

DOI: 10.3901/JME.2009.02.036

基于多目标遗传算法的混合动力电动汽车 控制策略优化*

张 昕 宋建峰 田 毅 张 欣

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 混合动力电动汽车是一个高度复杂的非线性系统, 并且影响其控制策略的参数较多, 要对这样的系统进行优化, 常规的优化算法显得无能为力, 模型的精确程度也直接影响了选取参数的可靠性。应用汽车动力性、排放性高级模拟分析软件 AVL CRUISE, 联合 Matlab/Simulink 软件, 建立混合动力电动城市客车整车动态性能仿真分析模型, 以百公里油耗和排放指标为优化目标, 运用多目标遗传优化算法, 针对欧洲、日本及中国的城市公交循环工况对混合动力系统工作模式的选择和能量流的分配进行全局优化, 减少了运算时间, 获得一组可靠的可行解, 精确地确定出控制逻辑参数。该解集在很大程度上同时提高了原车的燃料经济性和排放性能, 并且为混合电动车的设计和控制在提供了一个适宜的选择范围, 设计者可以按不同的要求进行不同的方案选择。

关键词: 混合动力电动汽车 控制策略优化 多目标遗传算法

中图分类号: U469.72

Multi-objective Optimization of Hybrid Electric Vehicle Control Strategy with Genetic Algorithm

ZHANG Xin SONG Jianfeng TIAN Yi ZHANG Xin

(School of Mechanical Electric and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Hybrid electric vehicle(HEV) is a very complicated non-linear system, whose performance is affected by lots of control parameters. To optimize this system, the routine optimization approach is inefficient, and the reliability of optima depends on the precision of model. An HEV bus dynamic simulation model is built for performance analysis by the interlinking of advanced software AVL CRUISE and MATLAB/Simulink. For achieving minimum fuel consumption and emissions, a multi-objective genetic algorithm(GA) optimization method is applied to getting the optima of work modes and energy distribution in different city bus cycles, which finds the compatible control logic parameters and saves much time. The feasible solution can improve the fuel economy and emissions simultaneously and provide wider choices for different requirements in HEV design.

Key words: Hybrid electric vehicle Optimization of control strategy Multi-objective genetic algorithm

0 前言

混合动力电动汽车(Hybrid electric vehicle, HEV)通过多种动力源的组合, 采用电力储能和电力驱动技术, 与传统汽车的内燃机驱动相结合, 为能量的优化分配提供了广阔的空间, 能够获得传统汽车所不能得到的优化控制目标(最佳燃油经济性、

最佳排放等)。驱动力的实时最优分配通过整车能量管理控制策略来实现, 能量管理是混合动力汽车控制策略的核心算法, 也是目前研究最多的混合动力汽车关键技术之一。

由于 HEV 车是一个高度复杂的非线性系统, 而且影响其控制策略的参数较多, 参数如何选取通常根据以往车辆的性能数据、设计经验以及反复调试来进行确定。这种方法不能保证选取了最合适的参数值, 只能是对特定问题的较为合理的解。近年来对 HEV 参数的优化研究逐步地深入, FISH 等^[1]

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2006AA11A183)。20080313 收到初稿, 20080915 收到修改稿。

应用确定性优化方法序列二次规划法(Sequential quadratic programming, SQP)对串联式 HEV 参数进行了优化分析, 但仅能收敛于局部最优解, 而不是全局最优解。WIPKE 等^[2]采用 DIRECT 搜索方法对燃料电池 SUV 进行了能量管理优化, 比 SQP 方法更为有效, 但 DIRECT 不适于大规模的运算, 收敛速度慢。要想对 HEV 复杂系统进行优化, 常规的优化算法显得无能为力。即使能够采用常规最优算法来实现, 其计算时间也是无法忍受的, 所以 HEV 优化领域开始引入随机搜索方法^[3], HASANZADEH 等^[4-6]在串联 HEV 优化中运用了进化优化算法, 取得较好效果, 仿真分析软件多采用 ADVISOR, 该软件采用逆向运算, 速度快, 但与实际工况有一定偏差, 模型相对而言不够精确。

本文应用正向仿真软件 AVL CRUISE 在精确的 HEV 整车动态分析模型基础上, 以降低油耗及排放为目标, 通过遗传优化算法, 对混合动力系统工作模式的选择和能量流的分配进行了优化, 确定出适宜的控制逻辑参数, 有效地解决了混合动力汽车能量分配的最优控制问题, 并在提高了燃油经济性的同时改善了排放性能。

1 HEV 仿真分析模型及控制策略

建模仿真分析方法是能量管理策略研究的有力工具, 本文应用 AVL CRUISE 软件建立了国内某混合动力城市客车仿真模型, 并在此基础上借助于工程经验和控制逻辑方法在 Matlab 中建立了能量管理策略。CRUISE 软件是奥地利 AVL List 公司开发的高级模拟分析软件, 用来研究汽车动力性、燃油经济性、排放性能及制动性能^[7], 并且与以往反向运算的确定性动态规划不同的是, CRUISE 模型可实现正向动态优化运算, 更加接近实际运行情况, 结果也更加准确。

1.1 基于 AVL CRUISE 的 HEV 仿真模型

根据动力总成系统结构, 在 CRUISE 下建立了其整车动态分析模型, 如图 1 所示。该模型为并联式结构, 发动机与电动机在离合器之后耦合, 采用的是后轮驱动。模型中各个模块之间连接及信息的交换, 通过机械连接线、电气连接线和位于图形底部的数据线实现。机械连接用来表示实际车辆中机械动力的传递, 体现出来了整车结构的布置形式, 电气连接用来表示电流的传递, 实现电气传动, 数据线用来传递各部件间的数据信息。动力系统的主要部件形式和参数如表 1 所示。

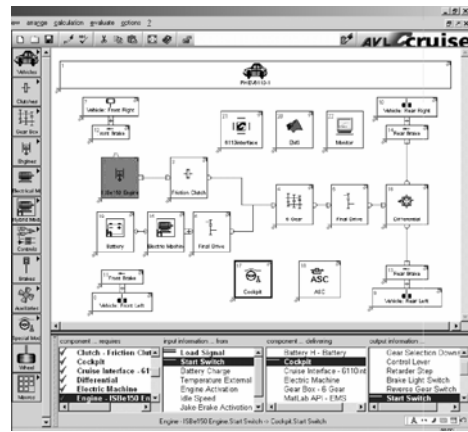


图 1 HEV 整车仿真模型

表 1 动力系统主要参数

	参数	形式或数值
发动机	形式	共轨、电喷、四缸
	排量 Q/L	3.99
	燃料种类	柴油
	额定功率/转速 $P_e/n_e/(kW \cdot \text{min}^{-1})$	110/2 500
	压缩比 ϵ	17.0 : 1
电动机	类型	开关磁阻电动机
	额定功率 P_m/kW	35
	额定转速 $n_m/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 000
电池	类型	Ni-MH
	公称容量 C_N/Ah	40
	电池组电压 U_b/V	336

1.2 能量管理控制策略

能量管理控制策略在 Matlab/Simulink 中完成, 通过标准接口与 CRUISE 模型相连。控制策略示意图如图 2 所示, 发动机的最小转矩线 ($T_{emin} \cdot t_{emin}$) 和最低转速线(n_{low})构成了发动机的起停分界线, 而最大转矩线($T_{emax} \cdot t_{emax}$)构成了发动机负荷的上限, 其中 t_{emin} 为发动机最小转矩包络线系数, t_{emax} 为发动机最大转矩包络线系数使发动机工作在高效率、低排放的工作区域^[8]。其中 T_d 和 T_e 表示起点在横轴、沿竖直方向的矢量, 分别代表转矩耦合器的输出转矩(即驱动转矩)和发动机的输出转矩, 并且分别以 “▲” 和 “●” 符号进行了标示。

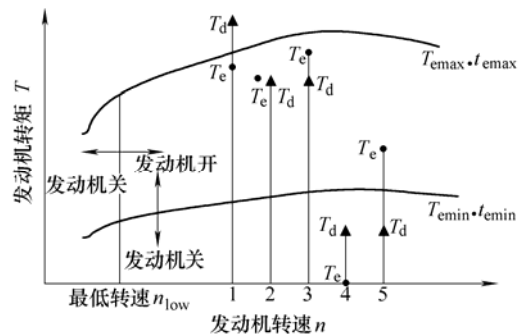


图 2 HEV 控制策略示意图

(1) 在进行搜索前将解空间的解数据表示成遗传空间的基因形串结构数据, 每个串结构数据即为一个个体, 随机初始化一个具有 n 个个体的种群 $P, i=1$ 。

(2) 把每一条染色体所代表的控制器参数作为新个体带入参数化的整车仿真模型, 进行一次完整的工况仿真, 并且根据事先确定好的适应度函数, 确定每个个体的适应度。

(3) 根据适应度值的大小来选择下一代的种群 P , 适应度值表明个体的优劣, 此处适应度越小, 被选中的概率就越大, 最合适的个体生存下来并进行复制, 不合适的个体被舍弃。

(4) 对 P 进行交叉和变异操作, 从而产生下一代 P 。

(5) $i=i+1$ 。

(6) 转向步骤(2), 直到满足停止条件(本文采用最大进化代数)。

仿真模型以模块形式嵌入到整个执行程序中执行, 针对每一代的每个个体, 都运行一次参数化整车仿真模型, 优化中解的燃料消耗量及各排放目标值由修改模型中的原车参数后调用一次完整的循环工况仿真求得。

仿真采用三种典型循环工况进行了分析。分别为欧洲公交客车循环工况(UDC)、Ja1015(日本城市循环工况)、中国城市公交循环工况(CBC), 如图 4 所示。驾驶循环由怠速、稳速、加速以及减速组成, 各循环的最高车速, 最大加速速度均略有不同。UDC 循环的行驶里程短、平均速度较高、加减速速度比较平稳、减速阶段较多、共有 3 次停车; Ja1015 循环的行驶里程长、平均车速高、加减速速度比较平稳、减速阶段较多、共有 7 次停车; 中国城市公交循环工况的行驶里程长、加减速速度比较大、平均车速低、减速阶段多、共有 14 次停车; 这三个循环具有各自的特点, 能够代表目前阶段下汽车测试循环一般情况。

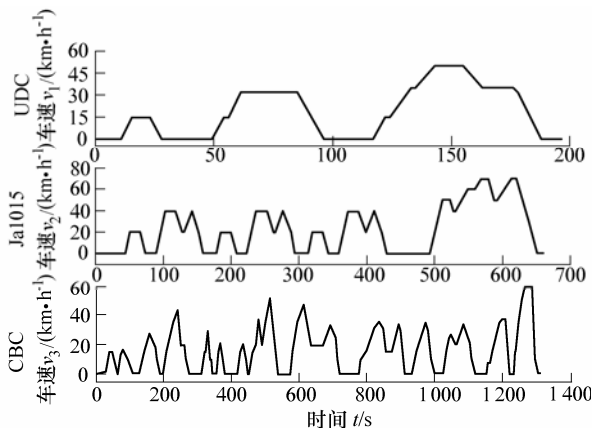


图 4 道路循环工况车速曲线

2.2 仿真结果分析

寻优结果如图 5 所示。可以看出, 进化初期最优个体的适应度值随着进化代数的增加而减少, 其收敛速度也较明显。到第 30 代, 最佳适应度就基本维持不变了。UDC 工况收敛速度最快, 适应度幅值变化较大。三种循环下获得的控制逻辑参数最优值是不同的, 见表 3。表 4 对三种循环工况下优化前后的油耗及排放进行了对比。燃油经济性及排放指标都得到了不同程度的改善, 油耗和 NO_x 排放可降低 18%~31%, CO 与 HC 排放降低基本在 5% 左右。

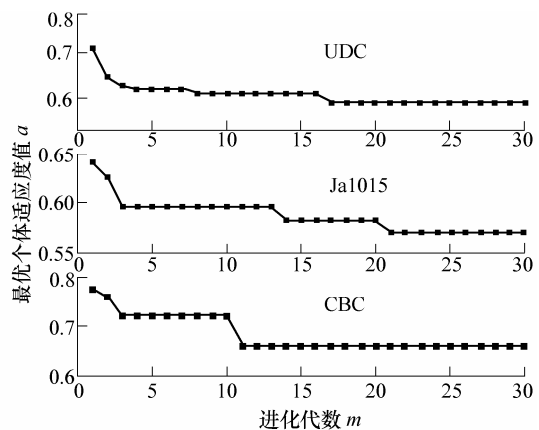


图 5 寻优进程

表 3 三种循环工况下的控制参数最优值

优化参数	UDC(ECE-R15)	Ja1015	CBC
最低转速 $n_{\text{low}}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	15	13	12
最大转矩时包络线系数 t_{emax}	0.85	0.83	0.82
最小转矩时包络线系数 t_{emin}	0.46	0.43	0.44
电池荷电状态 S_{cmin}	0.62	0.55	0.57

表 4 三种循环工况下优化后的油耗及排放与优化前的对比

循环工况	优化目标	优化前	优化后	改善率 $R/\%$	
UDC	排放量 $E/(\text{g} \cdot \text{km}^{-1})$	NO_x	7.20	5.30	26.39
		CO	0.95	0.76	20.00
		HC	0.39	0.33	15.38
		PM	0.041	0.040	2.440
	油耗 $F_c/(10^{-5}\text{L} \cdot \text{m}^{-1})$	20.16	13.79	31.60	
	总目标值 J	0.71	0.56	21.13	
Ja1015	排放量 $E/(\text{g} \cdot \text{km}^{-1})$	NO_x	8.50	6.90	18.82
		CO	0.69	0.66	4.35
		HC	0.30	0.29	3.33
		PM	0.030	0.029	3.330
	油耗 $F_c/(10^{-5}\text{L} \cdot \text{m}^{-1})$	22.21	18.41	17.11	
	总目标值 J	0.64	0.57	10.94	
CBC	排放量 $E/(\text{g} \cdot \text{km}^{-1})$	NO_x	7.60	5.90	22.37
		CO	0.92	0.90	2.17
		HC	0.41	0.39	4.88
		PM	0.045	0.043	4.440
	油耗 $F_c/(10^{-5}\text{L} \cdot \text{m}^{-1})$	20.06	15.34	23.53	
	总目标值 J	0.72	0.64	11.11	

以上为各优化子目标的重要程度相同的情况下,对控制策略参数进行的优化,如重视程度不同,可根据需要对权重进行选取,改变优化目标函数,获得针对某一目标下的控制策略参数最优值。本文分别对关注油耗或关注 CO 排放的情况进行了分析,为最优值的选取提供了较大的空间。当 $w_1=1, w_i=0(i=2, \dots, 5)$ 时,多目标优化就转变成了针对燃油经济性的单目标优化问题,同样, $w_3=1, w_i=0(i=1, 2, 4, 5)$ 时,为针对 CO 的优化问题。优化运算过程与上述多目标优化相同,行驶工况采取 UDC 道路循环工况。

不同权重下的优化结果,见表 5,可以看出控制策略参数对权重变化的敏感程度是不同的, S_c 限值与最大转矩包络线系数 t_{emax} 变化不明显,但最小转矩包络线系数 t_{emin} 受影响较大。为了便于对比不同优化目标情况下优化得到的油耗及排放值,对数据进行了标准化处理,见图 6,可以看到单独考虑燃油经济性,虽然油耗降低明显,但排放并没有随之降低。CO 排放的变化趋势与优化变化并不一致,甚至出现相反的变化,但油耗和排放值的变化并不完全依赖于发动机的工作点,它也与电池和电动机的工作状态有关。

表 5 不同权重情况下获得的最优值

优化方法	优化参数			电池荷电状态 S_{cmin}
	最低转速 $n_{\text{low}}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	最大转矩 时包络线 系数 t_{emax}	最小转矩 时包络线 系数 t_{emin}	
多目标优化	15	0.85	0.46	0.62
FC 单目标优化	15	0.83	0.45	0.60
CO 单目标优化	12	0.82	0.38	0.61

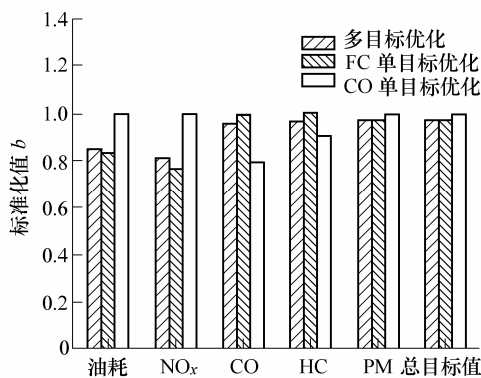


图 6 不同权重下优化后的目标值

3 结论

(1) 仿真和优化的结果表明,本文所提方法对提高整车的燃油经济性和排放性能效果显著,燃油经济性及排放指标都得到了不同程度的改善,油耗

和 NO_x 排放可降低 20%左右,CO 与 HC 排放可降低 5%左右。

(2) 遗传算法在解决多目标多参数优化问题时,能够在可承受的时间限度内得到令人满意的解,在实际应用中是可行的。不仅可以减少实车调试的时间,具有良好的实用价值,也为设计各类型混合动力汽车能量管理策略提供了指导方案。

参 考 文 献

- [1] FISH S, SAVOIE T B. Simulation-based optimal sizing of hybrid electric vehicle components for specific combat missions[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2001, 37: 485-488.
- [2] WIPKE K, MARKEL T, NELSON D. Optimizing energy management strategy and degree of hybridization for a hydrogen fuel cell SUV[C]//18th Electric Vehicle Symposium, Berlin, Germany, 2001.
- [3] WANG Q, SPRONCK P, TRACHT R. An overview of genetic algorithms applied to control engineering problems[C]// 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2003: 1 651-1 656.
- [4] HASANZADEH A, ASAEI B, EMADI A. Optimum design of series hybrid electric buses by genetic algorithm[C]// IEEE ISIE, Dubrovnik, Croatia, 2005.
- [5] SCHOEGGL P, KRIEGLER W. Virtual optimization of vehicle and powertrain parameters with consideration of human factors[R]. SAE Paper 2005-01-1945.
- [6] DIAS A H F, DE VASCONCELOS J A. Multiobjective genetic algorithms applied to solve optimization problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38: 1 133-1 136.
- [7] Cruise 3.0 user guide[M]. Austria: AVL List, 2005.
- [8] 张欣, 刘溧, 于海生. 混合动力电动汽车制动系统回馈特性仿真[J]. 中国公路学报, 2006, 19: 111-116.
ZHANG Xin, LIU Li, YU Haisheng. Simulation for regenerative characteristics of hybrid electric vehicle braking system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19: 111-116.
- [9] MORTEZA M G, AMIR P. Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles[J]. Journal of the Franklin Institute, 2006: 420-435.

作者简介: 张昕, 女, 1976 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为车辆系统动力学与电子控制。

E-mail: xinzhang@bjtu.edu.cn