

# 控制与决策

Control and Decision

## 机载光电稳瞄平台的扰动观测分数阶控制方法

王春阳, 孙靖, 肖博, 刘雪莲

引用本文:

王春阳, 孙靖, 肖博, 等. 机载光电稳瞄平台的扰动观测分数阶控制方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 1902–1908.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1677>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 立方体机器人自抗扰平衡控制方法

Dynamic modeling of a cubical robot balancing on its corner

控制与决策. 2019, 34(6): 1203–1210 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1559>

#### 基于弹性能量函数的非线性不确定系统控制方法

Nonlinear uncertain system control method based on elastic energy function

控制与决策. 2019, 34(6): 1247–1252 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1545>

#### 一阶不确定系统的固定时间收敛扰动观测器

Fixed-time convergent disturbance observer for first-order uncertain system

控制与决策. 2019, 34(5): 917–926 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1414>

#### 网络环境下连续切换系统观测器和控制器设计

Observer and controller design for continuous switched systems in the network environment

控制与决策. 2019, 34(12): 2649–2655 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0357>

#### 复杂系统的分数阶内模控制器设计

Design of fractional order internal model controller for complex system

控制与决策. 2015(3): 531–535 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1779>

# 机载光电稳瞄平台的扰动观测分数阶控制方法

王春阳<sup>1,2†</sup>, 孙靖<sup>3</sup>, 肖博<sup>4</sup>, 刘雪莲<sup>4</sup>

(1. 西安工业大学 西北兵器工业研究院, 西安 710021; 2. 长春理工大学 人工智能学院, 长春 130022;  
3. 长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022; 4. 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 随着机载光电稳瞄平台在国防军事领域的广泛应用,现代武器系统对机载光电稳瞄平台控制技术的要求越来越高. 鉴于此,结合分数阶控制和扰动观测器原理,提出一种基于扰动观测的分数阶控制方法,用于提高机载光电稳瞄平台控制系统的各项性能. 给出相应的闭环控制系统结构和控制器设计方法,并对其输入输出特性、扰动抑制能力等性能进行研究. 在阶跃响应、正弦跟踪、扰动抑制和鲁棒性等仿真实验中,所提出控制器均表现良好. 仿真结果表明,所提出基于扰动观测的分数阶控制器不仅具有分数阶控制响应速度快、鲁棒性强的特性,还表现出扰动观测器抗扰能力强的优点,可以达到提高机载光电稳瞄平台控制系统性能的目的.

**关键词:** 机载光电稳瞄平台; 分数阶控制; 扰动观测器; 扰动抑制; 鲁棒性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Disturbance observation fractional order control method for airborne photoelectric stabilized platform

WANG Chun-yang<sup>1,2†</sup>, SUN Jing<sup>3</sup>, XIAO Bo<sup>4</sup>, LIU Xue-lian<sup>4</sup>

(1. Northwest Institutes of Advanced Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. College of Artificial Intelligence, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 4. College of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** With the wide application of airborne photoelectric stabilized platforms in the field of national defense and military, the requirement of the modern weapon system for the control technology of the airborne photoelectric stabilized platform is getting higher and higher. Therefore, based on the fractional-order control and the principle of disturbance observers, a fractional-order control method based on disturbance observation is proposed to improve the performance of the airborne photoelectric stabilized platform control system. This paper gives the corresponding closed-loop control system structure and the controller design method. Then, the input and output characteristics and anti-interference ability are studied. In the simulation experiments of step response, sinusoidal tracking, disturbance suppression and robustness, the proposed controller performs well. Simulation results show that the proposed controller has the characteristics of fast response and strong robustness of fractional-order control, and also shows the strong anti-interference ability of the disturbance observer. The purpose of improving the performance of the airborne photoelectric stabilized platform control system can be achieved.

**Keywords:** airborne photoelectric stabilized platform; fractional-order control; disturbance observer; disturbance suppression; robustness

## 0 引言

机载光电稳瞄平台可以有效隔离载体的运动干扰,保证光电探测设备的视轴始终保持稳定. 与导弹制导装置结合,可以对远距离的军事目标进行精准的打击;与电子对抗武器装备结合,可以有效实现电子干扰和防御,极大地提高载机的作战性能. 随着机载

光电稳瞄平台在国防军事领域的广泛应用,现代武器系统对机载光电稳瞄平台控制技术的要求也越来越高<sup>[1]</sup>.

影响机载光电稳瞄平台控制系统性能的主要因素有机械结构误差、平台框架质量不均衡、轴系摩擦力矩、载体干扰力矩和传感器噪声等. 对于这些影响

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-04-03.

基金项目: “十三五”兵器创新基金项目(6141B012826); 吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20190591KJ).

责任编辑: 虞文武.

†通讯作者. E-mail: wangchunyang19@163.com.

因素,仅仅通过改进精密机械加工和装配等技术并不能完全解决问题,还需要采取有效的控制方法进行抑制.目前实际应用的控制方法主要还是以PID控制为主,但已经有很多学者在控制方法的改进上做了积极的尝试.例如,文献[2]提出小波神经网络扰动观测器内模控制器,对稳定平台的未建模动态和扰动进行估计和抑制,有效提高了系统的扰动隔离度;文献[3]利用滑模变结构控制方法,解决了三轴惯性平台控制器鲁棒性较差及控制效果容易受到平台轴间耦合因素影响的问题;文献[4]设计了一种鲁棒自适应反步控制方法,克服了模型参数不确定性以及外界干扰带来的影响,提高了平台稳定回路的鲁棒性和跟踪性能.

近年来,随着分数阶微积分理论研究的不断深入以及计算机技术的迅猛发展,分数阶微积分理论已经逐渐渗透到各个科研领域.1999年,Podlubny<sup>[5]</sup>将分数阶微积分理论引入到PID控制器中,提出了分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器的概念,极大地推进了分数阶控制理论的发展进程.其与传统整数阶PID控制器结构上基本相同,但增加了一个积分阶次λ和一个微分阶次μ.参数的设计多了两个自由度,使得控制器的调节更加细腻,控制效果更为精确.大量实验证明,分数阶控制器比整数阶控制器具有更好的快速性、更高的控制精度以及更强的鲁棒性<sup>[6]</sup>.

理论界追求的是模型的精确性,绝大多数控制理论都是基于精确模型阐述的.但实际上,大部分系统的精确模型无法获得,不管其模型如何得到,实际模型与近似模型即名义模型之间都会存在差异.模型的不确定性总是客观存在的,这种不确定性包含未建模动态特性以及系统中存在的扰动等不能精确建模的因素.扰动观测器(disturbance observer, DOB)为模型的不确定性提供了很好的解决办法.扰动观测器的使用不需要得到被控对象的精确模型,只需要得到名义模型即可对系统中存在的外界扰动进行估计和补偿.基于此,扰动观测器在现代控制领域的应用越来越多.

本文结合分数阶控制响应快、鲁棒性强和扰动观测器对模型精确度依赖性低、抗扰能力强的优点,提出一种基于扰动观测的分数阶控制方法,用于提高机载光电稳瞄平台控制系统的各项性能.其中分数阶控制器的使用可以提高系统的响应速度、减小系统稳态误差并增强控制系统的鲁棒性,而改进型扰动观测器则可以有效克服外界扰动和不确定因素对机载光电稳瞄平台系统稳定性的影响.

## 1 分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器设计

### 1.1 分数阶控制原理

分数阶比例积分微分控制器形式为

$$C(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu. \quad (1)$$

其中:  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,  $K_d$  为微分系数,  $\lambda$  为积分阶数,  $\mu$  为微分阶数,  $\lambda$  和  $\mu$  可取 (0, 2) 内的任意实数.

由于分数阶控制系统从理论上讲是无限维的,一般情况下不能直接对其进行分析和设计,需要利用整数阶控制系统去近似. Chen等<sup>[7]</sup>提出了一种Al-Alaoui型生成函数与CFE法相结合的加权的连分式近似法,该方法分数阶微积分算子  $s^{\pm\alpha}$  的离散化近似形式为

$$D^\alpha(z) = \left(\frac{8}{7T}\right)^\alpha \text{CFE}\left\{\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}/7}\right)^\alpha\right\}_{p,q} = \left(\frac{8}{7T}\right)^\alpha \frac{P_p(z^{-1})}{Q_q(z^{-1})}. \quad (2)$$

其中:  $T$  为采样周期;  $\text{CFE}\{u\}$  为连分式展开;  $P(\cdot)$  和  $Q(\cdot)$  为变量  $z^{-1}$  的互质多项式,其阶次分别为  $p$  和  $q$ ,通常设定  $p = q = n$ . 该阶次由迭代次数决定,迭代次数越多阶次越高,近似效果越好.

### 1.2 基于向量模型的分数阶控制器设计方法

已知被控对象传递函数为  $P(s)$ , 控制器传递函数为  $C(s)$ , 开环传递函数为  $G(s) = C(s)P(s)$ , 系统相角裕度为  $\phi_m$  和截止频率为  $\omega_c$  的情况下,可以得到分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器参数整定规则(flat-phase)<sup>[8]</sup>,表示如下:

1) 控制系统开环传递函数  $G(s)$  在截止频率  $\omega_c$  处的相角特性为

$$\arg[G(j\omega_c)] = \arg[C(j\omega_c)P(j\omega_c)] = -\pi + \phi_m; \quad (3)$$

2) 控制系统开环传递函数  $G(s)$  在截止频率  $\omega_c$  处幅值特性为

$$|G(j\omega_c)| = |C(j\omega_c)P(j\omega_c)| = 1; \quad (4)$$

3) 为保证系统对增益变化的鲁棒性,增加一个增益鲁棒性条件:要求系统开环传递函数的相位相频特性曲线在截止频率  $\omega_c$  附近平坦,即导数为0,有

$$\left(\frac{d(\arg[C(j\omega)P(j\omega)])}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} = 0. \quad (5)$$

根据以上3条参数整定规则,由式(3)和(4)得到开环频率响应  $G(j\omega)$  在穿越频率  $\omega_c$  处的向量模型为

$$G(j\omega_c) = 1\angle(\phi_m - 180^\circ). \quad (6)$$

被控对象频率响应  $P(j\omega)$  在穿越频率  $\omega_c$  处的向量模型为

$$P(j\omega_c) = |P(j\omega_c)|\angle P(j\omega_c). \quad (7)$$

根据开环频率响应  $G(j\omega) = C(j\omega)P(j\omega)$  得到控制器在穿越频率  $\omega_c$  处的向量模型为

$$C(j\omega_c) = \frac{1}{|P(j\omega_c)|} \angle(\phi_m - 180^\circ - \angle P(j\omega_c)) = A\angle\theta. \quad (8)$$

其中:  $A = 1/|P(j\omega_c)|$ ,  $\theta = \phi_m - 180^\circ - \angle P(j\omega_c)$ ,  $A$  和  $\theta$  分别表示控制器向量在穿越频率  $\omega_c$  处的模值和相角<sup>[9]</sup>.

由式(5)得到

$$\left(\frac{d(\arg[G(j\omega)])}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} = \left(\frac{d(\arg[P(j\omega)])}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} + \left(\frac{d(\arg[C(j\omega)])}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} = 0, \quad (9)$$

令

$$\begin{aligned} \left(\frac{d(\arg[P(j\omega)])}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} &= \varphi_P, \\ \left(\frac{d(\arg[C(j\omega)])}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} &= \varphi_C, \end{aligned}$$

则有

$$\varphi_C = -\varphi_P, \quad (10)$$

其中  $\varphi_C$  和  $\varphi_P$  分别为控制器和被控对象在穿越频率  $\omega_c$  处的相角变化率. 由此得到分数阶控制器参数整定规则向量模型为式(8)和(10).

### 1.3 基于向量模型的FOPI控制器参数整定方程

FOPI控制器传递函数及其频率响应分别为

$$C_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda}, \quad 0 < \lambda < 2; \quad (11)$$

$$C_1(j\omega) = K_p + \frac{K_i}{(j\omega)^\lambda}, \quad 0 < \lambda < 2. \quad (12)$$

FOPI控制器向量模型及满足式(8)的控制器向量模型如图1所示.

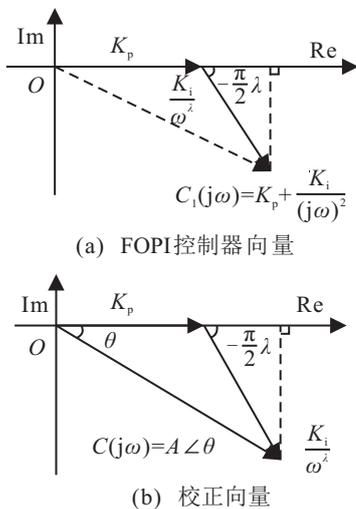


图1 FOPI控制器向量及其校正向量模型

由图1(a)可见, FOPI控制器的相角为

$$\arg[C_1(j\omega)] = \arctan \frac{\frac{K_i}{\omega^\lambda} \sin\left(-\frac{\pi}{2}\lambda\right)}{K_p + \frac{K_i}{\omega^\lambda} \cos\left(-\frac{\pi}{2}\lambda\right)},$$

则有相角变化率为

$$\left(\frac{d(\arg[C_1(j\omega)])}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_c} = \frac{\lambda K_p \frac{K_i}{\omega_c^{\lambda+1}} \sin\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right)}{\left(K_p + \frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \cos\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right)\right)^2 + \left(\frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \sin\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right)\right)^2} = \varphi_C. \quad (13)$$

由图1(b)和三角形余弦定理可以得到

$$\frac{K_i}{\omega_c^\lambda} = \sqrt{K_p^2 + A^2 - 2K_p A \cos \theta} = B, \quad (14)$$

$$\cos\left(\pi - \frac{\pi}{2}\lambda\right) = \frac{K_p^2 + B^2 - A^2}{2BK_p} = \frac{K_p - A \cos \theta}{B}, \quad (15)$$

$$\left(K_p + \frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \cos\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right)\right)^2 + \left(\frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \sin\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right)\right)^2 = A^2, \quad (16)$$

$$\frac{K_i}{\omega_c^\lambda} \sin\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) = -A \sin \theta. \quad (17)$$

由式(13)、(16)和(17)得到

$$-\frac{\lambda K_p \sin \theta}{A\omega_c} = \varphi_C. \quad (18)$$

进而, 得到基于向量的FOPI控制器参数整定方程为

$$\begin{cases} \frac{K_i}{\omega_c^\lambda} = \sqrt{K_p^2 + A^2 - 2K_p A \cos \theta}, \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) = \frac{A \cos \theta - K_p}{\sqrt{K_p^2 + A^2 - 2K_p A \cos \theta}}, \\ -\frac{\lambda K_p \sin \theta}{A\omega_c} = \varphi_C. \end{cases} \quad (19)$$

## 2 改进型扰动观测器设计

### 2.1 经典扰动观测器

扰动观测器(DOB)的概念由Ohnishi<sup>[10]</sup>于1987年提出. 扰动观测器的工作过程是将输入信号分别作用于实际对象和其名义模型, 以实际输出和名义模型输出的差作为作用在名义模型上的等效干扰, 然后对这种等效干扰进行估计并将其作为反馈信号加入到控制端, 以达到抑制扰动的目的<sup>[11]</sup>.

经典扰动观测器的一般结构如图2所示. 其中:  $u_r$  为参考输入;  $d$  为外部扰动, 由外界环境、系统非线性和不确定性等决定, 为低频扰动;  $\zeta$  为高频测量噪声;  $y$  为输出;  $P(s)$  为实际系统;  $P_n(s)$  为名义模型;  $Q(s)$  为用于限制扰动观测器有效带宽的低通滤波器;  $\hat{d}$  为  $d$  的观测值,  $\delta$  为  $\hat{d}$  通过  $Q(s)$  滤波获得的外部扰动的估计值; 误差信号  $u$  由参考输入信号  $u_r$  与扰

动补偿信号  $\delta$  相减所得。

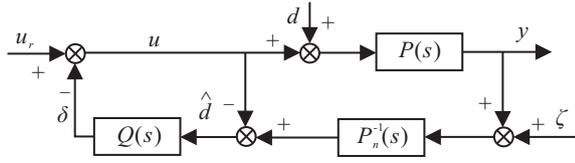


图2 扰动观测器一般结构

前期研究表明,经典扰动观测器在机载光电稳瞄平台上应用时存在一些问题,原因在于机载光电稳瞄平台模型通常建立为一阶惯性环节或纯积分环节,因此  $P_n^{-1}(s)$  必然包含微分环节。由于陀螺等速度传感器不可避免地存在测量噪声,而微分会放大噪声,从而使伺服系统的鲁棒性受到影响。

### 2.2 改进型扰动观测器

本文采用一种改进型扰动观测器<sup>[12]</sup>解决经典扰动观测器实现过程中存在的噪声放大问题,以达到对低频扰动和高频噪声共同抑制的目的,控制系统结构如图3所示。

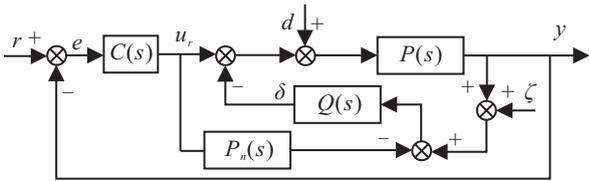


图3 含有改进型扰动观测器的控制系统结构

由图3可知,系统的输出  $y$  与输入  $r$ 、外部扰动  $d$  和测量噪声  $\zeta$  的函数关系可以表示为

$$y = G_{ry}(s)r + G_{dy}(s)d - G_{\zeta}(s)\zeta. \quad (20)$$

其中

$$G_{ry}(s) = \frac{C(s)P(s)[1 + Q(s)P_n(s)]}{1 + Q(s)P(s) + C(s)P(s)[1 + Q(s)P_n(s)]},$$

$$G_{dy}(s) = \frac{P(s)}{1 + Q(s)P(s) + C(s)P(s)[1 + Q(s)P_n(s)]},$$

$$G_{\zeta}(s) = \frac{Q(s)P(s)}{1 + Q(s)P(s) + C(s)P(s)[1 + Q(s)P_n(s)]}.$$

未引入改进型扰动观测器的控制系统函数关系可以表示为

$$y = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}r + \frac{P(s)}{1 + C(s)P(s)}d - \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}\zeta. \quad (21)$$

当名义模型准确,即  $P(s) = P_n(s)$  时,式(20)中输入  $r$  的系数为  $G_{ry}(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}$ ,与式(21)中输入  $r$  的系数相同。由此可知,若名义模型  $P_n(s)$  与被控对象实际模型  $P(s)$  完全相同,则改进型扰动观测器的引入不改变系统输入与输出之间的传递关系。这表明在设计控制系统时,控制器  $C(s)$  和改进型

扰动观测器的设计是完全独立的。因此,可以先采用合适的控制器设计方法设计控制器  $C(s)$ ,保证系统的动态响应性能等指标达到期望要求,然后根据需要改进型扰动观测器进行设计。

由式(20)可以观察到,在  $P_n(s)$  一定的情况下,可以通过调整滤波器  $Q(s)$  来调整输出与扰动和噪声的关系,当  $|Q(s)| \approx 0$  时,  $G_{\zeta}(s) \approx 0$ ,表明当滤波器  $Q(s)$  趋近于0时,系统可以使测量噪声被衰减掉;当  $|Q(s)| \approx 1$  时,  $G_{dy}(s)$  的值最小,表明当滤波器  $Q(s)$  趋近于1时,系统对外部扰动的抑制达到了最大。

由上述分析可知,可以通过选择合适的  $Q(s)$  实现对扰动和噪声的共同抑制。理想情况是滤波器  $Q(s)$  在高频段趋近于0,在低频段趋近于1,显然,  $Q(s)$  只有为低通滤波器时才能满足上述要求。

### 2.3 改进型扰动观测器

通过上节的分析可知,低通滤波器  $Q(s)$  的设计决定着扰动观测器性能,因此低通滤波器是扰动观测器设计的重要部分。

Umeno等<sup>[13]</sup>给出了低通滤波器的一般形式,即

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^{N-r} a_k(\tau)^k}{(\tau + 1)^N} = \frac{1 + \sum_{k=1}^{N-r} a_k(\tau)^k}{1 + \sum_{k=1}^N a_k(\tau)^k}. \quad (22)$$

其中:  $a_k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$  为二项式系数,  $N$  为  $Q(s)$  的阶次,  $\tau$  为滤波器的时间常数,  $r$  为  $Q(s)$  的分子分母阶次之差。

由式(22)可知,对于  $Q(s)$  滤波器的设计应主要考虑3个方面:滤波器的相对阶次  $r$ 、阶次  $N$  和时间常数  $\tau$ 。通过对常用滤波器的仿真分析可知,滤波器的3个参数变化对扰动观测器性能的影响规律分别为:

1) 相对阶次  $r$  越大,扰动观测器对噪声的抑制能力越强,但对干扰的抑制能力越弱,相对阶次  $r$  越小,系统的鲁棒性越好;

2) 相对阶次  $r$  一定时,滤波器的阶次  $N$  越高系统的鲁棒稳定性越好,对干扰的抑制能力越强,但对噪声的抑制能力减弱;

3) 时间常数  $\tau$  越小,频带越宽,系统对低频干扰的抑制能力越强,鲁棒稳定性却变差,对高频噪声也更加敏感,因此对噪声的抑制能力越弱,一般选择滤波器的时间常数远远小于系统的时间常数。

综合上述3个参数对系统性能的影响规律可知,设计  $Q(s)$  滤波器时需要折中考虑扰动观测器的鲁棒稳定性、抗干扰能力以及对高频噪声的抑制能力,并

根据具体的系统情况进行合理选择.

### 3 基于扰动观测的分数阶控制器

为了满足机载光电稳瞄平台响应速度快、稳定精度高和鲁棒性强的控制要求,将分数阶控制和改进型扰动观测器结合,提出了一种基于扰动观测的分数阶控制策略,用于提高机载光电稳瞄平台的各项性能.

本文以两轴两框架机载光电稳瞄平台为研究对象,利用频域辨识的方法获得其名义模型.建立如图4所示的机载光电稳瞄平台速度环扰动观测分数阶控制系统结构框图.

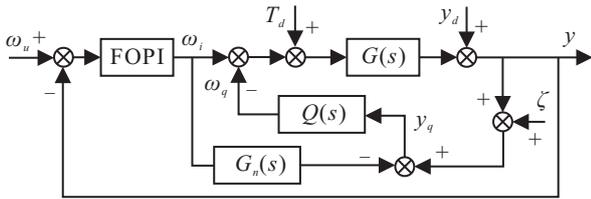


图4 基于扰动观测的分数阶控制系统结构框图

图4中:  $\omega_u$  为控制指令; FOPI 为速度环控制器;  $\omega_i$  为输出控制量;  $Q(s)$  为改进型扰动观测器的低通滤波器;  $\omega_q$  为扰动估计量;  $G(s)$  为机载光电稳瞄平台的真实模型;  $G_n(s)$  为其名义模型;  $T_d$  为力矩扰动,包括摩擦力矩、线挠力矩、不平衡力矩等;  $y_d$  为载体速度扰动;  $\zeta$  为传感器测量噪声.

由图4可见,控制量  $\omega_i$  可知,通过名义模型  $G_n(s)$  可以计算出  $\omega_i$  激励出的平台速度响应,将其与平台实际速度响应  $y$  相减,得到的就是由力矩扰动  $T_d$ 、载体速度扰动  $y_d$  和测量噪声  $\zeta$  引起的平台速度响应的估计量  $y_q$ . 估计量  $y_q$  经过低通滤波器  $Q(s)$  得到等效补偿力矩  $\omega_q$ , 将其与控制量  $\omega_i$  叠加,可以对机载光电稳瞄平台受到的扰动进行有效的补偿. 由上述分析可以看出,基于扰动观测的分数阶控制器没有使用模型的逆,因此有效地避免了噪声放大的问题.

### 4 控制器性能仿真及结果分析

为验证本文所提出基于扰动观测的分数阶控制器的控制效果,根据上述控制器设计规则,分别设计基于扰动观测的分数阶控制器、分数阶PI控制器和整数阶PI控制器,并进行仿真对比研究.其中,分数阶控制器与整数阶控制器都是以辨识得到的平台名义模型为对象,利用基于向量模型的参数设计方法进行设计.具体仿真参数如下.

机载光电稳瞄平台模型

$$P(s) = \frac{7.919}{1 + 1.4363s}$$

名义模型

$$P_n(s) = \frac{7.9}{1.4s + 1}$$

分数阶控制器(FOPI)

$$C_1(s) = 13.26 + \frac{11.8149}{s^{0.3}}$$

整数阶控制器(PI)

$$C_2(s) = 4.9428 + \frac{31.0914}{s}$$

采用如式(22)所示的滤波器形式,取低通滤波器阶次  $N = 1$ ,相对阶次  $r = 1$ ,时间常数  $\tau = 0.005$ ,则有低通滤波器为

$$Q(s) = \frac{1}{0.005s + 1}$$

1) 系统阶跃响应与正弦跟踪对比实验.

给定系统输入信号为  $1^\circ/s$ , PI 控制器、FOPI 控制器与本文所设计的基于扰动观测的分数阶控制器的阶跃响应如图5所示.给定输入信号为  $1^\circ/s$ , 频率为 2 Hz 的正弦信号,3种控制器的跟踪残差如图6所示.

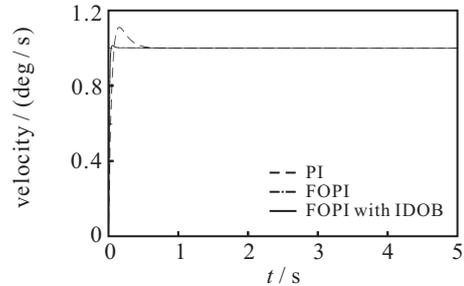


图5 阶跃响应曲线

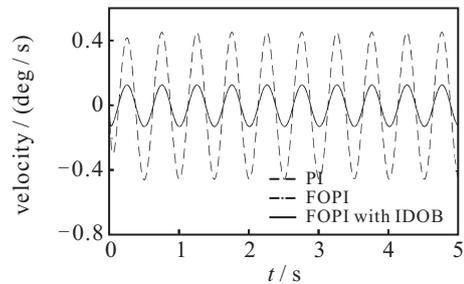


图6 跟踪正弦信号残差曲线

由仿真结果可见,两组实验中,FOPI控制器和本文所设计的控制器曲线基本重合,表明扰动观测器的引入不改变控制器的动态响应特性.阶跃响应仿真实验中,本文所设计的控制器的超调量和稳定时间均小于整数阶PI控制器,其中本文所设计的控制器超调量为 1.54%,整数阶PI控制器超调量为 11%.在正弦信号跟踪实验中可以看到,整数阶PI控制器的信号跟踪残差约为本文所设计控制器信号跟踪残差的4倍.由此可知,本文所设计的基于扰动观测的分数阶控制器在提高系统动态性能和跟踪精度方面都具有良好的效果.

2) 系统力矩扰动和速度扰动隔离对比实验.

在力矩扰动和载体速度扰动分别存在情况下,采

用基于扰动观测的分数阶控制器、FOPI控制器和整数阶PI控制器进行扰动隔离实验. 给定输入信号为 $0^\circ/s$ , 保持控制器参数不变, 在系统中分别加入正弦力矩扰动 $T_{d1} = 0.3 + 0.2 \sin(2\pi t) \text{ N}\cdot\text{m}$ 、幅值为 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、频率为 $1 \text{ Hz}$ 的周期方波干扰以及两种载体速度扰动 $y_{d1} = 3 \sin(2\pi t) \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $y_{d2} = 0.6 \sin(\pi t) \text{ N}\cdot\text{m}$ . 3种控制器对力矩扰动和载体速度扰动的抑制残差曲线分别如图7~图10所示.

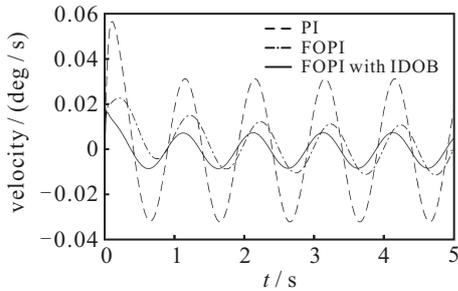


图7 正弦力矩扰动抑制残差曲线

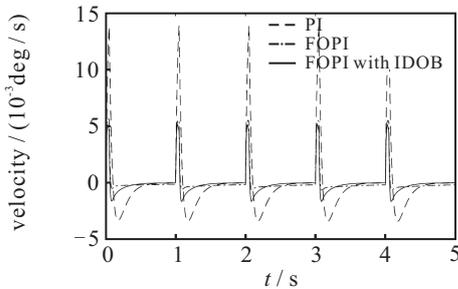


图8 方波干扰抑制残差曲线

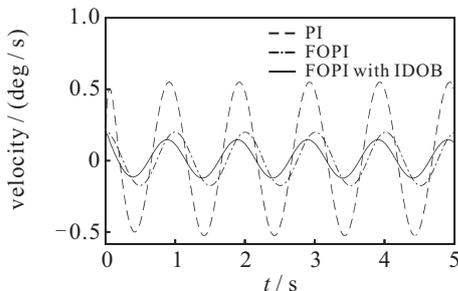


图9 1 Hz载体速度抑制残差曲线

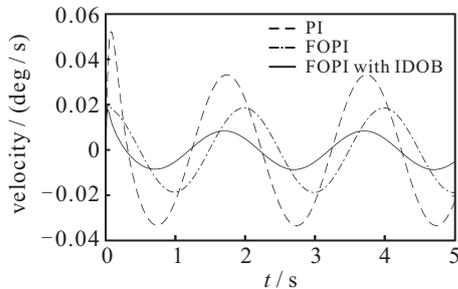


图10 0.5 Hz载体速度抑制残差曲线

由图7~图10可见, 当系统中存在不同的力矩扰动和载体速度扰动时, 本文所设计控制器的扰动抑制能力相对于FOPI控制器有所改善, 并明显强于整数阶PI控制器. 3种控制器下由正弦力矩扰动引起

的系统速度响应均方根值分别为 $0.0240$ 、 $0.0096$ 和 $0.0060$ , 由 $1 \text{ Hz}$ 载体速度扰动引起的系统速度响应均方根值分别为 $0.3835$ 、 $0.1331$ 和 $0.0965$ , 由 $0.5 \text{ Hz}$ 载体速度扰动引起的系统速度响应均方根值分别为 $0.0245$ 、 $0.0131$ 和 $0.0063$ . 由此可知, 本文所设计的基于扰动观测的分数阶控制器明显提高了系统对扰动的抑制能力.

### 3) 系统测量噪声抑制能力及鲁棒性实验.

在系统测量噪声存在的情况下, 采用基于扰动观测的分数阶控制器、FOPI控制器和整数阶PI控制器进行测量噪声抑制及本文所提出控制器对模型增益摄动的鲁棒性实验. 保持控制器参数与上文相同, 图11为给定输入信号为 $0^\circ/s$ , 在系统中加入峰值为 $0.01^\circ/s$ 测量噪声时的噪声抑制能力对比图, 图12为给定信号幅值不变, 将被控对象增益变化 $\pm 30\%$ 时的阶跃响应曲线.

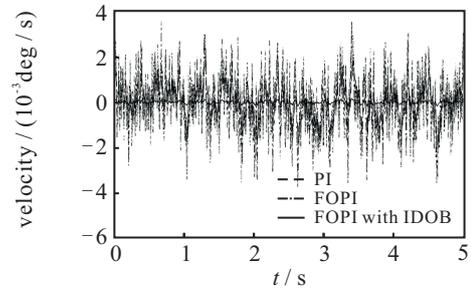


图11 测量噪声抑制能力对比

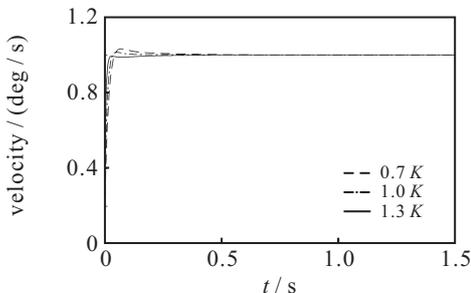


图12 系统增益变化阶跃响应曲线

由图11可见, 采用本文所设计的控制器时, 由测量噪声引起的系统速度响应曲线幅值明显低于FOPI控制器和整数阶PI控制器, 表明本文所设计的控制器对测量噪声具有较强的抑制能力. 由图12可见, 当被控对象增益变化 $\pm 30\%$ 时, 系统超调没有发生很大变化, 调节时间只是随着增益 $K$ 的增大略微减小, 系统的总体控制效果依旧良好, 表明本文所设计基于扰动观测的分数阶控制器对模型增益摄动具有很好的鲁棒性.

## 5 结论

为了提高机载光电稳瞄平台的控制性能, 本文提出了一种基于扰动观测的分数阶控制器, 并引入到机

载光电稳瞄平台的闭环控制系统中. 与经典的扰动观测器相比, 所提出控制器采用一种改进型扰动观测器, 避免了由于应用于光电稳定平台而存在的微分环节, 有效解决了噪声放大的问题. 理论分析和仿真实验均证明了本文所提出方法的有效性, 使得机载光电稳瞄平台控制系统不仅具有良好的动态性能, 还有优良的鲁棒性和较强的抗干扰能力.

#### 参考文献(References)

- [1] 晋超琼, 张葆, 李贤涛, 等. 基于扰动观测器的光电稳定平台摩擦补偿策略[J]. 吉林大学学报, 2017, 47(6): 1876-1885.  
(Jin C Q, Zhang B, Li X T, et al. Friction compensation strategy of photoelectric stabilized platform based on disturbance observer[J]. Journal of Jilin University, 2017, 47(6): 1876-1885.)
- [2] 王仁臻, 吉书鹏. 稳定平台神经网络扰动补偿内模控制[J]. 电子测量技术, 2018, 41(3): 50-53.  
(Wang R Z, Ji S P. IMC and ESO based on ann of stabilized platform[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(3): 50-53.)
- [3] 胡悦, 汪浩, 刘鸿雁. 三轴惯性平台的滑模控制器设计[J]. 战术导弹技术, 2016(1): 87-90.  
(Hu Y, Wang H, Liu H Y. Sliding mode controller design of three-axis inertial platform[J]. Tactical Missile Technology, 2016(1): 87-90.)
- [4] 王慎航, 张焕鑫, 杨轶, 等. 基于鲁棒自适应反步法的四轴平台稳定回路控制[J]. 航天控制, 2018, 36(2): 3-8.  
(Wang S H, Zhang H X, Yang Y, et al. Stabilization loop control of four-axis inertial platform based on robust adaptive backstepping method[J]. Aerospace Control, 2018, 36(2): 3-8.)
- [5] Podlubny I. Fractional-order systems and  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controller[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.
- [6] 王春阳. 分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器参数整定方法与设计研究[D]. 长春: 吉林大学通信工程学院, 2013.  
(Wang C Y. Study on fractional order  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controller parameter tuning methods and design[D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2013.)
- [7] Chen Y Q, Vinagre B M, Podlubny I. Continued fraction expansion approaches to discretizing fractional order derivatives — An expository review[J]. Nonlinear Dynamics, 2004, 38(1/2/3/4): 155-170.
- [8] Li H S, Luo Y, Chen Y Q. A fractional order proportional and derivative(FOPD) motion controller: Tuning rule and experiments[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2010, 18(2): 516-520.
- [9] 王春阳, 蔡年春, 李明秋, 等. 基于向量的鲁棒分数阶比例微分控制器参数求解算法[J]. 吉林大学学报, 2015, 45(6): 1933-1940.  
(Wang C Y, Cai N C, Li M Q, et al. Robust fractional order proportional differential controller parameters algorithm based on phasor[J]. Journal of Jilin University, 2015, 45(6): 1933-1940.)
- [10] Ohishi K. A new servo method in mechatronics[J]. Japanese Society of Electrical Engineering, 1987, 107(1): 83-86.
- [11] Kempf C J, Kobayashi S. Disturbance observer and feed forward design for a high-speed direct-drive positioning table[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(5): 513-526.
- [12] 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]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 998-1004.)
- [13] Umeno T, Kaneko T, Hori Y. Robust servo system design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(5): 473-485.

#### 作者简介

王春阳(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 从事信息处理、智能控制等研究, E-mail: wangchunyang19@163.com;

孙靖(1993—), 女, 硕士生, 从事先进控制理论及技术的研究, E-mail: sunjing1777@126.com;

肖博(1987—), 男, 博士生, 从事信息处理、智能控制的研究, E-mail: 13610701380@126.com;

刘雪莲(1987—), 女, 博士生, 从事信息处理、智能控制的研究, E-mail: tearlxl@126.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)