

中国交通运输协会团体标准
商用车燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法
编制说明

标准编制组

2022 年 11 月

1. 任务来源，起草单位，协作单位，主要起草人

1.1 任务来源

潍柴动力股份有限公司已建成燃料电池整车、燃料电池系统、电堆、单电池等综合性测试平台，同时具备万套级的燃料电池模组、电堆和双极板产能，在行业中属于重要的燃料电池厂商。但在燃料电池耐久及可靠性测评过程中发现缺少科学统一的标准，为了让燃料电池产品在推向市场前对产品的耐久性及可靠性有全方位的测试评价，且以解决行业内没有统一的燃料电池车辆用耐久试验工况提取和拟合方法为宗旨，通过一系列针对燃料电池耐久测评特征的提取和拟合制定出耐久试验工况分析调研，提出了本标准的新方法，并向中国交通运输协会提交团体标准《商用车燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法》立项申请，通过了中国交通运输协会标准化技术委员会组织的评审，2021年12月17日在中国交通运输协会官方网站下发立项通知。

1.2 起草单位、协作单位及主要起草人

本标准主要由潍柴动力股份有限公司起草，山东国创燃料电池技术创新中心有限公司、中汽研汽车检验中心（天津）有限公司、潍柴巴拉德氢能科技有限公司、同济大学、上海捷氢科技有限公司、上海重塑科技有限公司等单位协作起草。

主要起草人如下：

序号	姓名	单位	职务/职称	分工
1	王钦普	潍柴动力股份有限公司	潍柴科学家/研究员级高工	组长
2	潘凤文	山东国创燃料电池技术创新中心有限公司	首席科学家/正高级工程师	副组长
3	李明阳	潍柴动力股份有限公司	工程师	成员
4	郭 婷	中汽研汽车检验中心（天津）有限公司	博士/副研究员	成员
5	王彦波	山东国创燃料电池技术创新中心有限公司	博士/高级工程师	成员
6	赵小军	山东国创燃料电池技术创新中心有限公司	博士/高级工程师	成员
7	朱晓春	潍柴巴拉德氢能科技有限公司	高级工程师	成员
8	陈 沛	上海捷氢科技有限公司	高级工程师	成员
9	翟 双	上海重塑科技有限公司	首席专家工程师	成员
10	李 冰	同济大学	教授/博士生导师	成员

2. 制定标准的必要性和意义

燃料电池车辆应用场景的不同，电堆或发动机变载条件不同，寿命周期内操作方式存在明显差异，若采用通用工况不能真正反映出某车型匹配的电堆或发动机的耐久

性能和寿命，为满足具体车型的耐久性测试和寿命预测等对耐久试验工况的需求，亟需制定统一、规范的燃料电池车用耐久试验工况的制定方法、标准。针对具体车型应用的耐久试验工况和燃料电池的输出特性，通过科学合理地提取和拟合方法，并规范统一化，更加客观地、真实地反映出该车型所匹配的电堆和发动机耐久性和可靠性，同时为市场化的对比提供了统一标准，有助于推动行业健康发展。《商用车燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法》标准的制定，可为企业规范化、统一开展燃料电池电堆、发动机可靠性、耐久性测试及寿命评价提供重要的技术指导意义。

3. 主要工作过程

第1阶段（2020.10-2021.05）：国内标准法规解读与对比分析，研究分析燃料电池耐久试验工况的设计方法。

第2阶段（2021.01-2021.10）：对商用车中各种车型的耐久试验工况提取和拟合方法研究，并按中国交通运输协会项目计划制定《商用车燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法》团标草案；

第3阶段（2021.08-2022.10）：设计用于验证的牵引车、客车推荐耐久试验工况；

第4阶段（2022.05-2022.12）：开展电堆或系统样本验证，以充分证明该标准方法的科学合理性。

4. 制定标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

4.1 原则和依据

在充分总结和比较了国内外燃料电池耐久测试工况的标准和文献、调研了国内外对耐久测试方法的基础上提出了科学合理的工况提取和拟合方法，本标准制定按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》标准编制；按照但不限于GB/T 38146.2-2019《中国汽车行驶工况 第2部分：重型商用车辆》中路谱要求进行提取和拟合。

4.2 与现行法律、标准的关系

法律法规方面，本标准制定遵守现行法律法规。

标准方面，燃料电池发动机国家标准层面主要制定了GB/T38914-2020《车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法》，方法中提及了“参比工况谱”、“自定义工况谱”。

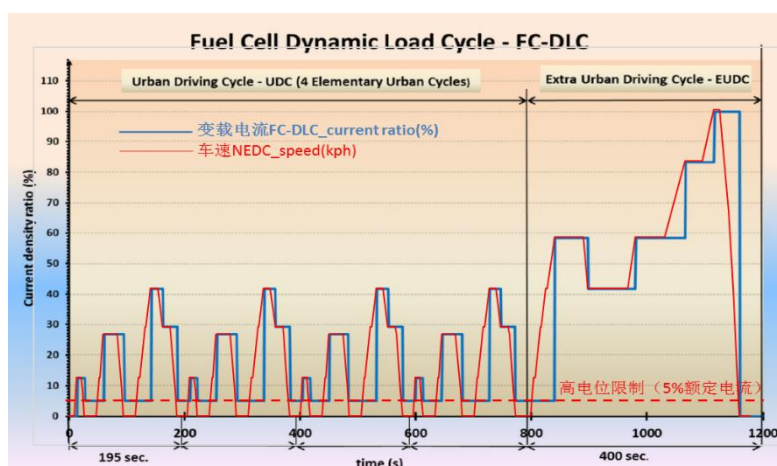


图 1 欧盟 EU Harmonised Test 动态载荷工况

现有的相关标准的问题及本标准的补充或优化：

a) 欧盟 EU Harmonised Test 中提及应用于汽车领域的单电池组件耐久测试时，基于 NEDC 行驶工况制定了动态载荷耐久试验工况及耐久测评规范，但该耐久试验工况简单地将“速度-时间”变载趋势直接转换为“电流-时间”，如图 1 所示，造成燃料电池功率特性、能量输出、驱动阻力与速度的三次项关系等未被充分考虑在内。

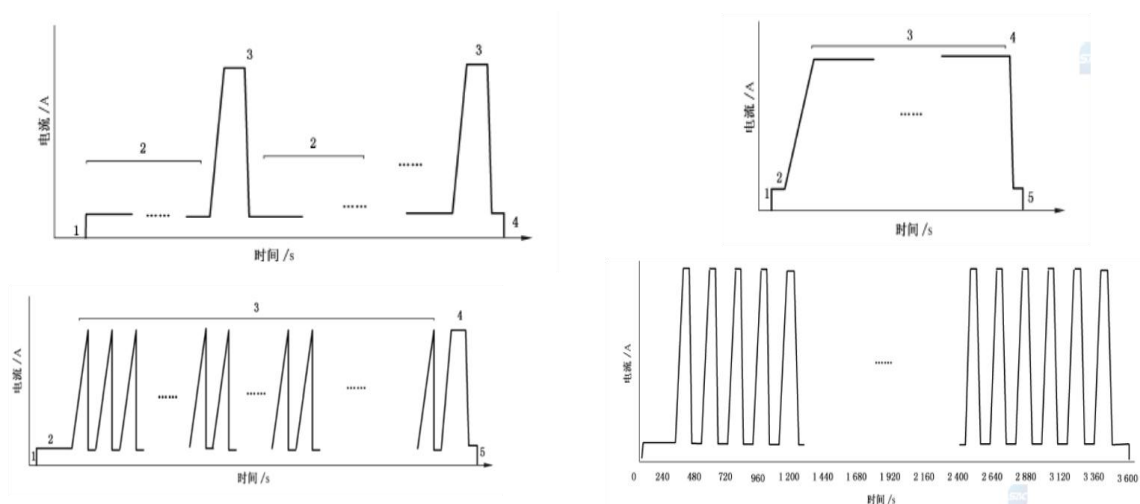


图 2 国标 GB/T 38914“参比工况谱”

b) 国家标准层面制定了 GB/T 38914-2020《车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法》，方法中虽然提及了“参比工况谱”（怠速工况、稳定工况、变载工况、额定工况），如图 2 所示，又提及了“自定义工况谱”，但仅提供了工况谱的启停、加载、减载次数及时间要求，且该工况是以加速测试的方式进行，不能直观体现

整车实际应用场景的变载特性。怠速和额定次数及时间等/未提出相关变载循环工况的提取和拟合制定方法，本团体标准可以作为自定义工况谱的补充设计。

5. 主要条款的说明，主要技术指标、参数、试验验证的论述

5.1 术语、定义及参考文献

燃料电池国家标准涉及的相关术语适应于本标准，标准中对怠速电流、额定电流、峰值电流、工况循环等术语引用国标。

GB/T 18386 电动汽车 能量消耗率和续驶里程 试验方法

GB/T 20042.1-2017 质子交换膜燃料电池 术语

GB/T 24548-2009 燃料电池电动汽车 术语

GB/T 24554 燃料电池发动机性能试验方法

GB/T 27840 重型商用车辆燃料消耗量测量方法

GB/T 38146.2 中国汽车行驶工况 第2部分：重型商用车辆

GB/T 38914 车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法

同时，参考了部分新能源车辆及动力系统的资料，IEC 60027 电气技术用字母符号作为基本规范性电气符号使用，本标准中不作为特殊引用。

5.2 工况的提取和拟合过程中的说明

从燃料电池目前发展阶段来看，在商用车领域作为大规模试点应用燃料电池动力，是发展燃料电池技术和产业的有利的切入点，本标准以商用车行驶工况为主线，制定适合的燃料电池耐久试验工况方法。

中国汽车行驶工况（或路谱）是指在中国交通环境下，描述特定车辆行驶特征的时间-速度曲线，能够代表车型的行驶特征，因此燃料电池的耐久试验工况应在所匹配车辆实际运行特征的基础上，进行燃料电池的耐久性测试和使用寿命预测，更加贴合商用的实际应用需求。本标准中商用车行驶工况以 GB/T 38146.2-2019、GB/T27840、GB/T 18386 中推荐的行驶工况为主，其他针对应用场景和车型的工况也适用。如 CHTC（中国重型商用车辆行驶工况）相关的 CHTC-B（中国客车行驶工况）和 WTVC（世界重型商用车辆瞬态循环）相关的 C-WTVC（中国重型商用车辆瞬态循环）等；从大量文献资料中可知，不同行驶工况均有各自特点，因此使用和选取行驶工况可按实际应用场景需求选择，本标准不约束具体的商用车行驶工况。

目前，燃料电池车辆动力系统一般由燃料电池系统和动力电池（蓄电池）系统联

合驱动电动机的方式为车辆提供动力,在实际道路中燃料电池系统提供基本行驶功率或维持动力电池 SOC（荷电状态）稳定,但在加减速、坡度、高速等大负荷工况下动力电池辅助驱动和能量回收,本标准提取的整车瞬态需求功率是基本行驶阻力功率,涉及的阻力为空气阻力和滚动阻力之和。

本标准根据车型、行驶工况（路谱）、车型阻力系数计算瞬态需求功率,如图 3 所示。结合燃料电池堆或发动机的特性,针对行驶工况（路谱）功率特性进行分析提取,最终制定了燃料电池行业可用的耐久试验工况。

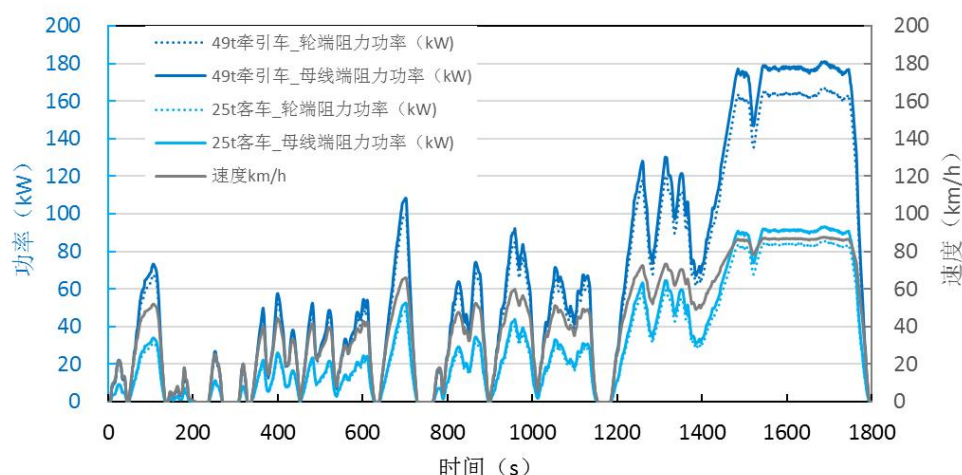


图 3 车型、阻力系数和行驶工况计算的瞬态功率

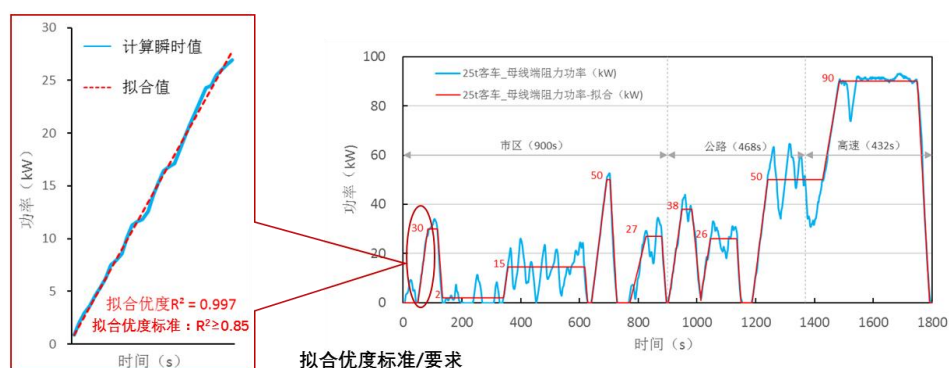


图 4 分析各区段（加载阶段、减载阶段）拟合优度

拟合优度的要求： R^2 是指回归曲线对观测值的拟合程度。 R^2 值越接近于 1，说明回归曲线对观测值的拟合程度越好。计算过程： y_i 实际值（即待拟合瞬态功率数据）， $\bar{y}_i$ 为 y_i 的平均值； $\hat{y}_i$ 为拟合值：

$$\text{总平方和 } SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2;$$

回归平方和 $SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$;

残差平方和 $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 。

其中 $R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$, 最右侧等式中分母值为 0 时表明拟合值与观测值重合, 其他情况, 分子值越小表明拟合值与观测值约接近。 R^2 分析也可通过商业软件如 Excel 中的趋势线功能或者 LINEST 函数, 或 MATLAB 类似函数等。

如图 4 所示, 本标准主要根据瞬态功率曲线中明显的加载和减载阶段进行分段拟合处理, 且引入数学统计中的拟合优度 R^2 进行规范要求, 一般地从数学统计来看拟合优度高于 0.8 拟合相对较好, 从起草组拟合的多种车型和行驶工况结果来看加载或减载过程中分段拟合可以保证 $R^2 \geq 0.93$, 故 $R^2 \geq 0.85$ 拟合要求可以较好地实现也能较好地保证拟合效果。通常, 市区工况中行驶阻力功率以小功率频繁变载特点为主, 燃料电池整车在此类工况特征下总功率输出主要为动力电池驱动策略, 且燃料电池不输出功率或以某恒定功率输出以保持动力电池 SOC 稳定, 因此, 对各路段中小幅度频繁加载、减载区间均采用分段恒功率输出。

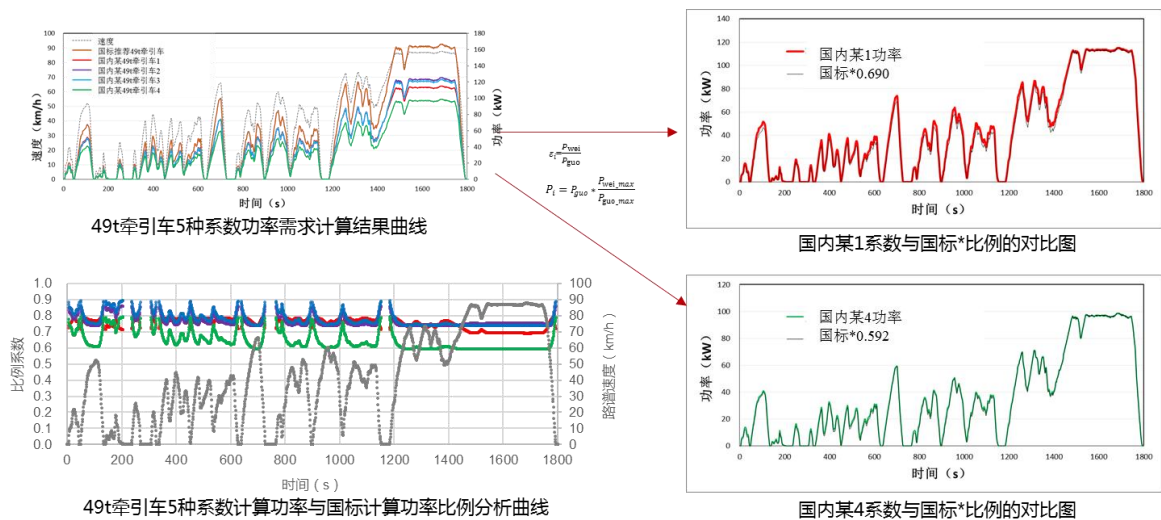


图 5 相同吨位不同制造商车辆的瞬时需求功率递减规律分析

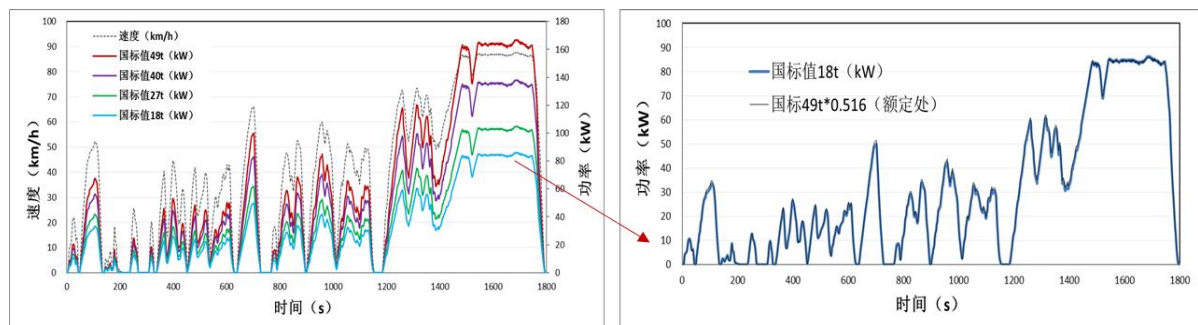


图 6 相同车型不同吨位瞬时需求功率递减规律分析

商用车包括各种车辆类型和各种吨位（总质量）的车辆，相同类型但不同吨位的需求功率不同，或相同吨位不同品牌的车辆需求功率也不同，若逐一计算、提取和拟合工况工作量较大，为便于简化工况计算、提取、拟合过程，起草组共计研究分析了 13 种关联车型：相同吨位（49t）的 5 种品牌车辆、不同吨位的相同型号（客车、牵引车）。分析发现国标推荐阻力系数计算得到的功率作为分母（参考车辆，且以最大功率某一区段平均值为基准时），其他类似车辆型号或吨位型号（匹配应用车辆）的计算功率作为分子，所得比例值接近为固定值。如图 5、图 6 所示，49t 牵引车国标阻力系数计算得到的最大功率约 162kW（高速巡航 1600s-1700s 段均值），国内某厂商类似型号相同段约 112kW，比例值约为 0.69，该比例值与国标的瞬态功率相乘计算，结果得到的曲线与某厂商计算的功率曲线吻合。因此在燃料电池提取和拟合过程中，可用一种拟合曲线通过比例系数的方式扩展成不同吨位或不同类型的拟合曲线。

5.3 工况曲线的拟合

表 1 特征里程分配比例

车辆类型	最大设计总质量 (GCW/GVM) (单位: kg)	市区比例 (K _{市区})	公路比例 (K _{公路})	高速比例 (K _{高速})
半挂牵引车	9000<GCM≤27000	0	40%	60%
	GVM>27000	0	10%	90%
自卸汽车	GVM>3500	0	100%	0
货车 (不含自卸汽车)	3500<GCM≤5500	40%	40%	20%
	5500<GCM≤12500	10%	60%	30%
	12500<GCM≤25000	10%	40%	50%
	GVM>25000	10%	30%	60%
城市客车	GVM>3500	100%	0	0
客车 (不含城市客车)	3500<GCM≤5500	50%	25%	25%
	5500<GCM≤12500	20%	30%	50%
	GVM>12500	10%	20%	70%

注：GCW（Gross Car Weight）和 GVM（Gross Vehicle Weight）一般均指车辆总重量，参考已发布的相关标准未以缩略语或定义形式列出，且属于相关人员易懂词语，故本标准也不再单独列出。

GB/T 18386-2017 中对不同车辆的特征里程做了分配，该分配比例可以代表对应车辆的典型驾驶里程特征，本标准以商用车应用场景特点为主，因此参考使用了该国标的推荐特征里程，如表 1 所示。同时，GB/T 18386-2017 中对多种车型及不同吨位

的商用车行驶阻力系数有相关推荐，若计算阻力过程中无整车厂的阻力系数，可以使用国标推荐值进行计算。本说明中截取了国标中的部分推荐值供参考，如表 2、表 3、表 4，本标准不限定行驶阻力具体值，但行驶阻力值应满足实际车型阻力计算为基本原则。

表 2 GB/T18386-2017 中货车行驶阻力系数推荐值

最大设计总质量(GVW) kg	常数项 (A)	一次项系数 (B)	二次项系数 (C)
3 500	477.5	2.00	0.102
4 500	540.5	2.53	0.109
5 500	603.4	3.06	0.115
7 000	697.9	3.86	0.125
8 500	792.3	4.65	0.135
10 500	918.2	5.72	0.148
12 500	1 044.1	6.78	0.161
16 000	1 264.4	8.64	0.184
20 000	1 516.2	10.77	0.210
25 000	1 830.9	13.43	0.242
31 000	2 208.6	16.62	0.281

表 4 GB/T18386-2017 中客车行驶阻力系数推荐值

最大设计总质量(GVW) kg	常数项 (A)	一次项系数 (B)	二次项系数 (C)
3 500	450.9	2.29	0.115
4 500	481.0	2.66	0.119
5 500	511.0	3.02	0.123
7 000	556.1	3.57	0.129
8 500	601.1	4.12	0.134
10 500	661.2	4.85	0.142
12 500	721.3	5.58	0.150
14 500	781.4	6.32	0.158
16 500	841.5	7.05	0.165
18 000	886.5	7.60	0.171
22 000	1 006.7	9.06	0.187
25 000	1 096.8	10.16	0.198

表 3 GB/T18386-2017 中半挂牵引车行驶阻力系数推荐值

最大设计总质量(GCW) kg	常数项 (A)	一次项系数 (B)	二次项系数 (C)
18 000	1 638.3	0.01	0.246
27 000	1 960.3	5.15	0.246
35 000	2 246.5	11.44	0.246
40 000	2 425.3	15.37	0.246
43 000	2 532.6	17.73	0.256
46 000	2 640.0	20.09	0.266
49 000	2 747.3	22.45	0.276

在本标准提取和拟合过程中，会存在原始瞬态工况不满足特征里程分配比例的情况，此时应进行扩展，基本原则是将不同区段（市区、公路、高速）进行重复或删减，如图 7 所示，主要参考乘用车 NEDC 中市区段的 4 个重复段的处理方式，因此认为重复相同区段更能代表本区段的特征。

表 5 某车型各区段和全程能量分析、特征里程分析表

序号	名称	市区	公路	高速	全程	备注
1	标准能量(kJ)	11090.76	27878.67	127374.99	166344.42	实际需求-功率积分
2	拟合能量(kJ)	11009.76	27029.90	130516.01	168555.67	拟合-功率积分
3	偏差比率 (%)	-0.73	-3.04	2.47	1.33	(拟合-标准)/标准*100%
4	特征里程扩展 (km)	5.73	11.37	36.37	53.47	实际距离
5	特征里程占比 (%)	10.72	21.27	68.01	/	分段距离/全程距离*100%，约等于标准特征里程分配推荐 1:2:7

根据特征里程扩展后的拟合曲线应遵循其能量与计算瞬态相同或相近，因此需要对各区段和全程进行能量对比分析、特征里程分析，如图 8 和表 5 示例分析所示。偏差控制在±5%范围。

偏差率 5%的设定，是根据燃料电池标定或实验经验中发现，一般在小发动机功率段，BOP 标定差异或变载波动时常有<5%的偏差率，该偏差率在大功率段相对小，故认为 5%偏差率可控且能保证功率和能量的偏差控制在适宜范围。

堆耐久曲线中怠速电流应为拟合曲线中的最小电流、额定电流应为拟合曲线中的最大电流。

对提取和拟合后的工况曲线列出执行表格，明确加载、减载、稳定、启停等工序信息，并以表格形式列出耐久试验工况曲线的所有工步参数。耐久试验的使用以表 3 形式输入，并开展燃料电池电堆或发动机的耐久试验。

表 3 工况循环测试工序表

序号	状态	变载速率	电流或功率	电流密度	本工序时间	累计时间
1	启动					
2	加载					
3	减载					
	...					

6. 重大意见分歧的处理依据和结果

工作大纲审查会中，专家认为本标准的涉及范围主要为商用车或重型商用车，因此需要将名称进行准确定位。分歧的处理结果：起草组同意专家的建议，将原名称“燃料电池车辆用耐久试验工况提取和拟合方法”更改为“商用车燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法”。

7. 采用国际、国外、国家及行业标准程度及对照分析情况

采用了 GB/T38914-2020 《车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法》中对怠速电流、额定电流、峰值电流、工况循环等术语进行定义。

GB/T38914-2020 规定的部分	本标准采用的部分
----------------------	----------

4.4 特别规定 燃料电池堆的测试评价应依据以下规定执行： ——燃料电池堆额定电流：由委托方指定，或对应燃料电池平均每节电压 0.65V 时的电流； ——燃料电池堆怠速电流：由委托方指定，或对应燃料电池平均每节电压 0.60V 时的电流； ——燃料电池堆基准电流：在完成初步活化后对燃料电池平均每节电压 0.70V 时的电流； ——车用燃料电池堆使用寿命的评价准则：从开始伏安曲线至最终伏安曲线，在基准电流下燃料电池平均每节电压衰减 10%。	4.1 电流点的规定 a) 燃料电池堆峰值电流：由电堆或发动机厂家、委托方指定，或对应燃料电池堆平均每节电压 0.60V 时的电流； b) 燃料电池堆额定电流：由电堆或发动机厂家、委托方指定，或对应燃料电池堆平均每节电压 0.65V 时的电流； c) 燃料电池堆怠速电流：由电堆或发动机厂家、委托方指定，或对应燃料电池堆平均每节电压 0.85V 时的电流； d) 燃料电池堆基准电流：由电堆或发动机厂家、委托方指定，或在完成初步活化后对应燃料电池平均每节电压 0.70V 时的电流。 4.2 耐久试验评价准则 车用燃料电池堆使用寿命的评价准则：从开始伏安曲线至最终伏安曲线，在基准电流下燃料电池平均每节电压衰减 10%。
--	---

8. 作为推荐性标准建议及其理由

建议标准作为推荐性标准，相关单位可以参照执行。

本标准可作为燃料电池发动机耐久测试评价体系的重要组成部分之一，能为燃料电池发动机的规模化生产和应用提供技术支撑。同时，通过制定和推荐实施该团体标准，推动燃料电池耐久测评达到高度统一和协调，有利于为各企业燃料电池发动机产品开发和示范应用统一测试方法的形成，并科学评估燃料电池耐久性，不断提升燃料电池发动机产品竞争力，推动燃料电池产业快速发展。

9. 贯彻标准的措施建议

本标准完成制定、批准发布后，推荐行业内相关人员开展宣贯、培训等工作；燃料电池行业协会与相关企业、第三方检测机构等进行标准宣贯，定期到相关生产制造企业进行标准宣贯培训，督导标准要求执行落实。

10. 其它应说明的事项

无

标准起草工作组

2022 年 11 月