

核安全导则 HADxxx/xx

核动力厂设计中除火灾和爆炸外内部灾害的防护

国家核安全局 200 年 月 日批准发布

(征求意见稿)

国家核安全局

北京 200

核动力厂设计中除火灾和爆炸外内部灾害的防护

(200 年 月 日 国家核安全局批准发布)

本导则自 200 年 月 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 范围	(1)
2 总的考虑	(2)
2.1 假设始发事件	(2)
2.2 可接受性考虑	(3)
2.3 二次和级联效应的分析	(5)
2.4 防护和安全的考虑	(11)
3 内部灾害的评价	(15)
3.1 飞射物	(15)
3.2 构筑物坍塌和物体跌落	(23)
3.3 管道破裂及其后果	(24)
3.4 管道甩动	(27)
3.5 喷射效应	(30)
3.6 水淹	(32)

1 引言

1.1 概述

本导则适用于陆上固定式热中子核动力厂，是对《核动力厂设计安全规定》有关条款的说明和补充。本导则中所给出的例子适用于轻水反应堆核动力厂，但其所给出的建议通常也可适用于其他类型的热中子反应堆核动力厂。

1.2 目的

本导则的目的是对核动力厂内部灾害¹可能后果的评价提供相关指导。本导则对《核动力厂设计安全规定》中有关安全要求加以解释，并对如何实现这些要求给出建议。本导则对分析方法和程序提供指导，以支持对内部灾害可能后果的评价。本导则可供安全许可证件审批过程中的安全评价者和管理者以及核动力厂设计者使用。

1.3 范围

1.3.1 本导则对《核动力厂设计安全规定》中所规定的核动力厂不同运行状况下可能发生的假设始发事件²加以讨论，并补充了《核动力厂设计安全规定》相关章节的内容。本导则对以下内容的评价引入了概率论方法和确定论方法：

(1) 假设始发事件，由确定论方法进行假设，由概率论方法估计其发生概率³；

(2) 构筑物、系统和部件⁴受影响的可能性或概率；

1 内部灾害是在厂控制边界内，核动力厂运行区内发生的灾害。本导则中所指的是除火灾和爆炸外的内部灾害。

2 假设始发事件是设计期间确定的能导致预计运行事件或事故工况的事件。假设始发事件的主因可能是可信的设备故障或人员差错（设施范围内部和外部皆可），和人为事件或自然事件。

3 严格的说，这是一个事件发生的频率而不是概率。然而，为了和相关技术文件相符，在本导则中使用概率这一术语。

4 “构筑物、系统和部件”是涵盖设施的对保护和安全的所有的物项或活动（除了人员差错之外）的一个总称。构筑物是非能动物项：建筑物、容器、屏蔽等。系统包括以某种方式组合在一起执行特定（能动的）功能的几个部件。

(3) 破坏性后果的可能性或概率；

(4) 后果的全面评价，以对其可接受性做出判断。

1.3.2 本导则对于如何分析假设始发事件的后果（包括二次和级联效应的分析）以及相应的功能分析提供指导。本导则也讨论了防护内部灾害和降低上述概率的措施。

1.3.3 本导则中将评价下列内部灾害：飞射物、坍塌和物体跌落、管道破裂及其后果（管道甩动、喷射效应和水淹）。对于每一个灾害，本导则将描述假设始发事件并讨论预防和防护该假设始发事件的具体考虑。其他内部灾害（如车辆对构筑物、系统和部件的撞击或者有毒或窒息性气体的释放）在本导则中没有明确讨论，但是应在合适的地方加以考虑。

1.3.4 对于现有的核动力厂，某些设计建议在实际中可能难以实现，但是在可行时，涉及维修、监督和在役检查的建议应该得到满足。还应考虑纠正行动不可行情况下故障后果的分析。

2 总的考虑

2.1 假设始发事件

2.1.1 《核动力厂设计安全规定》提出了核动力厂安全设计的要求和概念，其中定义了假设始发事件。假设始发事件可能挑战任何层次的纵深防御，在设计过程中必须加以考虑。所考虑的假设始发事件将包括内部灾害。《核动力厂设计安全规定》的附件 I 中定义了假设始发事件。

2.1.2 根据《核动力厂设计安全规定》的要求，核动力厂设计应使其对在概率论和确定论技术基础上选择的假设始发事件的敏感性减至最小。应提供合适的预防和缓解措施来应付假设始发事件的影响（见《核动力厂设计安全规定》4.1.3, 4.2.3, 4.3, 5.2.3 和 5.2.4.2）。本导则将详述这些要点。

2.2 可接受性考虑

2.2.1 根据纵深防御的总原则，核动力厂设计中应考虑以下几点：

(1) 预防或限制假设始发事件发生；

(2) 保护构筑物、系统和部件（其可用性是将核动力厂带到并维持安全停堆状态所必需的或其失效会导致不可接受的放射性释放）免受所考虑的假设始发事件对其产生的所有可能影响；

(3) 构筑物、系统和部件本身的抗影响能力（如其质量鉴定）。

(4) 其他特性，如可能的固有安全特性，安全重要系统的多重部件，多样系统和实体分隔。

2.2.2 任一设备故障的安全评价中应包括假设始发事件及其影响，除非出现以下任意一种情况：

(1) 此假设始发事件发生的概率（其概率表示为 P_1 ）是可以接受的低（见 2.2.9—2.2.10），以至于可以排除考虑其后果的必要；或

(2) 系统或部件受影响的概率（这种情况的概率表示为 P_2 ）足够低（见 2.2.9—2.2.10）；或

(3) 如果系统受影响，其导致不可接受后果⁵的概率（这种情况的概率表示为 P_3 ）足够低（见 2.2.9—2.2.10）；或

(4) 不可接受后果的总的概率（这种概率表示为 P ）足够低（见 2.2.9—2.2.10）。 P 等于 $P_1 \times P_2 \times P_3$ 的乘积。 P 的估算应考虑多重性和其他有益的设计特性，以及共因故障的可能性、某些部件所假设的不可用性和其他不利事件的发生。

⁵ “不可接受的后果”意味着《核动力厂设计安全规定》的安全要求所定义的三个安全功能中一个或多个的丧失：a) 控制反应性；b) 排出堆芯热量；和 c) 包容放射性物质和控制运行排放，以及限制事故释放。

2.2.3 降低这些概率的方法的解释如下：

(1) 保守性设计是降低 P1 的方法；

(2) 布置上的规定，如在源和靶⁶之间实体分隔是降低 P2 的方法；

(3) 可能受影响的靶的全面设计和质量鉴定是降低 P3 的方法；

(4) 应用恰当的运行规程是把 P 降低到最小的方法；例如，把不利的水淹的概率降低到最小（对 P1 的影响）或采取正确的行动避免水灾的蔓延（对 P2 的影响）。

2.2.4 在确定论方法中认为，这些方法排除了假设始发事件的发生和/或其排除了对安全不可接受影响。这意味着，概率 P1, P2, P3 中至少一个将降低到零。在概率论方法中将优先使用核动力厂专用的完整可靠性数据。概率论方法是确定论方法的一种补充。

2.2.5 按优先级顺序来排列，最好的设计方法是在实践上消除假设始发事件（即，使 P1 可接受的小）；其次的方法是将构筑物、系统和部件和源分隔（即，使 P2 可接受的小）；使后果可以接受也是一种选择（即，使 P3 可接受的小）。在可能的范围内，应保证第二层次防御的有效性，如果必需，应保证第三层次防御的有效，以此来维持纵深防御。在某些情况下可能需要使用所有三个层次防御的组合。

2.2.6 核动力厂中有多组根据相同的原则设计的相类似部件，这些部件有可比较的质量标准和运行条件。通过分析某一部件的概率 P1 来分析和这些部件相关的灾害是可能的。

2.2.7 在核动力厂设计中，为了把 P1（如一些会跌落的物体被安装在底层地板上就可以从假设始发事件中消除）和/或 P2（如，相对于反应堆厂房为涡轮发

⁶ 靶是所涉及的安全相关系统

电机选择合适的位置)降低到最小,在确定核动力厂布置时应考虑对内部灾害的防护。这种最小化的程度主要取决于核动力厂布置和设备的细节。

2.2.8 在核动力厂设计和修改过程中,这里所述的分析过程可以作为一种优化工具,则会导致以降低一个或更多 P_i 因子为目的的设计变更。在概率论方法中,应应用这个过程来为防护的可接受性提供证据。

2.2.9 稀有事件的可信度有很大不同,随稀有事件的可信度的不同可确定其频率和后果。设计中,最大的可靠性应放在那些可有效控制的物项上。这意味着,在某种情况下注重于降低 P_1 和在另一种情况下主要集中于 P_2 或 P_3 的降低。为了处理在量化 P_1 、 P_2 或 P_3 上的不确定性,应把分析和实验工作适当结合,来确定最坏的情况和能够做出保守的估计。

2.2.10 由于量化特别严重后果的不确定性和所估计的概率缺乏可信度,在相关风险不确定处,应采取措施(例如监督、监测,检查、屏蔽和特别是实体分隔等方法)来加以特别的注意。

2.2.11 模糊或者清晰地做出决定来对某些可能的灾害给予非常详细的和全面的考虑,而对其他危害则仅进行粗略地评论。这些决定是在风险基础上做出的。有时候给出某些最大后果事件的极限概率,低于此概率的风险则认为是可接受的⁷。更多情况下,指标是启发式的,概率限值是不明确的。在后一种的情况下,根据确定论计算(例如应力分析、破裂机理或撞击损坏分析的计算)和有资质的专家判断,来分别对每一种情况做决定。

2.3 二次和级联效应的分析

2.3.1 假设始发事件直接导致损坏称为一次效应。假设始发事件通过某些扩

⁷ 根据所涉及的方法和关注的设施,可接受的小的概率 p 被定义为小于每年 10^{-7} 至 10^{-6} 。

展损坏的失效机理而间接导致损坏称为二次效应。这些二次效应导致的损坏可能超过一次效应所导致的损坏。假设的设备故障需要进行安全评价来证明核动力厂基本安全功能能否满足时，所有随后发生的二次效应应被包括在内。在某些情况中，本导则所讨论的假设始发事件可认为是另一个假设始发事件的二次效应，例如，管道甩动可能导致二次飞射物。

2.3.2 本质上二次效应引起的可能损坏会大不相同。很多超出设计者控制的因素会起作用，因此优先采取的措施应是着重于终止级联效应的措施，换句话说，应是降低 P1 和/或 P2 而不是降低 P3 的措施。应特别注意预防管道破裂，因为其可能防止几个潜在的假设始发事件发生（例如水淹、管道甩动和喷射效应）。

2.3.3 核动力厂设计应考虑由假设始发事件引起的二次和级联效应。应在建造后通过系统和全面的方法进行验证来补充设计措施，以保证已考虑到所有的可能性。一种方法是使用检查表格，表中列出所有可能的二次效应，并在表中提供空格来标注得出不会导致不可接受的间接损坏的依据。这种方法应通过巡检来补充。

2.3.4 在全面分析中，应评价下述重要的二次效应：

2.3.4.1 二次飞射物。

飞射物或管道甩动可能产生二次飞射物（如混凝土块或部件的各部分），其可能导致不可接受的损坏。总的来说，归纳这些二次效应的特征是很困难的；最稳妥的措施是防止其产生或将其包容在源处。例如，如果管材的延性和断裂韧性足够高，则不大可能发生自发的多处管道破裂导致管道部件分离成为（二次）飞射物。

2.3.4.2 物体跌落。

可能有这样一些情况，管道甩动或飞射物可以损坏位于安全系统上方的重

物体的支撑结构，这样，物体跌落可能导致进一步损坏。在某些情况下能表明物体跌落不会导致不可接受的损坏。如果不能证明，应修改支撑结构来承受飞射物影响，或者应采取措施来防止这种二次影响。

2.3.4.3 高能管道⁸和部件的失效。

如果假设始发事件能导致含有大量贮能流体的管道或部件的破裂，这种流体能量可能通过下面方式或机理释放来导致进一步损坏：喷射、高压、压力波、温度或湿度的上升、管道甩动、水淹、二次飞射物、化学反应和高放射水平。

高能管道和部件的破裂也可能引起应在安全系统鉴定中考虑的冷却剂丧失事故或其他事故。除非根据可获得的能量和可能破裂的位置，或通过其他合适而具体的分析方法表明，上述机理不会导致安全系统明显的损坏，否则就应采取措施来防止管道和部件破裂的假设始发事件，或尽可能把这一事件的可能性降低到最小。

2.3.4.4 水淹。

在高速飞射物有可能撞击正常情况下充满液体的管道、水箱或水池处，应评价由于水淹所造成的损坏的可能性。在评价管道破裂后果时，也应考虑冷却剂由于虹吸作用从设备和水箱中的泄漏。水淹可以通过一些效应如电气短路、火灾、流体静压水头效应、波作用、热冲击、仪器误差、浮力和临界风险（与硼稀释相关）来对安全重要物项产生间接损坏，其效应取决于所涉及的液体的装量和物性。如果安全重要物项有被水淹的可能性，大多数情况下，稳妥的措施是将 P2 降低到可以接受的水平，因为预计和缓解所有可能的水淹效应是非常

⁸ 高能管道定义为在工质是水的情况下，内部运行压力等于或超过 2.0MPa 或运行温度等于或超过 100℃ 的管道。对于其他流体可能应用其他的限值。

困难的。

2.3.4.5 放射性物质释放。

放射性物质的释放可能由对包容这些放射性物质的物项或对其控制所需要的物项的撞击所造成的。放射性物质释放也可能由水淹所造成。这些释放可能影响一些部件的功能。（避免任何有重要意义的放射性释放是《核动力厂设计安全规定》中所建立的总的核安全目标，且这将被任何安全分析所关注；从这个意义来说，放射性释放不是二次效应）。

2.3.4.6 化学反应。

飞射物或管道甩动撞击可以释放危险的化学物，而水淹、气体扩散或喷射效应可能导致化学反应。涉及的化学反应可能包括：（1）能导致火灾或爆炸的易燃或爆炸性液体的释放。（2）通常保持隔离的化学物之间的放热反应。（3）对构筑物或部件的酸腐蚀。（4）能削弱重要材料或可以产生大量气体并伴有压力效应的快速腐蚀性反应。（5）可以释放有毒物质的反应（源的释放或是化学反应结果），和（6）窒息性气体的释放或产生。由水淹产生的可能的化学反应效应有很多种，各式各样且很难预计。稳妥的措施是使 P2 可以接受的小。在这方面，应把任何可能支持该类反应的化学物质的使用限制为最小量，且仅在必不可少时使用。

2.3.4.7 电气损坏。

飞射物、管道甩动和水淹可能损坏电气设备和导致其故障（如误动作）。核动力厂电气设备和配线物项的数量和范围确实能使穿过核动力厂的飞射物会导致一些电气回路失效。在这些例子中，损坏的机理包括电缆的断裂，设备的破坏和电气起燃火灾。在保护电气设备免受撞击引起间接损坏的设计中，应评价一些技术如多重回路的实体分隔、故障安全回路的使用、保险丝和断路器的恰

当应用、足够的防火措施和屏障的适当使用。最合适方案应由所考虑的假设始发事件的具体情况所确定。例如，如果一个假设飞射物是金属的，且可以带来电缆间意料不到的连接，这将可能影响保险丝的可靠程度，并可能使其他电气保护方法更具有吸引力。应注意到，电子线路复杂的潜在失效模式意味着，对造成的灾害后果作出完全评价是不可能的；应假设最不利的失效模式，除非物项受到保护不受灾害的影响。

2.3.4.8 仪器和控制线路的损坏。

一些气体和液体控制的设备以及一些需要监测或控制技术参数的仪表线路，可能因飞射物、管道甩动或喷射效应的现象而受损坏。这可能导致系统误动作或者是给操纵员提供不适当信息。应比照电气损坏应用最不利的假设。

2.3.4.9 火灾。

假设始发事件可能导致火灾，例如，一次撞击产生一个点燃源（如在易燃物料附近的电弧）。化学反应或电气短路也可能导致火灾。应参照相关导则评价由于火灾或可能的进一步行动所造成损坏的可能性。

2.3.4.10 人员伤害。

假设始发事件可能直接或间接地导致核动力厂工作人员受伤害。通常在核动力厂工作人员执行安全功能所使用的区域里，假设始发事件造成影响的概率应达到可以接受的小。假设始发事件也可以使得工作人员不能进入某些区域。如果要求工作人员进入这些区域，那么应采取措施保证其安全或者应排除该行动的必要性。

2.3.5 万一假设始发事件直接导致了预计运行事件，应证明核动力厂设计能防止其上升为设计基准事故。同样的，万一假设始发事件直接导致了设计基准事故，应能证明，核动力厂设计能防止其上升为超设计基准事故。对于这些假

设始发事件的分析，单一故障准则⁹应应用到相应的安全组合，相反，在对其他初始事件的分析中，不受事件影响的部件则应被认为是可用的。

2.3.6 另外，在核动力厂安全分析报告中考虑的假设始发事件组仅代表了少数最具挑战性的假设始发事件。实际上内部灾害方面应考虑的假设始发事件组应更多，应包括一整套对安全重要系统可能的损坏，以及对那些其失效可以影响安全系统的辅助系统可能的损坏。

2.3.7 分析的过程最好是以渐进方式进行。在筛选过程中，应确定作为假设始发事件来源的候选部件。筛选过程应是相当的小心，如果对某部件产生怀疑，有疑问的部件不应被排除，而应列在必须更详细分析的潜在灾害名单上。这种情况下概率安全评价可能是有用的。

2.3.8 筛选过程中应对需要安全系统运行的情况加以描述。这些情况包括假设始发事件本身（如，该假设始发事件包括失水事故），一次效应造成的损坏和如果有二次效应，其引起的任何后续损坏。

2.3.9 更进一步，该筛选过程应用来确定可运行的系统。系统可能是不可用的，由于假设始发事件本身，或者由于超出本导则范围的原因所导致的安全系统某个部件不可用。例如，假设安全系统的某个部件承受了一个单一故障或者在试验或维修模式中，或者假设一个操纵员差错。应考虑可能的共因故障。

2.3.10 应确定安全系统所余下的（未受损的）能力是否足够处理已发生的情况（如假设始发事件伴随着所引起的效应及级联失效）。如果不能证明安全系统有足够的性能，那么应提供额外的保护或者增加安全系统的多重度，或者使用

⁹ 单一故障是导致某一部件不能执行其预计安全功能的一种故障，以及由此引起的各种继发故障。单一故障准则是应用于存在单一故障时还必须有能力执行其任务的这种系统的准则（或要求）。

两者的组合，只要能证明安全系统具有足够的性能。

2.3.11 实际上，对内部灾害的防护将涉及到大量的工程判断和实际准则的使用。因此，应尽实际可能提供实验基础来支持理论分析。

2.3.12 在确定设计用来处理假设始发事件后果的专用装置或设施中，应采取预防措施，保证该专用装置对所考虑的假设始发事件是合格的，且其本身不会变成一个新的假设始发事件来源。

2.4 防护和安全的考虑

2.4.1 预防假设始发事件的方法和手段

2.4.1.1 设计

2.4.1.1.1 保守性设计构成对部件故障的第一层防御，应该执行有严格设计限值的保守性设计来降低 $P1$ 。通常采用对于设备的静态、动态和热载荷及其组合的详细的分析，足够安全要素的应用，物料特性的全面役前控制，以及在制造中足够的质保措施的使用。例如，也应考虑使用安全装置或系统来限制最大压力或最高旋转速度，作为降低 $P1$ 的方法。在可能的范围内，部件设计中应考虑老化效应。

2.4.1.1.2 在设备故障的后果会危害安全的情况下，至少上述的设计方法应与检查、监督措施或其他降低 $P1$ 的方法相结合使用。

2.4.1.2 检查

2.4.1.2.1 反应堆内压力回路的管道和部件及其支撑件应定期进行无损检查，以探测可能在运行中已变大的材料缺陷。使用的检查技术所设置的敏感度应能探测和确定那些明显小于可能导致严重失效的那些破裂。应注意保证所进行的检查不会因为管壁的变薄（或其他原因）而增大 $P1$ 。

2.4.1.2.2 如果在役检查是有效的，应能鉴别出制造中产生的缺陷，且应进行

分析来预计其发展。应进行足够频度的检查以便为探测到缺陷生长和可能的破损之间提供足够的时间余量。可以通过调查来补充定期无损试验。例如，部件移动原因的调查可能指示出有水锤现象或者其他未预计到的载荷。应彻底研究能加速缺陷发展的诸因素（例如疲劳、腐蚀或蠕动等）。

2.4.1.2.3 万一发生可能危及某个给定构筑物、系统和部件的未预料到的缺陷或核动力厂故障，则应考虑核动力厂中相似物项的可能的影响和别处同类核动力厂可能的影响。

2.4.1.2.4 这种在役检查结合其他降低故障概率的措施和深入研究（如，在先漏后破的验收程序的研究）能够确定一个可以接受的可以无需假设某些压力容器和管道以及某些转动设备的整体破损设计基准，因此无须提供额外设计措施来防护某些类型的内部灾害（飞射物和管道甩动）。然而，应考虑泄漏的后果，如喷射影响，水淹、潮湿、温度上升，窒息效应和放射性释放。

2.4.2 监测系统

2.4.2.1 在要求降低 P1 的情况下，一种监督技术是监测能指示破损起始的情况。该项技术是基于以下经验：大部分破损特别是延性金属部件的破损是逐渐发展的，从而允许在危险情况产生之前及时采取纠正行动。在所有用来降低 P1 的方法中，有效监测对核动力厂设计或运行带来的干扰最小。应认识到监测仅给出警告而不是预防破损。此外，监督系统可为维修计划提供有用的信息。

2.4.2.2 核动力厂监测应包括管道和压力容器的泄漏探测系统，大型转动设备振动的监测和松动部件的监测；其他监测的例子应针对低和高的周期疲劳、位移、水化学、振动和热分层效应、老化效应、磨损探测和润滑材料化学。

2.4.2.3 在监测系统的设计中，应考虑运行经验的反馈（包括老化效应）。转动机械的振动监测系统、高压水系统中泄漏探测系统和松动部件的探测系统已

经大范围和长时间地加以应用。在核和常规动力厂中，已有许多的关于振动监测器及时向操纵员警告设备的劣化而防止较大的损坏的记录。在大多数核动力厂中，已安装基于湿度、温度、放射性水平、压力或地坑水位及其他参量的多重系统，来探测不同尺寸和不同位置的泄漏。这里也有许多例子，其安装的探测器或例行核动力厂检查发现了各类小泄漏，从而避免了大的破损。

2.4.2.4 减少设备破损的监测系统的可靠程度在实践中各不相同。根据纵深防御原则，监测系统的应用应认为是其他减少设备破损手段的补充，而本身不是减少设备破损的有效手段。例如就防止一回路破裂而言，泄漏探测系统和声学监测系统是保守设计和制造、无损检查以及一些其他因素的附加措施。对更高级别的安全设施或者构筑物 and 部件的设计，即使所有这些方法一起也不能排除需要假设管道的破裂。应为监测系统制定适当的维修大纲。

2.4.2.5 为了排除和降低大型管道破裂的概率及随之而来飞射物、管道甩动和喷射影响的后果，应执行一个全面的规程来鉴定某些管道系统¹⁰。

2.4.2.6 适当的运行规程也可能有助于降低假设始发事件产生的概率。如：防止金属压力容器的过度热应力和监测容器材料辐射脆化；通过使用卸压阀和触发保护系统的安全装置来限制核动力厂瞬态；有一定风险运行活动期间的各种禁止或限制；使用地震仪器给地震后持续运行的核动力厂工况的评估提供数据；一回路和二回路的水化学的控制来抑制腐蚀和腐蚀引发的破裂。

2.4.3 保护构筑物、系统和部件免遭可能影响的方法和手段

2.4.3.1 布置规定

¹⁰ 对管线系统进行质量鉴定的全面规程的例子是欧洲对先漏后破概念应用的安全实践 (EUR18549), 美国核管会的先漏后破应用 (SRP3.6.3), 德国 (RSK 指导方针) 应用的破裂排除大纲或日本应用的先漏后破指导方针 (JEAG4613)。

2.4.3.1.1 作为一种降低 P2 的有效途径，应在核动力厂设计过程的早期阶段对布置作出规定。这方面应考虑类似装置上的经验反馈。布置上的决定对飞射物和水淹灾害是特别重要的，这些考虑将在本导则的相关节中加以讨论。

2.4.3.2 屏障和实体分隔

2.4.3.2.1 如果核动力厂的总体布置不足以将 P2 降低到可接受水平，则可在假设始发事件来源处和预计的受影响的部件之间设置屏障。屏障最好应位于靠近动态效应来源（飞射物、管道甩动和其他撞击物）的位置。这包括存在飞射物情况下对所有潜在目标的保护，以及消除对飞射物散射的关注。另外，假设撞击物在其运动过程中可以持续获得能量（如喷射驱动飞射物和管道甩动），因此越靠近源处屏障设计要求程度越小。然而，在一些特殊情况下，除一个和两个小目标之外，也许是现有的构筑物对于所有的目标提供了足够的保护，那么，最好是在小目标处安置专用屏障。万一发生水淹，应以适当的门、门槛、平台、阻挡墙的形式来设置屏障。但应适当的考虑试验和维修问题，例如从压力容器和管道外表面处应该很容易接近焊缝。

2.4.3.2.2 基于多重部件间应相互独立且其分隔应有助于消除共同的外部因素导致的多重故障，在安全设备（包括电源、仪表电缆和任何相关系统）的多重物项之间应设置实体分隔。在对每种情况依次评价的基础上，应确定任何假设始发事件是否会损伤多重安全系统。可能有二次效应时，应特别注意假设始发事件可能损坏一个部件而其二次效应可能损坏其相同的多重部件。

2.4.4 避免不可接受后果的方法和手段

2.4.4.1 只要可能，构筑物、系统和部件的设计都应是耐失效设计。也就是说，如果这些物项失效，其失效将把核动力厂推到趋于安全的核动力厂工况。除防护内部灾害外，该项技术在各领域还有着更广泛的应用，如有效则可以

助于缓解假设内部灾害的后果。

2.4.4.2 如已讨论的，假设始发事件可以导致随后的流体释放，这将通过局部增加湿度、温度、压力和放射性水平来改变核动力厂的环境。应使用该环境中可以执行其安全功能且有合格鉴定的设备。如果部件没有在这种环境下合格鉴定，则应认为是不可用或应通过封装、屏蔽和其他合适的方法加以保护。封装使维修活动复杂且需要应在每次维修活动完成后恢复密封。

2.4.4.3 一项可缓解加压管道破裂可能后果的成功技术（在携带高压流体管道的某些段外加上不加压保护套管的措施）已在多种情况下加以使用。该方案可能给内部管道检查活动增加困难。

3 内部灾害的评价

3.1 飞射物

在核动力厂设计和评价中，应考虑由假设始发事件引起的内部飞射物（如压力容器和管道的破损、阀的故障、控制棒的弹起和高速转动设备的破损）。也应评价二次飞射物的可能性。如果防止出现内部飞射物的方法可行，则应加以采用。否则，应使用以下所述的方法给构筑物、系统和部件提供对内部飞射物的防护。通常用确定论和概率论方法的组合来进行飞射物灾害的分析和核动力厂防护飞射物设计的分析。某些飞射物是确定论进行假设，而作用在构筑物、系统和部件上的撞击或损坏效应则可用确定论或概率论方法加以评价。在某些例子中，飞射物灾害评价的所有方面——起源、撞击、损坏是由概率论处理。

3.1.1 防止飞射物的产生

3.1.1.1 压力容器的破损

3.1.1.1.1 在核动力厂中，依据非常广泛和成熟的实践来设计和建造安全重要

的压力容器以保证其安全运行。对其进行分析来证明在所有设计工况下应力水平是可以接受的。应根据已批准的程序监察设计、建造、安装和试验的所有阶段以验证所有的工作符合设计规范，并且容器的最终质量是可以接受的。在调试和运行中应使用监督大纲以及可靠的超压保护系统来确定容器是否维持在设计限值内。这种容器（例如反应堆压力容器）的大破裂通常认为是几乎不可能的，不需要将这些容器的断裂作为假设始发事件加以考虑。

3.1.1.1.2 核动力厂中其他容器可以不需要经历这么严格的设计、质保和监督。但是应评价这些内部装有高能流体的容器的破损，因为如果其断裂，则将变成飞射物来源。压力容器的破损可能存在多种失效模式，这取决于材料特性、容器的形状、焊缝的位置、喷嘴的设计、建造实践和运行条件等因素。由脆性材料组成的金属容器更可能产生飞射物。

3.1.1.1.3 进一步降低 P1 的方法包括使用延性材料和容器的附加固定或支撑。在确定 P1 不够低或如果容器可能以脆性的方式失效处，应假设飞射物的尺寸和形状涵盖所有的可能性，并加以分析来确定设计基准飞射物。或者，采用简化的保守方法来确定要考虑的飞射物也是可以接受的。

3.1.1.1.4 因为容器行为的不可预计和严重损坏的可能性，应设计成其不能整体成为飞射物。如果容器可能整体成为飞射物，应分析各种断裂位置和破口尺寸以确定产生的容器爆裂力是否足够将容器从其限制的支撑物（约束件）分离出来。如果容器可以与其固定物分离，应修改容器的设计来防止这种失效。

3.1.1.1.5 对于设置容器封头封闭塞来将核燃料限制在其位置上的反应堆，应提供专门设计装置来保证封闭塞弹出的概率低。缺少这种特定装置的情况下，破损的后果或单一封闭塞的弹出应作为飞射物加以评价。

3.1.1.2 阀门故障

3.1.1.2.1 在高内能流体系统中的阀门应作为潜在的飞射物加以评价。为便于维修，阀门通常设计成许多的部件是可拆卸的。这些可拆卸的部件表明产生飞射物的故障有很大的可能性。作为好的工程实践，应考虑阀杆或阀盖或固定螺栓的故障，即使这些故障还未被观察到。阀体强度通常远强于连接管道。为此，在大多数情况下由阀体本身故障成为飞射物是相当不可能的，因此在核动力厂设计和/或评价中通常不需要考虑。

3.1.1.2.2 阀门设计首选和最简单方法是使 P1 可接受的小，为实现这一点阀门设计可采取几种方法。阀杆应加装合适的装置，万一阀杆故障应能证明该装置有能力防止其变成飞射物。阀盖通常由螺栓固定。作为设计规则，单独螺栓的故障不应导致除了其本身之外的飞射物的产生。该规则应用于阀门、压力容器和其他包含高能流体的螺栓固定部件。万一流体漏过填实接缝，应考虑由于腐蚀或应力腐蚀造成的多重螺栓故障的可能性。

3.1.1.3 控制棒弹出

3.1.1.3.1 在大多数反应堆设计中具有插入和抽出堆芯的固体中子吸收控制元件（控制棒）装置，其驱动罩在反应堆压力容器处形成了封头。对于反应堆压力容器承受相当大的流体压力的反应堆设计，通常假设其中一个封头由于所包容的流体的驱动力而以控制棒弹出的方式发生破损。这一假设控制棒弹出引起反应性瞬态和冷却剂丧失事故，这两者都不在本导则中处理。基于特定的反应堆设计，控制棒弹出有可能导致重大的一次和二次效应损坏。例如，涉及的典型问题包括可能对附近的控制棒、安全系统和安全壳构筑物造成损坏。

3.1.1.3.2 在某些类型反应堆中，由于特殊的设计装置，可以降低控制棒的弹出概率。应通过实验和分析来证明，这种设计装置在某个控制棒驱动罩壳失效破损情况下能够保持控制棒和驱动组件不动。

3.1.1.4 高速转动设备破损

3.1.1.4.1 核动力厂中存在含运行时高速旋转部件的大型设备，例如主汽轮发电机组、蒸汽轮机、大型泵（如主冷却剂泵）及其马达、飞轮。这些转动部件可以获得相当大的转动能量，一旦损坏可以转化为转子碎片的迁移动能。这种损坏可以由转动部件上的缺陷或超速造成的额外应力引起。

3.1.1.4.2 既然转动机械通常有一个围绕转动部件的重型固定结构，那么应考虑破损后由于固定部件的能量吸收特性所造成碎片的能量损失。由于构筑物的形状不同，穿透这些构筑物的能量损失必定是一个复杂过程。应在实际可行范围内采用在仔细确定的类似构筑物的实验基础上建立的经验关系式进行能量损失的计算。为简化起见，通常使用保守的方法计算，即假设在飞射物和固定的转子罩的相互作用中没有能量损失。

3.1.1.4.3 过去的例子表明，一旦转动设备破损会抛出大量尺寸和形状不同的碎片。实验数据表明，对于简单的几何体（如碟型），破损过程趋向于生成一些大致相当的碎片。应力集中、结构不连续性、材料中的缺陷和其他因素都可以影响破损过程，从而影响形成碎片的类型。转动机械破损产生的飞射物应根据其所造成损坏的可能性而确定其性质，并应包括在可能的一次和二次效应的评价中。

3.1.1.4.4 假设由高速转动设备破损导致的典型飞射物包括：

- (1) 风扇叶片；
- (2) 汽轮机碟型碎片或叶片；
- (3) 泵叶轮；
- (4) 法兰；
- (5) 连接螺栓。

3.1.1.4.5 为确定这些转动设备的 P1，应采取以下步骤：

(1) 在设计基准考虑的所有核动力厂状态下（包括预计运行事件和设计基准事故），应在材料的选择、速度控制特性和应力余量等方面，评价转动机械本身的设计；

(2) 应评价旋转机械的制造过程是否符合设计要求、检测可能缺陷的无损检查和其他试验的充分性，以及为保证设备安装满足所有技术规格而采取的质量控制措施的充分性；

(3) 应评价防止破坏性超速手段的可靠性。这包括探测和防止开始超速的设备，相关的电源设备与仪表和控制设备，以及所有这些设备定期校正和备用试验所涉及的程序。

3.1.1.4.6 转动设备的速度由输入能量和输出载荷之间的平衡来确定。输出载荷的突然减少和输入能量的突然增大都会导致超速。在有较大可能由于飞射物而造成明显的不可接受的损坏处，应设置额外的限制转动速度的多重手段，如通过控制器、离合器和刹车装置以及通过仪表、控制和阀门系统的组合来降低发生不可接受程度超速的可能性。

3.1.1.4.7 应注意，虽有工程方案可限速和防止过量超速而产生飞射物，但这些措施本身可能不足以使转动设备产生飞射物的可能性可接受的小。除了超速导致的破损之外，在正常运行速度或低于运行速度也有可能由于转子上的缺陷导致飞射物的产生。应用其他手段来对付这些飞射物，如保守设计、高质量制造、仔细的操作、参数的适当监测（如振动）和全面的在役检查。当适当地应用所有的这些手段之后，转动机械破损产生的飞射物的概率可明显地降低。

3.1.2 飞射物分析及其防护

3.1.2.1 在假设设备故障导致飞射物产生的分析中，应确定这些飞射物的飞

射方向和可能的靶。

3.1.2.2 通过研究有关破裂机理可以缩小调查范围。例如，根据飞行物能量和质量，可以限制其最大射程。在某些情况下，如大型的汽轮机飞射物，可能影响的最大范围覆盖了整个核动力厂厂址。了解飞射物可能从一个特定源射出的方向，有助于确定其可能的影响目标，以避免飞射物的撞击。特例之一是阀杆飞射物，其驱动能量是单方向的。其他实例中，飞射物的飞行范围存在一最可几平面或扇面，如旋转机器飞射物。转动机械破损证据表明，高能飞射物通常在旋转平面的一个狭窄的角度内射出，除非它们被位于源处的某些屏障（如外壳）偏转。在后者的情况下，应进行试验或分析来估计迁移方向的限制。

3.1.2.3 在设计和/或评价中，应考虑到可能需要一种能滞留设备故障导致的高能飞射物的装置，或其能将这此飞射物反射到一个无害的方向。对转动设备可增设这样的装置。通常表明，泵的重型外壳以及马达和发电机的大型定子可能滞留或偏转可能由转子破坏性损坏导致的碎片。

3.1.2.4 通常可以通过在系统中对阀门加以合适的定向来降低 P2。除非这种方法被其他考虑所排除，否则阀杆应以以下方式安装，即阀杆或相关部件的射出不会导致其对关键目标的影响。

3.1.2.5 在布置方面中，一个特别有指导意义的例子是主汽轮发电机。除其他重要限制外，主汽轮发电机的布置应使那些可能的关键目标（如控制室）位于被汽轮机飞射物直接撞击的可能性最小的区域，即在沿着汽轮机轴的一个圆锥范围内。这种布置考虑到这样一个事实，如果转子的大的碎片射出，将会在旋转平面的 25° 范围之内飞出。这种布置不会排除它们撞击关键目标的可能，但其明显降低了直接撞击的概率。

3.1.2.6 通常将可能受到可能飞射物撞击的阀、泵、马达发电机和高压气体

容器布置在一个足够坚固的混凝土结构内。这种方法作为一种消除灾害的手段是直接的、简单的和容易理解的，还应采取相应措施便于设备所需要的维修和检查。

3.1.2.7 在某些情况中，在某段包容高压流体的管线外加上未承压保护管的预防措施对于防护飞射物也许是有用的。由此得到两个防护特性：保护周围的构筑物和设备免遭甩动管道和可能的二次飞射物的撞击以及保护内部管道免受周围区域内所产生的飞射物的撞击。

3.1.2.8 也许降低 P2 的最直接和效果明显的设计方法是在飞射物源和目标之间设置屏障。屏障也被用来降低某些二次效应，例如成疤或甚至混凝土碎块从混凝土目标上的弹射。下面讨论了屏障的这两方面作用。

3.1.2.9 核动力厂中经常设置飞射物屏障来吸收假设飞射物的能量和防止其飞出屏障。通常飞射物屏障由钢筋混凝土厚板或钢板建成。也可使用其他手段如编织的钢网和飞射物偏转屏障。如 2.4.3.2.1 所述，通常屏障应置于飞射物源处。

3.1.2.10 屏障（无论是为其他目的设置的构筑物或专用的飞射物屏障）充分性的评价，需要考虑飞射物对屏障的局部和整体效应。处于支配地位的可能是飞射物的局部或整体效应，这取决于所假设的飞射物质量、速度和撞击区域，但两者都应加以评价。飞射物的局部效应是穿透、钻孔和成疤或混凝土块的射出和剥落，这些将主要限制在目标的撞击区域内。整体效应包括扭弯、拉伸或剪切形式的结构损坏。小的飞射物例如阀杆，主要是局部效应，而大的缓慢的运动飞射物如那些结构坍塌和载荷跌落引起的主要是整体效应。更快的大型飞射物如那些转动机械可能同时呈现局部和整体效应。

3.1.2.11 在分析飞射物对屏障的局部效应中，实践上是使用可接受的经验公

式来确定飞射物在目标屏障上穿透的深度。公式由不同的实验得来，且限于实验所采用的参数范围内适用。应认识到，穿透深度公式不是在所有的情况下都足以确定飞射物屏障的设计（如所需的厚度、强度和钢筋或混凝土强化）。飞射物的质量、速度、撞击面积、形状和硬度，以及建筑的特性和目标的强度都是应考虑的重要参数。选择适用公式需要专家的工程判断，因为可能没有可以直接可用的公式，可能需要对参数范围进行一定的外推。在对钢筋混凝土目标的局部效应的考虑中，另一个因素是剥落或成疤或碎块射出引起二次飞射物。由于二次飞射物的散射具有某些难以预计的特性，因此在任何可能出现的地方应防止这些现象的发生。通过足够厚的屏障或通过混凝土表面设置铁衬层能预防二次飞射物的产生。

3.1.2.12 对屏障所受整体飞射物效应的考虑应包括飞射物局部效应可能造成的构筑物变形。如果穿透没有造成构筑物大的局部变形，为了确定屏障是否可以包容飞射物且能持续执行其设计功能这一目的，可以使用能量平衡和动量平衡的方法预计主要的构件中的挠度或应力。如果就像通常的那样，飞射物局部效应很严重，应建立应力响应时程，且构筑物响应作为一个脉冲载荷加以分析。应考虑由飞射物撞击导致的动态载荷，且适当的关注目标构筑物的频率响应。当屏障的响应可能会影响直接装配在屏障上或安装在屏障附近的设备的可运行性，这是特别重要的。

3.1.2.13 如果 $P1$ 和 $P2$ 的乘积不能证明是可以接受的小，则下一步方法是使 $P3$ 达到可接受的小。可以通过对目标的可能撞击作一个详细分析且证明该撞击和其可能的二次效应不会妨碍满足安全要求来实现这一点。

3.1.2.14 在涉及多重安全系统处，应使用实体分隔以保证即使飞射物损坏一个和更多的多重安全系统仍可满足总的的安全要求。这是有关布置问题的扩展，

但此方法在某些方面需要特殊考虑。

3.1.2.15 可能飞射物的数量和范围很大程度上影响多重重要目标实体分隔的价值。对于设备故障仅产生一个或两个高能飞射物的情况，实体分隔和适当的多重性也许是足够的。如果在多个方向上可能同时产生多个飞射物，那么距离分隔和多重性的好处就大大降低。应考虑可能目标和飞射物的安排和布置以把这种事件的影响降至最小。

3.2 构筑物坍塌和物体跌落

任何构筑物或非结构性元件或有大量潜能的物体都可以被认为是可能的假设始发事件来源。应考察所有的这种构筑物（冷却塔、烟囱和汽轮机厂房）来确定其坍塌是否会影响构筑物、系统和部件。对于被分类为一旦其坍塌可能影响构筑物、系统和部件的构筑物，应设计成和建成其倒塌的可能性证明是可以忽略；否则应评价其倒塌的后果。同样，应评价由跌落物（吊车和被提升载荷）施加于构筑物、系统和部件上的危害。

3.2.1 构筑物和结构性元件

3.2.1.1 核动力厂中安全相关构筑物设计成能承受极端载荷，如地震、强风、某种飞行物撞击、外部爆炸、外部水淹、雪和冷却剂丧失事故引起的结果。因此，由内部原因造成这些构筑物倒塌认为是不可能的。相关导则包括了对构筑物防护由自然或人为现象引起的内部灾害评价。设计实践是保证较低级的构筑物的失效不会扩展到较高级的构筑物、系统和部件，否则，分级较低的构筑物失效应作为一个假设始发事件加以评价。除了把 P1 降至最小，应使用构筑物、系统和部件的实体分隔通过保证单一结构倒塌不会影响所有的多重度来降低 P2。

3.2.1.2 非结构性元件（例如分区墙壁，楼梯和架子）的失效会对构筑物、

系统和部件产生影响。外部灾害（例如，地震、强风、爆炸或飞行物撞击）可能是这些失效的起因，通常根据相关导则对其加以评价。有些情况下，非结构性元件的失效可能由内部初始事件（如操纵员差错或维修期间事故）引起。这些情况下应评价构筑物、系统和部件的后果。应注意通过合适的定位和足够的屏障设计，避免这种失效或是把对构筑物、系统和部件的潜在损坏降至最小。

3.2.2 重型设备跌落

3.2.2.1 如果核动力厂设备中的重型物项位于一个相当高的位置，且这种设备跌落事件的可能性不能忽略，则应评价与其相关的可能危害。一般而言，重型设备跌落可由外部现象引起，例如地震或飞行物撞击，但也可由人员差错引起。相关导则给出了防止这些事件和分析其安全重要性的方法。遵照有关导则的建议将降低由于内部始发事件而导致的重型设备跌落的可能性。

3.2.2.2 为了确定产生的飞射物或飞射物群可能的方向、尺寸、形状和能量，以及其可能对安全产生的后果，应分析物体的特性和其跌落的原因。

3.2.2.3 通常功能设计要求决定了这类设备的实体位置。在功能上要求重型设备接近重要目标处，可能需要提供足够的设计措施如吊车上多重电缆或联锁来降低故障的概率。另外，在装卸邻近构筑物、系统和部件的重载荷时应加以额外的注意。应特别的注意对吊车（如其联锁、电缆和刹车）、绞索、传送带、挂钩和相关物项的定期检查和维修。

3.2.2.4 在吊车吊装重型载荷（如燃料运输容器）下，在可能跌落飞射物和目标之间放置屏蔽或屏障经常是不实际的。对于使用水中贮存燃料系统的反应堆，应注意燃料容器可能跌落燃料贮存池中。这种可能性通常通过计算分析来确定如果燃料容器从最高操作高度跌落池中，燃料池是否将有大的破裂，并证明在燃料容器跌落造成泄漏事件中，补水系统是否有足够的容量维持水池的水

位。应考虑的另一实践是将燃料容器的装卸限制在远离水池本身和远离其他重要目标的区域。

3.3 管道破裂及其后果

3.3.1 假设始发事件的假定

3.3.1.1 所考虑的破裂类型及其位置

3.3.1.1.1 根据所考虑管道的特性（内部参数、直径、应力值和疲劳因子），应考虑以下类型的破裂作为假设始发事件：

（1）对于高能管道（除了那些已确定的先漏后破、破裂排除或低概率破裂的管道外）：周向断裂或径向贯穿裂缝；

（2）对于低能管道¹¹：有限面积的泄漏。

3.3.1.1.2 如果可以证明所考虑的管道系统在高能参数下运行时间较短（例如少于总运行时间 2%）或如果其名义应力是合理的低（例如，低于 50MPa），仅有有限泄漏（而不是破裂）的假设是可以接受的。

3.3.1.1.3 应按如下方法确定假设破裂位置：

（1）对于那些按照适用于安全重要系统的规则而设计与运行的管道系统，在其终端（固定点、与大管道或部件的连接处）和高应力的中点。

（2）其他管道的所有位置。

对于名义直径小于 50mm 的管道系统，应假设破口可以在所有位置上发生。

3.3.1.1.4 周向管道断裂可能由以下原因导致：由随机同时双端剪切断裂引起的管道破裂；劣化失效机理如腐蚀或疲劳（即裂缝生长超过其临界尺寸）造成

¹¹ 低能管道被定义为工质是水的情况下，内部运行压力小于 2.0MPa 或运行温度小于 100℃的管道。对于其他流体可能应用其他的限值。

的损坏；由于其他管道断裂造成的影响；或考虑中对管道的不同影响。这种管道裂开的最可能的地方是任意一个在直管部件和管道部件（例如管道弯曲，T型管道交叉、异径管、阀或泵）之间的周向焊缝；总的来说，是在刚性和振动有变化或温差导致流体分层的这些地方。高能管道双端剪切断裂的频率可以从运行经验和断裂力学计算得到。该频率也可以从PSA评价中得到。

3.3.1.1.5 应将高能管道上由大泄漏面积产生的大的径向贯穿裂缝作为假设始发事件加以考虑，即使其比周向裂缝发生的可能性低。

3.3.1.1.6 在应急堆芯冷却系统能力和安全壳承压能力的分析中应假设高能管道瞬时完全破裂。这些管道破裂的后果包括水淹以及压力、湿度和温度上升。在设计中应考虑这些后果对部件质量鉴定的影响及杂质渗入应急堆芯冷却水中的影响。

3.3.1.2 引起的现象

3.3.1.2.1 假设始发事件可能通过局部效应（例如直接机械接触或喷射影响）以及总体效应（如水淹、湿度上升、温度上升、窒息效应和更高的辐射水平）对安全系统有影响。应分析这些可能的效应。

3.3.1.2.2 特别是，有限面积的泄漏¹²和破裂一样，应作为能导致内部水淹灾害的假设始发事件加以考虑。对于法兰连接和不同类型的封口，应逐个分析可能的泄露面积。

3.3.1.2.3 在以下章节中将讨论可能由管道破裂引起的三种主要现象：管道甩动、喷射效应和水淹。

¹²在某些国家中，这个泄漏的尺寸定义为管道截面的0.1倍。在其他国家中，使用以下的公式：面积由 $S \times D/4$ 给出，其中，S是管道的壁厚，D是内径。

3.3.2 管道破裂的排除和防止

3.3.2.1 如对容器所采取的措施相类似，对高能管道应用很高的质量标准可以把管道断裂风险降低到其破裂可以有效排除的水平。

3.3.2.2 如果对于所考虑的管道已经进行了先漏后破、破裂排除或低概率破裂的合格质量鉴定，导致自发破裂^{13,14}的频率足够低，那么则无须假设管道破裂。一般而言，应进行破裂机理分析来计算泄漏尺寸。替代这种分析，应假设相应于流动截面 10%的泄漏尺寸的次临界破口¹⁵。应表明泄漏探测系统有足够的灵敏度来探测次临界破口漏出的最小泄漏量。

3.3.2.3 对于没有先漏后破或破裂排除鉴定的一回路和二回路管道，如果应用另外与安全有关的措施，如监督措施（增加在役检查或对泄漏、振动和疲劳、水化学、松动部件、移位和磨蚀及腐蚀的监测），则可以明显降低管道破裂的概率。

3.4 管道甩动

3.4.1 管道甩动现象

3.4.1.1 典型的管道甩动现象仅由高能管线的双端剪切型管道破裂所产生。包容在系统里高能流体排放产生的力推动破裂管道的自由截面端，加速了破口处的管段，趋于将其从安装位置移开。在管段无限制的或足够大的移动情况下，不断加大的弯曲运动在最近的管道甩动的约束件或在刚性或充分坚硬的支撑件处形成了一种塑性的铰链。这就决定了在管道甩动运动阶段期间绕该点转动的管段的长度。

13 在一些国家中，对于应用先漏后破或破裂排除的质量鉴定的高质量管道推荐概率限值为每年 10^{-7} 。

14 应注意到，鉴定为破裂排除的管线本身应受到保护免受内部灾害的后果，如管道破裂，飞射物或重型载荷的跌落。

15 在一些国家中，有限长度的高质量管道的管段（超级管道）无需假设任何失效（破裂或泄漏）。

3.4.1.2 甩动管道一撞击到其他设备、构筑物或部件，其运动会减缓或停止，运动管段的动能作为冲击载荷部分的或全部的传递到靶上。应预防这些在安全相关目标上的机械撞击，或者如果不能避免，对于不可接受的后果应加以研究。

3.4.1.3 高能管道上出现大的径向贯穿裂缝的情况下，由于管道没有断开，在这个裂缝附近也不会发生典型的管道甩动。但应假设管线形成有三个塑性铰链的 V 型，且有可能影响其他安全相关设备，在此基础上考虑其大的移位。

3.4.2 管道甩动分析

3.4.2.1 应在几何上分析甩动管段来确定可能危及目标构筑物、系统和部件的可能的管段运动方向及动能。对靶的任何可能的机械撞击应在系统瞬态详细评价的基础上，通过合适的动态分析加以研究，来量化甩动管道喷射力和能量，以及会传递到靶上的能量份额（可根据保守假设限定分析范围）。此外，分析应包括管道甩动约束件的有效性评价，以证明实体约束会使管道偏移保持很小。在终端破裂的情况下，应考虑对其余终端的二次效应。

3.4.2.2 应直接从系统设计和假设断裂的位置和类型中获得破裂管道的特性。在管道甩动的情况下，通常保守假设一个周向的完全断裂，且管道将在最近的刚性约束件处形成一个铰链。对于形成完全塑性铰链的自由甩动管道的分析来说，可有简化的但已证明了的工程公式应考虑加以应用。

3.4.2.3 对于撞击后果的分析，应假设甩动管道撞击在一个设计相似、直径较小的管道，一般引起靶管损坏（破裂）。靶管直径等于或大于甩动管时则无须假设其失去完整性¹⁶。如果一个额外的质量（例如一个阀或一个流量孔板）在甩动支管上存在，运动的动能将增加。在这种情况下，即使靶管粗于甩动管也有可能打破。

¹⁶ 在一些国家中，如果被撞击的管道的厚度薄于撞击管道，则应考虑被撞击管道的有限泄漏的可能性。

3.4.2.4 在对甩动管道的研究中，应考虑撞击靶后导致破裂并伴有二次飞射物弹射的可能性。飞射物的源可能是管段内、或附属于管段的单个集中质量的物体（例如阀或泵或重部件）。如果这些部件通过设计独立支撑件来防止这些破裂和二次飞射物的形成，则分析应扩展到这些支撑点。还应注意到管道上的仪表和类似附件可能成为飞射物。

3.4.3 管道甩动后果的防护

3.4.3.1 尽管一般认为核动力厂中管道系统中严重管道断裂的概率是可以接受的低，通常实践是在所选择的位置通过使用实体约束件来限制可能断裂管道的运动。如果管线在合适的位置上装备了足够数量有效的管道甩动约束件，则可认为排除了管道甩动现象。

3.4.3.2 除了通过双端剪切型管道断裂发生的频率足够低来防止管道甩动和通过管道甩动约束件来排除甩动外，可能还需要采取保护性措施来降低安全相关管道和设备被撞击和受到不允许毁坏的概率。特别是，应采取特殊措施保护在可能的管道破裂或泄漏处附近的隔离阀以保证这些阀的可运行性。

3.4.3.3 如果满足以下任一条件，则无须提供特殊措施来防护管道甩动引起的撞击后果：

（1）如 3.3.1—3.3.2.3 所述，排除管道破裂。这种设计固有的提供了在役检查需要的可达性。

（2）通过保护性屏障、屏蔽或合适的距离使用动管道在实体上与安全重要管线（例如那些实体分隔的系列）及安全相关构筑物、系统和部件相分隔。

（3）可证明，双端断裂之后，断裂管道的任一端在最近的管道甩动约束件或刚性支撑件形成的塑性铰链附近的任何可能方向上不受限制的自由运动，都不会导致对任何安全重要构筑物、系统和部件的撞击。

(4) 可证明，甩动管道的内能不足以将受影响的安全相关构筑物、系统和部件的安全功能削弱到不可接受的程度。

3.5 喷射效应

3.5.1 喷射效应的现象

3.5.1.1 喷射是从承压系统中泄漏或破裂处以特定方向和很高速度所喷射出来的流体束。

3.5.1.2 喷射通常来自于那些破裂的部件，如包容高能加压流体的管道和容器。假设始发事件就是这些管道或容器的泄漏或破裂。低能量系统可以排除喷射效应。

3.5.1.3 应在任何合适的地方考虑其他可能的喷射源。这样源的例子是气体喷射（在相关导则中考虑可能的燃烧效应）。

3.5.1.4 一旦高能管道或容器破裂，则不可避免的产生喷射。防止喷射产生的唯一方法是防止假设始发事件本身。有许多措施可以在时间和/或空间上限制喷射。例如，安装在故障点上游的阀门和下游的逆止阀可以在喷射后很快将其停止。安装在破裂管道周围的屏障可以限制喷射的范围（见 2.4.3.2.1 和 2.4.3.2.2）。

3.5.2 喷射的分析

3.5.2.1 对于破口的每一个假设的位置和尺寸，应评价喷射的几何特征（形状和方向）和物理参数（压力和温度）与时间和空间的函数关系。

3.5.2.2 喷射源通常假设是容器和管道的周向破裂或径向泄漏。这样导致的喷射限制在一个特定的方向。就周向破裂来说，喷射可能沿管道的轴向或径向。径向喷射是在管道的两段分离的早期阶段，作为各来自一段管道的两个轴向喷射交汇作用产生的结果。如果管段的运动被限制，在管段错位之前，径向喷射可能持续一段时间。

3.5.2.3 如果假设始发事件产生多个的喷射，应考虑喷射之间可能的相互影响。这种情况的例子是没有约束件的管道双端破裂，其中可能产生两个喷射，即管道每一个的破裂端产生一个喷射。

3.5.2.4 应考虑喷射源（如甩动管道）运动对喷射几何特性以及其他可能的影响（如在喷射轨道附近的物体）。

3.5.2.5 可以使用最新的计算机程序，或者是在实验数据基础上的简化近似，或者是使用适当的保守假设，来分析喷射形状和特性。

3.5.3 喷射后果的防护

3.5.3.1 下一步应进行喷射后果的分析。应考虑喷射对靶的下述影响：机械载荷（压力、撞击）、热载荷（温度，包括适当地方的热应力和热冲击）和流体特性（例如电气设备中由于液态水的导电而导致的可能短路）。还应考虑可能的化学作用，特别是如果喷射流体不是水的情况。如果那些不是构筑物、系统和部件目标的损坏可能导致重要的二次后果，也许有必要分析喷射对其的效应。一个典型的例子是管道隔热体的损坏。尽管隔热体本身不是安全重要的，但隔热体材料的碎片可以堵塞应急堆芯冷却系统再循环泵的水坑滤网。

3.5.3.2 除了喷射对目标的直接喷射作用（局部效应），流动流体也可能对室内整体环境情况有重要的影响。这影响取决于很多因素，其中包括持续时间、喷射参数和空间尺寸。如果这一点需要关注，那么还应分析总体环境参数以及其对构筑物、系统和部件功能的影响。该分析通常作为设备环境鉴定过程的一部分加以进行。在设备鉴定过程中所考虑的假设始发事件组通常限制在核动力厂安全分析报告所分析的设计基准事故一个相当窄的范围内。更大组的假设始发事件组应在内部灾害（见 2.3.6）范围内考虑，包括压力、温度、湿度、水位和放射性对构筑物、系统和部件的功能性影响在内。例如，辅助系统中的破口

通常不在设计基准事故中分析，但应在内部灾害的评价中考虑。应通过分析表明，由喷射产生的总体环境条件不比那些在设备鉴定过程中所考虑的环境条件更苛刻。如果无法保证这一点，所涉及的部件应重新鉴定或应受到保护。

3.5.3.3 室内总体环境条件的改变可能由那些与内部灾害无关的因素产生。这不在本导则所考虑的范围之内，应在设备鉴定过程中考虑相应的保护措施。

3.5.3.4 对直接喷射作用的防护与对飞射物的防护相似（见 3.1—3.1.2.15）。应将保护性措施设计成既能对付飞射物也能对付喷射效应，或总体上尽可能的能对付多种内部灾害。

3.5.3.5 设计防护措施中应考虑的飞射物和喷射之间的区别包括：

（1）它们的持续时间（飞射物通常假设导致瞬间影响，而喷射除了它们的瞬间影响，还持续一段时间；应研究喷射可能由腐蚀而穿透屏障）。

（2）喷射和飞射物在撞击屏障之后的行为相当不同；屏障应设计成既不会将喷射也不会将飞射物偏转到不利的方向上。

（3）由于喷射不是一个紧凑固体，一些屏障（如网）对一些飞射物防护是有效的，但是不能保护构筑物、系统和部件免受喷射影响。

3.6 水淹

3.6.1 水淹现象

3.6.1.1 水淹可以由任何导致产生液体（通常是水）排放的假设始发事件引起。这些假设始发事件的实例包括，管道、容器和水箱的泄漏或破裂，以及可以导致喷淋系统（安全壳喷淋和灭火器喷淋）触发的假设始发事件，无论这触发是误动作或是有意的。

3.6.1.2 一般来说，水淹不仅意味着在房间的地板上形成水坑，如果不能保证充分的排水，也意味着液体在较高位置上的汇集。例如水（来自喷淋和冷凝

蒸汽)可以在电缆托架中汇集,即使其位于地板水平之上。那么位于这些位置的设备应考虑遭受水淹影响。此外,这些托架里的水可能排到其他未预料到的地方。

3.6.1.3 水淹的假设始发事件的实例包括:

- (1) 一回路和二回路系统的泄漏或破裂;
- (2) 安全壳喷淋系统的误动作;
- (3) 二回路给水系统的泄漏或破裂;
- (4) 应急堆芯冷却系统的泄漏或破裂;
- (5) 厂用水系统的泄漏或破裂;
- (6) 消防水系统的泄漏或破裂;
- (7) 维修期间的人员差错(例如,错误的把阀门、进出孔或法兰打开而未关闭)。

3.6.1.4 预防原则一般和那些预防其他内部灾害的相似。既然水淹可以由容器、水箱、管道的泄漏或破裂产生,那么降低泄漏和破裂的可能性(P1)的任何措施也可以降低水淹的可能性。

3.6.1.5 减少人员差错也是降低水淹概率的另一个重要措施。

3.6.2 水淹的分析

3.6.2.1 应仔细确定所有可能的假设始发事件。最好的方法是根据构筑物、系统和部件的列表建立假设始发事件表,然后识别所有可能的液体来源(在压水堆和沸水堆情况下是水),包括在其他房间中的来源。应逐个房间巡视来支持该识别。

3.6.2.2 对于每一个假设始发事件,应在考虑可能的人员差错的情况下确定P1。

3.6.2.3 对于所有的假设始发事件，除非 P1 是可接受的小，否则不仅对于包含液体源的房间，而且对于液体可以扩展到所有的房间（通过门、导管或者墙或地板上的裂缝），都应确定水位与时间的函数关系。在连接水箱或水池的管道破裂的情况下，应考虑可能的虹吸效应，这可加大排走的液体量。碎片可能堵塞排水孔，如果其将导致更严重的情况，那么这种情况也应加以考虑。在使用容量—高度关系式来确定液体水位时，应使用房间竣工状态来计算。还应分析液体在房间较高部位（如电缆托架）的可能的汇集。在一些情况下，也许有必要分析物体和/或小颗粒被输送到未意料位置情况下的水淹。一个典型的例子是应急堆芯冷却系统滤网的堵塞。隔热体碎片，腐蚀颗粒和甚至人头发都可以被水带到滤网并将其堵塞。

3.6.2.4 如果液体是水，通常认为主要关注的是水淹对电气装置的影响。如果液体和热的物体相接触，压力可能剧增，这种现象应在土木工程构筑物的设计中加以考虑。还应考虑其他可能的后果（如 2.3.4 中所述的）。

3.6.3 水淹后果的防护

3.6.3.1 有意的水淹有时候是一个设计特性，在设计中应充分考虑有意的水淹现象（如仪表和控制系统的一些部件应根据安全壳喷淋的要求进行质量鉴定，一些门或墙应是可以防消防喷淋水的）。作为设计特性，这些有意的水淹通常可不认为是内部灾害，但由于其相似特性，有意的水淹应包括在水淹事件组中。

3.6.3.2 可以通过如核动力厂布置等措施来降低构筑物、系统和部件受水淹影响的概率 P2。在这种情况下，多重系统有效的实体分隔可能意味着垂直的隔离。构筑物、系统和部件可位于一个高于最大可能水淹水位的基座上。如不可行，可以使用屏障进行隔离（围绕部件的墙或者是完整的密封）。还应通过所有可行措施来保证尽可能的减轻水淹（除非是作为设计特性的有意水淹）影响，

并防止其扩展到不利的区域（如通过相应的门槛）。可以用来减轻水淹影响的手段包括：

- （1）适当的设计（在可能危险管道、排水管和泵上的隔离阀）；
- （2）探测系统（水淹报警）；
- （3）规程（运行规程和/或应急规程）。

对于采取的所有减轻水淹影响措施，应仔细的评价成功的可能性。如有怀疑，分析中应假设其失效。在确定论方法中，总是应假设后果最严重的单一故障。

3.6.3.3 在潮湿工况甚至淹没中运行的鉴定合格的设备可降低系统或部件严重损坏的概率 P_3 。

3.6.3.4 如果任一种方法实际中都无法实现，则可使用实体分隔的多重系统或部件来降低不可接受后果的总的概率。由于液体可以淹没整个房间甚至可以扩展到其他房间，应考虑到有很大共因失效的可能性。

3.6.3.5 如水淹足够快（如在水箱整个破裂的情况下），应考虑和分析可能形成的波。波可能将局部水位提高到远高于基于稳态所预计的水位值。波也可能给构筑物、系统和部件施加一个大的机械载荷。如果确定这种可能性，则应提供适当的防护措施（如通过屏障，适当的布置或实体分隔的构筑物、系统和部件的多重性）。

3.6.3.6 除了在本节中所描述的水淹的直接影响外，流动液体也可能对房间中的整体环境情况有一个明显的影响。应在设备的质量鉴定过程中考虑这些影响。