

基于增程式电动商用车的增程器匹配和能耗分析

解少博<sup>1,2</sup>, 刘玺斌<sup>2</sup>, 李司光<sup>2</sup>, 王佳<sup>2</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西汽车集团有限责任公司, 陕西 西安 710049)

摘 要: 为了更合理地对应用于增程器的不同发动机和发电机进行匹配,利用发动机和发电机的效率特性得到增程器的最优效率曲线. 以一款增程式电动商用车为研究对象,在 Matlab/Simulink 中搭建整车正向仿真模型,基于中国典型城市工况对增程器的定点发电和沿最优效率曲线运行两种控制策略对整车经济性的影响进行了分析. 结果表明,合理地选择发动机和发电机进行增程器的匹配能有效提高整车经济性;同时,在功率跟随控制策略下增程器输出较宽范围的功率将会增大整车的油耗.

关键词: 增程式电动商用车;增程器匹配;能耗分析

中图分类号: TQ325 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.04.019

0 引言

随着能源危机的加剧和政府制定越来越严格的环保标准,发展新能源汽车成为未来汽车工业的必然选择<sup>[1-2]</sup>. 其中,纯电动汽车以高效、节能和零排放等优势受到广泛关注. 然而,在现有技术条件下动力电池尚未突破能量密度小、续航里程短和价格昂贵的瓶颈,作为过渡阶段的增程式电动汽车通过配置由发动机和发电机构成的增程器,在动力电池荷电状态下降至一定限度时给车辆提供能量,既能发挥纯电动汽车的优势,又能有效弥补其续航里程短的不足之处,成为现阶段新能源汽车的发展方向之一<sup>[3-6]</sup>.

对于增程式电动汽车而言,当需求续航里程较短时,如在市区内行驶,车辆工作在纯电动模式;而当车辆需求续航里程较长时,增程器开启使车辆进入增程模式. 在增程模式下,发动机和发电机构成的增程器可以给驱动电机提供功率,也可以为电池组充电,即将燃料的化学能转化为机械能和电池组的电能. 因此,增程器的效率将直接影响到整车的燃油经济性. 可以说,合理地选择发动机和发电机对增程式电动商用车的经济性有重要意义.

以往文献多研究增程式电动汽车的整车动力

系统匹配及由发动机和发电机构成的特定增程器的特性,而对构成增程器的发动机和发电机匹配及其对能耗的影响关注的相对较少. 笔者针对一款正在研发的增程式电动商用车底盘,在给定增程器发电机的前提下,对两款发动机和发电机的匹配进行了比较,分析两种匹配方案对整车能耗的影响,从而为增程器的匹配和整车的优化设计提供参考.

1 整车结构和参数选型

整车参数、驱动电机和电池等主要部件参数见表 1,整车动力系统结构如图 1 所示.

表 1 车辆主要参数

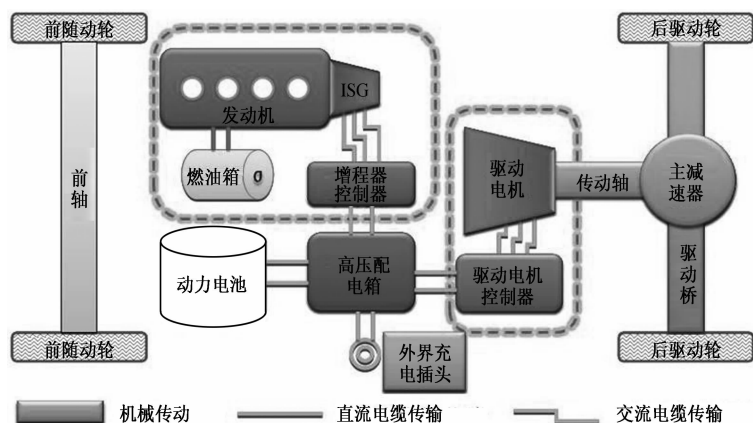
Tab. 1 Parameters of the vehicle

项目	参数	数值
整 车	满载质量/kg	16 000
	迎风面积/m <sup>2</sup>	7.0
	轮胎半径/m	0.507
	主减速器速比	6.73
驱动电机	永磁磁阻额定/最大功率/kW	100/200
	额定/最大转速/(r·min <sup>-1</sup> )	750/3 000
	额定/最大扭矩/(N·m)	1 250/2 500
动力 电池	磷酸铁锂单体电压/V	3.2
	总电压/V	538
	标称容量/Ah	180
	最大充/放电倍率	1C/3C

收稿日期:2015-02-15;修订日期:2015-04-05

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2012AA111106);汽车测控与安全四川省重点实验室开放课题资助(szjj2014-067);中央高校基本科研业务基金项目(2013G1502065)

作者简介:解少博(1983-),男,陕西咸阳人,长安大学副教授,博士,研究方向为新能源汽车,E-mail:xs2201020133@126.com.



**Fig. 1** Structure of the extended – range vehicle

## 2 增程器效率

增程器由发动机和发电机通过机械连接构成,能够在增程模式下向外输出功率,给驱动电机提供动力,还可以给电池组补充电量。由电动商用车的设计指标并考虑到车辆主要在市区内运行,参考中国典型城市工况,同时结合附件功率,选择额定功率为 60 kW 的永磁电机为增程器的发电机,额定转速 2 000 r/min。该发电机的效率图如图 2 所示。

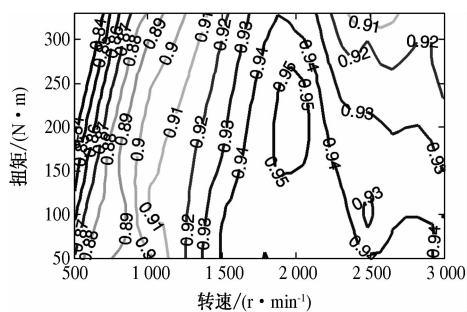


图 2 发电机效率图

**Fig.2 Efficient map of the generator**

在确定了发电机之后,需要匹配合适的发动机与之匹配向外输出功率. 现有两款(I#和II#)排量均为 2.78 L, 额定功率分别为 96 kW 和 92 kW 的发动机可供选择, 其参数如表 2 所示, 油耗特性分别如图 3 和图 4 所示.

**表 2 两款发动机基本参数对比表**  
**Tab.2 Parameters of the two engines**

参数	I#	II#
排量/L		2.8
最大转速/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )		3 200
最大扭矩/( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	360	310
额定功率/kW	96	92

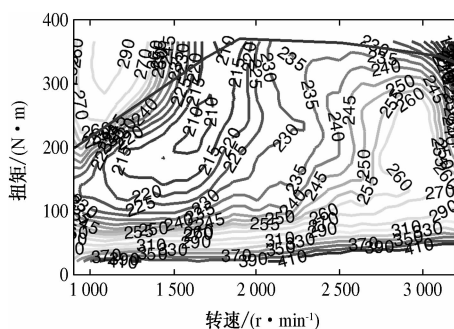


图 3 I#发动机油耗图

Fig.3 Fuel map for engine I

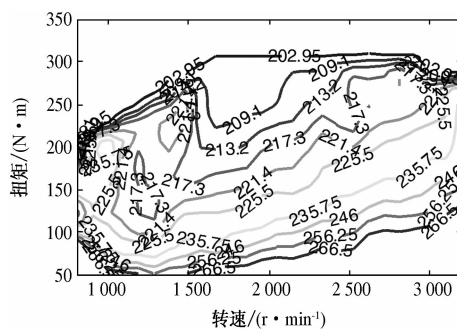


图 4 II#发动机油耗图

Fig.4 Fuel map for engine II

由于两款发动机有不同的油耗特性,从而有两种不同的增程器匹配方式. 在相同的整车控制策略下,车辆在增程模式下的燃油消耗将会呈现差异. 由发动机的油耗特性和发电机的效率特性,可以得到两款增程器的效率特性图,分别如图 5 和图 6 所示.

### 3 整车仿真与能耗分析

为了对两款增程器的油耗特性进行分析,在 Matlab/Simulink 中搭建了增程式电动商用车正向

仿真模型.由牵引电机的外特性和效率特性来实现驾驶员行驶意图的解析,由发动机的万有特性计算增程模式下的油耗,由发电机的外特性和效率特性得到增程器的输出功率.动力电池组为 Rint 模型.驾驶员模型采用 PID 控制,跟踪目标车速进行加速踏板和制动踏板开度的调节.仿真工况选择为连续的中国典型城市公交工况<sup>[7]</sup>,共计 100 km 构成.

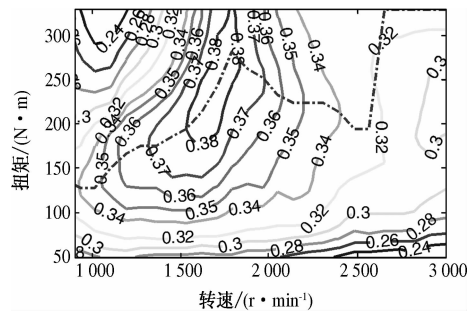


图 5 I#发动机对应的增程器最优效率曲线  
Fig.5 The optimal efficient line for engine I

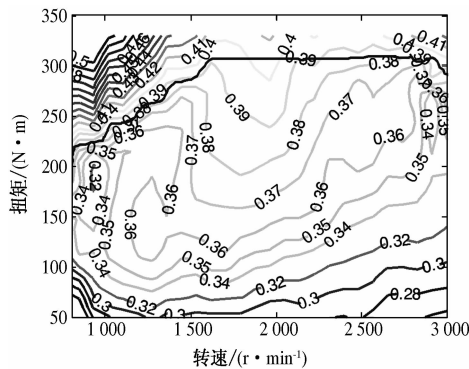


图 6 II#发动机对应的增程器最优效率曲线  
Fig.6 The optimal efficient line for engine II

对于车辆能耗的计算,参考标准<sup>[8]</sup>,将行驶过程中消耗电量折算为燃料消耗,两者的关系为

$$V_{\text{fuel}} = \frac{E_k \cdot 3\,600}{e_{\text{fuel}} \cdot Q_{\text{fuel-low}} \cdot \eta_{\text{eng}} \cdot \eta_{\text{gen}}} \tag{1}$$

式中: $V_{\text{fuel}}$ 为折算的柴油消耗量; $E_k$ 为消耗的电池能量; $e_{\text{fuel}}$ 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.

车辆在行驶过程中纯电动模式和增程模式的切换通过判断电池组 SOC 实现,即当电池组 SOC 大于 35% 时,车辆工作在纯电动模式;当电池组 SOC 小于 25% 时,车辆进入增程模式.同时,在增程模式中考虑了两种控制策略:一种为增程器定点发电,即发动机和发电机运行在固定的工作点;另一种为功率跟随模式,即发动机和发电机的工

作点随着目标功率的变化而发生变化,并且为了实现最佳的燃油经济性,发动机和发电机的工作点沿增程器最佳效率曲线运行.另外,在功率随动模式下,为了对比分析不同的增程器输出功率范围对整车油耗的影响,笔者选择了 30~40 kW 和 25~40 kW 两种功率输出范围,见表 3.

表 3 不同控制策略下的油耗对比  
Tab.3 Fuel comparison for the two engines

控制策略	发动机	输出功率范围/kW	SOC 终值	油耗量/L	等效百公里油耗/L
定点发电	I#	35	0.32	11.35	30.90
	II#		0.32	11.08	30.63
功率随动	I#	30~40	0.34	12.55	31.42
	II#		0.34	12.58	31.45
功率随动	I#	25~40	0.33	11.74	31.96
	II#		0.33	11.52	31.73

(1)增程器定点发电.在恒功率定点发电模式下,发动机和发电机运行在固定的工作点并向外输出功率.结合城市公交工况的平均功率需求并考虑提高发动机的负荷有助于改善燃油经济性,选择增程器的输出功率为 35 kW.

对于 I#发动机,与该输出功率对应的增程器最优效率曲线上的工作点转速为 1 679 r/min,扭矩为 230 N·m,在该工作点下,增程器的整体效率可以达到 0.38.

由于具有相同的控制策略和输出功率,两种增程器的输出功率和电池组的充放电电流均相同.电池组的 SOC 在车辆行驶过程中的变化和油耗如图 7 所示,可以看到,在前 4.2 h 车辆工作在纯电动模式,之后增程器开启车辆进入增程模式,在该模式下,发动机开始工作,整车的燃油消耗不断上升.在行驶结束时,I#发动机对应的车辆的电池组 SOC 降至 0.32,消耗燃油 11.35 L,整车的等效百公里油耗为 30.90 L,见表 3.

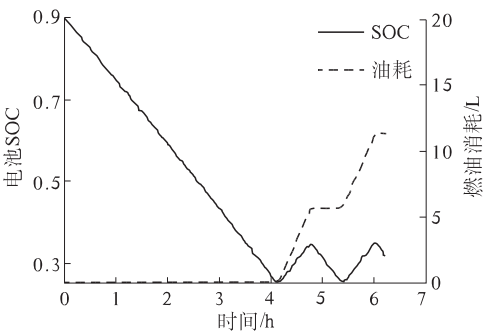


图 7 电池组 SOC 和消耗燃油量  
Fig.7 Battery's SOC and fuel consumption

对于 II#发动机,从增程器工作效率、发动机负荷率以及发动机工作稳定性的角度考虑,选择发动机和发电机的工作点为转速 1 730 r/min,扭矩 226 N·m.从仿真结果来看,行驶结束时 II#发动机对应的车辆的电池组 SOC 变为 0.32,消耗燃油 11.08 L,整车的等效百公里燃油消耗为 30.63 L,见表 3.在该工作点下增程器的系统效率也达到 0.38.

(2)增程器沿最优效率线运行,输出功率范围为 30 ~ 40 kW.增程器在功率跟随模式下,向外输出的功率随工况需求而不断变化.同样,考虑到城市公交工况下的平均功率需求和发动机负荷水平对其经济性的影响,选择增程器的输出功率为 30 ~ 40 kW.

I#发动机对应的电池 SOC 和油耗变化如图 8(a)所示.从图中可以看出,在行驶结束时,电池组 SOC 变为 0.34,消耗燃油 12.55 L,整车的等效百公里油耗为 31.42 L.增程器工作点的分布如图 8(b)所示.可以看到,工作点处于增程器最优效率曲线上,效率在 0.37 ~ 0.38 之间.

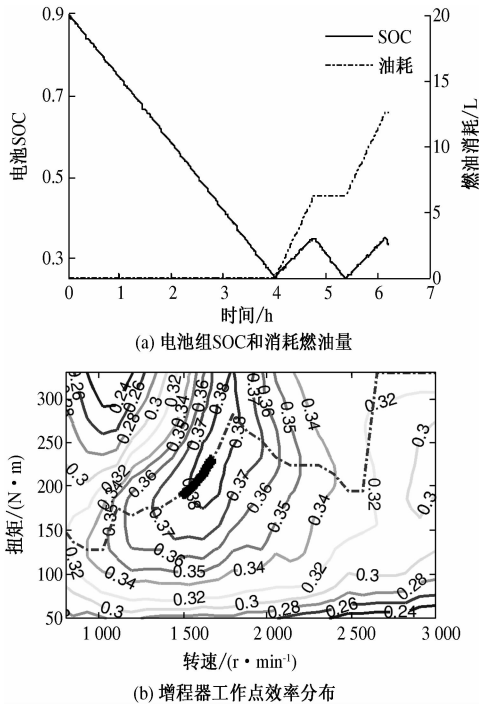


图 8 I#发动机功率随发电仿真结果  
Fig.8 Simulation results for engine I

II#发动机对应的增程器输出功率范围同样为 30 ~ 40 kW,在行驶终了,电池组 SOC 变为 0.34,消耗燃油 12.58 L,如图 9(a)所示.对应的增程器工作点分布如图 9(b)所示,工作点的效率在 0.38 附近.

(3)增程器沿最优效率线运行,输出功率范围为 25 ~ 40 kW.为了研究增程器输出功率范围的变化对整车油耗和电池组充放电电流的影响,设置增程器输出功率在 25 ~ 40 kW 之间.

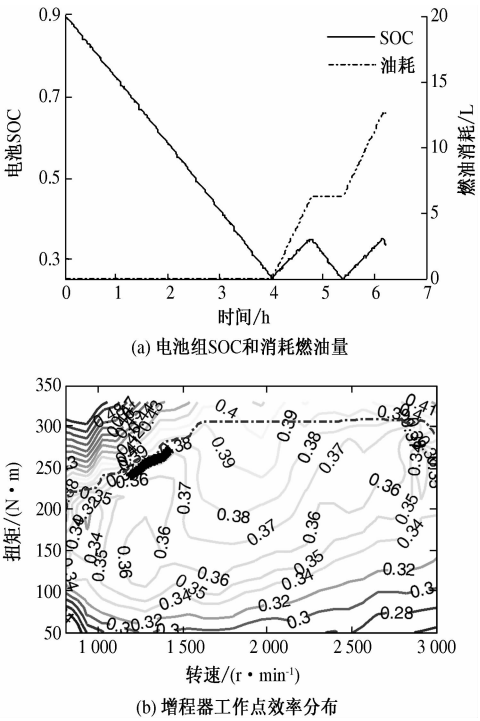


图 9 II#增程器功率随发电仿真结果  
Fig.9 Simulation results for engine II

整车的等效百公里油耗分别为 31.96 L 和 31.73 L,见表 3. I#发动机对应的增程器的工作点效率见图 10,效率处于 0.37 ~ 0.38 之间,II#发动机对应的增程器的工作点效率见图 11,效率在 0.38 附近.

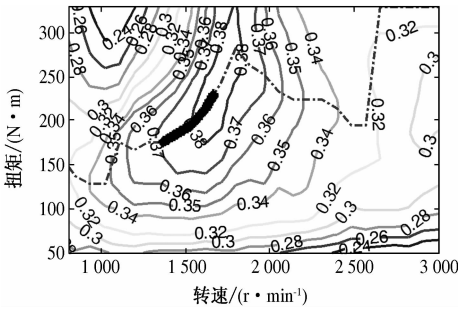


图 10 I#增程器工作点效率分布  
Fig.10 Efficiency of the APU's working points

4 结论

(1)通过发动机的油耗特性和发电机的效率特性,得到了应用于增程式电动商用车的两款增程器的效率特性及最佳效率曲线.同时,进行了增程式电动商用车的百公里工况行驶仿真.

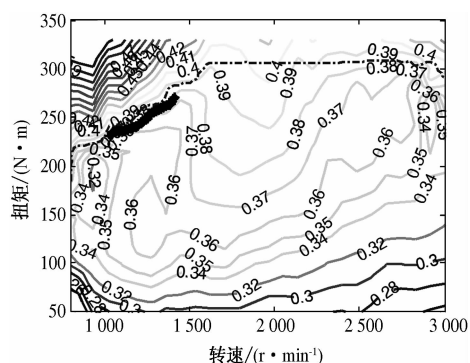


图 11 II#增程器工作点效率分布

Fig. 11 Efficiency of the APU's working points

(2)从两款增程器的能耗仿真分析可以看出,定点发电策略的整车等效百公里油耗低于功率随动策略下的油耗。

(3)从定点发电的角度来看,I#发动机和发电机构成的增程器对应的整车等效百公里油耗略大于II#发动机对应的车辆等效百公里油耗。

(4)从能量消耗的角度来看,在功率随动模型下,当设置的增程器输出功率的上下限在较宽的范围时,会增大车辆的等效百公里油耗。

## 参考文献:

[1] 欧阳明高,李建秋,杨福源,等. 汽车新型动力系统,模型与控制[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[2] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光,等. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.

[3] TATE E D, HARPSTER M O, SAVAGIAN P J. The electrification of the automobile; from conventional hybrid, to plug-in hybrids to extended-range electric vehicles[C]//2008 World Congress. SAE technical Paper, 2008:156-166.

[4] JOCHEM W, KEVIN R, DAVIE G. Development of electric and range-extended electric vehicles through collaboration partnerships[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical System, 2010,3(2):215-219.

[5] 胡明寅,杨福源,欧阳明高,等. 增程式电动车分布式控制系统研究[J]. 汽车工程,2012,34(3):197-202.

[6] XU Liang-fei, YANG Fu-yuan, HU Ming-yin, et al. Comparison of energy management strategies for a range extended electric city bus[J]. Journal of University of Science and Technology, 2012,42(8):640-647.

[7] 国家发展和改革委员会. QC/T 759—2006 汽车试验用城市运转循环[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[8] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 19754—2005 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

## Power-match and Energy Consumption Analysis of APU for an Extended-range Electric Vehicle

XIE Shao-bo<sup>1,2</sup>, LIU Xi-bin<sup>2</sup>, LI Si-guang<sup>2</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>

(1. Chang'an University Department of Automobile Engineering, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Automobile Group, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The power-train of APU including the engine and generator for a range-extended electric vehicle is compared to get the minimum curve of the fuel consumption. The forward vehicle model is built on the Matlab/Simulink. Two control strategies of the output of the APU including the constant power working point and power-follow are analyzed based on the Chinese classic urban driving cycle. The results show that the reasonable mach of the engine and generator can improve the vehicle's fuel economy and the fuel consumption is grown with the power-follow mode when the APU outputs a wider range of the power.

**Key words:** extended-range electric vehicle; APU matching; fuel consumption analysis