

基于实际运行数据的混合动力汽车能耗分析

李浩¹, 俞璐¹, 丁晓华², 张文杰², 涂辉招¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心, 上海 201805)

摘要: 针对并联式插电混合动力汽车(PHEV)能耗模式复杂及能耗规律尚不明确等问题, 提出一种基于实际运行数据进行PHEV工作模式辨识以及不同工作模式下能耗规律解析的方法, 利用多元非线性回归模型揭示混合驱动模式能量消耗率(ECR)的影响因素。基于上海市425辆PHEV一年的实际运行数据分析表明, PHEV的能耗受驾驶环境和工作模式的影响显著, 且能耗费用与燃油汽车相比具有成本效益。样本PHEV的平均ECR较传统燃油车节省37.9%, 是一般纯电动汽车的2.96倍。行驶速度和温度对ECR具有显著非线性影响, 加速度具有显著的线性正效应。

关键词: 交通能源; 能耗分析; 能量消耗率; 插电混合动力汽车; 混合驱动模式

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

Energy Consumption Analysis for Parallel PHEVs with Identifying Working Modes Based on Real-world Longitudinal Travel Data

LI Hao¹, YU Lu¹, DING Xiaohua², ZHANG Wenjie², TU Hui Zhao¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Electric Vehicle Public Data Collecting Monitoring and Research Center, Shanghai 201805, China)

Abstract: In order to better understand the energy consumption performance of parallel plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) and to analyze the impact factors under the hybrid driving mode, the working modes were identified for more accurate energy consumption analysis with real-world travel data. The methodology for identifying the different working modes is proposed. A multivariable non-linear regression model is used to analyze the effects of different factors on energy consumption rate (ECR). Based on the analyses of real-

world longitudinal travel data of 425 PHEVs in Shanghai, it is found that the energy consumption performance of a PHEV depends to a large extent on the driving environment and driving pattern and the energy cost of the PHEV is more effective compared to conventional fuel vehicles. The ECR of the sample PHEVs saves up to 37.9% compared to the conventional gasoline vehicle BYD Song, and is about 2.96 times of that for the Battery Electric Vehicle (BEV). The speed and temperature have significant quadratic effects on ECR, and the acceleration rate has a strong linear positive effect.

Key words: traffic energy; energy consumption analysis; energy consumption rate; plug-in hybrid electric vehicle; hybrid driving mode

解析电动汽车能耗规律是进一步提高电动汽车运输系统能效的一个重要环节^[1]。插电混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)采用内燃机与电动机相结合, 分为并联式、串联式和混联式三种形式, 能源消耗模式复杂^[2]。PHEV实际能耗是消费者、汽车制造商和政策制定者关注的关键性能指标^[3]。能量消耗率(Energy Consumption Ratio, ECR)受驾驶模式、行驶速度、加速度和环境温度等因素影响^[4], 是反映实际能耗的常用指标。准确分析PHEV的实际能耗及其影响因素不仅可以更充分地了解插电混合动力车性能, 降低消费者对电动车剩余里程的焦虑, 还有助于优化节能驾驶模式。

传统内燃机汽车(Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV)和纯电动汽车(Battery Electric Vehicle, BEV)^[5]的ECR能耗影响因素分析, 可为PHEV分析提供参考。ICEV的燃料消耗率(每100km的燃料消耗量)受交通拥堵^[6]、天气^[7]、交通基础设施^[8]等的影响。驾驶模式(速度和加速度)^[9]和不

收稿日期: 2020-08-18

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0108300); 国家自然科学基金(71971162)。

第一作者: 李浩(1982—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通风险评估与智能网联汽车、交通行为、交通路网建模以及交通规划与管理等。E-mail: haolitj@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

同汽车特性^[10]也是影响ICEV燃油消耗的主要因素。与ICEV和BEV能源使用单一的特点相比,油电混合动力汽车(HEV, Hybrid Electric Vehicle)使用内燃机与电动机混合驱动,具有多种工作模式,能耗分析复杂。本文所研究的并联式PHEV与HEV能源消耗原理相似,区别仅在于PHEV具有外接式充电插头。目前针对混合动力汽车基于实际数据的能耗研究大多聚焦于HEV^[11-13]。PHEV能耗研究大多基于ICEV或ICEV改装的PHEV的出行模式^[14-16],假设电力驱动的充电情景,使用基于标准化驾驶循环的PHEV官方燃料消耗值进行模拟,但模拟结果与实际燃料消耗的差异较大^[17]。并联式PHEV实际能耗方面,仅有夏洪朴等^[18]和金勇等^[19]进行相关研究,但夏洪朴等^[18]未区分工作模式,而是全模式计算能耗。金勇等^[19]对PHEV的不同工作模式进行了探讨,但未深入研究PHEV能耗的影响因素。本文提出基于大量并联式PHEV实际运行数据的四种工作模式(纯电动、内燃机、混合驱动、行车充电模式)辨识方法及不同工作模式下PHEV能耗规律的解析方法,对能耗影响因素进行回归分析。首先,介绍实际运行数据的筛选、清洗及整合方法,以及四种工作模式的辨识方法;其次,分析PHEV的ECR能耗规律及其影响因素,采用多元非线性回归模型探究电池荷电状态(State of Charge, SOC)、速度、时间、周围环境等因素对PHEV

混合驱动模式下ECR的影响;最后,根据分析结果对PHEV驾驶模式提出建议。

1 研究方法

1.1 数据处理

本文并联式PHEV数据来自上海新能源汽车公共数据采集与监测研究中心(SHEVDC),包含2015-2017年425辆同一构型PHEV一年的GPS实际运行数据,共计305 590段行程的出行记录,7 670 000km。安装在并联式PHEV汽车内的车载信息采集传输终端,利用GPRS无线传输技术,定时向监控平台发送车辆充放电、移动、停止等状态的运行数据。数据主要包括:时间、GPS位置、里程表读数(累计行驶里程)、SOC、温度、液体燃料消耗量等。

原始采集到的数据由于来源不同,呈现的问题不同,包含错误的车辆状态、异常的累积行驶里程和SOC、超出边界的GPS坐标、重复记录等问题,需要进行清洗。数据清洗主要包含数据去重和异常数据处理两个方面的内容。异常数据包括SOC为负、速度为负、累积行驶里程变小、车辆运行状态错误等。异常数据处理主要根据字段间存在的逻辑约束,对相关字段进行分析,补全空值、零值、缺失值,修正错误的数值。具体处理方法如表1所示。

表1 异常数据处理

Tab.1 Abnormal data processing

异常数值类别	含义	预处理方法	方法详述
累积行驶里程	里程表读数,即车辆行驶里程	结合经纬度进行修正 适当插值处理	累积行驶里程的增值应大于等于经纬度的偏移 数据段小部分累计行驶里程为空,采用滑动平均窗口法差值
车辆运行状态	运行状态,原始数据中,1表示移动;2表示充电;0表示停止	剔除值为负数的字段 结合SOC和累积行驶里程进行修正	SOC上升为充电状态 累积行驶里程持续上升为行驶状态 累积行驶里程不变、SOC不变、瞬时燃油消耗量为0为停滞状态
速度	车辆行驶的速度/(km·h ⁻¹)	剔除0~200km·h ⁻¹ 以外的数据 结合经纬度或累积行驶里程进行修正	经纬度的偏移与时间差的商为瞬时速度,速度 阈值定义为200km·h ⁻¹ ,如果计算的商大于该值, 说明 <i>i</i> +1条记录出现明显偏移,予以删除。
SOC	电池荷电状态(SOC)/%	适当插值处理 结合剩余能量进行修正	SOC等于电池剩余电量/电池能量

为了研究并联式PHEV的能耗,本文对用户的出行事件进行划分与识别。根据GPS轨迹中的停留和移动状态,将GPS轨迹分段,确定每一次出行的开始和结束时刻。并联式PHEV电池电量状态的变化为出行事件的识别增加了新的维度。出行事件的识别规则有:①识别车辆行驶里程长时间(40min及以上)保持不变且能量无消耗的行程段,更改为停

留状态;②识别长时间处于行驶状态的数据段,对记录时间出现大幅跳跃的相邻数据进行分割。

将行程段按时间顺序进行整合,行程段的字段包含:行程开始与结束时间、行程开始与结束SOC、行程开始与结束位置。行程间未被记录的时间段为停留段。在完成行程段的创建后,对合理性及有效性进行判定,需满足以下条件:①行程段前后有累积

行驶里程的变化;②行驶时长大于2min,不长于10h;③单个行程段距离不超过180km。然后对间隔时间较短的同类段落进行拼接处理,获得更加接近实际的划分事件集合。为获取平均速度和平均加速度,对划分出的行驶段根据一定的时间颗粒度切段,每段为一数据行,作为计算ECR的单元。如果时间颗粒度过大,平均速度和平均加速度会被过度稀释;如果时间颗粒度过小,记录的行程累计里程变化过小或无变化。高峰或者平峰时段上海城市道路车辆平均行驶速度约为30~40km·h⁻¹,行驶5min距离在2km以上,才能保证大部分切割的行驶数据累计行驶里程有变化,进而计算平均速度与平均加速度,因此本文选择5min时间颗粒度。

1.2 工作模式辨识

并联式PHEV的工作模式主要分为纯电动模式、混合驱动模式、内燃机模式和行车充电模式四

种^[20]。纯电动模式是指动力电池提供车辆所需全部能量,内燃机不工作。混合驱动模式是指内燃机和电动机同时输出力矩驱动车辆前进,电机的能量来自电池组。内燃机模式是指内燃机作为唯一动力源,电池既不充电也不放电。行车充电模式是指内燃机驱动车辆并通过发电机为电池充电。

并联式PHEV工作模式的辨识过程如图1所示:①判断PHEV在各数据段是否处于纯电动模式,若该段数据中所有瞬时液体燃料消耗量小于0.5L·(100km)⁻¹(数据预分析发现瞬时液体燃料消耗率数据存在可区分阈值,在0.256L·(100km)⁻¹至1.6L·(100km)⁻¹间无数据),则认为PHEV在该数据段处于纯电动模式,否则PHEV在该数据段处于非纯电动模式。②判断SOC,SOC递减,为混合驱动模式;SOC不变,为内燃机模式;SOC上升,则为行车充电模式。

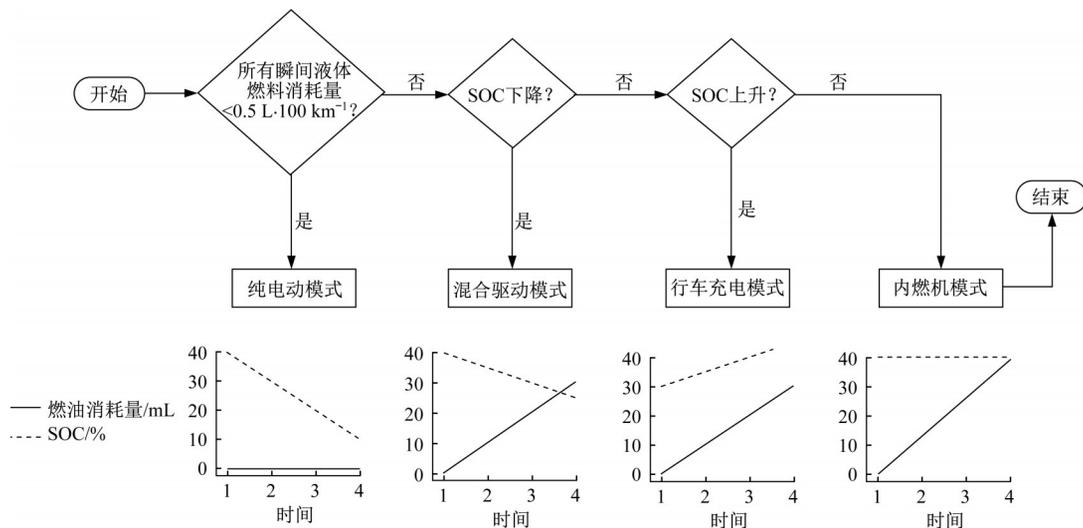


图1 工作模式辨识流程

Fig.1 Working mode identification

1.3 并联式PHEV能量消耗率(ECR)计算

并联式PHEV出行电力消耗为剩余能量的差值,燃料消耗量通过每个行程期间的即时燃料消耗率积分可得。

$$F = \int_{l_1}^{l_2} f(l) dl = \sum_{j=1}^{m-1} \Delta l_j \times f_j \quad (1)$$

式中: F 为燃料消耗量(L); l_1 为行程开始时的累计行驶里程; l_2 为行程结束时的累计行驶里程; $f(l)$ 为累计行驶里程为 l 时的即时燃料消耗率(L·km⁻¹)。对于实际运行数据,通过将 m 个采集时刻获取的数据划分成 $m-1$ 个时间间隔,累计每个时间间隔的燃料消耗计算得到; Δl_j 为第 j 个时间间隔内的行驶距离(km); f_j 为第 j 个时间间隔的平均液体燃料消耗率

(L·km⁻¹)。

并联式PHEV的能量消耗率,即ECR,是在不同驾驶环境下消耗的能量与行驶距离之间的比率,计算如下:

$$R_{\text{ECR}} = \frac{E + F \cdot c}{D} \quad (2)$$

式中: R_{ECR} 为并联式PHEV的能量消耗率(kW·h·(km)⁻¹); E 为行程中的耗电量(kW·h); D 为行程的距离,是行程开始和终点索引之间的累计里程的差值(km); c 为汽油的热值,美国对于油耗和电耗的换算关系是利用能量相等来等价的^[21]。美国能源部^[22]和加拿大自然资源部^[23]皆给出8.9kW·h·L⁻¹的取值,即每升汽油100%转换为电能的能量。

每辆车的行驶里程取决于电池容量和汽车性能。因此,较高的行驶里程不一定代表并联式PHEV在ECR方面表现更好。ECR可以更准确地了解并联式PHEV的能效表现。ECR越低,车辆能效越好。

1.4 并联式PHEV能耗影响分析建模

为分析不同因素对PHEV能耗的影响,采用多元非线性回归模型对样本PHEV一年的出行数据进行建模,多元非线性模型如下:

$$R_{\text{ECR}} = \lambda + X_1\beta_1 + (X_2 - r)^2\beta_2 + u \quad (3)$$

式中: λ 为未观测到的不随时间、车辆变化的常数; β_1 和 β_2 为模型待估系数向量; X_1 为与ECR线性相关的因素向量,如电池荷电状态、加速度等; X_2 为与ECR二次相关的因素向量,如温度、速度等; r 为对应因素最小值,即二次方程顶点; u 为均值为零的误差项,与任何解释变量均不相关。其中,线性相关和二次相关因素是根据实际运行数据所反映出的该因素与ECR之间的关系确定的。极大似然估计是统计学求解未知参数估计量的常用估计方法,本文采用该方法作为参数确定的方式。

2 数据分析结果与讨论

2.1 车辆信息与数据来源

用于研究的样本车辆为某款国产并联式

PHEV,该款车辆采用1.5T涡轮增压内燃机与电机组合的驱动系统。具体的车辆基本参数如下:车身尺寸(长×宽×高)为4740×1770×1480 mm;整备质量为1720 kg;油箱容积为50L;工信部综合油耗为 $1.6 \text{ L} \cdot (100\text{km})^{-1}$;综合工况纯电行驶里程为70km;电池容量为13 kW·h;电池类型为磷酸铁锂(LiFePO₄)。

该款并联式PHEV驾驶员可手动切换选择EV-ECO、EV-SPORT、HEV-ECO、HEV-SPORT四种驾驶模式。HEV-ECO和HEV-SPORT模式是混合动力模式。当车辆在HEV-SPORT模式下处于匀速行驶状态时,将切换至行车充电模式。HEV-ECO模式是节能混动模式,电量低于5%时,发动机会一直启动;电量大于5%,且车速较低时,将不会启动发动机,从而节省能源。HEV-SPORT是车辆运行混动模式,电机工作的同时发动机持续工作,车辆能源消耗增加,马力增强。EV-ECO和EV-SPORT模式是纯电动模式,前者在保证动力的情况下,最大限度节约电量;后者保证较好的动力性能,当车辆电量下降到15%时,或上陡坡时会自动切换到HEV模式。当电量不足或高压系统故障时,单独使用发动机驱动,为内燃机模式。

表2给出了并联式PHEV的原始数据(由于隐私,纬度信息未在表格中显示)。车辆当前状态字段一栏中,1表示移动;2表示充电;0表示停止。

表2 PHEV原始数据

Tab.2 Raw data of a particular PHEV

采集时间	累积行驶里程/km	经度/度	速度/(km·h ⁻¹)	方向(正北为0,顺时针)	电池电量/%	剩余能量/(kW·h)	高压电池电流/A	电池总电压/V	单体最高温度/(°C)	液体燃料消耗量/(mL·(100km) ⁻¹)	车辆当前状态
2015/5/28 17:32:01	5972	121.4127	15	350	82	10.65	3.9	507	27	66	1
2015/5/28 17:32:31	5973	121.4127	4	350	81	10.53	2.9	506	27	66	1
...
2015/5/28 22:55:09	6045	121.32845	0	261	21	2.73	0.4	488	27	138	1
2015/5/28 22:59:40	6045	121.3285	0	0	22	2.86	-5.7	495	27	138	2
2015/5/28 23:00:00	6045	121.3285	0	0	23	2.99	-5.9	496	27	138	2
...
2015/5/29 01:56:37	6045	121.3285	0	0	94	12.2	-5.6	522	27	138	2
2015/5/29 05:17:29	6045	121.3285	0	0	100	13.0	-0.1	516	28	138	0

2.2 并联式PHEV不同工作模式下能耗分析

样本并联式PHEV日均出行74.31km(包括网约车用户),日均出行2.09次,平均ECR为 $54.1 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot (100\text{km})^{-1}$ 。与同样发动机排量的ICEV比亚迪宋的ECR $87.1 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot (100\text{km})^{-1}$ [24](由等式(2)计算得到)相比,样本PHEV的ECR降低37.9%。与

Fetene等[5]分析的雪铁龙C-Zero,标致iOn和三菱iMiEV三款BEV车型的混合平均ECR $18.3 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot (100\text{km})^{-1}$ 相比,样本PHEV的ECR是BEV的2.96倍。

图2为PHEV在四种工作模式下平均ECR的对比图。在纯电动模式下,动力电池提供车辆所需全

部能量,能量转换率高,能量消耗率最低。内燃机模式采用内燃机作为唯一动力源,输出的能量全部用于驱动车辆前进,能量转换效率比电池低,能量消耗多,能量消耗率高。车辆在内燃机模式下匀速行驶时自动切换至行车充电模式,行车充电模式速度平稳,能量消耗率较内燃机模式更低,但比纯电动模式高。混合驱动模式下的平均ECR最高,混合驱动模式一般用于加速或爬坡等大负荷需求情况,能量消耗率高。

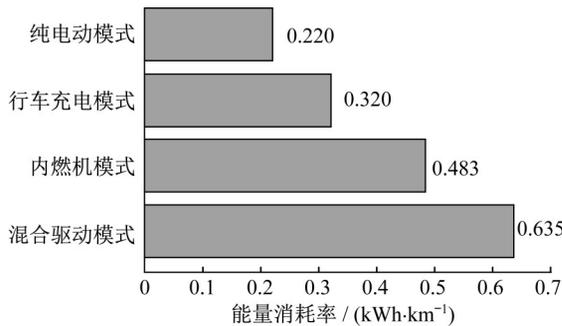


图2 PHEV不同模式下平均ECR

Fig.2 Average ECR in different working modes of the sample PHEVs

2.2.1 纯电动模式能耗分析

纯电动模式下并联式PHEV百公里消耗的电量估计范围为10.32kW·h~49.68kW·h,中位数为22.612kW·h,与金勇等人^[19]的研究结果基本一致。工信部公布的该款车辆的纯电行驶百公里所消耗电量为18.57kW·h,实际电耗比标准工况高21.76%,符合常规结果。并联式PHEV纯电动模式下的能耗高于一般BEV的能耗^[5],原因是样本并联式PHEV的整备质量(1720kg)大于所对比三款BEV(雪铁龙C-ZERO整备质量:1140kg,标致iOn:1080kg,三菱iMiEV:1080kg)的整备质量。

样本并联式PHEV纯电动模式的行驶里程占总行驶里程8.16%。样本数据中,一位用户将并联式PHEV当作BEV使用,表明在驾驶模式和充电习惯的正确组合下,电池可取代汽油。部分用户将并联式PHEV当作ICEV使用(44辆),几乎没有从电网中获取能量。图3是样本并联式PHEV纯电动模式下里程占比的分布(基于其余380辆车的数据)。纯电动模式行驶里程占总里程比例为0~8%车辆数目的占车辆总数的22%。大部分车辆的纯电动里程占比都小于40%(380辆车中,98%的车辆纯电动模式下的行驶里程占比均在40%以下)。

图4展示了纯电动模式行驶里程占比与日均出行里程的关系。当日均出行里程为70~90km时,纯

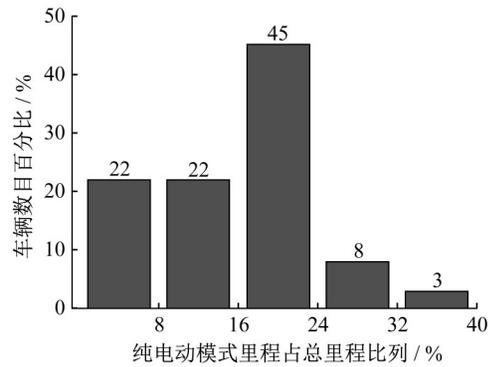


图3 PHEV纯电动模式行驶里程占比分布^[19]

Fig.3 The proportion of mileage under motor driving mode in four modes of sample PHEVs

电动模式的行驶里程占比最高,为11.3%;当日均出行里程在130km以上时,纯电动模式的行驶里程占比最低,为4.3%。说明当车辆的续航里程能够满足驾驶员每日出行需求时,驾驶员倾向于使用纯电动模式驾驶汽车;当续航里程无法满足驾驶员出行需求时,驾驶员开始用油。日均出行里程小于70km的用户,纯电动模式行驶里程的占比仅为4.4%,原因是73%日均出行里程小于70km的用户将PHEV作为ICEV使用,几乎没有从电网中获取能量,导致整体数值偏小,此类用户购买PHEV的主要原因可能是上海电动汽车牌照政策的优惠福利。

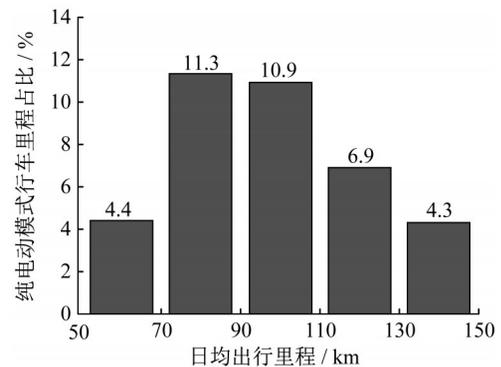


图4 纯电动模式行驶里程与占比与日均出行里程的关系^[19]

Fig.4 The relationship between the proportion of the mileage under motor driving mode in four modes and average daily traveling mileage

2.2.2 内燃机模式能耗分析

内燃机模式下的燃油消耗分布如图5所示。按距离加权平均得到样本并联式PHEV在行驶时的平均油耗范围为4.472~15.69L·(100km)⁻¹,中位数为7.6L·(100km)⁻¹,与Zoepf等^[16]在电量维持(Charge-Sustaining, CS)模式下平均燃油消耗量的研究结果接近,与一般燃油汽车油耗相当。

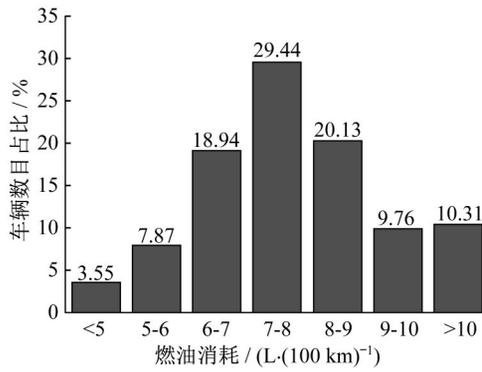


图5 内燃机模式下的油耗分布

Fig.5 Fuel consumption distribution in the ICE mode

2.2.3 行车充电模式能耗分析

行车充电模式平均ECR为0.320 kW·h·km⁻¹, 介于纯电动模式和内燃机模式之间。车辆处于匀速行驶状态时,内燃机模式将自动切换至行车充电模式。样本数据显示,车辆处于行车充电模式时,平均速度为48.77km·h⁻¹,高于内燃机模式时的26.35km·h⁻¹。行车充电模式下46%的行程段处于快速路,而内燃机模式下快速路行程仅为4.5%,因为在快速路上内燃机模式易切换至行车充电模式。

2.2.4 混合驱动模式能耗分析

并联式PHEV在混合驱动模式下的平均ECR为0.635kW·h·km⁻¹,即每行驶1km平均消耗0.635kW·h。图6展示了样本中164 994条数据段的ECR分布,呈现出较强的异质性。0.399kW·h·km⁻¹处的垂线表示工信部公布的平均ECR(13kW电力综合工况纯电行驶里程70km,2.4L燃油综合工况混合驱动模式行驶里程100km)。0.635kW·h·km⁻¹处的垂线来自实际运行样本数据的平均ECR,比工信部公布的ECR高。因此,在同样的油电消耗下,样本PHEV的实际驱动里程比工信部报告的驱动里程低约37.2%。ECR的差异与异质性来源于驾驶环境的差异、驾驶员驾驶习惯和行为的差异等,

因此分析ECR变化的影响因素显得极为重要。

车辆处于混合驱动模式时,平均车速低于40km·h⁻¹的数据段高达87%左右,这恰恰是内燃机效率较低的工作区间。因此,当车速低于40km·h⁻¹时,建议以电机驱动替代内燃机驱动,提高车辆在混合驱动模式下的电贡献度,减少内燃机在低效率、高能耗情况下的介入^[19]。

在样本数据段中,纯电动模式行程段占比为21.11%,内燃机模式为26.38%,行车充电模式为12.82%,混合驱动模式占比最高,为39.69%。研究^[16]证明加速度对ECR的影响显著,而获得较大的加速度正是驾驶员选择混合驱动模式的主要原因之一。另外,混合驱动模式能耗分析较复杂,因此本文将针对混合驱动模式下ECR的影响因素进行研究。

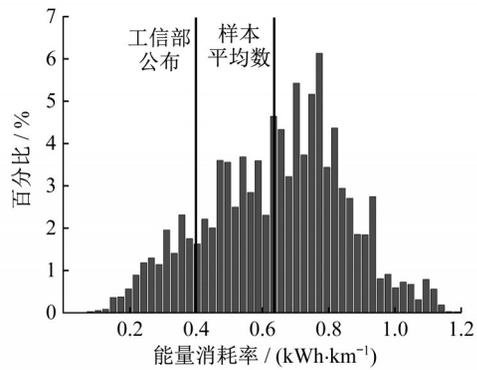


图6 混合驱动模式下ECR分布

Fig.6 ECR distribution in hybrid driving mode

2.3 混合驱动模式能耗影响因素分析与建模

从并联式PHEV运行数据中,提取一系列能耗影响因素: SOC、平均速度、平均加速度、单体最高温度、工作日和高峰小时,经Pearson相关性检验,变量间存在弱相关性,相关系数绝对值均小于0.2,直接纳入回归方程(式3)。对混合驱动模式下的ECR进行统计分析和建模。表3为影响因素的描述性统计。

表3 影响因素的描述性统计

Tab.3 The descriptive statistics of parameters

影响因素	描述	平均值	方差	最小值	最大值
ECR	能量消耗率/(kW·h·km ⁻¹)	0.634 8	0.208 4	0.024	1.770 2
SOC	数据段平均电池电量/%	43.795 7	24.944	5	99.5
平均速度	数据段平均速度/(km·h ⁻¹)	25.260 9	15.073 5	12.04	132
平均加速度	数据段平均加速度/(m·s ⁻²)	0.000 61	0.041 16	-2.29	2.278 5
单体温度	PHEV 电池单体最高温度/(°C)	42.596 1	5.873 5	3	55
工作日	是否工作日(1=是;0=否)	0.733 5	0.442 1	0	1
高峰小时	是否高峰小时/(1=7-9am,4-6pm;0=其余)	0.386 2	0.486 9	0	1

使用R软件的极大似然估计方法估计多元非线性模型。表4展示了模型的估计结果,全部解释变量具有统计显著性,且正负性与预期相同。

ECR越低,燃料效率越好,因此该模型中统计上显著的负参数表明这些影响因素对混合工作模式下的能量效率和行驶里程具有积极的影响。从表4的参数估计和基于实际运行数据绘制的ECR与各参数的关系图7得出以下结论。

(1)SOC与ECR负相关。图7a展示了SOC对ECR的影响局部平滑散点图,当SOC为100%时,ECR最低,接着随SOC的降低逐渐缓慢升高。这可能与磷酸铁锂电池放电性能相关^[25]。

(2)温度对ECR具有非线性U形效应,如图7b

表4 模型估计结果

Tab.4 Estimation results of the model

解释变量	参数值	标准误差	t值	显著性
SOC	-0.003 4	0.000 04	-79.087	***
平均速度(平方项)	0.001 4	0.000 005	292.439	***
平均加速度	0.191 5	0.026	7.360	***
单体温度(平方项)	0.000 1	0.000 01	4.878	***
工作日	0.012 1	0.002 3	5.208	***
高峰小时	0.030 3	0.002 2	14.07	***
常数λ	0.885 4	0.002 8	314.958	***
样本数量	143 516			
拟合优度	0.383 2			
调整拟合优度	0.383 2			

注:***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05

所示,因此在模型中选择平方项建模。过低和过高的温度下驱动都会对并联式PHEV的能量效率产生

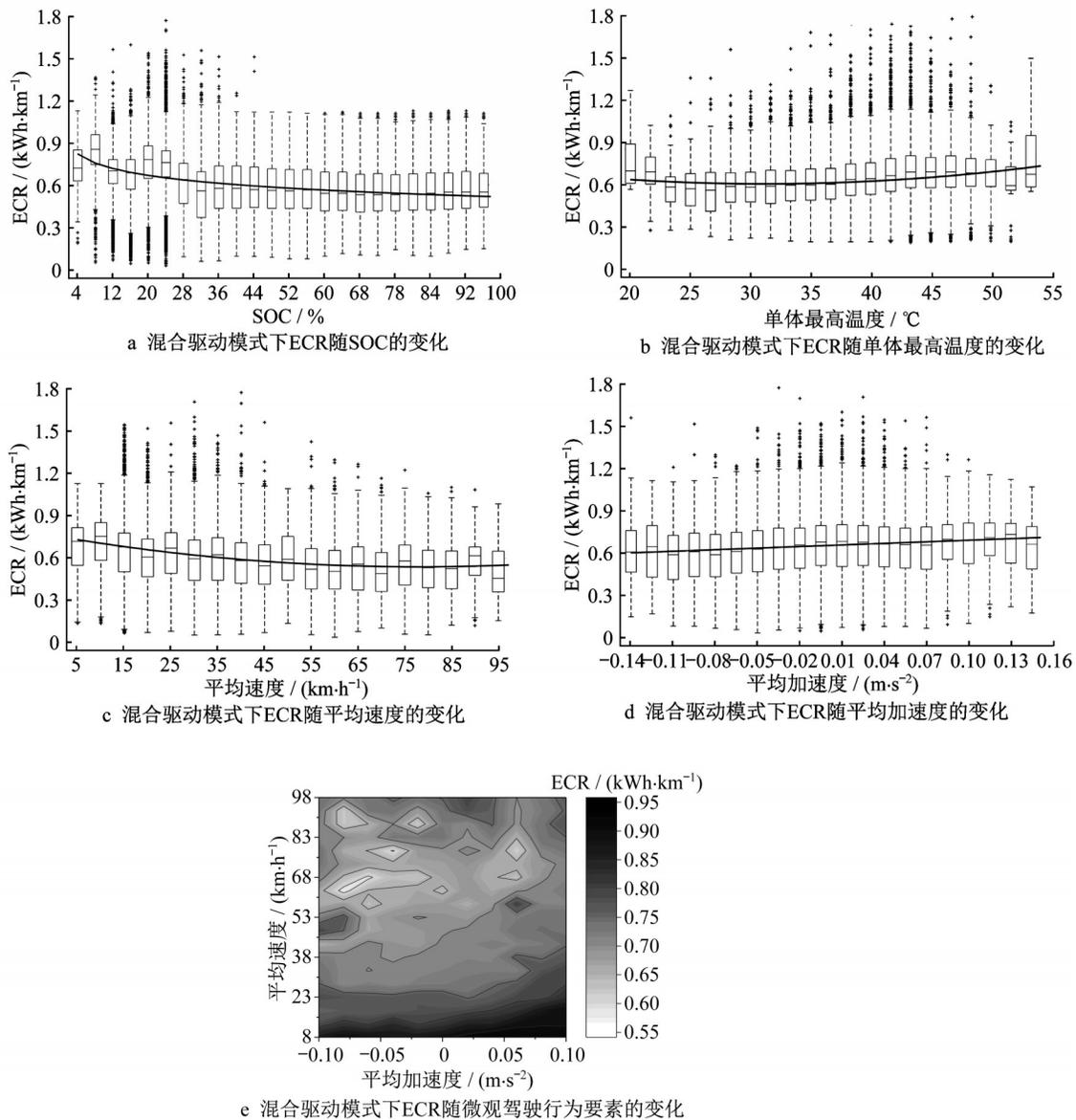


图7 混合驱动模式下ECR与各影响因素的变化关系

Fig.7 ECR variations with the influencing factors in hybrid driving mode

负面影响,结论与Fetene等^[5]和Lohse-Busch等^[13]对BEV的研究结果一致,即BEV在低温和高温下能量消耗增加。模型估计的正系数表明偏离最佳单体温度的低温和高温都将使ECR明显增加。模型表明,在其他条件不变的情况下,最有利的单体最高温度约为36摄氏度,大约在春秋季节。

(3)图7c和7d通过局部散点图平滑估计分别展示了能耗与平均速度和平均加速度的关系。平均速度与ECR密切相关,且呈现二次函数型,在慢速和高速下行驶ECR都会增加,与温度类似,同样在模型中选择平方项建模。样本数据分析显示,混合驱动模式下的节能驾驶速度在 $67.5\sim 72.5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,略高于ICEV $65\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的节油驾驶速度^[26]。模型估计的正系数表示,较低和较高的平均速度对ECR的增长有正向作用,这与Zhang等^[27]所描述的一致。慢速条件下的频繁加减速与高速条件下需克服的较大空气阻力可能是ECR增加的原因。图7c结果表明,低速相较高速有更强烈的作用。图7e展示了平均加速度和平均速度显著的异质性。

(4)表4显示了加速度对ECR变化的重要影响,这一发现与加速度对ICEV、BEV能量消耗率影响的研究一致^[28]。ECR随加速度增加而增加,驾驶员在行驶过程中应避免频繁的加减速,以节省能源。

(5)图8为不同道路类型,高峰小时和工作日的ECR交叉分布箱形图。以 $65\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度将道路分为城市道路(速度小于 $65\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)和快速路(速度大于 $65\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)两类。高峰小时定义为7-9am及4-6pm。箱型图中自上而下分别是最大值、上4分位数、中位数、下4分位数及最小值,其余散点是异常值。

图8a显示,高峰小时平均ECR高于平峰小时,这与Zahabi等^[28]的研究结果一致,归因于蒙特利尔也存在严重的交通拥堵,与上海情况相似。图8b中,工作日与周末的ECR差异不明显,两者的下4分位数及最小值大致相等,与表4工作日系数不显著一致。道路特性对并联式PHEV的燃油经济性有影响^[28],因此本文针对城市道路和快速路的ECR分别进行了分析。图8c显示,城市道路的平均ECR远大于快速路,可能原因为快速路行车速度高,驾驶员变速少,相反,城市道路拥堵现象常发,红绿灯密集,加减速频繁,速度也相对较低。Fetene等^[5]和Zahabi等^[28]对BEV的研究提到了相关的驾驶行为差异。

(6)模型估计中常数显著,说明有很多未观测到的因素对ECR有显著影响。除上文所述因素外,本

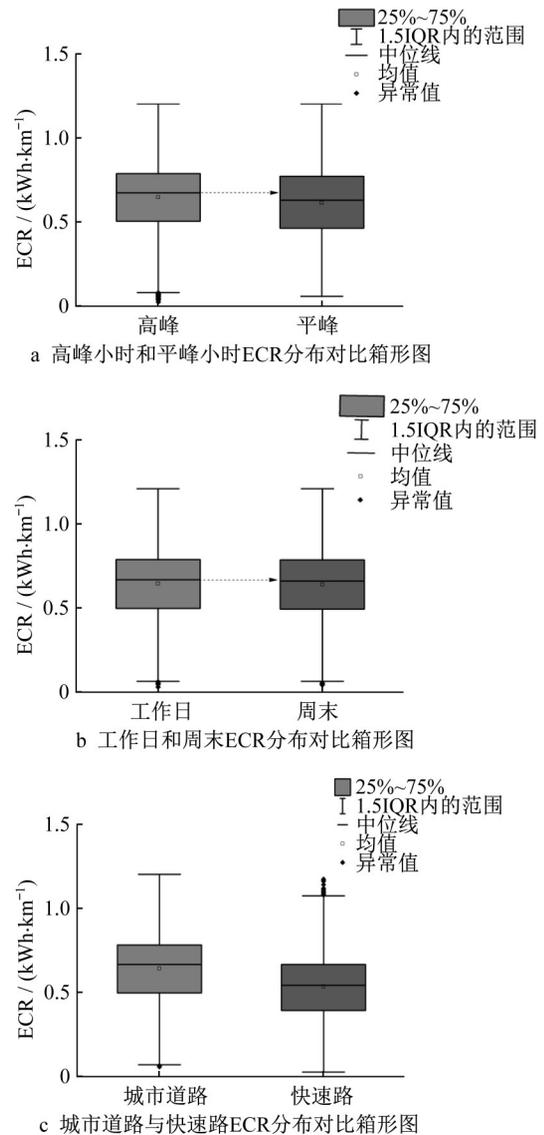


图8 不同道路类型,高峰小时和工作日的ECR交叉分布箱形图

Fig.8 Box plots of the ECR of time and environment parameters

文因数据源限制,存在一系列无法获得的因素,如环境因素(道路坡度、风速、降水、能见度),个体因素(车辆因素)等,这些因素对ECR也有一定影响。

各参数对混合工作模式下能耗影响大小的纵向分析中,平均加速度对ECR的影响最大,每上升 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,每公里ECR上升 $0.1915\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。驾驶员在行驶过程中应避免频繁的加减速,保持平稳驾驶,以节省能源。SOC每升高10%,每公里ECR降低 $0.034\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。保持较高的SOC既可延长电池寿命,也可节省能耗。平均速度与ECR密切相关,且呈现U型,在慢速和高速下行驶ECR都会增加,混合驱动模式下的节能驾驶速度在 $67.5\sim 72.5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之

间。高峰小时的影响较工作日更强烈,错峰出行或弹性工作时间调整会给节能带来较大的增益。温度虽然对能耗有显著的影响,但改变一摄氏度,ECR上升 $0.0001\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{km}^{-1}$,影响程度较小。

3 结论

通过区分并联式PHEV不同工作模式,及不同工作模式下的能耗规律的对比分析,探究了不同因素对并联式PHEV混合驱动模式下ECR的影响。基于上海市425辆同一构型并联式PHEV超过30万次出行的实际运行数据实证分析,结果表明:

(1)并联式PHEV相比传统燃油汽车具有显著的燃油经济性。样本并联式PHEV平均ECR为 $54.1\text{ kW}\cdot(100\text{ km})^{-1}$,与传统燃油车比亚迪宋相比,样本PHEV的ECR降低37.9%,但是BEV的2.96倍。

(2)并联式PHEV四种工作模式下,ECR排序为:混合驱动模式>内燃机模式>行车充电模式>纯电动模式。内燃机模式下油耗与一般燃油汽车相当,纯电动模式的电耗高于一般BEV。

(3)在混合驱动模式下,样本并联式PHEV平均车速低于 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的数据段占87%,表明内燃机效率较低的工作区间占了大部分。以电机驱动替代内燃机效率最低的工况,提高车辆在混合驱动模式下的电贡献度,减少内燃机在低效率、高能耗情况下的介入。

(4)样本PHEV在混合驱动模式下的平均实际运行ECR为 $0.635\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{km}^{-1}$,高于工信部公布的能耗值。低/高速、极端温度和较大的加速度等因素抵消了PHEV在混合驱动模式下相较常规燃油汽车的优势。较高的SOC可以提高能源效率,温度和平均速度对ECR具有二次效应,PHEV需要花费更多的能量在低温环境下加热,在高温环境下冷却。基于本文有限的样本数可得最佳单体温度约为 36°C 时(春秋季节),最佳行驶速度是约 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,高于ICEV的 $65\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ [5]。针对行程时间和道路类型的分析显示:高峰小时平均ECR高于平峰小时,工作日与周末的ECR差异不明显,快速路的平均ECR远低于城市道路。

本文虽然使用同一构型PHEV运行数据,但提出的工作模式识别和ECR分析方法均可推广至其他任一车型。后续研究可扩大研究的样本量及车型,进一步验证结论的可靠性和有效性。另外,可拓

展研究ECR作为不同城市道路拥堵状况表征指标的可行性。

作者贡献说明:

李浩:论文主要构思者,指导数据分析,模型构建及论文写作。

俞璐:数据分析,模型构建,论文撰写。

丁晓华:参与数据收集与分析。

张文杰:参与数据收集与分析。

涂辉招:数据分析指导,论文撰写指导及修改。

参考文献:

- [1] LIU Z, MENG Q, WANG S. Speed-based toll design for cordon-based congestion pricing scheme [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 31: 83
- [2] 陈雪平, 张海亮, 钟再敏, 等. 插电式混合动力汽车能耗及其影响因素分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(11): 1749
CHEN Xueping, ZHANG Hailiang, ZHONG Zaimin, *et al.* Simulation and user factors analysis of energy consumption of plug in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(11): 1749
- [3] WU D, ALIPRANTIS D C, GKRTZA K. Electric energy and power consumption by light-duty plug-in electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(2): 738
- [4] WU X, AVIQUZZAMAN M, LIN Z. Analysis of plug-in hybrid electric vehicles' utility factors using GPS-based longitudinal travel data [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 57: 1
- [5] FETENE G M, KAPLAN S, MABIT S L, *et al.* Harnessing big data for estimating the energy consumption and driving range of electric vehicles[J]. *Transportation Research Part D: Transport Environment*, 2017, 54: 1
- [6] SUGIYAMA Y, FUKUI M, KIKUCHI M, *et al.* Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam[J]. *New Journal Of Physics*, 2008. DOI: 10.1088/1367-2630/10/3/033001
- [7] WANG J, BESSELINK I, NIJMEIJER H. Battery electric vehicle energy consumption prediction for a trip based on route information [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2018, 232(11): 1528
- [8] JOHNSON L, NEDZESKY A. A comparative study of speed humps, speed slots and speed cushions[C]//ITE 2004 Annual Meeting and Exhibit. [S. l.]: Institute of Transportation Engineers, 2004: 14-26.
- [9] GUNDANA D, DOLLAR R A, VAHIDI A. To merge early or late: analysis of traffic flow and energy impact in a reduced lane scenario[C]//21st International Conference on Intelligent

- Transportation Systems (ITSC). Maui: IEEE, 2018: 525-530.
- [10] ZHENG F, LI J, VAN ZUYLEN H, *et al.* Influence of driver characteristics on emissions and fuel consumption [J]. Transportation Research Procedia, 2017, 27: 624
- [11] FONTARAS G, PISTIKOPOULOS P, SAMARAS Z. Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(18): 4023
- [12] ALVAREZ R, WEILENMANN M. Effect of low ambient temperature on fuel consumption and pollutant and CO₂ emissions of hybrid electric vehicles in real-world conditions[J]. Fuel, 2012, 97: 119
- [13] LOHSE-BUSCH H, DUOBA M, RASK E, *et al.* Ambient temperature (20°F, 72°F and 95°F) impact on fuel and energy consumption for several conventional vehicles, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles and battery electric vehicle [R]. USA: SAE Technical Paper, 2013.
- [14] DAVIES J, KURANI K S. Moving from assumption to observation: Implications for energy and emissions impacts of plug-in hybrid electric vehicles [J]. Energy Policy, 2013, 62: 550
- [15] PLÖTZ P, FUNKE S Á, JOCHEM P. Empirical fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Industrial Ecology, 2018, 22(4): 773
- [16] ZOEPF S, MACKENZIE D, KEITH D R, *et al.* Charging choices and fuel displacement in a large-scale demonstration of plug-in hybrid electric vehicles [J]. Transportation Research Record, 2013, 2385: 1
- [17] WU X, DONG J, LIN Z J E P. Cost analysis of plug-in hybrid electric vehicles using GPS-based longitudinal travel data [J]. Energy Policy, 2014, 68: 206
- [18] 夏洪朴, 王斌, 吴光耀, 等. 基于实车道路数据的插电式混合动力能耗敏感性分析[J]. 汽车工程, 2019, 41(9): 990
XIA Hongpu, WANG Bin, WU Guangyao, *et al.* Sensitivity analysis on energy consumption of PHEV based on real vehicle road data[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(9): 990
- [19] 金勇, 臧鹏飞, 王哲. 基于运行数据的PHEV工作模式辨别与能耗分析[J]. 汽车工程学报, 2018, 8(5): 358
JIN Yong, ZANG Pengfei, WANG Zhe. Working mode identification and energy consumption analysis based on PHEV operation data [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2018, 8(5): 358
- [20] 胡欢. 插电式混合动力汽车现状[J]. 城市车辆, 2009(7): 43.
HU Huan. The present situation of plug-in hybrid electric vehicle [J]. People's Public Transportation, 2009(7): 43
- [21] 侯聪, 王贺武, 欧阳明高. 中美PHEV能耗评价方法对比研究 [J]. 汽车工程, 2015(1): 1
HOU Cong, WANG Hewu, OUYANG Minggao, A comparison study on the evaluation methodologies of PHEV energy consumption between China and U.S [J]. Automotive Engineering, 2015(1): 1
- [22] ADFC. Fuel properties comparison [EB/OL]. [2020-12-28]. https://afdc.energy.gov/fuels/fuel_comparison_chart.pdf.
- [23] Natural Resources Canada. Buying an electric vehicle—understanding the tables—fuel consumption [EB/OL]. [2020-12-28]. <https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energy-efficiency-transportation/personal-vehicles/choosing-right-vehicle/buying-electric-vehicle/understanding-tables/21383>.
- [24] 小熊耗电. 宋油耗报告[EB/OL]. [2020-12-28]. <http://www.xiaoxiongyouhao.com/chexiyh/3780.html>.
Xiaoxionghaodian. BYD Song fuel consumption report [EB/OL]. [2020-12-28]. <http://www.xiaoxiongyouhao.com/chexiyh/3780.html>.
- [25] 李哲. 纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
LI Zhe. Characterization research of LiFePO₄ batteries for application on pure electric vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [26] ELSHAWARBY I, AHN K, RAKHA H A. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions [J]. Transportation Research Part D: Transport Environment, 2005, 10(1): 13
- [27] QI Z, YANG J, JIA R, *et al.* Investigating real-world energy consumption of electric vehicles: a case study of shanghai [J]. Procedia Computer Science, 2018, 131: 367
- [28] ZAHABI S A H, MIRANDAMORENO L F, BARLA P, *et al.* Fuel economy of hybrid-electric versus conventional gasoline vehicles in real-world conditions: a case study of cold cities in Quebec, Canada [J]. Transportation Research Part D: Transport Environment, 2014, 32: 184