

基于中国工况的纯电动续驶里程测试方法优化

丁李辉¹, 周金应¹, 刘永刚²

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122; 2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: GB/T 18386.1—2021 对纯电动轻型汽车的续驶里程测试采用中国工况, 且在流程中引入了缩短法, 其里程预估策略严重依赖于预先开展摸底试验提供的参考里程, 经济负担较大。本文提出以能量预估法来替代缩短法中的里程预估法, 以免去摸底试验, 降低试验成本, 也为后续相关标准制修订提供参考。

关键词: 纯电动汽车; 中国工况; 续驶里程; 缩短法

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2023)01-0033-04

Optimization of Testing Method for Pure Electric Vehicle Driving Range Based on China Light-duty Test Cycle

DING Lihui¹, ZHOU Jinying¹, LIU Yonggang²

(1. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: GB/T 18386.1—2021 adapts China Light-duty Test Cycle to test the driving range of pure electric light vehicles and brings the shortening method in the process. Its mileage estimation strategy relies heavily on the reference mileage provided by compliance tests conducted in advance, which has a larger economic burden. This paper proposes the energy estimation method to replace the mileage shortening method to avoid the compliance test and reduce test cost, and also to provide a reference for subsequent relevant standard revisions.

Key words: pure electric vehicles; China Light-duty Test Cycle; driving range; shortening method

我国电动汽车财政补贴政策的核心指标包括电动汽车的纯电续驶里程和能量消耗量^[1]。过去几年该项目的测试方法遵循的是 GB/T 18386—2017《电动汽车 能量消耗率和续驶里程试验方法》^[2-3]。随着 2021 年 10 月 1 日 GB/T 18386.1—2021《电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法 第 1 部分: 轻型汽车》^[4] 的实施, 试验循环由过去的 NEDC 变更为 CLTC(中国轻型汽车行驶工况)^[5], 并同时引入了缩短法测试方法, 以及增加了对试验结果的计算方法。新引入的缩短法测试流程能大幅减少原常规法试验

的时长, 提高试验效率, 但若按照标准中要求的方法开展试验, 必须要求车企预先进行自我测试, 得到预估的续驶里程“ BER_{est} ”, 方可促成试验一次成功, 不仅给车企造成了额外的经济负担, 还给未配置底盘测功机的企业开展预测试造成了技术难度。

本文结合实际的测试过程, 分析 GB/T 18386.1—2021 中缩短法试验的关键步骤, 提出用基于能量变化预判的优化试验方法^[6-9]来替代原有的里程预估方法, 并将优化后的方法应用于实际测试过程中进行验证, 力图为企业减负降本, 也为后续该国家标准的

收稿日期: 2022-12-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172400)。

第一作者: 丁李辉(1979—), 男, 硕士; 工程师; 主要从事整车测试评价关键技术研究工作。E-mail: dinglihui@caeri.com.cn。

通讯作者: 刘永刚(1982—), 男, 博士; 教授; 主要从事车辆动力学及其综合控制研究工作。E-mail: andyliuyg@cqu.edu.cn。

制修订提供参考。

1 GB/T 18386.1—2021 存在的问题

该标准中所述的缩短法试验具体步骤如图1所示,主要存在以下问题。

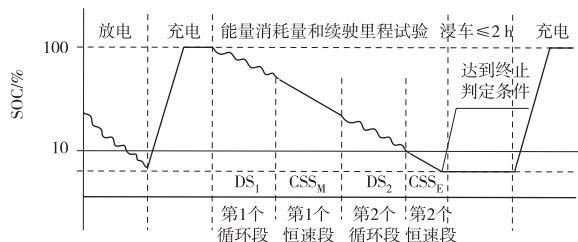


图1 缩短法测试流程

1.1 放电试验终止条件设定不确切

标准中将“SOC 最低值”等同于“试验终止判定条件”有待商榷。这是由于实际试验过程中,真正判定试验结束的依据是样车当前车速曲线与试验循环曲线之间的公差是否能持续满足标准要求。而车辆仪表盘上显示的SOC值,仅代表估算的电池的荷电状态,无法准确表示可充电储能系统(后面简称REESS,在本文中指代动力蓄电池)^[10]实际剩余电量,更不能代表当前车速能否满足偏差要求的瞬时状态。绝大多数纯电动车辆为了保护动力电池,在SOC的标定中,最低值“0%”往往不是电池电量真的为0,即SOC值显示为0%时,车辆还可以正常行驶,车速也能够满足试验工况曲线的偏差要求,且能够持续一段时长。所以笔者认为标准将“SOC值最低”作为放电结束的标准是不合理的。

1.2 恒速段CSS_M里程预估困难

缩短法测试的相应车速工况曲线如图2所示,主要由2个变速循环试验(DS₁, DS₂)以及两个恒速段试验(CSS_M, CSS_E)组成。

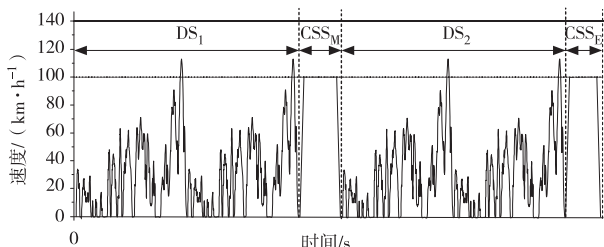


图2 缩短法车速工况曲线

CSS_M和CSS_E对车速的要求相同,对乘用车推荐使用100 km/h车速(商用车推荐70 km/h),两个阶段仅行驶里程不同。恒速段CSS_E的里程没有具体数值要求,但根据标准,该行驶阶段REESS的电能变化量 $\Delta E_{\text{REESS, CSS}_E}$ 与整个缩短法试验前后REESS总的电能变化量 $\Delta E_{\text{REESS, STP}}$ 的比值不能超过10%;若无法满足该要求,则该次试验作废,需要重新进行。

恒速段CSS_M的里程 d_{CSS_M} 按照式(1)估算:

$$d_{\text{CSS}_M} = \text{BER}_{\text{est}} - d_{\text{DS}_1} - d_{\text{DS}_2} - d_{\text{CSS}_E} \quad (1)$$

式中: BER_{est} 为缩短法试验中车辆在底盘测功机上行行驶总里程的估计值; d_{DS_1} 为试验循环段DS₁的里程; d_{DS_2} 为试验循环段DS₂的里程; d_{CSS_E} 为恒速段CSS_E的里程。以上数值的单位均为km。

实际测试过程中,恒速段CSS_M的里程只能按式(1)进行预估,难以准确预判,易造成试验失败。

1) 准确估计 d_{CSS_M} 是整个试验成败的关键所在, d_{CSS_M} 预留过短,会剩余过多的电能到CSS_E段,使得最后阶段的能量占比超过10%,造成试验失败;若 d_{CSS_M} 预留过长,会造成剩余电能太少,可能少到不足以完成DS₂的测试,更无法进入CSS_E段,同样造成试验失败。

2) 由于 d_{DS_1} 与 d_{DS_2} 的工况完全一样,所以行驶里程估算时可认为 $d_{\text{DS}_1} \approx d_{\text{DS}_2}$ 。但是 d_{CSS_E} 没有给出估计方法,标准中仅强调了这一段行驶的能量变化量在总的能耗中的占比不可超过10%,而距离长短与能量消耗又不是完全的线性关系;同时, BER_{est} 本就属于车辆生产企业提供的预估值,要求企业在进行试验之前要反复自行摸底,或至少通过仿真模拟得到该预估值。大多数企业本身不具备底盘测功机测试系统或仿真模拟技术能力不足,无法提供 BER_{est} ,进而无法给实际试验过程中CSS_M的预估提供依据。

2 基于能量变化的优化试验方法

以上缩短法存在的问题,本质上是基于里程数变化的试验方法引起的。基于此,本文提出基于能量变化值的优化试验方法来解决实际测试中遇到的问题。

2.1 改变放电试验终止条件

根据1.1节所述,整个试验终止的根本判定条件为实际车速是否能够跟上工况要求的车速。因此,本

文提出在满电车辆进行首次放电试验时, 放电的终止条件不再参照标准原文的“SOC 的最低值”, 而是直接参照整个试验的终止判定条件, 即车辆无法跟上车速的偏差要求时, 放电结束。记录该放电阶段的能量变化总量 $\Delta E_{\text{REESS, STPref}}$, 作为后续试验阶段理论计算的参考值之一。

2.2 提出基于能量变化的里程预估方法

相对于标准提出的式(1), 本文提出基于能量变化的预估法, 见式(2):

$$\Delta E_{\text{CSS}_M \text{ref}} = \Delta E_{\text{REESS, STPref}} - \Delta E_{\text{DS}_1 \text{ref}} - \Delta E_{\text{DS}_2 \text{ref}} - \Delta E_{\text{CSS}_E \text{ref}} \quad (2)$$

式中: $\Delta E_{\text{REESS, STPref}}$ 为首次完全放电电量; $\Delta E_{\text{DS}_1 \text{ref}}$ 为前 2 个 CLTC 工况电耗预估值之和; $\Delta E_{\text{DS}_2 \text{ref}}$ 为后 2 个 CLTC 工况电耗预估值之和; $\Delta E_{\text{CSS}_E \text{ref}}$ 为第二恒速段的电耗预估值。以上各参数的单位均为 Wh。

表 1 基于能量变化预估的优化试验方法

Algorithm 1: 基于能量消耗的预估策略

Data: REESS 首次放电的总电量 $\Delta E_{\text{REESS, STPref}}$

第 1 个变速工况 DS_1 阶段的能量消耗 $\Delta E_{\text{DS}_1 \text{ref}}$

第 2 个变速工况 DS_2 阶段的能量消耗 $\Delta E_{\text{DS}_2 \text{ref}}$

第 2 个等速工况 CSS_E 阶段的能量消耗 $\Delta E_{\text{CSS}_E \text{ref}}$

Result: 第 1 个等速工况 CSS_M 阶段的能量消耗 $\Delta E_{\text{CSS}_M \text{ref}}$

1. 将 REESS 首次放电的总电量 $\Delta E_{\text{REESS, STPref}}$ 作为缩短法试验全程总能耗的参考值 $\Delta E_{\text{REESS, STP}} \leftarrow \Delta E_{\text{REESS, STPref}}$;

2. 适当预留第 2 个等速工况 CSS_E 阶段的能量消耗 $\Delta E_{\text{CSS}_E \text{ref}}$, 只需

满足 $\frac{\Delta E_{\text{CSS}_E \text{ref}}}{\Delta E_{\text{REESS, STP}}} \leq 10\%$, 例如取 8%, 即 $\Delta E_{\text{CSS}_E \text{ref}} \leftarrow \Delta E_{\text{REESS, STP}} \times 8\%$;

3. 开始试验, 进行第 1 个变速工况 DS_1 阶段, 采集到能耗值作为 $\Delta E_{\text{DS}_1 \text{ref}}$;

4. 适当降低 $\Delta E_{\text{DS}_1 \text{ref}}$ 数值的大小, 作为第 2 个变速工况 DS_2 阶段的能量消耗 $\Delta E_{\text{DS}_2 \text{ref}}$, 根据经验取 5%, 即 $\Delta E_{\text{DS}_2 \text{ref}} \leftarrow \Delta E_{\text{DS}_1 \text{ref}} \times (1 - 5\%)$;

5. 运用公式(2)计算出第 1 个等速工况 CSS_M 阶段需要产生的能量消耗 $\Delta E_{\text{CSS}_M \text{ref}}$, 作为该阶段试验结束点的指导数值, 即 $\Delta E_{\text{CSS}_M \text{ref}} \leftarrow \Delta E_{\text{REESS, STP}} \times (1 - 8\%) - \Delta E_{\text{DS}_1 \text{ref}} \times (1 + 5\%)$;

6. 根据功率分析仪实时监测到的能耗数据, 当第 1 个等速工况 CSS_M 阶段的能量消耗达到第 5 步的计算结果时, 即刻进入第 2 个变速工况 DS_2 阶段;

7. 继续进行第 2 个等速工况 CSS_E 阶段直至试验结束。

本文提出的基于能量变化预估的优化试验方法见表 1。通过这样的方法转换, 可将原本极不确定的里程估算转变为较为确定的能耗估算, 降低失败概率, 确保整个缩短法试验一次性顺利完成。

3 实车测试验证

根据上述提出的优化试验方法, 依托本单位的测试设备, 选取某企业纯电动乘用车为测试对象, 在温度条件稳定的实验室内, 使用底盘测功机采用迭代法进行滑行阻力拟合, 实时记录测功机上的行驶里程, 填入表 2 的里程栏中, 将功率分析仪接入整车 REESS 的总正及总负端, 实时动力电池电压、电流及电能消耗量也填入表 2, 能耗与相应里程的比值作为该阶段的能耗率 ($EC_{\text{DC}, c}$) 填入, 第 c 个试验循环的权重系数 K_c , 按照式(3)计算。

$$K_c = \begin{cases} \frac{\Delta E_{\text{REESS}, c}}{E_{\text{REESS, STP}}}, & c \leq 2 \\ \frac{1 - K_1 - K_2}{2}, & c > 2 \end{cases} \quad (3)$$

以上所有数据结果一并填入表 2 中, 最终通过计算得出缩短法试验的续驶里程结果 BER 来验证优化后的试验方法的有效性。测试环境场景如图 3 所示, 实测所得的行驶车速曲线如图 4 所示, 测试结果见表 2。



图 3 实车测试场景

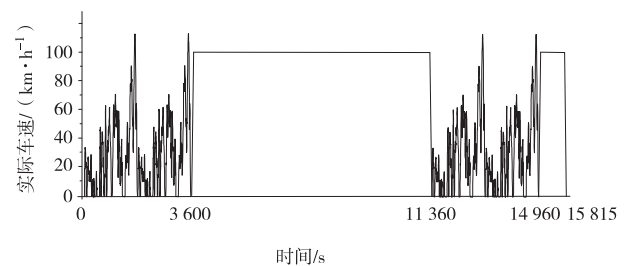


图 4 实测行驶车速曲线

表 2 优化后缩短法测试结果

| 项目 | 符号 | 能耗/ Wh | 里程/ km | 能耗率 $EC_{DC,c}/$ (Wh·km ⁻¹) | 权重系数 K_c |
|------------------|--|-----------|-----------|---|---------------|
| 首次放电 | ΔE_{REESS_STPref} | 61 851 | —— | —— | —— |
| DS ₁ | $c=1$ | 2 512 | 14. 475 | 173. 54 | 0. 040 678 8 |
| | $c=2$ | 2 423 | 14. 474 | 167. 40 | 0. 039 237 6 |
| CSS _M | $\Delta E_{CSS_M^{ref}}$ | 47 000 | 215. 555 | 218. 04 | —— |
| | $\Delta E_{REESS, CSS_M}$ | | | | |
| DS ₂ | $c=3$ | 2 357 | 14. 466 | 162. 93 | 0. 460 041 8 |
| | $c=4$ | 2 348 | 14. 469 | 162. 28 | 0. 460 041 8 |
| CSS _E | $\Delta E_{REESS, CSS_E}$ | 5 112 | 23. 750 | 215. 24 | —— |
| 总的能量 变化量 | $E_{REESS,STP}$ | 61 752 | —— | —— | —— |
| 总能耗率 | $EC_{DC} = \sum_{c=1}^4 (EC_{DC,c} \times K_c) = 173. 54 \times 0. 040 678 8 +$ | | | | |
| | $167. 40 \times 0. 039 237 6 + 162. 93 \times 0. 460 041 8 + 162. 28 \times$ | | | | |
| | $0. 460 041 8 \approx 163(\text{Wh/km})$ | | | | |
| 续驶里程 | $BER = \frac{E_{REESS,STP}}{EC_{DC}} = \frac{61\ 752}{163} \approx 379(\text{km})$ | | | | |
| | 注:续驶里程的结果必须由指定的公式计算得出,而不是车辆在底盘测功机上实际行驶的里程之和。 | | | | |

注:本表格中能耗列与里程列数值均为实测所得,能耗率($EC_{DC,c}$)与权重系数(K_c)是由公式计算得出。

进一步分析可知:

1) 在首次放电环节,车辆 SOC 值过早显示为 0%(即标准所述 SOC 值的最低点),此时车辆仍然可稳定跟随 100 km/h 的车速要求,并未达到标准中的车速偏差判定试验结束条件。

2) 以车速偏差作为唯一判定结束条件时,总放电量为 61 851 Wh,与本文优化后的缩短法的放电量 61 752 Wh 非常接近,进一步说明按照此优化方法进行放电所得到的电量变化值具有实际参考价值。

3) 当样车做完第一个 CLTC-P 循环后,即刻得到耗电量为 2 512 Wh,按照本文提供的 CSS_M 能耗预估策略,假设 CSS_E 段预留电量占比取 8%。则 $\Delta E_{CSS_M,ref} \geq 61\ 851 \times (1 - 8\%) - 2\ 512 \times 2 \times (1 + 93\%) = 47\ 206.6 \text{ Wh}$ 。最终取值 47 000 Wh 作为 CSS_M 段行驶结束点,实际试验过程中 CSS_E 段耗电量为 5 112 Wh,占比计算结果为 8.28%,满足 $\leq 10\%$ 的标准要求,本次试验全程有效。

4) 从各个阶段的能耗率结果看出,CLTC 工况行驶阶段的能耗率在 160~170 Wh/km 左右,且 DS₂ 阶段确实低于 DS₁ 阶段,而恒速段(CSS)的能耗率均在 210 Wh/km 以上,证实了高车速的恒速放电确实可以加快车辆放电进程,缩短试验时间;且由于每个阶段能耗率差异较大,无法将行驶里程与电能消耗简单地线性化;同时也证实了标准原文使用里程法进行 CSS_M 段行驶里程的预估缺乏良好的可行性,采用本文提出的基于能量法预估更加有效。

4 结束语

本文分析了国标 GB/T 18386.1—2021《电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法 第 1 部分:轻型汽车》中缩短法的测试方法在实际试验过程中存在的不合理之处,提出了基于能量变化预估的优化试验方法,在实际测试验证中表现出良好的可行性。该方法有利于车辆设计企业在缺乏摸底测试数据的情况下,顺利开展续驶里程试验,提高了一次性测试的成功概率,可为后续标准的制修订提供参考。

参考文献:

[1] 程浩. 浅析新能源汽车的发展趋势[J]. 汽车实用技术, 2019(22):1-2.

[2] 刘志超,郑天雷,龚慧明,等. 基于中国工况的纯电动乘用车续驶里程评价方法研究[J]. 汽车工程,2021,43(5):705-712.

[3] 张恒,马志鹏,王贺,等. 基于能耗的纯电动汽车续驶里程估算及仿真研究[J]. 电子测试, 2022(9):54-56.

[4] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法 第 1 部分:轻型汽车:GB/T 18386.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021:2.

[5] 中华人民共和国工业和信息化部. 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,2019:3.

[6] 张微,徐金波,王旭,等. 基于 WLTC 工况的电动汽车能量流测试与分析[J]. 汽车技术,2019(11):6-9.

[7] 陈燎,杨帆,盘朝奉. 基于电池能量状态和车辆能耗的电动汽车续驶里程估算[J]. 汽车工程学报,2017,7(2):113-122.

此,疲劳试验与有限元分析相结合的方式对 V 杆杆体失效位置的识别及结构的优化具有较好的指导作用。

5 结束语

本文通过分析 V 杆的结构和承载形式,制定了多种疲劳试验方案,依据实测路谱信息等效载荷条件,进行“纵向+横向”双向疲劳有限元分析及试验验证,结果表明 V 杆杆体疲劳试验断裂失效位置与有限元分析的疲劳强度因子小于 1 的位置具有较好的一致性,试验设计符合预期,准确地再现了其失效模式,能够为后续 V 杆的试验设计及产品研发提供参考。

参考文献:

[1] 张红红,陈昆山,张建. 空气悬架 V 型推力杆静动态特性分析[J]. 拖拉机与农用运输车,2009,36(3):40-42.

[2] 史文库,柯俊,王倩等. V 型推力杆的极限载荷分析与球铰结构优化[J]. 西安交通大学学报,2013,47(10):132-136.

[3] 李磊. 重型商用车推力杆橡胶球铰的设计与寿命研究[D]. 长春:吉林大学,2017.

[4] 冯国雨. 商用车推力杆性能优化与疲劳寿命预测研究[D]. 长春:吉林大学,2016.

[5] 侯永坤. 悬架系统 V 型杆的结构分析[J]. 客车技术与研究,2007,29(4):20-22.

[6] 李光耀. 浅析载重汽车用 V 型推力杆及其制造工艺[C]//2012 年山东省科协学术年会论文集. 2012:185-189.

[7] 谢万春,李英昊. 汽车空气悬架系统 V 型推力杆总成试验方法探讨[J]. 汽车科技,2006(5):50-52.

[8] 全国汽车标准化技术委员会. 商用车空气悬架推力杆橡胶铰接头技术规范:GB/T 35180—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017:1-20.

[9] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 一种 V 型推力杆总成的复合疲劳测试装置及方法:201811171382.9[P]. 2019-02-01[2022-09-25].

(上接第 36 页)

[8] 赵迁,辛雨,马永志,等. NEDC 切换到 CLTC-P 对纯电动汽车经济性的影响[C]//2022 年中国汽车工程学会年会论文集(2). 北京:机械工业出版社,2022:224-227.

[9] 宋媛媛. 基于行驶工况的纯电动汽车能耗建模及续航里程

估算研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.

[10] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车安全要求:GB 18384—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2022:1.