

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD13-2020



中国船级社

油气定量风险评估指南

2020

生效日期：2020年7月1日

北京

目 录

第 1 章 通 则	1
1.1 目的	1
1.2 适用范围	1
1.3 定义	1
第 2 章 评估方法与流程	3
2.1 评估方法	3
2.2 实施流程	3
2.3 项目管理	4
2.4 图纸资料	5
第 3 章 危险识别及场景选择	7
3.1 危险识别	7
3.2 危险识别流程	7
3.3 辨识方法	8
3.4 危险排序	10
3.5 场景选择	11
第 4 章 频率分析	12
4.1 历史数据	12
4.2 可靠性分析	13
4.3 故障树分析 (FTA)	13
4.4 事件树分析 (ETA)	16
4.5 人因可靠性分析 (HRA)	17
第 5 章 后果分析	20
5.1 灾害类型	20
5.2 后果计算	20
5.3 灾害接受衡准	21
第 6 章 风险呈现与评价	25
6.1 计算网格	25
6.2 个人风险值计算	25
6.3 社会风险值计算	26
6.4 风险可接受准则	28
6.5 风险敏感性分析	30
6.6 风险控制措施	31
附录 1 危险识别工作记录表	33
附录 2 通用案例失效清单	34
附录 3 扩散计算模型	37

附录 4 喷射火计算模型	41
附录 5 池火计算模型	42
附录 6 爆炸计算模型	44

第1章 通 则

1.1 目的

1.1.1 定量风险评估（QRA）是一种对某一设施或作业活动中发生的事故频率和后果进行量化的系统方法，也是进行风险管理的一种技术手段，帮助相关方更好地理解其所面临的风险，以实施更有针对性的风险控制措施，并为决策提供输入信息。

1.1.2 在船舶、海上油气生产设施及陆上油气站场的设计、建造和营运过程中开展定量风险评估，将油气泄漏引起的人员可能遭受伤亡风险、设施可能遭受破坏风险进行量化，呈现事故后果状态。

1.2 适用范围

1.2.1 本指南所述的定量风险评估方法适用于：

- （1） 船舶、海上油气生产设施及陆上油气站场工程中与安全相关的设计、建造和营运的评估；
- （2） 技术标准（包括规范、规定、规则、标准和指导性文件等）中要求的风险评估可参照本指南；
- （3） 本社船舶与海上设施技术措施的等效和免除的评估；
- （4） 新技术应用、新颖产品设计、油气装置发生重大改建的评估及其它适用情况。

1.2.2 本指南适用于油气泄漏事故定量风险评估，给出了危险识别、频率分析、后果分析及人员风险计算流程和相关要求，其他风险如财产风险、环境风险则应参照相关公认标准执行。

1.2.3 定性风险评估可参照本指南相关章节执行。

1.3 定义

1.3.1 下述基本定义适用于本指南：

- （1） 油气（Oil and gas）：石油天然气的统称，包括原油、成品油、天然气、煤层气、煤制天然气等。
- （2） 危险（Hazard）：可能造成人员伤害、职业病、财产损失、环境破坏的根源或状态。
- （3） 事故（Accident）：涉及人员伤亡、财产损失或环境破坏的意外事件。
- （4） 危险识别（Hazard Identification, HAZID）：采用系统分析方法识别出系统中存在的危险或事故隐患。
- （5） 初始事件（Initiating Event）：导致危险情况或事故发生的一系列事件中的第 1 个事件。
- （6） 失效（Failure）：系统一部分或大部分出现了停止执行所需功能的事件（如泄漏）。
- （7） 失效场景（Failure Scenario）：是用于定义特定失效事件的一套完整的环境集，一个场景通常伴随着一系列后续事件，即失效场景也是失效事件的集合。当在简单的风险分析中只需考虑一个场景时，事故场景可以等同于失效事件。
- （8） 检查表分析法（Check List）：用一张或多张检查表来系统地评估可能的危害。
- （9） 假设分析技术（What—if Analysis）：一种集思广益的方法，由一组专家通过不断提出的“如果出现什么情况，该怎么样”的问题，找出与某一功能或系统有关的危险、后果、安全性及可能的降低风险的措施。
- （10） 故障模式和影响分析（Failure Mode & Effect Analysis, FMEA）：识别危险的一种过程，在此过程中所有预期的有关系统的部件或特性的故障模式都可以一次加以考虑，并且还要注意到非预期的结果。
- （11） 危险和可操作性研究（Hazard and Operability Study, HAZOP）：一项通过应用引导词确定偏离某一系统预计功能的研究，这些偏离对安全和操作性有不好的起因和影响。

- (12) 频率 (Frequency)：单位时间内 (通常为每年) 某事件发生的次数。
- (13) 概率 (Probability)：事件发生的置信度，衡量标准为从 0 至 1。概率为 0 的事件系指相信该事件不可能发生；概率为 1 的事件系指相信事件肯定发生。
- (14) 失效频率 (Failure Frequency)：失效事件所发生的频率，单位为/年。
- (15) 失效后果 (Failure Consequence)：失效事件的结果，一个事件有一个或多个结果。
- (16) 故障树分析 (Fault Tree Analysis, FTA)：表明事件之间因果关系的逻辑图，这些事件单一或组合的发生会引起高一层事件的发生。这种方法常用来确定“顶层事件”频率，“顶层事件”可以是某一类型的事故或某一非预期发生的危险结果。
- (17) 事件树分析 (Event Tree Analysis, ETA)：一套探究事故、失效或非需求事件的发展和演化的方法，该方法通过图表的形式，从初始事件开始，在每一个具有控制或调节措施的影响点处进行分枝直到识别出最终的结果。指出这些措施成功的概率或频率，以便评估每项后果的可能性。
- (18) 人因可靠性分析 (Human Reliability Assessment, HRA)：这项评估涉及到定性和/或定量的方法，用来决定由特殊操作人员执行特殊任务时发生错误的可能性和潜在后果。
- (19) 风险 (Risk)：发生特定危害事件的频率与后果的组合乘积。
- (20) 风险矩阵 (Risk Matrix)：由所有危害发生的概率和相应的后果构成的矩阵，用来对危害进行排序。
- (21) 个人风险 (Individual Risk)：个人在危险区域可能受到危险因素某种程度伤害的频发程度，通常表示为个人死亡的发生频率，单位为/年或/船年。
- (22) 社会风险 (Social Risk)：群体 (包括职工和公众) 在危险区域承受某种程度伤害的频发程度，通常表示为大于等于 N 人死亡的事故累计频率 (F)，通常以累积频率和死亡人数之间关系的曲线图 (F-N 曲线) 来表示。

第2章 评估方法与流程

2.1 评估方法

2.1.1 定量风险评估是对某一设施或作业活动中发生事故的频率和后果进行量化呈现的系统方法。分析过程中，不仅要求对事故的原因、过程、后果和既有安全措施等进行定性分析，而且要求对事故频率和后果进行定量分析，并将分析结果与风险可接受准则进行比较，判断风险的可接受性。若不满足风险可接受准则要求，应提出降低风险的建议措施。

2.1.1.1 定量风险评估主要解决以下四个问题：

- (1) 可能发生什么意外事件以及为什么？（危险识别）
- (2) 意外事件发生的可能性或失效频率？（频率分析）
- (3) 发生意外事件后会产生什么样的后果？（后果分析）
- (4) 风险等级是否可容忍或可接受？是否要求进一步的应对和处理？（风险评价）

2.2 实施流程

2.2.1 定量风险评估应至少包含以下步骤，具体实施流程见图 2.2.1：

- (1) 定量风险评估准备；
- (2) 资料搜集；
- (3) 危险识别；
- (4) 失效场景选择
- (5) 频率分析；
- (6) 后果分析；
- (7) 风险计算；
- (8) 风险评价；
- (9) 确定评估结论，编制风险评估报告。

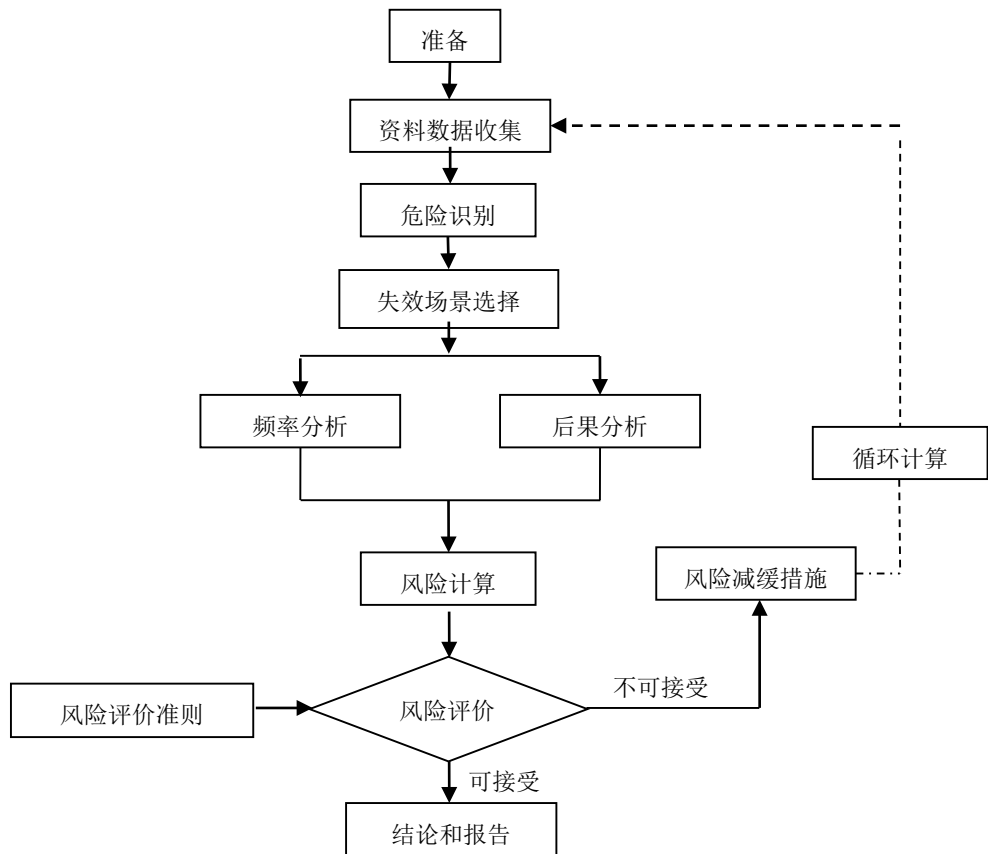


图 2.2.1 定量风险评估的基本过程

2.3 项目管理

2.3.1 定量风险评估项目的实施是一个团队活动，其组织者和领导者负有项目管理的职责。定量风险评估项目管理至少包含以下内容，流程图参见图 2.3.1:

- (1) 了解用户需求;
- (2) 确定研究目的和目标;
- (3) 确定研究深度;
- (4) 确定评估规则;
- (5) 制定项目计划;
- (6) 项目执行。

2.3.2 定量风险评估项目应组建工作团队，团队成员可包括安全工程师、工艺工程师、设备工程师、仪表工程师、电气工程师、材料工程师、工艺操作员等。

2.3.3 在项目开展之前，应明确小组成员在团队中的角色，并确定一下评估规则:

- (1) 风险可接受标准;
- (2) 数据采集、处理及缺失数据的处理;
- (3) 评估数据、假设、过程及结果的记录;
- (4) 频率的计算方法及原则;
- (5) 后果的计算方法及原则;
- (6) 风险的计算方法及原则。

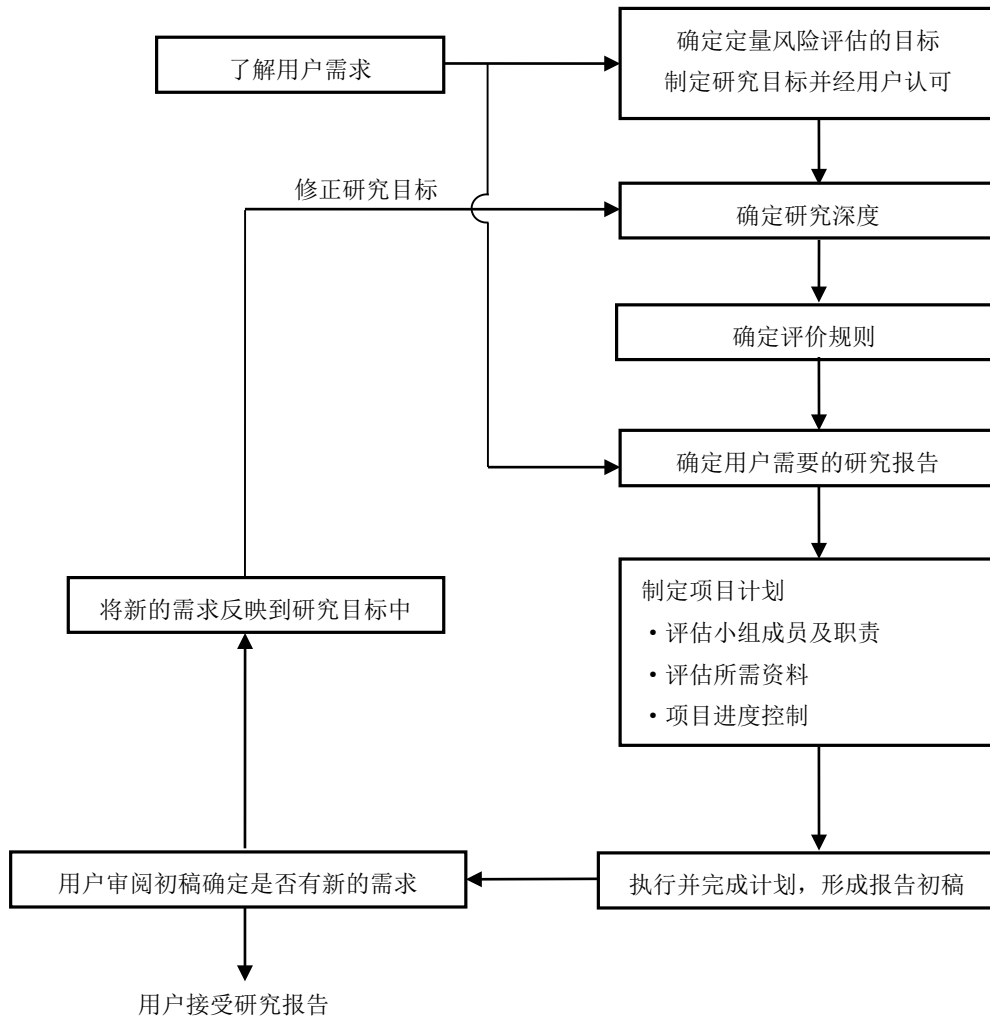


图 2.3.1 定量风险评估项目管理流程

2.4 图纸资料

2.4.1 定量风险评估资料准备包括项目管理资料和技术资料。

2.4.2 除另有明确规定外，通常定量风险评估所需图纸资料至少应包括：

- (1) 已有的定性风险评估报告，如 HAZID、HAZOP 报告等（如有时）；
- (2) 船舶、海上油气设施及陆上油气站场布置图；
- (3) 工艺流程图（PFD）；
- (4) 工艺管道及仪表流程图（P&ID）；
- (5) 工艺介质数据表；
- (6) 设备数据表；
- (7) 管道数据表；
- (8) 安全附件资料；
- (9) 危险区域划分图；
- (10) 通风系统布置图；
- (11) 消防设备与系统原理图；
- (12) 防火控制图（含应急消防逃生）；
- (13) 电气设备与系统原理图；
- (14) 监测、安全与报警系统图；

- (15) 当地气象、水文资料；
- (16) 装置操作与维护手册；
- (17) 历次事故记录（如有时）。
- (18) 所需的操作手册（如有时）；
- (19) 其他所需的资料。

2.4.3 项目管理资料包括：

- (1) 项目工作计划；
- (2) 定量风险评估项目的目标和策略；
- (3) 定量风险评估小组工作职责表；
- (4) 定量风险评估项目配置、规则和规范；
- (5) 定量风险评估项目实施程序；
- (6) 会议记录、资料管理等。

第3章 危险识别及场景选择

3.1 危险识别

3.1.1 危险识别是发现、认可并记录风险的过程，其目的是确定可能影响系统或组织目标得以实现的事件或情况，即可能对目标产生重大影响的风险源、影响范围、事件及其原因和潜在后果。

3.1.2 常用的分析方法包括检查表法（Check-lists）、假设分析技术（What-If）、危险与可操作性研究（HAZOP）、故障模式和影响分析（FMEA）等。

3.1.3 根据分析问题的类型选择适当的危险识别方法，分析危险的潜在原因、发展过程、影响因素、最终后果等。一般情况下，当可利用的数据和信息不多时，可采用假设分析技术（What-If）；当有较详细的设计信息等可利用时，可采用故障模式和影响分析（FMEA）、危险与可操作性研究（HAZOP）。

3.2 危险识别流程

3.2.1 危险识别流程见图 3.2.1。

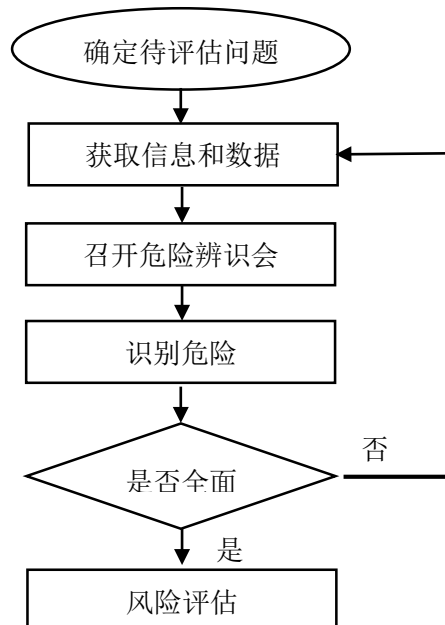


图 3.2.1 危险识别流程图

3.2.2 在进行危险识别之前应明确分析范围，确定空间、时间或工艺流程等的界限，明确分析目标及需重点考虑的问题。

3.2.2.1 分析范围取决于多种因素，主要包括：

- (1) 系统的物理边界；
- (2) 可用的设计描述及其详细程度；
- (3) 系统已开展过的任何分析的范围；
- (4) 适用于该系统的规范法规及相关标准的要求。

3.2.2.2 在确定分析目标时应考虑以下因素：

- (1) 分析结果的应用目的；
- (2) 分析处于系统、项目生命周期的哪个阶段；
- (3) 可能处于风险中的人或财产，如：员工、公众、环境、系统；
- (4) 系统所要求的标准，包括系统安全和操作性能两个方面的标准。

3.2.3 根据危险识别的界定范围及需要重点考虑的问题，收集相关资料文件，并尽可能收集以往的或类似项目的历史事故信息。

3.2.4 在危险识别阶段应组织召集有关方面专家参加危险识别会（或以调研、座谈等其他形式），确定一种危险识别方法系统地对危险进行识别，确定可能存在的所有危险，找出事故发生的原因和有可能导致的后果。

3.2.4.1 应对分析的系统根据其空间布置、设计功能及关键设备进行单元/节点划分，将系统分解为若干部分。

3.2.4.2 对于系统的某个单元/节点，首先对其设计目的、实现功能、与其他单元/节点的关联性、可能存在的安全风险进行解释。其次识别失效事件，并进一步分析失效事件的触发原因和事件所导致的后果，并依次对每个单元/节点重复以上步骤。危险识别过程应予以记录，危险识别工作记录表可参考附录 1。

3.2.4.3 依次对系统所有单元/节点重复 3.2.4.2 所述步骤，相关流程见图 3.2.4.3。

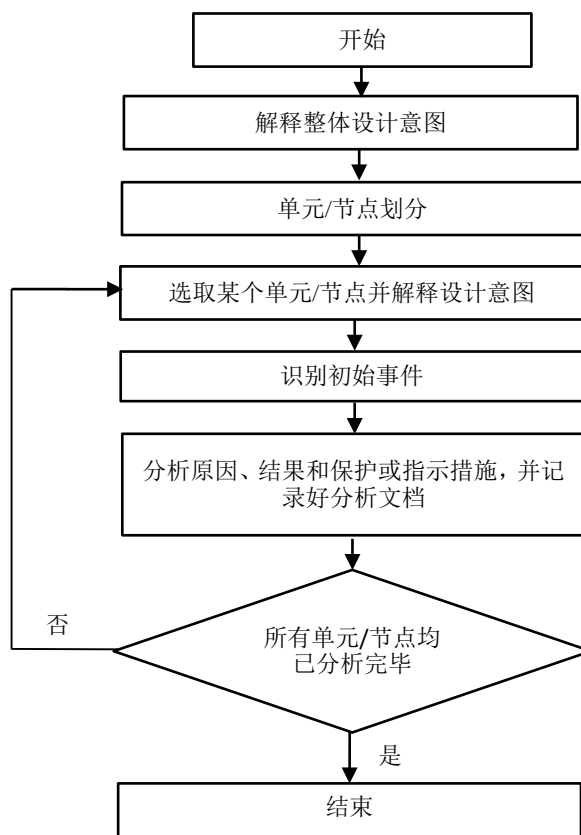


图 3.2.4.3 危险识别过程

3.3 辨识方法

3.3.1 检查表（Check-lists）是危险、风险或控制故障的清单，这些清单通常凭专家经验（根据以前的风险评估结果或过去发生的故障）进行编制。检查表法可用于识别危险或者评估风险控制效果，可用于系统生命周期的任何阶段，可以结合其他风险评估技术同时使用，其最主要的用途是检查在运用了旨在识别新问题的相关技术之后，是否还有遗漏问题。常见的油气危险事件可参见表 3.1。

危险事件清单示例

表 3.1

碰撞/触碰： 靠泊/系泊过程中两船碰撞； 靠泊/系泊过程中船与码头触碰； 作业中船舶与过往船只碰撞；	火灾和爆炸 池火； 闪火； 爆炸；
--	-----------------------------------

.....
设备和机械失效 压缩机密封失效; 泵塔/管系失效; 绝热失效;	恶劣天气 雷电; 暴风; 涌浪;
装卸货失效 装卸臂/软管失效; 货物掉落;	货物围护系统失效 液货舱破损泄漏; 阀门泄漏; 管汇处或接头泄漏;

3.3.2 假设分析技术 (What-If) 是一种分析可能导致不利结果的意外事件的非结构化方法, 该方法通过“如果-则”的方式, 来得到可能发生的后果。在运用该方法时, 提出的假设 (引导词) 要有一定的实际性, 应建立在专家们丰富的实际经验上, 否则会导致一些实际不可能发生的场景出现。假设分析技术 (What-If) 主要应用于概念设计及初步设计阶段, 同时也可以结合其他方法一并使用, 作为其他方法的辅助。引导词示例见表 3.3.2。

引导词示例

表 3.3.2

LNG 燃料船包含 LNG 燃料设备的失效——孔/裂纹导致的燃料泄漏	
磨损	振动, 载荷, 循环运动, 长期使用
侵蚀	燃料污染物, 高流速, 长期使用
应力和应变	振动, 载荷, 循环运动, 船舶运动, 长期使用
疲劳	振动, 载荷, 循环运动, 船舶运动, 长期使用
腐蚀	暴露于风雨, 暴露于海水, 湿气, 干燥空气供给损失, 接触腐蚀性物质
碰撞	与其他船舶碰撞, 触礁, 船舶撞击港口岸壁或码头
搁浅	船舶搁浅
撞击	物体掉落 (例如维护或货物装卸期间), 支撑构件倒塌, 装卸货物/维护期间的误操作
火灾	易燃材料着火, 邻近处所/区域发生火灾

3.3.3 故障模式和影响分析 (FMEA)¹ 是一种以系统中的组成部分为分析对象的风险分析方法, 目的是识别工艺系统中各个组成部件的故障模式及其原因, 记录故障模式下可能导致的所有后果 (包括对其他部件及整个系统的影响)。该方法专注于工艺流程中的设备本身, 假设组建的典型功能失效, 列出失效模式, 究其失效原因, 评估对系统中其他组件带来的影响。故障模式和影响分析 (FMEA) 主要应用于后期的详细设计及具体设备或系统的功能分析。

3.3.4 危险与可操作性研究 (HAZOP)² 目的是减少因工艺流程设计中的考虑不周而引起的事故。该方法通过综合多位专家的意见找寻系统过程或状态的偏差, 分析原因及可能的后果, 从而提出具有针对性的预防措施。该方法用来分析系统由概念到实施, 不断发展的各个阶段中存在的危险。其目标是将潜在危险消除或减到最少。偏差引导词示例见表 3.3.4。

¹ 可参照中国船级社发布的《故障模式和影响分析应用指南》。

² 可参照: 《危险与可操作性分析 (HAZOP 分析) 应用导则》AQT 3049

中国化学品安全协会发布的《危险与可操作性分析质量控制与审查导则》T/CCSAS 001

偏差引导词示例

表 3.3.4

控制程序失效——设计条件之外的操作，随后导致燃料泄漏	
温度高	绝热失效，仪器故障，软件故障，执行机构故障，操作员操作不当，外部火灾，遭受极端天气，变质
温度低	热循环介质损失，热介质污染，仪表故障，软件故障，执行机构故障，操作员操作不当，遭受极端天气
压力高	操作员操作不当（例如错误关闭阀），公用设备损失（例如仪表气源），外部火灾，动力损失，翻滚，过量产生蒸发气体，执行机构故障
压力低	操作员操作不当，公用设备损失（例如仪表气源），电源供应损失（电力），执行机构故障
流量高	仪器故障，软件故障，操作员操作不当，执行机构故障，遭受极端海况
流量低	仪器故障，软件故障，操作员操作不当，执行机构故障，遭受极端海况
逆流	仪器故障，软件故障，操作员操作不当（例如错误关闭阀），执行机构故障，遭受极端海况
无流量	仪器故障，软件故障，操作员操作不当（例如错误关闭阀），执行机构故障
液位高	仪器故障，软件故障，操作员操作不当（例如错误关闭阀），遭受极端海况
液位低	仪器故障，软件故障，操作员操作不当（例如错误关闭阀），遭受极端海况
管路内燃料残留	操作员操作不当，阀门关闭，无惰性/吹扫气源，有限的惰性/吹扫气源
管路内无燃料	仪器故障，软件故障，操作员操作不当，阀门关闭
动力损失	电信号丢失，断电，设备气源损失，液压油损失

3.4 危险排序

3.4.1 应对识别出的危险进行等级划分并将危险进行排序，以便在后续步骤中对主要危险作进一步筛选和提出风险控制方案。

3.4.2 对危险进行排序时，应根据所考虑的风险类型，如人员、财产、环境等，分别列出每种风险类别下的危险排序。

3.4.3 风险矩阵是最为常用和典型的一种危险排序方法。在定义风险矩阵之前，先定义风险值与事故发生频率和事故后果的运算关系，可以是相加或相乘等形式：

$$\text{风险} = \text{频率} \times \text{后果}$$

3.4.4 将发生频率和严重程度分为几个等级，随后将频率和相应的后果置于一个矩阵中，该矩阵即为风险矩阵。风险矩阵可分为三个区域：高风险区域，低风险区域，以及两者之间的临界区域。

3.4.5 在具体应用中可以根据相关标准或业主需求对失效频率、失效后果、风险等级进行划分，频率和后果的定义和取值可参考表 3.4.5（1）和表 3.4.5（2），风险矩阵可参考表 3.4.5（3）：

频率等级划分

表 3.4.5（1）

PI	频率 (/a)	定义
5	10^{-1}	经常发生
4	10^{-2}	有时发生-在产品周期内可能发生几次

3	10 ⁻³	偶尔发生-在产品周期的某一时间可能发生
2	10 ⁻⁴	很少发生-不太可能发生但有可能性
1	10 ⁻⁵	极少发生-完全不太可能发生

后果严重度等级划分

表 3.4.5 (2)

SI	严重度	定义
4	灾难	事故后果会导致灾难性的人员伤亡、财产损失、环境破坏，影响范围超出可控区域，后果不可接受
3	严重	事故后果会导致严重的人员伤亡、财产损失、环境破坏，影响范围未超出可控区域，但后果不可接受
2	中等	事故后果会导致人员受伤、一定的财产损失或环境破坏，影响范围有限，应综合考虑费效比采取相应控制措施
1	轻微	该类型后果可忽略不计

风险等级划分

表 3.4.5 (3)

	PI	1	2	3	4	5
SI		极少	很少	偶尔	有时	经常
4	灾难	5	6	7	8	9
3	严重	4	5	6	7	8
2	临界	3	4	5	6	7
1	轻微	2	3	4	5	6

3.5 失效场景选择

3.5.1 失效场景选择通常可采用失效案例清单和对危险识别结果进行筛选两种方法。

3.5.2 失效案例清单通常基于以往的经验建立，清单的优点在于使用简便且结合了以往的事故经验，其缺点在于可能会忽略非标准设计的重要危险。通用的清单见附录 2。

3.5.3 对于危险识别结果中经过现有保护措施仍为高风险的项，如难以凭借以往经验给出切实可行的风险减缓措施或难以评判风险减缓措施的效果，则通常作为定量风险评估场景。

第4章 频率分析

4.1 历史数据

4.1.1 历史数据可使用以下数据来源：

- (1) 失效数据库。主管机关或权威组织建立并发布的失效数据。包括 WOAD (Worldwide Offshore Accident Databank) 等。
- (2) 失效频率分析报告。主管机关或权威组织基于统计的数据分析形成的失效频率报告。包括但不限于以下：
 - ① Oil & Gas Resources of the UK, 'The Brown Book' (Department of Trade & Industry);
 - ② Norwegian Petroleum Directorate Annual Report.
- (3) 可靠性数据。有关单一设备失效频率的可靠性数据库，在作为 QRA 失效频率使用前需结合可靠性分析（例如故障树分析（FTA））。包括但不限于以下：
 - ① Risk Assessment Data Directory, OGP;
 - ② Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations, HSE;
 - ③ Offshore Reliability Data (OREDA);
 - ④ Non-electronic Parts Reliability Data (NPRD) (RAC 1991);
 - ⑤ IEEE Reliability Data for Nuclear Power Stations (IEEE 1984);
 - ⑥ Nuclear Plant Reliability Data System (NPRDS) (NUREG 1981);
 - ⑦ LNG Plant Failure Rate Database (ATC 1981)。
- (4) 历史统计数据。主管机关、组织或企业关于其收集的历史失效数据的统计结果。
- (5) 其他数据来源。业主推荐的其他数据库。

由 OGP 中获取的失效频率示例如表 4.1.1。

失效频率示例

表 4.1.1

管道失效频率（每米年）						
孔径范围	2"直径 (50mm)	6"直径 (150 mm)	12"直径 (300mm)	18"直径 (450mm)	24"直径 (600mm)	36"直径 (900mm)
泄漏孔径 3~10mm	2.7E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06	2.3E-06
泄漏孔径 10~50mm	6.0E-06	1.9E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.8E-06
泄漏孔径 50~150mm	0.0E+00	3.4E-06	7.7E-07	7.6E-07	7.6E-07	7.6E-07
泄漏孔径 大于 150mm	0.0E+00	0.0E+00	2.6E-06	2.6E-06	2.6E-06	2.6E-06
容器失效频率（每容器年）						
孔径范围	连接管 50 到 150mm 管径			连接管大于 150mm 管径		
	全部 释放	限定 释放	零压力 释放	全部 释放	限定 释放	零压力 释放
泄漏孔径	2.0E-04	2.0E-04	1.4E-04	2.0E-04	2.0E-04	1.4E-04

3~10mm						
泄漏孔径 10~50mm	1.0E-04	1.2E-04	1.2E-04	1.0E-04	1.2E-04	1.2E-04
泄漏孔径 50~150mm	5.1E-05	7.9E-05	1.8E-04	2.7E-05	3.7E-05	5.5E-05
泄漏孔径 大于 150mm				2.4E-05	4.2E-05	1.4E-04
泵失效频率（每泵年）离心式/往复式						
孔径范围	连接管 50 到 150mm 管径			连接管大于 150mm 管径		
	全部 释放	限定 释放	零压力 释放	全部 释放	限定 释放	零压力 释放
泄漏孔径 3~10mm	1.0E-03/ 1.2E-03	5.6E-04/ 6.2E-04	1.4E-04/0	1.0E-03/ 1.2E-03	5.6E-04/ 6.2E-04	1.4E-04/0
泄漏孔径 10~50mm	2.9E-04/ 7.4E-04	2.4E-04/ 4.7E-04	9.4E-05/0	2.9E-04/ 7.4E-04	2.4E-04/ 4.7E-04	9.4E-05/0
泄漏孔径 50~150mm	5.4E-05/ 5.0E-05	8.3E-05/ 5.3E-04	7.2E-05/0	3.9E-05/ 2.3E-04	5.0E-05/ 1.9E-04	3.1E-05/0
泄漏孔径 大于 150mm				1.5E-05/ 2.7E-04	3.3E-05/ 3.4E-04	4.1E-05/0

4.2 可靠性分析

4.2.1 适用于定量风险评估（QRA）的可靠性分析方法主要有：

- (1) 故障树分析（FTA）。综合分析由多个事件或部件故障可能引发的单一危险事件。
- (2) 事件树分析（ETA）。分析由单一初始事件可能引发的多个事件。
- (3) 人因可靠性分析（HRA）。将人员操作当作一个机械部件来考虑，并将操作失误的概率作为该部分的失效频率引入 QRA 中。

4.3 故障树分析（FTA）

4.3.1 应用范围

故障树分析方法可应用于：

- (1) 频率分析。它通常被用来量化顶层事件发生的频率，基于每个组件的失效频率。顶层事件可能是一个独立的失效事件，或者事件树中的一个分支。
- (2) 风险描述。它也可以用来显示各种风险因素结合产生整体风险。
- (3) 危险源辨识。它也可以用于定性地识别足以引起顶层事件的基础事件的组合，被称作“割集”。

4.3.2 故障树的建立

故障树的建立通常采用 **gate-by-gate** 的方法，其可量化故障树中的所有中间事件，并可直观地观察顶层事件的主要贡献者和故障树中安全措施的效果。通常从顶层事件开始，逐步建立至基础事件。对于每一个事件，需要考虑产生该事件的必要条件以及与引发上一层事件之间的联系。如果这些事件中的任何一个都能引发更高等级的事件，那么将它们归入或门（OR gate）；如果需要两个或以上结合才能引发更高等级的事件，那么将它们归入与门（AND gate）。故障

树分析中的典型符号如图 4.3.2 (1) 所示。

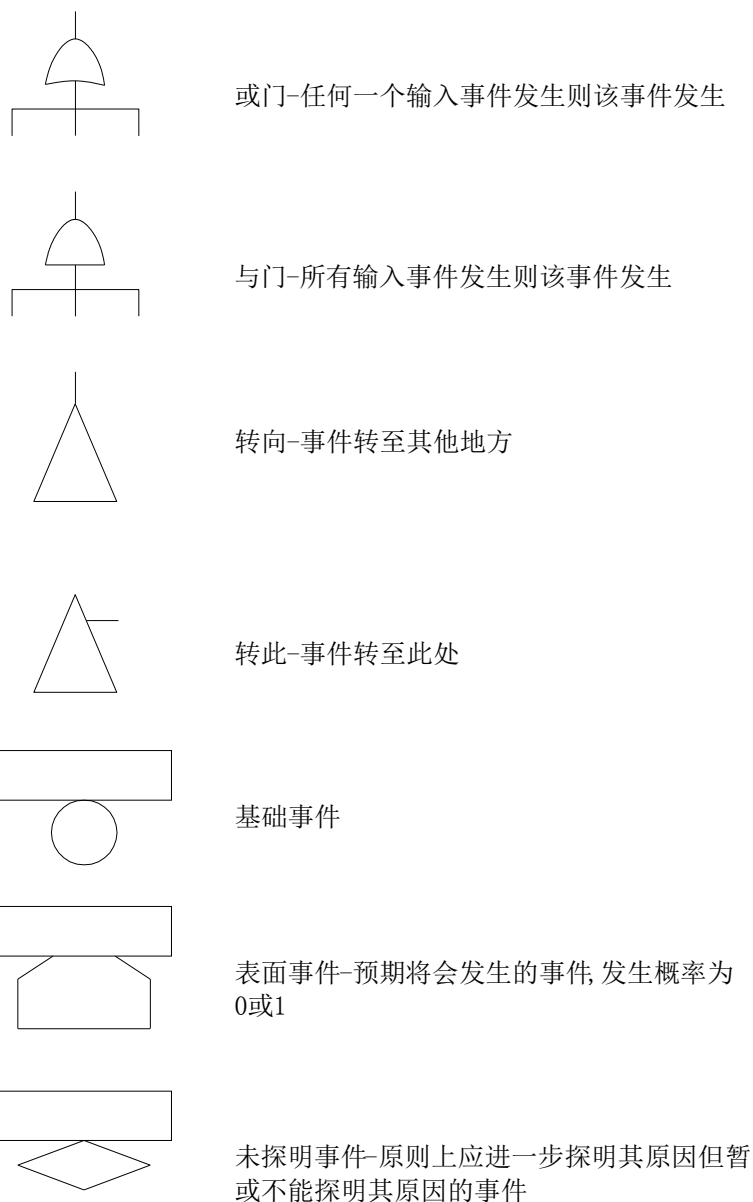


图 4.3.2 (1) 故障树分析常用符号

部分类型的事件（例如火灾或电力失效）可能会影响一个系统中的多个组件。这些事件被称作共性失效（**common-cause failures**），在故障树中的合适位置可以用相同的基础事件来代表。故障树示例如图 4.3.2 (2) 所示。

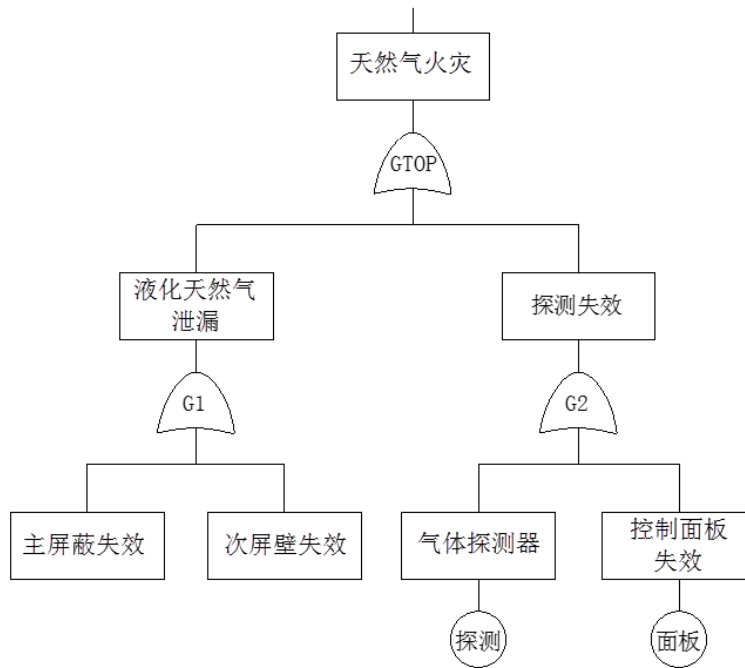


图 4.3.2 (2) 故障树示例

4.3.3 频率与概率相结合

在故障树中可以将频率与概率结合使用，其应用原则如表 4.3.3 所示。

频率与概率相结合的应用原则

表 4.3.3

门	输入	输出
或门	概率+概率	概率
	频率+频率	频率
	频率+概率	不允许
与门	概率×概率	概率
	频率×频率	不允许
	频率×概率	频率

4.3.4 故障树量化分析

简单的故障树可以采用 gate-by-gate 的方法来确定顶层事件的概率，即假设所有事件都是独立的且不存在共性事件。如果输入概率很小 (<0.1)，则或门和与门可由下式评估：

$$\text{或门: } P(A) = \sum_{i=1}^N P(B_i)$$

$$\text{与门: } P(A) = \prod_{i=1}^N P(B_i)$$

式中：

$P(A)$ 为 输出事件概率；

$P(B_i)$ 为输入事件概率；

N 为输入事件数量。

如果输入概率较大，则或门和与门可由下式评估：

$$\text{或门: } P(A) = P(B_1) + P(B_2) - P(B_1)P(B_2)$$

$$= 1 - (1 - P(B_1))(1 - P(B_2))$$

与门: $P(A) = P(B_1) \times P(B_2)$

4.4 事件树分析 (ETA)

4.4.1 应用范围

事件树可应用于:

- (1) 失效前应用—显示出所有能将事件演变成实际失效的保护设备或其他必要条件, 如图 4.4.1 (1) 所示。

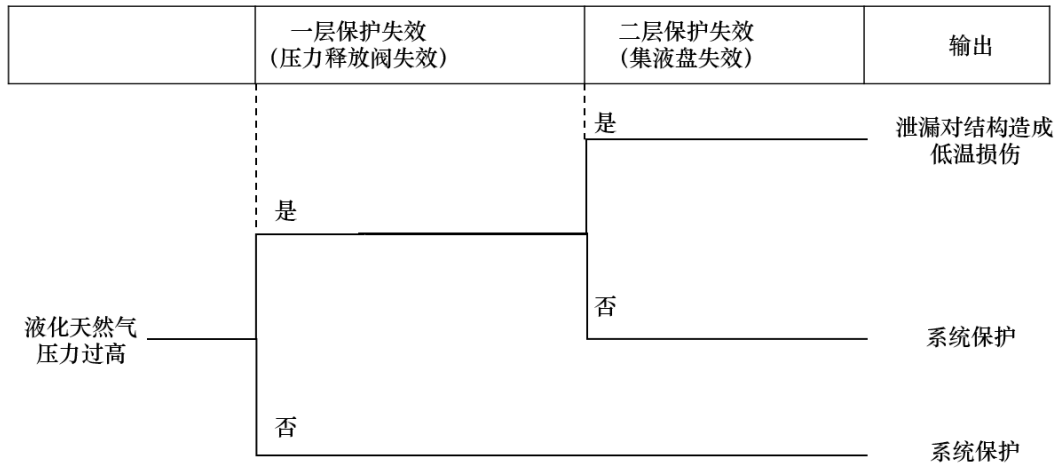


图 4.4.1 (1) 事件树失效前应用案例

- (2) 失效后应用—显示由一个失效导致的多种后果, 如图 4.4.1 (2) 所示。

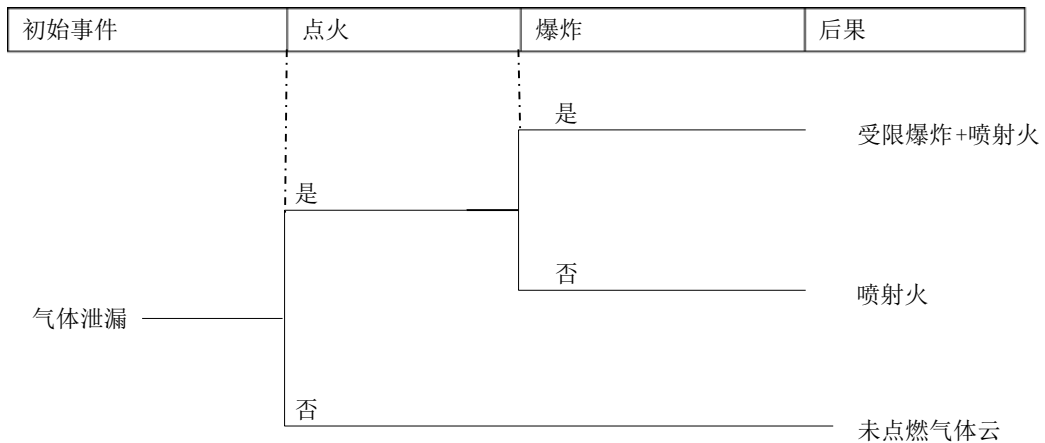


图 4.4.1 (2) 事件树失效后应用案例

4.4.2 事件树建立

由初始事件开始, 逐步建立至每个分支。每一个分支被定义为一个明确的问题 (例如点燃?), 问题的答案通常采用二元形式 (例如“是”或“否”), 也可以采用多元形式 (例如控制阀的操作, 可采用 100%, 20%或 0%)。事件树中的每一个分支都是在既定条件下对前一步提供的合适答案。

事件树通常将初始事件置于左侧, 将后果置于右侧。每一个分支所定义的问题置于事件树的顶部, 将标注“是”的分支置于上方。将标注“否”的分支置于下方。同样的, 事件树也可

将初始事件置于顶部而将后果置于底部。

4.4.3 事件树量化分析

概率与每一个分支相关联，即分支条件发生的可能性（例如分支问题的答案“是”或“否”发生的可能性）。对于单个案例，每个分支概率的总和必须统一。每一个后果的概率由下式求得：

$$P(A) = \prod_{i=1}^N P(B_i)$$

式中：

$P(A)$ 为结果概率
 $P(B_i)$ 为结果路径上分支概率
 N 为结果路径上分支数量

通常情况下，所有后果概率的总和为 1：

$$\sum_{j=1}^M P(A_j) = 1$$

式中：

$P(A_j)$ 为结果概率；
 M 为结果数量；

如果初始事件的频率已指定（例如为 F ），则每一个后果的发生概率按下式计算：

$$F(A_j) = F \times P(A_j)$$

式中：

F 为初始事件频率；
 $F(A_j)$ 为结果频率。

4.5 人因可靠性分析（HRA）

4.5.1 人因可靠性在 QRA 中的应用

人因可靠性分析是非常有用的方法，其应用范围非常广泛，本指南内容仅限于其在 QRA 中的应用。HRA 可在如下领域为 QRA 的分析提供输入材料：

- (1) 危险源辨识——辨识由人员错误操作导致的事故；
- (2) 事件发展概率——评估人为干预成功的可能性，例如启动放空；
- (3) 疏散成功概率——评估撤离、疏散或营救过程中有效行动的可能性。

4.5.2 重点任务识别

对于不同的设备，操作人员需要执行不一样的任务。因此，应针对具体设备的实际操作开展分析以识别该设备操作过程中的特定风险。可以采用人因任务分析（task analysis）方法来建立有关目标系统所有操作的列表。由于工作量巨大且涉及范围广，因此在该工作中需要筛选出对系统整体安全有重大影响的操作进行分析。

上述筛选涉及一系列的判断分析，通常以对任务和风险等级的定性评估开始。可以采用之前事故的经验，但是这样的做法不够全面。QRA 和 HRA 迭代使用能够定量评估个人任务失效对于系统整体风险的贡献度。

4.5.3 人员能力评估

重点任务识别完成后，应对人员的能力进行评估。对于人员能力评估，通常采用以下两种方法：

- (1) 分解法。该方法将操作人员作为设备部件进行分析，并根据操作难度和工作环境制定恒定的失效频率（或人员失误概率）。首先识别出人员涉及的各个任务并指定相应的失误率，然后人员就可作为设备部件纳入到标准的可靠性分析方法（例如故障树或事件树方法）中进行分析。
- (2) 环境敏感性方法。该方法更倾向于定性的研究，考虑人员如何选择和执行任务，以及操作问题发生的原因。该方法基于人员的能力为任务的交互设计提供依据。

人员能力评估可以直观地发现关键任务的执行是否充分，是否有明显的改进和不足。经评估，如果人员能力充足，则该评估结果可作为 QRA 中采用通用失效频率的依据；如果人员能力不足，则可要求相应的风险减缓措施，通用失效频率也需要对应进行修正以评估实际的风险等级。

4.5.4 人员失误概率

人员失误概率可参照表 4.5.4 执行。

人员失误概率

表 4.5.4

失误类型	行为类型	人员失误概率
1	极难出现的失误：通常情况下难以发生的失误类型，无压力状态。	10^{-5}
2	定期出现的失误，在最小压力下执行简单任务。	10^{-4}
3	委任失误，例如操作错误的按钮或读取了错误的显示。比失误类型 2 中更复杂的任务以及更少的可用时间。	10^{-3}
4	疏忽的失误，更加复杂以及不熟悉的任务，实践经验不足并带有一些注意力不集中。	10^{-2}
5	高度复杂的任务，相当大的压力，极少的完成时间。	10^{-1}
6	任务涉及创造性的思维、极度复杂的操作，并且时间短、压力大。	10^{-1} 至 1

人员失误概率也可采用相关的分析方法基于实际情况进行分析后确定，这种做法需要更多细节的分析，也可以获得更多关于人为因素的信息，包括对于风险的贡献、减少潜在的风险以及改进措施的效果等。常用的分析方法有：

- (1) HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique)。该方法基于与表 4.5.4 类似的通用人员失误概率，在该基础上根据各种可能发生的错误诱发条件进行修正；
- (2) THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)。该方法综合考虑各种具体的行动、常用人员失误率的选取以及相关能力形成因素的应用等来确定整体的失效频率。
- (3) SLIM (Success Likelihood Index Methodology)。该方法基于能力形成因素，例如适当的操

作规程、培训等级以及可用的时间等等。该方法要求分析人员能够判断这些因素相互间的重要性，并建立失效频率计算的公式。

上述方法中所依据的通用人员失误率部分来源于人员研究项目中的模拟研究成果，部分来源于专家的观点。在具体使用这些方法时，也涉及到通用任务和能力形成因素列表对于所分析的任务匹配性的判断。

第5章 后果分析

5.1 灾害类型

5.1.1 泄漏

5.1.1.1 泄漏是形成灾害的前提条件，根据泄漏物质的类型和性质、泄漏速率、被点燃的时间和周围环境，可能会发生扩散、火灾、烟雾、爆炸等各种灾害事件。

5.1.1.2 典型的油气泄漏通常可以划分为：连续气体泄漏、连续液体泄漏和两相泄漏。

5.1.2 扩散

5.1.2.1 扩散按照泄漏物质的相态可以分为液池扩散和气体扩散。

5.1.2.2 油气在重力或压力作用下泄漏形成液池或气体云团，其过程可以分为瞬间泄漏和连续泄漏。计算形成的液池需要考虑蒸发模型。

5.1.3 火灾

5.1.3.1 喷射火（或火炬）：加压的可燃物质泄漏时形成射流，在泄漏口处被点燃，由此形成喷射火。射流火焰的长度主要取决于燃料的射流速度，射流速度取决于引起泄漏的压力和孔径。

5.1.3.2 池火：可燃液体泄漏后流到地面形成液池，或流到水面并覆盖水面，遇到火源燃烧而形成池火。池火通常是由工艺设备损坏或井喷造成的油气泄漏所致。池火模型适用于主要受燃料控制（即不受其他限制，如空间、氧气等）的火灾。

5.1.3.3 闪火：在不造成超压的情况下可燃气体燃烧是所发生的现象称之为闪火。闪燃的持续时间相对较短，随后可演变成泄漏源处的持续射流火灾，并逐渐趋于稳定，形成喷射火或池火。

5.1.3.4 火球：大量燃料与周围的空气有限混合后燃烧时所发生的现象称之为火球。最常见的火球形成原因是沸腾液体扩展蒸气云爆炸（BLEVE），多发生于液化可燃气体储罐在着火的情况下超压破裂的位置。

5.1.4 烟雾

5.1.4.1 油气在没有足够氧气的环境下进行不完全燃烧，会产生含有一氧化碳等有毒气体和碳烟尘等固体颗粒的烟雾。

5.1.5 爆炸

5.1.5.1 当可燃气体（或可燃蒸气）与空气预先混合后，遇到点火源发生点火，由于存在某些特殊原因或条件，火焰加速船舶，产生蒸气云爆炸。爆炸的主要类型有以下三种：

- （1）受限爆炸（或通风受限爆炸）。燃烧气体所处的空间大部分受到限制，通常发生在中空的封闭空间，如储罐内或混凝土平台的支撑腿内。压力升高的主要原因是气体燃烧的体积膨胀，超过空间的排气能力。
- （2）开敞空间爆炸。气体云基本上是不受限制的（例如在上层甲板或海面以上），但是有足够的障碍物来产生湍流并积聚压力，也被称为“无限制蒸汽云爆炸”（UVCE），它可能发生在无任何明显受限的空间。
- （3）半受限爆炸。介于受限爆炸和开敞空间爆炸之间，部分气体受到限制情况下发生的爆炸。

5.2 后果计算

5.2.1 泄漏计算模型

5.2.1.1 初始泄漏速率主要取决于设备内部压力、泄漏尺寸以及介质相态。

5.2.1.2 船舶、海上油气生产设施及陆上油气站场中涉及的设备尺寸差异较大，在进行泄漏场景的定量计算时，应根据具体设备设定泄漏孔径，各设备的泄漏孔径可参考业内数据库进行选取。如无特殊要求或明确的泄漏孔径选择标准，可参考表 5.1.1 进行选取。

基于孔径的泄漏尺寸定义示例

表 5.1.1

泄漏尺寸	孔径范围	代表值
小尺寸	直径 3~10mm	直径 5mm
中等尺寸	直径 10~50mm	直径 25mm
大尺寸	直径 50~150mm	直径 100mm
破裂	直径大于 150mm	设备直径

注：上表中，同一孔径范围内的泄漏尺寸被视为同一泄漏频率，且在进行建模时取孔径范围的中间值作为模型孔径。当模拟的实际孔径相对较小时，泄漏频率对计算结果的影响较大，需进行敏感性分析。

5.2.1.3 当泄漏孔径难以确定时，可采用泄漏速率来替代但该法无法考虑工作压力的变化。

5.2.1.4 在进行泄漏速率计算时应全面考虑上述影响因素，具体的计算公式可以参见公认标准指南³。

5.2.2 扩散计算模型

5.2.2.1 气体扩散计算目前存在多个评价模型，主要有高斯模型、HMP 模型、BM 模型、平板模型、盒子模型等。

5.2.2.2 在进行扩散范围计算时应按照实际场景选取计算模型，具体的计算过程可以参见公认标准指南³。例如，LNG 扩散计算可参见附录 3。

5.2.3 喷射火计算模型

5.2.3.1 喷射火计算可参见公认标准指南³，天然气喷射火计算可参见附录 4。

5.2.3.2 火焰周围的热辐射场预测相对复杂，如需考虑射流火焰对障碍物的对流加热作用，可以采用计算流体动力学（CFD）进行更详细的预测。

5.2.4 池火计算模型

5.2.4.1 池火计算主要涉及到液池半径、燃烧速率和热辐射等参数，具体计算可参见公认标准指南³。例如，LNG 池火计算可参见附录 5。

5.2.4.2 动态池火发生在流动的液体中，可以采用计算流体动力学（CFD）进行预测。

5.2.5 闪火计算模型

5.2.5.1 闪火具体计算可参见 TNO 黄皮书，还可采用计算流体动力学（CFD）进行预测。

5.2.6 火球计算模型

5.2.6.1 火球计算模型可参见公认标准指南³。例如，天然气火球计算可参见附录 6.2。

5.2.7 烟雾计算模型

5.2.7.1 可利用传统的气体扩散模型对烟雾的分布规律进行简单的预测，但当烟雾对人员逃生通道或通风系统存在影响时，可采用计算流体动力学（CFD）进行更详细的预测。

5.2.8 爆炸计算模型

5.2.8.1 爆炸计算模型可参见公认标准指南³。例如，天然气蒸气云爆炸计算可参见附录 6.1。

5.2.9 采用计算软件进行后果分析时，应采用船级社认可的或行业广泛接受的计算软件，并考虑软件的适用工况，以保证计算结果的确信性和置信度。

5.3 灾害接受衡准

5.3.1 灾害接受衡准可依照下列衡准或者经本社认可的其他工业衡准准则。

5.3.2 蒸气云扩散浓度接受准则

5.3.2.1 常用可燃气体扩散体积分浓度的接受准则可参见公认标准指南³。

5.3.2.2 甲烷蒸气云扩散体积分浓度的接受准则应符合表 5.3.2.2 的规定。

³ 如 TNO 黄皮书、GB/T37243《危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法》、《石化装置定量风险评估指南》等。

蒸气云扩散浓度的接受准则⁴

表 5.3.2.2

蒸气云扩散	体积浓度	备注
	2.5%	甲烷燃烧下限的 50%

5.3.3 火灾热辐射接受准则

5.3.3.1 热辐射热通量和热剂量的接受准则应符合表 5.3.3.1 的规定。

5.3.3.2 热通量的计算方法可采用公认标准⁵的相关条款，或本社认可的其他计算方法。

火灾热辐射接受准则⁴

表 5.3.3.1

热辐射强度最大值 (kW/m ²)	热辐射剂量最大值 [kW/m ²] ⁴ /3t	备注
5.0	500	不少于 10%的皮肤暴露于火中 30 秒的情况下，则至少 10 人二等烧伤。
5.0	300	不少于 10%的皮肤暴露于火中 30 秒的情况下，建筑物中至少一人二等烧伤。
32	不适用	持续燃烧期间，暴露于火中的钢结构强度损失（承载能力显著降低）。

5.3.4 爆炸冲击波接受准则

5.3.4.1 爆炸灾害的冲击波压力接受准则应符合表 5.3.4.1 的规定

爆炸冲击波压力的接受准则⁴

表 5.3.4.1

损伤对应超压值 (N/m ²)		超压损坏类别
下限	上限	
250	4000	玻璃窗损坏
5000	10000	门、覆盖层和人员损伤
15000	20000	建筑物结构严重损坏
25000	50000	人员严重伤亡

5.3.5 人员热辐射死亡概率

5.3.5.1 死亡概率计算

给定暴露下死亡概率可采用概率函数法计算，死亡概率 P_d 与相应的概率值 P_r 函数关系见下式， P_d 和 P_r 的对应关系见表 5.3.5.1。

$$P_d = 0.5 \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

式中： t —暴露时间，单位为 s。

 P_d 和 P_r 的对应关系

表 5.3.5.1

P_r / %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72

⁴ 源自 GB/T 20368《液化天然气(LNG)生产、储存和装运》

⁵ 如 GB/T37243《危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法》。

40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
99	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.58	7.65	7.88	8.09

5.3.5.2 热辐射人员死亡概率

(1) 火球、池火及喷射火的死亡概率值可按下式计算：

$$P_r = -36.38 + 2.56 \ln(Q^{4/3} \times t)$$

式中：

P_r ——热辐射暴露下的死亡概率中间变量；

Q ——热辐射强度，单位为 W/m^2 ；

t ——暴露时间，单位为 s ，最大值为 $20 s$ 。

(2) 在计算热辐射暴露死亡概率时，处于火球、池火及喷射火火场中或热辐射强度不小于 $37.5 kW/m^2$ 时，人员的死亡概率为 100% 。不同热辐射强度造成的人员死亡概率参见表 5.3.5.2。

不同热辐射强度造成的人员死亡概率⁶

表 5.3.5.2

热辐射强度 kW/m^2	人员死亡概率	备注
37.5	1%死亡（10s） 100%死亡（1min）	操作设备损坏
25.0	重大烧伤（10s） 100%死亡（1min）	在无火焰，长时间辐射下木材燃烧的最小能量
12.5	1度烧伤（10s） 1%死亡（1min）	有火焰时，木材燃烧及塑料熔化的最低能量
6.3	在 8s 内裸露皮肤有痛感；无热辐射屏蔽设施时，操作人员穿上防护服可停留 1min	—
4.7	暴露 16s，裸露皮肤有痛感；无热辐射屏蔽设施时，操作人员穿上防护服可停留几分钟	—
1.58	长时间暴露无不适感	—

5.3.6 中毒人员死亡概率

毒性暴露下死亡概率值可按下式计算：

$$P_{r毒} = a + b \ln(C^n \times t)$$

式中：

$P_{r毒}$ ——毒性暴露下的死亡概率值；

a, b, n ——描述物质毒性的常数，见表 5.3.6

⁶ 源自 AQT3046—2013《化工企业定量风险评价导则》

C ——浓度，单位为 mg/m^3 ；

t ——暴露于毒物环境中的时间，单位为 min ，最大值为 30 min 。

常用物质毒性常数 a 、 b 、 n

表 5.3.6

物质	a	b	n	物质	a	b	n
丙烯醛	-4.1	1	1	氟化氢	-8.4	1	1.5
丙烯腈	-8.6	1	1.3	硫化氢	-11.5	1	1.9
烯丙醇	-11.7	1	2	溴甲烷	-7.3	1	1.1
氨	-15.6	1	2	异氰酸盐钾	-1.2	1	0.7
谷硫磷	-4.8	1	2	二氧化氮	-18.6	1	3.7
溴	-12.4	1	2	对硫磷	-6.6	1	2
二氧化碳	-7.4	1	1	光气（碳酰氯）	-10.6	2	1
氯	-6.35	0.5	2.75	磷胺（大灭虫）	-2.8	1	0.7
乙烯	-6.8	1	1	磷化氢	-6.8	1	2
氯化氢	-37.3	3.69	1	二氧化硫	-19.2	1	2.4
氰化氢	-9.8	1	2.4	四乙基铅	-9.8	1	2

5.3.7 闪火和爆炸超压人员死亡概率

- (1) 闪火的火焰区域等于点燃时可燃云团可燃下限（LFL）的范围。闪火火焰区域内，人员的死亡概率值为 100%；闪火火焰区域外，人员的死亡概率值为 0。
- (2) 对于蒸气云爆炸，在 0.03 MPa 超压影响区域内，人员的死亡概率为 100%；在 0.01 MPa 超压影响区域外，人员的死亡概率为 0。

第6章 风险呈现与评价

6.1 计算网格

6.1.1 在进行个人风险和社会风险计算之前应定义计算区域的网格。

6.1.2 网格单元内的人口密度假定为常数。

6.1.3 网格单元的尺寸应尽可能小，以减小其对计算结果产生的影响。

6.2 个人风险值计算

6.2.1 个人风险计算程序见图 6.2.1，步骤如下：

(1) 选择一个泄漏场景 (LOC)，确定 LOC 的发生频率 f_S ；

(2) 选择一种天气等级 M 和该天气等级下的一种风向 ϕ ，给出天气等级 M 和风向 ϕ 同时出现的联合概率 $P_M \times P_\phi$ ；

(3) 对于可燃物泄漏，选择一个点火事件 i 并确定点火概率 P_i 。如果考虑物质毒性影响，则不考虑点火事件；

(4) 计算在特定的 LOC 、天气等级 M 、风向 ϕ 及点火事件 i (可燃物) 条件下网格单元上的死亡概率 $P_{\text{个体风险}}$ ；

(5) 计算 (LOC 、 M 、 ϕ 、 i) 条件下对网格单元个人风险的贡献；

$$\Delta IR_{S,M,\phi,i} = f_S \times P_M \times P_\phi \times P_i \times P_{\text{个体风险}}$$

(6) 对所有的点火事件，重复 (3) 至 (5) 步的计算；对所有的天气等级和风向，重复 (4) 至 (5) 步的计算；对所有的 LOC ，重复 (1) 至 (5) 步的计算，则网格点处的个人风险由下式计算。

$$IR = \sum_S \sum_M \sum_\phi \sum_i \Delta IR_{S,M,\phi,i}$$

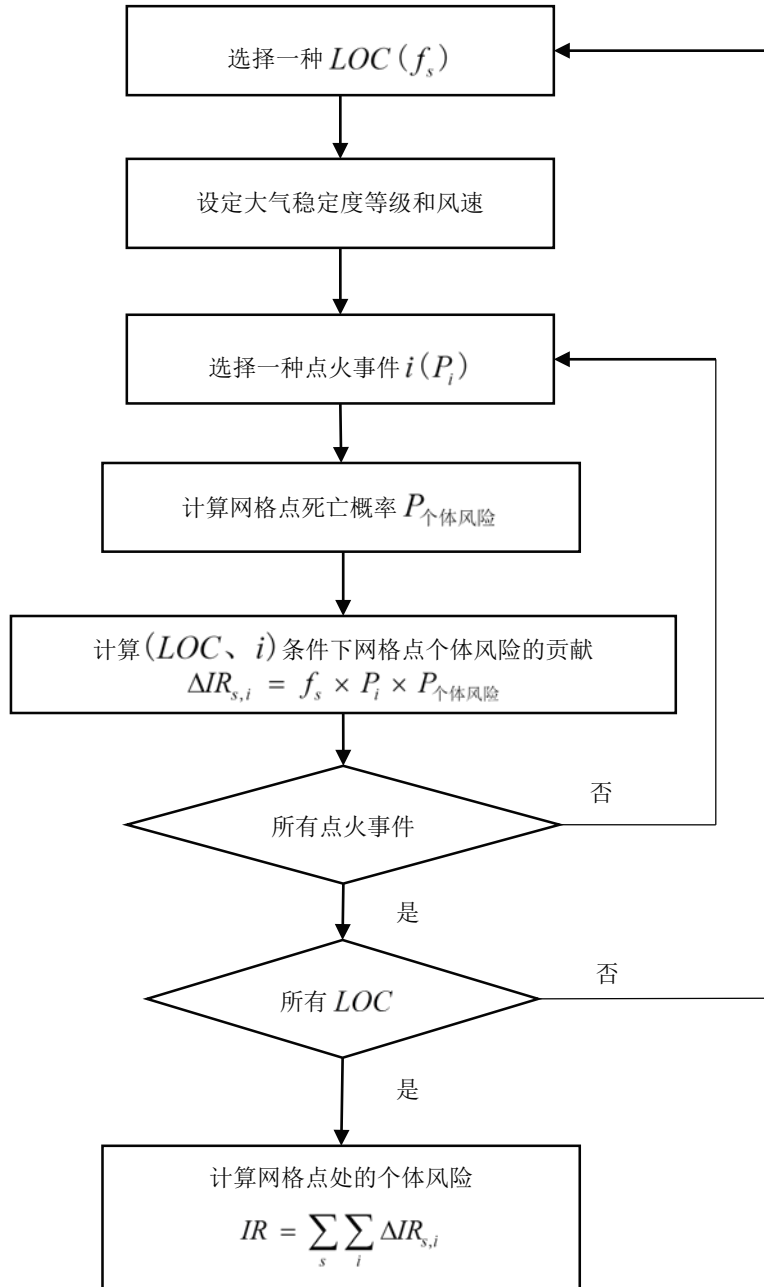


图 6.2.1 个人风险计算程序

6.3 社会风险值计算

6.3.1 社会风险计算程序见图 6.3.1，步骤如下：

- (1) 选择一个泄漏场景 (LOC)，确定 LOC 的发生频率 f_s ；
- (2) 选择一种天气等级 M ，其概率为 P_M ；
- (3) 选择该天气等级下的一种风向 ϕ ，其概率为 P_ϕ ；
- (4) 对于可燃物泄漏，选择一个点火事件 i 并确定点火概率 P_i 。如果考虑物质毒性影响，则不考虑点火事件；
- (5) 选择一个网格单元，确定网格单元内的人数 N_{cell} ；

(6) 计算在特定的 LOC 、 M 、 ϕ 及 i 下，网格单元内的人口死亡百分比 $P_{\text{社会风险}}$ ；

(7) 计算在特定的 LOC 、 M 、 ϕ 及 i 下的网格单元的死亡人数 $\Delta N_{S,M,\phi,i}$ ；

$$\Delta N_{S,M,\phi,i} = P_{\text{社会风险}} \times N_{\text{cell}}$$

(8) 对所有网格单元，重复(5)至(7)步的计算，对 LOC 、 M 、 ϕ 及 i ，计算死亡总人数 $N_{S,M,\phi,I}$ ；

$$N_{S,M,\phi,I} = \sum_{\text{所有网格单元}} \Delta N_{S,M,\phi,i}$$

(9) 计算 LOC 、 M 、 ϕ 及 i 的联合频率 $f_{S,M,\phi,i}$ ；

$$f_{S,M,\phi,i} = f_S \times P_M \times P_\phi \times P_i$$

(10) 对所有的 LOC (f_S)、 M 、 ϕ 及 i ，重复(1)至(9)步的计算，用累积死亡总人数 $N_{S,M,\phi,i} \geq N$ 的所有事故发生的频率 $f_{S,M,\phi,i}$ 构造 F-N 曲线：

$$F_N = \sum_{S,M,\phi,i} f_{S,M,\phi,i} \rightarrow N_{S,M,\phi,i} \geq N$$

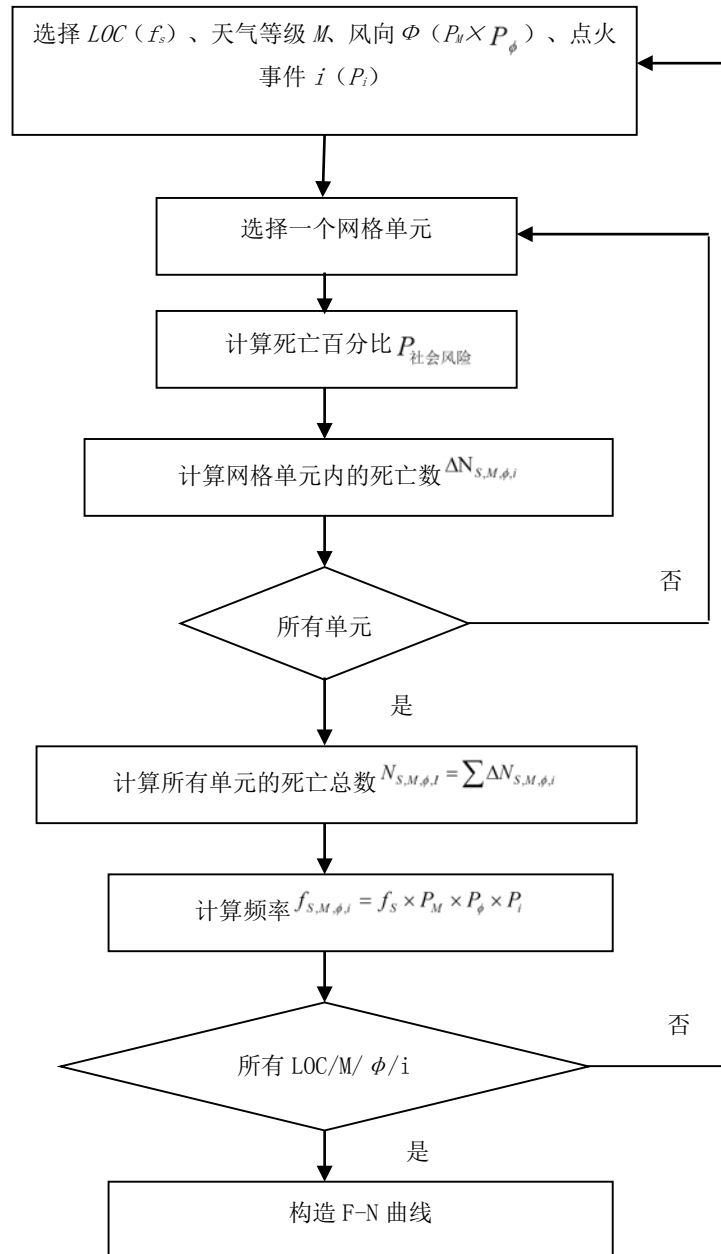


图 6.3.1 社会风险计算程序

6.4 风险可接受准则

6.4.1 一般要求

6.4.1.1 风险可接受准则表示了在规定时间内或某一行为阶段可接受的总体风险等级，为风险分析以及制定减小风险的措施提供了参考依据，因此在进行风险评估之前应预先给出。

6.4.1.2 定量风险评估通常使用最低合理可行原则（ALARP 原则）确定风险接受准则，见图 6.4.1.2。ALARP 原则将风险分为三个范围：

- (1) 不可接受区域：除特殊情况外该风险无论如何不能被接受。对于设计阶段，该设计方案不能通过；对于现有系统，必须立即停止作业。
- (2) 中间区域（ALARP 区域）：处于该区域的风险，应尽可能采取合理可行的措施使其降低。
- (3) 可忽略区域：处于该区域的风险是可以被接受的，无需采取措施。

6.4.1.3 相关方应在风险评估正式开始之前基于 ALARP 原则对个人风险或社会风险接受准则进行确认。如无特别要求，可使用 6.4.2、6.4.3 给出的风险接受准则。

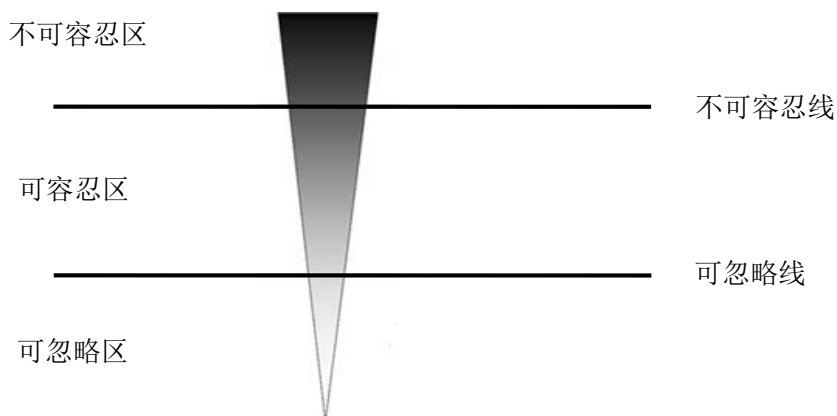


图 6.4.1.2 ALARP 原则

6.4.1.4 定量风险评估过程中，主要考虑个人风险和社会风险。通常应进行个人风险评估，当项目风险涉及 10 人及以上时还应进行社会风险评估。

6.4.2 个人风险接受准则

6.4.2.1 可使用表 6.4.2.1 (1)、6.4.2.1 (2) 或 6.4.2.1 (3) 中给出的个人风险可容许标准。

个人风险 (IR) 可容许标准表⁷ 表 6.4.2.1 (1)

可容许频率/年	场所类别
$IR \leq 10^{-5}$	1. 加注作业场所 (船员、加注操作人员)； 2. 新开发区工业场地 (泵房、工厂)。
$IR \leq 10^{-6}$	1. 居住类高密度场所 (如居民区、宾馆、度假村等)； 2. 公众聚集类高密度场所 (如办公场所、商场、饭店、娱乐场所等)。
$IR \leq 3 \times 10^{-7}$	1. 高敏感场所 (如学校、医院、幼儿园、养老院等)； 2. 重要目标 (如党政机关、军事管理区、文物保护单位等)； 3. 特殊高密度场所 (如大型体育场、大型交通枢纽等)。

个人风险 (IR) 可容许标准表⁸ 表 6.4.2.1 (2)

防护目标	个人可接受风险标准 (概率值)	
	新建装置 (/年) \leq	在役装置 (/年) \leq
低密度人员场所 (人数 < 30 人)：单个或少量暴露人员。	1×10^{-5}	3×10^{-5}
居住类高密度场所 (30 人 \leq 人数 < 100 人)：居民区、宾馆、度假村等。 公众聚集类高密度场所 (30 人 \leq 人数 < 100 人)：办公场所、商场、饭店、娱乐场所等。	3×10^{-6}	1×10^{-5}

⁷源自《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》

⁸源自《危险化学品生产、储存装置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准 (试行)》

高敏感场所：学校、医院、幼儿园、养老院、监狱等。 重要目标：军事禁区、军事管理区、文物保护单位等。 特殊高密度场所（人数≥100人）：大型体育场、交通枢纽、露天市场、居住区、宾馆、度假村、办公场所、商场、饭店、娱乐场所。	3×10^{-7}	3×10^{-6}
--	--------------------	--------------------

个人风险（IR）可容许标准表⁹

表 6.4.2.1 (3)

e		接受衡准	
		ALARP 区域的下限	ALARP 区域的上限
		可忽略(大体上可接受)的死亡风险 (/年)	最大可容忍的死亡风险 (/年)
个人风险	对船员	10^{-6}	10^{-3}
	对乘客	10^{-6}	10^{-4}
	对第三方、岸上的公众	10^{-6}	10^{-4}
	对新船的目标值	10^{-6}	上述值应降低一个量级

6.4.3 社会风险接受准则

6.4.3.1 社会风险可容许标准应符合图 6.4.3.1 中的规定。

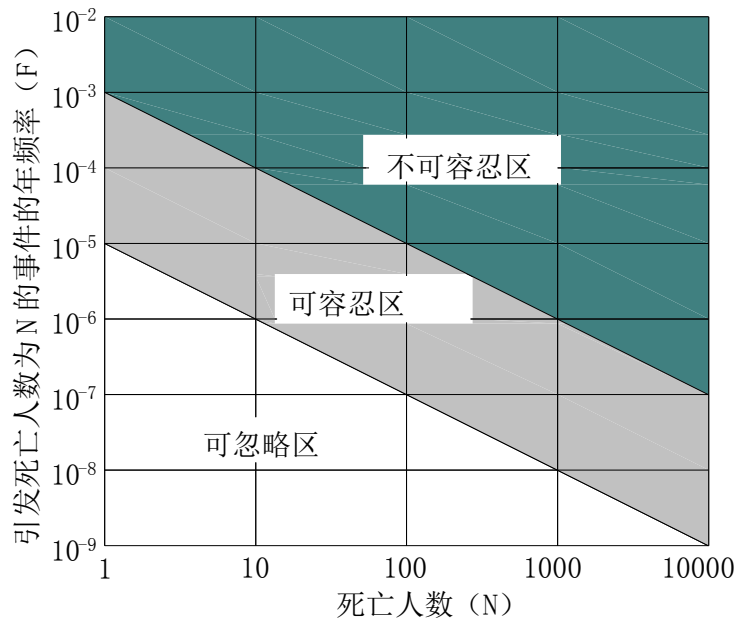


图 6.4.3.1 社会风险（SR）可容许标准

6.5 风险敏感性分析

6.5.1 一般要求

6.5.1.1 敏感性分析旨在评价风险对各种因素变动的敏感性。敏感性分析的步骤：

- (1) 选取不确定因素
- (2) 设定不确定因素变化范围

⁹ 源自《综合安全评估指南》（MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2）

- (3) 选取分析指标
- (4) 计算敏感性指标
- (5) 分析评价

6.5.2 选取不确定因素

- 6.5.2.1 宜选定影响较大的、重要的不确定因素进行分析。
- 6.5.2.2 通常结合行业及项目特点，参考同类项目经验进行。
- 6.5.2.3 可结合风险计算的输入信息和可行风险减缓措施选取。

6.5.3 设定不确定因素变化范围

- 6.5.3.1 宜同时考虑不确定因素的不利变化和有利变化。
- 6.5.3.2 不确定因素的变化率宜设定为±5%、±10%、±15%、±20%。

6.5.4 计算敏感性指标

- 6.5.4.1 敏感性指标包括敏感度系数和临界点。
- 6.5.4.2 敏感度系数按下式计算：

$$S = \Delta R / \Delta F$$

式中，S 为敏感度指标；

ΔR 为风险变化率，%；

ΔF 为不确定因素变化率，%。

- 6.5.4.3 临界点为不确定因素使得风险计算结果达到目标值时的临界数值。

6.5.4.4 临界点既可以表示为变化率，也可以表示为具体数值。当表示为变化率时，其大小与不确定因素的基准值相关。

6.5.5 分析评价

- 6.5.5.1 为对敏感性分析的结果进行分析，需编制敏感性分析表及绘制敏感性分析图。
- 6.5.5.2 敏感性分析表中应给出所考虑的不确定性因素、基本方案中各因素的基准值、不确定因素变化范围、风险变化率计算值、各不确定因素的敏感度指标和临界点。
- 6.5.5.3 敏感性分析图可基于敏感性分析表绘制。
- 6.5.5.4 敏感性分析图的横坐标为不确定因素变化率，纵坐标为风险计算值。

6.6 风险控制措施

6.6.1 一般要求

- 6.6.1.1 风险减缓措施的识别并非风险评估的必须程序。
- 6.6.1.2 可考虑从以下几个方面减缓风险：

- (1) 消除风险
- (2) 减少人员暴露在风险范围内
- (3) 减小失效发生概率
- (4) 减小事故后果
- (5) 改进应急疏散程序

6.6.2 设计阶段的减缓措施分析

6.6.2.1 设计阶段主要考虑经济性和可行性，并对安全性产生重大影响。概念设计阶段的风险减缓措施包括：

- (1) 减少人员在场时间
- (2) 减少工程建设时间
- (3) 减少运输作业次数

- (4) 独立设置生活区域
- (5) 避免危险区域的人员操作

6.6.3 燃爆防护措施分析

6.6.3.1 对于燃烧和爆炸，主要的风险减缓措施包括：

- (1) 简化设备构造及工艺
- (2) 减少过程系统中的库存
- (3) 优化操作及维护程序
- (4) 火灾探测及报警
- (5) 有效隔离及泄压
- (6) 通风
- (7) 控制点火源
- (8) 减小拥塞度
- (9) 防爆保护及泄压
- (10) 灭火系统
- (11) 防火阻燃
- (12) 应急程序
- (13) 临时避难处所的有效性

6.6.4 撤离系统

6.6.4.1 改进紧急撤离系统的措施主要包括：

- (1) 优化逃生路线
- (2) 集合点设置
- (3) 优选撤离方式
- (4) 撤离设备有效性
- (5) 撤离程序及撤离演练

附录 2 通用案例失效清单

2.1 船舶

包含燃料设备的失效 - 孔/裂纹导致的燃料泄漏	
磨损	振动, 载荷, 循环运动, 长期使用
侵蚀	燃料污染物, 高速流, 长期使用
应力和应变	振动, 载荷, 循环运动, 船舶运动, 长期使用
疲劳	振动, 载荷, 循环运动, 船舶运动, 长期使用
腐蚀	暴露于风雨, 暴露于海水, 湿气, 干燥空气供给损失, 接触腐蚀性物质
碰撞	与其他船舶碰撞, 触礁, 船舶撞击港口围墙或码头
搁浅	船舶搁浅
撞击	物体掉落 (例如维护或货物装卸期间), 支撑构件倒塌, 装卸货物/维护期间的误操作
火灾	易燃材料着火, 邻近处所/区域发生火灾
*加上含有气体或其他可能释放到空气中造成危害的物质 (例如窒息, 烧伤) 的设备	
控制程序失效 - 设计条件之外的操作, 随后导致燃料泄漏	
高温	绝热失效, 仪器故障, 软件故障, 执行机构故障, 操作员操作不当, 外部火灾, 遭受极端天气, 变质
低温	热循环介质损失, 热介质污染, 仪表故障, 软件故障, 执行机构故障, 操作员操作不当, 遭受极端天气
高压	操作员操作不当 (例如错误关闭阀), 公用设备损失 (例如仪表气源), 外部火灾, 动力损失, 翻滚, 蒸发气体的过量产生, 执行机构故障
低压 (真空)	操作员操作不当, 公用设备损失 (例如仪表气源), 电源供应损失 (电力), 执行机构故障
流量过高	仪器故障, 软件故障, 操作员操作不当, 执行机构故障, 遭受极端海况
流量过低	仪器故障, 软件故障, 操作员操作不当, 执行机构故障, 遭受极端海况
流向反向	仪器故障, 软件故障, 操作员操作不当 (例如错误关闭阀), 执行机构故障, 遭受极端海况
无流量	仪器故障, 软件故障, 操作员操作不当 (例如错误关闭阀), 执行机构故障
高液位	仪器故障, 软件故障, 操作员操作不当, 执行机构故障, 遭受极端海况
低液位	仪器故障, 软件故障, 操作员操作不当, 执行机构故障, 遭受极端海况
管路内货物残留	操作员操作不当, 阀门关闭, 无惰性/吹扫气源, 有限的惰性/吹扫气源
管路内无货物	仪器故障, 软件故障, 操作员操作不当, 阀门关闭
动力损失	电信号丢失, 断电, 设备气源损失, 液压油损失

2.2 海洋油气生产设施

井喷	钻井作业中的井喷；完工后的井喷；生产作业中的井喷；维修过程中的井喷；废弃油田时的井喷；地下井喷。还包括由井喷而引起的事故：井控事故；钻井系统中发生的火灾。
立管/管道泄漏	管道重点流线处泄漏；出口冒口处泄漏；海底管道泄漏；海底井口导管泄漏。
工艺泄漏	井口设备泄漏；分离器等工艺设备泄漏；压缩机等气体处理设备泄漏；工艺管道、法兰、阀门、泵等位置发生泄漏；出油管线泄漏；货物传输管线泄漏；发射器/接收器泄漏；照明/通风系统泄漏；储存罐泄漏；装卸系统泄漏；转塔系统泄漏。
非工艺火灾	燃气火灾；电气火灾；起居处所火灾；甲醇/柴油/航空燃料火灾；发电机/涡轮火灾；供热系统的火灾；机械处所火灾；工作处所火灾。
非工艺泄漏	化学品泄漏；甲醇/柴油/航空燃料泄漏；瓶装气体泄漏；放射性物质释放；意外爆炸。
海上碰撞	需考虑以下影响：补给船；待命船；其他辅助船（潜水器、驳船等）；过往商船；渔船；军船（包括潜艇）；浮式建筑物；钻井设备；钻井辅助船；近海加注船；海上浮式设备（半潜船、驳船、水上仓库）；冰山。 根据不同船型、船速，船舶是否具备自航能力，需要分开讨论。
结构事故	因疲劳、设计误差、冲刷、沉降等原因造成的结构破坏；低温脆化；极端天气；地震；桩基失效（包括冲击破坏）；连接桥坍塌；井架坍塌；起重机设备坍塌；桅杆坍塌；旋转设备坍塌。
海上事故	恶劣环境（台风）；抛锚/走锚（包括绞车失效）；翻船（由于压载错误或者极端天气引起）；不正确的重量分布（由压载和货物移动引起）；结冰；在运输过程中发生碰撞；在运输过程中发生搁浅；在运输过程中失去拖曳力。
物体掉落	物体在以下情况发生坠落：施工；起重机操作；货物搬运；钻井；装配吊杆
运输事故	包括船员交通船和港内运输船事故；直升机坠海/平台/海岸；直升机加油时发生火灾；飞机在平台坠毁；船员交通船在运输过程中发生倾覆；船员转运过程中发生人员事故；固定翼飞机分阶段转移至海上时坠毁；调配期间发生交通事故。
人员事故	
施工事故	在以下情况下发生的事故：岸上施工；海上设施安装；离岸施工；连接与调试；管道铺设。
辅助船事故	
潜水事故	

2.3 陆上站场

工艺泄漏	清管器收发筒泄漏；过滤分离器等工艺设备泄漏；压缩机等气体增压设备泄漏；调压装置等压力调节设备泄漏；工艺管道、法兰、阀门等位置发生泄漏；H ₂ S中毒。
非工艺火灾	燃气火灾；电气火灾；起居处所火灾；供热系统的火灾；机械处所火灾；工作处所火灾。
其他火灾	火炬放空系统火灾；放空系统回火；轻烃排污减压后气化处理不当；清管固体污物硫化亚铁自燃。
爆炸	压缩机房、阀室等相对封闭场所通风置换不良；放空爆炸；轻烃排污减压后气化处理不当；可燃气体探测器失效；防雷防静电设备失效；加热炉液位自动调节装置或高低液位报警装置失效。
结构事故	因初始缺陷、施工缺陷、疲劳、腐蚀、冲蚀、不均匀沉降等原因造成的结构破坏；极端天气；洪水；地震。
物体掉落	物体在以下情况发生坠落：高空作业；检维修；货物搬运
系统超压	阀门抱死；清管器卡堵；过滤分离器滤芯堵塞；安全阀定压过高；差压变送器失灵；高压气体窜入低压系统；泄压阀失效；冰堵。

振动	压缩机内气体失速导致压缩机喘振。
人员事故	窒息、触电、高处坠落、物体打击、高温灼伤

附录 3 扩散计算模型

3.1 扩散浓度计算模型

对于气体扩散，以下主要针对 LNG 常见泄漏场景即低压泄漏，初始速度低等特点，给出被动扩散计算模型，具体算法如下：

(1) 持续扩散源

高斯扩散模型基本表达式：

$$c(x, y, z) = \frac{q}{\pi u_a \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(h-z)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

持续扩散浓度的一般表达式：

$$c(x, y, z) = \frac{q}{u_a} F_y(x, y) F_z(x, z)$$

式中： q ——1/2 连续扩散流量，g/s；

h ——扩散源高度，m；

x ——距扩散源横向距离，m；

y ——距扩散源纵向距离，m；

z ——距扩散源垂向距离，m；

u_a ——在羽流高度 h 处的风速，m/s。

F_y, F_z ——扩散函数，与 x, y, z 有关， m^{-1} ，详见 3.2；

σ_y, σ_z ——扩散参数，m，详见 3.2；

(2) 瞬时或短时扩散源

瞬时或短时间扩散浓度表达式：

$$c(x, y, z, t) = Q F_x(x, t) F_y(u_a t, y) F_z(u_a t, z)$$

式中： t ——扩散时间，s；

Q ——扩散总质量，g；

F_x, F_y, F_z ——扩散函数， m^{-1} ，详见 3.2。

(3) 有限维度扩散源

对于只有顺风维度尺寸 $2b_{ox}$ 的扩散源，可用 GPM 求解模型计算持续扩散流浓度：

$$c(x, y, z) = \int_{(x-b_{ox})}^{(x+b_{ox})} \frac{q}{2b_{ox}u_a} F_y(x', y) F_z(x', z) dx'$$

式中， x' 为积分变量，最后的表达式为关于 x, y, z 的函数，且已知在很短的扩散距离内， b_{ox} 的影响很小。

(4) 有限时间扩散源

有限时间扩散源浓度:

$$c(x, y, z, t) = \int_0^{\infty} q(t') F_x(x, t-t') F_y((t-t')u_a, y) F_z((t-t')u_a, z) dt'$$

式中, t' 为积分变量。

3.2 扩散函数和扩散参数

下面将给出上述公式中扩散函数 F_x 、 F_y 、 F_z (单位 m^{-1}) , 以及扩散参数 σ_y 、 σ_z 的定义和计算方法。

(1) 扩散函数

a) 横向扩散函数 F_y

如果扩散源的侧向尺度为 $2b_{oy} = 0$:

$$F_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right)$$

如果扩散源的侧向长度 $2b_{oy} > 0$:

$$F_y(x, y) = \frac{1}{4b_{oy}} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{b_{oy}-y}{\sqrt{2}\sigma_y(x)}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b_{oy}+y}{\sqrt{2}\sigma_y(x)}\right) \right\}$$

误差函数 $\operatorname{erf}(x)$ 定义为: $\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ 。

其近似的数值解为:

$$\operatorname{erf}(x) \approx \frac{x}{|x|} \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{4x^2}{\pi}}}$$

b) 垂向扩散函数 F_z :

如果扩散源的垂向尺度为 $2b_{oz} = 0$, 且: $\sigma_z(x) \leq 0.6h_i\sqrt{1-h/h_i}$:

$$F_z(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z(x)} \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \right\}$$

如果扩散源的垂向尺度 $2b_{oz} > 0$, 且: $\sigma_z(x) \leq 0.6h_i\sqrt{1-h/h_i}$:

$$F_z(x, z) = \frac{1}{4b_{oz}} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{b_{oz}-z+h}{\sqrt{2}\sigma_z(x)}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b_{oz}+z-h}{\sqrt{2}\sigma_z(x)}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b_{oz}-z-h}{\sqrt{2}\sigma_z(x)}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b_{oz}+z+h}{\sqrt{2}\sigma_z(x)}\right) \right\}$$

如果 $0.6h_i\sqrt{1-h/h_i} < \sigma_z(x) \leq 1.6h_i$:

$$F_z(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z(x)} \left\{ \exp\left(-\frac{(2h_i-h-z)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(2h_i-h+z)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \right. \\ \left. + \exp\left(-\frac{(2h_i+h-z)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(2h_i+h+z)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \right\}$$

如果 $\sigma_z(x) > 1.6h_i$:

$$F_z(x, z) = \frac{1}{h_i}$$

c) 式中, h_i 为混合层高度, 混合层高度 h_i 取决于稳定性, 稳定性的选取参见 TNO 黄皮书

相关章节。纵向扩散函数 F_x ：

对于 $t=0$ 时的瞬时扩散， F_x 按如下计算：

如果扩散源的纵向纬度为 0：

$$F_x(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(u_a t)} \exp\left(-\frac{(x - u_a t)^2}{2\sigma_x^2(u_a t)}\right)$$

如果扩散源的纵向纬度为 $2b_{ox} > 0$ ：

$$F_x(x, t) = \frac{1}{4b_{ox}} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{b_{ox} - x + u_a t}{\sqrt{2}\sigma_x(u_a t)}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b_{ox} + x - u_a t}{\sqrt{2}\sigma_x(u_a t)}\right) \right\}$$

对于短时间扩散，令总扩散量为 Q ，扩散时间从 $0 \sim t_r$ ：

当 $0 < t < t_r$ ：

$$F_x(x, t) = \frac{1}{2u_a t_r} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma_x(x)}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - u_a t}{\sqrt{2}\sigma_x(x)}\right) \right\}$$

当 $t > t_r$ ：

$$F_x(x, t) = \frac{1}{2u_a t_r} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{x - u_a(t - t_r)}{\sqrt{2}\sigma_x(u_a t)}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - u_a t}{\sqrt{2}\sigma_x(u_a t)}\right) \right\}$$

(2) 扩散参数

a) 对于持续扩散源

σ_y 和 σ_z 的经验公式：（取值通常在 100~10000m 之间，若小于 100，则进行插值计算）

$$\sigma_y(x) = a \cdot x^b$$

$$\sigma_z(x) = c \cdot x^d$$

a, b, c, d 的值按下表确定：

表 1

		a	b	c	d
非常不稳定	(A)	0.527	0.865	0.28	0.90
不稳定	(B)	0.371	0.866	0.23	0.85
轻微不稳定	(C)	0.209	0.897	0.22	0.80
条件不稳定	(D)	0.128	0.905	0.20	0.76
稳定	(E)	0.098	0.902	0.15	0.73
非常稳定	(F)	0.065	0.902	0.12	0.67

由于粗糙长度对垂向的扩散参数有一定的影响，需要将垂向扩散参数 σ_z 修正如下：

$$\sigma_z(x) = c' \cdot x^{d'}$$

其中：

$$c' = c \cdot 1.98^{\log(10 \cdot z_0)}$$

$$d' = d - 0.059 \cdot \log(10 \cdot z_0)$$

假如需观测很短一段时间内的情况，则需要加入时间修正，此时横向扩散参数 $\sigma_y(x)$ 表达如下：

$$\sigma_y(x) = C_{t'} \cdot a \cdot x^b$$

其中， $C_{t'}$ 为平均时间修正系数：

$$C_{t'} = \left(\frac{t'}{600} \right)^{0.2}$$

注意， t' 为观测时间，且 $C_{t'}$ 最小为0.5。

b) 对于瞬时扩散源

σ_{xl} ， σ_{yl} ， σ_{zl} 的经验公式：

$$\sigma_{xl} = 0.13 \cdot x$$

$$\sigma_{yl} = \frac{a}{2} \cdot x^b$$

$$\sigma_{zl} = c \cdot x$$

当计算瞬时或短时间扩散时， σ_{xl} ， σ_{yl} ， σ_{zl} 分别取代上述公式中的 σ_x ， σ_y ， σ_z 来表示瞬时扩散源各方向的扩散参数，上述公式中的 a, b, c, d 按表 1 取值。

附录 4 喷射火计算模型

喷射火焰的主要危害形式是其燃烧产生的热辐射，相关简单计算模型如下：

$$Q_j = SEP \times F_{view} \times \tau$$
$$SEP = F_{sj} \times \frac{q_s \times H_c}{A_j}$$
$$F_{sj} = 0.21 \times e^{-0.00323 \times v_j} + 0.11$$
$$\tau = 2.02 [p_w x]^{-0.09}$$
$$p_w = p_w^0 \times R_H$$

式中： Q_j ——目标位置处的热辐射通量， W/m^2 。

SEP ——火焰表面热辐射率， $J/(m^2 \cdot s)$ ；

τ ——大气热传递系数；

F_{view} ——视角系数，具体计算可参见 TNO 黄皮书第 6 章，保守值可取 1；

F_{sj} ——火焰表面热辐射系数；

v_j ——泄漏孔处的气体流速， m/s ，该值的计算涉及马赫数、扩张喷射的温度、绝热指数等参数的计算，详细计算过程可参见 TNO 黄皮书第 6 章；

q_s ——泄漏速率， kg/s ；

A_j ——锥体火焰面积， m^2 ，该值的计算涉及对锥体火焰长度、宽度、高度等参数的计算，详细计算过程可参见 TNO 黄皮书第 6 章；

H_c ——燃烧热， J/kg ；

x ——目标与火焰中心间的水平距离， m ；

p_w ——环境温度下空气中的水蒸气压力， N/m^2 ；

p_w^0 ——环境温度下的饱和水蒸气压力， N/m^2 ；

R_H ——相对湿度。

附录 5 池火计算模型

以下计算模型中，基于给定的液池直径，将采用 Mudan 模型计算热辐射强度，采用 Thomas 模型计算池火火焰高度，采用 Bagster 模型计算大气热传递系数，采用 Babrauskas 质量燃烧效率。

$$Q_m = SEP \times F \times \tau$$

$$SEP_{\max} = \frac{f_s m H_c}{1 + 4H/D}$$

$$SEP = (1 - \xi)SEP_{\max} + \xi SEP_{\text{soot}}$$

$$H = 42D \left(\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61}$$

$$m = m_{\infty} [1 - \exp(-k\beta D)]$$

$$\tau = 2.02 [p_w (x - D/2)]^{-0.09}$$

$$p_w = p_w^0 \times R_H$$

式中： Q_m ——Mudan 模型模型目标所在位置的热辐射强度， W/m^2 ；

F ——视角系数，具体计算可参见 TNO 黄皮书第 6 章，保守值可取 1；

SEP ——火焰表面热辐射能， W/m^2 ；

SEP_{\max} ——火焰最大表面热辐射能， W/m^2 ；

SEP_{soot} ——烟粒表面辐射能， W/m^2 ，对于烃类如天然气和苯等经验值为 20×10^3 ；

ξ ——火焰表面被烟粒覆盖比率，对于烃类如天然气和苯等经验值为 80%；

f_s ——热辐射系数，通常经验值为 0.1~0.4，具体取值参考 TNO 黄皮书第 6 章；

H ——火焰高度， m ；

H_c ——燃烧热， J/kg ；

D ——液池直径， m ；

ρ_a ——空气密度， kg/m^3

m ——质量燃烧速率， $kg/(m^2 \cdot s)$ ；

m_{∞} ——最大质量燃烧速率， $kg/(m^2 \cdot s)$ ，常见烃类的 m_{∞} ：LNG， $0.078 kg/(m^2 \cdot s)$ ；LPG， $0.099 kg/(m^2 \cdot s)$ ；苯， $0.085 kg/(m^2 \cdot s)$ ；二甲苯， $0.090 kg/(m^2 \cdot s)$ ；汽油， $0.055 kg/(m^2 \cdot s)$ ；煤油， $0.039 kg/(m^2 \cdot s)$ ；甲醇， $0.015 kg/(m^2 \cdot s)$ ；

k ——火焰的吸收衰减系数， m^{-1} ；

β ——平均光线长度校正系数，常见烃类的 $k\beta$ ：LNG，1.1；LPG，1.4；苯，2.7；二甲苯，1.4；汽油，2.1；煤油，3.5；

τ ——大气热传递系数；

x ——目标至火焰中心水平距离，m；

p_w ——环境温度下空气中的水蒸气压力，N/m²；

p_w^0 ——环境温度下的饱和水蒸汽压力，N/m²；

R_H ——相对湿度。

附录 6 爆炸计算模型

6.1 蒸气云爆炸 (VCE)

采用 TNT 模型计算天然气蒸气云爆炸产生的超压值 Δp :

$$\Delta p = 14 \frac{W_{TNT}}{x^3} + 4.3 \frac{W_{TNT}^{\frac{2}{3}}}{x^2} + 1.1 \frac{W_{TNT}^{\frac{1}{3}}}{x}$$

$$W_{TNT} = \frac{f_d \alpha_d M H_c}{Q_{TNT}}$$

$$M = V C_Z L_Z \rho$$

式中: x ——距离, m;

Δp ——超压值, 10^5Pa 。

M ——蒸气云燃料总质量, kg;

V ——储罐容量, m^3 ;

C_Z ——充装极限;

L_Z ——爆炸剩余体积百分比;

ρ ——液体密度, kg/m^3 。

W_{TNT} ——TNT 当量, kg;

f_d ——地面爆炸系数, f_d 经验值为 1.8;

α_d ——自由蒸气云当量系数; α_d 统计平均值为 4%或 3%;

H_c ——燃烧热, J/kg;

Q_{TNT} ——TNT 的爆炸热, J/kg, Q_{TNT} 通常取值 4520000 J/kg

6.2 沸腾液体扩散蒸气爆炸 (BLEVE)

天然气 BLEVE 的主要后果形式是其燃烧产生的热辐射, 计算方法如下:

(1) 目标位置火球热辐射通量 Q_B

$$Q_B = SEP \times F_{view0} \times \tau$$

式中: Q_B ——火球热辐射强度, W/m^2 。

(2) 大气热传递系数 τ

$$\tau = 2.02 [p_w X]^{-0.09}$$

$$p_w = p_w^0 \times R_H$$

$$X = \sqrt{x^2 + H_0^2} - R_{fb}$$

式中: τ ——大气热传递系数;

X ——目标到火球表面的距离，m；

p_w ——环境温度下空气中的水蒸气压力，N/m²；

p_w^0 ——环境温度下的饱和水蒸汽压力，N/m²；

R_H ——相对湿度。

(3) 火球表面热辐射率 SEP

$$SEP = \frac{H_a F_s m_r}{4\pi R_{fb}^2 t_0}$$

式中： SEP ——火球表面热辐射能量，J/(m²·s)。

(4) 火球有效燃烧热 H_a

$$H_a = H_c - H_v - C_p \Delta T$$

式中： H_a ——火球有效燃烧热，J/kg；

H_c ——燃烧热，J/kg；

H_a ——蒸发热，J/kg；

C_p ——恒压比热，J/(kg·K)；

ΔT ——火球表面温度与环境温度之差，K。

(5) 火球表面热辐射能量比 F_s

$$F_s = 0.00325(P_{SV})^{0.32}$$

$$P_{SV} = 1.21P_V$$

式中： F_s ——火球表面热辐射能量比；

P_{SV} ——目标到储罐的水平距离，Pa；

P_V ——储罐安全阀起跳压力，Pa。

(6) 视角系数 F_{view0}

$$F_{view0} = \left(\frac{R_{fb}}{\sqrt{x^2 + H_0^2}} \right)^2$$

式中： F_{view0} ——视角系数；

x ——目标到储罐的水平距离，m。

(7) 火球抬升高度 H_0

$$H_0 = 2R_{fb}$$

式中： H_0 ——火球抬升高度，m。

(8) 火球持续时间 t_0

$$t_0 = 0.852m_r^{0.26}$$

式中： t_0 ——火球持续时间，s。

(9) 火球半径 R_{fb}

$$R_{fb} = 3.24m_r^{0.325}$$

式中： R_{fb} ——火球半径，m。

(10) 参与爆炸的可燃物质量 m_r

$$m_r = f_0 V \rho$$

式中： m_r ——参与爆炸的可燃物质量，kg；

f_0 ——参与爆炸的可燃物比例，单罐储存取 50%，双罐储存取 70%，多罐存取取 90%；

V ——储罐容量， m^3 ；

ρ ——液体密度， kg/m^3 。