

团 体 标 准

T/SCSAE 001-2022

燃料电池客车动力系统能量消耗量台架 试验方法

Energy consumption bench test method for powertrain of fuel cell hybrid

electric bus

2022-03-16 发布

2022-03-16 实施

四川省汽车工程学会 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 试验条件.....	2
5 试验程序.....	4
6 数据记录和结果.....	6
7 试验报告.....	10

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》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由四川省汽车工程学会提出。

本文件参加单位：西华大学、东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司、成都客车股份有限公司、电子科技大学、西南交通大学、四川省汽车工程学会、中国测试技术研究院、四川荣创新能动力系统有限公司、四川金星清洁能源装备股份有限公司、厚普清洁能源股份有限公司。

本文件主要起草人：杨继斌、邓鹏毅、彭忆强、武小花、黎青松、周华、孙树磊、陈鑫、练勇、刘煜、蒋平、谢先东、李凯、殷聪、李奇、徐俊德、肖潇、李海、陶诗涌、王勇、顾小明。

本文件首次制定。

燃料电池客车动力系统能量消耗量台架试验方法

1 范围

本文件规定了燃料电池动力系统在台架上进行能量消耗量试验的试验方法。

本文件适用于最大设计总质量超过3.5 t的使用氢气的氢燃料电池城市客车、氢燃料电池其他客车。

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 18352.6—2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法

GB/T 18488.2 电动汽车用驱动电机系统 第2部分：试验方法

GB/T 19596 电动汽车 术语

GB/T 19754—2021 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法

GB/T 24548—2009 燃料电池电动汽车 术语

GB/T 28183 客车用燃料电池发电系统测试方法

GB/T 35178 燃料电池电动汽车氢气消耗量测量方法

GB/T 37244 质子交换膜燃料电池汽车用燃料氢气

GB/T 38031 电动汽车用动力蓄电池安全要求

GB/T 38146.2 中国汽车行驶工况第2部分：重型商用车辆

3 术语和定义

GB/T 19596、GB/T 19754—2021、GB/T 24548—2009和GB/T 35178界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

燃料电池客车动力系统 powertrain of fuel cell hybrid electric bus

燃料电池客车用动力系统，包括燃料电池系统、DC/DC变换器、驱动电机及其控制系统、动力电池系统（包括动力电池和动力电池管理系统）和整车控制器。

3.2

燃料电池客车动力系统台架 test bench of fuel cell electric bus powertrain

用于在实验室加载和测试燃料电池客车动力系统的装置。

3.3

净能量改变量 net energy change; NEC

本文件指动力电池能量的净改变量，单位为千瓦时（kWh）。

4 试验条件

4.1 试验环境要求

4.1.1 规定测试环境条件为：海拔不超过 1 000 m，环境温度为 5 °C ~ 40 °C。

4.1.2 实验室具备必要的安全措施，包括氢气泄漏检测报警措施、通风措施、空间上部电器防爆密封措施。

4.2 试验台架要求

4.2.1 基本要求

加载测功机与燃料电池客车动力系统连接（参见图 1）。图 1 所示为一类典型燃料电池客车动力系统试验台架，仅代表一种典型燃料电池客车动力系统台架。燃料电池客车动力系统台架主要由被测燃料电池客车动力系统、加载装置、车辆模型实时仿真系统、数据采集及记录系统等组成。实时仿真系统运行车辆模型，并且发出驱动电机及测功机控制命令，采集动力系统动力输出末端转矩，以计算车辆运行状态（实时仿真系统），采集测功机转速，据此进行测功机速度闭环控制。

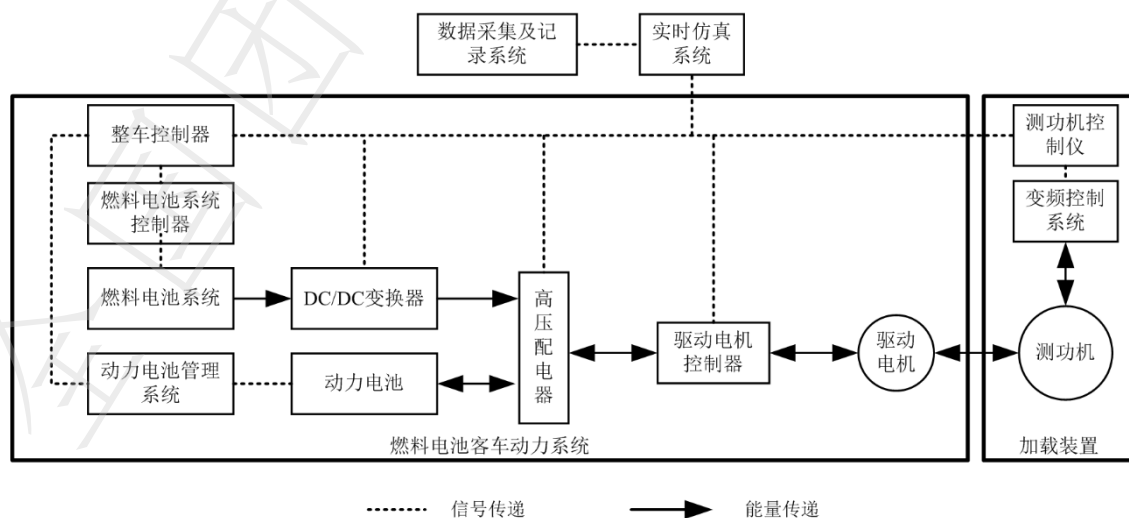


图 1 试验台架示意图

4.2.2 其他相关参数要求

测量参数、单位及精度见表1。

表1 测量参数、单位和精度要求

参数	单位	精度
电压	V	±0.5% FS
电流	A	±0.5% FS
温度	°C	±1.0
湿度	%	相对湿度不低于±3%
气体质量流量	g/s	不低于±1.0% FS
气体体积流量	L/s	不低于±1.0% FS
气体压力	kPa	不低于±1.0
转速	r/min	±2
转矩	Nm	0.5 级

4.3 试验氢气要求

台架使用的氢气规格应符合GB/T 37244或燃料电池系统生产厂商技术条件的规定。

4.4 试验燃料电池客车动力系统要求

4.4.1 燃料电池客车动力系统部件完整，且提供产品技术条件和技术规范。

4.4.2 根据 4.1 要求提供燃料电池客车动力系统部件测试通信协议。

4.5 试验循环工况

试验循环工况有下列三种形式，每次试验应选择同一种试验循环工况，试验循环的速度公差和时间公差应满足GB 18352.6—2016附录C.1.2.6.6的要求，且每个试验循环超出公差范围累计时间不能超过15 s：

- a) 按照GB/T 38146.2规定的中国客车行驶工况，依据被测车型选择中国城市客车行驶工况（CHTC-B）或中国普通客车行驶工况（CHTC-C）；
- b) 若车辆的最高车速小于CHTC的最高车速，在目标车速大于车辆的最高车速时，按照GB 18352.6—2016附件CA.5的规定对试验循环进行修改；
- c) 必要时可采用生产厂商自定义的实际运行测试工况，且在试验报告中注明。

4.6 试验载荷

对于城市客车，应在65%最大设计装载质量状态对应下的负荷进行试验，或者在最大设计总质量状态对应下的负荷进行试验，或者根据生产厂商建议并经由检验机构确认的负荷进行试验；对于其他客车，应在最大设计总质量状态对应下的负荷进行试验。

5 试验程序

5.1 密封性检测

燃料电池系统按照GB/T 28183气密性检查方法进行检查；动力电池系统的密封性应满足 \geq IP67的要求，按照GB/T 38031和GB/T 4208的方法进行检查；驱动电机及控制器按照GB/T 18488.2密封性检查方法进行检查。

5.2 跑合

生产厂商应对试验样机进行跑合，或按生产厂商提供的技术条件完成跑合。

5.3 能量消耗量试验程序

5.3.1 非外接充电型燃料电池客车的试验程序

5.3.1.1 动力电池系统的预置

在进行首次试验前，动力电池应达到生产厂商要求的荷电状态，否则应通过台架的外接充电装置或使用燃料电池系统的方式，根据生产厂商提供的动力电池技术规范进行外接充电或放电，将动力电池预置到生产厂商要求的荷电状态。

5.3.1.2 试验程序

车辆按照4.5试验循环进行试验，每完成一次试验，可根据需要关闭试验台架，关闭时间不超过30分钟。试验应连续进行，如果在未完成试验前，进行了非试验的运行，则试验无效，需重新进行试验。

5.3.1.3 试验循环的次数及其处理

要求进行至少三次试验循环，根据6.8.1.2及6.8.1.3的规定，判定试验结果是否有效、试验次数是否充分。如果连续运行多个实验循环后仍无法满足6.8.1.2及6.8.1.3的要求，根据汽车生产企业的建议并由检验机构确认，可运行12个试验循环后结束试验。经生产厂商建议，可适当增加试验循环数量。

5.3.2 外接充电型燃料电池客车的试验程序

5.3.2.1 动力电池系统的预置

在进行首次试验前，应根据生产厂商提供的动力电池技术规范进行外接充电或放电，达到生产厂商要求的荷电状态。

5.3.2.2 包含纯电动工作模式的燃料电池客车台架试验程序

5.3.2.2.1 一般规定

包含纯电动工作模式的燃料电池客车，指可以在满足4.5的条件下以纯电动工作模式完成一个试验循环的车辆。如果车辆的混合动力设计决定的或控制策略中设定的低于某车速下使用纯电动工作，高于

某车速使用混合动力工作的情况，不属于本规范中规定的包含纯电动工作模式的燃料电池客车，这类汽车按照5.3.2.3描述的试验程序实施。

纯电动工作模式的可操作模式如下：

- a) 以手动切换开关型式作为按钮布置在仪表台上，以加速踏板踩到底无法满足4.5规定的公差要求作为纯电动工作模式的结束；
- b) 靠整车控制器自动过渡，以燃料电池系统自动起动作作为纯电动工作模式结束的标志。

包含纯电动工作模式的燃料电池客车动力系统能量消耗量台架试验分为三个阶段，第一阶段为纯电动续驶里程阶段，第二阶段为动力电池能量调整阶段，第三阶段为电能量平衡运行阶段；如果试验车辆从动力电池能量调整阶段开始，连续运行多个试验循环后仍无法达到5.3.2.2.4规定的电能量平衡运行阶段的结束条件，根据生产厂商建议并经由检验机构确认，可判定为不具有电能量平衡运行阶段，此时动力电池能量调整阶段需运行12个试验循环。经生产厂商建议，可适当增加试验循环数量。试验应连续进行，如果尚未完成全部的试验，车辆就进行了非试验的行驶，则试验无效，需重新进行试验。

5.3.2.2.2 纯电动续驶里程阶段（第一阶段）试验程序

按照4.5规定的试验循环进行试验。

- a) 对于使用纯电动模式切换开关的车辆，如果有生产厂商规定的结束条件，当台架车速无法满足4.5的规定，或达到生产厂商规定的结束条件中的任何一个条件，应立即将车速设置为零，将此时的试验循环序号计为 n_1+1 ，记录纯电动续驶里程数值，然后按照安全操作流程停机，静置不超过30 min。纯电动续驶里程阶段试验结束；
- b) 对于自动切换纯电动工作模式的车辆，当台架车速无法满足4.5的规定，或燃料电池系统自动起动，应立即将车速设置为零，将此时的试验循环序号计为 n_1+1 ，记录纯电动续驶里程数值，然后按照安全操作流程停机，静置不超过30 min。纯电动续驶里程阶段试验结束。

5.3.2.2.3 动力电池能量调整阶段（第二阶段）试验程序

按照4.5规定的试验循环进行试验，并计算各试验循环动力电池NEC相对变化量，当出现NEC相对变化量绝对值不大于5%的试验时，达到第二阶段的试验结束条件，将此时的试验循环序号计为 n_2+1 ，第二阶段的试验循环包括 $n_1+1\sim n_2$ 个试验循环。经生产厂商建议，可适当增加试验循环次数，当再次出现NEC相对变化量绝对值不大于5%时，第二阶段的试验结束，将该次的试验循环序号计为 n_2+1 。对于不具有电能量平衡运行阶段的车辆，按照5.3.2.2.1规定的试验循环数量要求连续进行试验直至试验结束，将试验结束时的试验循环序号计为 n_2 。

5.3.2.2.4 电能量平衡运行阶段（第三阶段）试验程序

按照4.5规定的试验循环进行试验，并计算各试验循环动力电池NEC相对变化量，在第 n_2+1 个试验循环之后，当再次出现两次NEC相对变化量的绝对值不大于5%的试验时，达到第三阶段的试验结束条件。

5.3.2.3 不包含纯电动工作模式的燃料电池客车台架试验程序

5.3.2.3.1 一般规定

不包含纯电动工作模式的燃料电池客车动力系统能量消耗台架试验分为两个阶段：动力电池能量调整阶段和电能量平衡运行阶段；如果试验从动力电池能量调整阶段开始，连续运行多个试验循环后仍无法达到5.3.2.2.4规定的电能量平衡运行阶段的结束条件，根据生产企业建议并由检验机构确认，可判定为不具备电能量平衡运行阶段，为此能量调整阶段需运行12个循环。试验需连续进行，如果尚未完成全部的试验，车辆就进行了非试验的行驶，则应重新进行试验。

5.3.2.3.2 动力电池能量调整阶段试验程序

按照5.3.2.2.3的规定进行试验。

5.3.2.3.3 电能量平衡运行阶段试验程序

按照5.3.2.2.4的规定进行试验。

6 数据记录和结果

6.1 环境数据

记录试验的环境温度、湿度和大气压力。

6.2 动力电池荷电状态和电压

记录在每阶段试验开始和结束时刻动力电池荷电状态和电压。

6.3 行驶距离

记录各试验循环模拟车辆在台架上的当量行驶距离，单位为千米（km）。

6.4 氢气消耗量

本文件中氢气消耗量的测量方法参考GB/T 35178中的测量方法，包括压力温度法，质量分析法和流量法。氢气消耗量用质量表示，单位为克（g）。

6.5 燃料电池系统输出的电能量

测量和计算燃料电池系统在各试验循环中输出的电能量，单位为瓦时（Wh）。

6.6 动力电池净能量改变量（NEC）

测量并计算台架在各试验循环中动力电池的NEC，并记录结果。NEC的确定程序可参照GB/T 19754—2021中4.2.1的规定。

6.7 动力电池 NEC 的相对变化量

测量并计算台架在各试验循环中动力电池 NEC 的相对变化量，并记录结果。动力电池 NEC 的相对变化量的确定程序可参照GB/T 19754—2021中4.3的规定。

6.8 能量消耗量试验结果

6.8.1 非外接充电型燃料电池客车的试验程序

6.8.1.1 一般要求

对于非外接充电型燃料电池客车动力系统台架测试的能量消耗量试验结果应表示为：燃料消耗量（g/100 km）和电能消耗量（Wh/100 km）。

6.8.1.2 试验有效的判定条件

本文件以 NEC 的相对变化量作为判定条件，用于确定试验结果是否有效，是否需要燃料消耗量进行动力电池荷电状态的修正。判定原则如下：

- a) 如果 NEC 的相对变化量均不大于1%，则无须对燃料消耗量进行动力电池荷电状态修正，取多次试验的平均值作为能量消耗量结果；
- b) 如果 NEC 的相对变化量不大于5%，但存在大于1%的情况，应按照6.8.1.3的规定进行能量消耗量的计算；
- c) 如果 NEC 的相对变化量的结果大于5%，则认为该次循环的试验结果无效。

6.8.1.3 动力电池荷电状态修正程序

6.8.1.3.1 为了得到 NEC 为0时的燃料消耗量，采用线性插值法。至少进行三次试验，要求至少有一次 NEC 试验结果为正值，有一次 NEC 试验结果为负值，否则应适当增加试验次数。

6.8.1.3.2 用线性相关系数 R^2 判定试验结果的有效性。当 $R^2 \geq 0.8$ 时，线性回归结果有效，试验结果仅包含燃料消耗量；当 $R^2 < 0.8$ ，线性回归结果无效，应适当增加试验次数。

6.8.1.4 试验结果的特殊处理

如果燃料电池客车动力系统连续运行多个试验循环后仍无法满足6.8.1.2及6.8.1.3的要求，则试验结果应包含燃料消耗量和电能消耗量。按照5.3.1.3的相关规定运行特定的试验循环数量，对各个循环的燃料消耗量和电量消耗量结果取平均，得到试验结果。

6.8.2 外接充电型燃料电池客车的试验程序

6.8.2.1 一般要求

6.8.2.1.1 外接充电型燃料电池客车动力系统台架测试的能量消耗量试验结果表示为：燃料消耗量（g/100 km）和电能量消耗量（Wh/100 km）。其中，燃料消耗量为折算的氢气消耗量和动力电池净能量改变量的和。

燃料消耗量的计算：

$$FC = \frac{(w_{fc} - K \times NEC)}{d} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

FC ——燃料消耗量，单位为克每百公里（g/100 km）；

w_{fc} ——燃料电池系统氢气消耗量，单位为克（g）；

NEC ——动力电池净能量改变量，单位为千瓦时（kWh）；

d ——车辆行驶里程，单位为千米（km）；

K ——动力电池电能消耗量等效为氢气消耗量的等效因子，其值的两种参考确定方法如下：

a) K 值的第一种确定方法如公示（2）所示；

$$K = \frac{w_{fc} \times 1\,000}{E_{fc} \times \eta_{DC}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

E_{fc} ——燃料电池系统输出的电能量，单位为瓦时（Wh）；

η_{DC} ——DC/DC 直流变换器的平均效率。

b) K 值的第二种确定方法为被测车辆纯氢与纯电在相同工况和相同行驶里程下成本的比值。

注： K 值的确定推荐选用第一种确定方法，若考虑成本因素的评价，可选用第二种确定方法。

电能消耗量的计算：

$$EC = \frac{E_{fc} - NEC \times 1\,000}{d} \times 100 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

EC ——电能量消耗量，单位为瓦时每百公里（Wh/100 km）。

6.8.2.1.2 包含纯电动工作模式的燃料电池客车动力系统台架测试的能量消耗量试验结果分为纯电动续驶里程阶段、动力电池能量调整阶段、电能量平衡运行阶段三部分单独处理。

6.8.2.2 包含纯电动工作模式的燃料电池客车

6.8.2.2.1 纯电动续驶里程阶段（第一阶段）

电能消耗量：

$$EC_{tot1} = \frac{E_{fc1} - NEC_{s1} \times 1\,000}{d_{s1}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

EC_{tot1} ——第一阶段的电能消耗量，单位为瓦时每百公里（Wh/100 km）；

E_{fc1} ——第一阶段燃料电池系统的总电能输出，由于是纯电动工况，所以此处数值为 0，单位为瓦时（Wh），按照公式（5）计算；

NEC_{s1} ——第一阶段的动力电池的总能量净改变量，单位为千瓦时（kWh），按照公式（6）计算；

d_{s1} ——第一阶段车辆的总行驶里程，单位为千米（km），按照公式（7）计算。

$$E_{fc1} = \sum_{i=1}^{n_1} E_{fc,i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$E_{fc,i}$ ——第 i 个试验循环的燃料电池系统的电能量输出。

$$NEC_{s1} = \sum_{i=1}^{n_1} NEC_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

NEC_i ——第 i 个试验循环的动力电池能量净改变量。

$$d_{s1} = \sum_{i=1}^{n_1} d_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

d_i ——第 i 个试验循环的行驶里程。

6.8.2.2.2 动力电池能量调整阶段 (第二阶段)

燃料消耗量:

$$FC_{tot2} = \frac{w_{fc2} - K_2 \times NEC_{s2}}{d_{s2}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (8)$$

电能消耗量:

$$EC_{tot2} = \frac{E_{fc2} - NEC_{s2} \times 1000}{d_{s2}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

FC_{tot2} ——第二阶段的燃料消耗量, 单位为克每百公里 (g/100 km);

w_{fc2} ——第二阶段燃料电池系统的总氢气消耗量, 单位为克 (g), 按照公式 (10) 计算;

K_2 ——第二阶段动力电池电能消耗量等效为氢气消耗量的等效因子;

NEC_{s2} ——第二阶段动力电池的总能量净改变量, 单位为千瓦时 (kWh), 按照公式 (11) 计算;

d_{s2} ——第二阶段车辆的总行驶里程, 单位为千米 (km), 按照公式 (12) 计算;

EC_{tot2} ——第二阶段的电能消耗量, 单位为瓦时每百公里 (Wh/100 km);

E_{fc2} ——第二阶段燃料电池系统的总电能输出, 单位为瓦时 (Wh), 按照公式 (13) 计算。

$$w_{fc2} = \sum_{i=n_1+1}^{n_2} w_{fc,i} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$w_{fc,i}$ ——第 i 个试验的燃料电池氢气消耗量。

$$NEC_{s2} = \sum_{i=n_1+1}^{n_2} NEC_i \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$d_{s2} = \sum_{i=n_1+1}^{n_2} d_i \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$E_{fc2} = \sum_{i=n_1+1}^{n_2} E_{fc,i} \quad \dots\dots\dots (13)$$

6.8.2.2.3 电能量平衡运行阶段 (第三阶段)

电能量平衡运行工作阶段，参考6.8.1的规定计算第三阶段的燃料消耗量 FC_{tot3} ，参考6.8.2.2.2的规定计算第三阶段的电能消耗量 EC_{tot3} 。

6.8.2.3 不包含纯电动工作模式的燃料电池客车

6.8.2.3.1 动力电池能量调整阶段

按照 6.8.2.2.2 的规定计算试验结果，计算时公式 (10) ~ (13) 中的 n_{i+1} 替换为 1。

6.8.2.3.2 电能量平衡运行阶段

对于包含电能量平衡运行阶段的燃料电池客车动力系统，按照6.8.2.2.3的规定计算实验结果。

7 试验报告

试验报告应包括台架对应的燃料电池客车配置、动力系统参数、试验循环和第6章规定的所有测量参数和计算结果。
