

并联式混合动力汽车能量控制系统仿真研究

牛晶, 逯玉林

(天水师范学院, 甘肃 天水 741000)

摘要: 基于模糊控制和电力辅助控制两种混合动力汽车能量控制方法, 以某并联式混合动力汽车为对象, 建立了正常行驶工况下的能量控制策略, 并在 MATLAB/Simulink 仿真平台下进行仿真分析, 为实际系统的开发提供测试平台。

关键词: 汽车; 并联式混合动力汽车; 能量控制系统; 仿真分析

中图分类号: U469.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2011)06-0014-05

混合动力汽车按其结构形式可分为串联式、并联式、混联式和复合式四大类。并联式混合动力汽车采用发动机和电机两套独立的驱动系统, 其典型结构如图 1 所示。并联式混合动力汽车存在 4 种不同的工作模式, 即发动机单独驱动、电动机单独驱

动、发动机和电动机联合驱动及发动机提供动力源, 电动机以发电机形式工作向动力蓄电池充电。

车辆起步、低速低负荷运行时, 电动机单独驱动; 车辆中负荷运行时, 发动机单独驱动; 车辆中高负荷运行时, 发动机和电动机联合驱动; 当发动机提供的转矩大于车辆行驶需求转矩或车辆再生制动时, 以发动机和发电机模式工作。

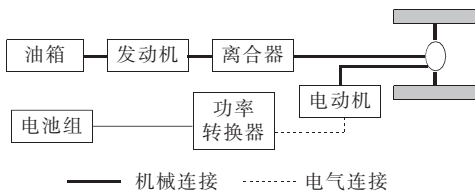


图 1 并联式混合动力汽车结构简图

1 结合电力辅助控制思想的模糊逻辑控制系统的建立

综合考虑电力辅助型和基于转矩型两种整车控

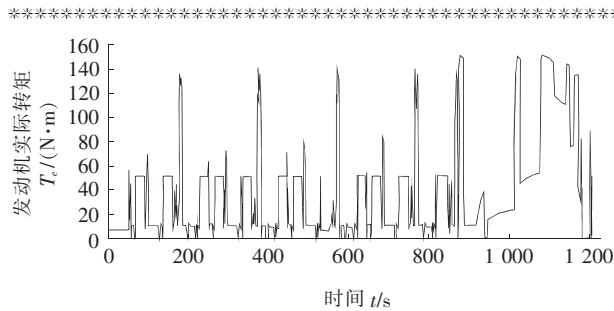


图 7 NEDC 循环工况下发动机实际转矩 T_e

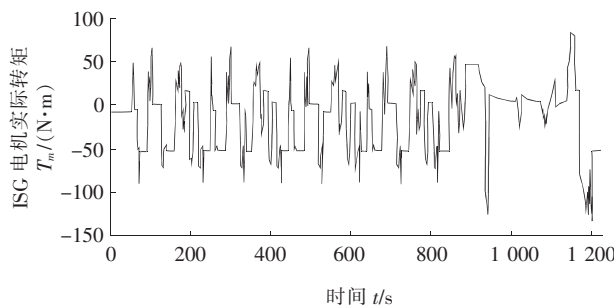


图 8 NEDC 循环工况下 ISG 电机实际转矩 T_m

究了混合动力样车的动力性与燃油经济性。仿真结果表明: 该混合动力轻型客车的整车动力性满足初始设计要求; 在 MATLAB/Simulink 中所建立的整车仿真模型跟实车性能接近, 模型具有相当的可信度; 混合动力样车的燃油经济性较原 IVECO 车有一定的改善。

参考文献:

- [1] 刘鹏. 某混合动力轿车动力系统参数匹配与能量分配优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [2] 冯永旭, 魏民祥, 陈长骏. 超级电容混合动力轿车加速策略与试验[J]. 公路与汽运, 2011(1).
- [3] 郭永斌. 混合动力城市轻型商用车动力系统设计及仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [4] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 何海波, 郑燕萍, 蒋元广. ISG 型混合动力轻客建模及性能仿真研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(3).

制策略,设计结合电力辅助控制思想的基于转矩型整车控制策略,一方面在保证 SOC 的前提下有效地控制发动机的油耗和排放,另一方面控制策略主旨明确,控制上易于实现。其中,在应用基于转矩的控制策略时引入模糊控制思想。

1.1 工作模式分析

混合动力汽车的行驶工况可分为起步怠速、正常行驶和再生制动 3 种。其中,起步怠速阶段发动机效率低、油耗和排放高,一般采用纯电动工作模式;再生制动阶段,地面转矩驱动发动机,进而带动发电机向动力蓄电池充电;正常行驶工况时,因车速、电池 SOC 状态以及车辆转矩需求不同,工作模式有较大变化。该文只讨论正常行驶工况下的整车能量分配策略。

1.2 控制策略的确定

图 2 是某并联式混合动力汽车发动机的万有特性曲线及电机满载转矩输出曲线。

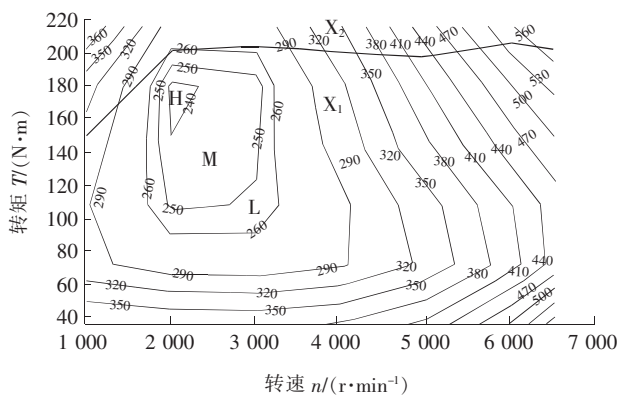


图 2 某并联式混合动力汽车发动机万有特性曲线

从图 2 可看出:发动机油耗最低的区域集中在转速 2 000~2 400 r/min 和转矩 150~182 N·m, 电机的满载输出转矩在 201 N·m 左右。为了避免电机的起停受电池 SOC 影响而频繁切换,同时考虑发动机油耗和排放,依据电机最大输出转矩,可将发动机的最优工作区域扩大至图 2 中由最内圈向外的第三圈,第三圈以外区域为不可接受区域(发动机应避免在此区域工作)。其中:图 2 中最内圈发动机工作性能最好,记为 H;次内圈发动机工作性能次之,记为 M;第三圈最差,记为 L;不可接受区域中,电机满载外特性以下区域记为 X₁,电机满载外特性以上区域记为 X₂。

该控制系统采用车速 u 、电池 SOC 和换算至发动机输出轴的行驶需求转矩 T_p 作为输入量,

经过一套控制规则,将输出量即发动机输出转矩 T_e 和电机输出转矩 T_m 输送给发动机控制器、电机控制器,进而调节发动机和电机的输出,在保证 SOC 的前提下使发动机的油耗和排放最好。

1.2.1 输入量隶属函数的确定

由车速 u 可得到对应的发动机(电机)转速 n 和换算至发动机输出轴的行驶需求转矩 T_p :

$$n = \frac{25i_g i_0}{3\pi R} u \quad (1)$$

$$T_p = \frac{(mg \cos \alpha f + mg \sin \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u^2 + \delta m \frac{du}{dt}) R}{i_g i_0} \quad (2)$$

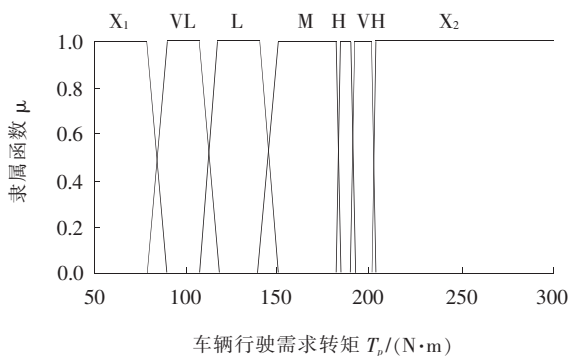
式中: i_g 为变速器挡位传动比; i_0 为主减速比; R 为车轮滚动半径(m); m 为车辆满载总质量(kg); α 为坡度角(°); f 为滚动阻力系数; C_D 为车辆空气阻力系数; A 为车辆迎风面积(m²); δ 为车辆旋转质量换算系数。

通过式(1)、式(2)转换,控制系统的输入量可表示为 $[n, T_p]$ 和 SOC。其中,由发动机(电机)转速 n 和车辆行驶需求转矩 T_p 组成的二维变量 $[n, T_p]$ 决定了其在发动机万有特性曲线上所处的区域,即决定了此工况下发动机的油耗和排放性能。

1.2.1.1 车辆行驶需求转矩 T_p 隶属函数的确定

对车辆行驶需求转矩使用梯形隶属函数。梯形隶属函数在 MATLAB 模糊逻辑工具箱中以式(3)表示,利用式(3)得到车辆行驶需求转矩隶属函数(如图 3 所示)。

$$y = \text{trapmf}(x, [a, b, c, d]) \quad (3)$$



X₁ 表示车辆行驶需求转矩过低;VL 表示车辆行驶需求转矩低;L 表示车辆行驶需求转矩稍低;M 表示车辆行驶需求转矩合适;H 表示车辆行驶需求转矩稍高;VH 表示车辆行驶需求转矩高;X₂ 表示车辆行驶需求转矩过高且超过了电机满载最大输出转矩的范围。

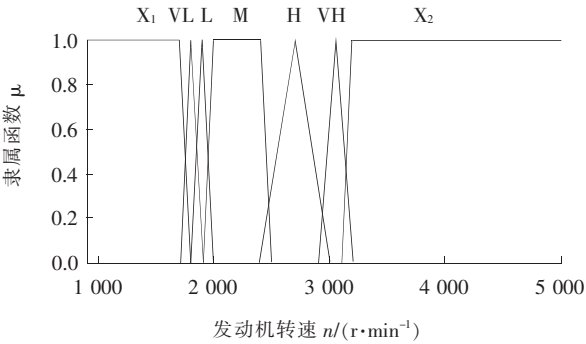
图 3 行驶需求转矩隶属函数

1.2.1.2 发动机转速 n 隶属函数的确定

一般混合动力车辆制动能量回收的下限车速为 5~8 km/h,通过对车辆制动能量回收过程的研究,选择 8 km/h 作为下限车速,由式(1)可得车辆正常行驶工况下发动机最小转速为 864 r/min。

在确定发动机转速隶属函数时,除使用梯形隶属函数外,还可使用三角形隶属函数。三角形隶属函数在 MATLAB 模糊逻辑工具箱中以式(4)表示。利用梯形隶属函数和三角形隶属函数得到发动机转速隶属函数(如图 4 所示)。

$$y=\text{trimf}(x,[a,b,c]) \tag{4}$$



X_1 和 X_2 表示发动机转速过低或过高的不可接受区域,其中利用三角形隶属函数描述了合适到不可接受区域之间的过渡情况;VL 表示发动机转速低;L 表示发动机转速稍低;M 表示发动机转速合适;H 表示发动机转速稍高;VH 表示发动机转速高。

图 4 发动机转速隶属函数

1.2.1.3 电池 SOC 隶属函数的确定

车辆在正常行驶过程中,电池 SOC 始终处于动态变化中。车辆长时间处于低 SOC 运行会影响电池寿命,长时间高 SOC 运行则能量利用率不高,不利于整车能量的分配,无法突出混合动力车辆强劲力性的优势。因此,在车辆正常行驶过程中,假设 $0.2 \leq \text{SOC} \leq 0.8$ 。

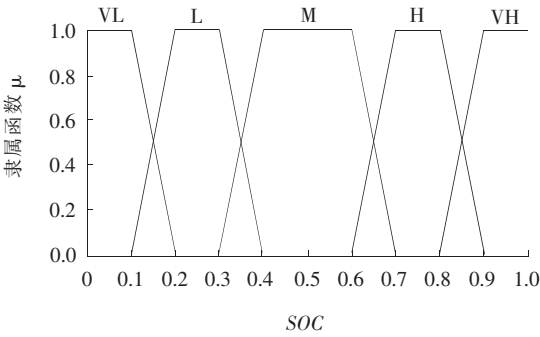
同时使用梯形隶属函数和三角形隶属函数确定电池 SOC 隶属函数,结果如图 5 所示。

1.2.1.4 输入量语言值的确定

根据上述各输入量的隶属函数,将其模糊变量语言值用数字形式表示,结果如表 1 所示。

1.2.2 输出量函数表达式的确定

根据混合动力车辆正常行驶工况的要求,输出量 T_m 有 3 种情况:车辆仅由发动机提供动力,电机不工作, $T_m=0$;车辆由发动机、电动机共同驱动或纯电动机工作, $T_m>0$;低 SOC 情况下,车辆由发动机提供动力,电机以发电机模式工作对电池充电,



VL 表示电池 SOC 非常低;L 表示电池 SOC 低;M 表示电池 SOC 合适;H 表示电池 SOC 高;VH 表示电池 SOC 非常高。

图 5 电池 SOC 隶属函数

表 1 输入变量语言值

输入量	语言变量	语言值	输入量	语言变量	语言值
T_p	X_1	-3	n	X_1	-3
	VL	-2		VL	-2
	L	-1		L	-1
	M	0		M	0
	H	1		H	1
	VH	2		VH	2
SOC	X_2	3		X_2	3
	VL	-2			
	L	-1			
	M	0			
	H	1			
	VH	2			

$T_m<0$ 。

将输出模糊变量语言值用数字形式表示,结果如表 2 所示。

表 2 输出变量语言值

T_e	T_m	语言值
T_{emax}	$T_{emax}-T_p$	1
T_p	0	2
$0.95T_p+0.05T_{emax}$	$0.05(T_p-T_{emax})$	3
$0.75T_p+0.25T_{emax}$	$0.25(T_p-T_{emax})$	4
$0.50T_p+0.50T_{emax}$	$0.50(T_p-T_{emax})$	5
$0.25T_p+0.75T_{emax}$	$0.75(T_p-T_{emax})$	6
$0.05T_p+0.95T_{emax}$	$0.95(T_p-T_{emax})$	7
0	T_p	8
T_p-T_{mmax}	T_{mmax}	9

1.2.3 整车控制策略的制定及模糊控制模型的建立

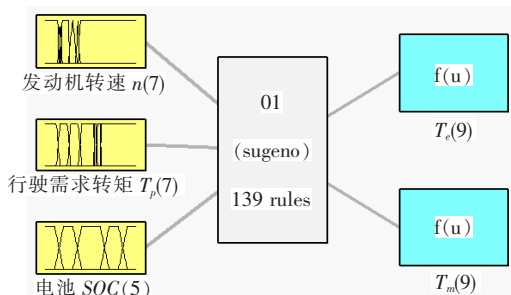
根据输入变量和输出变量的关系,给出模糊控制规则(如表 3 所示)。

表 3 模糊控制规则

输入量		输出量	输入量		输出量
$[n, T_p]$ 所 在范围	SOC 语言值	(T_e, T_m) 语言值	$[n, T_p]$ 所 在范围	SOC 语言值	(T_e, T_m) 语言值
H	-2	5	L	-2	7
	-1	4		-1	7
	0	3		0	6
	1	2		1	5
	2	2		2	4
M	-2	7	X ₁	-2	1
	-1	6		-1	1
	0	5		0	8
	1	4		1	8
	2	3		2	8
-2、-1 停车充电					
X ₂	0	9			
	1	9			
	2	9			

由表 1、表 2、表 3 可知车辆正常行驶过程中输入量和输出量之间的对应关系,以 $n=H$ 、 $T_p=L$ 、 $SOC=M$ 为例,其模糊关系可表示为 if n is H and T_p is L and SOC is M then $T_e=0.5T_p+0.5T_{emax}$ and $T_m=0.5(T_p-T_{emax})$ 。

对上述模糊控制规则,在 MATLAB/Simulink 环境下运用函数 plotfis 可得到如图 6 所示的模糊推理系统。在输入量已知的条件下,利用这个模糊推理系统可得到相应的输出量。



sugeno 是推理系统的类型;左边为系统的输入量,分别是发动机转速 n 、整车行驶需求转矩 T_p 、电池 SOC,分别有 7、7 和 5 个隶属度;右边为系统的输出量 T_e 和 T_m ,有 9 个隶属度。

图 6 模糊推理系统

2 仿真研究

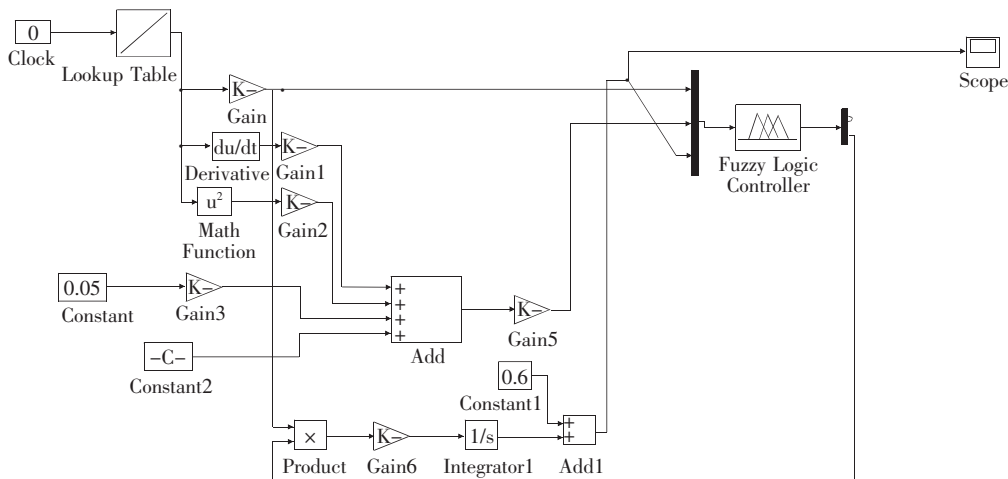
2.1 仿真模型的建立

应用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立上述整车控制策略的仿真模型(如图 7 所示)。该模型包括三部分:1) 输入环节,包括车速工况、车辆动力学模块、电池 SOC 估计模块;2) 中间环节,为模糊控制器;3) 输出环节,为数据显示。

采用 4 种车速工况,0~100 s 起步加速,分别为起步车速 8 km/h 至 60、70、80 和 120 km/h。

电池 SOC 估计模块应用下式进行估计:

$$SOC = 1 - \frac{\int_0^t T_m \frac{\pi n}{30} dt}{W_E} \quad (5)$$



式中: W_E 是初始时刻电池的总能量(J); T_m 是电机输出转矩($N \cdot m$), 正值表示电池耗电, 负值表示电池被充电。

2.2 仿真结果的分析

在4种车速工况下, 发动机的输出转矩如图8所示, 电机的输出转矩如图9所示, 电池SOC的变化如图10所示。

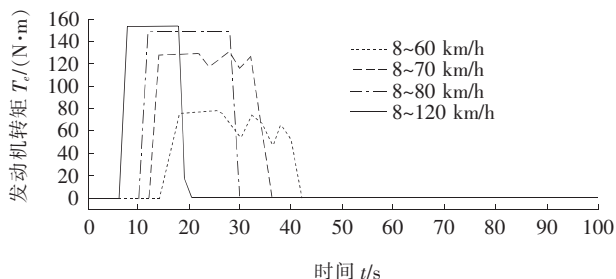


图8 发动机转矩输出曲线

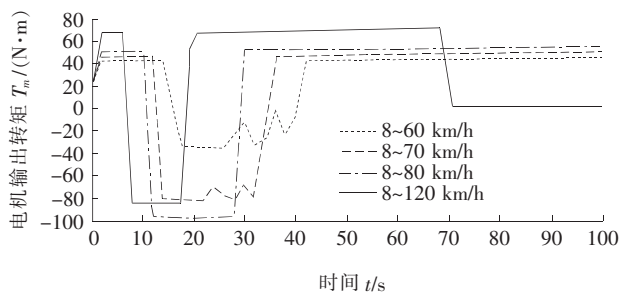


图9 电机转矩输出曲线

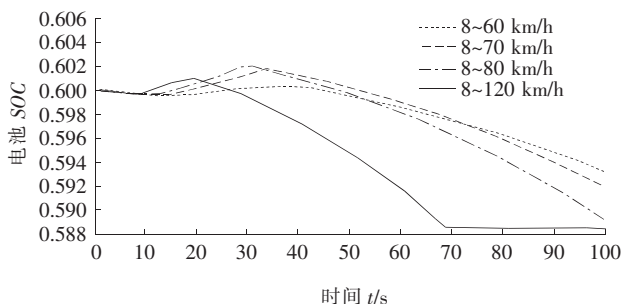


图10 电池SOC变化曲线

从图8可以看出: 车辆的加速度越大, 发动机的使用频率越高; 在低加速度(60和70 km/h 2条曲线)时, 发动机输出转矩有明显波动, 说明该控制策略在低速情况下对发动机的控制要求较高。

图9表明: 在低加速度(60和70 km/h 2条曲线)时, 电机输出转矩有明显波动。60、70和80 km/h 曲线上, 电机依次经历了电动机、发电机和电动机的工作状态, 而120 km/h 曲线上, 电机最后一

阶段输出转矩为零, 即车辆以纯发动机模式工作, 这说明在高速高负荷情况下, 发动机工作在高效区的可能性很小。

图10与图9正好对应, 电池也依次经历了放电、充电、再放电的过程。从图10还可以看出: 在电池再放电阶段, 高速高负荷情况下电池SOC的下降更快一些。

3 结语

在模糊控制和电力辅助控制相结合的能量控制策略下, 并联式混合动力车辆较多地利用了发动机高效区的输出转矩, 电池SOC不至于频繁波动, 改善了单纯依据电池SOC值作为阈值时车辆能量输出装置频繁在发动机和电池之间切换的弊端。

参考文献:

- [1] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [2] 刘庆凯, 纪丽伟, 刘雄. 混合动力汽车整车控制策略比较分析[J]. 柴油机设计与制造, 2010, 16(3).
- [3] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 于秀敏, 曹珊, 李君, 等. 混合动力汽车控制策略的研究现状及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11).
- [5] 梁龙, 张欣, 李国岫, 等. 并联式混合动力电动汽车动力总成系统的仿真研究[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(4).
- [6] 吴剑. 并联式混合动力汽车能量管理策略优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [7] 杜爱民, 冯旭云. 四轮驱动混合动力汽车能量管理策略仿真[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6).
- [8] 黄妙华, 陈飏, 陈胜金. 基于转矩分配的并联式混合动力电动轿车能量管理策略研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(1).
- [9] 孙文凯. 并联混合动力汽车系统建模与转矩动态控制的仿真研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007.
- [10] 周巍. 混合动力汽车多能源动力总成控制器的研究与开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [11] 张欣, 郝小健, 李从心, 等. 并联式混合动力电动汽车动力总成控制策略的仿真研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(2).
- [12] 孟亚鹏. 并联混合动力电动大客车多能源动力总成控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.