

增压直喷低压 EGR 发动机 GPF 再生效率研究

宁成钢¹, 孙孟祥¹, 张家瑞², 刘勇¹, 朱文武¹, 王东², 郭俊德^{2*}

1. 江铃汽车股份有限公司, 江西 南昌 330200; 2. 西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要:为提高某增压、直喷、低压废气再循环(low-pressure exhaust gas recirculation, LP-EGR)、米勒循环汽油机颗粒捕集器(gasoline particulate filter, GPF)的再生效率, 优化 GPF 再生控制策略, 并进行城市工况和城郊工况下的 GPF 再生试验验证。试验结果表明:将混合动力控制单元(hybrid control unit, HCU)作为 GPF 再生的关联控制器, 由 HCU 控制再生过程, 城市工况、城郊工况下的实际再生碳量较优化前分别提高了 10% 和 15%, 有效解决了混合动力车辆在这两种工况下 GPF 不易再生及再生效率较低的问题。

关键词:混合动力车辆; 增压直喷; 米勒循环; HCU; LP-EGR; GPF

中图分类号:TK411.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0069-06

引用格式:宁成钢, 孙孟祥, 张家瑞, 等. 增压直喷低压 EGR 发动机 GPF 再生效率研究[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1): 69-74.

NING Chenggang, SUN Mengxiang, ZHANG Jiarui, et al. GPF regeneration efficiency of a turbocharged direct injection low-pressure EGR engine [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 69-74.

0 引言

随着汽车技术的不断发展以及我国第四阶段油耗标准的日益严格^[1], 提高发动机热效率和燃油经济性成为了各大车企追求的关键目标, 混合动力技术应运而生并逐渐成为乘用车行业的主流选择^[2-4]。混合动力系统弥补了米勒循环发动机功率密度相对较低的不足, 使得汽油发动机米勒循环等技术重新受到广泛关注与重视。米勒循环发动机通过采用较短进气持续期的凸轮实现进气门早关, 搭配较高的几何压缩比及低压废气再循环(low-pressure exhaust gas recirculation, LP-EGR)技术, 能够减少汽油机部分负荷下的泵气损失, 降低大负荷区域的燃烧温度, 减少爆震倾向以及降低排气温度^[5-7], 从而有效提高汽油机的热效率和燃油经济性。

目前, 国内外众多学者对深度米勒循环结合 LP-EGR 技术在汽油机上的应用开展了大量深入的研究: Fontana 等^[8]研究发现, 在部分负荷工况下, 米勒循环发动机的节气门开度相对较大, 有助于降低泵气损失, 提高发动机的热效率; Cleary 等^[9]的研究结果表明, 米勒循环发动机最多可以实现 7% 的节油效果; Bourhis 等^[10]在一台直喷发动机上对比研究了 LP-EGR 和内部残余气体对发动机性能的影响, 结果表明, 在中等负荷工况下, LP-EGR 能够更有效地抑制爆震现象, 降低油耗的效果也更显著; 黄昭明等^[11]在一台高压压缩比增压米勒循环发动机上安装 LP-EGR, 深入研究了 EGR 对不同压缩比米勒循环发动机性能的影响, 研究结果表明, 通过合理提高米勒循环发动机压缩比并配合使用 LP-EGR, 可以显著提高发动机的燃

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目 (2024WZ-YBXM-09)

第一作者简介: 宁成钢 (1981—), 男, 黑龙江青岗人, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为发动机及整车电控标定, E-mail: cning@jmc.com.cn。

* 通信作者简介: 郭俊德 (1987—), 男, 河南驻马店人, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密机械设计及理论、机械摩擦学及表面工程等, E-mail: gjd0119@163.com。

油经济性;南征等^[12]基于一款排量为 1.5 L 的汽油发动机,在台架上开展了不同碳载量和入口温度下的汽油机颗粒捕集器(gasoline particulate filter, GPF)断油再生特性研究,研究结果显示,在断油再生过程中,GPF 载体温度出现阶跃式升高,特别是在碳载量较大以及入口温度较高的情况下,GPF 的温度很容易超过载体材料的耐受温度;范明哲等^[13]通过在 GPF 载体内部安装热电偶,测量了 GPF 在主动再生和被动再生过程中的内部温度变化,试验结果表明,随着 GPF 碳载量的不断增加,GPF 载体内部的瞬态温度越来越高。

目前,国内外关于米勒循环发动机燃油经济性的研究较多,但关于米勒循环对 GPF 载体温度的影响以及混合动力车辆搭载米勒循环发动机后 GPF 再生效率的研究相对较少,国内的相关研究也大多仅限于在给定 GPF 入口温度的条件下,对 GPF 载体内部温度变化进行研究。鉴于当前搭载米勒循环发动机的混合动力车辆已成为市场主流,因此有必要对混合动力车辆的 GPF 再生效率以及载体温度进行深入研究。本文中针对一台排量为 1.5 L、增压、直喷、LP-EGR、米勒循环发动机的 GPF 开展试验研究,分析 GPF 再生策略对混动车辆 GPF 再生效率的影响规律。

1 试验设备及方案

1.1 试验发动机

试验用发动机为一台排量为 1.5 L 的米勒循环发动机,搭载 35 MPa 高压燃油系统、LP-EGR 系统,压缩比为 12.9 ± 0.1 ,最大功率和最大扭矩分别为 113 kW、230 N·m。

1.2 试验车辆

试验用混合动力车辆(full hybrid electric vehicle, FHEV)整体架构如图 1 所示。该车辆动力总成主要由排量为 1.5 L 的增压直喷高效内燃机和两挡专用混合动力变速器(dedicated hybrid transmission, DHT)(P1+P3 电机)组成,车辆配备容量为 3 kW·h 的电池包和底盘式 GPF,可实现纯电、串联和并联 3 种能量模式,兼顾车辆的动力性能和经济性能。

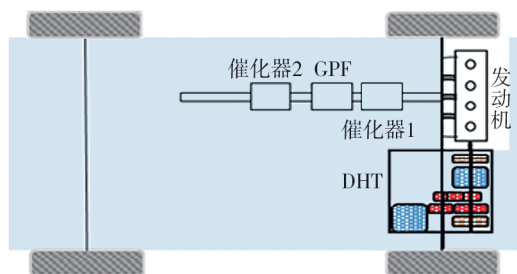


图 1 FHEV 整车架构

1.3 整车 GPF 再生控制策略试验方案

由于混动专用发动机在混合动力车辆运行过程中不需要全时直接驱动车辆,GPF 再生控制较传统车辆更加灵活。GPF 再生控制策略对 GPF 再生效率影响的试验方案如表 1 所示,其中,城市工况为车速低于 45 km/h 且在城市内部道路行驶的工况;城郊工况为车速为 60~80 km/h 且行驶道路为郊区道路的工况。试验中使用 ETAS582 设备及 INCA 软件与整车电子控制单元(engine control unit, ECU)通信并实时记录发动机转速、车速、氧气质量流量、GPF 中心温度等关键参数。

表 1 GPF 再生控制策略对 GPF 再生效率影响的试验方案

工况	碳载量/g	车速/(km·h ⁻¹)	驱动方式	再生时间/min	再生方式
城市工况	10	35~50	串联	20	主动再生
城郊工况	10	60~80	串联	20	主动再生

2 整车 GPF 再生控制策略优化及结果分析

2.1 整车 GPF 再生控制策略优化

混合动力汽车与传统汽油车的 GPF 再生控制策略大体相同,ECU 作为 GPF 再生的主控制器控制

GPF 再生过程。为了提高混动专用发动机热效率,其排气温度较传统发动机偏低,导致 GPF 再生温度较低,GPF 再生效率低^[14-15]。

传统车辆 GPF 再生控制策略为:发动机管理系统(engine management system,EMS)根据发动机运行工况实时计算 GPF 捕集的碳载量,当 EMS 计算的碳载量超过再生阈值时,EMS 触发 GPF 再生请求,当发动机转速、负荷、排气流量、GPF 载体中心温度等均满足再生工况要求时,通过增大过量空气系数,推迟点火角,使排气温度达到再生目标温度,触发主动再生^[16-17];GPF 载体温度大于 500 ℃ 时发动机断油,触发被动再生。

优化 GPF 再生策略,将混合动力控制单元(hybrid control unit,HCU)作为 GPF 再生的关联控制器,再生策略如图 2 所示。图 2a)中主动再生方式 1 为传统主动再生策略,主动再生方式 2 为优化后的主动再生策略:在 GPF 碳载量超过阈值时,HCU 将发动机转速、负荷向有利于 GPF 主动再生的高排气温度工况控制,快速满足 GPF 主动再生条件且主动控制 GPF 载体中心温度处于较高温度,从而提高再生效率。优化后的被动再生策略如图 2b)所示,HCU 在 EMS 有被动再生请求且条件允许的情况下,可以执行断油且维持发动机运转,增加被动再生时间,从而达到提高 GPF 再生效率的目的。设计的 GPF 再生策略基于混动车辆自身特点,可灵活调整发动机转速及负荷至高排气温度工况,相比传统车辆在城市及城郊工况需大幅度推迟点火角提高排气温度,油耗增加较少。

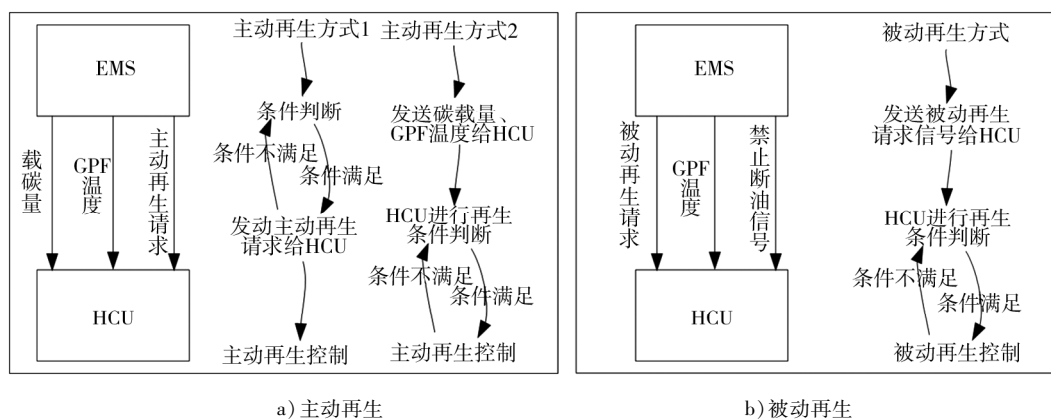


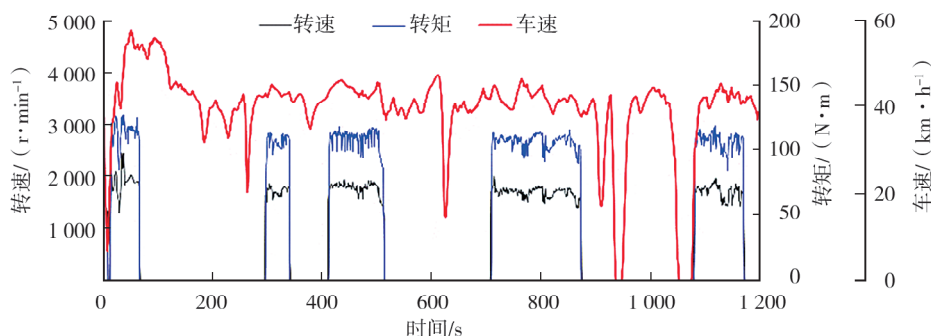
图 2 GPF 再生控制策略

2.2 整车 GPF 控制策略优化前、后结果分析

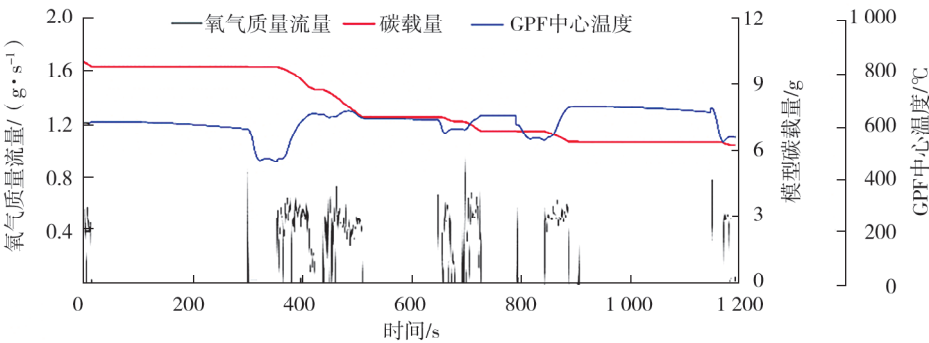
2.2.1 城市工况

整车 GPF 再生控制策略优化前、后的城市工况及再生试验结果图 3、4 所示。由图 3、4 可知:城市工况再生控制策略优化前、后,发动机各项指标变化不大,优化效果不明显。

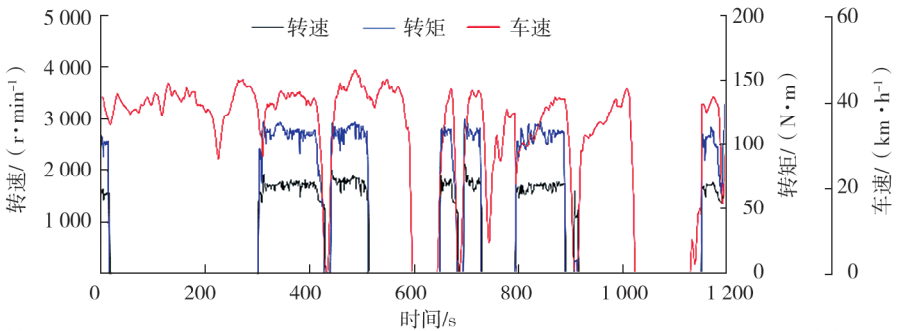
再生 20 min 后,GPF 再生控制策略优化前、后城市工况的碳载量实际称质量结果如表 2 所示。由表 2 可知:再生控制策略优化前、后,GPF 再生碳量分别为 0.90、0.99 g,优化后的再生碳量较优化前提高了 10%。



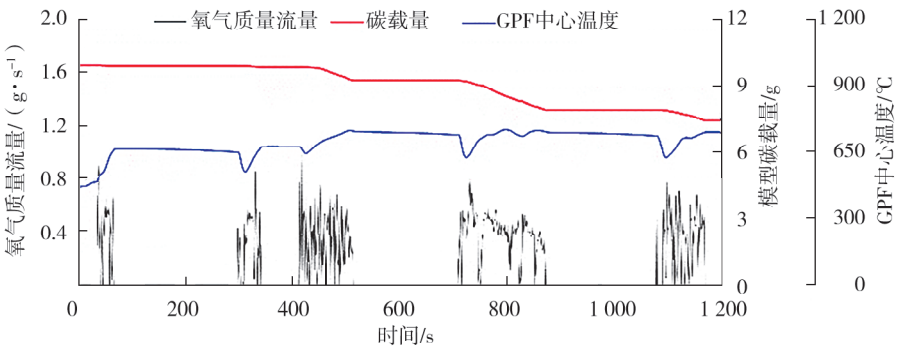
a) 转速、转矩、车速



b) 氧气质量流量、碳载量、GPF 中心温度
图 3 GPF 再生策略优化前城市工况及再生试验结果



a) 转速、转矩、车速



b) 氧气质量流量、碳载量、GPF 中心温度
图 4 GPF 再生策略优化后城市工况及再生试验结果

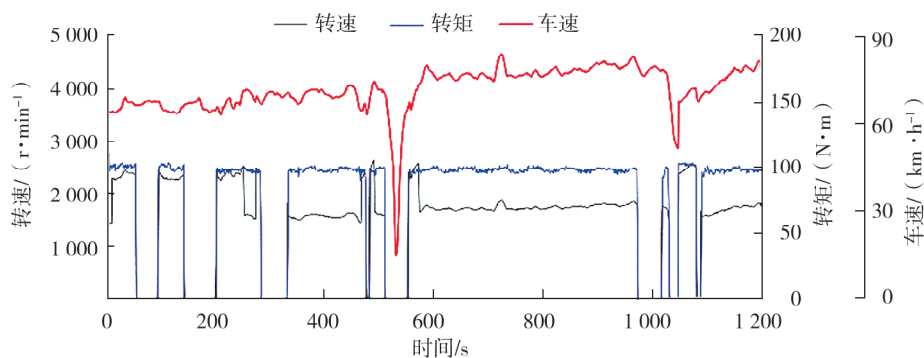
表 2 GPF 城市工况再生称质量结果

再生策略	再生前碳载量/g	再生后碳载量/g	再生方式	再生时间/min	再生碳量/g
优化前	9.98	9.08	主动再生	20	0.90
优化后	10.10	9.11	主动再生	20	0.99

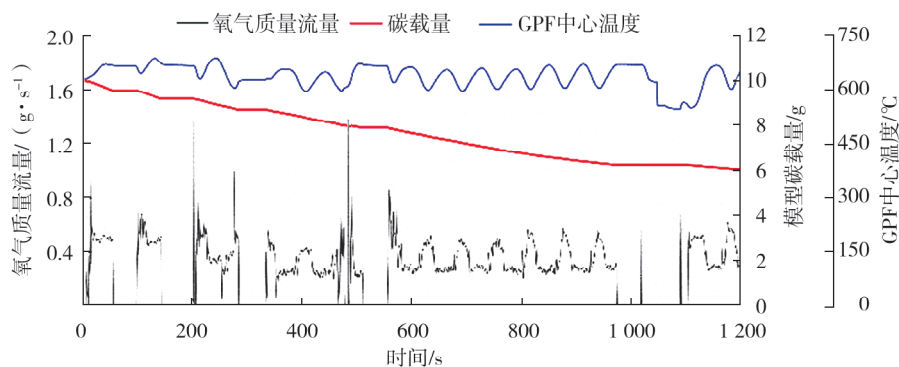
2.2.2 城郊工况

整车 GPF 再生控制策略优化前、后的城郊工况及试验结果分别如图 5、6 所示。由图 5、6 可知：优化后，因再生过程中实际转矩较优化前增加 20 $\text{N} \cdot \text{m}$ ，GPF 中心温度升高，表明高载碳量下 HCU 将运行工况调整到了适合 GPF 再生的高排气温度区域，且由于负荷增大，氧气质量流量增大，GPF 再生速率明显加快。

再生 20 min 后，GPF 再生控制策略优化前、后城郊工况的碳载量实际称质量结果如表 3 所示。由表 3 可知：城郊工况再生控制策略优化后，GPF 再生碳量较优化前提高了约 15%。

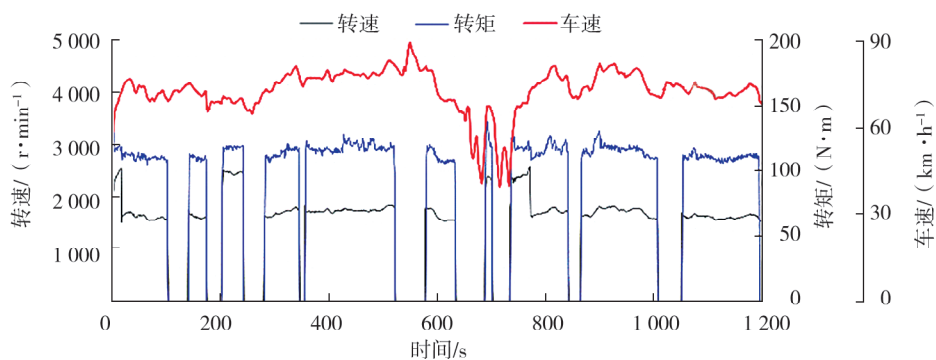


a) 转速、转矩、车速

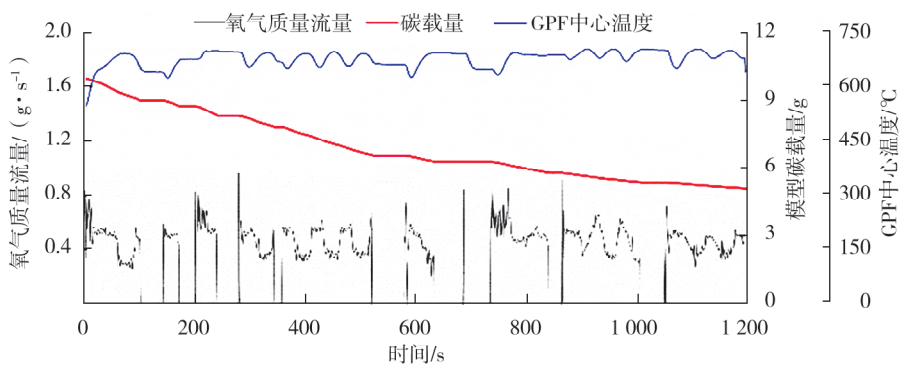


b) 氧气质量流量、碳载量、GPF 中心温度

图5 GPF 再生策略优化前城郊工况及再生试验结果



a) 转速、转矩、车速



b) 氧气质量流量、碳载量、GPF 中心温度

图6 GPF 再生策略优化后城郊工况及再生试验结果

表 3 GPF 城郊工况再生称质量结果

再生策略	再生前碳载量/g	再生后碳载量/g	再生方式	再生时间/min	再生碳量/g
优化前	10.08	7.57	主动再生	20	2.51
优化后	9.95	7.06	主动再生	20	2.89

3 结论

以一台混动汽车配备的排量为 1.5 L 的增压直喷低压废气再循环米勒循环发动机为研究对象,开展了城市工况及城郊工况下的汽油机颗粒捕集器再生试验研究,分析汽油机颗粒捕集器再生控制策略对混动车辆汽油机颗粒捕集器再生效率的影响。试验结果表明:将混合动力控制单元作为汽油机颗粒捕集器再生的关联控制器,由混合动力控制单元控制再生过程,城郊工况转矩较优化前增加 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$,汽油机颗粒捕集器中心温度升高,氧气质量流量增大,汽油机颗粒捕集器再生速率明显加快;两种工况下的再生效率均有所提高,实际再生碳量较优化前分别提高了 10% 和 15%。

参考文献:

- [1] 工业和信息化部. 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,2020.
- [2] 张国耕,史训亮,王全任. 混合动力驱动单元技术与展望[J]. 汽车文摘,2025(1):14-22.
- [3] 西部证券研发中心. 混合动力赛道:技术路线明晰,竞争格局重塑[J]. 汽车与配件,2024(22):22-27.
- [4] 郭晓鑫,刘力,魏崇亮,等. 我国乘用车燃料经济性标准发展研究[J]. 小型内燃机与车辆技术,2016,45(1):93-96.
- [5] FRANÇA O. Impact of the Miller cycle in the efficiency of an FVVT (fully variable valve train) engine during part load operation[C]//Proceedings of SAE Brasil 2009 Congress and Exhibit. Detroit, USA: SAE International, 2009.
- [6] GOTTSCALK W, LEZIUS U, MATHUSALL L. Investigations on the potential of a variable Miller cycle for SI knock control[C]//Proceedings of SAE 2013 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2013.
- [7] WAN Y, DU A. Reducing part load pumping loss and improving thermal efficiency through high compression ratio over-expanded cycle[C]//Proceedings of SAE 2013 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2013.
- [8] FONTANA G, GALLONI E, PALMACCIO R, et al. The influence of variable valve timing on the combustion process of a small spark-ignition engine[C]//Proceedings of SAE 2006 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2006.
- [9] CLEARY D, SILVAS G. Unthrottled engine operation with variable intake valve lift, duration, and timing[C]//Proceedings of SAE 2007 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2007.
- [10] BOURHIS G, CHAUVIN J, GAUTROT X, et al. LP EGR and IGR compromise on a GDI engine at middle load[J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6(1):67-77.
- [11] 黄昭明,沈凯,安宗权,等. 不同压缩比米勒循环和低压废气再循环对增压直喷汽油机性能影响[J]. 内燃机工程, 2019, 40(4):13-18.
- [12] 南征,李楠,张秋实,等. 汽油机颗粒捕集器再生时载体温度特性研究[J]. 内燃机学报,2022,40(4):322-330.
- [13] 范明哲,张宾,STERZER A,等. 汽油机 GPF 碳载量模型和再生策略的试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2018,35(6):1-10.
- [14] 苏永杰,徐磊,吕践,等. 车辆颗粒物捕集器的再生控制方法、系统及存储介质:CN 113202607B[P]. 2022-07-19.
- [15] 吴威龙,林思聪,陈砚才,等. 米勒增压直喷汽油机应用 LPEGR 的试验研究[J]. 小型内燃机与车辆技术,2021,50(2):1-7.
- [16] 张超. 不同空燃比对整车 GPF 售后再生效率影响研究[J]. 汽车与配件,2022(1):68-69.
- [17] 胡志远,徐扬,房亮,等. 米勒循环对增压直喷汽油机性能影响的仿真分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022, 50(10):1490-1499.

(下转第 86 页)

Lightweight design of the battery swap box for a heavy-duty new energy commercial vehicle

ZHU Xiuwen¹, LI Wei¹, ZHANG Dongjiang², ZHOU Shuai^{1*}, WANG Tong¹

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shanghai Enneagon Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 201821, China

Abstract: In order to solve the problem of excessive mass of the battery swap box for heavy-duty trucks, the framework of the battery swap box for a certain heavy-duty pure electric commercial vehicle is lightweight under the premise of ensuring reliability and safety. The constraint mode, static strength and deformation of the lightweight battery swap box are analyzed by finite element method, and verified by vibration test and full vehicle reinforcement bad road test. The analysis results show that after lightweight design, the mass of the battery swap box is reduced from 735 kg to 426 kg, the first order modal frequency of the improved battery swap box is 12.24 Hz, which meets the requirement of modal frequency greater than 10.00 Hz, the safety factor of the four typical working conditions of emergency braking, right emergency turning, upward jolting and battery swapping lifting are 2.18~3.19, all exceed 1.25, and the static strength meets the design requirements. The maximum deformation of the battery swap box under the four working conditions is 5.90 mm, which meets the requirement of enterprise technical standards. The results of the bench test and the bad road test show that appearance of the battery swap box is intact without any signs of damage, meeting the requirements for use.

Keywords: lightweight; battery swap box; load spectrum collection; finite element analysis; vehicle testing

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第 74 页)

GPF regeneration efficiency of a turbocharged direct injection low-pressure EGR engine

NING Chenggang¹, SUN Mengxiang¹, ZHANG Jiarui², LIU Yong¹,

ZHU Wenwu¹, WANG Dong², GUO Junde^{2*}

1. Jiangling Motors Co., Ltd., Nanchang 330200, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China

Abstract: In order to improve the regeneration efficiency of the gasoline particulate filter (GPF) in a turbocharged, direct injection, and low-pressure exhaust gas recirculation (LP-EGR) Miller cycle engine of a full hybrid electric vehicle, the GPF regeneration control strategy is optimized, and verified by regeneration tests under urban and suburban conditions. The experimental results show that using a hybrid control unit (HCU) as the associated controller for GPF regeneration, with the HCU controlling the regeneration process, the actual regeneration carbon content in urban and suburban conditions increases by 10% and 15% respectively compared to before optimization. The new GPF regeneration control strategy can effectively solve the problem of difficult GPF regeneration and low regeneration efficiency of GPF for full hybrid electric vehicle in these two conditions.

Keywords: full hybrid electric vehicle; supercharging direct injection; Miller cycle; HCU; LP-EGR; GPF

(责任编辑:臧发业)