

基于逆系统方法的直驱式 AMT 换挡控制方法*

林树森¹ 焦卫东¹ 曹振新¹ 吴江妙¹ 张兰春²

(1. 浙江师范大学工学院, 金华 321004; 2. 江苏理工学院汽车与交通工程学院, 常州 213001)

摘要: 为提高直驱式 AMT 换挡品质的稳定性, 针对 2 自由度电磁执行器的特性引入逆系统控制方法。阐述了执行器的结构及工作原理, 通过建模分析了执行器参数耦合现象, 执行器静态特性测试表明其输出特性具有非线性特点。引入逆系统方法并分析系统的可逆性, 建立执行器的伪线性系统并根据线性系统理论设计状态反馈控制器。扩张状态观测器的引入提高了系统在摩擦阻力时变条件下的输出特性稳定性。仿真与试验结果表明, 基于逆系统方法的换挡控制受参数变化影响小, 位移控制精度较高, 执行器输出特性较为稳定, 基于逆系统方法的直驱式 AMT 换挡性能较为突出, 有利于提升 AMT 竞争力。

关键词: 电控机械式自动变速器 直驱 换挡控制 逆系统 扩张状态观测器

中图分类号: U463.212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0303-07

Gearshift Control of Direct-drive AMT Gearshift System Based on Inverse System Method

Lin Shusen¹ Jiao Weidong¹ Cao Zhenxin¹ Wu Jiangmiao¹ Zhang Lanchun²

(1. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: To improve the shift performance stability of the direct-drive automated manual transmission (AMT) gearshift system, inverse system method (ISM) was introduced according to the characteristics of 2-DOF electromagnetic actuator. The structure and working principle of the actuator were described, and the analysis of the mathematical model indicated that the parameters of the actuator affected each other. Static characteristics experiments proved that the output characteristics were nonlinear. The reversibility of the system was analyzed and ISM was adopted to build the pseudo-linear system, and the state feedback controller was designed according to the linear system theory. Extended state observer (ESO) was added to weaken the influence of time varying friction force to the stability of the output characteristics. The simulation and experiment results indicate that controlled by the ISM - ESO controller, the gearshift performance is robust to variable parameters. The precision of displacement control is better. The stability of the output characteristics is improved. Based on the inverse system method, the gearshift performance of the direct-drive automated manual transmission is relatively excellent, and it is conducive to improve the competitiveness of AMT.

Key words: Automated manual transmission Direct-drive Gearshift control Inverse system
Extended state observer

引言

电控机械式自动变速器 (AMT) 具有结构简单、

响应快、控制简便等优点, 逐渐成为自动变速器研究的一个重要方向。然而, AMT 换挡过程中存在动力中断、换挡时间长、换挡品质差等问题。文献[1-4]研

究了 AMT 换挡过程的换挡规律、离合器接合控制、动力传动一体化控制等,并显著改善了 AMT 的换挡品质。文献[5]介绍了通过混合动力技术弥补 AMT 换挡过程动力中断的研究进展。文献[6-7]提出一种应用 2 自由度电磁执行器实现 AMT 换挡拨叉直驱的换挡系统,研究结果表明该系统能够提升换挡性能,电磁执行器的控制是该研究的核心。文献[8-10]研究了直线电动机的参数耦合和摩擦阻尼等不确定因素造成推力波动及对电动机控制的影响,并设计相应控制方法加以改善。针对非线性系统控制问题,一种可行的思路是将其转换为线性系统,再按照线性系统理论设计系统控制器,从而实现特定的性能^[11]。另外,直驱技术由于无中间传动环节,消除了传动环节弹性变形、间隙和摩擦等可能带来的不利影响,提高了传动效率。但也正是由于缺少中间环节的缓冲作用,执行器更易受摩擦力、负载扰动等干扰因素的影响,这些因素将不经缓冲直接作用到执行器上,阻碍精确位移控制的实现,因而对控制有着极高的要求。另外,2 自由度电磁执行器本身受线圈电感变化、漏磁和涡流等影响而呈现非线性的特点。

本文针对 2 自由度电磁执行器非线性的问题,

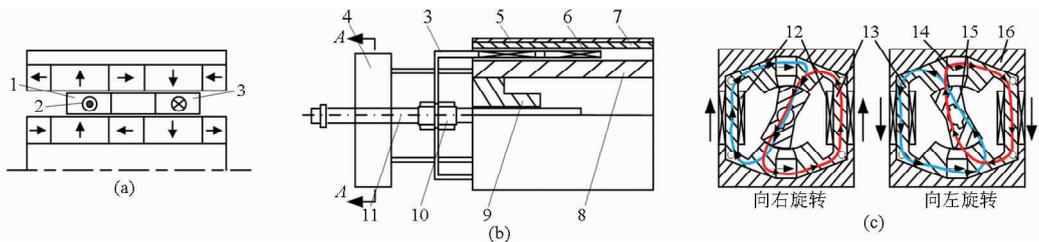


图 1 2 自由度电磁执行器结构图

Fig. 1 Structure of 2-DOF actuator

(a) 直动部分阵列方式 (b) 直动部分 (c) 旋转部分

1. 气隙 2. 线圈 3. 线圈骨架 4. 旋转部分 5. 外磁轭 6. 线圈绕组 7. 永磁体 8. 内磁轭 9. 直线轴承 10. 连接件 11. 输出轴
12. 旋转线圈 13. 旋转磁轭 14. 旋转永磁体 15. 转子 16. 外壳

执行器旋转部分采用动铁式结构,转子和磁轭端部之间存在微小的间隙,可自由旋转。两块充磁方向相同的永磁体分别与左右两块磁轭形成相反的磁通回路,从而在转子上形成叠加的磁通回路。线圈通电后,两条回路在转子上产生叠加的转矩使转子转动。旋转部分转动惯量为 $7.04 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,较 Ricardo 公司换挡执行器转动惯量 $3.3 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 降低明显^[12]。

2 建模与分析

2 自由度电磁执行器是电路、磁路和机械子系统耦合的复杂系统,它的数学模型及其相互耦合关系如图 2 所示。当直动部分线圈两端施加电压 u_l

引入逆系统控制方法改善控制效果。首先分析执行器数学模型的可逆性,通过求解系统的逆建立伪线性系统。采用线性系统理论设计状态反馈控制器,并引入扩张状态观测器对系统参数变化、摩擦阻尼时变和负载扰动等问题进行补偿控制。最终通过仿真与试验验证该控制方法的有效性。

1 2 自由度电磁执行器

2 自由度电磁执行器基于电磁原理,集旋转和直动功能于一体,旋转和直动分别用于实现选挡和退换挡,其结构如图 1 所示。执行器直动部分采用动圈式结构,与动磁式相比具有运动质量轻、磁场变化小等优点。永磁体采用径向与轴向磁化永磁体混合排列并可增强气隙磁通密度、降低磁轭饱和程度的 Halbach 阵列方式,有效提高功率密度并缩小执行器尺寸,使该电磁执行器具有功率密度高、动态特性好和运动质量小等优点。执行器输出轴一端由支撑座支撑,另一端通过对称平键与旋转部分转子间隙配合,使执行器直动和旋转两部分运动互不干涉。样机直动部分运动质量为 0.671 kg ,较现有全电式换挡执行器运动质量降低 30% 以上。

时,线圈产生电流 I_l ,根据电磁感应原理线圈骨架将受到电磁力 F 的作用在气隙磁场中运动,线圈的运动将改变其处于磁场中的有效长度导致力常数 k_m 产生波动,进而通过速度 v 影响反电势 E_{emfl} 和电流 I_l 。执行器工作过程中受到的阻力 F_d 难以测定,且随着换挡进程而变化,将影响电磁力的输出特性。旋转部分参数相互影响原理类似。 R_l, L_l 分别是直动线圈电阻和电感, m 为进挡运动质量, S 为直线位移。 u_r 是旋转线圈两端电压, E_{emfr} 是旋转部分反电势, R_r, L_r 分别是旋转部分线圈电阻和电感, I_r 是通过旋转线圈电流, T 是电磁转矩, k_r 是电磁转矩常数, J_r 是旋转部分转动惯量, ω 是角速度, T_d 是旋转阻力矩。

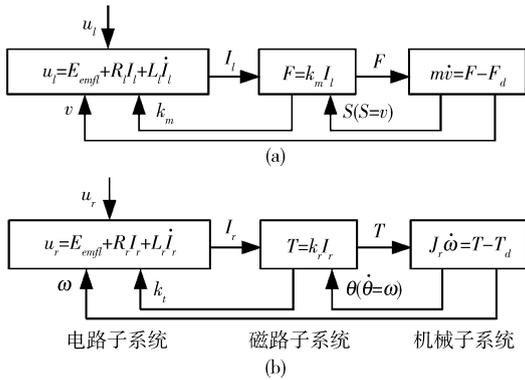


图 2 执行器数学模型及其耦合关系

Fig.2 Mathematical models of actuator and its coupling relationship between variables

(a) 直动部分 (b) 旋转部分

2 自由度电磁执行器直动部分静态特性试验结

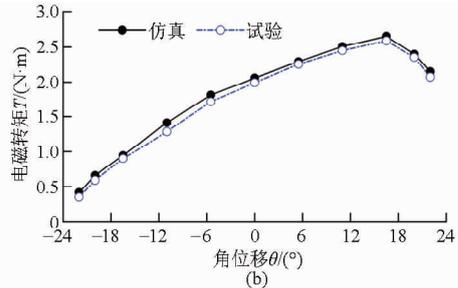
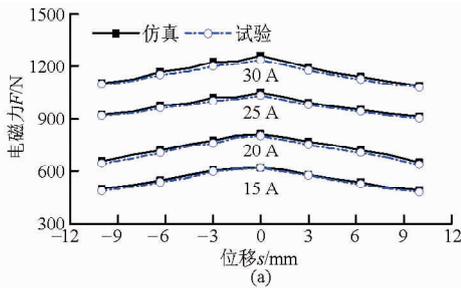


图 3 执行器静态特性曲线

Fig.3 Static characteristics of actuator

通过上述分析可知,2 自由度电磁执行器本身是一个非线性系统,运动过程中内、外部参数时变的特性将加剧系统输出的非线性,影响运动控制的精度和稳定性。另外,直驱系统取消了中间传动环节,驱动器本身更易受外界干扰的影响,应设计相应的控制方法加以改善,确保较好的换挡稳定性。

3 逆系统控制方法

3.1 伪线性系统

逆系统方法 (ISM),是通过动态系统“逆”的概念来研究一般非线性控制系统反馈线性化设计的一种方法。逆系统的定义为^[13]:假设 Σ^{-1} 为一个系统,具有初始状态 $x(t_0) = x_0$ 。表示其传递关系的算子为 $\hat{\theta}_\alpha: \varphi \rightarrow u$,其中 φ 为取值于某个域中的任给的连续函数,若取 $\varphi = y^{(\alpha)}$,则有 $\theta \hat{\theta}_\alpha \varphi = \theta \hat{\theta}_\alpha y^{(\alpha)} = \theta u = y$ 。则称系统 Σ^{-1} 为原系统 Σ 的 α 阶积分逆系统,简称 α 阶逆系统。由逆系统和原系统串联组成的系统满足以下关系: $\Sigma^{-1} \Sigma y^{(\alpha)} = \varphi$ 。它等价于 α 个积分器的串联,其输入输出关系是线性的,但其内部仍呈现非线性关系,因此称为伪线性系统。

基于 2 自由度电磁执行器的直驱式换挡系统是通过调整执行器两端输入电压来实现执行器的运动

果如图 3a 所示^[6]。当位移保持不变时,电磁力随加载电流的增大而增大;加载电流保持不变,当位移发生变化时电磁力不能保持稳定,而随位移从中点向两端呈下降趋势。主要原因是:随着执行器直动部分线圈骨架由中间向两端运动,线圈绕组处于磁场中的有效长度发生了变化。图 3b 所示为执行器旋转部分静态特性仿真与试验结果,加载电流为 15 A。可以看到电磁转矩随着角位移的变化呈现先增大后减小的趋势,最大电磁转矩位于角位移 16.5° 处。这是由执行器旋转部分结构决定的,当角位移为 16.5° 时,旋转部分转子与磁轭的接触面积达到最大,此时磁通量最大,产生了最大的电磁转矩。执行器输出特性的非线性不利于直线位移和角位移的精确控制。

位移精确控制,可视为一个单输入单输出 (SISO) 系统,其输入量是执行器两端电压 u ,输出是执行器输出轴运动位移 S 。以直动部分为例,其系统状态方程为^[12]

$$\begin{cases} \dot{I} = -\frac{R}{L}I - \frac{k_m}{m}v + \frac{u}{L} \\ \dot{v} = \frac{k_m}{m}I - \frac{c}{m}v \\ \dot{S} = v \end{cases} \quad (1)$$

式中 I ——线圈电流
 R ——线圈电阻
 L ——线圈电感
 m ——运动质量
 c ——阻尼系数
 k_m ——力常数
 v ——运动速度

选择系统的状态向量为

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [I \quad v \quad S]^T \quad (2)$$

式中 x_1, x_2, x_3 ——状态分量

由式(1)可得系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & k_m & 0 \\ k_m/L & -c/m & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

输出方程为

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据系统可逆性分析步骤^[13-14],可得

$$\begin{cases} y = x_3 \\ \dot{y} = \dot{x}_3 = x_2 \\ \ddot{y} = \dot{x}_2 = \frac{k_m}{m}I - \frac{c}{m}\dot{y} \\ \dddot{y} = \dot{x}_2 = -\frac{c}{m}\ddot{y} + \frac{k_m}{m} \left[-\frac{R}{L}x_1 - \frac{k_m}{L}\dot{y} + \frac{u}{L} \right] \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可见, y 、 \dot{y} 和 \ddot{y} 都不显含 u , 而 \ddot{y} 中显含 u 。因此其相对阶 α 存在, 且 $\alpha = 3$, 而系统状态向量的维数 $n = 3$, 也即 $\alpha = n$, 满足可逆性充要条件。因此, 式(1)描述的系统是可逆的。

由逆系统定义可知, 逆系统求解即是求解得到 u 。 \ddot{y} 中显含 u , 因此可以通过式(5)求解得到以状态变量 \mathbf{x} 和 \dot{y} 、 \ddot{y} 表示的逆系统方程

$$u = \frac{mL}{k_m}\ddot{y} + \frac{cL}{k_m}\dot{y} + k_m\dot{y} + Rx_1 \quad (6)$$

由 α 阶积分逆系统与原系统一起构成的伪线性系统如图4所示。

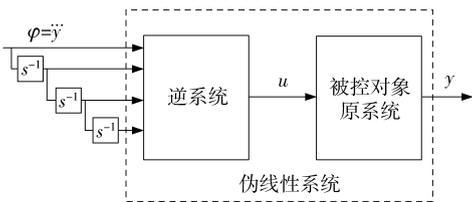


图4 伪线性系统

Fig. 4 Pseudo-linear system

α 阶积分逆系统与原系统组成的系统已具备线性系统的特征, 对于控制问题已转换为解决线性系统的控制问题, 因此可以采用线性系统控制常用的方法。选择伪线性系统的状态向量为

$$\mathbf{w} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3]^T = [y \quad \dot{y} \quad \ddot{y}]^T \quad (7)$$

伪线性系统状态方程可表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{w}_1 \\ \dot{w}_2 \\ \dot{w}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \varphi = \mathbf{A}\mathbf{w} + \mathbf{B}\varphi \\ y = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{w} \end{cases} \quad (8)$$

3.2 状态反馈控制器

对伪线性系统设计反馈控制器, 使其控制系统的输入输出动态特性可描述成

$$y^{(k)}(t) + a_{k-1}y^{(k-1)}(t) + \dots + a_1y'(t) + a_0y(t) = r(t) \quad (9)$$

式中 a_0, a_1, \dots, a_{k-1} ——任意实数

$r(t)$ ——参考输入

结合伪线性系统状态向量, 可知 $k = 3$ 。用状态反馈方法构成控制律为

$$\begin{cases} \varphi = r - y_f \\ y_f = KY = a_0y + a_1\dot{y} + a_2\ddot{y} \end{cases} \quad (10)$$

其结构框图如图5所示。

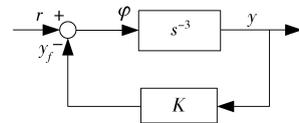


图5 伪线性系统的反馈控制

Fig. 5 Feedback control of pseudo-linear system

根据图5所示闭环系统建立其传递函数

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (11)$$

3阶伪线性系统预期特征方程为^[15]

$$(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(s + \xi\omega_n) = 0 \quad (12)$$

式中 ξ ——系统阻尼系数

ω_n ——无阻尼自振角频率

根据文献[16]的求解方法, 取 ξ 为 0.707, 调整时间 $t_s = 20$ ms, 求得 ω_n 为 282.88。将 ξ 和 ω_n 代入系统特征方程, 可得

$$s^3 + 600s^2 + 160\,021.1s + 16\,004\,218.9 = 0 \quad (13)$$

由此, 可得 $a_2 = 600$, $a_1 = 160\,021.1$, $a_0 = 16\,004\,218.9$ 。

3.3 扩张状态观测器

扩张状态观测器(ESO)不依赖于扰动的具体数学模型, 也不需要直接测量扰动的作用^[17]。它是在状态观测器的基础上, 把作用于开环系统的加速度 $f(x_1(t), x_2(t))$ 实时作用量扩充成新的状态变量 x_3 , 并记 $\dot{x}_3 = w(t)$ 。非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (14)$$

可转换为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu \\ \dot{x}_3 = w(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (15)$$

为便于工程应用, 对这个扩张的系统建立其离散的状态观测器

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_{01}e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_{02}e + bu) \\ z_3 = z_3 - h\beta_{03}e \end{cases} \quad (16)$$

式中 h ——采样周期
 z_1 —— y 的跟踪信号
 z_2 —— \dot{y} 的跟踪信号
 z_3 —— $w(t)$ 的观测值

扩张状态观测器的参数为^[16]: $\beta_{01} = 1/h, \beta_{02} = 1/(1.6h^{1.5}), \beta_{03} = 1/(8.6h^{2.2})$ 。控制量可以取

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b} \quad (17)$$

即控制量中补偿被扩张的状态 x_3 的估计值 z_3 , 使原来的非线性系统变成线性的积分器串联型控制系统。

最终构建的 ISM - ESO 系统结构如图 6 所示。ISM - ESO 系统主要参数: $h = 0.0001, \beta_{01} = 10000, \beta_{02} = 625000, \beta_{03} = 73400000, b = 23.87, m = 1.676 \text{ kg}, k_m = 40 \text{ N/A}, \xi = 0.707, \omega_n = 282.88$ 。

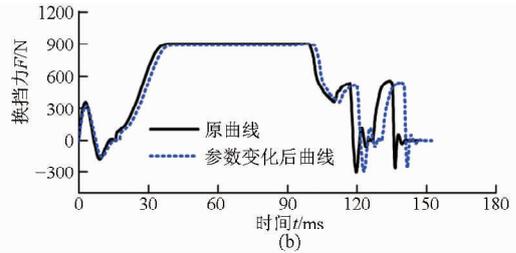
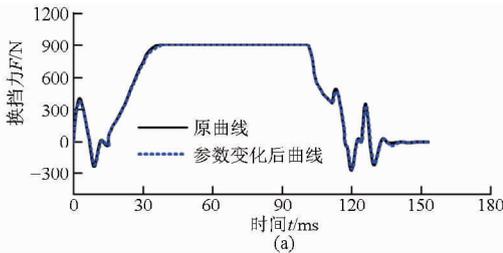


图 7 变参数条件下两种控制方法的换挡力变化曲线

Fig.7 Shift force curve with variable parameter under two kinds of control methods

(a) ISM - ESO 方法 (b) PID 方法

4 试验

为进一步验证基于 ISM - ESO 的 AMT 换挡系统逆系统控制的效果,搭建了如图 8 所示的 AMT 换挡试验平台。换挡试验平台包括变速器、变频电动机、传感器和惯量盘等。控制系统则包括上位机、

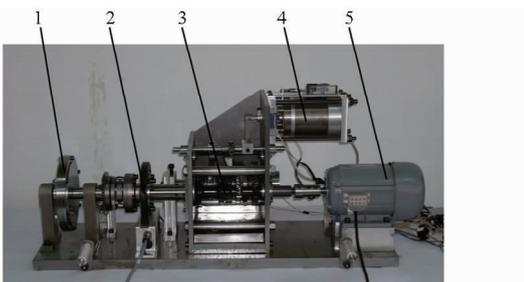


图 8 换挡试验台

Fig.8 Gearshift test bench

- 1. 惯量盘 2. 转矩传感器 3. 变速器 4. 2 自由度电磁执行器
- 5. 变频电动机

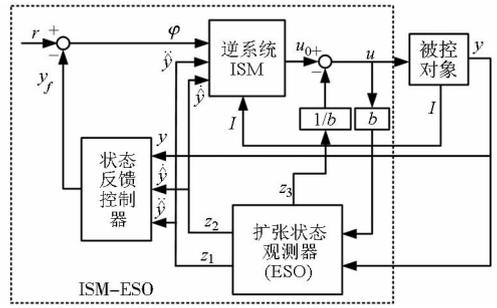


图 6 ISM - ESO 系统

Fig.6 Control system of ISM - ESO

3.4 仿真

当转速差为 600 r/min,转动惯量为 0.03 kg·m² 时不同控制方法应对参数变化的能力如图 7 所示。参数变化曲线是指在其他参数保持不变的情况下执行器电感、电阻变化 10% 后的仿真结果。基于逆系统控制方法的变参数换挡力变化不明显,而基于 PID 方法的换挡力变化则较为明显。由于执行器电阻的增加,执行器响应略有降低,导致整体换挡时间延长了 5.3 ms,在同步过程中产生了 2.3% 的跟踪误差,影响了总体换挡性能。

ARM 微控制器、功率驱动电路、信号处理电路、CAN 总线 and 嵌入的控制算法等^[14]。

由于 AMT 换挡过程的阶段性,在控制过程中一般可将其分为同步前阶段、同步阶段和同步后阶段,各个阶段的位移精确控制可有效避免换挡元件之间的碰撞^[18]。为验证逆系统控制方法的性能,设计 PID 控制方法与其比较,PID 控制器采用增量式算法。图 9 所示为执行器直线位移的仿真与试验比较

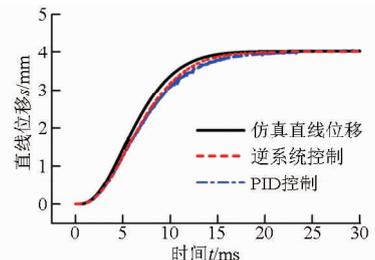


图 9 执行器直线位移试验与仿真结果

Fig.9 Simulation and experiment results of linear displacement control

结果,逆系统控制和PID控制的位移响应曲线都未产生超调,这对改善换挡品质非常有利,因为位移超调意味着换挡元件之间的碰撞,不仅会产生噪声而且还可能造成换挡元件的损坏。但PID控制存在约1.63%的稳态误差。在响应时间方面,最终达到稳定的时间逆系统方法较PID方法短2.9 ms。

换挡过程能够进行的前提是换挡过程的角位移精确控制。换挡拨块的横截面较小,选换挡杆下端柱面必须与拨块精确接触,否则易产生无法换挡现象。以选换挡杆垂直向下为零点,换挡角位移为 $-22^{\circ} \sim 22^{\circ}$,角位移控制误差小于 $\pm 0.3^{\circ}$ 即可认为

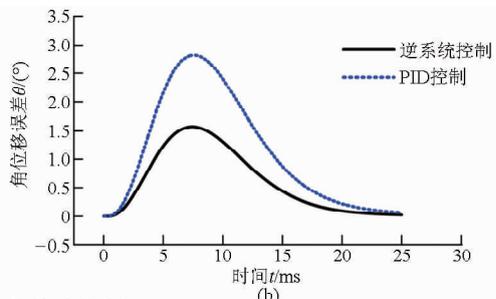
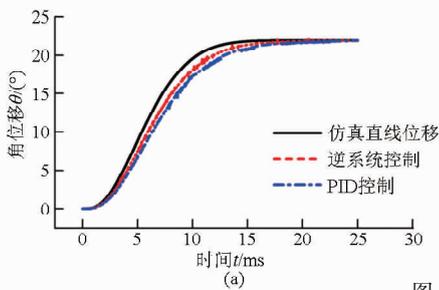


图10 角位移精确控制

Fig. 10 Precise control of angular displacement

在同步过程中,摩擦阻力、阻力矩和系统参数的时变都将影响执行器的输出特性。图11所示为在换挡转速差为600 r/min、等效转动惯量为 $0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 条件下的换挡力曲线。可以看到,采用PID控制的换挡力在同步阶段产生了较大的波动,从而也将产生较大程度的冲击。相比之下采用逆系统控制的换挡力波动较小,换挡力的上升也较为平缓。采用PID和逆系统控制的换挡时间分别为137.9 ms和128.7 ms。图12比较了2种控制方法得到的冲击度变化曲线,其中PID控制最大冲击度 5.89 m/s^3 ,而逆系统控制最大冲击度 3.41 m/s^3 。综上所述,逆

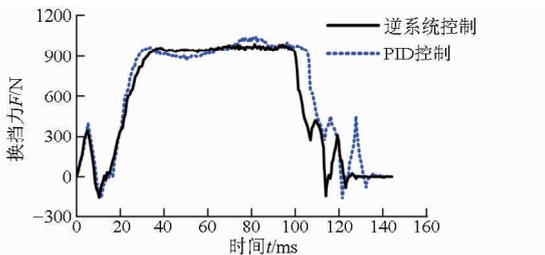


图11 2种控制方法的换挡过程电磁力曲线

Fig. 11 Shift force curves under two kinds of control methods

系统控制方法在最大冲击度和换挡时间2个指标上均优于PID控制方法。

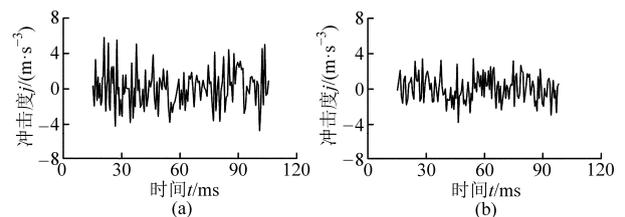


图12 冲击度变化曲线

Fig. 12 Curves of degree of impact

5 结束语

提出了一种应用2自由度电磁执行器实现换挡拨叉直驱的换挡系统,并从2自由度电磁执行器结构、工作原理、数学模型和静态特性等方面分析表明执行器存在参数耦合、系统非线性等问题,据此提出逆系统控制方法(ISM),建立伪线性系统,采用线性系统理论设计状态反馈控制器,并引入扩张状态观测器(ESO),使系统在参数耦合、摩擦阻力时变等条件下保持较高的运动控制精度和稳定的输出特性,在缩短换挡时间的同时降低了冲击度,提高了换挡性能。

参 考 文 献

- 1 余荣辉,孙东野,秦大同. 机械自动变速系统动力性换挡控制规律[J]. 农业机械学报,2006,37(4):1-4.
Yu Ronghui, Sun Dongye, Qin Datong. Study on dynamic gear-shift law of automated mechanical transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4):1-4. (in Chinese)
- 2 Gao Binzhao, Lei Yulong, Ge Anlin, et al. Observer-based clutch disengagement control during gear shift process of automated

- manual transmission [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2011, 49(5):1-17.
- 3 秦大同,陈清洪. 基于最优控制的AMT/DCT离合器通用起步控制[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(12):85-91.
Qin Datong, Chen Qinghong. Universal clutch starting control of AMT/DCT automatic transmission based on optimal control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(12):85-91. (in Chinese)
- 4 李勇,常思勤,魏英俊. 基于转速/转矩控制的AMT换挡策略[J]. *中国机械工程*, 2011, 15(8):1880-1885.
Li Yong, Chang Siqin, Wei Yingjun. Shift strategy of AMT vehicle based on speed and torque control[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 15(8):1880-1885. (in Chinese)
- 5 钟再敏,孔国玲,余卓平,等. 机械式自动变速器动力中断研究进展及解决方案[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2011, 39(12):1850-1855.
Zhong Zaimin, Kong Guoling, Yu Zhuoping, et al. Review on torque interruption and its solution of automated mechanical transmission[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(12):1850-1855. (in Chinese)
- 6 林树森,常思勤,李波. 应用2自由度电磁执行器的AMT换挡控制[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(4):14-21.
Lin Shusen, Chang Siqin, Li Bo. Gearshift control for AMT based on a 2-DOF electromagnetic actuator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):14-21. (in Chinese)
- 7 李波,常思勤,林树森. 电磁执行器直接驱动的AMT换挡机构[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(10):29-35.
Li Bo, Chang Siqin, Lin Shusen. Shifting mechanism of AMT direct driven by electromagnetic linear actuator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10):29-35. (in Chinese)
- 8 张代林,陈幼平,艾武,等. 基于观测器模型的直线电机干扰抑制技术的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(12):14-18.
Zhang Dailin, Chen Youping, Ai Wu, et al. Research on disturbance suppression technology for linear motors based on a disturbance observer model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(12):14-18. (in Chinese)
- 9 王丽梅,武志涛,刘春芳. 永磁直线伺服系统最优参数负载扰动补偿方法[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(3):133-138.
Wang Limei, Wu Zhitao, Liu Chunfang. Optimal parameter load disturbance compensation method of permanent magnet linear servo system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(3):133-138. (in Chinese)
- 10 Zheng Q, Chen Z, Gao Z. A practical approach to disturbance decoupling control[J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9):1016-1025.
- 11 宋夫华,李平. 基于支持向量机 α 阶逆系统方法的非线性内模控制[J]. *自动化学报*, 2007, 33(7):778-781.
Song Fuhua, Li Ping. Nonlinear internal model control based on support vector machine α th-order inverse system method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(7):778-781. (in Chinese)
- 12 Turner A, Ramsay K, Clark R, et al. Direct-drive rotary-linear electromechanical actuation system for control of gearshifts in automated transmissions[C]//*Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007:267-272.
- 13 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- 14 Lin Shusen, Chang Siqin, Li Bo. Improving the gearshifts events in automated manual transmission by using an electromagnetic actuator [J]. *Proc. IMechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, doi:10.1177/0954406214546204.
- 15 李春文,苗原,冯元琨,等. 非线性系统控制的逆系统方法(I)——单变量控制理论[J]. *控制与决策*, 1997, 12(5):529-535.
Li Chunwen, Miao Yuan, Feng Yuankun, et al. Inverse system method for nonlinear systems control (I) —single variable control theory[J]. *Control and Decision*, 1997, 12(5):529-535. (in Chinese)
- 16 Dorf R C, Bishop R H. *Modern control systems* [M]. 11th ed. New York: Pearson Prentice Hall, 2008.
- 17 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- 18 葛文庆,李波,赵彦峻,等. 基于直接驱动和自增力技术的AMT换挡系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9):1-7.
Ge Wenqing, Li Bo, Zhao Yanjun, et al. AMT shift system based on direct-drive and self-energizing technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9):1-7. (in Chinese)

(上接第286页)

- 12 赵彦光. 柴油机SCR技术尿素喷雾分解及氨存储特性的试验研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
Zhao Yanguang. Experimental study of urea solution spray and decomposition and ammonia storage in selective catalytic reduction system for diesel engines[D]. Beijing:Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- 13 Christoph M Schar, Christopher H Onder, Hans P Geering. Control of an SCR catalytic converter system for a mobile heavy-duty application[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(4):641-653.
- 14 刘传宝,颜伏伍,胡杰,等. 柴油机SCR后处理系统控制策略[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11):6-11.
Liu Chuanbao, Yan Fuwu, Hu Jie, et al. SCR post processing system control strategy of diesel engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11):6-11. (in Chinese)
- 15 陈朝辉,李志军,高立波,等. $\text{La}_2\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_4$ 催化去除柴油机 NO_x 和PM排放台架试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9):11-15.
Chen Zhaohui, Li Zhijun, Gao Libo, et al. Simultaneous removal of diesel NO_x and soot over $\text{La}_2\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_4$ perovskite-type catalysts[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(9):11-15. (in Chinese)