

基于贝叶斯网络的油轮装卸作业安全风险评价

况丽姣¹, 史慧敏¹, 钱源来², 顾超东², 潘宝峰¹

(1. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022;

2. 中安惟新(舟山)技术有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘要:针对油轮装卸作业安全风险较高、事故频发等问题,提出一种基于数据驱动和贝叶斯网络的油轮装卸作业安全风险评价方法。依据系统工程学理论,构建具有34个网络节点的三层贝叶斯网络评价模型。运用最大期望值算法的推理原理,计算该模型网络节点的条件概率,实现该模型的风险评价量化,通过敏感性和有效性分析验证该模型的合理性和可靠性。以20艘实船数据对评价模型进行验证,结果表明,该模型的输出结果与港口安全生产人员评估的装卸作业风险水平一致,能准确地评价油轮装卸作业风险;所提出的模型和方法可用于油轮装卸作业安全风险水平的评价,同时为其他类型的危险品船舶装卸作业安全评价提供参考。

关键词:油轮装卸作业;安全风险评价;贝叶斯网络;敏感性分析;有效性分析

中图分类号:U698.5

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.011

Safety risk assessment of oil tanker loading and unloading operation based on Bayesian network

KUANG Lijiao¹, SHI Huimin¹, QIAN Yuanlai², GU Chaodong², PAN Baofeng¹

(1. School of Shipping and Marine Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Zhong'an Weixin Technology Co., Ltd, Zhoushan 316000, China)

Abstract: To address the high safety risks and frequent accidents associated with oil tanker loading and unloading operations, this paper proposes a data-driven risk assessment method based on Bayesian networks. Guided by systems engineering theory, a three-layer Bayesian network evaluation model comprising 34 nodes is constructed. Using the inference principle of the expectation-maximization algorithm, the conditional probabilities of the network nodes are computed to quantify risk levels within the model. The rationality and reliability of the model are verified through sensitivity and effectiveness analyses. Validation using data from 20 actual tankers demonstrates that the model's output aligns with risk levels assessed by port security personnel and can accurately evaluate the risks during oil tanker loading and unloading operations. The proposed model and method are applicable for assessing safety risk levels in oil tanker operations and can serve as a reference for safety evaluations of loading and unloading operations for other types of dangerous goods carriers.

Key words: oil tanker loading and unloading operation; safety risk assessment; Bayesian network sensitivity analysis; effectiveness analysis

国内石油进口量增长迅速,油码头船岸收发量以及油轮靠港装卸作业的安全隐患也随之增加^[1]。在油轮装卸过程中,船舶因自身缺陷情况易处于高危风险,极易引发火灾、爆炸和污染事故,且已发生

过类似的事故,如海南东方八所港“F”轮、青岛码头超级油轮“A”等事故。为使油轮在港区安全地进行油品装卸作业,有必要在作业时根据装卸作业安全检查缺陷项对油轮装卸作业风险进行评价,并找到

收稿日期:2023-11-23

作者简介:况丽姣(1996—),女,硕士研究生,研究方向为水上交通系统风险分析与安全保障。E-mail: kuanglijiao111@163.com

通信作者:潘宝峰(1986—),男,博士,研究方向为智能船舶、船舶通信及物联网技术。E-mail: panbaofeng@zjou.edu.cn

引用格式:况丽姣,史慧敏,钱源来,等.基于贝叶斯网络的油轮装卸作业安全风险评价[J].中国航海,2025,48(3):90-97.

KUANG L J, SHI H M, QIAN Y L, et al. Safety risk assessment of oil tanker loading and unloading operation based on Bayesian network [J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 90-97. (in Chinese)

影响其风险水平的关键因素,从源头上对风险实施管控,降低事故发生率。

近年来,各学者从不同视角对油码头作业风险进行了深入研究。崔文罡等^[2]利用模糊联结模型对油轮靠港装卸作业溢油事故风险进行定量分析。以往研究多采用系统化的风险辨识模式,而黎法明等^[3]利用结构化风险辨识框架对油船装卸过程进行风险辨识,并在贝叶斯网络模型基础上结合数据动态推理整个作业中的溢油风险时序变化规律,实现了风险的定量评估。SEZER 等^[4]将 Dempster-Shafer 证据理论、人为失误评估及减少技术和联结模型融合,对油/化学品船的货舱开裂风险进行分析。崔文罡等^[5]通过确定油轮靠港装卸作业风险因素,建立邻接矩阵及可达矩阵构建风险因素解释结构模型,对作业过程进行风险分析并确定因素间层级关系,明确了事故风险的产生机理。ELIDOLU 等^[6]基于 Fine-Kinnney 理论和 TODIM 交互式多准则决策方法分析港区油轮气体释放过程中的数值风险,并修改直觉模糊集以克服人为决策中的不确定性。GAO^[7]提出了一种油轮货物装卸作业风险分析的新方法,利用云模型和专家对风险因素的判断进行建模,并采用 DEMATEL 决策试验与评估试验的方法确定风险因素的重要性和关联性。SEZER 等^[8]将 FMECA 故障模式影响和临界分析、D-S 证据理论和基于规则的贝叶斯网络进行融合,用于港口油轮货物操作中歧管过程的综合风险评估,以此来降低货物歧管过程的操作风险。

综上,现有研究存在以下问题:1) 现有研究多针对油码头作业风险进行定性分析,且评价过程中相关定量数据的确定多采用专家评分获取,专家的选择和其观点的主观性会影响到风险评价结果^[9-10];2) 现有研究在评价作业风险时评价指标的选择过于概化,不能与实际生产作业过程相结合;3) 绝大多数研究旨在通过历史事故数据找出规律,难以在无事故数据的情况下对油码头作业风险水平进行量化;4) 现有研究未考虑以单船的装卸作业安全风险为研究对象,分析油轮装卸作业的风险水平。为此,在现有研究基础之上,本文以单艘油轮的装卸作业安全风险水平为研究对象,利用贝叶斯网络模型,结合舟山某大型油码头油轮装卸作业安全检查历史数据构建油轮装卸作业安全风险评价模型,并验证模型的合理性。在此基础上,对贝叶斯网络进行正向推理和诊断推理来评价油轮装卸作业的安全风险水平。基于推理结果,分析导致作业过程处于高风险的关键因素。

1 贝叶斯网络概述

1.1 基本概念

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)又称因果概率网络,是不确定性知识表达和推理领域中有效的理论模型。它由有向无环图和条件概率分布表组成。有向无环图由节点和连接这些节点的有向边组成,节点对应因果概率网络中的随机变量,节点间的有向边代表了变量间的因果关系,有向边由父节点变量指向子节点变量^[11]。节点的条件概率分布表表示节点间关系的强度,没有父节点的用先验概率进行信息表达。令 G 为定义在 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 上的一个 BN 结构,其联合概率分布可以表示为各节点条件概率分布的乘积,联合概率可表示为:

$$p(X) = \prod_i^N p_i(X_i | P \text{ ar } G(X_i)) \quad (1)$$

其中, $P \text{ ar } G(X_i)$ 为节点 X_i 的父节点集, X 为贝叶斯网络中的变量集, $P_i(X_i | P \text{ ar } G(X_i))$ 为节点的条件概率表。

假设试验 E 的样本空间为 S , B_j 为 E 的事件, A_1, A_2, \dots, A_m 分别为 E 的一组事件集, $A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_m = S$ 且互不相融;随机事件 A_i 的条件概率就是贝叶斯定理,也称后验概率公式。 $p(A_i)$ 是 A_i 的先验概率,若已知 $p(B_j | A_i)$ 且 $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$, 则 A_i 的后验概率计算公式为:

$$p(A_i | B_j) = \frac{p(A_i)p(B_j | A_i)}{\sum_{i=1}^m p(A_i)p(B_j | A_i)} \quad (2)$$

其中, $p(B_j | A_i)$ 为事件 A_i 的似然度。

1.2 贝叶斯网络的结构学习

贝叶斯网络的结构学习是贝叶斯网络建模的一个难点,根据建模的方式不同,结构学习分为三类:专家先验知识建模、数据学习建模以及融合专家知识和数据的混合建模。由于本文搜集的数据样本量较小,故采用专家先验知识建立网络结构。

1.3 贝叶斯网络的参数学习

在确定网络结构后,需要根据数据确定各节点变量的条件概率,这个过程称为贝叶斯网络的参数学习。根据数据完备与否,参数学习分为完备数据和不完备数据的参数学习。因本文搜集的样本数据存在少量缺值故采用最大期望值(Expectation Maximization, EM)算法进行条件概率的计算。其核心思想是从参数 θ 的某个随机初始值 θ_0 开始迭代,迭代 t 步之后,得到参数估计值 θ_t , 利用 θ_t 修补数据,使数据完整,最后利用修补后数据对参数 θ 进行最大

似然估计,由此可以得到 θ_{i+1} ,在此基础上进行下一迭代,直至似然函数达到局部极值,算法完成收敛。在数据修补过程中,每个缺值会被完整的权样本(由样本权重值表示)所代替。参数 θ 基于修补样本 D_i 的对数似然函数如式 3。

$$L(\theta | D_i) = \sum_{l=1}^N \left[\sum_{x_l \in X_l} P(X_l = x_l | D_i, \theta) \ln P(D_i, X_l = x_l | \theta) \right] \quad (3)$$

其中,样本量为 N , X_l 为任意样本 D_i 中所有缺值变量的集合, x_l 是相应于样本 X_l 的一个样本值。当 X_l 为空集时, $P(X_l = x_l | D_i, \theta) = 1$ 。

2 油轮装卸作业安全风险评价模型的建立

2.1 评价指标的选取

本文以舟山某大型油码头 2022 年 9 月至 12 月 170 艘油轮装卸作业安全检查数据为样本,选择 150 艘船舶数据建立油轮装卸作业风险评价模型,其余 20 艘船舶数据用于后续的模式验证与风险评价。建模的数据由油轮装卸作业检查缺陷项以及装卸风险水平构成,需说明的是,油轮装卸风险水平是港口安全生产人员按照相关标准对检查缺陷项进行评估确定的。按照系统工程学理论,将检查缺陷项从人、设备、环境、管理四方面进行归类,辨识装卸风险的影响因素。通过分析每艘油轮的检查缺陷项,并将所有缺陷项进行整合,筛选出合适的缺陷项作为评价指标,评价指标对应 BN 模型的节点。最终构成含有 34 个网络节点的三层 BN 拓扑结构。其对应的三层风险因素图如图 1 所示。

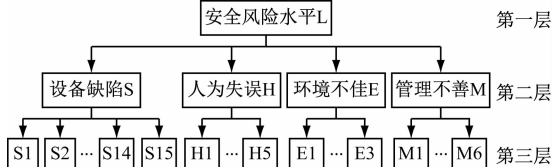


图 1 油轮装卸作业风险致因架构

Fig. 1 Risk cause architecture diagram of oil tanker loading and unloading operation

图 1 中的各因素与图 2 中的评价指标相对应,具体见图 2。尽管油轮装卸作业检查缺陷项远不止这 34 项,但为了保障所构建网络模型的实用性,忽略了装卸检查缺陷项中的小概率事件(如:靠泊期间主桅未悬挂慢车通过信号旗,驾驶台 VHF 未设置成低功率等),并将一些相近的缺陷项归到同一类中(如将“作业期间船方梯口附近未保持连续值班”

与“甲板值班人员坐着值班”归到“船员在作业期间值班不认真”)。油轮装卸作业安全风险评价指标如图 2 所示。

设备缺陷S	人为失误H
S1: 溢油材料和防污设备准备不足	H1: 船员未正确使用个人防护装备
S2: 货操时使用非防爆装置	H2: 船员未遵守明火规则
S3: 船岸安全通道布设不符合要求	H3: 违规使用手机接打电话
S4: 应急拖缆未按码头规定布置	H4: 船员在作业期间值班不认真
S5: 船舶系泊不符合要求	H5: 船员不熟悉货操作应急程序和必要资料
S6: 消防水带、应急防火控制图等消防设施未按要布设	环境不佳E
S7: 船方未拉上栏杆防护链	E1: 部分货控室杂物卫生情况不佳
S8: 装货期间泵舱机械通风故障	E2: 船岸两端通讯情况不畅
S9: 部分压力P/V阀门故障或未处于关闭状态	E3: 船方排水孔未严密堵塞
S10: 接管工具材质不符合要求	管理不善M
S11: 船方货舱压力表处于失效状态	M1: 船岸安全检查表未按要求落实完成
S12: 国际通岸接头箱放置在驾驶台且箱内缺少铜质开口板	M2: 船方在货作业期间未保持封舱作业
S13: 检查船方未正确放置挡鼠板	M3: 船方违反码头规定进行货作业
S14: 部分设备的阀门腐蚀不能使用	M4: 船方梯口未摆放登轮告知牌
S15: 船舶火灾报警装置故障	M5: 船方未制定本航次装卸作业计划书
	M6: 甲板消防泡沫炮未对准输油臂区域

图 2 油轮装卸作业安全风险评价指标

Fig. 2 Safety risk assessment indicators for oil tanker loading and unloading operation

2.2 风险评价 BN 模型节点值域的确定

根据 BN 模型理论,在节点选取之后,需要确定各节点值域。在本文研究的油轮装卸作业安全风险水平评价模型中,人、设备、环境、管理因素的各节点均存在“是”和“否”两个状态。当样本数据少且网络的叶节点状态量较多时,模型的推理结果精度较低,为提高精度,将装卸作业风险水平划分为高、低两个风险状态。每个状态的值为 $[0, 1]$, 节点状态的数值表示所对应事件发生的概率,数值越大,事件发生的可能性越大。当节点状态数值为 1, 表示该节点所对应的事件发生,反之,当节点数值为 0 表示该节点对应的事件在装卸作业安全检查中并未发生。

2.3 风险评价 BN 模型网络拓扑结构的确定

客观上搜集的装卸作业安全检查数据不充足和主观上关于油品船装卸过程安全检查的实践积累较为已经完备,本文通过专家的领域知识进行风险评价 BN 模型结构的搭建。在装卸油品过程中 150 艘船舶的安全检查数据为样本,构建油轮装卸作业安全风险评价 BN 模型。每个节点的位置以及节点之间的联系在进行初步确定后,由舟山某油码头安全

作业领域的专家根据油轮装卸检查报告并结合自身经验,按照可行性、简洁性原则进行适当调整,进而构建了油轮装卸作业安全风险评价 BN 模型的网络拓扑结构,如图 3 所示。

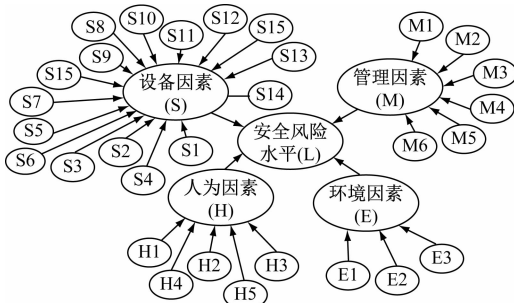


图 3 油轮装卸作业安全风险评价贝叶斯网络拓扑结构

Fig.3 Bayesian network topology for safety risk assessment of oil tanker loading and unloading operation

2.4 风险评价 BN 模型条件概率表的确定

通过 Bootstrap 抽样方法有放回地从原始数据集中随机抽取 t 个样本,将其加入原始数据集中,这样小数据集中就增添了 t 个“新”样本,以此来扩大样本量。利用 EM 算法结合样本数据进行网络参数的学习以此来确定节点的条件概率表。

EM 算法的计算框架由 E 步骤 (Expectation-step) 和 M 步骤 (Maximization-step) 交替组成。以节点 E“环境因素”发生的条件概率 $p(E_{是} | E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是})$ 的计算过程为例进行说明(上标“是”和“否”分别代表节点对应的事件是否真实发生)。上

述概率表示,船舶货舱在卫生情况良好,船岸通信良好以及船方作业期间排水孔未堵塞时船舶所处环境不佳的条件概率。

E 步骤:将节点 E 的初始条件概率值设为 0.5,即 $p(E_{是} | E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是}) = 0.5$,然后以此计算缺失数据的条件期望值,将计算值视为观测值,得到完整的观测值将其带入最大似然估计公式中。

$$p(E_{是} | E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是}) = \frac{N(E_{是}, E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是})}{N(E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是})} \quad (4)$$

其中, $N(E_{是}, E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是})$ 表示节点 E、 E_1 、 E_2 、 E_3 在具体取值下的联合概率的观测值。

M 步骤:将上述最大似然估计算法逼近局部极大值,得出 $p(E_{是} | E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是})$ 的最大可能值。

重复上述的 E 步骤和 M 步骤直至参数收敛,就可得到 $p(E_{是} | E_{1,否}, E_{2,否}, E_{3,是})$ 的最佳估计值。

3 油轮装卸作业安全风险评价模型的验证及应用

3.1 模型的验证及风险评价

3.1.1 敏感性分析

在确定贝叶斯网络拓扑结构和条件概率表后得到油轮装卸作业安全风险评价 BN 模型如图 4。根据 BN 模型进行敏感性分析的两条定律,以节点“人为失误”发生状态为例,对建立的模型进行敏感性分析。

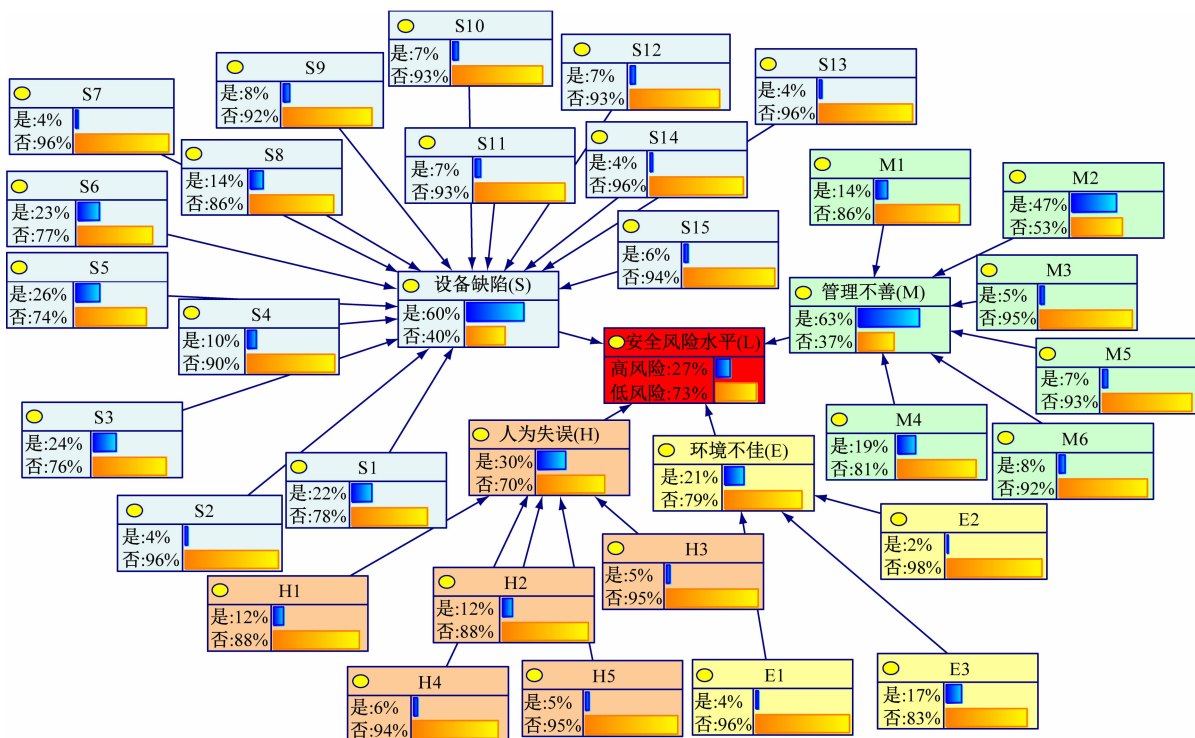


图 4 油轮装卸作业安全风险评价贝叶斯网络

Fig.4 Bayesian network for safety risk assessment in oil tanker loading and unloading operation

定律1:任意父节点先验概率的增加或减少会相应地引起其子节点后验概率的增加或减少。

定律2: n 个父节点先验概率变化对其子节点后验概率的影响不小于 $n-1$ 个父节点先验概率变化对其子节点后验概率的影响。

通过计算可得, $p(H_{是} | H_1, H_2, H_3) = 0.3$; $p(H_{是} | H_{1,否}, H_2, H_3) = 0.22$; $p(H_{是} | H_{1,否}, H_{2,否}, H_3) = 0.13$; $p(H_{是} | H_{1,否}, H_{2,否}, H_{3,否}) = 0.1$ 。上述概率代表:选取节点H的“是”状态作为敏感性分析的对象,当给定父节点 H_1 状态为“否”即船员正确使用个人防护装备时,人为因素检查缺陷发生的概率由0.3降为0.22。当继续增加父节点 H_2 的状态为“否”即船员遵守明火规则时,人为因素检查缺陷发生概率由0.22降为0.13,当 H_3 节点状态变为“否”即船员未使用手机接打电话时,人为因素检查缺陷

发生的概率由0.16继续降至0.1。

同样,对模型中的多个子节点进行敏感性分析。结果表明,所建立的模型中子节点后验概率因父节点先验概率改变所产生的变化符合敏感性分析的定律,不存在父节点状态变化对子节点后验概率无影响的无效连接。说明该模型节点间的敏感性良好。

图5是当油轮装卸作业高风险状态为敏感性分析的目标节点时贝叶斯网络全域敏感性分析龙卷风图,图中条状带的长度代表各风险状态对油品装卸作业时船舶风险水平的影响程度^[12]。图5展现了导致装卸作业高风险的10个最主要因素。其中较显著的因素为设备缺陷、管理不善、船方排水孔在作业期间未严密堵塞以及船方在货操作期间未保持封舱作业。

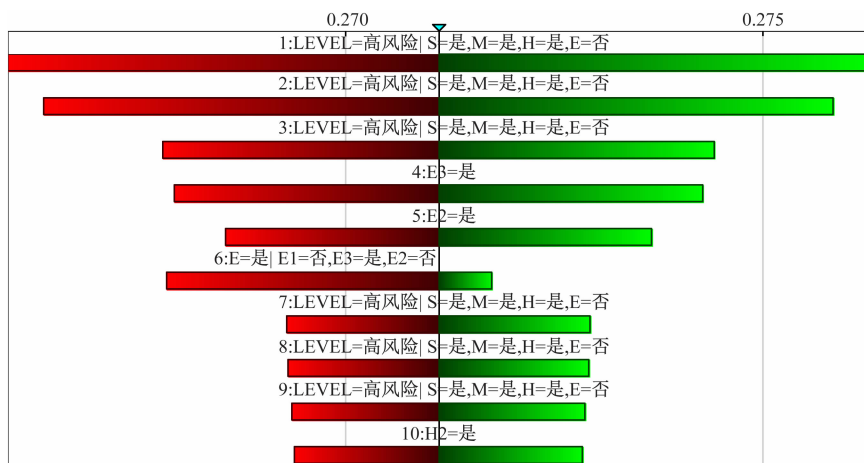


图5 装卸作业高风险状态为敏感性分析目标节点的龙卷风图

Fig. 5 Tornado diagram with high risk status of loading and unloading operation as the target node of sensitivity analysis

3.1.2 风险水平评价及有效性分析

有效性分析的过程又称为贝叶斯网络的正向推理。利用样本中20艘油品船在装卸中的安全检查数据对每艘船的装卸风险进行评估以验证模型的有效性。将每艘船的装卸检查缺陷项提取出来,作为证据节点输入BN模型中,推理出每艘船在对应检查缺陷项的组合之下相应的装卸风险水平的后验概率。

以2022年12月19日停靠在舟山某大型油码头的一艘低风险作业油轮“W”在油品装卸作业中的风险水平为例进行评价,以验证模型的有效性。评价及验证过程具体为:将该船装卸作业的检查缺陷项组合作为证据节点输入模型中,其节点概率设置为“是=1”,贝叶斯网络得到的联合概率为: $p(\text{高风险}) = 30\%$, $p(\text{低风险}) = 70\%$,具体见图6。

验证结果表明,在船岸安全通道布设不符合要

求且船岸安全检查表未按要求落实完成这一缺陷项组合下,该船的装卸作业过程为低风险,低风险概率为70%。按照隶属度最大原则,说明评价结果与船舶实际装卸风险水平一致,所建立的油轮装卸作业安全风险评价BN模型对该艘船舶是有效的。

用本文中建立的贝叶斯网络评价其他19艘油轮的装卸风险水平,其评价结果进一步验证所建立BN模型的有效性。评价结果如表1所示。

由表1可知,19艘油轮中低装卸风险对应的概率均在57%以上,其中,14艘油轮的装卸低风险概率在70%以上,占检验样本总量的73.7%;1艘油轮的低风险概率为60%~70%;4艘油轮的低风险概率在55%~60%。根据油轮装卸作业安全检查的真实数据所建立的风险评价模型的评价结果,可以看出本文建立的评价模型所选取的装卸检查缺陷项、网络拓扑结构与油轮装卸安全检查的真实场景

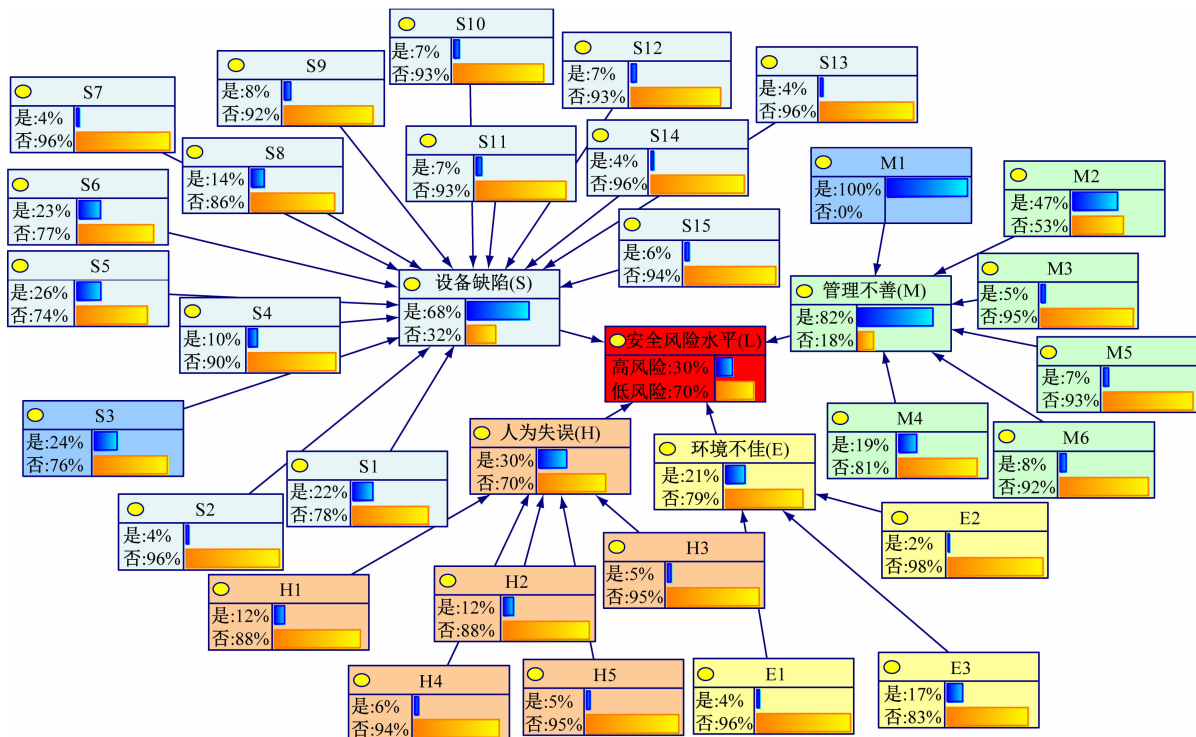


图6 “W”油轮装卸作业安全风险水平验证

Fig.6 Verification of loading and unloading safety risk level for the "W" oil tanker

表1 19艘油轮装卸作业安全风险评价结果

Tab.1 Risk assessment results for loading and unloading operations of 19 oil tankers

序号	船舶名称	风险水平	检查缺陷项	低风险概率/%
1	Tanker 01	低	S5、S6	72.4
2	Tanker 02	低	S3、S4、M2、S9	57.2
3	Tanker 03	低	S3、S4、M4	71.0
4	Tanker 04	低	S12、M2	70.3
5	Tanker 05	低	S7、M4	70.8
6	Tanker 06	低	S3、M4	72.5
7	Tanker 07	低	S4、M4、S13	71.3
8	Tanker 08	低	S3、S4	73.1
9	Tanker 09	低	M4、S13	70.8
10	Tanker 10	低	M2、M4、M6	72.9
11	Tanker 11	低	E2、S6	59.3
12	Tanker 12	低	S4、S6、E3	57.5
13	Tanker 13	低	S4、E3	72.2
14	Tanker 14	低	S3、S4	73.1
15	Tanker 15	低	H1、S8	59.7
16	Tanker 16	低	S3、M2	72.3
17	Tanker 17	低	M6、S3	71.6
18	Tanker 18	低	S3、M4	69.0
19	Tanker 19	低	S5、S12、M2	70.2

相符,能体现各种检查缺陷项与船舶最终的装卸安全风险水平的关联强度,表明构建的模型能够有效评价油轮的装卸风险水平。

3.2 基于诊断推理的关键风险因素分析

诊断推理是指假设油轮装卸作业安全风险水平高,计算各检查缺陷项发生的后验概率。推理结果如图7所示。当油品船装卸作业安全风险水平高时,贝叶斯网络第2层的风险影响因素(S,M,E,H)的后验概率分别为 $p(S_{是} | L_{是}) = 0.66$, $p(M_{是} | L_{是}) = 0.72$, $p(E_{是} | L_{是}) = 0.33$, $p(H_{是} | L_{是}) = 0.47$ 。可以明显看出节点M(管理不善)的后验概率最高,即在船舶装卸作业风险高时,装卸作业中管理不善是导致高风险的最主要原因,设备缺陷、人为失误,作业环境不佳作为次要因素,这些次要因素在一定程度上影响着装卸风险水平。

从管理方面因素分析,船方在货作业期间未保持封舱作业、船方未在登梯口摆放登轮告知牌及船方《船岸安全检查表》未按要求落实完成对油轮装卸作业安全风险水平的影响较大;从设备因素分析,船舶系泊不符合要求、船岸安全通道布设不符合要求、装卸作业现场溢油材料和防污设备准备不足及消防水带、应急防火控制图等消防设备未按要求布设对装卸作业风险水平的影响较大;从人为因素分析,船员未正确使用个人防护装备及船员未遵守

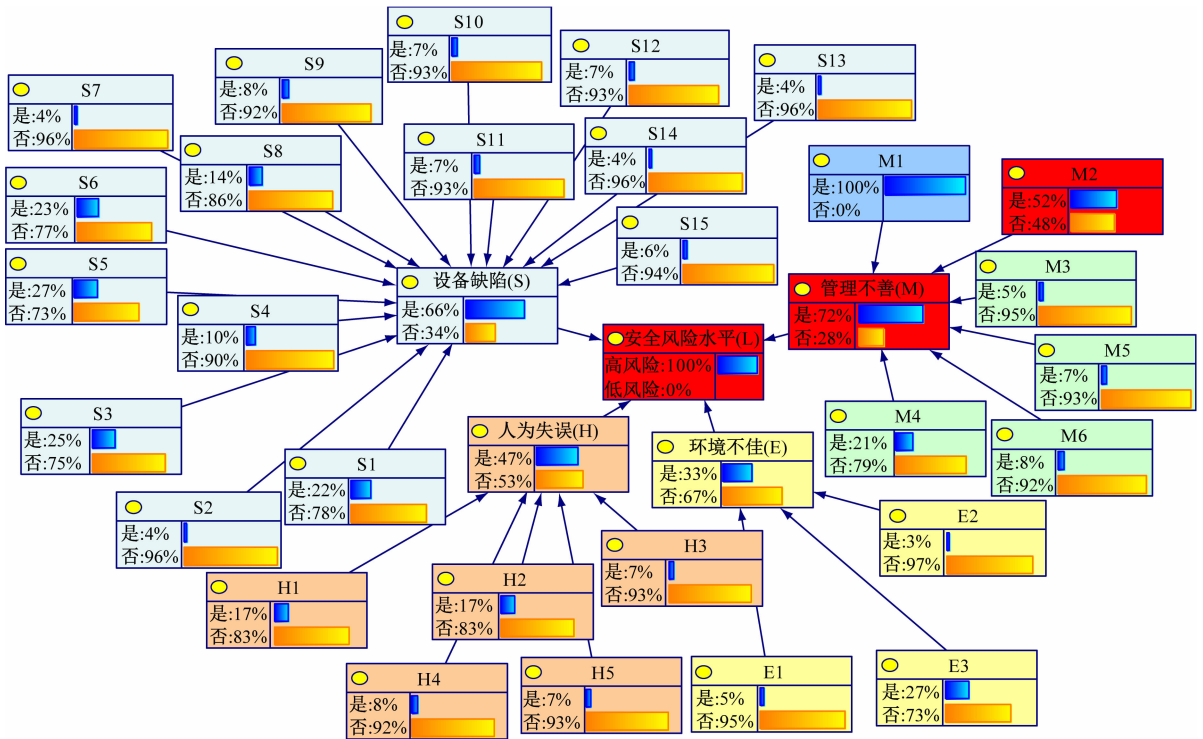


图7 评价模型的诊断推理结果

Fig. 7 Diagnostic inference results of evaluation model

明火规则是装卸作业高风险的关键因素;从作业环境因素分析,船方排水孔在作业期间未严密堵塞是导致装卸作业高风险的主要因素。

为了解油轮装卸作业高风险的形成机制,进行针对高风险最大可能的致因链分析,具体过程为:1)结果设置,假设装卸处于高风险状态;2)贝叶斯网络诊断推理,在装卸作业处于高风险状态下计算各检查缺陷项发生的后验概率;3)逆向搜寻,从高安全风险水平节点状态开始,逆向搜寻后验概率最大的父节点。经分析,装卸作业高风险的最大可能致因链条,如图7中红色节点所示链条,即“船方在货操作期间未保持封舱作业-管理不善-装卸作业高风险”(M₂-M-L)。次最大可能致因链是“船舶系泊不符合要求-设备缺陷-装卸作业高风险”(S₅-S-L)。

4 结束语

为了评价油轮装卸作业的安全风险并分析导致装卸作业高风险水平的关键因素,根据油轮装卸检查数据和贝叶斯网络模型理论,建立油轮装卸作业安全风险评价模型,评估装卸作业安全风险。

结果表明,本文建立的评价模型能够有效阐明油轮装卸作业安全风险的缺陷项与其风险水平之间的联系,评价结果与真实装卸过程相符,验证了该模型的可靠性与有效性。通过分析关键风险因素,得

出装卸作业高风险的关键缺陷项为船方在货操作期间未保持封舱作业、船方排水孔在作业期间未严密堵塞、现场溢油材料和防污设备准备不足、船岸安全通道布设不符合要求、船舶系泊不符合要求、消防设备未按要求布设以及船方梯口未摆放登轮告知牌,这7类装卸检查缺陷项在日常的管理过程中应重点关注。

本次研究所提出的模型和方法可用于油轮装卸作业安全风险水平的评价,并为其他类型危险品船舶装卸作业安全评价提供参考。由于文章中数据来自于同一油码头,所建评价模型的适用范围比较局限,后续研究将扩大数据搜集的范围,并使用机器学习的方法建立风险评价模型以提高模型的精度。

参考文献

- [1] KHAN R U, YIN J B, MUSTAFA F S, et al. Risk assessment for berthing of hazardous cargo vessels using Bayesian networks[J]. Ocean & Coastal Management, 2021, 210: 105673.
- [2] 崔文罡, 范厚明, 姚茜, 等. 基于模糊 Bow-tie 模型的油轮靠港装卸作业溢油风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(12): 92-98.
- CUI W G, FAN H M, YAO Q, et al. Oil spill risk analysis of tanker berthing and loading operations based on fuzzy Bow-tie model[J]. China Safety Production Science and Technology, 2016, 12(12): 92-98. (in

- Chinese)
- [3] 黎法明,李壮,胡甚平,等.超大型油船作业过程溢油风险网络分析方法[J].船舶工程,2022,44(6):134-140.
- LI F M, LI Z, HU S P, et al. Network analysis method for oil spill risk during operation of VLCC[J]. Marine Engineering, 2022, 44 (6): 134-140. (in Chinese)
- [4] SEZER S I, CAMLIYURT G, AYDIN M, et al. A bow-tie extended D-S evidence-HEART modelling for risk analysis of cargo tank cracks on oil/chemical tanker[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 237: 109346.
- [5] 崔文罡,范厚明,姚茜,等.基于ISM的油船靠港装卸作业安全风险[J].上海海事大学学报,2016,37(4):20-26.
- CUI W G, FAN H M, YAO Q, et al. ISM-based safety risk analysis of oil tanker berthing and loading operations [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2016, 37 (4): 20-26. (in Chinese)
- [6] ELIDOLU G, UFLAZ E, AYDIN M, et al. Numerical risk analysis of gas freeing process in oil/chemical tanker ships[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 113082.
- [7] GAO F. An integrated risk analysis method for tanker cargo handling operation using the cloud model and DEMATEL method [J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 113021.
- [8] SEZER S I, ELIDOLU G, AKYUZ E, et al. An integrated risk assessment modelling for cargo manifold process on tanker ships under FMECA extended Dempster-Shafer theory and rule-based Bayesian network approach [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 174: 340-352.
- [9] 余静,蒋惠园,胡佳颖.基于贝叶斯网络的浙江沿海船舶通航风险分析[J].中国航海,2018,41(2):97-101.
- YU J, JIANG H Y, HU J Y. Risk analysis of Zhejiang coastal ship navigation based on Bayesian network[J]. Navigation of China, 2018, 41 (2): 97-101. (in Chinese)
- [10] 甘浪雄,张怀志,卢天赋,等.基于熵权法的水上交通安全因素[J].中国航海,2021,44(2):53-58.
- GAN L X, ZHANG H Z, LU T F, et al. Water traffic safety factors based on entropy weight method [J]. Navigation of China, 2021, 44 (2): 53-58. (in Chinese)
- [11] LIU K, YU Q, YUAN Z, et al. A systematic analysis for maritime accidents causation in Chinese coastal waters using machine learning approaches[J]. Ocean & Coastal Management, 2021, 213: 105859.
- [12] FU S, YU Y, CHEN J, et al. A framework for quantitative analysis of the causation of grounding accidents in arctic shipping[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 226: 108706.