

基于模糊逻辑的 SHEV 控制策略设计与仿真

刘旭东¹, 范青武¹, 郑榜贵², 段建民²

(1. 北京工业大学 实验学院, 北京 101101; 2. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘要: 针对一辆串联式混合动力电动汽车设计了一种基于模糊逻辑的控制策略, 根据蓄电池组荷电状态(SOC)及车辆需求功率的变化实时调整发动机输出功率, 以实现恒 SOC 控制, 同时兼顾发动机燃油消耗及排放。给出了模糊控制器的结构, 建立了车辆前向仿真模型, 进行了离线仿真及硬件在环仿真。仿真结果表明, 模糊控制策略能够较好将蓄电池组 SOC 维持在期望值 0.7 附近, 且发动机可以稳定的工作在其高效率区以获得较低的燃油消耗及排放。

关键词: 电动汽车; 混合动力; 控制策略; 模糊逻辑

中图分类号: U 469.72

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)03-0000-0006

Design and Simulation of Fuzzy Logic Control Strategy for an SHEV

LIU Xu-dong¹, FAN Qing-wu¹, ZHENG Bang-gui², DUAN Jian-min²

(1. The Pilot College, Beijing University of Technology, Beijing 101101, China;

2. College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A control strategy based on fuzzy logic is proposed for a series hybrid electric vehicle. According to the state-of-charge of batteries and the power required by the vehicle, the engine output power is real-time changed to realize constant SOC control, and the fuel consumption and emissions are considered as well. The architecture of the vehicle controller is given and a forward simulation model for the vehicle is established. Both off-line and hardware-in-loop simulations are performed. Simulation results show that the fuzzy logic control strategy can maintain the SOC of batteries nearby the exceptive value 0.7, and the engine works at its high efficiency area to get low fuel consumption and emissions.

Key words: electric vehicle; hybrid power; control strategy; fuzzy logic

控制策略是混合动力电动汽车(hybrid electric vehicle, HEV)开发的关键, 直接影响着能量/功率在 HEV 内部的流动和整车性能。HEV 控制策略的目标包括: 满足驾驶员需求并提供最佳的动力性能、优化传动系统效率、降低油耗及排放等^[1,2]。对于电量维持型 HEV, 还要求能够维持蓄电池组荷电状态(state of charge, SOC)在运行前后不变。然而, 对于上述控制目标, 如降低油耗和最佳动力性能, 往往存

在一组互相矛盾的控制参数, 因此, 一个好的控制策略应能提供不同控制目标之间的折衷, 从而获得满意的综合性能^[3]。

HEV 是一个涉及复杂问题决策和非线性时变系统控制的复杂系统, 很难建立起精确的数学模型; 同时, 行驶路况和驾驶员操作具有的随机性, 也增加了控制策略设计的难度, 传统方法很难满足控制要求^[3,4]。与之相对应, 模糊逻辑对于非线性、复杂对

收稿日期: 2010-02-04。

基金项目: 北京工业大学青科基金资助项目(02400054K4003X); 北京工业大学教育教学立项资助项目(ER2009-C-62, 0240005141908)。

作者简介: 刘旭东(1975—), 男, 讲师, 主要从事混合动力电动汽车、汽车电子技术方面的研究, E-mail: jkdo@emails.bjut.edu.cn。

象具有鲁棒性好、控制性能高的优点,广泛应用于工业控制、交通等领域,近些年也应用在 HEV 控制策略的设计中^[5-9]。本文对课题组研制的一辆串联式混合动力电动汽车(以下简称 BJUT-SHEV)设计了一种模糊逻辑控制策略,并对其进行了离线仿真及硬件在环仿真。

1 控制目标

BJUT-SHEV 是为运动场馆提供清洁节能用车设计的,因此要求必须随时可以提供较长的纯电动行驶里程。为满足较长纯电动行驶里程要求,控制策略应能将蓄电池组 SOC 值始终维持在一个较高水平。即在车辆运行时,当蓄电池组 SOC 值较低时,能够迅速充电至一个较高水平,当蓄电池组 SOC 值过高时,为保护蓄电池组,应能迅速放电至 SOC 设定值。因此,提出 2 个控制目标:

- 1) 恒 SOC 控制,即维持蓄电池组 SOC 值在一个较高的水平;
- 2) 混合驱动时具有较低的燃油消耗和排放。

所谓恒 SOC 控制,并非指蓄电池组 SOC 值始终维持一个恒定值不变,而是指将蓄电池组 SOC 值限制在一个合理的区间内,始终工作在 SOC 期望值附近^[9-10]。本文设计的模糊控制策略,根据 BJUT-SHEV 行驶过程中蓄电池组 SOC 值及车辆需求功率的变化来实时调整 APU 和蓄电池组输出功率的分配,以实现将蓄电池组 SOC 值始终维持在一个较高水平,同时使发动机工作在其高效率区间,并且变化尽可能平缓,从而降低燃油消耗和排放。

2 控制器结构

BJUT-SHEV 控制器系统结构如图 1 所示。整个控制器分为 5 个模块,分别为需求功率计算模块、发动机开/关判断模块、模糊控制器模块、发动机输出

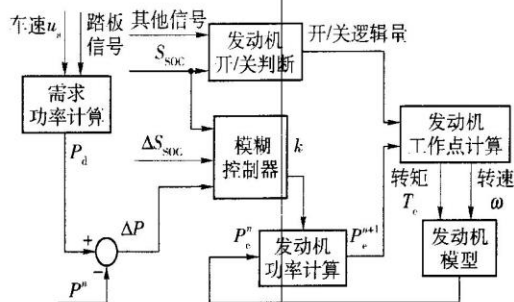


图1 BJUT-SHEV 控制器系统框图

Fig.1 Schematic of the BJUT-SHEV controller

功率计算模块、发动机工作点计算模块。

模糊控制器模块是整个控制器的核心模块,根据 3 个输入变量进行模糊判决,输出发动机功率调整因子 k 。发动机输出功率计算模块由模糊控制器模块的输出 k 、发动机当前输出功率 P_e^n 以及参考功率 P_{ref} 计算下一时刻发动机输出功率 P_e^{n+1} , 计算公式为

$$P_e^{n+1} = P_e^n + k \cdot P_{ref} \quad (1)$$

3 模糊逻辑控制策略

3.1 输入输出设计

模糊控制器共有 3 个输入量:蓄电池组 SOC 值 S_{soc} 、SOC 值与期望值的偏差 ΔS_{soc} 以及车辆需求功率 P_d 与当前输出功率 P_n 偏差 ΔP 。1 个输出量,为发动机功率调整因子 k 。

3.1.1 SOC 工作范围的确定

一方面,为能随时满足较长纯电动行驶里程的要求, S_{soc} 应保持在较高的水平;另一方面,为提高能量利用效率,希望蓄电池组能有效的回收再生能量,而过高 S_{soc} 会影响蓄电池组回收再生能量的能力。因此,应将 S_{soc} 控制在一个合理的范围之内^[9-10]。

BJUT-SHEV 采用水平铅布蓄电池 EV85,图 2 为通过实验得出的放电过程中蓄电池组(18 节 EV85 串联)内阻特性曲线^[3]。由图中可以看出,当 S_{soc} 介于 0.4~0.8 时,EV85 的放电内阻较小,意味着此时可放出较大的功率。在 BJUT-SHEV 中, S_{soc} 设计在 0.6~0.8 间,期望值为 0.7。

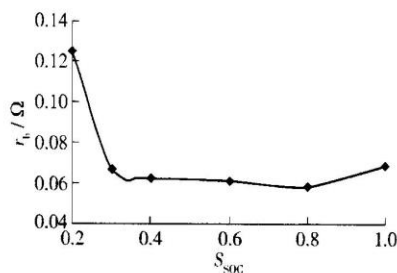


图2 蓄电池组内阻特性曲线

Fig.2 Characteristic curve of battery pack's internal resistance

3.1.2 隶属函数设计

将 S_{soc} 划分为 3 个模糊子集。当 S_{soc} 处于较低水平时,应增大 APU 功率输出,一部分用来满足行驶工况需求,另一部分用来给蓄电池组充电;当 S_{soc}

过高时,应减小或关闭发动机输出,蓄电池组放电;当 S_{SOC} 处于中间范围时,根据 ΔS_{SOC} 及 ΔP 来调整发动机输出,使 S_{SOC} 能尽量维持在期望值 0.7 附近。

同样,将 ΔS_{SOC} 和 ΔP 分别划分为 3 个和 5 个模糊子集,将输出因子 k 在 $[-1, 1]$ 上划分为 7 个模糊子集。输入/输出隶属函数设计见图 3(采用高斯型隶属函数)。

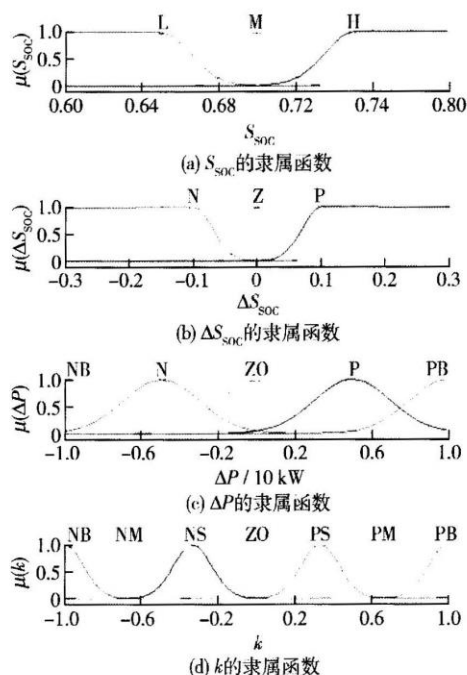


图 3 模糊控制器的输入、输出隶属函数

Fig. 3 Membership functions for the inputs and output of fuzzy controller

3.2 模糊控制规则设计

模糊规则表如表 1,表中规则是建立在对被控对象的直观经验上的。如当 S_{SOC} 处于模糊子集“M”、 ΔS_{SOC} 处于“Z”时,表示 S_{SOC} 处于期望值附近,当 ΔP 为“ZO”,表示车辆工况功率需求基本不变,因此发动机只需维持上一步输出功率既可,即输出 k 为“ZO”;当 ΔP 为“NB”(“NS”)时,表示下一步功率需求有较大(较小)的降低,此时发动机输出也应随之下降,为“NM”(“NS”);当 ΔP 为“PB”(“PS”)时,表示下一步功率需求有较大(较小)的增加,此时发动机输出也应随之增加,为“PM”(“PS”)。其他情况与之类似,根据经验推出相应的规则。

根据表 1 建立了模糊控制器的规则库,共有 45 条规则,涵盖了整个输入空间。模糊控制器采用 mamdani 型模糊推理机制,采用重心法进行解模糊

运算。

表 1 模糊规则表
Table 1 Fuzzy rule table

荷电状态	ΔS_{SOC}	ΔP				
		NB	N	ZO	P	PB
低 S_{SOC}	N	ZO	PS	PM	PM	PB
	Z	NS	ZO	PS	PM	PB
	P	NM	NS	ZO	PS	PM
中 S_{SOC}	N	NS	ZO	PS	PM	PB
	Z	NM	NS	ZO	PS	PM
	P	NB	NM	NS	ZO	PS
高 S_{SOC}	N	NM	NS	ZO	PS	PB
	Z	NB	NM	NS	ZO	PS
	P	NB	NM	NM	NS	ZO

4 仿真研究

4.1 仿真模型及离线仿真

在 MATLAB/Simulink 下建立了系统前向仿真模型如图 4。驾驶员根据给定工况车速与实际车速信息,向整车控制器输出踏板操作。整车控制器根据踏板信号,按照控制策略输出控制信号给动力系统关键部件。动力系统各部件则执行相应功能,最后整车动力学模型输出车速反馈给驾驶员和整车控制器^[11]。

选择 UDSS 作为仿真工况,每次仿真运行 5 个 UDSS 以获得稳定的燃油消耗,仿真步长为 1 s。当 SOC 初始值为 0.7, P_{ref} 为 3 kW 时,各部件输出功率变化及发动机的燃油消耗速率及排放实验结果分别见图 5~7。

图 5 中,发电机输出功率 P_g 被限定在一个最佳功率输出区间,随 S_{SOC} 及负载功率而变化。当在 300 s 附近时, S_{SOC} 偏低,因此 P_g 输出较大;在 700 s 左右时 S_{SOC} 偏高, P_g 输出降低;在 800 s 以后时, S_{SOC} 正常, P_g 输出主要随负载功率调整。图 6 中,排在发动机启动瞬间较高,发动机运转平稳后很低;燃油消耗速率在蓄电池组充电时较高,放电时较低。由图 7 可见,模糊控制策略中发动机能稳定的工作在设定的最优工作线附近。

4.2 硬件在环仿真

在 dSPACE 平台下对 BJUT-SHEV 进行了硬件在环仿真。将模糊控制器和整车模型分别下载到

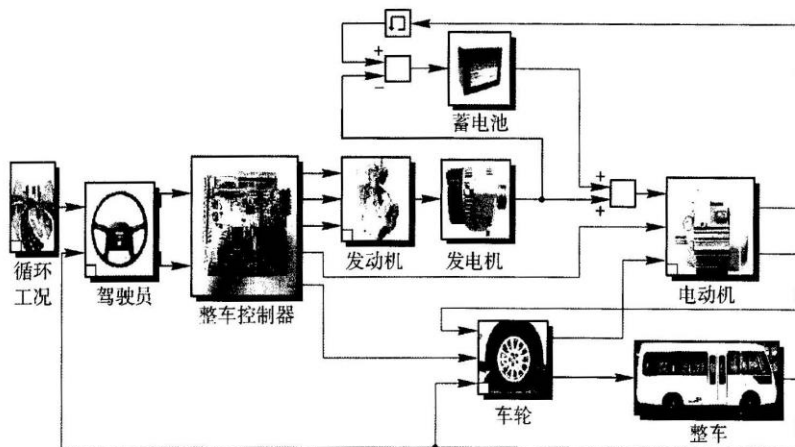


图4 BJUT-SHEV前向仿真模型

Fig. 4 Forward simulation model of BJUT-SHEV

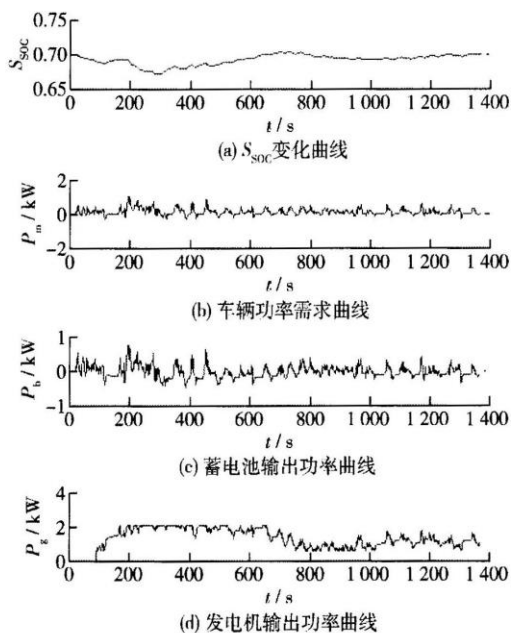


图5 输出功率变化示意图

Fig. 5 Power output changing curves

DS1103中,通过2个电位器模拟加速踏板和刹车踏板,实时监控界面见图8。

在ARTERIAL工况下的实时仿真结果见图9。由图中可以看出,通过手动调节2个电位器模拟驾驶员行为,车速可以较好地跟随工况车速;同时,发电机输出功率跟随车辆需求功率进行调整,当车辆需求功率较大时,发电机和电池组同时输出较大功率,当车辆需求功率变小时,发电机输出功率降低,同时

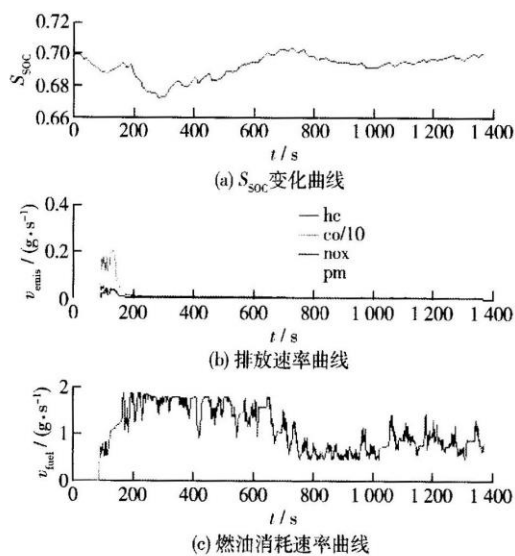


图6 发动机的燃油消耗速率及排放曲线

Fig. 6 Fuel consumption rate and emissions of fuel converter

给蓄电池组进行充电。 S_{SOC} 可以较为平稳地工作在期望值0.7附近,以实现恒SOC控制。

5 结束语

本文针对一辆串联式混合动力中巴车 BJUT-SHEV,设计了一种模糊逻辑控制策略,根据蓄电池组SOC值、SOC值与期望值偏差及车辆需求功率的变化实时调整发动机(发电机)的输出功率,从而使蓄电池组SOC值始终维持在期望值0.7附近,实现恒SOC控制。

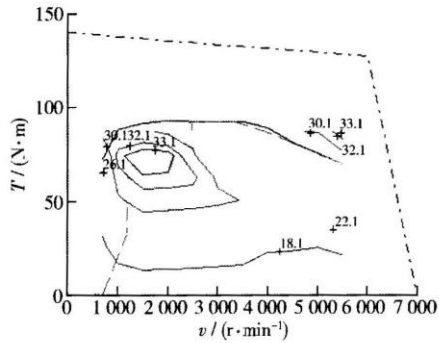


图7 模糊控制策略下发动机工作点分布

Fig.7 Operating points of the engine for the fuzzy control strategy

给出了模糊控制器的结构,并搭建了 BJUT-SHEV 前向仿真模型,对设计的模糊控制策略进行了离线仿真及硬件在环仿真,仿真结果表明,模糊逻辑控制策略能较好地实现恒 SOC 控制,同时发动机可以稳定地工作在其高效率区以获得较低的燃油消耗及排放。

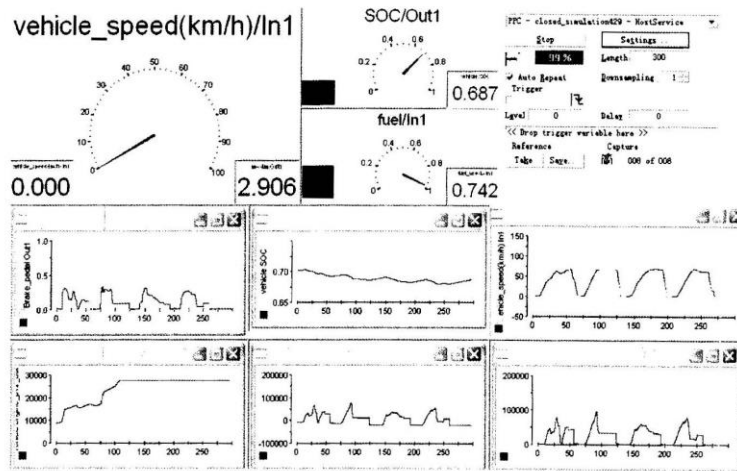


图8 实时监控界面

Fig.8 Real-time monitoring interface

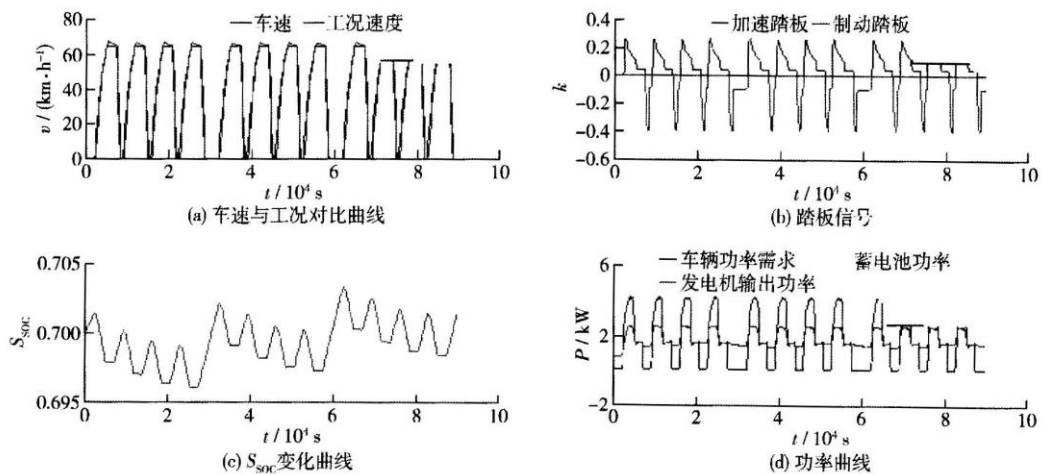


图9 实时仿真结果

Fig.9 Real-time simulation results

参考文献:

- [1] CHAN C C. The state of the art of electric vehicle and hybrid vehicle [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90 (2): 247-275.
- [2] FARZAD R S. Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison and future trends [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(5): 2393-2404.
- [3] 刘旭东. 串联式混合动力电动汽车控制策略及其应用技术研究[D]. 北京: 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 2008.
- LIU Xu-dong. Research on the series hybrid electric vehicle control strategies and its application techniques [D]. Beijing: College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [4] 段建民, 吴艳萍, 刘旭东. 串联式混合动力电动汽车模糊控制策略的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(1): 28-30.
- DUAN Jian-min, WU Yan-ping, LIU Xu-dong. Study on fuzzy logic control strategy for a series hybrid electric vehicle [J]. Tractor & Farm Transporter, 2009, 36(1): 28-30. (in Chinese)
- [5] LIU Xu-dong, WU Yan-ping, DUAN Jian-min. Power split control strategy for a series hybrid electric vehicle using fuzzy logic [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, NJ 08855-1331, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2008: 481-486.
- [6] CERRUTO E, CONSOLI A, RACITI A, et al. Fuzzy logic based efficiency improvement of an urban electric vehicle [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'94). Los Alamitos, CA, United States: IEEE, 1994(2): 1304-1309.
- [7] SCHOUTEN N J, SALMAN M A, KHEIR N A. Energy management strategies for a parallel hybrid vehicle using fuzzy logic [J]. Control Engineering Practice, 2003(11): 171-177.
- [8] HAJIMIRI M H, SALMASI F R. A fuzzy energy management strategy for series hybrid electric vehicle with predictive control and durability extension of the battery [C] // Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Electric Vehicles (ICEHV'06). Piscataway, NJ 08855-1331, United States: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2006: 1-5.
- [9] LIU Xu-dong, FAN Qing-wu, ZHENG Kun, et al. Constant SOC control of a series hybrid electric vehicle with long driving range [C] // Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, NJ 08855-1331, United States: IEEE Computer Society, 2010: 1603-1608.
- [10] 谷中丽, 王素贞, 李军求. 混合动力车辆多目标控制能量管理策略研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(6): 487-491.
- GU Zhong-li, WANG Su-zhen, LI Jun-qiu. Energy management strategy of multiple objects control for hybrid electric vehicle [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(6): 487-491. (in Chinese)
- [11] 吴艳萍. 串联式混合动力汽车控制策略研究[D]. 北京: 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 2008.
- WU Yan-ping. Research on control strategy of series hybrid electric vehicle [D]. Beijing: College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese)

(责任编辑 苗艳玲)