

核燃料循环设施始发事件定量分析

李 峰¹, 王晓荣¹, 秦乐刚¹, 张焕朝², 赵 弥¹

1. 国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080; 2. 国防科工局, 北京, 100048

摘要: 分析了典型核燃料循环设施始发事件的特点。依据始发事件的数学模型和核燃料循环系统中硬件相关始发事件的失效机理, 给出了核燃料循环设施始发事件定量分析的途径, 以具有相同工艺过程特征的假想模型为例, 对由多重因素导致的始发事件进行了定量分析, 并给出了静电火花、管塞泄漏、腐蚀导致泄漏、溶剂探测器失效等几类始发事件频率。

关键词: 核燃料循环设施; 始发事件; 定量分析

中图分类号: TL934 **文献标志码:** A

Quantitative Analysis on Typical Initial Events of Nuclear Fuel Cycle Facilities

Li Feng¹, Wang Xiaorong¹, Qin Legang¹, Zhang Huanchao², Zhao Mi¹

1. Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100080, China;

2. State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100048, China

Abstract: The characteristics of initial events (IEs) for nuclear fuel cycle facilities were analyzed. According to the model of IEs and failure mechanism of IEs for hardware of nuclear fuel cycle facilities, the method for nuclear fuel cycle IEs quantification was developed. For IEs caused by complex factors, a fictitious model with the same process characteristics was analyzed as an example. The frequency of some IEs, such as static spark, pipe plugs leakage, leakage caused by corrosion, solvent detector failure, were calculated through PSA analysis software.

Key words: Nuclear fuel cycle facilities, Initial event, Quantitative analysis

0 引言

概率安全分析 (PSA) 已经广泛应用于核电厂。然而, PSA 在核电厂以外的核燃料循环设施中应用较少, 主要是围绕核临界、火灾、爆炸等开展故障树分析, 尚没有系统地开展 PSA^[1-2]。随着公众对核安全的关注程度越来越高, 系统地开展核燃料循环设施 PSA 是一个趋势。

在反应堆 PSA 当中, 始发事件定义为发生在反应堆的一种扰动, 它可能潜在地导致反应堆堆芯损害。相应地, 在核燃料循环设施 PSA 当中, 不妨将始发事件定义为发生在核燃料循环设施中的一种扰动, 它可能潜在地导致核临界事故或大规模放射性物质泄漏。

始发事件是 PSA 的基础, 对始发事件进行定量评价是 PSA 获得量化风险结果的必备条件。典型始发事件 (或设备失效) 的发生频率是进行 PSA 的基础。本文通过建立数学模型及初步分析计算给出了几类始发事件 (或设备失效) 发生频率, 为下一步对核燃料循环设施进行 PSA 提供数据基础。

1 始发事件的数学模型

始发事件是引发事故序列的初始因素, 通常用年发生频率来描述这些事件, 设施每年可能会发生数十次这类事件, 当然, 也有可能 10000 年中只发生一次。

通常假设始发事件对于时间具有随机性,且假设其为常数值。但是,核电厂的运行经验表明,这个数值并不是常数,早期数据要明显高一些。

一般认为可以使用泊松模型来表述,泊松分布常用于描述独立重复试验中,如某稀有事件在某段时间内发生的次数、某地区一年内发生暴雨的次数、一段时间间隔内某地区发生火灾的次数等。

对于由设备失效导致的始发事件或由复杂因素导致的始发事件,也可以使用设备的可靠性参数和故障树来获取始发事件的年发生频率。

1.1 设备失效导致的始发事件

核燃料循环设施中的一些始发事件是设备故障导致的,这些设备的可靠性一般使用失效率 λ 来描述。要想确定这类始发事件的年发生频率,就需要确定这些设备的寿命(或平均寿命)、单次任务时间以及每年总的任务次数。

在可靠性工程中,产品寿命一般指产品从开始使用到发生故障时总的工作时间,通常用平均寿命来表示。对于不可修产品,平均寿命就是平均故障前工作时间(T_{MTTF} , h);对于可修产品来说,平均寿命即平均故障间隔时间(T_{MTBF} , h)。对于这2种情况,有下列等式成立:

$$T_{MTTF} = T_{MTBF} = \frac{1}{\lambda}$$

根据始发事件频率的含义,可使用如下公式求得由设备导致的始发事件的年发生频率:

(1) 可维修产品:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{T_{MTBF}} = \sum_{i=1}^n T_i \times \lambda$$

式中, F 为始发事件频率; T_i 为第*i*次任务时间; n 为每年总的任务次数。

(2) 不可修产品:

$$F = \frac{8760}{T_{MTTF}} = \lambda \times 8760$$

本文取1a为365d,1d为24h,则1a相当于8760h。

分析时认为,如果设备是不可维修的,则认为故障之后,马上更换新设备;如果设备是可维修的,则认为故障之后,执行新的任务之前,必须进行维修,将设备恢复到正常状态。

1.2 由复杂因素导致的始发事件

除设备自身的因素以外,导致始发事件的因素还有很多,如人为失误、自然灾害、支持系统

失效等,需要采用相应的方法进行分析;故障树分析是最为实用的一种方法。可以将每个始发事件单独进行处理,也可以将几个事件综合起来之后,作为一个始发事件进行量化评价。当然,在分析中要获取的是始发事件(可能是多个事件的综合)发生频率,而不是发生概率。

当使用故障树获取始发事件频率时,故障树中可能会包含频率模型,一般频率模型只用于描述始发事件。但是对于这种情况,在求解过程中往往要给予特殊处理,通常的做法是仅仅考虑只包含一个频率模型基本事件的最小割集,而忽略包含2个以上频率模型基本事件的最小割集。

在求解*T*时刻始发事件频率*F*(*T*)过程中,用到的计算公式如下:

(1) 可维修部件、不可维修部件、定期试验部件:

$$F(T) = \lambda[1 - Q(T)]$$

式中, $Q(T)$ 为*T*时刻设备或系统的不可用度。

(2) 需求概率设备,固定任务时间的部件:

$$F(T) = 0$$

(3) 对于频率模型的基本事件:

$$F(T) = f$$

式中, f 为设备或系统的失效频率。

(4) 逻辑门对频率的运算:

或门运算:

$$F_{\text{NOD}}(T) = \sum_{i=1}^k F_i(T) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k [1 - Q_j(T)]$$

与门运算:

$$F_{\text{NOD}}(T) = \sum_{i=1}^k F_i(T) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k Q_j(T)$$

式中, $F_{\text{NOD}}(T)$ 为或门或与门的运算结果; $F_i(T)$ 为逻辑门下频率模型基本事件的频率; $Q_j(T)$ 为*T*时刻第*j*个设备或系统的不可用度。

(5) 最小割集频率求解:包含频率的最小割集的运算同与门运算相同。

(6) 顶事件频率的求解:

$$F_{\text{TOP}}(T) = \sum_{i=1}^k F_{\text{MCS},i}(T) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k [1 - Q_{\text{MCS},j}(T)]$$

式中, $F_{\text{TOP}}(T)$ 为顶事件在*T*时刻的发生频率; $F_{\text{MCS},j}(T)$ 为第*j*个最小割集在*T*时刻的发生频率;

$Q_{MCS,j}(T)$ 为第 j 个最小割集在 T 时刻的不可用度。

现有 PSA 分析软件 (如 RiskSpectrum) 都可以自动完成上述计算功能, 快速求解包含频率模型基本事件的故障树; 当然, 这种情况下, 所得结果为顶事件的发生频率, 而不再是发生概率。值得注意的是对于频率的计算当中, 往往不考虑二阶以上因式。

2 始发事件的失效机理

(1) 由腐蚀产生的失效: 对于化工系统中的设备, 经常要面对腐蚀性很强的气体或液体, 这些腐蚀性的气体或液体会导致设备的失效, 如高放废液贮存罐由于腐蚀而泄漏, 这种情况已经被实际经验所证明。

(2) 焊接缺陷导致的泄漏: 这种情况主要出现在需要进行焊接的设备上, 如管道、压力容器等, 焊接的质量受诸多因素影响, 但是其失效机理非常类似。对于这种缺陷, 如果过于严重则可能导致大的破口, 甚至是断裂。

(3) 密封失效导致的泄漏: 对于运行在高压环境下的设备, 如泵、阀门等, 都有泄漏的可能。原因主要是密封出现问题, 其更深层次的原因可能是老化或疲劳损伤。

(4) 由应力导致的失效: 运行在高温、高压下的设备, 往往会受到热冲击或机械力的冲击, 如高温高压回路中阀门的阀瓣可能会出现卡死现象。

(5) 由堵塞导致的失效: 本身具有网状或细孔结构的设备, 在运行过程中可能会发生堵塞现象, 如果运行环境近似, 则其失效则可以看作是同一类型的, 这类设备有滤网过滤器等。

(6) 由超温、超压导致的失效: 核燃料循环设施中很多设备运行在高温高压的环境当中, 有相当数量的设备对温度压力比较敏感, 如果运行环境发生重大变化, 即超温或超压, 则其可能失效, 最常见的是仪表设备或容器。

3 始发事件定量化的方法

依据始发事件发生机理和现有可靠性数据的可选性, 可以将其分为 3 种不同的赋值类型。

(1) 可直接量化的始发事件: 通用设备失效构成的始发事件 (如阀门、泵和吊车等)。这些设备通常都是标准化的设备, 也许可靠性会受

到运行环境的影响, 但是只要在规定的运行环境中运行, 其可靠性变化不大。

(2) 可有条件地进行量化的始发事件: 由特殊设备失效构成的始发事件, 虽然数据库没有对应的可靠性数据, 但是有失效机理相同的设备失效数据可供选择。

(3) 需要通过开展进一步分析来量化的始发事件。

对于一些由多重因素导致的始发事件, 如丧失设备冷却水、火灾和全厂断电等事件, 需要通过开展更加详细的分析才能够获得始发事件的发生频率。

4 故障树分析 (FTA) 求解始发事件实例

根据核燃料回收工厂的工艺特点, 选择某具有相同工艺过程特征的假想模型作为分析对象, 对第 1 级萃取循环中溶剂失火事故进行了分析。

4.1 工艺过程描述

(1) 第 1 级萃取循环的第 1 部分: 溶液通过控制器输送到反应器, 使用有机相萃取溶液中铀和钚的硝酸盐, 而多数的裂变产物则仍在水溶液中。随着第 1 级循环这项工作连续的进行, 该循环中使用的溶剂是用 n -十二烷稀释的浓度为 30% 的磷酸三丁酯 (TBP)。该部分包含 3 个部分, 稀释冲洗部分、萃取部分和净化部分, 每部分都与 1 个混合沉降器。

(2) 第 1 级萃取循环的第 2 部分: 来自第 1 部分的溶液中的铀和钚被提取到水溶液中。提取工作共分 2 个阶段完成: 第 1 个阶段分 4 步用于提取钚; 第 2 阶段使用 8 步用于提取铀。这 2 个阶段都包含在同 1 个混合沉降器中。

(3) 第 1 级萃取循环的第 3 部分: 将第 2 部分中的溶剂存贮起来, 并配给到第 1 级萃取中的溶剂再生系统。溶剂再生系统也在不间断地运行, 使用 1 个 4 级混合沉淀容器对溶剂进行 4 次清洗, 经过滤之后, 新的溶剂供给第 1 级萃取循环的第 1 步。

4.2 安全特征

溶剂提取循环使用 n -十二烷稀释的浓度为 30% 的 TBP 作为不溶溶剂, 用于配合多个化学控制。该有机相的闪点为 70 ; 当容器倾覆或溶剂泄漏时, 有发生溶剂火灾的可能。使用温度控制将运行温度保持在 70 以下, 通过检测流量来防

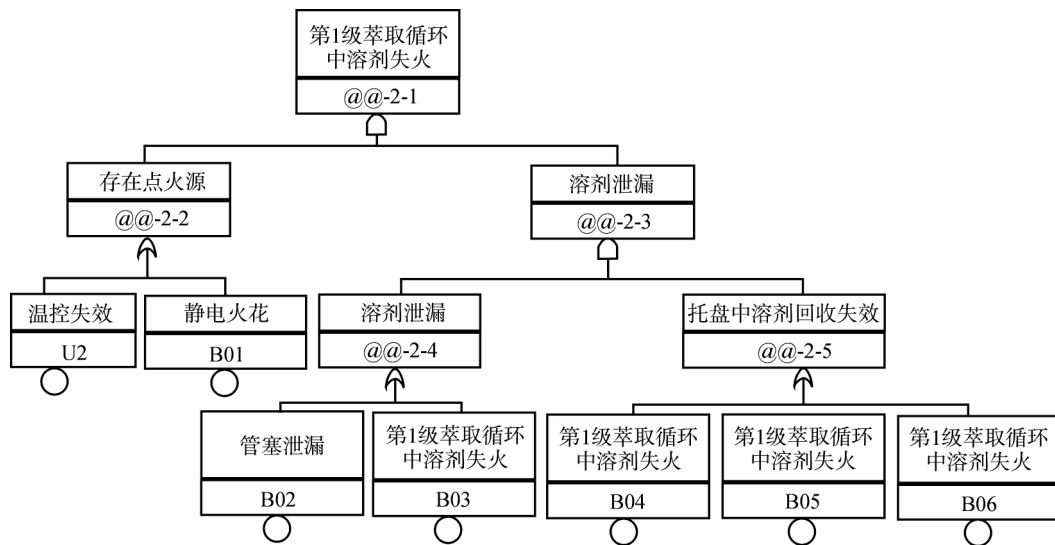


图1 核燃料回收工艺中火灾频率分析

Fig. 1 Fire Frequency Analysis for Nuclear Fuel Recycle Process

止溢出，保持该过程中设备中溶剂流入流出的稳定。

4.3 故障树建模

溶剂火灾可能由下列因素导致：电火花或温度控制失效引起；如果溢出回收系统失效，溢流或泄漏也会导致溶剂火灾。

据此演绎出的溶剂失火事故的故障树如图1所示；各个始发事件频率的取值见表1。

表1 核燃料回收工艺中失火事故的始发事件频率

Table 1 IEs for Fire Accident of Nuclear Fuel Recycle Process

序号	始发事件名称	频率/a ⁻¹
1	静电火花	8.55×10^{-4}
2	管塞泄漏	1.28×10^{-2}
3	腐蚀导致泄漏	1.28×10^{-2}
4	溶剂探测器失效	2.56×10^{-3}
5	溶剂传输系统失效	1.28×10^{-2}
6	操作员操作失误	4.27×10^{-3}
7	温控失效	8.55×10^{-4}

5 结论

根据相同类型现有设备可靠性数据，对核燃料回收工艺涉及的主要工艺设备失效概率进行了赋值。依据赋值结果对几类始发事件频率，使用PSA软件（如RiskSpectrum）进行了计算与分析，得出了几类始发事件年发生频率。

核燃料循环设施覆盖的范围广，非标设备多，操作工艺复杂，对其始发事件进行定量PSA是一项难度较大的工作。受条件所限，本文仅提供了几类始发事件频率，为下一步对核燃料循环设施进行PSA提供数据基础。

参考文献：

- [1] IAEA. Defining initiating events for purposes of probabilistic safety assessment[R]. IAEA-TECDOC-719, September 1993.
- [2] IAEA. Safety of and regulations for nuclear fuel cycle facilities[R]. IAEA-TECDOC-1221, May 2001, VIENNA, P5-6, P13-16.

（责任编辑：马蓉）