

团 标 准

T/CES XXX-XXXX

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产
系统设计要求

Technical Specification for Design Method of Prefabricated Cabin Type
Compact Renewable Energy Cogeneration System for Electricity, Heat and
Hydrogen

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次	I
前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 系统构成	4
5 系统总体设计要求	4
5.1 模块化设计	4
5.2 紧凑化设计	5
5.3 动态响应适应性设计	5
5.4 冗余设计	5
5.5 连锁设计	5
5.6 安全要求	5
6 模块设计要求	5
6.1 电源模块设计要求	5
6.2 碱水电解制氢模块	6
6.3 固态储氢模块	6
6.4 燃料电池模块	7
6.5 热量管理系统	8
6.6 综合安全管理系统	8
7 系统集成设计要求	9
8 选址与安装设计要求	9
附录 A 规范性附录 碱水电解模块容器容积及结构计算逻辑	10

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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会~~×××~~(**专业**)工作组归口。

本文件起草单位清华大学、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、华中科技大学、中国船舶重工集团公司第七一八研究所、清华大学山西清洁能源研究院、同济大学、河南豫氢动力有限公司、有研工程技术研究院有限公司、北方北京四方继保自动化股份有限公司。

本文件主要起草人史翊翔、刘敏、李爽、张雪松、陈群、涂正凯、刘树、王昱瑞、蔡宁生、张凤新、刘帅、常华伟、孟晓宇、张存满、李文博、汪飞杰、卢森、王树茂、张伟、王冬冬、邢英金。

本文件为首次发布。

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统设计要求

1 范围

本文件规定了预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统的系统组成、技术设计要求、模块设计要求、安全设计要求和安装要求。

本文件适用于可离网型的兆瓦级及以下风能、太阳能等可再生能源电力转换、储存场景，耦合碱性电解制氢、固态储氢、燃料电池和热管理系统等功能模块紧凑化集成的电热氢联产系统的设计。

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 151 热交换器
- GB 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求
- GB 3836.15 爆炸性环境第15部分：电气装置设计、选型、安装规范
- GB 4962 氢气使用安全技术规程
- GB/T 12459 钢制对焊管件 类型与参数
- GB/T 13347 石油气体管道阻火器
- GB/T 29729 氢系统安全的基本要求
- GB/T 35544 车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶
- GB/T 36288 固体氧化物燃料电池单电池测试方法
- GB/T 37563 压力容器用铝及铝合金锻件
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范
- GB 50177 氢气站设计规范
- GB 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计规范
- GB 50650 石油化工装置防雷设计规范
- SH 3097 石油化工静电接地设计规范
- T/CES 226-2023 电力储能系统并网检测技术规范
- T/CES 242-2023 电力储能用电池管理系统技术规范
- ISO 16750 道路车辆 电气和电子设备的环境条件和试验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

紧凑型可再生能源电热氢联产系统 Compact Renewable Energy Cogeneration System for Electricity, Heat and Hydrogen

基于太阳能、风能等可再生能源，通过集成化技术将发电、制氢与热（冷/热）供应功能相结合的系统，能够同步输出电能、氢能及热能，并利用模块化设备实现能源高效转换、存储与梯级利用，以满足用户多元用能需求，推动能源系统低碳化发展的综合供能单元。

3.2

碱性水电解制氢模块 hydrogen production module by alkaline water electrolysis

以碱性电解质（如氢氧化钾或氢氧化钠）为电解液，利用直流电作为能源，由电解槽、气液分离装置、循环水泵、换热器、气体纯化装置及辅助系统组成的模块化装备的总称。

3.3

固态储氢模块 solid state hydrogen storage module

利用材料对氢气的物理吸附和化学吸附作用将氢气存储在固体材料中。物理吸附机制是指通过范德华力将氢分子可逆地吸附在比表面积高的多孔材料。化学吸附机制中，氢一般是以离子键或共价键与其他元素结合，生成金属氢化物等材料，在一定条件下可逆地吸收和释放氢气。

3.4

燃料电池模块 fuel cell module

以燃料电池为核心，由燃料供给与循环系统、氧化剂供给系统、水/热量管理模块和控制系统等辅助系统设备组成的发电系统。

3.5

热量管理系统 heat management system

是指将碱水电解制氢模块、固态储氢模块、燃料电池系统内部各组成部分产生的热量综合控制、管理、分配和传导的热量管理系统。

3.6

电源系统 power supply system

是指将外部电力输入给电解制氢及其它需电附属设备，为各系统提供能量来源，及将燃料电池产生的电力向外稳定输出的供能装置系统。

3.7

综合安全管理系统 integrated safety management system

集成了多种安全功能和监控手段的系统，包括监测、控制、报警、排放等各种功能，旨在确保电解制氢、储氢及燃料电池系统运行过程的安全、稳定。

4 系统构成

4.1 紧凑型可再生能源电热氢联产系统主要模块设备包括电源模块、碱水电解制氢模块、储氢模块、燃料电池模块、热量管理系统和综合安全管理系统和辅助管路及部件。

4.2 紧凑型可再生能源电热氢联产系统组成示意图见图1。

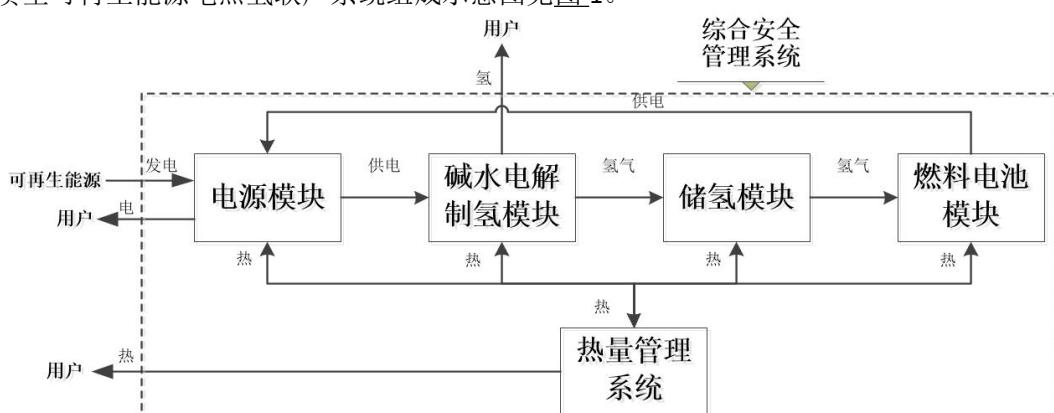


图 1 紧凑型可再生能源电热氢联产系统组成示意图

5 系统总体设计要求

5.1 模块化设计

5.1.1 系统设置为电源模块、碱水电解制氢模块、储氢模块、燃料电池模块、热量管理系统和综合安全管理系统。

5.1.2 将电源模块、碱水电解制氢模块、储氢模块、燃料电池模块单元独立封装。

5.1.3 模块间通过直流母线、高压氢气管道法兰等标准化接口互联，支持即插即用。

5.1.4 模块间维护通道宽度 $\geq 0.8\text{m}$ 。

5.2 紧凑化设计

5.2.1 各个模块集成采用预制舱式立体分层设计，纵向空间利用率为 $\geq 80\%$ ，设备集成度 $\geq 85\%$ 。

5.2.2 管道布局遵循最短路径原则，减少能量传输损耗与安全隐患。

5.2.3 模块内部和各个模块集成过程中均应进行合理布局，使整体空间利用率为 $\geq 80\%$ 。

5.2.4 碱水电解制氢模块中将电解槽、分离装置、换热器设置成卧式，电解槽放于系统最下端。

5.2.5 排污（回水）管路设置在系统最低点，将旋风分离装置设置于内部。

5.2.6 储氢系统与燃料电池模块上下布置。

5.2.7 电解槽宜选用省去二级增压单元的卧式结构电解槽。

5.2.8 储氢材料宜选用储氢密度大的固态储氢合金材料。

5.2.9 燃料电池堆宜选用集成余热回收且厚度 $\leq 30\text{cm}$ 超薄质子交换膜燃料电池堆。

5.3 动态响应适应性设计

5.3.1 电解槽与燃料电池需支持 20%–120% 额定功率的波动范围，响应时间 ≤ 10 秒。

5.3.2 储氢模块应设计规模为最大制氢量的 130%。

5.3.3 采用 IGBT 制氢电源，低负荷（5%–100%）下保持整流效率 $\geq 80\%$ ，毫秒级功率响应。

5.3.4 设置可再生能源发电过剩模式和不足模式自动切换，过省模式优先储能富余电力制氢，不足模式启动燃料电池补电。

5.4 冗余设计

5.4.1 氢气泄漏监测覆盖所有连接点，报警阈值 $\leq 1\%$ 爆炸下限（LEL），响应时间 ≤ 3 秒。

5.4.2 储氢模块需配置自动切断阀、泄压排空系统及应急电源切换功能。

5.4.3 控制单元采用双冗余通信架构，关键参数（如储氢压力、温度）实时备份。

5.5 连锁设计

5.5.1 液位高/低预警和液位高/低联锁。

5.5.2 压力高/低预警和压力高/低联锁。

5.5.3 温度高预警和温度高连锁。

5.5.4 气体泄漏报警和泄漏停止运行连锁。

5.5.5 硬联锁：信号控制电源开断。

5.6 安全要求

系统安全设计要求应符合《预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统安全要求》标准要求。

6 模块设计要求

6.1 电源模块设计要求

6.1.1 电源设计技术规范应符合 T/CES 242-2023 的要求。

6.1.2 电源波动适应性设计应符合 T/CES 226-2023 的要求。

6.1.3 电源安全设计应符合 GB/T 37563 的要求。

6.1.4 电源模块应具备交流电变直流电和直流电变交流电的供能，满足可再生能源到电解槽和燃料电池到用户用电的转化要求。

6.2 碱水电解制氢模块

6.2.1 主要由电解槽、电解液、分离装置、换热器和水泵及附件组成，工艺流程图见图 2

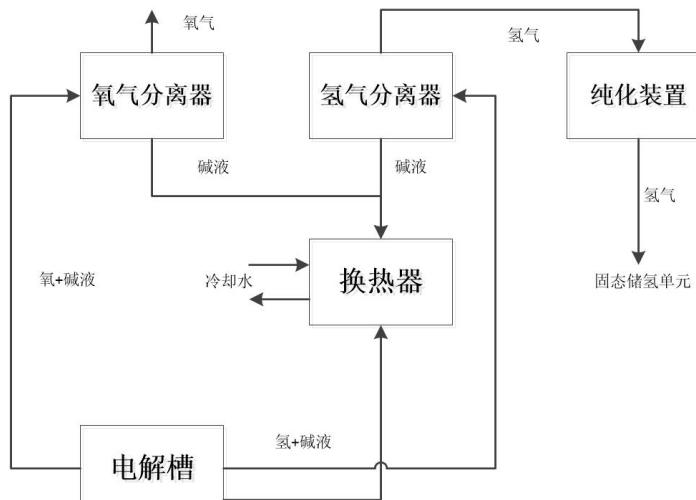


图 2 碱水电解制氢模块流程图

6.2.2 碱水电解制氢模块容器的容积及结构计算逻辑见附录 A。

6.2.3 管路材质选择，宜按以下标准选择：

- ① 碱液管路材料宜选用 S32168，DN 超过 250mm 宜选用碳钢内镀镍。
- ② 冷却水管路材料宜选用 S30408，DN 超过 100mm 宜选用碳钢或镀锌管道。
- ③ 气体管路材料宜选用 S30408，大直径管道宜选用其他不会产生氢脆的材料。

6.2.4 电解槽设计压力≤2.5MPa，运行温度≤110℃，应符合 GB/T 150.1~150.4 要求。

6.2.5 电解液应设置循环供应系统，应具备流量、温度等关键参数监测和控制功能。

6.2.6 产氢量 20~1500Nm³/h 的碱水电解制氢系统，管内流速宜按以下标准选择：

- ① 碱液流速宜控制在 1.5~2.5m/s。
- ② 主管中气体流速宜控制在 8m/s 左右，旋风分离器中入口气体流速宜控制在 10~15m/s。
- ③ 直供型补水流速宜控制在 1.5~3m/s，洗涤器补水宜控制在 0.5~1m/s。
- ④ 压缩空气和氮气流速宜控制在 8~10m/s。

6.2.7 电解水能采用直流电，电解液溶质采用 KOH 或 NaOH，浓度不宜超过 30%。

6.2.8 碱水电解制氢模块安全设计应符合 GB/T 37563 的要求。

6.3 固态储氢模块

6.3.1 模块设计应遵循安全、经济、高效及可维护原则，满足储氢密度≥5 wt%或≥50 kg/m³。

6.3.2 模块结构组成主要包括储氢材料、容器、换热单元、控制系统及其辅助管路及部件。

6.3.3 工作温度范围-40℃~200℃，释氢温度控制精度≤±5℃。

6.3.4 系统压力波动范围为额定压力的±10%，并配置冗余泄压装置。

- 6.3.5 储氢材料选择宜优先采用镁基、钛铁系或稀土系储氢合金，材料纯度 $\geq 99.5\%$ 。
- 6.3.6 模块结构设计应具备均匀热交换通道，避免局部过热或氢滞留。
- 6.3.7 容器材料应选用耐氢脆不锈钢（如316L）、铝合金或复合材料，且内部需做防渗透涂层，设计寿命 ≥ 10 年。
- 6.3.8 管路连接应采用焊接或法兰密封，泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。
- 6.3.9 加热方式应采用电加热、余热回收或外部热源，加热效率 $\geq 85\%$ ；冷却方式应采用强制风冷或液冷，冷却速率 $\geq 0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。
- 6.3.10 设置两级安全泄压装置，泄压动作压力 \leq 设计压力的1.1倍。
- 6.3.11 储氢容器外部配置防火隔离层，耐火极限 ≥ 1 小时。
- 6.3.12 安装氢气浓度传感器（检测限 $\leq 1\% \text{LEL}$ ），报警响应时间 ≤ 3 秒。
- 6.3.13 系统应具备自动切断供氢功能，泄漏量 $\geq 2\%$ 时触发紧急停机。
- 6.3.14 电气设备应符合GB 3836.1爆炸性环境防护标准。
- 6.3.15 储氢材料要求：初始活化次数 ≤ 5 次，循环寿命 ≥ 2000 次（容量衰减 $\leq 10\%$ ）。
- 6.3.16 材料与氢气长期接触后，氢脆敏感性需通过ASTM F1459标准测试。

6.4 燃料电池模块

6.4.1 燃料电池模块设计主要由燃料电池堆、氢气供应系统、换热器、水热管理系统以及控制系统等几大部分组成，工艺流程见图3。

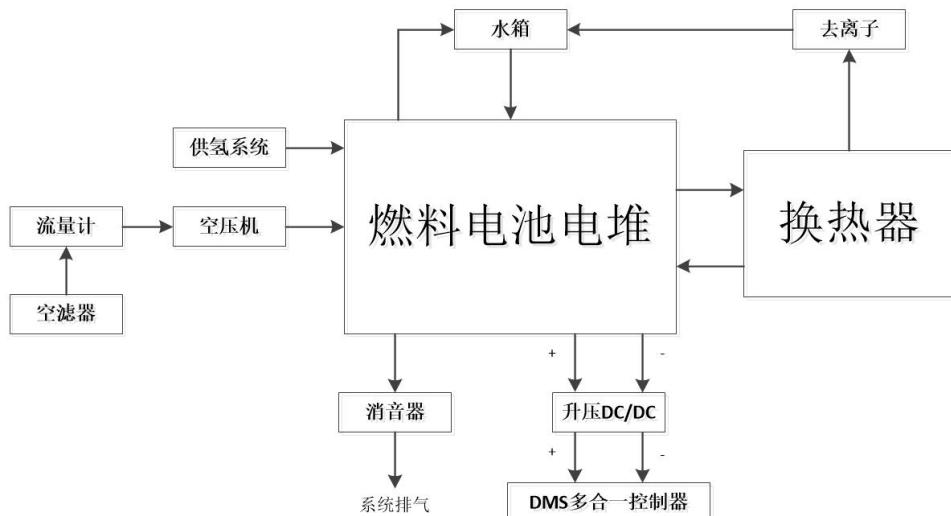


图3 燃料电池模块工艺流程图

- 6.4.2 燃料电池堆优先选择质子交换膜电池堆或固体氧化物电池堆。
- 6.4.3 需具备热电联供功能，支持电、热、氢能的协同输出，综合效率不低于80%。
- 6.4.4 模块应采用标准化接口设计，支持快速集成与模块化扩展，适应集装箱式或分布式安装需求。
- 6.4.5 燃料电池电堆应符合GB/T 36288的安全要求。
- 6.4.6 氢气泄漏率 $\leq 0.5 \text{ sccm/cm}^2$ ，压力容器需通过1.5倍工作压力测试，且配备氢浓度实时监测与报警系统。
- 6.4.7 模块在标准工况(25°C、常压)下的持续输出功率偏差不超过±2%，动态响应时间 ≤ 10 秒(0-100%)

负载)

6.4.8 单电池电压波动范围 $\leq \pm 5\%$ ，电堆平均电压 $\geq 0.6 \text{ V}/\text{cell}$ (PEMFC) 或 $\geq 0.7 \text{ V}/\text{cell}$ (SOFC)

6.4.9 冷却系统需支持宽温域运行 (-30°C~85°C)，散热能力满足峰值功率下的热负荷需求。

6.4.10 冷却系统需采用没有腐蚀性、无杂质的冷却液。

6.4.11 配备智能温控算法，电堆内部温度梯度应 $\leq 10^\circ\text{C}$ 。

6.4.12 系统接口设计

①氢气输入接口：符合 GB/T 35544 压缩氢气储罐标准，流量可调。

②电输出接口：直流电压范围 200-800 V，兼容并网逆变器或离网储能系统。

③数据接口：支持 Modbus、CAN 总线等通信协议，实时上传电压、温度、效率等关键参数。

6.4.13 配备能量管理系统 (EMS)，支持与电解槽、储氢罐、光伏/风电的协同控制。

6.5 热量管理系统

6.5.1 热量回收与分配设计

①系统需集成制氢模块、储氢模块、燃料电池模块的余热回收功能，综合热回收率 $\geq 70\%$ 。

②热输出接口应支持 65°C~90°C 热水或蒸汽输出，热交换效率 $\geq 90\%$ 。

③电解槽入口电解液温度应控制在 70°C 以下，燃料电池堆内部温度梯度 $\leq 10^\circ\text{C}$ 。

④储氢模块释氢温度控制精度 $\leq \pm 5^\circ\text{C}$ ，加热效率 $\geq 85\%$ 。

6.5.2 热交换器

①类型选择：优先采用板式换热器（空间受限时）或列管式换热器（空间充裕时）。

②材质要求：与冷却液接触部分需耐腐蚀（如 S30408 不锈钢），碱液侧材质需耐碱。

6.5.3 冷却水循环泵流量偏差 $\leq \pm 5\%$ ，扬程按系统热负荷计算，管道流速控制在 1~1.5 m/s。

6.5.4 管道布局遵循最短路径原则，DN50 以下管道弯头采用插接型，法兰密封面选用 RF 或 M/FM 形式。

6.5.5 配备温度传感器（精度 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ ）及 PLC 控制系统，实现热量动态分配与故障自诊断。

6.5.6 电解槽超温（ $\geq 110^\circ\text{C}$ ）或燃料电池堆局部过热（温差 $\geq 15^\circ\text{C}$ ）时触发联锁停机。

6.5.7 冷却系统需配置备用泵，主备切换时间 ≤ 10 秒。

6.5.8 热管理模块应通过 GB/T 151 热交换器性能测试及 ISO 16750 环境适应性验证。

6.6 综合安全管理系统

6.6.1 系统架构采用分层分布式架构，包含传感器层（氢气浓度、温度、压力等）、控制层（PLC/DCS）和监控层（HMI/SCADA），关键控制单元应采用双冗余设计，主备切换时间 ≤ 1 秒。

6.6.2 监测功能设计

①氢气泄漏监测覆盖所有连接点，检测精度 $\leq 1\%\text{LEL}$ ，报警响应时间 ≤ 3 秒。

②设置多级压力监测点（电解槽/储氢罐/管路），量程覆盖 0-150% 设计压力，精度等级 ≤ 0.5 级。

③温度监测应覆盖电解液循环系统 (0-150°C)、储氢模块 (-50-250°C)、燃料电池堆 (-30-100°C)

6.6.3 联锁控制要求

①硬联锁系统独立于 PLC 运行。

②氢气浓度 $\geq 2\%\text{LEL}$ ，紧急停机。

③系统压力 $\geq 110\%$ 设计值，开启泄压阀。

④电解槽超温自动降功率。

6.6.4 应急处理系统

- ①配置氮气吹扫系统，可在 30 秒内将危险区域氧浓度降至 $<5\%$ 。
- ②紧急泄放管径 $\geq DN80$ ，排放速率 \geq 系统最大产氢量的 200%。
- ③防爆通风系统换气次数 ≥ 20 次/小时。

6.6.5 通信与数据管理

- ①支持 OPC UA、Modbus TCP 等工业协议，与各子系统刷新周期 $\leq 100ms$ 。
- ②数据存储应满足：实时数据存储间隔 ≤ 1 秒，历史数据保存周期 ≥ 10 年，报警事件记录精确到毫秒级。

6.6.6 人机界面要求

- ①三维可视化界面应实时显示氢气管网拓扑及浓度热力图和各模块安全状态（绿/黄/红三色标识）
- ②声光报警器声压级 $\geq 85dB$ （1m 处）。
- ③光信号可见距离 $\geq 50m$ 。

7 系统集成设计要求

- 7.1 模块间通过直流母线、高压氢气管道及热力管道互联，支持即插即用。
- 7.2 电气接口支持 Modbus、CAN 总线通信协议，实时上传运行参数至综合安全管理系统。
- 7.3 集装箱式集成时，40 英尺柜内空间利用率 $\geq 85\%$ ，设备间距 $\geq 0.8 m$ 。
- 7.4 电解槽与储氢模块上下分层布置，氢气管路长度 $\leq 5 m$ ，弯头数量 ≤ 3 个。
- 7.5 控制系统采用双冗余架构，关键数据（压力、温度、流量）实时备份，通信中断时自动切换至本地控制。
- 7.6 配备热量管理系统，支持与电解槽、储氢罐、可再生能源的协同控制，动态分配功率并实现故障自诊断。
- 7.7 数据存储周期 ≥ 10 年，支持历史数据回溯及远程故障诊断。

8 选址与安装设计要求

- 8.1 应优先考虑太阳能、风能等可再生能源丰富的区域，光伏年辐射量需 $\geq 1200kWh/m^2$ ，年平均风速 $\geq 5m/s$ 。
- 8.2 场地需平坦、开阔，坡度 $\leq 5\%$ ，避免山体、高大建筑或植被遮挡。
- 8.3 储氢罐与周边建筑物距离 $\geq 15m$ ，与公共道路 $\geq 10m$ 。
- 8.4 制氢设备与明火/火花源距离 $\geq 25m$ ，加氢设施与居民区距离 $\geq 50m$ 。
- 8.5 基础需采用 C30 混凝土浇筑，承载力 $\geq 150kPa$ ，设备安装水平误差 $\leq 2mm/m$ 。
- 8.6 管道连接需使用氢用不锈钢材质，焊接后需通过氦检漏测试，泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-6} Pa \cdot m^3/s$ 。
- 8.7 氢能设备区域需设置防爆电气设备，通风系统换气次数 ≥ 12 次/小时，氢气浓度监测装置需覆盖全区域。
- 8.8 系统整体接地电阻 $\leq 4\Omega$ ，避雷针保护范围需覆盖所有露天设备。

附录 A
规范性附录
碱水电解模块容器容积及结构计算逻辑

碱水电解模块容器容积及结构计算逻辑见图 4

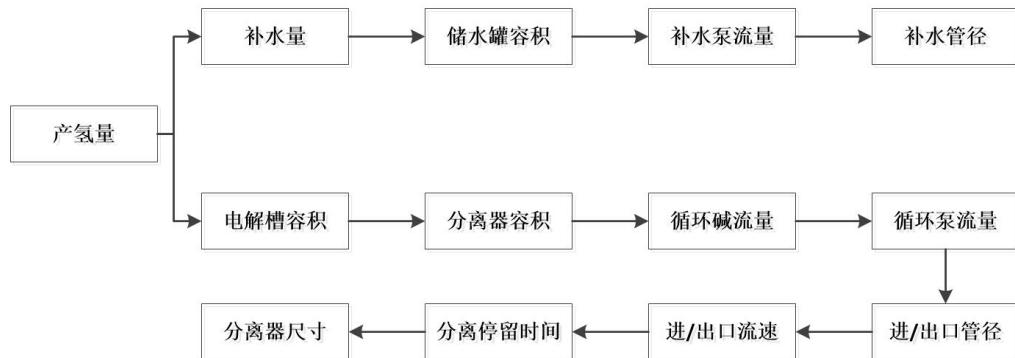


图 4 碱水电解制氢系统设计逻辑图

- A.1 根据产氢量确定碱液流量，根据管阻和液位差计算扬程，从而确定循环泵的型号。
- A.2 根据系统耗水量，确定泵的流量，根据系统压力，确定泵的扬程，从而确定补水泵的型号。
- A.3 纯化装置选型：根据系统氢气产量和处理量选择，并留有一定设计余量，应考虑氢气的纯度，温度，压力等参数来确定。
- A.4 系统产氢量决定了纯化装置的处理量，根据后端用户端的纯度、压力和露点的要求，确定纯化装置的设计和选型。
- A.5 接口管件连接形式的选择：DN50 以下碱液管道弯头应采用插接型弯头，法兰连接的密封面应采用 RF 或 M/FM 形式。
- A.6 焊接管件应按照 GB/T12459 标准来选取。