

ICS 27.180

F 19

备案号: XXXXX-2019

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T XXXX—202X

质子交换膜燃料电池系统性能测试规范

Performance Testing Specification for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System

(征求意见稿)

202X-X-XX 发布

202X-X-XX 实施

国家能源局 发布

目 次

前 言..... II

质子交换膜燃料电池系统性能测试规范..... 错误！未定义书签。

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语、定义和符号 1

4 测量参数、单位和准确度 5

5 测试准备 6

6 测试条件 6

7 测试方案 8

8 性能测试方法 10

9 环境适应性测试方法 23

附录 A 常数表 24

前 言

本标准依据 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。

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。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由××归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

质子交换膜燃料电池系统性能测试规范

1 范围

本文件规定了固定式质子交换膜燃料电池系统的术语、定义和符号、测量参数、单位和准确度、测试准备、测试条件、测试方案、测试方法等。

本规则适用于额定功率 $\geq 1\text{ MW}$ 的固定式质子交换膜燃料电池系统的性能测试。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 12325-2008 电能质量 供电电压偏差
- GB/T 14549-1993 电能质量 公共电网谐波
- GB/T 15543-2008 电能质量 三相电压不平衡
- GB/T 15945-2008 电能质量 电力系统频率偏差
- GB/T 27748.1-2017 固定式燃料电池发电系统 第1部分：安全
- GB/T 27748.2-2022 固定式燃料电池发电系统 第2部分：性能试验方法
- GB/T 27748.3-2017 固定式燃料电池发电系统 第3部分：安装
- GB/T 27748.4-2017 固定式燃料电池发电系统 第4部分：小型燃料电池发电系统性能试验方法
- GB/T 24554-2022 燃料电池发动机性能试验方法
- GB/T 24548-2009 燃料电池电动汽车 术语
- GB/T 28816-2020 燃料电池术语
- GB/T 37244-2018 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 24548-2009、GB/T 27748.2-2022和GB/T 28816-2020界定术语和定义适用于本文件。

3.1.1

固定式燃料电池发电系统 Stationary Fuel Cell Power Generation System

连接并固定于适当位置的燃料电池发电系统。

[来源：GB/T 28816-2020，3.49.3]

3.1.2

固定式质子交换膜燃料电池系统 Stationary Proton Exchange Membrane Fuel Cell System

使用一个或多个质子交换膜燃料电池发电单元产生电能和热能的固定式燃料电池发电系统。

3.1.3

并网功率 Grid-connected power

固定式质子交换膜燃料电池系统并网后，在额定工作状态下可以向电网注入的有功功率，单位 MW。

3.1.4

冷态 Cold state

燃料电池发电系统在环境温度下，既没有功率输入也没有功率输出的状态。

[来源：GB/T 27748.2-2022，3.1.4]

3.1.5

储存态 Storage State

燃料电池发电系统处于非运行状态，而且在制造商规定的条件下，可能需要输入热和/或电能和/或惰性气体，以避免组件性能衰减和/或给控制系统供应能量。

[来源：GB/T 27748.2-2022，3.1.30]

3.1.6

轴功 Shaft work

从燃料电池发电系统边界外输入、能做有用功的机械能。

[来源：GB/T 27748.2-2022，3.1.26]

3.1.7

水消耗速率 Water consumption rate

系统边界外提供给燃料电池发电系统的水在运行时的消耗速率。

3.1.8

辅助电功率输入 Auxiliary electric power input

由系统边界外部供给辅助负载（机器和设备）的电功率。

[来源：GB/T 27748.2-2022，3.1.1]

3.2 符号

本文件中使用的符号及含义见表 1，表中包含合适的计量单位。

表 1 符号

符号	定义	单位
c_{HR}	热回收流体的比热容	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
E_{mf}	每摩尔燃料的能量输入	kJ/mol
E_{mpf}	平均压力 p_f 条件下燃料的压力能	kJ/mol
E_{ma}	每摩尔氧化剂（空气）的能量输入	kJ/mol
E_{mpa}	氧化剂（空气）的压力能	kJ/mol
E_{elst}	电启动能量	kJ
E_{fst}	燃料启动能量	kJ
E_{ast}	氧化剂（空气）启动能量	kJ
E_{st}	总启动能量	kJ
H_{f0}	在 101.325 kPa、288.15 K（15℃）条件下燃料的热值	kJ/mol
H_{mf}	平均温度 T_f 条件下燃料的摩尔焓	kJ/mol
H_{mf0}	在 288.15 K（15℃）条件下燃料的摩尔焓	kJ/mol
H_{ma}	平均温度 T_a 条件下氧化剂（空气）的摩尔焓	kJ/mol
H_{ma0}	在 288.15 K（15℃）条件下氧化剂（空气）的摩尔焓	kJ/mol
I	三相交流电的相电流值	A
I_s	燃料电池系统电流	A
$m_{\text{H}_2\text{theo}}$	燃料电池系统理论氢气消耗量	kg
m_{H_2}	燃料电池系统实际氢气消耗量	kg
m_{f1}	第一次试验开始时补水水箱的质量	kg
m_{f2}	第一次试验结束时补水水箱的质量	kg
m_{l1}	第二次试验开始时补水水箱的质量	kg
m_{l2}	第二次试验结束时补水水箱的质量	kg
M_{mf}	燃料的摩尔质量	g/mol
M_{ma}	氧化剂（空气）的摩尔质量	g/mol

符号	定义	单位
n	每个氢分子释放的电子数	
N	燃料电池系统单电池片数	
p_f	燃料的平均压力	kPa
p_a	氧化剂（空气）的平均压力	kPa
P	三相交流电的有功功率	kW
P_{fin}	平均气态燃料输入功率	kJ/s
P_{ain}	氧化剂（空气）的平均输入功率	kJ/s
P_{wsin}	平均轴功输入功率	kJ/s
P_{thin}	平均外部热输入功率	kJ/s
P_{in}	输入燃料电池系统的平均总功率	kJ/s
P_{elin}	平均辅助电功率输入	kW
P_{elout}	平均电功率输出	kW
P_n	平均净电功率输出	kW
P_e	燃料电池系统输出功率	kW
$P_{elstin,max}$	启动过程中辅助输入电功率的最大值	kW
q_{H_2}	燃料电池系统实际氢气流量	g/s
q_{mf}	燃料的平均质量流量	g/s
q_{air}	燃料电池系统实际氧化剂（空气）流量	g/s
q_{ma}	氧化剂（空气）的平均质量流量	g/s
q_{mHR}	热回收流体的质量流量	kg/s
q_w	水消耗速率	kg/h
q_{wt}	水消耗流量	g/s
Q_{thst}	热启动能量	kJ
t_1	起始时间	s
t_2	结束时间	s
t_{st1}	启动开始时刻	
t_{st2}	启动至怠速时刻	
t_{st3}	启动至额定时刻	

符号	定义	单位
Δt_{st1}	怠速启动时间	s
Δt_{st2}	额定启动时间	s
t_{shut1}	关机过程开始时刻	
t_{shut2}	关机过程结束时刻	
Δt_{shut}	关机时间	s
T_f	燃料的平均温度	K
T_a	氧化剂（空气）的平均温度	K
T_{HRin}	热回收流体的流入温度	K
T_{HRout}	热回收流体的流出温度	K
U	三相交流电的线电压值	V
W_{sst}	轴功启动能量	kJ
η_{H_2}	氢气利用率	
η_{el}	电效率	
η_{th}	热回收效率	
η_{total}	总能量效率	
λ	功率因数	

4 测量参数、单位和准确度

表 2 规定了试验测量的参数、单位和准确度。

表 2 测量参数、单位和准确度要求

测量参数	单位	准确度	分辨率
电压	V	$\pm 0.3\% \text{ FSD}^a$ 或 $\pm 1\% \text{ rdg}^b$	0.1
电流	A	$\pm 0.3\% \text{ FSD}$ 或 $\pm 1\% \text{ rdg}$	0.1
功率	kW	/	/
温度	K	± 1	0.1
质量流量	kg/s	$\leq 1.0\% \text{ FSD}$	0.01
压力	kPa	$\pm 0.3\% \text{ FSD}$	0.1

测量参数	单位	准确度	分辨率
质量	kg	≤0.5% FSD	0.1
时间	s	±0.1	0.1
^a FSD: 满量程。 ^b rdg: 读数。			

5 测试准备

- 5.1 测试前应编制测试方案并制定相应的安全措施。
- 5.2 测试前，应检查所有制造商提供的各种合格证、技术文件、包括全部例行测试记录和证书、图纸资料等。在文件、资料齐全，并逐一进行核对无误后，才能进行测试。
- 5.3 外观检查，检查燃料电池系统可接触部件不得具有可能造成人身伤害的尖利的边、角和粗糙表面。
- 5.4 测试前应对燃料电池系统进行气密性测试和绝缘测试。气密性测试参照 GB/T 24554-2022《燃料电池发动机性能试验方法》中 8.8 燃料电池发动机气密性测试，绝缘测试参照 GB/T 24554-2022《燃料电池发动机性能试验方法》8.9 绝缘电阻测试。
- 5.5 试验用燃料符合 GB/T 37244 的规定要求。

6 测试条件

6.1 试验边界

固定式质子交换膜燃料电池系统可包含一个或多个燃料电池模块或系统，包含燃料电池发电单元、供氢系统、空气处理系统、热管理系统、自动控制系统、电力变换系统以及其他必要的子系统，示意图及边界如图 1 所示。

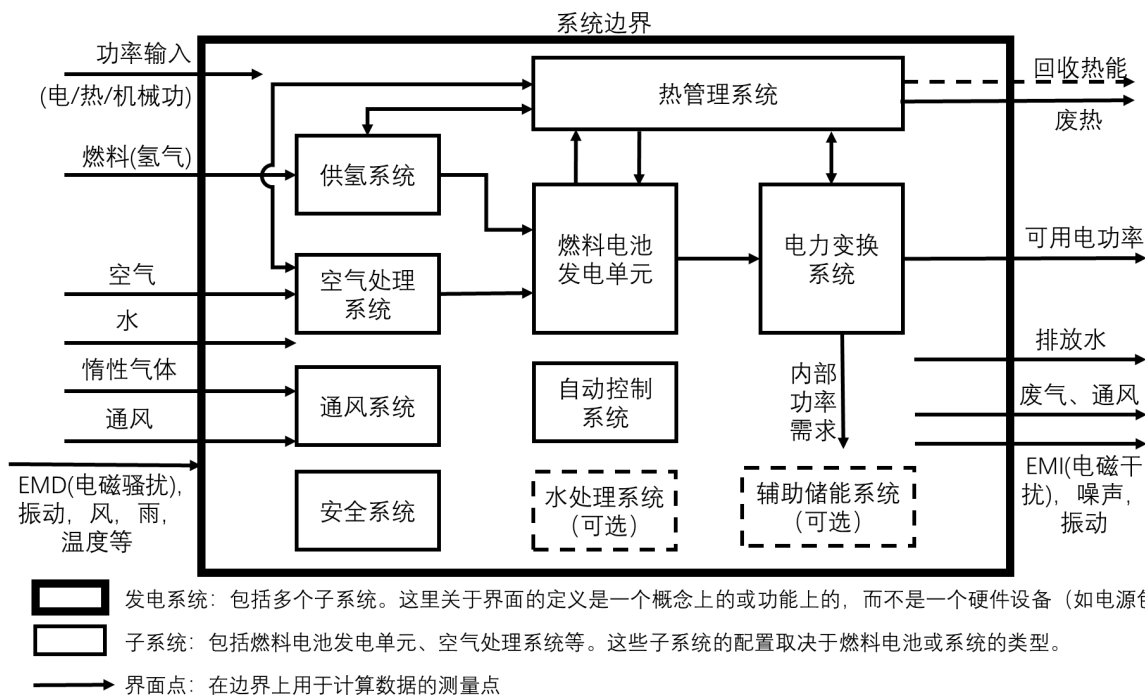


图 1 固定式质子交换膜燃料电池系统示意图

本标准所适用的质子交换膜燃料电池系统由下列子系统有机组合而成，各子系统需要执行各自指定的功能。

- 燃料电池发电单元**：一个或多个将化学能转化为电能和热能的燃料电池堆组成的集合；
- 供氢系统**：由化学和/或物理处理设备以及相应的热交换和控制器组成的系统，用于分配、加压（如有必要）氢气，供燃料电池发电单元使用；
- 空气处理系统**：用于量测、调节、处理并可以加压燃料电池发电单元所需的空气的系统；
- 热管理系统**：提供加热或冷却以及散热功能，以保持质子交换膜燃料电池系统工作在运行温度范围内，以及在启动时辅助加热动力传动机构的系统，也可对热量回收再利用（可选）；
- 电力变换系统**：用于调节燃料电池发电单元的电能输出，使其满足其他子系统使用要求，以及输出三相交流电的设备；
- 自动控制系统**：由传感器、执行器、阀门、开关和逻辑单元所组成，用于将质子交换膜燃料电池系统参数维持在制造商设定范围内，包括在无需人工干预即可转移至安全状态；
- 通风系统**：通过强制对流或自然对流，向燃料电池系统机柜内通入空气的系统；
- 安全系统**：用于被动处理紧急安全隐患的系统，包括氢气浓度探测设备、消防设备等；
- 水处理系统（可选）**：对回收水或添加水提供所有必要净化处理，以供质子交换膜燃料电池系统内部使用的系统；
- 辅助储能系统（可选）**：系统内部所带的电能储存装置，用于协助或补充燃料电池发电单元向

内部子系统供电。

6.2 固定式质子交换膜燃料电池系统测试工作环境应清洁、通风良好，工作环境温度宜为 10~40℃；相对湿度不高于 75%；大气压强为 86 kPa~106 kPa。如果制造商有要求，则在指定环境条件下测试。

6.3 固定式质子交换膜燃料电池系统测试场所应符合涉氢试验场所的安全要求。

6.4 固定式质子交换膜燃料电池系统的启动、加载、降载、关机等均均为自动运行。测试过程中，人工不得干预，不得对固定式质子交换膜燃料电池系统做出任何改动。

6.5 数据采集及记录系统应具有自动连续采集和记录的功能，连续采集记录间隔周期应不超过 1 秒。

7 测试方案

本标准的测试内容包括性能测试和环境适应性测试。

其中，性能测试包括：并网功率测试，效率测试，启停特性测试，尾排气体浓度测试，水消耗速率测试（选测），电能质量测试等（见表 3）。

7.1 性能测试运行过程

性能测试运行过程共分为四个阶段：启动前准备、启动、稳定运行和关机。所有性能测试项目均可同步进行。测试步骤如下：

- a) 在开始试验前，让燃料电池系统处于冷态或储存态至少 48 h；
- b) 开始试验。按照 6.4 的规定，向燃料电池系统发送启动指令；
- c) 按照 6.4 的规定，向燃料电池系统发送加载指令，加载到额定功率点后，在额定功率点稳定运行至少 65 min；
- d) 按照 6.4 的规定，向燃料电池系统发送关机指令。
- e) 如试验中断，需重新按照本试验步骤进行试验。

注：额定功率点为必测功率点。如有需要，可以增加其他功率点进行测试。

表 3 测试项目表

序号	测试内容		测试指标	章节
1	性能测试	并网功率测试	并网功率	8.1.2

序号	测试内容		测试指标	章节
2		效率测试	氢气利用率	8.2.2.1
			电效率	8.2.2.2
			热回收效率（选测）	8.2.2.3
			总能量效率（选测）	8.2.2.4
3		启停特性测试	启动时间	8.3.2.1
			关机时间	8.3.2.2
			启动能量	8.3.2.3
			最大启动输入电功率	8.3.2.4
4		尾排气体浓度测试	尾排气体浓度	8.4.2
5		水消耗速率测试（选测）	水消耗速率	8.5.4
6		电能质量测试	供电电压偏差	8.6.2.1
			三相电压不平衡	8.6.2.2
			频率偏差	8.6.2.3
			谐波	8.6.2.4
7		环境适应性测试	防水等级	9.1
			防尘等级	9.1
			储存温度	9.2

7.2 稳定运行的误差要求

燃料电池系统达到稳定运行的时刻，是指实际净电功率输出稳定在设定净电功率输出 $\pm 2\%$ 以内的时刻。如果系统状态不能稳定在设定净电功率输出 $\pm 2\%$ 以内，那么可以选择一个更大的容差值，并在报告中指出。图 2 指明了系统稳定运行的时刻。

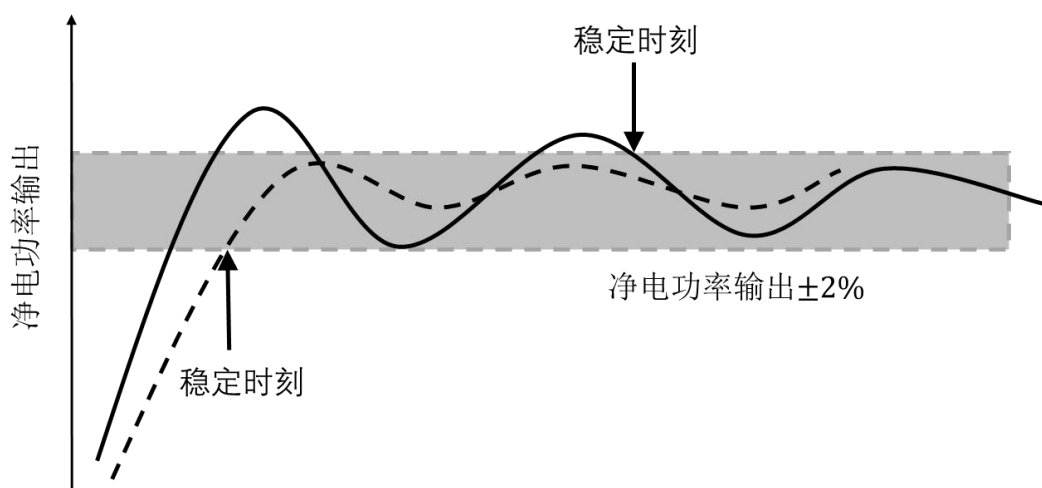


图 2 系统达到稳定运行时刻示例

7.3 性能测试测量物理量

整个测试过程中，需要测量的物理量包括：

- 1) 启动时刻、启动至怠速时刻、启动至额定时刻；
- 2) 燃料（氢气）输入率、压力、温度；
- 3) 氧化剂（空气）输入率、压力、温度；
- 4) 外部热能输入率、压力、温度；
- 5) 辅助电功率输入功率、电流、电压；
- 6) 轴功输入功率；
- 7) 输出电功率、电流、电压；
- 8) （可选）热回收流体输出速率、压力、温度；
- 9) 尾排气体浓度；
- 10) 水消耗速率或水消耗量；
- 11) 电能质量（供电电压偏差、三相电压不平衡、频率偏差、谐波等）；
- 12) 关机时刻、关机结束时刻。

8 性能测试方法

8.1 并网功率测试

8.1.1 概述

- 1) 宜使用功率分析仪对燃料电池系统输出的交流电的有功功率进行测试。
- 2) 当无法直接测量功率时，可通过测量线电压值、线电流值和功率因数来计算有功功率。
- 3) 功率因数应在燃料电池系统连接到一个外部负载或与当地电网连接的情况下进行测量。
- 4) 测量并网功率时，功率表、电压表、电流表和功率因数表均应接在电输出接口处。
- 5) 按照 7.1 进行试验，取稳定运行最后 60 min 的数据进行结果计算。

8.1.2 计算方法

有功功率按照公式（1）计算：

$$P = \frac{\sqrt{3}}{1000} \times U \times I \times \lambda \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

- P ——三相交流电的有功功率，单位为千瓦（kW）；
- U ——三相交流电的线电压值，单位为伏（V）；
- I ——三相交流电的线电流值，单位为安（A）；
- λ ——功率因数；

8.2 效率测试

8.2.1 概述

本试验项目是燃料电池系统在额定功率稳定运行状态下，通过测量燃料电池系统实际氢气流量、燃料电池系统电流和试验起止时间，输入燃料电池系统的化学能、热能、机械能和电能，和输出的电能和热能，计算额定功率下的氢气利用率、电效率、热回收效率和总能量效率。

若燃料电池系统不对热量进行回收再利用，则无需计算热回收效率和总能量效率。

9 按照 7.1 进行试验，取稳定运行最后 60 min 的数据进行结果计算。

9.1.1 计算方法

9.1.1.1 氢气利用率测试

9.1.1.1.1 燃料电池系统理论氢气消耗量

燃料电池系统理论氢气消耗量，按公式（2）计算：

$$m_{H_2\text{theo}} = \frac{1}{1000} \int_{t_1}^{t_2} \frac{M_{mf} \times I_s \times N}{n \times F} \cdot dt \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$m_{H_2\text{theo}}$ ——燃料电池系统理论氢气消耗量，单位为千克（kg）；

M_{mf} ——燃料的摩尔质量，2.016 g/mol；

I_s ——燃料电池系统电流，单位为安培（A）；

N ——燃料电池系统单电池片数；

n ——每个氢分子释放的电子数，2；

F ——法拉第常数，96485 C/mol；

t_1 ——起始时间，单位为秒（s）；

t_2 ——结束时间，单位为秒（s）。

9.1.1.1.2 燃料电池系统实际氢气输入量

燃料电池系统实际氢气输入量，按公式（3）计算：

$$m_{H_2} = \frac{1}{1000} \int_{t_1}^{t_2} q_{H_2} \cdot dt \dots\dots\dots (3)$$

m_{H_2} ——燃料电池系统实际氢气消耗量，单位为千克（kg）；

q_{H_2} ——燃料电池系统实际氢气流量，单位为克每秒（g/s）；

t_1 ——起始时间，单位为秒（s）；

t_2 ——结束时间，单位为秒（s）。

9.1.1.1.3 氢气利用率

氢气利用率按公式（4）计算：

$$\eta_{H_2} = \frac{m_{H_2\text{theo}}}{m_{H_2}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中：

η_{H_2} ——氢气利用率；

m_{H_2} ——燃料电池系统实际氢气输入量，单位为千克（kg）；

$m_{H_2\text{theo}}$ ——燃料电池系统理论氢气消耗量，单位为千克（kg）。

9.1.1.2 电效率测试

9.1.1.2.1 燃料功率输入

平均温度 T_f 和平均压力 p_f 条件下，每摩尔燃料的输入能量，应按公式（5）计算：

$$E_{mf} = H_{f0} + H_{mf} - H_{mf0} + E_{mpf} \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中：

E_{mf} ——每摩尔燃料的能量输入，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

H_{f0} ——在 101.325 kPa、288.15 K（15℃）条件下燃料的热值，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

H_{mf} ——平均温度 T_f 条件下燃料的摩尔焓，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

H_{mf0} ——在 288.15 K（15℃）条件下燃料的摩尔焓，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

E_{mpf} ——平均压力 p_f 条件下燃料的压力能，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

气态燃料平均输入功率 P_{fin} （kJ/s），应按公式（6）计算：

$$P_{fin} = q_{mf} \times E_{mf} / M_{mf} \cdots \cdots \cdots (6)$$

式中：

P_{fin} ——平均气态燃料输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

E_{mf} ——每摩尔燃料输入的能量，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

q_{mf} ——燃料的平均质量流量，单位为克每秒（g/s）；

M_{mf} ——燃料的摩尔质量，2.016 g/mol；

燃料的平均质量流量应按公式（7）计算：

$$q_{mf} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} q_{H_2} \cdot dt \cdots \cdots \cdots (7)$$

式中：

q_{mf} ——燃料的平均质量流量，单位为克每秒（g/s）；

q_{H_2} ——燃料电池系统实际氢气流量，单位为克每秒（g/s）；

t_1 ——起始时间，单位为秒（s）；

t_2 ——结束时间，单位为秒（s）。

9.1.1.2.2 氧化剂功率输入

平均温度 T_a 和平均压力 p_a 条件下，每摩尔氧化剂（空气）的输入能量，应按公式（8）计算：

$$E_{ma} = H_{ma} - H_{ma0} + E_{mpa} \cdots \cdots \cdots (8)$$

式中：

E_{ma} ——每摩尔氧化剂（空气）的能量输入，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

H_{ma} ——平均温度 T_a 条件下氧化剂（空气）的摩尔焓，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

H_{ma0} ——在 288.15 K（15℃）条件下氧化剂（空气）的摩尔焓，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

E_{mpa} ——氧化剂（空气）的压力能，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

如果燃料电池系统用作联合循环的上循环，那么 E_{mpa} 可忽略。

氧化剂（空气）平均输入功率 P_{ain} (kJ/s)，应按公式（9）计算：

$$P_{\text{ain}} = q_{\text{ma}} \times E_{\text{ma}} / M_{\text{ma}} \cdots \cdots (9)$$

式中：

P_{ain} ——氧化剂（空气）的平均输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

E_{ma} ——每摩尔氧化剂（空气）输入的能量，单位为千焦每摩尔（kJ/mol）；

q_{ma} ——氧化剂（空气）的平均质量流量，单位为克每秒（g/s）；

M_{ma} ——氧化剂（空气）的摩尔质量，28.96 g/mol；

氧化剂（空气）的平均质量流量应按公式（10）计算：

$$q_{\text{ma}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} q_{\text{air}} \cdot dt \cdots \cdots (10)$$

式中：

q_{ma} ——氧化剂（空气）的平均质量流量，单位为克每秒（g/s）；

q_{air} ——燃料电池系统实际氧化剂（空气）流量，单位为克每秒（g/s）；

t_1 ——起始时间，单位为秒（s）；

t_2 ——结束时间，单位为秒（s）。

9.1.1.2.3 辅助电功率输入

平均辅助电功率输入 P_{elin} (kW)，可通过试验期间输入系统边界的全部电输入总和（kWh）除以试验时间（h）计算。

9.1.1.2.4 轴功输入

平均轴功输入功率 P_{wsin} (kJ/s)，计算方式参照 GB/T 27748.2-2022《固定式燃料电池发电系统 第2部分：性能试验方法》中 9.2.3.5 轴功输入。

9.1.1.2.5 外部热功率输入

平均外部热输入功率 P_{thin} (kJ/s)，计算方式参照 GB/T 27748.2-2022《固定式燃料电池发电系统 第2部分：性能试验方法》中 9.2.3.2 外部热输入。

9.1.1.2.6 平均总功率输入

输入燃料电池系统的平均总功率 P_{in} (kJ/s)按公式（11）计算：

$$P_{\text{in}} = P_{\text{fin}} + P_{\text{ain}} + P_{\text{wsin}} + P_{\text{thin}} \cdots \cdots (11)$$

式中：

P_{in} ——平均总功率输入，单位为千焦每秒（kJ/s）；

- P_{fin} ——平均燃料输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；
- P_{ain} ——平均氧化剂输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；
- P_{wsin} ——平均轴功输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；
- P_{thin} ——平均外部热输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）。

9.1.1.2.7 净电功率输出

平均净电功率输出 P_n （kW）的计算应减去所有辅助电功率输入，按公式（12）计算：

$$P_n = P_{elout} - P_{elin} \cdots \cdots \cdots (12)$$

式中：

- P_n ——平均净电功率输出，单位为千瓦（kW）；
- P_{elout} ——平均电功率输出，单位为千瓦（kW）；
- P_{elin} ——平均辅助电功率输入，单位为千瓦（kW）。

平均电功率输出 P_{elout} （kW）为试验期间燃料电池系统的平均输出功率，按公式（13）计算：

$$P_{elout} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_e \cdot dt \cdots \cdots \cdots (13)$$

式中：

- P_{elout} ——平均电功率输出，单位为千瓦（kW）；
- P_e ——燃料电池系统输出功率，单位为千瓦（kW）；
- t_1 ——起始时间，单位为秒（s）；
- t_2 ——结束时间，单位为秒（s）。

9.1.1.2.8 电效率计算

电效率 η_{el} （%）为平均净电功率输出除以平均总输入功率，按公式（14）计算：

$$\eta_{el} = (P_n / P_{in}) \times 100\% \cdots \cdots \cdots (14)$$

式中：

- η_{el} ——电效率；
- P_n ——平均净电功率输出，单位为千瓦（kW）；
- P_{in} ——平均总功率输入，单位为千焦每秒（kJ/s）；

9.1.1.3 热回收效率测试（选测）

9.1.1.3.1 平均热回收功率

试验期间的平均回收热功率，按公式（15）计算：

$$P_{HR} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (T_{HRout} - T_{HRin}) \times q_{mHR} \times c_{HR} \cdot dt \cdots \cdots (15)$$

式中：

P_{HR} ——平均回收热功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

T_{HRout} ——热回收流体的流出温度，单位为开（K）；

T_{HRin} ——热回收流体的流入温度，单位为开（K）；

q_{mHR} ——热回收流体的质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

c_{HR} ——热回收流体的比热容，单位为千焦每千克开 [kJ/(kg·K)]；

t_1 ——起始时间，单位为秒（s）；

t_2 ——结束时间，单位为秒（s）。

9.1.1.3.2 热回收效率计算

热回收效率 η_{th} （%）为平均热回收功率输出除以平均总输入功率，按公式（16）计算：

$$\eta_{th} = (P_{HR}/P_{in}) \times 100\% \cdots \cdots (16)$$

式中：

η_{th} ——热回收效率；

P_{HR} ——平均热回收功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

P_{in} ——平均总功率输入，单位为千焦每秒（kJ/s）；

9.1.1.4 总能量效率测试（选测）

总能量效率 η_{total} （%），按公式（17）计算：

$$\eta_{total} = \eta_{el} + \eta_{th} \cdots \cdots (17)$$

式中：

η_{total} ——总能量效率；

η_{el} ——电效率；

η_{th} ——热回收效率；

9.2 启停特性测试

9.2.1 概述

9.2.1.1 启动特性试验

按照 7.1 进行试验。图 3 是启动过程电功率示意图。启动开始时刻（ t_{st1} ）是按下启动按钮或启动信号发送的时刻；启动至怠速时刻（ t_{st2} ）是产生净电功率为正的時刻；启动至额定时刻（ t_{st3} ）是额定工况稳定运行（判断标准见 7.2）的时刻； Δt_{st1} 为怠速启动时间； Δt_{st2} 为额定启动时间。

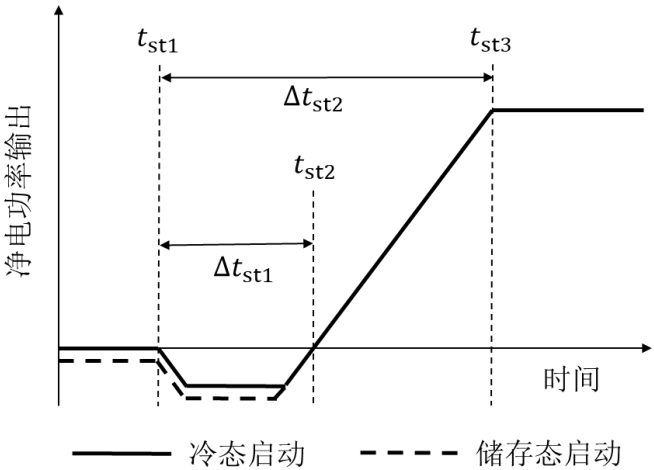


图 3 启动过程电功率示意图

9.2.1.2 关机特性试验方法

按照 7.1 进行试验。图 4 是关机过程电功率示意图。关机开始时刻（ t_{shut1} ）是按下关机按钮或关机信号发送的时刻；关机结束时刻（ t_{shut2} ）是净电功率回落到储存态净电功率 150%以内的时刻； Δt_{shut} 为关机时间。

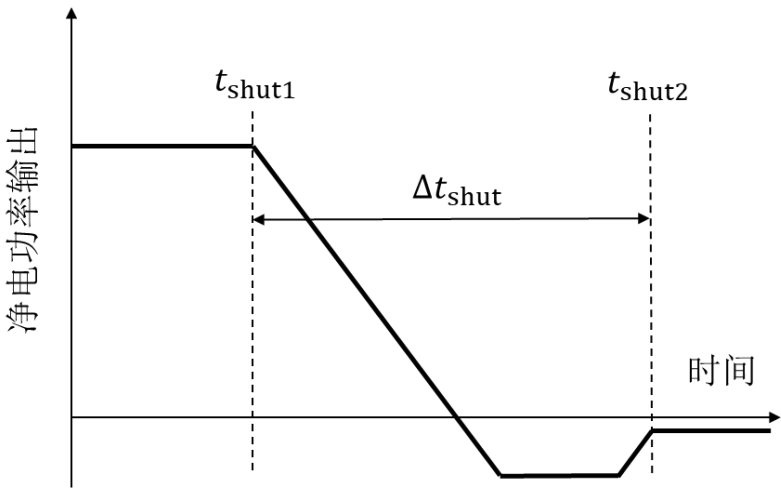


图 4 关机过程电功率示意图

9.2.2 计算方法

9.2.2.1 启动时间计算

怠速启动时间按照公式（18）计算：

$$\Delta t_{st1} = t_{st2} - t_{st1} \cdots \cdots \cdots (18)$$

式中：

Δt_{st1} ——怠速启动时间，单位为秒（s）；

t_{st1} ——启动开始时刻；

t_{st2} ——启动至怠速时刻。

额定启动时间按照公式（19）计算：

$$\Delta t_{st2} = t_{st3} - t_{st1} \cdots \cdots \cdots (19)$$

式中：

Δt_{st2} ——额定启动时间，单位为秒（s）；

t_{st1} ——启动开始时刻；

t_{st3} ——启动至额定时刻。

9.2.2.2 关机时间计算

关机时间按照公式（20）计算：

$$\Delta t_{shut} = t_{shut2} - t_{shut1} \cdots \cdots \cdots (20)$$

式中：

Δt_{shut} ——关机时间，单位为秒（s）；

t_{shut1} ——关机过程开始时刻；

t_{shut2} ——关机过程结束时刻。

9.2.2.3 启动能量计算

启动至怠速过程中的能量输入和输出的计算方式与效率测试（见 8.2.2）的方法相同。

9.2.2.4 电启动能量计算

启动至怠速过程中的净电功率输出根据 8.2.2.2.7 规定的方法计算。启动过程中的电启动能量按照公式（21）计算：

$$E_{elst} = P_n \times \Delta t_{st1} \cdots \cdots \cdots (21)$$

式中：

E_{elst} ——电启动能量，单位为千焦（kJ）；

P_n ——平均净电功率输出，单位为千瓦（kW）；

Δt_{st1} ——怠速启动时间，单位为秒（s）。

9.2.2.4.1 燃料启动能量计算

启动至怠速过程中的平均燃料功率输入根据 8.2.2.2.1 规定的方法计算。启动过程中的燃料启动能量按照公式（22）计算：

$$E_{\text{fst}} = P_{\text{fin}} \times \Delta t_{\text{st1}} \cdots \cdots \cdots (22)$$

式中：

E_{fst} ——燃料启动能量，单位为千焦（kJ）；

P_{fin} ——平均气态燃料输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

Δt_{st1} ——怠速启动时间，单位为秒（s）。

9.2.2.4.2 氧化剂（空气）启动能量计算

启动至怠速过程中的氧化剂（空气）平均输入功率根据 8.2.2.2.2 规定的方法计算。启动过程中的氧化剂（空气）启动能量按照公式（23）算：

$$E_{\text{ast}} = P_{\text{ain}} \times \Delta t_{\text{st1}} \cdots \cdots \cdots (23)$$

式中：

E_{ast} ——氧化剂（空气）启动能量，单位为千焦（kJ）；

P_{ain} ——氧化剂（空气）平均输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

Δt_{st1} ——怠速启动时间，单位为秒（s）。

9.2.2.4.3 热启动能量计算

启动至怠速过程中的平均外部热输入功率根据 8.2.2.2.5 规定的方法计算，平均热回收功率根据 8.2.2.3.1 规定的方法计算。启动过程中的热启动能量按照公式（24）计算：

$$Q_{\text{thst}} = P_{\text{thin}} \times \Delta t_{\text{st1}} - P_{\text{HR}} \times \Delta t_{\text{st1}} \cdots \cdots \cdots (24)$$

式中：

Q_{thst} ——热启动能量，单位为千焦（kJ）；

P_{thin} ——平均外部热输入功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

P_{HR} ——平均热回收功率，单位为千焦每秒（kJ/s）；

Δt_{st1} ——怠速启动时间，单位为秒（s）。

9.2.2.4.4 轴功启动能量计算

启动至怠速过程中的平均轴功输入功率根据 8.2.2.2.4 规定的方法计算。启动过程中的轴功启动能量

按照公式（25）算：

$$W_{sst} = P_{wsin} \times \Delta t_{st1} \cdots \cdots \cdots (25)$$

式中：

W_{sst} ——轴功启动能量，单位为千焦（kJ）；

P_{wsin} ——平均轴功输入功率，单位为千瓦（kJ/s）；

Δt_{st1} ——怠速启动时间，单位为秒（s）。

9.2.2.4.5 启动能量计算

总启动能量即为启动至怠速过程中不同形式的启动能量的总和，按照公式（26）计算：

$$E_{st} = E_{elst} + E_{fst} + E_{ast} + Q_{thst} + W_{sst} \cdots \cdots \cdots (26)$$

式中：

E_{st} ——总启动能量，单位为千焦（kJ）；

E_{elst} ——电启动能量，单位为千焦（kJ）；

E_{fst} ——燃料启动能量，单位为千焦（kJ）；

E_{ast} ——氧化剂（空气）启动能量，单位为千焦（kJ）；

Q_{thst} ——热启动能量，单位为千焦（kJ）；

W_{sst} ——轴功启动能量，单位为千焦（kJ）。

9.2.2.5 最大启动输入电功率

最大启动输入电功率（ $P_{elstin,max}$ ）即为启动过程中辅助输入电功率的最大值，单位为千瓦（kW）。

9.3 尾排气体浓度测试

9.3.1 试验方法

本试验项目为测试阳极尾排气体的氢气相对体积浓度。

气体取样点应位于尾排管直管段流量稳定处，建议布置于尾排口中心处。若燃料电池系统无合适的取样位置，可在尾排管后端加装取样管道，取样管道内径与尾排管内径保持一致且接口处确保密封，取样点位置应遵循前述规定。

按照 7.1 进行试验，取稳定运行最后 60 min 的数据进行结果计算。

9.3.2 数据处理

对记录数据计算平均值，计算结果为尾排气体浓度。

9.4 水消耗速率测试（选测）

9.4.1 概述

对于需要外加增湿水的燃料电池系统，应对增湿水消耗量进行测试。
对于有冷却水消耗的燃料电池系统，可与制造方协商确定是否需要冷却水消耗量进行测量。

9.4.2 试验方法

消耗水速率可通过下列方法之一进行测量：

- a) 将流量计安装于补水罐和系统之间，直接测量水消耗速率；
- b) 其他规定方法，如直接称重测量水消耗量并换算为水消耗速率。

9.4.3 试验步骤

9.4.3.1 直接测量法

如采用流量计测量消耗水速率，则按照 7.1 进行试验，取稳定运行最后 30 min 的数据进行结果计算。

9.4.3.2 间接测量法

如采用称重法测量消耗水速率，则试验步骤如下：

- a) 第一次试验，按照 7.1 进行试验，其中稳定运行时间为 65 min。
- b) 第二次试验，按照 7.1 进行试验，其中稳定运行时间为 35 min

9.4.4 计算方法

9.4.4.1 直接测量法

水消耗速率按照公式（27）计算：

$$q_w = \frac{3.6}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} q_{wt} \cdot dt \dots\dots\dots (27)$$

式中：

q_w ——水消耗速率，单位为（kg/h）；

q_{wt} ——水消耗流量，单位为克每秒（g/s）。

t_1 ——起始时间，单位为秒（s）；

t_2 ——结束时间，单位为秒（s）。

9.4.4.2 间接测量法

水消耗速率按照公式（28）计算：

$$q_w = 2 \times [(m_{f1} - m_{f2}) - (m_{l1} - m_{l2})] \dots\dots\dots (28)$$

式中：

q_w ——水消耗速率，单位为（kg/h）；

m_{l2} ——第二次试验结束时补水水箱的质量，单位为千克（kg）；

m_{l1} ——第二次试验开始时补水水箱的质量，单位为千克（kg）；

m_{f2} ——第一次试验结束时补水水箱的质量，单位为千克（kg）；

m_{f1} ——第一次试验开始时补水水箱的质量，单位为千克（kg）。

9.5 电能质量测试

9.5.1 概述

电能质量测试内容包括电压偏差、三相电压不平衡、频率偏差、谐波等。

按照 7.1 进行试验，取稳定运行最后 10 min 的数据进行结果计算。

9.5.2 试验方法

9.5.2.1 供电电压偏差

供电电压偏差测试参照 GB/T 12325-2008《电能质量 供电电压偏差》。

9.5.2.2 三相电压不平衡

三相电压不平衡测试参照 GB/T 15543-2008《电能质量 三相电压不平衡》。

9.5.2.3 频率偏差

频率偏差测试参照 GB/T 15945-2008《电能质量 电力系统频率偏差》。

9.5.2.4 谐波

谐波测试参照 GB/T 14549-1993《电能质量 公共电网谐波》。

10 环境适应性测试方法

10.1 防水防尘测试

防水防尘测试等级与制造方协商后确定。

测试方法参照 GB/T 4208 中的相关规定进行。

10.2 储存温度测试

储存试验温度与制造方协商后确定。

按照制造商规定的要求处理后，进行储存温度试验。

- a) 燃料电池系统置于存储试验环境温度中，静置 48 h 以上，至燃料电池系统内温度达到预定的储存温度；
- b) 试验环境温度升至室温，静置 48 h 以上；

试验后检查燃料电池系统内外部结构和安装固定部件是否出现裂缝、扭曲变形等缺陷；按照 7.1 的试验方法，对燃料电池系统进行效率试验。

将试验结果与储存试验前的数据进行对比。

附录 A 常数表

名称	符号	数值	单位
法拉第常数	F	96485	C/mol
燃料的摩尔质量	M_{mf}	2.016	g/mol
氧化剂（空气）的摩尔质量	M_{ma}	28.96	g/mol