

ICS 03. 220. 40
CCS R20/29

团 体 标 准

T/CIN XXXX—XXXX

燃料电池船舶安全要求和风险评估方法

Safety requirements and risk assessment for fuel cell vessel

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国航海学会 发布

目 次

| | |
|----------------|----|
| 前 言..... | II |
| 1 范围..... | 1 |
| 2 规范性引用文件..... | 1 |
| 3 术语和定义..... | 1 |
| 4 安全要求..... | 2 |
| 5 风险评估..... | 4 |

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国航海学会提出并归口。

本文件起草单位：特嗨氢能检测（保定）有限公司、大连海事大学、海大清能船舶（大连）有限公司。

本文件主要起草人：胡乃武、张英、邢辉、王大威、齐贺宇、魏一、尹大和、郑贺婷。

燃料电池船舶安全要求和风险评估方法

1 范围

本文件规定了燃料电池船舶的安全要求，包括一般设计准则、氢系统安全设计一般原则、氢安全系统、船舶布置、氢系统及零部件、通风、监控预警与应急处理、消防等方面的要求；提供了燃料电池船舶的风险评估程序及方法，包括燃料电池船舶安全事故风险评估准备、风险识别、风险分析、风险评价、风险应对和监督检查。

本文件适用于燃料电池船舶在设计、建造、营运、检验和检测各阶段的风险评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅注日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3836.1—2021 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求

GB/T 14536.19—2017 家用和类似用途电自动控制器 电动燃气阀的特殊要求，包括机械要求

GB/T 26990—2023 燃料电池电动汽车 车载氢系统技术条件

GB/T 27748.1—2017 固定式燃料电池发电系统 第1部分：安全

GB/T 29729—2022 氢系统安全的基本要求

GB/T 29838—2013 燃料电池 模块

GB/T 34872—2017 质子交换膜燃料电池供氢系统技术要求

GB/T 35544—2017 车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶

GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范

GB 50217 电力工程电缆设计规范

GD 14—2022 船舶应用燃料电池发电装置指南

GD 22—2015 电气电子产品型式认可试验指南

中国船级社 E-23 氢燃料电池

中国船级社 B-07 氢气瓶

TSG 23—2021 气瓶安全技术规程

T/CATSI 02 007—2020 车用压缩氢气塑料内胆碳纤维全缠绕气瓶

IMO MSA 2022 第22号公告 氢燃料电池动力船舶技术与检验暂行规则

IEC 62282-3-200 燃料电池技术第3-200部分：固定式燃料电池发电系统-性能试方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

涉氢系统 hydrogen related system

氢在船舶上的加注、储存、处理、输送和应用系统的总称。

4 安全要求**4.1 氢安全一般设计原则**

4.1.1 鉴于氢易燃易爆的特性以及燃料电池在船舶的内部使用环境，氢安全将直接影响到整体船舶的安全性。燃料电池船舶整体氢安全设计的一般准则如下：

- a) 失效安全原则。在进行涉氢系统设计时，必须保证即使在某一零部件失效时，也不会因之导致更加严重的后果。即当系统单一零部件出现故障时，系统是安全的。
- b) 最简化原则。在进行涉氢系统设计时，在满足安全需求和使用需求的前提下，系统应尽可能简化，避免冗余。
- c) 区域布置原则。在进行涉氢系统安装时，应将系统零部件尽可能集中布置。并根据压力等级进行分区域布置。
- d) 氢电隔离原则。在进行涉氢系统安装时，应将涉氢系统与电气系统进行有效隔离。隔离措施可以是系统的物理隔离，也可以是针对可能产生火花的零部件自身的隔离，例如采用防爆电器。

4.1.2 氢气存储、供应、连接装置及管路应能防止氢腐蚀及氢脆。

4.1.3 氢气供应系统应有过流保护装置或其他措施，当检测到氢气储存容器或管路内压力异常降低或流量异常增大时，能自动关断氢气瓶内的氢气供应；如采用过流保护阀，该阀应安装在主关断阀上或紧靠主关断处；还应设置压力释放装置，在释放管路的出口采用必要的保护措施，防止在使用过程中被异物堵塞，影响气体排放。

4.1.4 氢气供应阀组应符合以下要求：向燃料电池系统供应氢气，既具有减压阀功能，又具有安全关闭阀功能；电气操作的氢气供应阀应符合 GB 14536.19—2017 规定的要求。

4.1.5 涉氢系统可能产生静电的地方应有静电消除装置；或采取控制氢泄漏量及浓度的措施，以使得即便在产生静电的地方也不会发生安全问题。

4.1.6 涉氢系统应安装氢气浓度检测装置，当检测到氢气浓度超过规定数值时，能自动关断氢气瓶内的氢气供应。

4.1.7 涉氢系统其他安全技术要求，应符合 GB/T 34872—2017 的要求。

4.2 船舶安全技术要求

船舶整体安全应满足 IMO MSA 2022 第 22 号公告的要求。

4.3 安全系统

安全系统应由两个部分组成：

- a) 被动安全系统：由氢气瓶、氢管路、安全泄压装置和排空管构成，一旦氢气瓶或管道内氢气超过一定的温度或压力，安全泄放装置将自动打开，通过排空管将氢气排到外部大气环境中。
- b) 主动安全系统：由氢气管理模块为主构成的氢气主动监控系统，监控系统应与通风系统、消防系统以及船舶控制系统联动，在工作过程中时刻监控涉氢系统安全、氢气泄露状态及船舶运行状态，只要出现异常，随时主动关闭供涉氢系统和电气系统，保证船舶安全。

4.4 涉氢系统及零部件

4.4.1 材料

4.4.1.1 涉氢系统及其零部件材料应具有耐盐雾、耐腐蚀性、耐磨性、耐老化性、导电性、冲击强度、耐热性、耐高低温冲击性能、高低温存储适应性能、高低温动态响应性、耐紫外线照射性能、及抗氢脆性能。

4.4.1.2 涉氢系统中与氢气接触的材料应与氢兼容，并应充分考虑氢脆现象对设计使用寿命的影响。

4.4.1.3 材料选择参照 GB/T 29729—2022 中 7.2.2。

4.4.2 燃料电池电堆

燃料电池设计、测试、安全应符合《船舶应用燃料电池发电装置指南》，IEC 62282-3-200、GB/T 29838—2013 和 GB/T 27748.1—2017 的要求。

4.4.3 燃料电池系统

燃料电池系统安全性、部件安装及防护、系统安全测试、电气安全性、安全监控要求、冲击震动和碰撞、电池兼容应符合中国船级社 GD 22—2015，IMO MSA 2022 第 22 号公告，中国船级社 GD 14—2022 以及 E-23 的要求。

4.4.4 氢气瓶

氢气瓶应依据 B-07，GB/T 35544—2017，GB/T 42612—2023，TSG 23—2021 等法规和标准进行设计、制造与检验；氢气瓶充装、运输、储存、使用与检验须符合 TSG 23—2021 的规定。

4.4.5 支架管路、阀门及附件

4.4.5.1 涉氢系统支架管路应满足 GB/T 26990—2023 中 5.4 的要求。

4.4.5.2 安全泄压装置、阀门、密封件及过滤器应满足 GB/T 29729—2022 中 7.2.5 的要求，其中集成式瓶口阀和温度驱动的压力释放装置，除了单独进行型式试验之外，还应与高压氢瓶一起进行火烧试验以验证其安全性，并出具型式试验报告。

4.4.6 电子元器件

4.4.6.1 元器件应符合 GD22—2015 和 GB 3836.1—2021 中 II 类设备的防爆安全规定。

4.4.6.2 涉氢系统铺设的电线及导线应符合 GB 50217 的规定，电线及导线需用具有阻燃功能的波纹管包裹，起到对线束的保护作用。

4.4.6.3 浓度传感器测量精度应符合 GB/T 26990—2023 中 4 的相关要求。

4.4.6.4 电气设备工作时的表面温度应低于氢在空气中的着火点。

4.4.6.5 浓度传感器、压力传感器、碰撞传感器及温度传感器等测量元器件满足 GB/T 29729—2022 中 7.2.5 要求。

4.5 通风

4.5.1 区域内有氢存储或设备时，应设有通风系统。

4.5.2 有爆炸危险的房间，事故排风机的选型应符合 GB 50058 的规定，且不低于氢气爆炸混合物的级别和组别。

4.5.3 应避免通风系统将氢带入不涉氢区域，通风系统进口宜设于底部，出口宜设于船体顶部且应朝向安全区域。

4.6 监控、预警与应急处理

4.6.1 加氢安全

4.6.1.1 氢气加注应在空旷、通风敞开环境下操作，加氢机不宜安放在室内。如果要在室内进行加氢操作，应选择空旷通风区域，并有防止泄漏氢气聚集和预防火灾事故的安全措施。

4.6.1.2 加氢之前，燃料电池系统、高压电系统必须关闭；船舶必须在加氢站接地。

4.6.1.3 加氢枪与加氢口之间需有通讯协议，使得加氢站的管理系统和船舶主动监控系统可实时监控加氢站系统和船舶涉氢系统的压力、温度、警报信号等安全数据。

4.6.1.4 高压氢气在氢气瓶快速加注过程中，会产生热量，导致氢气瓶内温度伴随着加氢过程快速升高，给氢气瓶的使用带来安全隐患，加注过程中应控制加注过程中的温升，确保高压氢气安全的快速加注。

4.6.1.5 涉氢系统主动安全监控系统应具有防止超压加注及超量加注的自动程序，加注到设定的压力和容量时，自动停止加注。

4.6.1.6 加氢机应设置紧急切断按钮以及与加氢系统配套的自动控制装置，当紧急切断警报被触发时，船舶应有控制装置自动关闭船舶的加氢管道。

4.6.2 储氢安全

4.6.2.1 氢气瓶及其系统在使用或存放时应安装牢固，具有缓冲保护措施，以防止其使用时发生移动或损坏，并定期检查其固定结构松紧程度，观察氢瓶是否有移动和转动。

4.6.2.2 氢气瓶及其系统放置地点不宜靠近人员、明火及易受电击的地方，应采取可靠的防晒、防潮、防腐蚀、防碰撞等防护措施保证气瓶瓶体安全。氢气瓶在使用过程中，发现有严重腐蚀、损伤或对其安全可靠有怀疑时，应提前进行检验。

4.6.2.3 当氢气瓶内部压力或温度过高超过额定值，气瓶的安全泄压装置应自动释放氢瓶氢气并通过氢气管路、安全阀和通风系统安全排放到外部大气环境中。

4.6.3 氢泄露安全

4.6.3.1 在涉氢系统中易发生氢气泄露或者氢气积聚的部位，且人员容易识别的部位安装氢气泄露提醒装置，根据氢泄漏量的等级启动相应等级警告信号，根据不同的警告级别进行发出警告、关闭有氢泄露的部分涉氢系统以及关闭整个涉氢系统的处理，并开启通风系统进行排空。

4.6.3.2 发生氢气泄露时，应疏散人员，避开气流，往上风处迅速撤离，对漏气场所进行隔离，避免无关人员入内，同时停止周围一切能产生明火或火花的作业。

4.6.4 紧急状态安全

涉氢系统主动安全监控系统在监测到系统异常时，应能够自动切断电源和氢气供应，以确保涉氢系统的完整性、电气系统完整性等。

4.6.5 消防

消防应满足 IMO MSA 2022 第 22 号公告要求。

5 风险评估

5.1 总则

5.1.1 评估时机

为了尽可能确保相关利益方安全，评估主体应在燃料电池船舶设计、使用过程、定期维护、燃料电池系统部件更换时，开展安全风险评估。

5.1.2 评估主体

燃料电池船舶安全风险评估的主体宜为船公司和驾驶人员（包括岸基操控人员），宜建立评估工作组，并将船舶设计师、结构工程师、机械工程师、验船师、辅助员、记录员以及海事监管主体等相关人员纳入评估工作组。

5.1.3 评价内容

燃料电池船舶安全风险评估主要从燃料电池系统技术因素方面进行分析。评价内容主要对碰撞、火灾、爆炸、电气安全等技术方面进行有效评估。

5.1.4 评估方法

风险评估常用方法包括事件树分析（ETA）、故障树分析（FTA）、风险贡献树（RCT）、失效模式和影响分析（FMEA）、危险与可操作性研究（HAZOP）等。

5.1.5 评估程序

燃料电池船舶安全风险评估的程序宜包括风险评估准备、风险识别、风险分析、风险评价和风险应对，见图 1。

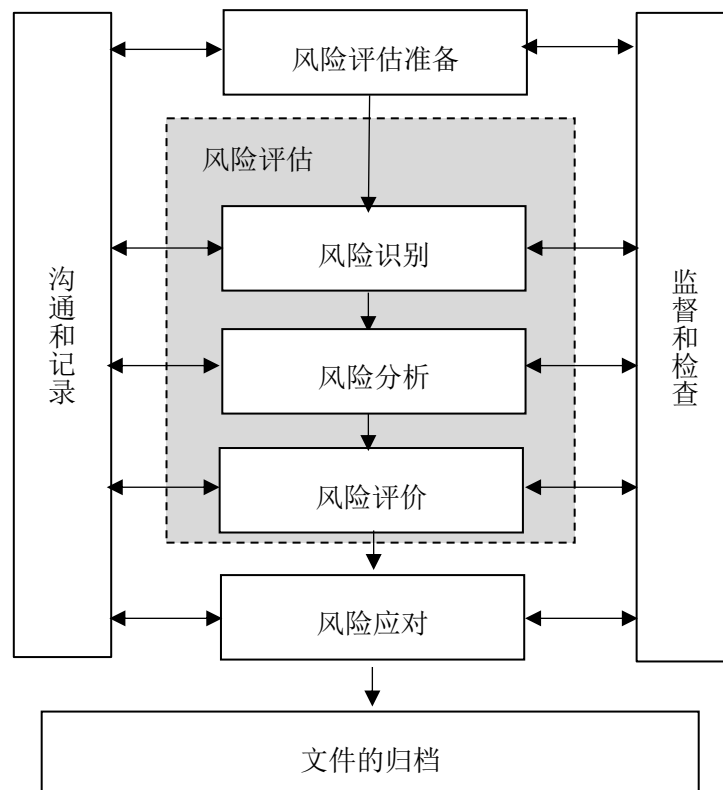


图 1 风险评估程序

5.1.6 综合安全评估

基于全面、综合地考虑影响安全的诸方面因素，建立结构化和系统化的评估模式，提出更为合理、有效且实际的控制风险的技术要求，不断改进和提高燃料电池船舶安全性，可以引入综合安全评估（FSA）方法。

5.2 风险评估准备

5.2.1 工作范围

界定待评估的问题以及有关的边界条件或限定条件，成立风险评估工作组，协调准备工作，促成专家以团队的形式开展工作，并对于要开展的风险评估工作形成文件记录。

5.2.2 风险准则确定

5.2.2.1 风险准则确定原则

燃料电池船舶安全风险准则可直接引用国家、地方政府或本行业组织给出的风险准则；无可适用风险准则的，可按照本标准给出的定性、半定量或定量方法确定。

5.2.2.2 定性方法确定风险准则

定性分析方法对分析对象的危险状况进行系统、细致的检查，根据检查结果对其危险性做出大致的评价。定性分析应对每项风险的概率级别及其对每项目标的影响进行评估，对风险进行等级评定，并以概率和风险矩阵型式表现。

5.2.2.3 半定量方法确定风险准则

半定量分析方法则将对象的危险状况表示为某种形式的分度值，从而区分出不同对象的危险程度，以此选出重要程度较高的危险。

半定量分析方法确定燃料电池船舶安全风险准则可采用风险矩阵法。风险矩阵有事故发生频率和危害后果组成。

燃料电池船舶安全事故等级划分和燃料电池船舶安全事故危害后果等级划分见表 1 和表 2，安全事故风险准则矩阵示意图见图 2。

表 1 燃料电池船舶安全事故频率等级划分

| 等级 | 定义 | 频率（每船年） |
|----|--------------------|--------------|
| P1 | 1 艘船每年发生 10 次以上 | ≥ 10 |
| P2 | 1 艘船每年发生 1 次以上 | 1~10 |
| P3 | 10 艘船每年发生 1 次以上 | 0.1~1 |
| P4 | 100 艘船每年发生 1 次以上 | 0.01~0.1 |
| P5 | 1000 艘船每年发生 1 次以上 | 0.001~0.01 |
| P6 | 10000 艘船每年发生 1 次以上 | 0.0001~0.001 |

注：区间值前一个数量级包含本数，后一个数量级不包含本数。

表 2 燃料电池船舶安全事故危害后果等级划分

| 危害后果 | 等级划分 | | | |
|------|-----------|-----------|------------|----------|
| | C1 | 死亡或重伤 | ≤1 千万 | 1~10 人重伤 |
| C2 | 多人死亡或重伤 | 1 千万~5 千万 | 10~50 人重伤 | 3~10 人 |
| C3 | 较多人死亡或重伤 | 5 千万~1 亿 | 50~100 人重伤 | 10~30 人 |
| C4 | 大量的人死亡或重伤 | ≥1 亿 | 100 人以上重伤 | ≥30 人 |

注 1：区间值前一个数量级包含本数，后一个数量级不包含本数。

注 2：伤亡人数和直接经济损失参照中华人民共和国交通运输部《水上交通事故统计办法》有关要求确定。

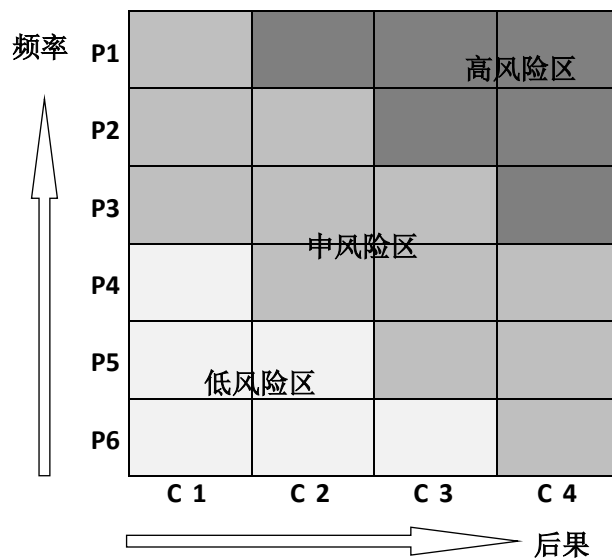


图 2 安全事故风险准则矩阵示意图

5.2.2.4 定量方法确定风险准则

定量分析方法以基于统计方法的事故概率和数值模拟计算事故后果。定量分析重要的是真实准确的客观数据，客观数据可以通过现场观测、调查统计和数据库等途径获取。当缺少客观数据时，可通过专家判断、物理模型、数值模拟等来获得有价值的结果，以对客观数据进行补充。

5.3 风险识别

5.3.1 风险源的识别

5.3.1.1 涉氢系统的风险因素

涉氢系统的风险因素包括氢气泄露和渗漏、与燃烧有关的危险因素、与压力有关的危险因素、与温度有关的危险因素、氢腐蚀和氢脆、生理危害等。

5.3.1.2 燃料电池系统风险因素

燃料电池系统主要包含氢气供应系统、空气供应系统、热管理系统、控制系统等关键子系统，其风险因素主要来自于外壳防护、控制系统策略、软管和金属管路及其附件、橡胶部件、电气安全、热安全等因素。

5.3.1.3 燃料电池电堆的风险因素

燃料电池电堆主要包含膜电极、质子交换膜、气体扩散层、碳纸、双极板、端板等关键部件，燃料电池电堆风险因素包括外部振动、冲击、温湿度交变、高压、腐蚀环境导致的风险和内部气体窗口串漏、短路、水淹、绝缘、工作温度过高、冷启动等风险。

5.3.1.4 储氢系统风险因素

储氢系统主要包含氢瓶、阀门、控制仪表等部件组成，其风险因素主要来自于安装、振动与冲击、腐蚀、氢气泄露、超压超温、泄压等风险因素。

5.3.2 识别方法

燃料电池船舶安全风险识别方法，可采用德尔菲法、头脑风暴、检查表法、事件树法或故障树法等方法中的一种或多种方法进行识别。

5.3.3 信息收集分析

风险评估需要界定风险信息，根据风险发生的几率和实际要求，确定目标影响的程度。信息包括但不限于：法律法规相关信息、船舶信息、氢系统及其部件相关信息、操作和维护信息、安全防护设施信息、电气安全信息、消防安全信息、员工安全行为信息、紧急情况应急处理信息等。

5.4 风险分析

识别的相对重要的事故场景的原因和初始事件及后果进行详细调查，确定风险的分布，并识别和评估影响风险水平的因素。分析应确定风险类型、风险度量单位、风险模型、风险假定、方法与工具、风险贡献树、风险可接受衡准、敏感性分析和不确定性分析等内容。

5.4.1 事故原因分析

基于风险源的识别，分析安全事故发生的直接、间接原因。

5.4.2 潜在后果分析

根据统计数据 and 专家判断对潜在后果及其出现概率或频率进行评估，根据概率或频率值和潜在后果按照严重程度从高到低进行排序，并以此作为评价依据。

5.5 风险评价

5.5.1 风险值计算方法

燃料电池船舶安全风险值可用安全事故发生概率及其危害后果的乘积表示：

$$R = P \times C \quad (1)$$

式中：

R —风险值

P —安全事故概率（事件数/单位时间）

C —事故造成的危害

5.6 风险应对

5.6.1 在设计阶段应将风险因素纳入考虑范围，尽可能在设计阶段消除风险因素。

5.6.2 针对已知风险因素，应制定预防措施。

5.6.3 针对无法消除、难以预防的已知未知风险因素，应制定风险减轻措施。

5.6.4 针对未知未知的风险因素，应进行应急预案储备。

5.7 监督和检查

风险评估过程中和评估结束后，应当对影响风险评估结论的前提条件和环境因素进行持续的监督和检查。

5.8 记录和沟通

开展风险评估前应掌握风险评估建设项目或区域的内、外部环境和实施风险管理的过程。应对风险评估过程和结果进行记录，在组织各层级通报风险管理活动及结果。沟通应尽可能真实、准确、简洁易懂，记录各利益相关方的风险认知和接受程度，并在确定风险准则和风险评价时予以考虑。
