

文章编号:1005-9865(2024)04-0057-12

# 基于离散度聚合算法的海洋核动力平台 拖航作业风险分析

郭冲冲<sup>1</sup>, 武文华<sup>1, 2</sup>, 吕柏呈<sup>1</sup>, 曹光明<sup>3</sup>, 罗起航<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315016; 3. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

**摘要:**为了解决海洋核动力平台(MNPP)在拖航作业中面临的风险问题,提出了一种基于离散度聚合算法(DAM)的拖航作业风险分析方法。该方法采用故障树表示风险系统的层次关系,并映射为动态贝叶斯网络(DBN)结构;采用模糊集理论和专家评价克服缺乏客观统计数据的局限,基于离散度聚合方法确定模糊动态贝叶斯网络参数。针对建立的模糊动态贝叶斯网络模型,进行影响强度分析、因果推理分析、诊断推理分析和敏感性分析,得到拖航作业过程中最可能出现的风险路径、事故动态演化过程以及关键风险因素等。同时,给出了针对性风险控制措施,为现场作业和管理人员提供参考。

**关键词:**海洋核动力平台;离散度聚合算法;动态贝叶斯网络;拖航作业;风险分析

中图分类号:P751 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2024.04.006

## Risk analysis of towing operations for marine nuclear power platforms based on discrete aggregation method

GUO Chongchong<sup>1</sup>, WU Wenhua<sup>1, 2</sup>, LYU Baicheng<sup>1</sup>, CAO Guangming<sup>3</sup>, LUO Qihang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China; 3. Wuhan Second Ship Design Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** In order to address the risk issues faced by marine nuclear power platforms (MNPP) during towing operations, a risk analysis method based on the discrete aggregation method (DAM) is proposed. This method utilizes fault trees to represent the hierarchical relationships of the risk system and maps them into a dynamic Bayesian network (DBN) structure. By employing fuzzy set theory and expert evaluation to overcome the limitations of lacking objective statistical data, the parameters of the fuzzy dynamic Bayesian network are determined based on the discrete aggregation method. With the established fuzzy dynamic Bayesian network model, impact intensity analysis, causal reasoning analysis, diagnostic reasoning analysis, and sensitivity analysis are conducted to identify the most likely risk paths, dynamic evolution processes of accidents, and key risk factors during towing operations. Meanwhile, targeted risk control measures are provided as references for on-site operators and management personnel.

**Keywords:** marine nuclear power platform; discrete aggregation method; dynamic Bayesian networks; towing operations; risk analysis

海洋核动力平台(marine nuclear power platform,简称 MNPP)可以为海上油气开发、偏远岛屿和海水淡化

收稿日期:2023-06-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFA1003501);国家自然科学基金项目(U1906233);山东省联合基金项目(2019JZZY010801);深圳市自由探索类基础研究项目(2021Svup021);高等学校基本科研业务费项目(DUT22ZD209)

作者简介:郭冲冲(1993—),男,博士研究生,研究方向为海洋核动力平台风险分析。E-mail: guoccc@mail.dlut.edu.cn

通信作者:武文华(1973—),男,博士,教授,主要从事工业装备结构健康监测和运维分析研究。E-mail: lxyuhua@dlut.edu.cn

等提供稳定的能源供给,是极具潜力的海洋装备<sup>[1]</sup>。由于回坞维修维护或更换作业地点等原因,MNPP会进行海上拖航作业,如图1所示。拖航是大型海工平台水上移动或迁航的主要方式,拖航作业风险高,作业期间的事故防控工作极具挑战<sup>[2]</sup>。拖航过程发生事故,往往会造成被拖物(船)失控,有时还会导致船舶碰撞、搁浅、沉船,甚至人员伤亡及海洋环境污染等更为严重的后果。因此,针对MNPP拖航作业的风险分析十分必要。一般而言,拖航系统是由船体甲板前部的左右2个SMIT向前依次连接2条龙须链(防磨链)经由导缆孔分别与一块钢质三角板连接。三角板的另一端与过桥缆及拖轮的主拖缆连接。为了使连接作业安全,需要保证6 d以上的气候窗,并且在作业过程中每12 h提供一次天气预报,实时监控孤立波与风浪流。基于中国船级社《船舶与海上设施法定检验规则》<sup>[3]</sup>,在主拖船主机负荷发挥75%的情况下,静水中的拖航速度可达到3.09 m/s(6.0 kn)。

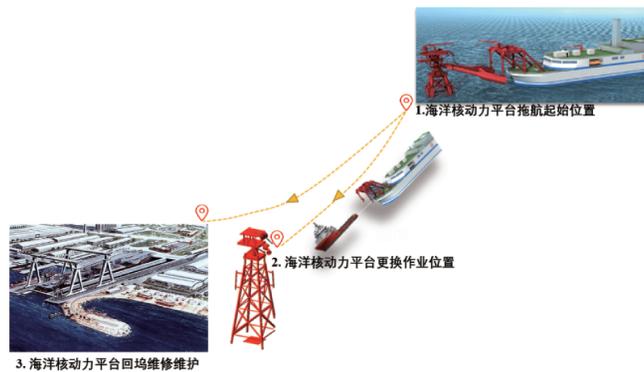


图1 海洋核动力平台拖航作业

Fig. 1 Marine nuclear power platform towing operation

目前,国内一些学者针对海工平台的拖航作业风险开展了大量研究。李红涛和余建星<sup>[4]</sup>以中国南海某平台组块海上拖航作业为例,进行了风险评估与计算,进而提出了适用于中国海洋石油工程项目的风险值标准。陈卫东等<sup>[5]</sup>针对海上拖航作业提出了一套基于因子分析法和BP神经网络相结合的风险辨识方法,实现对海上拖航作业的风险控制。王刚等<sup>[6]</sup>将风险矩阵评估方法引入工作安全分析(job safety analysis,简称JSA)过程,结合自升式海洋平台拖航作业及行业评价指标特点,得出不同作业步骤各类风险重要度和风险水平。李伟等<sup>[2]</sup>提出一种基于领结法(bowtie)和改进的以可靠性为中心的维修(reliability centered maintenance,简称RCM)风险控制方法,对平台拖航风险进行了有效识别、分析和控制。徐国庆等<sup>[7]</sup>从人、机、环境、管理4个方面构建海上拖航作业安全评估指标体系,提出基于误差反向传播算法的海洋平台拖航作业安全评估模型。上述研究对于海工平台拖航作业风险控制起到了积极作用,但研究成果侧重于静态风险分析。同时,一些相对较新的技术,如马尔科夫链、petri网络、贝叶斯网络(Bayesian networks,简称BN)和动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian networks,简称DBN)等,还没有被引入到拖航作业风险分析中。

在定量风险评估中要求风险因素具有精确的概率,一般可以从故障数据库和相关文献手册获得。在用于风险评估的数据缺乏时,可以通过综合模糊评价的方式来获得主观概率。目前,模糊集理论已经成为风险评估中处理故障概率不确定性的主流技术。群体决策的一个重要步骤,是将专家个人的模糊意见汇总为群体共识。各种聚合技术已经被开发出来<sup>[8]</sup>,包括算数平均法、线性意见聚合法、最大最小德尔菲法、相似性聚合法和模糊分析层次过程等。但是,这些聚合算法忽略了专家意见之间的离散程度,这是衡量专家组形成共识的重要指标,可以使得聚合结果不仅倾向于高可靠性专家意见,也会倾向于离散程度更小的专家意见。

因此,文中建立了一个模糊动态贝叶斯网络(fuzzy dynamic bayesian networks,简称FDBN)模型,进行MNPP拖航作业的动态风险分析。同时,提出了一种离散度聚合算法(discrete aggregation method,简称DAM),来解决群体决策下专家意见发生冲突的难题,也更好地降低专家评价的主观性。最后,利用DBN中的预测、诊断和敏感度分析技术,模拟了整个风险系统的演化过程。并针对相应风险制定安全控制措施,以有效降低MNPP在拖航作业中面临的危险。

## 1 理论方法

### 1.1 模糊集理论

模糊集理论(fuzzy set theory,简称FST)可以对模糊事件进行数学语言的描述和分析,在缺乏统计数据时表达不确定问题<sup>[9]</sup>。在目前不同类型的模糊成员函数中,最常见的是三角形和梯形隶属函数<sup>[10]</sup>。式(1)为梯形模糊数 $\tilde{R} = (a, b, c, d)$ 的隶属函数。

$$\mu_{\tilde{R}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \text{ 或 } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{x-d}{c-d} & c \leq x < d \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a, b, c, d$ 为梯形模糊数区间的4个值。

### 1.2 动态贝叶斯网络(DBN)

BN是一种概率推理方法,由节点、有向弧和条件概率组成,表示一组随机变量及其之间的条件依赖关系<sup>[11]</sup>。在数学上,BN表示变量 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 之间的概率因果关系,反映每个节点及其父节点之间的条件概率分布。BN的联合概率分布为:

$$P = \prod_{i=1}^n P[X_i | P_a(X_i)] \quad (2)$$

DBN是对普通BN的长期扩展,引入时间依赖性进行动态建模,基于之前的状态对当前条件进行推理分析<sup>[12]</sup>。通常,考虑每个变量相邻的2个时间片,并展开DBN直到第 $t$ 个时间片时( $n$ 个节点),即可得到联合概率分布公式:

$$P(X_{1:t}) = \prod_{t=1}^t \prod_{i=1}^n P[X_i^t | P_a(X_i^t)] \quad (3)$$

式中: $X_i^t$ 为 $t$ 时间片内的第 $i$ 个节点; $P_a(X_i^t)$ 是网络中 $X_i^t$ 的父节点。

DBN具有诊断分析能力,可以在观察到新的证据时使用贝叶斯定理更新变量的先验概率,得到节点 $X_i^t$ 在任意时间片 $t$ 上的后验概率,如式(4)所示:

$$P(X_{1:t} | E) = \frac{P(X_{1:t}, E)}{P(E)} = \frac{P(X_{1:t}, E)}{\sum_{X_{1:t}} P(X_{1:t}, E)} \quad (4)$$

式中: $E$ 为证据(新的观测量)。

### 1.3 模糊意见离散度聚合算法(DAM)

提出了一种模糊意见离散度聚合算法,通过计算群体决策下专家意见模糊数的标准差,得到相对离散度系数进而汇总新的群体共识意见(模糊数)。选取的专家组中,每位专家 $E_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的权重为 $W_{E_i} (i = 1, 2, \dots, n)$ ,并在征询过程中使用标准梯形模糊数来表示语言术语值。那么,根据以下DAM得到汇总的模糊数:

1)建立所有专家的模糊数矩阵 $A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} \tilde{R}_1 \\ \tilde{R}_2 \\ \vdots \\ \tilde{R}_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} a_{11} & b_{12} & c_{13} & d_{14} \\ a_{21} & b_{22} & c_{23} & d_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & b_{n2} & c_{n3} & d_{n4} \end{bmatrix}_{n \times 4} \quad (5)$$

式中: $A$ 代表 $n$ 个专家对于同一基本事件评价的集合; $\tilde{R}_i (i = 1, 2, \dots, n) = [a_{i1}, b_{i2}, c_{i3}, d_{i4}]$ 为第 $i$ 个专家的标准梯形模糊数。

2)计算所有专家模糊数矩阵的算数平均值 $\bar{X}$ 。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A(i, 1:4) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{i1}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_{i2}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{i3}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{i4} \right] = [\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}] \quad (6)$$

式中： $\bar{X}$ 代表所有专家模糊意见的平均值，反映专家意见的集中趋势； $[\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}]$ 为平均模糊数。当然，式(6)还可以拓展到几何平均值、调和平均值、加权平均值、平方平均值以及指数平均值等。

3) 计算所有专家模糊意见的(绝对)离散度  $D_i$ 。

$$D_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^4 [A(i,j) - \bar{X}_j]^2}{3}} = \sqrt{\frac{(a_{i1} - \bar{a})^2 + (b_{i2} - \bar{b})^2 + (c_{i3} - \bar{c})^2 + (d_{i4} - \bar{d})^2}{3}} \quad (7)$$

式中： $D_i$ 为第  $i$  个专家模糊意见离散度，本质上是第  $i$  个专家模糊意见的标准差，反映了这个专家远离中心值的程度。研究认为，专家模糊意见的标准差越小，则距离群体意见的中心值越近，其可信度越高；反之，离散度越大，可信度越低。

令  $W_{D,i} = \frac{1}{D_i}$ ，即离散度倒数。 $D_i$  越小，则  $W_{D,i}$  越大，模糊意见就可信度越高。

4) 计算所有专家模糊意见的加权相对离散度  $R_{D,i}$ 。

$$R_{D,i} = \frac{W_{D,i} \cdot W_{E,i}}{\sum_{i=1}^n W_{D,i} \cdot W_{E,i}} \quad (8)$$

式中： $W_{E,i}$ 为专家  $E_i$  的权重。

这里把专家权重与绝对离散度倒数相结合，即权重离散度，进而获得更加合理可靠的估计。从式(7)~(8)中可以看出，如果某个专家的离散度  $D$  越小，则加权相对离散度  $R_D$  越大，这意味给出的意见更可信。

5) 计算所有专家的共识度系数程度  $C_{C,i}$ 。

$$C_{C,i} = \beta \cdot W_{E,i} + (1 - \beta) \cdot R_{D,i} \quad (9)$$

式中： $C_{C,i}$ 为第  $i$  个专家的共识度系数程度； $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) 为松弛因子<sup>[13]</sup>，是平衡每个专家重要程度(权重)和加权相对离散度的关键因素。由于  $\beta$  决定了  $W_{E,i}$  和  $R_{D,i}$  之间哪个更关键，所以  $\beta$  值需要由决策者根据偏好预先设定。当  $\beta = 1$  时， $C_C$  完全由专家权重  $W_E$  决定。相反，当  $\beta = 0$  时， $C_C$  完全由专家意见的离散程度决定。

6) 计算专家意见的汇总结果，可以得到“总体”的模糊数  $\tilde{R}$ <sup>[14]</sup>：

$$\tilde{R} = \sum_{i=1}^n (C_{C,i} \times \tilde{R}_i) = C_{C,1} \times \tilde{R}_1 + C_{C,2} \times \tilde{R}_2 + \cdots + C_{C,n} \times \tilde{R}_n \quad (10)$$

#### 1.4 模糊失效概率

解模糊是将专家们“汇总”的模糊数  $\tilde{R}_{all} = (a, b, c, d)$  转换为模糊可能性分数(fuzzy probability score, 简称FPS)。采用了面积中心法(center of area, 简称CoA)解模糊技术。梯形模糊数解模糊可以被表示为<sup>[15]</sup>：

$$P_{FPS} = \frac{\int_a^b \frac{x-a}{b-a} x dx + \int_b^c x dx + \int_c^d \frac{d-x}{d-c} x dx}{\int_a^b \frac{x-a}{b-a} dx + \int_b^c dx + \int_c^d \frac{d-x}{d-c} dx} = \frac{1}{3} \frac{(d+c)^2 - dc - (a+b)^2 + ab}{(d+c-a-b)} \quad (11)$$

Onisawa<sup>[16]</sup>提出将FPS转换为模糊失效概率(fuzzy failure probability, 简称FFP)的方法，被许多学者广泛应用于模糊量化风险分析。通常，转换公式<sup>[15]</sup>为：

$$P_{FFP} = \begin{cases} \frac{1}{10^K} & P_{FPS} \neq 0 \\ 0 & P_{FPS} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $K$ 是一个常数。

然而，Onisawa公式并不适用于所有场合，Yu等<sup>[17]</sup>提出了根据DNV规范改进计算  $K$  的方法。

$$K = \begin{cases} -0.72 \ln P_{FPS} + 2.839 & 0 \leq P_{FPS} \leq 0.2 \\ 4.523 - 3.287 P_{FPS} & 0.2 < P_{FPS} \leq 0.8 \\ 3.705 [(1 - P_{FPS}) / P_{FPS}]^{0.445} & 0.8 < P_{FPS} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

## 2 MNPP拖航作业风险分析

### 2.1 危害识别

根据大型平台相关操作规程和拖航经验,拖航作业一般包括准备就位、缆接、起拖和航行4个重要环节。每个作业环节的分析资料主要来自2个方面:1)同类型系泊方式浮式生产储卸油装置(FPSO)的工程应用案例、历史统计信息以及相关文献报告等;2)该领域专家小组的经验知识,这些专家来自大学、研究所、海洋石油公司以及现场作业单位等。根据上述资料对MNPP拖航作业的风险因素进行完备分析,并按照危险类别进行分类,如表1所示。

表 1 MNPP 拖航作业的风险因素  
Tab. 1 Risk factors of MNPP towing operations

叶节点	中间节点	根节点
		地震(X1)
		风暴(X2)
	恶劣海况(M1)	大雾(X3)
		凌汛(X4)
		拖具失效(X5)
	连接失效(N1)	拖耳失效(X6)
		异物阻断(X7)
	主拖缆断裂(M2)	材料缺陷(X8)
		制造缺陷(X9)
	载荷过大(N3)	加车过快(X10)
		拖缆长度不匹配(X11)
MNPP拖航作业事故(T)		控制系统故障(X12)
	拖航设备故障(M3)	动力系统故障(X13)
		备用设备故障(X14)
		舵系统故障(X15)
		拖船与平台距离较近(X16)
	平台碰撞(N4)	转向角过大(X17)
	碰撞(M4)	偏离航线(X18)
		天气影响(X19)
	船舶碰撞(N5)	航道船只(X20)
		人员落水(X21)
	人为失误(M5)	管理失误(X22)
		操作不当(X23)
		检查不充分(X24)

2.2 DBN 结构

将 MNPP 拖航作业事故定义为顶事件,采用故障树模型表示风险因素的层次关系,故障树模型如图 2 所示。根据文献[18]将故障树的基本事件、中间事件和顶事件分别映射为 DBN 的根节点、中间节点和叶节点,如图 3 所示。

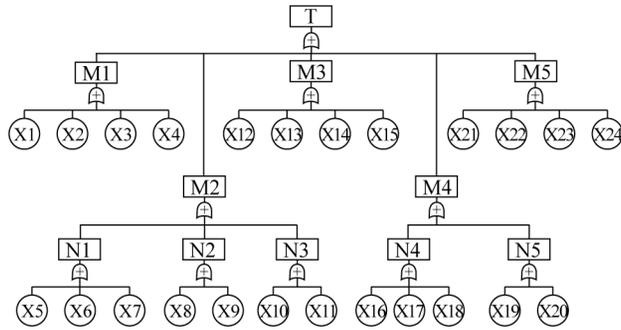


图 2 MNPP 拖航作业事故的故障树模型  
Fig. 2 Fault tree model of accidents in MNPP towing operations

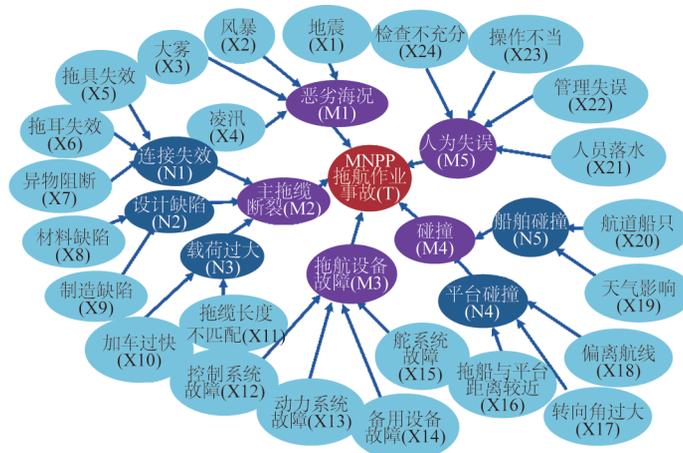


图 3 MNPP 拖航作业事故的 DBN 模型  
Fig. 3 DBN model of accidents in MNPP towing operations

2.3 专家意见

采用 FST 将专家对事件判断的定性语言转化为模糊区间,利用标准梯形模糊数来定义专家语言术语和模糊成员函数之间的映射关系,然后选择 7 个术语组成的语言变量用于专家判断<sup>[19]</sup>(见表 2)。

表 2 语言值对应的标准梯形模糊数  
Tab. 2 Standard trapezoidal fuzzy numbers corresponding to linguistic values

语言值	模糊数 $\tilde{R}$			
	$a$	$b$	$c$	$d$
非常低 (VL)	0	0	0.1	0.2
低 (L)	0.1	0.2	0.2	0.3
中低 (ML)	0.2	0.3	0.4	0.5
中 (M)	0.4	0.5	0.5	0.6
中高 (MH)	0.5	0.6	0.7	0.8
高 (H)	0.7	0.8	0.8	0.9
非常高 (VH)	0.8	0.9	1.0	1.0

选取来自大学、研究所、海洋石油公司以及现场作业单位等不同领域的 5 位专家。根据专家的具体信息<sup>[20]</sup>计算各位专家的权重  $W_{E,i} (i = 1, 2, \dots, 5)$ , 见表 3。采用书面信函的方式匿名咨询每位专家, 他们使用表 2 中的 7 级语言变量(VL、L、ML、M、MH、H 和 VH)对基本事件做出判断。表 4 第 2 列展示了 5 位专家对所有基本事件发生概率的意见。

表 3 专家信息及权重  
Tab. 3 Expert information and weights

专家编号	专业位置	个人经验/a	教育水平	年龄	权重系数
E1	高级学者	25	博士	53	0.276 9
E2	高级学者	7	博士	35	0.215 4
E3	工程师	32	学士	54	0.230 8
E4	工程师	8	硕士	33	0.169 2
E5	工人	7	学士	29	0.107 7

表 4 根节点的专家评价、聚合模糊数与概率  
Tab. 4 Expert evaluation, aggregated fuzzy numbers and probabilities of the root nodes

根节点	专家评价(E1~E5)	聚合模糊数 $\tilde{R}_{all} = (a,b,c,d)$	模糊可能性分数 FPS	FFP 先验概率	后验概率
X1	VL L VL VL L	( 0.028, 0.056, 0.128, 0.228 )	0.113	$3.91 \times 10^{-5}$	$5.58 \times 10^{-4}$
X2	L VL VL VL VL	( 0.018, 0.036, 0.118, 0.218 )	0.101	$3.22 \times 10^{-5}$	$7.30 \times 10^{-4}$
X3	L ML M ML L	( 0.202, 0.302, 0.354, 0.454 )	0.328	$3.59 \times 10^{-4}$	$2.28 \times 10^{-2}$
X4	VL L L VL ML	( 0.074, 0.140, 0.181, 0.281 )	0.171	$7.73 \times 10^{-5}$	$2.91 \times 10^{-3}$
X5	L M L ML M	( 0.212, 0.312, 0.342, 0.442 )	0.327	$3.56 \times 10^{-4}$	$1.34 \times 10^{-2}$
X6	ML ML L ML ML	( 0.185, 0.285, 0.370, 0.470 )	0.327	$3.58 \times 10^{-4}$	$2.21 \times 10^{-2}$
X7	M ML L ML L	( 0.212, 0.312, 0.365, 0.465 )	0.338	$3.88 \times 10^{-4}$	$1.42 \times 10^{-2}$
X8	L ML VL ML L	( 0.115, 0.198, 0.246, 0.346 )	0.227	$1.67 \times 10^{-4}$	$4.84 \times 10^{-3}$
X9	L L VL L ML	( 0.093, 0.179, 0.199, 0.299 )	0.193	$9.50 \times 10^{-5}$	$3.89 \times 10^{-3}$
X10	ML M M ML MH	( 0.338, 0.438, 0.480, 0.580 )	0.459	$9.68 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-1}$
X11	M ML M ML M	( 0.332, 0.432, 0.466, 0.566 )	0.449	$8.98 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-1}$
X12	M ML L M L	( 0.245, 0.345, 0.381, 0.481 )	0.363	$4.68 \times 10^{-4}$	$6.15 \times 10^{-2}$
X13	L ML ML VL ML	( 0.144, 0.232, 0.301, 0.401 )	0.270	$2.32 \times 10^{-4}$	$2.43 \times 10^{-2}$
X14	VL L VL L VL	( 0.034, 0.068, 0.134, 0.234 )	0.120	$4.32 \times 10^{-5}$	$5.33 \times 10^{-3}$
X15	L ML ML M L	( 0.193, 0.293, 0.352, 0.452 )	0.322	$3.44 \times 10^{-4}$	$3.81 \times 10^{-2}$
X16	VL ML L ML ML	( 0.132, 0.211, 0.284, 0.384 )	0.253	$2.04 \times 10^{-4}$	$8.67 \times 10^{-2}$
X17	ML VL M L ML	( 0.186, 0.270, 0.336, 0.436 )	0.308	$3.09 \times 10^{-4}$	$6.48 \times 10^{-3}$
X18	L ML VL M L	( 0.141, 0.224, 0.264, 0.364 )	0.249	$1.97 \times 10^{-4}$	$2.83 \times 10^{-3}$
X19	ML ML MH ML MH	( 0.289, 0.389, 0.489, 0.589 )	0.439	$8.31 \times 10^{-4}$	$1.92 \times 10^{-2}$
X20	M ML VL L L	( 0.167, 0.249, 0.291, 0.391 )	0.276	$2.41 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-2}$
X21	M L MH L VL	( 0.244, 0.335, 0.362, 0.462 )	0.351	$4.28 \times 10^{-4}$	$2.02 \times 10^{-2}$
X22	M VL M M L	( 0.299, 0.382, 0.399, 0.499 )	0.396	$6.00 \times 10^{-4}$	$7.65 \times 10^{-2}$
X23	M ML M M L	( 0.328, 0.428, 0.452, 0.552 )	0.440	$8.40 \times 10^{-4}$	$8.19 \times 10^{-2}$
X24	M ML M L M	( 0.313, 0.413, 0.438, 0.538 )	0.426	$7.53 \times 10^{-4}$	$3.71 \times 10^{-2}$

不同专家具有不同的经验、立场、知识背景和其他因素,所以对同一事件可能有不同的判断,因此采用 1.3 节所提出的 DAM 来汇总 5 位专家们的意见,使用式(5)~(10)计算聚合的模糊数  $\tilde{R} = (a, b, c, d)$ ,其中选取松弛因子  $\beta = 0.5$ ,计算结果见表 4 的第 3 列。

## 2.4 DBN 参数

### 2.4.1 根节点(基本事件)先验概率

根据 1.4 节方法,计算根节点(基本事件)的先验概率。根据式(11)计算 FPS,见表 4 的第 4 列;根据式(12)~(13)计算 FFP,见表 4 的第 5 列。

### 2.4.2 条件概率表与动节点状态转移概率表

DBN 的网络参数还包括中间节点的条件概率表(conditional probability table,简称 CPT),文献[21]定义了新的条件概率评分标准。由于篇幅有限,表 5 显示了 M4(碰撞)的 CPT。同理,上述方法可以得到其他中间节点的 CPT。表中 State0 代表事件不发生,State1 代表事件发生。对于动节点 X16(拖船与平台距离较近),其状态随时间而变化。同理确定动节点 X16 的转移概率表,见表 6。

表 5 节点 M4(碰撞)的条件概率  
Tab. 5 Conditional probability for node M4 (collision)

N4	N5	M4	
		State0	State1
State0	State0	1	0
	State1	0.647 7	0.352 3
State1	State0	0.816 9	0.183 1
	State1	0	1

表 6 节点 X16(拖船与平台距离较近)的状态转移概率  
Tab. 6 Transition probability for node X16 (the tug is close to platform)

X16, $t-1$	X16, $t$	
	State0	State1
State0	0.997	0.003
State1	0.350	0.650

## 3 计算结果与讨论

使用 GeNIe<sup>[22]</sup>软件进行 DBN 模型的推理。将根节点的先验概率、中间节点的条件概率表以及动节点的状态转移概率表输入 DBN 模型,进行 MNPP 拖航作业的风险分析。

### 3.1 影响强度分析

图 4 显示了 MNPP 拖航作业事故 FDBN 的影响强度分析。图 4 中的有向弧越宽,其所连接节点之间的影响强度也越大,路径故障的可能性也就越大。

从图 4 可以看出,最可能导致拖航作业事故的路径是:

1) X10/X11(加车过快/拖缆长度不匹配)→N3(载荷过大)→M2(主拖缆断裂)→T(MNPP 拖航作业事故)。

2) X19/X20(天气影响/航道船只)→N5(船舶碰撞)→M4(碰撞)→T(MNPP 拖航作业事故)。

3) X8/X9(材料缺陷/制造缺陷)→N2(设计缺陷)→M2(主拖缆断裂)→T(MNPP 拖航作业事故)。

4) X16(拖船与平台距离较近)→N4(平台碰撞)→M4(碰撞)→T(MNPP 拖航作业事故)。

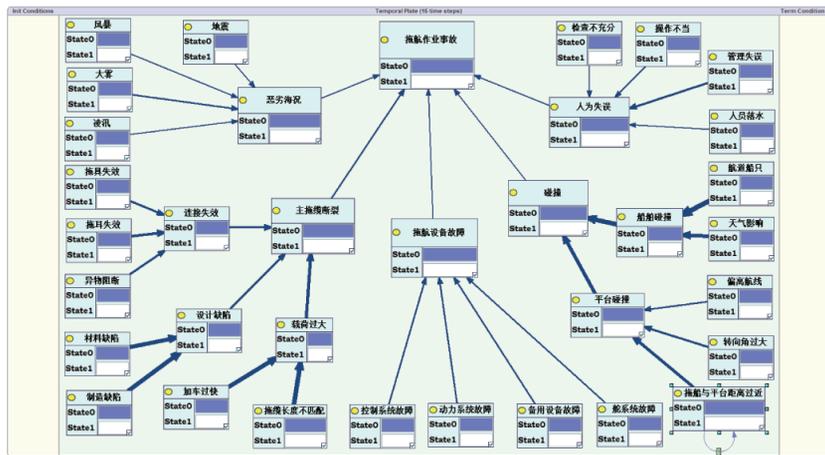


图4 MNPP拖航作业事故FDBN的影响强度分析

Fig. 4 Impact intensity analysis of accidents in MNPP towing operations FDBN

### 3.2 因果推理分析

在FDBN模型中,根据拖航作业的工期设置了15个时间片,每个时间片为1h。图5展示了T(MNPP拖航作业事故)概率的动态变化过程。从图5可以看出,拖航作业事故概率在整个作业期间逐渐增加,在15h内从最初的 $6.158 \times 10^{-4}$ 增加到 $8.625 \times 10^{-4}$ 。

图6展示中间节点M1~M5在最后一个时间片的概率。由图6可以看出,中间节点M4(碰撞)的概率最大( $7.353 \times 10^{-4}$ ),其他依次排序为M5(人为失误)、M2(主拖缆断裂)、M3(拖航设备故障)和M1(恶劣海况)。因此,M4在拖航作业中最可能发生,要重点关注拖航过程中的碰撞风险。在拖航过程中应选择白天视野开阔时通过交会水域,并在前方来船时及时警戒避让,同时要实时监测平台与拖轮间的距离、航向与速度,采取有效措施降低碰撞风险。值得关注的是,针对M2,学者进行拖缆结构力学模型的强度设计,通过增大安全系数来增加结构安全裕量,综合考虑所有可能致使拖缆载荷过大的因素。

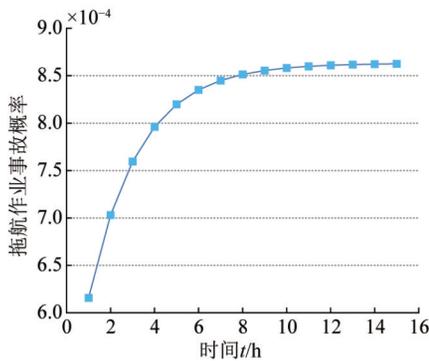


图5 叶节点(T)概率变化

Fig. 5 Probability changes of leaf node (T)

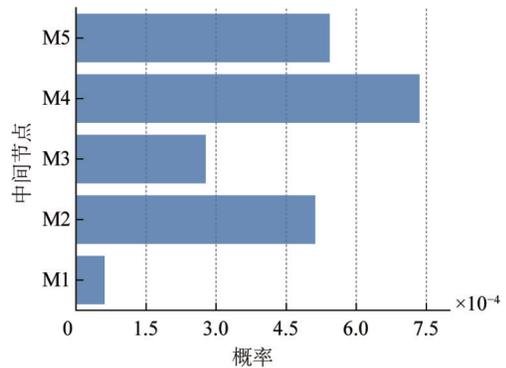


图6 中间节点(M1~M5)在t=15 h的概率

Fig. 6 Probability of intermediate nodes (M1~M5) at t=15 h

### 3.3 诊断推理分析

假设叶节点发生,叶节点T的概率被实例化为1,然后进行诊断推理得到根节点在最后一个时间片的后验概率 $P(X_i^{t=15}|T = State1)$ ,更新结果在表4的最后一列。根节点的先验概率和后验概率对比如图7所示,左纵轴表示先验概率,右纵轴表示后验概率。由图7分析可知,概率增加比较显著的基本事件是X16(拖船与平台距离较近)、X11(拖缆长度不匹配)、X10(加车过快)、X7(异物阻断)和X5(拖具失效),因此这些节点是造成拖航作业事故最可能的原因。其中,造成X10的原因在很大程度上取决于作业人员的现场操作经验,当加车过快的程度严重影响到正常作业时属于操作不当,但也存在拖航设备故障致使加车过快。利用先验概率和后验概率计算概率模糊异化比 $R_{\theta}(X_i) = [\pi(X_i) - \theta(X_i)] / \theta(X_i)$ , $\pi(X_i)$ 为后验概率, $\theta(X_i)$ 为先验概率。根据 $R_{\theta}$ 可以确定导致拖航作业事故的关键节点,如图8所示。由图8可以看出,除了节点X16、X11和

X10之外, X12(控制系统故障)、X14(备用设备故障)和X22(管理失误)也是造成拖航作业事故的重要原因。

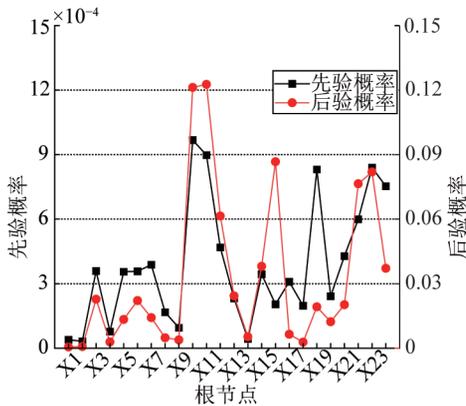


图7 根节点的先验概率与后验概率对比

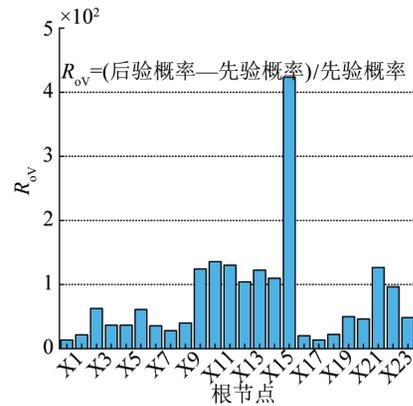


图8 根节点的概率模糊化比

Fig. 7 Comparison of prior and posterior probabilities at the root node Fig. 8 Probability fuzzification ratio of variation of root nodes

在上述诊断分析的基础上,应采取以下几项预防措施来降低拖航作业事故发生的概率:1)实时监测平台与拖轮间距离,在距离较近时应及时预报预警;2)拖轮应该适当增放主拖缆长度,防止主拖缆和拖带索具受到拉力突变而损伤或发生断缆;3)拖轮船长在操纵上应逐渐加车,要避免快速加车,尽量使主拖缆及索具逐渐带力,直至定速、匀速航行;4)应加强对拖带索具的养护,并定期登记检查,使其保持良好的适用状态;5)规范海上拖航作业人员的行为,提高安全意识和技能。

### 3.4 敏感性分析

将根节点  $X_i$  的证据设置为 State=0 或 State=1,代表该变量发生与否,同时计算这2种状态下T拖航作业事故发生的概率  $P(T^{t=15} | X_i = \text{State}0)$  和  $P(T^{t=15} | X_i = \text{State}1)$ 。图9展示了根节点的敏感度分析结果,左纵轴表示根节点拖航作业事故不发生条件下T的概率,右纵轴表示根节点拖航作业事故发生条件下T的概率。由图9可以看出, X11(拖缆长度不匹配)、X12(控制系统故障)、X22(管理失误)、X10(加车过快)和X14(备用设备故障)是影响拖航作业事故的关键因素。这与诊断分析中的结果吻合。

同时,对中间节点 M1~M5 进行敏感度分析,计算得到  $P(T^{t=15} | M_i = \text{State}0)$  和  $P(T^{t=15} | M_i = \text{State}1)$ ,如图10所示。当M2(主拖缆断裂)的概率从0增加到100%,拖航作业事故概率从  $6.04 \times 10^{-4}$  增加到  $5.05 \times 10^{-1}$ ;当M3(拖航设备故障)的概率从0增加到100%,拖航作业事故概率从  $7.52 \times 10^{-4}$  增加到  $3.99 \times 10^{-1}$ ;当M4(碰撞)的概率从0增加到100%,拖航作业事故概率从  $5.76 \times 10^{-4}$  增加到  $3.90 \times 10^{-1}$ 。由此可见, M2、M3 和 M4 对于结果T(拖航作业事故)有着较大贡献。换言之,当所有节点概率增大相同幅度时,贡献大的节点所造成的后果更加严重,所以需要管理人员进行重点关注。

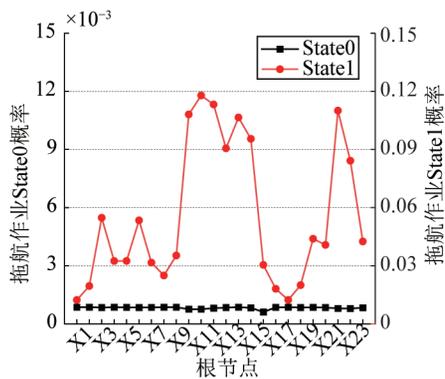


图9 根节点敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of root node

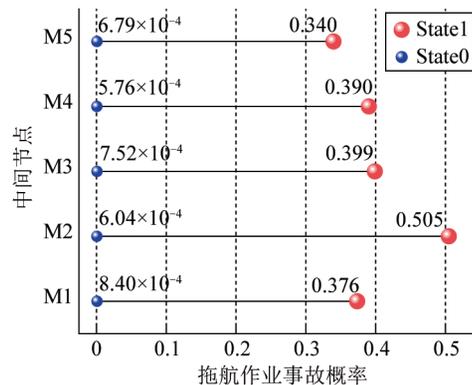


图10 中间节点敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of intermediate nodes

## 4 结 语

针对MNPP拖航作业中面临的风险问题开展研究,提出了一种模糊动态贝叶斯网络(FDBN)的风险分析方法。在处理专家意见汇总难题时提出了一种离散度聚合方法(DAM),从而得到新的群体共识意见。通过工程案例分析,主要结论如下:

1)最可能导致拖航作业事故的风险路径,X10/X11(加车过快/拖缆长度不匹配)→N3(载荷过大)→M2(主拖缆断裂)→T(MNPP拖航作业事故)。

2)拖航作业事故概率在整个作业期间从 $6.158 1 \times 10^{-4}$ 增加到 $8.625 7 \times 10^{-4}$ 。

3)诊断推理得到拖航作业事故最可能的原因为X16(拖船与平台距离较近)、X11(拖缆长度不匹配)、X10(加车过快)、X7(异物阻断)和X5(拖具失效)。

4)敏感度分析得到最关键的风险因素为X11(拖缆长度不匹配)、X12(控制系统故障)、X22(管理失误)、X10(加车过快)和X14(备用设备故障)。

文中研究工作仍存在一定不足,如历史统计数据缺乏导致严重依赖专家评估,致使风险分析在很大程度上取决于专家的专业技能和知识,这种主观性不可避免地造成模型分析出现偏差。因此,在今后的研究中将增加客观数据的比重,包括模型试验数据、数值模拟数据等。

### 参考文献:

- [1] 郭冲冲,武文华,程丛志,等. 基于模型试验的海洋核动力平台定位系统解脱作业关键指标分析[J]. 海洋工程, 2022, 40(6): 114-124. (GUO C C, WU W H, CHENG C Z, et al. Key performance indicators analysis for disconnection operation of marine nuclear power platform mooring system based on model test [J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(6): 114-124. (in Chinese))
- [2] 李伟,胡基平,郭云龙. 基于Bowtie和RCM的大型海工平台拖航作业风险控制[J]. 中国航海, 2019, 42(1): 63-67. (LI W, HU S P, GUO Y L. Risk control for large offshore platform towing on bowtie and RCM[J]. Navigation of China, 2019, 42(1): 63-67. (in Chinese))
- [3] 中国船级社. 船舶与海上设施法定检验规则[S]. 北京: 中国船级社, 2018. (China Classification Society. Regulations of statutory survey of ships and offshore installations[S]. Beijing: China Classification Society, 2018. (in Chinese))
- [4] 李红涛,余建星. 海上拖航过程的风险评估方法研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(3): 92-95. (LI H T, YU J X. A study on risk assessment method to the process of towing operation At sea[J]. Ocean Technology, 2005, 24(3): 92-95. (in Chinese))
- [5] 陈卫东,李俊梅,李跃根. 基于因子分析和BP神经网络的海洋平台拖航风险分析[J]. 海洋技术, 2010, 29(2): 107-111. (CHEN W D, LI J M, LI Y G. Analysis of offshore platform towing risk based on factor analysis and BP neural network [J]. Ocean Technology, 2010, 29(2): 107-111. (in Chinese))
- [6] 王刚,徐长航,陈国明. 基于工作安全分析和风险矩阵法的自升式平台拖航作业风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(10): 109-114. (WANG G, XU C H, CHEN G M. Risk assessment on towing operation of jack-up platform based on job safety analysis and risk matrix method [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(10): 109-114. (in Chinese))
- [7] 徐国庆,卢志远,吴晨辉. 基于误差反向传播算法的海上拖航风险[J]. 中国海洋平台, 2020, 35(4): 44-48. (XU G Q, LU Z Y, WU C H. Sea towing risk based on error back propagation algorithm[J]. China Offshore Platform, 2020, 35(4): 44-48. (in Chinese))
- [8] GUO X X, JI J, KHAN F, et al. Fuzzy Bayesian network based on an improved similarity aggregation method for risk assessment of storage tank accident[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 817-830.
- [9] 申建红,刘树鹏. 模糊动态贝叶斯网络在深基坑施工风险演化分析中的应用[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12): 4211-4221. (SHEN J H, LIU S P. Application of fuzzy dynamic Bayesian network in risk evolution analysis of deep foundation pit construction[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(12): 4211-4221. (in Chinese))
- [10] GUO C C, WU W H. Quantitative risk analysis of disconnect operations in a marine nuclear power platform using fuzzy Bayesian network[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(10): 1479.
- [11] 刘志军,纪卓尚,林焰. 基于贝叶斯网络的船舶机舱火灾风险分析[J]. 中国造船, 2010, 51(3): 199-205. (LIU Z J, JI

- Z S, LIN Y. Fire risk analysis in ship engine room based on Bayesian networks[J]. *Shipbuilding of China*, 2010, 51(3): 199-205. (in Chinese))
- [12] LI X, ZHANG Y, ABBASSI R, et al. Probabilistic fatigue failure assessment of free spanning subsea pipeline using dynamic Bayesian network[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 234: 109323.
- [13] HSU H M, CHEN C T. Aggregation of fuzzy opinions under group decision making[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 79(3): 279-285.
- [14] AYDIN M, AKYUZ E, TURAN O, et al. Validation of risk analysis for ship collision in narrow waters by using fuzzy Bayesian networks approach[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 231: 108973.
- [15] SUGENO M, KANG G T. Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 18(3): 329-345.
- [16] ONISAWA T. An approach to human reliability on man-machine systems using error possibility[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1988, 27(2): 87-103.
- [17] YU J X, DING H Y, YU Y, et al. A novel risk analysis approach for FPSO single point mooring system using Bayesian Network and interval type-2 fuzzy sets[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113144.
- [18] 白旭, 汤荣铿, 罗小芳, 等. 基于故障树分析和贝叶斯网络方法的半潜式钻井平台系统多状态可靠性分析[J]. *中国造船*, 2020, 61(2): 220-228. (BAI X, TANG R K, LUO X F, et al. Multi-state reliability analysis of semi-submersible drilling platform system based on FTA and BN[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(2): 220-228. (in Chinese))
- [19] SHI L, SHUAI J, XU K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 278: 529-538.
- [20] RAMZALI N, LAVASANI M R M, GHODOUSI J. Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing Fuzzy Event Tree Analysis[J]. *Safety Science*, 2015, 78: 49-59.
- [21] ONÍŠKO A, DRUZDZEL M J, WASYLUK H. Learning Bayesian network parameters from small data sets: application of Noisy-OR gates[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2001, 27(2): 165-182.
- [22] 刘昆, 纵帅, 王加夏, 等. 基于模糊故障树和贝叶斯网络的FPSO碰撞风险分析方法研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(4): 574-583. (LIU K, ZONG S, WANG J X, et al. Collision risk analysis method of deepwater general FPSO based on fuzzy fault tree and Bayesian network[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(4): 574-583. (in Chinese))