

# PHEV 模糊能量管理策略优化设计

武小兰<sup>1</sup>, 白志峰<sup>1</sup>, 史小辉<sup>1</sup>, 曹秉刚<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学机电学院, 西安 710055; 2. 西安交通大学机械学院, 西安 710049)

**摘要:** 针对插电式混合动力电动汽车(PHEV)动力系统结构复杂、建立精确的数学模型非常困难的特点和模糊控制器设计主要依靠专家经验、主观性较大的缺点, 提出一种基于粒子群优化的模糊能量管理策略, 保持按专家知识设计的模糊规则不变, 采用粒子群优化算法优化模糊控制器隶属度函数参数。利用 Matlab/simulink 建立该策略模型, 并将该模型嵌入到 Advisor 软件中进行仿真和对比分析, 结果表明, 采用基于粒子群优化的模糊能量管理策略与采用未优化的模糊能量管理策略相比, 能够更有效地降低燃油消耗, 减少尾气排放。

**关键词:** 插电式混合动力电动汽车; 能量管理策略; 粒子群优化; 模糊控制

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0242-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801031

## Optimization Design of Fuzzy Energy Management for Plug-in Hybrid Electric Vehicles

Wu Xiaolan<sup>1</sup>, Bai Zhifeng<sup>1</sup>, Shi Xiaohui<sup>1</sup>, Cao Binggang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Because of complex system configuration, it is difficult to find precise mathematics model of PHEV drivetrain. The fuzzy controller design depends mainly on expert's experience and has much subjectivity. A fuzzy energy management strategy (EMS) based on particle swarm optimization (PSO) is presented. In this EMS, the fuzzy rules obtained from expert knowledge are unaltered and the PSO is used to optimize the parameters of membership functions of the fuzzy controller. The provided EMS model is built by Matlab/simulink and embedded in the Advisor software for simulation and comparative analysis. The result shows that, compared with the conventional fuzzy EMS, the fuzzy EMS based on PSO can more effectively reduce oil consumption and reduce tail gas emission.

**Keywords:** plug-in hybrid electric vehicle; energy management strategy; particle swarm optimization; fuzzy control

## 引言

插电式混合动力电动汽车(PHEV)与传统的混合动力电动汽车相比配备有更大容量储能装置, 能

够利用普通电网对储能装置充电, 从而增加了纯电动行驶里程, 大大减少了燃油消耗和废气排放, 被认为是解决能源危机和汽车排放污染问题最具发展前景的新能源汽车技术, 日前已成为各国汽车企业及相关研究机构研究的热点<sup>[1-3]</sup>。能量管理策略是整车控制的核心, 是 PHEV 低油耗和低排放等目标的关键所在。

目前, PHEV 能量管理策略可以大致分为“基于规则的能量管理策略”<sup>[4]</sup>、基于优化技术的能量



收稿日期: 2015-11-25 修回日期: 2016-03-20;  
基金项目: 国家自然科学基金(51405367);  
作者简介: 武小兰(1975-), 女, 甘肃皋兰, 博士, 讲师, 研究方向为电动汽车能量管理; 白志峰(1974-), 男, 陕西蒲城, 博士, 讲师, 研究方向为电动汽车控制与新型储能技术。

管理策略<sup>[5-7]</sup>、“模糊能量管理策略”<sup>[8]</sup>。其中, 模糊能量管理策略鲁棒性好, 易于实现实时控制, 比较适合应用于混合动力电动汽车上。然而, 模糊规则的建立、隶属度函数的确定主要依靠经验, 尚没有成型的方法可以遵循。

考虑到传统的依靠经验设计的模糊控制器无法获得全局最优的局限性, 本文提出一种采用粒子群算法优化设计模糊控制器的方法, 通过与未优化的模糊能量管理策略比较, 说明其在降低燃油消耗和减少废气排放方面的优越性。

## 1 PHEV 动力系统结构

PHEV 动力系统结构主要特点与传统 HEV 类似, 可分为串联式、并联式、混联式三种构成型式<sup>[9]</sup>, 其中, 并联式动力系统构型如图 1 所示, 其特点是发动机和电机以机械能叠加的方式实现驱动, 发动机与电机分属两套系统, 既可共同驱动又可单独驱动, 整车能源利用率较高, 实现形式较多, 但控制技术、结构设计与制造要求高。本文的研究主要针对并联型 PHEV。

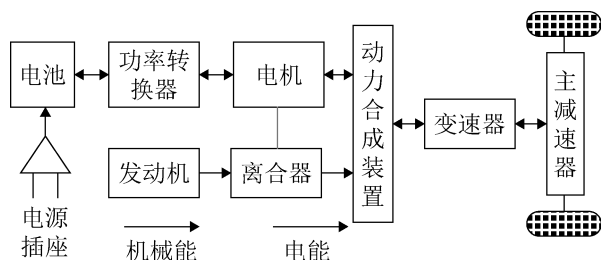


图 1 PHEV 并联式结构  
Fig.1 Parallel PHEV configuration

## 2 模糊控制器设计

### 2.1 模糊控制器结构

在设计模糊控制器(FLC)时, 两大主要部分需要确定。一部分是结构, 包括输入输出变量, 模糊规则结构, 隶属函数的数量和类型, 推理机类型, 算子和解模糊方法; 另一部分是与隶属函数和模糊规则相关的参数。在本文的设计研究中, 采用 Mamdani 类型的模糊系统, 需求转矩和电池

SOC 作为 FLC 的输入, 发动机转矩作为输出, 采用 Mamdani 推理方法, 采用重心法解模糊。

### 2.2 隶属函数

首先, 将输入、输出量进行尺度变换, 将其变换到要求的论域范围。为了便于模糊控制的实现, 将输入的需求转矩  $T_r$  和输出地发动机转矩  $T_o$  量化成[1, 11]的区间连续变化量。‘1’表示转矩为 0, ‘6’表示最优转矩, ‘11’表示最大转矩值, 其余数值采用线性插值的方法和转矩对应。另外, 按照电池组允许的工作范围(由电池的工作效率区决定), 将输入变量电池荷电状态  $S_c$  量化成[1, 11]的区间连续变化量, ‘1’表示其下限, ‘11’表示其上限。

其次, 确定模糊子集。模糊子集的个数决定了模糊控制精细化的程度, 在本文的研究中将输入、输出地模糊子集均定义为 5 个, 如图 2 所示。

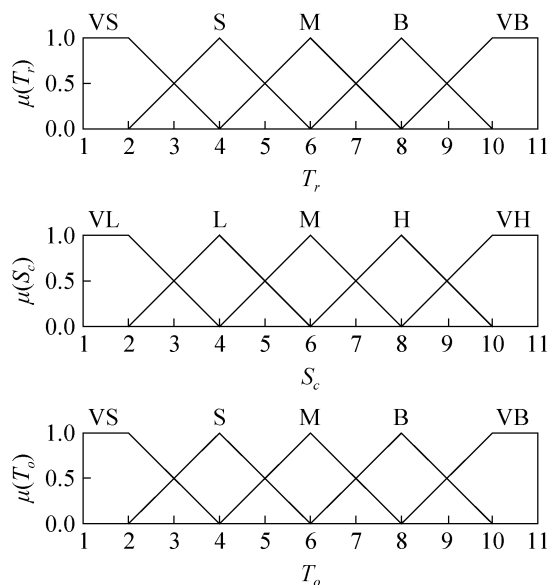


图 2 模糊输入、输出隶属度函数  
Fig.2 Input and output membership functions of the FLC

$T_r$  的模糊子集: {VS, S, M, B, VB};

$S_c$  的模糊子集: {VL, L, M, H, VH};

$T_o$  的模糊子集: {VS, S, M, B, VB}。

其中, VS 表示极小, S 表示小, M 表示中等, B 表示大, VB 表示极大, L 表示低, VL 表示极低, H 表示高, VH 表示极高。

最后, 确定隶属函数。隶属度函数描述了模糊化映射, 它将数值域连续数值和模糊论域的离散概念用隶属度的关系联系起来, 赋予数值以实际的内涵。隶属度函数的形状对模糊控制器的性能有很大影响。当隶属度函数比较窄瘦时, 控制比较灵敏, 反之, 控制比较平稳。各变量隶属度函数初步设置如图 2 所示。

## 2.3 模糊控制规则

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、试验中获得的经验来设计模糊控制规则, 本文设计模糊规则的主要依据是:

- (1) 需求转矩  $T_r$  近似为当前转速下发动机的最优转矩时, 电机不工作, 由发动机单独驱动;
- (2) 需求转矩  $T_r$  小于或大于最优转矩一定值时, 发动机工作于效率最优转矩曲线附近, 余下的部分由电机提供;
- (3) 电池组 SOC 值  $S_c$  较高时, 主要采用电机驱动。

另外, 控制规则的设计需要考虑规则库的完备性和一致性, 即规则库中包含所有可能的输入组合, 而且规则的结论不能有相互冲突。按照上述原则, 设计了 PHEV 模糊控制规则, 如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表  
Tab. 1 Fuzzy rule table

		$S_c$				
		S	RS	M	RB	B
$T_r$	S	M	RS	RS	S	S
	RS	M	M	RS	S	S
	M	M	M	M	RS	S
	RB	RB	M	M	M	RS
	B	B	RB	M	M	RS

## 3 基于粒子群算法优化模糊控制器

上述模糊控制器的设计只要依靠专家经验, 带

有较大的主观性, 而由于 PHEV 这类控制问题本身的复杂性, 这样的控制器很难获得最优的性能。在本节中, 采用粒子群算法离线对 FLC 的参数进行优化以得到最小目标函数, 然后, 将优化后的 FLC 实时应用于 PHEV 控制, 这一优化调节流程的示意图如图 3 所示。

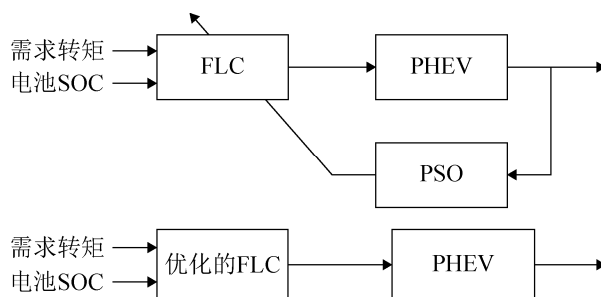


图 3 优化调节 FLC 参数示意图  
Fig. 3 Schematic of the optimized FLC

为了通过粒子群优化获得最优的 FLC 参数, 所有有关隶属度函数和模糊规则参数都可以表示为粒子的维数, 从而进行优化选择, 而且, 这些优化的参数越多, 获得全局最优解的机会就越多。然而, 随着这些参数的增加, 粒子的维数相应的增加, 这就需要更大的粒子群规模和迭代次数去获取全局最优解, 最后直接导致计算时间的大幅增加; 另外, 优化结果中可能会有相当数量的模糊规则彼此冲突或者用专家知识无法解释。为了解决这些矛盾, 本文的研究中采用一种折中的处理方法: 按专家知识设计的模糊规则保持不变, 由 PSO 调节隶属度函数的参数。

### 1) 隶属度函数优化变量

如前面所述, 随着优化变量的增加, 粒子的维数相应增加, 导致搜索时间增加、搜索效率降低, 因此, 应采用尽量少的变量数目来定义隶属度函数。在本次研究中假设隶属度函数集中心点 '6' 的位置固定不变, 针对需求转矩的隶属度函数所需优化变量及范围如表 2 所示, 其中,  $TC_1$ ,  $TC_2$ ,  $TC_4$  和  $TC_5$  为各隶属函数子集的中心点位置,  $TW_1$ ,  $TW_2$ ,  $TW_3$ ,  $TW_4$  和  $TW_5$  为各隶属函数宽度的一半。电池荷电状态  $S_c$  所需优化变量与需求转矩相似,

包括四个中心点位置  $SC_1$ 、 $SC_2$ 、 $SC_4$  和  $SC_5$ , 5 个宽度变量  $SW_1$ 、 $SW_2$ 、 $SW_3$ 、 $SW_4$  和  $SW_5$ 。另外, 假设发动机输出转矩  $T_o$  的隶属度函数与需求转矩的隶属度函数相同, 因此, 实际需要确定的变量为 18 个。所采用的粒子可以定义为如下形式:

$$x=(TC_1, TC_2, TC_4, TC_5, TW_1, \dots, TW_5, SC_1, SC_2, SC_4, SC_5, SW_1, \dots, SW_5)$$

表 2 优化变量范围  
Tab. 2 Range of optimized variables

优化变量	范围	优化变量	范围
$TC_1$	[1, 3]	$TW_1$	[0, 3]
$TC_2$	[3, 5]	$TW_2$	[0, 3]
$TC_4$	[7, 9]	$TW_3$	[0, 3]
$TC_5$	[9, 11]	$TW_4$	[0, 3]
		$TW_5$	[0, 3]

## 2) 优化问题表述

本文能量管理策略的主要设计原则是在保证汽车动力性能的条件下实现整车的燃油消耗和废气排放最小。采用归一化的燃油消耗和废气排放之和作为适应度函数, 将车辆加速性能、最高车速和爬坡等动力性能作为约束条件, 模糊控制器的优化目标是使该适应度函数值最小, 该目标函数定义如下:

$$J(x) = \overline{FC} + \overline{HC} + \overline{CO} + \overline{NOx}$$

由此, 优化模糊控制器隶属度函数参数的优化问题可以定义为如下有约束优化问题:

$$\begin{cases} \min_{x \in \Omega} J(x) \\ \text{s.t. } h_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

在此表达式中,  $x$  代表优化问题的解向量, 即隶属度函数的优化变量,  $TC_1$ ,  $TC_2$ ,  $TC_4$ ,  $TC_5$ ,  $TW_1$ ,  $\dots$ ,  $TW_5$ ,  $SC_1$ ,  $SC_2$ ,  $SC_4$ ,  $SC_5$ ,  $SW_1$ ,  $\dots$ ,  $SW_5$ ,  $\Omega$  是解空间, 限制优化变量的上下限, 不等式  $h_i(x) \leq 0$  是以上讨论的非线性约束,  $J(x)$  是目标函数,  $n$  是约束的数目。

## 3) 优化流程

将汽车仿真软件 ADVISOR 用于评价车辆性能和排放。利用粒子群算法对 FLC 隶属度参数进行优化, 具体优化流程如下:

Step1: 将优化变量  $x=(TC_1, TC_2, TC_4, TC_5, TW_1, \dots, TW_5, SC_1, SC_2, SC_4, SC_5, SW_1, \dots, SW_5)$  作为粒子, 其每一维均采用实数编码, 在参数变动范围内随机初始化每个粒子的位置和速度;

Step 2: 对每个粒子解码, 作为隶属度函数的相应参数输出到模糊控制器, 结合 ADVISOR 中建立的车辆模型进行仿真, 借助于循环工况分别计算目标函数值和判断约束条件是否满足;

Step 3: 更新每个粒子的个体最优  $p_{\text{Best}}$  和整个群体的全局最优  $g_{\text{Best}}$ ;

Step 4: 转到 Step2 进行迭代, 直到最大迭代次数达到指定值时, 将  $g_{\text{Best}}$  解码作为隶属度函数参数的输出, 从而得到优化的模糊控制器。

# 4 仿真

基于 ADVISOR 构建仿真平台, 主要部件的仿真参数如表 3 所示。采用 Matlab6.5 建立模糊控制器仿真模型并将其嵌入 ADVISOR 中用于控制调节动力系统能量分配。在 UDDS 驱动循环路况下优化所得到的 FLC 隶属度函数如图 4 所示。

表 3 PHEV 仿真模型参数  
Tab. 3 PHEV components models and specifications

部件	参数	数值
整车	整车质量 $m_g/\text{kg}$	1 593
	负载质量 $m_l/\text{kg}$	136
	迎风面积 $A_f/\text{m}^2$	2.17
	风阻系数 $C_D$	0.3
	轮胎滚动半径 $r_r/\text{m}$	0.32
	滚动阻力系数 $f_r$	0.01
	主减速比	4.1
变速器	1~5 档传动比	3.36 2.52 1.85 1.36 1
	类型	汽油发动机
发动机	最大功率/kW	47
电机	类型	交流永磁同步电机
	最大功率/kW	48
电池	类型	NiMH
	容量/Ah	22
	额定电压	244

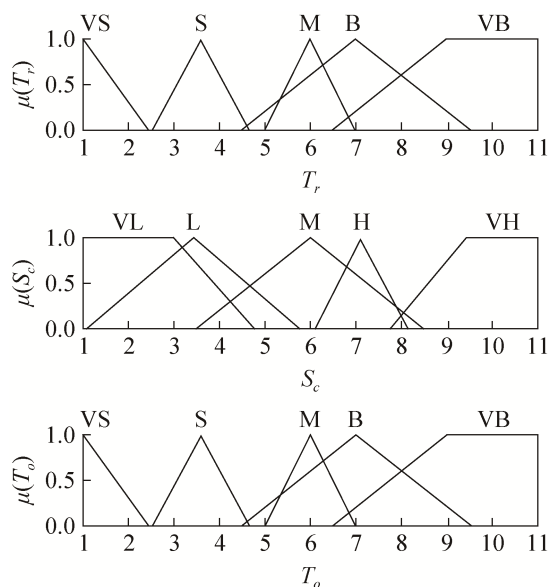


图4 优化后的模糊输入、输出隶属度函数  
Fig. 4 Input and output membership functions of the optimized FLC

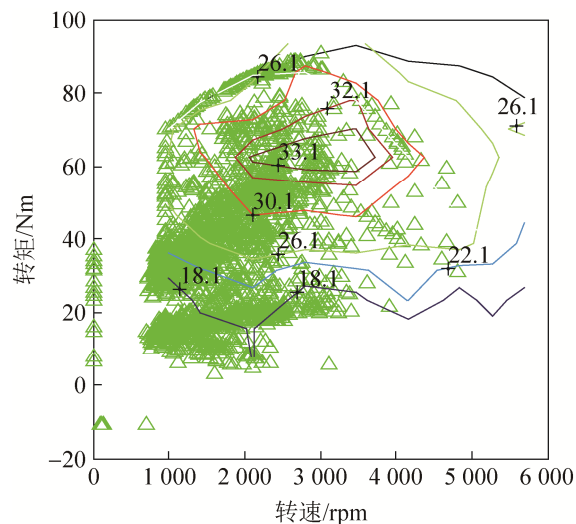
将优化后的模糊控制器(PSO\_FLC)应用于模糊能量管理策略中,在 ADVISOR 中对 UDDS 行驶工况进行仿真研究,并与未优化的模糊控制器(FLC)的仿真结果进行比较。表4为仿真车辆采用上述两种能量管理策略得到的百公里油耗、废气排放以及相应的归一化目标函数值。从中可以看出,基于粒子群优化的模糊能量管理策略将百公里油耗降低了9.6%,HC排放减少6.1%,NO<sub>x</sub>排放相近,CO排放增加11.1%,归一化后的目标值减少5.3%。

表4 UDDS 工况下的油耗和废气排放比较  
Tab. 4 Comparison of oil consumption and exhaust gas emission over UDDS cycle

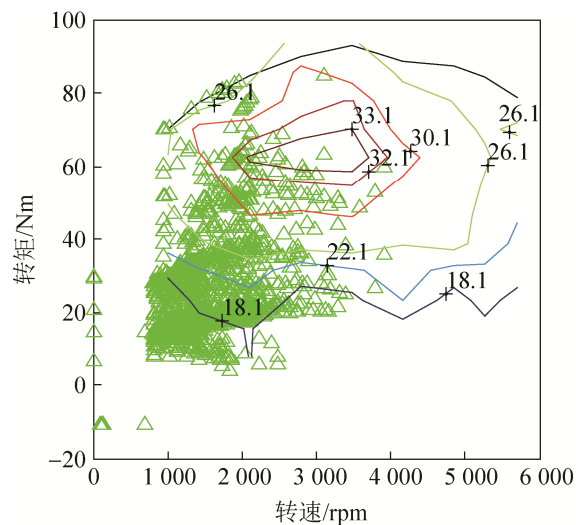
控制器类型	FLC	PSO_FLC
FC/L/100 km	5.2	4.7
HC/g/km	0.163	0.153
CO/g/km	0.565	0.628
NO <sub>x</sub> /g/km	0.103	0.102
Objective	2.794 0	2.647 1

图5给出了仿真车辆在UDDS工况下分别采用优化的模糊控制器(PSO\_FLC)和模糊控制器(FLC)时发动机工作点在效率曲线图上的分布,从图中可以看出,采用 PSO\_FLC 车辆的发动机工作点多分布于效率曲线 18.1~32.1 间,相对处于高效

区的较多,而采用 FLC 的发动机工作点多处于效率曲线 18.1 周围,这说明 PSO\_FLC 通过合理分配发动机和电机输出转矩可以更有效地改善 PHEV 发动机的工作区域,提高发动机工作效率。



(a) PSO\_FLC



(b) FLC

图5 发动机工作点在效率曲线图上的分布  
Fig. 5 Distribution of engine working points on efficiency curve

图6给出了仿真车辆在UDDS工况下采用 PSO\_FLC 时,电池 SOC 以及发动机、电机输出转矩的变化曲线。从图中可以看出,当电池 SOC 较高时,主要由电机驱动车辆,发动机只起到辅助作用,此时虽然发动机并未工作在高效区,但由于其



输出能量很小,故整车燃油消耗及废气排放仍相对较低,在这一过程中,电池 SOC 下降较快。当 SOC 下降到较低水平时(0.4 左右),发动机输出扭矩增大,作为主要动力源驱动车辆,电机则作为辅助动力源使发动机尽可能工作在效率较高的区域,这样,使得整车油耗和排放都比较低。另外,在这一过程中,发动机输出额外转矩给电池充电,使电池 SOC 保持在一个值(0.4)附近(仅有微小波动),这样有利于保护电池,提高电池使用寿命。

最后,将 PSO\_FLC 和 FLC 分别针对不同的行驶工况进行仿真研究。表 5 为仿真车辆分别采用 PSO\_FLC 和 FLC 时在 HWFET、NEDC 和 LA92 三种工况下的燃油消耗和排放比较。从表中可以看出,与一般的模糊能量管理策略相比,基于粒子群优化的模糊能量管理策略在这三种工况下百公里油耗、HC 和 NO<sub>x</sub> 排放都比较少,虽然 CO 排放量有所增加,但是归一化后的目标值是减小的,这说明,所提出的能量管理策略也能在这三种工况下有效降低燃油消耗和废气排放。需要说明的是,如果

在能量管理策略设计要求中对 CO 排放量有严格限制的话,可以通过改变目标函数中各分量相应的权重系数来达到设计要求。

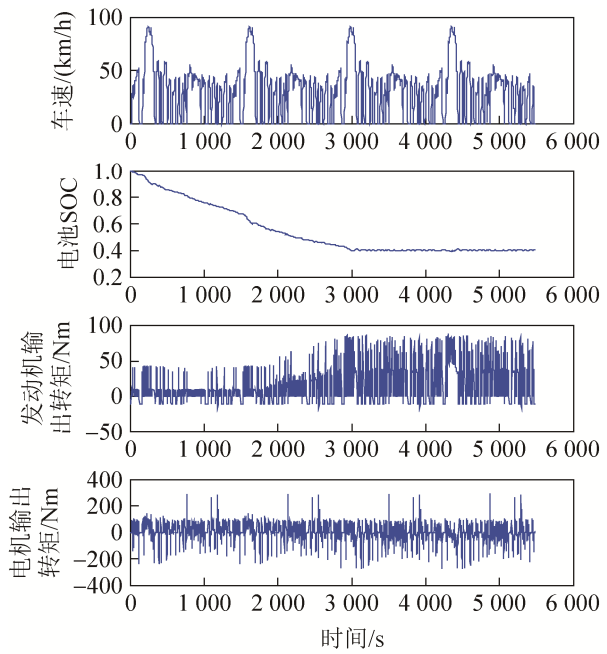


图 6 UDDS 工况下的仿真结果  
Fig. 6 Simulation results over UDDS cycle

表 5 不同工况下的燃油消耗和尾气排放比较  
Tab. 5 Comparison of fuel consumption and exhaust emission over different cycles

工况 控制器类型	HWFET		NEDC		LA92	
	FUZZY	PSO_FUZZY	FUZZY	PSO_FUZZY	FUZZY	PSO_FUZZY
FC/L/100 km	4.2	3.9	4.9	4.2	6.5	6.2
HC/g/km	0.117	0.111	0.164	0.152	0.161	0.153
CO/g/km	0.497	0.58	0.59	0.666	0.814	0.938
NO <sub>x</sub> /g/km	0.105	0.102	0.086	0.085	0.153	0.148
Objective	2.314 3	2.245 9	2.662 2	2.445 9	3.540 7	3.489 6

5 结论

针对插电式混合动力电动汽车动力系统结构复杂、建立精确的数学模型非常困难的特点以及模糊控制器设计主要依靠专家经验,带有较大主观性的缺点,本文提出一种基于粒子群优化的模糊能量管理策略。通过与未优化的模糊能量管理策略仿真比较说明,所提出的能量管理策略能在保证整车驱动性能的前提下,更有效地降低燃油消耗,减少尾气排放。

参考文献:

[1] Silva C, Ross M, Farias T. Evaluation of Energy Consumption, Emissions and Cost of Plug-In Hybrid Vehicles[J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2009, 50(7): 1635-1643.

[2] Torres J L, Gonzalez R, Gimenez A, et al. Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. A comparative study [J]. Applied Energy(S0306-2619), 2014, 113: 816-824.

[3] 李锦, 徐兆坤, 许建昌. 浅谈 PHEV 的发展现状及趋势[J]. 上海汽车, 2009(2): 10-12.

- Li Jin, Xu Zhaokun, Xu Jianchang. Discussion of the Situation and Development Trend of PHEV[J]. SHANGHAI AUTO, 2009 (2): 10-12.
- [4] Banvait H, Anwar S, Chen Y B. A Rule-Based Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)[C]//Paper Presented at the American Control Conference, St. Louis, MO, USA, 2009.
- [5] Moura S J, Fathy H K, Callaway D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2011, 19(3): 545-555.
- [6] 张松, 吴光强, 郑松林. 插电式混合动力汽车能量管理策略多目标优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 99-103, 108.
- Zhang Song, Wu Guangqiang, Zheng Songlin. Multi-objective Optimization of Energy Management Strategy of Plug-in Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 99-103, 108.
- [7] 张博, 李君, 高莹, 等. Plug-in 混合动力汽车能量管理策略优化设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 20-25.
- Zhang Bo, Li Jun, Gao Ying, et al. Optimization of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Management Control Strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for AGRICULTURAL Machinery, 2009, 40(9): 20-25.
- [8] 付主木, 王聪慧, 普杰信. PHEV 模糊控制能量管理策略建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(6): 50-54.
- Fu Zhumu, Wang Conghui, Pu Jiexin. Modeling and Simulation of Fuzzy Control Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(6): 50-54.
- [9] Bayindir K Ç, Gözükcük M A, Teke A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units [J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2011, 52(2): 1305-1313.

(上接第 241 页)

- [11] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- Zhang W L, Ming Q, Lai X K. Application of Energy Storage Technologies in Power Grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [12] Masaud T M, Keun L, Sen P K. An overview of energy storage technologies in electric power systems: what is the future[C]// proceedings of the North American Power Symposium (NAPS). Arlington, Texas, USA: IEEE, 2010: 26-28.
- [13] Bludszuweit H, Dominguez-Navarro J A. A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty [J]. IEEE Trans. on Power Systems (S0885-8950), 2011, 26(3): 1651-1658.
- [14] Opathella C, Venkatesh B. Managing uncertainty of wind energy with wind generators cooperative [J]. IEEE Trans. on Power Systems (S0885-8950), 2013, 28(3): 2918-2928.
- [15] 江知瀚, 陈金富. 计及不确定性和多投资主体需求指标的分布式电源优化配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 34-42.
- Jiang Z H, Chen J F. Optimal Distributed Generator Allocation Method Considering Uncertainties and Requirements of Different Investment Entities[J]. Proceedings of the Csee, 2013, 33(31): 34-42.
- [16] 肖定奎, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 1569-1576.
- Xiao D Y, Wang C M, Zeng P L, et al. A Survey on Power System Flexibility and Its Evaluations[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 1569-1576.
- [17] GB/T 19963-2011, 风电场接入电力系统技术规定[S].
- [18] Zimmerman R D, Murillo-Sanchez C E, Gan D Q. MATPOWER [EB/OL]. [2016-03-16]. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>