

Analysis and Exploration of Safety Evaluation in Chemical Industry

Shupeng Cheng, Zhiguo Yan*, Qian Li, Xia Yin

Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Email: *samanyan@163.com

Received: Aug. 10th, 2017; accepted: Aug. 21st, 2017; published: Aug. 30th, 2017

Abstract

Security issues have been an important factor which restricts the development of chemical industry. In order to fundamentally prevent the occurrence of chemical industry safety accidents, it is necessary to carry out safety evaluation of the chemical industry. Chemical industry safety evaluation is a complex and rigorous process, in order to enable people to clearly understand the safety evaluation, accurately choose and use safety evaluation methods, this paper selects seven safety evaluation methods widely used in chemical industry, and analyzes and summarizes them in detail: 1) they are classified into three categories: qualitative, quantitative and hybrid methods, and their advantages, disadvantages and application scope are summarized comprehensively. And the selection of these methods is elaborated in combination with the five principles of safety evaluation; 2) the safety evaluation process is analyzed in detail and the roles of the seven safety evaluation methods in the evaluation process are clearly expressed to promote the application of the safety evaluation method. On the basis of the above, this paper collects and selects 121 typical chemical accidents in China from 2010 to 2016, and analyzes and summarizes the accident causes (hazard sources) and the proportion. The results showed that the illegal operation, equipment failure, defects of process defects, accidental factors and management loopholes are the five dangerous sources of chemical industry safety accidents. These five types of hazard sources are used as the evaluation objects of seven safety evaluation methods, and their application is divided into three parts to deepen the understanding of chemical safety evaluation.

Keywords

Safety Evaluation, Chemical Industry, Hazard Sources

化工安全评价的剖析与初探

程书鹏, 闫志国*, 李倩, 殷霞

*通讯作者。

武汉工程大学, 绿色化工过程省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉
Email: samanyan@163.com

收稿日期: 2017年8月10日; 录用日期: 2017年8月21日; 发布日期: 2017年8月30日

摘要

安全问题一直是制约化工发展的重要因素, 为了从根本上阻止化工安全事故的发生, 就必须对化学工业进行安全评价。化工安全评价是一个复杂、严谨的过程, 为了使人们能够清晰地理解安全评价, 并且准确地选择、运用安全评价方法, 本文筛选出七种在化工领域广泛应用的安全评价方法, 并对其进行分析与总结: 1) 将其分为定性、定量和混合评价法三类, 全面地总结其优缺点、适用范围, 并结合安全评价方法选择的五项原则对这些方法的选择进行了详细的阐述; 2) 对安全评价过程进行详细地剖析, 并将这七种安全评价方法在评价过程中发挥的作用进行明确地表述, 以促进对安全评价方法的运用。在此基础上, 本文收集并选取了2010~2016年发生在我国的121例典型化工事故, 并对事故原因(即危险源)及比重进行详细地分析与统计, 结果发现: 违章操作、设备故障、工艺缺陷、意外因素、管理漏洞是化学工业安全事故的五大危险源, 将这五类危险源作为七种安全评价方法的评价对象, 对其进行具体地应用划分, 以加深对化工安全评价的认识。

关键词

安全评价, 化学工业, 危险源

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

化学工业从其诞生开始, 就伴随着层出不穷的化工安全问题, 并造成了重大的人员伤亡和巨大的经济损失。换言之, 化工安全问题从一定程度上制约了化工的发展。为了促进化工安全、健康地发展, 就必须采取一定的措施预防化工事故的发生。

风险评估, 也称为安全评价, 它是一个评估人类的活动对具有危险性特征系统所造成的影响或后果的必要和系统的过程[1] [2] [3]。具体来讲, 安全评价就是对系统中潜在的危险、有害因素进行详尽地分析与辨识, 并评估系统发生事故的可能性及其严重程度, 以此来提出预防措施或保护手段, 而这就意味着对化工进行全面地安全评价, 就会在一定程度上促进化学工业安全、健康地发展。

为了使人们能够更加清晰地理解安全评价, 并且准确、有效地选择、运用安全评价方法, 那么就很有必要详细地剖析安全评价的过程, 并对适用于化学工业的安全评价方法进行分析、分类、总结, 以促进对安全评价的进一步认识。

2. 安全评价方法选择

Safety Science, Journal of Safety Research, Accident Analysis and Prevention, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, International Journal of Industrial Ergonomics, Reliability Engineering, System Safety (这七种期刊是基于 web of science 数据库, 根据影响因子的大小选择出来的)是在安全评价领域具有代表

性的期刊, 本文从中筛选出七种在化学工业领域广泛应用的安全评价方法, 并对其进行详细地分析、总结。

2.1. 安全评价方法的分类

2.1.1. 安全评价方法的基本介绍

经过对前人研究工作的总结分析, 目前通用的安全评价方法分别为检查表法、假设分析法、危险与可操作性分析、故障树分析法、风险矩阵法、人因可靠性分析法、道化学法。

检查表法(Checklists): 检查表法是最简单的辨识危险源的方法[4]。通过系统地对一个生产系统或设备进行科学的分析, 找出各种不安全的因素, 并将其以问题清单的形式制成表, 即为检查表, 而检查表就是根据所编制的检查表, 对系统进行彻底的安全检查和诊断。

假设分析法(What-If analysis): 假设分析法是一种对系统工艺过程或操作过程进行创造性分析的方法。具体来讲, 它是一种结构化的头脑风暴法, 通过假设出现错误情况来分析、判断这些情况可能导致的后果[5], 从而发现可能的事事故隐患以及所导致的意想不到的后果。

危险与可操作性分析(HAZOP): 危险与可操作性分析一种是最常用的过程危险分析方法, 并被使用者视为最彻底、最完整的安全评价手段[6]。它通过分析生产运行过程中工艺状态参数的变动, 操作控制中可能出现的偏差, 以及这些变动与偏差对系统的影响及可能导致的后果, 找出出现变动或偏差的原因, 明确装置或系统内及生产过程中存在的主要危险、危害因素, 并针对变动与偏差的后果提出应采取的措施[7]。随着计算机技术的快速发展, 传统的 HAZOP 已经逐渐向计算机辅助分析过渡, 并朝着量化不断前进。

故障树分析法(FTA): 故障树分析法是一种具有结构化特征的安全评价方法, 它通过演绎分析来确定导致不良事件发生的潜在原因[8]。故障树分析就是从可能的事故开始, 一层一层地逐步寻找导致事故发生的促发事件、直接原因和间接原因, 并用逻辑树图把这些原因以及它们的逻辑关系表示出来。

风险矩阵分析法(The Risk Matrix): 风险矩阵是一个对过程风险进行表征和排序的机制[9], 而风险矩阵分析法就是将决定事件风险的两种因素(即危险事件发生的可能性和危险事件的严重性)作为风险的表征, 按照其特点相对地划分等级, 并赋予一定的权值来衡量风险的大小, 最后对风险进行排序。

人员可靠性分析法(HRA): 人因失误已经被广泛的行业视为导致事故发生的主要原因[10], 而人因可靠性分析就是对人的可靠性进行定性与定量分析和评价, 以分析、预测、减少与预防人的失误。在现有的人因可靠性方法中, 人因失误率预测技术可以比较准确地分析人为失误。

道化法(F & EI): 任何大型化工厂发生火灾、爆炸的潜力都是巨大的, 特别是加工、储存碳氢化合物的工厂[11], 一旦发生火灾、爆炸, 它将会导致严重的人员伤亡、巨大的经济损失、工人失业以及长久性的环境破坏。而采用道化法就可以定量计算系统工艺装置、设备、物质等存在的实际潜在火灾、爆炸的危险性以及可能造成的损失[12]。

2.1.2. 安全评价方法的分类

为了能够更加直观、清晰地理解安全评价方法, 根据评价结果的量化程度将安全评价方法分为定性安全评价法、定量安全评价法、混合(定性 - 定量、半定量)安全评价法三类, 每类方法细分为后果(即评估事故后果)、概率(即预测事故发生的概率)、事故 - 后果(既可评估事故后果又可预测事故发生的概率)。这七种安全评价方法的具体分类, 见表 1。

从表 1 中, 我们可清晰地发现, 除了检查表法和人因失误率预测技术外, 剩下的五种安全评价方法均可评估事故后果, 另外只有少部分的安全评价方法可以预测事故发生的可能性, 这主要是因为预测事

故发生的概率非常难，而且由于预测的结果受到评价人员的主观影响很大，从而使得其缺乏可靠性。

2.2. 安全评价方法的优缺点及适用范围

安全评价方法五花八门，各有各的优点、缺点以及适用范围，它们所具备的这些特性和条件与它们适用于何种被评价系统有直接的关系。对这七种安全评价方法的优缺点及其适用范围进行简单介绍，见表 2。

根据表 2，可知检查表法、假设分析法的应用范围最为广泛，几乎可以适用任何系统；故障树分析法特别适合危险源的识别，并且通过树图可以清晰、明了地将其呈现出来；风险矩阵分析法和道化法易于操作，通过定量分析可以得出明确的评价结果；在人员可靠性分析法中，人因失误率预测技术可以比较准确地分析人为失误。

Table 1. Classification of seven safety evaluation methods

表 1. 安全评价方法的分类

	定性安全评价法		定量安全评价法		混合安全评价法	
	序号	名称	序号	名称	序号	名称
后果	2	假设分析法	7	道化法	-	-
概率	-	-	-	-	6	人因失误率预测技术
后果 - 概率	3	危险与可操作性分析	-	-	4	故障树分析法
					5	风险矩阵分析法

注：检查表法只能识别危险源，并不能评估事故后果、预测事故发生的概率，故未列入表一中。

Table 2. Advantages, disadvantages and of application scope of seven safety evaluation methods

表 2. 安全评价方法的优缺点及适用范围

序号	名称	优点	缺点	适用范围
1	检查表法	简明易懂，容易掌握	不能识别复杂的危险源	各类系统的设计、验收、运行、管理、事故调查
2	假设分析法	易于掌握与使用；能识别出可能发生的意想不到的事故事件	只能进行定性分析	可以用于任何生产活动或系统
3	危险与可操作性分析	一种非常系统的综合评价方法；可以全面检查、识别出系统中潜在危险，并明确事故后果	定性分析得到的评价结果受到评价人员的主观影响较大；耗费大量时间	适用于设计阶段和现有的生产装置的评价
4	故障树分析法	既可定性分析，又可定量分析；通过直观的树图可以全面掌握系统内的各种危险源，并确定它们的影响程度	耗费大量时间；分析的过程比较复杂、困难	系统安全工程的事故分析
5	风险矩阵分析法	主要针对过程危险；操作简单	评价结果受到评价人员主观影响较大	主要用于石油工业危险性及其后果分析
6	人因失误率预测技术	用来分析人因失误的原因，预测人因失误的概率	对失误的分析和量化过于粗糙	任何人参与的过程
7	道化法	能够真实地量化潜在火灾、爆炸的危险性，以及可能造成的经济损失；使用大量的图表，简洁明了；操作简单	应用领域小	主要用于评价生产、储存、处理易燃、可燃、活性物质的工艺单元

2.3. 安全评价方法的选择

2.3.1. 安全评价方法的选择原则

随着化学工业的迅速发展,安全问题也变得愈加繁杂多样,为了应对这些风险,用于安全评价的方法或技术也随之不断涌现,而如何准确、有效地选择出合适的安全评价方法便成为安全评价方法能否发挥作用的重中之重。

对于安全评价方法的选择,一般需要遵守五个原则,分别是:充分性原则、适应性原则、系统性原则、针对性原则、合理性原则[13]。

充分性原则指在选择安全评价方法之前,充分地分析被评价的系统,掌握足够多的安全评价方法,并充分了解各种安全评价方法的优缺点、适用范围。

适应性原则指安全评价方法应该适用于被评价的系统。换言之,安全评价方法应该与被评价系统的主要危险相对应。根据表 2 可知,若要评估人为失误,则应选择人员可靠性分析法。

系统性原则是指被评价系统能够提供进行评价所需的系统化数据和资料。安全评价的结果只有建立在真实、合理和系统的基础数据之上,才具有可信度。

针对性原则是指所选择的安全评价方法应该能够提供所需的结果。由于评价目的的不同,需要安全评价提供的结果可能是事故发生的概率、事故后果、系统的危险性等。根据表 1 可知,假设分析法、危险与可操作性研究、故障树分析法、道化法可以评估事故后果,故障树分析法、风险矩阵分析法、人因失误率预测技术可以预测事故发生的可能性,另外,危险与可操作性研究、故障树分析法、风险矩阵分析法既可以评估事故后果也可以预测事故发生的可能性。

合理性原则是指在满足安全评价目的、能够提供所需安全评价结果的前提下,应该选择最合理的安全评价方法。评价方法应具有一定的先进性,即在满足评价要求的同时,应选择比较先进的方法。这种先进性可以反映在评价方法的不断修改完善上:例如 HAZOP 分析方法经过数十年的发展已经从传统的人工分析发展到目前通过计算机辅助进行自动分析,在选择 HAZOP 分析方法进行安全评价时,选择计算机辅助的 HAZOP 分析方法不仅可以减少不必要的人为错误,还可节约时间、提高效率。这种先进性也可反映在评价方法的优先选择上:例如对油库进行安全评价时,应优先选择道化法[14]。评价方法的选择多样性。对于一个被评价系统而言,可选用不同的评价方法,或同时选用几种方法进行评价。在对重大危险源进行评价时,为保证评价结果全面可靠,可选用多种评价方法,从不同的角度同时进行评价,例如 ZHANG Kang 等[15]将专家评议法和模糊理论融入风险矩阵之中,形成模糊风险矩阵分析法。对于多种安全评价方法的联合使用,Marhavidas 等[16]认为随机安全评价方法(即经典统计法、事故预测模型[17])和确定性安全评价方法(目前绝大多数的安全评价方法为确定性安全评价方法,本文精选出的七种安全评价方法也为确定性安全评价方法)的综合使用是安全评价未来的发展方向,并提出了一个将随机安全评价法与确定性安全评价法联合使用的风险评价方法。

2.3.2. 安全评价方法的选择过程

当掌握了安全评价方法的选择原则之后,还需将其融入具体的选择过程之中,才能选择出合适的安全评价方法。

安全评价方法的选择过程为:分析被评价系统→收集安全评价方法→分析安全评价方法→明确被评价系统能够提供的基础数据和资料→选择安全评价方法。要想能够准确、有效地选择出合适的安全评价方法,首先详细地分析被评价系统,以确定想要通过安全评价达到的目标;然后应收集尽量多的安全评价方法;对这些安全评价方法进行分类整理,充分了解它们的优缺点、适用范围等;明确被评价系统能够提供的基础数据和资料;根据安全评价想要达到的目标以及所需的基础数据和资料,就能准确、有效

地选择出合适的安全评价方法。

3. 安全评价过程

安全评价方法繁杂多样,当懂得如何从这些安全评价方法中选取符合自己要求的评价方法后,还必须熟悉安全评价过程,以便掌握安全评价方法的运用。

安全评价分两步进行:第一步对所有可能存在的风险进行系统地辨识,第二步评估风险并进行危险等级划分。更具体的来讲,安全评价的分析框架可由三个部分组成,也可以认为其分为三个阶段来进行,分别是辨识、评估、等级划分[18]。

辨识,即对危险源进行辨识。Hammer [19]最早将危险源定义为“可能导致发生人员伤亡或财物损失事故的潜在的不安全因素”。这个定义说明潜在性是危险源所具有的最鲜明的特点,在一定的条件下危险源会发展成为事故隐患,而事故隐患继续失去控制,则会演变为事故。换言之,要想防止事故的发生,就得控制危险源。而制定相关的防护措施来控制危险源的前提条件就是辨识危险源。

评估,即危险评估,也就是对辨识出来的危险源进行危险性评估,一般而言,实现危险评估的方式有两种:一种就是评估危险源演化为事故的可能性,即事故发生的概率;另一种就是评估事故所造成的后果。

等级划分,就是危险等级划分,在分析系统的危险性时,根据系统中各个事故发生的可能性及事故后果的危险程度,将其进行轻重缓急的排序,优先解决最有可能导致事故发生的危险源及事故后果最严重的危险源。

安全评价的分析框架由辨识、评估、等级划分三部分组成,但安全评价方法发挥的作用不一定由辨识、评估、等级划分所构成,它也可以仅由以下组合构成:辨识;辨识和评估;辨识、等级划分。以此对这七种安全评价方法进行划分,见表3。

根据表3,可以十分清晰地发现绝大部分安全评价方法在安全评价中,都具备辨识危险源和评估危险的作用,只有很少的方法仅仅具备辨识危险源的作用或是同时具备辨识、评估、等级划分三个功能。

4. 安全评价方法在化学工业上的应用

4.1. 化学工业的危险源

危险源是危险的根源[20],在进行安全评价时,无论采用哪种安全评价方法,无论处于评价的哪个阶

Table 3. The role of seven safety assessment methods in the process of safety evaluation

表 3. 七种安全评价方法在安全评价过程中的作用

序号	安全评价方法	安全评价过程		
		辨识危险源	评估危险	危险等级划分
1	检查表法	√		
2	假设分析法	√	√	
3	危险与可操作性分析	√	√	
4	故障树分析法	√	√	
5	风险矩阵分析法	√	√	√
6	人因失误率预测技术	√	√	
7	道化法	√	√	

段,都必须紧紧围绕着危险源,这也足以表明危险源在安全评价中的绝对地位。在化学工业中,存在着各种各样的危险源,为了更好地理解安全评价、使用安全评价方法,就很有必要对危险源进行一定的了解。

从国家安全生产监督管理总局的官方网站上收集、选取了从 2010~2016 年我国发生的造成重大伤亡或较大影响的 121 例典型化工事故案例,并对其进行详细的分析与统计。将这些化工事故按照爆炸、火灾、泄漏四种事故类型进行划分,见表 4;分析化工事故的原因(即危险源),将其归纳为五类,并统计这五类危险源在事故中的比重,见表 5。

根据表 4 可知,这 121 例典型化工事故中爆炸接近一半,其次是火灾为 23%、泄漏为 19%,三者合起来达到 90%,占据着主导地位。由表 5 可以发现,由于违章操作引起的事故次数最多,管理漏洞次之,工艺缺陷与意外因素导致的事故次数差不多,设备故障造成的事故次数最少。这在一定程度上也说明了违章操作、管理漏洞是造成化工企业安全事故频发的主要原因,因此应该重点加强对这两类危险源的防控。

4.2. 安全评价方法在化学工业上的应用

对于化学工业而言,找到并控制危险源是使促使化学工业健康发展的重要途径,而达到这个目的的前提就是选择何种安全评价方法识别、评估危险源。现将化学工业上的五类危险源作为七种安全评价方法的评价对象,对其进行具体的应用划分,见表 6。

由表 6,可以发现检查表法、假设分析法、故障树分析法、风险矩阵分析法能够比较完整的识别出绝大部分危险。虽然人因失误率预测技术只能识别出违章操作这类危险源,但在这类危险的评估方面它却比其它方法更具专业性和全面性。对于设备故障和工艺缺陷这两类危险源,除了人因失误率预测技术,其它的安全评价方法都可进行评价。至于意外因素,可以通过假设分析法、故障树分析法进行评价。而对于管理漏洞这个危险源的识别,最为广泛使用的是检查表法。

Table 4. Types of chemical accidents

表 4. 化工事故类型分布

事故类型	事故数量	比重/%
爆炸	58	48
火灾	28	23
泄漏	23	19
其他	10	10

Table 5. The types and role of hazard sources in chemical industry

表 5. 化学工业危险源的类型及比重

危险源的类型	危险源的比重/%
违章操作	57
设备故障	6
工艺缺陷	9
管理漏洞	19
意外因素	9

Table 6. The specific application of seven safety evaluation methods in the hazard sources of chemical industry
表 6. 七种安全评价方法在化学工业危险源上的具体应用

序号	安全评价方法	危险源				
		违章操作	设备故障	工艺缺陷	意外因素	管理漏洞
1	检查表法	√	√	√		√
2	假设分析法	√	√	√	√	√
3	危险与可操作性分析		√	√		
4	故障树分析法	√	√	√	√	√
5	风险矩阵分析法	√	√	√		√
6	人因失误率预测技术	√				
7	道化法		√	√		

5. 结论与展望

1) 通过对七种安全评价方法的分类、优缺点、适用范围进行详细阐述,可以充分认识和理解到这些安全评价方法的功能与不足。七种安全评价方法中,除了检查表法和人因失误率预测技术外,剩下的五种安全评价方法均可评估事故后果;人因失误率预测技术、危险与可操作性分析、故障树分析法、风险矩阵分析法均可以预测事故发生的可能性;检查表法、假设分析法几乎可以适用任何系统;故障树分析法特别适合危险源的识别,并且通过树图可以清晰明了地将其呈现出来;风险矩阵分析法和道化法易于操作,通过定量分析,可以得出明确的评价结果;人因失误率预测技术可以比较准确地分析人为失误。

2) 通过对安全评价方法的选择原则及过程进行全面解析,可以知道想要准确地选择出合适的安全评价方法,首先需要详细地分析被评价系统,以确定想要通过安全评价达到的目标,然后应收集尽量多的安全评价方法,并对这些方法进行分类整理以充分了解它们的优缺点、适用范围等,最后再根据所需的基础数据和资料,就能准确选择出所需的安全评价方法。当对一个系统进行评价时,为保证评价结果全面可靠,往往会选用多种评价方法,从不同的角度同时进行评价。

3) 通过对安全评价过程的全面剖析,明确危险源的辨识在安全评价中的绝对地位。从国家安全生产监督管理总局的官方网站上收集、选取了从 2010~2016 年我国发生的造成重大伤亡或较大影响的 121 例典型的化工事故案例,并对其进行分析与统计,结果发现:爆炸是最主要化工事故类型,其次是火灾与泄漏;违章操作、设备故障、工艺缺陷、意外因素、管理漏洞是化学工业安全事故的五大危险源,其中违章操作和管理漏洞的比重最大。将化学工业上的五类危险源作为七种安全评价方法的评价对象,对其进行具体的应用划分,结果显示:检查表法、假设分析法、故障树分析法、风险矩阵分析法能够比较完整的识别出绝大部分危险源;虽然人因失误率预测技术只能识别出违章操作这类危险源,但在这类危险的评估方面它却比其它方法更具专业性和全面性;对于设备故障和工艺缺陷这两类危险源,除了人因失误率预测技术,其它的安全评价方法都可进行评价;至于意外因素,可以通过假设分析法、故障树分析法进行评价。

4) 安全评价方法经过数十年的发展,目前已经从定性分析过渡到了定量分析,而从传统的定量分析实现动态定量分析将成为安全评价方法未来前进的方向。时下,人工智能技术兴起,并且发展迅速,将安全评价与其结合在一起,将会极大提高安全评价的便捷性、可靠性。

基金项目

湖北省自然科学基金重点项目(2013CFA091)。

参考文献 (References)

- [1] Woodruf, J.M. (2005) Consequence and Likelihood in Risk Estimation: A Matter of Balance in UK Health and Safety Risk Assessment Practice. *Safety Science*, **43**, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.07.003>
- [2] Reniers, G.L.L., Dullaert, W., Ale, B.J.M., *et al.* (2005) Developing an External Domino Accident Prevention Framework: Hazwim. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **18**, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.03.002>
- [3] Van Duijne, F.H., Van Aken, D. and Schouten, E.G. (2008) Considerations in Developing Complete and Quantified Methods for Risk Assessment. *Safety Science*, **46**, 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.05.003>
- [4] Marhavilas, P.K. and Koulouriotis, D.E. (2008) A Risk-Estimation Methodological Framework Using Quantitative Assessment Techniques and Real Accidents' Data: Application in an Aluminum Extrusion Industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **21**, 596-603. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.04.009>
- [5] Sivapirakasham, S.P., Thiyagarajan, S., Bineesh, P., *et al.* (2014) Hazard Identification in Electrical Discharge Machining (EDM) Process Using What-If Analysis. *Applied Mechanics and Materials*, **592-594**, 2508-2512.
- [6] Baybutt, P. (2015) A Critique of the Hazard and Operability (HAZOP) Study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **33**, 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.11.010>
- [7] 王秀军, 陶辉. HAZOP 分析方法在石油化工生产装置中的应用[J]. 安全、健康和环境, 2005, 5(2): 6-9.
- [8] Khakzad, N., Khan, F. and Amyotte, P. (2011) Safety Analysis in Process Facilities: Comparison of Fault Tree and Bayesian Network Approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, **96**, 925-932. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.012>
- [9] Markowski, A.S. and Mannan, M.S. (2008) Fuzzy Risk Matrix. *Hazard Mater*, **159**, 152-157. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.055>
- [10] Marhavilas, P.K., Koulouriotis, D. and Gemeni, V. (2011) Risk Analysis and Assessment Methodologies in the Work Sites: On a Review, Classification and Comparative Study of the Scientific Literature of the Period 2000-2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **24**, 477-523. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.004>
- [11] Gupta, J.P., Khemani, G. and Sam Mannan, M. (2003) Calculation of Fire and Explosion Index (F&EI) Value for the Dow Guide Taking Credit for the Loss Control Measures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **16**, 235-241. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00044-5)
- [12] 郑贤斌, 李自力. DOW 火灾爆炸指数评价法在油库中的应用[J]. 油气储运, 2003, 22(5): 49-52+61-66.
- [13] 佟瑞鹏, 李桂君, 于春雨. 常用安全评价方法及其应用[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2011.
- [14] 吉尚伟, 张耀伟. 道化学火灾、爆炸指数分析法在油库安全评价中的应用[J]. 辽宁化工, 2009, 38(7): 503-506.
- [15] Zhang, K., Duan, M., Luo, X., *et al.* (2017) A Fuzzy Risk Matrix Method and Its Application to the Installation Operation of Subsea Collet Connector. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **45**, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.014>
- [16] Marhavilas, P.K. and Koulouriotis, D.E. (2012) Developing a New Alternative Risk Assessment Framework in the Work Sites by Including a Stochastic and a Deterministic Process: A Case Study for the Greek Public Electric Power Provider. *Safety Science*, **50**, 448-462. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.10.006>
- [17] Zheng, X. and Liu, M. (2009) An Overview of Accident Forecasting Methodologies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22**, 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.03.005>
- [18] Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., *et al.* (2002) Review of 62 Risk Analysis Methodologies of Industrial Plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 291-303. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00008-6)
- [19] Hammer, W. (1972) Handbook of System and Product Safety. Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- [20] 张跃兵, 王凯, 王志亮. 危险源理论研究及在事故预防中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 10-16.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8844，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjct@hanspub.org