

某插电式混合动力汽车高原实际行驶排放 试验研究

刘文彬

安徽江淮汽车集团股份有限公司技术中心,安徽 合肥 230601

摘要:为降低高原低温边界环境下插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)实际行驶污染物排放(real driving emissions, RDE),采用车载便携式排放测试设备对某PHEV车型开展RDE测试,基于排放测试结果,优化发动机控制单元、整车控制单元控制策略降低冷启动、过渡工况的排放,并对优化后的PHEV进行RDE测试验证。结果表明:优化后,RDE测试总行程的 NO_x 、PN排放较优化前分别下降52.5%、75.2%,市区行程的 NO_x 、PN排放分别下降70.3%、51.6%,且 NO_x 、PN的符合性因子均小于2.1,满足国六b要求。PHEV实际道路排放与传统车型存在较多不同,需从多工况、多控制器角度出发优化排放,满足环保标准要求。

关键词:高原;PHEV;RDE; NO_x 排放;PN

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)06-0071-06

引用格式:刘文彬. 某插电式混合动力汽车高原实际行驶排放试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(6): 71-76.

LIU Wenbin. Experimental study on high altitude real driving emissions of a plug-in hybrid electric vehicle [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023, 40(6): 71-76.

0 引言

随着我国汽车工业的飞速发展,机动车保有量快速增加,车辆污染物排放已成为我国环境污染的主要来源^[1]。为应对日益严峻的排放污染问题,我国大力发展新能源汽车,混合动力汽车发展也进入快车道。插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)的电池容量较大,可以通过外部电网充电,综合了燃油汽车续航里程长与纯电动汽车清洁环保的优点,在汽车市场中占有率逐步提高。文献[1]加严了轻型车污染物排放限值,增加了粒子数量(particle number, PN)排放测量要求和实际行驶污染物排放(real driving emissions, RDE)测试要求等,因此有必要对PHEV车型开展RDE测试和研究。

本文中,在某市对PHEV车型开展高原低温环境下的RDE测试,分析影响PHEV车型高原排放性能的关键影响因素及排放高的原因,并进行优化和试验验证。

1 RDE测试条件与排放计算方法

文献[1]对传统车型与PHEV车型的RDE测试过程和方法有详细规定。

1.1 传统车型RDE测试条件

1)海拔高度。普通海拔高度条件为不高于700 m;可扩展海拔高度为高于700 m且低于1 300 m;进

收稿日期:2023-10-16

基金项目:长三角科技创新共同体联合攻关项目(SQ2023CSJGG0086)

作者简介:刘文彬(1986—),男,安徽泗县人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为车辆电控系统开发与测控,E-mail:lw2108@126.com。

一步扩展的海拔高度为不低于 1 300 m,且不高 于 2 400 m。

2) 环境温度。普通温度条件为环境温度不低于 0 ℃ 且不高 于 30 ℃;扩展温度条件为环境温度高于或等于 -7 ℃ 且低 于 0 ℃,或高于 30 ℃ 且低 于 35 ℃。

3) 测试质量要求。基本载荷与附加载荷的和不得超 过车辆最大载荷的 90%。

4) 行程和行驶比例要求。根据瞬时车速将行程划 分为市区、郊区和高速路段,各段所占总行程的比 分别为 34%、33%、33%,各段相对误差应控制在 ±10% 以 内,但市区路段的行驶比例不能低 于总行驶距离 的 29%。市区、郊区和高速路段的最小行驶距离均 为 16 km。

5) 车速要求。最高车速为 120 km/h,在不超 过高速路段行驶时间的 3% 的时间 内,最高车速最大可 增加 15 km/h;市区行驶的平均车速(包括停 车)为 15~40 km/h;高速段行驶车速应覆盖 90~110 km/h,车速高于 100 km/h 的时间不少 于 5 min;停车阶段时间为市区行驶时间的 6%~30%,单 次停车超 过 180 s 的时间段不计算排放。

6) 持续时间要求。测试时间为 90~120 min。

7) 试验用油要求。测试应使用符合国家标准 的市售燃油和润滑油。

8) 行程动力学要求。车速与大于 0.1 m/s² 的正向加 速度乘积的第 95 个百分位(记为 $k_{v,a,95}$)超 过规定 值,行程无效;相对正加速度(relative positive acceleration, RPA)小 于规定值,行程无效。

9) 累计正海拔高度增加量要求。试验开始点和 结束点之间的海拔高度差不得超 过 100 m;试验车辆的 累计海拔高度增加应小 于 1 200 m/(100 m)。

10) 排放计算方法。采用移动平均窗口法计算 CO₂ 排放。

11) 完整性和正常性验证要求。市区、市郊和 高速窗口数量均占总窗口数量的 15% 以上;50% 以 上的市区、市郊和高速窗口落在特性曲线定义的基本 公差范围内。

1.2 PHEV 车型与传统车型 RDE 测试要求对比

PHEV 车型的 RDE 测试要求中,海拔高度、环 境温度、测试质量、试验用油、行程动力学、累计正 海拔高度增加量、车速、持续时间、行驶距离等与传 统车型相同。

PHEV 车型需在电量维持模式下开展试验,并 且市区行程中内燃机工作的累计里程不少 于 12 km,不需要 进行完整性和正常性验证,根据累计气体排放、PN 排 放和 CO₂ 排放计算最终 RED 排放(包含冷启动排 放)。

1.3 排放结果计算方法

有别于传统车型的移动平均窗口法计算排放 结果,PHEV 车型要求根据累计气体排放、PN 排放和 CO₂ 排放,计算最终的 RDE 排放结果。

RDE 测试总行程的加权气体污染物比排放或 PN 比排放

$$m_1 = m_t e_{\text{WLTC,C}} / m_{t,C},$$

式中: m_1 为总行程的总气体污染物排放或 PN 排 放; $m_{t,C}$ 为总行程的 CO₂ 排放; $e_{\text{WLTC,C}}$ 为基于全球轻型车 辆测试循环(worldwide harmonized light vehicles test cycle, WLTC)电量保持模式下包括冷启动过程排放的 试验车辆的 CO₂ 比排放,取试验车辆的信息公开值。

RDE 测试市区行程的加权气体污染物比排放或 PN 比排放

$$m_2 = m_u e_{\text{WLTC,C}} / m_{u,C},$$

式中: m_u 为市区行程的总气体污染物排放或 PN 排 放; $m_{u,C}$ 为市区行程的 CO₂ 比排放。

该算法中包含了冷启动过程排放,低温环境对 PHEV 汽车排放的影响较大^[2],因此按照拓展低温边 界要求开展 RDE 测试。

2 RDE 试验方案

2.1 试验车辆

试验车辆为满足国六排放要求的直列、4 缸、自然 吸气 PHEV,主要技术参数如表 1 所示。

表1 PHEV 汽车主要技术参数

整备质量/kg	混动形式	发动机排量/L	汽油标号	电池额定电量/(kW·h)	电池总电压/V
1 765	P13	1.499	92#	19.71	394

2.2 试验设备

采用日本 HORIBA 公司的 OBS-ONE 车载便携式排放测试设备 (portable emission measurement system, PEMS) 进行 RDE 测试。该系统主要由气体 (GAS) 分析模块、PN 分析模块和排气流量计 3 部分组成^[3]。OBS-ONE 车载便携式排放测试系统如图 1 所示。

气体分析模块的测试精度为满量程的 $\pm 0.3\%$ 和实际测量值的 $\pm 2\%$ 中的较大者; PN 分析模块中, 粒子计数器的精度为 $\pm 10\%$, 挥发性粒子去除率大于 99% (C40)。

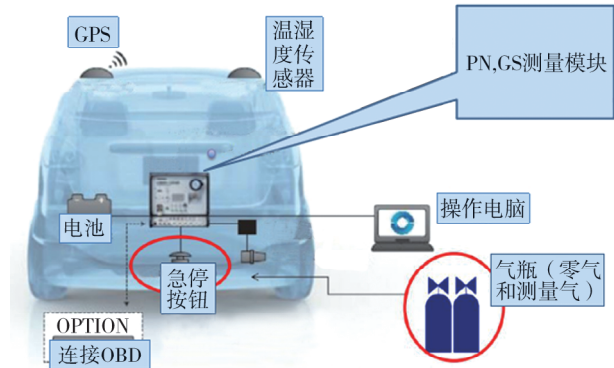


图1 OBS-ONE 车载便携式排放测试系统

2.3 试验方案

文献[1]规定海拔高度应在 2 400 m 以下, 环境温度为 $-7 \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。西宁市海拔为 2 400 m 左右, 冬季平均气温约为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此选择在西宁进行低温、高海拔 RDE 测试。先在平原地区开展 RDE 测试, 确保测试车辆满足国六排放要求。高原试验前, PHEV 静置一夜, 使发动机水温达到 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 车辆在市区充分运行, 电量控制在电量维持模式。

经过测试, 选择的市区测试路段为昆仑西路—同仁路—西关大街—新宁路—昆仑西路, 郊区测试路段为宁贵高速—宁大高速, 高速测试路段为宁大高速—大通收费站, 在大通收费站折返。

3 试验结果分析与优化

3.1 试验结果及分析

相关研究表明, 行驶动力学参数对 RDE 结果的影响较为明显^[4~7], 且激烈驾驶对排放影响更大。为确保 PHEV 汽车 RDE 排放符合要求, 试验采用较为激烈的驾驶方式开展。

RDE 测试完成后, 行程动力学校核结果如表 2 所示, 表中 δ_1 为实测 $k_{v,a,95}$ 与最大 $k_{v,a,95}$ 的比, δ_2 为实测 RPA 与最小 RPA 的比。由表 2 可知: 市区、郊区和高速路段的 δ_1 、 δ_2 均较大, 驾驶风格较为激烈。RDE 测试的累计正海拔高度等均满足文献[1]要求。

表2 行程动力学校核结果

工况	平均车速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	$k_{v,a,95}$		$\delta_1/\%$	RPA		$\delta_2/\%$
		实测	标准最大限值		实测	标准最小限值	
市区	22.2	12.5	17.459 2	71.60	0.262 0	0.139 98	187
市郊	76.1	23.5	24.612 6	95.48	0.146 9	0.053 74	273
高速	109.0	25.7	27.053 8	95.00	0.136 9	0.025 00	548

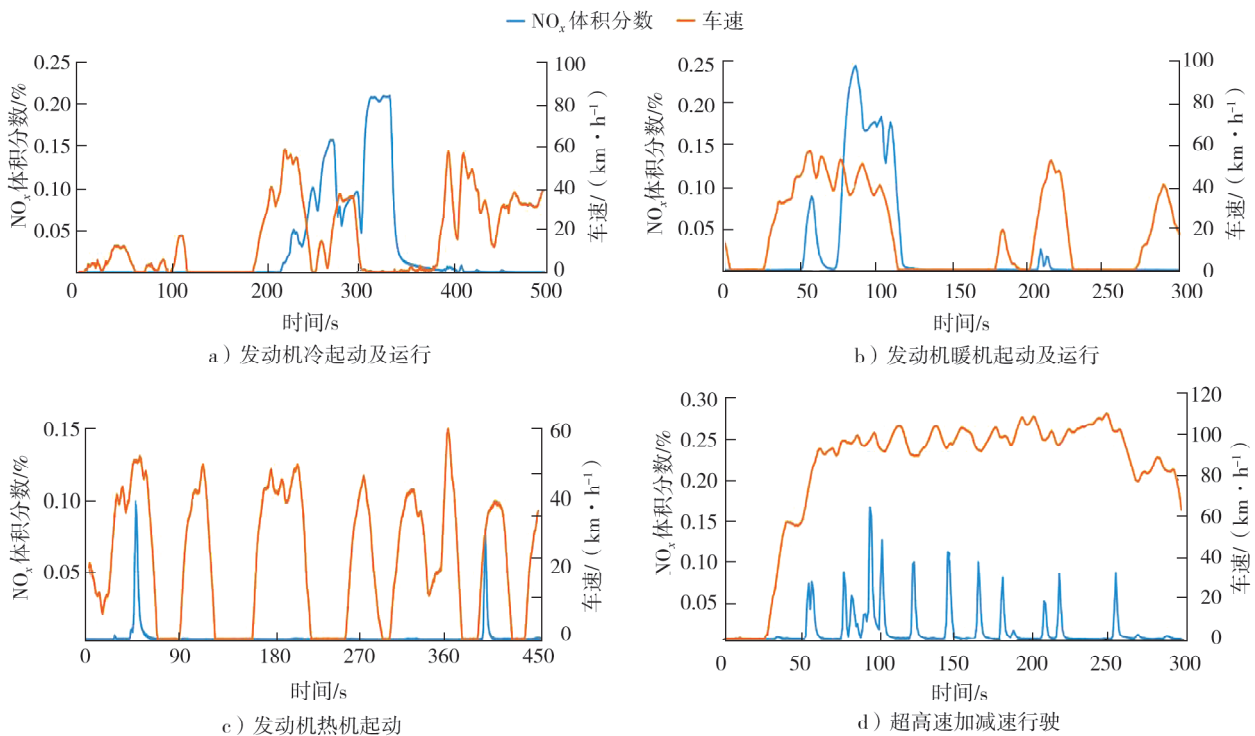
采用 PEMS 软件分析试验数据, PHEV 的 RDE 实测排放数据如表 3 所示。

根据文献[1]要求, NO_x 、PN 的符合性因子 (comformity factor, CF) 应小于 2.1。由表 3 可知: 该 PHEV 市区段 NO_x 的 CF 为 2.59, 不满足要求, 需优化 NO_x 排放。

表3 PHEV的RDE结果

NO _x 排放/(mg·km ⁻¹)		PN 排放/(10 ¹¹ 个·km ⁻¹)		NO _x 的CF		PN 的CF	
总行程	市区行程	总行程	市区行程	总行程	市区行程	总行程	市区行程
39.13	90.77	1.56	4.01	1.12	2.59	0.26	0.67

对逐秒采集的排放数据、发动机控制单元(engine control unit, ECU)的采集车速数据进行分析,结果表明:发动机冷机起动及运行阶段、发动机暖机起动及运行阶段、发动机热机起动阶段、超高速驾驶加减速阶段的NO_x排放较高,其中发动机冷机起动及运行阶段NO_x排放最高。不同阶段NO_x排放随时间变化曲线如图2所示。

图2 不同阶段NO_x排放随时间变化曲线

根据该车控制架构进行分析,得出发动机冷机起动及运行、发动机热机起动、超高速驾驶加减速阶段NO_x排放高的主要原因如下。

1) 该车在平原地区的RDE测试结果满足要求。高原阶段,ECU在冷起动高原喷油系数修正、冷机运行过渡工况控制过程中空燃比偏稀。

2) 发动机冷机及暖机运行阶段,尤其是大油门驾驶时,车辆主要为串联发电状态,选择发电功率时未考虑对排放的影响,此时发动机转速及转矩均较大,导致排放较高。

3) PHEV车型存在较多的发动机起停,发动机起动阶段存在一定的排放污染物,需要对暖机及热机起动空燃比进行优化。

4) 超高速驾驶阶段,车辆主要采用并联运行模式,加减速过程中整车控制单元(vehicle control unit, VCU)对ECU的转矩请求存在突变,ECU在响应转矩请求时未考虑排放的影响,在负荷突变过程空燃比控制存在一定问题^[8]。

3.2 排放优化

根据PHEV车型的运行特点以及排放高的原因,采取以下优化措施。

1) 优化发动机冷起动时的高原喷油系数,在冷机运行阶段优化过渡工况空燃比控制,采取加浓处理,降低 NO_x 排放。

2) 发动机冷机及暖机阶段,VCU 限制发动机转矩及转速,避免发动机运行在较高转速、高负荷区间。

3) 优化发动机热机起动喷油系数,降低热机起动过程污染物排放。

4) 超高速阶段,VCU 优化发动机转矩请求,减缓转矩突变,ECU 优化此过程空燃比。

对 ECU 及 VCU 的控制程序反复优化,将优化后的程序更新到车辆中,重新进行 RDE 测试。优化后 PHEV 的 RDE 实测数据如表 4 所示。由表 4 可知:优化后,总行程的 NO_x 、PN 排放较优化前分别下降 52.5%、75.2%,市区行程的 NO_x 、PN 排放分别下降 70.3%、51.6%,且 NO_x 、PN 的 CF 均小于 2.1,排放大幅降低,优化措施有效。

表 4 优化后 PHEV 的 RDE 实测数据

NO_x 排放/($\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$)		PN 排放/($\text{个} \cdot \text{km}^{-1}$)		NO_x 的 CF		PN 的 CF	
总行程	市区行程	总行程	市区行程	总行程	市区行程	总行程	市区行程
18.57	26.98	6.29×10^{10}	1.94×10^{11}	0.53	0.77	0.26	0.32

逐秒采集程序优化后的 NO_x 排放数据和车速,如图 3 所示。由图 3 可知,整个运行过程的 NO_x 排放均较低,排气中 NO_x 的体积分数最大不超过 0.1%。

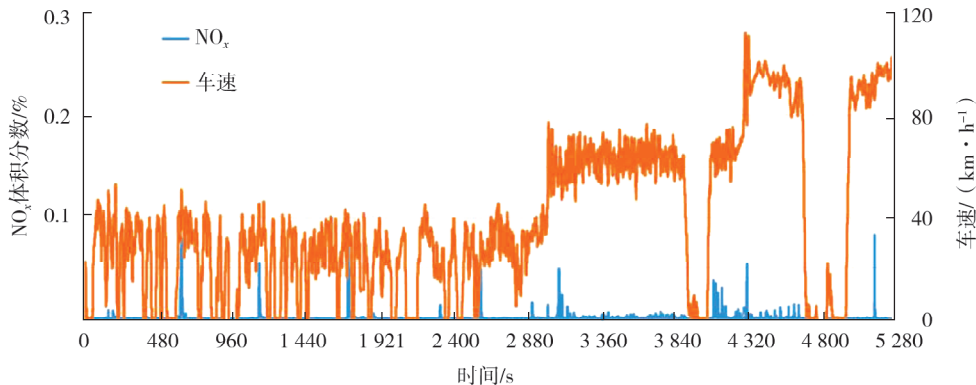


图 3 程序优化后排气中 NO_x 体积分数秒采样

4 结论

对某 PHEV 开展高原低温环境下 RDE 测试,根据该车控制架构分析排放高的原因,并通过 ECU、VCU 的标定优化降低排放。

1) 标定优化后,PHEV 的 RDE 总行程的 NO_x 、PN 排放较优化前分别下降 52.5%、75.2%,市区行程的 NO_x 、PN 排放分别下降 70.3%、51.6%,满足国六 b 阶段限值要求。

2) 与传统车型不同,PHEV 的 RDE 排放包含冷起动阶段排放,在实际测试过程中应更关注低温对排放的影响;在 RDE 测试过程,发动机频繁起停,因此,冷机的起动、催化器加热、过渡控制、暖机及热机起动等与 RDE 排放高相关,在排放控制中应予以关注。

3) 与传统车型不同,PHEV 汽车排放与 VCU 的控制息息相关,VCU 的发电工况点、发动机的起停控制、串并联切换、转矩请求等对排放有较大影响,需要重点关注和优化。

参考文献:

[1] 环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 18352.6—2016[S]. 北京:中国环境出版

- 社, 2016.
- [2] 郑丰,赵海光,吉江林,等.基于北京和昆明海拔条件下的国VI混合动力车实际道路排放特性研究[J].环境科学研究,2022,35(7):1581-1588.
- [3] 罗佳鑫,于恒彬,温溢,等.基于实际道路测试的插电式混合动力汽车排放特性研究[J].小型内燃机与车辆技术,2022,51(1):70-75.
- [4] 涂安全,张风平,杨宝牛,等.增压直喷汽油车在不同海拔地区的RDE排放特性研究[J].小型内燃机与车辆技术,2020,49(2):54-58.
- [5] 李岳兵,杜宝程,张运,等.国六排放法规对RDE试验中驾驶行为激烈程度评判的有效性分析[J].重庆大学学报,2019,42(6):26-33.
- [6] 宋彬,葛蕴珊,尹航,等.行驶动力学参数对RDE实验结果的影响研究[J].汽车工程,2018,40(4):389-395.
- [7] 汪晓伟,颜燕,景晓军,等.驾驶特性对进气道喷射汽油车RDE排放的影响[J].汽车工程,2018,40(10):1146-1150.
- [8] 禹文林.混合动力汽车实际道路行驶污染物排放特性研究[D].北京:北京理工大学,2021.

Experimental study on high altitude real driving emissions of a plug-in hybrid electric vehicle

LIU Wenbin

Technical Center of JAC, Hefei 230601, China

Abstract: In order to reduce the real driving emissions (RDE) of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) in high-altitude low-temperature boundary environments, a portable emission testing device is used to conduct RDE emission test on a certain PHEV model. Based on the emission test results, the engine control unit and vehicle control unit control strategies are optimized to reduce emissions during cold start and transition conditions, and conduct RDE testing to verify the optimized PHEV. The results show that after optimization, the NO_x and PN emissions of the total RDE test decreases by 52.5% and 75.2%, respectively. The NO_x and PN emissions of the urban phase decreases by 70.3% and 51.6%, respectively, and the conformity factor of NO_x and PN are both lower than 2.1, which meets the requirements of CHINA 6 b. The actual road emissions of PHEV differ significantly from traditional vehicle models, requiring optimization of emissions from multiple operating conditions and controllers to meet environmental standards.

Keywords: high altitude; PHEV; real driving emission; NO_x emission; PN

(责任编辑:郎伟锋)