

重型新能源商用车换电箱轻量化设计

朱秀文¹, 李伟¹, 张东江², 周帅^{1*}, 王彤¹

1. 山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357; 2. 上海玖行能源科技有限公司, 上海 201821

摘要:为解决换电式重卡换电箱质量过大的问题,在保证可靠性和安全性的前提下,对某重型纯电动商用车换电箱框架进行轻量化设计,采用有限元分析轻量化换电箱的约束模态、静强度、变形,结合台架振动试验与整车强化回路试验进行验证。结果表明:轻量化设计后,换电箱质量由735 kg减轻至426 kg;换电箱优化后的一阶振型模态频率为12.24 Hz,满足模态频率大于10.00 Hz的要求;前进中紧急制动、右急转弯、向上颠簸工况、换电提升4种典型工况的安全系数为2.18~3.19,均超过1.25,静强度满足设计要求;4种工况下换电箱最大变形为5.90 mm,满足企业技术标准要求。台架试验及回路试验结果表明换电箱外观完好无损,未见任何损坏迹象,满足使用要求。

关键词:轻量化;换电箱;载荷谱采集;有限元分析;整车试验

中图分类号:U469.7

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0080-07

引用格式:朱秀文,李伟,张东江,等. 重型新能源商用车换电箱轻量化设计[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1): 80-86.

ZHU Xiuwen, LI Wei, ZHANG Dongjiang, et al. Lightweight design of the battery swap box for a heavy-duty new energy commercial vehicle [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 80-86.

0 引言

近年来,随着新能源车产业的迅速发展,对电池系统、电机系统、续驶里程、充电设施等各项技术指标有了更高的要求^[1-2]。新能源车辆“车电分离”模式可在5~10 min完成电池组更换,具有速度快、效率高的优势^[3-4],在重型商用车特定的短途运输场景中(如矿区、发电厂、港口等区域)得到了广泛应用^[5-6]。

换电式重型商用车的换电箱结构复杂、质量较大,导致换电式重卡总质量明显高于传统燃油重卡,车辆有效载荷能力降低,运营成本增加^[7-8]。换电箱质量主要包括动力电池组、集成控制模块、换电箱框架及外壳的质量。由于换电箱框架在换电箱总质量中占比较大,约为15%~25%,因此对换电箱框架进行轻量化设计是减轻换电箱质量的有效途径^[9]。

本文将真实工作场景下采集的重型商用车载荷谱进行数据处理,确定有限元仿真分析边界条件,分析换电箱框架优化后的模态、强度和变形,并通过试验验证轻量化换电箱框架的结构可靠性。

1 换电箱框架轻量化设计

1.1 载荷谱采集

某重型新能源商用车采用原换电箱方案,利用LMS数据采集设备实时采集和存储不同工况下的实

收稿日期:2025-01-21

基金项目:山东省重大专项项目(2024CXGC010301)

第一作者简介:朱秀文(1999—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为车辆轻量化,E-mail:zhuxiuwen2022@163.com。

*通信作者简介:周帅(1987—),男,山东潍坊人,工学硕士,副教授,主要研究方向为汽车轻量化技术与应用,E-mail:zhoushuai1059@163.com。

车试验数据,分别在底托左右侧车架、横梁的中部及换电箱框架重心(由于框架内部为电池组,用单侧框架重心进行模拟)5个位置安装加速度传感器,得到换电箱车架不同位置的振动载荷谱,利用 Ncode 软件对载荷谱数据进行分析处理,为有限元仿真提供精确的边界条件。车辆传感器安装位置示意图如图 1 所示。

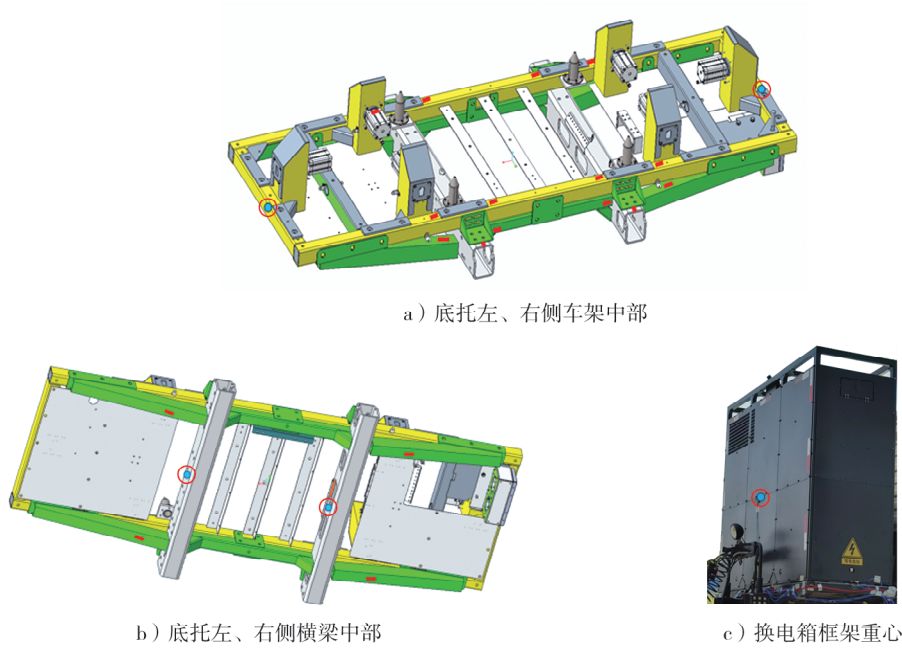


图1 车辆传感器安装位置示意图

紧急制动、急转弯和颠簸工况是重型新能源商用车较典型的工况,选取前进中紧急制动、右急转弯、向上颠簸工况(分别记为工况 A、B、C)进行分析,且实际换电过程中需提升换电箱,综合考虑换电箱质量、提升过程中的惯性冲击力及可能出现的意外故障(如锁止故障等),设置换电提升工况(记为工况 D),提升力设置为 40 kN,方向为 z (垂直地面向下)。

由于车辆在极端情况下(如行驶路面有大面积凹坑、极端情况下紧急制动等)可能导致电池框架损坏。为进行精确的结构性能评估和优化设计,仿真工况应真实反映换电箱实际工况状态。结合采集数据和可能的极端情况,为保证仿真工况的准确性和可靠性,设置载荷边界条件,进行有限元分析。不同仿真工况载荷边界条件如表 1 所示,表中 g 为自由落体加速度。

表 1 不同仿真工况载荷边界条件 单位: g

工况类型	x 方向 ^① 载荷	y 方向 ^② 载荷	z 方向载荷
工况 A	3	0	1
工况 B	0	3	1
工况 C	0	0	5

①为车辆行驶方向;②为驾驶员左侧方向。

1.2 框架材料

换电箱在使用过程中受到不同程度的冲击,综合考虑碰撞安全性、维修拆装方便性、高强度和高可靠性等要求,选用高强度钢作为换电箱框架,框架材料性能参数如表 2 所示。

表 2 框架材料性能参数

牌号	密度/ $(t \cdot m^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
700L	7.9	210	0.3	750	800

1.3 结构优化

基于该车现有换电箱底托的几何参数与预设电池包模块轮廓,参照现行企业换电系统设计标准,考

虑动力电池组件的装配精度、稳固性及后续运维实际需求,在不影响换电箱框架刚度和强度的前提下,通过优化换电箱结构,实现换电箱承载框架的轻量化设计,提高电池更换过程工作效率^[10]。

换电箱框架优化前、后结构对比如图 2 所示。由图 2 可知:结合框架上部承重小、底部承重大的实际承重分布,取消原框架前、后、左、右 4 面承重效率低的大斜筋,框架前、后底部增设斜筋(蓝色),提高工况 B 时框架的刚度和强度;减少电池置放架纵梁,并增设加强小斜筋(灰色),灰色短纵梁与小斜筋配合提高工况 A 和 C 时的刚度和强度;将上、下的横梁尺寸由 60 mm×50 mm×4 mm 优化为 60 mm×45 mm×3 mm,优化后的横梁(绿色)与小斜筋配合,提高正常使用过程及工况 D 时的刚度和强度。该优化措施不仅减轻框架整体质量,还实现了电池从侧面抽出的设计,提高了电池运维的便捷性。结构优化后的换电箱框架质量为 426 kg,相较于原框架的 735 kg,质量减少 42%,效果显著。

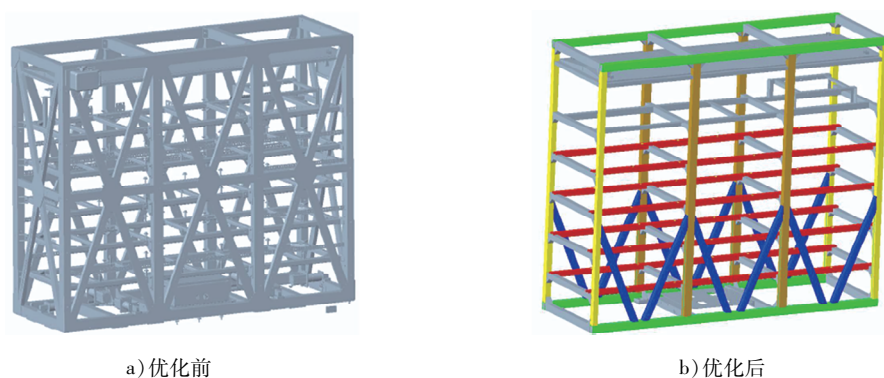


图 2 换电箱框架优化前、后结构对比

2 有限元仿真分析

2.1 有限元模型

采用有限元分析验证优化后换电箱电池框架的约束模态、静强度和变形。为了确保仿真结果的准确性,导入换电箱底托结构和电池组模型(下四层)进行合并计算,其他控制组件(上一层)因体积和质量较小,对框架的模态、强度和变形影响较小,用质量点进行模拟。采用 HyperMesh 软件构建换电箱总成模型,在底托横梁底面、横梁与主车架的螺栓连接处建立刚性连接,并对连接点施加 6 个自由度的约束,轻量化换电箱总成有限元分析模型如图 3 所示。

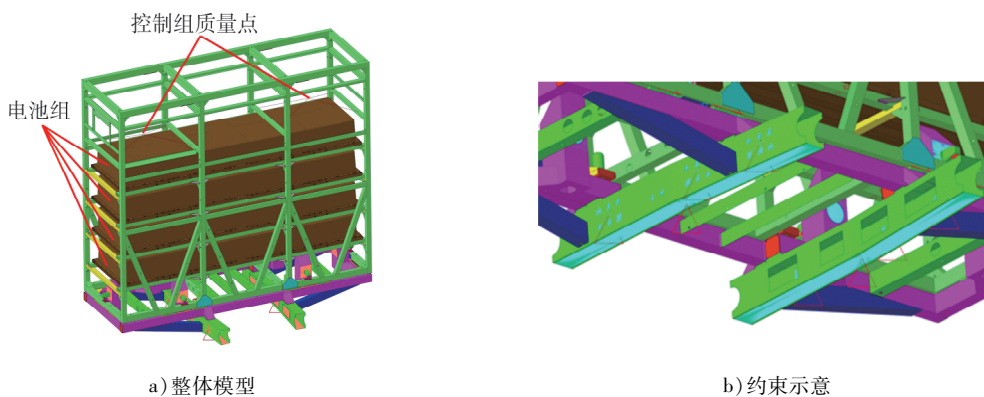


图 3 轻量化换电箱总成有限元分析模型

2.2 仿真分析

2.2.1 约束模态分析

采用有限元计算优化后换电箱框架的约束模态,前两阶约束模态如图 4 所示。

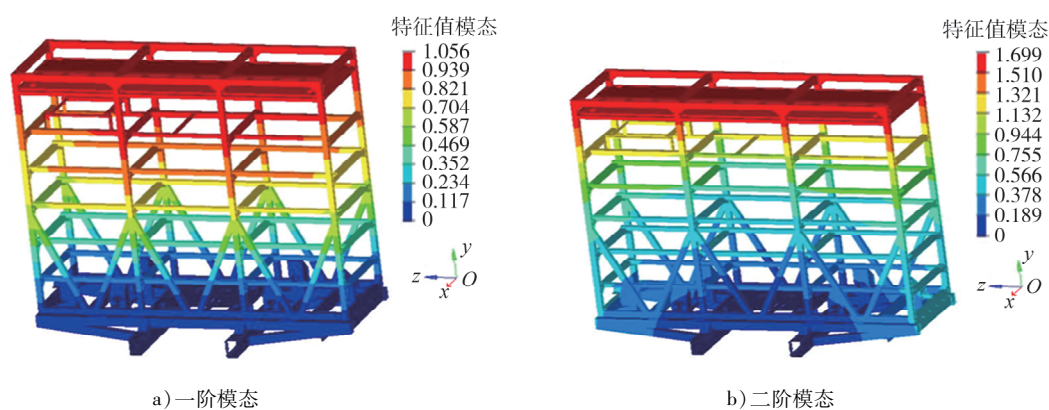


图4 换电箱框架约束模态

优化后换电箱框架的一阶振型为箱体上部沿车辆前进方向摆动,模态频率为 12.24 Hz;二阶振型为箱体上部沿车辆转弯方向摆动,模态频率为 20.54 Hz。一、二阶模态频率均满足大于企业最低模态频率 (10 Hz) 的技术设计要求,优化后换电箱框架的约束模态频率符合设计要求。

2.2.2 静强度分析

采用有限元计算 4 种工况下换电箱框架应力,如图 5 所示。

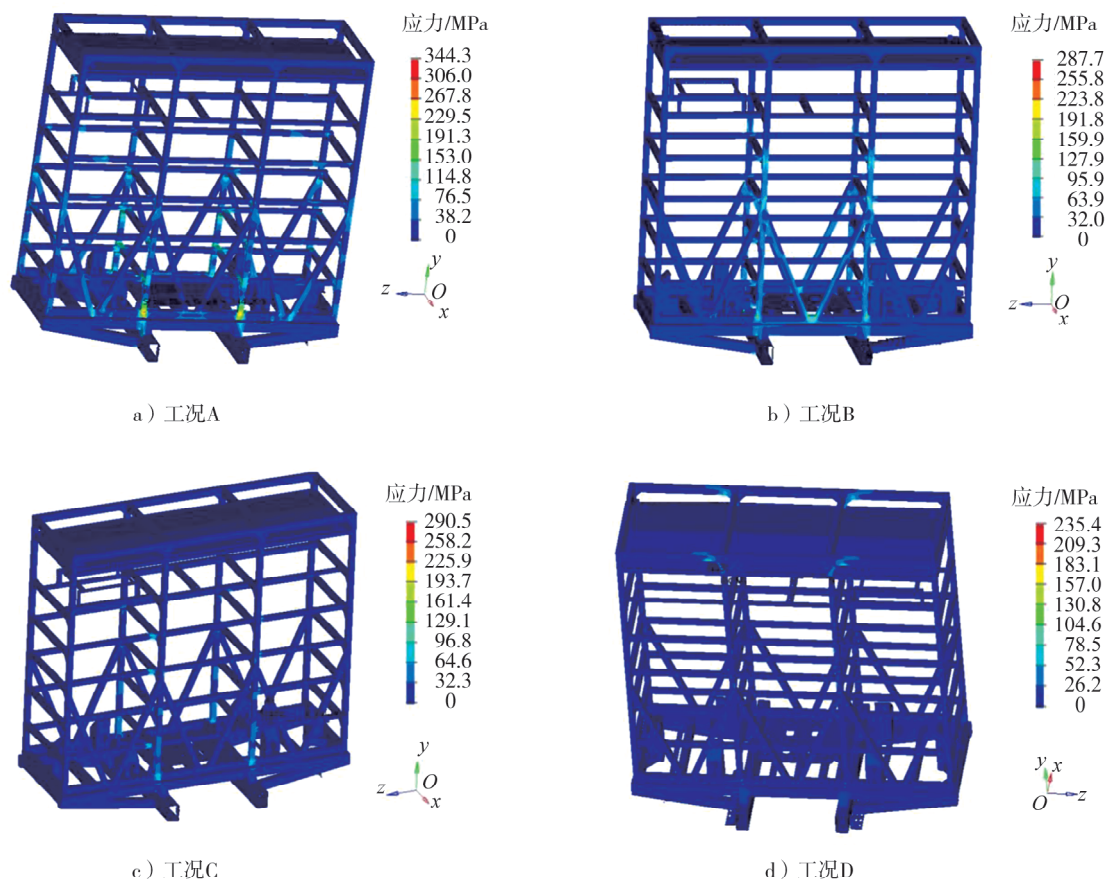


图5 换电箱框架应力分析

在静强度评估中,采用安全因数作为评判标准。参考工程实践经验,最大应力应低于材料屈服强度的 80%,即安全因数大于 1.25。4 种工况下换电箱的最大应力位置、最大应力及安全因数如表 3 所示。由表 3 可知:所有工况安全因数均超过 1.25,优化后换电箱框架静强度满足设计要求。

表 3 应力分析结果

工况类型	最大应力位置	最大应力/MPa	安全因数
工况 A	最底层短纵梁底部	344	2.18
工况 B	下底托纵梁螺栓位置处	287	2.61
工况 C	电池固定孔位置处	290	2.59
工况 D	提升力作用位置吊环处	235	3.19

2.2.3 变形分析

通过有限元计算 4 种工况下换电箱框架整体变形,如图 6 所示。

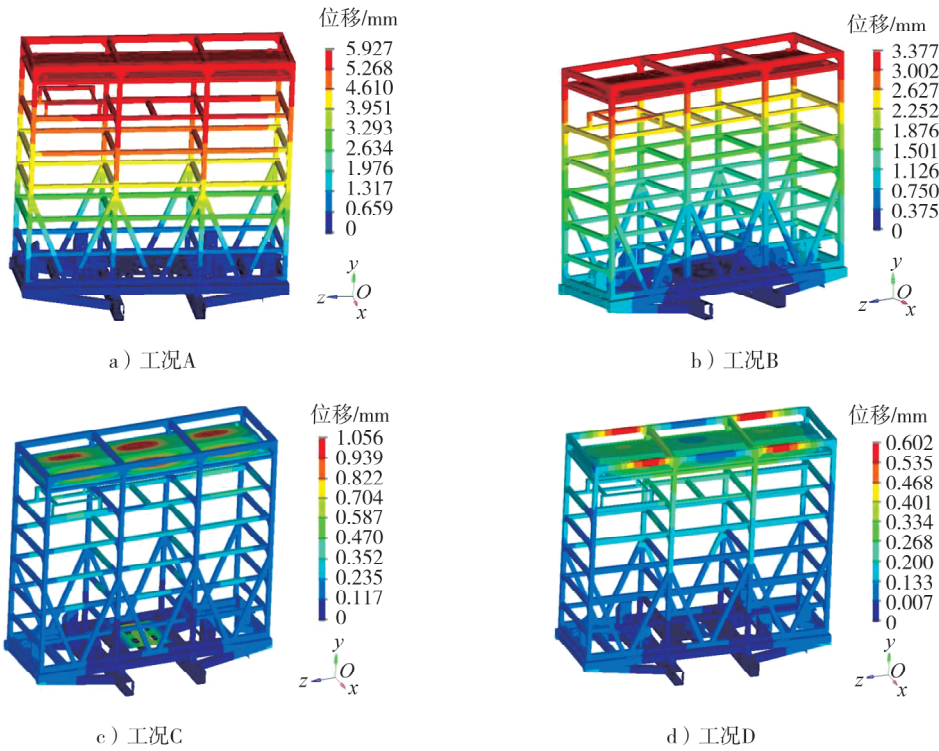


图 6 换电箱框架变形分析

在变形评估中,根据实际经验,采用 1.00 m 长度位移变形不超过 3.00 mm 的标准进行评价。4 种工况下换电箱的最大变形位置、最大变形和企业允许变形技术要求如表 4 所示。

表 4 变形分析结果

工况类型	最大变形位置	最大变形/mm	允许变形 ^① /mm
工况 A	换电箱顶部	5.90	6.00
工况 B	换电箱顶部	3.38	6.00
工况 C	换电箱遮雨棚	1.06	3.00
工况 D	换电箱上部横梁	0.60	3.00

①允许变形为根据实际经验,结合各部件长度计算。

4 种工况下换电箱最大变形均未超出极限变形,换电箱变形符合要求。但工况 A 最大变形为 5.90 mm,接近允许变形(6.00 mm),若进一步轻量化可能影响结构稳定性。综合考虑模态、静强度与变形等多方面因素,本文中设计的轻量化电池框架在当前条件下为最优设计状态。

3 试验验证

3.1 台架振动试验

在外部暴露环境下对电池进行振动试验存在危险,因此换电箱框架的下四层安装与电池质量相等的配重块,上一层安装与控制组件质量相等的配重块,在电动振动台上进行台架振动试验。根据文献[11]中安装在轮式车设备的试验谱进行振动试验,要求垂直于指定轴向(z 轴)的任一轴(x 、 y)的总加速度均方根不应超过 z 轴加速度均方根的50%,每个轴向持续振动8 h,试验谱拐点分别为10、50、1 000 Hz,对应的加速度谱密度分别为10、10、0.1 (m/s^2)/Hz。试验结果显示,样品在振动后外观完好无损,未见损坏迹象,验证了换电箱框架在振动环境下的结构可靠性。

3.2 整车试验

为验证轻量化换电箱框架使用寿命,进行整车试验。试验车辆在标准强化道路试验场地按照规定的环路试验路线进行绕圈行驶,并在行驶里程分别为0.5万、1.0万、1.5万和2.0万km处进行检查。经检验轻量化后的换电箱框架在整个试验过程中未出现屈服性开裂或断裂现象,满足使用寿命要求。

台架振动试验和整车强化环路试验结果表明轻量化换电箱结构可靠,使用寿命符合实际使用要求,轻量化换电箱方案可行。

4 结论

1)采集原换电箱进行前进中紧急制动、右急转弯、向上颠簸工况、换电提升工况下的实车载荷谱,确定有限元仿真边界,使仿真工况真实反映换电箱实际工况状态。

2)结合框架上部承重小、底部承重大的实际承重分布,取消原框架前、后、左、右4面承重效率低的大斜筋,在框架前、后底部增设斜筋;减少电池置放架纵梁,增设加强小斜筋;将上、下横梁尺寸由60 mm×50 mm×4 mm优化为60 mm×45 mm×3 mm,轻量化设计后的换电箱框架质量为426 kg,比原框架减轻了309 kg,质量减少42%,效果显著。

3)采用有限元分析对轻量化设计后的换电箱框架进行模态、静强度及变形分析,均符合设计要求;通过台架振动试验与整车强化环路试验验证了轻量化换电箱方案的可行性。

参考文献:

- [1] LI X, PENG Y, HE Q Q, et al. Development of new-energy vehicles under the carbon peaking and carbon neutrality strategy in China[J]. Sustainability, 2023, 15(9):7725.
- [2] 彭华. 中国新能源汽车产业发展及空间布局研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [3] 郑传笔,朱基荣. 浅谈新能源商用车发展趋势[J]. 重型汽车,2019(2):40-42.
- [4] 陶亮明,阮景奎. 新能源商用车电池框架轻量化设计[J]. 机电工程技术,2024,53(4):214-217.
- [5] 杨卓帆,李延庆,王林林. 重型商用车电池快换方案研究[J]. 汽车实用技术,2019(18):40-41.
- [6] 束晓永,陈显立. 车电分离模式下纯电动汽车换电服务设计研究[J]. 设计艺术研究,2022,12(4):114-119.
- [7] SETTEY T, GNAP J, SYNÁK F, et al. Research into the impacts of driving cycles and load weight on the operation of a light commercial electric vehicle[J]. Sustainability, 2021, 13(24):13872-13893.
- [8] 周友明,李骏,程一明,等. 某商用重卡的一体式蓄电池框架轻量化设计与仿真研究[J]. 装备制造技术,2024(9):42-46.
- [9] SONG Z. Optimized design solutions for battery and frame performance and safety in new energy vehicles[J]. MATEC Web of Conferences, 2024, 404:01006.
- [10] 葛林,杨国庆. 基于有限元的轴孔耳板强度计算研究[J]. 一重技术,2024(5):13-16.
- [11] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. 环境试验 第2部分:试验方法 试验Fh:宽带随机振动和导则:GB/T 2423. 56—2023[S]. 北京:中国标准出版社,2023.

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)