

插电式混合动力汽车能量管理策略多目标优化

张 松¹, 吴光强^{1,2}, 郑松林³

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 东京大学 生产技术研究所, 东京 153-8505;
3. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 能量管理策略与插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicles, PHEV)的燃油消耗和尾气排放密切相关。在开发的 PHEV 能量管理策略基础上, 建立整车仿真模型。利用自适应惯性因子对基本粒子群算法进行改进。为克服单一优化算法的固有缺陷, 将改进粒子群算法和遗传算法组成混合优化算法, 并将该混合算法应用于 PHEV 能量管理策略的多目标优化。优化结果表明, 该算法能有效跳出局部最优, 其寻优能力明显高于基本粒子群算法和遗传算法, 优化后的 PHEV 油耗和尾气排放相对于优化前减少近 30%。

关键词: 能量管理策略; 混合动力汽车; 粒子群优化; 遗传算法

中图分类号: TP 13; U 469

文献标识码: A

Multi-objective Optimization of Energy Management Strategy of Plug-in Hybrid Electric Vehicle

ZHANG Song¹, WU Guangqiang^{1,2}, ZHENG Songlin³

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan; 3. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Energy management strategy is related to fuel consumption and exhaust emissions of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV). Vehicle simulation model is established on the basis of energy management strategy developed in this paper. A hybrid optimization algorithm is proposed to overcome the inherent defects in single optimization algorithm by combining the improved particle swarm algorithm and genetic algorithm (GA). The hybrid optimization algorithm is applied to the multi-optimization of energy management strategy of PHEV. Optimization results show that the hybrid

optimization algorithm can avoid falling into local optimum and its search capability is much better than simple particle swarm optimization (PSO) and GA. The optimized fuel consumption and the exhaust emissions reduce around 30%.

Key words: energy management strategy; hybrid electric vehicle; particle swarm optimization (PSO); genetic algorithm

目前, 插电式混合动力汽车(PHEV)被认为是解决能源危机和汽车排放污染的最有潜力的新能源汽车技术, 已成为各国汽车企业及相关机构研究的热点。控制策略是 PHEV 的关键技术, 直接影响到汽车的燃油经济性、动力性和尾气排放, 因此, 研究其控制策略的多目标优化有重要的理论意义和应用价值。

近几年, 一些研究人员从不同角度对混合动力汽车能量管理策略进行了优化, HUANG Y J 等^[1]以混合动力汽车燃油经济性为优化目标, 采用瞬时优化法对能量管理策略进行优化。张博等^[2]采用 DIRECT 全局优化算法对 PHEV 能量管理控制策略进行优化设计研究。Montazeri Gh 等^[3-4]采用遗传算法对能量管理策略进行单目标优化。他们均只对整车性能的单一指标进行优化, 没有综合考虑其他性能指标。Huang B 等^[5-8]用加权求和法把能量管理策略的多目标问题转化为单目标问题, 同样采用遗传算法得到 Pareto 最优解。但遗传算法易出现早熟现象, 尤其是在适应度函数选择不当的情况下, 容易收敛于局部最优, 而不能达到全局最优, 且该算法对参数要求较高, 若变异率过大会导致丢失最优解, 而过小则会导致算法过早地收敛于局部最优点, 在进行优化之前需对该算法进行多次调试。WU J 等^[9]采用目标达成方法将多目标优化问题转化为单目标优

收稿日期: 2010-04-07

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA04Z132)

第一作者: 张 松(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为混合动力汽车控制系统。E-mail: gxuzhs@163.com

通讯作者: 吴光强(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车自动变速理论与控制技术、混合动力传动系统控制技术与仿真。E-mail: wuguangqiang@tongji.edu.cn

化问题,并利用基本粒子群优化算法对能量管理策略和系统部件参数进行优化.但基本粒子群算法也存在容易陷入局部极小解、参数依赖性强、鲁棒性差等缺陷.

针对以上能量管理策略优化中单一优化算法所存在的固有缺陷,本文通过共享种群的最优位置,将粒子群算法和遗传算法进行有机结合,有效克服优化算法早熟缺陷,在优化空间中搜索到全局最优位置.将该混合优化算法应用于 PHEV 能量管理策略,以获得最优的燃油经济性和尾气排放.

1 PHEV 的能量管理策略

本文所研究的 PHEV 由发动机、电机、双离合器自动变速器、电池等主要部件组成,其结构示意图如 1 所示,其中发动机与电机 1 的转子相连,电机 1 和电机 2 之间连有主离合器,以实现动力的耦合.其具体结构如图 1 所示.

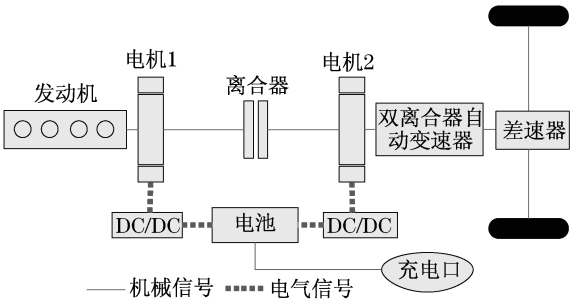


图 1 PHEV 结构图
Fig.1 PHEV configuration

该 PHEV 属于混联插电式混合动力系统,包括纯电动、串联、并联、混联驱动模式.在车辆启动时采

用电机 2 驱动,执行纯电动模式,启动完成后,当电池电量过低时采用串联驱动,发动机带动电机 1 对电池充电,同时电机 2 驱动车辆;当车辆需求功率大且电池电量充足时采用并联驱动,发动机和电机 2 共同驱动车辆,若满足不了车辆驱动需求,电机 1 输出力矩,3 个动力源共同驱动车辆;当电池需要充电且车辆需求大功率时采用混联驱动,发动机输出的力矩一部分用来驱动电机 1 对电池充电,一部分用来驱动车辆,电机 2 只用来驱动车辆;当车辆减速或制动时,发动机和电机 1 停止工作,电机 2 回收制动能量给电池充电. PHEV 的不同驱动模式下的各动力源工作状态如表 1 所示.

表 1 各动力源的工作状态表
Tab.1 Working states of power sources

工作模式	工作状态		
	发动机	电机 1	电机 2
驱动模式	纯电动	停机	输出力矩/回收制动能量
	串联	输出力矩	发电
	并联	输出力矩	发电/输出力矩
	混联	输出力矩	发电
制动模式	再生制动	停机	回收制动能量

根据表 1 中的各工作模式,选定电池电量 S 、车速和油门开度 α 为能量管理策略的控制参数,通过制定 3 个参数的门限值,可实现 4 种驱动模式之间的协调切换,详细切换条件见表 2. 表 2 中, S_{low} 是电池电量下限, S_{high} 是电池电量上限, v_{low} 是发动机启动的车速下限, v_{high} 是激活并联的速度限值, α_{on} 是激活并联的油门开度限值.

表 2 各模式切换条件
Tab.2 Conditions of shifting modes

S	$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$\alpha/\%$	纯电动	串联	并联	混联
$S_{\text{low}} < S < S_{\text{high}}$	$v < v_{\text{low}}$	无关	启动	休眠	休眠	休眠
$S_{\text{low}} < S < S_{\text{high}}$	$v_{\text{low}} < v < v_{\text{high}}$	$\alpha \leq \alpha_{\text{on}}$	启动	休眠	休眠	休眠
$S < S_{\text{low}}$	$v < v_{\text{high}}$	无关	休眠	启动	休眠	休眠
$S_{\text{low}} < S < S_{\text{high}}$	$v_{\text{low}} < v < v_{\text{high}}$	$\alpha > \alpha_{\text{on}}$	休眠	休眠	启动	休眠
$S_{\text{low}} < S < S_{\text{high}}$	$v > v_{\text{high}}$	无关	休眠	休眠	启动	休眠
$S \leq S_{\text{low}}$	$v_{\text{low}} < v < v_{\text{high}}$	$\alpha > \alpha_{\text{on}}$	休眠	休眠	休眠	启动
$S < S_{\text{low}}$	$v > v_{\text{high}}$	无关	休眠	休眠	休眠	启动

2 PHEV 的整车 Simulink 仿真模型

为验证控制策略的正确性,建立 PHEV 整车的

正向仿真模型.模型包括发动机模型、两个电机模型、电池模型、双离合器自动变速器模型、驾驶员模型、能量管理策略模型、换挡控制策略模型和循环工况模型等 10 个模块.

3 PHEV 的多目标优化模型

在保证整车动力性的前提下,PHEV 能量管理策略的参数优化对提高整车的经济型和排放尤为重要,参数优化的目标是在各控制参数约束范围内,获得整车最大的燃油经济性和最低的尾气排放.通过优化控制油门开度限值 α_{on} 、电池电量下限 S_{low} 、电池电量上限 S_{high} 、最低车速 v_{low} 、最高车速 v_{high} 5 个参数来实现油耗及 HC,CO,NO_x 3 种废气排放达到最优.该优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \min \{ & f_{fuel}(X), f_{HC}(X), f_{CO}(X), f_{NO_x}(X) \} \\ \text{s. t. } & X_i^l \leq X_i \leq X_i^h \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

式中: f_{fuel} , f_{HC} , f_{CO} 和 f_{NO_x} 分别是车辆的燃油消耗, HC, CO, NO_x 的尾气排放量; $X = [x_1, x_2, \dots, x_5]$ 是一组优化参数, x_1, x_2, \dots, x_5 分别代表 α_{on} , S_{low} , S_{high} , v_{low} , v_{high} ; X_i^l 是各优化参数的下限; X_i^h 是各优化参数的上限.为保证整车的动力性要求,选择最高车速 v_{max} (km · h⁻¹) 和百公里加速时间 T (s) 作为优化函数的约束条件,所得到的优化结果须满足动力性约束条件后才被接受.

目前多目标优化问题的转化通常采用线性加权法,先将多目标优化问题转化为单目标问题,然后采用优化算法求解该单目标^[10].但是,线性加权法存在要求解集为凸集等缺点,因此,本文采用目标规划法将多目标优化转化为单目标优化问题求解,赋予燃油消耗较高的优先因子 λ_1 ,赋予 CO, HC, NO_x 尾气排放较低的优先因子 λ_2 ,依目标规划法转化后的 PHEV 能量管理策略优化模型为

$$\begin{aligned} \min Z = & \lambda_1 \frac{f_{fuel}(X)}{F_{fuel}^*} + \lambda_2 \left(\frac{f_{HC}(X)}{F_{HC}^*} + \right. \\ & \left. \frac{f_{CO}(X)}{F_{CO}^*} + \frac{f_{NO_x}(X)}{F_{NO_x}^*} \right) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} 0.6 \leq x_1 \leq 1 \\ 0.1 \leq x_2 \leq 0.3 \\ 0.3 \leq x_3 \leq 0.6 \\ 10 \leq x_4 \leq 40 \\ 40 \leq x_5 \leq 100 \\ 180 \leq v_{max} \\ 0 < T \leq 11.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Z 为目标函数值; F_{fuel}^* , F_{HC}^* , F_{CO}^* 和 $F_{NO_x}^*$ 分别为行驶过程中燃油消耗目标值和尾气排放参考目标值.

4 混合优化算法及优化过程

4.1 改进粒子群算法

基本粒子群算法首先随机初始化为一组微粒群,确定微粒的初始位置和初始速度,通过对每个粒子的适应度来评价各微粒的目标函数,确定 t 时刻每个微粒所经过的最优解位置和群体所处的最优解位置,再按如下公式分别更新各微粒的速度和位置:

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j} - \varphi_{i,j}(t)] + c_2r_2[p_{g,j} - \varphi_{i,j}(t)] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_{i,j}(t+1) &= \phi_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), \\ i &= 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

式中: v 为粒子的速度; w 为惯性因子; c_1, c_2 为加速因子; r_1 和 r_2 为 0~1 之间均匀分布的随机数; φ 为粒子的位置,由能量管理策略中的 5 个控制变量 x_i 组成; p_i 为粒子经过的最优解位置; p_g 为粒子群体的最优解位置.

粒子群算法控制参数的确定对有效找到问题的最优解至关重要,为平衡算法的全局搜索能力和局部改良能力,本文采用一种非线性动态自适应惯性因子,使其随粒子的目标值动态变化.自适应惯性因子的计算式如下:

$$w = \begin{cases} w_{min} + \frac{(w_{max} - w_{min})[f(\varphi) - f_{min}(\varphi)]}{f_{avg}(\varphi) - f_{min}(\varphi)}, & f(\varphi) < f_{avg}(\varphi) \\ w_{max}, & f(\varphi) \geq f_{avg}(\varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: w_{min} 和 w_{max} 分别为 w 的最大值和最小值; $f(\varphi)$ 为粒子当前的目标值; $f_{avg}(\varphi)$ 和 $f_{min}(\varphi)$ 分别为当前粒子群所有粒子的平均值和最小目标值.采用该自适应惯性因子能够使得粒子位置在接近最优位置时,以较小惯性因子移动,在远离最优位置时,以较大惯性因子移动,这样既实现了对较优粒子的保护,又能使较差粒子更快地趋向最优.

4.2 混合改进粒子群算法

每一种单一优化算法都有其固有缺陷,粒子群算法也是如此.将多种优化算法相结合生成的混和算法,其性能优于单一模式算法,可使得粒子在解空间内多个区域进行搜索,一定程度上克服了局部最优缺陷^[11].由于遗传算法具有快速随机的搜索能力,鲁棒性好,且具有可扩展性,容易与其他算法结合,因此本文将改进粒子群算法和遗传算法组合成混合改进粒子群算法.该混合算法的主要计算步骤如下:

(1) 初始化种群,即给定种群规模 N ,在定义范围内随机给定初始粒子的速度与位置.

(2) 按粒子的适应度值对粒子进行排序,较优的一半粒子进行改进粒子群优化,其余粒子进行遗传算法优化.

(3) 判断算法停止准则是否满足(本文以迭代 60 次为停止准则),如满足,输出问题的 Pareto 最优解,算法停止;否则执行(2).

(4) 取两种优化算法的较优值.

该混合算法的具体流程图如图 2 所示.

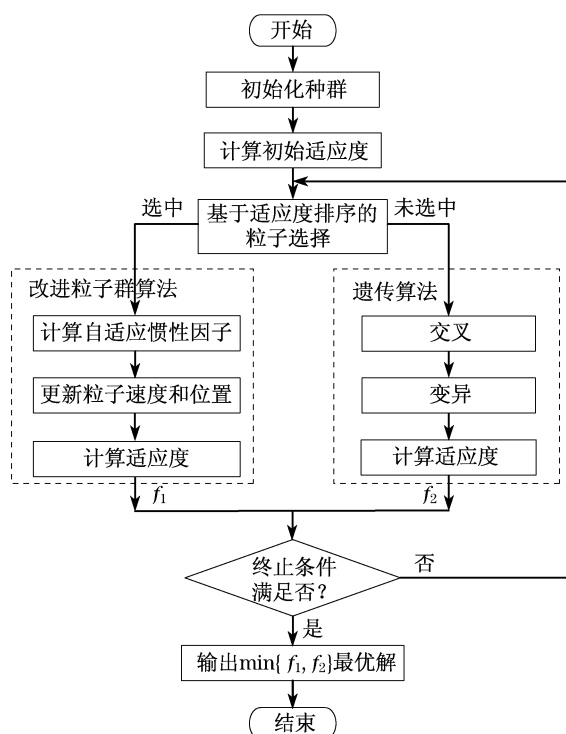


图 2 混合改进粒子群算法流程图

Fig.2 Flowchart of hybrid IPSO

5 仿真结果

为验证所建立的 PHEV 整车仿真模型和能量管理策略的正确性,依据新欧洲行驶工况 (new European driving cycle, NEDC),设定初始 S 为 0.5, S_{low} 为 0.2, S_{high} 为 0.5, v_{low} 为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, v_{high} 为 $55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, α_{on} 为 0.85. 其运行结果如图 3 所示. 从图 3a 中可以看出, PHEV 车辆能够准确跟踪循环工况; 从图 3b 中可以看出, 运行结果能够反映能量管理策略中的各模式切换条件(图中, 0 代表模式关闭, 1 代表模式打开), 即在 S 低于 0.2 时, 以串联模式运行, 车速高于 $55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 则以混联模式运行. 从图 3c 中电池电量 S 变化可以看出, PHEV 能够准确实

现串联充电和制动能量回收. 因此, 可利用该 PHEV 整车模型同优化程序进行联合仿真.

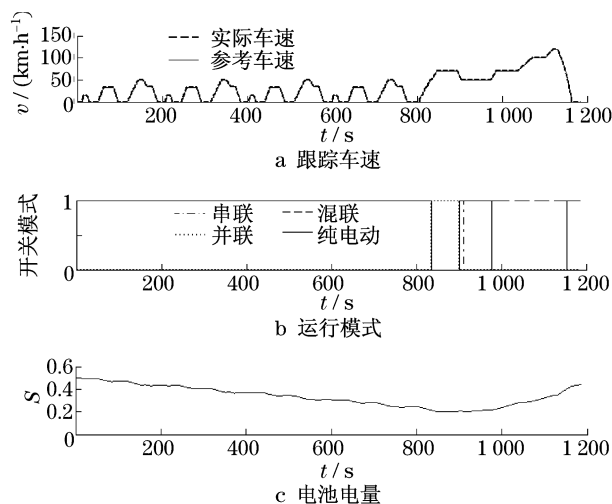


图 3 NEDC 仿真运行结果

Fig.3 Simulation results according to NEDC

为验证混合改进粒子群算法的优势,编写混合改进粒子群优化算法程序,将算法程序与 PHEV 整车仿真模型进行集成,以无缝运行方式实现数据交互,通过优化能量管理策略的设计参数,得到最优的燃油消耗和尾气排放. 为保证每次迭代后的优化结果都能准确跟踪循环工况,对运行过程进行速度偏差监控,若偏差超过 2 km 则判为跟踪失效并剔除该优化结果. 根据 NEDC 循环工况进行验证,由于燃油经济性相对于尾气排放更为重要,故设定 λ_1 和 λ_2 分别为 1.0, 0.5. 根据目前市场销售的混合动力汽车排放和燃油经济性指标,设定该工况下的参考目标 F_{fuel}^* , F_{HC}^* , F_{CO}^* 和 $F_{\text{NO}_x}^*$ 分别为 $4 \text{ L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$, $0.3 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, $1.05 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, $0.1 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, 分别采用基本粒子群算法、遗传算法和混合改进粒子群算法对 PHEV 进行多目标优化,均迭代 60 次后,得到图 4 中的适应度变化曲线. 由图 4 可以看出,混合改进粒子

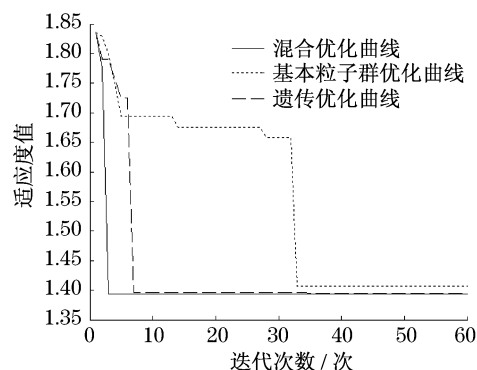


图 4 3 种算法的优化曲线图

Fig.4 Optimization curves of three algorithms

群算法收敛速度明显更快,且能跳出局部最优解,得到全局 Pareto 最优解 1.393 3,可见,混合改进粒子群算法的寻优能力高于基本粒子群算法和遗传算法.

利用混合改进粒子群算法对 PHEV 能量管理策略的设计参数进行多目标优化,设定初始 S 为 0.8,迭代 60 次后得到优化结果,见表 3.

表 3 优化前后的变量					
Tab.3 Variables of pre-and post-optimization					
优化 前后	α_{on}	S_{low}	S_{high}	$v_{low}/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$v_{high}/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
优化前	0.85	0.30	0.50	20	55
优化后	0.91	0.27	0.47	35	90

为验证优化结果的正确性,将优化结果嵌入模型并进行仿真,从图 5 的仿真结果中可以看出,优化结果能够准确跟踪循环工况.

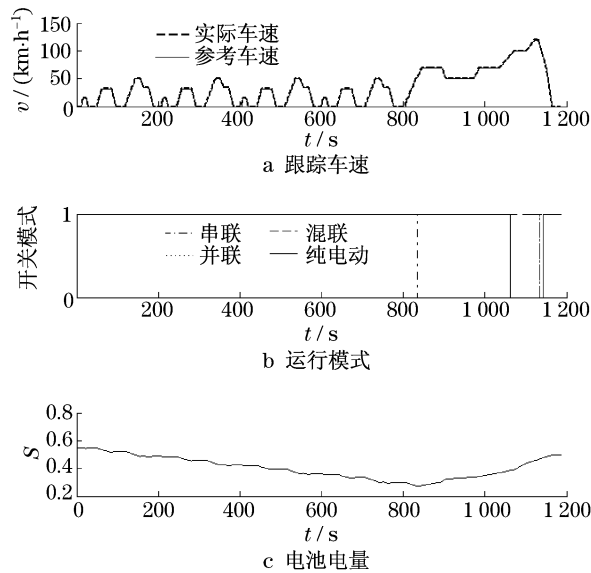


图 5 优化后的 NEDC 仿真结果
Fig.5 Simulation results of the optimized NEDC

图 6 给出了优化前和优化后的油耗和尾气排放的对比图. 燃油消耗量由优化前的 $6.26 \text{ L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$ 减少到 $4.03 \text{ L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$,CO 的排放量由优化前的 $1.15 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 减少到 $0.67 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,HC 的排放量由优化前的 $0.38 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 减少到 $0.24 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,CO 的排放量由优化前的 $0.16 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 减少到 $0.11 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,燃油消耗量和 CO,HC,NO_x 的排放量降幅均在 30%左右.

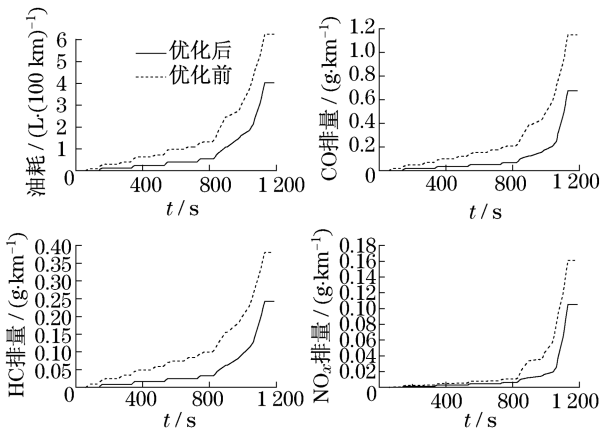


图 6 优化前后的结果对比图
Fig.6 Result comparison of pre-and post optimization

6 结论

- (1) 开发 PHEV 能量管理策略,建立包括发动机、电机、双离合自动变速器、驾驶员模型等 10 个模块的整车 Simulink 仿真模型,仿真结果表明,该模型能准确跟踪循环工况,能量管理策略准确合理.
- (2) 建立了以最低 PHEV 燃油消耗和尾气排放为优化目标,以能量管理策略控制参数为优化变量的 PHEV 能量管理策略多目标优化数学模型,并利用目标规划法把多目标转化为单目标.
- (3) 采用自适应惯性因子对常规粒子群算法进行改进,将其与遗传优化算法组合成混合改进粒子群优化算法,优化结果表明,该混合算法的寻优能力明显高于基本粒子群算法和遗传算法.
- (4) 把混合改进粒子群算法应用于 PHEV 能量管理策略优化,优化后的油耗和尾气排放相对于优化前降幅均在 30%左右.

参考文献:

[1] Huang Y J, Yin C L, Zhang J W. Design of an energy management strategy for parallel hybrid electric vehicles using a logic threshold and instantaneous optimization method[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10 (4):513.

[2] 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.

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.

(下转第 1044 页)