

核电厂设备冷却水系统可靠性分析

文丽娟

(海南核电有限公司, 海南 昌江 572733)

摘要: 故障树分析法是目前核电厂概率安全评价中最常用的方法, 具有清晰直观、逻辑性强的特点, 包括故障树定性分析和故障树定量分析。本文通过运用故障树分析方法, 定量地评价了海南昌江核电厂 1、2 号机组设备冷却水系统的可靠性及系统失效的支配性序列。分析结果表明, 导致设备冷却水系统失效的主要因素有: 贝类捕集器维修不可用、旋转滤网堵塞、板式热交换器泄漏。

关键词: 设备冷却水系统; 故障树; 可靠性分析

中图分类号: TM623

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2023.06.043

在进行故障树定性分析中, 可用上行法、下行法或故障树分析程序求出故障树的所有最小割集, 即导致顶事件发生的各种底事件的组合。若有足够数据, 能估计出故障树中各底事件发生的概率, 则可进行故障树定量分析, 求出顶事件发生概率和支配性最小割集。本文根据设备冷却水系统 (RRI) 在事件树分析中响应的成功准则, 从失效的角度定义故障树顶事件, 通过建立故障树模型对海南昌江核电厂 1、2 号机组设备冷却水系统 (RRI) 进行量化分析^[1]。

1 RRI 系统简介

1.1 RRI 系统功能

设备冷却水系统 (RRI) 的主要功能是在核电厂正常运行和事故发生情况下, 冷却各种核岛辅助系统的热交换器; 将热负荷通过安全厂用水系统 (SEC 系统) 传至最终热阱——海水; 在核岛热交换器和海水之间形成屏障, 防止核岛放射性物质不可控地释放到海水中, 同时避免核岛设备由于和海水直接接触而产生腐蚀或污垢等问题^[2]。

1.2 RRI 系统的组成

RRI 系统回路是在核辅助系统设备与海水之间的一个闭合回路, 包括两个独立的安全列和一个公用环路。两列分别向各自安全列上的各核岛重要热交换器提供冷却水, 其他在公共列的核岛热交换器可由两列中任何一列提供冷却水。两个独立的安全列分别由电源 A 列和电源 B 列供电, 并由应急柴油发电机作为备用电源。每个列在事故发生情况下都能发挥 100% 的应急冷却能力。RRI 系统作为闭环式的冷却系统, 与其他系统主要的接口是热交换器, 水由 RRI 泵送至 RRI/SEC 板式热交换器冷却后, 进入各个分支的冷却管道。通过用户的热交换器执行冷却功能后, 热水又重新回到 RRI 泵入口^[3]。图 1 为 RRI 系统的简化流程图。

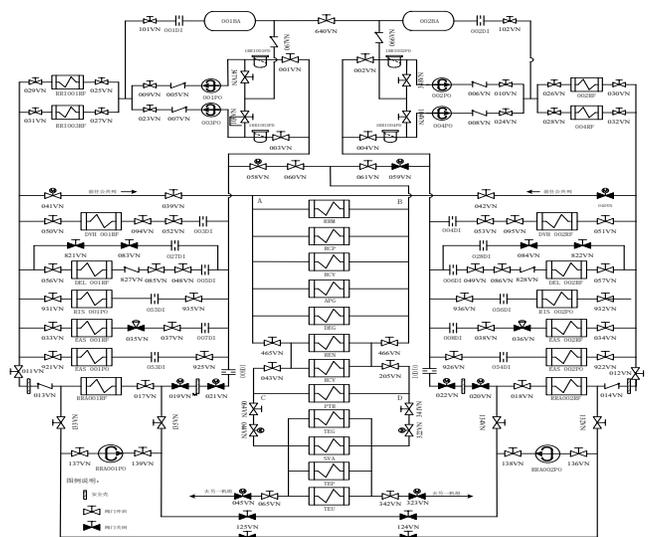


图 1 RRI 系统流程图

2 故障树建模

2.1 顶事件的确定

对于 RRI 系统, 本文对两类故障树顶事件进行了分析:

顶事件 1 失效准则: POSA/B/C 下 A 列的两台 RRI 泵都失效或一台热交换器失效, 或相关连接管线失效, 或 SEC 系统对 RRI A 列热交换器的冷却失效。故障树如图 2 所示。

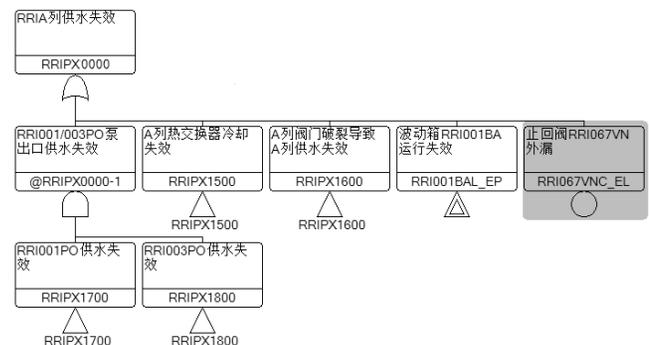


图 2 RRI A 类供水失效故障树

顶事件 2 失效准则：POSA/B/C 下 B 列的两台 RRI 泵都失效或一台热交换器失效，或相关连接管线失效，或 SEC 系统对 RRI B 列热交换器的冷却失效，或 A 列向 B 列切换失败。故障树如图 3 所示。

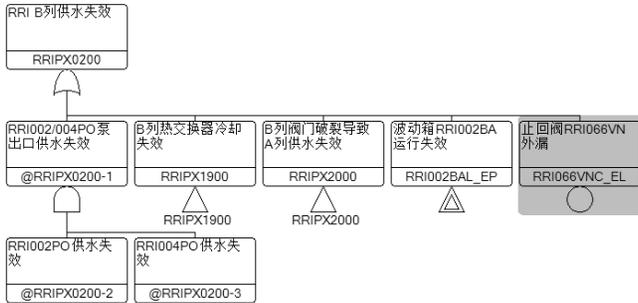


图 3 RRI B 类供水失效故障树

2.2 建模假设与简化

为了简化故障树和减小故障树规模，在 RRI 系统故障树分析过程中，做了以下建模假设和简化：

(1) RRI 系统在正常功率运行情况下是一列一台泵运行，在低功率停堆工况时将根据当时的系统配置继续运行。本文假设 RRI 系统的初始状态为：A 列 001PO 泵运行，由其向包括公用列以及两机组共用列在内的 RRI 冷却水用户供水。在 001PO 失效后，按系统设计首先启动同列的 003PO，若 003PO 失效则顺序启动 B 列的 004PO 及 002PO 两台泵。

(2) RRI 是常年运行系统，正常运行时只需要一个系列一台泵运行即可满足要求。实际运行时，四台泵交替使用，因此各条供水主管线上的常开手动阀一旦出现忘开的情况就能够及时发现，故不考虑该系统供水回路常开手动阀的忘开失效模式。

(3) 公用回路和安全列之间有电动隔离阀，可以对公用回路进行隔离，公用回路设备破裂对于供水回路的影响较小，因此本系统分析不予考虑。

2.3 数据分析

数据分析的主要目的是提供系统故障树定量分析所需要的基本事件数据，包括设备可靠性参数、共因失效参数、试验和维修不可用度及人误失效概率。

本文的分析中对设备类的选取和确定参考了国家核安全局发布的《中国核电厂设备可靠性数据报告》(2022 版)，并结合国内普遍使用的通用数据源，最终确定本系统的设备类，该设备类及失效模式清单与海南核电可靠性数据库系统中的基本一致，相关数据也参考了《中国核电厂设备可靠性数据报告》(2022 版)^[4]。

2.4 人员可靠性分析

采用 SPAR-H 方法分析确定了本系统在事故发生后操纵员未成功响应始发事件后的人员失误。本系统与人员失误有关的事件为“自动启动失败，手动启动泵”，其中取值为 4.00E-04，不确定性参数为 0.499。

2.5 共因失效分析

共因失效是由于某一个原因和一些不能显示表达的耦合机理两个因素同时出现而导致的结果。本文采用共因事件模型的多希腊字母 (MGL) 模型进行分析^[5]，通过分析 RRI 系统的设备信息，得到共因事件组。RRI 系统分析共因事件信息如表 1 所示。

表 1 RRI 系统共因事件信息表

共因事件组	包含的基本事件	共因事件描述
C2RRIBAL1_EP	RRI001BAL_EP RRI002BAL_EP	RRI 波动箱共因失效
C4RRIFDW1_GP	RRI001FDW_GP RRI002FDW_GP RRI003FDW_GP RRI004FDW_GP	RRI 泵入口过滤器共因堵塞
C4RRIPLM1_FS	KCS123AR74PLM_FS KCS124AR74PLM_FS KCS124AR84PLM_FS KCS123AR73PLM_FS	RRI002/003/004PO 泵 PLM 共因失效
C4RRIPOM1_FR	RRI001POM_FR RRI002POM_FR RRI003POM_FR RRI004POM_FR	RRI 泵共因运行失效
C4RRIPOM1_FS	RRI001POM_FS RRI002POM_FS RRI003POM_FS RRI004POM_FS	RRI 泵共因需求失效
C4RRIRFP1_GP	RRI001RFP_GP RRI002RFP_GP RRI003RFP_GP RRI004RFP_GP	RRI 热交换器 001/002/003/004RF 共因堵塞
C4RRIRFP1_IL	RRI001RFP_IL RRI002RFP_IL RRI003RFP_IL RRI004RFP_IL	RRI 热交换器 001/002/003/004RF 内漏
C4RRIVNC1_FO	RRI005VNC_FO RRI006VNC_FO RRI007VNC_FO RRI008VNC_FO	RRI 泵下游止回阀共因拒开

2.6 试验与维修不可用

本文对部件的试验、部件的维修的不可用度的分析采用通道不可用的方法，在通道的主要部件上（例如电动泵、汽动泵等）对事故前由于定期试验、纠正性维修以及预防性维修等导致的设备不可用的情况进行了分析。本文使用的试验维修数据来源于海南核电 1、2 号机组的运行数据，表 2 为试验和维修不可用表。

表 2 试验和维修不可用表

基本事件编码	描述	不可用度
RRI002POM_C_UV	002PO随机维修不可用	2.61E-03
RRI002RFP_C_UV	002RF随机维修不可用	1.82E-04
RRI003POM_C_UV	设冷水泵RRI003PO随机维修不可用	2.61E-03
RRI004POM_C_UV	设冷水泵RRI004PO随机维修不可用	2.61E-03
RRI004RFP_C_UV	RRI004RF随机维修不可用	1.82E-04

3 定量分析结论

量化包括故障树的量化、事件序列的量化。事件序列量化的目的是估算始发事件发生后导致堆芯损坏的事件序列发生的频率。事件序列量化侧重于事件树中导致堆芯损坏的序列，产生定性的最小割集（MCS），并计算其发生频率以及确定影响堆芯损坏频率的各种贡献因素的相对重要性。事故工况下，在对顶事件进行定量分析时（24小时内），根据事故序列的发展设置了相应的边界条件。分析得到的主要的定量结果和支配性最小割集如表 3 和表 4 所示。

表 3 顶事件 1 分析结果

序号	发生概率	百分比 (%)	最小割集	描述
1	2.07E-04	38.09	SEC001FIW_C_UV SEC003FIW_C_UV	贝类捕集器001FI随机维修不可用 贝类捕集器003FI随机维修不可用
2	1.09E-04	20.00	CFI031TF_GP	A列旋转滤网堵塞
3	3.48E-05	06.39	RRI003RFP_EL	热交换器RRI003RF外漏
4	3.48E-05	06.39	RRI001RFP_EL	热交换器RRI001RF外漏
5	2.71E-05	04.98	RRI001RFP_IL	板式热交换器001RF内漏
6	2.71E-05	04.98	RRI003RFP_IL	板式热交换器003RF内漏

表 4 顶事件 2 分析结果

序号	发生概率	百分比 (%)	最小割集	描述
1	2.07E-04	21.85	SEC002FIW_C_UV SEC004FIW_C_UV	贝类捕集器002FI随机维修不可用 贝类捕集器004FI随机维修不可用
2	1.82E-04	19.18	RRI002RFP_C_UV	002RF随机维修不可用
3	1.82E-04	19.18	RRI004RFP_C_UV	004RF随机维修不可用
4	1.09E-04	11.47	CFI032TF_GP	B列旋转滤网堵塞
5	3.48E-05	03.67	RRI002RFP_EL	热交换器RRI002RF外漏
6	3.48E-05	03.67	RRI004RFP_EL	热交换器RRI004RF外漏

顶事件 1 发生概率是 5.44E-04，其中贡献占比较大的最小割集有：

(1) 贝类捕集器 001FI 和 003FI 随机维修不可用二阶共因，占比为 38.09%。

(2) A 列旋转滤网堵塞，占比为 20.00%。

顶事件 2 发生概率为 9.49E-04，其中贡献占比较大的最小割集有：

(1) 贝类捕集器 002FI 和 004FI 随机维修不可用二阶共因，占比为 21.85%。

(2) 002RF 随机维修不可用，占比为 19.18%。

(3) 004RF 随机维修不可用，占比为 19.18%。

(4) B 列旋转滤网堵塞，占比为 11.47%。

4 结语

定量分析结果表明导致 RRI 系统失效的主要因素有贝类捕集器维修不可用、旋转滤网堵塞、板式热交换器泄漏。建议在电站日常巡检过程特别注意保持 RRI 系统旋转滤网的通畅，避免旋转滤网发生堵塞；保证板式热交换器的密封性，将贝类捕集器的维修安排在不使用 RRI 系统的情况下，以此来保证该系统的有效性和可靠性。

参考文献：

[1] 杨铭. 核电厂辅助给水系统可靠性分析 [J]. 科技信息, 2021, (01): 89-90.

[2] 李旬青. 核电厂概率安全评价方法及应用研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.

[3] 海南昌江核电厂. 海南昌江核电厂 1、2 号机组设备冷却水系统手册 [C]. CJX17ASG002B30745GN.2010.

[4] 国家核安全局. 中国核电厂设备可靠性数据报告 [R]. 国家核安全局, 2022.

[5] 海南昌江核电厂. 海南昌江核电厂 1、2 号机组低功率和停堆工况一级概率安全分析报告 [R]. 海南昌江核电厂, 2022.

作者简介：文丽娟（1986-），女，四川绵阳人，硕士研究生，工程师，主要从事核电厂安全分析研究。