

文章编号 1004-924X(2015)08-2296-10

## 航空光电稳定平台的自抗扰控制系统

魏 伟<sup>1,2</sup>, 戴 明<sup>1\*</sup>, 李嘉全<sup>1</sup>, 毛大鹏<sup>1</sup>, 柏旭光<sup>1</sup>, 孙敬辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**对航空光电稳定平台模型进行分析并利用电流环简化了平台模型。阐述了影响平台稳定性的扰动及抑制扰动的方法,提出一种基于预报修正的自抗扰控制系统。首先,提出了一种预报修正方法,采用"先预报,后修正"的方法来减小扰动观测值的滞后和超调;然后,设计了基于二阶扩张状态观测器的自抗扰控制系统,对扰动进行线性化动态补偿;最后,在振动平台上对系统进行了速度稳定实验、目标跟踪实验和鲁棒性分析。结果表明,与经典的平方滞后超前控制方法相比,本文设计的控制方法对扰动的隔离度至少提高了 5.88 dB。另外,设计的系统具有很强的鲁棒性,在系统参数改变±15%的范围内,仍得到很好的控制效果。由于所设计的控制系统具有很强的实用性和鲁棒性,在工程实际应用中提高了航空光电稳定平台的抗扰动性能。

**关键词:**航空光电稳定平台;二级自抗扰控制器;预报修正;扰动补偿

**中图分类号:**TP273;V476.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2296

## ADRC control system for airborne opto-electronic platform

WEI Wei<sup>1,2</sup>, DAI Ming<sup>1\*</sup>, LI Jia-quan<sup>1</sup>, MAO Da-peng<sup>1</sup>, BAI Xu-guang<sup>1</sup>, SUN Jing-hui<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: daim@vip.sina.com*

**Abstract:** A model for aerial photoelectrical stabilized platforms was analyzed and it was simplified with a current loop. The disturbance influencing the platform stability was explained and a disturbance rejection method was illustrated. An Active Disturbance Rejection Controller (ADRC) was designed based on forecast revision. Firstly, a method is proposed to reduce the time lag and the overshoot of disturbance observing values by amending followed by forecasting. Then, a new controller was designed based on the two stage extended state observer to isolate the disturbance linearly and dynamically. Finally, a speed stability experiment and a target tracking experiment were taken on a vibration platform and the robustness of the system was also analyzed. The experimental results show that the designed controller method improves the disturbance isolation by 5.88 dB as compared with conventional method. Moreover, the designed control system has good robustness while the system

**收稿日期:**2014-04-28; **修订日期:**2014-05-18.

**基金项目:**国家 973 重点基础研究发展规划资助项目 (No. 2009CB72400603B); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121803)

parameters vary by 15%. As the proposed control system has good practicability and stronger robustness, it observably improves the disturbance isolation of the opto-electronic platforms.

**Key words:** airborne photoelectrical stabilized platform; two-stage Auto-disturbance Rejection Controller(ADRC); forecast amendment; disturbance compensation

## 1 引言

高精度机载光电稳定平台是由多级框架、光电红外系统以及激光瞄准系统组成的综合航空遥感器,其主要作用是隔离载体对光电平台的扰动,使光电系统视轴能够快速并且稳定地跟踪目标,具有机动性高,鲁棒性强,实时性好等特点,因而被广泛应用于地质测绘、军事侦察、军事打击引导等领域。

造成机载光电稳定平台视轴不稳定的因素有很多,例如飞机姿态的变化,飞机的振动,轴系间的摩擦、耦合,传感器噪声等;而平台采用力矩电机直接驱动的方式,因此载体上的干扰源对平台的速度扰动最为明显,其通过平台和负载间的摩擦影响光学镜头视轴稳定性。目前消除扰动的方法主要有PID理论以及平方滞后超前等方法。这些方法通过提高开环系统的型别和低频段的增益来降低扰动对平台稳定性的影响,属于被动抗扰方法。被动抗扰方法的优点是理论简单,易于调节,适应性强,目前仍为控制过程中常采用的控制方法<sup>[1]</sup>。不过,由于被动抗扰方法会受机械谐振频率的影响,系统开环剪切频率不能无限提高,因而限制了被动抗扰方法抑制扰动的能力。

自抗扰控制方法是一种不依赖于系统模型的控制方法<sup>[2-4]</sup>,它不必对控制对象建模,而是直接将系统的未建模动态和未知外界扰动都归结为对系统的总和扰动来进行估计和补偿。采用自抗扰控制器的机载光电侦察平台伺服系统,阶跃响应速度快、无超调,对模型摄动和测量噪声不敏感,对外界扰动的抑制能力强,能够有效克服摩擦扰动对平台低速运动性能的影响,各项性能均优于传统控制器。考虑到自抗扰控制的上述优点,本文设计了基于自抗扰控制方法的控制器<sup>[5]</sup>,线性化地补偿扰动,并在此基础上,提出了一种预报修正方法,可以很好地修正扰动观测值的滞后和超调。最后,在振动平台上进行了速度稳定和目

跟踪实验验证了所提方法的性能。

## 2 稳定平台扰动分析

### 2.1 “总和扰动”的提出和分析

影响机载光电稳定平台稳定性的因素有轴系间的摩擦,风阻力矩,载体扰动等,其中最主要的是载体姿态变化对平台的速度扰动<sup>[7]</sup>。本文分析的光电稳定平台为两轴四框架结构<sup>[8]</sup>,其由大功率力矩电机直接驱动,控制过程如图1所示。

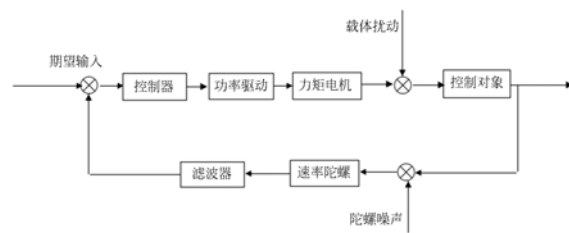


图1 稳定平台控制系统结构

Fig.1 Control system structure of stable platform

结合具体参数,在电机稳定输出力矩的作用下,负载的运动方程为<sup>[9-10]</sup>:

$$T_M = K_T i_a = T_L + J_{GES} \frac{d\omega_M}{dt}, \quad (1)$$

其中: $K_T$ 为转矩系数; $i_a$ 为电枢电流; $\omega_M$ 为电动机的旋转角速度; $J_{GES}$ 为折合到电动机上总的转动惯量; $T_L$ 为影响系统的“总和扰动力矩”,它包括上述分析的导线干扰力矩、摩擦力矩、质量不平衡力矩和风阻力矩等阻碍视轴正常运转的扰动力矩。式(1)经拉氏变换可得:

$$K_T i_a(s) = T_L + J_{GES} \omega_M(s) s, \quad (2)$$

这样

$$\omega_M(s) = \frac{K_T}{J_{GES} s} i_a(s) - \frac{1}{J_{GES} s} T_L = \frac{K_T}{J_{GES} s} (i_a(s) - \frac{1}{K_T} T_L), \quad (3)$$

令  $d(s) = -T_L/K_T$ , 由此上式可以简化为:

$$\omega_M(s) = \frac{K_T}{J_{GES} s} (i_a(s) + d(s)) = \frac{k}{s} (i_a(s) + d(s)), \quad (4)$$

式(4)中,  $d(s)$ 代表与系统中的“总和扰动力矩”相等效的控制电流,只要扰动力矩影响了系统正常的工作状态,那么总可以用一个控制电流来驱动系统<sup>[11]</sup>,使其产生与扰动力矩同样的效果。因此,在对系统进行分析时,便可以用这个控制电流来等效系统中的各种扰动力矩,其具体原理如图 2 所示。

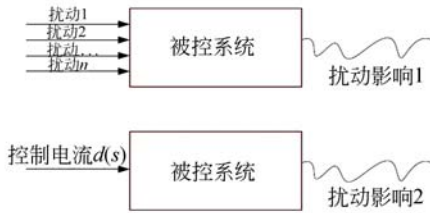


图 2 扰动力矩等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of disturbing moment

对于系统中的复杂扰动 1、扰动 2、…、扰动  $n$ ,由于它们作用原理各异,且与具体的工作环境密切相关,因此很难对它们进行定量分析和推理。由图 2 可见,如若扰动 1 和扰动 2 的影响相等,那么无论扰动 1、扰动 2、…、扰动  $n$ 是线性的还是非线性的、是连续的还是不连续的,只要它给系统带来的影响可以通过控制电流  $d(s)$ 进行复现,便可以通过控制电流  $d(s)$ 对该扰动进行综合表示。因此在设计控制器时,可以回避分析各种扰动力矩作用原理的复杂过程,而只考虑对“等效控制电流  $d(s)$ ”的抑制效果即可。

由于航空光电稳定平台的内外框架结构相似,对它们采用类似的控制策略,方位轴和俯仰轴相互正交,而且每个轴系之间互相的扰动耦合影响可以忽略不计,所以本文仅对方位框架进行控制系统设计和扰动隔离策略研究。本文所研究的对象为某型两轴四框架航空光电稳定平台,结合具体参数,经电流环处理后<sup>[12]</sup>,其方位轴内外框架速度环的被控对象分别为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{aligned} x_{in}(s) &= \frac{32}{s} [u(s) + d(s)] \\ x_{out}(s) &= \frac{26}{s} [u(s) + d(s)] \end{aligned} \quad (5)$$

## 2.2 扰动抑制方法

图 3 为稳定平台控制系统简图,其中  $e(s)$ 为“等效总和扰动”, $G(s)$ 为控制器, $P(s)$ 为控制对象, $R(s)$ 为期望输入, $C(s)$ 为系统输出。

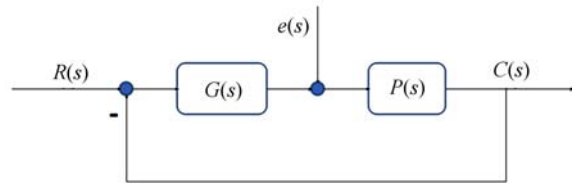


图 3 平台控制系统框图

Fig. 3 System diagram of control system

该系统闭环传递函数如式(6)所示:

$$C(s) = \frac{G(s)P(s)}{1+G(s)P(s)}R(s) + \frac{P(s)}{1+G(s)P(s)}e(s), \quad (6)$$

式中:等号右边第一项为扰动为零时的系统输出,第二项为扰动作用于系统的输出项,从数学上来说,研究扰动抑制方法的目的就是消除第二项。

目前稳定平台最常采用的是 PID,平方滞后超前等经典控制方法,其实质就是增大扰动项的开环低频增益  $|G(s)P(s)|$ ,从而使扰动项减小,但是通过分析开环传递曲线,很容易得出这种方法的局限性,即由于系统机械谐振环节的影响,穿越频率  $\omega_c$ 不能无限增大,所以系统的低频段增益难以做到更高,其扰动隔离度水平也难以进一步提高。

本文所采用的自抗扰控制方法的实质为利用扰动观测器直接观测扰动,得到扰动观测值  $e'(s)$ ,令其尽可能接近扰动  $e(s)$ ,再将  $e'(s)$ 反馈给系统,从而直接消除扰动项  $e(s)$ 。这类方法归类于主动抗扰方法,其优点是突破了传统控制方法中机械谐振频率的限制,而且也不需要事先知道控制对象参数,可直接对系统中的扰动进行实时估计和补偿。

## 3 自抗扰控制器设计

### 3.1 扩张状态观测器

本文以带扰动的二阶非线性被控系统为研究对象,对扩张状态观测器的原理进行讨论<sup>[14-15]</sup>,其具体形式如式(7)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1(t), x_2(t), t) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f$ 表示系统中的“总和扰动”,它是系统状态变量  $x_1, x_2$  和时间  $t$  的函数; $b$ 是系数矩阵; $u$ 为

控制量。将“总和扰动”扩张成为一个新的状态变量,用  $x_3$  表示,记作  $x_3 = f$ 。那么带扰动的二阶非线性被控系统可以转变成为一个新的三阶线性控制系统,具体形式如式(8)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (8)$$

按照现代控制理论状态观测器的原理,采用三阶非线性状态观测器对上述系统中的状态变量进行观测:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{01} e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_1) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} |e_1|^{\frac{1}{4}} \text{sign}(e_1) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$  为扩张状态观测器的主要参数。由式(9)可以看出,只要参数选择合适,观测值  $z_1, z_2, z_3$  便可以实现对系统的状态变量  $x_1, x_2$  以及被扩张状态的实时作用量  $x_3$  的准确估计。

### 3.2 扰动观测值的预报修正

为了更直接地分析在实际系统中,扩张状态观测器对扰动观测结果的准确程度,以某型两轴两框架航空光电稳定平台为研究对象进行实验。首先将平台中的光电载荷全部拆除,仅留下轴角编码器和陀螺仪以敏感平台旋转的角度和角速度,然后经过精准的配平,使其质心尽可能与平台的旋转轴相重合,从而可以最大程度地减小导线扰动和质量不平衡力矩等干扰的影响,使平台处于一个近似理想的工作状态。此时,在“总和扰动”中影响平台正常转动的因素主要为摩擦力矩。该实验台如图 4 所示。

令实验台以编码器的零点为原点做正弦运动,然后采用扩张状态观测器对系统中的扰动进行观测,图 5 为平台以幅值为  $1(^{\circ})/s$ ,频率为  $1\text{ Hz}$  的角速度做正弦运动时,扩张状态观测器对系统中以摩擦力矩为主的“总和扰动”的观测结果。

摩擦力矩的方向与互相接触的两个物体相对的运动趋势相反,而图 5 中扰动观测值相对于平台的运动方向改变时刻滞后比较明显,大约为  $0.025\text{ s}$ ,且存在着较大的超调,这都严重地影响了自抗扰控制器对系统中扰动的补偿精度,严重

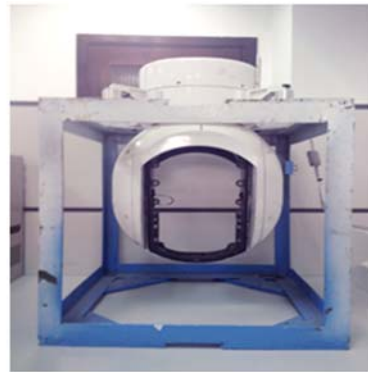


图 4 无任何载荷的两轴两框架实验平台

Fig. 4 Experiment platform with two axes and two frameworks without any load

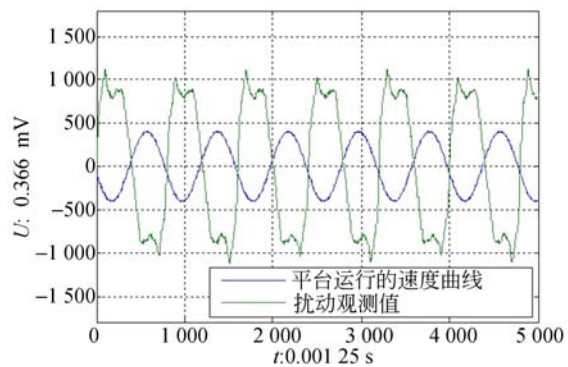


图 5 传统扩张状态观测器的扰动观测值与平台速度之间的关系

Fig. 5 Relationship between platform angular velocity and disturbance observations of traditional ESO

时甚至有可能带来负效果。故如何减小扰动观测值的滞后与超调是提高自抗扰控制器补偿精度的关键,下面针对这两方面进行深入分析。

#### 3.2.1 扰动观测值的滞后修正

由扩张状态观测器的工作原理可知,它是利用系统的上一采样时刻的输入输出值对系统中的扰动进行实时估计,由此可见,无论扩张状态观测器的参数怎样调节,与扰动的真实值相比,其扰动观测值至少要滞后一个采样周期,甚至更多。这种现象在高阶系统的扰动观测过程中体现的尤为明显。因此有必要对扩张状态观测器的扩张状态即扰动的观测值加以预报修正。

由上文可知,跟踪微分器既能实时跟踪输入信号,又能得出输入信号的微分值。因此可以采

用跟踪微分器对扩张状态观测器的扰动观测值进行处理,从而得到“总和扰动”的变化趋势,然后以此为依据,对扰动观测值进行预报和修正,采取“先预报,后微分”的办法,其具体原理如式(10)所示:

$$\begin{cases} dis(t) = ESO\_dis(t) + h_1 * v\_dis\_d(t) \\ fh = fhan(v\_dis(t) - dis(t), v\_dis\_d(t), r, h_0) \\ v\_dis(t+h) = v\_dis(t) + h * v\_dis\_d(t) \\ v\_dis\_d(t+h) = v\_dis\_d(t) + h * fh \end{cases}, \quad (10)$$

其中:  $dis$  为经预报修正后的扰动观测值;  $ESO\_dis$  为扩张状态观测器对扰动的观测值;  $fhan$  为跟踪微分器,它可以实现对  $v\_dis$  跟踪微分器输入信号  $dis$  的跟踪,同时获得  $dis$  的微分信号  $v\_dis\_d$ 。

### 3.2.2 扰动观测值的超调修正

由图 5 可以明显看出,扰动观测值的超调现象主要发生在被控框架与其承载体之间相对运动趋势方向发生改变的时候,这是因为在相对运动趋势改变时,扰动的真实值,尤其是其中轴系间的摩擦力矩猛然间发生了偏转,这与自动控制原理中的阶跃响应有些相似。由于该过程过于迅速,扰动观测值的误差太大,进而导致扰动观测值的超调;除此之外,由图 5 还可以看出,在观测稳态时,扰动观测值稳定在  $\pm 800$  附近,这与轴系间的摩擦力矩直接相关。由此可见,扰动观测值在观测过程中有了“大致目标值”。为了减小扰动观测值的超调,本文在被控框架与其承载体之间的相对运动趋势方向发生改变时的一小段时间内,利用扰动观测值与“大致目标值”之间的误差对扰动观测值进行相应的引导和修正,直至扰动观测值在一定程度上大致趋近于目标值,然后再令其按照传统的扩张状态观测器的原理对系统中的扰动进行实时观测,从而有效减小了扰动观测值的超调。其具体原理如式(11)所示:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{01} e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_1) + bu + f(z_3, d_{\text{Target}}, dir) \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} |e_1|^{\frac{1}{4}} \text{sign}(e_1) \end{cases}, \quad (11)$$

其中  $d_{\text{Target}}$  为前文所述的“大致目标值”幅值,它可

以根据被控框架的启动力矩并结合平台的具体特征初步选取,  $dir$  为相对运动趋势的方向,  $f(z_3, d_{\text{Target}}, dir)$  为扰动观测值的引导函数,其具体形式在调试过程中具体确定。图 6 为采用上述方法对扰动观测值滞后和超调现象修正后的结果。

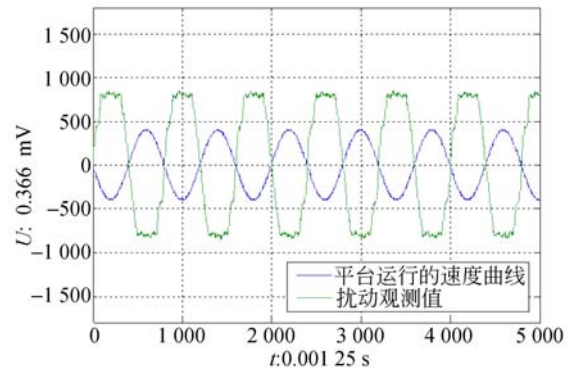


图 6 改进扩张状态观测器的扰动观测值与平台速度之间的关系

Fig. 6 Relationship between platform angular velocity and disturbance observations of improved ESO

由此可见,在“扰动观测值预报”和“大致目标值引导”方法的作用下,传统扩张状态观测器的扰动观测值的滞后和超调现象得到了很好的修正,此时,再进行动态补偿,系统的扰动隔离度将进一步得到提升。

### 3.3 动态线性化补偿

结合扩张状态观测器对系统中“总和扰动”的估计值  $z_3(t)$ ,便可以对系统中的“总和扰动”进行实时补偿,从而抑制扰动对系统的影响,提高系统的扰动隔离度。当系统的参数  $b$  已知时,系统控制量的形式可以改写为:

$$u = y_0 - \frac{z_3(t)}{b}, \quad (12)$$

其中:  $u_0$  为传统控制器单纯根据系统输入输出间的误差运算而得到的控制量,在控制量  $u$  的作用下,系统可以转变成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1(t), x_2(t), t, w(t)) + b(u_0 - \frac{z_3(t)}{b}) \\ y = x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1(t), x_2(t), t, w(t)) - z_3(t) + bu_0 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

由此可见,当  $z_3(t) \rightarrow f(x_1(t), x_2(t), t, \omega(t))$  时,原来的非线性系统转变成线性的纯积分器串联型控制系统,具体形式如式(14)所示,此过程被称为动态补偿线性化过程。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = bu_0 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (14)$$

综上所述,无论被控对象是确定的还是不确定的,线性的还是非线性的,时变的还是时不变的,只要作用在系统中的“总和扰动”有界,便可以通过扩张状态观测器对该“总和扰动”进行观测,进而对其进行动态线性化补偿,从而实现了系统中扰动的主动抑制,即系统在传统控制器的基础上,扰动隔离度得到了进一步的提高。

式(14)中参数  $b$  称为扰动补偿因子,对于一阶被控对象,参数  $b$  的值表示不同对象之间唯一的差别,若近似方法不同,那么同一对象也会得出不同的  $b$  值,而且,由于控制对象模型建立的不精确,参数  $b$  也只能通过估计方法得到近似值。通过扰动观测器估计出的  $b$  值叫做控制量增益或者扰动补偿因子。实验证明,对  $b$  进行估计可得到估计值  $b_0$ ,只要其相对误差小于 30%,对系统扰动隔离效果的影响就可以忽略。

综上所述,设计自抗扰控制器结构如图 7 所示。

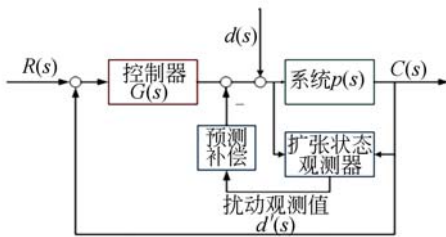


图 7 改进型自抗扰控制器的工作原理  
Fig. 7 Principle of ADRC

### 4 实验结果

为了验证此控制器的控制效果,将光电稳定平台安装在振动平台上进行实验。固定翼飞机给平台带来的扰动频率集中在 3 Hz 以内,其它频率扰动基本均被减震器隔离,因此令振动平台在 0.1 ~ 3 Hz 的频率内任意振动,对稳定平台分别进行速度稳定实验,目标跟踪实验以及控制器的鲁棒性分析实验<sup>[16]</sup>。由于国内生产的稳定平台大多

采用 PID 控制,平方滞后超前控制等,因此,实验中采用经典的平方滞后超前控制器作为对比<sup>[17]</sup>。

图 8 为五轴飞行模拟转台,其中内部的 3 个轴系模拟飞行器的三维飞行状态,外部两个轴系模拟目标的飞行轨迹。从而模拟在载体运动情况下对运动目标的跟踪环境。



图 8 五轴飞行模拟转台  
Fig. 8 Five axis flight simulator

#### 4.1 速度稳定实验

速度稳定实验中,振动平台在 3 Hz 内以任意频率摇摆,稳定平台期望转速为零,实验通过测量陀螺信号中的速度残差,来得出不同方法的扰动隔离度,图 9 和图 10 为稳定平台分别采用平方滞后超前控制器和本文所设计的控制器时所产生的速度残差。振动台以幅值为 1°,频率为 3 Hz 做正弦运动。

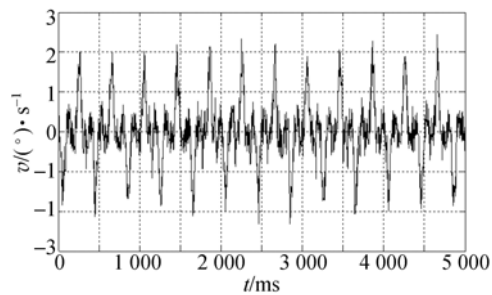


图 9 在 3 Hz 扰动下,采用平方滞后超前法的扰动残差

Fig. 9 Disturbance residuals of square lag-lead controller response to 3 Hz disturbance

由速度残差曲线可以看出,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,平台速度尖峰的幅值和持续时间均显著减小,其峰值大约为 0.51(°)/s,对陀螺数据进行方差计算,采用自抗扰控制器前后,平台相对于零点速度的波动均

方差分别为  $9.58 \times 10^{-9}$  和  $1.21 \times 10^{-5}$ , 稳定程度大约提高了 3 个数量级。而平台在绝对静止的情况下, 陀螺噪声的峰值为  $0.435(^{\circ})/s$ , 这说明本系统速度波动的提升极限为  $0.435(^{\circ})/s$ , 可见自抗扰控制器的控制结果已十分令人满意, 同时也说明, 自抗扰控制策略在高噪声条件下, 也同样适用, 仍然可以给出令人满意的控制结果。

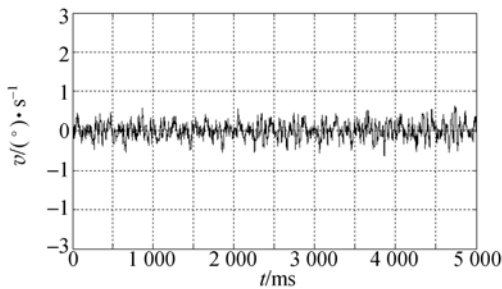


图 10 在 3 Hz 扰动下, 采用本文设计控制器的扰动残差

Fig. 10 Disturbance residual of designed controller response to 3 Hz disturbance

对 3 Hz 下扰动残差数据进行频谱分析, 频谱曲线如图 11 所示。从图 11 可以看到, 隔离扰动后本文所设计控制器的残差量大约为采用平方滞后超前控制器的  $2/9$ , 即对 3 Hz 的扰动隔离度提高了 15.52 dB。另外, 对于其它非线性因素引起的倍频速度分量扰动, 本文方法也有很明显的抑制效果。

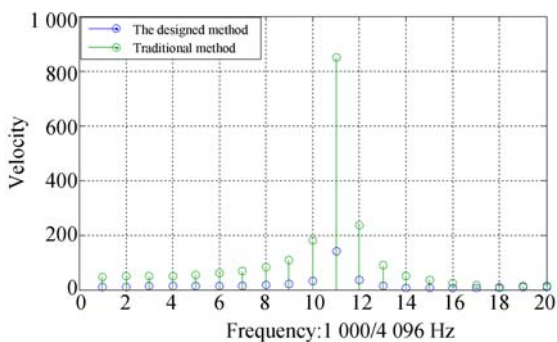


图 11 3 Hz 速度扰动时角速率的频谱图

Fig. 11 Spectra of angle rate under 3 Hz disturbance

表 1 为振动平台在幅值为  $1(^{\circ})$ 、频率为 0.1~3 Hz 间每隔 0.5 Hz 摇摆时, 本文方法后相比于传统方法扰动隔离度提高程度。由表 1 可看出, 在扰动频率为 0.1 Hz 时, 扰动隔离度提高了 5.88 dB, 即将近提高了一倍, 而且随着扰动频率的

提高, 扰动的隔离效果更加明显, 最多提高了 15.52 dB, 这说明本文方法相比于其它常用方法, 在平台实际工作频率段内, 对扰动隔离能力的提升非常明显。

表 1 相比于平方滞后超前控制器, 本文方法对扰动隔离度的改善效果

Tab. 1 Improvement of disturbance isolation of designed method compared with square lag-lead controller

Disturbance frequency/Hz	Improvement of disturbance isolation degree /dB
0.1	5.88
0.5	8.96
1.0	9.72
1.5	10.98
2.0	14.46
2.5	15.08
3.0	15.52

## 4.2 目标跟踪实验

在飞行模拟转台以幅值为  $1^{\circ}$ 、频率在 3 Hz 以内的任意频率进行晃动时, 使稳定平台跟踪器处于最长焦距(此时角度值量纲为  $53 \mu\text{rad}$ )来跟踪无限远处的固定目标, 通过视轴偏离目标的角度得出平台的稳定精度<sup>[18]</sup>。

图 12 和图 13 为分别采用平方滞后超前控制和本文控制方法时, 视轴偏离目标点的运动范围, 此时, 模拟转台以幅值为  $1^{\circ}$ 、频率为 3 Hz 做正弦运动。对比图 12 和图 13 可以发现, 图 13 的视轴运动范围明显减小, 大约为  $\pm 0.318 \text{ mrad}$ , 仅为图 12 的  $1/4$ 。

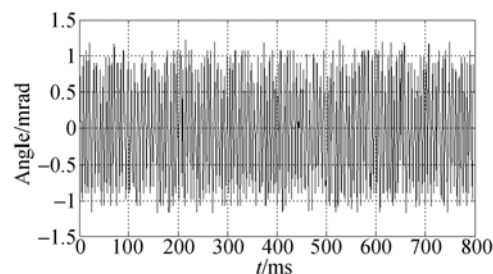


图 12 在 3 Hz 扰动下, 采用平方滞后超前控制器视轴偏离目标点的情况

Fig. 12 Range of visual axis departed from target with square lag-lead controller and 3 Hz disturbance

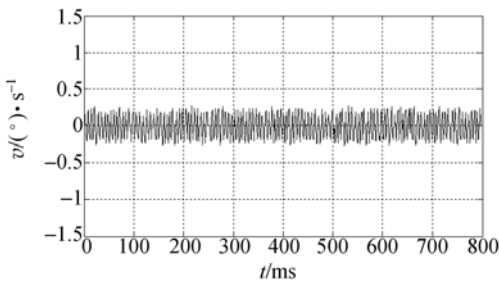


图 13 在 3 Hz 的扰动下,采用本文控制器视轴偏离目标点的范围

Fig. 13 Range of visual axis departed from target with designed controller and 3 Hz disturbance

令飞行模拟转台以幅值为  $1^\circ$ , 频率在  $0.1\sim 3$  Hz 之间每隔 0.5 Hz 晃动一次, 重复上述目标跟踪实验, 记录各个频率点处, 系统视轴的运动角度范围, 结果如表 2。分析实验结果可知, 对于国内生产的稳定平台, 例如 618 所的 T6 平台, 其视轴运动角度范围约为  $0.1\text{ mrad}$ , 而本文所设计控制器的视轴运动角度范围约为  $0.05\text{ mrad}$ , 大约提高了一倍, 故可以使视轴对目标的跟踪更加准确。本文设计的控制方法的目标跟踪效果已与国外同类平台中的佼佼者接近, 如美国的广域海上监视系统 ( $-10\ \mu\text{rad}$ ), 以色列的 Esp-600c- $15\ \mu\text{rad}$  等。

表 2 3 Hz 内各频率点视轴偏离目标点的范围

Tab. 2 Range of visual axis departed from target in given frequencies within 3 Hz

Frequency /Hz	The designed method /mrad	Traditional method /mrad
0.1	$\pm 0.057$	$\pm 0.109$
0.5	$\pm 0.162$	$\pm 0.789$
1.0	$\pm 0.219$	$\pm 1.121$
1.5	$\pm 0.283$	$\pm 1.191$
2.0	$\pm 0.298$	$\pm 1.211$
2.5	$\pm 0.331$	$\pm 1.272$
3.0	$\pm 0.369$	$\pm 1.289$

### 4.3 鲁棒性分析

为了验证本文所设计控制器的鲁棒性, 令控制对象的参数在  $\pm 15\%$  内变化, 并保持控制器参数不变, 再次进行速度稳定和目标跟踪实验。得到  $0.1\sim 3$  Hz 内速度稳定和目标跟踪结果, 如表 3 所示。

表 3  $k=28$  和  $36$  时扰动隔离度改进程度

Tab. 3 Improvement of disturbance isolation of designed method at  $k=28$  or  $k=36$

Disturbance Frequency/Hz	$\Delta = -15\%$ /dB	$\Delta = +15\%$ /dB
0.1	7.37	7.52
0.5	9.98	9.82
1.0	10.85	10.71
1.5	11.43	11.33
2.0	12.29	12.48
2.5	12.34	12.36
3.0	12.50	12.61

表 4  $k=28$  和  $36$  时, 视轴的晃动范围

Tab. 4 Range of visual axis departed from target of designed controller at  $k=28$  or  $k=36$

Disturbance frequency/Hz	$\Delta = -15\%$ /mrad	$\Delta = +15\%$ /mrad
0.1	$\pm 0.072$	$\pm 0.080$
0.5	$\pm 0.211$	$\pm 0.224$
1.0	$\pm 0.286$	$\pm 0.269$
1.5	$\pm 0.282$	$\pm 0.273$
2.0	$\pm 0.352$	$\pm 0.344$
2.5	$\pm 0.429$	$\pm 0.434$
3.0	$\pm 0.461$	$\pm 0.489$

实验结果表明, 当系统参数变化时, 自抗扰控制器的速度稳定性能依然至少优于平方滞后超前控制器 1 倍以上, 证明其具有较强的鲁棒性。

## 5 结 论

本文通过建立光电稳定平台模型, 分析影响其性能的扰动, 并结合平台模型特点, 提出一种基于自抗扰理论的控制系统设计方法。设计了基于扰动频率自适应的扩张状态观测器。提出了预报修正扰动观测值的方法。对总和扰动进行动态线性化补偿, 结合平台具体参数, 设计自抗扰控制器, 并在模拟振动平台上进行了速度稳定和跟踪实验。

实验结果表明: 对于幅值为  $1^\circ$ , 频率为  $0.1\sim 3$  Hz 的载体扰动, 本文设计的控制系统比国内主要使用的平方滞后超前控制器的系统扰动隔离度至少提高了一倍, 已接近国外同类先进设备的水平, 而且被控对象参数在  $15\%$  内任意变化时, 本

文控制器仍具有非常好的速度稳定性和目标跟踪精度,而且控制器具有很强的鲁棒性。

综上所述,相比于经典控制方法,本文所设计

的控制器大大提高了光电稳定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。

### 参考文献:

- [1] 杨丹迪,王晓珍,胡发兴,等.光电稳定平台的抗扰问题研究[C].烟台:第30届中国控制年会,2011,7:22-24.  
YANG D D, WANG X B, HU F X, *et al.*. On disturbance rejection on a photoelectrical stabilized platform[C]. *Yantai: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, 2011, 7: 22-24. (in Chinese)
- [2] 赖爱芳,郭毓,郑立君.航天器姿态机动及稳定的自抗扰控制[J].控制理论与应用,2012(3):401-407.  
LAI A F, GUO Y, ZHENG L J. Active disturbance rejection control for spacecraft attitude maneuver and stability[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, (3): 401-407. (in Chinese)
- [3] 王丽君,童朝南,李擎,等.实用自抗扰控制在大时滞厚度自动监控系统中的应用[J].控制理论与应用,2012(3):368-374.  
WANG L J, TONG CH N, LI Q, *et al.*. Practical active disturbance rejection solution for monitoring automatic gauge control system with large time-delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2012(3): 368-374. (in Chinese)
- [4] 黄浦,葛文奇,李友一,等.航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制[J].光学精密工程,2011,19(4):812-819.  
HUANG P, GE W Q, LI Y Y, *et al.*. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 812-819. (in Chinese)
- [5] 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.  
QIU X B, DOU L H, SHAN D SH, *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)
- [6] 高志强.控制工程的抗扰范式[C].29届中国控制年会,2010.7:29-31.  
GAO ZH Q. On disturbance rejection paradigm in control engineering [C]. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, 2010, 7: 29-31. (in Chinese).
- [7] 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.  
LIAN M, HAN ZH Y, FU H Y. Application of active disturbance rejection control technique to satellite attitude simulation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 616-621. (in Chinese)
- [8] 阮久宏,杨福广,李贻斌.车辆加速度自抗扰控制[J].控制理论与应用,2011,28(9):1189-1194.  
RUAN J H, YANG F G, LI Y B. Active disturbance-rejection control in vehicle acceleration [J]. *Control Theory & Application*, 2011, 28 (9): 1189-1194. (in Chinese)
- [9] 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,2009,5.  
HAN J Q. *Active Disturbance Rejection Control Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009, 5. (in Chinese)
- [10] 张绍德,陈主成.一种基于干扰观测器的伺服系统设计[J].电子科技大学学报,2005(2):85-88.  
ZHANG SH D, CHEN ZH CH. Design method for servo-system based on disturbance observer [J]. *Journal of UEST of China*, 2005 (2): 85-88. (in Chinese)
- [11] 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.  
LI J Q, DING C, KONG D J, *et al.*. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 998-1004. (in Chinese)
- [12] 张黎黎,黄一,吕俊芳.机载光电跟踪平台伺服系统中电流环的设计与仿真[J].理论与实践,2003,23(6):15-21.  
ZHANG L L, HUANG Y, LV J F. Design and simulation of current-loop for servo of airborne electro-optical pointing and tracking platform [J]. *Theory and Practice*, 2003, 23(6): 15-21. (in Chinese)
- [13] 王帅,李洪文,孟浩然,等.光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J].光学精密工程,2011,19

- (10): 2442-2449.
- WANG SH, LI H W, MENG H R, *et al.*. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(10): 2442-2449. (in Chinese)
- [14] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. *Proceedings of the American Control Conference*. Evanston, IL: IEEE,2003:4989-4996.
- [15] GAO Z Q. A paradigm shift in feedback control system design[C]. *In Proceedings of the American Control Conference*,2009:2451-2457.
- [16] 王广雄,何朕. 控制系统设计[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- WANG G X, HE ZH. *Control System Design* [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2008. (in Chinese)
- [17] 孙辉. 机载光电平台目标定位与误差分析[J]. *中国光学*, 2013,6(6): 912-918.
- SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(6): 912-918. (in Chinese)
- [18] 孙辉,郎小龙,李志强,等. 动载体光电平台视轴稳定精度的检测[J]. *光学精密工程*, 2011,19(9): 2131-2137.
- SUN H, LANG X L, LI ZH Q, *et al.*. Measurement for LOS stabilization accuracy of electro-optical imaging system on moving carrier[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(9): 2131-2137. (in Chinese)

## 作者简介:



魏 伟(1987—),男,甘肃兰州人,博士研究生,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事机载光电平台视轴稳定方面的研究。E-mail: vvictm@mail.ustc.edu.cn

## 导师简介:



戴 明(1965—),男,湖北潜江人,研究员,博士生导师,1993年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事机载设备图像处理及动基座稳定技术方面的研究。E-mail: daim@vip.sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)