

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.06.006

基于多层次参数扫描优化算法的PHEV控制策略

李高¹, 王欣¹, 裴亚伟², 秦斌¹, 刘邦¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 南车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为了减少汽车尾气排放, 提出了利用多层次参数扫描优化算法对并联式混合动力汽车的控制参数进行优化。优化后的参数在 ADVISOR 仿真软件上进行仿真实验, 将其仿真结果和参数优化前的试验结果进行比较。在美国循环工况 CYC_UDDS 条件下, 仿真分析结果表明: 汽车尾气排放中, HC 为 0.520 g/mile, CO 为 2.361 g/mile, NO_x 为 0.407 g/mile, 和优化前相比, 有明显降低, 这说明多层次参数扫描优化算法的优越性。

关键词: PHEV; 控制策略; 多层次参数扫描算法; 控制参数

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)06-0026-05

PHEV Control Strategy Based on Multi-Level Scanning Parameters Optimization Algorithm

Li Gao¹, Wang Xin¹, Pei Yawei², Qin Bin¹, Liu Bang¹

(1. School of Information Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. CSR Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412001, China)

Abstract: In order to reduce automobile exhaust emissions, proposes the control parameters optimization of parallel hybrid electric vehicle (PHEV) by means of multi-level scanning parameters optimization algorithm. The optimized parameters are simulated through ADVISOR software, and the simulated results and the results before the parameters optimization are compared. Under the CYC_UDDS condition, the simulated results show that HC is 0.520 g/mile, CO is 2.361 g/mile and NO_x is 0.407 g/mile in automobile exhaust emissions, which are obviously low compared with the results before the parameters optimization. The superiority of multi-level scanning parameters optimization algorithm is proved.

Keywords: PHEV; control strategy; multi-level parametric scanning algorithm; control parameters

0 引言

传统的内燃机汽车动力性能好, 使用也比较方便, 但是其主要的问题是对环境污染非常严重。与传统汽车相比, 纯电动汽车 (electric vehicle, EV) 对环境的影响很小, 但是电池技术的瓶颈还没有得到

解决, 因此, 其性价比不高。目前, 混合动力汽车 (hybrid electric vehicle, HEV) 能够比较有效地解决传统内燃机汽车及纯电动汽车所面临的一些问题^[1]。随着石油资源越来越紧张, 环境污染越来越严重, 混合动力汽车作为新型交通工具具有效率高、尾气排放量小等优点, 所以发展混合动力汽车显得

收稿日期: 2013-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61074067, 21106036), 湖南省自然科学基金资助项目 (13JJ1038), 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (11B038)

作者简介: 李高 (1985-), 男, 河南驻马店人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为混合动力汽车能量管理控制策略, E-mail: ligao2@163.com

尤为迫切。按照发动机、电动机以及储能装置的不同结构进行划分,混合动力汽车可分为3种主要类型:串联式混合动力汽车、并联式混合动力汽车、混联式混合动力汽车^[2-3]。本文对并联式混合动力汽车(parallel hybrid electric vehicle, PHEV)进行了研究,优化其能量管理控制策略,即约束条件选择混合动力汽车的加速性能和爬坡性能等指标,对控制参数进行修改,达到燃油经济性最佳的目的。由于混合动力汽车的能量管理系统是一种复杂的非线性结构,因此,本文以ADVISOR软件^[4]中的多层次参数扫描算法为基础,对PHEV的能量管理系统进行控制策略优化,并对其进行仿真分析。

1 PHEV 整车模型及其参数设置

图1为PHEV的2个牵引机连接方式。这2个牵

引机在向汽车提供动力时,可单独提供,也可两者同时提供,这样能保证能量的合理分配^[5]。

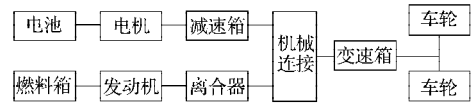


图1 PHEV结构框图

Fig. 1 PHEV structure diagram

利用汽车仿真软件ADVISOR建立PHEV整车模型。仿真参数设置见表1,模型见图2。

表1 混合动力汽车仿真的主要参数

Table 1 The main parameters of PHEV simulation

参数	数值	参数	数值
质量/kg	1 340	发动机最大功率/kW	41
迎风面积/m ²	2.1	电池组额定容量/Ah	18
电机最大功率/kW	20	电池组额定电压/V	336
发动机排量/L	2.0	电机类型	永磁同步电机

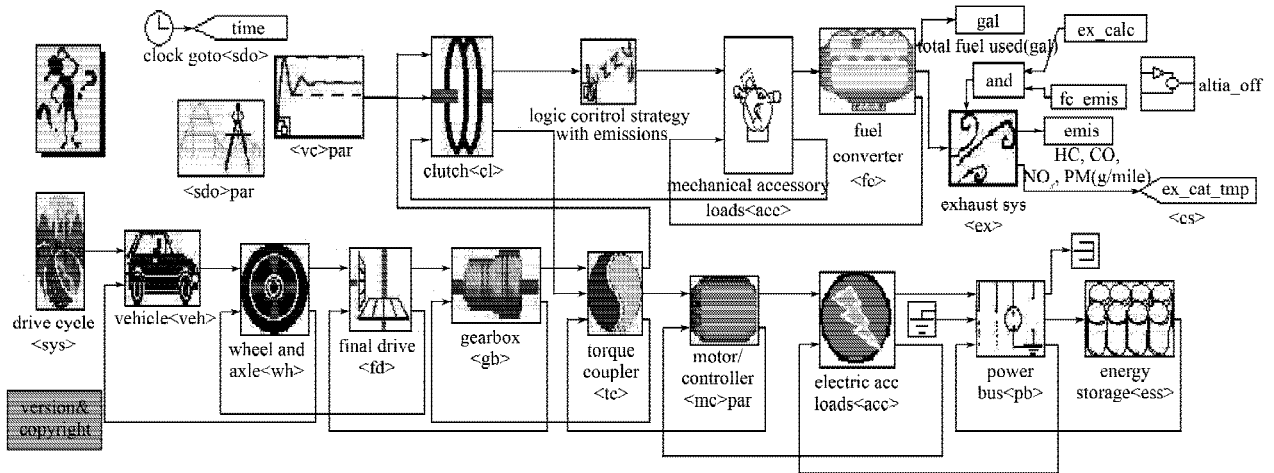


图2 PHEV仿真模型

Fig. 2 PHEV simulation model

2 多层次参数扫描优化算法

2.1 多层次参数扫描优化算法原理

以Matlab为基础的ADVISOR软件有多种优化算法,且ADVISOR仿真软件还可以和其他智能优化算法通过接口相结合,对部分控制参数进行设计,然后仿真实现^[6-7]。多层次参数扫描优化算法^[7](multi-level parametric sweeps, MLPS)是ADVISOR仿真软件自身携带的一种优化算法,其采用两阶段全范围搜索方法,从而达到控制优化参数的目的。此算法的基本原理如下。

非线性问题最优化的约束条件为:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{X}), \\ \text{s.t. } v_i(\mathbf{X}) > 0, i = 1, 2, \dots, n_o. \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{X} 表示参数变量的向量; $F(\mathbf{X})$ 表示目标函数;

$v_i(\mathbf{X})$ 表示目标函数的约束条件。

选择一个初始化空间,保证极小点在这个空间内。在该初始化空间中,通过式(2)判断每一个探测点的可行性。如果探测点可行,则选择一个合适的步长因子和搜索方向,继续寻找下一个探测点;反之,需要将步长因子减小,使新的探测点落在允许区间内。通过逐步缩小区间,利用反复插值方法,得出符合精度的极小点和步长因子,不停地循环迭代,直到满足精度的最优点被找到。在整个搜索过程中,既要保证探测点不能超出搜索空间,又要使目标函数的数值减少比较多,还要满足可行性的下降条件,即:

$$\begin{cases} g_u(\mathbf{X}^{k+1}) \leq 0, u = 1, 2, \dots, p; \\ h_v(\mathbf{X}^{k+1}) = 0, v = 1, 2, \dots, m; \\ F(\mathbf{X}^{k+1}) - F(\mathbf{X}^k) < 0, k = 0, 1, \dots, q. \end{cases} \quad (2)$$

式中： $g_u(\mathbf{X}^{k+1})$ 表示搜索点的不等式约束集合； $F(\mathbf{X}^{k+1})$ 表示目标函数下一个搜索点； $h_v(\mathbf{X}^{k+1})$ 表示搜索点的等式约束集合。

迭代的具体步骤^[8]为：

1) 设置初始条件。设 $k=0$, \mathbf{X}^0 表示初始内点, ε 表示收敛精度, δ 表示约束容限。

2) 确定约束集合。 $J = \{u | -\delta \leq g_u(\mathbf{X}^{k+1}) \leq \delta\}$, $u=1, 2, \dots, p$ 。

3) 搜索公式。 $\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{X}^k + \alpha_k \mathbf{S}^k$, 其中, α_k 表示步长因子, \mathbf{S}^k 表示搜索方向。

4) 判断收敛性。当点 \mathbf{X}^k 在可行区间内, 并且约束集合 J 是空集, 如果 $|\Delta F(\mathbf{X}^k)| \leq \varepsilon$, 则令 $\mathbf{X}^* = \mathbf{X}^k$, $F^* = F(\mathbf{X}^k)$, 这种情况下的解即为最优解; 否则, $\mathbf{S}^k = -\Delta F(\mathbf{X}^k)$, 转到步骤 7。如果约束集合 J 不是空集, 转到步骤 5。

5) 当 \mathbf{X}^k 符合库恩-塔克判断条件时, 令 $\mathbf{X}^* = \mathbf{X}^k$, $F^* = F(\mathbf{X}^k)$, 其解即为最优解, 停止循环。否则, 转到

步骤 6。

6) 将问题转变为求解线性规划的问题

$$\begin{cases} \min [\Delta F(\mathbf{X}^k)]^T \mathbf{S}, \\ [\Delta g_u(\mathbf{X}^k)]^T \leq 0, \\ S_j - 1 \leq 0, \\ -1 - S_j \leq 0, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (3)$$

式中： \mathbf{S} 为方向向量； S_j 是第 j 次搜索方向。求出解 \mathbf{S}^* , 并令 $\mathbf{S}^k = \mathbf{S}^*$ 。

7) 在 \mathbf{S}^k 方向进行约束搜索, 得到 \mathbf{X}^{k+1} , 然后令 $k=k+1$, 并转到步骤 2。

2.2 参数设置

控制策略优化的目标是使混合动力汽车的燃油经济性最佳。利用 Matlab 软件设置参数 cs_hi_soc 和 cs_lo_soc , 故在 ADVISOR 仿真软件中使用多层次参数扫描优化算法时, 此参数不会再被优化。在 ADVISOR 软件中, 仅对 6 个变量进行优化, 见表 2^[9]。

表 2 变量优化设计

Table 2 Variables optimization design

变量名	描述	上限	下限
cs_change_trq	发动机充电转矩 / (N · m)	10	165.36
cs_min_trq_frac	发动机最小转矩分量	0.05	1
cs_off_trq_frac	发动机关机最小转矩限值	0.05	1
cs_electric_launch_spd_lo	车辆纯电动车速下限 / (m · s ⁻¹)	0	15
cs_electric_launch_spd_hi	车辆纯电动车速上限 / (m · s ⁻¹)	10	30
cs_change_deplete_bool	电量策略类型: 布尔类型, 1 表示使用耗尽型策略; 0 表示使用持续型策略	0	1

利用 ADVISOR 仿真软件对本汽车能量管理控制策略优化算法进行仿真时, 选择美国 CYC_UDDS 循环工况。该循环工况下, 汽车行驶路程为 20 km, 仿真时间为 1 369 s, 最大速度是 91.65 km/h, 循环工况如图 3 所示。

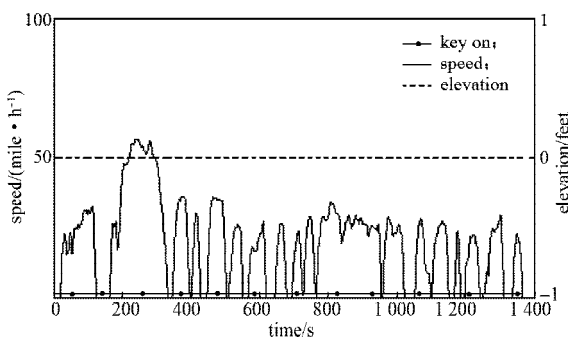


图 3 CYC_UDDS 循环工况图

Fig. 3 CYC_UDDS cycle graph

在该循环工况的设置面板, 点击 “Optimize cs- vars” 按钮, 进入多层次参数扫描优化算法界面, 如图 4 所示; 然后选择 “Optimize using matlab” 选项,

cs_hi_soc 和 cs_lo_soc 参数是不能被优化的, 根据表 2 设置其他优化控制参数的初始值、最高值以及最低值, 初始值要在最低值和最高值之间, 否则程序运行时, 会出错。一般情况下, 仿真耗时为 92.5 min。

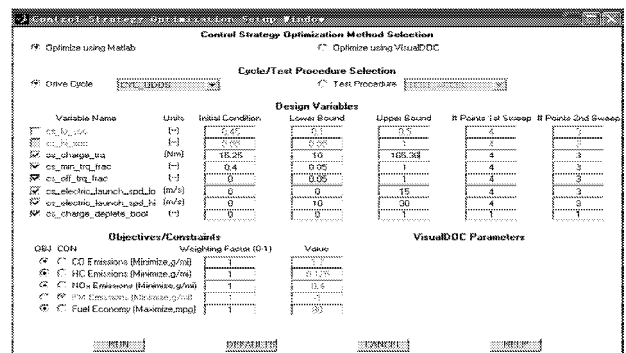


图 4 MLPS 界面

Fig. 4 Interface of MLPS

3 仿真优化结果分析

对 PHEV 进行多层次参数扫描算法优化后的界面如图 5 所示。由图可以看出, 多层次参数扫描优

化算法只优化了6个控制参数,其中cs_min_trq_frac和cs_change_deplete_bool的运行图分别见图6和图7,由于篇幅所限,其他参数的运行图就不再一一列出。

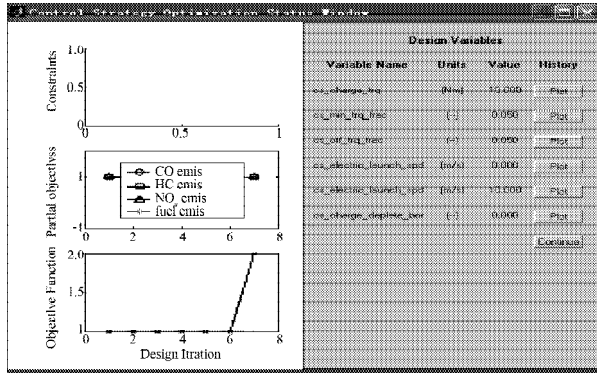


图5 仿真完成后的结果图
Fig. 5 The simulation results

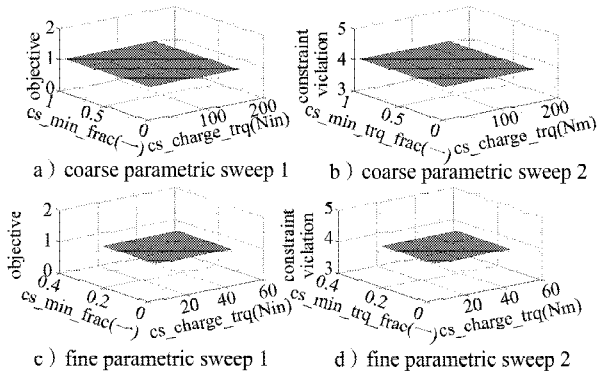


图6 cs_min_trq_frac运行界面图

Fig. 6 Operation interface diagram of cs_min_trq_frac

由图6可以看出,优化后的最小转矩系数要比优化前小,并且运行更平稳,PHEV性能更优。发动机的最小转矩等于最小转矩系数乘以汽车当前转速下的最大转矩,因此,该系数越小,汽车性能越好。

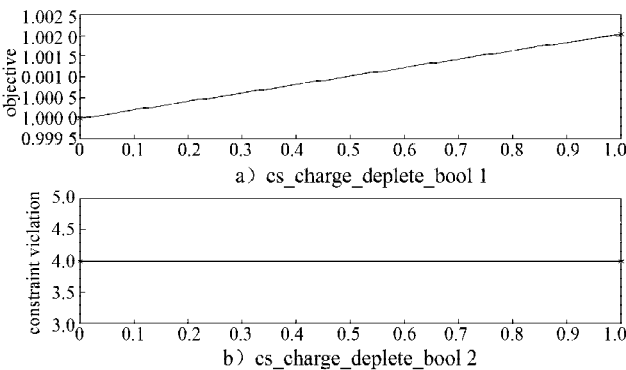


图7 cs_change_deplete_bool运行界面图

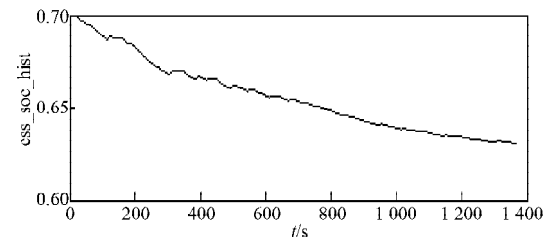
Fig. 7 Operation interface diagram of cs_change_deplete_bool

cs_change_deplete_bool值为0,表示汽车处于发动机工作状态;其值为1,表示汽车处于减速或低速状态,可关闭发动机,让汽车处于电动机运行状态,

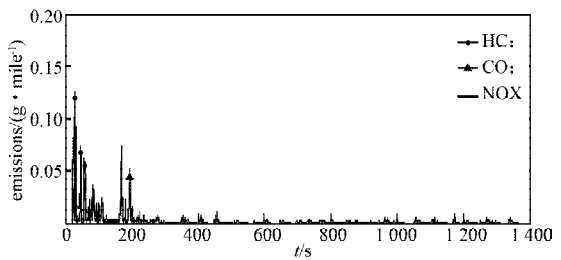
这样可以达到节能减排的目的。

由图7可以看出,优化后的cs_change_deplete_bool值在1附近。刚开始,汽车的发动机处于工作状态;随着仿真地进行,当汽车处于减速或低速运行时,关闭发动机,从而达到节约能源和减少尾气排放量的目的。

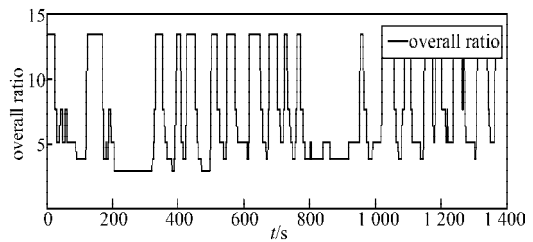
并联式混合动力汽车在CYC_UDDS循环工况下进行仿真试验,它的荷电状态(state of charge, SOC)、尾气排放(emissions)、整比(overall ratio)运行图如图8所示。



a) 荷电状态SOC



b) 尾气排放



c) 整比

图8 仿真结果图

Fig. 8 The results of simulation

由图8a和c可以看出,电池荷电状态的初始值为0.7,经过多层次参数扫描算法优化之后,在前半段时间内其下降比较明显,之后趋于平稳。这说明经过多层次参数扫描算法优化后,如果电池组的SOC当前值比较高,汽车需要的动能主要靠电动机提供,发动机提供的动能比较少;如果电池组的SOC当前值比较低,汽车需要的动能主要靠发动机提供,电动机提供的动能比较少。由图b可以看出,汽车在刚启动时,HC,CO,NO_x废气的排放量都较高,仿真运行到200s后,废气的排放量有明显地降低。

并联式混合动力汽车在CYC_UDDS循环工况下,

优化前后的指标对比结果见表3。

表3 优化前后的指标结果

Table 3 Indicators result before and after optimization

评价指标	算法优化前	算法优化后
HC/(g/mile)	0.587	0.520
CO/(g/mile)	2.417	2.361
NO _x /(g/mile)	0.483	0.407
能量回收率/%	35.1	40.4

由表3可以看出,优化后的算法能够满足汽车行驶性能的同时,提高汽车的能量回收率,且尾气排放量有显著降低。HC的排放量由优化前的0.587 g/mile减少至0.520 g/mile,CO的排放量由优化前的2.417 g/mile减少至2.361 g/mile,NO_x的排放量由优化前的0.483 g/mile减少至0.407 g/mile。

4 结语

本文以并联式混合动力汽车为基础,采用多层次参数扫描优化算法优化汽车的控制参数,然后利用仿真软件ADVISOR对整车进行仿真。从仿真结果可以看出,经优化后的汽车能满足汽车行驶性能,且尾气排放量都比优化前有所减少,其中,HC减少了0.067 g/mile,CO减少了0.056 g/mile,NO_x减少了0.076 g/mile。本文方法对减少汽车尾气排放量有一定的指导意义。但是本文只是把控制参数优化前和优化后的仿真结果相比较,并没有和其他智能优化算法进行比较,所以,下一步的工作重点是将本优化算法和其他智能优化算法进行分析和比较。

参考文献:

- [1] 吴克刚.混合动力汽车燃油经济性研究[J].车用发动机,2004(3):19-22.
Wu Kegang. Fuel Economy for Hybrid Electric Vehicle [J]. Vehicle Engine, 2004(3): 19-22.
- [2] 谈丽华.基于ADVISOR的混合动力汽车再生制动控制策略仿真研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
Tan Lihua. ADVISOR-Based Control Strategy Study on Regenerative Braking System of Hybrid Electric Vehicle [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [3] Ehsani M, Gao Yimin, Gay S E, et al. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design[M]. New York: CRC Press, 2005: 244-308.
- [4] 陈可亮.并联式混合动力电动汽车能量管理系统智能控制策略研究[D].长沙:湖南大学,2011.
Chen Keliang. Study on Intelligent Control Strategy of Energy Management System for Parallel Hybrid Electric Vehicle [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [5] 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,2012,6(24):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, 6(24): 50-54.
- [6] Lemmon M D, He K X, Markovsky I. Supervisory Hybrid Systems[J]. IEEE Control Systems, 1999, 19(4): 42-55.
- [7] Allam M, Alla H. Modelling Production Systems by Hybrid Automata and Hybrid Petri Nets[J]. Journal of Control of Industrial Systems, Belfort, France, 1997, 17(7): 374-383.
- [8] Alla H, David R. Continuous and Hybrid Petri Nets[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 1998, 8(1): 159-188.
- [9] Delprat S, Guerra T M, Paganelli G, et al. Control Strategy Optimization for an Hybrid Parallel Powertrain [C]//Proceedings of the 2001 American Control Conference. Arlington: IEEE, 2001: 1315-1320.

(责任编辑:邓彬)