

# 混联型混合动力汽车建模及控制策略研究

龚贤武<sup>1,2</sup>, 吴德军<sup>1</sup>, 高 闯<sup>1</sup>, 马 建<sup>2</sup>

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 在 PRIUS 工作模式和试验研究的基础上, 设计了逻辑门限值控制策略, 并结合整车仿真模型研究基于逻辑门限控制策略的控制效果. 在 UDDS 工况下对整车的速度特性、动力性、蓄电池 SOC 和油耗进行了仿真分析. 仿真结果表明, 基于逻辑门限的控制策略能够实现各种工作模式间的合理切换, 整车的动力性能、燃油经济性和实车数据基本吻合, 验证了整车仿真模型和控制策略的有效性.

**关键词:** 汽车工程; 混联型混合动力汽车; 仿真; 整车模型; 控制策略

**中图分类号:** TP273; U462.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.018

## 0 引言

混联型混合动力汽车(Parallel-series hybrid electric vehicle, PSHEV)综合了串联型和并联型混合动力汽车的结构及性能优点, 通过对发动机、发电机和电动机的功率流进行灵活的优化匹配, 能控制混合动力系统各功率部件在各种运行工况下高效运行, 从而获得更好的燃油经济性和排放性能, 是目前研究的热点之一<sup>[1]</sup>. 其中最具代表性的是丰田汽车公司的混联型混合动力汽车 PRIUS. 美国再生能源试验室(NREL)及 ANL(Argonne Nation Laboratory)等部门, 通过道路试验, 获取了详细的试验数据<sup>[2]</sup>. 文献[3]介绍了混联式混合动力汽车 PRIUS 动力总成的结构, 并利用试验数据, 总结出多种混合动力工作模式. 文献[4]通过分析其系统结构和基本工作原理, 探讨了系统建模方法. 但是这些研究仅集中于其系统结构、基本工作原理和工作模式的分析, 未能与整车控制策略相结合. 目前, 还鲜见关于 PRIUS 混合动力系统建模及其控制策略方面的系统阐述.

笔者以 PRIUS 混联型混合动力系统为研究对象, 利用软件 Matlab/Simulink 建立了混联型混合动力汽车的仿真模型, 并在现有 PRIUS 工作模式和试验研究结果的基础上<sup>[2-3]</sup>, 研究一种基于逻辑门限控制策略的控制效果, 通过整车性能仿真与实车技术指标的对比分析, 验证了所建立的

仿真系统及控制策略的适用性.

## 1 动力系统结构与工作原理

以 PRIUS 混联型混合动力汽车为研究对象, 它被认为是目前最成功的混合动力结构之一, 其结构见图 1. 在此结构中, 发动机(Internal Combustion Engine, ICE)与行星架相联, 通过行星齿轮将动力传给外圈的齿圈和内圈的太阳轮, 齿圈轴与电动机(Electric Motor, EM)和传动轴相联, 太阳轮轴与发电机(Generator)相联. 动力分配装置将发动机大部分转矩直接传递到驱动轴上, 将另外一小部分转矩传递给发电机, 发电机发出的电能根据指令给蓄电池充电; 发电机也可以作为电动机以增强驱动力. 制动时电动机作为发电机, 将汽车的动能转化为电能对蓄电池进行充电. 这种结构可以通过调节发电机转速使发动机转速稳定地运行在低油耗、低排放的工作区域里<sup>[4]</sup>.

## 2 逻辑门限值控制策略与控制原理

### 2.1 控制策略分析

混合动力汽车的实际行驶性能与其采用的控制策略密切相关. 为了获得整车最佳燃油经济性和排放性能, 控制策略应能够在满足车辆驱动功率需求的前提下, 合理分配发动机和电机之间的驱动功率. 目前已经提出的混合动力汽车控制策略主要有: 简单地限定发动机工作区的电力辅助

收稿日期: 2013-12-20; 修订日期: 2014-02-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA111106)

作者简介: 龚贤武(1978-), 男, 福建邵武人, 长安大学讲师, 博士研究生, 研究方向为现代电动汽车技术, E-mail: xwgong@chd.edu.cn.

控制模式;通过实时计算比较确定发动机和电机最佳工作点的自适应控制策略;模糊控制策略;全局最优控制策略;基于运行状态识别的智能控制策略<sup>[5]</sup>.

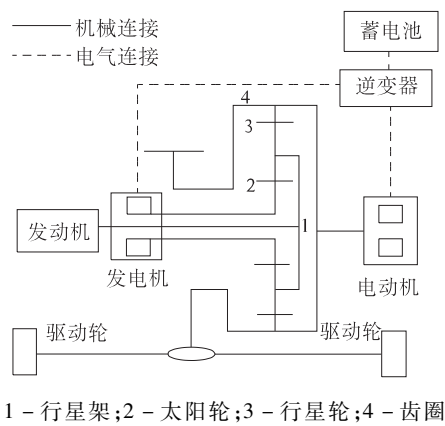


图1 PRIUS 混联系统结构

Fig.1 Structure of PRIUS parallel-series hybrid system

考虑到实用性和设计的方便性,笔者采用限定发动机工作区的电力辅助控制模式,通过基于逻辑门限的控制策略使发动机工作在最优工作区.当发动机有富余功率时驱动发电机给动力电池充电,当发动机功率不足或整车功率需求较低时由电动机提供驱动功率,从而使发动机始终运行在高效率区域,达到提高燃油经济性的目的.

2.2 基于逻辑门限控制策略控制原理

为了实现基于逻辑门限的控制策略,本着满足车辆的功率需求和提高发动机燃油经济性的原则,需根据车辆的功率需求划分各动力部件的工作区域,并采取相应的控制方式<sup>[6]</sup>.笔者根据PRIUS 轿车发动机工作点的试验测试结果<sup>[2]</sup>,确定了混联型混合动力汽车主要有 4 种驱动模式.

(1)纯电动模式:当汽车起步或在低功率需求的低速工况行驶,并且蓄电池 SOC 高于期望值时,汽车工作于纯电动驱动模式,用于避免发动机运行于低效率区域.

(2)发动机单独驱动模式:当车辆运行于较高车速的稳定工况时,发动机单独驱动,并保持在高效率区间工作,多余功率驱动发电机发电.

(3)混合驱动模式:加速爬坡工况时,工作于混合驱动模式.发动机保持在高效率区间工作,不足功率由发电机和驱动电机补偿.

(4)再生制动模式:减速制动工况时,电动机工作于再生制动模式,制动减速的同时把制动能量回收,并储存于动力电池内.

4 种驱动模式的具体判定规则如表 1 所示.

表 1 基于逻辑门限控制策略的基本规则

Tab.1 Basic rules of control strategy

驱动模式	发动机	电动机	发电机
$P_d < 0$ (再生制动)	0	$\text{Max}(P_d, P_{\text{mmax}})$	0
$P_d < P_{\text{ev}}$ (纯电动)	0	$P_d$	0
$P_{\text{ev}} < P_d < P_{\text{emax}}$ (发动机单独驱动)	$P_d (+ P_{\text{ch}})$	$P_g$	$P_e - P_{\text{mec}}$
$P_d > P_{\text{emax}}$ (混合驱动)	$P_{\text{emax}}$	$P_g + P_b$	$P_e - P_{\text{mec}}$

注: $P_d$  为车辆的功率需求; $P_{\text{mmax}}$  为电动机的最大驱动功率; $P_{\text{ev}}$  为纯电动最大输出功率; $P_{\text{emax}}$  为发动机的最大输出功率; $P_{\text{ch}}$  为电池的充电功率; $P_g$  为电动机的发电功率; $P_e$  为发动机的输出功率; $P_{\text{mec}}$  为发动机由机械路分流功率; $P_b$  为电池的输出功率.

3 混联型混合动力汽车建模分析

3.1 整车模型

图 2 为所研究的混联型混合动力汽车的 Matlab/Simulink 顶层仿真模型.系统采用逆向仿真的方法进行动态建模仿真<sup>[4]</sup>.控制器模块作为系统的控制核心,首先根据驾驶员模块输出的加速踏板或者制动踏板信号计算出车辆的转矩和功率需求,并结合车辆相关状态参数判断整车所处的驱动模式.对应于不同的工作模式,再根据需求总功率向各动力源控制模块发出对应于当前动力源的转速和转矩要求.

3.2 整车控制器模型

3.2.1 整车驱动模式判断

根据上述基于逻辑门限控制策略,可以建立如图 3 所示的混联型混合动力汽车驱动模式判定控制算法流程图.

其中 brake\_control(0.05) 为制动踏板信号,在本仿真模型中若制动信号数值大于 0.05,则表示汽车有制动需求,反之,则无制动要求.为了提高蓄电池的使用效率和延长使用寿命,使用过程中蓄电池的 SOC 要尽量保持在一定的允许范围内,如果 SOC 太高,就不容易尽可能多的回收再生能量;如果 SOC 长时间处于较低值,会大大降低电池的使用寿命,并可能影响车辆的加速性能. SOC\_hign(0.9) 为设定的蓄电池 SOC 的最高值, SOC\_low(0.3) 为设定的蓄电池 SOC 下限.  $\omega_E$  为发动机转速,由于当发动机转速小于 1 200 r/min 时,其工作效率较低,设置了发动机工作最低转速  $\omega_{\text{Elow}}$ (1 200 r/min).

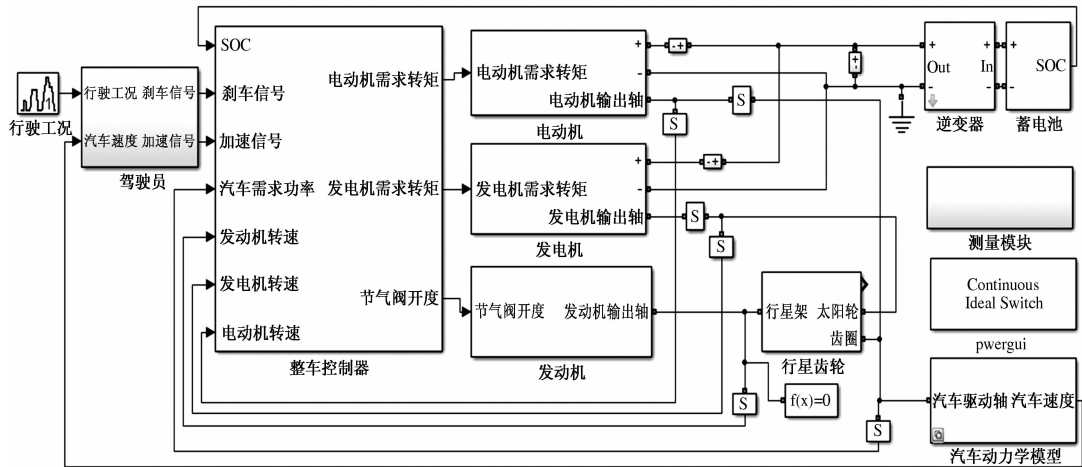


图 2 混联型混合动力汽车 Matlab/Simulink 模型

Fig. 2 Matlab/Simulink model of PSHEV

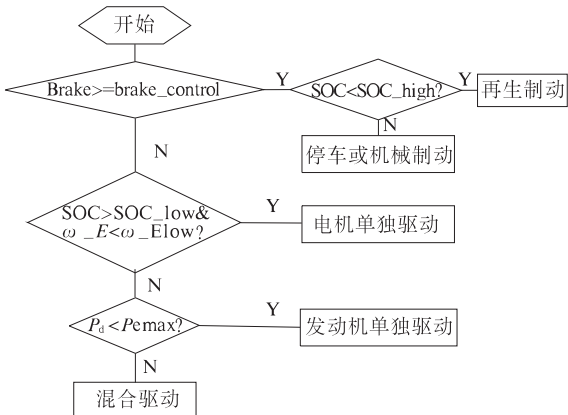


图 3 整车驱动模式判定流程图

Fig. 3 Flow chart of driving-mode determination

3.2.2 整车控制器模型

图 4 为控制器模块的仿真模型,该控制模块由 5 个主要的子模块组成,包括控制逻辑和 4 个动力源控制模块.控制逻辑根据图 3 实现笔者所采用的基于逻辑门限的控制策略,其根据蓄电池 SOC、刹车信号、发动机转速和汽车需求转矩来决定发动机、电动机和发电机的状态(开启或者关闭),即完成整车驱动模式的判定;发动机控制器根据发动机的实际转速和需求转速计算出发动机节气门开度信号,来控制发动机输出转矩;电动机控制器根据电动机的需求转速和实际转速计算出电动机的需求输出转矩;发电机控制器根据发动机需求转速、电动机需求转速、蓄电池需求充电转矩和发电机的实际转速计算出发电机所需要输出的转矩;蓄电池控制器根据发动机转速和蓄电池 SOC 计算出蓄电池需求充电转矩.最后,由行星齿轮将发动机、发电机和电动机三者的扭矩进行耦合,为汽车动力学模型提供动力输入,同时保持

蓄电池的 SOC 维持在设定的工作区域 (30% ~ 90%) .

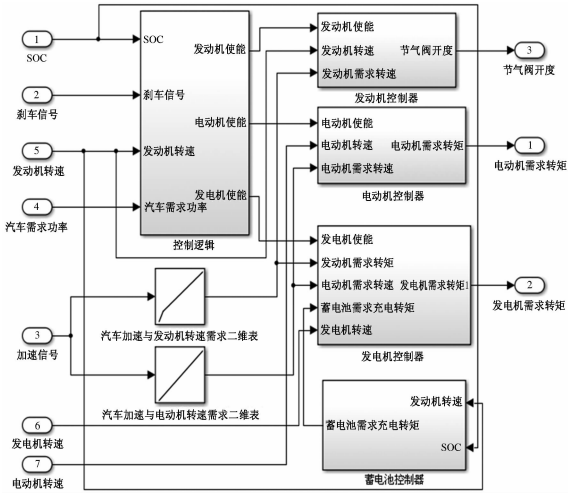


图 4 混联型混合动力汽车控制器模型

Fig. 4 Controller model of PSHEV

4 仿真结果分析

4.1 仿真参数设置

笔者所建立的混联型混合动力汽车采用 PRIUS 典型混合动力汽车参数进行仿真<sup>[7]</sup>. 其具体参数如表 2 所示,仿真工况选择 UDDS 循环工况,蓄电池 SOC 的初始值为 0.7.

4.2 仿真结果分析

仿真结果见图 5. 由图 5(a)可以看出,建立的仿真模型可以很好地跟踪循环工况车速的变化,表明了仿真模型的正确性和有效性.图 5(b)为蓄电池 SOC 变化曲线.结合工况分析可见,整车加速时 SOC 随着电动机辅助驱动而下降,整车制动或减速时 SOC 随着电动机再生制动而上升.由于工况后期加减速频繁,因此 SOC 下降幅度较

大,但蓄电池 SOC 在整个循环过程中都能在设定的范围内保持平衡.如图 5(c)所示,汽车驱动模式反复在纯电动、发动机单独驱动、混合驱动、制动和停车模式之间切换,验证了所采用的逻辑门限控制策略具有良好的控制效果.图 5(d)为电动机功率输出仿真曲线,可以观察到在道路循环期间要求汽车加速时,电动机均提供了辅助驱动功

率;在整车制动或减速时,电动机工作在发电状态,实现了制动能量回收.图 5(e)为发动机功率输出仿真曲线,可以观察到在道路循环的停车期间,发动机处于关闭状态,以降低油耗.由图 5(f)可以看出,发动机在低速区基本没有工作点分布,且工作点都集中在效率相对较高的经济工作区域,提高了系统的燃油经济性.

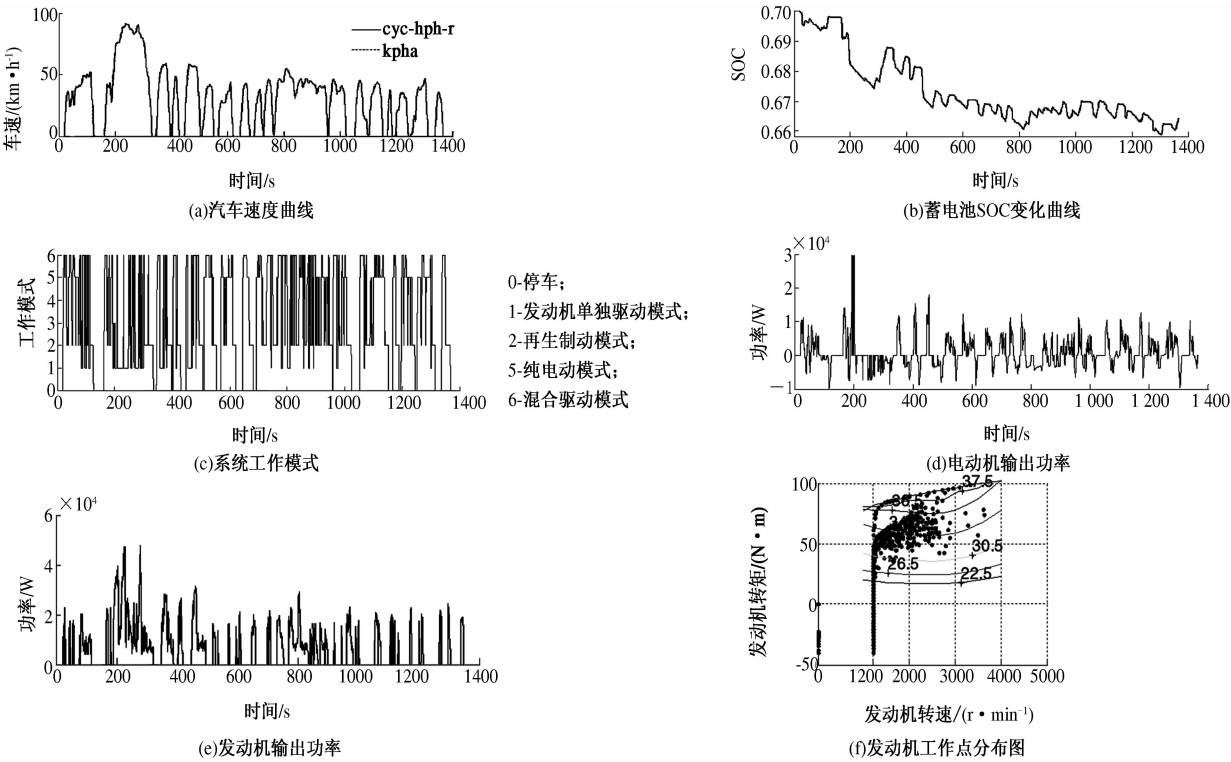


图 5 PSHEV 系统的仿真结果

Fig.5 Simulation results of PSHEV system

表 2 整车仿真参数	
Tab.2 Parameters of PRIUS PSHEV	
参数	数值
整车整备质量/kg	1 345
滚动阻力系数	0.012
空气阻力系数	0.26
迎风面积/m <sup>2</sup>	2.33
车轮半径/m	0.301
发动机最大功率/kW	55
发动机最大转矩/(N·m)	115
电动机最大功率/kW	50
电动机最大转矩/(N·m)	400
电动机最大转速/(r·min <sup>-1</sup> )	6 700
发电机最大功率/kW	25
发电机最大转矩/(N·m)	30
发电机最大转速/(r·min <sup>-1</sup> )	10 000
蓄电池最大功率/kW	21

在 UDDS 工况下,笔者所建立的混联型混合

动力汽车的油耗、动力性能仿真结果与实车测试数据<sup>[7]</sup>对比如表 3 所示.百公里加速时间仿真值为 11.3 s,与实车 10.9 s 的加速时间基本吻合.燃油经济性仿真值略小于实验结果,分析其主要原因:一是动力总成效率不可能完全做到与实际情况相同;二是控制策略的逻辑门限值的选择与实车控制参数不可能完全相同.但综合上述动力性与燃油经济性结果来看,其误差小于 3.6%,因此仿真精度基本可满足要求.

表 3 动力性及燃油经济性仿真结果比较			
Tab.3 Simulation results comparison of power performance and fuel economy			
参数	加速时间/s	最高车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	油耗/ (L·100 km <sup>-1</sup> )
仿真	11.3	160	4.85
实车	10.9	160	4.9

注:加速时间是指 0~100 km·h<sup>-1</sup> 状态下.

5 结论

(1)以 PRIUS 混联型混合动力系统为研究对象,分析了系统的结构和工作原理,结合逻辑门限控制策略,建立了系统的仿真模型.应用该模型能够对系统的性能进行比较理想的仿真,对利用计算机仿真技术辅助设计混合动力汽车,具有重要的意义.

(2)仿真研究表明:UDDS 工况下,基于逻辑门限的控制策略能够使发动机的工作点集中在高效区,有效地提高了燃油经济性,同时保持 SOC 在合理的范围内变化.整车的动力性能、燃油经济性与实车数据基本吻合,验证了整车模型和控制策略的有效性.

(3)基于逻辑门限的控制策略算法简单有效,容易实现,但与实际工况适应性差,特别是在实际工况与预设工况差异较大情况下,必须对设定的门限值进行优化.

参考文献:

[1] 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 - 143.

[2] DUOBA M, NG H, LARSEN R. In-Situ mapping and analysis of the toyota prius HEV engine-SAE Technical Paper [R]. 2000 - 01 - 3096, 2000.

[3] 钟虎,杨林,张毅. 混合动力无级变速运行模式的试验研究[J]. 汽车工程, 2005,27(04): 434 - 437.

[4] LIU Jin-ming. Modeling, configuration and control optimization of power-split hybrid vehicles [D]. Ann Arbor; University of Michiga, 2007.

[5] 田毅. 电动汽车运行状态识别及 HEV 控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2011:31 - 35.

[6] HOFMAN T. Framework for combined control and design optimization of hybrid vehicle propulsion systems [D]. Eindhoven; Technische Universiteit Eindhoven, 2007.

[7] 于永涛. 混联式混合动力车辆优化设计与控制 [D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2010.

Research on Parallel-series Hybrid Electric Vehicle’s Modeling and Control Strategy

GONG Xian-wu<sup>1,2</sup>, WU De-jun<sup>1</sup>, GAO Chuang<sup>1</sup>, MA Jian<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang’an University, Xi’an 710064, China; 2. School of Automobile, Chang’an University, Xi’an 710064, China)

**Abstract:** On the basis of PRIUS working modes and experiment research, a logic threshold control strategy was designed. Combined with the simulation model of the vehicle, the control performance of the proposed control strategy was studied. The speed characteristic, power performance, battery SOC (state of charge) and fuel consumption of the vehicle have been studied under the UDDS driving cycle. The simulation results show that the control strategy based on logic threshold can realize rational switch in different operation modes, the vehicle power performance and fuel economy can match with the vehicle experiment data, and this verifies the feasibility of the whole-vehicle simulation model and the control strategy.

**Key words:** automotive engineering; parallel-series hybrid electric vehicle; simulation; whole-vehicle model; control strategy