

〈系统与设计〉

基于摩擦伺服跟踪模型的自抗扰控制策略研究

韩顺杰, 栗 华, 缙泽恩

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要: 针对摩擦非线性扰动和外部干扰影响光电稳定平台跟踪性能的问题, 提出了一种基于 Elastoplastic 摩擦模型的自抗扰控制方法。首先, 建立了基于 Elastoplastic 摩擦的伺服系统空间状态模型; 其次, 利用 Elastoplastic 模型前馈补偿系统中的摩擦非线性, 减小量测噪声对系统的影响, 并初步抑制摩擦力矩对系统的干扰, 然后, 基于该模型设计摩擦补偿与自抗扰控制相结合的复合控制器, 最后对带有摩擦的伺服系统进行了仿真实验, 仿真和实验结果表明, 该复合控制方案能够提高光电稳定平台的跟踪性能, 验证了所提出控制方法的有效性和鲁棒性。

关键词: Elastoplastic 摩擦模型; 自抗扰控制; 前馈补偿; 伺服控制; 参数识别

中图分类号: TM273

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2024)12-1418-07

Active Disturbance Rejection Control Strategy Based on a Friction Servo Tracking Model

HAN Shunjie, SU Hua, GOU Zeen

(School of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: A self-anti-disturbance control method based on an elastoplastic friction model is proposed to address the problem of frictional nonlinear and external disturbances that affect the tracking performance of an optoelectronic stabilized platform. First, a spatial state model of a servo system based on elastoplastic friction is established. Second, the proposed elastoplastic model is used to compensate for the friction nonlinearity in the system via a feedforward method while initially suppressing the disturbance of the friction torque on the system and reducing the influence of measurement noise on the system. Third, a composite controller combining friction compensation and self-anti-disturbance control is designed based on this model. Finally, simulation experiments are performed on a servo system with friction. The simulation and experimental results show that the composite control scheme can improve the tracking performance of the photoelectrically stabilized platform. Moreover, the results verify the effectiveness and robustness of the proposed control method.

Key words: elastoplastic friction model, active disturbance rejection control, feed-forward, servo control, parameter identification

0 引言

近年来, 光电稳定平台被广泛装备在各类飞机、舰船等载体上, 应用于军事侦察和民用领域^[1], 进行目标探测并获取稳定的图像, 随着对平台光电测量设备的探测距离以及对系统视轴稳定精度要求大大提高, 从而对与平台相关的伺服控制、图像处理等技术

有更严格的要求。非线性摩擦、框架耦合、系统模型的不确定性、载体振动和风阻力矩等扰动会导致平台视轴不稳定, 影响光电探测设备的成像质量, 甚至导致被跟踪目标物的丢失。此外, 非线性摩擦引起平台系统低速爬行, 导致系统运动不稳定, 并在系统高速运行时产生跟踪误差。因此, 控制策略和摩擦补偿被用来抑制非线性摩擦和外部干扰对光电稳定平台的

收稿日期: 2023-09-14; 修订日期: 2023-10-14.

作者简介: 韩顺杰 (1972-), 女, 吉林省白山人, 博士生导师, 主要从事电力装备故障诊断与智能运维、光电伺服跟踪、工业节能技术与装备方面的研究。E-mail: hansunjie@ccut.edu.cn.

影响,以提高视轴的稳定精度。

非线性摩擦是光电稳定平台运动状态发生变化时的一种主要扰动,建立摩擦模型来估计系统的非线性扰动并加以补偿^[2]是最有效的方法,大量学者提出了各种摩擦模型以及它们的摩擦补偿方法^[3],其中,C. Canudas de Wit 提出摩擦模型能够准确描述摩擦的动态和静态特性以及反应摩擦现象,利用接触表面间的刚毛微观形变量来描述动态摩擦,它可以比较准确地同时反应动静态补偿模型的特征^[4],在文献[5]中设计了一种自适应摩擦补偿的自适应反推控制器,用于解决系统中精度不足的问题。文献[6]中,2002年,P. Dupont 等人进行了一系列实验,得到了 LuGre 摩擦模型的优劣之后,对动态模型的摩擦行为进行了改进,首次提出 Elastoplastic 摩擦模型,因为 Elastoplastic 摩擦模型在低速运行时可以更好地补偿光电稳定平台的动摩擦扰动,又可以避免漂移现象,基于这个现象,Alexander Keck 等人在前馈补偿中使用该模型,进行动态和静态参数识别,通过参数辨识得到摩擦模型^[7],在扩张状态观测器中运用识别到的角速度误差,抑制非线性摩擦对系统的影响。

随着光电稳定平台的广泛应用,对平台性能的要求也越来越高。目前,为提高光电稳定平台的性能,在多个研究领域提出了各种控制方法,如 PID 控制、神经网络控制、自适应控制等。但在实际工程中由于光电稳定平台的非线性、耦合性能强和不确定性大等特点,难以得到推广应用,这时,韩京清教授提出了一种主动抗扰的控制理论,逐渐完善,得到了一种自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[8]非线性控制方法,它直接将系统内外的未知扰动视为总扰动,将总扰动展开为新的展开状态,通过系统的输入输出对其进行估计和补偿,从而抵消扰动,达到抗干扰的目的,它极大地推动了控制理论的发展。目前,自抗扰控制理论已经广泛应用于伺服控制系统、光电稳定平台以及各种控制领域^[9],如 ADRC 与神经网络、自适应控制和模糊控制的结合。文献[10]设计了一种基于自适应扰动频率的扩张状态观测器(extended state observer, ESO),以提高光电稳定平台的抗扰动能力。文献[11]提出了一种基于遗传算法参数整定的自抗扰控制器,以提高系统的抗干扰性能和稳定精度。采用位置环、速度环、电流环来提高永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)抗扰动的能力^[12],通过参数辨识得到光电稳定平台的系统模型,最后减少输入的跟踪误差。在上述控制策略中,摩擦扰动被视

为 ADRC 总扰动的一部分,没有根据实际摩擦特性对摩擦扰动进行分析和补偿。

本文对光电稳定平台伺服系统建模,并采用 Elastoplastic 摩擦模型对非线性摩擦建模和补偿,利用自抗扰控制器对扰动的观测和补偿特性,减小摩擦模型的补偿误差和其它扰动对系统的影响,提高系统跟踪精度,最后验证了该方法的优越性。

1 光电稳定平台伺服系统建模

光电稳定平台是实现地对空目标进行全景式、大范围跟踪与探测的高精度伺服系统。本文采用两轴四框架结构,可以分成两个部分,如图1所示,一部分为外框架,其中包括外方位框架 A,外俯仰框架 E;另一部分为内框架,包括内方位框架 a,内俯仰框架 e。平台外框架的主要功能是承载内框架和光电设备,为内框架提供完全密闭的环境。当光电稳定平台受到巨大外部扰动时,这些扰动会先经外框架的隔离作用再传至内框架,使得传递到内框架上的扰动作用大大减弱。内框架作为光电设备的载体,主要决定光电稳定平台的稳定精度。

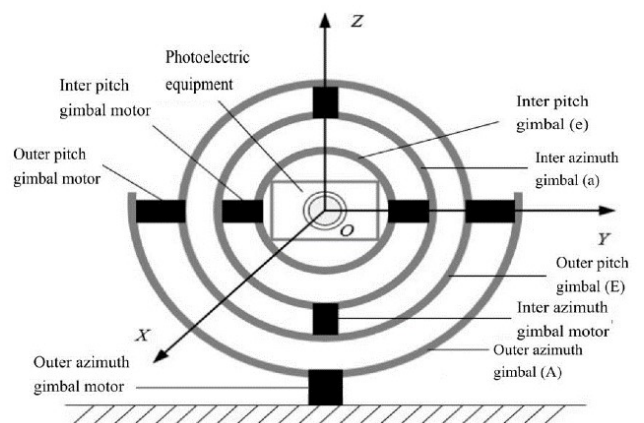


图1 两轴四框架光电稳定平台示意图

Fig.1 Diagram of a two-axis, four-frame photoelectric stabilized platform

光电跟踪稳定平台的主要目的是提高目标跟踪精度和保障视轴稳定。平台伺服控制系统采用电流环、速度环和位置环。如图2所示,电流环通过电流传感器组成控制回路,减小力矩电机的影响。速度环可以隔离载波速率扰动,是控制系统核心,位置反馈回路由位置环通过光电编码器数据组成,它是以脱靶量为控制量,对目标与视轴进行补偿,以满足动静态性能要求。使用三环控制避免各种扰动相互影响。

图2中, θ_m 为目标空间角; F_f 为摩擦力矩扰动; F_d 为除摩擦力矩之外的其他扰动。

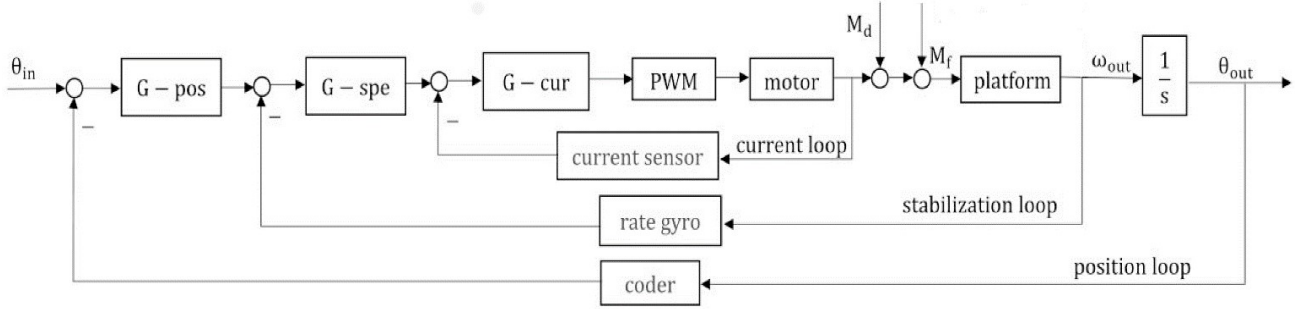


图2 平台伺服系统单轴视轴稳定回路控制结构

Fig.2 Platform servo system single-axis visual axis stabilization loop control structure diagram

2 电机控制

永磁同步电机控制系统是三闭环控制驱动器的重要组成部分,在伺服驱动器速度控制性能中起到至关重要的作用。本文对于PMSM的控制,采用“ $i_d=0$ ”控制策略使得电机的电磁转矩只与电机的电枢电流成正比,那么强耦合PMSM的模型就等价于一个简单的直流电机模型。使用具有圆柱形转子的PMSM,因此 d_q 轴下的电感被表示为 L ,并且电机定子电阻 R_s 被缩写为 R ,图3是PMSM的结构图。

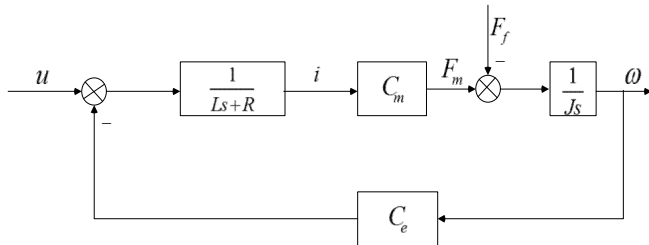


图3 PMSM 模型框图

Fig.3 PMSM model block diagram

在“ $i_d=0$ ”控制策略下,PMSM在 d_q 轴下的解耦状态方程简化为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C_e}{L} \\ \frac{C_m}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L} \\ -\frac{F_f}{J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i 是 q 轴上的绕组相电流的瞬时值; ω 描述PMSM转子的角速度; F_f 表示转矩扰动; J 包括PMSM转子和框架的转动惯量; n_p 和 ψ_f 描述磁极数和磁链,它们的乘积表示反电动势系数 $C_e=\psi_f n_p$,转矩系数 $C_m=3\psi_f n_p/2$ 。

图4为电流回路结构。作为永磁同步电机闭环控制系统中的一环,其特性对系统的动态响应性能有一定的影响。功率驱动中的逆变器等效为一阶惯性环节,一般取逆变器PWM周期的一半作为时间常数的值。

在电流环路的反馈通道和前向通道上有两个相同的一阶滤波器链路。根据电流环的设计要求,工程上一般采用PI调节器作为电流调节器。根据工程设计方法,速度环的截止频率一般比电流环的截止频率低一个数量级,因此将后者降为一阶。考虑电流环前向通道中一环节的比例因子,电流环闭环传递函数为:

$$G_{i(s)} = \frac{1}{k_j(2T_\Sigma s + 1)} \quad (2)$$

式中: k_j 表示该回路的反馈系数; T_Σ 是逆变器和电流环路之间链路的时间常数。

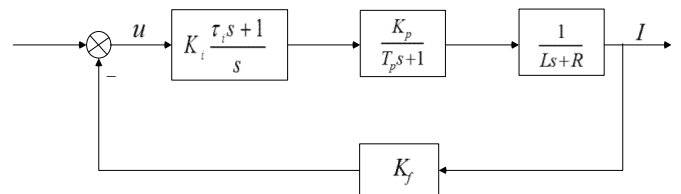


图4 电流环控制框图

Fig.4 Current loop control block diagram

在电流环中,电流控制器常采用PI控制器,传递函数为 $K_i \frac{\tau_i s + 1}{s}$,其中 K_i 为电流控制器的增益; τ_i 为积分时间常数; K_f 为电流反馈系数。

永磁同步电机的摩擦阻力,光电平台系统的微分方程表示为:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ J_n \ddot{\theta} = -B_n \dot{\theta} + C_1 u - T_1 - F_1 + d_e \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ 和 ω 表示角度和角速度; J_n 、 B_n 是标称模型参数; F_1 是摩擦扭矩。

3 非线性摩擦建模

3.1 Elastoplastic 模型

为了对光电稳定平台伺服转台系统进行非线性

摩擦扰动补偿,以提高跟踪精度,需要建立摩擦模型。
建立 Elastoplastic 摩擦模型公式如下:

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{y} \quad (4)$$

$$\dot{z} = \dot{y} \left[1 - \alpha(z, \dot{y}) \frac{z}{z_{ss}(\dot{y})} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_0 z_{ss}(\dot{y}) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(\frac{\dot{y}}{v_s})^2} \quad (6)$$

式中: z 表示刷毛的平均偏转; σ_0 为刷毛的刚度系数, 函数 $z_{ss}(\dot{y})$ 为正; σ_1 为阻尼系数; σ_2 为粘性摩擦系数; F_c 为库仑摩擦力矩; F_s 为静摩擦力矩; v_s 为斯特里贝克角速度。

模型中的参数定义如下:

$$\alpha(z, \dot{y}) = \begin{cases} 0, & |z| \leq z_{ba} \\ \alpha_m(z, z_{ss}(\dot{y})), & z_{ba} < |z| < z_{ss}(\dot{y}) \\ 1, & |z| \geq z_{ss}(\dot{y}) \\ 0, & \text{sgn}(\dot{y}) \neq \text{sgn}(z) \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha_m(z, z_{ss}(\dot{\theta})) = \frac{1}{2} \sin\left(\pi \frac{z - \frac{1}{2}(\dot{\theta}) + z_{ba}}{z_{ss}(\dot{\theta}) - z_{ba}}\right) + \frac{1}{2} \quad (8)$$

3.2 静态参数识别

将摩擦力矩与速度的一系列对应点绘制成一张散点图,从而确定了摩擦力矩与转速之间的稳态对应关系,即 Stribeck 曲线,之后根据相应的参数辨识方法获取 Elastoplastic 模型的参数值,采用遗传算法对 Elastoplastic 摩擦模型进行静态参数辨识,待辨识的参数向量有:

$$P_1 = [\hat{F}_s, \hat{F}_c, \hat{\omega}_s, \hat{\sigma}_2] \quad (9)$$

辨识误差定义为:

$$e(P_1, \omega_i) = F_{m_i} - F_{sf}(P_1, \omega_i) \quad (10)$$

式中: F_{m_i} 为测得的摩擦力; $F_{sf}(P_1, \omega_i)$ 为期望的摩擦力,由下式确定:

$$F_{sf}(P_1, \omega_i) = \left[\hat{F}_c + (\hat{F}_s - \hat{F}_c) e^{-(\frac{\omega_i}{\hat{\omega}_s})^2} \right] \text{sgn}(\omega_i) + \hat{\sigma}_2 \omega_i \quad (11)$$

目标函数定义为:

$$S_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e^2(P_1, \omega_i) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

静态参数 F_c 、 F_s 、 ω_s 和 σ_2 由极小化目标函数 S_1 确定。根据实验得到摩擦力矩与速度的散点图,再利用遗传算法拟合的 Stribeck 曲线如图 5 所示。

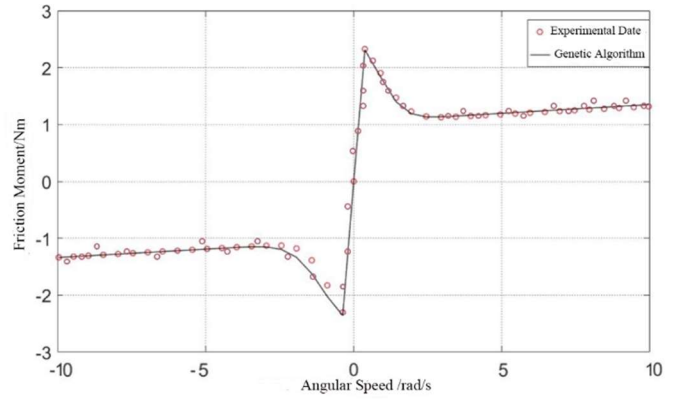


图5 遗传算法拟合结果

Fig.5 Genetic algorithm fitting results

3.3 动态参数计算

Elastoplastic 摩擦模型只能求出它的近似值,用近似计算求得,其中:

$$z_{ba} = 0.7169 z_{ss}, \quad \sigma_1 + \sigma_2 = 2\sqrt{\sigma_0 \cdot m} \quad (13)$$

当系统稳态时,有:

$$z_{ss}(\dot{y}) = \frac{F_c}{\sigma_0} \quad (14)$$

使用近似计算得 $\sigma_0 = 240 \text{ N/m}$, $\sigma_1 = 2.4 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

4 控制器的设计

自抗扰控制 (ADRC) 策略是韩京清教授提出的一种非线性控制理论。它直接将系统内部和外部未知扰动视为总和扰动,提高了系统的扰动隔离度,将总和扰动扩展为一种新的状态变量,通过系统的输入量和输出量对其进行估计和补偿,用以抵消扰动达到抗干扰的目的。

自抗扰控制器 (ADRC) 主要由跟踪微分器 (trace the differentiator, TD)、扩张状态观测器 (ESO), 以及非线性状态误差反馈 (nonlinear state error feedback, NLSEF) 等环节组成,其自抗扰控制器结构如图 6 所示。

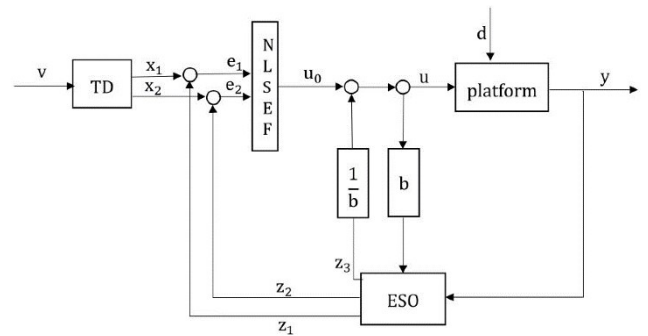


图6 自抗扰控制器结构示意图

Fig.6 Structure diagram of auto disturbance rejection controller
图中, x_1 、 x_2 是 TD 的输出, 分别表示输入信号 v

的跟踪信号和微分信号; z_1 、 z_2 、 z_3 分别是 x_1 、 x_2 和 x_3 的观测值; u 和 y 分别是被控对象的输入和输出; b 是系统增益; u_0 为控制量。

4.1 跟踪微分器

由实验对象, 二阶跟踪微分器可描述为:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h[-r^2(x_1(k) - v_0(k)) - 2rx_2(k)] \end{cases} \quad (15)$$

以原点为终点的快速最优控制综合函数为:

$$u(x_1, x_2) = -r \operatorname{sign}(x_1 + \frac{x_2 |x_2|}{2r}) \quad (16)$$

将最速跟踪微分器离散化, 得到:

$$\begin{cases} f = -r \operatorname{sign}[x_1(k) - v(k) + \frac{x_2(k) \cdot |x_2(k)|}{2r}] \\ x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hf \end{cases} \quad (17)$$

取其最速控制综合函数为 $u = f_{\text{han}}(x_1, x_2, r, h)$, 经变换得到离散化的跟踪微分函数:

$$\begin{cases} f_h = f_{\text{han}}[x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h] \\ x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hf_h \end{cases} \quad (18)$$

4.2 扩张状态观测器

扩张状态观测器为自抗扰的核心部分, 它是将影响控制对象输出的扰动看作总扰动, 再将其扩张成一个新的可观测的状态变量。

状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 - a_2 x_1 - a_1 x_2 + bu \\ \dot{x}_3 = f \end{cases} \quad (19)$$

式中: x_1 表示位置信息; x_2 表示运动速度, 把 f 作为一个新的被扩张状态变量加入到系统中, 即令 $x_3 = f$ 。根据被控对象的控制量和输出量, 扩张观测器可以对系统的位置、速度以及总扰动进行估计。其表达形式如下:

$$\begin{cases} e_1(k) = z_1(k) - y(k) \\ [z_1(k+1) - z_1(k)]/h = -\beta_1 e_1(k) + z_2(k) \\ [z_2(k+1) - z_2(k)]/h = -\beta_2 \operatorname{fal}(e_1, \alpha, \delta) + bu + z_3(k) \\ [z_3(k+1) - z_3(k)]/h = -\beta_3 \operatorname{fal}(e_1, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (20)$$

式中: β_1 、 β_2 、 β_3 是状态误差反馈增益。在三阶非线性状态观测器中, z_1 和 z_2 是被控对象状态变量的估计, 用于跟踪系统输出 y 及其导数 \dot{y} 。 z_3 是所有未建模干

扰和外部干扰的实时观测。且有:

$$\operatorname{fal}(e_1, \alpha, \delta) = |e_1| \begin{cases} \frac{e_1}{\delta^1 - \alpha} & |e_1| \leq \delta \\ |e_1|^\alpha \operatorname{sgn} e_1 & |e_1| > \delta \end{cases} \quad (21)$$

4.3 非线性误差反馈律

非线性误差反馈律用于拟合状态误差和补偿扰动, 其形式如下:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - z_1 \\ e_2 = x_2 - z_2 \\ I_0 = \eta_1 \operatorname{fal}(e_1, \frac{3}{4}, \delta_2) + \eta_2 \operatorname{fal}(e_2, \frac{5}{4}, \delta_2) \\ I_{\text{in}} = I_0 - \frac{Z_3}{b} \end{cases} \quad (22)$$

式中: η_1 和 η_2 是 NLSEF 的增益; δ_1 是控制器的可调参数。

5 仿真和实验结果

由于内框架对光电稳定平台的稳定精度起着主要作用, 本文以内俯仰框架为例, 用 MATLAB 对平台的内俯仰框架进行仿真, 验证方案的有效性。Elastoplastic 模型和平台系统的参数列于表 1 中。

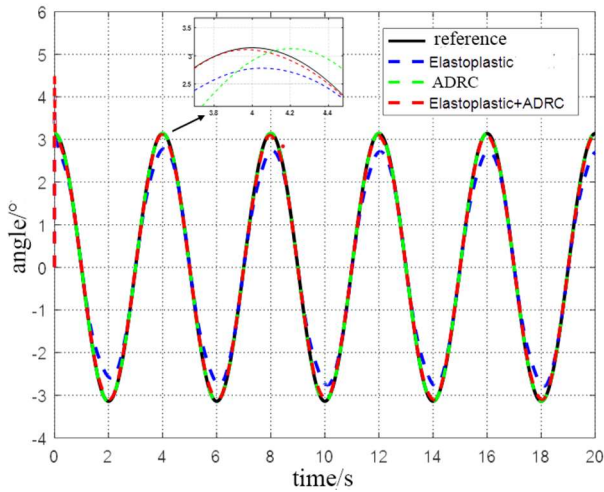
表 1 系统和摩擦模型参数

Table 1 System and friction model parameters	
Project parameters	Value
Nominal model moment of inertia /(kg·m ²)	$J_n=1.2$
Nominal model damping factor /(N·s·m ⁻¹)	$B_n=0.176$
Coulomb friction /(N·m)	$M_c=0.15$
Damping factor /(Nm·s/deg)	$\sigma_1=0.73$
Torque coefficient	$C_T=1.43 \times 10^{-2}$
Strybeck angular velocity /(deg/s)	$\omega_T=0.05$
Adaptive parameters	$R_1=15$

为了进一步研究带有 Elastoplastic 摩擦前馈补偿的自抗扰控制器对光电稳定平台控制性能的影响, 设计仿真对比实验, 与摩擦前馈补偿控制和传统自抗扰控制进行仿真实验对比。

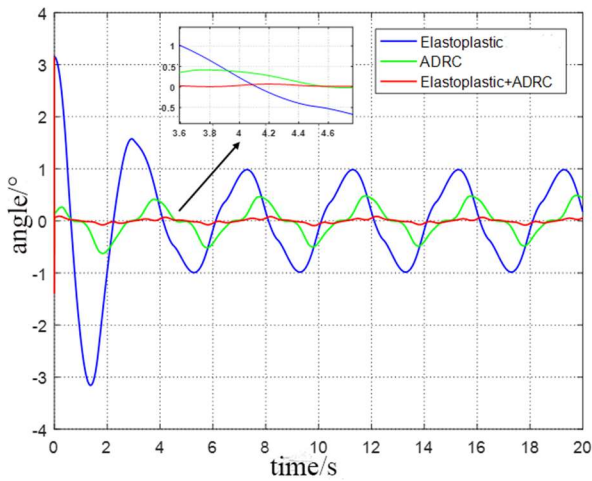
5.1 正弦轨迹跟踪实验

图 7(a)、7(b)分别表示角度跟踪曲线, 角度误差曲线, 该方案的角度误差最大值为 0.0622°, 误差的均方根约为 0.0165°。与自抗扰控制器相比, 误差均方根减少了 62.85%, 与 Elastoplastic 模型前馈补偿相比, 误差的均方根减少了 93.56%。结果表明, 采用 Elastoplastic 模型的自抗扰控制器具有较好的位置跟踪能力和抗干扰能力。



(a) 角度跟踪

(a) Angular tracking



(b) 角度误差

(b) Angular error

图7 正弦轨迹跟踪实验

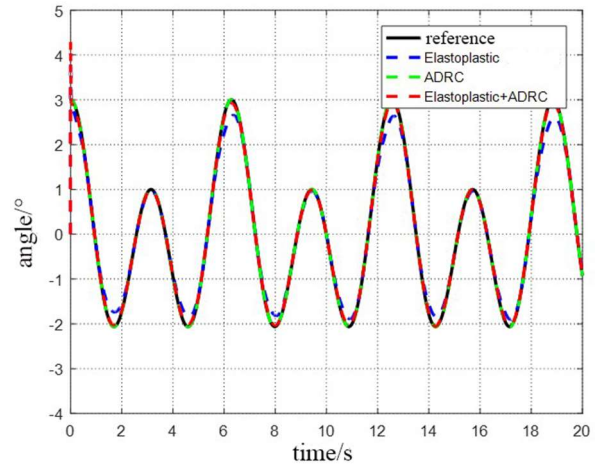
Fig.7 Sinusoidal trajectory tracking experiment

5.2 多正弦轨迹跟踪实验

输入信号 $\theta_n = \sin 0.5\pi t + 2\sin t + 4\pi$ 是期望输出的跟踪曲线, 将具有零均值和单位方差的随机信号作为外部干扰添加到系统中, 3种控制方法的仿真结果如图8所示, 图8(a)表示角度跟踪曲线, 8(b)表示多正弦角度误差曲线, 从中可以看出, 该方案的角度 θ 以较小的相位差跟踪给定的输入信号。

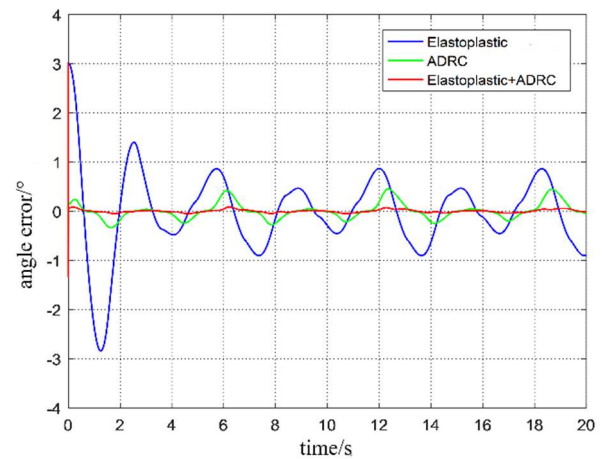
该方案的角度误差的峰值约为 0.0560° , 误差的均方根约为 0.0119° 。与自抗扰控制器相比, 误差的均方根减小了 80.40% , 与 Elastoplastic 摩擦模型前馈补偿相比, 误差的均方根减小了 86.58% 。结果表明, 采用 Elastoplastic 摩擦模型的自抗扰控制器具有较小的跟踪误差和较好的抗干扰效果。仿真实验表明, 在非线性摩擦和外部干扰的情况下, 本文提出的带 Elastoplastic 摩擦补偿的自抗扰控制器具有更好的抗

干扰性能和目标跟踪能力, 与传统的自抗扰控制器相比, 该控制方案可以实现高精度和稳定的控制。



(a) 多正弦角度跟踪

(a) Multi-sinusoidal angle tracking



(b) 多正弦角度误差

(b) Multi-sinusoidal angle error

图8 多正弦轨迹跟踪实验

Fig.8 Multi-sinusoidal trajectory tracking experiment

6 结论

为了提高光电稳定平台的抗扰动性能, 提出了一种基于 Elastoplastic 摩擦模型的光电稳定平台的自抗扰控制方法。针对伺服系统中常见的非线性摩擦扰动, 建立 Elastoplastic 摩擦模型, 可以更好地补偿光电稳定平台在低速区的摩擦扰动。利用自抗扰控制器对扰动的观测和补偿特性, 减小了摩擦模型的补偿误差和其它扰动对系统的影响, 证明了自抗扰控制系统的稳定性实验和仿真的结果表明, 不同的输入信号下, 将所提出的控制方案与传统的自抗扰控制器和 Elastoplastic 模型前馈补偿进行了比较, 本文提出的控制策略可以很好地提高光电稳定平台的跟踪性能, 降

低多源扰动对系统的影响。

参考文献:

- [1] 孔德杰. 机械光电平台扰动转矩抑制与改善[D]. 长春: 中科院长春光机所, 2013.
- KONG Dejie. Disturbance Torque Suppression and Improvement of Mechanical Optoelectronic Platforms [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [2] 王正玺, 张葆, 李贤涛, 等. 航空光电稳定平台高性能摩擦力补偿方案[J]. 航空学报, 2017, **38**(12): 277-284.
- WANG Zhengxi, ZHANG Bao, LI Xiantao, et al. Friction compensation strategy of high performance for aerial photoelectrical stabilized platform[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, **38**(12): 277-284.
- [3] CHEN P, LIU X, YAN Q. Adaptive friction compensation for a class of mechanical systems based on LuGre model[J]. *Int. J. Robust. Nonlinear Control*, 2022, **32**: 4510-4534.
- [4] Canudas de Wit, H Olsson, K J Astrom, et al. A new model for control of systems with friction[J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1995, **40**(3): 419-425.
- [5] YAO J, DENG W, JIAO Z. Adaptive control of hydraulic actuators with LuGre model-based friction compensation[J]. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2015, **62**: 6469-6477.
- [6] Dupont P, Hayward V, Armstrong B, et al. Single state elastoplastic friction models[J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2002, **47**(5): 787-792.
- [7] 吴旭, 张倩, 王群京, 等. 基于摩擦补偿的伺服转台自抗扰控制策略研究[J]. 微电机, 2021, **54**(5): 62-66, 85.
- WU Xu, ZHANG Qian, WANG Qunjing, et al. Research on active disturbance rejection control strategy of servo turntable based on friction compensation [J]. *Micromotor*, 2021, **54**(5): 62-66, 85.
- [8] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(3): 900-906.
- [9] WANG L, LIU X, WANG C. Disturbance frequency adaptive control for photo-electric stabilized platform based on improving extended state observation[J]. *Optik*, 2019, **187**: 198-204.
- [10] 周涛, 朱景成. 机载光电跟踪平台伺服系统自抗扰控制[J]. 光电工程, 2011, **38**(4): 31.
- ZHOU Tao, ZHU Jingcheng. Active disturbance rejection control of servo system of airborne photoelectric tracking platform[J]. *Optoelectronics*, 2011, **38**(4): 31.
- [11] 刘志刚, 李世华. 基于永磁同步电机模型辨识与补偿的自抗扰控制器[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(24): 118.
- LIU Zhigang, LI Shihua. Automatic disturbance rejection controller based on permanent magnet synchronous motor model identification and compensation[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2008, **28**(24): 118.
- [12] 郭磊磊, 朱林强, 曹玲芝, 等. 基于扰动观测器的永磁同步风力发电机无速度传感器控制[J]. 电气传动, 2022, **52**(23): 3-10.
- GUO Leilei, ZHU Linqiang, CAO Lingzhi, et al. Speed sensorless control of permanent magnet synchronous wind turbines based on disturbance observer [J]. *Electrical Transmission*, 2022, **52**(23): 3-10.