第24卷第5期　原子能科学技术　Vol.24, No. 5
1990年9月　Atomic Energy Science and Technology　Sep. 1990

考虑系统间共用部件相关性的事故序列计算

罗丹会　蒲富庠

（中国原子能科学研究院，北京）

事故序列计算是核电站概率风险评价中的一个重要环节。文章讨论了考虑系统间共用部件相关性的事故序列计算，给出了一种比较全面地考虑了系统间相关性的新算法，可以使事故序列堆芯熔化概率的计算结果更加合理和正确。

关键词　概率风险评价，事故序列，最小割集。

一、引　言

在核电站概率风险评价分析中，堆芯熔化概率是通过对核电站事故序列的定量计算求得的。核电站的事故序列表示核电站发生某一初因事件后，电站中各个安全系统的不同响应导致的事故发展过程。不同的事故序列说明了导致堆芯熔化的各种途径。在事故序列的定量计算中，如果序列中的各系统是互相独立的，序列的发生概率可以通过各系统的成功或失效概率相乘而简单地求得。但是，实际核电站的堆芯熔化事故序列中，构成序列的各系统并不都是完全独立的。例如，某核电站在大LOCA后的一个堆芯熔化事故序列为低压安注系统成功，低压再循环系统失效。而低压安注系统与低压再循环系统中的许多部件如泵、阀门、管道等都是共用的部件，因此两系统是相关的。在事故序列分析中，如果用$\bar{S}_1$表示系统I成功，S_2表示系统II失效，则这种事故序列可表示为$\bar{S}_1S_2$。在导致堆芯熔化的事故序列中，这种类型的事故序列，即$\bar{S}_1S_2$序列，一般说是常见的，并且是相关程度较显著的系统的最主要组合形式。又例如发生小LOCA后，高压注入系统成功但高压再循环系统失效；安全壳喷淋成功，安全壳喷淋再循环系统失效等，都会导致堆芯熔化。为了求得较准确的堆芯熔化概率，对这一类型的事故序列必须加以仔细分析，并进行比较合理的计算。

在这里应当说明，在实际事故序列分析中，$\bar{S}_1S_2$可能就构成了堆芯熔化事故序列，也可能仅是较长的堆芯熔化事故序列中的一部份。此时，整个堆芯熔化事故序列的发生概率则应由$\bar{S}_1S_2$的概率与序列中其它系统的成功或失效概率相乘求得。因此对$\bar{S}_1S_2$序列的分析是对系统间具有共用部件相关性的事故序列分析的基础。

过去在考虑系统间具有共用部件相关性的事故序列中，对$\bar{S}_1S_2$的处理方法是用SETS程序分别求出S_1，S_2的最小割集后，再将两系统的最小割集进行比较，若S_2中的某一割集为S_1中的任一割集所包含，则将该割集从S_2的割集中消去（通常称为消去项法），并由比较后的割集求得S_2的概率，最后与$\bar{S}_1$的概率相乘求得$\bar{S}_1S_2$的概率。

但从上述算法中，可以发现有两点不足：

（1）按照SETS程序的逻辑，若某一割集在系统I中不发生，那么在系统II中就不可

能发生。这是不合理的。因为此时系统 I 与系统 II 的运行时间是前后关系，并非同时运行，因此在系统 I 中不发生的割集，在系统 II 中仍可能发生。

(2) SETS 程序仅涉及了系统 I 与系统 II 割集间的包含关系，没有考虑割集间的部份相关情况。而部份相关在实际系统的割集间是普遍存在的。

本文的目的就是针对 SETS 程序的上述不足，给出了事故序列中存在 $\bar{S}_1S_2$ 这类序列时的计算方法。

二、计 算 方 法

由系统 I 和系统 II 的故障树分析可知，系统 I 和系统 II 的失效模式可分别由各系统的最小割集表示。对事故序列 $\bar{S}_1S_2$ 的计算则可分别由下面 4 种情况加以讨论：

1．系统 I 和系统 II 都仅有一个割集，且割集所含事件相同 设割集中含有 n_1 个相互独立的事件，用 $x_i(i=1,\cdots n_1)$ 表示，割集用 R 表示，则

$$R=\prod_{i=1}^{n_1}x_i$$

如果系统 I 的运行时间为 $0\sim t_1$，系统 II 的运行时间为 $t_1\sim t_2$。事件 x_i 在 $0\sim t_1$ 时间内发生记为 $x_{i,1}$，在 $t_1\sim t_2$ 时间内发生记为 $x_{i,2}$。事件 R 在 $0\sim t_1$ 时间内发生记为 R_1，在 $t_1\sim t_2$ 时间内发生记为 R_2，则

$$x_i=x_{i,1}+x_{i,2}$$

$$R=R_1+R_2$$

事件 x_i 不可能同时在两个时间段内发生，因此

$$x_{i,1}\cdot x_{i,2}=\phi$$

ϕ 表示是空集。同理

$$R_1\cdot R_2=\phi$$

由于系统 II 中的部件实际运行时间为 $0\sim t_2$，所以

$$\begin{aligned}\bar{S}_1S_2&=\bar{R}_1R=R-R_1R\\&=R-R_1\end{aligned}$$

由此得

$$\begin{aligned}P(\bar{S}_1S_2)&=P(R-R_1)=P(R)-P(R\cdot R_1)\\&=P(R)-P(R_1)\end{aligned}\tag{1}$$

式中

$$P(R)=\prod_{i=1}^{n_1}P(x_i)=\prod_{i=1}^{n_1}\int_0^{t_2}\lambda_i(t)\mathrm{d}t$$

$$P(R_1)=\prod_{i=1}^{n_1}P(x_{i,1})=\prod_{i=1}^{n_1}\int_0^{t_1}\lambda_i(t)\mathrm{d}t$$

$\lambda_i(t)$ 为 x_i 的失效率。

2．系统 I 和系统 II 都仅有一个割集，它们部份相关 设系统 I 的割集为 RA，系统

II 的割集为 RB，其中 A 包含 n_2 个互相独立的事件，B包含 n_3 个互相独立的事件，则有

$$A=\prod_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} x_i$$

$$B=\prod_{i=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} x_i$$

这时有

$$\begin{aligned}\bar{S}_1S_2&=\overline{R_1A}\cdot RB\\&=(\bar{R}_1+\bar{A})(R_1+R_2)B\\&=B(R_1\bar{A}+R_2\bar{R}_1+R_2\bar{A})\\&=B(R_1\bar{A}+R_2)\\&=B(R-AR_1)\end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned}P(\bar{S}_1S_2)&=P[B(R-AR_1)]\\&=P(B)[P(R)-P(A)P(R_1)]\end{aligned}\tag{2}$$

式中

$$P(A)=\prod_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} P(x_i)$$

$$P(B)=\prod_{i=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} P(x_i)$$

若式（2）中 $P(A)=P(B)=1$，那么式（2）即等价于式（1）。可见割集间完全相关仅是部份相关的一个特例。

3．系统 I 具有多个割集，系统 II 仅有一个割集，系统 I 的某些割集与系统 II 的割集相关　设系统 II 的割集仍为 RB，系统 I 具有 m 个割集。

$$c_{1,1},\ \cdots\ c_{i,1},\ \cdots\ c_{m,1}\qquad i=1,\cdots,m$$

其中 $m_1(m_1\leqslant m)$ 个割集中含有事件 R，其它割集独立于 RB，因此

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{m} c_{i,1}&=\sum_{i=1}^{m_1} c_{i,1}+\sum_{i=m_1+1}^{m} c_{i,1}\\&=R\cdot D+I\end{aligned}$$

式中

$$D=\sum_{i=1}^{m_1}(c_{i,1}/R)$$

$$I=\sum_{i=m_1+1}^{m} c_{i,1}$$

由此

$$\begin{aligned}\bar{S}_1S_2&=\overline{(R_1D+I)}\cdot RB\\&=\bar{I}\cdot\overline{R_1D}\cdot RB=B\bar{I}\cdot R(1-R_1D)\\&=B\bar{I}(R-DR_1)\end{aligned}$$

所以

$$P(\bar{S}_1S_2)=P[B\bar{I}(R-DR_1)]$$
$$=P[B]P[\bar{I}][P(R)-P(D)P(R_1)] \quad (3)$$

如果 $m=m_1=1$ 则 $P(\bar{I})=1$，$P(D)=P(A)$，公式（3）便等价于公式（2）。可以看出，公式（3）是比公式（2）更为普遍的形式。

对于某些实际情况，我们不可能用一个简单的事件R来表示各种相关情形。但对所有情况都进行精确的分析也是不现实的。因此作为工程意义上的近似处理，可以选取在系统I的割集中重要度较高的事件作为R进行分析，忽略其它事件的相关性。

4．系统I和系统II均有多个割集 设系统II具有n个割集

$$c_{1,2},\ \cdots,\ c_{i,2},\ \cdots,\ c_{n,2} \quad i=1,\ \cdots,\ n$$

因此

$$\bar{S}_1S_2=\overline{\sum_{i=1}^{m}c_{i,1}}\sum_{i=1}^{n}c_{i,2}$$
$$=\sum_{i=1}^{n}c_{i,2}\left[\overline{\sum_{i=1}^{m}c_{i,1}}\right]$$

如果忽略上述和的相交项，则可得以下近似式：

$$P(\bar{S}_1S_2)=\sum_{i=1}^{n}P\left[c_{i,2}\left(\overline{\sum_{i=1}^{m}c_{i,1}}\right)\right]$$

将式（3）代入得

$$P(\bar{S}_1S_2)=\sum_{i=1}^{n}P(B_i)P(\bar{I}_i)[P(R_i)-P(D_i)P(R_{i,1})] \quad (4)$$

式中，R_i为$c_{i,2}$与系统I割集间的相关事件；B_i为$c_{i,2}$中的独立事件；I_i为系统I中不含有R_i的割集之和；D_i表示系统I中含R_i的割集提取公因子R_i后的余式；$R_{i,1}$表示事件R_i在$0\sim t_1$内发生。

公式（4）即为序列$\bar{S}_1S_2$普遍的计算公式。

三、计 算 示 例

例一：系统I和系统II的割集分别为

$$x_1x_2$$
$$x_1x_2x_3$$

系统I的运行时间为0～10 h，系统II的运行时间为10～20 h，x_3在10 h这一时刻开始运行。x_1，x_2，x_3的失效率分别为1.0×10^{-3}，6.3×10^{-4}，3.1×10^{-3}。

按照SETS程序的方法计算，系统II的割集被系统I的割集所包含，应当消去，因此

$$P(\bar{S}_1S_2)=0$$

但按照本文所给出的方法进行计算，则$P(\bar{S}_1S)$不能为零，按照公式（2）

$$P(\bar{S}_1S_2)=P(B)[P(R)-P(A)P(R_1)]$$

这时

$$R=x_1x_2$$
$$B=x_3$$

故
$$\begin{aligned}P(R_1)&=P(x_{1,1})P(x_{2,1})\\&=(1.0\times10^{-3}\times10)(6.3\times10^{-4}\times10)\\&=6.3\times10^{-5}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P(R)&=P(x_1)P(x_2)\\&=(1.0\times10^{-3}\times20)(6.3\times10^{-4}\times20)\\&=2.52\times10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P(B)&=P(x_3)=3.1\times10^{-3}\times10\\&=3.1\times10^{-2}\end{aligned}$$

$$P(A)=1$$

所以
$$\begin{aligned}P(\bar{S}_1S_2)&=P(B)[P(R)-P(A)P(R_1)]\\&=5.86\times10^{-6}\end{aligned}$$

例二：系统 I 的割集为

$$x_1x_2 \qquad x_1x_3 \qquad x_4$$

系统 II 的割集为

$$x_1x_5 \qquad x_6$$

系统 I 的运行时间为 0～15 h，系统 II 的运行时间为 15～20 h。x_5 从零时刻开始运行，x_6 从 15 h 处开始运行。x_1，x_2，x_3，x_4，x_5，x_6 的失效率分别为 1.2×10^{-3}，3.7×10^{-3}，4.5×10^{-4}，3.0×10^{-3}，7.1×10^{-3}，1.7×10^{-5}。

按照 SETS 程序的算法，有
$$\begin{aligned}P(\bar{S}_1S_2)&=P(\bar{S}_1)P(S_2)\approx P(S_2)\\&=P(x_1)P(x_5)+P(x_6)\\&=(1.2\times10^{-3}\times20)(7.1\times10^{-3}\times20)+(1.7\times10^{-5}\times5)\\&=3.49\times10^{-3}\end{aligned}$$

按照本文所给出的方法计算，可通过公式（4）求得，此时
$$P(\bar{S}_1S_2)\approx P(x_6)+P(x_5)[P(x_1)-P(x_2+x_3)P(x_{1,1})]$$
$$P(x_6)=1.7\times10^{-5}\times5$$
$$P(x_5)=7.1\times10^{-3}\times20$$
$$P(x_1)=1.2\times10^{-3}\times20$$
$$P(x_2)=3.7\times10^{-3}\times15$$
$$P(x_3)=4.5\times10^{-4}\times15$$
$$P(x_{1,1})=1.2\times10^{-3}\times15$$

故
$$\begin{aligned}P(\bar{S}_1,S_2)&=(1.7\times10^{-5}\times5)+(7.1\times10^{-3}\times20)[(1.2\times10^{-3}\times20)\\&\quad-(3.7\times10^{-3}\times15+4.5\times10^{-4}\times15)(1.2\times10^{-3}\times15)]\\&=3.33\times10^{-3}\end{aligned}$$

从以上二例可以看出，在事故序列的计算中正确考虑共用部件的相关性，可以得到比较合理和准确的结果，这样使堆芯熔化概率的计算更加合理和正确。

四、结　　论

本文针对SETS程序中处理含有相关系统事故序列所采用的计算方法存在的某些不足，给出了一种合理地考虑含有共用部件相关性事故序列的实用算法。通过计算实例表明，采用SETS程序中所用的消去项法，会对结果产生一定的误差，系统割集间的部份相关对计算结果具有一定的影响。因此采用本文给出的计算方法，可以使结果更加合理和正确。在系统II的相关割集重要度较大的实际事故序列中采用本文给出的计算方法进行分析，将具有一定的实用意义。

参 考 文 献

[1] Stack, D.W. A SETS User's Manual for Accident Sequence Analysis, NUREG/CR-3547.

（编辑部收到日期：1988年4月14日）

A NEW APPROACH FOR PHASED MISSION ANALYSIS IN ACCIDENT SEQUENCE CALCULATION

LUO DANHUI　　FU FUXING

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing)

ABSTRACT

The calculation of accident sequence plays an important role in PRA of nuclear power plant. In this report, a new method is developed for the phased mission analysis in accident sequence calculation. The dependent failures between two systems which have common components are calculated. A more reasonable core-melt frequency can be obtained by this approach.

Key words Probabilistic risk assessment(PRA), Accident sequence, Minimum cutset.