



中华人民共和国国家标准

GB/T 27748.2—2013/IEC 62282-3-200:2011

固定式燃料电池发电系统 第2部分：性能试验方法

Stationary fuel cell power systems—Part 2: Performance test methods

(IEC 62282-3-200:2011, IDT)

2013-11-12 发布

2014-03-07 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 2

3 术语、定义和符号..... 5

4 参考条件..... 12

5 性能试验项目..... 12

6 试验准备..... 12

7 测量仪器和测量方法..... 13

8 试验计划..... 21

9 试验方法和试验结果计算..... 23

10 试验报告 43

附录 A（规范性附录） 不确定度分析 45

附录 B（规范性附录） 燃料热值的计算 58

附录 C（规范性附录） 参考气体 62

参考文献 65

前 言

GB/T 27748《固定式燃料电池发电系统》已经或计划发布以下部分：

- 第1部分：安全；
- 第2部分：性能试验方法；
- 第3部分：安装。

本部分为 GB/T 27748 的第2部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 IEC 62282-3-200:2011《固定式燃料电池发电系统 性能试验方法》。

与本部分中规范引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

GB/T 2429—1988 航空燃料净热值计算法(neq ISO 3648:1976)

GB/T 2624(所有部分) 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量[ISO 5167:2003(所有部分),IDT]

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

GB/T 3785.2—2010 电声学 声级计 第2部分：型式评价试验(IEC 61672-2:2003,IDT)

GB/T 7676(所有部分) 直接用作模拟指示电测量仪表及其附件[IEC 60051(所有部分)]

GB/T 10894—2004 分离机械 噪声测试方法(ISO 3744:1994,NEQ)

GB/T 11060.6—2011 天然气 含硫化合物的测定 第6部分：用电位法测硫化氢、硫醇硫和硫化物含量(ISO 6326.3:1989,MOD)

GB/T 11060.7—2011 天然气 含硫化合物的测定 第7部分：用林格奈燃烧法测定总硫含量(ISO 6326.5:1989,MOD)

GB/T 11914—1989 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法(eqv ISO 6060:1989)

GB/T 13850—1998 交流电量转换为模拟量或数字信号的电测量变送器(idt IEC 60688:1992)

GB/T 14412—2005 机械振动与冲击 加速度计的机械安装(ISO 5348:1998,IDT)

GB/T 17215.211—2006 交流电测量设备 通用要求、试验和试验条件 第11部分：测量设备(IEC 62052-11:2003,IDT)

GB/T 17215.322—2008 交流电测量设备 特殊要求 第22部分：静止式有功电能表(0.2S级和0.5S级)(IEC 62053-22:2003,IDT)

GB/T 17281—1998 天然气中丁烷至十六烷烃类的测定 气相色谱法(eqv ISO 6975:1986)

GB/T 17411—2012 船用燃料油(ISO 8217:2010,MOD)

GB/T 17626.7—2008 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则(IEC 6100-4-7:2002,IDT)

GB/T 17626.13—2006 电磁兼容 试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗扰度试验(IEC 6100-4-13:2002,IDT)

GB/T 17860(所有部分) 电测量仪器 X-t 记录仪[IEC 61143(所有部分),IDT]

GB/T 18345.1—2001 燃气轮机 烟气排放 第1部分：测量与评估(ISO 11042-1:1996,IDT)

GB/T 18345.2—2001 燃气轮机 烟气排放 第2部分：排放的自动监测(ISO 11042-2:1996,IDT)

GB/T 18619.1—2002 天然气中水含量的测定 卡尔费休法-库仑法(ISO 10101-1:1993;

GB/T 27748.2—2013/IEC 62282-3-200:2011

ISO 10101-3:1993, EQV)

GB/T 19000—2008 质量管理体系 基础和术语(ISO 9000:2005, IDT)

GB/T 21069—2007 天然气 高压下水含量的测定(ISO 11541:1997, MOD)

GB/T 22592—2008 水处理剂 pH 值测定方法通则(ISO 10523:1994, NEQ)

GB/T 27894—2011(所有部分) 天然气 在一定不确定度下用气相色谱法测定组成[ISO 6974:2000(所有部分), IDT]

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会(SAC/TC 342)归口。

本部分起草单位:上海神力科技有限公司、机械工业北京电工技术经济研究所、中科院上海硅酸盐研究所、深圳市华测检测技术股份有限公司、上海攀业氢能源科技有限公司、中国科学院大连化学物理研究所、武汉理工大学、宁波拜特测控技术有限公司、武汉银泰科技燃料电池有限公司、新源动力股份有限公司、南京大学昆山创新研究院、清华大学、同济大学、北京久安通氢能科技有限公司等。

本部分主要起草人:张若谷、陈晨、王绍荣、朱平、孙婷、董辉、卢琛钰、侯明、衣宝廉、黄平、田超贺、徐江、齐志刚、侯中军、顾军、胡里清、裴普成、侯永平、张立芳等。

固定式燃料电池发电系统 第2部分：性能试验方法

1 范围

GB/T 27748 的本部分规定了固定式燃料电池发电系统(以下简称发电系统)的运行性能和环境影响。

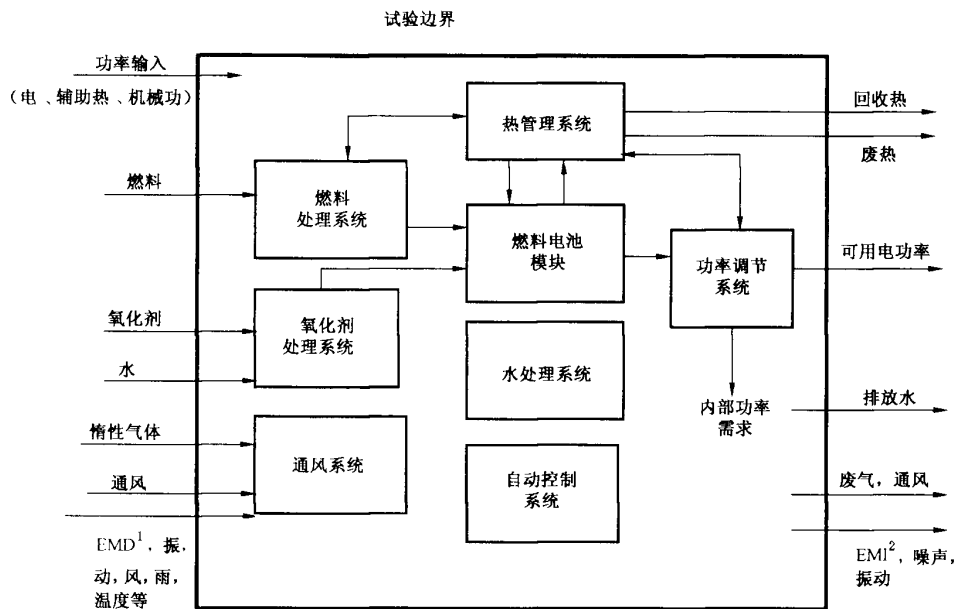
本部分适用于以下试验方法：

- 在规定运行条件和瞬变工况下的功率输出；
- 在规定运行条件下的发电效率和热效率；
- 环境特性：例如，在规定运行条件和瞬变工况下的气体排放、噪声等；
- 本标准未提供电磁兼容性(EMC)试验。

本部分不适用于输出功率小于 10 kW 的小型固定式聚合物燃料电池发电系统，尚未出台的 IEC 62282-3-201 适用于该类型系统。

由于燃料电池类型及应用不同，以及输入与输出的流体物质和能量形式的不同，发电系统可以有不同的子系统。但是，为了评估发电系统，本部分定义了一个通用的系统示意图及边界(见图 1)。为确定发电系统的试验边界，考虑以下条件：

- 所有能量回收系统都包括在试验边界之内；
- 任何类型的电能储存装置都被认为在试验边界之外；
- 输入燃料(例如天然气、丙烷气、纯氢气等)的热值计算是基于其在发电系统边界处的状态来进行的。



说明：

 发电系统：包括子系统。这里关于界面的定义是一个概念上的或者功能上的，而不是一个硬件设备（如电池组）。

 子系统：包括燃料电池模块、燃料处理器等。这些子系统的配置取决于燃料的种类以及燃料电池或系统的类型。

——> 界面点：在边界上用于计算数据的测量点。

¹ EMD：电磁灵敏度；

² EMI：电磁干扰。

图 1 发电系统示意图

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。

IEC 60051(所有部分) 直接用作模拟指示电测量仪表及其附件(Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories)

IEC 60359 电工电子测量设备性能表示(Electrical and electronic equipment—Expression of performance)

IEC 60688 交流电量转换为模拟或数字信号的电测量变送器(Electrical measuring transducers for converting A. C. and D. C. electrical quantities to analogue or digital signals)

IEC 61000-4-7 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连接设备谐波、谐间波的测量仪器导则[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 4-7: Testing and measurement techniques—General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto]

IEC 61000-4-13 电磁兼容 试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗度试验[Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 4-13: Testing and measurement techniques—Harmonics and interharmonics including mains signalling at a.c. power port, low frequency immunity tests]

IEC 61028 电气测量设备 X-Y 记录仪(Electrical measuring instruments—X-Y recorders)

IEC 61143(所有部分) 电气测量设备-X-t 记录仪(Electrical measuring instruments—X-t recorders)

IEC 61672-1 电声学 声级计 第1部分:技术规范(Electroacoustics—Sound level meters—Part 1: Specifications)

IEC 61672-2 电声学 声级计 第2部分:型式评价试验(Electroacoustics—Sound level meters—Part 2: Pattern evaluation tests)

IEC 62052-11 交流电测量设备 通用要求、试验和试验条件 第11部分:测量设备[Electricity metering equipment(AC)—General requirements, tests and test conditions—Part 11: Metering equipment]

IEC 62053-22 交流电测量设备 特殊要求 第22部分:静止式有功电能表(0.2S级和0.5S级)[Electricity metering equipment(a.c.)—Particular Requirements—Part 22: Static meters for active energy(classes 0,2 S and 0,5 S)]

ISO/IEC 指南 98-3 不确定度测试 第3部分:测量中不确定度表述的指南(GUM:1995)[Guide 98-3, Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)]

ISO 3648 航空燃料净热值算法(Aviation fuels—Estimation of net specific energy)

ISO 3744 声学 采用声压测定噪声源声压等级 通过反射的机械法测量噪声(Acoustics—Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure—Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane)

ISO 4677-1 大气氛中测试和调节-相对湿度的测定 第1部分:吸气湿度计法(Atmospheres for conditioning and testing—Determination of relative humidity—Part 1: Aspirated psychrometer method)

ISO 4677-2 大气氛中测试和调节-相对湿度的测定 第2部分:旋转式湿度计法(Atmospheres for conditioning and testing—Determination of relative humidity—Part 2: Whirling psychrometer method)

ISO 5167(所有部分) 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量(Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full)

ISO 5348 机械振动和电击 加速计的机械安装(Mechanical vibration and shock—Mechanical mounting of accelerometers)

ISO 6060 水质 化学需氧量的测定(Water quality—Determination of the chemical oxygen demand)

ISO 6326(所有部分) 天然气 硫化物的测定(Natural gas—Determination of sulfur compounds)

ISO 6974(所有部分) 天然气 在一定不确定度下用气相色谱法测定组成(Natural gas—Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography)

ISO 6975(所有部分) 天然气 扩展测试 气相色谱法(Natural gas—Extended analysis—Gas Chromatographic method)

ISO 7934 固定源排放 二氧化硫质量浓度的测试 过氧化氢/高氯酸钡/索林法 (Stationary source emissions—Determination of the mass concentration of sulfur dioxide—Hydrogen peroxide/barium perchlorate/thorin method)

ISO 7935 固定源排放 二氧化硫质量浓度的测试 自动测试法测量性能特征 (Stationary source emissions—Determination of the mass concentration of sulfur dioxide—Performance characteristics of automated measuring methods)

ISO 8217 石油产品 燃料(F级) 船舶用燃料规范 [Petroleum products—Fuel(class F)—Specifications of marine fuels]

ISO 9000 质量管理体系 基础和术语 (Quality management systems—Fundamentals and vocabulary)

ISO 9096 固定源排放 特殊物质质量浓度的手动测试 (Stationary source emissions—Manual determination of mass concentration of particulate matter)

ISO 10101 (所有部分) 天然气中水含量的测定 卡尔费休法-库仑法 (Natural gas—Determination of water by the Karl Fisher Method)

ISO 10396 固定源排放 样品气体浓度的自动测试 (Stationary source emissions—Sampling for the automated determination of gas concentrations for permanently installed monitoring systems)

ISO 10523 水质量 pH测试 (Water quality—Determination of pH)

ISO 10707 水质量 在水溶液中“最终”有氧生物降解有机化合物的评估-化学需氧量分析法(密封测试) [Water quality—Evaluation in an aqueous medium of the “ultimate” aerobic biodegradability of organic compounds—Method by analysis of biochemical oxygen demand (closed bottle test)]

ISO 10780 固定源排放 管道中气流流速和体积流量的测量 (Stationary source emissions—Measurement of velocity and volume flowrate of gas streams in ducts)

ISO 10849 固定源排放 氮氧化物质量浓度的确定 自动测试系统的性能特性 (Stationary source emissions—Determination of the mass concentration of nitrogen oxides—Performance characteristics of automated measuring systems)

ISO 11042-1 燃气轮机 烟气排放 第1部分:测量与评估 (Gas turbines—Exhaust gas emission—Part 1: Measurement and evaluation)

ISO 11042-2 燃气轮机 烟气排放 第2部分:排放的自动监测 (Gas turbines—Exhaust gas emission—Part 2: Automated emission monitoring)

ISO 11541 天然气 高压下水含量的测试 (Natural gas—Determination of water content at high pressure)

ISO 11564 固定源排放 二氧化氮质量浓度测试 萘二胺光度测定法 (Stationary source emissions—Determination of the mass concentration of nitrogen oxides—Naphthylethylenediamine photometric method)

ISO 14687 氢燃料 产品规范 (Hydrogen fuel—Product specification)

ISO 15916 氢气系统的基本安全考虑 (Basic consideration for the safety of hydrogen systems)

ISO 16622 气象学 风速计/温度计中等风测量可接受的测试方法 (Meteorology—Sonic anemometer/thermometers—Acceptance test methods for mean wind measurements)

ASTM D4809-00 用弹式量热计测量液态烃燃烧热的标准测试方法 [Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method)]

ASTM F2602-08e1 用尺寸排除层析法测量壳聚糖和壳聚糖盐的摩尔质量标准测试方法 (Standard Test Method for Determining the Molar Mass of Chitosan and Chitosan Salts by Size Exclusion Chromatography with Multi-angle Light Scattering Detection)

ASME PTC50 燃料电池发电系统性能测试规范 50 (Performance Test Code 50 on Fuel Cell Power Systems Performance)

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

可闻噪声等级 **audible noise level**

在规定距离测量的发电系统所有运行模式下产生的声压等级。

注：用分贝 (dB) 表示；按本标准描述方式测量。

3.1.2

辅助电功率输入 **auxiliary electric input power**

由系统外部供给辅助负载 (3.1.18) 的电功率。

3.1.3

背景噪声等级 **background noise level**

在测量点测量的环境噪声的声压等级。

注：在发电系统冷态状况下，按本标准描述方式测量。

3.1.4

背景振动等级 **background vibration level**

环境引起的影响振动测量读数的机械振动。

注：背景振动应在发电系统冷态状态下测量。

3.1.5

冷态 **cold state**

发电系统在环境温度下，既没有功率输入也没有输出的状态。

3.1.6

排放水 **discharge water**

由发电系统排放出的水。

3.1.7

(发电系统的) 电效率 **electric efficiency (of a fuel cell power system)**

发电系统产生的净电功率与供给发电系统总的能量流的比率。

注：任何从发电系统外部给发电系统辅助负载提供的电功率应从发电系统输出的电功率中扣除。

3.1.8

排放特性 **emission characteristics**

废气中总的硫氧化物 (SO_x)、总的氮氧化物 (NO_x)、二氧化碳 (CO_2)、一氧化碳 (CO)、总的碳氢化合物以及微粒的浓度。

注：按本标准描述的方法在向外界排放的出口处测量。

3.1.9

燃料电池模块 **fuel cell module**

一个或多个燃料电池堆和其他主要附加部件的集成体，目的是组装到一个发电装置或一个交通工具中。

注：一个燃料电池模块包括以下几个主要部件：一个或多个燃料电池堆，输送燃料、氧化剂和废气的管路系统，电池堆输出的电路连接、监测和/或控制手段。此外，燃料电池模块还可包括：额外流体（如冷却介质、惰性气体）的

输送手段、检测正常或不正常运行条件的手段、外壳或压力容器和模块通风系统。

3.1.10

燃料电池发电系统 fuel cell power system

使用燃料电池模块产生电能和热能的发电系统。

注：燃料电池发电系统是由以下全部或部分子系统组成：一个或多个燃料电池模块、一个燃料处理系统、一个功率调节系统、一个热管理系统，以及其他必要的子系统。一般的燃料电池发电系统如图 1 所示。

3.1.11

燃料输入量 fuel input

在规定运行条件下，发电系统消耗的天然气、氢气、甲醇、液化石油气、丙烷、丁烷或其他含有化学能物质的量。

3.1.12

(发电系统的)热回收效率 heat recovery efficiency(of a fuel cell power system)

平均回收热功率和平均输入总功率的比率。

3.1.13

界面点 interface point

物料和/或能量进入或离开燃料电池发电系统边界的测量点。

注：该边界是有意选择用来精确测量系统性能的。如有必要，被评估的燃料电池发电系统的边界或界面点应通过各方协商确定。

3.1.14

最低功率 minimum power

燃料电池发电系统能够连续稳定运行的情况下输出的最小净电功率。

3.1.15

运行温度 operating temperature

在制造商规定的测量点，发电系统运行的温度。

3.1.16

(发电系统的)总能量效率 overall energy efficiency(of fuel cell power system)

总平均可用输出净功率(包括电功率和热功率)与总平均输入功率的比率。

3.1.17

氧化剂(空气)输入量 oxidant(air)input

在规定运行条件下燃料电池模块内消耗的氧气量。

3.1.18

辅助系统负载 parasitic load

辅助机械和装置[如运行发电系统所需的辅助系统(BOP)]消耗的功率。

3.1.19

功率响应时间 power response time

从电或热功率输出变化的开始时刻到电或热输出功率达到设定值稳态公差范围内的时间间隔。

3.1.20

90%功率响应时间 90% power response time

从电功率或热功率输出初始变化时刻到电或热功率输出达到设定值 90%的持续时间。

3.1.21

压力 pressure

发电系统内测量的气体或液体的压力。

注：ISO 建议使用绝对压力。如果使用表压，应注明。

3.1.22

吹扫气体消耗量 **purge gas consumption**

在规定条件下,为发电系统运行或关机准备而供给发电系统的惰性气体或稀释气体的量。

3.1.23

(发电系统的)回收热量 **recovered heat(of a fuel cell power system)**

从发电系统回收的热能。

注:回收热量是通过在发电系统界面点测量进入和离开热能回收子系统的热回收流体(水、蒸汽、空气或油等)的温度和流量来确定的。

3.1.24

参考条件 **reference condition**

为检测测量仪器性能而规定的影响量值,在本标准中为温度 288.15 K(15 °C),压力 101.325 kPa。

3.1.25

额定功率响应时间 **response time to rated power**

从负载向额定功率变化的初始瞬间到达到额定功率值第一瞬间的持续时间。

3.1.26

辅助热功率 **secondary thermal power**

应统计的输入试验边界的额外热能。如:循环补偿和冷凝回收处理。

3.1.27

轴功 **shaft work**

穿越发电系统边界被有效利用的机械能。

3.1.28

关机时间 **shutdown time**

从额定功率去掉负载开始到按制造商规定关机完成之间的时间间隔。

注:关机操作分为两类:正常关机和紧急关机。

3.1.29

待机状态 **standby state**

怠速状态 **idle state**

燃料电池发电系统有足够高的工作温度并处在零电力输出的运行模式下,但燃料电池发电系统能够快速切换到有可观电力输出的运行状态。

3.1.30

启动能量 **start-up energy**

发电系统在启动时间内所需电能、热能和(或)化学(燃料)能的总和。

3.1.31

启动时间 **start-up time**

(对不需要外部能量的燃料电池发电系统)指从冷态转变到净电功率输出足够维持储存状态的持续时间。

注:对需要外部能量来维持储存状态的发电系统,启动时间是指从储存状态转变到净电功率输出状态的持续时间。

3.1.32

储存状态 **storage state**

发电系统没有运行,按制造商规定可能需要输入热能和(或)电能以及(或)惰性气体以防止部件性能退化和(或)给控制系统供电的状态。

3.1.33

试验运行时间 test run

记录计算试验结果所需的数据点的时间间隔。

注：试验结果是根据这些数据点计算出来的。

3.1.34

振动级别 vibration level

燃料电池发电系统运行过程中产生机械振动的最大测量值。

注：用分贝(dB)表示。

3.1.35

废热 waste heat

释放且未被回收的热能。

3.1.36

水消耗量 water consumption

除首次加水以外，(从试验边界以外)提供给发电系统的水。

3.2 符号

本标准中使用的符号及含义与单位见表1，包括恰当的计量单位。

表1 符号

符号	定 义	单位
q_v	体积流量	
q_{vf}	燃料在平均温度 t_f 和平均压力 p_f 下的平均体积流量	m^3/s
q_{vf0}	燃料在参考条件下的平均体积流量	m^3/s
q_{vo}	氧化剂(空气)在平均温度 t_o 和平均压力 p_o 下的平均体积流量	m^3/s
q_{vo0}	氧化剂(空气)在参考条件下的平均体积流量	m^3/s
q_{vHRr}	热回收流体的体积流量	m^3/s
q_{ve}	废气的体积流量	m^3/s
q_{vw}	水在运行温度和压力下的体积流量	m^3/s
M_o	理想气体参考摩尔体积($2.364\ 5\times 10^{-2}\text{ m}^3/\text{mol}$)(在参考温度下： $t_o=288.15\text{ K}$)	m^3/mol
T_{int}	测量间隔	s
q_m	质量流量	
q_{mf}	燃料的平均质量流量	kg/s
q_{mo}	氧化剂(空气)的平均质量流量	kg/s
q_{mHR}	热回收流体的平均质量流量	kg/s
q_{mve}	废气中特定气体组分的质量流量	kg/s
q_{mr}	热回收流体的质量流量	kg/s
M_{hfl}	试验期间由辅助热源进入(和离开)发电系统的导热流体(蒸汽、空气等)的质量	kg
M_m	氧化剂(空气)的摩尔质量	kg/mol
P	电功率	

表 1 (续)

符号	定 义	单位
P_{out}	平均输出电功率(包括直流电)	kW
P_{in}	从外部电源(包括直流电)输入到寄生负载的平均辅助电功率	kW
P_n	平均净电功率输出	kW
P_{10}	在额定电功率和最低净电功率之间,从额定电功率总共减少了 90%的低净电功率输出	W, kW
P_{90}	90%的额定净电功率输出	W, kW
P_{min}	最低净电功率输出	W, kW
P_{rated}	额定净电功率输出	W, kW
p	压力	
p_0	参考压力	kPa
p_t	试验期间燃料平均压力	kPa
p_a	试验期间氧化剂(空气)平均压力	kPa
t	温度	
t_0	参考温度	K
t_t	试验期间燃料平均温度	K
t_a	试验期间氧化剂(空气)平均温度	K
t_{HR1}	输出的热回收流体温度	K
t_{HR2}	输入的热回收流体温度	K
ρ	密度	
ρ_0	参考条件下原始燃料密度	kg/m ³
ρ_t	平均温度 t_t 时液体燃料密度	kg/m ³
ρ_{a0}	参考条件下氧化剂(空气)密度	kg/m ³
ρ_c	规定气体组分的质量浓度	kg/m ³
ρ_{HR}	在测定压力和温度下热回收流体密度	kg/m ³
x_j	组分 j 的摩尔浓度,见附录 B 中工作表	—
Q	热值	
Q_{i0}	参考条件下燃料热值	kJ/mol
Q_s	平均温度 t_t 下液体燃料热值	kJ/kg
Q_{i0j}	参考温度 t_0 下组分 j 的热值	kJ/mol
Q_{WH}	废热量	kJ/s
S_{HR}	热回收流体的比热	kJ/kg · K
S_j	纯组分 j 的比热	kJ/kg · K
H, h	焓、比焓	
h_t	平均温度 t_t 下燃料比焓	kJ/mol

表 1 (续)

符号	定 义	单位
h_{fu}	参考温度 t_c 下燃料比焓	kJ/mol
h_s	平均温度 t_s 下氧化剂(空气)比焓	kJ/mol
h_{s0}	参考温度 t_0 下氧化剂(空气)比焓	kJ/mol
h_{tj}	平均温度 t_j 条件下组分 j 的比焓	kJ/mol
H_{in}	试验期间进入发电系统的导热流体(蒸汽、空气等)平均比焓	kJ/kg
H_{out}	试验期间离开发电系统的导热流体(蒸汽、空气等)平均比焓	kJ/kg
E, Q, W	输入能量和功率	
E_f	每摩尔燃料的输入能量,见附录 B 中工作表 1	kJ/mol
E_{fv}	单位体积燃料的输入能量	kJ/m ³
E_{fm}	单位质量燃料的输入能量	kJ/kg
E_{pf}	平均压力 p_f 下每摩尔燃料的压力能	kJ/mol
E_o	每摩尔氧化剂(空气)的输入能量	kJ/mol
E_{ov}	单位体积氧化剂(空气)的输入能量	kJ/m ³
E_{om}	单位质量氧化剂(空气)的输入能量	kJ/kg
E_{po}	每摩尔氧化剂(空气)的压力能	kJ/mol
Q_{in}	平均总输入功率	kJ/s
Q_{mf}	气体燃料或液体燃料的平均输入功率	kJ/s
Q_{ma}	氧化剂(空气)的平均输入功率	kJ/s
W_{si}	机械功平均输入功率	kJ/s
W_{tsi}	总机械功	kJ
Q_{HR}	试验期间平均回收热功率	kJ/s
Q_{tHR}	试验期间回收热能	kJ
Q_{st}	平均辅助热功率输入	kJ/s
Q_{ext}	试验期间输入发电系统的总辅助热能	kJ
Q_{rated}	额定净热能输出	kJ
Q_{min}	最低净热能输出	kJ
Q_{10}	在额定净热功率和最低净热功率之间,从额定净热功率总共减少了 90% 的低净热功率输出	W, kW
Q_{90}	90% 的额定净热功率输出	kJ/s, W, kW
η	效率	
η_e	电效率	%
η_{th}	热回收效率	%
η_{total}	总能效	%
T, PR, QR	响应时间、斜率	

表 1 (续)

符号	定 义	单位
T_{up}	由 $T_{ini} \sim T_{attain_rated}$ 所需响应时间	s
T_{down}	由 $T_{ini} \sim T_{attain_min}$ 所需响应时间	s
T_{up90}	达到 90% 额定净电功率或热功率所需响应时间,或由 $T_{ini} \sim T_{attain90}$ 所需响应时间	s
T_{down90}	净电功率或热功率达到额定净电功率或热功率变化要求的 90% 所需响应时间,即由 $T_{ini} \sim T_{attain10}$ 的时间	s
$T_{attain10}$	达到 P_{10} 的时间	s
$T_{attain90}$	达到 P_{90} 的时间	s
T_{attain_rated}	发电系统达到额定功率 $\pm 2\%$ 范围内的净电功率或热功率输出所需时间	s
T_{attain_min}	发电系统达到额定功率 $\pm 2\%$ 范围内的最低净电功率或热功率输出所需时间	s
T_{attain_up90}	净电功率达到规定的高需求值 90% 所需时间	s
T_{attain_down90}	净电功率达到规定的低需求值 90% 所需时间	s
T_{in}	用户开始改变净电功率或热功率输出的初始时点	s
T_{int}	测量间隔	s
PR_{rated}	最低电功率到额定电功率的斜率	W/s, kW/s
PR_{min}	额定电功率到最低电功率的斜率	W/s, kW/s
PR_{up90}	最低电功率到 90% 额定电功率的斜率	W/s, kW/s
PR_{down90}	在额定电功率和最低电功率之间,从额定电功率到总共减少了 90% 电功率的斜率	W/s, kW/s
QR_{rated}	最低热功率输出到额定热功率输出的斜率	W/s, kW/s
QR_{min}	额定热功率输出到最低热功率输出的斜率	W/s, kW/s
QR_{up90}	最低热功率输出到 90% 额定热功率输出的斜率	W/s, kW/s
QR_{down90}	在额定热功率到和最低热功率之间,从额定热功率输出到总共减少了 90% 热功率输出的斜率	W/s, kW/s
注: 发电系统的主要符号见图 2。		

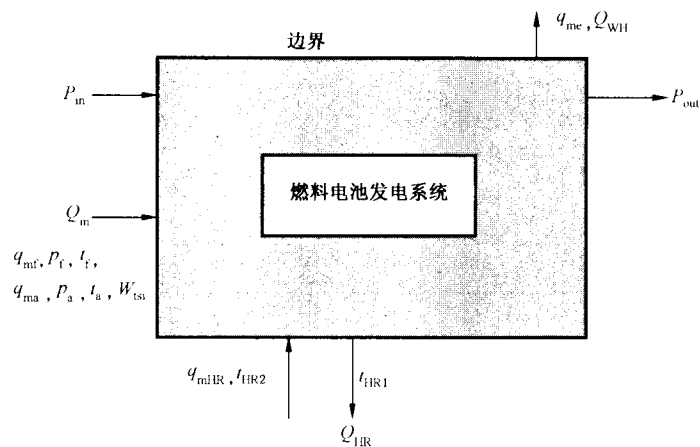


图 2 符号图例

4 参考条件

4.1 概述

本条款给出了计算试验结果所需的参考条件。

4.2 温度与压力

参考条件规定如下：

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

参考压力： $p_0 = 101.325\text{ kPa}$ 。

4.3 热值基准

燃料热值原则上以低热值(LHV)为基准。能量效率值的表示如下：

$$\eta_e \text{ 或 } \eta_{th} = \times \times \%$$

若使用低热值(LHV)，不必加符号“LHV”。

若使用高热值(HHV)，应如下所示在能量效率值上加缩写“HHV”：

$$\eta_e \text{ 或 } \eta_{th} = \times \times \%(\text{HHV})$$

注：LHV 为低热值；HHV 为高热值。

5 性能试验项目

发电系统的性能评估应考虑以下两点：

- a) 运行方面：在正常运行和变工况下测试系统的性能；
- b) 环境方面：测试系统如何影响环境。

表 2 给出了运行性能试验和环境影响试验项目。表 2 中的试验项目适用于作为一个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要进行所有项目试验。由于系统设计和技术的不同，部分试验项目可能会省略(例如，没有热回收的系统不需要热回收试验)。

表 2 试验项目及试验分类

项 目	试 验	
	运行方面	环境方面
1	效率试验	废气排放试验
2	启动/关机特性试验	可闻噪音等级试验
3	吹扫气体消耗量试验	振动等级试验
4	水消耗量试验	排放水质量试验
5	废热试验	

6 试验准备

6.1 概述

本条款描述在进行试验之前应考虑的典型项目。应选择高精密检测仪器，谨慎仔细地制定试验计

划细节,尽量减少不确定因素。试验各方应以本部分为基础,准备详尽的书面试验计划。相关试验项目见表3。

下列各项应列入试验计划:

- a) 目的;
- b) 试验规范;
- c) 试验人员资质;
- d) 质量保证标准(ISO 9000 或其他等效标准);
- e) 指标不确定度(见附录 A 中 A.1 和 A.2);
- f) 对试验仪器及设备的鉴定(见第 7 章);
- g) 估计试验参数范围;
- h) 数据采集计划(见 6.2.2);
- i) 在适用条件下,氢气作为燃料的基本安全要求事项参见 ISO/TR 15916 或等效文件(由终端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

以下四个试验项目应进行不确定度分析,以确定试验结果的可靠性及是否满足客户要求,下述试验结果应进行分析以确定其绝对不确定度和相对不确定度。应制定一个试验计划以评估下列试验结果的可靠性:

- 电功率输出;
- 电效率;
- 热回收效率;
- 总能量效率。

6.2.2 数据采集计划

性能试验开始之前就应准备好符合指标不确定度要求的数据采集系统(如:数据采集时长和频次),和符合数据采集频次和速度要求的数据记录设备(见 8.5 和 A.2)。

7 测量仪器和测量方法

7.1 概述

测量用仪器类型及测量方法应符合相关国际标准,应满足制造商规定的测量精度指标。如有必要,应增加符合精度要求的外部仪器。

7.2 测量仪器

以下仪器和设备通常用于测量燃料电池的性能:

- a) 测量电能输出、输入的仪器:
 - 功率表、电压表、电流表,其他附件。
- b) 测量燃料输入速率的仪器:
 - 燃料流量计、压力传感器、温度传感器。
- c) 测量氧化剂输入速率的仪器:
 - 氧化剂流量计、压力传感器、温度传感器。

- d) 测量燃料热值的仪器：
 - 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。
- e) 测量热回收流体流速的仪器：
 - 流体流量计、温度传感器、压力传感器。
- f) 测量废气的组分和排放水质量的仪器：
 - 废气分析仪：如针对微粒、SO_x、NO_x、CO₂、CO 和碳氢化合物总量的；
 - 水质分析仪：如：pH 计、电化学探针。
- g) 测量噪声等级的仪器：
 - 声级计、麦克风等。
- h) 测量振动等级的仪器：
 - 振动测量仪、加速计、拾振传感器。
- i) 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 电功率测量

电功率的测量可用于计算试验期间的电能。
数字电功率测量仪除测量电压值 U 、电流值 I 之外，还可直接用来测量输入、输出电功率。
当无法直接测量功率时，若已知功率因数 λ ，可用以下公式来计算交流电的电功率：
三相系统：

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \lambda$$

单相系统：

$$P = U \times I \times \lambda$$

直流电可使用以下公式：

$$P = U \times I$$

电功率、电压、电流和功率因数的测量应符合 IEC 60051、IEC 60359、IEC 62052-11、IEC 62053-22、IEC 60688、IEC 61028 和 IEC 61143。

电功率表、电压表、电流表以及功率因数表在测量之前应符合精度和校准相关规定。

测量的位置应按如下所述：

- a) 为测量输出功率，功率表、电压表、电流表和功率因数表应接在电输出接口处；
- b) 为测量从外部电源为辅助负载输入的电功率，功率表、电压表、电流表和功率因数表应接在电输入接口处；
- c) 功率因数应在发电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。

7.3.2 燃料输入测量

7.3.2.1 概述

根据被测量的发电系统的技术要求，使用的燃料既可以是气态也可以是液态，但整个试验期间燃料热值应一致（见表 4）。

7.3.2.2 气态燃料测量

7.3.2.2.1 概述

气态燃料特性应包括：

- a) 热值;
- b) 温度;
- c) 压力;
- d) 密度。

气态燃料热值应根据 9.2.3.1.2.1 计算。

7.3.2.2.2 气态燃料组分测量

气体燃料组分的测量应包括:

- a) 取样

燃料气体的取样应在燃料电池发电系统运行期间进行,燃料气体的取样频次和样品数量应符合不确定度分析要求。

如果被分析气体组分的不确定度与要求一致,可用预分析过的瓶装气体代替取样气体。

- b) 燃料气组分测量

天然气主要由甲烷、少量高分子碳氢化合物以及其他不可燃气体组成。其他气体燃料可能含有其他成分。下列所有主要组分应依据 ISO 6974 和 ISO 6975 中规定的具体方法进行测量。

- 甲烷;
- 乙烷;
- 丙烷;
- 丁烷;
- 戊烷;
- 己烷;
- 氮气;
- 二氧化碳;
- 苯。

下列微量成分应根据 ISO 6974 和 ISO 6975 中规定的具体方法进行测量。

- 氢;
- 氧;
- 一氧化碳。

硫化物(包括气味剂)应按 ISO 6326 中规定的具体方法进行测量。

水蒸气成分应按 ISO 10101 和 ISO 11541 中规定的具体方法进行测量。

当用氢气作为燃料时,采样和气体组分测量应按照 ISO 14687 中的规定进行。

7.3.2.2.3 气态燃料流量测量

燃料流量测量,可通过试验期间的流量积分计算总的燃料流量。

燃料流量对测量发电系统效率必不可少。气体燃料输入量可通过体积流量计、质量流量计,或涡轮流量计进行测量。如果此方法不可行,则推荐使用符合 ISO 5167 规定的测流嘴、孔板或文丘里流量计。燃料流量计应与所用气体的压力相适应,不确定度应符合相应要求。流量计接入位置和流量测量应符合以下规定:

- a) 流量计安装位置:流量计应安装在靠近试验边界处;
- b) 测量条件:燃料的温度和压力应在安装于试验边界的流量计附近进行测量。

7.3.2.2.4 气态燃料温度测量

推荐直接温度测量仪是带显示器的热电偶温度计或带显示器的热敏电阻温度计。

温度传感器精度应符合要求。

如果流量计要求温度校正,那么温度传感器应安装在紧贴流量计的上游处,以用于该流量计的温度校正。

7.3.2.2.5 气态燃料压力测量

可采用校准过的压力计、净重仪、波尔登或其他弹力型压力计,另外可选校准过的压力传感器。燃料压力测量仪器应适合试验期间的压力,并且其不确定度应与不确定度分析一致。

性能试验前应检查管路连接,保证工作条件下无泄漏。

如果存在压力波动,应在有效位置安装一个合适的阻尼装置。

测量的燃料压力应是静压力,应考虑速度的影响并扣除。

7.3.2.3 液体燃料测量

7.3.2.3.1 概述

应采用合适的取样方法来确定燃料的特性,包括:

- a) 密度(单位体积的质量);
- b) 热值;
- c) 黏度(适用情况下);
- d) 温度;
- e) 液态燃料成分。

这些特性应根据相关的 ISO(如 ISO 3648 和 ISO 8217)以及 ASTM D4809-00 的适用部分进行测量。

7.3.2.3.2 液态燃料流量测量

燃料流量的精确测量对测量发电系统热效率必不可少。推荐使用测流嘴、孔板或文丘里流量计。测量仪器应符合 ISO 5167 中的规定。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、校准的液体流量计和直接称重计量方法。无论如何,应知道所用燃料流量测量仪器的不确定度,并保证其与不确定度计算一致。

测量点后不允许有燃料溢出或泄漏。

燃料流量测量,可通过试验期间燃料流量积分计算总的燃料流量。

7.3.2.3.3 液态燃料温度测量

推荐直接温度测量仪是带显示器的热电偶温度计或带显示器的热敏电阻温度计。

温度传感器精度应符合要求。

如果流量计要求温度校正,那么温度传感器应安装在紧贴流量计的上游处,以用于该流量计的温度校正。

7.3.3 热回收测量

7.3.3.1 概述

热回收流体可以是热水、热空气或其他冷却剂,如油等。根据试验发电系统的技术规定,可使用这些流体的组合。

热回收流体的温度和压力应同时测量。

7.3.3.2 热回收流体流量测量

每种热回收流体都应使用合适的测量设备。精确测量流入、流出热能使用设备或热能储存设备的热回收流体,对确定燃料电池发电系统热效率是必需的。推荐使用测流嘴、孔板或文丘里流量计,应符合 ISO 5167 中的规定,也可采用质量流量计和涡轮流量计。

流量计应符合流量范围和精度要求。

流量计应安置于靠近发电系统的边界处。

热回收流量测量,可通过试验期间流量积分计算总热回收流量。

7.3.3.3 热回收流体温度测量

推荐直接温度测量仪是带显示器的热电偶温度计或带显示器的热敏电阻温度计。

流体温度测量仪应符合温度范围和精度要求。

流体温度测量仪应安装在靠近发电系统的边界处,位于相应流量计的上游。温度传感器不应与管壁相接触。

7.3.3.4 热回收流体压力测量

本测量方法适用于测量气相流体,包括蒸汽。测量方法包括:

- a) 测量准备:应选用符合精度要求的压力计;
- b) 压力计安装位置:压力计传感器应安装于流体管路中靠近发电系统边界处(流体输出和输入点)的紧贴相关流量计的上游。应在管路外面包覆足够的隔热材料。

7.3.4 吹扫气体流量测量

吹扫气体消耗可通过体积流量计、质量流量计或涡轮流量计进行测量。如果此方法不可行,则推荐符合 ISO 5167 中规定的测流嘴、孔板或文丘里流量计。流量计应适合所用气体压力,不确定度应与不确定度分析相一致。

吹扫气体消耗量测量,可通过试验期间吹扫气体消耗量积分计算总吹扫气体消耗量。

流量计安装位置和测量规定:

- a) 流量计安装位置:流量计应安装在靠近试验边界处;
- b) 测量条件:吹扫气体的温度和压力应在安装于试验边界的流量计附近进行测量。

7.3.5 氧化剂(空气)输入测量

7.3.5.1 概述

氧化剂(空气)的下列特性应被测量:

- a) 温度;
- b) 压力;
- c) 组分(氧化剂特性会影响到燃料电池性能),氧化剂(空气)的组分应在试验报告中予以说明;
- d) 密度。

7.3.5.2 氧化剂(空气)流量测量

氧化剂(空气)流量可通过体积流量计、质量流量计或涡轮流量计进行测量。如果此方法不可行,则推荐符合 ISO 5167 中规定的测流嘴、孔板或文丘里流量计。流量计应适合所用气体压力,其不确定度应与不确定度分析相一致。

氧化剂(空气)流量测量,可通过试验期间流量积分计算氧化剂(空气)总量。

流量计安装位置和测量条件:

- a) 流量计安装位置:流量计应安装在靠近试验边界;
- b) 测量条件:氧化剂(空气)的温度和压力应在安装于试验边界的流量计附近进行测量。

7.3.5.3 氧化剂(空气)温度测量

推荐直接温度测量仪是带显示器的热电偶温度计或带显示器的热敏电阻温度计。

温度传感器应符合精度要求。

如果流量计要求温度校正,那么温度传感器应安装在紧贴流量计的上游处,以用于该流量计的温度校正。

7.3.5.4 氧化剂(空气)压力测量

可采用校准过的压力计、净重仪、波尔登或其他弹力型压力计,另外可选校准过的压力传感器。氧化剂(空气)压力测量仪器应适合试验期间的压力,不确定度应与不确定度分析一致。

性能试验前应检查管路连接,保证工作条件下无泄漏。

如果存在压力波动,应在有效位置安装一个合适的阻尼装置。

测量的氧化剂(空气)压力应是静压力,应考虑速度的影响并扣除。

7.3.5.5 氧化剂(空气)组分测量

氧化剂(空气)组分应当通过气相色谱仪或其他适用设备进行测量。如果使用空气作为氧化剂,除非特别说明,氧化剂组分应视为一般大气的空气组分。

7.3.6 其他流体流量测量

如有必要,冷却水、废水应通过下列方法之一进行测量。

- a) 标准测流嘴或孔板流量计;
- b) 位移流量计;
- c) 其他规定方法,如直接称重、容量槽、质量流量计等。

7.3.7 废气流量测量

7.3.7.1 废气温度测量

推荐直接温度测量仪是带显示器的热电偶温度计或带显示器的热敏电阻温度计。

废气温度用于流量测量及其校正。

如果流量计要求温度校正,那么废气温度传感器应直接安装在紧贴废气流量计和气体分析仪的上游处,以用于该流量计的温度校正。

7.3.7.2 废气压力测量

可采用校准过的压力计、净重仪或其他弹力型压力计,另外可选校准过的压力传感器。废气压力测量仪器应适合试验期间的压力和温度,不确定度应与不确定度分析一致。

性能试验前应检查管路连接,保证工作条件下无泄漏。

如果存在压力波动,应在有效位置安装一个合适的阻尼装置。

废气压力用于流量测量和压力校正。

如果流量计要求温度校正,那么废气压力传感器应直接安装在紧贴废气流量计和废气分析仪的上

游处,以用于该流量计的温度校正。

7.3.7.3 废气流量测量

对于那些 ISO 10780 中不包括的较小的导管(管道直径小于 30cm),废气流量可以用毕托流速测定管计算,也可以根据仪器制造商建议使用高精度流速计或高精度热线流速计进行计算。

7.3.7.4 微粒浓度测量

参照 ISO 9096、ISO 11042-1 和 ISO 11042-2。

7.3.7.5 硫氧化物(SO_x)和氮氧化物(NO_x)浓度测量

硫氧化物(SO_x)浓度:

参照 ISO 7934、ISO 7935、ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396。也可采用其他能满足不确定度分析的合适的测量方法。

氮氧化物(NO_x)浓度:

参照 ISO 11564、ISO 10849、ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396。也可采用其他能满足不确定度分析的合适的测量方法。

7.3.7.6 二氧化碳和一氧化碳浓度测量

二氧化碳(CO₂):参照 ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396,CO₂ 含量可根据燃料中碳含量计算。

一氧化碳(CO):参照 ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396。

7.3.7.7 总碳氢化合物浓度测量

参照 ISO 11042-1 和 ISO 11042-2。

7.3.7.8 氧浓度测量

参照 ISO 11042-1、ISO 11042-2 和 ISO 10396。

7.3.7.9 氢浓度测量

采用气体分析仪或气相色谱仪或其他合适的方法测量废气流(可能有多个废气流)中的氢浓度。

7.3.8 排放水测量

7.3.8.1 概述

从发电系统排放的排放水测量应包括:

- a) 排放水的体积;
- b) 排放水的温度;
- c) 氢离子浓度(pH);
- d) 生物化学需氧量(BOD),如有必要,化学需氧量(COD);
- e) 发电系统可能排放的受国家法规限制的其他排放物的排放水平。

7.3.8.2 排放水体积测量

参照 7.3.6。

若有必要,排放水应通过直接称重或容量槽测量。

7.3.8.3 排放水温度测量

推荐直接温度测量仪是带显示器的热电偶温度计或带显示器的热敏电阻温度计。
温度测量应尽可能靠近系统出口。

7.3.8.4 氢离子浓度(pH)测量

参照 ISO 10523。

7.3.8.5 化学需氧量(COD)测量

参照 ISO 6060。

7.3.8.6 生物化学需氧量(BOD)测量

参照 ISO 10707。

7.3.9 可闻噪声等级测量

应采用符合 IEC 61672-1 和 IEC 61627-2 规定的声级计测量发电系统产生的噪声。试验应按照 ISO 3744 的规定进行。

依据 ISO 3744 确定以下各项参数:

- a) 测量界面(距发电系统外表面一定距离);
- b) 测量点的数量;
- c) 背景噪声的影响。

噪声级应在参与试验各方都同意的位置和距离进行测量。

7.3.10 振动级别测量

振动测量应在燃料电池发电系统按照制造商安装说明书的要求安装和运行后进行。

燃料电池发电系统产生的振动应在以下描述的支撑点进行测量。

按上述要求应使用制造商提供的支撑构件支撑发电系统。支撑点就是振动传播点。振动从发电系统通过支撑点传递到地基、地板、墙壁、天花板或制造商设计的其他支撑构件。如果设计有多种支撑构件配置,每种配置都应进行测量。

- a) 测量点:应在能有效反映系统所有振动动力和特性的支撑点进行测量,对于没有固定支撑点的系统,应通过动力分析或预试验来确定有效测量点。
- b) 为描述每个测量点的振动行为,需要在三个互相垂直的坐标方向上进行测量。
- c) 加速计安装,参照 ISO 5348。

7.3.11 总谐波失真率测量

对于输出交流电的燃料电池发电系统,应测量总谐波失真率并形成报告。测量方法见 IEC 61000-4-7 和 IEC 61000-4-13。

7.3.12 环境条件测量

应测量环境的湿度、风速、气压和温度。

环境湿度测量见 ISO 4677-1 和 ISO 4677-2。

环境风速测量见 ISO 16622。

推荐直接温度测量仪是带显示器的热电偶温度计或带显示器的热敏电阻温度计。

温度传感器精度应符合要求。

推荐以下直接测量环境气压的仪器。

- a) 水银气压计；
- b) 酒精气压计。

压力传感器精度应符合要求。

8 试验计划

8.1 概述

表 2 中列出的试验项目,应根据试验目的在以下不同运行条件下进行,包括下列运行状态:

- a) 额定功率下的稳态；
- b) 额定功率和最低功率中间点附近的部分负载稳态；
- c) 待机状态的稳态；
- d) 最低功率下的稳态；
- e) 稳态可输出的最大值；
- f) 瞬变状态。

所有试验项目的运行状态条件见表 3。

8.2 环境条件

每一试验过程都应测量并记录如下环境条件:

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

表 3 试验项目和系统状态

项目	试 验	稳 态 条 件				最大值 测定	瞬 变 状 态 ^b
		额定功率	部分负载 ^a	最低负载 ^a	待机状态		
运行方面							
1	效率试验	×	(×)				
2	功率输出响应试验						×
3	启动/停机特性试验						×
4	吹扫气体消耗量试验						×
5	水消耗量试验	×	(×)				
6	废热试验	×	(×)				
环境方面							
1	微粒子排放					×	
2	SO _x 、NO _x 排放					×	
3	CO ₂ 、CO 排放					×	

表 3（续）

项目	试 验	稳 态 条 件				最大值 测定	瞬变状态 ^b
		额定功率	部分负载 ^a	最低负载 ^a	待机状态		
4	全部碳氢化合物、氢气排放					×	
5	可闻噪音等级试验	×	(×)		×	×	×
6	振动级别试验	×	(×)		×	×	×
7	排放水质质量试验	×	(×)		×		
^a 经试验参与各方同意,可进行部分负载和 或最低负载试验。 ^b 瞬变状态试验包括关机试验。 × 代表需要进行的试验项目。							

8.3 稳态运行条件下的最大容许偏差

试验期间的最大容许偏差见表 4。
表 4 不适用于启动和关机试验。
如果总不确定度值的计算结果对于试验参与各方是可接受的,则偏差可以超过表 4 内的容许值。

表 4 试验运行条件下最大容许偏差

参 数	试验期间容许偏差
制造商规定和参与各方同意的系统固定参数	按规定
电功率输出/kW	±2%
试验地点大气压力	±0.5%
进口氧化剂(空气)温度	±3 K
热值…… 每单位体积燃料	±1%
进入系统的气态燃料压力	±1%
排气绝对压力	±0.5%
进入系统的氧化剂(空气)绝对压力	±0.5%
进入燃料流量	±2%
进入燃料温度	±2 K
进入氧化剂(空气)流量	无规定
回收热功率	±2%
总谐波失真率(THD ^a)	±2%
注：此表参考 ASME-PTC50 的仪器和测量方法。 ^a 仅用于总谐波失真率(THD)；对于总谐波失真率平均值为 5%，介于 3%~7%之间的值可接受。	

8.4 试验运行程序

下列测量项目在效率试验中应同时进行：

——燃料输入、辅助热能输入、氧化剂输入、辅助电输入、机械能输入、电输出和热输出。

注：在效率试验中的电效率、热回收效率和总能量效率，以及在废热试验中的废热率，其计算均基于上述测量得出的测量值。

在上述试验实施过程中，还应测量以下数值：

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

8.5 试验持续时间和记录频次

根据被测燃料电池发电系统的类型，确定适当的试验持续时间和记录频次。应根据数据波动、平均值的稳定性和本标准对不确定度分析的要求，采集足够的测量值并确定测量集的数量。

9 试验方法和试验结果计算

9.1 概述

本部分只描述了试验类型和试验方法，没有规定和要求例行试验，也没有设定性能指标。

9.2 效率试验

9.2.1 概述

本试验项目是燃料电池发电系统在额定功率稳态运行状况下，测量输入发电系统的平均化学能、热能、机械能、电能和输出的平均电能及热能，计算额定功率下电效率、热回收效率和总能量效率。

经试验参与各方认可，可进行部分负载和最低功率输出的效率试验。

9.2.2 试验方法

9.2.2.1 试验步骤

效率试验应根据以下步骤进行：

- a) 在额定电功率输出(或部分负载或最低电功率输出)下运行发电系统；
- b) 根据表 4 给出的数据确定系统已满足稳态运行条件；
- c) 测量以下物理量不少于 1 h(3 600 s)，根据 A.2 和 A.3 选择测量时间间隔：
 - 1) 燃料输入率(体积或质量)、温度和压力；
 - 2) 辅助热能输入率(质量)、温度和压力；
 - 3) 氧化剂(空气)输入率(体积或质量)、温度和压力；
 - 4) 辅助电功率输入；
 - 5) 机械能输入功率；
 - 6) 净电功率输出、电压和电流；
 - 7) 热回收流体输出率(体积或质量)、温度和压力；
 - 8) 环境温度和气压。

9.2.2.2 计算步骤

应通过不少于 60 组的连续测量值来计算物理量的平均值。

9.2.3 输入计算

9.2.3.1 燃料输入

9.2.3.1.1 燃料输入率

9.2.3.1.1.1 平均气态燃料输入率

平均气态燃料输入率可被描述成燃料体积流量 q_{vf0} (m^3/s) 或燃料质量流量 q_{mf} (kg/s)。平均气态燃料输入率应按照以下步骤计算。

a) 体积流量

- 1) 试验期间的总气态燃料输入 (m^3)，应通过测量试验运行时段内体积流率 (m^3/s) 对时间积分而得。
- 2) 试验条件下燃料的平均体积流量 q_{vf} (m^3/s)，应通过用试验期间的总体积 (m^3) 除以试验时间 (s) 计算。
- 3) 参考条件下燃料的平均体积流量 q_{vf0} (m^3/s)，应通过如下公式计算。应采用试验期间测量的燃料温度和压力的平均值。

$$q_{vf0} = q_{vf} \times (t_0/t_f) \times (p_f/p_0)$$

式中：

- q_{vf0} ——参考条件下燃料的平均体积流量，单位为立方米每秒 (m^3/s)；
- q_{vf} ——平均温度 t_f 和平均压力 p_f 下燃料的平均体积流量，单位为立方米每秒 (m^3/s)；
- t_0 ——参考温度，288.15 K；
- p_0 ——参考压力，101.325 kPa；
- t_f ——试验期间燃料的平均温度，单位为开尔文 (K)；
- p_f ——试验期间燃料的平均压力，单位为千帕 (kPa)。

b) 质量流量

- 1) 试验期间的总气态燃料输入质量 (kg)，应通过试验期间测量的质量流量 (kg/s) 合计计算。
- 2) 试验条件下燃料的平均质量流量 q_{mf} (kg/s)，应通过用试验期间的总质量 (kg) 除以试验时间 (s) 计算。

c) 体积流量和质量流量之间的转换

平均质量流量 q_{mf} (kg/s) 和参考条件下平均体积流量 q_{vf0} (m^3/s) 的关系可通过下式表示：

$$q_{mf} = q_{vf0} \times \rho_{f0}$$

式中：

- q_{vf0} ——参考条件下燃料的平均体积流量，单位为立方米每秒 (m^3/s)；
- q_{mf} ——燃料的平均质量流量，单位为千克每秒 (kg/s)；
- ρ_{f0} ——参考条件下原燃料的密度，单位为千克每立方米 (kg/m^3)。

9.2.3.1.1.2 平均液体燃料输入率

平均液体燃料输入率可被描述成燃料体积流量 q_{vf0} (m^3/s) 或燃料质量流量 q_{mf} (kg/s)，应按以下步骤计算。

a) 体积流量

- 1) 试验期间的总液体燃料输入 (m^3)，应通过试验期间测量的体积流量 (m^3/s) 合计计算。
- 2) 参考条件下液体燃料的平均体积流量 q_{vf0} (m^3/s)，应通过用试验期间的总体积 (m^3) 除以试验时间 (s) 计算。

注：因为液体的体积变化非常小，故在参考条件下液体燃料的平均体积流量即可视为试验条件下测量的值。

b) 质量流量

1) 试验期间的液体燃料总输入质量(kg),应通过试验期间测量的质量流量(kg/s)合计计算。

2) 试验条件下液体燃料的平均质量流量 q_{mf} (kg/s),应通过用试验期间的总质量(kg)除以试验时间(s)计算。

c) 体积流量和质量流量之间的转换

平均质量流量 q_{mf} (kg/s)和参考条件下平均体积流量 q_{vf0} (m³/s)的关系可通过以下公式表示:

$$q_{mf} = q_{vf0} \times \rho_{f0}$$

式中:

q_{vf0} ——参考条件下燃料的平均体积流量,单位为立方米每秒(m³/s);

q_{mf} ——燃料的平均质量流量,单位为千克每秒(kg/s);

ρ_{f0} ——参考条件下原燃料的密度,单位为千克每立方米(kg/m³)。

9.2.3.1.2 燃料输入功率

9.2.3.1.2.1 气态燃料平均输入功率

应按以下步骤根据体积流量或质量流量计算气态燃料的平均输入功率 Q_{mf} (kJ/s)。应采用试验期间测量的燃料温度和压力的平均值。

a) 体积流量

1) 平均温度 t_f 和平均压力 p_f 条件下,每摩尔已知成分混合气体燃料的输入能量 E_f (kJ/mol),应按以下公式计算:

$$E_f = Q_{f0} + h_f - h_{f0} + E_{pf}$$

式中:

E_f ——每摩尔燃料输入的能量,单位为千焦每摩尔(kJ/mol)(见附录 B 中的工作表 1);

Q_{f0} ——参考条件下燃料的热值,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_f ——平均温度 t_f 条件下燃料的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_{f0} ——参考温度 t_0 条件下燃料的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

E_{pf} ——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)。

参考条件下燃料的热值 Q_{f0} (kJ/mol),应按以下公式计算:

$$Q_{f0} = \sum_{j=1}^N X_j \cdot Q_{f0j}$$

式中:

Q_{f0j} ——参考温度 t_0 条件下燃料组分 j 的热值,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

X_j ——组分 j 的摩尔浓度(见附录 B 中的工作表);

j ——燃料的一个组分;

N ——气体燃料的成分数目。

注: Q_{f0j} 的数值见附录 B 的表 B.1。

燃料的比焓 h_f (kJ/mol),按以下公式计算:

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

式中:

h_{fj} ——平均温度 t_f 下组分 j 的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

X_j ——组分 j 的摩尔浓度。

并且, h_{fj} 按以下公式计算:

$$h_{fj} = (A_j \times t_f + B_j/2 \times 10^{-3} \times t_f^2 + C_j/3 \times 10^{-6} \times t_f^3) \times 10^{-3}$$

式中:

A_j, B_j 和 C_j ——组分 j 的常数,见表 B.1;

t_f ——试验条件下燃料的温度,单位为开尔文(K)。

注:参考温度下燃料的比焓 h_{f0} ,在上述 h_{fj} 公式中用 t_0 与代替 t_f 计算。

燃料的压力能 E_{pf} (kJ/mol),按以下公式计算:

$$E_{pf} = R \times t_0 \times \ln(p_f/p_0) \times 10^{-5}$$

式中:

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

R ——通用气体常数, $R=8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

t_0 ——参考温度, $t=288.15\text{K}$;

p_0 ——参考压力, $p_0=101.325\text{kPa}$;

p_f ——燃料平均压力,单位为千帕(kPa)。

2) 气态燃料平均输入功率 Q_{mf} (kJ/s),应按以下公式计算:

$$Q_{mf} = q_{vfo} \times E_f/M_m$$

其中:

$$q_{vfo} = q_{vf}(p_f/p_0)(t_0/t_f)$$

式中:

Q_{mf} ——燃料平均输入功率,单位为千焦每秒(kJ/s);

q_{vfo} ——参考条件下燃料的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

E_f ——每摩尔燃料所含能量,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

M_m ——理想气体的参考摩尔体积($2.3645 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{mol}$)(本标准中规定参考温度为 $t_0=288.15\text{K}$);

q_{vf} ——温度 t_f 和压力 p_f 条件下燃料的体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

t_0 ——参考温度(288.15 K);

t_f ——试验期间燃料的平均温度,单位为开尔文(K);

p_0 ——参考大气压(101.325 kPa);

p_f ——试验期间燃料的平均压力,单位为千帕(kPa)。

b) 质量流量

1) 平均温度 t_f 和平均压力 p_f 条件下,每摩尔已知成分混合气体燃料的输入能量 E_f (kJ/mol),应按以下公式计算:

$$E_f = Q_{fo} + h_f - h_{fo} + E_{pf}$$

式中:

E_f ——每摩尔燃料的输入能量,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);(见表 B.1)

Q_{fo} ——参考条件下燃料的热值,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_f ——平均温度 t_f 条件下燃料的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_{fo} ——参考温度 t_0 条件下燃料的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

E_{pf} ——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)。

2) 气态燃料平均输入功率 Q_{mf} (kJ/s),应按以下公式计算:

$$Q_{mf} = q_{mf} \times E_f/M_m$$

式中:

Q_{mf} ——平均气态燃料输入功率,单位为千焦每秒(kJ/s);

E_f ——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,单位为千克每秒(kg/s),见 9.2.3.1.1.1;

M_m ——燃料的摩尔质量,单位为千克每摩尔(kg/mol),根据 ASTM F2602-08e1 中方法

测量。

9.2.3.1.2.2 液体燃料平均输入功率

液体燃料的平均输入功率, Q_{inf} (kJ/s), 应按体积流量或质量流量通过以下步骤计算。

a) 体积流量

1) 平均温度 t_f 下单位体积液态燃料的能量输入 E_{fv} (kJ/m³), 应按以下公式计算:

$$E_{fv} = \rho_f \times Q_n$$

式中:

E_{fv} —— 单位体积液态燃料的能量输入, 单位为千焦每立方米(kJ/m³);

ρ_f —— 平均温度 t_f 下燃料的密度, 单位为千克每立方米(kg/m³), 是根据相关国际标准测量而得;

Q_n —— 平均温度 t_f 下测量燃料的热值, 单位为千焦每千克(kJ/kg), 依据 ASTM D4809-00 中的方法测量。

2) 液态燃料平均输入功率 Q_{inf} (kJ/s), 应按以下公式计算:

$$Q_{\text{inf}} = q_{vf} \times E_{fv}$$

式中:

Q_{inf} —— 燃料平均输入功率, 单位为千焦每秒(kJ/s);

E_{fv} —— 单位体积燃料的能量输入, 单位为千焦每立方米(kJ/m³)。

q_{vf} —— 参考条件下燃料的平均体积流量, 单位为立方米每秒(m³/s)。

b) 质量流量

单位质量液态燃料的平均输入功率 Q_{inf} (kJ/s), 应按以下公式计算:

$$Q_{\text{inf}} = q_{mf} \times Q_n$$

式中:

Q_{inf} —— 燃料平均输入功率, 单位为千焦每秒(kJ/s);

q_{mf} —— 燃料的平均质量流量, 单位为千焦每秒(kg/s), 见 9.2.3.1.1.2;

Q_n —— 平均温度 t_f 下测量燃料的热值, 单位为千焦每千克(kJ/kg)。根据 ASTM D4809-00 中的方法测量。

9.2.3.2 辅助热输入

9.2.3.2.1 辅助热能输入

计算总热输入时按以下方法将辅助热输入考虑在内。

a) 闭合回路辅助热输入

试验期间发电系统的总热能输入 Q_{st} (kJ), 是通过测量穿过系统试验边界的蒸汽或导热液热含量的变化, 再乘以穿过系统试验边界的蒸汽或导热液的总流量计算。

$$Q_{\text{st}} = M_{\text{hif}} \times (H_{\text{in}} - H_{\text{out}})$$

式中:

Q_{st} —— 试验期间输入发电系统的总热能, 单位为千焦(kJ);

M_{hif} —— 试验期间由辅助热源输入和输出发电系统的蒸汽或导热液的质量, 单位为千克(kg);

H_{in} —— 试验期间进入发电系统的导热液的平均焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg);

H_{out} —— 试验期间流出发电系统的导热液的平均焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg)。

b) 蒸汽或液体热输入

对于输入系统且不再输出试验边界的蒸汽或液体总热能输入 Q_{st} (kJ) 的计算, 是通过测量导热液的焓, 乘以进入试验边界的导热液的总流量, 以 15 °C 饱和水为基准焓(62.99 kJ/kg)进行校正。

$$Q_{\text{st}} = M_{\text{hif}} \times [H_{\text{in}} - 62.99 \text{ kJ/kg}]$$

式中:

- Q_{tot} ——试验期间输入发电系统的总热能,单位为千焦(kJ);
 M_{htf} ——试验期间由辅助热源输入发电系统的蒸汽或导热液的质量,单位为千克(kg);
 H_{in} ——试验期间进入发电系统的蒸汽或导热液的平均焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。
c) 气体热输入

对于输入系统且不再输出试验边界的气态热总热能输入 Q_{tot} (kJ) 的计算,是通过测量输入蒸汽的焓,乘以进入试验边界的蒸汽的总流量,以 15 °C 大气压力下干燥空气为基准焓(33.0291 kJ/kg)进行校正。

$$Q_{\text{tot}} = M_{\text{htf}} \times [H_{\text{in}} - 33.0291 \text{ kJ/kg}]$$

式中:

- Q_{tot} ——试验期间输入发电系统的总热能,单位为千焦(kJ);
 M_{htf} ——试验期间由辅助热源输入发电系统的空气或气态导热液的质量,单位为千克(kg);
 H_{in} ——试验期间进入发电系统的气或气态导热液的平均焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

9.2.3.2.2 平均辅助热功率输入

平均辅助热功率输入 Q_{st} (kJ/s),由总热能输入 Q_{tot} (kJ)除以试验时间(s)计算。

9.2.3.3 氧化剂(空气)输入

9.2.3.3.1 平均氧化剂(空气)输入率

平均氧化剂(空气)输入率可由氧化剂(空气)的体积流量 q_{va0} (m³/s)或质量流量 q_{ma} (kg/s)表示。应按以下步骤计算。

a) 体积流量

- 1) 试验期间的总氧化剂(空气)输入体积(m³),应通过试验期间测量的体积流量(m³/s)合计计算。
- 2) 试验条件下氧化剂(空气)的平均体积流量 q_{va} (m³/s),应通过用试验期间的总体积(m³)除以试验时间(s)计算。
- 3) 参考条件下氧化剂(空气)平均体积流量 q_{va0} (m³/s),应通过以下公式计算。应采用试验期间测量的氧化剂(空气)温度和压力的平均值。

$$q_{\text{va0}} = q_{\text{va}} (p_{\text{a}} / p_0) (T_0 / T_{\text{a}})$$

式中:

- q_{va0} ——参考条件下氧化剂(空气)的平均体积流量,单位为立方米每秒(m³/s);
 q_{va} ——平均温度 T_{a} 和平均压力 p_{a} 条件下氧化剂(空气)的平均体积流量,单位为立方米每秒(m³/s);
 T_0 ——参考温度(288.15 K);
 p_0 ——参考大气压(101.325 kPa);
 T_{a} ——试验期间氧化剂(空气)的平均温度,单位为开尔文(K);
 p_{a} ——试验期间氧化剂(空气)的平均压力,单位为千帕(kPa)。

b) 质量流量

- 1) 试验期间的总氧化剂(空气)输入质量(kg),应通过试验期间测量的质量流量(kg/s)合计计算。
- 2) 试验条件下总氧化剂(空气)的平均质量流量 q_{ma} (kg/s),应通过用试验期间的总质量(kg)除以试验时间(s)计算。

c) 体积流量和质量流量之间的转换

平均质量流量 q_{ma} (kg/s)和参考条件下体积流量 q_{va0} (m³/s)的关系可通过以下公式表示:

$$q_{ma} = q_{va0} \times \rho_{a0}$$

式中:

q_{va0} ——参考条件下氧化剂(空气)的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

q_{ma} ——氧化剂(空气)的平均质量流量,单位为千克每秒(kg/s);

ρ_{a0} ——参考条件下氧化剂(空气)的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

9.2.3.3.2 氧化剂(空气)的平均输入功率

当热的氧化剂(空气)或压缩的氧化剂(空气)直接输送到发电系统时,氧化剂(空气)的能量应根据氧化剂(空气)在系统界面点的情况计算。

氧化剂(空气)的平均输入功率, Q_{ma} (kJ/s),应通过体积流量或质量流量按以下步骤计算,并且采用试验期间测量的氧化剂(空气)的温度和压力的平均值。

a) 体积流量

- 1) 平均温度 t_a 和平均压力 p_a 下每摩尔的氧化剂(空气)能量 E_a (kJ/mol),应按以下公式计算:

$$E_a = h_a - h_{a0} + E_{pa}$$

式中:

E_a ——每摩尔体积氧化剂(空气)的输入能量,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_a ——平均温度 t_a 条件下氧化剂(空气)的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_{a0} ——参考温度 t_0 条件下氧化剂(空气)的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

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

平均温度 t_a 下氧化剂(空气)的比焓 h_a (kJ/mol)按下式计算:

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

式中:

h_a ——平均温度下空气的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

A_a, B_a 和 C_a ——氧化剂(空气)的常数,其数值见附录 B 中的工作表 1;

t_a ——氧化剂的温度,单位为开尔文(K)。

氧化剂(空气)的压力能 E_{pa} (kJ/mol)按下式计算:

$$E_{pa} = R \times t_0 \times \ln(p_a/p_0) \times 10^{-3}$$

式中:

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

R ——通用气体常数[8.314 J/(mol·K)];

t_0 ——参考温度(288.15 K);

p_0 ——参考大气压(101.325 kPa);

p_a ——试验期间氧化剂的平均压力,单位为千帕(kPa)。

- 2) 氧化剂(空气)的平均输入功率应按以下公式计算:

$$Q_{ma} = q_{va0} \times E_a / M_a$$

其中:

$$q_{va0} = q_{va} (p_a/p_0) (t_0/t_a)$$

式中:

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

q_{va0} ——参考条件下氧化剂(空气)的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s),
见 9.2.3.3.1;

E_a ——每摩尔氧化剂(空气)的输入能量,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

M_a ——理想气体的参考摩尔体积($2.3645 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol}$), (参考温度 $t_0 = 288.15 \text{ K}$);

- q_{v0} 温度 t_0 和压力 p_0 条件下氧化剂(空气)的体积流量, m^3/s ;
 t_0 参考温度(288.15 K);
 t_m 试验期间氧化剂(空气)的平均温度,单位为开尔文(K);
 p_0 参考大气压(101.325 kPa);
 p_m 试验期间氧化剂(空气)的平均压力,单位为千帕(kPa)。

b) 质量流量

- 1) 每摩尔氧化剂(空气)的输入能量 E_a (kJ/mol), 应按以下公式计算:

$$E_a = h_a - h_{a0} + E_{p0}$$

式中:

- E_a 每摩尔氧化剂(空气)的输入能量,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);
 h_a 平均温度 t_m 的条件下氧化剂(空气)的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);
 h_{a0} 参考温度 t_0 条件下氧化剂(空气)的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);
 E_{p0} 氧化剂(空气)的压力能,单位为千焦每摩尔(kJ/mol)。

- 2) 氧化剂(空气)的平均输入功率 Q_m (kJ/s), 应按以下公式计算:

$$Q_m = q_m \times E_a / M_m$$

式中:

- Q_m 氧化剂(空气)的平均输入功率,单位为千焦每秒(kJ/s);
 q_m 空气的平均质量流量,单位为千克每秒(kg/s),见 9.2.3.3.1;
 E_a 每摩尔氧化剂(空气)的输入能量,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);
 M_m 氧化剂(空气)的摩尔质量,单位为千克每摩尔(kg/mol)。

9.2.3.4 平均辅助电功率输入

平均辅助电功率输入 P_m (kW), 可通过试验期间输入试验边界的全部电输入总和(kWh)除以试验时间(h)计算。

计算发电系统平均净电功率输出时, 应从平均电功率输出中扣除平均辅助电功率输入。

9.2.3.5 机械功输入

9.2.3.5.1 机械能输入

机械能输入 W_m (kJ), 应以测量的扭矩和转速(r/min)计算, 结果以 kJ 为单位。凡因系统限制无法测量扭矩和转速(r/min)情况下, 测量输入的燃料、蒸汽、导热液或液压传动状态点精度应在 1% 以内, 机械功输入的能量也应被计算在内。不允许对涡轮机或原动机效率进行修正或补偿。如果可能的话应将原动机移至试验边界以内, 燃料、辅助热或辅助电负载等输入能量都应被计算在输入至原动机的能量内。

9.2.3.5.2 平均机械功输入

平均机械功输入 W_m (kJ/s) 应通过输入的机械能 W_m (kJ) 除以试验时间(s)计算。

9.2.3.6 平均总功率输入

输入发电系统的平均总功率 Q_m (kJ/s) 可通过以下公式计算:

$$Q_m = Q_{mf} + Q_{m0} + W_m + Q_{st}$$

式中:

- Q_m 平均总功率输入,单位为千焦每秒(kJ/s);
 Q_{mf} 平均燃料输入功率,单位为千焦每秒(kJ/s),见 9.2.3.1.2;
 Q_{m0} 平均氧化剂输入功率,单位为千焦每秒(kJ/s),见 9.2.3.3.2;

W_{st} ——平均机械功输入功率,单位为千焦每秒(kJ/s),见 9.2.3.5.2;

Q_{st} ——平均辅助热输入功率,单位为千焦每秒(kJ/s),见 9.2.3.2.2。

9.2.4 输出计算

9.2.4.1 电功率输出

9.2.4.1.1 平均电功率输出

平均电功率输出 P_{out} (kW)应通过以下步骤计算。

a) 试验期间总电能输出(kWh)应通过试验期间电功率输出(kW)的时间积分计算。

b) 平均电功率输出 P_{out} (kW)应通过总电能输出(kWh)除以试验时间(h)计算。

9.2.4.1.2 平均净电功率输出

平均净电功率输出的计算应减去所有外部电源输入辅助电负载。在电效率的计算中,平均净电功率产出 P_n (kW),应通过以下公式计算:

$$P_n = P_{out} - P_{in}$$

式中:

P_n ——平均净电功率输出,单位为千瓦(kW);

P_{out} ——平均电功率输出,单位为千瓦(kW),见 9.2.4.1.1;

P_{in} ——平均辅助电功率输入,单位为千瓦(kW),见 9.2.3.4。

9.2.4.2 平均热回收功率

平均热回收功率 Q_{HR} (kJ/s),应根据热回收流体的体积流量或质量流量,按以下步骤计算。

a) 体积流量

1) 回收的热能 Q_{tHR} (kJ),应通过以下公式计算:

$$Q_{tHR} = \sum [(t_{HR1} - t_{HR2}) \times q_{vHR} \times \rho_{HR} \times T_{int} \times S_{HR}]$$

式中:

Q_{tHR} ——试验期间回收的热能,单位为千焦(kJ);

$\sum$ ——瞬时测量值合计;

t_{HR1} ——热回收流体的流出温度,单位为开尔文(K);

t_{HR2} ——热回收流体的流入温度,单位为开尔文(K);

q_{vHR} ——热回收流体的体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

ρ_{HR} ——测量压力和温度下的流体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

S_{HR} ——热回收流体的比热,单位为千焦每千克开尔文 [$kJ/(kg \cdot K)$];

T_{int} ——测量间隔,单位为秒(s),见 9.2.2.13。

如果热回收流体是混合液,需进行成分分析并按以下公式计算混合物的比热。若热回收流体比热已知,可忽略成分分析和比热计算。

$$S_{HR} = \sum (x_j \times S_j)$$

式中:

S_{HR} ——热回收流体的比热,单位为千焦每千克开尔文 [$kJ/(kg \cdot K)$];

S_j ——成分 j 的比热;

x_j ——成分 j 的摩尔浓度。

注:当用水作为热回收流体时,可认为其比热为 1。

2) 平均热回收功率 Q_{HR} (kJ/s),应通过回收热能 Q_{tHR} (kJ)除以试验时间(s)计算。

b) 质量流量

1) 当以质量为单位测量热回收流体流量时, 试验期间回收热能 Q_{HR} (kJ) 应通过以下公式计算:

$$Q_{\text{HR}} = \sum [(t_{\text{HR1}} - t_{\text{HR2}}) \times q_{\text{mHR}} \times T_{\text{int}} \times S_{\text{HR}}]$$

式中:

Q_{HR} —— 试验期间回收的热能, 单位为千焦(kJ);

$\sum$ —— 瞬时测量值合计;

t_{HR1} —— 热回收流体的流出温度, 单位为开尔文(K);

t_{HR2} —— 热回收流体的流入温度, 单位为开尔文(K);

q_{mHR} —— 热回收流体的质量流量, 单位为千克每秒(kg/s);

T_{int} —— 测量间隔, 单位为秒(s), 见 9.2.2.13;

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

2) 平均热回收功率 Q_{HR} (kJ/s), 应通过总回收热能 Q_{HR} (kJ) 除以试验时间(s) 计算。

9.2.5 效率计算

9.2.5.1 电效率计算

电效率 η_e (%) 应通过平均净电功率输出 P_n (kW) 除以平均总输入功率 Q_m (kJ/s) 计算。

注: 若 Q_m 中使用的是 HHV(高热值), 见 4.3。

$$\eta_e = (P_n / Q_m) \times 100\%$$

式中:

η_e —— 电效率, %;

P_n —— 平均净电功率输出, 单位为千瓦(kW); 或千焦每秒(kJ/s), 见 9.2.4.1.2;

Q_m —— 平均总输入功率, 单位为千焦每秒(kJ/s), 见 9.2.3.6。

9.2.5.2 热回收效率计算(热效)

热回收效率 η_{th} (%) 应通过平均回收热功率 Q_{HR} (kJ/s) 除以平均总输入功率 Q_m (kJ/s) 计算:

$$\eta_{\text{th}} = (Q_{\text{HR}} / Q_m) \times 100$$

式中:

η_{th} —— 热回收效率, %;

Q_{HR} —— 平均热回收功率, 单位为千焦每秒(kJ/s), 见 9.2.4.2;

Q_m —— 平均总输入功率, 单位为千焦每秒(kJ/s), 见 9.2.3.6。

9.2.5.3 总能量效率

总能量效率 η_{total} (%) 按下式计算:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_e + \eta_{\text{th}}$$

式中:

η_{total} —— 总能量效率, %;

η_e —— 电效率, %;

η_{th} —— 热回收效率, %。

9.3 电功率和热功率的响应特性试验

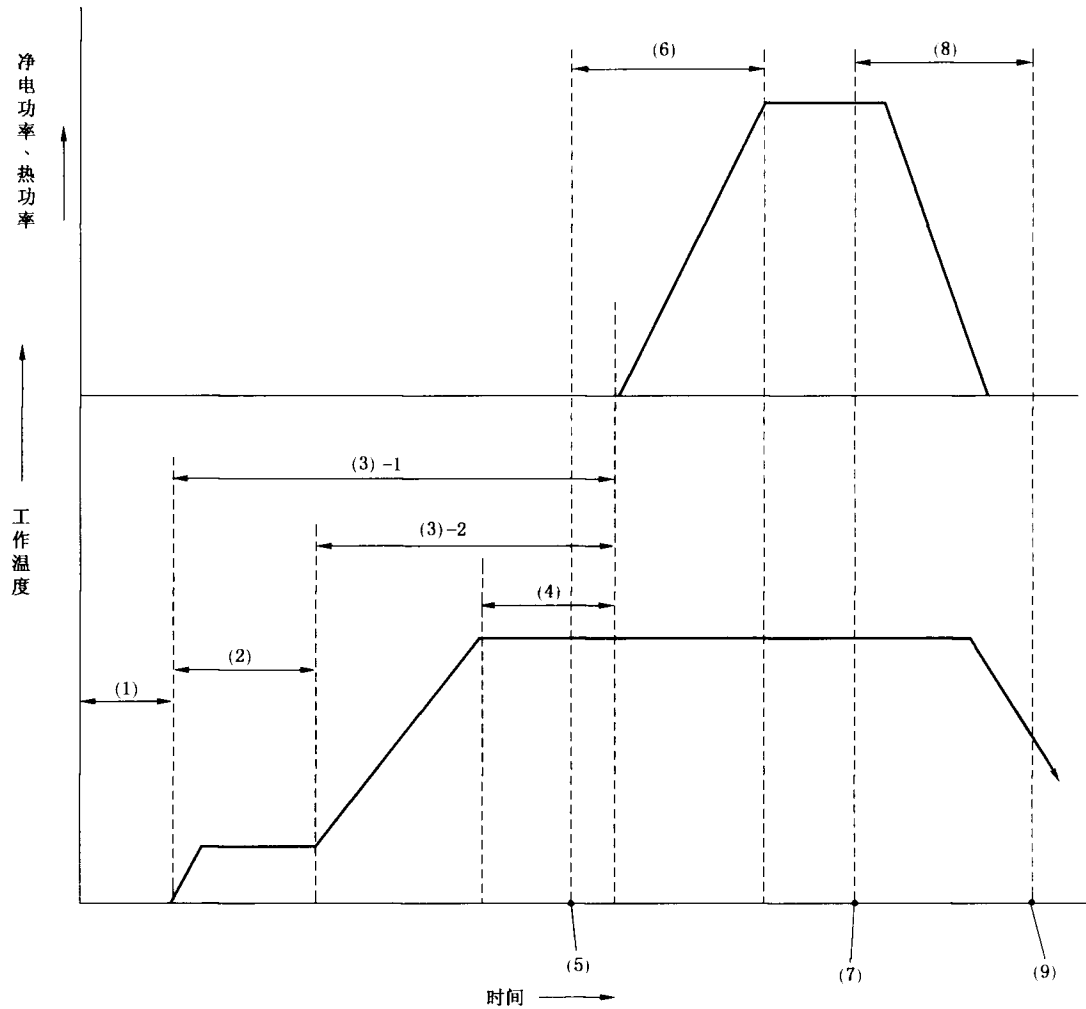
9.3.1 概述

图 3 提供了 3.1.5(冷态)、3.1.27(机械功)、3.1.28(关机时间)、3.1.30(启动能量)和 3.1.31(启动

时间)中定义的更多信息。

图 4 和图 5 提供了 9.3.2.1.2、9.3.2.2.2、9.3.3.2 中试验的更多信息。

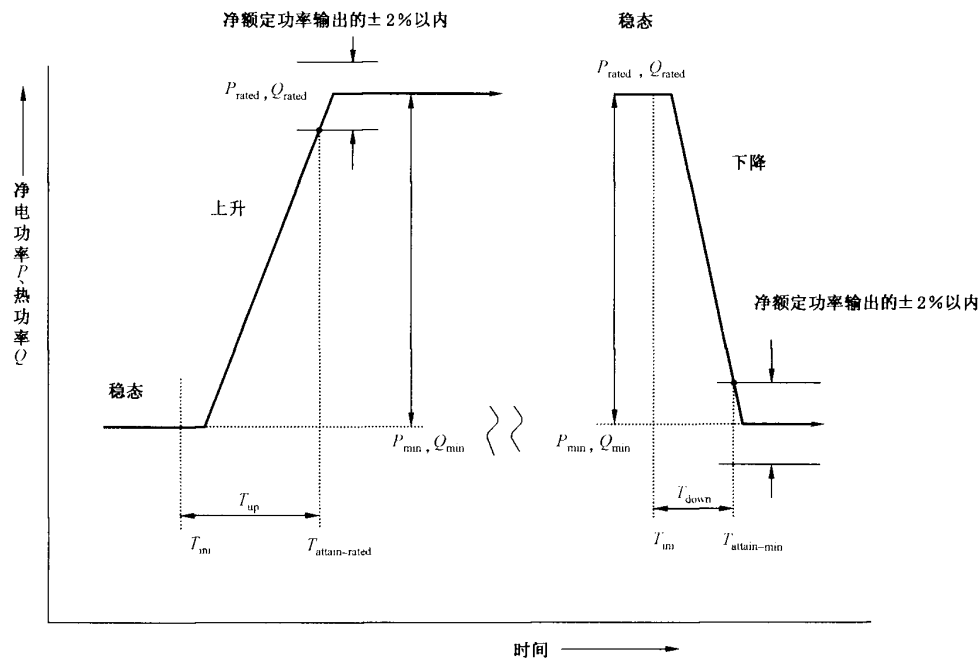
图 6 提供了 9.3.2.1.3、9.3.2.2.3、9.3.3.3 中试验的更多信息。



说明:

- (1) — 冷态(关机),零功率输入时的环境温度;
- (2) — 储存状态;
- (3)-1 — 不需要外部能量维持储存状态的系统启动时间,从系统冷态开始测量;
- (3)-2 — 需要外部能量维持储存状态的系统启动时间,从系统储存状态开始测量;
- (4) — 待机状态;
- (5) — 开始产生电功率的时点;
- (6) — 额定功率响应时间;
- (7) — 关机开始时点;
- (8) — 关机时间;
- (9) — 规定的关机状态;
- (2)~(8) — 运行模式。

图 3 燃料电池发电系统操作过程曲线



说明：

$P_{\text{rated}}, Q_{\text{rated}}$ ——额定净电功率输出, 额定净热功率输出；

$P_{\text{min}}, Q_{\text{min}}$ ——最低净电功率输出, 最低净热功率输出；

T_{ini} ——用户开始改变净电功率输出或净热功率输出的初始时点；

$T_{\text{attain-rated}}$ ——发电系统达到额定功率 $\pm 2\%$ 范围内的额定净电功率输出或热功率输出的时间；

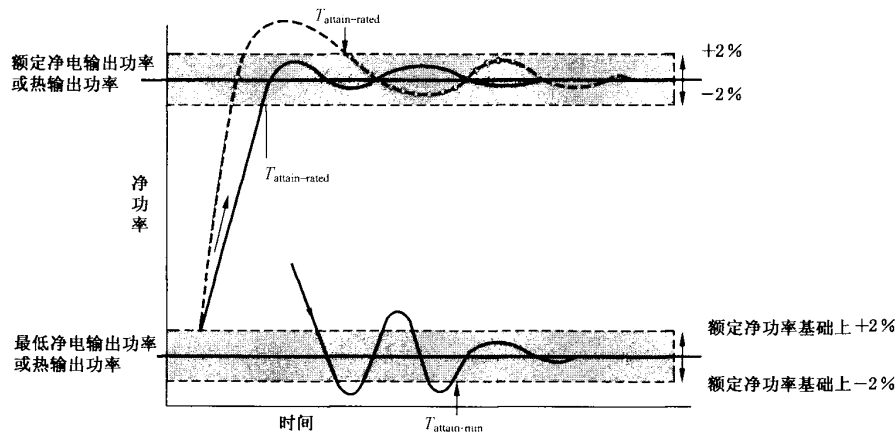
$T_{\text{attain-min}}$ ——发电系统达到额定功率 $\pm 2\%$ 范围内的最低净电功率输出或热功率输出的时间；

T_{down} ——从 T_{ini} 到 $T_{\text{attain-min}}$ 的时间；

T_{up} ——从 T_{ini} 到 $T_{\text{attain-rated}}$ 的时间。

图 4 净电和热功率响应斜率

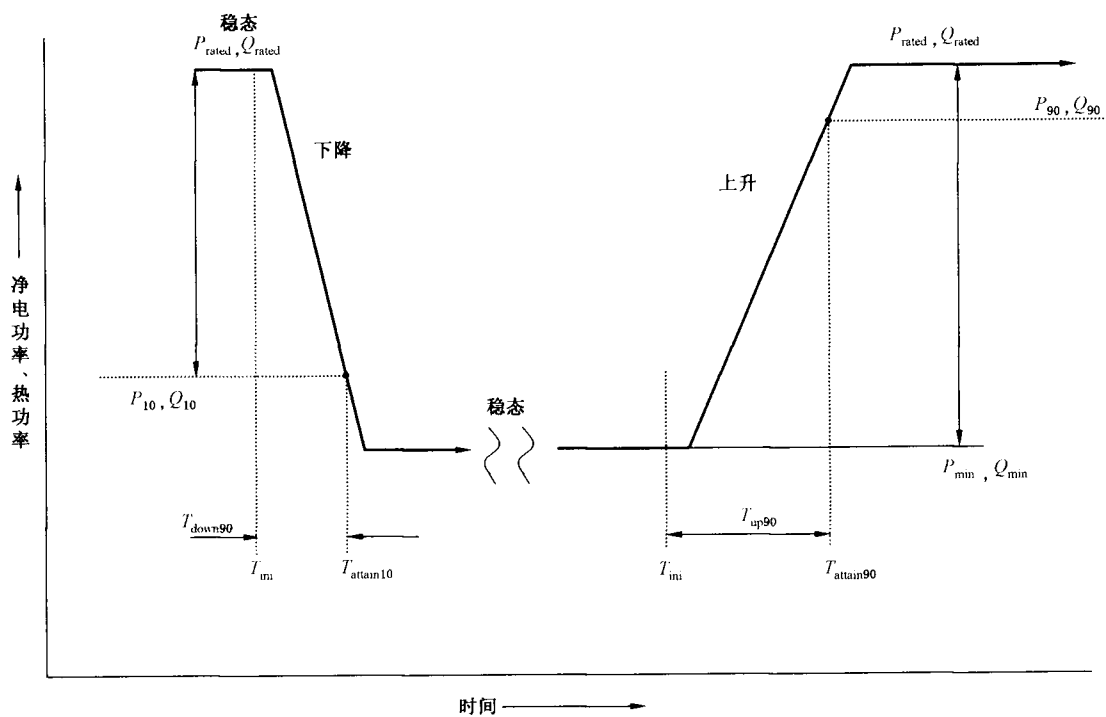
若净电功率或热功率输出在图 4 所示的 $\pm 2\%$ 范围中上下任何一个水平内是稳定的, 则净电功率或热功率输出最先(第一)达到各自稳定区域的时点为“达到时间”。 $T_{\text{attain-rated}}$ 和 $T_{\text{attain-min}}$ 的定义如图 4 所示。



注 1：图中符号的定义与图 4 一致。

注 2：波形可能会有不同的特征。

图 5 净电和热功率达到稳态的响应时间斜率示例



说明：

$P_{\text{rated}}, Q_{\text{rated}}$ —— 额定净电功率输出, 额定净热功率输出；

$P_{\text{min}}, Q_{\text{min}}$ —— 最低净电功率输出, 最低净热功率输出；

P_{10}, Q_{10} —— P_{10} 为额定功率和最低功率(W,kW)之间, 净电功率由额定电功率减少了 90% 时相应的低净电功率输出。这应按制造商规定的每台系统的基本额定净电功率和最低净电功率进行计算, 可能会超过额定净电功率的 10% 以上。对于 Q_{10} , 净热功率输出(kJ/s,W,kW)亦是如此；

P_{90}, Q_{90} —— P_{90} , 达到额定净电功率输出的 90% 时的净电功率输出(W,kW)。 Q_{90} , 净热功率输出(kJ/s,W,kW)；

T_{ini} —— 用户开始改变净电功率或热功率输出的初始时点；

$T_{\text{attain}90}$ —— 净电功率达到额定净电功率输出 90% 所需的时间；

$T_{\text{attain}10}$ —— 净电功率达到额定净电功率输出 10% 所需的时间；

$T_{\text{down}90}$ —— 净电功率或热功率达到净电功率或热功率下降 90% 变化要求所需的响应时间。响应时间为 T_{ini} 到 $T_{\text{attain}10}$ 的时间(s)；

$T_{\text{up}90}$ —— 达到额定净电功率或热功率 90% 的响应时间, 或从 T_{ini} 到 $T_{\text{attain}90}$ 的时间(s)。

图 6 90%响应时间斜率

9.3.2 电功率输出响应时间

9.3.2.1 独立于电网发电系统的电功率响应时间

9.3.2.1.1 独立于电网发电系统可承受的最大瞬时电功率输出

对于独立电网运行的燃料电池发电系统, 本试验程序用于确定发电系统在不出现系统跳闸或报警情况下所能承受的最大瞬时输出电功率。本项试验应配备电阻负载。

在试验期间, 应按 7.3.1 要求对净电功率输出进行持续监测。

如果净电功率输出在初始稳态值(见 8.1 和表 4)和变化值之间的变化在 20ms 以内, 这种电功率瞬变对于发电系统被认为是可接受的。

注：20 ms 相当于一个 50 Hz 的信号周期，该标准也适用于 60 Hz 交流电和直流电发电系统，对于不适用该时限的设计，制造商可规定不同的时限，并在试验报告中特别说明。

本试验只监测净输出功率，表 4 中列出的任何其他参数的不稳定状态和产生的变化以及（制造商定义的）系统稳定参数、总谐波失真率均不予考虑。

制造商应规定目标瞬变等级，例如制造商可规定系统的最大瞬变等级（如，57%）。试验由该目标值开始。若试验成功，则可按制造商给定的更高瞬变等级进行一个附加试验，以验证系统更高能力；若最初试验失败，则应按制造商规定的较低电功率瞬变等级再进行试验。至少应有一次成功试验以记录其试验结果。

系统处于待机状态，净电功率输出值为额定电功率输出 0% 的初始稳态可得到上升瞬变。对于要求最低净电功率输出以持续保持稳定的工作状态的系统，上升瞬变可由该最低电功率输出的初始稳态得到。

净电功率输出值为额定电功率输出 100% 的初始稳态可得到下降瞬变。

9.3.2.1.2 独立于电网发电系统净电功率输出瞬变

对于独立于电网运行的燃料电池发电系统，当 9.3.2.1.1 定义的配备电阻负载的发电系统最大可接受电功率输出变化的瞬间，应关注在电流总谐波失真和电压总谐波失真方面的电功率响应时间，其电功率指净的电功率，响应时间按 3.1.19 的定义。

注：电流总谐波失真等于谐波电流或电压（至 50 阶谐波）幅值平方和的平方根除以基波数量。

净电功率输出的响应时间应按下式计算：

$$T_{up} = T_{attain rated} - T_{ini}$$
$$T_{down} = T_{attain min} - T_{ini}$$

式中：

- T_{ini} —— 用户开始改变电或热功率输出的初始时点；
- $T_{attain rated}$ —— 总谐波失真值的变化达到表 4 规定值的时间，由此确定的一个在更高需求水平的新稳态运行条件；
- $T_{attain min}$ —— 总谐波失真值的变化达到表 4 规定值的时间，由此确定的一个在更低需求水平的新稳态运行条件。

相关试验应根据以下步骤进行：

- a) 独立于电网发电系统下降瞬变到稳态总谐波失真
 - 1) 应确认发电系统在额定电功率输出的稳态运行条件下；
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率下降指令发送至发电系统的控制器；
 - 3) 发电系统根据这一控制信号减少电功率输出；
 - 4) 从电功率需求信号发出到总谐波失真值变化达到表 4 中值的响应时间，应测量和记录由此确定的关于总谐波失真的一个新的稳态运行条件。
- b) 独立于电网发电系统上升瞬变到稳态总谐波失真
 - 1) 应确定发电系统处于最低电功率输出的稳态运行条件下；
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率上升指令发送至发电系统的控制器；
 - 3) 发电系统根据这一控制信号增加电功率输出；
 - 4) 从电功率需求信号发出到总谐波失真值变化达到表 4 中值的响应时间，应测量和记录由此确定的关于总谐波失真的一个新的稳态运行条件。

9.3.2.1.3 独立于电网发电系统 90% 电功率输出的响应时间

对于独立于电网运行设计的燃料电池发电系统，当 9.3.2.1.1 定义的配备电阻负载的发电系统发

生最大可接受电功率输出变化的瞬间,应关注从变化伊始到达到需求信号 90% 的两个运行状态之间按 3.1.19 定义的净电功率输出响应时间。

净电功率输出的 90% 响应时间应按下式计算:

$$T_{down90} = T_{attain90} - T_{ini}$$
$$T_{up90} = T_{attain90} - T_{ini}$$

式中:

- T_{ini} —— 用户开始改变电功率输出的初始时点;
- $T_{attain10}$ —— 净电功率输出达到额定净电输出功率 10% 的时间;
- $T_{attain90}$ —— 净电功率输出达到额定净电输出功率 90% 的时间。

相关试验应根据以下步骤进行:

- a) 独立于电网发电系统下降瞬变到最大瞬时需求 90%
 - 1) 应确认发电系统处于额定电功率输出的稳态运行条件下;
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率下降指令发送至发电系统的控制器;
 - 3) 发电系统根据这一控制信号减少电功率输出;
 - 4) 应测量和记录从电功率下降需求信号发出到净电功率输出达到需求值 90% 的响应时间。
- b) 独立于电网发电系统上升瞬变到最大瞬时需求 90%
 - 1) 应确认发电系统处于最低电功率输出的稳态运行条件下;
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率上升指令发送至发电系统的控制器;
 - 3) 发电系统根据这一控制信号增加电功率输出;
 - 4) 应测量和记录从电功率上升需求信号发出到净电功率输出达到需求值 90% 的响应时间。

9.3.2.2 并网发电系统电功率响应时间

9.3.2.2.1 概述

本条款适用于并网运行的发电系统。试验期间,发电系统的输出参数(频率、电压等)应符合本地并网标准。

应在下述的并网运行电功率瞬变过程中测量按 3.1.19 定义的电功率响应时间。

在试验期间,应按 7.3.1 的要求对电功率输出进行持续测量。

9.3.2.2.2 并网发电系统的净电功率输出对额定功率的响应

图 4、图 5 的电功率输出和额定功率之间变化响应斜率,应根据以下公式计算:

$$PR_{min} = (P_{rated} - P_{min}) / (T_{attain min} - T_{ini}) = (P_{rated} - P_{min}) / T_{down}$$
$$PR_{rated} = (P_{rated} - P_{min}) / (T_{attain rated} - T_{ini}) = (P_{rated} - P_{min}) / T_{up}$$

式中:

- PR_{min} —— 由额定功率到最低电功率的斜率, W/s, kW/s;
- PR_{rated} —— 由最低功率到额定电功率的斜率, W/s, kW/s;
- P_{min} —— 最低电功率输出, W, kW;
- P_{rated} —— 额定电功率输出, W, kW;
- T_{ini} —— 用户开始改变电功率输出的初始时点;
- $T_{attain min}$ —— 达到最低电功率输出的 2% 以内的时点;
- $T_{attain rated}$ —— 达到额定电功率输出的 2% 以内的时点;
- T_{down} —— 由 T_{ini} 到 $T_{attain min}$ 的时间, s;
- T_{up} —— 由 T_{ini} 到 $T_{attain rated}$ 的时间, s。

相关试验应根据以下步骤进行：

- a) 电功率输出的下降功率响应
 - 1) 应确认发电系统处于额定电功率输出的稳态运行条件下；
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率下降指令发送至发电系统的控制器；
 - 3) 发电系统根据这一控制信号减少电功率输出；
 - 4) 应测量和记录从电功率需求信号发出到达到最低电功率输出 $\pm 2\%$ 以内的响应时间。
- b) 电功率输出的上升功率响应
 - 1) 应确认发电系统处于最低电功率输出的稳态运行条件下；
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率上升指令发送至发电系统的控制器；
 - 3) 发电系统根据这一控制信号增加电功率输出；
 - 4) 应测量和记录从电功率需求信号发出到达到额定电功率输出 $\pm 2\%$ 以内的响应时间。

9.3.2.2.3 并网发电系统 90%电功率响应时间

应按 3.1.20 定义的测量达到需求 90%的响应时间。按 7.3.1 的试验期间，应持续测量电功率输出。

应依据图 6，按下式计算电功率输出的响应斜率：

$$\begin{aligned} PR_{down90} &= (P_{rated} - P_{10}) / (T_{attain90} - T_{ini}) = (P_{rated} - P_{10}) / T_{down90} \\ PR_{up90} &= (P_{90} - P_{min}) / (T_{attain90} - T_{ini}) = (P_{90} - P_{min}) / T_{up90} \end{aligned}$$

式中：

PR_{down90} —— 额定电功率和最低电功率之间，从额定电功率到减少了 90%电功率水平的斜率，W/s、kW/s；

PR_{up90} —— 由最低电功率到 90%额定电功率的斜率，W/s、kW/s；

P_{rated} —— 额定电功率输出，W、kW；

P_{90} —— 额定电功率输出的 90%，W、kW；

P_{10} —— 额定电功率和最低电功率之间，从额定电功率到减少了 90%电功率的低净电功率水平的电功率输出（W、kW）。这个值可能会大于额定电功率的 10%，应根据制造商规定，按每一不同类型的发电系统的额定电功率和最低电功率计算；

P_{min} —— 最低电功率输出，W、kW；

T_{ini} —— 用户开始改变电功率输出的初始时点；

$T_{attain90}$ —— 达到 P_{90} 的时点；

$T_{attain10}$ —— 达到 P_{10} 的时点；

T_{down90} —— 由 T_{ini} 到 $T_{attain10}$ 的时间，s；

T_{up90} —— 由 T_{ini} 到 $T_{attain90}$ 的时间，s。

相关试验应根据以下步骤进行：

- a) 电功率输出下降功率响应
 - 1) 应确认发电系统处于额定电功率输出的稳态运行条件下；
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率下降指令发送至发电系统的控制器；
 - 3) 发电系统根据这一控制信号减少电功率输出；
 - 4) 应测量和记录从电功率需求信号发出到达到需求变化 90%的响应时间。
- b) 电功率输出上升功率响应
 - 1) 应确认发电系统处于最低电功率输出的稳态运行条件下；
 - 2) 按 9.3.2.1.1 中规定阶跃变化的一个电功率上升指令发送至发电系统的控制器；
 - 3) 发电系统根据这一控制信号增加电功率输出；

4) 应测量和记录从电功率需求信号发出到达到 90% 额定电功率输出的响应时间。

9.3.3 热功率输出响应时间

9.3.3.1 概述

本条款适用于设计为控制主要热功率输出的发电系统,或可在这一模式下运行的发电系统。

应测量下述热功率瞬变过程中 3.1.19 定义的热功率响应时间。根据 7.3.1 和 7.3.3 中的规定,试验期间应持续测量电和热功率的输出。

9.3.3.2 额定热功率输出响应时间

应参考图 4、图 5 按以下式计算热功率输出的斜率:

a) 自额定热功率输出的下降响应

$$QR_{\min} = (Q_{\text{rated}} - Q_{\min}) / (T_{\text{attain min}} - T_{\text{ini}}) = (Q_{\text{rated}} - Q_{\min}) / T_{\text{down}}$$

b) 至额定热功率输出的上升响应

$$QR_{\text{rated}} = (Q_{\text{rated}} - Q_{\min}) / (T_{\text{attain rated}} - T_{\text{ini}}) = (Q_{\text{rated}} - Q_{\min}) / T_{\text{up}}$$

式中:

QR_{rated} ——由最低热功率输出到额定热功率输出的斜率, W/s、kW/s;

$QR_{\min}$ ——由额定热功率输出到最低热功率输出的斜率, W/s、kW/s;

Q_{rated} ——额定热功率输出(回收热 Q_{HR}), kJ/s、W、kW;

$Q_{\min}$ ——最低热功率输出(回收热 Q_{HR}), kJ/s、W、kW;

T_{ini} ——用户开始改变热功率输出的初始时点;

$T_{\text{attain rated}}$ ——达到稳态额定热功率输出 $\pm 2\%$ 以内的时点;

$T_{\text{attain min}}$ ——达到稳态最低热功率输出 $\pm 2\%$ 以内的时点;

T_{down} ——由 T_{ini} 到 $T_{\text{attain min}}$ 的时间, s;

T_{up} ——由 T_{ini} 到 $T_{\text{attain rated}}$ 的时间, s。

c) 额定热功率输出下降响应

应确认发电系统处于额定热功率输出的稳态运行条件下;

发送热功率下降到最低热功率负载的指令至发电系统的控制器;

发电系统根据这一控制信号减少热功率输出;

应测量和记录从热功率下降需求信号发出到达到最低热功率输出 $\pm 2\%$ 以内的响应时间。

d) 额定热功率输出上升响应

应确认发电系统处于最低热功率输出的稳态运行条件下;

发送热功率输出上升到额定热功率的指令至发电系统控制器;

发电系统根据这一控制信号增加热功率输出;

应测量和记录从热功率上升需求信号发出到达到额定热功率输出 $\pm 2\%$ 以内的响应时间。

如果热功率输出长时间持续波动超过 $\pm 2\%$ (当热管理系统有很大的热容量时, 有时会发生), 应记录波动范围, 参考 9.3.3.3 中 90% 热功率输出响应时间, 描述发电系统的特性。

9.3.3.3 90%热功率输出响应时间

应参考图 6 按以下公式计算热功率输出达到 90% 需求值的斜率:

a) 热功率输出到需求值 90% 的下降响应

$$QR_{\text{down}90} = (Q_{\text{rated}} - Q_{90}) / (T_{\text{attain}90} - T_{\text{ini}}) = (Q_{\text{rated}} - Q_{90}) / T_{\text{down}90}$$

b) 热功率输出到需求值 90% 的上升响应

$$QR_{up90} = (Q_{90} - Q_{min}) / (T_{attenu90} - T_{in}) = (Q_{90} - Q_{min}) / T_{up90}$$

式中:

QR_{down90} ——额定热功率和最低热功率之间,从额定热功率输出到减少 90% 的热功率输出的斜率, W/s 或 kW/s;

QR_{up90} ——从最低热功率输出到额定热功率输出 90% 的斜率, W/s 或 kW/s;

Q_{rated} ——额定热功率输出(回收热 Q_{HR}), kJ/s、W、kW;

Q_{90} ——额定热功率输出的 90%, W、kW;

Q_{10} ——额定热功率和最低热功率之间(W、kW),从额定热功率减少了 90% 的低热功率水平下的热功率输出。这个值可能会大于额定热功率的 10%,应根据制造商规定,按每一不同发电系统类型的额定热功率和最低热功率计算;

Q_{min} ——最低热功率输出(回收热 Q_{HR}), kJ/s、W、kW;

T_{in} ——用户开始改变热功率输出的初始时点;

$T_{attenu90}$ ——额定热功率和最低热功率之间(W、kW),达到额定热功率减少 90% 的低热功率水平下的热功率输出在 $\pm 2\%$ 范围内的时点;

$T_{attenu90}$ ——达到额定热功率输出 90% 的 $\pm 2\%$ 以内的时点;

T_{down90} ——由 T_{in} 到 $T_{attenu90}$ 的时间, s;

T_{up90} ——由 T_{in} 到 $T_{attenu90}$ 的时间, s。

c) 热功率输出下降响应

应确认发电系统处于额定热功率输出的稳态运行条件下;

发送热功率下降到最低热功率负载的指令至发电系统的控制器;

发电系统根据这一控制信号减少热功率输出;

应测量和记录从热功率下降需求信号发出到达到最低热功率输出 $\pm 2\%$ 以内的响应时间。

d) 热功率输出上升响应

应确认发电系统处于最低热功率输出的稳态运行条件下;

发送热功率输出上升到额定热功率的指令至发电系统的控制器;

发电系统根据这一控制信号增加热功率输出;

应测量和记录从热功率上升需求信号发出到达到额定热功率输出 $\pm 2\%$ 以内的响应时间。

9.4 开机、关机特性试验

试验项目包括以下几项:

a) 启动时间(见 3.1.31);

b) 关机时间(见 3.1.28);

c) 启动能量(见 3.1.30)。

制造商应如 3.1.31 和 3.1.28 的定义,分别规定储能状态和待机状态的条件。附加信息见图 3。

上述 a) 和 b) 试验用于测量从启动或关机信号的发出到达到要求状态的时间。

上述 c) 试验,应测量启动期间的能量。应根据 7.3.1 和 7.3.3 中规定,在启动能量试验期间同时分别测量电功率输出和热功率输出。

9.5 吹扫气体消耗量试验

若吹扫气体由外部设备提供,则吹扫气体流量可根据 7.3.4 测量。

相关试验应根据以下步骤进行:

a) 分别测量下列条件下吹扫气体消耗量:

1) 冷态;

- 2) 启动;
- 3) 正常关机;
- 4) 紧急关机;
- 5) 储存状态。
- b) 启动期间吹扫气体消耗量的测量,应测量从启动程序开始瞬间到启动完成瞬间之间吹扫气体的使用量。
- c) 正常关机期间吹扫气体消耗量的测量,应测量从正常关机程序开始瞬间到关机完成瞬间之间吹扫气体的使用量。
- d) 紧急关机期间吹扫气体消耗量的测量,应测量从紧急关机程序开始瞬间到紧急关机完成瞬间之间吹扫气体的使用量。
- e) 储存状态吹扫气体消耗量的测量,应测量正常关机程或紧急关机完成后吹扫气体每小时的用量。

9.6 水消耗量试验

应在表 3 规定条件下根据 7.3.6 规定测量水消耗量 q_{vw} (m^3/s)。

试验期间,应测量和记录功率水平。

应测量和记录每次试验运行的持续时间。

应测量和记录每次试验进行过程中水的净消耗量。也应测量和记录系统中消耗或储存的水量。

9.7 废热试验

废热按下式计算:

$$Q_{WH} = q_{vfo} \times E_{fk} + q_{vao} \times E_{av} - (P_{out} - P_{in}) - Q_{HR}$$

式中:

- Q_{WH} ——废热,单位为千焦每秒(kJ/s);
- q_{vfo} ——参考条件下燃料的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);
- E_{fk} ——每单位体积燃料的输入能量,单位为千焦每立方米(kJ/m^3);
- q_{vao} ——参考条件下氧化剂(空气)的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);
- E_{av} ——每单位体积空气的输入能量,单位为千焦每立方米(kJ/m^3);
- P_{out} ——有效电功率输出,单位为千瓦(kW);
- P_{in} ——外部电源的有效电功率输入,单位为千瓦(kW);
- Q_{HR} ——回收热能,单位为千焦每秒(kJ/s)。

9.8 废气排放试验

9.8.1 概述

本试验程序是为了确定发电系统在以下条件下运行的排放特性:

- a) 按 7.3.7 中描述,在启动期间测量每一组分的峰值浓度;
- b) 按 7.3.7 中描述,在关机期间测量每一组分的峰值浓度;
- c) 按 7.3.7 中描述,在根据 8.1 和表 3 中规定的部分功率输出运行期间测量每一组分的量;
- d) 按 7.3.7 中描述,在额定功率输出期间测量每一组分的量。

应按 7.3.7、8.1 和表 3 规定,持续测量颗粒物、硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、总碳氢化合物和氢气的排放。应按 7.3.7.1、7.3.7.2 和 7.3.7.3 中规定分别测量废气温度、压力和流量。

9.8.2 排放计算

排放中指定气体组分的量应按下式计算：

$$q_{me}=q_{ve}\times\rho_e$$

式中：

q_{me} —— 废气中指定气体组分的质量流量,单位为千克每秒(kg/s)；

q_{ve} —— 测量的废气体积流量,单位为立方米每秒(m³/s)；

ρ_e —— 指定气体组分的质量浓度,单位为千克每立方米(kg/m³)。

应根据 ISO 7934,按照实际温度、压力和干/湿条件校正 ρ_e 值。

应测量和记录废气中氧的浓度。

9.9 可闻噪声级试验

应根据 7.3.9 和表 3 测量发电系统运行过程中(启动到关机)产生的噪声,以获得最大值。

应根据 ISO 3744 中规定进行背景噪声的校正。背景噪声级应为声级计读数的平均值。

应测量和记录校正后的最大噪声级、相应运行条件和输出功率水平。

9.10 振动级别试验

应按以下顺序描述的运行状态测量燃料电池发电系统产生的振动,按 7.3.10 确定最高振动级别。

- a) 应在发电系统非运行状态下测量背景振动级别；
- b) 应从冷态开始监控启动过程中的振动级别；
- c) 应测量功率逐渐增加直到额定负载过程中的振动级别；
- d) 应测量额定负载稳态下的振动级别；
- e) 应监控从额定负载关机后瞬变期间的振动级别；
- f) 应测量从关机开始到发电系统达到待机状态或冷态过程中的振动级别。

找出最高振动级别。

应测量和记录最高运行振动级别。也应测量和记录发电系统非运行时的背景振动级别,背景振动级别应为背景振动仪表读数的平均值。

应根据以下步骤对最高振动级别进行背景振动级别校正。

a) 计算记录的最高振动级别和背景振动级别之差,以分贝(dB)为单位。

b) 根据表 5 计算记录的最高振动级别的校正。

如果差值超过 9 分贝(dB)(最高振动级别超过背景 9 分贝以上),不必校正。

如果差值少于 3 分贝(dB),则对于可靠测量来说背景振动级别太高,应将其降低。

对于振动很低的系统,最高振动级别可能会低于 10 dB,对于这样的系统,也不必进行背景振动校正。

如果最高运行振动级别和非运行背景振动级别之差在 3 dB~10 dB 之间,使用表 5 对记录的最高振动级别进行校正计算。

表 5 振动校正系数

记录值的差/dB	3	4	5	6	7	8	9
校正值/dB	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1
10 dB 或以上的差值说明背景振动没有显著的影响,无需校正。							
3 dB 以下的差值说明对于可靠测量而言背景振动太高。							

9.11 排放水质量试验

根据 7.3.8 和表 3 进行排放水质量的测量。

10 试验报告

10.1 概述

试验报告应准确、清晰和客观的提供足够多的信息证明试验的所有目标都已达到。报告应包含第 7 条款中列出的所有信息。报告应有三种形式,摘要、详细和完整。每种形式的报告应包含同样的标题页和目录。根据本标准进行试验的发电系统,摘要报告将提供给有关各方。

10.2 标题页

标题页应介绍下列信息:

- a) 报告编号(可选);
- b) 报告形式(摘要、详细和完整);
- c) 报告作者;
- d) 试验执行单位;
- e) 报告日期;
- f) 试验地址;
- g) 试验名称;
- h) 试验日期和时间;
- i) 发电系统标识和制造商名称。

10.3 目录

每种类型的报告都应提供目录。

10.4 摘要报告

摘要报告应包括下列信息:

- a) 试验目的;
- b) 试验、仪器和设备的描述;
- c) 试验项目的顺序和日期,以及所有的试验结果;
- d) 每项试验结果的不确定度;
- e) 每项试验结果的置信度;
- f) 相应结论。

10.5 详细报告

详细报告应在摘要报告内容外增加下列信息:

- a) 发电系统的类型、规格、运行配置和说明试验边界的流程图;
- b) 仪器和设备的安排、布置和运行条件的描述;
- c) 仪器设备校准情况;
- d) 计算方式;
- e) 显示试验结果的表格和图形;
- f) 试验及其结果的讨论(如评论和记录)。

10.6 完整报告

完整报告应在详细报告内容外增加下列信息：

- a) 原始数据表复印件；
- b) 原始数据表应在测量数据中增加下列信息：
 - 1) 试验进行日期和时间；
 - 2) 用于试验的设备的型号和测量精度；
 - 3) 试验的环境条件；
 - 4) 试验执行者的姓名和资质；
 - 5) 完整和详细的不确定度分析；
 - 6) 燃料分析结果。

附录 A

(规范性附录)

不确定度分析

A.1 概述

当报告一个物理量的测量结果时,必须给出质量结果的定量化指标,以便使用者能评定其可靠性。因此,不确定度分析对于发电系统性能试验是必不可少的,不确定度可在试验前或试验后进行分析。

建议在试验前进行不确定度分析,以便在试验前采取纠正措施。这样或可以将不确定度减少至与试验的总体目标适当一致的程度,或可以降低不确定度试验时的试验成本。

试验后不确定度分析是强制性的。不确定度分析将使用试验数据来确定发电系统性能的不确定度。不确定度应由一个性能值来表示(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导,提供了电效率不确定度分析的例子,它仅起到示范作用,而不是一个明确的试验结果。使用本标准者应阅读、理解、参照 ISO/IEC 指南 98-3 中“测量中不确定度的表述”(GUM),以完成适当的不确定度分析。

本部分中的不确定度分析应按照 ISO/IEC 指南 98-3 进行。本附录给出了示例,但明确指导请参考 GUM。

A.2 准备

发电系统性能的不确定度(如电效率等)可通过各种参数的不确定度,以及发电系统性能计算。

每个参数的测量值是由实际值与总测量误差的和组成。总测量误差包含系统误差和随机误差。

参数的总不确定度是由系统误差和随机误差引起的不确定度组成。

为使发电系统性能的不确定度最小化,应尽量减少参数的不确定度,系统不确定度和随机不确定度,误差不确定度。

为使系统不确定度最小化,建议使用高精度仪器。本标准中,仪器精度(不确定度校准)被直接视为系统不确定度,必须认真选择仪器。

为使随机不确定度最小化,应研究试验程序、试验条件和数据采集方法。估计随机不确定度可达标准偏差的 2 倍(95%覆盖率,2SD)。性能试验前,必须仔细编制试验计划。

参数测量应尽可能同时进行。使用自动设备将有助于确保数据同时采集,性能试验中试验条件应处于稳态。

性能试验前,应通过预试验验证测量的波动(短波动和长波动)以及稳态试验条件。稳态的定义在 8.1c)。试验时间应根据长波动参数测量确定,试验时间应至少包括一个长波动周期。

试验期间,每个参数应测量至少 30 个独立的数据组,以求得数据的标准偏差。每个数据组应是测量值的平均值(如对电压的测量),或将一个累积量除以试验时间(如燃料的流量)。

为保证数据点的独立性,要求稳态测量的数据组之间时间间隔最少 1 min。对于瞬变测量,为尽可能得到最佳的精确性,需要更频繁采样。

A.3 基本假设

本附录中的指南基于 IEC/ISO 指南 98-3。本指南对于发电系统使用是简化的。假定使用情况与设计一致,且试验性能与本标准能得到很好的吻合。

基本假设包括：

假定所有系统不确定度来源是正态分布，估计 95% 覆盖率为 2σ 。本标准中，系统不确定度定义为校准不确定度或仪器精度，以 B 表示。

所有参数采集至少 30 个独立数据点。如果一个或多个参数少于 30 个独立数据点，需要附加计算。在该情况下，请查阅 GUM。

假定所有随机不确定度来源是正态分布，估计确信 95% 覆盖率为测量的 $2S_x$ 。

总不确定度 U_{95} 由系统不确定度 B 和随机不确定度 S_x 按下式计算：

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

或：

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

A.4 通用程序

以下为逐步计算过程：

- a) 确定试验步骤。
 - 1) 审查试验目的和试验持续时间。
如果必要，应进行一个预试验来决定试验运行时间。
 - 2) 列出所有的独立测量参数及其标称值。
 - 3) 列出会影响各个参数的所有校准和仪器设置。确定检查系统组件测量中可能同时影响两个或更多测量值的不确定度（相关不确定度）。
 - 4) 定义独立测量参数和试验结果之间的函数关系（如本标准内容中给出的定义发电系统性能计算公式）。
- b) 列出基本不确定度来源：列出所有参数的所有可能试验不确定度来源的完整的、详尽的清单。
- c) 各个参数绝对的系统不确定度的计算或规定。
 - 1) 绝对系统不确定度 (B_i) 是通过各个参数的标称值乘以仪器校准精度计算。
 - 2) 绝对随机不确定度 ($2S_{xi}$) 相当于参数标准偏差的两倍。
- d) 各个参数系统和随机不确定度的传递。
 - 1) 独立参数的系统和随机不确定度分别按下式路径传递至最终结果。
 - 2) 需要计算灵敏度系数 θ_i ，通过微分或根据上述 d)1) 定义的函数关系用计算机微扰计算。

$$B_R = [\sum (\theta_i \times B_{Ri})^2]^{1/2}$$
$$2S_R = [\sum (\theta_i \times 2S_{Ri})^2]^{1/2}$$

式中：

B_R —— 结果的系统不确定度分量；

$2S_R$ —— 结果的随机不确定度分量。

- e) 总不确定度计算。
按下式计算不确定度，总不确定度通过系统和随机不确定度结合计算得到。

$$U_{95} = [(B_R)^2 + (2S_R)^2]^{1/2}$$

- f) 按第 9 章准备试验报告。

A.5 计算示例

A.5.1 电效率的不确定度计算

A.5.1.1 测量程序描述

本示例主要介绍电效率计算。系统为一个 1 kW 的质子交换膜燃料电池发电系统，从电网为辅助

负载以及燃料输入 0.1 kW 电功率。系统使用城市燃气作为燃料,输出 1.1 kW 的电功率,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)常温、常压。

用精密质量流量计测量燃料流量,使用在线采样计算燃料的低热值,用 kW·h 功率表测量电输出和电输入。

试验运行时间应考虑参数的长波动测量确定。试验运行时间应包括 5 个长波动周期。在试验运行期间,各个参数需测量 30 个测量值,一共测量 60 组,每一组测量间隔 1 min,每一个用于计算性能的参数值是这 30 个测量值的 60 组的平均值。所有独立测量参数和 30 个测量值 60 组的总平均值的标称值列于表 A.1 中。根据表 A.2 中参数计算的结果列于表 3 中。

由于空气功率输入非常小,其测量被省略;本示例中没有机械功输入和辅助热功率输入。

根据 9.2.5.1,电效率 η_e 定义如下:

$$\eta_e = [P_n / Q_m] \times 100\%$$

式中:

$P_n = P_{out} - P_m$, 见 9.2.4.1.2;

$Q_m = Q_{inf} + Q_{in} + W_{st} + Q_{st}$, 见 9.2.3.6;

由于本例中空气功率输入、机械功和辅助热功率被省略了, Q_m 可以简化为:

$Q_m = Q_{inf} = (q_{vfo} \cdot E_{fv})$, 见 9.2.3.1.2.1;

因此, η_e 可表示为:

$$\eta_e = [(P_{out} - P_m) / (q_{vfo} \times E_{fv})] \times 100\%$$

式中:

P_{out} —— 平均电功率输出;

P_m —— 平均辅助电功率输入;

q_{vfo} —— 参考条件下燃料的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

E_{fv} —— 单位体积燃料的输入能量,单位为千焦每立方米(kJ/m^3)。

q_{vfo} (m^3/s)按下式计算:

$$q_{vfo} = q_{vf} \times (288.15 / t_f) \times (p_f / 101.3)$$

式中:

q_{vf} —— 平均温度 t_f 、平均压力 p_f 下燃料的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s)。

q_{vfo} —— 参考条件下燃料的平均体积流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

t_f —— 试验期间燃料的平均温度;

p_f —— 试验期间燃料的平均压力。

燃料的输入能量 E_{fv} (kJ/m^3)按下式计算:

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

式中:

Q_{fo} —— 参考条件下燃料的热值,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_f —— 平均温度 t_f 下燃料的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

h_{fo} —— 参考温度 t_o 下燃料的比焓,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

E_{pf} —— 燃料的压力能,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

M_0 —— 理想气体的参考摩尔体积, $2.3645 \times 10^{-2} m^3/mol$ (参考温度 288.15 K)。

燃料热值 Q_{fo} (kJ/mol), 参考条件下按下式计算:

$$Q_{fo} = \sum_{j=1}^N x_j \cdot Q_{foj}$$

式中:

Q_{foj} —— 参考温度 t_o 下组分 j 的热值,单位为千焦每摩尔(kJ/mol);

x_j ——组分 j 的摩尔浓度；
 j ——燃料的一个组分；
 N ——燃料气体的组分数量。

注： $Q_{\text{R},i}$ 的数值在表 B.1 中。

燃料的比焓 h_i (kJ/mol)，按下式计算：

$$h_i = \sum_{j=1}^N X_j \cdot h_{ij}$$

式中：

h_{ij} ——平均温度 t_i 下组分 j 的比焓，单位为千焦每摩尔(kJ/mol)；
 x_j ——组分 j 的摩尔浓度。

h_{ij} (kJ/mol)按下式计算：

$$h_{ij} = [A_j \times t_i + (B_j/2\ 000) \times t_i^2 + (C_j/3 \times 10^6) \times t_i^3] \times 10^{-3}$$

式中：

A_j, B_j 和 C_j ——组分 j 的常数，见附录 B 中工作表 1；
 t_i ——试验条件下燃料的温度，单位为开尔文(K)。

注：参考温度下燃料 h_{i0} (kJ/mol)的比焓用 t_0 代替 t_i 用上式计算 h_{i0} 。

燃料压力能 E_{pi} (kJ/mol)，按下式计算：

$$E_{pi} = R \times t_0 \times \ln(p_i/p_0)$$

式中：

R ——通用气体常数(8.314 J/mol·K)
 t_0 ——参考温度(288.15 K)；
 p_0 ——参考压力(101.325 kPa)；
 p_i ——燃料压力，单位为千帕(kPa)。

表 A.1 测量参数汇总及其标称值

参数 P_i	说 明	单位	标称值
$q_{v,i}$	温度 t_i 和压力 p_i 下燃料的体积流量	m ³ /s	6.6E-05
t_i	燃料温度	K	298.15
p_i	燃料压力	kPa	110
燃料组分(13A)	甲烷	%	88
燃料组分(13A)	乙 烷	%	6
燃料组分(13A)	丙 烷	%	5
燃料组分(13A)	丁 烷	%	2
P_{out}	电功率输出	kW	1.10
P_{in}	用于辅助负载等的电功率输入	kW	0.10

表 A.2 计算结果的标称值

计算结果	说明	单位	标称值
$q_{v,r}$	参考条件下燃料的体积流量	m ³ /s	6.9E-05
$Q_{F,r}$	参考条件下燃料的热值(低热值,LHV)	kJ/mol	926.4

表 A.2 (续)

计算结果	说明	单位	标称值
h_t	温度 t_t 下燃料的比焓	kJ/mol	7.969
h_b	参考温度下燃料的比焓	kJ/mol	7.583
E_{pf}	燃料的压能	kJ/mol	0.203 6
E_{fc}	燃料的输入能量	kJ/m ³	39 203.2
η	电效率	%	37.0

A.5.1.2 列出基本误差来源

基本误差来源可以根据判断、预试验数据计算,或用试验室校正计算来估计,表 A.3 中给出了示例程序中各种参数的基本误差来源。

表 A.3 各种参数的基本误差源

参数 P_i	说明	单位	标称值	基本误差源
q_{vf}	温度 t_f 和压力 p_f 下燃料的体积流量	m ³ ·s	6.6E-05	仪表校准误差,随机误差
t_f	燃料温度	K	298.15	温度计校准误差,温度传感器标定误差,回路校准误差,随机误差
p_f	燃料压力	kPa	110	压力计校准误差,压力传感器标定误差,回路校准误差,随机误差
燃料组分 (13A)	甲烷	%	88	取样误差,实验室分析误差,列表数据误差,质谱仪校准误差,随机误差
燃料组分 (13A)	乙烷	%	6	取样误差,实验室分析误差,列表数据误差,质谱仪校准误差,随机误差
燃料组分 (13A)	丙烷	%	5	取样误差,实验室分析误差,列表数据误差,质谱仪校准误差,随机误差
燃料组分 (13A)	丁烷	%	2	取样误差,实验室分析误差,列表数据误差,质谱仪校准误差,随机误差
P_{out}	电功率输出	kW	1.10	仪表校准误差,回路校准误差,随机误差
P_{in}	用于辅助负载的输入电功率	kW	0.10	仪表校准误差,回路校准误差,随机误差

A.5.1.3 各个参数系统和随机不确定度计算或规定

不确定度的类型一共有以下两种。

a) 系统不确定度

大部分系统不确定度是由校准误差引起的,所以对于已知校准不确定度的那些仪器可以以此来判定绝对系统不确定度。对于校准是满量程±1%的仪器或设备回路,其绝对不确定度就是用其满量程读数乘以 0.01 来计算。对于校准不确定度为读数±1%的仪器,其绝对不确定度的计算就是以标称读数乘以 0.01。不同的校准不确定度需要输入不同的数据。

绝对系统不确定度(B_i)通过表 A.4 中的每个参数的标称值乘以校准精度计算。

b) 随机不确定度

随机不确定度估值相当于参数测量值标准偏差的两倍。

参数的标准偏差(S_{xi})通过试验运行期间的 30 个测量值 60 组的总平均值来计算。

表 A.4 中绝对随机不确定度($2S_{xi}$)相当于标准偏差的两倍。 σ 是标准偏差,单位为百分数。

对于试验后分析,应采用实际标准偏差。如果随机不确定度太大,增加试验时间和增加数据点将降低标准偏差值。

表 A.4 绝对系统不确定度(B_i)和绝对随机不确定度($2S_{xi}$)

参数 P_i	说明	单位	标称值	基本误差源	计算值	绝对系统 不确定度 (B_i)	σ (S_{xi})	绝对随机 不确定度 ($2S_{xi}$)
q_{sc}	温度为 t_f 和压力 为 p_f 时燃料的 体积流量	m ³ ·s	6.6E-05	仪表校准误差,随机误差	0.010	6.58E-07	0.010	1.32E-6
t_f	燃料温度	K	298.15	温度计校准误差,温度传 感器标定误差,回路校准 误差,随机误差	—	1.00E+00	0.015	2.00E+00
p_f	燃料压力	kPa	110	压力计校准误差,压力传 感器标定误差,回路校准 误差,随机误差	0.005	5.50E-01	0.001	2.20E-01
燃料组分 (13A)	甲烷	%	88	取样误差,实验室分析误 差,列表数据误差,质谱 仪校准误差,随机误差	0.005	4.40E-01	0.001	1.76E-01
燃料组分 (13A)	乙烷	%	6	取样误差,实验室分析误 差,列表数据误差,质谱 仪校准误差,随机误差	0.005	2.90E-02	0.001	1.16E-02
燃料组分 (13A)	丙烷	%	5	取样误差,实验室分析误 差,列表数据误差,质谱 仪校准误差,随机误差	0.005	2.25E-02	0.001	9.00E-03
燃料组分 (13A)	丁烷	%	2	取样误差,实验室分析误 差,列表数据误差,质谱 仪校准误差,随机误差	0.005	8.50E-03	0.001	3.40E-03
P_m	电功率输出	kW	1.10	仪表校准误差,回路校准 误差,随机误差	0.005	5.50E-03	0.001	2.20E-03
P_m	用于辅助负载等 的电功率输入	kW	0.10	仪表校准误差,回路校准 误差,随机误差	0.005	5.00E-04	0.001	0.000 2

A.5.1.4 各个参数的系统不确定度和随机不确定度的传递

独立参数的系统不确定度和随机不确定度分别逐步传递到最终结果。为正确计算各种不确定度传递,应计算每个参数 P_i 的各种灵敏度系数 θ_i 。一个特定参数的灵敏度系数计算或者通过参数在结果中的偏微分计算(如效率),或者通过使用每个独立参数微小变化确定试验结果的变化来进行数据域计算机微扰计算。本示例采用第二种办法。参数变化在 0.000 1%。每个参数的系统不确定度和随机不确定度应根据下式乘以合适的灵敏度系数。

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

式中：

- B_{Pi} —— 参数 P_i 的绝对系统不确定度；
- S_{Pi} —— 参数 P_i 的平均绝对标准偏差；
- B_R —— 结果的系统不确定度分量；
- $2S_R$ —— 结果的随机不确定度分量；
- θ_i —— 参数 P_i 的灵敏度系数；
- $(\theta_i \cdot B_{Pi})^2$ —— 绝对系统不确定度对参数 P_i 的影响；
- $(\theta_i \cdot 2S_{Pi})^2$ —— 绝对随机不确定度对参数 P_i 的影响。

参数 P_i 的灵敏度系数见表 A. 5。

系统不确定度 B_R 和随机不确定度 $2S_R$ 的传递见表 A. 6。

A. 5. 1. 5 总不确定度计算

结果的总绝对不确定度是结合绝对系统不确定度和绝对随机不确定度按以下方式计算得出。
总绝对不确定度的计算结果：

$$U_{R95} = \sqrt{B_R^2 + (2S_R)^2}$$

式中：

- B_R —— 系统不确定度分量传递的结果；
 - $2S_R$ —— 随机不确定度分量传递的结果。
- 电效率 U_{R95} 的百分比不确定度可由总绝对不确定度除以电效率标称值获得。
 U_{R95} 的总绝对不确定度和电效率的 U_{R95} 的百分比不确定度如表 A. 7 所示。

A. 5. 1. 6 根据第 9 章准备报告

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：4.7%。
见表 A. 7。

表 A.5 参数 P_i 灵敏度系数

参数灵敏度		q_{ef}	t_i	P_i	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	P_{out}	P_m
参数 P_i	基值	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta
q_{ef}	0.0000E+00	2.3672E-07	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
t_i	0.0000E+00	0.0000E+00	2.9815E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
P_i	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1000E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
甲烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.8000E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
乙烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.8000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
丙烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.5000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
丁烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.7000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00
P_{out}	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1000E-06	0.0000E+00
P_m	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E-07
计算结果	η Nom	η + Delta	η + Delta	η + Delta	η + Delta	η + Delta	η + Delta	η + Delta	η + Delta	η + Delta
q_{ef}	0.2484	0.2484	0.2484	0.2484	0.2484	0.2484	0.2484	0.2484	0.2484	0.2484
Q_{in}	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4
h_i	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969
h_{in}	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583
E_{ef}	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036
E_{in}	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2
η	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0
绝对灵敏度 θ_i		3.1031E+02	-3.3154E-04	7.9858E-02	3.8214E-01	5.7447E+00	7.8138E+00	2.1744E+01	7.0568E+01	3.3268E+02

表 A.6 系统不确定度(B_R)和随机不确定度($2S_R$)的传递

参数 P_i	说明	单位	标称值	基本误差源	计算值	绝对系统不 确定度(B_i)	$\sigma(S_{R_i})$	绝对随机不 确定度($2S_{R_i}$)	绝对灵敏度 (θ_i)	绝对系统不 确定度影响 ($B_i \cdot \theta_i$) ²	绝对随机不 确定度影响 ($2S_{R_i} \cdot \theta_i$) ²
q_v	温度为 t_1 , 压力为 p_1 时燃料的体积流量	m ³ /s	6.58E-05	仪表校准误差, 随机误差	0.01	6.58E-07	0.010	1.32E-06	1.1171E+06	5.3959E-01	2.1584E+00
t_1	燃料温度	K	298.15	温度计校准误差, 温度传 感器标定误差, 回路校准 误差, 随机误差		1.00E+00	0.015	2.00E+00	-3.3154E-04	1.0992E-07	4.3966E-07
p_1	燃料压力	kPa	110	压力计校准误差, 压力传 感器标定误差, 回路校准 误差, 随机误差	0.005	5.50E-01	0.001	2.20E-01	7.9858E-02	1.9291E-03	3.0866E-04
燃料组分 (13A)	甲烷	%	88	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	4.40E-01	0.001	1.76E-01	3.8214E-01	2.8271E-02	4.5234E-03
燃料组分 (13A)	乙烷	%	6	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	2.90E-02	0.001	1.16E-02	5.7447E+00	2.7755E-02	4.4407E-03
燃料组分 (13A)	丙烷	%	5	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	2.25E-02	0.001	9.00E-03	7.8138E+00	3.0909E-02	4.9451E-03
燃料组分 (13A)	丁烷	%	2	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	8.50E-03	0.001	3.40E-03	2.1744E+01	3.4159E-02	5.4654E-03
P_{out}	电功率输出	kW	1.10	仪表校准误差, 回路校准 误差, 随机误差	0.005	5.50E-03	0.001	2.20E-03	7.0568E+01	1.5064E-01	2.4102E-02
P_m	辅助负载等的 电功率输入	kW	0.10	仪表校准误差, 回路校准 误差, 随机误差	0.005	5.00E-04	0.001	0.0002	3.6964E+01	3.4159E-04	5.4654E-05

表 A.6 (续)

参数 P_i	说明	单位	标称值	基本误差源	计算值	绝对系统不 确定度(B_i)	$\sigma(S_{\text{in}})$	绝对随机不 确定度($2S_{\text{in}}$)	绝对灵敏度 (θ_i)	绝对系统不 确定度影响 ($B_i \cdot \theta_i$)	绝对随机不 确定度影响 ($2S_{\text{in}} \cdot \theta_i$)
计算结果	说明	单位	标称值								
q_{in}	参考条件下燃料的 体积流量	m^3/s	6.90E-05								
Q_{in}	参考条件下燃料 的热值	kJ/mol	926.4								
h_1	温度 t_1 下燃料的比焓	kJ/mol	7.969								
h_6	参考温度下燃料 的比焓	kJ/mol	7.583								
E_{p}	燃料的压力能	kJ/mol	0.2036								
E_{in}	燃料的输入能量	kJ/m^3	39203.2								
η	电效率	%	37.0								
									$\sum(\theta_i \cdot B_i)$ (L)	绝对系统不 确定度影响 ($B_i \cdot \theta_i$)	绝对随机不 确定度影响 ($2S_{\text{in}} \cdot \theta_i$)
									$\sum(\theta_i \cdot 2S_{\text{in}})$ (R)	8.1359E-01	2.2022E+00
									$B_{\text{in}}(\text{L}), 2S_{\text{in}}(\text{R})$	9.0199E-01	1.4810E+00

表 A.7 U_{R95} 总绝对不确定度和电效率的 U_{R95} 的百分比不确定度

参数 P_i	说明	单位	标称值	基本误差源	计算值	绝对系统不 确定度(B_i)	$\sigma(S_{\text{R}})$	绝对随机不 确定度($2S_{\text{R}})$	绝对灵敏度 (θ_i)	绝对系统不 确定度影响 ($B_i \cdot \theta_i$)	绝对随机不 确定度影响 ($2S_{\text{R}} \cdot \theta_i$)
q_v	温度为 t_1 、压力为 p_1 时燃料的体积流量	m^3/s	$6.58\text{E}-05$	仪表校准误差, 随机误差	0.01	$6.58\text{E}-07$	0.010	$1.32\text{E}-06$	$1.1171\text{E}+06$	$5.3959\text{E}-01$	$2.1584\text{E}+00$
t_1	燃料温度	K	298.15	温度计校准误差, 温度传 感器标定误差, 回路校准 误差, 随机误差		$1.00\text{E}+00$	0.015	$2.00\text{E}+00$	$-3.3154\text{E}-01$	$1.0992\text{E}-07$	$4.3966\text{E}-07$
p_1	燃料压力	kPa	110	压力计校准误差, 压力传 感器标定误差, 回路校准 误差, 随机误差	0.005	$5.50\text{E}-01$	0.001	$2.20\text{E}-01$	$7.9858\text{E}-02$	$1.9291\text{E}-03$	$3.0866\text{E}-01$
燃料组分 (13A)	甲烷	%	88	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	$4.10\text{E}-01$	0.001	$1.76\text{E}-01$	$3.8211\text{E}-01$	$2.8271\text{E}-02$	$4.5234\text{E}-03$
燃料组分 (13A)	乙烷	%	6	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	$2.90\text{E}-02$	0.001	$1.16\text{E}-02$	$5.7417\text{E}+00$	$2.7755\text{E}-02$	$4.4107\text{E}-03$
燃料组分 (13A)	丙烷	%	5	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	$2.25\text{E}-02$	0.001	$9.00\text{E}-03$	$7.8138\text{E}+00$	$3.0909\text{E}-02$	$1.9454\text{E}-03$
燃料组分 (13A)	丁烷	%	2	取样误差, 实验室分析误 差, 列表数据误差, 质谱 仪校准误差, 随机误差	0.005	$8.50\text{E}-03$	0.001	$3.40\text{E}-03$	$2.1741\text{E}+01$	$3.4159\text{E}-02$	$5.1654\text{E}-03$
P_{out}	电功率输出	kW	1.10	仪表校准误差, 回路校准 误差, 随机误差	0.005	$5.50\text{E}-03$	0.001	$2.20\text{E}-03$	$7.0568\text{E}+01$	$1.5064\text{E}-01$	$2.4102\text{E}-02$
P_{in}	辅助负载等的 电功率输入	kW	0.10	仪表校准误差, 回路校准 误差, 随机误差	0.005	$5.00\text{E}-01$	0.001	0.0002	$3.6964\text{E}+01$	$3.4159\text{E}-01$	$5.1654\text{E}-05$

表 A.7 (续)

参数 P_i	说明	单位	标称值	基本误差源	计算值	绝对系统不 确定度(B_i)	$\sigma(S_{N_i})$	绝对随机不 确定度($2S_{N_i}$)	绝对灵敏度 (θ_i)	绝对系统不 确定度影响 ($B_i \cdot \theta_i$)	绝对随机不 确定度影响 ($2S_{N_i} \cdot \theta_i$)
计算结果	说明	单位	标称值								
q_{LHV}	参考条件下燃料的 体积流量	$m^3 \cdot s$	6.90E-05								
Q_R	参考条件下燃料 的热值	kJ/mol	926.4								
h_R	温度 T_R 下燃料的比焓	kJ/mol	7.969								
h_{RP}	参考温度下燃料 的比焓	kJ/mol	7.583								
E_{ref}	燃料的压力能	kJ/mol	0.2036								
E_N	燃料的输入能量	kJ/m	39203.2								
η	电效率	%	37.0								

总绝对不确定度 ($U_{R,i}$)	百分比不确定度 ($U_{R,i}^{\%}$)
1.7	1.7%

表 A.7 (续)

参数灵敏度		q_{cl}	t_i	P_i	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	P_{out}	P_m
参数 P_i	基值	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta	0.0001%Delta
q_{cl}	0.0000E+00	6.5755E-11	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
t_i	0.0000E+00	0.0000E+00	2.9815E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
P_i	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
甲烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	8.8000E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
乙烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	5.8000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
丙烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.5000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
丁烷	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.7000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00
P_{out}	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1000E-06	0.0000E+00
P_m	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	1.0000E-07
计算结果	η Nom	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$	$\eta_c + \text{Delta}$
q_{ev}	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Q_{ev}	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4	926.4
h_i	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969	7.969
h_o	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583	7.583
E_{rel}	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036	0.2036
E_i	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2	39203.2
η	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0
绝对灵敏度 θ_i		1.1171E+06	-3.3154E-04	7.9858E-02	3.8214E-01	5.7447E+00	7.8138E+00	2.1711E+01	7.0568E+01	3.3268E+02

附 录 B
(规范性附录)
燃料热值的计算

气体燃料的组分热值见表 B.1。

表 B.1 气体燃料的组分热值

序号	组 分	摩尔低热值 kJ/mol	摩尔高热值 kJ/mol	质量低热值 MJ/kg	质量高热值 MJ/kg
1	甲烷	802.69	891.56	50.035	55.574
2	乙烷	1 428.84	1 562.14	47.52	51.95
3	丙烷	1 000	2 221.10	46.34	50.37
4	正丁烷	2 657.69	2 879.76	45.72	49.55
5	2-甲基丙烷	2 648.42	2 870.58	45.57	49.39
6	正戊烷	3 272.00	3 538.60	45.35	49.04
7	2-甲基丁烷	3 265.08	3 531.68	45.25	48.95
8	2,2-二甲基丙烷	3 250.83	3 517.43	45.06	48.75
9	正己烷	3 887.21	4 198.24	45.11	48.72
10	2-甲基戊烷	3 879.59	4 190.62	45.02	48.43
11	3-甲基戊烷	3 882.19	4 193.22	45.05	48.66
12	2,2-二甲基丁烷	3 869.80	4 180.83	44.91	48.51
13	2,3-二甲基丁烷	3 877.57	4 188.60	45.00	48.60
14	正庚烷	4 501.72	4 857.18	44.93	48.47
15	正辛烷	5 116.11	5 516.01	44.79	48.29
16	正壬烷	5 731.49	6 175.82	44.69	48.15
17	正癸烷	6 346.14	6 834.90	44.60	48.04
18	乙烯	1 323.24	1 412.11	47.17	50.34
19	丙烯	1 926.13	2 059.43	45.77	48.94
20	1-丁烯	2 540.97	2 718.70	45.29	48.46
21	顺-2-丁烯	2 534.20	2 711.90	45.17	48.33
22	反-2-丁烯	2 530.50	2 708.30	45.10	48.27
23	2-甲基丙烯	2 524.30	2 702.00	44.99	48.16
24	1-戊烯	3 155.59	3 377.75	44.99	48.16
25	丙二烯	1 855.09	1 943.96	46.30	48.52
26	1,2-丁二烯	2 461.82	2 595.12	45.51	47.98
27	1,3-丁二烯	2 408.80	2 542.10	44.53	47.00
28	乙炔	1 256.94	1 301.37	48.27	49.98

表 B.1 (续)

序号	组 分	摩尔低热值 kJ/mol	摩尔高热值 kJ/mol	质量低热值 MJ/kg	质量高热值 MJ/kg
29	环戊烷	3 100.03	3 322.19	44.20	47.37
30	甲基环戊烷	3 705.86	3 912.46	44.03	47.20
31	乙基环戊烷	4 320.92	4 631.95	44.01	47.17
32	环己烷	3 689.42	3 956.02	43.84	47.01
33	甲基环己烷	4 293.06	4 604.09	43.72	46.89
34	乙基环己烷	4 911.49	5 266.95	43.77	46.94
35	苯	3 169.56	3 302.86	40.58	42.28
36	甲苯	3 772.08	3 949.81	40.94	42.87
37	乙苯	4 387.37	4 609.53	41.33	43.42
38	O-二甲苯	4 376.48	4 598.64	41.22	43.31
39	甲醇	676.22	765.09	21.1	23.88
40	甲硫醇	1 151.41	1 240.28	23.93	25.78
41	氢气	241.72	286.15	119.91	141.95
42	水	0.00	44.4333	0	2.47
43	硫化氢	517.95	562.38	15.2	16.5
44	氨水	316.86	383.51	18.61	22.52
45	氰化氢	649.50	671.70	24.03	24.85
46	一氧化碳	282.91	282.91	10.1	10.1
47	硫化碳	548.15	548.15	9.12	9.12
48	二硫化碳	1 104.32	1 104.32	14.5	14.5
注：这些值摘自 ISO 6976:1995 Corrigendum3:1999 中表 3 和表 4。					

燃料气体能量计算工作表见工作表 1。空气能量的计算工作表见工作表 2。

工作表 1 燃料气体能量计算工作表

燃料温度 t_f : 293 K (1)										
燃料压力 p_f : 103.325 kPa (2)										
组分	燃料组分 (mol %) (3)	气体组分热 值(kJ·mol) (4) ^a	燃料组分 热值 $Q_{R,i}$ (kJ·mol) (5)	气体组分 常数 A ^b (2)	气体组分 常数 B	气体组分 常数 C	参考温度下每种 燃料组分的比焓 (kJ·mol)(6)	参考温度下燃料 的比焓 $h_{R,i}$ (kJ·mol) (3) × (6) × 10 ⁻²	温度 t_f 下每种燃 料组分的比焓 (kJ·mol)(8)	参考温度 t_f 下燃 料的比焓 h_i (kJ·mol) (3) × (8) × 10 ⁻²
氮气	0.00	0.00	0.00	27.016	5.812	-0.289	8.0236	0.00	8.16	0.00
氧气	0.00	0.00	0.00	25.594	13.251	-4.205	7.8915	0.00	8.03	0.00
一氧化碳	0.00	282.91	0.00	26.537	7.6831	-1.1719	7.9561	0.00	8.10	0.00
甲烷	88.00	802.69	706.37	14.146	75.496	-17.991	7.0669	6.22	7.23	6.37
乙烷	5.80	1428.84	82.87	9.401	159.833	-46.229	8.9757	0.52	9.23	0.54
丙烷	4.50	2043.37	91.95	10.083	239.304	-73.358	12.2551	0.55	12.61	0.57
丁烷	1.70	2657.60	45.18	18.631	302.378	-92.943	17.1806	0.29	17.66	0.30
氢气	0.00	241.72	0.00	29.062	-0.820	1.9903	8.3560	0.00	8.50	0.00
水	0.00	0.00	0.00	30.204	9.933	1.117	9.1246	0.00	9.29	0.00
合计			(5) 926.37					(7) 7.58		(9) 7.77

^a 参考 ISO 6976。

^b 参考 JANAF 热化学表 D. R. Stull, H. Prophet Published by NSRDS-NBS 37 (1965,1971)。

^c $E_{R,i} = [A \times 288.15 + (B/2)/10^3 \times 288.15^2 + (C/3)/10^6 \times 288.15^3] \times 10^{-3}$ 。

^d $E_{R,i} = [A \times (1) + B/2/10^3 \times (1)^2 + C/3/10^6 \times (1)^3] \times 10^{-3}$ 。

热值($Q_{R,i}$):

温度 t_f 下燃料的比焓(h_i):

参考温度下燃料的比焓($h_{R,i}$):

燃料的压力能($E_{R,i}$) = $8.314 \times 10^{-3} \times 288.15 \times \ln[(2)/(101.325)]$

单位体积摩尔燃料的输入能量(E_i) = $Q_{R,i} + h_i - h_{R,i} + E_{R,i} = (5) + (9) - (7) + (10)$

926.37	kJ/mol	(5)
7.77	kJ/mol	(9)
7.58	kJ/mol	(7)
0.05	kJ/mol	(10)
926.61	kJ/mol	

工作表 2 空气能量的计算工作表

空气温度 t_a :	<u>300</u> K(1)				
空气压力 p_a :	<u>103.325</u> kPa(2)				
组分	空气常数 A^a	空气常数 B	空气常数 C	参考温度下空气的比焓 ($h_{a,r}$)kJ/mol (3)	温度 t_a 下空气的比焓 (h_a)kJ/mol (4)
				E_{q1}^b	E_{q2}^c
空气	27.434	6.180	-0.8987	8.1545	8.5002

^a 参考 JANAF 热化学表 D. R. Stull, H. Prophet published by NSRDS-NBS 37(1965, 1971)。

^b $E_{q1} = [A \times 288.15 + (B/2)/10^3 \times 288.15^2 + (C/3)/10^6 \times 288.15^3] \times 10^{-3}$ 。

^c $E_{q2} = [A \times (1) + (B/2) \times 10^3 \times (1)^2 + (C/3) \times 10^6 \times (1)^3] \times 10^{-3}$ 。

温度 t_a 下空气的比焓 (h_a):	<u>8.50</u>	kJ/mol	(4)
参考温度下空气的比焓 ($h_{a,r}$):	<u>8.15</u>	kJ/mol	(3)
氧化剂(空气)的压力能 ($E_{p,a}$) = $8.314 \times 10^{-4} \times (1) \times \ln[(2)/101.325]$	<u>0.05</u>	kJ/mol	(5)

每摩尔空气的输入能量 (E_a) = $h_a - h_{a,r} + E_{p,a} = (4) - (3) + (5)$

0.40 kJ/mol

附 录 C
(规范性附录)
参 考 气 体

C.1 概述

本部分提供的参考气体表允许用户比较自己天然气的测量数据和制造商公布的天然气的测量数据。当制造商和越来越多的用户使用同样设备测量不同的天然气(并公布试验结果)时,可逐步建立起一个用于区分不同天然气调整系数的数据库。最终新用户应能够根据其自己使用的天然气组分结构最接近的参考气体,找到调整系数校正公布的性能参数。

C.2 天然气和丙烷气体的参考气体

- a) 表 C.1 提供了 14 种天然气的参考气体,表 C.2 提供了 17 种丙烷的参考气体。
- b) 当使用试验气体时,应在试验报告中说明与其最接近的参考气体。
- c) 天然气和丙烷气体的配送系统通常含有各种有异味的硫化物。

主要的硫化物:四氢噻吩、硫化氢(H_2S)、二乙硫醚(DES)、甲乙硫醚(MES)、甲硫醚(DMS)、甲硫醇(MM)、异丙硫醇(IPM)、叔丁硫醇(TBM)、异丁基硫醇(IBM)、丁硫醇(SBM)等。

表 C.1 天然气参考气体

项目	A1	A2	G25	B1	B2	G26	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2	N1	N2	N4	N5	K4	J1	J2	J3	J1	G1	G2
甲烷 CH ₄	66.2	67.2	86.0	63.0	82.4	100.0	65.1	74.9	75.6	97.2	88.9	71.7	92.0	85.70	90.65	90.50	90.35	89.57	90.0	89.6	88.9	87.5	89.2	83.4	72.0
乙烷 C ₂ H ₆	5.0	1.7	0.0	11.7	0.0	0.0	8.3	3.3	11.7	0.0	10.0	15.0	1.7	13.3	4.0	4.0	4.0	5.0	6.0	5.6	6.8	5.9	4.6	6.7	13.3
丙烷 C ₃ H ₈	0.7	3.3	0.0	2.0	0.0	0.0	4.0	3.3	0.7	1.3	0.0	2.7	6.0	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	3.4	3.1	5.3	2.7	4.7	5.3
丁烷 C ₄ H ₁₀	0.2	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	1.0	0.5	0.2	0.0	0.3	0.2	0.2	n-0.3 i-0.3	n-0.3 i-0.3	n-0.15 i-0.3	n-0.3 i-0.3	n-0.2 i-0.2	1.4	1.2	1.2	3.4	1.5	1.3
戊烷 C ₅ H ₁₂															neo-0.0 n-0.1 i-0.1	neo-0.0 n-0.15 i-0.15	neo-0.15 n-0.15 i-0.15	neo-0.1 n-0.1 i-0.1	neo-0						
己烷及 以上	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.03	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4
二氧化碳 CO ₂	7.8	10.0	0.0	5.6	2.2	0.0	5.6	1.1	8.9	1.1	1.1	3.3	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2
氮 N ₂	20.0	17.8	11.0	17.8	13.3	0.0	15.6	15.6	2.2	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	2.5	2.5	2.5	2.5	1.2	0.0	0.0	0.1	0.1	2.2	4.1
低热值 kW·h/m ³	7.84	7.86	8.13	8.89	9.01	9.45	9.66	9.58	10.21	10.19	10.65	10.77	11.19	11.26	10.28	10.33	10.33	10.38	10.66	11.29	11.29	11.56	11.58	11.92	11.96
低热值 kJ/m ³	28.21	28.30	29.25	32.01	32.43	34.02	34.77	34.48	36.76	36.68	38.34	38.77	40.30	40.55	37.01	37.19	37.18	37.37	38.37	40.64	40.66	41.63	41.69	42.93	43.07
高热值 kW·h/m ³	8.69	8.71	9.03	9.84	9.99	10.49	10.67	10.59	11.39	11.31	11.81	11.99	12.39	12.47	11.15	11.20	11.07	11.25	11.56	12.51	12.51	12.80	12.82	13.17	13.20
高热值 kJ/m ³	31.27	31.36	32.19	35.41	35.96	37.78	38.40	38.14	40.67	40.72	42.51	42.85	44.90	44.90	40.12	40.32	39.85	40.52	41.60	45.02	45.03	46.07	46.15	47.42	47.50

表 C.2 丙烷气参考气体

项目	JPI	1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D	3A	3B	3C	3D	3E	3F	3G	3H	G30
乙烷 C_2H_6	0.8	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	0.0
丙烷 C_3H_8	98.0	100.0	90.0	90.0	80.0	80.0	70.0	70.0	60.0	60.0	50.0	50.0	40.0	40.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0
丁烷 C_4H_{10}	1.2	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	75.0	80.0	95.0	100.0	n=50 i=50
低热值 (LHV) $kJ \cdot h/m^3$	25.37	25.91	25.96	26.80	26.82	27.65	27.68	28.51	28.53	29.36	29.38	30.22	30.24	31.07	31.95	32.78	33.66	34.49	32.25
低热值 (LHV) MJ/m^3	91.35	93.38	93.47	96.46	96.55	99.54	99.63	102.62	102.71	105.70	105.78	108.77	108.86	111.85	115.02	118.01	121.17	124.16	116.09
高热值 (HHV) $kJ \cdot h/m^3$	27.56	28.22	28.25	29.14	29.14	30.06	30.09	30.98	31.00	31.90	31.92	32.82	32.84	33.73	34.68	35.57	36.52	37.41	34.94
高热值 (HHV) MJ/m^3	99.22	101.58	101.69	104.90	105.00	108.21	108.31	111.52	111.62	114.83	114.92	118.13	118.23	121.44	124.85	127.06	131.47	134.68	125.81

参 考 文 献

- [1] GB/T 2900.83—2008 电工术语 电的和磁的器件(IEC 60050-151:2001,IDT)
 - [2] GB/T 23716—2009 人对于振动的响应 测量仪器(ISO 8041:2005,IDT)
 - [3] IEC 60050-300 International Electrotechnical Vocabulary—Electric and electronic measurements and measuring instruments—Part 311;General terms relating to measurements—Part 312;General terms relating to electric measurements—Part 313;Types of electric measuring instruments—Part 314;Specific terms according to the type of instrument
 - [4] IEC 62282-3-201 Fuel cell technologies—Part 3-201;Stationary fuel cell power systems—Performance test methods for small fuel cell power systems
 - [5] ISO 6976:1995 Natural gas—Calculation of calorific values,density,relative density and Wobbe index from composition
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
固定式燃料电池发电系统
第2部分:性能试验方法

GB/T 27748.2—2013 IEC 62282-3-2000:2011

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

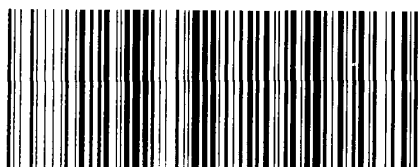
*

开本 880×1230 1/16 印张 4.5 字数 132 千字
2014年2月第一版 2014年2月第一次印刷

*

书号:155066·1-47976 定价 60.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 27748.2-2013