

液化天然气场站事故定量风险评价方法研究

郭海新（昆仑能源湖北黄冈液化天然气有限公司，湖北 黄冈 438000）

摘要：液化天然气场站在储存、运输和处理过程中存在诸多潜在的危险，如火灾、爆炸和泄漏等，这些事故不仅会对场站本身造成巨大破坏，还会对周围环境和人类健康产生严重影响。针对液化天然气场站事故定量风险评价问题，本次研究对液化天然气场站事故风险进行识别，阐述事故定量风险评价的步骤，以此开展液化天然气场站事故定量风险评价方法研究工作，为提高液化天然气场站安全管理水平奠定基础。研究表明：在开展液化天然气场站事故定量风险评价的过程中，其步骤为危险识别、事故后果模拟、事故发生概率分析、风险计算及评价，常见的评价方法为故障树分析、事件树分析、蒙特卡洛模拟以及贝叶斯网络，通过选择合理的风险评价方法以及遵循科学的风险评价步骤，可以全面提高风险评价效果。

关键词：液化天然气场站；风险识别；事故定量风险评价；步骤；方法研究

液化天然气（LNG）作为一种清洁、高效的能源，近年来在全球范围内得到了广泛应用。随着能源需求的不断增长，LNG 产业呈现出快速发展的趋势，其在能源结构优化、环境保护和能源安全等方面发挥着重要作用。但是 LNG 的生产、储存、运输和使用过程中存在着潜在的安全风险，一旦发生事故不仅会造成人员伤亡和财产损失，还可能对环境造成严重污染^[1]。因此，如何有效识别、评估和管理 LNG 场站的事故风险成为急需解决的关键问题。LNG 场站事故的风险管理是一项复杂的系统工程，需要综合考虑多种因素和情景。传统的定性风险评价方法虽然能够识别潜在的危险源，但难以量化风险的大小和后果，无法为决策者提供精确的风险管理依据。因此，本次研究主要是对风险事故定量评价方法进行研究，以此更加精确地评估事故的发生概率和后果，为风险控制和应急管理提供科学依据。

1 液化天然气场站事故风险识别

1.1 LNG 场站主要危险源识别

LNG 场站作为高风险的能源基础设施，其主要危险源涉及多个方面，涵盖设备及设施、操作过程、外部因素和环境因素，这些危险源一旦失控，可能导致严重的泄漏、火灾、爆炸等事故，危及人员安全、财产和环境。首先，LNG 场站的核心设施包括储罐、管道、阀门、接头、泵和压缩机等，这些设备是储存和运输 LNG 的关键环节，设备的安全对于整个场站的安全十分重要。其次，操作过程中的危险源主要包括装卸操作、维护保养和紧急操作。装卸操作过程中，操作失误、设备故障或接口连接不当可能导致 LNG 泄漏。紧急操作中，如果紧急操作设备失灵、操作失误或应急预案

不完善，可能导致事故未能有效控制灾害扩大。此外，外部因素也是 LNG 场站的重要危险源。自然灾害如地震、洪水、雷击和台风等可能引发设施损坏或操作失控。最后，环境因素对 LNG 场站的安全运行也构成潜在威胁，极端天气导致的温度剧变和系统压力失控可能引发设备故障和介质泄漏。设备长期暴露在腐蚀性环境中，材料老化导致设备失效和泄漏，形成火灾和爆炸风险。

1.2 定量风险评价概念

定量风险评价是一种系统化、科学化的风险分析方法，其使用目的是在通过数学模型和统计技术，对潜在事故的发生概率及其后果进行量化描述和评估，定量风险评价的主要目标是提供基于数据的详细分析，以支持决策者制定有效的风险管理和控制措施，降低事故发生概率及其带来的损失。风险是指特定危险事件发生的可能性及其带来的后果。风险的量化表达通常包括两个主要因素，分别是发生概率和后果严重性，发生概率指的是某一特定事故在给定时间段内发生的可能性，通常用频率或概率来表示。后果严重性指的是事故发生后对人员、财产、环境等造成的影响，通常用定量的损失指标来表示，如人员伤亡数量、经济损失金额、环境破坏程度等。

2 液化天然气场站事故定量风险评价的步骤

2.1 危险识别

危险识别是 LNG 场站事故定量风险评价的首要步骤，旨在系统地识别可能导致事故的潜在危险源和事故类型，通过全面的危险识别，可以为后续的风险分析、评估和管理提供基础数据和科学依据。常见的识别方法为危险与可操作性研究方法以及故障模式及影

响分析两种方法。对于危险与可操作性研究方法而言,其是一种系统的、结构化的危险分析方法,通过对工艺流程中的每个步骤进行详细检查,识别潜在的操作偏差及其可能导致的危险,在应用的过程中,通过组建危险与可操作性研究小组,审查工艺流程图,识别每个单元操作的偏差,分析偏差原因和后果,提出改进措施。对于故障模式及影响分析而言,其是通过分析系统或设备的各个组成部分,识别其可能的故障模式及其对系统的影响,在应用该方法的过程中,需要通过定义系统边界,列出各部件可能的故障模式,评估故障的影响和严重性,提出预防和控制措施。在危险识别后,需要列出所有识别出的危险源及其可能的事故类型,详细描述每种事故的发生机制、可能后果和影响范围,将识别出的危险源按发生概率和后果严重性进行分类,形成风险矩阵。

2.2 事故后果模拟

事故后果模拟是通过科学模型和计算工具,预测和评估潜在事故一旦发生的后果和影响范围,事故后果模拟为风险管理和应急预案的制定提供了重要的数据支持和决策依据。事故后果模拟的主要目的是量化事故发生后的影响,包括对人员、设施和环境的危害程度。通过准确的模拟,需要评估事故的严重性和潜在影响范围,提供数据支持,帮助制定风险控制措施和应急响应计划,识别和分析不同情景下的事故后果,为风险决策提供科学依据,提升场站的安全管理水平,保障人员、设备和环境的安全。事故后果模拟模型包括泄漏扩散模型、火灾模型以及爆炸模型。泄漏扩散模型用于模拟 LNG 泄漏后气体或液体的扩散行为,预测浓度分布和扩散范围,火灾模型用于模拟 LNG 燃烧形成的火灾类型,包括池火灾、喷射火等,预测火焰高度、辐射热强度和影响范围,爆炸模型用于模拟 LNG 蒸气云爆炸的超压分布和破坏范围,评估爆炸的破坏力。

2.3 事故发生概率分析

事故发生概率分析是在评估不同事故场景发生的可能性,通过准确的概率分析,可以为风险评估提供可靠的数据支持,有效预测和预防事故的发生。事故发生概率分析的主要目的是定量评估各种潜在事故情景的发生概率,以便进行全面的风险评估,在概率分析的过程中,需要识别关键风险因素,确定高风险事故情景,提供定量数据支持,帮助决策者制定科学的风险管理和控制措施,优化应急预案,提高事故响应

的有效性。

2.4 风险计算及评价

风险计算及评价是通过定量计算事故发生的风险值,并根据风险评估标准进行综合评价,从而制定有效的风险控制措施。在对 LNG 场站进行风险计算及评价的过程中,评估储罐泄漏的发生概率,模拟泄漏后果,计算储罐周围不同位置的个体风险值和社会风险值,基于个体风险和社会风险的评价标准,判断储罐泄漏风险是否在可接受范围内,提出相应的风险控制措施。评估装卸操作失误的发生概率,模拟操作失误导致的事故后果,计算装卸区域的个体风险值和社会风险值,根据评价标准,判断装卸操作风险是否可接受,提出改进装卸操作规程和加强操作人员培训的建议。综合评估 LNG 场站内所有设备和操作过程的风险,计算整体个体风险和社会风险,绘制 FN 曲线,基于综合风险评价,识别 LNG 场站的主要风险来源,制定系统性的风险管理和控制措施,优化场站安全设计和运行流程。

3 液化天然气场站事故定量风险评价方法研究

3.1 故障树分析

故障树分析是一种系统化的、图形化的定量风险分析方法,用于分析和描述系统中潜在事故或失效的因果关系。故障树通过逻辑门和事件节点表示系统故障的层级关系,帮助识别导致系统顶事件的基本事件和路径。在使用该方法进行 LNG 场站事故定量风险评价的过程中,需要明确分析对象和需要预防的重大事故或失效事件,即顶事件,在 LNG 场站中,顶事件可以是大规模 LNG 泄漏或储罐爆炸。确定系统边界,识别系统的主要组成部分和功能单元, LNG 储罐、管道、阀门、控制系统等。通过调查和专家访谈,确定顶事件的直接原因或前置事件,对每个前置事件进行分解,识别其进一步的直接原因,直到找到基本事件,即最底层的故障原因。使用逻辑门连接事件节点,构建反映事件因果关系的树形图,通过历史数据、可靠性数据或专家估计,确定每个基本事件的发生概率。基于故障树结构和逻辑关系,使用定量分析方法计算顶事件的发生概率。故障树分析提供了系统化、结构化的方法,能够清晰地展示系统中复杂的因果关系,帮助识别关键故障路径和事件。但是该方法的定量分析需要可靠的基础数据和专家经验,对于新系统或缺乏历史数据的系统,可能存在较大不确定性,对于大型复杂系统,故障树可能非常庞大和复杂,构建和

分析需要大量时间和资源。

3.2 事件树分析

事件树分析是一种系统化的风险分析方法,用于分析和评估系统中潜在事故情景的发展路径及其后果。事件树分析通过构建事件树,展示初始事件后的各种可能发展路径及其结果,帮助评估事故发生的可能性和潜在影响。在使用该种分析方法的过程中,首先需要确定分析的起点事件,即可能引发事故的初始事件,在 LNG 场站中,初始事件可以是 LNG 储罐泄漏或管道破裂。根据初始事件的发展,识别可能的后续事件或状态,每个后续事件的结果可以是成功或失败,从初始事件开始,沿不同路径绘制后续事件及其结果,形成树状结构,每个节点代表一个后续事件,每个分支代表该事件的不同结果。为每个后续事件的结果分配发生概率,通常基于历史数据、专家意见或可靠性数据,例如某设备故障后安全系统启动的成功概率和失败概率。计算每条路径的发生概率,通常通过乘法将每个节点的概率相乘,分析每条路径的最终结果,评估其可能的后果和影响,量化每种后果的严重程度,帮助综合评估风险水平。事件树分析结合概率计算,量化评估不同事故情景的发生概率和后果,提供定量数据支持决策,可以帮助识别系统中的关键节点和高风险路径,重点加强这些环节的风险控制。但是该方法需要准确的概率数据和后果分析,缺乏可靠数据时可能导致结果不准确,在使用过程中假设事件之间相互独立,但实际系统中事件可能存在相互依赖性,影响分析结果的准确性。

3.3 蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛模拟是一种基于随机抽样和统计分析的数值模拟方法,用于处理复杂系统中的不确定性和随机性问题。通过大量随机样本的生成和计算,蒙特卡洛模拟可以估计系统行为的概率分布和统计特性。该方法在 LNG 场站事故定量风险评价中广泛应用,以模拟各种不确定因素对风险的影响。在使用该方法的过程中,需要明确需要模拟和评估的风险问题,确定目标变量和输入变量,即评估 LNG 储罐泄漏事故的概率和可能后果。构建描述系统行为的数学模型,包括输入变量与目标变量之间的关系,即建立泄漏概率模型和后果分析模型,为每个输入变量确定其概率分布,基于历史数据、专家意见或假设,在 LNG 场站事故定量风险评价的过程中,设备故障率服从指数分布,操作失误率服从正态分布。使用随机数生成器,从输入变量的概率分布中抽取大量随机样本,形成多组输入

数据,将每组随机样本代入数学模型,计算对应的目标变量值,记录所有计算结果。对所有模拟结果进行统计分析,估计目标变量的概率分布、均值、方差等统计特性,即估计泄漏事故发生概率的均值和置信区间,绘制后果概率分布图。

3.4 贝叶斯网络

贝叶斯网络又称信念网络,是一种基于贝叶斯概率理论的图形模型,用于表示和分析变量之间的概率关系和依赖结构。贝叶斯网络通过有向无环图和条件概率分布描述变量间的因果关系和依赖性。在 LNG 场站事故定量风险评价中,贝叶斯网络可以用于构建复杂系统的事故模型,分析事故发生的可能性和影响因素,帮助进行风险评估和决策。在使用该方法的过程中,需要确定与事故风险相关的所有变量,包括事件、条件和后果等,构建贝叶斯网络的拓扑结构,即用有向无环图表示变量间的因果关系和依赖性,LNG 场站中的变量可以包括设备故障、操作失误、安全系统状态、环境条件等。为网络中每个节点定义其条件概率表,描述该节点在给定父节点条件下的概率分布,设备故障的条件概率可以基于历史数据和可靠性分析确定,操作失误的条件概率可以基于培训水平和操作规程等因素确定。收集并输入与分析相关的观测数据或先验信息,用于更新网络中的条件概率,观测数据为观测到的设备维护记录、操作人员培训情况等数据。使用贝叶斯推理算法,根据输入的观测数据和条件概率分布,计算目标事件的后验概率,即计算 LNG 泄漏事故在当前条件下的发生概率,分析各个变量对事故风险的贡献。

综上所述,LNG 产业在全球范围内迅速发展,对安全管理的要求也日益提高,传统的定性风险评价方法难以量化风险的大小和后果,无法提供精确的风险管理依据。通过引入故障树分析、事件树分析、蒙特卡洛模拟以及贝叶斯网络等事故风险定量分析方法,可以为 LNG 场站的安全管理提供科学依据和技术支持,提升整体安全管理水平,降低事故发生率。

参考文献:

- [1] 郝武民,郑建国,张志鹏.LNG 气化站泄漏动态风险概率评估方法及应用[J].安全、健康和环境,2024,24(03):1-8.

作者简介:

郭海新(1980-),男,河南遂平人,油气储运工程师、注册安全工程师、安全工程高级工程师,主要从事成品油储运及液化天然气工厂安全生产管理工作。