

危险化学品环境污染事故 风险评估方法研究

*Weixian Huaxuepin Huanjing Wuran Shigu
Fengxian Pinggu Fangfa Yanjiu*

许兰娟 / 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

危险化学品环境污染事故 风险评估方法研究

许兰娟 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

危险化学品环境污染事故风险评估方法研究 / 许兰娟著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2018. 11
ISBN 978 - 7 - 5646 - 4256 - 3

I. ①危… II. ①许… III. ①化工产品—危险品—环境污染事故—风险评价—研究 IV. ①X507

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 272731 号

书 名 危险化学品环境污染事故风险评估方法研究
著 者 许兰娟
责任编辑 夏 然 章 毅
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83884103 83885105
出版服务 (0516)83995789 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 7 字数 151 千字
版次印次 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 常用风险评估方法	2
1.3 HAZOP 分析概述	4
1.4 主要研究内容及技术路线	11
第 2 章 连续生产过程 HAZOP 分析方法	12
2.1 SDG 技术	12
2.2 基于 SDG 的计算机辅助 HAZOP 分析	15
2.3 SDG—HAZOP 建模	17
2.4 SDG 推理机制	26
2.5 SDG—HAZOP 案例分析	26
第 3 章 间歇生产过程 HAZOP 分析方法	36
3.1 间歇过程 HAZOP 分析	36
3.2 间歇过程 SDG—HAZOP 分析	37
3.3 改进的 SDG 模型	40
3.4 改进的 SDG—HAZOP 分析方法	48
第 4 章 间歇过程 SDG 模型推理规则	54
4.1 Petri 网推理规则	54
4.2 SDG 推理规则	60
4.3 改进模型整体推理规则	63
第 5 章 间歇过程 SDG—HAZOP 案例分析	74
5.1 煤粉输送系统	74
5.2 带搅拌釜式反应器系统	78
5.3 总结	80

第 6 章 基于 HAZOP 分析的环境污染事故风险评估	85
6.1 风险的定义	85
6.2 环境污染事故风险评估	85
6.3 基于 HAZOP 分析的风险评估	91
第 7 章 研究结论与展望	95
7.1 研究结论	95
7.2 展望	96
参考文献	97
附录 1 煤粉输送系统传统 SDG-HAZOP 分析结果	101
附录 2 釜式反应器系统传统 SDG-HAZOP 分析结果	104

第1章 绪 论

1.1 研究背景

根据《危险化学品安全管理条例》(国务院令 第 591 号, 2011 年)的定义, 危险化学品是指具有毒害、腐蚀、爆炸、燃烧、助燃等性质, 对人体、设施、环境具有危害的剧毒化学品和其他化学品。我国是危险化学品生产、使用、进出口和消费大国。根据 2017 年 9 月国家安全生产监督管理总局发布的《危险化学品安全生产“十三五”规划》(安监总管三〔2017〕102 号), 截至 2015 年底, 全国有危险化学品企业近 29 万家(其中生产企业 1.8 万家, 经营企业 26.5 万家, 储存企业 0.55 万家), 从业人员近千万, 陆上油气输送管道总里程超过 12 万公里。由于危险化学品具有易燃、易爆、有毒等固有危险特性, 全世界范围内, 在其生产、使用、储存、运输、经营和废弃等环节上, 不断发生火灾、爆炸、中毒、窒息等事故, 造成了重大的人员伤亡和财产损失。

1976 年 7 月 10 日, 位于意大利北部塞韦索市的伊克梅萨化工厂发生爆炸。爆炸导致包括化学反应原料、生成物以及二恶英杂质等在内约两吨化学物质泄漏。泄漏物扩散到周围地区, 致使当地居民产生热疹、头痛、腹泻和呕吐等症状, 许多飞禽和动物被污染致死。调查人员统计, 这次爆炸事故最终的污染范围涉及塞韦索、梅达、地赛欧等 7 个城市, 受影响居民达到 12 万人。

1984 年 12 月 3 日凌晨, 印度中央邦首府博帕尔市的美国联合碳化物属下的联合碳化物(印度)有限公司设于贫民区附近的一所农药厂发生剧毒化学品异氰酸甲酯(MIC)泄漏事故, 共造成 6 495 人直接死亡, 12.5 万人中毒, 20 余万人永久残疾。在整个人类历史上, 博帕尔事件被公认是“十大人为环境灾害”之首。2009 年进行的一项环境检测显示, 在当年爆炸工厂的周围依然有明显的化学残留物, 这些有毒物质污染了地下水和土壤, 导致至今当地居民的患癌率及儿童夭折率仍然因这场灾难而远高于其他印度城市。

2010 年 4 月 20 日, 英国石油公司在美国墨西哥湾租用的钻井平台“深水地平线”发生爆炸, 事故导致 7 人重伤 11 人死亡, 大量原油泄漏。据美国政府估计, 该起事故中泄漏的原油总量在 1 970 万加仑到 4 300 万加仑之间。受漏油事件影响, 墨西哥湾沿岸的路易斯安那州、亚拉巴马州、佛罗里达州以及密西西比

州等多个地区的生态环境受到严重影响,该水域约 14 种生物表现出各种由于石油影响而产生的病症。

近年来,我国由危险化学品所导致的环境污染事故也不断发生。如 2004 年 4 月重庆天原化工总厂液氯储罐爆炸事故,造成 9 人死亡,3 人受伤,附近 15 万人被迫紧急疏散;2005 年 11 月 13 日,中石油吉林石化公司双苯厂爆炸事故,共造成 8 人死亡,60 人受伤,附近数万人紧急疏散,松花江受到严重污染,下游哈尔滨市停水四天;2010 年 7 月 16 日,大连中石油国际储运有限公司原油罐区输油管道爆炸事故,造成原油大量泄漏并引起火灾,周边海域受到严重污染;2012 年 12 月 31 日,山西长治市潞城市山西天脊煤化工集团股份有限公司发生苯胺泄漏事故,造成 8.7 吨苯胺排入浊漳河,导致下游河北邯郸市市区从 1 月 5 日下午起紧急大面积停水,河南安阳市供水也受到影响。

综上所述,危险化学品事故不仅会导致重大的人员伤亡和财产损失,还可能造成周边水体、大气、土壤等污染,进而危害到动物、植物和居民的安全和健康。因此,必须从源头入手,防患于未然,采用技术、管理等多种手段有效预防危险化学品环境污染事故的发生。

风险评估(Risk Assessment)是指在危险辨识的基础上,确定事故或危险发生的频率及可能造成的后果,从而将事故风险量化的过程。对危险化学品环境污染事故风险进行评估,可以在事故发生前判定事故风险是否低于可接受的风险值,进而根据风险的可接受程度来校核现有防护措施,提出降低、消除或转移风险的对策,从而达到预防事故发生的目的。

1.2 常用风险评估方法

风险评估最早起源于 20 世纪 50 年代的保险行业,发展至今,国内外提出的风险评估方法不下几十种,各种方法适于特定场合,具有不同特点。常用的安全评价方法如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的安全评价方法			
名称	目的	适用范围	效果
安全检查表 (Check List)	检查系统是否符合标准要求	适用各个阶段	对危险定性辨识,使系统与标准一致
预先危险分析 (PHA)	分析原材料、工艺、设备设施及能量失控时的危险性	开发、设计阶段	定性分析,得出供设计考虑的危险性

续表 1-1

名称	目的	适用范围	效果
故障类型和影响分析 (FMEA)	辨识设备和机器故障造成的事故后果	设计阶段	定性或定量,找出故障类型对系统的影响
事故树分析 (FTA)	找出事故发生的基本原因及其组合	设计、操作阶段、事故调查阶段	定性或定量,查明系统内固有的和潜在的危险因素
事件树分析 (ETA)	辨识初始事件发展成为事故的过程和可能造成的后果	设计和操作阶段	定性或定量,推测类似事故的预防对策
危险与可操作性研究 (HAZOP)	辨识工艺过程偏离设计意图所导致的后果	生产过程的各个阶段	定性分析,并能发现新危险性
故障假设分析 (What-if)	分析某种故障可能导致的后果及已有安全防护措施	生产过程的各个阶段	定性分析,发现系统中潜在的事故隐患
作业条件危险性评价 (LEC)	确定作业环境的危险性	设计和操作阶段	定量分析,划分作业场所的危险性等级
风险矩阵 (LS)	定性分析事故可能性和严重度,确定危险等级	生产过程的各个阶段	定性,判断事故风险是否处于可接受区域
指数评价法 (道化、蒙德等)	对系统、子系统进行危险度分析	设计和操作阶段	定性定量,确定工厂、车间工艺、单元危险度等级
数学模型计算	计算出火灾、爆炸、中毒事故可能的伤害范围	设计和操作阶段	定量分析,可算出人员伤亡和财产损失的范围

其中,危险与可操作性研究(HAZOP)是化工和危险化学品领域应用最为广泛的风险评估方法之一。

美国职业安全与健康管理局(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)为过程安全管理颁布的标准中将 HAZOP 作为推荐方法之一,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)和国际劳工组织(International Labor organization, ILO)提出的三步骤危险评估方法中,第一步和第二步(危险识别和事故后果评估)都采用了 HAZOP 技术。

我国国家安全监管总局《关于加强化工过程安全管理的指导意见》(安监总管三〔2013〕88 号)中指出,企业要制定化工过程风险管理制度,明确风险辨识范围、方法、频次和责任人,规定风险分析结果应用和改进措施落实的要求,对生产全过程进行风险辨识分析。对涉及重点监管危险化学品、重点监管危险化工工艺和危险化学品重大危险源(简称“两重点一重大”)的生产储存装置进行风险辨

识分析,要采用危险与可操作性分析(HAZOP)技术,一般每3年进行一次。对其他生产储存装置的风险辨识分析,针对装置不同的复杂程度,选用安全检查表、工作危害分析、预先危险性分析、故障类型和影响分析(FMEA)、HAZOP技术等方法或多种方法组合,可每5年进行一次。

本文主要针对危险与可操作性研究方法及其在危险化学品环境污染事故风险评估中的应用开展研究。

1.3 HAZOP 分析概述

1.3.1 HAZOP 分析基本原理

危险与可操作性研究(Hazard and Operability Studies, HAZOP)是查明生产装置和工艺过程中工艺参数及操作控制中可能出现的偏差,针对这些偏差,找出原因,分析后果,提出对策的一种分析方法。

该法是1974年由英国帝国化学工业集团(ICI)开发出来的,主要用于工程项目设计审查阶段查明潜在危险性和操作难点,以便制定对策加以控制。化工生产中,工艺参数的控制是非常重要的,因此这种方法特别适用于装置设计审查和运行过程中危险性分析。国际电工委员会(IEC)于2001年颁布了《危险与可操作性分析(HAZOP分析)应用指南》(IEC 61882)。目前,该方法的应用范围已经从化工、石油、石化等行业逐渐扩展到机械、核电、航空航天等多个领域,在欧美国家得到普遍推广应用。

HAZOP分析方法的本质就是通过系列的分析会议对工艺图纸和操作规程进行分析。在这个过程中,由各专业人员组成的分析组按照规定的方式系统的分析偏离设计工艺条件的偏差。ICI对HAZOP分析的最初定义是:HAZOP分析是各专业人员组成的分析组对工艺过程的危险和操作性问题进行分析,这些问题实际上是一系列的“偏差”——偏离设计工艺条件。其理论依据就是“工艺流程的状态参数(如温度、压力、流量等)一旦与设计规定的基准状态发生偏离,就会发生问题或出现危险”。

HAZOP分析对工艺或操作的特殊点进行分析,这些特殊的点称为“分析节点”,或工艺单元,或操作步骤。HAZOP分析组分析每个工艺单元或操作步骤,识别出那些具有潜在危险的偏差,这些偏差通过引导词(也称为关键词)引出。使用引导词的一个目的就是为了保证对所有工艺参数的偏差都进行分析。表1-2列出了HAZOP分析常用的引导词及其含义。

表 1-2 HAZOP 分析常用的引导词

引导词	含义	过程工业举例
NO 或者 NOT	设计目的的完全否定	无流量,温度、压力无显示等
MORE	定量增加	温度、压力、流量高于设计值
LESS	定量减少	温度、压力、流量低于设计值
AS WELL AS	有多余事件发生	有另外组分在流动,或液体发生沸腾等相变
PART OF	只完成规定要求的部分	应输送两种组分,却只输送一种
REVERSE	设计目的的逻辑取反	管道中的物料反向流动以及逆化学反应
OTHER THAN	完全替代	原始的目的没有实现,而达到了完全不同的结果。 例如:输送了错误物料
EARLY(早于)	早于期望的发生时间	某操作早于时钟时间发生
LATE(晚于)	晚于期望的发生时间	某操作晚于时钟时间发生
BEFORE(先)	提前于期望的发生顺序	A 操作先于 B 操作发生
AFTER(后)	落后于期望的发生顺序	A 操作在 B 操作之后发生

选择一个参数,逐一与上述引导词组合,就形成了偏差。以常见的流量、温度、压力为例,与表 1-2 中的引导词组合,形成的偏差如表 1-3 所示。

表 1-3 HAZOP 分析工艺参数、引导词及偏差

工艺参数	引导词	偏差
流量	more	高流量
	less	低流量
	no	无流量
	reverse	逆流
压力	more	压力高
	less	压力低
温度	more	温度高
	less	温度低

1.3.2 HAZOP 分析实施流程

HAZOP 分析一般由 4~8 人的工作小组完成,该小组成员由小组领导、秘书、工艺设计工程师、控制工程师、操作专家、项目工程师等组成。

人工 HAZOP 是一种定性的、结构化的头脑风暴式的评价方法。该方法将

所研究的过程根据设计目的分为多个逻辑上可管理的部件(或节点)。对于每一个部件的设计参数,使其偏离设计指标,对于这种偏差进行潜在原因、后果分析。在这过程中,设备故障、人为失误、工程或管理控制以及外部事件都将列入考虑范围。

一般而言,HAZOP 分析按以下四个步骤进行:

步骤一:确定任务。

由相关领导部门下达 HAZOP 分析任务;确定 HAZOP 分析的范围和目标;挑选并任命评价小组组长及成员;确定各自的职责。

分析的目的、对象和范围必须尽可能明确。分析对象通常是由装置或项目的负责人确定的,并得到 HAZOP 分析组的组织者的帮助。应当按照正确的方向和既定目标开展分析工作,而且要确定应当考虑到哪些危险后果。例如,如果要求 HAZOP 分析确定装置建在什么地方才能使对公众安全的影响减到最小,这种情况下,HAZOP 分析应着重分析偏差所造成的后果对装置界区外部的影响。

危险分析组的组织者应当负责组成有适当人数且有经验的 HAZOP 分析组。HAZOP 分析组最少由 4 人组成,包括组织者、记录员、两名熟悉过程设计和操作的人员。虽然对简单、危险情况较少的过程而言,规模较小的分析组可能更有效率,但 5~7 人的分析组是比较理想的。如果分析组规模太小,则由于参加人员的知识和经验的限制将可能得不到高质量的分析结果。

步骤二:分析准备。

做出分析计划;搜集相关技术资料和数据;商定分析记录的形式;预估分析时间;安排分析日程表。

最重要的资料就是各种图纸,包括 PID 图、PFD 图、布置图等,此外,还包括操作规程,仪表控制图、逻辑图,计算机程序,有时还应提供装置手册和设备制造手册。重要的图纸和数据应当在分析会议之前分发到每位分析人员手中。

获得必要的资料后,需要将资料变成适当的表格并拟定分析顺序。此阶段所需时间与过程的类型有关。对连续过程,工作量最小。在分析会议之前使用已更新的图纸(如果对设计进行过修改)确定分析节点,每一位分析人员在会议上都应有这些图纸。

步骤三:检查分析。

HAZOP 分析需要将工艺图或操作程序划分为分析节点或操作步骤,然后用引导词找出过程的危险。图 1-1 是元素优先的 HAZOP 分析方法流程图。分析组对每个节点或操作步骤使用引导词进行分析,得到一系列的结果:偏差的原因、后果、保护装置、建议措施。

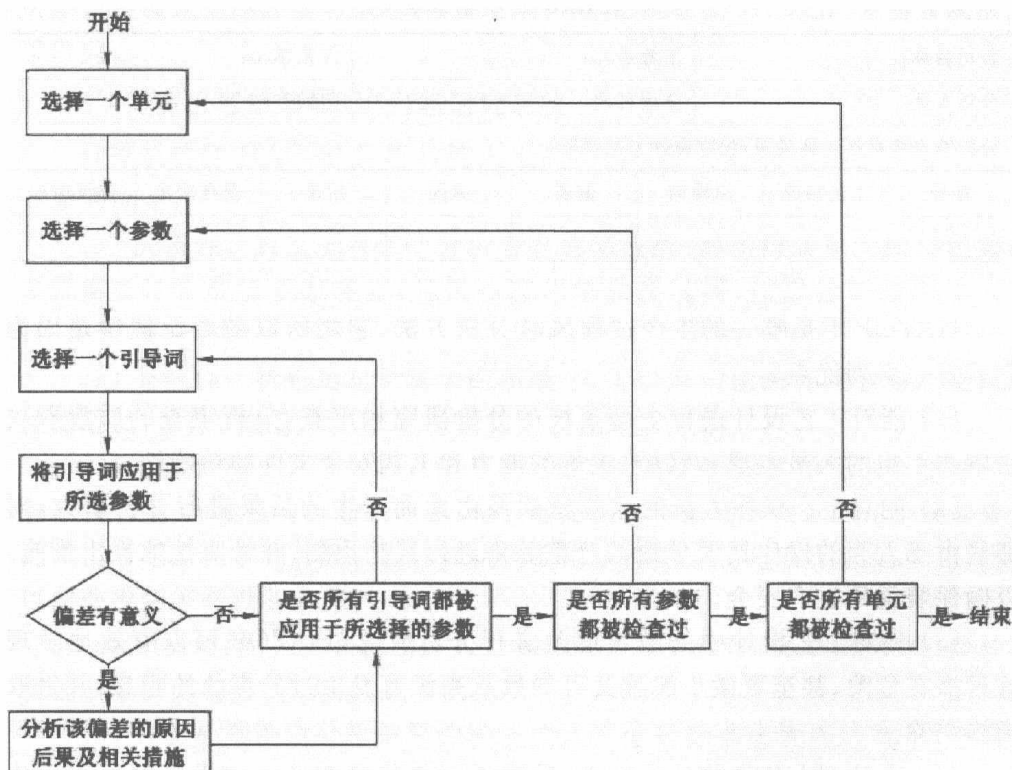


图 1-1 元素优先的 HAZOP 流程图

HAZOP 分析涉及过程的各个方面,包括工艺、设备、仪表、控制、环境等,HAZOP 分析人员的知识及可获得资料总是与 HAZOP 分析方法的要求有距离,因此,对某些具体问题可听取专家的意见,必要时对某些部分的分析可延期进行,在获得更多的资料后再进行分析。

步骤四:完成分析文件和后续措施。

记录检查分析的内容;签署有关文件;完成分析报告;提出整改措施;跟踪安全措施的执行情况;得到最终评价报告。

分析记录是 HAZOP 分析的一个重要组成部分,负责会议记录的人员应根据分析讨论过程提炼出恰当的结果,不可能把会议上说的每一句话都记录下来(也没这个必要),但是必须记录所有重要的意见。有些分析人员为了减少编制分析文件的精力,对那些不会产生严重后果的偏差不予深究或不写入文件中,但一定要慎重。也可举行分析报告审核会,让分析小组对最终报告进行审核和补充。表 1-4 是 HAZOP 分析记录表的一种常用形式。

表 1-4 HAZOP 分析记录表

公司名称：		装置名称：			工艺单元：		
分析人员：		会议日期：			图纸号：		
分析节点或操作步骤说明,确定设计工艺指标							
序号	工艺参数	引导词	偏离	原因	后果	现有措施	建议措施

HAZOP 不是唯一的生产过程风险分析方法,它之所以被广泛使用是因为它具有一系列优点:

(1) 能对工艺设计进行全面系统的分析研究和审查,分析审查的质量取决于审查小组的人员组成和素质、组长的能力和工艺安全文件的精确性。

(2) 能对生产操作人员的操作错误及由此而产生的后果进行分析研究,对那些由于人为的操作错误导致的严重后果进行某些预测,并针对性地提出措施,以确保装置的生产安全。

(3) 针对工艺设计中的潜在危险进行分析研究,HAZOP 可以有效地发现这种潜在危险,甚至更微小隐蔽又可导致从来没有发生过的事故的隐患,并采取措施消除。

(4) 通过 HAZOP 的分析审查,排除了工艺装置在设计 and 操作中可能发生的突然停车、设备破坏、产品不合格以及爆炸、着火、中毒等恶性事故,从而提高装置的生产效率和经济效益。

(5) 通过 HAZOP 的分析研究,可以使设计和操作人员更加全面深入地了解装置的性能,既完善了设计,保证了装置的生产安全,又能充实生产操作规程,提高操作人员的培训质量。

传统的 HAZOP 分析以人工头脑风暴的方式进行。由于人脑思维的局限性和有限的推理能力,导致这一系统方法只能针对系统的局部进行,无法有效地针对大型系统全流程中存在的系统安全问题进行分析。另外,复杂系统中各种安全隐患的数目众多,与系统构成的事故状态数量也极为庞大。人工 HAZOP 评价很难保证结论的完备性。

在美国,一个典型的 HAZOP 分析需要花费 1 至 8 周时间完成,每周费用在 13 000~25 000 美元之间。据美国 OSHA 要求,美国大约有 25 000 个化工企业需要进行流程工业危险(安全)分析,每一轮化学工业进行流程工业危险(安全)分析及相关工作的花费约为 50 亿美元,占销售额的 1%和利润的 10%左右。因此,高时耗、高成本也成为制约人工 HAZOP 分析在相关行业推广应用的重要因素之一。为提高 HAZOP 分析效率,降低分析费用,同时避免分析结果受人

员知识经验或主观因素的影响,很多学者对计算机辅助 HAZOP 分析方法展开了研究。

1.3.3 计算机辅助 HAZOP 分析研究现状

计算机辅助 HAZOP 分析与纯人工的 HAZOP 分析相比主要有以下几个方面的优点:

(1) 完备性。人工 HAZOP 分析容易忽略故障,而由设备单元模型组建的系统模型时经多位专家建立,且又在应用中反复完善,所以分析结果比人工 HAZOP 更完备。

(2) 系统性。特别是对于复杂的系统,人工口头讨论的方式容易产生概念性的混乱,计算机辅助 HAZOP 分析很少出现此类问题。

(3) 推理深度。人工分析只能考虑与偏离点相邻的设备单元的非正常原因和不利后果,即使是有经验的专家,也只能分析到与偏离点相近的几个设备单元的非正常原因和不利后果。而计算机向后可追溯到工艺过程的起始单元,也可以向前推到末端设备单元。

(4) 节省时间、人工和费用。人工 HAZOP 分析费时、费力、成本高;而计算机辅助分析则省时、省力,且成本低。

(5) 计算机辅助对分析结果的表达比人工分析标准化程度更高,条理更清晰,而且特别方便于日后查看。

从 20 世纪 80 年代末开始就有学者对计算机辅助 HAZOP 分析方法进行了研究,目前的计算机辅助 HAZOP 分析方法主要分为三大类:

(1) 计算机辅助文字处理软件

早期的计算机辅助 HAZOP 分析主要采用计算机软件引导分析过程,采用“模板”方式帮助分析人员管理节点、偏差、措施等信息,并根据分析人员录入的信息生成规范化的 HAZOP 报表。此类辅助分析软件中比较有代表性的有 PHA-Pro、Hazard Review LEADER、PHA Works 等,此类软件的核心与人工 HAZOP 分析并无本质区别,对原因、后果的分析仍以人为主,只是采用软件引导分析人员,使分析过程和分析结果更加规范。采用这类软件辅助进行 HAZOP 分析,虽然可以在一定程度上减轻分析人员的工作量,提高分析效率,但仍然无法避免由于人员的知识经验或主观因素所导致的疏漏或错误等问题,无法从根本上提高 HAZOP 分析的质量。

(2) 基于知识/经验的计算机辅助 HAZOP 分析

基于知识/经验的计算机辅助 HAZOP 分析是指将知识经验或人工 HAZOP 分析结果以“专家规则”的形式存储在知识库中,用于帮助分析人员自动分析偏差的原因、后果、措施等。

1987年, Parmar 和 Lees 采用基于规则的方法进行自动 HAZOP, 并用于一个水分离系统的危险识别。他们将单元过程中故障传播的知识表达为定性传播方程, 把工厂 PID 图分解为由管道、泵、阀门所组成的“线”(line), 其中有过程物流通过。控制回路由变送器、控制器和控制阀组成。流程中的旁路表达成一个独立的过程单元。HAZOP 分析, 是在一个“线”中的某一个过程变量的偏离作为开始点。非正常原因采用搜索初始事件得到; 不利后果采用搜索终点(端)事件得到。

1990年, Karvonen、Heino 和 Suokas 在 KEE“专家系统”外壳上开发了一种基于规则的“专家系统”原型 HAZOPEX 软件。HAZOPEX 的知识库中具有过程系统的结构和搜索原因及后果的“规则”。

用于搜索潜在原因的规则有如下形式:

“IF 偏离类型 AND 过程结构/条件 THEN 潜在原因”

HAZOPEX 曾用于分析合成氨系统的一小部分, 所建立的规则有 350 条。当过程单元增加时, 规则的数量也相应增加, 因此限制了该系统的通用性。

1997年 Suh、Lee 等人开发了一个基于知识的专家系统, 该系统由三个知识库组成: 单元知识库、组织型知识库和物料知识库, 有三种危险分析算法: 偏离、误动作和事故分析算法。对于管道、阀门、换热器、储罐、混合器、控制阀和泵等知识库中存在的单元, 能自动进行 HAZOP 分析。

基于知识/经验的计算机辅助 HAZOP 分析方法模拟人工 HAZOP 分析过程, 知识库相当于人的大脑, 通过预先将知识/经验储存在知识库中, 对于指定过程, 可以自动完成偏差的确定及原因、后果分析, 从而大大缩短了分析时间, 并在一定程度上提高了 HAZOP 分析质量。此类方法的缺点也与人工 HAZOP 分析类似, 即分析结果的可靠性、完备性完全取决于知识库的质量, 对于知识库中未存储的单元、偏差、原因、后果等内容无法进行有效辨识和分析。

(3) 基于模型的计算机辅助 HAZOP 分析

基于模型的计算机辅助 HAZOP 分析方法的主要特点是通过模型来表达过程、系统或单元的基本特性。在进行 HAZOP 分析时, 首先建立系统的模型, 然后利用自动推理算法寻找导致偏差的可能原因及偏差所导致的可能后果。

1997年, Dimitradis、Shah 和 Pantelides 提出了一种基于定量模型混合方法用于过程安全验证。在他们的方法中, 采用了状态传递网络来表达混合特性。安全验证要求该软件系统能识别可能导致危险的干扰模式。数学形式的结果作为一种混合的积分最优问题。可见, 对于工业规模的问题, 该最优问题的解可能难于得出, 特别是当系统模型中存在强非线性时。此外, 即使当该数学程序的解指示对于时间域而言系统是安全的, 当存在局部最优时, 也不能保证没有危险

发生。

1999年, Turk 提出一个程序用于综合非时域的离散模型, 该模型可获取给定的化工过程现象和连续的动态关系。所提出的程序集中在基于给定说明辅助下的离散模型的建构方面。“说明”用于识别化工过程中相关的原因路径。本程序沿着这些原因路径反向搜索, 以便建构状态变量的传递关系, 包括物理系统、控制系统、操作顺序和操作特性。这样, 提出的程序建构了一个离散模型, 用于验证化工过程的安全和可操作性问题。

1996~2000年, 美国普渡大学 V. Venkatasubramanian 教授领导的过程系统研究室成功地将符号有向图(Signed Directed Graph, SDG)模型应用于计算机辅助 HAZOP 分析, 并开发完成了基于模型的智能化 HAZOP 分析软件 HAZOP Expert。SDG 模型既能很好地表达系统中潜在的故障及故障传播演变的途径, 又避免了纯定量模型对物性数据、设备结构数据和现场动态特性数据的强依赖性, 分析过程不但效率高、速度快, 而且分析结论的完备性更好。因此, 基于 SDG 模型的计算机辅助 HAZOP 分析方法是目前安全领域研究的热点之一。

1.4 主要研究内容及技术路线

本文以 SDG-HAZOP 方法为基础, 研究适用于危险化学品环境污染事故的风险评估方法, 通过案例分析验证方法的可行性和有效性, 并根据风险评估结果, 提出针对危险化学品环境污染事故的预防控制和应急处置措施。研究技术路线如图 1-2 所示。



图 1-2 技术路线

第2章 连续生产过程 HAZOP 分析方法

在连续生产过程中,生产操作各环节连续、同时进行,不间断地生产、输出产品,整个生产过程稳定性较高,大多数工艺参数不随时间变化。因此,连续生产过程的工艺参数一旦偏离其设计值,就可以爆发危险或导致事故,这与 HAZOP 分析的原理完全一致。因此,可使用 HAZOP 分析方法对于连续生产过程进行风险评估,并用 SDG 技术对过程进行建模,以实现计算机辅助 HAZOP 分析。

2.1 SDG 技术

2.1.1 符号有向图 SDG

符号有向图是在有向图的基础上,对节点与支路进行进一步的符号定义所形成的图,称之为 SDG 图(Signed Directed Graph),其本质是通过给 SDG 图中节点和支路进行符号化的定义,使节点和支路能够代表实际物理意义,用于表达复杂的因果关系,并且包容大规模潜在的信息。

现有的 SDG 图在化工安全分析的应用中,多用于描述复杂化工系统变量之间的因果关系,将节点映射到某一物理量;用支路来映射该物理量与其他相关变量之间的关系。通过这种描述,将一个复杂系统中的各个变量之间的影响关系用有向图的方式记录下来,称之为 SDG 模型。

在人工智能领域,将 SDG 模型称为深层知识模型(Deep Knowledge Based Model)。同时,运用 SDG 模型揭示复杂系统的变量间内在因果关系及影响属于定性仿真的一个重要分支,因此 SDG 模型又称为定性模型(Qualitative Model)。

图 2-1 为一个简单的离心泵液位系统。该系统由一个开口容器、一台离心泵、一个调节阀(V1)、一个手动阀(V2)和若干管道组成。其中,容器的液位由一个单回路控制器(LIC)控制,LS 是液位变送器,上游入口流量为 F_1 ,下游出口流量为 F_2 ,离心泵出口压力为 p 。

图 2-2 是该系统 SDG 模型的一种表达。图中的节点表示过程系统中的物理变量,如流量、液位、温度、压力和组成等。还包括操作变量,如阀门、开关等,以及相关的仪表,如控制器、变送器等。

SDG 看似简单,却能够表达复杂的因果关系,并且具有包容大规模潜在信