

文章编号:1007-6735(2014)01-0044-05

基于非线性规划遗传算法的汽车动力传动系统参数优化研究

成志伟, 孙跃东, 刘 宾, 廖 欢

(上海理工大学 机械工程学院, 上海, 200093)

摘要: 研究了兼顾动力性和燃油经济性的汽车动力传动系统优化数学模型,以改善燃油经济性和整车动力性为目标,采用非线性规划遗传算法对某款轿车的动力传动系统参数进行优化研究并进行了仿真试验验证.结果表明:优化后原地起步加速时间降低了3.96%,整车多工况百公里油耗降低了8.23%.表明运用非线性规划遗传算法进行动力传动系统参数优化是可行的.

关键词: 动力传动系统; 参数; 非线性规划遗传算法; 优化设计

中图分类号: U 463.2 **文献标志码:** A

Parametric Optimization of Automobile Powertrain Based on Nonlinear Programming Genetic Algorithm

CHENG Zhiwei, SUN Yue-dong, LIU Bin, LIAO Huan

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: An optimized mathematical model for vehicle powertrain was introduced, considering comprehensively the dynamic property and the fuel economy. Taking fuel economy and dynamic property of the vehicle as optimal goals the powertrain parameters of the vehicle were optimized based on a nonlinear programming genetic algorithm. And the results were verified by simulation tests. The optimization results show that the acceleration time from standstill decreases by 3.96% and the fuel economy of the commercial vehicle decreases by 8.32% per 100km. The feasibility of the method based on nonlinear programming genetic algorithm was then proved.

Key words: powertrain; parameters; nonlinear programming genetic algorithm; optimization design

实现汽车动力传动系统不同参数的最佳匹配是提高汽车的运输生产率、降低汽车燃油消耗重要途径之一.而决定汽车动力性、燃油经济性好坏的因素

主要包括:发动机性能状况和动力传动系统参数选取的合理程度^[1].不同的动力传动系统参数优化方法的使用,直接影响到整车动力性和燃油经济性状

收稿日期: 2013-02-25

基金项目: 上海市科委科研计划资助项目(11140502000)

第一作者: 成志伟(1985-),男,硕士研究生.研究方向:汽车动力传动系匹配仿真. E-mail: czw370632798@126.com

通讯作者: 孙跃东(1965-),男,教授.研究方向:车辆动力系统及匹配、车辆发动机性能测试. E-mail: syd@usst.edu.cn

况,因此对其研究具有现实意义.而动力传动系统设计是一种混合变量的非线性复杂优化问题,需要兼顾动力性和燃油经济性两方面的因素.目前,动力传动系统参数优化的方法主要采用的是遗传算法,它具有良好地全局搜索能力,可进行分布计算,求解速度快.但是缺点是遗传算法易出现早熟现象,即进化初期出现适应度较高的个体,繁殖过快,破坏群体多样性.而且在逼近最优解 90% 后,达到最优解时,花费时间长,局部搜索能力差,从而导致最优解的分布不理想.基于传统遗传算法的缺陷,提出了将遗传算法和非线性规划算法相结合的非线性规划遗传算法,这样既能利用遗传算法全局搜索的能力,又能发挥非线性规划算法较大地局部搜索能力,能保证运算速度和最优解较好的均匀性、较强的逼近性.本文综合考虑了影响车辆使用性能诸多因素,运用非线性规划遗传算法,通过对某款轿车动力传动系统的传动比和主减速比进行优化,进而达到了改善整车动力性和燃油经济性的目的.

1 动力传动系统优化数学模型

1.1 目标函数的选择

1.1.1 动力性目标函数

采用原地起步加速到最高车速的 80% 速度时连续换挡的加速时间,优化时要求加速时间尽量小些,数学表达式为

$$f_1(X) = t = t_0 + \int_{u_{amin}}^{u_a} \frac{\delta G}{3.6g[F_t - (F_f + F_w)]} du \quad (1)$$

式中, t 为加速时间, s; t_0 为原地起步时间, s, 可由试验确定; u_{amin} 为汽车起步档位时最低车速, km/h; δ 为车轮旋转质量换算系数; G 为整车重量, N; F_t , F_f , F_w 为驱动力、滚动阻力和空气阻力.

1.1.2 燃油经济性目标函数

$$Q = \frac{\sum \theta_1 + \sum \theta_2 + \sum \theta_3 + \sum \theta_4}{S} \quad (2)$$

其中, $Q_1 = \frac{p_e g_e s_1}{102 u_1 \gamma}$; $Q_2 = \int_{u_0}^{u_i} \frac{7.2 s_2 p_e g_e}{367.1 (u_i^2 - u_0^2) \gamma} du$;

$$Q_3 = \frac{2 Q_d s_3}{u_{01} + u_{t1}}; Q_4 = Q_d t_d$$

式中, S 为整个多工况的行程; Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 为等速段、等加速段、等减速段和怠速段的油耗; $\sum \theta_1, \sum \theta_2, \sum \theta_3, \sum \theta_4$ 分别为对应 4 个工况段的总油耗; γ 为燃油的密度; g_e 为燃油消耗功率; s_1, s_2, s_3 分别

为等速、等加速、等减速的行程; u_0, u_t 为等加速起始、终了的车速; u_{01}, u_{t1} 为等减速起始、终了的车速; t_d 为怠速时间.

1.1.3 综合目标函数

运用线性加权法优化目标函数,同时引入加权因子 ω_i 来考虑各个分目标函数在相对重要程度方面的差异,但是由于动力性目标函数采用加速时间,单位是秒,而燃油经济性目标函数采用的百公里油耗,单位是升,存在量纲上的差异,无法直接相加.如果单位进行变换的话,优化结果也会不同.这样就会产生加权因子的选择无意义的问题,计算结果会与实际优化结果有较大的偏差.

解决方法是将有量纲的指标做统一量纲处理,目标函数就变形为

$$F(X) = \omega_1 \frac{t}{t_{min}} + \omega_2 \frac{Q}{Q_{min}} \quad (3)$$

式中, ω_1, ω_2 为加权因子; t_{min}, Q_{min} 为单个目标函数的最优值.

1.2 优化变量

对于动力传动系统而言,在发动机和其它条件确定的情况下,影响动力性和燃油经济性主要因素为各档位传动比和主减速比,对于 5 档变速器的汽车而言,优化设计变量为

$$X = [x_1, \dots, x_5, x_6]^T = [i_{g1}, \dots, i_{g5}, i_{g0}] \quad (4)$$

式中, $i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{g4}, i_{g5}$ 和 i_{g0} 为变速器中 1, 2, 3, 4, 5 挡传动比和主减速比.

1.3 约束条件

动力传动系统优化约束条件主要指各档速比间隔要求和汽车动力性能要求.速比约束条件主要为相邻两档间的传动比的比值不宜过大,否则会造成发动机转速变化范围过大,换挡困难.故相邻两档间的比值一般不大于 1.7~1.8,而且档位增加,相邻两档传动比的比值应减小.汽车动力性能约束条件主要指最高车速、最大爬坡度和附着力的要求.

所以约束条件为

$$g_1(X) = \frac{X_1}{X_2} - 1.8 \leq 0 \quad (5)$$

$$g_2(X) = \frac{X_2}{X_3} - \frac{X_1}{X_2} \leq 0 \quad (6)$$

$$g_3(X) = \frac{X_3}{X_4} - \frac{X_2}{X_3} \leq 0 \quad (7)$$

$$g_4(X) = \frac{X_4}{X_5} - \frac{X_3}{X_4} \leq 0 \quad (8)$$

$$g_5(X) = 1 - \frac{X_4}{X_5} \leq 0 \quad (9)$$

$$g_6(X) = D'_{1\max} - D_{1\max} \leq 0 \quad (10)$$

$$g_7(X) = \alpha'_{1\max} - \alpha_{1\max} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_8(X) = \frac{T_{tq\max} X_6 X_1 \eta_T}{r} - F_{Z\varphi} \leq 0 \quad (12)$$

$$g_9(X) = u'_{a\max} - u_{a\max} \leq 0 \quad (13)$$

式中, $D_{1\max}$, $D'_{1\max}$ 为 1 档动力因数最大值和要求值; $\alpha_{1\max}$, $\alpha'_{1\max}$ 为最大爬坡度最大值和要求值; $T_{tq\max}$ 为发动机最大扭矩; $F_{Z\varphi}$ 为汽车驱动轮上法向反作用力; φ 为道路附着系数; $u_{a\max}$, $u'_{a\max}$ 为最高车速最大值和要求值.

2 非线性规划遗传算法

非线性规划遗传算法的是一种基于生物界自然选择原理和进化机制,进行高效率全局寻优,同时根据所研究问题的非线性化的特点,利用非线性规划算法在局部寻优能力强的特点进行局部搜索的参数优化方法.

应用非线性规划遗传算法对动力传动系统参数优化设计,要进行如下步骤:

a. 种群初始化 进行遗传算法,首先要确立种群群体,即优化变量的设计解的集合.而群体的组成个体是一定数目的二进制串,所以设计变量与个体间的映射需通过编码来实现,本文中采取浮点编码的方法,即由问题解空间的一组向量 $\mathbf{X}$ 表示一个染色体编码,故动力传动系优化问题可表示为

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$$

群体的性质变化决定遗传算法的搜索能力,而其收敛性决定算法的收敛性,为保证算法的精度和速度,通常群体规模取 20~100 之间.同时为了保证初始群体具有普遍性,采用一致随机方式选取初始群体.

b. 适应度值计算 在非线性规划遗传算法中,采用适应度函数来区分群体中个体好坏的标准,适应值越大表明个体越优,即得到传动比和主减速比能更好改善动力性和燃油经济性.进行动力传动系统参数优化,优化问题是最小值优化问题,必须对目标函数进行适当的转化才能与适应度建立关系,适应度的计算函数为

$$G(X) = \begin{cases} C_{\max} - F(X) & \text{当 } F(X) < C_{\max} \\ 0 & \text{当 } F(X) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $C_{\max}$ 为一个可调参数,通常取 $F(X)$ 理论上可能最大的值,本文中取 $C_{\max} = 10$.

c. 选择 从旧设计变量的解集合中以一定概

率选择优良个体组成新的集合,以得到更好的解集合.个体被选中的概率与适应度值有关.一般采用轮盘赌法,即基于适应度的选择策略,个体 i 被选择的概率为

$$p_i = F_i / \sum_{j=1}^N F_j \quad (15)$$

式中, F_i 为个体适应度值; N 为种群规模.

d. 交叉 指从种群中随机选择两个个体,采用实数交叉法交换组合,将父串的优秀特征遗传给子串,产生新的优秀个体.具体交叉操作方法,例如第 k 个染色体 a_k 和第 l 个染色体 a_l 在位交叉操作方法为

$$\begin{cases} a_{kj} = a_{ij}(1-b) + a_{lj}b \\ a_{lj} = a_{ij}(1-b) + a_{kj}b \end{cases} \quad (16)$$

式中, b 是 $[0,1]$ 区间的随机数.

e. 变异 从种群中随机选取某个个体,对其进行变异以产生更优秀的个体.第 i 个个体的第 j 个基因 a_{ij} 进行变异的操作方法为

$$a_{ij} = \begin{cases} a_{ij} + (a_{ij} - a_{\max})f(g), & r \geq 0.5 \\ a_{ij} + (a_{\min} - a_{ij})f(g), & r \leq 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

$$f(g) = r_2(1 - g/G_{\max})^2 \quad (18)$$

式中, $a_{\max}$, $a_{\min}$ 为区间的随机数 a_{ij} 基因的上界和下界; r_2 是一个随机数; g 是当前迭代次数; $G_{\max}$ 是最大进化次数; r 为 $[0,1]$ 区间的随机数.

f. 非线性寻优 当遗传算法每次进化到 10 代后,以所得到的结果为初始值,搜索约束条件下的非线性元函数的最小值.由于动力传动系统参数优化是一个多变量有约束的非线性优化问题,故采取惩罚函数法来进行非线性寻优,具体步骤为:

(a) 给定一串数列, $\{r_n\}$, $r_n \rightarrow 0$, 初始点 x^0 , 精度 $\epsilon > 0$, 令 $k = 1$.

(b) 构造罚函数 $p(x) = \sum_{i=1}^9 [\min(g_i(x), 0)]^2$ 及目标函数 $G_{rk}(x) = F(x) + \frac{1}{r_n} p(x)$, 采用共轭方向法,以 x^{k-1} 为初始点求解 $\min G_{rk}(x)$.

(c) 若 x^k 达到精度要求,终止算法,输出最优解;否则,令 $k = k + 1$,从 b 步继续.

g. 判断运算 遗传算法是一种向最优解逐渐逼近的、反复进化的搜索方法,故需要判断新一代群体是否满足结束条件,判断标准为是否完成所需的进化次数,如不满足,从 b 步骤继续进行计算.

非线性规划遗传算法流程图如 1 所示.

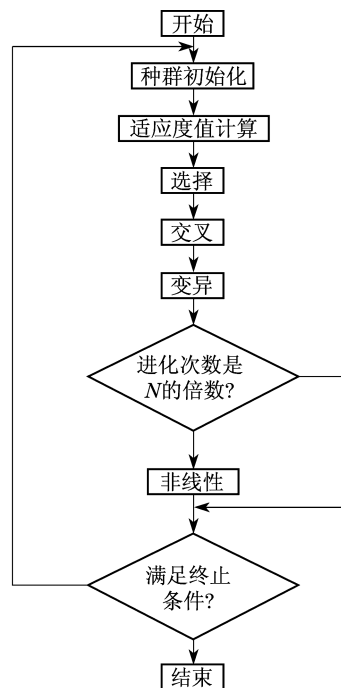


图 1 非线性规划遗传算法流程图

Fig.1 Flow chart of nonlinear programming genetic algorithm

3 优化实例

应用非线性规划遗传函数对某型轿车动力传动系统参数进行优化,该车的基本参数:发动机的排量为 1 070 mL,额定功率为 48 kW,额定转速为 5 700 r/min,最大扭矩为 88 N·m(3 500~4 000 r/min),空载质量为 896 kg,满载质量为 1 265 kg,轮胎半径为 272 mm,风阻系数为 0.40,迎风面积为 2.31 m²,传动效率为 0.9,各档传动比分别为 3.420,1.897,1.30,0.915,0.76,主减速比为 4.388.

3.1 优化过程

发动机扭矩外特性拟合多项式为

$$M_e = 2.8351 \times 10^{-10} n_e^3 - 4.7021 \times 10^{-6} n_e^2 + 2.2387 \times 10^{-2} n_e + 53.9867$$

万有特性拟合多项式为

$$b_e = 600.9 - 5.178 M_e - 1.2315 \times 10^{-2} n_e + 2.3187 \times 10^{-2} M_e^2 + 1.7129 \times 10^{-2} n_e^2 - 2.6975 \times 10^{-6} M_e^3 - 2.5957 \times 10^{-6} M_e^2 n_e + 2.5312 \times 10^{-8} M_e n_e^2 + 1.075710 - 8 n_e^3$$

优化过程中非线性规划遗传算法采用的基本参数为:种群规模为 50,迭代次数为 100,交叉率为 0.6,变异率为 0.1.本算法中初始种群与每代产生的新一代种群都严格约束在给定范围内,保证了生

成个体都是一个可行解.图 2 反映了非线性规划遗传算法的优化过程.传动比和主减速比优化结果如表 1 所列.

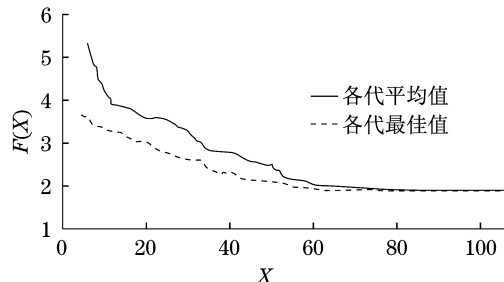


图 2 非线性规划遗传函数优化过程

Fig.2 Optimization process of nonlinear programming genetic function

表 1 优化结果

Tab.1 Results of optimization

参数	i_{g1}	i_{g2}	i_{g3}	i_{g4}	i_{g5}	i_{g0}
优化前	3.420	1.897	1.30	0.915	0.76	4.388
优化后	3.365	2.031	1.345	0.949	0.725	4.378

3.2 仿真试验验证

应用遗传算法对动力传动系统参数进行优化后,采用 AVL-Cruise 软件,并结合 MATLAB 对由优化结果进行仿真试验验证分析.基于 AVL-Cruise 软件所建立的整车传动系统仿真模型如图 3 所示.优化前后动力性和燃油经济性如表 2 所示(见下页).优化前后动力性能和经济性能分别如图 4(见下页)和图 5(见下页)所示.

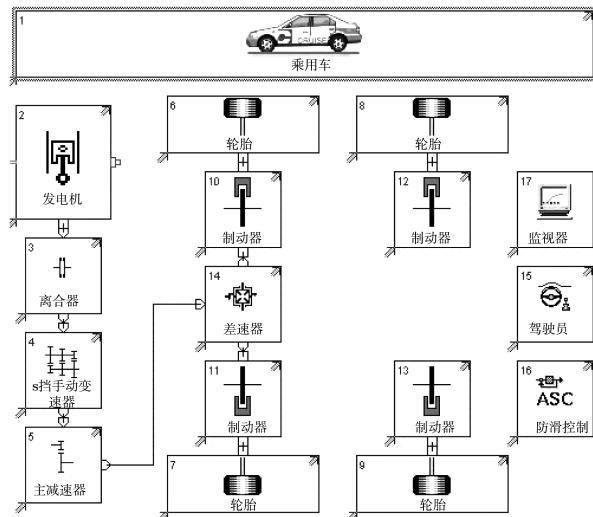


图 3 整车传动系统仿真模型

Fig.3 Simulation model of drive system of the vehicle

表2 优化前后整车性能对比

Tab.2 Comparison between performances before and after optimization

参数	优化前	优化后	变化量
最高车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	143.85	136.32	-5.23%
加速时间/s	33.60	32.27	-3.96%
最大爬坡度/%	38.22	36.57	-4.32%
直接档最大动力因数	0.1037	0.1138	9.74%
多工况百公里油耗/ $\text{L} \cdot (100\text{km})^{-1}$	6.609	6.065	-8.23%

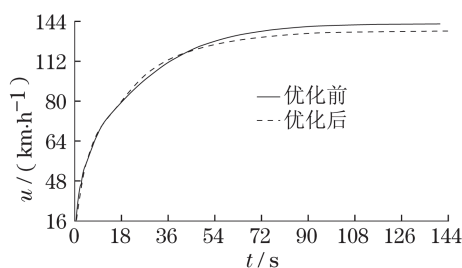
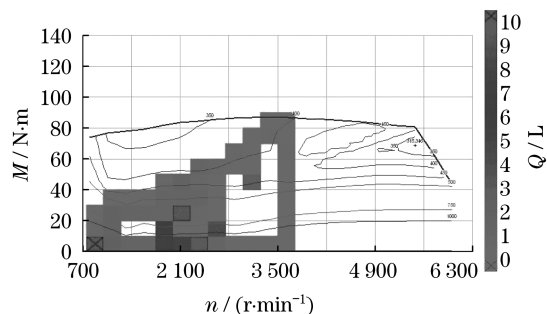
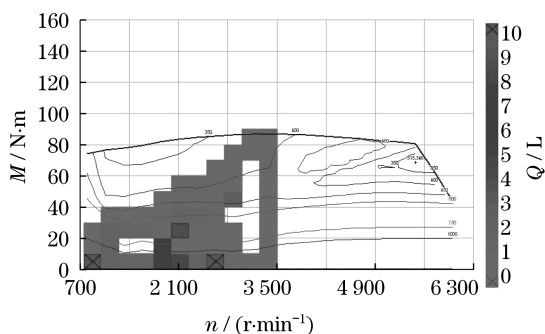


图4 优化前后动力性能比较

Fig.4 Comparison between dynamic properties before and after optimization



(a) 优化前发动机工作工况图



(b) 优化后发动机工作工况图

图5 优化前后燃油经济性比较

Fig.5 Comparison between fuel economy before and after optimization

结合表2和图4中可以看出,原地起步连续换挡加速时间有所减小,直接档最大动力因数有较大提高,虽然最高车速和最大爬坡度有所下降,但是下降幅度较小.结合表2和图5中可以看出,图中彩色区域主要表示发动机工作区域,优化后发动机主要工作区域向左偏移,向经济工作区逐渐靠近,表明汽车燃油经济性得到改善,同时多工况百公里油耗明显下降,所以从总体来说,这种优化方案使得动力性和燃油经济性都得到一定程度的改善,兼顾了动力性和经济性指标,优化的结果令人较为满意,故采用非线性规划遗传算法来有效地优化汽车动力传动系统参数.

4 结论

综合考虑汽车动力性和燃油经济性因数,提出了汽车动力传动系统优化数学模型,对目标函数分量做了归一化处理.应用非线性规划遗传算法对动力传动系统参数进行了优化并做了仿真试验验证,结果表明,整车动力性和燃油经济性得到一定程度提高,说明了运用该算法对动力传动系统进行优化是可行的.

参考文献:

- [1] 颜伏伍,胡峰,田韶鹏,等.基于多目标遗传算法的汽车动力传动系统参数优化设计[J].汽车技术,2009,12:20~23.
- [2] 汪定伟.智能优化算法[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [3] 余志生.汽车理论[M].4版.北京:机械工业出版社,2006.
- [4] 李明.遗传算法的改进及其在优化问题中的应用研究[D].长沙:湖南大学,2004.
- [5] 王薇,谷正气,董继征.基于惩罚函数法的汽车动力传动系参数优化匹配分析[J].机械与电子,2005(10):21~24.
- [6] Tang C Q, Zhao L G. Fuzzy optimization of vehicle power train based on dynamic quality and fuel economy [J]. IEEE, International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, 2010, 20(6):390~393.

(编辑:金虹)