

渤海海上石油平台的溢油风险概率评估

刘保占^{1,2}, 魏文普³, 段梦兰², 安 伟¹, 靳卫卫¹

(1. 中海石油环保服务(天津)有限公司,天津 300452;2. 中国石油大学(北京),北京 102249;3. 中国海洋石油总公司,北京 100010)

摘 要:本研究通过层次分析法,筛选和分析了海上石油平台溢油风险源,初步建立海上石油平台溢油风险评价指标体系,确定评价指标权重集和隶属度,并运用多级模糊综合评价方法对该类设施溢油风险进行综合评价。结合 SINTEF 井喷/井涌数据库和 DNV 海上平台溢油概率模型,建立了渤海海上石油平台溢油风险概率模型。通过对渤西某一生产平台溢油风险等级进行计算,结果显示,平台评分为 41.6,溢油风险等级中等偏低,溢油风险概率模型按平台数量和油处理量分别为 $F=5.7\times 10^{-5}Q^{-0.3}$ 和 $F=4.0\times 10^{-4}Q^{-0.988}$ 。该评价方法可判断海上石油平台溢油风险等级和溢油风险概率,可为海上石油平台溢油事故应急提供技术支持。

关键词:渤海;海上石油平台;溢油;概率;风险评估

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2017)01-0015-06

Oil spill risk assessment of offshore platform in Bohai Sea

LIU Bao-zhan^{1,2}, WEI Wen-pu³, DUAN Meng-lan², AN Wei¹, JIN Wei-wei¹

(1. China Offshore Environmental Services Co. Ltd., Tianjin 300452, China; 2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China)

Abstract: To comprehensively evaluate the risks of offshore platform oil spill in the Bohai Sea and establish an effective appraisal system, we screened and identified the underlying oil spill sources by means of the analytic hierarchy process. The extent to which oil spill may occur was also considered using a fuzzy comprehensive method. For these purposes, a probability model for predicting the oil spill risks was established by the combination of SINTEF blowout/kick database and DNV oil spill risk assessment model, and a working platform located in the Western Bohai Sea was exemplified. Building on the platform number and oil processing capacity, two models of $F=5.7\times 10^{-5}Q^{-0.3}$ and $F=4.0\times 10^{-4}Q^{-0.988}$ were set up for this platform, respectively. A total score of 41.6 implied a moderate level of oil spill risk. The risk assessment method can be utilized to effectively evaluate the degree and probability of offshore platform oil spill and consequently offer the important technical support during emergency response operations.

Key words: offshore platform; oil spill; probability; risk assessment; Bohai Sea

随着海洋经济的迅猛发展,人类在海洋中的作业越来越多,海洋石油平台已逐渐成为海上流行的建筑物,海洋成为能源开发的重要基地。海上平台的不断增多,造成平台溢油事故的风险也

随之增大。海上石油平台结构复杂,长期暴露在恶劣的海洋环境中,生产系统阀门失效、管道腐蚀、渗漏、破裂等都会造成原油泄漏事故发生。海上石油平台溢油事故不仅危害海洋生态系统,对

海洋渔业、养殖业及旅游业同样存在极大的威胁,严重影响了经济发展和海洋环境保护。2010 年英国石油公司在美国墨西哥湾租用的钻井平台“深水地平线”发生爆炸,导致大量原油泄漏,约有 490 万桶原油从油井中泄漏,酿成一场经济和环境惨案。因此,开展海上石油平台溢油事故风险评价和风险管理具有重要的现实意义。

目前国内外对船舶和海底管道的溢油风险评价研究做了大量的工作。1974 年 Devanney 等^[1]利用贝叶斯方法研究了船舶溢油事故发生次数、规律等概率特征,但这种随机理论方法并不适用于局部海域溢油概率分析;肖景坤等^[2]应用概率与数理统计、人工神经网络等方法,对我国海域内油船溢油事件风险概率、溢油因素、危害预报等进行了全面的理论分析和应用研究,建立了船舶溢油风险评价模型,为解决船舶间发生溢油提供了较好的方案;吕妍等^[3]对海底油气管道溢油可能性风险进行分析,并综合评价海底管道溢油危害后果,构建了海底管道溢油风险源数据库及风险评价体系。对海洋石油设施安全风险分析的研究,挪威一直处于领先地位,1991 ~ 2011 年先后颁布了一系列的海洋工程风险分析和技术规范,其中具有代表性的有“RA 规范”、NORSOK 规范、HSE 管理条例,分别规定了风险评估领域^[4]、安全规范及技术法规、风险可接受准则^[5]等。现如今,英国、美国和澳大利亚等国家在海洋石油设施风险评估体系方面也取得很大成果,主要石油公司如 BP、壳牌等均建立了公司内部风险评估规范。我国海上石油设施安全风险评估起步较晚,但也开展了较多相关研究,中国海洋大学在海洋平台风险评估方法的选择上取得较大成果^[6-7],如运用定量风险评估和多位随机变量联合概率随机模拟技术、整体不确定性分析及主要不确定性因素敏感性分析等。对于海上石油平台溢油风险评价研究,国外做了大量工作,如对设备故障造成的泄露等风险进行模拟,并对模型和监测系统进行描述^[8];而我国海洋平台溢油风险分析处于起步阶段,更多是基于历史统计数据定性分析或者事件树进行定量分析^[9-10]。随着国际交流增多,我国在海上石油平台溢油风险评价领域逐渐与国际

接轨。本文通过层次分析方法和模糊综合评价方法对海上石油平台溢油风险等级进行分析,结合溢油事故数据库对渤海海域某生产平台溢油概率进行评价,建立溢油概率计算模型,对海上石油平台溢油风险做出评判,旨在为提高我国海上石油平台的管理水平及安全运营提供技术支持。

1 溢油风险源的确定

确定溢油风险源是溢油风险评价的第一步,是对所评估的主体造成的溢油事故潜在可能性分析识别,并针对风险导致的溢油后果危害给出改进风险的建议,在此基础上将溢油风险量化。海上石油平台无论是从最初的勘探、开发,或是完井后的生产、外输作业,都存在溢油风险。海上石油平台具体的溢油风险源分析结果见表 1。

2 溢油风险评价

2.1 溢油风险评价指标体系构建

根据海上石油平台溢油风险源的筛选分析结果,构建溢油风险指标体系^[11](图 1),其中一级指标定义为 $U = \{ U_1 \text{ 平台参数}, U_2 \text{ 平台疲劳老化}, U_3 \text{ 海区环境}, U_4 \text{ 第三方破坏}, U_5 \text{ 人为因素}, U_6 \text{ 应急能力}, \dots, U_n \}$,二级指标体系依次展开。溢油风险指标的确定可根据平台具体属性、作业实时环境及设施状况进行删减,比如极端天气中海冰仅为渤海海域冰期时的一项重要指标因子。

得到主观评价数据后,需要对判断矩阵进行一致性检验,判断求出的权重值是否合理,当判断偏移一致性过大时,将判断矩阵的权向量结果作为决策依据是不可靠的^[12]。为此在求出判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 后需进行一致性检验,一致性指标 CI (consistency index)计算方法为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{1}$$

其中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵 W 的最大特征根; n 为 W 的阶数,是衡量不一致程度的数量标准。

判断矩阵 A 的“随机一致性指标” RI (random index)。

对于 1 ~ 9 阶判断矩阵,Saaty^[13]给出 RI 值如表 3。

表 1 海上石油平台溢油风险源分析
Tab.1 Oil spill risk sources of offshore platform

风险类型	风险源描述
地质性溢油	钻井液不恰当的注入会造成地层压力异常,如储层附近存在连通自然地质断层;此外,油气田表层套管深度不足或固井质量差,当钻遇到异常高压油气层,同样可能发生溢油事故。
操作失误	主要包括人员操作与指挥失误,管理能力欠缺;不掌握控井技术、应变能力差或措施不当;设备的维护、安装、调试未按要求进行。
振动、碰撞	振动、撞击及外力作用主要来自落物及过往船只,造成压井设备、管线、阀门损坏或连接松动而泄露使压力降低。
海底管道与立管泄露	海底管道与立管可能因穿孔、破裂及腐蚀等导致油气泄露。外部原因包括落物撞击、渔船拖网或误抛锚、自然灾害等;内部原因有无防护层、材料缺陷等;此外还有人员误操作等。
储油系统风险	油水罐、工艺管线外部密封性较差;井口、出油管线的安全装置失效;罐排放口蒸汽释放(雷击点火源),油泵过热或故障。
井控措施失效	钻井作业 钻井过程中,一级井控措施失效主要包括抽汲、未预报的高压及固井水泥凝固时静液压力丧失等;二级井控措施失效原因主要有防喷器组故障、方钻杆阀(管住安全阀)故障和套管泄露。
	修井作业 一级井控措施失效包括抽汲压力、过低的泥浆相对密度和气体聚集;二级井控失效的主要原因是防喷器和管住安全阀发生故障。
	生产作业 一级井控措施失效主要包括固井质量差、油管或环空泄露、地面控制安全阀失效等;二级井控措施失效原因为采油树失效、环空阀失效、井口密封失效及套管泄露等。
	警报、控制系统失效 可燃气体探测器、预警预报装置、电控截止阀等设备失效。
应急系统失效	通讯失效 通讯系统失效或人为操作失误。
恶劣气候	风、浪、流、雾等恶劣天气情况下易造成设备操作失灵,过往船只碰撞等事故发生。

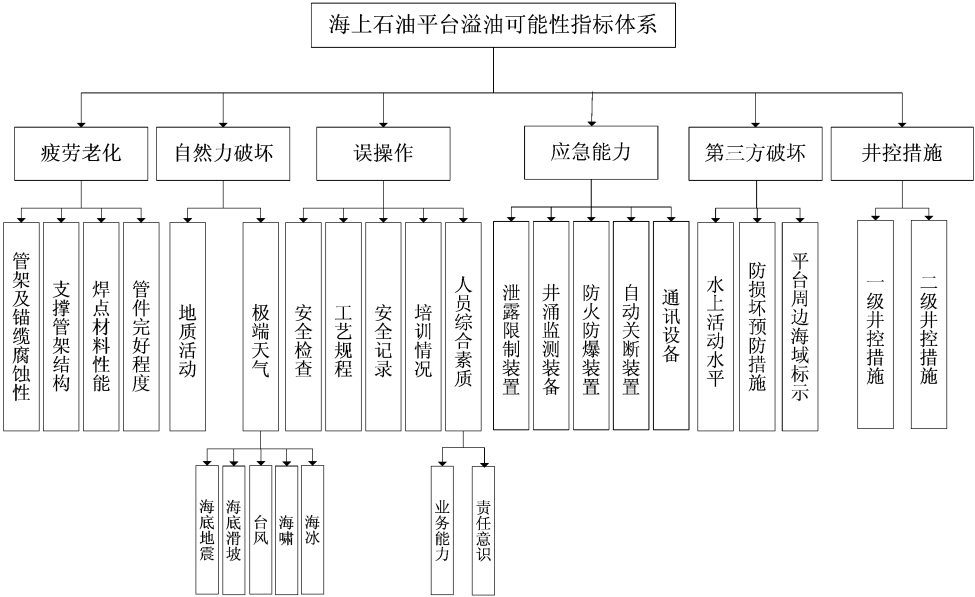


图 1 海上石油平台溢油风险评价指标体系

Fig. 1 Index system of oil spill risk assessment of offshore platform

本研究中,采用五级评语,溢油可能性评语集表示为 $V=\{V_1$ 溢油可能性极小(10 分), V_2 溢油可能性小(30 分), V_3 溢油可能性中(50 分), V_4 溢油可能性大(70 分), V_5 溢油可能性极大(100 分) $\}$ 。

2.2 评价指标权重集的确定

根据建立的溢油风险评价指标体系,可确定

表 2 各标度值含义

Tab. 2 Meaning of each scale value

重要性等级	标度值
表示元素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 相比,具有同样重要性	1
表示元素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 相比,前者比后者稍重要	3
表示元素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 相比,前者比后者明显重要	5
表示元素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 相比,前者比后者强烈重要	7
表示元素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 相比,前者比后者极其重要	9
若元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 重要性之比为 a_{ij} ,元素 <i>j</i> 和 <i>i</i> 重要性之比为 $1/a_{ij}$	1/3, 1/5, 1/7, 1/9
重要程度介于两者之间	2, 4, 6, 8, 1/2, 1/4, 1/6, 1/8

表 3 RI 系数

Tab. 3 Coefficient table of RI

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.94	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

计算“随机一致性比率” CR (consistency ratio):

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{2}$$

当 $CR<0.10$ 时,认为判断矩阵具有满意的一致性。否则,必须重新进行两两比较,调整判断矩阵中的元素,直至判断矩阵具有满意的一致性为止。判断矩阵中计算出的最大特征根所对应的特征向量经标准化后,才可作为层次分析的排序权值。

2.3 评价指标隶属度确定

隶属度是实现评价指标对于不同风险等级描述的有效方法,指各个因素对应于评价集中元素的可能性。海上石油平台溢油风险因子的隶属度能够反映出各级评价标准属于某一溢油风险等级的变化过程。目前,确定隶属度的方法主要有:专家经验法、模糊统计法、二元对比排序法等^[15-16]。本研究采用专家经验法来构造单因素评价矩阵,专家调查表如表 4。

表 4 单因素隶属度调查

Tab. 4 Membership questionnaire of single factor

评价指标	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
依据 1					
依据 2					
...					
依据 3					

根据专家经验以及判断准则得到的各个指标

风险指标间的隶属关系,即评价指标的权重,本研究采用层次分析法求取各因子的权重,通过两两比较建立判断矩阵。因子间标度值及意义的获得按照 1~9 标度表(表 2)赋予^[14],得到目标层指标的重要性判断矩阵 W 。

具体评价标准与可能性等级建立对应关系,实现单因素溢油风险等级的综合评价。

2.4 模糊综合评价

根据确定的评价指标权重和隶属度,构建海上石油平台溢油风险评价模型,具体方法如下。

根据评价指标体系,以疲劳老化为例介绍初次模糊综合评价。利用二级指标危险度评价标准子集表,建立疲劳老化的隶属度矩阵(R_1)。

$$R_1 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \end{pmatrix} \tag{3}$$

各二级指标的权重为 $A_1=(A_{11},A_{12},A_{13},A_{14})$,则疲劳老化模糊综合评价为:

$$B_1=A_1 \cdot R_1=(b_{11},b_{12},b_{13},b_{14},b_{15})$$
$$=(A_{11},A_{12},A_{13},A_{14}) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \end{pmatrix} \tag{4}$$

其中: B_1 为海上石油平台疲劳老化参数的溢油风险评价矩阵; A_1 为疲劳老化参数指标中二级风险指标的权重分配; R_1 为疲劳老化参数指标对应的隶属度矩阵。

同理,根据此公式计算其他指标溢油风险评价矩阵 $B_2 \sim B_6$ 。

多层次评价结果均由上层评价输入,由一级综合模糊评价结果可得到总评价矩阵,由三级指

标综合评价结果,可求出二级指标评价向量,由二级指标综合评价向量,即可求出海上石油平台溢油风险等级综合评价结果。

3 溢油风险评估模型构建

SINTEF 海上井喷数据库是较全面分析井喷/井涌风险评价事件数据库,数据库收录了自 1955 年 573 起世界范围的海上井喷/井涌事故、美国墨西哥湾外大陆架和北海地区的公开数据。数据库中包含了 51 个不同的选项用于表述与井喷相关的各种参数^[17]。

DNV 对海上勘探井溢油事件建立的概率模型为 $F=3.1 \times 10^{-4} Q^{-0.3}$,对开发井溢油事件建立的概率模型为 $F=2.5 \times 10^{-4} Q^{-0.3}$,式中: 3.1×10^{-4} 和 2.5×10^{-4} 为每口井每年发生井喷的概率; Q 为发生井喷时的溢油量^[18]。

DNV 对海上生产井溢油事件建立的概率模型为:

(1)按平台数量: $F=6.9 \times 10^{-5} Q^{-0.3}$,式中: 6.9×10^{-5} 为每口井每年发生井喷的概率; Q 为发生井喷时的溢油量。

(2)按油处理量: $F=0.019 Q^{-0.988} P$,式中: 0.019 为单个平台每年每 10^6 t 油生产量溢油概率, Q 为溢油量(t); P 为平台油处理量。

由于 SINTEF 井喷数据库收录的是世界范围内井喷/井涌的有关记载及美国墨西哥湾外大陆架和北海地区(英国和挪威)的公开数据资料,这些公开数据资料和有关井喷/井涌的记载中的数据并不直接关联,所以不能直接用来确定井喷概率。结合 SINTEF 数据库和 DNV 海上石油平台溢油概率模型,根据研究得出的海上石油平台溢油可能性评价体系对其调整,引入风险因子对渤海海域石油平台溢油概率进行计算,风险因子的确定首先通过随机选择 SINTEF 井喷数据库中 10 个平台进行评分,然后求出评分平均值为 50,最后通过渤海石油平台评分与美国墨西哥湾外大陆架和北海地区平台评分对比,得到渤海海上石油平台溢油评价模型的风险因子为:

$$a = \frac{\text{海上石油平台评分}}{50} \quad (5)$$

渤海海域石油平台溢油风险评价模型:

$$\text{勘探井: } F = \frac{\text{钻井平台评分}}{50} \times 3.1 \times 10^{-4} Q^{-0.3} \quad (6)$$

$$\text{开发井: } F = \frac{\text{钻井平台评分}}{50} \times 2.5 \times 10^{-4} Q^{-0.3} \quad (7)$$

生产井:

(1)按平台数量:

$$F = \frac{\text{生产平台评分}}{50} \times 6.9 \times 10^{-5} Q^{-0.3} \quad (8)$$

(2)按油处理量:

$$F = \frac{\text{生产平台评分}}{50} \times 0.019 Q^{-0.988} P \quad (9)$$

4 应用算例

以渤海渤西油田某一生产作业平台为例。该平台建于 2004 年,输送介质为油气水混输,年产量 25600 t/a。平台所处海域平均水深 13 m,一般风速 26.6 m/s,常年最高气温 33℃,最低气温 -13℃,结冰期 100 d 左右,极端天气出现频率虽然不高,但危害较大。海底地质构成十分复杂,地貌形态不稳定,但地质因素造成损坏性活动的可能性较低。平台配有压力、常压装置的安全保护装置,并有详细的生产作业规范、排污记录及相关资质证明,平台自 2007 年已进行了长期的检测、评估和维修工作。平台结构大气区采用涂层保护,无腐蚀;潮汐飞溅区有海洋生物附着,全浸区无附着。平台支撑管架有稍微松动,焊接位置有明显的退化,焊接材料性能下降,关键连接阀及管件有明显微裂纹。平台周边海域经常有油轮和捕鱼船经过,平台上有相应的通信服务系统,能够及时联系可能对平台有影响的过往船只,平台周边海域有明显的记号和标示。每天对平台的安全阀、防喷器、管架等关键部件进行检查,同时进行安全记录,并突出主要问题,阀门维护、安全装置检查及校准、生产操作等工艺规程较好,平台技术人员综合素质处于较高等级,每年都会进行专业培训,培训科目全面。生产作业过程中井下井控措施正常,当发生井控失效时,能够及时的发现并进行相应的调整。平台溢油应急装置配备齐全,并配有溢油回收装置和良好的通讯系统,发生溢油事故时,可及时与陆上终端及溢油应急人员联系。

该平台溢油概率计算过程如下(以第三方破坏为例)。第三方破坏指标重要性判断矩阵见表 5。

表 5 第三方破坏指标重要性判断矩阵

Tab.5 Weight matrix of third party damage index

	海上活 动水平	防损坏预 防措施	平台周边 海域标示	权重
海上活动水平	1	3	5	0.6370
防损坏预防措施	1/3	1	3	0.2583
平台周边海域标示	1/5	1/3	1	0.1047
$\lambda_{\max}=3.0385, CR=0.03<0.10$, 满足一致性检验				

第三方破坏指标隶属度矩阵结果为：

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

故第三方破坏参数溢油风险模糊综合评价结

表 6 某渤海海上生产平台溢油风险模糊综合评价结果

Tab.6 Fuzzy comprehensive assessment results of oil spill risk in a Bohai offshore production platform

评价指标	初级评价结果	综合评价结果	平台评分
疲劳老化	0.09,0.1,0.36,0.29,0.16	0.18,0.27,0.35,0.16,0.04	41.6
自然力破坏	0.45,0.15,0.25,0.15,0		
第三方破坏	0.25,0.11,0,0.38,0.26		
误操作	0.30,0.53,0.17,0,0		
应急能力	0.60,0.33,0.07,0,0		
井控措施	0,0.20,0.60,0.20,0		

该生产平台溢油风险概率模型为：

按平台数量： $F = \frac{\text{生产平台评分}}{50} \times 6.9 \times$

$10^{-5} Q^{-0.3} = 5.7 \times 10^{-5} Q^{-0.3}$ (10)

按油处理量： $F = \frac{\text{生产平台评分}}{50} \times$

$0.019 Q^{-0.988} P = 0.0169 Q^{-0.988} P = 4.0 \times 10^{-4} Q^{-0.988}$ (11)

5 结论

本文对渤海海上石油平台溢油风险进行评价,根据平台实际情况,构建了海上石油平台溢油风险评价指标体系,引入模糊综合评价方法建立海上石油平台溢油风险等级评价方法。并使用溢油数据库方法,建立渤海海域石油平台溢油概率模型,为我国溢油应急计划提供技术支持。

参考文献：

[1] DEVANNEYIII J W, STEWART R J. Bayesian analysis of oil spill statistics[J]. Marine Technology II, 1974, 10: 365-382.
[2] 肖景坤. 船舶溢油风险评价模式与应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2001.
[3] 吕妍, 吕立功, 魏文善, 等. 海底油气管道溢油风险评价和风险管理[J]. 中国造船, 2012, 53(S2): 452-457.
[4] NPD. Regulations relating to implementation and use of risk analysis in the petroleum activities[S]. Stavanger: Norwegian Petroleum Directorate, 1991.

果为：

$$B_3 = W_3 \cdot R_3 = (0.64, 0.26, 0.10) \cdot$$
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.25, 0.11,$$

0, 0.38, 0.26)

同理,按照上述示例,得到疲劳老化、自然破坏力、误操作、应急能力和井控措施初级模糊综合评价评价结果,根据加权平均原则,得到该生产平台溢油风险评分,见表 6。

[5] VINNEM J E. Offshore risk assessment: principles, modelling and applications of QRA studies[M]. London: Springer, 2007.
[6] 牟善军. 海上石油工程风险评估技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
[7] 吕秀艳, 刘德辅, 牟善军, 等. 基于随机分析和概率预测的固定式海洋平台结构风险评估研究[J]. 中国海洋平台, 2005, 20(5): 6-11, 16.
[8] NATARAJAN S, SRINIVASAN R. Multig-model based process condition monitoring of offshore oil and gas production process[J]. Chemical Engineering Research and Design. 2010, 88(5/6): 572-591.
[9] 尹群, 孙彦杰, 李良碧. 油气泄漏灾害下海洋平台风险评估及安全措施研究[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2008, 22(2): 1-5.
[10] 李文龙, 谭家华. 超大型海洋浮式储油系统的风险评估[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 1-8.
[11] 刘保占, 魏文善, 段梦兰, 等. 海上钻井平台溢油风险评价和风险管理[J]. 环境工程, 2015, 33(S): 656-660, 823.
[12] 刘刚, 金业权, 李峰, 等. 层次分析法在井控风险可控诱因分析中的应用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 137-141.
[13] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 5-7.
[14] 李锋, 余先友, 杨谭. 塔里木油田勘探井井控安全技术和方式探索与实践[J]. 钻采工艺, 2006, 29(5): 111-113.
[15] 肖芳淳, 张效羽, 张鹏, 等. 模糊分析设计在石油工业中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 1-10.
[16] 于少伟. 基于区间数的模糊隶属度函数构建[J]. 山东大学学报: 工学版, 2010, 40(6): 32-35, 93.
[17] SINTEF. Blowout and well release characteristics and frequencies[R]. Report No. STF50 F06112, 2006.
[18] DNV. Assessment of the risk of pollution from marine oil spills in Australian ports and waters[R]. Report No. PP002916. DET Norske Veritas, 2011.