

## 机载光电稳定平台自抗扰控制研究

郑春艳<sup>1,2</sup>, 张红刚<sup>2</sup>, 冯兴伟<sup>2</sup>, 高军科<sup>2</sup>

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 为了提高机载光电稳定平台的稳定精度, 在分析研究机载光电稳定平台工作原理的基础上, 对稳定控制回路进行了分析建模, 简要分析了影响稳定平台精度的因素和经典控制算法存在的不足, 提出了基于自抗扰控制技术的改进算法。首先, 将电机模型进行处理, 简化为二阶积分串联型环节; 然后, 设计扩张观测器对扰动进行实时估计, 设计带扰动补偿的反馈控制律; 最后, 仿真测试了自抗扰控制器对扰动的抑制能力, 并与现有的经典控制方法进行对比。仿真结果表明, 自抗扰控制能够有效地抑制各种扰动的影响, 与经典控制算法相比, 抗干扰能力有明显增强, 速度稳定精度和视轴稳定精度也有较明显的提高。

**关键词:** 光电稳定平台; 自抗扰控制; 扩张状态观测器; 扰动补偿

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0051-04

## ADRC of Airborne Electro-Optical Stabilized Platform

ZHENG Chun-yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-gang<sup>2</sup>, FENG Xing-wei<sup>2</sup>, GAO Jun-ke<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to improve the stabilization accuracy of airborne electro-optical stabilized platform. Analysis is made to the working principle of the stabilized platform, based on which a stabilized control loop is modeled. The factors that have effect on the stability accuracy and the deficiencies of classical control algorithm are analyzed briefly. An improved algorithm is then presented based on Active Disturbance-Rejection Control (ADRC). At first, the model of motor is simplified. Then, an extended state observer is designed to estimate the disturbance in real time and a feedback control law with disturbance compensation is designed. Eventually, simulation is made to test the ability of active disturbance rejection controller with comparison with the existing classical control algorithms. The result proves that: 1) The ADRC algorithm can reject the nonlinear disturbance effectively; and 2) Compared with the classical algorithm, it has stronger anti-jamming capability, and higher velocity/LOS stabilization accuracy.

**Key words:** electro-optical stabilized platform; active disturbance rejection control; extended state observer; disturbance compensation

### 0 引言

机载光电探测设备是一种光、机、电高度集成的精密设备, 主要用于目标捕获、跟踪和定位等。现代战争对于探测距离、成像质量和目标定位精度要求越来越高, 而机载光电探测设备更高的成像质量、更远的作用

距离和更高定位精度的实现, 很大程度上取决于平台的视轴稳定精度<sup>[1]</sup>。然而在机载环境下, 平台很容易受到外界环境干扰, 进而降低系统性能, 因此如何提高平台的抗干扰能力, 成为提高光电稳定平台稳定精度的关键。

针对扰动抑制问题, 传统的控制策略通过提高速度环的校正增益来提高抗干扰能力, 但是受限于机械谐振频率, 系统开环剪切频率无法提高, 导致校正增益也无法得到进一步提高, 因此限制了光电平台稳定精度的提高<sup>[2]</sup>。自抗扰控制器的核心思想是对系统的“总和扰动”进行实时观测并加以补偿, 从而大幅度提

收稿日期: 2016-06-30 修回日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61273075)

作者简介: 郑春艳(1991—), 女, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为控制工程。

高系统的扰动抑制能力<sup>[3]</sup>。并且自抗扰控制器的稳定性已经得到了证明<sup>[4-5]</sup>。

本文以某两轴两框架机载陀螺稳定平台为研究对象,分析了影响系统稳定精度的因素,引入了自抗扰控制策略来提高系统的扰动隔离度,进而提高系统的视轴稳定精度,最后通过仿真验证了该算法的有效性,该算法具有抗干扰能力强、精度高和算法简单等优点。

### 1 光电稳定平台构型

本文采用两轴两框架结构的稳定平台,将反射镜和陀螺固定在俯仰框架上,陀螺和码盘分别为测速和测角装置,陀螺工作在速率模式,将测量值与速度指令信号差之后,经过各自控制器产生控制量,驱动方位电机和俯仰电机转动,达到隔离扰动、稳定视轴的目的。工作原理如图 1 所示。 $M_a$  和  $M_f$  分别为方位和俯仰力矩电机; $G$  为两自由度陀螺,用来测量平台相对于惯性空间的姿态和角速度变化; $S_a$  和  $S_f$  分别为方位和俯仰码盘,用于测量视轴偏移量。

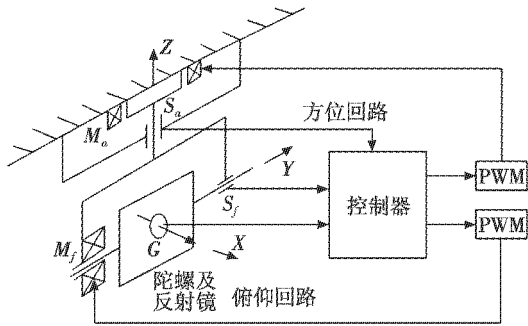


图 1 两轴陀螺稳定平台工作原理示意图  
Fig. 1 Schematic of a two-axis gyro-stabilized platform

### 2 光电稳定平台扰动类型分析

影响光电稳定平台视轴稳定的因素有很多,按其来源可以分为摩擦力矩、质量不平衡力矩、导线干扰和电机干扰等,在控制器设计过程中,应该尽量减小这些扰动对控制系统的影响。

摩擦力矩产生于平台环架轴承的运动,当载体有振动或者姿态发生变化时,载体与平台框架发生相对运动,在轴系间必然会有摩擦产生,再逐个耦合至传感器视轴,使视轴产生不期望的偏移量,造成稳定精度下降。质量不平衡力矩产生的原因在于平台质心与转轴不重合,与载体振动以及内部载荷安装有关。导线干扰力矩产生于导线的弹性形变,与导线的数量、弹性系数、平台转动角度和角速度等有关。电机干扰产生于电磁波动、电子噪声和齿槽波动等。由于产生的原因复杂,这些干扰都没有精确的数学模型。

### 3 稳定回路控制算法设计

#### 3.1 稳定回路建模和经典控制算法设计

由于方位轴和俯仰轴控制系统相互独立,而且两通道的控制策略相似,所以本文仅讨论方位轴的控制设计。稳定平台的单轴稳定回路模型如图 2 所示。

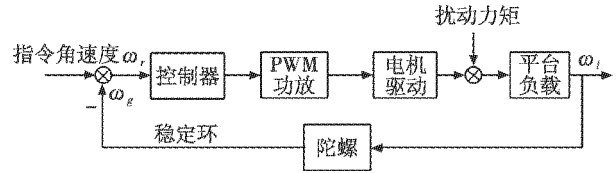


图 2 单轴稳定回路结构框图

Fig. 2 Diagram of a single-axis stabilization loop

图中: $\omega_r$  为指令角速率; $\omega_g$  为陀螺量测角速率; $\omega_l$  为平台输出角速率。

$F(s)$  为控制器传递函数,传统的控制方式是基于频域的设计方法,根据系统的开环频率特性和期望的系统频率特性来设计校正环节。控制器的设计应该尽量提高低频段的增益来提高系统的扰动抑制能力,增加中频段的宽度来保证系统稳定性和动态精度。经过计算,稳定回路校正后的控制器的传递函数为

$$F(s) = \frac{39\ 514.2(0.007\ 962s + 1)(1.146\ 4s + 1)(0.002\ 273s + 1)}{(0.001\ 33s + 1)s^2} \quad (1)$$

#### 3.2 基于自抗扰控制技术的稳定回路的改进控制算法设计

利用经典控制方法设计的算法可以保证系统具有良好的稳定性,但是由于实际系统受到各种干扰的影响,不能保证系统始终具有最佳控制精度<sup>[6]</sup>。自抗扰控制技术最突出的特征就是能够对干扰进行实时估计,并予以补偿。与传统 PID 控制相比,自抗扰控制技术具有低超调、收敛速度快、精度高、抗干扰能力强及算法简单等特点。其工作原理如图 3 所示。

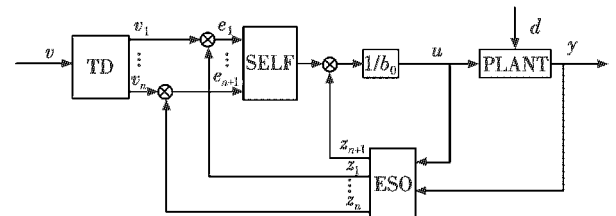


图 3 n 阶自抗扰控制器工作原理图

Fig. 3 Fundamental diagram of n-step ADRC

图中: $v$  为期望值,即经过规划的指令信号; $z_1, z_2, \dots, z_n$  为对象的状态变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的观测值, $z_{n+1}$  为影响系统所有扰动总和的观测值; $d$  为外扰;PLANT 为被控对象。自抗扰控制器(ADRC)主要由跟踪微分器

(TD)、扩张状态观测器(ESO)、误差反馈率(SELF)和扰动补偿4个部分组成。自抗扰控制器的工作原理是利用扩张状态观测器观测出对系统造成影响的总和扰动 $f$ ，与其他所有扰动的作用效果相同，它的观测值为 $z_{n+1}$ ，再补偿给输入 $u_0$ ，直接在控制量上对扰动进行补偿，相当于直接对扰动进行抑制。

系统的干扰作用原理如图4所示，经过等效转化之后如图5所示。

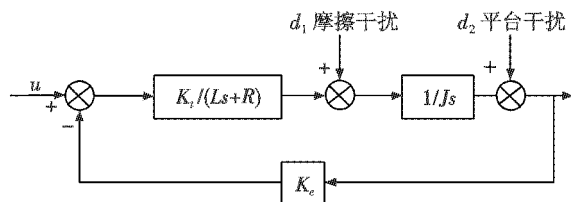


图4 系统中扰动作用原理

Fig. 4 Principle of disturbances in system

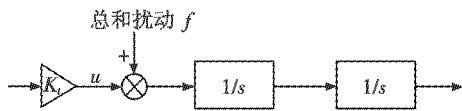


图5 等效处理后扰动作用原理

Fig. 5 Principle of disturbance by equivalent processing

自抗扰控制器设计中最重要的是跟踪微分器和扩张状态观测器的设计。

### 3.2.1 跟踪微分器设计

跟踪微分器的主要作用是根据控制目标和对象承受能力安排合适的过渡过程，解决系统的快速性和超调之间的矛盾。本文所用的最速跟踪微分器为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h * x_2 \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h * fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h)$ 是系统的最速控制综合函数，其算法为

$$\begin{cases} d = r * h \\ d_0 = h * d \\ y = x_1 - v + h * x_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8 * r * |y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + (\frac{a_0 - d}{2}) * \text{sgn } y & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h} & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan = \begin{cases} -r * \text{sgn } a & |a| > d \\ -r * (\frac{a}{d}) & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

### 3.2.2 扩张状态观测器设计

扩张状态观测器是自抗扰控制器最重要的一部分，其核心思想是将所有影响系统稳定输出的因素作为一

个整体，统称为“总和扰动”，并将其扩张成为一个新的状态变量，然后设计扩张状态观测器，对系统的“总和扰动”进行观测<sup>[7]</sup>，并将扰动观测值补偿给控制量。

本文选线性 ESO 对扰动进行观测，将扰动 $f$ 扩张为第三维状态 $x_3$ ，根据控制对象建立线性扩张状态观测器为

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - l_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - l_2 e_1 + bu \\ \dot{z}_3 = -l_3 e_1 \end{cases} \quad (4)$$

该扩张状态观测器的特征方程为  $D(s) = (s + \omega_0)^3 = s^3 + 3\omega_0 s^2 + 3\omega_0^2 s + \omega_0^3$ ，只要 $\omega_0$ 的值为正，就可以保证特征值为负，则该扩张状态观测器稳定。关于扩张状态观测器参数整定<sup>[8]</sup>，本文采用基于带宽概念的单参数化设计方法对扩张状态观测器的参数 $l_1, l_2$ 和 $l_3$ 进行设计，则有 $l_1 = 3\omega_0, l_2 = 3\omega_0^2, l_3 = \omega_0^3$ ，只需要在正数范围内调节参数 $\omega_0$ ，便可以完成扩张状态观测器的设计，同时保证观测器的稳定。

### 3.2.3 自抗扰控制器设计

本文以两轴两框架机载光电稳定平台为例进行设计，电机的电感 $L$ 为9.4 mH，电枢电阻 $R$ 为16.4  $\Omega$ 。

控制对象微分方程为

$$\ddot{y} = -1744.68 \dot{y} + 1213.18u = f + bu \quad (5)$$

式中： $f = -1744.68 \dot{y}; b = 1213.8$ 。则系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -1744.68x_2 + 1213.18u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

该系统的特征方程为  $D(s) = (s + \omega_c)^2 = s^2 + 2\omega_c s + \omega_c$ ，只要保证 $\omega_c > 0$ ，就可以保证系统稳定。

将扩张状态观测器估计出的状态变量与指令信号结合，产生控制量 $u_0$ ，即

$$u_0 = k_p(v - x_1) + k_d(\dot{v} - x_2) \quad (7)$$

式中， $k_p$ 和 $k_d$ 也采用单参数化设计方法，则 $k_p = \omega_c^2, k_d = 2\omega_c$ 。扰动观测值 $z_3$ 对控制量 $u_0$ 进行补偿，产生新的控制量  $u = \frac{u_0 - z_3}{b_0}$ 。

只要设计的自抗扰控制器参数选择合适，便可以实现对扰动的准确估计和补偿，从而提高稳定精度。

### 3.3 仿真分析

图6所示为传统PID控制算法和自抗扰控制算法的阶跃响应对比结果。

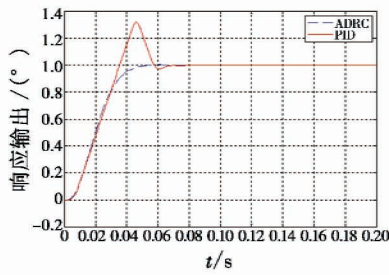


图 6 单位阶跃响应曲线

Fig. 6 Unit step response curves

由图 6 可以看出,对于单位阶跃响应,传统 PID 控制算法的超调量  $\sigma = 32\%$ ,调节时间  $t_p = 0.07\text{ s}$ ,而自抗扰控制算法基本上没有超调,调节时间  $t_p = 0.05\text{ s}$ 。

图 7 所示为传统 PID 控制算法和自抗扰控制算法在  $0.12^\circ, 5\text{ Hz}$  平台扰动时光电稳定平台的速度稳定曲线。

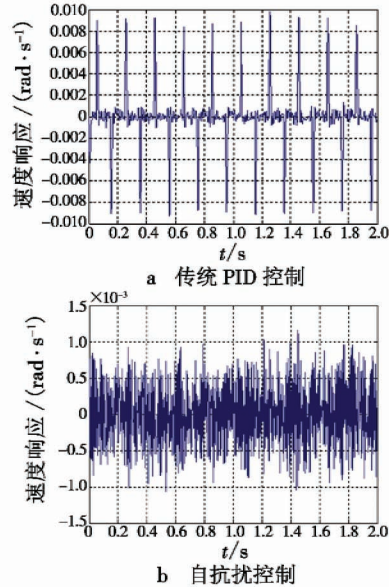
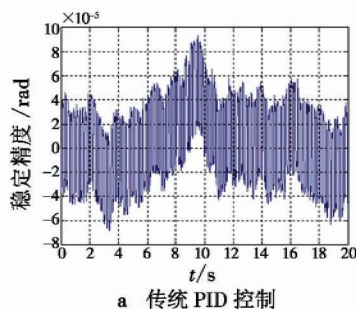


图 7 有平台扰动的速度稳定曲线

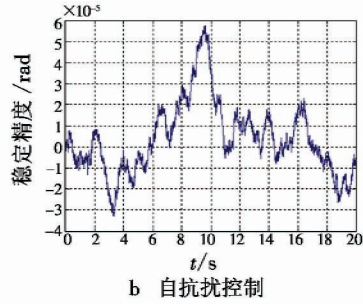
Fig. 7 Velocity curves with platform disturbance

通过对比图 7a 和图 7b 可以发现,PID 控制器的速度响应幅值为  $0.02\text{ rad/s}$ ,采用自抗扰控制器之后平台速度波动显著减小,幅值大约为  $2.3 \times 10^{-3}\text{ rad/s}$ ,由此可见,自抗扰控制器的扰动抑制能力远远高于 PID 控制器。

图 8 所示为此时光电平台的稳定精度曲线。



a 传统 PID 控制



b 自抗扰控制

图 8 有平台扰动的稳定精度曲线

Fig. 8 Stability accuracy curves with platform disturbance

由图 8 可以看出,当平台扰动为  $0.12^\circ, 5\text{ Hz}$  时,PID 控制器的稳定精度为  $16 \times 10^{-5}\text{ rad}$ ,自抗扰控制器的稳定精度为  $9 \times 10^{-5}\text{ rad}$ ,自抗扰控制器的扰动抑制能力优于 PID 控制器。

### 4 结束语

本文讨论了机载光电探测设备控制系统的设计方法,对稳定回路进行了分析和建模,并简要分析了影响平台稳定精度的因素,针对经典控制算法存在的不足,提出了基于自抗扰控制的改进算法。仿真结果表明,相对于经典控制算法,采用自抗扰控制算法后,平台的速度和角度稳定精度均有明显提高,自抗扰控制算法能够有效提高系统的抗干扰能力,从而提高系统的成像质量和稳定精度。

### 参考文献

- [1] 孔德杰. 机械光电平台扰动力矩抑制与改善[D]. 长春:中科院长春光机所,2013.
- [2] 赵秀元,张新立,耿乐. 扩张状态观测器的抑制扰动性分析[J]. 辽宁师范大学学报:自然科学版,2011, 34(3):262-265.
- [3] 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.
- [4] 陈增强,孙明玮,杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报,2013,39(5):574-580.
- [5] ZHENG Q, GAO L Q, GAO Z Q. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics [C]//IEEE Conference on Decision and Control, 2007:3501-3506.
- [6] 王合龙,刘建业. 机载光电系统平台稳定控制算法[J]. 南京航空航天大学学报,2008,40(2):234-238.
- [7] 李贤涛. 航空光电稳定平台扰动抑制技术的研究[D]. 长春:中科院长春光机所,2014.
- [8] HILKERT J M. A reduced-order disturbance observer applied to inertially stabilized line-of-sight control[C]//The International Society for Optical Engineering, 2011. doi: 10.1117/12.884123.