

核安全导则 HAD 101/01-2025

核动力厂厂址地震危险性评价

国家核安全局 2025 年 12 月 30 日批准发布

国家核安全局

核动力厂厂址地震危险性评价

(2025年12月30日 国家核安全局批准发布)

本导则自2025年12月30日起实施

本导则由国家核安全局负责解释

本导则是指导性文件。在实际工作中可以采用不同于本导则的方法和方案，但必须证明所采用的方法和方案至少具有与本导则相同的安全水平。

目 录

1 引 言.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 目的.....	1
1.3 适用范围.....	1
2 基本要求.....	1
3 基础资料与调查.....	2
3.1 概述.....	2
3.2 地质、地球物理和岩土基础资料.....	2
3.3 地震基础资料.....	5
4 区域地震构造模型.....	6
4.1 概述.....	6
4.2 发震构造.....	7
4.3 弥散地震活动区（地震构造区）.....	8
5 地震动危险性评价.....	9
5.1 概述.....	9
5.2 地震动危险性级别.....	9
5.3 确定地震动的方法.....	10
5.4 地震动特征.....	12
6 厂址潜在的地表断层活动.....	13
6.1 概述.....	13
6.2 能动断层.....	14
6.3 鉴定能动断层需要进行的调查.....	14
7 地震地质灾害.....	15
7.1 概述.....	15
7.2 海啸.....	15
7.3 湖涌.....	16
7.4 地震引起的挡水构筑物失效（溃坝）.....	16
7.5 地震液化.....	17

7.6 边坡稳定性.....	17
7.7 地面沉降.....	17
7.8 地面塌陷.....	17
7.9 火山活动引发的地震.....	17
8 质量管理.....	17
附录 I 地震概率安全分析所需的地震危险性输入范例.....	19
名词解释.....	20

1 引言

1.1 概述

1.1.1 本导则是对核安全法规《核动力厂厂址评价安全规定》(HAF101-2023)有关条款的说明和补充，为核动力厂厂址地震危险性评价提供技术指导与建议，针对评价过程中需要开展的资料收集、现场调查、分析计算工作提出了技术要求。地震危险性评价的对象包括地震动、地表断层位错、地震地质灾害。

1.1.2 为了确定核动力厂的设计基准地震动，应分别采用确定论和概率论方法进行地震动危险性分析。概率论方法也可为核动力厂地震概率安全分析提供地震危险性输入，附录I给出了概率论方法用于核动力厂地震概率安全分析时的输出范例。

1.1.3 对于核动力厂厂址评价，依靠某些特殊设计和采取工程措施通常可有效减轻潜在的地震动影响，但这些措施无法解决由于地表断层错动、沉降、塌陷、断层蠕变、地震液化等永久性地面变形所产生的影响。

1.2 目的

本导则的目的是对核动力厂地震动危险性评价、可能影响厂址可接受性的潜在地表断层位错和地震地质灾害的调查与评价提供建议。

1.3 适用范围

本导则适用于不同地震构造环境的核动力厂的厂址适宜性和地震危险性评价，也可供除核动力厂之外的其他核设施参考。

2 基本要求

2.1 核安全法规 HAF101-2023 条文 2.5.2 中要求“营运单位在核动力厂整个寿期的不同阶段开展厂址评价工作，应当根据本规定和其他有关规定的要求进行。”因此，营运单位应在核动力厂整个寿期的不同阶段开展厂址地震危险性评价工作。

2.2 应对厂址及其周围地区进行地质、地球物理、地震和岩土工程调查。

2.3 应根据地震构造环境的特征和复杂程度确定调查区域的大小、基础资料的类型、调查的内容与详细程度。

2.4 应根据具体情况适当地扩展调查区域的空间范围，位于边境附近的厂址应包括相邻国家的部分地区，位于滨海地带的厂址应包括相邻的海域，应充分完整地表述相邻国家或海域的地震构造特征。调查区域内相关的基础资料应具有

一致性。

2.5 基础资料和现场调查的内容与详细程度，必须满足核动力厂厂址地震危险性评价的需求。

2.6 SL-2 级地震动反应谱的水平向峰值加速度不得低于 0.15g。

2.7 在调查评价的各环节中应考虑不确定性降低与工作投入的平衡，尽可能减少地震危险性评价中的不确定性。

2.8 应充分考虑认知不确定性和随机不确定性对评价结果的影响。

3 基础资料与调查

3.1 概述

3.1.1 应建立全面、完整的基础资料库，以统一的方式（地理信息系统）整合地震危险性评价所需的基础资料。

3.1.2 在整合基础资料之前，应对拟采用的基础资料进行尽可能深入完整的分析和评价。

3.1.3 应收集厂址所在地区的基础资料并开展必要的现场调查，按照与厂址距离的远近，将调查研究的范围划分为区域、近区域、厂址附近、厂址区，应逐步提高基础资料的精度和现场调查的工作深度。基础资料应尽可能及时地汇集在地理信息系统中。若核动力厂运行期间开展了地震危险性分析工作，如定期安全评价、地震概率安全分析等，应对现有数据库进行相应更新。

3.1.4 为了充分考虑远场大震对核动力厂的影响，应收集更大范围内关键地震源的相关基础资料。对于厂址相邻海域，为了弥补调查工作的欠缺或地震资料的不足，应进行适当的地球物理调查。

3.2 地质、地球物理和岩土基础资料

3.2.1 区域调查

3.2.1.1 区域调查至少应包含厂址半径 150km 以内的范围，应根据地质构造背景调整区域调查的空间范围，为了包括距离较远的重要地震源，调查区域的形状可以不对称。为了了解区域地球动力学背景及其现今构造机制，并鉴别和表征可能影响厂址地震危险性的地质构造，包括发震构造和能动断层，应收集厂址所在区域范围内地质、地震、地球物理场方面的基础资料，并将这些基础资料反映在附有适当剖面的图件中。

3.2.1.2 在调查潜在海啸时，应考虑到远源大震的影响。

3.2.1.3 应根据构造的分布位置、范围、最新活动时代、活动速率，及其与地震活动的相关性来确定发震构造。针对可能显著影响厂址地震危险性的潜在发震构造，应按照近区域或厂址附近地区的精度要求，开展地质和地球物理调查，复核并完善现有基础资料。采用地质地貌分析手段识别出的古地震也可用于发震构造的鉴别。

3.2.1.4 应将上述调查资料表示在比例尺为 1: 1000000 的图中，并附有适当的剖面图。

3.2.2 近区域调查

3.2.2.1 近区域调查至少应包含厂址半径 25km 以内的范围，可根据地质构造等条件进行局部调整。近区域调查的目标是：

(1) 根据比区域调查更加详细的资料，详细说明近区域范围的地震构造特征；

(2) 确定断层的最新活动时代，对地震危险性评价有重要影响的断层，应确定断层面产状、位错的大小和方向、断层活动速率与分段依据等地震构造特征。

3.2.2.2 为了完善现有基础资料，应对近区域范围开展必要的补充调查，包括确定近区域范围的地层、地质构造、构造演化历史。为了解现代构造的背景，应详细研究构造演化历史。对我国中、东部地区，应评价第四纪以来活动的断层和构造，并通过适当的方法进行最新活动时代鉴定；对我国西部受板块构造运动影响强烈的地区，相应的评价可考虑晚更新世以来有过活动的断层和构造。应提供下述资料：

(1) 调查精度不小于 1: 100000 的地质图，并附垂直于主要地质构造单元及穿越厂址具代表性的剖面图；

(2) 利用地球物理调查获得的资料，分析和鉴别与厂址地震危险性相关的构造，包括构造的几何形状、延伸范围、构造运动的强度等，也可利用热流资料进行分析。滨海厂址近区域海域调查中应收集水深资料；

(3) 利用第四纪地质和地貌调查获得的地表资料，如阶地及其它地貌面、土壤和沉积物调查等，应特别注重利用航空和卫星影像的解译成果；

(4) 为了了解构造的类型和活动水平，还可利用由最新发展的观测技术手段获得的资料，如全球定位系统数据、雷达干涉测量数据、应变测量数据等。

3.2.2.3 对于在近区域调查中确定的发震构造，为了更加详细地反映其构造特征，可按照厂址附近地区的精度进行地质和地球物理调查。

3.2.2.4 应详细调查近区域范围内与新构造活动相关的地质和地貌特征，如在航空照片和卫星或其他遥感影像中发现的线性地貌或线性构造特征、地球物理异常带等。

3.2.2.5 应将上述调查资料表示在比例尺为 1:100000 的图中，并附有适当的剖面图。

3.2.3 厂址附近地区调查

3.2.3.1 厂址附近地区调查至少应包含厂址半径 5km 以内的范围。该范围调查的目的除了提供更详细的基础资料外，还包括更详细地确定断层的新构造活动历史，特别要确定厂址附近地区潜在的地表断层活动，即断层能动性鉴定，同时还要鉴别厂址区潜在的地震地质灾害。

3.2.3.2 厂址附近地区的常规调查应包括地质-地貌填图、地球物理探测、钻探与槽探等，并且应提供下述资料：

(1) 调查精度不小于 1: 25000 的地质图，并附垂直于主要地质构造单元及穿越厂址具代表性的剖面图；

(2) 位于该区内所有可能对厂址稳定性构成影响的断层的最新活动特征，包括断层面产状、活动时代、位错的大小和方向等；

(3) 鉴别和评价该范围内可能存在的地震地质灾害，如沉陷、滑坡等，以及人为活动引起的潜在灾害，应特别注意水库蓄水或大量地下流体抽取与注入引发地震活动的可能性。

3.2.3.3 应将上述调查资料表示在比例尺为 1: 25000 的图中，并附有适当剖面图。

3.2.4 厂址区调查

3.2.4.1 厂址区调查应覆盖核动力厂的整个厂区，特别是抗震 I 类物项的空间分布范围。调查的主要目的是收集地表断层位错可能性评价所需的详细资料，并为场地反应分析提供场地岩土介质的动力特性资料，如压缩波速、剪切波速等。

3.2.4.2 应采用详细的地质、地球物理、岩土勘查、原位测试、实验室测试技术，收集厂址区的基础资料。

3.2.4.3 应采用地质、地球物理、地震和岩土勘查技术，对厂址区进行下述调查：

(1) 地质和岩土勘查，应采用钻探、地球物理和实验室测试方法进行调查，以确定厂址区的地层和构造。根据工程模型要求确定各下伏土层的厚度、埋藏深

度、地层倾角、静力和动力特性。静力和动力特性包括泊松比、杨氏模量、剪切模量、密度、相对密度、剪切强度、固结比、孔隙比、粒度分布、剪切波速、压缩波速和阻尼比；

(2) 水文地质调查，应利用钻孔和其他相关技术手段进行调查，以确定厂址区内所有含水层的空间分布、物理化学特性和水力特性，其目的是确定地下水和基础之间的相互影响；

(3) 厂址场地效应的调查，应尽可能利用历史和仪器记录的地震资料评价厂址土体和岩石的动力反应特性。

3.2.4.4 厂址区调查应给出基土-结构动力相互作用分析所需的全部资料。为了保证资料的完整性和有效性，应结合基土-结构动力相互作用分析的需求进行调查。

3.2.4.5 应将上述资料表示在比例尺为 1: 1000 到 1: 2000 的图中，并附有适当剖面图。

3.3 地震基础资料

3.3.1 总体要求

应收集调查区域范围内发生的所有记录到的地震资料，包括历史地震和仪器记录地震资料，编制地震目录。

3.3.2 历史地震资料

3.3.2.1 应以地震主管部门正式出版的地震目录和报告为基础编制历史地震目录，历史地震目录应包括有记载以来所有 M $4\frac{3}{4}$ 级以上的地震事件。当厂址周围区域存在可能对厂址地震动参数有较大影响的历史地震时，应开展专项调查。

3.3.2.2 每个历史地震的资料应尽可能包括下述内容：

- (1) 地震的年代和日期；
- (2) 宏观震中位置；
- (3) 估计的震源深度；
- (4) 最大地震烈度，如果与宏观震中的烈度存在差异，则应描述局部场地条件及破坏情况；
- (5) 等震线分布；
- (6) 所有上述参数的不确定性估计；
- (7) 厂址的地震影响烈度，连同所有可用的场地效应的详细资料。

应说明地震目录中所用的烈度类型，并根据仪器记录地震和历史上宏观地震

资料之间的经验关系，估计每一历史地震的震级。

3.3.2.3 应评价历史地震目录的可靠性和完整性。

3.3.3 仪器记录地震资料

3.3.3.1 应收集所有可用的仪器记录地震资料，具体数据应包括：

- (1) 地震发生的时刻；
- (2) 震源和震中位置，同时存在宏观和微观震中时，以宏观震中为准；
- (3) 震级及其标度；
- (4) 前震和余震区的尺度与几何分布特征（若有）；
- (5) 其他可能有助于了解地震构造的信息，如震源机制、应力降和其他震源参数；
- (6) 震源和震中位置、震级、应力降等参数的不确定性估计；
- (7) 与 3.3.2.2 同样的宏观地震详细资料。

3.3.3.2 应评价仪器记录地震目录的可靠性和完整性，并应注明地震目录的来源。

3.3.4 厂址特定的仪器记录数据

3.3.4.1 为了确定潜在震源包括鉴定发震构造，必要时可使用具有微震监测能力的高灵敏地震仪器台网有针对性地进行观测，以补充更详细的地震记录数据。

3.3.4.2 应仔细分析厂址区域范围仪器记录地震与所调查区域发震构造的相关性，在必要且仪器记录地震数据充分的条件下，可采用更加精细的定位方法对小震进行重新定位研究，以鉴别地震活动与发震构造的相关性。

3.3.4.3 应尽可能收集区域强震动记录资料，并用于建立适用的地震动预测方程和地震动反应谱。

3.3.4.4 在核动力厂运行阶段，应安置永久性的强震动观测仪，并保持连续运行，记录各种地震事件对厂址区造成的地震动影响。

4 区域地震构造模型

4.1 概述

4.1.1 区域地震构造模型是基础资料与地震危险性计算模型之间的纽带，它是在区域基础资料综合分析的基础上建立的。在建立该模型的过程中，所有已有的、存在于可用文献中对区域地震构造的解释都应予以说明，这些可靠的基础资料是建立可信地震构造模型的基础。

4.1.2 应在对地震、地球物理和地质等基础资料进行综合分析的基础上，建立一个由各相关发震构造组成的综合地震构造模型。

4.1.3 由于可能存在未表现出目前可识别的地表或地下标志的发震构造，加上从时间尺度考虑，断层错动的重现间隔比地震观测时期长得多，所以鉴定出的发震构造不一定能解释所有观测到的地震活动。

4.1.4 区域地震构造模型，至少包含两种类型的地震源：

- (1) 通过利用基础资料能够鉴定出的发震构造；
- (2) 与利用基础资料鉴定出的发震构造无关的、通常但又不完全是由中小地震构成的弥散地震活动。

4.1.5 对上述两种类型地震源的评价应考虑不确定性。其中弥散地震在地震危险性评价中是十分复杂的问题，由于这类地震的地震源不明确，通常含有较大的不确定性。

4.2 发震构造

4.2.1 发震构造的鉴别

4.2.1.1 应根据地质和地震资料提供的直接或间接证据，鉴别发震构造。历史和仪器地震记录与地质、地球物理特征的相互关系在鉴别发震构造中尤其重要；但缺乏这种相关性的地质构造也可能是发震构造。

4.2.1.2 如果调查表明，无论是单一地震还是震群，若其震中分布可能与某个地质构造具有潜在相关性，则应根据该地质构造的特征、几何形状、地理范围、与区域大地构造格架的构造联系，对空间相关性加以解释。

4.2.1.3 其他可用的地震信息，如震中不确定性、震源机制解、构造应力环境以及前震和余震分布等，也可用于分析判断地震震中和地质构造的相关性。

4.2.1.4 当缺乏地震资料时，应采用构造类比法鉴别发震构造。

4.2.1.5 应基于可信的基础资料，并考虑地质构造的不确定性，将发震构造纳入区域地震构造模型。

4.2.2 发震构造的表征

4.2.2.1 对于厂址地震危险性评价中确认的发震构造，应进一步表征该发震构造的特征。应根据该发震构造的规模、位错量及其产状、现今地壳形变最大的历史地震、古地震资料、现代地震数据，与具有可信历史地震资料的相似的发震构造进行类比。

4.2.2.2 地震烈度表描述了地震对环境产生的直接和间接影响，如断层位错、

地震液化、海岸线上升等，可用来鉴别过去发生的地震。在缺乏历史地震记录的地区，更应关注古地震研究成果，古地震研究的目的主要包括以下几方面：

- (1) 基于区域内古地震遗迹与次生效应鉴别发震构造；
- (2) 通过开挖探槽、鉴别地震遗迹、沉积地层测年等方法，改善高震级段地震资料的完备性；
- (3) 可通过断错地质体和断错地貌测量、开挖探槽等方法获得同震位移资料。以地震震级、发震断层规模、同震位移等参数和地震崩塌、砂土液化、海啸等地震次生效应为依据，估计发震构造的最大潜在地震；
- (4) 采用大地震的重复间隔以及离逝时间等进行概率地震危险性分析与校核。

4.2.2.3 在断层或构造的地震和地质历史资料充分的情况下，可利用活动断层分段研究成果、平均应力降、断层宽度等信息，对地震的最大破裂尺度或未来地震的位移进行估计，并可直接利用经验关系估计潜在的最大震级。

4.2.2.4 在缺乏详细资料的情况下，发震构造的最大潜在地震可根据发震构造的规模进行估计。但在使用这种方法时，应利用断层总长度中能够在一次地震中同时错动的断层段，这一断层段的确定取决于断层的特征，特别是断层的分段性。

4.2.2.5 地震震级是震源尺度和应力降的函数，应根据现有研究成果合理地估计应力降。

4.2.2.6 最大潜在地震震级的估计值具有较大的不确定性，并且存在显著的地区差异，应充分地描述这些不确定性，以及所用方法的区域性特征，其结果应与地质和地貌证据相一致。

4.3 弥散地震活动区（地震构造区）

4.3.1 弥散地震的鉴别

4.3.1.1 可采用区域地震构造模型中的地震构造区来表征弥散地震活动，地震潜势相等的地区位于同一个地震构造区内，可通过地震活动性的差异来鉴别弥散地震活动区。

4.3.1.2 应分析弥散地震活动，确定其震源深度。可根据弥散地震都发生在地壳中的脆-韧性转换带之上这一事实来估计其最大震源深度。

4.3.1.3 在地震活动性水平方面的显著差异，可能反映不同的构造条件，可用于确定弥散地震活动区的边界；在震源深度方面的显著不同，也可用于区别不

同的弥散地震活动区。

4.3.2 弥散地震的表征，应根据地震构造区内的历史地震资料和地震构造特征来评价潜在的最大弥散地震。也可将地震构造区与具有丰富历史地震资料的相似区域进行对比，评价其潜在的最大弥散地震，但这个过程中需要大量的综合判断。与构造运动过程相比，现有的历史地震数据仅包含一个相当短的时期，所以最大潜在弥散地震的估计值常会有显著的不确定性。

5 地震动危险性评价

5.1 概述

5.1.1 应根据本导则第4章中论述的区域地震构造模型评价厂址的地震动危险性。

5.1.2 应按照核安全导则《核动力厂抗震设计与鉴定》(HAD102/02-2019)的要求，选择构筑物、系统和部件的地震动输入及其相关的荷载组合。应评价两个对应于不同安全要求的地震动，即SL-1和SL-2，核安全导则《核动力厂抗震设计与鉴定》中明确了SL-1和SL-2在设计中的具体应用方式。

5.2 地震动危险性级别

5.2.1 SL-2对应于极限安全要求。SL-2代表了设计中采用的最高水平的地震动，在核动力厂寿期内的超越概率不得高于 $1e-4$ /年。必须根据区域地震构造背景和厂址区下伏土层的工程地质条件来确定SL-2。

5.2.2 核动力厂必须采用对应于极限安全要求的地震动作为设计基准。

5.2.3 SL-1与SL-2的安全意义不同，对应于严重性较低和可能性较大的地震动。在确定SL-1时，应考虑下述因素：

(1) 区域地震活动水平：与厂址地震危险性相关的各地震源以及与核动力厂寿期相关的各地震源的地震频度；

(2) 设计考虑：所要求的荷载组合和应力限值的安全含义以及核动力厂类型；

(3) 震后安全运行：地震对厂址的影响超过SL-1之后，继续安全运行需要符合的有关要求；

(4) 震后电力需求：在可能造成其他发电厂破坏的地震发生以后，区域范围内对核动力厂继续安全运行的需求；

(5) 核动力厂检查方面的考虑：核动力厂设计和建造采用较高的SL-1，造

价会比较高；核动力厂设计和建造采用较低的 SL-1，地震引起停堆的可能性较高，因此可能会面临更高频率的检查。

5.2.4 应采用反应谱和时程来定义 SL-1 和 SL-2。该地震动可以是自由场条件下处于地表、基础底部、等效基岩面位置的地震动。应给出等效基岩条件下的地震动，并提供充分的和可用的基础资料，计算基础底部和地表的地震动。等效基岩面是地震动输入和场地反应分析的接口，应确认其位置的合理性。

5.2.5 应根据核动力厂地震响应分析的需求，来定义 SL-1 和 SL-2 级地震动的特征。应根据可能影响厂址的各类地震来确定具有不同特征的地震动。

5.3 确定地震动的方法

5.3.1 总的要求

5.3.1.1 通常采用三个正交方向、不同阻尼的反应谱和对应的时程来表征地震动。应直接计算厂址特定 SL-2 级地震动反应谱，也可采用以规定水准的自由场峰值加速度标定的标准谱。

5.3.1.2 应全面地利用现有的基础数据，如历史地震资料、强震动记录，来确定厂址特定地震动。

5.3.1.3 应分别采用确定论和概率论方法，开展地震动危险性分析工作。在确定 SL-2 时，可取二者分析结果的外包络值，或分别采用二者的分析结果，进行抗震设计和抗震验算。应综合考量条款 5.2.3 中列举的因素，确定 SL-1 级地震动。

5.3.2 烈度和震级数据

5.3.2.1 烈度和震级资料除了能提供区域内与发震构造和弥散地震活动区相关的地震构造资料以外，还可用于评定地震动的衰减特征。

5.3.2.2 烈度资料可用于评估历史地震的震级。在因强震动观测仪运行时间不够长而无法提供仪器记录衰减数据的地区，烈度数据可用于建立地震动预测方程。将缺乏强震动观测数据但有丰富烈度资料的地区称为研究区，将同时具有强震动观测资料和烈度资料的地区称为参考区。在比较研究区和参考区的地震烈度衰减关系的基础上，通过改进参考区的地震动预测方程，得到研究区的地震动预测方程。

5.3.3 确定论方法

应按照下述步骤，采用确定论方法评价 SL-2：

5.3.3.1 将地震构造模型分解为与弥散地震活动相应的地震构造区和发震

构造；

5.3.3.2 鉴定与每个发震构造和每个地震构造区相关的最大潜在地震；

5.3.3.3 选择或建立恰当的地震动预测方程；

5.3.3.4 按照下述步骤进行评价：

(1) 对每一个发震构造，应假定最大潜在地震发生在该构造可能对厂址产生最不利地震动影响的部位，同时应考虑实际的震源尺度。当厂址位于发震构造边界之内，则应假定最大潜在地震发生在厂址下方。在这种情况下，应特别注意论证该发震构造是非能动的；

(2) 评价厂址所在地震构造区最大潜在地震对厂址的地震影响时，应假定其发生在厂址下方，可根据该地震构造区内或区域同类地震的震源深度的恰当估计值，评价其影响；

(3) 其他地震构造区内与弥散地震活动相关的最大潜在地震，应假定其发生在该地震构造区边界上最接近厂址的部位；

(4) 应采用适当的地震动预测方程给出的均值，来评价最大潜在地震在厂址位置引起的地震动，同时要考虑厂址的局部场地条件，取所有地震动的包络值作为确定论方法分析结果；

(5) 应按照 5.4 节提出的方法确定地震动的特征，包括峰值加速度、加速度反应谱、加速度时程。

5.3.4 概率论方法

5.3.4.1 地震概率安全分析输入条件的地震危险性曲线，应扩展到比设计中使用的概率水平更低的年超越概率水平。

5.3.4.2 概率论方法应充分体现区域地震构造模型及其不确定性。

5.3.4.3 概率论方法包括下述步骤：

(1) 在厂址区域内采用潜在震源区反映区域地震构造模型；

(2) 对于每个潜在震源区，应评价其震级上限、地震发生率和地震复发模型，以及与每项评价相关的不确定性；

(3) 确定适用于厂址区域的地震动预测方程；

(4) 进行概率地震动危险性分析计算。应对地震动预测方程给出的均值以及围绕均值的变化这两方面的不确定性进行校正；

(5) 必要时，开展场地地震反应分析；

(6) 为地震概率安全分析提供地震危险性输入时，应给出附录 I 要求的结

果。

5.3.4.4 应针对某一目标年超越概率进行分解分析，通常采用厂址设计基准地震动的年超越概率。应至少在两个反应谱频率上进行分解分析，通常情况下为1Hz和10Hz。分解分析可用于确定在这些频率上对地震动反应谱起控制作用的地震的平均震级和距离。

5.4 地震动特征

5.4.1 总的要求

5.4.1.1 应采用反应谱和相应的时程来表征SL-1和SL-2的地震动特征。

5.4.1.2 对于非基岩场地，还应提供场地相关地震动反应谱和相应的时程曲线。

5.4.2 反应谱

5.4.2.1 地震动反应谱的特征取决于震源特征以及从震源到厂址区地震波传播所通过地层的衰减特征的相关影响。地层的地震动反应特征是地震波引起的应变大小的函数，在基岩上覆地层中，地震波将随着地层的反应特性不同而变化。

5.4.2.2 宽频带标准反应谱的谱形平滑，考虑了多种地震源的特征。应基于强震动记录的反应谱，来定义宽频带标准反应谱的谱形。可采用厂址特定的峰值加速度来标定宽频带标准反应谱。近场中强地震富含高频成分，持时较短，其峰值加速度较高，用来标定宽频带标准反应谱，会使得设计基准地震动在其他频段内过于保守。在这种情况下，可根据设计目标，采用多个地震动反应谱进行抗震设计，恰当地反映不同类型地震源的特征。

5.4.3 时程

5.4.3.1 时程应恰当地反映所描述的全部地震动参数，其中包括持续时间。用于详细分析的时程数量以及用于生成时程的方法将取决于所采用的分析模式。为了了解分析模式的特殊需求并做出恰当响应，应与核动力厂设计者密切配合。

5.4.3.2 地震动的持续时间主要取决于断层破裂的长度和速度，场地效应也会增加地震动的持续时间，特别是深盆地对地震波的围陷作用；同时，持续时间也与震级相关。在整个评价中应使用一致的定义，加速度时程的平稳段持时可通过全部加速度均方值积分的95%至5%分位数的时间间隔(D_{5-95})来确定。

5.4.3.3 在确定时程长度时，应注重给出由区域基础资料所提供的经验证据。对于某些厂址，来自于远场大震的振幅相对较低的震动可能引起基土液化。用于地震液化评价的时程，其持时应足够长，以包括足够长持续时间的低幅值震动。

5.4.3.4 可基于多种数据生成时程，例如：

- (1) 使用考虑地震波相位特征的谱拟合技术生成人造时程；
- (2) 在厂址附近地区获得强震动记录，或对获得的记录进行适当修正、通过峰值加速度标定、以及应用适当的滤波或组合这些记录；
- (3) 在具有类似地震、地质和土层特征的其他地区获得的强震动记录；在某些情况下，可能需要对这些记录进行振幅和频率修正，使这些记录适合于厂址条件；
- (4) 为了全面反映地震动特征，应按几个不同阻尼生成人造时程。

5.4.3.5 无论采用何种方法生成的时程，都应与设计反应谱相匹配。应保证生成的时程包含适当能量含量，与经过评估的地震动相比，功率谱密度函数的偏差在可接受的范围内。

5.4.4 竖向与水平向地震动之比

5.4.4.1 在厂址附近地区不存在可用的竖向地震动预测方程的情况下，可在竖向与水平向地震动之间合理地假定一个比值，如 2/3 到 1。已有的经验数据表明这一比值也许在近场最大，其变化主要取决于震源和厂址特征，以及其他相关因素。

5.4.4.2 评价与竖向地震动相对应的反应谱和时程应采用与水平方向反应谱和时程同样的方法。在有可用资料的情况下，竖向地震动的时程记录应作为评价的基础。

5.4.5 基础隔震结构的时程

5.4.5.1 对于具有固定基础的核动力厂结构，已提出了推导地震动危险性的方法。对于为了防御地震而采用基础隔震系统的结构，也许有必要增加一些考虑，特别是可能在基础隔震系统的部件中产生超量剩余位移的长周期效应。对于拟采用基础隔震系统的核动力厂结构，应对时程进行校核，并且在必要的情况下修正上述长周期效应。对于厚层沉积场地，评价时应考虑面波影响。

5.4.5.2 对于埋置结构如管道和管线，应在与设计者协商的情况下提出适当的反应谱和时程。对于需要考虑液体晃动效应的物项，应恰当表征地震动时程的特征。

6 厂址潜在的地表断层活动

6.1 概述

6.1.1 本章给出了评价可能危害核动力厂安全的潜在地表断层活动的准则和方法，也论述了进行这种评价所需的调查范围。

6.1.2 在没有地震能量显著释放的情况下，也可能出现地表破裂，应重视这种类型的地表破裂现象。例如，沿着走滑断裂带部分活动段的慢滑移，这种现象在火山构造环境相对常见，地下流体的开采也可能引起正断层的慢滑移。在构造运动和地震活动强烈的地区，已观测到典型的慢滑移。蠕滑、断层破裂至地表以及地震引起的地表破裂，都属于沿能动断层在时间和空间上可能出现的断层位错现象。

6.2 能动断层

6.2.1 评价厂址或厂址附近地区的某一断层（隐伏或出露）潜在位移的首要问题是鉴别其是否属于能动断层。回答这一问题需要对基础资料进行恰当的分析和解释，综合考虑区域地震构造模型和通过必要的补充调查收集的资料。

6.2.2 在地质、地球物理、大地测量学、地震资料的依据方面，如果具备下述特征之一，则断层将被认为是能动断层：

（1）有证据表明断层晚更新世以来有过活动，可据此合理推论未来在地表或近地表能够再次出现这种活动，则认为该断层属于能动断层；

（2）采用现有方法不能获得可靠年代学数据的情况下，如果断层与已知能动断层具有构造联系，以至于一条断层的活动可能导致另一条断层在地表或近地表活动，那么该断层应考虑为能动断层；

（3）按照第4章的结果，如果与某一发震构造相关的最大潜在地震足够大并且震源足够浅，基于厂址所在区域的构造背景，可据此合理推论地震发生时将会产生地表或近地表破裂。

6.3 鉴定能动断层需要进行的调查

6.3.1 应从区域、近区域、厂址附近和厂址区的调查中获取充分的地表及地表以下的相关资料，以说明厂址及其附近地区不存在断层活动，或者如果断层存在，则应描述断层的方向、范围、活动特征和历史，并严谨细致地估计其最新的活动时代，给出可靠的估计结果。

6.3.2 如第3章所述，应特别注意厂址或厂址附近地区的地质和地貌特征，这些特征可用于鉴别断层活动，并可用于确定断层活动的年代。

6.3.3 当已知或怀疑断层存在时，应按照厂址附近地区的要求进行现场调查，包括非常详细的地质填图和地貌测绘、地形分析、地球物理勘查、槽探、钻探、

年代测定（沉积层、地貌面、断层岩）、局部的地震调查以及任何其他适当的技术，以确定断层最新的活动时代。

6.3.4 在厂址选择和评价阶段，如果有可靠证据表明能动断层在厂址附近或厂址区可能产生潜在地震破裂位移，且其对厂址的影响无法用经证实的设计改进或工程保护措施加以弥补，则需将该能动断层作为厂址颠覆性因素，应考虑另选厂址。

7 地震地质灾害

7.1 概述

应采用地震危险性分析的结果，评价可能对核动力厂安全有显著影响的地震地质灾害，包括海啸、地震液化、边坡失稳、震陷、岩溶地貌、地下洞穴垮塌、地震动或断层位错引发的挡水构筑物破坏，以及火山活动引发的地震。为了确定适用于地震地质灾害评价的地震作用和模型，应开展详实的分析。应关注大型水库荷载、流体注入、流体抽取或其他现象影响下，断层再活动的可能性。

7.2 海啸

7.2.1 对于滨海厂址，应采用核安全导则《滨海核电厂厂址设计基准洪水的确定》(HAD101/09)规定的水文灾害评价体系细致评估海啸可能性。地震引起的海底构造变形或水下滑坡，可进而引发海啸。对于构造成因的海啸，调查区域的半径可达数千公里。竖向运动最有可能引发海啸，调查应集中于可能引起海底显著竖向位移的地震源。

7.2.2 水下滑坡引发的海啸，滑坡发生的位置距厂址较近，应根据厂址所在区域的地震构造背景，确定触发滑坡的地震作用。

7.2.3 为评价与断层相关的海啸灾害，应估计海岸的沉降和隆起。应开展近区域范围内的古海啸研究，以了解沿海地区海啸的历史。

7.2.4 鉴别可能在厂区引起最严重后果的那些远海啸源和当地海啸源的地区是必要的。对那些海啸源地区中的每个地区均应收集海啸强度数据，应根据地震震级、震源深度，垂直位移分量和发生的频率以确定最大海啸。为了做出上述估计，通常需要分析来自延伸范围很大区域内的数据。对某些厂址，有可能以可用的历史资料确定在厂址引起最严重后果的海啸发生地区；对其他厂址，则可能需要从所有潜在海啸源地区来模拟设计基准海啸，以确定是哪个海啸源在厂区引起最严重的后果。

7.2.5 根据以下三个主要因素，估计靠近厂址海岸线的水位爬高和下降：

- (1) 大陆架边缘或根据厂址附近海底地形而确定的水深处的海啸波；
- (2) 由近海岸地形特征引起的、包括考虑共振效应的放大作用；
- (3) 可能改变海啸效应的严重程度的潮汐和波浪条件。

7.3 湖涌

7.3.1 湖涌是一种在诸如湖泊、水库或海湾等有限水体中，可能由地震、滑坡或火山爆发的振动效应引起的振荡运动。虽然风暴、台风或运动性气压变化等气象扰动也可能引起湖涌，但本节的范围限于由地震和滑坡引起的湖涌。

7.3.2 为了确定湖涌的最大潜在涌浪，应收集下述资料：

- (1) 长周期地震波的振幅和持续时间；
- (2) 岸坡地形和水深；
- (3) 水体的规模；
- (4) 滑入水体的滑坡体的规模和速度；
- (5) 涌浪的历史记录。

7.3.3 通过分析条款 7.3.2 要求收集的资料，将提供对水体自振周期和振动源自振周期之间的共振效应的现实估计。此外，它还将表明每一历史涌浪的机制。也应考虑可以改变湖涌效应的潮汐和波浪条件。

7.3.4 应注意即使在区域内不存在高地震活动性的特征，厂区也可能遭遇显著的潜在湖涌。

7.4 地震引起的挡水构筑物失效（溃坝）

7.4.1 应调查位于厂址区上游的挡水构筑物因地震事件而可能发生的破坏，还应考虑可能影响核安全的后续洪灾。应向挡水构筑物主管部门查阅其设计基准，以及地震危险性、性能要求、安全准则。应合理分析这些信息，确保核动力厂的安全或充分落实与厂址相关的缓解措施。

7.4.2 应考虑上游地区多个水坝溃坝的多米诺效应。应基于防洪水位和水流速度考虑水的动力影响。滑坡可能产生泥石流、碎屑流、堰塞湖，应考虑堰塞湖的溃决。

7.4.3 如果可能影响所考虑的挡水构筑物的所有发震构造都位于核动力厂地震危险性分析的调查范围内，则在对挡水构筑物进行地震危险性评价时，应采用相同的地震源。若发震构造不完全相同，应参考核动力厂地震危险性分析中采用的属性，对与挡水构筑物共用的地震源进行建模。地震危险性分析专家应与溃

坝分析和防洪设计的水文工程专家建立密切的协作关系。

7.5 地震液化

7.5.1 厂址非粘性土的地震液化可能性评估，是地震危险性评价工作的重要部分。对液化可能性较大和可供选择的工程措施受到限制的那些厂址，是不宜接受的。

7.5.2 地震液化评估技术的详细要求和可能的工程措施见核安全导则《核电厂的地基安全问题》(HAD101/12)。应根据非粘性土的液化可能性和液化的后果判定厂址的可接受性。

7.6 边坡稳定性

7.6.1 应评价地震荷载下边坡的稳定性，应评价地震引起与核动力厂有关的坝和堤的永久性位移。对有严重边坡失稳、永久性位移问题和可供选择的工程措施受到限制的那些厂址，是不宜接受的。

7.6.2 应按照核安全导则《核动力厂抗震设计与鉴定》(HAD102/02)和《核电厂的地基安全问题》(HAD101/12)中的要求评价边坡的稳定性，可采用设计基准地震动的峰值加速度确定地震荷载，必要时需要进行精细的动力分析。

7.7 地面沉降

在厂址附近存在较厚的蓄水层、在厂址附近抽取流体、在厂址附近进行采矿活动，有可能引发地面沉降。如果不能用工程措施来减轻潜在地面沉降的后果，该厂址是不宜接受的。

7.8 地面塌陷

由地质地球化学过程或人类活动形成的地下特征，可能造成严重影响厂址安全的地面塌陷。如果没有适当的工程解决措施，这个厂址是不宜接受的。

7.9 火山活动引发的地震

伴随火山事件会出现地震和相关灾害。火山活动产生的地震通常比构造地震小。如果在活火山附近发现能动断层，则应同时考虑地震灾害和火山灾害，由于构造运动和岩浆侵入的双重影响，该断层可能在火山爆发之前、同时、之后发生地震。在界限明确的局部地区，呈线状排列的多个火山口，可能表明存在构造断层或能动断层。

8 质量管理

8.1 应开展全过程质量管理，建立质量保证大纲，并将其应用于全部数据

收集与数据处理活动、野外调查、实验室分析测试以及本安全导则范围内的所有分析与评价。

8.2 由于调查分析的多样性以及在决策过程中需要专家的判断，为了促进这些工作的执行与验证，应根据核动力厂厂址所在区域的具体情况，针对某些技术环节编制技术规程，建议对这些技术规程的编制和实施进行同行审查。

附录 I 地震概率安全分析所需的地震危险性输入范例

表 I-1 给出了地震概率安全分析所需的地震危险性输入范例，包括常用的格式。

表 I-1 地震概率安全分析所需的地震危险性输入

输出	说明	格式
均值危险性曲线	通过计算概率地震危险性分析所有逻辑树分支产生的地震危险性曲线（年超越频率是地震动参数的函数）的均值，生成均值危险性曲线。	以图表的形式，给出每种地震动参数的均值危险性曲线。
分位数危险性曲线	在概率地震危险性分析所有逻辑树分支产生的地震危险性曲线满足高斯分布的前提假设下，通过计算给定分位数的地震危险性曲线，生成分位数危险性曲线。	以图表的形式，给出每种地震动参数的分位数危险性曲线。应至少给出分位数为 5%，16%，50%，84%，95% 的地震危险性曲线。
一致危险性反应谱	从每个有工程意义的结构周期的地震危险性曲线中导出的，具有相同年超越频率的反应谱。	以图表的形式，给出均值和分位数反应谱。应至少给出年超越频率为 $1e-2, 1e-3, 1e-4, 1e-5, 1e-6, 1e-7$ 和分位数为 5%，16%，50%，84%，95% 的一致危险性反应谱。
震级-距离分解	震级-距离分解给出了各震级-距离组合对厂址地震危险性分析结果的相对贡献。	对于地震危险性曲线上给定年超越频率的地震动参数值，震级-距离分解给出了各震级-距离组合（对年超越频率）的相对贡献。通常以图表（如三维柱状图）的形式，给出抗震设计或地震概率安全分析中关注的年超越频率的均值危险性曲线的震级-距离分解。
震级-距离的 均值和众值	通过对震级-距离分解结果进行统计，可以给出震级-距离组合的均值和众值。	对每种给定水平（年超越频率、分位数）的地震动参数，都应给出震级-距离组合的均值和众值。应至少给出加速度反应谱中 1, 2.5, 5, 10, 25 Hz 的谱值以及峰值加速度的震级-距离组合的均值和众值。
潜在震源区分解	厂址地震危险性曲线是所有潜在震源区地震危险性曲线的和，按照潜在震源区对地震危险性结果进行分解，可说明将来（可能影响厂址的）地震的发生位置和类型。	通常对均值地震危险性曲线进行基于潜在震源区的分解，以图表的形式，给出各潜在震源区的地震危险性曲线。
地震动时程	时程通常表达为以时间为自变量，以地震动参数（如加速度）为因变量的波形函数。工程应用中采用的时程，应该与概率地震危险性评价结果相一致。应说明时程的选取和生成的验收准则。例如，对于给定的地震动或年超越频率，时程的某些特征（如峰值速度/峰值加速度）应与相应的均值和众值震级-距离组合内的时程的特征相一致。	应按照指定的表达方式给出地震动时程（如加速度时程，单位为重力加速度 g，时间间隔为 0.01 秒）。

注：1. 在服从泊松分布的前提下，当数值较小（低于 0.01）时，年平均超越概率与年平均超越频率的数值相同；
 2. 对于离散随机变量，众值是指概率最大的变量值；对于连续随机变量，众值是指概率密度最大的变量值。

名词解释

能动断层

可能引起地表或近地表明显错动的断层。

自由场地震动

在不考虑结构和设备影响的情况下，由地震引起的、在某一给定地点发生的地震动。

地震烈度

地震对人类、人工构筑物以及地表产生实际影响的量度。该量度由一组基于主观判断而非仪器记录的数值指标组成。

地震动预测方程

地震动参数与表征地震震源、地震波传播路径、场地条件等因素的物理量之间的函数关系。

发震构造

曾发生和可能发生破坏性地震的地质构造。

最大潜在地震

未来可能发生的最大地震。

潜在震源区

概率地震危险性分析中，表征未来发生地震的震源可能分布的地区。

震级上限

地震统计区或潜在震源区内可能发生的地震的震级的上限值。

地震构造区

具有同样地质构造和地震活动性的地理区域。

弥散地震

地震构造区内与已确认的发震构造无关的地震。

控制地震

用于确定反应谱形状或估算厂址地震动的地震。对某一厂址，可能存在几个控制地震，控制地震用地震危险性概率分析方法给出的平均震级和距离来表示。

地震概率安全分析

一种全面的、结构化的处理方法，识别出地震导致核动力厂失效的情景，并对工作人员和公众所承受的风险做出数值估计。