

文章编号 1004-924X(2018)08-2084-08

## 基于扩张状态观测器的快速步进/凝视成像机构控制

黄 浦<sup>1\*</sup>, 杨秀丽<sup>2</sup>, 修吉宏<sup>1</sup>, 李 军<sup>1</sup>, 李友一<sup>1</sup>, 许永森<sup>1</sup>

(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. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**提出一种基于扩张状态观测器并引入加速度补偿策略的控制器设计方案,以实现快速步进/凝视成像机构对控制性能的高要求。首先,阐述了扩张状态观测器理论,对其特性进行了详细分析,并设计了以成像机构为被控对象的三阶线性扩张状态观测器。通过将观测器置于速度内环反馈通道,设计了基于扩张状态观测器的位置和速度双回路控制器。在此基础上,利用观测器输出的加速度估计值,提出加速度补偿策略,并设计了补偿环节。实验结果表明,与无加速度补偿环节相比,引入加速度补偿后,成像机构每次步进调节时间由 76 ms 减小到 33 ms,凝视期间的角位置精度由约  $0.07^\circ$  减小到  $0.01^\circ$  以内,速度波动减小约 2~3 倍,成像机构的控制性能明显改善。控制器设计简单,需整定参数少,对于提高同类控制系统性能具有较高的实用价值。

**关键词:**快速步进/凝视成像;扩张状态观测器;加速度补偿;扰动估计;带宽参数化

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182608.2084

## Extended state observer based control of fast step/stare imaging mechanisms

HUANG Pu<sup>1\*</sup>, YANG Xiu-li<sup>2</sup>, XIU Ji-hong<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, LI You-yi<sup>1</sup>, XU Yong-sen<sup>1</sup>

(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. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: hpu8@163.com

**Abstract:** An extended state observer (ESO) based controller with acceleration compensation strategy was proposed to satisfy the high requirements for control performance of fast step/stare imaging mechanisms. First, the theory of ESO was described and its characteristics were expatiated. Then, the third-order linear extended state observer (LESO) was designed with an imaging mechanism as the controlled object. By placing the observer in the feedback channel of the speed loop, a double loop controller of position and speed based on an ESO was designed. On this basis, an acceleration compensation strategy was proposed, and the compensating link was described using the estimated acceleration output by the observer. The experiment results showed that the settling time of the imaging mechanism was reduced at every step from 76 ms to 33 ms and the accuracy of the angular position

收稿日期:2018-01-15;修订日期:2018-03-30.

基金项目:科技部国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFB0503001)

during the period of stare decreased approximately  $0.07^\circ$  to  $0.01^\circ$ . In addition, the speed fluctuation was reduced by approximately two to three times compared with that without acceleration compensation. The control performance of the mechanism was significantly improved to meet high-performance requirements. The design process of the controller was simple and the adjusted parameters were less than that of traditional designs, which is of high practical value in terms of improving the performance of similar control systems.

**Key words:** fast step/stare imaging; Extended State Observer(ESO); acceleration compensation; disturbance estimate; bandwidth parameterization

## 1 引 言

对于具有小视场光学系统的航空成像设备,若要实现大区域覆盖成像,需设计框架运动机构,通过机构运动转换视场实现大范围成像。框架的运动方式分为速度扫描方式和位置步进/凝视方式。航空成像应用中大多采用速度扫描方式,其缺点是定位精度和成像性能易受载机姿态扰动影响。位置步进/凝视方式是根据实时计算的指向角执行步进运动,在到达指定位置后进行凝视成像的一种方式,这种方式在满足凝视时刻视轴定位精度的前提下对系统位置响应的动态和稳态性能提出了更高的要求,即步进过程更快的响应速度和凝视期间更小的残余速度,其目的是满足帧频要求及图像清晰度要求,其优点是不易受载体姿态影响,指向精确。传统 PID 控制器限于其简单结构,难以满足步进/凝视成像系统对控制性能的需求。

控制问题的核心是消除被控对象内部不确定性和施加其上的外部扰动(称为系统总扰动),其本质就是抗扰问题<sup>[1]</sup>。传统 PID 控制主要依赖高增益和积分环节实现控制性能,但只能在误差产生后才能反应,特别由于系统内部和外部的不确定性,包括相位和时间滞后等因素导致其控制能力有限<sup>[2-3]</sup>。尽管目前已经有很多融合 PID 思想和智能控制技术的各种改进算法,如模糊控制<sup>[4-5]</sup>、神经网络<sup>[6]</sup>等,虽然控制性能有所提高,但控制器设计实现和参数整定复杂,工程应用困难。现代控制理论中基于被控对象数学模型的观测器设计方法虽然理论严谨,但由于实际对象模型的不确定性导致设计复杂,稳定性差。扩张状态观测器是近年逐渐开始工程应用的自抗扰控制技术

的核心组成部分,其特点是不依赖于被控对象数学模型,仅仅根据被控对象的输入输出信号就能够估计出被控对象内部和外部的扰动总和。通过对总扰动估计值进行补偿实现控制目标,是针对 PID 控制缺陷的有效补充和完善<sup>[7]</sup>。目前,基于扩张状态观测器的控制器设计已在很多领域实现了成功应用,如飞行器姿态控制<sup>[8]</sup>、超导腔体控制<sup>[9]</sup>等。

本文以一种工作于位置方式的快速步进/凝视成像机构为研究对象,进行位置控制时,在速度内环反馈通道设计扩张状态观测器,通过观测器估计的扰动值生成扰动补偿量,与前向通道的控制量组合,实现了基于扩张状态观测器的控制器设计。在此基础上,根据观测器产生的加速度估计值,提出加速度补偿策略,进一步提高了成像机构的控制性能,很大程度上改善了快速步进/凝视成像机构的动态和稳态特性。

## 2 扩张状态观测器理论

控制的目标应是消除可影响被控对象输出结果的扰动。因此,若系统满足可观性,就能通过其输入和输出信号进行观测。基于此思想,韩京清研究员提出了扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的概念,将对系统输出有影响的扰动(包含内扰和外扰)状态扩张为一个新的状态变量,并建立了能观测该扰动状态的观测器<sup>[10]</sup>。

对于  $n$  阶被控对象:

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n-1)}, \omega(t)) + bu, \quad (1)$$

式中:  $\omega(t)$  为被控对象的外部未知扰动,  $u$  为控制信号。令  $b = b_0 + \Delta b$ , 其中  $b_0$  为  $b$  的预估值。定义一个新的扩张状态  $x_{n+1}$ , 令  $x_{n+1} = f(x, \dot{x}, \ddot{x},$

...,  $x^{(n-1)}, \omega(t) + \Delta bu$ , 从该表达式可以看出, 扩张出的新状态包含了系统的不确定性信息, 也即扰动总和信息。被控对象可简化为  $x = x_{n+1} + b_0 u$ , 将被扩张后的  $n+1$  阶系统写为状态空间形式如式(2)所示<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dots\dots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = x_{n+1} + b_0 u \\ \dot{x}_{n+1} = f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

因此, 针对被扩张新状态后的系统, 可以设计对应的形式如式(3)的状态观测器:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g_1(e) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 g_2(e) \\ \dots\dots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - \beta_n g_n(e) + b_0 u \\ \dot{z}_{n+1} = -\beta_{n+1} g_{n+1}(e) \end{cases} \quad (3)$$

图 1 为扩张状态观测器(ESO)的一般形式结构图。

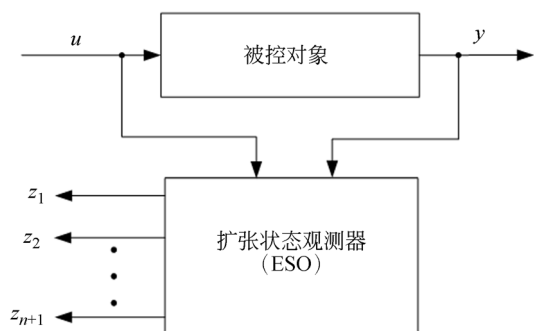


图 1 扩张状态观测器(ESO)结构图

Fig. 1 Structure chart of ESO

式(3)中,  $z_1$  到  $z_{n+1}$  分别是被扩张状态后的  $n+1$  阶系统中  $x_1$  到  $x_{n+1}$  的估计,  $z_{n+1}$  即为原  $n$  阶系统的扰动总和估计值。 $\beta_i$  为观测器增益,  $g_i(e)$  是满足条件  $e \cdot g_i(e) \geq 0$  的适当非线性或线性函数, 文献[10]给出了  $g_i(e)$  选取为非线性函数的一般形式。 $g_i(e)$  若取为非线性形式, 则该观测器称为非线性扩张状态观测器(NLESO);  $g_i(e)$  若取为线性形式, 则称为线性扩张状态观测器(简称

LESO)。LESO 的一般形式见式(4)。

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e \\ \dots\dots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - \beta_n e + b_0 u \\ \dot{z}_{n+1} = -\beta_{n+1} e \end{cases} \quad (4)$$

### 3 二阶被控对象 LESO 设计

由于 NLESO 参数较多, 整定复杂, 近年来 LESO 在工程中应用更为广泛。文献[12]提出了带宽参数化的 LESO 设计方法, 其设计思想化繁为简, 需整定参数少, 在很多领域成功进行了控制性能验证<sup>[13-15]</sup>。

根据式(4)的 LESO 的一般形式及带宽参数化设计思想, 以某成像机构的运动组件作为被控对象, 设计基于该对象的 LESO。该成像机构采用直流永磁力矩电机直接进行驱动, 通过对该运动机构参数和所选执行电机参数进行计算, 对象的输出传递函数可以写为式(5)的形式, 式中  $y(s)$ 、 $u(s)$ 、 $d(s)$  分别为速度输出信号、控制器输出的控制信号、对象的外部扰动的拉氏变换。

$$y(s) = G_p(s) u(s) + G_{wd}(s) d(s) = \frac{1.748}{(0.526s+1)(0.002s+1)} u(s) + \frac{8.475}{0.526s+1} d(s) \quad (5)$$

由式(5)可知, 成像机构为典型二阶被控对象, 将该式改写为微分方程的形式可表示为:

$$\ddot{y} = -501.9\dot{y} - 950.57y + 15.875\dot{d} + 8056.1d + 1661.6u = -501.9\dot{y} - 950.57y + 15.875\dot{d} + 8056.1d + (1661.6 - b_0)u + b_0u \quad (6)$$

令:

$$f = -501.9\dot{y} - 950.57y + 15.875\dot{d} + 8056.1d + (1661.6 - b_0)u \quad (7)$$

则式(6)可以简化为如下形式:

$$\ddot{y} = f + b_0 u \quad (8)$$

根据式(8), 可将被控对象状态空间表达式写为式(9)的形式。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$



架的,位置外环根据位置指令与光电编码器反馈角度产生误差,通过位置校正后生产速度参考输入量,设计控制律时一般采用比例控制即可。若断开位置外环以外部速度作为指令输入,则为速度扫描方式,其扫描速度是相对于惯性空间的。前文已将成像机构模型简化为两个积分器串联的系统,对于这样的系统,通过对其速度内环理想闭环传递函数进行分析,速度校正环节可以采用 PD 控制<sup>[12]</sup>。但实际调试过程中,由于微分控制会给系统引入噪声,一般微分增益取值很小。因此,在设计速度内环控制律时直接取消了微分环节,仅仅采用比例控制。因此从前向通道看,位置和速度控制律均采用了比例控制。

速度内环反馈通道采用了扩展状态观测器。根据前文式(15)的 LESO 设计结果,以 LESO 对速度的估计值作为速度负反馈。实际测试结果表明,用观测器估计值作为速度反馈比直接采用陀螺输出值作为速度反馈更有利于提高系统性能。其主要原因在于陀螺输出数据噪声较大,一般的惯性滤波器会给系统带来滞后,从而带来性能降低。而观测器能够消除由简单差分运算带来的相位滞后,在不损失相位的情况下能够对输出值起到滤波的效果<sup>[10,16]</sup>。图 3 显示了成像机构稳定在零位时的陀螺输出角速度和 LESO 观测角速度。从图中可以看出,LESO 观测角速度噪声减少,对陀螺直接输出值进行了一定程度的滤波。此外,通过计算均方差,LESO 观测角速度比陀螺直接输出角速度均方差减小约 10%。

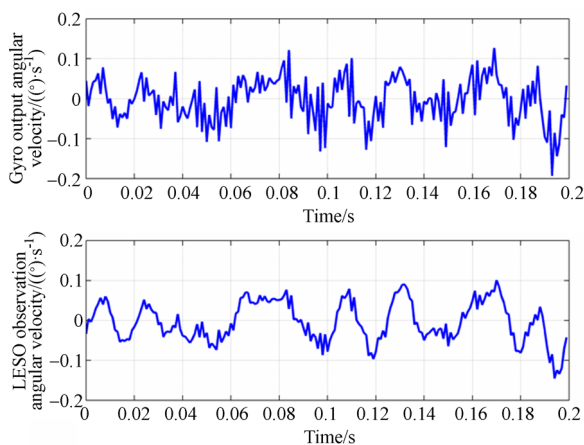


图 3 陀螺输出与 LESO 观测角速度对比

Fig. 3 Comparison of gyro output angular velocity and LESO observation

因此,前向通道的控制律可简单写为如下形式:

$$u_0 = K_v(K_p(\theta - \theta_i) - z_1), \quad (16)$$

式(16)中, $K_v$ 为速度环增益, $K_p$ 为位置环增益, $\theta$ 为输入指令角, $\theta_i$ 为光电编码器反馈角度值。根据自抗扰控制技术的思想,LESO 对系统扰动总和的估计值  $z_3$  能够用于消除系统的扰动。因此,加入扰动补偿量后,实际的控制量设计为如下形式:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} = \frac{K_v(K_p(\theta - \theta_i) - z_1) - z_3}{b_0}, \quad (17)$$

式中  $b_0$  称为扰动补偿因子,其物理意义为电机的力矩系数  $K_t$  与负载转动惯量的比值<sup>[17]</sup>。对该成像机构,其电机力矩系数  $K_t = 0.528 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ ,负载总惯量为  $J_L = 0.06 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$ ,因此扰动补偿因子的理论值约为  $b_0 = 8.516$ 。实际上, $b_0$  值在调试过程中以其理论值作为初值进行调整。扰动补偿量具有消除系统稳态误差的效果,在某种意义上与积分环节效果相似,但没有传统积分环节的明显缺点。

根据以上基于 LESO 的控制器设计结果,控制器需要整定的参数包括:位置环比例系数  $K_p$ 、速度环比例系数  $K_v$ 、LESO 带宽参数  $\omega_o$ 、扰动补偿因子  $b_0$ 。实际整定结果见表 1。

表 1 基于 LESO 的控制器参数整定结果

Tab. 1 Parameters setting result of LESO-based controller

参数名称	实际整定结果
位置环比例系数 $K_p$	60
速度环比例系数 $K_v$	19 600
LESO 带宽参数 $\omega_o$	160
扰动补偿因子 $b_0$	12

#### 4.2 加速度补偿策略

文献[18]采用加速度滞后补偿策略改善了光电经纬仪的控制性能。由于采用对速度进行差分的方式获取加速度,且对加速度值进行了惯性滤波处理,因此相当于在加速度补偿中引入了滞后环节,不利于系统稳定。根据 LESO 的设计结果,其估计值可视为对机构加速度的估计量。图 4 为  $1^\circ$  阶跃响应时加速度估计值和速度差分加速度值的对比曲线,可以看出,估计值曲线平滑,用速度差分方法计算的加速度则噪声较大。

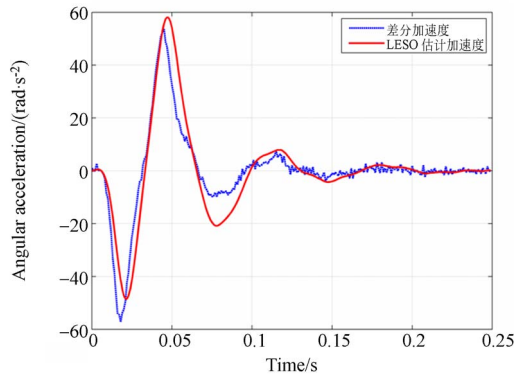


图 4 差分加速度与 LESO 估计加速度对比

Fig. 4 Comparison of acceleration by difference and LESO estimation

因此,考虑将观测器加速度估计值以近似加速度前馈的方式,通过一个补偿增益  $K_{ac}$  进行放大后与控制量合成生成最终控制量。加入加速度补偿环节后,图 2 的控制器结构变为图 5 的形式。从图 5 可以看出,加速度补偿环节的设计以上节中设计的控制器为基础,并不影响外部的速度和位置回路工作,而是采用加速度补偿量与位置和速度回路控制量计算结果进行了复合。

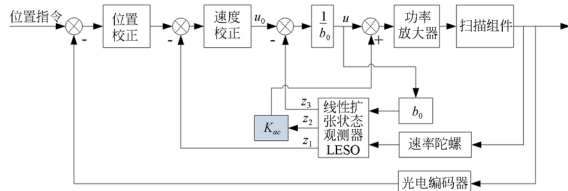


图 5 有加速度补偿的基于 LESO 的控制器结构图

Fig. 5 Structure chart of LESO-based controller with acceleration compensation

此时,最终控制量表达式表现为如下形式:

$$u = \frac{K_v(K_p(\theta - \theta_1) - z_1) - z_3 + K_{ac}z_2}{b_0}, \quad (18)$$

式中:  $K_{ac}$  是调试过程需要选取的参数。经过调试,选取加速度补偿增益为  $K_{ac} = 3.5$ 。无加速度补偿和有加速度补偿时,成像机构进行  $1^\circ$  步进的角位置阶跃响应曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,加入加速度补偿策略后,系统阶跃响应动态性能改善明显,超调由 7% 减小到 1%,并能很快达到稳态,响应后期无微小波动。从角位置精度看,加入加速度补偿策略后,过渡过程后期位置波动明显减小,若以  $0.05^\circ$  误差带作为判据,其稳态时间由 76 ms 减小到 33 ms。

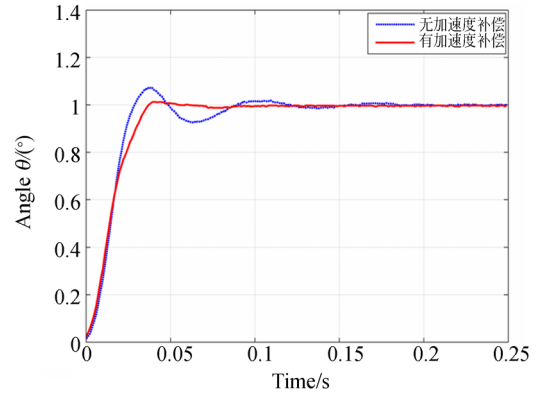


图 6 无加速度补偿和有加速度补偿时的控制器阶跃响应

Fig. 6 Step response of controller no acceleration compensation and with acceleration compensation

### 5 快速步进/凝视控制实验

为验证成像机构实际工作性能,进行了快速步进/凝视控制实验。实验过程中,使成像机构在  $0^\circ \sim 5^\circ$  之间以  $1^\circ$  步进角进行“先步进,后凝视”的往复运动。成像帧周期为 80 ms,其中步进时间为 70 ms,图像传感器凝视时间为 10 ms。运动组件每次根据指令角步进至指定位置并保持稳定后开始凝视成像,凝视结束后开始步进到下一个位置。成像机构在进行步进/凝视时的关键性能包括凝视期间的位置精度和速度波动。其中,位置精度是对步进动作快速性的要求;而速度波动是为了衡量凝视期间视轴偏差,对速度波动进行积分可获得成像过程的视轴晃动量,从而可以对图像模糊情况进行分析。无加速度补偿和有加速度补偿时的角位置曲线如图 7 所示。

图 8 为成像机构步进/凝视期间的速度曲线。从图 8 可以看出,加入加速度补偿后,每次步进后期角速度有明显的位于零附近的稳速段,能够保证凝视期间的成像性能。

图 7 和图 8 的结果表明,与无加速度补偿相比,引入加速度补偿后,位置和速度曲线过渡过程后期均平稳无明显波动。通过计算每次步进完成后的角度误差数据和凝视期间的角速度波动数据的均方差,对无加速度补偿和有加速度补偿时的位置和速度性能进行了对比,结果见表 2。通过数据对比可以看出,采用加速度补偿策略后,凝视

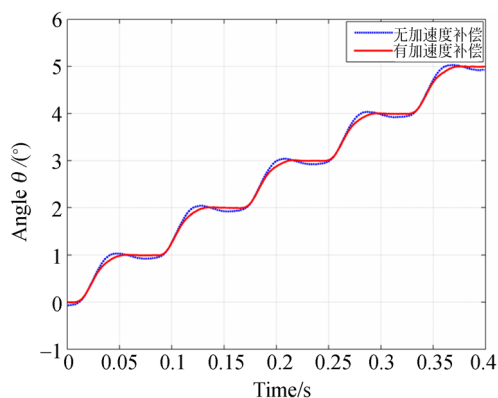


图 7 无加速度和有加速度补偿时的控制器快速步进/凝视性能

Fig. 7 Step/Stare response of controller no acceleration compensation and with acceleration compensation

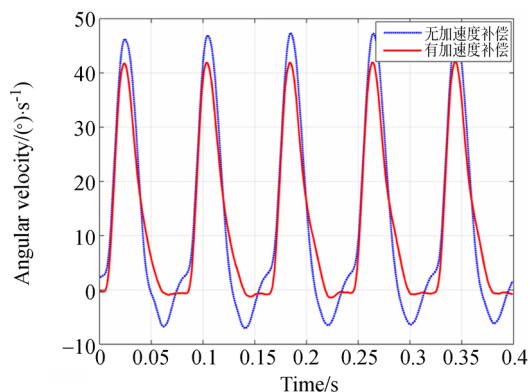


图 8 无加速度和有加速度补偿时的快速步进/凝视速度曲线

Fig. 8 Angular velocity characteristic of controller no acceleration compensation and with acceleration compensation

起始时刻的机构角位置精度得到明显改善,由约  $0.07^\circ$  减小到  $0.01^\circ$  以内,同时凝视期间速度波动

#### 参考文献:

- [1] 高志强. 控制工程的抗扰范式[C]. 第二十九届中国控制会议论文集,北京:2010:6071-6076.  
GAO ZH Q. On Disturbance Rejection Paradigm in Control Engineering [C]. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China*, 2010: 6071-6076, (in Chinese)
- [2] 黄浦,修吉宏,李军,等. 航空相机镜筒位置控制的扰动估计与补偿[J]. 光学精密工程,2012,20(4): 803-810.

减小约 2~3 倍,使成像机构的控制性能得到明显改善。

表 2 快速步进/凝视控制性能

Tab. 2 Controlling performance of Fast Step/Stare

指令 角度/ $(^\circ)$	位置精度/ $(^\circ)$		速度波动/ $((^\circ) \cdot s^{-1})$	
	无加速 度补偿	有加速 度补偿	无加速 度补偿	有加速 度补偿
1	0.073 8	0.006 7	1.604 9	0.633 9
2	0.078 8	0.004 9	1.583 0	0.710 4
3	0.075 8	0.005 8	1.562 7	0.450 3
4	0.075 5	0.007 6	1.583 7	0.553 7
5	0.074 4	0.007 1	1.562 2	0.577 5

## 6 结 论

为实现一种工作于快速步进/凝视方式的成像机构的控制性能,对被控对象模型进行了分析简化,设计了对象的三阶线性扩张状态观测器 LESO。以 LESO 对速度的估计值作为速度反馈,根据 LESO 的扰动估计值,设计了基于 LESO 的带扰动补偿量的控制器。以扩张观测器对加速度的估计值为基础,提出了一种加速度补偿策略,并设计了补偿环节。

实验结果表明,采用引入加速度补偿策略的基于 LESO 的控制器,成像机构凝视起始时刻的角位置精度由约  $0.07^\circ$  减小到  $0.01^\circ$  以内,速度波动减小约 2~3 倍,满足了成像机构对步进快速性和凝视稳定性的控制性能要求。基于 LESO 并引入加速度补偿策略的控制器设计较为简单,需整定参数少,其设计思想对于提高同类控制系统性能具有较高的参考和实用价值。

HUANG P, XIU J H, LI J, *et al.*. Disturbance estimation and compensation of position control of lens-barrels in aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 803-810. (in Chinese)

[3] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.

HAN J Q. From PID Technique to Active Disturbance Rejection Control Technique [J]. *CONTROL Engineering of China*, 2002, 9(3): 13-18. (in Chinese)

[4] 崔宁,陈兴林,曹开锐,等. 空间光通信精跟踪系统

- 的模糊自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5):1394-1400.
- CUI N, CHEN X L, CAO K R, *et al.*. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1394-1400. (in Chinese)
- [5] 彭树萍, 李博, 姜润强, 等. 光电跟踪系统的双模控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):335-342.
- PENG SH P, LI B, JIANG R Q, *et al.*. Dual mode control for electro-optical tracking systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):335-342. (in Chinese)
- [6] 周旺平, 刘文, 刘伟. 斜轴式天文望远镜机架的驱动控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6):1664-1672.
- ZHOU W P, LIU W, LIU W. Driving control for mounting rack of slant axis astronomical telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1664-1672. (in Chinese)
- [7] YOO D, YAU S S T, GAO Z. Optimal fast tracking observer bandwidth of the linear extended state observer[J]. *International Journal of Control*, 2007, 80(1):102-111.
- [8] XIA Y Q, ZHU ZH, FU M Y, *et al.* Attitude Tracking of Rigid Spacecraft With Bounded Disturbances [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(2):647-659.
- [9] JOHN VINCENT, DAN MORRIS, NATHAN USHER, *et al.*. On Active Disturbance Rejection Based Control Design for Superconducting RF Cavities [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, 643(1):11-16.
- [10] 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.
- HAN J Q. *Active Disturbance Rejection Control Technique—the technique for estimating and compensating the uncertainties* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [11] SANJAY E. Talole, Jayawant P. Kolhe, Srivijay B. Phadke. Extended-State-Observer-Based Control of Flexible-Joint System With Experimental Validation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(4):1411-1419.
- [12] GAO ZH Q. Scaling and Bandwidth-Parameterization Based Controller Tuning[C]. *Proceedings of American Control Conference*, 2003, 4989-4996.
- [13] TIAN G, GAO ZH Q. Benchmark Tests of Active Disturbance Rejection Control on an Industrial Motion Control Platform[C]. *Proceedings of the 2009 American Control Conference*, 2009: 5552-5557.
- [14] DONG L L, Prasanth Kandula, GAO ZH Q, *et al.*. On a robust control system design for an electric power assist steering system [C]. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 2010: 5356-5361.
- [15] DONG L L, ZHENG Q, GAO ZH Q. On Control System Design for Conversional Mode of Operation of Vibrational gyroscopes [J]. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2008, 8(11):1871-1878.
- [16] GEORGE ELLIS. *Control System Design Guide (Fourth Edition)* [M]. ELSEVIER, 2012.
- [17] LI SH H, LIU ZH G. Adaptive Speed Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor System With Variations of Load Inertia [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(8):3050-3059.
- [18] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪、捕获快速运动目标计数的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2002.
- WANG J L. *Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)

#### 作者简介:



黄浦 (1981—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 副研究员, 2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事航空成像与测量技术及先进数字控制技术研究; E-mail: hpu8@163.com



杨秀丽 (1979—), 女, 吉林松原人, 硕士, 讲师, 2008年于长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位, 主要从事控制系统机械结构设计与有限元分析研究; E-mail: yangxl0@163.com