

重型纯电动商用车能量流分析

张坤,李琦,张佑源

东风柳州汽车有限公司,广西柳州 545000

摘要:为提高重型纯电动商用车各部件运行效率,降低能量消耗,进行重型商用车瞬态循环,速度分别为80、60、40 km/h等速,4种工况下转毂台架能量流测试试验。结果表明:4种工况下电池充放电效率为92%~95%,电池包工作稳定且效率较高;微控制器工作效率为94%~98%,电机输出效率为91%~96%,电机能量回收效率约为94.37%,电机运行正常;直流电压转换器转化效率均在85%以上,处于较高水平;油泵在静置状态下的能耗较大,为0.39 kW,其余附件能耗正常。可采用减少油泵压力、优化系统结构、减少油管阻力等措施对油泵进行优化。

关键词:纯电动商用车;能量流;能耗优化

中图分类号:U464.12

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)04-0064-07

引用格式:张坤,李琦,张佑源.重型纯电动商用车能量流分析[J].内燃机与动力装置,2024,41(4):64-70.

ZHANG Kun, LI Qi, ZHANG Youyuan. Energy flow analysis of a heavy-duty pure electric commercial vehicle [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(4): 64-70.

0 引言

随着《节能与新能源汽车技术路线2.0》的提出,零排放、零污染的纯电动商用车得到了广泛应用,但纯电动商用车存在续航里程有限、能量回收不足、控制策略待优化等问题^[1]。现行的续航里程试验标准仅考核了整车因素,未考核各部件因素,考核指标比较单一^[2-3]。在纯电动商用车电池包净放电量一定的情况下,分析各部件能耗,合理优化能量配置,可增大续航里程,提高车辆竞争力。整车能量流测试可测试和分析动力电池提供的能量分配到各部件的有效功率、热损耗及其它低压附件的能量损耗、整车能耗与能量流向等,提高车辆能量利用率,为能量回收和能量分配控制策略提供建议,是研究车辆能耗的主要方法。

由于模型误差等原因,常规的车辆仿真分析方法不能准确评价各部件能耗;若采用零部件台架试验进行测试,测试工况与整车实际运行工况存在差异,使台架能耗测量结果与实际运行工况不一致,可能导致各系统间能耗分析不准确,难以对车辆优化方向提供有效指导^[4]。李敏等^[5]基于新欧洲行驶循环(new European driving cycle, NEDC)工况,研究了某纯电动汽车高温、常温和低温下电池-车轮能量流,得到不同温度下的系统能耗转化效率及能量回收效率,实现了对纯电动汽车经济性的准确评价;冯仁华等^[6]基于重型商用车瞬态循环(China-world transient vehicle cycle, C-WTVC)工况,研究了电动商用车纯电驱动、并联驱动、驱动发电和能量回收模式下的运行状况及能效,表明能量流测试方法对于纯电动车辆能耗优化具有显著意义;Jung等^[7]基于发动机能量流提出了一种热管理模型,发现适当控制冷却液流量可提高燃油经济性,缩短发动机预热时间,确定了能量流对整车-系统-部件多层次能量优化有一定的指导意义。

本文中针对某电动商用车各部件进行能耗分析,从系统集成角度分析电动商用车能量转换及传递过程,对比C-WTVC、不同等速工况下的车辆转毂台架测试能耗,提高车辆能耗利用率。

收稿日期:2024-05-27

基金项目:柳州市科技重大专项项目(2022ABA0101)

第一作者简介:张坤(1983—),男,贵阳人,高级经济师,主要研究方向为汽车产业管理、战略转型、汽车技术开发,E-mail: zhangkun@dlzm.com。

1 研究基础与试验方案

1.1 研究基础

采用 C-WTVC 工况、等速工况对比分析各部件能耗,C-WTVC 工况包括市区、公路、高速 3 部分路段,不同行驶工况下的能量消耗率的数值

$$\{c_i\} = \{Q_i\} / \{S_i\}, \quad (1)$$

式中: i 为工况编号, $i=1,2,3,4$,分别指 C-WTVC 工况包括市区、公路、高速路段及等速工况; $\{c_i\}$ 分别为以 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 为单位的不同工况每 100 km 能量消耗率 c_i 的数值; $\{Q_i\}$ 为以 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 为单位的不同工况试验结束后的充电机输入能量 Q_i 的数值; S_1, S_2, S_3, S_4 分别为以 km 为单位的不同工况续航里程 S_i 的数值。

C-WTVC 工况,车辆综合能量消耗率

$$c_e = c_1 k_1 + c_2 k_2 + c_3 k_3, \quad (2)$$

式中: k_1, k_2, k_3 分别为市区、公路、高速工况所占权重。

动力电池包、微控制器(micro controller unit,MCU)、电机为电动商用车主要能量部件,动力电池包为电动商用车主要能量输出源,MCU 是电机控制单元的核心组件,负责执行复杂算法、监测传感器数据、调整电机参数并与其他车辆系统通信。纯电动汽车车辆加速和匀速行驶时,电池包给电机及其他高、低压附件供电;车辆制动时,由于制动能量回收,电机作为电源供电,电能由电机流向高、低压附件及电池包。各部件输出能量的数值

$$\{E_{j0}\} = \int_a^b \{U_j\} \cdot \max(0, \{I_j\}) dt / 3\ 600\ 000, \quad (3)$$

式中: j 为主要能量部件编号, $j=1,2,3$ 分别指电池包、MCU、电机; $\{E_{j0}\}$ 分别为以 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 为单位的输出能量 E_{j0} 的数值; a 为试验开始时刻; b 为试验当前时刻; $\{U_j\}$ 为以 V 为单位的输出电压 U_j 的数值; $\{I_j\}$ 为以 A 为单位的输出电流 I_j 的数值; t 为时间,s。

各部件回收能量的数值

$$\{E_{jb}\} = \int_a^b \{U_j\} \cdot \min(0, \{I_j\}) dt / 3\ 600\ 000, \quad (4)$$

式中: $\{E_{jb}\}$ 分别为以 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 为单位的回收能量 E_{jb} 的数值。

各部件净输出能量

$$E_{ji} = E_{j0} - E_{jb},$$

式中: E_{ji} 为净输出能量,kW。

1.2 试验方案

某重型电动厢式货车若按照文献[3]进行续航里程测试,由于相关的试验数据较少,缺少样本对比数据,因此本文中按照文献[8]进行续航里程测试;参考文献[9-10],设计车辆各部件能量流测试试验方案,试验过程中监控和分析电池包、电源分配单元(power distribution unit,PDU)、电池配电单元(battery distribution unit,BDU)、MCU、电机、直流交流(direct current-alternating current,DCAC)转换器、直流电压(direct current-direct current,DCDC)转换器、正温度系数(positive temperature coefficient,PTC)热敏电阻加热器、低压蓄电池、油泵、水泵、风扇等主要零部件的工作状态,计算 C-WTVC 工况、等速工况下部件能耗。重型电动厢式货车性能参数如表 1 所示。

表 1 重型电动厢式货车性能参数

轴距/ m	空载质量/ t	标准载质量/ t	最大电机功率/ kW	最大电机转矩/ (N·m)	电机额定功率/ kW	电池额定容量/ (kW·h)	最高车速/ (km·h ⁻¹)
4.5	8	18	165	950	105	246	89

根据测试车辆系统结构安装传感器,采集时间、电压、电流、功率、温度、压力等信号,针对重型电动货

车主要耗能部件测试要求,参考企业纯电动汽车高、低压模块操作规范,设置了14个电流测试点($I_1 \sim I_{14}$)和12个电压测试点($U_1 \sim U_{12}$),按照编号顺序,电流测试点包括电池包、MCU输出、电机输出、MCU输入、DCAC输入、转向油泵输出、制动空压机泵输入、快充输出(仅限于电池包充电时)、空调压缩机输出、PTC输出、DCDC输入、DCDC输出、水泵输出、风扇输出共14个电流测点;电压测试点包括电池包输出、MCU输出、电机输出、MCU输入、DCAC输入、转向油泵(三相电)、制动空压机泵(三相电)、快充输出(仅限于充电工况)、DCDC输入、DCDC输出、水泵输入、风扇输入共12个电压测点。能量流测试点如图1所示。

为使车辆转毂滑行试验阻力与道路滑行阻力效果一致,根据道路滑行阻力曲线确定整车道路阻力因数,调整转毂滑行试验阻力曲线,模拟实际道路行驶阻力。阻力曲线如图2所示。

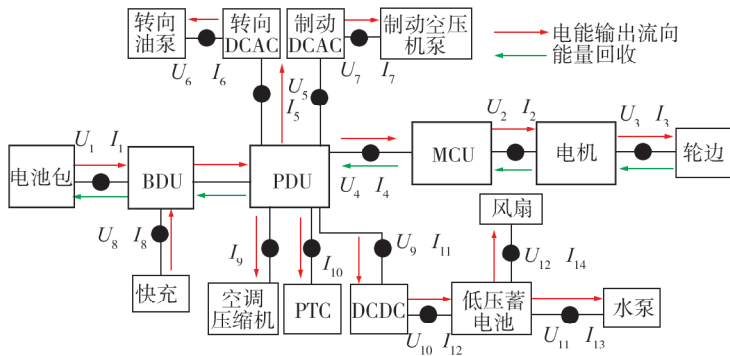


图1 能量流测试点

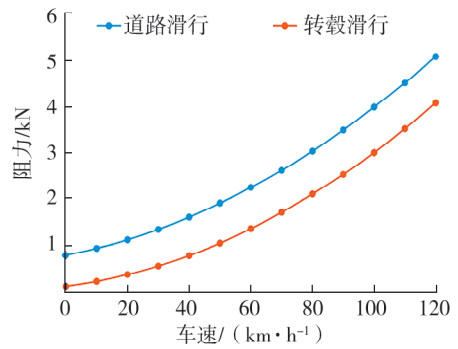


图2 阻力曲线

由于不同驾驶风格对整车各部件能耗测试结果存在明显影响^[11],本次测试选取温和型驾驶风格的驾驶员,要求油门轻踩轻收,C-WTVC工况下,车速跟随性偏差为 ± 2 km/h。在C-WTVC工况(记为 A_1 工况),等速车速分别为80、60、40 km/h的循环工况(记为 A_2 、 A_3 、 A_4 工况)下进行车辆各部件转毂台架能耗测试, A_1 工况的 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为10%、40%、50%。

能量回收策略应在车辆减速状态下实现,C-WTVC工况规定了时间与车速,无法进行复杂车速及减速变化下的能量回收策略研究,等速工况测试无能量回收,因此,能量回收数据只参考C-WTVC工况。

2 试验结果

2.1 整车能耗及能量分布特性

电池包输出能量经过PDU分为不同方向,一部分经过MCU、电机到车轮,一部分经DCDC、低压部件到水泵,还有一部分到油泵或气泵,不同工况下整车能量流如图3所示。

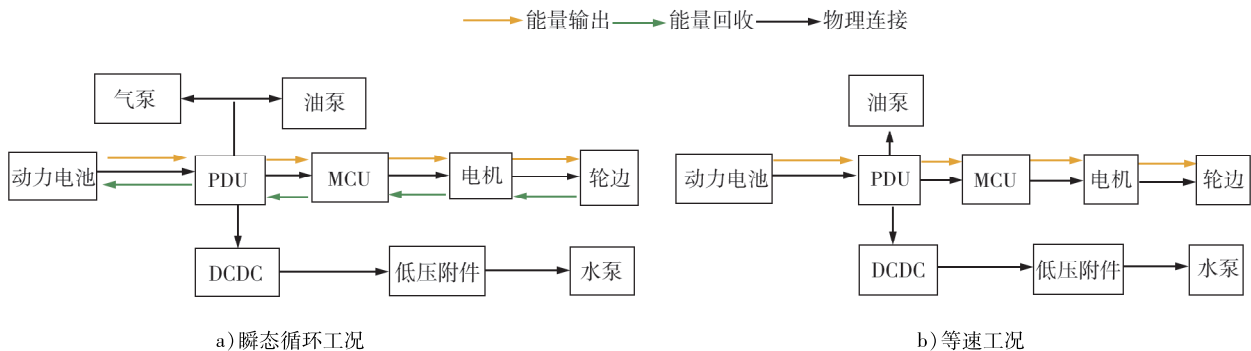


图3 重型商用车不同工况整车能量流

4种工况下电池荷电状态从99%分别下降到7%、6%、3%、5%,试验结束后按照文献[3]的规定进行充电试验,因车辆充电地点与转毂台架之间存在距离,在计算电池包净放电量时需考虑充电地点与转毂台架往返途中的耗电量。不同工况整车各部件能量试验结果如表2所示。

表2 不同工况整车各部件能量

单位: kW·h

工况	电池包输出 能量	MCU 输入 能量	MCU 输出 能量	电机输出 能量	DCDC 输入 能量	DCDC 输出 能量	气泵输入 能量
A ₁	242.55	238.27	231.31	221.95	1.76	1.52	0.88
A ₂	207.47	205.37	200.93	190.36	0.81	0.69	0
A ₃	218.39	214.82	208.81	195.00	1.41	1.20	0
A ₄	229.19	222.37	210.30	192.55	2.57	2.24	0

工况	油泵输入 能量	水泵输入 能量	低压蓄电池 输出能量	充电机输入 电量	电池包 净放电量 ^①	能量消耗率 ^②
A ₁	2.37	0.29	0.08	213.92	199.72	86.80
A ₂	1.29	0.11	0.08	225.73	208.60	95.38
A ₃	2.16	0.19	0.07	231.75	219.19	70.98
A ₄	4.25	0.40	0.18	241.54	229.20	55.49

①电池包净放电量包含台架测试电池包消耗电量、充电往返路上消耗电量2部分。②能量消耗率为100 km的能量消耗率。

由表2可知:A₁工况下电池包输出能量最大,等速工况下,电池包输出能量随车速增大而减小;不同工况下均为MCU耗能最多,A₁工况下,MCU输入能量占电池包输出能量的98.24%;油泵、水泵、气泵的能耗都相对较低,4种工况油泵平均功耗约占电池包输出能量的1.1%,气泵、水泵、低压蓄电池的平均功耗占比均不足1%;等速工况下,车辆能量消耗率随着车速降低而明显降低。计算4种工况续航里程分别为237.20、236.66、326.49、435.25 km,车辆续航里程随车速降低而升高,符合电动车车速越高能耗越高的规律。

计算A₁工况电池包、MCU、电机、电机机械回收能量分别为43.86、44.51、47.79、50.64 kW·h。MCU输出效率为MCU输出能量与MCU输入能量的比,电机输出效率为电机输出能量与MCU输出能量的比,DCDC输出效率为DCDC输出能量与DCDC输入能量的比,A₁工况MCU回收效率为MCU回收能量与电机回收能量的比,A₁工况电机回收效率为电机回收能量与电机机械回收能量的比,电池充放电效率为电池包净放电量与充电机输入电量的比。计算A₁工况MCU、电机回收效率分别为93.14%、94.37%。不同工况主要部件效率如表3所示。

表3 不同工况主要部件效率

单位:%

工况	MCU 输出效率	电机输出效率	DCDC 输出效率	电池充放电效率
A ₁	97.04	95.95	86.36	93.36
A ₂	97.83	94.74	85.19	92.41
A ₃	97.20	93.39	85.11	94.58
A ₄	94.57	91.56	87.16	94.89

由表3可知:不同工况下,各部件运行效率也有较大差别,电机输出效率在A₁工况下最大,等速工况下电机输出效率随车速增加而增大,A₁、A₂、A₃工况电机输出效率均大于93%;4种工况下DCDC输出效率均在85%以上;电池包充、放电效率为92%~95%,MCU工作效率为94%~98%。由于本车型电机最高转化效率为97%,结合驱动电机高效运转特性分析^[12-13],判断电机运行效率正常;结合同种类型车辆的

经验数据库,参考文献[14-16],本车型能量回收效率水平较优;通常DCDC转化效率为75%~94%,判断本车型DCDC工作效率较好;根据直流电充电效率大于90%的经验数据判断,本车型电池包充、放电效率较高。

各工况下电池包输出电压、电流如图4、5所示。

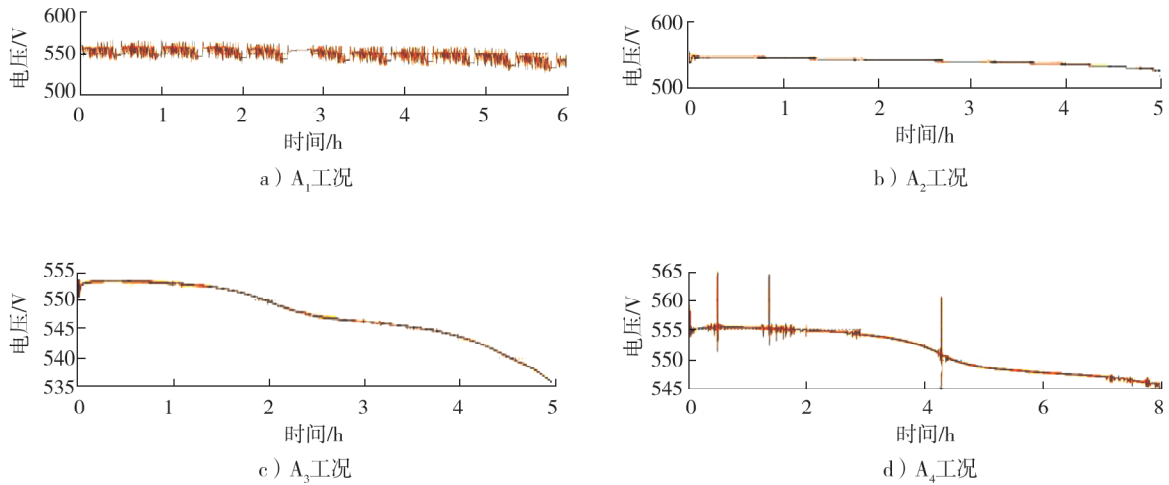


图4 各工况电池包输出电压

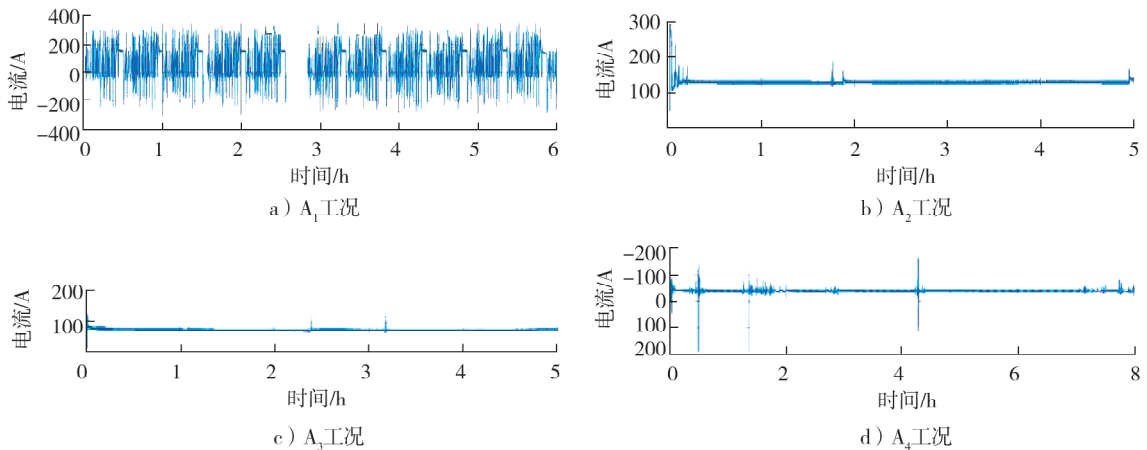


图5 各工况电池包输出电流

由图4、5可知:4种工况动力电池包输出电压为比较稳定,波动范围较小,试验结束时电压为524.50~531.48V; A_2 、 A_3 、 A_4 工况的电流输出稳定,电池包整体工作状态稳定。

2.2 关键附件工作分析

对转向油泵、气泵、PTC部件、空调压缩机、电子风扇等关键能耗附件进行能耗测试。测试转向油泵能耗时,设置转向盘正向、左半圈、左一圈、左打满、右半圈、右一圈、右打满7种状态(记为 $Z_1 \sim Z_7$),测试不同转向盘状态下对应的油泵输入功率、输出功率、工作效率;测试气泵能耗时,设置气泵压力分别为0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 MPa(记为 $L_1 \sim L_5$)时,气泵的输入功率、输出功率、工作效率;PTC加热器、空调压缩机均有打开、关闭2种状态;通过脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)控制电子风扇的开启占比,测试PWM分别为10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%及PWM为100%且空调开启的11个状态(记为 $M_1 \sim M_{11}$)时,电子风扇的平均工作功率。PTC加热器开启时,空调电压为552.9V,电流为5.6A,平均功率为3.1kW;空调压缩机开启时,空调电压为553.0V,电流为1.8A,平均功率为1.0kW。附件能耗测试结果如表4、5所示。

表4 油泵、气泵能耗测试结果

测试状态	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
输入功率/kW	0.39	0.98	2.39	4.70	2.53	3.23	3.33	3.33	4.33	4.22	3.38	4.30
输出功率/kW	0.37	0.95	2.33	4.58	2.47	3.16	3.25	3.27	4.27	4.19	3.34	4.25
工作效率/%	94.9	96.9	97.5	97.4	97.6	97.8	97.6	98.2	98.6	99.1	99.1	98.7

表5 电子风扇能耗测试

测试状态	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁
电流/A	0.032	0.810	1.470	2.700	4.500	6.500	9.900	13.700	19.300	0.007	4.400
电压/V	25.2	27.7	27.7	27.7	27.7	27.7	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6
功率/W	0.8	22.3	40.7	73.4	124.5	180.0	273.7	379.2	531.8	0.2	122.4

由表4可知:转向盘正向时的油泵功率为0.39 kW。由于同类型车辆油泵功率通常为0.2 kW,且试验在转毂台架进行,转向盘未参与实际运行,判断该车型油泵能耗较大,可从减少油泵压力,优化系统结构,减少管路阻力等对油泵进行优化。参考文献[17],结合表4、5中的结果,本车型气泵、电子风扇能耗正常。

3 结论

本文中以重型纯电动商用车为研究对象,采用转毂试验台架,对比C-WTVC、等速工况的能量流测试结果,分析车辆各部件能耗,评价系统整体工作效率并进行能耗优化。

1) 车辆整体能耗表现正常,电池包充放电效率、MCU运行效率、电机运行效率、系统能量回收效率等均处于正常范围内。

2) 该车型气泵、电子风扇能耗正常,油泵能耗较大;可采用减少油泵压力,优化系统结构,减少管路阻力等方式进行优化。

参考文献:

- [1] 朱增怀,常耀红. 纯电动汽车能量流测试方法研究[J]. 汽车测试报告,2023(6):152-154.
- [2] 全国汽车标准化技术委员会. 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.
- [3] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法:第2部分:重型商用车:GB/T 18386.2—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.
- [4] 黄伟,张桂连,周登辉,等. 基于能量流分析的纯电动汽车电耗优化研究[J]. 汽车工程,2021,43(2):171-180.
- [5] 李敏,雍安姣. 某纯电动汽车的能量流测试与分析[J]. 太原学院学报(自然科学版),2022,40(3):51-59.
- [6] 冯仁华,陈昆阳,赵智超,等. 混合动力商用车能量流测试[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(2):77-85.
- [7] JUNG D, YONG J, CHOI H, et al. Analysis of engine temperature and energy flow in diesel engine using engine thermal management[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(2):583-592.
- [8] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法:GB/T 18386—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [9] 石玉玮,段龙杨,黄炯,等. 纯电动车整车能量流测试[J]. 汽车实用技术,2019(7):24-25.
- [10] 于凤珠. 纯电动汽车能量流向及降能耗措施分析[J]. 汽车实用技术,2023,48(3):20-27.
- [11] 赵佳伟,胡明辉,荣正璧,等. 驾驶风格对纯电动汽车能耗的影响[J]. 重庆大学学报,2021,44(12):103-115.
- [12] 暴杰,许重斌. 电动汽车用超高效率电机驱动系统关键技术研究[J]. 汽车工艺与材料,2023(2):63-71.

- [13] 沈海燕. 纯电动客车电机效率对整车能耗的影响[J]. 上海汽车, 2021(1):12-16.
- [14] 徐金波. 纯电动汽车驱动控制策略与能量管理策略分析[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [15] 米祥林. 纯电动商用车制动能量回收控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学, 2022.
- [16] 季孟渊, 左印波, 焦治国. 基于汽车能量流理论的纯电动汽车行驶工况能耗极值分析[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(23):19-25.
- [17] 孙龙, 李涛, 杜宪. 电动汽车不同测试工况下的经济性差异分析[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2024, 53(1):62-67.

Energy flow analysis of a heavy-duty pure electric commercial vehicle

ZHANG Kun, LI Qi, ZHANG Youyuan

Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd., Liuzhou 545000, China

Abstract: To improve the operational efficiency of components in a heavy-duty pure electric commercial vehicle and reduce energy consumption, energy flow tests are conducted on a hub dynamometer under four steady-state conditions at speeds of 80, 60, and 40 km/h. The results indicate that the battery charge and discharge efficiency ranges from 92% to 95%, demonstrating stable and high efficiency. The microcontroller operates at an efficiency of 94% to 98%, while the motor output efficiency is between 91% and 96%, with a motor energy recovery efficiency of approximately 94.37%, indicating normal motor operation. The conversion efficiency of the DC voltage converter is above 85%, which is at a high level. The energy consumption of the oil pump in a stationary state is relatively high at 0.39 kW, while the energy consumption of other accessories is normal. Optimization measures for the oil pump include reducing pump pressure, optimizing system structure, and minimizing pipe resistance.

Keywords: pure electric commercial vehicle; energy flow; energy consumption optimization

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第 63 页)

using GT-Power software to analyze the effect of exhaust pipe arrangements on exhaust interference, and optimization and experimental verification are carried out. The results show that the layout and firing sequence of the exhaust pipes are the main factors of exhaust interference, and uneven sweeping of each cylinder is the direct cause of exhaust interference. The arrangement of exhaust pipes with a 4-row pipe structure, dual turbocharger channels, and a single channel exhaust interval with a crankshaft angle of 180° will result in higher exhaust pressure than intake pressure under low load conditions, resulting in uniform exhaust interference for each cylinder. At 25% rated load, the excess air coefficient abnormally decreases. After delaying the opening angle of the exhaust valve crankshaft from 120° to 140° , the excess air coefficient increases from 1.82 to 2.15, and the low-speed performance is significantly improved.

Keywords: pulse pressure charging; diesel engine; exhaust pipe; exhaust interference; GT-Power

(责任编辑:臧发业)