静液传动混合动力车辆控制策略优化

刘 涛[1], 胡淑荣[3], 罗念宁[1], 姜继海[2]

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 汽车工程学院, 264209 威海, lt4325@163.com;
2. 哈尔滨工业大学 流体传动与控制研究所,150001 哈尔滨; 3. 国家林业局管理干部学院, 102600 北京)

摘 要: 为了提高静液传动混合动力车辆的燃油经济性,在 Matlab/Simulink 平台上建立了整车动态性能仿真分析模型,建立逻辑门限控制策略参数优化的有约束非线性规划模型,以燃油消耗率为优化目标,以发动机主动充压转矩差值和主动充压压力限值为优化对象,运用多目标遗传优化算法,在不同的循环工况下对静液传动混合动力系统工作模式的选择和能量的分配进行了优化,找到了一组全局最优的控制策略参数. 仿真结果表明:优化后的控制策略参数可使发动机更多地在燃油经济性较好的区域工作,提高整车的燃油经济性. 将该方法用于离线参数优化,可以大大缩短控制器的实车标定时间.

关键词: 汽车工程;混合动力车辆;控制策略;遗传算法

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)09-0086-05

Optimization of hydrostatics hybrid vehicle control strategy

LIU Tao[1], HU Shu-rong[3], LUO Nian-ning[1], JIANG Ji-hai[2]

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, China, lt4325@163.com;
2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;
3. State Academy of Forestry Administration, 102600 Beijing, China)

Abstract: To improve the fuel economy of hydrostatics hybrid vehicle (HHV), a HHV dynamic simulation model is built up for performance analysis in MATLAB/Simulink. The optimal tuning of these threshold logic control strategy parameters is formulated as a constrained nonlinear programming problem with an objective function minimizing fuel consumption. The engine active pressurized torque difference and the active pressurized pressure limit are the objects of optimization. A multi-objective genetic algorithm (GA) optimization method is applied to get the optima of work modes and energy distribution in different drive cycles, which gives the compatible control strategy parameters. Simulation results demonstrate that the optimized control strategy parameters allow the engine working in more fuel economy area, improve the fuel economy of HHV. This method can be used for off-line parametric optimization and to shorten the time of controller calibration in the real vehicle.

Key words: automotive engineering; hybrid vehicle; control strategy; genetic algorithm

静液传动混合动力车辆通过多种动力源的组合,采用液压储能和液压驱动技术,与传统车辆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,能够在不降低原车性能的前提下降低油耗,减少排放. 驱动转矩的实时最优分配需要通过整车能量管理策略来实现. 能量管理策略作为混合动力车辆控制策略的核心算法[1-3],通过控制各个子系统工作于最佳状态,使多能源动力系统高效运行. 由于静液传动混合动力车辆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,参数的选取常根据以往车辆的性能数据、工程经验以及反复调试来确定. 这种方法只能获得针对特定问题的较为合理的解,不能保证选取了最合适的参

收稿日期: 2010-04-09.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875054);山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FL002).
作者简介: 刘 涛(1966—),男,博士研究生,副教授;
姜继海(1957—),男,教授,博士生导师.

数值. 传统的基于梯度的搜索方法，如 SQP（sequential quadratic programming），要求目标函数连续、可微，并满足 Lipschitz 条件，而对于 HHV 优化问题而言，这些条件很难满足，此外，目标函数的梯度值也很难计算，且无法保证最优.

遗传算法（GA）是一种模仿生物进化过程的全局最优搜索算法，被广泛应用于优化、神经网络训练以及系统识别中的参数估计等领域. 由于不需要目标函数的梯度信息，且能自行跳出局部最优解，遗传算法已经被证明非常适合应用于混合动力系统的参数优化[4-8].

本文利用在 Matlab/Simulink 平台建立的静液传动混合动力车（HHV）整车动态分析模型，以降低油耗及排放为目标，采用遗传优化算法，对静液传动混合动力系统工作模式的选择和转矩的分配进行了优化，得到最佳的控制策略参数，提高了整车燃油经济性.

1　HHV 仿真分析模型

本文以利用一汽商用车底盘开发的静液传动混合动力车辆 T57HHV 的结构参数及其控制策略为研究实例，对整车的控制策略进行优化研究，所采用的优化方法同样适用于其他结构形式的混合动力车辆. 图 1 为 T57HHV 静液传动混合动力轻卡的结构原理图，该模型为并联式结构，主要由内燃机、高压蓄能器、低压蓄能器和可变排量的液压泵/马达组成. 主要动力源为传统车辆的发动机，液压泵/马达通过扭矩耦合器与传动轴连接. 其动力系统主要参数见表 1.

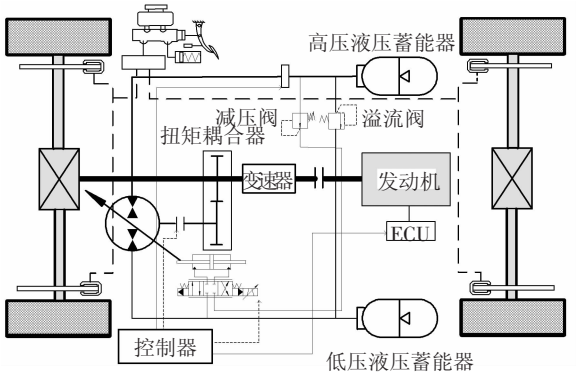

图 1　HHV 结构原理图

表 1　HHV 主要参数

发动机					整车参数					
型号	额定功率/kW	额定功率时转速/（r · min^{-1}）	最大扭矩/（N · m）	最大扭矩时转速/（r · min^{-1}）	外形尺寸/mm	整车最大总质量/kg	整车整备质量/kg	轴距/mm	质心至前轴距离（满载）/mm	质心高度（满载）/mm
DA465Q－1 A/D	38.5	5200	83	3 000～3 500	4 260 × 1 510 × 1 890	1 795	865	2 550	1 350	578

液压泵/马达			主动充压泵			液压蓄能器				扭矩耦合器
型号排量/（mL · r^{-1}）	最高转速/（r · min^{-1}）	最高工作压力/MPa	排量/（mL · r^{-1}）	最高转速/（r · min^{-1}）	最高工作压力/MPa	容积/L	充气压力/MPa	最高工作压力/MPa	最低工作压力/MPa	传动比
A4VG40/40	3 700	40	10	5 400	40	25	12	31	15	1.3

基于上述结构和参数，在 Matlab/Simulink 平台上建立了 HHV 整车动态分析模型，如图 2 所示.

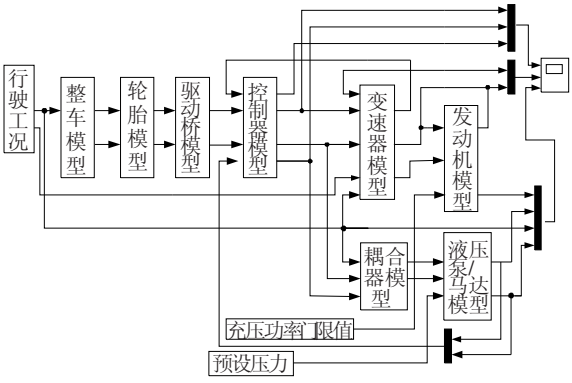

图 2　HHV 仿真模型

2　HHV 能量利用策略

并联式静液传动混合动力系统的基本工作模式可用图 3 所示的典型行驶工况来说明. 在图 3 的上部曲线中，*AC* 段为汽车由静止起步缓慢加速过程，*CD* 为匀速行驶段，*DE* 段为急加速，*EF* 段为制动至停车. 这一行驶曲线体现了本文静液传动混合动力车辆的 5 种基本工作模式：1）*AB* 段为液压泵／马达单独驱动模式，发动机处于怠速状态；2）*BC* 段为液压蓄能器放能完毕发动机单独驱动模式；3）*CD* 段匀速行驶，为发动机驱动并同时主动充压模式；4）*DE* 段车辆急加速，为发动机和液压泵／马达联合驱动模式；5）*EF* 段为再生制动

模式,发动机怠速,液压泵 / 马达工作在液压泵工况,将部分或全部制动动能转换为液压能后存储于蓄能器中. 图 3 的下部曲线是与上部行驶曲线对应的驱动功率,图中在时间轴上方的功率为正功率,用于驱动,在时间轴下方的为负功率,用于制动和发动机向液压泵 / 马达充压.

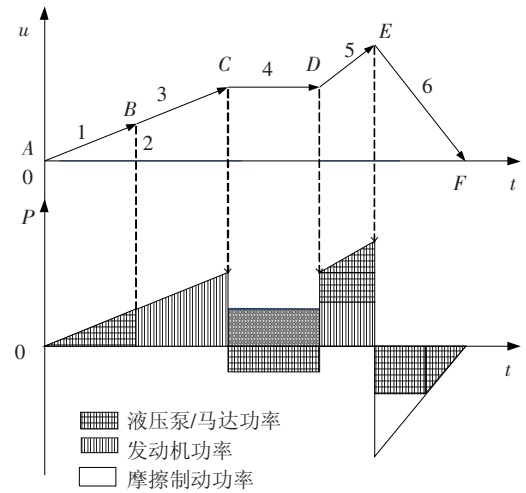

图 3　典型行驶工况与基本工作模式

行驶过程中,采用驾驶员的加速踏板指令、制动踏板指令、当前车速、蓄能器 SOC 以及其他车辆状态信息确定系统的工作模式,混合动力车辆由整车控制器(VCU)控制,可在以上 5 种模式间切换. 该车采用逻辑门限控制策略(LTCS) 来控制工作模式的切换,控制策略程序运行于 VCU 上[9-10].

并联式静液传动混合动力车辆的能量控制策略根据转矩来定义发动机的优化工作区域,以发动机效率图为发动机负荷调整的依据,如图 4 所示. 其中发动机最优转矩是从静态条件下发动机的万有特性曲线出发,将一定转速条件下发动机最小比油耗点插值连接成的曲线,主动充压泵的转矩通过总的需求转矩与发动机所需转矩的差值得到.

在静液传动混合动力车辆的能量利用策略中,作为逻辑门限参数的主要有:

1) 发动机主动充压功率上限值 P_{e_opt}. 由发动机万有特性曲线可以看出,对应于每一条等功率曲线必有一条等油耗线与之相切,该切点即该功率下的最佳油耗点,将多个切点数据进行拟合即可得到发动机最佳燃油经济性功率曲线,即发动机主动充压功率上限值 P_{e_opt}.

2) 发动机主动充压功率下限 P_c. 对于图 4,设发动机正常行驶时工作于 1 点,此时发动机功率为 P_c,燃油消耗率为 b_1,为节省燃油调整发动机工作点至2点,此时发动机功率为 P_{e_opt},燃油消耗率为 b_2,多余功率 $P_{e_opt} - P_c$ 由主动充压泵将其转换为液压能贮存于蓄能器中,当达到充压极限压力值 p_c 后,发动机怠速(怠速燃油消耗率为 b_3/gs^{-1}) 运转,由液压泵/马达释放液压能驱动整车行驶.

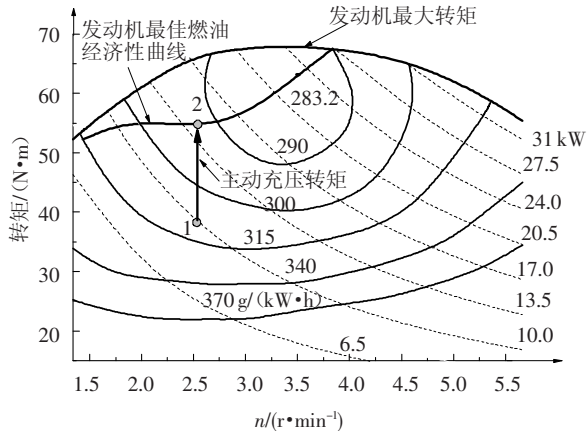

图 4　能量利用策略示意图

假设发动机工作点由1点调整至2点,在2点工作时间为 T_1,则主动充压的能耗为 $(P_{e_opt} - P_c)T_1$;储能释放以功率 P_c 驱动车辆行驶 T_2 时间,此时发动机怠速行驶,设能量循环转换效率为 η_{e_p},则发动机主动充压时的功率限值 P_c 可由

$$b_2 P_c P_{e_opt} + b_3 (P_{e_opt} - P_c)\eta_{e_p} - b_1 P_c [(P_{e_opt} - P_c)\eta_{e_p} + P_c < 0$$

来确定. 当需求功率 P_{req} 在 P_c 与 P_{e_opt} 之间时,因为存在循环效率,主动充压反而会恶化燃油经济性,不能进行充压. 根据主动充压时的功率限值 P_c 和发动机主动充压功率上限值 P_{e_opt} 可得到发动机的充压转矩限值 T_c、T_{e_opt}.

3) 主动充压压力限值 p_c. 液压蓄能器功率密度大,但其能量密度小,液压蓄能器主动充压压力限值 p_c 会对系统的节能效果造成很大影响. p_c 过大,会导致再生制动提前结束,能量回收率降低. p_c 过小,将导致发动机负荷率频繁变动,恶化燃油经济性. 一般控制液压蓄能器的压力在 $0.5p_{max}$ 以下,以保证蓄能器有足够的空间回收制动能量.

3　HHV 控制策略参数优化

3.1　参数优化数学模型

静液传动混合动力车辆参数优化设计问题是一个典型的有约束非线性规划问题(NLP),其数学模型可以表述为

$$\min \quad f(x),$$
$$\text{s.t.} \quad g_j(x) \geqslant 0, \quad j = 1, \cdots, m;$$
$$x_i^l \leqslant x_i \leqslant x_i^u, \quad i = 1, \cdots, n.$$

式中：x_i 为控制策略的设计变量；n 为设计变量数；x_i^l、x_i^u 分别为设计变量 x_i 的下限和上限；$g_j(x)$ 为非线性不等式约束；$f(x)$ 为控制策略优化的目标函数.

控制策略的目标是同时最小化油耗和排放，为减少各自子优化目标之间的数值差异，对其进行了单位化处理，然后采用权重系数变换法将多目标综合为单一的优化目标（适应度评价函数），即

$$f(x) = \frac{w_1}{Q_{\text{tar}}}\int Q(t)\,\mathrm{d}t + \frac{w_2}{Q_{\text{CO_tar}}}\int Q_{\text{CO}}(t)\,\mathrm{d}t + \frac{w_3}{Q_{\text{HC_tar}}}\int Q_{\text{HC}}(t)\,\mathrm{d}t + \frac{w_4}{Q_{\text{NO}_x\text{_tar}}}\int Q_{\text{NO}_x}(t)\,\mathrm{d}t.$$

式中：$w_i(i = 1,2,3,4)$ 为权重因子，$Q(t)$、$Q_{\text{HC}}(t)$、$Q_{\text{CO}}(t)$、$Q_{\text{NO}_X}(t)$ 为燃油消耗、碳氢化合物、一氧化碳和氮氧化合物的排放量；Q_{tar}、$Q_{\text{CO_tar}}$、$Q_{\text{HC_tar}}$、$Q_{\text{NO}_X\text{_tar}}$ 为燃油消耗、碳氢化合物、一氧化碳和氮氧化合物排放量的对应目标值.

3.2　HHV 能量利用策略参数优化

应用遗传算法解决静液传动混合动力车辆能量利用策略的参数优化问题，即是使控制策略参数 x_i，在求解空间 X 内，通过整车动态模型的循环工况运算，针对每一个确定的解进行仿真运算，求得相应的适应度 $f(x)$，确定出满足 $\min\limits_{x\in X} f(x)$ 时的逻辑门限参数.

在进行遗传优化时，利用 MATLAB 进行算法设计，将遗传算法编制成各种 m 文件，利用 MATALB 对各个文件进行调用，编写特定的遗传算法语句，完成遗传步骤所需的生成初始群体、选择、交叉、变异等，对逻辑门限控制策略的参数进行优化试验；在 Simulink 环境下，利用整车仿真模型计算目标函数和约束，得到控制策略参数优化仿真模型如图 5 所示. 仿真模型以模块形式嵌入到整个程序中，进化是基于动态仿真进行的，并在时域中完成. 针对每一代的每个个体，都在一个完整的循环工况下运行一次整车仿真模型，求得优化中的解.

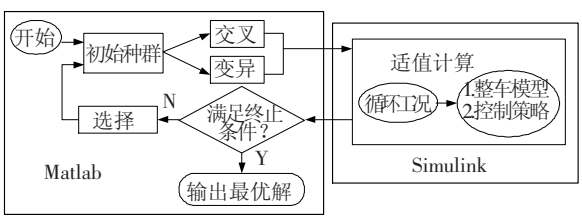

图 5　基于遗传算法的控制策略参数优化模型

选取静液传动混合动力车辆的发动机主动充压转矩差值 ΔT，主动充压压力限值 p_c 为待优化的控制策略参数，把待优化的每一个参数看成是一个基因，即个体由基因 ΔT 和 p_c 组成，采用固定长度为 8 的二进制数基因编码来表示一个变量，由 ΔT 和 p_c 共同组成一条染色体，代表问题的一个解，即

$$x = (\Delta T,\ p_c).$$

逻辑门限控制策略的设计变量及其上下限边界值如表 2 所示.

表 2　逻辑门限控制策略的设计变量及其边界值

设计变量	符号	单位	下限值	上限值
ΔT	x_1	N · m	10	58
p_c	x_2	MPa	17	26

选择操作使用轮盘赌比例选择策略，被选择的个体概率为 $f_{x,i}/\sum\limits_{i=1}^{n} f_{x,i}$，其中 $f_{x,i}$ 为个体的适应度，每个个体都与它的适应度成比例. 在遗传算法中，整个群体被各个个体所分割，各个个体的适应度函数值在全部个体的适应度函数值之和中所占比例也大小不一，这个比例值瓜分了整个赌盘盘面，它们决定了各个个体被遗传到子代群体中的概率. 交叉操作采用单点交叉策略，变异操作采用位点变异，在父串中随机选择一个交叉点，同代的所有父串交叉点的位置都相同，父串中由交叉点划定部分相互交换产生新的个体，当完成交叉后，以一定的概率随机改变父串上的某一位，以便产生新的个体. 选定交叉概率为 0.65，变异概率为 0.06，初始种群数目为 100，最大终止代为 100.

选定 UDDS、1015、NYCC 等 3 种循环工况，对满载时的静液传动混合动力车辆的控制策略参数进行优化. 这里只针对油耗进行了优化，寻优过程如图 6 所示.

可以看出，进化初期最优个体的适应度随着进化代数的增加而减少，其收敛速度较快. 到第 15 代，最佳适应度就基本维持不变了，UDDS 工况收敛速度最快，适应度幅值变化较大. 3 种循环工况下获得的控制策略参数是不同的，如表 3 所示，3 种循环工况下优化前后的油耗如表 4 所示，其燃油经济性得到了不同程度的改善.

表 3　不同循环工况下的控制策略参数最优值

循环工况	ΔT/（N · m）	p_c/ MPa
UDDS	54.570	25.394
1015	54.183	18.325
NYCC	54.400	24.840

表 4　不同循环工况下优化前后的油耗对比

循环工况	优化前油耗/g	优化后油耗/g	改善率/%
UDDS	404.0	396.04	1.97
1015	150.1	146.40	2.47
NYCC	110.0	107.27	2.48

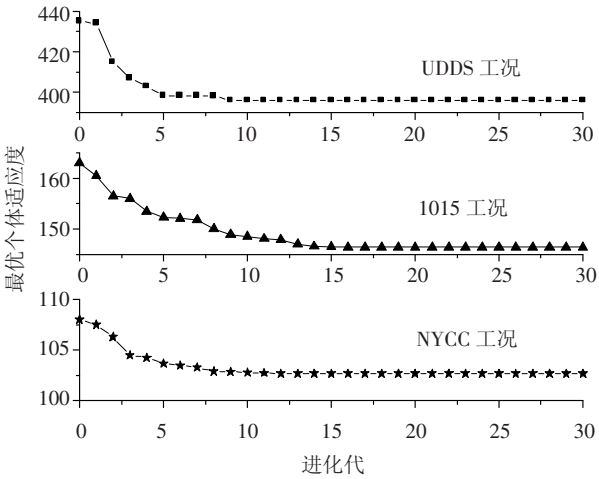

图 6　寻优过程

4　结　语

1）利用遗传算法对能量管理策略参数进行优化,可以提高整车的燃油经济性.

2）遗传算法在解决多目标多参数优化问题时,能够在相对较短时间内得到令人满意的解,在实际中是可行的,采用遗传算法对静液传动混合动力车辆的能量管理策略进行优化是行之有效的.

3）本文方法在 T57HHV 静液传动混合动力车辆的控制策略优化中已得到应用,将其用作控制策略的离线参数优化,可以大大缩短控制器的实车标定时间.

参考文献:

[1] HUANG Y J, YIN C L, MANG J W. Development of the energy management strategy for parallel hybrid electric urban buses[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(4): 44 – 50.

[2] EWA F. A genetic algorithm and a simulated annealing algorithm combined with column generation technique for solving the problem of scheduling in the hybrid flowshop with additional resources[J]. Computers and Industrial Engineering, 2009, 56(1): 142 – 151.

[3] CHAN C M, ZHANG L M, JENNY T M. Optimization of pile groups using hybrid genetic algorithms[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(4): 497 – 505.

[4] 浦金欢, 殷承良, 张建武. 遗传算法在混合动力汽车控制策略优化中的应用[J]. 中国机械工程, 2005, 16(7): 648 – 651.

[5] LIU Yong-xin, ZOU Ping-hua. Optimization of networks impedance identification based on hybrid genetic algorithm[C]//2009 2nd International Conference on Information and Computing Science. Manchester City, England: IEEE Computer Society, 2009: 138 – 141.

[6] 张昕, 宋建峰, 田毅, 等. 基于多目标的混合动力电动汽车控制策略优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 36 – 40.

[7] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 186 (2): 311 – 338.

[8] 吴光强, 陈慧勇. 基于遗传算法的混合动力汽车参数多目标优化[J]. 汽车工程, 2009, 31(1): 60 – 64.

[9] WU B, LIN C C, FILIPI Z, *et al.* Optimal power management for a hydraulic hybrid delivery truck[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(1): 23 – 40.

[10] HOFMAN T, STEINBUJCH M, DRUTEN R V, *et al.* Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles[J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2007, 1(1): 71 – 94.

（编辑　杨　波）