

液化天然气 (LNG) 领域中风险分析概述

于 曼

中国石油工程建设有限公司华北分公司气工艺设计室

摘要: 近年来, 全球对作为能源的液化天然气 (LNG) 的需求正快速增长。为了满足这一需求, 需建设大量设施, 如 FPSO (浮式液化天然气生产储卸装置), FSRU (浮式 LNG 储存及再气化装置)、LNG 调峰站及 LNG 液化工厂等, 以进行 LNG 的储存, 加工和运输。这些设施中的任何一个设施的故障都可能使市场, 公司, 人员和环境面临危险, 因此, 将风险分析应用于液化天然气行业已成为全世界的热议话题。为了评估与液化天然气设施和运输设施相关的安全风险, 已采用各种风险分析方法来识别潜在危害, 计算事故概率以及评估后果的严重性。

关键词: 液化天然气 (LNG); 风险分析; 风险评估

1 简介

LNG 作为一种清洁、高效的能源, 其具有蒸汽扩散特性, 高度易燃, 已被广泛用于安全关键行业^[2]。失去对诸如液化天然气 (LNG) 等可燃产品的控制, 可能会导致事故, 造成火灾或爆炸等灾难性后果。为了减轻这种后果, 资产管理必须根据监管要求设计并采取相应的安全措施。为此, 风险分析已成为一种非常有用的工具, 可以指导关键安全行业中有关设计, 制造, 安装, 操作和维护以及资产退役等的决策。

作为一个科学领域的风险分析研究始于 30 到 40 年前。尽管风险分析是一门较年轻的学科, 但其已被广泛应用于许多行业, 例如医疗, 工程基础设施, 安全和国防等。美国核监管局的信息委员会 (2016)^[1]指出, 1970 年代, 第一个概率风险评估 (PRA) 技术是为核电站开发的, 此后, 相继开发了许多新的分析方法和工具。

2 风险评估方法

通常来说, 风险评价方法按照风险因素是否可以量化可分为定性方法 (不可量化) 和定量方法 (可量化)。

根据 Nwaoha 等人^[3]的说法, 定性风险分析方法是一种以专家的主观判断为输入信息的演绎方法, 在于注重于事物发展在性质方面的预测, 具有较大的灵活性。它被认为是风险分析方法中最快和最简单的方法, 因为它几乎不需要使用数学和计算技能。定性风险分析方法的结果通常用颜色指标表示。例如, “红色”代表“高风险”或不可接受的风险, 这意味着绝对有必要采取措施消除或降低故障风险。“黄色”(或“琥珀色”)代表“中等风险”, 这意味着可以使用现有的风险降低策略来管理风险。“绿色”代表“低风险”, 意味着几乎不需要采取任何行动。

定量风险分析是一种使用数学和计算模型识别和量

化潜在事故概率和后果的系统方法。根据 Marhavi 等人^[4]的说法, 定量风险分析方法通过利用模拟或实验方法或应用现实生活信息作为输入信息, 在数量上估计风险。与定性风险分析不同, 定量风险评估的结果以既定的定量风险接受标准为基准, 例如致命事故率 (FAR) 或个人风险 (IR)。大多数国际法规要求使用定量风险评估方法来支持具有灾难性故障后果的工业设施选址的决策过程, 其中模拟和运筹学 (OR) 方法被广泛应用于定量风险分析项目。

半定性风险分析是定性和定量风险分析方法的混合体。这是因为定性和定量风险分析技术都有局限性, 因此为了弥补每种方法的局限性, 将专家的主观输入与定量风险分析相结合。这种方法适用于客观故障数据不可用或不足的情况。Berle 等人^[5]建议半定性方法采用定量技术, 但它们不使用精确数字进行概率计算或后果评估。初步危害分析 (PHA)、影响和临界分析 (FMECA)、危害和可操作性 (HAZOP) 等均为是半定性风险分析方法的典型例子。

风险评估方法是降低甚至杜绝风险的有效手段, 因此, 针对液化天然气项目的风险评价方法进行研究, 并结合液化天然气自身项目风险特点, 提出准确适合的风险评价方法, 以帮助液化天然气项目管理者更好地预测风险。

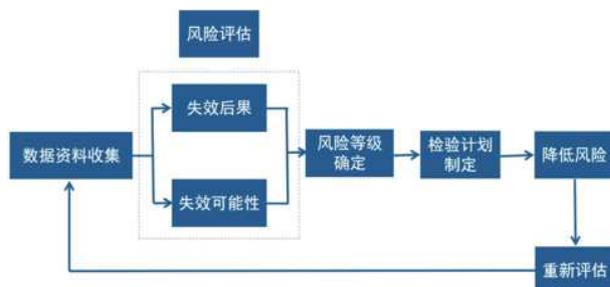


图 2-1 风险评估流程图

3 风险分析工具

在过去的二十年中,已经开发了多种风险分析工具来支持各行各业的基于风险的决策。

3.1 检查表

用于识别危害和风险暴露的常用方法之一。检查表主要是根据专家积累的知识和判断以及从以前的项目中获得的信息制定的。在风险分析中,检查表被认为是识别潜在危险的最简单、最快的方法。它涉及提出一系列问题并以结构化和系统化的方式提供答案。该工具的主要特点包括:

- 1) 主要产生定性结果;
- 2) 数据收集过程涉及使用访谈、实地考察和审查项目文件;
- 3) 需要有经验的人,了解清单问题。

由于它依赖于个人开发问题的经验,这会给最终结果带来不确定性,检查表的结果大多是主观的或定性的,建议将此工具与液化天然气行业的其他风险分析工具结合起来,以确保风险分析的准确性。

3.2 危害和可操作性研究 (HAZOP)

一种结构化、系统化的定性风险评估工具,用于识别工厂中可能导致事故和不合规的操作中的潜在危险和偏差。HAZOP是通过头脑风暴和使用一组特殊引导词(例如,无、更多、更少、部分等)来完成的^[6]。该工具的一个关键独特之处在于,它可以在考虑设计意图、操作和流程偏差时发挥团队成员的想象力。偏差是根据项目团队的经验确定的,包括团队负责人、工程师、材料专家、设计师和设备制造商等提供的相关信息。这种风险分析工具在面临难以量化的风险时很有优势,决策者不必为发生概率和后果严重程度分配数值,风险没有排名,与其他风险评估工具相比,它很简单。但这种风险分析工具无法评估多组件系统中不同组件相互交互的风险。

可能性	严重性				
	1	2	3	4	5
A	M	M	H	E	E
B	M	M	H	H	E
C	L	M	M	H	H
D	L	L	M	M	H
E	L	L	L	M	M
F	L	L	L	L	M
G	L	L	L	L	L

图3-1 风险矩阵图

3.3 保护层分析 (LOPA)

一种直接和简化的半定量工具,使用者可以用更少的精力和时间获得定量结果。在风险分析中,LOPA提供

了确定是否有足够的保护系统或安全功能来抵御危险事件以降低其风险的基础。对于LOPA程序,计算始发事件的频率、失效的后果和保护层失效的可能性,以确定任何给定事故情景的风险水平^[7]。执行LOPA的主要步骤是:

- 1) 描述事故场景。
- 2) 确定始发事件并为始发事件指定频率。
- 3) 确定后果严重程度。
- 4) 确定对于使用风险矩阵的风险降低措施。
- 5) 确定保护层。
- 6) 根据需要确定每一层保护的故障概率并以数学方式组合它们。
- 7) 确定组合风险。
- 8) 比较组合的风险已识别保护层的风险降低有效性和风险降低要求,以确定是否需要额外的风险降低措施。

3.4 事故树分析 (ETA)

事件树分析(ETA)通过使用逻辑模型来确定可能导致设备故障或过程中断的事故场景(始发事件)的所有可能结果。ETA可用于识别复杂系统中所有潜在的意外事件和过程^[8]。执行ETA的主要步骤是:

- 1) 确定所有可能导致不可接受风险的相关起始事件。
- 2) 确定降低风险所需的所有安全措施。
- 3) 构建事件树。
- 4) 描述潜在的风险偶然序列。
- 5) 为每个事件分配概率。
- 6) 通过乘以单个事件的概率来计算系统成功和失败的概率。

与其他风险分析工具相比,ETA适用于评估复杂动态系统中的多个故障,但其局限性是无法一次分析多个始发事件或安全事件。

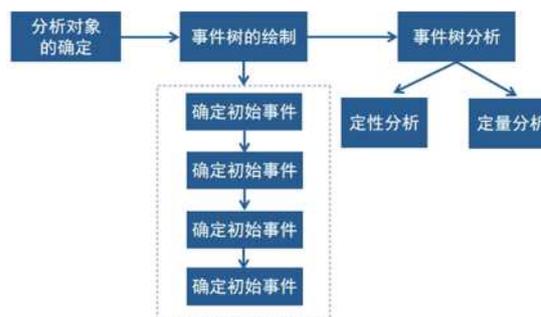


图3-2 风险矩阵图

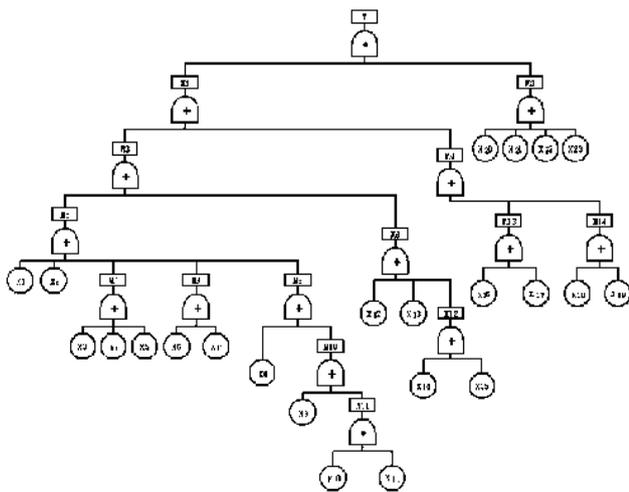
3.5 故障树分析 (FTA)

用于复杂系统根本原因分析的结构良好且广泛使用的风险评估工具之一。它于1962年由AT&T的贝尔实验室首次推出,用于弹道控制系统^[9]。FTA是安全分析师

使用的演绎故障分析工具，用于在系统故障或过程中断发生之前确定可能的原因^[8]。在FTA中，系统的故障分析从顶事件开始，然后向后确定顶事件的潜在原因。构建故障树的主要步骤包括：

- 1) 系统定义
- 2) 顶层故障的定义
- 3) 顶层故障潜在原因的识别
- 4) 下一级事件的识别
- 5) 确定根本原因
- 6) 分配事件概率
- 7) 故障树分析

FTA可用于以定性、定量或半定性方式评估风险。定性方法涉及将故障树减少到最小事件集，而定量方法需要通过统计或分析技术计算顶级事件的发生概率。使用来自每个事件的定量信息来估计发生概率，该信息可包括可靠性和可维护性数据。FTA的主要优势之一是它可以帮助决策者识别系统中最关键的组件，以便规划最有效的维护方法。传统的FTA更适合对那些经历单一故障模式并在整个生命周期中表现出静态故障行为的组件进行安全和可靠性分析。然而，大多数现代复杂工业系统都存在多种故障模式并表现出动态故障行为。因此，传统的FTA工具无法处理复杂系统的动态故障行为^[9]。



T: 天然气储罐爆炸; M1: 天然气泄漏; M2: 产生点火源; M3: 设备原因; M4: 第三方破坏; M5: 主体设备; M6: 其他; M7: 设计原因; M8: 加工问题; M9: 材料原因; M10: 腐蚀; M11: 外部腐蚀; M12: 仪表问题; M13: 自然因素; M14: 非自然因素; X1: 机械故障; X2: 安装不符合要求; X3: 设计规格不符; X4: 布局不合理; X5: 地基下沉或移位; X6: 焊缝缺陷; X7: 未按要求完成加工; X8: 变形/破损; X9: 发生内部腐蚀。

图3-3 事件树分析步骤流程图

3.6 失效模式和影响分析 (FMEA) / 失效模式、影响和关键性分析 (FMECA)

FMEA/FMECA是最常用的归纳风险分析工具之一，用于调查不同安全关键行业复杂系统中组件故障的潜在故障模式、原因和影响。决策者能够想出可能的方法来消除或最小化系统的潜在故障模式，以提高系统的运行安全性和可靠性。使用该工具的程序是首先定义要分析的系统，将其分解为子系统和组件，识别潜在的故障模式和可能的原因，确定当前的控制方案以检测或预防故障原因，然后评估故障对系统的影响。

对于定量分析，风险优先级数 (RPN) 计算如下：

$$RPN=O \times S \times D$$

其中：O—分配给发生概率

S—发生严重性

D—不可检测性

O、S和D的数据输入具有主观性，这三个因素通常是根据专家的判断来确定的，会降低对RPN结果进行决策的置信度^[10]。FMECA中的“C”表示考虑和排序了各种失效影响的严重程度。因此，FMECA是一种带有关键性分析的FMEA。

3.7 贝叶斯网络 (BN)

BN对于处理风险和可靠性决策过程中的不确定性、组合来自不同来源的信息以及在新信息可用时更新结果非常有用。当操作条件急剧变化时，它也可用于更新维护计划。BN的主要目的是在获得新信息后对系统最终结果（通常是因果关系）的后验条件概率分布进行建模^[11]。许多研究人员认为BN是处理动态复杂系统（如LNG设施）风险分析过程中的不确定性的非常合适且有前景的工具。

4 数据来源

为了做出适当的决策，风险分析师需要高质量的定量和定性数据。数据来源需可靠并被广泛认可，例如OREDA手册、英国HSE数据库、监管机构的报告及专家咨询等。

4.1 海上和陆上可靠性数据 (ORDEA)

OREDA数据库包含一段时间内从海上和陆上油气设备收集的高质量可靠性数据。OREDA手册中的可靠性信息已被石油和天然气行业的研究人员、从业人员、学者和其他利益相关者用于评估安全、生产和环境关键系统的可靠性、可用性、可维护性。

4.2 管道和立管泄漏 (PARLOC)

多年来，管道和立管泄漏 (PARLOC) 数据库已成为油气行业管道和立管风险评估的首选信息来源。它包

含在英国大陆架 (UKCS) 的管道和立管上发生的事故中的一般密封损失数据。PARLOC数据可以帮助设计人员和运营商验证液化天然气行业管道的设计和操作系统要求。

4.3 英国 HSE 数据库

英国 HSE 数据库包含石油工业中使用的设备的详细信息及其相应的故障率和用于风险评估的事件数据。这些数据库中存在的故障率和事件数据是通用的,因为它们是从风险评估工具中获得的。

4.4 专家咨询

在某些情况下,当所需的数据不可用、有限或难以收集时,专家的判断就成为唯一的信息来源。专家的判断基于特定领域专家的知识 and 经验。征求专家意见是获取数据的常用方法。在 LNG 领域,故障模式和原因、故障率、平均故障时间、事故的经济影响等数据的模型类型是可以通过专家获得的数据示例。

5 结论

随着我国的科技发展与技术进步,天然气行业生产也逐步趋于大型化,系统也趋于复杂化。在这样的情况下,加之有些生产过程会牵涉到有毒或高危原料,对相关企业和设备的安全要求也越来越严格和苛刻。目前,风险管理和评估工作的发展方向趋于使用更高效的综合风险分析工具(组合技术)来评估复杂的风险。在实际应用中如何选择适当的方法或者方法组合是决定风险评估效果好坏的最关键的因素。

我国学习了国际优秀风险评估案例,已经引进了很多风险评估方案,但是很多数据与我国实际国情不能够完全吻合。由于制造水平和加工工艺等实际局限性,国外的许多失效数据并不能够直接使用,所以,应该加大力度建立属于自己的失效数据库。

风险评估工作的最终目的应该落地在日常维护管理,通过风险识别和评估等流程,对日常厂区运行提出具有扎实的理论基础且快速有效的维修建议十分重要。如何将风险评估工作与维修可以结合起来将会对生产实际的安全性、经济性和可操作性的多重提升具有重大意义。

参考文献:

- [1] United States Nuclear Regulatory Commission, 2016. Backgrounder on Probabilistic Risk Assessment. Maryland, USA, Available at: <https://www.nrc.gov/reading-rm/>.
- [2] 展建江. 中国天然气产业发展形势与前景[J]. 中国集体经济, 2021(21):13-14+75.
- [3] Nwaoha, T., Yang, Z., Wang, J., Bonsall, S., 2013. Adoption of new advanced computational techniques to hazards ranking in LNG carrier operations. *Ocean Eng.* 72, 31 - 44.
- [4] Marhavilas, P.K., Koulouriotis, D., Gemeni, V., 2011. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: on a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 24, 477 - 523.
- [5] Berle, Ø., Norstad, I., Asbjørnslett, B.E., 2013. Optimization, risk assessment and resilience in LNG transportation systems. *Supply Chain Manag.: Int. J.* 18 (3), 253 - 264.
- [6] Marhavilas, P.K., Koulouriotis, D., Gemeni, V., 2011. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: on a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 24, 477 - 523.
- [7] Willey, R.J., 2014. Layer of protection analysis. *Procedia Eng.* 84, 12 - 22.
- [8] 周建方, 唐椿炎, 许智勇. 事件树、故障树、决策树与贝叶斯网络[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(3):351-355.
- [9] Kabir, S., 2017. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. *Expert Syst. Appl.* 77, 114 - 135.
- [10] Shafiee, M., Enjema, E., Kolios, A., 2019b. An integrated FTA-FMEA model for risk analysis of engineering systems: a case study of subsea blowout preventers. *Appl. Sci.* 9 (6), 15.
- [11] Rausand, M., 2011. Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications. John Wiley & Sons, p. 664.

