

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.01.002

增程式混合动力洗扫车控制与仿真分析

钟勇, 林宁, 魏忠彬

(福建工程学院 福建省汽车电子与电驱动重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 针对目前国内传统双发动机洗扫车在作业工况下带来的高排放、高油耗、高噪音问题,以现有的洗扫车为原型,采用增程式混合动力系统结构,实现驱动系统与上装作业系统完全解耦,对动力系统主要部件的参数进行选型。通过 AVL-Cruise 软件对增程式混合动力洗扫车与传统双发动机洗扫车进行参照对比,在 Matlab/Simulink 平台搭建功率跟随控制策略进行联合仿真。仿真结果表明:APU 能在电池 SOC 下降到设定的最低值开启,APU 在设定的 SOC 上限值关闭,保证车辆的续航,使电池 SOC 维持在一定区间内,防止电池过充过放,延长电池寿命。在能耗方面,通过与传统双发动机洗扫车对比,增程式混合动力洗扫车在市区转场工况下节油 51.5%,作业工况下节油 22.2%,验证了混合动力洗扫车的燃油经济性。

关键词: 增程式;混合动力洗扫车;功率跟随;联合仿真

中图分类号: U48

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)01-0007-05

Control and simulation analysis of extended-range hybrid sweeper truck

ZHONG Yong, LIN Ning, WEI Zhongbin

(Fujian Key Laboratory of Automotive Electrics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming at the problems of high emissions, high fuel consumption and high noise caused by the current traditional domestic dual-engine sweeper truck under operating conditions, the existing sweeper truck were used as the prototype and the extended-range hybrid power system structure was adopted to realize the complete decoupling of the driving system and the loading operation system. The parameters of the main components of the power system were selected. The extended-range hybrid sweeper truck was built by AVL-Cruise software and compared with the traditional dual-engine sweeper truck vehicle. A power following control strategy was built on the Matlab/Simulink platform for joint simulation. Simulation results show that the APU can be turned on when the battery SOC drops to the set minimum value, and the APU can be turned off at the set SOC upper limit to ensure the endurance of the vehicle, so as keep the battery SOC within a certain range, and prevent the battery from overcharging, thereby extending battery life. In terms of energy consumption, compared with the traditional dual-engine sweeper truck, the extended-range hybrid sweeper truck can save fuel by 51.5% under urban transition conditions and 22.2% under operating conditions. Such results verified the fuel economy of the hybrid sweeper.

Keywords: extended-range; hybrid sweeper truck; power following strategy; joint simulation

国内洗扫车的动力系统一般采用双发动机形式。在作业工况下,由于车辆低速行驶,主发动机

无法工作在高效区域,容易产生尾气排放与噪音,对环境有一定污染。

收稿日期: 2020-12-03

第一作者简介: 钟勇(1968—),男,湖南双峰人,教授,博士,研究方向:新能源汽车技术、汽车检测技术、汽车优化设计等。

目前国内对专用车领域特别是洗扫车,研究主要集中于纯电动驱动,但为了保证续航和大功率作业需要配备大容量电池,从而使车辆重量增加,导致能量的有效利用率降低。对此,一些高校和企业对洗扫车的发展趋势进行分析^[1],甚至也开始关注太阳能技术的使用^[2-3],根据现有的技术,文献[4]采用增程式混合动力,上装洗扫装置通过分动器与发动机耦合,但在进行作业时控制较为复杂。文献[5]提出混联的动力系统,在结构和控制方面也更为复杂。本文以某一款洗扫车为原型,根据工况需求对其主要参数进行匹配,运用 AVL-Cruise 软件同时建立增程式混合动力洗扫车和传统双发动机洗扫车模型,在 Matlab/Simulink 平台建立功率跟随控制策略,通过仿真进行对比,增程式混合动力洗扫车比传统洗扫车具有更好的燃油经济性,仿真达到预期效果。

1 增程式混合动力系统结构及参数匹配

1.1 系统结构

洗扫车的作业工况多是低速行驶,增程式系统布局不需要携带大容量的电池就能满足洗扫车作业时风机、水泵和油泵的功率需求,还能保证车辆低排放的环保要求。结合当前技术^[6-7],本文提出的增程式混合动力系统结构如图 1 所示,车辆作业或者行驶过程中电池给电机提供电能,当出现电池电量过低时,电池给 ISG 电机提供电能带动发动机启动,保证发动机处于高效低排放工况,发动机再带动 ISG 电机发电,给电池充电,电池继续提供电能给行驶与作业系统电机,动力实现完全解耦。

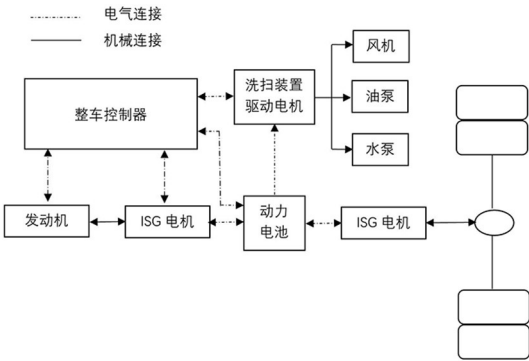


图 1 增程式混合动力系统结构

Fig.1 Range-extended hybrid power system structure

增程式混合动力洗扫车以现售某款洗扫车为原型设计,采用后轮驱动布局,车辆主要参数如表 1 所示。

表 1 车辆主要参数

Tab.1 Main parameters of the vehicle

| 参数 | 数值 |
|------------------|---------------------|
| 长×宽×高/mm ×mm ×mm | 8 820 ×2 500 ×3 050 |
| 前悬,后悬/mm | 1 565,2 255 |
| 轴距/mm | 5 000 |
| 总质量/kg | 18 000 |
| 整备质量/kg | 11 320 |
| 主减速比 | 6.14 |
| 车轮半径/mm | 506 |

1.2 驱动电机选型

汽车行驶过程中主要受到滚动、空气、坡度以及加速阻力,车辆正常行驶,匹配的驱动电机功率应满足如下方程:

$$P = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgf \cos \alpha}{3\,600} v_a + \frac{C_D A}{76\,140} v_a^3 + \frac{mg \sin \alpha}{3\,600} v_a + \frac{\delta n v_a}{3\,600} \frac{dv}{dt} \right) \quad (1)$$

式中: η_T 为机械效率; m 为汽车总重量(kg); g 为重力加速度(N/kg); f 为滚动系数; α 为道路坡度; v_a 为车速(km/h); C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积(m^2); δ 为旋转质量换算系数; dv/dt 为加速度(m/s^2)。

车辆最高速度与驱动电机所能提供的最高转速满足:

$$u_{\max} = \frac{0.377 n_{\max} r}{i_0} \quad (2)$$

式中: u_{\max} 为最高车速(km/h); n_{\max} 为驱动电机的最高转速(r/min); r 为车轮半径(mm); i_0 为主减速器比。

增程式洗扫车主要在市区行驶,最高车速设置 80 km/h,由于目前国际标准尚未对专用车辆的最大爬坡度有明确要求,根据(GB50180—93)《城市居住区规划设计规范》规定:机动车道道路纵坡度控制指标应小于 8%,本文选取设计目标最大爬坡度为 10%,车辆在此坡度上以 10 km/h 匀速行驶。

当车辆以 80 km/h 的最高时速行驶时,电机输出功率为 127.8 kW,所以选取电机额定功率为 150 kW、峰值功率为 200 kW 的异步电动机,最大转速为 3 500 r/min,额定转速为 800 r/min。

1.3 辅助动力单元的选型

辅助动力单元(APU)是指发动机和发电机组,发动机不直接参与车辆的驱动,主要用于发电,当电池的荷电状态过低时,整车控制器就会发送指令开启 APU 为电池供电。由于洗扫车主要是在市区作业以及转场,所以辅助动力单元的输出功率既要满足市区转场时的车速行驶,也要满足市区作业时的动力和洗扫装置,还要考虑空调、冷却系统、转向电机等电气装置。由此得到辅助动力单元输出功率满足式(1)及式(3)。

$$P_{APU} = P_{MW} + P_{sweep} + P_{HVC} \quad (3)$$

式中, P_{APU} 为 APU 的输出功率(kW); P_{MW} 为行驶驱动电机在作业工况下的输出功率(kW); P_{sweep} 为洗扫装置驱动电机功率(kW); P_{HVC} 为空调、冷却系统、转向电机等附件的功率(kW)。

洗扫车的转场工况参考中国重型商用车的市区工况,作业工况下行驶车速不超过 20 km/h,结合式(1)和式(3),初步计算得到最大需求功率约为 100 kW,故选取额定功率为 120 kW、峰值功率为 150 kW 的异步电机作为辅助动力单元的发电机。为了与发电机匹配,并考虑连接的机械效率,选取一款排量 6.5 L 的柴油发动机作为辅助动力单元的动力源,该发动机最大输出功率 162 kW,最大扭矩 890 N·m。

1.4 电池组的选型

为减少大容量电池带来的负担,根据文献[8]对电池性能分析,采用磷酸铁锂能量型电池,3块单体并联成块,192块单体串联成组,单体电压为 3.2 V,电池组总电压为 614.4 V,总电池电量为 48 kW·h,电池放电深度为 80%,单体电池放电电流为 3 C, C 为放电倍率。

2 能量管理策略的设计

混合动力洗扫车的能量管理控制主要是实现燃油经济性,所以尽可能使用电池组中的电能来满足车辆的功率需求。当电池的荷电状态(SOC)过低时,启动 APU 为电池组供电,使电池组的 SOC 保持在一个合理的范围来减少容量损失,延长电池组的使用寿命,为了防止电池过充和过放,

电池的荷电状态满足:

$$SOC_{low} \leq SOC(t) \leq SOC_{high} \quad (4)$$

式中, SOC_{low} 为电池放电时的最低荷电状态; SOC_{high} 为电池充电时的最高荷电状态。

车辆行驶过程主要包含以下 2 种模式:

(1)纯电动行驶:洗扫车的电池处于 SOC_{high} 区域,此时电池满足车辆在市区的转场,APU 关闭,车辆零排放。

(2)APU 开启行驶:洗扫车的电池处于 SOC_{low} , ISG 电机带动发动机启动,保证发动机运行在低油耗工作区域,APU 为电池组充电,洗扫车作业时,需求功率大,发动机提高输出功率,保证洗扫正常作业。在功率跟随控制策略下,尽可能使发动机运行在最低燃油消耗线^[9],降低排放。

制动过程中,传统机械制动产生的最大制动力矩为:

$$M_B = 2 \cdot p_B \cdot A_B \cdot \eta_B \cdot \mu_B \cdot r_B \cdot c_B \quad (5)$$

式中, M_B 为制动力矩(N·m); p_B 为单侧制动有效压力(MPa); A_B 为制动器活塞面积(mm²); η_B 为制动效率; μ_B 为摩擦系数; r_B 为有效摩擦半径(mm); c_B 为特定制动系数。

根据电机特性,当电机进行制动能量回收时,工作状态属于第四象限,产生的最大制动力矩为驱动电机最小扭矩^[10],若驾驶员需求的制动力矩大于驱动电机最小扭矩,将由机械制动补充所需的制动力矩:

$$T_B(t) = M_B \cdot B_p - T_{M_min} \cdot F_d \cdot \eta_m \quad (6)$$

式中, $T_B(t)$ 为机械制动补充的制动力矩(N·m); B_p 为制动踏板开度; T_{M_min} 为驱动电机最小转矩(N·m); F_d 为主减速器传动比; η_m 为机械效率。

APU 仅在 $SOC > SOC_{high}$ 时关闭,当 $SOC_{low} \leq SOC \leq SOC_{high}$ 时,加入 APU 模式判断,如果 APU 开启就进入运行模式,避免发动机频繁启动,发动机启动时输出功率满足:

$$P_{ice} = P_{TMA} + P_{HVC} + P_{sweep} + P_{SOC} \quad (7)$$

式中, P_{TMA} 为当前驱动电机需求功率(kW); P_{HVC} 为空调、冷却系统、转向电机等附件装置的功率(kW); P_{sweep} 为洗扫装置驱动电机功率(kW),在非作业工况下 $P_{sweep} = 0$; P_{SOC} 为电池充电功率(kW)。

3 仿真与分析

增程式混合动力洗扫车仿真模型在 AVL-Cruise 软件中搭建,如图 2 所示,通过 Matlab/Simulink 建立控制策略后编译生成 DLL 文件与 Cruise 进行联合仿真。为了与传统的双发动机洗扫车对比,同时在 Cruise 中建立了传统洗扫车模型,如图 3 所示。

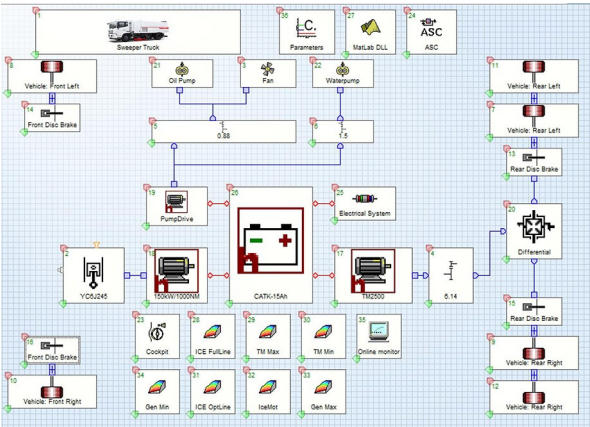


图 2 增程式混合动力洗扫车 Cruise 模型
Fig.2 Cruise model of the extended-range hybrid sweeper truck

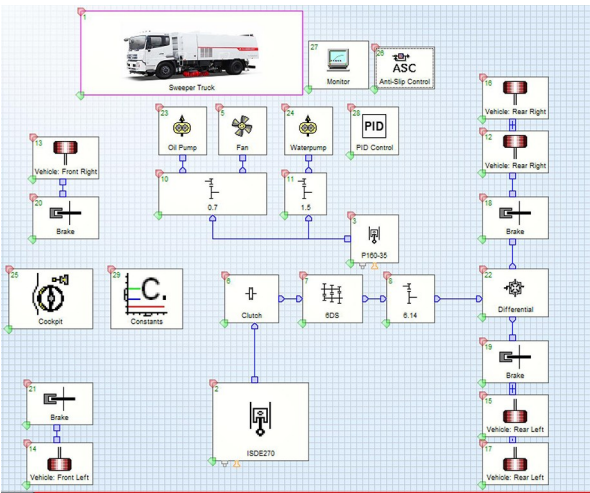


图 3 传统双发动机洗扫车 Cruise 模型
Fig.3 Cruise model of the traditional dual-engine sweeper truck

洗扫车驾驶分为转场和作业工况,为了尽量拟合洗扫车在市区转场的行驶工况,选取中国重型商用车工况路谱图的市区部分作为参考,设置 3 个循环,如图 4 所示。选取某地区洗扫车的作业工况作参考,如图 5 所示。

市区转场工况的行驶车速仿真如图 6 所示,

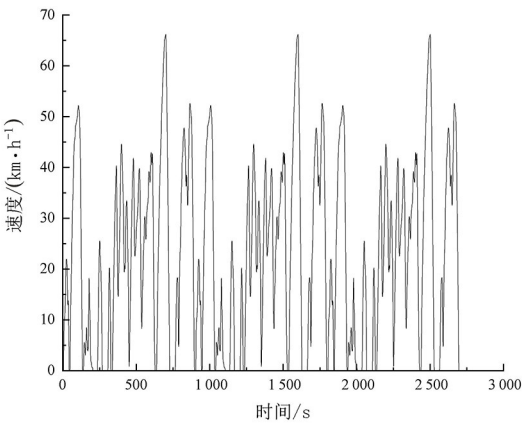


图 4 洗扫车市区转场工况路谱图
Fig.4 Road map of the urban transition conditions of the sweeper truck

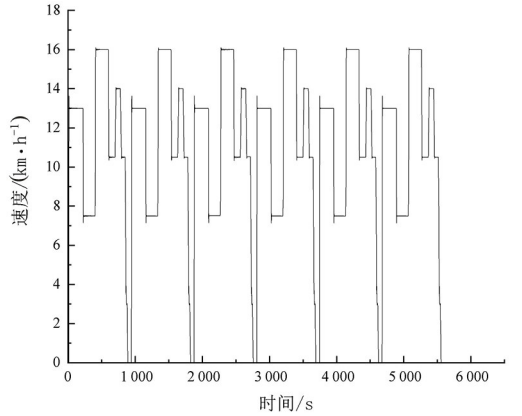


图 5 洗扫车作业工况路谱图
Fig.5 Road map of the operating conditions of the sweeper truck

可以看到实际车速与目标车速基本拟合,说明车辆行驶达到预期车速。在转场工况下电池荷电状态如图 7 所示,本文仿真设置的电池初始荷电状态为 50%,根据文献[11]对电池充放电寿命分析,将电池 SOC 放电下限值设为 40%,电池充电上限 SOC 值设为 60%。在车辆行驶过程中,电池给驱动电机提供电能,处于放电状态,车辆为纯电动驱动模式,当 SOC 值下降到 40%时,APU 开始工作,此时 ISG 电机先向外输出正向功率,用于带动发动机启动,发动机向外做工开始发电,给动力电池充电,电池 SOC 值不断上升,直至 60%后不再上升,此时 APU 停止工作,达到预期控制效果,与所设计的控制策略相符,有效保护电池,避免发生过充或者过放的现象,延长电池使用寿命。在转场工况下,仿真过程中传统洗扫车主发动机输

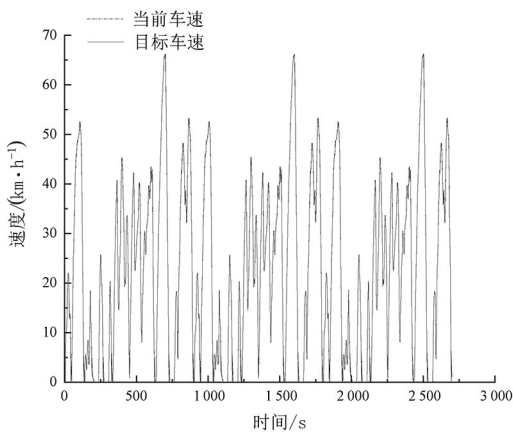


图 6 转场工况下车速行驶仿真

Fig.6 Simulation of vehicle speed under transition conditions

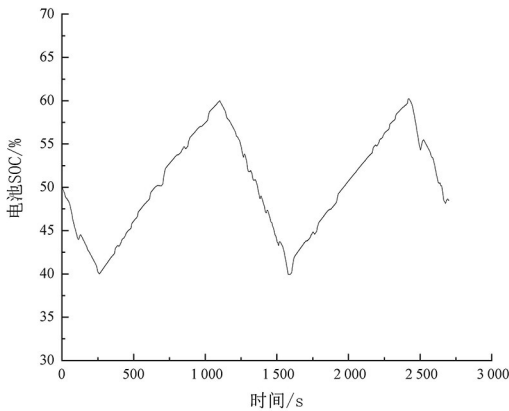


图 7 转场工况下电池 SOC 值

Fig.7 Battery SOC value changes under transition conditions

出功率变化区间大,急加速情况下发动机输出功率最高可达 160 kW,市区行驶低速区域发动机功率无法得到充分利用,发动机能耗以及排放效果都比较差。增程式洗扫车在市区转场过程中,

APU 开启后,最高输出功率为 50~140 kW,处于一个相对稳定的功率输出区间,造成功率变化主要由于车辆的急加速,带动 18 t 的洗扫车需求功率较大,但是整体波动还是在发动机运行高效区域,发动机开启时间也比传统洗扫车晚 260 s,工作时间更短。

作业工况下洗扫车的 SOC 值变化如图 8 所示,可以看出,由于作业工况下功率需求较大,此时车速低于 20 km/h,电池 SOC 值在放电 293 s 后降到 40%,APU 开启充电状态,过程持续约 982 s,电池 SOC 值达到 60%停止充电,APU 关闭。整个过程依然在控制策略的控制目标内,控制效果理想。

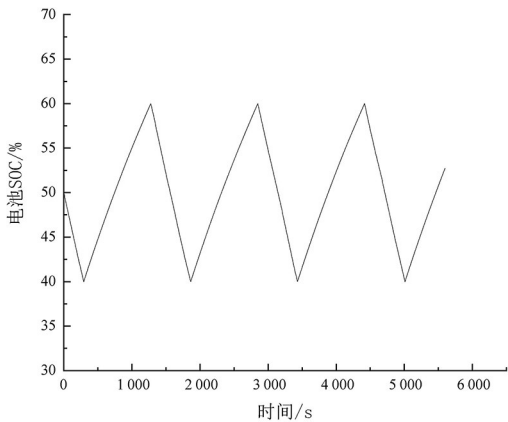


图 8 作业工况下电池 SOC 值

Fig.8 Battery SOC value changes under operating conditions

市区转场与作业工况下的油耗如表 2 所示。根据比亚迪工程师为混合动力汽车制定的等效油耗计算方法,每百公里等效油耗=(起点至终点油耗+起点至终点电耗/3.0)·100/总里程,对比油耗结果可看出,增程式混合动力洗扫车有更低的油耗表现,此外,增程式混合动力洗扫车在作业工况下还额外为电池充电 6.05 kW·h/100 km。

表 2 洗扫车燃油消耗情况

Tab.2 Fuel consumption of the sweeper truck

| 车型 | 工况 | 油耗/ | 电耗/ | 等效油耗/ |
|------------|------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| | | (L·(100km) ⁻¹) | (kW·h·(100km) ⁻¹) | (L·(100km) ⁻¹) |
| 传统双发动机洗扫车 | 市区转场 | 33.00 | \ | 33.0 |
| | 作业 | 121.77 | \ | 121.77 |
| 增程式混合动力洗扫车 | 市区转场 | 12.90 | 9.33 | 16.01 |
| | 作业 | 96.74 | -6.05 | 94.72 |