

ICS 点击此处添加 ICS 号
CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CIEP

中国工业环保促进会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

氢燃料电池发动机技术规范

Technical Specifications for Hydrogen
Fuel Cell System

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国工业环保促进会

发布

目次

前言	IV
1 范围	5
2 规范性引用文件	5
3 术语和定义	5
4 测量参数、单位和准确度	5
5 技术要求	6
5.1 正常使用条件	6
5.2 质量功率密度	6
5.3 安全性要求	6
5.3.1 氢气排放	6
5.3.2 绝缘电阻	6
5.3.3 氢气流道气密性	6
5.3.4 整体气密性	6
5.4 起动特性	6
5.5 额定功率	7
5.6 峰值功率	7
5.7 动态响应特性	7
5.8 稳态特性	7
5.9 动态平均效率	7
5.10 环境适应性	7
5.10.1 温度适应性要求	7
5.10.2 防水防尘性能要求	7
5.10.3 盐雾性能要求	7
5.11 电磁兼容	7
5.11.1 瞬态传导发射（电源线）	8
5.11.2 传导骚扰（电压法）	8
5.11.3 传导骚扰（电流法）	8
5.11.4 辐射发射-RE	8
5.11.5 磁场发射-REM	8
5.11.6 磁场发射	8
5.11.7 电场发射	8
5.11.8 电源瞬态传导抗扰度	8
5.11.9 信号线耦合干扰抗扰度	8
5.11.10 磁场抗扰度	8
5.11.11 辐射抗扰度	9
5.11.12 大电流注入（BCI）	9
5.11.13 静电抗扰度（ESD）	9
5.12 耐振动性	9
5.13 耐冲击性	9
5.14 噪声	9

5.15 工况寿命	9
6 试验方法	9
6.1 氢气流道气密性试验	9
6.2 整体气密性试验	9
6.3 动态平均效率试验	9
6.3.1 试验条件	9
6.3.2 试验步骤	9
6.3.3 试验过程中测量记录的数据	10
6.3.4 试验结果处理	10
6.4 环境适应性试验	10
6.4.1 温度适应性试验	10
6.4.2 盐雾试验	10
6.5 电磁兼容性试验	10
6.5.1 瞬态传导发射（电源法）	10
6.5.2 传导骚扰（电压法）	10
6.5.3 传导骚扰（电流法）	11
6.5.4 辐射发射-RE	11
6.5.5 磁场发射-REM	11
6.5.6 磁场发射	11
6.5.7 电场发射	11
6.5.8 电源瞬态传导抗扰度	11
6.5.9 信号线耦合干扰抗扰度	12
6.5.10 磁场抗扰度	12
6.5.11 辐射抗扰度	12
6.5.12 大电流注入(BCI)	13
6.5.13 静电抗扰度(ESD)	13
6.6 耐振动性试验	13
6.7 耐冲击性试验	14
6.8 噪声试验	14
6.8.1 试验条件	14
6.8.2 试验方法	14
6.8.3 数据记录	14
7 维护保养件要求	15
附录 A（资料性） 燃料电池发动机性能试验记录表	16
A.1 试验样品信息表	16
A.2 起动特性试验结果记录表	16
A.3 功率输出特性试验结果记录表	17
A.4 稳定特性试验结果记录表	17
A.5 动态响应特性试验结果记录表	18
A.6 动态平均效率试验结果记录表	18
附录 B（规范性） 稳态试验数据处理	19
B.1 燃料电池电堆功率	19
B.2 燃料电池电堆效率	19

B.3 辅助系统功率	19
B.4 燃料电池发动机功率	19
B.5 燃料电池发动机效率	20
B.6 燃料电池发动机实际氢气消耗量	20
B.7 燃料电池发动机能量	20
B.8 燃料电池发动机动态平均效率	20
附录 C（规范性） 动态循环工况加载方法	1

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国工业环保促进会提出。

本文件由中国工业环保促进会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

氢燃料电池发动机技术规范

1 范围

本文件规定了氢燃料电池发动机安全性要求、起动特性、稳态特性、动态响应特性、功率输出特性、动态平均效率、环境适应性、电磁兼容、耐振动性、耐冲击性、噪声、工况寿命等技术要求及试验方法。

本文件适用于车用氢燃料电池发动机。其它领域用氢燃料电池发动机可参考本文件。

2 规范性引用文件

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

GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 18387 电动车辆的电磁场发射强度的限值和测量方法

GB/T 24554 燃料电池发动机性能试验方法

GB/T 28046.4 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第4部分：气候负荷

GB/T 37154 燃料电池电动汽车 整车氢气排放测试方法

GB 38031 电动汽车用动力蓄电池安全要求

GB/Z 44116 燃料电池发动机及关键部件耐久性试验方法

ISO 7637-2 道路车辆 传导和耦合引发的电气骚扰 第2部分：仅沿供电线路的瞬时电气传导

ISO 7637-3 道路车辆 由传导和连接引起的电干扰 第3部分：12V和24V电压的车辆

ISO 10605 道路车辆-静电放电电气干扰的测试方法

ISO 11452-2 道路车辆 窄频辐射电磁能引发的电磁干扰整车试验方法 第2部分：线装吸波室

ISO 11452-4 道路车辆 窄频辐射电磁能引发的电磁干扰的部件试验方法 第4部分：大容量电流发射（BCI）

ISO 11452-8 道路车辆 窄带辐射电磁能量引起的电气干扰测试方法-磁场抗扰性方法

IEC CISPR 25 车辆，船舶和内燃机 - 无线电干扰特性 - 车载接收机保护的限值和测量方法

3 术语和定义

GB/T 24548界定的术语和定义适用于本文件。

4 测量参数、单位和准确度

表1规定了试验测量的参数、单位和准确度。

表1 仪器设备精度表

测量参数	单位	准确度	分辨率	备注
电压	V	±0.3% FSD 或 ±1% rdg	0.1	FSD: 满量程 rdg: 读数 dgt: 分辨率数字
电流	A	±0.3% FSD 或 ±1% rdg	0.1	
温度	K	±1	0.1	
湿度	/	±3%		
质量流量	kg/s	≤1.0% FSD		

时间	s	±0.1	0.1
质量	kg	≤0.5% FSD	
绝缘阻值	MΩ	±2% rdg±2 dgt	
压力	kPa	±0.3% FSD	0.001
噪声频谱分析仪	dB (A)	±1	

5 技术要求

5.1 正常使用条件

环境温度和最高工作海拔，应满足以下要求：

- a) 环境温度：-40℃~85℃。
- b) 最高工作海拔：不低于 4500m。其中，4500m 时发动机功率可达到额定功率的 30%。

5.2 质量功率密度

按照 GB/T 24554 中 8.10.1 的规定对燃料电池发动机的质量功率密度进行试验，其质量功率密度不低于 0.5kW/kg。

5.3 安全性要求

5.3.1 氢气排放

按照 GB/T 37154-2018 中的 6.1 的规定进行试验，在进行正常操作（包括起动和停机）时，任意连续 3s 内的平均氢气体积浓度不超过 4%，且任何瞬时氢气体积浓度峰值不超过 8%。

5.3.2 绝缘电阻

按照 GB/T 24554 中 8.9 的规定进行试验，正负电极对地绝缘电阻应大于 100 Ω/V。

5.3.3 氢气流道气密性

按照 6.1 的规定进行试验，氢气腔总压降不大于 50kPa。

5.3.4 整体气密性

按照 6.2 的规定进行试验，各腔内压降不大于 10kPa。

5.4 起动特性

5.4.1 常温怠速冷起动特性

按照 GB/T 24554 中 8.1.1.1 的规定进行试验，系统起动时间不大于 10s。

5.4.2 常温怠速热起动特性

按照 GB/T 24554 中 8.1.1.2 的规定进行试验，系统起动时间不大于 8s。

5.4.3 常温额定功率冷起动特性

按照 GB/T 24554 中 8.1.1.3 的规定进行试验，系统起动时间不大于 18s。

5.4.4 常温额定功率热起动特性

按照 GB/T 24554 中 8.1.1.4 的规定进行试验，系统起动时间不大于 16s。

5.4.5 低温怠速冷起动特性

按照 GB/T 24554 中 8.1.2.1 的规定进行试验，系统起动时间不大于 90s。

5.4.6 低温额定功率冷起动特性

按照 GB/T 24554 中 8.1.2.2 的规定进行试验，系统起动时间不大于 150s。

5.5 额定功率

按照 GB/T 24554 中 8.2 的规定进行试验，燃料电池发动机的输出功率应始终处于有效测量时间内平均功率的 97%~103%之间，燃料电池发动机输出的有效测量时间内平均功率不低于标称值。

5.6 峰值功率

按照 GB/T 24554 中 8.3 的规定进行试验，燃料电池发动机的输出功率应始终处于有效测量时间内平均功率的 95%~105%之间。

5.7 动态响应特性

按照 GB/T 24554 中 8.4 的规定进行试验，10% P_E ~90% P_E 的加载时间不应超过 8s，90% P_E ~10% P_E 的卸载时间不应超过 6s。其中 P_E ：燃料电池发动机额定功率(初始值)。

5.8 稳态特性

按照 GB/T 24554 中 8.5 的规定进行试验，可达到各工况点功率，并稳定运行。

5.9 动态平均效率

按照 6.3 的规定进行试验，效率不小于 45%。

5.10 环境适应性

5.10.1 温度适应性要求

5.10.1.1 高温存储

按照 6.4.1.1 的规定进行高温存储试验，应满足以下要求：

- a) 箱内复测燃料电池发动机绝缘和整体气密性满足 5.3 的要求。
- b) 试验完成后，将燃料电池发动机恢复标准状态，复测性能应符合 5.8 的规定。

5.10.1.2 低温存储

按照 6.4.1.2 的规定进行低温存储试验，应满足以下要求：

- a) 箱内复测燃料电池发动机绝缘和整体气密性满足 5.3 的要求。
- b) 试验完成后，将燃料电池发动机恢复标准状态，复测性能应符合 5.8 的规定。

5.10.1.3 高温适应性

按照 6.4.1.3 的规定进行试验，试验期间系统输出功率应始终处于有效测量时长 60min 运行功率的平均值的 97%~103%之间。

5.10.1.4 低温适应性

按照 6.4.1.4 的规定进行试验，在完成 10 次冷冻解冻循环后，系统怠速起动时间小于 10s。

5.10.2 防水防尘性能要求

系统中具备防水防尘能力的部件按照 GB/T 4208 中试验方法进行检测，应符合 IP67 等级或以上等级的规定。

5.10.3 盐雾性能要求

按照 6.4.2 的规定进行盐雾试验，试验完成后将燃料电池发动机恢复标准状态，应符合 5.3 和 5.8 的规定。

5.11 电磁兼容

燃料电池发机电磁兼容性试验按照表 2 的项目执行。

表 2 试验项目及要要求

序号	项目	标准要求	等级要求	工作模式设置
1	瞬态传导发射（电源线）	ISO 7637-2	+75/-100V	模式 3
2	传导骚扰（电压法）	IEC CISPR 25	等级 3	模式 1 和 2
3	传导骚扰（电流法）	IEC CISPR 25	等级 3	模式 1 和 2
4	辐射发射-RE	IEC CISPR 25	等级 3	模式 1 和 2
5	磁场发射-REM	MIL-STD-461F	Navy limit	模式 1 和 2
6	磁场发射	GB/T 18387	-	模式 1 和 2
7	电场发射	GB/T 18387	-	模式 1 和 2
8	电源瞬态传导抗扰度	ISO 7637-2	等级 3	模式 2
9	信号线耦合干扰抗扰度	ISO 7637-3	-	模式 3
10	磁场抗扰度	ISO 11452-8	-	模式 3
11	辐射抗扰度	ISO 11452-2	-	模式 1 和 2
12	大电流注入 BCI	ISO 11452-4	-	模式 2 和 3
13	静电抗扰度（ESD）	ISO 10605	-	模式 1、2 和 3
注： 模式 1：燃料电池发动机功率拉升到额定功率； 模式 2：燃料电池发动机功率拉升到 10%的额定功率； 模式 3：低压供电，保持通讯； 模式 4：无任何线束连接。				

5.11.1 瞬态传导发射（电源线）

按照6.5.1的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.2 传导骚扰（电压法）

按照6.5.2的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.3 传导骚扰（电流法）

按照6.5.3的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.4 辐射发射-RE

按照6.5.4的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.5 磁场发射-REM

按照6.5.5的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.6 磁场发射

按照6.5.6的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.7 电场发射

按照6.5.7的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.8 电源瞬态传导抗扰度

按照6.5.8的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.9 信号线耦合干扰抗扰度

按照6.5.9的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.10 磁场抗扰度

按照6.5.10的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.11 辐射抗扰度

按照6.5.11的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.12 大电流注入（BCI）

按照6.5.12的规定进行试验，低于限值要求。

5.11.13 静电抗扰度（ESD）

按照6.5.13的规定进行试验，低于限值要求。

5.12 耐振动性

按照6.6的规定进行随机振动试验，测试完成后，应满足以下要求：

- a) 燃料电池发动机保持连接可靠、结构完好、无明显变形，燃料电池发动机能够正常工作；
- b) 试验结束后，绝缘阻值、整体气密性、额定功率应满足5.3.2、5.3.4、5.5的要求。

5.13 耐冲击性

按照6.7的规定进行冲击试验，测试完成后，应满足以下要求：

- a) 燃料电池发动机保持连接可靠、结构完好、无明显变形，燃料电池发动机能够正常工作；
- b) 试验结束后，绝缘阻值、整体气密性、额定功率应满足5.3.2、5.3.4、5.5的要求。

5.14 噪声

按照6.8的规定进行测试，记录噪声最大值，噪声最大值应不大于75 dB。

5.15 工况寿命

按照GB/Z 44116的规定，试验工况开展1000h后，燃料电池发动机在电流 I_{100} 下的功率下降不超过5% P_E 。

I_{100} ：燃料电池发动机在100% P_E 对应的电流。

6 试验方法

6.1 氢气流道气密性试验

关闭燃料电池发动机的氢气排气端口，从燃料电池发动机氢气入口充入氮气，压力设定为50kPa，压力稳定后关闭进气阀门，其他端口保持畅通，保压20min，记录压力下降值。

6.2 整体气密性试验

关闭燃料电池发动机的氢气排气端口、空气排气端口和冷却液出口，同时向氢气流道、空气流道（空压机出口端后部）和冷却液流道加注氮气，压力均设定在正常工作压力，压力稳定后关闭进气阀门，保压20min，记录压力下降值。

6.3 动态平均效率试验

6.3.1 试验条件

试验前燃料电池发动机处于热机状态。试验过程应自动进行，不应有人工干预。

6.3.2 试验步骤

按照如下步骤进行试验：

- a) 燃料电池发动机进行热机，热机过程结束后，回到怠速状态运行10s。
- b) 按照附录C规定的动态循环工况进行加载；
- c) 循环工况转换结束后按照规定的方法停机；
- d) 工况转换之间可以增加阶梯，工况运行期间如果出现中断，则试验失败，允许重新测试一次；
- e) 试验进行三次，试验结果取三次平均值。

6.3.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量数据：氢气流量、燃料电池电堆电压、电流等。

6.3.4 试验结果处理

实际氢耗量、理论氢耗量、氢气排放量、氢气排放率按附录B提供的方法进行试验结果处理。

6.4 环境适应性试验

6.4.1 温度适应性试验

6.4.1.1 高温存储试验

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 GB/T 28046.4 中的规定进行高温存储试验；
- b) 先在 $65\pm 2^{\circ}\text{C}$ 高温存储 40h，再在 $85\pm 2^{\circ}\text{C}$ 高温存储 8h，存储时燃料电池发动机管路及电气处于非连接状态；
- c) 高温存储结束后，恢复至常温状态。

6.4.1.2 低温存储试验

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 GB/T 28046.4 中的规定进行低温存储试验；
- b) 在 $-40^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 低温存储 24h，存储时燃料电池发动机管路及电气处于非连接状态；
- c) 低温存储结束后，恢复至常温状态。

6.4.1.3 高温适应性试验

燃料电池发动机与散热器均置于 $45^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的高温环境中，燃料电池发动机在额定功率工况下稳定运行不少于 60 min。

6.4.1.4 低温适应性试验

燃料电池发动机与散热器均置于 $-30^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的低温环境中，燃料电池发动机在额定功率工况下稳定运行不少于 60 min。

6.4.2 盐雾试验

试验方法和步骤参照 GB/T 28046.4 规定的方法，应满足以下要求：

- a) 燃料电池发动机管路和电气正常连接，保持低压通电状态；
- b) 一个试验循环持续 24h，其中包括 8h 的盐水喷雾，以及 16h 的放置，每个循环的第 4 个小时和第 5 个小时之间，启动燃料电池发动机在额定功率运行 1h；共进行 6 个循环。

6.5 电磁兼容性试验

6.5.1 瞬态传导发射（电源法）

按照如下步骤进行试验：

- a) 根据 ISO 7637-2 搭建快速脉冲的实验设置，完成后验证样品电气功能，使样品维持模式 2。
- b) 采集 10 次关到开的快脉冲波形，然后再次采集 10 次开到关的快脉冲波形，并记录最大值。
- c) 根据 ISO 7637-2 搭建慢速脉冲的实验设置，重复第 3 步一次。
- d) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.2 传导骚扰（电压法）

按照如下步骤进行试验：

- a) 按 IEC CISPR 25 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 检测测试环境底噪。
- c) 根据标准 CISPR25，等级 3，使样品维持模式 1 和 2，测量 DCDC 高压输出的正极与负极，电

- d) 堆低压输入的正极和负极。
- 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.3 传导骚扰（电流法）

按照如下步骤进行试验：

- a) 按 IEC CISPR 25 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 检测测试环境底噪。
- c) 根据标准 IEC CISPR 25，等级3，使样品维持模式1和2，在距离 DC/DC变换器50mm和750mm两处用探头测量发射；在距离电堆50mm和750mm 两处用探头测量发射。在低压线束上距离 FCCU和 DCDC控制部分50mm和750mm 处用探头测量发射
- d) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.4 辐射发射-RE

按照如下步骤进行试验：

- a) 按 IEC CISPR 25 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 检测测试环境底噪。
- c) 参考标准 IEC CISPR 25，等级 3，使样品维持模式 1 和 2，同时使用单级天线、双锥天线、对数周期天线、喇叭天线分别测试相应频段。
- d) 棒天线、双锥天线、对数天线测试时，位置①、位置②和位置③均需进行测试；喇叭天线测试时，测试位置②和位置③。
- e) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.5 磁场发射-REM

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 MIL-STD-461F 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 参考标准 MIL-STD-461F，将磁场探头放置于距离被测设备 70mm。使样品维持模式 1，测量这个位置的磁感应强度
- c) 将磁场探头放置在离开被测设备的磁场敏感处，各重复第 2 步一次。
- d) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.6 磁场发射

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 GB/T 18387 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 检测测试环境底噪。
- c) 参考标准 GB/T18387，使样品维持模式 1 和 2。使用环天线测试在不同轴向（X、Y）下，各自测试规定频率下的磁场。
- d) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.7 电场发射

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 GB/T 18387 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 检测测试环境底噪。
- c) 参考标准 GB/T 18387，使样品维持模式 1 和 2。使用棒天线测试相应频段。
- d) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.8 电源瞬态传导抗扰度

按照如下步骤进行试验：

- a) 校准脉冲信号发生器的波形输出。

- b) 架设完成后，验证样品电气功能。
- c) 参考标准 ISO 7637-2，将低压电源线接到脉冲信号器上，并使被测设备处于模式 2。测试要求见表 4。
- d) 测试完成后，验证样品电气功能。

表 4：电源线的电瞬态传导抗扰度试验等级和试验结果要求

脉冲编号	测试电压等级 V	测试脉冲数量或测试时间	脉冲循环周期 a		功能状态等级
			最小	最大	
1	-112	500 个脉冲	0.5s	5s	等级 C
2a	+55	500 个脉冲	0.2s	5s	等级 A
2b	+10	10 个脉冲	0.5s	5s	等级 C
3a	-165	1h	90ms	100ms	等级 A
3b	+112	1h	90ms	100ms	等级 A

6.5.9 信号线耦合干扰抗扰度

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 ISO 7637-3 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 参考标准 ISO 7637_3，校准脉冲信号发生器的波形输出。
- c) 将低压线束除电源线以外的线束放于容性夹中。
- d) 使被测设备保持在模式 3 的工作模式下。
- e) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.10 磁场抗扰度

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 ISO 11452-8 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 参考标准 ISO 11452-8，完成架设。使被测设备保持在模式 2 的工作模式下。
- c) 将磁场发射环放置在离开被测设备的位置 50mm 处，发生相应频率的磁场。期间记录控制电脑的采集数据，并查看被测设备状态。
- d) 将磁场发射环放置在离开被测设备的其他面及线束 50mm 处，各重复第 3 步一次。
- e) 电磁线圈应分别放置在 DC/DC 变换器和燃料电池发动机上表面进行测试，至少包括控制器和主要传感器位置点。
- f) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.11 辐射抗扰度

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 ISO 11452-2 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 参考标准 ISO 11452-2，闭合被测设备内部继电器，使被测设备维持模式 1，模式 2。
- c) 在天线极性为水平方向时，注入 200MHz-1GHz 频率信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- d) 在天线极性为垂直方向时，注入 400MHz-1GHz 频率信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- e) 在天线极性为水平方向时，注入 1GHz-2GHz 频率信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- f) 在天线极性为垂直方向时，注入 1GHz-2GHz 频率信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- g) 对数周期天线测试时，位置①、位置②和位置③均需进行测试；喇叭天线测试时，位置②和位置③需进行测试。
- h) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.5.12 大电流注入(BCI)

按照如下步骤进行试验：

- a) 按照 ISO 11452-4 试验设置完成后，验证样品电气功能。
- b) 参考标准 ISO 11452-4，使被测设备维持模式 3。
- c) 注入探头夹在低压线束距离被测设备 150mm。
- d) 在低压线束注入 0.1MHz-30MHz 频率的 CW 和 AM 信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- e) 注入探头夹在低压线束距离被测设备 450mm，重复第 d) 步一次。保持注入探头夹位置。
- f) 在低压线束注入 30MHz-400MHz 频率的 CW 和 AM 信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- g) 注入探头夹在低压线束距离被测设备 750mm，重复第 f) 步一次。
- h) 注入探头夹在高压线束距离被测设备 150mm。
- i) 在高压线束注入 0.1MHz-30MHz 频率的 CW 和 AM 信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- j) 注入探头夹在高压线束距离被测设备 450mm，重复第 i) 步一次。保持注入探头夹位置。
- k) 在高压线束注入 30MHz-400MHz 频率的 CW 和 AM 信号，并记录被测设备数据，观察被测设备状态。
- l) 注入探头夹在高压线束距离被测设备 750mm，重复第 k) 步一次。
- m) 使被测设备维持模式 2。重复第 3 至第 l) 步一次；
- n) 测试完成后，验证样品电气功能。

注：频率在30MHz以下，DUT 电源回（地）线应放在电流注入探头外部；频率在 30MHz至400MHz 范围内，DUT 的所有线束应放在电流注入探头内部。（高压线束全频段所有线束都放入电流探头内部）。

6.5.13 静电抗扰度(ESD)

按照 ISO 10605 试验设置完成后，按如下步骤检查样品功能。

- a) 静电枪设置为+4kV，使用高压表校验电压，使被测设备维持模式 1。
- b) 对样品等级相应的外壳螺丝进行静电放电，每个位置 3 次干扰，并使用 1M Ω 电阻对测试点干扰后的放电，每次操作间隔大于等于 1 秒。
- c) 循环步骤 b)~e) 分别测试-4kV、+6kV、-6kV、+8kV、-8kV 电压等级。
- d) 使被测设备维持模式 2，重复第 c) 至第 d) 步一次。
- e) 使被测设备维持模式 3，重复第 c) 至第 d) 步一次。
- f) 测试完成后，验证样品电气功能。

6.6 耐振动性试验

测试前，确保被测燃料电池的完整性，且与装车状态一致，具体要求如下：

- a) 试验前，对燃料电池发动机进行气密性测试和绝缘电阻测试。
- b) 参考测试对象车辆安装位置和 GB/T 2423.43-2008 的要求，将测试对象安装在振动台上。振动测试在三个方向上进行。测试从 Z 轴开始，然后是 Y 轴，最后是 X 轴（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）。每个轴向的实验时间是 22h。
- c) 测试参数按照表 5 进行。
- d) 测试完成后，燃料电池发动机满足 5.12 的要求。

表 5 随机振动载荷谱

频率 (Hz)	PSD (m/s^2) ² /Hz		
	X-方向	Y-方向	Z-方向
10	20	20	20
55	6.5	6.5	6.5
180	0.25	0.25	0.25
300	0.25	0.25	0.25

360	0.14	0.14	0.14
1000	0.14	0.14	0.14
RMS	27.8	27.8	27.8
试验时长/h	22	22	22

6.7 耐冲击性试验

测试前，确保被测燃料电池的完整性，且与装车状态一致，具体要求如下：

- 试验前，对燃料电池发动机进行气密性测试和绝缘电阻测试。
- 参考测试对象在实际应用中的安装位置和 GB/T 2423.43-2008 的要求，将测试对象安装在振动台上。
- 对燃料电池发动机施加表 6 规定的半正弦冲击波， $\pm z$ 方向各 6 次，共计 12 次。半正弦冲击波最大、最小容差允许范围按 GB 38031 中 8.2.2 项规定的值。
- 相邻两次冲击的间隔时间以两次冲击在试验样品上造成的响应不发生相互影响为准，一般应 5 倍冲击脉冲持续时间。
- 测试完成后，燃料电池发动机满足 5.13 的要求。

表 6 冲击试验要求

测试程序	参数要求
冲击波形	半正弦波
测试方向	$\pm Z$
加速度值	5g
脉冲时间/ms	6
脉冲次数	正负方向各 10 次

6.8 噪声试验

6.8.1 试验条件

- 燃料电池发动机测试对象不包含燃料电池散热系统。
- 传声器布置位置:如图 2 所示，规定传声器位于每个面积单元的中心位置，距离测试物中心表面位置 1 米距离。
- 在测量表面上所有传声器位置和测试频率范围内的每个频段，背景噪声级应比被测声源工作时的声压级至少低 10dB。

6.8.2 试验方法

按照制造厂规定的起动操作步骤起动燃料电池发动机。

- 在怠速状态下持续稳定运行 10min。
- 然后按照厂家规定的加载方法进行加载，加载到额定功率，持续稳定运行 10min。
- 按照制造厂规定的关机操作步骤关闭燃料电池发动机，待系统达到待机状态，试验测试完毕。

6.8.3 数据记录

记录噪音测试中，燃料电池发动机在起动、最低净输出功率、加载过程、额定功率、卸载过程和关机过程中的噪音最大值。

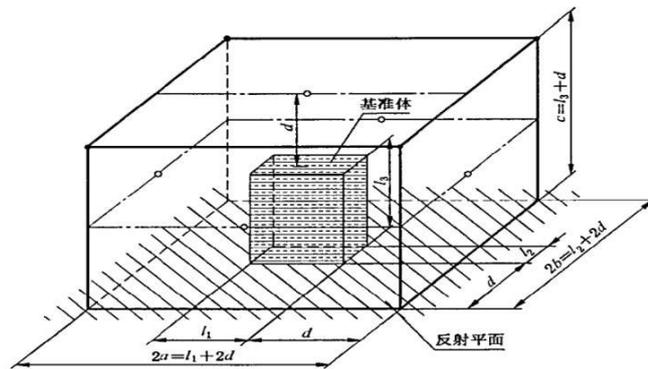


图2 噪声测试图

7 维护保养件要求

为了便于维护保养，燃料电池发动机的设计应满足以下要求：

- a) 去离子罐和冷却液过滤器应布置在易于更换的位置；
- b) 冷却系统的布置应利于更换冷却液，留有排气孔实现气体快速排出。

附录 A
(资料性)
燃料电池发动机性能试验记录表

A.1 试验样品信息表

表 A.1 试验样品信息表

样品名称	
样品型号	
种类	
燃料类型	
冷却方式	
燃料电池发动机工作温度范围 (°C)	
燃料电池发动机进气压力 (kPa)	
燃料电池发动机额定功率 (kW)	
燃料电池发动机峰值功率 (kW)	
工作电压范围 (V)	
双极板类型	
电子控制器型号/生产厂	
燃料电池电堆型号/生产厂	
质子交换膜型号/生产厂	
空压机型号/生产厂	

A.2 起动特性试验结果记录表

表 A.2 起动特性试验结果记录表

序号	试验项目		试验结果	
1	常温怠速冷起动试验		起动时间 (s)	
			系统电压 (V)	
2	常温怠速热起动试验		起动时间 (s)	
			系统电压 (V)	
3	常温额定功率冷起动试验		起动时间 (s)	
			系统电压 (V)	
4	常温怠速热起动试验		起动时间 (s)	
			系统电压 (V)	
5	常温额定功率热起动试验		起动时间 (s)	
			系统电压 (V)	
6	低温冷起动试验	怠速功率	环境温度 (°C)	
			冷却液进出口起始温度 (°C)	
			起动时间 (s)	

	额定功率	系统电压 (V)	
		环境温度 (°C)	
		冷却液进出口起始温度 (°C)	
		起动时间 (s)	
		系统电压 (V)	

A.3 功率输出特性试验结果记录表

表 A.3 功率输出特性试验结果记录表

序号	试验项目	试验结果	
1	额定功率	电堆功率 (kW)	
		辅助系统功率 (kW)	
		燃料电池发动机功率 (kW)	
		氢气消耗量 (L/min)	
2	峰值功率	运行时间 (s)	
		电堆功率 (V)	
		辅助系统功率 (s)	
		燃料电池发动机功率 (kW)	
		氢气消耗量 (L/min)	
		电堆功率 (V)	
		辅助系统功率 (s)	
		燃料电池发动机功率 (kW)	
氢气消耗量 (L/min)			

A.4 稳定特性试验结果记录表

表 A.4 稳定特性试验结果记录表

工况点	燃料电池发动机			辅助系统功率 (kW)	发动机输出功率 (kW)	氢气流量 (L/min)	氢气流量 (g/s)	电堆效率 (%)	发动机效率 (%)
	电流 (A)	电压 (V)	功率 (kW)						
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									

工况点	燃料电池发动机			辅助	发动	氢气	氢气	电堆	发动
8									
9									
10									

A.5 动态响应特性试验结果记录表

表 A.5 动态响应特性试验结果记录表

序号	试验项目	试验结果	
1	加载动态响应	起始功率 (kW)	
		截止功率 (kW)	
		加载动态响应时间 (s)	
2	卸载动态响应	起始功率 (kW)	
		截止功率 (kW)	
		减载动态响应时间 (s)	

A.6 动态平均效率试验结果记录表

表 A.6 动态平均效率试验结果记录表

序号	试验项目	试验结果	
1	动态评价效率	实际氢气消耗量 (g)	
		系统能量 (kW)	
		动态平均效率	

附录 B
(规范性)
稳态试验数据处理

B.1 燃料电池电堆功率

由燃料电池电堆输出电流和电压按公式(B.1)计算。

$$P_s = \frac{U_s \cdot I_s}{1000} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

P_s ——燃料电池电堆功率，单位为千瓦（kW）；

U_s ——燃料电池电堆电压，单位为伏特（V）；

I_s ——燃料电池电堆电流，单位为安培（A）。

B.2 燃料电池电堆效率

燃料电池电堆效率按公式(B.2)计算。

$$\eta_s = \frac{1000P_s}{m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \times 100\% \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

η_s ——燃料电池电堆效率；

m_{H_2} ——氢气流量，单位为克每秒（g/s）；

LHV_{H_2} ——氢气低热值， 1.2×10^5 kJ/kg。

B.3 辅助系统功率

由空压机、水泵等所有辅件消耗的功率组成，按公式(B.3)计算。

$$P_A = \frac{U_A \cdot I_A}{1000} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

P_A ——辅助系统功率，单位为千瓦（kW）；

U_A ——辅助系统电压，单位为伏特（V）；

I_A ——辅助系统电流，单位为安培（A）。

B.4 燃料电池发动机功率**B.4.1 如果燃料电池发动机电压和电流直接测得，则燃料电池系统功率按公式(B.4)计算。**

$$P_F = \frac{U_F \cdot I_F}{1000} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

P_F ——燃料电池发动机功率，单位为千瓦（kW）；

U_F ——燃料电池发动机电压，单位为伏特（V）；

I_F ——燃料电池发动机电流，单位为安培（A）。

B.4.2 如果燃料电池发动机功率由燃料电池堆功率和辅助系统功率相减所得，则燃料电池系统功率按公式(B.5)计算。

$$P_F = P_s - P_A \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

P_F ——燃料电池发动机功率，单位为千瓦（kW）；

P_S ——燃料电池电堆功率，单位为千瓦（kW）；

P_A ——辅助系统功率，单位为千瓦（kW）。

B.5 燃料电池发动机效率

燃料电池发动机效率按公式(B.6)计算。

$$\eta_F = \frac{1000P_F}{m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \times 100\% \quad \text{..... (B.6)}$$

式中：

η_F ——燃料电池发动机系统效率；

m_{H_2} ——氢气流量，单位为克每秒（g/s）；

LHV_{H_2} ——氢气低热值， 1.2×10^5 kJ/kg。

B.6 燃料电池发动机实际氢气消耗量

燃料电池发动机实际氢气消耗量按公式(B.7)计算。

$$M_{H_2} = \int_{T_1}^{T_2} m_{H_2} \cdot dt \quad \text{..... (B.7)}$$

式中：

M_{H_2} ——燃料电池发动机实测氢气消耗量，单位为克g；

m_{H_2} ——燃料电池发动机实测氢气流量，单位为克每秒（g/s）；

T_1 ——起始时间，单位为s；

T_2 ——结束时间，单位为s。

B.7 燃料电池发动机能量

燃料电池发动机能量按公式(B.8)计算。

$$Q_F = \int_{T_1}^{T_2} P_F \cdot dt \quad \text{..... (B.8)}$$

式中：

Q_F ——某段时间内燃料电池发动机能量，单位为kJ；

P_F ——燃料电池发动机功率，单位为kW；

T_1 ——起始时间，单位为s；

T_2 ——结束时间，单位为s。

B.8 燃料电池发动机动态平均效率

燃料电池发动机动态平均效率按公式(B.9)计算。

$$\overline{\eta_{FD}} = \frac{1000Q_F}{M_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \times 100\% \quad \text{..... (B.9)}$$

式中：

$\overline{\eta_{FD}}$ ——燃料电池发动机动态平均效率；

Q_F ——某短时间内燃料电池发动机能量，单位为kJ；

M_{H_2} ——燃料电池发动机实测氢气消耗量，单位为克g；

LHV_{H_2} ——氢气低热值， 1.2×10^5 kJ/kg。

附录 C
(规范性)
动态循环工况加载方法

燃料电池发动机动态循环工况加载方法由以下阶段组成（见图C.1和表C.1）。

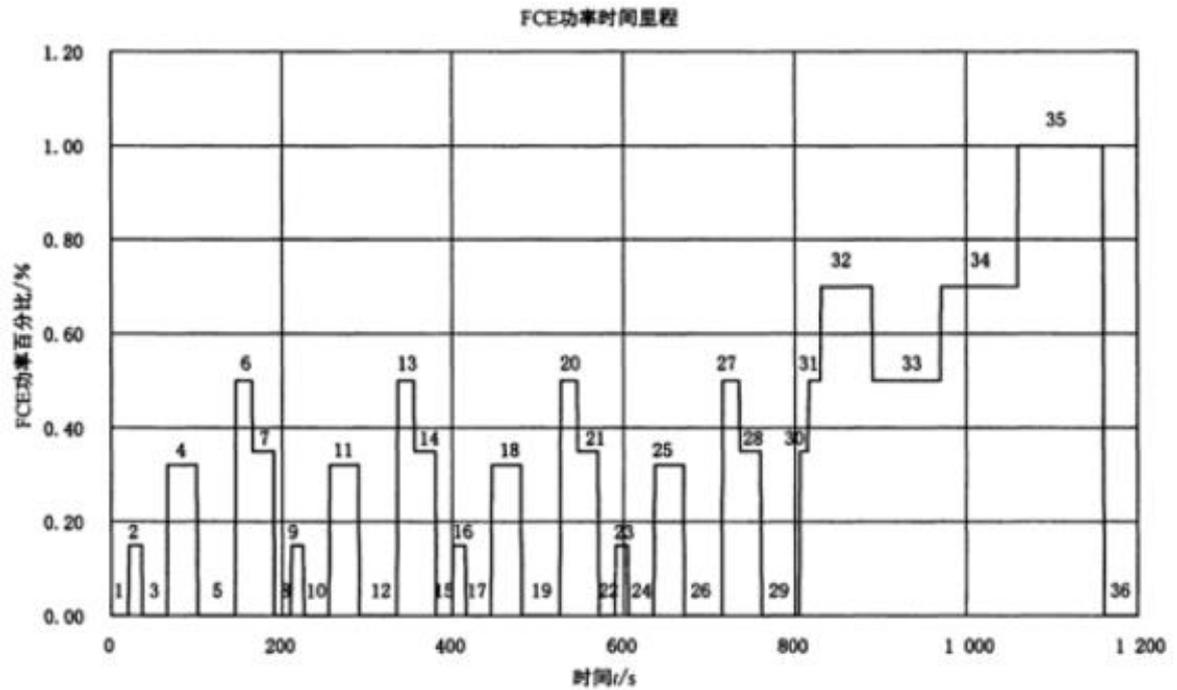


图 C.1 燃料电池发动机动态循环工况加载曲线

表 C.1 燃料电池发动机动态循环工况加载阶段

加载步骤	加载功率/kW	加载时间/s
1	P_I	20
2	$15\%P_E$	15
3	P_I	30
4	$32\%P_E$	35
5	P_I	45
6	$50\%P_E$	20
7	$35\%P_E$	25
8	P_I	20
9	$15\%P_E$	15
10	P_I	30
11	$32\%P_E$	35
12	P_I	45
13	$50\%P_E$	20
14	$35\%P_E$	25

加载步骤	加载功率/kW	加载时间/s
15	P_I	20
16	$15\%P_E$	15
17	P_I	30
18	$32\%P_E$	35
19	P_I	45
20	$50\%P_E$	20
21	$35\%P_E$	25
22	P_I	20
23	$15\%P_E$	15
24	P_I	30
25	$32\%P_E$	35
26	P_I	45
27	$50\%P_E$	20
28	$35\%P_E$	25
29	P_I	45
30	$35\%P_E$	10
31	$50\%P_E$	15
32	$70\%P_E$	60
33	$50\%P_E$	80
34	$70\%P_E$	90
35	$100\%P_E$	100
36	P_I	30

注： P_I 表示总功率， P_E 表示额定功率，相邻工况之间转换可以增加过度阶梯，过度时间根据具体情况确定。