

文章编号: 1006-9941(2007)02-0140-04

基于 FTA 与 BN 技术的某点火具安全失效分析

胡延臣^{1,2}, 汪佩兰¹, 郑 恒³, 李 浩²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国人民解放军驻四七四厂军事代表室, 辽宁 抚顺 113003; 3. 北京理工大学管理与经济学院, 北京 100081)

摘要: 为提高某辐射式延期点火具的安全性, 在对比贝叶斯网络(BN)技术和故障树分析(FTA)技术的基础上, 针对火工品系统实际情况, 提出了综合利用 FTA 与 BN 技术进行火工品安全失效分析的新方法。用此方法对某点火具的安全失效进行了分析, 找到了其安全失效原因为延期药密度不均、延期管内壁粘烟火药和报警装置误报, 据此制定了相应的解决措施, 分析结果与实际吻合较好。

关键词: 安全工程; 火工品; 点火具; 失效分析; 贝叶斯网络(BN); 故障树分析(FTA)

中图分类号: TJ45⁺5; X913.4

文献标识码: A

1 引 言

某辐射式延期点火具(以下简称点火具)起点燃导导弹发动机的作用。若点火具过迟点火, 将直接导致弹丸减速甚至提前跌落; 过早点火, 则会造成使用人员受伤, 甚至死亡。因此, 点火具的安全性与其可靠性直接影响导弹使用的安全性与可靠性。开展点火具安全失效分析, 对于提高导弹使用安全性具有重要意义。

失效树分析(FTA)是一种对火工品系统进行安全失效分析的有效方法^[1], 但 FTA 也有自身难以克服的局限性。20 世纪 80 年代以来, 人工智能领域中处理不确定性问题的强有力工具的贝叶斯网络(BN)^[2]可以较好地克服 FTA 存在的缺陷, 引起人们的广泛关注。近年来, BN 被引入到系统可靠性、安全性分析领域, 逐渐发展成为继 FTA 之后的一种进行系统失效分析的行之有效的新技术。本文将 BN 方法具体应用于点火具安全失效分析中, 对其进行了深入分析。

2 点火具安全失效分析方法

2.1 失效树分析方法

FTA 是基于顶事件, 用演绎分析的方法找出它的各种可能的原因事件, 直到基本事件为止的一种分析方法。FTA 可以进行定性分析与定量分析。定性分析的目的是求解最小割集; 定量分析的主要内容是计算

顶事件失效率。

FTA 的局限性主要有:(1)只考虑事件状态的二态性: 工作或失效。而实际中许多事件往往是多态的, 如电子器件可能是三态的: 正常、开路、短路。(2)事件之间只有与、或等确定性逻辑关系。实际中, 很多导致系统失效的下一级事件与上一级事件之间往往不存在确定的因果关系。

2.2 贝叶斯网络分析方法

BN 方法以节点表示事件变量, 变量之间的因果关系用有向弧表示, 通过条件概率表(CPT)来表示变量之间的联系强度。BN 建模以目标事件为基础, 然后利用演绎分析方法构造 BN 网络图, 最后为每个节点指定相应的 CPT。CPT 数据主要来源于专家经验和试验统计等途径。BN 模型建立后, 可进行系统推理(定量)分析。BN 是一种概率关系模型, 它利用 CPT 可以方便地表示事件多态性和逻辑关系的非确定性, 从而轻易突破 FTA 的局限, 利于 BN 模型准确描述系统并提高推理的准确性。

2.3 点火具安全失效分析方法

实际上 BN 方法和 FTA 方法相比二者各有优势。

首先, 模型建立方面。二者的建模均利用了演绎分析方法, 但 BN 建模尚需确定各节点 CPT 数据, 在数据样本缺乏必须大量依赖专家知识的场合时, 系统 BN 建模变得十分困难。当系统规模较小、逻辑关系确定时, 失效树(FT)的建立过程更显简单, 对系统失效各原因事件的层次关系和逻辑关系表达也更清晰。

其次, 定性分析方面。FTA 可求得最小割集, 最小割集是顶事件发生的直接原因, 这对于制定控制措施十分有意义。而 BN 虽然在模型上能够表示出各事件

收稿日期: 2006-04-17; 修回日期: 2006-06-27

基金项目: “十五”国防预研项目资助(项目编号 41305070301)

作者简介: 胡延臣(1979-), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 从事武器系统安全分析与评估研究。

e-mail: hyc3332002@126.com 或 hyc3332002@bit.edu.cn

之间是否相关以及关联程度,但其对规模较小、失效逻辑关系较确定的系统,不如 FTA 直观实用。对于火工品系统而言,规模通常较小,失效逻辑关系也较确定。

最后,定量分析方面。BN 能够轻易突破 FTA 的局限,有利于 BN 模型对系统的准确描述,提高定量分析的准确性。定量分析时,BN 可以比 FTA 进行更多有意义的分析,除了可以进行 FTA 能够进行的概率计算以外,还可以进行原因诊断计算,这对于分析失效原因,确定系统薄弱环节更有帮助。

综上所述可见:仅使用 FTA 或者 BN 中的任何一种方法来进行火工品安全失效分析都是不理想的,综合利用两种方法互相取长补短才是合理的选择。近年来,国内外学者研究并实现了 FT 向 BN 的转化,任何 FT 模型均可以被直接转化成 BN 模型^[3,4]。因此,首先建立火工品安全失效 FT 模型,利用 FT 进行定性分析,然后将 FT 直接转化成 BN 模型,根据实际情况,对 BN 模型进行适当修正,最后利用修正模型进行系统 BN 定量分析,这是一种进行火工品安全失效分析的有效思路。

3 某点火具安全失效分析

3.1 点火具概述

点火具的结构示意图如图 1 所示^[5]。它主要由带隔板的辐射传火管组件和带延期药的点火管组件。

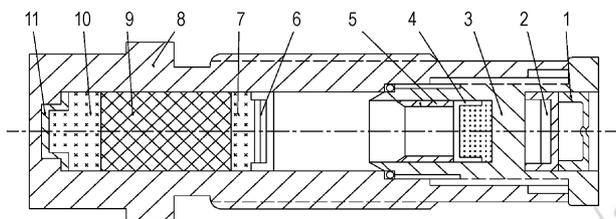


图 1 点火具结构示意图

- 1—辐射罩,2—1#热辐射火帽,3—传火管体,4—2#冲击激发火帽,
- 5—套筒,6—3#引燃火帽,7—引燃药,8—延期管体
- 9—延期药,10—烟火药,11—顶盖

Fig.1 Diagram of igniter structure

- 1—thermal cup, 2—1# thermal shock primer, 3—flame tube,
- 4—2# shock explosive primer, 5—inner barrel,
- 6—3# primer, 7—firing charge, 8—delay tube,
- 9—delay charge, 10—pyrotechnic charge, 11—inner capsule

点火具功能及作用过程如下:辐射罩固定并密封 1#火帽,当外界辐射能量作用到辐射罩时,辐射罩破裂,1#火帽被点燃,火帽输出燃爆能量经过传火管隔板衰减后作用于 2#火帽上,此时套筒牢固支撑 2#火

帽,使其不发生位移,在套筒支撑和冲击波共同作用下 2#火帽发火,穿过空腔 3#引燃火帽被引燃,继而引燃药发火,延期药燃烧延期,最后烟火药作用,冲破顶盖,下一级装药被点燃。点火具的功能框图如图 2 所示(注:虚线表示功能接口)。

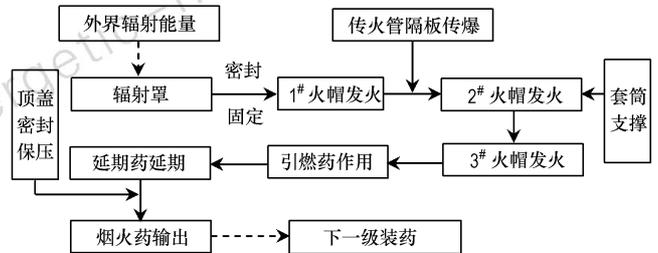


图 2 点火具功能框图

Fig.2 Diagram for function of the igniter

3.2 点火具安全失效定性分析

3.2.1 失效树的建立

点火具延期时间短会造成使用人员的伤亡,属于灾难性事故,于是选取点火具安全失效“延期时间短”作为顶事件建立 FT。

导致点火具延期时间短的直接原因有:延期药量少、延期药燃烧过快和延期药输入能量过大等。建立 FT 如图 3 所示,各事件的代号、名称及失效概率值见表 1,其中失效概率值由本领域专家给出,实际工作中还可以通过试验或历史资料统计获取。

3.2.2 点火具安全失效定性分析

根据 FT 图,利用布尔代数化简,得该 FT 图的结构函数如下:

$$T = A_1 + A_2 + A_3 \dots\dots\dots$$

$$= X_1X_2 + X_3 + X_4 + X_5X_6 + X_7X_8 + X_9X_{10} + X_{10}X_{11} + X_{12}X_{13}$$

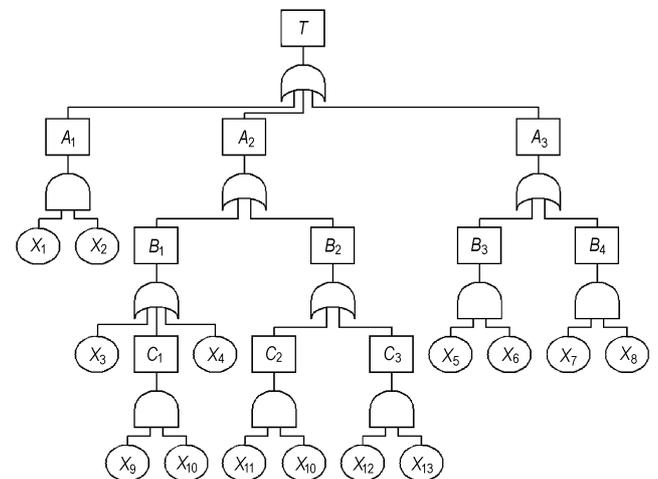


图 3 点火具安全失效树

Fig.3 Safety fault tree of the igniter

表 1 事件的代号、名称及失效概率值

Table 1 Code, name and probability of the failure events

code	name	probability	code	name	probability
T	延期时间短		X ₂	漏测延期药高度	2 × 10 ⁻³
A ₁	延期药量少		X ₃	延期药密度不均匀	1 × 10 ⁻⁴
A ₂	延期药燃烧过快		X ₄	延期管内壁粘烟火药	5 × 10 ⁻⁵
A ₃	延期药输入能量过大		X ₅	漏检药量	2 × 10 ⁻³
B ₁	串火燃烧		X ₆	2 [#] 火帽药量过大	7 × 10 ⁻⁵
B ₂	压药密度过低		X ₇	双 3 [#] 火帽	7 × 10 ⁻⁵
B ₃	2 [#] 火帽能量过大		X ₈	外观漏检	2 × 10 ⁻³
B ₄	3 [#] 火帽能量过大		X ₉	保压时间不足	4 × 10 ⁻⁴
C ₁	延期药有裂纹		X ₁₀	报警装置失灵	1 × 10 ⁻⁴
C ₂	铅砵未抬起		X ₁₁	人为失误	5 × 10 ⁻³
C ₃	压机故障		X ₁₂	压机不灵活	4 × 10 ⁻³
X ₁	漏装一次延期药	5 × 10 ⁻⁶	X ₁₃	用前未检查	2 × 10 ⁻⁴

通过结构函数解析,得该 FT 最小割集共有 8 种,也就是说有 8 种原因会造成该点火具延期时间短发生。其中 X₃ 或 X₄ 任一事件,都会造成延期药串火燃烧事件 B₁ 发生,导致延期药燃烧过快 A₂ 的发生,成为点火具延期时间短的引发因素,属于单点失效事件,单点失效事件的存在会大幅度降低点火具安全性指标,必须排除或者将其变成非单点失效事件。

3.3 点火具安全失效定量分析

3.3.1 BN 模型的建立

如前所述,任何 FT 均可以被等效转化成 BN,点火具安全失效 FT 模型建立后,便可以将其转化为等效 BN 模型(见图 4)。

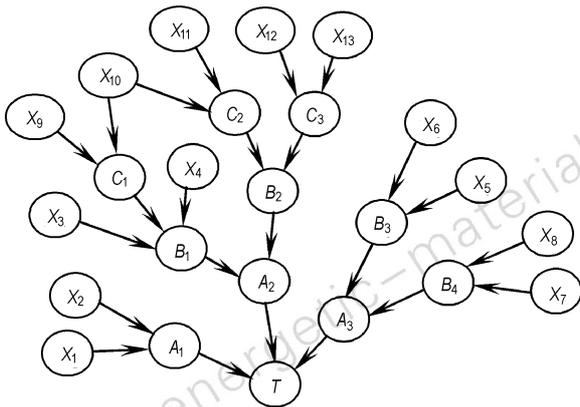


图 4 点火具安全失效 BN 模型

Fig. 4 Model of BN corresponding to the fault tree

在网络中,基本事件称作根节点,中间事件称非根节点,顶事件也叫做目标节点。网络中各节点状态均为正常或失效两态,根节点边缘失效率为相应基本事件失效率,父结点(箭头的来源结点)与子节点(被箭头指向的结点)之间的条件概率关系与 FT 模型逻辑

门对应,均为确定性逻辑关系。

3.3.2 BN 模型的修正

(1) 二态性修正。网络中节点 X₁₀ 状态为“失灵”和“正常”二态不合理,因为报警装置失灵至少包括“不工作”和“早报”,所以必需对 X₁₀ 由二种状态修正为三种,即“不工作、早报和正常”,调整 C₁ 的 CPT 如图 5 所示,对 C₂ 的 CPT 修改与此类似。其它节点状态为二态比较合理,不需要修正。

X ₉	0		1	
X ₁₀	0	1	0	1
P(C ₁ = 1 X ₉ , X ₁₀)	0.0	0.0	0.0	1.0

1 represents failure, 0 represents normal. the same are in the following.

X ₉	0			1		
X ₁₀	normal	prealarm	failure	normal	prealarm	failure
P(C ₁ = 1 X ₉ , X ₁₀)	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0

图 5 C₁ 的 CPT 修改过程

Fig. 5 Modification of the CPT of nodel C₁

(2) 确定性逻辑关系修正。对于节点 X₃ 而言,延期药不均匀并不能以概率为 1.0 使得串火燃烧发生,因为延期药不均匀可能造成燃烧过快而出现串火燃烧,也可能造成延期药燃烧缓慢甚至熄灭,因此,需要对 B₁ 的 CPT 进行修改如下:

$$P(B_1 = 1 | X_3 = 1, C_1 = 0, X_4 = 0) = 1.0 \Rightarrow$$

$$P(B_1 = 1 | X_3 = 1, C_1 = 0, X_4 = 0) = 0.5$$

概率值的更改依据专家知识给出,实际工作中还可以通过试验统计获取。另外节点 B₂ 的 CPT 也需要做类似修改,此处不予赘述。其它父、子节点之间确定性逻辑关系比较合理,不再需要修正。

由此可见,在 FT 模型中难以描述的事件状态多态性和逻辑关系非不确定性,在 BN 模型中只需要更改相应的 CPT 便可以轻易实现。修正后的 BN 模型更加符合实际,有利于提高点火具安全失效定量分析的准确性。

3.3.3 点火具安全失效定量分析

应用 BN 修正模型可以对点火具这一安全失效现象进行定量分析。原则上,在 FTA 上可做的定量分析均能在 BN 上进行,在 FTA 中,对顶事件失效率的计算,对应于 BN 中计算目标事件的先验概率;对于基本事件和割集重要度的计算,相当于在给定失效的条件下,计算根节点和割集的后验概率。

(1) 目标事件失效率计算。利用修正模型,将表 1 各底事件失效概率值代入,计算得点火具延期时间短概率 $P(T = 1) = 1.2 \times 10^{-4}$ 。

(2) 根结点事件重要度计算。假定延期时间短发

生,即节点“T”的概率为1.0,代入修正BN模型进行运算,得各根节点事件失效的后验概率如表2所示。FT定性分析求得的最小割集的后验概率,可以利用表2数据方便算出,此处从略。

表2 发生延期时间短情况下各根节点失效概率值
Table 2 Probability of the failure of root node under the short delay

node	prior probability	posterior probability	node	prior probability	posterior probability
X_1	5×10^{-6}	8.7×10^{-5}	X_8	2×10^{-3}	3.2×10^{-3}
X_2	2×10^{-3}	2.1×10^{-3}	X_9	4×10^{-4}	6.6×10^{-4}
X_3	1×10^{-4}	0.4123761	X_{10}	2×10^{-5} (早报)	0.1649387
X_4	5×10^{-5}	0.4123467		8×10^{-5} (不工作)	3.6×10^{-3}
X_5	2×10^{-3}	4.3×10^{-3}	X_{11}	5×10^{-3}	8.3×10^{-3}
X_6	7×10^{-5}	1.2×10^{-3}	X_{12}	4×10^{-3}	7.3×10^{-3}
X_7	7×10^{-5}	1.2×10^{-3}	X_{13}	2×10^{-4}	3.5×10^{-3}

从各根节点概率值的变化可以看出:在点火具延期时间短发生情况下,各节点的概率值均有了不同程度的提高,其中 X_3 、 X_4 和 X_{10} (早报)发生的概率值最大,分别排列一、二、三位,并远大于其它节点,即导致点火具延期时间短事故发生的最重要因素是 X_3 、 X_4 和 X_{10} (早报)失效的发生,对比FT定性分析结果,可以发现,二者分析基本上是一致的,说明利用BN方法进行分析的结果是可信的。 X_{10} (早报)后验概率的大幅度提高是由于对节点 X_{10} 进行多状态修正时,改变了“早报”状态与其结果事件的逻辑关系所致。

(3) 诊断推理计算。例如,在点火具延期时间短已经发生的情况下,为了查明失效原因,进行了生产现场检查,通过检查发现报警装置不工作,压机灵活好用。于是,可将 $P(T=1)=1.0$, $P(X_{10}=不工作)=1.0$, $P(X_{12}=1)=0.0$,作为已知条件加入BN修正模型进行推理计算。通过计算发现后验概率最大者为节点 X_{11} ,其失效率 $P(X_{11}=1)=0.9094406$,其次为节点 X_9 ,失效率 $P(X_9=1)=0.0727552$,其它节点失效率变化不大。由此判断,在目前的条件下,人为失误造成铅砵未抬起和保压时间不足是点火具延期时间短的主要原因。

(4) 最可能事件组合分析。实际中,造成系统失效的原因往往不是单一事件,而是某些事件的组合。因此,除了单个事件的失效率大小外,人们往往更关注哪几个事件的组合导致系统失效的概率最大。对点火具BN修正模型进行整个网络状态空间搜索,可得造成点火具延期时间短发生的最可能的事件组合为:节点 X_3 、 B_1 和 A_2 同时失效,其它节点正常。因此,如果能够采取措施防止该事件组合中任一事件发生,便可

以大幅度降低点火具系统的安全失效率。

4 失效分析结论及解决措施

4.1 失效分析结论

(1) 点火具安全失效概率为 1.2×10^{-4} ,尚达不到点火具安全性指标小于 10^{-6} 要求^[6];

(2) 导致点火具安全失效的原因至少有8种组合,其中有延期药密度不均匀、延期管内壁粘烟火药二种单点失效;

(3) 造成点火具安全失效的主要因素是延期药密度不均匀、延期管内壁粘烟火药、报警装置失灵;

(4) 在报警装置不工作,压机灵活好用的情况下,造成点火具延期时间短的主要原因是人为失误和保压时间不足;

(5) 导致点火具安全失效的最可能事件组合是事件延期药密度不均匀、串火燃烧和延期药燃烧过快同时发生,其它事件正常。

4.2 解决措施

为了使点火具的安全性指标达到 10^{-6} 要求,首先应该考虑如何防止延期药密度不均匀、串火燃烧和延期药燃烧过快,也就是防止延期药密度不均匀、延期管内壁粘烟火药和报警装置失效的发生,或者将其失效的概率降低到可以接受的程度。延期药密度不均匀主要表现为延期药精度差,点火具延期称量散差大。对于多组份机械混合延期药而言,完全避免延期药不均匀现象的发生是不可能的。因此,对生产出来的延期药必须进行百分之百的均匀性检验,合格后才能投产使用。延期管内壁粘烟火药会导致延期药串火燃烧,进而导致点火具延期时间短。实际中可以在生产工艺流程中,在“压烟火药”工序后“装压延期药”工序前增加“清擦烟火药浮药”工序,以消除延期管内壁粘烟火药的可能性。对于报警装置误报而言,可以采取定期对报警装置进行检定的措施。这一分析与目前点火具的安全生产情况是非常吻合的,这一事实进一步说明了应用FTA与BN综合分析法对火工品安全失效进行分析是非常有效的。

参考文献:

- [1] 汪佩兰,王翠珍. 火工品系统失效分析的有效方法:故障树分析[J]. 火工品,1993(3):30-35.
WANG Pei-lan, WANG Cui-zhen. An effective method of failure analysis for initiators, fault tree analysis[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1993(3): 30-35.
- [2] Pearl J. Probabilistic reasoning in intelligent systems[M]. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann, 1989.

(下转 147 页)

- [7] 马世昌. 基础化学反应[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2003.
[8] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.

- [9] 董师颜, 张兆良. 固体火箭发动机原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.

Effects of the Binding Agents on the Burning Rate of the Tungsten Delay Composition

XU Jun-feng, PENG Jia-bin, WANG Xiu-zhi, ZHANG Zhou-mei, ZHANG Ye

(Shann-xi Applied Physics-Chemistry Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: To study the effects of the binding agents on the burning rate of the tungsten delay composition, two delay compositions in bound form were made with nitrocellulose and Teflon separately. An experiment on the two delay compositions was carried out and their delay time at room temperature and high temperatures (120, 160, 180 °C) were obtained. The results show that the burning rate of the composition with nitrocellulose as binding agent is much faster than that of the composition with Teflon as binding agent. When the temperature rises, the burning rate of the composition with nitrocellulose as binding agent increase rapidly while the burning rate of the composition with Teflon as binding agent does slowly.

Key words: applied chemistry; delay composition; tungsten type delay composition; binding agent; burning rate

(上接 136 页)

原子发射光谱双谱线法测量半导体桥 (SCB) 等离子体温度

冯红艳, 李艳, 张琳, 吴蓉, 王俊德, 朱顺官

(南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094)

摘要: 在原子发射光谱双谱线法的基础上, 设计了含有两个干涉滤光片和光电倍增管双谱线测温系统。仪器的最高的时间分辨率为 0.1 μs 。讨论了不同能量输入条件下 SCB 等离子体的温度和等离子体的存在时间。实验结果表明在电压 24 ~ 32 V, 电容 68 μF 不变的情况下, 等离子体的温度从 2710 K 升高到 3880 K, 等离子体存在时间从 170.7 μs 上升到 283.4 μs 。

关键词: 应用化学; SCB 等离子体; 原子发射光谱法; 温度测定

中图分类号: TJ55; O657.31

文献标识码: A

(上接 143 页)

- [3] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, 71: 249 - 260.
[4] 李剑川, 胡莺庆, 秦国军, 等. 基于故障树的贝叶斯网络建造方法与故障诊断应用[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 24: 225 - 228.
[5] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 177 - 178.
[6] GJB2865 - 97. 火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则[S].
LI Jian-chuan, HU Niao-qing, QIN Guo-jun, et al. Application and construction of bayesian networks based on fault trees[J]. *Computer Engineering & Application*, 2003, 24: 225 - 228.

Safety Fault Analysis of Igniter Based on FTA and BN

HU Yan-chen^{1,2}, WANG Pei-lan¹, ZHENG Heng³, LI Hao²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. PLA Military Representative Office in No. 474 Factory, Fushun 113003;

3. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Bayesian networks(BN) and fault tree analysis(FTA) were compared for safety fault analysis. According to the initiator system, a new method that used FTA & BN to perform fault analysis was proposed. The reasons causing safety fault to the igniter with the method were analyzed as the non-uniform density of delay powder, the sticking of protechnic charge to the internal wall of delay tube and the failure of alarm device, etc. The corresponding solution was established at end.

Key words: safety engineering; initiators; igniter; fault analysis; bayesian networks (BN); fault tree analysis (FTA)