指导性文件
GD034-2026

中　国　船　级　社

氢能驱动船舶风险评估指南

2026

2027 年 1 月 1 日生效

北　京

简 要 说 明

为适应船舶应用氢燃料的快速发展，中国船级社结合国家重点研发计划“氢能驱动典型船舶关键技术”项目的科研成果以及行业发展现状，基于氢能驱动船舶氢事故危险源识别、氢安全量化评估研究成果，对氢能驱动船舶风险评估方法适用性、流程规范性以及评估准则开展研究，构建针对氢能驱动船舶的全套风险评估（定性、定量）能力，编制了《氢能驱动船舶风险评估指南》。

《氢能驱动船舶风险评估指南》旨在为氢能驱动船舶全生命周期的风险评估提供规范化流程，涵盖氢能驱动船舶的设计、建造和营运阶段，确保从设计到营运的各个环节都能有效识别和管理风险，有助于提升船舶的安全性和可靠性。

目　　录

第 1 章 通　则 1

第 1 节 一般规定 1

第 2 章 风险评估方法与流程 3

第 1 节 一般规定 3
第 2 节 定性风险评估实施流程及要求 3
第 3 节 定量风险评估实施流程及要求 6

第 3 章 氢能驱动船舶 HAZID 应用 8

第 1 节 一般规定 8
第 2 节 HAZID 分析过程 8
第 3 节 典型场景的 HAZID 分析 10

第 4 章 氢能驱动船舶 HAZOP 应用 11

第 1 节 一般规定 11
第 2 节 HAZOP 分析过程 11
第 3 节 典型场景的 HAZOP 分析 13

第 5 章 氢能驱动船舶 FMEA 应用 14

第 1 节 一般规定 14
第 2 节 FMEA 分析过程 14
第 3 节 典型场景的 FMEA 分析 17

第 6 章 氢能驱动船舶 QRA 应用 19

第 1 节 一般规定 19
第 2 节 危险识别及场景选择 19
第 3 节 频率分析 19
第 4 节 后果分析 23
第 5 节 风险评价 26
第 6 节 典型场景的 QRA 分析 31

附录 1 危险识别工作记录表 33

1.1　HAZID 分析记录表 33
1.2　HAZOP 分析记录表 33
1.3　FMEA 分析记录表 33

附录 2　危险识别示例 35

2.1　燃料电池处所 HAZID 分析记录表示例 35
2.2　靠泊及系泊阶段 HAZID 分析记录表示例 36
2.3　高压氢气供气和加注 HAZOP 分析记录表示例 37
2.4　低温质子交换膜燃料电池 FMEA 分析示例 41
2.5　固体氧化物燃料电池 FMEA 分析示例 45
2.6　航行场景下电力系统 FMEA 分析示例 49

附录 3　涉氢处所氢泄漏扩散、火灾和爆炸分析示例 52

3.1　氢气泄漏扩散分析示例 52
3.2　氢气泄漏火灾分析示例 52
3.3　氢气泄漏爆炸分析示例 53
3.4　个人风险值计算示例 54

第 1 章　通　则

第 1 节　一般规定

1.1.1　目的

1.1.1.1　本指南的目的是为氢能驱动船舶全生命周期适用风险评估方法提供规范化流程，聚焦氢泄漏、火灾、爆炸等核心风险，通过定性、定量风险评估，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。

1.1.2　适用范围

1.1.2.1　本指南提出了危险识别、频率分析、后果分析和人员风险分析流程和相关要求，适用于氢能驱动船舶适用的定性和定量风险评估。

1.1.2.2　本指南所述的风险评估方法适用于：

(1) 氢能驱动船舶全生命周期中与安全相关的设计、建造和营运的评估；

(2) 氢能驱动船舶技术标准[①]中要求的风险评估。

1.1.3　定义

1.1.3.1　氢能驱动船舶：使用氢为燃料或预设氢燃料动力系统的船舶。

1.1.3.2　危险：可能造成人员伤害、职业病、财产损失或环境破坏的根源或状态。

1.1.3.3　事故：涉及人员伤亡、财产损失或环境破坏的意外事件。

1.1.3.4　危险识别：是一种结构化的风险评估方法，用于系统地识别项目或运营过程中可能存在的潜在危险。

1.1.3.5　后果：危险事件发生后可能造成的负面影响，如人员伤亡、环境污染或经济损失。

1.1.3.6　可能性：危险事件发生的概率，通常基于历史数据、专家判断或统计分析。

1.1.3.7　风险：危险发生的可能性和后果严重性的结合，通常用于描述不确定性和潜在损失。

1.1.3.8　初始风险：不考虑任何安全措施情况下的风险。

1.1.3.9　剩余风险：风险应对之后仍然存在的风险。

1.1.3.10　风险矩阵：由危险发生的可能性和相应的后果构成的矩阵，用来对危害进行排序。

1.1.3.11　工艺参数：与工艺过程有关的物理和化学特性，如温度、压力、流量等。

1.1.3.12　工艺指标：确定系统或装置如何按照系统的操作而不发生偏差，即工艺过程的正常操作条件。

1.1.3.13　偏差：工艺参数偏离工艺指标的情况，偏差的形式通常为“引导词+工艺参数”。

1.1.3.14　故障：产品执行规定功能能力的终止。

1.1.3.15　故障模式：产品故障的表现形式。

1.1.3.16　故障概率：故障发生的置信度，衡量标准为从 0 至 1。概率为 0 的事件系指相信该故障不可能发生；概率为 1 的事件系指相信故障肯定发生。

1.1.3.17　故障严重度：故障模式对产品工作、环境和操作者影响的严重程度；故障模式影响严重度与分析所定义的系统边界有关。

1.1.3.18　可靠性：在特定条件下和一段时间内，产品按规定功能运行的能力。可靠性=1-故障概率。

1.1.3.19　初始事件：导致危险情况或事故发生的一系列事件中的第 1 个事件。

1.1.3.20　失效：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）。

---

① 如中国船级社《船舶应用氢燃料指南》《船舶氢燃料加注作业指南》等，凡是本指南中未注明版本号的引用文件，其最新版本适用于本指南。

1.1.3.21　失效场景：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。

1.1.3.22　频率：单位时间内（通常为每年）某件事发生的次数。

1.1.3.23　概率：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 的事件系指相信该事件肯定发生。

1.1.3.24　失效频率：失效事件所发生的频率，单位为次/年。

1.1.3.25　失效后果：失效事件的结果，一个事件有一个或多个结果。

1.1.3.26　个人风险（IR）：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。

1.1.3.27　社会风险（SR）：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），通常以累计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　风险评估方法与流程

第 1 节　　一般规定

2.1.1　一般要求

2.1.1.1　风险评估是风险分析和风险评价的全部过程，风险分析可以是定性的，也可以是定量的，氢能驱动船舶风险评估具体采取哪种方法应综合考虑分析目的、分析对象。

2.1.1.2　定性风险分析以完全定性的方法确定概率和后果，氢能驱动船舶适用的方法包括但不限于危险源识别分析（HAZID）、危险与可操作性分析（HAZOP）、故障模式和影响分析（FMEA）等。

2.1.1.3　定量风险分析（QRA）需对概率和后果进行数学估计，适用于对发生概率较低、影响较大的事件（如泄漏、火灾、爆炸等）的风险进行量化。

第 2 节　　定性风险评估实施流程及要求

2.2.1　一般要求

2.2.1.1　可根据分析目的来选择适用的定性风险评估方法。对于氢能驱动船舶，在船舶设计阶段，可采用 HAZID 分析方法对全船涉氢处所设计方案进行危险识别，可采用 HAZOP 分析方法对船舶氢燃料储供系统、加注系统的工艺流程图进行危险识别，可采用 FMEA 分析方法对动力装置及系统，包括氢燃料发动机、燃料电池等进行危险识别。在船舶营运阶段，可采用 HAZID、HAZOP 等方法对燃料加注方案、船舶特殊航行场景（如过闸、过隧道等）进行危险识别。

2.2.1.2　定性风险评估开展过程包括准备阶段、分析阶段和报告编制阶段，工作流程见本章图 2.2.1.2。

2.2.2　实施流程

2.2.2.1　在准备阶段，应明确本次危险识别的工作范围，收集相关的图纸资料，组建分析小组并策划工作会议。

2.2.2.2　分析范围取决于多种因素，主要包括：

(1) 分析对象的物理边界；

(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；

(4) 适用规范法规及相关标准的要求。

2.2.2.3　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) 分析处于船舶生命周期的哪个阶段；

(3) 可能处于风险中的人或船舶结构；

(4) 船舶适用标准要求，包括系统安全和操作性能两个方面。

2.2.2.4　应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，并尽可能收集以往或类似项目的历史事故信息。

2.2.2.5　分析阶段包括危险识别和评估风险等级。

2.2.2.6　应组织召集有关方面专家参加危险识别会，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可能导致的后果。该过程由主席引导专家组成员按照确定好的引导词进行“头脑风暴”式的分析，由记录员进行记录。分析小组的知识、技术与经验对确保分析结果的可信度和深度至关重要。

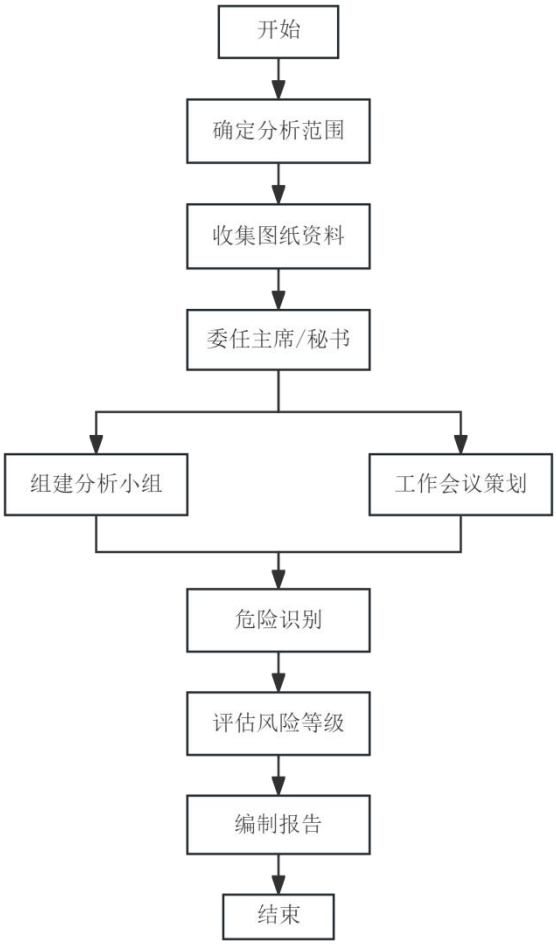


图 2.2.1.2 定性风险评估工作流程

2.2.2.7 HAZID 分析方法参见本指南第 3 章，HAZOP 分析方法参见本指南第 4 章，FMEA 分析方法参见本指南第 5 章。

2.2.2.8 评估风险等级即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做进一步筛选和提出风险控制方案。

2.2.2.9 风险矩阵是最为常用和典型的一种危险排序方法。风险矩阵中，风险值由事故发生频率乘以事故后果计算得到，如在该计算公式两边取对数则得到风险指数为频率指数和严重度指数之和。

风险=频率×后果

log（风险）=log（频率）+log（后果）

风险指数（RI）=频率指数（FI）+严重度指数（SI）

2.2.2.10 风险矩阵分为三个区域：高风险区域（H－深灰区域），低风险区域（L－白色区域），以及两者之间的临界区域（M－浅灰区域）。对于处于高风险区域的危险事件，应提出风险减缓措施，并对提出的措施再实施风险评估程序，评估其剩余风险，最终达到在有效的预防或保护下将风险降至可接受的水平；对于处于临界区域的危险事件，应依据专家判断和企业承受能力（如成本、精力和时间）来决定是否采取风险减缓措施；对于处于低风险区域的危险事件，通常无需额外采取措施。

2.2.2.11 在具体应用中可根据相关标准②或业主需求对事故发生频率、事故后果、风险等级进行划分，频率和后果的定义和取值可参考本章表 2.2.2.11（1）和表 2.2.2.11（2），风险矩阵可参考本章

② CCS《船舶综合安全评估指南》《油气定量风险评估》《故障模式和影响分析应用指南》，IACS《关于满足 IGF 规则要求的风险评估的建议案 REC.146》等。

表 2.2.2.11（3）。

频率等级划分表 表 2.2.2.11（1）

FI	频率（年）	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 表 2.2.2.11（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 表 2.2.2.11（3）

	FI	1	2	3	4	5
SI		A 极少	B 很少	C 偶尔	D 有时	E 经常
4	灾难	5	6	7	8	9
3	严重	4	5	6	7	8
2	中等	3	4	5	6	7
1	轻微	2	3	4	5	6

2.2.2.12 定性风险评估报告至少应包含以下内容：

(1) 封面：包括项目名称、编制单位、编制日期等；

(2) 目录：列出报告各章节及页码；

(3) 正文，至少包括以下内容：

① 术语和缩写：解释报告中的专业术语和缩写（如适用）；

② 项目概述：简要介绍报告编制目的、背景和依据；

③ 分析程序：介绍本次危险识别分析采用的方法、工具和流程；

④ 分析范围：明确危险识别分析的对象、目标、技术资料清单和节点划分/层次划分；

⑤ 定义引导词/偏差/故障模式；

⑥ 风险可接受衡准：明确采用的风险矩阵；

⑦ 结论和建议：总结风险统计分析结果，提出项目改进措施和建议。

(4) 附件，至少包括以下内容：

① 分析使用的图纸、说明书等清单；

② 会议签到表；

③ 分析记录表，见本指南附录1。

第 3 节　定量风险评估实施流程及要求

2.3.1　一般要求

2.3.1.1　氢能驱动船舶的定量风险评估是对船舶本身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，除对事故的原因、过程、后果和既有安全措施等进行定性分析之外，还应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。

2.3.1.2　定量风险评估开展过程包括准备阶段、QRA 分析阶段和分析报告编制阶段，工作流程见本章图 2.3.1.2。

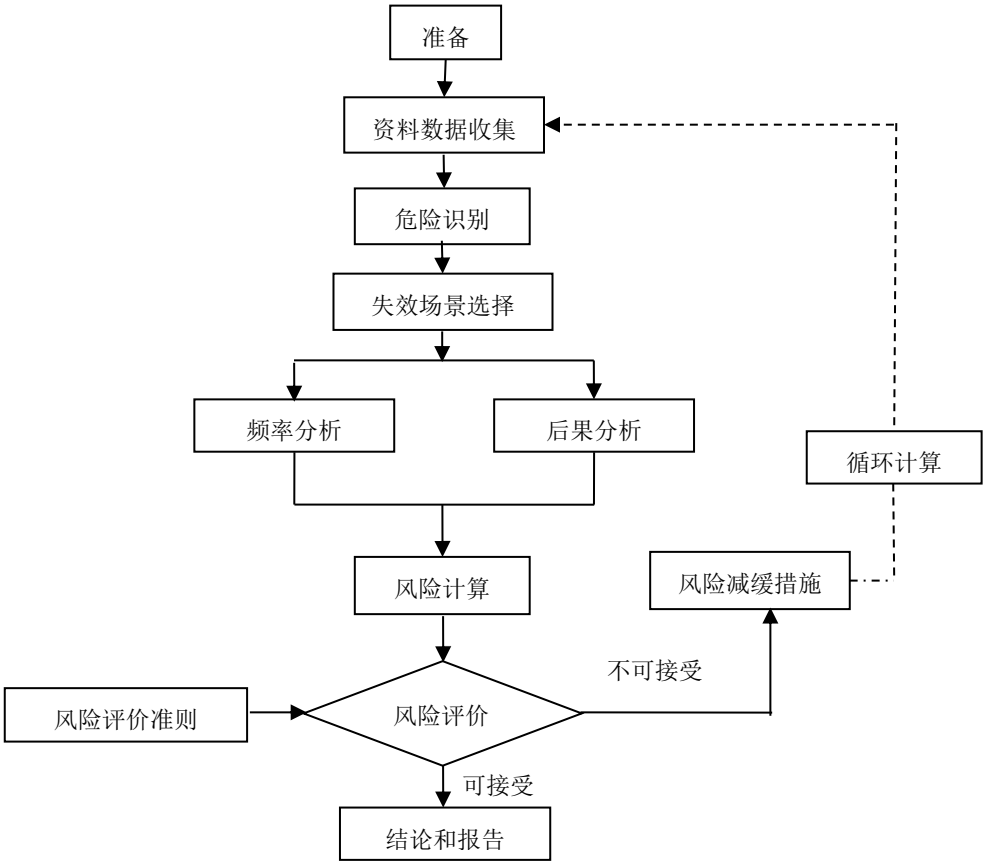


图 2.3.1.2 定量风险评估流程

2.3.2　实施流程

2.3.2.1　在准备阶段，应明确风险评估目标和分析场景，组建评估工作组，收集资料并安排工作计划。

2.3.2.2　氢能驱动船舶，可根据风险评估需求来确定风险评估目标，界定分析范围应考虑以下因素：

(1) 船舶参数（如：船型、船长、新船或现有船等）；
(2) 船舶系统（如：总体布置、供气系统、动力装置等）；
(3) 船舶作业（如：作业地点，燃料加注模式等）；
(4) 外部对船舶的影响（如：天气、水文等）；
(5) 事故类别（如：碰撞、火灾、爆炸等）；
(6) 风险的后果类别（如：人员受伤和/或死亡，船舶或港口设施受损等）。

2.3.2.3　应组建评估工作组，并指定一名组长。评估工作组成员应包括但不限于船舶安全、工艺、材料、电气、仪表、设备以及工艺操作等专业人员，以及计算流体力学（CFD）分析师。工作组成员可根据不同评估阶段的工作内容只参与部分工作，为工作组提供必要的资料和咨询。

2.3.2.4　组长应为项目制定工作计划，根据项目具体情况和能够运用的资源，确定项目目标和工作范围，并负责项目执行过程中的各方协调工作。

2.3.2.5　在评估正式开展前，工作组成员应协助工作组组长制定评估规则，如下：

(1) 风险可接受标准；

(2) 数据采集、处理及缺失数据的处理（如插值、外推、归纳等）；

(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。

2.3.2.6　应根据风险评估的目标和深度确定需要收集的资料数据，对于氢能驱动船舶，需收集的资料包括但不限于：

(1) 船舶相关图纸资料，如船舶总体布置图、工艺流程图（PFD）、工艺管道及仪表流程图（P&ID）、危险区域划分图、通风系统布置图等；

(2) 作业当地气象、水文资料；

(3) 所需的操作手册；

(4) 已有的定性风险评估报告（如有时）；

(5) 历次事故记录（如有时）；

(6) 其他所需资料。

2.3.2.7　氢能驱动船舶 QRA 分析方法参见本指南第 6 章。

2.3.2.8　定量风险评估报告至少应包括以下内容：

(1) 封面：包括项目名称、编制单位、编制日期等；

(2) 目录：列出报告各章节及页码；

(3) 正文，至少包括以下内容：

① 术语和缩写：解释报告中的专业术语和缩写（如适用）；

② 项目概述：简要介绍报告编制目的、背景和依据；

③ 分析范围：明确分析的对象、目标、技术资料清单；

④ 危险识别过程：至少包括本章2.2.2.11（3）③~⑦的内容（如有时）；

⑤ 频率和后果分析：包括每一个危险事件的频率和后果分析过程，明确输入参数、使用的模型和方法；

⑥ 风险计算：个人风险值、社会风险值计算过程（如有时）；

⑦ 结论和建议：根据风险评估结果，提出降低风险措施和建议。

(4) 附件，至少包括以下内容：

① 分析使用的图纸、说明书等清单；

② 危险识别会议签到表（如有时）；

③ 危险识别记录表（如有时）。

第 3 章　氢能驱动船舶 HAZID 应用

第 1 节　　一般规定

3.1.1　目的

3.1.1.1　HAZID 分析的目标是识别船舶现有设计方案、作业过程中可能存在的安全隐患，开展定性分析，评估其后果，从而确定可靠的防护措施，以减少事故发生时的影响，并指导后续的设计，从而使项目更加安全高效。

3.1.2　一般要求

3.1.2.1　HAZID 分析主要用于氢能驱动船舶设计阶段，对全船涉氢处所开展风险分析，提出降低风险的建议。也可用于船舶建造阶段的气试加注作业、营运阶段的燃料加注作业、特殊场景航行（如船舶过闸、船舶过隧道等）的风险分析。

3.1.2.2　在 HAZID 分析时，通常采用“故障假设法（what-if）”来识别危险。在运用该方法时，应基于专家经验，提出实际性的假设（引导词），避免实际不可能发生的场景出现。

第 2 节　　HAZID 分析过程

3.2.1　分析流程

3.2.1.1　HAZID 的实施过程包括研究准备、HAZID 分析和编制报告。

3.2.1.2　在 HAZID 分析的准备阶段，需要确定分析目标和范围、组建分析小组、收集基础资料、安排会议时间及培训等。

(1) HAZID分析应根据分析对象和目的来确定分析范围。如，氢能驱动船舶涉氢处所的HAZID分析，其分析范围为全船涉氢处所；氢能驱动船舶加氢作业的HAZID分析，其分析范围为加氢作业全过程。

(2) HAZID的分析小组通常由主席、专家组、记录员等人员组成。分析小组应根据项目的具体特点，确定适用于项目的引导词。

(3) HAZID分析通常在主席的引导下完成，主席应熟悉HAZID分析技术，接受过HAZID分析专业培训，具有较高的沟通技巧、会议进度控制能力和会场控制能力。HAZID分析小组成员应熟悉项目背景，了解项目方案，以具有类似项目经验的人员为佳。

(4) HAZID分析资料的种类和详细程度决定了HAZID分析程度的深浅。对于氢能驱动船舶，建议至少在完成初步设计方案后，再开展HAZID分析。

(5) 除图纸资料外，还应尽量收集之前发生的事故情况，类似系统之前进行过的危险分析，氢能驱动船舶适用的标准规范以及主管机关发布的相关管理规定等。

3.2.1.3　HAZID 分析需要将总布置图或操作程序划分为若干分析节点，分析小组对每个节点使用所有引导词依次进行分析，分析事故产生原因，可能导致的后果，现有安全措施，并给出建议安全措施。HAZID 分析基本步骤见本章图 3.2.1.3。

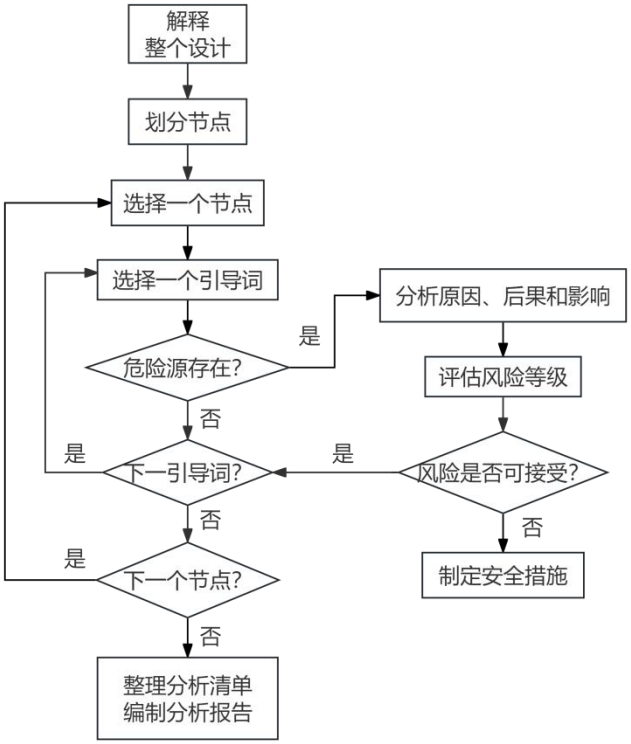


图 3.2.1.3 HAZID 分析过程

(1) 节点划分可按照功能区块或工艺过程进行划分。如，对全船涉氢处所开展HAZID分析，可按照船舶的不同处所来划分节点，对氢燃料加注作业开展HAZID分析，则可按照作业流程来划分节点。

(2) 氢能驱动船舶相关危险源引导词可参考但不限于本章表3.2.1.3所列。

氢能驱动船舶 HAZID 分析引导词表　　表 3.2.1.3

碰撞	机械设备失效
搁浅	电力系统失效
撞击（高空坠物、海冰撞击等）	控制系统失效
火灾/爆炸	通讯系统失效
失电	管系（含阀件、法兰及附件等）泄漏与破裂
船舶失控（主机、舵机失效）	管路堵塞
燃料围护系统失效	预冷不足
超压（过充）	腐蚀或磨损
快速升温	制造缺陷/材料缺陷
氢脆	人为因素/操作不当
疲劳（应力与应变、振动）	……

(3) 在分析会议中，由主席引导组员按照确定好的危险源引导词顺序，对每个节点进行“头脑风暴”式的分析，讨论危险源产生的原因、所导致的影响或后果，并识别现有的安全措施。讨论内容应记录在HAZID记录表中，见本指南附录1.1。

(4) 危险识别后，还应根据预先设定的风险矩阵来评估风险等级。风险等级的确定应满足本指南第2章第2节2.2.2.9~2.2.2.11的要求。

(5) 应按照本指南第2章第2节2.2.2.10的要求提出建议措施，确保通过现有安全措施和建议措施的实施使风险降低到企业可以接受的水平。

(6) HAZID分析报告的编制应满足本指南第2章第2节2.2.2.12的要求。

第 3 节　典型场景的 HAZID 分析

3.3.1　船舶涉氢处所 HAZID 分析

3.3.1.1　氢能驱动船舶涉氢处所 HAZID 分析，所需图纸资料至少包含船舶总布置图、氢燃料加注站布置图、氢燃料储存处所布置图、燃料电池处所布置图等。

3.3.1.2　应按照不同处所划分节点。氢能驱动船舶涉氢处所至少包括储氢处所、氢燃料加注站、燃料电池处所等，如船舶设有动力蓄电池，则应将布置蓄电池的处所作为一个节点纳入分析。

3.3.1.3　HAZID 分析小组由主席、记录员和具有丰富经验的相关专业人员组成，相关专业涉及船舶总体、动力系统、加注系统、燃料电池系统、储氢系统、储氢材料等。

3.3.1.4　分析会议中，分析小组应对船舶设计布置、工艺流程、设备故障及人为操作导致的危险源原因、后果、风险水平及现有安全措施进行分析，并根据风险等级提出建议安全措施。以燃料电池处所为例，其部分 HAZID 分析记录表可参见本指南附录 2.1。

3.3.2　船舶氢燃料加注作业 HAZID 分析

3.3.2.1　船舶氢燃料加注作业 HAZID 分析，所需图纸资料至少包含船舶总布置图、加注站布置图、危险区域划分图、安全操作手册、加注地点环境条件和加注设施信息等。

3.3.2.2　应按照作业流程划分节点。氢燃料加注作业节点通常可划分为靠泊及系泊阶段、加注系统连接及准备阶段、加注作业阶段、加注完成拆管与离泊阶段。

3.3.2.3　HAZID 分析小组，由 HAZID 分析主席、记录员和具有丰富经验的相关专业人员组成，相关专业涉及船舶总体、加注系统、储氢系统、加注工艺等。

3.3.2.4　分析会议中，分析小组应对作业各阶段的危险场景产生原因、后果、现有安全措施、风险水平进行分析，并根据风险等级提出建议安全措施。以靠泊及系泊阶段为例，其部分 HAZID 分析记录表可参见本指南附录 2.2。

第 4 章　氢能驱动船舶 HAZOP 应用

第 1 节　　一般规定

4.1.1　目的

4.1.1.1　HAZOP 分析的目标是对船舶工艺系统进行安全分析，识别工艺流程及操作偏差导致的危险源原因、后果，对现有安全措施进行分析，并根据风险水平提出建议安全措施。

4.1.2　一般要求

4.1.2.1　HAZOP 分析主要用于氢能驱动船舶设计阶段，对氢燃料供应系统、加注系统开展风险分析，从设计方案上降低工艺系统的风险。也可用于船舶营运阶段，对燃料加注工艺系统开展风险分析。

第 2 节　　HAZOP 分析过程

4.2.1　分析流程

4.2.1.1　HAZOP 的实施过程包括研究准备、HAZOP 分析和编制报告。

4.2.1.2　在 HAZOP 分析的准备阶段，需要确定分析目标和范围、组建分析小组、收集基础资料、安排会议时间及培训等。

(1) HAZOP分析应根据分析对象和目的来确定分析范围。工作范围通常为一套工艺系统，如船舶燃料供应系统、燃料加注系统等。

(2) HAZOP分析小组，由HAZOP主席、记录员和具有丰富经验的相关专业人员组成。分析小组应根据项目的具体特点，确定适用于项目的偏差，包括引导词和参数。

(3) HAZOP主席应具有丰富的分析经验，且接受过HAZOP分析专业培训。分析小组成员应熟悉项目背景，了解项目方案，以具有类似项目经验的人员为佳。

(4) HAZOP分析资料的种类和详细程度决定了HAZOP分析程度的深浅。对于氢能驱动船舶，建议在工艺设计完成后，再开展HAZOP分析。

(5) 除图纸资料外，还应尽量收集之前发生的事故情况，类似系统之前进行过的危险分析，氢能驱动船舶适用的标准规范以及主管机关发布的相关管理规定等。

4.2.1.3　HAZOP 分析需将工艺图或操作程序划分为若干分析节点或工艺单元，分析小组对每个节点使用所有引导词依次进行分析，得到偏差原因、后果、保护装置、建议措施。HAZOP 分析基本步骤见本章图 4.2.1.3。

(1) 节点划分可按照工艺流程或操作顺序进行划分。如，对氢燃料供应系统和加注系统设计方案的HAZOP分析，可按照工艺流程划分为氢燃料供应、氢燃料加注、加注后吹扫惰化等。

(2) 氢能驱动船舶应根据分析对象确定其允许过程中的偏差，偏差通过引导词和参数的组合产生，氢能驱动船舶相关的工艺参数通常为温度、压力、液位、流量、组分和操作，相关引导词通常为无、过小（低）、过大（高）、逆向、伴随，引导词和参数包含并不限于本章表4.2.1.3（1）所列。引导词的含义和使用方法见本章表4.2.1.3（2）。

(3) 在分析会议中，由主席引导组员按照确定好的偏差，对每个节点进行“头脑风暴”式的分析，讨论偏差产生的原因、所导致的影响或后果，并识别现有的安全措施。讨论内容应记录在HAZOP记录表中，见本指南附录1.2。

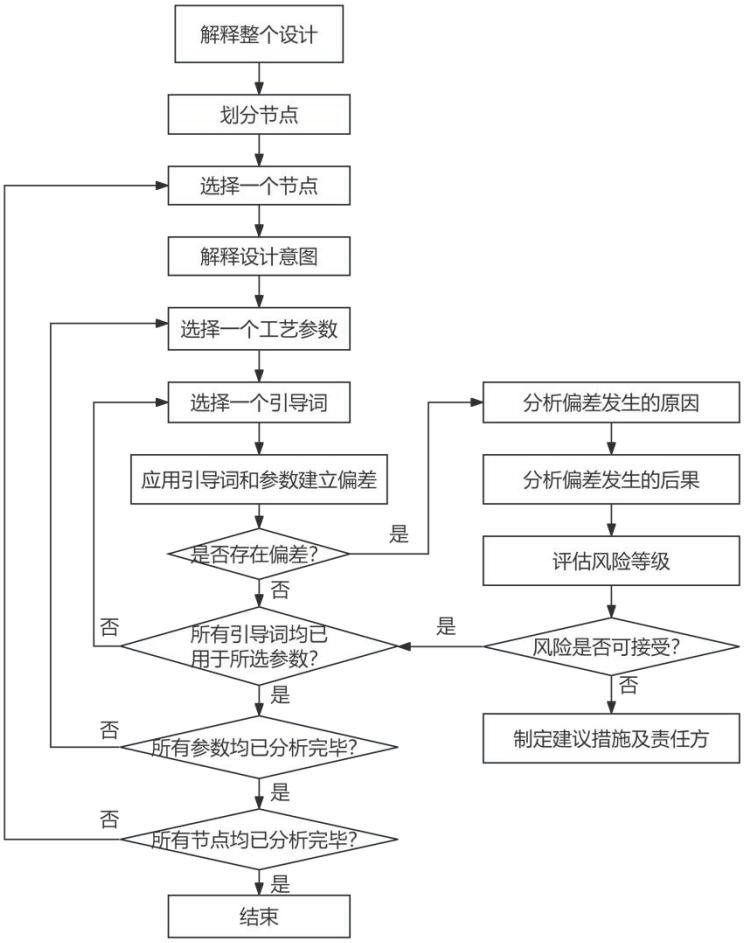


图4.2.1.3 HAZOP分析过程

(4) 危险识别后，还应根据预先设定的风险矩阵来评估风险等级。风险等级的确定应满足本指南第2章第2节2.2.2.9~2.2.2.11的要求。

(5) 应按照本指南第2章第2节2.2.2.10的要求提出建议措施，确保通过现有安全措施和建议措施的实施使风险降低到企业可以接受的水平。

(6) HAZOP分析报告的编制应满足本指南第2章第2节2.2.2.12的要求。

氢能驱动船舶HAZOP分析引导词表　　表4.2.1.3（1）

参数	无	过小（低）	过大（高）	逆向	伴随
流量	无流量	流量小	流量大	逆流	其他相
液位	无液位	液位低	液位高	——	——
压力	无压力	压力低	压力高	——	压力波动
温度	——	温度低	温度高	——	——
组分	气液两相、杂质进入				
操作	开启/关闭、操作有误、顺序不对				

引导词的含义和使用方法表　　表4.2.1.3（2）

引导词	意义	注释
无	设计或操作意图的完全否定。	完全没有达到设计要求，但无其他状况发生。
低	同设计值比，相关参数的量化减少。	这里指描述相关物理性质的量，如流量、温度等。

高	同设计值比，相关参数的量化增加。	这里指描述相关物理性质的量，如流量、温度等。
逆	出现与设计意图完全相反的事或物。	此项大都用于描述动态状况，如液体反向流动、反应向相反的方向进行等。
部分	相关性能的定性减少。	只完成既定功能的一部分，如组分的比例发生变化、无某些组分等。
伴随	相关参数的定性增加。	在完成既定功能的同时，伴随多余的事件发生，如燃料在加注过程中发生相变、产生静电等。
异常	偏离正常设计区间。	出现和设计意图不相同的事或物，如发生异常事件或状态、改变操作模式等。

第 3 节　典型场景的 HAZOP 分析

4.3.1　船舶燃料供应系统和加注系统 HAZOP 分析

4.3.1.1　氢能驱动船舶燃料供应系统和加注系统 HAZOP 分析，所需图纸资料至少包含船舶总布置图、氢燃料供应系统原理图、氢燃料加注系统原理图等。

4.3.1.2　氢能驱动船舶燃料供应系统和加注系统可按照工艺流程划分节点，包括氢燃料供应、氢燃料加注、加注后吹扫惰化等。以使用氢气瓶作为燃料储存装置的燃料电池动力船为例，其供气和加注系统可划分为高压氢气加注、高压氢气供气、低压氢气供气、加注管路吹扫等节点。

4.3.1.3　HAZOP 分析小组由主席、记录员和具有丰富经验的相关专业人员组成，相关专业涉及船舶动力系统、加注系统、储氢系统、储氢材料等。

4.3.1.4　分析会议中，应先由设计人员充分说明各节点的设计意图，分析小组在主席的带领下，充分分析偏差发生的原因、后果，识别现有的安全措施，并根据风险水平提出建议安全措施。以高压氢气供气和高压氢气加注节点为例，其部分 HAZOP 分析记录表可参见本指南附录 2.3。

第 5 章　氢能驱动船舶 FMEA 应用

第 1 节　　一般规定

5.1.1　目的

5.1.1.1　FMEA 分析的目标在于通过评估设备或系统潜在的故障模式、影响和解决方案，在设备和系统开发的早期识别风险并减少失败，提升产品可靠性。

5.1.2　一般要求

5.1.2.1　FMEA 分析主要用于氢能驱动船舶重要设备和工艺系统，如燃料电池、氢燃料内燃机和电力系统等，开展风险分析。

第 2 节　　FMEA 分析过程

5.2.1　分析流程

5.2.1.1　FMEA 的实施过程包括策划准备、FMEA 分析和编制报告。

5.2.1.2　开展 FMEA 分析之前，需要做好相关策划准备，包括以下四个主要阶段：

(1) 定义目标和范围：明确分析的范围和目标，包括确定要分析的产品或过程，以及需要识别风险的区域和问题点。

(2) 组建FMEA分析团队：FMEA团队通常由核心团队成员和扩展团队成员构成，核心团队可包括主持人、记录员、设计工程师和设计质量工程师，扩展团队可包括设备相关的其他专业人员。核心团队和扩展团队主要职责：

① 核心团队成员在主持人的带领下，通过主持人的提问和团队成员的回答以及讨论开展FMEA分析工作。

② 扩展团队成员帮助核心团队分析产品的特定方面，提供必要的专业知识。

(3) 收集所需图纸资料：FMEA分析需要有关系统、部件足够详细的数据和信息，以便对各部件出现故障的方式进行有意义的分析。数据和信息可能包括：

① 正在分析的系统及系统部件的图纸，或者过程步骤的流程图；

② 了解过程中每一步或系统组成部分的功能；

③ 可能影响运行的过程及环境参数的详细信息；

④ 对特定故障结果的了解；

⑤ 有关故障的历史信息，包括现有的故障率数据。

(4) 会议及培训：制订会议计划及安排项目参与者进行培训，明确FMEA分析方法及自身职责。

5.2.1.3　在对设备实施 FMEA 分析时，应明确分析对象，即明确约定层次的定义，将系统分成部件或步骤，绘制功能框图和可靠性框图。FMEA 分析基本步骤见本章图 5.2.1.3。

5.2.1.4　对于列出的各部件或步骤，应确认以下内容：

(1) 故障判别准则；

(2) 故障模式及原因；

(3) 故障影响和故障影响级别。

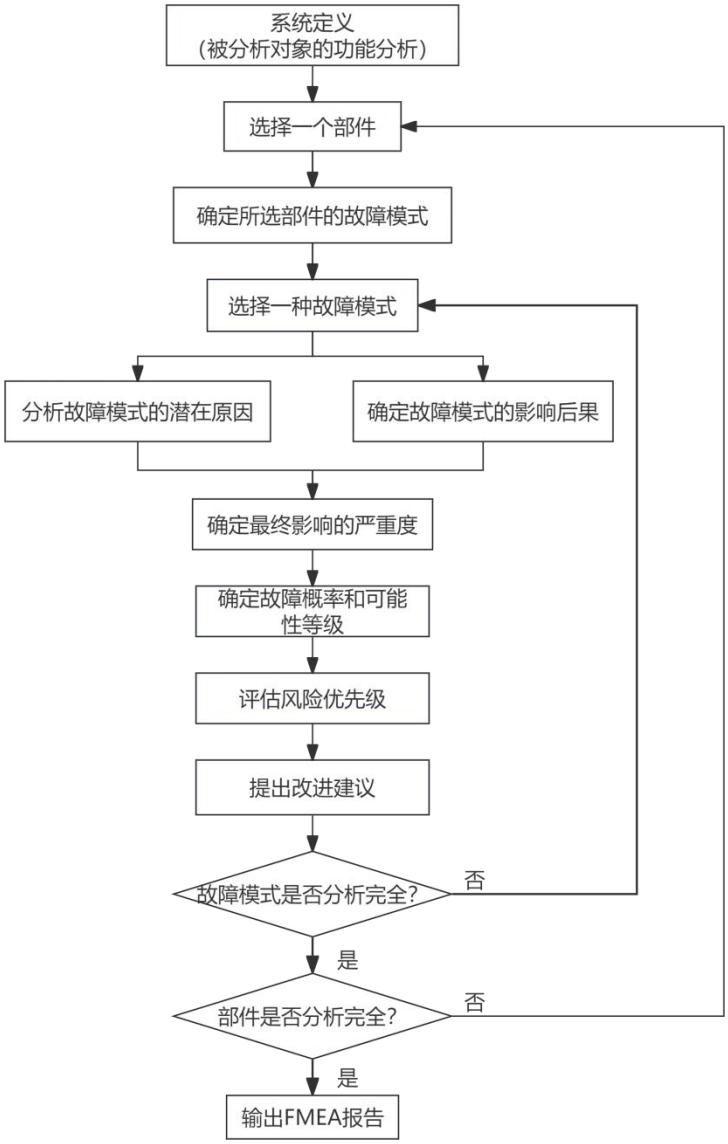


图 5.2.1.3 FMEA 分析流程

5.2.1.5　故障判别准则是判断系统是否构成故障的界限值， 任何导致维修及故障需求的非人为事件都是故障事件。分别以某 10kW～70kW 低温质子交换膜燃料电池和某 0kW～40kW 固体氧化物燃料电池为例，影响系统完成任务的所有软、硬件故障都为关联故障，以此规定该质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池，以及其组成装置的性能参数及容许界限如本章表 5.2.1.5（1）和表 5.2.1.5（2）所示，该限值可根据燃料电池制造商实际产品参数予以调整。

低温质子交换膜燃料电池性能参数及容许界限示例　　表 5.2.1.5（1）

性能参数	测量单位	规定的要求及容许界限	故障判别准则
功率	kW	≤70	>75
电压	V	200～400	＜200
			>400
氢气入堆压力	kPa	15~90	＜10
			>95
空气入堆压力	kPa	10~90	＜5
			>95

纯水进口温度	℃	≤75	>80
纯水出口温度	℃	≤85	>85
供氢管路氢气压力	MPa	0.5~0.7	＜0.45
			>0.75
纯水离子电导率	μS/cm	≤5	>10
纯水路压力	MPa	0.03~0.1	＜0.02
			>0.11

固体氧化物燃料电池性能参数及容许界限示例　　表 5.2.1.5（2）

性能参数	测量单位	规定的要求及容许界限	停机故障判据
功率	A	0~40	＞43
电压	V	230~350	＜230
			＞350
燃气总管压力	kPa	100~200	＜50
			＞400
空气总管压力	kPa	0~8	＞8
水缓冲罐压力	MPa	0.45~0.55	＜0.4
			＞0.6
水支管压力	kPa	0~250	＞250
电堆空气入口温度	℃	660~680	＞700
电堆空气出口温度	℃	700~730	＞750
空气进出口温差	℃	≤60	＞100
水碳比		2~4	＜2
			≥4
工作电压	V	252~258	≤230
燃烧烟气温度	℃	800~880	＞900

5.2.1.6　氢燃料电池相关的故障模式可参考但不限于本章表 5.2.1.6（1）和表 5.2.1.6（2）所列。

低温质子交换膜燃料电池故障模式表　　表 5.2.1.6（1）

单电压低	输出信号错误
氢空串气	膜电极干化
泄漏	超温
高温	增湿膜穿孔或开裂
过电流	增湿膜透水率下降
绝缘不足	节气门控制失效
通讯故障	压力失控
电压检测异常	不动作
控制失效	机械损伤
氢气直排	控制系统故障
不排水	密封失效
空气入口压力不满足范围	氢气循环组件故障
氢气入口压力不满足范围	热损伤失效

固体氧化物燃料电池故障模式表　　表 5.2.1.6（2）

电压低	输出信号错误
出入堆温差大	重整器积碳

泄漏	燃烧器超温
堆超温	燃气流量异常
过电流	空气流量异常
绝缘不足	水碳比异常
通讯故障	风机控制失效
电压检测异常	压力失控
控制失效	电磁阀不动作
水箱液位异常	机械损伤
燃气缓冲罐压力异常	控制系统故障
电导率异常	密封失效
燃烧器熄火	冷却水泵故障
保温失效	...

5.2.1.7　在分析会议中，为找出产品在功能及硬件设计中所有可能的故障模式、原因及影响，讨论内容应记录在 FMEA 分析记录表中，见本指南附录 1.3。

5.2.1.8　应开展危害性分析，确定每一种故障影响的相对大小，为决策提供帮助。可综合故障模式的严重度和故障概率，确定减轻或消除特定故障影响采取措施的优先顺序。风险等级的确定应满足本指南第 2 章第 2 节 2.2.2.9~2.2.2.11 的要求。

5.2.1.9　应按照本指南第 2 章第 2 节 2.2.2.10 的要求提出设计改进和使用补偿措施，确保通过设计改进和使用补偿措施的实施使风险降低到企业可以接受的水平。

5.2.1.10　FMEA 分析报告的编制应满足本指南第 2 章第 2 节 2.2.2.12 的要求。

第 3 节　典型场景的 FMEA 分析

5.3.1　低温质子交换膜燃料电池 FMEA 分析

5.3.1.1　氢能驱动船舶低温质子交换膜燃料电池 FMEA 分析，所需图纸资料至少包含燃料电池模块原理图等。

5.3.1.2　应按照低温质子交换膜燃料电池具体产品的功能关系或组成特点进行约定层次划分。以某低温质子交换膜燃料电池为例，其约定层次图可参见本指南附录 2.4.1。

5.3.1.3　应根据产品的组成，绘制低温质子交换膜燃料电池系统的功能框图。以某低温质子交换膜燃料电池为例，其功能框图可参见本指南附录 2.4.2。

5.3.1.4　应绘制可靠性框图，用以表征低温质子交换膜燃料电池对应任务剖面下的功能逻辑关系，直观展示各组成单元单独失效或多单元组合失效引发系统整体失效的逻辑关联。鉴于低温质子交换膜燃料电池系统中任一单元出现故障均需开展检修或更换作业，并随之产生对应的维修及保障工作，因此该系统适用串联可靠性模型。以某低温质子交换膜燃料电池为例，其可靠性框图可参见本指南附录 2.4.3。

5.3.1.5　FMEA 分析团队由主持人、记录员、设计工程师和具有丰富经验的相关专业人员组成。相关专业涉及质子交换膜燃料电池、船舶动力系统、设备工程、储氢系统等。

5.3.1.6　分析会议中，分析团队应找出低温质子交换膜燃料电池在功能及硬件设计中所有可能的故障模式、原因及影响，并针对其薄弱环节，提出设计改进和使用补偿措施。以某低温质子交换膜燃料电池为例，其部分 FMEA 分析记录表可参见本指南附录 2.4.4。

5.3.2　固体氧化物燃料电池 FMEA 分析

5.3.2.1　氢能驱动船舶固体氧化物燃料电池 FMEA 分析，所需图纸资料至少包含燃料电池模块原理图等。

5.3.2.2　应按照固体氧化物电池的功能关系或组成特点进行约定层次划分。以某固体氧化物燃料电池为例，其约定层次图可参考本指南附录 2.5.1。

5.3.2.3　应根据产品的组成，绘制固体氧化物燃料电池系统的功能框图。以某固体氧化物燃料电池为例，其功能框图可参考本指南附录 2.5.2。

5.3.2.4　应绘制可靠性框图，用以表征固体氧化物燃料电池对应任务剖面下的功能逻辑关系。以某固体氧化物燃料电池为例，其可靠性框图可参考本指南附录 2.5.3。

5.3.2.5　FMEA 分析团队由主持人、记录员、设计工程师和具有丰富经验的相关专业人员组成。相关专业涉及固体氧化物燃料电池、船舶动力系统、设备工程、储氢系统等。

5.3.2.6　分析会议中，分析团队应找出固体氧化物燃料电池在功能及硬件设计中所有可能的故障模式、原因及影响，并针对其薄弱环节，提出设计改进和使用补偿措施。以某固体氧化物燃料电池为例，其部分 FMEA 分析记录表可参见本指南附录 2.5.4。

5.3.3　航行场景下电力系统 FMEA 分析

5.3.3.1　航行场景下电力系统 FMEA 分析，所需图纸资料至少包含电力系统原理图等。

5.3.3.2　应按照电力系统的功能关系或组成特点进行约定层次划分。航行场景下电力系统约定层次划分可参见本指南附录 2.6.1。

5.3.3.3　应根据系统的组成，将航行场景下电力系统分成部件或步骤，绘制功能框图。以某航行场景下电力系统为例，其功能框图可参见本指南附录 2.6.2。

5.3.3.4　应绘制可靠性框图，用以表征航行场景下电力系统对应任务剖面下的功能逻辑关系。鉴于电力系统各支路中任何一个单元发生故障均需开展检修或更换作业，并随之产生对应的维修及保障工作，因此该系统适用串联可靠性模型。而对于由多个支路构成的电力系统，如各支路彼此存在互为冗余/备份的情况，支路中任何一个单元发生故障并不需要维修或更换，因此这类系统模型是一个并联模型。以某航行场景下电力系统为例，其支路模型可靠性框图可参见本指南附录 2.6.3。

5.3.3.5　FMEA 分析团队由主持人、记录员、设计工程师和具有丰富经验的相关专业人员组成。相关专业涉及船舶电力系统、设备工程、安全工程等。

5.3.3.6　分析会议中，分析团队应找出产品在功能及硬件设计中所有可能的故障模式、原因及影响，并针对其薄弱环节，提出设计改进和使用补偿措施。以航行场景下电力系统为例，其部分 FMEA 分析记录表可参见本指南附录 2.6.4。

第 6 章　氢能驱动船舶 QRA 应用

第 1 节　一般规定

6.1.1　目的

6.1.1.1　QRA 分析的目标是对船舶或其加注作业活动中各类事故的发生频率和后果进行量化分析，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。

6.1.2　一般要求

6.1.2.1　QRA 分析主要用于氢能驱动船舶设计阶段，对可能存在氢泄漏的处所进行氢扩散、窒息、火灾或爆炸的风险分析，从设计方案上降低布置、结构以及工艺系统的风险。也可用于船舶营运阶段，对燃料加注过程开展分析。

6.1.3　QRA 实施流程

6.1.3.1　QRA 的实施过程主要包括资料收集、危险源识别、事故场景频率与后果量化分析、风险计算及评价，具体流程参见本指南第 2 章第 3 节。

第 2 节　危险识别及场景选择

6.2.1　危险识别与失效场景选择

6.2.1.1　危险识别实施流程和具体分析方法可参见本指南第 2 章第 2 节，第 3 章，第 4 章和第 5 章。

6.2.1.2　对于危险识别结果中实施现有保护措施后仍为高风险的项，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 3 节　频率分析

6.3.1　历史数据

6.3.1.1　历史数据可使用以下数据来源：

(1) 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。

(2) 业主推荐的其他数据库。

(3) 其他数据来源③。

6.3.1.2　使用历史数据应当注意其数据源的适用性，必要时可考虑采用科学的数据处理方法进行概率模型验证。

6.3.2　故障树分析

6.3.2.1　故障树分析方法通常是基于每个组件的失效频率来量化顶层事件发生的频率。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。

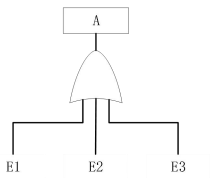
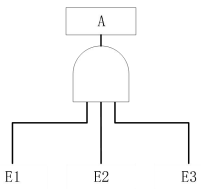
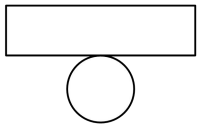
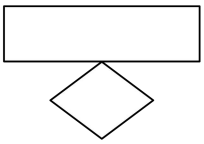
6.3.2.2　故障树的建立通常采用门到门（gate-by-gate）的方法，其可量化故障树中的所有中间

---

③ 美国国家可再生能源实验室、马里兰大学以及其他氢能利益相关者合作开展的 HyCReD 项目；美国能源部 H_2 Tools Lessons Learned 数据库；欧盟的 HySafe 项目以及欧洲委员会联合研究中心 Hydrogen Incidents and Accidents Database 项目数据库；美国化学工程师协会的 Center for Hydrogen Safety 项目数据库；桑迪亚国家实验室的氢失效和事故数据库等。

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本章表 6.3.2.2 所示。

故障树分析常用符号表 **表** 6.3.2.2

	符号	描述
逻辑门	或-门 	或－门表示只要有任意一个输入事件E_i发生，顶事件 A 就会发生
	与-门 	与－门表示只有所有输入事件E_i同时发生，顶事件 A 才会发生
输入事件	基础事件 	基础事件表示不需要进一步细分失效原因的基本设备失效
	未探明事件 	未探明事件表示由于缺乏信息或者后果不重要不需要进一步分析的事件

6.3.2.3　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。这些事件被称作共因失效（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。

6.3.2.4　以燃料电池氢泄漏事件为例，其故障树分析示例可参见本章图 6.3.2.4。

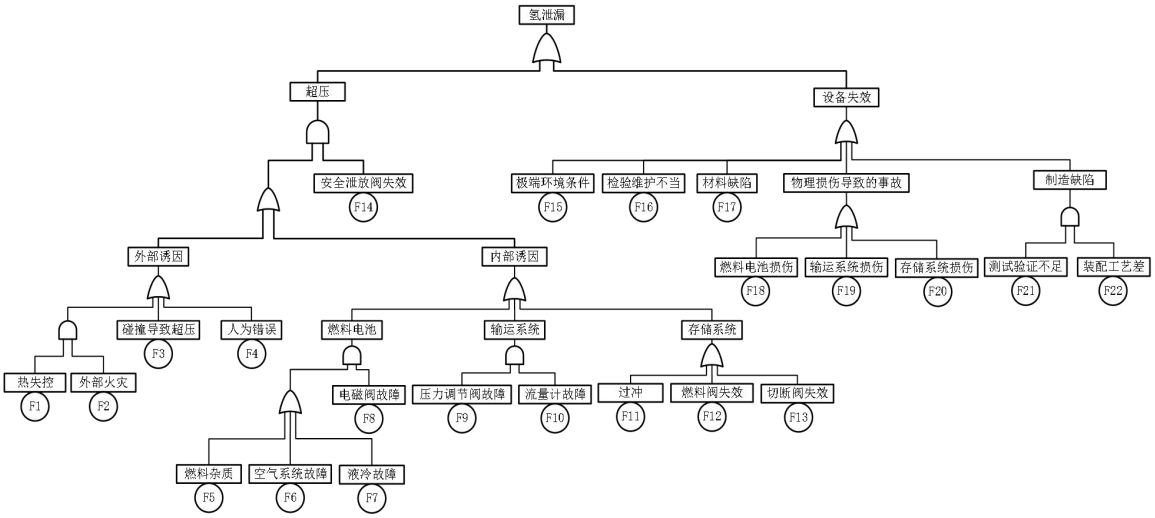


图 6.3.2.4 燃料电池氢泄漏故障树示例

6.3.2.5　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，其应用原则如本章表 6.3.2.5 所示。

频率与概率相结合的应用原则表　　**表** 6.3.2.5

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

6.3.2.6　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；

$P(Bi)$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：

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

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

$$\text{与门：} P(A) = P(B_1) \times P(B_2)$$

6.3.3　事件树分析

6.3.3.1　事件树可用于分析一个事故的初始触发事件如何沿着不同路径发展，最终导致多种可能后果。

6.3.3.2　确定分析目标和初始事件

明确风险评估目标：在开始事件树分析前，首先需要明确评估的目标是什么，如评估某个系统在发生故障时的安全性，或者分析特定事故（如氢燃料气瓶储存间发生高压氢气泄漏）的发展路径

及其后果。

确定初始事件：初始事件是整个事件树分析的起点，通常为某个意外或故障的发生（如设备失效、操作失误或外部冲击，气瓶密封垫片发生老化等）。这个事件触发了后续的一系列响应和防护措施。

6.3.3.3　构建事件树

绘制树状图结构：从初始事件出发，绘制一个自顶向下的树状图，每个分支代表一个关键的转折点。每个节点表示在某个特定时刻可能发生的事件，如安全系统是否按预期工作、紧急措施是否及时启动等。

分支节点设置：常用二元分支（正常/异常或点燃/未点燃等），但在实际应用中，也可根据需要设置多分支。

逻辑顺序和时间轴：事件树的分支应按照事故发展的时间顺序排列，体现事故从初始事件到最终结果的因果链条。确保每个分支节点都与系统的物理或管理流程相符。

6.3.3.4　以高压氢气瓶泄漏事件为例，其事件树分析示例可参见本章图 6.3.3.4。

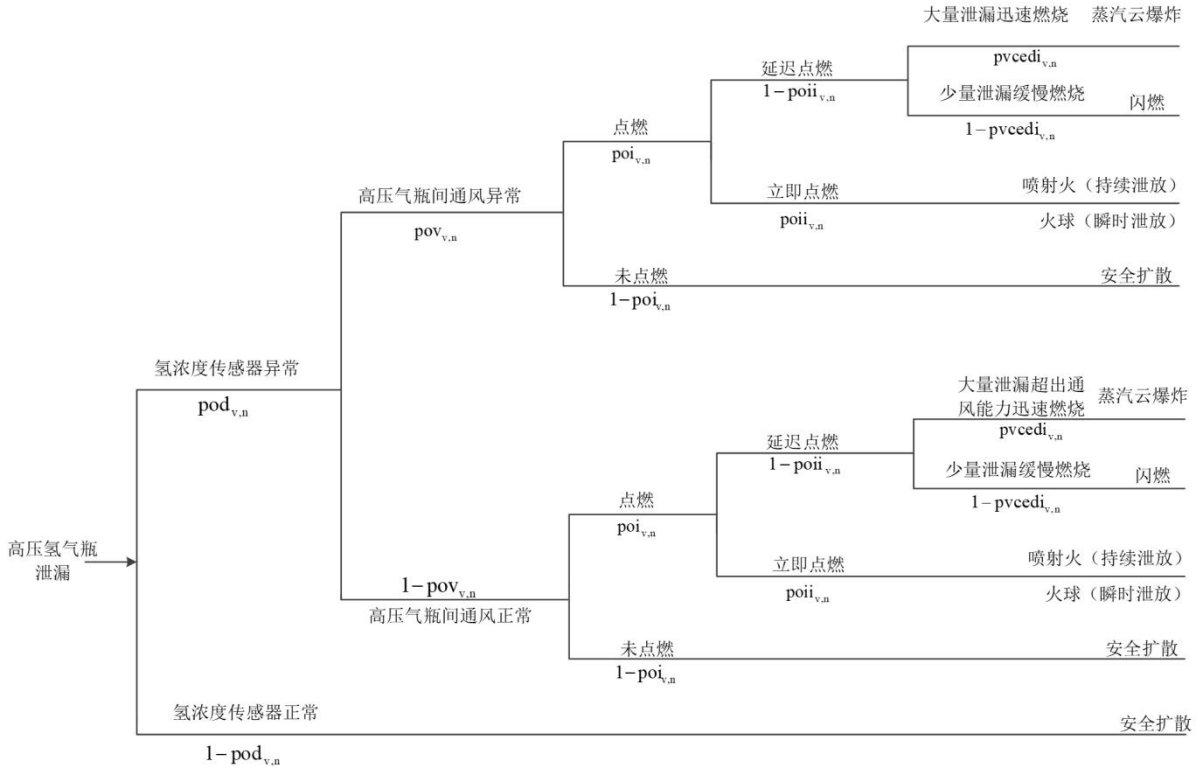


图 6.3.3.4 **高压氢气瓶氢泄漏事件树示例**

6.3.3.5　事件树量化分析

(1) 分支节点分配概率：根据历史数据、设备故障率、专家经验或实验数据，为每个关键事件节点分配一个发生概率。例如，某氢气浓度传感器的失效概率可能为0.02，而成功探测到的概率为0.98（上图中$pod_{v,n}$等标识均为对应的概率）。

(2) 计算路径概率：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。

第 4 节　后果分析

6.4.1　氢事故灾害后果类型

6.4.1.1　氢事故通用灾害后果类型

(1) 泄漏

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、爆炸等各种灾害事件；

② 典型的氢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。

(2) 扩散

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；

② 液氢/氢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。

(3) 爆炸

爆炸在专业标准④中分为爆燃和爆轰。当氢气/液氢蒸气/储氢物质粉尘与空气混合后，被点燃发生亚音速燃烧，通常被称为爆燃。爆燃的火焰通过热传导和对流传播，速度较慢（通常 1~100 m/s，低于音速）。当可燃物与空气混合被点燃后，由于存在某些特殊原因或条件，火焰加速传播，发生超音速燃烧，形成强烈的冲击波，通常被称为爆轰。火焰传播速度极快（可达 1500 m/s 或更高，远超音速）。在实际事故中，90%以上的“爆炸”其实是爆燃（亚音速）。

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，如储罐内或船舶围蔽/半围蔽处所内。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。

6.4.1.2　高压储氢灾害后果类型

(1) 喷射火（或火炬）：加压氢气泄漏时形成射流，在泄漏口处被点燃，由此形成喷射火。射流

---

④ NFPA68 *Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting* 和 CCPS *Guidelines for Hazard Evaluation* 等标准中明确区分 Deflagration（爆燃） 和 Detonation（爆轰），前者亚音速，后者超音速。

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。

(2) 闪火：在不造成超压的情况下可燃气体燃烧时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。

(3) 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。

6.4.1.3 液态储氢灾害后果类型

(1) 池火：液氢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

(2) 快速相变（RPT）：当泄漏的低温液体接触到水时，会迅速且剧烈地蒸发，这一过程被称为快速相变（Rapid Phase Transition，RPT）现象。RPT现象可能引发物理性爆炸（非燃烧性），并产生过压冲击波。

(3) 闪蒸：液氢从高压环境泄漏至常压/低压环境，或低温液氢接触常温物体表面时，因压力骤降、温度相对过热，发生瞬间急剧部分汽化的物理现象。该过程会形成包含低温液体与氢气的两相云团，并显著影响氢气扩散距离及低温危险区域的范围。

(4) 空气冷凝：液氢与空气接触后，空气中的水蒸气，二氧化碳和其他杂质遇冷冷凝固化，固体杂质可能堵塞管路、过滤器、阀门，导致保护装置失效。固体氧颗粒可能会导致系统爆炸着火。

(5) 富氧环境：液氢或冷量泄漏后，储罐周围空气中的氮气会冷凝形成富氧环境。

6.4.1.4 金属氢化物储氢灾害后果类型

(1) 粉尘爆炸：储氢合金在微粉化的过程中如果直接将合金粉末或者其氢化物暴露在空气中，会有粉尘爆炸的危险。在合金粉体爆炸实验过程中发现粉体半径越小，爆炸的可能性越大，爆炸产生的压力也越大。

(2) 超压失效：固态储氢系统超温时系统中的氢气压力可能急剧上升，导致承压失效。

6.4.2 后果计算

6.4.2.1 泄漏计算模型

(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。

(2) 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，可参考本章表6.4.2.1进行选取。

基于孔径的氢设备泄漏尺寸定义示例 **表** 6.4.2.1

设备	尺寸
管道	若 D≤100 mm，则典型泄漏尺寸为 $0.01D^2(mm^2)$ 若 D>100 mm，则典型泄漏尺寸为 100 mm^2
法兰	垫片破裂：$\pi Dt/4$
阀门	使用螺栓紧固时螺栓失效：螺栓面积=$\pi DBt/4$
软管	全口径破裂：$\pi D^2/4$
管接头和螺纹连接	全口径破裂：$\pi D^2/4$
表中 D 为管道直径，t 为垫片厚度，DB 为螺栓直径	

(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。

(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⑤。

⑤ 如荷兰应用科学研究组织（TNO）*Methods for the calculation of physical effects ‘Yellow Book’*、GB/T37243-2019《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》等。

6.4.2.2　扩散计算模型

(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。

(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⑤。

6.4.2.3　喷射火计算模型

(1) 喷射火计算可参见公认标准⑤。

(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。

6.4.2.4　池火计算模型

(1) 池火计算主要涉及液池半径、燃烧速率和热辐射等参数，具体计算可参见公认标准⑤。

(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。

6.4.2.5　闪火计算模型

闪火具体计算可参见公认标准⑤，还可采用计算流体动力学（CFD）进行预测。

6.4.2.6　火球计算模型

火球计算模型可参见公认标准⑤，还可采用计算流体动力学（CFD）进行预测。

6.4.2.7　爆炸计算模型

爆炸计算模型可参见公认标准⑤，还可采用计算流体动力学（CFD）进行预测。

6.4.2.8　采用计算软件进行后果分析时，应采用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定性和置信度。

6.4.3　灾害接受衡准

6.4.3.1　灾害接受衡准可参考本章 6.4.3.2~6.4.3.7 条所列衡准。

6.4.3.2　氢气扩散浓度接受准则可参考本章表 6.4.3.2 的规定。

氢气扩散浓度的接受准则　　**表** 6.4.3.2

氢气扩散	体积浓度	备注
	2%	氢气燃烧下限的 50%

6.4.3.3　火灾热辐射接受准则可参考本章表 6.4.3.3 的规定。

火灾热辐射接受准则　　**表** 6.4.3.3

热辐射强度最大值 ($kW/m^{2)}$)	热辐射剂量最大值 ($(kW/m^2)^{4/3} \cdot s$)	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 1 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）。

注：热辐射剂量最大值为累计热辐射剂量，计算公式为 $Q=\int_0^t Q^{4/3}dt$，为热通量的时间积分（按照 4/3 次方加权）。

6.4.3.4　爆炸冲击波接受准则可参考本章表 6.4.3.4 的规定。

爆炸冲击波的接受准则　　**表** 6.4.3.4

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

6.4.3.5　人员热辐射死亡概率

(1) 火球、池火及喷射火的死亡概率值可按下式计算：

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

式中：P_r——热辐射暴露下的死亡概率值；

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本章表6.4.3.5。

不同热辐射强度造成的人员死亡概率　　**表** 6.4.3.5

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	—

6.4.3.6　闪火和爆炸超压人员死亡概率

闪火的火焰区域为氢气在燃烧下限点燃时的范围。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。

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。

6.4.3.7　氧/氢浓度窒息衡准

窒息主要考虑氢气进入空气后导致氧浓度降低带来的影响，氧/氢浓度窒息准则参见本章表6.4.3.7。

氧/氢浓度窒息准则　　**表** 6.4.3.7

氧浓度	氢浓度	状况	来源
8%	62%	极短时间内死亡	国际海事组织（IMO）《船舶安全手册》

第 5 节　风险评价

6.5.1　计算网格

6.5.1.1　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。

6.5.1.2　网格单元内的人口密度假定为常数。

6.5.1.3　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。

6.5.2　个人风险值计算

6.5.2.1　个人风险计算程序见本章图 6.5.2.1，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。

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

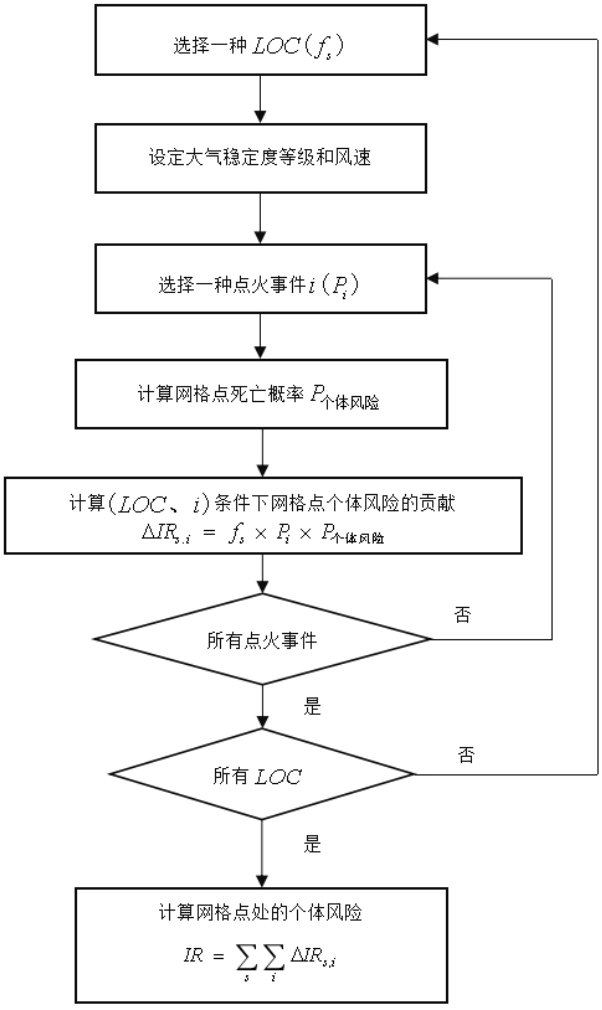


图 6.5.2.1　个人风险计算程序

6.5.3　社会风险值计算

6.5.3.1　社会风险计算程序见本章图 6.5.3.1，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*Pi*。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$P_{社会风险}$；

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

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

(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：

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

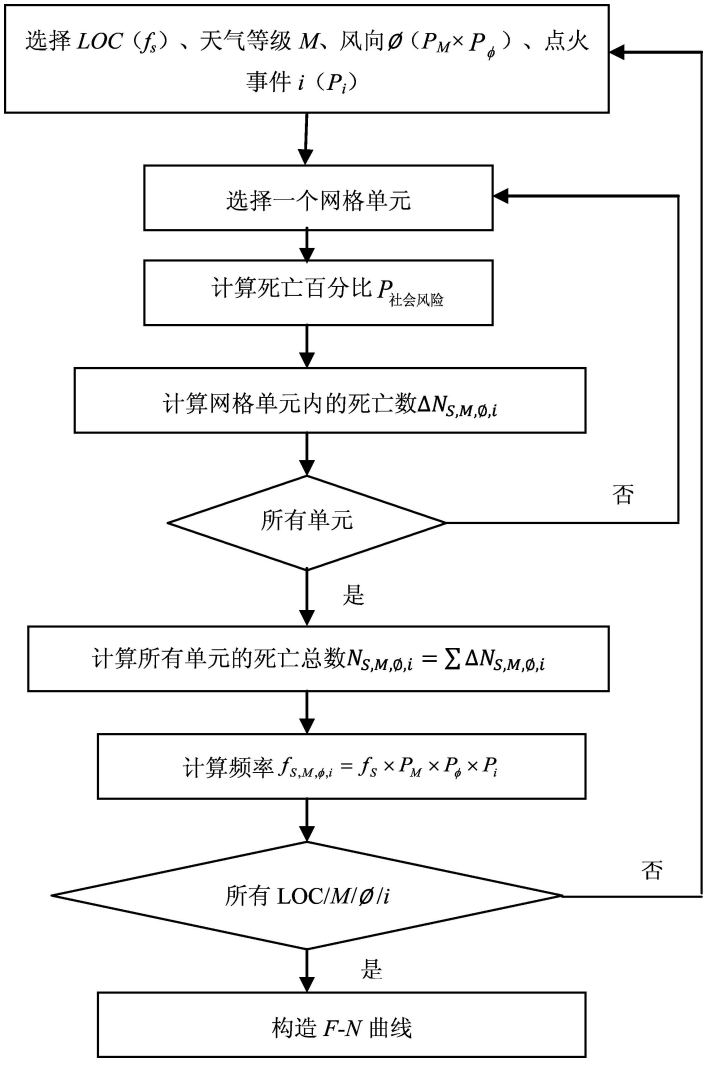


图 6.5.3.1 社会风险计算程序

6.5.4 风险可接受准则

6.5.4.1 一般要求

(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。

(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，见本章图6.5.4.1。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。

(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，可使用本章6.5.4.2、6.5.4.3给出的风险接受准则。

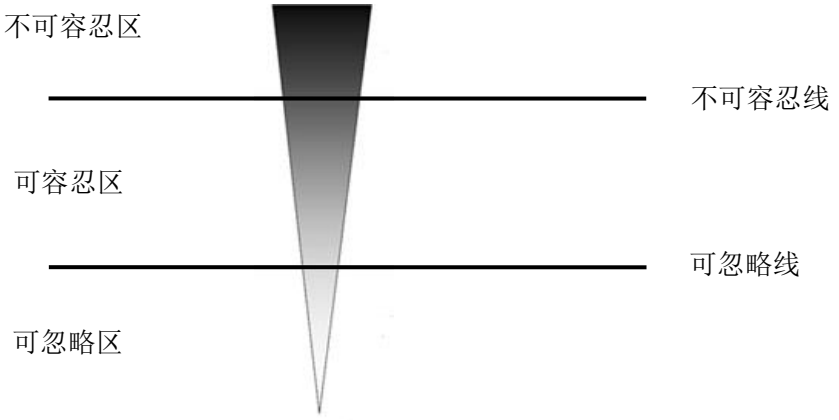


图 6.5.4.1　ALARP 原则

(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。

6.5.4.2　个人风险接受准则可使用表 6.5.4.2（1）、6.5.4.2（2）或 6.5.4.2（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[⑥]　　**表 6.5.4.2（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）。
$IR \leq 3x10^{-7}$	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[⑦]　　**表 6.5.4.2（2）**

防护目标	个人可接受风险标准（概率值）	
	新建装置（/年）≤	在役装置（/年）≤

⑥源自中国船级社《油气定量风险评估指南》

⑦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）》

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≤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≤人数＜100 人）：办公场所、商场、饭店、娱乐场所等。	3×10^{-6}	1×10^{-5}
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⑧　　**表 6.5.4.2（3）**

防护目标		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

6.5.4.3　社会风险接受准则应符合本章图 6.5.4.3 中的规定。

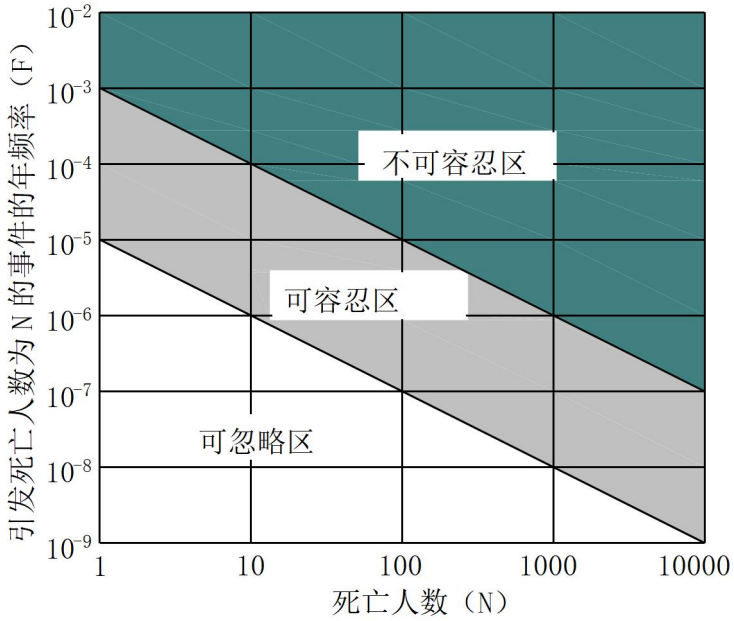


图 6.5.4.3 社会风险（SR）可容许标准

第 6 节　典型场景的 QRA 分析

6.6.1　船舶涉氢处所氢气泄漏场景扩散、火灾和爆炸分析

6.6.1.1　对于涉氢处所的氢泄漏扩散分析，所需图纸资料至少应包含船舶总布置图、涉氢处所

⑧ 源自《综合安全评估指南》（MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2）

布置图、涉氢处所通风布置图、氢系统工艺原理图、氢系统设备管路及附件清单（包括尺寸）等。如进行火灾和爆炸分析，还应提供涉氢处所的防火分隔布置图。氢泄漏后的扩散、火灾和爆炸分析可参见附录 3。应考虑阀件、管路以及燃料电池本身等涉氢设备的泄漏场景。

6.6.1.2　如经危险识别确定存在人员窒息风险，还应对人员窒息损伤风险进行量化分析。

6.6.1.3　扩散、火灾和爆炸分析的事故场景应考虑不同的涉氢处所、不同的设备/管路/附件尺寸以及不同的设备/管路/附件工作压力。应按照实际设计设置处所的通风型式和通风量。

6.6.1.4　燃料电池处所的扩散、火灾和爆炸分析应考虑燃料电池、管路、阀件、滤器、压力变送器等的泄漏场景。储氢处所的扩散、火灾和爆炸分析应考虑储氢容器、管路、阀件、滤器、压力变送器等的泄漏场景。

6.6.1.5　可根据扩散和火灾分析结果对涉氢处所内可燃气体探测器和火灾探测器进行优化布置。

6.6.1.6　应根据涉氢处所内氢系统及其安全监控系统设计确定定量计算所需的氢泄漏持续时间。

6.6.1.7　应根据扩散、火灾和爆炸分析的结果，采取相关措施降低事故风险水平。

附录 1 危险识别工作记录表

1.1 HAZID 分析记录表

节点 x：_____

序号	引导词	场景	起因	后果	初始风险			既有安全措施	剩余风险			建议措施	剩余风险			备注
					S	L	R		S	L	R		S	L	R	

注：S—事故后果严重性；L—事故发生可能性；R—风险等级

1.2 HAZOP 分析记录表

节点 x：_____

序号	要素	引导词	偏差	起因	后果	初始风险			既有安全措施	剩余风险			建议措施	剩余风险			备注
						S	L	R		S	L	R		S	L	R	

注：S—事故后果严重性；L—事故发生可能性；R—风险等级

1.3 FMEA 分析记录表

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严重度指数	发生概率等级	风险等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	严重度指数	发生概率等级	风险等级	备注
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响										

附录 2　危险识别示例

表中部分内容省略，仅作说明使用。

2.1　燃料电池处所 HAZID 分析记录表示例

节点 1：燃料电池处所

序号	引导词	起因（事故/事件）	后果	既有安全措施	初始风险			建议措施	剩余风险			负责人
					S	L	R		S	L	R	
1	燃料电池模块失效	1、空气流量/压力异常 2、机械通风系统流量异常 3、冷却水入口温度过高 4、空气中、冷却水内含杂质过多 5、系统零部件失效 6、内部氢气泄漏 7、控制系统故障	1、排气氢气浓度过高 2、欠压 3、功率不足 4、冷却水管路堵塞，影响电池模块冷却效果 5、影响全船电力系统运行	1、快速切断； 2、已设计多台燃料电池模块，并设置了锂电池组 3、电压/电流/温度监测报警 4、冷却水管设有滤器 5、经过产品检验	1	D	M	1、首制模拟单模块故障试验	1	D	M	
2	泄漏/破裂	1、氢气管路/阀件泄漏 2、燃料电池模块密封失效 3、制造缺陷 4、人为因素/操作不当	1、影响船舶电力系统运行 2、可能导致火灾爆炸	1、氢气探测器 2、安全操作规程 3、经过产品检验 4、设有两个独立燃料电池处所 5、舱室内设有机械通风 6、联锁切断燃料供应 7、供气管路为双壁管 8、燃料电池模块采用气密设计	2	C	M	1、通风建议采用下面进风上面出风设计 2、加强人员操作技能培训，制定相关操作制度	2	C	M	
3	火灾/	1、外部火灾	1、设备损伤	1、火灾探测	3	B	M	1、燃料电模块局部爆炸数	3	B	M	

	爆炸	2、泄漏的氢气被点火源点燃（燃料电池） 3、人为因素/操作不当	2、人员伤亡 3、船舶电力系统运行受影响	2、舱室强度足以承受爆炸超压带来的影响 3、A60 防火分隔 4、采用固定式燃料电池设计标准，满足舱室内运行的环境条件 5、满足国际海事组织对燃料电池舱室的规定 6、设置 CO2 灭火系统				值模拟 2、充分评估处理火灾方式 3、人员培训及应急计划 4、燃料电池处所考虑设置防爆泄压措施				

2.2 靠泊及系泊阶段 HAZID 分析记录表示例

节点 1：靠泊及系泊阶段

序号	引导词	场景	起因	后果	既有安全措施	初始风险			建议措施	剩余风险			负责人
						S	L	R		S	L	R	
1	缆绳失效	船舶与码头之间缆绳失效	1、绞缆机失效 2、系缆桩损坏 3、缆绳选型不当 4、系缆方案不当 5、系缆操作不当 6、恶劣天气	1、造成船舶较大相对运动或漂移，导致受注船/加注船结构受损 2、影响加氢作业 3、人员受伤	1、船舶配有备用缆绳 2、对绞缆机、系缆桩及缆绳进行日常检查和维护保养	3	A	L	1、密切关注当地气象预报，在允许的作业条件下进行靠泊、系泊作业 2、评估系泊方案的可靠性	3	A	L	
2	碰撞	船舶与码头发生碰撞	1、操纵控制不足 2、船舶未能抵靠码头护舷 3、恶劣天气	1、船舶结构受损 2、码头设备损坏 3、人员受伤	1、码头已设置护舷	3	B	M	1、密切关注当地气象预报，在允许的作业条件下进行靠泊作业 2、加强船员实操训练，严格船员培训考试	3	A	L	

序号	引导词	场景	起因	后果	既有安全措施	初始风险			建议措施	剩余风险			负责人
						S	L	R		S	L	R	
									3、加强恶劣水文、气象信息跟踪与预警				

2.3 高压氢气供气和加注 HAZOP 分析记录表示例

节点 1：高压氢气供气

序号	要素	引导词	偏差	原因	后果	现有安全措施	初始风险			建议安全措施	剩余风险			负责人
							S	L	R		S	L	R	
1	流量	无	氢气瓶组至减压阀总成流量无	1、阀门故障关闭	1、无法供气	1、设有两套供气管路	1	B	L		1	B	L	
2		小	氢气瓶组至减压阀总成流量小	1、减压阀故障 2、传感器故障 3、氢气瓶压力低 4、滤器堵塞	1、供气量减少，影响航程	无	1	B	L	1、定期清洗或更换滤器	1	B	L	
3		大	氢气瓶组至减压阀总成流量大	1、传感器故障 2、氢气泄漏 3、氢气排空	1、氢气泄漏 2、大量氢气泄放 3、无法正常供气	1、管路设有安全阀，并与氢气排气总管相连 2、氢气排放总管设有阻火器 3、可燃气体探测报警 4、氢气瓶口设有过流阀 5、氢气瓶口设有限流阀	3	B	M	1、每个瓶组的高压供气管路汇管上增设限流阀	3	B	M	
4	压力	无	氢气瓶组至减压阀总成压力无	1、阀门故障关闭	1、无法供气	1、设有两套供气管路	1	B	L		1	B	L	

5		低	氢气瓶组至减压阀总成压力低	1、排空管路阀门故障开启 2、传感器故障 3、氢气瓶压力低 4、过滤器堵塞	1、供气量减少，影响航程	1、设有压力表	1	B	L		1	B	L	
6	温度	低	氢气瓶组至减压阀总成温度低	1、氢气快速排空	1、管路结霜	无	1	C	L		1	C	L	
7		高	氢气瓶组至减压阀总成温度高	1、氢气瓶内气源温度高	1、影响燃料电池效率	1、气瓶内设有温度传感器 2、气瓶口设有安全泄压装置（TPRD）	1	B	L		1	B	L	

节点 2：高压氢气加注

序号	要素	引导词	偏差	原因	后果	现有安全措施	初始风险			建议安全措施	剩余风险			负责人
							S	L	R		S	L	R	
1	流量	无	加注站至氢气瓶组无流量	1、阀门故障关闭 2、瓶口组合阀故障 3、加氢机故障	1、无法加注 2、加注软管超压	1、加氢机低压报警 2、加注管路设有安全阀	1	B	L		1	B	L	
2		小	加注站至氢气瓶组流量小	1、排空管件阀件发生内漏 2、传感器故障 3、压缩机故障 4、氢气瓶压力高 5、滤器堵塞	1、加注时间延长	1、加注管路及氢气瓶设有压力监测 2、加注站及储氢瓶间设有可燃气体探测 3、加氢机设有流量计	1	B	L	1、压力表（PG-01/02-01）移至过滤器前 2、定期维护过滤器	1	B	L	
3		大	加注站至氢气瓶组流量大	1、传感器故障 2、平衡法加注时，下游阀件非正常开启	1、管路超压 2、大量氢气泄放	1、管路设有安全阀，并与氢气排气总管相连 2、高压报警	2	B	L	1、加注作业前检查表	2	B	L	

						3、储氢瓶上设有安全泄压装置（TPRD） 4、氢气排放总管设有阻火器								
4		逆流	加注站至氢气瓶组流量反向	1、压缩机管路破裂	1、高压氢气回流泄漏	1、压缩机端设止回阀 2、氢气加注管路设止回阀	2	A	L		2	A	L	
5	压力	无	加注站至氢气瓶组无压力	1、阀门故障关闭 2、瓶口组合阀故障 3、加氢机故障	1、无法加注 2、加注软管超压	1、加氢机低压报警 2、加注管路设有安全阀	1	B	L		1	B	L	
6		低	加注站至氢气瓶组压力过小	1、排空管件阀件发生内漏 2、传感器故障 3、压缩机故障 4、滤器堵塞	1、加注时间延长	1、加注管路及氢气瓶设有压力监测 2、加注站及储氢瓶间设有可燃气体探测	1	B	L	1、压力表（PG-01/02-01）移至过滤器前 2、定期维护过滤器	1	B	L	
7		高	加注站至氢气瓶组压力过大	1、传感器故障 3、过滤器堵塞 4、加注温度过高	1、管路超压 2、大量氢气泄放	1、管路设有安全阀，并与氢气排气总管相连 2、高压报警 3、储氢瓶上设有安全泄压装置 4、氢气排放总管设有阻火器	2	B	L		2	B	L	
8		波动	加注站至氢气瓶组压力波动	1、压缩机故障	1、加注管路可能产生剧烈震动，影响加注软管固定 2、对仪表产生冲击	1、加注软管充分固定	1	C	L	1、压缩机后设缓冲罐	1	C	L	
9	温	高	加注站至氢	1、加注速率过快	1、加注量不足	1、储氢瓶上设有安全泄	2	C	M	1、加氢站侧考虑增设冷	2	B	L	

	度		气瓶组温度过高	2、环境温度过高	2、安全泄压装置释放 3、燃料电池可能无法启动（燃料电池前阀门可能无法承受高温） 4、长时间高温可能造成氢气瓶碳纤维材料损伤，影响使用寿命	压装置 2、氢气瓶温度监测 3、加氢机流量监测				却器 2、确定合适的加注速率				

2.4 低温质子交换膜燃料电池 FMEA 分析示例

2.4.1 低温质子交换膜燃料电池约定层次图

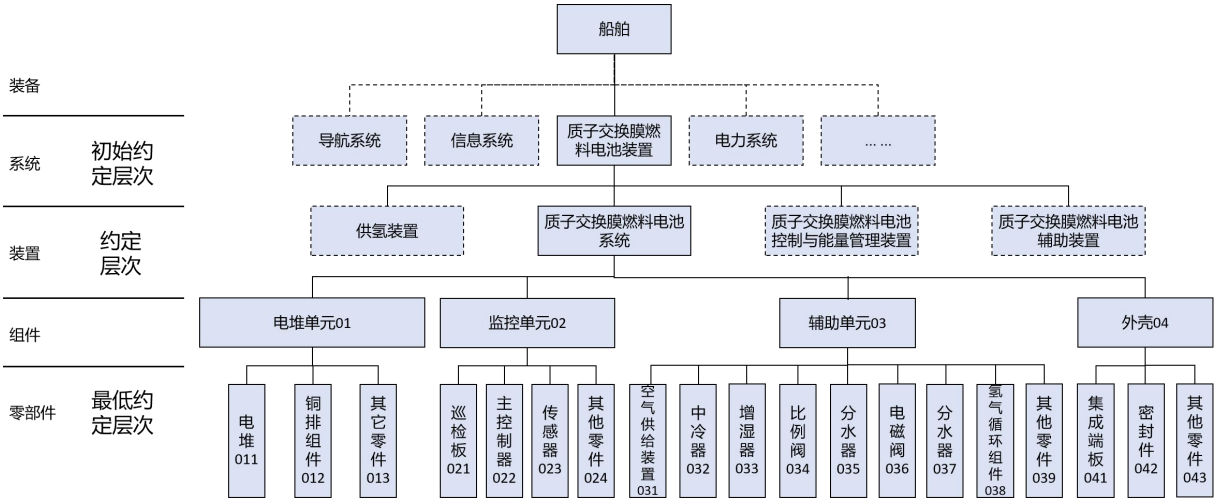


图 2.4.1 低温质子交换膜燃料电池约定层次图

2.4.2 质子交换膜燃料电池功能框图

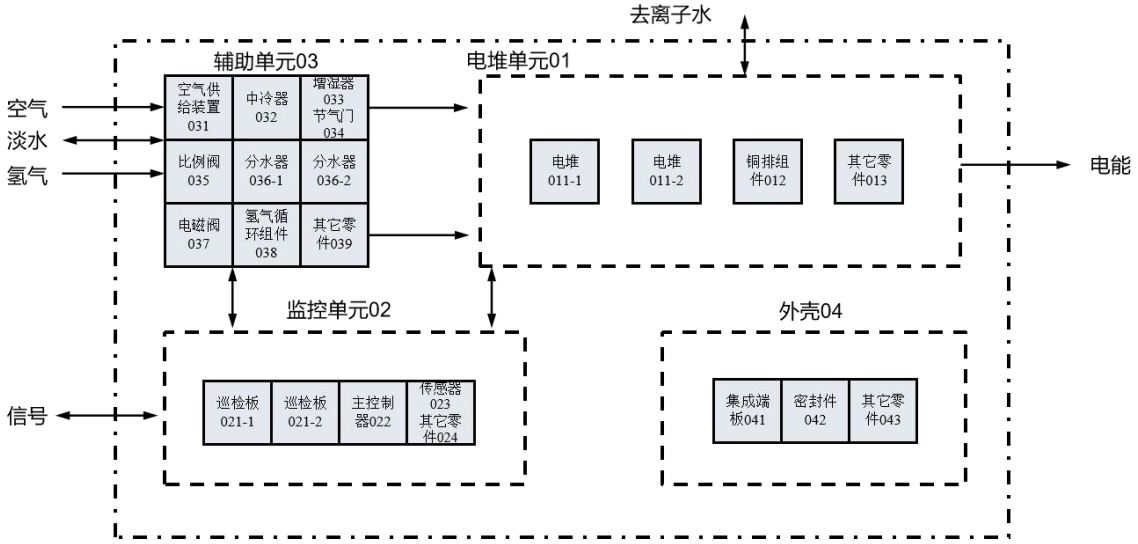


图 2.4.2 质子交换膜燃料电池功能框图

2.4.3 质子交换膜燃料电池可靠性框图

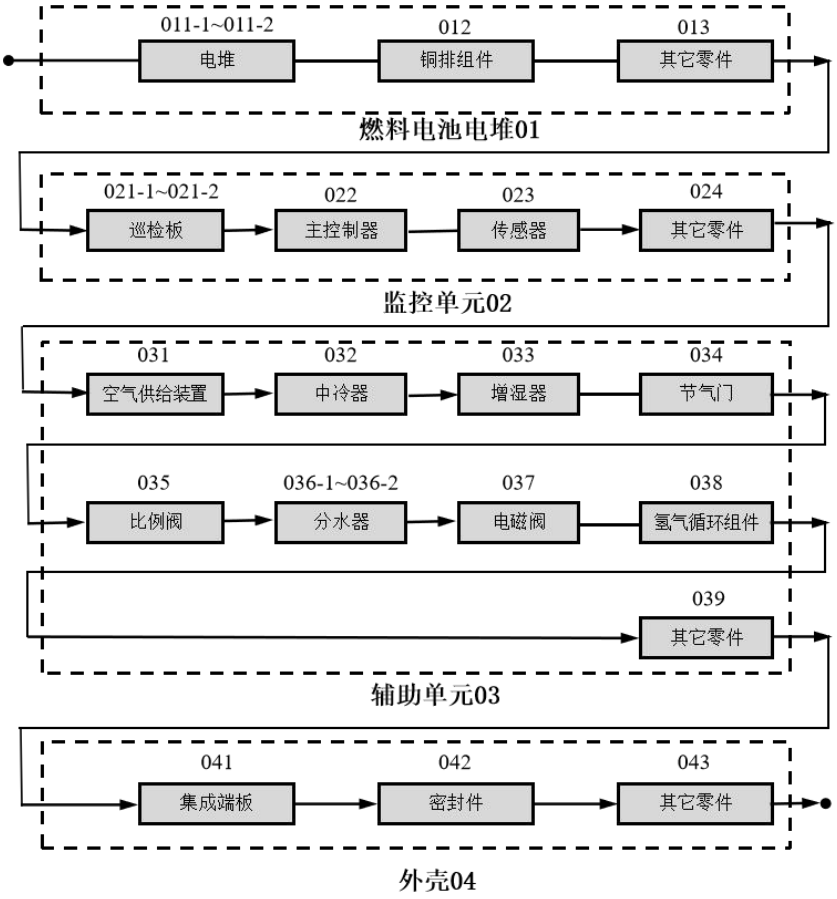


图 2.4.3 质子交换膜燃料电池基本可靠性框图

2.4.4 低温质子交换膜燃料电池 FMEA 分析记录表示例

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严重度指数	发生概率等级	风险等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	严重度指数	发生概率等级	风险等级	备注
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响										
011	电堆	氢氧反应输出电能	0111	单电压低	供气不足或电堆内部水淹	运行阶段	单电池寿命减少	系统降载	燃料电池系统启动备用系统或增加蓄电池输出	1	2	3	比较相邻两节电池电压	优化电池水管理	设置降载运行	1	1	2	
			0112	氢空串气	膜电极出现针孔或开裂	运行阶段	电堆丧失功能	系统停机	系统维修	2	2	4	传感器检测	增强膜电极的强度或优化装配工艺	增设膜电极强度测试及互窜测试	1	1	2	
			0113	泄漏	密封老化失效或装配力不够	运行阶段	反应气泄漏或冷却水泄漏	系统停机	系统维修	2	2	4	采用氮气记性外漏检测	优化密封设计及装配强度	适当拧紧紧固螺母	2	1	3	
			0114	高温	冷却水流量不足或散热装置失效	运行阶段	电堆高温损伤	系统停机	系统维修	2	2	4	传感器检测	优化控制策略	设置停机保护	1	1	2	
			0115	过	过载或短	运行阶	电堆反	系统	系统维修	2	2	4	传感器	优化控制	设置停机	1	1	2	

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严重度指数	发生概率等级	风险等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	严重度指数	发生概率等级	风险等级	备注
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响										
				电流	路	段	极	停机					检测	策略	保护				
012	铜牌组件	电流回路	0121	绝缘不足	绝缘老化	运行阶段	漏电	系统停机	系统维修	2	2	4	传感器测量	优化绝缘设计	提前维护	2	1	3	

2.5 固体氧化物燃料电池 FMEA 分析示例

2.5.1 固体氧化物燃料电池约定层次图

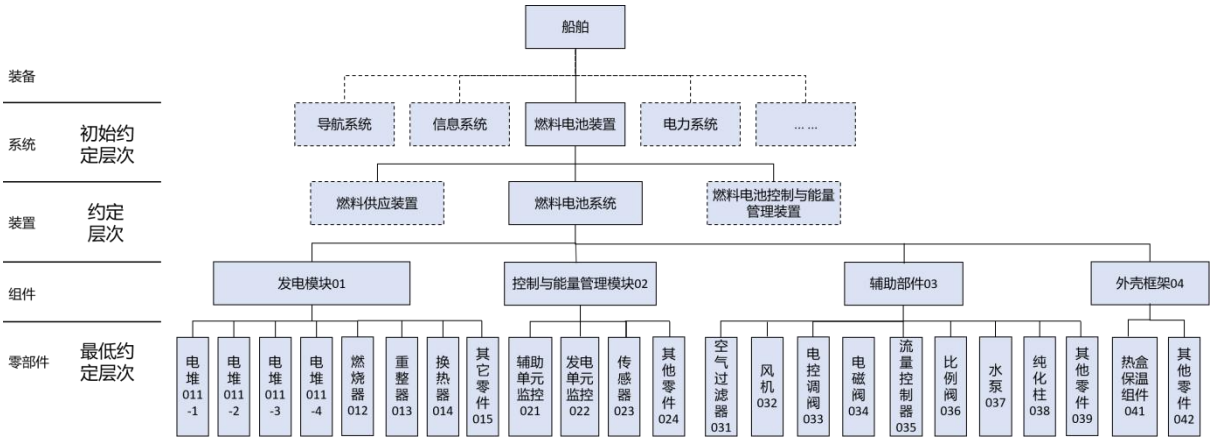


图 2.5.1 固体氧化物燃料电池约定层次图

2.5.2 固体氧化物燃料电池功能框图

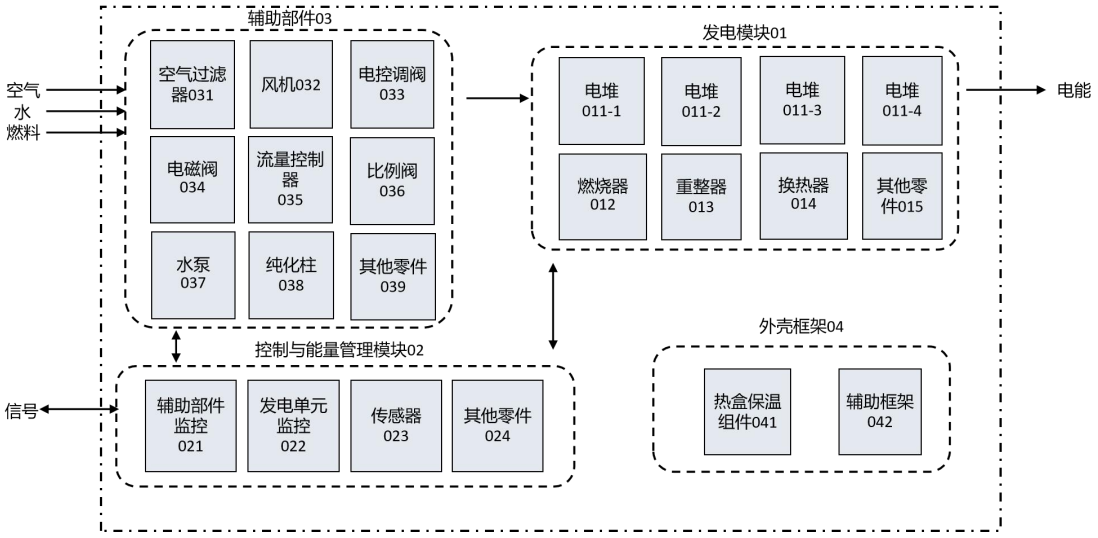


图 2.5.2 固体氧化物燃料电池功能框图

2.5.3 固体氧化物燃料电池可靠性框图

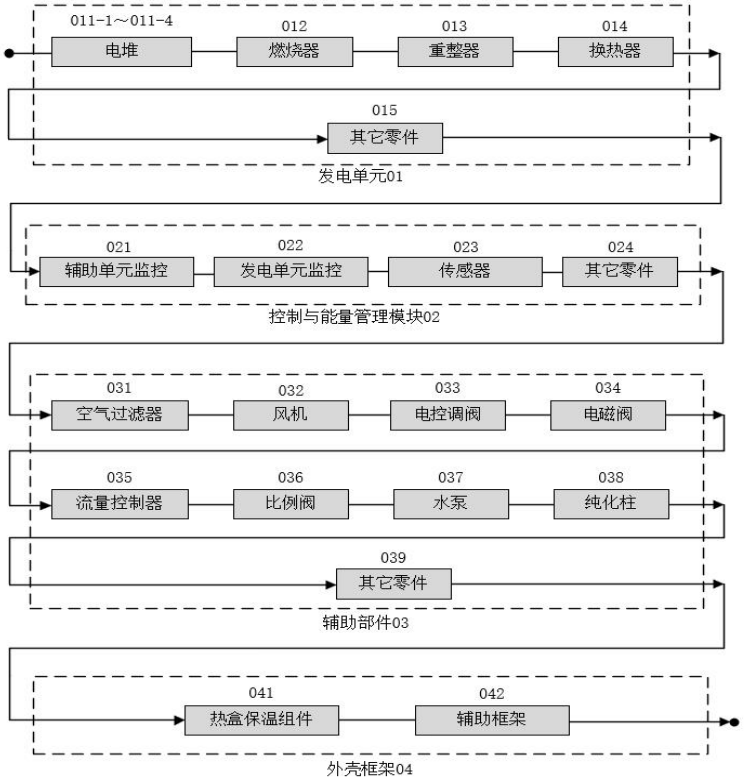


图 2.5.3 固体氧化物燃料电池基本可靠性框图

2.5.4 固体氧化物燃料电池 FMEA 分析记录表示例

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严重度指数	发生概率等级	风险等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	备注
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响							
011	电堆	燃气和空气反应输出电能	0111	未达到热备机状态	电堆漏气	运行阶段	电堆发电性能	系统停机	系统维修	3	2	4	电压在线检测	优化控制策略	设置停机保护	
			0112	功率初始无法加载至额定	电堆衰减	运行阶段	电堆发电性能	系统降载	系统维修	3	2	4	电压在线检测	优化控制策略	设置停机保护	
			0113	泄漏过大	密封老化失效	任务全阶段	燃气泄漏	系统停机	系统维修	3	2	4	采用氮气进行外漏检测	优化密封设计	设置停机保护	
012	燃烧器	消耗电堆尾排气体，提供热量	0121	无法启动	通讯故障、离子棒破损或变压器故障	任务全阶段	电堆模块无法启动	系统停机	系统维修	3	2	4	开机自检	选择高可靠性元器件	设置停机保护	

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严重度指数	发生概率等级	风险等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	备注
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响							
			0122	燃烧器超温	燃气量过大；空气量不足	任务全阶段		系统停机	系统维修	4	2	4	温度在线检测	优化控制策略	设置停机保护	
013	重整器	燃料重整转化	0131	重整效率下降	重整器积碳或重整催化剂老化	任务全阶段	电堆模块性能下降	系统降载	系统维修	4	2	4	压力在线检测	选择高可靠性元器件	设置降载保护	

2.6 航行场景下电力系统 FMEA 分析示例

2.6.1 航行场景下电力系统约定层次图

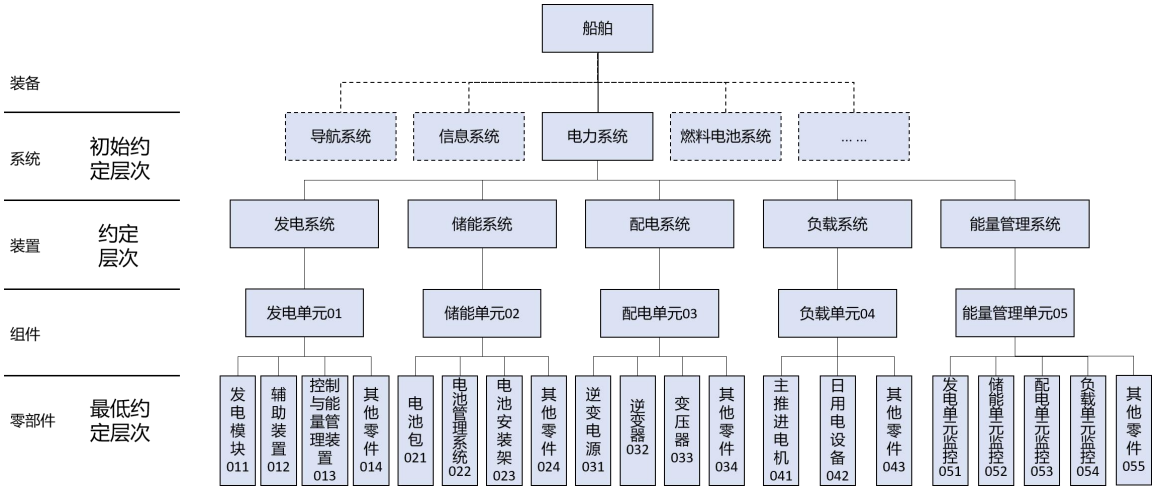


图 2.6.1 航行场景下电力系统约定层次图

2.6.2 航行场景下电力系统功能框图

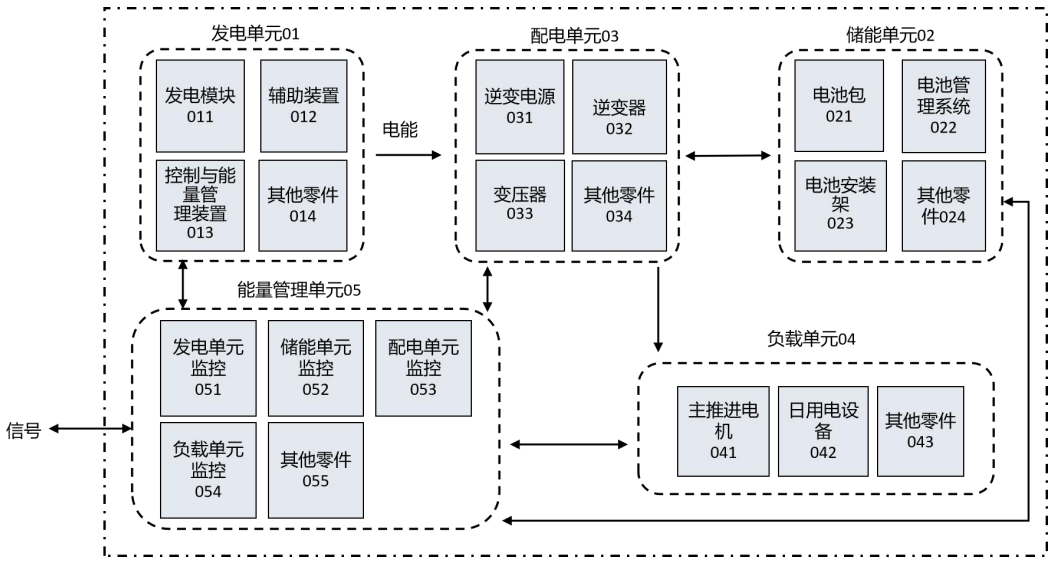


图 2.6.2 航行场景下电力系统功能框图

2.6.3 航行场景下电力系统可靠性框图

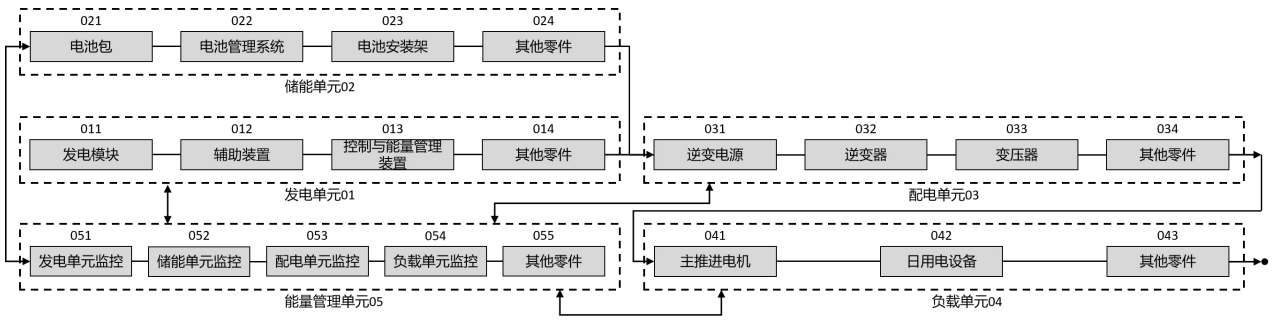


图 2.6.3 航行场景下电力系统基本可靠性框图

2.6.4 航行场景下电力系统 FMEA 分析记录表示例

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严重度指数	发生概率等级	风险等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	备注
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响							
011	发电模块	燃气和空气反应输出电能	0111	未达到热备机状态	发电模块漏气	运行阶段	发电模块发电性能	系统停机，无法提供电能	系统维修	3	2	4	电压在线检测	优化控制策略	1.设置停机保护； 2.通过储能系统供电	
			0112	功率初始无法加载至额定	发电模块衰减	运行阶段	发电模块发电性能	系统降载，无法提供电能	系统维修	3	2	4	电压在线检测	优化控制策略	1.设置停机保护； 2.通过储能系统供电	
			0113	泄漏过大	密封老化失效	任务全阶段	燃气泄漏	系统停机，无法提供电能	系统维修	3	2	4	采用氮气进行外漏检测	优化密封设计	1.设置停机保护； 2.通过储能系统供电	

代码	产品或功能标志	功能	故障模式		故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严重度指数	发生概率等级	风险等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施	备注
			识别号	模式			局部影响	高一层次影响	最终影响							
012	辅助装置	提供并维持发电模块必要的工作条件与环境	0121	关键设备功能失效	风机、阀件、泵等关键设备故障	任务全阶段	发电模块无法工作	系统停机，无法提供电能	系统维修	3	2	4	1.监控部件故障码； 2.传感器监测	选择高可靠性元器件	1.设置停机保护； 2.通过储能系统供电	
013	控制与能量管理装置	控制整个系统运行并管理电能的输出	0131	通讯故障	断线、松脱	任务全阶段	数据传输中断	系统停机，无法提供电能	系统维修	3	2	4	通信监控	接线工艺优化	1.设置停机保护； 2.通过储能系统供电	
			0132	控制失效	断线 元器件失效	任务全阶段	控制失效	系统停机，无法提供电能	系统维修	3	2	4	比对控制指令与执行件响应	优化控制策略	1.设置停机保护； 2.通过储能系统供电	

附录 3　涉氢处所氢泄漏扩散、火灾和爆炸分析示例

本示例仅用于演示分析方法，实际计算应结合船舶实际设计和可能的事故场景进行。

3.1　氢气泄漏扩散分析示例

（1）通风设置

通风进口、通风出口、通风型式及通风量根据实际设计确定。

（2）事故后果模拟及分析

选取高压氢（40MPa）发生 10mm 直径的圆孔泄漏为典型场景，泄漏点位于氢气瓶与供氢管路的连接接头位置。发生泄漏后不同时间点的可燃蒸气云见本附录图 3-1 和图 3-2。可燃蒸气云在 3.4s 内铺满整个储氢处所，处所净容积为 95m^3。

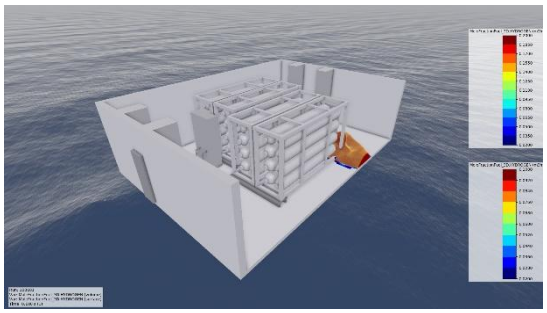


图 3.1-1 0.1s 时可燃蒸气云图（2%~20%）

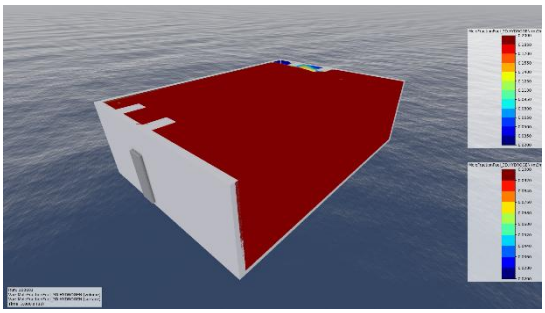


图 3.1-2 3s 时可燃蒸气云图（2%~20%）

（3）扩散后果分析

基于所有识别出的氢扩散事故场景模拟，储氢处所发生不同氢泄漏扩散的后果分析见本附录表 3.1。

储氢处所泄漏扩散后果量化数据表　　表 3.1

泄漏口径（mm）	压力（MPa）	可燃气云体积（m^3）
1	40	22
	2.5	0
10	40	95
	2.5	43

通过分析不同泄漏场景的氢泄漏过程可知，氢泄漏后能够及时探测到可燃蒸气的位置包括潜在泄漏点（氢气瓶阀和氢气瓶充装进口压力变送器处）、泄漏点正上方、通风出口处等，应在这些位置设置固定式可燃蒸气探测器，此外其他位置的顶部也有可燃蒸气云积聚的可能，可考虑增设探测器。

3.2　氢气泄漏火灾分析示例

（1）通风设置

通风进口、通风出口、通风型式及通风量根据实际设计确定。

（2）事故后果模拟及分析

高压氢（40MPa）发生 10mm 直径的圆孔泄漏场景下，泄漏点位于氢气瓶与供氢管路的连接接头位置，泄漏后即时点火发生火灾。发生氢火灾后不同时间点的热辐射云图见本附录图 3.2-1 和图 3.2-2。

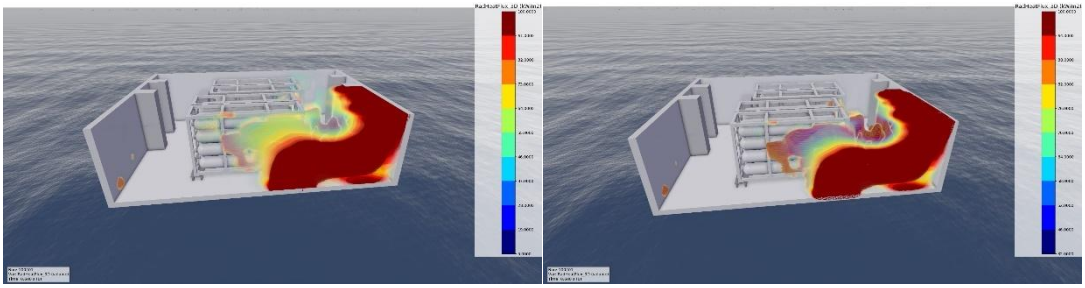


图 3.2-1 点火瞬间热辐射云图（左 5~100kW/m^2，右 32~100kW/m^2）

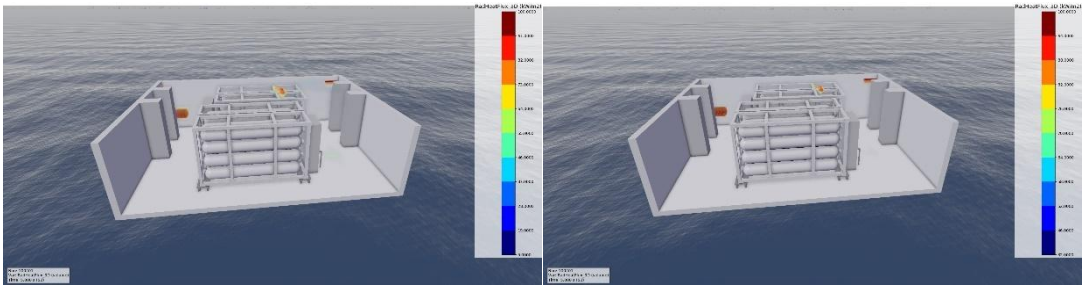


图 3.2-2 点火 5s 热辐射云图（左 5~100kW/m^2，右 32~100kW/m^2）

整个火灾过程最大热辐射约 498kW/m^2，以 5kW/m^2 为边界，热辐射范围最大约覆盖 40m^3 的体积，影响泄漏处附近区域底板和舷侧以及通风出口和通风入口之间的顶板。以 32kW/m^2 为边界，热辐射范围最大约覆盖 30m^3 的体积，影响泄漏处附近区域底板和舷侧以及通风出口和通风入口之间的顶板。

（3）火灾后果分析

基于所有识别出的氢火灾事故场景模拟，储氢处所发生不同氢火灾的后果分析见本附录表 3.2。

储氢处所火灾事故后果量化数据表　　表 3.2

泄漏口径（mm）	压力（MPa）	5kW/m^2 热辐射范围	32kW/m^2 热辐射范围
1	40	体积极小，影响到通风进口到通风出口之间的少部分顶板。	无影响。
10	40	影响体积 40m^3，影响泄漏处附近区域底板和舷侧以及通风出口和通风入口之间的顶板。	影响体积 30m^3，影响泄漏处附近区域底板和舷侧以及通风出口和通风入口之间的顶板。

火灾发生后影响的结构主要包括氢泄漏处（氢气瓶阀和氢气瓶充装进口压力变送器处）附近区域底板和舷侧以及通风出口和通风入口之间的顶板，但受氢气泄漏速率降低、舱内氧气持续消耗等因素的影响，火灾持续时间仅维持约 5s，对结构物造成的累计损伤有限。火灾发生后影响的人员活动区域主要为泄漏处附近和处所通风出口/进口所在区域附近。结合船舶储氢舱室结构特点、氢气扩散特性及船舶安全作业要求，建议针对性布设气体/火灾探测设备：在储氢设备潜在泄漏点位、管路接头、阀门等易泄漏区域重点设置气体探测设备，同时在储氢处所通风出风口、进风口等空气流通关键区域配套布设火灾探测设备，实现氢气泄漏及早期火情的全覆盖、无死角监测，提前预警泄漏燃爆风险，保障船舶储氢处所及周边区域作业安全。

3.3 氢气泄漏爆炸分析示例

（1）通风设置

通风进口和通风出口布置在处所顶部，通风进口设置自然进风。

（2）事故后果模拟及分析

高压氢（40MPa）发生 10mm 直径的圆孔泄漏场景下，泄漏点位于氢气瓶与供氢管路的连接接头位置，泄漏后延迟点火发生爆炸。发生氢爆炸后最大压力分布见本附录图 3.3。

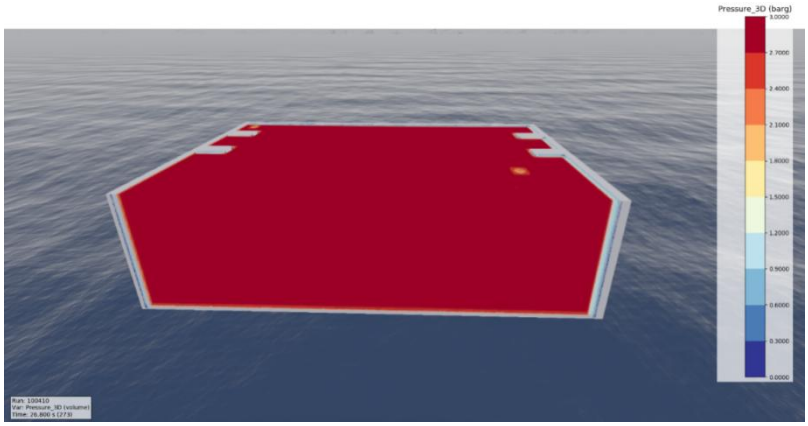


图 3.3 氢爆炸后储氢处所内最大压力分布（0.2-3bar）

氢泄漏扩散 3s 左右后，整个储氢处所已完全被可燃蒸气云覆盖，点火瞬间发生爆炸，爆炸发生后，处所内压力最大达到约 2.8bar。

（3）火灾后果分析

基于所有识别出的氢爆炸事故场景模拟，储氢处所发生不同氢爆炸的后果分析见本附录表 3.3。

储氢处所爆炸事故后果量化数据表　　表 3.3

泄漏口径（mm）	压力（MPa）	最大压力（bar）
10	40	2.8

考虑到最大超压值较大（>0.5Bar），建议处所进行防爆设计，科学布设泄爆装置，并考虑规避泄爆飞溅对舱外船体结构及人员造成的潜在损伤。

3.4 个人风险值计算示例

本案例选取本指南第 6 章 6.3.1.1 中的桑迪亚实验室的氢事故数据库。

（1）泄漏频率分析

基于设备和附件清单，结合氢事故数据库，计算不同设备和附件发生不同口径泄漏的频率，见本附录表 3.4-1。

储氢处所设备、管路及附件泄漏频率　　表 3.4-1

泄漏对象	累计泄漏频率（/年）		
	1%口径	10%口径	100%口径
氢气瓶瓶口阀	1.7×10^{-3}	8.0×10^{-4}	1.5×10^{-4}
氢气瓶瓶尾阀	1.7×10^{-3}	8.0×10^{-4}	1.5×10^{-4}

（2）事故频率分析

结合氢事故数据库，采用事件树分析法进行泄漏后发生灾害事故的频率分析，见本附录图 3.4-1。事故频率分析结果见本附录表 3.4-2。

储氢处所氢气泄漏事故频率分析结果表　　表 3.4-2

	说明	点火时间	输出	泄漏频率（/年）	点火概率	累计频率（/年）
爆炸	高压氢 10mm 孔径泄漏后延迟点火	延迟	压力	3.00×10^{-4}	0.027	8.1×10^{-6}
火灾	高压氢 10mm 孔径泄漏后即时点火	即时	热辐射	3.00×10^{-4}	0.053	1.6×10^{-5}
	高压氢 1mm 孔径泄漏后即时点火	即时	热辐射	1.60×10^{-3}	0.008	1.3×10^{-5}
扩散	高压氢 10mm 孔径泄漏扩散	—	浓度	3.00×10^{-4}	—	—

	高压氢 1mm 孔径泄漏扩散	—	浓度	1.60×10^{-3}	—	—



图 3.4-1 储氢处所内高压氢 10mm 直径圆孔泄漏事件树

（3）个人风险值计算

本案例选取本指南第 6 章表 6.5.4.2（3）作为个人风险可容许标准，按照新船最大可容忍的死亡风险，设定个人风险的可容许频率为 10^{-4}/年。

① 典型事件树场景下储氢处所的事故影响区域分析

以储氢处所内高压管路发生 10mm 直径圆孔氢泄漏衍生的事故作为典型事件树场景，基于事件树中各灾害后果发生的频率，仿真计算事故影响后果，模拟得到考虑频率后的各灾害影响区域，并换算得到处所完全处于人员致死阈值内的概率。

对于窒息影响，在 10^{-4}/年为基准概率下，窒息的影响区域见本附录图 3.4-2，整个储氢处所基本均处于人员窒息死亡浓度阈值以上，仅有极少区域低于阈值。

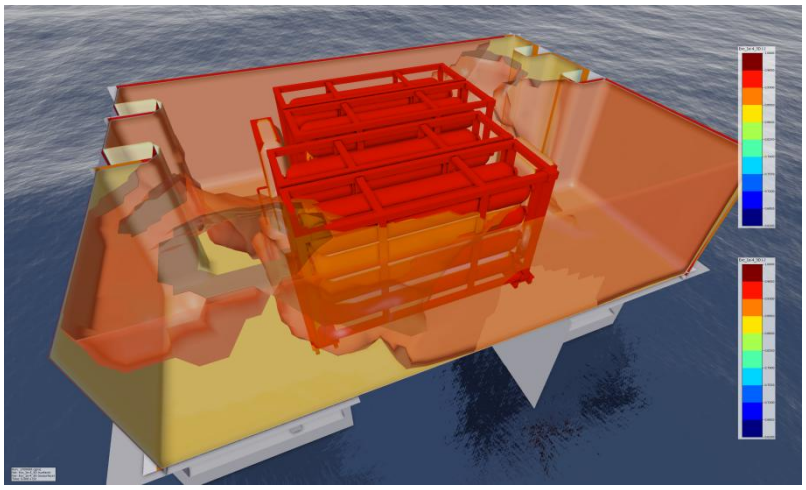


图 3.4-2 窒息后果影响区域（>62%）

对于火灾热辐射影响，在 10^{-4}/年为基准概率下，整个舱室未能呈现高于 12.5kW/m^2 的热辐射（1%死亡概率）。10^{-5}/年基准概率下，12.5kW/m^2 的热辐射的影响区域见本附录图 3.4-3。

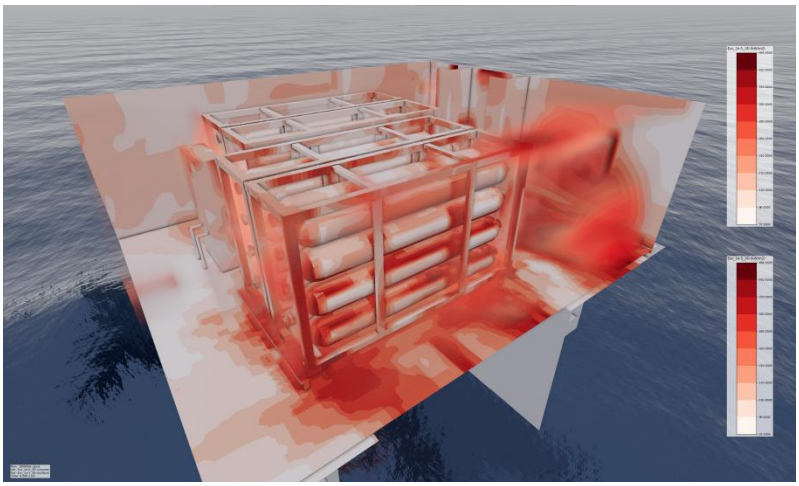


图 3.4-3 火灾后果影响区域（12.5-37.5 kW/m$^{2)}$

以 25kW/m^2（100%致死）的热辐射为基准，处所被热辐射全部覆盖的发生概率为 7.4×10^{-5} 次/年，见本附录图 3.4-4。

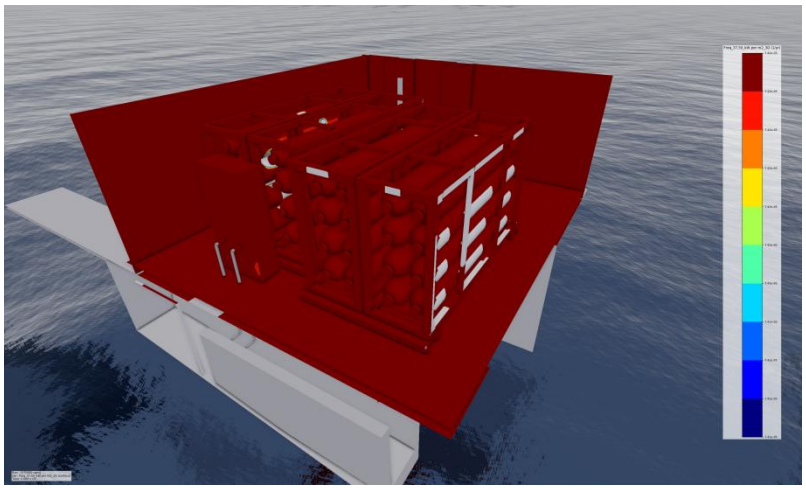


图 3.4-4 火灾后果致死阈值全覆盖（>25 kW/m^2）

对于爆炸超压，在 10^{-4}/年为基准概率下，处所内未出现 0.3bar（100%致死）的爆炸超压，10^{-5}/年基准概率下，处所内 0.3bar 以上爆炸超压的影响区域见本附录图 3.4-5。

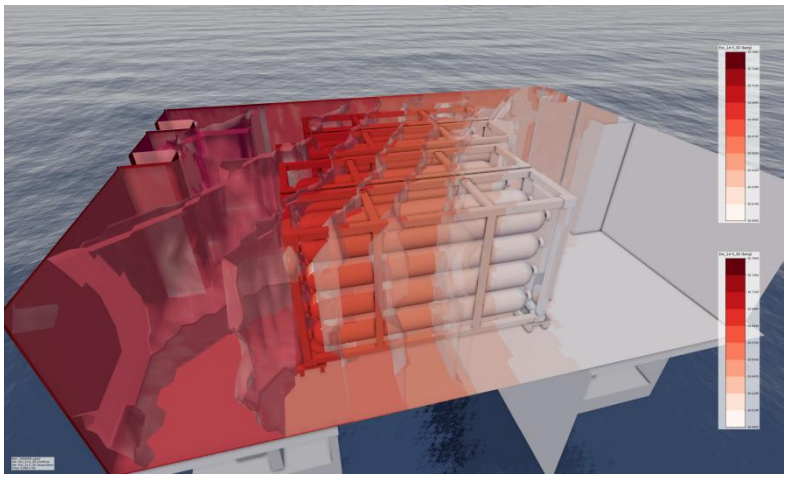


图 3.4-5 爆炸后果影响区域（0.3-10.73bar）

以 0.3bar 的爆炸超压为基准，处所被超压全部覆盖的发生概率为 3.78×10^{-5} 次/年，见本附录图 3.4-

6。

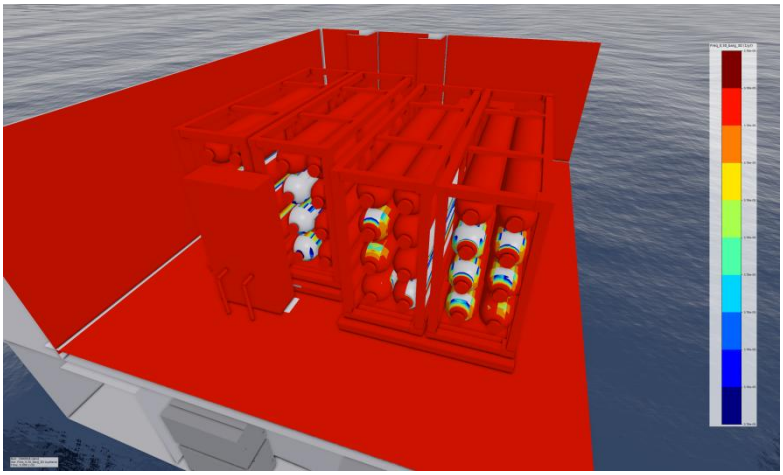


图 3.4-6 爆炸后果致死阈值全覆盖（>0.3bar）

② 人员位于储氢处所的概率计算

分析人员进入储氢处所的作业、检修、加注等的次数需求，结合每次作业或检修需要的时长，确定每年有人进入储氢处所的总时长，并换算成人员存在概率。本案例假定每年 12 次检查、2 次维修、50 次加注，每次时间 30 分钟，算得人员存在概率为 6.84%。

③ 典型事件树场景人员位于储氢处所内的死亡概率计算

各区域的热辐射及爆炸超压导致人员死亡概率参照本指南第 6 章 6.4.3 确定。超压 0.03MPa 以上的区域致死概率为 1；热辐射在 12.5-25 kW/m^2 范围内的区域，人员死亡概率为 1%，热辐射在 25kW/m^2 以上范围内的区域，人员死亡概率为 100%；高浓度窒息区域内（氢浓度>62%）人员死亡概率为 1。

④ 典型事件树场景个人风险值计算

基于影响区域、人员位于各区域内的概率以及人员位于各区域内死亡概率，计算个人风险值见本附录表 3.4-3。

储氢处所不同类别氢事故个人风险值　　表 3.4-3

	判定准则	发生频率（/年）	人员死亡概率	人员存在概率	个人风险值（/年）
窒息	62%	1×10^{-4}	100%	6.84%	6.84×10^{-6}
热辐射	25kW/m^2	7.42×10^{-5}	100%	6.84%	5.07×10^{-6}
爆炸超压	0.3bar	3.78×10^{-5}	100%	6.84%	2.54×10^{-6}

⑤ 所有事故累计的个人风险值计算

叠加所有事件树场景下的个人风险值，计算得到储氢处所内各区域的总的个人风险值为 1.45×10^{-5}/年，低于 10^{-4}/年，个人风险满足安全要求。