



# 中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 21743—2008

---

## 固定式质子交换膜燃料电池发电系统 (独立型) 性能试验方法

Stationary proton exchange membrane fuel cell power system (separate)—  
Tests methods for the performance

2008-05-20 发布

2009-01-01 实施

---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布  
中国国家标准化管理委员会

## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	2
3 术语、定义和符号 .....	3
3.1 术语和定义 .....	3
3.2 符号 .....	3
4 标准条件 .....	6
4.1 标准温度与压力 .....	6
4.2 热值计算基础 .....	6
5 性能检验和检验分类 .....	6
5.1 性能检验 .....	6
5.2 检验分类 .....	6
6 检验准备 .....	7
6.1 概述 .....	7
6.2 不确定度分析 .....	8
7 试验仪器、设备和试验方法 .....	8
7.1 概述 .....	8
7.2 仪器与设备 .....	8
7.3 测量方法 .....	8
8 检验方法和结果的计算 .....	13
8.1 检验计划 .....	13
8.2 检验持续时间和记录频次 .....	15
8.3 结果计算 .....	15
9 试验报告 .....	25
9.1 标题页 .....	25
9.2 内容目录 .....	26
9.3 摘要式报告 .....	26
9.4 详细式报告 .....	26
9.5 完整式报告 .....	26
附录 A (规范性附录) 不确定度分析指南 .....	27
附录 B (资料性附录) 燃料热值的计算 .....	35
附录 C (资料性附录) 标准气体 .....	38
图 1 质子交换膜燃料电池发电系统框图 .....	1
图 2 符号图例 .....	5
图 3 燃料电池系统的运行过程图 .....	19
图 4 系统功率响应曲线斜率 .....	20

图 5	90%输出功率响应曲线斜率 .....	21
表 1	符号 .....	3
表 2	检验项目及检验分类 .....	7
表 3	试验项目的运行条件 .....	13
表 4	在试验操作条件下可允许最大变动量 .....	14
表 5	振动修正系数 .....	25
表 A.1	测量参数汇总及其标称值 .....	30
表 A.2	计算结果的名义值 .....	30
表 A.3	不同参数的基本误差源 .....	31
表 A.4	绝对系统误差( $B_i$ )和绝对随机误差( $2S_{\text{a}}$ ) .....	31
表 A.5	参数 $p_i$ 敏感系数 .....	32
表 A.6	传递的系统误差( $B_R$ )和随机误差( $2S_R$ ) .....	33
表 A.7	计算结果 .....	34
表 B.1	在不同的参考条件下燃烧天然气组分的理想气体的热值 .....	35
表 B.2	空气能量的计算工作表 .....	36
表 B.3	燃料气体能量计算工作表 .....	37
表 C.1	天然气的标准气体 .....	38
表 C.2	丙烷的标准气体 .....	39

## 前 言

本指导性技术文件是根据我国质子交换膜燃料电池发展现状,参考了国外同类燃料电池技术和国际电工委员会起草的 IEC TC 105/58/CDV 和 IEC 105/79/RVC 草案起草的。

本指导性技术文件的附录 A 是规范性附录,附录 B 和附录 C 是资料性附录。

本指导性技术文件由中国电器工业协会提出。

本指导性技术文件由全国燃料电池标准化技术委员会(SAC/TC 342)归口。

本指导性技术文件由大连新源动力股份有限公司负责起草。

本指导性技术文件参加起草单位:中国科学院大连化物所、机械工业北京电工所和北京世纪富原燃料电池有限公司等。

本指导性技术文件主要起草人:阳贻华、王宇晨、方晓燕、胡军、杨庆苏、邱立东等。

## 引 言

《固定式质子交换膜燃料电池发电系统(独立型)性能试验方法》是国家“十五”重大科技专项的重要技术标准研究项目《新能源和可再生能源关键技术标准研究——质子交换膜燃料电池、太阳热水系统、并网型光伏发电及风力发电机组》研究制定的、结合我国“863”计划燃料电池电动汽车重大项目质子交换膜燃料电池技术的系列国家标准之一。本部分规定了固定式质子交换膜燃料电池发电系统(独立型)(以下简称发电系统)的运行性能方面和它对环境所产生的影响方面的试验方法。

燃料电池不仅适合建设为固定式电站来提供社区和家庭用电力源,更重要的在于车载燃料电池可以为电动汽车提供动力源以及微型燃料电池使用于各种通讯设备、笔记本电脑和掌上电脑等。而燃料电池技术正在从这些方面的研究和开发向产业化转变,燃料电池在固定电站、运输电源和便携式电源等方面的商业化即将来临。与燃料电池相关的一些技术也将在未来5~10年内实现商业化,一些新技术、新材料和新组件也将会在市场国际化的基础上快速发展,可以预见燃料电池技术将会持续而高速地发展。

我国“九五”、“十五”期间都把质子交换膜燃料电池(PEMFC)及其相关技术作为重大项目列入国家科技攻关包括“863”燃料电池汽车重大项目计划,并已取得阶段性成果。目前我国在PEMFC技术方面以高校和科研院所为技术支撑,以几家主要的高新技术企业为龙头,已形成了大连、上海、北京和武汉等主要的研发基地。他们当中有的已取得拥有自主知识产权专利技术,正在积极推进我国燃料电池技术的产业化和商业化。

早期制定标准对于推动这项具有无限发展潜力的新技术——燃料电池的产业化和商业化是非常重要的。国际电工委员会(IEC)成立了IEC/TC 105来负责燃料电池专业的标准工作,近年来活动非常频繁,目前已发布了多项国际标准。我国在开展燃料电池技术科技攻关和跟踪国际标准的同时,根据我国实际安排了相关关键技术标准的研究制定,旨在体现标准早期介入科技成果产业化,与国际接轨的理念。目前已完成的标准项目有:

- 1) 质子交换膜燃料电池 术语(GB/T 20042.1—2005)
- 2) 质子交换膜燃料电池 电池堆通用技术条件(GB/T 20042.2—2008)
- 3) 便携式质子交换膜燃料电池发电系统(GB/Z 21742—2008)
- 4) 固定式质子交换膜燃料电池发电系统(独立型)性能试验方法(GB/Z 21743—2008)

## 固定式质子交换膜燃料电池发电系统 (独立型) 性能试验方法

### 1 范围

1.1 本指导性技术文件规定了固定式质子交换膜燃料电池发电系统(以下简称发电系统)的运行性能方面和它对环境所产生的影响方面的试验方法。

1.2 本指导性技术文件规定的试验内容包括:

在规定运行条件下的输出功率;

在规定运行条件下的发电效率和热利用效率;

在规定运行条件下的环境特性:例如气体排放、噪声等;

本指导性技术文件未涉及电磁兼容(EMC)方面的规定,有关这方面的问题有待将来考虑。

1.3 本指导性技术文件适用于各种类型的独立运行的固定式质子交换膜燃料电池发电系统。

1.4 由于发电系统所使用的燃料种类(如纯氢、富氢气体、甲醇溶液等)不同、使用目的不同,以及输入与输出的流体物质和能量形式的不同,它们可能会带有不同的子系统。但是,为了评估发电系统,需要定义一个常规的系统及其边界(图1)。

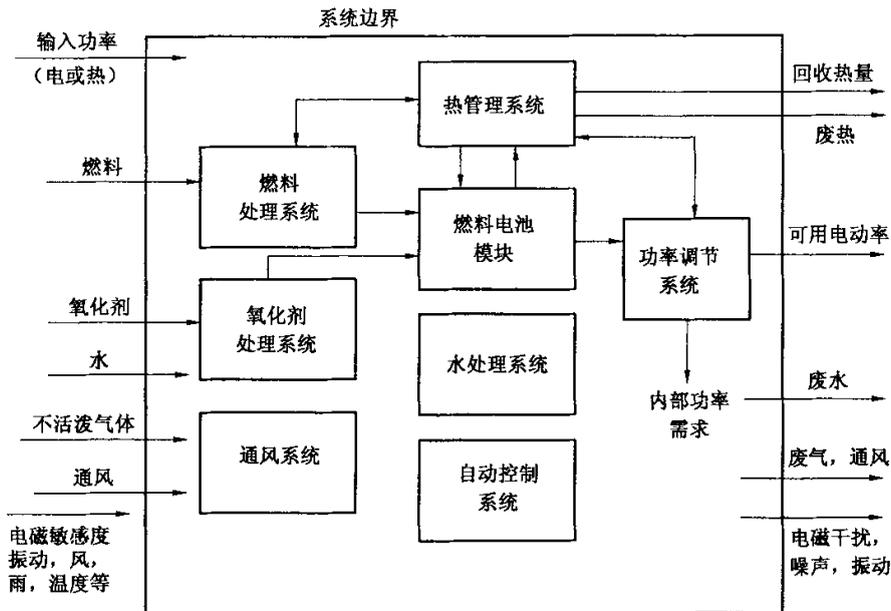


图1 质子交换膜燃料电池发电系统框图

1.5 为确定发电系统的试验边界,应考虑以下条件:

所有能量回收系统都应包括在系统边界之内;

根据燃料在发电系统边界处的状态计算它们(例如纯氢、甲醇溶液等)的热值。

1.6 本指导性技术文件不考虑输入或输出的机械功或机械能。燃料电池运行所需的机械子系统(如通风机、微型涡轮机、空气压缩机)都应包括在试验边界内。不需要对试验边界内的这些机械子系统进行直接测量,但是,它们在发电系统运行中的效应应包括在内。如果机械功和机械能超出了试验边界,就

必须进行附加的试验和计算。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本指导性技术文件的引用而成为本指导性技术文件的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本指导性技术文件,然而,鼓励根据本指导性技术文件达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本指导性技术文件。

GB/T 3767 声学 声压法测定噪声源声功率级 反射面上方近似自由场中的工程法(GB/T 3767—1996,eqv ISO 3744:1994)

GB/T 2464 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量

GB/T 7626(所有部分) 直接作用模拟指示电测量仪表及其附件[idt IEC 60051(所有部分)]

GB/T 19000 质量管理体系 基础和术语(GB/T 19000—2000,ISO 9000:2000,IDT)

GB/T 17215 1级和2级交流静电式有功瓦特-小时表(IDT IEC 61036)

GB/T 17626.7 电磁兼容性(EMC) 第4-7部分:试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波和  
谐间波的测量和仪器仪表的通用指南(IDT IEC 61000-4-7)

GB/T 17860 电测量仪器 X-t记录仪(IEC 61143,IDT)

GB/T 17883 0.2S和0.5S级静止式交流有功电度表(GB/T 17883—1999,eqv IEC 60887:1992)

GB/T 20042.1—2005 质子交换膜燃料电池 术语

SJ/T 10423 声级计通用技术条件

IEC 60359:1987 电工和电子设备性能的表述

IEC 60688:2002 将交流电转换成模拟信号或数字信号用的电测量变送器

IEC 61000-4-13 电磁兼容性(EMC) 第4-13部分:电磁兼容试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信号低频抗扰度试验

IEC 61028:1991 电气测量设备 X-Y记录仪

ISO 4677-1 调节和试验用大气 相对湿度的测定 第1部分:吸入式湿度计法

ISO 4677-2 调节和试验用大气 相对湿度的测定 第2部分:旋流式湿度计法

ISO 5348 机械振动与冲击 加速计的机械安装

ISO 6060 水质量 化学需氧量

ISO 6568 天然气 用气相色谱法的简明分析

ISO 6974(所有部分) 天然气 用气相色谱法测定具有规定不确定度的组分

ISO 6975 天然气 扩展分析 气相色谱法

ISO 7934 固定排放源 硫氧化物、过氧化氢的质量浓度测定方法 高氯酸钡/高氯酸钪法

ISO 9096 固定排放源 气体输送管道中颗粒物的浓度和质量流量的测定 重量法指南

ISO 10396 固定排放源 气体浓度测定 自动取样

ISO 10523 水质 氢离子浓度测定方法

ISO 10707 水质量含有机物的水介质生物化学需氧量的评定

ISO 10780 固定源排放物 管道中气体流速和体积流量的测定

ISO 10849 固定源排放物 氮氧化物质量浓度的测定方法 性能特性自动测定

ISO 11042-1 燃气轮机废气排放 第1部分:试验和评估

ISO 11042-2 燃气轮机废气排放 第2部分:排放的自动监测

ISO 11564 固定源排放物 燃料气体中氮氧化物质量浓度的测定方法

### 3 术语、定义和符号

#### 3.1 术语和定义

GB/T 20042.1 所确立的术语和定义适用于本指导性技术文件,还应该增加以下术语和定义:

##### 3.1.1

**试验过程 test run**

测取和记录试验数据的持续时间。

##### 3.1.2

**90%功率响应时间 90% power response time**

输出的电功率(或热功率)开始变化时刻与变化到期望功率 90%所经历的时间。

##### 3.1.3

**传热介质 thermal media**

为了将可利用的热量回收而采用的传递热量的液体或气体。

#### 3.2 符号

在本指导性技术文件中使用的符号及其含义与单位见表 1。

表 1 符号

符 号	含 义	单 位
体积流量 $q_v$		
$q_{v_i}$	燃料在温度 $t_i$ 和压力 $p_i$ 下的体积流量	$m^3/s$
$q_{v_0}$	燃料在标准状态下的体积流量	
$q_{v_e}$	排放气体在排放温度和排放压力下的体积流量	
$q_{v_a}$	空气在温度 $t_a$ 和压力 $p_a$ 下的体积流量	
$q_{v_{a0}}$	空气在标准状态下的体积流量	
$q_{v_w}$	水的体积流量	
质量流量 $q_m$		
$q_{m_f}$	燃料的质量流量	$kg/s$
$q_{m_a}$	空气的质量流量	
$q_{m,HR1}$	热回收液体在出口处的质量流量	
$q_{m,HR2}$	热回收液体在入口处的质量流量(回到燃料电池发电系统的流体)	
$q_{m_e}$	排放物的质量流量	
电功率 $P$		
$P_{out}$	输出的有功功率(包括直流电)	$kW$
$P_{in}$	外部电源输入的有功功率(包括直流电)	
总功率 $P_T$		
$P_T$	发电系统输出的有功电功率和热功率之和	$kW, kJ/s$
$Q_{in}$	由燃料和氧化剂提供的总输入功率	

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
压力 $p$		
$p_0$	标准(基准)压力	kPa
$p_f$	燃料压力	
$p_a$	氧化剂(空气)压力	
$p_{HR1}$	热回收流体输出压力	
$p_{HR2}$	热回收流体输入压力	
温度 $t$		
$t_0$	标准温度	K
$t_f$	燃料温度	
$t_a$	氧化剂(空气)温度	
$t_{HR1}$	热回收流体输出温度	
$t_{HR2}$	热回收流体输入温度	
密度 $\rho$		
$\rho_0$	在标准状态下燃料的密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_f$	液体燃料在温度 $t_f$ 时的密度	
$\rho_{a0}$	在标准状态下的氧化剂(空气)的密度	
$\rho_c$	排放物在排放气体温度与压力下的质量浓度	
$X_j$	组分 $j$ 的摩尔比	—
热值 $Q$		
$Q_0$	在标准条件下燃料的热值	kJ/mol
$Q_0$	燃料在液相时的热值	kJ/kg
$Q_{0j}$	燃料组分 $j$ 在标准状态下的热值	kJ/mol
$Q_{HR}$	回收热量	kJ/s
$Q_{WH}$	废热量	kJ/s
焓 $H$ , 比焓 $h$		
$H_{HR1}$	出口处热回收流体的焓	kJ
$H_{HR2}$	入口处热回收流体的焓	
$h_{HR1}$	出口处热回收流体在温度 $t_{HR1}$ 、压力 $p_{HR1}$ 的比焓	kJ/kg
$h_{HR2}$	入口处热回收流体在温度 $t_{HR2}$ 、压力 $p_{HR2}$ 的比焓	
$h_f$	燃料在温度 $t_f$ 下的比焓	kJ/mol
$h_0$	燃料在标准温度下的比焓	
$h_{ij}$	组分 $j$ 在温度 $t_j$ 下的比焓	
$h_a$	氧化剂(空气)在温度 $t_f$ 下的比焓	
$h_{a0}$	氧化剂(空气)在标准温度下的比焓	

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
输入能量 $E$		
$E_{iv}$	燃料的输入能量	$\text{kJ}/\text{m}^3$
$E_{pi}$	燃料的压力势能	$\text{kJ}/\text{mol}$
$E_{av}$	氧化剂 (空气) 的输入能量	$\text{kJ}/\text{m}^3$
$E_{pa}$	氧化剂 (空气) 的压力势能	$\text{kJ}/\text{mol}$
效率 $\eta$		
$\eta_e$	电效率	%
$\eta_{rh}$	回收热效率	
$\eta_{total}$	总效率	
电压 $V$		
$V_{out}$	输出电压	V
$V_{in}$	输入电压	
电流 $I$		
$I_{out}$	输出电流	A
$I_{in}$	输入电流	
功率因数 $\lambda$		
$\lambda_{out}$	输出功率的功率因数	—
$\lambda_{in}$	输入功率的功率因数	—
注：燃料电池发电系统的主要符号见图 2。		

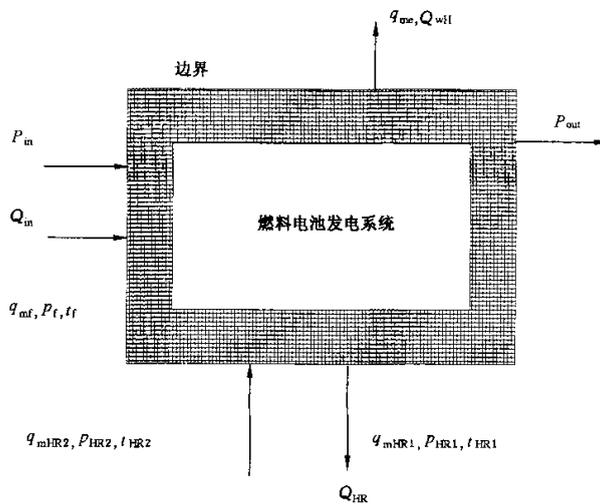


图 2 符号图例

## 4 标准条件

### 4.1 标准温度与压力

本条提供了有关试验结果计算的标准条件,以供在公开的技术资料上采用。

标准温度: $t_0 = 288.15 \text{ K}(15^\circ\text{C})$ ;

标准压力: $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$ 。

### 4.2 热值计算基础

燃料的热值原则上以低热值(LHV)为基准。

若使用低热值(LHV),不必加符号“LHV”,如: $\eta_e = \times \times \%$ 。

若使用高热值(HHV),应加符号“HHV”,如: $\eta_e = \times \times \%(\text{HHV})$ 。

## 5 性能检验和检验分类

### 5.1 性能检验

发电系统的性能评估要从以下两点考虑:

——运行:在正常运行期间和瞬变过程中检验系统的性能。

——环境方面:检验系统如何影响环境。

表2给出了运行性能检验和环境适应性检验项目。表2中的检验项目应适用于作为整体考虑的发电系统。

除非另有规定,各种类型的发电系统都应进行所有项目检验。由于系统设计的差别和技术的不同,可能会增减一些检验项目(例如没有热回收系统的将不需要热回收的检验)。

### 5.2 检验分类

检验共分如下三类。

#### 5.2.1 型式检验

对某一设计的一台或多台产品进行的检验,以验证该项设计是否符合特定的规范要求。

注:型式检验是强制性的。对一批产品中抽取的每一件样品都要进行型式检验。其目的就在于验证设计是否符合合同要求。

#### 5.2.2 例行检验

在制造过程中和/或制成后,对每件独立产品进行的检验,以确定其是否符合特定规范的某些要求。

注:本指导性技术文件中并没有确定例行性能检验是要求的或者说是必需的。

#### 5.2.3 验收检验

按合同规定应进行的检验,以向客户证明产品符合其特定规范的要求。

注:经制造商与客户双方同意,按照客户的要求,可从表2中选取验收及检验项目,这些检验一经选定,就应按本指导性技术文件的规定执行。

注1:型式检验和例行检验通常以相同的方法和采用相同的规程进行。在进行例行检验的过程中,型式检验和例行检验之间的差别可能是必要的(例如,特别严格的稳定性要求也许并不必要,或者说例行检验测取的读数可能较少一些),这些差别将在检验方法的描述中加以说明。

注2:本指导性技术文件只包括检验方法,不涉及性能要求。

表 2 检验项目及检验分类

序号	试验项目名称	型式检验	例行检验
运行			
1	电功率输出	×	
2	谐波	×	
3	燃料消耗	×	
4	电效率	×	
5	热回收效率	×	
6	总能量效率	×	
7	功率输出响应	×	
8	启动/停机特性	×	
9	吹扫气体消耗量	×	
10	水消耗量	×	
11	氧化剂消耗量	×	
12	废热量	×	
环境方面			
1	微颗粒物排放量	×	
2	SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 排放量	×	
3	CO <sub>2</sub> 、CO 排放量	×	
4	总碳氢化合物、氢气排放量	×	
5	噪音值	×	
6	振动值	×	
7	排放水的质量特性	×	
注 1：“×”表示应进行的试验项目。			
注 2：例行检验项目由制造商确定。			

## 6 检验准备

### 6.1 概述

本部分描述在进行检验之前应该考虑的典型项目。对于每项检验来说,应选择高精度的检测仪器及设备,以便将不确定因素减到最少。应准备一个书面的检验计划。有关的检验项目见表 2。

下列各项应该列入检验计划:

- a) 目的;
- b) 检验规范;
- c) 检验人员资格;
- d) 质量保证标准(GB/T 19000 或其他等效标准);
- e) 结果不确定度(参见附录 A);
- f) 对测量仪器及设备的要求(参见第 7 章);
- g) 检验参数范围的估计;
- h) 数据采集计划(参见 6.2.2);

i) 必要时,列出以氢气作为燃料的最低安全要求事项(由最终产品制造者提供说明文件)。

## 6.2 不确定度分析

### 6.2.1 不确定度分析项目

为了评估检验结果的不确定度(见附录 A),应制订一个检验计划,对以下四个项目的检验结果应进行分析,计算出它们的绝对误差和相对误差,以便判定检验结果的不确定度和确定是否能满足客户的要求。

- 电功率输出;
- 电效率;
- 热回收效率;
- 总效率。

### 6.2.2 数据采集和记录

为满足目标误差要求(见附录 A 的 A.2),数据采集系统和数据记录设备应满足采集频次与采集速度的需要,其性能应优于性能试验设备。

## 7 试验仪器、设备和试验方法

### 7.1 概述

本部分描述了发电系统的试验设备及其用法和注意事项。测量的设备类型和测量方法应符合有关标准和制造商确定的不确定度目标。如有必要,可以附加适当的外围仪器设备。

下列各项是用以检验发电系统性能的主要仪器和设备。

### 7.2 仪器与设备

- 输出、输入电能的测量仪器:电压表,电流表,功率表及其附件;
- 测定燃料消耗的仪器:燃料流量计,压力传感器,温度传感器;
- 测定燃料热值的仪器:
  - 气相色谱仪或相同精度的其他仪器;
  - 热量计或相同精度的其他仪器;
- 测量回收热的设备:液体流量计,温度传感器和压力传感器;
- 测定废气的成分和排放水质的装置:
  - 微粒、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 和碳氢化合物分析仪器;
  - pH 计和电化学传感器等水质分析仪器;
- 测量噪声的工具:声压计等;
- 测量振动的工具:振动测量仪,加速度表,拾振传感器;
- 测量环境条件的仪器:气压计,湿度计和温度传感器。

### 7.3 测量方法

#### 7.3.1 电功率

电气测量包括燃料电池发电系统的输出电能和辅助负载消耗的输入电能。测量应符合 GB/T 7676、IEC 60359、GB/T 17883、IEC 60688 和 GB/T 17860.1。测量项目如下:

- 功率;
- 电压;
- 电流;
- 功率因数。

##### 7.3.1.1 测量准备

电功率表、电压表、电流表以及功率因数表的精度必须符合有关标准的规定。

### 7.3.1.2 电气仪表的接入位置

为了测量输出功率,功率表、电压表,电流表和功率因数表应接在电能的输出接口处。

为了测量外部电源供电的辅助设备消耗功率,功率表、电压表、电流表和功率因数表应接在辅助设备电源的输入接口处。

### 7.3.2 燃料消耗量

检验时,气态燃料或液态燃料都可使用,这主要取决于被试燃料电池发电系统的规格,但燃料热值在检验阶段必须一致。

#### 7.3.2.1 气态燃料

气态燃料特征应包括温度、压力和热值,热值应根据 8.3.3.1 计算。

##### 7.3.2.1.1 燃料成分

###### 取样

发电系统运行期间,燃料气体的取样频次和样品个数,都应满足不确定度分析的需要。如果被分析气体成分不确定度符合目标不确定度的要求,可用瓶装气体代替取样气体。

###### 燃料气成分测定

天然气是由甲烷和少量高碳化合物以及其他不可燃气体组成。别的燃料可能含有其他成分。甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷和氮气、二氧化碳、苯都应根据 ISO 6568, ISO 6974 和 ISO 6975 进行测定。氢气、氧气和一氧化碳等微量成分应根据 ISO 6974 和 ISO 6975 进行测定。硫化物(包括气味)应按 ISO 6326 进行测定。

##### 7.3.2.1.2 燃料流量

气体燃料消耗量可以通过体积流量计、质量流量计或涡轮流量计进行计量。如果上述方法不可行,则推荐使用喷嘴、孔板或文丘里流量计,使用要求符合 GB/T 2624 的规定。燃料流量计应与所用气体的压力相适应,其测量误差应符合目标不确定度的要求。有关流量计接入的位置和流量测量应符合如下规定:

- 流量计的安装位置应靠近系统边界;
- 燃料的温度和压力应在系统边界上同时测量。

##### 7.3.2.1.3 燃料温度

用来直接测量温度的仪器宜采用:

- 带变送器的热电偶温度计;
- 带变送器的热敏电阻温度计。

开始测量前,应确定温度传感器具有合适的精度,而且应置于靠近燃料流量计的上游处。

##### 7.3.2.1.4 燃料压力

压力测量可以采用压力传感器,自重仪或其他弹力型仪表。压力仪器设备必须适合于运行期间的压力,并且测量误差应满足不确定度分析的要求。测试前要检查管路以保证工作条件下无泄漏。如果发生压力波动,应在适当位置安装一个合适的阻尼装置。测得的燃料压力应是静压力,应该考虑速度的影响并消除这些影响。

### 7.3.2.2 液体燃料

液体燃料的特征包括:

- 密度;
- 热值;
- 黏度;
- 温度;
- 成分。

#### 7.3.2.2.1 液态燃料流量

精确测量发电系统的燃料流量可使用皮特管流量计、孔板流量计或文丘里流量计。也可使用包括位移流量计、质量流量计、体积流量计、涡轮流量计、液体刻度计量和直接称重计量方法。无论如何,应了解所用的燃料流量测量装置的误差,而且应满足误差计算要求。

测量点后不允许有燃料溢出或泄漏。

#### 7.3.2.2.2 液态燃料温度

用于直接测量温度的推荐工具是:

- 带变送器的热电偶温度计;
- 带变送器的热敏电阻温度计。

开始测量前,应确定温度传感器具有合适的精度,而且应置于靠近燃料流量计的上游处。

#### 7.3.3 热回收

传热介质可以是水、空气或其他介质,如油等。也可以根据被试发电系统的检验说明书来使用这些介质的组合。

传热介质的温度和压力应同时测量。

##### 7.3.3.1 传热介质流量

每种传热介质的流量都应采用合适的仪器,如喷嘴、孔板或文丘里流量计进行测量,并应符合 GB/T 2624 的规定,也可采用质量流量计或涡轮流量计。

测量之前,应选用适当量程和精度的流量计。

流量计应放置于靠近发电系统的边界处。

##### 7.3.3.2 热介质温度

测量之前,应选用适当量程和精度的温度计。温度计应放置于靠近燃料电池发电系统的边界处,应位于流量计的上游,确保温度传感器不与管壁相接触。

用来直接测量温度的工具包括:

- 带变送器的热电偶温度计;
- 带变送器的热敏电阻温度计。

##### 7.3.3.3 传热介质压力

本测量方法适用于测量包括蒸汽的气相介质。

- a) 测量应选用适当量程和精度的压力计,并校准;
- b) 压力传感器应放置于流体输送管线上流量计的上游,应靠近燃料电池发电系统边界处(流体输出和输入点)。在管线外面应包上足够的绝热材料;
- c) 对于蒸汽的冷凝应考虑适当补偿。

##### 7.3.4 吹扫气体流量

吹扫气体消耗量应按 7.3.6 规定的方法测定。

##### 7.3.5 氧化剂(空气)特征

氧化剂(空气)特征测定包括:

- 温度;
- 压力;
- 成分(氧化剂特征会影响到燃料电池性能,氧化剂的成分应在检验报告中予以说明);
- 密度。

氧化剂的温度和压力应在系统边界上同时测量。

##### 7.3.5.1 氧化剂(空气)流量

氧化剂(空气)气体流量也应通过体积流量计、质量流量计或涡轮流量计进行测量。如果上述方法

不可行,则推荐使用喷嘴流量计、孔板流量计或文丘里流量计,使用要求符合 GB/T 2624 的规定。流量计应与所用气体的压力相适应,其测量误差应符合目标不确定度的要求。有关流量计接入的位置和流量测量应按如下规定:

流量计的位置应靠近系统边界。

#### 7.3.5.2 氧化剂(空气)温度

用来直接测量温度的器具宜采用:

- 带变送器的热电偶温度计;
- 带变送器的热敏电阻温度计。

测量前,温度传感器应校准。温度传感器应安装在流量测量计的上游并朝向上游方向。

#### 7.3.5.3 氧化剂(空气)压力

氧化剂(空气)压力测量要求参见 7.3.2.1.4。

#### 7.3.5.4 氧化剂(空气)成分

氧化剂成分应当通过气相色谱仪或其他适用设备进行测定。如果使用空气作为氧化剂,除非特别说明,氧化剂的成分应采用常压下的数据。

#### 7.3.6 其他流体流量

如有必要,吹扫气体、冷却水或者电池生成水流量等应通过下列方法之一进行测量。

- a) 标准喷嘴或者孔板流量计;
- b) 排水体积流量计;
- c) 其他特殊方法,如直接称重、量取体积,用质量流量计等。

#### 7.3.7 废气排放测量

如果燃料为纯氢,则可不进行 7.3.8.4~7.3.8.5 项测定。

##### 7.3.7.1 废气温度

用来直接测量温度的器具宜采用:

- 有变送器的热电偶温度计;
- 有变送器的热敏电阻温度计。

测量前,温度传感器应校准。温度传感器应安装在废气流量计和废气分析仪的上游并朝向上游方向。

##### 7.3.7.2 废气压力

废气压力测量要求参见 7.3.2.1.4。

废气压力仪表应安装在废气流量计和废气成分分析仪的上游。

##### 7.3.7.3 废气流量

测量要求参见 ISO 10780。也可采用质量流量计、体积流量计或涡轮流量计测量。如果喷嘴、孔板或文丘里流量计符合 GB/T 2624,则这三种流量计也可使用。流量计应与所用气体压力相适应,并应满足不确定度分析的要求。

##### 7.3.7.4 微小颗粒物的浓度

测量要求参见 ISO 9096、ISO 11042-1 和 ISO 11042-2。

##### 7.3.7.5 硫氧化物(SO<sub>x</sub>)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的浓度

###### 7.3.7.5.1 硫氧化物(SO<sub>x</sub>)

测量要求参见 ISO 7934、ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396。维修时,其他能满足不确定度分析的适用方法也可采用。

###### 7.3.7.5.2 氮氧化物(NO<sub>x</sub>)

测量要求参见 ISO 11564、ISO 10849、ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396。维修时,其他能满足不确定度分析要求的适用方法也可采用。

### 7.3.7.6 碳氧化物含量

#### 7.3.7.6.1 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)含量

测量要求参见 ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396, CO<sub>2</sub> 含量可根据燃料中碳的含量计算出。

#### 7.3.7.6.2 一氧化碳(CO)含量

测量要求参见 ISO 11042-1、ISO 11042-2、ISO 10396。

### 7.3.7.7 总碳氢化合物含量

测量要求参见 ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396。

### 7.3.7.8 氧含量

测量要求参见 ISO 11042-1 和 ISO 11042-2。

### 7.3.7.9 氢含量

采用气相色谱仪或其他合适的方法测定废气流中的氢含量。

### 7.3.8 排放水质量检测项目

对于燃料电池排放水的检测应包括：

- 排放水的体积；
- 排放水的温度；
- 氢离子浓度(pH)；
- 生物化学需氧量,如有必要,还有化学需氧量；
- 国家法规有限制而燃料电池发电系统可能排放的其他的排放物排放量。

#### 7.3.8.1 排放水的体积

测量要求参见 7.3.6。

#### 7.3.8.2 排放水的温度

推荐使用下列仪器测定生成水的温度：

- 有变送器的热电偶温度计；
- 有变送器的热敏电阻温度计。

#### 7.3.8.3 氢离子浓度

测量要求参见 ISO 10523。

#### 7.3.8.4 化学需氧量

测量要求参见 ISO 6060。

#### 7.3.8.5 生物化学需氧量

测量要求参见 ISO 10707。

### 7.3.9 可闻噪声等级

发电系统产生的噪声应采用符合 SJ/T 10423 规定的声级计来测量。此项试验应按照 GB/T 1767 的规定进行。

下列各项参数应按 GB/T 1767 确定：

- a) 测量面(距发电系统外表面一定距离的一个包络面)；
- b) 测量点的数目；
- c) 背景噪声的影响。

噪声应由专业试验人员在规定的位置和距离上进行测定。

### 7.3.10 振动值测定

振动测定应在发电系统按照制造商的使用说明书说明安装后,在正常运行时进行。测量点应为下列安装点：

通过制造商提供的安装构件将发电系统安装就位,安装点就是振动传播点。振动通过安装点从发电系统传递到安装地基,再传到地板、墙壁、天花板或制造商设计的其他支持构件。如果设计有多种安

装结构,那么对每种安装结构都应进行测定。

振动测定位置应选择系统全部测点中振动最强的点,对于没有固定安装点的系统,就应通过动态分析或初步检验,来确定振动最强的测量点。

为了确定每个测量点的振动特性,必须在互相垂直的三个座标方向上进行测量。

加速度计的安置应参照 ISO 5348。

### 7.3.11 总波形畸变率

对于输出交流电的发电系统,必须测量输出电压的波形畸变率。测量方法见 GB/T 17626.7 和 IEC 61000-4-13。

### 7.3.12 环境条件

应测量环境的相对湿度、风速、大气压力和温度。环境相对湿度的测量见 ISO 4677-1 和 ISO 4677-2。环境风速测量见 ISO 1662。测量前,温度和压力传感器应校准。

环境温度的测量可采用下列仪器:

- 带变送器热电偶温度计;
- 带变送器热敏电阻温度计。

环境大气压力测量可采用下列仪器。

- 水银气压计;
- 酒精气压计。

## 8 检验方法和结果的计算

### 8.1 检验计划

表 2 中列出的各项检验项目,应在下列不同的运行条件下进行:

- a) 稳定输出额定功率;
- b) 稳定输出约 50% 额定功率;
- c) 待机状态(输出功率为 0);
- d) 稳定输出最大功率;
- e) 瞬变状态。

所有试验项目的运行状态条件见表 3。

#### 8.1.1 环境条件

每一检验过程都应测量并记录如下的环境条件:

- a) 环境温度;
- b) 大气压力;
- c) 相对湿度;
- d) 风速。

表 3 试验项目的运行条件

序号	检验项目名称	系统状态条件			最大值测定	瞬变状态 <sup>a</sup>
		额定功率	部分功率	0 功率		
运行						
1	功率输出	×	×			
2	供电质量 <sup>a</sup>	×	×			
3	燃料消耗量	×	×			
4	电效率 <sup>b</sup>	×	×			

表 3 (续)

序号	检验项目名称	系统状态条件			最大值测定	瞬变状态 <sup>c</sup>
		额定功率	部分功率	0 功率		
5	热回收效率 <sup>b</sup>	×	×			
6	总能量效率	×	×			
7	功率输出响应					×
8	启动/停机特性					×
9	吹扫气体消耗量					×
10	水消耗量	×	×		×	
11	氧化剂消耗量	×	×			
12	废热	×	×			
环境方面						
1	微颗粒物排放量				×	
2	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 排放量				×	
3	CO <sub>2</sub> 、CO 排放量				×	
4	全部碳氢化合物、氢气排放量				×	
5	噪音值	×	×	×	×	×
6	振动值	×	×	×	×	×
7	排放水的质量特性	×	×	×		
注：“×”是应进行的检验项目。 a 在波形畸变条件下作相应检验。 b 几项检验同时进行。 c 瞬变状态检验包括停机瞬变过程检验。						

8.1.2 在稳定运行条件下可允许的最大变动量

在稳定运行条件下可允许的最大变动量见表 4。

如果检验人员认为总的不确定度计算结果符合要求,则表 4 规定的允许偏差也可以超出。

表 4 在试验操作条件下可允许最大变动量<sup>a</sup>

参 数	试验过程中允许的变动量
产品制造商或业内人士共同确认的系统固定参数	按规定
有功输出功率, kW	±2%
总功率, kW 或 kVA	
试验地点大气压力	±0.5%
入口空气温度	±3K
热值—每单位体积燃料	±1%
气态燃料入口压力	

表 4 (续)

参 数	试验过程中允许的变动量
气体出口压力	±0.5%
空气入口压力	
相对于外部冷却速率的热损失比率	±2%
燃料流量	
燃料温度	±2 K
二级热能输入温度	±3 K
二级热能的传输速率	±2%
空气/氧气入口流速	未规定
热能输出速率	±2%
总波形畸变: THD <sup>a</sup>	
<sup>a</sup> 参考 ASME-PTC50, 工具和测量方法。 <sup>b</sup> 由于总波形畸变(THD)有 5% 的允许变化值, 故在 3% 和 7% 之间是可以接受的。(仅对 THD)	

### 8.1.3 检验要求

下列检验需同时进行:

- 电气输出功率和回收热量;
- 燃料消耗和氧化剂消耗。

在上述检验实施的过程中, 还应进行以下检验:

- 水消耗;
- 输出功率的动态响应;
- 启动/关机;
- 吹扫气体消耗量。

### 8.2 检验持续时间和记录频次

应根据被测发电系统的类型来确定适当的试验持续时间和记录频次。应根据检验过程中的数据波动、平均值的稳定性和“不确定度分析”的要求来确定测得数据的数量和检测设备的台数, 详见附录 A 中的 A.5 章。

对于电功率输出, 电效率和热回收效率(如需提供)的检验应连续做三次, 每次试验的持续时间不少于 10 min。具体情况视最终误差分析结果而定。

### 8.3 结果计算

#### 8.3.1 电功率

在表 3 中描述的三种不同系统状态条件下, 输出功率和输入功率应在同一试验过程中进行测量, 试验方法在 7.3.1 中给出。

##### 8.3.1.1 输出的电功率

根据检测到的电压、电流和功率因数计算输出功率  $P_{out}$ , 计算方法如下:

三相电输出功率, 按式(1)计算:

$$P_{out} = \sqrt{3}V_{out} \cdot I_{out} \cdot \lambda_{out} \times 10^{-3} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$P_{out}$ ——电功率, kW;

$V_{out}$ ——线电压, V;

$I_{out}$ ——线电流, A;

$\lambda_{out}$ ——功率因数。

单相电的输出功率按式(2)计算:

$$P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \cdot \lambda_{out} \times 10^{-3} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$P_{out}$ ——电功率, kW;

$V_{out}$ ——相电压, V;

$I_{out}$ ——相电流, A;

$\lambda_{out}$ ——功率因数。

直流电输出功率按式(3)计算:

$$P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \times 10^{-3} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$P_{out}$ ——电功率, kW;

$V_{out}$ ——电压, V;

$I_{out}$ ——电流, A。

### 8.3.1.2 外电源的输入功率

在每一载荷条件下,发电系统在测量输出功率的同时应测量输入功率,分别地表示为  $V_{in}$ 、 $I_{in}$  和  $\lambda_{in}$ , 输入功率为  $P_{in}$  的计算方法分别同式(1)、式(2)和式(3)。

### 8.3.2 燃料消耗

本条款规定了燃料消耗量与燃料消耗量对应的燃料能量的计算方法。

在 8.3.1 所述输入功率和输出功率的试验过程中应测量燃料的消耗量。根据试验结果按 7.2.3 和式(4)~式(6)计算燃料消耗量:

气态燃料消耗量按式(4)~(5)计算:

$$q_{v10} = q_{vt} \cdot (t_0/t_t) \cdot (p_t/p_0) \dots\dots\dots(4)$$

$$q_{mf} = q_{v10} \cdot \rho_{10} \dots\dots\dots(5)$$

式中:

$q_{v10}$ ——标准状态下燃料的体积流量,  $m^3/s$ ;

$q_{vt}$ ——在温度  $t_t$  和压力  $p_t$  下燃料的体积流量,  $m^3/s$ ;

$q_{mf}$ ——燃料的质量流量,  $kg/s$ ;

$t_0$ ——标准温度, 288.15 K;

$t_t$ ——试验条件下燃料的温度, K;

$p_t$ ——试验条件下燃料的压力, kPa;

$p_0$ ——标准压力, 101.325 kPa;

$\rho_{10}$ ——标准状态下原料燃料的密度,  $kg/m^3$ 。

液态燃料消耗量按式(6)计算质量流量:

$$q_{mf} = q_{v10} \cdot \rho_{10} \dots\dots\dots(6)$$

式中:

$q_{mf}$ ——燃料的质量流量,  $kg/s$ ;

$q_{v10}$ ——标准状态下燃料的体积流量,  $m^3/s$ ;

$\rho_{10}$ ——标准状态下原料燃料的密度,  $kg/m^3$ 。

### 8.3.3 燃料的能量计算

#### 8.3.3.1 气态燃料

##### 8.3.3.1.1 燃料的能量计算

在温度  $t_t$  和压力  $p_t$  的条件下,燃料的能量按式(7)计算:

$$E_{iv} = (Q_{10} + h_t - h_{t_0} + E_{pt})/M_0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

$E_{iv}$ ——单位体积燃料输入的能量, kJ/m<sup>3</sup>;

$Q_{10}$ ——标准状态下燃料的热值, kJ/mol;

$h_t$ ——在温度  $t_t$  条件下燃料的焓, kJ/mol;

$h_{t_0}$ ——在标准温度  $t_0$  条件下燃料的焓, kJ/mol;

$E_{pt}$ ——燃料的压力势能, kJ/mol;

$M_0$ ——理想气体的标准摩尔体积( $2.3645 \times 10^{-2}$  m<sup>3</sup>/mol)(在标准温度下, 即  $t_0 = 288.15$  K)。

标准状态下燃料的热值按式(8)计算:

$$Q_{10} = \sum_{j=1}^N X_j \cdot Q_{10j} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:

$Q_{10j}$ ——燃料组分  $j$  在标准状态下的热值, kJ/mol;

$X_j$ ——组分  $j$  的摩尔分率。

注:  $Q_{10j}$  的数值见附录 B 的表 B.1。

### 8.3.3.1.2 燃料的焓的计算

燃料的焓按式(9)计算:

$$h_t = \sum_{j=1}^N X_j \cdot h_{tj} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:

$h_{tj}$ ——在温度  $t_t$  下组分  $j$  的焓; kJ/mol。

$$h_{tj} = (A_{tj} \cdot t_t + (B_{tj}/2000) \cdot t_t^2 + [C_{tj}/(3 \times 10^6)] \cdot t_t^3) \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:

$A_j$ ,  $B_j$  和  $C_j$ ——组分  $j$  的常数, 见附录 B 的表 B.3;

$h_{t_0}$ ——在标准温度下燃料的焓, 可用于  $h_t$  相同的计算公式计算得出。

燃料的压力势能  $E_{pt}$  按式(11)计算:

$$E_{pt} = R \cdot t_0 \cdot \ln(P_t/P_0) \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

$R$ ——通用气体常数,  $R = 8.314$  J/(mol · K);

$t_0$ ——标准状态下的温度,  $t_0 = 288.15$  K;

$P_0$ ——标准大气压,  $P_0 = 101.325$  kPa;

$P_t$ ——燃料的压力, kPa。

### 8.3.3.2 液态燃料

在温度  $t_t$  下液态燃料的能量, 按式(12)计算:

$$E_{iv} = \rho_t \cdot Q_{nt} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

$\rho_t$ ——在温度  $t_t$  下燃料的密度, kg/m<sup>3</sup>, 依照有关的液态燃料试验的国际标准进行测定;

$Q_{nt}$ ——测得的液体燃料的热值, kJ/kg; 在温度  $t_t$  条件下按照 ASTM 4809-00 中的说明方法进行试验。

### 8.3.4 电效率

按式(13)~(15)计算电效率:

$$\eta_e = [(P_{in} - P_{out})/Q_{in}] \times 100\% \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$Q_{in} = (q_{v10} \cdot E_{iv} + q_{vac} \cdot E_{sv}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\eta_e = [(P_{in} - P_{out}) / (q_{vf0} \cdot E_{fv} + q_{va0} E_{av})] \times 100\% \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中:

- $\eta_e$ ——电效率;
- $P_{out}$ ——输出的电有功功率;
- $P_{in}$ ——(电气)辅助负载所用电有功功率, kW;
- $Q_{in}$ ——由燃料和氧化剂提供的输入功率, kJ/s;
- $q_{vf0}$ ——标准状态下燃料的体积流量,  $m^3/s$ ;
- $E_{fv}$ ——单位体积燃料输入的能量,  $kJ/m^3$ ;
- $q_{va0}$ ——标准状态下空气的体积流量,  $m^3/s$ ;
- $E_{av}$ ——单位体积空气输入的能量,  $kJ/m^3$ 。

8.3.5 热回收功率和效率

在 8.3.1 中输入功率和输出功率的计算中,根据 7.3.3 的内容进行热回收的试验。它的计算公式在 8.3.5.1 中给出。

热回收效率是基于在 8.3.5.1 中的热回收试验、8.3.3 中输入燃料的总能量和 8.3.12 中输入氧化剂(空气)的总能量来计算的,其公式在 8.3.5.2 中介绍。

8.3.5.1 热回收功率的计算

热回收功率  $Q_{HR}$  按式(16)计算:

$$Q_{HR} = h_{HR1} \cdot q_{mHR1} - h_{HR2} \cdot q_{mHR2} \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中:

- $Q_{HR}$ ——回收热功率, kJ/s;
- $h_{HR1}$ ——在温度  $t_{HR1}$  和压强  $p_{HR1}$  下热回收流体的比焓, kJ/kg;
- $h_{HR2}$ ——在温度  $t_{HR2}$  压强  $p_{HR2}$  下热回收流体的比焓, kJ/kg;
- $q_{mHR1}$ ——在系统出口热回收流体的最大质量流量, kg/s;
- $q_{mHR2}$ ——在系统入口热回收流体的最大质量流量, kg/s。

8.3.5.2 热回收效率计算

热回收效率  $\eta_{th}$  按式(17)计算:

$$\eta_{th} = (Q_{HR} / Q_{in}) \times 100\% \quad \dots\dots\dots(17)$$

即

$$\eta_{th} = [Q_{HR} / (q_{vf} \cdot E_{fv} + q_{va} \cdot E_{av})] \times 100\%。$$

式中:

- $Q_{HR}$ ——热回收功率, kJ/s;
- $E_{fv}$ ——输入的每单位体积燃料的能量,  $kJ/m^3$ ;
- $E_{av}$ ——输入的每单位体积氧化剂(空气)能量,  $kJ/m^3$ ;
- $q_{vf}$ ——燃料在温度  $t_f$  和压力  $p_f$  下测定的体积流量,  $m^3/s$ ;
- $q_{va}$ ——空气在温度  $t_a$  和压力  $p_a$  下测定的体积流量,  $m^3/s$ ;
- $q_{in}$ ——燃料和氧化剂提供的输入功率, kJ/s。

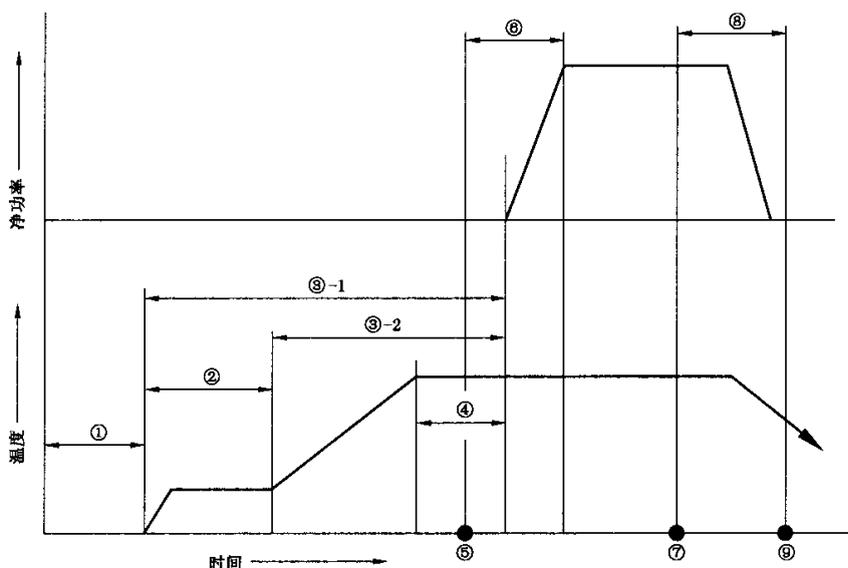
8.3.6 总能量效率

总能量效率  $\eta_{total}$  是根据 8.3.4 中的电效率  $\eta_e$  和 8.3.5 中的热回收效率  $\eta_{th}$  而得,  $\eta_{th}$  按式(18)如下:

$$\eta_{total} = \eta_e + \eta_{th} \quad \dots\dots\dots(18)$$

8.3.7 功率和热的响应特性

图 3 给出了冷态、储能状态、待机状态、起动时间、起动能量、功率响应时间和停机时间的示意图。



- ① 冷态(关机状态),环境温度,零功率输出
- ② 蓄能状态  
启动时间
- ③ -1 对于不需要外部电力维持蓄能状态的系统,这一点从冷态开始测量
- ③ -2 对于需要外部电力维持蓄能状态的系统,这一点从蓄能状态开始测量
- ④ 待机状态
- ⑤ 功率开始建立时刻
- ⑥ 额定功率响应时间
- ⑦ 关机开始时间
- ⑧ 关机时间
- ⑨ 规定的停机状态
- ②~⑧ 运行模式

图3 燃料电池系统的运行过程图

### 8.3.7.1 独立发电系统的功率响应时间

#### 8.3.7.1.1 独立发电系统可承受的最大瞬时输出功率

对作为单独(即独立于电网)连续运行而设计的发电系统来说,本检验程序就是在不改变运行模式的情况下,测定该系统所能承受的最大瞬时输出功率。本项检验应配备电阻性负载。

在检验过程中,应按7.3.1的要求对净输出功率随时进行监测。发电系统的净输出功率稳定值(见8.1与表4)发生在 $20\text{ ms}^{1)}$ 内的波动是发电系统所能接受的。此时,只监测净输出功率,不稳定的和表4中列出的其他参数以及系统固定参数(由制造商定义)、总波形畸变都不考虑。

制造商应规定目标瞬时的值的大小。例如可指定57%作为最大瞬时值。试验由目标值开始。若试验成功,则按照制造商给定的更高标准进一步验证系统的更大能力;若最初试验失败,则要按制造商要求降低标准进行试验。总之,至少应有一次成功的试验,作为检验结果报告。

若起始稳态的净输出电功率为0,即系统处于待机状态,则得到一个上升瞬变过程。

若起始稳态的净输出电功率等于100%额定功率,则得到的是下降瞬变过程。

1)  $20\text{ ms}$ 即50 Hz信号的一个周期,这一规范也适用于发出60 Hz交流电的发电系统。对于不符合这一时间限制的发电系统,制造商可规定特别的时间限制,在检验报告中给予特别的说明。

8.3.7.1.2 独立发电系统净输出功率瞬值

对独立运行的发电系统来说,净输出功率响应时间应在与电流波形畸变(THD)<sup>2)</sup>及电压波形畸变(THD)相关的两个稳定状态之间测定,此时 8.3.7.1.1 所说明的可承受的最大瞬时输出功率,必须是来自发电系统供电的电阻性负载(见图 3)。

净输出功率的响应时间应通过式(19)和式(20)计算求得:

$$T_{up-i} = T_{attain-up-i} - T_{ini} \dots\dots\dots(19)$$

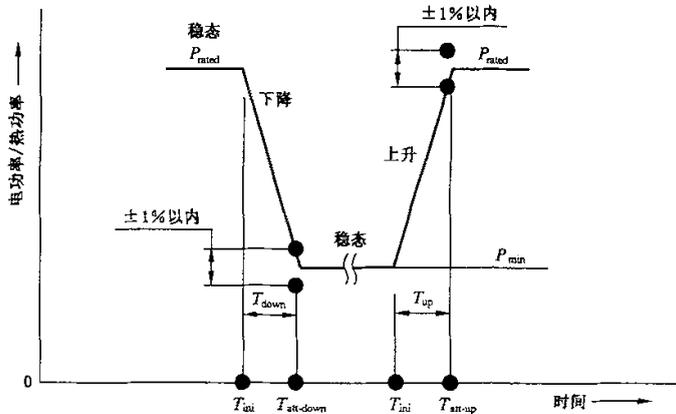
$$T_{down-i} = T_{attain-down-i} - T_{ini} \dots\dots\dots(20)$$

式中:

$T_{ini}$ ——输出功率上升和下降过程开始时,电气负载变化信号发出的时刻;

$T_{attain-up-i}$ ——总波形畸变(THD)的变化达到表 4 规定值,从而在较高输出功率下建立新的稳定状态的时刻;

$T_{attain-down-i}$ ——总波形畸变(THD)的变化达到表 4 规定值,从而在较低输出功率下建立新的稳定状态的时刻。



$P_r$ ——额定功率;

$P_{min}$ ——最小输出功率;

$T_{ini}$ ——输出功率开始变化时间;

$T_{att-down}$ ——由  $P_{rated}$  下降到  $P_{min}$  的时间;

$T_{up}$ ——由  $P_{min}$  上升到  $P_{rated}$  的时间;

$T_{down}$ ——下降到期望功率值的时间间隔;

$T_{up}$ ——上升到期望功率值的时间间隔。

图 4 系统功率响应曲线斜率

8.3.7.1.2.1 独立发电系统由额定功率状态下降至稳定的 THD 状态

- 燃料电池发电系统在输出额定功率的状态下稳定运行;
- 将一信号送至燃料电池系统的控制器,该信号应等于 8.3.7.1 中所述确定下降瞬变过程的瞬值所要求的信号;
- 根据控制信号燃料电池系统减少功率输出;
- 检测和记录从最初的信号发出,到 THD 值变化后达到表 4 中的要求值、确定新的稳定运行状态的响应时间。

8.3.7.1.2.2 独立发电系统由最小输出功率上升至稳定的 THD 状态

- 发电系统在最小功率输出的稳定操作状态下运行;

2) (总)波形畸变(THD)=(50次谐波及以下)各次电流(或电压)谐波振幅的平方和的平方根除以基波振幅。

- 将一信号送至发电系统控制器,该信号控制系统功率上升至 8.3.7.1 中所述值;
- 根据控制信号燃料电池系统增加功率输出;
- 检测和记录从最初的信号发出,到 THD 值变化后达到了表 4 中的要求值的响应时间,此过程中应根据 THD 确定在稳定的运行条件下。

8.3.7.1.3 独立发电系统上升或下降 90% 输出功率的功率响应时间

对作为独立电站设计的燃料电池发电系统,3.1.2 所定义的净输出电功率的功率响应时间,应在与达到 90% 所需功率有关的两个运行条件下测定,此时,8.3.7.1.1 所说明的最大可承受的瞬时输出功率的瞬时值,必须是来自燃料电池发电系统供电的电阻性负载。

净输出功率的响应时间应按式(21)和式(22)计算求得(见图 4):

$$T_{\text{down-90-i}} = T_{\text{attain-down-90-i}} - T_{\text{ini}} \quad \dots\dots\dots(21)$$

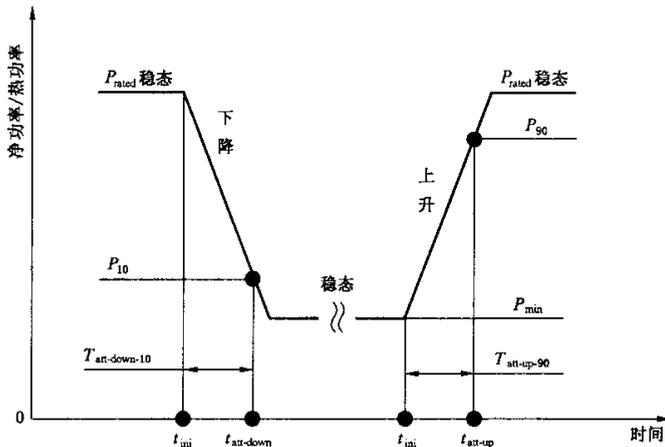
$$T_{\text{up-90-i}} = T_{\text{attain-up-90-i}} - T_{\text{ini}} \quad \dots\dots\dots(22)$$

式中:

- $T_{\text{ini}}$ ——输出功率上升或下降过程开始时,电气负载变化信号发出的时刻;
- $T_{\text{attain-down-90-i}}$ ——净输出功率下降了整个瞬变过程功率增量的 90% 所经历的时间;
- $T_{\text{attain-up-90-i}}$ ——净输出功率上升了整个瞬变过程功率增量的 90% 所经历的时间。

8.3.7.1.3.1 独立发电系统功率下降到整个瞬变过程输出功率 90% 的响应时间

- 燃料电池发电系统在额定功率输出的稳定操作状态下运行;
- 将一信号送至燃料电池系统控制器,该信号控制系统功率下降至 8.3.7.1 中所述值;
- 根据控制信号燃料电池系统减小功率输出;
- 检测和记录从最初的信号发出至下降到整个瞬变过程 90% 输出功率的响应时间。



- $P_{\text{rated}}$ ——额定输出功率, kW;
- $P_{\text{min}}$ ——最小输出功率, kW;
- $P_{90} = P_{\text{min}} + 90\% \times (P_{\text{rated}} - P_{\text{min}})$ ;
- $P_{10} = P_{\text{rated}} - 90\% \times (P_{\text{rated}} - P_{\text{min}})$ ;
- $t_{\text{ini}}$ ——输出功率开始变化的时间;
- $t_{\text{att-down}}$ ——达到  $P_{10}$  的时间;
- $t_{\text{att-up}}$ ——达到  $P_{90}$  的时间;
- $T_{\text{att-down-10}}$ ——由  $t_{\text{ini}}$  到  $t_{\text{att-down}}$  的时间间隔, s;
- $T_{\text{att-down-90}}$ ——由  $t_{\text{ini}}$  到  $t_{\text{att-up}}$  的时间间隔, s。

图 5 90% 输出功率响应曲线斜率

8.3.7.1.3.2 独立发电系统功率上升到整个瞬变过程输出功率 90% 的响应时间

- 燃料电池发电系统在最小功率输出的稳定操作状态下运行；
- 将一信号送至燃料电池系统控制器，该信号控制发电系统功率上升至 8.3.7.1 中所述值；
- 根据控制信号燃料电池系统增加功率输出；
- 检测和记录从最初的信号发出至上升到整个瞬变过程输出功率 90% 的响应时间。

8.3.7.2 热能输出响应

本条适用于同燃料电池发电系统最初和其他运行模式下的热能输出试验。

在热能输出的过程中应测定热能响应时间。根据 7.3.1 和 7.3.4 中的规定，在试验期间应随时测定电能和热能的输出。

8.3.7.2.1 额定热能输出的响应

热能输出和额定热能输出之间的热能变化率根据图 3 和式(23)与式(24)来计算：

$$Q_{Rmin} = (Q_{rated} - Q_{min}) / (T_{attain-min} - T_{ini}) = (Q_{rated} - Q_{min}) / T_{down} \dots\dots\dots(23)$$

$$Q_{Rrated} = (Q_{rated} - Q_{min}) / (T_{attain-rated} - T_{ini}) = (Q_{rated} - Q_{min}) / T_{up} \dots\dots\dots(24)$$

式中：

- $Q_{Rmin}$  ——由额定热能输出到最小热能输出过程的热能变化率，kW/s；
- $Q_{Rrated}$  ——由最小热能输出到额定热能输出过程的热能变化率，kW/s；
- $Q_{rated}$  ——额定热能输出，包括回收热  $Q_{HR}$ ，kW；
- $Q_{min}$  ——最小热能输出，包括回收热  $Q_{HR}$ ，kW；
- $T_{ini}$  ——热能开始变化的时间，任一方向；
- $T_{attain-rated}$  ——达到额定热能输出的时间，±2% 以内；
- $T_{attain-min}$  ——达到最小热能输出的时间，±2% 以内；
- $T_{down}$  ——由  $T_{ini}$  到  $T_{attain-min}$  的时间间隔，s；
- $T_{up}$  ——由  $T_{ini}$  到  $T_{attain-rated}$  的时间间隔，s。

8.3.7.2.1.1 热能输出下降的响应时间测量

- 燃料电池发电系统在额定热能输出的稳定状态下运行；
- 将热能输出下降信号送至燃料电池系统控制器；
- 燃料电池系统根据控制信号减小热能输出；
- 测定从最初的信号发出至下降到最小热能输出的响应时间，若不超过计算的±2% 则符合要求。

8.3.7.2.1.2 热能输出上升的响应时间测量

- 燃料电池发电系统在最小热能输出的稳定状态下运行；
- 热能输出上升信号送至燃料电池系统控制器；
- 燃料电池系统根据控制信号增大热能输出；
- 测定从最初的信号发出至上升到额定热能输出的响应时间，若不超过计算的±2% 则符合要求。

8.3.7.2.1.3 热能输出下降至 90% 的响应时间测定

- 燃料电池发电系统在额定热能输出的稳定状态下运行；
- 将系统热能输出下降信号送至燃料电池系统控制器；
- 燃料电池系统根据控制信号减小热能输出；
- 检测从最初的信号发出至下降到 90% 热能输出的响应时间，若不超过计算的±2% 则符合要求。

8.3.7.2.1.4 热能输出上升至 90% 的响应时间测定

- 燃料电池发电系统在最小热能输出的稳定状态下运行；

- 通过额定电子负载将系统热能输出上升信号送至燃料电池系统控制器；
- 燃料电池系统根据控制信号增大热能输出；
- 检测从最初的信号发出至上升到 90% 热能输出的响应时间，若不超过计算的 ±2% 则符合要求。

8.3.8 开机、关机特性

试验包括以下几项：

- a) 启动时间；
- b) 关机时间；
- c) 启动所需能量。

按所定义的蓄能和待机两种状态和图 3 所示的附加的信息，上述 a) 项和 b) 项试验测定的是由最初信号发出到系统实现启动或停机的时间。

上述 c) 项试验测定的是系统开机所需要的能量。根据 7.3.1 和 7.3.3 中的描述，在进行 c) 项试验的过程中应随时检测电能和热能的输出。

8.3.9 吹扫气体消耗

根据 7.3.6 测量吹扫气体的流量。在下列情况下分别测量吹扫气体消耗量：

- 冷态；
- 启动；
- 正常停机；
- 紧急停机；
- 蓄能状态。

在正常停机和紧急停机完毕后吹扫时，吹扫气体的消耗量，m<sup>3</sup>/s。

8.3.10 水的消耗

根据 7.3.6 中的规定，在表 3 的操作条件下应测量水的消耗量 q<sub>vw</sub>，(m<sup>3</sup>/h)。

在试验过程中，对系统的功率应做检测和记录。

在试验运行过程中对于试验时间应作相应的记录。

在每次试验运行过程中对于水的净消耗量应作相应的检测和记录。

试验和记录每一运行过程中水的累计消耗量。

8.3.11 氧化剂(空气)消耗

根据 7.3.5.1 中表 4 的内容测量氧化剂的消耗量。

根据测定的氧化剂的流量按式(25)和式(26)计算其体积流量和质量流量：

$$q_{va0} = q_{va} \cdot (t_0/t_a) \cdot (p_a/p_0) \dots\dots\dots(25)$$

$$q_{ma} = \rho_{a0} \cdot q_{va0} \dots\dots\dots(26)$$

式中：

- q<sub>va0</sub>——在标准状态下氧化剂(空气)的体积流量，m<sup>3</sup>/s；
- q<sub>va</sub>——在温度 t<sub>a</sub> 和压力 p<sub>a</sub> 下氧化剂(空气)的体积流量，m<sup>3</sup>/s；
- t<sub>a</sub>——在试验情况下氧化剂的温度，K；
- p<sub>a</sub>——在试验情况下氧化剂的压力，kPa；
- q<sub>ma</sub>——氧化剂(空气)的质量流量，kg/s。

注：以上值是试验期间的平均值。

- t<sub>0</sub>——标准状态温度 (288.15 K)；
- p<sub>0</sub>——标准大气压 (101.325 kPa)；
- ρ<sub>a0</sub>——标准状态下氧化剂(空气)的密度，kg/m<sup>3</sup>。

8.3.12 氧化剂(空气)能量的计算

当热的氧化剂(空气)或压缩的氧化剂(空气)直接输送到燃料电池发电系统时,氧化剂(空气)的能量将根据氧化剂(空气)在系统接口处的条件来进行计算。

a) 温度为  $t_a$  和压力为  $p_a$  时,氧化剂(空气)的能量按式(27)计算:

$$E_{av} = (h_a - h_{a0} + E_{pa})/M_0 \quad \dots\dots\dots(27)$$

式中:

- $E_{av}$ ——输入的每单位体积氧化剂(空气)能量, kJ/m<sup>3</sup>;
- $H_a$ ——在温度  $t_a$  的条件下氧化剂(空气)的焓, kJ/mol;
- $H_{a0}$ ——在标准状态温度  $t_0$  条件下氧化剂(空气)的特定焓, kJ/mol;
- $E_{pa}$ ——氧化剂(空气)的压力势能, kJ/mol;
- $M_0$ ——理想气体的标准摩尔体积(2.364 5×10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>/mol)(温度为  $t_0=288.15$  K)。

b) 氧化剂(空气)的焓按式(28)计算:

$$h_a = \{A_a \cdot t_a + (B_a/2\ 000) \cdot t_a^2 + [C_a/(3 \times 10^6)] \cdot t_a^3\} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots(28)$$

式中:

- $A_a, B_a$  和  $C_a$ ——氧化剂(空气)的常数,其数值在附录 B 的表 B.3;
- $h_a$ ——按空气  $h_i$  的相同的公式计算。其他的氧化剂的焓必须分别计算;
- $t_a$ ——氧化剂的温度, K。

c) 氧化剂(空气)的压力势能按式(29)计算:

$$E_{pa} = R \cdot t_0 \cdot \ln(p_a/p_0) \quad \dots\dots\dots(29)$$

式中:

- $R$ ——通用气体常数 (8.314 J/mol·K);
- $t_0$ ——标准状态温度 (288.15 K);
- $p_0$ ——标准大气压 (101.325 kPa);
- $p_a$ ——氧化剂的压力, kPa。

8.3.13 废热量

废热量按式(30)计算:

$$Q_{WH} = q_{vfo} E_{fv} + q_{va0} E_{av} - P_{out} - P_{in} - Q_{HR} \quad \dots\dots\dots(30)$$

式中:

- $Q_{WH}$ ——废热值, kJ/s;
- $Q_{vfo}$ ——标准状态下燃料的体积流量, m<sup>3</sup>/s;
- $E_{fv}$ ——输入的每单位体积燃料的能量, kJ/m<sup>3</sup>;
- $Q_{va0}$ ——标准状态下氧化剂(空气)体积流量, m<sup>3</sup>/s;
- $E_{av}$ ——输入的每单位体积空气的能量, kJ/m<sup>3</sup>;
- $P_{out}$ ——电能输出的有效功率, kW;
- $P_{in}$ ——外部电源输入的有效功率, kW;
- $Q_{HR}$ ——热回收能, kJ/s。

8.3.14 废气排放量

8.3.14.1 废气排放测试条件

废气排放的试验在下列条件进行:

- 按 7.3.7 所述测定启动过程每一组分的峰值浓度。
- 按 7.3.7 所述测定关机过程每一组分的峰值浓度。
- 在 8.1 中描述的部分载荷运行期间,对 7.3.7 中所介绍的各组分总量进行测量。
- 在额定功率输出操作期间,对 7.3.7 中所介绍的各组分总量进行测量。

依照 7.3.7 和表 4 的规定,应随时测量二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、一氧化碳(CO)和总碳氢化合物和氢气的排放量。废气温度、压力和流量都应分别按照 7.3.7.1、7.3.7.2 和 7.3.7.3 中的说明进行测量。

8.3.14.2 气体排放量

按式(31)计算废气排放量:

$$q_{me} = q_{ve} \cdot \rho_e \dots\dots\dots(31)$$

式中:

$q_{me}$ ——排放气体的质量流量,kg/s;

$q_{ve}$ ——排放气体的体积流量,m<sup>3</sup>/s;

$\rho_e$ ——各组分气体的密度,kg/m<sup>3</sup>。

根据标准 ISO 7934, $\rho_e$  值应按照实际环境的温度、压力和干/湿条件随时校正。

测取废气中氧的浓度并写入试验报告。

8.3.15 噪声

应测量发电系统运行过程中产生的噪声。为了测得噪声的最大值,启动至关机要同 7.3.9 和表 3 一致。

背景噪声的校正应按 GB/T 1767 中的规定进行。

对于最大噪声校正、相应的系统运行条件和输出功率应详细写入试验报告。

8.3.16 振动

根据 7.3.10 的规定,燃料电池发电系统产生的振动应在下述运行过程中测量。背景振动应在系统停机状态下测量。

从系统冷态启动,瞬变过程开始时起就应监控其振动,应在逐渐增加负载直到额定负载的过程中测定振动。振动测定也应在稳定运行于额定负载时进行,还应从额定负载开始监控下降瞬变过程系统的振动,并测取系统下降瞬变过程直到其达到稳定状态或冷态过程的振动,以求测得最大的振动值。最大振动值应写入试验报告,系统停机状态的背景振动值也应写入试验报告。

对测得的最大振动值,应根据以下程序按背景振动进行修正。最大振动值和背景振动值之差值应以分贝为单位。最大振动修正值见表 5。如果测得的最大振动值大于背景振动值 10 dB,则不必修正;如果这一差值小于 3 dB,且背景振动值的测量也是可靠的,则不必修正。

对于振动很低的系统,其振动值可能很低,可能低于 10 dB,对于这样的系统,也不必进行背景振动修正。

如果系统在正常运行条件下的最大振动值和背景振动值之差在 3 dB~9 dB 之间,则使用表 5 进行修正计算。

表 5 振动修正系数

差值/dB	3	4	5	6	7	8	9
修正值/dB	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1

8.3.17 生成水量

根据 7.3.8 和表 3 进行生成水量的测量。

9 试验报告

根据所做试验,试验报告应提供足够多的正确、清晰和客观的数据用来进行分析和参考。报告应包含第 8 章中所有的数据。报告有三种形式,摘要式、详细式和完整式。每个类型的报告都应包含相同的标题页和内容目录。

9.1 标题页

标题页应介绍下列各项信息:

- 报告编号(可选择)；
- 报告的类型(摘要式、详细式和完整式)；
- 报告的作者；
- 试验者；
- 报告日期；
- 试验的场所；
- 试验的名称；
- 试验日期和时间；
- 发电系统鉴定和制造商的名称；
- 用于试验的燃料种类；
- 试验申请单位。

## 9.2 内容目录

每种类型的报告都应提供一个目录。

## 9.3 摘要式报告

摘要式报告将包括下列各项数据：

- 试验的目的；
- 试验的种类,仪器和设备；
- 所有的试验结果；
- 每个试验结果的不确定因素；
- 每个试验结果的确定因素；
- 热回收液体的回收热量、压力和温度的测定；
- 摘要性结论。

## 9.4 详细式报告

详细报告除包含摘要式报告的内容外,还应包括下列各项数据：

- 燃料电池发电系统的类型、操作方式和试验系统流程图；
- 仪器和设备的安排、布置和操作条件的描述；
- 仪器设备校准情况；
- 用图或表的形式说明试验结果；
- 试验结果的讨论分析。

## 9.5 完整式报告

完整报告除了包含详细内容,还应有原始数据的副本,此外还应包括下列各项：

- 试验进行时间；
- 用于试验的燃料电池堆数和测量设备的精度；
- 试验的环境条件；
- 试验者的姓名和资格；
- 完整和详细的不确定度分析；
- 燃料分析结果。

## 附录 A

### (规范性附录)

### 不确定度分析指南

#### A.1 概述

当报告一个自然特性的测量结果时,给出的结果特性必须是定量指示,以方便实用,还可以假定其可靠性。因此,对于燃料电池发电系统来说,不确定度分析是必不可少的,不确定度可以在测试前或者测试后进行分析。

我们推荐在测试前进行不确定度分析,这可以允许在测试前进行纠正。它要么将减小不确定度,要么减少测试费用。

测试之后的不确定度分析是强制性的。不确定度分析将根据经验数据来限定系统性能的不确定度。不确定度将与性能值一起被表达(如:电效率,热回收效率等)。

本附录作为试验前和试验后不确定度计算的指南,提供了一个电效率的不确定度的例子,它仅提供了一个信息,不是一个试验结果。

#### A.2 准备

发电系统性能的不确定度(如电效率等)可以按照各种不同的不确定参数计算。

每个参数的测得值是由真值加上全部测量误差组成的。全部测量误差由系统误差和随机误差组成的。

总的参数不确定度是系统误差和随机误差的综合。

为了尽量减小发电系统的性能不确定度,系统和参数的不确定度应当尽量减小。

为了尽量减小系统误差,建议使用较精密的仪器,因为在本指导性技术文件中,工具的准确性被当做系统的不确定度,必须小心选择使用仪器。

为了尽量减小随机误差,须认真研究试验程序、试验条件和数据收集方法。随机误差可能会达到标准偏差的二倍。在进行性能测试前,必须仔细编制试验计划。

参数测量应该尽可能同时进行。使用自动化数据记录仪将有助于数据的同时采集,此时试验条件应该处于稳定状态。

在进行性能试验前必须通过初步试验验证测量量的波动(短波动和长波动)以及在稳定条件下的试验状态。试验过程的持续时间必须根据长波动参数的测量来决定,至少必须包括一个长波动周期。

试验过程中,测量的每个参数组至少包含 30 个独立的数据,以便求得这些数据的标准偏差。每个数组都应求取测得值的平均值(如对电压的测量),或将一个累积量除以时间(如燃料的流量)。

为了保证数据点的独立性,也要求两个数组之间保持最少 1 min 的时间间隔。

#### A.3 基本假设

本附录中的指南是根据 IEC/ISO 的 1995 版“检测值不确定度的表述指南”而编制的。我们假设发电系统都设计得很好并且实际试验都符合本指导性技术文件的规定,为了便于燃料电池检测,本附录进行了简化。

基本假设包括:

假定所有的系统误差是正态分布,并且认为  $2\sigma$  能覆盖其 95%。在本指导性技术文件中,系统误差定义为校准误差或者仪器的精度,以  $B$  表示。

对于所有参数,应至少测取 30 个独立数据。如果少于 30 个独立数据,需要附加计算一个或一个以

上的参数。

假定所有的随机误差是正态分布,并且认为测量量的  $2S_x$  能覆盖其 95%。

按公式(A.1),可由系统误差  $B$  和随机误差  $S_x$  的综合来求得,总误差  $U_{95}$ :

$$U_{95} = [B^2 + (2S_x)^2]^{1/2} \dots\dots\dots(A.1)$$

或改写为:

$$U_{95} = [(B/2)^2 + (S_x)^2]^{1/2}$$

**A.4 一般程序**

以下所给的是一步一步的计算程序:

**A.4.1 确定试验步骤**

A.4.1.1 回顾以往的试验,试验目的和试验情况,如果必要,需进行一个初步试验来决定试验过程。

A.4.1.2 列出所有的独立测量参数及其正常值。

A.4.1.3 列出所有会影响各参数的刻度和器械设定。认真检查测量系统中同时影响二个或更多测量结果的器件(与不确定度相关的)。

A.4.1.4 说明独立的测量参数和试验结果之间的功能关系(说明燃料电池发电系统计算公式,如本指导性技术文件所规定的)。

**A.4.2 列出基本误差来源**

为所有的参数做一个完全的、无遗漏的可能产生试验误差的清单。

**A.4.2.1 误差的计算或分配**

为每个参数计算或分配绝对系统误差和随机误差;

A.4.2.2 绝对系统误差( $B_i$ )是通过各个参数的标称值乘以仪器刻度的准确度来计算的。

A.4.2.3 绝对随机误差( $2S_{R_i}$ )差不多是参数标准偏差的两倍。

**A.4.3 各参数系统误差与随机误差的传递**

A.4.3.1 独立参数的系统误差和随机误差分别按照式(A.2)或式(A.3)的方式向最终结果传递。

A.4.3.2 这就要求计算敏感度系数  $\theta_i$ ,敏感度系数  $\theta_i$  或者通过微分或采用计算机通过 A.4.1.4 中定义的功能关系来进行计算。

$$B_R = [\sum(\theta_i B_{R_i})^2]^{1/2} \dots\dots\dots(A.2)$$

$$2S_R = [\sum(\theta_i \cdot 2S_{R_i})^2]^{1/2} \dots\dots\dots(A.3)$$

$B_R$ ——最终结果的系统误差部分;

$2S_R$ ——最终结果的随机误差部分。

**A.4.4 计算总不确定度**

总不确定度根据式(A.4)来计算,综合系统误差和随机误差得到总不确定度。

$$U_{R95} = [(B_R)^2 + (2S_R)^2]^{1/2} \dots\dots\dots(A.4)$$

**A.4.5 准备试验报告**

按照第9章的要求准备试验报告。

**A.5 计算示例**

**A.5.1 电效率的不确定度计算**

**A.5.1.1 确定试验程序**

本示例介绍电效率的计算。系统为 1 kW 的质子交换膜燃料电池发电系统,需要从电网向发电系统内输入 0.1 kW 的电能作为寄生负载以及燃料供给的动力。系统使用城市燃气作为燃料同时输出 1.1 kW 的电功率。系统的净输出功率为 1 kW。城市燃气的供气温度为 298.15 K,供气压力为 110 kPa,氧化剂(空气)在常温常压下供给。

燃料流量采用精密质量流量计测量,使用在线采样并且计算燃料的低热值,电输出与输入采用千瓦时功率表。

决定试验持续时间应考虑到测量参数的长期的波动。试验持续时间应包括 5 个波动周期。在试验持续进行期间,每个参数需测量 60 组,每组 30 个测量值,每一组测量间隔 1 min,每一个用于计算性能的参数值是这 60 组测量值的平均值。

所有的独立测量参数以及 60 组 30 个测量值的总平均值列于表 A.1 中。

根据 7.3.4 的规定,确定电效率  $\eta_e$ 。本例中,以下计算时空气所携带的能量都被忽略。

$$\eta_e = [(P_{\text{out}} - P_{\text{in}})/(q_{\text{vto}} \cdot E_{\text{fv}})] \times 100\%$$

式中:

$P_{\text{out}}$ ——输出电功率, kW;

$P_{\text{in}}$ ——寄生负载用输入电功率, kW;

$q_{\text{vto}}$ ——在标准状态下燃料的体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$E_{\text{fv}}$ ——单位体积燃料输入的能量,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ 。

当燃料为气体时,根据以下公式计算燃料的体积流量  $q_{\text{vto}}$ :

$$q_{\text{vto}} = q_{\text{vt}}(288.15/t_f) \cdot (p_f/1.013 \times 10^2)$$

式中:

$t_f$ ——燃料温度, K;

$p_f$ ——燃料压力, kPa;

$q_{\text{vto}}$ ——在标准状态下的燃料体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$q_{\text{vt}}$ ——在温度  $t_f$ 、压力  $p_f$  下燃料体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

当燃料为气体时,根据以下公式计算燃料的输入能量  $E_{\text{fv}}$ :

$$E_{\text{fv}} = (Q_{\text{to}} + h_f - h_{\text{to}} + E_{\text{pf}})/M_0$$

式中:

$E_{\text{fv}}$ ——单位体积燃料输入的能量,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;

$Q_{\text{to}}$ ——在参考条件下燃料的热值,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;

$h_f$ ——在温度  $t_f$  下燃料的比焓,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;

$h_{\text{to}}$ ——在标准条件下燃料的比焓,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;

$E_{\text{pf}}$ ——燃料的压力势能,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;

$M_0$ ——理想气体的标准摩尔体积,  $2.3645 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol}$ (标准温度为 288.15 K)。

燃料热值按下式计算:

$$Q_{\text{to}} = \sum_{j=1}^N X_j \cdot Q_{\text{to}j}$$

$Q_{\text{to}j}$ ——成分  $j$  的热值,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;

$X_j$ ——成分  $j$  的摩尔比。

注:  $Q_{\text{to}j}$  的数字值在附录 C 的表 C.1 中给出。

燃料的比焓按下式计算:

$$h_f = \sum_{j=1}^N X_j \cdot h_{fj}$$

式中:

$h_{fj}$ ——成分  $j$  在温度  $t_f$  的比焓,  $\text{kJ}/\text{mol}$ 。

$h_{fj}$  按下式计算:

$$h_{fj} = A_j \cdot t_f + B_j \cdot t_f^2 + C_j \cdot t_f^3$$

式中  $A_j$ ,  $B_j$  和  $C_j$  是组分  $j$  的常数。

注：A<sub>j</sub>、B<sub>j</sub> 和 C<sub>j</sub> 的数值，在附录 C 的表 C.2 中给出。

在标准温度下，燃料的比焓  $h_{t0}$  按照与  $h_t$  相同的公式计算。

燃料的压力势能按下列等式计算

$$E_{pt} = R \cdot t_0 \cdot \ln(p_t/101.325)$$

其中 R 是理想气体常数(8.314 J/(mol · K))。

A.5.1.2 列出基本误差来源

基本误差来源可以根据判断来估计，用以前的试验数据来计算，或从试验室的校正计算得到，表 A.3 中给出了一个例子的不同参数的基本误差来源。

A.5.1.3 各参数系统误差及随机误差的计算或分配

系统误差：人们认为大多数校准误差是来自于校准设备的系统误差，因为他们是使用已知绝对系统误差的那些设备来校准。对于仪器设备或仪表刻度盘的一个刻度是满量程的±1%，其绝对误差就是用的满刻度读数乘以 0.01 来计算。对于刻度误差为该数的±1%的仪器仪表，其绝对误差的计算就是以名义读数乘以 0.01。不同的校准误差需要输入不同的数据。

绝对系统误差(B<sub>j</sub>)：用每个参数的名义值乘以刻度的准确度来计算，参数的名义值见表 A.4。

随机误差：随机误差差不多是参数测得值的标准偏差的两倍。

参数的标准偏差(S<sub>m</sub>)用试验期间测取的 60 组测量数据中的 30 个数据的平均值来计算。

绝对随机误差(2S<sub>m</sub>)同样差不多是标准偏差的两倍。见表 A.4。表中，σ 是标准偏差。

对于加速试验的分析，必须采用当时的标准偏差。如果随机误差也很大，附加试验持续时间和附加试验数据点都应少于标准偏差的。

表 A.1 测量参数汇总及其标称值

参 数	参 数 含 义	单 位	标 称 值
$q_{vt}$	燃料在温度 $t_t$ 下的体积流量	m <sup>3</sup> /s	$6.6 \times 10^{-5}$
$t_t$	燃料温度	K	298.15
$p_t$	燃料压力	kPa	110
燃料组分(13A)	甲烷	%	87
	乙烷		6
	丙烷		5
	丁烷		2
$P_{out}$	电输出功率	kW	1.10
$P_{in}$	用于寄生负载的输入电功率		0.10

表 A.2 计算结果的名义值

参 数	参 数 含 义	单 位	名 义 值
$q_{v0}$	燃料在标准状态下的体积流量	m <sup>3</sup> /s	$6.9 \times 10^{-5}$
$Q_{t0}$	燃料在标准状态下的热值	kJ/mol	926.4
$h_t$	燃料在温度 $t_t$ 下的比焓		7.969
$h_{t0}$	燃料在标准状态下的比焓		7.583
$E_{pt}$	燃料的压力势能		0.203 6
$E_{iv}$	燃料的输入能量	kJ/m <sup>3</sup>	39 203.2
$\eta_r$	电效率	%	37.0

表 A.3 不同参数的基本误差源

参数	参数含义	单位	标称值	基本误差源
$q_{vt}$	燃料在标准状态下的体积流量	m <sup>3</sup> /s	$6.6 \times 10^{-5}$	仪表校准误差, 随机误差
$t_f$	燃料温度	K	298.15	温度表校准误差, 压力传感器校准误差, 回路校准误差, 随机误差
$p_f$	燃料压力	MPa	110	压力表校准误差, 压力传感器校准误差, 回路校准误差, 随机误差
燃料组分 (13A)	甲烷	%	87	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质谱校准误差, 随机误差
	乙烷		6	
	丙烷		5	
	丁烷		2	
$P_{out}$	输出电功率	kW	1.10	仪表校准误差, 回路校准误差, 随机误差
$P_{in}$	用于寄生负载的输入电功率		0.10	

表 A.4 绝对系统误差( $B_i$ )和绝对随机误差( $2S_{Ri}$ )

参数	参数含义	单位	标称值	基本误差源	计算值	绝对系统误差( $B_i$ )	$\sigma$ ( $S_{Ri}$ )	绝对随机误差( $2S_{Ri}$ )
$q_{vt}$	燃料在温度为 $t_f$ , 压力为 $p_f$ 时的体积流量	m <sup>3</sup> /s	6.6E-05	仪表校准误差, 随机误差	0.010	6.58E-07	0.010	1.32E-06
$t_f$	燃料的温度	K	298.15	温度表校准误差, 压力传感器校准误差, 回路校准误差, 随机误差	0.005	1.00E+00	0.015	2.00E+00
$p_f$	燃料的压力	kPa	110	压力表校准误差, 压力传感器校准误差, 回路校准误差, 随机误差		5.50E-01	0.001	2.20E-01
燃料组分 (13A)	甲烷	%	87	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质谱校准误差, 随机误差		4.40E-01		1.76E-01
	乙烷		6			2.90E-02		1.16E-02
	丙烷		5			2.25E-02		9.00E-02
	丁烷		2			8.50E-03		3.40E-03
$P_{out}$	电输出功率	kW	1.10	校准误差, 随机误差		5.50E-03		2.20E-03
$P_{in}$	用于寄生负载的输入电功率		0.10		5.00E-04	0.002		

A.5.1.4 参数的系统误差和随机误差的传递

独立参数的系统误差和随机误差通过不同的方式, 被分别传递到最终结果。为了正确传递各种不同误差, 必须计算每个参数  $p_i$  的各种不同敏感度  $\theta_i$ 。特殊参数的敏感度要与部分的影响结果的不同参数和参数的微小变化接合起来一同计算。在该例子中, 将介绍后面的方法。参数的变化是 0.000 1%。每个参数的系统误差和随机误差一定会根据下列等式被正确传递。

$$B_R = [\sum(\theta_i \cdot B_{p_i})^2]^{1/2}$$

$$2S_R = [\sum(\theta_i \cdot 2S_{p_i})^2]^{1/2}$$

式中:

- $B_{p_i}$ ——参数  $p_i$  的绝对系统误差;
- $2S_{p_i}$ ——参数  $p_i$  的绝对标准偏差;
- $B_R$ ——结果的系统误差部分;

$2S_R$ ——结果的随机误差部分；

$\theta_i$ ——参数  $p_i$  的敏感系数；

$(\theta_i B_{p_i})^2$ ——参数  $p_i$  对绝对系统误差的影响；

$(\theta_i 2S_{p_i})^2$ ——参数  $p_i$  对绝对随机误差的影响。

参数  $p_i$  的敏感系数见表 A. 5。

传递的系统误差  $B_R$  和随机误差  $2S_R$  见表 A. 6。

A. 5. 1. 5 计算总误差

结果的总绝对误差是由绝对系统误差和绝对随机误差按以下方式计算得出。

总绝对误差的计算结果为： $U_{R95} = \sqrt{B_R^2 + (2S_R)^2}$

式中：

$B_R$ ——系统误差部分的传递结果；

$2S_R$ ——随机误差部分的传递结果。

电效率的总绝对误差  $U_{R95}$  的百分误差可由总绝对误差除以电效率名义值来获得。

计算结果，电效率的总绝对误差  $U_{R95}$  为 1.7%，总绝对误差  $U_{R95}$  的百分误差为 4.6%。

A. 5. 1. 6 报告计算结果

根据第 9 章要求而准备的报告。

不确定度分析的结果按如下方式表示，例如：

电效率：37.0%±1.7%。

电效率的总不确定度：4.6%。

表 A. 5 参数  $p_i$  敏感系数

敏感系数		$q_{vf}$	$t_t$	$p_t$	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	$P_{out}$	$P_{in}$
参数	基值	0.000 1% Delta								
$q_{vf}$	0.000 0E+00	2.367 2E-07				0.000 0E+00				
$t_t$		0.000 0E+00			2.981 5E-04		0.000 0E+00			
$p_t$		0.000 0E+00			1.100 0E-04		0.000 0E+00			
甲烷		0.000 0E+00			8.800 0E-05		0.000 0E+00			
乙烷		0.000 0E+00			5.800 0E-06		0.000 0E+00			
丙烷		0.000 0E+00			4.500 0E-06		0.000 0E+00			
丁烷		0.000 0E+00			1.700 0E-06		0.000 0E+00			
$P_{out}$		0.000 0E+00			1.100 0E-06		0.000 0E+00			
$P_{in}$		0.000 0E+00				1.000 0E-07				
计算结果	$\eta_{eNom}$	$\eta_e + \text{Delta}$								
$q_{v0}$	0.248 4	0.248 4								
$Q_{t0}$	926.4	926.4								
$h_t$	7.969	7.969								
$h_{t0}$	7.583	7.583								
$E_{pt}$	0.203 6	0.203 6								
$E_{iv}$	39 203.2	39 203.2								
$\eta_e$	37%	37%								
绝对敏感系数	—	3.103 1 E+02	-3.315 4 E-04	7.985 8 E-02	3.821 4 E-01	5.744 7 E+00	7.813 8 E+00	2.174 4 E+01	7.056 8 E+01	3.326 8 E+02
注：Delta X% = 0.000 1。										

表 A.6 传递的系统误差( $B_R$ )和随机误差( $2S_R$ )

参数	参数含义	单位	名义值	基本误差源	计算值	绝对系统 误差 ( $B_i$ )	$\sigma$ ( $S_{xi}$ )	绝对随机 误差 ( $2S_{xi}$ )	绝对 敏感度 ( $\theta_i$ )	绝对系统 误差影响 ( $B_i \cdot \theta_i$ ) <sup>2</sup>	绝对随机 误差影响 ( $2S_{xi} \cdot \theta_i$ ) <sup>2</sup>
$q_{v1}$	燃料在温度为 $t_1$ , 压力为 $p_1$ 时的 体积流量	m <sup>3</sup> /s	6.6 E-05	仪表刻度误差, 随机误差	0.010	6.58E -07	0.010	1.32 E-06	1.117 1 E-05	?	?
	燃料的温度	K	298.15	温度表刻度误差, 压力传感器刻度误 差, 线圈刻度误差, 随机误差	0.005	1.00 E+00	0.015	2.00 E+00	-3.315 4 E-04	1.099 2 E-07	4.396 6 E-07
$p_1$	燃料的压力	kPa	110	压力表刻度误差, 压力传感器刻度误 差, 线圈刻度误差, 随机误差		5.50 E-01		2.20 E-01	7.985 8 E-02	1.929 1 E-03	3.086 6 E-04
燃料组分 (13A)	甲烷	%	87	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质 谱刻度误差, 随机误差		4.40 E-01		1.76 E-01	3.821 4 E-01	2.821 E-02	4.523 4 E-03
	乙烷		6	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质 谱刻度误差, 随机误差		2.90 E-02		1.16 E-02	5.744 7 E+00	2.775 5 E-02	4.440 7 E-03
	丙烷		5	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质 谱刻度误差, 随机误差		2.25 E-02		9.00 E-02	7.813 8 E+00	3.090 9 E-02	4.495 4 E-03
	丁烷		2	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质 谱刻度误差, 随机误差		8.50 E-03		3.40 E-03	2.174 4 E+01	3.415 9 E-02	5.465 4 E-03
$P_{out}$	电输出功率	kW	1.10	功率表刻度误差, 线圈刻度误差, 随机 误差		5.50 E-03		2.20 E-03	7.056 8 E+01	1.506 4 E-01	2.410 2 E-02
$P_{in}$	用于辅助消耗 的电输入功率		0.10		5.00 E-04	0.002 E+01	3.415 9 E-04	5.465 4 E-05			
										8.135 9E-01	
										2.202 2E+00	
										9.019 9 E-01	1.484 0 E+00

表 A.7 计算结果

参数 $p_i$	参数代号	参 数 含 义		单 位	理 论 值					参数 $p_i$	
$q_{v0}$	$q_{v0}$	燃料在标准状态下的体积流率		$m^3/s$	6.9E-05						
	$Q_{f0}$	燃料在标准状态下的热值		$kJ/mol$	926.4						
	$h_{f1}$	燃料在温度 $t_1$ 下的比焓		$kJ/mol$	7.969						
	$h_{f0}$	燃料在标准温度下的比焓		$kJ/mol$	7.583						
	$E_{pf}$	燃料的压力势能		$kJ/mol$	0.203 6						
	$E_{fv}$	燃料的输入能量		$kJ/m^3$	3 9203.2						
$p_i$	$\eta_e$	电效率		%	37.0						
燃料组分 (13A)	甲烷	%	87	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质谱刻度误差, 随机误差	0.005	4.40 E-01	0.001	1.76 E-01	3.821 4 E-01	2.821 7 E-02	4.523 4 E-03
	乙烷		6	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质谱刻度误差, 随机误差		2.90 E-02		1.16 E-02	5.744 7 E+00	2.775 5 E-02	4.440 7 E-03
	丙烷		5	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质谱刻度误差, 随机误差		2.25 E-02		9.00 E-02	7.813 8 E+00	3.090 9 E-02	4.495 4 E-03
	丁烷		2	取样误差, 实验分析误差, 制表误差, 质谱刻度误差, 随机误差		8.50 E-03		3.40 E-03	2.174 4 E+01	3.415 9 E-02	5.465 4 E-03
$P_{out}$	电输出功率	kW	1.10	功率表校准误差, 线圈校准误差, 随机误差	0.002	5.50 E-03	2.20 E-03	7.056 8 E+01	1.506 4 E-01	2.410 2 E-02	
$P_{in}$	用于辅助消耗的输入功率		0.10			5.00 E-04	0.002	3.696 4 E+01	3.415 9 E-04	5.465 4 E-05	
		$\sum(\theta_i \cdot B_i)^2$							8.135 9E-01		
		$\sum(\theta_i \cdot 2S_{Ri})^2$							2.202 2E+00		
		$B_R$							9.019 9 E-01	1.484 0 E+00	
		$2S_R$									

**附录 B**  
(资料性附录)  
**燃料热值的计算**

**表 B.1 在不同的参考条件下燃烧天然气组分的理想气体的热值**

序号	组分	摩尔热值 kJ/mol	质量热值 MJ/kg
1	甲烷	802.69	50.035
2	乙烷	1 428.84	47.52
3	丙烷	2 043.37	46.34
4	正丁烷	2 657.60	45.72
5	2-甲基丙烷	2 648.42	45.57
6	正戊烷	3 272.00	45.35
7	2-甲基丁烷	3 265.08	45.25
8	2,2-二甲基丙烷	3 250.83	45.06
9	正己烷	3 887.21	45.11
10	2-甲基戊烷	3 879.59	45.02
11	3-甲基戊烷	3 882.19	45.05
12	2,2-二甲基丁烷	3 869.80	44.91
13	2,3-二甲基丁烷	3 877.57	45.00
14	正庚烷	4 501.72	44.93
15	正辛烷	5 116.11	44.79
16	正壬烷	5 731.49	44.69
17	正癸烷	6 346.14	44.60
18	乙烯	1 324.24	47.17
19	丙烯	1 926.13	45.77
20	1-丁烯	2 540.97	45.29
21	顺-2-丁烯	2 534.2	45.17
22	横-2-丁烯	2 530.5	45.10
23	2-甲基丙烯	2 524.3	44.99
24	1-戊烯	3 155.59	44.99
25	丙二烯	1 855.09	46.30
26	1,2-丁二烯	2 461.82	45.51
27	1,3-丁二烯	2 408.80	44.53
28	乙炔	1 256.94	48.27
29	环戊烷	3 100.03	44.20
30	甲基环戊烷	3 705.86	44.03

表 B.1 (续)

序号	组分	摩尔热值 kJ/mol	质量热值 MJ/kg
31	乙基环戊烷	4 320.92	44.01
32	环己胺	3 689.42	43.84
33	甲基环己胺	4 293.06	43.72
34	乙基环己胺	4 911.49	43.77
35	苯	3 169.56	40.58
36	甲苯	3 772.08	40.94
37	乙苯	4 387.37	41.33
38	O-二甲苯	4 376.48	41.22
39	甲醇	676.22	21.10
40	甲醛	1 151.41	23.93
41	氢气	241.72	119.91
42	水	0	0
43	硫化氢	517.95	15.20
44	氨水	316.86	18.61
45	氰化氢	649.5	24.03
46	一氧化碳	282.91	10.10
47	硫化碳	548.15	9.12
48	二硫化碳	1 104.32	14.50

注 1: 温度  $T_0=288.15$  K.  
注 2: 参见 ISO 6976 的表 3 和表 4.

表 B.2 空气能量的计算工作表

成分	空气的常数 $A^a$	空气的常数 $B$	空气的常数 $C$	在标准温度下 空气的( $h_{a0}$ ) kJ/mol	在温度 $t_a$ 下燃料 各组分的焓( $h_a$ ) kJ/mol
				$E_{q1}^b$	$E_{q2}^c$
空气	27.434	6.180	-0.898 7	8.154 5	8.500 2

<sup>a</sup> 参考 JANAF 热化学表 D. R. Stull, H. Prophet published by NSRDS-NBS 37 (1965, 1971)  
<sup>b</sup>  $E_{q1} = [A \times 288.15 + (B/2\ 000) \times 288.15^2 + (C/3 \times 10^6) \times 288.15^3] \times 10^{-3}$   
<sup>c</sup>  $E_{q2} = [A \times (1) + (B/2\ 000) \times (1)^2 + (C/3 \times 10^6) \times (1)^3] \times 10^{-3}$   
 空气温度  $t_a$ : 300 K ..... (1)  
 空气压力  $p_a$ : 103.325 kPa ..... (2)  
 温度  $t_a$  下空气的焓( $h_a$ ): 8.50 kJ/mol (由 4) ..... (5)  
 标准温度下空气的焓( $h_{a0}$ ): 8.15 kJ/mol (由 3) ..... (6)  
 空气的压力势能( $E_{pa}$ ) =  $8.314 \times 10^{-3} \times (1) \times \ln((2)/101.325) = 0.05$  kJ/mol ..... (7)  
 空气的总能量( $E_{av}$ ) =  $Q_{a0} + h_a - h_{a0} + E_{pa} = (5) - (6) + (7) = 0.39$  kJ/mol.

表 B.3 燃料气体能量计算工作表

组分	燃料成分 mol %	气体组分 热值 <sup>a</sup> kJ/mol	燃料组分 热值 kJ/mol	气体组分 常数 A <sup>b</sup>	气体组分 常数 B	气体组分 常数 C	燃料组分在 参考温度下 的比焓 kJ/mol	燃料组分在 参考温度下 的比焓 ( $h_{i0}$ ) kJ/mol	燃料组分在 温度 $t_i$ 下 的比焓 $h_i$ kJ/mol
	(3)	(4)	(3)×(4) ×10 <sup>2</sup>				$E_{q1}$ <sup>c</sup> (6)	(3)×(6)×10 <sup>-2</sup>	$E_{qe}$ <sup>d</sup> (8)
氮气	0.00	0.00	0.00	27.016	5.812	-0.289	8.023 6	0.00	8.16
氧气	0.00	0.00	0.00	25.594	13.251	-4.205	7.891 5	0.00	8.03
一氧化碳	0.00	282.91	0.00	26.537	7.683 1	-1.171 9	7.956 1	0.00	8.10
甲烷	88.00	802.69	706.37	14.146	75.496	-17.991	7.066 9	6.22	7.23
乙烷	5.80	1 428.84	82.857	9.401	159.833	-46.229	8.975 7	0.52	9.23
丙烷	4.50	2 043.37	91.95	10.083	239.304	-73.358	12.255 1	0.55	12.61
丁烷	1.70	2 657.60	45.18	18.631	302.378	-92.943	17.180 6	0.29	17.66
氢气	0.00	241.72	0.00	29.062	-0.820	1.990 3	8.356 0	0.00	8.50
水	0.00	0.00	0.00	30.204	9.933	1.117	9.124 6	0.00	9.29
合计			926.37(5)					7.58(7)	7.77(9)

<sup>a</sup> 参考 ISO 6976

<sup>b</sup> 参考 JANAF 热化学表 D. R. Stull, H. Propser Published by NSRDS-NBS 37 (1965,1971)

<sup>c</sup>  $E_{q1} = (A \times 288.15 + 288.15^2 \times B / 2 \times 10^3 + 288.15^3 \times C / 31 \times 10^6) \times 10^{-3}$

<sup>d</sup>  $E_{qe} = (A \times t_i + t_i^2 \times B / 2 \times 10^3 \times + t_i^3 \times C / 3 \times 10^6 \times) \times 10^{-3}$

燃料温度  $t_i$ : 293 K ..... (1)

燃料压力  $p_i$ : 103.325 kPa ..... (2)

热值 ( $Q_{00}$ ) 926.37 kJ/mol [见(5)] ..... (10)

燃料组分在温度  $t_i$  下的比焓 ( $h_i$ ) 7.77 kJ/mol [见(9)] ..... (11)

燃料组分在标准温度下的比焓 ( $h_{i0}$ ) 7.58 kJ/mol [见(7)] ..... (12)

燃料的压力势能 ( $E_{pi}$ ) =  $8.314 \times 10^{-3} \times 288.15 \times \ln((2)/101.325) = 0.05$  kJ/mol ..... (13)

燃料的全部能量 ( $E_{iv}$ ) =  $Q_{00} + h_i - h_{i0} + E_{pi} = (10) + (11) - (12) + (13) = 926.60$  kJ/mol.

**附录 C**  
(资料性附录)  
**标准气体**

**C.1 总则**

本指导性技术文件提供的标准气体表格,允许用户使用制造商规定外的天然气并作结果比较的要求。当制造商和越来越多的用户使用不同的天然气对同种基站系统进行测试(并发表相关结果)时,在不同的天然气之间应建立相应的调整系数。新的用户最终才能根据调整系数尽可能找到和制造商要求的天然气组分相近的气体来进行相关测试。

**C.2 对应于天然气和丙烷气体的标准气体**

- a) 表 C.1 提供了一组 14 个相对于天然气的标准气体,表 C.2 提供了一组 17 个相对于丙烷的标准气体。
- b) 当采用与试验气体最相近的参照气体为试验气体时,在试验报告中必须说明。
- c) 天然气一般都含有有异味的硫化物:

主要的硫化物有:四氢噻吩、硫化氢( $H_2S$ )、二乙基(基)甲苯酰胺(DES)、甲基甘氨酸氧化酶(MES)、二甲亚砜(DMS)、甲硫醇(MM)、(IPM)、三丁基汞化溴(TBM)、异丁基汞化溴(IBM)、2-丁基汞化溴(SBM)等等。

**表 C.1 天然气的标准气体**

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2	G1	G2
甲烷 $CH_4$	66.2	67.2	63.0	82.4	65.1	74.9	75.6	97.2	88.9	71.7	92.0	85.7	83.4	72.0
乙烷 $C_2H_6$	5.0	1.7	11.7	0.0	8.3	3.3	11.7	0.0	10.0	15.0	1.7	13.3	6.7	13.3
丙烷 $C_3H_8$	0.7	3.3	2.0	0.0	4.0	3.3	0.7	1.3	0.0	2.7	6.0	0.7	4.7	5.3
丁烷 $C_4H_{10}$	0.2	0.0	0.0	1.0	0.7	1.0	0.5	0.2	0.0	0.3	0.2	0.2	1.5	1.3
戊烷 $C_5H_{12}$	0.1	0.0	0.0	0.7	0.6	0.4	0.3	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.9
己烷 及以上	0.1	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.4
二氧化碳 $CO_2$	7.8	10.0	5.6	2.2	5.6	1.1	8.9	1.1	1.1	3.3	0.0	0.0	0.0	2.2
氮 $N_2$	20.0	17.8	17.8	13.3	15.6	15.6	2.2	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	2.2	4.4
低热值 $kWh/m^3$		7.86	8.89	9.01	9.66	9.58	10.21	10.19	10.65	10.77	11.19	11.26	11.92	11.96
低热值 $kJ/m^3$	28.21	28.30	32.01	32.43	34.77	34.48	36.76	36.68	38.34	38.77	40.30	40.55	42.93	43.07
高热值 $kWh/m^3$	8.69	8.71	9.84	9.99	10.67	10.59	11.30	11.31	11.81	11.90	12.39	12.47	13.17	13.20
高热值 $kJ/m^3$	31.27	31.36	35.41	35.96	38.40	38.14	40.67	40.72	42.51	42.85	44.62	44.90	47.42	47.50

表 C.2 丙烷的标准气体

	乙烷 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	丙烷 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	丁烷 C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	低热值(LHV)		高热值(HHV)	
				kWh/m <sup>3</sup>	kJ/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	kJ/m <sup>3</sup>
1A	0	100	0	28.22	101.6	28.94	93.38
1B	5	90	5	28.25	101.7	25.96	93.47
1C	0		10	29.14	104.9	26.8	96.46
1D	5	80	15		105	26.82	96.55
1E	0		20	30.06	108.2	27.65	99.54
2A	5	70	25	30.09	108.3	10.59	99.63
2B	0		30	30.98	111.5	28.51	102.6
2C	5	60	35	31	111.6	28.53	102.7
2D	0		40	31.9	114.8	29.39	105.7
3A	5	50	45	31.92	114.9	29.38	105.8
3B	0		50	32.82	118.1	30.22	108.8
3C	5	40	55	32.84	118.2	30.24	108.9
3D	0		60	33.73	121.4	31.07	111.9
3E	5	20	75	34.68	124.9	31.95	115
3F	0		80	35.57	127.1	32.78	118
3G	5	0	95	36.52	131.5	33.66	121.2
3H	0		100	37.41	134.7	34.49	124.2