

复杂系统安全评价模式的集成研究及应用

姚锡文¹, 汤规成^{1,2}, 许开立¹, 闫放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: 为了充分提高对复杂系统安全评价的准确性与可靠性,提出了将危险度评价法、HAZOP 分析、LOPA 研究与 Bow-Tie 分析有机结合的复杂工艺系统安全评价模型. 首先应用危险度评价法确定系统中危险度等级较高的单元,对其进行详细的 HAZOP 分析;然后利用 LOPA 对后果严重的事故场景进行研究,依据半定量风险矩阵评估事故的剩余风险等级,借助于 LOPA 完善 HAZOP 分析;最后通过 Bow-Tie 分析详细识别出防止防护层失效的关键措施,从根本上避免有重大伤亡或财产损失的工艺安全事故的发生. 以辽河石化公司的重油催化裂化装置为例进行应用研究,验证了该模型的适用性与可靠性.

关 键 词: 危险度评价;危险性与可操作性研究;防护层分析;领结图分析;安全评价

中图分类号: X 937 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)07-1047-05

Integration and Application Research on Safety Evaluation Model of Complex Systems

YAO Xi-wen¹, TANG Gui-cheng^{1,2}, XU Kai-li¹, YAN Fang¹

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

Abstract: In order to fully improve accuracy and reliability of safety assessment for complex systems, a risk evaluation model for complicated process by combining risk evaluation with HAZOP, LOPA and Bow-Tie analysis. Firstly, higher risk units in system are chosen by risk evaluation method, and detailed HAZOP analysis is conducted for such higher risk node. Secondly, LOPA is applied for scenarios with higher risk, and the residual risk level of accident is evaluated based on the semi-quantitative risk matrix, and HAZOP case library was enriched by means of LOPA; Finally, key activities to prevent the failure of IPL (independent protection layer) are identified uselessly working through Bow-Tie analysis, then the safety accident with heavy casualties or property damage caused by system unsafe behavior is fundamentally prevent. Taking the RFCC (residue fluid catalytic cracking) equipment in Liaohe Petrochemical Industry Company as an example, the applicability and reliability of the model were verified through field application.

Key words: risk evaluation; HAZOP; LOPA; Bow-Tie analysis; safety evaluation

对于复杂流程工业,系统安全事故的发生、发展和爆发过程类似多米诺骨牌效应,事故是由一次非正常的事件触发,比如某个阀门误操作导致某工艺变量发生偏差^[1-2]. 如今对企业的安全生产要求越来越高,而对于复杂工艺系统,单独使用某种系统安全分析方法不能全面评估其潜在危险.

对此,国内外众多专家学者在采用不同的安全评价方法进行组合应用方面展开了大量研究^[3-8]. 这些研究虽然在一定程度上可以提高对企业安全评价的客观性,但是对于后果较为严重的重大事故场景,评价人员很难对其准确地进行安全评价,并且缺乏对防止重大工艺危险所采取

收稿日期: 2014-06-03

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2013020137)。

作者简介: 姚锡文(1987-),男,山东五莲人,东北大学博士研究生;许开立(1965-),男,山东鄄城人,东北大学教授,博士生导师。

的确保措施的安全评价,对确保防护措施持续发挥作用的关键活动的研究资料更是缺乏。

本文通过结合危险度评价法、HAZOP 分析、LOPA 研究以及 Bow - Tie 分析的优势,提出了一种复杂工艺系统安全评价模型,并将其在辽河石化公司催化裂化装置进行现场应用,验证了该模型的适用性与可靠性,可为复杂工艺系统客观、准确、全面地进行安全评价提供一种新思路。

1 概 述

1.1 危险度评价简介

危险度评价通过将系统内的装置划分成若干单元,根据其中的危险物质及设备情况来设置评价的工艺参数;然后对单元内的容量、压力、温度、操作条件等内容进行客观打分,具体赋分标准见文献[9]表 1;将各项得分相加,根据其总分对各个单元的危险度进行评估。其中,总分 ≥ 16 为 I

级高度危险;总分在 11 ~ 15 之间为 II 级中度危险;总分在 1 ~ 10 之间为 III 级低度危险。

1.2 HAZOP 分析

HAZOP 分析通过用引导词来设想工艺参数可能出现的偏离设计意图的情况,系统地辨识装置系统中潜存的危险源,评估生产装置现有安全防护措施(如预防、检测、控制和缓解措施)的充分性,根据需要提出改善建议,并采取适当的针对性强的安全防护措施,使工艺系统更加安全可靠。

1.3 LOPA 研究

LOPA 研究是在经 HAZOP 分析基础上进行的,通过事故的发生频率以及后果的严重程度,参照半定量风险矩阵,来综合评定事故的风险等级和采取减缓措施后的剩余风险等级;研究经采取防护层措施后,是否将系统的风险水平降至可接受水平。LOPA 研究所采用的半定量风险矩阵如表 1 所示,矩阵由危险剧情发生的频率和不利后果的严重程度构成。

表 1 LOPA 半定量风险矩阵
Table 1 Semi-quantitative risk matrix of LOPA

后果严重度				年事故发生频率			
后果等级	人员伤亡	财产损失	环境污染	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 1$	> 1.0
				很不可能	不可能	可能	很有可能
I	可忽略的	极小	极小	0	1	2	3
II	轻微	小	小	2	3	4	5
III	严重	大	大	3	4	5	6
IV	个体死亡	重大	重大	4	5	6	7
V	多人死亡	巨大	巨大	5	6	7	8

1.4 Bow - Tie 分析

Bow - Tie 分析也称领结分析或蝴蝶结模型,是一种集故障树、事件树相结合的复合型工艺安全评价技术。通过故障树分析事故的原因,并采取防止顶上事件发生的预防控制措施;通过事件树分析找出防止不期望的输出事件发生的关键事件,归纳顶上事件可能导致的事故后果,从而采取减缓控制措施消除危险源与潜在有害因素。

2 复杂工艺系统安全评价新模型

该模型集合了危险度评价、HAZOP 分析、LOPA 研究与 Bow - Tie 分析的优势,对复杂系统的安全评价有较好的适用性与可操作性,具体思路如下:

1) 通过危险度评价法对系统装置内各节点

的危险度进行客观性的打分,根据危险度分析确定装置中的危险节点,并选择处于 I, II 级高度危险的节点进行全面详细的 HAZOP 分析。

2) 利用 HZAOP 分析识别工艺过程中的危险源,详细分析过程中偏差引起的潜在危险、产生原因及后果,进而研究应该采取的安全措施。

3) 对具有较高后果等级的事故场景进行 LOPA 研究,通过事故的发生频率以及后果的严重程度,参照半定量风险矩阵,综合评定事故的风险等级和采取减缓措施后的剩余风险等级,设置相应的独立防护层措施,研究经采取防护层措施后,是否将系统的风险降至可接受水平。

4) 利用 Bow - Tie 领结分析法对剩余风险等级仍较高的事件进行深入研究,详细识别出可以使防护层措施持续有效的关键措施。

3 应用实例与结果分析

3.1 工艺流程简介

以辽河石化公司的重油催化裂化装置中的反应-再生系统为例,对复杂工艺系统安全评价模型进行应用.反应-再生系统的工艺流程较为复杂,限于篇幅,其主要工艺简述如下:原料油经过加热汽化后进入提升管反应器进行裂化.提升管

中催化剂处于稀相流化输送状态,反应产物和催化剂进入沉降器,并经汽提段用过热水蒸气提,再经旋风分离器分离后,反应产物从反应系统进入分馏系统,催化剂沉降到再生器.

3.2 危险度评价结果

为了确定装置的总体危险等级和最大危险度,需将装置划分成若干评价单元,依据其工艺、设备参数及工艺危险性等计算单元固有危险程度.评价结果见表2.

表2 危险度评价结果
Table 2 Risk evaluation results

单元名称	主要操作 介质名称	分值	设备容量 m ³	分值	温度 ℃	分值	压力 MPa	分值	操作类型	分值	总分	危险等级
反应器	油气、催化剂	10	20	2	505	5	0.12	0	有危险	2	19	I
第一再生器	催化剂、烟气	2	气相>500	5	680	5	0.15	0	有危险	2	14	II
分馏塔	油气、水汽	10	428	5	350	5	0.10	0	有危险	2	22	I
吸收塔	油气	10	液相≥50	2	38	0	1.00	0	有危险	2	14	II
解吸塔	脱乙烷汽油	5	液相≥100	5	104	0	1.00	0	有危险	2	12	II
稳定塔	汽油、液化气	10	液相≥100	5	150	0	1.00	0	有危险	2	17	I

3.3 HAZOP 分析结果

根据危险度评价表可知,催化裂化装置中危险等级处于I级高度危险的为:反应器、分馏塔和稳定塔,因此,必须对这3个单元进行详细的

HAZOP分析,确保及时消除隐患并重点防范.对反应器的HAZOP分析结果如表3所示.

3.4 LOPA 研究结果

该事故的LOPA研究过程如下:

表3 反应器HAZOP研究部分结果
Table 3 Parts of results about reactor HAZOP

序号	偏差	原因	后果	现有保护措施	建议措施
节点1	反应器料位上升	1) 工作人员对料位表的读数低 2) 进料流量控制阀门故障	反应器料位上升,造成第二再生器料位下降,严重时导致第二再生器烟气串入反应系统引起爆炸	第二再生器有料位指示	1) 增设第二再生器的低料位报警 2) 增加料位低联锁以及触发其他相应联锁动作
节点2	反应器的器壁温度过高	反应-再生系统衬里脱落	器壁温度过高,催化剂导致的磨损加剧,严重可导致器壁磨损、泄漏	操作规程,夜间灭灯热点检测	建议使用红外摄像机
略...					

1) 初始事件确定为“员工对料位表错误读数低,造成反应器料位上升”,其年发生频率为 10^{-1} .

2) 由表3可知,此场景下的防护层为第二再生器有料位指示.设置独立防护层为两层,第一层:增设第二再生器低料位报警和人员响应,失效概率为 0.5×10^{-1} .第二层:增加料位低联锁以及触发其他相应联锁动作,失效概率为 0.2×10^{-1} .

3) 减缓后果频率等于初始事件发生的频率

与防护层失效概率的乘积,该场景下为

$$1 \times 10^{-1} \times 0.5 \times 10^{-1} \times 0.2 \times 10^{-1} = 1 \times 10^{-4}.$$

4) 增设两独立防护层之后,该场景的后果等级仍为V级,但事故频率降为 1×10^{-4} ,由 $10^{-1} \sim 1$ 降至 $10^{-4} \sim 10^{-2}$,查表1可知,事故剩余风险水平降至5级.

经LOPA完善后的HAZOP研究结果见表4.其中,各事件的频率与防护层失效概率根据企业的统计资料得到.

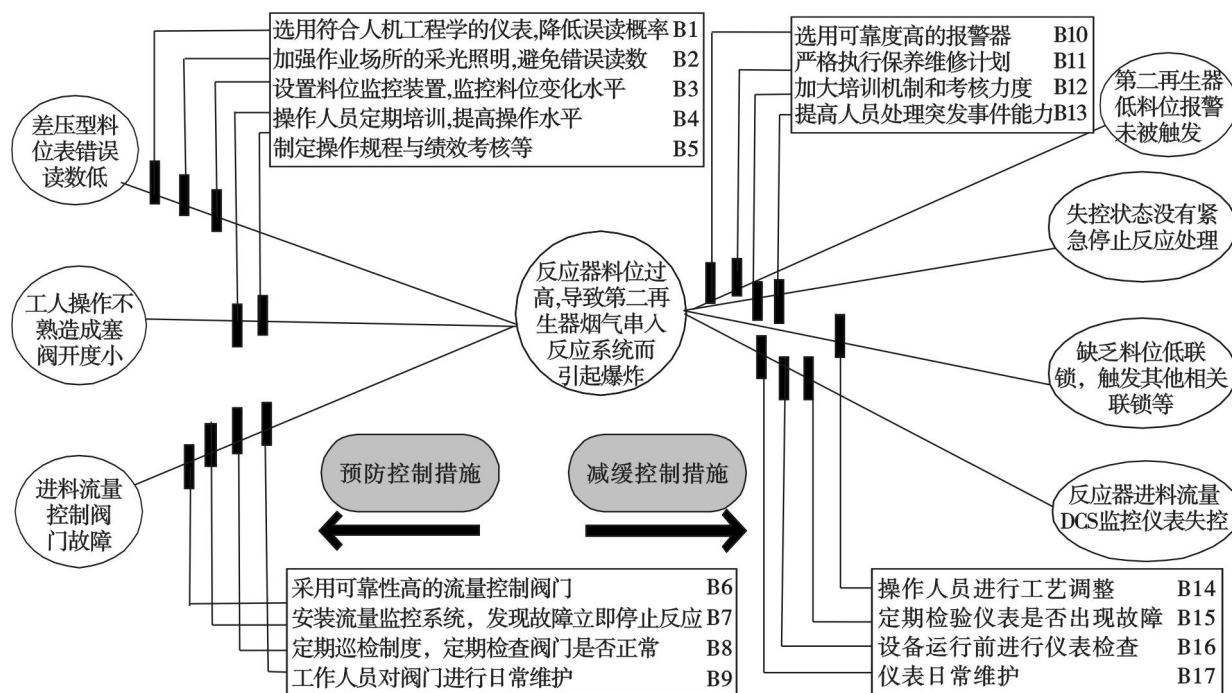
表 4 补充完善的 HAZOP 研究结果
Table 4 Results of HAZOP after supplement

偏差	原因	后果	后果等级	频率等级	风险等级	安全措施	剩余后果等级	剩余频率等级	剩余风险等级
反应器料位过高	1) 工作人员对料位表的读数低 2) 进料流量故障	反应器料位上升, 导致第二再生器烟气串入反应系统引起爆炸	V	$10^{-1} \sim 1$	7	1) 增设第二再生器低料位报警 2) 增加料位低联锁	V	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	5

3.5 Bow - Tie 分析结果

通过 HAZOP 与 LOPA 集成风险分析后, 可知“反应器料位上升而导致爆炸”的剩余风险等级由 7 级下降到 5 级, 但其剩余风险水平仍然较

高, 因此, 对该事件 Bow-Tie 分析, 找出提高防护层措施可靠度的关键活动, 进而避免反应器因料位上升而发生爆炸事故, 结论图分析结果如图 1 所示。



分析图 1 可知, 为了最大限度降低“反应器料位过高引起爆炸”的概率, 确保采取的独立防护层措施持续有效, 需要采取 9 条防止预防控制措施和 8 条降低事故后果的减缓控制措施, 通过 Bow - Tie 分析, 可进一步降低因反应器料位过高引起爆炸事故的风险。

4 结 论

1) 对于复杂工艺系统, 单独使用某种系统安全分析方法不能全面评估潜在危险, 提出了复杂工艺系统安全评价模型。

2) 该模型集成了 4 种系统安全分析方法的优点, 应用危险度评价法确定系统中危险度等级较高的单元, 并对其进行 HAZOP 分析; 然后利用 LOPA 对后果严重的事故场景进行研究; 最后利用 Bow - Tie 分析详细识别出使防止防护层措施失效的关键措施, 从根本上避免有重大伤亡或财产损失的工艺安全事故的发生。

3) 以辽河石化公司的催化裂化装置为例, 对该安全评价模型进行现场应用, 验证了其可操作性与准确性, 为复杂工艺系统的安全评价提供了一种新模式和新思路。

(下转第 1055 页)