

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.04.001

插电式混合动力汽车纯电动 行进间启动发动机的平顺性控制

秦大同, 尚 阳, 杨官龙

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:针对单电机插电式混合动力汽车在纯电动行进间电动机启动发动机时由于系统输出转矩变化进而引起整车冲击的问题,分析得到发动机点火时刻的不同及离合器接合状态的不同是造成转矩波动的原因。在此基础上,提出了基于离合器主、从动盘转速差和电机角加速度为输入量的离合器压力模糊控制的混合动力汽车模式切换动态协调控制策略,并对比了发动机目标转速点火和怠速转速点火的控制效果。最后通过台架试验以及实车道路试验对提出的控制策略进行了验证。结果表明,基于目标转速点火的协调控制策略能减小整车的冲击度。

关键词:混合动力汽车;模式转换平顺性;动态过程控制;发动机点火时刻

中图分类号:TH11

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)04-0001-09

The ride comfort control of PHEV during engine starting in-motion process

QIN Datong, SHANG Yang, YANG Guanlong

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: Improper management of engine starting in-motion of PHEV (plug-in hybrid electric vehicle) may result in noticeable jerk. The engine ignition time and the clutch state are the key to the ride comfort control. Therefore, a clutch pressure fuzzy control algorithm for PHEV mode transition is proposed, which bases on torque coordination control and starting engine at target speed. And the strategy is verified through bench test and road test, and the test results indicate that the torque coordination control strategy which is based on engine starting at target speed and clutch pressure fuzzy control algorithm can improve vehicle ride comfort.

Key words: PHEV; mode transformation; target speed ignition; dynamic control

插电式混合动力电动汽车在电池电量充足且需求功率较低时采用纯电动驱动行驶,电池电量较少时或需求功率较高时须切换至发动机驱动或混合驱动,减少发动机运行在低负荷非经济区的时间,从而减少油耗和排放。同时,插电式混合动力汽车利用晚间电网用电低谷的电能对电池充电,可以改善电厂机组运行效率,节约能源。然而,由于插电式混合动力汽车在驱动模式转换过程中存在发动机启动、离合器接合、发动机和电机转矩分配等动态过程,控制不当容易引起传动系统输出转矩的突变,从而带来整车冲击,影响车辆的平顺性^[1-3]。

目前,混合动力汽车的模式切换平顺性协调控制策略已经成为混合动力汽车的重要研究内容。文献[4]针对一种并联式混合动力系统提出了“发动机转矩开环+发动机动态转矩估计+电机转矩补偿”的动态协调控制算法;文献[5]针对一种混合动力城市客车模式切换过程中传动系统输出转矩突变问题,提出了在限制

收稿日期:2015-03-16

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2013BAG12B01)。

Supported by National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2013BAG12B01).

作者简介:秦大同(1956-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事动力传动研究,(E-mail)dtqin@cqu.edu.cn。

发动机动态转矩变化率的同时,利用电机进行转矩补偿的控制方法;文献[6-7]针对一种基于行星齿轮机构的混合动力系统,提出了从纯电动切换至发动机驱动过程的动力源和离合器转矩协调控制策略;文献[8]提出了一种基于电机转速闭环控制的混合动力汽车模式切换动态协调控制策略。丰田 THS 混联式混合动力系统根据汽车加速度的反馈信息对电机输出转矩进行闭环控制,从而减少模式切换时的整车冲击^[9];Kim 等^[10]建立了扭矩干扰观测器,通过干扰观测器对干扰量进行估计,然后通过 ISG 电机补偿干扰量来消除传动系输出转矩的突变。

笔者以减小插电式混合动力汽车模式切换时的整车冲击为目标,针对一种装有无级变速器(CVT)的单电机并联式混合动力系统的关键模式切换过程——纯电动行进间启动发动机的动态过程进行了动力学分析,结果表明发动机点火时刻选择不当及离合器接合过程控制不当是造成整车冲击的原因,从而提出了发动机目标转速点火、电动机和离合器协调控制相结合的纯电动行进间启动发动机的控制策略。通过仿真建模分析、台架试验以及实车控制试验,对该控制策略对降低模式切换过程中整车冲击度的有效性进行了验证。

1 动力系统

研究的混合动力系统结构如图 1 所示。系统中发动机输出轴连接湿式离合器的从动盘,ISG 电机既可作为发电机又可作为电动机,电机转子同时连接湿式离合器的主动盘和无级变速器(CVT)的输入端,系统动力通过无级变速器、主减速器传递至车轮。

通过控制发动机、ISG 电机和湿式多片离合器的工作状态,该混合动力系统可以实现多种工作模式(如表 1 所示)。混合动力系统从纯电动模式切换至有发动机参与驱动的工作模式的过程中,ISG 电机的扭矩同时用来驱动车辆和启动发动机。在此过程中 ISG 电机和离合器的协调控制是关键,离合器接合压力和 ISG 电机的转矩控制不当会造成系统输出扭矩变化剧烈,影响车辆的平顺性。此外,发动机点火后的转矩波动也会直接导致系统输出转矩波动,所以发动机点火时刻的 ISG 电机转矩的补偿以及离合器接合压力控制成为系统平顺性控制的关键。

该混合动力系统主要部件的参数如表 2 所示。

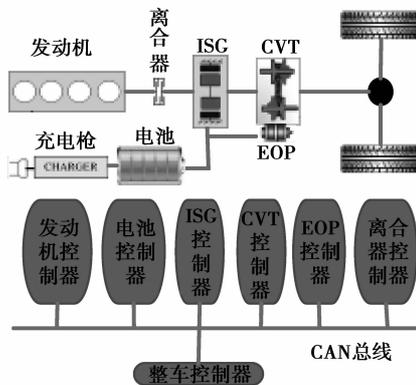


图 1 混合动力汽车结构简图

Fig.1 Structure diagram of hybrid vehicle

表 1 混合动力系统工作模式

Table 1 Mode of hybrid system

工作模式	发动机	ISG 电机	湿式离合器
纯电动	0	1	0
发动机驱动	1	0	1
混合驱动	1	1	1
行车充电	1	-1	1
再生制动	0	-1	1

注:1 表示动力源/执行元件处于工作状态,0 表示动力源/执行元件处于不工作状态,-1 表示电机处于发电状态。

表 2 混合动力系统整车和主要部件的参数

Table 2 Parameters of the main components and vehicle

部件名称	主要技术参数	
	参数	数值
整车	质量 m_0 /kg	1 547
	迎风面积 A /m ²	2.28
	风阻系数 CD	0.357
	车轮半径 r /m	0.289
	滚动阻力系数 f_r	0.008 3
发动机	最大功率 P_{emax} /kW	93
	最大扭矩 $T_{\text{emax}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	160(3 900 r/min)
ISG	转速范围 $n_e/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	800~6 000
	最大功率 P_m /kW	32
电池包	最大扭矩 $T_m/(\text{N} \cdot \text{m})$	113
	转速范围 $n_m/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	0~6 000
CVT	容量 $Q_0/(\text{A} \cdot \text{h})$	45
	额定电压 U_0 /V	336
CVT	速比范围 i_{cvt}	0.422~2.432
	最终速比 i_0	5.297

2 模式切换的动力学建模

PHEV的工作模式有纯电动驱动模式、发动机单独驱动模式、行车充电模式、混合驱动模式、再生制动模式等。车辆根据油门开度、车速和电池电量SOC,以能耗经济性最优化为目标来控制发动机、ISG电机和离合器进行模式切换。模式切换平顺性控制的目的是通过协调控制发动机扭矩、离合器接合压力和电动机的扭矩以消除由于传动系输出扭矩的突变产生的冲击。

针对研究的单电机混合动力系统关键模式切换过程——由纯电动模式切换至有发动机参与驱动的模式,扭矩的控制可分为以下3个阶段:1)离合器滑摩、电机扭矩补偿离合器滑摩转矩并启动发动机阶段;2)离合器接合、电机扭矩补偿发动机扭矩阶段;3)电机退出工作阶段。该混合动力传动系统如图2所示。

图2中, J_e 为发动机转动惯量; J_{ce} 为湿式多片离合器发动机端转动惯量; J_{cm} 为湿式多片离合器电机端转动惯量; J_m 为电机转动惯量; J_{ti} 为CVT输入端转动惯量; J_{to} 为CVT输出端转动惯量; J_{mr} 为主减速器转动惯量; J_w 为车轮转动惯量; m 为整车质量; r 为车轮半径; i_{cvt} 为CVT变速器速比; i_0 为主减速器传动比。

将混合动力传动系统电机之后的转动惯量等效为 J_v ,可得:

$$J_v = \frac{((J_w + mr^2)/i_0^2 + J_{mr} + J_{to})}{i_{cvt}^2} + J_{ti} \quad (1)$$

当车辆纯电动行驶时,整车的动力学方程为

$$T_{req} = T_{m_tar} = (J_m + J_{cm} + J_v) \cdot \dot{\omega}_m, \quad (2)$$

式中: T_{req} 为驱动车辆的需求扭矩; T_{m_tar} 为电机扭矩; ω_m 为电机的转速。

当整车控制器发出模式切换指令,离合器开始接合,离合器进入滑摩状态。当离合器摩擦转矩小于发动机的起动阻力矩时,电机需求扭矩为

$$T_{m_tar} = T_{req} + T_{cl}, \quad (3)$$

$$T_{cl} = \text{sgn}(\omega_m - \omega_e) \mu z A_p (P_{in} - P_{base}) R_m, \quad (4)$$

$$R_m = 2(R_o^3 - R_i^3)/(3R_o^2 - 3R_i^2), \quad (5)$$

式(3)~(5)中: T_{cl} 为离合器传递的扭矩; ω_e 为发动机的转速; μ 为摩擦片的摩擦因数; z 为离合器的摩擦面数; A_p 为活塞作用面积; P_{in} 为油缸控制压力; P_{base} 为回位弹簧压力; R_m 为摩擦片的等效摩擦半径; R_i 、 R_o 分别为离合器片的内外半径。

当离合器滑摩转矩大于发动机的起动转矩,发动机飞轮开始转动,此时动力学方程为

$$T_{m_tar} = T_{req} + T_{cl}, \quad (6)$$

$$T_{cl} - T_{ef} = (J_e + J_{ce}) \cdot \dot{\omega}_e, \quad (7)$$

式(6)~(7)中 T_{ef} 为发动机启动阻力矩。

当发动机转速到达设定的点火转速,发动机点火。研究的ISG电机直接启动发动机的混合动力系统,发动机的点火时刻不同导致各部件的运动状态不同,所以将发动机点火时刻分为怠速转速点火(发动机转速为800 r/min、离合器处于滑摩状态)、目标转速点火(发动机转速刚与电机转速同速、离合器完全接合)。

发动机怠速转速点火又分为两个阶段:1)发动机转速 $n_e \geq 800$ r/min,离合器为滑摩状态;2)离合器完全接合。

当发动机转速 $n_e \geq 800$ r/min时,发动机点火,离合器滑摩状态的动力学方程为

$$T_{m_tar} = T_{req} + T_{cl}, \quad (8)$$

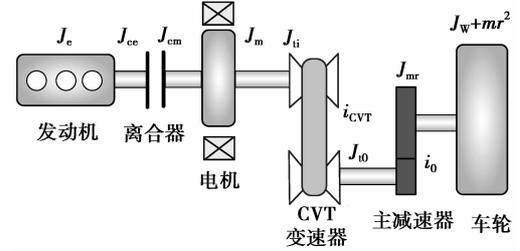


图2 单电机混合动力传动系统

Fig.2 Single-motor hybrid powertrain

$$T_{cl} + T_e = (J_e + J_{ce}) \cdot \dot{\omega}_e, \quad (9)$$

$$T_{req} = (J_m + J_{cm} + J_v) \cdot \dot{\omega}_m, \quad (10)$$

当离合器完全接合时,动力学方程为

$$T_{m_tar} = T_{req} - T_e, \quad (11)$$

$$T_{req} = T_m + T_e = (J_e + J_{ce} + J_{cm} + J_m + J_v) \cdot \dot{\omega}_m. \quad (12)$$

发动机目标转速点火:

当离合器主、从动盘刚达到同速,离合器完全接合,发动机点火工作,整车动力学方程为

$$T_{m_tar} = T_{req} - T_e, \quad (13)$$

$$T_{req} = T_m + T_e = (J_e + J_{ce} + J_{cm} + J_m + J_v) \cdot \dot{\omega}_m. \quad (14)$$

3 纯电动行进间启动发动机控制策略

3.1 离合器控制策略

插电式混合动力汽车在纯电动行进间启动发动机时,电机的扭矩一部分用于驱动车辆正常行驶,一部分通过湿式离合器的接合提供发动机启动所需转矩。要求在 0.4 s 内将发动机转速拖动到设定的点火转速,并完成启动发动机^[6]。在该过程中应对电机转矩和离合器转矩进行协调控制,以保证启动发动机不会对车辆正常行驶造成过大冲击。

采用湿式多片离合器,其传递的扭矩由式(4)决定,当结构参数确定之后,离合器的接合压力将决定离合器传递的扭矩。因而,离合器扭矩的控制就转化成为对油压的控制^[11-12]。

采用模糊控制器对离合器接合油压进行控制。以离合器主、从动盘的转速差 ω 和电机的角加速度 $\dot{\omega}_m$ 为输入量,离合器的接合压力变化率 $P(t)$ 为输出量,初始接合压力为给定值 P_0 ,则模式切换过程的离合器油压为

$$P = P_0 + \int_0^t P(t) dt.$$

在该模式切换过程中,离合器主、从动盘转速差的论域为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$,相应的模糊子集分为 $\{VS(\text{很小}), S(\text{小}), M(\text{中}), B(\text{大}), VB(\text{很大})\}$ 5 个等级。电机角加速度论域为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$,相应的模糊子集分为 $\{NB(\text{负大}), NS(\text{负小}), Z(\text{零}), PS(\text{正小}), PB(\text{正大})\}$ 5 个等级。输出为离合器接合压力变化率,论域为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$,相应的模糊子集分为 $\{VS(\text{很小}), S(\text{小}), M(\text{中}), B(\text{大}), VB(\text{很大})\}$ 。上述 3 个变量的隶属度函数都采用高斯函数。控制规则如表 3 所示。

表 3 接合压力变化率模糊控制规则表

Table 3 The fuzzy control rule table of the rate of engagement pressure

$P(t)$	ω				
	VS	S	M	B	VB
NB	S	S	VS	VS	VS
NS	S	S	S	S	VS
$\dot{\omega}_m$ Z	M	M	M	M	M
PS	VB	B	B	B	B
PB	VB	VB	VB	B	B

3.2 动力源转矩协调控制策略

根据该插电式混合动力汽车的结构特点、参数和能量管理策略,制定纯电动切换至发动机驱动过程的转

矩协调控制策略,包括发动机怠速转速点火(如图 3 所示),发动机目标转速点火(如图 4 所示)的控制流程。

具体步骤为:车辆以纯电动行驶,控制器发出模式切换指令;湿式多片离合器开始接合,离合器接合油压由接合油压模糊控制器控制,此时电机根据离合器传递的转矩进行转矩补偿;离合器传递的转矩克服发动机阻力矩,发动机开始转动(见图 3①);发动机转速达到 800 r/min 时发动机点火(见图 3②);发动机转速达到和电机同速时,离合器快速接合发动机点火,电机逐渐退出工作,然后发动机单独驱动(见图 3③)。

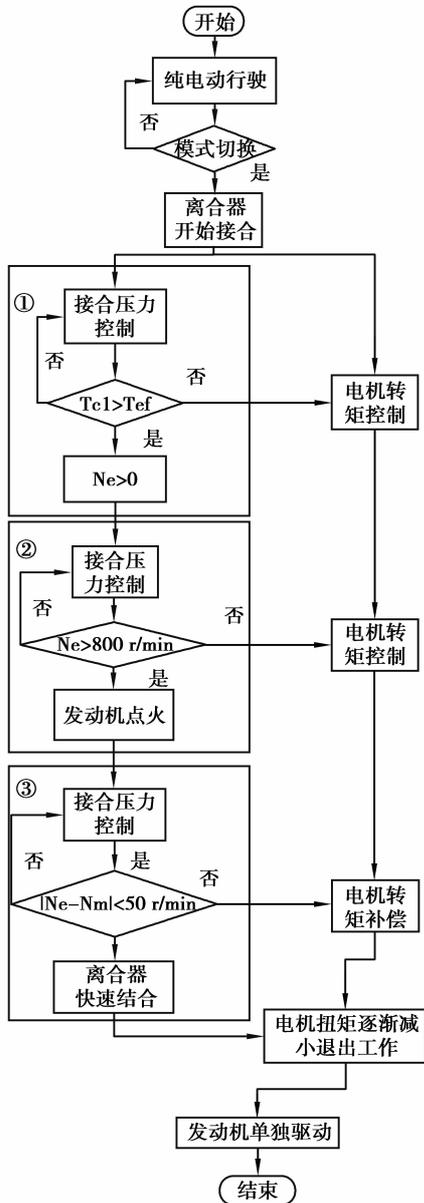


图 3 发动机怠速转速点火控制逻辑

Fig.3 Ignition engine at idle speed control logic

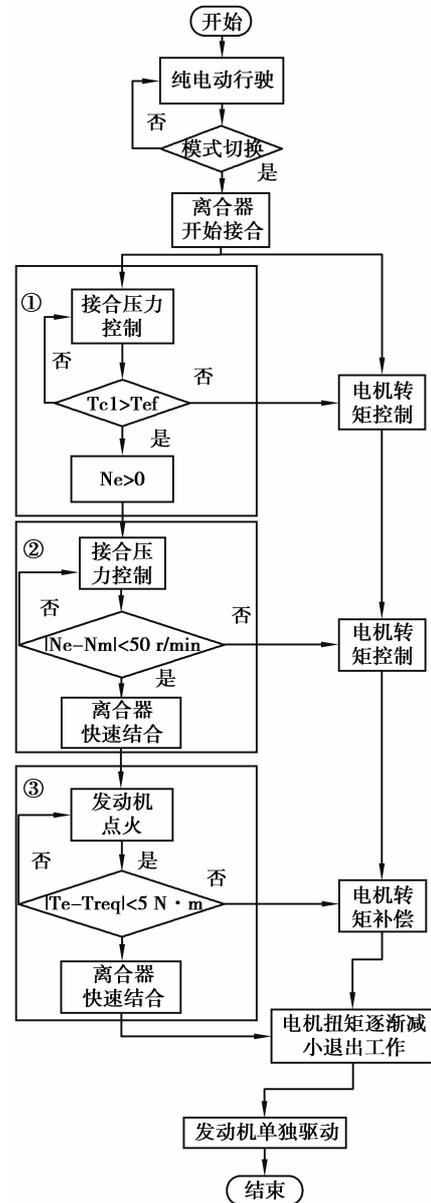


图 4 发动机目标转速点火控制逻辑

Fig.4 Ignition engine at target speed control logic

发动机目标转速点火和怠速转速点火的不同之处在于图 3 和图 4 中的②与③。目标转速点火时,要求发动机转速和电机转速刚实现同步,且离合器已完全接合之后发动机才点火工作。

4 仿真分析

根据所建动力学方程和控制策略,在 Matlab/Simulink 和 Matlab/Simcape 平台上建立了前向式混合动力系统动态仿真模型(如图 5 所示),对混合动力系统纯电动启动发动机过程的转矩协调控制策略进行仿真分析。图 6 为发动机怠速 800 r/min 时发动机点火的仿真结果。图 7 为发动机目标转速点火的仿真结果。

由图 6 可以看出,发动机怠速点火时,传动系统会在离合器的主、从动盘达到转速同步时,离合器由滑摩变为完全接合,离合器传递的扭矩大小会由滑摩扭矩变为发动机阻力矩,而离合器的滑摩力矩大于发动机的阻力矩。因而,在图 6(a)、(c)中可以看到,合成扭矩有较大波动,冲击度较大。

图 7 是采用发动机目标转速点火的仿真结果,发动机被离合器拖到与电机转速同步,此时发动机点火,由于电机扭矩响应速度大于发动机,电机完全可以补偿发动机的扭矩,抵消发动机的扭矩波动。在这种情况下不存在转矩传递方向的突变。从图 7(a)、(b)中可以看出,合成扭矩变化较小,冲击度小,驾驶平顺性较好。

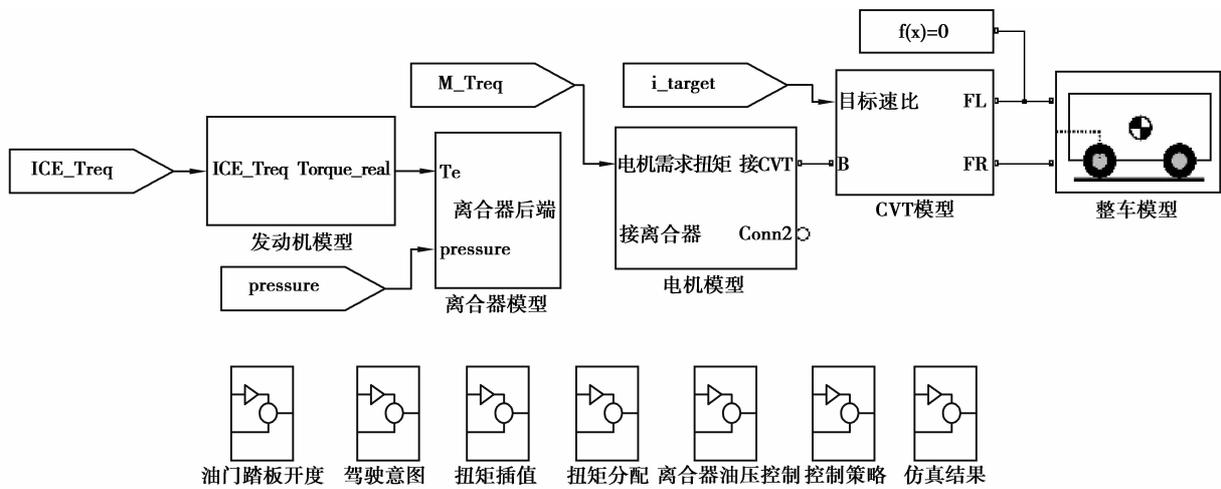


图 5 混合动力系统动态仿真模型

Fig.5 Hybrid power system dynamic simulation model

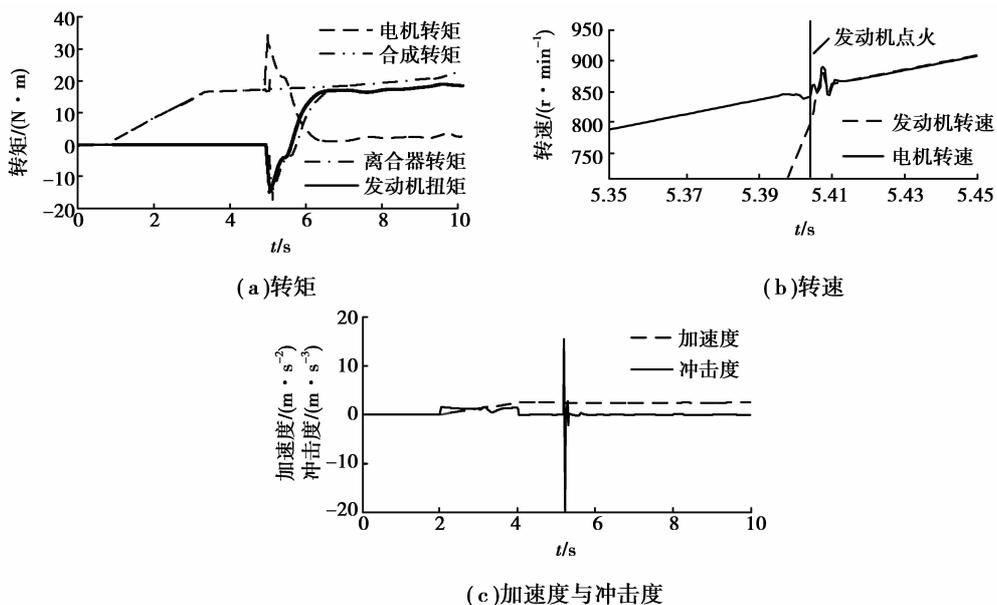


图 6 发动机怠速(800 r/min)点火的仿真结果

Fig.6 The simulation results of Engine idle speed(800 r/min) Ignition

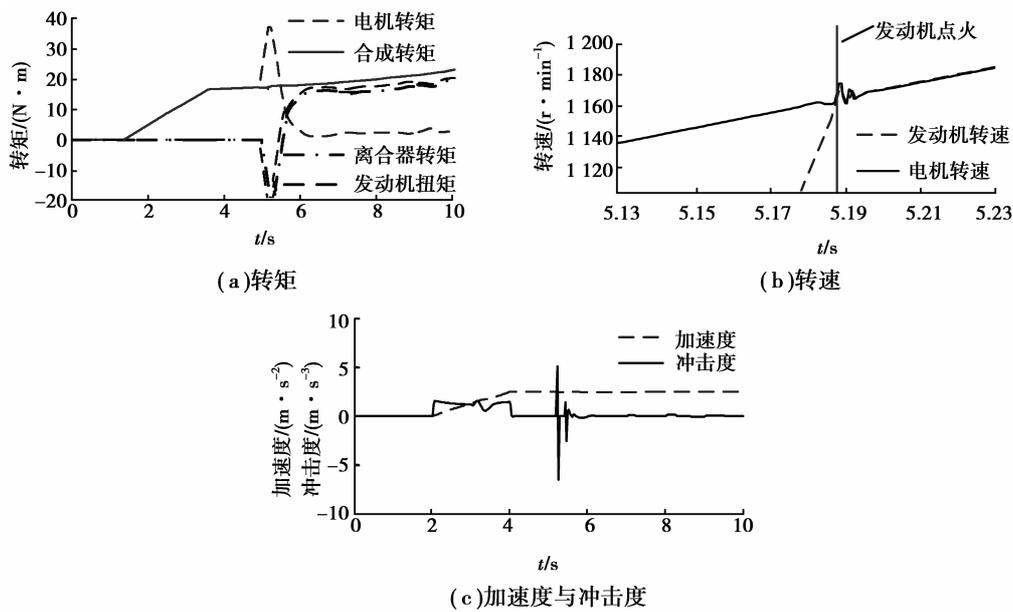
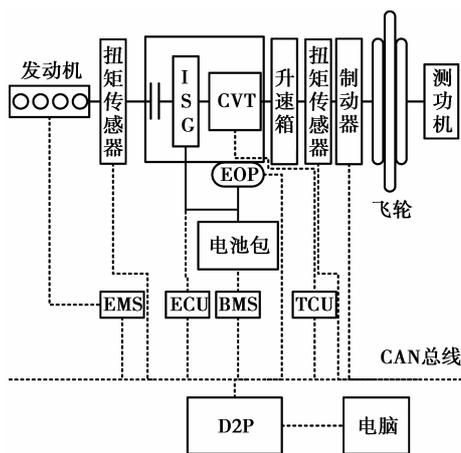


图7 发动机目标转速点火的仿真结果

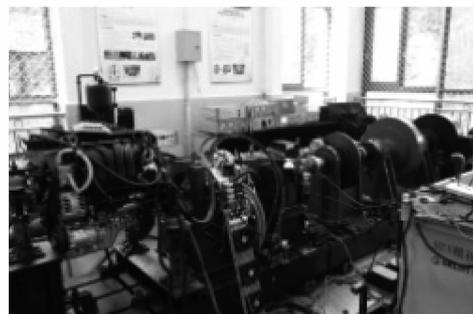
Fig.7 Ignition engine at target rotation speed simulation results

5 台架及实车控制试验

首先通过台架试验验证目标转速点火控制策略的有效性。台架试验中利用整车控制器(D2P)对该插电式混合动力系统进行控制。台架的组成为:发动机、扭矩传感器、ISG电机、无级变速器(CVT)、升速箱、盘式制动器、飞轮(整车等效转动惯量)、电力测功机等。各部件的连接关系如图8所示。台架试验中,首先将电机转速稳定在1000 r/min左右,然后控制器发出模式切换指令,系统在23.3 s时进行模式切换,发动机在离合器接合后点火工作,合成扭矩变化很小,电机转速波动也较小。试验结果如图9所示。



(a) 台架试验原理图



(b) 台架试验实物图

图8 试验台架的原理图与实物图

Fig.8 Schematics and physical figure of TEST BENCH

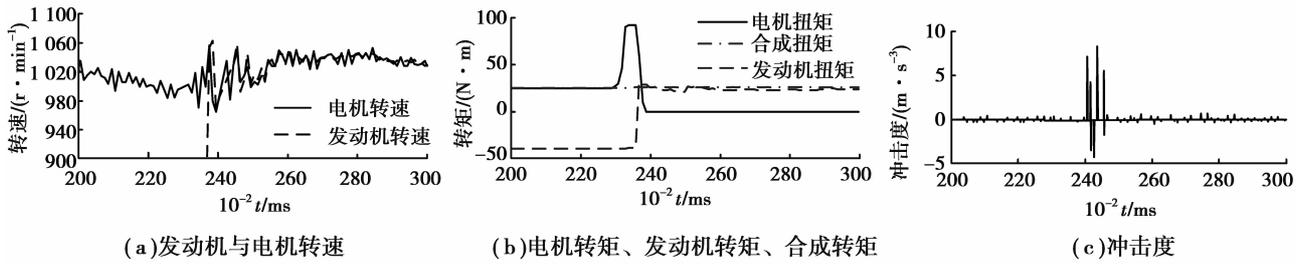


图 9 目标转速点火台架试验结果

Fig.9 Target speed ignition bench test

图 10 为插电式混合动力汽车实车试验结果。从图 10 中可以看出,发动机在目标转速点火时可以很好地解决驾驶平顺性控制问题,冲击度较小,满足德国冲击度标准 $J \leq 10 \text{ m/s}^3$,远小于中国标准 $J \leq 17.64 \text{ m/s}^3$ [13]。

根据以上仿真、试验得到发动机怠速转速点火和目标转速点火的整车冲击度对比(表 4)。从表中可以看出,基于发动机目标转速点火的协调控制策略比基于发动机怠速转速点火的协调控制策略整车冲击度要小,且基于发动机目标转速点火的协调控制策略的台架试验结果和装车试验结果与仿真结果具有较好的一致性。

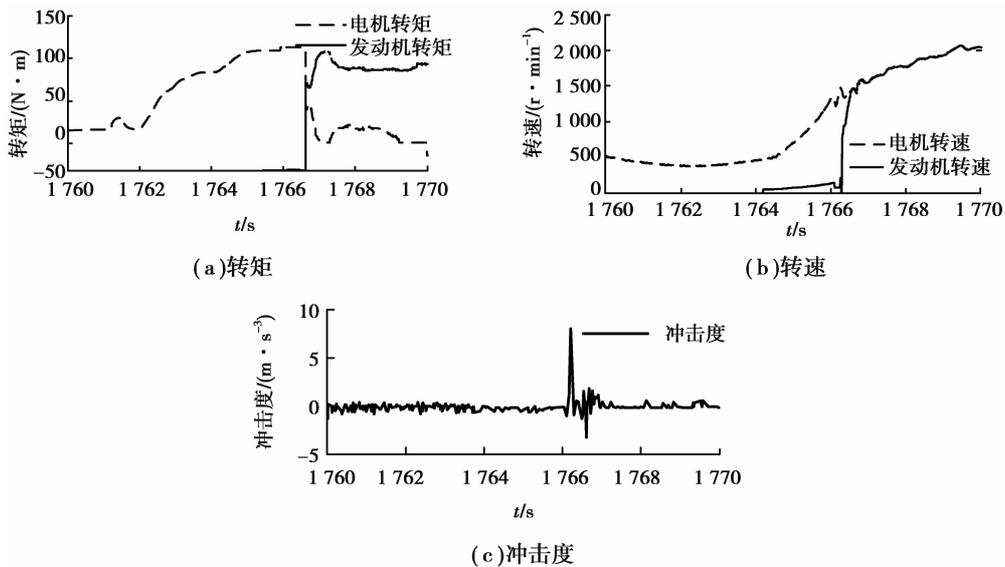


图 10 发动机目标转速点火实车试验结果

Fig.10 Vehicle test results of ignition engine at target speed

表 4 不同点火时刻的整车冲击度对比

Table 4 Vehicle jerk of different ignition timing

模式切换	最大冲击度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)	
	怠速转速点火	目标转速点火
仿真	19.6	7.3
台架试验		8.1
装车试验		8.3

6 结束语

在发动机目标转速点火控制的条件下,采用以电机角加速度和转速差为输入量的模糊控制策略,通过控

制离合器压力使离合器主、从动盘转速达到同速时离合器的滑摩转矩等于发动机的阻力矩,从而有效减小了混合动力汽车纯电动行进间启动发动机的整车冲击。建立了系统动力学模型,在 Matlab/Simulink 和 Matlab/Simcape 平台上进行了纯电动行进间启动发动机的控制策略的仿真分析,最后采用台架试验和实车控制试验对所提出的控制策略进行了验证。

参考文献:

- [1] van Berkel K, Veldpaus F, Hofman T, et al. Fast and smooth clutch engagement control for a mechanical hybrid powertrain[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(4):1241-1254.
- [2] 叶心,秦大同,胡明辉,等.ISG 型中度混合动力轿车油门动态协调控制策略[J]. 重庆大学学报,2010,33(11):1-7.
YE Xin, QIN Datong, HU Minghui, et al. Throttle dynamic coordinated control strategy of ISG type medium-HEV[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(11): 1-7. (in Chinese)
- [3] 舒红,秦大同,胡建军.混合动力汽车控制策略研究现状及发展趋势[J].重庆大学学报(自然科学版),2001,24(6):28-37.
SHU Hong, QIN Datong, HU Jianjun. Research on current situation and trend of control strategies for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2001, 24(6): 28-37. (in Chinese)
- [4] 童毅,欧阳明高,张俊智.并联混合动力汽车控制算法的实时仿真研究[J].机械工程学报,2003,39(10):158-160.
TONG Yi, OUYANG Minggao, ZHANG Junhzi. Study on the coordinated control issue in parallel hybrid electric system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 158-160. (in Chinese)
- [5] 冀耳聪.并联混合动力汽车模式切换中的协调控制研究[D].长春:吉林大学,2006.
JI Ercong. Study on the coordinated control for mode-switch of parallel hybrid electric vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [6] 杜波,秦大同,段志辉,等.新型混合动力汽车动力切换动态过程分析[J].汽车工程,2011,33(12):1018-1023.
DU Bo, QIN Datong, DUAN Zhihui, et al. An analysis on the power switching dynamic process in a new type of hev [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(12): 1018-1023. (in Chinese)
- [7] 杨阳,杨文辉,秦大同,等.强混合动力汽车驱动模式切换扭矩协调控制策略[J].重庆大学学报,2011,34(2):74-81.
YANG Yang, YANG Wenhui, QIN Datong, et al. Coordinated torque control strategy for driving-mode-switch of strong hybrid electric vehicle [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2): 74-81. (in Chinese)
- [8] 戴一凡,罗禹贡,李克强,等.单电机强混合动力电动车辆的动态协调控制[J].汽车工程,2011,33(12):1007-1012.
DAI Yifan, LUO Yugong, LI Keqiang, et al. Dynamic coordinated control for a full hybrid electric vehicle with single motor [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(12): 1007-1012. (in Chinese)
- [9] Douba M, Ng H, Larsen R. Characterization and comparison of two hybrid electric vehicles (hevs) honda insight and toyota prius [C/OL]. Society of Automotive Engineers, SAE World Congress, 2001-01-1335. <http://papers.sae.org/2001-01-1335/>
- [10] Kim H, Kim J, Lee H, et al. Mode transition control using disturbance compensation for a parallel hybrid electric vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2011, 225(2):150-166.
- [11] Koprubasi K, Westervelt E R, Rizzoni G, et al. Experimental validation of a model for control of drivability in a hybrid-electric vehicle [C/OL] // ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Transportation Systems, Seattle, Washington, USA, November 11-15, 2007. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1601098&-resultclick=1>.
- [12] Du C, Yan F, Cao Z, et al. Smooth mode-switch control for the powertrain of parallel hybrid electric vehicle [C/OL] // Power and Energy Engineering Conference, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009. Asia-Pacific. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2009:1-4. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=4918773&-tag=1>.
- [13] 倪成群,张幽彤,赵强,等.混合动力离合器结合过程的动态转矩控制策略[J].机械工程学报,2013,49(4):114-121.
NI Chengqun, ZHANG Youotong, ZHAO Qiang, et al. Dynamic torque control strategy of engine clutch in hybrid electric vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 114-121. (in Chinese)

(编辑 张 苹)