

电磁功率分流混合动力汽车传动控制模式研究*

于海生^{1,2} 张建武¹ 张彤² 唐小林¹ 王晨² 汪东坪²
(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海华普汽车有限公司, 上海 201501)

【摘要】 设计了电磁功率分流混合动力系统,此系统采用双转子有刷电动机对发动机进行功率分流调节,可同时起到电磁离合器和无级变速箱的作用。在分析系统结构、工作原理和确定整车控制模式的基础上,基于NEDC循环利用整车仿真模型对控制模式进行了验证,并对整车动力性和经济性进行了分析。结果表明:针对电磁功率分流混合动力系统所涉设计的传动控制模式在各种工况下工作正常;采用该控制模式的整车0~100 km/h加速时间为12 s,满足最大爬坡度的指标,符合整车动力性设计的要求;整车的综合油耗为4.75 L/(100 km),与传统车相比节油率达到41.3%。

关键词: 混合动力汽车 电磁功率分流 控制模式 行星排 无级变速
中图分类号: U463.22⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)06-0001-07

Transmission Control Mode of Electromagnetic Power-split Hybrid Electric Vehicle

Yu Haisheng^{1,2} Zhang Jianwu¹ Zhang Tong² Tang Xiaolin¹ Wang Chen² Wang Dongping²
(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. Shanghai Maple Automobile Co., Ltd., Shanghai 201501, China)

Abstract

A electromagnetic power-split (EMPS) hybrid electric vehicle was designed. This system with dual-rotor brush motor could be used to modulate the engine power flow, also can be used as electromagnetic clutch and CVT. The system configuration, working principle, the vehicle control mode and etc were analyzed. The control mode was tested under the NEDC based on the vehicle simulation platform. The dynamic and economic performances of the EMPS HEV were analyzed. The results noted that the designed vehicle control mode of the EMPS HEV worked properly under different cycles. The results also noted that the time from 0 km/h to 100 km/h was 12 s and climbing grade was bigger than 17°, these values were all satisfied with vehicle dynamic target. The average fuel consumption under the NEDC was 4.75 L/(100 km), the fuel can be saved was 41.3% compared with the related conventional vehicle.

Key words Hybrid electric vehicle, Electromagnetic power-split, Control mode, Planetary, Continuously variable transmission

引言

按照功率混合比例,混合动力电动汽车可分为弱混、中混和强混,其中强混动力电动汽车可以实现40%以上的节油效果^[1-2],是目前国内外各大汽车公司研发的重点。强度混合可分为通过双转子电动

机实现的电磁功率分流和通过行星排实现的机械功率分流两种方案,这两种方案都具备在较宽速比范围内实现无级变速传动,使发动机在变负载条件下均能运行在最佳经济运行线上而不受轮边负荷约束,从而节省了燃油消耗^[3-7]。机械功率分流系统以丰田公司的Prius为代表^[8],是一款成熟的产业

收稿日期: 2011-08-08 修回日期: 2011-09-03
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA11A125)
作者简介: 于海生,博士生,上海华普汽车有限公司工程师,主要从事混合动力系统设计和传动控制研究,E-mail: yhsdg@sjtu.edu.cn

化系统,1997 上市至今已发展到第四代 Prius。电磁功率分流系统虽然有很多公司和科研机构进行了相关研究,但目前还没有成熟的系统。

本文在电磁耦合双转子电动机混合动力系统的基础上,增加一排行星排,将行星架与齿圈固定,太阳轮与外电动机相连,实现定轴齿轮传动,起到减速增扭的作用,综合两种功率混合方案的优点。

1 结构方案和工作原理

1.1 结构方案

电磁功率分流混合动力汽车结构示意图如图 1 所示,系统包括:发动机、扭转减振器、内电动机(双转子电动机)、行星排(PG)、外电动机、逆变器、泵升单元、锂电池、主减速器和车轮等。内电动机和外电动机分别采用逆变器进行控制。

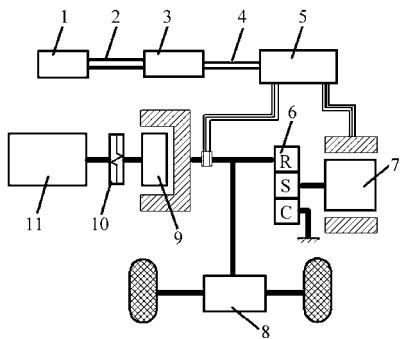


图 1 电磁功率分流混合动力汽车结构示意图

Fig. 1 Schematic of EMPS HEV

1. 锂电池 2. 低压母线 3. 泵升单元 4. 高压母线 5. 逆变器
6. 行星排(PG) 7. 外电动机 8. 主减速器 9. 内电动机 10.
扭转减振器 11. 发动机

内电动机是双转子有刷电动机,其内转子与发动机的输出轴相连,其外转子与行星排的齿圈(R)相连,并通过齿轮传动与主减速器耦合驱动车轮;行星排的行星架(C)与箱体固定在一起,行星排在这里起定轴齿轮传动的作用,实现减速增扭功能;外电动机是永磁同步电动机,其转子与行星排的太阳轮(S)相连。

1.2 工作原理

发动机直接驱动内电动机,通过调节内电动机的转矩,对发动机进行转速闭环控制,使发动机始终工作在最佳的燃油消耗点;由于电磁使内转子旋转发电,内、外转子相互作用的电磁力矩将拖动外转子随内转子做同向、但速度可以不等的旋转运动,内电动机在逆变器的控制下,使内电动机的转矩与其两个转子转速差对应的功率以电能的形式形成与高压母线能量的传递,内电动机的转矩与外转子转速对应的功率仍然以机械能的形式输出,直接驱动车轮,所以又称内电动机为动能透过式电动机;高压母

线上的电能根据整车控制的需要既可以驱动外电动机进行助力,也可以存储到电池中对整个动力系统进行能量平衡。

图 2 所示为电磁功率分流混合动力系统在常用工况下的功率流向图。从图中可以看出,发动机发出的功率 P_{ICE} 分为两条路径传递,一条路径是通过内电动机直接传递到输出轴的功率 P_{out1} ,另一条路径是通过内电动机发电的功率 P_{M1} ,这一部分功率回馈到母线上;高压母线上的功率根据整车控制的需要即可以驱动外电动机进行助力,这一部分功率为 P_{M2} ,也可能存储到电池中,这部分功率为 P_B ,外电动机通过行星排作用到输出轴上的功率为 P_{out2} ,整个系统作用到输出轴上的功率为 P_{out} 。

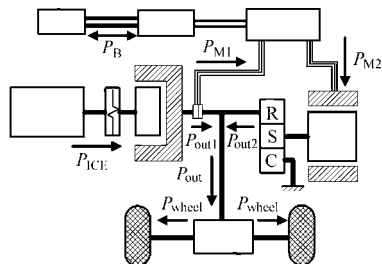


图 2 电磁功率分流混合动力系统的功率流向图

Fig. 2 Power flow diagram of EMPS HEV

发动机的功率为

$$P_{ICE} = T_{ICE} n_{ICE} \quad (1)$$

式中 T_{ICE} ——发动机扭矩

n_{ICE} ——发动机转速

内电动机的发电功率为

$$P_{M1} = T_{M1} n_{M1} \quad (2)$$

式中 T_{M1} ——内电动机电磁扭矩

n_{M1} ——内电动机转速

发动机可以输出的功率为

$$P_{out1} = T_{out1} n_{out} \quad (3)$$

式中 T_{out1} ——发动机经过内电动机后作用在输出轴上的扭矩

n_{out} ——主减速器输入转速

不考虑传递过程中的机械损失以及充放电效率的情况,可以得到电磁功率分流系统的功率平衡关系

$$P_{ICE} = P_{M1} + P_{out1} \quad (4)$$

动力系统的电功率平衡关系为

$$\eta_{M1} = f(T_{M1}, n_{M1}) \quad (5)$$

$$\eta_{M2} = f(T_{M2}, n_{M2}) \quad (6)$$

$$P_B = \frac{T_{M1} n_{M1}}{\eta_{M1}} + \frac{T_{M2} n_{M2}}{\eta_{M2}} \quad (7)$$

式中 η_{M1} ——内电动机及其控制器系统效率

η_{M2} ——外电动机及其控制器系统效率

T_{M2} ——外电动机扭矩

n_{M2} ——外电动机转速

式(7)是动力系统能量转换过程中的通用公式,当电动机工作在电动状态时,电动机系统的效率用式(7)所示的数值,当电动机工作在发电状态时,式(7)所用的效率数值,为发电效率的倒数^[9]。

动力系统最终输出到车轮的功率为

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{out1} + P_{out2} + P_{mech_loss} = \\ &P_{ICE} + P_B + P_{mech_loss} = \\ &P_{ICE} + \frac{T_{M1} n_{M1}}{\eta_{M1}} + \frac{T_{M2} n_{M2}}{\eta_{M2}} + P_{mech_loss} \end{aligned} \tag{8}$$

式中 P_{out} ——输出到车轮的最终功率
 P_{mech_loss} ——动力传递过程中机械损失功率

2 整车控制模式分析

确定整车运行模式原则为:按照驾驶员的行为方式,以驾驶员的需求作为出发点,同时不考虑各个零部件的具体工作,按照整车控制的需求向各个零部件发送控制指令。图 3 为电磁功率分流混合动力系统的整车控制模式状态迁移图,图中各个字母代表状态迁移的条件。

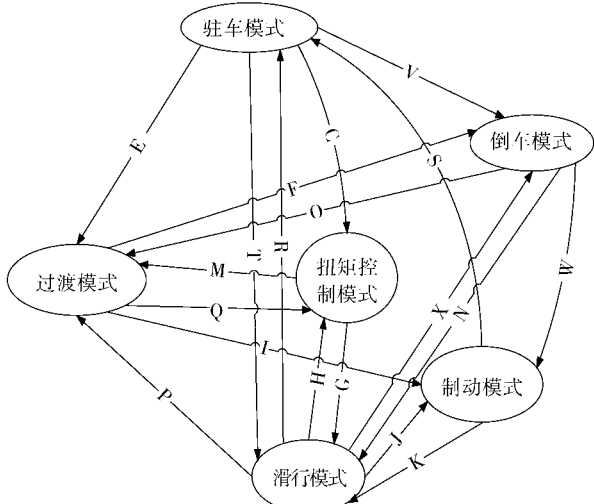


图 3 整车控制模式状态迁移图

Fig. 3 State transition diagram of vehicle control mode

根据驾驶员驾驶过程中的动作,将整车运行过程中状态分为 6 种模式(图 3)即驻车模式、过渡模式、扭矩控制模式、制动模式、滑行模式和倒车模式。

2.1 驻车模式

图 4 为驻车模式的状态迁移图。驻车模式是车速为零的模式,又包括图 4 所示的子模式:①停车模式:钥匙“off”位,发动机熄火停车。②怠速模式:发动机进行暖机、充电或空调运行,具体分为:暖机子模式:冷启动后,使发动机水温以及三元催化的温度上升到设定值;驻车充电电子模式:停车后发动机在设定的优化工作区域内通过内、外电动机的协调控制

给蓄电池充电;空调状态子模式:通过 CAN 总线接收到空调制热请求的信号开启,发动机怠速运行;③怠速延迟模式:在设定的短暂时间内怠速,等待信号触发,有信号触发进入相应工况或模式,无信号触发进入停车模式。

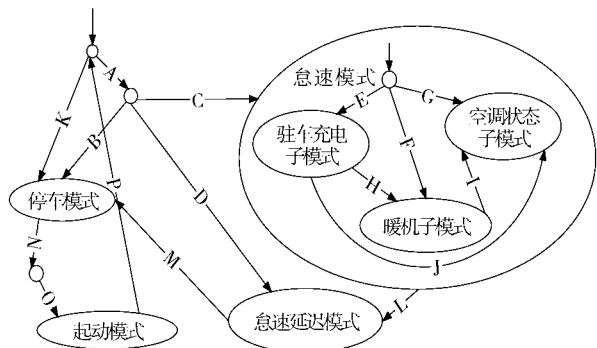


图 4 驻车模式状态迁移图

Fig. 4 State transition diagram of stationary mode

2.2 过渡模式

过渡模式是车速大于零小于某一值(7 km/h)并且制动踏板小于 20%、加速踏板为零的模式。在过渡模式中进行速度的闭环控制,在系统能力容许的情况下,根据制动踏板的行程控制系统维持在目标车速状态下,规定制动踏板开度 BPS 为 20% 时目标车速为零, BPS 为零时目标车速为 7 km/h。

这一过程始终工作在闭环控制状态下,主要控制参数是电池荷电状态 SOC 值,以 SOC 值为分界线,出现两种工作模式:①纯电动模式。在这一过渡工况中,当 SOC 值大于某一值时,完全依靠外电动机来保证这一速度闭环。②混合动力模式。当 SOC 值小于某一值时,启动发动机,以较大的功率对蓄电池进行充电,同时提供一部分功率输出维持速度闭环的需求。这个过程中涉及发动机低速段的滑差控制,设定固定发电点,确定固定发电量,以及内、外电动机之间的扭矩平衡,外电动机在闭环扭矩控制的基础上再增加扭矩,继续进行扭矩闭环控制。

2.3 扭矩控制模式

在行驶过程中,加速踏板开度大于某一门限值时,整车控制系统进入扭矩控制模式。整车扭矩控制模式流程如图 5 所示。

根据整车的功率需求 P_{out} ,电池荷电状态 SOC 值,发动机最大功率 P_{ICE_max} 和最小功率 P_{ICE_min} ,以及内电动机的转速限制 n_{slip_min} 等条件,将整车扭矩控制模式划为纯电动模式、内部功率平衡模式、助力模式和极端电池保护控制模式。

加速踏板的开度反映了整车的扭矩需求,并且能够覆盖整车最高车速、加速和爬坡等对扭矩的需求,通过对整车的动力总系统进行分析,整车的扭矩

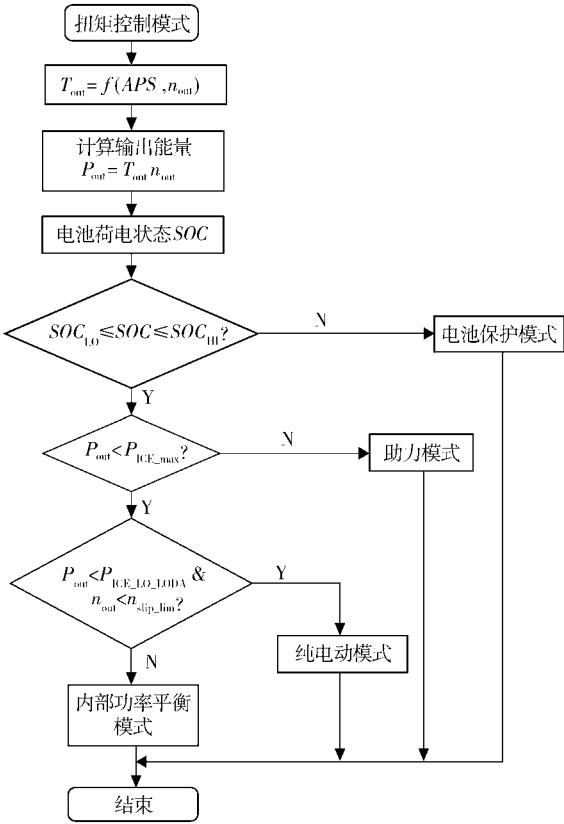


图 5 整车扭矩控制模式流程图

Fig. 5 Flow chart of vehicle torque control mode

需求是加速踏板开度 APS 和主减速器输入轴转速 n_{out} 的函数,函数关系为

$$T_{out} = f(APS, n_{out}) \tag{9}$$

2.4 制动模式

制动模式是一种制动踏板大于零并且车速大于某一值的模式。图 6 所示为制动模式状态迁移图,制动过程中,根据制动强度、车速、电池荷电状态以及电动机系统本身的特性,将制动过程分为纯电动机制动、电动机和机械刹车共同作用的复合制动以及纯机械制动,以保证整车在各种条件下安全、可靠地制动并能够尽量回收制动能,获得较好的整车经济性和制动平顺性。

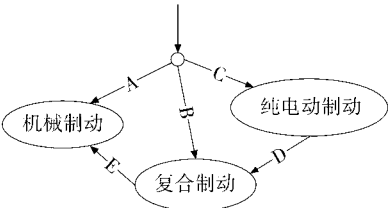


图 6 制动模式状态迁移图

Fig. 6 Transition diagram of brake mode state

2.5 滑行模式

滑行模式是一种车速大于设定值且制动踏板和油门踏板位置均为零的模式。基于滑行安全性及平顺性且兼顾惯性能量回收的考虑,将滑行模式分为

带挡滑行和空挡滑行两个子模式。图 7 是滑行模式的状态迁移图,以完成整车在滑行模式下安全、可靠和平稳地行驶并能够尽量回收惯性能。

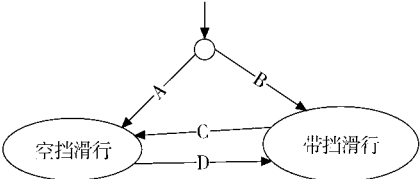


图 7 滑行模式状态迁移图

Fig. 7 Transition diagram of sliding mode state

3 结果验证分析

在混合动力汽车研究开发过程中,静态、准静态和动态的分析都建立在仿真模型基础上。为了验证混合动力汽车控制模式和策略,同时分析整车动力性能、燃油经济性能和排放性能,本文针对电磁功率分流混合动力总成系统搭载的目标车型建立了基于 Matlab/Simulink 仿真平台,如图 8 所示。表 1 所示为整车主要参数。动力总成系统中发动机为 1.5 L 汽油机,其额定功率为 69 kW,最大扭矩为 128 N·m;内电机为永磁同步电动机,额定功率为 30 kW,最大扭矩为 128 N·m,最高转速为 6 000 r/min;外电动机为永磁同步电动机,额定功率为 50 kW,最大扭矩为 200 N·m,最高转速为 13 000 r/min,储能元件为磷酸铁锂电池,公称容量 6.5 A·h,总电压 288 V;行星排的齿圈齿数为 73,行星轮齿数为 25,太阳轮齿数为 23,行星排的效率为 98%。

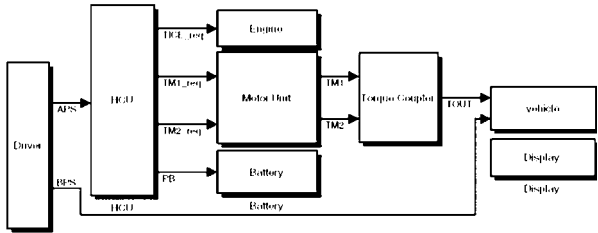


图 8 电磁功率分流混合动力汽车仿真平台

Fig. 8 Simulation platform of EMPS HEV

表 1 整车参数

Tab. 1 Vehicle parameters

参数	数值
整车质量/kg	1 300
迎风面积/m ²	2.2
风阻系数	0.3
滚阻系数	0.009
车轮半径/m	0.31
主减速齿轮速比	2.6

3.1 控制模式验证

在进行策略开发过程中,采用基于特定循环的

方法进行策略的验证和设计,通过目标循环解析出驾驶员的踏板需求,进行正向仿真开发。图 9 所示为基于 NEDC 循环仿真过程中目标车速和实际车速之间的关系,从图中可以看出,两条曲线基本吻合,验证了所设计的控制策略基本符合本车型的控制需求。

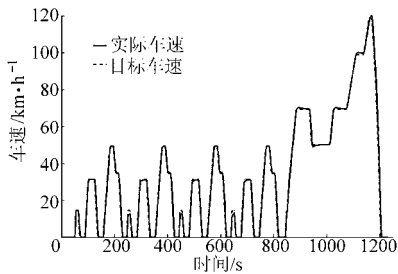


图 9 目标车速和实际车速的对比
Fig. 9 Comparison between target vehicle speed and actual speed

整车控制模式分成 6 种,在仿真过程中分别用“1”代表驻车模式 (Stationary),用“2”代表过渡模式 (Transition),用“3”代表扭矩控制模式 (TrqCtrl),用“4”代表制动模式,用“5”代表滑行模式 (Sliding),用“6”代表倒车模式;扭矩控制分成 4 种,在仿真过程中分别用“1”代表极端电池保护控制模式,用“2”代表助力模式,用“3”代表内部功率平衡模式,用“4”代表纯电动模式。图 10 为 NEDC 循环下整车控制模式和扭矩控制模式的变化过程,如图所示整车控制模式在整个 NEDC 循环中只出现了“1”、“2”、“3”和“4”4 种模式,而没有出现“5”和“6”这 2 种模式,是因为在仿真的过程中没有出现空挡位和倒车的工况,从图中可以看出“1”、“2”、“3”和“4”这 4 种整车控制模式与工况对应关系与前面所设计的对应条件下的整车控制模式是完全对应的。

图 11 为整车需求功率、发动机最大功率与扭矩

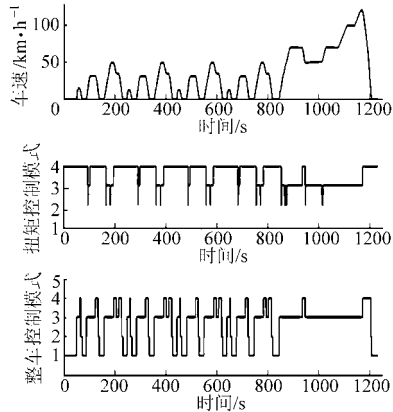


图 10 NEDC 循环下扭矩控制模式和整车控制模式的变化过程

Fig. 10 Change process of torque control mode and vehicle control mode under NEDC

控制模式的关系。从图中可以看出,整车需求功率如果大于发动机在当前状态下能够提供的最大功率时,整车工作在助力模式下,图中出现的扭矩控制模式为“2”。图 12 为 NEDC 循环下 SOC 的变化过程。从图 10、11 和 12 中可以看出,整车扭矩控制模式只出现了“2”、“3”和“4”3 种扭矩控制模式,这是因为 SOC 值在整个变化过程中都在上、下限值 (0.3 ~ 0.8) 范围内,所以没有出现扭矩控制模式为“1”的情况,即系统没有出现需要工作在极端电池保护控制模式的情况下。从图中的扭矩控制模式随工况的变化过程中可以看出,在城市工况下大多在纯电动模式下工作,加速需求大的情况下发动机会起动,系统在助力模式下工作,然后转到功率平衡模式;在郊区工况下大多在内部功率平衡模式下工作。

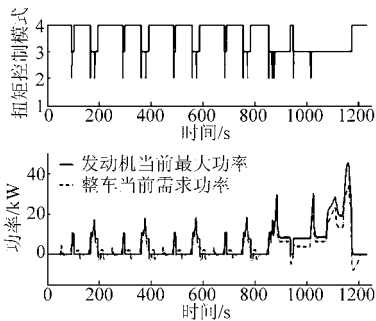


图 11 整车需求功率、发动机最大功率与扭矩控制模式的关系

Fig. 11 Relation among vehicle required power, engine maximum power and torque control mode

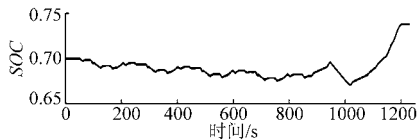


图 12 SOC 值在 NEDC 循环下的变化过程

Fig. 12 Change process of SOC under NEDC

3.2 动力性能验证

在动力系统设计中,与系统动力性相关的主要指标为最大爬坡度和百公里加速时间等。

乘用车设计规定应满足 17° 的最大爬坡度要求,在这一坡度的坡上静止起动时需要的扭矩为

$$T_{\text{wheel}} = F_{\text{st}} r_{\text{wheel}} = 3\,724 \times 0.31 = 1\,155 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (10)$$

其中

$$F_{\text{st}} = m g \sin \alpha = 1\,300 \times 9.8 \times 0.292 = 3\,724 \text{ N} \quad (11)$$

式中 m ——整车质量 α ——坡度

r_{wheel} ——车轮半径

外电动机的最大扭矩为 200 N·m,经过行星排和主减速器的增扭作用,外电动机单独作用时,可以提供到车轮的扭矩为 $200 \times 3.174 \times 2.6 = 1\,650 \text{ N} \cdot \text{m}$,

远大于式(10)的计算结果,可以满足最大爬坡度的要求。

图 13 为 0 ~ 100 km/h 加速过程中车速变化与扭矩控制模式、整车控制模式的对应关系。图 14 为这一过程中的发动机、内外电动机的转速、扭矩和功率的变化关系。由图可以看出,0 ~ 100 km/h 的加速时间为 12 s,整个加速过程中,都是工作在扭矩控制模式中,其中 0 ~ 1 s,系统工作在扭矩控制模式的纯电动模式,这一过程发动机正在起动不对外输出动力,1 s 后,发动机起动完成,系统工作在扭矩控制模式的助力模式中。由图 14 的扭矩变化可以看出整个加速过程中外电动机基本上都是工作在外特性的工作点上。

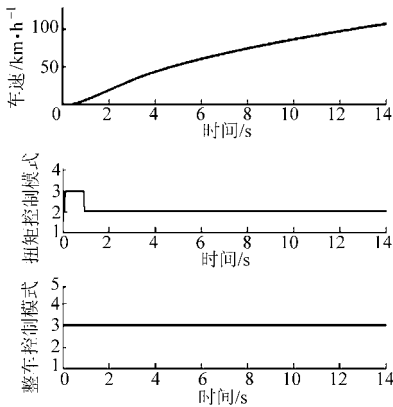


图 13 车速、扭矩控制模式和整车控制模式的变化关系
Fig. 13 Change process of vehicle speed, torque control mode and vehicle control mode

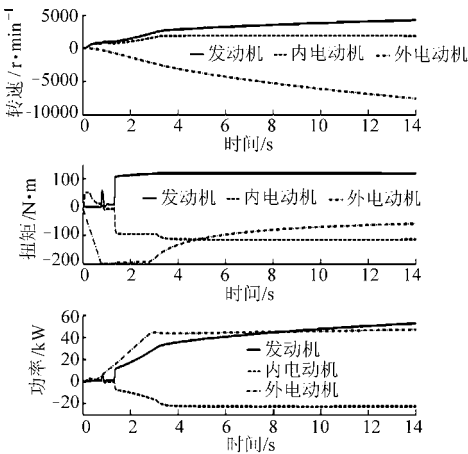


图 14 发动机、内外电动机的转速、扭矩和功率的变化关系

Fig. 14 Change process of speed, torque and power for the engine, inner and outer motor

3.3 基于 NEDC 循环的经济性分析

图 15 所示为 NEDC 循环下发动机的转速和 SOC 值的变化过程。图中所示,在城市工况下以纯电动工作为主,只有在加速需求比较大的情况下发动机才会起动,郊区工况下,由图 10 可以看出绝大

部分工作在内部功率平衡的高效模式下。整个 NEDC 循环中, SOC 值从 0.70 变化到 0.73,变化量很小,可以认为整个工作过程中电池的能量是平衡的,所以发动机的油耗可以代表当前状态下整车的平均油耗。

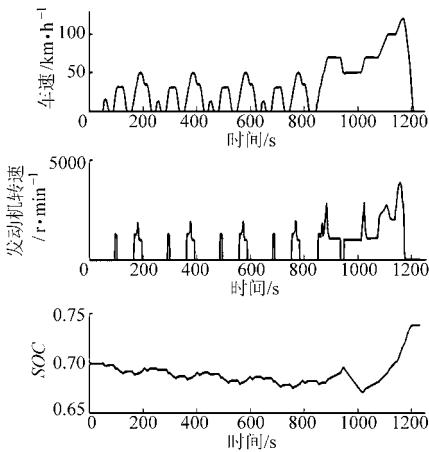


图 15 NEDC 循环下发动机的转速和 SOC 值的变化过程
Fig. 15 Change process of engine speed and SOC under NEDC

图 16 为 NEDC 循环下整车行驶里程和平均油耗。从图中可以看出城市工况下的平均油耗和综合工况下的平均油耗。表 2 为采用电磁功率分流混合动力系统的整车油耗与原型车油耗对比。结果表明,综合工况下节油率为 41.3%,城市工况下的节油率为 70.0%,郊区工况下的节油率为 13.7%,采用电磁功率分流混合动力系统的车型具有较好的燃油经济性。

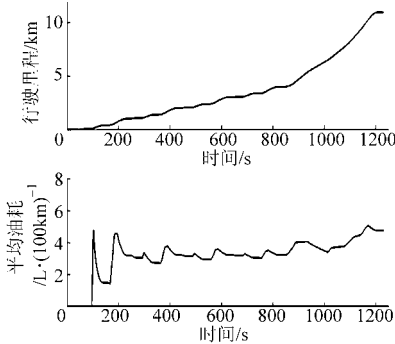


图 16 NEDC 循环下整车行驶里程和平均油耗
Fig. 16 Average fuel consumption and vehicle distance under NEDC

表 2 油耗结果对比

类型	油耗/L·(100 km) ⁻¹		
	综合工况	城市工况	郊区工况
原型车	8.10	10.80	6.50
电磁功率分流混合动力系统	4.75	3.24	5.61
节油率/%	41.3	70.0	13.7

4 结论

(1)对电磁功率分流混合动力系统进行传动控制模式的设计开发,着重对整车控制模式和整车控制模式中的扭矩控制模式进行了分析。

(2)通过建立的电磁功率分流混合动力汽车仿真平台对传动控制模式进行了验证,结果表明各种控制模式能够正确地按照设计目标进行切换。

(3)基于设计的传动控制模式对电磁功率分流混合动力系统进行了动力性的验证分析,动力性能能够满足设计的要求,0 ~ 100 km/h 的加速时间仅为 12 s。

(4)基于设计的传动控制模式对电磁功率分流混合动力系统进行了经济性的验证分析,并且与原型车进行了对比,结果表明整车综合工况的节油率达 41.3%。

参 考 文 献

1

John M Miller. Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006,21(3): 756 ~ 767.

2

Michael Duoba, Henry Ng, Robert Larsen. Characterization and comparison of two hybrid electric vehicles(HEVs)-honda insight andtoyota prius[C]. SAE Paper 2001-01-1335,2001.

3

Li Wenyong, Abel A, Todtermuschke K, et al. Hybrid vehicle power transmission modeling and simulation with simulationX [C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and, Harbin, China, 2007: 1 710 ~ 1 717.

4

Shibata Fukuo. Electric control system of an electric machine arrangement combining electromagnetic coupling with electric rotating machine: USA,US 3789281[P]. 1974-02-29.

5

Dae Hun Lee, Ui Seong Kim, Chee Burm Shin, et al. Modelling of the thermal behaviour of an ultracapacitor for a 42 V automotive electrical system[J]. Journal of Power Sources,2008,175(1):664 ~ 668.

6

Zheng Ping, Liu Ranran, Wu Qian, et al. Magnetic coupling analysis of four-quadrant transducer used for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2 597 ~ 2 599.

7

左义和,项昌乐,闫清东. 基于功率跟随的混联混合动力汽车控制策略[J]. 农业机械学报,2009,40(12):23 ~ 29.

Zuo Yihe, Xiang Changle, Yan Qingdong. Control strategy of parallel-serial hybrid electrical vehicle based on the power track method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(12):23 ~ 29. (in Chinese)

8

Koichiro Muta, Makoto Yamazaki, Junji Tokieda. Development of new-generation hybrid system THS II -drastic improvement of power performance and fuel economy[C]. SAE Paper 2004-01-0064, 2004.

9

Kukhyun Ahn, Sungtae Cho, Suk Won Cha. Optimal operation of the power-split hybrid electric vehicle powertrain[J]. Proc. IMechE. Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008,222(5):789 ~ 800.

(上接第 78 页)

5

甘晓伟,苏广达. 甘蔗叶片生长与蔗茎生长关系的研究[J]. 甘蔗糖业,1995(6):6 ~ 11.

Gan Xiaowei, Su Guangda. A study on the relationship between the leaf and cane growth in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) production[J]. Sugarcane and Canesugar, 1995(6):6 ~ 11. (in Chinese)

6

蒙艳枚,刘正士,李尚平,等. 甘蔗收获机械排刷式剥叶元件虚拟试验分析[J]. 农业机械学报,2003,34(4):43 ~ 46.

Meng Yanmei, Liu Zhengshi, Li Shangping, et al. Virtual experiment analysis of a brush shape of cleaning element for sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(4):43 ~ 46. (in Chinese)

7

王光炬,杨坚,梁兆新,等. 小型甘蔗剥叶机剥叶质量影响因素的试验研究[J]. 农机化研究,2006(12):142 ~ 145.

Wang Guangju, Yang Jian, Liang Zhaoxin, et al. Experiment study of the factors influence on the sugarcane detrashing quality of sugarcane detrashing machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(12):142 ~ 145. (in Chinese)

8

Ma Fanglan, Li Shangping, He Yulin, et al. Virtual experimental analysis on cleaning element of sugarcane harvester[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005,18(4):586 ~ 591.

9

潘丽军,陈锦权. 试验设计与数据处理[M]. 南京:东南大学出版社,2008.

10

傅美贞,龚永坚,陈德俊,等. 全喂入稻麦联合收获机复脱系统设计[J]. 农业机械学报,2011,42(11):57 ~ 61.

Fu Meizhen, Gong Yongjian, Chen Dejun, et al. Design of re-threshing system of whole-feed rice-wheat combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):57 ~ 61. (in Chinese)