|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 27.070 |
| CCS | |  | | --- | | CEEIA |   K82 |

团体标准

T/CEEIA XXXX—XXXX

乘用车用燃料电池系统耐久性试验方法

Durability test method of fuel cell system for passenger cars

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中国电器工业协会  发布

中国电器工业协会（CEEIA）是在平等、自愿基础上，由全国电工装备制造、科研、院校、工程成套、销售、用户及相关企事业单位组成的全国性社会组织。按照专业分为发电设备、输变电设备、配电设备、用电设备、基础元件和材料五大领域。现有39个分支机构，6000余家会员单位，分布在全国各地，涵盖电器工业所有领域。中国电器工业协会始终以振兴和发展我国电器工业、代表和维护全行业共同利益和会员合法权益为宗旨，在政府和会员之间发挥"纽带"和"桥梁"的作用。

制定中国电器工业协会团体标准是协会重要工作之一，旨在是推动行业可持续发展、满足企业需要、推进企业技术进步。中国境内的团体和个人，均可提出中国电器工业协会团体标准制修订的项目建议并参与有关工作。

中国电器工业协会团体标准按照《中国电器工业协会团体标准制定工作管理办法》进行制定、发布和管理。标准中有关的知识产权问题，按照《中国电器工业协会团体标准知识产权管理办法》进行管理。

在标准实施过程中，如发现需要修改或完善之处，请联系中国电器工业协会标准化工作委员会秘书处。

本文件由中国电器工业协会制定发布，其版权归中国电器工业协会所有，任何

组织和个人未经中国电器工业协会同意，不得印刷、销售。考虑到本文件

中某些条款可能涉及的专利，中国电器工业协会不负责对任何类别专利权

的鉴别。

中国电器工业协会地址：北京市丰台区南四环西路12区30号楼

邮政编码：100070 电话：010-68171344 传真：68244802

网址：www.ceeia.com

目次

[前言 I](#_Toc20511)

[引言 II](#_Toc27941)

[1 范围 1](#_Toc873)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc15953)

[3 术语和定义 1](#_Toc4846)

[4 测量参数、单位和准确度 2](#_Toc19786)

[5 试验要求 2](#_Toc23819)

[6 试验方法 3](#_Toc31476)

[7 故障及停机处理 6](#_Toc23718)

[8 数据处理 7](#_Toc23678)

[9 耐久试验报告 8](#_Toc10401)

[附录A（规范性） 燃料电池系统功率谱循环工况 9](#_Toc29153)

[附录B（规范性） 燃料电池系统振动测试工况 15](#_Toc9631)

[附录C（资料性） 燃料电池系统耐久性试验数据记录表 17](#_Toc15039)

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的的结构和起草规则》及T/CEEIA 270—2017《CEEIA标准编写指南》给出的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会标准化工作委员会提出。

本文件由中国电器工业协会燃料电池标准化专业委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件于202x年首次制定。

1. 引言

团体标准引言部分主要应体现出其创新性、技术性和特殊性，主要包括以下内容：

——编制标准原因或解决的主要问题；

——标准技术内容的特殊信息或说明，团体标准严于国家标准、行业标准的内容；

——采用同步研究并转化国际标准的草案文件国际标准草案或过程文件、与国外机构签订协议的国外标准不涉及版权的国外协会标准以及国际招标中的事实标准，及与国内外同类标准的主要技术差异，国内外同类标准的应用情况、与之相比的优势；

——与地方标准化主管部门合作，可为区域产业集群服务的产品标准，以双编号的形式互认，以及适用于其他产业相关联的社团组织合作的互认标准等；

——科技成果转化和市场应用的情况；

——参考部门规章、规范性文件。

乘用车用燃料电池系统耐久性试验方法

* 1. 范围

本文件规定了乘用车用燃料电池系统耐久性测试评价的试验条件、试验方法、故障及停机处理、数据处理、耐久试验报告。

本文件适用于燃料电池为主要动力提供的乘用车用燃料电池系统耐久性能评价。

* 1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2423.43-2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 振动、冲击和类似动力学试验样品的安装

GB/T 2423.56-2023 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fh：宽带随机振动和导则

GB/T 24548-2009 燃料电池电动汽车 术语

GB/T 24554-2022 燃料电池发动机性能试验方法

GB/T 28816-2020 燃料电池 术语

GB/T 37244-2018 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气

GB/Z 44116-2024 燃料电池发动机及关键部件耐久性试验方法

* 1. 术语和定义

GB/T 24548-2009、GB/T 28816-2020界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

燃料电池系统 fuel cell system

包括燃料电池堆和燃料电池辅助系统，在外接氢源的条件下可以正常工作。

3.2

燃料电池堆 fuel cell stack

由单电池、隔离板、冷却板、歧管和支承结构组成的设备，通过电化学反应把（通常）富氢气体和控制反应物转换成直流电、热和其他反应物。

[来源：GB/T 28816-2020，3.50]

3.3

怠速状态 idle conditions

燃料电池系统处于最小功率输出的稳定工作状态。

3.4

额定功率 rate power

在生产商规定的正常运行条件下，所设计的燃料电池系统的最大连续电输出功率。

注：在本测试条件下，燃料电池电堆单电池平均节电压不低于0.60 V。

[来源：GB/T 28816-2020，3.85.4，有修改]

3.5

峰值功率 peak power

燃料电池系统在制造商规定的时间内的最大有效净输出功率。

3.6

燃料电池系统参考电流 reference current of fuel cell system

燃料电池系统在耐久性试验前进行稳态特性试验时，选定的功率点对应的燃料电池堆电流。

注：*P*E为燃料电池系统额定功率(初始值),本文件选取燃料电池系统在100%*P*E、50%*P*E和10%*P*E对应的

燃料电池堆电流*I*100、*I*50、*I*10作为参考电流。

[来源：GB/Z 44116-2024，3.2，有修改]

* 1. 测量参数、单位和准确度

表1 测量参数、单位和准确度要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 测量参数 | 单位 | 准确度 | 分辨率 |
| 时间 | s | ±1.0 | 0.1 |
| 电压 | V | ±0.5% FSDa | 0.1 |
| 电流 | A | ±0.5% FSDa | 0.1 |
| 温度 | ℃ | ±1.0 | 0.1 |
| 压强 | kPa | ±1.0 | 0.1 |
| 气体流量 | NLPM | ±1.0% FSDa | 0.1 |
| 液体流量 | L/min | ±1.0% FSDa | 0.1 |
| 相对湿度 | — | ±3.0% | — |
| 电导率 | µS/cm | ±0.5% FSDa | 0.001 |
| a FSD：最大显示或标尺的长度。 | | | |

* 1. 试验要求
     1. 环境

除非另有规定，试验应在环境温度为23℃±5℃，相对湿度为15%~90%，大气压力96kPa~106kPa的环境中进行。

* + 1. 燃料电池系统

应保证被测系统完整性的原则，确保能够实现燃料电池系统各项性能和功能，在外接氢源和启动电源条件下能够正常工作，且与装车状态一致。试验样本数量可根据制造商要求选择1台～3台燃料电池系统进行试验。

* + 1. 试验平台及试验用氢气要求

试验平台应提供满足燃料电池系统所需的散热条件，且通过CAN通信向燃料电池系统发送指令的频率应不低于10Hz。试验用氢气应符合GB/T 37244-2018的规定。

* + 1. 燃料电池系统控制

试验过程中，燃料电池系统的启动、加载、降载、停机等均应由试验平台按照制造商提供的通信协议进行控制。

* + 1. 试验数据采集、计算要求

试验数据采样频率应不低于5 Hz。循环工况试验过程中，宜每连续采集不超过5 h进行一次数据分段保存。

试验过程中，应记录燃料电池堆的电压、燃料电池堆的电流、单电池电压（若有）、环境温度和湿度、冷却液温度、辅助系统各部件的电压、辅助系统各部件的电流、氢气流量。

* + 1. 振动测量系统

测量系统的特性应使其能准确判断在基准点给定轴向测得的振动实际值是否在试验所要求的容差范围内。

整个测量系统包括传感器、信号调理器和数据采集与处理装置，其频率响应对测量精度有显著影响。

测量系统的频率范围应从试验最低频率(*f*1)的0.5倍延伸到最高频率(*f*2)的2.0倍。测量系统在该频率范围内的频率响应应平坦，并在±5%以内。任何超出该范围的偏差应记录于报告中。

* + 1. 安装要求

参照在车辆的安装位置和GB/T 2423.43-2008的要求，将燃料电池系统安装在振动台。汽车行驶方向为x轴方向，另一垂直于行驶方向的水平方向为y轴方向。

* + 1. 循环工况要求

燃料电池系统在功率加载或电流加载的方式下，均以燃料电池系统的净输出功率作为循环工况功率公差判定对象。燃料电池系统实际功率和循环工况规定功率之间的允许公差按照GB/Z 44116-2024第5.2.7.2条进行规定：当循环工况规定的功率*P*SET不大于60 kW时，功率公差为±3 kW；当循环工况规定的功率*P*SET大于60 kW时，功率公差为±5%*P*SET kW。

* + 1. 保养要求

燃料电池系统在每累计完成240 h循环工况的停机期间，制造商可按照GB/Z 44116-2024第5.2.8条规定对燃料电池系统进行维护保养。

* 1. 试验方法
     1. 气密性试验

按照GB/T 24554-2022第8.8.2.1条和8.8.2.2条分别进行燃料电池系统的氢气流道气密性和整体气密性测试。

* + 1. 绝缘强度试验

按照GB/T 24554-2022第8.9条进行燃料电池系统的绝缘电阻测试。

* + 1. 活化、额定功率及稳态特性试验
       1. 燃料电池堆活化

按照制造商的要求对燃料电池系统进行准备或活化，但总时间不应超过100h。

* + - 1. 额定功率试验

按照GB/T 24554-2022第8.2条进行燃料电池系统额定功率试验。

有效测量时长60min运行功率的平均值作为燃料电池系统的额定功率（*P*E）测量值，额定功率测量值保留小数点后2位，额定功率标称值为额定功率测量值的整数部分。

注：额定功率（*P*E）单位为kW。

* + - 1. 稳态特性试验

燃料电池系统稳态特性试验按照以下步骤进行：

a）若燃料电池系统未处于热机状态，则首先按照GB/T 24554-2022第7.4条使其达到热机状态；

b）热机过程结束后，回到怠速状态（或燃料电池系统最低功率点）运行10s；

c）选取燃料电池系统在10%*P*E、50%*P*E和100%*P*E对应的燃料电池堆电流*I*10、*I*50和*I*100作为参考电流；

d）选择怠速状态（或燃料电池系统最低功率点）、*I*10、10%*P*E、20%*P*E、30%*P*E、40%*P*E、*I*50、50%*P*E、60%*P*E、70%*P*E、80%*P*E、90%*P*E、*I*100和100%*P*E工况点进行燃料电池系统稳态特性试验，测试平台向燃料电池系统发送加载指令，在每个工况点至少稳定运行3min；

e）每个工况点的分析数据时间长度不应少于2min，将试验数据记录到表C.1中。

**注:**若燃料电池系统怠速状态（或燃料电池系统最低功率点）大于*I*10、10%*P*E，则不在*I*10、10%*P*E工况点运行。

* + 1. 耐久试验环境预处理

燃料电池系统在耐久试验开始前，制造商可以在以下环境条件中选择1项作为耐久试验阶段燃料电池系统的运行环境，并按照6.5.2或6.6.2耐久试验阶段步骤a)对燃料电池系统进行预处理：

* + - 1. 常温运行环境

将环境舱的温度设定为23.0℃，按照GB/T 24554-2022第7.1条的常温浸机方法进行浸机处理。同时，监测燃料电池系统空气进气温度，确保耐久试验过程中进气温度为23.0℃±2℃。试验过程应自动进行，不应有人工干预。

* + - 1. 低温运行环境

将环境舱的温度设定为-10.0℃，按照GB/T 24554-2022第7.2条的低温浸机方法进行浸机处理。同时，监测燃料电池系统空气进气温度，确保耐久试验过程中进气温度为-10.0℃±2℃。试验过程应自动进行，不应有人工干预。

* + - 1. 高温运行环境

将环境舱的温度设定为45.0℃，按照GB/T 24554-2022第7.3条的高温浸机方法进行浸机处理。同时，监测燃料电池系统空气进气温度，确保耐久试验过程中进气温度为45.0℃±2℃。试验过程应自动进行，不应有人工干预。

* + 1. 山区工况耐久试验
       1. 试验准备阶段

试验准备阶段的步骤如下：

a) 按照6.1和6.2规定的方法进行初始气密性、绝缘电阻测试，测试结果应满足以下要求：

* 燃料电池系统的气密性应满足制造商的要求；
* 燃料电池系统的正负极对地的绝缘电阻不低于500Ω/V。

b）按照制造商的要求对燃料电池系统进行活化和调整；

c）按照6.3.2规定的方法对燃料电池系统进行额定功率试验；

d）按照6.3.3规定的方法对燃料电池系统进行稳态特性试验（设定目标工况点为：怠速状态（或燃料电池系统最低功率点）、*I*10、10%*P*E、20%*P*E、30%*P*E、40%*P*E、*I*50、50%*P*E、60%*P*E、70%*P*E、80%*P*E、90%*P*E、*I*100和100%*P*E）；

e）然后使燃料电池系统运行在怠速状态（或燃料电池系统最低功率点），再按照制造商规定的关机操作步骤关闭燃料电池系统；

f）参照在车辆的安装位置和GB/T 2423.43-2008的要求，将燃料电池系统安装在振动台。控制点放在台面或按试验要求点设置，形成控制系统回路。

* + - 1. 耐久试验阶段

耐久性试验阶段的步骤如下：

a) 试验前燃料电池系统置于环境舱中，制造商根据试验需求，在6.4中选择1项环境条件进行预处理，并记录在试验报告中；

b) 预处理过程结束后，按照制造商建议的启动操作步骤，测试平台向燃料电池系统发送启动指令，启动燃料电池系统；

c）然后使燃料电池系统运行在怠速状态（或燃料电池系统最低功率点）；

d）振动试验台在三个轴向分别施加随机振动载荷，试验从z轴开始，然后是y轴，最后是x轴。试验过程参照GB/T 2423.56-2023，按照附录B.1或B.2（根据制造商试验需求进行工况选择）的工况进行随机振动加载，每0.5 h为1个振动循环，每个轴向累计完成20 h循环工况（即 40 个循环工况），切换振动方向；

e）与此同时，燃料电池系统按照附录A.1的工况进行功率加载（若燃料电池系统的最低净输出功率大于8.75%*P*E，则表A.1中8.75%*P*E工况点按燃料电池系统最低功率点运行），每0.5 h为1个循环工况；

f）每累计完成5 h循环工况（即10个循环工况，记为一组）后，停机15 min；

g）每累计完成20 h循环工况（即 40 个循环工况）后，停机5 h；

h）每累计完成240 h循环工况（即 480 个循环工况）后，将环境舱的温度恢复至室温，按照6.3.3进行一次稳态特性试验，按照制造厂的要求进行正常关机，待燃料电池堆恢复至室温，按照6.1和6.2进行气密性和绝缘电阻测试；

i）重复上述步骤的a）至h），当燃料电池系统达到试验终止条件时，停止试验并记录燃料电池系统累计运行时长，将环境舱的温度和燃料电池堆恢复至室温，按照6.3.3、6.1和6.2进行燃料电池系统稳态特性试验、气密性和绝缘电阻测试。

* + - 1. 试验终止条件

试验过程中，达到以下任意一项条件则终止试验：

——燃料电池系统在参考电流*I*100下的功率无法达到90%*P*E；

——燃料电池系统的气密性无法满足制造厂规定的安全限值；

——燃料电池系统的绝缘阻值结果＜500Ω/V；

——燃料电池系统发生故障，且制造商建议终止试验；

——循环工况加载的累计时间超过燃料电池系统设计寿命10%，且不少于480 h时。

* + 1. 城市工况耐久试验
       1. 试验准备阶段

试验准备阶段的步骤如下：

a) 按照6.1和6.2规定的方法进行初始气密性、绝缘电阻测试，测试结果应满足以下要求：

* 燃料电池系统的气密性应满足制造商的要求；
* 燃料电池系统的正负极对地的绝缘电阻不低于500Ω/V。

b）按照制造商的要求对燃料电池系统进行活化和调整；

c）按照6.3.2规定的方法对燃料电池系统进行额定功率试验；

d）按照6.3.3规定的方法对燃料电池系统进行稳态特性试验（设定目标工况点为：怠速状态（或燃料电池系统最低功率点）、*I*10、10%*P*E、20%*P*E、30%*P*E、40%*P*E、*I*50、50%*P*E、60%*P*E、70%*P*E、80%*P*E、90%*P*E、*I*100和100%*P*E）；

e）然后使燃料电池系统运行在怠速状态（或燃料电池系统最低功率点），再按照制造商规定的关机操作步骤关闭燃料电池系统；

f）参照在车辆的安装位置和GB/T 2423.43-2008的要求，将燃料电池系统安装在振动台。控制点放在台面或按试验要求点设置，形成控制系统回路。

* + - 1. 耐久试验阶段

耐久性试验阶段的步骤如下：

a) 试验前燃料电池系统置于环境舱中，制造商根据试验需求，在6.4中选择1项环境条件进行预处理，并记录在试验报告中；

b) 预处理过程结束后，按照制造商建议的启动操作步骤，测试平台向燃料电池系统发送启动指令，启动燃料电池系统；

c）然后使燃料电池系统运行在怠速状态（或燃料电池系统最低功率点）；

d）振动试验台在三个轴向分别施加随机振动载荷，试验从z轴开始，然后是y轴，最后是x轴。试验过程参照GB/T 2423.56-2023，按照附录B.1或B.2（根据制造商试验需求进行工况选择）的工况进行随机振动加载，每0.5 h为1个振动循环，每个轴向累计完成20 h循环工况（即 40 个循环工况），切换振动方向；

e）与此同时，燃料电池系统按照附录A.2的工况进行功率加载（若燃料电池系统的最低净输出功率大于8.75%*P*E，则表A.2中8.75%*P*E工况点按燃料电池系统最低功率点运行），每0.5 h为1个循环工况；

f）每累计完成5 h循环工况（即10个循环工况，记为一组）后，停机15 min；

g）每累计完成20 h循环工况（即 40 个循环工况）后，停机5 h；

h）每累计完成240 h循环工况（即 480 个循环工况）后，将环境舱的温度恢复至室温，按照6.3.3进行一次稳态特性试验，按照制造厂的要求进行正常关机，待燃料电池堆恢复至室温，按照6.1和6.2进行气密性和绝缘电阻测试；

i）重复上述步骤的a）至h），当燃料电池系统达到试验终止条件时，停止试验并记录燃料电池系统累计运行时长，将环境舱的温度和燃料电池堆恢复至室温，按照6.3.3、6.1和6.2进行燃料电池系统稳态特性试验、气密性和绝缘电阻测试。

* + - 1. 试验终止条件

试验过程中，达到以下任意一项条件则终止试验：

——燃料电池系统在参考电流*I*100下的功率无法达到90%*P*E；

——燃料电池系统的气密性无法满足制造厂规定的安全限值；

——燃料电池系统的绝缘阻值结果＜500Ω/V；

——燃料电池系统发生故障，且制造商建议终止试验；

——循环工况加载的累计时间超过燃料电池系统设计寿命10%，且不少于480 h时。

* + 1. 耐久试验后外观检查

耐久试验结束后，进行系统外观情况检查，系统结构应无损坏、无断裂、螺栓无松动脱落损坏等情况，硅胶软管等原则上无磨损破坏；

经目视检查，燃料电池系统保持连接可靠、结构完好、无明显变形。

* 1. 故障及停机处理

燃料电池系统进行耐久试验时，测量燃料电池系统基本性能特征值（包含但不限于氢气进气压力、氢气进气温度、氢气进气流量、空气进气压力、空气进气温度、空气进气流量、尾排气体温度、尾排气体压力、进堆温度、出堆温度、电导率、电堆电流、绝缘电阻等），通过测试设备的设置限制和燃料电池系统的控制系统等随时进行监测运行数据。

根据危害程度，将其分为致命故障、严重故障、一般故障三类。各类型故障特性描述如表2所示。由外围条件（氢气、高低压电、天气环境等）影响的燃料电池系统停机不计入故障类型，可恢复后继续加载循环。

表2　燃料电池系统的故障分类

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 故障等级 | 故障类型 | 故障特性描述 |
| 1级 | 致命故障 | 燃料电池系统运行完全中断，无法正常运行启动。发生损坏、起火、失控等情况；危及人身安全、行车安全，或对周围环境造成严重危害；涉及安全的主要零部件功能失效（包括燃料电池堆、系统控制器、氢气循环泵、氢气浓度传感器、电流传感器、氢气调压阀等） |
| 2级 | 严重故障 | 燃料电池系统通过关机解决故障后可再次运行启动。燃料电池系统关机非正常关机；涉及运转的主要零部件功能失效（包括空压机、空压机控制器、水泵、电控三通阀、中冷器、增湿器、氢气循环泵、温度传感器、压力传感器、氢气电磁阀、电子节气门等） |
| 3级 | 一般故障 | 某项参数超出规定值，通过降功率或报警措施等方式可解决，不影响燃料电池系统正常运行（包括冷却液温度、氢空温度、氢空压力、电堆及系统电压、电流、单片电压等） |

燃料电池系统耐久性测试过程中出现上述故障时，故障处理应满足以下要求：

a）记录每次停机的原因及操作内容；

b）当出现故障时，应进行故障分析和记录，并由制造商根据具体情况给出处理建议；

c）试验过程中，每累计完成240 h循环工况的停机期间，制造商可按照5.9条对燃料电池系统进行维护保养；

d）记录停机时本组循环工况中已完成的个数n。故障恢复后，继续进行循环工况试验，将本组未完成的循环工况数（10～n）加至下一组循环工况中，即连续完成（20～n）个循环工况，试验过程中不再停机。

* 1. 数据处理
     1. 耐久前后燃料电池系统功率衰减

燃料电池系统参考电流点下的功率衰减幅度按公式（1）计算：

（1）

式中：

——燃料电池系统参考电流下的功率衰减幅度；

——耐久试验前，燃料电池系统参考电流下的功率，单位为千瓦（kW）；

——耐久试验后，燃料电池系统参考电流下的功率，单位为千瓦（kW）。

* + 1. 耐久前后燃料电池堆电压衰减

根据所记录的燃料电池系统耐久性试验前和试验后，燃料电池堆参考电流点下的平均单片电压衰减率，按如下公式（2）计算：

（2）

式中：

——电压衰减率；

——耐久性试验前燃料电池堆平均单片电压，单位为伏（V）；

——耐久性试验后燃料电池堆平均单片电压，单位为伏（V）。

* + 1. 耐久前后燃料电池系统效率衰减

燃料电池系统耐久性试验前和试验后，额定功率下燃料电池系统的效率按照GB/T24554-2022中B.4进行计算，额定功率下燃料电池系统的效率衰减按如下公式（3）计算：

（3）

式中：

——额定功率下燃料电池系统的效率衰减幅度；

——耐久性试验前，首次稳态测试中额定功率下燃料电池系统的效率；

——耐久性试验后，末次稳态测试中额定功率下燃料电池系统的效率。

* + 1. 耐久前后燃料电池系统气体压降差

采用压降差值法评价燃料电池系统耐振动特性，燃料电池系统耐久性试验前后气体压降差值按照公式（4）进行计算：

（4）

式中：

*Z*——燃料电池系统耐久试验前后气体压降差值，单位为千帕（kPa）；

——燃料电池系统耐久试验前气体压降值，单位为千帕（kPa）；

——燃料电池系统耐久试验后气体压降值，单位为千帕（kPa）。

* + 1. 平均失效前时间（MTTFF）计算

平均首次失效前时间（MTTFF）可通过公式（5）和公式（6）进行计算。

（5）

（6）

式中：

——平均首次失效前时间点估计值，单位为小时（h）；

——无故障工作总时间，单位为小时（h）；

——发生故障燃料电池系统数量；

——第j个系统首次故障时间，单位为小时（h）；

——试验的系统总数；

——定时截尾时间。

* + 1. 平均失效间隔时间（MTBF）计算

平均失效间隔工作时间（MTBF）可通过公式（7）和公式（8）进行计算。

（7）

（8）

式中：

——平均失效间隔工作时间的点估计值，单位为小时（h）；

——时间内发生的故障总数；

——中止试验系统数；

——工作总时间，单位为小时（h）；

——第j个系统中止试验时间，单位为小时（h）。

* 1. 耐久试验报告

耐久试验报告至少应包含以下内容：

a）试验依据；

b）试验项目；

c）试验对象：注明被测燃料电池系统的数量、主要参数及试验照片；

d）试验条件；

e）试验结果：

1）对原始数据加以整理，宜用曲线表示，重要的数据可以列表;

2）气密性、绝缘强度及稳态特性测试结果；

3）耐久性评价指标计算结果：系统功率衰减、电压衰减及压降差；

4）描述故障的模式、类型、数量及发生故障的时间；

5）可靠性评价指标计算结果：平均失效前时间、平均失效间隔时间；

6）故障、维修统计。

f）试验日期；

g）相关人员签字。

1. （规范性）  
   燃料电池系统功率谱循环工况
   1. 山区循环工况曲线和数据

燃料电池系统山区循环工况如图 A.1 和表 A.1 所示。



图 A.1 燃料电池系统山区循环工况曲线

表 A.1 燃料电池系统山区循环工况数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 步骤 | 加载功率  kW | 持续时间  s | 开始时刻  s | 结束时刻  s |
| 1 | 8.75%*P*E | 80 | 0 | 80 |
| 2 | 8.75~18.75%*P*E | 1 | 80 | 81 |
| 3 | 18.75%*P*E | 19 | 81 | 100 |
| 4 | 18.75~8.75%*P*E | 1 | 100 | 101 |
| 5 | 8.75%*P*E | 101 | 101 | 202 |
| 6 | 8.75~18.5%*P*E | 1 | 202 | 203 |
| 7 | 18.5%*P*E | 39 | 203 | 242 |
| 8 | 18.5~12.75%*P*E | 1 | 242 | 243 |
| 9 | 12.75%*P*E | 19 | 243 | 262 |
| 10 | 12.75~8.75%*P*E | 1 | 262 | 263 |
| 11 | 8.75%*P*E | 101 | 263 | 364 |
| 12 | 8.75~42.75%*P*E | 1 | 364 | 365 |
| 13 | 42.74%*P*E | 19 | 365 | 384 |
| 14 | 42.75~11.75%*P*E | 1 | 384 | 385 |
| 15 | 11.75%*P*E | 19 | 385 | 404 |
| 16 | 11.75~8.75%*P*E | 1 | 404 | 405 |
| 17 | 8.75%*P*E | 97 | 405 | 502 |
| 18 | 8.75~26.75%*P*E | 1 | 502 | 503 |
| 19 | 26.75%*P*E | 19 | 503 | 522 |
| 20 | 26.75~61%*P*E | 1 | 522 | 523 |
| 21 | 61%*P*E | 19 | 523 | 542 |
| 22 | 61~36.25%*P*E | 1 | 542 | 543 |
| 23 | 36.25%*P*E | 19 | 543 | 562 |

表 A.1 燃料电池系统山区循环工况数据（续）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 步骤 | 加载功率  kW | 持续时间  s | 开始时刻  s | 结束时刻  s |
| 24 | 36.25~29.75%*P*E | 1 | 562 | 563 |
| 25 | 29.75%*P*E | 19 | 563 | 582 |
| 26 | 29.75~15.25%*P*E | 1 | 582 | 583 |
| 27 | 15.25%*P*E | 19 | 583 | 602 |
| 28 | 15.25~8.75%*P*E | 1 | 602 | 603 |
| 29 | 8.75%*P*E | 106 | 603 | 709 |
| 30 | 8.75~44.75%*P*E | 1 | 709 | 710 |
| 31 | 44.75%*P*E | 19 | 710 | 729 |
| 32 | 44.75~15%*P*E | 1 | 729 | 730 |
| 33 | 15%*P*E | 19 | 730 | 749 |
| 34 | 15~8.75%*P*E | 1 | 749 | 750 |
| 35 | 8.75%*P*E | 98 | 750 | 848 |
| 36 | 8.75~24.5%*P*E | 1 | 848 | 849 |
| 37 | 24.5%*P*E | 19 | 849 | 868 |
| 38 | 24.5~19.5%*P*E | 1 | 868 | 869 |
| 39 | 19.5%*P*E | 19 | 869 | 888 |
| 40 | 19.5~32%*P*E | 1 | 888 | 889 |
| 41 | 32%*P*E | 19 | 889 | 908 |
| 42 | 32~42.75%*P*E | 1 | 908 | 909 |
| 43 | 42.75%*P*E | 19 | 909 | 928 |
| 44 | 42.75~35.75%*P*E | 1 | 928 | 929 |
| 45 | 35.75%*P*E | 19 | 929 | 948 |
| 46 | 35.75~21.75%*P*E | 1 | 948 | 949 |
| 47 | 21.75%*P*E | 19 | 949 | 968 |
| 48 | 21.75~8.75%*P*E | 1 | 968 | 969 |
| 49 | 8.75%*P*E | 111 | 969 | 1080 |
| 50 | 8.75~28.5*P*E | 1 | 1080 | 1081 |
| 51 | 28.5%*P*E | 19 | 1081 | 1100 |
| 52 | 28.5~43.75%*P*E | 1 | 1100 | 1101 |
| 53 | 43.75%*P*E | 19 | 1101 | 1120 |
| 54 | 43.75~42.75%*P*E | 1 | 1120 | 1121 |
| 55 | 42.75%*P*E | 19 | 1121 | 1140 |
| 56 | 42.75~31%*P*E | 1 | 1140 | 1141 |
| 57 | 31%*P*E | 19 | 1141 | 1160 |
| 58 | 31~23%*P*E | 1 | 1160 | 1161 |
| 59 | 23%*P*E | 19 | 1161 | 1180 |
| 60 | 23~18%*P*E | 1 | 1180 | 1181 |
| 61 | 18%*P*E | 19 | 1181 | 1200 |
| 62 | 18~8.75%*P*E | 1 | 1200 | 1201 |

表 A.1 燃料电池系统山区循环工况数据（续）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 步骤 | 加载功率  kW | 持续时间  s | 开始时刻  s | 结束时刻  s |
| 63 | 8.75%*P*E | 102 | 1201 | 1312 |
| 64 | 8.75~40.5%*P*E | 1 | 1312 | 1313 |
| 65 | 40.5%*P*E | 19 | 1313 | 1332 |
| 66 | 40.5~45.25%*P*E | 1 | 1332 | 1333 |
| 67 | 45.25%*P*E | 19 | 1333 | 1352 |
| 68 | 45.25~12.25%*P*E | 1 | 1352 | 1353 |
| 69 | 12.25%*P*E | 19 | 1353 | 1372 |
| 70 | 12.25~8.75%*P*E | 1 | 1372 | 1373 |
| 71 | 8.75%*P*E | 101 | 1373 | 1474 |
| 72 | 8.75~32%*P*E | 1 | 1474 | 1475 |
| 73 | 32%*P*E | 19 | 1475 | 1494 |
| 74 | 32~37.75%*P*E | 1 | 1494 | 1495 |
| 75 | 37.75%*P*E | 19 | 1495 | 1514 |
| 76 | 37.5~18.5%*P*E | 1 | 1514 | 1515 |
| 77 | 18.5%*P*E | 19 | 1515 | 1534 |
| 78 | 18.5~8.75%*P*E | 1 | 1534 | 1535 |
| 79 | 8.75%*P*E | 100 | 1535 | 1635 |
| 80 | 8.75~57.5%*P*E | 1 | 1635 | 1636 |
| 81 | 57.5%*P*E | 19 | 1636 | 1655 |
| 82 | 57.5~58%*P*E | 1 | 1655 | 1656 |
| 83 | 58%*P*E | 19 | 1656 | 1675 |
| 84 | 58~50%*P*E | 1 | 1675 | 1676 |
| 85 | 50%*P*E | 19 | 1676 | 1695 |
| 86 | 50~38.75%*P*E | 1 | 1695 | 1696 |
| 87 | 38.75%*P*E | 19 | 1696 | 1715 |
| 88 | 38.75~64.75%*P*E | 1 | 1715 | 1716 |
| 89 | 64.75%*P*E | 19 | 1716 | 1735 |
| 90 | 64.75~15%*P*E | 1 | 1735 | 1736 |
| 91 | 15%*P*E | 19 | 1736 | 1755 |
| 92 | 15~8.75%*P*E | 1 | 1755 | 1756 |
| 93 | 8.75%*P*E | 44 | 1756 | 1800 |

* 1. 城市循环工况曲线和数据

燃料电池系统城市循环工况如图 A.2 和表 A.2 所示。



图 A.2 燃料电池系统城市循环工况曲线

表 A.2 燃料电池系统城市循环工况数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 步骤 | 加载功率  kW | 持续时间  s | 开始时刻  s | 结束时刻  s |
| 1 | 8.75%*P*E | 77 | 0 | 77 |
| 2 | 8.75%~30.75%*P*E | 1 | 77 | 78 |
| 3 | 30.75%*P*E | 19 | 78 | 97 |
| 4 | 30.75%~45.25%*P*E | 1 | 97 | 98 |
| 5 | 45.25%*P*E | 19 | 98 | 117 |
| 6 | 45.25%~40.75%*P*E | 1 | 117 | 118 |
| 7 | 40.75%*P*E | 19 | 118 | 137 |
| 8 | 40.75%~9.25%*P*E | 1 | 137 | 138 |
| 9 | 9.25%*P*E | 19 | 138 | 157 |
| 10 | 9.25%~8.75%*P*E | 1 | 157 | 158 |
| 11 | 8.75%*P*E | 128 | 158 | 286 |
| 12 | 8.75%~19.25%*P*E | 1 | 286 | 287 |
| 13 | 19.25%*P*E | 19 | 287 | 306 |
| 14 | 19.25%~16.75%*P*E | 1 | 306 | 307 |
| 15 | 16.75%*P*E | 19 | 307 | 326 |
| 16 | 16.75%~11.5%*P*E | 1 | 326 | 327 |
| 17 | 11.5%*P*E | 19 | 327 | 346 |
| 18 | 11.5%~10.25%*P*E | 1 | 346 | 347 |
| 19 | 10.5%*P*E | 19 | 337 | 366 |
| 20 | 10.25%~9.5%*P*E | 1 | 366 | 367 |
| 21 | 9.5%*P*E | 39 | 367 | 406 |
| 22 | 9.5%~9%*P*E | 1 | 406 | 407 |
| 23 | 9%*P*E | 19 | 407 | 426 |
| 24 | 9%~8.75%*P*E | 1 | 426 | 427 |
| 25 | 8.75%*P*E | 132 | 427 | 559 |
| 26 | 8.75%~24.25%*P*E | 1 | 559 | 560 |
| 27 | 24.25%*P*E | 19 | 560 | 579 |

表 A.2 燃料电池系统城市循环工况数据（续）

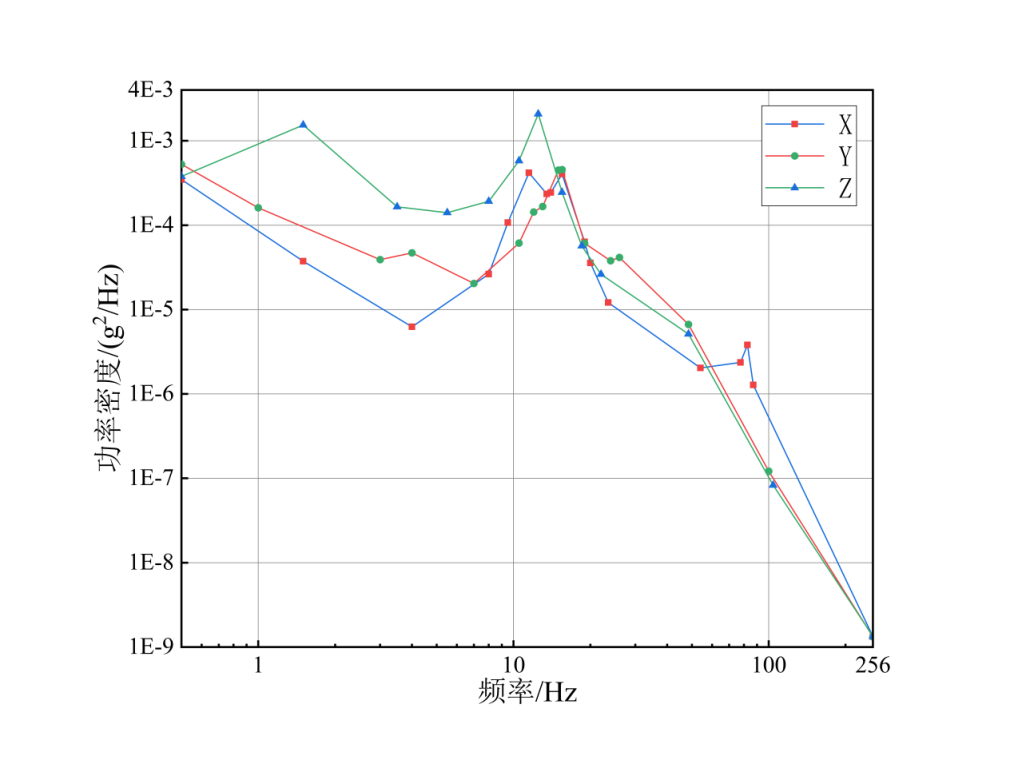
|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 步骤 | 加载功率  kW | 持续时间  s | 开始时刻  s | 结束时刻  s |
| 28 | 24.25%~25.25%*P*E | 1 | 579 | 580 |
| 29 | 25.25%*P*E | 19 | 580 | 599 |
| 30 | 25.25%~15.75%*P*E | 1 | 599 | 600 |
| 31 | 15.75%*P*E | 39 | 600 | 639 |
| 32 | 15.75%~15.25%*P*E | 1 | 639 | 640 |
| 33 | 15.25%*P*E | 19 | 640 | 659 |
| 34 | 15.25%~8.75%*P*E | 1 | 659 | 660 |
| 35 | 8.75%*P*E | 145 | 660 | 805 |
| 36 | 8.75%~10%*P*E | 1 | 805 | 806 |
| 37 | 10%*P*E | 19 | 806 | 825 |
| 38 | 10%~17.5%*P*E | 1 | 825 | 826 |
| 39 | 17.5%*P*E | 19 | 826 | 845 |
| 40 | 17.5%~20.75%*P*E | 1 | 845 | 846 |
| 41 | 20.75%*P*E | 19 | 846 | 865 |
| 42 | 20.75%~10.75%*P*E | 1 | 865 | 866 |
| 43 | 10.75%*P*E | 19 | 866 | 885 |
| 44 | 10.75%~8.75%*P*E | 1 | 885 | 886 |
| 45 | 8.75%*P*E | 131 | 886 | 1017 |
| 46 | 8.75%~9.5%*P*E | 1 | 1017 | 1018 |
| 47 | 9.5%*P*E | 19 | 1018 | 1037 |
| 48 | 9.5%~12.75%*P*E | 1 | 1037 | 1038 |
| 49 | 12.75%*P*E | 19 | 1038 | 1057 |
| 50 | 12.75%~20%*P*E | 1 | 1057 | 1058 |
| 51 | 20%*P*E | 19 | 1058 | 1077 |
| 52 | 20%~23%*P*E | 1 | 1077 | 1078 |
| 53 | 23%*P*E | 19 | 1078 | 1097 |
| 54 | 23%~8.75%*P*E | 1 | 1097 | 1098 |
| 55 | 8.75%*P*E | 146 | 1098 | 1244 |
| 56 | 8.75%~14.5%*P*E | 1 | 1244 | 1245 |
| 57 | 14.5%*P*E | 19 | 1245 | 1264 |
| 58 | 14.5%~12.75%*P*E | 1 | 1264 | 1265 |
| 59 | 12.75%*P*E | 19 | 1265 | 1284 |
| 60 | 12.75%~10.75%*P*E | 1 | 1284 | 1285 |
| 61 | 10.75%*P*E | 19 | 1285 | 1304 |
| 62 | 10.75%~17.5%*P*E | 1 | 1304 | 1305 |
| 63 | 17.5%*P*E | 19 | 1305 | 1324 |
| 64 | 17.5%~21.5%*P*E | 1 | 1324 | 1325 |
| 65 | 21.5%*P*E | 19 | 1325 | 1344 |
| 66 | 21.5%~23.25%*P*E | 1 | 1344 | 1345 |

表 A.2 燃料电池系统城市循环工况数据（续）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 步骤 | 加载功率  kW | 持续时间  s | 开始时刻  s | 结束时刻  s |
| 67 | 23.25%*P*E | 19 | 1345 | 1364 |
| 68 | 23.25%~17.25%*P*E | 1 | 1364 | 1365 |
| 69 | 17.25%*P*E | 19 | 1365 | 1384 |
| 70 | 17.25%~14%*P*E | 1 | 1384 | 1385 |
| 71 | 14%*P*E | 19 | 1385 | 1404 |
| 72 | 14%~28.5%*P*E | 1 | 1404 | 1405 |
| 73 | 28.5%*P*E | 19 | 1405 | 1424 |
| 74 | 28.5%~36.5%*P*E | 1 | 1424 | 1425 |
| 75 | 36.5%*P*E | 40 | 1424 | 1464 |
| 76 | 36.5%~32.5%*P*E | 1 | 1464 | 1465 |
| 77 | 32.5%*P*E | 19 | 1465 | 1484 |
| 78 | 32.5%~30.5%*P*E | 1 | 1484 | 1485 |
| 79 | 30.5%*P*E | 19 | 1485 | 1504 |
| 80 | 30.5%~24.75%*P*E | 1 | 1504 | 1505 |
| 81 | 24.75%*P*E | 19 | 1505 | 1524 |
| 82 | 24.75%~26%*P*E | 1 | 1524 | 1525 |
| 83 | 26%*P*E | 19 | 1525 | 1544 |
| 84 | 26%~40.75%*P*E | 1 | 1544 | 1545 |
| 85 | 40.75%*P*E | 19 | 1545 | 1564 |
| 86 | 40.75%~45%*P*E | 1 | 1564 | 1565 |
| 87 | 45%*P*E | 19 | 1565 | 1584 |
| 88 | 45%~42.75%*P*E | 1 | 1584 | 1585 |
| 89 | 42.75%*P*E | 19 | 1585 | 1604 |
| 90 | 42.75%~37%*P*E | 1 | 1604 | 1605 |
| 91 | 37%*P*E | 19 | 1605 | 1624 |
| 92 | 37%~32.25%*P*E | 1 | 1624 | 1625 |
| 93 | 32.25%*P*E | 19 | 1625 | 1644 |
| 94 | 32.25%~31%*P*E | 1 | 1644 | 1645 |
| 95 | 31%*P*E | 19 | 1645 | 1664 |
| 96 | 31%~26.25%*P*E | 1 | 1664 | 1665 |
| 97 | 26.25%*P*E | 19 | 1665 | 1684 |
| 98 | 26.25%~26.5%*P*E | 1 | 1684 | 1685 |
| 99 | 26.5%*P*E | 19 | 1685 | 1704 |
| 100 | 26.5%~21.75%*P*E | 1 | 1704 | 1705 |
| 101 | 21.75%*P*E | 19 | 1705 | 1724 |
| 102 | 21.75%~12.5%*P*E | 1 | 1724 | 1725 |
| 103 | 12.5%*P*E | 19 | 1725 | 1744 |
| 104 | 12.5%~8.75%*P*E | 1 | 1744 | 1745 |
| 105 | 8.75%*P*E | 55 | 1745 | 1800 |

1. （规范性）  
   燃料电池系统振动测试工况
   1. 常规道路燃料电池系统振动测试工况

常规道路燃料电池系统振动测试工况如图 B.1 和表 B.1 所示。



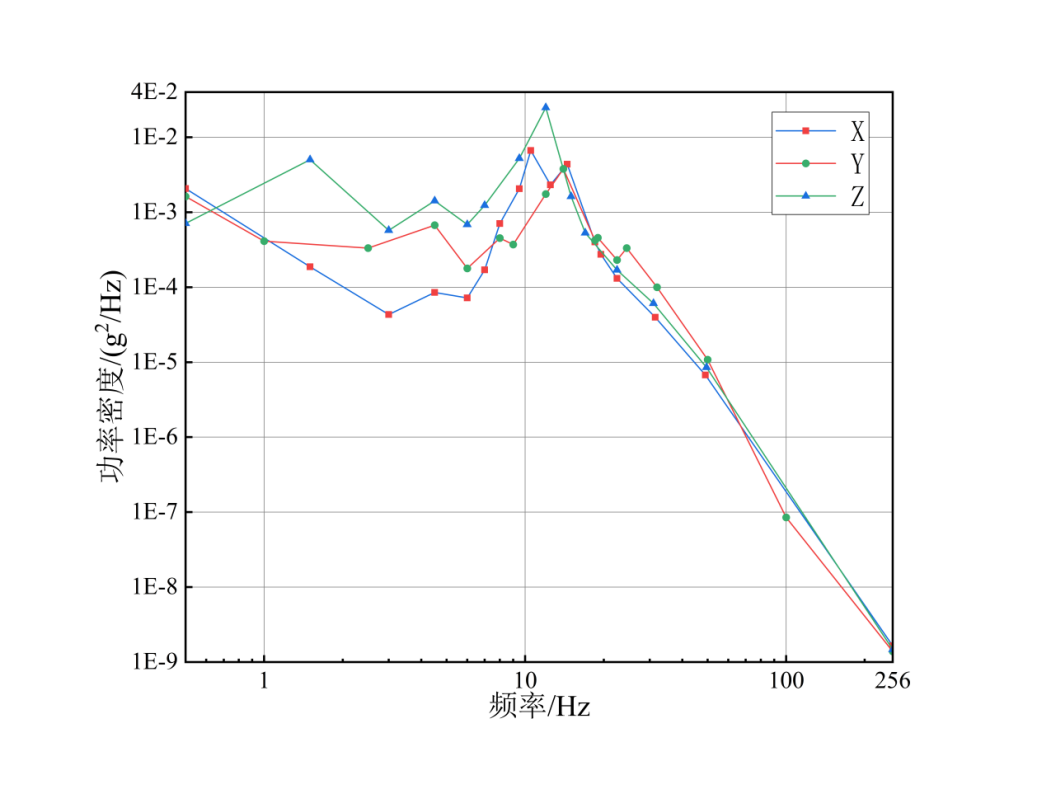
图B.1 常规道路燃料电池系统随机振动测试曲线

表B.1　常规道路燃料电池系统振动测试条件

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 随机振动（每个方向测试时间为20 h） | | | | | |
| 频率（Hz） | z轴功率谱密度（PSD）  （g2/Hz） | 频率  （Hz） | y轴功率谱密度（PSD）  （g2/Hz） | 频率  （Hz） | x轴功率谱密度（PSD）  （g2/Hz） | |
| 0.5 | 3.79362E-4 | 0.5 | 5.28302E-4 | 0.5 | 3.47336E-4 | |
| 1.5 | 0.00154 | 1 | 1.60766E-4 | 1.5 | 3.73518E-5 | |
| 3.5 | 1.64904E-4 | 3 | 3.91514E-5 | 4 | 6.26029E-6 | |
| 5.5 | 1.40786E-4 | 4 | 4.7076E-5 | 8 | 2.63546E-5 | |
| 8 | 1.92111E-4 | 7 | 2.03664E-5 | 9.5 | 1.07534E-4 | |
| 10.5 | 5.80719E-4 | 10.5 | 6.14213E-5 | 11.5 | 4.18941E-4 | |
| 12.5 | 0.00208 | 12 | 1.4313E-4 | 13.5 | 2.3517E-4 | |
| 15.5 | 2.45069E-4 | 13 | 1.66697E-4 | 14 | 2.44345E-4 | |
| 18.5 | 5.68008E-5 | 15 | 4.50183E-4 | 15.5 | 4.04246E-4 | |
| 22 | 2.61698E-5 | 15.5 | 4.55929E-4 | 19 | 6.36344E-5 | |
| 48.5 | 5.12195E-6 | 19 | 6.10991E-5 | 20 | 3.57774E-5 | |
| 104 | 8.30542E-8 | 24 | 3.79781E-5 | 23.5 | 1.21265E-5 | |
| 256 | 1.33823E-9 | 26 | 4.15129E-5 | 54 | 2.0316E-6 | |
| -- | | 48.5 | 6.65715E-6 | 77.5 | 2.36258E-6 | |
| 100 | 1.21331E-7 | 82.5 | 3.81103E-6 | |
| 256 | 1.3237E-9 | 87 | 1.28058E-6 | |
| -- | | 256 | 1.32735E-9 | |
| RMS | z轴 | RMS | y轴 | RMS | x轴 | |
| 0.0117885 | 0.00393593 | 0.00366596 |

* 1. 强化道路燃料电池系统振动测试工况

强化道路燃料电池系统振动测试工况如图 B.2 和表 B.2 所示。



图B.2 强化道路燃料电池系统随机振动测试曲线

表B.2　强化道路燃料电池系统振动测试条件

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 随机振动（每个方向测试时间为20 h） | | | | | |
| 频率（Hz） | z轴功率谱密度（PSD）  （g2/Hz） | 频率  （Hz） | y轴功率谱密度（PSD）  （g2/Hz） | 频率  （Hz） | x轴功率谱密度（PSD）  （g2/Hz） | |
| 0.5 | 7.10114E-4 | 0.5 | 0.00162 | 0.5 | 0.00206 | |
| 1.5 | 0.00503 | 1 | 4.11399E-4 | 1.5 | 1.87E-4 | |
| 3 | 5.74656E-4 | 2.5 | 3.31794E-4 | 3 | 4.32582E-5 | |
| 4.5 | 0.00142 | 4.5 | 6.72148E-4 | 4.5 | 8.53823E-5 | |
| 6 | 6.86521E-4 | 6 | 1.77981E-4 | 6 | 7.18512E-5 | |
| 7 | 0.00123 | 8 | 4.51784E-4 | 7 | 1.7083E-4 | |
| 9.5 | 0.00522 | 9 | 3.70658E-4 | 8 | 7.0632E-4 | |
| 12 | 0.0248 | 12 | 0.00174 | 9.5 | 0.00206 | |
| 15 | 0.00162 | 14 | 0.00379 | 10.5 | 0.00665 | |
| 17 | 5.29024E-4 | 18.5 | 4.21591E-4 | 12.5 | 0.00232 | |
| 22.5 | 1.69855E-4 | 19 | 4.56812E-4 | 14.5 | 0.00438 | |
| 31 | 6.08716E-5 | 22.5 | 2.30688E-4 | 18.5 | 4.00876E-4 | |
| 49.5 | 8.49399E-6 | 24.5 | 3.31974E-4 | 19.5 | 2.74451E-4 | |
| 256 | 1.46842E-9 | 32 | 9.97535E-5 | 22.5 | 1.31303E-4 | |
| -- | | 50 | 1.08039E-5 | 31.5 | 3.97827E-5 | |
| 100 | 8.51283E-8 | 49 | 6.73392E-6 | |
| 256 | 1.38541E-9 | 256 | 1.64701E-9 | |
| RMS | z轴 | RMS | y轴 | RMS | x轴 | |
| 0.103171 | 0.0273254 | 0.0372149 |

1. （资料性）  
   燃料电池系统耐久性试验数据记录表
   1. 稳态特性试验数据记录表

燃料电池系统稳态特性试验数据记录表如表C.1所示。

表C.1　稳态特性试验数据记录表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试验日期： 试验时间： 已完成循环工况时长（h）： | | | | | | |
| 设定燃料电池系统功率  kW | 电堆电压  V | 电堆电流  A | 电堆功率  kW | 辅助系统功率  kW | 燃料电池  系统功率  kW | 氢气流量  （标准状态）  L/min |
| 怠速（或最  低功率点） |  |  |  |  |  |  |
| *I*10对应功率 |  |  |  |  |  |  |
| 10%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| 20%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| 30%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| 40%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| *I*50对应功率 |  |  |  |  |  |  |
| 50%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| 60%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| 70%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| 80%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| 90%*P*E |  |  |  |  |  |  |
| *I*100对应功率 |  |  |  |  |  |  |
| 100%*P*E |  |  |  |  |  |  |