

文章编号:1000-582X(2010)11-001-07

ISG 型中度混合动力轿车油门动态协调控制策略

叶 心¹, 秦大同¹, 胡明辉¹, 段志辉², 陈清洪¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆长安新能源汽车有限公司, 重庆 401120)

摘 要:采用瞬时优化与定工况下全局优化相结合的方法,对 ISG(Integrated Starter/Generator)型中度混合动力汽车的系统效率进行优化,以系统效率最高为优化目标,优化混合动力系统能量管理策略。为了避免混合动力汽车在模式切换或突然加速时,由于发动机油门突变导致的动态油耗增加,当发动机油门开度变化率过大时,采用发动机惯性矩闭环控制和电机补偿控制的方法对中度混合动力系统进行动态协调控制,限制发动机节气门开度变化率,抑制汽油过度喷射,以达到降低油耗的目的。建立了系统仿真模型并进行了仿真模拟,结果表明,通过对混合动力汽车油门的动态协调控制,在保证动力性的条件下,可明显降低混合动力轿车的整车综合油耗。

关键词:混合动力汽车;汽车;燃油经济性;油门动态控制

中图分类号:TK421.7

文献标志码:A

Throttle dynamic coordinated control strategy of ISG type medium-HEV

YE Xin¹, QIN Da-tong¹, HU Ming-hui¹, DUAN Zhi-hui², CHEN Qing-hong¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing Changan New Energy Automobile CO., LTD., Chongqing 401120, P. R. China)

Abstract: The system efficiency of ISG (integrated starter/generator) type medium hybrid electric vehicle (HEV) is optimized by combining transient and global optimization method under given driving mode, and energy management strategy of the hybrid system is optimized to reach the highest hybrid system efficiency. In order to avoid dynamic fuel increasing caused by engine throttle mutation during driving mode shifting or acceleration, closed-loop control of inertia moment of engine and compensation control of motor torque are adopted to coordinate the medium hybrid system to suppress over fuel injection of the ICE caused by engine throttle mutation. Model of medium hybrid electric vehicle is built and simulation is carried out. The results show that the throttle coordinated control can improve fuel economy, under the condition of guaranteed dynamic performance.

Key words: hybrid electric vehicle; vehicle; fuel economy; throttle dynamic control

对于并联混合动力系统,主要存在两类核心控制问题:稳态过程控制及动态过程控制。前者属于能量管理策略的范畴,包括模糊控制智能管理策略,基于规则的稳态能量管理策略和基于优化算法的动

态能量管理策略;后者在实际开发过程中日益凸现,包括变速器的换挡过程、工作模式之间的切换过程控制以及突然加速过程中的协调控制,是混合动力汽车走向实用化的关键性技术之一。在混合动力汽

收稿日期:2010-06-20

基金项目:国家 863 计划重大专项(2006AA11A107);重庆市科技攻关重大专项(CSTC:2008AA6025);中国博士后科学基金资助项目(20090450782)

作者简介:叶心(1981-),女,重庆大学博士研究生,主要从事混合动力系统能量管理策略研究。

秦大同(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)dtqin@cqu.edu.cn。

车动态协调控制研究方面,日本的 Kimura 等^[1]利用丰田混合动力系统特有的动力分配机构,实现了对发动机转矩的反馈控制和电机转矩补偿,解决了动态协调控制问题;清华大学的童毅^[2]提出“发动机转矩开环+发动机动态转矩估计+电动机转矩补偿”方法对并联混合动力汽车状态切换过程进行了协调控制;吉林大学翼尔聪等^[3-4]针对模式切换过程中的转矩波动问题,提出了电机辅助协调控制策略,以改善其切换过程的平顺性;上海交通大学的古艳春等^[5]建立了分层控制系统以实现发动机、电机及离合器等协调控制,从而提高车辆行驶平顺性和减小离合器磨损;江苏大学的袁银男等^[6]针对混合动力汽车的加速工况,对该工况进行扭矩补偿控制,以达到降低油耗和排放的目的,但未考虑动力部件的效率。混合动力汽车在行驶过程中,由于工作模式的切换或者突然加速导致发动机节气门开度突变,造成了汽车动态油耗的增加,从而降低了混合动力汽车的燃油经济性。

笔者是以提高燃油经济性为目的,对 ISG (Integrated Starter/Generator) 型中度混合动力汽车的油门进行动态协调控制。首先对 ISG 型中度混合动力汽车进行了能量匹配研究,采用瞬时优化和给定工况下全局优化相结合的方法对中度混合动力轿车的系统效率进行了优化,以系统效率最高为优化目标,获得了最佳能量匹配策略^[7]。在最佳能量匹配策略的基础上,对 ISG 型中度混合动力汽车油门进行动态协调控制,以限制发动机节气门开度的变化率,避免动态油耗的增加,从而改善整车燃油经济性。利用 Matlab/Simulink 仿真平台建立仿真模型并进行仿真分析,从而验证了动态协调控制的有效性。

1 ISG 型中度混合动力汽车能量管理策略

本文研究对象是国内某汽车厂正在开发的一款 ISG 型中度混合动力汽车。中度混合动力汽车与轻度混合动力汽车相比,由于电机功率在动力源中所占比重增加,因此在低速时电机可以单独驱动车辆,电机的利用率增加,同时,制动或减速时有较高的能量回收率,因而具有更好的燃油经济性;与重度混合动力汽车相比,电机电池容量需求低,因此成本也较低。

该中度混合动力汽车布置方案采用 ISG 单轴连接动力部件方式,在发动机与 ISG 电机之间增加了一个离合器,分离离合器,可实现纯电动工作模式。因而,采用该结构的混合动力汽车具有怠速起停、纯电动驱动、电机助力、轻载时充电和高效制动能量回收等功能,可实现较高的燃油经济性。在实际运行中,

混合动力系统在 5 个工作模式之间进行切换时,切换发生的条件由能量管理策略决定。动力部件布置结构如图 1,整车参数包括:整备质量 1 500 kg;迎风面积 2.28 m²;风阻系数 0.34;发动机型号 475Q3;ISG 电机峰值功率 25 kW;镍氢电池组 288 V,6.5 A·h;轮胎半径 0.31 m;滚动阻力系数 0.013 5;传动效率 0.9;主减速比 5.246 6;1~5 挡速比,[2.693 2 1.519 6 1.015 6 0.737 3 0.609 4]。

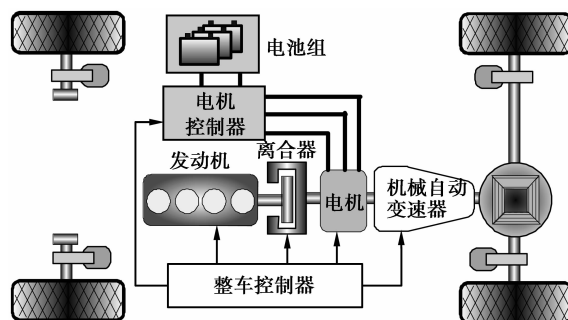


图 1 ISG 中度混合动力汽车结构

对 ISG 型中度混合动力系统采用瞬时优化^[8-9]和全局优化^[10-11]相结合的方法^[12-13],以“发动机+电机”的综合系统效率最高为优化目标,得到发动机关闭曲线、电机助力曲线和车载充电曲线,如图 2 所示,上述 3 条曲线确定了 ISG 型中度混合动力系统工作模式的划分和动力源的匹配策略。

1) 当 SOC 小于 X_{SOC} , 如图 2 (a) 所示: 车辆低速行驶时, 车辆需求转矩小, 如果需求转矩小于该时刻发动机充电曲线上所对应的转矩 $T_{e,chg}(n_e)$, 考虑到电池电量低, 则提高发动机负荷, 使其工作在较高效率区, 发动机除了提供车辆行驶的功率外, 多余的能量通过电机对电池充电, 从而提高电池中的电量。

当车辆需求转矩较大时, 发动机工作中高负荷区域, 发动机效率较高, 可单独驱动车辆。

当车辆需求转矩很大时, 发动机工作在高负荷区域, 发动机效率较低, 但由于电池电量低, 电机不助力, 仍由发动机单独驱动车辆。

2) 当 SOC 大于 X_{SOC} , 如图 2 (b) 所示: 车辆低速行驶时, 车辆需求转矩小, 如果需求转矩小于该时刻发动机关闭曲线上所对应的转矩 $T_{e,off}(n_e)$, 由于电池电量充足, 则关闭发动机, 断开离合器, 由电机单独驱动。

当车辆需求转矩大于该时刻发动机关闭曲线所对应的转矩 $T_{e,off}(n_e)$, 且小于该时刻发动机转矩最大工作曲线所对应的转矩 $T_{e,max}(n_e)$, 也即, 车辆行驶在发动机中高负荷区域时, 发动机效率较高, 此时离合器结合, ISG 电机空转, 由发动机单独驱动车辆。

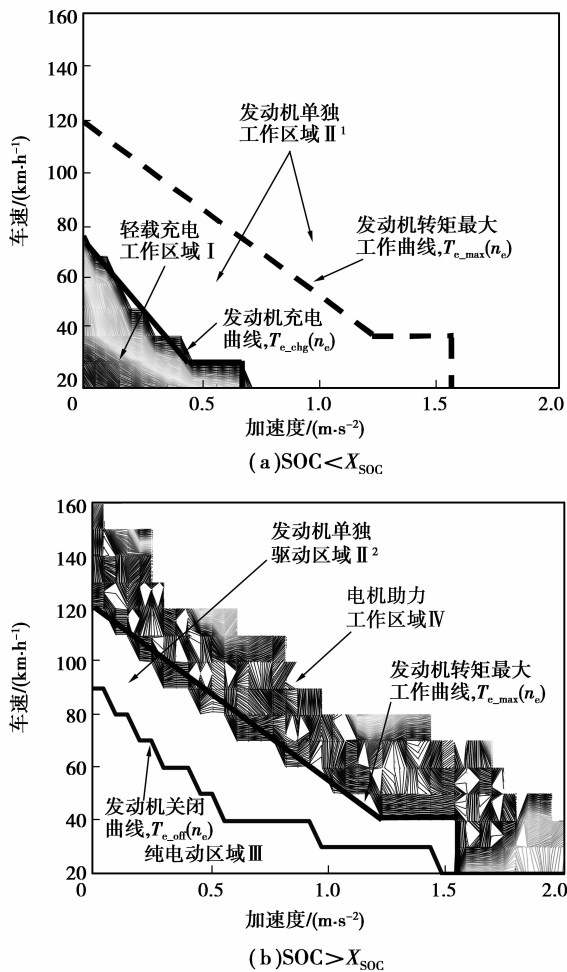


图 2 混合动力系统驱动工况工作模式的切换规律

当车辆行驶的需求转矩大于该时刻发动机转矩最大工作曲线上所对应的转矩 $T_{e,max}(n_e)$ 时,电机提供助力转矩,辅助发动机驱动车辆,从而降低发动机负荷,提高发动机效率。

2 ISG 型中度混合动力汽车油门动态协调控制

2.1 油门动态协调控制的必要性

根据上述能量管理策略可知,ISG 型混合动力汽车工作模式又可以简单地划分为发动机工作模式和发动机停机模式。发动机工作模式包括发动机单独驱动模式、电机助力模式和车载充电模式;发动机停机模式又包括纯电动工作模式和停车模式。当道路需求转矩发生变化时,混合动力汽车由发动机停机模式切换到发动机工作模式,或者由于突然加速,均会导致发动机节气门开度发生突变。武汉理工大学的杜常清等^[13]给出了在不同节气门开度变化率的情况下,节气门开度和发动机输出转矩的关系,可知发动机节气门开度变化率越小,发动机输出转矩越平稳。节气门开度变化率变大,将增加进入气缸混合气体的

浓度,以满足整车动力性的要求,发动机的惯性矩会造成发动机的进气滞后,导致排放和油耗增加。

因此,控制发动机的节气门开度变化率,避免汽车行驶过程中动态油耗的增加,可以达到改善混合动力汽车燃油经济性的目的。

2.2 电机转矩补偿控制

由于发动机和电机的动态特性不同,发动机转矩的响应时间明显大于电动机转矩的响应时间,而电机可以在很短的时间内增大或者减小输出转矩^[14],因此采用电机转矩补偿的办法对油门动态协调控制中发动机转矩减小的差值进行补偿。动态协调控制的目的不是使发动机和电机的转矩尽快响应目标转矩,而是在分别响应两者目标转矩的过程中,限制发动机节气门开度变化率,抑制汽油过度喷射,同时,保持两者的转矩之和在状态切换过程中的波动尽可能减小。如果将发动机和电机看作一个整体,发动机和电机的转矩变化只是混合动力系统动力源内部的协调过程。

在动态协调过程中,发动机转矩由节气门开度调节,由于限制了发动机节气门开度变化率,使得发动机输出转矩减小,发动机实际转矩与目标转矩的差值由电机进行补偿。所以电机目标转矩除了原来要求的目标转矩之外还增加了补偿部分的转矩。

2.3 发动机和电机输出转矩的确定

当发动机油门发生突变,将增加进入气缸混合气体的浓度,以满足整车动力性的要求。同时,转动惯量引起节气门进气滞后,造成油耗增加。因此,降低发动机惯性力矩,有利于减小发动机的动态油耗。发动机惯性力矩的计算公式为

$$T_{ei} = I_e \frac{d\omega_e}{dt}, \quad (1)$$

式中: T_{ei} 为发动机惯性力矩, $N \cdot m$; I_e 为发动机转动惯量, $kg \cdot m^2$; ω_e 为发动机转速, rad/s 。

根据图 3 发动机输出特性图可知,限制节气门开度的变化率,也就是限制了发动机输出转矩的变化率。

油门动态协调控制中,发动机输出转矩 T_e 计算公式为

$$T_e = \begin{cases} T_{e,tar} - T_{ei}, & \Delta\theta > \Delta\theta_{limt} \text{ 时;} \\ T_{e,tar}, & \Delta\theta \leq \Delta\theta_{limt} \text{ 时。} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{e,tar}$ 为能量管理层决定的发动机转矩, $N \cdot m$; $\Delta\theta$ 为发动机节气门开度变化率, $\%/s$; $\Delta\theta_{limt}$ 为发动机节气门开度变化率的限制值, $\%/s$ 。

由于混合动力系统能量管理层决定了整车需求转矩在动力源中的匹配,也即是决定了发动机和电机的目标转矩。如图 3 所示,根据发动机转矩和当前转速,得到当前发动机节气门开度。当节气门开度变化

率大于其限制值时,则进入油门动态协调控制程序,限制发动机节气门开度变化率。通过动态协调控制,得到限制后的节气门开度,结合发动机转速,根据发动机输出特性图可得到发动机实际输出转矩。

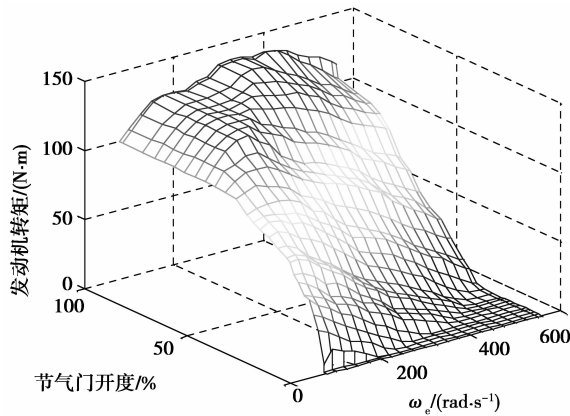


图 3 发动机输出特性图

考虑到电机和发动机时间响应特性不同,电机具有转矩响应迅速的优点,因此采用电机补偿发动机油门动态协调控制中的差值。电机目标转矩为

$$T_{m_tar} = T_{req} - T_e \quad (3)$$

同时,电机受到自身外特性的限制,因此对电机实际输出转矩进行约束:

$$T_m = \begin{cases} T_{req} - T_e, & T_m < T_{m_max} \text{ 时;} \\ T_{m_max}, & T_m \geq T_{m_max} \text{ 时。} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_m 为电机转矩, $N \cdot m$; T_{req} 为需求转矩, $N \cdot m$; T_{m_max} 为电机最大转矩, $N \cdot m$ 。

2.4 油门动态协调控制流程

通过上述分析,为了避免在模式切换或者突然加速时,发动机油门的突变引起动态油耗的增加,采用发动机惯性矩闭环控制和电机补偿控制方法,通过限制发动机节气门开度变化率来避免汽油过度喷射,改善混合动力汽车的燃油经济性。

发动机惯性力矩闭环控制方法:当发动机节气门开度变化率大于 $\Delta\theta_{limt}$ 时,对发动机进行动态协调控制,补偿发动机惯性力矩,限制发动机输出转矩的变化率,减小的转矩差值由电机补偿,直到满足边界条件;发动机节气门开度变化率小于等于 $\Delta\theta_{limt}$ 时,结束油门动态协调控制。同时保证发动机和电机总输出转矩之和不至于产生大的波动。油门动态协调控制流程如图 4 所示。

2.5 $\Delta\theta_{limt}$ 的取值

发动机节气门开度变化率限制值 $\Delta\theta_{limt}$ 的大小决定了进入油门动态协调控制流程的时间,将影响 ISG 型中度混合动力汽车燃油经济性的改善度。

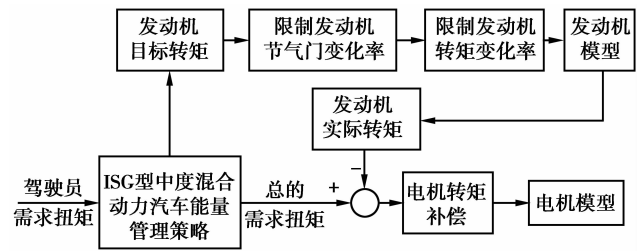


图 4 发动机油门动态协调控制流程图

目前国际上未对发动机节气门开度变化率的限制值 $\Delta\theta_{limt}$ 给出一个标准。笔者以采用 475Q3 型发动机为例,当发动机节气门开度的变化率大于 $10\%/s$ 时,喷油量开始增大。在给定 1015 工况下,发动机节气门变化率在 $-40 \sim 30\%/s$ 之间变化,如图 5(f) 所示。 $\Delta\theta$ 为负和 $\Delta\theta$ 等于零分别表示发动机节气门开度在减小和节气门开度在 Δt 内无变化,不属于油门突变范围,此处不做讨论; $\Delta\theta$ 大于零时则表示发动机节气门在变大,属于本文讨论范围。

$\Delta\theta$ 在 $0 \sim 30\%/s$ 之间时,令 $\Delta\theta_{limt}$ 分别为 5、10、15、20 和 $25\%/s$,并把其值依次输入油门动态协调控制程序,通过仿真计算可知,混合动力汽车的油耗均有不同程度的下降。对比 $\Delta\theta_{limt}$ 取不同值时的油门动态协调控制的结果,当 $\Delta\theta_{limt}$ 取 $15\%/s$ 时,折算电池电量 ΔSOC 后的整车综合油耗最低。

3 ISG 型中度混合动力汽车动态协调控制仿真

3.1 建立模型

在确定了 ISG 型中度混合动力汽车动态协调控制程序后,以降低发动机动态油耗为目的,在 Matlab/Simulink 平台下,采用前向和后向仿真相结合的方法,建立 ISG 型中度混合动力汽车整车模型。在给定的 1015 道路循环工况下,计算汽车所需的行驶转矩,根据上述的中度混合动力汽车能量管理控制策略实时分配发动机和电机的动力输出。

根据图 4 发动机油门动态协调控制流程,在 Matlab/Simulink 平台下,制定限制油门变化率的控制程序。当发动机节气门开度变化率大于 $15\%/s$ 时,满足动态协调控制的边界条件,限制发动机节气门开度变化率,减小的转矩差值由电机进行补偿,直到满足动态协调终止的边界条件:发动机节气门开度变化率小于等于 $15\%/s$,结束油门动态协调循环。

3.2 仿真结果

通过仿真计算,分别得到油门动态协调控制前后的发动机转矩曲线、电机转矩曲线、电池 SOC 值变化曲线、油门变化曲线以及油门变化率曲线,其对比结果如图 5、6 所示。

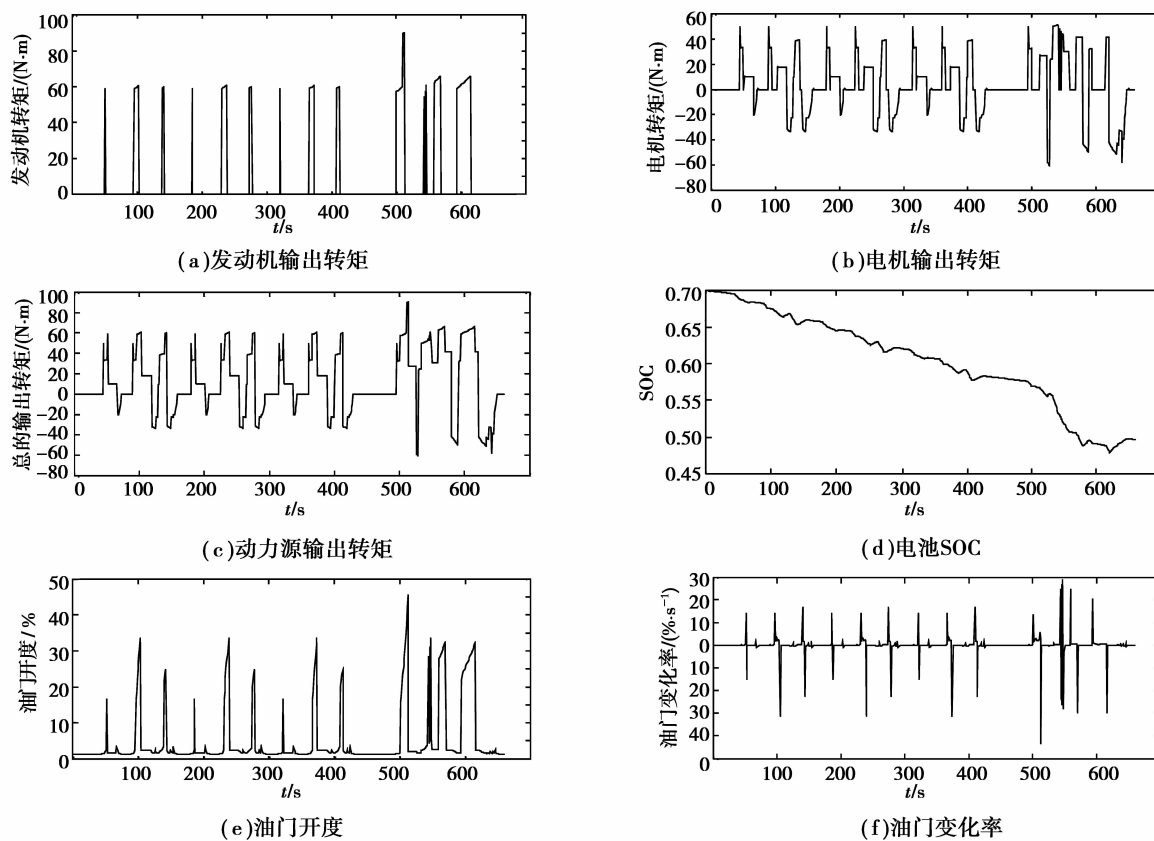


图 5 动态协调控制前各个变量曲线图

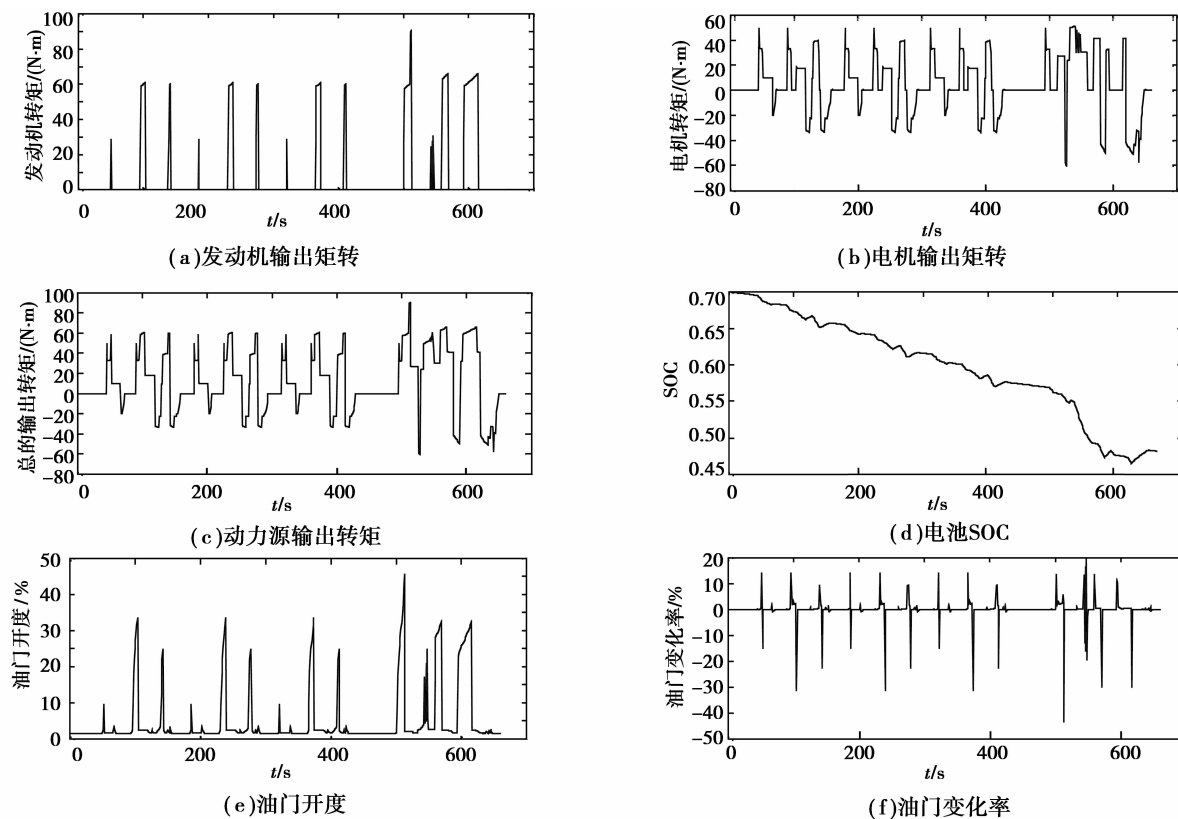


图 6 动态协调控制后各个变量曲线图

图 5 为未进行油门动态协调控制时的发动机转矩、电机转矩、电池 SOC、油门等参数曲线图,图 6 为油门动态协调控制后相应的各个参数曲线图。由于电机补偿转矩受到电机外特性的限制,当发动机所需补偿转矩大于电机最大转矩时,则电机无法进行补偿。如图 6(f)中油门变化率所示,在 550 s 的时候有极小部分油门变化率仍然大于 15%/s。通过油门动态协调控制,ISG 型混合动力汽车节气门开度的变化率绝大部分控制在 15%/s 以下,油门动态协调控制前后发动机电机输出转矩之和基本一致。

3.3 综合油耗评估

为了客观地评价 ISG 型中度混合动力汽车燃油经济性,将电池电量变化值 ΔSOC 折算成为等效油耗,电池等效燃油消耗计算式为

$$Q_{\text{fuel_bat}} = \Delta E / K, \quad (7)$$

式中: ΔE 为电池能量的变化量, $W \cdot h$; K 为每升燃油的热值,取 $7\,356\, W \cdot h/L$ 。

将式(7)中的电池等效油耗折算到百公里油耗中,折算公式

$$Q_{\text{fuel}} = 100(Q_{\text{fuel_engine}} + Q_{\text{fuel_bat}}) / S, \quad (8)$$

式中: S 为标准城市循环工况的行驶距离, km ; Q_{fuel} 为混合动力汽车实际百公里油耗, L ; $Q_{\text{fuel_engine}}$ 为标准城市循环工况下混合动力汽车发动机的燃油消耗, L 。

按照上述电池等效油耗的计算方法,得到油门动态协调控制前后电池电量折算后的综合油耗,如表 1 所示,对比 ISG 型中度混合动力汽车动态协调控制前后的结果,由于将发动机节气门开度变化率绝大部分控制在 15%/s 以内,避免了油门突变带来的动态油耗增加,改善了 ISG 型中度混合动力汽车的燃油经济性。折算电池 ΔSOC 为等效油耗后的综合油耗降低了 2%,同时最大加速度提高了 7.7%,0 到 100 km/h 加速时间提高了 0.8%,最大车速和最大爬坡度保持不变,保证了混合动力汽车的动力性。

表 1 仿真结果对比

控制方案	百公里油耗 ($L \cdot (100\, km)^{-1}$)	折算 ΔSOC 以后的 百公里综合油耗 ($L \cdot (100\, km)^{-1}$)	ΔSOC	
未动态控制	3.7	5.0	0.20	
已动态控制	3.6	4.9	0.22	
改善度	↓ 2.7%	↓ 2%	↑ 10%	
控制方案	0~100 km/h 加速时间/s	最大车速 ($km \cdot h^{-1}$)	最大 加速度 ($m \cdot s^{-2}$)	最大 爬坡度
未动态控制	12.6	175.4	3.9	15.4
已控制动态	12.5	175.4	4.2	15.4
改善度	↓ 0.8%	—	↑ 7.7%	—

4 结 语

1) 针对模式切换或者突然加速工况,为了避免动态油耗的增加,对 ISG 型混合动力汽车进行油门动态协调控制,限制发动机节气门变化率,将其尽可能控制在 15%/s 以内,抑制汽油过度喷射,有利于降低混合动力汽车油耗。

2) 在 Matlab/Simulink 环境下,建立 ISG 型中度混合动力整车模型,在给定 1015 道路循环工况下,分别对 ISG 型中度混合动力汽车油门动态协调控制前后的特性进行仿真分析。结果表明,通过对 ISG 型中度混合动力汽车油门动态协调控制,在满足动力性的情况下,燃油经济性得到了一定的改善,折算电池 ΔSOC 后的整车综合油耗降低了 2%。

3) 由于发动机和电机动态测试比较复杂,笔者是在发动机和电机静态输出特性基础上展开的研究,但在实际应用中,应该考虑发动机和电机的动态转矩变化情况。

参考文献:

- [1] KIMURA A, ABE T, SASAKI S. Driving force control of a parallel-series hybrid system[J]. JSAE Review, 1999, 20(3): 337-341.
- [2] 童毅. 并联式混合动力系统动态协调控制问题的研究[D]. 北京:清华大学汽车工程系, 2004.
- [3] 王庆年, 翼尔聪, 王伟华. 并联混合动力汽车模式切换过程的协调控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(1): 1-6.
WANG QING-NIAN, JI ER-CONG, WANG WEI-HUA. Coordinated control for mode-switch of parallel hybrid electric vehicle[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(1): 1-6.
- [4] 翼尔聪. 并联混合动力汽车模式切换中的协调控制问题研究[D]. 吉林:吉林大学, 2005.
- [5] 古艳春, 殷承良, 张建武. 并联混合动力汽车扭矩协调控制策略仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 631-636.
GU YAN-CHUN, YIN CHENG-LIANG, ZHANG JIAN-WU. Investigation to coordinated torque control strategy of parallel hybrid electric vehicles[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(3): 631-636.
- [6] 袁银男, 王忠, 梁磊. ISG 混合动力汽车加速扭矩补偿策略与仿真[J]. 车用发动机, 2009, 32(1): 27-31.
YUAN YIN-NAN, WANG ZHONG, LIANG LEI. Acceleration torque compensation strategy and

- simulation of ISG hybrid electric vehicle[J]. *Vehicle Engine*, 2009, 32(1): 27-31.
- [7] 胡明辉. CVT 轻度混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- [8] LI W M, XU G Q, WANG Z C, et al. Dynamic energy management for hybrid electric vehicle based on adaptive dynamic programming [C/OL] // *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, April 21-24, 2008: [2008-08-26]. http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=4594156&queryText%3DDynamic+energy+management%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All.
- [9] LIAN J, ZHOU Y F, CAO D T. Control strategy and simulation technology of integrated starter/generator hybrid electric vehicle [C/OL] // *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009, July 5-8, 2009: [2009-08-25]. http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=4350451&queryText%3DControl+strategy+and%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All.
- [10] BERNARD J, DELPRAT S, BUECHI F, et al. Global optimisation in the power management of a Fuel Cell Hybrid Vehicles(FCHV)[C/OL] // *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2006, September 6-8, 2006: [2007-05-29]. http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=4211317&queryText%3DGlobal+optimisation+in+the+power+management+of+a+Fuel+Cell+Hybrid+Vehicles.LB.FCHV.RB.%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All.
- [11] ZHANG L P, LIN C, NIU X. Optimization of control strategy for plug-in hybrid electric vehicle based on differential evolution algorithm [C/OL] // *Power and Energy Engineering Conference*, 2009. Asia-Pacific, March 27-31, 2009: [2009-05-12]. http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=4211317&queryText%3DGlobal+optimisation+in%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All.
- [12] KWEMANI S, DELPRAT S, TRIGUI R, et al. Predictive energy management of hybrid vehicle [C/OL] // *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008, September 3-5, 2008: [2008-11-18]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4677724.
- [13] 杜常清, 颜伏伍, 严云兵. 用于控制的发动机转矩估计方法研究[J]. *内燃机学报*, 2008, 26(5): 446-451. DU CHANG-QING, YAN FU-WU, YAN YUN-BING. Methods of engine torque estimation for control algorithms[J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(5): 446-451.
- [14] 王锋, 冒晓建, 卓斌. ISG 并联混合动力轿车最优转矩分配策略[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(5): 499-504. WANG FENG, MAO XIAO-JIAN, ZHUO BIN. Torque distribution for an integrated starter generator parallel hybrid electric car[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(5): 499-504.
- [15] WANG Z, MA Y, LIANG L. The study on dynamic coordinated simulation under transient conditions of HEV [C] // *Proceedings of 2008 International Conference of Modeling and Simulation*. England: World Academic Press, 2008: 329-334.

(编辑 张 苹)