

基于智能控制的重卡 48 V 微混系统能效分析

孙云祥,王斌*,李颖,张忠珍,闫富煦

中国重型汽车集团有限公司,山东 济南 250000

摘要:为提高车辆能量利用率,满足重卡用户用电的多样化需求,基于某牵引车搭建 48 V 微混系统,分析 48 V 微混系统电机辅助驱动策略及制动能量回收控制策略,采用中国半挂牵引车列车行驶工况(China heavy-duty commercial vehicle test cycle for tractor-trailer,CHTC-TT)进行转毂测试,分析车辆在纯柴油、微混两种状态下的工作特性。结果表明:车辆在微混状态进行 CHTC-TT 测试时,电机在辅助驱动模式下驱动效率为 89.0%,百公里助力电能为 2.477 kW·h;制动能量回收模式下发电效率为 79.5%,百公里回收电能为 2.924 kW·h;相同循环工况下,与纯柴油状态相比,微混状态下发动机平均转速降低 117 r/min,整车平均负载增加 0.25%,百公里燃油消耗降低 4.17%。48 V 微混系统能有效回收电能以辅助发动机驱动及整车用电,改善发动机运行工况。

关键词:48 V 微混;制动能量回收;辅助驱动;重卡

中图分类号:U462

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0051-07

引用格式:孙云祥,王斌,李颖,等.基于智能控制的重卡 48 V 微混系统能效分析[J].内燃机与动力装置,2025,42(4):51-57.

SUN Yunxiang, WANG Bin, LI Ying, et al. Energy efficiency analysis of 48 V micro-hybrid system for a heavy-duty truck based on intelligent control[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(4): 51-57.

0 引言

随着重型商用车市场需求的增加及全球车辆节能法规、技术标准的日益严格,采用节能减排技术提高重型货车能源利用效率已成为一个重要研究方向^[1-3]。与乘用车相比,重型商用车具有运行距离长、运载载荷高和用户用电需求多样化的特点,对整车运营成本和使用体验提出了严峻挑战^[4]。

目前传统重型商用车的整车用电由 24 V 发电机和 24 V 蓄电池提供,由于 24 V 蓄电池容量仅为 2.5 kW·h,难以满足长时间高功率设备的需求,尤其在驻车工况下使用空调等负载设备时,会导致油耗增加、噪声增大,降低了用户用车体验。在传统动力系统上改进的 48 V 微混系统,采用额定电压为 48 V 的锂电池作为主电源,保留 24 V 蓄电池为辅助电源,将传统的车辆发电机升级为 48 V 皮带驱动起动机一体机电机(belt driven starter generator,BSG),不仅提高系统适配性,还可实现辅助驱动和制动能量回收功能,可广泛应用于重型商用车节能^[5];48 V 微混系统通过将机械式空调压缩机更换为 48 V 电动压缩机,有效减少发动机附件能耗,降低油耗和运输成本,提高能量利用率^[6-7]。对比其它混动系统,作为辅助系统的 48 V 微混系统不仅保持传统车辆基本功能,而且实现了能量管理系统优化升级,该系统主要有三大优势:1)结构简单,可适配传统车辆动力系统;2)通过对电机的智能控制,可实现制动能量回收、辅助发动机驱动等功能;3)提高整车可靠性,即使该系统发生故障,车辆仍可短时间运行^[8-10]。

本文中以某重型商用车为研究对象,搭建 48 V 微混整车架构,重点分析电机辅助驱动策略和制动能

收稿日期:2025-04-15

第一作者简介:孙云祥(1997—),男,昆明人,工学硕士,主要研究方向为新能源汽车,E-mail:sunyunxiang@sinotruk.com。

* 通信作者简介:王斌(1990—),男,山西右玉人,工学博士,高级工程师,主要研究方向为新能源汽车,E-mail:wangbin1@sinotruk.com。

量回收控制策略,在中国半挂牵引车列车行驶工况 (China heavy-duty commercial vehicle test cycle for tractor-trailer,CHTC-TT) 下进行转毂试验,分析电池、电机的工作状态,验证 48 V 微混系统的功效及节能效果。

1 48 V 微混整车架构

本文中以某半挂牵引车为研究对象,基于该车的传统动力系统进行 48 V 微混系统改制,构建整车架构拓扑图如图 1 所示。

48 V 微混系统主要改进技术为:1)采用 48 V BSG 永磁同步电机代替传统 24 V 发电机,该电机通过皮带与发动机机械连接,可实现制动能量回收发电及辅助发动机运行;2)将机械式空调压缩机更换为电动空调压缩机,将空调压缩机所需功率来源由传统的发动机改为电机制动回收能量,不仅减少了发动机附件消耗功,还减少了驻车工况下的振动和噪声,提高了整车的经济性和动力性,改善了噪声、振动与声振粗糙度 (noise vibration harshness,NVH) 性能,提高了用户舒适性;3)增加额定电压为 48 V、额定容量为 100 A·h 的锂电池,保留 24 V 铅酸蓄电池,48 V 锂电池为 BSG 电机和空调压缩机供电,同时通过直流/交流逆变器 (DC/AC 逆变器) 将 48 V 直流电转变为保障生活用电需求的 220 V 交流电,通过直流/直流转换器 (DC/DC 转换器) 将 48 V 直流电转变为 24 V 直流电为整车提供低压电力。牵引车主要参数如表 1 所示。

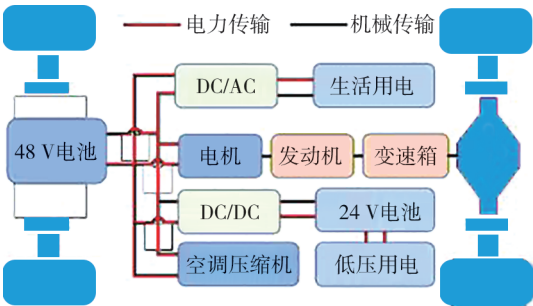


图 1 48 V 微混系统整车架构拓扑图

表 1 牵引车主要参数

发动机			电机			整车				
怠速转速/ (r·min ⁻¹)	额定功率/ kW	额定转速/ (r·min ⁻¹)	工作电压/ V	额定功率/ kW	峰值转速/ (r·min ⁻¹)	整备质量/ kg	轴距/ mm	准牵引总 质量/kg	轮胎规格	最高车速/ (km·h ⁻¹)
550	400	1 800	36~60	5	18 000	6 800	3 900	35 000	12R22.518PR	89
48V 电池						变速箱				
额定功率/ kW	峰值转速/ (r·min ⁻¹)	结构形式	正极材质	额定 电压/V	总储电量/ (kW·h)	电池容量/ (A·h)	型式	前进挡数		
5	18 000	1P16S	磷酸铁锂	48	5.04	105	AMT	16		

2 48 V 系统控制策略

48 V 微混系统的 BSG 电机有辅助驱动、制动能量回收和空转 3 种模式,根据车辆不同运行状态及相关参数进行智能控制^[11]。电机进行辅助驱动时,所需电能来自于电机制动能量回收,通过皮带给发动机施加正向转矩,辅助提供发动机所需动力;电机进行制动能量回收时,可作为发电机使用,通过皮带给发动机施加反向转矩,辅助车辆制动,实现能量回收;电机退出制动能量回收和辅助驱动模式后进入空转模式,不同模式需结合车辆运行工况及相应的控制策略实现。

2.1 电机辅助驱动策略

电机辅助驱动即电机辅助发动机做功,可有效改善发动机运行工况,提高能量利用率,降低整车能耗。该控制策略通过多参数协同判断,确保在最佳工况区间激活电机助力,提高能量利用效率。电机辅助驱动模式有电机助力打开、助力关闭 2 种运行方式。电机运行方式与油门踏板信号 L_k 、以 r/min 为单位的发动机转速的数值 n_f 、电池荷电状态 (state of charge, SOC) Q_s 和换挡状态 D_s 有关,当离合器断开或

变速箱空挡时, $D_s = 1$, 否则 $D_s = 0$ 。

当车辆启动时, 采集 L_k 、 n_f 、 Q_s 、 D_s , 并与踏板信号限值 L_1 、以 r/min 为单位的发动机最大转速的数值 n_m 、以 r/min 为单位的发动机最小转速的数值 n_l 、SOC 最大限值 $Q_{s,1}$ 进行对比, 确定是否开启电机助力运行。当 $L_k > L_1$ 、 $Q_s > Q_{s,1}$ 、 $D_s = 0$ 、 $n_l < n_f < n_m$ 时, 电机助力打开, 否则电机助力关闭; 当电机助力打开且 $D_s = 0$, 若 $n_l - n_f \geq 50$ 或 $n_f - n_m \geq 50$ 或 $L_1 - L_k \geq 5\%$ 或 $Q_s < Q_{s,1}$ 时, 电机助力关闭, 否则保持当前状态; 当电机助力打开且 $D_s = 1$ 时, 电机助力关闭; 车辆熄火后, 助力关闭。

2.2 电机制动能量回收控制策略

传统牵引车采用机械制动, 车辆进入制动状态时, 制动控制器控制制动器制动, 将整车制动能量转化为机械能和热能, 无法进行能量回收利用, 同时由于制动器摩擦做功, 造成制动器磨损和发热, 减少制动器寿命。采用48 V微混系统BSG电机进行整车制动能量回收, 可提高车辆能量效率, 减少机械制动器工作, 延长制动器寿命。

电机制动能量回收运行方式与车辆运行状态(车速、油门踏板信号)、变速箱状态、离合器状态、48 V锂电池SOC、最小制动车速 v_m 相关。当车辆启动时, 采集 L_k 、 Q_s 、 D_s 、 v_m 、实时车速 v_c , 电机能量回收关闭; 当 $L_k = 0$ 、 $D_s = 0$ 、 $Q_s < Q_{s,1}$ 、 $v_c > v_m$ 时, 电机能量回收打开, 否则电机能量回收关闭; 当电机为能量回收打开且 $D_s = 1$ 时, 电机能量回收关闭; 当电机为能量回收打开且 $D_s = 0$ 或 $L_k > 0$ 或 $Q_s - Q_{s,1} \geq 5\%$ 或 $v_c < v_m$, 电机能量回收关闭, 否则保持原状态; 当车辆熄火时, 电机能量回收关闭。电机辅助驱动策略及电机制动能量回收控制策略分别如图2、3所示。

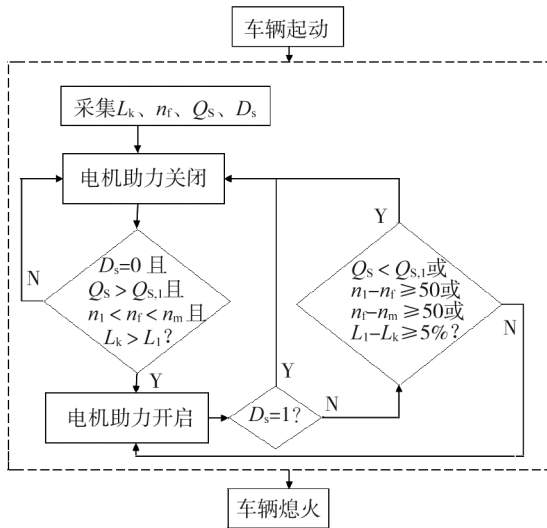


图2 电机辅助驱动策略

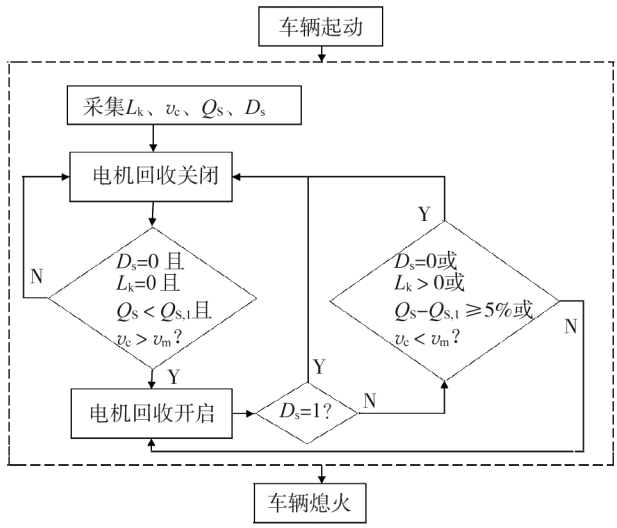


图3 电机制动能量回收控制策略

3 48 V 微混系统试验分析

3.1 CHTC-TT 工况循环

为了更贴近真实驾驶工况, 采用CHTC-TT工况进行整车转毂试验, CHTC-TT循环工况如图4所示。按照文献[12]规定, 试验过程中, 人工调整挡位使车辆实际状态尽量与循环工况一致, 车速偏差应尽量不要超过 ± 3 km/h, 当超过速度偏差时, 超出时间不大于2 s, 累计超出时间不应大于10 s。根据道路滑行阻力曲线确定整车道路阻力因数, 结合转毂试验, 调整转毂阻力曲线, 使转毂模拟整车阻力与实际道路行驶阻力一致, 转毂模拟整车阻力特性曲线如图5所示。

为了对比车辆在纯柴油、微混两种状态下的能耗差异, 改制的试验车辆可实现纯柴油、微混两种状态的切换, 结合CHTC-TT循环工况进行多次测试循环, 随机选取一组满足测试要求的测试循环进行对比分析。两种状态下的车速测试结果如图6所示。

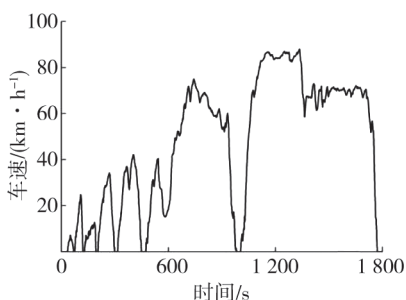


图4 CHTC-TT 循环工况

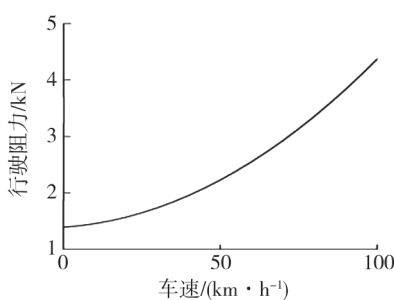


图5 整车阻力特性曲线

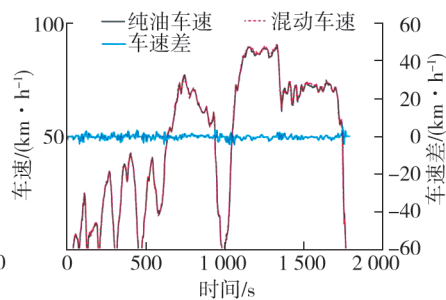


图6 不同状态车速测试对比

由图6可知:两种测试状态下车速曲线几乎一致,车速差(纯柴油状态平均车速与微混状态平均车速的差)为0.72 km/h,满足测试要求,该测试方法数据有效。

3.2 电池工作状态分析

从电池电流、电压、SOC 分析电池工作状态,纯柴油、微混两种测试状态下的电池工作状态如图7所示。

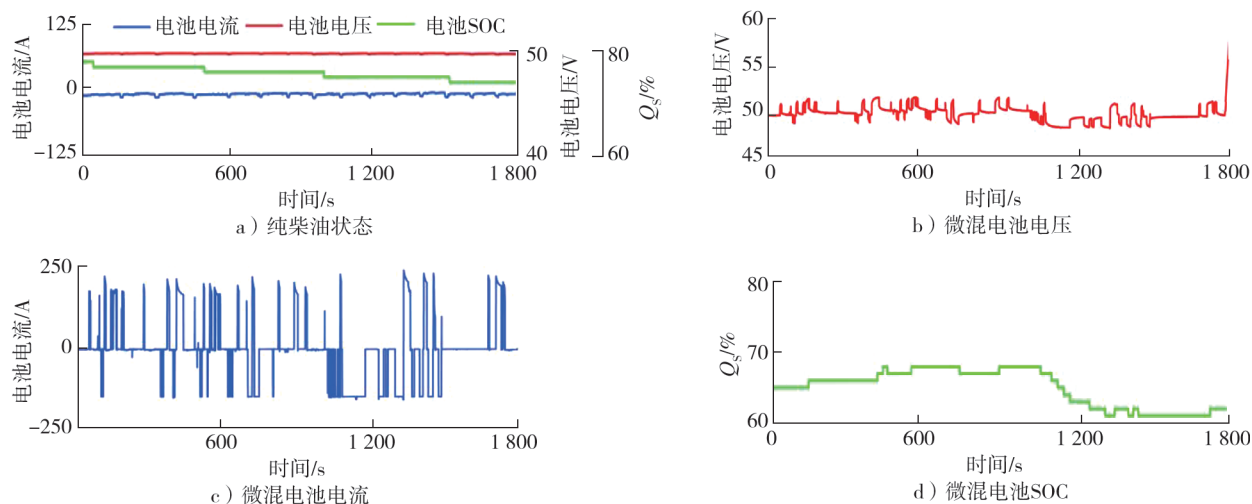


图7 两种测试状态下的电池工作状态

由图7a)可知:纯柴油状态下,整个循环工况电池电流、电压、SOC 均比较稳定,没有明显变化。由图7b)~d)可知:微混状态下,电机为辅助驱动模式时,电机作为驱动单元工作,48 V 电池向电机供电(此时电池电流为负),最大输出电流为-162.4 A,计算电池最大功率为7.84 kW;当电机为能量回收模式时,电机作为发电机向48 V 电池充电(电池电流为正),最大充电电流为240 A,计算电池最大功率为12.06 kW;整个循环工况电机工作正常,根据车辆不同行驶工况实现辅助驱动模式、能量回收模式的切换;整个测试循环,电池SOC 从65%降到62%,计算整个循环工况平均电压为49.63 V,平均电流为-6.42 A,平均功率为-0.256 kW。

3.3 电机工作状态分析

纯柴油、微混两种测试状态下的电机工作状态如图8所示。

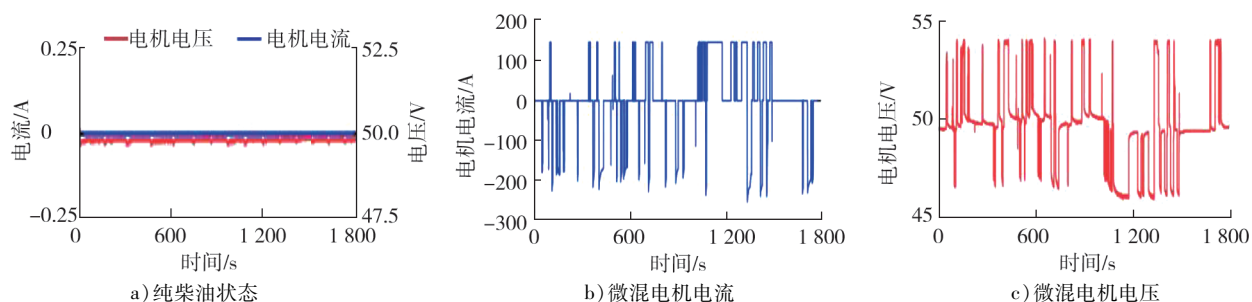


图8 两种测试状态下的电机工作状态

由图 8a)可知:纯柴油状态下,整个循环工况电机电流为 0,平均电压为 49.8 V,电机为空转模式。由图 8b)、c)可知:微混测试状态下,电机进入辅助驱动模式时,电机电压降低,电流为正,最大电流为 149 A,计算电机最大功率为 7.01 kW;电机进入制动能量回收模式时,电机电压升高,电流为负,最大电流为-257 A,计算电机最大功率为 13.89 kW;整个循环工况,电机可根据车辆运行状态,结合控制策略进入辅助驱动模式或制动能量回收模式。

电机为发动机辅助驱动模式时对应的电压、电流、转矩和转速特性如图 9 所示。

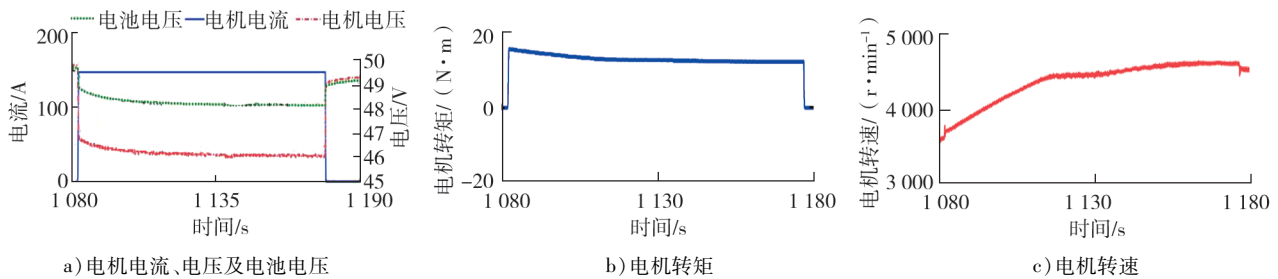


图9 发动机助力模式时电机的相关特性

由图 9 可知:整个循环工况中,第 1 082.2—1 176.6 秒电机为发动机助力模式,该阶段电机驱动电流最大且稳定在 148 A,电机电压和电池电压均缓慢降低,电机转速略增大,电机驱动初始转矩由 15.9 N·m 缓慢降低至 12.5 N·m,计算电机驱动功率由 6.937 5 kW 降低至 6.817 2 kW,电机驱动能力受限于电机最大驱动电流(最大电流为 148 A);经过 1 176.6 s 系统退出发动机辅助模式。

电机为制动能量回收模式时对应的电机电压、电流、转矩和转速特性如图 10 所示。

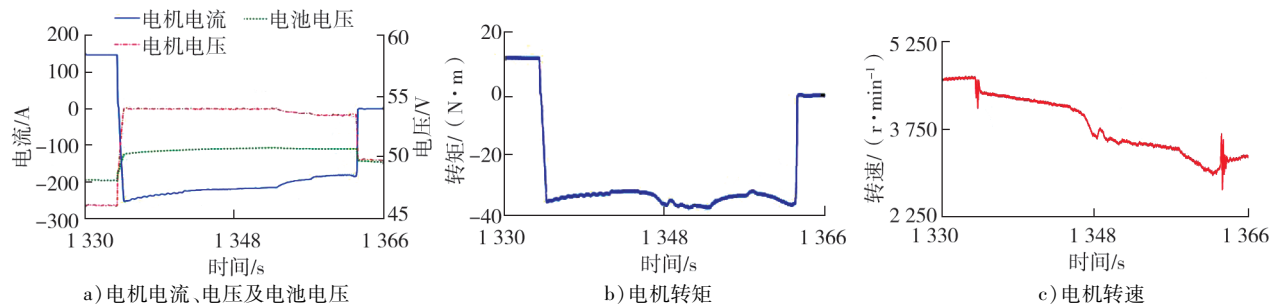


图10 发动机制动能量回收模式时电机的相关特性

由图 10 可知:电机制动能量回收过程主要分为 3 个阶段。1)前 1 334.5 s,电机电压升高至电机允许的上限电压(54 V),低于电机设计允许的最高电压(60 V),电机进入电压饱和状态,电机转矩不再随制动需求增加,电机发电转矩为 35.76 N·m。2)第 1 334.5—1 352.2 秒,电机电压几乎稳定,波动较小,电机电压到达上限 54 V;随电池电压缓慢升高,电机与电池的电压差减小,充电电流从 253.7 A 线性下降至 217.0 A,计算电机回收功率大约从 13.70 kW 降低至 11.72 kW,电机发电状态受限于电机允许工作电压。3)第 1 352.2—1 361.8 秒,电池电压缓慢下降并趋于稳定,电机电压从 54.0 V 缓慢降低至 53.5 V,电机转速呈下降趋势,电机充电电流从 217.0 A 缓慢减小至 186.0 A,计算电机回收功率从 11.72 kW 减少至 9.95 kW,经过 1 361.8 s 系统退出制动能量回收模式。

微混模式下,整个循环工况电机辅助驱动模式助力电能与制动能量回收模式产生电能及两种模式下对应的百公里电能、机械能、发电效率对比如表 2 所示。

表2 微混状态下,电机不同模式各参数对比

模式	单循环电能/(kW·h)	百公里电能/(kW·h)	机械能/(kW·h)	发电效率/%
辅助驱动	0.577	2.477	0.514	89.0
制动能量回收	0.681	2.924	0.857	79.5

3.4 发动机测试结果分析

该重型商用车搭载的发动机万有特性及不同状态下发动机工况对比如图 11 所示,图 11a)中数据为以 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 为单位的发动机燃油消耗率的数值,图 11b)中圆圈面积越大说明发动机在该工况点的运行占比越高。

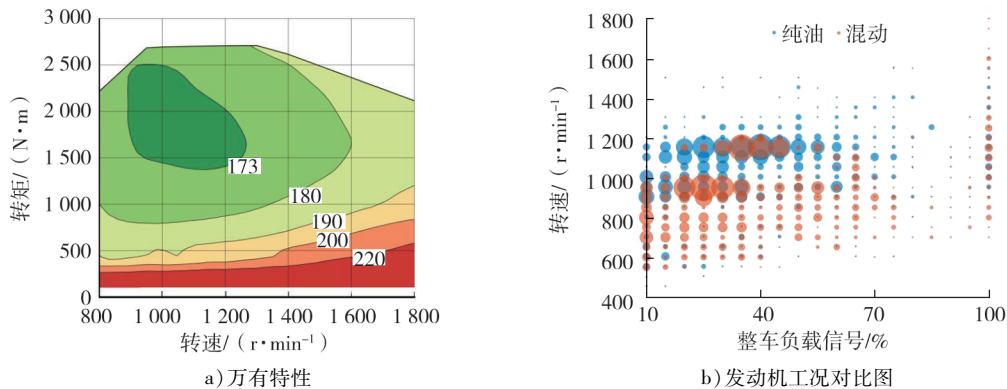


图 11 发动机万有特性及不同状态下发动机工况对比

通常转速越小、转矩越大,燃油经济性越好。由图 11a)可知:转速为 $900\sim 1\,250\text{ r}/\text{min}$,转矩为 $1\,400\sim 2\,500\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,燃油消耗率最佳。由图 11b)可知:基于 CHTC-TT 工况,车辆在纯柴油、微混两种测试状态下,发动机转速主要为 $900\sim 1\,200\text{ r}/\text{min}$,整车负载主要为 $10\%\sim 60\%$ 。两种测试状态下,发动机及车辆相关参数统计对比如表 3 所示。

表 3 两种测试状态下发动机及车辆相关参数对比

测试状态	最大转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	最小转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	平均转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	平均负载/%	百公里油耗/L
微混	1 848.5	454.0	847.2	25.93	29.599
纯柴油	1 938.5	458.5	964.2	25.68	30.888

由表 3 可知:相同循环工况下,对比两种测试状态,微混状态下发动机平均转速降低 $117\text{ r}/\text{min}$,整车平均负载增加 0.25% ,有助于发动机运行在经济性较好的工况。

4 结论

本文中分析了重卡 48V 微混系统在纯柴油和微混 2 种状态下 48 V 电池、电机及整车的性能,结论如下。

1)48 V 微混系统以额定电压为 48 V 的蓄电池作为主电源,保留 24 V 蓄电池为辅助电源,选用额定电压为 48 V 的 BSG 电机安装在发动机前端,并将机械式空调压缩机更换为 48 V 电动压缩机,该系统控制方式便捷,改制方便,对车辆可靠性影响较小,可减少发动机附件的功率消耗,实现发动机助力和制动能量回收。

2)重卡 48V 微混系统在 CHTC-TT 工况循环测试时,纯柴油状态对能量回收影响较小;微混状态下,电机助力模式下驱动效率为 89.0% ,最大功率为 7.01 kW ,能为发动机在驱动过程中提供助力;制动能量回收模式下发电效率为 79.5% ,最大功率为 13.89 kW ,能有效回收制动过程能量,为整车低压和高压用电提供能量来源。

3)电机辅助驱动模式下,助力能力受限于电机最大驱动电流;电机制动能量回收模式下,发电能力受限于电机最大电压。

4)重卡 48V 微混系统在 CHTC-TT 工况循环测试时,微混状态发动机平均转速为 $847.2\text{ r}/\text{min}$,平均

负载为 25.93%,百公里燃油消耗为 29.599 L;纯柴油状态发动机转速为 964.2 r/min,平均负载为 25.68%,百公里燃油消耗为 30.888 L;重卡 48 V 微混系统微混模式可显著提高发动机动力,降低油耗,有效减小重卡运输成本。

参考文献:

- [1] 张佩,吴先攀,徐宏明,等.基于动态规划的混合动力重型货车能量管理策略研究[J].机械传动,2020,44(11):7-13.
- [2] 黄德军,田茂军,彭航,等.基于行驶特征区间划分的重型载货汽车实际道路能耗评价方法[J].汽车工程学报,2024,14(3):544-552.
- [3] 李兴坤,王国晖,卢紫旺,等.基于IDP的重型商用车自适应距离域预见性巡航控制策略[J].汽车工程,2024,46(8):1346-1356.
- [4] 杜常清,陈磊,杨贤诚,等.混合动力重卡自适应等效燃油消耗最小化能量管理策略[J].内燃机工程,2023,44(1):1-8.
- [5] 张应兵,靳素华,黄伟,等.48 V混动控制系统仿真与试验[J].汽车安全与节能学报,2018,9(4):463-468.
- [6] 李敏,雍安姣,李琤.48 V轻混汽车的燃油经济性优化分析及验证[J].内燃机工程,2023,44(2):92-99.
- [7] 杨建军,高继东,刘双喜,等.基于48 V系统的能量管理应用效能分析[J].车用发动机,2020(2):71-76.
- [8] 程吉鹏,陈丁跃,姜良超.48 V ISG微混动力系统车辆整车控制策略研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(12):14-20.
- [9] 王震,哈迪,张威威,等.48 V微混系统降低油耗策略分析[J].汽车技术,2017(2):1-4.
- [10] 王建勋,辛海霞,方立辉,等.48 V BSG混合动力系统控制策略研究[J].汽车实用技术,2020,45(17):73-76.
- [11] 陆绍梯,李彤,赵健福,等.重型汽车空调能耗影响因素试验研究[J].汽车实用技术,2024,49(2):102-109.
- [12] 全国汽车标准化技术委员会.重型商用车燃料消耗量测量方法:GB/T 27840—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.

Energy efficiency analysis of 48 V micro-hybrid system for a heavy-duty truck based on intelligent control

SUN Yunxiang, WANG Bin*, LI Ying, ZHANG Zhongzhen, YAN Fuxu

China Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250000, China

Abstract: To improve the vehicle energy utilization rate and meet the diversified electricity needs of heavy-duty truck user, a 48 V mild hybrid system is built based on a tractor. The control strategy of the motor assistance and the braking energy recovery control strategy of the 48 V mild system are analyzed. The China heavy-duty commercial vehicle test cycle for tractor-trailer (CHTC-TT) is used for the dynamometer test, and the working characteristics of the vehicle under the state of pure diesel and mild hybrid are analyzed. The results show that when the vehicle is tested with CHTC-TT in mild hybrid state, the driving efficiency of the motor in assistance mode is 89.0%, and the energy consumption of the motor assistance per hundred kilometers is 2.477 kW·h. The power generation efficiency in the braking energy recovery mode is 79.5%, and the energy recovery per hundred kilometers is 2.924 kW·h. Under the same condition, compared with the pure diesel state, the average engine speed decreased by 117 r/min, the average load of the whole increased by 0.25%, and the fuel consumption rate per hundred kilometers decreased by 4.17% in the mild hybrid state. The 48 V hybrid system can effectively recycle electric energy to assist the engine drive and the electricity consumption of the whole vehicle, and improve the engine operation condition.

Keywords: 48 V micro-hybrid; braking energy recovery; auxiliary drive; heavy-duty truck

(责任编辑:胡晓燕)