

# 电控自动变速器换挡过程控制策略<sup>\*</sup>

孙文涛 陈慧岩

**【摘要】** 为了提高电控自动变速器的换挡品质,通过分析自动变速器的换挡过渡过程,建立了行星式自动变速器动力学模型,并应用此模型对换挡过程进行了详细分析,得到换挡过渡过程的变化规律,同时对离合器充放油规律进行了研究,并采用 PWM 控制电磁阀对离合器充放油压力进行调节。在换挡过程中,系统先后采用了开环控制、斜率控制以及基于增量 PID 算法的闭环控制,同时改变发动机喷油量对换挡过程进行了控制。通过试验可以看出换挡过程中采用的开环控制、斜率控制以及基于增量 PID 算法的闭环控制以及发动机喷油量的控制策略改善了换挡品质。

**关键词:** 车辆 电控自动变速器 换挡过程 控制策略

**中图分类号:** U461.91

**文献标识码:** A

## Control Strategy as Shifting Progress with an Electronic Automatic Transmission

Sun Wentao Chen Huiyan

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

### Abstract

The shift system of electronic automatic transmission was analyzed, and a mathematic model of the shifting process was set up. The model could be used directly for shifting process control. With the model the shifting process was also analyzed, and the rule of shifting process was obtained. The process of the clutch applies and exhaust was analyzed. Through adjusting the pressure by using PWM to control the solenoids, the pressure was controlled in good conditions. Trough the research, the system used the open-loop control during the fill-time phase, faxed ramp rate control during the second phase and closed-loop control during the third phase by using PID control strategy. At the same time, the electronic engine was used to adjust the engine speed to acquire the better quality of shifting process. Finally, though a bench test, the control strategy of shifting process of the electronic automatic transmission was obtained.

**Key words** Vehicle, Electronic automatic transmission, Shifting process, Control strategy

### 引言

行星式电控自动变速器是通过电控液压操纵换挡离合器或制动器来进行换挡操纵的。换挡时会产生换挡冲击、动力中断等换挡不平稳现象<sup>[1]</sup>。换挡过程控制旨在增加换挡的平稳性,使驾驶更加舒适;减少传动系的动载荷,增加零件的使用寿命;减少离合器摩擦片热负荷,提高离合器的工作可靠性和耐

用性。换挡过程中通常是一个结合元件结合,另一个结合元件分离。如果这两个结合元件分离和结合的时间不当,则会造成换挡不平稳:搭接过早会造成动力干涉,过晚会产生动力中断。换挡过程中作用在结合元件上的油压决定了结合元件所传递的转矩极限。控制油压的适当变化能够起到减小输出轴转矩的波动、减小结合元件磨损等作用<sup>[2]</sup>。换挡的控制即是对结合元件在换挡过程中的动作搭接时序、

收稿日期: 2007-11-09

<sup>\*</sup> 北京理工大学车辆传动国家重点实验室基金资助项目(项目编号:9140C340306604)

孙文涛 北京理工大学机械与车辆工程学院 博士生, 100081 北京市

陈慧岩 北京理工大学机械与车辆工程学院 教授

油压变化规律和发动机转矩的控制。发动机转矩的控制通常采用节气门控制、点火延迟和切断燃油供给等方法,目的是降低换挡期间传动系统的转矩,减少冲击<sup>[3]</sup>。结合元件在换挡过程中的动作搭接时序和油压变化规律是影响换挡品质的主要因素,本文对此加以研究。

## 1 建模与理论分析

### 1.1 建模

采用等效集中质量法把车辆动力传动系统简化成线性多自由度弹性集中质量系统,由无惯性的弹性环节和无弹性的惯性环节组成,各相关部件以集中质量形式存在。

在建模过程中,作以下基本假设:① 忽略发动机扭振、轴的扭振对系统的影响。② 忽略轴的横向振动。③ 将各元件视为完全刚性无阻尼的惯性元件,并以集中质量的形式表示。④ 忽略系统其他运动副的间隙。⑤ 除离合器的摩擦力外,忽略轴承和轴承座的摩擦阻力、搅油阻力等系统中其他运动副的摩擦阻力。⑥ 假定车轮与地面间无滑转和滑移。

基于以上基本假设,车辆动力传动系统简化模型如图1所示。该模型只有2个挡位,接合制动器R时为低挡,接合离合器C时为高挡。这样就把车辆复杂的换挡过程简化成液力变矩器闭锁离合器L、制动器R与换挡离合器C之间的切换过程。图中:B为泵轮,T为涡轮,D为导轮。

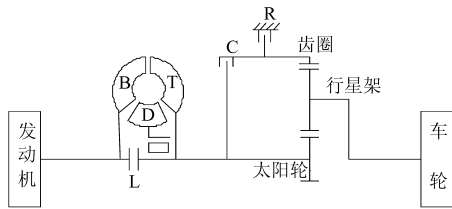


图1 车辆动力传动系统简化模型

Fig.1 Module of the vehicle transmission system

### 1.2 理论分析

以升挡过程为例,根据简化模型对车辆换挡过程进行分析,如图2所示。

图中在A点之前,变速器处于低挡工作区,A点之后,开始了充放油过程,进入了低挡转矩阶段。离合器滑转摩擦力矩 $M_C$ 不断增加,制动器传递转矩 $M_B$ 逐渐下降,直到B点时,制动器开始出现打滑,低挡转矩阶段结束。考虑到整个换挡过程中车速基本不变,所以各构件的转速都保持不变。在B点以后,进入惯性阶段。离合器与制动器都处于打滑状态,各构件的转速变化情况:转速 $n_T$ 下降,齿圈转速 $n_Q$ 则上升,输出轴转速 $n_J$ 基本保持不变。直到3个构件达到同步旋转,惯性阶段结束。在C

点以后,离合器C停止打滑而结合,而制动器已经分离,进入到高档阶段工作。由输出转矩图线的变化,可分析换挡过程中的转矩扰动。B点和C点处,输出转矩有很大的变动,这就是引起换挡冲击的转矩扰动。在车辆行驶中,在B点驾驶员能够感觉到减速度,C点能够感觉到加速度。通过分析可知:过渡过程各阶段的变化,取决于执行机构的充放油规律。因此,改变2个执行机构的充放油压特性,就可改善输出转矩的扰动。

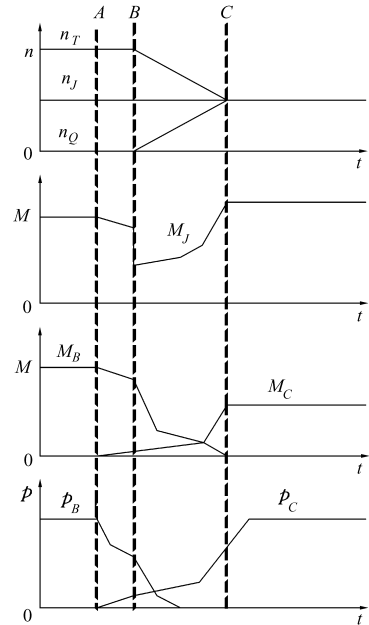


图2 换挡过程理论分析示意图

Fig.2 Analysis of the shifting process

图中: $n_T$ 为太阳轮转速, $n_J$ 为行星架转速, $n_Q$ 为齿圈转速, $M_J$ 为行星架转矩, $M_B$ 为制动器转矩, $M_C$ 为离合器转矩, $p_B$ 为制动器油压, $p_C$ 为离合器油压

## 2 试验研究

为了更好地说明换挡过渡过程的变化情况,通过试验对整个过程进行研究分析。建立的自动变速器加载试验台如图3所示。

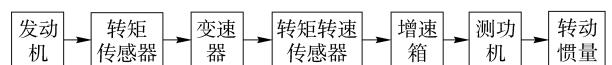


图3 试验台原理图

Fig.3 Principle of bench test

试验台包括BF6M1015CP型电控柴油机(带增压中冷),330 kW;HBM T10型输入轴转矩仪,3 000 N·m;HD4070PR型电控自动变速器;输出轴转速转矩仪,5 000 N·m,5 000 r/min;增速箱,6 000 r/min、12 000 r/min;CW400型测功机,1 900 N·m(6 500 r/min);转动惯量为125 kg·m<sup>2</sup>。

美国Allison公司设计生产的HD4070PR型自动变速器(图4)具有7个前进挡,按照模块化思想

设计:包括输入模块(带闭锁离合器的液力变矩器和取力器)、行星齿轮模块(4 个行星排、2 个离合器和 4 个制动器)、输出模块(带有液力缓速器)和电液控制模块。它由先进的电子控制单元控制,采用脉宽调制液压操纵机构,具有响应快、换挡平稳、有自学习功能、自适应性强等优点,并拥有与发动机通讯的 CAN 接口,能实现与发动机协调控制,并能通过手柄上的故障诊断按钮提取工作过程中的故障代码。

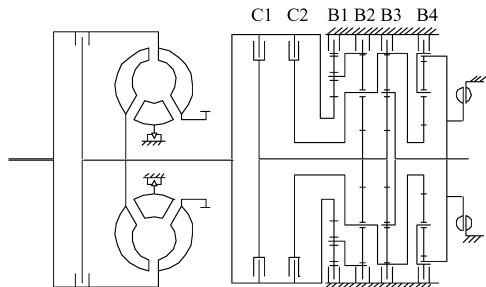


图 4 HD4070PR 型自动变速器结构简图

Fig. 4 Schematic of HD4070PR automatic transmission

试验时,通过在变速器输入输出轴上分别安装的转矩仪获取工作时的转矩值,同时通过 CAN 获取各个转速信号以及通过安装压力传感器的方式获取离合器或制动器的充放油压力信号,通过以上数据即可得到换挡过渡过程各个信号的变化规律,从而对其整个过程进行分析。

图 5 为变速器由 5 挡升 6 挡的过渡过程曲线,  $M_e$  为发动机转矩,  $M_2$  为变速器输出轴转矩,  $p_1$ 、 $p_3$  为离合器 C1 和制动器 B1 的充油压力,  $n_e$ 、 $n_t$ 、 $n_2$  分别为发动机转速、涡轮转速和输出轴转速。可以看出,整个过程与理论分析基本吻合,如果改变离合器的充油过程(图 6),同时改变发动机的喷油量  $b$ ,即

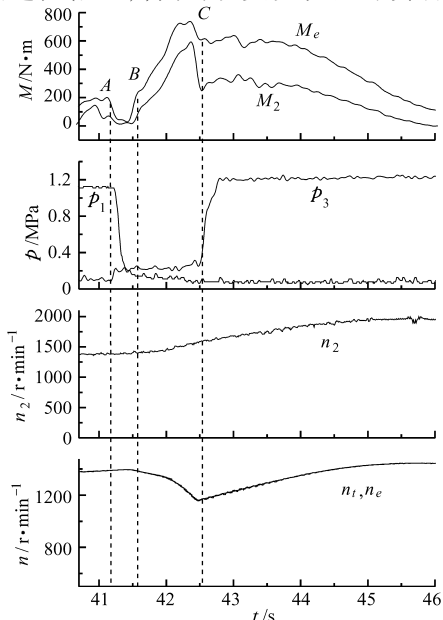


图 5 5 挡升 6 挡的变速器过渡过程试验曲线

Fig. 5 Analysis of shifting process for 5th gear to 6th gear

可消除转矩下降的趋势,没有挡位中断,使得换挡过程更加平顺。离合器充放油过程是由电磁阀的占空比进行调节的,如图 7 所示。

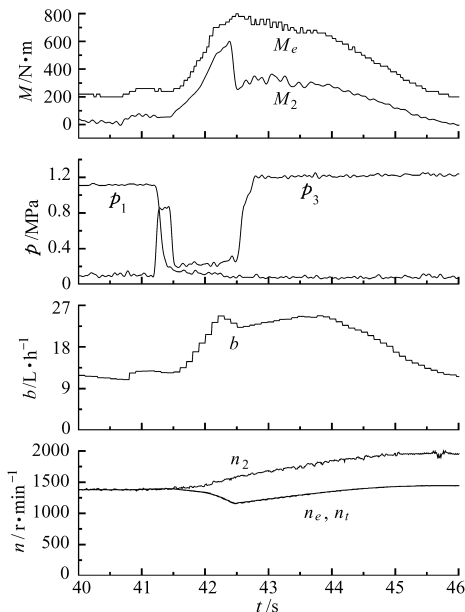


图 6 改变充油规律和发动机供油后换挡过程曲线

Fig. 6 Shifting process after change the pressure rule and the engine fuel

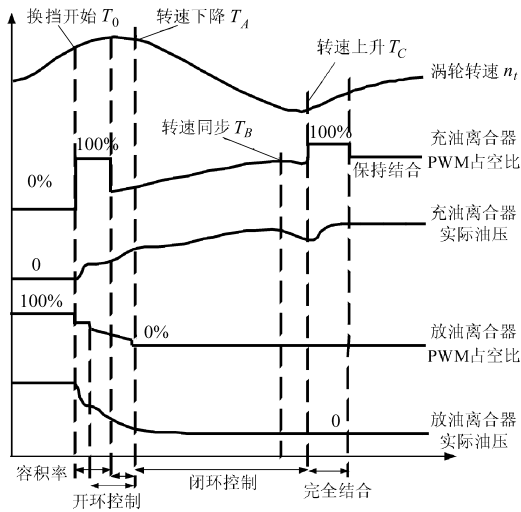


图 7 换挡过程离合器控制策略

Fig. 7 Clutch control rule during up-shift

在换挡开始时,命令充油离合器控制电磁阀全开一段时间,油液充满活塞后面的空腔推动活塞开始运动,充油离合器达到了充油油压的起始点。这段时间内电磁阀驱动信号的占空比是 100%,即完全打开。同时,控制放油离合器的电磁阀占空比降为某一值,放油离合器油压开始下降。

由于 ECU 开环控制电磁阀驱动信号占空比沿一定斜率上升,从而使充油离合器的压力逐渐升高。开环上升斜率是一个预设的提高离合器油压的比率,它一直持续检测到涡轮轴转速下降时为止。在充油离合器的容积率和开环控制占空比以一定斜率

上升期间,作用在放油离合器上的压力不断下降。

当检测到涡轮轴转速下降后,ECU 开始对充油离合器进行闭环控制,这是 ECU 通过调制电磁阀驱动信号主动控制涡轮轴转速的时期。闭环控制一直持续到离合器主、被动摩擦片几乎无转速差时结束,这将使涡轮轴转速保持最佳的变化曲线<sup>[4]</sup>。

当 ECU 发现涡轮轴转速等于输出轴转速乘以即将结合的下一个挡位的速比时,控制充油离合器进入完全接合阶段。在这段时间内,ECU 向电磁阀发出完全“开”的指令,使离合器完全接合,最终完成升挡操作。其控制策略如图 8 所示。换挡过程中发动机的控制时序过程如图 9 所示<sup>[5]</sup>。

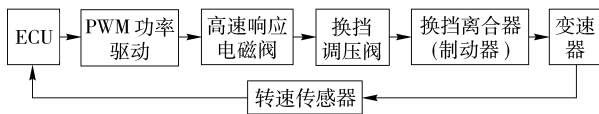


图 8 自动换挡控制策略框图  
Fig. 8 Control rule of auto shift

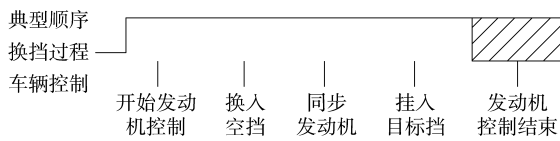


图 9 换挡过程发动机控制时序

Fig. 9 Sequence of engine control during shifting

### 3 控制策略分析

采用的闭环控制系统是一个典型的非线性、时变系统。由于系统存在油液泄漏、摩擦、机械惯性延迟、电磁阀的电液响应滞后及液压阀的非线性流量特性,使得控制系统表现为复杂的非线性。故采用基于 PID 调节的增益调度控制,既有 PID 调节简单方便的特点,又可根据运行条件自动调整控制参数,具有一定的适应性<sup>[6]</sup>。

连续系统 PID 公式为

$$u_n(t) = K_{np} \left( e_n(t) + \frac{1}{T_{ni}} \int_0^t e_n(t) dt + T_{nd} \frac{de_n(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

式中  $u_n(t)$ ——转速闭环的控制量  
 $e_n(t)$ ——目标转速与实际转速的偏差  
 $K_{np}$ ——转速闭环比例系数  
 $T_{ni}$ ——转速闭环积分时间常数  
 $T_{nd}$ ——转速闭环微分时间常数

对式(1)进行离散化,取  $t = kT(k = 1, 2, \dots)$ , 则有位置式 PID 算法

$$u_n(k) = K_{np} e_n(k) + K_{ni} \sum_{j=0}^k e_n(j) + K_{nd} (e_n(k) - e_n(k-1)) \quad (2)$$

其中  $K_{nd} = \frac{K_{np}}{T_{nd}}$   $K_{ni} = \frac{K_{np}}{T_{ni}}$

式中  $K_{ni}$ ——转速闭环的积分系数

$K_{nd}$ ——转速闭环的微分系数

采用增量式 PID 算法

$$\Delta u_n(k) = K_{np} (e_n(k) - e_n(k-1)) + K_{ni} e_n(k) + K_{nd} (e_n(k) - 2e_n(k-1) + e_n(k-2)) \quad (3)$$

于是有

$$u_n(k) = u_n(k-1) + \Delta u_n(k) \quad (4)$$

由转速闭环 PID 算法获得的控制量是电磁阀 PWM 驱动信号的占空比。控制过程中,由当前涡轮转速与目标挡位的变速比计算出输出轴的目标挡位转速,得到输出轴在换挡前后的转速差,并设定转速差在允许的换挡时间内线性递减,即可计算出当前的目标转速。然后在满足条件时,对转速进行闭环控制,采用如图 10 所示的电磁阀驱动信号占空比变化规律。图中 b 区和 c 区即为图 7 所示的闭环控制阶段,  $t_b$  时刻转速同步,转速差消除。c 区占空比下降是为了消除由滑动摩擦转换到静摩擦状态时摩擦因数突变带来转矩突变,限制加速度变化。0 区、a 区为开环控制,进入 d 区表示换挡完成。具体控制参数需结合试验来整定。

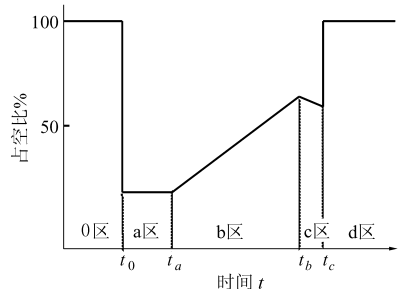


图 10 离合器压力闭环控制规律

Fig. 10 Closed-loop control rule of the clutch pressure

由试验数据曲线可知,换挡过渡过程与理论分析整体吻合。即通过此试验可以很好地监测变速器换挡过渡过程的品质,为进一步改善换挡品质提供良好的技术平台,并可以实现发动机与自动变速器的一体化控制。

### 4 结论

(1) 建立了行星式电控自动变速器换挡过程控制分析的简化动力学模型,可直接应用于换挡过程的实时控制。

(2) 应用建立的模型对换挡过程进行了分析,得到了换挡过程的直观理解,并对换挡过程的控制策略进行了研究。

(4) 电磁阀关闭存在着约 2 ms 的关闭延时间,因此与开启过程一样会产生雾化不完全的过渡过程。

(5) 电磁阀开启和关闭的过程中伴随有涡旋运动的产生、发展和运输的过程。

#### 参 考 文 献

- 1 Wilson B J, Brain P. Long-term stability of distribution of *Alopecurus myosuroides* huds within cereal fields[J]. *Weed Res.*, 1991,31(3): 367~373.
- 2 Thornton P K, Fawcett R H, Dent J B, et al. Spatial weed distribution and economic thresholds for weed control[J]. *Crop Protection*, 1990, 9(5): 337~342.
- 3 Blumhorst M R, Weber J B, Swain L R. Efficacy of selected herbicides as influenced by soil properties[J]. *Weed Technol.*, 1990,4(2): 279~283.
- 4 Womac A R, Bui Q D. Development of a variable flow rate fan spray nozzle for precision chemical application[C]//2001 ASAE Annual International Meeting, 2001, Sacramento Convention Center, Sacramento, California, USA.
- 5 Stark J C, McCann I R, King B A, et al. A two-dimensional irrigation control system for site-specific application of water and chemicals[M]. *Agronomy Abstracts ASA* 85, 1993: 329.
- 6 Camp C R, Sadler E J, Evans D E. Using variable-rate, digitally controlled metering device[J]. *Trans. of the ASAE*, 2000,16(1): 39~44.
- 7 吴春笃,杜彦生,张伟,等. 脉宽调制型变量喷雾系统雾量沉积分布[J]. *农业机械学报*,2007,38(12):70~73.  
Wu Chundu, Du Yansheng, Zhang Wei, et al. Study on the deposit distribution of the modulated variable rate spray system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007,38(12): 70~73. (in Chinese)
- 8 焦俊生,张伟. 脉宽调制型变量喷雾控制 ECU 设计与分析[J]. *农业机械学报*,2007,38(1):54~57.  
Jiao Junsheng, Zhang Wei. Design and analysis of the ECU for PWM spraying[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007,38(1):54~57. (in Chinese)
- 9 尹晔东,王运东,费维扬. 计算流体力学在化学工程中的应用[J]. *石化技术*,2000,7(3):166~169.  
Yin Yedong, Wang Yundong, Fei Weiyang. Computational fluid dynamics for chemical engineering[J]. *Petrochemical Industry Technology*,2000,7(3):166~169. (in Chinese)
- 10 韩占忠,王敬. FLUENT:流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.

(上接第 26 页)

(3) 通过试验的方式,分析了换挡过程中各个参数变化的规律、电磁阀控制的离合器充放油的规律特性,其变化过程与理论分析基本一致。采用分

阶段控制的方式:开环控制、斜率控制以及增量式 PID 闭环控制算法对换挡过程进行了改进,得到了较好的控制效果。

#### 参 考 文 献

- 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,1993:60~80.
- 2 唐新星,赵丁选,黄海东,等. 工程车辆自动变速控制系统的仿真与试验[J]. *农业机械学报*,2007,38(4):26~29.  
Tang Xinxing, Zhao Dingxuan, Huang Haidong, et al. Study on automatic transmission control system for construction vehicle [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2007, 38(4):26~29. (in Chinese)
- 3 Joachim Horne, Joachim Bambergera, Peter Michaud, et al. Flatness-based clutch control for automated manual transmissions [J]. *Control Engineering Practice*,2003(12):1 353~1 359.
- 4 Shim B K, Hahn J O, Lee K I. Development of shift control algorithm using estimated turbine torque[C]. *SAE Paper* 2000-01-1150,2000.
- 5 Msmao Kawai, Hideki Aruga. Development of a shift control system for automatic transmission using information from a vehicle navigation system[C]. *SAE Paper* 1999-01-1095,1999.
- 6 Baek-Hyun Cho, Jong-Sun Oh, Won Hi-Lee. Modeling of pulse width modulation pressure control system for automatic transmission[C]. *SAE Paper* 2002-01-1257,2002.