

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2022.02.002

# 插电式混合动力乘用车能耗和续驶里程 评价方法研究\*

刘志超<sup>1</sup>, 郑天雷<sup>1</sup>, 柳邵辉<sup>1</sup>, 龚慧明<sup>2</sup>

(1. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300; 2. 能源基金会, 北京 100004)

**[摘要]** 本文中通过理论分析和试验验证详细揭示了轻型混合动力汽车能量消耗量试验方法旧国标(GB/T 19753—2013)存在的问题,同时作为对其新国标(GB/T 19753—2021)所作修改合理性的诠释。主要论据包括:尽管下一阶段可暂时采用WLTC试验循环,但最终仍应全面推动中国轻型汽车行驶工况(CLTC-P)的应用;新标准中PHEV的试验流程全面覆盖了车辆实际使用的各个阶段;采用基于利用系数的加权计算方法能更科学地评价PHEV的综合能耗;基于循环能量需求计算PHEV的续驶里程更为合理。两款PHEV的试验结果表明:标准修订后,电量平衡阶段燃料消耗量显著增加,综合燃料消耗远高于2 L/100km;综合电量消耗量有所下降;续驶里程显著降低;考虑能耗折算后,折算的燃料消耗量显著高于综合燃料消耗,甚至有可能增加至电量平衡阶段的燃料消耗量水平。

**关键词:** 插电式混合动力汽车; 能量消耗; 续驶里程; 评价方法; 试验循环; 利用系数

## Research on Energy Consumption and Driving Range Evaluation Method of Plug-in Hybrid Electric Passenger Car

Liu Zhichao<sup>1</sup>, Zheng Tianlei<sup>1</sup>, Liu Shaohui<sup>1</sup> & Gong Huiming<sup>2</sup>

1. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300; 2. The Energy Foundation., Beijing 100004

**[Abstract]** In this paper, the existing problems of old national standard on “the test methods for energy consumption of light-duty hybrid electric vehicles” (GB/T 19753—2013) are revealed in detail through theoretical analysis and test verification, which meanwhile serves as an explanation of the reasonability of the revisions made in new national standard (GB/T 19753—2021). The main arguments are as follow: Though WLTC test cycle can temporarily be adopted in next stage, the application of China light-duty vehicle test cycle should finally be all-round pushed forward. The PHEV test procedures in new standard can all-round cover all stages of the practical use of vehicles. The adoption of utility factor-based weighting calculation method can more scientifically evaluate the comprehensive energy consumption of PHEV. The calculation of PHEV driving range based on cycle energy demand is more rational. The test results of two PHEVs show that after the revision of standard, the fuel consumption in charge-sustaining (CS) stage significantly increase, with the comprehensive fuel consumption much higher than 2 L/100km, and the comprehensive electricity consumption slightly lowers, with the driving range greatly reduce. With consideration of energy consumption conversion, the converted fuel consumption significantly higher than comprehensive fuel consumption, probably even increasing to the level of fuel consumption in CS stage.

**Keywords:** plug-in hybrid electric vehicle; energy consumption; driving range; evaluation method; test cycle; utility factor

\* 国家重点研发计划(2018YFB0106405)资助。

原稿收到日期为2021年02月22日,修改稿收到日期为2021年04月19日。

通信作者: 郑天雷, 高级工程师, 硕士, E-mail: zhengtianlei@catarc.ac.cn。

## 前言

随着我国汽车工业的快速发展,能源环境问题也愈加突出<sup>[1-2]</sup>。新能源车作为节能减排的重要技术路线,近年来在政策推动下产业规模不断壮大。与纯电动汽车相比,插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)不存在“里程焦虑”问题,同时较短出行里程时也可以兼顾纯电动汽车的优势<sup>[3-6]</sup>;另一方面,可充电储能系统(rechargeable energy storage system, REESS)电量平衡后PHEV仍具备传统混合动力汽车的节油性能,因此得到国内外主流企业的广泛关注<sup>[7-9]</sup>。2020年,我国PHEV的产销量分别为26.0万辆和25.1万辆,连续多年领跑全球,而能耗和续航里程作为PHEV最重要的性能参数,如何科学评价尤为重要。由于PHEV的产销量中乘用车占比超过98%,因此本文的研究将围绕此类车型开展。

目前,包括国际标准ISO 23274<sup>[10-11]</sup>、联合国全球技术法规UN GTR 15<sup>[12]</sup>和国际自动机工程师学会标准SAE J1711<sup>[13]</sup>等在内的国际主流标准法规中,对于PHEV能耗和续航里程的测量大都按照电量消耗模式(charge-depleting operating condition, CD)和电量保持模式(charge-sustaining operating condition, CS)两个阶段的试验进行。CD阶段试验是指车辆行驶过程中,REESS能量平均处于减少的状态;CS阶段试验是指车辆行驶过程中,REESS能量保持在平衡状态<sup>[14]</sup>。基于PHEV的CD和CS两个阶段试验,国内外学者开展了广泛和深入的研究,重点从能量管理策略的角度进行相关论证<sup>[15-21]</sup>。

我国现行国家标准GB/T 19753—2013<sup>[22]</sup>参照联合国欧洲经济委员会法规UN ECE R101<sup>[23]</sup>制定,试验流程包括条件A和条件B两个阶段。条件A是指REESS处于充电终止的最高荷电状态,条件B是指REESS处于运行放电的最低荷电状态。解难等<sup>[24]</sup>基于国家标准完成16款PHEV的测试,并构建了涵盖能耗、排放和续航里程等关键指标的综合评价体系;李孟良等<sup>[25]</sup>提出基于利用系数或平均充电行驶里程权重系数进行PHEV综合的计算方法,同时建议试验条件和试验工况应进行相应调整;杜建波等<sup>[26]</sup>在对国内外标准法规分析的基础上,提出PHEV的能耗与出行里程、充电习惯等密切相关,同时建议补充空调试验以反映不同季节车辆的能耗水平。

试验方法标准是车辆准入的依据,也是车辆标定与优化的基础。GB/T 19753—2013发布时,我国几乎没有PHEV量产车型,因此主要参照了欧洲的法规进行制定。但随着PHEV产业的不断发展,标准中存在的问题也愈加凸显。目前,GB/T 19753—2013的核心条款与国际存在显著差异,制定所参照的欧洲法规也进行了全面完善,因此须开展必要的修订以实现PHEV能耗和续航里程的科学评价。

本文中对PHEV能耗和续航里程评价方法开展研究,通过理论分析,提出GB/T 19753—2013在试验循环、试验流程和试验结果计算等方面存在的问题及修订建议,结合试验验证结果得到标准的修订对PHEV能耗和续航里程的影响。本文中的研究充分吸取了GB/T 19753—2013修订过程中的相关成果,详细分析了核心条款修订的原因,形成的结论与新发布的GB/T 19753—2021一致,有助于行业对标准的进一步理解和试验的规范化开展。

## 1 试验循环

试验循环表征车辆在实际道路中的行驶特征,是能耗和续航里程测试的基础,车辆按照试验循环规定的速度-时间关系行驶以模拟车辆的实际使用情况。

对于PHEV的能耗和续航里程测试,GB/T 19753—2013规定应按照新欧洲驾驶循环(new European driving cycle, NEDC)进行。该循环由多个恒定的加速、减速和匀速片段构成,体现的是一种理想化的稳态工况。稳态工况的形成主要受限于早期技术水平,随着测试技术的发展和理论水平的完善,国际主流国家和地区均完成了更能体现实际行驶特征的瞬态工况的构建,并已应用于相关标准法规。

目前,我国的相关标准中,国六排放标准GB 18352.6—2016已纳入全球统一轻型车测试循环(worldwide light-duty test cycle, WLTC)<sup>[14]</sup>并实施,中国轻型汽车行驶工况(China light-duty vehicle test cycle, CLTC,其中与乘用车对应的为CLTC-P)<sup>[27]</sup>也已于2019年发布,循环曲线与NEDC的对比如图1所示,特征参数见表1。

由表1可以看出,3种循环特征参数差异显著。其中,平均速度、运行平均速度、平均加速度、平均减速度和匀速比例CLTC-P均显著低于NEDC和WLTC;加速比例和减速比例CLTC-P高于NEDC,与

WLTC相当;怠速比例CLTC-P与NEDC相当,高于WLTC。

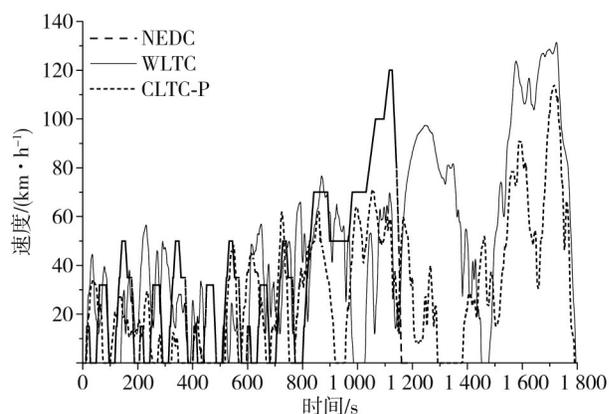


图1 循环曲线

表1 循环特征参数

特征参数	CLTC-P	NEDC	WLTC	实际道路数据
平均速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	28.96	33.60	46.40	29.88
运行平均速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	37.18	43.50	53.20	36.35
平均加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	0.45	0.53	0.53	0.48
平均减速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	-0.49	-0.75	-0.58	-0.53
加速比例/%	28.78	23.20	30.90	29.14
减速比例/%	26.44	16.60	28.60	26.40
匀速比例/%	22.67	37.50	27.80	22.41
怠速比例/%	22.11	22.60	12.70	22.05

由表1可知:CLTC-P与实际道路数据相差很小,表明CLTC-P能客观反映我国实际道路中的行驶特征;而NEDC和WLTC的特征参数均与实际道路数据存在明显差异。

由于GB/T 18352.6—2016已实施,新车型已按照WLTC完成研发,为降低工况切换对行业的影响,保障平稳过渡,下一阶段暂以WLTC进行PHEV能耗和续驶里程管理<sup>[28-31]</sup>。由于CLTC-P更符合我国实际道路的驾驶特点,为进一步推动实际道路的节能降耗,建议能耗排放国家标准在后续的修订中能够全面应用CLTC-P。

## 2 试验流程

实际使用中,PHEV在REESS电量较高时电力驱动为主,随着REESS电量的不断消耗发动机逐渐介入,当REESS达到电量平衡后完全依靠燃油驱动。GB/T 19753对试验流程的规定也应同时涵盖这

两个阶段。

### 2.1 电力驱动阶段

GB/T 19753—2013规定了条件A试验以描述PHEV从REESS满电直至电量平衡的阶段。试验流程也给出两种方法:①按照试验循环连续进行试验,直至REESS达到电量平衡;②仅进行一个试验循环,以该循环的试验结果代表整个电力驱动阶段的能耗情况<sup>[22]</sup>。第①种方法全面反映了电力参与驱动的整个阶段,但与第②种方法相比,此方法测试时间长,同时REESS电量较低时发动机将会启动,从而导致燃料消耗产生,综合燃料消耗量也将随之增加。因此在实际执行过程中PHEV均选取第②种方法进行试验。试验流程如图2所示。

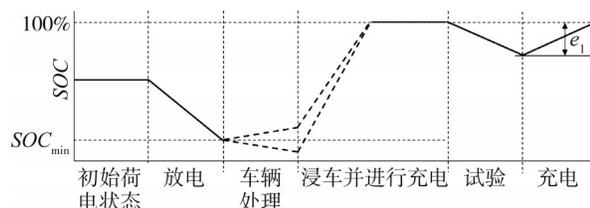


图2 条件A试验流程

续驶里程的测量须另行开展,按照试验循环连续试验,直至发动机启动时车辆行驶的里程即为PHEV的续驶里程<sup>[32]</sup>。

随着REESS电量的逐渐降低,动力来源也将发生变化,仅一个试验循环的结果无法代表整个电力驱动阶段的能耗情况。因此须在第①种方法的基础上,结合WLTC的工况特点提出一种能够覆盖电力参与驱动的整个过程。GB/T 19753—2021规定的CD阶段试验方法即基于此制定,试验流程如图3所示。

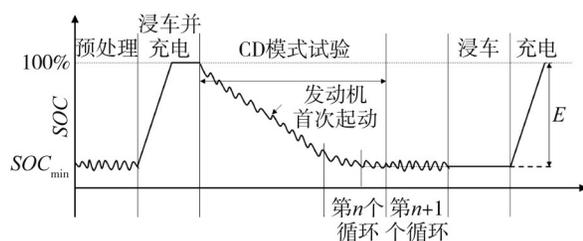


图3 CD阶段试验流程

由图3可知:CD阶段包含的 $n$ 个试验循环中,允许发动机参与部分驱动;第 $n+1$ 个试验循环是为确认REESS是否达到电量平衡。因此,CD阶段体现了REESS从满电直至电量平衡的整个过程,其中也会

有燃料消耗的产生。

## 2.2 仅燃油驱动阶段

GB/T 19753—2013规定的条件B试验,理论上为描述PHEV仅依靠燃油进行驱动的阶段,但对电量变化没有限制,允许试验过程中电力的介入。试验流程如图4所示。

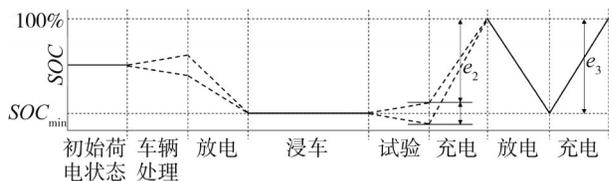


图4 条件B试验流程

尽管图4所示的第一个“放电”结束后REESS应达到电量平衡,但以“无法满足50 km/h的纯电行驶或发动机启动”为截止条件无法保障该要求,部分车型的REESS很可能有电量残存,导致试验过程中电量消耗的产生。“试验”结束REESS没有达到电量平衡点再次说明了条件B允许电量消耗产生,这将进一步降低条件B的燃料消耗量,不利于PHEV能耗的客观评价。因此须确定一种能够代表REESS电量平衡后的测试流程,GB/T 19753—2021中的CS试验阶段由此提出。试验流程如图5所示。

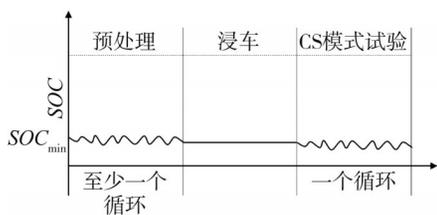


图5 CS阶段试验流程

图5中的“预处理”要求试验前REESS须达到电量平衡,“CS模式试验”也同样要求试验前后的电量平衡状态,保障了此阶段试验的动力来源仅为燃油。

## 3 试验结果的计算方法

PHEV试验结果包含燃料消耗量、电量消耗量和续驶里程,燃料消耗量和电量消耗量又细分为各个阶段和综合结果。目前,根据工信部“中国汽车能源消耗量查询”系统相关数据,PHEV综合燃料消耗量通常不超过2 L/100km,与实际显著不符;续驶里程的计算方法也缺乏一定的合理性。因此需要对试

验结果的计算方法进行完善。

### 3.1 燃料消耗量

GB/T 19753—2013规定的综合燃料消耗量为

$$FC = \frac{AER}{AER + R_B} \times FC_A + \left(1 - \frac{AER}{AER + R_B}\right) \times FC_B \quad (1)$$

式中:FC为综合燃料消耗量,L/100km;AER为续驶里程,km; $R_B$ 为REESS电量耗尽至下次充电间的行驶里程,依据早期欧洲统计结果取25 km; $FC_A$ 为条件A燃料消耗量,L/100km; $FC_B$ 为条件B燃料消耗量,L/100km。

由于条件A仅包含一个试验循环,通常没有燃料消耗产生,因此式(1)中的 $FC_A$ 为0,代入相关参数可得式(2)。

$$FC = \frac{25}{AER + 25} \times FC_B \quad (2)$$

根据国家标准及产业政策的要求,PHEV续驶里程应不低于50 km,由此可得

$$FC \leq \frac{25}{50 + 25} \times FC_B = \frac{1}{3} \times FC_B \quad (3)$$

由式(3)可知,PHEV综合燃料消耗量通常低于条件B燃料消耗量的1/3,而条件B又无法客观反映REESS电量平衡后的燃料消耗量,这两方面因素便是目前PHEV综合燃料消耗量极低的直接原因。在PHEV能耗加权计算的相关研究中,SAE J2841<sup>[33]</sup>提出的依据利用系数(utility factor, UF)进行计算的方法得到了包括GB/T 19753—2021在内的广泛应用,见式(4)。

$$FC = \sum_{c=1}^n (UF_{CD,c} \times FC_{CD,c}) + \left(1 - \sum_{c=1}^n UF_{CD,c}\right) \times FC_{CS} \quad (4)$$

式中: $UF_{CD,c}$ 为CD阶段第c个试验循环的UF,按照GB/T 19753—2021附录F<sup>[28]</sup>确定; $FC_{CD,c}$ 为CD阶段第c个试验循环的燃料消耗量,L/100km; $FC_{CS}$ 为CS阶段的燃料消耗量,L/100km。

由式(4)可知:CD阶段的燃料消耗量根据各循环进行加权计算,这主要是由于随着REESS电量的不断变化,电量消耗量也将改变,由此导致各个循环的燃料消耗量不同;而CS阶段为REESS电量平衡后的燃料消耗量,多个循环下的结果不存在差异。结合图3,由于CD阶段允许发动机启动,因此式(4)中的 $FC_{CD,c}$ 不为0。

GB/T 19753—2021规定的UF基于我国的实际出行规律提出,赋予了各里程段不同的权重,也可以

理解为不同里程段占实际使用的比重不同。根据不同里程段的试验结果,通过 $UF$ 进行加权计算,得到PHEV的综合能耗结果。式(1)中的 $AER/(AER+R_B)$ 也即 $FC_A$ 的权重系数。根据GB/T 19753—2021附录F的相关公式以及式(1)中 $FC_A$ 的权重系数,拟合得到如图6所示的曲线。

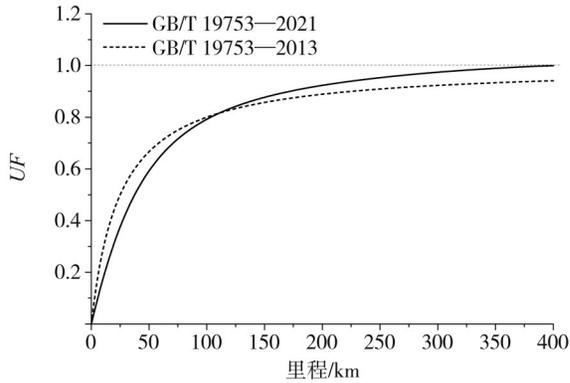


图6  $UF$ 曲线

图6为 $UF$ 随里程增加的总体趋势。由图6可知, $UF$ 曲线的总体趋势为先急后缓,随着里程的增加不断趋近1;式(1)在里程前段赋予的权重系数高于式(4)。结合前文分析得到的条件A燃料消耗量为0而CD阶段燃料消耗量不为0,由此可以得出式(1)计算得到的综合燃料消耗量将显著低于式(4)。对单位里程的 $UF$ 进行拟合可以得到如图7所示的曲线。

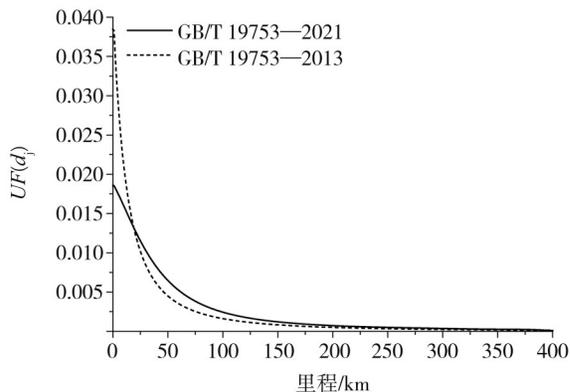


图7 单位里程 $UF$ 曲线

图7进一步说明CD阶段单位里程的权重远高于CS阶段,且按照式(1)计算得到的权重系数在CD阶段初期远高于式(4)的权重系数。

### 3.2 电量消耗量

与燃料消耗量类似,GB/T 19753—2013规定的

综合电量消耗量为

$$EC = \frac{AER}{AER + 25} \times EC_A + \left(1 - \frac{AER}{AER + 25}\right) \times EC_B \quad (5)$$

式中: $EC$ 为综合电量消耗量, $\text{kW}\cdot\text{h}/100\text{km}$ ;  $EC_A$ 为条件A电量消耗量, $\text{kW}\cdot\text{h}/100\text{km}$ ;  $EC_B$ 为条件B电量消耗量, $\text{kW}\cdot\text{h}/100\text{km}$ 。

式(5)中保留了 $EC_B$ ,进一步说明了GB/T 19753—2013允许条件B存在电能消耗。GB/T 19753—2021规定的综合电量消耗量同样利用 $UF$ 进行加权计算,如式(6)所示。

$$EC = \sum_{c=1}^n (UF_{CD,c} \times EC_{CD,c}) \quad (6)$$

式中: $EC_{CD,c}$ 为CD阶段第 $c$ 个试验循环的电量消耗量, $\text{kW}\cdot\text{h}/100\text{km}$ 。

由式(6)可知,综合电量消耗量仅包含CD阶段的试验结果,即CS阶段电量消耗量为0,进一步规范了PHEV综合电量消耗量的计算方法。

### 3.3 续驶里程

根据GB/T 32694—2016的规定,PHEV续驶里程的测量从满电开始,按照NEDC连续进行试验,直至发动机启动时车辆行驶的里程即为PHEV纯电模式续驶里程<sup>[32]</sup>。一个NEDC循环里程约为11 km,为满足相关要求PHEV需至少在第5个试验循环纯电运行6 km,而截至到6 km时对应的NEDC的最高车速仅为70 km/h。由于NEDC循环曲线被人为地划分为市区在前、市郊在后,在实际使用中并无这种规律,若将市郊放在较为靠前的位置,则刚好符合50 km要求的PHEV很可能不再满足要求,这也导致了与实际的差异。

下一阶段试验循环将切换为WLTC,该工况的最高车速为131.3 km/h,高于我国高速路的限速要求以及NEDC的最高车速120 km/h,实际使用中基本不会发生。另外,超高速下电量消耗量通常很高,而发动机则有可能处于更加经济的区域,即超高速下的纯电行驶不符合我国实际道路情况,也不利于综合能耗的进一步优化,因此需要对续驶里程的评价方法进行适当调整。调整一方面需保障PHEV在实际使用时,非超高速下优先用电的原则,另一方面也需解决循环车速由低到高的排序影响。基于以上考虑,研究提出了基于循环能量需求的有条件的等效全电里程,按照式(7)和式(8)计算。

$$EAER = \frac{FC_{CS} - FC_{CD,avg}}{FC_{CS}} \times R_{CD} \quad (7)$$

$$EAER_v = EAER \times \min\left(\frac{\Delta E_{REESS,v}}{\Delta E_{REESS,CD}}, 1\right) \quad (8)$$

式中:  $EAER$  为等效全电里程, km;  $FC_{CD,avg}$  为 CD 阶段  $n$  个试验循环燃料消耗量的算术平均值, L/100km;  $R_{CD}$  为 CD 阶段  $n$  个试验循环的行驶里程, km;  $EAER_v$  为有条件的等效全电里程, km;  $\Delta E_{REESS,v}$  为 CD 阶段中, 当发动机在 WLTC 前 3 个速度段(最高车速为 97.4 km/h)中某一速度段起动, 截至该速度段结束时的电能消耗, kW·h;  $\Delta E_{REESS,CD}$  为 CD 阶段  $n$  个试验循环的电能消耗, kW·h。

式(7)中的  $EAER$  从循环能量需求的角度计算得到 CD 阶段车辆完全依靠电力驱动的里程。对于某一款车型, 其热效率和机械损失等是确定的, 在特定的试验循环下动力系统输出的能量与车辆行驶的里程成正比, 即

$$\frac{(FC_{CS} - FC_{CD,avg}) \times R_{CD} \times \rho \times H_u \times \eta}{FC_{CS} \times R_{CD} \times \rho \times H_u \times \eta} = \frac{EAER}{R_{CD}} \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为燃料密度;  $H_u$  为燃料低热值;  $\eta$  为发动机综合效率。

CD 阶段涉及燃料消耗量和电量消耗量, 两个参数量纲不同, 无法准确计算出各自提供驱动能量的权重以及总驱动能量, 只能通过间接计算获得。由于 CS 阶段仅有燃料消耗量, 因此可以通过  $FC_{CS}$  计算 CD 阶段的总能量需求。CD 阶段燃料提供驱动能量则可以依据  $FC_{CD,avg}$  得到, 通过计算与 CD 阶段总能量需求的差即可得到电力提供的驱动能量。另外, CD 阶段包含  $n$  个完整的试验循环, 因此  $EAER$  是基于循环能量需求计算得到的, 不受试验循环结构的影响。将式(9)进行约分简化即可得到式(7)。

由于  $EAER$  未对发动机起动时的车速进行限制, 即发动机可以在任意速度下起动, 这与我国 PHEV 优先用电的技术路线不符, 因此需要进行适当的约束, 具体方法可以通过设置放电计量的截止点实现。  $EAER$  基于 CD 整个阶段计算获得, 对应于从满电至电量平衡的所有电能消耗  $\Delta E_{REESS,CD}$ 。为保障 PHEV 非超高速下的纯电行驶, 要求发动机在 WLTC 前 3 个速度段不可以介入, 否则电能消耗的计量截至该速度段结束。发动机起动越早, 计量结束点越早,  $\Delta E_{REESS,v}$  越小, 计算得到的  $EAER_v$  越小。  $EAER_v$  通常小于  $EAER$ , 但为避免通过过放电导致  $EAER_v$  更大的情况, 故在式(8)中进行了相应的设置。

### 3.4 折算燃料消耗量

折算燃料消耗量描述了包含 PHEV 燃料消耗量和电量消耗量的综合能耗。目前全球范围内暂无标准法规对 PHEV 电量消耗量进行相关约束, 但随着国家层面上“碳达峰、碳中和”战略目标的提出, 能源消耗的综合管控也将是未来的发展方向。因此对于 PHEV, 也需要同时考虑电量消耗, 具体可以通过折算燃料消耗量实现。将 PHEV 的综合电量消耗量按照 GB/T 37340—2019<sup>[34]</sup>所述的方法折算成燃料消耗量, 通过与综合燃料消耗量相加即可得到 PHEV 的折算燃料消耗量。本文以 GB/T 37340—2019 中的  $CO_2$  排放折算法为例进行分析, 折算方法为

$$FC_{CO_2} = EC \times F_{CO_2} \quad (10)$$

式中:  $FC_{CO_2}$  为按照  $CO_2$  排放折算法得到的当量燃料消耗量, L/100km;  $F_{CO_2}$  为  $CO_2$  折算因子, 考虑了火力发电比例、标准煤与燃料的  $CO_2$  排放因子、充电效率和线损率等, 对于燃用汽油的车辆取 0.31 L/(kW·h)。

## 4 试验研究

为研究标准修订前后 PHEV 的能耗和续航里程, 选取了 2 款车型, 分别按照 GB/T 19753—2013 和 GB/T 19753—2021 进行试验, 车型相关参数见表 2。

表 2 车型参数

参数	车型 1	车型 2
整车整备质量/kg	2 110	1 760
最大总质量/kg	2 485	2 135
燃料类型	92#汽油	92#汽油
发动机排量/L	1.5	1.5
最大净功率/kW(转速/(r·min <sup>-1</sup> ))	110/(5 200)	71/(5 500)
蓄电池容量/(A·h)	37	36
蓄电池总电压/V	475	396
电动机最大转矩/(N·m)	250	300
电动机最大功率/kW	110	120
电动机额定功率/kW(转速/(r·min <sup>-1</sup> ))	40/(8 127)	120/(4 092)

### 4.1 燃料消耗量

2 款车型燃料消耗量结果如图 8 所示。图中“V1”和“V2”分别代表车型 1 和车型 2 的试验结果。由图 8 可知, 标准修订后, 2 款车型各试验阶段和综合燃料消耗量均显著增加。其中, 条件 A 修订为 CD

阶段后燃料消耗量不再为0;条件B修订为CS阶段后燃料消耗量大幅增加;计算方法修订后也彻底消除了PHEV综合燃料消耗量低于2 L/100km的问题。

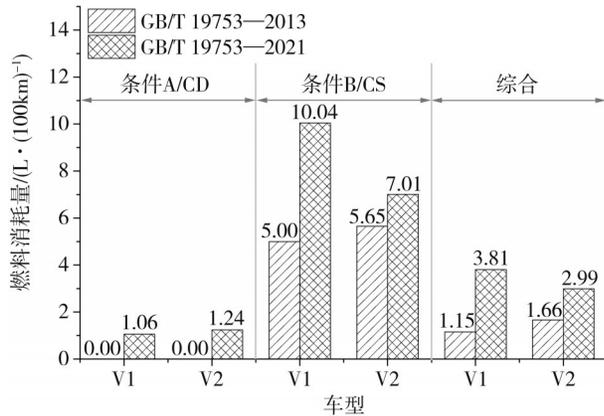


图8 各试验阶段和综合燃料消耗量

需要说明的是,燃料消耗量的增加一方面是由于试验流程和试验结果计算方法的优化,另一方面也受试验循环等测试规程的影响。乘用车第五阶段燃料消耗量标准在研究过程中得出试验循环等将导致燃料消耗量增加15%<sup>[29-30]</sup>,结合图8所示数据可以得出,燃料消耗量的增加水平远高于15%,因此与试验循环相比,试验流程和试验结果计算方法的优化是影响PHEV燃料消耗量更关键的因素。

#### 4.2 电量消耗量

2款车型电量消耗量结果如图9所示。由图9可知,标准修订后,2款车型的电量消耗量结果与燃料消耗量的变化趋势不同。其中,条件A修订为CD阶段后电量消耗量既有增加又有降低的情况,无明显变化规律;条件B修订为CS阶段后电量消耗量均为0;计算方法修订后电量消耗量均适当下降。

图9与图8对比可以大致得出,CD阶段燃料参与驱动的比例车型1低于11%,车型2近18%,结合试验循环等导致燃料消耗量增加15%,可初步判断标准修订后CD阶段的电量消耗量车型1将有所增加,车型2将适当降低,与图9所示的变化趋势相符。综合电量消耗量的降低主要是由于计算方法优化后,燃料消耗量参与计算的权重大大增加。

#### 4.3 续驶里程

2款车型续驶里程结果如图10所示。由图10可知,标准修订后,2款车型的续驶里程均显著下降,其中车型1下降28.55%,车型2下降13.33%。

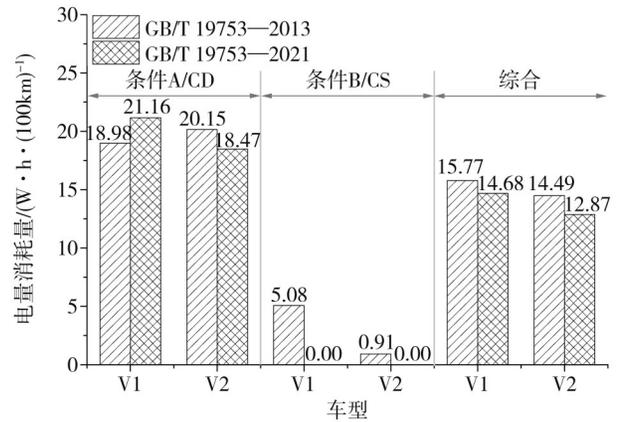


图9 各试验阶段和综合电量消耗量

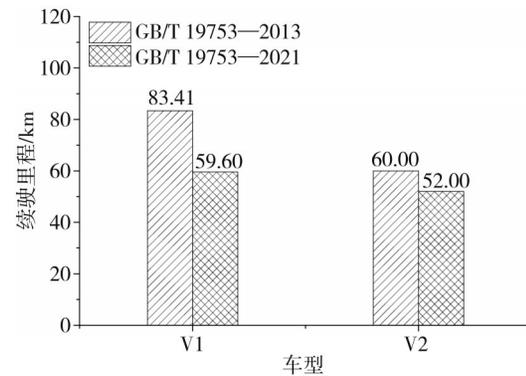


图10 续驶里程

这一方面是受标准修订后评价方法变更的影响,同时也与车辆在不同试验循环下电量平衡点的设置有关。

结合图9条件A电量消耗量和对应的图10续驶里程可以得出,标准修订前车型1的放电近16 kW·h,车型2的放电近12 kW·h;结合图9的CD阶段的电量消耗量和2款车型CD阶段的行驶里程69.8 km可以得出,标准修订后车型1的放电低于15 kW·h,车型2的放电近13 kW·h。即标准修订后车型1的放电有所减少,车型2的放电有所增加,这也是2款车型续驶里程变化差异显著的重要原因。

#### 4.4 折算燃料消耗量

2款车型折算燃料消耗量结果如图11所示。

对比图8的综合燃料消耗量可以得出,考虑折算燃料消耗量后2款车型在不同评价方法下的燃料消耗量均大幅增加;对比图8的CS阶段燃料消耗量可以得出,车型1考虑折算后的燃料消耗量仍有一定程度的下降,而车型2考虑折算后与完全依靠燃

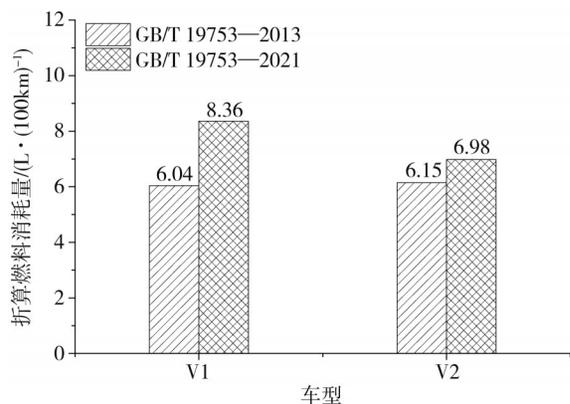


图11 折算燃料消耗量

油驱动并无优势。因此,引入能耗折算方法后将会进一步促进PHEV综合能耗水平的降低。

#### 4.5 试验结果分析

PHEV的试验结果包含多项参数,对每项参数的正确理解有助于更客观地看待PHEV的整体性能。以下将从能耗和续驶里程两个方面对各项参数进行分析。

能耗方面,标准修订后CD阶段以电量消耗量为主,燃料消耗量为辅,CS阶段仅包含燃料消耗量,综合能耗包含燃料消耗量和电量消耗量两方面,通过折算可得折算燃料消耗量。由此可知,对于CD阶段能耗和综合能耗,单独任何一个参数都是片面的。目前,汽车产业在不同层面都主要关注PHEV的综合燃料消耗量,没有考虑电量消耗量占车辆总体能耗的比重,因此得到的结论通常是不客观的。“补贴”“双积分”等产业政策陆续对PHEV的电量消耗量提出了要求,引导企业在关注燃料消耗的同时也须考虑电量消耗,因此标准修订后引入的折算燃料消耗量具有很重要的现实意义。尤其是随着国家“碳达峰、碳中和”目标的提出,车辆整体能耗的评价将会摆到日益突出的位置。另外,需要说明的是CS阶段仅包含燃料消耗量,该指标体现PHEV在不充电情况下的能耗水平,因此对于完全不充电的PHEV使用群体,该指标更具参考意义。

续驶里程方面,PHEV一直以50 km作为门槛要求,标准修订后该指标修改为43 km<sup>[31]</sup>,这主要是由于标准修订后,试验循环由NEDC切换为WLTC。由于NEDC的循环能量需求显著低于WLTC,因此对于同一款车型来说,标准修订后续驶里程均会有所下降。GB/T 32694—2021在研究过程中结合多款车型提出:试验循环切换后,续驶里程平均降低14%。因

此标准修订后的指标变化仅是进行了同等严格程度的调整,尽管标称的续驶里程指标比以前有所降低,但在实际使用中并无明显的差别。

## 5 结论

详细分析了国家标准GB/T 19753—2013存在的问题,系统梳理了标准修订过程中的相关成果,通过理论分析和试验验证,得到如下结论。

(1)中国工况基于我国实际道路特征制定,尽管下一阶段采取了与排放协同的WLTC试验循环,但后续应全面推动中国工况的应用以实现实际道路的节能降耗。

(2)标准修订后,PHEV的测试流程能够覆盖车辆从满电至电量平衡的全部过程,同时可以体现REESS电量耗尽后车辆的运行状态,有效解决了PHEV能耗和续驶里程测试不合理的问题。

(3)采取固定值“ $R_b=25$  km”的方式与基于我国实际道路统计得到的 $UF$ 差异显著,基于 $UF$ 进行加权计算的方法能够科学评价PHEV综合能耗。

(4)基于循环能量需求计算PHEV续驶里程有效解决了试验循环结构的问题,同时在保障PHEV优先用电的基础上,允许发动机在超高速状态下介入,有利于实现综合能耗的优化。

(5)两款PHEV车型的试验结果表明,标准修订后,CS阶段及综合燃料消耗量均显著增加,彻底消除了综合燃料消耗量低于2 L/100km的问题;CD阶段电量消耗量无明显变化规律,综合电量消耗量有所下降;续驶里程显著降低,两款车型分别降低28.55%和13.33%;考虑能耗折算后,折算燃料消耗量显著高于综合燃料消耗量,甚至有可能增加至CS阶段燃料消耗量水平。

### 参考文献

- [1] 王钦普,游思雄,李亮,等.插电式混合动力汽车能量管理策略研究综述[J].机械工程学报,2017,53(16):1-19.  
WANG Q P, YOU S X, LI L, et al. Survey on energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 1-19.
- [2] 杨官龙.基于驾驶意图与工况识别的插电式混合动力汽车能量管理策略研究[D].重庆:重庆大学,2014.  
YANG G L. Energy management strategy of plug-in hybrid electric vehicle based on the recognition of driving intention and working condition [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [3] 周能辉,赵春明,辛明华,等.插电式混合动力轿车整车控制

- 策略的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 99-104.
- ZHOU N H, ZHAO C M, XIN M H, et al. A Research on the vehicle control strategy of a plug-in hybrid electric car[J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(2): 99-104.
- [4] 秦大同, 杨官龙, 胡明辉, 等. 基于驾驶意图的插电式混合动力汽车能量管理策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(6): 1743-1750.
- QIN D T, YANG G L, HU M H, et al. Energy management strategy of plug-in hybrid electric system based on driving intention [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(6): 1743-1750.
- [5] SIVERTSSON M, ERIKSSON L. Design and evaluation of energy management using map-based ECMS for the PHEV benchmark [J]. *Oil & Gas Science and Technology*, 2015, 70(1): 195-211.
- [6] 欧阳, 周舟, 唐国强, 等. 自适应路况的插电式混合动力汽车能量管理策略[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 152-158.
- OU Y, ZHOU D, TANG G Q, et al. Control strategy for plug-in hybrid electric vehicle based on self-adaptive road condition [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(9): 152-158.
- [7] YANG C, ZHA M J, WANG W D, et al. Efficient energy management strategy for hybrid electric vehicles/plug-in hybrid electric vehicles: review and recent advances under intelligent transportation system [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(7).
- [8] DONG H, FU J Q, ZHAO Z C, et al. A comparative study on the energy flow of a conventional gasoline-powered vehicle and a new dual clutch parallel-series plug-in hybrid electric vehicle under NEDC[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 218.
- [9] 舒红, 彭大, 袁月会, 等. 插电式并联混合动力汽车动力传动系统与控制参数匹配设计[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(2): 105-112.
- SHU H, PENG D, YUAN Y H, et al. Matching design of power train and control parameters for a plug-in parallel hybrid electric vehicle [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2012, 2(2): 105-112.
- [10] ISO 23274—1: 2019 Hybrid-electric road vehicles—exhaust emissions and fuel consumption measurements—part 1: non-externally chargeable vehicles [S/OL]. [2019-08]. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:23274:-1:ed-2:v1:en>.
- [11] ISO 23274—2: 2012 Hybrid-electric road vehicles—exhaust emissions and fuel consumption measurements—part 2: externally chargeable vehicles [S/OL]. [2012-08]. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:23274:-2:ed-1:v1:en>.
- [12] UN GTR 15 Global technical regulation on worldwide harmonized light vehicles test procedures (WLTP) [S/OL]. [2019-12]. <https://wiki.unece.org/display/trans/Latest+GTR+15>.
- [13] SAE J1711: 2010 Recommended practice for measuring the exhaust emissions and fuel economy of hybrid-electric vehicles, including plug-in hybrid vehicles [S/OL]. [2010-06]. [http://www.sae.org/technical/standards/J1711\\_201006](http://www.sae.org/technical/standards/J1711_201006).
- [14] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB/T 18352.6—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (China 6): GB 18352.6—2016 [S]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [15] 谢海明, 黄勇, 王静, 等. 插电式混合动力汽车能量管理策略综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(7): 1-9.
- XIE H M, HUANG Y, WANG J, et al. Review of energy management strategies for plug-in HEVs [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2015, 29(7): 1-9.
- [16] JEFFREY G, TONY M. Energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles [J]. *SAE World. Congress*, 2007 (1): 290.
- [17] BANVAIT H, ANWAR S, CHEN Y. A rule-based energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle [C]. *American Control Conference*. St. Louis: IEEE, 2009: 3938-3943.
- [18] FAJRI P, ASAEI B. Plug-in hybrid conversion of a series hybrid electric vehicle and simulation comparison [C]. *Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on. IEEE, 2008.
- [19] ZHANG B, MI C C, ZHANG M. Charge-depleting control strategies and fuel optimization of blended-mode plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1516-1525.
- [20] 杨林, 胡艳青, 闫斌. 基于行驶工况的插电式混合动力汽车电能消耗最优控制[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 87-96.
- YANG L, HU Y Q, YAN B. Optimal charge depleting control of plug-in hybrid electric vehicles based on driving condition [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(1): 87-96.
- [21] 侯聪. 基于出行特征的插电式混合动力汽车能耗评价与优化 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- HOU C. Evaluation and optimization of energy consumption based on driving patterns for plug-in hybrid electric vehicle [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准化委员会. 轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法: GB/T 19753—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for energy consumption of light-duty hybrid electric vehicles: GB/T 19753—2013 [S]. Beijing: China Standard Press, 2013.
- [23] UN ECE R101: 2013 Uniform provisions concerning the approval of passenger cars powered by an internal combustion engine only, or powered by a hybrid electric power train with regard to the mea-

- surement of the emission of carbon dioxide and fuel consumption and / or the measurement of electric energy consumption and electric range, and of categories m1 and n1 vehicles powered by an electric power train only with regard to the measurement of electric energy consumption and electric range [S/OL]. [2013-04]. <https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-101-120>.
- [24] 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 版), 2017, 31(4):34-39.
- XIE N, SUN L, WANG Y W. Construction of comprehensive evaluation system of vehicle emission and energy consumption of PHEV[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(4):34-39.
- [25] 李 孟 良, 彭 文 明, 颜 伏 伍, 等. Plug-in 混 合 动 力 电 动 汽 车 能 耗 综 合 评 价 方 法 研 究 [J]. 汽 车 工 程, 2014, 36(8):919-922, 910.
- LI M L, PENG W M, YAN F W, et al. An investigation into the comprehensive evaluation method of the energy consumption of PHEV[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(8):919-922, 910.
- [26] 杜 建 波, 牛 向 春, 李 涪, 等. 插 电 式 混 合 动 力 电 动 汽 车 能 耗 特 征 研 究 [J]. 汽 车 工 程, 2014, 36(4):394-397, 408.
- DU J B, NIU X C, LI W, et al. A research on the energy consumption characteristics of plug-in HEV [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(4):394-397, 408.
- [27] 中 华 人 民 共 和 国 国 家 市 场 监 督 管 理 总 局, 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会. 中 国 汽 车 行 驶 工 况 第 1 部 分: 轻 型 汽 车; GB/T 38146.1—2019[S]. 北 京: 中 国 标 准 出 版 社, 2019.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. China automotive test cycle - part 1: light-duty vehicles; GB/T 38146.1—2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019.
- [28] 中 华 人 民 共 和 国 国 家 市 场 监 督 管 理 总 局, 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会. 轻 型 混 合 动 力 电 动 汽 车 能 量 消 耗 量 试 验 方 法; GB/T 19753—2021[S]. 北 京: 中 国 标 准 出 版 社, 2021.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for energy consumption of light-duty hybrid electric vehicles; GB/T 19753—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [29] 中 华 人 民 共 和 国 国 家 市 场 监 督 管 理 总 局, 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会. 乘 用 车 燃 料 消 耗 量 限 值; GB 19578—2021[S]. 北 京: 中 国 标 准 出 版 社, 2021.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fuel consumption limits for passenger cars; GB 19578—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [30] 中 华 人 民 共 和 国 国 家 市 场 监 督 管 理 总 局, 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会. 乘 用 车 燃 料 消 耗 量 评 价 方 法 及 指 标; GB 27999—2019[S]. 北 京: 中 国 标 准 出 版 社, 2019.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fuel consumption evaluation methods and targets for passenger cars; GB 27999—2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019.
- [31] 中 华 人 民 共 和 国 国 家 市 场 监 督 管 理 总 局, 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会. 插 电 式 混 合 动 力 电 动 乘 用 车 技 术 条 件; GB/T 32694—2021[S]. 北 京: 中 国 标 准 出 版 社, 2021.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plug-in hybrid electric passenger cars—specifications; GB/T 32694—2021 [S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [32] 中 华 人 民 共 和 国 国 家 质 量 监 督 检 验 检 疫 总 局, 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会. 插 电 式 混 合 动 力 电 动 乘 用 车 技 术 条 件; GB/T 32694—2016 [S]. 北 京: 中 国 标 准 出 版 社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plug-in hybrid electric passenger cars — specifications; GB/T 32694—2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2016.
- [33] SAE J2841:2010 Utility factor definitions for plug-in hybrid electric vehicles using travel survey data[S/OL]. [2010-09]. [https://www.sae.org/standards/content/j2841\\_201009](https://www.sae.org/standards/content/j2841_201009).
- [34] 中 华 人 民 共 和 国 国 家 市 场 监 督 管 理 总 局, 中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会. 电 动 汽 车 能 耗 折 算 方 法; GB/T 37340—2019[S]. 北 京: 中 国 标 准 出 版 社, 2019.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Conversion methods for energy consumption of electric vehicles; GB/T 37340—2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019.