

doi: 10.7690/bgzd.2025.05.018

基于干扰观测器的某爆破发射平台终端滑模控制

闫智聪, 童仲志, 侯远龙, 李有为, 肖顺志

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为解决某爆破发射平台液压随动系统在运行时因液压系统泄漏、元件非线性摩擦及外部负载变化导致的非线性问题, 提出一种基于扰动观测器与终端滑模控制结合的控制方法。使用扰动观测器观测系统扰动, 降低扰动对系统稳定的影响, 使用强鲁棒性的滑模控制消除系统内部非线性不确定因素的影响; 针对传统滑模控制的跟踪误差无法在有限时间收敛的缺点, 采用一种非线性系统的。终端滑模控制, 以实现在指定时间内的跟踪。仿真及实验结果表明: 设计的控制策略能够有效地提高发射平台的位置精度, 并且使系统具有较强的鲁棒性。

关键词: 滑模控制; Terminal 滑模控制; 扰动观测器; 电液伺服系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Terminal Sliding Mode Control of a Blasting Launching Platform Based on Disturbance Observer

Yan Zhicong, Tong Zhongzhi, Hou Yuanlong, Li Youwei, Xiao Shunzhi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the nonlinear problems caused by hydraulic system leakage, nonlinear friction of components and external load changes in the hydraulic servo system of a blasting launching platform, a control method based on disturbance observer and Terminal sliding mode control was proposed. The disturbance observer is used to observe the system disturbance and reduce the influence of the disturbance on the stability of the system, and the sliding mode control with strong robustness is used to eliminate the influence of the internal nonlinear uncertainties of the system. Aiming at the defect that the tracking error of the traditional sliding mode control can not converge in a finite time, the Terminal sliding mode control of a nonlinear system is adopted to achieve the tracking in a specified time. The simulation and experimental results show that the control strategy can effectively improve the position accuracy of the launch platform, and the system has strong robustness.

Keywords: sliding mode control; Terminal sliding mode control; disturbance observer; electro-hydraulic servo system

0 引言

与电机伺服系统相比, 电液伺服系统因其输出功率高、质量比大、响应速度快及负载能力强而被广泛应用在功率需求大的发射平台上。由于电液伺服系统存在时变的液压弹性模量、粘性摩擦系数等参数不确定性和外在干扰、摩擦、泄露等不确定性非线性, 使得 PID 等传统控制方法无法取得一个理想的控制效果^[1]。

针对非线性问题, 存在一种滑模变结构控制(sliding mode control, SMC), 这是一种能用来实现线性和非线性系统鲁棒控制的方法。该方法具有对参数变化和扰动不敏感、响应速度快、鲁棒性强的特性, 因而被广泛使用于各种智能控制方法中。然而, 传统滑模控制的误差无法在有限时间收敛为 0, 使得系统响应慢、控制精度差, 基于上述问题, Feng

等^[2]提出了一种非奇异快速终端滑模, 可实现有限时间的误差收敛为 0, 但是这种控制器不具有最优收敛时间且只能用于二阶系统。Yu 等^[3]设计了一种全局快速终端滑模, 可用于高阶系统, 但是使用这种方法无法克服奇异点的问题。上述 2 种方式在应用于液压系统时总是存在阶数不匹配、奇异现象无法消除的缺点。为解决上述问题, 采用一种新型的非线性终端滑模面, 可以同时解决高阶系统问题和奇异现象问题。

此外, 传统滑模控制在实际应用中往往伴随着高频抖振, 会造成发射平台的不稳定, 以及机械磨损、能源浪费, 甚至影响射击精度, 这严重限制了滑模控制的使用; 因此, 削弱滑模控制器的高频抖振十分必要。目前, 各国学者都提出了不同的削弱抖振的方法^[4-6]。

笔者以电液伺服系统为研究对象, 建立了阀控

收稿日期: 2024-08-05; 修回日期: 2024-09-10

第一作者: 闫智聪(1998—), 男, 山西人, 硕士。

对称缸的数学模型,使用了新型终端滑模控制方法,使得系统跟踪误差可在有限时间快速收敛到 0,同时使用干扰观测器对控制过程中的干扰进行有效补偿,降低切换增益,达到提高抗干扰性能和有效削弱抖振的效果。仿真结果证明:该方法不仅很好地继承了滑模控制响应速度快、鲁棒性强的特点,而且有效地削弱了抖振现象,达到了很好的控制效果。

1 爆破发射平台的数学建模

1.1 发射平台电液伺服系统原理

电液伺服系统原理如图 1 所示。

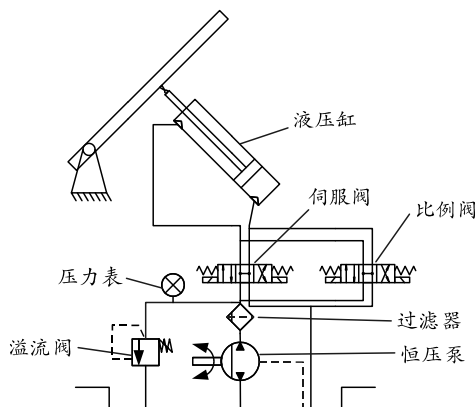


图 1 发射平台电液伺服系统原理

$$x_p = \left(\frac{K_q}{A_p} x_v - \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right) F_L \right) / \left(\frac{m_t V_t}{4\beta_e A_p^2} s^3 + \left(\frac{m_t K_{ce}}{A_p^2} + \frac{B_p V_t}{4\beta_e A_p^2} \right) s^2 + \left(1 + \frac{B_p K_{ce}}{A_p^2} + \frac{K V_t}{4\beta_e A_p^2} \right) s + \frac{K K_{ce}}{A_p^2} \right) \quad (5)$$

式中 $K_{ce} = K_c + C_{tp}$ 为总流量-压力系数。

考虑伺服系统的负载多为惯性负载,可以忽略弹性负载。另外,通常负载黏性阻尼系数 B_p 很小,使 $(K_{ce} B_p / A_p^2) \ll 1$, 因此 $K_{ce} B_p / A_p^2$ 与 1 相比可以忽略不计^[7]。式(5)可简化为:

$$x_p = \frac{\frac{K_q}{A_p} x_v - \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right) F_L}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (6)$$

式中: $\omega_h = \sqrt{4\beta_e A_p^2 / V_t m_t}$ 为液压固有频率;

$\xi_h = \frac{K_{ce}}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_e m_t}{V_t}} + \frac{B_p}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e m_t}}$ 为液压阻尼比。

发射平台的仰角可以在控制计算机中计算为液压缸活塞的位移,出于简化操作,这里只建立活塞位移量与控制电压的传递函数。

1.3 电液伺服系统状态空间模型

电液伺服系统简化方框如图 2 所示,其中伺服

1.2 电液伺服系统数学建模

液压伺服阀的流量方程为:

$$q_L = K_q x_v - K_c p_L \quad (1)$$

式中: q_L 为负载流量; K_q 为阀的流量增益; x_v 为阀芯位移; K_c 为阀的压力-流量系数; p_L 为负载压力。

根据液压缸流量连续性方程可以得出:

$$q_L = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{tp} p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_L}{dt} \quad (2)$$

式中: A_p 为液压缸活塞有效面积; x_p 为活塞位移; C_{tp} 为液压缸泄漏系数; V_t 为液压缸总容积; β_e 为有效体积弹性模量。

液压缸与负载的力平衡方程为:

$$A_p p_L = m_t d^2 x_p / dt^2 + B_p dx_p / dt + K x_p + F_L \quad (3)$$

式中: m_t 为活塞等效质量; B_p 为黏度阻尼系数; K 为负载弹簧刚度; F_L 为外负载力。

将式(1)~(3)做拉式变换后可得:

$$\left. \begin{aligned} Q_L &= K_q x_v - K_c P_L \\ Q_L &= A_p s x_p + C_{tp} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} s P_L \\ A_p P_L &= m_t s^2 x_p + B_p s x_p + K x_p + F_L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

整理之后可得:

放大器的增益为 K_a , 伺服阀的增益为 K_{sv} , 电压信号为 u , 所以:

$$x_v = K_a K_{sv} u / k_q \quad (7)$$

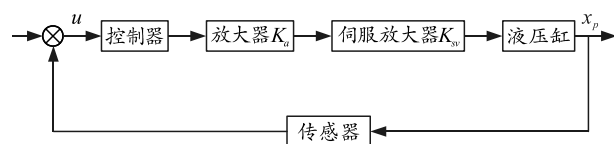


图 2 电液伺服系统简化方框

将式(7)代入式(5)可得到对控制电压 u 的传递函数:

$$\frac{x_p}{u} = \frac{K_a K_{sv} / A_p}{s \left(s^2 / \omega_h^2 + 2\xi_h s / \omega_h + 1 \right)} \quad (8)$$

选取变量 $x = \{x_1, x_2, x_3\}^T$, $x_1 = x_p$, $\dot{x}_1 = \dot{x}_p$, $\ddot{x}_1 = \ddot{x}_p$,

则系统的状态空间方程可写为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= f(x, t) + bu + d \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $f(x, t) = a_1 x_3 + a_2 x_2$; $b = K_a K_{sv} \omega_h^2 / A_p$;

$$d = -\frac{4\beta_e K_{ce}}{m_l V_l} F_L - \frac{1}{m_l} \dot{F}_L + \Delta f(x, t) ; \quad a_1 = -2\omega_h \xi_h ;$$

$$a_2 = -\omega_h^2 ; \quad \Delta f(x, t) \text{ 为系统总不确定性； } |d| \leq D。$$

2 基于干扰观测器的终端滑模控制器设计

2.1 干扰观测器设计

由式(9)可得:

$$d = \ddot{x}_p - a_1 \ddot{x}_p - a_2 \dot{x}_p - bu。 \quad (10)$$

定义观测误差为:

$$\tilde{d} = d - \hat{d}。 \quad (11)$$

式中 $\hat{d}$ 为干扰的估计值。

观测器基本思路就是用估计值与实际值的差值对估计值进行修正, 所以取:

$$\dot{\hat{d}} = K(d - \hat{d})。 \quad (12)$$

将式(10)带入式(12)有:

$$\dot{\hat{d}} = K(\ddot{x}_p - a_1 \ddot{x}_p - a_2 \dot{x}_p - bu) - K\hat{d}。 \quad (13)$$

定义辅助参数向量为:

$$z = \hat{d} - K\ddot{x}_p。 \quad (14)$$

则:

$$\dot{z} = \dot{\hat{d}} - K\ddot{x}_p。 \quad (15)$$

将式(13)和(14)带入式(15)可得:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= K(\ddot{x}_p - a_1 \ddot{x}_p - a_2 \dot{x}_p - bu) - K(z + K\ddot{x}_p) - K\ddot{x}_p = \\ &= -K(a_1 \ddot{x}_p + a_2 \dot{x}_p + bu) - K(z + K\ddot{x}_p) = \\ &= -K(a_1 \ddot{x}_p + a_2 \dot{x}_p + bu + K\ddot{x}_p) - Kz。 \end{aligned} \quad (16)$$

针对常值干扰和慢干扰, 可假设 $\dot{d} = 0$ [8], 则:

$$\ddot{\hat{d}} = \dot{d} - \dot{\hat{d}} = -\dot{\hat{d}} = -\dot{z} - K\ddot{x}_p。 \quad (17)$$

将式(16)代入上式可得:

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{d}} &= K(a_1 \ddot{x}_p + a_2 \dot{x}_p + bu + K\ddot{x}_p) + Kz - K\ddot{x}_p = \\ &= K(z + K\ddot{x}_p) + K(a_1 \ddot{x}_p + a_2 \dot{x}_p + \\ &= bu - \ddot{x}_p) = K\tilde{d} - Kd = -K\tilde{d}。 \end{aligned} \quad (18)$$

解式(18)可得:

$$\tilde{d}(t) = \tilde{d}(t_0)e^{-Kt}。 \quad (19)$$

可以看到: 观测误差按指数收敛于 0, 且其速度由 K 决定。

2.2 Terminal 滑模面设计

定义误差向量为 $E = x_d - x_p = [e \quad \dot{e} \quad \ddot{e}]^T$, 滑模面可设计为:

$$s = C(E - P)。 \quad (20)$$

式中: $C = [k_1 \quad k_2 \quad 1]$; $P = [p(t) \quad \dot{p}(t) \quad \ddot{p}(t)]^T$; k_1, k_2 为正常数, 且满足 Huriwitz 条件。

实现终端滑模控制的关键在于辅助向量 P , 对于 P , 有以下 3 点条件:

1) 为保证滑模控制的全局鲁棒性, 需要系统的初始状态就处于滑模面上, 取 $P(0) = E(0)$ 。

2) 为保证系统误差在指定时间 t 收敛为 0, 取 $P(t) = 0$ 。

3) $P(t)$ 连续可导且有界。

因此, 可以构造如下 $P(t)$:

$$p(t) = R_1 E'(0) + R_2 Q E'(0)。 \quad (21)$$

式中: $R_1 = [1 \quad t \quad t^2 \quad t^3]$; $R_2 = [t^4 \quad t^5 \quad t^6 \quad t^7]$;

$E'(0) = [e(0) \quad \dot{e}(0) \quad \ddot{e}(0) \quad \ddot{\ddot{e}}(0)]^T$;

$$Q = \begin{bmatrix} a_{00}/T^4 & a_{01}/T^3 & a_{02}/T^2 & a_{03}/T \\ a_{10}/T^5 & a_{11}/T^4 & a_{12}/T^3 & a_{13}/T^2 \\ a_{20}/T^6 & a_{21}/T^5 & a_{22}/T^4 & a_{23}/T^3 \\ a_{30}/T^7 & a_{31}/T^6 & a_{32}/T^5 & a_{33}/T^4 \end{bmatrix}; \quad a_{ij} (i, j =$$

0, 1, 2, 3) 为终端滑模系数。

由有限时间收敛条件 $P(t) = 0$ 求解上述方程式可以得到终端滑模系数:

$$\left. \begin{aligned} a_{00} &= -35 \\ a_{10} &= 84 \\ a_{20} &= -70 \\ a_{30} &= 20 \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} a_{01} &= -20 \\ a_{11} &= 45 \\ a_{21} &= -36 \\ a_{31} &= 10 \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} a_{02} &= -5 \\ a_{12} &= 10 \\ a_{22} &= -\frac{15}{2} \\ a_{32} &= 2 \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} a_{03} &= -\frac{2}{3} \\ a_{13} &= 1 \\ a_{23} &= -\frac{2}{3} \\ a_{33} &= \frac{1}{6} \end{aligned} \right\}。 \quad (22)$$

2.3 Terminal 滑模控制器设计

在实际的控制过程中, 活塞的理想位置为 x_d ,

则 $e = x_d - x_p$, $\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x}_p$, $\ddot{e} = \ddot{x}_d - \ddot{x}_p$, $\ddot{\ddot{e}} = \ddot{\ddot{x}}_d - \ddot{\ddot{x}}_p$, 且:

$$\ddot{\ddot{e}} = \ddot{\ddot{x}}_d - \ddot{\ddot{x}}_p = \ddot{\ddot{x}}_d - f(x, t) - bu - d。 \quad (23)$$

由式(20)有:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= C(\dot{E} - \dot{P}) = k_1(\dot{e} - \dot{p}) + k_2(\ddot{e} - \ddot{p}) + (\ddot{\ddot{e}} - \ddot{\ddot{p}}) = \\ &= k_1(\dot{e} - \dot{p}) + k_2(\ddot{e} - \ddot{p}) + \ddot{\ddot{x}}_d - f(x, t) - bu - d - \ddot{\ddot{p}}。 \end{aligned} \quad (24)$$

此外, 由于不连续控制项中的 $\text{sgn}(s)$ 函数会造成系统的抖振, 所以采用一种饱和函数 $\text{sat}(s)$ 对其进行替代, 饱和函数形式为:

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > \delta \\ s/\delta & -\delta \leq s \leq \delta \\ -1 & s < -\delta \end{cases}。 \quad (25)$$

式中 $\delta>0$ 。
取控制率为：

$$u = (k_1(\dot{e} - \dot{p}) + k_2(\ddot{e} - \ddot{p}) + \ddot{x}_d - f(x, t) - \ddot{p} - \hat{d} + k_0 s + \eta \text{sat}(s))/b。$$

(26)

式中 $k_0>0$, $\eta>D$ 。则有：

$$\begin{aligned} \dot{s} &= k_1(\dot{e} - \dot{p}) + k_2(\ddot{e} - \ddot{p}) + \ddot{x}_d - f(x, t) - \ddot{p} - \hat{d} - \\ &\quad (k_1(\dot{e} - \dot{p}) + k_2(\ddot{e} - \ddot{p}) + \ddot{x}_d - f(x, t) - \ddot{p} - \hat{d} + \\ &\quad k_0 s + \eta \cdot \text{sat}(s)) = -k_0 s - \eta \cdot \text{sat}(s) - \tilde{d}。 \end{aligned}$$

(27)

2.4 收敛性分析

取 Lyapunov 函数为：

$$V = s^2/2 + \tilde{d}^2/2。$$

(28)

则有：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \tilde{d}\dot{\tilde{d}} = s(-k_0 s - \eta \cdot \text{sat}(s) - \tilde{d}) - K\tilde{d}^2 = \\ &\quad -k_0 s^2 - \eta s \cdot \text{sat}(s) - \tilde{d}s - K\tilde{d}^2 \leq -k_0 s^2 - \\ &\quad K\tilde{d}^2 \leq -k_3(s^2/2 + \tilde{d}^2/2) = -k_3 V。 \end{aligned}$$

(29)

式中： $\eta \geq |\tilde{d}|_{\max}$ ； $k_3 = 2 \min\{k_0, K\}$ 。

解式(29)可得：

$$V(t) \leq e^{-k_3(t-t_0)} V(t_0)。$$

(30)

可以看出：控制系统以指数收敛，收敛精度取决于参数 k_3 。

3 仿真验证

为测试本文中控制算法的控制效果，针对爆破发射平台电液伺服系统进行 Matlab/Simulink 仿真研究，系统主要参数如表 1 所示。

表 1 电液伺服系统主要参数

名称	数值
负载总质量 m_t/kg	12 000
活塞截面积 A_p/m^2	5.48×10^{-3}
体积弹性系数 β_e/MPa	700
液缸容积 V_t/m^3	2.192×10^{-3}
粘性阻尼系数 $B_p/(\text{N} \cdot \text{s})$	7 500
伺服阀增益 $k_{sv}/(\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{A}))$	5.2×10^{-4}
伺服放大器增益 $k_a/(\text{A/V})$	0.036
伺服阀流量-压力系数 $k_{ce}/(\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa}))$	5.57×10^{-11}
伺服阀流量增益 $k_q/(\text{m}^2/\text{s})$	3.1

控制算法中的主要参数为：

$$k = 5, k_1 = 49, k_2 = 14, k_3 = 50,$$

$$D = 80, T = 0.3, \delta = 0.02, \eta = 0.1。$$

为模拟系统内部参数不确定及外力带来的复合扰动，取扰动为以下形式：

$$d = \begin{cases} 40\dot{x}_p & 0 \leq t < 3.5 \\ 40\dot{x}_p + 40 & 3.5 \leq t < 3.6 \\ 40\dot{x}_p & 3.6 \leq t < 10 \end{cases}。$$

(31)

在本次仿真中，将线性滑模控制器、终端滑模控制器及本文中的改进终端滑模控制进行比较，用于仿真的 2 种参考信号分别为阶跃信号和正弦信号。

3.1 阶跃信号输入

选择 100 mm 的正弦信号作为输入，仿真时间为 10 s。图 3 为阶跃信号响应曲线，图 4 为阶跃信号下的位置追踪误差，图 5 为阶跃信号下的控制输出，图 6 为干扰观测器观测结果对比。

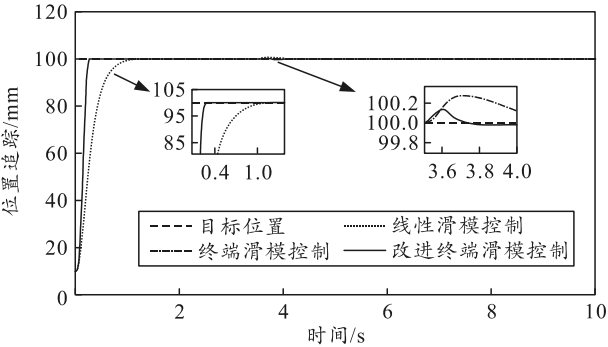


图 3 阶跃信号响应曲线

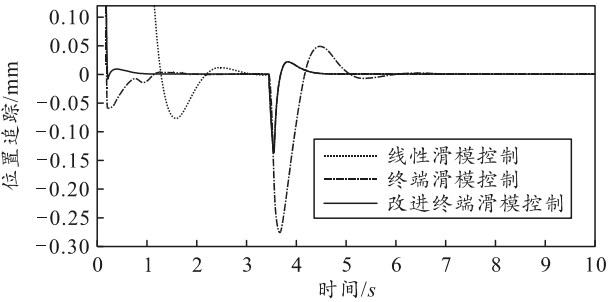


图 4 阶跃信号位置追踪误差

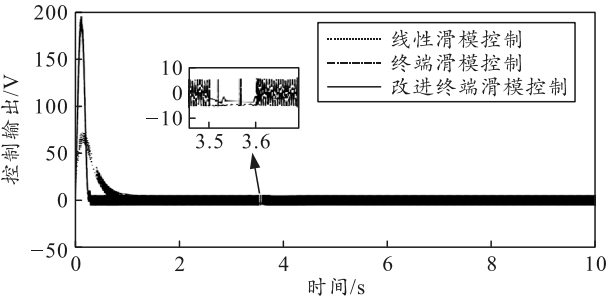


图 5 阶跃信号控制输出

从图 3 和 4 可以看出：对比线性滑模控制和终端滑模控制，改进终端滑模控制响应速度更快，且具有更好的鲁棒性。其阶跃响应到达稳定的时间为 0.3 s，稳态误差小于 10^{-8} mm，可以忽略不计，大幅优于线性滑模控制和终端滑模控制。面对 3.5 s 加入的阶跃扰动，改进终端滑模控制的最大误差仅为 0.137 mm，仅为其他 2 种控制方法的一半。同时，由图 5 可以看出，改进终端滑模控制的控制输出较为平滑，几乎不存在抖振。

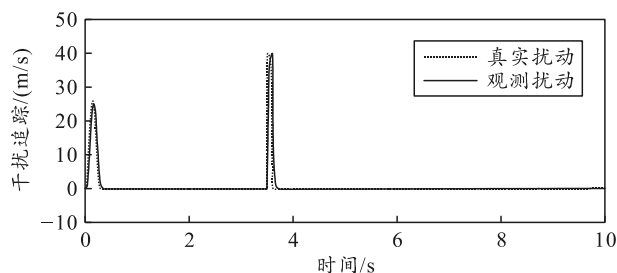


图 6 干扰观测器观测结果对比

由图 6 可以看出：笔者设计的干扰观测器观测误差在 $\pm 0.5 \text{ m/s}^3$ ，并且可以实现快速稳定的观测。

3.2 正弦信号输入

为进一步比较控制器的性能，选择幅值为 100 mm ，周期为 2 s 的正弦信号作为输入。图 7 为正弦信号响应曲线，图 8 为正弦信号下的位置追踪误差，图 9 为干扰观测器观测结果对比。

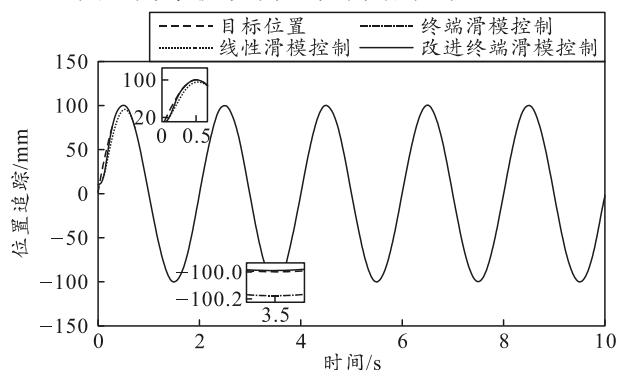


图 7 正弦信号响应曲线

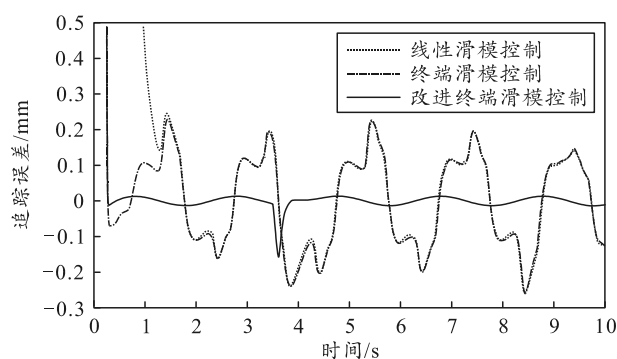


图 8 正弦信号位置追踪误差

从图 7 和 8 可以看出，与线性滑模控制和终端滑模控制相比，改进终端滑模控制跟踪正弦信号所需时间更短，为设定的 0.3 s ，且控制误差在 $\pm 0.01 \text{ mm}$ ，大幅优于前 2 种控制方法。

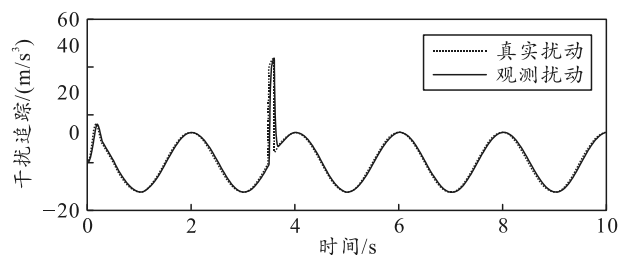


图 9 干扰观测器观测结果对比

由图 9 可以看出：笔者设计的干扰观测器无论是面对慢干扰还是快干扰，都有很好的跟踪效果，可以对系统扰动进行较好的补偿。

4 结论

针对某爆破发射平台电液伺服系统存在的参数不确定、非线性及外界干扰的问题，设计了基于干扰观测器的终端滑模控制器。仿真结果表明：该控制器具有响应速度快、稳态误差小、鲁棒性强等特点，可以很好地解决上述问题，控制效果较好。

参考文献：

- [1] 吴潇潇. 电液伺服系统建模与控制策略研究[D]. 南京：南京理工大学, 2011.
- [2] FENG Y, YU X H, MAN Z H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [3] YU X H, MAN Z H. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2002, 49(2): 261-264.
- [4] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007(3): 407-418.
- [5] CHEN J, ZHAO H C. Sliding mode disturbance observer and sliding mode controller for quadrotor UAV[J]. IOP Publishing, 2022, 2296(1): 012030.
- [6] 黄丽琼, 王园园. 基于干扰观测器的时滞非线性切换系统滑模控制方法[J]. 机械与电子, 2022, 40(10): 63-66, 71.
- [7] 江桂云, 王勇勤, 严兴春. 液压伺服阀控缸动态特性数学建模及仿真分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008(5): 195-198.
- [8] CHEN W H, BALLANCE D J, GAWTHROP P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2000, 47(4): 932-938.