

## 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰控制

李贤涛<sup>1,2</sup>, 张 葆<sup>1</sup>, 孙敬辉<sup>1</sup>, 毛大鹏<sup>1</sup>, 柏旭光<sup>1</sup>, 沈宏海<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了进一步提高光电稳定平台的抗干扰能力, 文中提出一种基于扰动频率自适应的自抗扰控制新方法。首先, 基于带宽单参数化的设计方法, 设计了扰动频率自适应的扩张状态观测器, 从而解决了传统扩张状态观测器对二阶及二阶以上系统扰动观测存在明显相位滞后的影响; 然后, 设计了带扰动补偿的控制规律; 最后, 在模拟飞行器中以 2.5 Hz 以内任意频率扰动的作用下, 测试其抗扰动的性能。实验结果表明: 对比于传统的平方滞后超前控制器, 采用于扰动频率自适应的自抗扰控制器, 系统的扰动隔离度至少提高 6.72 dB, 且随着扰动频率大于 0.5 Hz, 扰动隔离度的提高更为明显, 最优情况已达到 12.94 dB; 同时, 该控制器具有很强的鲁棒性, 允许被控对象参数在 10% 的范围内浮动, 满足高精度光电稳定平台的性能要求, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 自抗扰控制器; 扰动频率自适应扩张状态观测器; 扰动隔离度; 航空光电稳定平台  
**中图分类号:** TH273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1574-08

## ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilized platform

Li Xiantao<sup>1,2</sup>, Zhang Bao<sup>1</sup>, Sun Jinghui<sup>1</sup>, Mao Dapeng<sup>1</sup>, Bai Xuguang<sup>1</sup>, Shen Honghai<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve isolation degree of disturbance, a new active disturbance-rejection controller based on disturbance frequency adaptive was proposed. Firstly, the ESO based on disturbance frequency adaptive was designed in order to avoid phase lag when ESO observed the disturbance in the second-order and more second-order system. And then, the controller was designed. Finally, an experiment was performed to test the disturbance rejection performance of the ADRC based on disturbance frequency adaptive when the speed disturbance was from 0.1 Hz to 2.5 Hz as compared with the traditional square lag-lead compensation method. The results show that ADRC can reduce the disturbance error 6.72 dB at least. And the isolation degree of disturbance was improved obviously when the perturbation frequency was more than 0.5 Hz, the best isolation degree of disturbance was increased 12.94 dB. And the ADRC had strong robustness, allowing system parameters to range from -10% to

收稿日期: 2013-09-11; 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划重点项目(2008AA121804)

作者简介: 李贤涛(1986-), 男, 博士生, 主要从事航空光电稳定平台视轴稳定的研究。Email: lixiantao\_86@126.com

导师简介: 张葆(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事航空光电成像技术方面的研究。Email: cleresky@vip.sina.com

10%. In conclusion, the ADRC based on disturbance frequency adaptive satisfies the performance requirements of aerial photoelectrical stabilized platform and has higher practical value.

Key words: ADRC; extended state observer based on disturbance frequency adaptive; isolation degree of disturbance; aerial photoelectrical stabilized platform

## 0 引言

光电稳定平台具有多通道、多光谱的综合探测能力,能够实现对目标的可见光、红外和激光的综合侦察和集中显示,同时具有隔离载体扰动,精确保持光学传感器视轴指向的能力,能够完成对目标的捕获、跟踪和瞄准。因此,在现代武器系统中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

光电稳定平台采用直接驱动的方式,其扰动主要来源于载体对平台的扰动<sup>[2-3]</sup>,它通过平台及负载之间的摩擦力影响光学镜头姿态,这就要求系统在载体各种姿态扰动条件下保证高精度的视轴稳定功能。目前在同类系统研究领域常见的设计思想仍为被动抗扰的思想,即采用传统PI控制器、平方滞后超前控制器或其他经典控制理论,通过提高开环系统的型别以及低频段的增益来抑制载体扰动对系统的影响。然而由于受到机械谐振环节的影响,系统的开环剪切频率受到严格的限制。而且在传统设计模式下系统的低频段增益难以做到更高,所以其扰动隔离度水平也难以提高<sup>[4]</sup>。现代控制理论如最优控制理论、自适应控制理论等可以有效提高光电跟踪系统的性能,但设计难度大,计算复杂,控制系统成本高,不易在实际工程中得到推广和应用<sup>[5]</sup>。

相比之下,自抗扰控制技术是一种设计简单,不依赖于系统模型的新型控制技术,它能够主动从被控对象的输入输出信号中把扰动信息提炼出来,以这个信息为依据,拟合系统在运行环境中运动时受到的各种外扰以及系统机理本身决定的内扰的总和和作用<sup>[6]</sup>。然后将该扰动观测值前馈至系统控制量中,构成复合校正,对扰动进行抑制。

然而,实验中发现扩张状态观测器仅对一阶系统的扰动可以实现实时观测,对二阶及二阶以上系统扰动的观测均存在明显的相位滞后,且这种滞后随着扰动频率的增加而不断加大,这严重影响了自抗扰控制策略对扰动的抑制效果。

针对这一问题,文中以某型航空光电稳定平台为研究对象,提出了一种扰动频率自适应的扩张状态观测器,在此基础上对系统中的扰动进行实时观测并根据扰动估计值生成控制量,结合经典的平方滞后超前控制方法实现光电稳定平台的稳定控制。

控制结果表明:基于扰动频率自适应的状态扩张观测器能够实时观测系统所受的扰动作用,利用该信息对扰动进行实时前馈补偿,在传统控制器的基础上进一步抑制了扰动,提高了扰动隔离度,为自抗扰控制方法在光电稳定平台系统中的工程化应用提供了有力支撑。

## 1 光电稳定平台数学模型

文中的研究对象为某型两轴两框架航空光电稳定平台,它采用大力矩电机直接驱动,通过角速率陀螺敏感平台相对于惯性空间的角速率。由于方位轴和俯仰轴相互正交,所以二者之间扰动的耦合影响很小,可以忽略,而且这两个通道的控制策略相似,所以文中仅讨论方位轴扰动频率自适应自抗扰控制器的设计方法。

经实验测试,忽略机械谐振和高频小惯性环节对系统的影响,最终得到方位轴的速度环传递函数为:

$$P(s) = \frac{1.45}{0.00101s^2 + 0.1202s + 1} \quad (1)$$

## 2 光电稳定平台的扰动分析

光电稳定平台的扰动主要来源于平台与负载之间的摩擦力<sup>[7]</sup>和载体对平台的速度扰动<sup>[8]</sup>,其作用原理如图1所示。

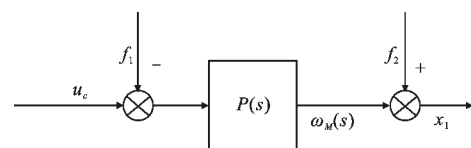


图1 系统中扰动的作用原理

Fig.1 Principle of disturbance in system

图中  $f_1$  为平台与负载之间的等效摩擦力,  $f_2$  为

载体对平台的速度扰动。

$$\omega_M(s) = x_1(s) - f_2(s) = P(s)(u_c(s) - f_1(s)) \quad (2)$$

即：

$$x_1(s) = P(s)[u_c(s) + (P^{-1}(s)f_2(s) - f_1(s))] \quad (3)$$

根据公式(3),图 1 可以简化为图 2。由此可见,只要总和扰动能够被实时准确的观测,那么利用此扰动观测值生成控制量,对系统中的扰动进行前馈补偿,便可以达到进一步抑制扰动的目的。图中 $(P^{-1}(s)f_2(s) - f_1(s))$ 为系统中等效总和扰动。

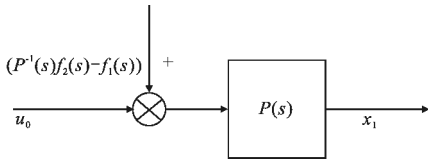


图 2 经等效处理后系统中扰动的作用原理

Fig.2 Principle of disturbance by equivalent processing

### 3 平方滞后超前控制器的控制方法

#### 3.1 平方滞后超前控制器的设计

为了提高低频段的增益,更好地抑制载体对平台的扰动,文中采用平方滞后超前控制器。其中滞后校正的平方使得校正后的系统开环低频段斜率为 $-60\text{dB}$ ,来大幅度提高开环增益,抑制或消除干扰力矩,同时低频段增益的提高,相对的减小了中频段的增益,能够起到对较低机械谐振的抑制;超前校正的平方使得校正后的系统具有较宽的频带和良好的动态性能。经公式计算和仿真验证,平方滞后超前环节的参数为:

$$G_v(s) = \frac{3\ 500(0.055\ 6s+1)^2(0.011\ 1s+1)}{(1.176\ 5s+1)^2(0.005\ 6s+1)} \quad (4)$$

经该控制器校正后,系统的相位裕量 $P_m=52.3^\circ$ ,完全满足工程上相位裕量通常在 $40^\circ\sim 70^\circ$ 之间的要求;幅值裕量 $G_m=\infty$ ,系统稳定。闭环带宽 $B_\omega=167\text{ rad/s}$ ,即 $26.6\text{ Hz}$ 。单位阶跃响应如图 3 所示,超调量 $\sigma=24.3\%$ ,调节时间 $t_s=0.0113\text{ s}$ 。

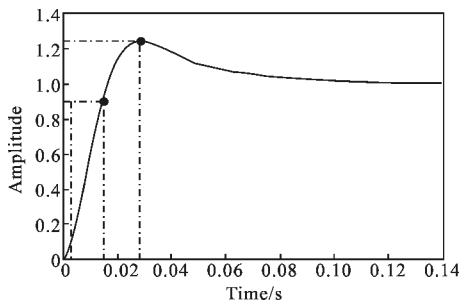


图 3 速率稳定回路单位阶跃响应

Fig.3 Unit step response of velocity-stabilized loop

#### 3.2 平方滞后超前控制器的不足

采用平方滞后超前控制器,其核心是依靠提高开环系统的型别从而提高低频段的增益来实现对载体扰动的抑制。然而,提高开环增益,相位裕量将减小,这使得系统的稳定性变差;同时,系统受到机械谐振环节的影响,其开环剪切频率受到严格的限制,因此系统开环频率特性的低频段增益和系统的带宽很难做到更高水平,所以其扰动抑制能力难以得到本质上的提高。

### 4 扰动频率自适应自抗扰控制器的设计

自抗扰控制技术的核心思想为“主动抗扰”,它将系统的外界扰动和系统模型的不确定性对系统的影响统称为“未知扰动”,然后通过扩张状态观测器(ESO)对该“未知扰动”进行实时估计,从而实现对扰动的直接前馈补偿控制,达到提高扰动隔离度的目的。

然而由于扩张状态观测器(ESO)对二阶及二阶以上系统扰动的观测值存在着较大的相位滞后,且滞后量随着扰动频率的增加而不断加大。

综合上述两方面因素,文中提出了一种基于扰动频率自适应的自抗扰控制器。首先以 $0.1n\text{ Hz}$ ( $n$ 为整数)为中心频率对频率区域进行划分,然后设计三阶扩张状态观测器(ESO)分别对 $0.1n\text{ Hz}$ 频率的扰动进行观测,并根据各个频率点处扰动观测值不同的相位滞后量,设计相应的相位超前环节。再与频率辨识环节相结合一同构成基于扰动频率自适应的状态扩张观测器,实现对系统扰动最大限度的实时观测,在此基础上结合平方滞后超前控制器实现航空光电稳定平台的自抗扰控制(为了论述简便,文中将基于扰动频率自适应的自抗扰控制与平方滞后超前相结合的控制方法简称为自抗扰控制),其作用原理如图 4 所示。

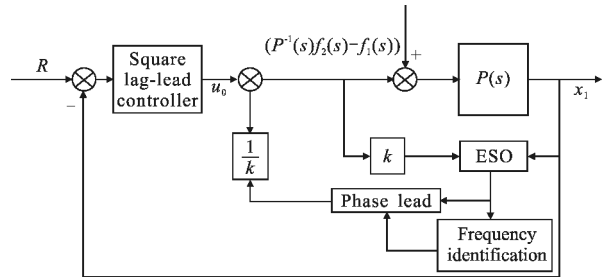


图 4 基于扰动频率自适应的自抗扰控制器的工作原理

Fig.4 Principle of ADRC based on disturbance frequency adaptive

### 4.1 扩张状态观测器 ESO 的设计<sup>[9]</sup>

将方位轴速度环传递函数式(1)改写成状态方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = 119x_1 + 990x_2 + 1435u + d \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $d$  表示图 2 中的总和扰动。将公式(5)中  $d$  作为一个新的被扩张的状态加入到系统中, 即令:  $x_3 = d$ , 并记其导数为  $a(t)$ , 由此公式(5)可以改写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = 119x_1 + 990x_2 + x_3 + 1435u \\ \dot{x}_3 = a(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

二阶被控对象另加一个扩张的状态  $x_3$ , 从而可以通过对这个被扩张的对象设计三阶状态观测器对总和扰动  $d$  进行估计, 具体形式如下:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_1 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = 119z_1 + 990z_2 + z_3 - \beta_{02}fal\left(e, \frac{1}{2}, \delta\right) + 40.576u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal\left(e, \frac{1}{4}, \delta\right) \\ y = z_1 \end{cases}$$

其中:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} e/\delta^{\alpha-1} & |e| \leq \delta \\ |e|sign(e) & |e| > \delta \end{cases}$$

在这里, 采用基于带宽概念的参数化的设计方法来确定扩张状态观测器的参数<sup>[10-11]</sup>。相应的有  $\beta_{01} = 3\omega$ 、 $\beta_{02} = 3\omega^2$ 、 $\beta_{03} = \omega^3$ , 其中  $\omega$  的适应范围很宽, 因此很容易调整出合适的  $\omega$ 。在实验中, 选取  $\omega = 100$ 。  $2\delta$  为  $fal(e, \alpha, \delta)$  函数中线性段区间长度, 它可以避免 ESO 在原点附近发生高频振荡。由于实验采用的陀螺噪声较大, 其幅值为  $0.435(^{\circ})/s$ , 所以  $\delta$  的取值应该大于陀螺的噪声峰值, 此次实验中  $\delta = 0.6(^{\circ})/s$ 。

### 4.2 扰动的相位超前处理

由于扰动观测值存在着较大的相位滞后, 这严重影响了自抗扰控制器对扰动的抑制效果, 因此需要引入相位超前环节, 具体形式如下:

$$\begin{cases} fh = fhan(v_1 - v(t), v_2, r, h) \\ \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = fh \\ y(t) = \frac{1}{\gamma}(v_1(t) + \lambda hv_2(t)) \quad \gamma > 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: 参数  $\lambda$  值越大, 超前的相位值也越大。因为对

于不同的相位滞后, 需要设计不同参数  $\gamma$  和  $\lambda$  的相位超前环节。又因为, 扰动频率相差  $0.05 \text{ Hz}$ , 观测值的相位滞后差异很小, 所以为了减小编写程序的复杂程度, 可以采用相同的相位超前环节进行处理。如  $1.95 \sim 2.05 \text{ Hz}$  扰动的观测值均可采用  $2 \text{ Hz}$  扰动对应的相位超前环节进行校正, 其具体参数为:  $\gamma = 5.2$ ,  $\lambda = 416$ 。

### 4.3 扰动的频率辨识

对于正弦信号  $x(t) = a \sin(\omega t)$ , 取其微分信号为  $\dot{x}(t) = a\omega \cos(\omega t)$ , 于是可得:

$$\frac{\int_0^t (\dot{x}(\tau))^2 d\tau}{\int_0^t (x(\tau))^2 d\tau} = \frac{a^2 \omega^2 \int_0^t \cos^2(\omega\tau) d\tau}{a^2 \int_0^t \sin^2(\omega\tau) d\tau} = \omega^2 \frac{\int_0^t \cos^2(\omega\tau) d\tau}{\int_0^t \sin^2(\omega\tau) d\tau}$$

由于:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t \cos^2(\omega\tau) d\tau}{\int_0^t \sin^2(\omega\tau) d\tau} = 1$$

因此就有:

$$\omega^2 \approx \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t (\dot{x}(\tau))^2 d\tau}{\int_0^t (x(\tau))^2 d\tau}$$

其中,  $x(t)$  的微分信号可以通过自抗扰控制策略中的跟踪微分器获得:

$$\begin{cases} fh = fhan(x_1(k) - v(t), x_2(k), r, h_0) \\ x_1(k+1) = x_2(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hfh \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $fhan(x_1, x_2, r, h_0)$  为离散系统的最速控制综合函数, 按这个差分方程递推, 可以实现从非零初值出发, 以有限步到达原点并停止不动, 其具体形式如下式所示。其中  $r$  为最速因子,  $r$  越大, 跟踪微分器的跟踪速度越快;  $h_0$  为滤波因子,  $h_0$  越大, 跟踪微分器<sup>[12]</sup> 的滤波效果越明显,  $h$  为采样步长, 实验中  $h = 1 \text{ ms}$ 。综上, 实验中参数最终选取为:  $r = 2000$ ,  $h_0 = 100$ ,  $h = 0.1 \text{ s}$ 。

$$fhan(x_1, x_2, r, h_0) = \begin{cases} d = rh_0 \\ d_0 = h_0 d \\ y = x_1 + h_0 x_2 \\ a_0 = \sqrt{d_2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} sign(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h_0}, & |y| < d_0 \end{cases} \\ fhan = - \begin{cases} r sign(a), & |a| > d \\ r \frac{a}{h_0}, & |a| \leq d \end{cases} \end{cases}$$

### 4.4 自抗扰控制器设计

根据自抗扰控制的思想, 令  $u = u_0 - z_3 / 1435$ , 其中  $u_0$  为平方滞后超前控制器根据速度偏差得出来的控制量, 将  $u$  带入公式(5)中得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = 119x_1 + 990x_2 + 1435u_0 + d - z_3 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

由此可见,只要设计的状态观测器合适,便可以使得  $d - z_3 \rightarrow 0$ ,从而主动抑制扰动  $d$  对系统的影响。由此可见,这种控制策略在理论上可以在经典反馈控制策略的基础上进一步提高扰动隔离度。

### 5 实验结果

为了验证扰动频率自适应自抗扰控制器抑制载体对平台速度扰动的能力,将光电稳定平台安装于飞行模拟器上进行控制实验。在飞行模拟器以 2.5 Hz (在实际工程应用中,载体扰动的最大频率)以内任意频率进行摇摆运动的情况下,分别进行了速度稳定、目标跟踪和控制鲁棒性性能的测试。作为对比,同时给出了原系统在单独采用平方滞后超前控制器时的实验结果。

#### 5.1 扰动频率自适应扩张状态观测器对扰动的观测实验

在设计过程中,采用扰动频率自适应扩张状态观测器对输入量中人为施加的扰动进行观测,以对比扰动真实值和观测值之间的关系。图 5 为传统扩张状态观测器对扰动  $500\sin(4\pi t)$  的观测结果。由图 5 可以明显看出,扰动的观测值相对于真实值幅值相等,相位上却存在着 0.125 s 的滞后。

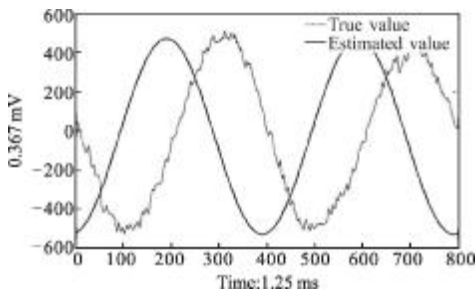


图 5 扩张状态观测器对 2 Hz 扰动的观测值  
Fig.5 Value of 2 Hz disturbance estimated by ESO

为了对扰动观测值进行相位超前校正,首先将扰动观测值引入频率辨识环节,扰动频率辨识结果如图 6 所示。由图可见,扰动频率发生变化后,辨识结果可以在 1.49 s 时便开始收敛于 1.95~2.05 Hz 的频率范围内。

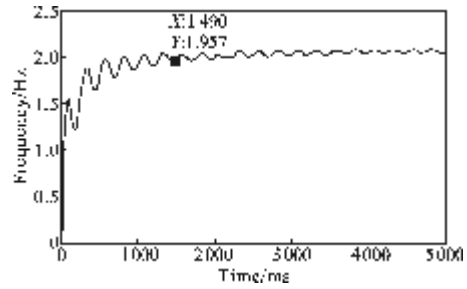


图 6 当飞行模拟器以 2Hz 的频率晃动时,扰动频率的辨识结果  
Fig.6 Identification result when the disturbance frequency is 2 Hz

采用该频率范围的相位超前环节参数对扰动观测值进行相位校正。校正结果如图 7 所示。对比于图 5 可以明显发现:校正后,扰动观测值的相位滞后已明显减小,符合扰动前馈的要求。

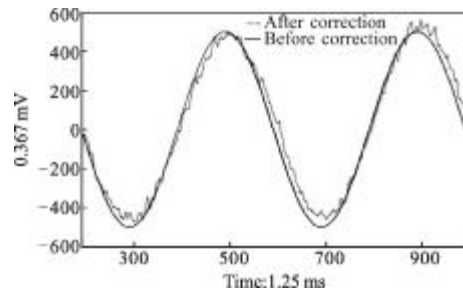


图 7 扰动频率自适应扩张状态观测器对 2 Hz 扰动的观测值  
Fig.7 Value of 2 Hz disturbance estimated by ESO based on disturbance frequency adaptive

#### 5.2 速度稳定实验

实验中,光电稳定平台的期望转速为零,飞行模拟转台以 2.5 Hz 以内的任意频率进行摇摆,然后通过测定陀螺信号中的扰动残差来判断平台对扰动的抑制能力。图 8 和图 9 为飞行模拟器以  $1 \pm 2$  Hz 做正弦运动,光电稳定平台分别采用平方滞后超前控制器和自抗扰控制器时的速度稳定情况。

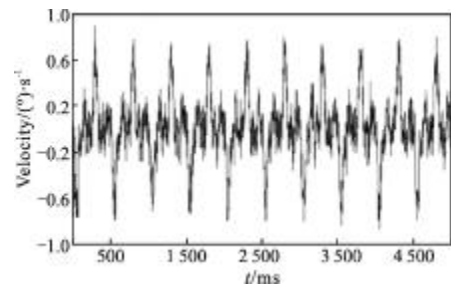


图 8 2 Hz 的扰动下,采用平方滞后超前控制器,扰动的响应曲线  
Fig.8 Square lag-lead controller response to 2 Hz disturbance

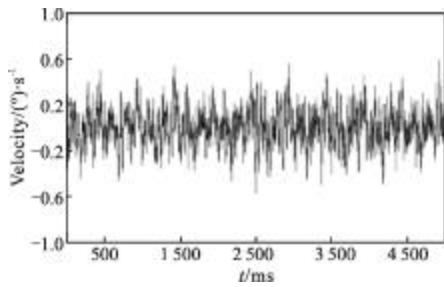


图 9 2 Hz 的扰动下,采用自抗扰控制器,扰动的响应曲线

Fig.9 ADRC response to 2 Hz disturbance

很显然,与经典平方滞后超前控制器相比,在采用自抗扰控制器之后,平台速度的尖峰的幅值和持续时间均显著减小,其峰值大约为  $0.57(^{\circ})/s$ 。考虑到陀螺的噪声比较大,平台绝对静止时陀螺噪声的峰值就为  $0.435(^{\circ})/s$ ,这说明在如此大噪声的系统中,该系统的提升极限为  $0.435(^{\circ})/s$ ,可见自抗扰控制器的控制结果已十分令人满意。

为了更清楚地比较光电稳定平台对速度扰动的抑制能力,对图 8 的数据进行频谱分析,结果如图 10 所示。采用自抗扰控制器,2 Hz 的扰动残余量大约为采用平方滞后超前控制器时的 0.225 5,使系统对 2 Hz 扰动的隔离度提高了 12.94 dB,对于有摩擦、不平衡力矩等非线性因素引起的倍频分量,自抗扰控制器也具有很强的抑制作用。

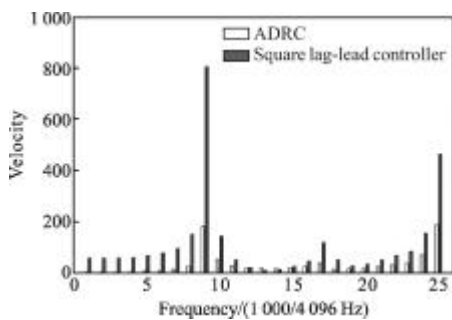


图 10 2 Hz 的速度扰动下,速度稳定为零时陀螺速率的傅里叶变换

Fig.10 Fourier transform of rate when the photoelectrical stabilized platform is disturbed by 2 Hz disturbance

表 1 为光电稳定平台在飞行模拟器以幅值为  $1^{\circ}$ 、频率在 0.1~2.5 Hz 之间每隔 0.5 Hz 的频率进行摇摆时,采用自抗扰控制器对各个频率扰动隔离度的提高程度,由表中可以明显发现,在各个频率处,在抗扰控制器对速度环扰动的抑制能力都明显好于平方滞后超前控制器,扰动隔离度至少提高了 6.72 dB,

且随着扰动频率大于 0.5 Hz,扰动隔离度提高得更明显,最好的情况已达到 12.94 dB。

表 1 扰动隔离度的提高程度

Tab.1 Improvement of disturbance isolation degree by using ADRC

Disturbance frequency/Hz	Improvement of disturbance isolation degree/dB
0.1	6.72
0.5	10.67
1.0	11.72
1.5	11.98
2.0	12.94
2.5	11.65

### 5.3 目标的跟踪实验

光电稳定平台的跟踪器处于最长焦距,使其对无限远的固定目标进行跟踪,再控制飞行模拟转台使其以幅值为  $1^{\circ}$ 、频率为 0.1~2.5 Hz 做正弦运动,以模仿载体对光电稳定平台的扰动。然后通过测定视轴相对于目标点的最大偏离程度,来考核平台的稳定精度。其中跟踪器在最长焦时,对应的角度值量纲为  $53 \mu rad$ 。

图 11 和图 12 为飞行模拟器以  $1^{\circ}$ 、2 Hz 做正弦运动时,光电稳定平台分别采用平方滞后超前控制器

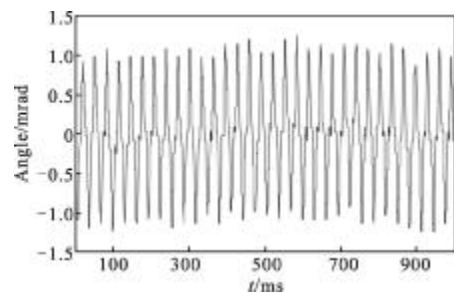


图 11 2 Hz 的速度扰动下,平台处于跟踪状态时,采用平方滞后超前控制器视轴的波动范围

Fig.11 Range of visual axis sloshing when the photoelectrical stabilized platform by using square lag-lead controller is disturbed by 2 Hz disturbance

和自抗扰控制器时,视轴相对于目标点运动的角度

范围。由图可见,采用平方滞后超前控制器时,视轴的运动范围是 $\pm 1.26$  mrad,而采用自抗扰控制器,视轴的运动范围为 $\pm 0.371$  mrad,仅为单独采用平方滞后超前控制器的 1/3。

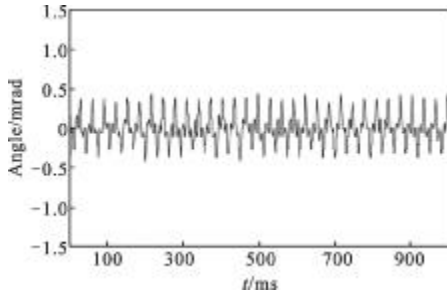


图 12 2 Hz 的速度扰动下,平台处于跟踪状态时,采用自抗扰控制器视轴的波动范围

Fig.12 Range of visual axis sloshing when the photoelectrical stabilized platform by using ADRC is disturbed by 2 Hz disturbance

表 2 为光电稳定平台在飞行模拟器以幅值为  $1^\circ$ 、频率在 0.1~2.5 Hz 之间每隔 0.5 Hz 的频率进行摇摆时,分别采用自抗扰控制器和平方滞后超前控制器,光电稳定平台视轴相对于目标中心点的最大角度运动范围。由表中不难看出,在各个频率处,自抗扰控制器的跟踪效果都明显优于平方滞后超前控制器的跟踪效果。

表 2 跟踪状态时视轴的晃动范围

Tab.2 Range of visual axis sloshing in tracking state

Frequency/Hz	ADRC/mrad	Traditional controller/mrad
0.1	$\pm 0.053$	$\pm 0.106$
0.5	$\pm 0.212$	$\pm 0.636$
1.0	$\pm 0.212$	$\pm 1.06$
1.5	$\pm 0.265$	$\pm 1.166$
2.0	$\pm 0.371$	$\pm 1.219$
2.5	$\pm 0.424$	$\pm 1.219$

5.4 控制器鲁棒性实验

在抗扰控制器参数不变的情况下,人为改变控制对象的参数,使模型参数上下浮动,然后重新进行 5.2 和 5.3 节的实验。表 3 为模型参数上下浮动 10% 时的实验结果。

表 3 模型参数变化 $\pm 10\%$ 时扰动隔离度的提高程度和视轴的晃动范围

Tab.3 Improvement of disturbance isolation degree and the range of visual axis sloshing by using ADRC when the model parameters change in 10%

Frequency/Hz	+10%dB/mrad	-10%dB/mrad
0.1	$6.06/\pm 0.106$	$6.11/\pm 0.106$
0.5	$9.94/\pm 0.212$	$9.89/\pm 0.265$
1.0	$10.18/\pm 0.318$	$10.23/\pm 0.265$
1.5	$10.89/\pm 0.318$	$10.92 / \pm 0.371$
2.0	$11.17/\pm 0.371$	$11.06/\pm 0.424$
2.5	$10.93/\pm 0.53$	$10.87 / \pm 0.477$

对比表 1 和表 2,当系统参数变化 $\pm 10\%$ 时,自抗扰控制器的速度稳定性能和跟踪精度依然保持着至少优于平方滞后超前控制器 1 倍以上的性能。当系统参数的变化超过 $\pm 10\%$ 时,速度稳定性能和跟踪精度虽有提高,但提高程度已低于 6.02 dB(即 1 倍)。

由于 $\pm 10\%$ 的参数变化范围已经很好地符合实际工程的需要,所以,基于扰动频率自适应的自抗扰控制器具有较强的鲁棒性。

6 结论

为了在传统控制器的基础上进一步提高航空光电稳定平台的抗干扰能力,文中通过对其扰动特性的分析,结合其自身的特点提出了一种基于扰动频率自适应的自抗扰控制方案。针对传统扩张状态观测器对二阶及二阶以上高阶系统的扰动观测存在较大相位滞后的问题,文中首先设计了扰动频率自适应的扩张状态观测器。然后在经典平方滞后超前“被动抗扰”控制策略的基础上,引入扰动前馈补偿算法进行“主动抗扰”。

实验结果表明:针对  $1^\circ$ 、 $0.1 \sim 1^\circ$ 、2.5 Hz 的载体扰动,相比于传统的平方滞后超前控制器,采用扰动频率自适应自抗扰控制器,系统扰动隔离度至少提高了 6.72 dB,且随着扰动频率大于 0.5 Hz,扰动隔离度提高得更为明显,最好的情况已提高 12.94 dB。而且,它还具有较强的鲁棒性允许被控对象参数在

10%的范围内任意变化。除此之外,基于带宽的单参数化扩张状态观测器的设计方法在很大程度上降低了控制器设计的复杂性和参数整定难度。

综上所述,基于扰动频率自适应的自抗扰控制方案的提出解决了自抗扰控制技术中扩张状态观测器对二阶及二阶以上系统的扰动观测存在较大相位滞后的问题,对比于经典控制方法,进一步提高了平台对扰动的抑制能力。为进一步提高航空光电稳定平台的扰动隔离度提供了新方法,具有较高的参考价值 and 实用价值。

#### 参考文献:

- [1] Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, et al. Analysis and design of multi-loop IMC controller for electro-optical servo control systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2020-2027. (in Chinese)  
周晓尧, 范大鹏, 张智永, 等. 光电伺服控制系统多回路内模控制器分析与设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 2020-2027.
- [2] Wang Chen, Ma Caiwen, Liang Yanbing, et al. Self-stabilization target tracking technology based on mobile platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 39(4): 644-649. (in Chinese)  
王晨, 马彩文, 梁雁冰, 等. 基于机动平台的光电经纬仪自稳定跟踪技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 39(4): 644-649.
- [3] 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.
- [4] Yang Dandi, Wang Xiaopan, Hu Faxing, et al. On disturbance rejection on photoelectrical stabilized platform [C]//*Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, 2011: 6345-6349. (in Chinese)  
杨丹迪, 王晓盼, 胡发兴, 等. 光电稳定平台的抗扰问题研究[C]//第30届中国控制年会, 2011: 6345-6349.
- [5] Qiu Xiaobo, Dou Lihua, Shan Dongsheng, et al. Design of active disturbance rejection controller for electro-optical tracking servo system [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(1): 220-226. (in Chinese)  
邱晓波, 窦丽华, 单东升, 等. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(1): 220-226.
- [6] Lian Ming, Han Zhenyu, Fu Hongya. Application of active disturbance rejection control technique to satellite attitude simulation system[J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(3): 616-621. (in Chinese)  
廉明, 韩振宇, 富宏亚. 自抗扰技术在卫星姿态模拟系统中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(3): 616-621.
- [7] Ke Jing, Su Baoku, Zeng Ming. Nonlinear stick-slip friction compensation for DC motors[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(6): 736-739. (in Chinese)  
克晶, 苏宝库, 曾鸣. 一种直流力矩电机系统的滞滑摩擦补偿方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(6): 736-739.
- [8] Li Hui, Wu Junhui, Zhu Xia, et al. Analysis and tracking principle for rate gyroscope laser seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1337-1341. (in Chinese)  
李慧, 吴军辉, 朱霞, 等. 速率陀螺式激光导引头稳定跟踪原理分析与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1337-1341.
- [9] Han Jingqing. Active Disturbances Rejection Control Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (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, 2009.
- [10] Gao Zhiqiang. Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning [C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Evanston, IL: IEEE, 2003: 4989-4996.
- [11] Gao Zhiqiang. A paradigm shift in feedback control system design[C]//*Proceedings of the American Control Conference*, 2009: 2451-2457.
- [12] Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao, et al. Application of the nonlinear tracking differentiator in velocity estimation on optical encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 849-853. (in Chinese)  
王帅, 王建立, 陈涛, 等. 非线性跟踪微分器在光电编码器测速中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 849-853.