

ICS 27.020

CCS J 92

团 体 标 准

T/CSICE 055-2025

船用氢燃料电池系统技术条件

Technical specifications for marine hydrogen fuel cell systems

2025-12-26 发布

2025-12-26 实施

中国内燃机学会 发布

目 次

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号和缩略语.....	2
5 氢燃料电池系统技术条件的依据.....	2
6 氢燃料电池系统工作条件.....	2
6.1 环境温度条件.....	2
6.2 船舶倾斜摇摆范围.....	3
6.3 振动试验参数.....	3
6.4 交变湿热试验.....	3
6.5 运输条件.....	3
7 氢燃料电池系统工作分析.....	3
7.1 任务剖面.....	4
7.2 寿命剖面.....	4
8 氢燃料电池系统质量保证.....	4
8.1 总述.....	4
8.2 设计流程.....	4
9 氢燃料电池系统设计准则.....	5
9.1 总述.....	5
9.2 氢燃料电池技术设计准则.....	5
10 氢燃料电池系统验证.....	10
附录 A（资料性） 船用氢燃料电池系统任务剖面、寿命剖面与可靠性要求.....	12

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》起草。请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国内燃机学会标准管理部提出。

本文件由中国内燃机学会归口。

本文件起草单位：武汉氢能与氢燃料电池产业技术研究院有限公司、中国船舶集团有限公司第七一二研究所、大连理工大学、山东大学、上海交通大学。

本文件主要起草人：王振、张选高、宋创云、王阳、邹亮、彭林法。

本文件于2025年首次发布。

船用氢燃料电池系统技术条件

警告：本文件的应用可能涉及到某些有危险性的材料、操作和设备，但未对与此有关的所有安全问题都提出建议。因此，用户在使用本文件之前有责任制定相应的安全和防护措施，并确定相关规章限制的适用性。

1 范围

本文件规定了船用氢燃料电池系统的技术条件依据、工作条件、工作分析、质量保证、设计准则和验证。

本文件条件适用于内河船舶的氢燃料电池系统的技术条件。

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，仅该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 28816 氢燃料电池 术语
CCS 《钢质海船入级规范》
CCS 《船舶应用氢燃料电池发电装置指南》
CCS 《电气电子产品型式认可试验指南》
中国海事局 《氢燃料电池动力船舶技术与检验暂行规则》
GJB 151A 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求
GJB 450A 装备可靠性工作通用要求
GJB 451A 可靠性维修性保障性术语
GJB/Z 27 电子设备热设计手册
GJB/Z 35 元器件降额准则
GJB/Z 105 电子产品防静电放电控制手册

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

燃料电池堆 fuel cell stack

能将燃料中的化学能经过电化学反应直接转化为电能和热能的电源装置，一般由膜电极、双极板、隔离板、歧管和支撑结构组成。

3.2

燃料电池模块 fuel cell module

一个或多个燃料电池堆和其他主要及适当的附加部件的集成体，目的组装到一个发电装置或交通工具中。

3.3

燃料电池发电系统 fuel cell power system

由燃料电池、氢燃料重整装置（如设有）及其相关联的管路构成的整体。燃料电池发电系统组成框图如图1所示。

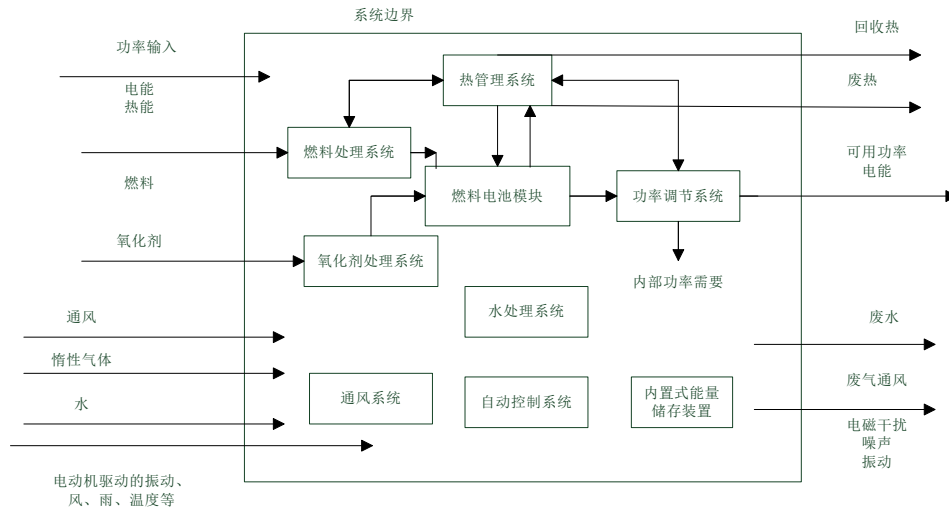


图1 燃料电池发电系统组成框图

3.4

燃料电池发电装置 fuel cell power installation

燃料电池发电系统，以及用于向船舶提供电力所需的其他系统和组件，包括维持燃料电池运行的辅助系统。

4 符号和缩略语

下列缩略语适用于本标准。

PEMFC：质子交换膜燃料电池。

5 氢燃料电池系统技术条件的依据

专业类的氢燃料电池系统技术条件，可根据专业特点，参照相关的标准和手册，并在认真总结工程经验的基础上制定技术条件（包括硬件和软件）。在产品的设计过程中，设计人员应贯彻实施技术条件，并在执行过程中修改完善这些技术条件。

针对特定类别产品，制定技术条件的依据有。

国内外有关标准、规范和手册中与氢燃料电池系统技术条件有关的设计要求。

相似型号中制定的技术条件。

国内外相似型号及本单位所积累的关于氢燃料电池系统技术条件的经验和教训。

产品的专业特点属性。

6 氢燃料电池系统工作条件

6.1 环境温度条件

船用氢燃料电池系统设计、选型和布置均应能在船舶正常运营中环境温度下正常工作。根据CCS《钢质海船入级规范》要求，环境温度范围如表1所示。

表 1 环境温度条件

介质	部位	温度/℃	
		无限航区	除热带海区以外的有限航区
大气	围闭处所内	0~45	0~40
	温度超过45℃（或40℃）或低于0℃的处所内	按这些处所的温度	按这些处所的温度
	开敞甲板	-25~45	-25~40
水	—	32	25

6.2 船舶倾斜摇摆范围

船用氢燃料电池系统设计、选型和布置均应能在船舶正常运营中倾斜摇摆环境下正常工作。根据CCS《钢质海船入级规范》要求，船舶倾斜摇摆范围如表2所示。

表 2 船舶倾斜角

用途	倾斜角/(°)			
	横倾	横摇	纵倾	纵摇
作为应急电源	22.5	22.5	10	10
其他	15	22.5	5	7.5

6.3 振动试验参数

船用氢燃料电池系统设计、选型和布置均应能在船舶正常运营中所产生的冲击和振动环境条件下正常工作。根据CCS《电气电子产品型式认可试验指南》规定，振动试验参数如表3所示。

表 3 振动试验参数

安装位置	频率/Hz	振幅/mm	加速度/($m \cdot s^{-2}$)
一般振动条件	2(+3/0)~13.2	±1	—
	13.2~100	—	±6.9 (或 0.7g)
剧烈振动条件	2(+3/0)~25	±1.6	—
	25~100	—	±39 (或 4.0g)

6.4 交变湿热试验

船用氢燃料电池系统设计、选型和布置均应能在船舶正常运营中潮湿空气环境条件下正常工作。根据CCS《电气电子产品型式认可试验指南》规定，交变湿热试验条件如下。

- 温度：55℃±2℃。
- 相对湿度：90%~95%。
- 持续时间：48h。

6.5 运输条件

船用氢燃料电池系统应在给定运输条件下保持结构完好性。运输过程中氢燃料电池为非工作状态，典型运输条件如下。

- 高速路面：里程大于 800 km，车速小于 100 km/h。
- 二级路面：里程大于 600 km，车速小于 60 km/h。
- 沙石路面：里程大于 200 km，车速小于 25 km/h。

7 氢燃料电池系统工作分析

7.1 任务剖面

根据实际使用情况，典型的船用氢燃料电池系统任务剖面如图2所示，包括启动任务剖面、运行任务剖面、以及停机任务剖面等三个任务剖面。各任务剖面的主要任务、持续时间、任务要求及可靠性要求见附表A1。



图2 典型船用氢燃料电池系统任务剖面框图

7.2 寿命剖面

根据氢燃料电池的实际使用情况，以运输阶段、岸基准备阶段及实航阶段等三个典型寿命剖面进行描述。

船用氢燃料电池系统寿命剖面框图如图3。其寿命剖面与可靠性要求参见表A.2。

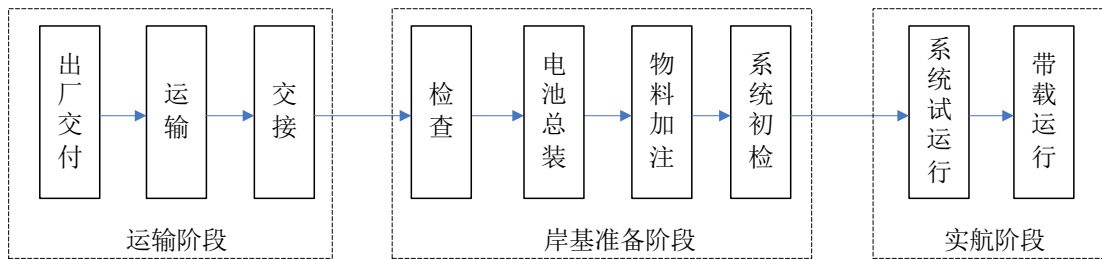


图3 船用氢燃料电池系统寿命剖面框图

8 氢燃料电池系统质量保证

8.1 总述

产品设计师应根据本产品的特点、可靠性要求、经费与研制周期等条件，在产品设计中逐条予以贯彻落实技术条件设计准则，做到每条准则均有相应的质量保证措施。工程研制阶段的各次设计评审时应提交贯彻设计准则的符合性报告。

8.2 设计流程

设计流程计划如表4所示。

表4 设计流程计划表

阶段	工作项目	输出文件
设计输入阶段	立项论证	立项论证报告，研制要求，合同性文件，项目计划，研制质量保证大纲，研制技术要求，通用质量特性技术要求
设计评审阶段	评审	
方案设计阶段	方案设计	通用质量特性工作计划，标准化大纲，技术状态管理计划，研制方案，方案设计说明书，风险评估报告（方案设计），通用质量特性设计与分析报告（方案设计）
方案评审阶段	方案评审	
技术设计阶段	技术设计	计算书，技术条件（产品规范），工艺方案，技术设计说明书，特性分析报告，零部件图，风险评估报告（技术设计），通用质量特性设计与分析报告（技术设计），外包技术要求，试验大纲
技术设计评审阶段	技术设计评审	
施工设计阶段	施工设计	风险评估报告（施工设计），检试大纲，检验验收细则，设计明细表，采购件汇总表，工艺过程卡，关键过程明细表，关键过程三定表，施工设计说明书
	施工设计评审	
	工艺设计	
	工艺设计评审	

表 4 设计流程计划表（续）

阶段	工作项目	输出文件
生产阶段	采购及试生产	生产策划，产品质量分析报告，生产总结，检试报告，试验总结报告，质量证明，合格证
	检验试验及型式试验	
	产品质量评审	
样机评审阶段	样机评审	通用质量特性总结报告，研制技术总结报告，技术说明书，数据模型报告，技术总结报告，工作总结报告

9 氢燃料电池系统设计准则

9.1 总述

为了使设计出来的产品达到规定的技术要求，在设计中需要贯彻实施技术设计措施和技术设计细则。为将技术设计措施和技术设计细则落实到产品的设计中去，在设计中设计人员要编制贯彻技术设计准则的符合性报告。

9.2 氢燃料电池技术设计准则

9.2.1 成熟技术和工艺

成熟技术和工艺方面要优先选用经过考验、验证、技术成熟的设计方案(包括硬件和软件)和零部件，充分考虑产品设计的继承性。

PEMFC 成熟技术和工艺要求如下。

- a) 优先采用动态排水技术。
- b) 水泵前应设置过滤器。
- c) 电堆冷却水路应设置去离子装置。
- d) 冷却水系统根据实际情况设置加热装置。
- e) 氢气管路、管系和部件的最小设计压力应为 1.0 MPa，但对管端敞开的管路，其设计压力应不小于 0.5MPa。
- f) 氢气管路应选用满足 CCS 规范的 1 级管系，优先选用 BA 级不锈钢无缝钢管，材料应选用奥氏体不锈钢 S30403、S30408、S31603、S31608。
- g) 供氢装置相关金属管道的连接优先采用自动焊，并实施 100%探伤检测，管路接头应尽可能少，尽量选用焊接接头，其次选用螺纹、法兰接头，高压氢气管路接头优先采用 VCR，低压可采用法兰或端面密封，禁止使用卫生法兰、卡套接头。氢气管道的气密性优选氦质谱检漏测试。
- h) 对于氢气可能产生聚集的密闭环境内，应设置通风。
- i) 危险区内的电气元器件应符合防爆安全等级，氢气聚集的危险区电气设备的防爆类别和温度组别不低于 IICT1。
- j) 优先选用经过试验验证的控制电路设计方案。
- k) 对于重要的元器件，如断路器、接触器，需对其工作状态进行监控。

9.2.2 简化设计

元器件、零部件和原材料的选择和控制尽可能以最少的元器件、零部件来满足产品的功能要求。优先选用标准件；采用模块化设计，最大限度地压缩和控制原材料、元器件、零件、组件、部件的种类、牌号和数量等。编制和修订元器件、零部件、原材料的优选目录，严格控制超优选目录元器件、零部件、原材料的使用，保持和提高产品的固有可靠性。不能由于技术冻结长期使用落后的、质量等级低的元器件。

PEMFC 元器件、零部件和原材料的选择和控制要求如下。

- a) 氢燃料电池系统零部件应优选标准化程度高的零部件、紧固件、连接件、管线及缆线等，并尽量减少其品种。
- b) 采用带防松功能的紧固件，减少垫圈的使用。

- c) 过滤器滤芯材料应选用透气性好、过滤效率高和滞燃的材料，其计重过滤效应应不低于 90%。
- d) 电磁阀、传感器、过流部件等元器件主体部分采用 304 或 316 不锈钢制造。
- e) 优先选用常用、标准化、带有船级社证书和技术成熟的元器件及接插件。
- f) 尽量减少元器件通讯接口的种类，系统层级优先选择以太网接口的元器件，部件层级优先选择 CAN 接口。
- g) 尽量减少模拟量输入信号接口的种类，优先选择 4-20mA 模拟量信号接口。
- h) 尽量减少元器件供电接口的种类，优先选择 DC24V 供电的元器件。
- i) 优先选择标准导轨安装固定的元器件，减少使用螺钉安装固定的元器件，便于安装和维护。
- j) 供氢管路优选 1/4"、1/2"、1" 等通用规格尺寸，尽量减少不同规格的数量。
- k) 供氢装置的储氢单元或制氢单元均采用模块化设计，并具备互换功能。
- l) 氢气原料选择满足 GB/T34872-2017 要求，甲醇原料满足 GB338-2011 要求。
- m) 优先选用安装牢固可靠的控制继电器，如带有卡扣的继电器，确保继电器在工作过程中不会松脱而误动作。
- n) 换热器的选型应根据换热功率需求、进出口温度、体积重量限制等综合选型，换热器板材的材质选择应依据换热器最高使用温度和冷却介质中氯离子的含量综合选取。

9.2.3 降额设计

降额设计是针对其电应力和温度应力比较敏感机械和结构部件。降额设计的概念是指设计的机械和结构部件所能承受的负载(强度)要大于其实际工作时所承受的负载(应力)。对于机械和结构部件，应重视应力与强度分析，并根据具体情况，采用提高强度均值、降低应力均值、降低应力和强度方差等基本方法，找出应力与强度的最佳匹配，提高设计的可靠性。不能用降额来补偿低劣元器件的使用。

PEMFC降额设计要求如下。

- a) 选用的电子元器件、气动元件、泵、各种结构件，应采用降低负荷额定值的降额设计，以提供更大的安全储备。
- b) 电堆功率应考虑辅机功耗、自消耗，同时保留一定的功率余量。
- c) 氢、空气、冷却管径设计应依据计算书做降额设计。
- d) 膨胀水箱、储水箱等储存设备应依据计算理论值增大储量。
- e) 电磁阀和传感器耐压能力不低于工作压力的 1.5 倍。
- f) 集成端板的耐温性能高于实际使用温度 20℃ 以上。
- g) 减压阀、空压机、氢气循环泵及水泵的额定流量不低于实际工作流量的 120%。
- h) 电线电缆根据计算电流理论值的 1.2-1.5 倍进行选型，以预留适当安全余量。
- i) 变频器等设备选型应考虑环境温度上升导致的降容使用，根据功率选型应至少放大一档，提供合适安全余量。
- j) 环境温度越高，电缆和元器件选型时预留安全余量应越大。
- k) 氢气储罐、氢气管道、氢气缓冲罐等涉及带压氢气的设备或部件，设计压力不低于最大工作压力的 1.3 倍。

9.2.4 冗余设计

冗余设计中关键的单点失效，采用冗余。如果不能通过设计来消除这种影响任务或安全的单点故障模式，就必须设法使设计对故障的原因不敏感（即健壮设计）或采用容错设计技术。软硬冗余、机械与电子，自动与手动等不同类型冗余。安全性重要部件独立原则。

PEMFC冗余设计要求如下。

- a) 氢气采用三重紧急切断措施，模块内部切断，手动阀门切断，ESD 紧急切断系统。
- b) 全船氢燃料电池系统分舷独立布置，相互备用。
- c) 模块及舱室风机采用一用一备，单台风机风量即可满足要求。
- d) 采用紧急情况下的双重切断措施，设置控制系统紧急停机按钮和安全系统紧急切断按钮。
- e) 采用本地与遥控双重控制位置切换，自动与手动双重控制模式切换，确保系统的可控性。
- f) 安全系统独立于控制系统，并分开供电，安全系统配置 UPS 不间断电源，其容量可维持安全系统正常工作至少 30min。

- g) 氢燃料电池控制系统应设置蓄电池用于氢燃料电池启停控制，蓄电池容量可维持控制系统及负载正常工作至少 30min。
- h) 供氢管路和氢气缓冲罐上同时设置安全阀，保证氢气超压排放的可靠性。
- i) 同时采用磁翻板液位计和数显式液位计，监测甲醇等液体氢燃料的液位。
- j) 同时采用压力传感器和压力表，监测氢气压力。
- k) 监测到氢浓度高于 20%LEL 时，应进行报警，两个探测器探测到氢浓度超过 40%LEL 时，安全系统应能关闭受影响的氢燃料电池发电系统，切断泄漏点所在氢燃料电池处所内所有非合格防爆电气设备供电，并自动关闭所有用于隔离泄漏点的阀门。
- l) 氢浓度探测器应为两个互相靠近且独立的探测器，如探测器具备自检功能，则允许使用一个探测器，并应有备件以便及时更换。

9.2.5 电路容差设计

电路容差设计应设法使由于器件退化而性能变化时，仍能在允许的公差范围之内，满足所需的最低性能要求。最坏的情况分析，也是容差分析方法之一。

PEMFC 电路容差设计要求如下。

- a) 控制部件的设计应有较宽的工作区，应允许元器件有较大的容差范围。
- b) 对影响产品安全性和任务完成的电路进行容差分析。
- c) 对核心安全控制部件应采用最坏情况试验法。
- d) 电路容差分析有关基线包括：被分析电路的功能和使用寿命、电路性能参数和偏差要求、电路使用环境应力条件（或环境剖面）、元器件参数的标定值、偏差值和分布、电源和信号源的额定值和偏差值、电路接口参数。
- e) 电路容差设计还应该考虑：参数随时间的漂移量，电路负载的变动，所有正常的工作方式、预料中的偶然工作方式及各个工作点的情况。

9.2.6 防瞬态设计

防瞬态设计（应力、失温、失压、电路）主要针对电路、机械冲击和可能的瞬间过应力。

PEMFC 防瞬态设计要求如下。

- a) 在有强烈的振动、循环压力、速度变化的地方应增加减震装置，在管路、元器件支撑架固定卡箍之间应使用缓冲垫减振。
- b) 空压机底部安装减振垫。
- c) 氢燃料电池模块底部安装减振器。
- d) 应在可能因极端温度引起的热膨胀或收缩管路处采用膨胀节或软管设计。
- e) 应在管路可能失压、过压区域设置安全阀。
- f) 设置断路器等安全保护元器件，在瞬态电流过大（短路和过载）的情况下，对电路进行保护。
- g) 对于循环泵等大功率元器件，在功率大于 15 kW 时采用变频启动或软启动减小启动电流。
- h) 氢燃料计量泵、空气泵等振动设备采用减振结构安装。
- i) 在可能因极端温度引起的热膨胀或收缩的物料输送管路上设置膨胀节或连接软管。
- j) 高压氢气管路设置限流阀。
- k) 穿舱管路设置钢管保护。
- l) 瞬态温度达到氢燃料自燃温度 80% 时应能断开/降低负载或采取降温措施。

9.2.7 热设计（热管理）

热设计（热管理）是对热敏感的产品实施热分析，进行发热计算、散热设计。

PEMFC 热设计（热管理）要求如下。

- a) 应对低温/高温管路与其邻接的装备构件进行热隔离，以防止装备温度超出装备材料的设计温度。
- b) 手可以触摸到的设备表面温度不应超过 60 °C。
- c) 应对低温/高温管路与其邻接的装备构件进行热隔离，以防止装备温度超出装备材料的设计温度。

- d) 发热量大的辅机如空压机、变频器一般采用水冷措施。
- e) 电动减压阀、氢气循环泵合理布置，增强通风散热。
- f) 氢气回流管道增加保温材料，防止冷凝。
- g) 电控柜设置散热风机和通风过滤器，散热风机安装在柜体上部时往外抽风，在柜体下部时往内吸风，发热较大的元器件，如变压器、开关电源等，尽量安装在靠近柜内风扇处，对环境温度要求较高的元器件及关键元器件，如 PLC 模块，尽量安装于柜体中下部。
- h) 对储制氢装置中的换热器、汽化器、冷却器等设备的换热量及工作耐受温度进行设计分析，确保换热量及设备耐受温度满足使用要求。

9.2.8 环境防护设计（三防）

环境防护设计（三防）是全寿命中应力防护：温度防护设计；防潮湿、防盐雾和防霉的“三防”设计；冲击和振动的防护设计以及防风沙、防污染、防电磁干扰以及静电防护等。此外，要特别注意综合环境防护设计问题，例如采用整体密封结构，不仅能起到“三防”作用，也能起到对电磁环境的防护作用。

PEMFC环境防护设计（三防）要求如下。

- a) 外壳铝合金材料采用阳极氧化防腐处理，氢燃料电池模块表面采用三防涂层防腐。
- b) 模块底部与基座连接处增加绝缘隔层，防止电化学腐蚀。
- c) 模块整体采取 IP44 及以上的防护等级设计，电气元器件防护等级应为 IP65 及以上。
- d) 紧固件一般选用 A2 不锈钢材料。
- e) 室内环境电控柜选用 IP44 防护等级以上柜体，室外环境电控柜选用 IP56 防护等级以上柜体，且进出线采用填料函。
- f) 潮湿环境中的电控柜内部应设置加热器除潮。
- g) 与甲醇等液体氢燃料接触的存储及输送设备、管道及密封件选用耐溶胀性和腐蚀性好的材质。
- h) 氢气管路、储氢装置做好防静电设计，维修时应穿防静电服。
- i) 送入系统的空气应进行去盐雾处理。

9.2.9 电磁兼容设计

电磁兼容设计一般需要从抑制干扰源、切断干扰传播途径等方面进行设计。考虑到电磁兼容设计的复杂性，目前在很多装备的研制中，都制定单独的电磁兼容设计规范。

PEMFC电磁兼容设计要求如下。

- a) 模块采用封闭金属外壳结构，屏蔽电磁干扰。
- b) 同一电控柜内高低压电源线分开布置。
- c) 对于变频器、DC/DC 等电磁干扰较大的设备，增加封闭金属外壳以屏蔽电磁干扰。
- d) 电控柜内设置 IE 和 PE 铜排，不同接地要求的元器件按要求接入相应铜排。
- e) 电控柜外电缆接入柜内端子排时，需将屏蔽层接入 PE 铜排。
- f) 通讯和控制电缆选用带屏蔽的电缆。
- g) 系统应开展潜在电路分析。

9.2.10 与人的因素有关的设计（人安全/易操作/易识别）

与人的因素有关的设计（人安全/易操作/易识别）是因为除了设备本身发生故障以外，人的错误动作也会造成系统故障。人的因素设计就是应用人类工程学与技术设计，从而减少人为因素造成设备或系统故障。

PEMFC与人的因素有关的设计要求如下。

- a) 手动阀门、控制按钮标识清楚。
- b) 现场管路设压力机械表、温度表、液位机械表，便于人员掌握现场状况。
- c) 供氢装置设置紧急切断阀。
- d) 根据船级社规范设置停机按钮。
- e) 电控柜门板设置声光报警器，用于系统报警指示，安装的位置和高度合适，易于识别。
- f) 电控柜内的高压电源线，根据国标 GB/T6995.2-2008 要求进行颜色区分，易于识别。

- g) 氢燃料电池模块、储制氢装置涉及高温、强电、易燃易爆等相关设备，按照国家标准，悬挂或设置警示牌或警示标识。
- h) 电控柜外设置有电危险警示标识。
- i) 照 GB3033 对氢燃料管路和所有其他管路进行颜色标识。

9.2.11 软件技术设计

软件工程化是软件技术设计的基础。软件可靠性、安全性贯穿研制全过程。总体做好软件顶层设计，关键是分析、综合与协调。理清数据流、控制流；界面、资源分配；设计要求和软件需求；折中各功能性能的指标，具有易实现性。软件设计人员要准确理解软件需求，存在疑问勤沟通，不可草率想当然。任务提出方和开发方要共同评审确认。软件测试要全面、充分。尤其重视异常条件下的测试。嵌入式软件的设计要充分认识软件的硬件平台环境，并准确理解软件协同运行的时序和接口。软件更改进行影响域分析，安全关键软件进行安全性分析，避免副作用。中断设计的缺陷难以通过测试发现，必须在设计中加强分析。程序运行时首先进行全面的、正确的初始化。对程序模块的输入输出数据域进行检查，可防止错误的扩散，对边界值的处理和测试应该特别注意（为软件多发病）。

PEMFC软件技术设计要求如下。

- a) 对巡检等虚警率高的故障点进行软件判断。
- b) 软件中的数据判断流程，对数据的边界值进行重点分析，对边界值的处理程序加强测试。
- c) 采用模块化设计，优化软件结构，明确各个模块之间的接口，简化接口数据结构。
- d) 对氢燃料电池的故障状态进行分析，根据故障的严重程度划分四个故障等级，针对不同的故障等级进行分类处理。
- e) 对关键数据采用冗余设计，应对单个数据来源的失效风险。
- f) 针对传感器数据采用滤波等算法排除外部电磁噪声干扰。
- g) 对数据的边界条件进行分析，并进行针对性的测试。
- h) 通过软硬件仿真对软件进行逻辑测试、算法测试、故障测试等。

9.2.12 包装与运输设计

包装与运输设计（保护关重设备）目的是通过考虑产品在包装、储存、装卸与运输过程中可能出现的故障，对包装、储存、装卸与运输方式提出技术设计约束要求。

PEMFC包装与运输设计要求如下。

- a) 氢燃料电池如需长期存储，应充分吹扫，冷却液排除干净。
- b) 氢燃料电池发电系统存储环境温度低于 0℃时，应将系统内的冷却液更换为氢燃料电池专用防冻液。
- c) 存储与运输前应采用橡胶帽、密封带等材料对外露接口、接头进行密封，密封面及整个装置进行防尘、防水保护。
- d) 包装与运输前，电控柜内所有断路器处于断开状态，UPS 电源处于关闭状态。
- e) 对于安装于柜体外表面的元器件，如按钮、触摸屏，包装运输前进行防撞保护，避免元器件损坏。
- f) 电控柜类产品的运输，需在运输前做好防水措施，如铺设三防布，避免进水。
- g) 储制氢装置运输、吊装过程中，应排出设备和管路中的氢气或甲醇等氢燃料。
- h) 运输需采取减震措施，如增加减震垫。

9.2.13 容错与防差错设计

容错与防差错设计（防主动操作失误）是对产品接口和操作位置采取防差错设计措施，减少人机交互操作中发生差错的可能性。总体设计，应做好时域、空域、环境、接口等分析，避免出现“总体缺陷任务见”应进行潜在分析，暴露和消除设计隐患。设计或更改时无意引入的，在特定条件下导致系统产生非期望功能。非故障导致的，潜在路径、潜在时序、潜在指示、潜在标志。

PEMFC容错与防差错设计要求如下。

- a) 氢燃料电池系统应与冷却水装置、供氢装置、氢气浓度探测装置连锁保护。
- b) 手动阀门带自锁装置，防止误操作。

- c) 控制系统上位机人机交互界面对关键的操作有确认，操作人员确认后系统才发送相关指令。
- d) 控制系统上位机人机交互界面设定操作权限，仅限有操作权限的人员使用。
- e) 设置于同一位置的多个接插件的形状、型号、大小应尽量不同，避免相互之间插错。

9.2.14 寿命及维修替换件

寿命及维修替换件（免维修/可维修）为非金属材料应进行老化试验和寿命评估。关键材料使用性能评价尽可能模拟任务环境，以获得可靠的数据。

PEMFC寿命及维修替换件要求如下。

- a) 易损耗件如去离子器过滤器、空滤等应布置于方便维修更换的位置，同时应设置备品备件。
- b) 对于熔断器等易损件，应该置于方便维修更换的位置。
- c) 需要下载程序的控制部件或接口应置于方便触及的地方，便于后期升级维护。
- d) 对于需吊具搬运、安装的大型零部件，应考虑吊装结构。
- e) 非金属零件应进行老化试验，管路优先选用车规或验证过的材料。

9.2.15 模拟仿真

模拟仿真（强度/温度/气体浓度/振动/疲劳）是模拟仿真影响系统正常运行的参数。

PEMFC模拟仿真要求如下。

- a) 应进行系统内部氢浓度分布仿真。
- b) 应进行集成端板、管网强度及流体仿真。
- c) 应进行水热管理仿真。
- d) 应进行主电路仿真。

9.2.16 测试性

测试性通用设计准则包括测试点、测试方式及测试内容。

PEMFC测试性要求如下。

- a) 氢燃料电池监测范围，应至少包括：氢燃料电池电压、氢燃料电池电压波动、排气温度、氢燃料电池内部温度、氢燃料气体的纯度（如需要）、输出电流、控制系统故障。
- b) 应根据氢燃料电池的类型、工作模式和工作特点，考虑增加监控内容：空气流量、空气压力、冷却介质流量、压力和温度（如适用）、氢燃料流量、氢燃料温度、氢燃料压力、排气的探测、水系统的液位、水系统压力、水系统的纯净度、影响和反映氢燃料电池寿命或衰减所必须监测的参数。
- c) 氢燃料电池内部如存在化学反应，如内部重整系统，应对温度、压力和电压等进行监测。
- d) 应根据氢燃料电池的工作过程确定内部各参数的限值，如温度、压力、电压等。当各参数实际值超过限值时，应触发安全系统以实现氢燃料电池发电系统的保护。
- e) 对存在液体氢燃料泄漏可能的处所应提供快速探测液体氢燃料的装置。
- f) 通风系统应监测：氢燃料电池处所应安装通风流量和负压监测系统，不应采用风机电机的运行信号作为通风监测。

10 氢燃料电池系统验证

船用氢燃料电池系统应进行如下验证。

- a) 技术指标试验与其他试验综合统筹安排，纳入研制计划，经济、高效的实现产品技术增长、验证目标。
- b) 制定并实施工作寿命、使用寿命、贮存寿命试验方案，验证规定的寿命要求。对电堆、氢燃料电池模块应开展耐久性验证。
- c) 合理制定统计抽样方案，实施技术指标鉴定试验，验证技术指标。
- d) 对产品实施环境与参数的拉偏试验，考核设计的健壮性，进行极限试验。
- e) 贮存试验与评价应以设计为本，统筹规划。
- f) 对电路板进行100%环境应力筛选，剔除早期失效。

- g) 氢燃料电池型式试验至少包含如下环境适应性试验：绝缘电阻测量、耐电压试验、能源波动试验、能源故障试验、高温试验、低温试验、交变湿热试验、倾斜和摇摆试验、振动试验、外壳防护试验、滞燃试验、电磁兼容性试验。
- h) 对新材料、工艺开展可靠性验证和寿命评估，氢燃料电池集成端板、储制氢装置中橡胶密封圈、橡胶垫片、树脂复合材料高压罐等非金属件应进行热老化或紫外老化试验、耐热试验等验证。

附 录 A
(资料性)

船用氢燃料电池系统任务剖面、寿命剖面与可靠性要求

表A.1为船用氢燃料电池系统任务剖面与可靠性要求。

表 A.1 船用氢燃料电池系统任务剖面与可靠性要求

序号	事件	主要任务	持续时间	任务要求	可靠性要求
1	启动	外置配电网为氢燃料电池系统辅机供电，辅助装置和监控装置开始运行，满足运行条件后供氢装置开始供应氢气，空气系统开始供应空气，氢气和空气进入氢燃料电池发电装置发生电化学反应，氢燃料电池产生电压，准备对外输出电能。	随环境条件特别是温度的不同而变化，区别很大，典型时长1~10min	完成正常运行前的准备工作	技术准备完好率 故障率
2	运行	氢燃料电池系统正常对外供电时输出功率可分两种状态：稳态运行、变载工况。氢燃料电池系统运行时，各状态间可互相切换。氢燃料电池通常与其他蓄电网构成船舶电源系统，长期工作在额定功率或输出电流固定的几个工况下，输出平稳，负载变化时通常由蓄电池提供或吸收额外功率，动态响应要求较低。	典型时长 8 小时	稳态运行输出功率 动态响应时间	平均故障间隔时间
3	停机	在外部不需要氢燃料电池系统对外输出电能时，氢燃料电池系统将执行停机任务。此情况下，氢燃料电池首先切断对外供电开关，然后按照内部预设停机逻辑停机，完成惰化，最后停止对氢燃料电池系统辅机供电，停机完成。	典型停机时间1~10min	氢燃料电池惰化，并切断电源	工作过程完好率 故障率

表A.2为船用氢燃料电池系统寿命剖面与可靠性要求。

表 A.2 船用氢燃料电池系统寿命剖面与可靠性要求

项目	工作事件	环境	持续时间	工作状态	是否检测	是否维修	相应特征时间	相应的要求
运输阶段	出厂—公路（铁路、水路）运输—交接—入库	工厂库房、公路铁路水路运输、贮存库房、工房	随运输距离不同而变化	非工作状态	出厂验收	否	运输距离、运输速度、贮存时间	运输环境试验性、贮存寿命
岸基准备阶段	检查—电池总装—物料加注—系统初检	码头、装载平台	几天到几个月	部分系统工作	入库检验	预防性维护	技术准备时间	技术准备完好率
实航阶段	系统试运行—带载运行	氢燃料电池处所内	典型单次时运行长约 8 小时，总运行时长 10000 小时	系统工作	日常检查、周期性检查	排除故障、维修与维护	运行时间	可靠寿命、平均故障间隔时间、平均故障修复时间

