

保护层分析研究综述

姜 好¹, 张 鹏², 王大庆³

(1. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 四川 成都 610500; 3. 西南石油大学石油工程学院, 四川 成都 610500)

摘要:从保护层分析的定义、典型化工装置的独立保护层的“洋葱”形分布、独立保护层的要求、保护层事件树的发展路径、风险决策等方面对国内外保护层分析相关研究进行论述和分析。然后以保护层分析法的优点及局限性为研究的切入点, 讨论了为克服这些缺点, 产生的一些扩展保护层分析方法, 包括将一些过程危险分析法与保护层分析的联合; 保护层分析专家系统, 将专家系统引入保护层分析中以识别事故场景; 模糊保护层分析, 处理数据的不确定性。给出了一些联合技术和保护层分析的扩展应用, 将保护层产生以来的相关研究做出分类并进行了综述。

关键词:过程安全; 风险评价; 保护层分析; 研究综述; 事故场景

中图分类号: X937

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)04-0009-05

Review on layer of protection analysis

JIANG Hao¹, ZHANG Peng², WANG Da-qing³

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
3. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The development of layer of protection analysis (LOPA) at home and abroad has been introduced, including its definition, “onion-shape” distribution and requirement of protection layers for typical chemical device, development path of event tree for protection layers, risk-based determination, etc. The advantages and disadvantages of LOPA are analyzed. To overcome the disadvantages, some extended approaches are provided such as combination of production process risk analysis and LOPA, an inclusion of an expert system into accident scenario identification and new approach to deal with uncertainty connected with input data (fuzzy LOPA). Some combined techniques and the extended applications for LOPA are provided. The research related to LOPA around the world is classified as well.

Key words: process safety; risk assessment; layer of protection analysis (LOPA); review; accident scenario

在石油、石油化工生产中, 由于其生产装置的规模向大型化、超大型化、智能化方向发展, 生产装置的密集程度越来越高, 对操作、控制及安全的要求也越来越严格。石化装置的产品一般都属于易燃、易爆或有毒介质, 一旦出现事故, 就会造成装置的全线停车, 其损失是巨大的, 有时甚至是灾难性的。

保护层分析(layer of protection analysis, LOPA)是一种半定量的风险分析和评估工具。LOPA方法源于20世纪80年代末由当时的化学品制造商协会(现为美国化学理事会)出版的《责任关怀——工艺安全管理实施准则》和1993年CCPS出版的《化工过程安全自动化指南》。LOPA通常使用初始事件频率、后果严重程度和独立保护层(IPLs)失效频率的数量级大小来表征场景的风险。在LOPA中, 将对提供的每一保护层的有效性进行分析, 然后将所有保护层联合作用下的事故风险与风险可容忍标准

比较, 以确定是否有足够的保护层以防止意外事故的发生(风险是否能够容忍)。

1 保护层分析法

1.1 保护层

由于过程工业的复杂性和危险化学品的使用会对周围的人、财产和环境造成很大的威胁, 在过程工业中采用了各种不同的安全保护层以减少事故的风险。典型化工装置的独立保护层呈“洋葱”形分布, 从内到外一般设计为工艺设计、基本过程控制系统、警报与人员干预、安全仪表系统、物理防护、释放后物理防护、工厂紧急响应以及社区应急响应等^[1]。

安全仪表系统作为过程工业安全的重要保障, 广泛地采用安全仪表系统(SIS)以确保生产的正常进行, 防止事故的发生和扩大, 使生产过程在有可靠安全保障的前提下, 实现全生产过程的自动化运行。

收稿日期: 2013-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50974105); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20105121110003)

作者简介: 姜好(1989-), 女, 硕士生; 张鹏(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事管道风险评价、完整性管理及管道数字化建设等方面的研究, zp_swpi@sina.com。

目前,在石油、石油化工工业装置的设备和工艺过程设计中越来越注重安全装置的安全性。通常在装置中,工艺过程的目标安全水平是由国家标准、条例、政策法规和环保要求或根据国际标准来确定的。

近年来,国际上通用的两大安全标准是 1996 年美国仪表协会 ISA 通过和颁布的 ANSI/ISA S84.01—1996 标准^[2]和 1997 年国际电工委员会 IEC 通过和颁布的 IEC 61508/61511 标准^[3]。这两大安全标准的重要目的是用于确定工艺过程所要求的安全功能,建立它们的 SIL 等级以及在 SIS 中实现其安全功能来满足工艺过程所要求的安全水平。

1.2 独立保护层

保护层是一类安全保护措施,是能有效阻止始发事件演变为事故的设备、系统或者动作。兼具独立性、有效性和可审查性的保护层称为独立保护层(independent protection layer, IPL),正确识别和选取独立保护层是完成 LOPA 分析的重点内容之一。

设备、系统或行动作为独立保护层,必须满足:

(1)有效性。独立保护层是针对特定的后果或危险事件而设计(按照设计的功能发挥作用,必须能有效地防止后果发生)。

(2)独立性。独立于初始事件和任何其他已经被认为是同一场景的独立保护层的构成元件。

(3)可审查性。对于阻止后果的有效性和 PFD 必须能够以某种方式(通过记录、审查、测试等)进行验证。

如果防护措施不能满足这些要求,则它不是独立保护层。

1.3 LOPA 事件树

LOPA 是由事件树分析发展而来的一种风险分析技术,作为辨识和评估风险的半定量工具,是沟通定性分析和定量分析的重要桥梁与纽带。如图 1 所示显示了某一初始事件的事件树。事件树显示了初始事件所有可能的后果。一个 LOPA 场景代表了穿过事件树的一条路径(通常选择导致最严重后果的路径)。

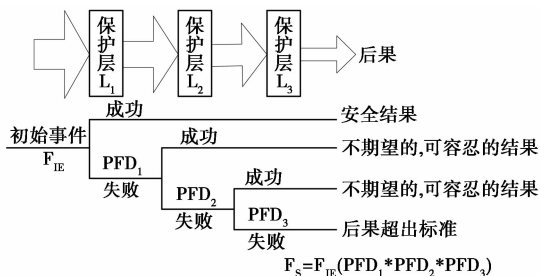


图 1 LOPA 事件树

在 LOPA 中,对于后果,可根据设备类型、泄漏率以及爆炸引起的超压来评估后果严重性的数量级大小。已知初始事件的频率(F_{IE})和各独立保护层要求的失效概率(PFD),就可以得到特定后果的频率。

2013 年邓彬等^[4]将 LOPA 与轨迹交叉理论相结合对系统安全性进行分析,并运用 LOPA 分析 IPL 的 PFD,判断其风险等级,以决定是否应该增加安全措施,从而提高系统的安全性。

1.4 风险决策

在对某一事件进行风险分析时,要假设与该事件相关的所有保护层全部失效,以最大的可能性和最严重的后果来确定风险等级,然后通过保护层的分析确定是否能将风险降低到可接受水平,进而确定是否提出建议措施。

对比可采用矩阵形式来表示后果频率和后果等级之间的关系。如果计算的风险低于风险容忍标准,则场景不需要额外的减缓措施;如果高于风险容忍标准,则需要减缓措施甚至是停车。风险矩阵法相当简单而且是 LOPA 中最常用的风险决策方法。

2 LOPA 的优缺点

LOPA 耗费的时间比定量分析少,能够集中研

表 1 保护层分析的优点及缺点

优点	缺点
主要考虑具有高后果和高频率的事件(主要的危害事故)	不能识别事故情景而且必须和一些定性危害分析方法联合使用
易进行扩展应用	风险严重度的定性评价
考虑所有识别的初始事件	对减缓后果严重度的风险指数无效
对优先考虑的危险场景及进行风险决策很有用	所采用的频率数据具有不确定性
确定独立保护层对每一个初始原因都有效	不能评估复合事件及保护层之间的相互依赖关系
有效地分配风险减少措施	要求失效时的概率只对独立保护层和初始原因可用
从系统的角度考虑问题	很少注意没有安全仪表系统的保护层
与故障树分析法和定量风险分析法相比,LOPA 花费的时间较少	在使用 LOPA 时有许多缺陷:①不考虑人和作业文化;②不考虑常见失效模式;③频率数据库的有限性及正确使用的困难性;
企业员工很易学习和理解 LOPA 体系可将适用范围扩	④不考虑独立保护层对整个系统及其他风险评价和管理目标的影响。

究后果严重或高频率事件,善于识别、揭示事故场景的始发事件及深层次原因,集中了定性和定量分析的优点,易于理解,便于操作,客观性强,用于较复杂事故场景效果甚佳。所以在工业实践中一般在定性的危害分析如 HAZOP,检查表等完成之后,对得到的结果中过于复杂的、过于危险的以及提出了 SIS 要求的部分进行 LOPA,如果结果仍不足以支持最终的决策,则会进一步考虑如 QRA 等定量分析方法。通过与其他过程危险性分析方法的对比研究^[1],可以确定 LOPA 分析的研究范围,明确与其他分析方法相比的优缺点,其主要的优缺点如表 1 所示。

3 LOPA 分析研究进展

3.1 扩展 LOPA 分析领域

LOPA 有许多优点和缺点,缺点的存在促进了对传统 LOPA 方法的改进,因此,伴随着 LOPA 在特定系统中的应用及对这些系统的特性进行分析,研究者认为有必要对 LOPA 进行适当修改或者考虑与其他过程危险性分析方法进行结合,开发不同的 LOPA 扩展方法。

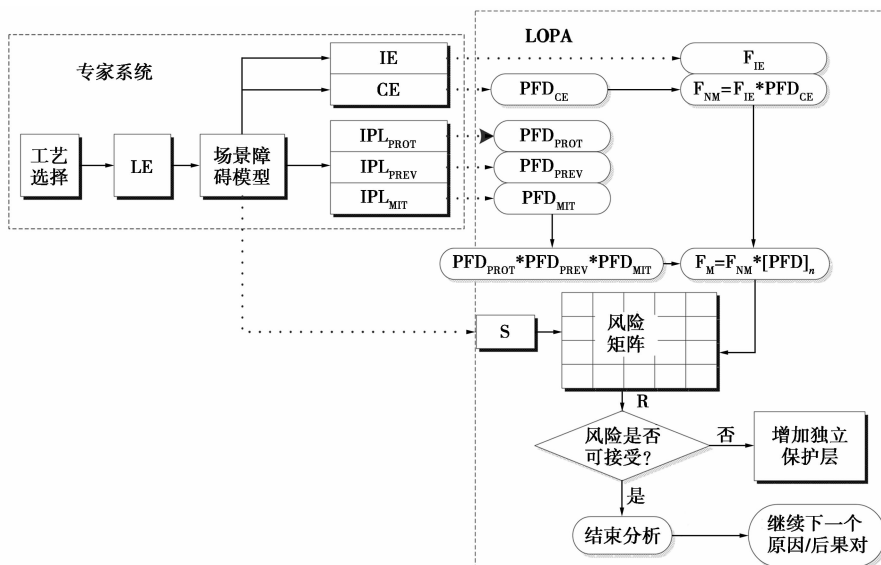
3.1.1 与其他 PHA 技术结合

由于实际过程中分析的要求,有许多研究将过程危险性分析方法(process hazard analysis, PHA)与 LOPA 联合使用以识别事故场景,尤其是 HAZOP 和

专家系统。利用 PHA/HAZOP 审查的信息来描述场景的构成要素以开发 LOPA 场景。

Trammel 等^[5]把保护层分析加入到 HAZOP 混合分析技术中,提高了该技术的评估能力。HAZOP 部分在混合系统中用来简化系统界限选取和危险识别,而 LOPA 则用于评估已有或拟采取的独立保护层和识别有效的控制措施。

有的专家将故障假设分析与保护层分析集成研究^[6]。由于识别事故场景所采用的定性危害评价方法如 HAZOP 和 What-If 分析法需要丰富的经验和专家组花费大量的时间,特别是对于复杂的化学工艺单元。为简化这个过程,有些学者将识别事故场景的专家系统和 LOPA 联合使用,称为专家系统的保护层分析(expert system LOPA,即 ExSys-LOPA)。2010 年 Markowski 等^[7]将专家系统与保护层分析法相结合对化学过程工业进行风险分析,给定了 13 种损失事件的类型。针对选定的化工过程和保护措施,这种方法采用预先准备的识别损失事件的工程数据库,建立事故场景障碍的保护层分析模型。如图 2 所示为专家系统保护层分析的步骤。这种规则在详细审查后,对于缺乏经验的人来说,用于事故场景的识别可以简化并加快分析,提供足够的安全措施。然而,这种方法不能保证对所有的场景都进行讨论,也不能保证在特定的损失事件中包括所有的安全屏障。



注:LE(loss event)代表损失事件;IE(initiating event)代表初始事件;CE(conditional event)代表条件事件;IPL(independent protection layer)代表独立保护层;PROT(protection)代表保护;PREV(prevention)代表预防;MIT(mitigation)代表减缓;PFD(probability failure on demand)代表要求失效时的概率;S(severity of consequence)代表后果严重度;R(risk level)代表风险等级; F_{NM} (no-mitigated frequency)代表未减缓频率; F_M (mitigated frequency)代表减缓频率。

图 2 专家系统保护层分析法

许多风险分析方法是对后果严重度的定性评价,由于后果严重度的评估直接影响风险指数,最终影响风险降低措施。Summers 等^[8]通过一致的后果严重性估计来改进 PHA/LOPA。后果严重度的一致性可以通过采用查表对后果严重度的评估提供指导。

3.1.2 人为因素进行识别

实际生产中,50%~90%的操作风险是由人为因素引起的,因此对于人为因素的识别具有非常重要的意义。

Baybutt^[9]和 Myers^[10]分别用 LOPA-PHA 框架结构对人的因素进行识别,将人的失误(如操作失误或工作负荷过重等)作为初始事件或将人作为独立保护层进行量化,对人的可靠性进行了分析,并开发了对于给定装置的运行人因失误的概率。由于人因失误受到多种因素的影响,以及 LOPA 的复杂性,需要将定量风险分析和人因专家的经验结合起来应用到 LOPA 中,以避免存在的缺陷。

3.2 贝叶斯保护层分析法

初始事件的频率及独立保护层的要求失效时的概率通常缺失或具有不确定性。为处理这些不确定性,2009年,Yun^[11]提出贝叶斯保护层分析法,将事故场景的失效概率(先验概率)和实验信息(样本信息)相结合,从而对先验概率进行更新,并对液化天然气接收站可能出现的7种事故场景的后果概率进行了计算,这种方法计算得出的风险结果比传统保护层分析法所得失效概率更可靠。

贝叶斯网络将概率理论和图论相结合,为解决不确定性问题提供了一种自然而直观的方法。Pasman 等^[12]在 2013 年将贝叶斯网络应用到保护层分析中,建立了间歇聚合反应的贝叶斯网络,并对保护层的成本-效益问题进行了分析,最终做出规避风险决策。

Clementina 等^[13]在 2013 年提出基于保护层分析的风险减少优化过程,在降低风险及满足安全仪表等级的条件下,对独立保护层的相关成本与可接受风险标准之间的关系用混合整数非线性规划模型进行优化分析,从而做出风险决策。

当失效数据缺失或失效事件不独立,对于共因失效而言单独采用 LOPA 不恰当,这时可采用事故树分析法。事故树分析法可准确地评估共因失效,并可计算失效之间的相互关系。二者结合是一种风险分析的有效工具^[14]。

3.3 模糊保护层分析法

传统的保护层分析法在进行定量分析时,采用的是基本事件概率的单值形式,通常会导致后果概率较大的不确定性^[15]。采用的模糊集合理论作为一种专门处理不确定或不精确数据信息的方法,可用于解决这类问题,将模糊逻辑系统引入保护层分析法,模糊逻辑的应用能够处理可靠性数据的缺乏,这些可靠性数据包括初始事件和安全功能的概率,并提出严重度削减指数的概念。Markowski 在 2009 年用模糊保护层分析^[16]对管线进行风险评价。并于 2011 年将“Bow-tie”模型应用在模糊保护层分析中^[17],文中假设事故场景的频率仅受保护层和预防层的影响,后果严重度仅受保护层和减缓层的影响(模糊保护层分析法的结构如图 3 所示),并对传统保护层分析的结果与模糊保护层分析法的结果进行对比分析。然而这种假设的合理性以及结果的精确性需进一步验证。

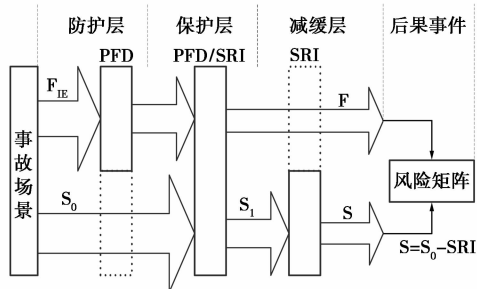


图 3 模糊保护层分析中保护层的功能

4 结论

(1) 概述了自 LOPA 产生以来的相关研究,发现模糊 LOPA 是研究最为广泛的领域。

(2) 在过程工业中,保护层分析法是一种评估安全措施灵活有效的方法。由于石油、天然气工业和过程工业具有相似的安全措施结构体系,保护层分析法可以成功地应用到石油、天然气工业,尤其是储存和运输设施。

(3) 保护层分析方法的扩展使用可以满足特殊需要,使得应用范围更为广泛,同时可以支撑和扩大保护层分析在过程工业中的应用。

(4) 保护层分析法可以应用到其他的安全管理中:设计风险审查、变更管理、设备风险管理和事故调查。

(5) 目前的保护层分析法并未考虑保护层之间的相互依赖关系,进一步的研究应该将模糊逻辑及

贝叶斯网络与保护层分析法联合起来使用,以得到更精确的风险评价后果。

参考文献

- [1] Center for chemical process safety. Layer of protection analysis-simplified process risk assessment[M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2001.
- [2] Application of safety instrumented for the process industries[S]. ANSI/ISA S81.01, 1996.
- [3] Functional safety in the process industry-guidance for the determination of the required safety integrity levels[S]. IEC 61511, 2004.
- [4] 邓彬,施式亮. 基于LOPA与轨迹交叉理论的系统安全性[J]. 矿业工程研究, 2013, 28(1): 62-66.
- [5] Trammell S, Lorenzo D, Davis B. Integrated hazards analysis: Using the strengths of multiple methods to maximize effectiveness[C]// ASSE Professional Development Conference and Exposition, Denver, Colorado, 2003.
- [6] 周荣义,刘何清. 故障假设分析与保护层分析的集成研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(5): 227-231.
- [7] Markowski A S, Mannan M S. Exsys-LOPA for the chemical process industry[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(6): 688-696.
- [8] Summers Angela, Vogtmann Willian, Smolen Steven. Improving PHA/LOPA by consistent consequence severity estimation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(6): 879-885.
- [9] Baybutt Paul. Layers of protection analysis for human factors (LOPA-HF)[J]. Process Safety Progress, 2002, 21(2): 119-129.
- [10] Myers P M. Layer of protection analysis-quantifying human performance in initiating events and independent protection layers[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(3): 534-546.
- [11] Yun G W, Rogers W J, Mannan M S. Risk assessment of LNG importation terminals using the Bayesian-LOPA methodology[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1): 91-96.
- [12] Pasman Hans, Rogers William. Bayesian networks makes LOPA more effective, QRA more transparent and flexible, and thus safety more definable[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(3): 434-442.
- [13] Clementina Ramirez-Marengo, Julio De Lira-Flores, Antioco Lopez-Molina, et al. A formulation to optimize the risk reduction process based on LOPA[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(3): 489-494.
- [14] Marc Rothschild. Fault tree and layer of protection hybrid risk analysis[J]. Process Safety Progress, 2004, 23(3): 185-190.
- [15] Raymond Randy Freeman. Quantifying LOPA uncertainty[J]. Process Safety Progress, 2012, 31(3): 240-247.
- [16] Makowski A S, Mannan S M. Fuzzy logic for piping risk assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 921-927.
- [17] Makowski A S, Kotynia A. "Bow-tie" model in layer of protection analysis[J]. Proceedings of 13th International Symposium on Loss Prevention, 2011, 89(4): 205-213. ■

上海化学工业园区工业气体有限公司与 上海赛科石油化工有限公司 签订长期供气合同

液化空气中国于近期通过其子公司——上海化学工业园区工业气体有限公司(SCIPIG)——与上海赛科石油化工有限公司(SECCO)签订了一项为期15年的工业气体供应合同。

根据合同,SCIPIG将向位于上海化学工业园区的SECCO提供大量纯氧,用于其硫酸再生(SAR)装置,以提高产量,并大幅降低排放和改善整体生产效率。SCIPIG将建造1套日产氧量900t、配备一体式液化器的新空分装置,还将延伸其位于上海化学工业园区的管网,以满足SECCO与其他客户对工业气体的新需求。新空分装置预计于2015年1月投产。该项重要合同进一步强化了SCIPIG的供应能力及其在上海化学工业园区的地位,从而提升其领先的化学工业园区的服务水平。

SCIPIG是液化空气集团和普莱克斯公司按50/50比例组建的合资公司。自2001年创立以来,SCIPIG一直是上海化学工业园区的合作伙伴,拥有超过20万m³/h的多种工业气体的生产能力,是中国和亚洲最大的工业气体生产基地之一。如今,SCIPIG为客户提供包括氮气、氧气、压

缩空气、一氧化碳、氢气和蒸汽在内的一系列产品。液化空气中国首席执行官马瑞龙表示:“这项新合同象征着SCIPIG在上海化学工业园区的发展进入了一个新阶段。我们将继续为SECCO和上海化学工业园的其他客户提供可靠运营和高附加值服务。”(张欣然)

可燃冰实验室落户青岛

2014年3月18日,从青岛海洋地质研究所传出消息,该所天然气水合物(可燃冰)模拟实验室正式在青岛蓝色硅谷核心区开工建设,以期打造具有世界级水平的天然气水合物实验室,为我国战略新能源的进一步勘察和开发提供有力保障。

据介绍,该实验室包括天然气水合物勘探模拟实验室和天然气水合物开发利用实验室,一期占地面积20亩(1亩=666.6m²),建筑面积5037m³。该实验室的“绝活”是检测钻探样品是否为可燃冰并确定其分子结构,同时解决可燃冰勘探开发关键技术和相关理论。

青岛海洋地质研究所东部基地建设办公室主任鲁静表示,作为调查、研究、开发新能源的大本营,天然气水合物模拟实验室在蓝色硅谷的建设将进一步提升我国在可燃冰研究领域的整体实力,为跻身国际可燃冰研究先进行列争取话语权。(张力)