

doi: 10.7690/bgzdh.2023.07.004

# 基于扰动观测器的协调器自适应滑模控制

千金杰, 耿雪浩, 王 巧

(内蒙古北方重工业集团南京研发中心, 南京 210094)

**摘要:** 为提高某型火炮协调器在复杂运动工况下的控制精度, 以协调器液压系统为研究对象, 提出一种基于扰动观测器的自适应滑模控制策略。滑模控制可使系统遵循所设计的滑模动态面状态轨迹, 实现系统的非线性控制; 增加自适应策略可防止系统因滑模切换增益过大而失效; 在此基础上增加扰动观测器进行前馈补偿, 能减小系统参数变化和未知扰动对系统的影响, 减少抖振, 有效提高控制性能。联合仿真和实验结果表明, 该控制策略能较好地提高系统控制精度。

**关键词:** 火炮协调器; 联合仿真; 扰动观测器; 自适应滑模

**中图分类号:** TJ301 **文献标志码:** A

## Coordinator Adaptive Sliding Mode Control Based on Disturbance Observer

Gan Jinjie, Geng Xuehao, Wang Qiao

(Nanjing Research and Development Center, Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd., Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the control accuracy of a certain type of artillery coordinator under complex motion conditions, an adaptive sliding mode control strategy based on disturbance observer was proposed for the hydraulic system of the coordinator. The sliding mode control can make the system follow the state trajectory of the sliding mode dynamic surface, and realize the nonlinear control of the system. An adaptive strategy is added to prevent the system from failure due to excessive sliding mode switching gain. On this basis, adding disturbance observer for feed forward compensation can reduce the influence of system parameter changes and unknown disturbances on the system, reduce chattering, and effectively improve the control performance. The joint simulation and experimental results show that the control strategy can improve the control accuracy of the system.

**Keywords:** artillery coordinator; joint simulation; disturbance observer; adaptive sliding mode

## 0 引言

火炮协调器系统是一个复杂的机电液系统<sup>[1]</sup>, 在弹丸协调过程中系统负载会发生明显变化, 在后续使用过程中, 系统会受到长时间的发射冲击, 也会造成一定的磨损和未知扰动。故系统一开始采取一种模糊 PID 控制策略来进行控制, 但从实际情况反馈可知, 该控制策略会出现抖振现象, 增加协调器的到位时间。

滑模控制的特点是适用于非线性控制, 对于扰动和参数变化影响小, 易实现<sup>[2]</sup>; 但真实系统是不理想的, 状态轨迹会在滑模面来回穿越, 造成抖动, 对系统的状态和控制精度造成影响。自适应控制能识别对象动态特性, 并采取决策改变系统动作。扰动观测器不需要建立准确数学模型, 结构简单, 工程性强<sup>[3]</sup>。该策略可对系统未知参数和未建模状态进行补偿, 有效降低滑模控制器的抖振, 增强其自适应能力和系统的抗干扰能力<sup>[4]</sup>, 以此来消除控制

时的抖振现象。

## 1 协调器系统介绍及建模

### 1.1 系统介绍

协调器系统的工作如图 1 所示。

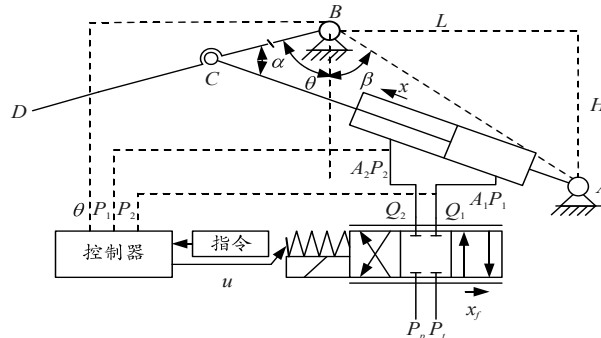


图 1 协调器系统工作

图中:  $A$  点为协调器油缸的固定耳轴;  $B$  点是协调器的固定耳轴; 协调器重心点  $D$  和油缸通过铰接点  $C$  相连;  $\theta$  为协调器的转动角; 油缸和协调器

收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20140773)

作者简介: 千金杰(1995—), 男, 浙江人, 硕士, 从事液压系统的控制与故障分析研究。E-mail: 569862472@qq.com。

的夹角为 $\alpha$ ； $\beta$ 为 $AB$ 与竖直方向上的夹角；协调器通过油缸的伸缩绕着 $B$ 点做转动； $u$ 为控制器对伺服阀发出的电流指令信号； $P_p$ 为油源供给伺服阀的进油压力即系统压力经减压阀后的压力； $P_t$ 为回油压力；无杆腔部分：流量为 $Q_1$ ，有效容积为 $V_1$ ，有效面积为 $A_1$ ，腔中液压油压力为 $P_1$ ；有杆腔部分：流量为 $Q_2$ ，有效容积为 $V_2$ ，有效面积为 $A_2$ ，腔中液压油压力为 $P_2$ ； $x_f$ 为伺服阀位移； $x$ 为油缸位移。

## 1.2 数学模型建立

在建立协调器液压系统数学模型之前，先要对系统进行适当简化；因此，首先设定以下假设<sup>[5]</sup>：

1) 假设系统油缸是无泄漏无磨损的理想单出杆油缸；油缸中所有腔室的压力相等，伺服阀没有死区和零漂，是一个理想的三位四通滑阀；液压油的温度不变、油的体积弹性模量不变、油液中无杂质；系统所有油路中压力无损失；阀芯的位移和阀开口处的压力变化无时间差，能快速响应。

在实际的系统中，阀的固有频率会远超过系统整体的固有频率，故可把伺服阀化简成比例环节，即伺服阀阀芯位移与控制器的输入信号成正比：

$$x_f = k_t u. \quad (1)$$

式中： $k_t$ 为伺服阀增益且 $k_t > 0$ ； $u$ 为控制器输入信号。

伺服阀进油流量 $Q_1$ 和回油流量 $Q_2$ 为：

$$Q_1 = k_{Q_1} x_f \sqrt{|\Delta P_1|}; \quad (2)$$

$$Q_2 = k_{Q_2} x_f \sqrt{|\Delta P_2|}. \quad (3)$$

式中： $k_{Q_1} = C_d w_1 \sqrt{2/\rho}$ ； $k_{Q_2} = C_d w_2 \sqrt{2/\rho}$ 。其中 $C_d$ 为液压油流量系数； $w_1$ 和 $w_2$ 为伺服阀的面积梯度； $\rho$ 为油液密度。

2) 假设整个液压系统无泄漏，则协调器油缸的连续流量方程为：

$$Q_1 = A_1 \dot{x} + V_1 \dot{P}_1 / \beta_e; \quad (4)$$

$$Q_2 = A_2 \dot{x} - V_2 \dot{P}_2 / \beta_e. \quad (5)$$

协调器油缸的力平衡方程为：

$$F = P_1 A_1 - P_2 A_2. \quad (6)$$

由式(1)–(6)可得协调器的动力学方程：

$$\left. \begin{aligned} x_f &= k_t u \\ Q_1 &= k_{Q_1} x_f \sqrt{|\Delta P_1|} = A_1 \dot{x} + V_1 \dot{P}_1 / \beta_e \\ Q_2 &= k_{Q_2} x_f \sqrt{|\Delta P_2|} = A_2 \dot{x} - V_2 \dot{P}_2 / \beta_e \\ m_1 \ddot{x} + B_1 \dot{x} + T_1 &= P_1 A_1 - P_2 A_2 \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

式中： $m_1$ 为协调器油缸活塞杆的等效质量； $B_1$ 为协调器油缸的等效摩擦系数； $T_1$ 为协调器油缸的等效扰动。

取液压系统的状态变量为 $\mathbf{X} = [c_1, c_2, c_3]^T = [x, \dot{x}, \ddot{x}]^T$ ，由式(7)可得：

$$\left. \begin{aligned} \dot{c}_1 &= c_2 \\ \dot{c}_2 &= c_3 \\ a_1 \dot{c}_3 &= -a_2 c_2 - a_3 c_3 + u - d \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

由上式可观察出 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $d$ 的值都是不确定的，在实际协调器实际系统中，参数 $m_1$ 、 $B_1$ 、 $\beta_e$ 、 $k_t$ 、 $T_1$ 的值都是有界的，所以作如下假设：

3) 假设不确定参数 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $d$ 均有界，即有已知参数 $a_{1\max} > a_{1\min} > 0$ 、 $a_{2\max} > a_{2\min} > 0$ 、 $a_{3\max} > a_{3\min} > 0$ 、存在 $\eta > 0$ 使得 $a_{1\min} \leq a_1 \leq a_{1\max}$ 、 $a_{2\min} \leq a_2 \leq a_{2\max}$ 、 $a_{3\min} \leq a_3 \leq a_{3\max}$ 、 $|d| < \eta$ 。

## 2 控制器设计

### 2.1 自适应滑模控制器设计

根据式(8)所示的系统状态变量方程，给定以下的协调器角度跟踪误差：

$$\left. \begin{aligned} e(t) &= x(t) - x_d(t) \\ \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{x}_d(t) \\ \ddot{e}(t) &= \ddot{x}(t) - \ddot{x}_d(t) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

式中： $x_d(t)$ 为给定的期望角度； $x(t)$ 为协调器运动的实际角度； $e(t)$ 为跟踪误差。

采用如下的滑模函数：

$$s(t) = \ddot{e}(t) + y_1 \dot{e}(t) + y_2 e(t). \quad (10)$$

式中： $y_1$ 和 $y_2$ 为不确定的滑模面参数，并且满足 $y_1 > 0$ 、 $y_2 > 0$ 。为满足协调器系统整体的稳定性， $y_1$ 和 $y_2$ 的值需满足式 $T^2 + y_1 T + y_2 = 0$ 的2个根都存在负实部。

根据式(8)–(10)可得：

$$a_1 \dot{s} = a_1 (\ddot{e} + y_1 \dot{e} + y_2 e) = a_1 (-\ddot{x}_d + y_1 \dot{e} + y_2 e) - a_2 c_2 - a_3 c_3 + u - d. \quad (11)$$

为验证式(11)的稳定性，取以下的Lyapunov函数：

$$H_1 = a_1 s^2 / 2. \quad (12)$$

对式(12)进行求导，可得：

$$\dot{H}_1 = s a_1 \dot{s}. \quad (13)$$

把式(13)代入式(11)中可得：

$$\dot{H}_1 = s[a_1(-\ddot{x}_d + y_1\ddot{e} + y_2\dot{e}) + s(-a_2c_2 - a_3c_3 + u - d)] \quad (14)$$

假设式(14)中  $a_1(-\ddot{x}_d + y_1\ddot{e} + y_2\dot{e}) - a_2c_2 - a_3c_3 + u - d$  为 0 时, 则

$$u = a_1(\ddot{x}_d - y_1\ddot{e} - y_2\dot{e}) + a_2c_2 + a_3c_3 + d \quad (15)$$

假设选取控制律方程为:

$$u = a_1(\ddot{x}_d - y_1\ddot{e} - y_2\dot{e}) + a_2c_2 + a_3c_3 - k_s s - \eta \text{sat}(s) \quad (16)$$

式中:  $k_s$  为鲁棒系数;  $\eta$  为切换项增益;  $\text{sat}(s)$  为饱和函数, 为削弱滑模控制中存在的抖振现象, 其表达式如下:

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s \geq \Delta \\ s/\Delta, & |s| \leq \Delta \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (17)$$

式中  $\Delta$  为边界层厚度。

把式(16)代入式(14)可得:

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 &= s[a_1(\ddot{x}_d + y_1\ddot{e} + y_2\dot{e}) - a_2c_2 - a_3c_3 + u - d] = \\ & s[-k_s s - \eta \text{sat}(s) - d] = -k_s s^2 - \eta |s| - ds \leq -k_s s^2 \end{aligned} \quad (18)$$

故证明系统是闭环稳定收敛的。

## 2.2 扰动观测器设计

笔者采用基于指数收敛的扰动观测器来估计系统出现的扰动, 提高系统的整体控制性能。具体设计过程如下:

$$\text{取: } \dot{\hat{d}} = K(d - \hat{d}) \quad [6] \quad (19)$$

定义辅助向量为:

$$\mathbf{Z} = \hat{d} + Ka_1\ddot{x} \quad (20)$$

则对式(20)求导可得:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \dot{\hat{d}} + Ka_1\ddot{x} \quad (21)$$

由状态方程式(8)可知:

$$d = -a_1\ddot{x} - a_2\dot{x} - a_3\ddot{x} + u \quad (22)$$

把式(21)代入式(19)可得:

$$\dot{\hat{d}} = K(-a_1\ddot{x} - a_2\dot{x} - a_3\ddot{x} + u) - K\hat{d} \quad (23)$$

由此可得:

$$\dot{\mathbf{Z}} = K(-a_2\dot{x} - a_3\ddot{x} + u) - K\hat{d} \quad (24)$$

因此, 根据式(19)~(24), 扰动观测器设计为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{Z}} &= K(-a_2\dot{x} - a_3\ddot{x} + u) - K\hat{d} \\ \hat{d} &= \mathbf{Z} - Ka_1\ddot{x} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中:  $\hat{d}$  为扰动观测器估计项;  $K$  为观测器增益。

整理可得:

$$\dot{\mathbf{Z}} = K(-a_2\dot{x} - a_3\ddot{x} + u - Ka_1\ddot{x}) - K\mathbf{Z} \quad (26)$$

定义扰动观测器的观测误差为:

$$\tilde{d} = d - \hat{d} \quad (27)$$

针对协调器运动存在的常值干扰, 可假设  $\dot{d} = 0$ 。

对式(27)进行时间求导可得:

$$\dot{\tilde{d}} = \dot{d} - \dot{\hat{d}} = -\dot{\mathbf{Z}} + Ka_1\ddot{x} \quad (28)$$

将式(26)代入式(28)得:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{d}} &= -[K(-a_2\dot{x} - a_3\ddot{x} + u + Ka_1\ddot{x}) - K\mathbf{Z}] + \\ & Ka_1\ddot{x} = K(\mathbf{Z} - Ka_1\ddot{x}) - K(-a_1\ddot{x} - a_2\dot{x} - \\ & a_3\ddot{x} + u) = K(\hat{d} - d) = -K\tilde{d} \end{aligned} \quad (29)$$

从而得到扰动观测器的观测误差方程为:

$$\dot{\tilde{d}} + K\tilde{d} = 0 \quad (30)$$

式(30)误差方程的解为:

$$\tilde{d}(t) = \tilde{d}(t_0)e^{-Kt} \quad (31)$$

式中  $\tilde{d}(t_0)$  是常值确定的, 所以观测器的收敛精度取决于参数  $K$ , 通过选定参数  $K$  值, 尽可能使扰动估计值  $\hat{d}$  按指数逼近于扰动  $d$ 。

引入扰动观测器后, 系统的控制律变为:

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 + u_3 + u_d = a_1(\ddot{x}_d - y_1\ddot{e} - y_2\dot{e}) + \\ & a_2c_2 + a_3c_3 - k_s s - \eta \text{sat}(s) + \hat{d} \end{aligned} \quad (32)$$

式中  $u_d = \hat{d}$ 。

取闭环系统的 Lyapunov 函数为:

$$H_2 = a_1 s^2 / 2 + \tilde{d}^2 / 2 \quad (33)$$

对上式进行时间求导:

$$\begin{aligned} \dot{H}_2 &= a_1 s \dot{s} + \tilde{d} \dot{\tilde{d}} \leq -k_s s^2 - K\tilde{d}^2 \leq \\ & -K_1(a_1 s^2 / 2 + \tilde{d}^2 / 2) = -K_1 H_2 \end{aligned} \quad (34)$$

式中  $K_1 = 2 \min\{k_s, K\}$ , 不等式  $\dot{H}_2 \leq -K_1 H_2$  的解为<sup>[7]</sup>:

$$H_2(t) \leq e^{-K_1(t-t_0)} \cdot H_2(t_0) \quad (35)$$

故而控制系统是指数收敛的, 并且收敛精度取决于  $K_1$  的值。

## 2.3 自适应率设计

由系统状态方程式(8)可知, 在实际协调器系统中,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的参数值是未知的; 因此, 式(32)控制律不能进行实际运用, 为能使控制律得到实际运用, 笔者采取一种有效的自适应算法来在线估算系统未知参数的值。

假设估计误差为:

$$\tilde{a}_i = a_i - \hat{a}_i \quad (36)$$

式中:  $\tilde{a}_i$  为估计误差;  $a_i$  为实际值;  $\hat{a}_i$  为估计值,

$i=1, 2, 3$ 。

代入式(32)则可得新的控制律为：

$$u = \hat{a}_1(\ddot{x}_d - y_1\ddot{e} - y_2\dot{e}) + \hat{a}_2c_2 + \hat{a}_3c_3 - k_3s - \eta\text{sat}(s) + \dot{d} \quad (37)$$

故定义如下 Lyapunov 函数：

$$H_3 = H_2 + b_1\tilde{a}_1^2/2 + b_2\tilde{a}_2^2/2 + b_3\tilde{a}_3^2/2 \quad (38)$$

式中： $b_1, b_2, b_3$  为待定系数，且  $b_1>0, b_2>0, b_3>0$ 。

对式(38)进行时间求导可得：

$$\begin{aligned} \dot{H}_3 = & \dot{H}_2 + b_1\dot{\tilde{a}}_1\tilde{a}_1 + b_2\dot{\tilde{a}}_2\tilde{a}_2 + b_3\dot{\tilde{a}}_3\tilde{a}_3 = \tilde{a}_1[-s(\ddot{x}_d - \\ & y_1\ddot{e} - y_2\dot{e}) + b_1\dot{\tilde{a}}_1] + \tilde{a}_2(-sc_2 + b_2\dot{\tilde{a}}_2) + \\ & \tilde{a}_3(-sc_3 + b_3\dot{\tilde{a}}_3) - k_3s - \eta|s| - ds - K\tilde{d}^2 \end{aligned} \quad (39)$$

假设： $a_1, a_2, a_3$  是慢时变的，则  $\dot{a}_1=0, \dot{a}_2=0, \dot{a}_3=0$ ；代入式(36)可得：

$$\dot{\tilde{a}}_1 = \dot{a}_1 - \hat{\dot{a}}_1 = -\hat{\dot{a}}_1; \quad \dot{\tilde{a}}_2 = \dot{a}_2 - \hat{\dot{a}}_2 = -\hat{\dot{a}}_2; \quad \dot{\tilde{a}}_3 = \dot{a}_3 - \hat{\dot{a}}_3 = -\hat{\dot{a}}_3 \quad (40)$$

因此，设计如下自适应率：

$$\left. \begin{aligned} \hat{\dot{a}}_1 &= -s(\ddot{x}_d - y_1\ddot{e} - y_2\dot{e})/b_1 \\ \hat{\dot{a}}_2 &= -sc_2/b_2 \\ \hat{\dot{a}}_3 &= -sc_3/b_3 \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

将式(41)自适应率代入式(39)可得：

$$\dot{H}_3 = -k_3s^2 - \eta|s| - ds - K\tilde{d}^2 \leq -k_3s^2 - K\tilde{d}^2 \quad (42)$$

由此可知，设计的控制系统是收敛稳定的。

在实际系统操作中，为防止参数  $a_1, a_2, a_3$  的估计值过大对协调器控制效果造成不好的影响，为保证其有界性，对自适应值采用非连续投影算法<sup>[8]</sup>：

$$\hat{\dot{a}}_i = \text{Proj}_{a_i}(\beta_i/b_i) = \begin{cases} 0, & \hat{a}_i > a_{i\max} \text{ and } (1/b_i)\beta_i > 0 \\ 0, & \hat{a}_i \leq a_{i\min} \text{ and } (1/b_i)\beta_i < 0 \\ \beta_i/b_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (43)$$

式中： $i=1, 2, 3$ ； $\beta_i$  为自适应率； $\beta_1 = -s(\ddot{x}_d - y_1\ddot{e} - y_2\dot{e})$ ； $\beta_2 = -sc_2$ ； $\beta_3 = -sc_3$ 。假如  $a_{i\min} \leq \hat{a}_i(0) \leq a_{i\max}$ ，则满足任何时刻下  $a_{i\min} \leq \hat{a}_i(t) \leq a_{i\max}$  成立，因此该算法能保证估计参数的有界性。

综上所述可知，设计的基于扰动观测器的自适应滑模控制律满足控制器要求。

系统的控制如图 2 所示。

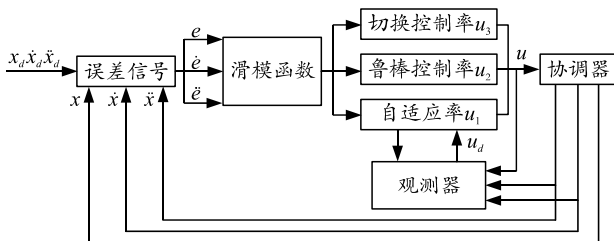


图 2 基于扰动观测器的自适应滑模控制系统

从上图可知，协调器角度编码器将所采集到的角度值在控制器中通过微分器进行一阶和二阶求导。求导后的值与期望值做差进入滑模函数，经过滑模函数计算后根据切换控制律、鲁棒控制律和自适应控制律将输出信号给协调器系统中的伺服阀，使协调器油缸进行运动；观测器收集协调器的反馈值并对其进行扰动估计，并将扰动估计值传输至自适应率算法，最终对协调器系统控制更加平稳、快速。

### 3 联合仿真结果分析

协调器的机电液联合仿真模型中，利用 AMESim 软件对液压系统进行模型建立，控制系统的模型根据控制结构图，利用 Simulink 中的模块进行搭建。通过此接口将 AMESim 中液压系统的数据和 Simulink 中控制程序的数据进行实时交换，使两者之间进行联合仿真；仿真时选择 ode45 处理器，仿真时间为 3 s，仿真步长为 0.01 s。

状态方程式(8)中的初始值和上下边界限值如表 1 所示。

表 1 状态方程参数

参数	初始值	上边界值	下边界值
$a_1$	$3.40 \times 10^{-6}$	$4.40 \times 10^{-5}$	$2.40 \times 10^{-8}$
$a_2$	$4.24 \times 10^{-3}$	$5.60 \times 10^{-2}$	$4.60 \times 10^{-4}$
$a_3$	$4.40 \times 10^{-4}$	$3.40 \times 10^{-3}$	$3.40 \times 10^{-5}$

基于扰动观测器的自适应滑模控制系统参数值如表 2 所示。

表 2 控制系统参数

参数符号	参数意义	参数值
$y_1$	滑模面参数	$2 \times 10^2$
$y_2$	滑模面参数	$18 \times 10^3$
$b_1$	自适应系数	$1 \times 10^{16}$
$b_2$	自适应系数	$1 \times 10^8$
$b_3$	自适应系数	$1 \times 10^{13}$
$k_3$	鲁棒系数	$\text{abs}(s) \times 10^{-6}$
$\Delta$	边界层厚度	$1 \times 10^4$
$\eta$	切换增益	12
$K$	观测器增益	50

为能够使仿真结果具有一般性，分别以 30°、45°、70°这 3 种不同范围的协调期望角度来进行仿真；并且对模糊 PID 控制器、自适应滑模控制器和基于扰动观测器的自适应滑模控制器三者进行对比，仿真得到的跟踪轨迹和跟踪误差如图 3—8 所示。

由图 3 和 4 可知，当协调器的期望角度为 30°时，利用自适应滑模控制器仿真得到的结果为：到位时间为 0.7 s，稳态误差为 0.005°，最大动态误差

为  $1.74^\circ$ ；在自适应滑模控制算法中加入 DOB 观测器后，仿真所得到的结果如图中 DOB 自适应曲线所示：到位时间为  $0.68\text{ s}$ ，稳态误差为  $0.0009^\circ$ ，最大动态误差为  $1.45^\circ$ ；两者和模糊 PID 控制仿真结果相比较，控制曲线更加稳定，并且到位时间更快、到位精度更高。但两者之间 DOB 自适应仿真曲线的控制性能更加优异。

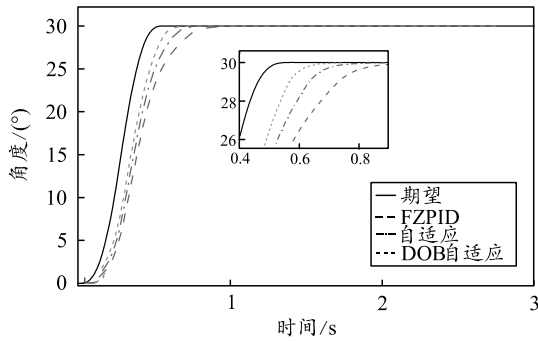


图 3 30°跟踪曲线

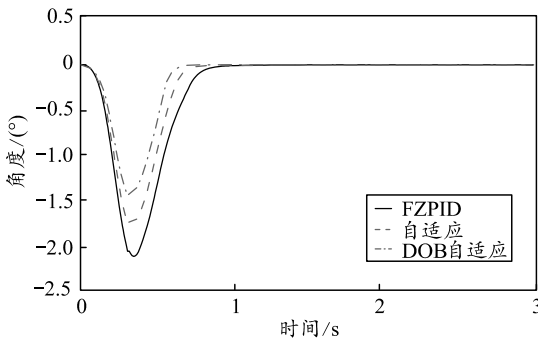


图 4 30°误差曲线

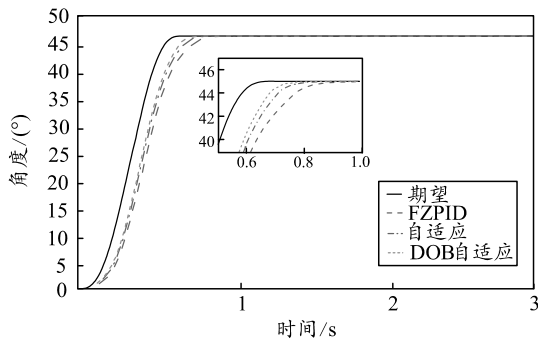


图 5 45°跟踪曲线

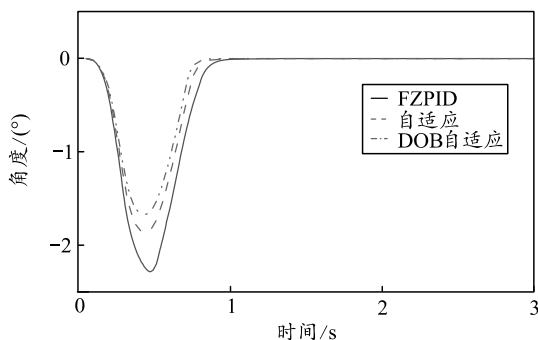


图 6 45°误差曲线

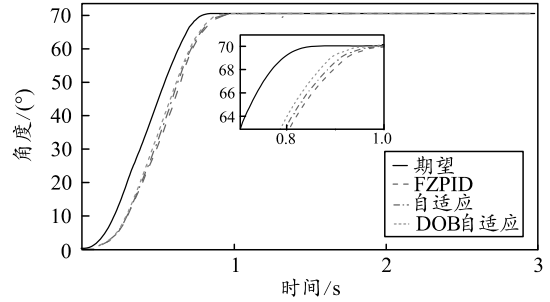


图 7 70°跟踪曲线

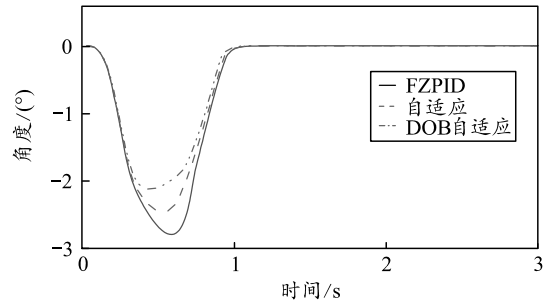


图 8 70°误差曲线

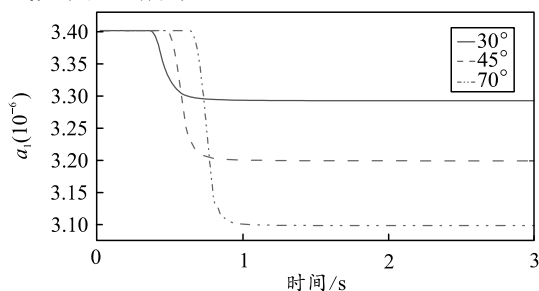
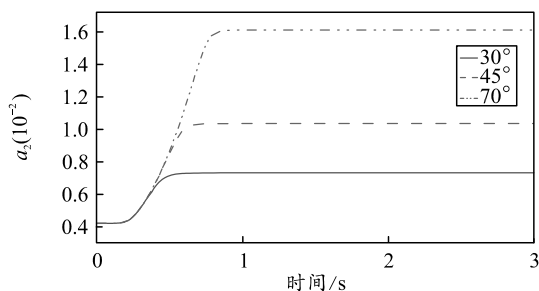
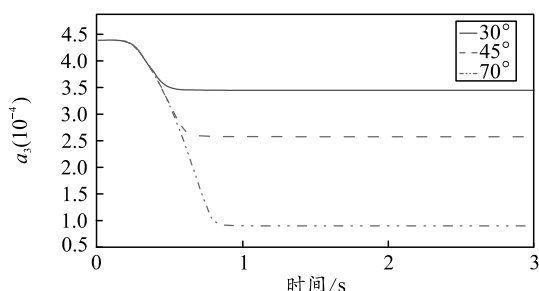
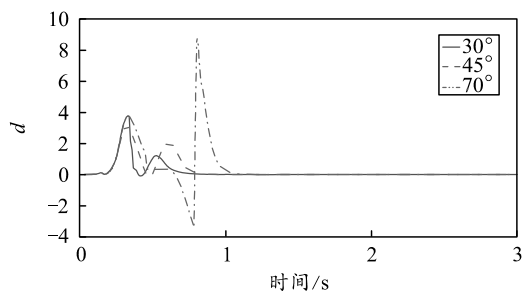
由图 3 和 4 可知，当协调器的期望角度为  $30^\circ$  时，利用自适应滑模控制器仿真得到的结果为：到位时间为  $0.7\text{ s}$ ，稳态误差为  $0.005^\circ$ ，最大动态误差为  $1.74^\circ$ ；在自适应滑模控制算法中加入 DOB 观测器后，仿真所得到的结果如图中 DOB 自适应曲线所示：到位时间为  $0.68\text{ s}$ ，稳态误差为  $0.0009^\circ$ ，最大动态误差为  $1.45^\circ$ ；两者和模糊 PID 控制仿真结果相比较，控制曲线更加稳定，并且到位时间更快、到位精度更高。但两者之间 DOB 自适应仿真曲线的控制性能更加优异。

由图 5 和 6 可知，协调器期望角度为  $45^\circ$  时，自适应滑模制器仿真的到位时间为  $0.8\text{ s}$ ，稳态误差为  $0.008^\circ$ ，最大动态误差为  $1.83^\circ$ ；基于扰动观测器的自适应滑模控制器仿真到位时间为  $0.76\text{ s}$ ，稳态误差为  $0.0011^\circ$ ，最大动态误差为  $1.63^\circ$ 。相比较期望角度  $30^\circ$  时的仿真结果，稳态和动态误差略有增加。

由图 7 和 8 可知，协调器期望角度为  $70^\circ$  时，自适应滑模控制器仿真的到位时间为  $1.1\text{ s}$ ，稳态误差为  $0.011^\circ$ ，最大动态误差为  $2.38^\circ$ ；基于扰动观测器的自适应滑模控制器仿真到位时间为  $0.96\text{ s}$ ，稳态误差为  $0.0017^\circ$ ，最大动态误差为  $2.06^\circ$ 。通过上述 3 种不同期望角度和 3 种不同控制器的仿真结果可知，自适应滑模控制器和基于扰动观测器的自适应滑模控制器的仿真结果比模糊 PID 控制器更加优异，在大角度协调过程中不但能消除抖振和超调现象，在到位时间和到位精度上都有很大改善。基于 DOB 观测器的自适应控制器能在过程中对系统的

扰动值进行估算，并且对其进行补偿，所以其控制性能各方面都优于自适应滑模控制器。综上所述，基于扰动观测器的自适应滑模控制算法能很好地解决模糊 PID 出现的抖动现象，能对系统的扰动进行补偿，使系统具有更好的自适应能力，能消除系统在生产和装配过程中所带来的未知系统误差的影响，提高控制器的鲁棒性。

基于扰动观测器自适应滑模控制器在期望角度为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $70^\circ$  时自适应参数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的仿真曲线如图 9—11 所示，扰动观测器的扰动估计值仿真曲线如图 12 所示。

图 9  $a_1$  自适应参数图 10  $a_2$  自适应参数图 11  $a_3$  自适应参数图 12 扰动  $\hat{d}$  估计值

由图 9—11 可知，通过自适应算法和非连续性投影算法，能对系统状态方程中的未知参数进行估计，且所有自适应参数均为有界，协调角度范围越大，自适应参数的估计值变化范围也越大。综上所述，自适应率的设计是可行有效的。

由图 12 可知，扰动观测器能很好地估计系统在协调动作时扰动的变化，并对系统进行补偿；同时，大角度的协调会对系统产生较大的扰动，影响系统的控制性能，但通过观测的扰动补偿，能很好地消除系统扰动，使控制曲线更加平稳，不会出现抖振和超调现象，提高了控制性能，证明了扰动观测器设计的有效性。

## 4 结束语

笔者将一种基于 DOB 的自适应滑模控制策略应用于火炮协调器的控制分析，并将其应用于液压伺服系统。AMESim 和 Matlab 电液联合仿真表明，自适应算法能够很好地估计参数值并保证边界内的波动。扰动观测器可对系统进行前馈补偿，大大减少了未建模的扰动和未知参数对控制精度的影响、传统滑模控制中存在的抖振现象，使控制系统具有较强的刚性和较高的控制精度。

## 参考文献：

- [1] 侯保林, 刘琮敏, 樵军谋. 火炮自动装填[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 15-38.
- [2] 才秦东. 某火炮协调器优化设计及控制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [3] 郑颖, 马大为, 姚建勇. 火箭炮伺服系统自抗扰控制[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 597-603.
- [4] 汲静静. 自行火炮输弹机提升机构液压控制系统分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [5] TIAN L F, QIAN L F, CHEN L M, et al. Sliding mode control based on backstepping method for electro-hydraulic single-rod actuator[C]//IEEE International Conference on Information & Automation. IEEE, 2015.
- [6] LIU J K, SUN F C. A novel dynamic terminal sliding mode control of uncertain nonlinear system[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2007, 5(2): 189-193.
- [7] UTKINVI. Variable Structure System with Sliding Modes[J]. IEEE Transactions Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.
- [8] YAO B. Advanced Motion Control: From Classical PID to Nonlinear Adaptive Robust Control[C]//The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Nagaoka, Japan, 2010.