

文章编号:1671-8879(2018)01-0105-07

# 基于效率优化的增程式电动环卫车控制策略

刘 钊,解少博

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了提高增程式电动汽车在增程阶段的能量转换效率及整车的等效燃油经济性,以一款增程式电动环卫车为例,对增程器的 3 种不同控制策略进行了对比分析。首先基于台架试验的发动机油耗特性和发电机效率特性,合成得到增程器整体效率特性及其最优效率曲线,并在 MATLAB/Simulink/Stateflow 平台搭建整车正向动力系统仿真模型;然后对增程式电动汽车的等效能耗进行了推导,将所消耗燃油和电能全部换算为单一的燃油量;在此基础上基于中国典型城市客车运转工况,分别应用增程器定点发电、增程器沿最优效率曲线功率随动和增程器恒定转速随动输出功率这 3 种控制策略进行车辆行驶仿真试验。研究结果表明:增程器在定点发电模式下,能够始终工作于最高效率点,从而达到最优的能量转换效率,此时整车等效百公里油耗为 29.22 L;增程器在恒转速功率随动模式下效率最低,其等效百公里油耗为 33.41 L;增程器沿最优效率曲线的功率随动模式下比恒转速功率随动模式下的等效百公里油耗降低了约 2.78 L,达到 30.63 L。通过对比 3 种增程器控制策略的仿真结果发现,在增程式电动汽车增程器的电量消耗-电量维持工作模式下,定点发电模式能够使增程器达到最佳的工作效率并实现最小的整车等效百公里燃油消耗,可将其作为增程式电动汽车增程器的最佳控制策略。

**关键词:**汽车工程;增程式电动环卫车;仿真;控制策略;定点发电;功率随动

**中图分类号:**U469.72

**文献标志码:**A

## Control strategy for a range-extended electric sanitation truck based on efficiency optimization

LIU Zhao, XIE Shao-bo

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to improve the energy conversion efficiency and equivalent fuel economy of the whole vehicle for a range-extended sanitation truck in the process of extended range, three control strategies of the engine-generator unit (EGU) were compared by taking a range-extended electric sanitation truck as an example. Firstly, the overall efficiency characteristics and the efficiency curve of the EGU were obtained based on the engine's fuel consumption characteristics and generator's efficiency characteristics of the bench test, and then the simulation model of the whole vehicle's forward dynamic system was built on the MATLAB/Simulink/Stateflow platform. Then, the equivalent fuel consumption of the range-extended electric vehicle was deduced. All consumed fuel and electric energy were converted into a single amount of fuel.

收稿日期:2017-07-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)项目(2012AA111106)

作者简介:刘 钊(1985-),男,陕西商洛人,工学博士研究生,E-mail:liuzhao1217@126.com。

Based on the typical operating conditions of urban passenger cars in China, three control strategies including the fixed-point power generation of the EGU, the servo output power of the EGU under optimal efficiency curve and servo output power of EGU with constant speed were used to conduct the simulation experiment of vehicle driving. The results show that in fixed-point power generation mode, the EGU can always work at the maximum efficiency point so as to achieve the optimal energy conversion efficiency. At this time, the fuel consumption of the whole vehicle is 29.22 L per 100 km. In the power servo with constant speed, the efficiency of EGU is the lowest, the fuel consumption of which is 33.41 L per 100 km. In the power servo mode under optimal efficiency curve, the fuel consumption of EGU is 30.63 L per 100 km, which is reduced by about 2.78 L than the power servo with constant speed. By comparing the simulation results of three EGUs' control strategies, it is found that under the mode of electricity-consumption and electricity-maintenance of a range-extended sanitation truck, fixed-point power generation mode can achieve the optimal working efficiency of EGU and achieve the minimum fuel consumption per 100 km of the whole vehicle, which can be regarded as the optimal control strategy of EGU for the range-extended sanitation truck. 1 tab, 7 figs, 20 refs.

**Key words:** automobile engineering; range-extended electric sanitation truck; simulation; control strategy; fixed-point power generation; power servo

## 0 引言

当前,发展新能源汽车已成为汽车工业的必然选择<sup>[1]</sup>。发展新能源汽车是促进汽车产业不断升级,也是中国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路。增程式电动汽车能够有效避免传统内燃机汽车对汽、柴油等燃料的过度依赖,还可以克服纯电动汽车在现有电池技术条件下无法满足长续驶里程的局限,已受到全球汽车企业和研究机构的广泛关注<sup>[2-4]</sup>。通用汽车公司的 Volt 轿车成为增程式乘用车的典型代表,它可以工作在 2 种模式,即纯电动模式和增程模式,当电池组 SOC(荷电状态,剩余电量的百分比)降至设定的下限时,车辆从纯电动模式切换到增程模式以达到延长续驶里程的目的<sup>[5-6]</sup>。在理论研究方面,针对增程式电动汽车的控制策略主要有基于优化算法和规则的策略。基于优化理论的策略主要包括动态规划<sup>[7-9]</sup>、随机动态规划<sup>[10-12]</sup>和庞特里亚金极小值原理<sup>[13-14]</sup>等算法。其中,动态规划算法尽管能够得到全局最优解,但只适用于确定的行驶工况,不具备通用性;随机动态规划算法结合了马尔科夫链与动态规划,可以不依赖行驶工况,但计算量大,实施困难;庞特里亚金极小值原理算法与随机动态规划算法相似,只能进行离散理论优化,无法实车应用。基于规则的策略可以明确地将电能的使用划分为电量消耗(CD)和电量维持(CS)2 个阶段<sup>[15-16]</sup>。在增程阶段,增程器的工作模式包括定点发电和功率跟随 2 种方式<sup>[17-18]</sup>。

作为一种能够实时应用的策略,定点发电和功率跟随工作模式需要对整车能耗的影响进一步对比分析,从而为其应用提供重要的理论依据。

本文针对某款增程式电动环卫车,就如何发挥增程器的最优效率,提高其能量转换效率并提高燃油经济性进行研究。选择增程器定点发电、增程器沿最优效率曲线功率随动和增程器恒定转速随动输出功率 3 种控制策略进行仿真,得到增程器能量转换效率和整车等效百公里油耗,更直接反映了增程式车辆行驶的经济性问题,为增程式车辆能量管理策略制定提供了参考。

## 1 增程器效率分析

增程式电动环卫车如下页图 1(a)所示,是以陕西重型汽车有限公司生产的商用车为原型车设计的增程式电动重型环卫车。该车为后轮驱动,整备质量 10 800 kg,总质量 16 000 kg,主减速器减速比 6.733,轮胎半径 507 mm。增程器由发动机和发电机通过机械连接构成,与动力电池共同为驱动电机供电,如图 1(b)所示。发动机为 2.8 L 排量的柴油机,最高转速为 3 200 r/min,额定功率为 96 kW,其油耗特性见下页图 2(a),发动机最低燃油消耗率为 210 g/(kW·h)。

与发动机匹配的发电机为永磁磁阻电机,额定功率 60 kW,峰值功率可达 90 kW,最高转速 3 000 r/min。

图 2(b)为发电机的效率  $\eta_{\text{MAp}}$ ,从图中可以看到,当转速在 1 000~2 500 r/min 范围内时,发电机



(a) 增程式环卫车

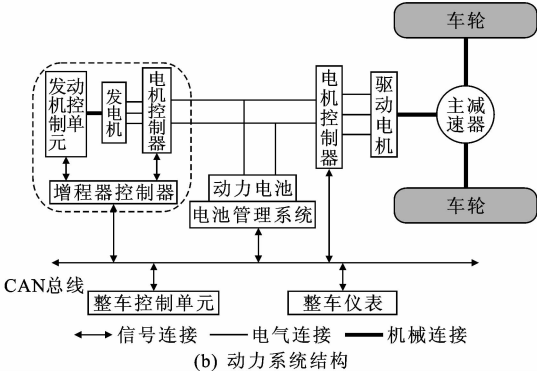


图 1 增程式电动环卫车动力系统结构

Fig. 1 Structure of range-extended electric sanitation truck

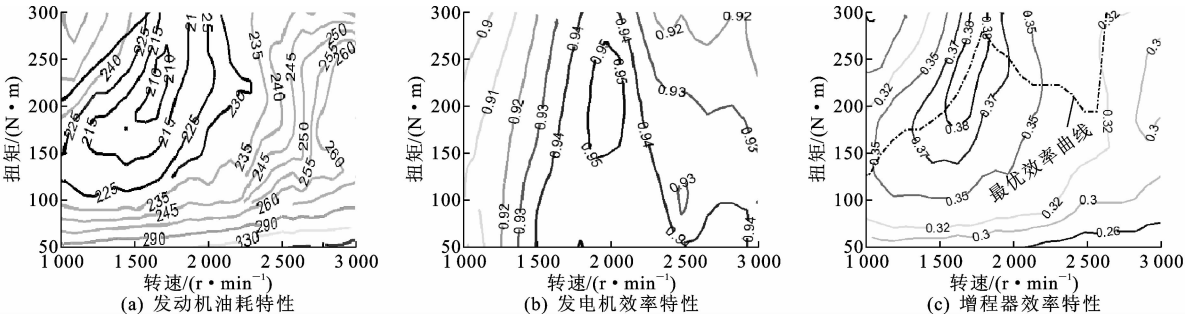


图 2 发动机与发电机效率合成

Fig. 2 Engine and generator efficiency interconnection

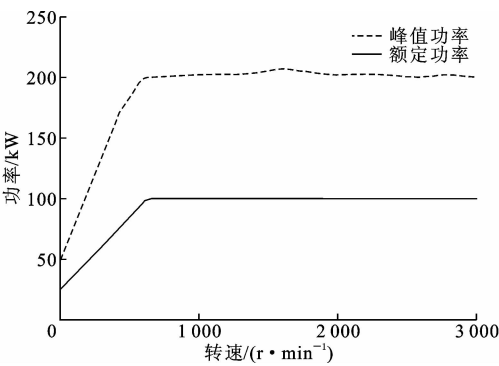


图 3 驱动电机功率特性

Fig. 3 Motor power characteristics

选用的动力电池为磷酸铁锂电池,由 168 个单体串联成组,电池单体电压 3.2 V。电池组的标称容量 180 Ah,最大充放电电流分别为 180、540 A,放电深度可达 80% 以上。

效率为 0.9~0.95。

构成增程器的发动机和发电机均为能量转换装置,发动机将燃油的化学能转化为机械能,而发电机则将发动机传递过来的机械能转化为电能向外输出。因此,在增程器发电过程中,只有当发动机的热效率和发电机的发电效率同时处在高效区,才能使增程器的效率达到最优,从而避免发动机和发电机高效区域的错位。

结合发动机和发电机各自的效率,得到增程器的系统效率特性,见图 2(c)。由图 2(c)可以得到,增程器在每个功率需求下的最高效率点,将这些点连接便得到增程器的最优效率曲线,本文增程器的系统效率最高可达 0.38。

2 控制策略及仿真

2.1 仿真模型

驱动电机的功率外特性和扭矩外特性曲线分别见图 3、图 4,其额定功率为 100 kW,峰值功率可达 200 kW,额定扭矩和峰值扭矩分别为 1.2、2.51 kN·m。

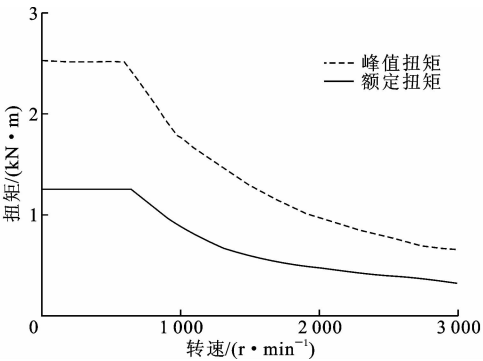


图 4 驱动电机扭矩特性

Fig. 4 Motor torque characteristics

增程式电动环卫车整车模型在 MATLAB/Simulink 软件中搭建,控制策略通过 Stateflow 软件实现。该模型为正向仿真模型,通过 PID(比例-积分-微分)控制模型来调节驾驶人的加速和制动,

动力电池组为 Rint 模型<sup>[19]</sup>。

参考《重型混合动力电动车能量消耗试验方法》(GB/T 19754—2005)<sup>[20]</sup>,选择中国典型城市客车循环运转工况,行程约 100 km,进行仿真试验。

将行驶过程中消耗的电量折算为燃料消耗,两者的关系为

$$V_{\text{fuel}} = \frac{3\,600 E_k}{D_{\text{fuel}} Q_{\text{fuel-low}} \eta_{\text{eng}} \eta_{\text{gen}}}$$

式中: $V_{\text{fuel}}$ 为折算的柴油消耗量; $E_k$ 为消耗的电池能量; $D_{\text{fuel}}$ 为柴油密度; $Q_{\text{fuel-low}}$ 为柴油燃烧的低热值; $\eta_{\text{eng}}$ 为发动机的平均工作效率; $\eta_{\text{gen}}$ 为电机的平均工作效率。

2.2 控制策略

为了对比分析增程器的效率及其对车辆燃油消耗的影响,分别对 3 种控制策略进行仿真。3 种控制策略为:①定点发电控制策略,发动机、发电机工作在恒定的转速和扭矩状态,增程器输出功率恒定,且工作点为最优效率点;②增程器沿最优效率曲线工作且输出功率随需求功率变化的控制策略,即增程器的输出功率随车辆所需功率的变化而动态调整,工作点沿最优效率曲线变化;③增程器转速恒定,输出功率随需求功率变化的控制策略,即增程器输出功率随需求功率的变化而动态调整,但转速不变,工作点在一定功率范围内变化。

仿真中电池组 SOC 初始值设为 0.6,仿真共持续约 6.2 h。在增程模式,增程器根据电池组的 SOC 值

大小进行开关控制,设置 SOC 的上下限值分别为 0.35 和 0.25,即当电池组 SOC 低于下限时增程器开启,当电池组 SOC 达到上限时增程器关闭。

2.3 结果与分析

控制策略 1 为定点发电控制策略,见图 5。考虑到中国典型城市客车运转工况的平均功率,选择增程器的输出功率为 35 kW。考虑到发动机和发电机连接的机械效率及发电机效率,选择发动机的工作点转速为 1 670 r/min,扭矩为 230 N·m,如图 5(a)所示。在该工作点发动机的比油耗为 210 g/(kW·h),是发动机的最低比油耗值。从图 2(b)的增程器效率可以看到,增程器在该工作点的能量转换效率为 0.38,达到了增程器的最高效率。

仿真中增程器的输出功率如图 5(b)所示,整个过程中开关 4 次,对应的电池组 SOC 值变化如图 5(c)所示。可以看到,在前 2.1 h,车辆运行在纯电动模式,由电池组给车辆提供能量,电池组 SOC 值随行驶过程持续下降;当电池组 SOC 值降至 0.25 时增程器开启,其输出功率除了满足工况需求外,其余部分给动力电池充电,使电池组 SOC 值不断增加;当电池组 SOC 值达到 0.35 时增程器关闭。电池组充放电电流大小如图 5(d)所示,其变化范围为 -180~200 A。仿真结束时电池组 SOC 值下降至 0.31,发动机消耗柴油 19.45 L,如图 5(e)所示。将电池消耗的电能折算成燃油得到整车的等效百公里油耗为 29.22 L,见下页表 1。

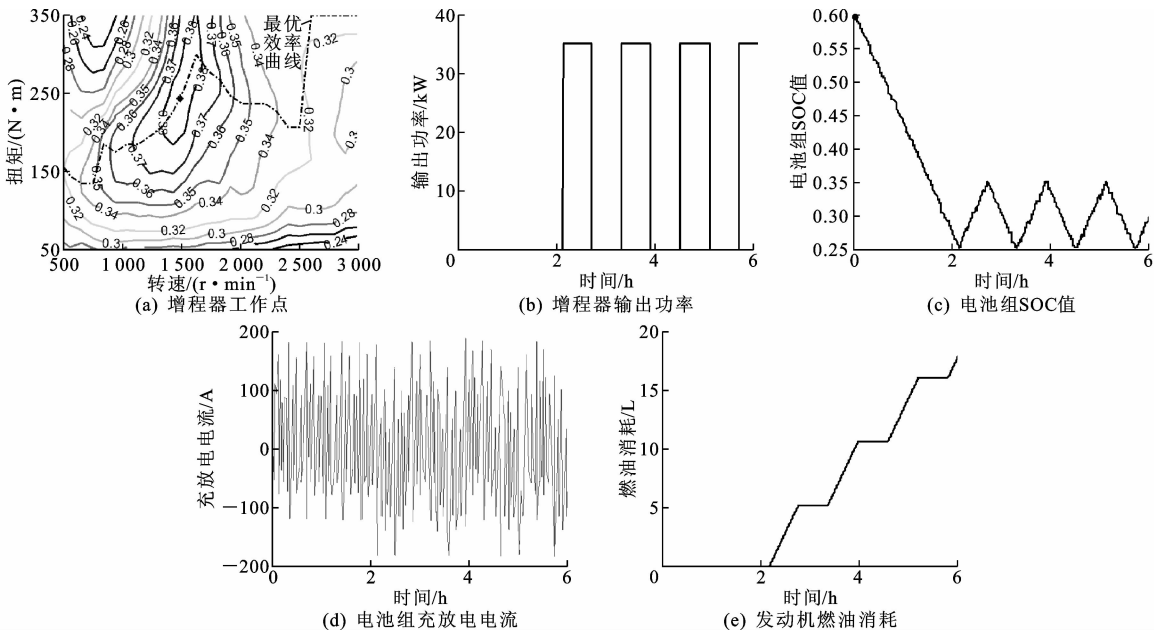


图 5 定点发电工作模式

Fig. 5 Fixed-point working mode

表 1 控制策略能量消耗

Tab. 1 Energy consumption of control strategies

控制策略	初始 SOC 值	终点 SOC 值	燃油消耗/L	等效百公里油耗/L
定点发电	0.6	0.31	19.45	29.22
沿最优效率曲线功率随动	0.6	0.26	19.16	30.63
恒转速功率随动	0.6	0.25	21.61	33.41

除了定点发电模式,增程器输出功率还可以随需求功率不断变化,即增程器可以工作在功率随动模式。为了响应整车控制器的功率指令,发动机可以在不同的工作点拖动发电机发电。但从能量转化效率角度来看,对于每个功率指令,当增程器工作在该需求功率对应的最佳效率点时,能量转换效率最高,即沿增程器的最优效率曲线工作以达到最优效率。因此,控制策略2为沿最优效率曲线功率随动

控制策略,见图 6。另外,从发动机响应的角度考虑,应尽量使其转速在较窄的范围内变化,同时结合增程器的高效区间,对增程器的输出功率设置上下限值,分别为 30、40 kW。

仿真中增程器的输出功率如图 6(a)所示,整个过程开关 3 次,电池组 SOC 值变化如图 6(b)所示。可以看到,车辆在前 2.1 h 工作在纯电动模式,之后一直运行于增程模式直到仿真结束。电池组充放电电流如图 6(c)所示,可以看到,电流的变化范围为  $-180\sim 200$  A,发动机的燃油消耗见图 6(d)。增程器的工作点分布如图 6(e)所示,可以看到,增程器整体效率均在 0.38 附近,处于最佳效率曲线上。仿真过程共消耗燃油 19.16 L,电池组的 SOC 值变为 0.26。折算为等效的百公里燃油消耗为 30.63 L,见表 1。

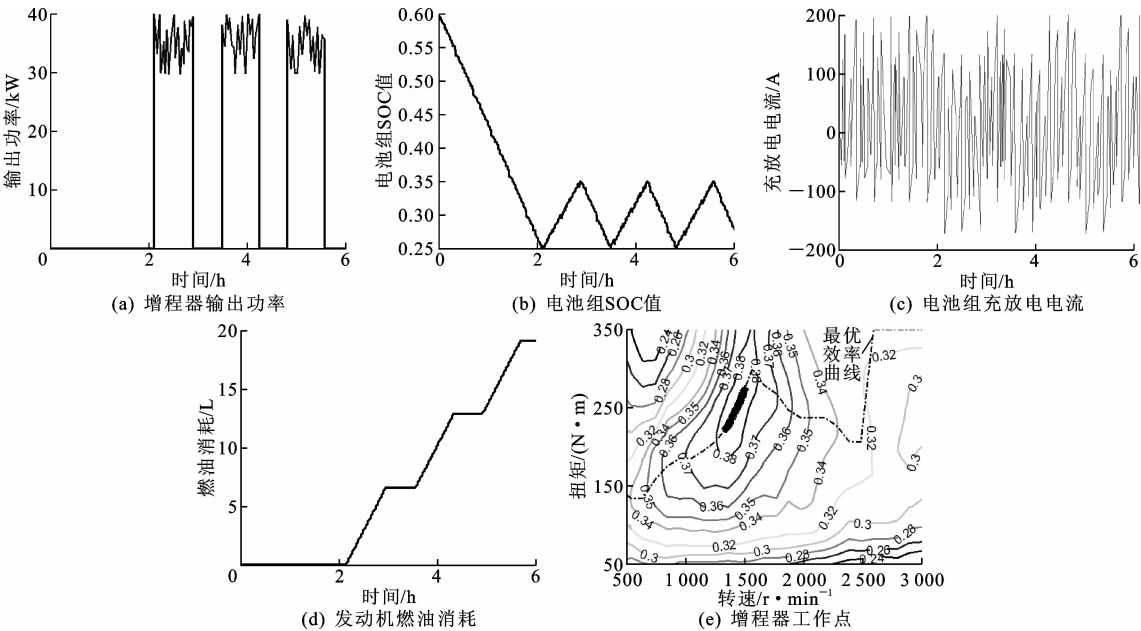


图 6 沿最优效率曲线功率随动

Fig. 6 Power-followed working on optimal efficiency curve

作为对比,选择发动机和发电机工作在恒定转速下,并随需求功率变化向外输出功率为控制策略 3。同控制策略 2 一样,设置增程器输出功率的上下限分别为 30、40 kW,发动机和发电机的转速选择为 1 700 r/min。

下页图 7(a)为增程器的输出功率,可以看到,从仿真开始车辆一直处于纯电动模式,直到 2.1 h 电池组 SOC 值下降到 0.25 时增程器开启。从图 7(b)电池组的 SOC 值变化过程可以看到,伴随着每次增程器的开启,电池组的 SOC 值都得到了提高,即增程器的输出功率除了满足驱动需求外,还要给

电池组充电。整个行驶过程中增程器开关 4 次。电池组充放电电流如图 7(c)所示,电流在  $-180\sim 200$  A 变化。发动机的燃油消耗如图 7(d)所示,整个行驶过程发动机共消耗 21.61 L 柴油,仿真结束时 SOC 值变为 0.25。增程器工作点如图 7(e)所示,可以看到,增程器并没有在所有功率需求点达到最佳效率,对应发动机工作点燃油消耗也相应增大。

对比控制策略 3 和控制策略 2 可以看到,当发动机的工作点沿增程器最优效率曲线工作时,可以达到每一功率点的最佳能量转换效率,使发动机和发电机整体处于最优效率,发动机油耗从 33.41 L

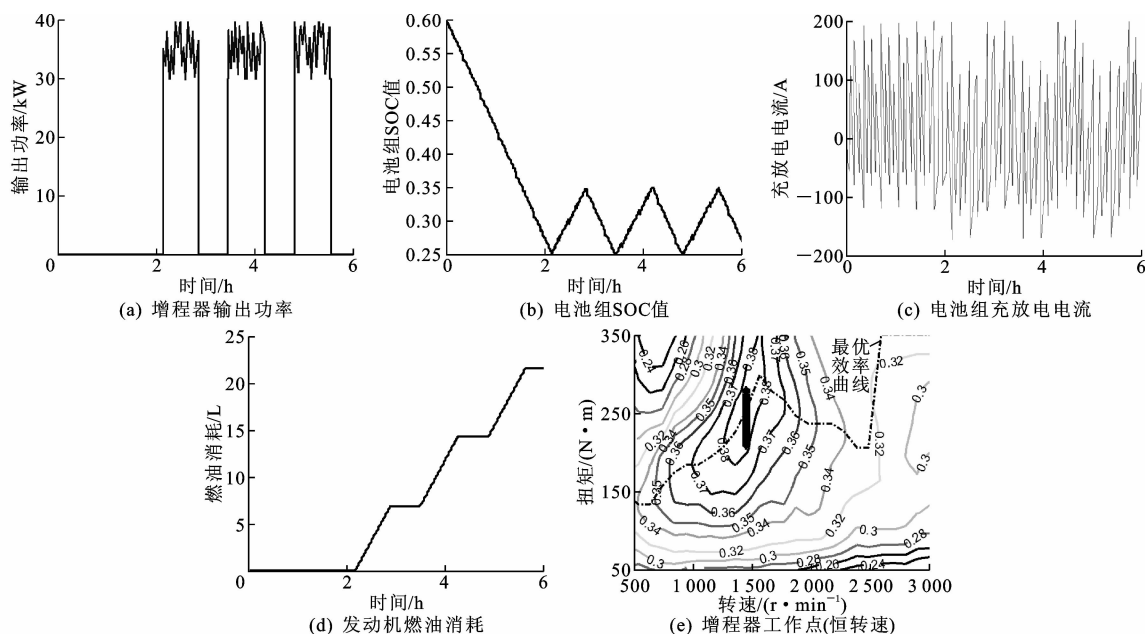


图7 恒转速功率随动

Fig. 7 Power-followed working on constant speed

降至 30.63 L,即等效百公里油耗降低了 2.78 L,整车经济性得到提高。

### 3 结 语

(1)基于发动机和发电机的实测效率,对中国典型城市客车循环运转工况进行了整车百公里等效油耗正向仿真。选取了 3 种常用的增程器控制策略,并进行了对比分析,使仿真过程尽可能符合实际情况。

(2)定点发电模式可使增程器工作在最佳效率点,整车等效百公里油耗为 29.22 L,为 3 种控制策略中最小值。在功率随动模式中,沿增程器最优效率曲线功率随动控制策略的等效百公里油耗为 30.63 L,比恒转速功率随动控制策略的等效百公里油耗降低了 2.78 L。

(3)通过对 3 种控制策略的对比发现,增程器定点发电模式下输出功率恒定,相比其他 2 种控制策略,增程器始终工作在最高效率点,发动机和发电机稳态工作且均处于高效区,不受外界循环工况干扰,是能量转换效率最高的一种控制策略。本文的研究结果不仅适用于增程式电动环卫车,同时为其他增程式电动商用车能量管理策略的制定提供了参考。

(4)本文结论是基于中国典型城市客车循环工况进行的仿真分析,在理论联系实际方面尚有不足,且未通过实车试验对仿真结果进行验证。后续可进一步进行实车验证,并加入多种城市工况,完善试验

内容,为增程式电动商用车的发展提供技术借鉴。

### 参考文献:

### References:

- [1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.  
CHEN Qing-quan, SUN Feng-chun, ZHU Jia-guang. Modern electric vehicle technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.
- [2] WOLSCENDORF J, RZEMIEN K, GIAN D J. Development of electric and range-extended electric vehicles through collaboration partnerships[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Electronic and Electrical Systems, 2010, 3(2): 215-219.
- [3] 胡明寅,杨福源,欧阳明高,等. 增程式电动车分布式控制系统的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(3): 197-202.  
HU Ming-yin, YANG Fu-yuan, OUYANG Ming-gao, et al. A research on the distributed control system for extended-range electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(3): 197-202.
- [4] ROUSSEAU G, SINOQUET D, ROUCHON P. Constrained optimization of energy management for a mild-hybrid vehicle[J]. Oil & Gas Science & Technology, 2007, 62(4): 623-634.
- [5] 牛继高,司璐璐,周 苏,等. 增程式电动汽车能量控制策略的仿真分析[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(1): 140-145.  
NIU Ji-gao, SI Lu-lu, ZHOU Su, et al. Simulation

- analysis of energy control strategy for an extended-range electric vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(1): 140-145.
- [6] TATE E, HARPSTER M O, SAVAGIAN P J. The electrification of the automobile: From conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Electronic and Electrical Systems, 2008, 1(1): 156-166.
- [7] 张晓玲, 贝绍轶, 汪 伟, 等. 基于动态规划的增程式电动汽车优化控制[J]. 现代制造工程, 2016(10): 30-35.
- ZHANG Xiao-ling, BEI Shao-yi, WANG Wei, et al. Optimal control strategy of the extended-range electric vehicle based on dynamic programming[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(10): 30-35.
- [8] 申彩英, 夏超英. 基于改进型动态规划算法的串联混合动力汽车控制策略[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 427-432.
- SHEN Cai-ying, XIA Chao-ying. Control strategy of series hybrid electric vehicle based on improved dynamic programming[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(3): 427-432.
- [9] 于海芳, 张袅娜, 崔淑梅. 基于动态规划的 HEV 复合储能系统效率最优控制策略[J]. 微电机, 2015, 48(8): 55-60.
- YU Hai-fang, ZHANG Niao-na, CUI Shu-mei. Dynamic programming-based control strategy with optimum efficiency of hybrid energy storage system for hybrid electric vehicle[J]. Micromotors, 2015, 48(8): 55-60.
- [10] 肖仁鑫, 李 涛, 邹 敢, 等. 基于随机动态规划的串联式混合动力汽车能量管理策略[J]. 汽车工程, 2013, 35(4): 317-321.
- XIAO Ren-xin, LI Tao, ZOU Gan, et al. Energy management strategy for a series-parallel hybrid electric vehicle based on stochastic dynamic programming[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(4): 317-321.
- [11] 邹 渊, 陈 锐, 侯仕杰, 等. 基于随机动态规划的混合动力履带车辆能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 91-96.
- ZOU Yuan, CHEN Rui, HOU Shi-jie, et al. Energy management strategy for hybrid electric tracked vehicle based on stochastic dynamic programming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 91-96.
- [12] MOURA S J, FATHY H K, CALLAWAY D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Control Systems Technology, 2011, 19(3): 545-555.
- [13] 秦大同, 赵新庆, 苏 岭, 等. 插电式混合动力汽车变参数能量管理策略[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 112-118.
- QIN Da-tong, ZHAO Xin-qing, SU Ling, et al. Variable parameter energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(2): 112-118.
- [14] 张承宁, 周 维, 李军求, 等. 基于极小值原理的增程式电动车辆在线能量管理控制策略[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(9): 931-935.
- ZHANG Cheng-ning, ZHOU Wei, LI Jun-qi, et al. An online energy management strategy for extended-range electric vehicle based on Pontryagin's minimum principle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(9): 931-935.
- [15] 曲晓冬, 王庆年, 于远彬. 增程式电动车的 APU 控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(9): 763-768.
- QU Xiao-dong, WANG Qing-nian, YU Yuan-bin. A study on the control strategy for APU in a extended-range EV[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(9): 763-768.
- [16] 盘朝奉, 韩福强, 陈 燎, 等. 基于模糊控制的增程式电动汽车能量分配策略[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, 33(3): 140-144.
- PAN Chao-feng, HAN Fu-qiang, CHEN Liao, et al. Power distribution strategy of extend-range electric vehicle based on fuzzy control[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(3): 140-144.
- [17] ZHANG B. Optimization of plug-in hybrid electric vehicle energy management control strategy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 20-25.
- [18] ROUSSEAU A, PAGERIT S, WENDONG G. Plug-in hybrid electric vehicle control strategy parameter optimization[J]. Journal of Asian Electric Vehicles, 2008, 6(2): 1125-1133.
- [19] JOHNSON V H. Battery performance models in ADVISOR[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 321-329.
- [20] GB/T 19754—2005, 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法[S].
- GB/T 19754—2005, Test methods for energy consumption of heavy-duty hybrid electric vehicle[S].