

中文引用格式:刘富鹏,杨九,吴世博,等. 基于 FDHHFLTS-BN 的海底管道泄漏失效风险定量分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 166-170.

英文引用格式:LIU Fupeng, YANG Jiu, WU Shibo, et al. Quantitative risk analysis on failure of submarine pipeline leakage based on FDHHFLTS-BN[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 166-170.

基于 FDHHFLTS-BN 的海底管道泄漏失效 风险定量分析*

刘富鹏^{1,2}高级工程师, 杨九^{**1}, 吴世博¹, 徐立新¹教授

(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 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

中图分类号: X937

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.01.1247

基金项目: 国家自然科学基金资助(51879189)。

【摘要】 为预防海底油气管道泄漏失效事故, 提出基于自由双层次犹豫模糊语言术语集(FDHHFLTS)和贝叶斯网络(BN)的FDHHFLTS-BN风险分析方法, 用于分析海底油气管道泄漏失效事故概率及事故的关键风险因素。将故障树模型转换为BN结构, 由专家根据FDHHFLTS评估基本事件发生可能性; 采用最佳最差法(BWM)确定专家权重, 结合相似性聚合方法(SAM)聚合专家意见; 依据构建的BN模型, 正向推理得到事故发生概率, 反向推理得到后验概率, 并进行敏感性分析。将该方法应用于实例分析, 结果表明: 分析段海底管道泄漏事故的概率值为 $P=6.20 \times 10^{-3}$; 焊缝施工缺陷、材料施工缺陷和渔具作用等为事故发生的关键因素; 与传统方法对比分析结果证明, 所提方法在确定海底管道风险方面具有一定的优势。

【关键词】 自由双层次犹豫模糊语言术语集(FDHHFLTS); 贝叶斯网络(BN); 海底管道泄漏; 风险分析; 相似性聚合方法(SAM)

Quantitative risk analysis on failure of submarine pipeline leakage based on FDHHFLTS-BN

LIU Fupeng^{1,2}, YANG Jiu¹, WU Shibo¹, XU Lixin¹

(1 State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2 Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: In order to prevent the leakage failure of submarine pipelines, a FDHHFLTS-BN risk analysis method based on FDHHFLTS and BN was proposed to study the probability and key factors of the leakage failure of submarine pipelines. BN was transformed from the fault tree model, and then experts evaluated the probability of basic events according to FDHHFLTS. The best-worst method (BWM) was used to determine the weights of experts, and SAM was used to aggregate the opinions of experts. Finally, based on the constructed Bayesian network model, the probability of accident occurrence was obtained through forward reasoning. Also, the posterior probability was obtained through backward reasoning, and

* 文章编号: 1003-3033(2024)01-0166-05; 收稿日期: 2023-06-14; 修稿日期: 2023-09-17

** 通信作者: 杨九(1996—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋工程风险评估与控制。E-mail: yangjiu@tju.edu.cn。

sensitivity was analyzed. Applying the method for the example analysis, the results show that the probability value of the leakage accident of the analyzed submarine pipeline is $P = 6.20 \times 10^{-3}$. Through sensitivity analysis, construction defect of weld-seam, construction defect of material, and fishing gear interaction can be identified as the key factors for the accident.

Keywords: free double hierarchy hesitant fuzzy linguistic term set (FDHFLTS); Bayesian network(BN); submarine pipeline leakage; risk analysis; similarity aggregation method(SAM)

0 引言

随着海洋石油业的蓬勃发展,海底管道建设发展空间日益增大^[1]。海底管道一旦泄漏,很容易升级为灾难性事件,造成巨大的生命财产损失和环境污染。因此,定量分析海底管道油气泄漏事故的风险,提高海底管道安全性,成为亟需解决的问题。

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)作为一种强大的建模方法,在事件逻辑关系描述和概率推理方面具有优势,已被广泛应用于海底管道风险分析^[2]。LI Xinhong 等^[3]基于 BN、模糊集和证据理论,提出一种动态概率方法,用于海底管道不同时间段的疲劳破坏动态概率计算及失效原因分析;SULAIMAN 等^[4]提出一种基于 BN 和交互式模糊层次分析法的海底管道风险分析模型,取得较好的应用效果。近年来,基于 BN 和模糊集理论的模糊 BN 已经被证明是一种适用于不确定性环境下安全评估和风险分析的有效技术^[5],但是,现有基于模糊 BN 的海底管道泄漏风险分析的研究在专家意见收集过程中存在信息损失较多的问题。对此, JORDI 等^[6]提出自由双层次犹豫模糊语言术语集(Free Double Hierarchy Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set, FDHFLTS),允许不同的第 1 层次语言术语集对应不同的、恰当的第 2 层次语言术语集,这增加了语言术语的数量,能够更合理地表达出专家意见,可有效避免在专家意见收集过程中出现过多的信息损失。目前,自由双层次犹豫模糊语言在风险分析领域应用甚少,且其与 BN 相结合的方法研究还较为鲜见。

鉴于此,笔者拟基于 FDHFLTS 和 BN,构建 FDHFLTS-BN 风险分析方法;采用 FDHFLTS 方法收集专家意见,并采用最佳最差法(Best-Worst Method, BWM)^[7]确定专家权重;通过相似性聚合方法(Similarity Aggregation Method, SAM)^[8]聚合不同专家的意见,再根据建立的 BN 进行风险分析,确定事故的概率值及关键因素,以期为防控海底管道泄漏事故提供参考。

1 FDHFLTS-BN 风险分析法

基于 BN 和 FDHFLTS 构建 FDHFLTS-BN 风险分析法。采用 FDHFLTS 为专家提供 2 个层次的语言术语集,第 1 层次为传统语言术语,第 2 层次用于对第 1 层次进行程度上的描述。专家可从 2 个层次的术语集中自由选择,更精准地表述意见。采用 BWM 方法确定专家权重。由于 FDHFLTS 中语言术语较为丰富,使不同专家意见间的差异性更容易被体现。为使结果更加准确,采用相似聚合方法聚合不同专家意见,并将聚合后的专家意见去模糊化,得到基本事件的先验概率。通过 BN 正向推理和反向诊断,得到事故发生概率及根节点敏感性。FDHFLTS-BN 风险分析法计算流程如图 1 所示。

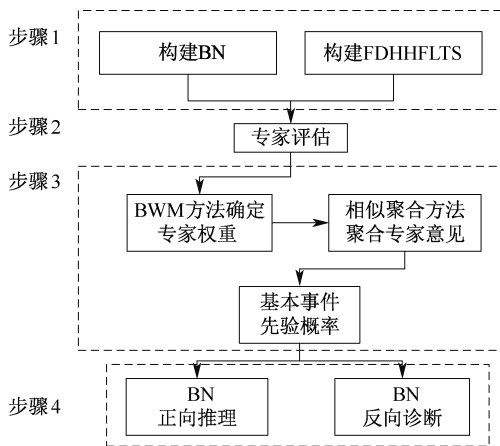


图 1 FDHFLTS-BN 风险分析方法计算流程

Fig. 1 Process diagram of FDHFLTS-BN risk analysis method

FDHFLTS-BN 法的海底管道泄漏失效风险定量分析步骤如下:

步骤 1: 根据故障树模型构建 BN 结构。海底管道泄漏失效故障树的顶事件为海底油气管道泄漏,共有 24 个基本事件^[9],全部节点事件见表 1。

步骤 2: 评估数据的获取与转换。第 1 层次评语变量划分为 7 个等级,即 $S = \{s_{-3} = \text{无}, s_{-2} = \text{很低}, s_{-1} = \text{低}, s_0 = \text{中}, s_1 = \text{高}, s_2 = \text{很高}, s_3 = \text{完全}\}$ 。专家根据个人喜好和习惯选取第 2 层次语言术语集和评

表 1 海底管道泄漏失效节点事件

Tab. 1 Description of nodes

符号	节点事件	符号	节点事件
T	海底管道泄漏失效	X_6	坠物撞击
A_1	外部因素	X_7	锚固
A_2	内部因素	X_8	渔具作用
B_1	腐蚀	X_9	人为打孔盗油
B_2	外部负载	X_{10}	海上施工
B_3	出现悬跨	X_{11}	设计埋深不足
B_4	自然灾害	X_{12}	操作埋深不足
B_5	材料缺陷	X_{13}	处理不及时
B_6	焊缝缺陷	X_{14}	强流和强波
B_7	辅助设备故障	X_{15}	海底土易被侵蚀
C_1	内部腐蚀	X_{16}	海底地震
C_2	外部腐蚀	X_{17}	海底运动
C_3	埋深不足	X_{18}	台风
C_4	环境条件恶劣	X_{19}	材料设计缺陷
X_1	未清除腐蚀气体和杂质	X_{20}	材料施工缺陷
X_2	未添加缓蚀剂	X_{21}	焊缝设计缺陷
X_3	未定期清管	X_{22}	焊缝施工缺陷
X_4	防腐涂层失效	X_{23}	辅助设备老化
X_5	阴极防蚀失效	X_{24}	辅助设备设计缺陷

估采用的表达式。领域专家根据定义的评价术语,评估海底油气管道泄漏事故基本事件发生的可能性。每个专家的评估结果均可表示为一个连续的自由双层次犹豫模糊语言元。

步骤 3:专家意见聚合与去模糊化。首先,采用 BWM 方法^[7],确定专家权重为 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。然后,通过改进的 SAM 聚合专家意见^[8]:

$$Z(h_1, h_2) = 1 - D(h_1, h_2) \quad (1)$$

$$WA(E_j) = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N W(E_k) \cdot Z(h_j, h_k)}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N W(E_k)} \quad (2)$$

$$RA(E_j) = \frac{WA(E_j)}{\sum_{j=1}^M WA(E_j)} \quad (3)$$

$$CC(E_j) = \beta \cdot W(E_j) + (1 - \beta) \cdot RA(E_j) \quad (4)$$

$$h = CC(E_1) \times h_1 + \dots + CC(E_n) \times h_n \quad (5)$$

式中: $Z(h_1, h_2)$ 为 h_1 与 h_2 的相似度,且 $Z(h_1, h_2) \in [0, 1]$; h_1 和 h_2 分别为 2 位专家评价的犹豫模糊语言元; $D(h_1, h_2)$ 为 h_1 与 h_2 的距离;WA (Weighted Agreement) 为专家的加权一致度; E_j, E_k 分别为第 j, k 位专家;RA (Relative Agreement) 为归一化得到的每个专家的相对一致度;CC (Consensus Coefficient) 为专家的共识度; β 为 $W(E_j)$ 和 $RA(E_j)$ 之间哪个更关键,一般情况下可取 $\beta=0.5$; h 为聚合后的专家意见。需要注意的是,在计算中,若 h_{s_0} 为离散情况,则需引入

连续性校正因子,将离散情况转变为连续情况。

去模糊化聚合后的专家意见分为 2 个部分,首先,采用质心法将模糊数转换为模糊概率 (Fuzzy Possibility Score, FPS):

$$FPS = \frac{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \mu(u) \cdot u du}{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \mu(u) du} \quad (6)$$

然后,再将 FPS 转化为失效概率 (Fuzzy Failure Probability, FFP)^[1],即先验概率。

步骤 4:依据构建的 BN 模型,正向推理得到海底油气管道泄漏事故的概率值。基于 BN 反向诊断得到基本事件的后验概率,进行敏感性分析:

$$RoV(X_i) = \frac{\varphi(X_i) - \phi(X_i)}{\phi(X_i)} \quad (7)$$

式中: $\phi(X_i)$ 和 $\varphi(X_i)$ 为基本事件 X_i 的先验概率和后验概率;RoV 为变化比 (Ratio of Variation)。

根据后验概率和敏感性值判定基本事件影响海底油气管道泄漏事故发生的重要度,确定关键风险因素。

2 实例分析

以埕北油田中某段海底管道为例,分析海底油气管道泄漏事故风险。该油田的平均水深为 15.8 m。该段海底管道全长 1.6 km,用于连接井口平台和综合处理平台。管道的入口压力为 0.15 MPa,入口温度为 95 °C,环向应力为 2.97 MPa,轴向应力为 204 MPa^[1]。

首先,将海底管道泄漏失效故障树转换为 BN 模型,如图 2 所示。模型的叶节点与故障树的顶事件相对应,为海底油气管道泄漏,其致因包括外部因素和内部因素。外部因素包括腐蚀、外部负载、悬跨和自然灾害;内部因素包括材料缺陷、焊缝缺陷和辅助设备故障。此外,模型的 24 个根节点与表 1 中的 24 个基本事件相对应。

邀请 3 位专家 E_1, E_2 和 E_3 ,采用 BWM 方法计算得到专家权重为 $\mathbf{W} = (0.53, 0.30, 0.17)$ 。采用 SAM,将收集到的专家意见转换为自由双层次犹豫模糊元,通过去模糊化技术将其转化为清晰数值的模糊概率,并进一步转化为相应的先验概率,结果见表 2。

根据 BN 模型、各根节点先验概率和条件概率表,通过正向推理得到海底油气管道泄漏事故的概率值 $P=6.20 \times 10^{-3}$ 。基本事件中的辅助设备老化、人为打孔盗油和海底运动的后验概率较大,是最可

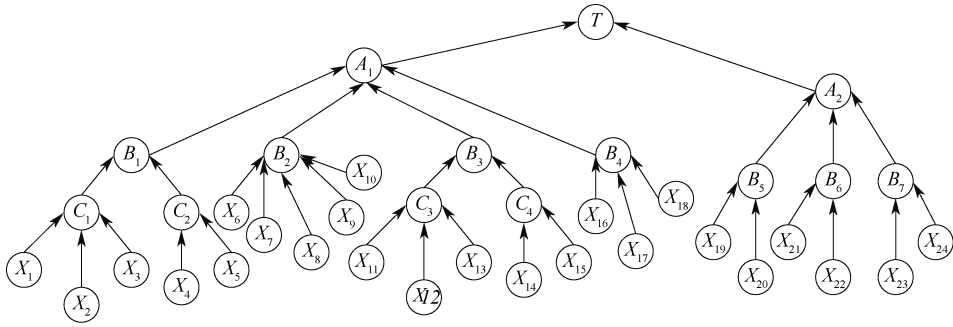


图 2 海底管道泄漏失效 BN

Fig. 2 BN of submarine pipeline leakage

表 2 专家意见的聚合与转化结果

Tab. 2 Evaluation results

基本事件	FPS	FFP	基本事件	FPS	FFP
X_1	0.607 2	1.09×10^{-3}	X_{13}	0.504 9	3.35×10^{-4}
X_2	0.614 5	1.18×10^{-3}	X_{14}	0.257 0	1.93×10^{-5}
X_3	0.460 6	2.01×10^{-4}	X_{15}	0.754 5	5.92×10^{-3}
X_4	0.536 1	4.79×10^{-4}	X_{16}	0.160 2	6.32×10^{-6}
X_5	0.485 9	2.69×10^{-4}	X_{17}	0.670 6	2.26×10^{-3}
X_6	0.446 1	1.70×10^{-4}	X_{18}	0.314 0	3.72×10^{-5}
X_7	0.460 6	2.01×10^{-4}	X_{19}	0.582 1	8.14×10^{-4}
X_8	0.475 4	2.38×10^{-4}	X_{20}	0.597 5	9.71×10^{-4}
X_9	0.696 7	3.05×10^{-3}	X_{21}	0.472 5	2.30×10^{-4}
X_{10}	0.340 1	5.02×10^{-5}	X_{22}	0.562 4	6.49×10^{-4}
X_{11}	0.561 4	6.41×10^{-4}	X_{23}	0.712 5	3.65×10^{-3}
X_{12}	0.318 3	3.91×10^{-5}	X_{24}	0.205 9	1.07×10^{-5}

需在管理中更加重视,采取防控措施降低事故的发生概率。对于辅助设备老化,应开发并引入故障检测系统,实时监测系统运行状态;对于人为打孔盗油,应采用海底管道外损伤预警技术,在发生盗油时能迅速发出报警信号;对于海底运动,尤其是在海底不稳定区域,应考虑采用对海底地形适应性较好、抗疲劳能力较高的柔性软管;对于焊缝、材料的施工缺陷,应改进管道的施工工艺,严格抽查检验管道^[2];对于渔具作用等第三方影响,应加强海底管道的外部防护,如混凝土配重层、埋深等,以防止外部冲击对管道的破坏^[10]。

采用另 3 种方法与文中提出的方法进行对比,结果见表 3 和图 3。根据表 3 和图 3 中的结果,各方法得出的事故概率值有一定差异,但大部分结果的数量级与所提方法得到的结果一致。且后验概率较大的因素和关键因素的排序结果大部分趋势相同。

能导致失效的诱因。根据敏感性分析结果,焊缝施工缺陷、材料施工缺陷和渔具作用是失效发生影响较大的因素。这些关键因素对事故发生影响较大,

表 3 事故概率值和后验概率结果

Tab. 3 Accident probability and posterior probability results

方法	文中方法		未采用 SAM 的 FDHHFLTS 方法		采用 SAM 的梯形模糊数方法		条件概率表仅通过“与/或”逻辑门转化得到的采用 SAM 的 FDHHFLTS 方法	
事故概率	6.20×10^{-3}		6.05×10^{-3}		4.96×10^{-3}		1.55×10^{-2}	
后验概率较大因素排序	X_{23}	2.49×10^{-1}	X_{23}	2.50×10^{-1}	X_9	2.41×10^{-1}	X_{23}	2.36×10^{-1}
	X_9	2.08×10^{-1}	X_9	2.01×10^{-1}	X_{19}	1.40×10^{-1}	X_9	1.97×10^{-1}
	X_{17}	1.54×10^{-1}	X_{17}	9.87×10^{-2}	X_{23}	1.23×10^{-1}	X_{17}	1.46×10^{-1}
	X_{20}	6.64×10^{-2}	X_{19}	9.73×10^{-2}	X_1	1.17×10^{-1}	X_2	7.63×10^{-2}

表 3 中,采用 SAM 的 FDHHFLTS 方法得到的事故概率值与其他 3 种方法相比较,原因是条件概率表完全仅由“与/或”逻辑门转化得到,将事件间关系完全视为确定关系,导致结果与实际工程不符。后验概率较大因素为事故发生最有可能的致因,采用 SAM 的梯形模糊数方法的后验概率排序结果与其他 3 种方法有差异,且出现部分根节点后验概率相同的情况。这是由于在基于梯形模糊数的方

法中,专家进行评价时可选择语言术语较少,导致在后验概率和敏感性分析中不同根节点之间的区别没有被充分体现,且结果不够准确。基于 FDHHFLTS 的方法具有更加丰富的语言术语和专家通过语言术语表达意见时的自由性,使得后验概率结果更加准确,敏感性分析结果更为详细。

图 3 中,无相似聚合的 FDHHFLTS 方法中,部分关键因素排序结果与有相似聚合的 FDHHFLTS

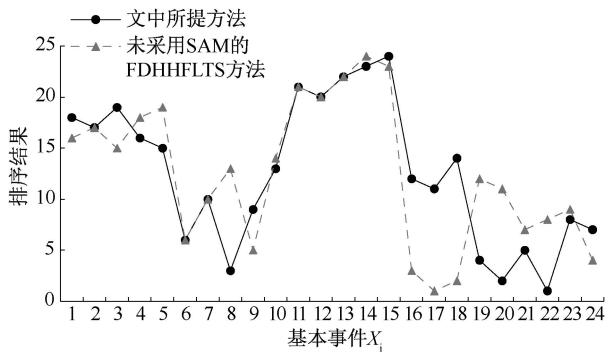


图3 关键因素排序

Fig. 3 Ranking of key factors

相差较大。结合表3中的结果可以看出,对于基于FDHHFLTS的方法,是否采用相似聚合方法对事故概率值、后验概率值和敏感性分析结果都存在一定影响。这是由于无相似聚合时,专家意见聚合得到的模糊概率结果过于倾向权重较大专家的意见。以基本事件 X_{13} 为例,采用文中所提方法和未采用SAM的FDHHFLTS方法得到的模糊概率分别为0.5049和0.4686,相差较大,进而对后续结果产生较大影响。因此,在FDHHFLTS-BN中引入相似聚合方法是必要的,可以实现更好地衡量和表达专家

意见间的差异性和一致性,获得更准确的结果。

3 结论

1) 结合FDHHFLTS与BN,建立FDHHFLTS-BN风险分析方法,并将BWM方法与改进的SAM方法相结合,提出一种新的专家意见聚合方法。所提方法通过BWM从主观角度获取专家权重,并利用SAM通过客观角度聚合专家意见。同时,考虑主客观角度、专家意见间的差异性和一致性,能够充分利用专家意见,合理地完成聚合过程。

2) 案例评估结果表明:基本事件中的辅助设备老化、人为打孔盗油和海底运动的后验概率较大是最可能导致泄漏失效的诱因。焊缝施工缺陷、材料施工缺陷和渔具作用等为事故发生的关键因素。案例结果验证了FDHHFLTS-BN风险分析法应用于海底管道失效风险分析中的可行性及优势。

3) 文中主要致力于在相关历史失效数据缺失的情况下,开展海底管道泄漏失效风险分析。因此,专家意见是文中进行风险分析的主要来源。而未来的研究将侧重于结合机器学习或深度学习技术对海底管道泄漏失效开展长期动态评估。

参考文献

- [1] 张新生, 蔡宝泉. 基于改进随机森林模型的海底管道腐蚀预测[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 69-74. ZHANG Xinseng, CAI Baoquan. Corrosion prediction of submarine pipelines based on improved random forest model [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(8): 69-74.
- [2] LI Xinhong, CHEN Guoming, JIANG Shengyu, et al. Developing a dynamic model for risk analysis under uncertainty: case of third-party damage on subsea pipelines [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 54: 289-302.
- [3] LI Xinhong, ZHANG Yi, ABBASSI R, et al. Probabilistic fatigue failure assessment of free spanning subsea pipeline using dynamic Bayesian network [J]. Ocean Engineering, 2021, 234: DOI:10.1016/J.OCEANENG.2021.109323.
- [4] SULAIMAN N S A, TAN H, ZARDASTI L, et al. Integration of Bayesian network with fuzzy analytical hierarchy process for determining the pipeline conditions [J]. Process Safety Progress, 2022, 41: S187-S196.
- [5] ZAREI E, KHAKZAD N, COZZANI V. Safety analysis of process systems using fuzzy Bayesian network (FBN) [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 57: 7-16.
- [6] MONTSERRAT-ADELL J, XU Zeshui, GOU Xunjie, et al. Free double hierarchy hesitant fuzzy linguistic term sets: an application on ranking alternatives in GDM [J]. Information Fusion, 2019, 47: 45-59.
- [7] LUO Chao, JU Yanbing, DONG Peiwu, et al. Risk assessment for PPP waste-to-energy incineration plant projects in China based on hybrid weight methods and weighted multigranulation fuzzy rough sets [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: DOI:10.1016/J.SCS.2021.103120.
- [8] GUO Xiaoxue, JI Jie, 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] LI Xinhong, CHEN Guoming, ZHU Hongwei, et al. Quantitative risk analysis on leakage failure of submarine oil and gas pipelines using Bayesian network [J]. Transactions of The Institution of Chemical Engineers. Process Safety and Environmental Protection, Part B, 2016, 103: 163-173.
- [10] LI Xinhong, HAN Ziyue, YAZDI M, et al. A CRITIC-VIKOR based robust approach to support risk management of subsea pipelines [J]. Applied Ocean Research, 2022, 124: DOI:10.1016/J.APOR.2022.103187.

作者简介: 刘富鹏 (1988—),男,山东无棣人,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为海洋工程建设、风险评估。E-mail:liufp6@cooec.com.cn。