第 27 卷第 6 期 兵 工 学 报 Vol. 27 No. 6
2006 年 11 月 ACTA ARMAMENTARII Nov. 2006

贝叶斯网络在火工系统安全评价中的应用

郑恒[1], 吴祈宗[1], 汪佩兰[2], 史爱芬[1,3]
(1. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081;
3. 中国兵器工业系统总体部, 北京 100089)

摘要: 提出一种基于贝叶斯网络(BN)的火工系统安全评价方法,采用 BN 取代原有的故障树分析法(FTA)有两个方面的优势:一是在建模方面,突破了故障树分析的一些较强的假设,可以考虑多态变量以及变量之间的相关性,并能以比逻辑门更好的形式表达变量间的不确定性关系;二是在分析方面,既能进行前向的预测推理,又能进行后向的诊断推理,并可以找出导致系统故障的组合模式,从而能够方便地找出系统的薄弱环节。采用基于 MATLAB 的 Bayes Net Toolbox (BNT) 软件包,大大简化了计算过程。通过一个工业雷管生产线的安全评价实例,说明该方法是对传统的基于故障树分析的安全评价方法的有益改进。

关键词: 贝叶斯网络; 故障树分析; 火工系统; 安全评价; 安全系统工程
中图分类号: TJ08 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-1093(2006)06-0988-06

Application of Bayesian Networks to Safety Assessment in Pyrotechnics Systems

ZHENG Heng[1], WU Qi-zong[1], WANG Pei-lan[2], SHI Ai-fen[1,3]
(1. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. System Engineering Institute, China North Industries Group, Beijing 100089, China)

Abstract: A Bayesian network (BN) approach for safety assessment in pyrotechnics production systems was presented. Bayesian networks have two advantages in contrast with the fault tree analysis (FTA). Firstly, in the modeling process, BN breaks through some hypotheses in FTA so as to do some important things that cannot be done in FTA, including taking the multi-state variables into account, considering the correlation among the variables, and representing the uncertainty relations among the variables in better form than that of logic gate. Secondly, in the analyzing process, BN can perform the forward inference (prediction) as well as backward inference (diagnosis). It can also find out the most probable mode causing the system failure. Adopting the Bayes Net Toolbox (BNT) software based on Matlab, the modeling and analyzing process is greatly facilitated. Finally, an example on industrial detonator production line illustrates that the BN approach is a good substitute for FTA for safety assessment in pyrotechnics production systems.

Key words: Bayesian networks; fault tree analysis; pyrotechnics system; safety assessment; safety system engineering

火工及烟火器件是兵器系统中最敏感的爆炸、燃烧子系统,在生产、使用、贮存、运输过程中均存在着燃烧、爆炸、中毒的危险,稍有疏忽即可引起重大的恶性事故。近年来,随着武器弹药向高威力、高作

收稿日期: 2005 - 11 - 10
基金项目: 国防预研基金资助项目(514040101BQ0604)

战效能方向发展,火工、烟火器件相应地向多功能、系统化发展,其生产规模也在向大型化、连续化发展,使得事故更具突发性、灾难性、复杂性和社会性[1]。这就迫切要求按照安全系统工程的理论方法,找出系统存在的薄弱环节,有针对性地加以改进。

安全评价是安全系统工程中必不可少的环节。火工系统的安全评价可以分为两大类,一类是基于指数法并结合兵工生产的特点而提出的火工品、火炸药和弹药企业重大事故隐患的定量评价法,该法适用于危险源的综合评价;另一类是以故障树分析方法(FTA)为基础的可靠性安全评价方法,它适用于某一限定系统如火工与烟火产品的引燃、引爆系统或某设备、生产线的事故预测及安全评价,该方法评价结果的精确度较高,但需要有一定的数学基础及数据。FTA 基于如下假设: 1) 事件是二值的(工作/故障); 2) 事件是相互独立的; 3) 事件和原因的关系通过逻辑门来表示。尽管 FTA 可以有效地计算出火工系统的安全性指标,但由于其假设约束较为苛刻,不能很好地处理各节点之间的相关性问题,在实际计算中过于繁杂,从而限制了其合理应用。

近年来,贝叶斯网络(BN)成为人工智能领域中一种用以表示系统不确定性、进行概率推理的行之有效的新方法[2],它能够利用模型中的局部条件依赖关系,进行双向不确定性推理,广泛应用于预测、分类、因果分析和诊断分析。本文提出了一种基于 BN 的火工系统安全评价方法。在火工系统中比较了 FTA 和 BN 在建模和分析能力上的不同。在建模方面,提出了一个将故障树(FT)转换为 BN 的算法,并对 BN 中的各种建模扩展方法进行了研究,考虑了多态变量、变量间的相关性,以及如何更好地表达变量间的不确定性关系。在分析方面,BN 可以比 FTA 进行更多有意义的分析,既能进行前向的预测推理,又能进行后向的诊断推理,并可以找出影响故障的组合模式,从而能够方便地找出系统的薄弱环节。采用 BNT 软件包,大大简化了计算过程。通过一个工业雷管生产线的安全评价实例说明该评价方法的合理性和有效性。

1　贝叶斯网络

一个 BN 可以用 $N = \langle\langle V, E\rangle, P\rangle$来描述,这里$\langle V, E\rangle$分别是一个有向无环图(DAG)的结点和边,$P$是 V 上的概率分布。离散随机变量 $V = \{X_1, X_2, \cdots, X_n\}$对应于这些结点,有向边 E 表示结点间的概率因果关系。BN 由定性部分(以 DAG 表示的网络拓扑结构)和定量部分(条件概率表 CPT)组成。定性部分表示了一个条件独立假设集合,它们可以通过 d-分离理论获得;定量部分指每一个变量在它的父结点取值组合下的条件概率,通过在每个结点上指定一个 CPT 来表示。没有父结点的变量称为根节点变量,其概率为先验边缘概率。按照 d-分离理论和条件独立性假设,变量集 V 上的联合概率分布 P 可以写成(1)式[2-3]

$$P(X_1, X_2, \cdots, X_n) = \prod_{i=1}^{n} P(X_i \mid Parent(X_i)). \quad (1)$$

BN 的基本的推理任务,是在给定对一个变量集合 E 的观测值(证据)时,计算出另一个被调查的变量集合的后验条件概率分布(即 $P(Q \mid E)$). 研究者已经提出很多有效的算法来进行推理,包括精确算法和近似算法[2-4]。

目前已有不少针对 BN 网络进行建模和推理分析的软件包,其中 BNT 软件包是 Kevin P Murphy 基于 Matlab 语言开发的,提供了多种底层基础函数库,支持精确推理和近似推理、参数学习和结构学习、静态模型和动态模型,可扩展性良好[4-5]。本文以 BNT 为原型开发出了 FTA-BN 软件包,对火工系统安全评价进行建模和分析。

2　基于贝叶斯网络的火工系统安全评价模型

本模型是在 FTA 基础上提出的一种基于 BN 的火工系统安全评价模型。首先阐明如何将 FTA 转换为 BN[6-7],其次以工业雷管生产线安全评价系统为例阐明如何放宽对 FTA 的假设以便建立更合适的评价模型。

2.1　将故障树转换为贝叶斯网络

FTA 是建立在对系统故障事件、可能引起系统故障的子系统及元件故障事件的综合分析的基础上,以顶端事件(或不希望发生事件)为出发点,根据系统中元件的故障率,运行人员的误操作及其他外部条件对顶端事件的影响,采用自顶向下的方式,从事件到原因,直到获得基本事件的失效概率,从而建立它们之间的逻辑关系图 —FT,再运用工程和逻辑的推理对所研究系统做出定性分析或定量估计的方法[1]。

为方便分析,约定对于一个普通的二值组件 C,

以 $C=1$(或者 C)表示组件故障;以 $C=0$(或者 $\overline{C}$)表示组件正常;并且已知 FT 上每一个叶结点的先验概率值。图 1 显示了如何将 FT 的逻辑门转换为等价的 BN 结点。容易看出,FT 中的逻辑关系可以用 BN 中对应节点的 CPT 简单地表示出来。

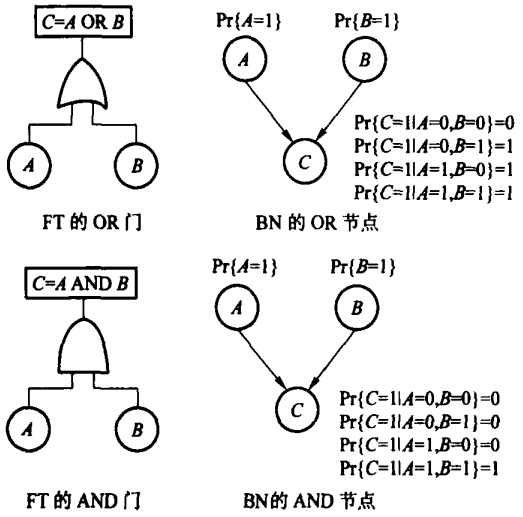

图 1 FT 和 BN 形式下对应的逻辑门表示

Fig. 1 The OR and AND gates in FT and BN representation

FT 转换为相应的 BN 的算法如下:

1) 将 FT 中的所有基本事件(叶结点)对应表达为 BN 中的根节点。FT 中多次出现的叶节点在 BN 中只需要表达为一个根节点;

2) 将 FT 中各个基本事件的先验概率直接赋值给 BN 中对应的根节点作为其先验概率;

3) 将 FT 中的每个逻辑门都表达为 BN 中的一个节点,节点状态取值与 FT 中逻辑门的输出事件一致;标记 FT 的顶事件为 BN 中总的输出结点。

4) 按照 FT 中的逻辑门与基本事件的关系连接 BN 中的节点,连接节点的有向边的方向与 FT 中逻辑门的输入输出关系对应;

5) 将 FT 中逻辑门的逻辑关系表达为 BN 中对应节点的 CPT.

依照这种转化算法,任何 FT 都可以被转换为相应的 BN. 由于 FT 中逻辑门的特殊性质,BN 中的非根节点实际上是确定性节点,不是随机变量,其对应的 CPT 可被自动地指定出来。

2.2 火工系统安全评价模型

以上建模方法通过一个火工系统实例 —工业雷管压合压爆的故障分析[1]来说明。目前国内工业雷管生产线大多采用的工序流程如图 2 所示。统计资料表明,装起爆药、压合和抖浮药是 3 个最危险的工序,这里选择压合工序进行实例分析。

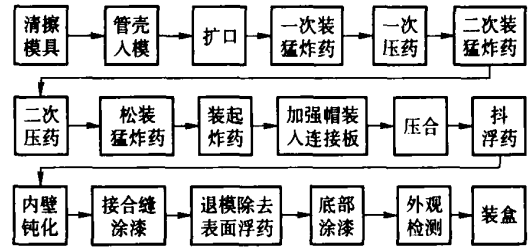

图 2 工业雷管生产线工序流程图

Fig. 2 Flow chart of working procedures on industrial detonator production line

压合工序的 FT 如图 3 所示,FT 的事件编号、类型代号和事件名称及其概率值见表 1. 其中基本事件的概率值由领域专家给出。在该 FT 中,主要考虑了可能引起爆炸事故的 4 大主要因素,即机械撞击、传输线摩擦、非正常退模、压合异常等因素,压合工序上的事故基本上都是由这些因素造成的。

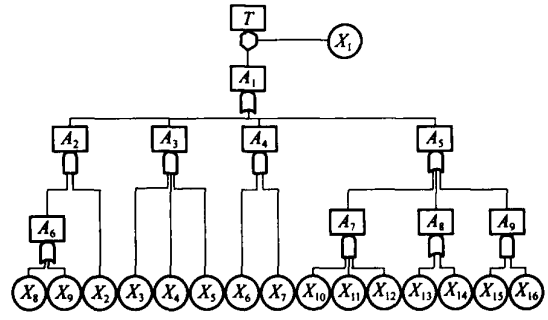

图 3 压合工序故障树图

Fig. 3 FT for working procedures of press-assembling

该 FT 的最小割集为

$$\{X_1, X_{13}\},\{X_1, X_{14}\},\{X_1, X_2, X_8\},$$
$$\{X_1, X_6, X_7\},\{X_1, X_2, X_9\},\{X_1, X_{15}, X_{16}\},$$
$$\{X_1, X_3, X_4, X_5\},\{X_1, X_{10}, X_{11}, X_{12}\}.$$

顶事件的结构函数:

$$\Phi(X) = X_1X_2X_8 + X_1X_3X_4X_5 + X_1X_6X_7 + X_1X_{10}X_{11}X_{12} + X_1X_2X_9 + X_1X_{13} + X_1X_{15}X_{16} + X_1X_{14}. \quad (2)$$

通过 MATLAB 软件编制的 FT 转换为 BN 的程序,自动生成了转换后的对应的 BN 模型,如图 4 所示。

BN 的根节点的先验概率就是表 1 中 $X_1 \sim X_{16}$ 的概率。非根节点上是 CPT,如 26 号节点(对应于 AND 门)的 CPT 记录如下:

表 1　压合工序故障树事件编号、类型代号、事件名称及概率值对照表

Tab. 1　The event numbers, codes, names and their prior probabilities in FT of the working procedures of press assembling

事件编号	类型代号	事件名称	概率值
1	X_8	人为失误	5×10^{-2}
2	X_9	机器失误	4×10^{-3}
3	A_6	操作失灵	-
4	X_2	保护装置失灵	4×10^{-4}
5	X_3	有浮药	3×10^{-4}
6	X_4	除尘失灵	4×10^{-4}
7	X_5	模具与工作台摩擦	5×10^{-3}
8	X_6	管壁有浮药	5×10^{-3}
9	X_7	退模过猛	7×10^{-3}
10	X_{10}	送模不到位	3×10^{-3}
11	X_{11}	报警失灵	5×10^{-4}
12	X_{12}	自动处理装置失灵	6×10^{-3}
13	A_7	不到位压合	-
14	X_{13}	压机故障	5×10^{-3}
15	X_{14}	压合操作失误	4×10^{-2}
16	A_8	压力过大	-
17	X_{15}	漏检	5×10^{-3}
18	X_{16}	加强帽或管壳不合格	2×10^{-3}
19	A_9	零件不合格	-
20	A_2	机械撞击	-
21	A_3	传输线上摩擦	-
22	A_4	非正常退模	-
23	A_5	压合异常	-
24	A_1	爆炸引发因素	-
25	X_1	达到起爆药起爆感度	4×10^{-3}
26	T	压合爆炸	-

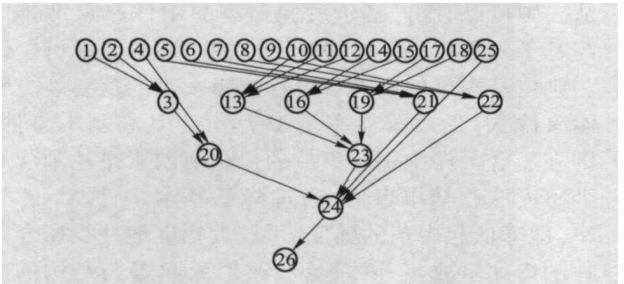

图 4　压合工序贝叶斯网络图

Fig. 4　BN for working procedures of press-assembling

$$\Pr(S_{26}|S_{24},S_{25})=1,\Pr(S_{26}|S_{24},\bar{S}_{25})=0,$$

$$\Pr(S_{26}|\bar{S}_{24},S_{25})=0,\Pr(S_{26}|\bar{S}_{24}\bar{S}_{25})=0.$$

BN 是比 FT 更一般的形式,它拥有一些更适合于安全性(可靠性)建模和分析的特点。

1) 表达变量间的不确定性关系

FT 分析中,逻辑门处理的是确定性的关系,对于图 1 所示的 OR 门,只要 A 或者 B 中任何一个事件发生,则 C 发生。但实际情况中,即使 A 或者 B 发生(失效),C 仍然有可能不发生(正常),尽管其可能性很小。BN 可以利用对应于逻辑门的节点上的 CPT 来处理这种情形。

由图 3 的 FT 可知,压合异常子系统(A_5)在 A_7 或 A_8 或 A_9 等子系统失效的情况下失效,故在对应的 BN 中(见图 4),23 号节点有 3 个父节点 13、16 和 19 号节点,这样 23 号节点的 CPT 上必须指定 8 个记录。利用 noisy-or 模型可以简化 CPT 的指定工作[2]。给定一个二值变量 Y(取 1 或 0),它有二值的父节点 $X_1, X_2, \cdots, X_n$,则 noisy-or 模型要求指定 n 个参数 $p_1, p_2, \cdots, p_n$, $p_i = P(Y|\bar{X}_1, \cdots, X_i, \cdots, \bar{X}_n)$. 设 X_i 独立影响 Y,并且当 X_i 都为 0 时 Y 取 0,则有

$$P(Y|X)=1-\prod_{X_i\in\pi_x}(1-p_i), \qquad (3)$$

式中 π_x 是 X 中取得 1 的变量的集合。

对于 A_5 子系统,如果在 A_7 失效条件下 A_5 正常的概率为 0.01,即 $p(A_7)=P(A_5|A_7,\bar{A}_8,\bar{A}_9)=0.99$,并且类似的有 $p(A_8)=p(A_9)=0.995$,那么可以计算当 A_7 和 A_8 都失效而 A_9 正常的条件下 A_5 失效的概率为 $P(A_5|A_7,A_8,\bar{A}_9)=1-(0.01\times0.005)=0.999\,95$. 正如人们所预料的,该概率大于仅仅由 A_7 失效而引起 A_5 失效的概率。

在安全分析的建模过程中还必须考虑一般原因失效问题。在 FT 形式下构造一般原因失效模型较为繁琐,而在 BN 形式下,构造一般原因失效模型就比较简单,可以采用带有 leak 的 noisy-or 的模型来处理。该模型假设当 Y 的所有父节点 X_i 取 0 时,Y 以一个小的概率取 1(即 leak 或者一般原因失效概率),即在 X_i 与 Y 相互作用之外加入一个未知的父节点 L,则(3)式成为

$$P(Y|X)=1-\left[(1-l)\prod_{X_i\in\pi_x}(1-p_i)\right]. \qquad (4)$$

在压合异常子系统(A_5)中,假定 A_5 在其所有组件都正常工作的条件下一般原因失效的概率为 $l_{cc}=0.02$,则在 A_7 和 A_8 失效而 A_9 正常的条件下 A_5 失效的概率为 $P(A_5|A_7,A_8,\bar{A}_9)=1-[0.01\times0.005(1-0.02)]=0.999\,951$,它稍微大于没有带 leak 的概率。

基于上述讨论,在 BNT 中,对 A_5 子系统进行修正,将其对应的节点(23 号节点)的 CPT 修改为 bnet.CPD{a_5} = tabular_CPD(bnet,a_5,[0.98,0.01,0.005,0.005,0.000 049,0.000 049,0.000 024 5,0.000 000 245,0.02,0.99,0.995,0.995,0.999 951,0.999 951,0.999 975 50,0.999 999 755]);

同理,可以考虑 noisy-and 及其带 leak 的扩展模型。

2) 多态变量

FT 处理的通常都是二值变量,但在很多应用中多态变量的使用是非常重要的,此时,仅将组件状态仅仅定为正常/故障就是不充分的。如液压系统的状态除了正常(畅通)和故障(阻塞)以外,还很有可能处于半正常(半通畅)的状态,此时仅用工作和故障来表征液压系统的状态就不合适。在 FTA 中处理这种情况必须建模成两个独立的二值事件,然后在其间加入一个异或门(XOR). 而 BN 在处理变量的多态性时就简单得多,可以用变量的不同值表示组件本身的不同状态,然后调整相应节点的 CPT 即可。

3) 相关性失效问题

实际系统中,一个组件的失效可能引发相关组件的失效。假设在压合工序子系统中加入了液压系统(LS),显然 LS 失效会导致相关系统(如退模过猛 X_7,机器撞击 X_9,送模不到位 X_{10},压机故障 X_{13} 等)的失效,但当液压系统处于半正常状态时,相关系统失效的概率也增大了。FTA 无法建立这种相关性失效的模型,而 BN 可以方便地处理此类问题。设 LS 有 3 个值分别对应于这 3 种状态模式——正常(LS_0)、半正常(LS_1)和失效(LS_2),然后设定合适的 CPT 记录即可。如在液压系统处于正常条件下退模过猛(x_7)发生的概率是 $P(X_7|LS_0)$ = 0.000 07(比 $P(X_7)$ = 0.000 7 小),在液压系统处于半正常工作条件下退模过(X_7)发生的概率是 $P(X_7|LS_1)$ = 0.5,在液压系统处于故障条件下 X_7 发生的概率是 $P(X_7|LS_2)$ = 1.

3 算例分析

3.1 贝叶斯网络中的推理分析

任何 FT 均可以被转换成 BN,在 FTA 上可做的定量分析均能在相应的 BN 上进行。在 BN 中,对故障事件不可靠性的计算,对应于计算故障事件的先验概率;对于一个给定子系统的不可靠性的计算,就是计算与逻辑门对应的变量 S_i 的先验概率;对割集重要度的计算,就是在给定系统故障的条件下,计算这些割集的后验概率。FTA 在求解顶事件概率的过程中会遇到大量的不交化计算,当系统规模较大时计算量相当大。BN 建立在变量间考虑了条件独立性的概率约束上,省去了最小割集的求解,避开不交化计算过程,大大简化了计算。

BN 不同于 FT 的一个特殊用法是可以用来对系统进行故障诊断。利用 BN 的双向推理技术,既可以计算组件故障条件下系统故障的条件概率,又可以计算系统故障条件下各个组件的后验概率,并能方便地找出导致系统故障的最可能组合,使得计算分析更加直观灵活。

3.2 火工系统安全评价中的贝叶斯网络分析

本节利用 BNT 软件包提供的 junction tree 推理机对火工系统安全评价的 BN 模型进行推理。

根据表 1 中每个组件的失效概率,在 BN 中前向传播得到顶事件失效的先验概率为 $P_{bn1}(S_{26})$ = 0.000 179 45,而采用 FTA 最小割集首项近似法计算得到 $P_{ft}(S_{26})$ = 0.000 180 26,可见用 BN 方法计算出来的顶事件失效概率略微小于用 FTA 计算得到的结果,符合使用 FTA 最小割集首项近似法得到的值略微大于实际值的原理[1]。根据第三部分所述方法修正了压合异常子系统,得到修正的 BN 模型,推理得到 $P_{bn2}(S_{26})$ = 0.000 254 96,它略微大于 $P_{bn1}(S_{26})$,这是因为修正模型考虑了一般原因失效,故顶事件失效概率增大。可见用 BN 计算出来的结果是可信的。

如果观察到系统(S_{26})在某时刻故障,那么每个组件的后验边缘概率可以计算出来,如表 2 所示。从表中可以看出,基于后验概率的组件严重度排序与基于先验概率的排序是不同的。后验概率可以作为判定基本事件影响顶事件故障发生的重要度。基本事件 X_1 的后验概率是 1,远大于其它基本事件,即在压合工序中引起事故的最重要因素是达到起爆药感度这一基本事件,通过降低基本事件 X_1 的概率,即降低起爆药的感度,可较大幅度地减少压合工序的爆炸事故。具体地说,改用无起爆药结构的雷管,或在现用起爆药中加入一定量的添加剂,在不改变其火焰感度的前提下降低其机械感度等[1]。基本事件 X_{14}, X_{13} 是后验概率值第二、第三大的事件,从 FT 结构来看,压机故障 X_{13} 和操作失误 X_{14} 任一事件的发生,都会造成压合压力过大的事件 A_8 发生,进而造成压合异常事件 A_5 的发生,成为爆炸引发因素,所以 X_{14}, X_{13} 发生的概率大小也至关重

要。另外，X_2 的后验概率也比其先验概率有大幅度的提高，说明 X_2 也是相当重要的。其它基本事件的后验概率变化不大，说明它们对于事故发生所产生的影响较小。以上分析与基于 FT 分析得出的结论基本上是一致的[1]。

表 2　火工系统安全评价 BN 模型基本事件的先验概率与后验边缘概率表

Tab. 2　Prior and posterior probabilities of root nodes in BN for safety assessment in pyrotechnics production systems

基本事件	基本事件先验概率	初始 BN 中基本事件后验概率	修正 BN 中基本事件后验概率
X_1	4×10^{-3}	1	1
X_2	4×10^{-4}	0.000 857 98	0.000 715 96
X_3	3×10^{-4}	0.000 300 01	0.000 300 00
X_4	4×10^{-4}	0.000 400 01	0.000 400 00
X_5	5×10^{-3}	0.005 000 01	0.005 000 00
X_6	5×10^{-3}	0.005 741 44	0.005 511 53
X_7	7×10^{-3}	0.007 739 95	0.007 510 50
X_8	5×10^{-2}	0.050 402 89	0.050 277 96
X_9	4×10^{-3}	0.004 032 23	0.004 022 23
X_{10}	3×10^{-3}	0.003 000 19	0.003 000 13
X_{11}	5×10^{-4}	0.000 500 19	0.000 500 13
X_{12}	6×10^{-3}	0.006 000 19	0.006 000 13
X_{13}	5×10^{-3}	0.111 449 05	0.078 048 67
X_{14}	4×10^{-2}	0.891 592 43	0.624 389 43
X_{15}	5×10^{-3}	0.005 211 83	0.005 146 14
X_{16}	2×10^{-3}	0.002 212 47	0.002 146 58

在 BN 模型下还可以进行如下诊断分析，如在观察到保护装置失灵 X_2，报警失灵 X_{11} 的条件下，系统故障的后验概率为 $P'_{bn1}(S_{26})=0.000\ 384\ 98$（初始模型），或 $P'_{bn2}(S_{26})=0.000\ 456\ 43$（修正模型），分别大于 $P_{bn1}(S_{26})=0.000\ 179\ 45$ 和 $P_{bn2}(S_{26})=0.000\ 254\ 96$，这符合常识推理的结果。此时其他各个组件的后验概率也可以方便的计算得到。这种诊断分析在 FTA 模型下是无法进行的。

诊断分析中有时不仅要考虑哪个组件故障概率最大，而且要考虑哪种组件故障组合模式导致系统故障的可能性最大。这种分析对应于给定故障条件下，在组件的所有可能的状态空间上寻找最可能的状态。本例中通过调用 BNT 软件包的 MPE 函数进行推理，得到系统故障条件下最可能的状态是：$S_{15}(X_{14})$，$S_{16}(A_8)$，$S_{23}(A_5)$，$S_{24}(A_1)$，$S_{25}(X_1)$ 节点故障，其它节点正常。注意到这个诊断结果并非对应于割集$\{X_1, X_{14}\}$，因为该割集没有说明割集外的其它组件是正常工作的。

4　小结

本文用 BN 替换 FTA，进行火工系统的安全评价。火工系统安全评价需要考虑包括软件、硬件和人等众多因素对系统整体的影响，BN 在这方面具有很大的优势，因为 BN 具有比 FT 更强的表达能力，可以考虑多态变量以及变量之间的相关性，并能以比逻辑门更好的形式表达变量间的不确定性关系；在分析方面，BN 既能进行预测推理，又能进行诊断推理，并可以找出导致系统故障的组合模式，从而能够方便地找出系统的薄弱环节。因此，应用 BN 进行火工系统安全评价，可以更好地综合相关信息来源，通过推理得到更多有意义的结果，应用前景广阔。

参考文献(References)

[1] 汪佩兰，李桂茗. 火工与烟火安全技术[M]. 北京：北京理工大学出版社，1996：342 - 401.
WANG Pei-lan, LI Gui-ming. Initiators and pyrotechnics safety technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 342 - 401. (in Chinese)

[2] Jesen F V. Bayesian networks and decision graphs[M]. New York: Springer-Verlag, 2001: 18 - 28.

[3] Van der Gaag L C. Bayesisn belief networks: odds and ends[J]. The Computer Journal, 1996: 97 - 113.

[4] 程泽凯，林士敏，陆玉昌，等. 基于 Matlab 的贝叶斯分类器实验平台 MBNC[J]. 复旦学报(自然科学版)，2004，43(5)：729 - 732.
CHENG Ze-kai, LIN Shi-min, Lu Yu-chang, et al. MBNC: the experiment platform for Bayesian classifiers based on Matlab[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2004, 43(5): 729 - 732. (in Chinese)

[5] Kevin Murphy. Bayes Net Toolbox for Matlab. (2003 - 09 - 11) [2005 - 08 - 10] http: //www. cs. ubc. ca/～murphyk/ Software/ BNT/ bnt. html.

[6] Burton H Lee. Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis[C]. Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2001: 7 - 15.

[7] Bobbioa A, Portinalea L, Minichinob M. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 71: 249 - 260.