

文章编号 1004-924X(2014)08-2223-09

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

李贤涛^{1,2}, 张 葆^{1*}, 沈宏海¹

(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 100039)

摘要:提出一种基于电流环的自抗扰控制新方法以进一步提高航空光电稳定平台的抗干扰能力。首先,利用电流环将硬件电路中复杂的电机模型简化为一阶模型,从而减小了由于参数过大噪声对扰动观测值的影响;然后,采用带宽单参数化的设计方法为简化后的一阶系统设计了扩张状态观测器及带扰动补偿的控制规律;最后,在飞行模拟转台中测试了自抗扰控制器对 2.5 Hz 以内任意频率扰动的抑制能力,并与目前航空光电稳定平台中常用的平方滞后超前校正方法进行了对比。实验结果表明:与传统的平方滞后超前控制器相比,采用自抗扰控制器后系统的扰动隔离度至少提高了 6.56 dB;而且随着扰动频率大于 0.5 Hz,自抗扰控制器的扰动抑制能力更为明显,扰动隔离度最多可提高 12.03 dB。同时,自抗扰控制器具有很强的鲁棒性,允许被控对象参数在 15% 的范围内任意变化,可满足高精度航空光电稳定平台的性能要求,对提高航空光电稳定平台控制系统的抗扰动性能具有较高的实用价值。

关键词:航空光电稳定平台;自抗扰控制器;扩张状态观测器;扰动补偿;扰动隔离度;电流环;
中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2223

Improvement of isolation degree of aerial photoelectrical stabilized platform based on ADRC

LI Xian-tao^{1,2}, ZHANG Bao^{1*}, SHEN Hong-hai¹

(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 100039, China)*

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

Abstract: A new Active Disturbance-rejection Controller (ADRC) based on a current loop was proposed to improve the isolation degree of disturbance for an aerial photoelectrical stabilized platform. First, the structure diagram of a dc torque motor was simplified to a first-order model by the current loop to avoid the influence of noise from the parameters on disturbance observation values. And then, based on bandwidth parameterization, an extended state observer and the control law with disturbance compensation were designed. Finally, an experiment was performed to test the disturbance rejection performance of the ADRC at the speed disturbance from 0.1 Hz to 2.5 Hz and to compare with the

收稿日期:2013-10-06;修订日期:2013-12-01.

基金项目:吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001);林业公益性行业科研专项资助项目(No. 201204515)

traditional square lag-lead compensation method. Experiment results show that the ADRC can reduce the disturbance error by 6.56 dB at least. The isolation degree of disturbance is improved obviously when the perturbation frequency is more than 0.5 Hz, and the best isolation degree of disturbance is increased by 12.03 dB. Moreover, the ADRC have strong robustness, allowing the range of system parameters to change in 15%. In conclusion, the ADRC based on current loop satisfies the performance requirements of aerial photoelectrical stabilized platforms and has higher practical values.

Key words: aerial photoelectrical stabilized platform; active disturbance rejection controller; extended state observer; disturbance compensation; isolation degree of disturbance; current loop

1 引言

光电稳定平台广泛应用于航天、航空领域的可见、红外和激光跟踪系统^[1]中。它能够有效隔离载体(导弹、飞机、战车、舰船)的角运动干扰,使瞄准装置具备较高的指向精度以及快速的机动能力^[2],从而可以稳定地跟踪目标,减小由于颤振引起的图像模糊,提高成像质量。

光电稳定平台采用大力矩电机直接驱动,故负载上的扰动对系统的影响更为直接^[3]。该扰动主要为载体对平台速度回路的扰动^[4]。它通过平台轴系间的摩擦力直接影响光学镜头的视轴指向,因此,提高扰动隔离度是提高系统成像质量的关键。目前仍然采用“被动抗扰”的思想来提高扰动隔离度,即通过提高开环系统的型别以及低频段增益来减小扰动对系统的影响。然而,机械谐振环节严格限制了系统的开环剪切频率,而且在传统设计模式下,系统的低频段增益难以做到更高^[5],因此,若采用该类控制器,则系统的扰动隔离度水平难以得到本质上的提升。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,不易在工程中得到推广和应用^[6]。

与之相比,自抗扰控制技术^[7-8]是一种基于“主动抗扰”思想的新型控制技术。它设计简便,不依赖于系统的模型,通过分析输入输出信号来提取系统中的扰动信息,从而估计系统在运动时所受到的各种外扰以及系统机理本身决定的内扰的总和作用^[9]。然后结合传统控制器共同生成控制量,对系统中的扰动进行“主动”与“被动”双重

控制。

实验中发现若对二阶及以上系统中的扰动进行实时观测,则需要较大的扩张状态观测器参数,而且系统的阶次越高,需要的参数越大。而参数过大将直接导致扰动观测值在系统噪声的影响下产生剧烈波动,十分不利于扰动的前馈补偿,严重时,可能会导致系统不稳定。

针对这一问题,本文以某型两轴两框架航空光电稳定平台为研究对象,首先在硬件电路中采用电流环对复杂的电机模型进行处理,使其简化为一阶模型;然后设计相应的二阶扩张状态观测器(Expanded State Observer, ESO)对简化后系统的扰动进行实时观测,在此基础上结合经典的平方滞后超前控制方法共同生成控制量,从而实现光电稳定平台对扰动的主动抑制。

2 光电稳定平台数学模型分析与简化

本文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测量相对于惯性空间的角速率,通过高精度轴角编码器测量其角位置^[10]。由于方位轴和俯仰轴相互正交,二者之间扰动的耦合影响很小,可以忽略,而且两通道的控制策略相似,所以本文仅以方位轴讨论自抗扰控制器的设计。

速度回路的控制对象为二级惯性环节和一级振荡环节相串联的高阶模型。其中:二级惯性环节代表力矩电机的机电特性和电气特性,惯性环节的时间常数分别为电机的机电时间常数和电气时间常数;振荡环节代表控制机架的机械谐振特性^[11]。为了减小系统噪声因参数过大对高阶系统中扰动观测值的影响,本文在硬件电路中引入

电流反馈传感器和电流反馈校正网络构成电流闭

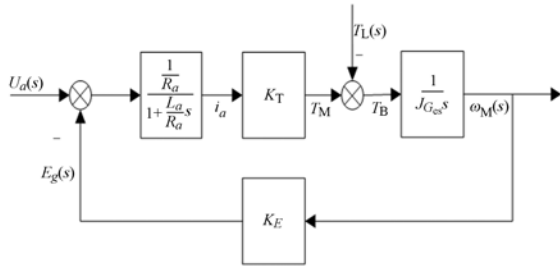


图 1 直流力矩电机开环驱动装置的结构图

Fig. 1 Structure diagram of open-loop driver for DC torque motor

环控制系统,以改变速度回路控制对象的特性,使其成为一阶系统,其原理图如图 1 和图 2 所示。

图 2 中 β_1 为电流反馈系数; $\omega_1(s)$ 为电流环校正函数; $\omega_{PWM}(s)$ 为双极性模式 PWM 功率转换电路; $T_L(s)$ 为影响负载转速的扰动力矩。若设计 $\omega_1(s)$ 使一定带宽内电流环的闭环传递函数 $G_i(s) = 1$, 由于电流环采用模拟电路,而且其与速度环相比,带宽较宽,因而电流的调节过程往往比速度的变化过程快得多,即比反电动势(与电机的转速相联系)的变化快得多,因此电流环的设计在很大程度上抑制了反电动势对系统的影响^[12]。所以图 2 可简化为图 3。

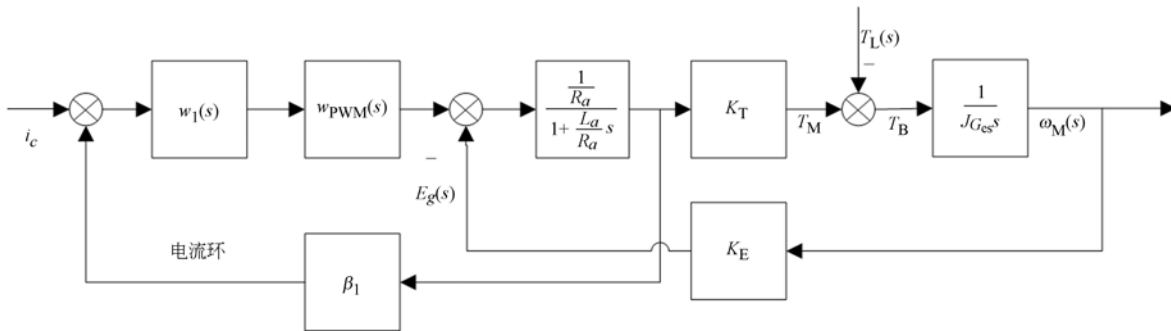


图 2 电流环的工作原理

Fig. 2 Principle of current loop

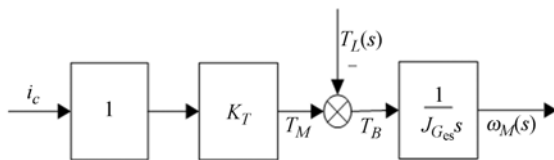


图 3 经电流环简化后的直流力矩电机结构图

Fig. 3 Structure diagram of DC torque motor simplified by current loop

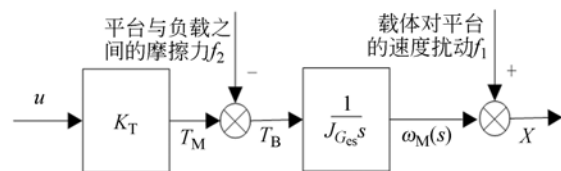


图 4 系统中扰动的作用原理

Fig. 4 Principle of disturbances in system

按照上述原理,采用电流环对光电稳定平台的方位轴进行处理,结合系统具体的各项参数,最终得到在无扰动作用的情况下,系统的传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{31}{s} \quad (1)$$

3 光电稳定平台的扰动分析

光电稳定平台的扰动主要为平台轴系的摩

擦力和载体对平台的速度扰动,其作用原理如图 4 所示。

$$\omega_M(s) = x(s) - f_1(s) = \frac{1}{J_{G_{es}}s} (K_T u(s) - f_2(s)) \quad (2)$$

即:

$$x(s) = \frac{K_T}{J_{G_{es}}s} [u(s) + (\frac{J_{G_{es}}s}{K_T} f_2(s) - \frac{f_1(s)}{K_T})] \quad (3)$$

令 $d(s) = \frac{J_{G_{es}}s}{K_T} f_2(s) - \frac{f_1(s)}{K_T}$, 根据式(4), 图

4 可以简化为图 5。

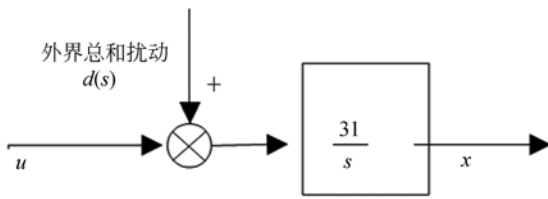


图 5 经等效处理后系统中扰动的作用原理

Fig. 5 Principle of disturbance by equivalent processing

图中 x 为光电稳定平台方位轴的角速率; $d(s)$ 为系统中的“总和扰动”; u 为控制量。由此可以得出,在扰动作用下,系统的传递函数为:

$$x(s) = \frac{31}{s} [u(s) + d(s)]. \quad (4)$$

4 平方滞后超前控制器的控制方法

4.1 平方滞后超前控制器的设计

平方滞后超前控制器中的平方滞后校正环节使得校正后系统的开环传递曲线在低频段的斜率为 -60 dB , 这有利于大幅度提高开环增益, 从而减小扰动对系统稳定精度的影响。此外, 低频段增益的提高, 相对降低了中频段曲线的高度, 有利于减小机械谐振的影响。同时, 利用超前校正环节, 在平方滞后校正环节的基础上使系统具有较宽的频带和更好的动态性能。经设计, 本次实验中, 采用平方滞后超前控制器的参数为:

$$G_v(s) = \frac{258(0.0111s+1)(0.03318s+1)^2}{(0.0056s+1)(0.2709s+1)^2}, \quad (5)$$

在该控制器的作用下, 系统的闭环带宽为

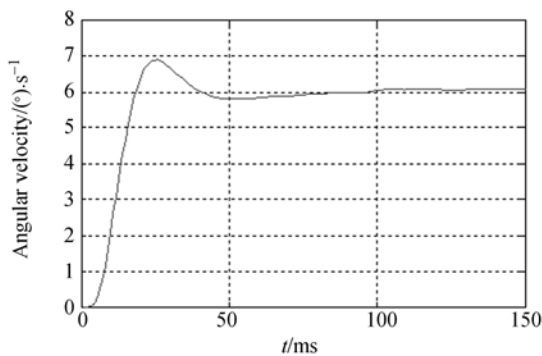


图 6 速率稳定回路阶跃响应

Fig. 6 Step response of velocity-stabilized loop

26.6 Hz。图 6 为系统在阶跃信号激励下的响应曲线。其中, 超调量 $\sigma = 15\%$, 上升时间 $t_r = 18 \text{ ms}$ 。

4.2 平方滞后超前控制器的不足

平方滞后超前控制器的核心思想为“被动抗扰”, 即通过提高开环系统的型别来进一步提高系统低频段的增益, 从而提高系统的扰动抑制能力。然而, 开环增益的提高, 势必会导致相位稳定阈值的减少, 不利于系统的稳定。而且, 由于机械谐振的影响, 系统的开环剪切频率会受到严格的限制, 因此很难将系统的低频段增益和带宽做到更高水平, 所以采用基于“被动抗扰”思想的控制器, 系统的扰动隔离度难以得到本质上的提升。

5 光电稳定平台自抗扰控制器的设计

自抗扰控制技术 (Active Disturbance Rejection Controller, ADRC) 是一种基于“主动抗扰”思想的新型控制技术, 其核心思想是将外界扰动和系统模型的不确定性对系统的影响统称为“总和扰动”, 并将其扩张为一个新的状态; 然后, 通过设计 ESO 来对总和扰动进行实时估计, 并根据估计值生成控制量, 从而实现主动抑制扰动的目的。具体工作原理如图 7 所示。

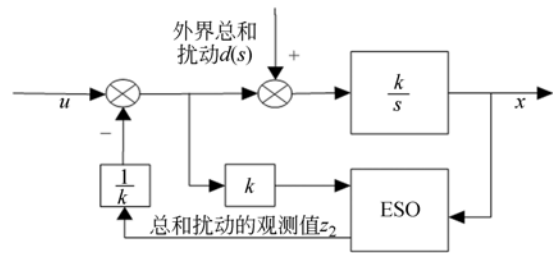


图 7 自抗扰控制器的工作原理

Fig. 7 Principle of ADRC

5.1 扩张状态观测器的设计^[13-14]

由于 ESO 是一种基于状态空间的设计理论, 因此结合扰动在系统中的作用原理将被控对象的传递函数(3)改写成状态方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 31u + d \\ y = x_1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: d 对应图 5 中的“外界总和扰动”, 令: $x_3 =$

d ,即将 d 作为一个被扩张的状态,并记其导数为 $a(t)$,由此式(6)可以改写为二阶系统的形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + 31u \\ \dot{x}_2 = a(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

针对上述二阶系统设计相应的二阶扩张状态观测器对“外界总和扰动” d 进行实时估计,实现 $z_2 \rightarrow d$,具体形式如式(8)所示:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} e_1 + bu \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} fal(e_1, \frac{1}{2}, \delta) \\ y = z_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中:

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

式中: 2δ 为 $fal(e, \alpha, \delta)$ 函数中线性段区间的长度,它可以避免观测值在原点附近发生高频振荡。为了验证自抗扰控制器对噪声的适应能力,实验中使用的陀螺噪声较大,幅值为 0.435 ($^\circ$)/s, δ 的取值应该大于陀螺的噪声峰值,本次实验中 $\delta=0.6$ ($^\circ$)/s。本文采用基于带宽概念的单参数化设计方法^[15-17]对扩张状态观测器的参数 β_{01} 和 β_{02} 进行设计。该方法中, $\beta_{01} = 2\omega$ 、 $\beta_{02} = \omega^2$,故只需要调节参数 ω 便可以完成扩张状态观测器的设计,大大简化了设计过程,在实验中,选取 $\omega=200$ 。

5.2 自抗扰控制器设计

结合扰动观测值 z_2 对系统的控制量 u 进行修正,令 $u = u_0 - z_2/31$,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, $z_2/31$ 为扰动前馈补偿量,将 u 带入式(6)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 31u_0 + d - z_2 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

由此可见,只要设计的状态观测器合适,便可以实现 $z_2 \rightarrow d$,使 $d - z_2 \rightarrow 0$,实现了对系统扰动的“主动抑制”,从而在经典反馈控制策略的基础上进一步提高了系统的扰动隔离度。

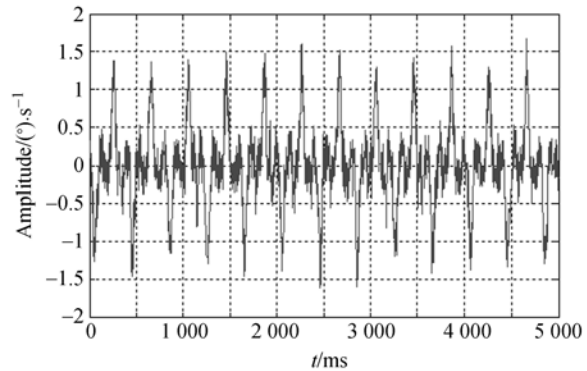
6 实验结果

为了测试自抗扰控制器较传统平方滞后超

前控制器对扰动抑制能力的提高程度。本文将光电稳定平台安装于飞行模拟转台上进行实验。在飞行模拟转台以 2.5 Hz(工程中,载体最大的晃动频率)内任意频率进行摇晃时,分别进行速度稳定、目标跟踪和控制鲁棒性实验。

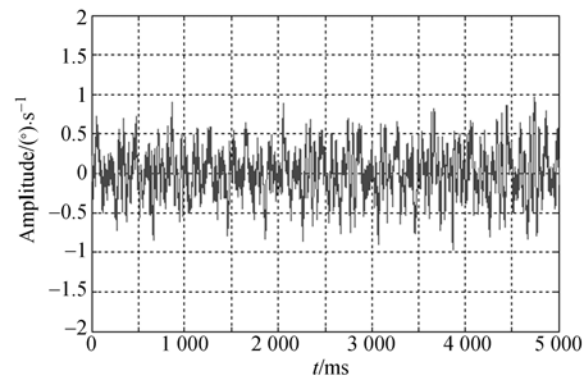
6.1 速度稳定实验

在飞行模拟转台以 2.5 Hz 内的任意频率进行晃动时,令光电稳定平台的期望转速为零,通过测定陀螺信号相对于零点的波动情况来分析光电稳定平台对扰动的抑制能力。图 8(a)和图 8(b)为飞行模拟转台以 1° 、 2.5 Hz 做正弦运动时,分别采用平方滞后超前控制器和自抗扰控制器时,光电稳定平台的速度相对于零点的波动情况。



(a)平方滞后超前控制器的扰动响应曲线

(a) Response curves of square lag-lead controller



(b)自抗扰控制器的扰动响应曲线

(b) Response curves of ADRC

图 8 2.5 Hz 扰动下,采用不同控制器的扰动响应曲线

Fig. 8 Response curves by different controllers with disturbance of 2.5 Hz

对比图 8(a)和图 8(b)可以明显发现,图 8(b)中尖峰的幅值和持续时间均显著减小,其峰值大

约为 $0.5(^{\circ})/s$,已十分接近实验系统的提升极限 $0.435(^{\circ})/s$ (实验中选取陀螺的噪声峰值),由此可见,自抗扰控制器的控制结果已令人十分满意。

通过傅里叶变换对图 8(a)和图 8(b)中的数据进行了频谱分析,结果如图 9 所示。由图 9 可以明显看出,相对于零点的波动中,采用自抗扰控制器的速度在 2.5 Hz 的波动量大约为采用平方滞后超前控制器时的 $1/4$,即系统对于 2.5 Hz 扰动的抑制能力提高了 11.97 dB 。除此之外,自抗扰控制器对摩擦、不平衡力矩等非线性因素所引起的倍频分量同样具有非常好的抑制作用。

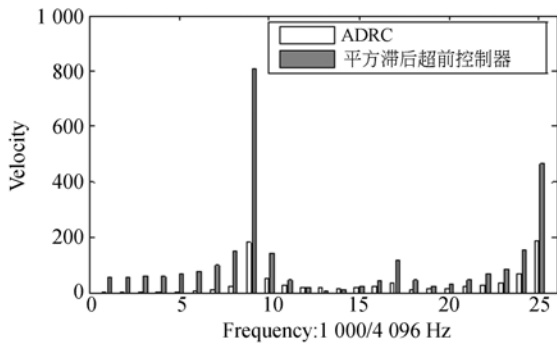


图 9 2.5 Hz 的速度扰动下,角速率的傅里叶变换
Fig. 9 Fourier transform of angular velocity with disturbance speed of 2.5 Hz

令飞行模拟转台以幅值为 1° 、频率在 $0.1\sim 2.5\text{ Hz}$ 之间每隔 0.5 Hz 进行一次晃动,重复上述速度稳定实验,结果如表 1 所示。显而易见,相比于传统平方滞后超前控制器,采用自抗扰控制器系统的扰动隔离度至少提高了 6.56 dB ,且当扰动频率大于 0.5 Hz ,平方滞后超前控制器的扰动抑制能力开始下降,自抗扰控制器的优势则更为明显,最好的情况提高了 12.03 dB 。

表 1 与平方滞后超前控制器相比,ADRC 的扰动隔离度的提高程度

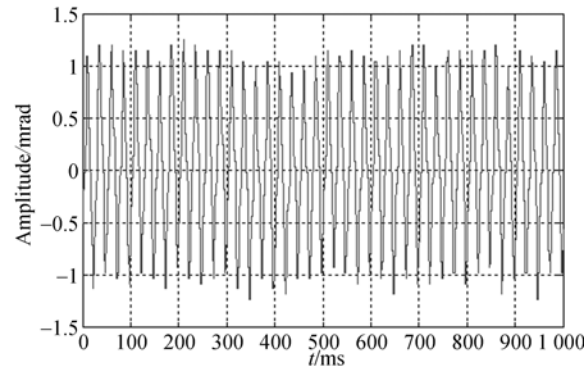
Tab. 1 Improvement of disturbance isolation degree of ADRC as comparing with square lag-lead controller

扰动频率/Hz	速度扰动隔离度的提高程度/dB
0.1	6.56
0.5	10.35
1.0	11.76
1.5	11.87
2.0	12.03
2.5	11.97

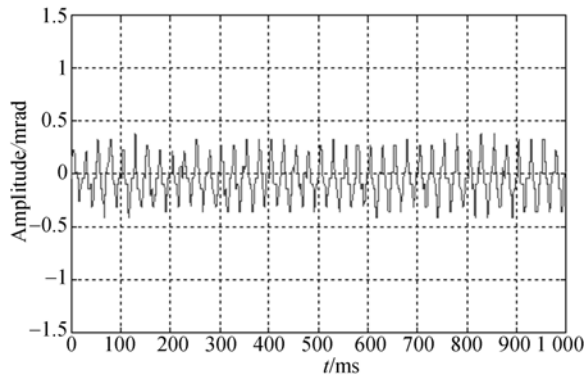
6.2 目标的跟踪实验

在飞行模拟转台以幅值为 1° 、频率为 2.5 Hz 以内的任意频率进行晃动时,令光电稳定平台的跟踪器处于最长焦距对无限远的固定目标进行跟踪。通过测定视轴相对于目标点的偏离角度分析平台视轴的稳定精度。当跟踪器处于最长焦距时,角度值量纲为 $53\ \mu\text{rad}$ 。

图 10(a)和图 10(b)为飞行模拟转台以幅值为 1° 、频率为 2.5 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和自抗扰控制器时,目标偏离中心点的运动范围。对比图 10(a)和图 10(b)可以明显发现,图 10(b)所表示的视轴运动范围明显减小,大约为 $\pm 0.424\text{ mrad}$,仅为图 10(a)的 $1/3$ 。



(a)采用平方滞后超前控制器时视轴的晃动范围
(a)Sloshing range of visual axis of square lag-lead controller



(b)采用自抗扰控制器时视轴的晃动范围
(b)Sloshing range of visual axis of ADRC

图 10 2.5 Hz 的扰动下,平台处于跟踪状态时采用两种不同控制器时视轴的晃动范围

Fig. 10 Sloshing range of visual axis by using 2 different controllers with disturbance of 2.5 Hz when platform is in tracking state

令飞行模拟转台以幅值为 1° 、频率在 $0.1\sim 2.5$ Hz之间每隔 0.5 Hz进行以晃动,重复上述目标跟踪实验,在各个频率处,系统视轴的运动角度范围如表2所示。由表2不难看出,相比于传统平方滞后超前控制器,采用自抗扰控制器的视轴运动的角度范围更小,跟踪效果更为精确。

表2 平台处于跟踪状态时视轴的晃动范围

Tab.2 Slosing range of visual axis when platform is in tracking state

扰动频率	自抗扰控制器	平方滞后超前控制器
/Hz	/mrad	/mrad
0.1	± 0.053	± 0.106
0.5	± 0.212	± 0.689
1.0	± 0.265	± 1.007
1.5	± 0.318	± 1.113
2.0	± 0.424	± 1.219
2.5	± 0.424	± 1.272

6.3 控制器鲁棒性实验

为了测试自抗扰控制器的鲁棒性能,通过人为增加负载的方式改变被控对象参数,使式(3)所示的模型参数 k 值在 $\pm 15\%$ 之间任意变化,然后重新进行速度稳定实验和目标跟踪实验,实验结果如表3所示。

表3 $\Delta = -15\%$ 和 $\Delta = 15\%$ 时扰动隔离度的提高程度和视轴晃动范围

Tab.3 Improvement of disturbance isolation degree and sloshing range of visual axis when $\Delta = -15\%$ and $\Delta = 15\%$

扰动频率/ Hz	$\Delta = -15\% /$ $\text{dB} \cdot \text{mrad}^{-1}$	$\Delta = 15\% /$ $\text{dB} \cdot \text{mrad}^{-1}$
0.1	$6.18/\pm 0.053$	$6.15/\pm 0.053$
0.5	$9.95/\pm 0.265$	$10.08/\pm 0.212$
1.0	$10.98/\pm 0.265$	$10.57/\pm 0.265$
1.5	$11.27/\pm 0.318$	$11.19/\pm 0.371$
2.0	$11.52/\pm 0.424$	$11.43/\pm 0.477$
2.5	$11.31/\pm 0.477$	$11.42/\pm 0.477$

参考文献:

[1] 王锐. 激光红外主被动复合导引系统[J]. 中国光

显而易见,与表1和表2相比,当模型参数的变化范围 Δ 为 $\pm 15\%$ 时,采用自抗扰控制器的光电稳定平台的速度稳定性和跟踪精度依然比单独采用平方滞后超前控制器时至少要好1倍,可以很好地满足实际工程中变化范围为 $\pm 12\%$ 的需要。因此,基于电流环的自抗扰控制器具有较强的鲁棒性。

7 结 论

为了进一步改善光电稳定平台的低速性能,提高平台的扰动隔离度,本文对光电稳定平台的扰动特性进行了分析,并结合自身特点提出了一种基于电流环的自抗扰控制方案。本文首先在硬件电路中采用电流环对原系统模型进行处理,使原系统中由二级惯性环节和一级振荡环节串联的高阶系统简化成为一阶系统;然后,在经典平方滞后超前“被动抗扰”控制策略的基础上,加入扩张状态观测器及扰动前馈补偿算法进行“主动抗扰”。

实验结果表明:针对幅值为 1° 、 $0.1\sim 2.5$ Hz的载体扰动,相比于传统的平方滞后超前控制器,采用自抗扰控制器的扰动隔离度至少提高了 6.56 dB,且当扰动频率大于 0.5 Hz时,自抗扰控制器的优势更为明显,最好的情况为提高 12.03 dB,而且,自抗扰控制器具有较强的鲁棒性,允许被控对象参数在 15% 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的难度。

综上所述,相比于经典的控制方法,基于电流环的自抗扰控制方案进一步提高了平台对扰动的抑制能力。这为进一步提高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。

学,2013,6(4):536-543.

WANG R. Compound guided system with active laser imaging and passive infrared imaging[J]. Chi-

- nese Optics*, 2013, 6(4): 536-543. (in Chinese)
- [2] 徐伟, 朴永杰. 从 Pleiades 剖析新一代高性能小卫星技术发展[J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 9-19.
XU W, PIAO Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the Pleiades[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 9-19. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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.
YANG D D, WANG X B, HU F X, *et al.*. Disturbance rejection on a photoelectrical stabilized platform [C]. *Yantai: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, 2011. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19-23.
HAN J Q. Active disturbances rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23. (in Chinese)
- [8] 高志强. 控制工程的抗扰范式[C]. 北京: 第 29 届中国控制年会, 2010.
GAO ZH Q. Disturbance rejection paradigm in control engineering [C]. *Beijing: Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, 2010. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 孙树红, 赵长海, 万秋华, 等. 小型光电编码器自动检测系统[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 600-606.
SUN SH H, ZHAO CH H, WAN Q H, *et al.*. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 600-606. (in Chinese)
- [11] 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.
KE J, SU B K, ZENG M. Nonlinear stick-slip friction compensation for DC motors [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(6): 736-739. (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] 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)
- [14] 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.
HAN J Q. *Active Disturbances Rejection Control Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization

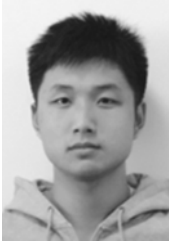
based controller tuning[C]. *Proceedings of the American Control Conference, Evanston, IL: IEEE*, 2003:4989-4996.

- [16] GAO Z Q. A paradigm shift in feedback control system design[J]. *In Proceedings of the Ameri-*

can Control Conference, 2009:2451-2457.

- [17] GAO Z Q, HUANG Y, HAN J Q. An alternative paradigm for control system design [J]. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001,12(4-7),5: 578-4585.

作者简介:



李贤涛(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,2009年于吉林大学物理学院获得学士学位,主要从事视轴稳定及自抗扰控制方面的研究。E-mail: lixiantao_86@126.com



张 葆(1966—),男,吉林磐石人,研究员,工学博士,博士生导师,1989年、1994年于长春光机学院分别获得学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空光电成像技术研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)