

并联式混合动力电动汽车多模式能量管理策略与 D2P 实时仿真^①

陈泽宇^{②*} 赵广耀* 佟尚铨*

(* 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819)

(** 电动车辆国家工程实验室 北京 100081)

摘要 针对并联式混合动力电动汽车的能量控制问题进行了研究,提出了一种多模式能量管理策略。建立了整车模型,以负载力矩、电池荷电状态(SOC)和车速作为控制依据设计了多个工作模式间的切换逻辑,将模式切换状态作为控制变量引入到力矩分配算法中,实现了多工况下对发动机与电机的优化控制。结合 US06、UDDS 和 EUDC 等工况进行了 Simulink 系统仿真,结果表明所提出的能量管理策略较传统功率跟随策略相比可以提高燃油经济性约 1.91%,且对于不同的工况具有良好的普遍适用性;基于 D2P 系统构建了硬件在环仿真平台,采用真实的驾驶员输入设备和控制器进行实时仿真,进一步表明所提出的能量管理策略合理有效且算法具有良好的实时性。

关键词 混合动力电动汽车(HEV), 能量管理, 控制策略, 实时仿真

0 引言

混合动力电动汽车(hybrid electric vehicle, HEV)既具有节能减排的优点,又可以实现理想的续行里程^[1,2]。HEV 系统中有多个动力部件共同工作,能量流动错综复杂,控制模式多变,如何设计合理有效的能量管理策略来实现能量流动的优化控制,具有重要意义。为此,国内外许多学者对 HEV 能量管理策略进行了研究。Mashadi 等^[3]对混联式 HEV 进行了能量控制研究,提出了一种基于车速、功率需求、电池剩余容量和冷却水温度的双模式能量管理算法;Kim 等^[4]基于最小值原理进行了 HEV 能量优化;Murphey 等^[5]使用基于模糊逻辑的智能优化算法建立了多能量源 HEV 能量管理策略;Petersheim 等人^[6]采用硬件在环仿真的方法对 HEV 能量管理策略进行了研究;Yoo 等人^[7]采用逻辑门限法研究了带超级电容的四驱串联 HEV 的能量管理策略;我国的田毅等人^[8]采用遗传算法与神经网络相结合的方法提出了一种计及行驶工况影响的 HEV 能量管理策略,赵治国等人^[9]则基于混杂系统理论对四驱 HEV 模式切换控制进行了研究。

本文针对并联 HEV 的能量控制问题,建立了多模式能量管理方案,将模式切换状态作为控制变量引入到力矩分配算法中,通过“系统建模-策略开发-离线仿真-实时仿真”的设计思路,得到一套合理有效的并联 HEV 能量管理策略,并通过实时仿真对所提出的控制策略进行了评价与验证。

1 整车模型

并联式 HEV 系统结构如图 1 所示,其动力总成主要包括发动机系统、电机驱动系统、动力电池组、逆变器-变换器组、综合控制器、机械式自动变速器(automated mechanical transmission, AMT)和离合器等。来自于发动机与电机驱动系统的动力经过耦合传动机构进行力矩耦合之后共同驱动车辆前轴,动力电池组布置在车辆后端,电机既可以与发动机共同驱动车辆,也可以用作发电机,由发动机带动为电池组充电或者制动时回收再生制动能量。能量管理系统(energy management system, EMS)通过控制器局域网络(controller area network, CAN)总线与发动机系统、电机控制器和电池管理系统实时通讯,实现发动机与电机的协同控制。

① 国家自然科学基金(50975027),北京理工大学电动车辆国家工程实验室开放基金(2012-NELEV-03)和中央高校基本科研业务费专项资金(N110303007)资助项目。

② 男,1982 年生,博士,讲师;研究方向:电动汽车控制与仿真技术;联系人, E-mail: chenzy@mail.neu.edu.cn
(收稿日期:2012-07-29)

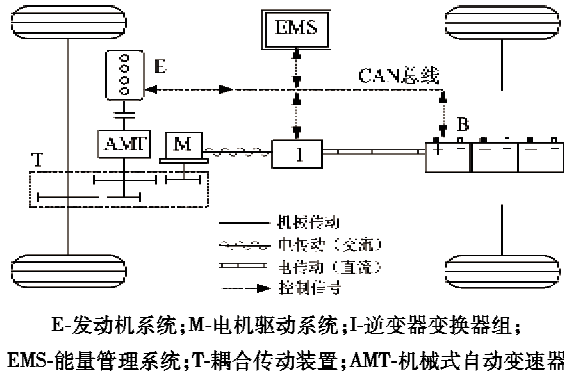


图1 并联 HEV 动力系统结构

结合图1所示动力系统,对并联 HEV 系统的主要元件进行建模。

1.1 发动机模型

发动机模型包含两个部分:一是发动机动力学控制模型,二是油耗计算模型。控制模型采用基于稳态实验数据进行多项式拟合的方法建立,并将发动机力矩的动态响应过程等效为一阶延迟环节:

$$T_e = \frac{1}{1 + \tau_e s} \chi_e T_v(\omega_e) \quad (1)$$

其中 T_e 为发动机输出转矩, ω_e 为发动机转速, χ_e 为由 EMS 确立的发动机力矩控制系数, τ_e 为发动机转矩响应时间常数, $T_v(\omega_e)$ 为当前转速下的发动机最大力矩。

油耗计算模型负责采集发动机工作点,并根据发动机万有特性图来实时计算发动机油耗:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{3600} \int_0^t \frac{P_e f_b(T_e, \omega_e)}{\rho_o} dt \quad (2)$$

其中 ε_e 为发动机总油耗, P_e 为发动机功率, ρ_o 为汽油密度, $f_b(T_e, \omega_e)$ 为当前发动机工作点下的燃油消耗率。

1.2 电机驱动系统模型

电机控制器通过 CAN 总线接收综合控制器的目标力矩,独立地对电机进行调节,使电机输出力矩跟随目标力矩。电机力矩的动态响应速度要快于发动机,但是达到稳态也需要经历一个动态过程,以一阶延迟环节对电机力矩进行修正,同时需要考虑电池最大充放电功率对电机力矩的限制:

$$T_m = \begin{cases} \frac{1}{1 + \tau_m s} \min \{ \chi_m T_e(\omega_m), \frac{P_d \eta_m}{\omega_m} \}, & \chi_m > 0 \\ \frac{1}{1 + \tau_m s} \max \{ \chi_m T_\sigma(\omega_m), \frac{P_c}{\omega_m \eta_m} \}, & \chi_m < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 T_m 为电机输出力矩, τ_m 为电机转矩动态响应

时间常数, χ_m 为由 EMS 确立的电机力矩控制系数, ω_m 为电机转速, $T_e(\omega_m)$ 和 $T_\sigma(\omega_m)$ 分别为当前转速下电机最大输出力矩和最大制动力矩, P_c 和 P_d 分别为电池组极限充、放电功率, η_m 为电机效率。

1.3 动力电池组模型

动力电池组采用容量 45Ah, 额定电压 320V 的锂离子电池组。电池管理系统实时地监测电池荷电状态 (state of charge, SOC), 并与综合控制器通过 CAN 总线通讯。

电池组建模过程采用内阻模型, 电池组的开路电压与内阻均为 SOC 和温度的函数, 通过实验数据查表的方式获得, 电池组端电压与输出电流如式

$$U_b = I_b R_i(\kappa, t_a) + U_o(\kappa, t_a) \quad (4)$$

$$I_b = P_b / U_b \quad (5)$$

所示。其中 U_b 为电池组端电压, U_o 为电池组开路电压, I_b 为电池组输出电流 (负值表示充电), κ 为电池 SOC 值, R_i 为电池组内阻, P_b 为电池组功率, t_a 为电池箱温度。电池 SOC 的计算采用安时计数法:

$$\kappa = ((Q_b - \int I_b dt) / Q_b) \times 100\% \quad (6)$$

其中 Q_b 为电池组总容量。

1.4 传动系统模型

发动机输出力矩经离合器与 AMT 之后, 与电机输出力矩在耦合传动装置耦合之后共同驱动车辆前轴, 所产生的前轴驱动力矩计算如下:

$$T_d = (\xi_e T_e i_A \eta_A + T_m i_t \eta_t) i_0 \eta_0 \quad (7)$$

其中 ξ_e 为反应离合器接合状态的参数, i_A 为 AMT 传动比, i_t 为电机与 AMT 输出轴耦合处齿轮传动比, i_0 为主减速齿轮传动比, η_A 、 η_t 和 η_0 分别为 AMT、耦合齿轮和主减速齿轮的传动效率。

1.5 车辆动力学模型

根据能量管理策略的研究需要, 车辆动力学模型中忽略垂向、俯仰和横摆自由度的运动, 而只考虑纵向动力学。采用刚体动力学基本方程建立车辆动力学模型^[10], 如式

$$u = \int \frac{1}{\delta m} \left(\frac{T_d}{r_z} - mg\psi - \frac{1}{2} C_d \rho_a A u^2 \right) dt \quad (8)$$

所示。其中 u 为车辆纵向速度, m 为车辆质量, g 为重力加速度, ψ 为道路阻力系数, C_d 、 ρ_a 和 A 分别为空气阻力系数、空气密度和迎风面积, δ 为旋转质量系数, r_z 为车轮半径。

2 能量管理策略研究

并联 HEV 能量管理策略设计的关键在于发动

机与电机之间的转矩分配。图2为发动机的万有特性图,可以看出,发动机在中高负荷时燃油消耗率很低,而低负荷时燃油消耗率显著增大。通过发动机与电机力矩的合理分配,可以使电机输出力矩调整发动机负荷,并且在怠速、低负荷时可以关闭发动机由电机单独驱动,将有利于提高整车燃油经济性,另一方面当电池SOC过低时,通过提高发动机力矩的方式来为电池组充电,维持电池电量。

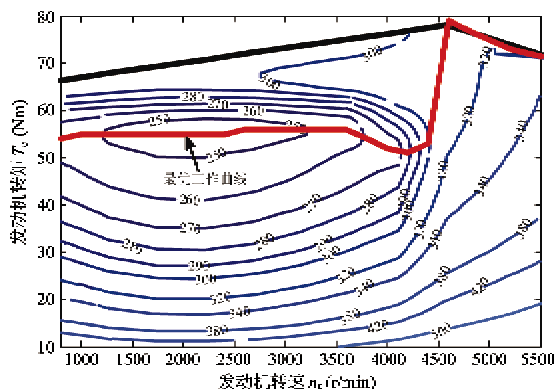


图2 发动机万有特性图

将力矩作为主要控制变量,以发动机万有特性图为基础,结合发动机、电机与动力电池组的工作特点,可将并联 HEV 的控制状态划分为 5 种模式:

(1) 发动机单独驱动模式。当车辆行驶过程中所需发动机提供的力矩位于图 2 中的低燃油消耗率区域,且电池 SOC 值在正常范围,则关闭电机而由发动机单独驱动。

(2) 电机单独驱动模式。当车辆起步或需求转矩较低,即所需发动机提供的力矩位于图2中下部高燃油消耗率区域时,则可以关闭发动机,由电机单独驱动。

(3) 联合驱动模式。当车辆转矩需求较大时(例如加速行驶或者爬坡),则发动机与电机共同输出力矩,实现车辆良好的动力性。

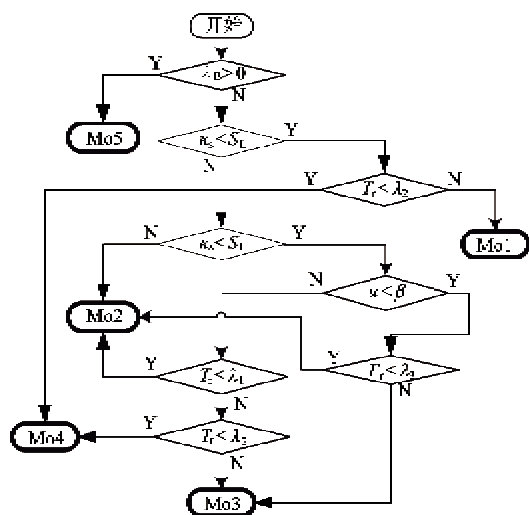
(4) 行车充电模式。在车辆行驶过程中如果所需发动机提供的力矩处于图 2 中燃油消耗率最优曲线的下方,且电池 SOC 偏低,则将发动机输出力矩增大,富余的功率带动电机为电池组充电。

(5) 再生制动模式。制动过程中驱动电机用作发电机,将车辆动能转化为电能存储在电池中。

以上述 5 种工作模式划分为基础,所建立的能量管理策略包含两个层次:顶层为 5 种工作模式之间的切换控制策略,底层为各个模式下的能量管理控制策略。顶层算法是以驾驶员操作信号、需求转

矩、电池 SOC 和车速为控制依据,来选择最为合适的工作模式。令变量 $\delta_1 - \delta_5$ 为表征 5 种模式切换状态的系数,每个工作模式对应一个 δ 值,当系统进入该模式时相应的 δ 被赋值为 1,退出该模式后被赋值为 0,任意时刻只有一个 δ 值可以取值为 1。

图3所示为工作模式切换控制策略流程。图中 λ_B 为制动踏板信号, T_r 为车辆需求转矩, S_H 与 S_L 分别为电池SOC正常区间的上限与下限, β 为低速行驶时的车速门限值。 λ_1 、 λ_2 与 λ_3 为需求力矩的三个门限值: λ_1 对应当前车速下发动机低燃油消耗率区域下限力矩值, λ_2 对应当前车速下最优工作曲线力矩值, λ_3 对应当前车速下电机单独工作所能提供的力矩上限。



Mo1-发动机单独驱动模式;Mo2-电机单独驱动模式;
Mo3-联合驱动模式;Mo4-行车充电模式;Mo5-再生制动模式

图3 并联 HEV 模式切换流程图

选取发动机与电机力矩分配系数 χ_e 和 χ_m 为控制变量,以车辆需求力矩 T_r 为控制依据,将 T_r 可视为驾驶员踏板信号的函数。当车正常行驶时,控制策略应使发动机与电机输出力矩满足车辆需求力矩

$$\chi_e T_e(\omega_e) k_e + \chi_m T_m(\omega_m) k_m = T_r \quad (9)$$

其中 k_e 和 k_m 分别为表示从发动机和电机到半轴的传动效率和传动比的系数。

能量管理策略旨在使发动机尽可能工作在最低燃油消耗率曲线上,结合上述模式切换策略,在模式(1)-(4)中分配系数 χ_i 和 χ_m 应满足

$$\begin{cases} \chi_e = \frac{\delta_1 T_r}{k_e T_v(\omega_e)} + (\delta_3 + \delta_4) \frac{T_o(\omega_e)}{k_e T_s(\omega_e)} \\ \chi_m = \frac{\delta_2 T_r}{k_m T_v(\omega_e)} + \frac{(\delta_3 + \delta_4)(T_r - k_e T_o(\omega_e))}{k_m T_s(\omega_m)} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $T_o(\omega_e)$ 为发动机当前转速下最优曲线力矩值。

当 λ_B 大于 0 时表示车辆处于制动状态,即进入模式(5),此时关闭发动机,电机工作目标力矩为负值工作在发电状态,能量管理策略旨在回收最大的再生制动能量,同时需兼顾前后轴制动力分配关系和维持电池 SOC 范围:

$$\begin{cases} \chi_e = 0 \\ \chi_m = \begin{cases} \max\{\frac{\xi_b T_r}{k_m T_o(\omega_e)}, -1\}, & \kappa_s < S_H \\ 0, & \kappa_s \geq S_H \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

其中 ξ_b 为前后轴制动力分配系数。

3 Simulink 离线仿真

为了验证所提出的能量管理策略的有效性,首先在 MATLAB/Simulink 环境下进行并联 HEV 离线仿真研究,仿真过程中采用 US06、EUDC 和 UDDS 作为运行工况。图 4 所示为三种工况下的仿真结果,可以看出所设计的多模式能量管理策略对于不同行驶工况具有普遍适用性,车辆在各种运行状态下发动机力矩基本对应最优曲线,实现了良好的燃油经济性,电机跟随高频负载力矩且电池组 SOC 维持在高效率区间。

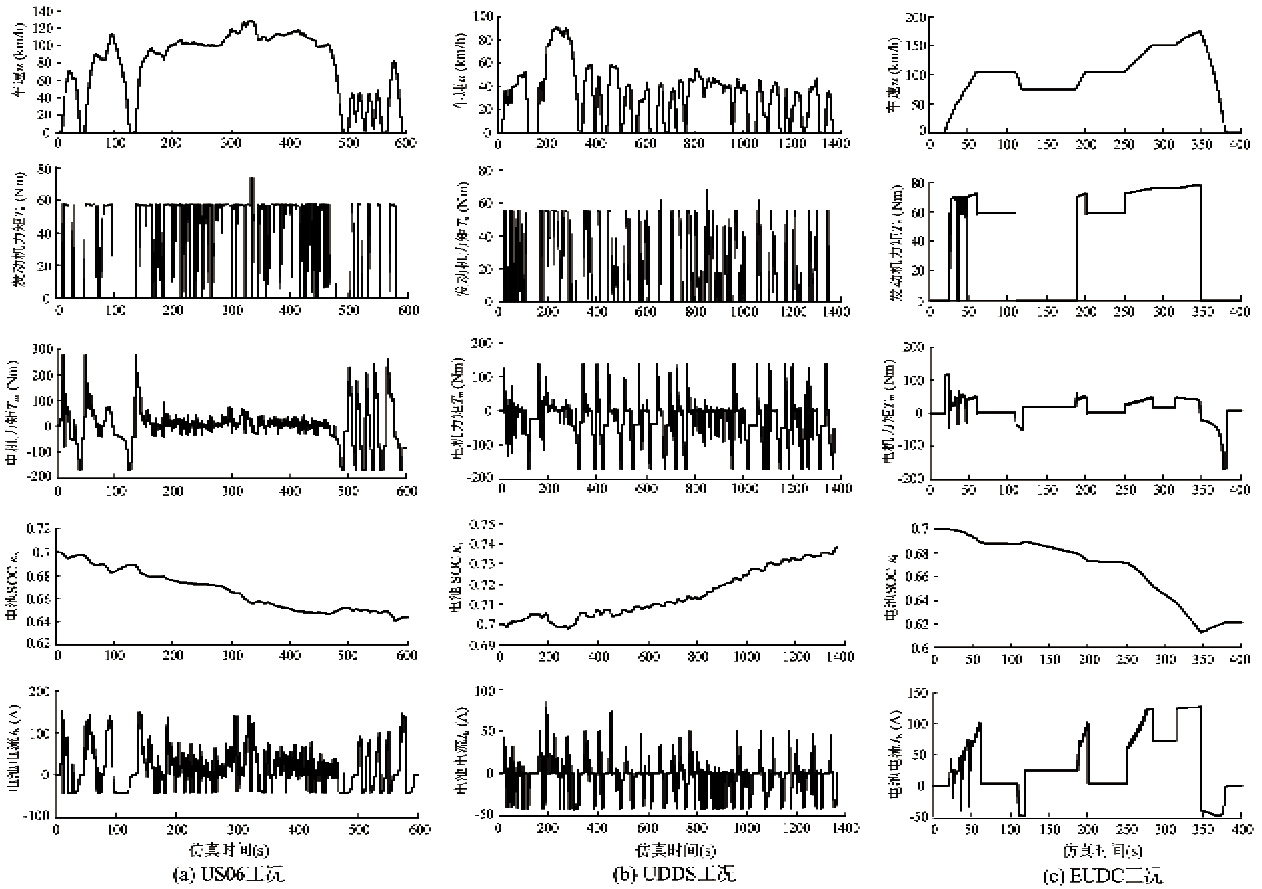


图 4 三种工况下的 Simulink 系统仿真结果

为了更好地从燃油经济性的角度来定量地评价所提出的能量管理策略,在 US06 工况下采用传统功率跟随策略^[11]重复仿真并进行对比。

对 HEV 燃油经济性评价时,常用的方法是将在电池组的始末 SOC 相等作为约束条件引入到能量管理策略中,这种方法虽然可以客观地评价燃油经济性,但是并不符合实际情况,因为驾驶员实际操作过程中不可能刻意控制车辆到达终点时的电池 SOC。

因此,为了更好地讨论能量管理策略的节油效果,本文引入等效总油耗作为评价指标,即:将电池组所消耗(或所回收)的电折算成燃油消耗(或获取),与所消耗的燃油累加。

$$J_Q = \frac{1}{3600\rho_o} \sum \left(\frac{P_b b_c}{\eta_e \eta_m \eta_A \eta_t} + P f_b(T_e, \omega_e) \right) \Delta t \quad (12)$$

其中 J_Q 为等效总油耗, b_c 为充电时的平均燃油消耗

率, η_c 为电池组充放电效率, Δt 为仿真步长。

两种能量管理策略下的瞬时等效油耗仿真结果如图 5 所示。从图中可以看出:相比于功率跟随策略,本文所提出的多模式能量管理策略的作用下车辆瞬时等效油耗明显略低。在循环工况连续运行直至行驶里程达到 100km 后,仿真结束并计算等效总油耗:功率跟随策略作用下百公里油耗为 7.36 升,而所提出的多模式能量管理策略作用下车辆百公里油耗为 7.22 升,燃油经济性提高约 1.91%。

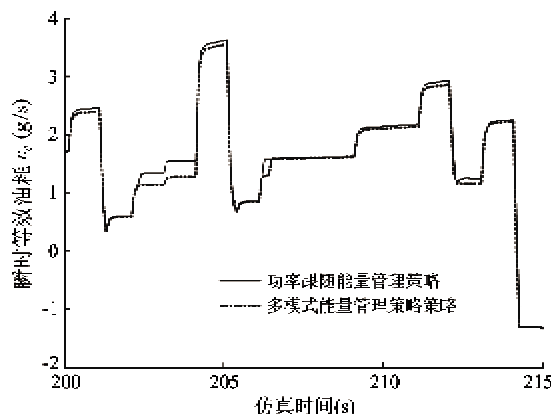


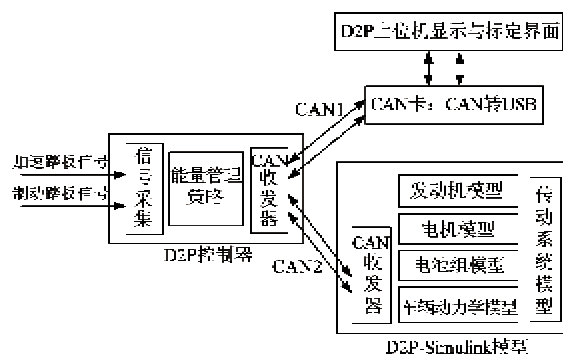
图 5 US06 工况下的瞬时油耗仿真结果

4 “驾驶员与控制器”在环仿真

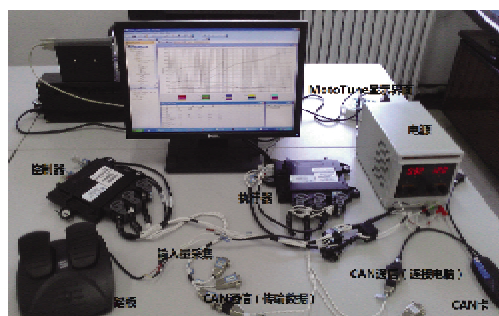
为了进一步验证所提出的能量管理策略的有效性与算法实时性,基于研发生产一体化(D2P)控制器快速原型开发系统构建并联 HEV“驾驶员-控制器”在环实时仿真平台。D2P 开发系统是由美国 Woodward 公司开发的一套基于 MATLAB/Simulink 和产品级电子控制单元(ECU)的控制系统开发的软硬件平台,支持控制策略 C 代码一键生成和在线标定等功能,非常适合用于汽车控制器仿真方面的研究。

设计方案与实物照片如图 6 所示;驾驶员输入设备与控制器采用真实硬件,由虚拟的 Simulink 模型刷写入 D2P 板卡中充当被控对象。

D2P 控制器通过信号采集单元实时地接收驾驶员发出的踏板信号,仿真系统中含有两路 CAN 总线通讯:控制器通过第 1 路 CAN 总线经 CAN 卡(CAN 转 USB 设备)与上位机界面相连接,上位机界面可以进行数据显示和在线标定;控制器通过第 2 路 CAN 总线与 D2P 板卡中的被控对象模型进行实时控制与通讯。仿真过程由四段加减速工况组合而成,系统输入和仿真结果如图 7 所示。



(a) D2P 实时仿真系统设计方案



(b) 仿真平台实物照片

图 6 驾驶员与控制器在环实时仿真平台

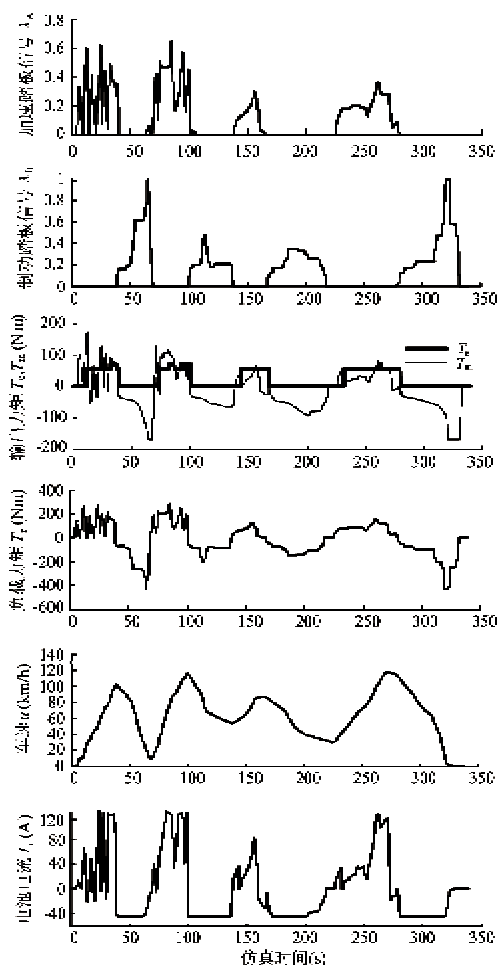


图 7 驾驶员输入与 D2P 实时仿真结果

在车辆起步阶段发动机关闭,电机单独驱动;随着车速的增加,发动机启动。发动机在大部分情况下工作在最优工作力矩,从而提高车辆的燃油经济性,电机充分发挥响应速度快的优势来弥补发动机最优工作力矩与车辆需求力矩之间的偏差。车辆加速时电机与发动机共同驱动且在必要情况下发动机工作在最大力矩以提高车辆动力性。实时仿真进一步表明所提出的并联 HEV 多模式能量管理策略可以有效地实现发动机与电机间的协同控制,控制算法正确有效且具有良好的实时性。

5 结 论

本文提出了一种并联 HEV 多模式能量管理策略,通过 Simulink 离线仿真和 D2P 实时仿真对所提出的能量管理策略进行了评价与验证。所提出的多模式能量管理策略与传统功率跟随策略相比可以提高燃油经济性约 1.91%,且对于不同的行驶工况具有良好的普遍适用性。基于 D2P 控制器快速原型开发系统构建了“驾驶员+控制器”在环仿真平台,通过实时仿真进一步证明了所提出的多模式能量管理策略具有良好的有效性和实时性。

参考文献

- [1] 杨为琛,孙逢春. 混合电动汽车的技术现状. 车辆与动力技术, 2001(4):41-46
- [2] 陈清泉,孙逢春. 混合电动车辆基础. 北京:北京理工大学出版社, 2001. 20-59
- [3] Mashadi B, Emadi S A. Dual-mode power-split transmission for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2010, 59(7):3223-3233
- [4] Kim N, Cha S, Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2011, 19(5): 1279-1287
- [5] Murphey Y L, Chen Z H, Kiliaris L. Intelligent power management in a vehicular system with multiple power sources. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(2):835-846
- [6] Petersheim M D, Brennan S N. Scaling of hybrid-electric vehicle powertrain components for hardware-in-the-loop simulation. *Mechatronics*, 2009 (19): 1078 - 1090
- [7] Yoo H, Sul S K, Park Y, et al. System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries. *Transactions on industry applications*, 2008. 44(1):108-114
- [8] 田毅,张欣,张昕等. 计及行驶工况影响的混合动力电动汽车控制策略. 汽车工程, 2010, 32(8):659-663
- [9] 赵治国,何宁,朱阳等. 四轮驱动混合动力轿车驱动模式切换控制. 机械工程学报, 2011, 47(4):100-109
- [10] Fang L C, Qin S Y. Optimal control of parallel hybrid vehicles based on theory of switched system. *Asian Journal of Control*, 2006, 8(3):274-280
- [11] Lin C C, Peng H, Grizzle J W, et al. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2003, 11(6):839-849

A multi-mode energy management strategy for parallel hybrid electric vehicles and its D2P real-time simulation

Chen Zeyu^{* **}, Zhao Guangyao^{*}, Tong Shang^e

(^{*} College of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

(^{**} The National Laboratory for Electric Vehicles, Beijing 100081)

Abstract

The energy control problem of parallel hybrid electric vehicles was studied and a multi-mode energy management strategy was proposed. The system mode was established firstly, and then the switchover logic among multiple modes was designed according to control bases of load torque, battery SOC and vehicle velocity. The mode switch state was taken as a control variable into the torque distribution algorithm for optimization control of the engine and the electric motor under multi-operating modes. The system simulations were conducted in MATLAB/Simulink circumstance using US06, UDDS and EUDC cycling conditions, and the results show that the presented strategy can improve the fuel economy by about 1.91% compared to the traditional power following strategy and has a universal applicability for different conditions. The hardware in the loop simulation platform using real driver operation devices and controller was built based on a D2P system. The real-time simulation further indicates that the proposed energy management strategy is effective and has the good real-time performance.

Key words: hybrid electric vehicle (HEV), energy management, control strategy, real-time simulation