DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711097

并联混合动力汽车改进双参数换挡规律设计

李宏才[1], 闫正军[1,2], 王伟达[1], 张 为[3], 刘 辉[1], 李训明[1]

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081;2. 陆军工程大学,武汉 430075;3. 交通运输部科学研究院, 北京 100029)

摘 要: 针对目前混合动力汽车换挡规律计算中机电转矩分配规则和实际运行工况相差较大的问题,以某并联插电式混合动力汽车(PHEV)为对象,以车速、油门开度和电池荷电状态(SOC)为控制参数制定机电转矩分配规则,在传统双参数换挡规律基础上,考虑双动力源协同和电池荷电状态的影响,提出改进双参数换挡规律计算原则和方法,分别以牵引力最大和系统综合效率最高为优化目标制定动力性、经济性换挡规律. 基于 AVL Cruise 和 Matlab/Simulink 软件联合仿真平台,分别将改进的双参数换挡规律与初始换挡规律的动力性、经济性进行对比,改进后,0~100 km·h^{-1}加速时间缩短 5.9%,在 NEDC、WLTC 循环工况下电平衡油耗分别降低 10.4%、7.5%.

关键词: 插电式混合动力汽车;能量管理策略;换挡规律;改进双参数;Cruise

中图分类号: TU375.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2019)01-0102-07

Design method of improved two-parameter gearshift schedule for parallel HEV

LI Hongcai[1], YAN Zhengjun[1,2], WANG Weida[1], ZHANG Wei[3], LIU Hui[1], LI Xunming[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. PLA Army Engineering University, Wuhan 430075, China; 3. China Academy of Transportation Sciences Ministry of Communications, Beijing 100029, China)

Abstract: In view of the difference between the torque distribution principle in the hybrid gearshift schedule calculation and the actual operation condition, on the basis of a parallel pulg-in hybrid electric vehicle (PHEV), the torque distribution principle was formulated with the velocity, throttle opening and battery SOC as control parameters. Considering the influence of dual power source synergy and battery SOC, the calculation principles and methods of dynamic and economic improved two-parameter gearshift schedules were defined, and the dynamic gearshift schedule was gained with maximizing traction as optimization objective, as the economic gearshift schedule was gained with maximizing systematic efficiency as optimization objective. The simulation of the proposed improved two-parameter dynamic and economic gearshift schedules were compared to the initial gearshift schedule on the platform of AVL Cruise and Matlab/Simulink. The acceleration time of 0~100 km·h^{-1} is shortened by 5.9%, and the consumption of SOC balanced is reduced by 10.4% and 7.5% respectively under the NEDC and WLTC.

Keywords: PHEV; energy management; gearshift schedule; improved two-parameter; cruise

机械自动变速器(automated manual transmission, AMT)以其低成本、高效率和易于制造的特点被广泛运用在混合动力汽车上[1]. 为改善混合动力汽车动力性和经济性指标,一方面要优化发动机和电机的转矩分配比例,如基线控制、粒子群算法、动态规划算法、模型预测算法等[2-9];另一方面要制定合适的换挡策略,优化发动机和电机的工作区间. 文献[10]提出了一种同时决策机电转矩分配和变速器挡位的优化控制方法. 文献[11]基于发动机、电机效率的加权函数制定了经济性换挡规律,简化了求解系统综合效率的方法. 文献[12]提出了一种基于试验测试逆向解析混合动力系统换挡规律的方法. 与传统汽车相比,在制定混合动力汽车换挡规律时,需要考虑多动力源协同这一特性. 文献[13]在制定动力性换挡规律时,基于节气门开度、车速以及电池荷电状态得到动力源合成输出扭矩. 文献[14]通过遍历发动机和电机所有转矩组合,制定了动力性和经济性换挡规律.

本文以牵引力最大和整车系统综合效率最高为优化目标,考虑双动力源协同和电池荷电状态的影响,制定以车速、油门开度为控制参数的改进双参数动力性和经济性换挡规律,并基于某双轴并联插电式混合动力汽车验证设计方法的合理性.

1 双轴并联插电式混合动力汽车结构

双轴并联插电式混合动力汽车(PHEV)结构原理如图 1 所示,该构型主要由发动机、电机、离合器

收稿日期: 2017-11-18
基金项目: 国家自然科学基金(51575043,U1564210)
作者简介: 李宏才(1970—),男,高级实验师,硕士生导师
通信作者: 王伟达,wangwd0430@bit.edu.cn

以及某型具有双轴输入的 AMT 构成，发动机和电机通过两根轴分别与 AMT 相连，具有两路独立到车轮的扭矩传递路径. 该型 AMT 在变速变矩的同时实现了机电扭矩耦合，机械路挡位与电动路挡位交替升挡，可无动力中断换挡[15]，具有 3 个纯电动挡位和 9 个混合动力挡位，传动简图如图 2 所示. 机械路 7 个前进挡挡位传动比分别为 3.369、1.815、1.252、0.978、0.784、0.636、0.297，电动路 3 个挡位传动比分别为 2.333、0.867、0.441. 本文研究的 PHEV 基本参数见表 1.

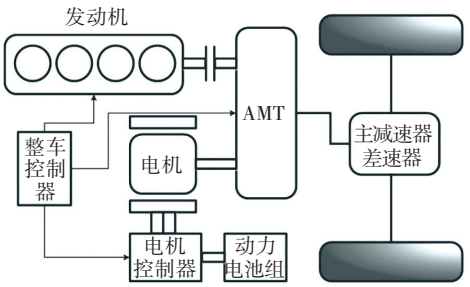


图 1　双轴并联 PHEV 结构

Fig.1　Dual-axis-parallel PHEV structure

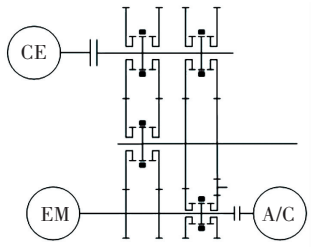


图 2　AMT 传动简图

Fig.2　Diagram of AMT system

表 1　PHEV 参数

Tab.1　Parameters of PHEV

M/ kg	A/ m^2	f	r/m	$P_{e,max}$/ kW	n_e/ (r·min^{-1})
1 869	2.69	0.4	0.358	133	800~5 600
$P_{m,max}$/ kW	$P_{m,rated}$/ kW	n_m/ (r·min^{-1})	C/ (A·h)	U/ V	i_0
84	42	0~12 000	37	312	4.053

注：M 为整备质量，A 为迎风面积，f 为风阻系数，r 为轮胎半径，$P_{e,max}$ 为发动机峰值功率，n_e 为发动机转速，$P_{m,max}$ 为电机峰值功率，$P_{m,rated}$ 为电机额定功率，n_m 为电机转速，C 为电池容量，U 为电池额定电压，i_0 为主减速比.

2　双动力源协同能量管理策略

根据双轴并联 PHEV 发动机与电机存在的耦合方式，整车运行模式共有 4 种情况：纯电动模式、混合动力模式、行车充电模式和回馈制动模式（包含机械制动）. 当需求转矩 $T_r < 0$ 时，车辆进入回馈制动模式. 当 $T_r > 0$ 时，车辆进入驱动状态，如果此时电池荷电状态低于目标值，车辆进入行车充电模式；如果电池荷电状态高于目标值，当电动机能够单独驱动车辆时，车辆进入纯电动模式，反之，车辆进入混合动力模式，如图 3 所示.

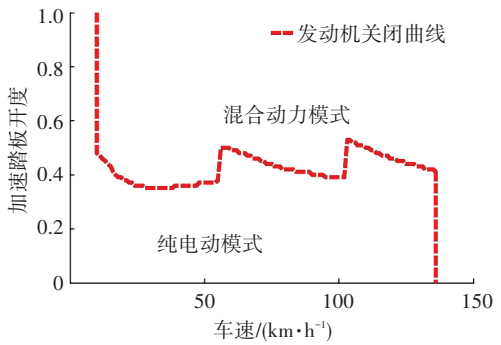


图 3　电池荷电状态高于目标值时模式切换条件

Fig.3　Mode switching conditions when the battery SOC is higher than the target value

根据 PHEV 特点，电池荷电状态目标值的确定首先要满足一定的纯电续驶里程（本文为 50 km）[16]，使电池中储存的价格较低的电网电能得到充分利用，因此应该允许电池放电到一定深度；另外，还要考虑电池的充放电内阻，如图 4 所示，当电池荷电状态低于 20%时，充放电内阻急剧上升. 因此本文的荷电状态目标值取为 25%.

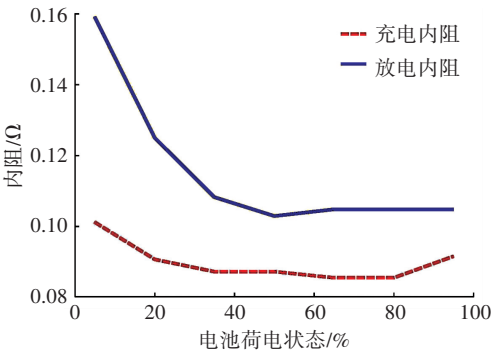


图 4　电池充放电内阻

Fig.4　Battery charge and discharge resistance

在各种模式中，转矩分配策略为规则型控制策略，主要原则是让发动机尽量沿最佳燃油经济性曲线工作，如图 5、表 2 所示.

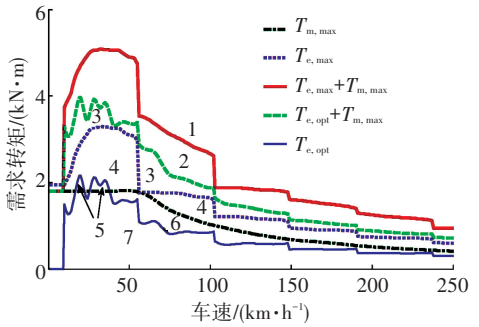


图 5　需求转矩 T_r 分区

Fig.5　Required torque T_r division

为了适应不同驾驶需求，本文制定的能量管理策略可通过手动开关切换动力模式和经济模式. 两种模

式机电转矩分配原则相同(表 2 原则涵盖了不同模式下不同需求转矩区间进行转矩分配的全部情况),不同点在于整车需求转矩解析方法不同,并且分别采用动力性换挡规律和经济性换挡规律,见式(1):

$$\begin{cases} T_r = \alpha \cdot T_{max}; \\ T_{max} = T_{emax}, \text{经济模式}; \\ T_{max} = T_{emax} + T_{mmax}, \text{动力模式}. \end{cases} \tag{1}$$

通过不同的动力源最大转矩值将不同模式和油门开度下的需求转矩设定在不同的工作区间,以区分模式和不同规则的能量分配. 整车需求转矩计算方法为油门开度与当前车速下动力源最大输出转矩的乘积. 动力模式下,动力源最大转矩为发动机和电动机最大合成输出转矩,以发挥车辆最大动力性能;经济模式下,动力源最大转矩为发动机最大输出转矩. 选择发动机最大转矩,既能保证车辆具有一定的动力性,又有利于混合动力或行车充电工况下,在发动机最佳燃油经济性转矩线上下发挥电动机的削峰填谷作用,提高整车燃油经济性.

表 2 转矩分配原则

Tab.2 Distribution principle of torque

模式	T_r 位于图 5 区域	转矩分配
纯电动	6, 7	$T_e = 0, T_m = T_r$
混合动力	1	$T_e = T_{e,max}, T_m = T_{m,max}$
	2, 5	$T_e = T_r - T_m, T_m = T_{m,max}$
	3, 4	$T_e = T_{e,opt}, T_m = T_r - T_e$
	1,2,3	$T_e = T_{e,max}, T_m = 0$
行车充电	4,6	$T_e = T_r, T_m = 0$
	5,7	$T_e = T_{e,opt}, T_m = T_r - T_{e,opt}$

注:T_r 为整车需求转矩,$T_{m,max}$ 为电机最大输出转矩,$T_{e,max}$ 为发动机最大输出转矩,$T_{e,opt}$ 为发动机最佳燃油经济性转矩.

3 改进双参数换挡规律研究

3.1 改进双参数换挡规律计算方法

由本文双动力源协同能量管理策略可知,电池荷电状态是决定车辆工作模式的重要参数之一,直接影响混合动力汽车转矩分配原则,在制定换挡规律时要考虑电池荷电状态这个影响因素. 在电池荷电状态约为 25%时,车辆的工作模式存在较大不同:当电池荷电状态高于 25%时,根据需求转矩大小,车辆在纯电动模式和混合动力模式之间切换(电池处于放电状态);当电池荷电状态低于 25%时,车辆仅工作在行车充电模式(电池处于充电状态). 在这两个区段内,车辆的工作模式相对固定,尽量使发动机工作在最佳燃油经济性曲线,电机补充驱动转矩的不足部分或工作在发电状态消耗发动机超出驱动转矩需求的部分,机电转矩分配原则基本相同且受电池荷电状态影响不大(电池荷电状态仅影响电机的峰值输出功率边界条件). 为了简化计算,本文仅分电池荷电状态高于、低于 25% 两种状态,对离线计算得到的不同电池荷电状态下的换挡规律进行整合,形成新的改进型换挡规律. 改进型的双参数换挡规律能综合反映踏板开度、车速和电池荷电状态的影响, 基本流程如图 6 所示. 另外,本文降挡规律使用等延迟型,故下文仅描述升挡规律的计算方法.

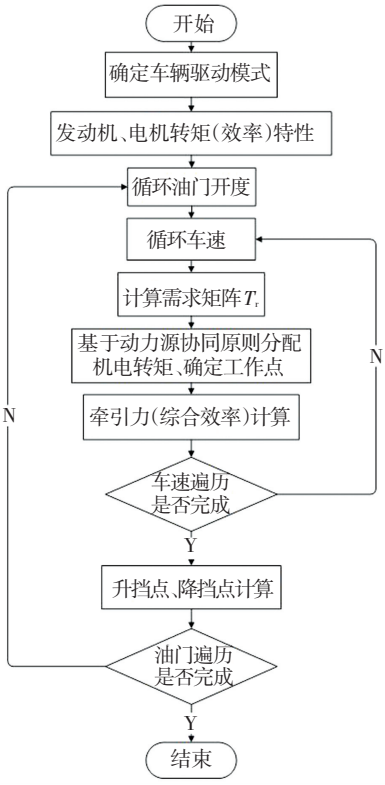


图 6 改进双参数换挡规律制定流程

Fig.6 Flow chart of improved two-parameter gearshift schedule

3.2 动力性换挡规律

动力性换挡要求充分发挥汽车各个挡位的驱动功率,以取得优异的加速能性、爬坡能力和高平均车速. 本文通过计算牵引力交点求取动力性换挡规律,整车牵引力计算方法见式(2)、(3):

$$T_r = \alpha \cdot T_{max}, \tag{2}$$

$$F_t = [(T_e \cdot i_{g,e} + T_m \cdot i_{g,m}) \cdot i_0 \cdot \eta_T]/r. \tag{3}$$

式中:T_r 为整车需求转矩,α 为油门开度,T_{max} 为当前车速下动力源最大输出转矩,$i_{g,e}$ 和 $i_{g,m}$ 分别为机械路和电动路的挡位,i_0 为主减速比,η_T 为机械传动效率,T_e 和 T_m 为发动机和电动机的输出转矩(由各个工作模式下转矩分配原则得到),r 为轮胎滚动半径.

以混合动力模式为例,当油门开度为 100%时,整车转矩需求最大,此时要求发动机和电机都工作在峰

值外特性曲线上，由于 1 挡比 2 挡传动比大，所以牵引力始终高于 2 挡，为了充分发挥 1 挡的驱动能力，取 1 挡最高车速即发动机最高转速点对应的车速作为换挡点，如图 7 所示；当油门开度为 30%时，整车需求转矩较小，此时发动机调节空间变大，可沿最优转矩曲线工作，其余转矩由电机补充. 由于油门开度相同，在同一车速下 1、2 挡的需求转矩相同且都较小，此时变速器处于 1、2 挡均能满足驱动需求，会出现如图 8 所示的牵引力重合现象，重合部分对应的车速点均能作为换挡点，但是考虑到在相同驱动能力下提前换挡有助于减少油耗，因此取重合部分最低车速作为换挡点. 将不同油门开度下各换挡点连接起来，可得到混合动力模式下的动力性升挡曲线，如图 9 所示. 同理，可分别得到纯电动、行车充电模式下的动力性升挡曲线，如图 10、11 所示.

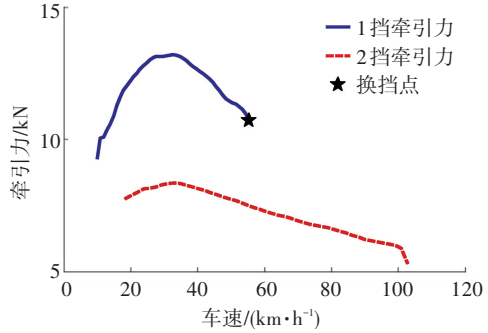


图 7 油门开度为 100%时 1–2 挡换挡点

Fig.7　1st-2nd gearshift point at 100% throttle opening

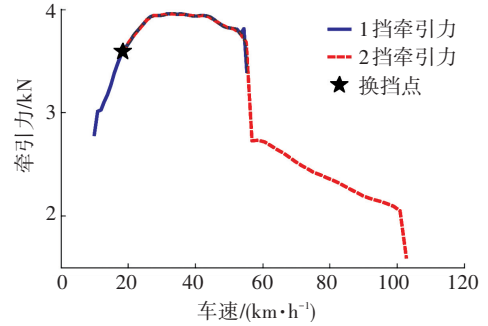


图 8　油门开度为 30%时 1–2 挡换挡点

Fig.8　1st-2nd gearshift point at 30% throttle opening

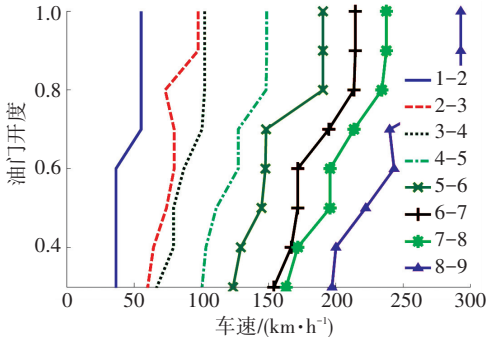


图 9　混合动力模式动力性升挡规律

Fig.9　Dynamic gearshift schedule for hybrid mode

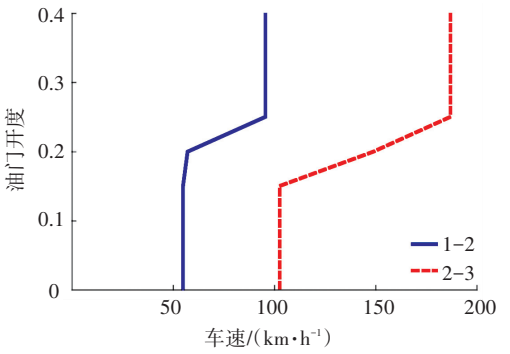


图 10　纯电动模式动力性升挡规律

Fig.10　Dynamic gearshift schedule for EV mode

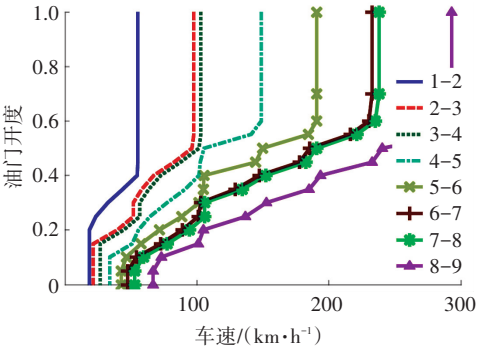


图 11　行车充电模式(电池荷电状态低于 25%时)动力性升挡规律

Fig.11　Dynamic gearshift schedule for charge mode (when the battery SOC is lower than 25%)

根据图 3 中模式切换条件可知，在车速–油门开度平面，纯电动模式和混合动力模式动力性升挡规律均只覆盖部分区域，所以将纯电动模式和混合动力模式的升挡规律进行整合，得到电池荷电状态高于 25%时的动力性升挡规律，如图 12 所示. 电池荷电状态低于 25%时，车辆仅工作在行车充电模式，故图 11 即为电池荷电状态低于 25%时的动力性升挡规律.

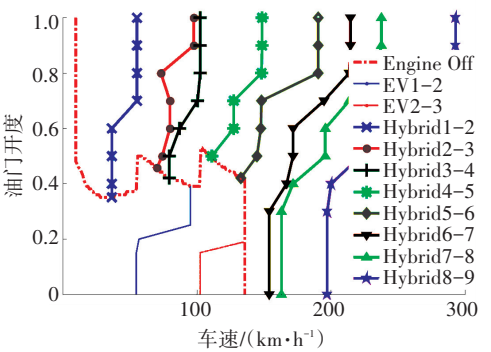


图 12　电池荷电状态高于 25%时动力性升挡规律

Fig.12　Dynamic gearshift schedule when the battery SOC is higher than 25%

3.3　经济性换挡规律

混合动力汽车经济性换挡规律的控制目标是通过控制变速器的挡位，调节发动机和电机的工作点，使变速器始终工作在系统综合效率较高的挡位. 整车系统综合效率为系统输出功率与输入功率的比值. 车辆在不同模式下运行时，功率流动方向不同，

系统综合效率的计算方法也不同. 以混合动力模式为例,功率流如图 13 所示.

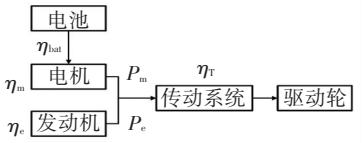


图 13 混合动力模式功率流示意

Fig.13 Power flow in hybrid driving mode

燃油燃烧和动力电池输出的功率经传动系统耦合输出到驱动轮,系统综合效率 η_{Hybrid} 为轮端驱动功率与动力源输出总功率的比值,如式(4)所示; 同理,可分别得到纯电动和行车充电模式下的系统综合效率 η_{EV}、η_{Charge}, 如式(5)、(6)所示.

$$\eta_{Hybrid}=\frac{(P_e+P_m)\cdot\eta_T}{P_e/\eta_e+P_m/(\eta_m\cdot\eta_b)}, \tag{4}$$

$$\eta_{EV}=\eta_b\cdot\eta_m\cdot\eta_T, \tag{5}$$

$$\eta_{Charge}=[(P_e-P_m)\cdot\eta_T+P_m\cdot\eta_c\cdot\eta_b]/(P_e/\eta_e). \tag{6}$$

式中: P_e 为发动机输出功率,P_m 为电机功率,η_e 为发动机效率, η_m 为电机电动效率, η_c 为电机发电效率, η_b 为电池充放电效率, η_T 为传动系统效率.

同理,通过求取相邻挡位效率曲线的交点,可得到各个模式下的经济性换挡曲线,再将纯电动模式和混合动力模式的经济性换挡规律进行整合,分别得到电池荷电状态低于和高于 25%时的经济性升挡规律,如图 14、15 所示.

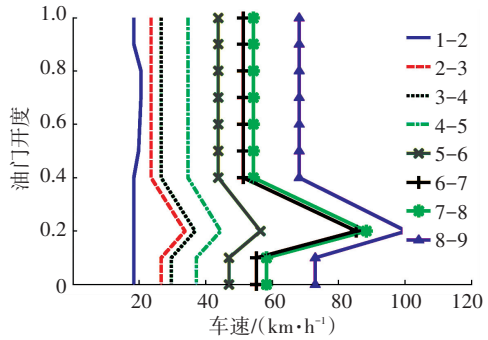


图 14 电池荷电状态低于 25%时经济性升挡规律

Fig.14 Economic gearshift schedule when the battery SOC is lower than 25%

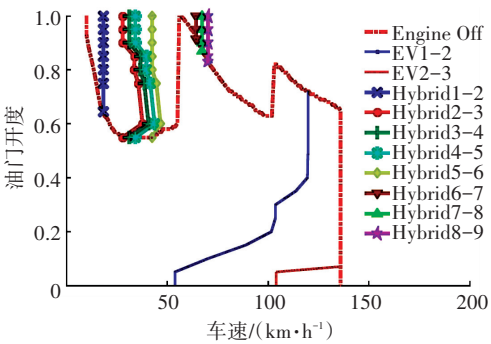


图 15 电池荷电状态高于 25%时经济性升挡规律

Fig.15 Economic gearshift schedule when the battery SOC is higher than 25%

可以看出,需求转矩解析方法的差异使得在经济型模式下发动机关闭曲线向上平移,纯电动模式覆盖工作区域增大.

4 仿真结果及分析

为了验证本文提出的换挡规律的有效性,基于 AVL Cruise 和 Matlab/Simulink 分别搭建双轴并联 PHEV 动力学模型和整车控制器模型. 在其他参数完全相同的情况下,分别对本文改进双参数换挡规律和初始换挡规律进行仿真对比.

4.1 动力性换挡规律仿真对比

由于传动系统参数相同,不同换挡规律下最大爬坡度和最高车速相同,故动力性仿真主要是对比 100 km · h^{-1}加速时间. 在 AVL Cruise 中构建相应工况,仿真结果表明,运用本文制定的动力性换挡规律,其加速时间为 6.4 s,较初始换挡规律的 6.8 s 缩短了 5.9%,升挡曲线如图 16 所示.

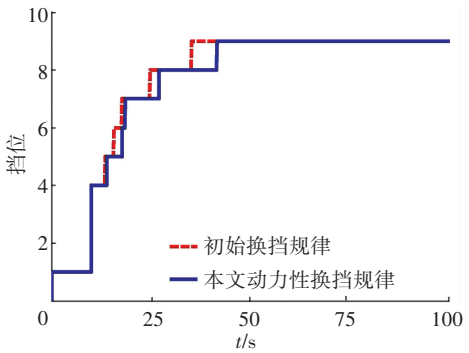


图 16 升挡曲线

Fig.16 Gearshifting curve

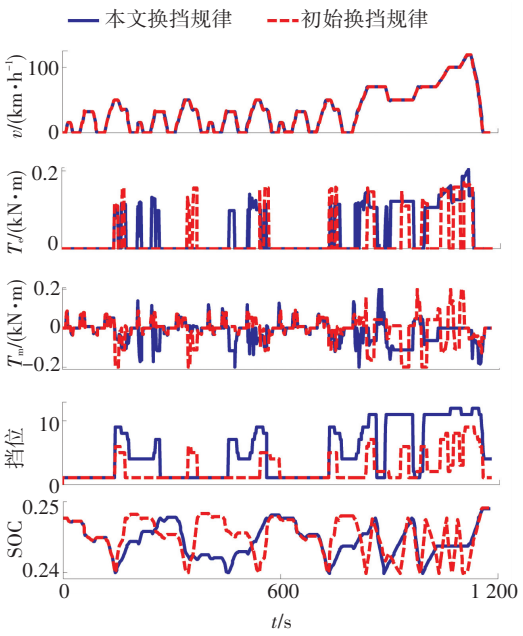
对比初始换挡规律,本文制定的动力性换挡规律总体上延迟了换挡时机,使低挡的牵引力得到充分发挥,同等条件下加速时间缩短,动力性增强.

4.2 经济性换挡规律仿真对比

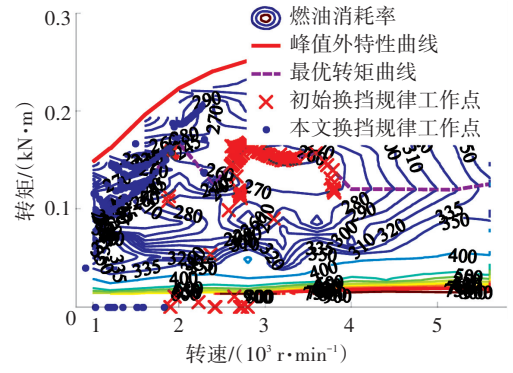
经济性换档规律仿真分别基于 NEDC 和 WLTC 循环工况,主要对比电平衡油耗指标. 电平衡油耗是在将电池初始荷电状态设置为 25%,且工况运行始末电池荷电状态变化范围在 3%以内的条件下得到的. 由于工况起止点电池荷电状态几乎相同,计算循环工况油耗时无需对电功率进行折算,所以更能反映并联 PHEV 的节油效果,仿真结果如图 17、18 所示.

由图 17、18 可知,本文提出的能量管理策略能很好地跟随工况车速,且能通过切换工作模式维持电池荷电状态平衡. 与初始换挡规律相比,运用本文制定的经济性换挡规律时,变速器运行挡位较高,发动机的转速低,此时发动机负荷相对较大,工作点更加集中于高效区,因此燃油经济性有所改善. 仿

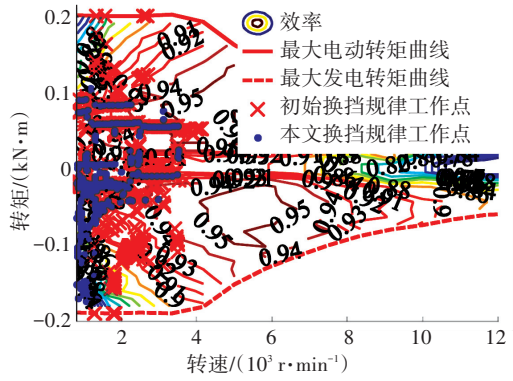
真结果显示，在 NEDC 工况下，运用本文制定的经济性换挡规律，百公里油耗为 6.20 L，较初始换挡规律的 6.92 L 节约了10.4%；在 WLTC 工况下，运用本文制定的经济性换挡规律，百公里油耗为 7.12 L，较初始换挡规律的7.70 L节约了 7.5%.



(a)关键参数仿真结果



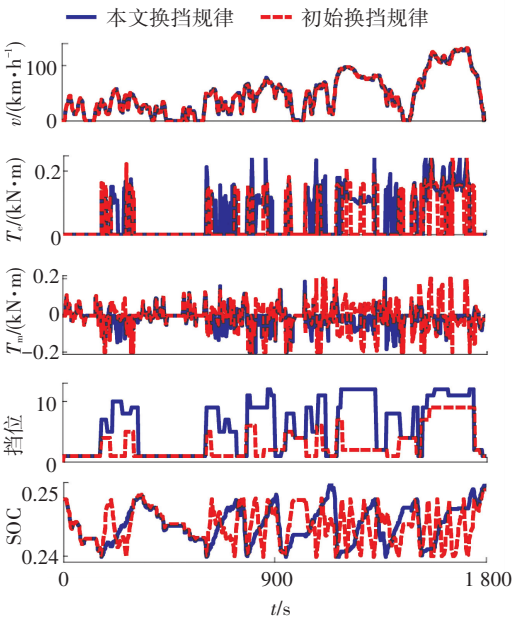
(b)发动机工作点分布



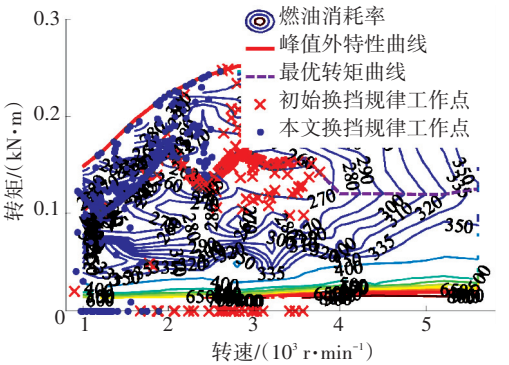
(c)电动机工作点分布

图 17　NEDC 循环工况仿真结果

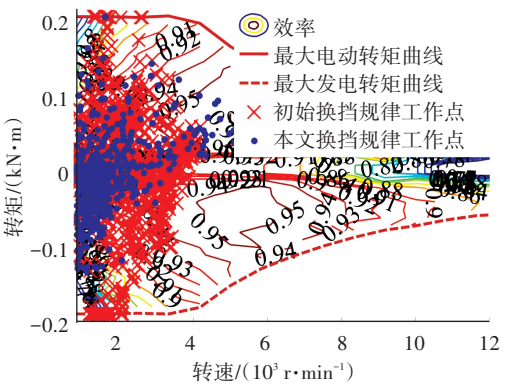
Fig.17　Simulation results of NEDC



(a)关键参数仿真结果



(b)发动机工作点分布



(c)电动机工作点分布

图 18　WLTC 循环工况仿真结果

Fig.18　Simulation results of WLTC

5　结　论

1)基于发动机燃油消耗最低制定了规则型双动力源协同能量管理策略，划分了整车工作模式，确定了转矩分配原则；

2)基于双动力源协同原则，考虑电池荷电状态影响，分别提出了针对混合动力汽车的改进双参数动力性、经济性换挡规律的设计方法.

3)以 AVL Cruise 和 Matlab/Simulink 软件为仿真平台,对本文提出的改进双参数换挡规律和初始换挡规律进行了对比,结果表明,本文提出的动力性、经济性换挡规律对双轴并联 PHEV 的动力性、经济性指标均有提升.

参考文献

[1] 叶心, 秦大同, 胡明辉, 等. ISG 型中度混合动力 AMT 汽车换挡综合控制[J]. 汽车工程, 2011, 33(9): 798. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2011.09.013
YE Xin, QIN Datong, HU Minghui, et al. Comprehensive shifting control of ISG type medium hybrid electric vehicle with AMT [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(9): 798. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2011.09.013

[2] 项昌乐, 吴洋, 王伟达, 等. 双模式机电复合传动系统电功率协调控制策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1): 120. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.017
XIANG Changle, WU Yang, WANG Weida, et al. Electric power coordinated control strategy of dual-mode electro-mechanical transmission system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(1): 120. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.017

[3] PENG Jiankun, HE Hongwen, XIONG Rui. Rule based energy management strategy for a series-parallel plug-in hybrid electric bus optimized by dynamic programming [J]. Applied Energy, 2017, 185: 1633. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2015.12. 031

[4] 黄硕, 李亮, 杨超, 等. 基于规则修正的同轴并联混合动力客车瞬时优化能量分配策略[J].机械工程学报, 2014, 50(20): 113. DOI: 10.3901/JME.2014.20.113
HUANG Shuo, LI Liang, YANG Chao, et al. Rule correction-based instantaneous optimal energy management strategy for single-shaft parallel hybrid electric bus [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (20): 113. DOI: 10.3901/JME.2014.20.113

[5] 王伟达, 项昌乐, 刘辉, 等. 混联式混合动力系统多能源综合控制策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(1): 138. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2012.01.027
WANG Weida, XIANG Changle, LIU Hui, et al. Design and validation of hybrid control strategy for parallel-series HEV [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(1): 138. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2012.01.027

[6] 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. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2015.09.010
ZHANG Chengning, ZHOU Wei, LI Junqiu, et al. An online energy management strategy for extended range electric vehicles based on pontryagin's minimum principle [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(9): 931. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2015.09.010

[7] 王钦普, 杜思宇, 李亮等. 基于粒子群算法的插电式混合动力客车实时策略[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 77. DOI: 10.3901/JME.2017.04.077
WANG Qinpu, DU Siyu, LI Liang, et al. Real-time energy management strategy for plug-in hybrid electric bus on particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 77. DOI: 10.3901/JME.2017.04.077

[8] BORHAN H, VAHIDI A, PHILLIPS A M, et al. MPC-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(3): 593. DOI:10.1109/TCST.2011.2134852

[9] 陈杰, 李亮, 宋健,等. 基于 LTV-MPC 的车辆稳定性控制研究[J].汽车工程, 2016, 38(3): 308. DOI: 10.3969/j.issn.1000-680X.2016.03.008
CHEN Jie, LI Liang, SONG Jian, et al. A study on vehicle stability control based on LTV-MPC[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(3):308.DOI:10.3969/j.issn.1000-680X.2016.03.-008

[10] 杨伟斌, 陈全世, 田光宇, 等. 插电式混合动力汽车换挡规律及转矩分配策略[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14): 91. DOI: 10.3901/JME.2013.14.091
YANG Weibin, CHEN Quanshi, TIAN Guangyu, et al. Shifting schedule and torque distribution strategy for the plug-in hybrid electric vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(14): 91. DOI: 10.3901/JME.2013.14.091

[11] LEE H D, SUL S K, CHO H S. Advanced gear-shifting and clutching strategy for a parallel-hybrid vehicle [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2000,6(6): 26. DOI: 10.1109/2943.877837

[12] 胡宇辉, 杨林, 席军强,等. 某单轴并联混合动力客车换挡规律的解析[J]. 汽车工程, 2013, 35(7): 629. DOI: 10.3969/j.issn.1000-680X.2013.07.011
HU Yuhui, YANG Lin, XI Junqiang, et al. An analysis on the shifting schedule of a single-shaft parallel hybrid electric bus [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(7): 629. DOI: 10.3969/j issn.1000-680X.2013.07.011

[13] 叶明, 秦大同, 刘振军,等.轻度混合动力 AMT 汽车动力性换挡规律研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(7): 671. DOI: 10.3321/j.issn:1000-680X.2006.07.017
YE Ming, QIN Datong, LIU Zhenjun, et al. A study on shift schedule for a mild hybrid electric car with automatic manual transmission [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(7): 671. DOI: 10.3321/j.issn:1000-680X.2006.07.017

[14] 古艳春, 殷承良, 张建武,等. 并联式混合动力汽车机械式自动变速器换档策略[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(2): 250. DOI: 10.3321/j.issn:1006-2467.2007.02.019
GU Yanchun, YIN Chengliang, ZHANG Jianwu, et al. The gear-shift strategy for parallel hybrid electric vehicle with automatic mechanical transmission [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007,41(2):250. DOI: 10.3321/j.issn:1006-2467.2007.02.019

[15] 吴海康, 钟再敏, 余卓平,等. 并联式混合动力新型有源传动装置动力换档特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014,42(12):1890.DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2014.12.017
WU Haikang, ZHONG Zaimin, YU Zhuoping, et al. Power shift feature research of a novel active transmission for parallel hybrid vehicle use [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014,42(12):1890.DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.-2014.12.017

[16] 秦大同, 杨官龙, 刘永刚,等. Plug-in 并联式单电机混合动力汽车能量管理优化控制策略[J]. 中国公路学报, 2013 (5): 170. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2013.05.023
QIN Datong, YANG Guanlong, LIU Yonggang, et al. Energy management optimization control strategy of plug-in parallel single-motor hybrid electric vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013(5):170.DOI:10.3969/j.issn.- 1001-7372.2013.05.023

(编辑 杨 波)