

引用格式:孙立志.基于自抗扰控制的无人机光电载荷视轴稳定技术[J].电光与控制,2019,26(1):104-108,113. SUN L Z. ADRC based line-of-sight stabilization of opto-electronic load onboard UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(1):104-108, 113.

## 基于自抗扰控制的无人机光电载荷视轴稳定技术

孙立志

(海鹰航空通用装备有限责任公司,北京 100074)

**摘要:**无人机系统重要的侦察设备是光电载荷。为了使光电载荷获得清晰的图像,提出了新的控制策略,以抑制视轴的扰动。首先,以两轴两框架光电载荷为研究对象,分析了其结构和工作原理;然后,分析了影响视轴稳定精度的扰动因素并将其分类;接着,提出了双速度环控制策略,设计了自抗扰稳定控制器;实验研究表明,采用该视轴稳定技术的光电载荷,其扰动抑制的效果能够达到技术指标要求。

**关键词:**侦察无人机;光电载荷;视轴稳定;自抗扰控制;双速度环

**中图分类号:** V279; TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.01.022

## ADRC Based Line-of-Sight Stabilization of Opto-Electronic Load Onboard UAVs

SUN Li-zhi

(Hiwing General Aviation Equipment Co., Ltd, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The opto-electronic load is an important reconnaissance equipment of the UAV system. To obtain a clear image, a new opto-electronic load control strategy is proposed for inhibiting the disturbance of visual axis. First, the structure and working principle of the two-axis and two-frame opto-electronic load are introduced. Then, analysis and classification are made to the disturbance factors affecting the stability of the visual axis. The dual rate-loop control strategy and an active disturbance rejection controller are applied on the opto-electronic load. The experimental results show that, the opto-electronic load using the proposed line-of-sight stabilization strategy can satisfy the technical requirements of disturbance rejection.

**Key words:** reconnaissance UAV; opto-electronic load; line-of-sight stabilization; Active Disturbance Rejection Control (ADRC); dual rate-loop

### 0 引言

在现代战争中,由于侦察类无人机的地位日趋重要,作为侦察无人机主要设备之一,光电载荷的研制也受到极大的重视。随着跟踪距离要求的逐渐提高,改善光电载荷的视轴稳定精度就显得尤为重要,视轴稳定的关键在于光电载荷对所受各类扰动的有效抑制。在传统的扰动抑制策略中,常采用PID控制、平方滞后控制等方法<sup>[1-2]</sup>,在控制结构上则多为单速度环控制回路。本文针对影响光电载荷视轴精度的各类扰动,在伺服控制系统中采用自抗扰控制技术,并设计了双速度环控制结构,对加入系统的扰动进行合理观测、分类隔离和有效抑制,从而提高光电载荷的目标跟踪性能。

### 1 光电载荷结构和机理

无人机光电载荷具有隔离载机扰动、保持视轴稳定的作用,图1所示为两款无人机的光电载荷。光电载荷由光学成像元件和电气稳像机构组成,其中,伺服机构对隔离扰动、稳定视轴起主要作用。



图1 两款无人机的光电载荷

Fig. 1 Two types of opto-electronic loads for UAV

图2所示为两轴两框架光电载荷,其方位轴上安装有方位测角旋变(旋转变压器)和方位驱动伺服电机,伺服电机运动的同时,同轴连接的方位测角旋变将测量框架角度和角速度信息。方位轴下方吊挂安装光

收稿日期:2018-01-18

修回日期:2018-12-10

作者简介:孙立志(1991—),男,内蒙古赤峰人,硕士,助工,研究方向为无人机航电系统技术。

电载荷的方位框架(外框架),其内部安装有俯仰框架(内框架),方位和俯仰即组成所谓的两框架结构,其旋转轴即为方位轴和俯仰轴。俯仰框架的内部结构与方位框架类似,不同点在于,俯仰测角旋变和俯仰驱动伺服电机分别安装在俯仰轴的两侧,成像元件安装在俯仰框架内部;敏感俯仰和方位两方向角速度的传感器是陀螺模块,均安装于俯仰框架,其中,俯仰陀螺与俯仰轴平行,方位陀螺与方位轴平行<sup>[3-4]</sup>。

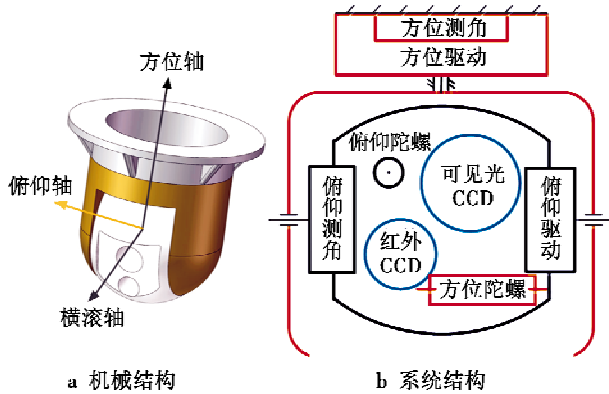


图2 两轴两框架光电载荷

Fig.2 Two-axis, two-frame opto-electronic load

以其中一个稳定轴为例,光电载荷工作时,陀螺和旋变分别测量稳定轴的空间角速度和角度,并将信号通过片载高速总线传输至伺服控制器,伺服控制器同时接收传感器的信号和上位机的指令,并按程序执行视轴稳定控制算法,输出伺服驱动器的控制信号。该控制信号经伺服驱动器进行功率放大后驱动伺服电机运动,从而稳定光电载荷视轴,同时,伺服控制器将系统运行状态实时反馈至上位机进行显示。

## 2 光电载荷的扰动来源和特性分析

扰动因素种类复杂,在光电载荷系统中的作用位置各不相同,据此可将扰动因素分为力矩干扰、电机干扰、模型干扰和速度干扰等几类,其中,力矩干扰和速度干扰作用于电机和控制器外部,称为外部扰动。本文主要研究对外部扰动的抑制。

### 2.1 力矩干扰

1) 摩擦力矩。光电载荷的两个框架通过轴承进行机械上的联接,而轴系间存在摩擦力,直接对伺服电机的定转子形成阻力,从而对视轴的稳定精度造成直接影响。摩擦力矩作用在框架上的形式有两种,即伺服电机驱动框架转动时轴系间直接产生的摩擦力矩,以及载机的动作通过轴系间的摩擦耦合到稳定轴的力矩。

2) 不平衡力矩。在光电载荷的框架随载机运动的过程中,其质心与载机的质心产生相对运动,根据刚体绕动点运动的动力学规律可以得出,因载机质心与

光电载荷质心间存在的距离,两质心相对运动速度将产生一定的不平衡力矩<sup>[5]</sup>,同理,载机运动时载机和光电载荷的加速度也会产生不平衡力矩。

3) 风阻力矩。光电载荷安装于载机外部,由于无人机的运动速度较大,载荷直接受到风阻的影响。风阻力矩作用于光电载荷的各个框架,使光电载荷的空气动力环境变得复杂,相当于改变了伺服电机的负载大小,并且风阻大小时刻变化,导致了光电载荷中非线性的干扰因素增加,即产生影响视轴稳定的风阻力矩。

4) 导线干扰力矩。信号的传输需要通过导线,包括传感器的信号线和驱动电机的功率线,由于导线在各框架间穿行走线,且线束的长度和布线受到框架空间的限制,当框架旋转运动时,导线的弹性形变必定会带给光电载荷一定的力矩干扰。

### 2.2 速度干扰

光电载荷系统中的速度干扰直接来自于载机的空间运动。载机在运动过程中,其速度相对于惯性空间的变化直接传递至外框架,进而通过内外框架的耦合关系传递至内框架,对工作于稳定状态下的光电载荷框架加入速度扰动,从而直接导致视轴指向的改变。

## 3 光电载荷视轴稳定控制系统设计

### 3.1 光电载荷双速度环控制系统

本文设计光电载荷速度稳定回路是双速度环串级结构,图3所示为光电载荷双速度环控制系统结构。其中,内环为速度环,外环为稳定环,稳定控制器和速度控制器在控制结构上串级连接。双速度环控制结构与传统单速度环相比具有显著的优势,原因在于位于内环的速度环将上文所分析的力矩干扰包含在环内,该速度控制器的反馈信号来自于速度传感器,即测角旋变的角速度信号,给定信号来自稳定控制器的输出,经合理参数设计后,速度环能够有效消除摩擦力矩、风阻力矩等力矩扰动。而位于外环的稳定环将光电载荷所受来自于载机的速度扰动包含在环内,其反馈信号是来自于陀螺空间角速度信号,伺服系统工作于稳定视轴状态时,其角速度给定值为0 rad/s,即保持视轴在空间坐标系下不动的状态,此时稳定环能够有效隔离速度干扰。这样,在该双速度环串级结构系统中,两类扰动被隔离开,并针对性地分别由所设计的控制器进行抵消,确保各种扰动因素之间不产生互相影响,达到精度更高的视轴稳定效果。

本文所述的光电载荷的控制系统中,最内环为电流环,电流控制器采用PI控制器,以满足其较高的实时性要求,而稳定环是视轴稳定控制系统的主要控制回路,在控制系统中起到至关重要的控制作用,采用的是本文设计的自抗扰稳定控制器。

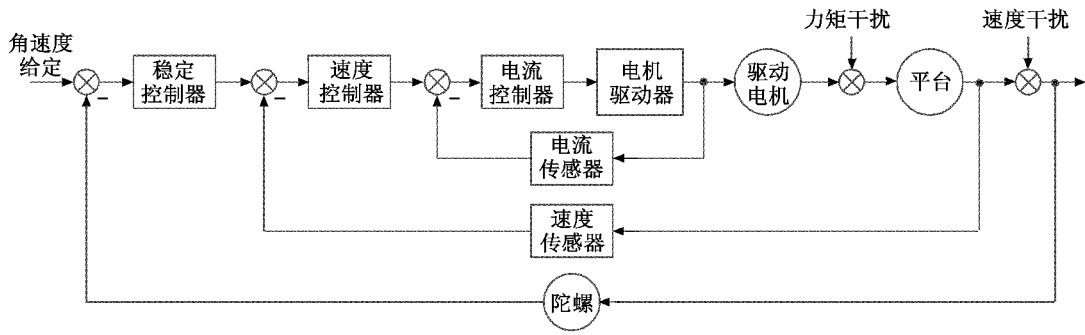


图3 双速度环控制系统结构框图

Fig. 3 Dual-rate-loop control system

### 3.2 自抗扰稳定控制器设计

光电载荷系统中扰动因素多样,且模型复杂,尤其是来自于载机的干扰,不易观测和隔离,因此采用主动抑制技术,将自抗扰控制算法应用于控制系统,在稳定环内对扰动因素进行整体观测和抑制<sup>[6-8]</sup>。本文采用永磁同步电机作为伺服电机,根据其数学模型及矢量控制方法,在采用“ $i_d=0$ 控制”策略后,可得其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{i}_q = -\frac{R_s}{L}i_q - \frac{n_p\omega_r\psi_f}{L} + \frac{u_q}{L} \\ \dot{\omega}_r = \frac{3n_p\psi_f}{2J}i_q - \frac{T_L}{J} - \frac{B\omega}{J} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_q, u_q$ 分别为伺服电机 $q$ 轴绕组相电流、相电压的瞬时值; $\omega_r$ 为伺服电机转子的机械角速度; $R_s$ 为伺服电机定子绕组的电阻; $L$ 为伺服电机 $d, q$ 轴的电感; $n_p$ 为伺服电机磁钢的极对数; $\psi_f$ 为伺服电机定子(磁钢)的磁链; $T_L$ 为伺服电机的轴上负载转矩; $J$ 为伺服电机转子及其轴上负载的转动惯量之和; $B$ 为伺服系统粘滞摩擦系数。

在式(1)中,将与载荷和载荷中力矩扰动相关的转矩项合并为一项,设计为自抗扰控制器的扰动项 $a(t)$ ,将电机 $q$ 轴电流的系数作为控制增益 $b_0$ ,即

$$\begin{cases} a(t) = -\left(\frac{T_L}{J} + \frac{B\omega}{J}\right) \\ b_0 = \frac{3n_p\psi_f}{2J} \end{cases} \quad (2)$$

进而可将电机的状态方程改写为一阶系统,即

$$\dot{\omega}_r = a(t) + b_0 i_q \quad (3)$$

跟踪微分器在自抗扰控制方法中用于安排过渡过程,在伺服控制系统中,能够对角速度信号和各阶微分信号进行合理提取。根据上述一阶系统的特点,首先针对伺服电机的给定转速这个变量,设计自抗扰稳定控制器的跟踪微分器为

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = \omega_1 - \omega^* \\ \dot{\omega}_1 = \omega_2 \\ \dot{\omega}_2 = u \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\omega^*$ 为伺服电机的给定转速; $\omega_1$ 为伺服电机给定转速的跟踪量; $\omega_2$ 为伺服电机给定转速微分的跟踪量; $u$ 为自抗扰稳定控制器的最速综合函数。其中,最速综合函数 $u$ 的形式<sup>[9-10]</sup>为

$$u = fhan(e_0, x_2, r, h_0),$$

$$\begin{cases} d = rh_0 \\ d_0 = h_0 d \\ y = x_1 - v_0 + h_0 x_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \operatorname{sgn} y & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h_0} & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan(-r) = \begin{cases} \operatorname{sgn} a & |a| > d \\ \frac{a}{d} & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $r$ 为跟踪微分器的速度因子; $h_0$ 为跟踪微分器的滤波因子。

在自抗扰控制方法中,扩张状态观测器的作用是不受系统模型和参数影响地估计系统中的扰动。针对伺服系统实际转速,接下来应设计自抗扰控制器的二阶扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - \omega \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} fal(e_1, \alpha_1, \delta) + b_0 i_q \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} fal(e_1, \alpha_1, \delta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\omega$ 为伺服电机的实际转速; $\alpha_1$ 为非线性因子, $0 < \alpha_1 < 1$ ;  $\delta$ 为线性段的区间长度; $\beta_{0i}$  ( $i=1, 2$ )为状态误差反馈增益,且 $\beta_{0i} > 0$ 。

状态误差反馈控制律用于对上述跟踪微分器及扩张状态观测器的状态变量进行处理,以生成系统的控制量,因此最后需设计自抗扰控制器非线性反馈控制率,如

$$\begin{cases} e_2 = \omega_1 - z_1 \\ i_{q0} = \beta_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (7)$$

从而得到控制量  $i_q$  为

$$i_q = i_{q0} - \frac{z_2}{b_0} \quad (8)$$

其中:  $\alpha_2$  为非线性因子,  $\alpha_2 > 1$ ;  $\beta_2$  为非线性反馈控制率的可调参数;  $b_0$  为放大系数;  $fal(e, \alpha, \delta)$  为最优综合控制函数, 其具体形式为

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \operatorname{sgn} e & |e| \geq \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| < \delta \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  为非线性因子,  $0 < \alpha < 1$ ;  $\delta$  为线性段的区间长度。

### 3.3 自抗扰控制器参数整定

自抗扰控制器中参数多, 非线性公式也多, 因此参数整定是设计自抗扰控制器的重要步骤, 本文结合理论推导和工程应用经验, 给出控制器中主要参数的整定方法。在跟踪微分器中, 速度因子  $r$  是需要重点关注的参数, 它对跟踪微分器的跟踪速度和超调大小有影响, 而跟踪速度与超调又不易协调, 因此需要根据载荷对视轴稳定的快速性和超调量的协调关系进行整定。

扩张状态观测器的参数整定是影响自抗扰控制器的关键参数。其中, 状态误差反馈增益和的值对系统的调节速度和稳态误差有直接影响, 而调节速度和稳态误差则直接影响系统的控制效果, 因此需要根据观测器的性能恰当取值。对于本文针对一阶系统设计的自抗扰控制器, 可根据基于带宽的整定方法<sup>[11-13]</sup>, 得到该参数的整定式为

$$\begin{cases} \beta_{01} = 2\omega_s \\ \beta_{02} = \omega_s^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\omega_s$  按速度环期望带宽进行设计。

对于最优综合控制函数  $fal(e, \alpha, \delta)$ , 其中的可调参数大多有具体参考范围。非线性因子  $\alpha$  的取值在式(9)中规定了范围, 在实际调整过程中, 其取值可以先从 0.5 开始整定, 再根据仿真和实验数据确定最终取值。线性段的区间长度  $\delta$  与系统的误差范围有关, 根据工程经验一般取值为 0.01。

### 3.4 自抗扰控制器的稳定性

针对式(6)所示扩张状态观测器, 可将其线性化为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - \omega \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e_1 + b_0i_q \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02}e_1 \end{cases} \quad (11)$$

进而推导得到伺服电机的给定转速  $\omega^*$  到实际转速  $\omega$  的传递函数, 得到系统的闭环特征方程, 即

$$a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 = 0 \quad (12)$$

在本系统中, 容易证明  $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$  且  $a_1a_2 > a_0a_3$ , 根据古尔维茨稳定性判据, 可以证明本

文设计的自抗扰控制器是稳定的。

## 4 光电载荷视轴稳定控制系统实验与分析

### 4.1 视轴稳定实验

为验证视轴稳定控制系统, 特别是双速度环控制结构和自抗扰稳定控制器的性能, 需要对光电载荷进行视轴稳定实验, 测量控制系统对扰动的隔离程度。实验方法是利用加载平台为视轴所在框架注入扰动量, 以此模拟实际工况下的干扰因素, 通过测试光电载荷系统的视轴稳定精度, 判断系统是否达到所要求的稳定性能指标。设定光电载荷稳定轴的角速度给定值为 0 rad/s, 即稳定视轴状态, 加载平台的输出是正弦速率扰动, 其频率为 2.5 Hz, 观察稳定运行后框架角速度的波形, 分析波动程度, 同时与 PI 稳定控制器的控制效果进行对比。

视轴稳定实验的波形如图 4 所示。

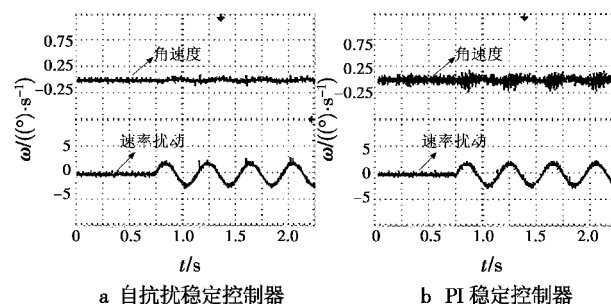


图 4 视轴稳定实验波形

Fig. 4 Experimental waveforms of line-of-sight stabilization

在给视轴加入一定的正弦速率扰动后, 两种稳定控制器均实现了视轴稳定, 框架角速度在一定范围内波动, 且没有明显的角速度突变。由图 4a 与图 4b 的对比实验波形可知, 前者对复杂扰动的抑制更为有效, 其扰动隔离程度更高, 能够满足系统稳定精度的指标要求; 经测量和计算, 其稳态精度为 0.1 (°)/s, 扰动隔离度小于 2%。

光电载荷工作环境一般较复杂, 存在对载荷产生突加大幅度扰动的情况。为了验证视轴稳定控制系统对突加扰动具有较强的抑制效果, 对载荷框架进行突加阶跃力矩的实验, 观察框架的转速响应波形。

由图 5 实验波形可知, 给光电载荷稳定轴突加力矩扰动后, 伺服电机转速响应良好, 框架角速度在 30 ms 内恢复稳定。在调节过程中, 框架角速度基本无超调, 且角速度跌落值仅约为 0.25 (°)/s。视轴稳定实验的结果表明, 应用双速度环控制结构, 系统能够对力矩扰动的有效隔离, 且自抗扰稳定控制器在稳定环的应用可以较好地稳定光电载荷视轴, 避免视轴对复杂外界环境中晃动。

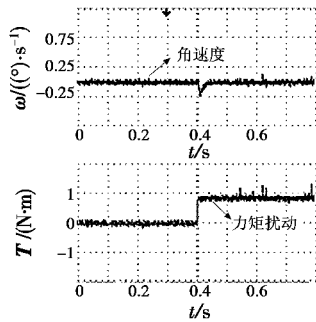


图 5 突加力矩扰动实验波形

Fig. 5 Experimental waveforms of sudden torque disturbance

### 4.2 阶跃响应实验

稳定控制器应具有快速响应的特性,在光电载荷的给定发生突变时能够快速响应,以满足系统对角速度和角加速度的指标要求。实验中将稳定环的给定设置为阶跃角速度,观察载荷框架对给定信号的跟踪情况,并与PI稳定控制器进行对比。实验中设置稳定环的角速度给定为阶跃信号,角速度的幅值为 $12.5 (^{\circ})/s$ ,实验得到波形如图6a。可以看出,伺服电机转速达到给定转速所用时间约为30ms,在调节过程中转速基本无超调。经计算可得,伺服电机达到了 $417 (^{\circ})/s^2$ 的平均角加速度,满足光电载荷对控制系统快速性的需求,实验证明了控制系统的稳定环具有快速平稳的跟踪性能。与传统的PI稳定控制器对比,实验波形图6b显示后者对角速度阶跃给定的响应效果不够理想,其在调节过程中产生了角速度超调,导致视轴出现较明显的晃动,不满足稳定环的性能指标要求。

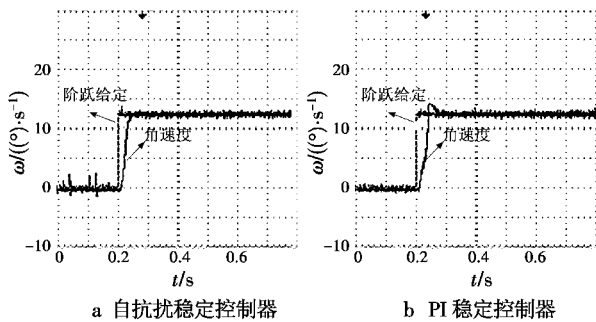


图 6 稳定环阶跃响应实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of stable-loop step response

### 4.3 控制器参数鲁棒性实验

在双速度环控制系统中应用稳定控制器隔离扰动,稳定光电载荷视轴的同时,应考虑减少控制器受系统模型参数的影响,即增强控制器的参数鲁棒性。在设计自抗扰控制器时,其中的参数 $b_0$ 含有伺服系统的参数转动惯量 $J$ ,因此针对该参数进行鲁棒性实验。实验中将 $J$ 的数值调整 $\pm 15\%$ ,观察载荷稳定运行后稳定轴的角速度并与视轴稳定实验波形进行对比,图7所示为参数鲁棒性实验的实验结果。

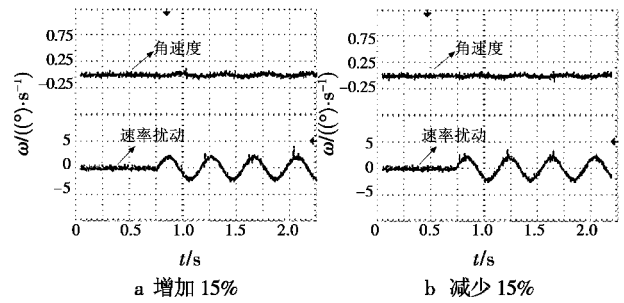


图 7 参数鲁棒性实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms of parameters' robustness

鲁棒性实验过程与稳定性实验过程相似,在控制程序中改变参数 $J$ 的数值。将两次改变参数 $J$ 的实验波形与图4a对比,结果表明,在转动惯量变化 $\pm 15\%$ 的情况下,框架的角速度波动仍然保持在较小的范围内,计算得出的扰动隔离度仍满足系统对稳定精度等指标的要求。因此说明,自抗扰稳定控制器具有较强的参数鲁棒性,在控制参数不准确的情况下仍然保持良好的控制性能,为系统的调试降低了难度。

## 5 结语

本文讨论了无人机光电载荷的机理和影响视轴稳定的扰动因素,在此基础上设计了基于自抗扰稳定控制器的双速度环控制系统,实验结果表明,相比于传统的PID控制器,载荷的扰动抑制能力有明显的优势,同时系统的响应速度、参数鲁棒性也有显著提高,将其应用于侦察无人机中能够大幅提高跟踪目标的能力,助力无人机在现代战场上夺取先机。

## 参考文献

- [1] 姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D]. 南京:东南大学,2006.
- [2] 李贤涛. 航空光电稳定平台扰动抑制技术的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2014.
- [3] 张润丰. 陀螺稳定吊舱控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [4] 喻智. 机载吊舱稳定平台的控制方法研究及DSP实现[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2013.
- [5] 陆建山. 水面武器操瞄系统稳定平台姿态测量及控制技术[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学,2007,1(1): 24-31.
- [7] 孙金秋,游有鹏. 基于线性自抗扰控制的永磁同步电机调速系统[J]. 现代电子技术,2014,37(16):152-155.

(下转第113页)

- [9] 秦晓康, 徐惠民. 嵌入式设备 NAND Flash 存储系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(3): 514-517.
- [10] 翟正军, 宋霄罡. 机载数据加卸载卡的设计与实现[J]. 测控技术, 2010, 29(9): 96-98, 102.
- [11] 吴洪成, 潘琪. 高可靠固态存储模块的实现与应用[J]. 计算机时代, 2015(9): 14-16.
- [12] PARK C, TALAWAR P, WON D, et al. A high performance controller for NAND Flash-based solidstate disk (NSSD) [J]. Non-Volatile Semiconductor Memory Workshop, 2006(7): 17-20.
- [13] 晏敏, 龙小奇, 章兢, 等. 开放式大容量 NAND Flash 数据存储系统设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(11): 13-16.
- [14] 彭卓文, 杨新民, 王胜红. 基于 FPGA 控制的高速大容量 NAND FLASH 存储模块设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(7): 111-114, 118.
- [15] BREEUWSMA M, DE JONGH M, KLAVER C, et al. Forensic data recovery from Flash memory[J]. Small Scale Digital Device Forensics Journal, 2007, 1(1): 1-17.
- [16] 郑光, 苏锦海, 孙万忠. 闪存数据应急销毁算法的研究与设计[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(9): 305-308.
- [17] 王强, 吴海容, 陈晓晨. 基于故障物理的航空电子设备高可靠性评估[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 216-219.

(上接第 96 页)

- [5] 陈增强, 李毅, 孙明玮, 等. 四旋翼无人飞行器 ADRC-GPC 控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 176-180, 188.
- [6] 何勇灵, 陈彦民, 周岷峰. 四旋翼飞行器在风场扰动下的建模与控制[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(5): 624-630.
- [7] 张天毅, 赵庆展, 刘伟. 四旋翼飞行器悬停模式 ITAE 最优 PID 控制[J]. 电光与控制, 2016, 23(8): 48-52.
- [8] 甄红涛, 齐晓慧, 夏明旗, 等. 四旋翼无人机块控反步姿态控制器设计[J]. 电光与控制, 2013, 20(10): 87-91, 101.
- [9] ISLAM S, LIU P X, EL SADDIK A. Nonlinear adaptive control for quadrotor flying vehicle [J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 78(1): 117-133.
- [10] 韩业壮, 华容. 四旋翼飞行器的 RBF 网络自适应滑模控制[J]. 电光与控制, 2017, 24(11): 22-27.
- [11] 岳欣, 姚建勇. 基于自适应的电液负载模拟器积分鲁棒控制[J]. 液压与气动, 2016(12): 25-30.
- [12] WANG X H, SHIRINZADEH B. Nonlinear augmented observer design and application to quadrotor aircraft [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(3): 1463-1481.
- [13] XIAN B, DAWSON D, DE QUEIRO Z M, et al. A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(7): 1206-1211.
- [14] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V. Nonlinear and adaptive control design [M]. New York: Wiley-Interscience, 1995.

(上接第 108 页)

- [8] 刘清. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机伺服系统控制策略的研究及实现[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [9] 郑春艳, 张红刚, 冯兴伟, 等. 机载光电稳定平台自抗扰控制研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(2): 51-54.
- [10] 邝平, 李军, 雷阳, 等. 高精度稳定平台伺服系统的自抗扰控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(1): 14-18.
- [11] LI J, REN H P, ZHONG Y R. Robust speed control of induction motor drives using first-order auto-disturbance rejection controllers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 712-720.
- [12] ZHENG Q, DONG L L, LEE D H, et al. Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(6): 1432-1438.
- [13] WU D, CHEN K. Design and analysis of precision active disturbance rejection control for noncircular turning process [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2746-2753.