

文章编号:1000-4653(2023)01-0073-07

基于 TOPSIS 和贝叶斯网络的液体化工码头 设备安全风险评价模型研究

邓 健^{1a,1b,1c}, 杨 港^{1a}, 孙 浩^{1a}, 胡玉昌², 廖芳达^{1a}

(1. 武汉理工大学 a. 航运学院; b. 内河航运技术湖北省重点实验室;

c. 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063; 2. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

摘 要:液体化工码头设备安全对码头作业安全至关重要,为有效评估化工码头设备安全风险,提出了一种基于逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)和贝叶斯网络的安全风险评估方法。运用 TOPSIS 方法从 24 个指标中筛选出 16 个重要指标,构建了液体化工码头设备安全风险指标体系,基于贝叶斯网络方法建立设备安全风险评价拓扑结构,通过马尔科夫链蒙特卡洛算法完成贝叶斯网络节点概率推理过程,得到基于贝叶斯网络方法的液体化工码头设备安全风险评价模型。最后以长江干线某化工码头为研究对象开展风险评价,结果表明该码头设备整体风险等级为较低,4 个设备子系统的风险概率从高到低的次序为管道设备、储存设备、机械设备和安全防护设备,管道设备风险等级相对较高,码头应针对管道设备做好风险管控措施。

关键词:液体化工码头; 设备安全; 风险评价; TOPSIS; 贝叶斯网络

中图分类号:U653

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2023.01.010

A risk evaluation model for facilities of liquid chemical terminal based on TOPSIS and Bayesian network

DENG Jian^{1a,1b,1c}, YANG Gang^{1a}, SUN Hao^{1a}, HU Yuchang², LIAO Fangda^{1a}

(1a. School of Navigation; 1b. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology; 1c. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

Abstract: TOPSIS and Bayesian network is introduced to the risk evaluation model for facilities of liquid chemical terminals. TOPSIS is used to screen the candidate risk indexes and 16 major indexes are identified to form the risk evaluation index system. The topography of the evaluation model is designed based on Bayesian network. The probabilistic inference concerning the nodes are fulfilled by Markov chain-Monte Carlo algorithm. The completed model is used, as an example, to evaluate the risks that a liquid chemical terminal at the Yangtze trunk line involves. The evaluation indicates that the risk level for the facilities is relatively low. The risk levels for facility subsystems are ranked as pipe system, storage facility, mechanical equipment and safety and protection equipment in descending order.

Key words: liquid chemical terminal; facility safety; risk evaluation; TOPSIS; Bayesian network

近年来,我国经济快速发展,作为工业基础原料的液体化学品的运输量逐年增加。化工码头作为存

储和运输原油、成品油、液体散装化学品和液体气体的终端,其数量和规模的增长提升了事故发生的可

收稿日期:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52031009)

作者简介:邓 健(1977—),男,副教授,博士,研究方向为水上交通与环境。E-mail:dengjian_whut@aliyun.com

引用格式:邓健,杨港,孙浩,等.基于 TOPSIS 和贝叶斯网络的液体化工码头设备安全风险评价模型研究[J].中国航海,2023,46(1):73-79.

DENG Jian, YANG Gang, SUN Hao, et al. A risk evaluation model for facilities of liquid chemical terminal based on TOPSIS and Bayesian network[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 73-79. (in Chinese)

能性,因液体化工品本身易燃易爆、毒害性大等危险特性,发生风险后,会对人员、码头财产、周遭生态、社会环境等造成严重损失。液体化工码头由于其设备繁多、工艺流程较复杂,一直是化工码头安全管理的重点对象。在现实中,如“大连 7.16 事故”等设备原因造成化工码头的事故也屡见不鲜,这为我国的码头设备安全形势敲响了警钟。由此可见,亟须对液体化工码头设备安全开展科学的风险评价,这是保障液体化工码头安全运营的重要前提^[1-2]。

目前,化工品等危险品设备的安全风险问题越来越成为学者研究的对象。例如,周品江等^[3]提出了熵权理论与云模型相结合的安全评价方法,得到液化天然气码头安全综合评价结果。缪克银^[4]采用层次分析法建立了海上危险品运输安全风险分析模型,并运用模糊数学构建了隶属函数,得出了安全风险评价结果。王磊^[5]通过人因失误概率量化主观因素不确定性的影响,结合传统风险评估模型构建了不确定性条件下的危险品仓储风险评估模型。乔剑华等^[6]基于对液体化工码头建设、营运特点的分析,提出液体化工码头装卸工艺设计和设备选型的原则和方法。宋剑伟^[7]利用 AHP - 模糊综合评判方法,建立青岛港液体化工码头的溢油风险评估模型,并提出溢油应急预案。

综上所述,目前针对液体化工码头的应急预案和基于人为因素和管理因素的风险评估进行的研究较多,对于液体化工码头设备安全风险的专门研究工作主要是针对某单个设备的强度和选型进行评价,缺乏对于液体化工码头整体设备安全风险的定量评价。从行业整体来看,设备是可能导致液体化工码头发生事故的重要风险因素之一,随着设备朝着自动化、专业化方向不断地发展,对于设备的安全风险评价也需更加科学、有效、系统化。因此,为了科学有效、系统评估液体化工码头设备安全风险,本文使用逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 和贝叶斯网络方法相结合的方式,建立液体化工码头设备安全风险评价模型,以期为液体化工码头设备安全风险评价提供一种更加科学可靠的方法,最后以长江干线某典型化工码头为研究对象,演示了风险评价过程并得出其安全风险评价结果。

1 风险指标体系建立

液体化工码头设备一般包括四大类别:存储设备、机械设备、管道设备、安全防护设备。本文结合我国液体化工码头设备发生的风险事故分析,由果

及因,从风险致因中进行液体化工码头设备安全风险识别,并依据风险评估指标体系建立原则对液体化工码头设备进行风险识别,构建初步风险指标清单,清单包含 4 个子系统和 24 项风险指标,如表 1 所示。

表 1 各指标熵值 H 的计算以及筛选结果
Tab.1 Calculation and screening results of entropy H of each index

子系统	风险因素	H	是否选取
存储设备子系统	储罐结构合理性	0.510 8	√
	储罐表面损坏程度	0.600 7	√
	存储区域是否适合包装液货品存放	0.684 3	√
	罐舱测量仪器、容量报警器可靠性	0.590 8	√
	存储区监控能力	0.482 6	×
	安全作业区域设置情况	0.432 7	×
机械设备子系统	机械设备老化程度	0.741 2	√
	机械设备运转状态	0.794 8	√
	机械保养制度实施情况	0.427 8	×
	电气设备安全可靠	0.779 7	√
管道设备子系统	装卸设备可靠性	0.674 9	√
	软管破裂程度	0.560 1	√
	管道腐蚀程度	0.675 1	√
	管道密封性	0.697 1	√
	阀门磨损密封性	0.824 3	×
	阀门设备安全可靠	0.813 9	×
	阀门紧急停止系统可靠性	0.663 1	√
安全防护设备子系统	CCTV 监控系统配备情况	0.472 8	×
	码头周围封闭围墙配备情况	0.465 9	×
	废物回收装置配备情况	0.482 4	×
	消防设备配备情况	0.659 8	√
	探火、气体检测设备配备情况	0.547 2	√
	个人防护设备配备情况	0.694 1	√
	应急设备配备情况	0.753 9	√

为了提高风险评价的可操作性,需要对构建的初步风险指标清单进行科学有效地筛选,从而确定最终的风险指标体系。TOPSIS 方法是一种检查和筛选多指标的方法,它可以分析比较数据的优劣,确

定出所有方案中的最优和最差方案。通过计算指标与最优和最差方案之间的距离,得到指标与最优方案的接近程度从而筛选指标,使得到的结果更加准确客观^[8]。

为使建立的风险指标体系更加准确,本研究征询了本领域内专家的意见,收集了相关数据,并分发大量问卷,专家信息如表 2 所示。问卷为每个指标确定了 3 个评分要素,即风险概率、后果危害程度和可控程度,分别设置 1~5 的 5 个评分选项。问卷主要发送到本领域内的港口码头操作管理人员、港航、海事和安监监管人员等,共收集 25 份有效问卷。

首先,设定其初始矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为问卷中第 i 项指标的第 j 项评分值得分。

评价指标通常由不同的单位组成,不同的指标可能产生不同的效应。本文设定正效应指标的指标值越高,风险越高;相反,负效应指标的指标值越低,风险越高,并用公式对指标采取同趋向处理。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min a_{ij}}{\max a_{ij} - \min a_{ij}} \quad (2)$$

式中: b_{ij} 为进行同趋向处理后的第 i 项指标的第 j 项得分。

由此可得风险判断矩阵 B :

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

然后,再用公式将风险判断矩阵 B 进行归一化处理

$$f_{ij} = \frac{b_{ij} + 1}{\sum_{i=1}^m (b_{ij} + 1)} \quad (4)$$

式中: f_{ij} 为各指标按列进行归一化处理后,第 i 项指标的第 j 项得分。

在进行归一化处理后,通过计算并比较各指标的熵值来进行指标筛选。本文采用以下熵值计算式算出每项指标的熵值 H :

$$H = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

式中: k 为常数,根据本项目情况取 $k = -\frac{3}{\ln 24}$ 。

根据式(1)~式(5)计算每个指标的熵值 H 。熵的数值越高,代表指标中的信息越多,对风险系统的贡献越大,但是如果熵值过高,通常说明各种信息

的输入是一致的,结果不明确。决策者对熵值贡献的大小有不同的认同度,根据经验,如果 H 的值处于区间 $[0.5, 0.8]$,则该指标作用强,对导致风险事故具有较大的引导性^[9]。表 1 为风险因素指标的 H 值计算结果,最终选择熵值 H 位处区间 $[0.5, 0.8]$ 的 16 个指标来构建本文的风险指标体系。

表 2 专家信息介绍

Tab.2 Expert information introduction

工作种类	人数/个
码头现场作业人员	6
码头管理人员	7
港航、海事、安监监管人员	12

2 基于贝叶斯网络的风险评价模型

贝叶斯网络是一种应用于不确定性知识表示和推理的方法,能够很好地应用在风险分析和评估领域^[10-11]。贝叶斯网络建模主要有三种方式:一种是人工确定模型的拓扑结构,根据专家知识和经验分配概率参数;第二种是计算机确定模型的拓扑结构,由计算机在学习数据库时自动获取贝叶斯网络拓扑结构;第三种是综合法,综合法包含了以上两个方法的优点,利用专家知识人工构建模型的拓扑结构,然后根据主要目标对象的数据采集,计算网络中节点的概率。本文采取综合法建立贝叶斯网络模型。

2.1 模型节点确定

根据上文建立的风险评价指标体系,设定目标节点为液体化工码头设备安全风险,中间节点为存储设备子系统、机械设备子系统等 4 个子系统,证据节点为存储区监控能力、电气设备安全可靠性等 16 个风险评价指标。

液体化工码头设备风险评价系统包括多个指标、多个层次,每个指标涵盖的范围很广,因此需要采取一定的措施来保证节点取值的便捷性和简化模型结构。这里将每个节点的状态选择范围为“好”和“坏”,取值范围为 $\{0,1\}$,若取值为 0 则表示节点状态不佳,为 1 则表示节点状态良好。

2.2 贝叶斯网络架构构建

贝叶斯网络节点之间的结构关系需通过检验指标之间的独立性来评估,从而进一步简化模型网络拓扑。这里以存储设备节点为例,建立和简化该节点的网络拓扑,本文将按照同样的思路和流程来构建和简化其余节点。

存储设备安全的主要影响因素包括 4 个指标:储罐结构合理性,储罐表面损坏程度,存储区域是

否适合包装液货品存放, 罐舱测量仪器、容量报警器可靠性。因此, 暂定这 4 个指标可以作为中间节点存储设备子系统下的证据节点, 初步拓扑结构如图 1 所示。

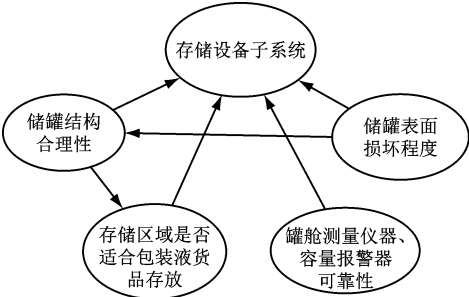


图 1 存储设备节点的初步拓扑结构

Fig. 1 Preliminary topology of storage device nodes

本文采用 SPSS 来计算每个指标的方差膨胀系数, 根据计算出的每个指标的方差膨胀系数进行独立性检验, 分析指标之间的相关性, 从而优化节点之间的结构关系, 根据经验, 当方差膨胀系数 < 10 时, 变量独立性良好^[12]。计算结果表明各指标的方差

膨胀系数均小于 10, 均具有较好的独立性, 说明各指标之间不存在明显的线性关系, 指标间无明显交互作用。本文由此简化了 4 个证据节点之间的拓扑结构, 简化后的拓扑结构如图 2 所示。

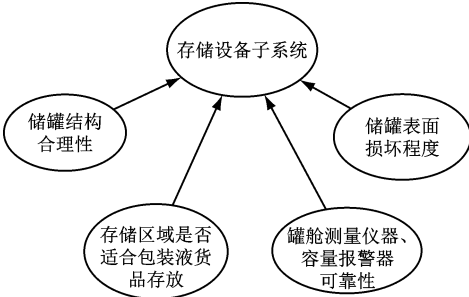


图 2 存储设备拓扑结构的简化

Fig. 2 Simplification of storage device topology

按照与存储设备节点构建网络拓扑同样的思路和流程, 创建其余 3 个中间节点和相应证据节点的拓扑结构, 并将 4 个中间节点的拓扑结构结合, 最后构建出整个液体化工码头设备风险评价系统的拓扑结构, 如图 3 所示。

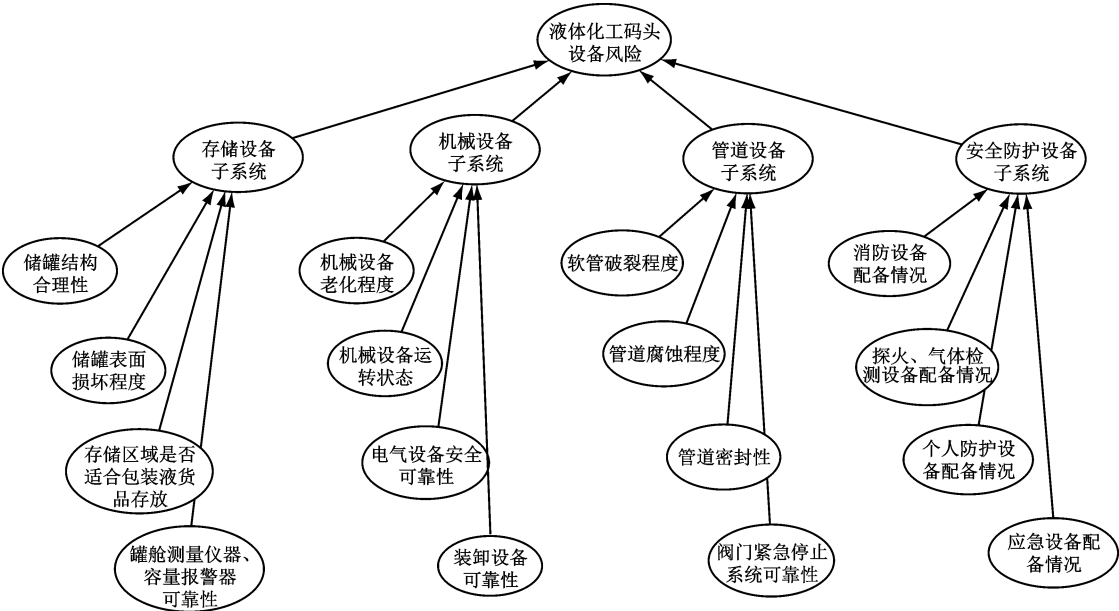


图 3 液体化工码头设备风险评价系统拓扑结构图

Fig. 3 Topological structure of risk assessment system for liquid chemical terminal equipment

2.3 节点概率分布

在建立出液体化工码头设备风险评价系统的拓扑结构后, 需进一步对液体化工品设备安全风险进行数据调查, 并基于调查数据计算液体化工码头设备安全风险评价模型各节点间的概率分布, 从而构建液体化工码头设备安全风险评价模型。

1) 确定方法

确定节点概率的方法一般有三种: 专家咨询法、

统计法和综合法。液体化工终端安全风险评估系统指标范围广、结构复杂, 采用统计方法时, 需要的数据量巨大, 收集如此大量的数据难度极大。经过考虑, 本文主要采用专家咨询法与相关现场调查数据相结合的综合法作为确定节点概率的方法。

2) 节点概率的确定

本文通过前文问卷调查得到专家对于节点概率 1~5 分的打分数据, 并将数据进行简化。若其风险

概率得分 ≥ 3 ,则节点值为1,代表指标取得了“良好”的评分;若得分 <3 ,则节点值为0,代表指标取得了“不佳”的评分。基于调查问卷的事故概率数据,将存储设备指标作为例子,介绍节点概率的计算思路和流程,计算结果见表3所示。

依据表3可得出各证据节点的概率分布,在得出概率分布后,可通过最大后验估计法计算所有中间节点的条件概率。最大后验估计法目标函数公式如下:

$$\hat{\theta}_{\text{MAP}}(x) = \arg \max_{\theta} \frac{f(x|\theta)g(\theta)}{\int_{\theta} f(x|\theta')g(\theta')d\theta'} = \arg \max_{\theta} f(x|\theta)g(\theta) \tag{6}$$

式(6)中, x 为观察数据, θ 代表观察数据 x 的某参数, f 代表对应的采样分布, $f(x|\theta)$ 表示总体参数值为 θ 时的概率分布, $\arg\max f(x|\theta)$ 为 θ 的最大似然估计计算公式, g 为 θ 的先验概率分布。

本文采用 MATLAB 上的 FULLBNT 工具箱来计算所有中间节点的最大后验估计的条件概率分布,必须先输入4个证据节点的事故概率数据,才能得到中间节点的16种条件概率分布。模型中其他节点的概率分布均采用与上述相同的计算方法,最终得到所有中间节点的条件概率分布。

表3 证据节点的概率分布

Tab.3 Probability distribution of evidence nodes

证据节点	状态为 1 样本	状态为 1 概率	状态为 0 样本	状态为 0 概率
储罐结构合理性	19	0.76	6	0.24
储罐表面损坏程度	21	0.84	4	0.16
存储区域是否适合 包装液货品存放	15	0.6	10	0.4
罐舱测量仪器、容量 报警器可靠性	16	0.64	9	0.36

2.4 模型推理计算

马尔科夫链蒙特卡洛算法(Markov Chain Monte

Carlo,MCMC)是一种常用的概率推理算法,主要用于网络规模大、结构复杂的贝叶斯网络模型,因此本文选用 MCMC 算法来进行概率推理计算。

MCMC 算法首先假设 $q(x \rightarrow x')$ 为节点从状态 x 转变到状态 x' 的概率。 $\pi(x)$ 为节点状态为 x 时的概率,当节点状态趋于稳定的时候,其概率分布可以表示为:

$$\pi(x') = \sum_x \pi(x)q(x \rightarrow x') \tag{7}$$

再假设 X_i 为组成贝叶斯网络的某节点, $\bar{X}_i$ 指剩余节点,其对应的状态取值为 x_i 和 $\bar{x}_i$ 。当 X_i 的状态转变为 x'_i 时,对 $\bar{X}_i$ 的条件进行采样,可以完成下式推导:

$$q(x \rightarrow x') = q((x_i, \bar{x}_i) \rightarrow (x'_i, \bar{x}_i)) = P(x'_i, \bar{x}_i, e) \tag{8}$$

被提前确定值的节点与剩余节点变量间不存在相关关系,可以使用下式计算该节点的概率:

$$P(x'_i / mb(X_i)) = aP(x'_i / \text{parents}(X_i)) \times \prod_{Y_i \in \text{Children}(X_i)} P(y_i / \text{parents}(Y_i)) \tag{9}$$

式(9)中, $mb(X_i)$ 为提前确定值的某节点, $\text{parents}(X_i)$ 表示模型中的父节点, $\text{Children}(X_i)$ 表示模型中的子节点, Y_i 为子节点中的某节点。 x'_i 和 y_i 为节点对应的状态取值。

使用式(7)~式(9)可以完成贝叶斯网络节点概率推理过程,即将节点的状态确定为一个特定的值,利用非证据节点的采样结果来确定节点值的变动,而状态变动只与当前状态有关。因此,基于所确定的证据节点的状态,可以利用剩余节点状态的随机变动来完成模型概率推理过程。

2.5 评价结果等级划分

为得到准确的评价结果,本文参考相关风险评价等级划分标准^[13],基于液体化工码头易燃易爆、毒害性大、事故社会危害性大等特性,将液体化工码头设备安全风险程度大小定量的划分为五档,如表4所示。

表4 风险等级的划分

Tab.4 Classification of risk levels

风险程度	高	较高	一般	较低	低
风险值	[0.65, +∞)	[0.50,0.65)	[0.35,0.50)	[0.20,0.35)	(-∞,0.20)

3 实例验证模型

应用所建贝叶斯模型,针对长江干线某化工石

化码头的实际情况,进行液体化工码头设备安全风险评价。

3.1 码头基本情况

本码头有 5 个液体化工泊位,采用浮式布置方案,泊位总长度 760 m,主要货类为甲醇、粗乙醇和苯乙烯等,近期吞吐量为 198.96 万 t/a,具体情况如表 5 所示。

表 5 码头设备情况
Tab.5 Wharf equipment

设备类别	设备情况
存储设备	液货化学品储罐 72 个,总罐容 30 万 m ³
机械设备	卸车系统 1 套,液货装卸系统 1 套
管道设备	根据货种设置专用软管,通球清管器
安全防护设备	每艘趸船设置架式消防炮塔 2 座,消防阀 5 个,45 L 推车式泡沫灭火器 1 个

本文结合武汉开展的化工码头安全整治行动,对区内相关化工码头情况进行了实地评估,通过问卷方式收集了从事港航、海事、安监、石化、安全工作专家的实地评估结果 25 份,结合模型评价体系,得到实例码头的各指标得分,以存储设备为例,指标得分见表 6 所示。

表 6 实例码头存储设备指标得分概率分布
Tab.6 Probability distribution of index scores of example terminal storage equipment

证据节点	状态为 1 样本	状态为 1 概率	状态为 0 样本	状态为 0 概率
储罐结构合理性	23	0.92	2	0.08
储罐表面损坏程度	20	0.80	5	0.20
存储区域是否适合 包装液货品存放	20	0.80	5	0.20
罐舱测量仪器、容量 报警器可靠性	22	0.88	3	0.12

3.2 码头设备安全风险概率计算

码头设备安全风险概率计算主要是通过贝叶斯网络模型来进行。主要分为以下步骤:

- 1) 构建模型框架
- GENIE 软件是一款较为成熟的构建和计算贝叶斯网络模型的软件,本文使用 GENIE 软件,基于图 3 所示液体化工码头设备安全风险评价的结构图构建贝叶斯网络框架。
- 2) 录入概率分布
- 在构建出液体化工码头设备风险评价系统拓扑结构图后,使用 GENIE 将表 3 中的贝叶斯网络节点概率分布录入风险评价系统中。

3) 贝叶斯网络学习过程

运行 GENIE 软件将完成整个系统的学习,当系统运行结束,节点右下角会由“?”变成“√”,节点训练前后的情况如图 4 所示。

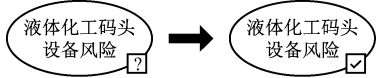


图 4 节点训练图
Fig.4 Node training diagram

4) 节点更改及概率推理计算

当模型学习完成后,再根据实例码头的各指标得分,对节点状态值进行相应的修改,设定完成后模型再次运行,即可对该液体化工码头设备安全风险进行计算,其结果如图 5 所示。

依据图 5 仿真结果可以看出,对照表 5 可知,该化工石化码头设备安全风险概率值为 0.22,对应表 5 中的风险等级为较低。4 个设备子系统的风险概率从高到低的次序为:管道设备 0.24、存储设备 0.18、机械设备 0.16、安全防护设备 0.15。其中存储设备、机械设备和安全防护设备对应的风险等级为低,管道设备风险等级相对较高,对应的风险等级为较低,该码头应针对管道设备做好风险管控措施。

3.3 码头设备安全风险管控措施

针对模型评价的结果,该码头设备的整体风险等级为较低,其中管道设备风险等级相对最高,这是由于本文实例选取的码头较新,整体设备状况良好。在码头现场实地评估时发现,该码头在管道密闭性和阀门紧急停止系统方面存在一定的缺陷,主要表现为管道法兰上螺栓未拧紧以及阀门紧急停止系统未正常工作。因此,本文针对该风险因素提出相应的管控措施建议。

1) 管道密封性

管道在投入使用之前必须进行密封性测试;在货物输送中未使用或使用完毕的管线都要用盲法兰封闭,且相应的螺栓都应固定拧紧;管道应符合相关标准在规定的温度、兼容性物质、工作压力和流速下使用运行;每年至少开展一次管道流体静水压力测试,以最大工作压力 1.5 倍的水压测试管道接头部件漏水或松动情况。

2) 阀门紧急停止系统

每个管道阀门都应配置阀门紧急停止系统,并定期测试其工作状态,确保阀门紧急停止系统正常工作;阀门紧急停止系统应当设置在容易接近的位置,否则在难以接近阀门的情况下,这会使得应急响应延迟。

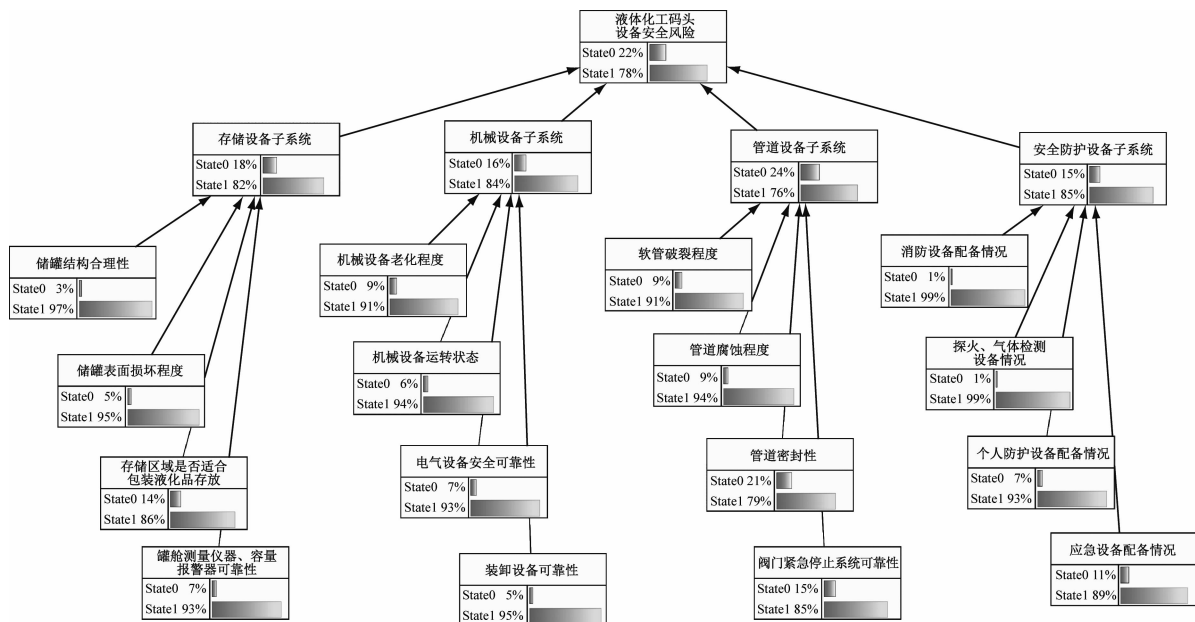


图5 液体化工码头设备安全风险概率计算结果

Fig. 5 Calculation results of safety risk probability of liquid chemical terminal equipment

4 结束语

1) 本文结合我国液体化工码头设备发生的风险事故识别风险因素,初步构建风险评价指标清单,并通过调查问卷来收集相关数据,引入 TOPSIS 方法量化地进行风险因素的重要程度比较,确保筛选过程的合理性,从 24 项指标中筛选出 16 个指标,从而得到更加准确客观的液体化工码头设备安全风险评价指标体系。

2) 本文基于贝叶斯网络方法建立了完整的液体化工码头设备安全风险评价的流程,贝叶斯网络可以通过对实时数据进行学习从而实现自身结构中概率信息的更新,从而提高所分析系统的可靠性。

3) 本文以某液体化工码头为对象开展设备安全风险评价,结果表明码头整体风险等级较低,4 个设备子系统中存储设备、机械设备和安全防护设备的风险等级为低,管道设备的风险程度相对最高,风险等级为较低。进一步对子要素分析,该码头管道法兰上螺栓未拧紧以及阀门紧急停止系统未正常工作是管道设备的风险程度相对最高的原因。建议码头在此后的工作中,参考提出的管控措施,特别加强对管道设备的监控和定期排查,并做好预警和应急工作,防患于未然,从而降低其管道设备的风险概率。实例结果表明本文方法适用于评估液体化工码头设备安全风险,对有效制定防控对策具有较好的指导意义。

参考文献

- [1] 杨扬,韩天睥,袁媛,等.我国危险品物流现状与发展对策研究[J].中国物流与采购,2016(1):68-69.
YANG Y, HAN T H, YUAN Y, et al. Research on the current situation and development countermeasures of China's dangerous goods logistics [J]. China Logistics and Procurement, 2016(1): 68-69. (in Chinese)
- [2] 苏立亭.企业危险品仓储安全集成管理研究[D].西安:长安大学,2016.
SU L T. Research on the integrated management of enterprise dangerous goods storage safety [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [3] 周品江,江福才,马全党.基于熵权云模型的 LNG 码头安全评价[J].安全与环境学报,2016,16(2):61-64.
ZHOU P J, JIANG F C, MA Q D. Safety evaluation of LNG terminal based on entropy weight cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(2): 61-64. (in Chinese)
- [4] 缪克银.危险品货物海上安全运输风险模糊评判[J].中国航海,2012,35(4):76-79.
MIAO K Y. Fuzzy evaluation of risk of safe maritime transport of dangerous goods [J]. Navigation of China, 2012, 35(4): 76-79. (in Chinese)
- [5] 王磊.不确定性条件下危险品仓储管理优化研究[D].成都:西南交通大学,2018.
WANG L. Research on optimization of dangerous goods storage management under uncertainty [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

- scheduling optimization on bulk cargo port considering ship lightening and berth shifting[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018,18(5):152-164. (in Chinese)
- [3] BIN J. Exact and heuristic methods for optimizing lock-quay system in inland waterway[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019,277(2):740-755.
- [4] YUAN X H. Co-scheduling of lock and water-land transshipment for ships passing the dam[J]. *Applied Soft Computing*, 2016,45:150-162.
- [5] 王展,刘克中,杨星,等. 面向单向航道通航能力的船舶减速概率[J]. *中国航海*, 2018,41(4):42-46.
WANG Z, LIU K Z, YANG X, et al. Probability of ship speed reducing in one-way channel[J]. *Navigation of China*, 2018,41(4):42-46. (in Chinese)
- [6] 冯宏祥,孔凡邗,肖英杰,等. 基于 AIS 的元胞自动机模型的船舶交通流特征参数分析[J]. *武汉理工大学学报:交通科学与工程版*, 2014,38(2):324-328.
FENG H X, KONG F, XIAO Y J, et al. Parameters characteristics analysis of ships traffic flow with cellular automata model on AIS-based[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2014,38(2):324-328. (in Chinese)
- [7] XIN X R. A simulation model for ship navigation in the “Xiazhimen” waterway based on statistical analysis of AIS data[J]. *Ocean Engineering*, 2019,180:279-289.
- [8] 刘宗杨,周春辉,赵俊男,等. 基于元胞自动机的航道通过能力建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2021,33(10):2478-2487.
LIU Z Y, ZHOU C H, ZHAO J N, et al. Modeling and simulation of channel passage capacity based on cellular automata[J]. *Journal of System Simulation*, 2021,33(10):2478-2487. (in Chinese)
- [9] 柯姜岑. 基于元胞自动机的水运枢纽运输组织研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
KE C J. Study on navigable hydro-junction organization mode with cellular automata [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] LÜBBECKE E, LÜBBECKE M E, MÖHRING R H. Ship traffic optimization for the Kiel canal [J]. *Operations Research*, 2019,67(3):791-803.
- [11] 戴林伟. 双向航道船舶交通流元胞自动机模型及仿真[J]. *上海海事大学学报*, 2019,40(1):27-31.
DAI L W. Cellular automaton model and simulation of ship traffic flow in two-way waterway [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2019,40(1):27-31. (in Chinese)
- [12] 李瀛,张玮. 基于停船视距的船舶领域模型研究[J]. *水运工程*, 2014(1):36-40.
LI Y, ZHANG W. On model about ship domain based on stopping sight distance [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2014(1):36-40. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 79 页)
- [6] 乔剑华,郭丽锦,武守元,等. 浅析港口液体化工码头的装卸工艺设计[J]. *港工技术*, 2013,50(1):16-18.
QIAO J H, GUO L J, WU S Y, et al. Analysis of the loading and unloading process design of the port liquid chemical terminal [J]. *Port Engineering Technology*, 2013,50(1):16-18. (in Chinese)
- [7] 宋剑伟. 青岛港液体化工码头风险评估与应急措施研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
SONG J W. Research on risk assessment and emergency measures of liquid chemical terminal in Qingdao port [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese)
- [8] 信桂新,杨朝现,杨庆媛,等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. *农业工程学报*, 2017,33(1):238-249.
XIN G X, YANG C X, YANG Q Y, et al. Evaluation of post-construction effects of high-standard basic farmland using entropy weight method and improved TOPSIS model [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2017,33(1):238-249. (in Chinese)
- [9] 雷勋平,邱广华. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J]. *环境科学学报*, 2016,36(1):314-323.
- [10] LEI X P, QIU G H. Empirical study on evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on entropy weight TOPSIS model [J]. *Journal of Environmental Science*, 2016,36(1):314-323. (in Chinese)
- [10] PENG M, ZHANG L. Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: a new model based on Bayesian networks[J]. *Natural Hazards*, 2012,64(1):903-933.
- [11] KHAKZAD N. Modeling wildfire spread in wildland-industrial interfaces using dynamic Bayesian network [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019,189:165-176.
- [12] 李江飞. 基于贝叶斯网络的地铁项目施工风险评价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
LI J F. Research on metro project construction risk assessment based on Bayesian network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 周旺. 交通项目社会稳定风险等级评判指标体系研究[J]. *西部交通科技*, 2016(5):82-84.
ZHOU W. Research on the evaluation index system of social stability risk level of transportation projects [J]. *Western Transportation Science and Technology*, 2016(5):82-84. (in Chinese)