

插电式混合动力汽车能耗研究

李永平, 宋乾毓

工业和信息化部装备工业发展中心, 北京

收稿日期: 2025年10月29日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月19日

摘要

本文选取了不同车型的插电式混合动力汽车开展能耗特性研究, 依据GB/T 19753-2021和GB 18352.6-2016要求进行电量消耗和电量保持模式下的能耗测试, 重点探究了车辆测试质量和电池容量在WLTC测试循环下的电量消耗量和燃油消耗量, 研究发现车辆在CS和CD模式下的油耗和综合油耗均随着车辆测试质量增大而增大, 此外, 车辆综合电耗随着车辆电池容量的增大而增大, 而随着车辆测试质量的增大没有明显变化趋势。

关键词

能耗, PHEV, 电量消耗, 电量保持, 全电里程

Research on Energy Consumption of Plug-In Hybrid Electric Vehicles

Yongping Li, Qianyu Song

Ministry of Industry and Information Technology Equipment Industry Development Center, Beijing

Received: October 29, 2025; accepted: December 10, 2025; published: December 19, 2025

Abstract

This study investigates the energy consumption characteristics of plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) across different models. Energy consumption tests were conducted in both power consumption and power retention modes according to GB/T 19753-2021 and GB 18352.6-2016 requirements. The research focuses on analyzing the relationship between vehicle test mass and battery capacity in terms of power consumption and fuel consumption under the WLTC test cycle. Findings reveal that both fuel consumption in CS and CD modes and overall fuel consumption increase with rising vehicle test mass. Additionally, overall electrical energy consumption grows with larger battery capacity but shows no significant trend with increasing vehicle test mass.

Keywords

Energy Consumption, PHEV, Charge-Depleting Operating Condition, Charge-Sustaining Operating Condition, All-Electric Rang (AER)

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源需求的不断增长和化石燃料资源的有限性, 能源危机已成为全球性问题。与此同时, 气候变化和环境污染问题日益严重, 迫使各国政府和企业寻求更加清洁、高效的能源解决方案。插电式混合动力汽车作为一种结合了燃油车和电动车优点的新兴技术, 成为减少碳排放和缓解能源危机的重要方向[1]。

传统燃油车在运行过程中依赖化石燃料, 不仅排放大量温室气体(如二氧化碳), 还对空气质量和生态系统造成严重威胁。此外, 全球范围内对化石燃料的过度依赖也导致了能源供应的不稳定性和价格波动。因此, 开发一种既能减少对化石燃料依赖, 又能降低排放的交通工具, 成为汽车行业的重要目标。虽然纯电动车(BEV)在环保性和能效方面具有显著优势, 但其续航能力和充电基础设施的不足仍然是制约其普及的主要问题, 而插电式混合动力汽车则通过结合燃油动力和电力驱动, 解决了纯电动车的续航焦虑问题。插电式混合动力汽车通过外接电源对车载电池进行充电, 其纯电动续航里程通常在 50~100 公里以上, 能够满足大多数用户的日常通勤需求。在电池电量不足时, 车辆可以切换到燃油动力模式, 从而显著扩展续航里程。这种设计不仅降低了对化石燃料的依赖, 还减少了尾气排放[2] [3]。

插电式混合动力汽车的能耗水平受到多种因素的影响, 包括电池技术、动力系统设计、能量管理策略等。近年来, 随着电池技术的进步和能量管理算法的优化, PHEV 的能耗效率得到了显著提升。然而, 如何进一步降低能耗、延长续航里程仍是一个研究重点。插电式混合动力汽车的能耗研究不仅有助于提升车辆的能源利用效率, 还能为减少碳排放和推动可持续交通发展提供技术支持[4]。

因此, 为了研究插电式混合动力汽车的能耗特性, 本文选取了 25 辆同车企但不同车型的插电式混动汽车, 分别进行了电量保持(CS)和电量消耗(CD)测试, 测试流程严格遵循 GB/T 19753-2021 排放法规。通过深入分析对比测试结果, 探讨了插电式混合动力汽车能耗的影响因素和优化措施, 为未来的汽车排放政策制定、环保标准的提升以及混合动力汽车技术的优化提供有力的数据支持和科学依据。

2. 研究内容

2.1. 车辆基本信息

本试验选取了 17 台不同车型的插电式混合动力汽车开展能耗特性研究, 车型覆盖了不同测试质量和电池容量的插电式混合动力汽车, 分别研究了影响插电式混动汽车能耗特性的车辆参数。试验车辆均已磨合, 机械状态良好, 车辆的主要技术参数如下表 1 所示:

Table 1. Key technical specifications of the vehicle

表 1. 车辆主要技术参数

| 电动机功率/转速/扭矩 | 压缩比 | 燃烧室大小 | 气流流动模式 | 点火系统 | 输出功率 kW | 电池容量/kWh | 测试质量/kg |
|-------------|-------|-------|--------|------|---------|----------|---------|
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 12.96 | 1926 |

续表

| | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|------|-----|----|--------|--------|
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 9.6 | 1776.3 |
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 15.874 | 1916 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 10.08 | 1801 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 12.96 | 1811.3 |
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 12.96 | 1991.3 |
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 18.316 | 1971 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 10.08 | 1801 |
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 15.874 | 1916 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 15.874 | 1721 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 7.68 | 1621 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 15.874 | 1721 |
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 12.96 | 1991.3 |
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 17.626 | 2041 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 15.874 | 1721 |
| 55/5000/105 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 7.68 | 1771 |
| 70/5570/120 | 16:01 | QC006 | 自然吸气 | 点燃式 | 74 | 15.898 | 1916 |

2.2. 试验流程和测试方法

按照 GB/T 19753-2021 [5]和 GB 18352.6-2016 [6]要求对试验样车分别进行 CD (电量消耗, Charge-Depleting)和 CS (电量保持, Charge Sustaining)模式下的能耗测试, 测试循环使用的是 WLTC 测试循环, 测试循环如图 1 所示, 首先进行 CD 模式下预处理, 保证车辆机械状态良好, 接着对车辆进行充电并浸

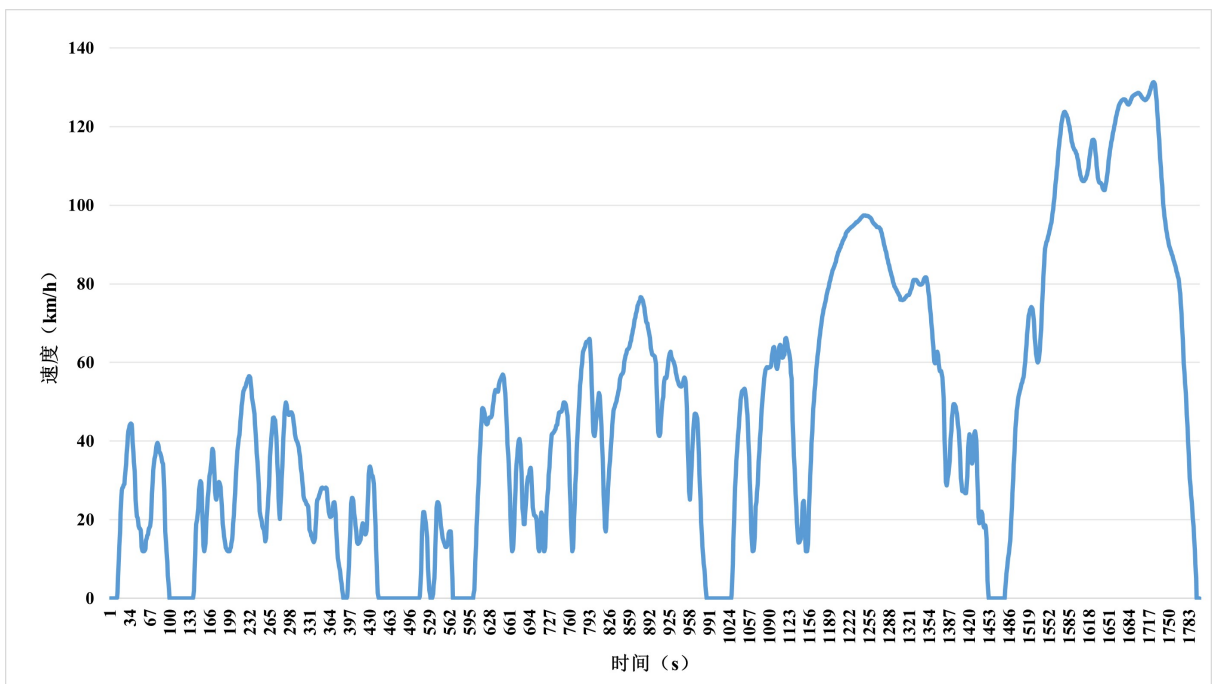


Figure 1. WLTC speed-time curve diagram

图 1. WLTC 速度 - 时间曲线图

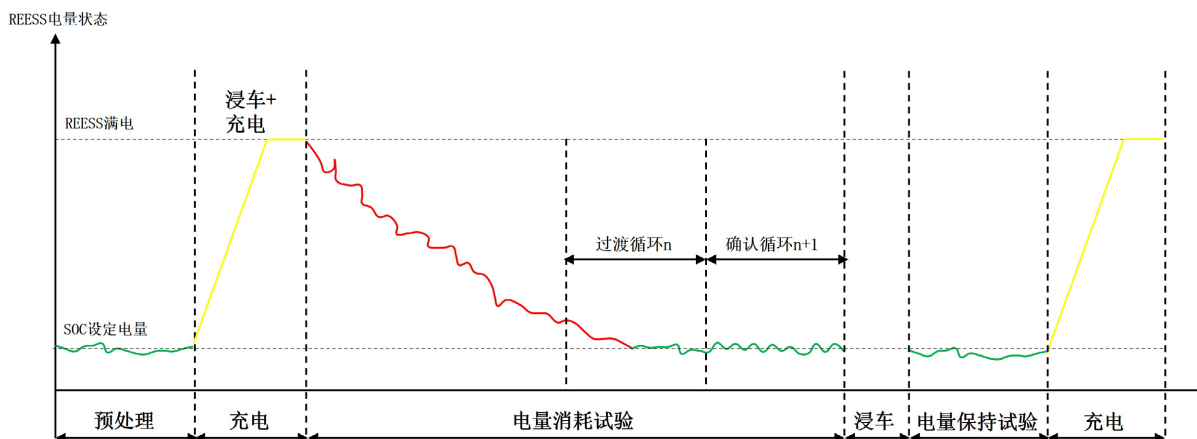


Figure 2. Test process diagram

图 2. 测试流程示意图

车, 充电完成后并且浸车时间达到法规要求后, 开始进行 CD 试验, CD 试验结束以后, 也即车辆处于电平衡状态, 浸车 6~24 h 后开始电量保持试验, CS 试验结束使用充电桩进行充电并记录车辆充电量和充电时间, 测试流程如图 2 所示。

测试设备采用 AIP 底盘测功机和 Horiba MEXA-ONE-C1-OV、DLT-1230 等主要排放测试系统, 颗粒物测试系统为 AVL APC 489, 环境舱为 ETS 环境舱, 大小尺寸为 8000×8000×5500 mm, 具体设备参数见表 2:

Table 2. Equipment parameters

表 2. 设备参数表

| 名称 | 厂家 | 型号 |
|------------|--------|-------------------|
| 底盘测功机 | AIP | AIP-CDM 48M 4-WD |
| 排气分析仪 | Horiba | MEXA-ONE-C1-OV |
| 稀释采样系统 CVS | Horiba | DLT-1230 |
| 颗粒计数系统 | AVL | AVL APC 489 |
| 环境舱 | ETS | 8000×8000×5500 mm |
| 充电设备 | TGOOD | TCDZ-DC0.7/120 |
| 功率分析仪 | HIOKI | PW3390 |

2.3. 数据处理

依据 GB 18352.6-2016 中附录 CE 中的污染物排放量计算方法, 在每个测试循环中分别用排气分析仪采集并分析尾管排气中各污染物的浓度, 依据得到污染物中 CO₂、CO 和 THC 的浓度, 用碳平衡法计算试验循环的燃油消耗量。先进行电量消耗试验, 计算每个循环下车辆的燃油消耗量 $FC_{CD,c}$, 接着计算整个电量消耗过程中的燃油消耗量 FC_{CD} , 公式为:

$$FC_{CD} = \frac{\sum_{c=1}^n (UF_c \times FC_{CD,c})}{\sum_{c=1}^n UF_c}$$

试验过程中使用功率分析仪记录每个循环下的瞬态电流和电压, 计算每个循环的电量 $\Delta E_{REESS,c}$, 根

据外部充电量 E_{AC} 计算电量消耗模式下每个循环的电量消耗量 $E_{AC,CD,c}$ ，最后计算出电量消耗模式下的电量消耗量 $E_{AC,CD}$ ，计算公式为：

$$E_{AC,CD} = \frac{\sum_{c=1}^n (UF_c \times E_{AC,CD,c})}{\sum_{c=1}^n UF_c}$$

$$E_{AC,CD,c} = E_{DC,CD,c} \times \frac{E_{AC}}{\sum_{c=1}^n \Delta E_{REESS,c}}$$

此外，记录电量消耗模式下发动机启动时车辆的全电里程 AER ，根据电量保持模式下和电量消耗模式下的油耗，计算车辆的全电续驶里程 R_{CDA} 和等效全电里程 E_{AER} ，计算公式分别为：

$$R_{CDA} = \sum_{c=1}^{n-1} d_c + \frac{FC_{CS} - FC_{CD,n}}{FC_{CS} - FC_{CD,n-1,avg}} \times d_n$$

$$E_{AER} = \frac{FC_{CS} - FC_{CD,avg}}{FC_{CS}} \times R_{CDA}$$

式中： d_c 为车辆在第 c 个试验循环的行驶里程， d_n 为车辆第 n 个试验循环的里程， R_{CDA} 为过度循环结束的里程，单位均为 km； FC_{CS} 为电量保持模式试验的燃料消耗量， $FC_{CD,n}$ 为电量消耗模式试验第 n 个试验循环的燃料消耗量， $FC_{CD,n-1,avg}$ 为电量消耗模式试验前 $n-1$ 个试验循环的平均燃料消耗量， $FC_{CD,avg}$ 为电量消耗模式下燃料消耗量的加权平均值，单位均为 L/km。电量保持模式试验中根据袋采的 CO、CO₂ 和 THC 的浓度计算燃油消耗量 FC_{CS} ，同 CD 试验相同在试验过程中记录电压和电流。

最后根据电量消耗和电量保持下的燃料消耗量和电量消耗量，分别计算插电式混合动力汽车的油耗和电耗的综合值 $FC_{weighted}$ 和 $EC_{AC,weighted}$ ，计算公式分别为：

$$FC_{weighted} = \sum_{c=1}^n (UF_c \times FC_{CD,c}) + \left(1 - \sum_{c=1}^n UF_c\right) \times FC_{CS}$$

$$EC_{AC,weighted} = \sum_{c=1}^n (UF_c \times E_{AC,CD,c})$$

3. 结果与分析

3.1. 插电式混合动力汽车电耗影响因素分析

插电式混合动力汽车的电量消耗量是日常衡量插电式混合动力汽车(PHEV)能源效率的核心指标，直接影响用车成本、续航里程、环保性和用户体验。所以对插电混动汽车的电量消耗量的研究很有意义。插电混动车电量消耗量的影响因素有很多，是电池、电机、发动机、车辆设计及使用环境共同作用的结果，其中影响比较直接的是车辆的测试质量和车辆搭载的电池容量，本试验研究了某一车企不同测试质量和电池容量的插电混动汽车在 WLTC 测试循环下电量消耗模式和电量保持模式下的电量消耗量。

分别选取了 6 台测试质量不同但电池容量相同以及测试质量相同但电池容量不同的插电式混动汽车。插电式混动汽车的全电里程和等效全电里程随着车辆测试质量和电池容量变化如图 3 所示，其中图 3(a)和图 3(b)图分别是里程随车辆测试质量和电池容量的变化曲线图，可见车辆测试质量越大，车辆在电量消耗模式下的全电里程以及等效全电里程都会越低，此外，车辆搭载的电池容量越大，电量消耗模式下的两种里程都会越高。这是因为车辆测试质量越大，车辆在转毂上运行时需要设定的转毂加载阻力也会增大，此外，车辆旋转部件的旋转惯性质量也会变大，因此车辆在转毂上运行需要克服的阻力也会在增

大, 同样电池容量下车辆能纯电状态下行驶的里程就会减小。

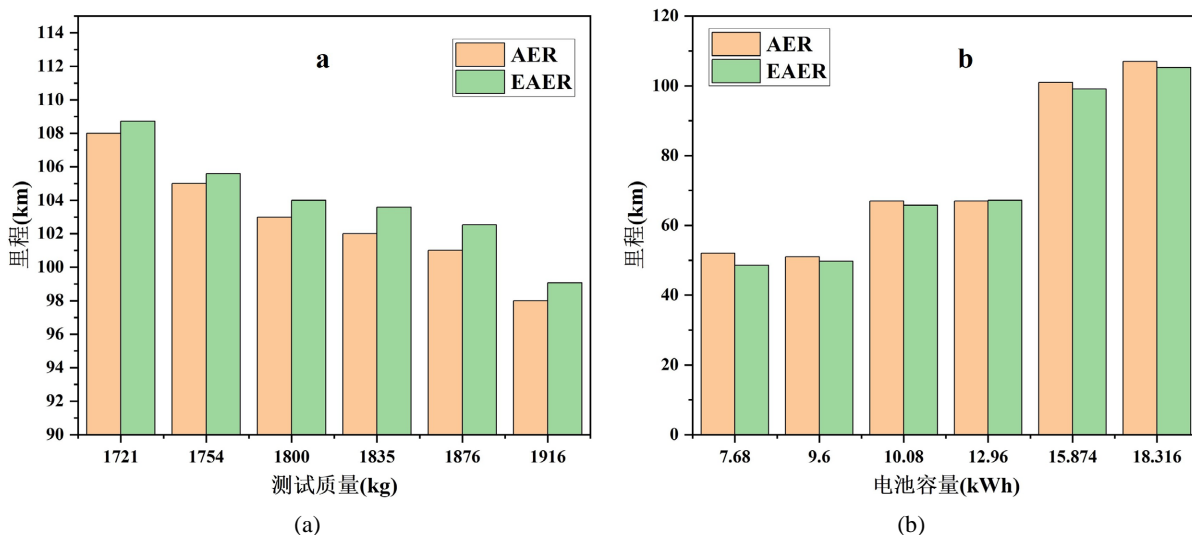


Figure 3. (a) Mileage vs. test mass bar chart; (b) Mileage vs. battery capacity bar chart

图 3. (a) 里程 - 测试质量柱状图; (b) 里程 - 电池容量柱状图

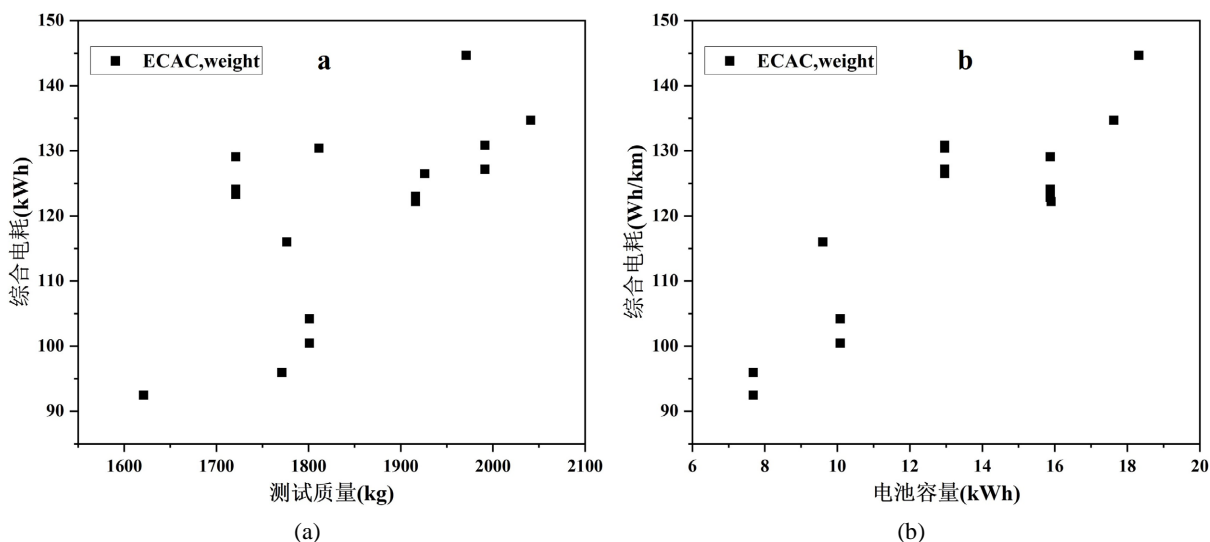


Figure 4. (a) Comprehensive power consumption vs. test mass scatter plot; (b) Comprehensive power consumption vs. battery capacity scatter plot

图 4. (a) 综合电耗 - 测试质量散点图; (b) 综合电耗 - 电池容量散点图

分别计算了选取的 17 台车的综合电耗, 不同测试质量和电池容量的电量消耗量变化如图 4 所示, 其中图 4(a)和图 4(b)分别为车辆测试质量和电池容量对插电式混合动力汽车综合电耗的影响, 可见, 车辆的测试质量不同, 虽然车辆的综合电耗会有差别, 但是车辆的综合电耗随着测试质量的增加并没有很明显的增大; 此外, 插电式混动汽车的综合电耗会随着车辆搭载的电池容量的增大而不断增大。这是因为车辆测试质量会增大车辆行驶时的能量消耗, 但是插电式混动汽车不是纯电动汽车, 在一定 SOC 下发动机会参与工作, 所以综合电耗并不一定会随着测试质量的增大而增大, 此外, 电池容量是车辆电量输出的主要来源, 在一定 SOC 下, 虽然发动机会启动给电池充电, 但是主要的电耗来源还是电池所携带的电量, 所以综合电耗会随着电池容量的增大而增大。

3.2. 插电式混合动力汽车油耗影响因素分析

选取了 7 台测试质量不同但是电池容量、设定的 SOC 参数相同的插电式混动汽车, 下图 5 所示为 CS 和 CD 模式下车辆的燃油消耗量和车辆测试质量的变化曲线图, 可见电量消耗和电量保持模式下的油耗都随着车辆测试质量的增大而增大, 此外, 根据 CS 和 CD 模式下的油耗计算得到的综合油耗也随着测试质量的增加而增大, 这是因为插电式混合动力汽车的油耗主要收到电量保持模式下的运行情况影响, 电量消耗模式下的油耗影响不是非常大, 此外, 在同样的 SOC 设定下, 发动机参与工作的频次就基本差不多, 车辆测试质量如果增大的话, 车辆在底盘测功机上的阻力就会更大, 电量保持模式下燃油消耗量也会随之增加。

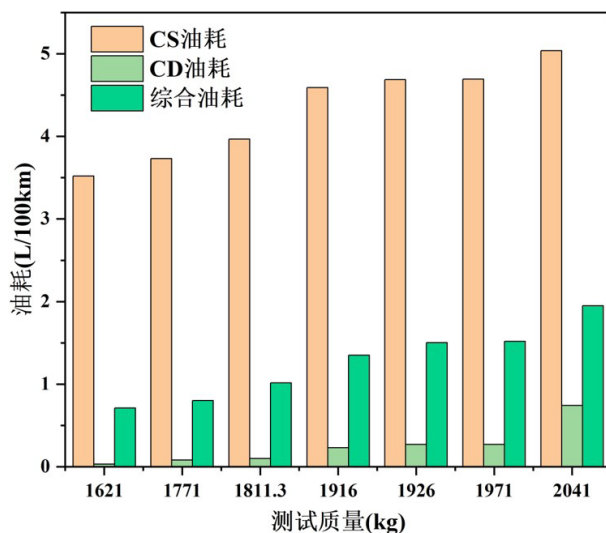


Figure 5. Fuel consumption-test mass bar chart

图 5. 油耗 - 测试质量柱状图

4. 结论

本文探究了插电式混合动力汽车能耗特性, 改变车辆测试质量和电池容量, 对车辆进行电量消耗和电量保持模式下的污染物排放试验, 对试验数据进行了分析和处理, 得到了以下几点结论:

1) 车辆的纯电里程和等效全电里程均随着车辆测试质量的增大而减小, 随着车辆电池容量的增大而增大; 车辆综合电耗随着电池容量的增大而增大, 而随着车辆测试的质量改变没有明显的变化趋势。

2) 车辆在 CS 模式和 CD 模式下的油耗均随着车辆测试质量的增大而增大, 两个模式下的综合油耗也会随着测试质量的增大而增大。

本文研究了插电式混合动力汽车的能耗特性, 为 PHEV 的优化设计(如电池与车身的轻量化平衡)、为政府制定能耗补贴或税收政策、以及为消费者选择最适合其驾驶习惯的车型提供更具体的量化建议。

参考文献

- [1] 秦孔建, 陈海峰, 方茂东, 等. 插电式混合动力电动汽车排放和能耗评价方法研究[C]//中国汽车工程学会. 2010 中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 中国汽车技术研究中心, 清华大学, 2010: 405.
- [2] 孙远涛, 张洪田. 混合动力汽车研究状况及发展趋势[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 2011, 25(2): 13-16.
- [3] 解难, 孙龙, 王玉伟. 插电式混合动力汽车排放与能耗综合评价体系的构建[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(4): 34-39.

- [4] 朱宁. 插电式柴电混合动力汽车燃油经济性与排放综合控制研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [5] 生态环境部. GB 18352.6-2016. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [6] 国家市场监督管理总局. GBT 19753-2021. 轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.