

# 核电厂 PSA 中事故序列后果分析方法研究

王海涛<sup>1</sup>, 吴宜灿<sup>1</sup>, 丁厚本<sup>2</sup>, 刘萍<sup>1</sup>, 胡丽琴<sup>1</sup>, 张士杰<sup>1</sup>, 李亚洲<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 合肥东方辐射技术开发有限公司, 安徽 合肥 230088)

**摘要:**在核电站 PSA 事故序列后果求解过程中,为减小事件树转换成故障树的规模,需对事故序列的布尔表达式进行简化。首先,引入“三步法”,即在事件树转换成后果故障树前,先形成以始发事件和功能事件为节点的故障树;然后,利用 FAUNET 规则对该故障树进行化简;最后,用始发事件和功能事件的实际输入替代这些节点。在 FAUNET 简化规则基础上,增加 1 条新的吸收规则用于简化事故序列后果故障树的某些特殊结构。在 FDS 团队开发的大型可靠性/概率安全分析软件 RiskA 平台上对上述方法进行了实现,并经大量实例测试证明了这种处理方法的有效性。

**关键词:**PSA; 事件树; 后果分析; FAUNET

中图分类号:O212.8

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)08-0724-05

## Algorithms of Consequence Analysis for PSA in Nuclear Power Plant

WANG Hai-tao<sup>1</sup>, WU Yi-can<sup>1</sup>, DING Hou-ben<sup>2</sup>, LIU Ping<sup>1</sup>,  
HU Li-qin<sup>1</sup>, ZHANG Shi-jie<sup>1</sup>, LI Ya-zhou<sup>1</sup>

(1. *Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*  
2. *Hefei Eastra Radiation Technological Development Co., Ltd., Hefei 230088, China*)

**Abstract:** In the process of consequence analysis for PSA, simplification on fault tree converted from event trees was done in order to reduce the scale of fault trees. A three-step algorithm was presented based on the theory of consequence analysis. In addition, considering the inconvenience of FAUNET for some specific consequence fault tree structure, a new absorption algorithm was introduced. The algorithms were implemented in the home-developed PSA code RiskA. The comparative analysis of some examples shows that the methods are effective.

**Key words:** PSA; event tree; consequence analysis; FAUNET

事件树分析法(ETA)是一种逻辑的归纳法,起源于决策树分析(DTA),它在给定一个始发事件的情况下,分析此始发事件可能导致

的各种事件序列的结果,从而可定性定量地评价系统的特性,并帮助分析人员做出正确的决策。ETA 通常用于安全系统的事故分析和

系统的可靠性分析<sup>[1]</sup>,并已成为核电厂概率安全评价(PSA)中的重要工具。

事件树事故序列后果指始发事件和功能事件的发生或不发生所构成的不同结果<sup>[2]</sup>。有文献对事件树事故序列后果求解方法做了探讨,其一般思想在于形成后果故障树前,对事故序列后果的布尔表达式进行简化,方法主要采用 FAUNET 算法<sup>[3]</sup>。但在实际研究过程中发现,FAUNET 规则并不能简化事故序列后果故障树的某些结构,而这些结构在故障树中大量存在。

本工作在 FDS 团队开发的大型可靠性/概率安全分析软件 RiskA<sup>[4-10]</sup> 平台上对事件树序列后果处理方法进行实现,以测试证明这种处理方法的有效性。

### 1 事故序列后果计算

#### 1.1 一般原理

假设当始发事件 IE 发生后,有功能事件 A、B、C 3 个系统相继响应,各自对应的上分支代表成功态,下分支代表失效态。这样形成多条事故序列(图 1)。对于每一事故序列,均有 1 种后果对应,假设 CD 代表危险状态,OK 代表安全状态。在图 1 中,括号内代表的是对应功能事件的输入,如功能事件 A 的输入为故障树 FT1,功能事件 A、B 和 C 在实际应用中对应的输入一般为故障树或基本事件。

当需计算后果为 CD 的发生频率时,首先构造后果为 CD 的故障树,然后通过求解该故障树得到 CD 的发生频率。具体步骤如下。

1) 为后果 CD 的每一序列建造序列故障树(这里考虑的是序列失效故障树,不考虑成功处理),以图 1 中序列 IEABC 为例,它对应的故障树示于图 2。

2) 将所有后果为 CD 的序列故障树形成 1 棵以或门为顶门的大故障树,对于本例形成的故障树示于图 3。

其中,SEQ2、SEQ4、SEQ6、SEQ7、SEQ8 分别代表各自对应的故障树,以 SEQ8 为例,它的故障树如图 2 所示,其它类同。

3) 利用图 3 形成的故障树计算事件树后果 CD 的发生频率。

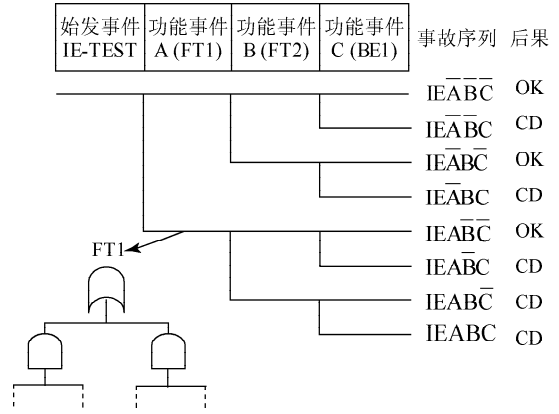


图 1 事故序列后果计算示意图

Fig. 1 Scheme of consequence for event tree

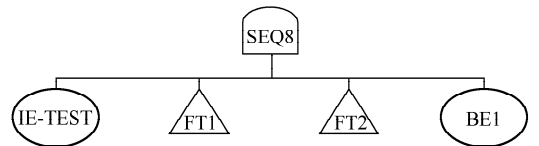


图 2 序列 IEABC 对应的故障树

Fig. 2 Fault tree for sequence IEABC

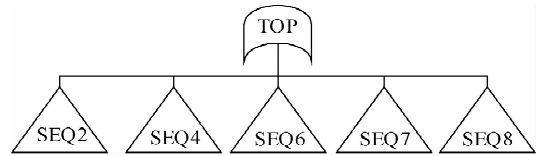


图 3 事件树后果 CD 对应的故障树

Fig. 3 Fault tree for consequence CD

#### 1.2 “三步法”概述

图 3 中的后果故障树规模取决于每一序列对应的故障树规模,如果这些序列对应的故障树规模很大,最终形成的后果故障树规模也将非常庞大。这是因为在后果故障树形成过程中会产生很多重复的始发事件和功能事件,如果不进行必要的简化,那么,最终形成的故障树规模将会很大。尤其对于一些大型系统,如核电厂,如果要计算整个电厂的堆芯损伤频率(CDF),那么,在形成计算 CDF 的故障树之前,必须进行简化处理。

一般在事件树转换成故障树求解前,对事故序列的布尔表达式进行简化。总结这些方法的思想,即“三步法”。

1) 建立以始发事件和功能事件为节点的故障树,称之为“原始故障树”,简称 Init-FT。

2) 利用 FAUNET 的一般简化规则,对 Init-FT 进行简化,得到新的故障树,称之为“中间结果故障树”,简称 Mid-FT。FAUNET 简化规则如下。

(1) 删除规则:相同底事件处在不同层同类门中,可将下层的共同底事件删去(图 4)。

(2) 收缩规则:若相邻两层门类型相同,可合并;若全部相同,则可合并为 1 个门;在同一层中,相同类型的门或底事件也可合并为 1 个(图 5)。

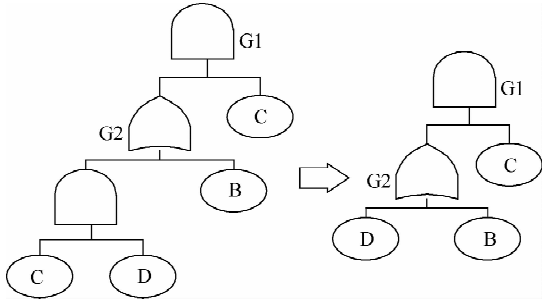


图 4 删除规则

Fig. 4 Cut rule

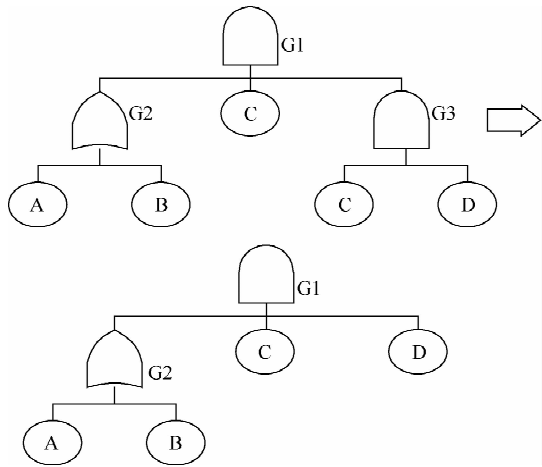


图 5 收缩规则

Fig. 5 Contraction rule

(3) 提取规则:相同底事件处在同层的各类逻辑中,可将该事件提取出来(图 6)。

在实际分析事故序列故障树的过程中发现,故障树中经常会存在图 7 左边所示结构。

针对该结构的故障树,无法用 FAUNET 规则进行简化,但在实际中,这种故障树结构又大量存在,因而增加 1 条用于解决上述结构的规

则,称之为吸收规则。

(4) 吸收规则:吸收规则(图 7)为在同一层门中使用布尔代数的吸收法则,即:

$$(A + B)(A + B + C) = A + B$$

$$AB + ABC = AB$$

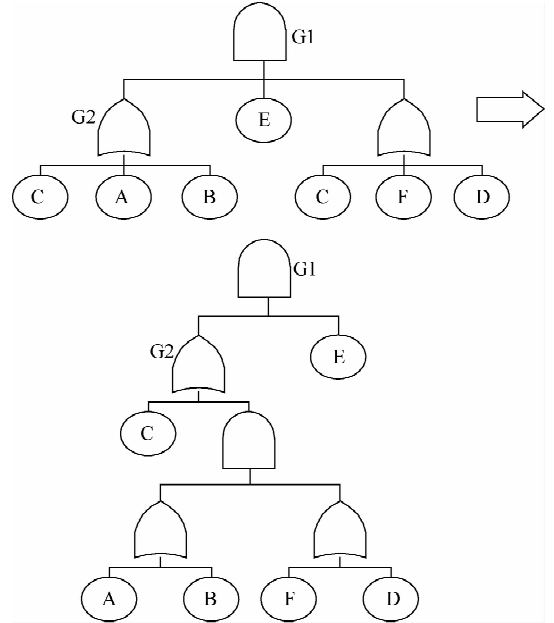


图 6 提取规则

Fig. 6 Extraction rule

3) 将始发事件和功能事件对应的输入带入到 Mid-FT 中,替换对应的节点,得到替换后的故障树,称之为“最终处理故障树”,简称 Fin-FT。

## 2 应用分析

在 FDS 团队开发的大型可靠性概率安全分析软件 RiskA 平台上对事件树序列后果处理方法进行实现。

利用“三步法”对上述例题进行求解,按该方法的步骤,首先构造如图 8 所示的 Init-FT。然后用 FAUNET 规则对故障树 Init-FT 进行简化,得到如图 9 所示的故障树 Mid-FT。最后将图 9 中节点 IE、C、A、B 用其实际的输入代替,可得到如图 10 所示的故障树 Fin-FT。

对比图 8、10 可看出,简化后的故障树规模明显减小。

利用上述方法对大亚湾核电站的 PSA 参考模型进行了求解,并与一般方法(对 Init-FT

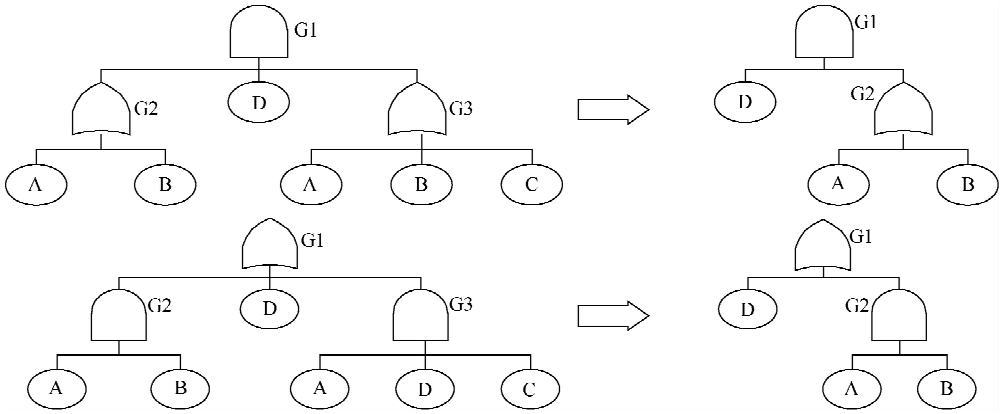


图 7 吸收规则  
Fig. 7 Absorption rule

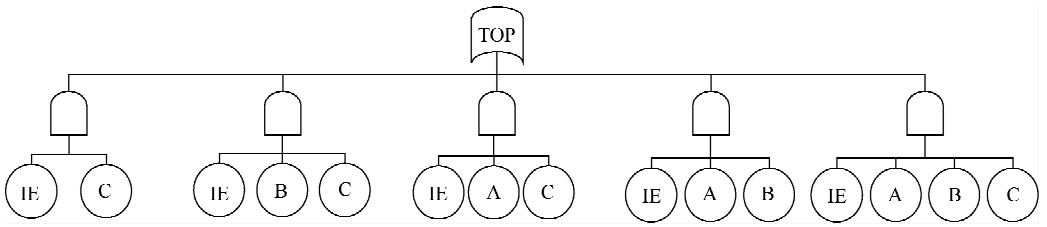


图 8 图 1 中后果 CD 对应的故障树 Init-FT  
Fig. 8 Init-FT for consequence CD of Fig. 1

不进行简化,而是直接使用类似于图 8 的故障树进行计算)对比,结果列于表 1。

从表 1 可看出,采用“三步法”提高了系统分析的效率,不仅可减小事件树计算所占内存,且可大幅提高分析计算速度。

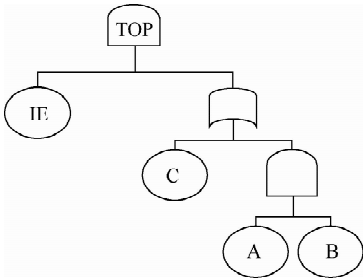


图 9 简化后的故障树 Mid-FT  
Fig. 9 Mid-FT after simplifying

表 1 计算时间测试对比结果

Table 1 Test results by adopting three-step way

事件树名称	三步法 t/s	一般方法 t/s	CDF/堆年
C 工况丧失 厂外电源	5.27	68.85	$7.170 \times 10^{-11}$
D 工况丧失 厂外电源	0.03	0.19	$5.301 \times 10^{-12}$
主蒸汽隔离阀 上游小破口	6.53	186.02	$1.156 \times 10^{-8}$
A 工况主给水 管道小破口	6.11	35.97	$1.718 \times 10^{-6}$
运行列 安全段大漏	6.20	69.87	$9.410 \times 10^{-8}$

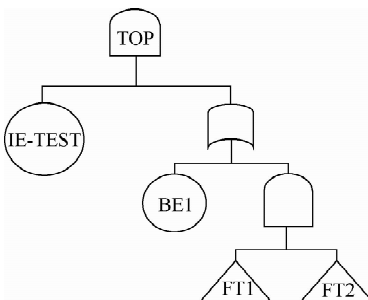


图 10 最终的故障树 Fin-FT  
Fig. 10 Fin-FT for consequence CD

### 3 结论

本文首先对事件树事故序列后果求解的一般原理进行了概括,即“三步法”,并利用该方法对实际问题进行了求解,针对 FAUNET 规则并不能简化事故序列后果故障树的某些特殊结构,在 FAUNET 规则基础上,增加了 1 条用于简化这些特殊结构故障树的规则。通过 RiskA 校验,较好地解决了在形成事件树的后果故障树时的规模问题,大幅加快了事件树后果的计算速度。

本工作得到了广东大亚湾核电厂吴继伟、中国广东核工程设计有限公司反应堆与安全分析研究所陈海燕、上海核工程设计研究院李肇华及秦山核电厂宋明海等的悉心帮助,在此表示衷心感谢。

### 参考文献:

[1] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京:清华大学出版社, 1990:70-75.

[2] 曾声奎,赵廷弟,张建国,等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001:146-157.

[3] PLATZ O, OLSEN J V. FAUNET: A program package for evaluation of fault trees and networks [J]. Research Establishment Ris Report, 1976, 348(4): 97-103.

[4] 聂森,吴宜灿,邓小玖,等. RiskA 和 Risk Spectrum 故障树计算的比较分析[J]. 核科学与工程, 2006,26(4):358-362.  
NIE Miao, WU Yican, DENG Xiaojie, et al. Comparative analysis between RiskA and Risk spectrum in fault tree calculation [J]. Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(4): 358-362 (in Chinese).

[5] 李亚洲,吴宜灿,刘萍,等. PSA 中不确定性分析实现方法研究[J]. 核科学与工程, 2006,26(4): 353-357.  
LI Yazhou, WU Yican, LIU Ping, et al. A low complexity method for the distributions' simulation in uncertainty analysis [J]. Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(4): 353-357(in Chi-

nese).

[6] 张士杰,吴宜灿,刘萍,等. 基于网络的核电站 PSA 数据库管理系统设计研究[J]. 核科学与工程, 2006,26(4):368-372.  
ZHANG Shijie, WU Yican, LIU Ping, et al. Design of net-based PSA database management system for nuclear power plants [J]. Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(4): 368-372 (in Chinese).

[7] 王海涛,吴宜灿,刘萍,等. 概率截断对 PSA 中 RAW 重要度的影响研究[J]. 核科学与工程, 2006,26(4):363-367.  
WANG Haitao, WU Yican, LIU Ping, et al. Study on the effect of probability truncation limit on probabilistic safety assessment RAW for importance measures [J]. Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(4): 363-367 (in Chinese).

[8] 胡丽琴,吴宜灿. 聚变发电反应堆双冷液态锂铅包层的初步概率安全分析[J]. 核科学与工程, 2005,25(2):184-187.  
HU Liqin, WU Yican. Probabilistic safety assessment of the dual-cooled liquid LiPb blanket for the FDS- II [J]. Nuclear Science and Engineering, 2005, 25(2): 184-187 (in Chinese).

[9] 吴宜灿,刘萍,胡丽琴,等. 大型集成概率安全分析软件系统的研究和发展[J]. 核科学与工程, 2007,27(3):270-276.  
WU Yican, LIU Ping, HU Liqin, et al. Development of an integrated probabilistic safety assessment software program [J]. Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(3): 270-276 (in Chinese).

[10] 刘萍,吴宜灿,胡丽琴,等. 一种基于 ZBDD 求解大故障树的基本事件排序方法[J]. 核科学与工程, 2007,27(3):282-288.  
LIU Ping, WU Yican, HU Liqin, et al. An ordering scheme of the basic events based on zero-suppressed binary decision diagrams for the large-scale fault tree analysis [J]. Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(3): 282-288 (in Chinese).