

基于 GT-DRIVE 软件的汽车传动系参数对经济性和排放性的影响

刘 宾, 孙跃东

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 利用整车性能仿真软件 GT-DRIVE 建立了某车型的 NEDC 循环仿真模型, 通过仿真计算分析了变速器挡位数对汽车经济性和排放性的影响. 应用拉丁超立方抽样法对主减速比和变速器各挡位速比进行 DOE 试验设计, 通过回归分析, 找出了对汽车经济性和排放性影响较为显著的 3 个参数: 主减速比、二挡速比和五挡速比, 并分析了它们对经济性和排放性的影响规律. 最后采用 DOE 与遗传算法相结合的策略, 以这些参数作为设计变量进行优化设计, 以求在保证动力性的前提下获得综合最优的经济性和排放性能.

关键词: GT-DRIVE 软件; 传动系; 参数; 经济性; 排放性

中图分类号: U 462.3 **文献标志码:** A

Influences of Vehicle Powertrain Parameters on Economy and Emissions Based on the GT-DRIVE Software

LIU Bin, SUN Yue-dong

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

Abstract: The vehicle simulation model for a certain car was set up using the GT-DRIVE software which is often used to simulate the vehicle performance. Based on the simulation results of the new European driving cycle (NEDC), the influences of transmissions with different gear numbers on vehicle economy and emissions were analyzed. The Latin hypercube sampling method (LHS) was adopted for the design of experiment (DOE) about the final drive ratio and various gear ratios. By the regression analysis, three parameters that have significant effects on the automobile economy and emissions were determined, and the laws of their influences were studied. Finally, the strategy of combining DOE and genetic algorithm (GA) was applied to achieve optimal design. The objective of improving economy and emission performance on the premise of ensuring the dynamic performance is attained.

Key words: GT-DRIVE software; powertrain; parameters; economy; emissions

能源危机、环境污染和全球气候变暖促使人们对汽车提出了更高的要求, 不仅要有好的动力性, 还应有优异的经济性和排放性. 参数优选的传动系统有利于发动机的性能充分发挥, 使汽车不仅具有良

收稿日期: 2013-12-02
基金项目: 上海市科委科研基金资助项目(11140502000)
第一作者: 刘 宾(1986-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 汽车动力传动系匹配. E-mail: huangtushen@sina.cn
通讯作者: 孙跃东(1965-), 男, 教授. 研究方向: 汽车动力传动系匹配及实验. E-mail: syd@usst.edu.cn

好的动力性和经济性,还可以改善排放效果^[1]. 目前,有关汽车动力传动系匹配对汽车动力性和经济性影响的研究已非常详尽,而排放性影响方面的研究资料却很少. 由于汽车的经济性和排放性之间具有非常紧密的联系,特别是 CO₂ 的排放量几乎与油耗量成正比关系^[1-2], 因此,应将两者一起进行研究.

本文利用整车性能仿真软件 GT-DRIVE, 基于对 NEDC 循环工况的模拟计算研究,分析传动系参数对汽车经济性和排放性的影响规律,以期在保证汽车动力性的前提下,能够更合理地匹配汽车动力传动系统.

1 仿真模型的建立

以某款配有五挡手动变速器的中级乘用车型为研究对象,其发动机和传动系统的主要参数如表 1 所示.

本文所使用的工具 GT-DRIVE 是一款高性能仿真软件,它采用部件模块化建模方式,因而可以通过设置各模块的参数实现对不同车型进行快速灵活建模. 在输入车身、发动机、离合器、变速器、传动轴、差速器、驱动桥及车轮等各模块的参数完成对它们

表 1 原车型主要参数
Tab.1 Parameters of the vehicle

参数	数值
整车整备质量/kg	1 555
满载质量/kg	1 910
发动机排量/L	2.0
标定功率/kW/转速/(r·min ⁻¹)	108/4 200
最大扭矩/(N·m)/转速/(r·min ⁻¹)	207/2 350
一挡速比	3.538
二挡速比	2.125
三挡速比	1.360
四挡速比	1.029
五挡速比	0.720
主减速比	3.370

的定义后,利用传感器和执行器将各模块进行连接(包括两类:部件间的物理连结和部件间的状态信息传递),当检查无误后,便可设置仿真计算模式、结束条件以及结果输出形式,这样就完成了整个仿真模型的建立.

图 1 是所建立的整车 NEDC 循环仿真模型. 需要说明的是,由于本文意在研究传动系参数对汽车相关性能的直接影响,模型中没有考虑排气后处理部分. 另外,本文中有关 CO₂ 的排放数据都是由碳守恒计算获得的结果.

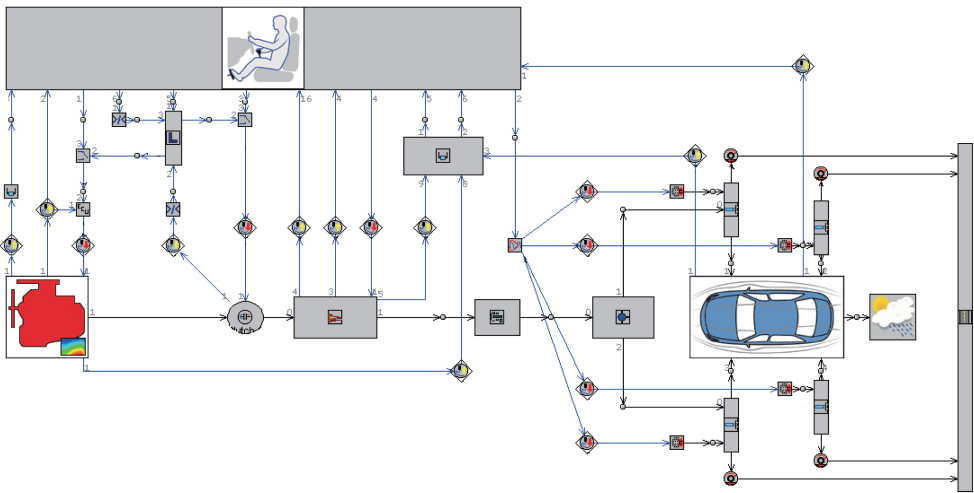


图 1 整车 NEDC 循环仿真模型
Fig.1 Simulation model of NEDC

2 传动系参数对经济性和排放性影响的分析

2.1 变速器挡位数

通过对目前主流的五速和六速变速器的研究,

分析具有不同挡位数的变速器对汽车经济性和排放性的影响. 将原车型的发动机匹配市面上的一款典型的六速变速器(各挡位速比为 3.892,2.338,1.496,1.132,0.904,0.713),并将其经济性和排放性仿真结果与原车型进行对比.

图2为分别匹配五速和六速变速器的发动机工况点在油耗万有特性图中的分布。 p 为压强, n 为转速.由图2可知,当匹配五速变速器时,发动机趋于工作在3 000 r/min转速附近,而当匹配六速变速器时发动机趋于工作在燃油消耗率相对较低的2 500 r/min附近.从图3中可以看出,两款变速器确实影响发动机工

况点在 NO_x 排放万有特性图中的分布,但对各等排放区的工况点分布数目统计结果表明,变速器的挡位数对 NO_x 排放的影响并不明显.从图4和图5(见下页)中可以明显地看出,当匹配六速变速器时,发动机可以有效地避开工作在3 000 r/min这一HC和CO高排放率区域,从而改善了发动机的相关排放性能.

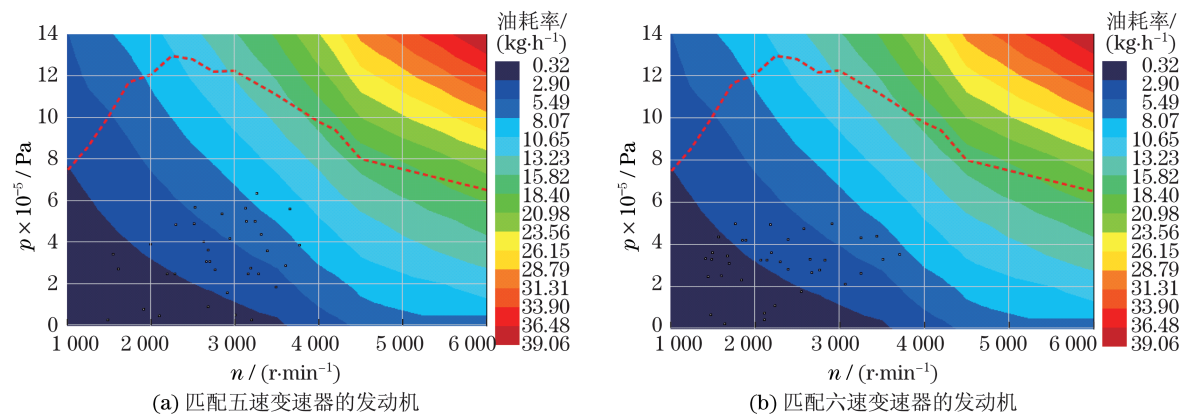


图2 发动机工况点在油耗万有特性图中的分布

Fig.2 Distribution of engine operation points on the fuel consumption map

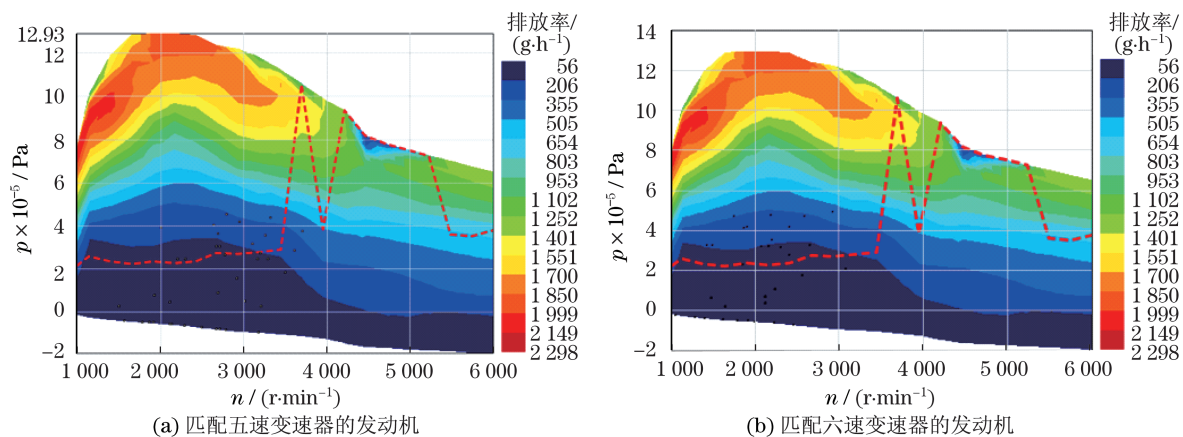


图3 发动机工况点在 NO_x 排放万有特性图中的分布

Fig.3 Distribution of engine operation points on the NO_x emission map

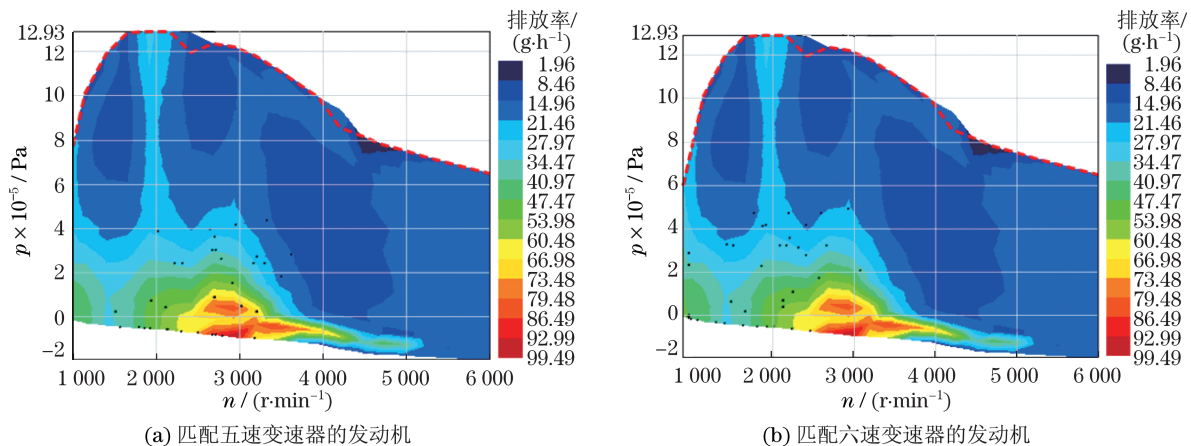


图4 发动机工况点在HC排放万有特性图中的分布

Fig.4 Distribution of engine operation points on the HC emission map

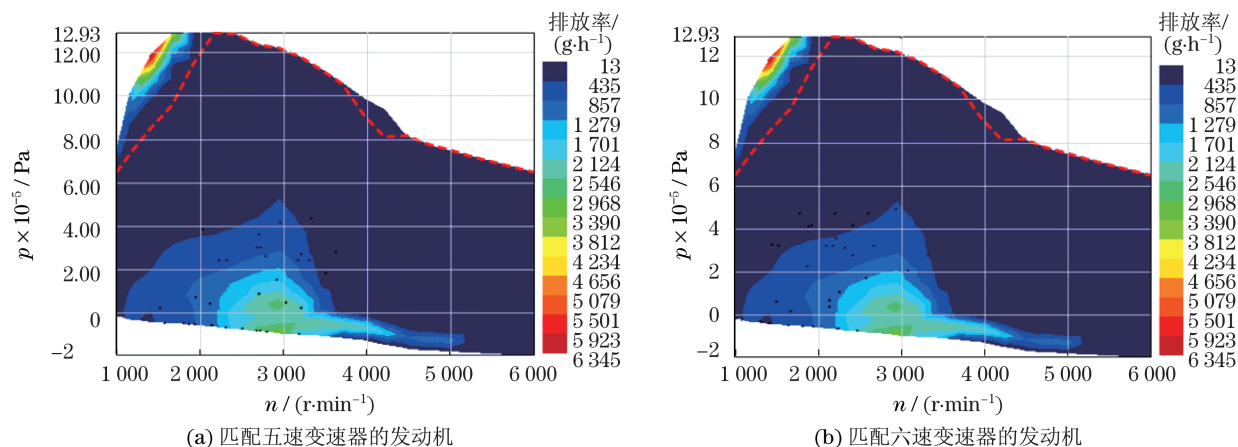


图5 发动机工况点在CO排放万有特性图中的分布

Fig.5 Distribution of engine operation points on the CO emission map

通过对匹配不同挡位数变速器的发动机工况点分布的对比,可以直观地认知到变速器的挡位数对汽车经济性和排放特性的影响.表2给出了匹配两种变速器的汽车经济性和排放性的仿真结果.从表2中可以看出,匹配六速变速器的汽车在经济性和排放性方面均优于匹配五挡变速器的汽车,这是因为挡位数多的变速器具有更紧密的变速比和更宽泛的变速范围,可以使发动机更趋于工作在理想的工作区间,有利于提升经济性,并减少有害气体和二氧化碳的排放^[1-3].

表2 匹配不同挡位变速器的仿真结果对比

Tab.2 Comparison of simulation results

性能指标	五速变速器	六速变速器
燃油消耗/(L·100 km ⁻¹)	7.00	6.40
NO _x 平均排放率/(g·km ⁻¹)	3.60	3.53
HC 平均排放率/(g·km ⁻¹)	1.47	1.30
CO 平均排放率/(g·km ⁻¹)	30.82	21.44
CO ₂ 平均排放率/(g·km ⁻¹)	157.22	144.93

2.2 传动系参数影响显著性分析

由于传动系参数较多,且各参数对汽车经济性和排放性影响的显著性以及参数之间的影响是否完全独立并不确定,因此,应先找出那些对汽车经济性和排放性影响较为显著的参数.首先利用拉丁超立方抽样法(LHS)^[4]将传动系参数进行DOE试验设计^[5].根据DOE试验统计所得的数据用回归分析法建立百公里燃油消耗和平均有害气体排放率关于传动系参数的回归方程,拟合方程为

$$y_n = b_0 + b_1 x_1 + \cdots + b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + \cdots + b_{k-1,k} x_{k-1} x_k + b_{11} x_1^2 + \cdots + b_{kk} x_k^2 \quad (1)$$

方程(1)包括了:a.主影响因子 $x_1, x_2, \cdots, x_k$;

b.主影响因子间的交互项 $x_1 x_2, x_2 x_3, \cdots, x_{k-1} x_k$;

c.主影响因子的平方项 $x_1^2, x_2^2, \cdots, x_k^2$.检验表明,4个回归方程的拟合优度分别为0.999 8,0.995 3,0.993和0.997 9,说明拟合精度非常高.

表3为回归分析的因子显著性结果.由表3可知,对汽车经济性和排放性影响最为显著的3个因子分别为主减速比、二挡速比和五挡速比,另外,三挡速比的影响也较明显.现将通过仿真分析,详细研究主减速比、二挡速比和五挡速比这3个参数对经济性和排放性的影响规律.

表3 对经济性和排放性影响显著的因子

Tab.3 Factors that have significant effect on the economy and emissions

研究对象	因子1	因子2	因子3	因子4
燃油消耗	主减速比	二挡速比	五挡速比	三挡速比
NO _x	-主减速比	-五挡速比	二挡速比	三挡速比
HC	主减速比	二挡速比	主减速比平方	五挡速比
CO	主减速比	二挡速比	五挡速比	三挡速比

注:-代表该因子对研究对象的影响是负相关的,若前面没有这一符号,表示影响是正相关的

2.3 主减速比

以原车型为研究对象,固定传动系中其它参数不变,通过改变主减速比的大小仿真分析主减速比的变化对汽车经济性和排放特性的影响.本文主减速比的变化范围为2.2~4.1,步长为0.1,共获得20个组合,仿真结果如图6所示.

由图6(a)可知,随着主减速比的增大,汽车的经济性变化曲线呈开口向上的抛物线,在主减速比等于2.4处出现最小值点,此时汽车具有最佳的经济性.由6(b)和6(c)可知,汽车的NO_x的排放率随主减速比的增加大幅度降低,而HC的排放率逐渐

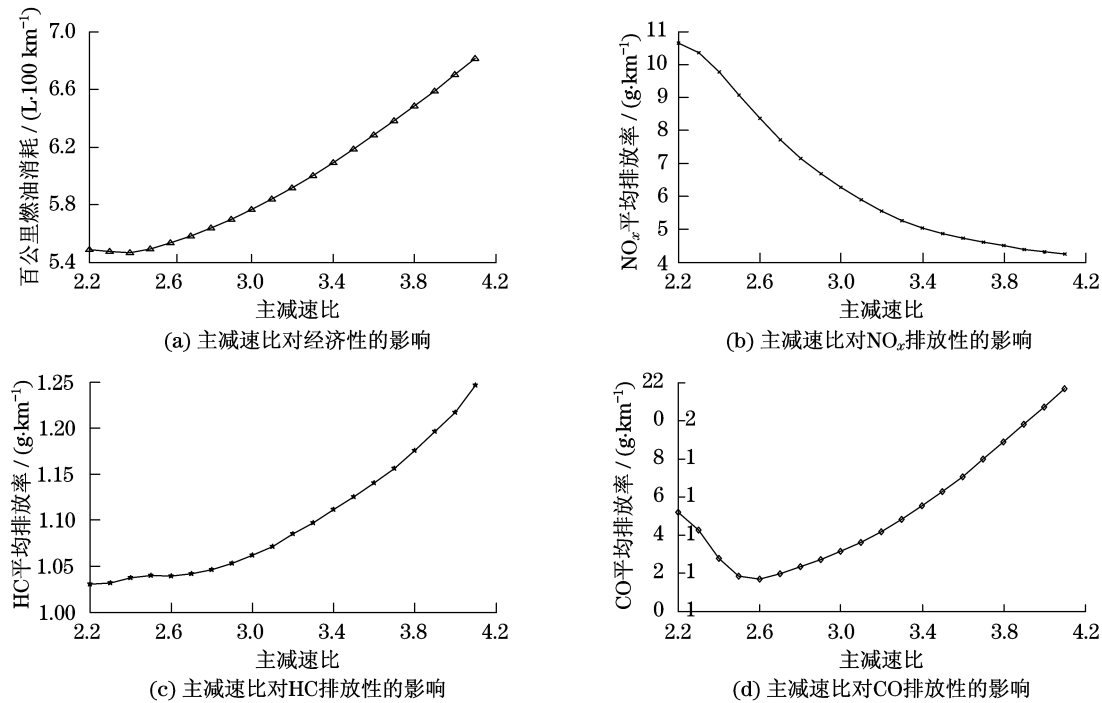


图6 主减速比对经济性和排放性的影响

Fig.6 Effect of final drive ratio on economy and emissions

变大,且变化率也逐渐增大.由6(d)可知,汽车的CO排放率变化曲线与经济性的变化曲线相似,且在主减速比等于2.6处达到最小值.

2.4 二挡速比

保持传动系中的其它参数不变,设置二挡速比的变化范围为1.6~2.8,步长为0.2,可获得7个组

合,仿真结果如图7所示.总的来说,随着二挡速比的增加,汽车经济性、HC和CO的排放性的变化幅度虽然不同,但趋势基本一致.而 NO_x 的排放率与其它3个研究对象的变化趋势相反.值得注意的是,当二挡速比在大于2.4的范围内变化时,对 NO_x 排放率的影响较小.

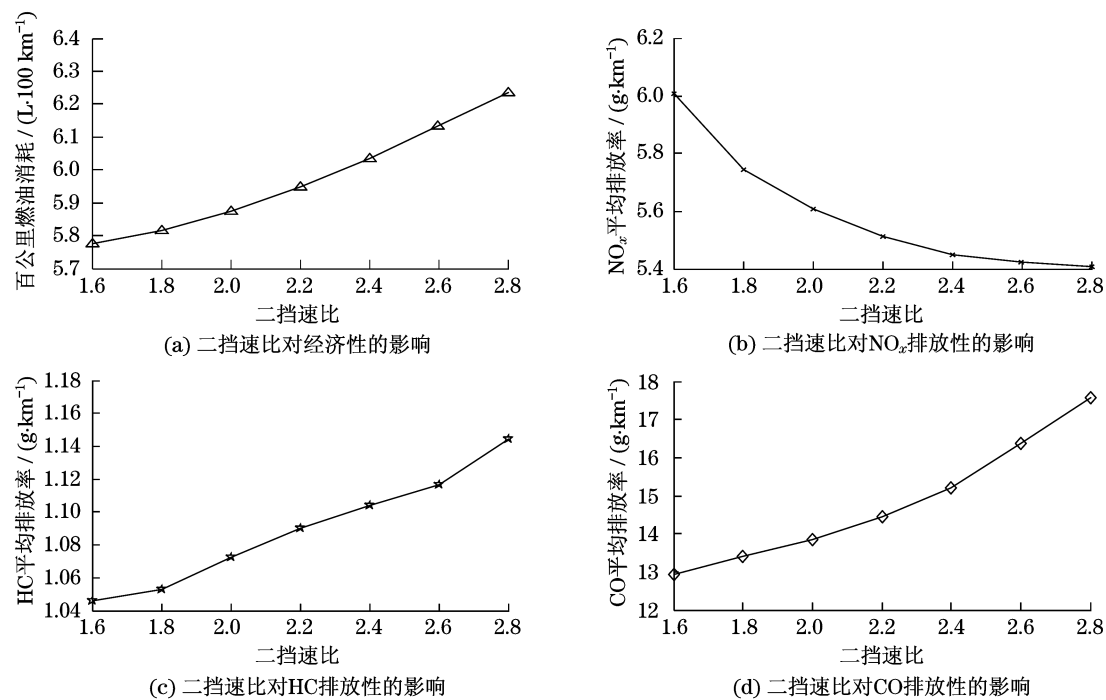
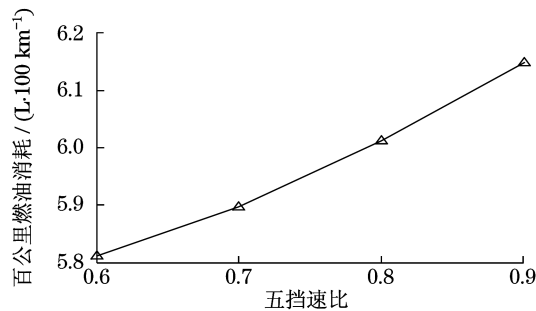


图7 二挡速比对经济性和排放性的影响

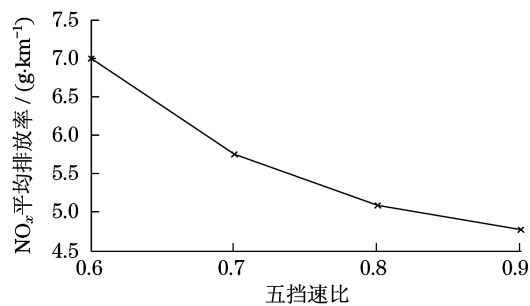
Fig.7 Effect of Gear 2 on economy and emissions

2.5 五挡速比

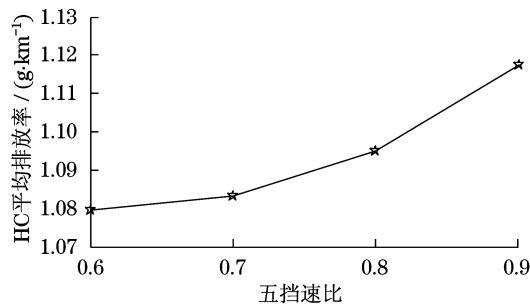
同样设置五挡速比的变化范围为0.6~0.9,步长为0.1,共获得4个组合,仿真结果如图8所示.



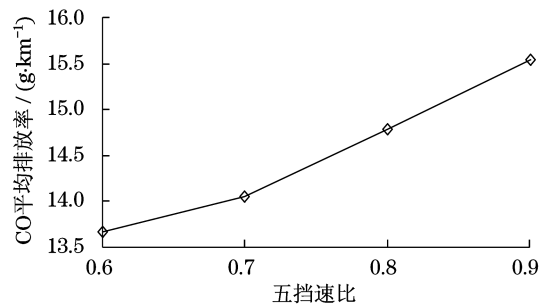
(a) 五挡速比对经济性的影响



(b) 五挡速比对NO_x排放性的影响



(c) 五挡速比对HC排放性的影响



(d) 五挡速比对CO排放性的影响

图8 五挡速比对经济性和排放性的影响

Fig.8 Effect of Gear 5 on economy and emissions

3 传动系参数优化

3.1 优化模型的建立

选择主减速比、二挡速比、五挡速比和三挡速比作为设计变量进行优化设计.采用将DOE试验设计与遗传算法^[6]相结合的策略,因为其可以用较少的计算获得较为精确和实用的优化结果.基于上文建立的回归方程做响应面,利用遗传算法进行寻优,在保证动力性的前提下,以燃油消耗和有害物排放综合最优为目标,获得最佳的传动系参数组合.现给出优化模型表达式.

设计变量

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [i_0, i_2, i_3, i_5] \quad (2)$$

目标函数

$$\min f(X) = \alpha F(X) + \beta N(X) + \gamma H(X) + \eta C(X) \quad (3)$$

约束条件

$$\begin{aligned} u_{a,\max} &\geq 180 \text{ km/h}, & i_{\max} &\geq 45\%, \\ t_{0\sim 100 \text{ km/h}} &\leq 12.5 \text{ s} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, i_0 为主减速比; i_2, i_3, i_5 分别为二挡、三挡和五挡的速比; $F(X)$ 为 NEDC 循环百公里燃油消耗;

由图8可知,五挡速比的变化对汽车经济性和排放性的影响与二挡速比的影响类似,但其对NO_x排放性的影响比二挡速比的显著.

$N(X)$ 为 NEDC 循环 NO_x 平均排放率; $H(X)$ 为 NEDC 循环 HC 平均排放率; $C(X)$ 为 NEDC 循环 CO 平均排放率; $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 分别为对应的权系数; $u_{a,\max}$ 为最高车速; $i_{\max}$ 为最大爬坡度; $t_{0\sim 100 \text{ km/h}}$ 为汽车原地起步加速到 100 km/h 用时.

这里以 $u_{a,\max}, i_{\max}$ 和 $t_{0\sim 100 \text{ km/h}}$ 为约束条件来保证汽车的动力性.本文采用加权因子法^[7]将多目标优化问题简化为单目标优化问题.由于 $F(X)$ 不仅代表了汽车的燃油经济性,还间接地说明了汽车的 CO₂ 排放性能^[1-2],因此,本文中其权系数 α 取为 0.4,而权系数 β, γ, η 的值均为 0.2.

图9是遗传算法的参数寻优过程,其中,遗传算法优化模型中的相关参数设置包括:初始种群 $N = 50$,交叉概率 $P_c = 0.6$,变异概率 $P_m = 0.01$,终止代数 $T = 100$.

3.2 优化结果分析

设计变量的优化结果如表4所示.需要说明的是,这里优化得到的结果是基于将优化变量作为连续变量的假设,而工程上它们是离散的,因此,还需要将优化结果提供给传动系供应商,由供应商根据工程技术经验和可能实现的制造工艺进行配齿分析^[8].

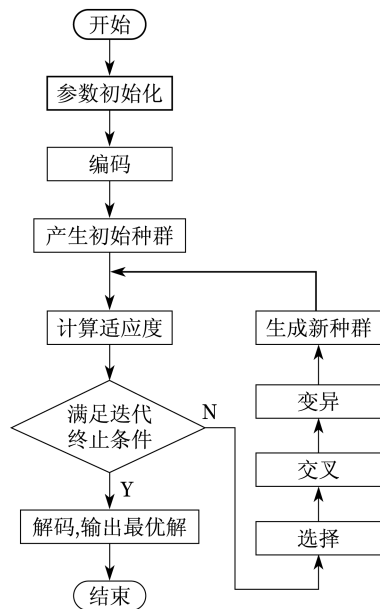


图 9 遗传算法参数寻优过程

Fig.9 Flow chart of parameters-optimized process using genetic algorithm

表 4 汽车传动系参数优化前后对比

Tab.4 Comparison of powertrain parameters before and after optimization

状态	i_0	i_2	i_3	i_5
优化前	3.370	2.125	1.360	0.720
优化后	3.242	2.016	1.190	0.757

表 5 是优化后的汽车经济性和排放性结果与优化前的仿真结果的对比,可以看出,优化后虽然 NO_x 的排放率稍微变大,但百公里燃油消耗、HC 和 CO 的排放率都有明显的改善.这一优化结果与上文的分析是吻合的,传动系参数对燃油经济性、HC 和 CO 排放率影响的规律基本相同,但对 NO_x 排放率的影响却与其它 3 个研究对象相反.由于优化后主减速比、二挡速比都有所增加,根据图 6 和图 7 可知,这将使得 NO_x 的排放量增大.

表 5 汽车经济性和排放性优化前后对比

Tab.5 Comparison of vehicle fuel economy and emissions before and after optimization

性能指标	优化前	优化后
燃油消耗/(L · km ⁻¹)	7.00	6.63
NO_x 排放率/(g · km ⁻¹)	3.60	3.63
HC 排放率/(g · km ⁻¹)	1.47	1.31
CO 排放率/(g · km ⁻¹)	30.82	20.56
CO_2 排放率/(g · km ⁻¹)	157.22	150.43

4 结 论

利用 GT-DRIVE 软件建立了某车型的 NEDC 循环仿真模型,通过研究传动系参数对汽车经济性和排放性的影响规律,得出以下结论:

a. 通过回归分析找出了对汽车经济性和排放性影响较为显著的传动系参数:主减速比、二挡速比和五挡速比.分析结果表明,这 3 个参数对汽车经济性和排放性的影响大体相同,随着 3 个参数的增大,燃油消耗和 HC,CO 排放率逐渐变大(除了主减速比对 CO 排放率的影响呈抛物线规律变化),而 NO_x 的排放率却逐渐减小.但 3 个参数的影响显著性并不相同,它们对汽车经济性和排放性的影响显著性如表 3 所示.

b. 优化结果表明,汽车的经济性和排放性之间存在一定的矛盾,很难获得同时各方面都最优的综合性能,这主要表现在随着速比参数的变化, NO_x 排放率与燃油消耗和 HC,CO 排放率具有相反的变化规律,因此,在优化时应该稍微牺牲一点 NO_x 排放性能以获得更好的其它汽车性能,并且在排放后处理中加强对其的催化转变来降低排放量.

参考文献:

- [1] Naunheimer H, Bertsche B, Ryborz J, et al. Automotive transmissions [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [2] 余志生. 汽车理论 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] Baglione M, Duty M J. Development of a powertrain matching analysis tool [C] // SAE 2010 World Congress & Exhibition. 2010: 2010-01-0490.
- [4] 刘晓路, 陈英武, 荆显荣, 等. 优化拉丁方试验设计方法及其应用 [J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(5): 73-77.
- [5] 倪计民, 杜倩颖, 周英杰, 等. DOE 在高压共轨柴油机优化设计中的应用 [J]. 内燃机学报, 2009, 27(3): 231-236.
- [6] 成志伟, 孙跃东, 刘宾, 等. 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 [J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(1): 44-48.
- [7] 岳惊涛, 廖冬平, 彭莫. 汽车动力系统的合理匹配评价 [J]. 汽车工程, 2004, 26(1): 102-106.
- [8] 詹樟松, 杨正军, 刘兴春. 汽车动力传动系统参数优化设计和匹配研究 [J]. 汽车技术, 2007, 37(3): 17-20.

(编辑: 石 瑛)