

## 基于自抗扰控制的光电平台视轴稳定技术研究

方宇超<sup>1</sup>, 李梦雪<sup>2</sup>, 车 英<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 长春汽车工业高等专科学校 汽车运用学院, 吉林 长春 130013)

**摘要:** 针对影响光电平台控制精度的载体速度扰动以及测量噪声等因素, 设计了扰动自抗扰以及滤波控制的两部分控制策略。首先, 通过分析光电平台伺服系统速度稳定环的数学模型中扰动作用原理, 等效各个扰动作用并提出扰动总和思想, 设计了基于降阶扩张状态观测器的自抗扰控制器。其次, 利用卡尔曼滤波器对系统中测量噪声进行了滤波处理, 降低了扩张状态观测器的估计误差。最后, 详细地进行了传统 PI 控制系统与文中设计的卡尔曼自抗扰控制系统的对比实验。实验结果表明, 在设计带宽相同的情况下, 卡尔曼自抗扰控制系统相比 PI 控制系统的阶跃响应稳定时间减小 32.53%, 超调幅值减小 72.73%; 当使用摇摆台引入幅值为 1° 频率、在 2.5 Hz 以内的正弦扰动时, 卡尔曼自抗扰控制系统较 PI 控制系统的扰动隔离度提升了 54.67% 以上; 在系统模型参数改变 ±15% 范围内, 卡尔曼自抗扰控制系统仍具有优异的扰动隔离性能, 表现出较强鲁棒性, 满足光电平台视轴稳定的性能要求, 对提升视轴稳定精度有较高实用价值。

**关键词:** 光电平台; 降阶扩张状态观测器; 卡尔曼滤波; 扰动隔离度

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0317005

## Study on ADRC based boresight stabilized technology of photoelectric platform

Fang Yuchao<sup>1</sup>, Li Mengxue<sup>2</sup>, Che Ying<sup>1</sup>

(1. College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022 China;  
2. College of Automobile Application, Changchun Automobile Industry Institute, Changchun 130013, China)

**Abstract:** According to the factors of velocity disturbance of the carrier and measurement noise that affected control accuracy of the photoelectric platform, two control strategies of active disturbance rejection control (ADRC) and filtering control were designed. Firstly, the law of disturbance in the mathematical model of velocity stabilized loop of servo control system for the photoelectric platform was analyzed, the disturbances equivalent was made and the notion of general disturbances was proposed, and then the ADRC controller based on reduced-order extended state observer (ESO) was designed. Furthermore, Kalman filter was used to process the measurement noise in the system, thus the error of

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61405191)

作者简介: 方宇超(1989-), 男, 博士生, 主要从事光电平台伺服系统控制方面的研究。Email: hansasnow@163.com

导师简介: 车英(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事精密测控技术与仪器方面的研究。Email: cheying@cust.edu.cn

通讯作者: 李梦雪(1989-), 女, 助教, 本科, 主要从事汽车发动机技术方面的研究。Email: lmx3519@sina.com

estimation of the ESO was reduced. Finally, was conducted thoroughly the contrast tests between the traditional PI control system with the Kalman-ADRC control system designed in this paper. The experimental results demonstrate that, with the same designed bandwidth, the stabilization time of step response of the Kalman-ADRC control system is reduced by 32.53% and the overshoot amplitude is reduced by 72.73% compared with the PI control system; when using swing table to introduce a sinusoidal disturbance with an amplitude of  $1^\circ$  and a frequency of less than 2.5 Hz, the disturbance isolation degree of the Kalman-ADRC control system gains an increase of 54.67% compared with the PI control system; when the parameters of the system model varied within the range of  $\pm 15\%$ , the Kalman-ADRC control system still has an excellent performance in disturbance isolation degree, presenting strong robustness. It is thus concluded that the Kalman-ADRC control system can meet the boresight stabilized performance requirements of the photoelectric platform, and has great practical value in improving the accuracy of boresight stabilization.

**Key words:** photoelectric platform; reduced-order ESO; Kalman filtering; disturbance isolation

## 0 引言

光电稳定平台能够快速捕捉并跟踪移动目标,已广泛应用于侦察测量、搜索和营救等领域。由光电平台中的传感器测量出移动目标和视轴存在的距离误差,即脱靶量,然后将脱靶量传送给伺服系统,由伺服系统计算出相应的控制量控制直流电机运动以抵消脱靶量,达到跟踪目标的目的。由于各个测量传感器以及光电载荷都安装在载荷舱内,载荷舱固定在光电稳定平台上,这样就要求光电平台对载体扰动与环境扰动具备一定的隔离度,在这些扰动作用的情况下,完成捕获和跟踪目标的任务<sup>[1]</sup>。有多种因素限制光电稳定平台控制精度的提高,包括载体的扰动、环境扰动、轴系间摩擦力扰动以及信号测量噪声等<sup>[2]</sup>。

随着自动控制技术的不断进步,人们对光电平台的性能的要求也日益增长,在传统PID控制策略的基础上,科研工作者们不断提出对PID控制技术的改进算法以提高光电平台伺服系统的控制性能。其中包括:基于遗传算法参数优化的模糊-PID控制算法<sup>[3]</sup>;基于RBF神经网络辨识的模型参考自适应控制算法<sup>[4]</sup>;利用BP神经网络的自学习能力来实现参数在线自整定和优化的PID控制器<sup>[5]</sup>;基于速度信号的DOB伺服控制系统<sup>[6]</sup>;基于自适应逆控制理论的稳定平台的自适应逆控制方案<sup>[7]</sup>;结合灰色预测控制与变结构控制理论而设计的一种灰色滑模变结构控制器<sup>[8]</sup>。上述改进的方法对于光电平台的控

制精度都有一定程度的提升。在实际应用中,由于上述控制器设计结构复杂,控制实时性不高,导致在系统中的使用效果受限,难以达到要求的性能。

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)策略是韩京清教授提出的一种非线性控制理论,现已发展为一种基于扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的新型实用型非线性控制技术。其特点是设计方法简单,不依赖于被控对象的数学模型,仅需要处理输入信号以及输出信号来提取扰动量,从而计算出系统中接收到的总扰动量,再将总扰动量的值取负前馈补偿于控制量,以“抵消”扰动的作用,达到抗扰的目的<sup>[9]</sup>。但在工程应用中发现,当设计的ESO阶数越高,所需的权重因子的参数值就越大,而过大的参数值直接导致超调量增大,甚至产生高频起振现象。同时高阶的观测器输出的观测值相比较真实值存在一定的相位滞后,这样就限制伺服系统的抗噪性能<sup>[10]</sup>。针对这一问题,文中通过对ESO作降阶处理,分析了传统ESO与降阶ESO的频谱特性,经对比发现,传统ESO较降阶ESO存在一定的相位滞后。文中将降阶ESO(Reduce-order ESO, RESO)应用于视轴稳定回路,以提升伺服控制系统的抗扰能力。在实际应用自抗扰控制器时,并没有设计滤波器对系统测量噪声以及状态扰动进行滤波,这也成为了限制ADRC控制器性能的原因之一。文中在对两轴两框架车载光电稳定平台伺服系统速度稳定回路提高扰动隔离度的实验中,在传统PI控制的基础上,引

入基于 RESO 的自抗扰控制器以提升视轴稳定控制系统的扰动隔离度;应用卡尔曼滤波器对系统的测量噪声进行滤波,使得 RESO 拥有较高观测精度以确保 ADRC 控制器发挥最大性能。

### 1 光电平台伺服系统描述及扰动分析

光电平台伺服控制系统的主要功能有两点:一是接收上位机或跟踪器发送的脱靶量并计算出相应的控制量,控制负载框架运动以跟踪移动目标;二是通过陀螺反馈构成视轴稳定闭环控制,隔离载体的扰动、环境扰动以及轴系间摩擦力扰动等各种速度干扰。这样,在隔离扰动稳定视轴的同时,完成了移动目标跟踪的任务。

#### 1.1 系统描述

光电稳定平台伺服系统包括控制方位轴和俯仰轴,其相互独立,并且根据目标在三维空间中的位置对其进行实时跟踪。为达到光电平台的高精度、快响应、强鲁棒性的技术指标,平台伺服控制系统采用包括电流环、速度环以及位置环构成的多闭环级联复合控制回路。其中,由速度陀螺、速度调节器、功率放大电路、直流电机以及负载构成速度闭环控制电路;光电编码器、跟踪器、位置控制器和速度环构成位置闭环控制电路。不难看出,由陀螺反馈构成的速度环是提高伺服系统的抗扰能力、提高光电平台控制精度的关键。平台单轴控制系统速度环的数学模型如图 1 所示。

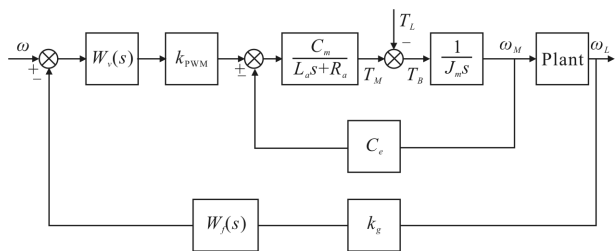


图 1 单轴速度稳定控制环数学模型

Fig.1 Mathematical model of single-axis velocity-stabilized control loop

图中,  $\omega$  为给定的速度信号,  $\omega_M$  为电机转速,  $\omega_L$  为负载的速度,  $T_L(s)$  为扰动力矩,  $W_v(s)$  为伺服控制器,  $W_f(s)$  为数字滤波器,  $k_{pwm}$  为功率放大系数,  $L_a$ 、 $R_a$  分别为电枢电感与电枢电阻,  $C_m$ 、 $C_e$ 、 $J_m$  分别为电机

的转矩系数、反电势系数以及转动惯量。

#### 1.2 扰动分析

影响光电稳定平台控制精度的因素包括轴系间摩擦力扰动、载体的扰动、输出信号测量噪声、环境扰动以及系统中未建模部分及状态的随机扰动等。在上述扰动中,载体对光电平台所带来的速度扰动最为主要。文中实验对象为两轴两框架结构的车载光电稳定平台,经电流环简化后<sup>[11]</sup>,速度稳定控制回路中的扰动作用如图 2 所示。

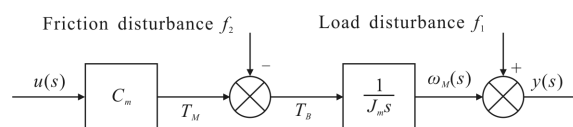


图 2 化简后的视轴速度稳定环

Fig.2 Simplified visual axis velocity-stabilized loop

图中,  $f_1$  为载体扰动,  $f_2$  为摩擦力扰动、线扰以及质量不均匀力矩扰动的总和,  $i_c$  为控制电流,  $\omega_M$  为电机输出角速度。则在电机稳定输出力矩作用下负载的运动方程为:

$$T_M = C_M i_c = f_2 + J_M \frac{d\omega_M}{dt} \tag{1}$$

将公式(1)做拉氏变换,得:

$$C_M i_c(s) = f_2(s) + J_M \omega_M(s) s \tag{2}$$

故:

$$\omega_M(s) = \frac{C_M}{J_M s} i_c(s) - \frac{1}{J_M s} f_2(s) \tag{3}$$

又:

$$\omega_M(s) = y(s) - f_1(s) = \frac{1}{J_M s} (C_M i_c(s) - f_2(s)) \tag{4}$$

则:

$$y(s) = \frac{C_M}{J_M s} \left[ i_c(s) + \left( \frac{J_M s}{C_M} f_1(s) - \frac{f_2(s)}{C_M} \right) \right] \tag{5}$$

将载体扰动力矩、摩擦力矩和质量不均匀力矩等各种扰动力矩等效为扰动  $d(s)$ , 令:

$$d(s) = \frac{J_M s}{C_M} f_1(s) - \frac{1}{C_M} f_2(s) \tag{6}$$

引入等效扰动后,根据公式(6)将公式(5)化简得到系统在干扰作用下的传递函数为:

$$y(s) = \frac{k}{s} [i_c(s) + d(s)], k = \frac{C_M}{J_M} \tag{7}$$

对于系统中的载体扰动、摩擦力扰动、线扰力矩以及质量不均匀力矩扰动等复杂扰动作用,很难对

其进行建模分析。如果可以通过公式(7)中的等效扰动  $d(s)$  复现出各种复杂扰动对系统的影响效果,就可以只针对隔离等效扰动  $d(s)$  的影响进行研究。这种等效扰动的方法也正迎合了自抗扰控制策略中提出的“总和扰动”的思想。

## 2 自抗扰控制器及其滤波器的设计

### 2.1 基于 RESO 的自抗扰控制设计

非线性机制可以取得高精度和高效率的反馈控制效果。但是由于需整定的参数过多,对理论分析和工程设计带来了极大困难。为了解决这个工程应用中的问题,将弃用非线性 ADRC,改用线性 ADRC 控制策略。这样在实际应用中不但达到了更好的控制精度,而且简化了 ADRC 控制器的结构同时也减少了需要调节的参数<sup>[12]</sup>。文中采用线性 ADRC 控制策略来提升光电平台视轴稳定系统的扰动隔离性能。

在不引入测量噪声的前提下,根据公式(7)对被控模型建立状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = bu(t) + d(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  为系统的状态;  $b$  为模型系数;  $u(t)$  为控制量;  $d(t)$  为等效扰动量。将  $d(t)$  作为扩张状态,建立扩张状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = bu(t) + x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = a(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $a(t)$  为集总扰动  $d(t)$  的导数。由公式(9)可知:若计算出  $x_3$ ,就实现了对扰动量的观测。在输出量  $y$  及其微分  $\dot{y}$  可以被观测或测量的情况下,对上述被扩张的二阶系统建立降阶扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e_1(t) = \hat{z}_1(t) - y(t) \\ \dot{\hat{z}}_1(t) = \hat{z}_2(t) + \beta_1 e_1(t) + bu(t) \\ \dot{\hat{z}}_2(t) = \beta_2 e_1(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $[\beta_1, \beta_2]$  为可调观测器增益;  $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$  为系统状态变量  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  的观测值。当非线性函数  $f_i(i=1, 2)$  满足条件  $e f_i(e_1) > 0, \forall e_1 \neq 0$ , 并且  $f_i(0) = 0$ , 则使得观

测器公式(10)的观测状态  $\hat{z}_1(t)$  逐渐收敛于真值。当函数  $f(e_1(t)) = e_1(t), i=1, 2$ , 时,观测器公式(10)变更为如下线性 ESO:

$$\begin{cases} e_1(t) = \hat{z}_1(t) - y(t) \\ \dot{\hat{z}}_1(t) = \hat{z}_2(t) + \beta_1 e_1(t) + bu(t) \\ \dot{\hat{z}}_2(t) = \beta_2 e_1(t) \end{cases} \quad (11)$$

观测器公式(11)的观测误差动态为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = e_2(t) - \beta_1 e_1(t) \\ \dot{e}_2(t) = a(t) - \beta_2 e_1(t) \end{cases} \quad (12)$$

基于带宽单参数化调节方法,使估计误差的动态特征多项式  $(s + \omega_0)^2 = s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2$  满足 Hurwitz 稳定条件,那么带宽  $\omega_0$  就为线性 ESO 需调节的单一参数<sup>[13]</sup>。

为了更清楚地解释传统 ESO 的基本原理,下面对速度环建立如下传统 ESO:

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = z_2(t) + \beta_1(x_1 - z_1) + (f_1(x_1) + b_1 x_2) \\ \dot{z}_2(t) = \beta_2(x_1 - z_1), \beta_1 > 0, \beta_2 > 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $z_1$ 、 $z_2$  分别表示速度环中测量输出量  $x_1$  与扰动量  $d_1$  的估计值。接下来对两种观测器的时域和频域响应进行分析。为此,扰动量  $d_1$  与降阶 ESO 和传统 ESO 对其估计量  $\hat{d}_1$  的传递函数分别由公式(14)和(15)所示:

$$\text{降阶 ESO } \frac{\hat{d}_1(s)}{d_1(s)} = \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \quad (14)$$

$$\text{传统 ESO } \frac{z_2(s)}{d_1(s)} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (15)$$

两观测器设计带宽相同,通过其传递函数,频域响应如图3所示。从图3可看出,RESO 在低频范围

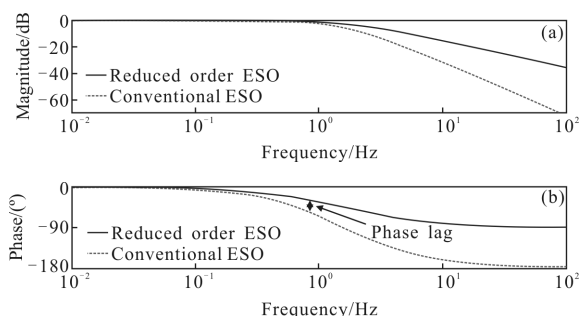


图3 不同观测器的频域响应

Fig.3 Frequency domain response for different observers

内减小了相位滞后,即通过 RESO 可获得更好的估计性能。峰值现象在微分电路或观测器中是一种常见的问题,由于提出的观测器的阶数已经降至一阶,故在 RESO 中可彻底消除初始相位中的峰值现象,此被视为现有线性观测器的一个特有优势。在图 3 中,对比传统 ESO,RESO 唯一的缺点是在高频范围内幅度衰减较小,即具有较弱的容噪能力。

为了确保受控对象通过 ESO 的扩张状态前馈补偿后的动态线性化,控制量  $u$  的最终形式为反馈控制量与前馈补偿量之和,如公式(16)所示:

$$u = i_{c0} - \frac{z_2}{b} \tag{16}$$

式中: $u$  为最终控制量; $i_{c0}$  为 PI 控制器的控制量; $b$  为控制器系统输入增益的估计。

### 2.2 卡尔曼滤波器的设计

由于传统卡尔曼滤波器的性能受模型精度以及初始值的影响,会出现不收敛的现象。广义卡尔曼滤波器算法是针对非线性模型提出的,其收敛速度不仅受模型精度影响,且计算量较传统卡尔曼滤波器更大。文中应用渐消卡尔曼滤波器对系统输出量进行滤波处理,即含有渐消因子的卡尔曼滤波算法。这样相比传统卡尔曼滤波器在计算量等同的条件下加快了滤波算法的收敛速度。渐消卡尔曼滤波器的框图如图 4 所示。

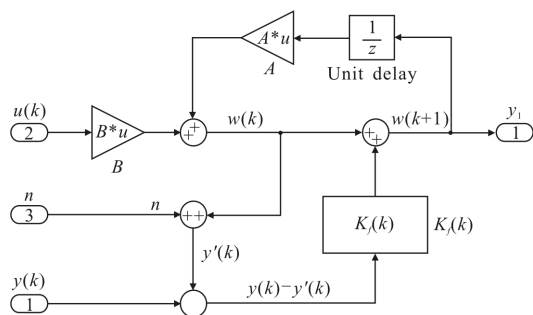


图 4 渐消卡尔曼滤波器框图  
Fig.4 Diagram of fading Kalman filter

图中, $u(k)$ 、 $y(k)$  分别为  $k$  时刻的控制信号和输出信号; $n$  为陀螺测量噪声的均值; $R$  为测量噪声方差; $\omega(k+1)$ 、 $\omega(k)$  分别为  $k+1$  与  $k$  时刻被控对象输出的状态预测量; $y(k)-y'(k)$  为被控对象输出量与预测输出量之间的误差; $K_f(k)$  为卡尔曼滤波增益。结合测量噪声方差  $R$  与状态预测方差  $P^*(k)$  设计的卡尔曼

滤波增益为  $K_f(k)$ :

$$K_f(k) = \frac{P^*(k)}{P^*(k) + R} \tag{17}$$

传统卡尔曼滤波器通过对被控对象输出状态预测值  $\omega(k)$  修正后得到系统状态的估计值  $\hat{\omega}(k)$ ,从而达到对输出量的滤波作用。为了不增加滤波算法计算量的同时提高算法的收敛速度,在计算状态预测方差  $P^*(k)$  时引入一渐消因子  $\lambda$ ,则有公式  $P^*(k+1) = \lambda \alpha^2 \hat{P}(k)$ ,使输出误差的自相关函数尽可能去极小值,从而提高算法的收敛速度。

## 3 性能对比实验及其结果分析

### 3.1 仿真实验

为了分析卡尔曼自抗扰控制器的扰动抑制性能,将其引入光电平台伺服系统速度稳定环进行 SIMULINK 环境下的仿真实验。仿真实验分为阶跃响应实验与控制系统抗扰实验两部分。单轴速度稳定环控制系统的控制结构如图 5 所示。

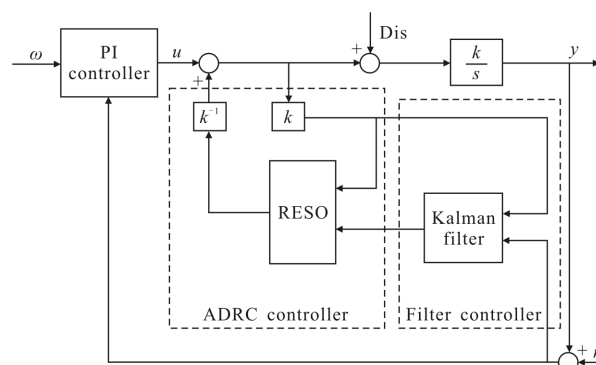


图 5 速度稳定环控制系统的控制结构图  
Fig.5 Diagram of control structure of velocity-stabilized loop control system

图中,虚线框分别为 ADRC 控制部分与卡尔曼滤波部分。 $\omega$  为输入信号, $u_0$  为 PI 控制器计算出的控制量, $u$  为经前馈补偿后的控制量, $y$  为系统输出量, $dis$  为外界速度扰动, $n$  为测量噪声。

在实际工程应用中,虽然带宽频率越大,控制系统的响应速度越快,但这样会使系统的稳定裕度降低,高频噪声干扰增大。合理的整定光电平台伺服系统速度环带宽应满足如下要求:

- (1) 能够有效抑制光电平台的低频扰动。
- (2) 控制系统需要对电子系统噪声有足够的动

态衰减。

光电平台的低频扰动范围通常为 0~5 Hz, 为了有效抑制低频扰动, 伺服系统速度环的带宽设计为扰动频率范围的 5 倍左右为宜; 电子系统的扰动频率范围通常为 50~5 000 Hz, 为了对其有足够的动态衰减, 伺服系统速度环带宽的设计应低于 50 Hz。综合上述分析以及 2.1 节对 RESO 带宽整定的分析, 设计 PI 控制器和 RESO 观测器带宽同为 30 Hz, 具体参数如下给出。

设计 PI 控制器带宽为 30 Hz, 其参数为  $K_p=5.5$ ,  $K_i=110$ ; 负载模型结合具体负载测量得  $\frac{36}{s}$ ; 设计 RESO 带宽与 PI 控制器相同  $\omega_0=30$  Hz, 其增益为  $l_1=376.8$ ,  $l_2=35\ 494.56$ 。

### 3.1.1 阶跃响应实验

阶跃响应实验方法: 分别对平台单轴传统 PI 控制系统与单轴引入卡尔曼自抗扰 PI 控制系统输入阶跃信号的幅度值为 1000 个数字量, 比较两控制系统的稳定时间以及超调量。其阶跃响应曲线如图 6 所示。

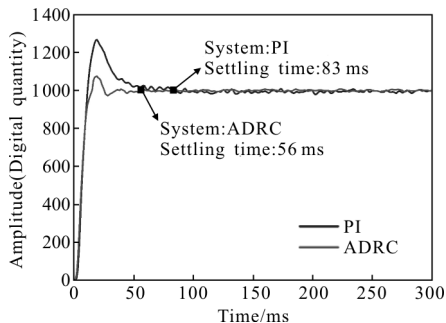


图 6 系统阶跃响应曲线对比图

Fig.6 Comparison curve chart of system step response

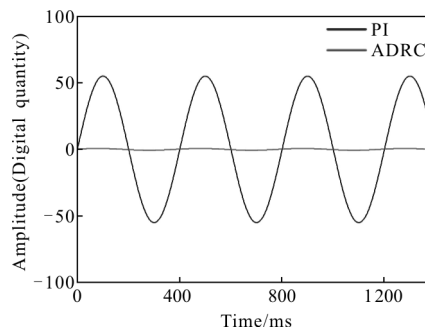
图中, 应用传统 PI 控制器的速度稳定环阶跃响应的稳定时间为 83 ms, 超调量 263.6, 为 26.36%; 应用中提出的卡尔曼自抗扰控制策略的速度稳定环的阶跃响应稳定时间为 56 ms, 超调量 71.9, 为 7.19%。经对比实验可见, 引入卡尔曼自抗扰的 PI 控制器的速度稳定环较传统 PI 控制器, 稳定时间缩短 32.53%, 超调量减小 72.73%。实验结果表明, 在相同的设计带宽下, 引入卡尔曼自抗扰的 PI 控制器相比传统 PI 控制器具备更加优异的动态性能。

### 3.1.2 控制系统抗扰实验

控制系统抗扰实验方法: 令输入速度为零使系

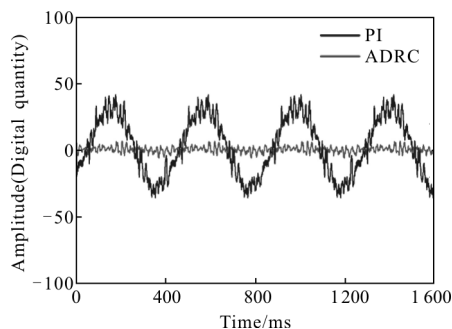
统工作在稳态, 通过对引入卡尔曼自抗扰的 PI 控制系统加入已知速度扰动的情况下观察系统的稳态误差, 并将实验结果与传统 PI 控制系统作对比, 分析控制器性能。引入扰动量的幅度为 200 个数字量、频率为 2.5 Hz 的正弦扰动以及近似平稳的陀螺噪声序列。实验结果如图 7(a)~(c)所示。其中, 图 7(a)为未考虑陀螺测量噪声的系统稳态误差; 图 7(b)为含有陀螺测量噪声的系统稳态误差; 图 7(c)为经卡尔曼滤波后的系统输出量。

由图 7(a)可见, 在不含有陀螺测量噪声的情况下, PI 控制系统稳态误差的最大正负值分别为 55.12 和 -55.08 个数字量, 其扰动隔离度为  $55.12 \times (200^{-1}) \times 100\% = 27.56\%$ ; ADRC 控制系统稳态误差的最大正负值分别为 1.66 和 -1.65 个数字量, 其扰动隔离度为  $1.66 \times (200^{-1}) \times 100\% = 0.83\%$ 。显然, ADRC 控制系统的抗扰能力优于 PI 控制系统。结合图 7(b)和图 7(c), 在引入测量噪声的情况下, 通过对比系统输出量  $y(k)$  与滤波后输出量  $y_0(k)$  的波形, 可以看出, 经卡尔曼滤波后更加平滑。此时, PI 控制系统稳态误差的最大正



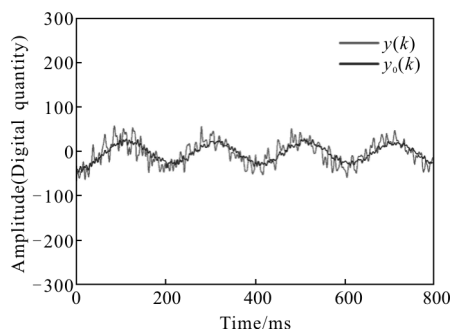
(a) 未考虑陀螺测量噪声的系统稳态误差

(a) System steady-state error without measurement noise



(b) 含有陀螺测量噪声的系统稳态误差

(b) System steady-state error with measurement noise



(c) 经卡尔曼滤波后的系统输出量  
(c) System output after Kalman filtering

图 7 系统扰动抑制仿真实验曲线

Fig.7 Experimental curves of system disturbances rejection simulation

负值分别为 41.92 和 -35.75 个数字量,其扰动隔离度为  $41.92 \times (200^{-1}) \times 100\% = 20.96\%$ ;ADRC 控制系统稳态误差的最大正负值分别为 6.89 和 -4.15 个数字量,其扰动隔离度为  $6.89 \times (200^{-1}) \times 100\% = 3.45\%$ 。尽管在引入测量噪声后引入自抗扰的 PI 控制系统的扰动隔离度有所下降,但较带宽相同的传统 PI 控制系统视轴晃动幅度更小,表现出良好的扰动隔离性能。

### 3.2 光电平台控制实验

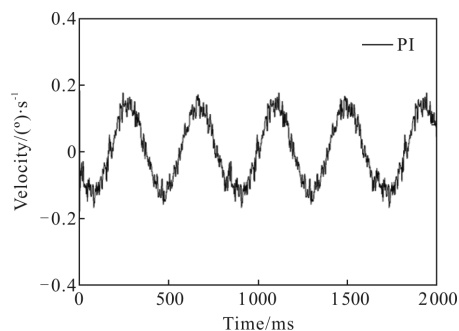
为了进一步研究引入卡尔曼自抗扰的 PI 控制系统相对于传统 PI 控制系统对光电稳定平台抗扰能力提升的程度,文中以某型车载光电平台作为控制对象,分别设计以下实验:(1) 速度稳定实验;(2) 控制系统的鲁棒性实验。实验设备包括:装载可见与红外相机的某型双载光电平台一台;摇摆台;计算机一台;DSP 仿真器一套。

#### 3.2.1 速度稳定实验

速度稳定实验方法:将光电平台固定于摇摆台上,平台伺服系统工作在稳态,使摇摆台以幅度为  $1^\circ$ 、频率为 2.5 Hz 以内做正弦运动模拟速度扰动,分别采用传统 PI 控制器和引入卡尔曼自抗扰的 PI 控制器时,对平台视轴的速度进行采样,分析控制系统抗扰能力。实验结果如图 8(a)~(c)所示。其中,图 8(a)为 PI 控制系统的稳态误差;图 8(b)为未滤波的 ADRC 控制系统的稳态误差;图 8(c)为卡尔曼自抗扰控制系统的稳态误差。

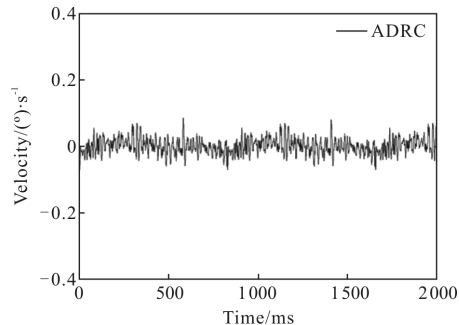
结合图 8(a)和图 8(b)分析得:在外界扰动幅值和频率相同的情况下,PI 控制系统稳态误差的最大正负值分别为 0.176 和 -0.169,其扰动隔离度为 17.6%;ADRC 控制系统稳态误差的最大正负值分别

为 0.086 和 -0.095,其扰动隔离度为 9.5%。以上数据说明,在扰动相同、控制器带宽相同的情况下,ADRC 控制系统相比 PI 控制系统具有更高的扰动隔离度。结合图 8(b)和图 8(c)可以看出,经卡尔曼滤波后的 ADRC 控制系统稳态误差的最大正负值分别为 0.056 和 -0.053,其扰动隔离度提升至 5.6%。实验结果表明,卡尔曼滤波器可以滤除 58.9%的测量噪声,从而降低了 ESO 的观测误差,提高了系统的扰动隔离度。



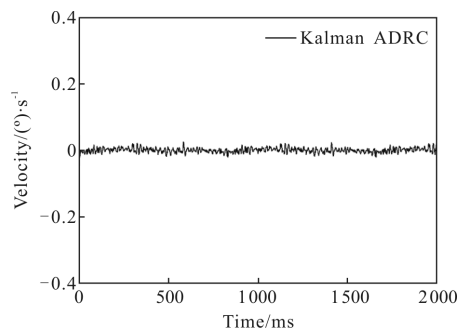
(a) PI 控制系统的稳态误差

(a) Steady-state error of PI control system



(b) 未滤波 ADRC 控制系统的稳态误差

(b) ADRC control system steady-state error without filtering



(c) 卡尔曼 ADRC 控制系统的稳态误差

(c) ADRC control system steady-state error with Kalman filtering

图 8 系统扰动抑制实验曲线

Fig.8 Experimental curves of system disturbance rejection control

令摇摆台以幅度为  $1^\circ$ 、频率为 0.1~2.5 Hz 范围内做正弦运动,使光电稳定平台重复 3.2.1 节的速度稳定实验,实验结果如表 1 所示。引入卡尔曼自抗扰的 PI 控制系统较传统 PI 控制系统的扰动隔离度提高了 54.67% 以上,最大提升扰动隔离度 73.75%,这表明了卡尔曼自抗扰策略优异的扰动隔离性能。

表 1 卡尔曼 ADRC 控制系统与 PI 控制系统的扰动隔离度

Tab.1 Comparison of disturbance isolation degree between PI control system and Kalman-ADRC control system

Disturbance frequency/Hz	Disturbance isolation degree of PI control system	Disturbance isolation degree of ADRC control system
0.1	34.57%	15.67%
0.5	19.52%	6.81%
1.0	18.90%	8.53%
1.5	20.04%	5.26%
2.0	18.35%	6.30%
2.5	17.60%	5.60%

3.2.2 控制器鲁棒性实验

控制器鲁棒性实验方法:在不改变速度稳定环控制器带宽的情况下,采用人为改变负载的方式改变被控对象的模型增益  $k$ ,使其变化范围在  $\pm 15\%$  以内,重新进行上文 3.2.1 的速度稳定实验,根据系统输出量的稳态误差分析控制器的鲁棒性。模型增益  $k=36$  经  $\pm 15\%$  变化后分别为  $k_1=30.6, k_2=41.4$ ,实验结果如表 2 所示。

表 2  $k=30.6$  和  $k=41.4$  时卡尔曼 ADRC 控制器相比 PI 控制器对于扰动残余幅值百分比

Tab.2 Percentage of the residual amplitude of disturbance between Kalman-ADRC controller and PI controller when  $k=30.6$  or  $k=41.4$

Disturbance requery/Hz	Percentage of the residual amplitude of disturbance ( $k=30.6$ )	Percentage of the residual amplitude of disturbance ( $k=41.4$ )
0.1	38.52%	38.69%
0.5	15.27%	25.68%
1.0	16.36%	23.75%
1.5	19.54%	27.16%
2.0	23.57%	31.81%
2.5	21.56%	32.12%

实验结果表明,当模型增益改变时,ADRC 控制器的干扰抑制能力仍然优于 PI 控制器,对于幅度为  $1^\circ$  频率在 2.5Hz 以下的干扰,其扰动残余幅值仅为 PI 控制器的 40% 以下,即抗扰能力提高了一倍以上。在被控对象模型增益改变  $\pm 15\%$  的情况下,自抗扰速度环仍然能很好地隔离摇摆台带来的正弦干扰,表现出较强的鲁棒性。

4 结论

文中分析了影响光电平台扰动隔离性能的主要因素,针对影响视轴稳定的载体速度扰动以及信号测量噪声,设计了扰动自抗扰控制和噪声滤波两部分策略的控制系统。其中自抗扰控制系统的设计基于降阶扩张状态观测器,减小了算法的相位滞后,保证了前馈补偿的动态线性化;滤波部分采用卡尔曼滤波器,并通过引入渐消因子在不增加滤波算法计算量的同时提高算法的收敛速度,从而提高了扩张状态观测器的估计精度。以某型双载光电平台为实验对象,详细地进行了传统 PI 控制系统与文中引入的卡尔曼自抗扰的 PI 控制系统的对比实验。

实验结果表明,在控制系统带宽相同的情况下,卡尔曼 ADRC 控制系统相比 PI 控制系统的阶跃响应稳定时间减小了 32.53%,超调幅值减小了 72.73%;当摇摆台引入幅值为  $1^\circ$  频率在 2.5Hz 以内的正弦扰动时,引入卡尔曼 ADRC 的 PI 控制系统较传统 PI 控制系统的扰动隔离度提升了 54.67% 以上,最高提升扰动隔离度 73.75%;当人为改变系统模型参数  $\pm 15\%$  范围内,引入卡尔曼自抗扰的 PI 控制系统仍具有优异的扰动隔离性能,表现出较强鲁棒性。

综上所述,文中设计的卡尔曼 ADRC 控制策略有效提高了光电平台伺服系统视轴速度稳定环的扰动隔离性能,其设计满足光电平台的性能要求,在实际应用中具备较高的实用性。

参考文献:

[1] Zuo Yujia, Bai Guanbing, Liu Jinghong, et al. Two-UAV intersection localization based on the airborne optoelectronic platform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 146-156. (in Chinese)  
左羽佳,白冠冰,刘晶红,等.基于机载光电平台的双机交会定位方法[J].光子学报,2017, 46(9): 146-156.



- [2] Cong Shuang, Sun Liguang, Deng Ke, et al. Active disturbance rejection and filter control of gyro-stabilized platform[J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(1): 169-177. (in Chinese)  
丛爽, 孙立光, 邓科, 等. 陀螺稳定平台扰动的自抗扰及其滤波控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 169-177.
- [3] Li Xiangxu, Zhang Zengke, Jiang Min. Design and simulation of a fuzzy-PID composite controller for dual DOF stabilized platform [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(1): 69-72. (in Chinese)  
李向旭, 张曾科, 姜敏. 两轴稳定平台的模糊-PID复合控制器设计与仿真[J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 69-72.
- [4] Pei Xuehong. Improved PID control based on RBF neural network [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)  
裴雪红. 基于改进 RBF 神经网络的 PID 控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.
- [5] Liu Di, Tang Yonghong, Wang Jing, et al. PID control algorithm based on improved BP neural network [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2010, 29(3): 28-32. (in Chinese)  
刘迪, 唐永红, 王晶, 等. 基于改进型 BP 神经网络的 PID 控制算法[J]. 兵工自动化, 2010, 29(3): 28-32.
- [6] Li Jiaquan, Ding Ce, Kong Dejie, et al. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(5): 998-1004. (in Chinese)  
李嘉全, 丁策, 孔德杰, 等. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 998-1004.
- [7] Li Ying, Ge Wenqi, Wang Shaobin, et al. Adaptive inverse control of stable platform [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(11): 2744-2749. (in Chinese)  
李英, 葛文奇, 王绍彬, 等. 稳定平台的自适应逆控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2744-2749.
- [8] Yang Pu, Li Qi. Nonlinear friction grey sliding mode control for gyro stabilized platform [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(7): 1328-1332. (in Chinese)  
杨蒲, 李奇. 陀螺稳定平台非线性摩擦的灰色滑模控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1328-1332.
- [9] Han Jingqing. Active Disturbance Rejection Control Technology—the Technology for Estimating and Compensating the Uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 183-287. (in Chinese)  
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: 183-287.
- [10] Wei Wei. The research of optical axis stabilization of the airborne photoelectric platform[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2015. (in Chinese)  
魏伟. 高精度机载光电平台视轴稳定技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- [11] Li Xiantao, Zhang Bao, Shen Honghai. Improvement of isolation degree of aerial photoelectrical stabilized platform based on ADRC[J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(8): 2223-2231. (in Chinese)  
李贤涛, 张葆, 沈宏海. 基于自抗扰控制技术提高航空光电稳定平台的扰动隔离度 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2223-2231.
- [12] Gao Z Q. A paradigm shift in feedback control system design[C]//Proceedings of the American Control Conference, 2009: 2451-2457.
- [13] Shao Xingling, Wang Honglun. Performance analysis on linear extended state observer and its extension case with higher extended order [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(5): 815-822. (in Chinese)  
邵星灵, 王宏伦. 线性扩张状态观测器及其高阶扩展的性能分析[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 815-822.