

石油化工设施风险管理丛书

石化装置定量风险 评估指南

**A Guidance for Quantitative Risk
Assessment in the Petrochemical Plant**

中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC.PRESS.COM](http://www.sinopecpress.com)

石油化工设施风险管理丛书

石化装置定量风险评估指南

A Guidance for Quantitative Risk
Assessment in the Petrochemical Plant

中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了在石化装置实施定量风险评估(Quantitative Risk Assessment, QRA)的过程,全书对实施QRA的各个环节及相关知识进行了阐述,主要内容包括:定量风险评估介绍、定量风险评估的基本过程、定量风险评估准备、资料收集、危险辨识、失效频率分析、失效后果分析、风险计算、风险评估、QRA评估实例分析。书后还附有国内外定量风险评估软件的介绍、国外失效数据库的介绍、管理系统评估,以方便在实施QRA过程中参考。

本书可供石油、石化领域的安全评价人员、管理人员、安全技术人员以及大专院校安全工程专业师生等学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

石化装置定量风险评估指南/中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院编著.

—北京:中国石化出版社,2007

(石油化工设施风险管理丛书)

ISBN 978-7-80229-284-0

I. 石… II. 中… III. 石油化工-化工设备-风险分析-指南 IV. TE96-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第037903号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

中国石化出版社图文中心排版

北京新华印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

850×1168毫米32开本7印张175千字

2007年4月第1版 2007年4月第1次印刷

定价:20.00元

编委会

主 任 徐 钢

副 主 任 张海峰 刘 跃 寇建朝 吕亮功

编委成员：张晓鹏 贾鹏林 王建军 卢世红

杜红岩 张志刚 龚 宏 狄 燕

卢传敬 张朋成 李祥寿 王绍民

刘广生 牟善军 俞雪兴 贾如伟

撰稿人员：牟善军 姜春明 李 奇 姜巍巍

张卫华 李俊杰 黄贤滨 李延渊

兰正贵 王春利 曹文东

编者的话

风险评价在我国又称为安全评价，我国安全评价工作从 20 世纪 80 年代后期开始起步，在安全评价理论、方法的研究和应用方面发展很快。目前我国引入的安全评价方法主要有安全检查表、危险性预分析、故障树分析、事件树分析、爆炸指数法等。尽管在《安全评价通则》中规定使用的定量安全评价方法中含有 QRA 定量评价，但由于种种原因，目前国内安全评价基本停留在定性与半定量阶段，定量风险评估一直未得到广泛应用。

国外发达国家对 QRA 研究非常重视，以荷兰和英国为先。现今许多国家已经制定了相应的定量风险准则和实施细则，并开发出一系列的 QRA 软件，如 DNV 公司 SAFETI 软件、SHELL 公司的 SHEPHERD DESKTOP 软件、TNO 研究院 RISKCURVES 软件等，这些为实施 QRA 提供了保障。

当前我国实施 QRA 定量评价存在一些难度，与发达国家相比主要体现在以下几个方面：

- (1) 国内尚没有一套实施 QRA 的方法。
- (2) 国内尚未建立自己的失效数据库。
- (3) 我国尚未建立自己的风险接受标准。

本书着重从第一个难点入手，介绍 QRA 技术的发展、方法和技术内容，参考荷兰 CPR(灾害预防委员会)出版的相关技术资料，按照一个完整的实施过程对 QRA 技术进行了详细的阐述，并通过实际的案例进行了说明。本书建立了国内第一套完整的实施 QRA 的方法，是帮助读者了解 QRA 技术和实施过程的一本内容新颖、信息量大、系统全面的参考资料。

本书从应用、实施 QRA 技术的角度，系统深入地介绍 QRA 实施过程中所涉及的各项内容。本书第一章“前言”，从 QRA 的发展历史开始，全面介绍了国内外 QRA 的进展情况。第二章“定量风险评估介绍”，回答了 QRA 是什么，QRA 的目的、结果及风险接受准则等问题。第三章“定量风险评估的基本过程”，介绍了实施 QRA 的 7 个步骤。第四章“定量风险评估准备”到第十章“风险评估”，按照一个完整的 QRA 实施过程对各个环节(QRA 准备、资料收集、危险辨识、失效频率分析、失效后果分析、风险计算、风险评估)进行了详细的描述。其中

第六章“危险辨识”介绍了一种对石化装置进行危害辨识方法，通过该方法可以简单、有效地辨识装置中高风险的设备。第七章“失效频率分析”中介绍了各类容器不同情景的泄漏频率，并结合设备系数和管理系数对国外失效频率进行修正，使其能够满足国内 QRA 分析的需要。第八章“失效后果分析”中详细介绍了扩散、火灾、爆炸后果模型及事故影响模型。第九章“风险计算”中介绍了个人风险和社会风险的详细计算方法。第十章“风险评估”中介绍了风险可接受准则、常用的风险准则及降低风险的措施等。最后一章“定量风险评估实例分析”介绍了某焦化装置实施 QRA 的过程，在实例中完整地阐述了 QRA 的实施。附录 1“国内外 QRA 软件介绍”中介绍了国内外四家公司 QRA 软件的功能及使用方法，可以便于读者选择使用。附录 2“国外失效数据库介绍”中介绍 DNV 公司的 OREDA 数据库的由来、范围、数据结构等，便于读者了解国外数据库。附录 3“管理系统评估”中列出了管理系统打分的原则，通过分析可以得到国内管理系统的调整系数。附录 4“相关术语”对本书中相关术语作了简单介绍。

由于定量风险评估比较复杂，涉及的知识及学科较宽，书中难免有误，不妥之处，望读者指正。

目 录

1 前言	(1)
1.1 国外定量风险评价的历史和现状	(1)
1.2 我国定量风险评价的历史和现状	(5)
2 定量风险评估介绍	(7)
2.1 定量风险评估的目的	(7)
2.2 定量风险评估的结果	(8)
2.3 定量风险评估风险接受准则	(9)
3 定量风险评估的基本过程	(11)
4 定量风险评估准备	(13)
4.1 定量风险评估工作组	(13)
4.2 定量风险评估培训	(14)
4.3 定量风险评估项目管理	(15)
5 资料收集	(19)
6 危险辨识	(20)
6.1 选择方法	(20)

6.2	利用设备选择方法选择设备的例子	(28)
7	失效频率分析	(35)
7.1	容器泄漏的频率分析	(35)
7.2	频率调整	(48)
7.3	容器泄漏后引起事故频率分析	(51)
8	失效后果分析	(56)
8.1	泄漏模型	(57)
8.2	闪蒸模式	(64)
8.3	液池扩散	(65)
8.4	蒸发模型	(67)
8.5	气体扩散模型	(69)
8.6	喷射火模型	(87)
8.7	池火模型	(93)
8.8	火球计算	(96)
8.9	蒸气云爆炸	(98)
8.10	事故影响模型	(101)
9	风险计算	(106)
9.1	网格定义	(106)
9.2	个人风险计算	(107)
9.3	社会风险计算	(108)
10	风险评估	(111)
10.1	风险可接受准则	(111)
10.2	降低风险措施	(115)
10.3	重新评估	(117)

11 定量风险评估实例分析	(118)
11.1 某延迟焦化装置概况	(118)
11.2 资料收集	(120)
11.3 危险辨识	(121)
11.4 焦化装置失效频率分析	(124)
11.5 焦化装置设备后果模拟	(129)
11.6 焦化装置风险计算	(136)
11.7 风险评估	(138)
参考文献	(139)
附录 1 国内外定量风险评估软件介绍	(143)
附录 2 国外失效数据库介绍	(170)
附录 3 管理系统评估	(191)
附录 4 相关术语	(209)

1 前 言

随着化学工业、石油化学工业的发展,大量易燃、易爆、有毒、有害、有腐蚀性的危险化学品种不断问世,它们作为工业生产的原料或产品出现在生产、加工处理、储存、运输、经营过程中。化学品的固有危险性给人类的生存带来了极大的威胁。例如,1976年意大利塞维索工厂环己烷泄漏事故,造成30多人死亡,迫使20余万人紧急疏散;1984年墨西哥城液化石油气爆炸事故,使650人丧生、数千人受伤;1984年印度博帕尔市郊农药厂发生甲基异氰酸盐泄漏的恶性中毒事故,有2500多人中毒死亡,20余万人中毒受伤且其中大多数人双目失明致残,67万人受残留毒气的影响;1993年8月5日中国深圳危险化学品种仓库爆炸火灾事故造成15人死亡,100多人受伤,损失2亿多元;1997年6月27日中国北京东方化工厂爆炸事故造成8人死亡,直接经济损失1亿多元;2001年11月1日中国洛阳发生11t氰化钠溶液泄漏事故。近两年我国发生了多次危险化学品种泄漏和爆炸事故,这些危险化学品种事故,尽管其起因和影响不尽相同,但它们都有共同特征:它们是偶然事件,会造成工厂内外大量人员伤亡,或是造成巨大的财产损失或环境损害,或是两者兼而有之,即重大事故。这些灾难性事故引起了世界各国的高度重视,各工业国和一些国际组织纷纷制订有关法规、标准和公约,旨在强化化学品种的管理,其中包括对危险化学品种进行安全评价的规定。

1.1 国外定量风险评价的历史和现状

风险评价起源于20世纪30年代的保险业。企业风险评价则从化工行业开始,始于20世纪60年代。1964年,美国DOW

化学公司开发出火灾、爆炸指数法。后几经修改，DOW 化学公司在 1994 年提出了第 7 版。DOW 指数法的基本思想是，以物质系数为基础，再考虑工艺过程中其他因素，如操作方式、工艺条件、设备状况等的影响，来计算每个单元的危险度数值，然后按数值大小划分危险度级别。英国帝国化学公司 (ICI) 蒙德 (MOND) 分部 1974 年在 DOW 指数法的基础上，根据化学工业的特点，扩充了毒性指标，并对所采取的安全措施引进了补偿系数的概念，从而把指数法向前推进了一大步。日本劳动省以 DOW 指数法和 MOND 法为参考，在 1976 年提出了化工厂六阶段安全评价法。

核电站的建成和投入使用，使人类获得了一种廉价、清洁的新能源。然而，核电站一旦发生泄漏事故，后果将不堪设想。为了准确评价核电站的安全性，20 世纪 60 年代末 70 年代初期开发了概率风险评价方法。概率风险评价的思想是 Farmer 在 1967 年提出的，美国的 Rasmussen 教授领导的研究小组在 1974 年正式发表了“商用核电站轻水反应堆的风险评价”报告，即著名的 WASH-1400 报告。该报告的目的是评估美国商用核电站潜在事故对社会造成的风险。它第一次成功地运用事件树分析和故障树分析方法，对核电站风险进行了定量分析和计算，并和已经存在的社会风险作了比较。这在安全分析史上是一个重要的里程碑，对世界各国产生了广泛而深入的影响。

20 世纪 70 年代以来，随着技术的进步，石化等企业的生产规模越来越大。与此同时，火灾、爆炸和有毒气体泄漏等重大事故的发生频率增加，事故损失增大，造成了巨大的财产损失和人员伤亡，引起了社会舆论的严重关注。因此，20 世纪 70 年代以来，世界各国和一些国际组织都高度重视对火灾、爆炸和有毒重大危险源的控制，不惜花费大量的人力、物力和财力，开展火灾、爆炸和有毒重大危险源控制技术研究，颁布重大危险源管理法规，加强对重大危险源的管理和控制。

英国是最早系统地研究重大危险源控制技术的国家。1974年6月 Flixborough 爆炸事故发生后,英国卫生与安全委员会设立了重大危险咨询委员会,负责研究重大危险源辨识评价技术,提出重大危险源的控制措施。1976年,应英国外境与就业大臣的要求,英国卫生与安全管理局对 Canvey 岛的工业设施危险性进行了评价。该项研究的目的是了解现有工业设施及建成炼油厂后给当地居民带来的危险。Canvey 岛有 7 座工厂,这些工厂主要储存、运输、生产汽油和石油产品,约储存 $1 \times 10^5 \text{ kg}$ 液化天然气, $1.8 \times 10^7 \text{ kg}$ 石油产品。该研究分析了可能发生的 38 种主要事故机理,得出了该岛现有工业设施以及扩建后的工业设施在改善前后的风险。由于评价对象为整个地区,因此评价时采用了宏观的方法,忽略了许多事故细节。

1979 年,应荷兰居民安全委员会的要求,英国的 Cremer&Wamerr 公司和德国的 Battele 公司对 Rijnmond 地区的六个工业设施进行了风险评价。此项研究的一个重要目的是探索对石油、化工设施进行风险分析的可行性,为实际应用积累经验。与 Canvey 岛的危险性评价不同,这次评价的对象为单个工业设施,而不是整个工厂,更不是整个地区,也没有考虑事故对厂内其他设施的影响。它是一种微观的评价方法。

为了保证危险物质生产、储存、运输和使用过程中的安全,各国政府和一些国际组织相继制定了不少关于危险物质管理方面的法律和法规。

英国

英国政府在 1982 年颁布了《关于报告处理危险物质设施的规程》,1984 年又颁布了《重大工业事故控制规程》。1985 年美国化学工程师协会出版了《危险性评价方法指南》;1992 年 2 月又完成了高危险性化学品制造过程安全管理规定,以预防易燃易爆和有毒气体泄漏事故的发生。

欧共体(现欧盟)

欧共体于1982年6月颁布了《工业活动中重大事故危险法令》(82/501/EEC),即《SEVESO指令》。该法令列出了180种危险化学品物质及其临界量标准。1996年12月欧共体对82/501/EEC进行了修订,通过了《SEVESO II指令》(96/82/EC)。

为实施《SEVESO指令》,英国、荷兰、德国、法国、意大利、比利时等欧共体成员国都颁布了有关重大危险源控制规程,要求对工厂的重大危险源进行辨识、评价,提出相应的事故预防和应急措施计划,并向主管当局提交详细描述重大危险源状况的安全报告。安全评价报告的内容主要包括:工厂说明、相关安全设施说明、物质的危险性鉴别、工艺安全性分析、防止事故的措施、事故影响分析和应急计划等。政府主管部门组织专家对安全报告进行审查。对报告的内容产生疑问时,企业必须提供进一步的说明,必要时到现场核查。

目前,欧盟国家对化学品,特别是新化学品的控制十分严格。欧盟国家要求对化学品进行危害性鉴定、分类和评价。一种新化学品在成为商品投放到市场销售之前,必须进行危害性鉴定、分类和评价,测定其物理性质、化学性质、危险特性、环境数据、毒性和作业场所的健康危害数据。所有数据的测定必须由有资质的机构完成(其中环境数据、毒性和健康危害要到指定机构测定)。为此企业将支付10万~50万美元的费用。

美国

1992年美国颁布了《高度危险化学品处理过程的安全管理》标准(PSM),该标准定义的处理过程是指涉及一种或一种以上高危化学物质的使用、储存、制造、处理、搬运等任何一种活动,或这些活动的结合。在标准中提出了130多种化学物质及其临界量。美国劳工部职业安全卫生管理局(OSHA)估计符合标准要求的重大危险源达10万个左右,要求必须对危险源进行评价。

国际劳工组织(ILO)

1993年通过了《预防重大工业事故》公约和建议书,该公约和建议书为建立国家重大危险源控制系统奠定了基础。为促进亚太地区的国家建立重大危险源控制系统,ILO于1991年1月在曼谷召开了重大危险源控制区域性讨论会。在ILO支持下,印度、印尼、泰国、马来西亚和巴基斯坦等建立了国家重大危险源控制系统。ILO将来的重点是,进一步支持建立国家重大危险源控制系统。第一步是在确定的危险物质及其临界量表的基础上,辨识重大危险设施和装置,然后逐渐实施风险评价、整改措施和应急计划。

为了在易燃、易爆、有毒危险源安全评价中推广应用定量风险评价方法,最近十多年来,国外开发了不少定量风险分析软件包,有的已经开始投入实际使用。例如,1982年英国的 TECHNICA 公司开发了 SAFETI 软件包,1989年荷兰咨询科学公司开发了 SAFE II 软件包,20世纪90年代荷兰 TNO(应用科学研究院)开发了 EFFECTIS 软件包和 DAMGE 软件包。这些软件包为工厂选址与设计、区域和土地使用决策、运输方案确定、危险源辨识和评价提供了有力的工具。

1.2 我国定量风险评价的历史和现状

我国的安全评价工作1981年才起步。1988年,机械电子部制订了“机械工厂安全性评价标准”。1992年,化工部劳保所制订了化工厂危险程度分级方法。目前,石油、化工、军工、航空等行业都制订了各自的安全评价标准。需要特别指出的是,为了加强对我国重大危险源的管理,有效控制重大工业事故的发生,1992年国家科委将“重大危险源的评价与宏观控制技术研究”列为国家“八五”科技攻关计划的内容。通过研究,提出了易燃、易爆和有毒重大危险源危险性评价方法。这是一个定性和定量相结

合的安全评价方法，因为它在估计事故发生的可能性时，基本上是采用定性方法，而在估计事故的后果时，主要是采用定量方法。这是因为我国还没有建立事故数据库计算机管理系统，不可能对各类事故的发生频率作出准确的估计。目前，我国还没有对固定的化学危险源进行过系统的定量风险评价。

国家经贸委安全科学技术研究中心提出了我国重大危险源辨识标准：GB 18218—2000《重大危险源辨识》，辨识重大危险源的出发点仍旧采用了物质的危险性及其数量。该标准提供了爆炸性化学物质名称及其临界量、易燃化学物质名称及其临界量、活性化学物质名称及其临界量和毒性化学物质名称及其临界量四个表格。重大危险源的安全评价已经引起我国政府的高度重视。1998年2月5日，劳动部颁发了“建设项目(工程)劳动安全卫生预评价单位资格认可与管理规则”和“建设项目(工程)劳动安全卫生预评价管理办法”两部法规。根据这两部法规的要求，对危险的建设项目必须进行劳动安全卫生预评价。

2002年6月29日，中华人民共和国第70号主席令颁布了《中华人民共和国安全生产法》，规定生产经营单位的建设项目必须“三同时”，同时还规定矿山建设项目和用于生产、储存危险物品的建设项目应该进行安全条件论证和安全评价。2002年1月9日，中华人民共和国国务院第344号发布了《危险化学品安全管理条例》，在规定的对危险化学品各环节管理和监督的同时，提出了“生产、储存、使用其他危险化学品的单位，应当对本单位的生产、储存装置每两年进行一次安全评价”的要求。《中华人民共和国安全生产法》和《危险化学品安全管理条例》的颁布，必将进一步推动安全评价工作向更广、更深的方向发展。

2 定量风险评估介绍

定量风险评估(QRA)是对某一设施或作业活动中发生事故的频率和后果进行表达的系统方法,也可以讲它是一种对风险进行量化管理的技术手段。定量风险评估在分析过程中,不仅要求对事故的原因、过程、后果等进行定性分析,而且要求对事故发生的频率和后果进行定量计算,并将计算出的风险与风险标准相比较,判断风险的可接受性,提出降低风险的建议措施。

在定量风险评估中风险的表达式为:

$$R = \sum_i (f_i \times c_i) \quad (2-1)$$

式中 f_i ——表示事故发生的频率;

c_i ——表示该事件产生的预期后果。

2.1 定量风险评估的目的

风险无处不在,即使很有把握的事情,也可能有意外发生,即风险具有客观存在性。定量风险评估是对危险进行识别、定量评估,做出全面的、综合的分析。借助于定量风险评估所获得的数据和结论,并综合考虑经济、环境、可靠性和安全性等因素,可以制定适当的风险管理程序,帮助系统操作者和管理者做出安全决策。

定量风险评估主要解决以下四个问题:

- (1) 可能发生什么意外事件;
- (2) 意外事件发生的可能性或失效频率;
- (3) 发生意外事件后会产生什么样的后果;
- (4) 这种意外事件的风险是否可以接受。