基于 HAZID 的某氢电混合加油船设计方案风险评估

赵丹阳，冯雨翔，陈立剑
（中国船级社 武汉规范研究所，武汉 430022）

摘 要：[目的]为保障氢电混合船舶的营运安全性，[方法]以某氢电混合加油船为研究对象，采用危险源辨识（HAZID）方法，结合船舶动力系统特性，将高压氢气加注站、氢气瓶间、燃料电池处所、锂电池和机电设备间、集装箱式移动电源划分为 5 个关键分析节点，参考 ISO 17776: 2000 标准制定风险矩阵，系统识别各节点潜在危险。[结果]结果表明：共识别出低风险场景 3 个、中风险场景 69 个、高风险场景 5 个。针对上述风险，从船舶结构布置优化、工艺流程优化及实船运营 3 个维度提出 69 条控制措施。[结论]研究成果为该类船舶的安全设计、合规营运及后续氢能船舶相关研究提供技术支撑和参考。

关键词：氢燃料船舶；风险评估；氢燃料加注；箱式电源
中图分类号：U665.12 **文献标志码：**A 【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.10.07

Risk Assessment of the Design Scheme for a Certain Hydrogen-Electric Hybrid Refueling Vessel Based on HAZID

ZHAO Danyang, FENG Yuxiang, CHEN Lijian
(Wuhan Rules and Research Institute, China Classification Society, Wuhan 430022, China)

Abstract: [Purpose] To ensure the operational safety of hydrogen-electric hybrid ships, [Method] a hydrogen-electric hybrid bunkering vessel is taken as the research object and the hazard identification (HAZID) method is adopted. Combined with the characteristics of the ship's power system, 5 key analysis nodes are defined: the high-pressure hydrogen refueling station, hydrogen cylinder room, fuel cell compartment, lithium battery and electromechanical equipment room, and containerized mobile power supply. A risk matrix is developed with reference to the ISO 17776: 2000 to systematically identify potential hazards at each node. [Result] The results show that a total of 3 low-risk scenarios, 69 medium-risk scenarios, and 5 high-risk scenarios are identified. In response to these risks, 69 control measures are proposed from three dimensions: optimization of ship structural arrangement, optimization of technological processes, and actual ship operation. [Conclusion] The research results can provide technical support and reference for the safety design, compliant operation of such ships, and subsequent research on hydrogen-powered ships.

Key words: hydrogen-fueled vessel; risk assessment; hydrogen fuel refueling; containerized power supply

0 引言

全球航运年碳排放量占全球总排放量的 3%[1]，减排压力日益凸显，国际海事组织（International Maritime Organization, IMO）明确提出要在 2050 年前实现净零排放目标[2]。在此背景下，氢燃料船舶凭借零碳优势成为航运绿色发展的重要趋势。然而，氢燃料船目前存在储氢运氢、燃料电池性能、系统集成匹配及材料氢脆防控等技术成熟度不足的

收稿日期：2026-01-05；**修回日期：**2026-04-10；**录用日期：**2026-04-27
基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFB4301702）
作者简介：赵丹阳（2000—），女，硕士、工程师。研究方向：船舶新能源应用。

问题[3-5]，而船舶作业场景又涉及水域环境、装卸作业等多重复杂因素，技术短板与场景风险叠加将大幅提升安全事故发生概率。此外，目前氢燃料船舶的实船应用案例较少，设计阶段风险识别与防控缺乏有效参考，易导致船舶设计存在安全隐患。因此须通过风险评估精准识别设计、建造及运营各环节的潜在危险，明确风险诱因和影响程度，优化技术方案，从源头降低风险发生的可能性。

截止目前，国内外针对氢燃料船舶风险评估的研究相对较少，但液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG）、氨等替代能源船舶的风险评估已形成成熟框架，同时氢在储运、燃料电池汽车、加氢站等场景的风险评估也有相关研究。孙志勇等[6]采用工艺危险分析软件工具（Process Hazard Analysis Software Tool, PHAST）建立烟团模型，模拟氢泄漏扩散过程，结合事故伤害准则计算热辐射、爆炸冲击波影响范围，但仅聚焦燃料电池氢气泄漏及加注与上下客场景，未覆盖燃料储存、动力系统集成、航行环境适配等全流程风险点，未能实现对氢燃料船舶风险的全面分析。甘少炜等[7]以 5 500 hp 氨动力港口作业船为研究对象，通过危险源辨识（Hazard Identification, HAZID）和危险和可操作性研究（Hazard and Operability Study, HAZOP）识别出燃料准备间液相管道泄漏、加注作业泄漏两大高风险场景，再以这 2 类场景为分析对象，运用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）软件火焰加速模拟器（Flame Acceleration Simulator, FLACS）构建三维模型并开展仿真。在此基础上，结合危险源辨识结果和仿真分析结论，提出针对性风险缓解措施。然而，该研究侧重单一泄露场景，缺乏对全船系统危险因素的考量。

黄国良等[8]以 LNG 加注船对超大型集装箱船的加注作业为对象，采用 HAZID 方法辨识危险场景，针对船-船作业、LNG 加注作业及集装箱装卸作业三大高风险场景提出风险防控措施。张元元等[9]针对甲醇船对船加注泄漏风险，采用蝴蝶结模型、动态贝叶斯网络等方法开展研究，识别出软管缺陷、法兰垫片失效等主要致因，量化了泄漏及后续闪火、喷射火等事故概率，并提出定期检查更换关键零件的防控措施，但因缺乏相关实船案例，模型精度有待提升。吕宏成等[10]提出融合行动优先级的优化失效模式与影响分析（Failure Mode and Effects Analysis, FMEA）风险评估框架，解决了传统 FMEA 打分主观和风险区分度不足的问题，但该框架仅聚焦船用箱式电源热管理、消防等子系统，未涉及氢燃料船舶储氢、输氢和燃料电池系统等特有风险环节，难以适配其技术特征与风险场景。韩涛等[11]构建融合改进 FMEA 与故障树分析（Fault Tree Analysis, FTA）的综合评估框架，融入船舶特有环境因素，但其研究对象仍为电池储能型箱式电源，未考虑氢泄漏和氢脆等氢燃料船舶特有风险，无法提供直接技术参考。在氢的非船舶场景风险评估中，CHO 等[12]对 100 kW 级海上绿氢生产系统开展研究，聚焦去离子水供应等节点，通过 HAZOP 开展系统风险评估，提出安全优化建议，同时通过保护层分析（Layer of Protection Analysis, LOPA）分配安全完整性等级，明确是否须增设防护层以保障系统安全。

鉴于 HAZID 方法在危险场景识别方面具备适用性，且能有效应对缺乏大量实船案例条件下的风险评估需求，本文选取氢电混合船舶为研究对象，采用 HAZID 方法系统识别氢燃料加注、氢气瓶存储、燃料电池处所、锂电池间及集装箱式移动电源等关键系统与作业环节的潜在危险，明确各风险的成因、可能后果及影响范围，构建氢电混合船舶风险清单。在此基础上，结合既有安全措施的有效性分析，提出针对性风险控制优化建议，弥补当前氢电混合船舶设计阶段风险识别不全面、防控依据不足的短板，为氢燃料船舶的安全设计、合规营运提供技术支撑，为后续相关研究与标准制定积累经验。

1 HAZID 方法

1.1 评估方法

HAZID 作为风险评估的核心前置环节，其核心目标是系统性识别系统、设备、作业过程中潜在的危险因素，分析可能引发的事故后果及影响范围，为后续风险分析与控制措施制定提供依据，常用的 HAZID 方法主要包括安全检查表（Safety Checklist, SCL）、FMEA 分析及故障假设法等[13]。SCL 通过梳理行业规范要求及同类项目历史经验，构建结构化的检查清单，逐一核查系统各环节是否存在与清单条目匹配的风险隐患，适用于成熟工艺或传统设备的常态化风险排查。FAME 以设备或组件的失效模式为核心分析对象，通过逐一拆解系统构成单元，明确各单元可能的失效形式、失效原因及对系统整体的影响程度，适用于单一设备的风险分析。而故障假设法通过以“如果……发生，会导致什么后果”的反向假设逻辑为核心，围绕设备运行边界和作业环境变化等关键环节，无预设地提出各类故障场景假设，进而推演风险链条及可能的事故后果，其聚焦于系统整体运行逻辑的分析视角，能够有效识别各子系统间的交互风险，弥补 SCL 高度依赖历史案例与 FMEA 单一设备分析的局限性。

针对氢电混合加油船的 HAZID 风险评估，采用故障假设法，并参考《使用气体或其他低闪点燃料船舶国际安全规则》和中国船级社（China Classification Society, CCS）发布的《船舶应用燃料电池发电装置指南》等相关规范要求，明确船舶在营运过程中发生危险的可能性，为后续氢能船舶的设计提供一定参考。

1.2 评估流程

HAZID 分析流程见图 1。结合目标系统风险，划分不同的节点，并根据各节点的结构组成、运行特性及典型风险场景，制定分析引导词。针对选定引导词所对应的工况偏离情形，逐一判断该偏离状态下是否存在与氢燃料相关的危险源。若判断存在危险源，则进一步分析该危险源可能引发的后果，随后围绕该类风险从工程控制、监测报警、应急处置、操作规程、防护设施等方面制定并讨论针对性安全措施。

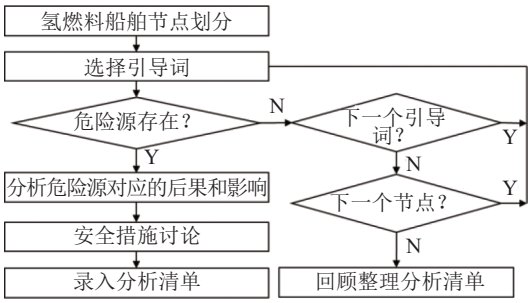


图 1　HAZID 分析流程

Fig. 1　Schematic Diagram of HAZID Analysis Process

在完成单条危险源的分析后，将节点信息、引导词、危险源、后果影响及安全措施等内容统一录入 HAZID 分析清单。若经判断该引导词对应的工况偏离下不存在危险源，则继续判断是否需要选择下一个引导词开展分析。若需要选择下一个引导词，则返回引导词选择环节重复上述危险源判断、后果分析及措施讨论的流程；若不需要选择下一个引导词，则进一步判断是否切换至下一个分析节点。若需要则回到最初确定分析节点的步骤，开启新节点的危险源辨识与风险评估工作；若不需要切换下一节点，则对已完整录入的 HAZID 分析清单进行全面回顾、核对与整理，最终基于整理完善的清单内容编制形成完整规范的 HAZID 分析报告。

2 应用实例

2.1 船型介绍

本文的研究对象为某氢电混合动力加油船，该船为国内近海航区航行，主要承运燃料油。采用“锂电池+燃料电池”混合动力系统，船舶上设有以下关键环节：

1）高压氢气加注站包含充装接头、气相管路、控制阀件及附件等关键部件，作为氢气补给的终端执行单元，暴露于作业环境中易受腐蚀与碰撞影响。

2）氢气瓶间集成高压氢气瓶组、氢气管路、氮封系统、通风系统及相关附件，是船舶氢气储存的核心载体。

3）燃料电池处所配备燃料电池模块、专用氢气管路、独立通风系统及配套附件，承担氢电转换的核心功能。

4）锂电池与机电设备间锂电池组、电池管理系统（Battery Management System, BMS）、配电系统及各类机电设备，负责船舶动力调节与电力分配。

5）集装箱式移动电源内置储能模块与独立配电单元，为应急场景提供灵活电力支援。

这 5 个环节均是支撑船舶氢电动力运行、燃料补给及应急供电核心功能的关键单元，且因氢气高压易燃、磷酸铁锂电池存在热失控风险等特性，叠加作业环境的复杂影响，存在显著安全隐患，可作为本次 HAZID 风险分析的关键风险点。

2.2 定性风险评估

2.2.1 节点划分

根据目标船舶的关键设备，对本船动力系统设备及处所布置开展节点划分，划分为高压氢气加注站、氢气瓶间、燃料电池处所、锂电池和机电设备间、集装箱式移动电源共计 5 个节点，见图 2。针对设计布置、人为操作及设备故障等各类诱发危险源的因素，逐一剖析各危险源的形成缘由、造成的后果、风险等级、现有防护措施及优化改进建议措施。

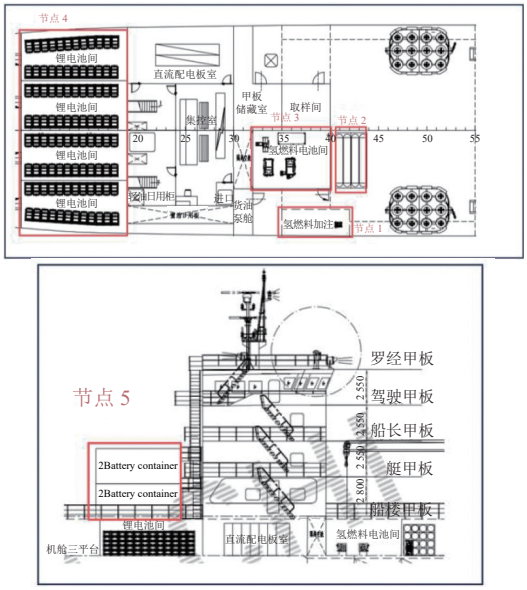


图 2　节点划分示意

Fig. 2　Schematic Diagram of Node Division

2.2.2 引导词

为提升风险识别的针对性与系统性，结合各节点的结构组成、运行特性及典型风险场景，制定了差异化的 HAZID 分析引导词，见表 1。高压氢气加注站聚焦碰撞、泄漏等与高压流体输送相关的风险；氢气瓶间聚焦振动和超压等储氢核心风险；燃料电池处所聚焦模块失效、通风失效等氢电转换关键风险；锂电池间聚焦火灾和机电失效等储能系统风险；集装箱式移动电源聚焦火灾、雷击等独立应急单元风险。

表 1 目标船舶的风险评估各节点的引导词

Tab. 1 Guiding Words for Each Node of the Risk Assessment of the Target Vessel

节点	高压氢气加注站	氢气瓶	燃料电池处所	锂电池间	集装箱式移动电源
引导词	碰撞	碰撞	燃料电池模块失效	火灾	火灾
	破损/泄漏	振动/摇摆	破损/泄漏	机电设备失效	碰撞
	火灾	破损/泄漏	火灾/爆炸	碰撞	腐蚀或磨损
	超压	超压	绝缘失效	进水	机械失效
	—	腐蚀	通风失效	—	通信失效
	—	火灾	—	—	人为因素
	—	—	—	—	雷击

2.2.3 风险矩阵制定

风险矩阵是 HAZID 分析中将定性的危害信息转化为可分级、可视化风险的评估工具，用于明确风险的严重程度与处理优先级，可根据经验对特定场景自主编制，也可按照相关规范要求制定。考虑到氢燃料船舶的实船案例较少，针对氢电混合加油船，依据 IACS Rec.146 IGF 规则对应的风险评估建议指导文件，选用 ISO 17776: 2000 中的风险矩阵作为参考，见表 2。

表 2 HAZID 分析使用的风险矩阵

Tab. 2 Risk Matrix of the HAZID Analysis

后果严重性	逐渐可能性			
	A	B	C	D
0	L	L	L	L
1	L	L	L	L
2	L	L	M	M
3	L	M	M	H
4	M	M	H	H
5	M	H	H	H

表 2 中，L 为低风险等级（Low），处于可接受范畴，建议在成本效益具备实际可行性的前提下，通过落实相关建议措施实现风险的进一步降低；M 为中风险等级（Middle），针对该等级危险源的管控建议措施，除执行成本与风险降低的收益失衡的情况外，应尽可能落实措施以管控风险；H 为高风险等级（High），该等级风险若无特殊豁免情况，须通过所有可行手段落实风险管控措施。

3 评估结果

通过 HAZID 分析，对某氢电混合动力加油船的氢燃料加注-存储-供气系统、氢气瓶间、燃料电池系统、锂电池和箱式电源共计 5 个节点进行风险识别分析，并提出相应的具体建议措施。本次共评估得出低风险场景 3 个，中风险场景 69 个，高风险场景 5 个，配套提出 69 条风险控制措施。将各节点的高风险场景和部分中风险场景分析结果及应对措施进行总结，见表 3 和表 4。表 3 和表 4 中，S 为后果严重性、P 为发生可能性、R 为风险等级。

表 3 HAZID 分析高风险场景结果

Tab. 3 Results of HAZID Analysis of High-Risk Scenarios

引导词	起因	后果	既有安全措施	原有风险			建议措施
				S	P	R	
节点1 高压氢气加注站							
破损/泄漏	加注阀件老化磨损	氢气泄漏后，高压氢气易自燃，或遇点火源引发喷射火、爆炸	1）阀件选材； 2）控制阀件防火防爆； 3）采用经认可的阀件； 4）加氢站设氢气探测器	5	B	H	1）在加注作业前，进行氢气泄漏检测； 2）在加注作业前，开展气体扩散CFD分析，确定加注限制区域； 3）加注作业期间，不宜同步开展加油作业； 4）加注站增设红外火焰探测器

表 3　HAZID 分析高风险场景结果（续）

Tab. 3　Results of HAZID Analysis of High-Risk Scenarios (Continued)

引导词	起因	后果	既有安全措施	原有风险			建议措施
				S	P	R	
节点2 氢气瓶间							
破损泄漏	管路连接老化	1）氢气管路泄漏； 2）火灾/爆炸	1）氢气管道定期维护/检修； 2）管路采用焊接减少接头	5	B	H	因氢气泄漏易自燃，制定加油作业时氢气瓶泄漏的应急处置方案
	瓶体老化	1）氢气泄漏； 2）火灾/爆炸	氢气瓶采用经认可的产品	5	B	H	1）限制氢气瓶使用循环次数； 2）氢气瓶组上方设置遮蔽； 3）制定氢气瓶维护/检验计划
节点3：燃料电池处所							
破损泄漏	氢气管路阀件泄漏	氢气积聚，遇点火源可能引发火灾	1）供气管路为双壁管； 2）燃料电池间设氢气探测器，联锁切断燃料供应并联动启动机械通风	5	B	H	1）燃料电池处所顶部采用光滑设计且向上倾斜，防止氢气积聚； 2）通风采用下进风、上出风设计； 3）对燃料电池进行局部爆炸数值模拟
节点4：锂电池间							
火灾	锂电池热失控	1）火灾； 2）人员伤亡； 3）电池模块失效，动力损失	1）锂电池的安装与检验符合CCS《船舶应用电池动力规范》和海事局《纯电池动力船技术与检验暂行规则》的适用要求； 2）锂电池间设火灾探测系统和固定式灭火系统； 3）采用方形磷酸铁锂电池	5	B	H	1）设备定期维护保养； 2）避免软包电池

表 4　HAZID 分析部分中风险结果

Tab. 4　Results of HAZID Analysis of Middle-Risk Scenarios

引导词	起因	后果	既有安全措施	原有风险			建议措施
				S	P	R	
节点1：高压氢气加注站							
碰撞	加注过程中发生碰撞	1）无法进行加注作业； 2）加注阀件/管路破损； 3）氢气系统管路振动； 4）加注管路氢气泄漏	1）设箱式电源，即使氢燃料失去供应，船舶仍具有动力； 2）加注站设可燃气体探测器	3	B	M	1）加注管路和船舷保持安全间距； 2）划警戒区域，氢燃料船舶加注期间禁止其他船舶靠近； 3）船端氢气接头加装拉断阀； 4）加注作业设置限制区域

表 4　HAZID 分析部分中风险结果（续）

Tab. 4　Results of HAZID Analysis of Middle-Risk Scenarios (Continued)

引导词	起因	后果	既有安全措施	原有风险			建议措施
				S	P	R	
破损泄漏	加注软管老化破损	加注软管剧烈甩动氢气泄漏，引发自燃或遇点火源可能引发喷射火或爆炸	1）软管支撑； 2）加氢站设氢气探测器； 3）加注软管投入使用前进行疲劳试验； 4）加注软管使用时控制弯曲半径	5	A	M	1）考虑采用氢气加注臂搭配软管，减少软管长度； 2）制定软管使用计划，依据加注记录定期更换； 3）开展软管高低温、盐雾环境适应性试验
超压	加注速率过快导致快速温升	1）加注系统压力与温度急剧上升； 2）安全阀起跳； 3）管路密封件或材料因高温高压失效	1）加注管路设置温度/压力监测； 2）氢气瓶设温度传感器； 3）氢气瓶头上设安全阀； 4）压力仪表采用冗余设计	3	C	M	1）在实船营运之前，编制加注操作安全规程，明确加注作业限制速率，控制氢燃料罐温升； 2）监测氢燃料罐温度≤85℃
	过滤器堵塞	1）超压； 2）管路薄弱点破裂引发高压氢气喷射泄漏	1）加氢管路设计压力是工作压力的1.25倍； 2）加氢温度/压力监测	3	C	M	建议过滤器增设差压传感器直观反映过滤器堵塞状态
节点2：氢气瓶间							
碰撞	船舶碰撞或恶劣海况	1）氢气瓶破损泄漏； 2）氢气管路破损泄漏	1）氢气瓶组设置钢架框架结构并与船体固定； 2）氢气瓶距离舷侧应≥$B/5$	2	B	L	1）氢气瓶支撑件加强； 2）建议改进氢气瓶固定方式，如采用鞍座固定在瓶头和瓶尾
破损泄漏	瓶体老化	1）氢气泄漏； 2）火灾/爆炸	氢气瓶采用经认可的产品	5	B	M	1）限制氢气瓶使用循环次数； 2）建议氢气瓶组上方设置遮蔽； 3）制定氢气瓶维护/检验计划
超压	加注快速温升	1）管路安全阀起跳或气瓶温度压力泄放装置（Thermal Pressure Relief Device, TPRD）动作； 2）泄放可能导致系统失压，中断加注	1）氢气瓶设有压力/温度传感器； 2）氢气瓶头设有安全阀	3	B	M	增设氢气瓶组-加氢站红外通信
节点3：燃料电池处所							
燃料电池失效	机械通风系统流量异常	1）泄漏的氢气积聚； 2）燃料电池本身不足，致冷却水入口温度过高，引发过热停机或损坏	1）电压、电流、温度监测报警； 2）多台燃料电池模块，并设置锂电池组	3	B	M	模拟单模块故障试验
	空气中含杂质过多	1）污染燃料电池催化剂，导致性能永久性衰减，长期功率不足； 2）堵塞空气流道	经过产品检验（包括对环境的要求）	2	B	L	建议增加空气流量计，判断是否发生堵塞

表 4　HAZID 分析部分中风险结果（续）

Tab. 4　Results of HAZID Analysis of Middle-Risk Scenarios (Continued)

引导词	起因	后果	既有安全措施	原有风险			建议措施
				S	P	R	
破损泄漏	氢气管路/阀件泄漏	氢气积聚，遇点火源可能引发火灾	1）供气管路为双壁管； 2）燃料电池间设氢气探测器联锁切断燃料供应； 3）氢燃料电池间内设机械通风	5	B	H	1）燃料电池处所顶部采用光滑设计且向上倾斜防止氢气积聚； 2）通风采用下进风、上出风设计； 3）对燃料电池模块进行局部爆炸数值模拟
节点4：锂电池间							
火灾	外部火灾	1）人员伤亡； 2）电池模块失效致动力损失	1）电池包/电池舱设防火隔热层； 2）锂电池间火灾探测、固定式灭火系统和A60级防火分隔	4	B	M	锂电池间左侧通道若为逃生通道，应设置A60级防火分隔
碰撞	船舶碰撞	锂电池发生热失控	锂电池间火灾探测系统和固定式灭火系统	4	A	M	1）蓄电池箱柜应尽可能远离外舷侧，避免碰撞的影响； 2）蓄电池箱柜至船体外板及结构的最小水平距离应≥500 mm
节点5：集装箱式移动电源							
火灾	外部火灾	1）箱式电源暴露于火灾热辐射，内部温度过高，锂电池热失控； 2）箱式电源内辅助系统失效	1）箱式电源布置区域及邻近区域禁止火源； 2）箱式电源带消防系统； 3）箱式电源和锂电池处所之间设A60级防火分隔； 4）箱式电源覆盖水消防； 5）预留箱式电源排风口和敏感区域进气口的安全距离（3 m）	4	B	M	1）制定失火场景应急预案； 2）船员专项培训，定期应急演练； 3）考虑在箱式电源和起居处所之间设置水幕分隔； 4）箱式电源之间应预留≥500 mm的间距； 5）考虑箱式电源之间应急排风口相互影响
碰撞	船舶碰撞	1）撞击导致电池破损，引发热失控； 2）箱式电源内辅助系统破损失效； 3）箱式电源外壳受损，影响防火性能与结构强度	1）箱式电源外侧布置有其余上层建筑； 2）按照系固手册或相关标准进行绑扎固定； 3）箱式电源设计考虑碰撞载荷	3	B	M	1）在恶劣天气等情况下禁止作业； 2）明确操作规程，严格执行及装卸作业人员日常培训和管理； 3）若定箱式电源不采用换箱模式，应在详设阶段的FMEA分析中考虑箱式申源船上充电风险和堆码充电风险

4　结论

本文针对某氢电混合动力加油船的设计方案，通过对 5 个节点开展 HAZID 分析，评估得出低风险场景 3 个，中风险场景 69 个，高风险场景 5 个，

从船舶结构布置优化、工艺流程优化及实船运营方面提出多项设计建议，主要风险管控措施如下：

1）在船舶结构布置优化方面，加注管路需与船舷保持一定距离，采用氢气加注臂搭配软管以缩短软管长度；合理划定加注作业安全区，加强氢气瓶支撑件，并采用鞍座固定瓶头和瓶尾；燃料电池处所顶部采用光滑向上倾斜设计，通风系统采用下进上出模式；锂电池间左侧为逃生通道，则须设置 A60 级防火分隔。

2）在工艺流程优化方面，氢燃料加注过程中需设置警戒区域，禁止其他船舶靠近，加注操作时划定限制区域并控制点火源；加注站需增设红外火焰探测器，编制加注操作安全规程并明确限制速率（参照 SAJ2601），同时监测氢燃料罐温度，确保≤85 ℃；箱式电源须开展失火场景 FMEA 分析，充分考虑船上充电及堆码充电风险。

3）在实船运营方面，岸基加氢站设计需在实船营运前统筹规划，作业相关人员经培训合格后方可上岗，同时制定加注作业人员操作规程；制定加注作业火灾应急响应预案，明确人员逃生路线，船员开展燃料电池安全操作规程培训及应急演练，箱式电源相关人员需要参加专项培训并定期开展应急演练；涉氢阀件、软管、氢气瓶、锂电池等设备需定期进行维护保养及巡查，制定氢气瓶维护、检验计划并限制其使用循环次数。通过落实氢燃料加注、氢气瓶存储、燃料电池处所、锂电池间及集装箱式移动电源等关键风险节点对应的 69 条风险控制措施，能够有效降低氢电混合船营运过程中的危险发生概率，保障船舶安全营运，同时可为后续氢能船舶的设计提供一定参考。

参考文献：

[1] 宋秀丽, 孙瑞, 胡成龙, 等. 船用低碳燃料的应用现状及趋势[J]. 船海工程, 2025, 54(6): 78-83.
SONG X L, SUN R, HU C L, et al. Application Status and Trend of Marine Low-Carbon Fuels[J]. Ship & Ocean Engineering, 2025, 54(6): 78-83.

[2] JI C, EL-HALWAGI M M. A Data-Driven Study of IMO Compliant Fuel Emissions with Consideration of Black Carbon Aerosols[J]. Ocean Engineering, 2020, 218: 108241.

[3] 唐旺, 于海婷, 王利中, 等. 船舶场景中氢基燃料供应技术及发展趋势[J]. 南方能源建设, 2025, 42(6): 35-46.
TANG W, YU H T, WANG L Z, et al. Supply Technology and Development Trend of Hydrogen-Based Fuel in Ship Scenarios[J]. Southern Energy Construction, 2025, 42(6): 35-46.

[4] 马小芳, 牛军强, 崔春雨, 等. 储氢技术发展: 现状、挑战与展望[J]. 石油管材与仪器, 2025, 11(6): 105-110.
MA X F, NIU J Q, CUI C Y, et al. Development of Hydrogen Storage Technology: Status, Challenges and Prospects[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2025, 11(6): 105-110.

[5] 方森林. 氢能制取和储存技术的运用[J]. 能源新观察, 2025(11): 76-78.
FANG S L. Application of Hydrogen Energy Production and Storage Technology[J]. New Energy Observation, 2025(11): 76-78.

[6] 孙志勇, 李双成, 吕峰, 等. 氢燃料电池动力船燃料泄漏事故模拟与风险评估[J]. 江苏船舶, 2024, 41(2): 40-43.
SUN Z Y, LI S C, LYU F, et al. Fuel Leakage Accident Simulation and Risk Assessment of Hydrogen Fuel Cell-Powered Ship[J]. Jiangsu Ship, 2024, 41(2): 40-43.

[7] 甘少炜, 冯雨翔, 金鼎, 等. 氨燃料动力港作船潜在风险及泄漏后果分析[J]. 船舶工程, 2025, 47(10): 132-143.
GAN S W, FENG Y X, JIN D, et al. Potential Risk and Leakage Consequence Analysis of Ammonia-Fueled Port Work Vessel[J]. Ship Engineering, 2025, 47(10): 132-143.

[8] 黄国良, 冯雨翔, 张海涛, 等. 基于 HAZID 的某超大型集装箱船加注 LNG 燃料风险评估[J]. 船海工程, 2021, 50(3): 1-3.
HUANG G L, FENG Y X, ZHANG H T, et al. Risk Assessment of LNG Bunkering for a Ultra-Large Container Ship Based on HAZID[J]. Ship & Ocean Engineering, 2021, 50(3): 1-3.

[9] 张元元, 张春昌, 孙虎, 等. 基于动态贝叶斯网络的甲醇船对船加注风险评估[J]. 上海海事大学学报, 2024, 45(4): 54-61.
ZHANG Y Y, ZHANG C C, SUN H, et al. Risk Assessment of Methanol Ship-to-Ship Bunkering Based on Dynamic Bayesian Network[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2024, 45(4): 54-61.

[10] 吕宏成, 吴添, 李江浩. 基于优化 FMEA 的船用箱式电源风险评估[J]. 船舶工程, 2025, 47(增刊 2): 306-312.
LYU H C, WU T, LI J H. Risk Assessment of Marine Box-Type Power Supply Based on Optimized FMEA[J]. Ship Engineering, 2025, 47(Suppl. 2): 306-312.

[11] 韩涛, 许家铭, 王雨佳. 船舶箱式电源系统风险评估方法与安全管理策略[J]. 船舶工程, 2025, 47(增刊 2): 215-221.
HAN T, XU J M, WANG Y J. Risk Assessment Method

and Safety Management Strategy of Ship-Borne Box-Type Power Supply System[J]. Ship Engineering, 2025, 47(Suppl. 2): 215-221.

[12] CHO S, OH S, LIM C H, et al. Risk Assessment of an Offshore Green Hydrogen Production System[J]. Process Safety Progress, 2025, 44(3): 368-378.

[13] MUTHIAH M, ELNASHAR M, AFZAL W, et al. Safety Assessment of Hydrogen Production Using Alkaline Water Electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 84: 803-821.