

# 插电式混合动力汽车控制策略硬件在环仿真研究

潘广纯,赵红,闫松,袁焕涛,崔翔宇

(青岛大学 机电工程学院,山东 青岛 266071)

**摘要:**利用 MATLAB/Simulink 搭建整车仿真模型,使用 RTICANMM 模块库中的模块进行设置并加载至 dSPACE/SCALEXIO 中,作为底层硬件在环平台。构建基于电量消耗-电量保持型控制策略,确定车辆多种运行模式之间的切换规则及发动机、电机的转矩分配原则;利用 MATLAB/RTICAN 模块库中的模块对控制策略进行仿真环境设置并将编译后的控制策略加载至 MicroAutoBox 控制器中,通过 CAN 通讯协议完成 MicroAutoBox 控制器和 SCALEXIO 设备的实时硬件在环交互。由硬件在环仿真与离线仿真对比显示:硬件在环仿真、离线仿真的终止 SOC 值与期望的 SOC 值误差控制在 5.60% 以内,整车控制策略能够满足预期效果,实时性较好,CAN 信号通讯正常。硬件在环仿真减少了控制策略应用实车的周期,降低了成本。

**关键词:**插电式混合动力汽车;控制策略;硬件在环仿真;仿真

**中图分类号:**U463.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0111-04

## Hardware in the Loop Simulation Study on Control Strategy of Plug-in Hybrid Electric Vehicle

PAN Guangchun, ZHAO Hong, YAN Song, YUAN Huantao, CUI Xiangyu

(Mechanical and Electronic Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** A simulation model of Plug-in electric vehicle is built with MATLAB/Simulink, which is set up using module in the RTICANMM library and downloaded into the dSPACE/SCALEXIO as the underlying hardware in the loop platform. Then, a power consumption-power retention control strategy is built and the control rules between multi-operation-mode and the torque distribution principle of engine and motor are proposed. The automatic code generation technology is used to compile and load control strategy into MicroAutoBox controller. The real-time hardware in the loop interaction between the MicroAutoBox controller and SCALEXIO is accomplished via the CAN communication protocol. The comparison result between hardware in the loop simulation and off-line simulation shows that the hardware in the loop and off-line terminal SOC value error was controlled within 5.60%, the vehicle control strategy can meet the expected effect, the CAN signal communication is normal. The hardware in the loop simulation can be used to reduce the subsequent vehicle debugging cycle and the cost.

**Keywords:** plug-in hybrid electric vehicle; control strategy; Markov chain; hardware in the loop simulation; simulation

## 0 引言

近年来,混合动力汽车以其降低燃油消耗和排放的潜力被广泛关注。集插电式混合动力汽车综合普通燃油汽车和纯电动汽车的优势于一体,既降低了对化石燃料的使用,又减少了温室气体和颗粒物的排放,还可以通过外接电网补充电能增加纯电动续航里程。能量管理策略通过合理分配能量源输出的转矩来提高车辆燃油经济性和动力性。

针对插电式混合动力汽车能量管理策略的实现,一些方法和原理被研究。基于规则(ruled-based, RB)的控制策略,如逻辑门限值控制策略,电量消耗型(charge depleting, CD)控制策略,电量保持型(charge sustaining, CS)控制策略,电量消耗-电量保持结合型(CD-CS)控制策略<sup>[1-2]</sup>。基于优化方法的控制策略,YANG C 等<sup>[3]</sup>使用全局最优的动态规划增加了纯电动模式的续航里程。

VAGG C 等<sup>[4]</sup>使用随机动态规划(SDP)方法降低了电力传动系统 13% 的损耗。GENG B 等<sup>[5]</sup>使用等效燃油最小值原理(ECMS)的优化方法对电池荷电状态进行优化,取得了良好的效果。

控制器逻辑的复杂性、冗长的开发周期以及将控制器用于实车测试的高风险、高成本,使得硬件在环系统在控制器测试环节起到重要作用。控制策略过于复杂会造成实时性较差,使得离线仿真与实车的控制效果差距较大。为此本文提出的控制策略进行了硬件在环仿真,验证控制策略的实时性。

将 Simulink 搭建的整车模型利用 dSPACE/Configuration-Desk 软件进行编译下载至 dSPACE/SCALEXIO 模拟整车实时仿真环境,运用代码自动生成技术对控制策略模型进行编译并下载至 MicroAutoBox 控制器中。硬件 SCALEXIO 和 MicroAutoBox 控制器通过 CAN 总线连接进行数据交互,完成硬件在环的验证,并在 ControlDesk 软件平台进行硬件在环的实

**基金项目:**山东省重点研发计划(2018GGX105004)

**作者简介:**潘广纯(1994—),男,山东日照人,硕士研究生,研究方向为车辆节能减排与新能源技术。

时监测,并根据试验结果进行数据的在线调试。

## 1 插电式混合动力系统

插电式混合动力系统除了包括普通混合动力系统的发动机、电机、变速箱、电池组、减速器等部件,还外接1个充电器,方便给电池组充电,见图1。

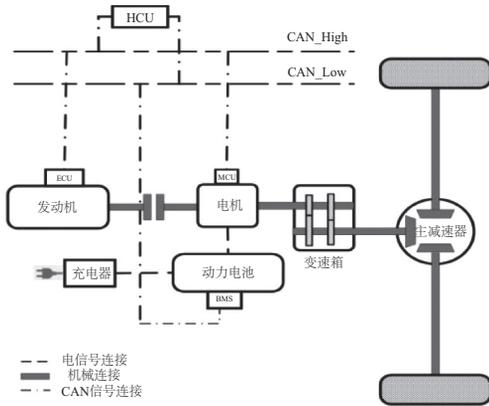


图1 插电式混合动力系统结构

## 2 混合动力汽车模型

### 2.1 发动机模型

发动机是一个极其复杂的非线性模型系统,对发动机进行理论建模时,由于影响发动机的因素很多,所以简化了发动机模型,主要考虑油耗及其影响油耗的因素,忽略了发动机瞬态工作特性、排放性和温度变化等。

### 2.2 电机模型

电机模型相对比较简单,采用实验数据建模法。电机既可作为电动机与发动机共同为车辆提供驱动力,也可以作为发电机通过再生制动和行车充电模式为电池充电。

电机效率是其转速和转矩的函数,表示为:

$$\eta_m = f(n_m, T_m) \quad (1)$$

电机的功率为:

$$p_m = \begin{cases} T_m \omega_m, & \text{电动机} \\ \eta_m T_m \omega_m, & \text{发电机} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\omega_m$ 为电机输出转速, $\eta_m$ 为电动机效率。电机效率特性见图2。

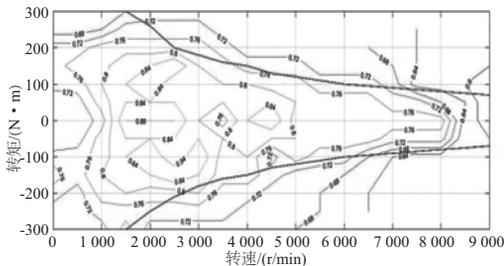


图2 电机效率特性图

### 2.3 电池模型

电池基本物理模型简化为串联内阻的开路电压,忽略温度变化的影响,主要考虑电池的荷电状态(SOC)的变化。

电池的SOC为:

$$SOC = SOC_{int} + \frac{1}{3600} \int_{t_0}^{t_f} I dt \quad (3)$$

电池的电流为:

$$I = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_{int}P_{bat}}}{2R_{int}} \quad (4)$$

式中: $SOC_{int}$ 为电池组最初荷电状态; $U_{oc}$ 为电池开路电压; $R_{int}$ 为电池内阻; $P_{bat}$ 为电池充放电功率。

### 2.4 车辆纵向动力学模型

车辆模型的建立主要依据纵向动力学方程,2个动力源输出转矩作为车辆需求转矩,表示为:

$$(T_v + T_b) \cdot \eta_T \cdot i = m \frac{dv}{dt} r_w \quad (5)$$

$$m \frac{dv}{dt} = mg \cos \alpha + mgs \sin \alpha + \frac{1}{2} C_d A \rho_{air} v^2 + \delta m \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

式中: $T_v$ 为车辆需求转矩, $T_b$ 为制动力矩, $\eta_T$ 为传动效率, $i$ 为总传动比, $m$ 为整车质量, $g$ 为重力加速度, $\alpha$ 为道路坡度, $\mu$ 为滚动阻力系数, $C_d$ 为空气阻力系数, $\rho_{air}$ 空气密度, $A$ 为迎风面积, $\delta$ 为汽车旋转质量系数, $r_w$ 为车轮滚动半径, $v$ 为车速。

### 2.5 车辆需求转矩分配原则及控制策略

转矩分配原则是依据车辆运行模式将驾驶员需求转矩合理地分配给发动机和驱动电机,使发动机高效工作减少油耗,电机尽可能工作在高效率区域。车辆需求转矩具体分配原则见表1。

表1中 $T_{ehigh}$ 为发动机最大输出转矩, $T_{mmax}$ 为电机输出端最大转矩, $T_{bmax}$ 为最大制动力矩。

表1 车辆需求转矩分配原则 单位: N·m

运行模式	发动机转矩	电机转矩
CD 纯电动模式	$T_e = 0$	$T_m = T_v$
CD 混合驱动模式	$T_e = T_v - T_m$	$T_m = T_{mmax}$
CS 纯电动模式	$T_e = 0$	$T_m = T_v$
CS 发动机驱动模式	$T_m = T_v$	$T_m = 0$
CS 混合驱动模式	$T_e = T_{ehigh}$	$T_m = T_v - T_e$
CS 行车充电模式	$T_e = T_{ehigh}$	$T_m = -(T_e - T_v)$
RB 再生制动	$T_e = 0$	$T_m = \max(T_v, T_{bmax})$

利用表1需求转矩分配原则作为车辆运行模式的切换条件,当驾驶员需求转矩小于电机输出转矩,电池SOC高于最优SOC值时车辆以纯电动模式驱动车辆;当车辆需求转矩大于电机输出转矩且电池SOC高于最低SOC值时,车辆进入混合驱动模式;当电池SOC低于下限值,发动机工作带动电机给电池充电,车辆进入行车充电模式。具体的控制策略见图3。

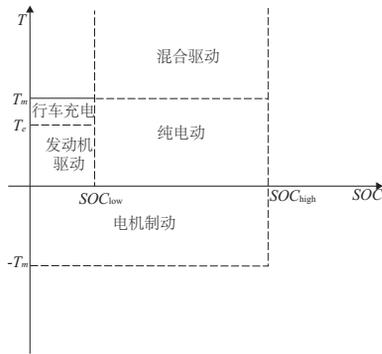


图3 混合动力控制策略

### 3 硬件在环仿真

#### 3.1 系统构架

本文基于系统建模、快速控制原型(RCP)、自动代码生成、硬件在环仿真(HIL)、标定的先进V模式开发流程,将MATLAB-Simulink 离线仿真结果和dSPACE 硬件在环仿真结果进行分析,验证控制策略的合理性和整车CAN信号的通讯情况,为将来控制策略的实车试验提供可靠的保证。

#### 3.2 试验平台的建立

将MATLAB-Simulink 搭建的整车模型加载至dSPACE/SCALEXIO 硬件中作为车辆基本模型进行实时仿真,SCALEXIO 机柜包括处理单元、电池模拟、外接负载、ECU 传输连接器、I/O 单元等,采用 dsrt 处理器,串行I/O 板卡 DS2703 带有 6 个 I/O 槽,能够很好地满足前向仿真的需要。

用RTICAN 模块将整车控制策略进行闭环连接,然后用自动代码生成技术进行编译加载至 MicroAutoBox 控制器中, MicroAutoBox 控制器可如同 ECU 一样,在无用户介入条件下自动执行。采用 ri1401 处理器, I/O 板卡为 DS1513/1514,拥有多路模数转换(ADC)、数模转换(DAC)、数字 IO(DIO)以及 CAN 通道,控制器通过 CAN 总线硬线与 dSPACE\SCALEXIO 硬件进行连接,调用 CAN 通讯协议来完成闭环实时仿真测试。

将整车模型加载至 SCALEXIO 之前需要使用 RTICANMM 模块对模型进行设置,然后把整车模型用 dSPACE/Configuration 软件进行编译,同时将自动代码生成技术编译和 ConfigurationDesk 软件编译生成的文件加载至 dSPACE/ControlDesk 软件中实现实时数据的可视化。

在 CANOE 软件中配置整车所需的 CAN 通讯信号,设置每个信号的位数和数据类型来完成 CAN 总线信号的建立。硬件在环具体流程见图 4。

#### 3.3 整车 CAN 信号通讯

驾驶员模型将加速踏板和制动踏板信号输入 HCU 中。发动机模型根据车辆行驶状态将发动机转速和节气门开度通过 CAN 总线输入 HCU, HCU 根据整车控制策略通过 CAN 总线将目标转矩和启停命令输出给发动机模

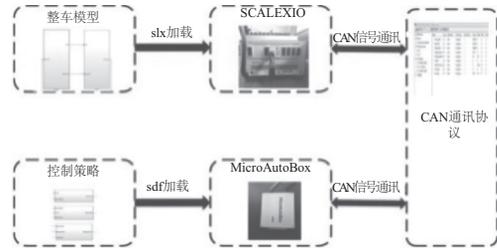


图4 硬件在环流程图

型。电机模型将当前运行模式、转矩、转速通过 CAN 总线输入 HCU, HCU 根据整车控制策略通过 CAN 总线将目标转矩、转速、运行模式输出给电机模型。电池模型将当前电池荷电状态、电流、电压信号通过 CAN 总线输入 HCU, HCU 依据控制策略将电池电流限流和电池荷电状态限制指令通过 CAN 总线输出给电池模型。整车模型将车速输入 HCU<sup>[9]</sup>。具体 CAN 信号通讯见图 5。

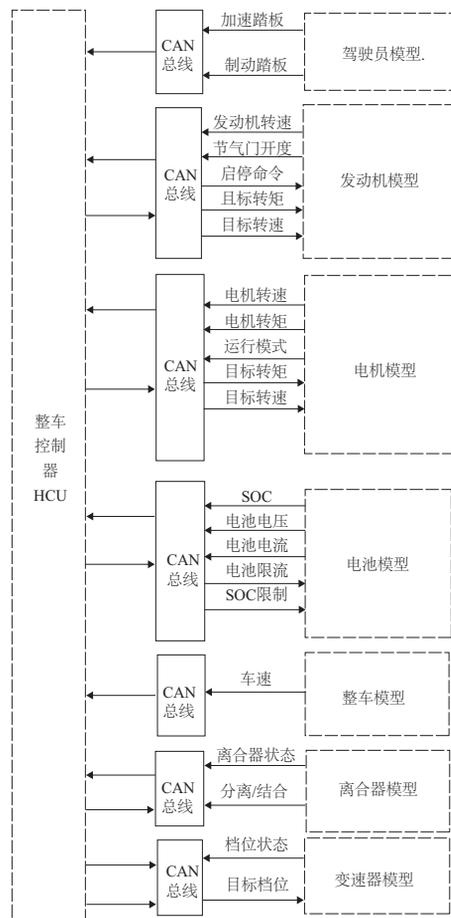


图5 CAN 信号通讯结构图

## 4 试验结果分析

本文选取工况 WLTP 作为离线仿真和硬件在环仿真的测试工况,测试时间 1800 s,选择的测试工况包括低速段、中速段、高速段、超高速段,最高车速为 131.3 km/h<sup>[10]</sup>。离线仿真曲线见图 6-图 8。硬件在环仿真与离线仿真对比图见图 9-图 10。

结合图6-图8可以看出整个运行工况以电机驱动为主,尽量减少发动机启停,既满足了混合动力汽车增加纯电动续航里程的需求又达到节油的目的。

综合离线仿真与硬件在环车速信号、电池SOC对比曲线可以看出,硬件在环仿真能够很好地跟随离线仿真曲线,误差较小,说明插电式混合动力系统能够很好地适应控制策略的调节,整车CAN信号通讯良好。

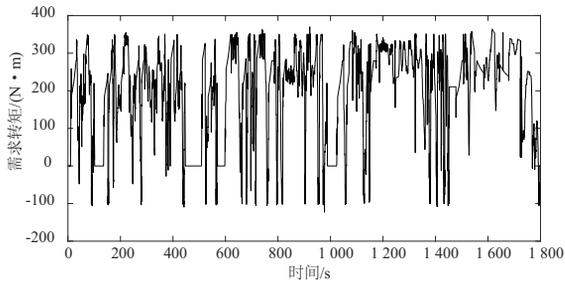


图6 需求转矩曲线图

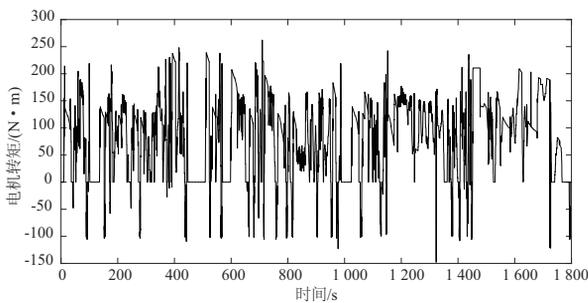


图7 电机转矩曲线图

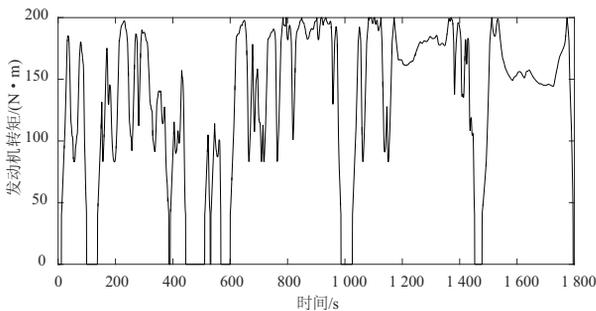


图8 发动机转矩曲线图

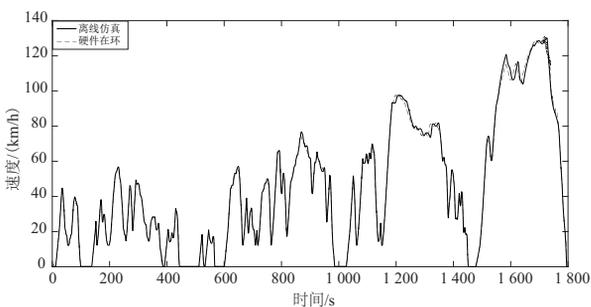


图9 车速曲线

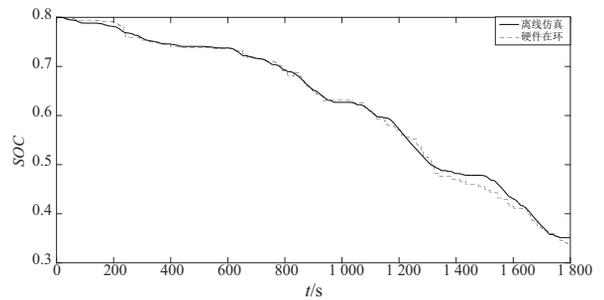


图10 电池SOC曲线

## 5 结语

1) 结合插电式混合动力系统特点设计了控制策略并将其在硬件在环仿真平台进行仿真试验,对控制策略进行实时监测、在线修正,为拓展到其他混合动力汽车的研究奠定了很好的理论基础。

2) 通过对离线仿真和硬件在环仿真结果比较得出:硬件在环仿真平台能够使搭建的控制策略满足预期的要求, MicroAutoBox 控制器和 SCALEXIO 硬件信号通讯正常,将控制策略应用于实车调试之前进行硬件在环仿真是一种先进高效的研究方法,能够提高控制策略开发的准确性、实时性。

### 参考文献:

- [1] PENG J, HE H, XIONG R. Rule based energy management strategy for a series parallel plug-in hybrid electric bus optimized by dynamic programming[J]. Applied Energy, 2017,185:1633-1643.
- [2] 刘星源. 搭载 CVT 的插电式混合动力汽车模式切换综合性研究[D]. 重庆:重庆大学汽车工程学院,2017.
- [3] YANG C, LI J, SUN W, et al. Study on global optimization of plug-in hybrid electric vehicle energy management strategies [C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific.
- [4] VAGG C, AKEHURST S, BRACE C J, et al. Stochastic dynamic programming in the real-world control of hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(3):853-866.
- [5] GENG B, MILL J K, SUN D. Energy management control of microturbine-powered plug-in hybrid electric vehicle using the telemetry equivalent consumption minimization strategy [J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2011, 60(9):4238-4248.
- [6] 王俊,王庆年,曾小华,等. 混合动力客车能量管理设计及硬件在环试验验证[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 174(5):1225-1232.
- [7] 杜常青,甘雯雯,张佩,等. 混合动力汽车整车控制策略建模及硬件在环仿真[J]. 汽车技术, 2016(12):31-36.

收稿日期:2019-09-04