

文章编号:1000-582X(2006)11-0001-05

# ISG 型混合动力汽车模糊控制策略及仿真\*

胡洪祥, 秦大同, 舒红, 杨亚联, 丁李辉

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**针对配备 CVT 的 ISG 型混合动力汽车,采用模糊控制策略对整车燃油经济性进行了研究.以整车瞬时状态为基础,燃油消耗最小为目标,建立了模糊控制器.为了消除模糊控制规则获取过程中的不确定性因素,以序列二次规划法的优化计算结果作为制定模糊控制规则的基础,制定了模糊控制规则.结合本文研究车型,对 ADVISOR 仿真软件进行二次开发,并对整车燃油经济性进行了仿真计算.仿真结果表明,模糊控制策略能够有效提高 ISG 型混合动力汽车的燃油经济性.

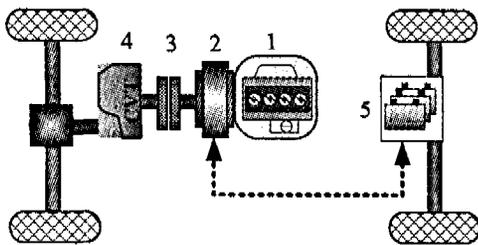
**关键词:**混合动力汽车;模糊控制策略;仿真 ADVISOR;燃油经济性

**中图分类号:**U469.2

**文献标识码:**A

混合动力汽车的控制策略必须实现能量流在整车各总成部件之间的有效转换,使得包括发动机、ISG (Integrated Starter and Generator)电机等在内的整车各总成部件工作在高效率区域,达到改善整车燃油经济性和降低排放的目的.目前,混合动力汽车的控制策略主要有3种:第1种控制策略是基于简单规则的控制策略;第2种控制策略是对特定循环工况下混合动力汽车油耗进行全局优化,使之对整个循环来说,油耗最小,通常应用的是动态规划算法<sup>[1]</sup>;第3种控制策略是对混合动力系统进行瞬时优化,可以使得混合动力汽车在任一瞬时的等效油耗最小<sup>[2]</sup>,常见的算法有经典最优化控制算法(如序列二次规划法)和模糊控制技术.

依赖于精确模型,对系统误差过于敏感,而混合动力汽车系统结构复杂,难于建立精确的数学模型,因此优化结果与实际情况往往相差较大.而模糊控制技术具有自适应性,不依赖于精确模型,适合应用于混合动力汽车系统<sup>[3]</sup>.但模糊控制规则的获取和确定却依赖于人的经验,会受到不确定的因素影响,因此,为了得到有效的模糊控制规则,本文结合两种算法的优点,以序列二次规划法(SQP)的优化计算结果作为制定模糊控制规则的指导依据,应用模糊控制技术对基于 CVT (Continuously Variable Transmission)的 ISG 型混合动力汽车控制策略进行了优化,得到了以整车燃油消耗最小为目标的模糊控制方法.



1. 发动机; 2. ISG 电机; 3. 离合器; 4. CVT; 5. 蓄电池

图1 ISG 型混合动力汽车结构简图

## 1 ISG 型混合动力汽车结构

如图1所示为配备无级变速器 CVT 的 ISG 型混合动力汽车的结构简图,发动机与 ISG 电机直接相连,ISG 电机作为辅助动力源为车辆提供动力,同时发动机向电池充电时和制动能量回收时又作为发电机工作.采用 CVT 的优点是可以获得连续的传动比变化,实现发动机在低油耗、低排放区工作或使 ISG 电机在高效区工作,进一步提高整车的燃油经济性或排放性能.整车主要参数见表1.

在第3种控制策略中,由于传统最优化控制过分

\* 收稿日期:2006-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50305037),重庆市科委自然科学基金资助项目(8718),教育部长江学者奖励计划

作者简介:胡洪祥(1981-),男,四川名山人,重庆大学硕士研究生,研究方向为混合动力汽车.

表1 ISG型混合动力汽车整车主要参数

整备质量( $m_0$ )	1 400 kg
迎风面积( $A$ )	2.28 m <sup>2</sup>
风阻系数( $C_D$ )	0.34
车轮滚动半径( $r_r$ )	0.31 m
滚动阻力系数( $f$ )	0.013 5
单个车轮转动惯量( $I$ )	0.9 kg·m <sup>2</sup>
轴距( $L$ )	2.6 m
重心高度( $h_g$ )	0.66 m
CVT 速比范围( $i_g$ )	0.442 ~ 2.432

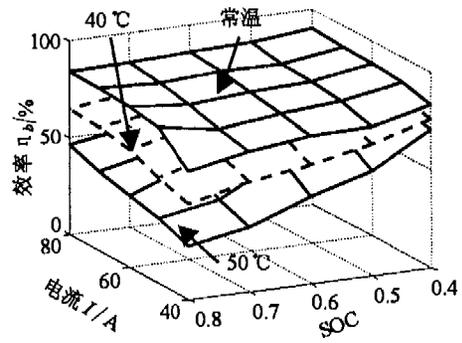


图4 不同温度下蓄电池放电效率图

## 2 动力源数值模型

### 2.1 发动机数值模型

采用排量为1.6升的JL475Q3型发动机,通过试验建立了发动机的数值模型,如图2所示。

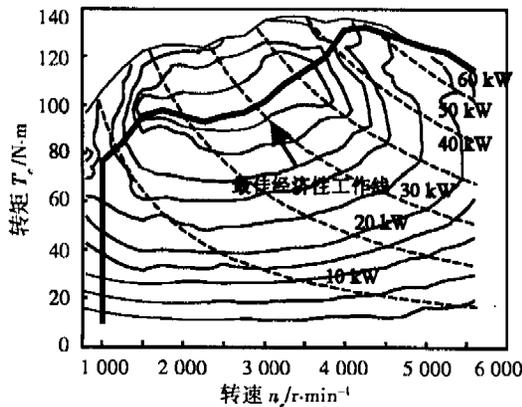


图2 发动机万有特性图

### 2.2 电机数值模型

根据ISG电机试验数据,建立了ISG电机效率特性图,如图3所示。

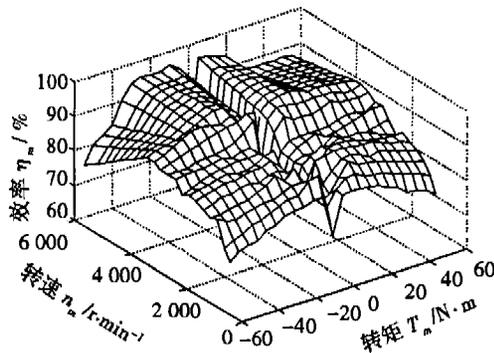


图3 ISG电机效率图

### 2.3 蓄电池模型

根据QNY6.5镍氢电池的试验结果,获得了蓄电池不同温度下的放电效率,如图4所示。

## 3 最优化控制策略数学模型

将蓄电池中储存的化学能和各部件损失的机械能转化成等量的燃油消耗量,就可以建立混合动力汽车的等效模型<sup>[1]</sup>。通过推导分析可以建立以等效燃油消耗量最小为目标的最优化数学模型,表示如下:

目标函数:

$$\min f(X) = \min f(P_{req}, T_e, T_m, n, SOC), \quad (1)$$

约束条件:

$$\left. \begin{aligned} T_{emin}(n) &\leq T_e \leq T_{emax}(n) \\ T_{min}(n) &\leq T_m \leq T_{max}(n) \\ n_{min} &\leq n \leq n_{max} \\ SOC_{min} &\leq SOC \leq SOC_{max} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

其中: $P_{req}$ ——整车需求功率,kW;

$T_e$ ——发动机转矩,N·m;

$T_m$ ——ISG电机转矩,N·m;

$n$ ——发动机/电机转速,r/min。

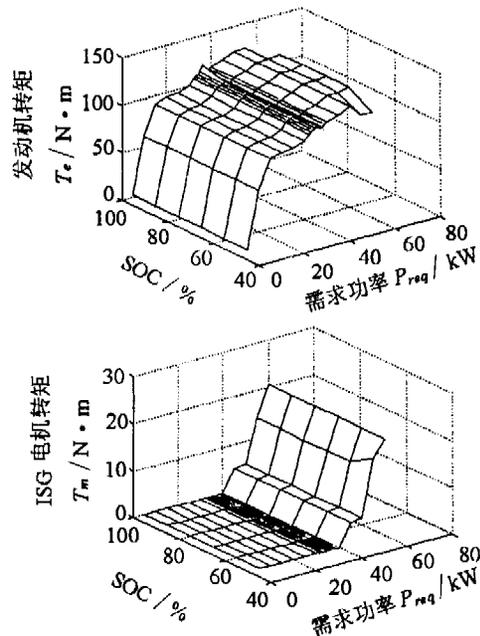


图5 放电工况下的发动机和电机转矩图

采用序列二次规划法(SQP)求解上述非线性最优化问题, 得出优化的发动机转矩和电机转矩. 以车速为 70 km/h 为例, 得到放电工况下的优化结果如图 5 所示. 由于 ISG 型混合动力汽车无纯电动工况, 在需求功率较低时, 由发动机单独驱动, 这点与上述优化结果有所区别. 上述方法建立在发动机、ISG 电机和蓄电池的稳态数值模型基础上, 模型本身具有实验误差, 并且与实际的动态特性差别较大, 因此采用这种方法得出的优化结果与实际情况有一定差别, 但可将此优化结果作为指导模糊控制规则制订的基本依据, 弥补模糊控制的不足.

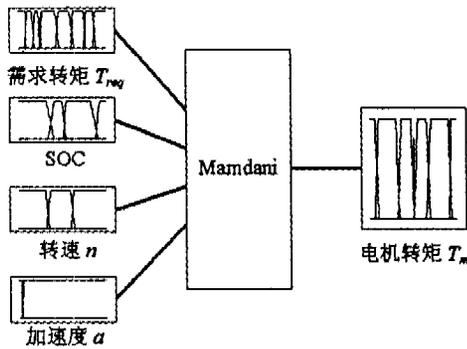


图 6 模糊控制器结构

#### 4 ISG 型混合动力汽车模糊控制策略

国外研究表明, 模糊控制适合于混合动力汽车的控制<sup>[3-5]</sup>, 具有智能化, 高适应性, 高灵活性的特点.

本文以需求转矩、蓄电池 SOC、发动机转速和汽车加速度为输入, 电机转矩为输出, 采用 Mamdani 推理方法, 建立如图 6 所示的模糊模糊控制器.

##### 4.1 输入变量的隶属度函数

图 7 所示为采用梯形函数形式的模糊控制器各输入、输出变量的隶属函数曲线.

“需求转矩( $T_{req}$ )”的语言值模糊子集定义为:

{ 负大, 负中, 负小, 低, 中, 最佳, 高, 过高 }.

“SOC”的语言值模糊子集定义为:

{ 过低, 低, 正常, 高, 过高 }.

“转速( $n$ )”的语言值模糊子集定义为:

{ 低, 中, 高 }.

“车辆加速度( $a$ )”的语言值模糊子集定义为:

{ 低, 高 }.

“车辆加速度”的定义根据电机助力大小确定, 加速度“高”, 电机助力大, 加速度“低”, 电机不助力或助力小.

##### 4.2 输出变量的隶属函数

图 7 中显示了模糊控制器输出变量电机转矩

( $T_m$ ) 的隶属函数曲线, 语言值模糊子集定义为:

{ 负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大 }.

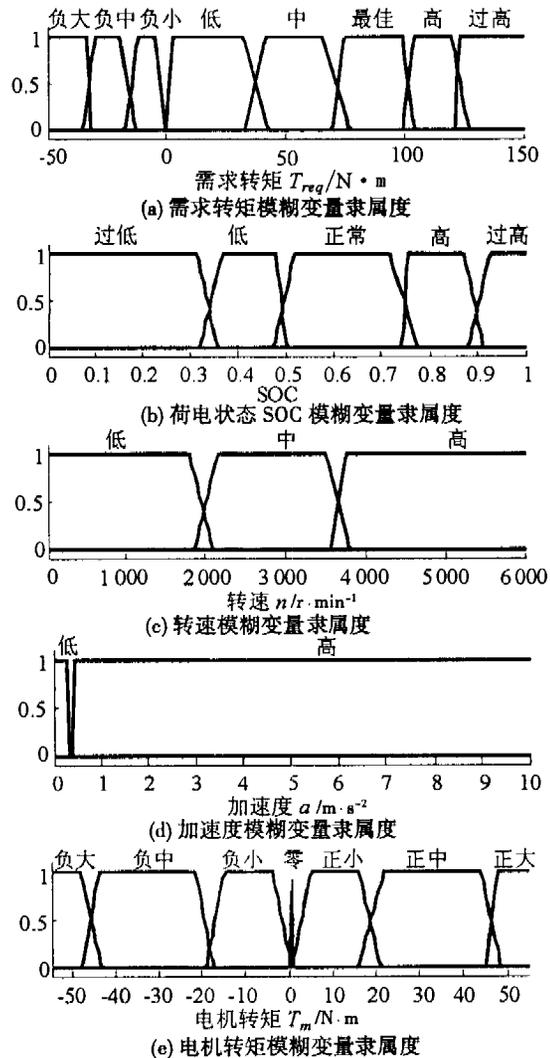


图 7 模糊输入、输出变量隶属函数曲线

##### 4.3 控制规则

为了避免过分依赖于人的经验, 消除不确定的误差影响, 以上述序列二次规划法的优化结果为基础, 按照汽车不同工况下的不同工作模式, 制定了 131 条控制规则, 部分控制规则如表 2 所示.

表中规则①②表示蓄电池 SOC 过低, 由发动机提供动力进行充电; ③表示需求转矩低, 不需要电机助力, 发动机单独驱动; ④表示汽车高速匀速行驶工况, 发动机油耗较低, 单独驱动; ⑤⑥表示汽车处于爬坡或急加速工况, 根据需求转矩的不同, ISG 电机提供助力大小程度不同; ⑦⑧表示汽车处于减速制动工况, ISG 电机根据制动情况, 不同程度地进行制动能量回收. 不同工况需要不同控制规则, 才能保证整车经济性的提高.

表 2 模糊控制规则

①	If 需求转矩 is 低 and SOC is 过低 and 加速度 is not 高 then 电机转矩 is 负中 ;
②	If 需求转矩 is 最佳 and SOC is 过低 and 转速 is 中 and 加速度 is 低 then 电机转矩 is 负中 ;
③	If 需求转矩 is 低 and SOC is not 过低 and 加速度 is 低 then 电机转矩 is 零 ;
④	If 需求转矩 is 最佳 and SOC is 正常 and 转速 is 中 and 加速度 is 低 then 电机转矩 is 零 ;
⑤	If 需求转矩 is 最佳 and SOC is 高 and 转速 is 中 and 加速度 is 高 then 电机转矩 is 正小 ;
⑥	If 需求转矩 is 过高 and SOC is not 过低 and 加速度 is 高 then 电机转矩 is 正大 ;
⑦	If 需求转矩 is 负小 and SOC is not 太高 then 电机转矩为负小 ;
⑧	If 需求转矩 is 负中 and SOC is not 太高 then 电机转矩为负中 ;
.....	

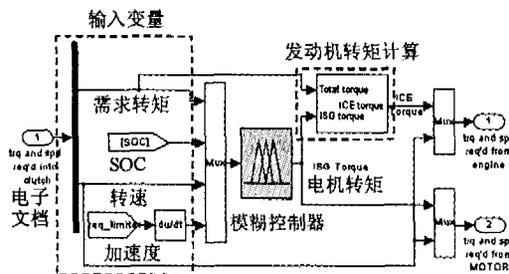


图 8 控制策略模块

图 8 为本文建立的模糊控制策略 Simulink 模块图,采用后向仿真方法,整车需求功率( $P_{req}$ ),发动机功率( $P_e$ )和电机功率( $P_m$ )有如式(3)所示关系:

$$P_{req} = P_e + P_m, \tag{3}$$

$$T_e = T_{req} - T_m. \tag{4}$$

通过模糊控制器计算得出电机转矩后,通过式(4)就可得到发动机转矩.

### 5 ADVISOR 二次开发及仿真

美国可再生能源国家实验室(NREL)开发的 ADVISOR2002(Advanced Vehicle SimulatOR)仿真软件是基于 MATLAB/SIMULINK 平台设计的,对传统车、电动车和混合动力汽车燃油经济性和动力性进行分析的一个仿真平台,由于其代码的开放性而得到了广泛的应用.

#### 5.1 ADVISOR 二次开发

根据本文研究内容,对 ADVISOR2002 进行了二次开发:

首先,建立用户自定义的仿真模块;根据用户需

求,对发动机、电机、蓄电池等数据文件进行修改;并按照实际车型的参数及配置,修改 PARALLEL\_defaults\_in.m 文件.

然后,将 all\_menus.mat 文件调入工作空间,在 options 结构变量中添加用户自定义的模块名;修改 gui\_miage.m 文件,实现车型图片显示在 GUI 界面中;修改 InputFigcontrol.m,使得相关数据图形显示在 GUI 界面中<sup>[6]</sup>.

最后,修改 block\_diagram\_name.m 文件,以实现仿真模块的调用.

另外,根据用户不同需要还可以进行相关修改.通过以上步骤的修改,就可以利用 ADVISOR 的仿真环境进行用户自定义参数设置和仿真计算.

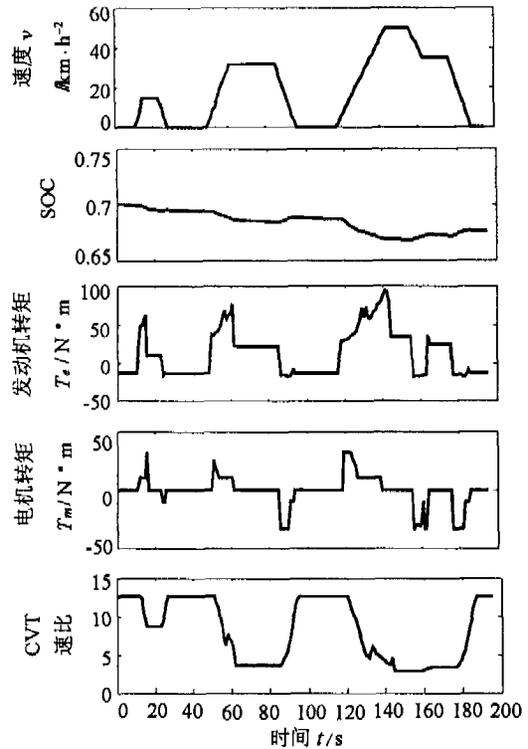


图 9 ECE 循环工况仿真结果

#### 5.2 仿真结果及分析

将装备 CVT 的 ISG 型混合动力汽车仿真模型嵌入 ADVISOR 仿真环境,利用 ADVISOR 的仿真功能,应用模糊控制策略对不同工况下的 ISG 型混合动力汽车进行了燃油经济性仿真.如图 9 所示为 ECE 循环工况下的仿真结果,从图中可以看出 ISG 电机在加速时对汽车进行了助力,在减速时进行了制动能量回收,蓄电池 SOC 的变化在合理范围内,说明模糊控制策略能有效地实现发动机、电机的动力分配,实现 ISG 型混合动力汽车的所有工作模式.配备了 1.6 L 发动机和 10 kW 电机的 ISG 型混合动力汽车与 1.8 L 的传统车动力性相当,

因此它们的油耗具有可比性. 表 3 为 ECE, EUDC 和 ECE + EUDC 三种工况下, 排量为 1.8 L 的传统车油耗试验结果(厂家提供的数据)和排量为 1.6 L 混合动力汽车的油耗仿真结果比较, 可以看出本文制定的模糊控制策略能有效达到降低油耗的目的.

表 3 仿真结果比较

车型	百公里油耗/L × 100 km		
	ECE	EUDC	ECE + EUDC
传统车	10.852	7.201	8.564
混合车	8.0	6.2	7.7
节油燃油	26.3%	13.9%	10.1%

## 6 结 论

1) 以整车瞬时状态为基础, 利用模糊控制技术, 对 ISG 型混合动力汽车的控制策略进行了研究, 得到了 ISG 型混合动力汽车的模糊控制方法.

2) 为了消除模糊控制规则制定过程中的不确定因素, 采用了序列二次规划法的优化结果作为制定控制规则的基础, 在一定程度上弥补了模糊控制的不足.

3) 通过对 ADVISOR 的二次开发, 充分利用 ADVISOR 较为完备的仿真环境, 通过对整车燃油经济性的仿真计算, 验证了模糊控制策略的有效性.

## 参考文献:

- [1] SEBASTIEN DELPRAT, JIMMY LAUBER, THIERRY MARRIE GUERRA, et al. Control of a Parallel Hybrid Powertrain: Optimal Control [C]. IEEE Transactions on vehicular, Vol, 53, May 2004.
- [2] CHU NHO KIM, EOK NAMGOONG, SEONGCHUL LEE, et al. Fuel Economy Optimization for Parallel Hybrid Vehicles with CVT [J]. Society of Automotive Engineers, 1999, 48, 337 - 343.
- [3] NAIM A. KHER, MUTASIM A SALMAN, NIELS J SCHOUTEN. Emissions and Fuel Economy Trade-off for Hybrid Vehicles Using Fuzzy Logic [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004, 66: 155 - 172.
- [4] NIEL J. SCHOUTEN, MUTASIM A SALMAN, NAIM A KHEIR. Energy Management Strategies for Parallel Hybrid Vehicles Using Fuzzy Logic [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11: 171 - 177.
- [5] NREL/The Ohio - state University, Development of Fuzzy Logic and Neural Network Control and Advanced Emissions Modeling for Parallel Hybrid Vehicles [R]. December 2001.
- [6] 曾小华, 王庆年, 李俊, 等. 基于 ADVISOR2002 混合动力汽车控制策略模块开发 [J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 394 - 396, 416.

## Fuzzy Control Strategy and Simulation for ISG-Type Hybrid Electric Vehicles

HU Hong-xiang, QIN Da-tong, SHU Hong, YANG Ya-lian, DING Li-hui.

(State key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Fuzzy control strategy is used to study the fuel economy of ISG-Type hybrid electric vehicle with CVT. Based on the instantaneous state of vehicle, the fuzzy logic controller is built aiming to get minimum fuel consumption. In order to avoid the subjective factor, the control rules are established with the optimized results from the sequence quadratic programming (SQP) method. Through the second development of ADVISOR, the simulation for ISG hybrid electric vehicle at different cycles has been accomplished. The results show that the fuzzy logic control strategy is efficient in improving the fuel economy of hybrid electric vehicle.

**Key words:** hybrid electric vehicle; fuzzy control strategy; simulation; ADVISOR; fuel economy; ISG

(编辑 张小强)