

基于遗传算法的轻度混合动力汽车动力传动系参数优化

Powertrain Parametric Optimization of Mild Hybrid Electric Vehicle Based on Genetic Algorithm

杜子学, 查 雷

(重庆交通大学 机电与汽车工程学院, 重庆 400074)

摘要: 在研究某 ISG 型轻度混合动力汽车控制策略的基础上, 选择对动力性和经济性有较大影响的主减速器传动比、变速器各挡传动比以及变速器换挡规律为优化参数, 以加速时间和等效燃油消耗为优化目标, 通过 GT-SUITEMP 建立整车仿真模型。采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法 (NSGA-II), 基于 mode FRONTIER 建立了多目标优化模型。通过联合仿真分析, 得到了 Pareto 最优解, 与优化前相比, 加速时间减少了 3.5%, 等效燃油消耗降低了 9.4%。

关键词: 轻度混合动力汽车; 动力传动系; 遗传算法; 多目标优化

Abstract: Based on the study of the control strategy of integrated starter/generator mild HEV, the vehicle simulation model was established via GT-SUITEMP. Aim at optimizing acceleration time and equivalent fuel consumption, the final drive ratio, each gear ratio and gear shifting rule were selected as optimization parameters, which have great influence on power performance and fuel economy. Based on the mode FRONTIER, multi-objective optimization model is set up by adopting the fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm (NSGA-II) and the Pareto-optimal solutions can be obtained through co-simulation analysis. Compared with the original vehicle, acceleration time is reduced by 3.5% and the equivalent fuel consumption is reduced by 9.4% in the final solution.

Key words: mild hybrid electric vehicle (MHEV); powertrain system; genetic algorithm; multi-objective optimization

1 前言

混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)配备了两套动力系统, 采用电力储能-电机驱动技术与传统的内燃机驱动相结合。理论和实践证明, 通过合理设计和精确控制, HEV 能够在保证动力性的基础上, 大幅度提高燃油经济性和降低排放。由于 HEV 是一个结构复杂, 影响参数较多的非线性系统。对所有参数进行优化并不现实。汽车动力传动系参数, 对汽车的动力性和燃油经济性有较大的影响^[1]。本文选择 MHEV 的动力传动系参数作为优化对象。

汽车的动力性和经济性是互相牵制的, 所以动力传动系参数的优化是一个多目标优化问题。由于目标之间的无法比较和矛盾现象, 导致不一定存在所有的目标上都是最优的解。因

此，多目标优化问题通常存在一个解的集合，它们之间不能简单地进行优劣比较^[2]。对于这种解来说，要同时使多个子目标一起达到最优值是不可能的，使各个子目标都尽可能地达到最优，这种解被称作非支配解或 Pareto 最优解。

本文利用 GT-SUITEMP 建立 MHV 整车仿真模型。以加速时间和等效燃油消耗量为优化目标，运用 mode FRONTIER 软件的 NSGA-II 优化功能和 GT-SUITEMP 联合仿真，对 MHV 动力传动系参数进行多目标优化。

2 MHV 动力系统设计及建模

2.1 MHV 动力系统结构设计

HEV 根据组成部件、控制策略以及布置方式的不同，形成了各种不同的结构形式。通常可以分为串联、并联和混联等形式。这些结构的全混合动力汽车，通过发动机运行的优化，以及采取有效的再生制动，能显著地降低油耗。但是高功率的电动机需要配置重型的能量储存装置，增加能量损耗。而且从传统驱动系统变为全混合动力的驱动系统，需要投入大量的时间和资金^[3]。

MHV 驱动系统易于由传统动力系统转化。在发动机后端安装一个小功率一体化起动机/发电机(Integrated Starter/Generator- ISG)作为汽车的辅助动力源。ISG 能够在高功率需求时，向驱动系统提供辅助功率，并能够将部分制动能量回收，转化为电能。MHV 系统如图 1 所示。

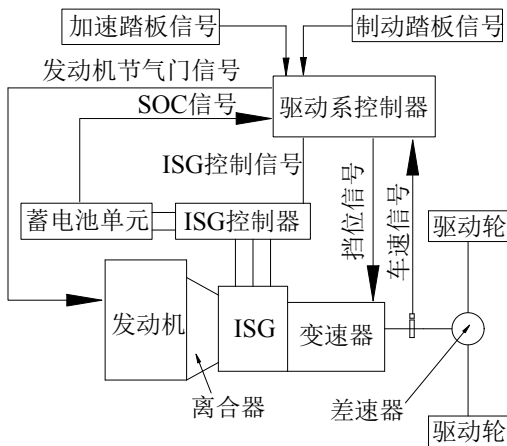


图 1 MHV 系统结构

ISG 安装在发动机和电控机械式自动变速器之间。在单电动机牵引模式、再生制动模式和变速器换挡期间，离合器断开，使发动机与变速器分离。由于电动机能方便地控制其转速和转矩，电动机与变速器之间不需要离合器来分离。发动机、ISG 以及其它各个部件的运行，通过驱动系统控制器，电动机控制器和相应的部件控制器予以控制。

2.2 MHV 的控制策略和运行模式

MHV 的控制策略通常是根据加速踏板位置、制动踏板位置、电池的 SOC、发动机转速以及车速信号，按照一定的规则控制摩擦制动器的制动力矩，以及发动机和 ISG 输出相应的功率（或转矩），以满足相应行驶状况的要求。

在实际运行中,根据汽车行驶状况的功率需求、汽车速度和蓄电池的 SOC, MHV 的驱动系有以下几种运行模式:

(1) 单 ISG 牵引模式: ISG 作为电动机单独驱动汽车,该模式中,发动机关闭,离合器断开。如遇红灯时,ISG 可以作为电动机在短时间内完成起步任务。这一模式也可以适用于车速很低的场合。

(2) 单发动机牵引模式: 发动机单独驱动汽车,该模式中,ISG 是去激励的。当蓄电池 SOC 处于高电平区域,且发动机能够单独满足功率需求的场合适用于该模式。

(3) 混合牵引模式: ISG 和发动机同时提供牵引功率。ISG 作为电动机运行以提供峰值功率。这一模式适用于发动机不能满足功率需求的加速、爬坡等大负荷场合。

(4) 电池组充电模式: ISG 作为发电机运行,发动机的富裕功率向蓄电池充电。这一模式适用于当蓄电池 SOC 处于低电平区域,且汽车行驶状况处于中、低功率需求的场合。

(5) 制动模式: ISG 作为发电机运行,对驱动系统产生一个制动力矩,将汽车的部分动能转化为电能,并存储于蓄电池。该模式中,离合器断开,发动机关闭,再生制动和摩擦制动器共同提供汽车所需的制动功率需求。为保证汽车的制动效能,在紧急制动时,仅由摩擦制动器来提供制动功率。

2.3 基于 GT-SUITEMP 的 MHV 模型

根据 MHV 的结构特点,基于 GT-SUITEMP 建立整车仿真模型,本研究中,针对不同的分析任务,分别建立了静力学模型,动力学模型和运动学模型。

其中运动学模型如图 2 所示。该模型包括发动机模块、离合器模块、ISG 模块,蓄电池模块,变速器模块、车身模块、驾驶员模块和各控制模块。各个模块之间通过机械连接和信号连接相互传递数据。

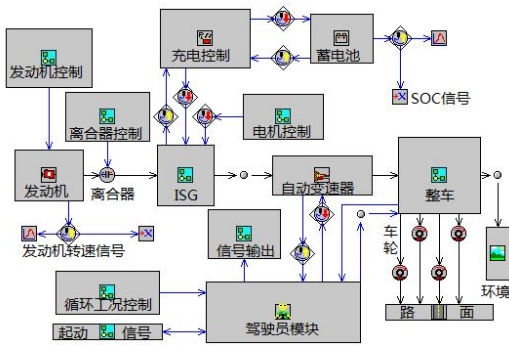


图 2 基于 GT-SUITEMP 的 MHV 仿真模型

汽车整备质量为 1375 kg,迎风面积为 2.28 m²,空气阻力系数为 0.32。发动机额定功率为 65.8 kW,ISG 额定功率为 7kW。

本仿真模型中选用 NEDC 循环工况对该 MHV 的经济性能进行计算。该循环工况由四次重复的市区运转循环工况和一次市郊循环工况构成,行驶时间 1180s,行驶里程为 11.007 km。NEDC 循环工况能够较好地体现汽车的常用工况。为实现预定的行驶工况,仿真模型中加入了循环工况控制模块,采用 PID 控制,保证汽车达到预期的行驶速度。

3 传动系参数优化设计

3.1 优化目标

MHV 动力传动系统的参数优化的目标就是在满足汽车其它各项性能的基础上, 尽可能使 HEV 的动力性和经济性有比较大的改善。本文选择以 0-100km/h 加速时间作为汽车动力性优化目标, 以基于 NEDC 综合循环工况的等效百公里燃油消耗量为汽车燃油经济性目标, 进行多目标优化。

优化目标函数可以用如下公式表示:

$$\min F(X)=[Time(X), Fuel(X)] \quad (1)$$

式中, $F(X)$ 为目标函数; $Time(X)$ 为 0-100 km/h 加速时间; $Fuel(X)$ 为等效燃油消耗量; X 为本文选择的 MHV 动力传统系的优化参数。

3.2 优化参数

MHV 设计参数众多, 对所有参数都进行优化, 将会比较困难。选择对整车性能有重大影响的参数进行优化, 能达到事半功倍的效果。主减速器和变速器的传动比均对整车的动力性和经济性有比较大的影响。自动变速器的换挡控制策略对整车性能, 尤其是燃油经济性有较大影响^[4]。

本文确定传动系优化参数为: 主减速器传动比 i_0 、自动变速器一档传动比 i_{g1} 、二挡传动比 i_{g2} 、三挡传动比 i_{g3} 、四挡传动比 i_{g4} 、五挡传动比 i_{g5} 、变速器升挡时发动机转速 S_u 和降挡时的发动机转速 S_d 。选取的动力传动系优化参数的上下界限及其步长如表 1 所示。

表 1 优化参数区间及步长

优化参数	下界	上界	步长
i_0	3.0	4.0	0.02
i_{g1}	3.27	4.27	0.01
i_{g2}	1.7	2.5	0.01
i_{g3}	1.19	1.59	0.01
i_{g4}	0.9	1.16	0.01
i_{g5}	0.71	0.91	0.01
S_u (r/min)	1200	1800	20
S_d (r/min)	2700	3700	20

3.3 优化约束

(1) 在水平良好的路面上 MHV 能达到的最高车速大于 160 km/h 的要求。

(2) 要适应汽车在各种地区的各种道路上行驶的要求, 必须满足最大爬坡度大于 30%的要求。

(3) 变速器的各挡利用率差别很大, 汽车行驶时主要用较高挡位, 所以选择较高挡位的邻挡位之间的传动比间隔要小一些, 这样能提高较高挡位的利用率。各挡传动比应满足下面的关系分布:

$$\frac{i_{g1}}{i_{g2}} \geq \frac{i_{g2}}{i_{g3}} \geq \frac{i_{g3}}{i_{g4}} \geq \frac{i_{g4}}{i_{g5}} \quad (2)$$

4 基于 GA 的传动系统参数优化设计实现

基于 GA 的多目标优化算法有很多类型,其中由 Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap 等在 2000 年提出的 NSGA-II 算法^[5],在解决多目标优化问题方面有很强的优越性。NSGA-II 算法使用快速非支配排序算法,降低了计算的复杂性;引进了精英策略,可以有效防止某些比较优良种群在进化的过程中被丢失;采用拥挤距离计算和拥挤距离排序的方法,选择接近 Pareto 前沿的个体,增强了 Pareto 前沿的前进能力,同时使优良个体种群能够均匀地遍布整个 Pareto 区域,能够保证解集的多样性。

本文选择 NSGA-II 算法,作为多目标优化算法。利用 mode FRONTIER (MF) 软件建立 NSGA-II 多目标优化模型。

4.1 基于 MF 的优化模型

MF 是一款通用多目标优化设计平台,可以轻松实现集成 CAE 和设计过程自动化、得到折中优化解功能。一旦模型建立,可以对数以百计,甚至数千计的设计方案进行自动评估。能够自动完成“计算—评估—参数修改—再计算”的反复迭代过程。

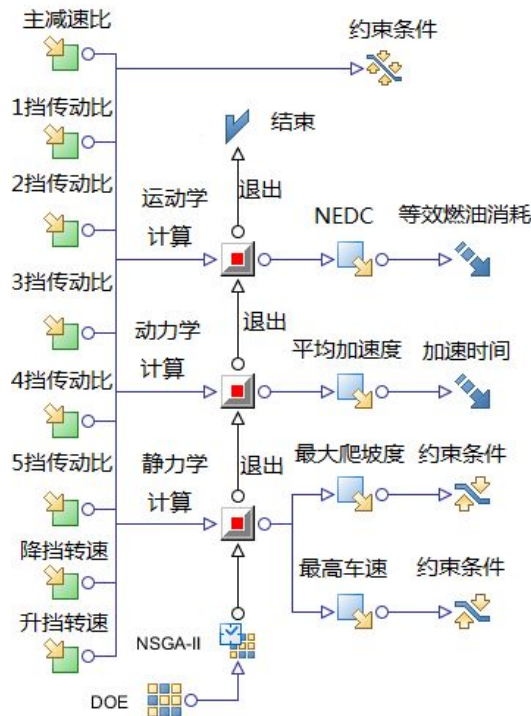


图 3 基于 MF 的优化模型

按照本文的计算要求,通过 MF 的 DOE 功能,生成 36 个原始种群,使用 NSGA-II 为优化算法,设定进化代数 30 代,基于 MF 的多目标优化模型如图 3 所示。

MF 首先由 DOE 生成优化参数的原始种群,通过调用 GT-SUITE 模型修改输入参数,并且进行所定制的动力性和经济性的计算。根据 NSGA-II 算法的基本思想,在目标空间中对群体进行快速非支配排序,通过选择、交叉和变异生成第一代子代种群。将父代种群和子代种群合并,根据优化目标,按照 Pareto 最优关系将群体中的个体进行比较,选择排名

靠前的个体组成新的父代种群。反复调用 GT-SUITEMP 运算，以此类推，直至达到规定的进化代数。

4.2 基于 NSGA-II 算法的优化结果

利用 NSGA-II 算法，通过 MF 和 GT-SUITEMP 的联合仿真，一共得到个体 1080 个，其中违反约束条件的个体有 262 个，可行解一共有 818 个。以等效燃油消耗量为横轴，0-100km/h 加速时间为纵轴，生成可行解的离散点图，如图 4 所示。随着计算过程的推进，Pareto 最优解逐步向前进化，其中前沿部分标记的散点为最终的 Pareto 最优解。

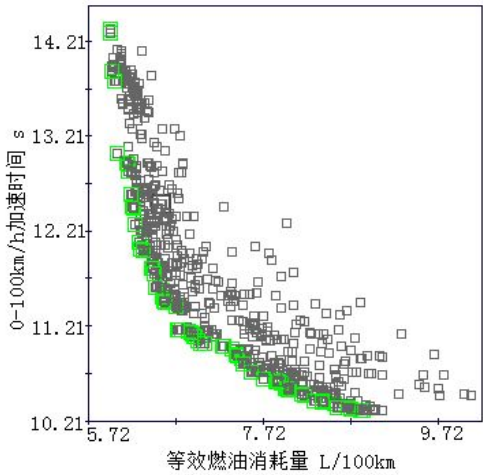


图 4 可行解离散点图

在综合考虑汽车动力性和燃油经济性的基础上，从最终的 Pareto 最优解中，选出 3 个较优的方案（933 号方案、994 号方案和 1030 号方案），优化后参数与优化前参数对比情况如表 2 所示。

优化前后目标函数值的柱形图，如图 5 所示，优化前，原始方案汽车的 0-100 km/h 加速时间为 11.55s，等效百公里燃油消耗量为 7.56 L。933 号方案汽车的 0-100 km/h 加速时间为 11.62s，等效百公里燃油消耗量为 6.48 L，994 号方案汽车的 0-100 km/h 加速时间为 11.15s，等效百公里燃油消耗量为 6.85 L，1030 号方案汽车的 0-100 km/h 加速时间为 10.81s，等效百公里燃油消耗量为 7.49 L。

表 2 优化参数对比表

优化参数	原方案	933 号	994 号	1030 号
i_0	3.5	3.88	3.96	3.66
i_{g1}	3.77	3.92	4.27	4.19
i_{g2}	2.1	1.78	2.11	2.31
i_{g3}	1.39	1.23	1.24	1.48
i_{g4}	1.03	0.91	0.92	1.08
i_{g5}	0.81	0.73	0.71	0.79
S_0 (r/min)	3200	3060	3180	3400

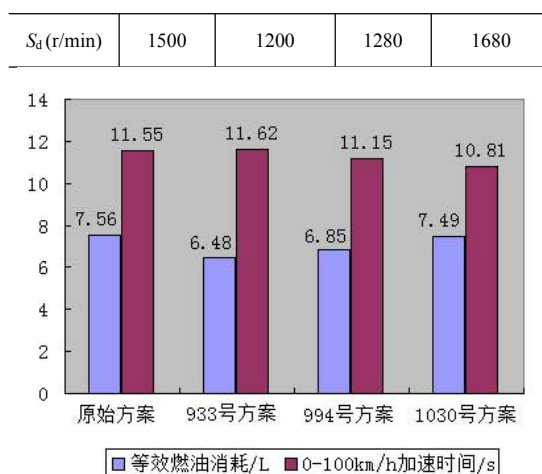


图 5 目标函数值柱形图

将所选择的方案的整车动力性和经济性指标与原始方案对比，933号方案动力性降低0.6%，经济性提高14.3%；994号方案经济性提高9.4%，动力性提高3.5%；1030号方案动力性提高0.93%，经济性提高6.4%。综合考虑动力性和经济性，选取994号方案为最终方案。

5 结束语

(1) 在研究ISG型MHV控制策略的基础之上，应用GT-SUITEMP软件，建立了整车动力性和经济性仿真模型，为建立多目标优化模型奠定了基础。

(2) 选择在多目标优化领域有很大优势的NSGA-II算法为优化算法，基于MF建立了动力性经济性模型，通过联合仿真，得到的最终优化方案与原始方案对比，动力性提高了3.5%，经济性提高了9.4%，取得了令人满意的优化效果。

(3) 本文论证了NSGA-II算法在混合动力汽车动力传动系参数优化方面的可行性及优越性，这种参数优化方法为新车型开发阶段的众多参数的多目标优化提供一种新的选择。

参考文献

- [1] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 75-84.
- [2] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化 [M]. 于歆杰, 周根贵, 译, 北京: 清华大学出版社, 2004: 76-82.
- [3] EHSANI M, Gao Yimin, EMADI A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车—基本原理、理论和设计 [M]. 倪光正, 倪培红, 熊素铭, 译, 北京: 机械工业出版社, 2010: 299-302.
- [4] 李茂林, 高翔. 乘用车动力传动系统对整车性能的影响[J]. 汽车技术, 2012, (8) 19-23.
- [5] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [6] 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.

- [7] 杜子学, 颜溯, 刘记君. 某重型汽车动力性与燃油经济性仿真与匹配优化[J]. 汽车技术, 2011, (10) 10-13.
- [8] RUDGE A, GUILHERME R. Simulation of the fuel Consumption Reduction Potential of a Mild Hybrid System Applied to a Popular Flexible Fuel Vehicle[C]. SAE Paper2012-36-0516.