

# 基于 Cruise GSP 的 DCT 整车换挡研究

周云山,王楠,蔡源春,尧文亮

湖南大学;汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙 410082

**摘要** 换挡规律是指两排挡间自动换挡时刻随控制参数变化的规律,其好坏直接影响车辆的燃油经济性、动力性和排放性。换挡规律的发展,大致经历了传统型、基于经验型和智能型。按照控制参数的多少,换挡规律大致可分为单参数、两参数和三参数换挡规律。本文以目前工程中大量实际应用的二参数换挡规律为基础,应用 AVL Cruise 软件针对装备双离合变速器(DCT)的某商用轿车进行整车仿真,在此基础上使用 Cruise GSP 功能模块对其换挡规律进行仿真计算,并综合考虑道路坡度、行驶环境、车辆经济性和排放对具体工况下的传动系状态进行优化。结果表明,该方法能够快速准确地生成换挡规律、方便地根据路况进行传动系状态优化,进而优化换挡,对于实际工程中加快整车开发、快捷地进行变速器标定具有一定借鉴意义。

**关键词** 双离合变速器;换挡程序;AVL Cruise 软件;优化;换挡规律

**中图分类号** U462.3

**文献标识码** A

**doi** 10.3891/j.issn.1000-7857.2011.12.005

## Shift Schedule in the Auto with Dual Clutch Transmission Based on Cruise Gear Shift Program

ZHOU Yunshan, WANG Nan, CAI Yuanchun, YAO Wenliang

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** Shift schedule is the automatic shift based on the control parameters changes in the automatic transmission. It will affect the vehicle fuel economy, acceleration, and emission. It has approximately passed through three development phases so far: traditional type, experience-based type, and intelligent type. And according to the numbers of the control parameters, it can be roughly divided into three main categories: single parameter, two parameters, and three parameters schedule. On the basis of the available studies, a simulation model of a commercial sedan equipped with Dual Clutch Transmission(DCT) is developed via the AVL Cruise software, and two parameters shift schedule which is widely used in the real auto engineering is taken account of. On this basis, the shift schedule is simulated and generated using the Gear Shift Program(GSP) module of the AVL Cruise software. Furthermore, the transmission states is optimized with the considerations involving vehicle fuel economy, emission, road slope, and driving environment under the given cycle condition. The result shows that this method could generate the shift schedule accurately and quickly and optimize the transmission states on the specific cycle conveniently. These works could be used in the effective calibration of automatic transmission and shorten the vehicle development cycle.

**Keywords** DCT; GSP; AVL Cruise software; optimization; shift schedule

### 0 引言

换挡规律主要是研究选择什么样的换挡参数,在何时进行换挡等问题,其好坏直接影响车辆的燃油经济性、动力性和排放性的优劣和乘坐舒适性,故换挡规律是自动控制系统的核心之一<sup>[1]</sup>。换挡规律的发展大致经历了传统型、基于经验型和智能化型。

按照控制参数的多少,换挡规律可分为单参数、两参数

和三参数换挡规律。单参数换挡规律一般选用车速作为控制参数,其控制系统结构简单,但是不能实现驾驶员干预换挡。两参数换挡规律克服了单参数换挡规律的不足,广泛采用油门开度、车速二参数联合控制。三参数换挡规律,在两参数换挡规律的基础上考虑了车辆的加速度,进一步反映了车辆的实际操纵规律,但是其以发动机动态实验数据为基础,目前的理论研究较多,工程上应用较少<sup>[2]</sup>。近年来有基于经验型和

收稿日期:2010-12-15;修回日期:2011-02-23

作者简介:周云山,教授,研究方向为金属带式无级变速器研发生产以及 DCT、混合动力,电子信箱:zys\_8888@sina.com

智能化的新型换挡规律<sup>[3]</sup>的提出,其本质上还是以车速、节气门开度、车辆加速度等为主要参数,辅之以其他重要参数。由于芯片资源和技术成熟度的一些限制,这种基于经验和智能化的换挡规律目前主要局限于理论研究方面,没有得到广泛使用。本文以工程应用中广泛与成熟的两参数换挡规律为基础,应用 AVL Cruise 软件针对装备双离合变速器(DCT)的某商用轿车的换挡规律进行仿真计算,并综合考虑道路坡度、行驶环境、车辆经济性和排放性对其进行优化,以期能快速准确地生成换挡规律及其换挡优化规律,对于目前技术形势下加快整车开发、快捷的进行变速器标定具有一定借鉴意义。

### 1 AVL Cruise 简介

AVL Cruise 是奥地利 AVL 公司开发的车辆性能仿真分析软件。它提供了图形化的交互环境,只需使用拖放的方法从模型库中拖出相应的元件,就能迅速地建立系统的结构框图,添加相应的控制模块,并正确连接数据总线<sup>[4]</sup>,便可很快得到系统模型。用户能方便地修改动力传动系的配置,轻松实现对传统或复杂车辆动力传动系统(纯电动汽车或混合动力车辆模型等)的各种工况和性能仿真分析及其控制策略的研究分析<sup>[5]</sup>;最新推出的变速箱换挡规律的自动生成和优化功能 GSP (Gear Shift Program),包括 GSP Wizard、GSP Generation 和 GSP Optimization,可根据用户自定义的边界约束条件生成并优化换挡规律。

## 2 汽车系统建模与仿真分析

### 2.1 整车系统建模

在对 DCT 结构与工作原理进行透彻分析后,以某款发动机前置前驱、配备 DCT 的商用轿车为例进行建模如下:整备、满载质量为 1250、1263kg,发动机排量 1995cm<sup>3</sup>,汽车迎风面积 1.88m<sup>2</sup>,轴距 3300mm,DCT 1—6 挡的挡速比分别为 3.909,2.105,1.387,1.023,0.814,0.674。基于 AVL Cruise 软件建立的汽车系统模型<sup>[6-9]</sup>,如图 1 所示。

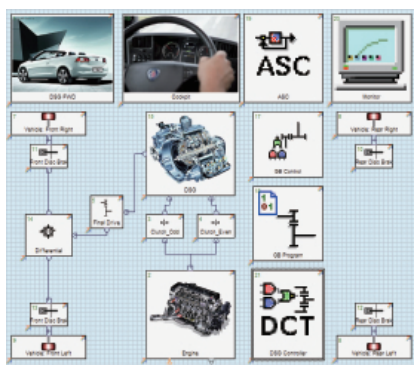


图 1 AVL Cruise 软件建立的整车模型  
Fig. 1 Car simulation model built up with the AVL Cruise software

### 2.2 换挡规律生成

完成整车建模以及输入整车、发动机、传动系、车轮等的参数之后,需要在 AVL Cruise 软件中 GSP Generation 模块进行相应的换挡条件设置。在 AVL Cruise 软件中,将车辆运行模式分为经济模式、运动模式、负载模式 1(道路坡度 4%—9%)、负载模式 2(道路坡度>9%,且车辆处于动力模式),把车辆换挡模式设置分为低节气门开度区、中节气门开度区、高节气门开度区 3 个主要部分,如图 2 所示。具体范围根据标定工程师的实际工程经验而定。

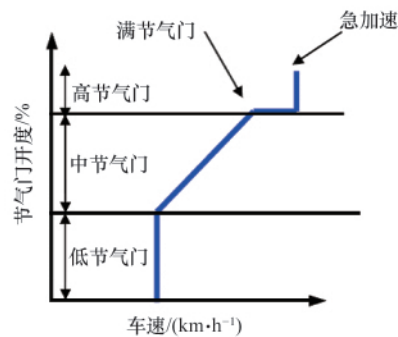


图 2 GSP 设置原理  
Fig. 2 Schematic diagram of GSP

为了研究换挡规律,需要先计算整车加速曲线。整车加速度<sup>[10]</sup> $a(i, \alpha, s, v)$ 是关于变速器挡位  $i$ 、节气门开度  $\alpha$ 、坡度  $s$ 、车速  $v$  的函数。即

$$a(i, \alpha, s, v) = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{\delta m} (F_t - F_r - F_i - F_w) \quad (1)$$

其中,  $a$  为整车加速度,  $\delta$  为旋转质量换算系数,  $F_t$  为驱动力,  $F_r$  为滚动阻力,  $F_i$  为坡度阻力,  $F_w$  为风阻,  $m$  为整车质量。根据式(1)得到整车加速度曲线如图 3 所示,曲线的不同颜色代表不同的节气门开度。

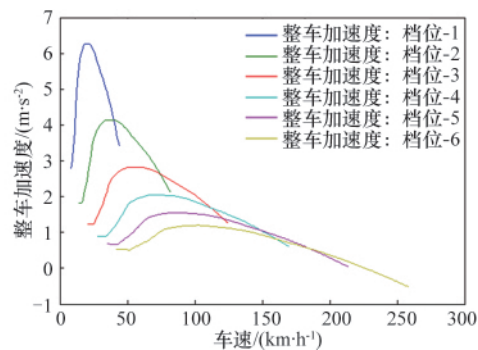


图 3 整车加速度曲线  
Fig. 3 Acceleration curve

然后将图(3)与式(1)结合道路状况和驾驶员行为,对换挡模式进行研究分析,以经济模式下高节气门开度区计算急加速信号为例。

$i \in [1, GEAR_{max}-1], \alpha=100\%, s=0$ ; 考虑换挡时间  $t_{shift\_up}$  和发动机最大转速  $N_{max}$ ,  $i$  挡位发动机最大转速  $N_{max}$  时的最大加速度为  $a_{upkick\_max}[i]$ , 则急加速时升挡点被定义为

$$v_{up\_ecc}[i](110\%) = N_{max}[i] \cdot \frac{V_{1000}[i]}{1000} - a_{upkick\_max}[i] \cdot t_{shift\_up}[i] \quad (2)$$

其中,  $V_{1000}$  为发动机转速为 1000r/min 时的车辆速度,  $GEAR_{max}$  为最大挡位数。式(2)同样适用于运动模式、负载模式 1、负载模式 2; 在实际工程中进行变速器标定的时候, 由于一般情况下的满节气门开度与急加速情况下的满节气门开度所对应的车辆响应不一样, 因而换挡规律也就不一样, 故使用 100% 表示车辆一般工况下的的满节气门开度, 使用 110% 表示急加速情况下车辆满节气门开度。图 4 说明了如何根据发动机最大转速利用式(2)确定急加速时升挡点。

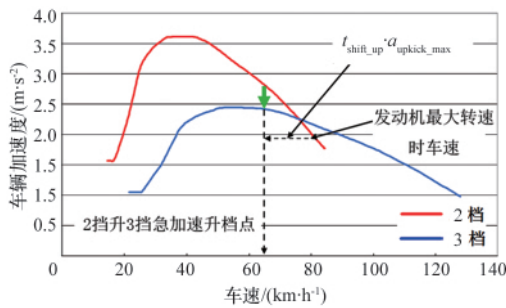


图 4 急加速升挡点计算图

Fig. 4 Calculation diagram for the point of kick upshift

由 AVL Cruise 软件仿真得到的换挡规律如图 5 所示。

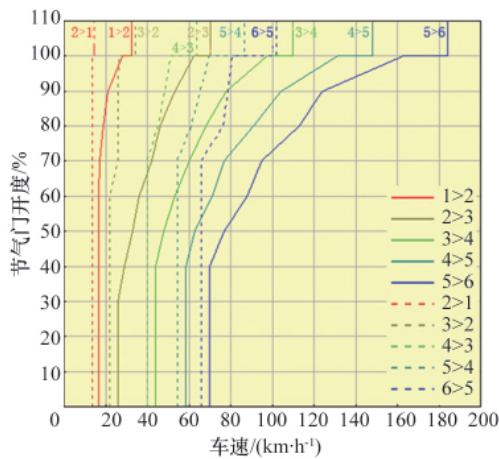


图 5 经济模式升挡与降挡规律

Fig. 5 Upshift and downshift schedule in the economic model

分析图 5 可知, 该换挡规律是一个有强制换挡的发散型换挡规律, 一方面保持发散型发动机工作转速较高, 换挡次数少, 舒适性高的优点; 另一方面又增加了司机干预的强制降低挡的功能, 以获得油门全开时良好的功率利用, 在目前自动变速器标定中应用较为广泛。同样的方法可以得到动力模式以及其他模式的换挡规律。110% 表示车辆急加速情况下车辆满节气门开度。此外, 将该图中各挡位的点数据经导出、

处理后, 导入变速器控制单元内作为变速器标定数据, 对加快整车开发, 便捷变速器标定有一定的借鉴意义。

### 2.3 给定工况下的传动系状态优化

#### 2.3.1 给定工况下传动系优化流程

由于汽车通常是按照某一循环工况 (本文中使用了新欧洲循环工况 NEDC) 行驶的, 因此研究汽车在某一循环工况内的传动系状态对换挡规律具有重要意义。Cruise 的 GSP Optimization 基于 Cruise 环境中搭建的车辆模型, 对车辆所有可能运行的工作区域进行分析, 考虑挡位、油门开度、路面坡度等状态的一系列参数, 同时考虑经济性和排放性的指标要求, 根据不同工况特性进行变速箱换挡特性优化, 其自动生成的  $K$  因子可以让使用者方便地实现经济性和排放性的平衡需求。简化流程如图 6 所示。

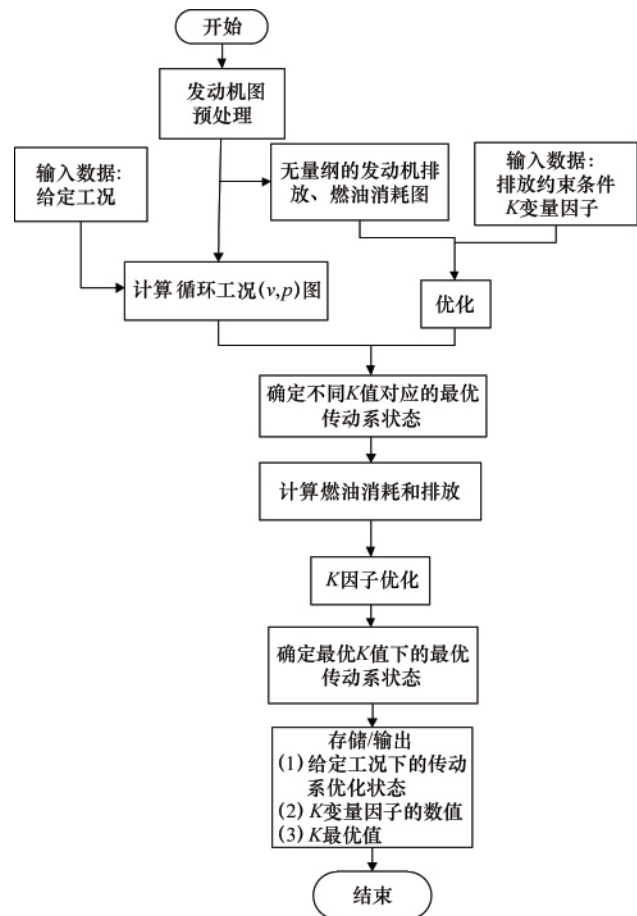


图 6 优化流程图

Fig. 6 Optimization flow chart

主要优化过程如下:

(1) 对发动机预处理, 如图 7 所示, 在加速踏板开度  $\alpha \in [0\%, 100\%]$ , 挡位状态  $i \in [1, GEAR_{max}]$ ,  $v \in [0, V_{max}]$ ,  $a \in [0, a_{max}]$  下, 根据汽车动力学方程, 由整车车速与车辆加速度计算得到车辆的输出扭矩与车轮转速, 然后考虑主减速器以及此时变速器的挡位状态, 最终计算得出发动机的输出扭矩与转速, 即

发动机扭矩  $T(i, \alpha, v)$ , 发动机速度  $N(i, \alpha, v)$ , 同理, 由发动机图还可以计算得到燃油消耗  $FC(i, \alpha, v)$ , 尾气排放  $EM(i, \alpha, v)$ , 发动机输出功率  $P(i, \alpha, v)$ , 整车加速曲线  $a(i, \alpha, v)$ , 以发动机扭矩、转速、功率曲线为例, 如图 8 所示。

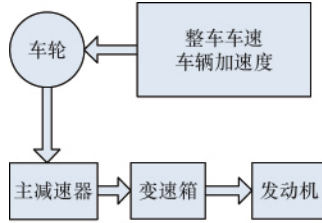


图 7 预处理计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of pre-treatment calculation

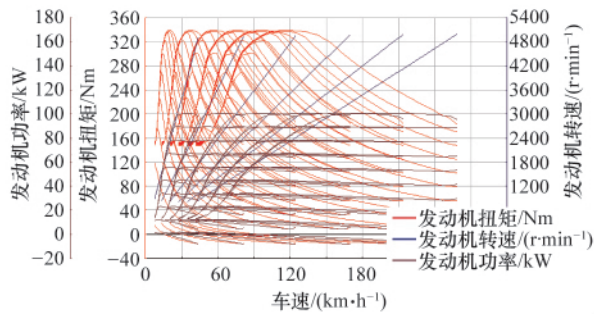


图 8 发动机预处理图

Fig. 8 Preliminary calculation of the engine

(2) 将给定循环工况离散化, 包含时间  $t$ , 速度  $v$  的参数对  $(t, v)$ , 通过式(3)将其扩展为  $(t, v, p)$ , 其中  $p$  为整车功率, 计算式为

$$p = m \cdot a \cdot v \quad (3)$$

(3) 量化, 计算得到无量纲的发动机燃油排放、消耗图。无量纲车辆消耗与排放由式(4)得出

$$\text{无量纲值} = \frac{X_{NO_x} - X_{NO_{x, \min}}}{X_{NO_{x, \max}} - X_{NO_{x, \min}}} \quad (4)$$

式中,  $X_{NO_x}$  表示氮氧化物含量, g/km。

由式(5)一式(6)即可计算得出无量纲的统一标准化的发动机燃油排放、消耗图。

$$fc(i, \alpha, v) = [FC(i, \alpha, v) - FC_{\min}] / (FC_{\max} - FC_{\min}) \quad (5)$$

$$em(i, \alpha, v) = [EM(i, \alpha, v) - EM_{\min}] / (EM_{\max} - EM_{\min}) \quad (6)$$

(4) 确定不同  $K$  值对应的最优传动系状态。在步骤(1)一(3)的基础上, 已得到传动系的基本状态, 在此基础上, 对传动系状态予以优化。给定速度与后备功率, 求出相应优化挡位。定义变量因子  $K$ , 综合考虑车辆经济性与排放性的平衡, 有

$$Opt = (1-K) \times FC + K \times EM \quad (7)$$

其中,  $Opt$  为综合考虑燃油消耗和尾气排放后的一个优化变量。且定义

$$EM = A \times EM_{CO} + B \times EM_{HC} + C \times EM_{NO_x} + D \times PM \quad (8)$$

其中,  $A, B, C, D$  为系数;  $EM_{CO}$ , 一氧化碳排放量, g/km;  $EM_{HC}$ , 碳氢化合物排放量, g/km;  $PM$ , 尾气微粒排放量, g/km。为简化计算, 这里仅考虑  $NO_x$  排放

$$EM = EM_{NO_x} \quad (9)$$

确定不同  $K$  值对应的最优传动系步骤如下,

① 对每个挡位  $i$ , 定义目标函数  $f_i(\alpha)$

$$f_i(\alpha) = (1-K) \times fc(i, \alpha, v) + K \times em(i, \alpha, v) \quad (10)$$

② 对每个挡位  $i$ , 考虑节气门开度  $\alpha$ ,

$$\min_{\alpha} f_i(\alpha), P_i(\alpha, v_0) = P_0, N_i(\alpha, v_0) \geq N_{\min}(i, T_i)$$

其中,  $N_{\min}(i, T_i)$  为一定挡位  $i$  和扭矩  $T_i$  下的发动机最小转速;  $P_0$  为后备功率;  $v_0$  为车速。在一定节气门开度  $\alpha$ , 车速  $v_0$ , 发动机后备功率  $P_0$ , 并且发动机转速高于最低限速的情况下, 使目标函数  $f_i(\alpha)$  达到最小。

③ 对每个挡位  $i$ , 定义  $f^*(i)$  全局最小值,  $\alpha^*(i)$  全局极小值。其中, 含有 \* 的变量或者函数, 表示其所标记变量或者函数的优化值, 下同。

④ 求得最优挡位  $i^* = \arg[\min_i f^*(i)]$ 。在一定节气门开度、一定车速下, 根据汽车动力学方程计算得到发动机转速, 然后求得该发动机转速在不同挡位下对应的燃油消耗与尾气排放, 根据优化算法, 寻找最合适的挡位, 使整车在此挡位下的燃油消耗与尾气排放最优, 这个挡位即最优挡位。

⑤ 求得最优燃油消耗  $FC^*$  与最优排放  $EM^*$

$$FC^* = FC(i^*, \alpha^*, v_0), EM^* = EM(i^*, \alpha^*, v_0)$$

经过步骤①—⑤可以计算得到不同  $K$  值对应的最优挡位以及相应的最优燃油消耗与尾气排放, 即最优传动系状态。下面所需要的就是根据设计要求或者相关排放法规选择合适的  $K$  因子。

(5)  $K$  因子最优化。根据循环工况的扩展图、相关排放法规标准以及精度需要, 使用二分法计算最优变量因子  $K^*$ 。

(6) 计算得到最优变量因子  $K^*$  之后, 就可以得到最优  $K$  值对应的最优传动系状态。

(7) 最后存储输出计算结果。

### 2.3.2 给定工况下传动系优化结果分析

(1) 图 9 为  $K$  变化范围为 0—1 时得到的  $K$  曲线图, 根据设计规定的发动机排放标准, 考虑循环工况和计算精度, 计算得到 NEDC 循环工况下此款车型结果,  $K$  最优值 0.6970, 燃油消耗 5.04L/100km;  $NO_x$  排放 0.240g/km;

(2) 表 1 为  $K=0.6970$  时, NEDC 循环工况的挡位敏感性分析。以 15s 时情况为例, 此时挡位为 1 挡。在方案 2, 3 中分别将挡位变更为 2, 3 挡, 可以观察到相应的燃油消耗与尾气排放的变化百分比。据此, 可以根据工程需求, 在给定的循环工况下, 选择理想的挡位, 以达到对于车辆经济性和排放性的综合需求。

(3) 车辆开发时, 在 GSP Optimization 中预先定义燃油消耗和尾气排放的优化目标, 在生成的  $K$  曲线中得到合适的  $K$

点,接着通过仿真计算得到对应的给定循环工况下的最优换挡情况(图 10)和不同车速下对应的优化节气门开度(图 11)等,最后将数据图叠加(图 12、图 13),调整换挡曲线,以改善给定工况下的换挡规律。最后将标定工程师修正过的换挡曲线数据导入变速器控制单元。使用这种方法可以快速在给定的循环工况下对换挡规律快速进行优化,对车辆实际工程开发具有重要意义。

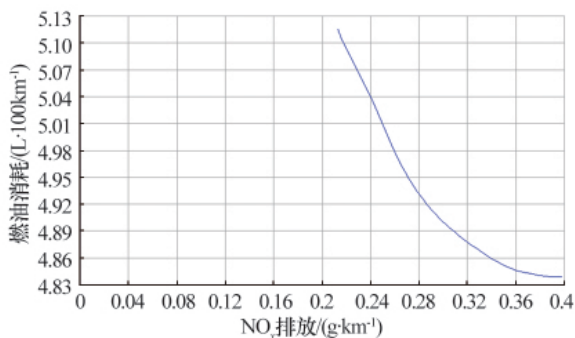


图 9 K 因子优化结果曲线图

Fig. 9 Diagram of K-optimal result

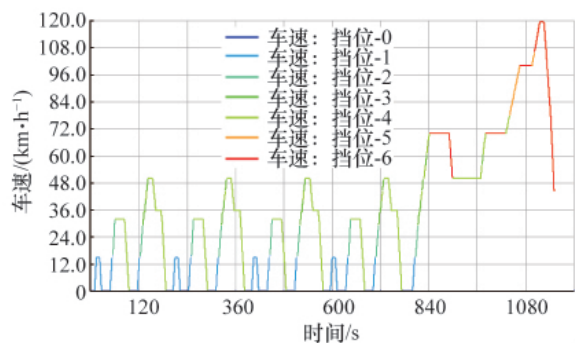


图 10 NEDC 工况优化

Fig. 10 Optimized cycle

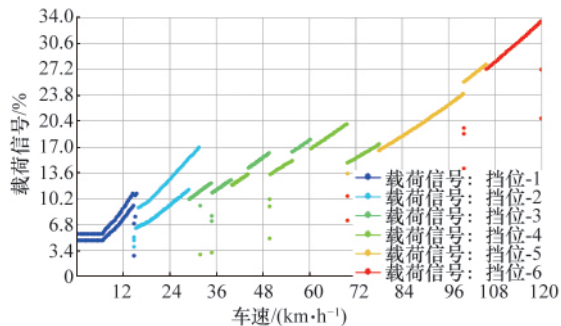


图 11 NEDC 工况换挡优化

Fig. 11 Optimum gears and load signal

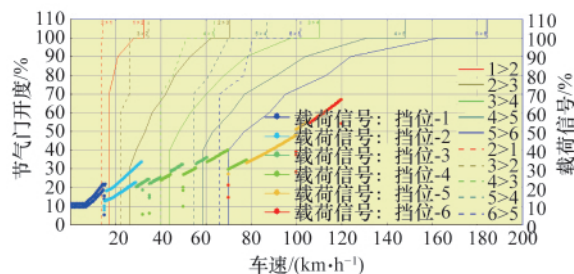


图 12 NEDC 循环工况换挡参考优化 1

Fig. 12 Comparison and optimization in NEDC

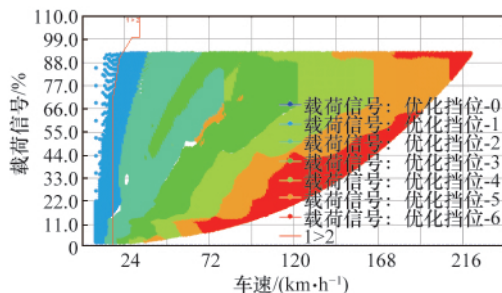


图 13 NEDC 循环工况换挡参考优化 2

Fig. 13 Comparison and optimization in NEDC

表 1 NEDC 循环工况敏感性分析  
Table 1 Optimum of NEDC states

时间/s	开始速度 /(km·h <sup>-1</sup> )	结束速度 /(km·h <sup>-1</sup> )	挡位	距离/m	燃油消耗 /(L·100km <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> 排放 /(g·km <sup>-1</sup> )	方案 1			方案 2		
							挡位	FCI/%	X <sub>NO<sub>x</sub></sub> /%	挡位	FCI/%	X <sub>NO<sub>x</sub></sub> /%
15	0	15	1	8.33	18.29	2.032	2	-45.68	-418.15	3	-14.59	-381.26
23	15	15	1	32.92	6.2	0.159	2	-72.84	-686.41	3	-39.51	-1129.36
61	0.3	32	1	51.39	16.43	2.001	2	-38.97	-117.39	3	-44.32	-114.08
85	32	32	4	212.44	2.58	0.202	3	17.74	134.7	5	-51.46	-417.14
143	0.3	50	2	195.14	8.92	0.32	1	86.55	493.89	3	-18.82	-79.97
155	50	50	4	165.28	2.82	0.098	3	20.89	-29.75	5	-10.21	218.42

### 3 结论

(1) 本文在对双离合自动变速器 DCT 的结构与工作原理进行透彻分析的基础上,以某款装备 DCT 的商用轿车作为研究对象,利用 AVL Cruise 软件,建立整车仿真模型,使用

Cruise GSP 模块的 GSP Generation 和 GSP Optimization 提出了一种快速生成换挡规律并且能够在给定工况下根据对汽车经济性、排放性等要求对传动系进行针对性优化的方法,对加快整车开发、优化传动系、快捷地进行变速器标定有一

定的借鉴意义。

(2) 在车辆实际开发过程中,符合整车实际运行工况的路谱数据是很重要的,AVL Cruise 中虽然有自带的路谱数据可以选用,但由于其与中国的路况有一定的差距,会对车辆的实际开发造成一定的影响,因此本文中所采集的部分数据仍然需要和试验结合进行进一步修正优化。此外作为一中新计算方法,有必要不断将其与工程实际结合进行修正,以不断趋于实际工程数据和准确结果。

**致谢** 在 AVL Cruise 软件使用过程中,得到了 AVL 上海李斯特技术中心张劲、李瑾博士以及上海泛亚汽车技术中心田华博士的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

#### 参考文献 (References)

- [1] 葛安林. 车辆自动变速理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.  
Ge Anlin. The theory and design of automatic transmission[M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [2] 刘治国. 基于动态修正的自动变速器模糊换挡策略研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
Liu Zhiguo. Research on the automatic transmission fuzzy gear shift strategy based on dynamic modification [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [3] 周学建, 付主木, 张文春, 等. 车辆自动变速器换挡规律的研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2003, 34(3): 139-145.  
Zhou Xuejian, Fu Zhumu, Zhang Wenchun, et al. Transactions of the

- Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2003, 34(3): 139-145.
- [4] Munn S A. A computer simulation of power train components with methodologies for generalized system modeling [D]. Madison, USA: University of Wisconsin, 1996.
- [5] 刘振军, 赵海峰, 秦大同. 基于 CRUISE 的动力传动系统建模与仿真分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(11): 8-11.  
Liu Zhenjun, Zhao Haifeng, Qin Datong. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2005, 28(11): 8-11.
- [6] Schyr C. Advanced simulation on the Testbed [C]. JSAE Spring Convention 1999, Yokohama Japan, May 1999.
- [7] 刘振军, 秦大同, 叶明, 等. 车辆双离合器自动变速传动技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 161-163.  
Liu Zhenjun, Qin Datong, Ye Ming, et al. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005, 36(11): 161-163.
- [8] 吴光强, 杨伟斌, 秦大同. 双离合式自动变速器控制系统的关键技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 13-18.  
Wu Guangqiang, Yang Weibin, Qin Datong. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(2): 13-18.
- [9] 王保华. 双离合变速器汽车建模与仿真 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2008, 22(3): 1-4.  
Wang Baohua. *Journal of Hubei Automotive Industries Institute*, 2008, 22(3): 1-4.
- [10] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1-21.  
Yu Zhisheng. *Automobile theory* [M] Beijing: China Machine Press, 2007: 1-21.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·



## “第十届中国国际地球电磁学术讨论会”征文

由中国地球物理学会主办的“第十届中国国际地球电磁学术讨论会”将于 2011 年 11 月 18—20 日在南昌举行。会议议题为迎接地球电磁技术发展的机遇和挑战。

会议征文范围: 青藏高原深部结构和动力学研究; 人工源电磁法模型研究和应用暨纪念阮百尧教授专题; 电磁仪器与观测新技术; 岩石物理与实验研究; 电磁资料处理及正反演、成像研究; 电磁法在能源、资源勘探中的应用研究; 电磁法在工程与环境中的应用研究; 电磁法在地震等灾害研究中的应用; 海洋电磁法研究等。

全文截止日期: 2011 年 8 月 20 日

联系方式: 江西省抚州市学府路 56 号, 东华理工大学核工程技术学院地球物理系 (344000) 邓居智, 方根显; 电话: 0794-8258308, 8258706; 传真: 0794-8258308; 电子信箱: cigew2011@gmail.com。

会议网站: <http://cigew.ecit.cn>。