

海洋石油平台溢油风险评价研究

吕 妍^{1,2}, 魏文普³, 张兆康¹, 王 佳², 安 伟¹

(1. 中海石油环保服务(天津)有限公司, 天津 300452; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋石油总公司, 北京 100010)

摘要: 通过层次分析法, 系统分析了我国钻井平台及生产平台的溢油风险因子, 初步建立了该类设施的溢油风险评价指标体系, 并运用多级模糊综合评级模型对目标设施的溢油风险进行综合评价。利用该评价方法对渤海某一钻井平台进行溢油风险分析, 结果表明该平台溢油风险等级较低, 风险因子中海区环境及平台疲劳老化程度的风险相对突出。该评价方法可及时判断目标设施的溢油风险等级, 为减少、预防各类平台溢油事故提供技术支持。

关键词: 海洋石油平台; 溢油事故; 溢油风险评价; 模糊综合评价

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)01-0033-06

doi: 10.11759/hyqx20120611002

海洋石油平台是海上油气勘探开发的重要设施, 随着我国海洋石油工程迅猛发展, 海洋石油平台在建、在役规模进一步扩大, 其潜在的溢油风险更是成为国内政府、企业的关注重点。2011年6月, 渤海蓬莱19-3油田B平台及C平台陆续发生溢油现象, 对该海域的海洋环境以及周边渔业、水产养殖业等均造成严重的影响, 也为海上石油平台溢油风险防范敲响了警钟。

海洋石油平台的溢油风险评价是在保证该类设施安全运行的前提下实现更大经济效益的必要手段, 是实现海洋石油平台从经验管理向科学管理进行过渡的重要技术。目前, 我国海洋溢油事故管理主要采用“危机管理”模式, 对海上石油平台溢油风险的研究极为缺乏, 导致海洋石油平台溢油源识别层次混乱、评价标准主观性强等问题, 不能有效反映目标设施的溢油风险等级。2011年7月8日, 国家海洋局发出通告, 要求全面开展海洋石油勘探开发溢油风险排查与整改, 进一步强化溢油风险管理措施。由此可见, 建立系统的海洋石油平台溢油风险评价体系, 完善海洋石油平台溢油风险的评价方法是目前我国海洋溢油污染防治工作亟待解决的重要任务。

本文在国内外对海洋石油平台溢油风险研究的基础上, 系统归纳了我国海洋石油钻井和生产平台的溢油风险因子, 构建了海洋石油平台的溢油风险评价指标体系, 并首次运用模糊综合评价模型量化该类设施溢油的风险等级, 为减少、预防各类平台溢油事故提供技术支持。

1 海洋石油平台溢油风险的评价方法

海洋石油平台的溢油风险评价即对该类设施的工程特点及其作业环境进行分析, 识别易于导致该设施发生溢油事故或影响事故后果的关键因子, 利用一系列评价方法及模型对该设施的溢油风险等级进行划分。近几年, 美国、挪威等欧美发达国家已经从海洋环境管理的实践中提出量化溢油风险的必要性, 并在量化海洋石油平台溢油风险评价中取得了一定成果, 例如事故树、事件树、模糊数学理论等定量评价方法都在完善海洋石油平台溢油风险评价研究中发挥了重要作用^[1-2]。而我国在海洋石油平台溢油风险量化评价方面尚属空白, 缺乏系统的方案和研究工具, 可借鉴的资料较有限。

海洋石油平台溢油风险的影响因素繁多, 而且各因素之间相互联系、制约, 简单的评价模型难以比较出各个指标之间的优先等级, 本研究引用模糊综合评价模型对我国海洋石油平台的溢油风险进行分析。模糊综合评价模型是模糊数学的一种具体应用, 综合考虑评价事物的各个相关影响因素, 依据模糊变换原理和最大隶属度原则, 对评价对象进行综合评价。该模型已被多次运用到船舶溢油风险评价的研究中^[3-4],

收稿日期: 2012-06-11; 修回日期: 2013-10-20

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(2012418012)

作者简介: 吕妍(1984-), 女, 天津人, 工程师, 博士, 目前研究方向为海洋溢油风险评价及管理, 电话: 18222519591, E-mail: lvyan@coes.org.cn

一般按照溢油风险因子识别、评价指标体系建立、权重和隶属度建立、模糊综合评价和溢油风险等级确定五个步骤进行,其评价流程如图 1 所示。

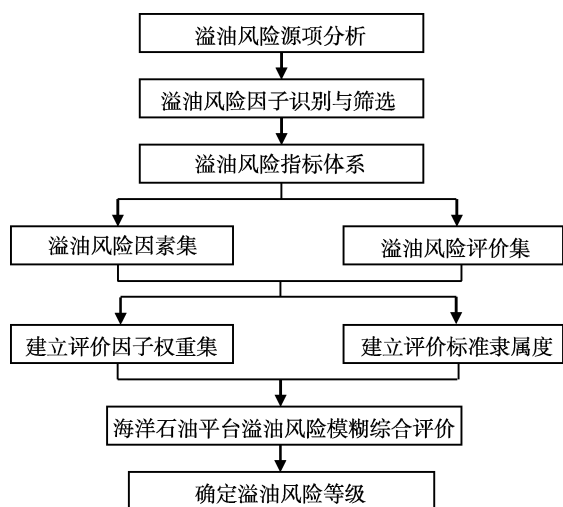


图 1 海洋石油平台溢油风险模糊综合评价流程

Fig. 1 Schedule of oil-spill risk assessment on offshore platform using fuzzy comprehensive evaluation

2 海洋石油平台溢油风险指标体系

评价海洋石油平台的溢油风险等级需从溢油事故可能性和溢油后果可控能力两方面考虑。溢油事故可能性即溢油事故发生的概率。造成海洋石油平台溢油的主要原因之一是海洋平台发生损坏、损毁事故;除此之外,地质性溢油也是近期较为关注的海上平台溢油风险源。通过对国内外海洋平台损毁事故进行统计分析,发现火灾及爆炸、碰撞风险、下落物体风险是造成海洋石油平台损伤、损毁事故的重要原因^[5-6],其涉及的关键风险因子涵盖了平台的作业管理、人员操作、平台老化及安全装置配置等。恶劣的气象条件及复杂的地质情况是造成海洋石油平台损毁的关键因素。据报道,从 1976 年至今,在我国近海油气田所发生的海洋石油平台事故中,不良地基引起的平台失效损毁事故有 7 起,而由恶劣气象条件(如台风、海冰)所造成的平台事故 5 起^[7]。地质性溢油主要是由于不恰当的钻井/注水使储层压力异常高压造成储层流体沿着地质断层运移至海床而发生油气泄漏。因此,对于地质性溢油评价一方面要考察作业方是否有钻屑回注或注水系统的作业规范及相关作业风险评价,另一方面要结合作业海域的地质及油藏情况,评价钻井及采油作业是否严格按照相关作业规范进行。在实际的海上溢油风险排

查工作中,对作业方溢油后果可控能力的评价侧重于溢油预警及应急能力的评估,评价平台作业方是否可及时发现溢油源,有效控制溢油事故,将溢油量/范围降低到最低水平。

根据以上分析的我国海洋石油平台溢油风险的关键因子,确定了 8 个一级溢油风险评价指标,分别为:平台设计参数、作业方式、海区环境、地质性溢油、人为因素、平台疲劳老化、组织管理能力以及应急能力。海上石油平台按照作业方式可分为钻井平台及采油生产平台,考虑到其工程性质及作业环节存在较大差异,因此针对这两类作业方式所建立溢油风险指标体系也略有不同。钻井过程中,由于对地层、油藏等信息的不确定,易造成地层溢油,甚至发生井涌,如若控制不及时或控制失效,就造成后果严重的井喷事故,因此在评价钻井平台的溢油风险时,关键的溢油评价指标包括:钻井类型、是否有合理的钻井方案并严格按规范操作、地层及油藏的了解程度、钻井顶部 TDS 的配备情况、井涌检测设备及井喷控制装置的完好程度等。海洋石油生产平台发生井喷的概率较低,发生溢油的可能性主要是由于过驳船舶的碰撞、外输失误以及油气处理设备破裂等造成的原油泄漏,因此在对海洋石油生产平台进行溢油风险分析时需格外关注油气外输情况,平台的压力及常压设备的安全装置配备、油水罐和工艺管线外部密封性以及注水系统工作情况等。海洋钻井平台和石油生产平台的关键溢油风险因子及评价指标体系如表 1 所示。

通过问卷调查形式由海上平台作业人员及相关专家对上述溢油评价指标进行打分(参与人员 > 30 人),初步确定了该溢油风险评价体系中各指标的权重分配。表 1 中所示权重分配仅为示例,评价者可根据海洋石油平台设施情况及环境实际情况进行调整。例如,海冰情况仅为作业于渤海海域尤其是辽东湾的平台评价溢油风险的一项指标,其他海域可以考虑减少该项指标的权重或忽略该项指标。

3 海洋石油平台溢油风险的模糊综合评价

3.1 因素集和评价集

根据建立的风险指标体系,海洋平台(钻井平台及生产平台)溢油风险一级评价指标的因素集为 $U = \{U_1 \text{ 平台设计参数}, U_2 \text{ 作业方式}, U_3 \text{ 海区环境}, U_4 \text{ 地质性溢油}, U_5 \text{ 人为因素}, U_6 \text{ 平台疲劳老化}, U_7 \text{ 组织}$

管理能力, U_8 应急能力}。二级指标的因素集按照所构建的评价指标体系依次展开。

本研究将溢油风险等级划分为五个等级, 评价集表示为 $V = \{V_1 \text{ 溢油风险极小}, V_2 \text{ 溢油风险小}, V_3 \text{ 溢油风险中等}, V_4 \text{ 溢油风险大}, V_5 \text{ 溢油风险极大}\}$ 。

表 1 海洋石油平台溢油风险评价指标体系

Tab.1 Factor system of oil-spill risk assessment on offshore platform

U_i	A_i	U_{ij}		A_{ij}	
		钻井平台	生产平台	钻井平台	生产平台
平台设计参数	0.05	平台类型	平台属性	0.08	0.33
		设施年龄	设施年龄	0.24	0.12
		平台和装置的星级证明文件	火炬系统的液位保护装置	0.30	0.25
		助航标志与信号	助航标志与信号	0.23	0.20
		应对灾害设计	应对灾害设计	0.15	0.10
作业方式	0.18	钻井类型	是否有油气生产作业	0.28	0.18
		钻井顶部 TDS 的配备情况	压力、常压装置的安全保护装置	0.25	0.33
		钻井泥浆及处理方式	油气外输方式	0.13	0.28
		钻井规范并执行情况	油气生产装置是否有异常情况记录	0.34	0.21
海区环境	0.09	气象条件	气象条件	0.30	0.30
		海冰状况	海冰状况	0.15	0.15
		平台周围水域水上活动情况	平台周围水域水上活动情况	0.20	0.20
		巡航频率	巡航频率	0.35	0.35
地质性溢油	0.20	井下条件	井下条件	0.13	0.07
		钻屑回注压力/地层破裂压力	注水压力/地层破裂压力	0.35	0.33
		钻屑回注是否得到海洋局批准	注水方式	0.23	0.16
		地质参数及作业压力评价周期	是否有注水系统评价报告	0.29	0.23
		-	地质参数及作业压力评价周期	-	0.21
人为因素	0.12	业务能力	业务能力	0.40	0.40
		身体状况	身体状况	0.15	0.15
		责任意识	责任意识	0.45	0.45
平台疲劳老化	0.10	管架或锚链腐蚀性	管架或锚链腐蚀性	0.15	0.10
		支撑管架结构松动	节点退化情况	0.35	0.20
		焊点材料性能下降	焊点材料性能下降	0.20	0.15
		阀及管件完好程度	油水罐、工艺管线外部密封性	0.30	0.18
		-	井口、出油管线的安全装置情况	-	0.18
		-	关键连接阀及管件完好程度	-	0.18
管理能力	0.12	安全管理体系	安全管理体系	0.35	0.35
		安全检查体系及执行情况	安全检查体系及执行情况	0.30	0.30
		安全记录	安全记录	0.20	0.20
		员工培训	员工培训	0.15	0.15
应急能力	0.14	泄漏限制装置	泄漏限制装置	0.15	0.20
		井涌监测设备	可燃气体及火灾报警系统	0.15	0.20
		可燃气体及火灾报警系统	防火、防爆装置	0.12	0.20
		防火、防爆装置	防井喷装置	0.15	0.15
		应急计划及现场溢油应急资源	溢油应急计划及资源配置	0.08	0.13
		井控设备组合	平台通讯系统配备	0.15	0.12
		压井阻流方式	-	0.12	-
		平台通讯系统配备	-	0.08	-

注: U_i 表示一级指标; U_{ij} 表示二级指标; A_i 表示一级指标权重; A_{ij} 表示二级指标权重; -表示没有评价指标

油风险中等, V_4 溢油风险大, V_5 溢油风险极大}={1分, 2分, 3.5分, 5分, 7分}。

3.2 评价指标隶属度的确定

隶属度是实现评价指标相对于不同风险等级量化描述的有效方法, 这种方法可体现不同评级指标危险等级高低的规律。在隶属度的确定方面, 通过专家的经验以及概率分布规律, 可将构造的风险因子评价标准划分至五个不同的危险等级中($V_1 \sim V_5$)。海洋石油平台溢油风险因子评价标准的隶属度模糊子集表能够反映各级溢油风险评价标准属于某一溢油可能性等级的变化过程。本文仅以海洋钻井平台中钻井类型及泄漏限制装置风险隶属度为例, 介绍评价指标隶属度在该评价方法中的应用。

海洋石油钻井总体分为勘探钻井和生产钻井两类。在勘探钻井中还可分为初探井钻井、详探井钻井和评价井钻井; 在生产钻井中可分为开发初期的生产井钻井和开发中后期的调整井钻井。我国自1966年至2010年先后在渤海、东海、南海东部和南海西部海区已钻勘探井、评价井和生产井2000余口, 共发生4次井喷(主要为勘探井和评价井), 在生产井钻井中尚未发生过井喷事故, 因此生产井/调整井发生井喷的风险等级要比其他类型钻井低。钻井类型溢油危险度的隶属度子集表见表2。

表2 钻井类型危险度评价标准的隶属度子集表
Tab.2 Membership degrees of type of well drilling

钻井类型	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
生产井/调整井	0.2	0.6	0.2	0	0
评价井	0	0.2	0.6	0.2	0
详探井	0	0	0.2	0.6	0.2
初探井	0	0	0	0.2	0.8

表3 泄漏限制措施危险度评价标准的隶属度子集表
Tab.3 Membership degrees of devices of oil spilling control

应急关断装置类型	操作人员对误报或溢油判断能力	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
自动截断阀	-	0.2	0.8	0	0	0
中控室控制	优(专门培训, 经验丰富)	0.2	0.7	0.1	0	0
	良(经验丰富)	0	0.2	0.6	0.2	0
	差(经验不足且有误判)	0	0	0	0.2	0.8
手动关断	经验丰富, 有专门培训	0	0.2	0.4	0.4	0
	经验不足	0	0	0	0.1	0.9

注: -表示未评价

泄漏限制即应急关断装置的评价主要通过应急关断类型及操作人员对溢油判断的能力进行综合评估。自动关断阀可根据压力、流量的变化及时打开, 迅速关断溢油源, 避免溢油量扩大; 然而, 这类设施也常常因为系统流量/压力不稳定而误开启, 影响正常作业。很多平台采用中控室的远程操作来控制溢油。评价中控室是否可及时、有效控制溢油源, 需对操作人员的溢油判断的及时性和正确性进行评估, 如果操作人员经过溢油培训, 海上作业经验丰富, 可对设备异常情况及时作出反应, 那么关断溢油源的反应时间就可以缩短, 其溢油控制能力较高。对于手动关断装置, 从操作人员识别溢油到关断溢油源, 必须考虑一定延时, 因此溢油控制能力相对较低。表3列出泄漏限制装置危险度评价标准的隶属度分配。

3.3 模糊综合评价

确定了评价指标的权重及隶属度后, 便可建立海洋石油平台溢油风险评估模型, 本文采用二级模糊综合评价。

(1) 初次评价: 通过各溢油风险二级指标($U_{11}, U_{12}, \dots, U_{1n}$)的危险度评价标准的隶属度子集表, 可构建目标海洋石油平台自身状况的隶属度矩阵(R_1)。对于海洋石油平台自身状况 U_1 , 其模糊综合评判的结果为:

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (b_{11}, b_{12}, \dots, b_{15})$$

其中, B_1 为海洋石油平台设计参数(U_1)的溢油风险评价结果矩阵, A_1 为该海洋石油平台设计参数指标中各二级溢油风险指标的权重分配, R_1 为该海洋石油平台设计参数指标所对应的隶属度矩阵。

同理, 根据此公式, 可计算出作业方式(U_2)、海区环境(U_3)、地质性溢油(U_4)、人为因素(U_5)、平台疲劳老化程度(U_6)、组织管理能力(U_7)以及应急能力

(U_8)的溢油风险评价结果矩阵 $B_2 \sim B_8$ 。

(2) 二级模糊综合评价：设划分后的因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_8\}$ 的因素权重子集为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_8\}$, U 的总评价矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ \vdots \\ A_8 \cdot R_8 \end{bmatrix}$$

二级模糊综合评价结果为:

$$B = A \cdot R$$

由二级综合评价结果所得向量, 即为溢油风险等级的总体评价结果, 采用最大隶属度法或加权平均法, 判断溢油风险所属等级。

4 应用算例

以渤海海域一自升式海洋钻井平台为例, 具体说明该溢油风险评价方法的应用。平台建于1989年, 设计年限25 a。平台自1993年, 已进行了长期的检测、评估和维修工作。目前平台作业于辽东湾海域, 进行生产井钻井作业, 油基泥浆采用回注处理方式, 钻屑回注压力严格控制不得超过地层破裂压力的85%, 钻井顶端配有TDS井工作状态良好, 平台有非常详细的钻井作业规范、排污记录和相关资质证明。平台中控室对各关键设备及井口溢油检测装置实时监控, 可对各关断阀实现远程控制。平台管架全浸区和飞溅区有海生物附着, 节点退化风险较严重, 管架有明显微裂纹发展为疲劳裂纹。该海域全年风力超过6级的天数115 d, 全年大浪日天数105 d, 海区的潮流类型为不规则的半日潮流, 冬季浮冰等级C级。平台上配置一定溢油回收装置并有良好的通讯系统, 在发

生溢油事故时可及时与陆上终端及溢油应急响应单位沟通。该平台的溢油风险如下:

(1) 平台设计参数溢油风险模糊综合评价结果:

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 =$$

$$(0.08, 0.24, 0.30, 0.23, 0.15) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.27, 0.196, 0.232, 0.238, 0.064)$$

(2) 平台作业方式溢油风险模糊综合评价结果:

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 =$$

$$(0.28, 0.25, 0.13, 0.34) \cdot \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.528, 0.286, 0.056, 0.026, 0.104)$$

按照上述示例, 计算海洋环境、地质溢油、人为因素、平台疲劳老化、组织管理能力以及应急能力各项评价指标的初级模糊综合评价结果, 根据加权平均原则, 得到该平台的溢油风险等级, 见表4。

根据模糊综合评价结果可以看出, 该算例中的钻井平台综合溢油风险等级中等偏低, 当溢油风险等级超过3.5(中等溢油风险等级), 意味着该平台的溢油风险等级较高, 需要对关键溢油环节重点控制。在该算例中, 通过初级评价结果可以看出, 海区环境及平台老化风险较突出(风险等级>3.5), 因此在日常平台维护及检修中加强平台节点、焊点、安全阀、法兰等关键部位的风险排查, 定期对平台水下结构进行腐蚀度及完整性检测, 并需重新核定该平台在极端天气下的应力载荷, 加强恶劣天气下的平台溢油应急管理, 避

表4 某海洋生产平台溢油风险模糊综合评价结果

Tab. 4 Results of oil-spill risk assessment on a specific offshore platform using fuzzy comprehensive evaluation

评价指标	初级评价结果	综合评价结果	溢油风险等级
平台设计参数	0.27, 0.196, 0.232, 0.238, 0.064	0.29, 0.33, 0.19, 0.10, 0.09	2.71 中等偏低
作业方式	0.528, 0.286, 0.056, 0.026, 0.104		
海区环境	0, 0.04, 0.28, 0.46, 0.22		
地质性溢油	0.312, 0.526, 0.136, 0.026, 0		
人为因素	0.45, 0.38, 0.17, 0, 0		
平台疲劳老化	0, 0.15, 0.34, 0.22, 0.29		
组织管理能力	0.35, 0.48, 0.17, 0, 0		
应急能力	0.208, 0.314, 0.282, 0.1, 0.096		

避免因平台结构损坏造成大规模溢油事故。

5 结论

本文就海洋石油平台的溢油风险评价进行了初步探讨, 根据我国海洋石油平台实际情况, 构建了海洋钻井平台和石油生产平台的溢油风险指标体系, 并引入模糊综合评价模型建立海上石油平台溢油风险的量化评价方法。评价方法所示的权重及隶属度可根据具体工程内容进行调整, 以适应不同作业情况。

参考文献:

[1] MMS (Minerals Management Service). Oil spill risk analysis: Gulf of Mexico Outer Continental Shelf (OCS) Lease Sales, Eastern Planning Area, 2003-2007 and Gulfwide OCS Program, 2003-2042[R]. US: MMS, 2002.

[2] Liu X, Wirtz K W. Consensus oriented fuzzified decision support for oil spill contingency management[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 134: 27-35.

[3] 高丹, 寿建敏. 船舶溢油事故等级的模糊综合评价[J]. 珠江水运, 2007, 2: 25-28.

[4] 张欣, 施欣. 船舶溢油事故等级评估方法比较[J]. 环境科学研究, 2007, 20(6): 164-168.

[5] 张圣坤, 白勇, 唐文勇. 船舶与海洋工程风险评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 121-125.

[6] 姜蕊. 老龄海洋石油平台风险评估研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.

[7] 顾宗平. 上海海洋地质调查志[R]. 上海: 上海市地方志办公室, 1996.

Risk assessment of oil spill on the offshore platform

LÜ Yan^{1, 2}, WEI Wen-pu³, ZHANG Zhao-kang¹, WANG Jia², AN Wei¹

(1. China Offshore Environmental Services Co.Ltd., Tianjin 300452, China; 2. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China)

Received: Jun., 11, 2012

Key words: offshore platform; accident of oil spill; risk assessment of oil spill; fuzzy comprehensive evaluation

Abstract: In this paper, the risk assessment system of oil spill for offshore platform was established by analyzing the risk factors related to oil-spill potentials of drilling and production platform based on the current situations of facilities in China. A fuzzy comprehensive model was used to evaluate the degree of oil spill on target facility. A drilling platform service in the Bohai Sea was used to calculate the oil-spill risk in order to illustrate how to apply the developed approach. The results showed that the oil-spill risk level for the example target platform was relatively low, and the main risk factors were sea environment and fatigue. The risk assessment approach could provide technical support for oil-spilling prevention and reduction on offshore platform.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)