

LNG 加气站槽车泄漏事故树分析

杨 晶 陈晓丽 吴 炜 (广西壮族自治区工业设计研究院有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要: 以一起 LNG 加气站的槽车泄漏事故作为分析企业的案例, 运用信息安全技术和管理系统进行信息工程的基础和原理, 采用事故树分析法, 明确控制系统, 确定顶上事件, 画出事故树, 布尔代数法化简事故树, 利用近似计算公式的定性数据分析问题基本生活事件结构在数学上具有很高重要性, 分析了基本社会事件对于事故的直接影响, 提出一种可行的预防和解决工作方式, 并且是针对泄漏事故引入的应急处理措施。

关键词: LNG 加气站; 槽车; 泄漏事故; 事故树

随着我们的环境污染越来越严重, 各级政府都在大力鼓励我们使用高质量的清洁能源。在我国能源发展战略调整的大背景下, LNG 加气站得以快速发展, 此类加气站可能发生安全事故的风险概率也将得以相应地增加。泄漏事故可以说是最为常见的事件, 也可以说是导致火灾、爆炸、窒息等各种事件的基本条件。就近年来我们所接触的一起加气站槽车泄露事故, 采用事故树分析研究的方法, 对社会风险影响结果分析, 找到了导致事故发生的主要原因及其应对策略, 避免出现同样事故又一次发生。

1 事故树 (FAT)

事故树逻辑推理主要内容包括: 只有多个事件同时发生的逻辑和门才能导致结果的同时产生; 在结果产生之前必须满足一定数量事件的条件和门; 结果发生必须满足多个事件的条件或门。在关于 LNG 加气站槽车泄漏事故树过程中, 首先要对系统进行明确的要求与分析, 在该系统中我们需要准确地把找出所需要分析的 LNG 加气站槽车泄漏事故 (也被称为顶上事件) 当做是研究与分析的起点; 然后, 按照大多数逻辑思维推理, 找出造成顶上事件不断地发生的原因 (也被称为中间事件); 最后, 我们通过利用 LNG 加气站槽车泄漏事故树的逻辑推理, 找出中间事件发生的根源, 直到不能再分为止的事件 (被称为基本事件)。在这个故障分析的过程中, 绘制了一个故障路径树, 根据对故障路径树的基本结构特征进行了简化, 得到了所有可能会引起事故的基本事件集 (也被称为最小分割集) 和所有不会引起事故的基本事件集 (也被称为最小路径集), 然后综合考虑基本事件对于事故的影响程度 (也被称为路径树的重要性)。一般而言, 故障树分析的主要步骤是: 定义体系、确定顶层事件、画设故障树、定性分析及制定各种预防措施。

2 FAT 在事故分析中的应用

2.1 事故概况

2015 年 9 月一辆装有 19t LNG 的槽车驶入某大型国企加气站, 在接卸 LNG 液体时, 槽车司机未连接好接卸软管并在气动阀门无法正常使用的情况下手动打开此阀门 (紧急切断阀), 然而司机从 LNG 工厂灌装完 LNG 后, 忘记关闭手动截止阀 (司机事后回忆说), 因此, 大量

LNG 液化天然气急速向外扩散, 现场弥漫一团白色烟雾。后经消防人员穿好防冻服在水枪掩护下, 经过近 1 个小时的处置成功关闭紧急切断阀, 有效阻止一起火灾爆炸事故。

2.2 事故树基本事件分析

可见, 事故原因分析系统是将液化天然气罐车装载到液化天然气加气站进行卸货的一个过程, 首要事件是液化天然气罐车的泄漏。通过对事故发生原因的研究和分析, 明确事故中可能发生的中间性事件和基础性事件, 建立对事故树的基础性事件分析 (表 1)。按照以上的数据分析表进行建立的安全事故树模型的结果显示如图 1。

表 1 事故树基础性事件

事件	符号	含义
顶上事件	T0	LNG 槽车泄露
中间事件	M1	槽车气动阀失效
	M2	安全措施失效
	M3	违规操作
	M4	监护人未有效监护
基本事件	X0	未及时发现
	X1	未及时维修
	X2	未有效连接卸液软管
	X3	作业前未检查手动阀是否关闭
	X4	操作人员安全培训不到位
	X5	监护人未在现场
	X6	监护人责任心不强
	X7	监护人安全培训不到位

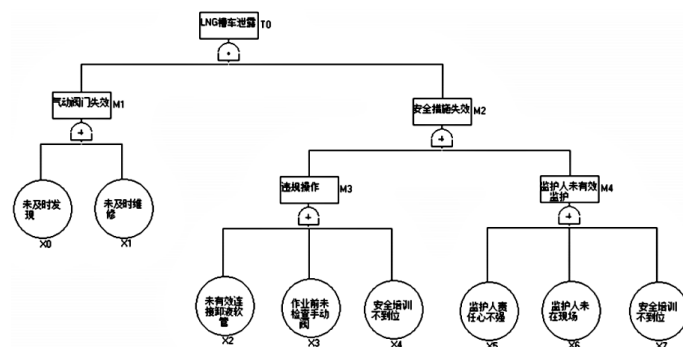


图 1 安全事故树模型

2.3 求最小割集

割集的基本事件的集合就是考虑每个最小割集的顶

层事件可能性,并且有几个最小割集。在求最小分割集时,要用布尔代数的运算技术能力方法就可以简单地化繁事故树。在事故树分析中常用逻辑运算符乘(·)、加(+),将各个事件连接起来,这种连接式称为布尔代数表达式。

运算法则主要包括:

交换律:

$$A+B=B+A, A \cdot B=B \cdot A$$

结合律:

$$A+(B+C)=(A+B)+C, A \cdot (B \cdot C)=(A \cdot B) \cdot C$$

分配率:

$$A \cdot (B+C)=A \cdot B+A \cdot C, A+(B \cdot C)=(A+B) \cdot (A+C)$$

吸收率:

$$A \cdot (A+B)=A, A+(A \cdot B)=A$$

幂等律:

$$A+A=A, A \cdot A=A$$

采用布尔代数求解图1事故树

$$T_0=M_1M_2=(X_0+X_1)(M_3+M_4)=(X_0+X_1)(X_2+X_3+X_4+X_5+X_6+X_7)=X_0X_2+X_0X_3+X_0X_4+X_0X_5+X_0X_6+X_0X_7+X_1X_2+X_1X_3+X_1X_4+X_1X_5+X_1X_6+X_1X_7。$$

求得最小割集为: $P_1=\{X_0X_2\}$; $P_2=\{X_0X_3\}$; $P_3=\{X_0X_4\}$; $P_4=\{X_0X_5\}$; $P_5=\{X_0X_6\}$; $P_6=\{X_0X_7\}$; $P_7=\{X_1X_2\}$; $P_8=\{X_1X_3\}$; $P_9=\{X_1X_4\}$; $P_{10}=\{X_1X_5\}$; $P_{11}=\{X_1X_6\}$; $P_{12}=\{X_1X_7\}$ 。

2.4 求最小径集

最小路径集是一个能够使顶级事件不会发生的根据性事件集。最小路径集则是一个使得顶级事件无法发生的根据性基本事件集。最小径集说明了在哪些问题根据企业生活中出现的问题而产生不同的情况下,企业自己所能发生的事情也就可以实现顶上一个事情不会发生的安全管理模型。寻找最短路径集的方法主要是将一个在故障树顶部的事件发生替换为不再再次发生,即把“或”门换成“与”门,把“与”门换成“或”门,可以求出原事故树对偶的成功树,那么求出来的成功树的最小割集就是事故树的最小径集了。

$$T_0'=M_1'+M_2'=X_0'X_1'+(M_3'M_4')=X_0'X_1'+X_2'X_3'X_4'X_5'X_6'X_7' \text{ 求得最小径集为: } K_1=\{X_0X_1\}; K_2=\{X_2X_3X_4X_5X_6X_7\}。$$

2.5 结构重要度故障分析(即决定性故障分析)

不限于充分考虑基本故障事件及其可能性及发生的最大概率,只从基本故障树型的结构角度分析基本故障事件及其可能性的发生对顶层基本事件的直接影响。分析大量的应用数据系统架构必须具备的安全重要性主要目的就是在为一个企业系统制订一套安全和可控风险的安全防范措施时依照任务轻重缓急慢行,以便企业系统能够实现所使用需要的各种基础设备和软件技术,以期能够达到一个经济可靠、有效和安全系统运行的技术目标。结构重要度的近似判别式如下:

$$I_{\varphi}(X_i)=\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} (j \in k_j)$$

其中, I 为第 i 个基本事件的结构重要度; 为第 j 个最小割集; n_j 为第 K_j 个最小割集的基本事件数。由此得出各基本事件的结构重要度系数分别为:

$$I_{\varphi}(X_0)=I_{\varphi}(X_0)=0.25$$

$$I_{\varphi}(X_0)=I_{\varphi}(X_3)=I_{\varphi}(X_4)=I_{\varphi}(X_5)=I_{\varphi}(X_6)=I_{\varphi}(X_7)=0.08333$$

2.6 结果分析

事故树稳定性分析的结果显示,事故树包括12个最小分割集和2个最小途径路集,即有12个可能导致事故发生的原因,但只要选择两个相同的直径高度浓缩物中的一个,就已经可以防止泄漏事故。第一个设计方案中 $\{x_0x_1\}$ 被认为是最优的解决办法,只要我们能够确保气动阀完美有效,就可以进行及时地关闭阀门,避免安全事故的进一步发生和扩大,通过对网络架构具备的重要性也充分验证基本的生活事故 x_0 、 x_1 是导致泄露安全事故发生的主要原因。第二种设计 $\{x_2x_3x_4x_5x_6\}$ 为防止泄漏事故控制系统管理措施。这个设计方案中的基础性事件繁多,不容易一一得到控制,所以这个设计方案从某种程度上来说并不理想。

3 预防措施

从以上的分析中我们可知,在LNG卸车的过程中,只有在设备的故障和运输管理问题同时出现或者发生了一定程度上的损坏后,才可能会导致LNG泄漏的事故,所以对于预防这类事件的预防措施首先就应该从以下几个重点方面入手:①必须交代承运人员定期做好检查与维护,及时排出故障;②在日常管理和监督监管中建立承运商的黑名单和违章行为,曝光违规违章行为;明确承运人员在卸液作业全过程中的安全操作和职责,完善卸液操作的技术规程,在卸液作业全过程中承运商与业主方之间实行了“双确认、双监护”,卸液的每步作业均需经过双方的签字或者确认,并由作业双方的财务人员负责进行全程的监控;③加强相关人员的培训,完善岗位设置,提高从业人员的专业技能,提高工作人员对安全问题的意识和社会责任心,从而真正达到减少或者降低因为各种操作错误而导致发生泄露事故的概率;④加强对应急预案的演练,强化与社会团队协调配合,备好吸氧器、防冻衣服、防爆工具等各种应急性物资的准备,熟练利用这些物资,以此实现应急能力、危险事故处置能力的提升。

参考文献:

- [1] 方学锋, 雒相垚, 等. FTA在液氨罐车泄漏事故分析中的应用[J]. 炼油与化工, 2021, 32(02): 41-46.
- [2] 高建丰, 郑豫, 等. 基于故障树-层次分析法的槽车液化气泄漏事故致因分析[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(03).
- [3] 张颖, 董国强, 雷莹, 何湛, 张璇, 刘鹏刚. 基于DEMATEL与逻辑树的海底原油管道泄漏风险分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(05).