

附件 2

核安全导则 HAD 102/04-2019

核动力厂内部危险（火灾和爆炸除外）的防护设计

（国家核安全局 2019 年 12 月 31 日批准发布）

国家核安全局

核动力厂内部危险（火灾和爆炸除外）的防护设计

（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

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，其目的是为评价核动力厂内部危险¹的可能后果，以及分析方法和程序提供指导。本导则可供核安全监督管理部门、核动力厂设计人员和许可证持有者使用。

1.2 范围

1.2.1 本导则适用于陆上固定式热中子反应堆核动力厂。本导则给出的例子一般源自轻水反应堆核动力厂，但给出的建议通常也适用于其他类型的热中子反应堆核动力厂。

1.2.2 本导则讨论了《规定》中所描述的核动力厂不同运行状态下可能发生的假设始发事件²，并补充了相关章节的内容。本导则使用概率论和确定论方法对以下内容进行评价：

（1）假设始发事件，使用确定论方法进行假设，以及使用概率论方法估算其发生频率；

（2）构筑物、系统和部件³受影响的可能性或频率；

¹内部危险是在场址边界内，核动力厂运行区域发生的危险。本导则中所研究的内部危险是将火灾和爆炸排除在外的。

²假设始发事件是设计阶段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、人员差错（设施范围内部和外部皆可）和人为或自然事件。

³构筑物、系统和部件是涵盖整个设施的用于保护核安全的所有物项或活动（除人员差错之外）的总称。构筑物是非能动物项，包括建筑物、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）功能的几个部件之和。

(3) 造成损坏后果的可能性或频率；

(4) 后果的全面评价，并对其可接受性做出判断。

1.2.3 本导则为假设始发事件的后果（包括二次和级联效应）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危险和降低 1.2.2 节中相关频率的措施。

1.2.4 本导则将评价下列内部危险：飞射物、构筑物倒塌和物体跌落、管道损坏及其后果、管道甩动、喷射效应和水淹。对于每一个危险，本导则将描述假设始发事件并讨论预防和防护的具体措施。其他内部危险（如车辆对构筑物、系统和部件的撞击，有毒或窒息性气体的释放）在本导则中没有涉及。

1.2.5 对于已有的核动力厂，某些设计建议在实际中可能难以实现。若建议可行，涉及维修、监督和在役检查的建议应该得到满足；若不可行，则还应考虑故障后果的分析。

2 总体考虑

2.1 假设始发事件

2.1.1 《规定》提出了核动力厂安全设计的要求和概念，其名词解释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，在设计过程中必须进行考虑。所考虑的假设始发事件应包括内部危险。

2.1.2 根据《规定》的要求，对于在概率论和确定论基础上选择的假设始发事件，核动力厂设计对其的敏感性应减至最小。应提供合适的预防和缓解措施来应对假设始发事件的影响。本导

则将详述这些内容。

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：

- (1) 预防或限制假设始发事件的发生；
- (2) 保护构筑物、系统和部件（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的所有可能影响；
- (3) 构筑物、系统和部件的稳健性（如开展质量鉴定）；
- (4) 其他措施，如可能的固有安全特性、安全重要系统的冗余设计、多样性系统和实体隔离。

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，以下情况除外：

- (1) 假设始发事件发生的频率（表示为 P_1 ）低到可以接受的程度（见 2.2.9、2.2.10 节），以至于可以排除考虑其后果的必要；
- (2) 系统或部件受影响的频率（表示为 P_2 ）足够低（见 2.2.9、2.2.10 节）；
- (3) 如果系统受影响，其导致不可接受后果⁴的频率（表示为 P_3 ）足够低（见 2.2.9、2.2.10 节）；
- (4) 不可接受后果的总的频率（表示为 P ）足够低（见 2.2.9、

⁴不可接受的后果意味着《规定》的安全要求所定义三个安全功能中一个或多个的丧失：(1) 控制反应性；(2) 排出堆芯热量；(3) 包容放射性物质和控制运行排放及限制事故释放。

2.2.10 节)。P 等于 P_1 、 P_2 和 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。

2.2.3 降低这些频率的方法示例如下：

(1) 保守性设计可降低 P_1 ；

(2) 布置上采取某些措施，如在源和靶⁵之间设置实体隔离，可降低 P_2 ；

(3) 对可能受影响的靶进行全面设计和鉴定，可降低 P_3 ；

(4) 应用恰当的运行规程可以把 P 降低到最小。例如，把出现意外水淹的频率降低到最小（对 P_1 的影响）或采取有效的行动避免水淹的漫延（对 P_2 的影响）。

2.2.4 确定论方法认为，上述方法排除了假设始发事件的发生和/或其对安全的不可接受的影响，即至少认为频率 P_1 、 P_2 或 P_3 中的一个将降低到零。概率论方法将优先使用核动力厂全面的特有可靠性数据，否则其将作为确定论方法的补充。

2.2.5 按优先级顺序来排列，最佳的设计方法是实际消除假设始发事件（ P_1 减小到可接受）；其次是将构筑物、系统和部件与源隔离（ P_2 减小到可接受）；使后果可以接受也是一种选择（ P_3 减小到可接受）。应尽可能保证纵深防御第二层次的有效性，必要时还应保证第三层次的有效性来维持纵深防御。某些情况下可能需要使用所有三个层次防御的组合。

⁵靶是源所涉及的安全相关构筑物、系统和部件。

2.2.6 在核动力厂设计中，对于按照相同原则设计的、质量标准 and 运行条件类似的部件，可以通过分析某一部件的频率 P_1 来分析这类部件相关的危险。

2.2.7 在核动力厂设计中，为了把 P_1 （如将存在跌落风险的物体安装在底层地板上就可以将其从假设始发事件中排除）和/或 P_2 （如相对于反应堆厂房布局而为汽轮发电机选择合适的方位）降低到最小，在确定核动力厂布置时应考虑对内部危险的防护。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 在核动力厂设计或修改过程中，本导则所述的分析过程可以作为一种优化工具，为降低一个或多个 P_i 因子（ P_1 、 P_2 或 P_3 ）进行设计变更。概率论方法中，可应用该分析过程为防护设计的可接受性提供依据。

2.2.9 稀有事件的频率和后果依据置信度（置信度的变化范围很大）来确定，这主要依赖可有效控制的物项来实现。这意味着，在某种情况下主要关注降低 P_1 ，在另一种情况下则主要关注降低 P_2 或 P_3 。为了处理在量化 P_1 、 P_2 或 P_3 上的不确定性，应恰当地结合分析和实验工作来确定最坏的情况和能够做出的保守估计。

2.2.10 由于对特别严重后果量化的不确定性或者所估计的概率置信度不足，对于相关风险的不确定性，应采取一些措施（如监督、监测、检查、屏蔽和实体隔离等方法）进行特别关注。

2.2.11 基于风险的考虑，应明确识别出那些可能的危险并

进行详细和全面的考虑，对其他危险则仅需粗略地评价。有时给出某些最大后果事件的极限频率，低于此频率的风险则认为可接受的⁶。更多情况下，指标值是启发式的，概率限值是不明确的。在此类情况下，可根据确定论方法计算（如应力分析、断裂力学或撞击损坏分析的计算）和工程判断，来分别对每一种情况进行决策。

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的损坏称为一次效应。假设始发事件通过某些损坏扩展的失效机理而间接导致的损坏称为二次效应。二次效应导致的损坏可能超过一次效应。当需要对假设的设备故障进行安全评价来证明满足核动力厂基本安全功能时，评价应包括所有的二次效应。某些情况下，本导则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（如管道甩动可能导致的二次飞射物等）。

2.3.2 二次效应的特点是其可能引起的损坏程度差异很大，很多设计人员无法控制的因素会起作用，因此应优先考虑那些能采取终止级联效应的措施，即降低 P_1 和/或 P_2 而不是降低 P_3 的措施。应特别注意预防管道破裂，因为其可能导致几个潜在的假设始发事件发生（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。在建造完成后应通过系统、全面的方法进行验证，并

⁶根据所涉及的方法和关注的设施，小到可接受的频率 P 被定义为小于每年 10^{-7} 至 10^{-6} 。

补充相关的设计措施，确保已考虑到所有的可能性。一种方法是使用列出所有可能二次效应的核对清单，并解释说明这些二次效应不会导致不可接受的间接损坏，并通过巡检对这种方法进行补充。

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。一般来说，归纳这些二次飞射物的特征是很困难的；最稳妥的措施是防止其产生或将其限制在源处。例如，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

若管道甩动或飞射物损坏位于安全系统上方重物的支撑结构，其导致的物体跌落可能引起进一步损坏。某些情况下应证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冲击，或者应采取措施来防止这种冲击。

2.3.4.3 高能管道⁷和部件的失效

如果假设始发事件会导致含有大量贮能流体的管道或部件破裂，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、温度或湿度上升、管道甩动、水淹、二次飞射物、化学反应和高活度放射性。高能管道和部件的破裂

⁷高能管道定义为在工作介质是水的情况下，内部运行压力大于或等于 2.0 兆帕且运行温度大于或等于 100 摄氏度的管道，而对于其他流体可能是其他限值。

也可能引起安全系统鉴定中考虑的冷却剂丧失事故或其他事故。除非能根据所拥有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直接证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,或尽可能把发生这一事件的可能性降至最低。

2.3.4.4 水淹

对于正常情况下充满液体的管道、水箱或水池,可能遭受高能飞射物撞击的位置,应评价水淹造成损坏的可能性。在评价管道破裂后果时,也应考虑冷却剂由于虹吸效应从设备和水箱中的泄漏。水淹可通过如电气短路、火灾、流体静水压力效应、波动作用、热冲击、仪器故障、浮力和临界风险(与硼稀释相关)等效应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特性。如果安全重要物项有被水淹的可能性,由于预防和缓解所有可能的水淹效应是非常困难的,大多数情况下,稳妥的措施是将 P_2 降低到可以接受的水平。

2.3.4.5 放射性物质释放⁸

对包容或控制放射性物质释放所需物项的撞击可能造成放射性物质的释放。水淹也可能导致放射性物质释放。这些释放可能影响一些部件的功能。

2.3.4.6 化学反应

飞射物或管道甩动撞击可能释放危险的化学物质,而水淹、

⁸ 避免任何超出规定限值的放射性物质释放是《规定》中所建立的总的的目标,其已被安全分析所包络。从这个意义来说,放射性物质释放不是二次效应。

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质之间的放热反应；
- (3) 对构筑物或部件的酸腐蚀；
- (4) 能劣化重要材料或可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（源的释放或化学反应结果）；
- (6) 窒息性气体的产生或释放。

由于水淹的化学反应产生的效应种类繁多且很难预计，稳妥的措施是使 P_2 降低到可以接受的水平。例如，应确保只在必须的情况下使用支持这类反应的化学物质，并限制到最小量。

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或导致其故障（如误动作）。核动力厂电气设备和线路的数量多且范围广，飞射物的穿越实际上肯定会导致一些电路失效（如电缆的断裂、设备的破坏或者电气致燃火灾）。在保护电气设备免受撞击引起间接损坏的设计中，应考虑适当使用如多重电路的实体隔离、故障安全电路、恰当地应用熔断器和断路器、足够的防火措施和屏障等技术。应依据考虑的假设始发事件具体情况确定最合适的方案。例如某个假设金属飞射物可能导致电缆间的意外连接，进而

影响熔断器的可靠性，那么应使用其他更有效的电气保护方法。应注意到，电路复杂的潜在失效模式意味着不可能彻底评价所造成的危险后果；除非被保护的物项不受危险影响，否则应假设最不利的失效模式。

2.3.4.8 仪表和控制线路的损坏

一些气动、液压设备以及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而损坏，并进而可能导致系统误动作或向操纵员提供不恰当的信息。应参照电气损坏进行最不利的假设。

2.3.4.9 火灾

假设始发事件可能导致火灾，例如飞射物撞击可能产生一个点燃源（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后续影响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到伤害。通常在工作人员执行安全功能所停留的核动力厂区域内，假设始发事件造成影响的频率应降低到可以接受的水平。假设始发事件也可能使工作人员无法进入某些区域，如果要求工作人员进入这些区域进行干预行动，那么应采取措施保证其安全，否则应排除该行动的必要性。

2.3.5 一旦假设始发事件会导致预计运行事件，应证明核动

力厂设计能防止其升级为设计基准事故。同样的，一旦假设始发事件直接导致设计基准事故，应能证明核动力厂设计能防止其升级为设计扩展工况。对于这些假设始发事件的分析，单一故障准则适用于相应的安全组合；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 在核动力厂安全分析报告中考虑的假设始发事件仅代表了少数最具挑战性的假设始发事件。实际上在内部危险方面应考虑假设始发事件应更多，包括一整套对安全重要系统可能的损坏，以及失效后会影响到安全系统的辅助系统。

2.3.7 推荐以渐进方式开展分析。筛选过程中，应确定作为假设始发事件来源的备选部件。筛选过程应足够谨慎，如果对某部件有疑问，则不应被排除，而必须列在更详细分析的潜在危险名单上。这种情况下概率安全分析方法可能有助于评价。

2.3.8 筛选过程中应对需要安全系统运行的情况进行描述，包括假设始发事件本身（如失水事故），一次效应造成的损坏和二次效应（如果有）引起的任何后续损坏。

2.3.9 使用筛选过程确定可运行的系统。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引发的安全系统某个部件不可用而导致某个系统不可用。例如安全系统的某个部件发生故障（单一故障准则），或在试验或维修模式中，或操纵员差错。分析时应考虑可能的共因故障。

2.3.10 应确定安全系统剩余（未受损的）能力是否足够应

对已发生的情况（如假设始发事件和其影响及级联效应）。如果不能证明安全系统有足够的力量，那么应进行额外的保护或者增加安全系统的多重性，或使用两者的组合，以证明安全系统具有足够的力量。

2.3.11 实际上，对内部危险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撑理论分析。

2.3.12 在用来处理假设始发事件后果的专用装置或设施的设计中，应采取预防措施，保证该专用装置或设施对所考虑的假设始发事件是经过鉴定的，且其本身不会成为一个新的假设始发事件的来源。

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 应执行有严格的设计限值并对部件故障形成第一层防御的保守性设计来降低 P_1 。通常采取的措施包括详细地分析设备的静态、动态、热荷载及其组合，适当应用安全因子，全面控制材料特性，以及在制造中恰当的质量保证措施。例如，应考虑使用安全装置或系统来限制最大压力或旋转速度以降低 P_1 。在可能的范围内，部件设计应考虑老化效应。

2.4.1.1.2 在设备故障后果会危害安全的情况下，上述的设计方法至少应结合检查、监督措施或其他降低 P_1 的方法来使用。

2.4.1.2 检查

2.4.1.2.1 反应堆一回路的管道和部件及其支撑件应定期进行无损检验，以探测其材料在运行中可能扩展的缺陷。所使用的在役检查技术敏感度应能探测并定性那些远小于可能导致严重失效的缺陷。应注意保证持续的检查，以确保不会因管壁的变薄（或其他原因）而增大 P_1 。

2.4.1.2.2 以在役检查有效为前提，应识别制造过程中的缺陷，并通过分析来预测其发展。检查的频度应适当，以便为探测到缺陷生长和可能的失效之间提供足够的时间裕量。可以通过其它调查来补充定期无损检验。例如，部件移动原因的调查可能指示出有水锤现象或其他未预计到的荷载。应彻底研究加速缺陷发展的相关因素（如疲劳、腐蚀或蠕变等）。

2.4.1.2.3 如果发现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设备故障，则应考虑该核动力厂以及其他同类核动力厂中类似物项缺陷或故障的可能性。

2.4.1.2.4 在役检查结合其他降低故障频率的措施以及深入研究（如破前漏的验收准则）能够提供一个可以无需假设压力容器、管道以及转动设备整体失效的可接受基准，因此无需提供额外的设计措施来防护某些类型的内部危险（如飞射物和管道甩动）。但应考虑泄漏的后果（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 P_1 的情况下，有的监测技术能指示出初始失效。该项技术是基于以下经验：大部分失效，特别是延性金属部件的失效是逐渐发展的，从而允许在危险情况产生前及时采取纠正行动。在所有用来降低 P_1 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。应认识到监测仅可给出警告而不是预防失效。此外，监测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脱部件监测，其他监测应针对低周期和高周期疲劳、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等。

2.4.2.3 在监测系统的设计中，应考虑运行经验反馈（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脱部件的监测系统已得到广泛和长期的应用。在核动力厂和常规动力厂中，有许多关于振动监测器及时向操纵员警告设备的劣化而防止重大损失的记录。在大多数核动力厂中，安装了测量湿度、温度、放射性活度水平、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。在许多实例中，核动力厂安装的探测器或其例行检查发现的各类小泄漏，避免了重大的失效。

2.4.2.4 减少设备失效的监测系统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失效手段的补充，但本身不是减少设备失效的有效手段。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、无损检验以及一些其他因素的附加措施。对更高级别的安全设施或构筑物 and 部件的设计，基于上述所有方法，仍需假设管道的破裂。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频率及随之而来的飞射物、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具体的管道系统⁹。

2.4.2.6 适当的运行规程有助于降低假设始发事件产生的频率。例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；通过使用卸压阀和保护系统触发的安全设施来限制核动力厂瞬态；有一定风险的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

2.4.3.1.1 作为一种降低 P_2 的有效途径，应在核动力厂设计早期阶段对布置作出规定。这方面应考虑类似设施上的经验反馈。布置上的决策对预防飞射物和水淹危险是特别重要的，这些考虑将在本导则的相关章节中进行讨论。

2.4.3.2 屏障和实体隔离

⁹对管道系统进行鉴定的全面规程的例子有欧洲对破前漏概念应用的安全实践（EUR18549），美国核管会的破前漏应用（SRP3.6.3），德国（RSK 指导方针）应用的破裂排除大纲或日本应用破前漏的指导方针（JEAG4613）。

2.4.3.2.1 如果核动力厂的总体布置不足以将 P_2 降低到可接受水平,则可在假设始发事件来源处和预计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。这样,不仅可以保护所有潜在靶,还可以消除对飞射物散射的关注。另外,对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)的情况下,越靠近源处的屏障设计要求越不苛刻。然而,在一些特殊情况下,除一两个靶之外,现有的构筑物可能对于所有的靶都提供了足够的保护,那么最好是在这些靶处设置专用屏障。在假设水淹的情况下,应以适当地门、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,例如在压力容器和管道外表面处的屏障应确保焊缝的可达性。

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外部共模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隔离。在对每种情况依次评价的基础上,应确定假设始发事件是否会损伤多重安全系统。由于假设始发事件可能损坏一个部件而其二次效应可能损坏与其匹配的多重部件,应特别注意可能存在二次效应的情况。

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,即使这些物项失效,也将把核动力厂带到趋

于安全的工况。对于内部危险防护，如设计有效则可有助于减轻假设内部危险的后果，其在其他领域还有更广泛的应用。

2.4.4.2 假设始发事件可以导致随后的流体释放，这将导致核动力厂局部湿度、温度、压力和放射性活度水平的增加从而改变局部环境。应使用该环境中可以执行安全功能且经合格鉴定的设备。如果部件未在这种环境下鉴定合格，则应认为是不可用或应通过密封、屏蔽和其他恰当方法进行保护。此外，外罩会使维修活动复杂化且需要在每次维修活动结束后恢复封闭。

2.4.4.3 通过不加压保护套管缓解高压流体加压管道破裂可能的后果已在多种条件下成功应用。但该方案可能给内部管道检查增加困难。

3 内部危险的评价

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失效、阀的故障、控制棒的弹出和高速转动设备的失效）。也应评价二次飞射物的可能性。应首先采用防止出现内部飞射物的可行性方法；否则应使用下文所述的方法为构筑物、系统和部件提供内部飞射物防护。通常用确定论和概率论方法的组合来进行核动力厂飞射物危险的分析 and 防护飞射物设计的分析。某些飞射物是用确定论进行假设，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进行评价。在一些例子中，飞射物危险评价的所有方面（包

括起源、撞击和损坏）均由概率论方法处理。

3.1.1 防止飞射物的产生

3.1.1.1 压力容器的失效

3.1.1.1.1 对核动力厂安全重要的压力容器，应依据广泛应用和成熟的实践进行设计和建造以保证其安全运行。应开展设计分析来证明在所有设计工况下其应力水平是可以接受的。应根据已批准的程序监督设计、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，并且压力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压力容器可维持在设计限值内。这种压力容器（如反应堆压力容器）破裂通常认为是几乎不可能的，无需作为假设始发事件进行考虑。

3.1.1.1.2 核动力厂中其他容器可能无需这么严格的设计、质保和监督。但是应评价这些内部容纳高内能流体容器的失效，因为如果其断裂，则将成为飞射物来源。压力容器的失效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、接管的设计、建造结果和运行条件等因素。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 容器使用延性材料和附加锚固或支撑等方法可以进一步降低 P_1 。如果确定 P_1 不够低或假设容器可能以脆性的方式失效时，所假设飞射物的尺寸和形状应具有包络性，并通过分析来确定设计基准飞射物。此外采用简化的保守方法来确定要

考虑的飞射物是可以接受的。

3.1.1.1.4 因为无法预计容器行为和可能受到的严重损坏，应将其设计成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喷放是否足够将容器从限制它的支撑物（约束件）上分离出来。如果容器可能与其约束件分离，应完善设计来防止这种失效。

3.1.1.1.5 对于设置密封塞将核燃料限制在其位置上的反应堆，应进行专门设计以保证密封塞弹出的频率足够低。如缺少该考虑，应评价失效的后果，或把单一密封塞的弹出作为飞射物进行评价。

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进行评价。为便于维修，阀门通常设计成由许多可拆卸的部件组成。这些可拆卸部件的失效可能产生飞射物。作为以往良好的工程实践，即使尚未观察到阀杆、阀盖或固定螺栓的故障，这些故障也应作为可能的飞射物进行考虑。阀体强度通常应远高于连接管道。因此，在大多数情况下阀体本身成为飞射物是相当不可能的，在核动力厂设计和/或评价中通常不考虑该内容。

3.1.1.2.2 阀门设计中首选和最简单方法是使 P_1 减小到可接受，可采取以下几种方法来实现。阀杆应加装特定装置，以确保在阀杆故障情况下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，单个螺栓损坏时，除螺栓本身，不会导致

其它飞射物。该规则应用于阀门、压力容器和其他包含高内能流体的螺栓固定部件。如果流体经过垫圈联接处发生泄漏，应考虑由于腐蚀或应力腐蚀造成多重螺栓失效的可能性。

3.1.1.3 控制棒弹出

3.1.1.3.1 在大多数反应堆设计了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，其耐压壳在反应堆压力容器处形成了封头。由于设计上反应堆压力容器承受相当大的流体压力，通常假设其中一个封头由于所包容流体的驱动力而以控制棒弹出的方式失效。假设控制棒弹出引起的反应性瞬态和冷却剂丧失事故，均不在本导则中进行讨论。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。典型案例包括可能损坏附近的控制棒、安全系统和安全壳构筑物。

3.1.1.3.2 在某些类型的反应堆中，由于特殊的设计装置，可以降低控制棒的弹出频率。应通过实验和分析来证明，该种设计装置在某个控制棒驱动壳失效情况下能够保持控制棒和驱动组件不被弹出。

3.1.1.4 高速转动设备失效

3.1.1.4.1 核动力厂中存在含有高速转动部件的大型设备，例如主汽轮发电机组、蒸汽轮机、大型泵（如主冷却剂泵）及其电机、飞轮。这些转动部件具有相当大的转动惯量，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过高应力引起。

3.1.1.4.2 转动机械通常有一个围绕转动部件的重型固定结构,那么应考虑失效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计算。为简化起见,通常使用保守的方法计算,即假设飞射物和固定转子罩的相互作用中没有能量损失。

3.1.1.4.3 以往的例子表明,一旦转动设备失效会飞射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),失效过程趋向于生成一些大致相当的碎片。应力集中、结构的不连续性、材料中的缺陷和其他因素都可能影响失效过程,从而影响形成碎片的类型。转动机械失效产生的飞射物应根据其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评价中。

3.1.1.4.4 假设由高速转动设备失效导致的典型飞射物包括:

- (1) 风机叶片;
- (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 P_1 , 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裕量等方面，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验和其他试验的恰当性，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恰当性；

(3) 应评价防止破坏性超速相关方法的可靠性，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验和备用试验所涉及的规程等。

3.1.1.4.6 转动设备的速度由输入能量和输出荷载之间的平衡来确定。输出荷载的突然减少和输入能量的突然增大都会导致超速。在很有可能因飞射物而造成不可接受的损坏处，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超速的可能性。

3.1.1.4.7 应注意，虽有工程方案实现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减小到可接受水平。除了超速导致的失效之外，在正常运行速度或低于正常运行速度的情况下也有可能由于转子上的缺陷导致产生飞射物。应用其他手段来应对这些飞射物，如保守设计、高质量制造、细致地操作、适当监测相关参数（如振动）和全面的在役检查。适当地应用所有的这些手段之后，转动机械

失效产生的飞射物的频率可明显地降低。

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，根据飞射物能量和质量，可以限定其最大射程。在某些情况下，如大型的汽轮机飞射物，其可能影响的最大范围覆盖了整个核动力厂场址。了解飞射物可能从一个特定源射出的方向，有助于确定可能的潜在靶，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，飞射物的飞行范围内最可能是平面或扇面，如旋转机器飞射物。旋转机器失效证据表明，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值。

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产生的高能飞射物，或能将这些飞射物反射到一个无害方向的装置。在某些情况下对旋转设备可增设这样的装置。通常，泵的重型外壳以及电机和发电机的大型定子可能滞留或偏转由转子破坏性损坏导致的碎片。

3.1.2.4 通常可以通过适当地选择阀门在系统中的方位来降低 P_2 。除非被其他考虑所排除，否则阀杆的安装应确保阀杆或相关部件的射出不会撞击重要靶。

3.1.2.5 在布置方面，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重要靶（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。这种布置考虑到以下事实：如果转子大的碎片射出，将会在旋转平面的 25° 范围内飞出。这种布置不会排除它们撞击重要靶的可能，但其明显降低了直接撞击的频率。

3.1.2.6 通常将很可能受到飞射物撞击的阀、泵、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危险的手段是直接、简单和容易理解的，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，在包容高压流体的管线外加上非承压保护管的预防措施对于防护飞射物可能是有效的。由此得到两个防护特性：保护周围的构筑物和设备免受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 降低 P_2 的最直接且效果明显的设计方法可能是在飞射物源和靶之间设置屏障。屏障也用来降低某些二次效应，例如外表面损伤或甚至从混凝土上弹出碎块。

3.1.2.9 核动力厂中通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组成。也可采用其他手段，如钢编织网和飞射物偏转屏障。

如 2.4.3.2.1 节所述，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）的评价中需要考虑飞射物对屏障的局部和整体效应。可能处于支配地位的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，但两者都应进行评价。飞射物的局部效应是穿透、钻孔和造成疤痕或混凝土块的弹射和剥落，这些效应将主要被限制在靶的撞击面积内。整体效应包括弯曲、拉伸或剪切形式的结构损坏。小的飞射物（如阀杆），主要是局部效应，而大的缓慢的运动飞射物，如那些结构倒塌和跌落荷载引起的主要是整体效应。那些转动机械引发的速度更快的大型飞射物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，实践中使用可接受的经验公式来确定飞射物在屏障上穿透的深度。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、强度和使用钢筋或混凝土进行强化）。飞射物的质量、速度、撞击面积、形状和硬度，以及建筑的特性和靶的强度都是应考虑的重要参数。选择适用公式需要专业人员的工程判断，因为可能没有直接可用的公式，可能需要对参数范围进行一定的外推。在对钢筋混凝土的局部效应考虑中，另一个额外因素是剥落、造成外表面损伤或碎块射出引起的二次飞射物。由于二次飞射物的散射具有难以预计的特性，因此在任何可能出现

的地方都应防止发生这些现象。通过足够厚的屏障或通过混凝土表面设置钢衬里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估算主要构件中的挠度或应力。如果像通常那样,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荷载进行分析。应考虑由飞射物撞击导致的动态荷载,且适当地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安装在屏障上或安装在屏障附近的设备的可运行性时,这种效应是特别重要的。

3.1.2.13 如果 $P_1 \times P_2$ 的值不能证明能减小到可接受水平,则下一步是使 P_3 减小到可接受水平。可以通过对靶的可能撞击进行详细分析,来证明该撞击及其可能的二次效应不会妨碍其满足安全要求。

3.1.2.14 在涉及多重安全系统中,应使用实体隔离保证即使飞射物损坏一个或更多的多重安全系统后仍可满足总的安全要求。这是有关布置问题的延伸,但此方法在某些方面需要特殊考虑。

3.1.2.15 飞射物的数量和范围很大程度上影响多重重要靶实体隔离的价值。对于设备故障仅产生一个或两个高能飞射物的情况,实体隔离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优势将大大降低。应考虑可能的靶以及飞射物的安排和布置，把这类事件的影响降至最低。

3.2 结构倒塌和物体坠落

任何构筑物或“非结构”构件或有大量潜能的物体都可以认为是可能的假设始发事件来源。应考察所有这种构筑物（冷却塔、烟囱和汽轮机厂房）来确定其倒塌是否会影响构筑物、系统和部件。对于确认为一旦倒塌可能影响构筑物、系统和部件的构筑物，应证明其设计和建造可以避免倒塌的可能性，否则应评价倒塌的后果。同样，应评价由跌落物（吊车和被提升荷载）施加于构筑物、系统和部件上的危险。

3.2.1 构筑物和“非结构”构件

3.2.1.1 核动力厂中安全相关构筑物设计成能承受极端荷载，如地震、强风、飞射物撞击、外部爆炸、外部水淹、雪和冷却剂丧失事故引起的作用。因此，认为由内部原因造成构筑物倒塌是不可能的。设计实践是保证安全分级较低的构筑物失效不会扩展到安全分级较高的构筑物、系统和部件，否则，安全分级较低的构筑物失效应作为一个假设始发事件进行评价。除了把 P_1 降至最小，应使用实体隔离保证单一构筑物倒塌不会影响所有的多重度来降低 P_2 。

3.2.1.2 “非结构”构件（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。外部危险（如地震、强风、

爆炸或飞射物撞击）可能是这些失效的起因。某些情况下，“非结构”构件的失效可能由内部始发事件（如操纵员差错或维修期间事故）引起。这些情况下应评价其对构筑物、系统和部件的影响。应注意避免这种失效，或是通过合适的定位和足够的屏障设计，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事件引起，例如地震或飞射物撞击，也可由人员差错引起。按照相关导则的建议可以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，应分析物体的特性及其跌落的原因。

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靶时，可能需要提供足够的设计措施（如吊车上多重电缆或联锁）来降低故障的频率。另外，在邻近构筑物、系统和部件处装卸重荷载时应更加小心。应特别注意对吊车（如其联锁、电缆和刹车）、绞索、传送带、挂钩及相关物项进行定期检查和维修。

3.2.2.4 对吊车吊装重型荷载（如燃料运输容器）的情况，

在可能跌落飞射物和靶之间设置屏蔽或屏障通常是不实际的。对于使用在水中进行燃料贮存的反应堆，应关注燃料容器跌落到燃料贮存池中的可能性。若燃料容器从最高操作高度跌落贮存池中，这种可能性通常通过计算分析来确定燃料池是否会有大的破裂，并证明在燃料容器跌落造成的泄漏事件中，补水系统有足够的的能力维持水池的水位。应考虑的另一实践是将燃料容器的装卸操作限制在远离水池本身和远离其他重要靶的区域。

3.3 管道损坏及其后果

3.3.1 假设始发事件的假设

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（除了那些已确定的破前漏、破裂排除或低概率破裂的管道外）：周向断裂或纵向贯穿裂缝；

（2）对于中能管道¹⁰：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（如少于机组总运行时间的2%）或如果其名义应力比较低（如低于50兆帕），仅考虑有限泄漏（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

¹⁰中能管道定义为工作介质是水的情况下，内部运行压力小于2.0兆帕或运行温度小于100摄氏度的管道。对于其他流体可能应用其他的限值。

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。

对于公称直径小于 50 毫米的管道系统，应假设破口可能在所有位置上发生。

3.3.1.1.4 周向管道断裂可能由以下原因导致：由随机的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）造成的损坏；由于其他管道断裂造成的影响；应考虑的其他影响。这种管道断裂最可能的地方是任意一个在直管部件和管道部件（如管道弯头，三通管、异径管、阀或泵的接管）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中得到，也可以从概率安全分析评价中得到。

3.3.1.1.5 即使高能管道上由大面积泄漏引起大的纵向贯穿裂缝比周向裂缝发生的可能性低，也应将其作为假设始发事件进行考虑。

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（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）对安全系统产生影响。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¹¹和破裂一样，应作为能导致内部水淹危险的假设始发事件进行考虑。对于法兰连接和不同类型的密封，应逐个分析可能的泄漏面积。

3.3.1.2.3 在 3.4、3.5、3.6 节中将讨论可能由管道失效引起的三种主要现象：管道甩动、喷射效应和水淹。

3.3.2 管道破裂的排除和防止

3.3.2.1 与对容器所采取的措施相类似，对高能管道采用很高的质量标准可以把管道断裂风险降低到可以有效排除其破裂的水平。

3.3.2.2 如果对于所考虑的管道已经进行了破前漏、破裂排除或低概率破裂的合格质量鉴定，导致自发破裂^{12,13}的频率足够低，则无需假设管道破裂。一般而言，应进行破裂机理分析来计算泄漏尺寸。作为一种替代分析方法，应假设相当于流动截面 10% 的泄漏尺寸的次临界裂纹¹⁴。应表明泄漏探测系统有足够的灵敏度来探测恰好为次临界破口漏出的最小泄漏量。

¹¹这个泄漏的尺寸可定义为管道截面的 0.1 倍或使用以下的公式：面积由 $S \times D/4$ 给出。其中， S 是管道的壁厚， D 是内径。

¹²对于应用破前漏或破裂排除的质量鉴定的高质量管道推荐频率限值为每年 10^{-7} 。

¹³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危险的后果，如管道破裂，飞射物或重型荷载的跌落。

¹⁴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）。

3.3.2.3 对于没有破前漏或破裂排除鉴定的一回路和二回路管道，如果采取了有利于安全的附加措施，如监督措施（增加在役检查或对泄漏、振动和疲劳、水化学、松脱部件、移位和磨损及腐蚀的监测），则可以明显降低管道破裂的频率。

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断裂产生。包容在系统里高内能流体排放产生的力推动破裂管道的自由截面端，加速破口附近的自由管段将其从安装位置移开。在管段不受限制或其足够大移动的情况下，不断加大的弯曲力矩使其在最近的管道甩动约束件或在刚性或充分坚硬的支撑处形成了一种塑性的铰链。这就确定了在管道甩动期间绕该点转动的管段长度。

3.4.1.2 甩动管道一旦撞击到构筑物、系统和部件，其运动会减缓或停止，运动管段的动能作为冲击荷载部分的或全部的传递到靶上。应预防对安全相关靶的机械撞击，如果不能避免，对于不可接受的后果应进行研究。

3.4.1.3 高能管道上出现大的纵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。但基于管线形成有三个塑性铰链的V形假设，应考虑其形成较大的位移，有可能影响其他安全相关设备。

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靶构筑物、系统和部件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，通过适当的动态分析进行研究，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，分析应包括甩动管道约束件的有效性评价，以证明实体约束确保管道偏移很小。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，应考虑使用简化但已得到证明的工程公式。

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）。靶管直径大于或等于甩动管道时则无需假设其失去完整性¹⁵。如果一个额外的质量（如一个阀或一个流量孔板）存在于甩动支管，则运动的动能将增加。这种情况下，即使靶管直径大于甩动管也有可能被打破。

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、或附属与管段的单个集中质量的物体（如阀、泵或重型部件）。如

¹⁵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。

果这些部件通过设计独立支撑件来防止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管道系统中发生严重管道断裂的频率是可以接受的低，但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破裂管道的运动。如果管线在合适的位置上安装了足够数量有效的管道甩动约束件，则认为可以排除了管道甩动现象。

3.4.3.2 通常除降低双端断裂频率和使用管道甩动约束件来消除管道甩动外，可能还需要采取保护性措施来降低安全相关管道、设备被撞击或发生不能允许毁坏的频率。特别在可能的管道破裂或泄漏点，应采取特定的保护措施确保附近的隔离阀的可运行性。

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

（1）如 3.3.1.1 – 3.3.2.3 节所述，排除管道破裂。这种设计需确保在役检查的可达性。

（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（如那些实体隔离的系列）及安全相关构筑物、系统和部件相分隔。

（3）可证明管道在双端断裂后，任一端在最近的甩动约束

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，都不会撞击任何安全重要构筑物、系统和部件。

（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 喷射是承压系统出现泄漏或破裂，并以特定方向和很高速度喷射出流体束。

3.5.1.2 喷射通常来自于那些破裂的部件，如在分析中假设的包容高能加压流体的管道和容器。这些管道或容器的泄漏或破裂就是假设始发事件。一般而言，低能量系统可以排除喷射效应。

3.5.1.3 在合适情况下应考虑其他可能的喷射源，例如气体喷射（其可能的燃烧效应在相关导则中说明）。

3.5.1.4 一旦分析中假设的高能管道或容器破裂，则不可避免地产生喷射。防止喷射产生的唯一方法是防止该假设始发事件本身。有许多措施可以在时间和/或空间上限制喷射。例如，在故障点上游安装阀门和下游安装逆止阀可以在出现喷射后很快将其停止。在破裂管道周围安装屏障可以限制喷射的范围（见 2.4.3.2.1 和 2.4.3.2.2 节）。

3.5.2 喷射的分析

3.5.2.1 对每一个已假设的位置和尺寸的破口，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 喷射源通常是假设容器和管道出现周向破裂或纵向泄漏。该类喷射会限制在一个特定的方向。就周向破裂而言，可能会沿管道的纵向或周向喷射。周向喷射是在管道破裂两段分离的早期阶段，各来自一段管道的两个纵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，周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喷射，应考虑喷射之间可能的相互影响。例如没有约束件的管道双端破裂，其中可能产生两个喷射，即管道每一处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，或在实验数据基础上的简化近似，或适当的保守假设，来分析喷射形状和特性。

3.5.3 喷射后果的防护

3.5.3.1 应进行喷射后果分析，考虑喷射对靶的下述影响：机械荷载（压力或撞击）、热荷载（温度，包括对应区域的热应力和热冲击）和流体特性（如电气设备中由于进入液态水而导致的可能短路）。还应考虑可能的化学作用，特别是喷射流体不是水的情况。如果那些非构筑物、系统和部件的靶的损坏可能导致重要的二次后果，则有必要分析喷射对其影响。例如管道保温层的损坏，尽管保温层不是安全重要物项，但保温层材料的碎片可

能堵塞应急堆芯冷却系统再循环泵的地坑滤网。

3.5.3.2 除了对靶的直接喷射作用（局部效应），流体也可能对室内整体环境情况产生重要的影响。该影响取决于很多因素，包括持续时间、喷射参数和空间尺寸。如果需要关注该因素，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，该分析通常是设备环境鉴定过程的一部分。设备鉴定考虑的假设始发事件通常被限制在安全分析报告所分析的设计基准事故这样有限的范围内。内部危险（见 2.3.6 节）应考虑更大范围的假设始发事件，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。例如，辅助系统的破口通常不在设计基准事故中进行分析，但应在内部危险评价中进行考虑。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进行保护。

3.5.3.3 室内总体环境条件的改变可能由那些与内部危险无关的因素产生。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 节）。应将保护性措施设计成既能应对飞射物也能应对喷射效应，应尽可能在总体上能应对多种内部危险。

3.5.3.5 设计防护措施中应考虑飞射物和喷射之间的区别包括：

(1) 持续时间（飞射物通常假设导致的瞬间影响，而喷射除了瞬间影响之外还持续一段时间；应考虑喷射可能带来腐蚀而穿透屏障）；

(2) 喷射和飞射物在撞击屏障之后的行为相当不同，屏障设计应确保不会将喷射或飞射物偏转到不利的方向上；

(3) 由于喷射是流体现象，一些屏障（如网）对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的影响。

3.6 水淹

3.6.1 水淹现象

3.6.1.1 水淹可以由任何导致液体（通常是水）排放的假设始发事件引起。该类假设始发事件的例子包括，在分析中假设的管道、容器和水箱的泄漏或破裂，以及可以导致喷淋系统（安全壳喷淋或灭火器喷淋）触发（含误动作和正常动作）的假设始发事件。

3.6.1.2 一般来说，水淹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，也意味着液体将汇集到更高的位置上。例如电缆桥架一般位于地板水平之上的，但来自喷淋或冷凝蒸汽的水还是有可能汇集其中，那么位于这些位置的设备应考虑水淹影响。此外，桥架里的水还有可能排到其他不利的区域。

3.6.1.3 水淹的假设始发事件的例子包括：

- (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（如错误地打开阀门、进出孔或法兰而未关闭）。

3.6.1.4 预防原则一般和那些预防其他内部危险的原则相似。既然水淹可以由在分析中假设的容器、水箱或管道的泄漏或破裂产生，那么降低 P_1 的任何措施都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频率的一个重要措施。

3.6.2 水淹的分析

3.6.2.1 应仔细地确定所有可能的假设始发事件。最好的方法是根据构筑物、系统和部件列表建立假设始发事件表，然后识别所有可能的液体来源（包括来自其他房间）。应逐个巡视相关房间来支持识别的液体来源。

3.6.2.2 对于每一个假设始发事件，应考虑在可能的人员差错的情况下确定 P_1 。

3.6.2.3 对于所有的假设始发事件，除非 P_1 已减小到可接受的低，否则不仅对于包含液体源的房间，而且对于液体可能蔓延到的所有房间（通过门、导管、墙或地板上的裂缝），宜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，应考虑可能加大液体排出的虹吸效应。碎片可能堵塞排水孔，

如果由此导致更严重的情况，那么设计中也应考虑这种情况。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的参数进行计算。还应分析液体可能汇集在房间较高的位置（如电缆桥架）。在一些情况下也有必要分析水淹把相关物体和/或小破碎颗粒输送到不利区域的情况。一个典型的例子是应急堆芯冷却系统滤网的堵塞。保温层碎片、腐蚀颗粒甚至人员头发都可能被水带到滤网并堵塞滤网。

3.6.2.4 对于电气装置，如果液体是水，通常认为水淹是重要的关注内容。如果液体和热的物体相接触，相关压力可能出现偏移，这种现象应在土木工程构筑物的设计中进行考虑。还应考虑其他如 2.3.4 节中所述的可能的后果。

3.6.3 水淹后果的防护

3.6.3.1 有目的的水淹有时候是一种设计特性，在设计中应充分考虑该现象（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鉴定，一些门或墙应是可以防御消防喷淋水侵蚀的）。作为设计特性，这些有目的的水淹通常不认为是内部危险，但由于其相似特性，有目的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频率 P_2 。在这种情况下，多重系统有效的实体隔离可能意味着垂直位置上的隔离。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快地减轻水淹（除非是作为设计特性的有目的的水淹）影响，并防止其扩展到不利的区域（如设置相应的门槛）。可以用来减轻水淹影响的手段包括：

（1）适当的设计（在可能有风险的管道上设置隔离阀、排水管和泵）；

（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的行动，应详细评价其成功的可能性。如有疑问，分析中应假设其无效。在确定论方法中，应假设后果最严重的单一故障。

3.6.3.3 经过潮湿工况甚至浸没环境中鉴定合格的设备可降低系统或部件严重损坏的频率 P_3 。

3.6.3.4 如果任意一种方法实际中都无法实现，则可使用实体隔离的多重系统或部件来降低不可接受后果的总频率。由于液体可以淹没整个房间甚至可以扩展到其他房间，应考虑存在共因失效的可能性。

3.6.3.5 如果水淹足够快（如在水箱整体破裂的情况下），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荷载。如果确定存在这种可能性，则应提供适当的防护措施（如通过屏障，适当的布置或实体隔离的构筑物、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直接影响外,流动液体也可能对房间中的整体环境情况有明显的影响。应在设备鉴定过程中考虑这些影响。