

# 基于扩张状态观测器的燃气舵舵机位置控制\*

王献策, 陈雄, 葛中杰, 马睿

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 为了实现对燃气舵舵片的高精度位置控制, 设计了高阶非线性扩张状态观测器对舵机位置系统进行精确闭环控制。通过将参数摄动耦合项和外界扰动项合并为一个新的状态量, 将原有三阶位置系统扩张为四阶控制系统。采用滑模变结构控制器对状态观测器观测结果进行控制, 使舵机偏转角度达到预定值。分别采用传统PID控制和所设计的高阶非线性扩张状态观测器对舵机控制系统进行仿真, 来验证所设计的控制器的响应性能和稳定性能。结果表明: 相比于传统的PID控制器, 所设计的高阶非线性扩张状态控制器具有更高的跟踪精度和更快的响应性能, 其响应时间在0.1s以内, 提升了约0.7s, 且该控制系统无超调量的产生。该控制器在鲁棒性、抗干扰性上体现出更好的特点, 因此可以更好地实现整体伺服系统的位置控制。

**关键词:** 燃气舵; 高阶非线性扩张状态观测器; 位置控制; 变结构控制器; 无刷直流电机

中图分类号: V448.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 10-2341-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190525

## Position Control of Gas Rudder Steering Gear Based on Extended State Observer

WANG Xian-ce, CHEN Xiong, GE Zhong-jie, MA Rui

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

**Abstract:** In order to realize high precision position control of gas rudder, a high-order nonlinear extended state observer was designed for precise closed-loop control of the steering gear position system. By combining the parameter perturbation coupling term with the external perturbation term into a new state variable, the original third-order position system was extended to a fourth-order control system. The sliding mode variable structure controller was used to control the observational results of the state observer, so that the steering angle reached the predetermined value. The traditional PID control and the designed high-order nonlinear extended state observer were used to simulate the actuator control system respectively to verify the response and stability performance of the designed controller. The results show that compared with the traditional PID controller, the designed high-order nonlinear extended state controller has higher tracking accuracy and faster response performance. Its response time is less than 0.1s, which improves about 0.7s, and the control system has no overshoot. The controller has better robustness and anti-interference. Thus it can better realize position control of the whole servo system.

**Key words:** Gas rudder; High-order nonlinear extended state observer; Position control; Variable structure controller; Brushless DC motor

\* 收稿日期: 2019-07-23; 修订日期: 2019-09-23。

基金项目: 国家自然科学基金(5106098); 江苏省自然科学基金(BK20140772)。

作者简介: 王献策, 硕士生, 研究领域为航空宇航控制技术。E-mail: 819370948@qq.com

通讯作者: 陈雄, 博士, 教授, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: chenxiong@njust.edu.cn

引用格式: 王献策, 陈雄, 葛中杰, 等. 基于扩张状态观测器的燃气舵舵机位置控制[J]. 推进技术, 2020, 41(10):2341-2347. (WANG Xian-ce, CHEN Xiong, GE Zhong-jie, et al. Position Control of Gas Rudder Steering Gear Based on Extended State Observer[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10):2341-2347.)

## 1 引言

推力矢量控制按照其控制方式不同,可以分为二次射流喷射推力矢量控制、摆动喷管控制、燃气舵推力矢量控制<sup>[1-3]</sup>。其中燃气舵推力矢量控制因其联动性好,结构简单、可提供滚转力矩等特点被广泛应用于各类空空导弹和舰防导弹上<sup>[4-5]</sup>。如美国的AIM-120空空导弹、欧盟的“海麻雀”舰防导弹等弹体尾部发动机均采用燃气舵作为其作动装置<sup>[6]</sup>。燃气舵舵偏伺服系统由舵机、传动装置、燃气舵舵片、反馈装置和弹上固体火箭发动机组成。其工作原理为:当弹体在飞行初始段进行矢量控制调整时,通过调节燃气舵舵机的输出角度使舵片偏转对应的角度。从而调整弹体上固体火箭发动机产生的推力方向。使弹体获得所需的侧向控制力,完成整体固体火箭发动机的推力矢量控制<sup>[7]</sup>。舵机作为燃气舵伺服控制系统的核心机构,其输出位置精度会直接影响弹体上固体火箭发动机所获得侧向力的大小。因此对舵机进行精确位置控制可以使燃气舵具有较高的矢量控制性能。

无刷直流电机(Brushless DC motor, BLDCM)是在原有的有刷电机基础上加入永磁体取代原有的励磁绕组,并通过电子换向电路中的晶闸管等开关器件来实现电机电流的换向。因此相比于传统的有刷电机具有结构简单、可靠性高等特点,从而被广泛应用于机器人以及航空航天等领域<sup>[8-9]</sup>。因为BLDCM是一个多变量、强耦合性且非线性的时变系统,传统的PID控制并不能很好地满足相应的控制精度要求<sup>[10-11]</sup>。因此,如何通过所设计的控制器实现电机位置的高精度控制是BLDCM系统的主要研究方向。

近年来,针对这一类非线性时变耦合系统,一些强鲁棒性控制方法被提出,包括自适应模糊控制、支持向量机控制、滑模控制等<sup>[12-13]</sup>。其中滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)因其对系统整体数学建模要求不高,并且对于外界扰动具有较强的稳定性等特点被广泛地应用于非线性系统的控制中<sup>[14-15]</sup>。但是针对某一类精确伺服控制系统,在实际中存在着较多的未知不确定项,并且不能有效地推算出其不确定项的上界阈值<sup>[16]</sup>,使得滑模变结构控制不能实时估算未知项的变化<sup>[17]</sup>。

韩京清等针对这一类非线性且不确定项未知的系统,提出了一种自抗扰非线性控制。其核心为扩张状态观测器,通过对不确定项和干扰项进行观测估计并实时跟踪,实现了对整体系统的干扰补偿。

自抗扰控制不依赖于系统模型,并且针对非线性系统有很强的鲁棒性,因此广泛地应用于位置伺服控制系统中<sup>[18-19]</sup>。文献[20]针对四旋翼无人机平动线速度不可测、内外部存在扰动等因素影响,引入一种同时具有鲁棒状态输出和平滑控制输入的扩张状态观测器。通过该扩张状态观测器实现了对四旋翼无人机轨迹的鲁棒控制。文献[21]提出了一种基于新型扩张观测器的导弹滑模制导律,通过新型扩张观测器实现了对该动态系统的扰动补偿,提高了该导弹系统的拦截性能。文献[22]在考虑直流电机存在的动态边端效应情况下,建立了基于定子电流、转子磁链的电机全阶状态观测器,并通过波波夫超稳定性理论实现了电机励磁电感的参数在线识别。文献[23]针对三阶非线性扩张状态观测器,利用系数冻结法对观测器的非线性系数进行修正,并通过极点配置的方法进行整体系统的频带拓展,以此来实现整体非线性系统的状态观测并对观测结果进行优化配置。文献[24]提出了一种利用二项式展开的方法来确定三阶非线性扩张状态观测器的观测系数,利用带宽补偿策略进行扩张观测精度的提升。总体来说,目前对非线性扩张观测器的设计主要适用于三阶及以下的控制系统。对三阶以上的高阶系统的非线性扩张状态观测器设计研究有限,有待于进一步深入研究。

本文针对舵机伺服控制系统的状态特性,引入了一个新的状态量来表示干扰项和外部参数摄动不确定项。将原有的三阶伺服系统位置状态控制方程扩充为一个四阶状态方程。针对新的四阶状态方程设计出一个高阶非线性扩张状态观测器(High-order Nonlinear Extended State Observer, HNLESO)。采用类多项式的带宽补偿策略来实现对相应的非线性扩张状态观测器的参数识别。通过设计变结构滑模控制器对所设计的高阶非线性扩张状态观测器的状态变量进行观测控制,并对整体位置伺服系统进行不同控制策略下的仿真分析。结果显示,相比于传统的PID控制器,所设计的高阶非线性扩张状态观测器具有更高的追踪精度和更好的稳态及动态性能。

## 2 控制原理与系统模型

### 2.1 燃气舵伺服控制系统原理

燃气舵伺服控制系统的工作原理如图1所示,图中 $\theta_p$ 表示预设目标角度值, $\theta_a$ 表示舵片偏转实际角度值。当系统给定一定角度指令时,控制器接收通过角度传感器反馈回来的 $\theta_a$ 和 $\theta_p$ ,控制器根据预设角度

值和实际角度值并结合控制算法使无刷舵机输出相应的角度,并通过传动机构输出相应的舵片偏转角度。从而控制燃气舵系统产生相应的侧向控制力。

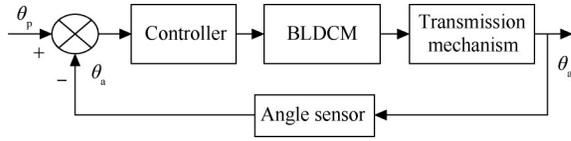


Fig. 1 Gas rudder servo control system

### 2.2 舵机数学模型

舵机采用无刷直流电机作为其控制对象,假定无刷直流电机采用三相星形绕组连接方式,并且三相绕组夹角呈120°均匀分布。不考虑绕组间互感以及线圈绕组内部的电感影响。除此之外,忽略涡流和磁滞损耗。根据基尔霍夫电压定律可知无刷直流电机的矩阵形式电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $u_1 \sim u_3$  分别表示三相绕组相电压,  $r$  为相电阻,  $i_1 \sim i_3$  分别表示三相绕组相电流,  $L_1$  为每相绕组自感,  $e_1 \sim e_3$  为三相绕组瞬时反电动势。

根据文献[25],上述平衡方程可以简化为

$$\begin{cases} u = L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot R + E \\ E = K_e \cdot \omega \end{cases} \quad (2)$$

式中  $u$  表示电机端电压,  $i$  表示相电流,  $R$  为相电阻且  $R=2r$ ,  $L$  为相电感且  $L=2L_1$ ,  $E$  表示反向电动势,  $K_e$  为反电动势系数,  $\omega$  为电机角速度。

电机转矩平衡方程为

$$\begin{cases} J_m \cdot \frac{d\omega}{dt} = T - T_1 - C_f \cdot \omega \\ T = k_t \cdot i \end{cases} \quad (3)$$

式中  $T$  为电机电磁转矩,  $T_1$  为负载转矩,  $J_m$  为电机电子转动惯量,  $k_t$  为电磁转矩系数,  $C_f$  为摩擦阻尼系数。

结合式(1)~(3)可以得到电机输出角度和输入电压间的关系为

$$u = \frac{J_m \cdot L}{k_t} \cdot \frac{d^3\theta}{dt^3} + \left( \frac{C_f \cdot L}{k_t} + \frac{J_m \cdot R}{k_t} \right) \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left( \frac{C_f \cdot R}{k_t} + K_e \right) \frac{d\theta}{dt} + \left( \frac{L}{k_t} \cdot \frac{dT_1}{dt} + \frac{R}{k_t} \cdot T_1 \right) \quad (4)$$

传动机构选用齿轮传动,因此电机输出角度和舵片偏转角度的关系为

$$\frac{\theta_a}{\theta} = M \quad (5)$$

式中  $M$  表示齿轮传动传动比。

结合式(4)和式(5)可知舵片偏转角度和输入电压间的关系为

$$u = \frac{J_m \cdot L}{k_t \cdot M} \cdot \frac{d^3\theta}{dt^3} + \left( \frac{C_f \cdot L}{k_t \cdot M} + \frac{J_m \cdot R}{k_t \cdot M} \right) \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left( \frac{C_f \cdot R}{k_t \cdot M} + \frac{K_e}{M} \right) \cdot \frac{d\theta}{dt} + \left( \frac{L}{k_t} \cdot \frac{dT_1}{dt} + \frac{R}{k_t} \cdot T_1 \right) \quad (6)$$

设电机输出角度  $\theta$  为状态变量  $x_1$ , 角速度  $\omega = \dot{\theta}$  为状态变量  $x_2$ , 角加速度  $\alpha = \ddot{\theta}$  为状态变量  $x_3$ , 可得电机控制系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = a \cdot x_3 + b \cdot x_2 + c \cdot u + f(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{式中 } a = -\left( \frac{C_f \cdot L + J_m \cdot R}{J_m \cdot L} \right), b = -\left( \frac{C_f \cdot R + K_e \cdot k_t}{J_m \cdot L} \right),$$

$$c = \frac{k_t}{J_m \cdot L}, f(t) \text{ 为系统的外界扰动且 } f(t) = -\left( \frac{1}{J_m} \cdot \frac{dT_1}{dt} + \frac{R}{J_m \cdot L} \cdot T_1 \right)。$$

### 3 控制器设计与仿真结果分析

#### 3.1 四阶非线性扩张观测器设计

因为系统存在外界干扰项和参数摄动项,因此需要通过观测器对该变换项进行估计。设定扩展状态  $x_4$ , 并对扩展状态做如下定义

$$\begin{cases} \dot{x}_4 = a \cdot x_3 + b \cdot x_2 + f(t) + \Delta c \cdot u \\ \dot{x}_4 = f \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\Delta c = c - c_0$ ,  $c_0$  为  $c$  的估测值,  $f$  为系统带宽值。则原系统的状态方程改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 + c_0 \cdot u \\ \dot{x}_4 = f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

针对式(9)设计如下非线性扩张状态观测器

$$\begin{cases} d = y - \hat{x}_1 \\ \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \beta_1 \cdot d \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + \beta_2 \cdot \text{fal}(d, \gamma_1, \delta) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \hat{x}_4 + \beta_3 \cdot \text{fal}(d, \gamma_2, \delta) + c_0 \cdot u \\ \dot{\hat{x}}_4 = \beta_4 \cdot \text{fal}(d, \gamma_3, \delta) \end{cases} \quad (10)$$

式中  $\hat{x}_i$  为状态量  $x_i$  的观测值,  $\beta_1 \sim \beta_4$  为非线性扩张状态观测器增益系数,  $\text{fal}(\cdot)$  函数为非线性连续幂次函数, 其定义为

$$\text{fal}(d, \gamma_i, \delta) = \begin{cases} \frac{d}{\delta^{1-\gamma_i}} & |d| \leq \delta \\ |d|^{\gamma_i} \cdot \text{sign}(d) & |d| > \delta \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\delta$  为线性段长度且取值范围为  $\delta > 0$ ,  $\gamma$  为非线性幂次系数且  $0 < \gamma < 1$ 。通过分析上式可以看出, 该非线性函数在误差较小的时候具有较大的函数值输出, 在误差较大的时候输出较小的函数值。

通过对上述非线性扩张状态观测器进行分析可知, 增益系数  $\beta_i$  的取值影响着整体的观测器精度。当增益系数的取值在合适范围内时, 适当的  $\text{fal}(\cdot)$  函数可以使得观测器的观测状态趋近于实际状态。即误差收敛到  $|\hat{x}_i - x_i| \leq g_i$ , 其中  $g_i$  为一个数值很小的正数。文献[24]指出, 增益系数  $\beta_i$  可以通过基于带宽  $f$  的多项式展开形式  $(s+f)^n$  来确定。通过调节观测器的适当带宽可以使得系统整体有较好的稳态性能。

### 3.2 滑模控制器设计

针对式(9)系统设计如下滑模切换函数

$$\begin{cases} s = n_1 \cdot h + n_2 \cdot \dot{h} + \ddot{h} \\ h = y - \theta_{1d} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\theta_{1d}$  为目标角度值,  $n_1, n_2$  满足 Hurwitzian 多项式条件且  $n_1 > 0, n_2 > 0$ 。

滑模函数到达条件为

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0 \leq \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} \quad (13)$$

则基于上述四阶非线性扩张状态观测器的滑模控制器可以设计为

$$\begin{cases} u = \frac{1}{c_0} \cdot (-n_g \cdot \hat{s} - \hat{Z} - \hat{Q} - \hat{T}) \\ \hat{Z} = n_1 \cdot \dot{\hat{h}} - \ddot{\theta}_{1d} \\ \hat{Q} = n_2 \cdot \ddot{\hat{h}} \\ \hat{T} = \hat{x}_4 \\ \hat{s} = n_1 \cdot \hat{h} + n_2 \cdot \dot{\hat{h}} + \ddot{\hat{h}} \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\hat{Z}, \hat{Q}, \hat{T}, \hat{s}$  表示上述各个变量的观测状态。

### 3.3 滑模控制器收敛性分析

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

对上式进行求导变换得

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(n_1 \cdot \dot{\hat{h}} + n_2 \cdot \ddot{\hat{h}} + \ddot{\hat{h}}) \quad (16)$$

定义实际状态如下

$$\begin{cases} Z = n_1 \cdot \dot{h} \\ Q = n_2 \cdot \ddot{h} \\ T = x_4 \end{cases} \quad (17)$$

令  $\tilde{Z} = Z - \hat{Z}, \tilde{Q} = Q - \hat{Q}, \tilde{T} = T - \hat{T}, \tilde{s} = s - \hat{s}$  带入上述公式得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(\tilde{Z} + \tilde{Q} + \tilde{T} - n_g \cdot \hat{s}) = \\ &= -n_g \cdot s^2 + s(\tilde{Z} + \tilde{Q} + \tilde{T} + k_g \cdot \tilde{s}) \end{aligned} \quad (18)$$

上式后一项为各个观测状态误差, 取  $\Delta \max \geq |\tilde{Z} + \tilde{Q} + \tilde{T} + n_g \cdot \tilde{s}|$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -n_g \cdot s^2 + \frac{1}{2} \cdot (s^2 + \Delta \max^2) = \\ &= -(2 \cdot n_g - 1)V + \frac{1}{2} \cdot \Delta \max^2 \end{aligned} \quad (19)$$

令  $\eta = 2 \cdot n_g - 1, \varphi = \frac{1}{2} \Delta \max^2$ 。则上述方程的解为

$$\begin{aligned} V(t) &\leq e^{-\eta(t-t_0)} V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\eta(t-\tau)} \varphi(\tau) d\tau = \\ &= e^{-(2n_g-1)(t-t_0)} V(t_0) - \frac{1}{2(2n_g-1)} \Delta \max^2 (1 - e^{-\eta(t-t_0)}) \end{aligned} \quad (20)$$

通过式(20)可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) \leq \frac{1}{2(2n_g-1)} \Delta \max^2 \quad (21)$$

当  $n_g$  足够大时可以保证  $\dot{V}(t) \leq 0$ , 当  $\beta$  取值合适时所设计的非线性扩张状态观测器可以将观测状态收敛至实际状态。因此整体 Lyapunov 函数是稳定的。

### 3.4 仿真参数设计

将上述设计的非线性扩张状态观测器和滑模控制器相结合, 搭建得到整体高阶非线性扩张状态观测器控制系统如图2所示。图中  $w$  表示控制律输出。

为验证所设计的高阶非线性扩张状态观测器的稳定性和动态响应特性, 采用电机分别进行传统PID控制器与所设计的高阶非线性扩张状态控制器下性能仿真分析。仿真所用直流无刷电机参数如表1所示。上述非线性扩张状态观测器的仿真参数设计为  $\beta_1=920, \beta_2=3.174 \times 10^5, \beta_3=4.8668 \times 10^7, \beta_4=2.79841 \times 10^9, \gamma_1=0.94, \gamma_2=0.505, \gamma_3=0.3905, \delta=0.01, k_1=7400, k_2=203, k_g=1200, c_0=1.293 \times 10^6$ 。

### 3.5 跟踪性能分析

针对上述设计的高阶非线性扩张状态观测器, 给定一组舵角在  $\pm 10^\circ$  内变化的正弦跟踪曲线, 见图3。采用所设计的高阶非线性扩张状态观测器进行跟踪性能仿真, 并与传统PID控制器下的跟踪性能进

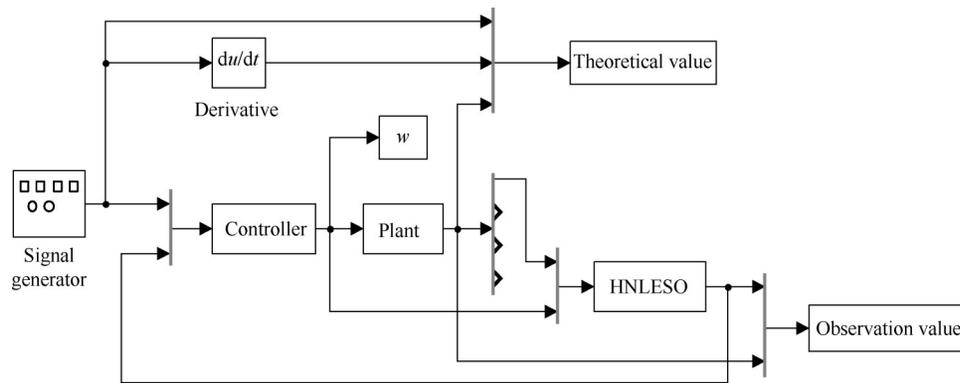


Fig. 2 High-order nonlinear extended state observer system

Table 1 Simulating motor parameters

Parameters	Value
Phase inductance/H	$8 \times 10^{-3}$
Phase resistance/ $\Omega$	6
Torque coefficient/( $N \cdot m/A$ )	0.06
Rotor inertia/( $kg \cdot m^2$ )	$5.8 \times 10^{-6}$
Back electromotive force constant/( $V/(rad/s)$ )	$6.6 \times 10^{-4}$
Friction damping coefficient/( $N \cdot m/(rad/s)$ )	$6.6 \times 10^{-6}$

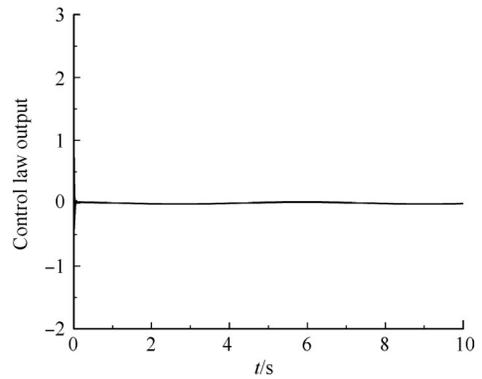
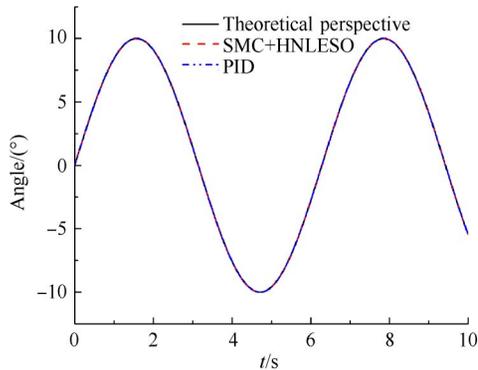
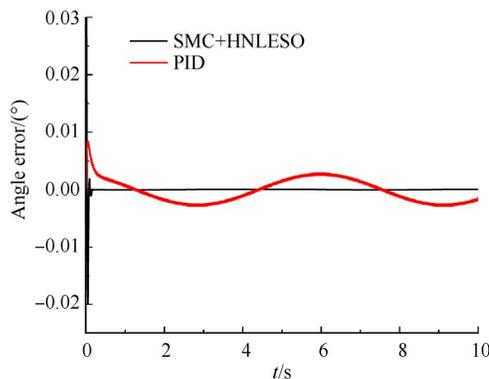


Fig. 4 Control law output



(a) Tracking curve



(b) Tracking error

Fig. 3 Sinusoidal position tracking

行对比。通过对跟踪性能效果图分析,可以看出所设计的高阶非线性扩张状态观测器相比于传统的PID控制器具有更好的跟踪效果,误差精度比传统的

PID控制器更高。通过对图4的控制律输出可以看出,所设计的高阶非线性扩张状态观测器系统稳定且无大幅度的抖振产生。

针对所设计的高阶非线性扩张状态观测器进行抗干扰性能分析。当系统稳定后外加扰动变化,通过对扰动情况下的跟踪曲线进行分析,验证所设计的高阶非线性扩张状态观测器的稳定性。通过图5可以看出所设计的高阶非线性扩张状态观测器的抗扰动性能优于传统的PID控制器。

### 3.6 响应性能分析

针对所设计的高阶非线性扩张状态观测器,采用一组舵偏角从 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的阶跃曲线进行响应性能分析,并与传统的PID控制器进行对比。通过对图6进行分析可以看出,相比于传统的PID控制器,所设计的高阶非线性扩张状态观测器具有更快的响应时间且无超调量的产生。响应时间相比于传统PID控制器提升了约0.7s。

为了验证所设计的高阶非线性扩张状态观测器的鲁棒性,在系统达到稳定状态后引入一组方波阶跃干扰来验证其性能响应。通过分析图7可以看出,所设计的非线性扩张状态观测器具有更好的抗干扰能力且响应特性要优于传统的PID控制器。

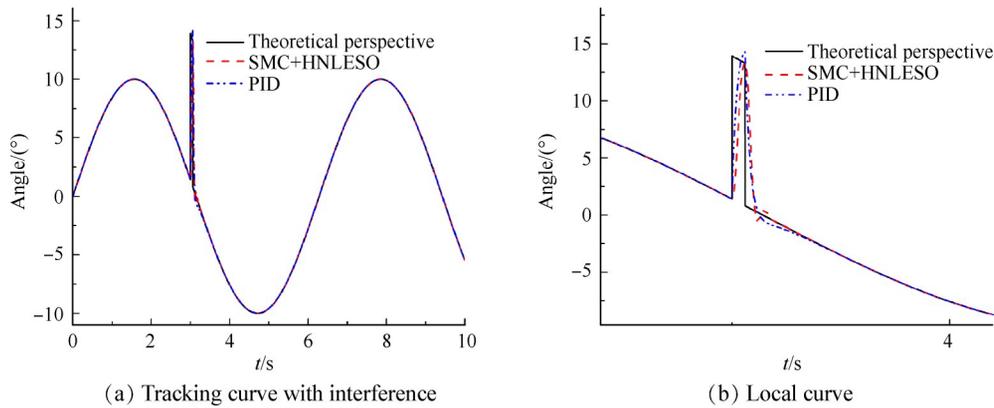


Fig. 5 Sinusoidal band interference position tracking

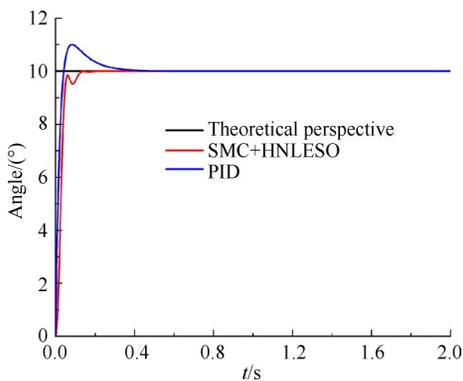


Fig. 6 Step curve tracking

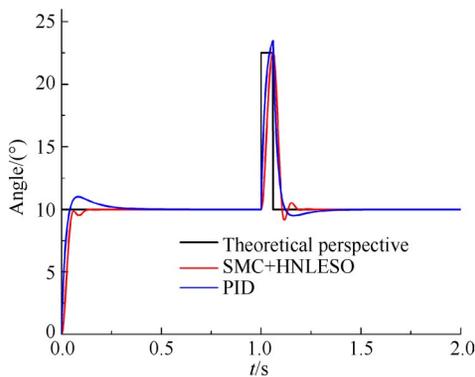


Fig. 7 Step curve with disturbance

## 4 结论

本文针对弹体固体火箭发动机上的燃气舵舵机位置伺服系统进行研究。设计了基于该控制系统的高阶非线性扩张状态观测器并对整体舵机伺服控制系统进行仿真实验,得到以下结论:

(1) 针对参数不确定项和摄动项所设计的非线性扩张状态观测器可以有效地实现舵机伺服控制系统的非线性跟踪控制,很好地解决系统的数学模型构建问题。

(2) 采用带宽补偿策略可以很好地对高阶非线

性扩张观测器的增益函数进行系数整定,从而很好地调节整体系统的性能。

(3) 基于高阶非线性扩张状态观测器的控制方法相比于传统的PID控制策略,不论是在跟踪精度上还是动态响应上均有更好的性能体现。相比于传统的PID控制器,高阶非线性扩张状态观测器响应时间在0.1s以内,提升了约0.7s,且没有位置超调量的产生。而且该控制器相比于传统PID控制器具有更好的鲁棒性和抗干扰性。因此可以很好地实现舵机位置伺服系统高精度控制。

致谢:感谢国家自然科学基金、江苏省自然科学基金的资助。

## 参考文献

- [1] 翟华,谷志军,刘娟,等. 助推滑翔飞行器复合控制系统线性化小偏差运动方程推导与控制系统设计[J]. 国防科技大学学报, 2009, (3): 37-42.
- [2] 王晓明,刘辉,韩龙柱,等. 激波诱导推力矢量喷管不同气体喷注时的性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(11): 24-29.
- [3] 林泳辰,徐惊雷,韩杰星,等. 气动推力矢量无舵面飞翼的飞行实验[J]. 航空动力学报, 2019, (3): 701-707.
- [4] 卜庆伟. 基于FNN-PID的制导火箭弹燃气舵舵机控制系统研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- [5] 房雷,莫展,杜长宝,等. 发动机燃气舵气动特性研究[J]. 航空兵器, 2013, (4): 34-36.
- [6] 薛海峰,陈雄,周长省. 碳/酚醛燃气舵热化学烧蚀过程数值研究[J]. 推进技术, 2016, 37(10): 1900-1908. (XUE Hai-feng, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng. Numerical Research of Thermochemical Ablation about Carbon-Phenolic Jet Vane in Solid Rocket Motors [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(10): 1900-1908.)
- [7] 孙得川,由旭. 发动机引流推力矢量方案数值研究

- [J]. 推进技术, 2016, 37(3): 436-442. (SUN De-chuan, YOU Xu. Numerical Research on Thrust Vector Control Scheme by Injection Bled from Motor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(3): 436-442.)
- [8] 方红伟, 夏长亮, 方攸同, 等. 无刷直流电动机二阶离散平滑滤波器位置伺服控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 65-70.
- [9] 夏长亮, 方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 25-35.
- [10] 夏长亮, 李志强, 王迎发. 无刷直流电机小脑模型网络与PID复合控制[J]. 电机与控制学报, 2008, (3): 254-259.
- [11] 赵希梅, 王晨光. 永磁同步电机的自适应增量滑模控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11).
- [12] 陈 强, 南余荣, 邢新科. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机混沌系统自适应滑模控制[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 113-120.
- [13] 金 月, 俞孟燕, 袁 伟, 等. 基于扩张观测器的船舶动力定位系统反演滑模变结构控制[J]. 舰船科学技术, 2017, (2): 103-107.
- [14] Feng Y, Yu X, Han F. High-Order Terminal Sliding-Mode Observer for Parameter Estimation of a Permanent-Magnet Synchronous Motor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(10): 4272-4280.
- [15] 姜仁华, 刘 闯, 宁银行, 等. 雷达伺服系统的高跟踪精度改进型自抗扰控制器[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 102-109.
- [16] 吴 真, 曹东海, 熊官送. 基于滑模变结构和扩张状态观测器的电动舵机复合控制方法[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(2): 50-55.
- [17] 杜佳璐, 杨 杨, 郭 晨, 等. 基于高增益扩张观测器的船舶动力定位系统的输出反馈控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(11).
- [18] 韩京清, 张 荣. 二阶扩张状态观测器的误差分析[J]. 系统科学与数学, 1999, (4): 465-471.
- [19] 孙佃升, 章跃进. 线性扩张状态观测器的改进及观测精度分析[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6).
- [20] 张居乾, 师玉茹, 任朝晖, 等. 基于扩张观测器的四旋翼无人机轨迹鲁棒滑模控制[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(2): 113-120.
- [21] 冯 丹, 任宏滨, 王华吉, 等. 基于新型扩张观测器的导弹滑模制导律[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(3).
- [22] 王惠民, 张 颖, 葛兴来. 基于全阶状态观测器的直线牵引电机励磁电感在线参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, (20): 275-282.
- [23] 陈松林, 赵海香. 三阶扩张状态观测器的优化参数配置方法[J]. 控制与决策, 2014, (10): 1851-1855.
- [24] Zheng Q, Chen Z, Gao Z. A Practical Approach to Disturbance Decoupling Control [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9): 1016-1025.
- [25] 崔业兵. 制导火箭弹固定鸭式舵机滚转控制技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.

(编辑:朱立影)