

基于贝叶斯网络的船舶污染事故应急预案完备性评估

王思琦^{1,2,3,4}, 张志明^{1,2,3,4}, 郑彭军^{1,2,3,4*}

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波港航物流服务体系协同创新中心, 浙江 宁波 315832;

3. 国家道路交通安全管理工程技术研究中心宁波大学分中心, 浙江 宁波 315832;

4. 现代城市交通技术江苏高校协同创新中心, 江苏 南京 210096)

摘要: 根据船舶污染事故应急预案涉及的事件和事件之间的逻辑关系构架了应急预案的故障树结构, 将故障树结构贝叶斯网络化, 构建了标准贝叶斯网络图, 由此建立一种船舶污染事故应急预案完备性评估的新方法. 利用该方法对市级船舶污染事故应急预案的缺失事件进行了分析, 评估了预案的完备度, 并与其他评估方法进行比较, 验证了该方法有效.

关键词: 船舶污染; 应急预案; 故障树分析法; 贝叶斯网络; 完备度评估模型

中图分类号: U698.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 04-0097-06

近年来, 随着船舶通航密度的增加, 发生船舶污染事故的可能性增大, 如不能及时处置, 会对海洋环境造成严重破坏. 《防治船舶污染海洋环境管理条例》^[1]指出, 交通运输主管部门和地方政府应当建立健全防治船舶及其有关作业活动污染海洋环境应急反应机制, 并制定防治船舶及其有关作业活动污染海洋环境应急预案. 船舶污染事故应急预案是应急响应过程中的应急行动方案和指导性文件, 用来保障工作高速、有效. 但是, 当前船舶污染事故应急预案的编制工作尚不够规范, 许多预案是凭编制人员的经验编制, 缺乏有效的质量控制手段, 不少应急预案存在完备性差、可操作性不强等问题^[2], 亟需能全方位评估预案质量及有效性, 并建立能反馈修订意见的方法. 完备性评估对保障应急预案的质量及有效性至关重要^[3]. 一份完备的应急预案应根据事故特征, 在事前监测、事中响应和事后恢复救助等方面都设定紧密连接的措施, 从而最大限度地防止和减轻船舶污染事故的发生和发展, 减少事故的损失.

目前国内外对应急预案的完备性评估研究较少, 已有的研究大多通过构建指标体系进行评价. 例如: 文献[4]通过模糊综合评价方法评价并优化

了西安市地铁火灾事故应急预案; 文献[5]选择了计划的快速性和内容的合理性等 5 个指标, 建立了基于直觉模糊集的方法来评估应急预案的完备性. 上述研究指标体系的构建容易受到评估者主观因素的影响. 为减少主观因素, 高明等^[6]将故障树理论应用于应急预案的完备性评估, 以改进评估方法. 但故障树分析法在对系统故障进行评价时, 只研究(0, 1)状态事件, 会产生较大误差, 而贝叶斯网络在数学推理和概率计算方面与故障树具有很大的相似性, 针对系统故障的诊断, 贝叶斯网络分析可从更深层次描述系统故障之间的因果关系及其故障机理, 提高评价系统的可靠性^[7].

本文以故障树结构为基础, 通过转化后的标准贝叶斯网络进行评估, 实现了对船舶污染事故应急预案完备性的定量评估, 为改进船舶污染应急预案提供了一种新的实用方法.

1 故障树结构的贝叶斯网络化

故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)是可靠性系统分析的一种图形演绎方法, 采用树形逻辑因果关系图, 用事件、逻辑门和其他符号描述系统中可能发生的事故与导致事故的各项原因之间

收稿日期: 2020-01-21.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际重点专项(2017YFE9134700); 欧盟地平线 2020 项目(690713).

第一作者: 王思琦(1995—), 女, 安徽宿州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 港航技术与管理工程. E-mail: 570490588@qq.com

*通信作者: 郑彭军(1965—), 男, 浙江慈溪人, 教授, 主要研究方向: 交通运输及港航管理. E-mail: zhengpengjun@nbu.edu.cn

的逻辑关系^[8]。在故障树分析法中,通常把不希望系统发生的事件称为顶端事件,位于故障树顶端;把导致事件发生的原因称为基本事件,位于故障树底端。

贝叶斯网络法(Bayesian Network, BN)运用有向无环图表示有关参数合集之间逻辑关系的网络结构,由表示随机变量含义的节点(父、子节点)和表示节点间互相关联的节点间有向边构成^[9]。连接两节点的有向边为单箭头,表明两者之间存在因果逻辑关系,其中箭头的始端为“因”,终端为“果”;而两节点之间如果不存在有向边,则表明两者相互独立,不存在必然的因果逻辑关系^[10]。该方法具有一定的不确定表达能力,结合条件概率与先验概率,能有效分析综合的不确定性系统。

在初始故障树模型中,所有基本事件只有2种状态,即发生故障或不发生故障,因此基本事件只参考(0,1)状态事件,会产生误差。所以按照故障树与贝叶斯网络的主要映射关系(事件—节点、逻辑门—连接强度),将故障树中的每个事件对应到贝叶斯网络中的父结点或子结点上,将其中逻辑门映射为贝叶斯网络中的连接强度,由此建立映射故障树结构中各事件之间的逻辑关系的贝叶斯网络结构图^[11]。

2 基于贝叶斯网络的应急预案完备性评估模型

采用 FTA 和 BN 相结合的方法对完备性进行评估,其基本流程如图 1 所示。

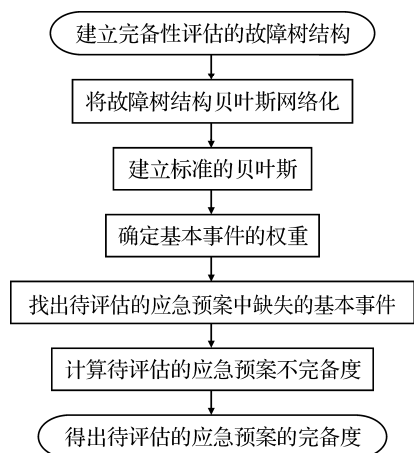


图1 应急预案完备性评估流程

2.1 标准贝叶斯的建立

基于故障树分析方法,将顶上事件确定为:不

完整应急预案(T);查找导致顶上事件发生的所有直接因素(中间事件(M))和间接因素(基本事件(X, Y, Z, …)),理清它们之间的因果关系;然后以故障树逻辑门形式表示每个级别事件之间的关系。

通过对船舶污染事故应急响应和应急管理过程要素的调研、分析和总结,将中间事件确定为:应急预防和应急准备不完备(M1),应急监测和预警不完备(M2),应急响应不完备(M3),善后处置不完备(M4)4部分。应急预防和应急准备是指在船舶污染事故发生前采取的各项预防措施,具体是指为预防可能发生的污染事故而提前安排人员、设施以及相应的保障措施;应急监测和预警是指在船舶污染事故发生时,对污染水域、大气等进行实时监测,并及时向有关单位发布预警信息;应急响应是指在船舶污染事故发生后进行的一系列救助救援和紧急处置工作;善后处置是指在船舶污染事故应急响应结束后进行相应的污染索赔、人员安置和环境恢复等一系列事故善后工作^[12]。

依据《国务院有关部门和单位制定和修订突发公共事件应急预案框架指南》^[13]中总则、组织指挥体系及职责任务、预警和预防机制、应急响应、后期处置、应急保障等内容,借鉴已有的有关应急预案完备性评估研究成果^[14],在咨询专业清污单位管理人员、船长、海事管理专家、高校教授等14位专家意见的基础上,梳理各事件之间的逻辑关系,分别对每个中间事件逐级找出其基本事件,建立的故障树结构如图2所示。

按照故障树结构的贝叶斯网络化方法,依据两者之间的主要映射关系,将顶上事件为应急预案不完备时的故障树结构进行贝叶斯网络化,并将各事件用符号化表示,建立对应的贝叶斯网络如图3所示。各事件含义见表1。

2.2 应急预案完备度计算

为了计算应急预案的完备度,需要计算标准贝叶斯网络中每个基本事件的权重,即事件对顶上事件的影响程度。

目前,用来分析底部事件权重的方法主要有概率重要性分析方法、事故隐患分析方法和结构重要性分级方法等^[15]。考虑到船舶污染事故应急预案的统计数据相当缺乏,因此采用结构重要性分级方法。而层次分析法(Analytic Hierarchy Process,

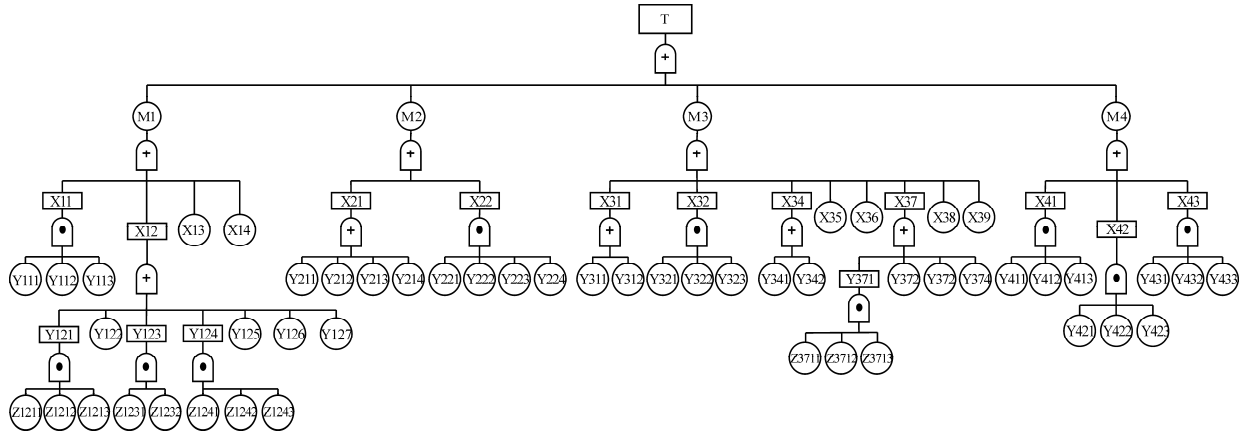


图2 应急预案不完备的故障树组织结构

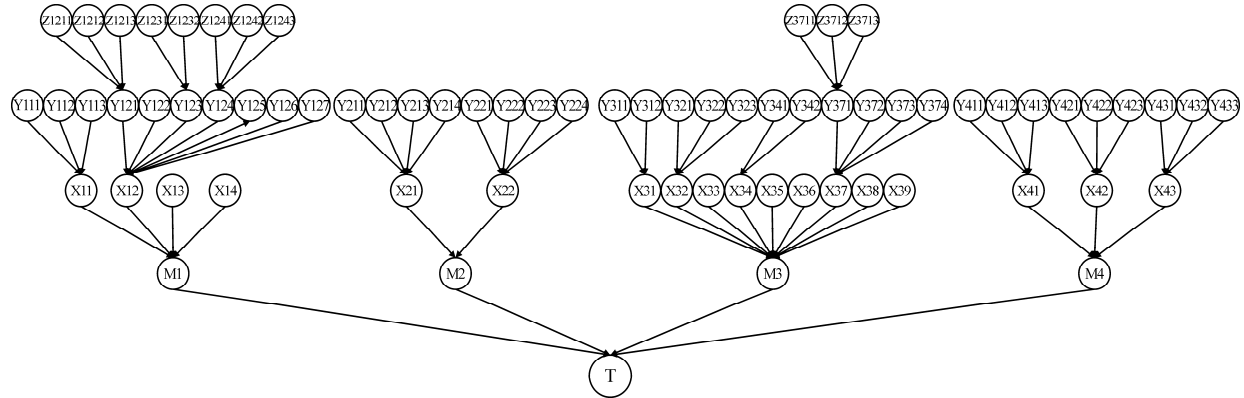


图3 应急预案不完备的贝叶斯网络

AHP)可把多个具有涵盖解释关系的层次展开, 根据决策指标的优劣性进行目标层分析和决策, 将难以赋值的比较关系转化为数学方法进行计算^[16]. 因此, 本文采用结构重要性分级方法结合层次分析法, 从顶上事件开始逐层计算, 根据式(1)计算每个基本事件的权重:

$$W_{(e_i)} = \begin{cases} 1, e_i \text{ 为顶上事件,} \\ W_{(e_j)}, e_i \text{ 非顶上事件逻辑关系为“或”,} \\ W_i, e_i \text{ 非顶上事件逻辑关系为“与”,} \end{cases} \quad (1)$$

式中: e_i 为缺失的基本事件; e_j 为事件 e_i 的直接上层事件; $W_{(e_j)}$ 为事件 e_j 的权重; W_i 为事件 e_i 经 AHP 计算取得的权重.

根据建立的标准贝叶斯网络图和事件之间逻辑关系, 计算应急预案的各事件的权重. 例如, 对事件 X22, 其直接上层事件 M2 权重为 1, 有 4 个子事件, 关系为“与”. 利用 AHP 方法, 通过征求 14 位专家, 进行两两对比, 采用 1~9 比例标度法构造判断矩阵, 经一致性检验后得出各层因子的权重

值. 其中 $P_{CR} = 0.0456 < 0.10$, 表明满足一致性要求, 基本事件权重为:

$$W_i = [0.3873, 0.2749, 0.1981, 0.1397].$$

同理可得其他基本事件权重, 结果见表 1.

应急预案的完备度是根据被评价应急预案缺失基本事件的数量及其权重得到, 其计算公式为:

$$P_{\text{completeness}} = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{W(e_i)}{m} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中: $P_{\text{completeness}}$ 为应急预案的完备度; n 为缺失的基本事件个数; $W(e_i)$ 为缺失的基本事件 e_i 的权重; m 为整个标准贝叶斯网络中最小割集数量.

用以下方法求解基于贝叶斯网络的最小割集^[17].

假设存在 N 个底层事件 $Z_1, \dots, Z_N$, 顶层事件为 T , 其最小割集为:

(1) 当 $k=1$ 时, 给定 i ($1 \leq i \leq N$), 若

$$P(T=0 | Z_i=0, Z_j=0, 1 \leq j \leq N, i \neq j) = 1,$$

则为 $\{Z_i\}$ 一阶最小割集组成集合, 可得出所有一阶最小割集为:

表1 基本事件的符号、名称及权重

符号	事件名称	权重	符号	事件名称	权重
M1	应急预防和应急准备不充分	1	M3	应急响应不到位	1
X11	未说明宣传培训演练	1	X31	未说明事故等级	1
X12	未说明提供资源保障	1	X32	未说明应急响应	1
X13	未说明进行事故风险评估	1	X33	未说明报送应急信息	1
X14	未说明建立监测与预警系统	1	X34	未说明进行应急资源调度	1
Y111	未说明进行事故宣传教育	0.140 0	X35	未说明进行环境保护	1
Y112	未说明进行应急培训	0.501 3	X36	未说明进行医疗保障	1
Y113	未说明进行应急演练	0.358 7	X37	未说明执行安全防护	1
Y121	未说明进行应急人员准备	1	X38	未说明对事故现场评测	1
Y122	未说明提供交通运输保障	1	X39	未说明应急结束	1
Y123	未说明提供医疗卫生保障	1	Y311	未说明事故等级标准	1
Y124	未说明提供基础设施保障	1	Y312	未说明事故等级信息	1
Y125	未说明提供应急物资保障	1	Y321	未说明应急响应启动条件	0.524 7
Y126	未说明提供救援经费保障	1	Y322	未说明应急响应启动方式	0.141 6
Y127	未说明提供救助场所	1	Y323	未说明应急响应启动流程	0.333 7
Z1211	未说明提供专家库	0.333 7	Y341	未说明进行人员调度	1
Z1212	未说明提供应急指挥人员	0.524 7	Y342	未说明进行物资调度	1
Z1213	未说明提供应急志愿力量	0.141 6	Y371	未说明对人员进行防护	1
Z1231	未说明提供医疗人员保障	0.666 7	Y372	未说明对设施进行防护	1
Z1232	未说明提供医疗设施保障	0.333 3	Y373	未说明进行医疗卫生防护	1
Z1241	未说明提供应急治安保障	0.272 1	Y374	未说明对治安进行防护	1
Z1242	未说明提供应急资金保障	0.119 9	Z3711	未说明对群众进行防护	0.490 5
Z1243	未说明提供通讯保障	0.608 0	Z3712	未说明对人员进行转移	0.311 9
M2	应急监测与预警不及时	1	Z3713	未说明对群众进行安置	0.197 6
X21	未说明进行事故监测	1	M4	后期处置不完善	1
X22	未说明进行事故预警	1	X41	未说明善后处理	1
Y211	未说明监测事故等级	1	X42	未说明事后索赔	1
Y212	未说明监测人员信息	1	X43	未说明事故总结	1
Y213	未说明监测范围	1	Y411	未说明人员安置	0.490 5
Y214	未说明监测方式	1	Y412	未说明环境恢复	0.311 9
Y221	未说明事故预警方式	0.198 1	Y413	未说明航行恢复	0.197 6
Y222	未说明事故预警流程	0.139 7	Y421	未说明责任认定	0.543 7
Y223	未说明发布预警信息	0.387 3	Y422	未说明损失赔偿	0.346 0
Y224	未说明预警信息	0.274 9	Y423	未说明伤亡赔偿	0.110 3
			Y431	未提及事故总结报告	0.650 1
			Y432	未提及评估预案实施效果	0.211 4
			Y433	未提及及时修订预案	0.133 5

$$\{\{Z_i\} \mid \{i\} \in \gamma_1 \subset U_1\},$$

式中: γ_1 为所有一阶最小割集所构成的集合.

$$U_1 = \{X: X \in 2^U, |X| = 1\},$$

式中: 2^U 为集合 U_1 的幂集; $|X|$ 为集合 X 中元素的数目. 若 $\alpha_1 = U_1$, 则找到最小割集.

(2) 当 $2 \leq k \leq N$, 若

$$\{i_1, \dots, i_k\} \in U_k \setminus U_{l=1}^{k-1} (\gamma_l \leftarrow U_{k-1}),$$

式中: γ_l 是所有 l 阶最小割集所构成的集合,

$$U_l = \{X: X \in 2^U, |X| = l\}, l = 1, \dots, k,$$

$$(\gamma_l \leftarrow U_{k-1}) = \{Y = X \cup Q: X \in \gamma_l, Q \in$$

$$U_{k-l}, |Y| = k\}, l = 1, \dots, k-1, \text{ 如果}$$

$$P(T=0 | Z_i = \dots = Z_k = 0, Z_m =$$

$$1, 1 \leq m \leq N, m \neq i_1, \dots, m \neq i_k) = 1,$$

$\{Z_{i_1}, \dots, Z_{i_k}\}$ 是 k 阶最小割集, 可以得出所有 k 阶最小割集为:

$$\{\{Z_{i_1}, \dots, Z_{i_k}\} | \{i_1, \dots, i_k\} \in \gamma_k \subset U_k\},$$

式中: γ_k 是所有 k 阶最小割集组成的集合. 假如

$$U_{l=1}^{k-1} (\gamma_l \leftarrow U_{k-1}) = U_k,$$

则可以判定已经找到所有的最小割集.

根据上述方法可找出所有最小割集, 共 33 个.

3 实例分析

以 A 市和 B 市政府发布的船舶污染事故应急预案为例, 运用本文提出的完备性评估方法, 对预案完备性进行评估.

逐项分析两预案的内容, A 预案包含的内容有: 适用范围、组织结构和责任、预防和预警、事故分级标准、应急响应程序、信息发布、响应终止、善后处置、污染索赔环境恢复、污染物处理、事故调查、总结评估、宣传培训、通讯保障、人员保护、设施安全、医疗保障、运输安全、奖惩和预案更新等诸多内容; B 预案包含的内容有: 编制依据和适用范围、应急处置程序、事故分级标准、应急响应流程、应急指挥部组成、善后处置、应急物资储备、污染索赔、环境恢复、污染物处理、通信安全、应急小组支持、设施安全、运输安全、事故调查报告等. 通过对比表 1 找出 A 应急预案中缺失的基本事件, 得出该预案缺失的基本事件有 7 个: X14、Y224、X35、Y372、Y413、Y421、Y423; B 预案缺失的基本事件有 18 个: X11、X14、X36、Y111、Y123、Y224、X35、Y372、Y373、Y374、Y413、Y421、Y423、Y433、Z1231、Z1232、Z3712、Z3713. 根据表 1 可得到这些基本事件的权重.

根据标准贝叶斯网络结构, 并利用式(2)计算两市船舶污染事故应急预案的完备度.

预案 A

$$P_{\text{completeness}} = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{W(e_i)}{m}\right) \times 100\% =$$

$$\left(1 - \frac{1+0.2749+\dots+0.1103}{33}\right) \times 100\% = 87.49\%.$$

预案 B

$$P_{\text{completeness}} = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{W(e_i)}{m}\right) \times 100\% =$$

$$\left(1 - \frac{1+1+\dots+0.1976}{33}\right) \times 100\% = 66.94\%.$$

经过评估, A 市预案的完备性达到 87.49%, 完备性较高; B 市预案的完备度只有 66.94%, 完备性有待提高. A、B 两市可对照评估结果进一步完善应急预案和体系. 如针对“未说明建立监视与预警系统”, 可能需要在应急体系中先建立监视预警系统, 在预案中明确建立船舶污染事故的监视预警系统. 而针对“未说明解除预警信息”, 有必要明确解除预警的条件和解除预警的相应流程等.

为验证本文方法的有效性, 采用文献[10,18]方法进行计算, 求得 A 市预案完备性为 87.12%和 87.96%, B 市预案完备度为 65.06%和 67.23%, 结果与本文计算结果接近, 表明本文方法有效.

4 结语

本文在广泛分析现有船舶污染事故应急预案, 综合专业应急人员、海上应急管理专家、学者意见的基础上, 系统梳理了船舶污染事故应急预案涉及的顶上事件、中间事件和基本事件以及它们之间的逻辑关系, 建立了故障树结构图, 并对故障树结构贝叶斯网络化. 依据建立的标准贝叶斯网络结构, 提出了一种识别应急预案缺失的基本事件和计算完备度的新方法, 既能用于辨析应急预案存在的不足, 指出应该改进和优化的部分, 还能量化评估预案的完备度, 找出实际的差距. 最后通过对两市船舶污染事故应急预案完备性的评估, 验证了本方法的实用性和有效性.

目前运用此方法来分析船舶污染事故应急预案的完备性时, 还需通过人工阅读应急预案来确立各项基本事件的构成. 随着人工智能的发展, 将来可通过人工智能来自动识别应急预案中各基本事件, 实现船舶污染事故应急预案的在线评估.

参考文献:

- [1] 防治船舶污染海洋环境管理条例[EB/OL]. [2019-10-12]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2017/content_5219154.htm.
- [2] 张红. 我国突发事件应急预案的缺陷及其完善[J]. 行政法学研究, 2008(3):9-15.
- [3] 王顺豪, 万瑛莹, 彭引. 基于网络层次分析法的高速公路应急预案评估[J]. 四川建筑, 2018, 38(1):79-82.
- [4] 孙艺博. 西安市地铁火灾事故应急预案质量评价与优化研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- [5] 郭子雪, 张强. 基于直觉模糊集的突发事件应急预案评估[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(22):64-69.
- [6] 高明, 李文云, 袁德君, 等. 使用故障树理论对电网调度自动化系统应急预案完备度的量化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17):58-63; 69.
- [7] 李盼, 樊建春, 刘书杰. 基于故障树与贝叶斯网络的钻井井塌事故的定量分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(1):143-149.
- [8] 周扬, 李宁, 吴吉东, 等. 中国自然灾害减灾救灾标准完备性评价[J]. 资源科学, 2012, 34(9):1741-1749.
- [9] Chang M C. De-aliasing in two-level factorial designs: A Bayesian approach[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2019, 203:82-90.
- [10] Roles A, ElAarag H. Coexistence with malicious and selfish nodes in wireless ad hoc networks: A Bayesian game approach[J]. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2017, 11(4):353-365.
- [11] 谢斌, 张明珠, 严于鲜. 贝叶斯网络对故障树方法的改进[J]. 燕山大学学报, 2004, 28(1):55-58.
- [12] 张磊. 突发事件应急预案评估问题研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [13] 国务院有关部门和单位制定和修订突发公共事件应急预案框架指南[EB/OL]. [2019-10-12]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2008-03/28/content_1216.htm.
- [14] 韩芳, 党德鹏, 刘吉夫, 等. 数字化应急预案完备性评价系统设计与开发[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(8):1918-1921.
- [15] 王鸥. 纺织企业突发环境事件应急预案评价体系研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [16] Perry R W, Lindell M K. Preparedness for emergency response: Guidelines for the emergency planning process[J]. Disasters, 2003, 27(4):336-350.
- [17] 王若愚. 民用机场火灾应急预案评估研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- [18] 夏保成, 牛帅印, 张永领, 等. 我国专项应急预案完备性评估指标与方法探讨[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(1):19-24.

Evaluation method based on Bayesian network for completeness of emergency plan of ship pollution accident

WANG Siqu^{1,2,3,4}, ZHANG Zhiming^{1,2,3,4}, ZHENG Pengjun^{1,2,3,4*}

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.Ningbo Collaborative Innovation Center for Port and Shipping Services System, Ningbo 315832, China;

3.National Traffic Management Engineering & Technology Research Center Ningbo University Sub-center, Ningbo 315832, China;

4.Jiangsu Province Collaborative Innovation Center for Modern Urban Traffic Technologies, Nanjing 210096, China)

Abstract: The fault tree structure of the emergency plan is structured according to the events involved in the ship pollution accident emergency plan and the logical relationship between the incidents. The fault tree structure is transformed into a Bayesian network, in which a standard Bayesian network diagram is constructed, and a new method for assessing the completeness of emergency plans for ship pollution accidents is proposed. The method is used to analyze the missing events of the emergency plan for ship pollution accidents taking place in cities, and to evaluate the completeness of the plan, as well as to compare it with other evaluation methods, with the effectiveness of the proposed method being verified.

Key words: ship pollution; emergency plan assessment; fault tree analysis method; Bayesian network; completeness evaluation model

(责任编辑 史小丽)