

电控机械式自动变速器离合器灰色预测PID控制技术*

余天明¹ 郑磊^{1,2} 李颂³

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025; 2. 中国第一汽车集团公司技术中心, 长春 130011;
3. 空军航空大学航空理论系, 长春 130022)

【摘要】 离合器控制的优劣是影响机械式自动变速车辆起步和换挡平顺性的最重要因素,传统PID控制方法难以对电控机械式自动变速器(AMT)离合器这种复杂的大滞后、非线性系统进行精确控制。对灰色预测PID控制在AMT离合器控制中的应用进行了深入研究,与传统控制方法相比,该方法提高了离合器的控制精度。灰色预测PID控制使控制系统的灰量得到一定程度的白化,提高了控制的质量和鲁棒性,有效解决了离合器控制的超调和震荡问题,提高了车辆起步与换挡的平顺性。

关键词: 电控机械式自动变速器 离合器 换挡品质 灰色预测
中图分类号: U463.211 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0001-06

Gray Prediction PID Control Technology of Automated Mechanical Transmission Clutch

Yu Tianming¹ Zheng Lei^{1,2} Li Song³

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
2. R & D Center, China FAW Group Corporation, Changchun 130011, China
3. Department of Aviation Theory, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract

The underway and shift smoothly of automated mechanical transmission (AMT) vehicle are influenced by the clutch control property, it is difficult to be precisely handled by traditional PID control technology. The main reasons are the big hysteresis and nonlinear characteristics of clutch and actuation system. The gray prediction PID control technology in clutch control of AMT was analyzed. The control precision of clutch was improved by the proposed technology compared with traditional PID control technology. The gray prediction PID control could whiten certainly gray factors in the control system, improve the control quality and rubust of PID, and solve the problems of overrun and oscillation of clutch control. Thus, the underway and shift smoothly for vehicle were improved.

Key words Automated mechanical transmission, Clutch, Shift quality, Gray prediction

引言

离合器控制是电控机械式自动变速器(automated mechanical transmission,简称AMT)的关键技术之一,其控制性能的好坏直接影响AMT车辆的换挡平顺性,是系统能否被乘员所接受的主要影响因素。因此,必须寻找有效的离合器控制方法,以降低离合器控制过程中扭矩超调及振荡带来的冲击

度等问题。

PID控制方法由于具有算法简单、参数易于整定、通用性强、鲁棒性好、使用方便等优点,在现代车辆电控系统中得到成功应用。但是,单纯的PID控制不能满足复杂控制过程的要求,对于大滞后、非线性及不确定性等系统难以控制;同时,PID参数的调整需要被控对象的精确数学模型,而这往往并不容易得到。因此,针对具体问题需要研究改进的PID

收稿日期: 2010-10-19 修回日期: 2011-02-28
* 国家自然科学基金资助项目(50505014)
作者简介: 余天明,博士生,讲师,主要从事自动变速车辆控制研究,E-mail: ytm0406@126.com

控制算法。

离合器通常采用 PID 控制技术,但由于离合器的控制需要经历从 TCU 到控制电磁阀、液压执行机构、离合器分离系统、离合器膜片弹簧、离合器从动盘的一系列传递过程,除存在大量非线性、滞后以外,也容易受到诸多干扰因素的影响,影响了 PID 控制的效果。

基于灰色系统理论的灰色预测 PID 控制算法,可以对系统不确定部分建立灰色控制模型,进行灰色预估补偿,使控制系统的灰量得到一定程度的白化,可以提高 PID 控制质量及鲁棒性,有效解决离合器控制的超调和振荡问题。本文对灰色预测 PID 控制方法在 AMT 离合器控制中的应用进行研究。

1 灰色预测 PID 控制原理

灰色预测 PID 控制算法,以灰色系统理论为基础,以系统的行为模型取代系统的数学模型,以系统的预测误差来参与对 PID 控制参数的在线整定,因而从根本上解决了单一 PID 控制算法的局限性,提高了控制品质。其基本方法是通过进行灰色预测,使控制系统的灰量得到一定程度的白化,将其预测值应用到 PID 控制算法中形成灰色预测算法。其闭环控制构成如图 1 所示。

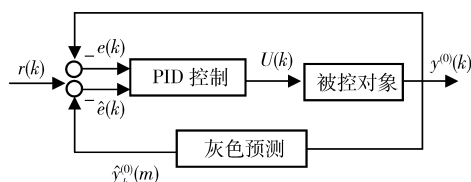


图 1 灰色预测控制算法的闭环控制框图

Fig. 1 Closed-loop control chart of gray prediction control

图中: $r(k)$ 、 $U(k)$ 、 $y^{(0)}(k)$ 为系统 k 时刻的输入量、控制量、输出量; $e(k)$ 、 $\hat{e}(k)$ 为系统 k 时刻的实际误差和预测误差; $\hat{y}_k^{(0)}(m)$ 为超前 $(m-k)$ 步的灰色预测值。

根据 $e(k)$ 和 $\hat{e}(k)$ 可以确定参与 PID 调节算法的误差项

$$\tilde{e}(k) = \begin{cases} \hat{e}(k) & (e(k)\hat{e}(k) \geq 0) \\ \frac{1}{2}(e(k) + \hat{e}(k)) & (e(k)\hat{e}(k) < 0) \end{cases} \quad (1)$$

当 $e(k)\hat{e}(k) < 0$ 时,系统的波动已经在给定值附近变化,此时应该取谨慎的控制策略;当 $e(k)\hat{e}(k) \geq 0$ 时,以 $\hat{e}(k)$ 为误差进行调节,可有效抑制系统可能出现的超调。

在进行 PID 运算时,为消除积分饱和现象,可采取变速积分,变速分子为

$$f(e(k)) = \begin{cases} \frac{E - |e(k)|}{E + |e(k)|} & (|e(k)| \leq E) \\ 0 & (|e(k)| > E) \end{cases} \quad (2)$$

式中 E ——积分投入界线

据此,可以得到一组具有灰色预测作用的 PID 调节算法的递推公式

$$U(k) = U_p(k) + U_I(k) + U_D(k) \quad (3)$$

其中

$$U_p(k) = K_p e(k)$$

$$\begin{cases} U_I(k) = U_I(k-1) + \Delta U_I(k) \\ U_I(0) = U_{I0} \end{cases}$$

$$\Delta U_I(k) = \frac{1}{2} K_I f(e(k)) (e(k) + \hat{e}(k-1))$$

$$\begin{cases} U_D(k) = \left(1 - \frac{1}{n}\right) U_D(k-1) + \Delta U_D(k) \\ U_D(0) = U_{D0} \end{cases}$$

$$\Delta U_D(k) = K_D (\tilde{e}(k) - \tilde{e}(k-1))$$

式中 $U_p(k)$ ——比例项 $U_I(k)$ ——积分项

$U_D(k)$ ——微分项 K_p ——比例系数

K_I ——积分系数 K_D ——微分系数

$\left(1 - \frac{1}{n}\right)$ ——衰减因子,模拟实际微分作用

2 离合器控制系统模型

控制离合器通常采用的控制参数为离合器结合量及离合器结合速度,其原因在于离合器位移便于检测。但是,这种控制方法因离合器位移与离合器传递扭矩之间的影响因素较多,使离合器结合量的控制反映到离合器传递扭矩上误差较大,而无法对传动系进行精确的扭矩控制,从而降低了系统的控制性能。

为寻找与离合器扭矩具有可控函数关系的控制量,需对离合器压紧力进行深入分析,图 2 所示为

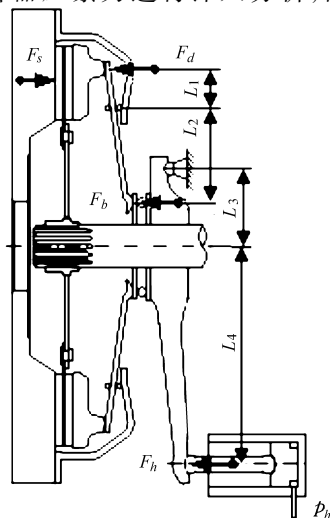


图 2 离合器受力系统及其受力分析图

Fig. 2 Support system and analysis of clutch

AMT 离合器控制系统及其受力分析图。

离合器执行机构出力作用到离合器从动盘过程中传递环节多,存在各种影响作用力传递的因素,因此,需要进行必要的假设,忽略次要因素,以建立离合器执行机构的数学模型:① 忽略离合器旋转部件导致的离心力等动态影响因素。② 忽略分离杠杆等分离力传递环节所产生的弹性变形。③ 将分离杠杆、分离轴承等处摩擦力产生的损失叠加到一起集中考虑。

根据对离合器的受力分析,可以建立方程

$$\begin{cases} F_b = \frac{L_3}{L_3 + L_4} F_h \\ F_h = p_h A_c \\ F_c = F_d - F_s - F_f \\ F_d = \psi \frac{L_2}{L_1} F_b \end{cases} \quad (4)$$

从而得到 $F_c = \frac{\psi L_2 L_3 A_c}{L_1 (L_3 + L_4)} p_h - F_s - F_f$ (5)

- 式中 F_b ——分离轴承处的作用力
 F_h ——分离油缸的作用力 p_h ——控制油压
 A_c ——油缸活塞工作面积
 $L_1、L_2、L_3、L_4$ ——分离杠杆及膜片弹簧各部分长度
 F_c ——离合器压紧力
 F_d ——膜片弹簧作用在压盘上的力
 F_s ——离合器从动盘波形片作用力
 F_f ——分离杠杆、分离轴承、压盘等处摩擦力
 ψ ——温度、疲劳、磨损等对作用力影响系数

根据式(5),可以得到离合器执行机构控制油压与离合器传递扭矩的关系式为

$$T_c = \mu_c \left[\frac{\psi L_2 L_3 A_c}{L_1 (L_3 + L_4)} p_h - F_s - F_f \right] R_c Z_c \quad (6)$$

- 式中 μ_c ——离合器摩擦因数
 R_c ——等效工作半径
 Z_c ——摩擦工作面数

离合器传递扭矩与执行机构作用油压成比例,分离油缸控制压力由比例电磁阀决定,其输入模型可简化为具有相同时间滞后的一阶系统

$$\tau_{cv} \dot{p}_h = -p_h + K_{cv} i_b (t - L_{cv}) \quad (7)$$

- 式中 i_b ——比例控制阀输入电流
 t ——时间
 τ_{cv} ——时间常数 K_{cv} ——电磁阀增益
 L_{cv} ——电磁阀响应滞后时间

3 离合器执行机构灰色预测 PID 控制

由离合器液压控制系统模型可见,给离合器控

制电磁比例阀输入信号后,到离合器输出扭矩,中间不确定影响因素多、多频扰动多、离合器负载干扰多,这些因素给系统控制带来了难度,离合器采用常规的 PID 控制难以提供满意的控制效果,需要寻求更佳的控制方法。

利用灰色系统理论处理不确定信息能力强的优点,结合传统 PID 控制,根据离合器控制系统的工作状态,通过灰色控制器针对系统输入输出变化的情况来调节 PID 控制器的比例系数、微分系数、积分系数,提高了控制品质和鲁棒性,获得了较好的跟踪控制效果和快速响应。

3.1 离合器状态控制方程

对于图 3 所示的离合器动力学模型,动力学方程为

$$I_c \frac{d\omega_c}{dt} = T_c - T_n \quad (8)$$

- 式中 I_c ——离合器从动部分转动惯量
 ω_c ——离合器从动部分角速度 (I_c 的值为等效转动惯量,与挡位有关)
 T_c ——离合器传递扭矩 T_n ——车辆阻力矩
则有

$$\frac{d\omega_c}{dt} = \frac{1}{I_c} \left\{ \mu_c \left[\frac{\psi L_2 L_3 A_c}{L_1 (L_3 + L_4)} p_h - F_s - F_f \right] R_c Z_c - T_n \right\} \quad (9)$$

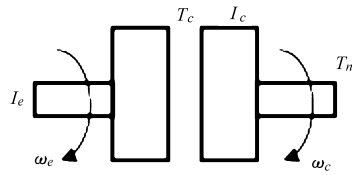


图 3 离合器动力学模型

Fig. 3 Dynamic model of clutch

取状态变量 $x_1、x_2$ 分别为 ω_c 和 p_h ,则相应的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{I_c} \left\{ \mu_c \left[\frac{\psi L_2 L_3 A_c}{L_1 (L_3 + L_4)} p_h - F_s - F_f \right] R_c Z_c - T_n \right\} \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{\tau_{cv}} x_2 + \frac{K_{cv}}{\tau_{cv}} (t - L_{cv}) i_b \end{cases} \quad (10)$$

整理后方程可以改写为矩阵形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}d \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (11)$$

- 其中 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_c \\ p_h \end{bmatrix}$ $\mathbf{y} = \omega_c$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_c R_c Z_c \psi L_2 L_3 A_c}{I_c L_1 (L_3 + L_4)} \\ 0 & -\frac{1}{\tau_{cv}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{cv}}{\tau_{cv}} (t - L_{cv}) \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0] \quad u = i_b$$

$$d = \frac{\mu_c R_c Z_c}{I_c} (F_s + F_f) - \frac{1}{I_c} T_n$$

式中 u ——系统输入 y ——系统输出

d ——离合器内部摩擦、车辆外部负荷等扰动因素

3.2 执行机构灰色预测 PID 控制器

在离合器控制过程中,状态变量 p_h 本身会受到诸多不确定性因素的影响,如控制电流的扰动、温度对液压油粘度的影响、阀芯移动的摩擦力等。此外,系统也会受到各种各样不确定干扰因素的影响。为此,将状态变量中的不确定性因素进行分离,将其合并到末项中,状态方程改写为

$$\dot{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \bar{\mathbf{E}}\mathbf{D}(x, t) \quad (12)$$

$$\text{则} \quad \mathbf{D}(x, t) = \frac{1}{\bar{\mathbf{E}}} (\dot{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) - \mathbf{B}u(t)) \quad (13)$$

$\bar{\mathbf{E}}\mathbf{D}(x, t)$ 代表系统满足匹配条件的不确定部分,包括与状态 $\mathbf{x}$ 相关的参数不确定部分,和与状态无关的外干扰等,将其进行分离得

$$\mathbf{D}(x, t) = \mathbf{V}_1 x_1 + \mathbf{V}_2 x_2 + f(t) \quad (14)$$

式中 $\mathbf{V}_1$ ——和状态 x_1 相关的分离参数向量

$\mathbf{V}_2$ ——和状态 x_2 相关的分离参数向量

$f(t)$ ——与状态无关的外干扰

灰色 PID 控制算法的步骤为:

(1) 首先采用 PID 控制,控制公式为

$$u_p = u(kT) = K_p e(kT) + K_I \sum_{j=0}^k e(jT)T + K_D \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \quad (15)$$

(2) 根据灰色 PID 控制需要,采用零阶线性静态模型,由于变量数多于一个,故采用 GM(0, N) 模型建模。在控制器启动过程中,采用灰色估计器对不确定部分的模型参数建立 GM(0, N) 模型进行估计,再对 $\mathbf{D}(x, t)$ 进行一定程度的补偿,以减弱不确定性部分的影响,改善系统控制性能并提高鲁棒性。由于这种灰色估计不要求连续实时地进行,故不存在通常实时辨识中存在的发散问题。

用灰色估计器对不确定部分的模型参数建立 GM(0, N) 模型的算法为:

建立原始离散数列 $x_i^{(0)}(k) (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, N; N \geq n)$

$$\begin{cases} x_1^{(0)} = (x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(N)) \\ x_2^{(0)} = (x_2^{(0)}(1), x_2^{(0)}(2), \dots, x_2^{(0)}(N)) \\ \vdots \\ x_n^{(0)} = (x_n^{(0)}(1), x_n^{(0)}(2), \dots, x_n^{(0)}(N)) \end{cases} \quad (16)$$

计算一次累加生成 $(1 - \text{AGO})$ 离散数列 $x_i^{(1)}(k) (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, N; N \geq n)$

$$\begin{cases} x_1^{(1)} = (x_1^{(1)}(1), x_1^{(1)}(2), \dots, x_1^{(1)}(N)) \\ x_2^{(1)} = (x_2^{(1)}(1), x_2^{(1)}(2), \dots, x_2^{(1)}(N)) \\ \vdots \\ x_n^{(1)} = (x_n^{(1)}(1), x_n^{(1)}(2), \dots, x_n^{(1)}(N)) \end{cases} \quad (17)$$

计算数据矩阵 $\mathbf{B}$, 必要时适当增加 N 以保证 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ 可逆。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)}(2) & \cdots & x_n^{(1)}(2) & 1 \\ x_1^{(1)}(3) & \cdots & x_n^{(1)}(3) & 2 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_1^{(1)}(N) & \cdots & x_n^{(1)}(N) & N-1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据状态 $x^{(0)}(k)$ 及式 (13), 计算 $\mathbf{D}^{(0)}(k) (k = 1, 2, \dots, N)$ 离散数列

$$\mathbf{D}^{(0)} = (D^{(0)}(1), D^{(0)}(2), \dots, D^{(0)}(N))^T$$

计算一次累加生成 $(1 - \text{AGO})$ 离散数列 $\mathbf{D}^{(1)}(k) (k = 1, 2, \dots, N)$

$$\mathbf{D}^{(1)}(k) = \sum_{i=0}^k \mathbf{D}^{(0)}(i)$$

$$\mathbf{D}^{(1)} = (D^{(1)}(2), D^{(1)}(3), \dots, D^{(1)}(N))^T$$

估计不确定部分 $\bar{\mathbf{E}}\mathbf{D}(x, t)$ 的灰色模型 $\mathbf{D}_1(x, t)$ 的参数向量 $\hat{\mathbf{V}}$

$$\mathbf{D}^{(1)}(x, t) = \mathbf{V}_1 x_1^{(1)} + \mathbf{V}_2 x_2^{(1)} + \cdots + \mathbf{V}_n x_n^{(1)} + f^{(1)}$$

$$\hat{\mathbf{V}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{(1)} \quad \hat{\mathbf{V}} = (\hat{V}_1, \hat{V}_2, \dots, \hat{V}_n, \hat{f})$$

式中 $f(t)$ ——慢时变扰动,在控制过程中可看作不变的常量,将 $f(t)$ 记作 f

(3) 在上述控制律基础上,按估计参数 $\hat{\mathbf{V}}$ 加上补偿控制 u_c , 估计器停止工作,灰色 PID 控制算法为 $u = u_p + u_c$, 即为补偿后的离合器控制输入。其中

$$u_c = - \left(\sum_{i=1}^n \hat{V}_i x_i + \hat{f} \right)$$

$$\text{则} \quad \hat{\mathbf{D}}(x, t) = \sum_{i=1}^n (\hat{V}_i - \hat{V}_i) x_i (f(t) - \hat{f})$$

4 离合器控制仿真与试验

分别针对 AMT 离合器的普通 PID 控制和灰色预测 PID 控制进行仿真分析和试验研究。车辆主要仿真参数如表 1 所示。

4.1 仿真

为检验 AMT 离合器的普通 PID 控制与灰色预测 PID 控制的效果,进行了仿真研究。图 4 是 I 挡升 II 挡时,离合器控制信号变化曲线,首先 AMT 控制器根据车速与加速踏板满足换挡条件发出换挡指令,离合器首先分离操作,动力中断,然后完成选换挡动作,最后离合器重新结合,换挡过程结束。图中

表 1 车辆参数	
Tab.1 Vehicle parameters	
参数	数值
发动机最大转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	6 500
最大扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	110
飞轮惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.1
变速器输入轴惯量(加离合器从动盘)/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.01
离合器摩擦片等效半径/mm	170
变速器速比 (Ⅰ挡/Ⅱ挡/Ⅲ挡/Ⅳ挡/Ⅴ挡)	3.273/1.895/1.241/0.919/0.756
主减速器速比	4.333
车质量/kg	1 750

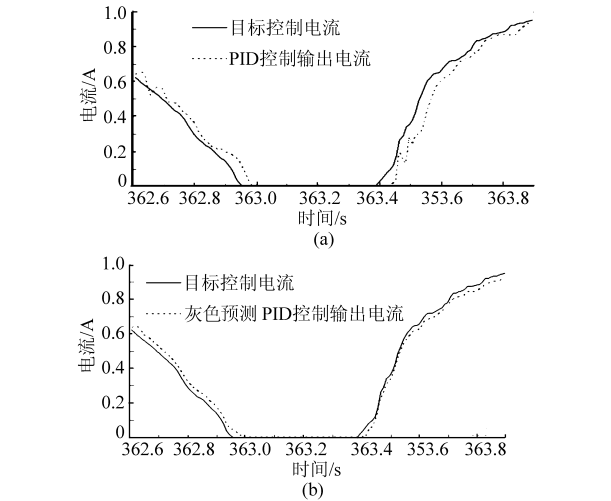


图 4 I 挡升Ⅱ挡电磁比例阀输入电流曲线
Fig.4 Gear I - II input electricity curves of electromagnetic valve
(a) 普通 PID 控制 (b) 灰色预测 PID 控制

明确显示了离合器分离、结合操作过程。

图 4a 为采用普通 PID 控制的情况,可见实际输入的控制电流相对于目标控制电流存在较大滞后,并伴有超调、振荡等现象发生,控制效果较差。图 4b 为采用灰色预测 PID 控制的情况,实际输入的控制电流能够很好的跟踪目标控制电流,控制效果优于普通 PID 控制。

与控制电流对应的是离合器实际传递的扭矩,图 5 所示是相应的 I 挡升Ⅱ挡过程中扭矩的变化曲线,其变化过程与图 4 趋势相同,进一步证明了灰色预测 PID 控制对离合器传递扭矩控制精度的提高,其结果优于普通 PID 控制。

图 6 所示为采用普通 PID 控制和灰色预测 PID 控制时,离合器控制目标扭矩和实际扭矩误差的比较,可见,采用灰色预测 PID 控制的离合器扭矩最大误差只有普通 PID 控制的 28.3%,对提高 AMT 的

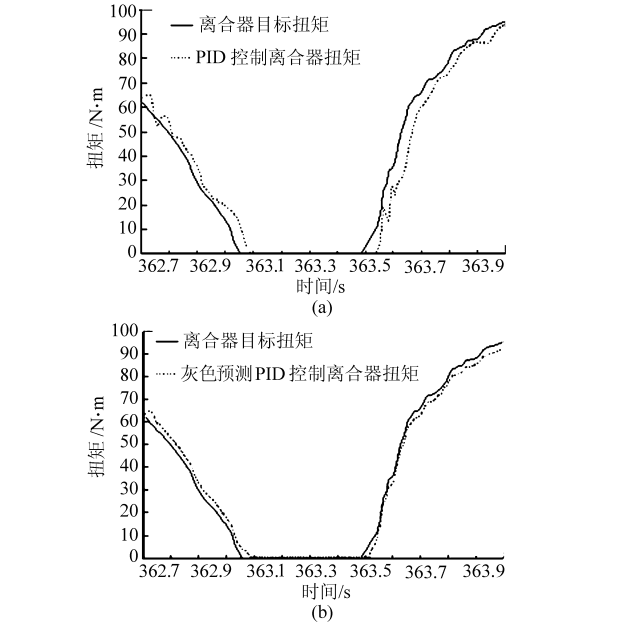


图 5 I 挡升Ⅱ挡离合器扭矩变化曲线
Fig.5 Gear I - II clutch torque shift curves
(a) 普通 PID 控制 (b) 灰色预测 PID 控制

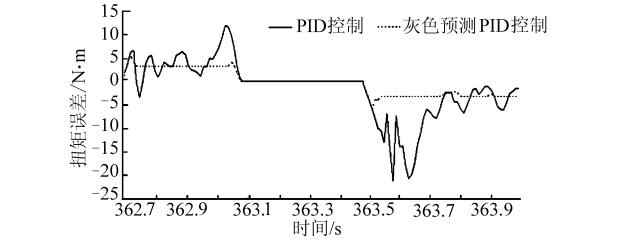


图 6 I 挡升Ⅱ挡扭矩控制误差曲线
Fig.6 Gear I - II torque control error curves

控制品质具有重要意义。

4.2 试验

对采用灰色预测 PID 控制的 AMT 系统进行了试验研究,在平直沥青路面上对改进 AMT 控制器车辆进行加速试验,图 7 为 I 挡升Ⅱ挡的试验结果。由图可见,采用灰色预测 PID 控制后,换挡品质大为提高,其最大换挡冲击度小于 10 m/s^3 ,换挡平顺性很好,改善了 AMT 的换挡品质。

试验说明,灰色预测控制技术的应用对提高 AMT 控制性能具有重要意义,既可以应用于 AMT 的控制之中,对其它自动变速器的开发也具有借鉴意义。

5 结束语

传统 PID 控制由于难以对大滞后、非线性且具有不确定性的复杂控制系统实现很好的控制效果,因此,本研究对灰色预测 PID 控制在 AMT 离合器控制中的应用进行了深入研究。

通过建立离合器的数学模型设计了可对离合器控制中不确定部分进行预测的灰色估计器,对离合

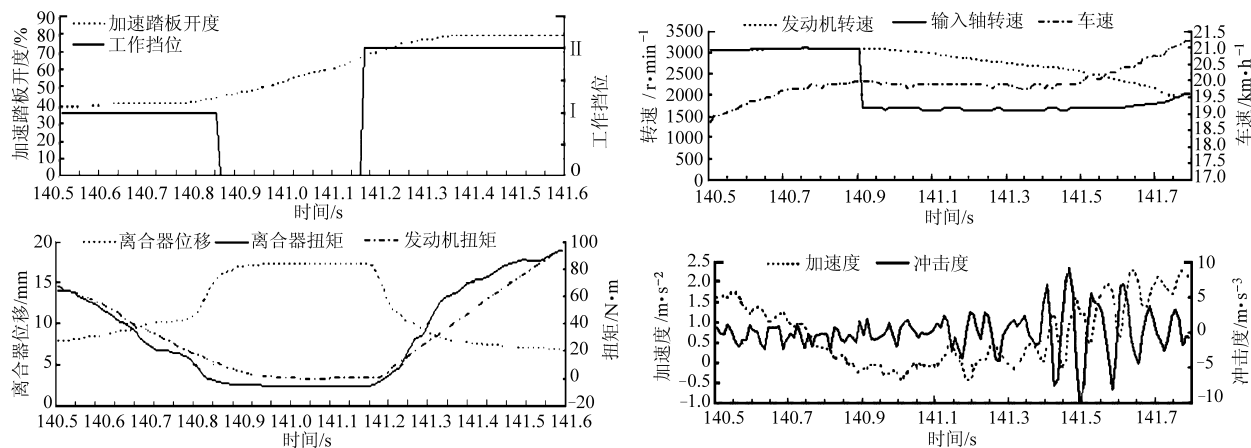


图7 AMT灰色预测PID控制试验曲线

Fig. 7 Test curves of gray prediction PID control for AMT clutch

器控制电磁比例阀的输入控制信号进行了补偿,经过控制仿真与试验对比表明,灰色预测PID控制技术控制品质和精度优于普通的PID控制算法。可

见,灰色预测PID控制算法是解决离合器控制的一种有效方法,从而能够提高机械式自动变速器车辆的换挡平顺性。

参考文献

- 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.
- 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1993.
- 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1986.
- 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:中国科学技术文献出版社,1992.
- 熊和金,徐华中. 灰色控制[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(2):267~272.
Liu Sifeng. Emergence and development of gray system theory and its forward trends[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004,36(2):267~272. (in Chinese)
- 王室朗. 灰色预测制导系统和灰色预测控制系统的基本原理[J]. 战术导弹技术,1990(4):43~56.
Wang Shilang. Principle of gray prediction guidance and gray prediction control systems[J]. Tactical Missile Technology, 1990(4):43~56. (in Chinese)
- 宋云霞,朱学峰. 大时滞过程控制方法及应用[J]. 化工自动化及仪表,2001,28(4):9~15.
Song Yunxia, Zhu Xuefeng. Control methods and application for the process with large time delay[J]. Control and Instrument in Chemical Industry, 2001,28(4):9~15. (in Chinese)
- 李楠. 灰色PID控制在磁盘驱动控制系统中的应用开发[J]. 现代电子技术,2007,30(18):137~139.
Li Nan. Study on application of gray PID control theory in disk drive control system[J]. Modern Electronic Technique, 2007, 30(18):137~139. (in Chinese)
- 蒋陵平,傅强. 灰色PID控制在航空发动机中的应用研究[J]. 机械设计与制造,2006(5):129~131.
Jiang Lingping, Fu Qiang. Gray theory of PID control of an aero-engine[J]. Machinery Design and Manufacture, 2006(5): 129~131. (in Chinese)
- 许可军,白建伟,黄培成. 灰色PID在电液伺服系统位置跟踪控制中的应用[J]. 液压与气动,2008(4):45~47.
Xu Kejun, Bai Jianwei, Huang Peicheng. The application of gray position tracking control in the electro-hydraulic servo systems[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2008(4):45~47. (in Chinese)
- 江发潮,陈全世,曹正清. 机械式自动变速器的离合器优化控制[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(2):242~245.
Jiang Fachao, Chen Quanshi, Cao Zhengqing. Optimal control of automated mechanical transmission clutches[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005,45(2):242~245. (in Chinese)
- 牛铭奎. 干式DCT离合器温度模型及其灰色预测控制研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
Niu Mingkui. Research on clutch temperature model and gray predication control of dry DCT[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)