

文章编号: 0258-0926(2005)01-0080-04

扩展割集矩阵在故障树快速求解方法中的应用

杨 宇, 刘晓平, 刘 萍, 吴宜灿

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031)

摘要: 提出了扩展割集矩阵的概念及其展开规则, 并将其应用在故障树快速求解方法中模块最小割集以及故障树最小割集的求解上, 同时, 利用矩阵形式, 结合故障树求解的特点, 提出了若干优化策略。

关键词: Living PSA; 故障树; 最小割集; 割集矩阵; 扩展割集矩阵

中图分类号: TL364 **文献标识码:** A

1 引言

故障树分析求解的运算规模随着故障树中的结点(门和基本事件)数的增加而呈指数增长^[1]; 大型故障树在实际系统安全分析中并不鲜见^[2], 广东大亚湾核电站各个子系统的故障树结点数动辄数百甚至上千个。因此, 故障树的快速求解是核安全工程的一个重要课题。文献[3]提出了一种适用于 Living PSA(活概率安全分析)的故障树快速求解方法, 即模块排序求解法, 并给出了该方法的基本设计思想。为了方便在计算机上进行故障树求解, 文献[4]给出了割集矩阵概念及其相关运算规则。本文在割集矩阵的基础上, 提出了扩展割集矩阵的概念及其展开规则, 实现了文献[3]提出的故障树快速求解方法的主体部分。

本文实现的故障树快速求解方法主要分为 5 个步骤: 故障树逻辑简化、模块划分和排序、事件编号、模块求解以及故障树结果合成。扩展割集矩阵在模块最小割集求解和故障树最小割集合成中得到了应用。另外, 本文利用矩阵形式的便利, 结合故障树求解的特点, 提出了若干优化策略, 进一步加快了求解速度。

2 扩展割集矩阵及其在故障树快速求解方法中的应用

2.1 扩展割集矩阵概念的提出及其展开规则

文献[4]的割集矩阵方法, 用矩阵来表达积之

和形式的结构函数。矩阵的每一行代表一个割集, 矩阵中的每一列代表一个布尔变量(即基本事件), 并采用上行法, 从各个基本事件向上逐步通过矩阵运算得出故障树的最小割集。

下行法更易于在计算机中实现, 因此, 本文采用下行法求解模块最小割集。下行法中, 故障树的结构函数是不断展开的, 在展开的过程中, 要不断地引入一些临时布尔变量, 这些布尔变量将不断地为其所代表的布尔表达式所展开。更重要的是, 故障树求解的一个基本策略是模块化; 针对划分出来的独立模块求解的最小割集是模块最小割集。如果模块中含有子模块, 那么模块最小割集中也会含有子模块的代表——超级事件; 而超级事件不在基本事件之列。因此, 对于模块的结构函数来说, 它们也是临时布尔变量。一般割集矩阵的形式无法进行带有临时布尔变量的运算, 因此, 在割集矩阵中添加了代表临时布尔变量的扩展列, 将其改写成如下形式的扩展割集矩阵:

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} & | & a_{1,n+1} & a_{1,n+2} & \cdots & a_{1,n+k} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} & | & a_{2,n+1} & a_{2,n+2} & \cdots & a_{2,n+k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & | & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} & | & a_{m,n+1} & a_{m,n+2} & \cdots & a_{m,n+k} \end{bmatrix}$$

其中, m 为结构函数中的割集数, n 为基本事件数, k 为引入的临时布尔变量数, 矩阵元素:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{第}j\text{个割集中包含第}i\text{号布尔变量} \\ 0 & \text{第}j\text{个割集中不包含第}i\text{号布尔变量} \end{cases}$$

在运用扩展割集矩阵计算模块最小割集时，要不断地展开临时布尔变量，即消去扩展列上的1。在由模块最小割集成故障树最小割集时，也要不断展开其中的超级事件，也是消去扩展列上的1。为方便在计算机上实现扩展割集矩阵中临时变量的展开，提出了扩展割集矩阵的展开规则。对于扩展割集矩阵A，如果其扩展部分的某个临时布尔变量*t*(设其在矩阵中所对应的列号为*i*)的割集矩阵为T，则展开A中的临时变量*t*的过程为：从A中取出*i*列上为1的行，并去除这些行在该列上的1，将这些行组成一个新的矩阵B，并设A中剩下的行组成的矩阵为C，那么，展开*t*后的矩阵D=C+B·T，其中的“+”和“·”即为文献[4]所给出的割集矩阵的“或”运算以及“与”运算。

2.2 在模块最小割集求解中的应用

应用扩展割集矩阵方法，要对基本事件和模块进行编号(图1)。图1a为原始故障树，其中标出了各个独立模块，图1b为模块序列，在各个基本事件和超级事件的下方标出了它们的编号。在求解某个模块前，还要对模块中的门进行编号，图1b中的模块M2的各个门的左上角标出了门的

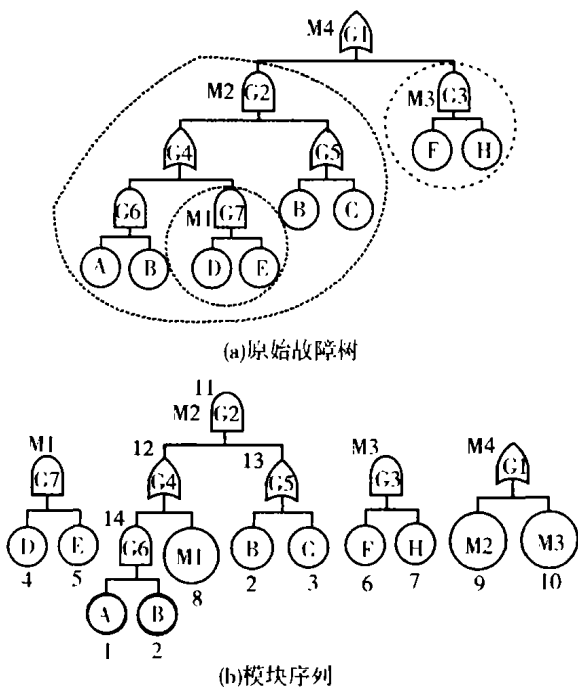


图1 模块化和模块序列
Fig. 1 Modularization and Module List

编号。

模块最小割集求解过程的基本思路是运用树的广度遍历算法。在遍历到某个门时，只求该门的一阶扩展割集矩阵；之后，利用该一阶扩展割集矩阵，按照展开规则，展开模块扩展割集矩阵中该门对应的扩展列(展开的过程中进行吸收运算)；当遍历完成时，所得到的扩展割集矩阵就是模块的最小割集矩阵。其中，一阶扩展割集矩阵指的是根据门的类型和输入结点的编号可以直接写出的扩展割集矩阵。例如，图1b中模块M2的门G2和G5的一阶扩展割集矩阵分别如图2a和图2b所示。模块最小割集求解过程的流程如图3所示。

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
(a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
(b)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图2 一阶扩展割集矩阵示例
Fig. 2 Sample for First Order Cut Set Matrix

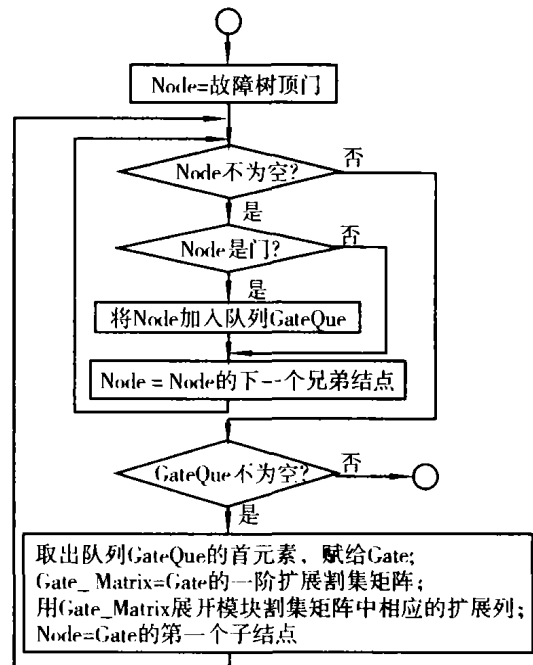


图3 模块最小割集求解过程
Fig. 3 Flow Chart for Generating Module Minimal Cut Sets

作为示例，图4给出了针对模块M2的求解过程。图中a、b、c、d分别为遍历到G2、G4、G5、G6时的模块扩展割集矩阵。图4d即为模块最小割集矩阵，由其可得模块最小割集为(B, M1), (C, M1), (A, B)。

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
(a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
(b)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
(c)	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
(d)	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0					
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0					
	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0					

图4 模块最小割集矩阵求解示例

Fig. 4 Sample for Generating Module Minimal Cut Sets

2.3 故障树最小割集的合成

上面求出的各个模块的最小割集矩阵仍是扩展割集矩阵，并且矩阵中每个扩展列所对应的割集矩阵就是相应模块的最小割集矩阵。这样，再次使用扩展割集矩阵的展开规则，不断展开模块序列中最后一个模块割集矩阵的扩展列，就可以从各个模块的最小割集矩阵得到整个故障树的最小割集矩阵。合成流程如图5所示。作为示例，图6给出了图1a中的故障树最小割集成过程，图中a为模块M4的最小割集矩阵，b、c、d分别为展开第9、8、10扩展列后的矩阵，图6d即为故障树的最小割集矩阵，由其可得故障树最小割集为(B, D, E), (C, D, E), (A, B), (F, H)。

2.4 优化策略

2.4.1 针对割集截断特点的优化策略 ①“与”门的一阶扩展割集矩阵中事件概率积小于截断值，则该矩阵被抛弃；②在展开过程中，对于两个将要相“与”的行，如果两行中相异事件的概率积小于截断值，则这两行不用相“与”。

2.4.2 针对割集吸收特点的优化策略 ①割集矩阵中的各行始终按照非零元的个数从小到大排列(该策略是下面两条策略的前提条件)；②在展开过程中，对于新生成的行，在插入模块割集矩阵之前，顺次检查矩阵中非零元个数比它少的行，如果新行能被其中某行吸收，则抛弃该新行；③对于刚插入割集矩阵的新行，顺次检查它下面的各行，抛弃它能吸收的行。

这些策略的使用，将高阶割集消灭在“萌芽”阶段，并在运算的过程中及时吸收冗余割集，从

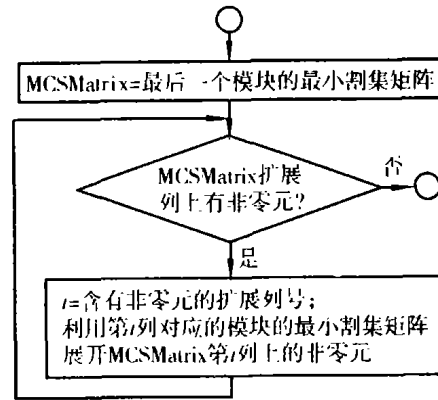


图5 故障树最小割集成流程

Fig. 5 Flow Chart for Generating Fault Tree Minimal Cut Sets

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
(a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
(b)	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
(c)	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	
	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	
	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
(d)	0	1	0	1	1	0	0				
	0	0	1	1	1	0	0				
	1	1	0	0	0	0	0				
	0	0	0	0	0	1	1				

图6 故障树最小割集成示例

Fig. 6 Sample for Generating Fault Tree Minimal Cut Sets

而大大减小了方法的求解空间，提高了该方法的求解效率。

3 结束语

本文提出的扩展割集矩阵方法，数据形式清晰紧凑，空间消耗小，易于编制程序，并且易于在分析求解中加入优化策略。扩展割集矩阵的数据形式使计算结果的存储与合成变得非常方便，当故障树结构或故障树中部件可靠性模型或数据发生变化时，能充分利用已经计算好的成果实时地求解故障树。笔者将扩展割集矩阵应用在文献[3]提出的适用于 Living PSA 的故障树快速求解方法中，取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 梅启智, 廖炯生, 孙惠中. 系统可靠性工程基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] Pullum L L, Dugan J B. Fault Tree Models for the Analysis of Complex Computer-Based Systems[C]. Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium, Las Vegas, 1996, USA: IEEE Press, 1996, 200 ~ 207.
- [3] 刘萍, 吴宜灿. 适用于 LivingPSA 的故障树求解方法[J]. 核动力工程, 2003(6): 568 ~ 571.
- [4] 宋笔锋, 王晓红, 张怡哲. 失效树分析的矩阵化方法[J]. 机械科学与技术, 1997(6): 961~966.

Application of Extended Cut Sets Matrix in Fault Tree Rapid Analysis Strategy

YANG Yu, LIU Xiao-ping, LIU Ping, WU Yi-can

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China)

Abstract: One of the most concerned issues in probabilistic security assessment (PSA) of nuclear power plants is living PSA(LPSA), and the key issue in LPSA is speed. Fault tree rapid analysis strategy is very important LPSA. The extended cut sets matrix method has been presented, and applied in fault tree rapid analysis strategy to generate module and fault tree minimal cut sets (MCSs). Some optimal policies based on extended matrix also haven been presented.

Key words: Living PSA, Fault tree, Minimal Cut Sets(MCSs), Cut Sets Matrix, Extended Cut Sets Matrix

作者简介:

杨宇(1978—)男, 在读硕士生。2001年毕业于合肥工业大学土木工程专业。现攻读合肥工业大学软件技术与理论专业硕士学位。

刘晓平(1964—), 男, 教授, 博士生导师。1998年于合肥工业大学获计算机应用专业博士学位。现从事计算机辅助设计与图形学研究。

刘萍(1963—), 女, 副教授, 在读博士生。1990年于国防科技大学获计算机应用专业硕士学位。现攻读中国科学院等离子体物理研究所核能科学与工程专业博士学位。

(责任编辑: 张明军)

(上接第 53 页)

作者简介:

朱江(1968—), 男, 工程师。1997年毕业于北京航空航天大学电子自动控制专业。现从事核反应堆运行工程研究。

王宇澄(1971—), 男, 工程师。2001年毕业于北京信息职业技术学院计算机应用管理专业。现从事核反应堆运行工程研究。

黄志勇(1966—), 男, 副研究员。1995年毕业于清华大学反应堆工程与安全专业。现从事高温堆氦气透平发电研究。

(责任编辑: 孙华平)