议: ①如何确定一个特定厂址上的电厂将面临的运动危险性; ②如何确定影响一个厂址上的电厂建造和安全运行适宜性的潜在地表断层作用。

### 1.3 新导则结构

新导则主要的章节包括:

- ①引言：论述导则编制的背景、目标和适用范围；
- ②总则：论述导则规定的调查范围、主要内容、最低的地震危险水平、不确定性处理的总体原则；
- ③必要信息和调查（基础数据）：重点论述不同区域尺度、不同调查深度地质基础资料和地震基础资料调查的技术规定与指导；
- ④建立区域地震构造模型：重点论述了发震构造鉴定、地震构造区划分的原则和技术要求，以及建立地震构造模型有关的规定；
- ⑤评估地面运动危险性：重点论述了确定厂址不同地震危险水平下地面运动参数及其特征的方法和技术要求；
- ⑥厂址潜在地表断层作用：论述了厂址潜在地表断层作用评价中的能动断层调查和鉴定的规定；
- ⑦质量保证。

## 2 新导则的重要修改

纵观整个新导则，并与原导则进行对比，有一些重要的调整需要重视。

### 2.1 导则标题的更改

新导则的名称调整为“Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants”（核电厂地震危险性评价），与原题目“Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Sitting”（核电厂厂址选择中的地震问题）相比，更加明确本导则提出的指导和方法，适用于任何地震环境的核动力厂厂址适宜性和地震危险性评价相关的指导。

### 2.2 部分内容被删减

与标题的更改相适应，新导则在内容上也有重要的调整。删除了关于地震引起的潜在地质灾害评价的相关内容。这部分内容在 1979 年、1991 年的两版导则中都有较多的论述（IAEA, 1979、1991），而在本版导则中，这部分内容被删除，并明确指出永久性地面位移的其它现象（砂土液化、边坡不稳定、沉陷和崩塌）以及地震引发的洪水问题在关于地基安全和滨岸洪水的安全导则中。

### 2.3 设计基准地面运动

新导则不再提设计基准地面运动分级，取而代之的是地震危险性分级。

原导则直接定位于为厂址设计基准地面运动水平和特征的确定提供指南和程序，设计基准地面运动分为 SL-1 和 SL-2 两级（IAEA, 1979; 1991）。新导则中相关的表述进行了调整，新导则定位于为地面运动危险性水平和特征的确定提供指南和程序，地面运动危险性水平分为 SL-1 和 SL-2 两级。

地震危险性水平的分级。SL-2、SL-1 分别对应不同的地震危险水平。SL-2 直接对应于极限的安全要求，这一水平的地震动应该在核电厂的寿命期内具有非常低的被超越的概率，代表了假定用于设计目的的地面运动水平。这一地震动的年超越概率水平通常为  $1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$ 。SL-1 与 SL-2 相比具有不同的安全含义，相应于较低严重性、更可能遭遇的地震，这一地震动的年超越概率水平通常为  $1 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-3}$ 。而关于这两个水平的地震动在核电厂设计中的应用，在 IAEA 安全导则 No.NS-G-1.6 中给出。

比较两版导则的相关描述，关于 SL-2 和 SL-1 的陈述基本上是一致的，之所以有上述命

名上的变化,反映了新导则的一个重要思路,即将厂址评价阶段与厂址设计阶段进行明确的区分。以明确厂址地震危险性评价得到的厂址地面运动参数及其特征(反应谱和时程),是作为厂址相关的特征提供,而设计基准地震动的确定可根据厂址特征在设计阶段来综合确定。概率一致反应谱在地震危险性分析阶段,表述的是厂址相关的特征,而在设计阶段,只是作为地震荷载的一种情况。IAEA 关于地震设计的安全导则 No.NS-G-1.6 规定,相应于不同的地面运动危险性水平,均可确定一系列的设计基准地震(Design Basis Earthquakes),且设计基准地震的确定应考虑地面运动的频率分布、持时、功率谱密度(IAEA, 2003)。在本新导则中也指出,分解(de-aggregate)厂址概率地震危险性分析结果,对于确定厂址的地面运动特征是有帮助的,这种分解通常需针对厂址设计基准地面运动确定关心的目标年超越概率,并可用于确定控制地震的震级和距离。可见,设计基准地震是相当于某一设计基准地震危险性水平(SL-2、SL-1)的设计用控制地震,设计基准地面运动是相应设计基准地震的地面运动。

导则的这一变化,可能还有其另外的考虑。在目前核电厂的设计中大都采用的是标准设计,厂址地震危险性评估的主要功用,体现在对厂址地震风险特征的确定上,目的是验证标准设计在厂址的适用性。

#### 2.4 对概率地震危险性分析方法强烈推荐

原导则中指出:评估地面运动水平 SL-2、SL-1 可包括基于确定性和/或概率性考虑的分析。当前大多数成员国倾向于使用确定性方法来推导 SL-2;概率性方法可用于设计基准地面运动的推导,也能用于验证确定性方法结果(IAEA, 1991)。可见,在原导则中,概率性地震危险性评价方法尚属于建议使用的对照方法,没有作为主要的评价方法来推荐,而 SL-2 级设计基准地面运动的推导更是主要依靠确定性方法。在新导则中,明显加强了对概率地震危险性分析方法的推荐和指导,使其成为主要的方法。最重要的原因是核电厂概率安全性分析(PSA)需要概率地震危险性曲线。新导则指出,“本导则中推荐的概率地震危险性分析方法,定位于核电厂外部事件概率安全性分析中的地震危险性分析的需要”。概率安全评价(PSA)用于分析复杂工程系统运行中所可能发生的潜在事故、估算其发生概率以及确定它们所可能导致的后果。当前许多 IAEA 的成员国在确定核电厂安全状况时都广泛执行了外部事件概率安全性分析(PSA)技术,以作为传统的确定论方法提供补充。因此,顺应这一趋势,在新导则中也对概率地震危险性分析方法进行了重点的推荐和指导。

新导则指出,概率分析方法在有效地用于确定地面运动危险性方面表现出实际应用上的优越性。概率地震危险性分析的结果对于外部事件的概率安全性分析(PSA)是必须的,地震危险性曲线可用于地震 PSA 研究的输入。导则中还对概率方法计算的要求、步骤、结果的表述与分析等提出了相关的建议和规定。

#### 2.5 对不确定性的强调

相对于原导则,新导则从基础资料调查、地震构造模型建立、确定性分析和概率性分析、地面运动特征的确定等许多方面均对不确定性的考虑进行了强调。总结新导则中涉及不确定性问题的相关表述,可以得到下列的基本认识:

##### (1) 应充分重视评价过程中的不确定性

新导则指出,在震源区鉴定、分析和表征以及地面运动评估的每个方面,均可能包括专家解释的大量主观性造成的不确定性。对不同的认识和专家解释,应特别注意避免偏见,专

家不应该偏重任何一种假设或模型，而应该对所有基于已有数据资料上的不同假设或模型进行评价，在最终的评估结果中应综合考虑所有的不确定性。

#### (2) 应合理的表述不确定性

新导则指出，降低不确定影响的最有效办法是收集充足而可靠的相关数据。但是新导则也同时指出，分析者应在所考虑的不确定性程度和获得详细可靠的相关基础数据需付出代价之间进行均衡性的考虑。也就是说，不应为了降低由于信息不完备导致的认识不确定性而无节制地加大调查的工作量和深度。

#### (3) 应对各环节中的不确定性进行评估

新导则指出，应对所有基于已有数据资料上的不同假设或模型进行评价，在最终的评估结果中应综合考虑所有的不确定性。对不确定性的评价应包括不同的方案及其权重，权重应根据资料的支持程度来确定。

#### (4) 不确定性的处理

新导则指出，当多种方案均能够充分好地解释获得的地震、地质、地球物理场资料，并且相互间的差异也不可能通过有限时段内的额外调查加以消除时，最终结果应考虑所有的方案及其合适的权重。概率方法中应采用多方案的处理方法。

### 2.6 能动断层的调查与鉴定

新导则中关于能动断层鉴定的准则与原导则基本一致。其唯一的细小变化，是在考虑发震构造相关的最大潜在地震是否能导致地表断层运动时，提出应结合考虑厂址所在的地球动力学环境。

新导则指出厂址附近范围应详细调查断裂的新构造活动历史。断层的新构造活动历史的研究，将有助于了解厂址附近范围内的断裂构造与区域较大范围内的断裂的构造关系，对断层活动性的鉴定以及能动性的判别具有重要的意义。

对于确定出的能动断层，新导则规定需要先评估其对核电厂建设和安全运行的影响，之后再决定是否接受厂址，而不是简单的否定厂址。

### 2.7 加强质量保证

新导则对质量保证更加重视，专门以一章的篇幅论述了核电厂地震危险性评价中的质量保证。提出在地震危险性评价的数据收集与处理、现场和实验室调查、分析与评估的过程中应建立质量保证体系。

## 3 新导则引进及应用中需注意的问题

新导则是在核能利用先进国家的相关实践中总结出来的，它的目的是指导 IAEA 众多成员国进行核电厂的地震危险性评价，因此，具有宏观指导性和广泛适用性。这一国际通用性的导则要在我国得到合理的应用，必须结合中国地震活动和构造环境的特征，结合我国地震安全性评价的技术规程，结合我国由众多重大工程尤其是核电厂地震安全性评价工作中获得的宝贵实践经验，对其加以修改和完善。

本节将就新导则在引进和应用中需要注意的主要问题概述如下。

### 3.1 概率地震危险性评价方法

新导则中的概率性方法针对的是国际通用的概率地震危险性分析 (PSHA) 方法。该方法基本上采用的是 Cornell (1968) 概率地震危险性分析方法的框架，以潜在震源区反映地震

活动的空间不均匀性,要求对每个潜在震源区确定其地震发生率和地震复发模型,且在潜在震源区内满足地震活动的均匀分布。我国核电厂地震危险性评价采用的概率方法,是在 Cornell (1968) 方法基本框架基础上,结合我国板内地震的特征提出的考虑时空不均匀性的概率地震危险性评价方法(国家质量技术监督局、国家标准化委员会,2005;卢寿德主编,2006)。该方法强调在我国以板内地震活动为主的地区,地震活动具有明显的空间不均匀性,以潜在震源区反映这种空间不均匀性,就难以满足确定地震发生率和地震复发模型的统计条件,因此,采用潜在震源区的两级划分和相应的地震活动性参数确定方法,地震活动的复发特征、发生率等的确定在地震统计区(地震带)一级完成,而以潜在震源区及其空间分布函数来体现地震的空间非均匀分布。相应地,潜在震源区划分的尺度一般而言较国际通用方法划分的潜在震源区的尺度相对要小。

还有一点需要注意,在新导则中,发震构造与潜在震源区在表述上没有明显的区分。导则中所指震源区基本上就是考虑一定边界不确定性的发震构造。新导则还特别指出,除最大地震震级外,对发震构造地震复发的评估应包括地震活动率和复发关系,并强调复发模型仅对于构造或断层相关的震源合适,可见,震源区与发震构造的含义是基本一致的。在新导则条文陈述的字里行间,均可见对两者不加区分的现象。例如,新导则论述 *seismogenic structure* (发震构造) 鉴定时,也同义使用 *seismic source* (震源区) 概念。与此相适应,发震构造的规模也较大。而在我国的概率方法中,发震构造与潜在震源区有明确的区分,发震构造是潜在震源区划分的重要基础之一,且两者的关系也更为复杂。发震构造的鉴定也较注重构造活动性和地震活动性的分段特征,因此,通常局限为构造带的某一段落,不仅不满足复发模型和地震发生率统计条件,其尺度甚至比潜在震源区更小。

由于上述概率方法上的差异,新导则中关于概率方法的相关表述在引用于我国的实践时,需要针对我国概率地震危险性分析方法的特点进行必要的调整。

### 3.2 关于确定性方法和概率方法的关系

在核工程的地震危险性评价中,无论是新导则还是原导则均强调了地震构造模型是任何一种评价方法计算模型的一致基础。而按导则的规定地震构造模型包含两类震源 (*seismic sources*, 这里同样没有区分发震构造与潜在震源区的差别),即发震构造和弥散地震区,因此,导则中规定的概率分析方法将地震构造模型直接作为概率方法使用的潜在震源区来考虑(对发震构造考虑其边界不确定性)。从前面的论述来看,新导则中的做法与其对发震构造和震源区的理解是一致的。但是,在引用至我国时,由于采用的概率地震危险性分析方法不同,不能直接将导则中的发震构造直接引申为潜在震源区。必须在发震构造鉴定的基础上,适当的划分潜在震源区。

发震构造的最大潜在地震与潜在震源区的震级上限同样存在协调配套的问题。在新导则和原导则中,关于发震构造的最大潜在地震与潜在震源区震级上限的区分是明显的。原导则中,关联于发震构造的最大潜在地震的表述为 *maximum earthquake potential*,同时原导则中规定发震构造最大潜在地震要采用最大历史地震震级、古地震数据、破裂规模和断裂总规模与震级的统计关系等来估计,因此,发震构造的最大潜在地震实际上是对发震构造未来最大发震能力的最优估计值,而不是极限估计值,相应震级的地震事件是符合该发震构造的基本条件的未来可能发生的最大事件。而原导则中对概率方法潜在震源区的震级上限,采用的表述是最大或截断 (*maximum or cut-off*) 震级,是震级频度关系中的截断震级,是未来发生概

率趋近于零的极限值, 是未来基本上不可能发生的事件。两者的区分是显著的, 发震构造的最大潜在地震震级必然小于等于潜在震源区震级上限。新导则中的陈述也没有本质的差异。我国的概率地震危险性分析方法, 虽然有所不同, 但在理论上对潜在震源区的震级上限的含义与导则中的是一致的, 我国的地震构造法中尽管发震构造的鉴定更为细致, 但其最大潜在地震的含义也是相同的。因此, 在引用新导则时, 需要正确的理解导则中地震构造模型作为概率法基础的条文其本质上的含义, 不能直接将发震构造的最大潜在地震与相关的潜在震源区的震级上限等同, 应判别两者在极限意义上的差别, 有时因为发震构造的条件不够明确会导致最大潜在地震的震级估计可能偏于保守, 此时, 在极限意义上两者差别很小, 因此可以等同, 否则, 前者应小于后者。

### 3.3 关于不确定性的处理

新导则中比较强调对于不确定性的考虑和处理。在地震构造模型的相关条文中明确指出, 当存在多个模型均可以很好地解释当前观测得到的地震、地球物理和地质资料, 且无法在一个合理的时间框架内通过增加额外的调查来解决这些认识的差异, 那么在最终的危险性评估中, 为了充分地表达包含在地震构造模型中的不确定性, 应该以合适的权重来考虑所有的这些模型。发震构造最大潜在地震确定的相关条文中指出, 不论是采用一种方法或多种方法来确定最大潜在地震震级, 均存在显著的不确定性, 应该给予充分的描述, 其结果应该与地质、地貌学的证据一致。在概率方法的有关条文中指出, 不同的专家或专家组可能提出不同的模型, 可在概率计算中包括进去, 这时应评价和考虑国际上应用的多方案地震危险性评估方法。

有几个方面的问题需要重视: ①这里的认识不确定性应是针对调查资料 and 数据的专家解释上的不确定性, 强调的是数据和资料基础的一致性, 在不同资料基础上得到的不同认识, 是不宜综合在一起评价的。②不同的认识强调的是来自不同的专家或专家组, 应具有独立性; 同一专家或专家组的认识, 应作为不能决策看待, 通常是因为对象信息不全, 如果补充调查也无法得到最终认识时, 应考虑保守方案。③当通过对不同认识进行鉴别分析评价而可以得出倾向性认识时, 应采用倾向性的认识, 只有当存在多个方案均可以很好地解释当前的基础资料时, 才可以考虑多方案的加权评价方法; 不应只要存在不同认识就采用多方案加权综合, 不加鉴别评价的多方案处理方法, 无法体现分析者主观能动性以及基础资料调查的价值。上述几个方面的问题在当前国内的实际工作中重视不够, 也存在较大的认识误区, 在新导则的引用中更应注意。

## 参考文献

- 国家核安全局, 国家地震局, 1987. 核电厂厂址选择中的地震问题.
- 国家核安全局, 国家地震局, 1994. 核电厂厂址选择中的地震问题 (HAD101/01).
- 国家质量技术监督局, 国家标准化管理委员会, 2005. 工程场地地震安全性评价 (GB17741-2005).
- 卢寿德主编, 2006. 国家标准化管理委员会国家标准统一宣贯教材, GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材. 北京: 中国标准出版社.
- A. Gurpinar, 2002. The New IAEA Safety Guide on Seismic Hazard Analysis. OECD Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering, Istanbul, 16—18 October 2002.
- Cornell C. Allin, 1968. Engineering seismic risk analysis. Bull Seism. Soc. Amer., 58 (5): 1583—1605.

- International Atomic Energy Agency, 1978. Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Sitting: A Safety Guide, Safety Standards Series No. 50-SG-S1 (Rev. 1), IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, 1991. Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Sitting: A Safety Guide, Safety Standards Series No. 50-SG-S1 (Rev. 1), IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, 2002. Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants: A Safety Guide, Safety Standards Series No. NS-G-3.3, IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, 2003. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants: A Safety Guide, Safety Standards Series No. NS-G-1.6, IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency, 2003. Site Evaluation for Nuclear Installations: A Safety Requirements, Safety Standards Series No. NS-R-3, IAEA, Vienna.

## **Analysis and Discussions on the New IAEA Safety Guide “Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants”**

**Pan Hua and Wu Jian**

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

**Abstract** The significant differences of contents and methodology between the new version of IAEA Safety Guide “Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants (NS-G-3.3)” and the previous one are discussed here. Some important suggestions on adopting and applying the new IAEA Safety Guide are also given in this paper by reviewing the developments of techniques and practices of seismic hazards analysis of NPPs in China.

**Key words:** IAEA; Safety guide; Nuclear power plants; Site; Evaluation of seismic hazards