

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2018.05.020

原油库 D/I-SD 集成模型风险分析方法*

陈利琼¹ 冯雨翔¹ 孔令圳¹ 马剑琳²

(1. 西南石油大学 石油与天然气工程学院 四川 成都 610500; 2. 中国石油西南管道分公司 四川 成都 610041)

摘要: 为降低原油库的风险水平,基于人、物、环境、管理4类事故致因,在风险因素辨识的基础上,通过集成 DEMATEL/ISM 法确定了系统间各因素的因果关系和权重,利用 Vensim 软件建立了系统动力学模型,形成了1种基于 DEMATEL/ISM 法和系统动力学的原油库风险分析方法,将该方法应用于某原油库进行了风险分析。研究表明:影响油库风险的关键因素是企业的安全氛围和监督力度;环境风险和物、管理风险分别对风险发展前期和风险成熟发展阶段影响显著;员工文化程度、设备使用时间、安全氛围和监督力度分别为人、物、环境和管理风险子系统的风险关键因素。D/I-SD 法从系统角度剖析了风险动态发展趋势和影响风险的关键因素,可为制定科学的油库风险削减措施提供依据。

关键词: D/I-SD 法; 系统动力学; 原油库; 风险分析

中图分类号: X937; TE972 文献标志码: A 文章编号: 1673-193X(2018)-05-0137-07

Risk analysis method of crude oil depot based on integrated D/I-SD model

CHEN Liqiong¹, FENG Yuxiang¹, KONG Lingzhen¹, MA Jianlin²

(1. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China;

2. CNPC Southwest Pipeline Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: In order to reduce the risk level of the crude oil depot, based on four kinds of accident causes including human, equipment, environment and management, and on the basis of identifying the risk factors, the integrated DEMATEL/ISM method was used to determine the causality and weights of each factor among the systems, then a system dynamics model was established by using the Vensim software. A risk analysis method of crude oil depot based on DEMATEL/ISM method and system dynamics was formed, namely the integrated D/I-SD method, and the method was applied to carry out the risk analysis of a crude oil depot. The results showed that the key factors influencing the risk of the oil depot were the safety atmosphere and supervision of the enterprise. The environment risk and the equipment and management risk had a significant impact on the early stage of risk development and the mature stage of risk development, respectively. The education degree of employee, usage time of equipment, safety atmosphere and supervision were the key risk factors for the human, equipment, environment and management risk subsystem, respectively. The integrated D/I-SD method analyzed the dynamic development trend of risk and the factors influencing the risk from the systematic perspective, and it can provide a basis for formulating the scientific risk reduction measures for the crude oil depots.

Key words: integrated D/I-SD method; system dynamics; crude oil depot; risk analysis

0 引言

由于油库中储存着大量易燃易爆物质,一旦发生火灾爆炸事故,易引发灾难性后果,如2005年在英国邦斯菲尔油库发生的火灾爆炸事故^[1]和2009年印度斋普

尔油库^[2]的火灾事故,分别烧毁油罐23座和11座,造成的经济损失数以亿计。海因里希因果连锁论认为,尽管事故的伤害可能在某瞬间突然发生,但是伤亡事故的发生不是一个孤立的事件,是一系列事件相互作用的结果^[3]。因此,有必要系统的研究造成油库发生事故的本

收稿日期: 2018-03-12

* 基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0802100)

作者简介: 陈利琼,博士,教授,主要研究方向为油气储运安全技术。

通信作者: 冯雨翔,硕士研究生,主要研究方向为油气储运安全技术。

质风险因素,采取相应风险管理措施降低总体风险水平,为社会防灾减灾提供理论依据。

近年来,针对原油库风险分析的研究主要是以事故树法、模糊综合评价法为主。王海等^[4]利用 FSA 方法的理念对油库安全管理过程中的客观危险因素进行识别;贾涛^[5]利用安全检查表法识别某油库的风险因素并给出了应对措施;王金亮等^[6]采用模糊综合分析法对油库进行了安全评价,分析各个因素的对油库安全的影响大小。虽然对于油库风险分析的问题,前人已经进行了大量的研究,但是目前针对油库危险因素的研究主要是将其当作孤立的事物,而未考虑因素间的耦合作用。因此,有必要从系统安全角度对原油库的风险分析进行全面研究。

系统动力学于 20 世纪 50 年代末由美国麻省理工学院教授弗雷斯特 Forrester 提出^[7],自创立以来,在处理环境、能源、管理等诸多问题中发挥了重要作用。贾一伟^[8]基于系统动力学对高校科技产业可持续发展进行了研究,对政策优化提出了针对性建议;唐韬^[9]建立了坑口电厂低碳经济发展的系统动力学模型,筛选出最适合坑口电厂低碳发展模式。自周德群等^[10]提出 DEMATEL 和 ISM 法存在一定共性,可形成集成 DEMATEL/ISM 法后,许多研究人员将其用于影响因素分析中,如吴彪等^[11]以集成 DEMATEL - ISM 方法构建了高速公路作业区交通安全影响因素辨识模型,确定了影响高速公路作业区交通安全的最直接因素。总之,集成 DEMATEL/ISM 法能够将具有耦合关系的风险因素解构为直观的层次递阶模型,从而为系统动力学模型的建立奠定基础。

基于此,论文提出一种基于 DEMATEL/ISM 及 SD 的原油库风险分析方法: D/I-SD 集成模型。该方法基于集成 DEMATEL/ISM 法确定因素间的因果关系,并指出导致事故发生的直接和根本风险因素,利用 Vensim 软件构建了系统动力学模型,研究各风险子系统的风险发展趋势以及各风险因素对总风险水平的影响。将系统动力学思想引入至风险管理中,从而为决策者掌握关键风险因素,从根本上防止原油库事故的发生提供了科学合理的依据。

1 D/I-SD 集成模型算法

1.1 算法思路

D/I-SD 集成模型算法思路如下:首先,通过 DEMATEL 法建立直接影响矩阵;其次,通过矩阵运算推导出综合影响矩阵和可达矩阵;然后,利用 ISM 法整理出具有因果关系和层次结构的多级递阶模型;随后,在得到风险因素间因果关系的基础上,绘制出因果关系图,建

立系统动力学模型;最终,利用系统动力学软件对研究对象进行具体研究。

1.2 解释结构模型的构建

为确定风险因素间的因果关系,采用集成 DEMATEL/ISM 法建立油库风险因素解释结构模型,并确定各风险因素的权重,从而为系统动力学模型的构建奠定基础。

1.2.1 风险因素的遴选

根据中国化学品安全协会网站、国家安全生产监督管理部门网站及相关文献,收集了近 100 例原油库事故,且按照我国关于事故分级的有关规定,这些事故等级均为一般以上事故。将其作为统计资料来源,通过统计分析可见,虽然导致各类事故的原因不同,但所有原因均可归纳为“人的因素、物的因素、管理因素以及环境因素”4 个方面。然后,基于频度统计法,将频度不小于 3 作为风险因素,最终选出了 18 个因素并编号,如图 1 所示。

1.2.2 层次结构的确定

集成 DEMATEL/ISM 法具体算法步骤如下:

1) 构建直接影响矩阵。通过调研行业专家的意见,根据一定的指标建立起直接影响矩阵 S 。

2) 计算综合影响矩阵。按照式(1)将直接影响矩阵规范化,再按式(2)计算出综合影响矩阵 T 。

$$G = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n s_{ij}} S \tag{1}$$

$$T = G(I - G)^{-1} \tag{2}$$

式中: s_{ij} 为因素 a_i 对因素 a_j 的直接影响程度, G 为规范后的直接影响矩阵, I 为单位阵。

3) 确定中心度和原因度。因素 a_i 的影响度 f_i 和被影响度 e_i , 中心度(表示某因素在系统中所起作用的大小^[12]) m_i 和原因度(若原因度大于零则表示该因素对其他因素影响较大,为原因因素;若原因度小于零表示该因素受其他因素影响较大,为结果因素) n_i 的计算公式如下:

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{3}$$

$$e_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{4}$$

$$m_i = f_i + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{5}$$

$$n_i = f_i - e_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{6}$$

式中: t_{ij} 为矩阵 T 中第 i 行第 j 列因素, t_{ji} 为矩阵 T 中第 j 行第 i 列因素。

4) 确定可达矩阵。为简化系统的层次结构,需要给定阈值 λ , 当 $h_{ij} \geq \lambda$ 时,可达矩阵中对应的元素 $k_{ij} = 1$; $h_{ij} < \lambda$ 时, $k_{ij} = 0$ 。阈值 λ 的取值直接影响后续系统中

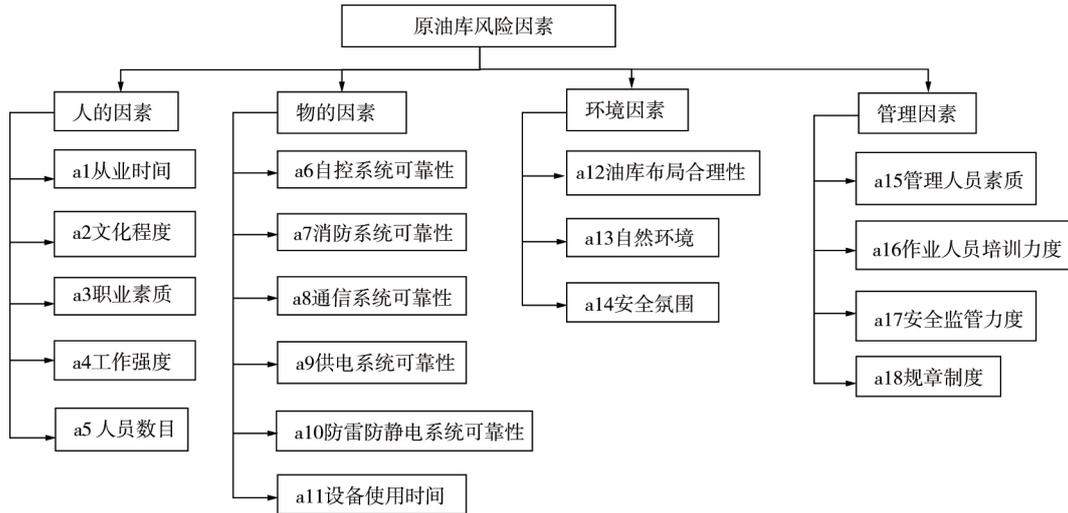


图1 原油库风险因素

Fig.1 Large crude oil depot risk factors

因素的因果关系和层次结构的确定。

5) 建立解释结构模型。为建立起多层递阶结构模型,首先应按式(7)和式(8)确定可达矩阵K的可达集合 R_i 和前项集合 L_i ,然后验证式(9)是否成立,若该式成立则说明该因素为底层因素,重复以上步骤,直至所有因素的层次关系均已确定。

$$R_i = \{x_j | x_j \in A, k_{ij} \neq 0\} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

$$L_i = \{x_j | x_j \in A, k_{ji} \neq 0\} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (8)$$

$$R_i = R_i \cap L_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (9)$$

1.3 系统动力学模型的构建

油库风险问题是1个复杂的管理问题,是多重矛盾综合作用的结果。现在已有对油库风险问题有一定认识,但是对油库风险动态性把握不足^[13],从而预期的管理措施实施效果与实际效果会产生一定偏差。因此,鉴于油库风险系统的系统变量间存在动态、非线性的反馈因果关系的特点,采用系统动力学的思想和方法对造成

油库事故的风险因素进行分析,通过建立系统动力学模型,找出对油库风险影响显著的子系统以及导致油库发生事故的本质影响因素,从而在根本上控制油库事故的发生。

2 案例分析

四川省某原油库建成于21世纪初,库区场地及周边范围内无特殊岩土,无崩塌、滑坡、地裂、泥石流等不良地质灾害,场地内无活动断裂带通过,历史上未发生过强烈地震。此案例基础数据的获取是基于油库风险管理专家的意见,并结合了该原油库的实地调研数据。

2.1 解释结构模型的确定

参考行业专家的意见构建的直接影响矩阵S如表1所示,其中,数值0代表风险因素 x_i 对 x_j 无影响,1代表弱影响、2代表中度影响、3代表强影响。

表1 油库风险因素的直接影响矩阵

Table 1 The direct influence matrix of the risk factors

因素	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18
a1	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0
a2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1
a3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0
a4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1
a5	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	0
a6	0	0	0	3	3	0	2	2	2	2	2	0	0	3	2	1	0	2
a7	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	1
a8	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	1
a9	0	0	0	1	1	3	3	3	0	3	0	0	0	3	0	1	0	1

续表 1

因素	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18
a10	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	1
a11	0	0	0	2	1	3	3	3	3	3	0	0	0	3	0	0	2	1
a12	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	1	2	0
a13	0	0	0	3	1	3	3	3	3	3	3	2	0	2	2	0	2	1
a14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0
a15	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	3	2	3
a16	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
a17	2	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	2	2	0	3
a18	1	2	2	1	0	3	2	3	2	2	2	3	2	2	3	3	2	0

根据该系统的实际情况,通过对行业专家和决策者的咨询取阈值为 0.02,在坐标系中绘制出各因素的中心度和原因度如图 2 所示,最终构建的该油库风险因素解释结构模型如图 3 所示。

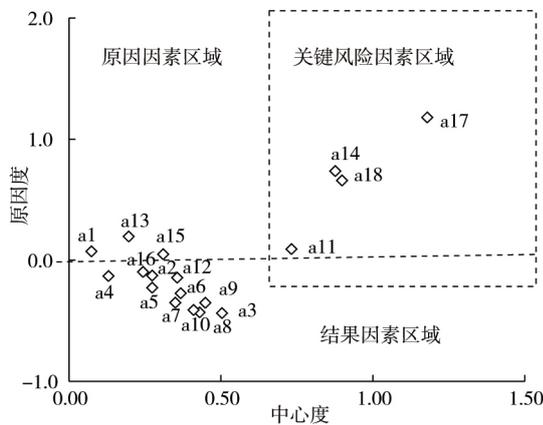


图 2 油库风险因素的中心度和原因度

Fig. 2 The centrality and causality of the risk factors

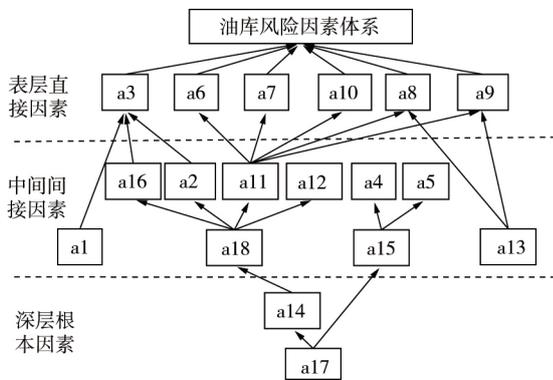


图 3 油库风险因素体系

Fig. 3 Interpretative structural model of safety risk factors for oil depots

由图 2 和图 3 可以看出:

1) 表层直接因素位于解释结构模型的最高层,系统中

其他风险因素的变化均会对它们造成影响。其中,表层直接因素包括了人和物的影响,说明在风险管理中既要注重作业人员综合素质的提升,也要留意物的不安全状态。具体而言,就是需要对作业人员进行定期体检和考核;对设备进行定期检测,并及时将分析检测数据反馈给决策者。

2) 中间间接因素将受到深层根本因素的影响,并将影响传递给表层直接因素。其中,规章制度(a18)直接影响作业人员的文化程度(a2)、设备的使用时间(a11)、油库布局的合理性(a12),而设备的使用时间将影响到设备的可靠性(a6,a7,a8,a9),从而直接影响到事故的发生;管理人员素质(a15)影响作业人员的连续工作时间(a4)和作业人员数目(a5),从而影响到作业人员的综合职业素质(a3)。

3) 深层根本因素位于解释结构模型的最底层,不受其他因素的影响,可在下文建立的系统动力学模型中作为初始输入参数^[14]。同时,它们又属于根本性因素,对原油库风险系统的影响最大,应该作为关键因素重点对待。对于该油库而言,深层根本因素为企业的安全氛围(a14)以及监管部门的监督力度(a17),其中企业的安全氛围的好坏将直接决定规章制度的合理性以及执行力度,而监管力度的强弱将直接影响企业决策者对安全的重视程度,从而督促决策者营造良好的安全氛围。因此,油库风险管理的关键在于营造良好的企业安全氛围并加强有关部门的监管力度。

4) 该原油库风险系统的原因因素(原因度大于零的因素)重要程度依次是:监管力度(a17)、规章制度合理性(a18)、安全氛围(a14)、管理人员素质(a15)、自然环境(a13)等。从图 3 中可以看出以上因素在模型中占据非常重要的位置,与其他因素连接紧密并影响较大;结果因素(原因度小于零的因素)重要程度依次是:连续工作时间(a4)、作业人员数目合理性(a5)、综合职业素质(a3)、消防系统可靠性(a8)、供电系统可靠性(a9)、油库布局合理性(a12)等,从图 3 可以看出以上因素受

其他因素的影响较大。

2.2 系统动力学仿真分析

2.2.1 模型建立

结合集成 DEMATEL/ISM 法确定的风险因素间的因果逻辑关系,运用系统动力学模拟软件 Vensim 构建

的油库风险系统存量流量图如图 4 所示。

2.2.2 油库总体风险及各子系统风险仿真分析

通过运行该油库风险系统的系统动力学模型,得到仿真时间段内的总体风险、安全投入以及各风险子系统的变化趋势,如图 5 所示。

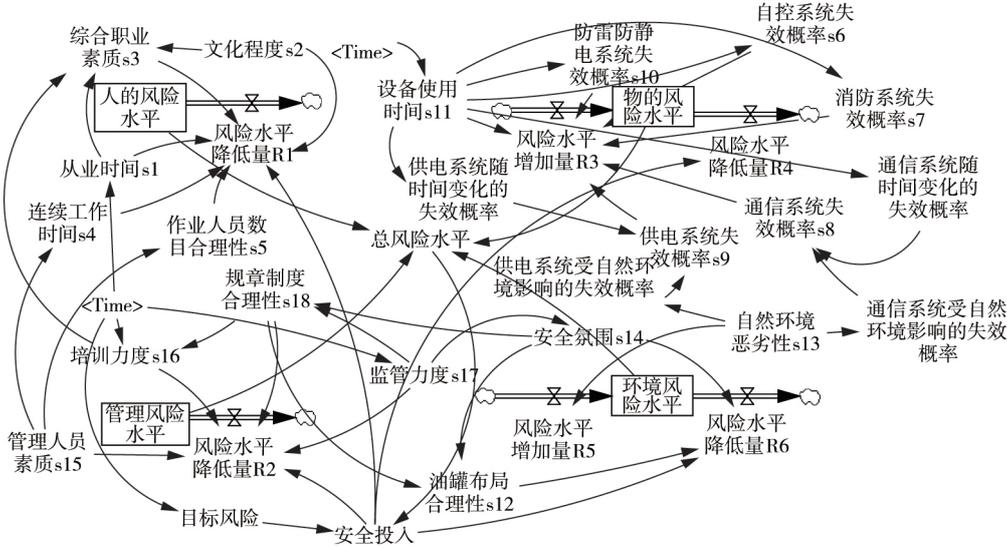


图 4 油库风险系统存量流量
Fig. 4 Stockpile safety risk stock flow chart

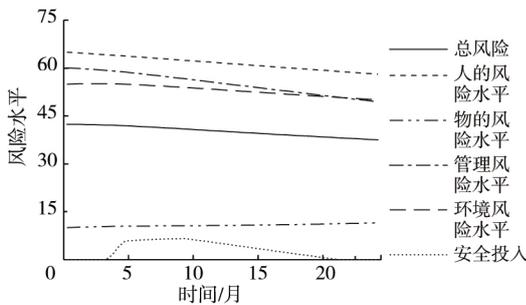


图 5 总风险及各子系统风险仿真结果
Fig. 5 Overall risk and each subsystem risk simulation results

仿真结果表明:

1) 在所有风险子系统中,只有物的风险子系统的风险水平不断增加,其余 3 个风险子系统的风险水平均呈下降趋势。这是由于设备随着使用时间的增长其损耗是不可逆的,而其他 3 个风险子系统均可通过增加对其安全投入改善风险水平。在这 3 个风险子系统中,管理风险子系统的风险水平降低速率最大,其次是人的风险子系统,最后是环境风险子系统。这是由于管理子系统监管力度日益增大,油库的规章制度日趋合理,在两者的共同作用下,管理子系统风险水平下降较快。而对于环境子系统,由于自然环境的恶劣性一直影响着其风险水平,且较难被改变,因此即使增加对其安全投入,

其风险水平降低量仍然不大。不同子系统风险水平的变化量共同加权构成了系统总风险水平的变化量,从而影响着总风险水平的变化趋势;

2) 油库总体风险水平在安全投入的负反馈调节下,在第 18 个月达到既定风险目标值。由于风险水平和安全投入之间存在一定的反馈关系,因此当风险水平达到目标值后,安全投入会降为 0,此时风险水平只受各风险子系统的风险水平的影响;

3) 在风险发展前期,只有环境风险子系统和物的风险子系统的风险水平略微增长,其余风险子系统风险水平均下降,故总风险水平降低趋势较缓主要是受环境风险子系统的影 响。这是由于风险发展初期,自然环境的恶劣性风险水平的累积使得环境风险水平上升,而随着后期安全投入的增加,安全氛围的改善,通过系统中负反馈的调节作用,环境风险水平下降,不再为总风险水平的主要影响因素。在系统风险发展后期,只有物的风险子系统的风险水平不断增加,其余子系统风险水平均不断降低,且其中风险水平下降速率最快的是管理风险子系统,说明此时总风险水平受物的风险和管理风险影响程度较大。这是由于风险发展的后期,设备磨损的问题日益凸显,且在此阶段管理风险水平对其他风险子系统的影响极为重要。

2.2.3 人的风险子系统仿真分析

为进一步研究各因素与子系统的相互作用关系,找

出各子系统中的本质风险因素,遂对各风险子系统进行仿真。采用控制变量法对人的风险子系统中各风险因素进行单因素变动模拟,即在其他风险因素不变的情况下,分别将风险因素 $s_1 \sim s_5$ 风险水平降低为基本方案的 50%。其中,Current0 为基本方案,Current1 ~ Current5 分别对应风险因素 $s_1 \sim s_5$ 的风险水平变化。仿真结果如图 6-8 所示。

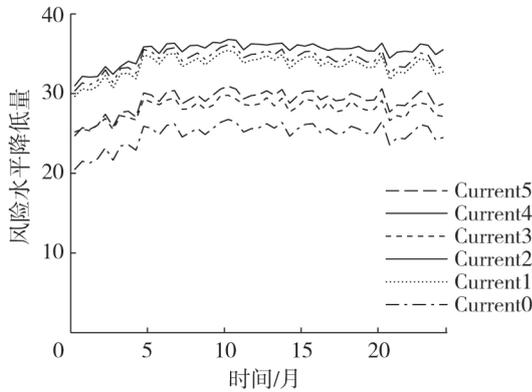


图 6 各方案风险水平降低量随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of risk level reduction of various program

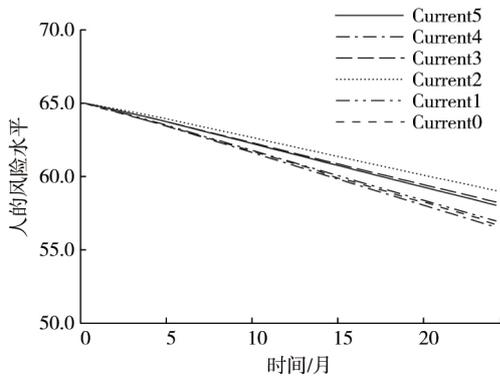


图 7 各方案人的风险水平随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of human risk levels of various programs

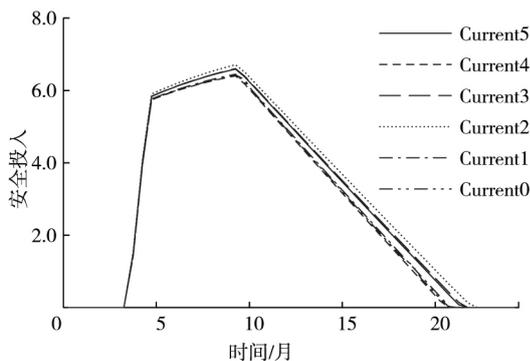


图 8 各方案安全投入随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of the safety input of each project

由仿真结果可见:

1) 对人的风险水平降低量而言,由于作业人员连续工作时间为时间的随机函数,因此其值随时间存在一定的波动,但总体趋势是当各影响因素均降低相同值时,风险水平相对基本方案变化幅度最大的是方案 3,其次是方案 4 和 6,变化幅度最小的是方案 2 和 5。即对该油库而言,提高员工职业综合素质和选用文化程度更高的作业人员对降低人的风险子系统的风险水平的效果最好。

2) 各个方案对系统风险总水平以及安全投入的影响均不大。这是因为一方面该子系统风险因素均是结果因素中重要度较大的因素;另一方面人的风险子系统中的因素为解释结构模型中的中间间接因素或表层直接因素,其中仅 1 个因素的变化对系统中其他因素的影响不大,因此对系统总风险水平影响较小。

3) 运用系统动力学的仿真结果与运用集成 DEMATEL/ISM 法得到的各因素权重(综合职业素质的权重最大,其次是作业人员数目和作业人员文化程度,然后是工作强度和作业人员从业时间)存在一定差别。这说明系统中各因素的重要度不能仅依靠常规的权重确定方法得出,还需考虑系统中的其他因素对其耦合作用。考虑系统各因素之间耦合作用确定的因素重要度为实际作用率^[15]。对该油库而言,实际作用率最高的风险因素是作业人员文化程度,其次是综合职业素质,即选用文化程度更高的员工,定期培训以提高员工职业素质对改善该油库人的风险子系统的风险水平效果较好。

总之,由于油库风险系统的复杂性,各个因素之间存在着促进和制约的关系,单单依靠“权重”来反映因素对系统的实际作用程度具有一定的局限性。因此,在实际风险管理中,决策者应对实际作用率较高的因素采取更有针对性的风险管理措施,方能保证决策的科学合理性。

2.2.4 其他风险子系统仿真分析

相似的,对其他 3 个风险子系统分别进行仿真分析,仿真结果表明:设备使用时间、安全氛围和监管力度分别为物、环境和管理风险子系统的风险因素;对原油库风险系统总风险水平和安全投入影响较大的因素均为在上述建立的解释结构模型中占据了较为重要的地位且为中心度较大的风险因素。

3 结论

1) 将集成 DEMATEL/ISM 法与 SD 法相结合对原油库风险进行分析,能够挖掘出风险因素间相互耦合的因果关系,并确定风险动态发展趋势和关键风险因素,找出原油库发生事故的关键问题,有利于从根本上防止原

油库事故的发生。

2) 案例分析表明,导致该油库事故发生的直接因素中涵盖了人和物的影响,说明在风险管理中,需针对人和物双管齐下才能取得良好的效果;造成事故发生的深层根本因素为企业的安全氛围以及监管部门的监督力度,它们的影响是基础而深远的;对该油库而言,员工文化程度、设备使用时间、安全氛围和监管力度分别为人、物、环境和管理风险子系统的键关键风险因素。

3) 在风险发展前期,环境风险对油库总体风险的影响显著;在风险的成熟发展阶段,物和管理风险子系统的发展完善对油库总体风险的影响程度最大。

4) 系统中的各因素重要度会受到系统中其他因素的耦合作用的影响,仅依靠传统的权重确定方法判断某因素的重要度具有局限性,通过系统动力学确定的各因素实际作用率将更有效的指导决策者针对实际作用率高的因素采取相关措施。

参考文献

- [1] GHASEMI A M, NOURAI F. A framework for minimizing domino effect through optimum spacing of storage tanks to serve in land use planning risk assessments[J]. *Safety Science*, 2017, 97(SI): 20-26.
- [2] SHARMA R K, GURJAR B R, SINGHAL A V, et al. Automation of emergency response for petroleum oil storage terminals[J]. *Safety Science*, 2015, 72(2): 262-273.
- [3] 陈宝智, 吴敏. 事故致因理论与安全理念[J]. *中国安全生产科学技术*, 2008, 4(1): 42-46.
CHEN Baozhi, WU Min. Accident causation theory and safety concept [J]. *Journal of safety science and technology*, 2008, 4(1): 42-46.
- [4] 王海, 杨鹏, 杨建, 等. 用 FSA 方法优化油库安全管理[J]. *中国安全生产科学技术*, 2007, 3(4): 128-131.
WANG Hai, YANG Kunpeng, YANG Jian, et al. Optimization of oil depot safety management by FSA method [J]. *Journal of safety science and technology*, 2007, 3(4): 128-131.
- [5] 贾涛. 天府国际机场油库风险评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [6] 王金亮, 陈全. 模糊层次综合分析法在油库安全评价中的应用[J]. *安防科技* 2011(10): 56-59.
WANG Jinliang, CHEN Quan. Application of fuzzy analytic hierar-
- chy process in safety evaluation of oil depot [J]. *Security science and technology*, 2011(10): 56-59.
- [7] RICARDO SAAVEDRA M M, FONTES C H, FREIRES F G. Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(1): 247-259.
- [8] 贾一伟. 基于系统动力学的高校科技产业可持续发展研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [9] 唐韬. 坑口电厂低碳经济发展系统动力学仿真研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014.
- [10] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. *管理科学学报*, 2008, 11(2): 20-26.
ZHOU Dequn, ZHANG Ling. Study on hierarchical division of complex systems integrated with DEMATEL/ISM method [J]. *Journal of management science*, 2008, 11(2): 20-26.
- [11] 吴彪, 许洪国, 戴彤焱. 基于 DEMATEL-ISM 的高速公路作业区交通安全影响因素辨识[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(5): 130-136.
WU Biao, XU Hongguo, DAI Tongyan. Differentiation of traffic safety factors affecting freeway work area based on DEMATEL-ISM [J]. *Transport System Engineering & Information*, 2010, 10(5): 130-136.
- [12] 张文会, 赵军芳, 罗文文, 等. 基于 DEMATEL-ISM 事故路段行车风险因素辨识模型[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2015(1): 13-17.
ZHANG Wenhui, ZHAO Junfang, LUO Wenwen, et al. Identification model of traffic factors based on DEMATEL-ISM accident section [J]. *Journal of traffic and transportation engineering and information*, 2015(1): 13-17.
- [13] ZHENG F, ZHANG M G, SONG J, et al. Analysis on risk of multi-factor disaster and disaster control in oil and gas storage tank [J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 1058-1064.
- [14] 刘骅宇. 基于系统动力学的建筑行业 BIM 技术应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [15] 肖楚阳, 宋守信. 地铁电气火灾中机械方面影响因子系统动力学仿真分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(8): 81-86.
XIAO Chuyang, SONG Shouxin. Simulation analysis of influence factors on mechanical dynamics in subway electrical fire [J]. *Journal of safety science and technology*, 2016, 12(8): 81-86.

(责任编辑: 王建光)