

机载光电稳瞄平台的线性自抗扰控制

王春阳^{1,2*}, 赵尚起¹, 史红伟², 刘雪莲²

- (1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 西安工业大学 光电工程学院 西北兵器工业研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为了提高机载光电稳瞄平台的抗扰动能力和动态响应特性, 在平台上进行了基于线性自抗扰控制的改进控制方法研究。改进的线性自抗扰控制器采用模型辅助的降阶线性扩张状态观测器以及采用系统输出量和输出量微分来产生控制量, 不仅可以减小观测器的相位滞后和观测负担, 提高观测器对扰动的估计能力, 还可以减小观测器滞后和估计误差对控制律的影响。仿真实验结果表明: 改进的线性自抗扰控制器在低中频段具有更好的频域特性, 阶跃响应实验中表现出更好的动态响应特性, 在系统输入为零的条件下, 给系统施加幅值为 π 、频率为 2.5 Hz 的正弦波力矩扰动和正弦波角速度扰动, 基于线性自抗扰控制器的系统输出残差峰值分别为 0.175 ($^{\circ}$)/s 与 0.566 ($^{\circ}$)/s, 基于改进的线性自抗扰控制器的系统输出残差峰值分别为 0.155 ($^{\circ}$)/s 与 0.030 ($^{\circ}$)/s, 实验结果验证了改进方法的有效性。

关键词: 线性自抗扰控制; 降阶线性扩张状态观测器; 模型辅助; 机载光电稳瞄平台
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1213002

Linear active disturbance rejection control of airborne photoelectric stabilized platform

Wang Chunyang^{1,2*}, Zhao Shangqi¹, Shi Hongwei², Liu Xuelian²

- (1. College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Northwest Institutes of Advanced Technology, College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve disturbance rejection capability and dynamic response characteristics of airborne photoelectric stability platform, the improved control method study was conducted on platform based on Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC). The Model-assisted Reduced-order Linear Extended State Observer (MRLESO) was used by the improved Linear Active Disturbance Rejection Controller (ILADRC), and used output of system and differential of output were used to generate the control quantity, which not only reduced phase lag and burden of observer, improved ability of estimation of observer, but also reduced the negative effects of observer with lag and estimation error of control law. The simulation experimental results show that the ILADRC had better frequency domain characteristics in the low-middle frequency band, ILADRC had better dynamic response characteristics in step response experiment, under the conditions of system had no input, sine wave moment disturbance and sine wave angular velocity disturbance with amplitude are π and frequency of 2.5 Hz were applied

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-08-21

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20160101279JC)

作者简介: 王春阳(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事自抗扰控制、鲁棒分数阶控制方面的研究。

Email: wangchunyang19@163.com

to the system, the residual peak value of system output based LADRC were 0.175 (°)/s and 0.566 (°)/s. The residual peak value of system output based ILADRC were 0.175 (°)/s and 0.566 (°)/s. The simulation results demonstrate the validity of improved control method.

Key words: Linear Active Disturbance Rejection Control; Reduced-order Linear Extended State Observer; model-assisted; airborne photoelectric stabilized platform

0 引言

机载光电稳瞄平台可以搭载可见光相机、红外相机和激光测距仪等光电探测设备,主要功能是将载体对光电探测设备的扰动与光电探测设备隔离开来,使光电探测系统视轴能够稳定、准确和迅速地跟踪和指向目标。光电探测系统视轴一般受载体飞行运动姿态的变化、机械谐振、轴系间摩擦、传感器噪声等扰动造成的影响而导致视轴稳定精度降低。光电稳瞄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光电稳瞄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的稳定性^[1]。近几年专家学者们对消除载体引起的扰动的控制方法与理论进行了广泛的研究,除了实际应用上最常用 PID 控制外,还有控制^[2]、基于扰动观测器 DOB 的控制理论^[3]、自适应控制^[4-5]以及智能控制^[6]等。PID 控制虽然具有不依赖于被控对象模型、原理和结构简单的优点,但其抗扰动的能力较差,其他控制方法与理论取得了较好的抗扰动能力和鲁棒性,也存在一定的不足之处,如依赖被控对象数学模型、计算量大、设计方法复杂和不利于工程实际应用等。

自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC)不依赖于系统的数学模型,还可以将系统内部扰动和外部扰动统一为“总扰动”并加以消除,具有较强的抗扰动能力和鲁棒性^[7-8],被用于光电稳瞄平台的控制^[9],取得了很好的效果,不足之处是需要调节的参数较多,整定过程困难,阻碍了实

际应用。美国 Cleveland State University 的高志强教授在自抗扰控制技术的基础上提出线性自抗扰控制 (Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)^[10],它大大减少了需要整定参数,使其在工程应用上更为便捷。参考文献[11]将 LADRC 应用于光电稳瞄平台稳定回路控制中,通过与 PI 控制器对比,LADRC 可以有效提高系统扰动抑制能力。

文中在简述其机载光电稳瞄平台伺服控制系统之后进行了基于 LADRC 的改进控制方法研究(改进的 LADRC 控制器记为 ILADRC),思想是采用模型辅助的降阶 LESO,以提高观测器对扰动的观测能力,为了避免控制过程中仍存在观测器的估计误差放弃用跟踪量来产生控制信号,设计运用直接采用系统输出量和输出量微分的控制律。在文中最后将 ILADRC 与 LADRC 进行了频域分析和阶跃响应以及抗扰动能力的仿真对比实验分析。

1 机载光电稳瞄平台伺服控制系统

机载光电稳瞄平台伺服控制系统包括方位轴伺服控制系统和俯仰轴伺服控制系统,它们的控制过程基本相似。由于平台的方位轴与俯仰轴在空间上是相互垂直正交的关系,所以可以忽略两者之间的耦合作用。机载光电稳瞄平台伺服控制系统中是速度环对各种扰动起主要的隔离作用,文中着重对方位轴的速度环进行研究,将改进的线性自抗扰控制用为速度环的速度控制器。机载光电稳瞄平台方位轴伺服控制系统采用经典的速度环和位置双闭环控制方式,如图 1 所示。

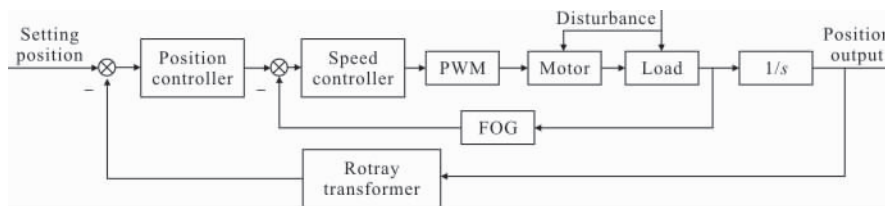


图 1 方位轴伺服控制回路框图

Fig.1 Block diagram of servo control loop of azimuth axis

2 ILADRC 的设计

2.1 线性自抗扰控制

线性自抗扰控制是在 ADRC 的基础上, 将自抗扰控制器的各个结构部分进行线性化设计, 并将控制器需要整定的参数减少到三个, 参数分别为观测器带宽 ω_o 、控制器带宽 ω_c 以及控制输入增益 b_0 , 其结构如图 2 所示。

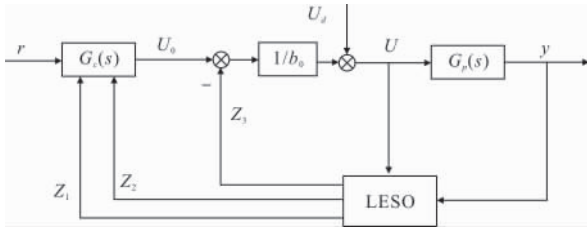


图 2 线性自抗扰控制结构

Fig.2 Structure of Linear Active Disturbance Rejection Control

图 2 中 LESO 为线性扩张状态观测器, r 为输入, $G_c(s)$ 为 PD 控制组合, $G_p(s)$ 为被控对象传递函数, U_d 为施加在系统上等价的总扰动, U 为控制量输入, y 为系统输出, Z_1 、 Z_2 分别是 LESO 对 y 以及其微分信号的跟踪与估计, Z_3 为 LESO 对总扰动 U_d 的估计。

2.2 模型辅助的降阶 LESO 设计

一般二阶系统的微分形式为:

$$\ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = bu \quad (1)$$

将所需考虑扰动加入公式(1)得:

$$\ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_0 y = \omega + (b - b_0)u + b_0 u \quad (2)$$

其中, a_0 、 a_1 已知, b 部分已知 (已知部分为 b_0), ω 为未知扰动, 则 $f = (b - b_0)u + \omega$ 为未知的总扰动,

记 $h = -a_1 \dot{y} - a_0 y + f$, 则 h 为包含了被控对象已知模型信息和系统未知扰动信息的总和, 视为 f 的扩展。选取状态变量 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = h$, 则公式(2)用状态空间描述的形式表达为^[12]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = -a_0 x_2 - a_1 x_3 - a_1 b_0 u + \dot{f} \end{cases} \quad (3)$$

即:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu + Cf \\ y = DX \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{其中: } X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ -a_1 b_0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 0 \ 1]^T, D = [1 \ 0 \ 0].$$

对应的连续扩张状态观测器为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + l_1 (y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + b_0 u + l_2 (y - z_1) \\ \dot{z}_3 = -a_0 z_2 - a_1 z_3 - a_1 b_0 u + l_3 (y - z_1) \end{cases} \quad (5)$$

即:

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + Bu + L(y - DZ) \\ \hat{y} = DZ \end{cases} \quad (6)$$

公式(6)与公式(4)中 A 、 B 、 D 一致。 $Z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$, 为观测器的状态向量。 z_1 是对 y 的跟踪与估计, z_2 是对 \dot{y} 的跟踪与估计, z_3 是对 h 跟踪与估计。 $L = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$ 为观测器增益矩阵。

公式(6)是一个三阶的模型辅助线性扩张状态观测器(Model-assisted LESO, MLESO), 由于 z_1 是对系统输出的跟踪与估计, 这部分信号可以直接测量得到且可信, 所以可以在扩张状态观测器中删除这部分的结构, 得到降阶的扩张状态观测器。具体设计方法为按照参考文献[13]的对 LESO 降阶的思想去掉公式(6)中对系统输出的跟踪与估计部分, 将系统输出的一阶微分与观测器跟踪估计的对应状态之差作为反馈加以修正, 可得到一个模型辅助的降阶线性扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + b_0 u + l_1 (\dot{y} - \hat{z}_1) \\ \dot{\hat{z}}_2 = -a_0 \hat{z}_1 - a_1 \hat{z}_2 - a_1 b_0 u + l_2 (\dot{y} - \hat{z}_1) \end{cases} \quad (7)$$

式中: \hat{z}_1 为对 \dot{y} 的观测跟踪; \hat{z}_2 为对 h 的观测跟踪。若将对 h 的观测跟踪作为输出并设为 \hat{f} 。公式(7)另写为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{Z}} = A_R \hat{Z} + B_R u + L_R (\dot{y} - C_R \hat{Z}) \\ \hat{f} = D_R \hat{Z} \end{cases} \quad (8)$$

将公式(8)合并同类项化简后重写观测器方程:

$$\begin{cases} \dot{\hat{Z}}=[A_R-L_R C_R]\hat{Z}+[B_R \ L_R]u' \\ \hat{f}=D_R \hat{Z} \end{cases} \quad (9)$$

公式(9)为模型辅助的降阶 LESO(Model-assisted Reduced-order LESO, MRLESO)。其中: $\hat{Z}=[\hat{z}_1 \ \hat{z}_2]^T$, $A_R=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}$, $B_R=\begin{bmatrix} b_0 \\ -a_1 b_0 \end{bmatrix}$, $C_R=[1 \ 0]$, $D_R=[0 \ 1]$, $L_R=[l_{R1} \ l_{R2}]^T$ 为需要配置的观测器增益矩阵, $u'=[u \ y, \dot{y}]^T$ 为组合输入。

配置观测器增益矩阵 L_R 的方法与 LESO 配置方法相同^[14],即将观测器特征方程的极点配置在 $-\omega_0$ 处,即:

$$\lambda(s)=|sI-(A_R-L_R C_R)|=(s+\omega_0)^2 \quad (10)$$

式中: I 为单位阵; ω_0 为观测器带宽,由公式(10)可得观测器的增益为:

$$\begin{cases} l_{R1}=-a_1+2\omega_0 \\ l_{R2}=\omega_0^2-2a_1\omega_0+a_1-a_0 \end{cases}$$

2.3 控制律设计

由于线性扩张状态观测器能实时观测跟踪并补偿系统外部与内部扰动,所以可以舍去传统 PID 中在常值扰动下为消除静差而使用的积分项,线性状态误差反馈控制律简化为 PD 控制组合^[12]。为了避免观测器滞后和估计误差产生的不利影响,对应 2.2 节,文中采用的 PD 控制组合的形式为:

$$U_0=K_p(r-y)-K_d \dot{y} \quad (11)$$

则控制输入为:

$$U=\frac{U_0-\hat{z}_2}{b_0} \quad (12)$$

式中: K_p 、 K_d 为需要整定的控制增益参数。

由于 $\ddot{y}=h+b_0 U$, $\hat{z}_2 \approx h$,则由公式(11)、(12)可得整个系统为一个无零点的二阶系统,其闭环传递函数为:

$$G(s)=\frac{y(s)}{r(s)}=\frac{K_p}{s^2+K_d s+K_p} \quad (13)$$

令 $K_p=\omega_c^2$, $K_d=2\omega_c$,则公式(13)等价于:

$$G(s)=\frac{\omega_c^2}{(s+\omega_c)^2} \quad (14)$$

式中: ω_c 为控制器带宽^[14]。

综合 2.2、2.3 节所述,所设计的 ILADRC 结构如图 3 所示。

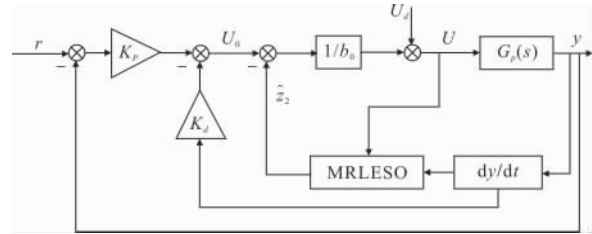


图 3 ILADRC 结构

Fig.3 Structure of ILADRC

图中 MRLESO 为模型辅助的降阶 LESO, r 为输入, $G_p(s)$ 为被控对象, U_d 为等效的总扰动, \hat{z}_2 为 MRLESO 对总扰动的估计, U 为控制量输入, y 为系统输出, K_p 、 K_d 为控制增益参数。

3 仿真实验及分析

文中参考文献[15]中的光电稳定平台方位轴数学模型:

$$G(s)=\frac{7.81}{0.006 \ 1s^2+0.569s+1} \quad (15)$$

公式(15)写成微分方程的形式为:

$$\ddot{y}+93.3\dot{y}+164y=1 \ 280u \quad (16)$$

由公式(2)得 $a_1=93.3$, $a_0=164$, $b_0=1 \ 280$ 。将 a_1 、 a_0 、 b_0 等吊舱模型信息代入公式(9)得:

$$\begin{cases} \dot{\hat{Z}}=A'_R \hat{Z}+B'_R u' \\ \hat{f}=D'_R \hat{Z} \end{cases} \quad (17)$$

其中: $A'_R=\begin{bmatrix} 93.3-2\omega_0 & 1 \\ -\omega_0^2+2\times 93.3\times\omega_0-93.3^2 & -93.3 \end{bmatrix}$, $B'_R=$

$$\begin{bmatrix} 1 \ 280 & 2\omega_0-93.3 \\ -93.3\times 1 \ 280 & \omega_0^2-2\times 93.3\times\omega_0+93.3^2-164 \end{bmatrix}, D'_R=[0 \ 1],$$

则公式(17)为加入光电稳瞄平台模型信息的 MRLESO。

为验证所设计的 ILADRC 的控制效果,以公式(15)为被控对象,运用 MATLAB/Simulink 软件,将 MRLESO 与 LESO、ILADRC 与 LADRC 进

行了基于伯德图的频域特性对比分析,设计了阶跃响应对比仿真实验和视轴抗扰动对比仿真实验。仿

真参数设置为 $\omega_0=90, \omega_c=160$ 。所搭建的仿真实验模型如图 4 所示。

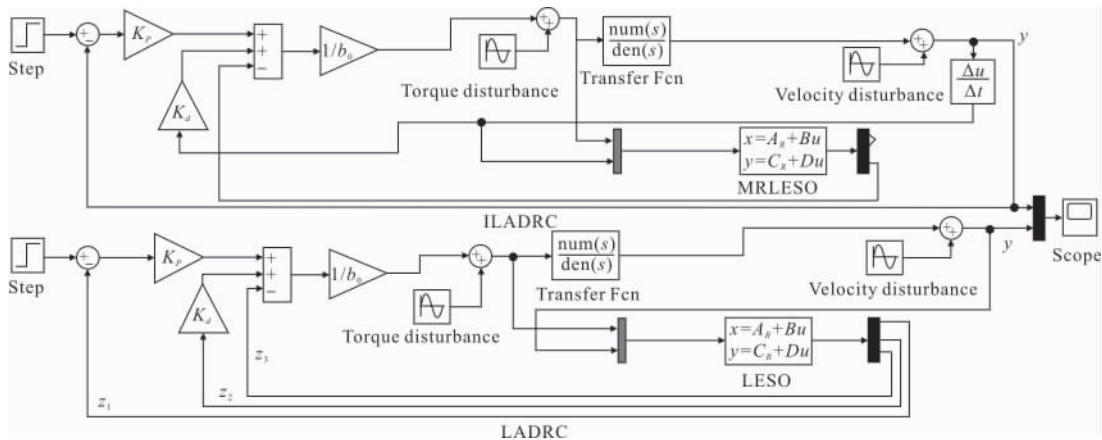


图 4 仿真实验模型

Fig.4 Simulation experimental model

3.1 频域特性分析

观测器的扰动输入与扰动跟踪估计值之间 MRLESO 与 LESO 的频域响应如图 5(a)、(b)所示。将力矩扰动作为输入,此输入与系统输出之间 ILADRC 与 LADRC 的频域响应如图 5(c)、(d)所示。

由图 5(a)、(b)可以看出,与 LESO 相比 MRLESO 减小了相位滞后,在低中频段获得更高的带宽,有更好的扰动观测能力。缺点是在高频段衰减慢,受高频噪声影响较大。由图 5(c)、(d)可以看出 ILADRC 带宽更高,响应速度更快。

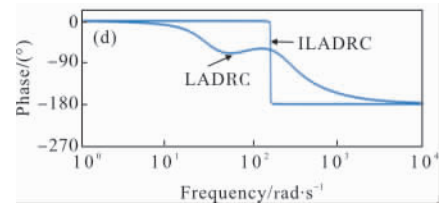
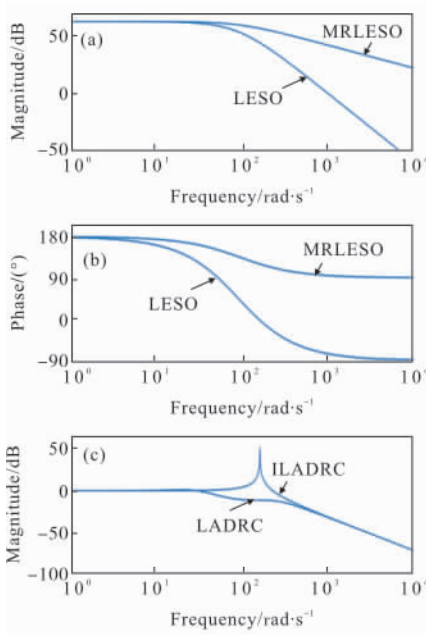


图 5 MRLESO 与 LESO 频域响应对比,ILADRC 与 LADRC 频域响应对比

Fig.5 Comparison of frequency domain response between MRLESO and LESO, comparison of frequency domain response between ILADRC and LADRC



3.2 阶跃响应实验分析

给系统加入 $r(s)=1 \text{ rad/s}$ 的阶跃信号,加入时刻为 0.5 s 时。如图 6 所示为两种控制器的阶跃响应曲线。图 7 为进入稳态后两种控制器产生的稳态误差曲线。

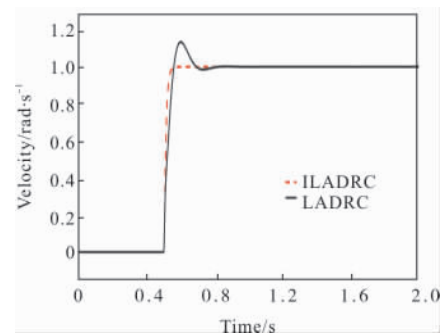


图 6 阶跃响应

Fig.6 Step response

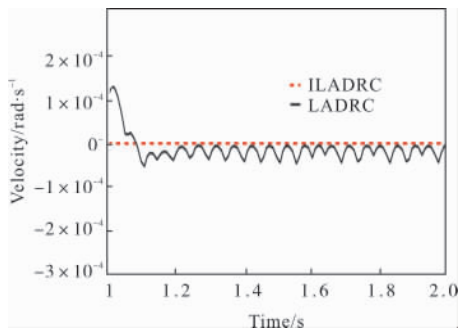


图 7 稳态误差

Fig.7 Steady state error

由图 6 和图 7 可以看出,ILADRC 动态响应能力优于 LADRC,在相同的参数配置下,即相同的观测器带宽和控制器带宽下,ILADRC 没有出现超调和振荡现象,稳态误差可以忽略不计,0.68 s 进入稳态。LADRC 超调量为 13.5%,经短暂振荡进入稳态,0.95 s 进入稳态,有 0.5×10^{-4} rad/s 左右的稳态误差。

3.3 视轴抗扰动能力实验分析

视轴抗扰动试验分别设计了视轴抗力矩扰动实验和视轴抗速度扰动实验,两种扰动所加入的位置如图 4 所示。其中 T_d 和 V_d 的幅值单位分别为 $N \cdot m$ 和 $(^\circ)/s$ 。在系统输入为零条件下给系统施加幅值为 π 、频率为 2.5 Hz 的正弦波力矩扰动和正弦波角速度扰动,图 8 和图 9 是在此实验条件下两种控制器在不同扰动下系统的扰动残差曲线。

由图 8 和图 9 可得,在力矩扰动下,基于 ILADRC 的系统输出的扰动残差峰值为 $0.155 (^\circ)/s$,基于 LADRC 的系统输出的扰动残差峰值为 $0.175 (^\circ)/s$ 。在速度扰动下,基于 ILADRC 的系统输出的扰动残

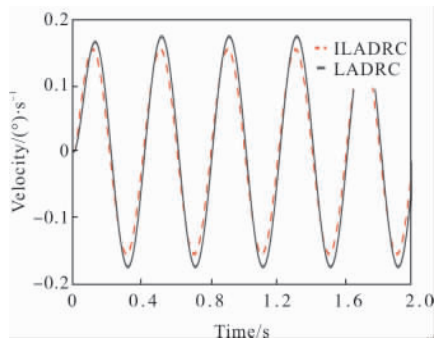


图 8 力矩扰动下系统扰动残差

Fig.8 Disturbance residual of the system under torque disturbance

差峰值为 $0.030 (^\circ)/s$,基于 LADRC 的系统输出的扰动残差峰值为 $0.566 (^\circ)/s$ 。在相同的参数配置条件下,ILADRC 的抗扰动能力好于 LADRC。

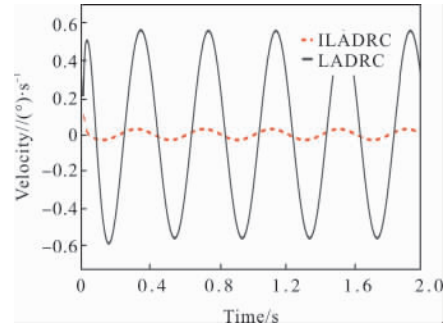


图 9 角速度扰动下系统扰动残差

Fig.9 Disturbance residual of the system under angular velocity disturbance

通过实验发现,保持正弦波扰动幅值为 π 不变,在不同的扰动频率下系统的抗扰动能力表现出不同,特别是角速度扰动抑制能力有较大差别,表 1 为在基于 LADRC、ILADRC 的系统在扰动幅值输入为 π ,扰动频率不同条件下输出的扰动残差峰值对比。

表 1 不同扰动频率下系统扰动残差峰值对比 (单位: $(^\circ)/s$)

Tab.1 Comparison of the peak value of disturbance residual of system under different disturbance frequencies (Unit: $(^\circ)/s$)

Frequency/Hz	Controller	Residual peak value under torque disturbance	Residual peak value under angular velocity disturbance
F=0.5	LADRC	0.158	0.024
	ILADRC	0.157	0.001
F=1	LADRC	0.161	0.088
	ILADRC	0.157	0.005
F=1.5	LADRC	0.165	0.197
	ILADRC	0.156	0.011
F=2	LADRC	0.170	0.355
	ILADRC	0.156	0.019
F=2.5	LADRC	0.175	0.566
	ILADRC	0.155	0.030

由表 1 可知,ILADRC 的抗扰动能力好于 LADRC,特别是角速度扰动抑制能力 ILADRC 有很大优势。随着扰动频率的增加,虽然两种控制器的角速度扰动抑制能力下降,但 ILADRC 的抗扰动能力仍好于 LADRC。随着扰动频率的增加,ILADRC 力矩扰动抑制能力有略微提高,LADRC 力矩扰动抑制能力下降。

4 结 论

文中分析研究了线性自抗扰控制并提出改进的线性自抗扰控制方案。采用具有滞后小、观测效果好的模型辅助的降阶线性扩张状态观测器以及设计受观测器影响小的控制律来提高系统抗扰动能力。通过仿真对比实验,结果表明:对于阶跃输入信号,ILADRC 比 LADRC 提前 0.27 s 进入稳态,且基本可以忽略稳态误差,对于幅值为 π ,频率范围为 0.5~2.5 Hz 的力矩扰动和角速度扰动,与 LADRC 相比 ILADRC 抗扰动能力分别提高 0.6%~11.4% 和 94.3%~95.8%。改进线性自抗扰控制,不但具有更好的动态响应特性和抗扰动能力,同时该方法也可应用于其他能够获取对象模型信息的相关系统中,为此类系统控制器设计提供一种思路和一种方法,具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] Wei Wei, Dai Ming, Li Jiaquan, et al. Design of airborne opto-electric platform control system based on ADRC and repetitive control theory [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(6): 1924–1932. (in Chinese)
- [2] Han Pengna, Liu Shanzhong, Li Ke, et al. Research on stabilization control of tracking and pointing platform based on output-feedback control [J]. *Aerospace Control*, 2018, 36(2): 9–13. (in Chinese)
- [3] Jin Chaoqiong, Zhang Bao, Li Xiantao, et al. Friction compensation strategy of photoelectric stabilized platform based on disturbance observer [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(6): 1876–1885. (in Chinese)
- [4] Li Xiantao, Zhang Bao, Sun Jinghui, et al. ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1574–1581. (in Chinese)
- [5] Ma Binhua, Zhang Bao, Li Xiantao, et al. Adaptive compensation for friction of aerial photoelectrical stabilized platform [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(12): 220–224. (in Chinese)
- [6] Ren Yan, Niu Zhiqiang. Application of new terminal sliding model in photoelectric stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0617005. (in Chinese)
- [7] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900–906.
- [8] Han Jingqing. Active disturbance rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19–23. (in Chinese)
- [9] Wang Wanting, Guo Jing, Jiang Zhenhua, et al. Study on photoelectric tracking system based on ADRC [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0217003. (in Chinese)
- [10] Gao Z. Active Disturbance rejection control: a paradigm in feedback control system design [C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, IEEE, 2006: 2399–2405.
- [11] Wang Shuai, Wang Jianli, Li Hongwen, et al. Active disturbance rejection control of torque ripple on optoelectronic tracking system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(4): 7–13. (in Chinese)
- [12] Zhu Bin. Introduction to Active Disturbance Rejection Control [M]. Beijing: Beihang University Press, 2017. (in Chinese)
- [13] Tian Gang. Reduced-order extended state observer and frequency response analysis [D]. US: Cleveland State University, 2007.
- [14] Gao Z Q. Scaling and parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of American Control Conference. IEEE, 2003: 4989–4996.
- [15] Wang Chunyang, Peng Yeguang, Shi Hongwei, et al. Design of linear active disturbance rejection controller for photoelectric stabilized platform [J]. *Electronics Optics & Control*, 2018, 25(11): 112–115, 119. (in Chinese)