

DOI: 10.3901/JME.2009.01.205

# 智能修正型换挡规律的设计及在双离合器式自动变速器中的应用\*

杨伟斌<sup>1,2</sup> 陈全世<sup>1</sup> 吴光强<sup>2</sup> 秦大同<sup>3</sup>

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084;

2. 同济大学汽车学院 上海 201804;

3. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

**摘要:** 以车速和发动机油门为控制参数,设计双离合器式自动变速器(Dual clutch transmission, DCT)的两参数换挡规律,硬件在环仿真结果表明该控制规律在城市工况极易导致频繁换挡,在制动工况容易产生意外升挡。分析不合理换挡现象的原因,并指出驾驶员的不合理操作习惯是引起频繁换挡和意外升挡的主要原因,两参数换挡规律不易避免不合理换挡现象。基于“sugeno”型模糊控制方法,建立智能修正型换挡规律的控制系统,该系统以油门开度和油门开度变化率为输入,实时升、降挡车速的修正系数为输出,确定隶属度函数并制定相应的模糊控制规则。智能换挡系统中的降挡速度为两参数降挡曲线临界值与降挡修正系数的乘积,升挡速度为两参数升挡曲线临界值与升挡修正系数的商。控制结果表明智能换挡规律在保留两参数换挡规律优点的同时,可以避免频繁换挡及意外升挡现象的发生,提高整车的舒适性和燃油经济性。

**关键词:** 双离合器式自动变速器 智能换挡规律 设计与应用

**中图分类号:** TG156

## Design of the Intelligent Compensating Shifting Schedule and Its Application in Dual Clutch Automatic Transmission Vehicle

YANG Weibin<sup>1,2</sup> CHEN Quanshi<sup>1</sup> WU Guangqiang<sup>2</sup> QIN Datong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. College of Automotive, Tongji University, Shanghai 201804;

3. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract:** The double parameter shifting schedule (DPSS) of dual clutch automatic transmission (DCT) controlled by vehicle speed and engine throttle opening, based on engine torque model, engine fuel model and gear ratios of DCT, is designed. In the hardware-in-loop simulation test, some unreasonable shifting phenomena such as frequent shifting in EUDC drive cycle and needless shifting in urgent braking condition are found. The reason of the unreasonable shifting phenomenon is analyzed, then, the conclusion that the unreasonable shifting is mainly caused by the incorrect operation of the driver is presented, and the unreasonable shifting is hard to be avoided if the DPSS is used. To eliminate the improper shifting under certain driving conditions, an intelligent compensating shift schedule (ICSS) is devised on the basis of “sugeno” fuzzy logic. The ICSS is composed of the input parameters including throttle opening and its changing rate, output parameters including upshift and downshift compensating ratio, membership function and fuzzy control principle. The downshifting speed at a given throttle opening is obtained from multiplying the corresponding speed inferred from DPSS by the downshift compensating ratio inferred from ICSS, but the upshifting speed is obtained from dividing the corresponding speed inferred from DPSS by the upshift compensating ratio inferred from ICSS. The final

\* 上海市科委重大攻关(06dz11002)、国家高技术研究发展计划(863计划, 2006AA11A102)和中国博士后科学基金(20080440380)资助项目。20080304 收到初稿, 20081009 收到修改稿

test results prove the ICSS can eliminate the improper shifting in drive cycle and braking condition, and the fuel economy is also improved.

**Key words:** Dual clutch transmission Intelligent shifting schedule Design and application

## 0 前言

换挡规律是指选择什么样的换挡控制参数,在何时进行换挡。换挡规律的好坏直接影响车辆的燃油经济性和动力性,是双离合式自动变速器(Dual clutch automatic transmission, DCT)控制系统的关键问题之一<sup>[1]</sup>。

传统的二参数和动态三参数换挡规律可使汽车获得最佳动力性能或最佳经济性能。但传统换挡规律没有考虑汽车行驶环境以及驾驶员操纵意愿对换挡过程的影响,只能反映汽车的行驶状态,在城市循环工况、制动和转弯等特殊路段容易导致频繁换挡或意外升挡现象。

意外升挡及频繁换挡的最大影响就是使乘客感到不舒服,而且还会影响离合器和同步器的使用寿命。实际驾驶操作过程中,不能要求每个驾驶员都来适应设定的控制规律,而应设计一种合理的控制方法,来适应不同驾驶员的操作习惯,修正驾驶员不合理的操作行为,避免不必要的换挡动作。

由 DCT 工作原理可知, DCT 采用预先接合同步器的方法<sup>[2]</sup>。如果产生循环换挡现象,必然会导致同步器不必要的频繁动作,因此 DCT 控制系统应尽可能地消除频繁换挡现象的发生。

在以前 AT 和 AMT 开发过程中,各国学者也对频繁换挡现象进行了大量的研究工作。文献[3-4]参照优秀驾驶员在特殊路段时的操作方法,建立挡位决策的模糊专家系统,避免频繁换挡现象。由于驾驶员类型、行驶环境和车辆状态可组合出若干种状态,所建系统不但工作量大,而且很难使车辆在常规路面时的性能达到最佳。文献[5]通过增加转向盘转角传感器和道路坡度传感器,引入坡道和弯道信息,避免频繁换挡现象。增加传感器不但会增加整车成本,如果传感器迟滞或失效,往往会给出错误的信息。文献[6-7]依据模糊推理方法,形成一个描述路面特征、司机意图和车辆状态的模糊集合,求出当前状态与各典型工况的贴进度,计算得到最终的挡位数值。该换挡规律是未来应用和发展的方向,但由于受硬件的限制,当前还不易于应用在实车上。

根据油门开度及油门开度变化率的大小,利用模糊智能控制技术,实时动态地增大升挡规律或减小降挡规律的数值。修正驾驶员不合理的操作行为,适应不同驾驶员的操作习惯,避免意外升挡或频繁换挡现象的发生,并且保证传统换挡规律在常规路

面行驶时的优点。该控制算法无需增加传感器,算法调试的工作量较小,利用当前的控制平台即可实现,适用性较好。

## 1 传统换挡规律的设计及控制效果

### 1.1 传统换挡规律的设计

本文的研究对象是一辆装备 5 挡 DCT 的微型轿车,它的总质量  $m=1\ 450\text{ kg}$ ,空气阻力系数  $C_D=0.32$ ,迎风面积  $A=2.28\text{ m}^2$ ,车轮滚动半径  $r=0.31\text{ m}$ ,传动效率  $\eta_T=0.9$ ,滚动阻力系数  $f=0.012$ ,主减速比  $i_0=4.19$ ,DCT 的 1 挡至 5 挡的速比分别为 3.73、1.96、1.32、0.95 和 0.76。

按照文献[8]中最佳换挡规律的设计方法,根据整车参数、图 1 所示的发动机转矩模型和图 2 的油耗模型,设计了油门开度的换挡规律,如下表所示,  $E_{12}$ 、 $E_{23}$ 、 $E_{34}$  和  $E_{45}$  分别表示 1 挡升 2 挡、2 挡升 3 挡、3 挡升 4 挡、4 挡升 5 挡的最佳经济性换挡规律的临界线,油门开度大于 36% 时的临界值相同;按照收敛型换挡延迟准则<sup>[8]</sup>,将升挡规律的临界线依次延迟 6~8 km,作为降挡规律的临界线。为了避免同步器的频繁接合,在各挡位换挡车速前一定数值处(提前的车速数值必须保证换挡前同步器可充分接合,本文取  $3\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ )接合下一挡位的同步器。

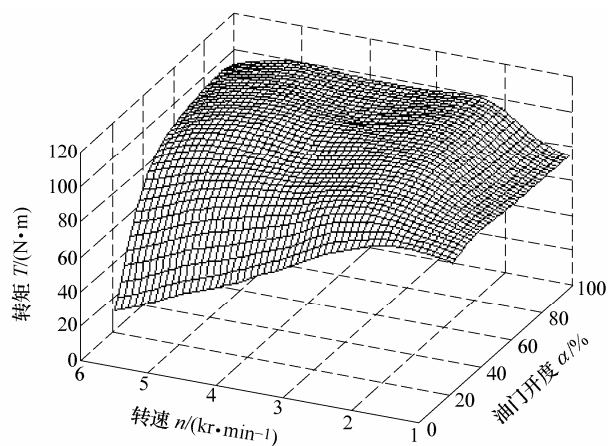


图 1 三维转矩模型

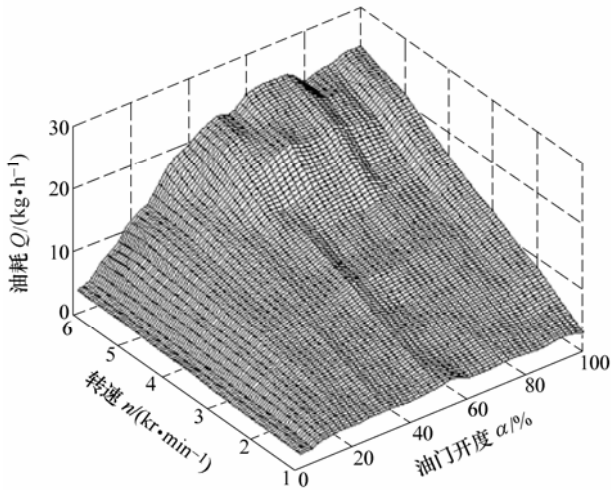


图2 三维油耗模型

表 换挡规律表  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

换挡点	油门开度 $\alpha/\%$							
	1	6	11	16	21	26	31	36
$E_{12}$	10.00	12.00	15.01	17.24	19.66	19.88	23.47	24.25
$E_{23}$	19.86	23.47	33.39	42.36	48.93	52.68	53.77	54.08
$E_{34}$	30.28	35.94	54.61	70.76	80.49	87.03	88.90	89.41
$E_{45}$	41.83	49.97	85.61	109.96	122.84	133.22	141.89	144.11

### 1.2 控制效果

在 DCT 车辆的硬件在环试验台<sup>[9]</sup>上对普通换挡的控制效果进行了测试。我国国标规定的循环工况由4个城市循环工况(European urban driving cycle, ECE)和1个高速行驶工况(Extra urban driving cycle, EUDC)组成。在调试过程中发现,采用传统的换挡规律,在EUDC工况极易导致频繁换挡,在制动工况极易发生不合理的换挡现象。

#### 1.2.1 制动工况

制动、溜坡或紧急转弯工况时,驾驶员通常会迅速松开油门。普通换挡规律的控制结果如图3所示。第一个图为加速踏板的变化曲线,车辆在18s前全油门高速行驶,由于前方有障碍物或需要急转弯,驾驶员快速松开油门,油门经过0.2s后迅速降低到最小值(通常为1%)。第二个图为车速的变化曲线。第三个图为挡位的变化曲线,在制动过程中发生了3→4→5挡的意外升挡现象。

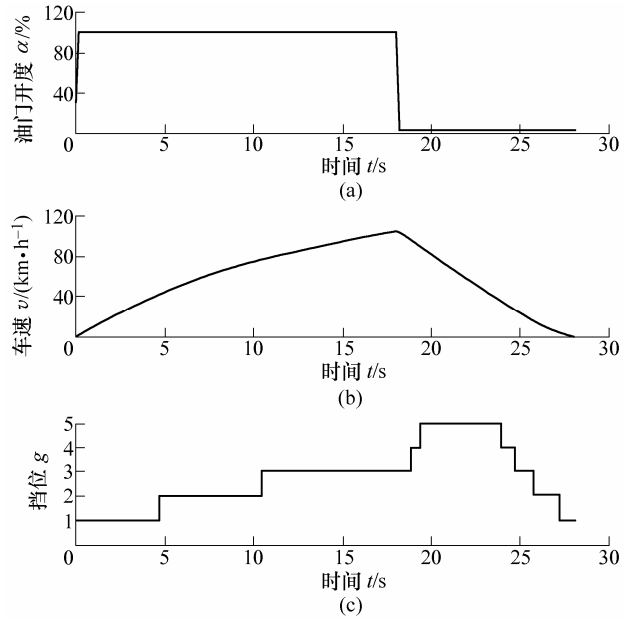


图3 制动工况的控制效果

#### 1.2.2 EUDC 循环工况

图4为EUDC循环工况的仿真结果,第一个图为循环工况的跟踪效果,由图可知实际运行曲线与目标运行曲线比较一致。第二个图为输出油门开度大小的曲线。第三个图为实际挡位曲线,在188s处由于汽车由匀速进入加速状态,驾驶员对油门的操作过程中产生了急升急降的现象,导致了频繁的升、降挡。实际驾车过程中,特别是对于那些操作不是非常熟练的驾驶员来说,这种现象是经常发生的。第四个图为第三个图在188~202s处的放大曲线,共发生了22次频繁换挡现象。

通过加大降挡曲线与升挡曲线间的间距,局部修正降挡曲线的数值未能消除图3、4中的不合理换挡现象,说明传统换挡规律不易避免不合理换挡现象。

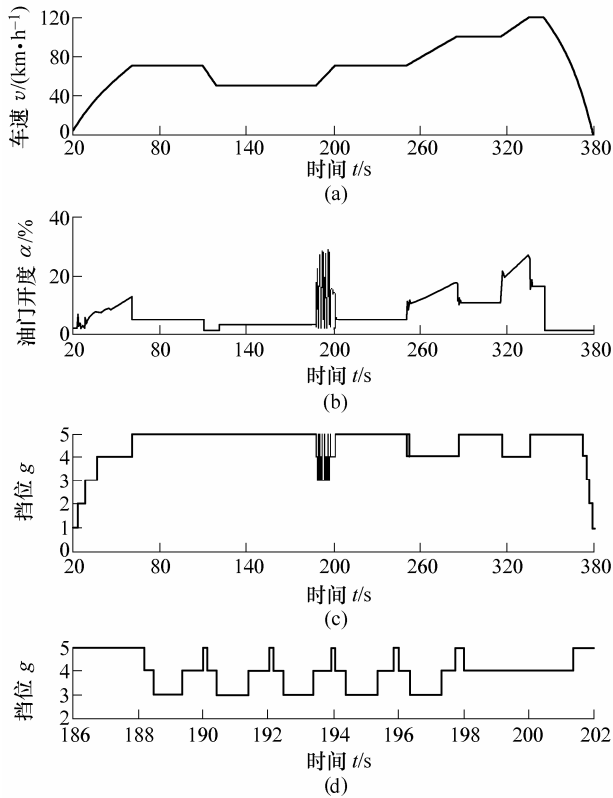


图4 EUDC循环工况的控制效果

## 2 频繁换挡及意外升挡原因的分析

### 2.1 制动、溜坡工况的意外升挡

图5为换挡规律的局部放大图形。车辆开始制动时,油门开度由较高数值迅速降低到最小开度,与图5中的 $gh$ 线段的变化过程比较相似。在油门迅速降低的过程中,由于车辆惯性的影响、车速降低较慢,由图5可见、必然导致 $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ 的升挡现象。

但这些升挡是不必要的。首先,由于DCT只能连续的升、降挡<sup>[10]</sup>,挡位由3挡升至5挡后,随着车速的逐步降低,挡位又会由5挡降至3挡,最终处于1挡,不必要的换挡过程增加了离合器和同步器的磨损,这是意外升挡最大的危害;其次,在制

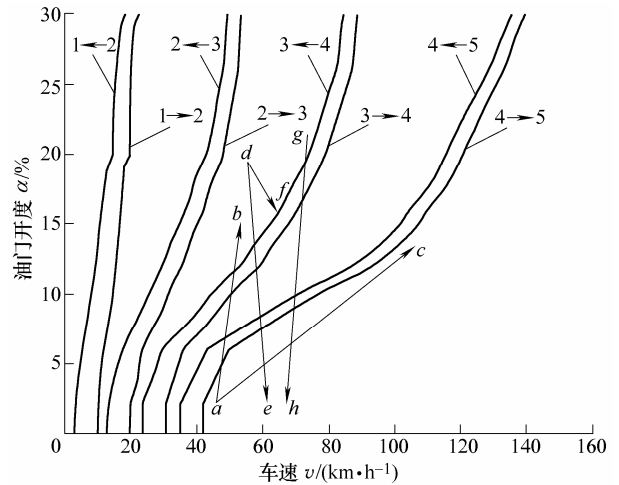


图5 普通换挡规律的局部放大图形

动或溜坡过程中,通常要利用发动机的制动作用,挡位意外升至高挡后,由于高挡的速比较小、会减弱发动机的制动作用。

### 2.2 城市循环工况的频繁换挡

当车辆需要加速时,驾驶员会加大加速踏板的开度,但操作稍不合理,就会导致频繁换挡现象。图4中的频繁降挡是由于驾驶员按照图5中 $ab$ 方向的趋势对加速踏板进行了操作,加速踏板的增长较快,但由于车辆惯性较大,车速增加较慢,产生了频繁降挡。如果驾驶员按照图5中 $ac$ 方向的趋势对加速踏板进行操作,就不会产生频繁降挡。同理,减小油门开度时,如果按照 $de$ 曲线就会产生频繁升挡现象,但按照 $df$ 趋势减小油门时,就可避免或减少频繁升挡现象。

由第2.1节和第2.2节的分析可见,意外升挡和频繁换挡是由于换挡曲线形状和驾驶员的操作而导致的,对于操作经验不是很熟练的驾驶员,更易产生这种现象。

不能要求每个驾驶员都来适应设定的控制规律,而应设计一种合理的控制方法,来适应不同驾驶员的操作习惯,修正驾驶员不合理的操作行为,避免不必要的换挡动作。

## 3 智能换挡规律的设计及控制效果

### 3.1 控制参数的选取及控制规则的制定

在自动变速器车辆中,驾驶员、车辆和行驶环境构成了“人-车-路”的闭环系统。驾驶员根据车辆行驶状态及行驶环境变化的反馈,实时调整油门踏板的大小,以使整个闭环系统达到平衡。油门开度及油门开度变换率的大小反映驾驶员的实时意图,因此应通过油门开度及油门开度变化率的大小,实时动态地增大升挡规律或减小降挡规律的数值,

以避免意外升挡或频繁换挡现象的发生，并且保证正常行驶时升、降挡规律不受影响。

图6为智能修正型换挡规律的控制框图， $v$ 表示车速， $i$ 表示当前挡位， $\alpha$ 表示油门开度， $d\alpha$ 表示油门开度变化率， $r_u$ 和 $r_d$ 分别为升挡和降挡规律的修正因子， $v_{i+1}$ 和 $v_{i-1}$ 分别表示由 $i$ 和 $\alpha$ 决定的升挡和降挡临界点的数值，实际降挡速度为 $v_{i-1}$ 与 $r_d$ 的乘积，实际升挡速度为 $v_{i+1}$ 与 $r_u$ 的商值。

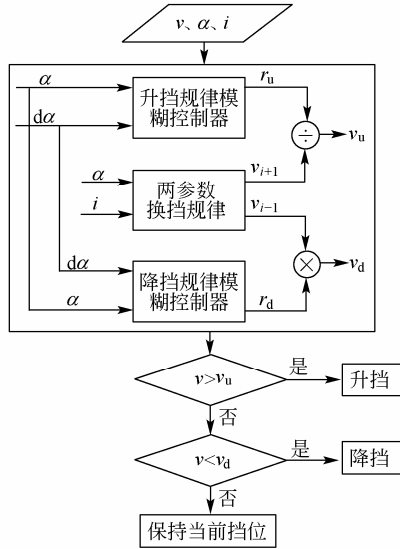


图6 智能修正型换挡规律的控制框图

“sugeno”型模糊控制方法的输出变量可为常值系数，比较适合于对升、降挡规律的修正。

降挡规律中各变量的语言集和基本论域分别如下设置。

$$\alpha: \{\text{小(S)、中(M)、大(B)}\}, \{0, 30\}$$

$$d\alpha: \{\text{很小(VS)、小(S)、中(M)、大(B)、很大(VB)}\}, \{0, 45\}$$

$$r_d: \{0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 1\}$$

升挡规律中各变量的语言集和基本论域分别如下设置。

$$\alpha: \{\text{小(S)、中(M)、大(B)}\}, \{0, 30\}$$

$$d\alpha: \{\text{很小(VS)、小(S)、中(M)、大(B)、很大(VB)}\}, \{-45, 0\}$$

$$r_u: \{0.2, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$$

降挡规律的输入和输出变量的隶属度函数如图7所示。

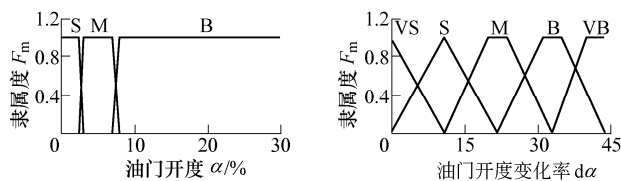


图7 降挡规律的隶属度函数

图8是通过模糊规则运算得到的插值图表。

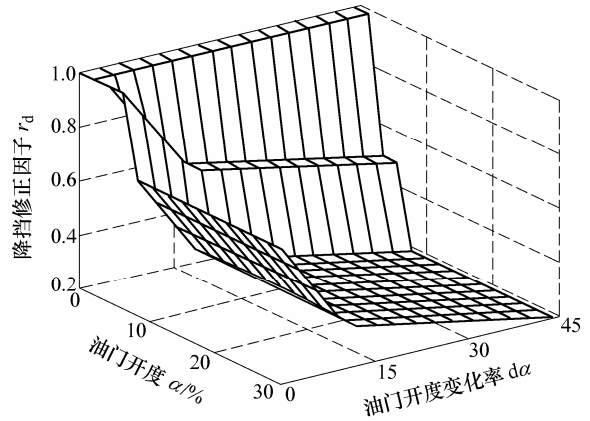


图8 降挡规律模糊控制器的输入输出关系

升挡规律的输入和输出变量的隶属度函数如图9所示，图10是通过模糊规则运算得到的插值图表。

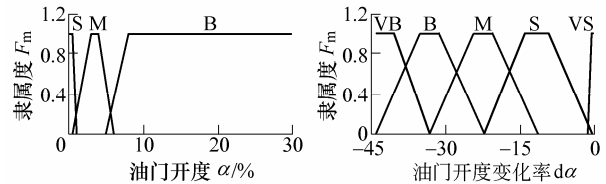


图9 升挡规律的隶属度函数

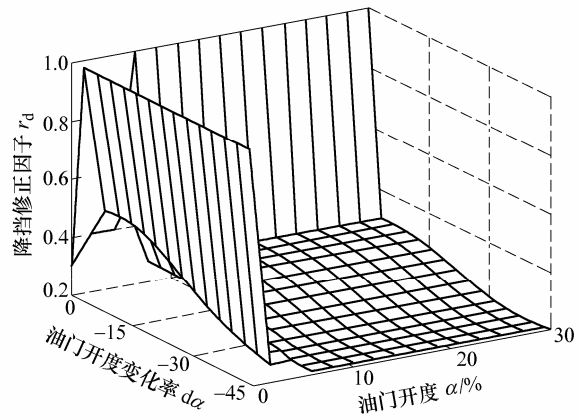


图10 升挡规律模糊控制器的输入输出关系

### 3.2 控制效果

#### 3.2.1 EUDC 循环工况

图11为EUDC工况时智能修正型换挡规律得出的控制结果，各种参数与第1.2.2节相同。由图11可见，该规律避免了188~202s循环换挡现象，且在370s后的降挡曲线与原规律相同，可及时使变速器降至低挡。与普通换挡规律相比，基于智能修正型的换挡规律减少了20次换挡操作。

由于DCT采用预先接合同步器的控制方法，与普通换挡规律相比，智能修正型换挡同样减少了同步器接合与分离的次数。

普通换挡规律的燃油经济性为  $8.14 \text{ L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$ ，而智能修正型换挡规律的经济性为  $7.88 \text{ L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$ ，节油率为 3.3%。

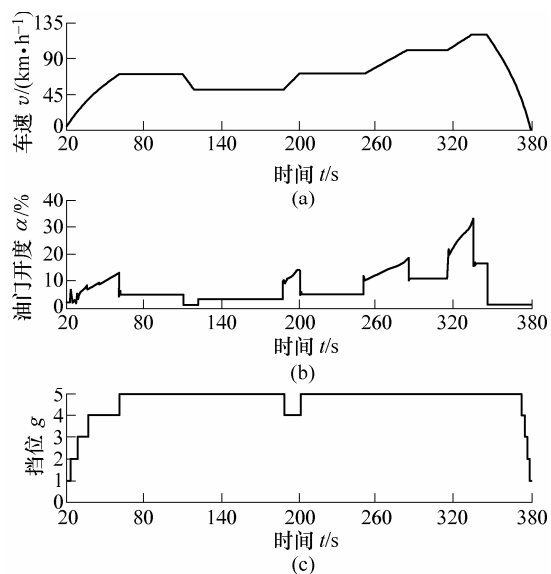


图 11 EUDC 循环工况的控制效果

### 3.2.2 ECE 循环工况

图 12 为 ECE 工况时智能修正型换挡规律得出的控制结果，由图 12 可见，该工况运行正常、未发生频繁换挡现象，该规律同样适用于 ECE 工况。

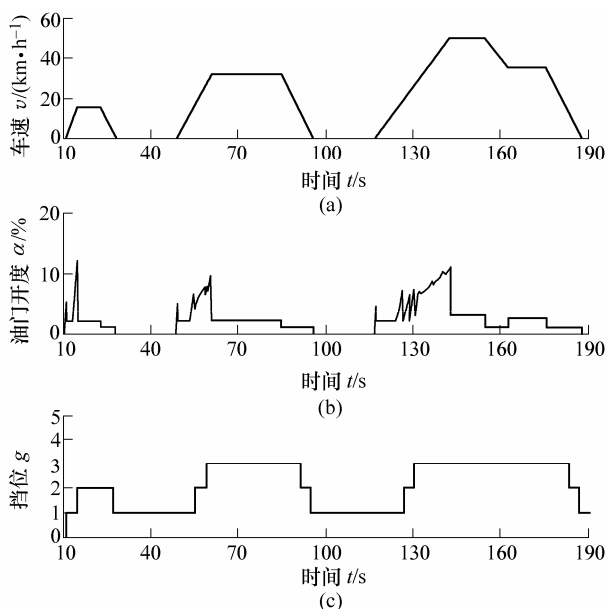


图 12 ECE 循环工况的控制效果

由 ECE 和 EUDC 循环工况的控制效果可以看出，智能修正型换挡规律可以修正驾驶员不合理的操作行为、避免频繁换挡现象的发生。

### 3.2.3 制动工况

图 13 为制动时智能修正型挡规律得出的控制结果，与图 3 相比，避免了不必要的意外升挡现象。

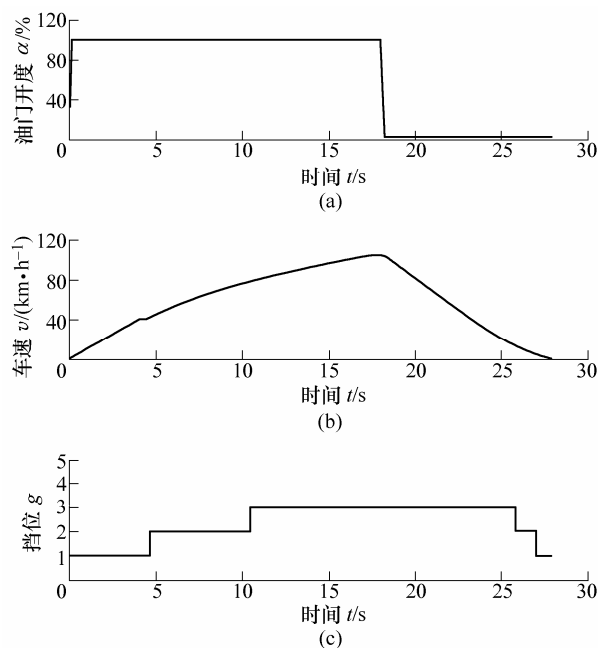


图 13 制动工况的控制效果

## 4 结论

(1) 设计了 DCT 车辆的两参数换挡规律，控制结果表明在 EUDC 循环工况及制动工况下产生了不合理换挡现象，通过加大降挡曲线与升挡曲线间的间距，未能消除不合理的换挡现象。

(2) 分析了产生不合理换挡现象的原因。制动、溜坡过程中的意外升挡现象是由于普通换挡规律的形状而造成的，由于车辆的惯性较大、车速降低较慢，在油门迅速减小过程中，采用普通换挡规律，必然会产生意外升挡。循环工况中的频繁换挡是由于驾驶员的操作而导致的，对于操作经验不是很熟练的驾驶员，更易产生这种现象。

(3) 基于“sugeno”型模糊控制方法，设计了智能修正型的换挡规律。该系统以油门开度和油门开度变化率为输入，输出参数为升、降挡规律数值的修正系数。实际降挡速度为降挡曲线临界值与降挡修正系数的乘积，实际升挡速度为升挡曲线临界值与升挡修正系数的商。控制结果表明智能换挡规律在保留两参数换挡规律优点的同时，可以避免频繁换挡及意外升挡现象的发生，并可减少 DCT 同步器接合、分离的次数，提高整车的舒适性和燃油经济性。

## 参 考 文 献

- [1] 吴光强, 杨伟斌, 秦大同. 双离合器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): 13-21.

- WU Guangqiang, YANG Weibin, QIN Datong. Key technique of dual clutch transmission control system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 13-21.
- [2] ZHANG Y, CHEN X, JIANG H, et al. Dynamic modeling and simulation of a dual-clutch automated lay-shaft transmission[J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2005, 127(2): 302-307.
- [3] WEIL H G, PROBST G, GRAF F. Fuzzy expert system for automatic transmission control[C]// First IEEE Conference on Control Applications, Sept. 13-16, 1992, Dayton, OH, USA. New York, NY, USA: IEEE, 1992: 716-721.
- [4] HAYASHI Koki, SHIMIZU Yoshinao, DOTE Yasuhiko, et al. Neuro fuzzy transmission control for automobile with variable loads[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(1): 49-52.
- [5] 申水文, 葛安林. 模糊换挡技术与综合换挡规律[J]. 农业工程学报, 1997 (9): 145-149.  
SHEN Shuiwen, GE Anlin. Fuzzy shift technology and integrated shift schedule[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1997 (9): 145-149.
- [6] SUN Yize, XIONG Wei, YAO Yufeng. Methods for the gear-position decision in AMT[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 12(2): 220-224.
- [7] QIN Guihe, ZHANG Hongkun, LEI Yulong, et al. Gear position decision method of automated mechanical transmission based on fuzzy inference[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 12(1): 76-80.
- [8] 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. Theory and design of automotive automatic transmission[M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [9] 杨伟斌. 双离合器式自动变速器电子控制系统关键技术的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
YANG Weibin. The key technique study for electronic control system of dual clutch transmission[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [10] 何维廉. LUK公司的XSG系列变速器[J]. 传动技术, 2004, 18(3): 41-46.  
HE Weilian. LUK'S XSG family gear boxes[J]. Drive System Technique, 2004, 18(3): 41-46.

---

作者简介: 杨伟斌, 男, 1978年出生, 博士后。主要从事汽车自动变速控制系统, 电动汽车控制系统, 汽车动力学与控制方面的研究工作。

E-mail: yangwbsuccess@yahoo.com.cn