

港口石油储备基地溢油风险概率计算

黄燕品, 李颖, 周新, 张至达, 刘丙新, 刘瑀

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:随着大连新港油罐区重大溢油事故的发生,港口溢油作为近年来备受关注的海洋灾害对港口环境及海洋生态环境造成的损害有目共睹,计算溢油风险概率是溢油事故风险评价和确定溢油事故等级的前提。本文介绍了直接计算法和故障树分析法两种溢油风险概率计算方法,通过对油罐区溢油事故资料的分析,建立事故诱因和它们之间的逻辑关系,结合故障树理论,建立故障树模型。以大连新港为例,根据底事件发生概率计算出顶事件的概率,通过分析计算油罐区每年发生溢油事故的风险概率为0.044,大约23a发生一次。

关键词:油罐区;故障树;风险概率

中图分类号:X55;X820.4

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2015)02-0313-04

Calculating the probability of oil spill at port oil reserve base

HUANG Yan-pin, LI Ying, ZHOU Xin, ZHANG Zhi-da, LIU Bing-xin, LIU Yu

(Environment Information Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: With the occurrence of oil spill accidents in Dalian New Port, port oil spills have been paid more attention as major marine disaster. The damages of port oil spills on port environment and marine eco-environments were obvious in recent years. Calculating oil spill risk probability is the premise of oil spill risk assessment and evaluating the spilled oil levels. This paper introduces two methods of calculating oil spill risk probability, according to analyze the information of tank farm oil spill accident, to know all the causes of accident and its logical relations, combine fault tree theory to establish fault tree model. For instance, Dalian new port, based on the probability of bottom event to calculate the probability of top event, through the analysis and calculation, the probability of tank farm oil spill accident is 0.044 every year, about 23 years happened a time.

Key words: tank farm; fault tree; risk probability

随着石油化工产业的发展,我国石油储存能力和规模也有了较快的增长,国家石油战略储备第一期项目已在大连、黄岛、镇海和舟山4个地区建立石油储备基地。港口石油储备基地的增多和石油吞吐量的增大,使溢油事故的发生率越来越高。溢油事故不仅破坏了海洋生物资源和海洋生态,而且使人类的生存环境受到了严重的威胁。

由于科技的发展,石油化工企业在风险管理、

技术水平等方面有了很大进步,但是仍然事故频发。2010年7月16日,大连新港至中石油大连保税区油库输油管线在油轮卸油作业时发生闪爆,引发管线内原油起火,大火燃烧15h,1500t油入海;2011年7月11日,惠州大亚湾石化区中海油惠州炼油厂失火,扑救工作持续13h;2011年7月16日,中石油大连石化公司常减压蒸馏装置因换热器泄漏发生火灾^[1]。

收稿日期:2014-03-03, **修订日期:**2014-06-27

基金项目:国家海洋公益项目(2012418012);国家科技支撑项目(港区储罐安全风险防控与应急技术);中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介:黄燕品(1972-),男,浙江舟山人,大连海事大学博士研究生,主要从事海事安全评估等研究, E-mail: yanpinh@hotmail.com

通讯作者:李颖(1968-),女,辽宁大连人,教授,博士生导师,主要从事水上溢油事故检测技术与溢油风险和处置效果评估等研究, E-mail: yldmu@126.com

目前,国内外大多数溢油风险概率的研究主要是针对船舶溢油事故风险概率,对港口石油储备基地溢油风险概率研究相对较少。本文运用故障树分析法找出港口石油储备基地溢油的基本事件和建立故障树模型,用直接计算法计算底事件的发生概率,再结合它们之间的逻辑关系计算出港口石油储备基地溢油风险概率,为港口溢油风险评估提供参考并对确定风险等级提供依据。

1 溢油风险概率计算方法

随机事件在一定时间内统计取得的发生次数称为频率,稳定的频率值即为事件的发生概率。必然发生的事件的概率为1,不可能发生的事件概率为0,一般随机事件的概率介于0与1之间。概率是个理论值,是由事件的本质所决定的,只能取唯一值,它能准确地反映事件出现可能性的大小。对于溢油事故概率而言,通常是使用溢油每年发生的次数来确定发生概率,即年概率。

本文的溢油风险概率包括溢油事故的基础概率和溢油事故的条件概率两部分,即溢油事故发生的综合风险概率。概率计算有先验概率计算和后验概率计算两种计算方法。先验概率是指事件没有发生,要求这事件发生的概率的大小,主要根据以往经验和分析得到,如全概率公式,作为“由因求果”问题中的“因”出现^[2]。后验概率是指事件已经发生,要求这事件发生的原因由某个因素引起的概率的大小,如贝叶斯公式中,是“由果寻因”问题中的“因”^[2]。先验概率和后验概率有不可分割的联系,后验概率的计算要以先验概率为基础。本文结合先验概率和后验概率两种计算方法,使用直接计算法和故障树分析法对溢油事故概率进行分析计算。

1.1 溢油风险概率直接计算法

通过对我国港口油罐区溢油事件历史资料的分析发现,港口油罐区发生溢油事故的表现形式近似符合泊松分布。

在自然界和人们的现实生活中,经常要遇到在随机时刻出现的某种事件,我们把在随机时刻相继出现的事件所形成的序列,叫做随机事件流。若事件流有平稳性、无后效性、普通性,则称该事件流为泊松事件流。对泊松事件流,在任意时间间隔 $(0, t)$ 内,事件出现的次数服从参数为 λt 泊松分布, λ 称为泊松流的强度^[3]。设随机变量 X 所有可能取的值为 $0, 1, 2, \dots$,且概率分布为:

$$P(X=k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \lambda > 0 (k=0, 1, 2, \dots)$$

则称 X 服从参数为 λ 的泊松分布,并用记号 $X \sim P(\lambda)$ 表示。

有关泊松分布的一些性质:

(1) 满足分布列的两个性质: $P(X=k) \geq 0$, $(k=0, 1, 2, \dots)$, 且有

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} = e^{-\lambda} \cdot e^{\lambda} = 1$$

(2) 若随机变量 X 服从参数为 λ 的泊松分布,则 X 的期望和方差分别为: $E(X) = \lambda$; $D(X) = \lambda$ 。

泊松分布是一种描述和分析稀有事件的概率分布。港口油罐区发生溢油事故的次数少,可将其视为稀有事件,因此可选用泊松分布作为港口油罐区事故发生概率分布分析的工具。

1.2 溢油风险概率故障树分析法

故障树是一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图,而故障树分析法是以所研究系统的最不希望发生的事件作为顶事件,通过分析找出直接原因作为中间事件,再分析中间原因,逐级推导,直到找到所有事故的基本事件,做定性和定量分析。它比较适用于复杂系统安全性与可靠性的分析,是一种有效地进行系统分析的方法^[4]。故障树有层次地显示所研究系统在发生事故的过程中,每个中间事件之间的相互关系,从而知道事故的发生途径是什么。

故障树分析法包含的一些基本概念:(1) 顶事件:故障树分析中所关心的结果事件,位于故障树顶端,即系统最不希望发生的事件;(2) 底事件:无需再探究的事件,位于故障树的底部,是导致其它事件的原因事件,分为基本事件和未探明事件;(3) 中间事件:位于顶事件和底事件之间,它既是某个逻辑门的输出事件,同时又是别的逻辑门的输入事件;(4) 或门:表示事件关系的一种逻辑门,当一个事件或多个输入事件发生时输出事件发生;(5) 与门:表示事件关系的一种逻辑门,只有所有输入事件发生时,输出事件发生^[7]。

部分事件和逻辑门的对应的符号如图1所示

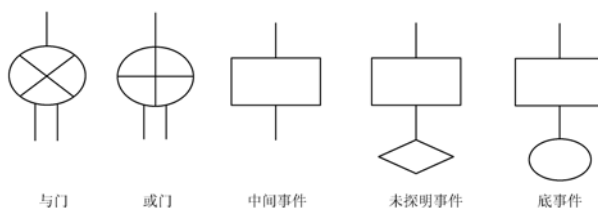


图1 部分事件和逻辑门

Fig. 1 Some events and logical gate

建立故障树一般有几个步骤:(1) 收集事故案例并进行事故统计,设想所研究对象可能

发生的事故;(2)对所收集的事故进行全面分析,找出最不希望发生的事故作为顶事件;(3)分析与事故有关的所有原因事件和各种因素,从上逐级找出直接原因的事件,对事故发生的原因进行分类,建造故障树;(4)按故障树结构进行简化;(5)求出故障树的全部最小割集;(6)计算顶事件发生概率。其中,设故障树有 n 个事件 $X_1, X_2, \dots, X_n, C = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}\}$ 为一些底事件的一组集合,当集合 C 中的全部基本事件都发生,顶事件必定发生,则集合 C 是故障树的一个割集。若集合 C 是一个故障树的割集,当任意去掉集合 C 中一个基本事件后,剩下的集合就不再是故障树的割集时,则称集合 C 是故障树的一个最小割集^[6],最小割集是导致顶事件发生的最低限度的基本事件的组合。

本文使用下行法来找最小割集,该算法根据故障树的结构,从顶事件开始,依次把逻辑门的输出事件用输入门事件置换。经过或门输入事件纵向写出,与门输入事件横向写出,直到全部门事件都置换为底事件为止。每行由若干个底事件组成构成一个割集,再吸收、简化相互包含和冗余的割集,最后得到最小割集。得到的全部事件积之和就是布尔割集表示式。以图2故障树为例,说明下行法的实现过程。

由图可知 $T = X_1 + G_0 + X_2, G_0 = X_3X_4, X_1, X_2, X_3X_4$ 为最小割集,所以用布尔式表示故障树为: $T = X_1 + X_3X_4 + X_2$ 。

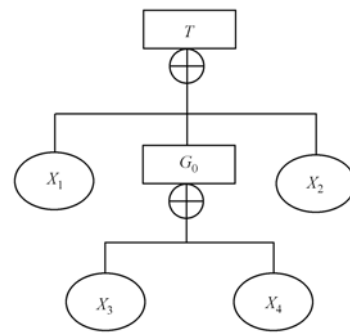


图2 故障树示例

Fig. 2 Example of fault tree

2 大连新港石油储备基地实例

港口油罐区事故引发的海上溢油相对于船舶溢油事故而言发生次数很少,但是一旦发生,溢油量非常大,对环境的影响也是长久的、难以恢复的^[7]。本文以大连新港油罐区发生事故为例,结合发生溢油事故的各种因素,对溢油事故发生概率进行计算。通过对油罐区溢油事故资料分析和现场调研,总结了事故发生的所有原因和其逻辑关系,构建故障树^[8]。

本模型用字母“ T ”表示顶事件,用大写字母加数字表示中间事件(M_{ij}), i 表示不同层的事件, j 表示相同层的不同事件,底事件用 X 加数字表示。油罐区溢油事故的故障树如图3所示。

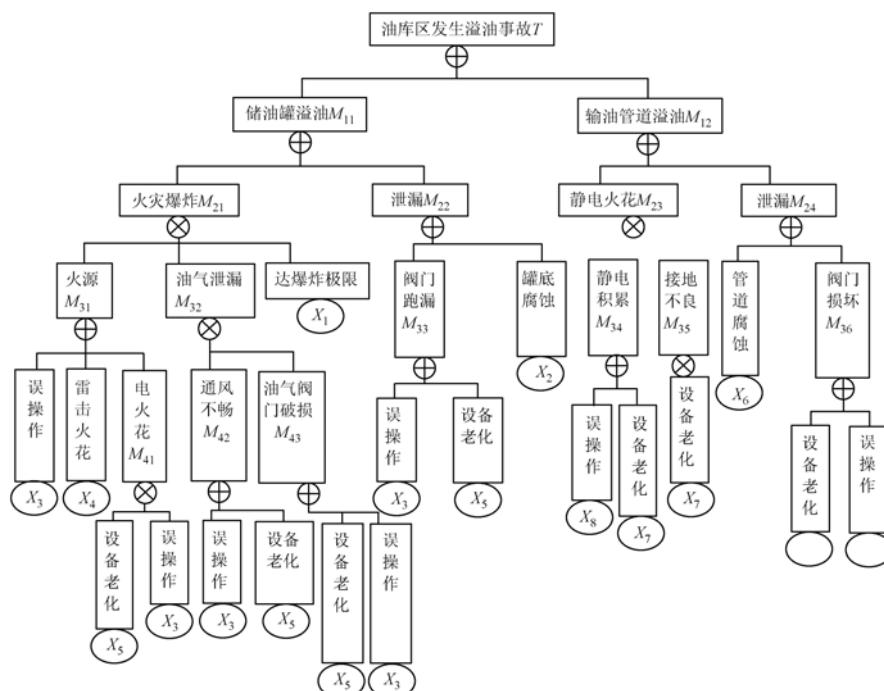


图3 油罐区溢油故障树模型

Fig. 3 Fault tree model of tank farm oil spill

运用下行法求最小割集,求得的最小割集为: $X_2, X_3, X_5, X_6, X_7, X_8$, 可知共有6种途径导致油罐区溢油事故的发生, 即 $T = X_2 + X_3 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8$ 。

表1 设备老化和误操作引起的溢油事故概率分布

Tab. 1 The probability distribution of oil spill accident by equipment aging and disoperation

概率	次数		
	0	1	2及以上
因操作失误导致发生溢油事故 X_3	0.988	0.012	极小
因设备老化导致发生溢油事故 X_5	0.992	0.008	极小

由表中统计的数据, 可以计算出我国港口因设备老化和操作失误导致油罐区发生溢油事故的期望值为:

$$E(X_3) = 0.988 + 10.012 + 20 = 0.012$$

$$E(X_5) = 0.992 + 10.008 + 20 = 0.008$$

则因设备老化和操作失误导致油罐区发生溢油事故的概率为:

$$P_3 = 1 - P(X=0) = 1 - e^{-0.012} = 0.012$$

$$P_5 = 1 - P(X=0) = 1 - e^{-0.008} = 0.008$$

同理, 根据其它底事件导致溢油事故的概率分布可以估算出每个底事件的概率^[9-10], 分别为: $P_2 = 0.012, P_6 = 0.006, P_7 = 0.005, P_8 = 0.001$ 。

最后, 根据故障树的最小割集和各个底事件的概率, 计算出港口油罐区溢油事故顶事件的发生概率,

$$\begin{aligned} P(T) &= P_2 + P_3 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 \\ &= 0.012 + 0.012 + 0.008 + 0.006 + \\ &\quad 0.005 + 0.001 \\ &= 0.044 \end{aligned}$$

经计算, 大连新港油罐区溢油事故发生概率大概为0.044, 即大约23 a发生一次。

由于历史资料统计数据具有一定的片面性和不完整性, 还可以引入时间、工作人员素质等对溢油概率进行修正。

$$\text{设备、油罐和管道腐蚀: } a_1 = \frac{\text{服役年限}}{50} \times \frac{60}{\text{维护措施}}$$

$$\text{违章和误操作: } a_2 = \frac{10}{\text{工作年限}} \times \frac{60}{\text{身体状况}}$$

$$\times \frac{60}{\text{规章制度}}$$

$$\text{则修正后的概率为: } P = P_n \times a_i$$

3 结束语

本文研究了故障树理论及分析方法, 通过对

以设备老化和误操作为例, 通过对近10 a来我国港口油罐区溢油事故发生的资料和国外数据资料进行收集和统计, 可以得出大致的分布概率如表1^[9-10]。

大连港资料的分析, 得出导致油罐区发生溢油事件的各个可能途径, 并建立了港口油罐区溢油事故的故障树模型, 根据每个底事件发生的概率计算出顶事件溢油事故的概率, 求出大连新港油罐区溢油事故发生概率大概为0.044, 即大约23 a发生一次。由于油罐和输油管道溢油事故统计资料的缺乏, 模型的建立和计算结果存在着一定的主观因素, 但是其研究结果对港口油罐区溢油风险评价和确定风险等级具有一定的意义。因此, 建议港口和海事等相关部门加大对溢油事故的研究统计, 完善海上溢油事故统计数据库, 为今后的溢油风险评估和概率研究提供帮助。

参考文献:

- [1] 朱云. 大连石化5次事故回顾[EB/OL]. 2011-12-02. <http://finance.ifeng.com/news/corporate/20111202/5189299.shtml>.
- [2] 石剑荣, 叶明. 突发事故概率估算研究[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(2): 46-53.
- [3] 赵瑛. 关于泊松分布及其应用[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2009, 11(2): 77-78.
- [4] 韩传峰, 何臻, 马良河. 基于故障树分析的建设工程风险识别系统[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 187-191.
- [5] 刘文权. 储油罐常见安全问题分析及维护[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2003, 20(5): 51-53.
- [6] DONG Y H, YU D T. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(2): 83-88.
- [7] 顾莉, 刘晓东, 鄢洪青. 故障树在油库火灾爆炸事故风险评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(6): 52-54.
- [8] 石媛丽, 宋文华, 董影超. 储油罐事故分析及对策研究[J]. 安全, 2011(10): 13-16.
- [9] 张舒. 海上溢油事故风险概率实用计算方法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [10] DAVIS P M. Performance of European cross-country oil pipelines; Statistical summary of reported spillages-2004[R]. Brussels: CONCAWE, 2006.