

# 团 体 标 准

T/CCTAS XXXX—XXXX

## 商用车燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法

Method for extraction and fitting of endurance test conditions for proton exchange membrane fuel cell vehicles

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2022.11.5）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发布

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 试验要求 .....	2
4.1 电流点的规定 .....	2
4.2 耐久试验评价准则 .....	2
5 工况的提取 .....	2
5.1 概述 .....	2
5.2 工况提取方法 .....	3
6 工况拟合方法 .....	5
6.1 一般规定 .....	5
6.2 拟合方法 .....	5
参考文献 .....	11

## 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。

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。

本文件由潍柴动力股份有限公司提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：



# 商用车燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法

## 1 范围

本文件规定了商用车用质子交换膜燃料电池耐久试验工况提取和拟合方法。

本文件适用于商用车所匹配的质子交换膜燃料电池电堆、质子交换膜燃料电池发动机的耐久试验工况的制定。

## 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 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

## 3 术语和定义

GB/T 20042.1-2017、GB/T 15089-2001、GB/T 24548-2009界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### **燃料电池电堆** fuel cell stack

由多个单体电池、隔板、冷却板、歧管等构成，而且把富氢气体和空气进行电化学反应生成直流电，并同时产生热、水等其他副产物的总成。本标准中一般指质子交换膜燃料电池电堆。

[来源：GB/T 20042.1-2017、GB/T 24548-2009]

### 3.2

#### **怠速电流** idling current

被测燃料电池堆对应车载燃料电池系统在怠速工况下燃料电池堆的输出电流，此电流下燃料电池堆能够维持燃料电池系统自身工作一定时间，但对外不输出功率。

[来源：GB/T 20042.1-2017]

### 3.3

#### **额定电流** rated current

被测燃料电池堆对应车载燃料电池系统在额定工况下燃料电池堆的输出电流，此电流下燃料电池堆能够维持运行一定时间。

[来源：GB/T 20042.1-2017]

### 3.4

#### 耐久试验工况循环 Endurance test cycle

被测燃料电池堆或对应车载燃料电池系统从启动到停机连续运行中燃料电池堆的工况变化历程为一个试验工况循环。燃料电池堆或系统在此工况中循环运行直至伏安特性衰减到规定的限值或失效即耐久试验工况循环试验完成。

### 3.5

#### 车用燃料电池堆使用寿命 lifetime of fuel cell stack in vehicle application

燃料电池堆在车用工况循环下从开始使用至伏安特性衰减到规定的最低程度时的累计使用时间。

[来源：GB/T 38914-2020]

### 3.6

#### 燃料电池系统 fuel cell system

#### 燃料电池发动机 fuel cell system

包括燃料电池堆和燃料电池辅助系统，在外接氢源的情况下可以正常工作。

[来源：GB/T 20042.1-2017、GB/T 24548-2009]

## 4 试验要求

### 4.1 电流点的规定

电流点按照如下要求确定：

- 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%。

注：参考 GB/T 38914 电压衰减标准。

## 5 工况的提取

### 5.1 概述

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。例如 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。

结合燃料电池发动机性能输出特性，设计既满足燃料电池耐久性能测试，又满足行驶工况总能量需求的燃料电池耐久试验工况。

特别的，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，因此，本标准提取的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。

## 5.2 工况提取方法

### 5.2.1 工况提取步骤

工况的提取和拟合的具体步骤如图1所示。

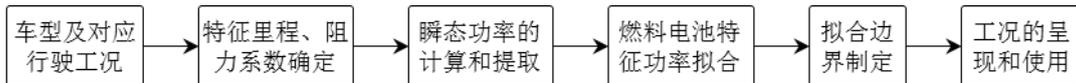


图 1 工况提取和拟合流程图

### 5.2.2 特征里程参数确定

存在特征里程要求的，按车型及其对应行驶工况明确“特征里程分配比例”分配，特征里程将用于后续各区段和总区段的能量对比和功率特征分析，GB/T 18386 中规定常用车型的特征里程分配比例如表 1 所示，按国标规定的特征里程将运行时间、运行距离、里程比例进行计算分析，如表 2 所示。

表 1 特征里程分配比例

车辆类型	最大设计总质量 (GCW/GVM) (kg)	市区比例 (K <sub>市区</sub> )	公路比例 (K <sub>公路</sub> )	高速比例 (K <sub>高速</sub> )
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%

表 2 按特征里程分配设计后行驶参数表

工况	运行时间 (s)	运行距离 (km)	里程比例 (%)
市区段	T1		
公路段	T2		
高速段	T3		
全部循环			

5.2.3 阻力系数确定

由整车商提供该阻力系数或按照国标 GB/T 18386 中获取车型阻力系数推荐值，格式参数见表 3。

表 3 匹配车型的阻力系数参考表（部分）

匹配车辆类型	最大设计总质量（GCW/GVM） （kg）	常数项 （A）	一次项系数 （B）	二次项系数 （C）
半挂牵引车	49000	2747.3	22.45	0.276
客车	18000	886.5	7.60	0.171

5.2.4 提取与计算

根据 5.2.2 和 5.2.3 所确定的参数、系数、行驶工况等进行计算和特征功率提取。根据公式（1），计算克服阻力  $F$ ：

$$F=A+B \times v+C \times v^2 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$F$ ——克服阻力（风阻与滚动阻力之和），单位为牛（N）；

$A$ ——阻力系数常数项，无量纲；

$B$ ——阻力系数一次项系数，无量纲；

$C$ ——阻力系数二次项系数，无量纲；

$v$ ——速度，单位千米每小时（km/h）；

根据公式（2）计算商用车轮端克服阻力功率  $P_l$ ：

$$P_l=\frac{F \times v \times 3.6}{1000} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$P_l$ ——为商用车轮端克服阻力功率，单位千瓦（kW）；

$F$ ——克服阻力（风阻与滚动阻力之和），单位为牛（N）；

$v$ ——速度，单位千米每小时（km/h）；

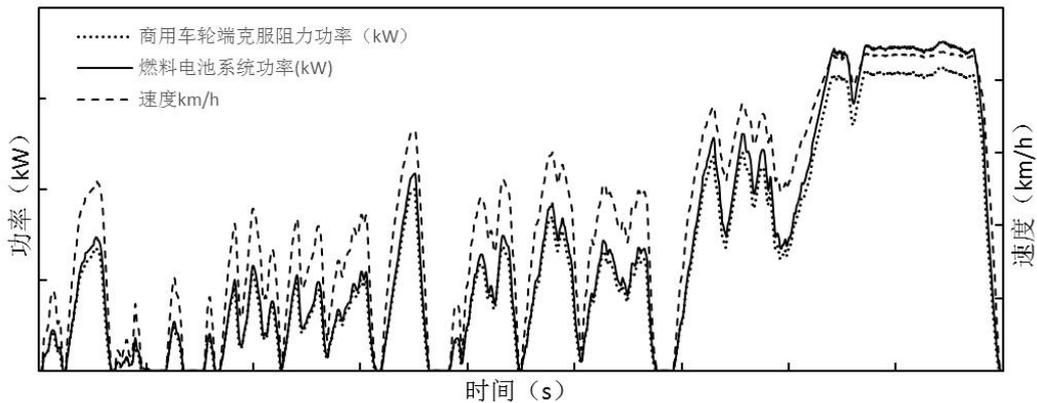


图 2 不同阻力系数时克服阻力功率曲线图

按图 2 所示，计算并绘制的示例商用车在 C-WTVC 路谱中轮端克服阻力所需功率。燃料电池发动机输出端功率与轮端功率之间，需经过电机、变速箱等，因此，应进一步根据其效率系数  $\eta_d$ 、 $\eta_b$  计算燃料电池系统端输出需求功率。

根据公式 (3)，计算燃料电池系统功率  $P_f$ ：

$$P_f = \frac{P_l}{\eta_d \times \eta_b} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$P_f$ ——燃料电池系统端需求功率，单位千瓦 (kW)；

$\eta_d$ ——电机传动效率，单位百分比 (%)；

$\eta_b$ ——变速箱传动效率，单位百分比 (%)。

需要计算电堆耐久试验工况时，根据公式 (4)，由发动机辅助系统 (BOP) 寄生功率占比进一步计算电堆输出需求，占比系数  $\eta_{bop}$ ，燃料电池电堆端计算公式：

$$P_s = \frac{P_f}{1 - \eta_{bop}} = \frac{P_l}{\eta_d \times \eta_b \times (1 - \eta_{bop})} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$P_s$  ——燃料电池电堆端需求功率，千瓦 (kW)；

$\eta_{bop}$  ——燃料电池发动机辅助系统 (BOP) 寄生功率占比，百分比 (%)。

## 6 工况拟合方法

### 6.1 一般规定

工况拟合一般规定如下：

- a) 变载工况拟合过程加载和减载区间段，要求分段式直线拟合，拟合直线段与瞬态曲线段变化趋势尽可能相近，即拟合设计后的趋势与瞬时趋势应一致，且拟合优度决定系数  $R^2 \geq 0.85$ ，其中， $R \approx 1$  时拟合效果最优，计算拟合优度决定系数  $R^2$ ，按照公式 (5) 计算。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$R^2$ ——拟合优度，无量纲；

$y_i$  ——实际值；

$\bar{y}$  ——平均值；

$\hat{y}_i$  ——拟合值；

- b) 对小幅度频繁加载、减载区间段采取分段恒功率输出方式拟合，即拟合曲线为水平直线段，且尽量设置为该瞬态功率区段的平均功率值。

### 6.2 拟合方法

#### 6.2.1 分段拟合

工况拟合过程中大幅度加载和减载曲线段，以分段的直线段拟合，可采用商业软件 (如 Excel、MATLAB 等) 趋势线功能或函数实现不同曲线段的自动拟合，拟合结果满足 6.1 中 a) 的要求；市区工况中能量输出策略主要以动力电动驱动方式，满足 6.1 中 b) 拟合方式，如图 3 所示。

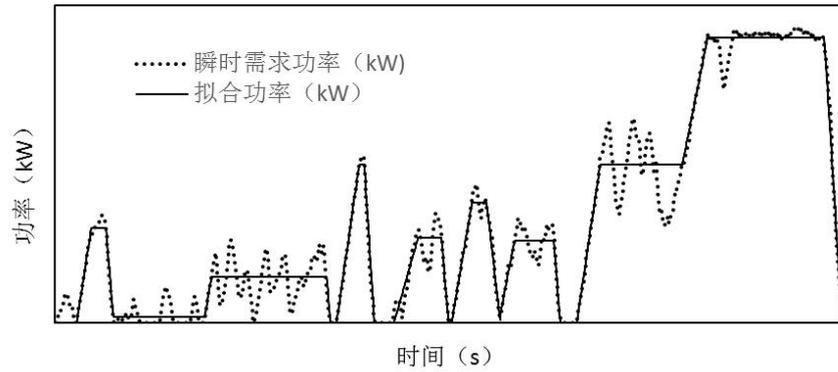


图 3 燃料电池瞬时需求功率和拟合功率示意图

### 6.2.2 拟合边界确定

特征提取和拟合边界的确定步骤如下：

- a) 燃料电池反复启停、大幅度频繁加载/减载、高电位运行极易造成燃料电池电压波动、膜电极腐蚀，导致燃料电池寿命衰减过快，因此在设计工况时设定最小功率。根据本文件第 4 章试验要求和制造商提供的极化性能曲线，如图 4 所示。设定最小运行功率工况点（总速电流  $I_0$ 、电压  $U_0$ ）。同时，最低运行功率应满足寄生功率的需求，拟合后的最小功率如图 5 所示。

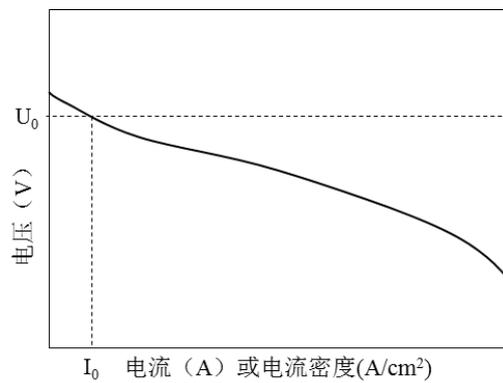


图 4 燃料电池极化性能曲线示意图

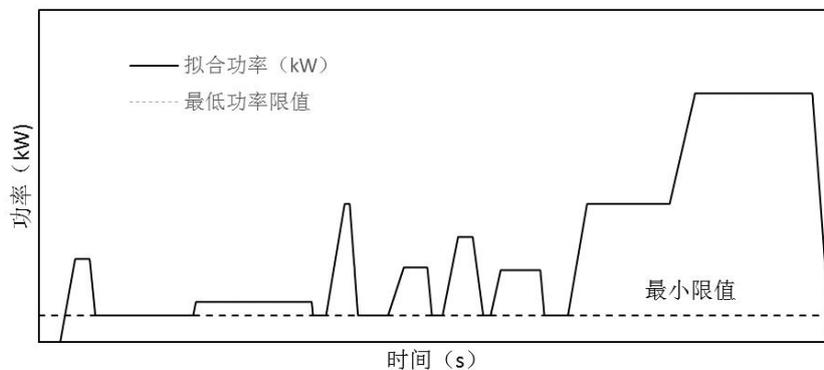


图 5 提取最低功率限值曲线

- b) 按特征里程比例合理扩展工况循环区段，推荐以市区、公路、高速区段重复增加方式扩展特征里程，最终耐久试验工况形式如图 6 所示，并分析每个里程区段、总工况循环段的能量偏差，偏差计算如公式 (6)，原则上偏差≤5%，偏差分析图如图 7 所示。

$$\Delta Q = \int_{t_0}^t \hat{P}_i dt - \int_{t_0}^t P_i dt \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\Delta Q$ ——能量偏差值，单位焦耳 (J)；

$\hat{P}_i$ ——拟合点功率，单位千瓦 (kW)；

$P_i$ ——瞬态点功率，单位千瓦 (kW)；

$t_0$ ——区段开始时间，单位秒 (s)；

$t$ ——区段结束时间，单位秒 (s)。

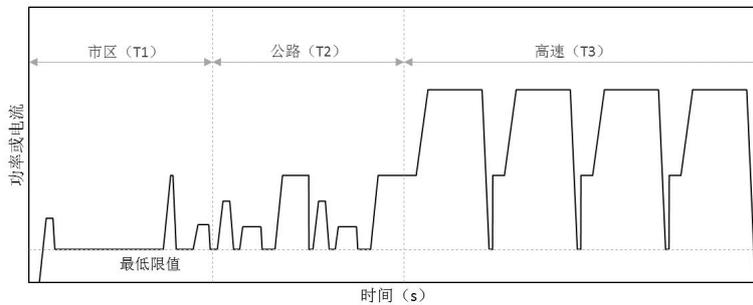


图 6 根据特征里程扩展各区段拟合工况示意图

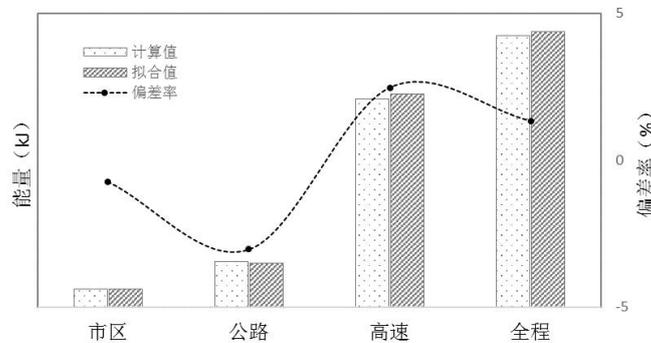


图 7 拟合前后能量偏差对比示意图

### 6.2.3 工况的呈现和使用

结合图 4 极化曲线，可将“功率-时间”循环工况转换为“电流-时间”耐久试验工况，一般地，电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，基准电流和峰值电流在耐久试验过程中极化曲线中体现。

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 4 形式呈现，并开展燃料电池堆或发动机的耐久试验。

表 4 工况循环测试工序表

序号	状态	变载速率 (kW/s)	电流或功率 (A) 或 (kW)	电流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	本工序时间 (s)	累计时间 (s)
1	启动					
2	加载					
3	减载					
	...					

## 附录 A

### (资料性)

#### 商用车辆燃料电池耐久试验工况拟合示例

A.1 本标准推荐了两种常用商用车的燃料电池耐久试验工况：如图 A.1 和表 A.1 为推荐的 18 吨客车燃料电池耐久试验工况；如图 A.2 和表 A.2 为推荐的 49 吨牵引车燃料电池耐久试验工况。

基于 C-WTVC 路谱按照本标准方法拟合得到的适用于燃料电池客车（18 吨）耐久试验工况

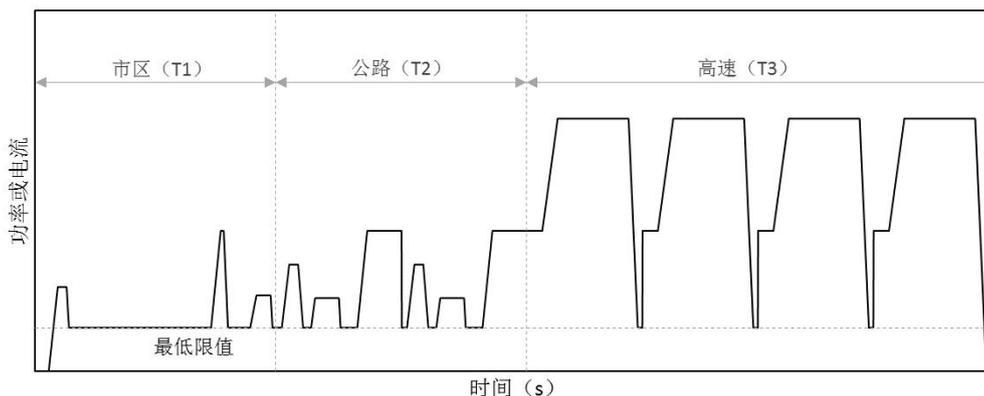


图 A.1 推荐燃料电池客车（18 吨）耐久试验工况曲线

表 A.1 推荐燃料电池客车（18 吨）耐久试验工况参数表

序号	时间 (s)	功率 (kW)	序号	时间 (s)	功率 (kW)	序号	时间 (s)	功率 (kW)
1	0	0	21	1140	12	41	2269	39
2	49	0	22	1202	12	42	2326	39
3	82	23	23	1240	39	43	2383	70
4	116	23	24	1368	39	44	2648	70
5	125	12	25	1369	12	45	2683	12
6	655	12	26	1388	12	46	2700	12
7	692	39	27	1416	30	47	2701	39
8	702	39	28	1449	30	48	2758	39
9	719	12	29	1468	12	49	2815	70
10	801	12	30	1497	12	50	3080	70
11	826	21	31	1513	20	51	3115	12
12	878	21	32	1601	20	52	3132	12
13	886	12	33	1608	12	53	3133	39
14	920	12	34	1670	12	54	3190	39
15	949	30	35	1708	39	55	3247	70
16	981	30	36	1894	39	56	3512	70
17	1000	12	37	1951	70	57	3554	0
18	1029	12	38	2216	70	58	3600	0
19	1044	20	39	2251	12			
20	1134	20	40	2268	12			

注：1.市区段时间T1=900s；公路段时间T2=936s；高速段时间T3=1764s；

2.最大功率一般指电堆额定输出功率。

A.2 基于 C-WTVC 路谱按照本标准方法拟合得到的适用于燃料电池牵引车（49 吨）耐久试验工况：

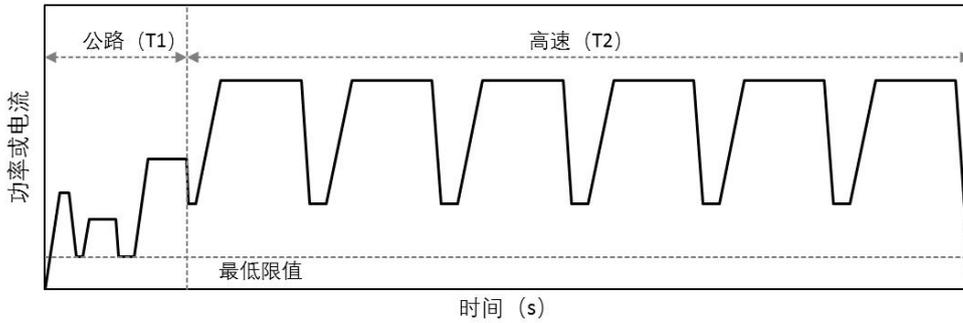


图 A.2 推荐燃料电池牵引车（49 吨）耐久试验工况曲线

附表 A.2 推荐燃料电池牵引车（49 吨）耐久试验工况参数表

序号	时间 (s)	功率 (kW)	序号	时间 (s)	功率 (kW)	序号	时间 (s)	功率 (kW)
1	0	0	16	875	66	31	2574	162
2	48	75	17	930	66	32	2603	66
3	79	75	18	1013	162	33	2658	66
4	103	25	19	1278	162	34	2741	162
5	125	25	20	1307	66	35	3006	162
6	145	54	21	1362	66	36	3055	0
7	235	54	22	1445	162	37	3060	0
8	244	25	23	1710	162			
9	296	25	24	1739	66			
10	341	101	25	1794	66			
11	468	101	26	1877	162			
12	475	66	27	2142	162			
13	497	66	28	2171	66			
14	581	162	29	2226	66			
15	846	162	30	2309	162			

注：1.公路段时间T1=468s；高速时间T2=2592s；

2.最大功率一般指电堆额定输出功率。

### 参考文献

- [1] GB/T 15089-2001 机动车辆及挂车分类.
  - [2] GB/T 18386 电动汽车 能量消耗率和续驶里程 试验方法.
  - [3] GB/T 20042.1-2017 质子交换膜燃料电池 术语.
  - [4] GB/T 24548-2009 燃料电池电动汽车 术语.
  - [5] GB/T 24554 燃料电池发动机性能试验方法.
  - [6] GB/T 27840 重型商用车辆燃料消耗量测量方法.
  - [7] GB/T 38146.2 中国汽车行驶工况 第2部分：重型商用车辆.
  - [8] 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.
  - [9] 崔胜民. 新能源汽车技术解析[M].北京：化学工业出版社，2016.04.
  - [10] 何绍清. 基于标准循环工况的某燃料电池整车性能研究[C]. 中国汽车工程学会, 2019:426-431.
-