

并联混合动力汽车模糊逻辑控制策略的建模和仿真

沈明星 杨农林

(华中科技大学交通科学与工程学院 武汉 430074)

摘要 提出了基于模糊逻辑控制扭矩分配策略,建立了各功能组件模型,并利用 ADVISOR2002 仿真平台,完成了该模糊逻辑扭矩控制策略和电气辅助控制策略仿真比较.结果表明,本文提出的模糊逻辑控制策略对提高混合动力汽车的动力性和燃油经济性,改善尾气的排放有明显的作用.

关键词 混合动力汽车(PHEV);扭矩管理策略;模糊逻辑;建模;仿真

引言

传统的内燃机汽车在运行过程中,发动机工作点往往偏离最佳工作点,虽然采用了稀燃技术、直喷技术等来提高发动机的燃烧效率,但是燃油和尾气排放仍达不到较好的效果.混合动力汽车是在传统汽车的动力性能基础上,融合电动汽车的零污染特点提出的一种过渡型产品.并联混合动力汽车有两种车载动力源:内燃机和电动机(蓄电池驱动),它们的工作模式在汽车运行过程中会随时发生改

变.能量流动较复杂,容易出现能量的双向流动,控制难度也较大,如何协调发动机和电动机之间的能量分配,是本文所要研究的主要问题.

1 并联混合动力汽车各组件模型^[1-3]

并联式混合动力汽车(Parallel Hybrid Energy Vehicle, PHEV)主要驱动系在车辆传动系处联合,即机械能的联合并输出到驱动轮.其动力系统包括热机驱动系和电气驱动系两部分,能量流动如图1所示(箭头表示能量流向).

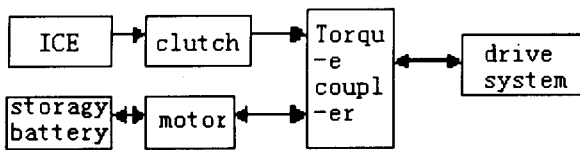


图1 并联混合动力汽车能量流动图
Fig.1 energy flow of PHEV

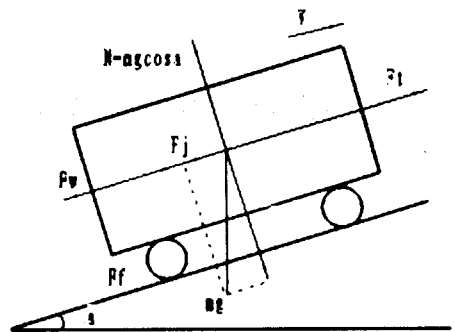


图2 车辆模型受力分析
Fig.2 force analysis of vehicle model

并联 HEV 主要有 4 种运行模式:

- (1). 车辆启动和加速时,发动机和电动机同时工作,共同分担驱动车辆所需要的扭矩;
- (2). 车辆正常行驶时,电动机关闭,仅由发动机工作提供动力;
- (3). 车辆制动和减速时,电动机工作于发电机状态,通过功率转换装置给蓄电池充电;

(4). 车辆轻载时,发动机发出的功率可以通过电动机转化为电能给蓄电池充电.

由于(3)、(4)中的能量流动比较复杂,电机处于发电机状态,出现能量双向流动,控制相对复杂,后面的能量控制策略主要是针对这两种情况来进行的.

1.1 车辆动力学模型^[5]

如果不考虑前后轴的轴荷转移,可将车辆(车身/底盘和轮胎)简化成一个不可变形的固体质量块,从而得到一个单自由度的模型,如图2。

由牛顿第二定律,可推导出汽车的行驶方程式:

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (1)$$

式中 F_t 为牵引力或制动力; F_f 为滚动阻力; F_w 为空气阻力; F_i 为爬坡阻力; F_j 为加速阻力。

滚动阻力 F_f 与轮胎负载、尺寸、型式、结构有关,通常采用下面公式表示:

$$F_f = mg \cos \alpha (f_1 + f_2 V) \quad (2)$$

式中 m 为汽车质量 kg; f_1 为滚动阻力系数,常量; f_2 为滚动阻力系数随车速变化的系数 s/m; V 为车速 m/s。

空气阻力 F_w 由迎风面积 A_f 、风阻系数 C_D 、和空气密度 ρ 决定,并与车速的平方成正比,即:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_D A_f V^2 \quad (3)$$

$$\text{爬坡阻力为: } F_i = mg \sin \alpha \quad (4)$$

$$\text{加速阻力为: } F_j = \delta m \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

式中 δ 为汽车旋转质量换算系数 ($\delta > 1$)。

由车轮模型得出了汽车的牵引力后,进而可以算驱动车轮需要的扭矩 R_{tor} ($R_{tor} = F_t \times R$, R 为车轮的半径),由减速器的传动比可以逆向推算出所需的耦合扭矩。

1.2 电机模型

作为 HEV 系统中的核心部件,电机的主要作用在于驱动车辆行驶,同时,电机驱动系统具有回馈制动能力。在整个系统控制和仿真中,电机及其控制器的模型占有重要的地位。无刷直流电机控制器简单,输出转矩大,因此在电气传动中应用广泛。

由于电机的三相绕组在空间完全对称,同时假设电机的磁场不饱和,并忽略涡流及磁滞损耗,则电机的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 u 、 e 和 i 分别为定子相绕组的电压、电动势和电流; L 和 M 分别为每相绕组的自感和彼此之间的

互感。对于三相绕组为 Y 型连接,而且没有中线的情况,三相电流满足:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (7)$$

则电机的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + 0 \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

电机的输出功率为:

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (9)$$

电机的电磁转矩为:

$$T_e = \frac{P}{\omega_m} \quad (10)$$

式中 ω_m 为转子机械角速度。

1.3 蓄电池模型

该蓄电池模型考虑了充放电内阻随 SOC 的变化关系和开路电压与 SOC 的关系,并假设充放电电流对蓄电池实际容量的影响相同且独立于 SOC 值,温度因素没有考虑。蓄电池 SOC 用 Peukert 方程进行计算,公式(11)、(12)、(13)描述了 SOC 的计算过程。

首先计算电池的平均放电电流:

$$\bar{I}_{dchg}(t) = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t |I_{dchg}(t)| \cdot dt \quad (11)$$

式中 $I_{dchg}(t)$ 为电池瞬时放电电流, A; $\bar{I}_{dchg}(t)$ 为电池平均放电电流, A; t 为放电时间, s。

然后,电池的实际容量用 Peukert 方程进行计算,即:

$$C_{actual} = K_1 \cdot \left| \frac{\bar{I}_{dchg}(t)}{I_{nomal}} \right|^{k_2} \quad (12)$$

式中 K_1 为 Peukert 常数 (1h 放电容量 A · h); K_2 为 Peukert 指数; I_{nomal} 为电池 1h 名义放电电流, A; C_{actual} 为电池实际容量, AH。

电池 SOC 的计算如下:

$$SOC = \frac{\int_0^T \eta \cdot I(t) dt}{C_{actual}} + SOC_{initial} \quad (13)$$

式中 SOC 为电池荷电状态, $SOC_{initial}$ 为电池初始的荷电状态; $I(t)$ 为电池充放电电流, 充电为正 (+), 放电为负 (-), A; η 为充放电效率, 与 SOC、充放电电流和温度等参数有关。

1.4 发动机模型

发动机由于本身特性的显著非线性,真实模型相当复杂,对于不同的节气门开度,发动机输出扭矩特性曲线各不相同,因此难以对这些曲线作出精确的模型描述,这里就不做具体的推导,方法是旋转基本坐标系 $w_{ice}M_{ice}$,利用多项式近似拟合发动机输出扭矩特性曲线,最后还原到原坐标系,得出发动机数学模型:

$$\begin{cases} M_{ice} = -c_w w_{ice}' \sin \varphi_{ice} + M_{ice}' \cos \varphi_{ice} \\ J \frac{dw_{ice}}{dt} = M_{ice} - M \end{cases} \quad (14)$$

式中, M_{ice} 为发动机扭矩; M_{ice}' 旋转坐标系后的发动机扭矩; M 负载转矩折算到发动机输出轴上的对应值; φ_{ice} 坐标旋转角度; w_{ice} 为发动机角速度。

2 模糊逻辑控制策略

模糊逻辑控制是上个世纪兴起的一门科学,它是基于规则的控制方法;“专家”的知识能够以规则的形式输入控制器中,由控制器来完成决策。模糊控制的主要优点在于它的自校正和自适应能力。就其本质而言,它是一种非线性控制方法,特别适用于复杂系统的控制。模糊控制的内容包括输入量模糊化、模糊规则确立、以及输出量解模糊。并联混合动力汽车的能量分配是一个非线性、多能量耦合

的系统,因此,模糊逻辑非常适合混合动力汽车的控制[6]。

2.1 模糊推理系统结构

MATLAB 模糊逻辑工具箱的模糊推理方法有 Mamdani 和 Sugeno 两种,这里采用 Mamdani 方法。为了保证汽车的动力性能(包括加速性能、最高车速和爬坡能力),使发动机尽可能获得最理想的经济性和排放性,建立以需求扭矩 R_{tor} 、蓄电池 SOC 为输入,电机扭矩和发动机扭矩 T_{ice} 为输出的模糊推理系统,见图 3。

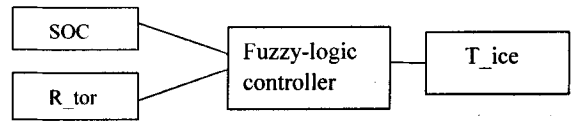


图 3 模糊逻辑控制器

Fig. 3 fuzzy - logic controller

2.2 控制变量的隶属函数

在模糊化过程中,首先将数值量的输入参数转变为模糊语言值。输入变量隶属函数的设计主要根据发动机、蓄电池和电动机的效率 MAP,确定各自高效运行的模糊集。输出变量的隶属函数用于确定电机的工作状态和输出功率的大小,可以按照需要均分成几个模糊集。该模糊控制模型输入/输出变量的隶属函数如图 4 所示。

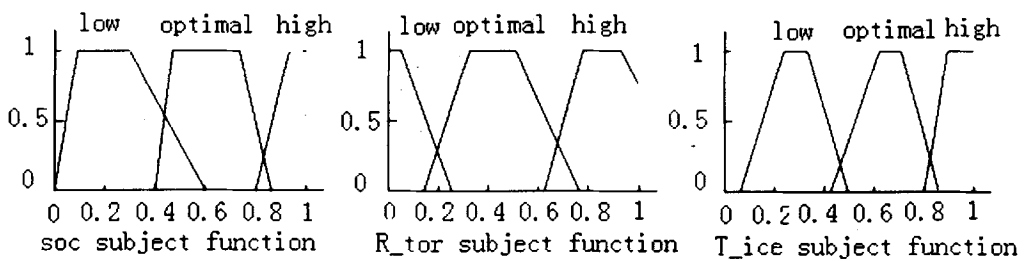


图 4 输入、输出变量的隶属函数

Fig. 4 input/output variable subject function

2.3 模糊逻辑控制规则

模糊逻辑控制规则是整个模糊逻辑控制环节的核心,每一条规则必须准确且能反映设计者的控制意图;其具体格式为:IF 输入变量的模糊状态 THEN 输出变量的模糊状态。根据模糊语言变量的离散化程度以及对 PHEV 工作原理的理解和在仿真、试验中获得的经验,以及请求功率、荷电状态和电机转速确定发动机功率。下面是主要的模糊规则^[7,8]:

IF R_{tor} is low, and SOC is low, THEN T_{ice} is high, and EM as generator;

IF R_{tor} is low, and SOC is optimal, THEN T_{ice} is optimal, and EM as generator;

IF R_{tor} is low, and SOC is high, THEN T_{ice} is very low, and EM as motor;

IF R_{tor} is optimal, and SOC is low, THEN T_{ice} is high, and EM as generator;

IF R_{tor} is optimal, and SOC is optimal, THEN

T_{ice} is high ,and EM as generator ;

IF R_{tor} is optimal ,and SOC is high ,THEN T_{ice} is low ,and EM as motor ;

IF R_{tor} is high ,and SOC is low ,THEN T_{ice} is very high ,and EM as generator ;

IF R_{tor} is high ,and SOC is low ,THEN T_{ice} is very low ,and EM as motor ;

IF R_{tor} is high ,and SOC is low ,THEN T_{ice} is very high ,and EM as motor ;

实际中的控制规则还有很多,将更加具体和详细,可以满足汽车稳定行驶的各种情况.最后,模糊控制器根据模糊规则得出了发动机的扭矩的模糊量,解模糊化后转化成物理量对发动机进行控制.

3 仿真结果

根据上海某汽车研究所的要求,选用某 PHEV 样车参数配置如下,重量:1334Kg (包括载荷 136Kg);汽油发动机功率:41kW;PB 蓄电池:12V26Ah 25 块;电机 25KW 交流感应电机. ADVI-

SOR 是 NREL(National Renewable energy lab 美国再生能源实验室)研制的基于 Matlab/Simulink 平台的多工况汽车性能模拟软件.将上述模糊逻辑控制模块嵌入到 ADVISOR2002,在 UDSS 和 HWFET 两种道路循环下仿真,并与电气辅助式控制策略进行比较^[4],发现尾气排放和燃料经济性都有明显的改善.仿真结果如下表 1 和表 2.

表 1 UDSS 循环工况燃料经济型和尾气排放量

Table 1 fuel economy and emission in UDSS Cyc.

| Control strategy | fuel economy (mpg) | CO (gram/mile) | NOx (gram/mile) | HC (gram/mile) |
|-------------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Electric - assist | 43.1 | 2.306 | 0.382 | 0.509 |
| Fuzzy - logic | 63.6 | 2.068 | 0.167 | 0.42 |

表 2 HWFET 循环工况燃料经济型和尾气排放量

Table 2 fuel economy and emission in HWFET Cyc.

| Control strategy | fuel economy (mpg) | CO (gram/mile) | NOx (gram/mile) | HC (gram/mile) |
|-------------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Electric - assist | 53.7 | 1.823 | 0.312 | 0.395 |
| Fuzzy - logic | 54.7 | 1.578 | 0.269 | 0.36 |

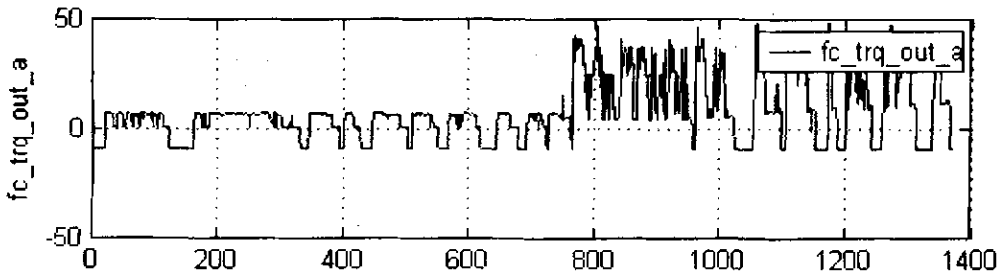


图 5 UDSS 循环模糊控制策略时发动机输出扭矩

Fig.5 output torque of ICE with fuzzy - logic strategy in UDSS Cyc

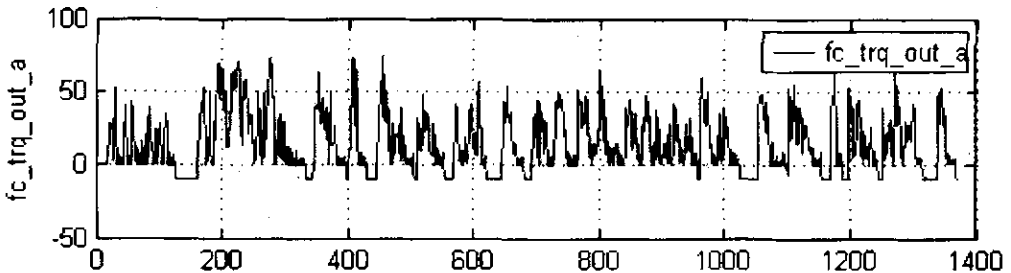


图 6 UDSS 循环电气辅助控制策略时发动机输出扭矩

Fig.6 output torque of ICE with electric - assisted strategy in UDSS Cyc

模糊控制中,开始电机工作,当接近 800s 时,发动机开始工作于高转矩区.输出转矩较并联电气辅助控制更加平稳,电机提供转矩不足部分.当发

动机的转矩高于所需的转矩时,电机作发电机运行.此时电动机提供附加充电转矩和负载转矩一起与发动机输出转矩达到平衡.比较两种控制策略,

电气辅助控制中发动机输出转矩变化大,电机转矩相对平稳。模糊优化控制中,发动机输出转矩相对

平稳,且工作在高效率区,电机转矩变化大。见图5~图8。

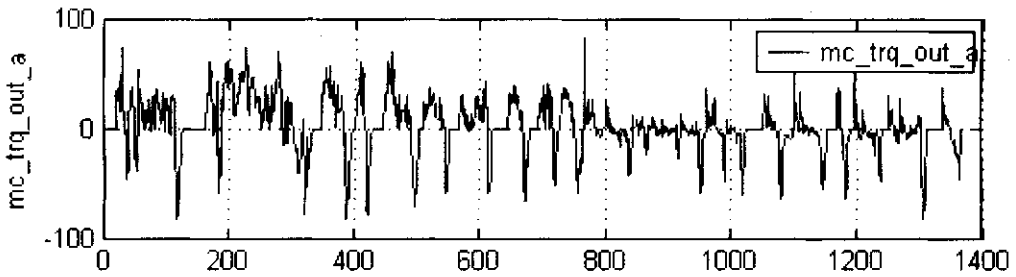


图7 UDDS 循环模糊控制策略时电机输出扭矩

Fig. 7 output torque of motor with fuzzy - logic strategy in UDDS Cyc

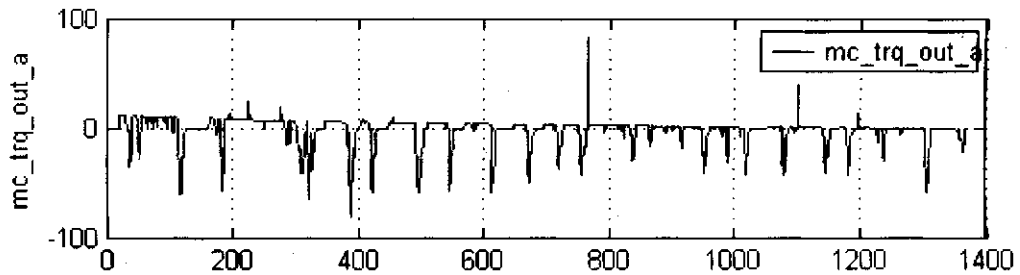


图8 UDDS 循环电气辅助控制策略时电机输出扭矩

Fig. 8 output torque of motor with electric - assisted strategy in UDDS Cyc

4 结论

本文对并联式混合动力汽车车辆动力、电动机、蓄电池、发动机建立模型,并提出了双输入单输出的模糊控制器结构,在标准道路循环工况下,运用模糊控制策略对样车的能量分配进行了仿真研究。从仿真结果来看,模糊逻辑控制策略较之传统的并联电气辅助控制策略,汽车的燃油效率得到了提高,废气排放降低,汽车的动力性能更优。本仿真缩短了实车开发周期,起到了节省成本的作用,对实车开发具有很强的指导作用。

参 考 文 献

- 1 Antoni Szumanowski. 混合电动车辆基础. 陈清泉, 孙逢春译. 北京:北京理工大学出版社, 2001 (Antoni Szumanowski, The Basis of Hybrid Energy Vehicle. Chen Qingquan, Shun Fengchun Translated. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001 (in Chinese))
- 2 陈全世, 仇斌, 谢起成等. 燃料电池电动汽车. 北京:清华大学出版社, 2005 (Chen Quanshi, Chou Bin, Xie QiCheng ect. Fuel Battery Electric Vehicles. Beijing: Tsinghua Press, 2005 (in Chinese))
- 3 张翔, 赵韩, 钱立军等. 混合动力轿车的建模与仿真. 计算机仿真, 2005, 22(1): 233 ~ 237 (Zhang Xiang, Zhao Han, Qian Lijun ect. Modeling and Simulation of Hybrid Electric Car. Computer Simulation, 2005, 22(1): 233 ~ 237 (in Chinese))
- 4 刘金玲, 宋健, 于良耀等. 并联混合动力客车控制策略比较. 公路交通科技, 2000, 22(1): 144 ~ 146 (Liu Jinling, Song Jian, Yu Liangyao ect. Control Strategies for Parallel Hybrid Electric Vehicles. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 22(1): 144 ~ 146 (in Chinese))
- 5 张云清, 周凡利, 王波等. 复杂机械系统动力学建模技术研究与应用. 动力学与控制学报, 2004, 2(2): 15 ~ 21 (Zhang Yunqing, Zhou Fanli, Wang Bo ect. Research and Application of the Modling Technology in the Simula-

- tion Platform of the Complicated Mechanical System. *Journal of Dynamics and Control*, 2004, 2(2): 15 ~ 21(in Chinese))
- 6 Xiaolin He, Jeffrey W. Hodgson. Modeling and Simulation for Hybrid Electric Vehicles—Part I: Modeling, Part II: Simulation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(4): 235 ~ 251
- 7 Beatrice Lazzerini, Leonardo M. Reyneri, and Marcello Chiaberge. Neuro ~ Fuzzy Approach to Hybrid Intelligent Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, 35(2): 413 ~ 424
- 8 Hyeoun - Dong Lee, Seung - Ki Sul. Fuzzy - logic - based torque control strategy for parallel - type hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 1998, 45(4): 625 ~ 632

MODELING AND SIMULATION OF FUZZY LOGIC CONTROL STRATEGY ON PARALLEL HYBRID ELECTRICAL VEHICLE

Shen Mingxing Yang Nonglin

(College of Traffic Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The fuzzy logical control strategy for the parallel - type hybrid vehicle was put forward, and the models of the main components were established. By using the mimic environment of ADVISOR2002, the comparison between the fuzzy logic control strategy and the electric - assisted control strategy were conducted. The result shows that the fuzzy logic control strategy can improve the dynamic fuel economy and emission.

Key words hybrid electrical vehicle, torque control strategy, fuzzy logic, modeling, simulation