

AMT 中度混合动力汽车经济性换挡规律研究

秦大同¹ 龙海威¹ 胡明辉¹ 叶心²

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 400044 2. 重庆理工大学, 重庆, 400050

摘要:针对装备机械自动变速器(AMT)的中度混合动力汽车,综合考虑发动机、电动机/发电机、电池和传动系统的效率,以动力传动系统效率最优为目标,确定了驱动工况各工作模式工作区域。在此基础上,分别对各模式下的经济性换挡规律进行研究,获得了中度混合动力汽车驱动工况下的经济性换挡规律。在 MATLAB/Simulink 平台上,采用 ECE+EUUC 循环工况对所提出的经济性换挡规律进行仿真,结果表明,与 ADVISOR 中的传统换挡控制规律相比,所提出的换挡控制规律能较好地提高整车的燃油经济性。

关键词:中度混合动力汽车;机械自动变速器;经济性换挡规律;系统效率

中图分类号:U463.212

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.20.022

Economic Shift Rule for Medium HEV with AMT

Qing Datong¹ Long Haiwei¹ Hu Minghui¹ Ye Xin²

1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044

2. Chongqing University of Technology, Chongqing, 400050

Abstract:Based on a medium HEV with an AMT, the work area was gained with maximizing systematic efficiency as objective, by comprehensively considering the efficiency of the engine, motor/generator, battery and transmission system. And then the economic shift rule under driving conditions was obtained after analyzing the economic shift rule of each working mode. The simulation of the proposed economic shift rule was carried out on the platform of MATLAB/Simulink under cycle condition of ECE+EUUC. The results indicate that it can improve the fuel economy of medium HEV compared to the traditional shift rule of ADVISOR.

Key words:medium hybrid electric vehicle(HEV); automated manual transmission(AMT); economical shift rule; system efficiency

0 引言

中度混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)采用较大功率的电机,具有纯电动驱动工况,因此可以进一步提高混合动力汽车的燃油经济性和排放性能。

机械自动变速器(automated manual transmission, AMT)以其效率高、成本低和易于制造等优点而成为国内外混合动力汽车采用的自动变速器主要类型之一。对于采用 AMT 的混合动力汽车,通过 AMT 自动换挡优化发动机和电动机的工作区域,提高整车的燃油经济性,是混合动力汽车研究的重要内容。文献[1]以发动机转矩、电机转矩和车速为控制参数,将整车运行时的电驱动能耗或发电产生的电池电能等效为燃油量,以综合油耗最小为目标确定了混合动力汽车的最佳经济性换挡规律。文献[2]针对轻度混合动力 AMT 系统,在电机助力模式下根据不同转矩需求确定发动机和电机最佳转矩分配,制定整车经济性换挡规律。先进汽车仿真软件 ADVISOR

以发动机或电机的效率最优为目标来制定 AMT 混合动力汽车的换挡规律^[3]。

本文综合考虑发动机、发电机、电池和传动系的效率,以系统效率最优为目标,在对混合动力系统进行效率优化,确定了混合动力系统各驱动模式的工作区间和模式切换控制策略的基础上,以各驱动模式下系统效率最优为目标,制定了各驱动模式下的经济性换挡规律,以提高中度混合动力汽车的燃油经济性。

1 关键部件效率模型

本文所研究的中度混合动力汽车结构原理如图 1 所示,图中,ICE 为发动机。该中度混合动力汽车在发动机和 ISG(Integrated Generator and Starter)电机之间、ISG 电机和 AMT 之间分别有离合器 1、2。通过控制这两个离合器的分离和接合,该混合动力汽车可以实现纯电动驱动、发动机单独驱动、发动机轻载充电、电机助力和再生制动等工作模式。

通过发动机台架实验,测得发动机有效燃油消耗率与转速和转矩的关系,然后利用发动机效率计算公式

收稿日期:2012-01-09 修回日期:2013-09-09

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA11A107)

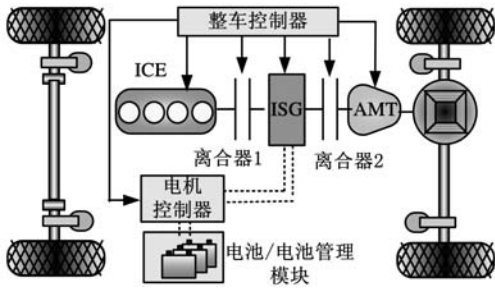


图1 中度混合动力汽车结构

$$\eta_e = g_e R / 360\,000 \quad (1)$$

式中, g_e 为发动机有效燃油消耗率; R 为汽油的热值常数。

可得到发动机的效率数值模型如图2所示。

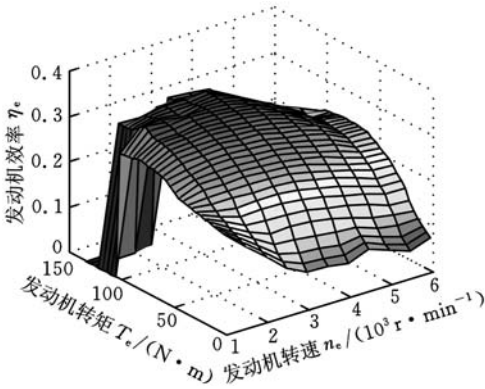


图2 发动机效率曲面

ISG 电机效率模型也基于台架实验数据通过插值得到,如图3所示。

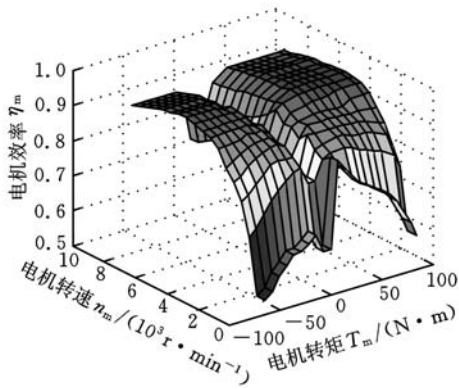


图3 ISG 电机效率特性

电池的能量效率与电池充放电功率、蓄电池荷电状态(SOC)、环境温度 t 等有关。根据电池实验及理论推导,得到电池充放电效率模型如下^[4]:

$$\eta_{b,c} = \frac{E_{SOC,t} - \sqrt{E_{SOC,t}^2 - 4P_b R_{SOC,t}} E_{SOC,t}}{2P_b R_{SOC,t}} \quad P_b < 0 \quad (2)$$

$$\eta_{b,d} = \frac{2P_b R_{SOC,t}}{E_{SOC,t} - \sqrt{E_{SOC,t}^2 - 4P_b R_{SOC,t}} E_{SOC,t}} \quad P_b > 0 \quad (3)$$

式中, $\eta_{b,c}$ 为电池的充电效率; $\eta_{b,d}$ 为电池的放电效率;

$E_{SOC,t}$ 为电池的电动势; $R_{SOC,t}$ 为电池内阻; P_b 为电池的充放电功率, $P_b < 0$ 时为充电, $P_b > 0$ 时为放电。

传动系统的效率等于传动系统中离合器、变速器和主减速器等效率的乘积,其主要的影响因素有输入转速和转矩以及 AMT 的挡位^[5],图4所示为 AMT 从一档到五挡时传动系统的效率曲面。

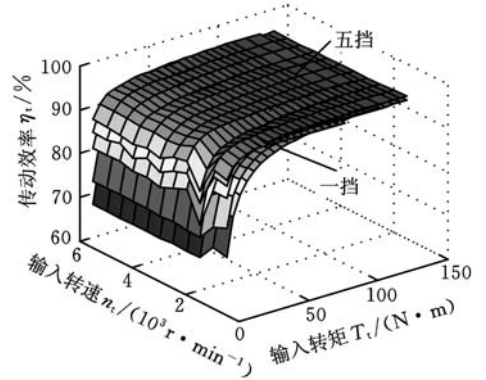


图4 传动系统效率

2 混合动力系统工作模式划分区域

本文采用文献[6-8]中提出的系统效率瞬时优化和全局优化相结合的方法,分别得到图5所示的中度混合动力汽车和传统汽车的效率图。将图5中的两种系统效率投影在车速-加速度平面,得到了图6所示的基于系统效率的工作模式切换规律。当电池荷电状态值 S_{SOC} 大于设定阈值 X_{SOC} 时,在不同车速和加速度下,中度混合动力汽车的工作区域可以划分为纯电动区域、发动机单独驱动区域和电机助力区域,如图6a所示。当 $S_{SOC} < X_{SOC}$ 时,在不同车速和加速度下,混合动力汽车的工作区域可以划分为发动机单独驱动区域和轻载充电区域,如图6b所示。再采用“三系数”法^[8]对图中的发动机关闭曲线、轻载充电曲线和 SOC 切换阈值进行优化,可得到基于系统效率最优的工作模式切换策略。为了分析每个工作模式下混合动力汽车的经济性换挡规律,将图6转化到“车速-油门开度”的关系图上,得到图7所示的工作模式划分区域。

3 AMT 中度混合动力汽车经济性换挡规律

3.1 各模式下的经济性换挡规律

AMT 中度混合动力汽车中,发动机和电机共同工作时,其经济性换挡规律的控制目标是在不同车速和加速度需求下,通过 AMT 挡位自动调节来控制发动机和电机的输出转矩和转速,从而使得动力传动系统的效率最高^[9-11]。此时,对

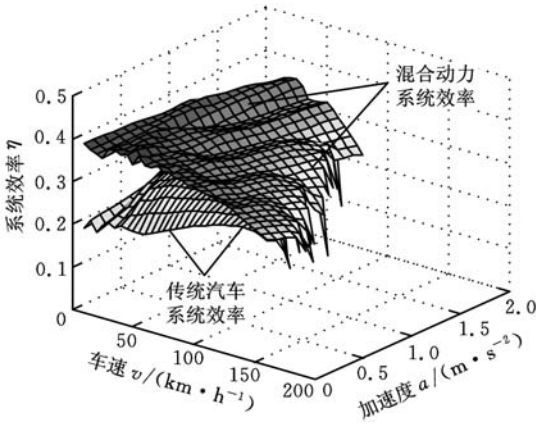
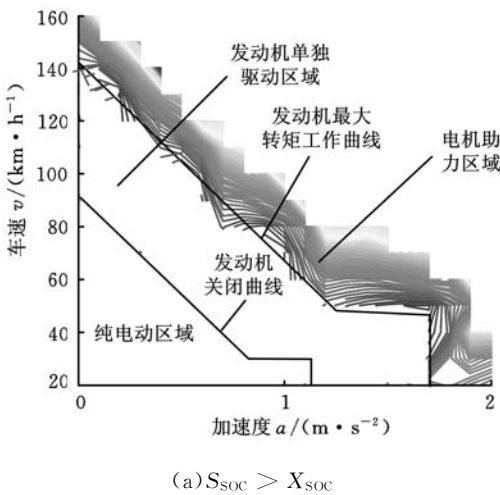
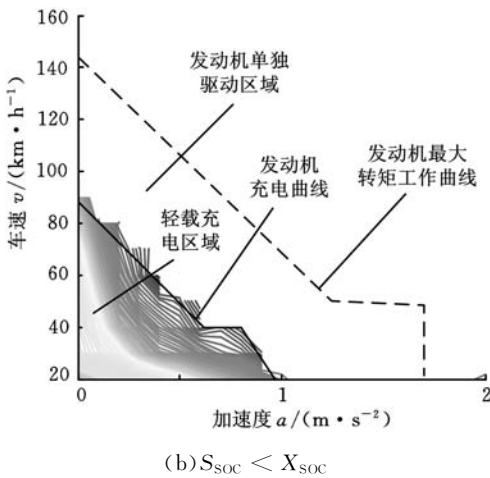


图 5 混合动力汽车与传统汽车效率对比图



(a) $S_{soc} > X_{soc}$



(b) $S_{soc} < X_{soc}$

图 6 驱动工况工作区域划分

于混合动力系统有

$$T_{req} = (T_e + T_m) i_{g(m)} i_0 \quad (4)$$

$$\omega_e = \omega_m = v_{g(m)} i_0 / (3.6 r_{wh}) \quad (5)$$

约束条件为

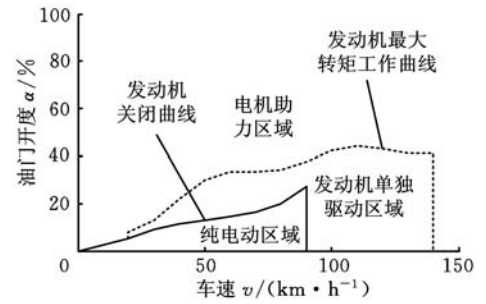
$$T_{emin}(\omega) \leq T_e(\omega) \leq T_{emax}(\omega)$$

$$T_{mmin}(\omega) \leq T_m(\omega) \leq T_{mmax}(\omega)$$

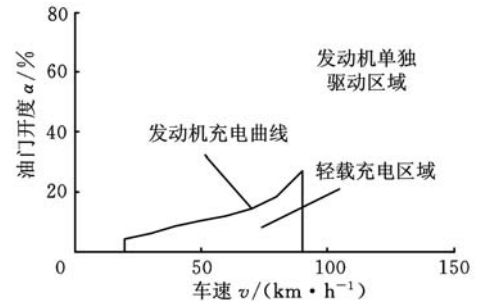
$$\omega_{emin} \leq \omega_e \leq \omega_{emax}$$

$$\omega_{mmin} \leq \omega_m \leq \omega_{mmax}$$

$$S_{SOCmin} \leq S_{SOC} \leq S_{SOCmax}$$



(a) $S_{soc} > X_{soc}$



(b) $S_{soc} < X_{soc}$

图 7 驱动工况工作区域划分

式中, T_{req} 为整车需求转矩; T_m 为电机输出转矩(其中 T_m 为正代表 ISG 电机电动, T_m 为负表示 ISG 电机充电); T_e 为发动机输出转矩; $i_{g(m)}$ ($m = 1, 2, 3, 4, 5$) 为 AMT 速比; i_0 为主减速器速比; ω_e 为发动机角速度; ω_m 为电机角速度; v 为整车车速; r_{wh} 为车轮半径; ω_{emin} 、 ω_{emax} 分别为发动机最小和最大角速度; ω_{mmin} 、 ω_{mmax} 分别为电机最小和最大角速度; T_{emin} 、 T_{emax} 分别为发动机最小和最大转矩; T_{mmin} 、 T_{mmax} 分别为电机最小和最大转矩; S_{SOCmin} 、 S_{SOCmax} 分别为设定的电池最小荷电状态值和最大荷电状态值。

发动机和电机共同工作包括电机助力和发动机轻载充电两种工作模式,系统效率主要由发动机效率、电机效率、电池放电效率和传动系统效率决定。本文没有考虑电机控制器和 DCDC 的效率。

电机助力工作模式下,系统效率可以表示为

$$\eta_{s,zl}(i_{g(m)}, T_e, T_m) = \frac{T_{req}}{T_e/\eta_e + T_m/(\eta_m \eta_{b,d})} \eta_t \quad (6)$$

式中, η_t 为传动系统效率。

发动机轻载充电模式下,系统效率可以表示为

$$\eta_{s,qz}(i_{g(m)}, T_e, T_m) = \frac{T_{req} + |T_m| \eta_m \eta_{b,c}}{T_e/\eta_e} \eta_t \quad (7)$$

在车速和加速度一定时,整车的的需求转矩 T_{req} 一定,由式(4)、式(5)和其变量的约束条件可知,AMT 挡位以及发动机和电机转矩、转速在其允许范围内存在多种选择。由式(6)和式(7)可以求出每种选择下的系统效率,从而可以通过每一车速和加速度下 AMT 挡位的优化使得混合动力系统效率达到最优,优化后的 AMT 目标挡位如

图 8 和图 9 所示(注:MATLAB 软件中由 surf 命令得到的三维图都是由“四边形”和“三角形”等组成,因此图中的“三角形”是正常显示。由于本文中挡位是离散的,导致目标挡位图中的“三角形”部分比较明显)。

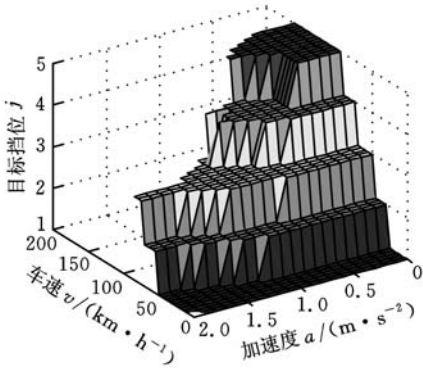


图 8 电机助力时的目标挡位

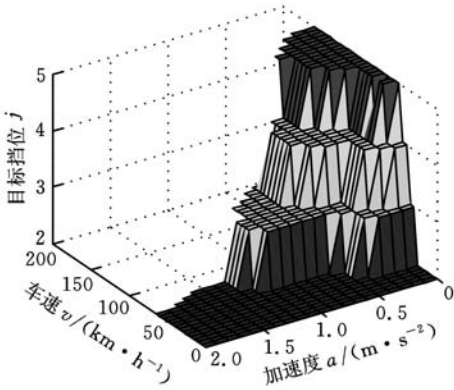


图 9 轻载充电时的目标挡位

将图 8 和图 9 所示的电机助力模式和发动机轻载充电模式下的目标挡位转换到“车速—油门开度”关系图上,可以分别得到电机助力模式和发动机轻载充电模式下的经济性换挡规律。图 10 和图 11 所示为优化所得的经济性换挡规律,经济性降挡规律可以采用等延迟型降挡控制策略直接获取。

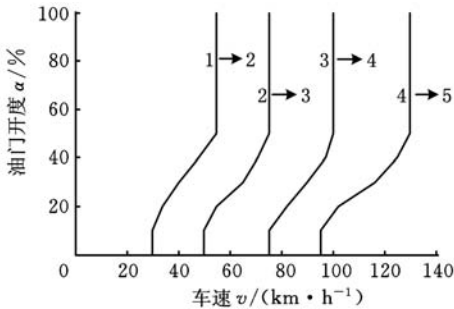


图 10 电机助力时的换挡规律

当 AMT 中度混合动力汽车运行在纯电动工作模式和发动机单独驱动模式时,同样可以先计算出系统效率,再通过效率优化的方式得到这两

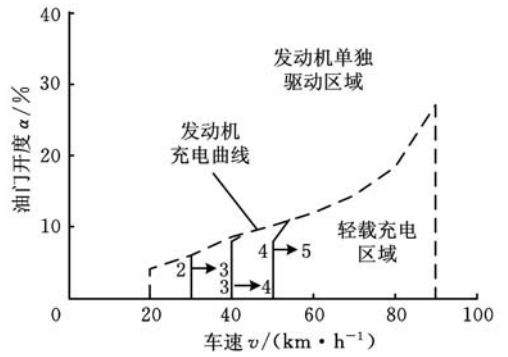


图 11 轻载充电时的换挡规律

个模式下的目标挡位。最终得到的纯电动模式和发动机单独驱动模式下的经济性换挡规律如图 12 和图 13 所示。

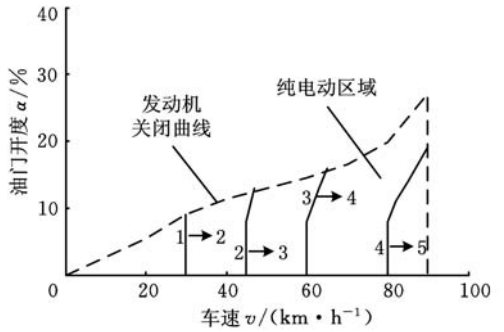


图 12 纯电动时的换挡规律

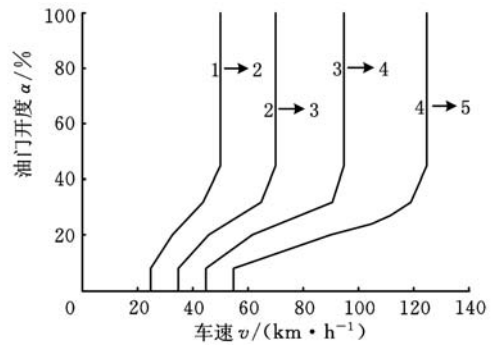
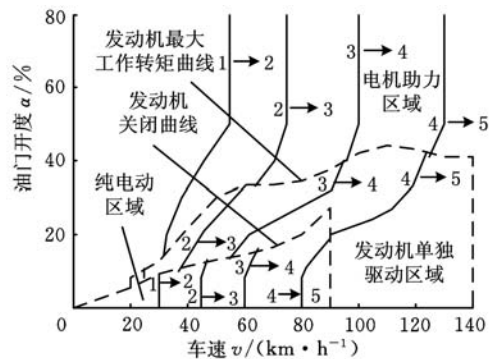


图 13 发动机单独驱动时的换挡规律

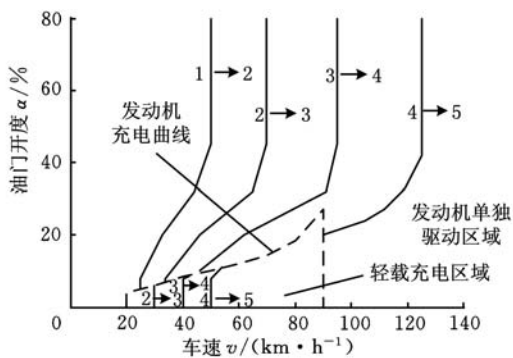
3.2 整车经济性换挡规律

在已获得驱动工况下所有工作模式的经济性换挡规律的基础上,将不同工作模式下的换挡规律进行整合,可以得到 AMT 中度混合动力汽车驱动工况下的经济性换挡规律,如图 14 所示。

当 S_{SOC} 大于设定阈值 X_{SOC} 时,混合动力汽车可能的工作模式有纯电动模式、发动机单独驱动模式和电机助力模式,在此条件下按图 14a 所示换挡规律进行换挡,从图中可以看出,电机助力时的换挡车速较发动机单独驱动时的换挡车速高,这是因为电机助力运行时,发动机从高负荷降低为中负荷工作,工作点向经济性曲线靠拢,以使整车系统效率较高,所以换挡车速有所提高。当 S_{SOC} 小于 X_{SOC} 时,混合动力汽车可能的工作模式



(a) $S_{soc} > X_{soc}$



(b) $S_{soc} < X_{soc}$

图 14 AMT 中度混合动力汽车经济性升挡规律

包括轻载充电模式和发动机单独驱动模式。在此条件下,整车按图 14b 所示升挡规律进行换挡,从图中可以看出轻载充电时的换挡车速较发动机单独驱动时低,这是因为轻载充电时,整车负荷较低,由于电机的充电,发动机由低负荷升高到中负荷工作,工作点向经济性曲线靠拢,以使整车系统效率较高,所以换挡车速有所降低。

4 仿真分析

为了验证本文提出的经济性换挡策略的有效性,基于 ADVISOR 中已有的轻度混合动力汽车 Insight 模型进行二次开发,在发动机模块和 ISG 电机模块之间加上一个离合器模块,再对整车参数进行相应的修改,即得到本文中的中度混合动力汽车整车模型。在此基础上分别对本文的换挡策略和采用与 ADVIOSR 相同的换挡策略在 ECE+EUDC 循环工况(图 15)下进行了仿真,模型中的仿真参数见表 1。

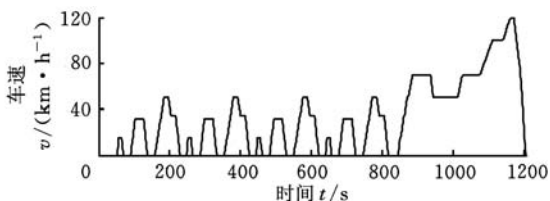
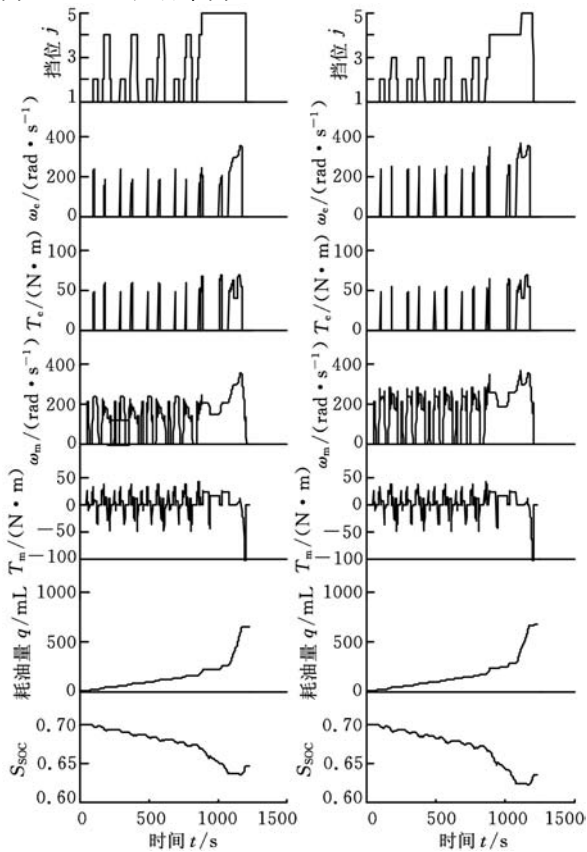


图 15 ECE+EUDC 循环工况

表 1 仿真参数

部件名称	参数	数值
整车	质量(kg)	1500
	迎风面积(m ²)	2.28
	风阻系数 C _D	0.32
发动机	排量(L)	1.6
	最大功率(kW)	69
电机	峰值功率(kW)	25
电池	额定容量(A·h)	6.5
	额定电压(V)	288
主减速器	速比	4.3
1~5 挡速比 i _g		(3.583,1.925,1.281,0.951,0.755)

图 16a 和图 16b 别为采用本文提出的经济性换挡策略和采用与 ADVISOR 相同的换挡策略在 ECE+EUDC 循环工况下的仿真结果。图 16a 中,在 ECE 工况阶段,AMT 的最高挡位达到了 4 挡,发动机和电机的平均转速较图 16b 中低,但输出转矩较大,发动机和电机的工作点向其各自的经济性曲线靠拢,使得整车系统效率较高。循环结束时,共耗油 653mL, S_{soc} 为 0.6467,降低了 0.0533,折算油耗为 10.7mL。循环共行驶了 11.022km,综合百公里油耗为 6.09L。图 16b 中,在 ECE 工况阶段,最高挡位只有 3 挡,循环结束时,共耗油 675mL, S_{soc} 为 0.6353,降低了 0.0647,折算油耗为 12.9mL。综合百公里油耗为 6.31L,节油率为 3.5%。



(a) 本文换挡策略

(b) 传统换挡策略

图 16 换挡策略仿真与结果对比

两种换挡控制策略仿真结果对比如表 2 所示。结果表明,针对本文中的混合动力车型,采用本文提出的经济性换挡控制策略比采用与 ADVISOR 相同的换挡控制策略在整个循环工况中的综合能耗更少,能更好地发挥中度混合动力汽车的节油潜力。

表 2 仿真结果对比

	本文换挡策略	ADVISOR 中换挡策略
耗油量 $q(\text{mL})$	653	675
循环结束时 SOC 值	0.6467	0.6353
综合百公里油耗(L)	6.09	6.31

5 结论

(1)基于实验数据,分别建立了混合动力汽车各关键部件的效率模型。(2)以系统效率优化为目标先确定了中度混合动力驱动工况各工作模式的工作区域及工作模式的切换条件,然后分别确定了 AMT 汽车在各模式下的经济性换挡规律,在此基础上得到了中度混合动力汽车在驱动工况下的经济性换挡规律。(3)以 MATLAB/Simulink 为平台建立了中度混合动力汽车的整车模型,在 ECE+EUDC 循环工况下对提出的控制策略进行了仿真,并与 ADVISOR 中已有的换挡控制策略进行了比较,结果表明,对于本文中的中度混合动力车型,本文提出的经济性换挡策略较采用与 ADVISOR 相同的换挡控制策略能较好地提高整车的燃油经济性。

参考文献:

- [1] 古艳春,殷承良,张建武. 并联式混合动力汽车机械式自动变速器换挡策略[J]. 上海交通大学学报, 2007,41(2):250-255.
Gu Yanchun, Yin Chengliang, Zhang Jianwu. The Gearshift Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicle with Automatic Mechanical Transmission[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(2):250-255.
- [2] 叶明,秦大同,刘振军. 轻度混合动力 AMT 系统经济性换挡规律优化[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(11):3012-3015.
Ye Ming, QinDatong, Liu Zhenjun. Optimization on Shift Schedule for a Mild Hybrid Electric Car with Automatic Manual Transmission [J]. Journal of System Simulation, 2008,20(11):3012-3015.
- [3] National Renewable Energy Laboratory. ADVISOR Documentation[R]. Golden,Colorado: NREL, 2002.
- [4] 严运兵,颜伏伍,杜常清. 并联混合动力电动汽车动态协调控制策略及仿真研究[J]. 中国机械工程, 2010,21(2):234-239.
Yan Yunbing, Yan Fuwu, Du Changqing. Research

on Strategy and Simulation for Dynamic Coordinative Control of PHEV[J]. China Mechanical Engineering, 2010,21(2):234-239.

- [5] 王熙. 基于传动系统效率的汽车燃油经济性研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [6] 秦大同,胡明辉,杨亚联,等. CVT 轻度混合动力系统电动机和发动机联合工作模式下的系统效率优化[J]. 机械工程学报,2008,44(11):171-177.
Qin Datong, Hu Minghui, Yang, Yalian, et al. Optimization of System Efficiency for the Mild Hybrid Electric Vehicle with Continuously Variable Transmission under the Motor and Engine Combined Working Conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(11):171-177.
- [7] 秦大同,叶心,胡明辉,等. ISG 型中度混合动力汽车动力驱动工况控制策略优化[J]. 机械工程学报, 2010,46(12):86-92.
Qin Datong, Ye Xin, Hu Minghui. Optimization of Control Strategy for Medium Hybrid Electric Vehicle with ISG at Drive Condition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(12):86-92.
- [8] 张承慧,吴剑,崔纳新. 基于无级变速器的并联式混合动力汽车能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2007,43(10):114-118.
Zhang Chenghui, Wu Jian, Cui Naxin. Energy Manage Strategy of Hybrid Electric Vehicle Based on Continuously Variable Transmission[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(10):114-118.
- [9] 李勇,常思勤,魏英俊. 基于转速/转矩控制的 AMT 换挡策略[J]. 中国机械工程, 2011,22(15):1880-1885.
Li Yong, Chang Siqing, Wei Yingjun. Shift Rule of AMT Based on Speed/Torque Control [J]. China Mechanical Engineering, 2011,22(15):1880-1885.
- [10] 王保华,罗永革,张建武. EQ6110 客车电动 AMT 换挡策略[J],农业机械学报,2007,38(1):37-40.
Wang Baohua, Luo Yongge, Zhang Jianwu. Electric AMT Shift Strategy of EQ6110 Bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):37-40.
- [11] 邓涛,孙冬野,秦大同,等. 重型车辆 AMT 硬件在环仿真试验研究[J]. 中国机械工程,2010,21(2):245-251.
Deng Tao, Sun Dongye, Qin Datong. Study of AMT Hardware — in — loop Simulation Test of Heavy Vehicle[J]. China Mechanical Engineering, 2010,21(2):245-251. (编辑 苏卫国)
- 作者简介:秦大同,男,1956 年生.重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力传动及其综合控制。龙海威,男,1986 年生.重庆大学机械传动国家重点实验室硕士研究生。胡明辉,男,1975 年生.重庆大学机械传动国家重点实验室副教授。叶心,女,1981 年生.重庆理工大学汽车学院讲师。