

基于贝叶斯网络的 LNG 储罐泄漏事故树改进研究

马欣*, 师统麾, 薛涛, 徐洋洋

(西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500)

摘要:通过对 LNG 储罐泄漏事故树模型进行分析,得到 LNG 储罐泄漏事故树的最小割集与结构重要度,确定了 LNG 储罐泄漏失效系统中的薄弱环节。同时由于 LNG 储罐的泄漏原因复杂性,而事故树中事件只有正常和失效两态,与工程实际不相符,使得事故树在应用于 LNG 储罐泄漏原因分析中受到了限制。为了能够提高 LNG 储罐安全失效分析的准确性,通过贝叶斯网络对 LNG 储罐事故树的二态性进行了修正。结果表明,修正后的贝叶斯网络模型更加符合工程实际。

关键词: LNG 储罐; 泄漏; 事故树; 二态性; 贝叶斯网络

中图分类号: X933.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)04-0179-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.04.044

Improvement of accident tree analysis of LNG tank leakage with Bayesian Networks

MA Xin*, SHI Tong-hui, XUE Tao, XU Yang-yang

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Through the analysis of accident tree model of LNG storage tank leakage, the minimum cut set and structure importance of LNG tank leakage accident tree are obtained. The weak link in LNG tank leakage failure system is determined. At the same time, because of the complexity of the LNG storage tank leakage reason, the accident tree is dimorphism (normal and failure). This is not in accordance with engineering practice. It makes the accident tree limited in LNG storage tank leakage reason analysis. In order to both solve the dimorphism in the accident tree of the LNG storage tanks and improve the accuracy of the LNG storage tank safety failure analysis, the dimorphism of LNG tank accident tree is modified by Bayesian network. The results show that the revised Bayesian network model is more in line with engineering practice.

Key words: LNG tank; leakage; accident tree; dimorphism; Bayesian network

液化天然气(liquefied natural gas, LNG)作为一种清洁、高效的能源越来越受到各国的关注,多数国家将 LNG 作为首选能源。LNG 的储运都是以液态形式进行的,储罐一旦发生泄漏,遇到火源将会引发严重的火灾爆炸事故^[1]。1944 年至今全球发生 20 起陆上 LNG 罐区泄漏燃爆事故,给经济和人身安全带来不可估量的损失。因此,提高并延长 LNG 储罐可靠性,保障其安全运行,对安全生产和国民经济的稳定发展具有十分重要的意义^[2]。

本文中主要通过建立 LNG 储罐事故树,分析 LNG 储罐泄漏事故中的薄弱环节,并通过贝叶斯网络对 LNG 储罐泄漏事故树进行了改进。

1 LNG 储罐泄漏事故树的建立与分析

事故树分析(fault tree analysis, FTA)是一种按

事故发展的时间顺序由初始事件开始推论可能的后果,从而进行危险源辨识的方法。事故树分析能识别各类系统的危险性并进行评价,既适用于定性分析,也适用于定量分析,并具有简明形象的特点。

FTA 图是表示故障因果关系的分析图,将导致事故原因的事件按因果逻辑关系逐层列出,用树型图从上到下表示出来,构成一种逻辑模型,主要包括顶事件、中间事件和底事件^[3]。

FTA 的基本假设有^[4]:①事件状态为两态,工作(W)或失效(F);②各事件之间独立;③事件之间只有与、或逻辑门关系。

1.1 LNG 储罐泄漏事故树的建立

将 LNG 储罐泄漏作为顶事件,而引起储罐泄漏的直接原因包括储罐过度充装、附属管线破裂、低压破裂、动力缺失、自然灾害、超压破裂和一些其他原

收稿日期:2016-09-13;修回日期:2017-02-14

基金项目:国家安全生产监督总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目(sichuang-0020-2015AQ)

作者简介:马欣(1973-),男,硕士,副教授,主要从事压力容器及管道的风险评估技术、天然气水合物开发技术研究工作,通讯联系人,028-83037205, lutmx@163.com.

因都会导致 LNG 储罐泄漏^[5], 这些事件中的任何一个都会导致顶事件的发生。将这些事件作为次顶事件, 采用类似方法深入分析得到 LNG 储罐泄漏事故树, 如图 1 所示。

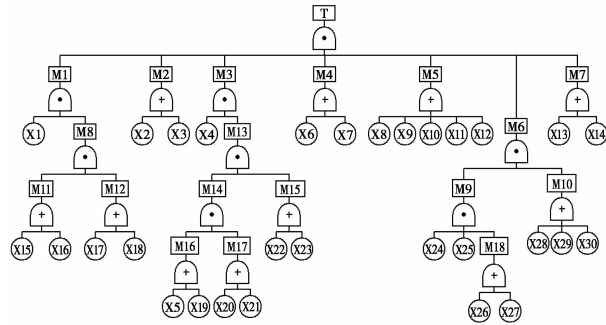


图 1 LNG 储罐泄漏事故树

事故树中各个事件符号说明见表 1。

表 1 LNG 储罐泄漏事件说明

符号	事件	符号	事件
T	LNG 储罐泄漏失效	X ₆	仪表空气缺失
M ₁	充装过度	X ₇	动力电源缺失
M ₂	附属管线破裂	X ₈	雷击
M ₃	低压破裂	X ₉	地震
M ₄	动力缺失	X ₁₀	水灾
M ₅	自然灾害	X ₁₁	滑坡
M ₆	超压破裂	X ₁₂	泥石流
M ₇	储罐断裂	X ₁₃	脆性断裂
M ₈	罐内达高液位	X ₁₄	焊接缺陷
M ₉	储罐压力保护设施失效	X ₁₅	液位指示器失效
M ₁₀	罐内达到排气压力	X ₁₆	操作员误读液位指示器
M ₁₁	充装时操作员对罐内上升液位无反应	X ₁₇	高液位报警器失效
M ₁₂	操作员对高液位未做出反应	X ₁₈	高液位报警时操作员未行动
M ₁₃	罐内达真空释放压力	X ₁₉	闪蒸气压缩机空吸
M ₁₄	罐内达补气压力	X ₂₀	低压和低压报警器失效
M ₁₅	补气系统故障	X ₂₁	低压报警时操作员未行动
M ₁₆	罐内达到低压	X ₂₂	电动球阀要求时失效
M ₁₇	操作员对低压未做出反应	X ₂₃	操作员未开启电动球阀
M ₁₈	操作员对罐内高压未做出反应	X ₂₄	与火炬管线相连的压力控制阀失效
X ₁	液位高度开关失效	X ₂₅	压力安全阀失效
X ₂	管线上排气安全阀失效	X ₂₆	高压报警器失效
X ₃	管线上温度安全阀失效	X ₂₇	高压报警时操作员未行动
X ₄	真空调节阀失效关闭	X ₂₈	大气压的下降
X ₅	外界大气压的上升	X ₂₉	出口管线阀门失效关闭
		X ₃₀	罐内液体翻滚

1.2 LNG 储罐泄漏事故树分析

经过计算得到所有的最小割集如下: X₁X₁₅X₁₇, X₁X₁₅X₁₈, X₁X₁₆X₁₇, X₁X₁₆X₁₈, X₁₀, X₁₁, X₁₂, X₁₃, X₁₄, X₂, X₂₄X₂₅X₂₆X₂₈, X₂₄X₂₅X₂₆X₂₉, X₂₄X₂₅X₂₆X₃₀, X₂₄X₂₅X₂₇X₂₈, X₂₄X₂₅X₂₇X₂₉, X₂₄X₂₅X₂₇X₃₀, X₃, X₄X₁₉X₂₀X₂₂, X₄X₁₉X₂₀X₂₃, X₄X₁₉X₂₁X₂₂, X₄X₁₉X₂₁X₂₃, X₄X₅X₂₀X₂₂, X₄X₅X₂₀X₂₃, X₄X₅X₂₁X₂₂, X₄X₅X₂₁X₂₃, X₆, X₇, X₈, X₉。

结构重要度大小:

$$\begin{aligned}
 I(X_{14}) &= I(X_{13}) = I(X_{12}) = I(X_{11}) = I(X_{10}) = \\
 I(X_9) &= I(X_8) = I(X_7) = I(X_6) = I(X_3) = I(X_2) = \\
 I(X_4) &> I(X_1) > I(X_{25}) = I(X_{24}) > I(X_{23}) = \\
 I(X_{22}) &= I(X_{21}) = I(X_{20}) = I(X_{19}) = I(X_{18}) = \\
 I(X_{17}) &= I(X_{16}) = I(X_{15}) = I(X_5) > I(X_{27}) = \\
 I(X_{26}) &> I(X_{30}) = I(X_{29}) = I(X_{28})
 \end{aligned}$$

通过计算结果可以得出, LNG 储罐泄漏失效事故树一共有 11 个一阶最小割集, 4 个三阶最小割集, 14 个四阶最小割集。通过割集基本理论可知, 割集结构中出现次数越多, 其结构重要度越大^[6-7], 直接影响 LNG 储罐泄漏失效, 是系统的薄弱环节。

LNG 储罐泄漏基本事件的概率通过相关文献资料和 OREDA、CCPS 等失效数据手册确定, 若无法从失效数据资料中获得基本事件的失效概率, 则采用模糊集理论和专家打分相结合的方法确定其发生概率^[8]。LNG 储罐泄漏基本事件概率见表 2。

表 2 LNG 储罐泄漏基本事件概率

基本事件	事件概率	基本事件	事件概率
X ₁	0.01	X ₁₆	0.001
X ₂	0.00867	X ₁₇	0.001
X ₃	0.0000212	X ₁₈	0.05
X ₄	0.0000212	X ₁₉	0.00000692
X ₅	0.01	X ₂₀	0.00025
X ₆	0.00000737	X ₂₁	0.01
X ₇	0.00000272	X ₂₂	0.0022
X ₈	0.000000724	X ₂₃	0.01
X ₉	0.0000000852	X ₂₄	0.00000692
X ₁₀	0.000000724	X ₂₅	0.0000212
X ₁₁	0.0000159	X ₂₆	0.00025
X ₁₂	0.000000936	X ₂₇	0.05
X ₁₃	0.000724	X ₂₈	0.01
X ₁₄	0.00503	X ₂₉	0.0314
X ₁₅	0.00867	X ₃₀	0.001

2 LNG 储罐泄漏事故树的贝叶斯网络化

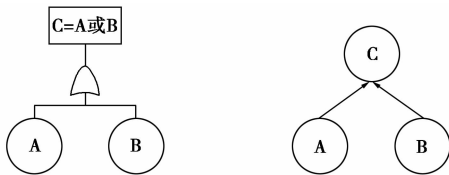
贝叶斯网络是基于概率推理的图形化网络,更为贴切地蕴含了网络节点变量之间的因果关系^[9]。贝叶斯网络在推理和描述系统失效的方法上与事故树有很多的相似之处,而贝叶斯网络相较于事故树可以描述部件的多种失效模式,这一点是事故树所不具备的^[10]。

2.1 从事故树到贝叶斯网络

贝叶斯网络与事故树在构造方法与推理机制上具有相似性,事故树的构成是基本事件和逻辑门,贝叶斯网络主要的2个构成是节点和连接强度,事故树中事件对应贝叶斯网络中的节点,逻辑门对应贝叶斯网络中的条件概率表。因此,可将事故树转化为贝叶斯网络(见图2、图3)。其步骤如下:

(1)故障树中事件对应贝叶斯网络中的节点,当故障树中存在相同事件,则对应贝叶斯网络中的同一节点。

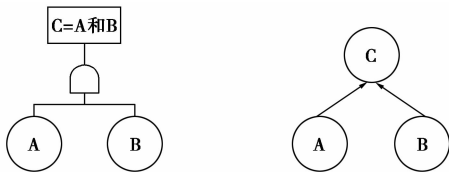
(2)故障树中门事件在贝叶斯网络中转换为由父代指向子代的有向弧线,并建立等价的条件概率表。



$$P(C=1|A=0, B=0) = 0 \quad P(C=1|A=0, B=1) = 1$$

$$P(C=1|A=1, B=0) = 1 \quad P(C=1|A=1, B=1) = 1$$

图2 或门的 FT 与 BN 和条件概率表



$$P(C=1|A=0, B=0) = 0 \quad P(C=1|A=0, B=1) = 0$$

$$P(C=1|A=1, B=0) = 0 \quad P(C=1|A=1, B=1) = 1$$

图3 与门的 FT 与 BN 和条件概率表

2.2 将 LNG 储罐泄漏事故树转化为贝叶斯网络

根据事故树到贝叶斯网络基本步骤,将 LNG 储罐泄漏事故树转化为贝叶斯网络,见图4。贝叶斯网络中的根节点对应事故树的基本事件,网络中的连接强度对应事故树中的逻辑门。

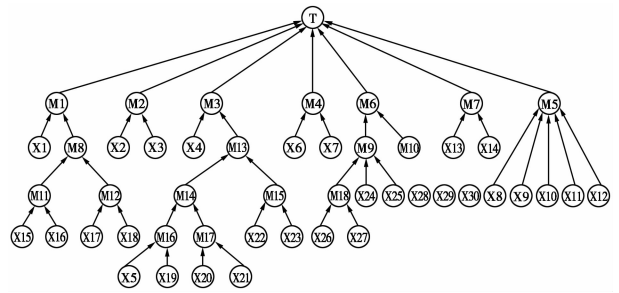


图4 LNG 储罐泄漏贝叶斯网络

3 贝叶斯网络改进 LNG 储罐泄漏事故树

3.1 LNG 储罐泄漏事故树模型中存在的问题

从本文中第2部分可以知道事故树中的事件和贝叶斯网络中的节点是对应的,事故树中的事件状态均只有正常和失效2种状态^[11],即事故树中的 X₁₄焊接缺陷对应于贝叶斯网络中的节点只有两态,显然这是不合理的,因为焊接缺陷包括焊接孔穴、裂纹、固体夹杂、未熔合和形状缺陷等^[12]。不同的焊接缺陷会产生不同程度应力集中,不同程度地降低 LNG 储罐的承载能力,所以必须对事故树中事件 X₁₄的二态性进行修正。

3.2 LNG 储罐泄漏事故树二态性修正

在此讨论焊接缺陷中的正常态、严重缺陷和孔穴3个状态。从事故树到贝叶斯网络的转换过程可知,事故树中的事件对应贝叶斯网络中的节点,逻辑门对应贝叶斯网络中相应的连接强度,所以可以通过修改相应的连接强度对二态性进行修正。

修改后的贝叶斯网络中 X₁₃ 和 X₁₄ 的三态与 M₇ 连接强度(条件概率表)见表3。

表3 修正后的基本事件 X₁₃、X₁₄ 与 M₇ 连接强度

事件	状态			状态		
X ₁₃	0			1		
X ₁₄	0	1	ξ	0	1	ξ
M ₇	0	1	0	1	1	1

注:表中0态代表不存在缺陷,1代表存在严重焊接缺陷,ξ代表存在单层≤2.5%,多层≤5.0%的孔穴^[13]。

定义信念 $Bel = P(x|e)$, 即已知证据 e 的情况下,事件 x 发生的条件概率, e 可表示为 $e = e_x^- \cup e_x^+$, 其中 e_x^- 对应以 X 为根节点的子树, e_x^+ 对应的是树的其余部分,令 $\lambda(x) = P(e_x^-|x)$ 表示对诊断的支持, $\pi(x) = P(x|e_x^+)$ 表示对预报的支持,则 $Bel = \alpha\lambda(x)\pi(x)$, 其中 $\alpha = [P(e_x^-|e_x^+)]$, 为归一化因子^[14]。

根据修改后的条件概率表可得到:

$$\begin{aligned}
P(M_7 = 1 | X_{13} = 0, X_{14} = 0) &= 0 \\
P(M_7 = 1 | X_{13} = 0, X_{14} = 1) &= 0 \\
P(M_7 = 1 | X_{13} = 0, X_{14} = \xi) &= 0 \\
P(M_7 = 1 | X_{13} = 1, X_{14} = 0) &= 1 \\
P(M_7 = 1 | X_{13} = 1, X_{14} = 1) &= 1 \\
P(M_7 = 1 | X_{13} = 1, X_{14} = \xi) &= 1
\end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}
\pi(x_{13}) &= P(x_{13}) = (7.24e - 3, 0.999\ 276) \\
\pi(x_{14(1)}) &= P(x_{14(1)}) = (3.64e - 3, 0.996\ 36) \\
\pi(x_{14(\xi)}) &= P(x_{14(\xi)}) = (1.39e - 3, 0.998\ 61)
\end{aligned}$$

则:

$$\begin{aligned}
\pi M_7(x_{13}) &= P(x_{13}) = (7.24e - 3, 0.999\ 276) \\
\pi M_7(x_{14(\xi)}) &= P(x_{14(\xi)}) = (1.39e - 3, 0.998\ 61)
\end{aligned}$$

由于 X_{13} 与 X_{14} 通过或门联接,同时考虑焊接缺陷 X_{14} 存在 ξ 态,可求得:

$$\begin{aligned}
\pi(M_7) &= \sum_{x_{13}, x_{14(1)}, x_{14(\xi)}, M_7} P(M_7 | x_{13}, x_{14(1)}, x_{14(\xi)}) \pi M_7(x_{13}) \pi M_7(x_{14(1)}) = \\
&= (2.635\ 36e - 5, 0.999\ 973\ 646\ 4)
\end{aligned}$$

则:

$$\begin{aligned}
Bel(M_7) &= \alpha \lambda(M_7) \pi M_7 = \\
&= \alpha(2.635\ 36e - 5, 0.999\ 973\ 646\ 4)
\end{aligned}$$

通过归一化处理消除 α ,即可得到:

$$Bel(M_7) = (2.635\ 36e - 5, 0.999\ 973\ 646\ 4)$$

4 结论

(1)通过对 LNG 储罐泄漏事故树模型进行分析,得到 LNG 储罐泄漏事故树的最小割集与结构重要度,进一步确定了 LNG 储罐泄漏失效系统中的薄弱环节,提高了安全工作水平及安全对策的准确性。

(2)由于贝叶斯网络与事故树在构造方法与推

理机制上存在相似性,本文中应用贝叶斯理论对 LNG 储罐泄漏事故树模型中焊接缺陷的二态性进行了修正,修正后的结果更加符合实际,有利于提高 LNG 储罐安全失效分析的准确性。

参考文献

- [1] 马欣,付晓君,余景刚,等. RBI 技术应用于 LNG 设备上的改进研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(4):107-109.
- [2] 马欣,雒定明,伍开松,等. III类压力容器设计阶段风险评估与系统开发[J]. 天然气工业,2014,34(7):104-108.
- [3] 刘北林,吴绒. 基于模糊事故树的 LPG 储罐火灾、爆炸事故分析[J]. 物流科技,2007,(12):18-22.
- [4] 谢斌,张明珠. 贝叶斯网络对故障树方法的改进[J]. 绵阳师范学院学报,2004,23(2):29-32.
- [5] 孙晓平,朱渊,陈国明,等. 国内外 LNG 罐区燃爆事故分析及预防措施建议[J]. 天然气工业,2013,3(5):126-128.
- [6] 于庭安,戴兴国. LNG 储罐火灾和爆炸事故树分析[J]. 中国安全科学学报,2007,17(8):110-113.
- [7] 景国勋,贾智伟,段振伟,等. 最小割集在系统安全分析方法中的应用[J]. 中国安全科学学报,2004,14(5):99-102.
- [8] 王大庆,张鹏,郭夔,等. 考虑相关性时 LNG 储罐泄漏模糊数事故树定量分析[J]. 中国安全科学学报,2014,24(1):97-101.
- [9] 马欣,刘兴华,胡博,等. 基于贝叶斯网络的常减压装置塔体安全性预测[J]. 化工装备技术,2013,34(1):27-31.
- [10] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks [J]. J Reliab Eng Syst Safe, 2001, 71:249-260.
- [11] 尹晓伟,钱学文,谢里阳. 系统可靠性的贝叶斯网络评估方法 [J]. 航空学报,2008,29(6):1482-1486.
- [12] 耿都都,春春妍,纳学洋,等. LNG 储罐用 9Ni 钢及其焊接性分析[J]. 焊管,2015,38(5):5-8.
- [13] ISO 6520-1. Defect Analysis[S]. 2007.
- [14] 王广彦,马志军,胡起伟,等. 基于贝叶斯网络的故障树分析 [J]. 系统工程理论与实践,2004,(6):66-68. ■

CHINAPLAS 2017 国际橡塑展:

巴斯夫展示轻量化“协作机器人”,帮助制造商提高生产效率

2017年3月29日,巴斯夫将在 CHINAPLAS 2017 国际橡塑展上展示与中科新松有限公司(以下简称“新松”)联合开发的工业用协作机器人。这种机器人采用巴斯夫 Elastollan®热塑性聚氨酯弹性体、Ultramid®玻纤增强聚酰胺和 3D 打印聚酰胺-6 制造,其轻量化的设计和材料可帮助制造商在提高生产速度的同时降低能源成本。

与传统工业机器人相比,协作机器人成本更低廉、适应性更强、更轻便,因此在机器人学和自动化领域具有重要意义。巴斯夫的先进材料不仅是一种更轻盈的替代材料,还可通过注塑成型或 3D 打印等方式加工成复杂的形状。这些材料具有诸多优异特性,包括材料强度高、触感舒适、耐磨损、耐化学腐蚀和电绝缘性强等。(范荣)