

文章编号:1005-9865(2022)01-0010-11

基于模糊 Petri 网络的 FPSO 单点多管缆干涉风险评估

余建星^{1,2}, 曾庆泽^{1,2}, 余 杨^{1,2}, 陈海成^{1,2}, 吴世博^{1,2}, 范海昭^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 天津市港口与海洋工程重点实验室, 天津 300350)

摘 要: FPSO 单点系泊系统水下管缆众多, 受环境等因素影响, 管缆容易发生拉伸、扭转、弯曲和碰撞, 引发干涉现象, 危及工程安全。针对 FPSO 单点多管缆干涉风险, 提出了基于模糊 Petri 网络的风险评估方法。首先, 辨识风险因素来构建风险评估指标体系, 并转化为模糊 Petri 网模型; 其次, 采用层次分析法确定风险因素的常权重, 并引入模糊置信结构来提高专家主观评价的准确性; 然后, 将变权理论与模糊推理算法相结合来迭代求解库所可信度和状态矩阵; 最后, 以南海某内转塔式 FPSO 为例进行了风险评估。结果表明: 该 FPSO 的风险评估等级为中等, 环境与设备因素是影响管缆干涉的主要因素。通过风险排序结果对综合评估值较高的风险指标提出了风险控制措施, 可有效降低管缆干涉风险发生的概率与危害。

关键词: FPSO 单点系泊系统; 管缆干涉; 模糊 Petri 网; 风险评估

中图分类号: P751; TE58 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.01.002

Risk assessment of riser interference of FPSO single point mooring system based on fuzzy Petri net

YU Jianxing^{1,2}, ZENG Qingze^{1,2}, YU Yang^{1,2}, CHEN Haicheng^{1,2}, WU Shibo^{1,2}, FAN Haizhao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Port and Ocean Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The FPSO single point mooring system has many risers underwater. Affected by the factors such as environment, the risers are prone to stretch, twist, bend and collide, which will cause interference and endanger engineering safety. Considering the risk of riser interference of FPSO single point mooring system, we proposed a risk assessment method based on the fuzzy Petri net. Firstly, the risk evaluation index system was built by identifying the risk factors, and was transformed into a fuzzy Petri net model. Secondly, the AHP was used to determine the constant weight of risk factors, and fuzzy belief structures were used to improve the accuracy of the subjective evaluation of experts. Then, the variable weight theory and the fuzzy reasoning algorithms were combined to iteratively compute the credibility of place and the state matrix. Finally, the risk assessment was carried out with an internal turret FPSO in the South China Sea. The results show that the risk assessment level of the FPSO is medium, and the environment factor and equipment factor are the main factors that affect the riser interference. Based on the risk ranking results, the risk control measures are proposed for the risk indexes with a high comprehensive evaluation value to effectively reduce the probability and harm of the risk of riser interference.

Keywords: FPSO single point mooring system; riser interference; fuzzy Petri net; risk assessment

在波、流和浮体运动等作用下, 海洋管线的水下形态会发生变化, 使管线受到不同程度的拉伸、扭转、

收稿日期: 2021-01-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC0310502); 国家自然科学基金面上项目 (51779173)

作者简介: 余建星 (1958-), 男, 福建泉州人, 博士, 教授, 主要从事海洋结构可靠性、风险评估方面的研究。E-mail: yjx2000@tju.edu.cn

通信作者: 余 杨 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋结构可靠性、水动力分析的研究工作。E-mail: yang.yu@tju.edu.cn

弯曲和挤压,并与周围管线相碰撞,引发干涉现象。干涉现象的发生容易使管线相互缠绕,周期性的碰撞也会造成管线的磨损、疲劳与断裂,危及工程安全。FPSO 内转塔式单点系泊系统水下管缆众多,如系泊缆、立管、电缆等,在作业过程中,错综复杂的管汇受多种因素影响容易产生干涉风险,影响 FPSO 系泊能力,并对人员生命安全和设备财产安全造成危害。因此,对 FPSO 进行管缆干涉问题的安全性研究具有重要意义。

在管缆干涉问题的研究上, DNV-RP-F203 规范^[1]对相邻立管的间距作出了规定以保证不发生碰撞; API RP 2RD^[2]指出,上游立管产生的尾流会使作用在下游立管的流速减小,导致相邻立管的间距变小并引发碰撞;裴晓梅等^[3]研究了拖曳力系数、单位长度质量、外径等参数对非黏接柔性立管干涉的影响;He 等^[4]提出了一种基于碰撞允许原理的立管干涉概率评估方法; Bai 等^[5]研究了脐带缆与立管间的干涉,发现水深、浪向和管长对干涉具有不同影响;何杨等^[6]根据 DNV 规范介绍了深水立管干涉的分析方法,总结了影响立管干涉的因素;康庄等^[7]通过建立干涉分析非线性时域模型,研究了浪流方向对立管干涉的影响。上述学者对管缆干涉的研究多集中在数值模拟和力学分析上,还鲜有对管缆干涉风险进行定量评估与分析,而针对 FPSO 单点系泊系统多管缆干涉的风险评估更是空白,不仅缺乏对风险源的全面辨识,还缺乏系统的管缆干涉风险评估体系。

鉴于 FPSO 单点多管缆干涉风险评估研究方面的不足,提出了一种基于模糊 Petri 网络(Fuzzy Petri Net, 简称 FPN)的定量风险评估方法,利用 Petri 网络的并行计算能力来处理各级风险因素之间的关系,以此建立了一套系统的 FPSO 单点多管缆干涉风险评估流程。首先通过识别 FPSO 单点多管缆干涉的风险因素建立了一个多层次的风险评估指标体系,并根据模糊 Petri 网理论转换为 FPN 模型。考虑到传统模糊语言评价方法存在的不足,采用三种形式的模糊置信结构来表示专家的主观评价以提高准确性。将变权理论引入到模糊推理算法中,综合采用层次分析法和变权理论确定风险指标的权重值,令权重根据实际工程情况进行动态变化,最后通过模糊推理算法迭代求解库所可信度和状态矩阵,并计算各级指标的综合评估值。通过上述风险评估流程对南海某内转塔式 FPSO 的单点多管缆干涉风险进行了实例评估,得出了该 FPSO 的风险评估等级,由风险排序找出其中的薄弱环节并提出相应的控制与预防措施,以降低风险发生概率并提高安全性。

1 风险评估指标体系建立

辨识风险因素是风险评估的首要环节。因目前有关管缆干涉风险评估的研究较少,且缺乏相关事故案例可供参考,使风险辨识的难度加大。这里从管缆干涉的致灾机理出发,通过调研单点系泊系统的失效模式^[8]与管缆干涉研究^[3-7]的相关文献,并咨询领域专家的意见,在遵循同一层次的各风险指标相互独立的原则上,建立了如图 1 所示的多层次风险评估指标体系。其中,最上层(目标层)是一级指标;中间层(准则层)是 5 个二级指标;最低层(指标层)是 30 个三级指标。指标的具体描述见表 1。

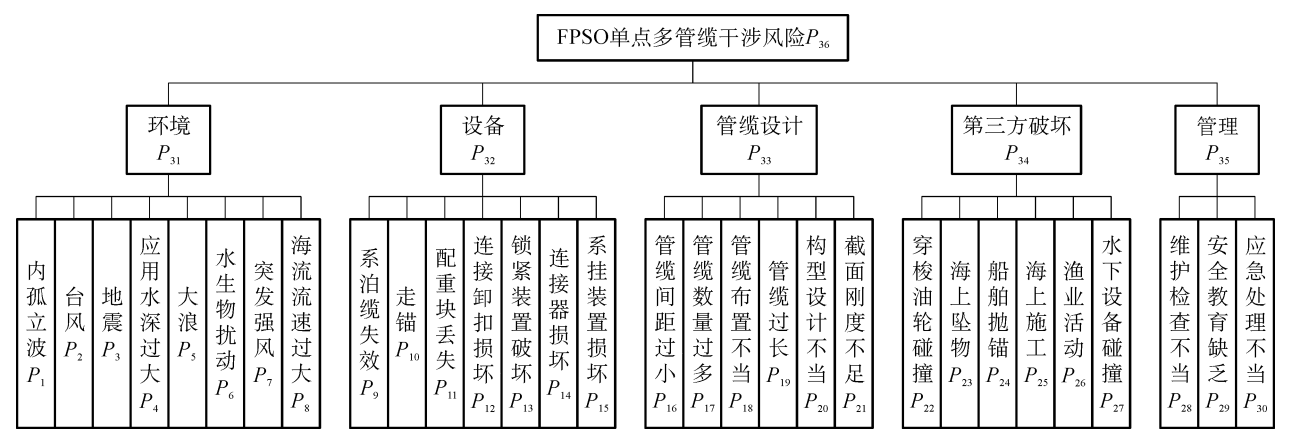


图 1 风险评估指标体系
Fig. 1 Risk evaluation index system

表 1 管缆干涉风险指标
Tab. 1 Risk index of riser interference

库所	风险指标	风险指标描述
P_1	内孤立波	内孤立波在传播时使海水发生强剪切流动,冲击管缆并施加剪切载荷,使管缆产生大变形
P_2	台风	台风作用下,管缆产生大变形和大位移,并导致系泊系统失效
P_3	地震	地震会影响土壤承载力,并对水下生产设施和系泊缆造成破坏
P_4	应用水深过大	应用水深过大,使水下管缆受上部结构的约束减小,更易发生弯曲和位移
P_5	大浪	大浪对船体造成冲击,使管缆产生大位移
P_6	水生物扰动	海中水生物扰动管缆
P_7	突发强风	所在海域突发强风,使 FPSO 船体发生运动,引动水下管缆
P_8	海流流速过大	海流流速过大使管缆受到的拖曳力变大,并使管缆产生涡激振动现象
P_9	系泊缆失效	系泊缆因腐蚀、疲劳等原因失效,影响系泊系统的可靠性
P_{10}	走锚	走锚导致船舶拖锚位移
P_{11}	配重块丢失	配重块随系泊缆运动及受到冲击时可能出现丢失情况,影响系泊可靠性
P_{12}	连接卸扣损坏	连接卸扣损坏导致锚链脱落
P_{13}	锁紧装置破坏	浮筒锁紧装置发生破坏导致浮筒下沉
P_{14}	连接器损坏	水下连接器损坏,影响水下管线的连接
P_{15}	系挂装置损坏	系挂装置包括支撑块和支撑螺栓发生损坏会影响管缆与单点浮筒间的连接
P_{16}	管缆间距过小	管缆间距过小会直接提高管缆间产生干涉的风险
P_{17}	管缆数量过多	管缆悬挂数量众多,增大干涉风险发生的可能
P_{18}	管缆布置不当	管缆布置不当,存在相互跨越、交叉的情况
P_{19}	管缆过长	管缆长度设计过长
P_{20}	构型设计不当	管缆水中构型设计不当
P_{21}	截面刚度不足	截面刚度不足使管缆在波、流作用下容易产生大变形
P_{22}	穿梭油轮碰撞	穿梭油轮在进行外输作业时与 FPSO 发生碰撞
P_{23}	海上坠物	过往船只或 FPSO 上坠落物体冲击管缆
P_{24}	船舶抛锚	船舶抛锚冲击管缆
P_{25}	海上施工	海上施工影响管缆正常运行
P_{26}	渔业活动	渔网等捕鱼设备冲击、缠绕管缆
P_{27}	水下设备碰撞	大型水下设备航行时与管缆发生碰撞
P_{28}	维护检查不当	维护检查措施不当,无法及时排除隐患
P_{29}	安全教育缺乏	缺乏安全教育,人员安全意识薄弱
P_{30}	应急处理不当	缺乏应急处理预案,无法在风险发生后正确处置、及时控制

2 模糊 Petri 网络模型

2.1 模糊 Petri 网络理论

Petri 网络是一种有向网状结构模型,具有并行计算能力和矩阵运算能力,可描述异步、同步、并行等逻辑关系,后结合模糊理论形成模糊 Petri 网络,可用一个九元组来表示^[9]: $FPN = (P, T, D, I, O, U, \alpha, R, M)$ 。其中, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 是库所集,指 FPSO 单点多管缆干涉风险因素集合, $P_i (1 \leq i \leq n)$ 为第 i 个风险因素; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 是变迁集,表示风险因素发生过程的集合, $t_j (1 \leq j \leq m)$ 表示第 j 个风险因素发生过程; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 为命题集合,与 P_i 相对应, $R: P \rightarrow D$ 表示库所到对应命题的映射; $I = \{\delta_{ij}\}$ 为输入矩阵, $\delta_{ij} \in [0, 1]$,当库所 P_i 是变迁 t_j 的输入库所时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$; $O = \{\gamma_{ij}\}$ 为输出矩阵, $\gamma_{ij} \in [0, 1]$,当库所 P_i 是变迁 t_j 的输出库所时, $\gamma_{ij} = 1$, 否则 $\gamma_{ij} = 0$; $U(t_j) = \{\mu_{ij}\}$ 为变迁置信度矩阵, $\mu_{ij} \in$

$[0,1]$ 指对于输出库所 P_i ,变迁 t_j 的置信度,表示风险发展可能; $\alpha(P_i) = \{w_i\}$ 为库所可信度矩阵, $w_i \in [0, 1]$ 是库所 P_i 存在风险的可信度,表示风险发生的可能性; $\mathbf{M}$ 是 $n \times q$ 阶的状态矩阵,表征风险因素的后果大小。 $\mathbf{M}(0)$ 为初始状态矩阵,元素 $m_{ij}^0 \in [0,1]$ 是库所 P_i 在风险等级 j 中的隶属度, $n \times q$ 即为 n 个库所在 q 个风险等级中的状态, $\mathbf{M}(k)$ 为迭代 k 次的状态矩阵。

2.2 模糊 Petri 网络模型建立

模糊产生式规则用于表示风险因素的逻辑关系,分“与”规则和“或”规则两种^[10]。采用“或”规则进行表示:当任意三级指标风险发生,认为系统存在风险并将引起上一级风险发生。“或”规则表示如下:

If $d_1(w_1)$ or $d_2(w_2)$ or $\cdots$ or $d_n(w_n)$, then $d_c(w_c)$ ($CF=\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_n$), $w_c = \max(w_1\mu_1, w_2\mu_2, \cdots, w_n\mu_n)$
式中: $d_1, d_2, \cdots, d_n$ 为前提, d_c 为结论, $w_1, w_2, \cdots, w_n$ 为前提可信度, w_c 为结论可信度, $\mu \in [0,1]$ 为规则置信度。

采用“或”规则将指标体系转换为 FPN 模型,以圆形表示库所、矩形表示变迁,二者通过有向弧进行连接,如图 2 所示。其中,库所 $P_1 \sim P_{30}$ 表示三级指标, $P_{31} \sim P_{35}$ 表示二级指标, P_{36} 表示目标层。

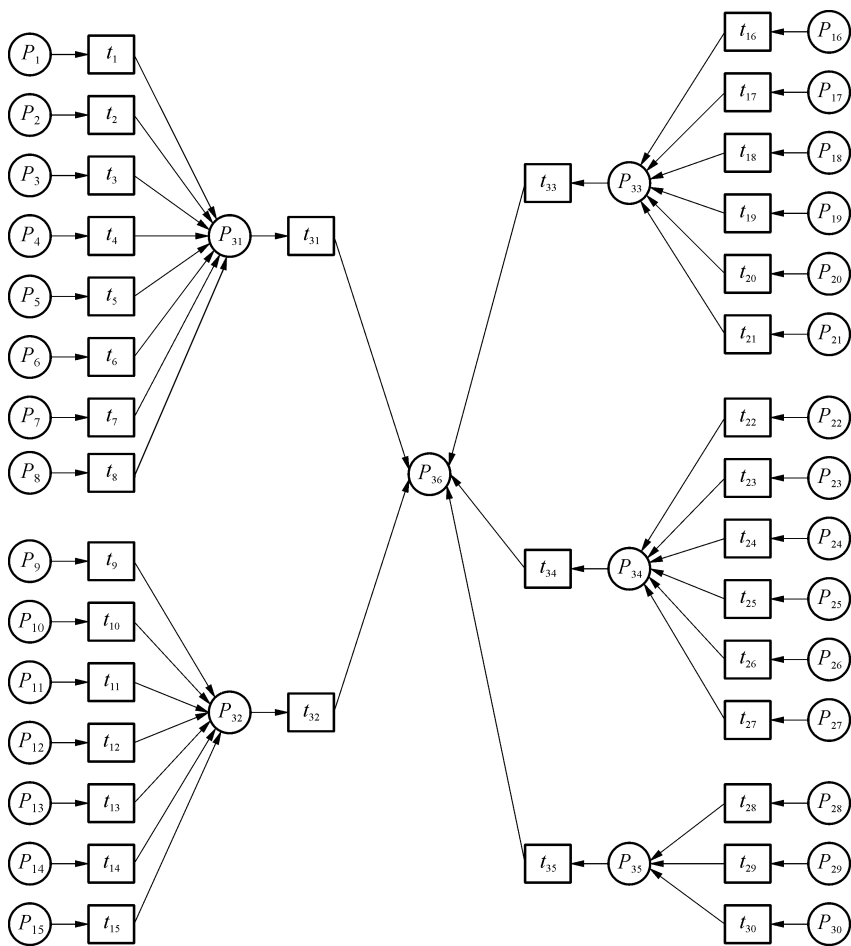


图 2 风险评估指标体系的 FPN 模型
Fig. 2 FPN model of risk evaluation index system

3 数据获取方法

3.1 赋权方法

赋权方法分为主观、客观和组合赋权三种。主观赋权法通过专家判断计算指标权重,适用于难以定量描述的指标,但权重受人为影响较大;客观赋权法根据指标信息进行计算,结果更客观,但具有一定机械性,过于依赖样本数据。组合赋权法^[10]综合采用主观和客观赋权,能够结合两者优点并弥补不足。

因目前关于管缆干涉风险评估的研究较少,缺乏足够的信息,且有些风险指标为定性指标,故难以通过客观赋权法计算风险因素权重。基于该考虑,采用层次分析法和变权理论来综合确定风险因素权重,通过专家经验进行判断,避免了数据不足的影响,并能根据实际工程情况进行变权,使权重分配更加合理。邀请了 10 位海油工程的专家,相较于其他研究中邀请 3~5 位专家的做法,能够减小个别专家意见存在较大出入而带来的影响。令 10 位专家组成专家组,获得各级风险指标下的判断矩阵,由层次分析法计算风险因素的常权重。层次分析法具体步骤在此不做赘述,专家信息见表 2。

表 2 专家信息
Tab. 2 Experts information

序号	教育程度	工作年限/a	职称	研究领域
1	硕士	13	高级工程师	海底管道结构设计
2	学士	20	高级工程师	海底管道结构设计
3	硕士	13	工程师	海底管道与深水立管结构研究
4	硕士	15	高级工程师	海底管道与深水立管结构研究
5	学士	13	工程师	管道结构设计与管缆干涉技术研究
6	硕士	13	高级工程师	单点系泊系统设计与安装
7	硕士	10	工程师	单点系泊系统设计研究
8	硕士	14	工程师	FPSO 连接与单点系泊系统安装
9	硕士	12	工程师	FPSO 解脱连接与单点系泊系统维修改造
10	硕士	14	高级工程师	FPSO 解脱连接与单点系泊系统维修改造

变权理论是相对于常权重而言的,分为惩罚型变权和激励型变权两类。在进行实际工程的风险评估时,对于某些评估值较高的指标,会对系统产生重大影响,需要进行重点关注。若采用常权重进行风险评估,将无法体现该指标的影响,导致评估结果与实际不符,降低评估的准确性。因此,采用变权理论对风险指标进行动态变权,令权重值随指标评估值的大小而变化,可使权重分配更科学合理,更符合实际情况。

采用激励型状态变权向量^[11]来对常权重进行动态变权:

$$S(x_i)=\begin{cases} e^{ax_i} & (x_i\geq a) \\ 1 & (x_i<a) \end{cases}\tag{1}$$

$$V(x_i)=\frac{C(x_i)S(x_i)}{\sum_{k=1}^n[C(x_k)S(x_k)]}\tag{2}$$

式中: $S(x)=[S(x_1)\ S(x_2)\ \cdots\ S(x_n)]$ 为激励型状态变权向量,满足 $S(x)$ 为单调递增的连续函数; $a\in[0,1]$,表示激励水平,在文中根据库所可信度的平均水平将 a 设为 0.5; $C(x)=[C_1(x_1)\ C_2(x_2)\ \cdots\ C_n(x_n)]$ 为常权重向量; $V(x)=[V_1(x_1)\ V_2(x_2)\ \cdots\ V_n(x_n)]$ 为变权后的权重向量。

3.2 模糊理论

3.2.1 模糊置信结构

将库所可信度和变迁置信度分为五个模糊评估等级: $H=\{H_{11},H_{22},H_{33},H_{44},H_{55}\}$,表示“极低”“低”“中等”“高”和“极高”,在论域 $[0,1]$ 内进行划分,模糊语言集见表 3。但考虑到传统模糊语言评价无法跨越多个等级进行评估,如当专家认为指标的评估等级处于“低”到“中等”之间时,传统模糊语言评价无法进行表示。故提出三种形式的模糊置信结构^[12]来表示专家主观评价以提高评估准确性:

- 1) 独立式:置信结构形式为 $\{(H_{ii},1.0),i=1,2,3,4,5\}$,表示指标模糊评估等级为 H_{ii} ,隶属度为 1.0。
- 2) 区间式:置信结构形式为 $\{(H_{ij},1.0),i=1,2,3,4,j=i+1,\cdots,5\}$,表示指标模糊评估等级在 H_{ii} 到 H_{jj} 之间,其对应的梯形模糊数为 H_{ii} 与 H_{jj} 所对应的梯形模糊数的综合。
- 3) 分布式:置信结构形式为 $\{(H_{ii},\gamma_{ii}),i=1,2,3,4,5\}$, γ_{ii} 表示模糊评估等级 H_{ii} 的隶属度, $\sum_{i=1}^5\gamma_{ii}=1$ 。

表 3 模糊语言集
Tab. 3 Fuzzy language set

评估等级	类 别	梯形模糊数
1	极低	(0.0,0.0,0.1,0.2)
2	低	(0.1,0.2,0.3,0.4)
3	中等	(0.3,0.4,0.6,0.7)
4	高	(0.6,0.7,0.8,0.9)
5	极高	(0.8,0.9,1.0,1.0)

3.2.2 加权综合与去模糊化

对于指标 P_n ,令专家 $Z_m(m=1,2,\cdots,M)$ 以三种形式的模糊置信结构进行评价,得到专家 Z_m 的评价为:

$$G_n^m = \{H_{ij}, \gamma_{ij}^m(P_n), i, j = 1, 2, 3, 4, 5, i \leq j\}$$
 (3)

式中: $\gamma_{ij}^m(P_n)$ 为专家 Z_m 的评估语言中等级 H_{ij} 的隶属度。

结合专家权重 $\beta_m(m=1,2,\cdots,M)$ 将 M 位专家的评价结果进行加权综合,形成一个综合置信结构:

$$G_n = \{H_{ij}, \gamma_{ij}(P_n), i, j = 1, 2, 3, 4, 5, i \leq j\}$$
 (4)

式中: $\gamma_{ij}(P_n)$ 为综合隶属度,是 $G_n^m(m=1,2,\cdots,M)$ 中对应于等级 H_{ij} 的各隶属度的加权和,可由下式获得:

$$\gamma_{ij}(P_n) = \sum_{m=1}^M [\beta_m \gamma_{ij}^m(P_n)]$$
 (5)

之后将综合置信结构转换成梯形模糊数 $R = (R_1, R_2, R_3, R_4)$, 其标度值 $R_k(k=1,2,3,4)$ 可由下式取得:

$$R_k = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i}^5 [r_k(H_{ij}) \times \gamma_{ij}(P_n)] \quad (k=1,2,3,4)$$
 (6)

式中: $r_k(H_{ij})(k=1,2,3,4)$ 为等级 H_{ij} 对应的梯形模糊数的四个标度值。

最后由重心法将 R 去模糊化,可得到指标 P_n 的评估值:

$$X = (\int f(x) x dx) / (\int f(x) dx)$$
 (7)

4 模糊推理算法

利用模糊 Petri 网络的并行计算能力和矩阵运算能力,提出了库所可信度和状态矩阵推理算法,来迭代求解库所可信度与风险等级评估值,完成综合风险评估。

4.1 库所可信度推理算法

库所可信度推理算法^[13] 基于模糊产生式“或”规则计算原理,具体推理步骤如下:

第一步,定义两个推理算子:

- 1) $\cdot : \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{C}$,其中 $\mathbf{A}$ 为 $n \times p$ 维矩阵, $\mathbf{B}$ 为 $p \times m$ 维矩阵, $\mathbf{C}$ 为 $n \times m$ 维矩阵, $c_{ij} = \max_{1 \leq k \leq p} (a_{ik} \times b_{kj})$;
- 2) $\oplus : \mathbf{A} \oplus \mathbf{B} = \mathbf{C}$,其中, $c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij})$, $i=1,2,\cdots,n, j=1,2,\cdots,m$ 。

第二步,令迭代次数 $k=0$,并确定初始库所可信度矩阵 $\alpha(0)$ 、变迁置信度矩阵 $\mathbf{U}$ 和权值矩阵 $\mathbf{W}$:

其中, $\alpha(0)$ 为 $n \times 1$ 维矩阵, $\mathbf{U}$ 为 $n \times m$ 维矩阵,初始库所可信度和变迁置信度令 10 位专家以三种形式的模糊置信结构对指标进行评价后由式(3)~(7)计算获得,专家权重均为 0.1; $\mathbf{W}$ 为 $n \times m$ 维矩阵,其元素 w_{ij} 表示库所 P_i 对于变迁 t_j 的权值,因采用模糊产生式“或”规则,若 P_i 是 t_j 的输入库所, w_{ij} 为 1,否则为 0。

第三步,计算等效模糊真值向量:

$$E(k+1)=W^T\times\alpha(k)$$

(8)

第四步,计算新的库所可信度矩阵:

$$\alpha(k+1)=\alpha(k)\oplus[U\cdot E(k+1)]$$

(9)

若 $\alpha(k+1)=\alpha(k)$, 则迭代结束,输出最终库所可信度矩阵;否则令 $k=k+1$,重复第三步。

4.2 状态矩阵推理算法

在状态矩阵推理算法^[14]中引入变权理论,具体步骤如下:

第一步,定义两个推理算子:

- 1) $\otimes$: $D\otimes B=C$, 其中 $B、C$ 为 $n\times m$ 维矩阵, D 为 $1\times n$ 维矩阵, $c_{ij}=d_i\times b_{ij}$;
- 2) $\oplus$: $A\oplus B=C$, 其中 $A、B、C$ 为 $n\times m$ 维矩阵, $c_{ij}=\max(a_{ij},b_{ij})$, $i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,m$ 。

第二步,令 $k=0$,并确定初始状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵、常权重向量与风险等级向量。

按照海洋石油工程风险的严重程度将 FPSO 单点多管缆干涉风险等级分为 5 个等级,令专家评估各风险因素发生的后果大小。定义风险等级向量 $Q=(0.2\ 0.4\ 0.6\ 0.8\ 1.0)$, $(0\ 0.2]$ 对应“极低”, $(0.2\ 0.4]$ 对应“低”, $(0.4\ 0.6]$ 对应“中等”, $(0.6\ 0.8]$ 对应“高”, $(0.8\ 1.0)$ 对应“极高”。具体划分标准如表 4 所示。

令专家评估库所 $P_1\sim P_{30}$ 的风险等级,结合专家权重得到风险等级评估向量^[15],数据处理规则如下:若 10 位专家在评估库所 P_i 的风险等级时,有 5 位专家评估为“中等”,4 位专家评估为“高”,1 位专家评估为“极高”,则风险等级评估向量为 $(0\ 0\ 0.5\ 0.4\ 0.1)$ 。综合所有风险等级评估向量可得初始状态矩阵。

第三步,根据库所可信度对三级指标进行变权,激励水平 a 根据库所可信度的平均水平进行设定:

$$S_i=\begin{cases} e^{aw_i} & (w_i\geqslant a) \\ 1 & (w_i<a) \end{cases}$$

(10)

$$V_i=\frac{C_iS_i}{\sum_{k=1}^n(C_kS_k)}$$

(11)

第四步,迭代计算变迁激发后的下一状态矩阵:

$$M(k+1)=M(k)\oplus(V\otimes O)[I^TM(k)]$$

(12)

第五步,若 $M(k+1)=M(k)$, 则迭代结束;否则令 $k=k+1$,回到第四步重复计算,直至相等。

第六步,计算库所的风险等级评估值:

$$D=M(k)Q^T$$

(13)

第七步,结合库所可信度计算综合评估值:

$$f_i=w_i\times D_i$$

(14)

表 4 风险等级划分标准

Tab. 4 Classification standard of risk grades

风险等级	类 别	描 述
1	极低	风险极小,可忽略
2	低	风险较小,安全状况较好
3	中等	有一定风险,安全状况一般
4	高	风险较大,安全状况较差
5	极高	风险极大,需高度重视进行规避

5 实例分析

现以南海某内转塔式 FPSO 单点系泊系统为例进行风险评估,对提出的方法进行验证说明。

5.1 库所可信度推理

首先,确定初始数据。初始库所可信度矩阵 $\alpha(0)$ 与变迁置信度矩阵 U 表示如下:

$$\alpha(0) = [0.685, 0.438, 0.291, 0.498, 0.826, 0.545, 0.851, 0.799, 0.633, 0.485, 0.623, 0.473, 0.54, 0.568, 0.425, 0.49, 0.428, 0.285, 0.388, 0.30, 0.32, 0.223, 0.45, 0.35, 0.216, 0.340, 0.293, 0.405, 0.413, 0.283, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$U = \{\mu_{ij}\}_{36 \times 35}, i=1, 2, \dots, 36, j=1, 2, \dots, 35。其中, \mu_{31,1}=0.769, \mu_{31,2}=0.922, \mu_{31,3}=0.922, \mu_{31,4}=0.783, \mu_{31,5}=0.784, \mu_{31,6}=0.568, \mu_{31,7}=0.730, \mu_{31,8}=0.866, \mu_{32,9}=0.905, \mu_{32,10}=0.735, \mu_{32,11}=0.816, \mu_{32,12}=0.878, \mu_{32,13}=0.888, \mu_{32,14}=0.905, \mu_{32,15}=0.896, \mu_{33,16}=0.888, \mu_{33,17}=0.879, \mu_{33,18}=0.796, \mu_{33,19}=0.762, \mu_{33,20}=0.797, \mu_{33,21}=0.808, \mu_{34,22}=0.922, \mu_{34,23}=0.553, \mu_{34,24}=0.665, \mu_{34,25}=0.922, \mu_{34,26}=0.498, \mu_{34,27}=0.853, \mu_{35,28}=0.905, \mu_{35,29}=0.779, \mu_{35,30}=0.863, \mu_{36,31}=0.888, \mu_{36,32}=0.850, \mu_{36,33}=0.888, \mu_{36,34}=0.801, \mu_{36,35}=0.777; 其余元素为 0。$$

$\alpha(0)$ 表示 $P_1 \sim P_{30}$ 的库所可信度, $P_{31} \sim P_{36}$ 的库所可信度通过后续迭代得到; U 表示 $t_1 \sim t_{35}$ 的变迁置信度。通过迭代计算,得 $\alpha(2)=\alpha(3)$, 迭代结束,则最终库所可信度矩阵如下:

$$\alpha(2) = [0.685, 0.438, 0.291, 0.498, 0.826, 0.545, 0.851, 0.799, 0.633, 0.485, 0.623, 0.473, 0.54, 0.568, 0.425, 0.49, 0.428, 0.285, 0.388, 0.30, 0.32, 0.223, 0.45, 0.35, 0.216, 0.34, 0.293, 0.405, 0.413, 0.283, 0.692, 0.573, 0.435, 0.250, 0.367, 0.614]^T$$

可知,环境、设备、管缆设计、第三方破坏和管理五个因素存在风险的可信度分别为 0.692、0.573、0.435、0.250、0.367,而目标层 FPSO 单点多管缆干涉风险的可信度为 0.614,说明环境与设备因素发生风险的可能性较高,并将引起管缆干涉风险的发生。

5.2 状态矩阵推理

首先,确定初始数据。常权重向量 C 与初始状态矩阵 $M(0)$ 表示如下:

$$C = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5 \quad c_6]$$

$$c_1 = [0.167 \ 0, 0.279 \ 8, 0.061 \ 5, 0.036 \ 4, 0.103 \ 9, 0.044 \ 6, 0.103 \ 9, 0.202 \ 8];$$

$$c_2 = [0.171 \ 2, 0.066 \ 6, 0.074 \ 5, 0.131 \ 4, 0.243 \ 1, 0.169 \ 9, 0.143 \ 4];$$

$$c_3 = [0.332 \ 4, 0.210 \ 0, 0.108 \ 4, 0.076 \ 6, 0.182 \ 5, 0.090 \ 1];$$

$$c_4 = [0.338 \ 6, 0.083 \ 5, 0.122 \ 1, 0.178 \ 6, 0.051 \ 9, 0.225 \ 4];$$

$$c_5 = [0.163 \ 4, 0.297 \ 0, 0.539 \ 6];$$

$$c_6 = [0.309 \ 7, 0.265 \ 9, 0.221 \ 4, 0.070 \ 1, 0.132 \ 9]。$$

其中, $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ 分别表示五个二级指标和一级指标下的指标常权重。

$$M(0) = [m_0^1 \quad m_0^2 \quad m_0^3 \quad m_0^4 \quad m_0^5 \quad m_0^6]^T$$

$$m_0^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 \end{bmatrix}; m_0^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix}; m_0^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix};$$

$$m_0^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}; m_0^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 \end{bmatrix}; m_0^6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

设激励水平 a 为 0.5,经模糊推理算法迭代,得 $M(2)=M(3)$, 迭代结束,最终状态矩阵如下:

$$M(2) = [m_2^1 \quad m_2^2 \quad m_2^3 \quad m_2^4 \quad m_2^5 \quad m_2^6]^T$$

$$m_2^1 = m_0^1; m_2^2 = m_0^2; m_2^3 = m_0^3; m_2^4 = m_0^4; m_2^5 = m_0^5;$$

$$m_2^6 = \begin{bmatrix} 0.009 & 0.061 & 0.237 & 0.358 & 0.336 \\ 0 & 0.033 & 0.240 & 0.482 & 0.245 \\ 0 & 0.046 & 0.269 & 0.427 & 0.259 \\ 0.024 & 0.113 & 0.232 & 0.398 & 0.232 \\ 0 & 0.046 & 0.230 & 0.441 & 0.284 \\ 0.005 & 0.052 & 0.244 & 0.420 & 0.280 \end{bmatrix}$$

$m_k^1, m_k^2, m_k^3, m_k^4, m_k^5$ 表示各二级指标下的三级指标的风险等级评估向量, m_k^6 表示 5 个二级指标和一级指标的风险等级评估向量, $k=0,1,2,3$ 为迭代次数。

可知, FPSO 单点多管缆干涉风险的评估向量为 (0.005 0.052 0.244 0.420 0.280), 由式 (13) 得管缆干涉风险的风险等级评估值为 0.784, 结合库所可信度得综合评估值为 0.481, 对应的风险评估等级为“中等”。因此需要对其中的风险薄弱环节提出相应措施来进行预防与控制, 进一步降低管缆干涉风险。

5.3 风险控制措施

由模糊推理算法可得各级指标的综合评估值。图 3 所示为五个二级指标的综合评估值, 可知 FPSO 单点多管缆干涉风险受到多种因素的综合作用, 其中环境和设备因素的综合评估值较高, 分别为 0.547 和 0.451, 说明这二者是影响管缆干涉的主要风险因素, 需要对其重点关注。

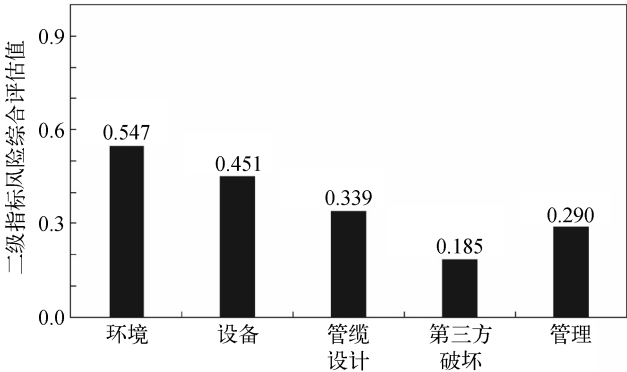


图 3 二级指标综合评估值
Fig. 3 Comprehensive evaluation value of secondary index

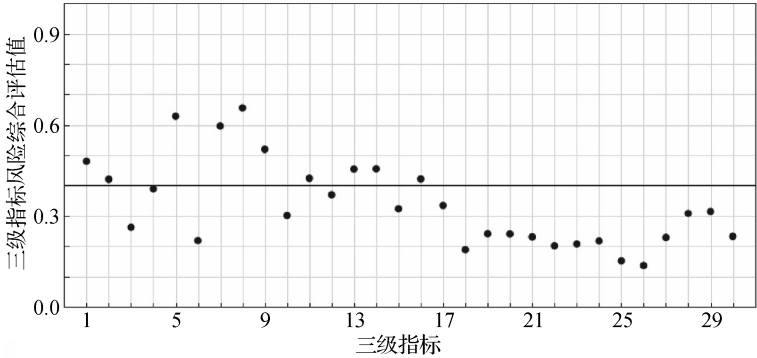


图 4 三级指标综合评估值
Fig. 4 Comprehensive evaluation value of third-level index

图 4 为 30 个三级指标的综合评估值, 据此对三级指标进行风险排序, 于表 5 列出了综合评估值大于 0.4 的 10 个指标, 对其提出风险控制措施如下:

1) 环境方面的主要风险因素包括海流流速过大、大浪、突发强风、内孤立波、台风, 该结果符合南海海域实际状况。对此, 可增设海上气象预报站, 观测周边海域及时对气象情况进行监测、预警, 并采取相应处置措

施;若出现台风等极端恶劣天气,可考虑解脱单点系泊系统,驶离海域来规避风险。

2) 管缆设计方面的主要风险因素是管缆间距过小。在设计时,应综合考虑规范要求、设计条件与当地海况,设计合适的管缆间距以避免间距过小,并在关键区域安装间隔框以保持足够间距。

3) 设备方面的主要风险因素包括系泊缆失效、连接器损坏、锁紧装置破坏、配重块丢失。对此,应对这些设备进行定期检查与维护,并及时更换失效与损坏的设备。此外,系泊缆失效主要由腐蚀、疲劳和磨损引起,应设定合适的腐蚀余量,提高系泊缆的抗腐蚀性能,做好防腐措施;减少系泊缆的初始缺陷,避免出现局部应力集中,延长疲劳寿命;定期清理链环中的异物,张紧锚链并重点关注锚链触地段易磨损区域,以防止磨损。对于配重块丢失问题,可直接焊接配重块或采用配重链替代配重块。

表 5 风险指标排序结果
Tab. 5 Ranking results of risk index

序号	综合评估值	风险指标	序号	综合评估值	风险指标
1	0.655 2	海流流速过大	6	0.454 4	连接器损坏
2	0.627 8	大浪	7	0.453 6	锁紧装置破坏
3	0.595 7	突发强风	8	0.423 6	配重块丢失
4	0.519 1	系泊缆失效	9	0.421 4	管缆间距过小
5	0.479 5	内孤立波	10	0.420 5	台风

5.4 对比分析

鉴于文献[10]和[14]采用组合赋权法来确定风险因素的权重,将变权理论的赋权方法应用于文献[10]和[14]的案例中,分别与层次分析法和组合赋权法得到的结果进行对比,根据案例中的库所可信度平均水平,在变权向量中取激励水平 a 为 0.8。因权重值不会影响三级指标的排序,仅对目标的综合评估值产生影响,采用各方法得到的目标综合评估值如表 6 所示。由表可知,通过变权理论得到的目标综合评估值相较于层次分析法更接近于组合赋权法得到的结果,说明在缺乏数据难以采用客观赋权法的情况下,通过指标的实际情况进行动态变权能够在一定程度上使结果更加客观准确,也证明了本文所提出方法的准确性。

表 6 对比结果
Tab. 6 Comparison result

案例	层次分析法	变权理论	组合赋权法
文献[10]	4.648	4.551	4.360
文献[14]	3.948	3.965	4.390

6 结 语

针对 FPSO 单点系泊系统的多管缆干涉风险,提出了一种基于模糊 Petri 网络的风险评估方法。综合考虑环境因素、设备因素、管缆设计因素、第三方破坏因素和管理因素 5 个方面来识别 FPSO 单点多管缆干涉的风险因素,建立了具有 30 个三级指标和 5 个二级指标的多层次风险评估指标体系,并转换为 FPN 模型,通过模糊推理算法对南海某内转塔式 FPSO 进行了单点多管缆干涉风险评估,得到的主要结论如下:

1) 采用三种形式的模糊置信结构表示专家的评估语言,克服了传统模糊语言评价的不足,使专家的模糊语言表示更加灵活准确,能够减小专家主观判断所产生的偏差。

2) 考虑到海洋环境与实际工程的复杂与多变,综合采用层次分析法和变权理论来确定风险因素的权重,在实例风险评估时可根据风险因素的库所可信度来对常权重进行动态变权,提高危险指标的权重值,在后续的模糊推理中突出其负面影响,使指标赋权更符合实际工程情况,克服固定权重的局限性,并通过对比

分析,证明了该方法的可行性与准确性。

3) 通过实例分析,由模糊推理算法得到该 FPSO 的单点多管缆干涉风险综合评估值为 0.481,对应风险评估等级为“中等”,存在一定风险,需要采取适当措施。在二级指标中,环境与设备因素是影响管缆干涉的主要因素,其综合评估值分别为 0.547 和 0.451,该结果符合 FPSO 的实际情况,验证了方法的可行性。在三级指标中,通过风险排序得到综合评估值大于 0.4 的指标共有 10 个,对其提出了相应的风险控制措施,以降低管缆干涉风险的发生概率与严重程度。

参考文献:

- [1] DNV-RP-F203, Riser interference[S]. Det Norske Veritas, 2009.
- [2] API RP 2RD, Design of risers for floating production systems (FPSs) and tension-leg platforms (TLPs) [S]. American Petroleum Institute, 2006.
- [3] 裴晓梅, 曹静, 张恩勇, 等. 缓波型非粘接柔性立管的干涉敏感性[J]. 船舶工程, 2021, 43(2): 20-24. (PEI Xiaomei, CAO Jing, ZHANG Enyong, et al. Interference sensitivity of unbounded flexible riser with lazy wave type[J]. Ship Engineering, 2021, 43(2): 20-24. (in Chinese))
- [4] HE J W, LOW Y M. A collision-allowed approach for probabilistic assessment of riser interference[J]. Ocean Engineering, 2014, 76: 21-31.
- [5] BAI Yong, ZHANG Dapeng, ZHU Keqiang, et al. Dynamic analysis of umbilical cable under interference with riser [J]. Ships and Offshore Structures, 2018: 1-13.
- [6] 何杨, 孙国民, 赵天奉. 深水立管干涉分析研究[J]. 中国海洋平台, 2014, 29(4): 46-50. (HE Yang, SUN Guomin, ZHAO Tianfeng. Study on deepwater riser interference analysis[J]. China Offshore Platform, 2014, 29(4): 46-50. (in Chinese))
- [7] 康庄, 张立, 刘禹维, 等. 顶部张紧式立管干涉分析[J]. 船舶工程, 2015, 37(5): 90-93. (KANG Zhuang, ZHANG Li, LIU Yuwei, et al. Interference analysis of top tensioned risers[J]. Ship Engineering, 2015, 37(5): 90-93. (in Chinese))
- [8] 贺辙, 孙雨萍, 康济川, 等. FPSO 单点系泊系统失效数据库的设计与实现[J]. 船海工程, 2015, 44(6): 129-133. (HE Zhe, SUN Liping, KANG Jichuan, et al. Design and implementation of failure database of single point mooring system for FPSO [J]. Ship & Ocean Engineering, 2015, 44(6): 129-133. (in Chinese))
- [9] 高翔, 祝跃飞, 刘胜利, 等. 基于模糊 Petri 网的网络风险评估模型[J]. 通信学报, 2013, 34(S1): 126-132. (GAO Xiang, ZHU Yuefei, LIU Shengli, et al. Risk assessment model based on fuzzy Petri nets[J]. Journal on Communications, 2013, 34(S1): 126-132. (in Chinese))
- [10] GUO Yanbao, MENG Xiaoli, WANG Deguo, et al. Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 18-29.
- [11] 李德清, 李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2002, 38(4): 455-461. (LI Deqing, LI Hongxing. The Properties and construction of state variable weight vectors[J]. Journal of Beijing Normal University, Natural Science, 2002, 38(4): 455-461. (in Chinese))
- [12] LIU H C, LIU L, LIN Q L, et al. Knowledge acquisition and representation using fuzzy evidential reasoning and dynamic adaptive fuzzy Petri nets[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(3): 1059-1072.
- [13] ZHOU Jianfeng, RENIERS G, ZHANG Laobing. A weighted fuzzy Petri-net based approach for security risk assessment in the chemical industry[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 174: 136-145.
- [14] CHANG Yuanjiang, WU Xiangfei, CHEN Guoming, et al. Comprehensive risk assessment of deepwater drilling riser using fuzzy Petri net model[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 117: 483-497.
- [15] 吴鹏, 夏海波, 吴建军, 等. 基于模糊 Petri 网的易流态化货物海上运输风险评估[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(3): 63-68. (WU Peng, XIA Haibo, WU Jianjun, et al. Risk assessment of shipping liquefiable solid bulk cargoes based on fuzzy Petri nets[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(3): 63-68. (in Chinese))