

基于ETA和FTA的输油管道泄漏公共安全事件演化分析

□张明红¹ 余廉^{1,2}

[1. 华中科技大学 武汉 430074; 2. 国家行政学院 北京 100089]

[摘要] 目前城市输油管道泄漏事故频发,青岛“11.22”中石化东黄输油管道泄漏爆炸事故发人深省。结合该事故的调研结果,运用事件树和事故树分析方法对输油管道泄漏导致公共安全事件的演化过程、路径与发生概率进行分析。研究表明:输油管道泄漏不管燃爆与否导致环境污染的概率最高;燃爆概率远低于不发生燃爆概率;由于不发生燃爆而导致环境污染引起的社会骚乱概率最高;“11.22”事故是沿着最高发生概率事件路径演化的,是可以预料事故。

[关键词] 输油管道泄漏;公共安全事件;事件树;事故树;演化

[中图分类号] D632

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2015)03-0024-05

近段时间,我国发生了青岛“11.22”输油管道泄漏爆炸事故、兰州油管泄漏致水污染重大事故和大连油管泄漏爆炸事件,产生较大社会影响。据统计,中国陆上油气管道总里程约12万公里。截至2014年3月31日,国务院安全生产委员会组织的全国油气管道拉网式专项检查,全国共排查隐患近3万处。其中占压11972处,安全距离不足9171处,不满足安全要求的交叉穿越8293处^[1]。

管道运输作为5大运输方式之一,在石油运输中发挥了重要作用。但受各种因素的影响,在运行中不可避免的出现泄漏事故。近10年我国有新闻报道的输油管道泄漏爆炸的案例如表1所示。从表1可见导致输油管道泄漏的原因主要是打孔盗油、腐蚀、第三方施工、误操作和自然灾害。在当前城市迅速扩张和地下管网复杂的情形下,青岛“11.22”中石化东黄输油管道泄漏爆炸事故(以下简称“11.22”)具有警示作用和研究意义。

本文运用事件树分析法梳理“11.22”事故的事件序列以及演化过程,并在事故树对中间事件的基本事件分析基础上,对输油管道泄漏发生公共安全事件的演化路径和发生概率进行定性和定量分析,

以期在管道运行管理和公共安全事件应急处置中提供支持。

表1 2003~2013年有新闻报道的输油管道泄漏事件

时间	事件名称	时间	事件名称
2003.12	兰成渝管道打孔盗油泄漏	2010.5	东黄复线第三方施工造成管道破裂泄漏
2004.10	陕京线管道第三方施工泄漏	2010.7	大连新港输油管线因操作不当发生闪爆
2005.8	开县输气管道泥石流压断	2011.9	延长靖边采油厂输油管道因滑坡发生泄漏
2006.8	鲁皖成品油管道打孔盗油泄漏	2012.4	长庆化子坪原油管道因老化破裂发生泄漏
2007.5	仪征-长岭输油管道打孔盗油泄漏	2012.5	济青输油管道因第三方施工挖断管道泄漏
2007.8	长庆靖边采油厂管道因滑坡断裂泄漏	2013.1	湛江-茂名输油管道因腐蚀穿孔发生泄漏
2007.11	海南东方海底管道挖沙船作业泄漏	2013.2	九昌樟输油管道因打孔盗油泄漏
2009.9	鲁皖成品油管道因打孔盗油柴油泄漏	2013.2	江西石油管道因盗油破裂泄漏
2009.9	海南澄迈一输油管道腐蚀穿孔发生泄漏	2013.4	兰成渝输油管道因盗油破坏发生泄漏
2009.12	兰郑长成品油管道因第三方施工泄漏		

[收稿日期] 2014-12-11

[基金项目] 国家自然科学基金“面向应急决策支持的非常规突发事件案例推理的理论与方法”(91324203);国家突发事件案例库建设项目“青岛11.22东黄输油管道泄漏爆炸事故案例”。

[作者简介] 张明红(1981-)女,华中科技大学公共管理学院博士研究生;余廉(1959-)男,博士生导师,华中科技大学公共管理学院教授,国家行政学院应急管理培训中心教授。

一、输油管道泄漏研究现状

目前,学界对输油管道泄漏的研究主要是在石油天然气工业领域、环境科学领域以及安全科学领域,如钱东良等运用事件树和事故树方法对海底管道系统泄漏事故进行了定性和定量分析,指出了测算的方法,但是没有具体指出发生的概率以及最具威胁性的原因和防治的关键措施^[2];马红娜等对成品油管道泄漏的环境风险进行评价,从地表水、农田土壤、并行管道和人口密集区四个方面做了分析,对于导致并行管道的泄漏和火灾的概率做了定量分析并提出参考数值,这在非成品油的管道运输中是否可靠不便定论^[3];袁雄军等基于各类危化品的物质特性和中间事件构建了泄漏初始事件后的通用事件树,并对常见的危化品发生主要事故后果的概率进行了计算,这对于泄漏事故演化的定量分析有参考意义,但是没有揭示在演化过程中的关键要素是哪些以及演化过程除了“点火”以外的操作动作起到控制事故的概率^[4];顾文婷等对长输管道泄漏事故的原因进行了事故树分析,并在计算结果基础上提出了对策建议,认为泄漏原因集中在腐蚀、材料缺陷、施工缺陷及外部干扰(第三方破坏)^[5]。

而较少有从公共安全事件的角度分析泄漏事故的研究。余廉等运用案例分析的方法对水体污染公共安全事件的诱发过程进行分析,指出了存在六个发展阶段,这对于从公共安全角度研究泄漏事故提供了视角^[6]。万礼锋等在介绍国外城市燃气安全分析方法的基础上提出了我国安全分析方法的体系和概率风险分析法的流程,从大安全观的角度提出了控制城市燃气事故的方法^[7]。钱建华从储运介质的易燃易爆和毒害性、油气储运设施易构成重大危险源两个方面论述了油气储运设施安全的重要性,并提出了在工程立项、设计、施工及运行管理的各个阶段加强安全管理的具体措施^[8]。

本文在以上研究的基础上,提出输油管道泄漏公共安全事件是指由输油管道泄漏事故导致的公共安全事件。输油管道泄漏公共安全事件是一个动态的演化过程,事件最终造成了重大的财产损失、人员伤亡或一定程度上的社会不稳定。

二、输油管道泄漏公共安全事件树的建立

(一) 事件树分析法

事件树分析法(Event Tree Analysis, 简称ETA)是安全系统工程中重要分析方法之一,它是一种按事故发展的时间顺序由初始事件开始推论可能的后

果。每一事件可能的后续事件只能取完全对立的两种状态(成功或失败,正常或故障,安全或危险等)之一的原则,逐步向结果方面发展,直到达到系统故障或事故为止。既可以定性地了解整个事件的动态变化过程,又可以定量计算出各阶段的概率,最终了解事故发展过程中各种状态的发生概率。事件树分析方法步骤如下:(1)确定初始事件;(2)判定安全功能;(3)绘制事件树;(4)简化事件树;(5)定性或定量分析。

(二) 事件树的建立

爆炸、火灾、环境污染或社会骚乱都是来自于管道系统的泄漏。若输油管道不泄漏,后面的危害事件也不会发生,因此把输油管道泄漏作为初因事件。油泄漏以后根据周边环境和自身物质特性的不同会发生一系列不同的后续事件,如泄漏点是否及时被定位和修复,是否燃爆,是否引起环境污染,是否引起社会骚乱等。根据以上分析,建立如图1所示的输油管道泄漏公共安全事件树,其中 E_0 为初因事件, $E_1 \sim E_3$ 为后续事件, $C_1 \sim C_8$ 为后果事件,如表2所示。

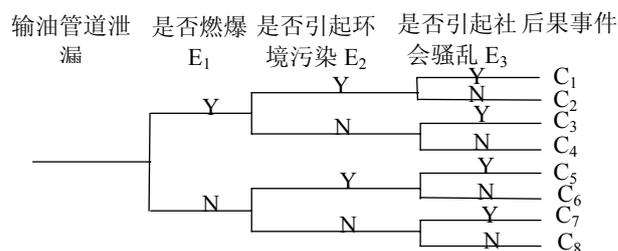


图1 输油管道泄漏公共安全事件树

表2 图1中后果事件列表

事件序号	事件描述	事件序号	事件描述
C ₁	泄漏爆炸污染环境并社会骚乱公共安全事件	C ₅	泄漏污染环境引起社会骚乱的公共安全事件
C ₂	泄漏爆炸污染环境的公共安全事件	C ₆	泄漏污染环境公共安全事件
C ₃	泄漏爆炸引起社会骚乱的公共安全事件	C ₇	泄漏引起社会骚乱公共安全事件
C ₄	泄漏爆炸公共安全事件	C ₈	持续漏油

三、事故树分析后续事件

(一) 事故树构建

事故树分析方法(Fault Tree Analysis)是系统安全性与可靠性分析的有效方法,它是以图形的方式表明“系统是怎样失效的”,分析系统发生事故的损失和概率大小,从中找出后果严重,且较容易发生的事故,作为分析的顶事件。从顶事件起进行演

绎分析, 一级一级地找出所有直接原因事件, 直到所要分析的深度, 按照其逻辑关系, 画出事故树, 并能进行定量和定性分析。

本文用事故树分析后续事件的原因, 以及发生的路径和概率。分别以E₁、E₂和E₃为顶事件进行事故树构建, 如下图所示。

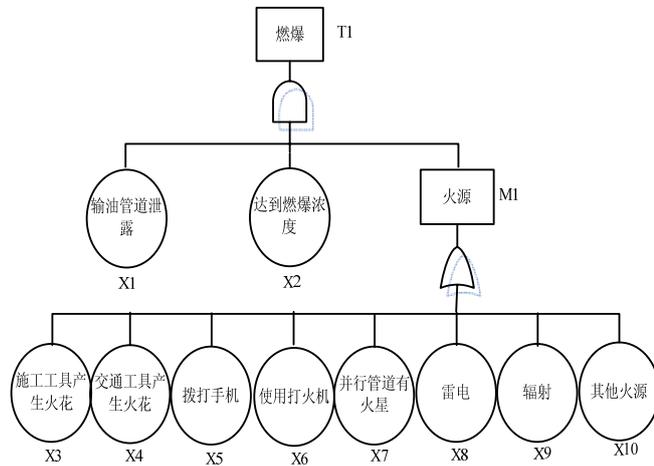


图2 燃爆 (E₁) 事故树

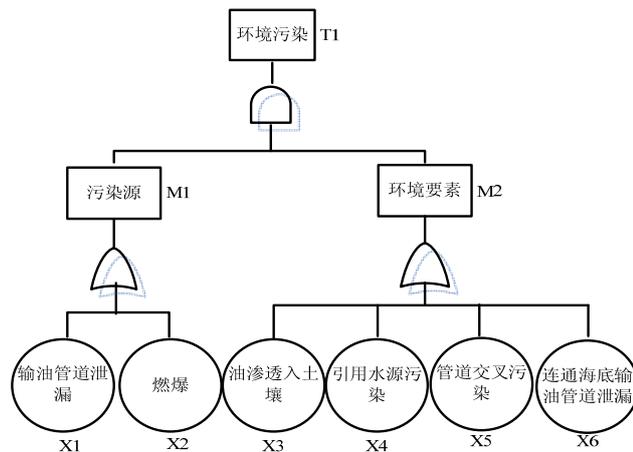


图3 环境污染 (E₂) 事故树

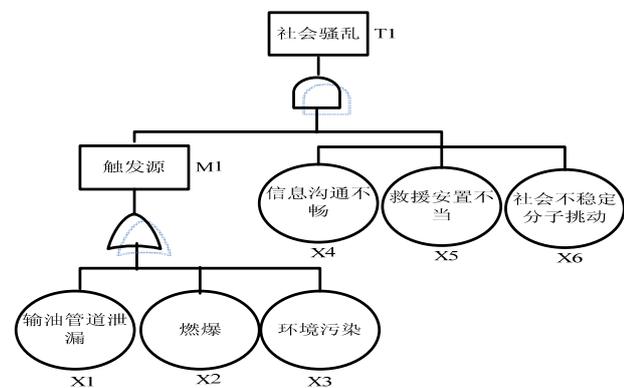


图4 社会骚乱 (E₃) 事故树

(二) 事故树分析

1. 最小割集与最小径集分析

在事故树中凡能导致顶上事件发生的基本事件的集合称作割集。能导致顶上事件发生最低限度的基本事件的集合称作最小割集。割集是表示系统的危险性。对图2~图4进行布尔代数化简后, 求得如下最小割集:

$$T_1(E_1) = X_1 \cdot X_2 \cdot M_1 = X_1 \cdot X_2 \cdot (X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10}) = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_5 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_6 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_7 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_8 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_9 + X_1 \cdot X_2 \cdot X_{10}$$

$$T_1(E_2) = M_1 \cdot M_2 = (X_1 + X_2) \cdot (X_3 + X_4 + X_5 + X_6) = X_1 \cdot X_3 + X_1 \cdot X_4 + X_1 \cdot X_5 + X_1 \cdot X_6 + X_2 \cdot X_3 + X_2 \cdot X_4 + X_2 \cdot X_5 + X_2 \cdot X_6$$

$$T_1(E_3) = M_1 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6 = (X_1 + X_2 + X_3) \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6 = X_1 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6 + X_2 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6 + X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6$$

每一个最小割集就是一条诱发危险的路径。在E₁事故树中X₁和X₂是组合出现, 表明这两个要素是重要的危险源, 只要同时出现, 就具有较强的危险性。在E₂事故树中两个中间事件中的任一基本事件的组合都会导致顶事件的发生, 表明每个要素都很危险。在E₃事故树中X₄和X₅和X₆是组合出现, 表明这三个要素很关键, 较具危险性。

如果事故树中某些基本事件都不发生, 顶事件必然不发生, 则这些基本事件的集合称为径集。最小径集是指在事故树中凡是不能导致顶上事件发生最低限度的基本事件的集合。在最小径集中, 去掉任何一个基本事件, 便不能保证一定不发生事故。径集是表示系统的安全性。利用成功树求得事故树的最小径集如下:

$$T_1'(E_1) = X_1' + X_2' + M_1' = X_1' + X_2' + X_3' \cdot X_4' \cdot X_5' \cdot X_6' \cdot X_7' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{10}'$$

$$T_1'(E_2) = M_1' + M_2' = X_1' \cdot X_2' + X_3' \cdot X_4' \cdot X_5' \cdot X_6'$$

$$T_1'(E_3) = M_1' + X_4' + X_5' + X_6' = X_1' \cdot X_2' \cdot X_3' + X_4' + X_5' + X_6'$$

在最小径集中, 单个基本事件组成的集合是最有效的控制措施和最佳路径。在E₁事故树中X₁和X₂是最易控制的。在E₃事故树中X₄和X₅和X₆是最易控制的。

2. 重要度分析

通过以上各个后续事件的事故树的最小割集与最小径集的分析, 可以求得结构重要度分别为:

E₁ 事故树中 $I(X_2) = I(X_1) > I(X_{10}) = I(X_9) = I(X_8) = I(X_7) = I(X_6) = I(X_5) = I(X_4) = I(X_3)$

E₂ 事故树中 $I(X_2) = I(X_1) > I(X_6) = I(X_5) = I(X_4) = I(X_3)$

E_3 事故树中 $I(X_6)=I(X_5)=I(X_4)>I(X_3)=I(X_2)=I(X_1)$

根据结构重要度分析,在 E_1 事故树中输油管道泄漏(X_1)和达到燃爆浓度(X_2)是最重要的,在 E_2 事故树中输油管道泄漏(X_1)和燃爆(X_2)是最重要的,在 E_3 事故树中信息沟通不畅(X_4)和救援安置不当(X_5)和社会不稳定分子挑动(X_6)是最重要的,所以在制定控制措施中要重点针对这些事件。

对每个后续事件的事故树也可以进行概率重要度分析,用最小割集法针对 E_1 、 E_2 和 E_3 顶上事件的发生概率为:

$$P(T) = \sum_{r=1}^k \prod_{x_i \in E_r} q_i - \sum_{1 \leq r < s \leq k} \prod_{x_i \in E_r \cup E_s} q_i + \dots + (-1)^{k-1} \prod_{x_i \in E_1 \cup E_2 \cup E_3 \dots \cup E_k} q_i$$

式中: r 、 s 、 k ——最小割集的序号, $r < s < k$;

i ——基本事件的序号;

$1 \leq r < s \leq k$ —— k 个最小割集中第 r 、 s 两个割集的组合顺序;

Y_r ——第 r 个最小割集;

$X_i \in Y_r$ ——属于第 r 个最小割集的第 i 个基本事件;

$X_i \in Y_r \cup Y_s$ ——属于第 r 个或第 s 个最小割集的第 i 个基本事件;

q_i ——第 i 个基本事件的发生概率 ($i=1, 2, \dots, n$)。

假设在 E_1 、 E_2 和 E_3 事故树中每个基本事件的发生概率都为0.5,则顶事件的发生概率为:
 $P(T_{E1})=0.248$; $P(T_{E2})=0.703$; $P(T_{E3})=0.109$ 。

四、事件树定量分析

在事件树的定量分析中关于初因事件和后续事件中的基本事件的概率可以采用统计法或专家判断法来获得,而后果事件的概率就可以通过初因事件和后续事件的概率求得。

$$P(C_1)=P(E_0) \cdot P(E_1) \cdot P(E_2) \cdot P(E_3)$$

$$P(C_2)=P(E_0) \cdot P(E_1) \cdot P(E_2) \cdot [1-P(E_3)]$$

$$P(C_3)=P(E_0) \cdot P(E_1) \cdot [1-P(E_2)] \cdot P(E_3)$$

$$P(C_4)=P(E_0) \cdot P(E_1) \cdot [1-P(E_2)] \cdot [1-P(E_3)]$$

$$P(C_5)=P(E_0) \cdot [1-P(E_1)] \cdot P(E_2) \cdot P(E_3)$$

$$P(C_6)=P(E_0) \cdot [1-P(E_1)] \cdot P(E_2) \cdot [1-P(E_3)]$$

$$P(C_7)=P(E_0) \cdot [1-P(E_1)] \cdot [1-P(E_2)] \cdot P(E_3)$$

$$P(C_8)=P(E_0) \cdot [1-P(E_1)] \cdot [1-P(E_2)] \cdot [1-P(E_3)]$$

运用上文事故树定量分析求得的后续事件概率,以及假设初因事件概率为0.2,利用以上后果事件的概率公式求得如下结果:

$$P(C_1)=0.0038; \quad P(C_2)=0.0311; \quad P(C_3)=0.0016;$$

$$P(C_4)=0.0131; \quad P(C_5)=0.0115; \quad P(C_6)=0.0942; \\ P(C_7)=0.0049; \quad P(C_8)=0.0398。$$

$$P(C_6)=0.0942 > P(C_8)=0.0398 > P(C_2)=0.0311 > \\ P(C_4)=0.0131 > P(C_5)=0.0115 > P(C_7)=0.0049 > P(C_1)=0.0038 > P(C_3)=0.0016。$$

所有后果事件的概率之和等于初因事件的概率。但是不同的后果事件概率反应不同的风险。其中燃爆发生导致的后果事件中以导致环境污染的风险最高即 $P(C_2)$,燃爆未发生而导致的后果事件中以导致环境污染的风险最高即 $P(C_6)$,足见在输油管道泄漏事件中重点控制环境污染对于防止事件扩大具有重要的作用。但是爆炸导致的后果事件的总体概率低于不发生爆炸导致的后果事件概率,这表明爆炸是一定条件下发生的极端事件,并且是极具破坏力的严重后果,概率虽低却不可忽视。而泄漏引起的环境污染概率虽高,囿于污染的受体不同在管控和污染处置中存在诸多困难。发生社会骚乱的总体概率不高,但是在不发生燃爆引起环境污染事件序列中出现社会骚乱的概率最高即 $P(C_5)$,这在兰州油管泄漏致水污染重大事故中得到印证。

五、结论

输油管道泄漏公共安全事件是一种多因素综合作用的过程,本文把它演化的过程分为燃爆阶段、环境污染阶段和社会骚乱阶段,每个阶段作为泄漏事件的后续事件构建事件树,通过对每个后续事件的事故树分析,进而求得每个后续事件的发生概率。结合初因事件的概率和后续事件的概率,可以估算后果事件的概率,这对于控制泄漏事件的扩散具有指导意义,也便于在每一阶段的后续事件中把握可能存在的的关键节点。

在“11.22”事故中演化路径如图5所示。在该事故中社会骚乱没有得到实质的演化,这和各部门的协调以及公安民警的持续维护稳定分不开的,调研中得知公安部门的应急工作介入持续到2014年4月。以现场燃爆为事故节点划分,会得到输油管道泄漏导致海面污染的事件序列和输油管道泄漏导致燃爆加重海面污染的事件序列,这分别对应图1中的 C_6 和 C_2 两个后果事件的事件序列。相应的 C_6 和 C_2 的发生概率在燃爆未发生和燃爆发生事件中是最大的,分别是0.0311和0.0942。这说明该事故的发生不是不可预料,恰是应对主体重点防控的事件序列。作为企业和政府在处置输油管道泄漏事故中,要首先抓住发生概率高的事件序列,而后严控概率低损失大的事件序列。

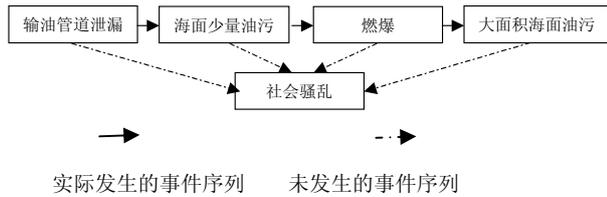


图5 “11.22”事故演化路径图

本文中概率数据是假设数据,带有一定的不足,若后期得到相关部门的统计数据会深入研究各个基本事件的概率以及细化辅助条件的研究,并且在数据概率统计中没有采用概率分布分析的研究带有一定的局限性。但是该数据研究结论仍可以为我们的应急处置提供一定的指导意义。

参考文献

[1] 庞清晖. 油管危情之一: 三万隐患大调查 [EB/OL]. [2014-10-11]. http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5MTM5MTQ4MA==&mid=200634657&idx=1&sn=0aeddccff72

9904d526fffd8889029fbf#rd.

[2] 钱东良, 纪苏丹, 陈袁, 任帅. 海底管道泄漏的事件树和故障树相结合分析[J]. 石油化工应用, 2013, 32(10): 41-44.

[3] 马红娜, 李彦斌, 武征. 成品油管道泄漏的环境风险评价[J]. 油气储运, 2011, 30(11): 801-804.

[4] 袁雄军, 毕海普, 周宁, 任常兴, 王凯全. 危险化学品泄漏事故演化机理研究[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(2): 21-24.

[5] 顾文婷, 李超, 毕中毅. 基于事故树分析法的长输管道泄漏因素分析[J]. 石油工业技术监督, 2014(4): 19-23.

[6] 余廉, 雷丽萍. 基于案例的水体污染公共安全事件诱发过程分析[J]. 阅江学刊, 2011(3): 50-55.

[7] 万礼锋, 尹贻林, 张丽君, 蒋慧杰. 城市燃气管网安全分析体系[J]. 煤气与热力, 2007, 27(11): 50-53.

[8] 钱建华. 论油气储运设施安全的重要性[J]. 油气储运, 2012, 31(6): 422-426.

Analysis of Oil Pipeline Leakage Public Safety Incident Evolution Based on ETA and FTA

ZHANG Ming-hong¹ SHE Lian^{1,2}

(1. Huazhong University of Science & Technology Wuhan 430074 China;

2. Chinese Academy of Governance Beijing 100089 China)

Abstract At present, the city pipeline leakage accidents occur frequently, and Qingdao “11.22” Sinopec Dong Huang oil pipeline explosion accident is thought-provoking. Combined with the research results of the accident, the article uses the Event Tree and Fault Tree to analyze the evolution process and path and probability of the pipeline leak public safety incident. The results show that: whether the explosion happens or not, the probability of environment pollution is the highest caused by the oil pipeline leakage; the probability of explosion is much lower than the probability of non-explosion; the probability of social unrest caused by the environment pollution without explosion is the highest; the evolution of “11.22” accident is along the occurrence of the highest probability accident, not an incalculable accident.

Key words oil pipeline leakage; public safety incident; event tree analysis; fault tree analysis; evolution

编辑 何婧