

附件 1

核安全导则 HAD 102/02—2019

核动力厂抗震设计与鉴定

(国家核安全局 2019 年 12 月 31 日批准发布)

国家核安全局

核动力厂抗震设计与鉴定

(2019年12月31日国家核安全局批准发布)

本导则自2019年12月31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。

1 引言

1.1 目的

1.1.1 本导则是对《核动力厂设计安全规定》(HAF102, 以下简称《规定》)有关条款的说明和细化, 其目的是给核安全监督管理部门、核动力厂设计人员和营运单位就核动力厂设计与鉴定提供可接受的通用方法, 使场址地震动不致危及核动力厂安全, 并在构筑物和设备的分析、试验鉴定所用方法和程序的一致性方面给予指导, 使其满足《规定》的安全要求。

1.1.2 附件 I 与正文具有同等效力。

1.2 范围

1.2.1 本导则适用于符合核动力厂地震危险性评价相关导则排除准则的陆上固定式水冷反应堆核动力厂的设计, 以抵御场址特定地震。本导则不涉及地震动的强度或核动力厂各物项的风险度。

1.2.2 当采用简化程序进行设计和验证时, 应证明这些程序对于实现安全目标的适宜性, 并从安全的角度进行恰当的评价。

1.2.3 本导则适用于新建核动力厂的设计与建造, 通常不用于对已建核动力厂的重新评价。本导则不适用于已建核动力厂的抗震设计裕度评价。

1.2.4 本导则也可用于其他类型核动力厂的设计, 但应根据反应堆类型及其特殊的安全要求, 采用工程判断的方法评价其适用性。

1.2.5 本导则中关于模型化与物项鉴定方面的技术建议可应用于地震以外其他原因引发振动的设计，如工业设施的爆炸、飞机撞击、采石场爆炸或高速旋转机械的事故等。但是，对于此类扩展应慎用，尤其是关于诱发振动的频率范围、持续时间、方向和对核动力厂的影响机理等方面，应进行工程判断。还应注意，抵御此类荷载的设计可采用不同的形式（如防撞墙），或可能包括其他不同的破坏形式（如冲击荷载引起的结痂或破碎）。本导则不考虑这些特殊的工程措施。

2 总则

2.1 概述

2.1.1 本章依据《规定》中的要求，按构筑物、系统和部件在设计基准地震事件中的安全重要性，提出抗震分类的建议。为保证在设计中有适当的安全裕度¹，还给出了关于设计标准应用的建议。

2.1.2 对于本导则适用范围内所涵盖的影响核动力厂安全的物项、服务和过程，应制定质量保证措施并有效实施。

2.2 设计基准地震

2.2.1 对每个场址应评定其地震危险性，并根据相关程序及核动力厂设计确定的目标概率水平或原则，给出两个级别的设计基准地震动：运行安全地震动（SL-1）和极限安全地震动（SL-2）。

¹ 本文中，安全裕度是指在设计、材料选择、建造、维修和质量保证中的特殊条款的结果。

2.2.2 在核动力厂的设计中，SL-2 与最严格的安全要求相关，而 SL-1 则具有不同的安全意义，其可能性较大且严重性较低，可由营运单位经综合评估确定。通常，SL-1 用于荷载组合（由于与概率相关的原因，其他事件与较低强度的地震组合）、事故后的检查及许可证要求。作为较低水平的地震动，SL-1 通常不与安全要求相关，只与运行要求相关。当核动力厂运行中场址实际发生的地震动超越 SL-1 时，应采取措施停堆，并应依据相关要求对核动力厂安全相关物项进行评估，经过核安全监督管理部门的审查认可后，方可恢复核动力厂运行。

2.2.3 对核动力厂每个安全级物项均应考虑 SL-2。最低水平应考虑相当于自由场地面加速度峰值 $0.15g$ （设计反应谱中零周期加速度的值）。

2.2.4 设计基准地震动的确定一般考虑潜在地震动的频谱及持续时间。当判定有多个震源对危险性具有主要贡献时，尤其应注意不同震源的频谱效应与持续时间的影响。在此情况下，对源于不同震源（如远场和近场）的地震动（或反应谱）进行包络时应更加谨慎。考虑到构筑物、系统和部件的抗震要求不同，宜对不同的地震动分别进行承载力评价。

2.2.5 输入地震动一般定义在地表或基岩表面处的自由场。当需要在基础标高处进行地震输入时，可采用反演-正演的方法来赋值。

2.3 构筑物、系统和部件的抗震分类

2.3.1 由地震引起的任何主要的场址预期效应，与通过核动力厂构筑物传至构筑物、系统和部件的震动相关。震动可通过直接或间接相互作用机制（如由地震引发的物项间的机械相互作用、危险物质的释放、火灾或水淹、操作人员通道的破坏以及撤离道路或进场道路的不可用等）影响核动力厂的安全功能。

2.3.2 所有构筑物、系统和部件都要经受任何可能发生的地震作用，而地震事件发生时所要求的性能可以不同于在安全分级中考虑的安全功能。这些安全功能是基于在所有设计基准工况下（假设始发事件）要求最高的安全功能。因此对于从安全出发的设计方法，除了安全分级以外，还要根据其在地震期间和地震后的安全重要性将构筑物、系统和部件进行分类。构筑物、系统和部件的抗震可分为抗震 I 类、抗震 II 类和非核抗震类，或根据核动力厂机组的设计特性分为更多类。分类的目的是为了有利于公众和环境对放射性物质释放的防护和保障核安全。

2.3.3 应规定核动力厂的抗震 I 类物项。此类物项应设计为可承受 SL-2。抗震 I 类物项通常相应于安全上的最高类别，并包括所有安全重要物项。具体来说，抗震 I 类物项应包括下列物项及其支承结构：

(1) 作为 SL-2 的后果，其失效会直接或间接导致事故工况的物项；

(2) 使反应堆停堆，保持反应堆处于停堆状态，在要求期间内排出余热所需的物项，以及对上述功能的参数进行监测所必

需的物项；

（3）预防或缓解设计中考虑的任何假设始发事件（不论其发生的概率如何）引起的放射性释放超过限值所必需的物项；

（4）预防或缓解乏燃料池不可接受的放射性释放后果所需的物项。

2.3.4 在 2.3.3 节（3）中物项的选取与纵深防御有关：在 SL-2 水平的地震事件中，所有层次的防御应总是处于可用状态²。为防御地震以外的外部事件所设计的实体屏障，在地震期间应保持完整性和功能性。

2.3.5 尽管轻水堆一回路主要压力边界是按承受地震荷载进行设计的，但作为一种保守措施，仍假设在一回路压力边界会发生某些设计基准事故而设置了减轻其后果的物项，这类物项也要包括在抗震 I 类物项中。

2.3.6 核动力厂抗震 I 类物项的设计、安装与维修应符合严格实践，即应高于常规风险的设施所采用的安全裕度。对于任何抗震 I 类的物项，应按照安全功能要求确定适当的验收准则³（如表明功能性、密封性或最大变形的设计参数）。但是在某些情况下，如果详细评价其对核动力厂安全功能的影响，对于包含 SL-2 的荷载组合，实体屏障的验收准则可以适当降低。

² 在纵深防御的框架中，对所有外部事件的防御是第一层次纵深防御的一部分。

³ 验收准则是对评价构筑物、系统和部件执行其设计功能的能力所用的功能性的或状态性指标而规定的边界值。此处所用的验收准则是指在所定义的假想初始事件下，对构筑物、系统和部件功能性的或状态性的指标规定的边界值（如：与功能性、密封性或无相互作用相关的指示）。

2.3.7 可确定核动力厂的抗震 II 类物项。抗震 II 类物项应包括：

(1) 所有具有放射性风险但与反应堆无关的物项（如乏燃料厂房和放射性废物厂房）。要求这些物项具有的安全裕度与其潜在放射性后果相一致。由于这些物项一般来说与不同的释放机理有关（如废物泄漏、乏燃料筒损坏），其预期后果与反应堆的潜在后果不同；

(2) 不属于抗震 I 类〔特别是 2.3.3 节(2) 和 (3) 中的物项〕，但在足够长的时间内（在该时间段内具有合理地发生 SL-2 或 SL-1 的可能性）预防或缓解核动力厂事故工况（由地震以外的假设始发事件引起的）所需要的物项；

(3) 与场址可达性相关的物项及实施应急撤离计划所需的物项。

2.3.8 抗震 II 类物项的设计地震水平应在以下基础上确定：为保护物项防御这一地震水平所做的附加工作必须与可能减轻核动力厂人员或公众遭受地震引起的风险相称。必须遵守国家规定的放射性物质释放可接受的限值。

2.3.9 不属于抗震 I 类、抗震 II 类的非核抗震类物项应依据国家非核设施的规范进行设计，即按常规风险的设施进行设计。其中的一些对核动力厂运行重要的物项，可根据运行目标选择较严格验收准则。这种做法可减少核动力厂停堆、检查和重新申请许可证的需要，从而使核动力厂持续运行。

2.3.10 在核动力厂所有物项中（包括那些安全上不重要的物项），那些可能与抗震 I 类和抗震 II 类物项发生空间相互作用（如由于倒塌、坠落或移位）或其他相互作用（如通过危险物质释放、火灾、水淹或地震引起的相互作用）的物项，应论证这些物项引起的潜在影响和造成的损害，既不影响任何抗震 I 类及抗震 II 类物项的安全功能，也不影响任何与安全相关的操纵员行动。

2.3.11 作为地震后果，根据分析、试验或经验，预计会发生某些相互作用，并且会危及抗震 I 类或抗震 II 类物项的功能（包括操作行动）时，应采取下述措施之一：

(1) 这类物项应重新分类为抗震 I 类或抗震 II 类，并重新进行设计；

(2) 为了避免对抗震 I 类或抗震 II 类物项产生不利影响，这类物项应按 SL-2 进行鉴定；

(3) 应适当地保护被危及的抗震 I 类或抗震 II 类物项，以免其功能受到与此类物项相互作用的危害。

2.3.12 第 2.3.10 节所述物项应按照核应用实践进行设计、安装和维修。但是，在第 2.3.11 节(2)中，当认为其与抗震 I 类或抗震 II 类物项发生相互作用的频率非常低时，可以适当降低安全裕度。

2.3.13 对物项的抗震分类，应以清楚地了解为保证安全在地震期间或地震后对其功能的要求为基础。根据不同的安全功

能，同一系统中的不同部件可能属于不同的抗震类别，例如应考虑密封性、损坏（如疲劳、磨损及开裂等）程度、机械或电气功能、最大位移、永久变形的程度和几何尺寸的保持等方面。

2.3.14 对核动力厂所有可能的运行模式都应考虑地震荷载。在抗震设计中，对所设计的物项应考虑其抗震分类。

2.3.15 应依据反应堆类型、核安全法规和标准以及场址的特殊边界条件（如冷却水源的可用性）等进行抗震分类。

2.3.16 作为设计过程的一部分，应列出具有相关验收准则的所有物项的详细清单。示范的清单见附件 I。

2.4 地震荷载与运行荷载的组合

2.4.1 设计荷载的分组如下：

- (1) L1，正常运行引起的荷载；
- (2) L2，预计运行事件引起的附加荷载；
- (3) L3，事故工况引起的附加荷载。

2.4.2 应按所考虑物项的特定位置计算地震荷载，要考虑土体和厂房构筑物的特性，包括质量和刚度及厂房内设备的分布。应保证已考虑了起控制作用的荷载组合。

2.4.3 对于抗震设计，地震引起的荷载应与核动力厂的运行荷载进行如下组合：

- (1) 对于抗震 I 类和抗震 II 类的物项，应根据其类别将 L1 与设计基准地震组合；
- (2) 对于抗震 I 类和抗震 II 类的物项，如果 L2 或 L3 由地

震荷载引起并（/或）与地震荷载同时发生可能性大（如 L2 与地震无关⁴，但发生相当频繁，就可能是这种情况），则 L1 和 L2（或 L3）应与设计基准地震组合；

（3）对已确认会发生与抗震 I 类或抗震 II 类物项相互作用的其他抗震物项，应采用与抗震 I 类或抗震 II 类物项相同的荷载组合，但可用不同的安全裕度；

（4）对于非核抗震类物项，应将相关设计基准荷载按常规工业规范进行组合。

表 1 与地震荷载的荷载组合

| 抗震类别 | L1 | L2 | L3 | 地震荷载 | 安全裕度 |
|---------------------------|----|----|----|--------------------------|--|
| I | √ | | | SL-2 | 依据较高风险设施的设计规范（核规范） |
| | √ | √ | | SL-2 | 同上 ^b |
| | √ | | √ | SL-2 | 同上 ^b |
| II | | √ | | SL-2 或 SL-1 ^a | 依据风险与核动力厂不同（通常较低）的设施的设计规范 |
| | √ | √ | | SL-2 或 SL-1 ^a | 同上 ^b |
| | √ | | √ | SL-2 或 SL-1 ^a | 同上 ^b |
| 与抗震 I 类或抗震 II 类物项发生空间相互作用 | √ | | | SL-2 或 SL-1 ^a | 依据较高风险设施的设计规范（核规范）或较低风险 ^c 的设计规范 |
| | √ | √ | | SL-2 或 SL-1 ^a | 同上 ^b |
| | √ | | √ | SL-2 或 SL-1 ^a | 同上 ^b |
| 非核抗震类 | √ | | | 常规地震输入 | 依据常规风险设施的设计规范 |

a 如果有恰当论证支持，荷载组合时可用 SL-1，而不是 SL-2。

b 仅在由 SL-2 引起或与其同时发生可能性高时才考虑。

⁴ 典型的由地震事件引发的 L2 可能是由反应堆停堆产生的荷载。

c 如果能表明相互作用的可能性小，可以考虑较小的安全裕度。

2.4.4 对于构筑物、系统和部件的抗震设计，应考虑假设由地震引发的在场址处的外部事件，如水淹或火灾等。这些外部事件应根据频率分析确定。作为地震后果，这些荷载应与 SL-1 或 SL-2 组合，并恰当地考虑事件的发生时间和持续时间。

2.5 抗震能力

2.5.1 荷载组合的验收准则（包括 SL-2 或 SL-1，与 L1 或 L2 或 L3 组合的效应）应与无地震作用的 L3 的相关做法相同。

2.5.2 对于抗震 I 类和抗震 II 类的构筑物，如果证明其验收准则（以表征弹性、最大裂缝宽度、不出现屈曲或最大延性的设计参数来表示）满足与其抗震类别一致的安全裕度，则可设计为呈现非线性特征（选择材料和/或几何尺寸）。不可逆的结构性状影响程度（如与接缝处的延性有关）应与相关地震场景的预计发生频度相一致。在任何情况下，应根据抗震分类明确地评定特定的验收准则（如密封性、最大相对位移及功能性）⁵。

2.5.3 与抗震 I 类或抗震 II 类可能存在相互作用的构筑物也可设计为呈现非线性特征。结构构件的节点，特别是接缝或连接处，应与验收准则所要求的延性水平相一致。

2.5.4 材料特性应依据由适当的质量保证程序所支持的特性值来选定。为了保证材料及构筑物、系统和部件的长期安全性能，应进行适当的老化评价。

⁵ 对于某些密封性结构（如安全壳和燃料水池）在极端地震下的验收准则有所降低。在此情况下，极端地震下只要求保持整体性，但震后恢复运行是视地震对此类结构的密封性影响的评价而定的。

2.5.5 应对由地震事件导致的加速退化的机理进行专门评价。如果这种机理在核动力厂寿期内引起任何抗震性能的降低，则为了保证设计中所要求的震后安全水平，应对其考虑附加的安全裕度。

2.5.6 为了保证足够的抗震安全，应实现延性设计，并且应引入逐渐的、可察觉的失效模式。下述措施作为范例，指出设计阶段所应考虑的问题：

(1) 在钢筋混凝土结构中，应避免发生在剪切区和/或连接处或在混凝土受压区发生脆性破坏；

(2) 应确定适当的混凝土最小抗压强度，以保证结构构件的极限强度由钢筋强度控制；

(3) 对于配筋，应确定适当的极限拉应力与抗拉屈服强度的最小比值，以保证最小延性；

(4) 结构节点（尤其在钢筋混凝土结构中）应设计成为高延性并具有承受大变形与扭转的能力；这种措施应与抗震分类中确定的验收准则相一致，但也要考虑超设计基准地震；

(5) 为了给“长期”的几何形态（如抗御蠕变与沉降）及材料的延性特性（如抗御辐照脆化）的假设提供依据，对于老化应进行适当的考虑。

2.5.7 破前漏概念⁶的应用代表了一种特殊情况：当应用此准则时，应使用与所需精度相一致的程序进行分析或试验，针对

⁶ 破前漏概念是一种影响设计、材料选择、建造、质量保证、监督与检查的总体方法。它对一些设计假设，如燃料组件设计时的瞬态荷载、冷却剂压力边界的瞬态荷载（避免考虑双端断裂）、由管道破裂场景产生的甩击荷载等具有重要的影响。

地震对裂纹扩展的贡献进行专门的评价。

2.5.8 非核抗震类物项的验收准则至少应按照常规风险设施的国家标准及规范执行。

2.5.9 当 SL-1 小于等于 SL-2 的 $1/3$ 时，强度设计分析可不考虑 SL-1，但仍需对 SL-1 产生的应力循环进行疲劳分析评价。所考虑地震循环次数为 2 次 SL-2 且每次 SL-2 有 10 个最大的应力循环；也可采用等效于 20 次 SL-2 振动循环的低振动幅值多循环次数来代替，但振动幅度不应小于 SL-2 最大振动幅度的 $1/3$ 。

2.5.10 当 SL-1 大于 SL-2 的 $1/3$ 时，疲劳分析应考虑 5 次 SL-1 和 1 次 SL-2，每次地震假设有 10 个峰值循环。

2.6 超设计基准地震的考虑

2.6.1 应依据上述各节列出的总体要求和第 3 章给出的设计要求进行抗震设计，以便为超设计基准地震提供一定的裕度，以防止陡边效应⁷。

2.6.2 为了进一步了解核动力厂的抗震裕度和抗震性能的薄弱环节，对新建核动力厂进行抗震裕度评估或地震概率安全分析时，可采用现实模型进行结构易损性分析，并根据场址特征确定适当的裕度地震。核动力厂设计应能保证极端情况下用于防止核动力厂早期放射性释放或大量放射性释放所需的物项能够发挥作用。

2.6.3 对于特定的物项，由于高度的非线性状态（如为满足

⁷ 陡边效应是指在核动力厂中，由微小变化的输入引发核动力厂状态的重大突变。例如，由参数微小的偏离导致核动力厂从一种状态突变到另一种状态的严重异常行为。

热荷载的其他设计准则而安装的单轴横向约束等引起的非线性状态）不能遵守抗震设计的通用原则，应对其进行敏感性研究，并且为了提高安全裕度，应采取适当的加强措施。

3 抗震设计

3.1 采用适当的厂房布置

3.1.1 在厂房设计的初期阶段，应提出主要设施的初步布置，这项工作应阶段性地进行审核，以获得最佳的抗震设计。对过去破坏性地震的后果都应有清楚的了解，并严格地贯彻到整个抗震设计过程中。在初步设计中，为减轻地震对构筑物、系统和部件的效应，应考虑本节所给出的建议。

3.1.2 在初步设计阶段，应通过采用以下原则，选择适当的结构布置使地震效应（如作用力、不利的扭转或摆动效应等方面）最小：

- (1) 尽可能降低所有结构的重心；
- (2) 构筑物的平面和立面应尽可能简单和规则，并避免埋置深度不同；
- (3) 尽可能避免突伸的部分（即对称性差）；
- (4) 尽可能使各楼层的刚度中心靠近其重心；
- (5) 尽可能避免不同抗震类别和不同动态特性的构筑物或设备之间的刚性连接。

3.1.3 为减少构筑物间不应有的差动，应在实际可行的范围内考虑将这些构筑物建在同一基础结构上，或者应至少避免不同

的埋置深度。在核动力厂的选址中，应避免基底的土体特性有显著差异。所有单独基础或桩基均应在构筑物基底平面内相互连接。

3.1.4 为便于抗震分析，应采用规则的结构布置和简单的结构联接，并改善附加在构筑物上的管道和设备的抗震性能。在交接的结构边界（如伸缩缝或施工缝）处、构筑物间的连接处、或通过地下管沟向构筑物或由构筑物供给水电时，应注意避免由于差动造成损坏或失效。

3.1.5 对于整体设计或部分设计，可采用抗震系统和装置（如基底隔震装置）的特定方法。该技术应整体考虑较复杂的基础设施系统的设计和为隔震装置进行定期检查和维修而制定的专门操作规程，这些额外的工作可明显降低构筑物、系统和部件的抗震需要。当相对位移增加时，应对结构交界面及其连接的设计予以重视，这些内容应在构筑物设计中明确。此外，当隔震装置对其他荷载的反应更不利时，应评价隔震装置的效应。

3.2 岩土参数

3.2.1 场址特定岩土特性的资料应由场址勘察、试验分析及工程假设来获得。第4章讨论了岩土模型化方法。

3.3 土木工程结构

3.3.1 在结构设计与设计审查时应特别关注下述项目：

(1) 持力层土体的适宜性；

(2) 基础支承类型的适宜性或相互联结的结构下采用不同

类型基础的适宜性(例如应避免同一构筑物单元的一部分基础支撑在桩上或基岩上，而另一部分直接坐落于土体上);

(3) 结构框架和剪力墙应均衡对称地布置，以获得最佳的刚度、荷载和重量分布，使扭转效应最小；

(4) 要防止相邻建筑物之间因动力变形发生碰撞(这类现象也可能发生在弱耦联结构中)；

(5) 附属建筑和附属物与主体结构的联接要恰当，见 3.3.1 节 (4)；

(6) 要保证主要结构构件具有足够抗力，尤其是抗横向剪力；

(7) 要保证足够延性和避免由剪力或压力引起脆性破坏。例如保证有足够的配筋，尤其是柱内有足够的箍筋(即足够的约束)，以防止在塑性区内受压钢筋的过早屈曲；

(8) 钢筋的布置和分布，钢筋的高度集中可能引起混凝土沿钢筋线开裂；

(9) 有必要对结构构件的连接及物项与混凝土的锚固点进行设计，以保证延性破坏模式(如锚固长度应足够长以防止拔出，并且应配置足够的横向拉筋)，同时构件间的连接要尽可能做到该构件与被连接的构件具有同样的强度和延性；

(10) 对地震中由于竖向力和水平位移引起的非线性弯矩(即“P-Δ”效应)进行评价；

(11) 地下水浮力对基础的附加效应；

- (12) 在地震时，结构在防水层上横向滑动的可能性（尤其是潮湿时）；
- (13) “非结构”构件（如隔墙）对结构构件的动态效应；
- (14) 为抗地震差动而设计的大型整体结构中对施工缝及温度应力的详细设计；
- (15) 当安全壳的刚度大于周围混凝土结构的刚度，而它们又相互联结或可能相互作用，以致混凝土结构上的地震荷载可能传到安全壳上时，各种作用力的传递效应。由于这种结构相互作用的复杂性，使这种力难以确定，应尽可能将这类结构在基础标高以上分开；
- (16) 机械部件应恰当地锚固在土建结构上；
- (17) 有必要加固“非结构”墙或钢结构，以防止其或其部分构件坠落到安全相关物项上。

3.3.2 在采用建筑物基底隔震方案时，应关注以下内容：

- (1) 建筑物基底隔震的目的是通过在其基底设置隔震支座，以减小其水平地震反应。所选隔震支座的水平刚度应使隔震结构的水平自振频率明显低于未采用隔震方案的结构。应考虑选取适宜的固有频率；
- (2) 上部结构的质量应尽量均匀分布在每个隔震支座上；
- (3) 为了减小扭转效应，隔震支座的刚度中心与上部结构重心在隔震支座系统平面上的投影点之间的偏心应在限值以内；
- (4) 隔震支座应能够支撑上部结构的重力荷载而不出现过

度蠕变，并且应能够抵抗如飞机撞击、风荷载及温度变形等非地震作用；

(5) 隔震支座应能够承受由设计基准地震引起的水平位移，同时还应安全地支撑上部结构的重力荷载以及地震产生的竖向地震作用；

(6) 除非采用附加装置提供该阻尼，否则隔震支座应提供足够的阻尼以控制地震作用产生的水平位移；

(7) 结构抗震分析既要考虑未老化时的隔震支座特性，又要考虑老化时的特性，并应考虑支座制造中的误差；

(8) 设计中应通过采取工程措施防止隔震支座因火灾而丧失承载能力（包括飞机撞击引起的火灾），即在主体结构的下部空间不应有火源，且此空间在飞机撞击后不应有火灾入口通道；

(9) 设计阶段应采用全尺寸隔震支座进行初始试验（瞬态试验和动力试验）和鉴定试验，以达到以下目标：

A) 判定支座的坚固性；

B) 至少应考虑设计基准地震下的位移，为结构设计提供隔震支座参数（如水平阻尼、水平刚度，均为固有频率和剪应变的函数）；

C) 为隔震支座制造提供控制参考值。

(10) 隔震支座应通过采用原型支座全尺寸试验和支座缩尺试验进行抗震鉴定。鉴定应满足下述要求：

A) 应对老化效应下的剪切模量和阻尼进行详细说明；

- B) 说明缩尺试验对于全尺寸试验的代表性和比例系数。
- (11) 核动力厂总体布置应减小地震和其他荷载作用下结构位移的影响，并在其周边提供足够的自由变形空间（抗震缝）；
- (12) 隔震支座的支承应足够高，以允许维修监测与便于支座更换；
- (13) 隔震支座的设计应考虑更换的可行性；
- (14) 设计阶段就应考虑支座置换方法，并经过鉴定；
- (15) 鉴于隔震支座的安装精度要求较高，因此安装过程应经过鉴定；
- (16) 设计阶段就应考虑后续支座特性监测的监测程序。

3.4 土工结构

3.4.1 在核动力厂场址中可能遇到下列安全相关的土工结构：

- (1) 最终热阱：坝、沟渠、堤；
- (2) 场址保护：坝、沟渠、防波堤、海堤、护坡；
- (3) 场址周边：挡土墙、自然斜坡、路堑和填土。

3.4.2 这些土工结构应依据其抗震类别设计，使其对下述地震相关效应具有足够的抗震能力：

- (1) 由设计基准地震动引起的斜坡破坏，包括液化；
- (2) 结构在弱地基材料上或强度可因液化而降低的地基材料上的滑移；
- (3) 由于地震动引起的埋置管道的损坏或通过裂缝的渗漏；

(4) 由于滨海场址海啸或水库中湖涌、塌方或岩石掉入水库、溢洪道或泄洪工程的损坏而使构筑物淹没；

(5) 挡土墙的倾覆。

3.4.3 相关的设计方法可参考核动力厂场址选择与地质或地基相关的导则。

3.5 管道和设备

3.5.1 对于设备和管道支承的抗震设计，应制定专门的要求：

(1) 在支承的设计中，应注意保证所有接头的设计能按支承分析中所假定的方式起作用，并能传递被连接构件中所确定的全部荷载。特别是，如果采用六个自由度的约束支承，则这些支承的设计、制造和安装应能将被支承构件产生的任何意外破坏和开裂延伸到功能部件（如反应堆压力容器或一回路管道等）的危险性减至最小；

(2) 在设备锚固装置的设计中，如可能采用的钩状或带端板的锚栓，应注意保证所有可能的内力和弯矩已全部考虑，并且锚固材料是适用的。尤其重要的是要保证基底板有足够的刚度，以避免翘曲效应；保证锚栓恰当的紧固，以避免摆动效应、频率降低、反应水平提高、高于设计荷载和增加松动、拔出及疲劳的危险。在安装预拉至接近其屈服点时，应加大锚栓直径或增加锚栓数量。

3.5.2 为改善抗震能力，应考虑以下方面：

(1) 设备的支承支柱应设交叉支承，除非其尺寸可保证不采用此做法。应避免共振，在某些情况下（如对于堆内构件要通过变更设计来避免共振是困难的），可以调整反应堆厂房内部结构本身的振动特性来防止共振效应。如果系统刚度较大，应考虑热应力、其他动力荷载及支承点的差动效应；

(2) 就合理可行而言，重要的是要避免如管道、仪表和堆内构件等设备在支承结构主振型频率发生共振。在某些情况下，设备反应虽然很大，但实际上又不可能通过其他办法来减小，此时可通过适当的设计修改来增加系统的阻尼；

(3) 为对管道和部件提供地震约束，同时又允许自由热变形，应使用阻尼器或运动限制器。由于缓冲器的使用与运行和维修有关，应避免采用过多的缓冲器。对地震荷载过于保守的设计会减小温度荷载的设计裕度（自由位移受约束），故确定地震输入时应采用实际的阻尼值；

(4) 应特别注意相邻部件之间或部件与相邻建筑构件之间因动力位移而发生碰撞的可能性。这类部件之间、部件与构筑物贯穿件之间、部件与连于建筑的地下联接之间以及建筑物之间的联接应具有柔性；

(5) 管道支承的布置应使其传到设备的荷载为最小。

3.5.3 上述措施对所有可能的振动源（如飞机撞击、运行振动及爆炸）也应参考使用，但它们的效应可能不同于地震引起的效应。

3.6 选用适当的设计标准

3.6.1 根据实际经验，同一项目中的不同专业（如机械、土建和电气）对设计、材料选择和建造质量通常采用不同的标准。在不同的设计工作中，应在早期对各自的安全裕度、相应的不确定性程度及其与项目总体安全要求的一致性进行评价。

3.6.2 设计应保证能够实现核动力厂总体安全方面的设计假设，这种评价可能实际影响项目管理及在整个设计评价和建造阶段的质量管理体系。

3.6.3 特别是，在选择适当的设计标准时，应评价下述选项的兼容性与适宜性：

- (1) 国内和国际的核与非核的抗震设计标准；
- (2) 国内和国际的除抗震设计外的核设计标准；
- (3) 国内的非核和非抗震的设计标准。

从场址数据到材料强度计算的整个设计过程中，安全裕度、设计程序和质量保证要求均应在评价中进行比较。由于设计标准的混用对设计的整体安全裕度必然会产生难以评价的后果，应尽量避免标准的混用。

3.6.4 应在安全评价阶段，评价设计所提供的总体安全裕度。

3.7 定期安全审查

3.7.1 运行核动力厂在规定时间间隔内或一旦证实对任何设计假设有明显改变时，应进行核动力厂的定期安全审查。为了

支持定期安全审查，应实施适当的结构控制与监测。

3.7.2 在此审查中，应依据新的场址评价（如新地震事件的发生或获取新的区域发震构造证据）、现行设计与鉴定的标准和新的设计方法对原设计假定进行评价，该评价结果将影响运行执照更新时需要考虑的事项。

3.7.3 在定期安全审查结束时，应保证设备抗震鉴定的有效性得以延续。应将保持设备抗震鉴定状态的必要性反映在控制核动力厂变更的规程中（包括其运行规程的变更）。在此体系中，除了具有核设施所期望的良好管理标准外，还应保持与抗震鉴定的构筑物、系统和部件相邻的区域没有相互作用的危险。

4 设备抗震鉴定

4.1 设备抗震鉴定的基本要求

4.1.1 安全重要物项的抗震鉴定可采用下述一种或几种方法进行：

- (1) 分析；
- (2) 试验；
- (3) 地震经验；
- (4) 与已鉴定合格的类似物项的比较。

也可采用这些方法的组合，如图 1 所示。

4.1.2 通常抗震鉴定包括结构完整性鉴定以及可运行性或功能性鉴定。抗震鉴定可直接在实际物项或原型物项上进行，或间接在缩尺模型上、缩尺原型物项上或简化的物项上进行，当被

鉴定物项与参考物项之间能确定其相似性且后者已进行过直接鉴定时，可通过相似性进行鉴定。不论采用哪种方法，该方法都应精确地代表部件或结构在遭受所指定的效应时的性能。

4.1.3 应注意确保所建模型的精细程度与将进行鉴定的物项相一致。

4.1.4 任何鉴定方法要求正确地或保守地模拟在地震时施加于该物项的边界条件，或者对边界条件的偏离不会显著地影响鉴定结果。在这些边界条件下，最重要的是：激振方式、支承形式、环境条件和运行工况。

4.1.5 为了保证鉴定结果(尤其是对于原型试验)足够可靠，应考虑分析和试验相结合的方法。一般来说：

在采用试验法的情况下，分析方法应给出：

- (1) 试验中传感器的位置；
- (2) 规定试验范围与试验程序；
- (3) 试验数据的处理。

在采用分析法的情况下，试验方法应证明：

- (1) 材料建模时所选择的本构关系的合理性；
- (2) 所确定的失效模式。

4.1.6 分析法抗震鉴定应用于只有完整性要求而没有其他安全功能性要求的物项，以及其尺寸或规模不可能进行试验鉴定的物项。土木工程结构、贮槽、分布系统及大型设备物项通常在满足上述建模要求后，采用分析法鉴定。

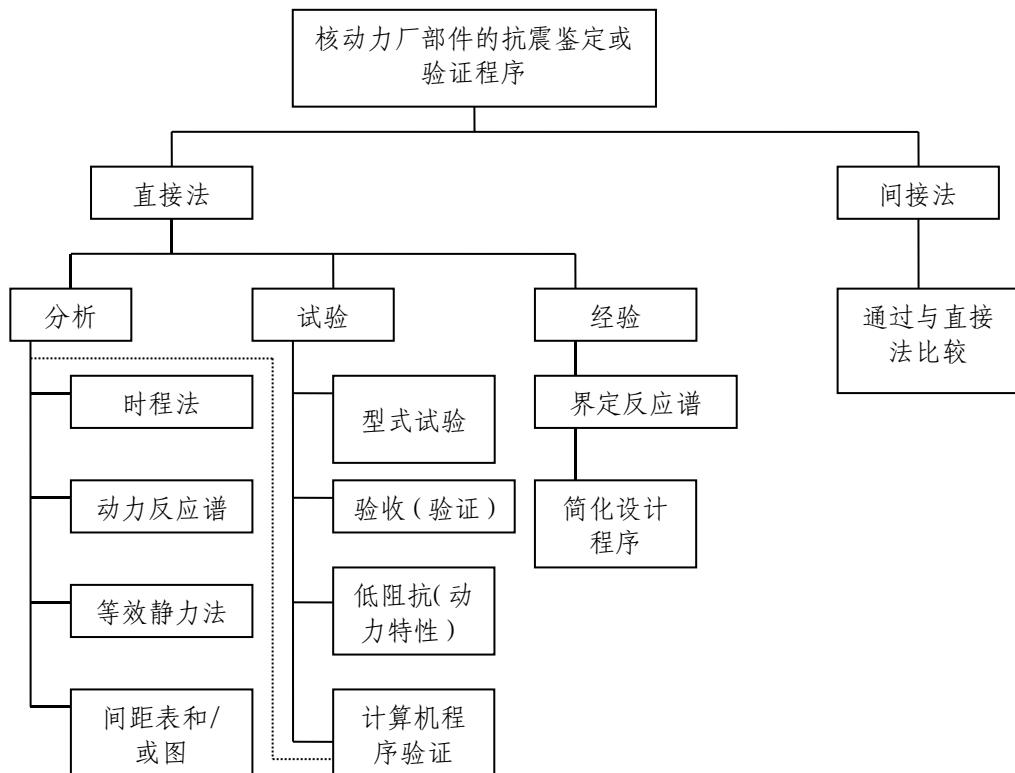


图 1 抗震鉴定或验证方法概要

4.1.7 对于设备，应参照核安全分级所确定的验收准则，通过特定的试验方法进行与地震有关的可能失效模式的系统评定。由于精细的计算机分析模拟技术的改进，即使是能动设备（如泵、阀门和柴油发电机组）在地震条件下的性能，也可通过分析进行预测。只有当潜在的失效模式可通过应力、变形（包括间隙）或荷载来识别时，能动部件的运行可行性方可采用分析进行鉴定。否则，能动部件的鉴定应采用试验或地震经验来进行。

4.1.8 一般来说，高水平的精密分析仍然要作一系列的假设，且至多也只是得出地震时的性状。特别是对能动设备的功能性要求，应始终使用试验或经验数据来验证分析结果。

4.1.9 除了上述方法以外，对于与抗震 I 类或抗震 II 类存

相互作用物项的抗震鉴定，应派专职专业人员进行现场巡查，以评价所有潜在的相互作用机制：机械相互作用或由于危险物质释放造成的相互作用，火灾及水淹（由地震引发的）、以及由于可达性的丧失而妨碍操作人员安全相关的行动。在此基础上，这种巡查方法可作为设计评价的一部分，并应制定巡查计划。

4.2 分析法鉴定

4.2.1 模型化技术

4.2.1.1 地震动输入模型化

（1）鉴定物项的输入地震动可使用保守而尽可能接近实际的时程或反应谱。反应谱的形状、地面加速度峰值及运动持续时间应按核动力厂地震危险性评价相关导则所论述的方法来推导，并与风险定义相一致。

（2）对物项数值模型通常的做法是同时输入两个水平方向和一个竖直方向的地震动分量。此时，分量之间应独立统计。当分量单独地输入时，相应的结构反应应适当地组合，以考虑两个方向输入分量的统计独立性。

4.2.1.2 构筑物及设备的通用建模技术

（1）核动力厂可按其结构特征采用不同的方式建模（如集中质量模型、一维模型、轴对称模型、二维或三维有限元模型）。应使用最适宜、可靠的数值建模技术，使其给结果带来的不确定性最小。

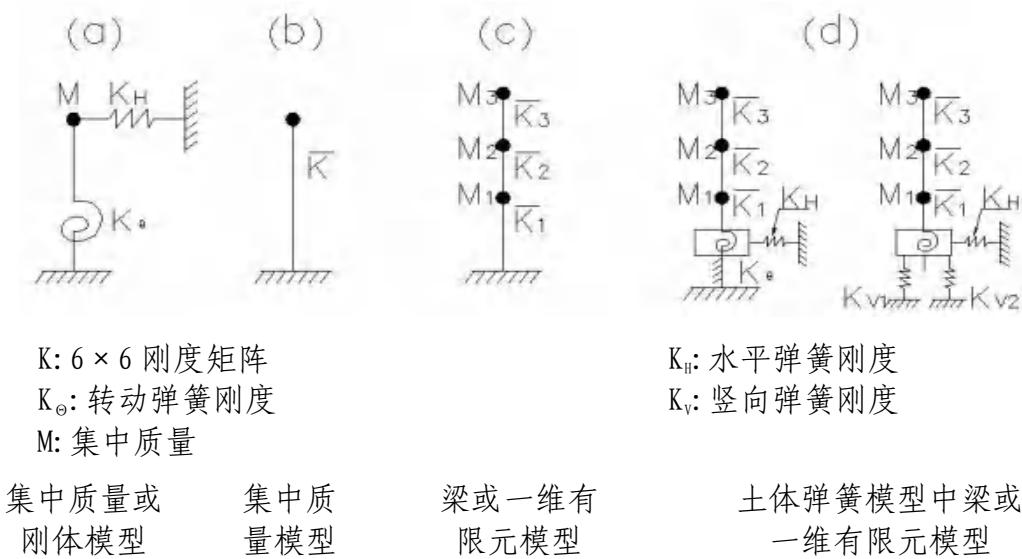
（2）核动力厂构筑物和设备的典型模型见图 2 和图 3。引

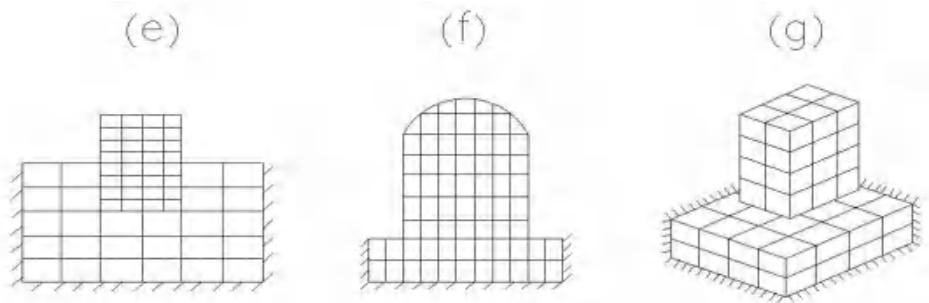
入这些图形说明，分析模型的建立可因其复杂性而有多种可能。采用简单概念模型能取得复杂结构或机械系统的总体反应，而局部的应力和变形最好由细化的模型得到。

(3) 对于结构部件使用简化的集中质量模型，或用弹簧支撑的刚性质量模型来代表土-结构相互作用应仅限于对细化模型所作计算的准确性进行校核。

(4) 如果这些分析工具已被以广泛接受的方法为基础的经验或理论结果所验证，则具有上千自由度并使用复杂土体建模技术的模型得出的计算结果就具有足够的置信度。

(5) 应在分析模型中恰当地考虑结构系统的质量特性。建模的质量应考虑运行荷载（包括活荷载）的适当贡献，依据该荷载与地震荷载组合的概率评价以及对其不利效应的设计考虑综合确定。





表示建筑物与土-结
构相互作用的二维有
限元模型

二维有限元或轴
对称建筑物和土
-结构相互作用
模型（容器内单
元可模拟内部爆
炸与温度效应）

建筑物与土-结构相互作
用的三维有限元模型（注
意有限元的单元网格划分
与地基标高以下的网格不
同：可以按需要采用不同
的网格密度）

图 2 动力或静力分析的各种构筑物模型示例

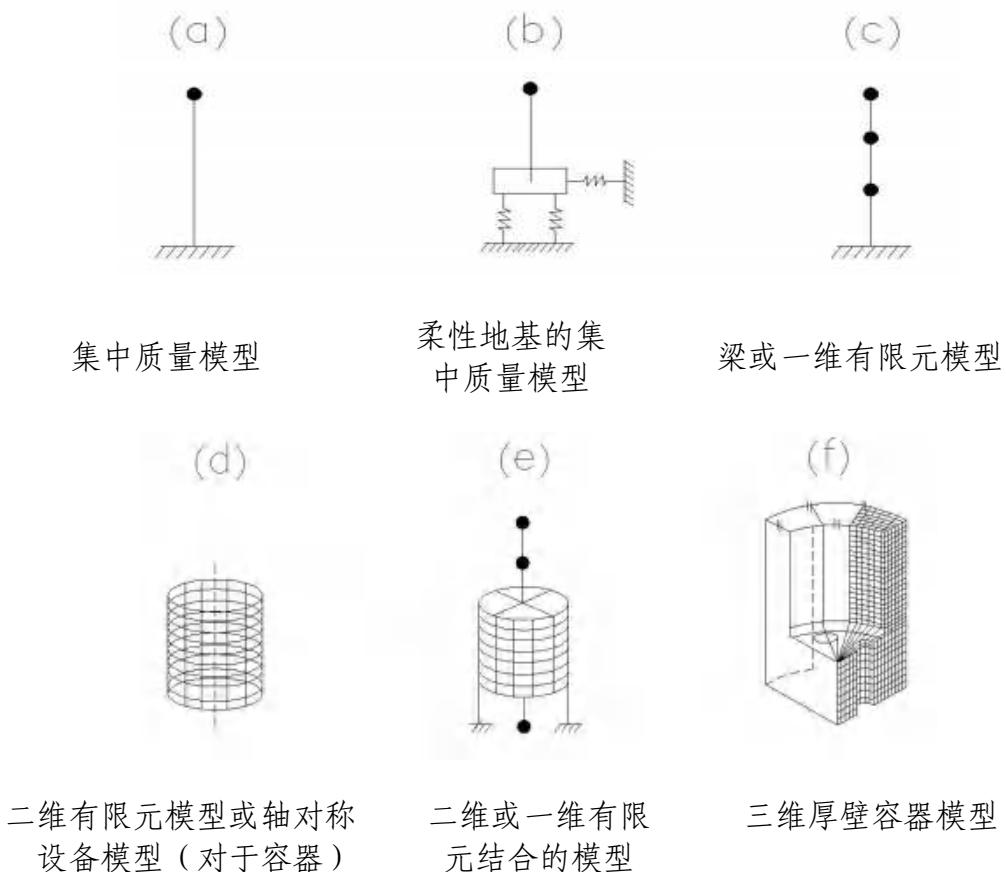


图 3 动力或静力分析的各种设备模型示例

(6) 如果某些结构部件的反应具有不确定性，则应建立多个模型。为了对不确定性的判断提供依据，应进行敏感性分析，而且如果使用这种建模技术，也有助于确定有限元单元的大小、类型及数量。为了消除可能存在的不确定性，应通过试验或对不同数值模型的比较，对模型进行验证。

(7) 适当自由度数量的选择往往是直观的（如在计算有楼板的常规建筑时）。在另一些情况中，例如对于壳或梁式结构，选取就不是很明显，而取决于抗震分析所需的振型数。模型的详细度应与要求的鉴定目标相一致，并应能够代表相应的局部模型。为保证在分析中考虑了足够的振型数（未计入的质量），一

种实用的方法是增加一个刚体或零周期加速度振型，这样可使评价中可能没有被计入的最高频率振型得以修正。应进行缺失质量评价以最终确认截止频率的正确性。在有限元模型范围内，还应保证支承的反力计算正确。

4.2.1.3 解耦准则

(1) 核动力厂的结构可能非常复杂，而整体结构的单一完整模型会过于繁琐或可能失真。因此应通过定义主系统和子系统来确定子结构。

(2) 与地基一起形成土-结构相互作用模型的主结构构成主系统，其他附属于主系统的构筑物、系统和部件构成子系统。

(3) 应使用某些准则来决定在主系统的分析中是否应考虑某一特定子系统。这种解耦准则应定义子系统与支承子系统的主系统之间的相对质量比及频率比的限值。应特别注意确定子系统与主系统之间是否存在共振的可能。

(4) 如不符合解耦准则，在主系统的模型中应包括一个适宜的子系统模型。当子系统的所有共振频率(考虑了支承的柔性)都高于放大频率时(对一般设计基准地震在15Hz以上)，应只将质量包括在主系统的模型中。

(5) 对于子系统的详细分析，应通过主系统模型的分析得出地震输入(包括不同支承或附属性件的运动)。当耦合明显时，子系统的模型应包括在主系统的分析中。至少应在关注的频率范围内，子系统模型具有与子系统的详细模型相同的自振频率及振

型质量。

4.2.1.4 材料特性

(1) 钢筋混凝土结构的模型化通常假定为截面未开裂。在敏感性分析中，应对截面减小效应（等效于某种程度的开裂）进行评价。

(2) 土体特性、频率及其与应变的相关性的选定应恰当地建档，应确定土体特性的变化范围，以考虑土体参数的不确定性。这种变化的影响可能包络结构特性的变化（如截面开裂），这方面应在安全评价中明确说明。

(3) 应切合实际地保守确定用于鉴定分析的结构阻尼。在这方面，应谨慎地评价试验所测定的材料或结构系统的阻尼，因为它可能并不代表安装在核动力厂的部件的实际结构性状。

(4) 应由保守的工程判断得到用于抗震分析的土体阻尼值（与几何形状和材料相关）。如有试验数据作为依据，可考虑采用随振动频率和振幅而变化的阻尼系数。

(5) 应特别注意具有不同阻尼值的模型各部分（如土体、结构及部件）的数值建模。

4.2.1.5 与土体、液体及其他结构的相互作用

(1) 在建筑物或建在地面的大型贮槽的建模过程中，应考虑土-结构相互作用并明确地建入模型。考虑到埋深、地下水位、土体特性的局部变化，应将针对地表条件定义的输入地震动向土-结构联合体规定的标高（典型的是在基底标高处）进行反演。

此过程应包括扭转输入。当所得输入地震动锐减时，应谨慎地进行判断。

(2) 应建立适当的土-结构联合体模型评价土-结构相互作用效应。随着健全的材料特性关系的应用而使得分析程序的可信度不断增加，即使对于非常细化的模型，此项工作也可相对容易地完成。当能够说明其保守性时，可使用简化方法。应完整地记录土体特性的适当取值范围和土体边界建模的方法。应特别注意土体边界的建模，其中应计入地震波在无限介质中的辐射效应。

(3) 应评价由于地震动引起的作用于构筑物地下部分或基础的侧向土压力。

(4) 应评价饱和颗粒土层在设计基准地震（通常定义为 SL-2）下的潜在液化、潜在承载力的丧失和潜在沉降，并应证明具有适当的安全裕度。

(5) 应按相关导则的要求考虑埋置构筑物的抗震设计，并考虑地震对独立埋置构筑物（如埋置管道、管沟及井筒）的下述效应：

- A) 在地震期间及地震后由周围土体迫使其变形；
- B) 在与建筑物或其他结构的联结端处的位移差或荷载；
- C) 所盛装液体的效应（冲击荷载、液压及晃动效应）。

(6) 当同一基础结构上的相邻建筑物或部件的相对位移会影响特定的验收准则（如表示弹性、最大裂缝宽度、无屈曲或最大延性的设计参数）时，则应将它们包含在同一模型内。

(7) 应校核在相邻结构部件间或相邻建筑物间结构接缝处有足够的间隙，以避免撞击和挤压，并考虑有足够的安全裕度。

(8) 在结构建模时应考虑由于盛装在水箱或水池中的液体可能使子系统表现出的惯性作用。尤其是，应评价并谨慎考虑由于竖向柔性水箱的吸附产生的竖向运动。

(9) 晃动的液体可对结构或部分结构产生很大的上下冲击和撞击荷载及循环荷载。这种冲击荷载在其作用路径上可能引起贮槽顶盖、贮槽和水池壁附件的破坏。一旦发现有冲击荷载，就应采用专门的程序进行建模。

(10) 当采用等效质量及弹簧结合建立适当的简化模型时，应保证在所要求的频率范围已正确地考虑到晃动效应。

(11) 晃动模态的阻尼系数应是非常低的⁸，因为与振动的脉冲模态相关的阻尼通常与容器材料、所使用的连接与锚固相关。另外，如果预计自由水面的加速度竖向分量大于 $1.0g$ ，则可能在自由水面产生额外的波浪。在此情况下，应考虑在反应中的非线性阻尼效应。

4.2.1.6 对于机械和电气部件的通用建模技术

(1) 除一回路物项外的机械与电气部件，在分析时通常以连于支承结构上的单质点或多质点体系来表示。如果证明它们满足上述总体解耦准则，其与主厂房的动力耦联一般是可以忽略的。

⁸ 晃动模态的阻尼系数通常应取为 0.5% 或更低。

(2) 设备的模型化通常分为如图 3 所示的几类。对于没有与支承结构一起模拟的部件，其分析的输入是楼层反应，用设计楼层时程⁹或设计反应谱¹⁰来表示。

(3) 隔热层的用量、支承间隙的大小、位置及数量、连接形式（如法兰连接）、反应频率以及柔性支承或能量吸收支承装置的使用，均对部件设计中考虑的阻尼有影响。应谨慎地核查这种影响并适当地在模型化过程中考虑。

(4) 对于装有液体的容器和贮槽，应考虑晃动和冲击荷载的效应（包括频率的影响）。还应考虑液体运动或淹没结构上的压力变化的效应。这些效应可能包括来自流体的流体动力荷载及对功能性能的降低（如燃料水池屏蔽效率降低或仪表信号干扰）。

4.2.1.7 分布系统的通用建模技术

(1) 分布系统（管道、电缆托盘及电缆套管）对地震激发的反应趋于完全非线性。采用线弹性分析方法进行的应力及支承反力计算是应力及支承荷载的粗略计算，仅适用于与验收准则进行比较，以确定设计的适宜性，但是这种计算不得用于得出实际应力和支承荷载的精确值。对位移有某些限制的分布系统名义上的固定支承，在模型化时可以认为是刚性连接的。

(2) 在模型中应考虑管道系统部件（如弯头、三通及接管）的柔度或刚度。在管道的抗震分析中可忽略弹簧吊架。如果管道

⁹ 设计楼层时程是由设计基准地震动导出的所考虑结构的楼层与时间有关的运动记录，其中考虑了输入地震动的可变性和不确定性及建筑物与地基的特性。

¹⁰ 竖向可采用等效静力输入。

系统中有泵或阀门，应评价它们对响应的贡献。应考虑所有附加质量及其偏心（如阀门操作器、泵、管道内的液体及隔热层）。

(3) 当分布系统与两个或更多个具有不同位移和不同适用反应谱的点联接时，应谨慎使用某一个特定支承点的反应谱。为考虑惯性效应，应使用包络反应谱或多个反应谱。但是，结果不一定总是保守的，在对它们进行评价时应使用工程判断。如果结果不可靠，应使用多支点激振与模态分析相结合的方法。

(4) 除惯性效应以外，应谨慎考虑支承之间的差动效应，因为地震经验表明，这种现象将是地震引起管道系统损坏的一个主要因素。

4.2.2 分析技术

4.2.2.1 结构分析方法

(1) 当要求数值分析以地震的楼层反应谱¹¹、最大相对位移、相对速度、绝对加速度及最大应力的形式输出时，对于大多数模型采用线性动力分析方法通常是恰当的（如直接时间积分、模态分析、频率积分及反应谱）。另外，当适宜或需要时可采用非线性动力分析方法（如结构发生翘曲，支承与荷载关系为非线性，土-结构相互作用问题中的地基材料特性或固体间的相互作用为非线性时）。

(2) 线性求解法与非线性求解法之间的权衡是依据具体情况而定：后者通常要求更好地确定带有不确定性的输入参数。因

¹¹ 楼层反应谱是对于输入地震动，构筑物某一特定楼层标高运动的反应谱。

此应通过参数研究来作决定。

(3) 通常简化方法（如等效静力法）应仅用于估算。

(4) 在反应谱法中，应直接使用设计反应谱来计算每一振型的最大反应。每个主导方向的最大反应应通过振型最大值的适当组合确定（如每一振型反应的平方和的平方根，或完全平方组合法）。对于紧密振型频率，应采用保守的方法，即取每个紧密振型和刚性反应的绝对值之和，或采用完全平方组合法。缺失质量与建模的详细程度、分析中使用的截止频率及振型参与系数等因素有关，还应谨慎评价并形成文档。

(5) 以三个不同方向输入加速度引起的反应应按各个反应的平方和的平方根进行组合。

(6) 在时程法¹²中，系统的结构反应是直接作为时间的函数或转换为振型坐标（仅用于线性模型）后计算的。输入运动应以在地面标高处或特定楼层标高处的一组天然加速度时程或人工加速度时程来代表。时程的选取应恰当地代表设计反应谱，地震灾害的计算应直接作为时间的函数或转换为振型坐标（仅用于线性模型）。输入地震动应以在地面标高处或特定楼层标高处的一组天然加速度时程或人工加速度时程来代表，其选取应能恰当地代表地震灾害的设计反应谱及其他特性（如持续时间）。

(7) 应选取适当的时间积分步长与所要求的结果精细程度相一致，并与总体模型化假定相一致（如网格密度）。

¹² 时程是与时间相关的地震动记录，或对于坐落于基底的结构的特定楼层或特定标高处，与时间有关的地震反应运动。

(8) 对于非线性分析，将不同荷载计算的结果进行线性组合已不再合理。在此情况下，应采用保守的包络方法，但需经过适当验证。

(9) 对于抗震 I 类或抗震 II 类物项，依靠对内力（线性计算）或输入反应谱采用延性系数的方法只用于校核计算。对于与抗震 I 类或抗震 II 类存在相互作用的物项及非核抗震类物项，适宜时可采用延性系数的简化方法，但应对它们的取值通过试验或分析进行恰当的论证。

4.2.2.2 楼层反应谱的评价

(1) 楼层反应谱通常作为设备的地震动输入，应根据构筑物对设计基准地震动的反应得到。对于结构分析，应采用天然或人工合成时程作为地震输入（应能证明由它们生成的反应谱至少与设计基准地震动的反应谱一样保守）。

(2) 楼层反应谱¹³也可用直接法计算，该法是以对自由场地震动与楼层反应谱之间关系的简化的工程假定为基础的。但是，楼层反应谱结果的保守性应与由时程法计算结果的保守性进行比较。

(3) 应根据正确的工程判断，对计算的楼层反应谱进行严格审查，其中应考虑反应谱的形状，以及建筑物的振动特性与地基支承材料之间的关系。

¹³ 设计楼层反应谱是在构筑物特定标高处的楼层运动反应谱，系通过考虑在地震动输入以及构筑物与基础的特性中的变化与不确定性修正一个或多个楼层反应谱而得到。

(4) 应拓宽¹⁴计算所得的楼层反应谱，以计及建筑物部件振动特性计算中可能存在的不确定性。如果对所考虑的与土体模型化相关的不确定性进行了参数研究，则拓宽的范围可以减小。另一方面，拓宽反应谱的各分谱段可逐段用于部件分析。对于具有紧密频率间隔的系统，采用分段的反应谱可有助于避免过分的保守性。

(5) 对于连接于非常柔性的结构构件上的设备（由于楼板的柔性使竖向反应放大），或当建筑物出现明显的扭转运动时，应考虑对输入的楼层反应谱进行调整。当建筑物的刚度中心和质量中心明显不同，而在建筑物结构模型化中没有对此进行考虑时，应对远离刚度中心的物项按非线性程序进行分析，或考虑支承结构的扭转反应用于楼层反应谱进行调整。

(6) 如果出现了明显进入非线性结构反应范围的情况，则应对楼层反应谱进行适当的调整。与任何物项相关的延性值都应与其结构构造细节相一致。

4.2.2.3 设备分析方法

设备及设备支承中的计算应力和反力应是动态或静态分析的直接输出。应注意的是电气设备（不包括锚固件或支承），一般仅通过试验或利用经验资料来评价其可运行性。而对电气柜、仪表板或支架结构等采用弹性理论进行分析，以计算柜内传递函数与计算支承荷载或锚固件荷载。

¹⁴ 在应用中，典型的取值为±10至±15%。

4.2.2.4 分布系统的分析方法

(1) 对于分布系统（如管道、电缆托盘、电缆导管、穿管与风管及其支承），振型反应谱分析可用于安全级系统的大直径管道（大于 60mm）的抗震设计，而静力法通常用于小直径管道的分析。根据一般分析或试验所制定的间距表及间距图也用于小直径管道的评价，并且一般用于电缆托盘、电缆导管、穿管及风管的评价。还可基于由地震经验得到的数据使用简化的分析或设计法。所有这些简化技术均应进行恰当验证，以证明它们与更加精细的模型化技术相比的保守程度，并应适当地记录在案。

(2) 对于直径 60mm 或更小的管道，可采用拟静力法。以频率范围在 $0.5f_f$ 至 $2.0f_f$ (f_f 为设备的基频) 的设计基准反应谱的最大加速度作为设计加速度。而后使用适当的放大系数，通常为 1.0~1.5，取决于支承的数量。在使用此方法之前，应经过严格的分析或试验法进行验证。

4.3 应用试验法、地震经验和间接法进行抗震鉴定

4.3.1 应用试验法进行抗震鉴定

4.3.1.1 试验类型及典型应用领域

(1) 对物项进行直接抗震鉴定的方法是对实际物项或原型进行试验。如果某一物项的完整性或执行功能的能力不能通过分析的方法被合理可信地证实，则应通过试验证明其能力或使试验有助于直接或间接地验证该物项。

(2) 试验类型包括：

- A) 极限试验（易损性试验）；
- B) 验收试验（验证试验）；
- C) 低阻抗试验（动力特性试验）；
- D) 计算程序验证试验。

(3) 当分析或地震经验不能辨别或确定抗震 I 类和抗震 II 类物项的破坏模式时，应进行试验鉴定。通过试验作直接鉴定时采用定型试验与验收试验。低阻抗（动力特性）试验应仅用于查明相似性或验证分析模型。计算程序验证试验应用于分析方法（通常使用计算机程序）的一般验证。试验方法取决于物项所需的输入、重量、尺寸、外形和运行特性，以及适用的试验设备的特性。

(4) 当必须评价标准电气设备及机械部件对于失效、损坏或非线性反应的设计裕度以及辨别下限破坏模式时，应采用极限试验（易损性试验）。这种试验一般用振动台来进行。由于试验条件一般覆盖比设计基准要求的荷载谱更宽的范围，因此该试验还为设计扩展工况的性状提供信息，故而易损性试验应能检测出意外破坏模式或潜在故障。

(5) 验收（验证）试验也用于电气及机械部件，以证明其抗震的恰当性。这类试验一般用振动台来进行。

(6) 计算程序验证试验对于可靠的分析工作是重要的。计算机程序在应用前应利用足够数量的试验结果或来自其他适当的计算机程序或分析方法的结果来进行验证。许多能覆盖所关注

范围的试验结果应与分析结果相适应。

4.3.1.2 试验装置

(1) 极限试验与验收试验通常在试验室中进行。应有下述一种或多种设施可用：

- A) 振动台（一个或多个自由度）；
- B) 液压激振器（通常需要大型刚性反力墙）；
- C) 电动激振器；
- D) 机械激振器（偏心质量型）；
- E) 冲击锤；
- F) 爆炸激振器。

(2) 低阻抗（动力特性）试验是在现场的物项上进行，物项一般采用机械激振器、冲击、爆炸和其他低能激振器以及环境激振进行试验。这类试验不能直接用于物项的地震鉴定，但可用来确定包括支承在内的动力特性，这些动力特性可在分析或其他试验中使用，以对物项进行鉴定。

4.3.1.3 试验计划

(1) 进行一项以评价物项的完整性或功能能力为目的的试验，需要正确地或保守地模拟地震时该物项在核动力厂中所处的条件，或者对于这些条件的任何偏离都不会明显地影响结果。在这些条件中最重要的是：

- A) 输入地震动；
- B) 边界（支承）条件；

- C) 环境条件（如压力与温度）；
- D) 运行条件（如果必须评定功能能力）。

(2) 在试验中，物项应经受保守的试验条件，以使产生的效应至少同设计基准地震事件与其他适当的设计或运行条件同时发生时所产生的效应一样强烈。对于偏离应按具体情况进行评价。

(3) 试验可在现场也可在试验室进行。因为成本高且通常与可达性冲突，设备及部件的现场试验应限于少数鉴定方面。对于实际支承、边界条件及老化效应的评价，这是一种可靠的策略。结构的现场试验通常是唯一的方法，用以获取材料的实际特性、结构的抗震总体性能及土-结构相互作用效应，并且只要其可为类似结构提供参考就应进行现场试验。

(4) 输入运动应与试验物项的抗震分类一致，以达到所需安全裕度的可靠性。

(5) 例如包含许多不同装置的控制盘这类复杂物项，应在物项本身的原型上或在各个装置上进行试验，其标定的地震试验输入要考虑这些装置在物项内或物项上的位置及连接方法(通过柜内传递函数)。

(6) 应考虑老化效应，它可能在物项寿期内引起物项退化或改变物项性质。

(7) 抗震试验可在物项本身或全尺寸模型上进行，适宜时也可在缩尺模型上进行。但从鉴定目的而言，应就部件本身或全

尺寸模型进行未经任何简化的试验；如果没有其他切实可行的替代方法，允许谨慎地采用缩尺模型进行鉴定。这类试验包括：

- A) 为保证部件所要求的安全功能或在地震期间和地震后不出现瞬态运行故障的功能试验；
- B) 目的在于证明部件机械强度的完整性试验。

(8) 当进行缩尺试验时，应考虑建立利用间接法进行抗震鉴定的相似性准则。

(9) 任何试验结果均应有对测量数据详细的评价，包括可靠性（通常由统计分析取得）、信噪比和敏感性的评价，以清楚地辨明数字（由数据处理产生）和物理的（由模型化假定产生）不确定性来源。

4.3.1.4 试验的实施

(1) 每次试验的重复次数或荷载循环的次数与使用情况有关，但对结果的评定应考虑各种类型疲劳或棘轮效应所造成的损伤的积累，以便有可能对物项的运行寿期作出鉴定。

(2) 对于需在地震情况下通过试验证实功能的部件，如符合下列条件之一的，采用一次单方向的激振即可认为满足要求，否则应采用多向同时输入：

A) 如果部件设计审查和外观检查或探查试验清楚地证明部件三个方向的激振效应是相互足够独立的；

B) 振动台强度的增加能计及三个方向同时激振所引起的相互作用（例如，在单方向激振幅度的增加能包络因耦联效应引起

另一方向的反应）。

(3) 如采用随机振动或多频输入，应依据适当的程序进行。输入运动的持续时间应根据预期的地震持续时间来决定。

(4) 刚性系统的鉴定试验可采用频率大大低于系统第一振型固有频率的正弦运动或正弦拍波运动。由此产生的试验反应谱要包络为鉴定该物项所要求的反应谱。如果没有适用的振动装置，可采用谐振正弦运动，以得到物项所必需的合格的反应水平。

(5) 当系统在所关注的频率范围内具有一个或更多的共振频率时，试验的输入运动应有一个不小于所要求的设计反应谱的试验反应谱。这可利用时程输入来实现，这个时程的试验反应谱要包络物项鉴定所要求的参考反应谱。

(6) 当物项的固有频率很分散时，可分别进行独立的试验，例如采用比例合适¹⁵的频率给定的正弦输入（该输入有半正弦波或其他关注的时间包络）。然而，此类试验应采用两个或两个以上人工时程或天然时程来进行，它们的反应谱不小于所要求的设计基准反应谱。应用几个不同的时程有助于克服由单个时程特性可能引起的缺陷。

(7) 部件的自振频率和其他振动特性一般可通过低阻抗振动特性试验（可采用 0.01g 到 0.05g 的低水平输入）来确定。

(8) 对于非线性系统，应注意到低阻抗或低激振水平试验，其结果可能不同于在高地震水平下进行的试验结果。若将对低阻

¹⁵ 比例合适的含义是试验谱在固有频率处的幅值高于所要求的谱的幅值。

抗试验用于设备的抗震鉴定，则要求设备的反应基本保持线性，直至达到可能失效的激振水平，以便能确定设计裕度。

(9) 对于能动物项（即运动或改变状态的那些物项），作为试验程序的一部分，一般要预先规定其功能要求。多数情况下，要求能动物项在地震激振过后履行其能动功能。若它们需要在地震激振过程中或可能的余震过程中履行能动功能，则应在规定功能试验要求时考虑这一要求。还应注意使功能性试验和使用时所要求的安全功能一致¹⁶。

(10) 要特别注意用于控制或数据计算的计算机的功能要求。这类设备的抗震性能非常复杂，且探测其失效或破坏可能是困难的。应编制专门的程序，包括准备在抗震试验中和试验后进行功能性试验的说明书。

(11) 应依据专门的质保程序进行下述活动：

- A) 所有试验设备均应进行校准并应保存校准的文档；
- B) 所有控制试验设备的软件均应提供鉴定文档。

4. 3. 2 应用地震经验进行抗震鉴定

4. 3. 2. 1 等同于被鉴定物项的一个物项在实际地震中所经历的地震激振水平应有效地包络该物项在建筑物的结构安装点上的设计地震动。被鉴定物项与经受强震的物项应具有相同的式样和类型，或应具有相同的物理性质和具有相似的支承或锚固特性。对于能动物项，应表明该物项执行的功能与抗震 I 类或抗震

¹⁶ 例如，为了改变线路状态继电器要求至少 20ms 来断开，对于这种情况，在地震中若由于继电器几毫秒振颤引起警示灯发亮就不合适了。

II类物项在地震期间或地震后（包括任何余震效应）所要求的功能相同。

4.3.2.2 一般以经验资料为依据直接鉴定单个物项时，其资料的质量和详细程度应不低于用分析或试验作直接鉴定时的要求。如同用分析或试验作直接鉴定的情况，地震经验也可用作间接法鉴定的依据。

4.3.3 应用间接法进行抗震鉴定

4.3.3.1 间接法鉴定以建立被鉴定物项与此前已经过分析、试验或地震经验鉴定的参照物项之间的相似性为基础。大量的地震经验资料，特别是适用于分布系统抗震鉴定的资料，在某种程度上，已被用来证实这类系统的分析计算和抗震鉴定的简化¹⁷是合理的。电缆托盘的抗震鉴定是根据地震经验资料作简化分析计算的一个例子。

4.3.3.2 用于鉴定被鉴定物项的地震输入应包络该物项的设计谱和参照物项所用的地震输入；同时还应等于或超过被鉴定物项所要求的地震输入。对物项比例模型的输入应考虑恰当的相似关系。还要求被鉴定物项的物理特性和支承条件、能动物项的功能特性以及对被鉴定物项的其他各项要求均与参照物项的要求非常相似。

4.3.3.3 间接法的可靠应用取决于严格的易验证的相似准则，它们以恰当的公式表达并被正确地运用。该准则的有效性验

¹⁷ 就通常验收准则而言，采用三倍静重对有延性支承（允许侧向有很大位移而不破坏）的电缆托盘进行计算是适宜的。

证和对审查队伍的资格培训是该过程的重要环节，故应清楚地记录在安全文档中。

4.3.3.4 当间接法用于与抗震 I 类或抗震 II 类存在相互作用的物项时，应通过专业人员的巡查来证实其相似性准则的运用。尤其是，鉴于潜在地震会引起大量的各种相互作用（由地震引起的碰撞、危险物质的释放、火灾或水淹），以及结构、设备和分布系统恰当的锚固和支承的重要性，所有抗震鉴定合格的物项均应在运行前由胜任抗震设计工作和具有抗震经验的结构工程师进行检查。

4.3.3.5 这种鉴定方法的目的是保证已就位物项，在考虑其锚固和相互作用¹⁸效应（对于物项与运行人员）后能承受设计基准地震效应而不丧失结构完整性。

4.3.3.6 应依据可用的质量保证程序将地震巡查工程师的培训记录和已满足适当准则的证据，记录在鉴定的安全文档中。

5 地震仪表

5.1 概述

5.1.1 核动力厂设置地震仪表的原因如下：

(1) 结构监测：收集核动力厂构筑物、系统和部件的动力性状的资料，以评价建筑物和设备抗震设计及鉴定中采用的分析

¹⁸ 地震相互作用是由地震引起的导致物项之间或物项与运行人员之间有影响的相互作用，这些影响损害他们履行其应尽的安全职能。相互作用可能是机械的（锤击、撞击、磨损及爆炸）、化学的（有毒或窒息物质释放）、辐射的（剂量的增加）或由地震引发的火灾或水淹。

方法的适用程度；

(2) 地震监测：提供报警，以提醒运行人员进行震后检查，对核动力厂停堆的必要性进行判断；

(3) 地震自动停堆系统：可为核动力厂的地震自动停堆提供触发机制。

5.1.2 所安装的地震仪表数量及其安全分级和抗震分类应取决于与系统设计相关的假设地震始发事件，并且一般来说，取决于仪表在核动力厂应急程序中的重要性。当安装地震监测和地震自动停堆系统时，应适当地进行安全分级并应提供适当的冗余。

5.1.3 安装在核动力厂的地震仪表应根据书面维修程序进行校准和维修。

5.2 结构的地震反应监测

5.2.1 每座核动力厂场址安装的地震仪表，其最少数量如下：

- (1) 安装一台三轴向强震记录仪记录自由场运动；
- (2) 安装一台三轴向强震记录仪记录反应堆厂房底板运动；
- (3) 在反应堆厂房最具有代表性的楼层上安装三轴向强震记录仪。

在 SL-2 自由场加速度大于或等于 $0.25g$ 的场址应考虑安装附加的地震仪表。

5.2.2 应定期对数据进行收集和分析，以支持核动力厂的定

期安全审查。

5.3 地震监测与地震自动停堆系统

5.3.1 是否安装地震自动停堆系统或一旦发生地震是否由地震监测来支持运行人员的行动，由下列各项决定：

(1) 核动力厂场址的地震活动水平、频度及持续时间：对处于低地震活动区的场址，设置自动系统是不尽合理的；

(2) 核动力厂系统的抗震能力：尤其是在抗震设计基准升级的情况下，自动系统应作为附加的保护措施；

(3) 与误停堆相关的安全考虑：地震自动停堆系统不得用于环境噪声水平高的区域，包括由其他核动力厂设备产生的噪声；

(4) 对由地震时自动停堆引发的瞬态与地震加速度的叠加效应的评价：对核动力厂安全来说，这种组合效应有时可能比核动力厂满负荷运行时受地震的影响更具威胁性；

(5) 运行人员的信心与可靠性水平：对于非自动系统，运行人员在震后行动的决定上起着重要的作用，因此应针对这一偶发事件进行恰当的培训。

5.3.2 低触发水平报警应接近 SL-1（通常与运行限值相关），此时不会对安全相关物项造成严重损坏。

5.3.3 对于地震自动停堆系统，反应堆停堆的最高阈值和触发水平应参照 SL-2 确定。并且还要参照这样一个事实，即对于这种水准的地震，场址附近的区域可能严重破坏，同时伴随失去

厂外电源和排出余热所需水源的中断。所有应急程序和运行人员的行动均应与此场景相一致。

5.3.4 传感器应优先布置在自由场以及核动力厂中安全相关设备的位置。触发水平应与核动力厂中传感器的位置相适应，并与抗震分析相一致。对于多机组场址，应协调不同的机组之间的停堆逻辑。

5.4 数据处理

5.4.1 震后运行人员行动和地震自动停堆两者都应根据一组恰当的参数，这组参数由记录的数据导出并经适当处理，这样做有两个主要目的：

- (1) 减少伪信号的影响；
- (2) 提供损坏指示，以便与抗震设计阶段所作假定相比较。

5.4.2 为实现上述两个目的，采用适当的软件，使用不同位置和不同方向信号的组合（滤除伪信号），加以适当的信号滤波（为了滤除未损坏部分的信号贡献），以及评价累积损伤参数，并以核动力厂巡查的方法进行证实。

5.4.3 累积损伤参数应主要依据速度记录的集成，从而在安全相关设备中，提供由地震引起损坏的更具代表性的参数。这种总体参数值应与同样数量的由自由场设计基准地震得来的数据以及地震经验数据进行比较。在核动力厂的其他位置也应作类似的比较，因为它们可为震后巡查，继而为核动力厂重新运行的决策提供良好支撑。

5.5 震后行动

5.5.1 即使安装了地震自动停堆系统，核动力厂也应对震后行动制定计划。

5.5.2 主控室运行人员应通过安装的地震仪表得知地震的发生。随后的响应应包括所记录到的地震动与安全相关物项的特定设计作比较评价并对核动力厂损坏作现场巡查评价，以及在地震发生后，对核动力厂恢复（或继续）运行是否就绪进行评价。

5.5.3 在这类巡查中要进行检查的物项清单应与核动力厂物项的安全分级和抗震分类相一致。震后要进行的试验的性质、范围和位置应清楚地确定并直接与预期地震损坏相关。考虑到实际可行，试验可能限于对可达物项的目测检查，以及与所有其他安全相关物项抗震性能的验证对比。

5.5.4 可依据所经历过的地震损坏来规定这类检查的不同水平（以适当的分析参数来衡量）：应在运行人员、核动力厂内部技术支持人员和外部专家组之间明确各自的责任。

5.5.5 应在规程中明确及时通知核安全监督管理部门及其参与核动力厂重新启动的规定。

5.5.6 震后运行程序的推荐做法和指导包括必要的时机、责任和追溯等，见核动力厂运行限值和条件与运行规程相关导则。

附件 I 抗震分类举例

I.1 本列表为抗震 I 类物项的示例（本列表并不全面）：

（1）工艺系统：

- A) 主冷却剂系统;
- B) 主蒸汽和主给水系统（安全壳内部分）;
- C) 余热排出系统;
- D) 控制棒驱动系统;
- E) 安全注入系统。

(2) 安全级电气系统和应急电源系统：包括柴油发电机、其附属及分布系统。

(3) 仪控系统：

- A) 反应堆保护系统、反应堆紧急停堆系统;
- B) 事故及事故后测量监测仪表;
- C) 主控制室。

(4) 专设安全设施。

(5) 容纳或支撑安全级机械设备和电仪设备的结构及建筑物。

(6) 保护场址的堤或坝。

I . 2 可能影响抗震 I 类或抗震 II 类物项安全功能或运行人员安全相关行动的，与抗震 I 类或抗震 II 类存在相互作用的物项示例：

- (1) 汽轮机厂房;
- (2) 排气烟囱;
- (3) 冷却水取水构筑物;
- (4) 进厂道路经过的边坡、桥梁和隧道等。

I . 3 与抗震 I 类或抗震 II 类存在相互作用的构筑物中由地震引发的崩塌、坠落、移位或结构与设备的空间反应可能发生或引起下列示例：

- (1) 碎屑荷载；
- (2) 旋转机械破坏造成的飞射物；
- (3) 由于贮存容器爆裂造成的冲击波；
- (4) 应急冷却管的阻塞；
- (5) 水淹；
- (6) 火灾；
- (7) 有毒物质的释放。

I . 4 抗震 II 类物项示例：

- (1) 放射性废物厂房。

I . 5 非核抗震类物项示例：

- (1) 车间及仓库；
- (2) 食堂；
- (3) 行政办公楼。