



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

电解水制氢系统功率波动适应性评价方法

Power fluctuation adaptability testing methods of water electrolysis system for
hydrogen production

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(报批稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

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

 3.1 术语 1

 3.2 符号 3

4 试验条件 5

 4.1 试验边界 5

 4.2 试验条件 6

 4.2.1 概述 6

 4.2.2 试验环境条件 6

5 试验准备 6

 5.1 资料检查 6

 5.2 试验安全检查 6

 5.3 原料要求 6

 5.4 系统状态检查 6

 5.5 数据采集计划 7

 5.6 时间同步性 7

6 测量仪器 7

 6.1 概述 7

 6.2 测量仪器及安装位置 7

 6.2.1 电解槽电能输入测量 7

 6.2.2 电功率测量 7

 6.2.3 气体流量测量 7

 6.2.4 液体流量测量 7

 6.2.5 温度测量 8

 6.2.6 压力测量 8

 6.2.7 气体纯度测量 8

 6.2.8 数据采集装置 8

 6.2.9 环境条件测量 8

 6.3 测试仪器精度要求 10

7 试验项目及测试指标 10

8 性能测试方法 12

 8.1 启动试验 12

 8.1.1 概述 12

8.1.2 试验方法	12
8.1.3 冷/热启动至额定电流时间	13
8.1.4 冷/热启动至额定工况时间	13
8.1.5 冷/热启动至气体纯度合格时间	13
8.1.6 冷/热启动功率曲线	13
8.1.7 冷/热启动氧中氢、氢中氧浓度曲线	13
8.1.8 热启动电流-电压曲线	13
8.2 额定工况稳态性能试验	14
8.2.1 概述	14
8.2.2 试验方法	14
8.2.3 电解槽额定功率	14
8.2.4 电解槽电压效率	14
8.2.5 电流密度	15
8.2.6 产氢量	15
8.2.7 电解槽单位直流电耗	17
8.2.8 电源转换效率	18
8.2.9 直流输出电流控制精度	18
8.2.10 电流效率	19
8.2.11 辅助设施和公用工程单位电耗	19
8.2.12 制氢系统单位总电耗	20
8.3 多工况稳态性能试验	20
8.3.1 概述	20
8.3.2 试验方法	21
8.3.3 功率调节范围	21
8.3.4 电流-电压曲线	21
8.3.5 电流密度-平均小室电压曲线	21
8.3.6 电流-电源转换效率曲线	22
8.3.7 电流-制氢系统单位总电耗曲线	22
8.4 变功率动态性能试验	22
8.4.1 概述	22
8.4.2 试验方法	22
8.4.3 电解槽加/减载功率曲线	23
8.4.4 电解槽最大加/减载速率	23
8.4.5 电源输入端的加/减载功率曲线	23
8.4.6 加/减载氧中氢、氢中氧浓度曲线	23
8.5 停机试验	23
8.5.1 概述	23
8.5.2 试验方法	23
8.5.3 电解槽停机功率曲线	24
8.5.4 停机氧中氢、氢中氧浓度曲线	24

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。

本文件由全国氢能标准化技术委员会（SAC/TC 309）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

电解水制氢系统功率波动适应性评价方法

警告：本文件不涉及与其应用有关的所有安全问题。在使用本文件时，使用者有责任制定相应的安全和保护措施，明确其限定范围，并保证符合国家有关法律法规、强制性国家标准的规定。

1 范围

本文件规定了电解水制氢系统的功率波动适应性测试的试验边界、试验条件、试验准备、测量仪器、试验项目及测试指标和性能测试方法。

本文件适用于产氢量5 m³/h及以上的碱性电解水制氢系统和质子交换膜电解水制氢系统功率波动适应性测试。阴离子交换膜电解水制氢系统的功率波动适应性可参照本文件。

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 37562 压力型水电解制氢系统技术条件

3 术语和定义

3.1 术语

GB/T 19774、GB/T 24499、GB/T 37562 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1 电解水制氢系统 **water electrolysis system for hydrogen production**

电解水制氢系统包含电解槽、电源转换单元、气液分离系统、热管理系统、氢气纯化系统、氧气纯化系统、控制系统、辅助设施、公用工程等。其中，氢气纯化系统和氧气纯化系统为可选设备。

3.1.2 功率波动适应性 **power fluctuation adaptability**

电解水制氢系统在制造商允许的最大功率和最小功率范围内，对由于输入功率变化引起的稳态、动态（加载/减载）性能变化适应性。

3.1.3 额定工况 **rated operating condition**

电解水制氢系统在制造商规定的额定压力、额定温度和额定电流下对应的运行状态。

3.1.4 冷待机状态 **cold steady state**

电解水制氢系统的电源转换单元、电解槽、气液分离系统等主工艺设备在没有任何电输入下的状态。此时电解液温度与环境温度一致，控制和安全相关辅助设施处于运行状态，制氢系统已完成启动前的准备工作（如置换、吹扫、补水、碱液/纯水循环、仪表预热等）。

3.1.5 热待机状态 **hot steady state**

电解水制氢系统的电解槽温度在制造商给定的工作温度范围内，电解槽输入电流为零的状态。该状态下，电解槽可随时输入电流再次启动。

3.1.6 冷启动 **cold start**

电解水制氢系统从冷待机状态直接通电的启动。

3.1.7 热启动 **hot start**

电解水制氢系统从热待机状态直接通电的启动。

3.1.8 冷启动时间 **cold start time**

电解水制氢系统从冷待机状态达到某一指定状态的时间。

注：根据测试需要，本文件给出了冷启动至额定电流时间、冷启动至额定工况时间、冷启动至气体纯度合格时间的指标定义和测试方法。

3.1.9 热启动时间 **hot start time**

电解水制氢系统从热待机状态达到某一指定状态的时间。

注：根据测试需要，本文件给出了热启动至额定电流时间、热启动至额定工况时间、热启动至气体纯度合格时间的指标定义和测试方法。

3.1.10 热中性电压 **thermoneutral voltage**

实现电化学反应可持续热平衡操作（不产生废热，不对外吸收热）的最小电压。

3.1.11 电压效率 **voltage efficiency**

电解槽在该运行条件下的热中性电压与电解槽的直流电压之比。

3.1.12 电流密度 **current density**

单位电极活性面积上通过的电流。

[来源：GB/T 20042.1-2017，3.2.14]

3.1.13 产氢量 **hydrogen yield**

采用某一方法直接测量或计算得到的电解水制氢系统在单位时间内产生的氢气体积。

注：根据测试需要，本文件给出了标称产氢量和实测产氢量的指标定义和测试方法。

注：本文件中所有的气体体积均为标准状态，即0℃（273.15K）、101325Pa（绝压）状态下的气体体积，单位为m³。

3.1.14 电解槽单位直流电耗 **unit DC power consumption of stack**

电解水制氢系统稳定运行在某一工况下，生产标准状态下1m³氢气电解槽所消耗的电量。

注：根据测试需要，本文件给出了电解槽标称单位直流电耗和实测单位直流电耗的指标定义和测试方法。

3.1.15 电源转换效率 **transfer efficiency of power supply**

电源转换单元输出的直流电能与输入电能之比。

3.1.16 电源直流输出电流控制精度 **current control precision of DC output of power supply**

电源转换单元的整流电源或直流电源的直流输出端，工作于直流电流控制模式下的电流设定值与实际输出电流的差值的绝对值与电流设定值之间的比值。

3.1.17 电流效率 **current efficiency**

电解槽内发生有效电化学反应的电流与电解槽输入电流之比。

注：电流效率达不到100%的主要原因包括电极上副反应、已析出产物再反应、膜分离效率低、电路从旁路漏电、短路等。

3.1.18 辅助设施单位电耗 **unit power consumption of auxiliary facilities**

电解水制氢系统稳定运行在某一工况下，生产标准状态下1m³氢气辅助设施所消耗的电量。

注：采用实测产氢量进行计算。辅助设施的电耗一般包括循环泵电耗、补水泵电耗、气体纯化系统电耗、控制系统电耗等。

3.1.19 公用工程单位电耗 **unit power consumption of utility facilities**

电解水制氢系统稳定运行在某一工况下，生产标准状态下1m³氢气公用工程所消耗的电量。

注：采用实测产氢量进行计算。公用工程的电耗一般包括冷却、储热、给水、水纯化、仪表供气、吹扫置换气等维持电解水制氢系统运转的公用设施的电力消耗。

3.1.20 电解设施单位电耗 **unit power consumption of electrolysis facilities**

电解水制氢系统稳定运行在某一工况下，生产标准状态下1m³氢气电解设施所消耗的电量。

注：采用实测产氢量进行计算。电解设施的电耗一般包括电解槽直流电耗、变压器变压损耗、电源整流损耗、铜排或电缆输入损耗等用于电解的电力消耗。

3.1.21 制氢系统单位总电耗 unit total energy consumption of hydrogen production system

电解水制氢系统稳定运行在某一工况下，生产标准状态下 1m^3 氢气制氢系统所消耗的总电量。

注：采用实测产氢量进行计算。根据公用工程用电的测量需要和实际情况，本文件给出了包含和不包含公用工程的制氢系统单位总电耗的指标定义和测试方法。

3.1.22 功率调节范围 power regulation range

电解水制氢系统能够稳定运行的电解槽的最大功率和最小功率范围，以电解槽输入功率与额定功率之比的形式表示。

3.1.23 准确度等级 accuracy class

在规定工作条件下，符合规定的计量要求，使测量误差或仪器不确定度保持在规定极限内的测量仪器或测量系统的等别或级别。

[来源：JJF 1001-2011，7.26/VIM4.25]

3.1.24 最大允许误差 maximum permissible errors

对给定的测量、测量仪器或测量系统，由规范或规程所允许的，相对于已知参考量值的测量误差的极限值。

[来源：JJF 1001-2011，7.27/VIM4.26]

3.2 符号

本文件中所用的符号及其含义列于表1，包括相应的单位。

表1 符号

符号	定义	单位
A_s	电解槽的电极活性区面积	m^2
E_{th}	热中性电压	V
e_a	辅助设施单位电耗	kWh/m^3
e_{el}	电解槽单位直流电耗	kWh/m^3
e_n	电解槽标称单位直流电耗	kWh/m^3
e_r	电解单位电耗	kWh/m^3
e_t	系统单位总电耗	kWh/m^3
e_i	公用工程单位电耗	kWh/m^3
F	法拉第常数	C/mol
F_p	实测产氢量	m^3/h
F_{ps_H2}	试验开始时刻的氢气累积流量	m^3
F_{pe_H2}	试验结束时刻的氢气累积流量	m^3
F_{ps_H2O}	试验开始时刻的水表的累积流量	m^3
F_{pe_H2O}	试验结束时刻的水表的累积流量	m^3
F_{ps_O2}	试验开始时刻的氧气累积流量	m^3
F_{pe_O2}	试验结束时刻的氧气累积流量	m^3
F_n	标称产氢量	m^3/h
ΔH	电解水制氢反应的焓变	J/mol
I_c	电源的设定电流	A
I_{rat}	电解槽在额定工况下的输入电流	A
I_s	电解槽的输入电流	A
J_s	电解槽的电流密度	A/m^2

N_s	电解槽的小室个数	
n_e	电解水制氢反应的电子摩尔数	
p_0	标准状况的气体压力	Pa
p_{te}	试验结束静置后的储罐的气体压力	Pa
p_{ts}	试验开始时刻的储罐的气体压力	Pa
ΔP	电解槽的功率调节范围	%
P_{max}	系统能够稳态运行下电解槽的最大功率输入	kW
P_{min}	系统能够稳态运行下电解槽的最小功率输入	kW
P_{rat}	电解槽的额定功率	kW
P_{rd}	从试验开始到试验结束电解槽的平均输入功率	kW
P_{rs}	从试验开始到试验结束电源转换单元的平均输入功率	kW
rP_u	电解槽最大功率加载速率	kW/s
rP_d	电解槽最大功率减载速率	kW/s
T_0	标准状况的气体温度	K
T_{es}	试验结束静置后的储罐的气体温度	K
T_{ts}	试验开始时刻的储罐的气体温度	K
t	试验时间	h
Δt_{s1}	启动至额定电流时间	min或s
Δt_{s2}	启动至额定工况时间	min或s
Δt_{s3}	启动至气体纯度合格时间	min或s
Δt_u	电解槽从最小功率升高到最大功率所需的最短时间	s
Δt_d	电解槽从最大功率降低到最小功率所需的最短时间	s
t_{s1}	启动开始时刻	min或s
t_{s2}	启动后电解槽首次达到额定电流点的时刻	min或s
t_{s3}	启动后电解水制氢系统首次达到额定工况点的时刻	min或s
t_{s4}	启动后氧中氢和氢中氧浓度首次达到合格气体组分范围的时刻	min或s
t_{te}	容积法试验结束时刻	h
t_{ts}	容积法试验开始时刻	h
U_c	平均小室电压	V
U_{rat}	电解槽在额定工况下的电压	V
U_s	电解槽的电压	V
V	气体储罐的水容积	m ³
W_{ae}	试验结束时辅助设施电能表的累积读数	kWh
W_{as}	试验开始时辅助设施电能表的累积读数	kWh
W_{rd}	从试验开始到试验结束电解槽的直流输入电能	kWh
W_{rs}	从试验开始到试验结束电源转换单元的输入电能	kWh
W_{ue}	试验结束时公用工程电能表的累积读数	kWh
W_{us}	试验开始时公用工程电能表的累积读数	kWh
δ_I	直流输出电流控制精度	%
η_c	系统的电流效率	%
η_s	系统的总电效	%
η_{se}	电源转换单元的电能转换效率	%

η_v	电解槽的电压效率	%
----------	----------	---

4 试验条件

4.1 试验边界

本文件中的电解水制氢系统的边界示意如图1所示。其中，氢气纯化系统和氧气纯化系统根据实际需要，为可选设备。

系统内由以下部分组成：

- a) 电解槽：电解水制氢系统的主体设备，串并联方式包含一正一负或一正两负（即中间极板接正极，两端极板接负极）；
- b) 电源转换单元：将系统的输入电源转换为符合电解槽输入电能要求的设备。电源转换单元的输入电能可以是交流，也可以为直流。若输入电能为交流，一般包含整流变压器和整流电源两部分。电源转换单元的输入电压等级和交直流形式根据运行现场实际情况设计，本文件不做要求；
- c) 气液分离系统：用于分离气体产品与液体介质并保持内部的碱液或纯水循环，包含气水分离器、洗涤器、碱液/水循环泵等设备；
- d) 热管理系统：为保持内部各设备温度在正常范围内而提供冷却、散热、加热或储能再利用的系统；
- e) 气体纯化系统：用于去除产品气体中的杂质、水分等，包含氢气纯化器、氧气纯化器等设备；
- f) 控制系统：用于电解水制氢系统的自动控制和监测，并且能够在系统发生故障时执行相应的应急动作。
- g) 辅助设施：电解水制氢系统中不直接参与电解反应的部分设施，包括气液分离系统、气体纯化系统以及控制系统等；
- h) 公用工程：维持电解水制氢系统运转的设施，如综合热管理系统、给水系统、水纯化系统、仪表供气系统、吹扫置换气系统等。

本系统边界内的电源转换单元、电解槽、气液分离系统、气体纯化系统可以是单台，也可以是同型号的多台，如一台整流变压器对应多台整流电源和电解槽，多台电解槽对应一套气液分离系统，多台电解槽对应一套气体纯化系统。各组件的个数和连接方式根据运行现场实际需求设计，本文件不做要求。

多台设备的功率波动适应性测试方法可参考本文件进行。

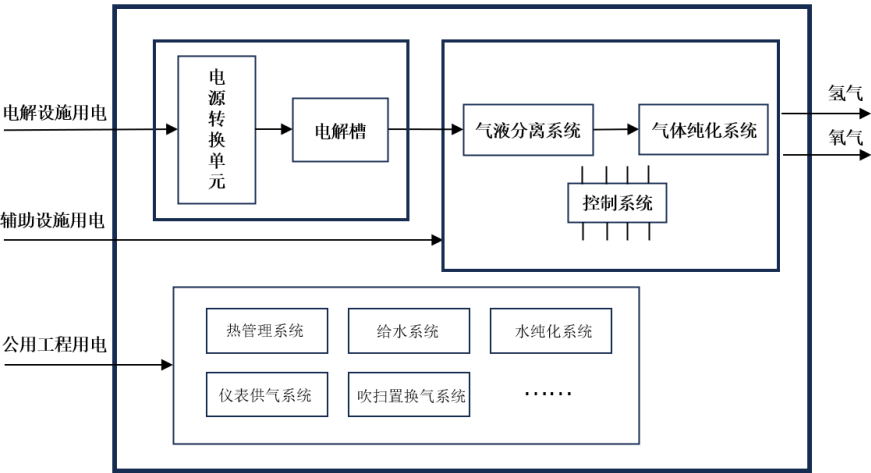


图1 典型的电解水制氢系统范围示意图

4.2 试验条件

4.2.1 概述

电解水制氢系统功率波动适应性测试评价的目的是考察电解水制氢系统的稳态运行性能和适应可再生能源波动性的能力，以供后续机组制定动态运行策略。

由于电解水制氢系统的波动运行能力受电源转换单元、辅助设施、公用工程、环境条件的影响，因此测试报告应明确标明试验场所，并记录试验环境条件，详细记录图1边界范围内的设备组成和主要技术参数。

试验场所优先推荐为电解水制氢系统所安装的运行现场，也可以在制造商的出厂测试场地或第三方测试场地，但用户应对不同测试场所的测试结果（特别是动态性能测试）可能存在差异有明确了解。

本文件不涉及所有可能的安全问题，使用者有责任采取适当的安全、健康和保护措施，并保证符合国家有关法律法规规定的条件。

4.2.2 试验环境条件

各项试验应在下列规定的环境中进行：

- a) 环境温度为5°C~55°C，若环境温度过高，现场测试人员应做好防护措施；
- b) 相对湿度在制造商要求之内，且不超过90%；
- c) 大气压强一般为86kPa~106kPa，若试验环境压强低于86kPa或海拔高度高于1300m，需注意选用符合该环境条件的测量仪器，并单独标明。

若电解水制氢系统的电源转换单元、电解槽、气液分离系统、气体纯化系统、公用工程等处于不同的厂房或构筑物，应记录所有设备所处场所的环境温度和湿度。

5 试验准备

5.1 资料检查

试验前应检查所有设备的合格证、检定或校准证书、技术文件（包括全部例行试验记录），压力设备、压力管道及安全附件等特种设备监检要求的证书、使用登记证等。文件资料齐全并逐一进行核对无误后，才能进行试验。

5.2 试验安全检查

试验前应对试验用介质、试验系统、试验环境的安全性以及试验操作人员的安全防护进行评估。

试验前应参照国家相关标准，对试验场所的防爆等级、防雷接地、应急措施、通风防火、碱液防护等进行安全检查。试验前应检查电解水制氢系统各类液体、气体管路和电气线路的连接准确性等，并确认试验内容与指标在制造商或系统集成商的设计范围以内。

5.3 原料要求

碱性电解水制氢系统和质子交换膜电解水制氢系统的试验用原料水品质应分别符合 GB/T 37562-2019 中5.1.2.5、5.1.2.8的要求；

碱性电解水制氢系统的试验用电解液质量要求应符合 GB/T 37562-2019 中5.1.2.7的要求。

5.4 系统状态检查

试验前制氢系统的气密性应满足 GB/T 37562-2019 中6.2.2和6.2.3的要求，制氢系统已完成吹扫和置换，电源和自控系统状态满足试验前状态要求，各种辅助设施均应达到开机所具备的条件。

5.5 数据采集计划

试验前应准备好符合数据采集时长和频次的数据采集设备和数据记录设备。启动、停机以及变功率动态性能试验的采集频次 $\geq 1\text{Hz}$ 。

5.6 时间同步性

试验前应对所有测试设备进行对时校准，设定同一个触发采样时间（精确到秒），确保数据时间的一致性及同步性。

6 测量仪器

6.1 概述

测量仪器应检定或校准合格，并在校准有效期内。测量仪器应满足试验环境条件要求，仪器的量程范围应包含试验的最大和最小量程。

测量仪器的安装方法、安装位置、补偿方式等对测试结果影响较大，应按照仪器厂家的说明书进行安装。

测量仪器的安装位置应在测试报告中详细标明。安装位置若在防爆区，应按照防爆要求选用合适型号和信号传输方式。

6.2 测量仪器及安装位置

6.2.1 电解槽电能输入测量

电解槽的总输入电能采用直流电流传感器和直流电压表检测。

测试仪表位置为近电解槽的电能输入端口。电流传感器安装在正极铜排或电缆线路上，电压表的安装位置为电解槽正极和负极端板。

若现场安装条件受限，经用户和制造商双方同意，认为电源转换单元与电解槽之间的铜排电压损耗可忽略，电压测量位置可调整至电源转换单元的输出端口。

6.2.2 电功率测量

电源转换单元的总输入电能可根据电压等级和交直流形式采用功率计、电能表、电流传感器、电压表等仪表测量。测量位置为电源转换单元的电能输入接口处，且应尽可能靠近系统边界。

对于典型的10kV或35kV三相进线的电源转换单元，建议在整流变压器前端线路上安装功率计进行测量。对于输入电压等级较低的电源转换单元，建议采用电能表测量。对于直流电源，可采用电流传感器和电压表进行测量。

辅助设施和公用工程的总输入电能采用功率计或电能表等仪表测量。测量位置为对应设备的总电力输入端。

若某一个设备需要单独测量电耗，如纯化系统，可在该设备的供电线路处安装电能表进行测量。

6.2.3 气体流量测量

氢气和氧气的流量测量，应采用具有累积功能的质量流量计。由于流量计的安装位置和方式对结果影响较大，应确保测量气体和安装条件符合该流量计的温度压力范围、杂质要求、管道口径、前后直管段、安装插入深度等。

氢气和氧气流量的测量位置在电解水制氢系统的产品气体输出管道上。

6.2.4 液体流量测量

电解过程的原料水的流量测量，应采用具有累积功能的流量计。

原料水流量的测量位置在原料水箱向电解槽补水的管道上。

6.2.5 温度测量

电解液或纯水的温度采用具有远传功能的温度传感器测量。为保障测量精度，宜选用热电阻。

冷启动和热启动试验的电解液或纯水的温度测量点为电解槽入口处，且尽可能靠近电解槽。

电解水制氢系统的运行温度一般是指电解槽氧侧出口温度，且尽可能靠近电解槽。

氢气产量试验（容积法）的气体储罐的温度测量点在储罐处。因各储罐设计不一，仪表安装位置参照压力容器相关设计规范。

6.2.6 压力测量

气体压力采用具有远传功能的压力传感器测量。

电解水制氢系统的运行压力一般是指氧气气液分离系统处的气体压力。

氢气产量试验（容积法）的气体储罐的压力测量点在储罐处。因各储罐设计不一，仪表安装位置参照压力容器相关设计规范。

6.2.7 气体纯度测量

气体纯度应采用氢中氧、氧中氢在线分析仪测量。如有气体纯化系统，纯化后气体可采用微量氧分析仪测量。

氢中氧分析仪和氧中氢分析仪的测量点分别在氢气气液分离器和氧气气液分离器的容器顶部或分离后的气体管道上。

为确保测试准确，每次测试前，氧中氢测试仪和氢中氧测试仪应进行标定。标定所用的气体组分按照仪表厂家的要求配置。

6.2.8 数据采集装置

数据采集过程应满足对应的采样时间和同步性要求，应采用数据记录仪，或采用带有数据远传功能的测试仪表并在终端进行数据记录。

6.2.9 环境条件测量

应按照4.2.2节的要求，开展环境温度、相对湿度、大气压强的测量，采用温湿度计、绝压测量仪等仪器测量。

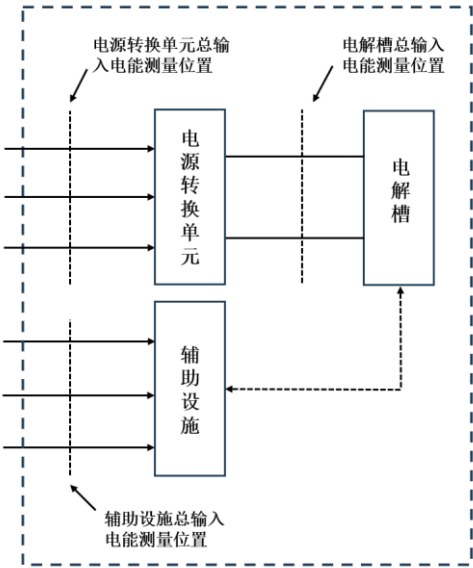
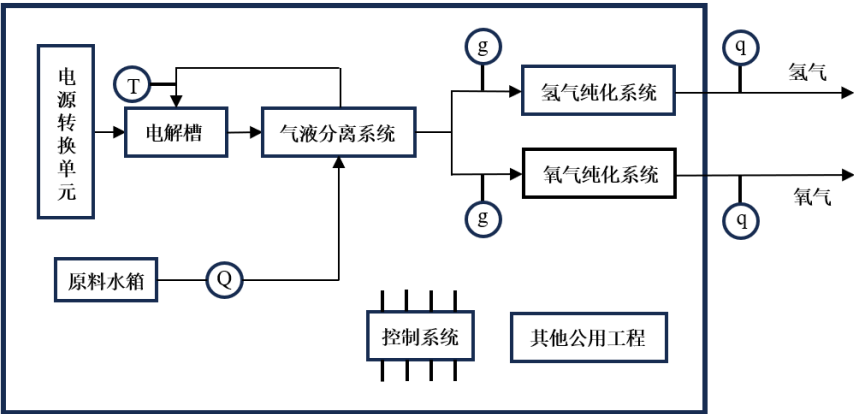


图2 电解水制氢系统电功率测量相关参数测试位置示意图



说明：
Q — 水流量计 T — 温度传感器
q — 氢气/氧气流量计 g — 氢中氧/氧中氢分析仪

图3 电解水制氢系统测量仪器安装位置（流量计法）

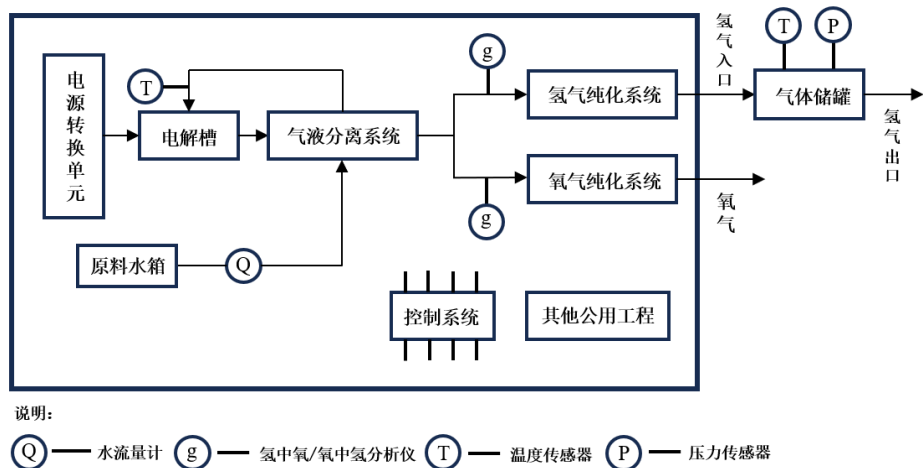


图4 电解水制氢系统测量仪器安装位置（容积法）

6.3 测试仪器精度要求

测试仪器仪表准确度等级或最大允许误差应符合表2要求。

表2 测试仪器仪表准确度要求

名称	准确度等级/最大允许误差
功率计	0.2级
电压表	±0.5%
电流传感器	0.5级
交流电能表	1级
直流电能表	1级
氢气质量流量计	1.5级
氧气质量流量计	1.5级
水流量计	0.5级
温度传感器	±0.5℃
压力传感器	0.5级
氢中氧测试仪	±1% FS
氧中氢测试仪	±2% FS
微量氧分析仪	±1% FS
数据采集装置	±0.2%
温度计	±1℃
湿度计	±5% RH
绝压测量仪	±5hPa
秒表	±0.5S/d

7 试验项目及测试指标

本文件的功率波动适应性试验项目如表3所示，建议按照编号顺序进行试验。根据测试对象的不同，试验项目可根据实际设备情况和需求选做。

本表格中系统为图1所示的电解水制氢系统的范围。

表3 功率波动适应性试验项目

编号	试验类型	测试对象	测试指标	章节
1	冷启动试验	电解槽	冷启动至额定电流时间（冷启动温度）	8.1.3
			冷启动功率曲线	8.1.6
		系统	冷启动至额定工况时间（冷启动温度）	8.1.4
			冷启动至气体纯度合格时间（冷启动温度）	8.1.5
			冷启动氧中氢、氢中氧浓度曲线	8.1.7
2	额定工况稳态性能试验	电解槽	额定功率	8.2.3
			电压效率	8.2.4
			电流密度	8.2.5
			标称产氢量	8.2.6.1
			标称单位直流电耗	8.2.7.1
			实测单位直流电耗	8.2.7.2
		电源转换单元	电源转换效率	8.2.8
			直流输出电流控制精度	8.2.9
		系统	实测产氢量	8.2.6.2
			电流效率	8.2.10
			辅助设施单位电耗	8.2.11.1
			公用工程单位电耗	8.2.11.2
			制氢系统单位总电耗（不含公用工程）	8.2.12.1
			制氢系统单位总电耗（含公用工程）	8.2.12.2
3	多工况稳态性能试验	电解槽	功率调节范围	8.3.3
			电流-电压曲线	8.3.4
			电流密度-平均小室电压曲线	8.3.5
		电源转换单元	电流-电源转换效率曲线	8.3.6
		系统	电流-制氢系统单位总电耗曲线	8.3.7
4	热启动试验	电解槽	热启动至额定电流时间（热启动温度）	8.1.3
			热启动功率曲线	8.1.6
			热启动电流-电压曲线	8.1.8
		系统	热启动至额定工况时间（热启动温度）	8.1.4
			热启动至气体纯度合格时间（热启动温度）	8.1.5
5	变功率动态性能试验	电解槽	电解槽加/减载功率曲线	8.4.3
			电解槽最大加/减载速率	8.4.4
		电源转换单元	电源输入端加/减载功率曲线	8.4.5
		系统	加/减载氧中氢、氢中氧浓度曲线	8.4.6
6	停机试验	电解槽	停机功率曲线	8.5.3
		系统	停机氧中氢、氢中氧浓度曲线	8.5.4

因启动温度对冷/热启动时间影响巨大，冷/热启动时间指标必须附带标注启动温度。

建议提供功率曲线的同时附带提供氧中氢浓度和氢中氧浓度曲线，以确认该试验过程中系统始终处于安全运行范围内。

8 性能测试方法

8.1 启动试验

8.1.1 概述

本试验的目的是测试电解水制氢系统从冷/热待机状态下启动，直到电解槽达到额定电流、或系统达到额定工况，或气体纯度达到合格所需的时间、功率曲线、浓度曲线等。

一般认为未通入纯化系统的气体纯度同时达到氧中氢浓度 $\leq 1.5\%$ 且氢中氧浓度 $\leq 0.3\%$ 时为合格。

一般认为电解水制氢系统的安全运行范围为氧中氢浓度 $\leq 2.0\%$ 且氢中氧浓度 $\leq 1.0\%$ ，制造商也可自行增加氢氧分离器液位、液位差等其他安全相关参数。

一般认为热待机状态的碱性电解槽入口的电解液温度在 50°C 以上，质子交换膜电解槽入口的纯水温度在 45°C 以上。

8.1.2 试验方法

8.1.2.1 冷启动试验

- 试验开始前，电解水制氢系统通过自然冷却或强制冷却等方式，在冷待机状态下保持 2h 以上，该状态下电解槽入口的电解液温度与环境温度的偏差应在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内；
- 试验开始前，电解水制氢系统应完成控制、安全相关辅助设施的启动以及吹扫、置换操作，循环泵处于运行状态；
- 启动电解水制氢系统，记录发出启动指令时刻为冷启动开始时刻 t_{s1} ，并以此时的电解槽入口的电解液温度为冷启动温度；
- 启动过程按照制造商提供的启动程序自动进行，不做统一要求；
- 试验过程中，以1s或更短时间间隔分别测量电解槽的电流、电压以及系统的氧中氢浓度、氢中氧浓度；
- 记录电解槽输入电流首次达到额定电流的时刻 t_{s2} ；
- 记录电解水制氢系统的运行温度、运行压力和输入电流同时达到额定温度、额定压力和额定电流的时刻 t_{s3} ；
- 当氧中氢浓度和氢中氧浓度分别稳定在气体纯度合格组分范围内至少5min后，记录氧中氢浓度和氢中氧浓度首次同时达到合格组分范围的时刻 t_{s4} ；
- 绘制启动过程中的功率曲线、氧中氢浓度曲线和氢中氧浓度曲线；
- 应确保试验过程中系统始终处于制造商允许的安全运行范围。

8.1.2.2 热启动试验

- 试验开始前，电解水制氢系统应在热待机状态下保持至少15min，碱液/纯水循环泵处于运行状态；
- 启动电解水制氢系统，记录发出启动指令时刻为热启动开始时刻 t_{s1} ，并以此时的电解槽入口电解液温度为热启动温度；
- 试验过程中，以1s或更短时间间隔分别测量电解槽的电流、电压以及系统的氧中氢浓度、氢中氧浓度；
- 启动过程按照制造商提供的启动程序自动进行，不做统一要求；

- e) 记录电解槽输入电流首次达到额定电流的时刻 t_{s2} ;
- f) 记录电解水制氢系统的工作温度、工作压力和输入电流同时达到额定温度、额定压力和额定电流的时刻 t_{s3} ;
- g) 当氧中氢浓度和氢中氧浓度分别稳定在气体纯度合格组分范围内至少5min后, 记录氧中氢浓度和氢中氧浓度首次同时达到合格组分范围的时刻 t_{s4} ;
- h) 绘制启动过程中的功率曲线、氧中氢浓度曲线和氢中氧浓度曲线;
- i) 应确保试验过程中系统始终处于制造商允许的安全运行范围。

8.1.3 冷/热启动至额定电流时间

冷/热启动至额定电流时间按记录的启动初始时间点与启动完成时间点做差计算:

$$\Delta t_{s1} = t_{s2} - t_{s1} \quad (1)$$

式中:

Δt_{s1} ——启动至额定电流时间 (s或min) ;

t_{s1} ——启动开始时刻;

t_{s2} ——启动后电解槽首次达到额定电流点的时刻。

8.1.4 冷/热启动至额定工况时间

冷/热启动至额定工况时间按记录的启动初始时间点与启动完成时间点做差计算:

$$\Delta t_{s2} = t_{s3} - t_{s1} \quad (2)$$

式中:

Δt_{s2} ——启动至额定工况时间 (s或min) ;

t_{s1} ——启动开始时刻;

t_{s3} ——启动后电解水制氢系统首次达到额定工况点的时刻。

8.1.5 冷/热启动至气体纯度合格时间

冷/热启动至气体纯度合格时间按记录的启动初始时间点与启动完成时间点做差计算:

$$\Delta t_{s3} = t_{s4} - t_{s1} \quad (3)$$

式中:

Δt_{s3} ——启动至气体纯度合格时间 (s或min) ;

t_{s1} ——启动开始时刻;

t_{s4} ——启动后氧中氢和氢中氧浓度首次达到合格气体组分范围的时刻。

8.1.6 冷/热启动功率曲线

冷/热启动的功率曲线的横坐标为时间, 纵坐标为电解槽的功率。功率由电解槽每一时刻的输入电流乘以电压得到。

8.1.7 冷/热启动氧中氢、氢中氧浓度曲线

冷/热启动的氧中氢、氢中氧浓度曲线的横坐标为时间, 纵坐标为系统的氧中氢浓度或氢中氧浓度。横坐标的时间范围应与功率曲线保持一致。

8.1.8 热启动电流-电压曲线

电解槽的热启动电流-电压的横坐标为电解槽的输入电流 I_s , 纵坐标为电解槽的电压 U_s 。横坐标的时间范围应与功率曲线保持一致。

特别注意平均小室电压为1.23V（理论电解电压）时的电流以协助判断电解槽电流效率的大小。平均小室电压的计算方法见8.3.5节。根据电化学原理，小室电压大于理论电解电压才能发生电解水制氢反应，此点电流过大则说明电流效率偏低。本曲线仅协助判断电流效率大小，具体的电流效率计算方法见8.2.10节。

8.2 额定工况稳态性能试验

8.2.1 概述

本试验的目的是测试当电解水制氢系统在额定工况下稳定运行时，电解槽、电源转换单元以及整个电解水制氢系统的各项性能指标。

8.2.2 试验方法

- 试验开始前，电解水制氢系统应在额定工况下稳定运行 15min 以上；
- 试验过程中应保持电解槽的输入电流设定值为额定电流，电流测量值与设定值的误差应在±2%以内；
- 试验过程中，应保持不同类型数据采样时间的同步性；
- 氧中氢浓度和氢中氧浓度达到稳定（15min 内的波动偏差应小于 5%）后才能开始试验；
- 记录试验开始时刻，记录采用累积值测量的数据初始值，如氢气/氧气质量流量初始值、原料水流量初始值、电源转换单元、电解槽及辅助设施的电能输入值等；
- 试验过程中，每间隔至少 5min 记录一次数据，包括电解槽的电流和电压值、电源转换单元的输入功率、氧中氢浓度、氢中氧浓度、系统出口处产氢压力、温度等，测量数据次数不少于 6 次；
- 试验完成后，记录结束时刻，记录采用累积值测量的数据结束值。
采用累积值测量的数据值等于试验结束和启动时各数据的差值。
采用平均值测量的数据值等于所有测量数据的平均值。

8.2.3 电解槽额定功率

电解槽运行在额定工况的功率为额定功率，根据下式计算：

$$P_{rat} = I_{rat} \times U_{rat} \quad (4)$$

式中：

I_{rat} ——电解槽在额定工况下的输入电流（A）；

U_{rat} ——电解槽在额定工况下的电压（V）。

8.2.4 电解槽电压效率

$$\eta_v = \frac{N_s \times E_{th}}{U_s} \times 100\% \quad (\text{一正一负}) \quad (5)$$

$$\eta_v = \frac{(N_s / 2) \times E_{th}}{U_s} \times 100\% \quad (\text{一正两负}) \quad (6)$$

式中：

η_v ——电解槽的电压效率（%）；

N_s ——电解槽的小室个数，需注意电解槽内小室的串并联方式，如一正一负或一正两负；

U_s ——电解槽的电压（V）；

E_{th} ——热中性电压（V），可通过下式计算：

$$E_{th} = \frac{\Delta H}{n_e \times F} \quad (7)$$

式中：

ΔH ——运行温度下电解水制氢反应的焓变（J/mol），认为电解槽氧侧出口温度为运行温度；

n_e ——参与反应的电子摩尔数；

F ——法拉第常数（96485 C/mol）。

不同温度下的热中性电压详见附录A。

8.2.5 电流密度

$$J_s = \frac{I_s}{A_s} \quad (\text{一正一负}) \quad (8)$$

$$J_s = \frac{I_s}{2 \times A_s} \quad (\text{一正两负}) \quad (9)$$

式中：

J_s ——电解槽的电流密度（A/m²）；

I_s ——电解槽的输入电流（A）；

A_s ——电解槽的电极活性区面积（m²），应标明电极活性区面积的计算方法。该面积计算方法应获得制造商和用户的共同认可，或由测试方在电解槽装配前实际测量。

注：一般认为每个小室的活性面积一样。

8.2.6 产氢量

产氢量指标分为标称产氢量和实测产氢量。

为简化评价电解槽的产氢量，可假设电流效率为100%，通过测量电解槽输入电流换算得到标称产氢量，主要用于区分电解槽的规格和产氢能力大小。

因电解水制氢系统的真实电流效率很难达到100%，真实产氢量应采用实测值。

8.2.6.1 标称产氢量

按照式（10）（11）计算电解槽的标称产氢量：

$$F_n = \frac{I_s N_s \eta_c}{2390} \quad (\text{一正一负}) \quad (10)$$

$$F_n = \frac{(I_s / 2) N_s \eta_c}{2390} \quad (\text{一正两负}) \quad (11)$$

式中：

F_n ——电解槽的标称产氢量（m³/h）；

I_s ——电解槽的输入电流（A）；

N_s ——电解槽的小室个数；

η_c ——电解水制氢系统的电流效率，计算标称值时设定电流效率为100%；

2390——标准状况下制取1m³氢气所需的理论电量（A·h/m³）。

8.2.6.2 实测产氢量

电解水制氢系统的实测产氢量的测量方法有容积法、氢气流量计法、氧气流量计法和耗水量法，具体测试方法可根据测试现场实际情况或用户要求选择，若条件允许优先推荐容积法。

8.2.6.2.1 容积法

若现场具备条件，能安装储存氢气的压力容器，则可采用容积法测量氢气产量。具体测试系统如下图所示。

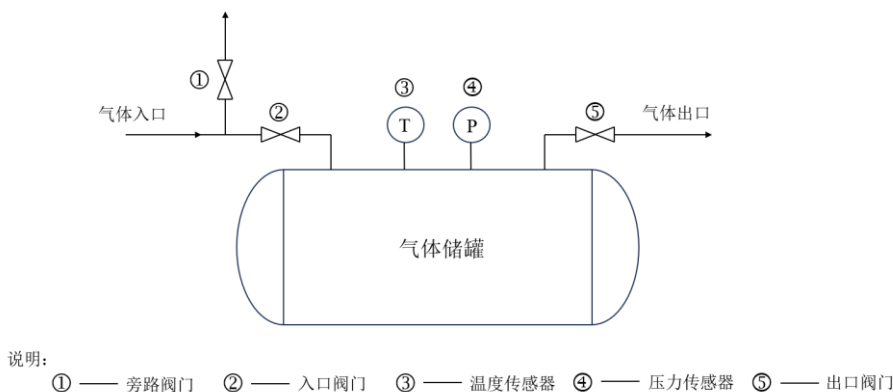


图5 容积法测试示意图

测试前应对气体储罐的容积 V 进行测量，可根据设计图纸进行体积尺寸计算，或采用注水法直接测量储罐的水容积。气体储罐的容积建议至少能存储电解水制氢系统 2 个小时的产氢量。

当系统达到 8.2.2 节（a）~（d）的要求后，开始进行试验。

记录试验开始时刻 t_{ts} 和此时的储罐内气体压力 p_{ts} 和温度 T_{ts} ，然后打开气体储罐入口阀门，关闭旁路阀门和出口阀门，开始进行气体充灌。

经至少 1 个小时的气体充灌后，关闭气体储罐入口阀门，打开旁路阀门，将系统所产氢气引入其他旁路，记录试验结束时刻 t_{te} 。

静置一段时间，待储罐内部温度均匀后记录储罐内气体压力 p_{te} 和温度 T_{te} 。具体静置时间与试验环境条件和储罐体积相关，根据现场实际情况确定。

根据理想气体的体积计算方法，该稳态运行过程中的平均氢气产量可由下式计算：

$$F_p = \frac{T_0 V}{p_0 (t_{te} - t_{ts})} \left(\frac{p_{te}}{T_{te}} - \frac{p_{ts}}{T_{ts}} \right) \quad (12)$$

式中：

F_p ——实测产氢量（ m^3/h ）；

V ——气体储罐的水容积（ m^3 ）；

T_0 ——标准状况的气体温度（273.15 K）；

T_{ts} ——试验开始时刻的储罐的气体温度（K）；

T_{te} ——试验结束静置后的储罐的气体温度（K）；

p_0 ——标准状况的气体压力（101325 Pa）；

p_{ts} ——试验开始时刻的储罐的气体压力（Pa）；

p_{te} ——试验结束静置后的储罐的气体压力（Pa）；

t_{ts} ——试验开始时刻（h）；

t_{te} ——试验结束时刻（h）；

8.2.6.2.2 氢气流量计法

氢气应经过干燥、冷却或纯化后才可使用流量计法测量氢气产量。现场气体成分和安装条件应满足流量计要求。

稳态运行过程中的平均氢气产量为：

$$F_p = \frac{(F_{pe_H_2} - F_{ps_H_2})}{t} \quad (13)$$

式中：

F_p ——实测产氢量（ m^3/h ）；

$F_{ps_H_2}$ ——试验开始时刻的氢气累积流量（ m^3 ）；

$F_{pe_H_2}$ ——试验结束时刻的氢气累积流量（ m^3 ）；

t ——试验时间（h）。

8.2.6.2.3 氧气流量计法

若现场具备条件，可通过测量氧气的流量来换算氢气的流量。氧气应经过干燥、冷却或纯化后才可使用流量计法测量氧气产量。现场气体成分和安装条件应满足流量计要求。

稳态运行过程中的平均氢气产量：

$$F_p = \frac{2(F_{pe_O_2} - F_{ps_O_2})}{t} \quad (14)$$

F_p ——实测产氢量（ m^3/h ）；

$F_{ps_O_2}$ ——试验开始时刻的氧气累积流量（ m^3 ）；

$F_{pe_O_2}$ ——试验结束时刻的氧气累积流量（ m^3 ）；

t ——试验时间（h）。

8.2.6.2.4 耗水量换算法

测试前向原料水箱中补充足够的纯水，记录原料水箱的初始液位和安装在水箱和电解槽之间的水表累积流量。

测试过程中，随着电解耗水的增加，水箱水位会下降，系统会进行补水动作，直到水箱液位达到初始液位。

原料水箱的补水方法可以是在线实时补水，也可以是间歇补水。若为在线实时补水，需确认测试前后水箱液位无变化。若为间歇补水方式，应确保测试过程经历了5个以上的补水周期，测试前后水箱液位无变化，测试开始和测试结束时刻均为补水动作结束的时刻。

测试结束时，记录水表的累积流量。

稳态运行过程中的实测产氢量：

$$F_p = \frac{1244.4 \times (F_{pe_H_2O} - F_{ps_H_2O})}{t} \quad (15)$$

F_p ——实测产氢量（ m^3/h ）；

$F_{ps_H_2O}$ ——试验开始时刻的水表累积流量（ m^3 ）；

$F_{pe_H_2O}$ ——试验结束时刻的水表累积流量（ m^3 ）；

t ——试验时间（h）；

1244.4——标准状况下消耗1 m^3 水产生的氢气量。

8.2.7 电解槽单位直流电耗

采用电流换算法所得的为电解槽标称单位直流电耗。采用实测产氢量计算所得的为电解槽单位实测直流电耗。

8.2.7.1 电解槽标称单位直流电耗

采用标称产氢量计算的为标称单位直流电耗：

$$e_n = \frac{U_s \times I_s}{1000 \times F_n} \quad (16)$$

式中：

e_n ——电解槽标称单位直流电耗（kWh/m³）；

U_s ——电解槽的电压（V）；

I_s ——电解槽的输入电流（A）；

F_n ——标称产氢量（m³/h），设定电流效率为100%时计算得到的氢气产量。

8.2.7.2 电解槽实测单位直流电耗

采用实测产氢量计算的为单位直流电耗：

$$e_{el} = \frac{U_s \times I_s}{1000 \times F_p} \quad (17)$$

式中：

e_{el} ——电解槽单位直流电耗（kWh/m³）；

U_s ——电解槽的电压（V）；

I_s ——电解槽的输入电流（A）；

F_p ——实测产氢量（m³/h），应标明氢气产量的测量方法。

8.2.8 电源转换效率

电源转换单元的转换效率可通过测量一段时间积累的电能输入输出，也可通过测量功率的输入输出来计算得到。

电能测量采用以下公式：

$$\eta_{se} = \frac{W_{rd}}{W_{rs}} \times 100\% \quad (18)$$

式中：

η_{se} ——电源转换单元的电能转换效率（%）；

W_{rs} ——从试验开始到试验结束电源转换单元的输入电能（kWh）；

W_{rd} ——从试验开始到试验结束电解槽的直流输入电能（kWh），可通过下式计算：

$$W_{rd} = I_s \times U_s \times t \quad (19)$$

功率测量采用以下公式：

$$\eta_{se} = \frac{P_{rd}}{P_{rs}} \times 100\% \quad (20)$$

式中：

P_{rs} ——从试验开始到试验结束电源转换单元的平均输入功率（kW）；

P_{rd} ——从试验开始到试验结束电源转换单元的平均输出功率或电解槽的平均输入功率（kW），可通过下式计算：

$$P_{rd} = I_s \times U_s \quad (21)$$

8.2.9 直流输出电流控制精度

电源转换单元的直流输出电流控制精度：

$$\delta_I = \frac{|I_s - I_c|}{I_c} \times 100\% \quad (22)$$

式中：

δ_I ——直流输出电流控制精度（%）；

I_s ——电解槽的输入电流（A）；

I_c ——电源的设定电流（A）。

8.2.10 电流效率

电流效率的计算 η_c 依据电解水制氢时的法拉第定律，标准状况下，制取1m³氢气所需理论电量为2390 A h/m³，对应氢气产量下所需理论电流为2390× F_p 。

电解水制氢系统的电流效率可按照下式计算：

$$\eta_c = \frac{2390 \times F_p}{I_s \times N_s} \times 100\% \quad (\text{一正一负}) \quad (23)$$

$$\eta_c = \frac{2390 \times F_p}{(I_s / 2) \times N_s} \times 100\% \quad (\text{一正两负}) \quad (24)$$

式中：

η_c ——电解水制氢系统的电流效率（%）；

F_p ——实测产氢量（m³/h），应标明氢气产量的测量方法；

I_s ——电解槽的输入电流（A）；

N_s ——电解槽的小室个数。

8.2.11 辅助设施和公用工程单位电耗

电解水制氢系统的辅助设施和公用工程均有一定量的电耗。若用户无需区分二者电耗，可在辅助设施和公用工程的总电力输入端安装电能表测量。若需区分，可按照下节方法分开测量。

8.2.11.1 辅助设施单位电耗

电解水制氢系统的辅助设施用电一般包括气液分离系统的循环泵和补水泵、气体纯化系统及控制系统。若该范围内还有其他用电设备，也应进行测量。

在辅助设施的电力总输入端安装电能表，也可以在各个用电设备的电力输入端分别安装电能表。

按照下式计算辅助设施单位电耗：

$$e_a = \frac{W_{ae} - W_{as}}{t \times F_p} \quad (25)$$

式中：

e_a ——辅助设施单位电耗（kWh/m³）；

W_{as} ——试验开始时辅助设施电能表的累积读数（kWh）；

W_{ae} ——试验结束时辅助设施电能表的累积读数（kWh）；

t ——试验时间（h）；

F_p ——实测产氢量（m³/h），应标明氢气产量的测量方法。

8.2.11.2 公用工程单位电耗

若电解水制氢系统的冷却、储热、给水、水纯化、仪表供气、吹扫置换气等公用工程，仅为电解水制氢系统提供，则可测试公用工程的单位电耗。若公用工程与其他非制氢系统有公用，难以区分，则本项目可不测试。

在公用工程的电力总输入端安装电能表。

按照下式计算公用工程单位电耗：

$$e_u = \frac{W_{ue} - W_{us}}{t \times F_p} \quad (26)$$

式中：

e_u ——公用工程单位电耗（kWh/m³）；

W_{us} ——试验开始时公用工程电能表的累积读数（kWh）；

W_{ue} ——试验结束时公用工程电能表的累积读数（kWh）；

t ——试验时间（h）；

F_p ——实测产氢量（m³/h），应标明氢气产量的测量方法。

8.2.12 制氢系统单位总电耗

根据现场公用工程的实际情况和测试需求，本文件给出了不含公用工程和包含公用工程的制氢系统单位总电耗的计算方式。

8.2.12.1 制氢系统单位总电耗（不含公用工程）

电解水制氢系统的总电耗（不含公用工程）包含电解电耗和辅助设施电耗：

$$e_{t1} = e_r + e_a \quad (27)$$

式中：

e_{t1} ——制氢系统单位总电耗（kWh/m³）；

e_a ——辅助设施单位电耗（kWh/m³）；

e_r ——电解设施单位电耗（kWh/m³），可通过下式计算：

$$e_r = \frac{W_{rs}}{t \times F_p} \quad (28)$$

式中：

W_{rs} ——从试验开始到试验结束电源转换单元的输入电能（kWh）；

t ——试验时间（h）；

F_p ——实际产氢量（m³/h），应标明氢气产量的测量方法。

8.2.12.2 制氢系统单位总电耗（含公用工程）

电解水制氢系统的总电耗包含电解电耗、辅助设施电耗和公用工程电耗：

$$e_{t2} = e_r + e_a + e_u \quad (29)$$

式中：

e_{t2} ——制氢系统单位总电耗（含公用工程）（kWh/m³）；

e_r ——电解设施单位电耗（kWh/m³）；

e_a ——辅助设施单位电耗（kWh/m³）；

e_u ——公用工程单位电耗（kWh/m³）。

8.3 多工况稳态性能试验

8.3.1 概述

本试验用于评价电解水制氢系统在不同功率点的稳态运行性能以及系统的功率可调节性，从而准确地反映电解槽、电源转换单元和系统在不同功率工况下的性能。测试结果以功率范围以及多种曲线的形式进行展示，以便于不同机组之间的性能对比。

功率点需在最大值和最小值之间选取，功率点个数应大于等于5个。系统的最大和最小功率值由制造商规定。若系统为电流控制模式，也可以电流值为基准进行相关测试点的选取。

为反映不同通电模式、小室数、电极面积的电解槽性能优劣，宜采用电流密度-平均小室电压曲线作为对比指标。选取的功率点建议包含平均小室电压2V、1.8V、1.6V、1.4V、1.23V（理论电解电压）等工况。若制造商规定的最小、最大范围无法包含以上平均小室电压值，可根据实际情况调整。

本试验应在系统额定压力工况下进行，系统温度在制造商规定的允许温度范围之内。

8.3.2 试验方法

- 试验开始前，电解水制氢系统应在额定工况下稳定运行 15min 以上；
- 设置电解槽功率或电流输入的最大值为目标值；
- 试验过程中，应保持不同类型数据采样时间的同步性；
- 每个功率点均应等待氧中氢浓度和氢中氧浓度达到稳定（15min 内的波动偏差应小于 5%）后才能开始试验；
- 试验过程中，每间隔至少 5min 记录一次数据，测量数据次数不少于 6 次，记录电源转换单元的电能输入、电解槽的电能输入、辅助设施的电能输入以及氢气流量相关测量参数；
- 逐步减小电解槽功率或电流输入的目标值至选定的功率点或电流点；
- 每个功率点按照步骤（d）和（e）记录数据，直至所有功率点测试完成；
- 试验完成，绘制电解槽电流-电压曲线、电解槽电流密度-平均小室电压曲线、电源直流输出电流-转换效率曲线、电流-系统总电耗曲线和系统功率-产氢量曲线；
- 应确保试验过程中系统始终处于制造商允许的安全运行范围，详见8.1.1节。若试验过程中气体浓度超过此安全范围，则认为电解槽不能在该功率下稳定运行。

各功率点的测试数据采用该测试时间段的算术平均值。

8.3.3 功率调节范围

按照式（25）计算电解槽的功率调节范围：

$$\Delta P = \left[\frac{P_{\min}}{P_{\text{rat}}} \times 100\%, \frac{P_{\max}}{P_{\text{rat}}} \times 100\% \right] \quad (30)$$

式中：

ΔP ——电解槽功率调节范围（%）；

P_{\min} ——系统能够稳态运行下电解槽的最小功率输入（kW）；

P_{\max} ——系统能够稳态运行下电解槽的最大功率输入（kW）；

P_{rat} ——电解槽额定功率输入（kW），计算公式见式（4）。

8.3.4 电流-电压曲线

电流-电压曲线的横坐标为电解槽的输入电流，纵坐标为电解槽的电压。

8.3.5 电流密度-平均小室电压曲线

电流密度-平均小室电压曲线的横坐标为电流密度，计算方法见本文件8.2.5节；纵坐标为平均小室电压，按照下式计算：

$$U_c = \frac{U_s}{N_s} \quad (\text{一正一负}) \quad (31)$$

$$U_c = \frac{2 \times U_s}{N_s} \quad (\text{一正两负}) \quad (32)$$

式中：

U_c ——平均小室电压（V）；

U_s ——电解槽的电压（V）；

N_s ——电解槽的小室个数。

8.3.6 电流-电源转换效率曲线

电源直流输出电流-转换效率曲线的横坐标为电源直流输出电流或电解槽的输入电流，纵坐标为电源转换效率，电源转换效率计算方法见本文件8.2.8节。

8.3.7 电流-制氢系统单位总电耗曲线

电流-系统单位总电耗曲线的横坐标为电解槽的输入电流，纵坐标为制氢系统单位总电耗。系统单位总电耗计算方法见本文件8.2.12节，根据实际需求选择是否包含公用工程的电耗。

8.4 变功率动态性能试验

8.4.1 概述

本试验用于评价电解水制氢系统运行状态下的最大加载速率和最大减载速率，加/减载过程应同步监测氧中氢和氢中氧浓度的变化情况，确保始终处于系统允许的安全范围内（氧中氢浓度 $\leq 2\%$ 且氢中氧浓度 $\leq 1\%$ ）。

本试验应在系统额定压力工况下进行，系统温度在制造商规定的允许温度范围之内。

本试验方法也可参考用于测量某一功率到新的设定功率的功率调节速率测试。

8.4.2 试验方法

- 试验开始前，系统应在最大功率/电流工况下稳定运行至少 15min；
- 以 1s 或更短的时间间隔测量电源转换单元、电解槽的电输入（含电压、电流、功率），以及系统的氧中氢浓度、氢中氧浓度；
- 设置电解槽功率或电流至制造商规定的最小值，以制造商允许的最大速率进行减载操作，并记录发出减载操作的时刻作为操作开始时刻；
- 记录电解槽功率或电流输入达到最小值后稳态运行的起始时刻；
- 保持电解槽在最小功率或电流下稳态运行至少 5min，整个减载及稳态运行过程应保证气体浓度不能超过安全允许范围。若试验过程中气体浓度超过安全范围，则需降低减载速率重复 c) 到 e) 步骤；
- 设置电解槽功率或电流至制造商规定的最大值，以允许的最大速率进行加载操作，并记录发出加载操作的时刻作为操作开始时刻；
- 记录电解槽功率或电流输入达到最大值后稳态运行的起始时刻；
- 保持电解槽在最大功率或电流下稳态运行至少 5min，整个加载及稳态运行过程应保证气体浓度不能超过安全允许范围，若试验过程中气体浓度超过安全范围，则需降低加载速率重复 f) 到 h) 步骤；
- 重复（c）到（h）步骤，测试至少 3 个循环，每个循环中间间隔时间推荐至少 10~30min 以等待系统各运行参数稳定；
- 试验完成后，绘制电解槽加/减载功率曲线、电源转换单元输入端的加/减载功率曲线以及电解水制氢系统加/减载氧中氢和氢中氧曲线，以 3 次循环中加/减载速率离平均值最近的一组数据为最终输出曲线。

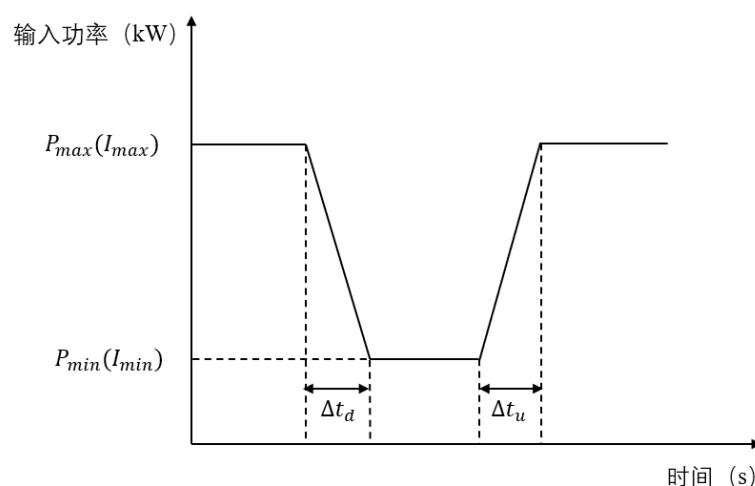


图 5 变功率动态性能试验示意图

8.4.3 电解槽加/减载功率曲线

电解槽加/减载功率曲线横坐标为时间（s），纵坐标为电解槽功率（kW）。功率由电解槽每一时刻的电流乘以电压得到。

8.4.4 电解槽最大加/减载速率

按照式（30）（31）计算电解水制氢系统在运行状态下的最大加/减载速率。

$$r_{P_u} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\Delta t_u} \quad (33)$$

$$r_{P_d} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\Delta t_d} \quad (34)$$

r_{P_u} ——电解槽最大功率加载速率（kW/s）；

r_{P_d} ——电解槽最大功率减载速率（kW/s）；

Δt_u ——电解槽从最小功率升高到最大功率所需的时间（s）；

Δt_d ——电解槽从最大功率降低到最小功率所需的时间（s）。

8.4.5 电源输入端的加/减载功率曲线

电源输入端的加/减载功率曲线横坐标为时间，纵坐标为电源转换单元交流侧的输入功率。

8.4.6 加/减载氧中氢、氢中氧浓度曲线

加/减载氧中氢、氢中氧浓度曲线横坐标为时间，纵坐标为系统的氧中氢浓度或氢中氧浓度。

8.5 停机试验

8.5.1 概述

本试验用于评价电解水制氢系统从额定工况切换至热待机状态的功率、氧中氢浓度和氢中氧浓度变化过程。

8.5.2 试验方法

a) 试验开始前，系统在额定工况下稳定运行至少 15min；

- b) 开始停机操作，并记录发出停机操作指令的时刻为起始时刻；
- c) 试验过程应按照制造商提供的程序自动进行，不能有人工干预；
- d) 以 1s 或更短的时间间隔，测量电解槽的电流和电压、系统的氧中氢浓度和氢中氧浓度，直至试验完成；
- e) 待电源转换单元停止输出电流至少 10min 后试验结束；
- f) 试验完成后，绘制停机功率曲线、氧中氢和氢中氧浓度曲线。

8.5.3 电解槽停机功率曲线

停机功率曲线横坐标为时间，纵坐标为电解槽功率，由电解槽的电流乘以电压得到。

8.5.4 停机氧中氢、氢中氧浓度曲线

停机氧中氢、氢中氧浓度曲线的横坐标为时间，纵坐标为系统氧中氢浓度或氢中氧浓度。

附 录 A
(资料性)

不同温度下电解水制氢反应焓变及热中性电压

表 A.1 不同温度下电解水制氢反应焓变及热中性电压

温度 (°C)	焓变 ΔH (kJ/mol)	热中性电压 (V)
5	286.471	1.4845
10	286.309	1.4837
15	286.148	1.4829
20	285.988	1.4820
25	285.829	1.4812
30	285.670	1.4804
35	285.511	1.4796
40	285.353	1.4787
45	285.195	1.4779
50	285.037	1.4771
55	284.880	1.4763
60	284.722	1.4755
65	284.564	1.4747
70	284.406	1.4738
75	284.249	1.4730
80	284.090	1.4722
85	283.932	1.4714
90	283.773	1.4706
95	283.614	1.4697
100	283.455	1.4689

参 考 文 献

- GB/T 19774 水电解制氢系统技术要求
GB/T 20042.1 质子交换膜燃料电池 第1部分：术语
GB/T 24499 氢气、氢能与氢能系统术语
JJF 1001-2011 通用计量术语及定义技术