

辛晶, 杨玉胜. 基于网络层次分析法的石油化工设施安全风险评估[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 151–154. [XIN Jing and YANG Yusheng. Security Risk Assessment of Petrochemical Facilities Based on Analytic Network ProcessJ]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 151–154. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.026.]

基于网络层次分析法的石油化工设施安全风险评估*

辛晶, 杨玉胜

(中国人民警察大学 涉外安保学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为评估石油化工设施的安全风险, 提出了一种基于网络层次分析法的安全风险评估模型。在构建石油化工设施安全风险网络层次分析模型的基础上, 采用 Saaty 标度法对安全风险参数进行量化, 利用 SD 软件对安全风险参数进行排序。仿真结果表明, 网络层次分析法考虑了安全风险参数之间的相互作用和相互影响, 能改进基于线性组合关系的递阶层次分析模型的不足, 评估结果可为石油化工企业制定安全风险管理措施提供决策依据。

关键词: 安全风险评估; 石油化工设施; 网络层次分析法

中图分类号: X4; X915.5; X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)02–0151–04

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.026

近年来, 全球范围内发生了多起人为蓄意的袭击事件, 造成了大量的人员伤亡和经济损失, 如 2001 年 9 月 11 日, 美国遭受严重的恐怖袭击事件, 造成 3 000 多人死亡。尤其是 2015 年法国化工厂遭遇人为蓄意袭击事件, 引起了全世界对石油化工企业安保工作的重视。石油化工企业的复杂性和关联性不仅会引发新的风险, 而且其脆弱性会加剧潜在后果的严重性, 如可能引发多米诺效应。因此, 对石油化工企业及其设施进行安全风险评估, 有助于完善企业的安保措施, 保障财产安全和社会稳定。

国内对于石油化工企业及其设施风险评估的研究没有考虑人为蓄意的破坏活动, 而是以自然灾害和系统故障及人为失误导致的各类事故为研究对象, 研究成果主要包括定性分析和风险评估理论模型方面的研究。如周靖轩^[1]在分析我国石化企业火灾风险特点的基础上, 提出了模糊重心理论的火灾风险评价方法, 并基于评价结果对石化企业进行消防安全管理。而石油化工企业安全风险评估主要侧重于企业遭受外部人为袭击事件, 研究文献不多。杨佳豪^[2]通过建立恐怖袭击风险评估指标体系, 利用公式赋权法确定指标权重, 用人员伤亡和财产损失衡量后果损失, 对重要化工企业遭遇恐怖袭击的风险进行评价。2001 年美国遭受恐怖袭击事件后, 国外研究机构开发了多种安全风险评估方法^[3–5], 这些方法主要是通过专家主观确定安全风险参数的分值, 然后通过加法或乘法的线性关系组合这些参数, 根据计算的安全风险参数的分值辨识出关键的资产, 再对关键资产是否需要增加安保措施进行决策, 以辅助风

险管理。

上述研究的主要不足是假设安全风险参数是彼此独立的, 并存在上下支配的递阶关系。由于人为蓄意破坏活动是随机性较高的事件, 安全风险参数之间是互相影响的, 所以, 从安保视角看, 递阶层次分析法很可能导致评估结果引起争议。本文采用网络层次分析法, 以安全风险参数之间存在相互作用为前提, 考虑了安全风险参数之间的相互作用, 能准确地反映它们之间的复杂关系, 适合于石油化工企业及设施安全风险评估的实际。

1 石油化工设施安全风险评估流程

安全风险^[6]是某种威胁袭击某个资产的可能性、资产的脆弱性和袭击成功导致负面后果的函数, 计算公式如下:

$$R = (A \times T) \times V \times C. \quad (1)$$

式中: R 是安全风险, A 是资产, T 是威胁, V 是资产的脆弱性, C 是负面后果。

根据美国石油协会安全风险评估方法, 石油化工设施安全风险评估的基本步骤^[3]主要包括资产辨识、后果评估、威胁评估、袭击可能性评估和脆弱性评估。

1.1 资产辨识

安全风险评估的主要目的是辨识关键资产, 通过增加安保措施降低关键资产的安全风险, 以辅助决策者进行安全风险管理。关键资产是指对某种威胁有吸引力的资产, 如公众、雇员、工艺

* 收稿日期: 2020–10–10

修回日期: 2020–12–20

基金项目: 中国人民警察大学实验创新平台课题(2019syexpd008)

第一作者简介: 辛晶(1976–), 女, 汉族, 黑龙江绥化人, 博士, 教授, 主要从事风险评估方面的研究。

E-mail: xin_jing@126.com

设备、管道、危险化学品储罐、关键的商业信息和公司信誉等。

1.2 后果评估

通常基于人员伤亡、经济损失、环境破坏、商业中断等后果对资产进行初步筛选,从而辨识关键资产,如超过预设阈值的石油化工企业的危险化学品储罐。根据后果严重程度的定性描述^[3],将后果分为非常低、低、中、高和非常高五个等级。

1.3 威胁评估

威胁包括外部威胁、内部威胁和内外勾结威胁三种类型。外部威胁主要有恐怖分子、罪犯、窃贼和激进分子。内部威胁主要有不满的雇员、承包商、合约商、访客或经批准进入石油化工企业的外来人员。威胁评估通常需要执法部门和情报部门的信息,如一般威胁史、石油化工企业已发生事故的记录、某种威胁潜在的行动能力、动机和意图等。根据威胁的定性描述^[3],将威胁分为非常低、低、中、高和非常高五个等级。

1.4 袭击可能性评估

袭击的可能性又称为资产的吸引力,即资产对某种威胁的相对吸引力。在安全风险评估中,基于后果的严重程度辨识出的、吸引力分值高的关键资产被认为是目标资产。从威胁的视角看,在评估资产的相对吸引力时应考虑资产的可接近性、资产的可辨识性和影响后果的轰动性等因素,并根据这些因素对目标资产袭击的可能性排序。根据资产对威胁相对吸引力的定性描述^[3],将袭击的可能性分为非常低、低、中、高和非常高五个等级。

1.5 脆弱性评估

脆弱性是某种威胁接近资产、并实施恶意破坏行动难易程度的度量。石油化工企业安全防护系统的可靠性和效能越低,资产越脆弱。除了阻止、探测、延迟、响应等实体安全防护系统外,还应该考虑网络安全防护系统、恢复力和恢复时间。脆弱性不仅影响资产对某种威胁的相对吸引力,而且影响威胁的类型。即资产越脆弱、其遭受袭击的可能性越大、威胁实施恶意破坏行动越容易。根据资产脆弱性的定性描述^[3],将资产脆弱性分为非常低、低、中、高和非常高五个等级。

2 石油化工设施安全风险评估模型

2.1 层次分析法

层次分析法^[7] (Analytic Hierarchy Process, AHP)是美国运筹学家萨蒂于20世纪70年代初提出的一种多准则决策方法。其基本思路是先将问题层次化,然后根据问题的性质和要达到的目标,将问题的组成因素按决策目标、决策准则、决策子准则和决策方案进行组合,形成从上到下的多层递阶结构,最终归结为最低层(方案)相对于最高层(目标)相对重要程度的排序问题,从而确定最优的决策方案。

2.2 网络层次分析法

网络层次分析法^[7-8] (Analytic Network Process,

ANP)是在层次分析法的基础上,萨蒂教授于20世纪90年代末提出的一种新的决策方法。虽然AHP和ANP这两种方法都是构造判断矩阵,利用Saaty标度法^[7]衡量因素间的关系,通过检验一致性求解特征向量对方案进行决策,但是ANP采用的是网络结构,网络层各因素之间不是独立的,更适合处理非线性的、具有复杂关系的决策问题。

2.3 基于网络层次分析法的石油化工设施安全风险评估模型

根据石油化工设施安全风险评估的基本流程,考虑安全风险参数之间的反馈和循环作用,采用网络层次分析法^[9-10]对影响安全风险参数的因素建模,石油化工设施安全风险评估模型如图1所示。由图1可知,脆弱性集合到资产集合用单箭头,表示根据脆弱性因素对资产因素进行比较,如实体安全防护系统弱时,对管线和危险化学品储罐进行比较。威胁集合和资产集合用双箭头,表示威胁和资产之间是相互作用的,如考虑资产中的公众因素,恐怖分子的威胁要大于窃贼的威胁,因为窃贼不可能制造袭击造成公众伤亡;另一方面,考虑威胁集合中的窃贼,其造成重要资产的经济损失要大于商业形象和声誉。后果集合用箭头本身,表示后果集合中的元素之间是相互影响的,如石油化工企业管理者认为人员伤亡的后果要高于环境破坏的后果。

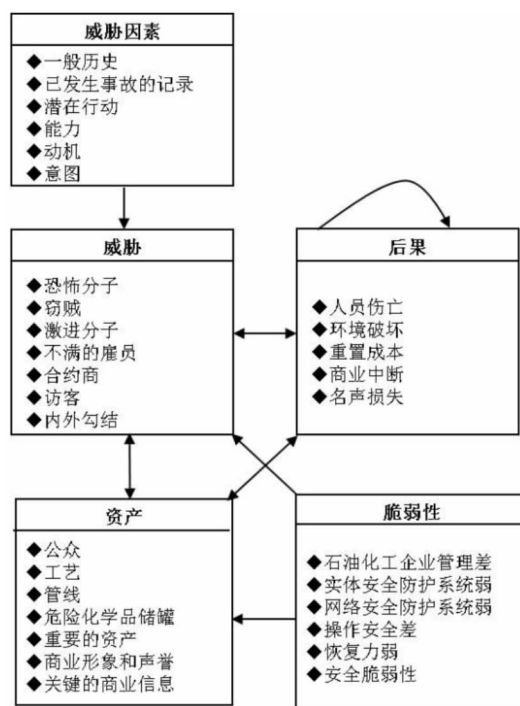


图1 基于网络层次分析法的石油化工设施安全风险评估模型

基于网络层次分析法的原理^[8]构建判断矩阵,采用Saaty标度法对威胁、后果、脆弱性等安全风险参数进行量化。设根据准则Y,因素X的相对重要性为高,因素Z的相对重要性为低,则基于Y准则,成对比较X和Z的定量结果为, $X/Z=5$, $Z/X=1/5$,判断矩阵中因素的定性定量转换如表1所示。

表 1 判断矩阵中因素的定性定量转换

	非常高	高	中	低	非常低
非常高	1	3	5	7	9
高	1/3	1	3	5	7
中	1/5	1/3	1	3	5
低	1/7	1/5	1/3	1	3
非常低	1/9	1/7	1/5	1/3	1

3 仿真

3.1 基本情况

利用网络层次分析法对某炼油厂^[3]进行安全风险评估。根据情报部门和执法部门的信息,如威胁的一般史、已发生事故的记录、潜在的行动和动机,确定该炼油厂的威胁类型及其等级:恐怖分子的威胁为低,不满雇员的威胁为中,激进分子的威胁为高。从炼油厂的安全管理视角看,人员伤亡、环境破坏和重置成本的后果是同样重要的。基于这些潜在后果的严重程度,炼油厂安全管理部门确定控制室、卸载码头和储罐区是关键资产。炼油厂安全风险评估模型如图 2 所示。

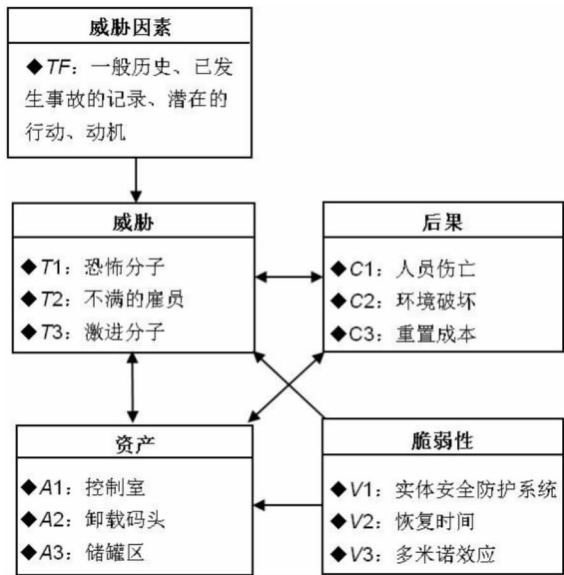


图 2 炼油厂安全风险评估模型

3.2 结果

根据炼油厂安全风险评估模型,构造两两比较的判断矩阵,利用 Super Decision (简称 SD) 软件^[11]进行仿真。以资产和后果间的相互作用为例,以人员伤亡 C1 为准则,比较控制室 A1、卸载码头 A2 和储罐区 A3 这三个关键资产,判断矩阵及定量比较结果如表 2 所示。

表 2 根据人员伤亡对关键资产的定量比较

	C1	A1	A2	A3	相对重要性权重
A1		1	5	5	0.714
A2		1/5	1	1	0.143
A3		1/5	1	1	0.143

由表 2 可知,在人员伤亡 C1 的准则下,炼油厂的控制室 A1 是最关键的资产。同理,利用 SD 软件计算炼油厂安全风险评估参数的相对重要性(表 3)。

将表 3 中的矩阵归一化形成极限超矩阵,得到炼油厂三个关键资产和三种类型威胁的排序,其中,卸载码头 A2 是最关键的资产,恐怖分子 T1 是最主要的威胁。

3.3 讨论

采用美国石油协会安全风险评估方法和网络层次分析法对炼油厂安全风险评估的结果进行了比较。美国石油协会安全风险评估方法没有考虑安全风险参数之间的相互作用,仅考虑了最严重的威胁类型、最严重的后果和脆弱性。以控制室 A1 为例,石油化工设施管理者认为恐怖分子的威胁为低,不满雇员的威胁为中,激进分子的威胁为高,因此,确定威胁的等级为高;同理,石油化工设施管理者认为人员伤亡的后果为高,环境破坏的后果为非常低,重置成本的后果为低,因此,确定后果的等级为高。根据安全风险参数的等级,采用风险矩阵法确定控制室 A1 和卸载码头 A2 的安全风险等级均为高,储罐区 A3 的安全风险等级为非常高。因此美国石油协会安全风险评估方法确定储罐区 A3 是炼油厂最关键的资产。本文采用的网络层次分析法在建模过程中考虑了安全风险因素之间的循环和反馈作用,建模比较灵活,推理比较可靠,采用非线性方法从资产、威胁和后果中辨识出最关键的因素,确定最关键的资产是卸载码头 A2,但是该方法仅适用于石油化工企业设施安全风险因素的排序,不能确定其安全风险是否在可接受范围之内。

表 3 炼油厂安全风险评估参数的相对重要性

	TF	T1	T2	T3	C1	C2	C3	V1	V2	V3	A1	A2	A3
TF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	0.105	0	0	0	0.792	0.672	0.6	0.111	0.066	0.649	0.081	0.751	0.658
T2	0.258	0	0	0	0.132	0.265	0.2	0.778	0.149	0.072	0.731	0.178	0.156
T3	0.637	0	0	0	0.076	0.063	0.2	0.111	0.785	0.279	0.188	0.071	0.186
C1	0	0.731	0.063	0.091	0	0	0	0	0	0	0.731	0.081	0.081
C2	0	0.081	0.265	0.091	0	0	0	0	0	0	0.081	0.731	0.188
C3	0	0.188	0.672	0.818	0	0	0	0	0	0	0.188	0.188	0.731
V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A1	0	0.105	0.751	0.649	0.714	0.058	0.081	0.072	0.063	0.066	0	0	0
A2	0	0.637	0.071	0.072	0.143	0.735	0.188	0.649	0.672	0.149	0	0	0
A3	0	0.258	0.178	0.279	0.143	0.207	0.731	0.279	0.265	0.785	0	0	0

4 结论

本文采用网络层次分析法对石油化工设施进行安全风险评估,利用SD软件辅助计算对安全风险参数进行了排序,不仅辨识了关键的资产,而且辨识了主要的威胁,结论如下:

(1)将网络层次分析法应用在石油化工设施安全风险评估中,修正了基于有限信息的专家打分法,评估结果可为石油化工企业制定安全风险管理措施提供决策参考。

(2)分别用网络层次分析法和递阶层次分析法对炼油厂安全风险的评估结果进行了对比分析。仿真结果表明,网络层次分析法考虑了威胁、资产及后果等安全风险因素之间的反馈和循环作用,更适合于石油化工设施安全风险评估的实际。

(3)由于缺少石油化工设施安全风险评估的实际数据,本文提出方法的合理性和有效性有待进一步检验,下一步将运用博弈论和贝叶斯网络等方法对石油化工企业及设施的安全风险评估进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 周靖轩,朱玉军. 基于模糊重心理论的石化企业火灾风险评估[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(3): 399-401.

- [2] 杨佳豪,马莹. 重要化工企业遭遇恐怖袭击的风险评价[J]. 湖北警官学院学报, 2016, 29(2): 11-16.
- [3] American Petroleum Institute (API). ANSI/API standard 780 - Security Risk Assessment Methodology for the Petroleum and Petrochemical Industry[S]. New York: American Petroleum Institute, 2013.
- [4] CCPS (Centre for Chemical Process Safety), Guidelines for Analyzing and Managing the Security Vulnerabilities of Fixed Chemical Sites[G]. American Institute of Chemical Engineers. Wiley, New York, 2003.
- [5] STAAL Duinen, KHAN N, GADA G, et al. Functional quantitative security risk analysis (QSRA) to assist in protecting critical process infrastructure [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 157: 23-34.
- [6] BAYBUT T. Issues for security risk assessment in the process industries[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 509-518.
- [7] SAATY T. Decision Making for Leaders: the Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World[M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2008.
- [8] 孙茂才,田平,王莲芬. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
- [9] 范赵鹏,张金金,温玮,等. 网络层次分析法(ANP)分析工具的设计与实现[J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(1): 46-50.
- [10] 郭璇,肖治庭,吴文辉,等. 桥梁作为潜在恐袭目标的 ANP 仿真模型[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(5): 1342-1346.
- [11] Super Decision Software Version 2.8.0[R]. Creative Decisions Foundation, USA, 2016. Available online at: www.superdecisions.com.

Security Risk Assessment of Petrochemical Facilities Based on Analytic Network Process

XIN Jing and YANG Yusheng

(School of Overseas Security and Protection, China People's Police University, Langfang 065000, China)

Abstract: To assess security risk of petrochemical facilities, a model of security risk assessment based on analytic network process is proposed in this paper. On the basis of establishing analytic network model, Saaty scale method is adopted to quantify security risk parameters, and SuperDecision software is used to calculate the parameter's rank ordering. Simulation results show that analytic network process considers the mutual interactions of security risk parameters, and could modify the shortage of hierarchical lineraty assessment model, which could provide decision-making references for petrochemical plants to make security risk management countermeasures.

Key words: security risk assessment; petrochemical facilities; analytic network process