

基于贝叶斯网络的 HAZOP – LOPA 集成分析与应用

姚锡文¹, 许开立¹, 汤规成^{1,2}, 王文菁¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国石油 辽河石化公司, 辽宁 盘锦 124002)

摘 要: 针对事件树、故障树等风险分析存在一定局限性的问题, 提出了基于贝叶斯网络的 HAZOP – LOPA 集成风险评估新思路. 编制系统故障树, 利用 GeNIe 软件将其映射成贝叶斯网络, 运用贝叶斯网络双向推理进行故障预测和诊断, 快速识别系统薄弱环节并确定为风险贝叶斯故障节点, 结合 HAZOP 与 LOPA 对其进行风险集成分析, 提出相应的独立防护层, 根据防护层失效概率并参照半定量风险矩阵确定剩余风险等级. 该风险评估模型在辽河石化公司催化裂化装置的反应再生系统中进行应用, 结果证实该模型在复杂工艺信息不确定条件下, 能有效提高风险评估的针对性、客观性与准确性.

关 键 词: 故障树; 贝叶斯网络; 防护层分析; 催化裂化; 风险分析

中图分类号: X 937 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2014)09-1356-04

Integrative Risk Analysis and Application of HAZOP-LOPA Based on Bayesian Networks Inference

YAO Xi-wen¹, XU Kai-li¹, TANG Gui-cheng^{1,2}, WANG Wen-jing¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaohe Petrochemical Industries Company, China Petroleum, Panjin 124002, China. Corresponding author: YAO Xi-wen, E-mail: yxw_20061005@126.com)

Abstract: Considering that the event tree and fault tree analysis bear some disadvantages, a new integrative risk analysis of HAZOP-LOPA was proposed on the basis of Bayesian networks. The system fault tree was established and mapped into Bayesian networks by using GeNIe software. Then fault prediction and diagnosis could be conducted by Bayesian networks two-side reason function, and it could rapidly identify the system weakness, which was chosen to be the Bayesian risk fault node. Integrative risk analysis was used by combining HAZOP with LOPA, putting forward the corresponding independent protective layer, and the residual risk level could be determined according to failure probability of protective layer and semi-quantitative risk matrix. This risk assessment model was then applied in the reactor regenerator system of RFCC equipment in Liaohe Petrochemical Industries Company, and the application results can verify the pertinence, objectivity and accuracy under the condition of uncertain information in complex system.

Key words: fault tree; Bayesian networks; layers of protection analysis; catalytic cracking; risk analysis

石油化工行业自动化程度越来越高,从原料到产品,绝大多数属于易燃易爆物质,若某一环节发生故障或操作失误,便极易引发火灾爆炸事故. 对石化装置火灾爆炸事故进行定量风险评估,及时辨识并控制系统中容易导致火灾爆炸等重大事故的薄弱环节尤为重要. 而目前常用的事件树、故障树等分析方法存在一定的局限性,例如故障树

分析只能考虑系统工作或失效两种状态,不能考虑多态间的假设推理关系,计算难度颇大,甚至无法计算.

贝叶斯网络技术可以直接基于故障树生成贝叶斯网络,避免大量计算,可简单处理故障树难以解决的问题^[1-2]. 本文提出基于贝叶斯网络的 HAZOP – LOPA 集成风险评估新方法,并将其应

用于辽河石化公司催化裂化装置的反应 - 再生系统中,有针对性地预测火灾、爆炸发生的可能性。

1 贝叶斯理论概述

1.1 贝叶斯网络的推理问题

贝叶斯网络 (Bayesian networks) 能很好地表示变量的随机不确定性和相关性,并能进行不确定性推理. 贝叶斯网络中的推理问题有三大类: 后验概率问题、最大后验假设问题以及最大可能解释问题. 人们通常说的概率推理就是指后验概率问题^[3-6], 即已知贝叶斯网中某些变量的取值, 计算另外一些变量的后验概率分布的问题。

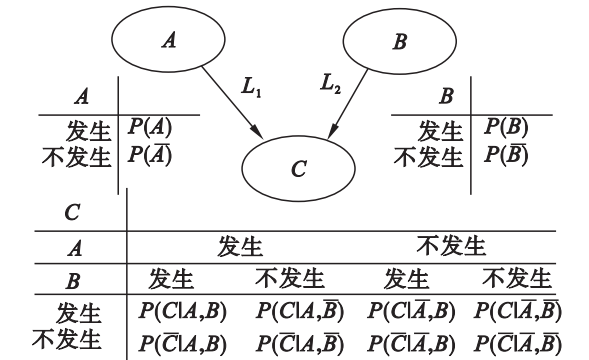


图 1 贝叶斯网络示意图

Fig. 1 The sketch map of Bayesian networks

贝叶斯网络推理问题本质是计算条件频率分布. 如图 1 所示的贝叶斯网络, 其联合概率分布是

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

1.2 故障树与贝叶斯网络的转化

贝叶斯模型与故障树结构一一对应, 将故障树映射为贝叶斯网络主要基于两个原则, 一是贝叶斯节点与故障树各事件对应; 二是贝叶斯网络中的条件频率是故障树中逻辑门关系的反应^[7-8].

构建贝叶斯网络时可以根据理解直接构建, 故障树可以直观地展现故障现象和原因之间的因果关系, 因此, 根据故障树分析构建的贝叶斯网络模型是关于故障的有效模型^[9-10]. 在此基础上建模可以有效地避免主观性, 提高可信度。

2 HAZOP - LOPA 集成风险分析

2.1 分析思路

故障树分析在可靠性评估中存在一定局限性, 提出了基于贝叶斯网络的 HAZOP - LOPA 集

成风险评估新方法. 首先编制系统故障树, 将其映射成对应贝叶斯网络, 构建条件概率表, 运用贝叶斯网络推理进行系统可靠性评估, 研究后果频率、后验概率, 从而快速识别系统的薄弱环节; 根据计算结果找出最容易导致装置发生事故的原因事件, 选择该基本事件为风险贝叶斯网络节点。

运用危险和可操作性研究 (HAZOP) 与防护层分析 (LOPA) 结合的方法对该风险贝叶斯故障节点进行分析, 全面分析重大事故场景的全过程, 比较被评价的防护层故障频率与允许的防护层故障频率, 确定被评价防护层是否符合安全防护要求. 根据半定量风险矩阵确定风险等级, 通过防护层失效概率来评估剩余风险等级, 研究防护层措施是否已将剩余风险降到可接受程度。

2.2 分析步骤

HAZOP - LOPA 集成风险分析步骤如下:

1) 熟悉工艺对象和意图, 并搜集资料。

2) 对偏差进行 HAZOP 分析. 表 1 是典型的风险矩阵. 事故后果严重度分为五个等级, 每一对事故后果严重度和事故发生概率对应一个风险级别。

3) 分析偏差引起的潜在危险、原因及后果, 确定初始事件、中间事件和后果事件的频率, 并计算未减轻事件的频率及等级。

4) 列举独立防护层措施, 确定其失效概率。

5) 结合事故后果等级与减轻事件的频率等级, 依据半定量风险矩阵确定剩余风险等级, 研究是否需进一步采取安全措施降低剩余风险。

表 1 半定量风险矩阵

Table 1 Semi-quantitative risk matrix

后果严重度	事故发生频率				
	1	2	3	4	5
1 低	1	2	3	4	5
2 较低	2	4	6	8	10
3 中	3	6	9	12	15
4 高	4	8	12	16	20
5 较高	5	10	15	20	25

3 实例应用

3.1 催化裂化装置反应 - 再生系统工艺简介

辽河石化公司反应 - 再生系统工艺流程如图 2 所示。

该系统主要由反应器和再生器组成. 其工艺流程如下: 原料经换热后与回炼油混合进入提升管, 上升过程中在高温和催化剂的作用下分解, 经气提蒸气提升进入沉降器上段反应分解后, 反应

油气和催化剂的混合物进入沉降器顶部的旋风分离器,经两级分离后,油气进入集气室输送至分馏塔底部进行分馏,分离出的催化剂则从旋风分离器底部翼阀排出。以提升管反应器为例说明 HAZOP-LOPA 集成风险分析在生产实际中的应用。

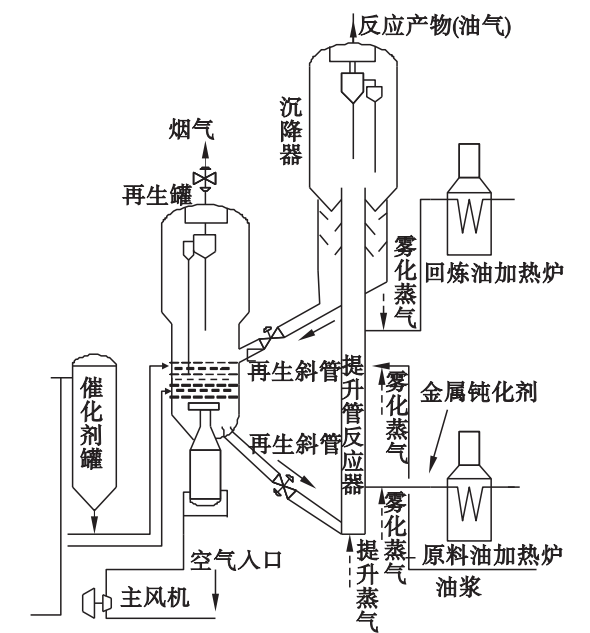


图 2 反应-再生系统工艺流程图
Fig. 2 Process flow chart of reactor-regenerator system

3.2 反应器火灾、爆炸故障树与贝叶斯网络

由反应-再生系统工艺流程编制的反应器火灾、爆炸故障树如图 3 所示,将故障树转化为贝叶斯网络见图 4。根据各基本事件的先验频率将贝叶斯网络节点数据全部更新后,诊断计算系统故障条件下各个组件的后验频率。篇幅所限,各个基

本事件的先验和后验频率不一一列出。
故障树中,各基本事件代号说明如下:
T 反应器火灾爆炸事故; M_1 反应器超压; M_2 反应器进空气; M_3 沉降器超压; M_4 提升管超压; M_5 两器差压超限; M_6 系统堵塞; M_7 油气分离器液面过高; M_8 分馏塔底液面高; X_1 差压超限自保系统故障; X_2 仪表失灵; X_3 气提蒸气带水; X_4 单级旋风分离器故障; X_5 分馏塔冲塔; X_6 反应压力剧增; X_7 原料油带水; X_8 粗旋风分离器故障; X_9 差压调节阀故障; X_{10} 开工未关闭放空阀; X_{11} 大油气管线结焦; X_{12} 冷却器堵塞; X_{13} 液位计失灵; X_{14} 调节阀故障; X_{15} 冷却器内漏; X_{16} 反应进料量突增。

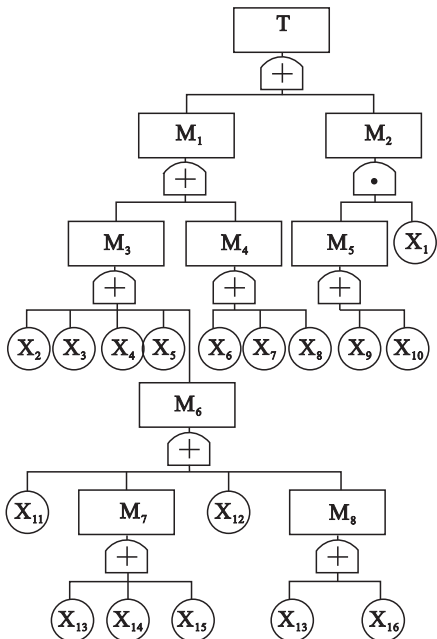


图 3 反应器火灾、爆炸故障树图
Fig. 3 Fault tree of reactor for fire and explosion accidents

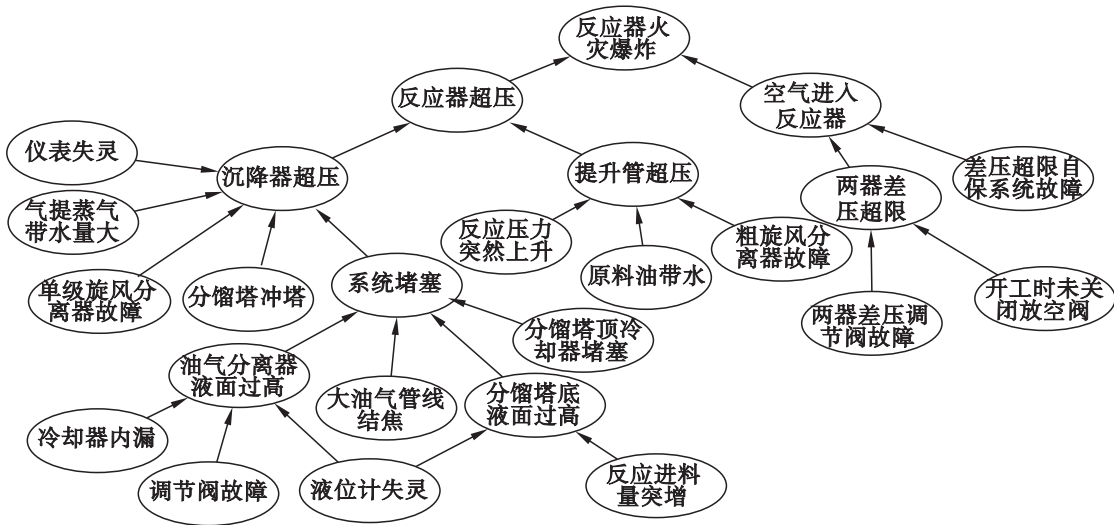


图 4 反应器火灾、爆炸事故贝叶斯网络
Fig. 4 Bayesian network of reactor for fire and explosion accidents

结果表明事故发生很可能是分馏塔冲塔、粗旋风分离器故障和液位计失灵引起.

3.3 HAZOP – LOPA 集成风险分析

由贝叶斯网络可知,基本事件 X_{13} 容易导致分馏塔底液面过高,并通过连锁反应造成反应器火灾爆炸事故.选取液位计失灵为风险贝叶斯网络故障节点,对该节点所包含的分馏塔底液面偏高进行 HAZOP – LOPA 集成风险分析,结果如表

2 所示.

从表 2 可知,分馏塔底液面偏高这一事故场景未降低事件的频率, 2.00×10^{-5} 超过了其风险可接受值 1.00×10^{-5} ,采取设置控制阀及液位报警两个独立保护措施后,事故发生频率由 2.00×10^{-5} 降低到了 4.00×10^{-8} ,且风险等级由未减轻事件的 10 级降至减轻事件的 5 级剩余风险.

表 2 分馏塔底液面偏高 HAZOP – LOPA 集成风险分析
Table 2 Integrative risk analysis of HAZOP-LOPA for fractionator high liquid level

事故场景描述	后果	风险可接受		始发事件	中间事件	后果事件
	严重程度	不可接受值	容许值	描述及频率	描述及频率	描述及频率
LT-205 液位计失灵使塔底液面超高,反应压力增大,引起管线破裂油气泄露;油气进分馏塔严重结焦导致油浆外甩,引起火灾、爆炸	5	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-5}	液位计失灵造成分馏塔底液面超高 1.00×10^{-1}	1) 仪表设计缺陷 1.00×10^{-1} 2) 维护人员未发现仪表故障 1.00×10^{-1}	1) 引起火灾、爆炸 2.00×10^{-2} 2) 造成人员伤亡 1.00
未减轻事件			独立防护层措施		减轻事件	
频率	频率等级	风险等级	描述	PDF	频率	频率等级 剩余风险等级
2.00×10^{-5}	2	10	1) 设手动控制阀控制油浆外甩量 2) 设液位超高报警,人员及时响应	1) 1.00×10^{-1} 2) 2.00×10^{-2}	4.00×10^{-8}	1 5
					设置自动控制阀控制分馏塔底液位,液位高阀开,低阀关	

4 结 论

1) 考虑到传统的风险评估方法在系统信息不确定条件下应用存在局限性,提出了基于贝叶斯推理的 HAZOP – LOPA 集成风险分析的新方法.

2) 通过贝叶斯网络双向推理进行故障预测和诊断,找出薄弱环节,确定风险贝叶斯故障节点,将 LOPA 融入 HAZOP 中对节点进行定量风险分析,可以有针对性地设置独立防护层降低剩余风险.

3) 将新方法应用于催化裂化装置中的反应 – 再生系统,结果表明该法较传统的事件树、故障树分析更加科学、合理,验证了其有效性与可行性.

参考文献:

[1] Langseth H,Portinale L. Bayesian networks in reliability[J]. *Reliability Engineering and System Safety*,2007,92(1):92 – 108.
[2] Jesen F V. Bayesian networks and decision graphs[M]. New York:Springer-Verlag,2001:18 – 28.
[3] Muller A, Suhner M C, Iung B. Formalization of a new

prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system [J]. *Reliability Engineering and System Safety*,2008,93(2):234 – 253.
[4] Vander G L C. Bayesian belief networks;odds and ends[J]. *The Computer Journal*,1996,6(3):97 – 113.
[5] Hood C S, Ji C Y. Proactive network fault detection [J]. *IEEE Transaction on Reliability*,1997,46(3):333 – 341.
[6] Pearl J F. Propagation and structuring in belief networks[J]. *Artificial Intelligence*,1986,29(3):246.
[7] Brooker P. Experts, Bayesian belief networks, rare events and aviation risk estimates [J]. *Safety Science*, 2011, 49 (8) : 1142 – 1155.
[8] 白永忠,张广文,蒋军成. 复合型工艺危害分析与控制技术的应用研究[J]. *中国安全生产科学技术*,2013,9(1):86 – 89.
(Bai Yong-zhong, Zhang Guang-wen, Jiang Jun-cheng. Research on application of hazard analysis and control technology for integrated process [J]. *Journal of Safety Science and Technology*,2013,9(1):86 – 89.)
[9] Hallowell M R, Gambatese J A. Construction safety risk mitigation [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*,2009,135(12):1316 – 1323.
[10] Center for Chemical Process Safety. Layers of protection analysis—simplified process risk assessment [M]. New York:American Institute of Chemical Engineers,2001.