

文章编号 1004-924X(2014)02-0383-07

光电陀螺稳定平台的分数阶控制

丁 策^{1,2*}, 戴 明¹, 李嘉全¹, 毛大鹏^{1,2}, 盖竹秋¹, 刘仲宇¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了提高光电陀螺稳定平台的隔离度, 改善其在速度扰动情况下的稳定精度和跟踪精度, 将分数阶 PI^λ 控制器引入到光电陀螺稳定平台的速率环控制中。首先, 说明了采用常规 PI 控制提高系统精度的弊端, 介绍了分数阶微积分和分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制, 提出采用分数阶 PI^λ 控制器来提高控制系统的控制精度。然后, 针对采用电流环的等效一阶纯积分控制对象, 提出基于稳定裕度和剪切频率的设计方法, 该方法同样适用于整数阶 PI 控制器。最后, 以机载光电陀螺稳定平台为研究对象, 分别采用分数阶 PI^λ 和整数阶 PI 控制器进行了阶跃响应、速度扰动隔离和稳定精度的实验研究。实验结果表明, 采用分数阶 PI^λ 控制器的系统具有阶跃响应超调量小的优点, 在幅值为 $3.14(^{\circ})/s$, 频率为 0.5 Hz 的速度扰动下, 速度扰动隔离度提高了约 38%, 稳定精度提高了约 40%。实验表明, 与整数阶 PI 控制器相比, 采用分数阶 PI^λ 控制器可在保证稳定裕度的前提下提高系统的控制精度, 且与整数阶 PI 控制器一样具有易于工程实现的优点。

关键词: 光电陀螺; 稳定平台; 分数阶 PI^λ 控制器; PI 控制器; 稳定裕度

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0383

Fractional control of stabilized platform for photoelectric gyro

DING Ce^{1,2*}, DAI Ming¹, LI Jia-quan¹, MAO Da-peng^{1,2}, GAI Zhu-qiu¹, LIU Zhong-yu¹

(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. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: dingce1983@gmail.com*

Abstract: To improve the isolation of a photoelectric gyro stabilized platform and to improve its accuracy of stability and tracking within velocity disturbance, the fractional PI^λ controller was applied to the rate loop control of the photoelectric gyro stabilized platform. First, the shortcomings to improve system accuracy by the conventional PI control were mentioned. Then, the fractional calculus and fractional order $PI^\lambda D^\mu$ control were introduced and the fractional PI^λ controller was proposed to improve the control accuracy of the control system. According to the equivalent first-order integral model with a current loop, the design method of fractional PI^λ controller parameters also suitable for the integer-order PI controller was proposed based on phase margin and crossover frequency. Finally, a fractional PI^λ controller and an integer order PI controller were respectively used to perform the experiments on step response, the residues of velocity disturbance and stable accuracy for an airborne

收稿日期: 2013-09-20; **修订日期:** 2013-11-05.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB72400607); 国防预研基金资助项目 (No. 402070301); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121803)

photoelectric gyro stabilized platform. Experimental results show that the system with fractional PI^λ controller has smaller overshoot than that with PI controller. The isolation of velocity disturbance is improved about 38% and the stability is improved about 40% at a frequency of 0.5 Hz and an amplitude of 3.14 ($^\circ$)/s. The experiments demonstrate that control accuracy of system can be improved by using fractional PI^λ controller under ensuring the stability margin. The method proposed can be easily realized on engineering.

Key words: photoelectric gyro; stabilized platform; fractional PI^λ controller; PI controller; stabilized margin

1 引言

光电陀螺稳定平台通过陀螺稳定隔离载体的扰动,保证探测器(可见光或红外)的视轴稳定地指向目标。随着探测器分辨率和探测距离的逐渐提高,对视轴的稳定精度提出了更高的要求。如何在存在载体扰动的情况下,保证视轴高精度地指向目标,成为研究人员关注的课题。相关课题涉及结构优化、电子学设计以及新的控制策略等领域。本文主要关注控制策略的研究。基于状态观测器和状态反馈的现代控制理论等先进控制策略的应用^[1-3],在一定程度上提高了系统的稳定精度。但是,这些控制策略都是在系统建立精确的数学模型基础上的。而事实上,由于摩擦力矩,不平衡力矩,线扰力矩、载体干扰力矩以及其他一些未建模动态的存在,使系统很难精确建模。因此,上述控制策略在实验室条件下能够取得比较满意的控制效果,但在实际挂机飞行时不能达到很好的效果,跟踪效果甚至会变差。

PID 控制由于结构简单,参数调节方便,对控制对象模型精度要求不高等优点,在光电陀螺稳定平台中得到了广泛的应用。对于光电陀螺稳定平台,由于对控制系统的快速性有较高的要求,为了避免由于微分环节带来的高频噪声,实际的 PID 控制仅为 PI 控制^[4]。PI 控制系统必须通过提高系统的开环增益,提高系统带宽,以达到提高系统控制精度的目的。但这会降低系统的稳定裕度,对控制系统非常不利。因此,常规的 PID 控制往往难以达到令人满意的控制效果,有必要对其进行深入研究^[5]。

分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器是对传统整数阶 PID 控制器概念的推广,它源于分数阶微积分理论。

分数阶微积分是把微积分的阶次推广到分数甚至复数领域,过去由于其计算复杂,没有明确的物理意义,只是数学家研究的对象。随着计算机科学的发展和人们研究的日益深入,分数阶微积分在许多工程应用领域显示出前所未有的优势。Podlubny 教授将分数阶理论和 PID 控制器整定理论结合起来,提出了分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制,并精确分析和证明了其应用于分数阶控制对象时可取得比常规 PID 更好的控制性能。但是由于成熟的系统辨识理论往往是基于整数阶系统,目前大多数分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制往往应用于整数阶控制对象。大量实验证明,采用分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制可取得比整数阶控制器更优的动态性能和鲁棒性^[6-8]。本文完成了分数阶 PI^λ 控制器的设计与控制性能的研究,在一定程度上提高了系统的控制精度。

2 分数阶微积分和分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制

2.1 分数阶微积分

分数阶微积分是整数阶微积分的推广,严格意义上应该称为非整数阶微积分,其连续的分数阶微积分算子定义为^[9]:

$${}_a D_t^r = \begin{cases} \frac{d^r}{dt^r}; r > 0 \\ 1; r = 0, \\ \int_a^t (d\tau)^{-r}; r < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: a 和 t 为微积分的上限和下限, τ 为积分变量, $r \in R$ 。通过引入分数阶微积分算子,可以将微分和积分统一。

常用的三种分数阶微积分定义为 Caputo 定义、Grünwald-Letnikov(GL)定义和 Riemann-Li-

ouv-ille(RL)定义。

(1) Caputo 定义:

$${}_a D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(r-n)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{r-n+1}} d\tau, \quad (2)$$

其中: $n-1 < r < n$, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。

(2) Grünwald-Letnikov(GL)定义:

$${}_a D_t^r f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-r} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t-a}{h} \rfloor} (-1)^j \binom{r}{j} f(t-jh), \quad (3)$$

其中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示整数部分。

(3) Riemann-Liouville(RL)定义:

$${}_a D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-1)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{r-n+1}} d\tau, \quad (4)$$

其中: $n-1 < r < n$ 。

在上述定义中, Gamma 函数是阶乘函数, 对于正实数 m , $\Gamma(m)$ 定义为:

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{m-1} du, \quad (5)$$

若 m 为整数, 则:

$$\Gamma(m+1) = m!. \quad (6)$$

从上述定义中可以看出, 连续函数在某点上的分数阶微分与整数阶微分不同, 分数阶微积分不是在该处求极限, 而是与初始时刻到该时刻以前的所有时刻的函数值相关, 因此, 分数阶微积分具有记忆性, 该特性在控制系统中的应用具有重要意义。

2.2 分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制

整数阶 PID 控制器, 连续形式的传递函数为:

$$G_{ic}(s) = K_p + K_i s^{-1} + K_d s, \quad (7)$$

其中: K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。相应的分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 的形式为:

$$G_{ic}(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu. \quad (8)$$

图1所示为PID和分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器之间的关系。可以看出, 整数阶PID是分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的特殊形式, 图中4个黑点的位置分别表示PID控制器的4种形式。当 $\lambda = \mu = 1$ 时, $G_{ic}(s)$ 为整数阶PID控制器; 当 $\lambda = 0, \mu = 1$ 时, $G_{ic}(s)$ 为整数阶PD控制器; 当 $\lambda = 1, \mu = 0$ 时, $G_{ic}(s)$ 为整数阶PI控制器; 当 $\lambda = 0, \mu = 0$ 时, $G_{ic}(s)$ 为整数阶P控制器。图中阴影部分表示分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器。整数阶PID控制器只是分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的特例。分数阶的 PI^λ 控制器的形式为:

$$G_{ic}(s) = K_p + K_i s^{-\lambda}, \quad (9)$$

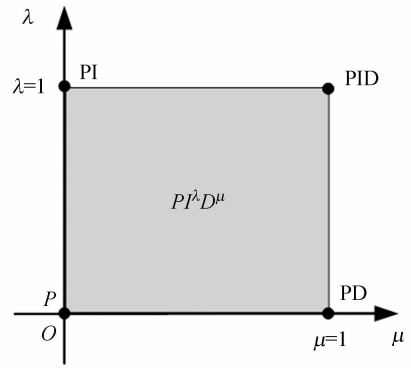


图1 PID和分数阶

Fig. 1 PID and fractional order

其中: 积分项 $s^{-\lambda}$ 表现出来的幅频特性为 $-20 \lambda \text{ dB/dec}$, 而不是整数阶的 -20 dB/dec 。 PI^λ 控制器相对于整数阶PI控制器, 多了一个可调参数 λ , 相当于控制系统多了一个自由度, 有更大的灵活性和可调空间, 使得控制系统具有更优的动态性能。

3 分数阶 PI^λ 控制器设计

3.1 系统模型

以某型号光电陀螺稳定平台为研究对象, 设计了速度回路的PI控制器和 PI^λ 控制器。为了提高伺服控制系统的控制精度, 在速度环基础上, 增加一个电流反馈传感器和电流反馈校正网络, 构成电流内环。采用电流内环和速度外环的双闭环设计。在控制对象的谐振范围内, 速度回路的控制对象可近似等效为一纯积分环节^[10-11]:

$$G(s) = \frac{K}{s}, \quad (10)$$

其中: K 为系统的增益系数。

3.2 控制器设计

为了保证系统的响应速度(带宽), 降低系统响应阶跃信号超调, 选取剪切频率 ω_c 和相位裕度 ϕ_m 两个频域指标作为控制器设计的依据。其中, 剪切频率 ω_c 和系统带宽相关, 相位裕度 ϕ_m 和系统的超调量以及稳定裕度相关。对于形如式(10)的一阶纯积分系统, 给定的 ω_c 和 ϕ_m , 采用分数阶 PI^λ 控制器, 系统的开环传递函数应满足:

$$G_{ic}(j\omega_c)G(j\omega_c) = e^{0j(\pi - \phi_m)}, \quad (11)$$

将上式展开得:

$$\left[K_p(\lambda) + \frac{K_i(\lambda)}{j^\lambda \omega_c^\lambda} \right] \frac{K}{j\omega_c} = e^{-j(\pi - \phi_m)}, \quad (12)$$

整理得:

$$\begin{aligned} & [KK_p(\lambda)\omega_c^\lambda \cos(\frac{\pi\lambda}{2}) + KK_i(\lambda) + \omega_c^{1+\lambda} \sin(\phi_m - \pi + \\ & \frac{\pi\lambda}{2})] + j[KK_p(\lambda)\omega_c^\lambda \sin(\frac{\pi\lambda}{2}) - \omega_c^{1+\lambda} \cos(\phi_m - \pi + \\ & \frac{\pi\lambda}{2})] = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

上式的实部和虚部分别得 0, 整理可得

$$K_p(\lambda) = \frac{\omega_c \cos(\phi_m - \pi + \frac{\pi\lambda}{2})}{K \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}, \quad (14)$$

$$K_i(\lambda) = \frac{\omega_c^{1+\lambda} \cos(\phi_m)}{K \sin(\frac{\pi\lambda}{2})}, \quad (15)$$

特殊情况, 当 $\lambda=1$ 时, PI 控制器的参数为:

$$K_p(1) = \frac{\omega_c \sin(\phi_m)}{K}, \quad (16)$$

$$K_i(1) = \frac{\omega_c^2 \cos(\phi_m)}{K}. \quad (17)$$

3.3 控制器的数字实现

不同于整数阶控制器, 分数阶控制器的数字实现比较复杂。常用的有两种方法实现分数阶控制器的离散化。式(1)将分数阶控制器在时域内利用整数阶的传递函数进行有理化近似, 然后利

用整数阶传递函数的离散化方法进行离散化。比较有代表性的方法有^[12]: CFE 方法、Carlson 方法、Matsuda 方法、Oustaloup 方法和 Chareff 方法等。随着计算机技术的不断发展, 上述方法可以通过 Matlab 的 CRONE^[13] 工具箱实现, 其 GUI 界面如图 2 所示。(2) 采用分数阶的 Z 域离散化方法直接进行近似离散化。最普遍的分数阶算子在 Z 域的离散化方法有 Euler, Tustin, Simpson 和 AI-alaoui 法。这些方法均是通过把分数阶算子在 Z 域进行离散化近似, 然后再进行连续分数阶扩展(CFE)或 Taylor 级数展开, 最终实现分数阶算子的 Z 变换。表 1 为以上常用的 4 种离散化方法的数学表达式。

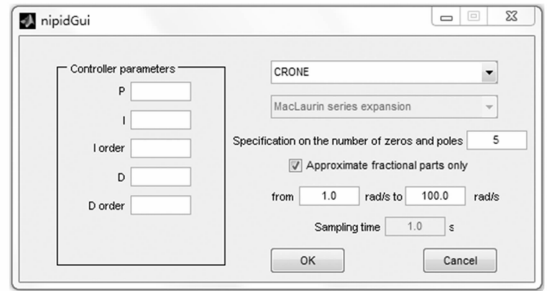


图 2 分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 近似工具箱

Fig. 2 Matlab toolbox of fractional order $PI^\lambda D^\mu$

表 1 分数阶算子的离散化方法

Tab. 1 Discrete-time conversion schemes

方法	Z 域近似	Taylor 展开
Euler	$s^\lambda \approx \left[\frac{(1-z^{-1})}{T} \right]^\lambda$	$s^\lambda \approx \left(\frac{1}{T} \right)^\lambda \left[1 - \alpha z^{-1} + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} z^{-2} \dots \right]$
Tustin	$s^\lambda \approx \left[\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \right]^\lambda$	$s^\lambda \approx \left(\frac{2}{T} \right)^\lambda \left[1 - 2\alpha z^{-1} + 2\alpha^2 z^{-2} \dots \right]$
Simpon	$s^\lambda \approx \left[\frac{3(1+z^{-1})(1-z^{-1})}{T(1+4z^{-1}+z^{-2})} \right]^\lambda$	$s^\lambda \approx \left(\frac{3}{T} \right)^\lambda \left[1 - 4\alpha z^{-1} + 2\alpha(4\alpha+3) z^{-2} \dots \right]$
AI-alaoui	$s^\lambda \approx \left[\frac{8(1-z^{-1})}{7T(1+z^{-1}/7)} \right]^\lambda$	$s^\lambda \approx \left(\frac{8}{7T} \right)^\lambda \left[1 - \frac{8}{7} \alpha z^{-1} + \left(-\frac{24}{49} \alpha + \frac{32}{49} \alpha^2 \right) z^{-2} \dots \right]$

$$G(s) = \frac{70}{s}. \quad (18)$$

4 实验研究

实际测量得到系统的模型为:

大量仿真和实验结果表明, 当 $\lambda < 0.9$ 时, 理论设计结果和实际实验结果偏差较大, 原因可能在于系统建模不准, 有未建模动态存在。因此, 选

取分数阶和整数阶控制器积分参数的中间值 0.95 作为积分分数阶参数。当分数阶积分参数 λ 确定以后,为了统一比较标准,采用上述控制器参数设计方法,设计控制系统相位裕度均为 80° ,控制系统闭环带宽均为 25 Hz,得到的 PI 控制器参数为:

$$G_{cpi}(s) = 1.6787 + \frac{35.3182}{s}, \quad (19)$$

PI^λ 控制器的参数为:

$$G_{cfpi}(s) = 1.9483 + \frac{38.5486}{s^{0.95}}. \quad (20)$$

利用 CRONE 工具箱对上述分数阶 PI^λ 控制器进行合理化近似,得到的二阶近似结果为:

$$G_{cfpi}(s) \approx \frac{2.615s^2 + 91.92s + 616}{s^2 + 11.65s + 11.22}. \quad (21)$$

可以采用双线性变化的离散化方法进行离散化处理。采用两种控制器分别进行了闭环阶跃响应测试、速度扰动隔离测试和稳定精度测试 3 组对比实验。

4.1 控制器的阶跃响应比较

阶跃响应实验曲线如图 3 所示。采用 PI 控制器的超调量为 17.7%,采用分数阶 PI^λ 控制器的系统的超调量为 7.75%,系统超调量偏差并不大,说明采用基于相位裕度的设计方法在一定程度上保证了系统的稳定裕度。而采用 PI^λ 控制器的系统超调量较小,并且稳态较 PI 控制器平稳,说明 PI^λ 控制器较 PI 控制器对系统的未建模动态有更强的鲁棒性。

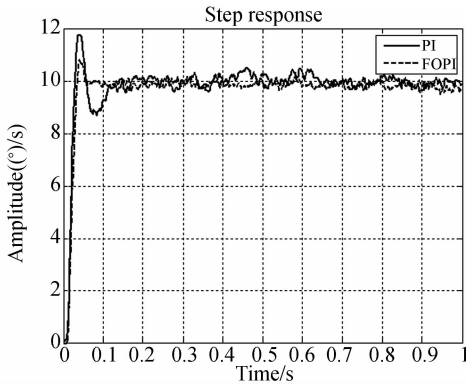


图 3 阶跃响应比较

Fig. 3 Comparison of step responses

4.2 控制器扰动隔离比较

速度扰动残差比较曲线如图 4 所示。幅值为 $3.14^\circ/\text{s}$,频率为 0.5 Hz 的速度扰动下,速度残

差的均方值从采用 PI 控制器的 $0.4571^\circ/\text{s}$ 减小到采用 PI^λ 控制器的 $0.2817^\circ/\text{s}$,扰动隔离度提高了约 38%。

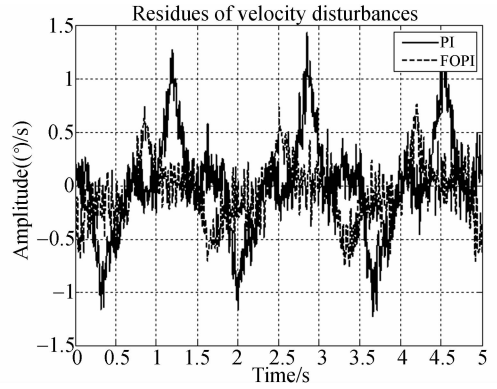


图 4 速度扰动残差比较

Fig. 4 Comparison of residues of velocity disturbances

4.3 系统稳定精度比较

稳定平台实际跟踪点目标的效果如图 5 所示。在幅值为 $3.14^\circ/\text{s}$,频率为 0.5 Hz 的速度扰

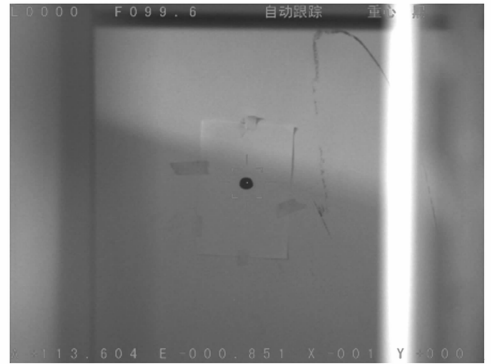


图 5 跟踪点目标效果

Fig. 5 Effect of tracking point target

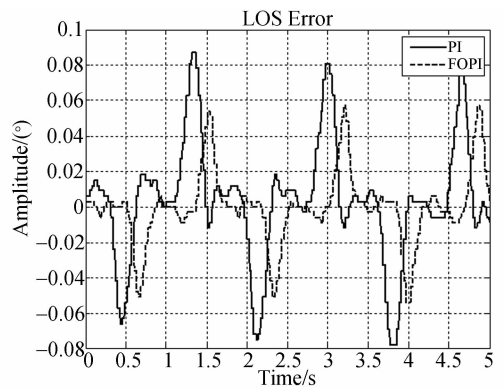


图 6 稳定平台视轴指向误差曲线

Fig. 6 LOS error curves of stabilized platform

动下,采用 PI 控制器和 PI^λ 控制器时,稳定平台的视轴指向误差曲线如图 6 所示。可见,采用 PI^λ 控制器时,视轴的指向误差有一定程度的减小,从原来的 0.0336° (RMS) 减小到了 0.0204° (RMS),稳定精度提高了约 40%。

5 结 论

本文将分数阶 PI^λ 控制器引入到光电陀螺稳定平台的速率环控制中,针对加入电流环内环的一阶控制系统,提出了基于相位裕度和剪切频率的分数阶 PI^λ 控制器参数设计方法,该方法同样适用于整数阶 PI 控制器的设计。此方法在保证稳定裕度的前提下,提高了系统的控制精度。可

以充分发挥 PI^λ 控制器较 PI 控制器多一个可自由度的优越性。实际实验结果表明,采用 PI^λ 控制器的系统具有阶跃响应超调量小的优点,在幅值为 $3.14(^\circ/s)$,频率为 0.5 Hz 的速度扰动下,速度扰动隔离度提高了约 38%,稳定精度提高了约 40%。

采用 PI^λ 控制器后,系统的控制精度提高不是很明显,主要原因在于系统建模存在误差,实际系统并非一个纯积分环节,包含多种未建模动态。如前文所述,分数阶控制器应用于分数阶控制对象,将会取得比整数阶控制器更好的控制性能。建立光电陀螺稳定平台的分数阶模型,将会充分发挥分数阶控制的优越性,更好地提高系统的控制性能。

参考文献:

- [1] 左哲,李东海,戴亚平,等. 陀螺稳定平台的状态补偿控制[J]. 航空学报,2008,29(1): 141-148.
ZUO Z, LI D H, DAI Y P H, *et al.*. State compensating control for gyro-stabilized platform [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(1): 141-148. (in Chinese)
- [2] 宋彦,高慧斌,张淑梅,等. 直流力矩电机力矩波动的自适应补偿控制[J]. 光学精密工程,2010,18(10): 2212-2220.
SONG Y, GAO H B, ZHANG SH M, *et al.*. Adaptive compensation of torque ripple in DC torque motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2212-2220. (in Chinese)
- [3] 张钊,周勇,王铃. 扩张状态观测器在陀螺稳定平台中的应用仿真[J]. 兵工自动化,2011,30(11): 83-85.
ZHANG Z, ZHOU Y, WANG Q. Application simulation of extended state observer in gyro-stabilized platform [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(11): 83-85. (in Chinese)
- [4] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学,2007,1(1): 24-31.
HAN J Q. Auto disturbances rejection control technique [J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24-31. (in Chinese)
- [5] 朱呈祥,邹云. 分数阶控制研究综述[J]. 控制与决策,2009,24(2): 161-169.
ZHU CH X, ZOU Y. Summary of research on fractional-order control [J]. *Control and Decision*, 2009, 24(2): 161-169. (in Chinese)
- [6] SILVA, MANUEL F, MACHADO, *et al.*. Fractional order control of a hexapod robot [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2004(4): 417-433.
- [7] LUO Y, CHEN Y Q. Stabilizing and robust fractional order PI controller synthesis for first order plus time delay systems [J]. *Automatica*, 2012, 5: 072-075.
- [8] RAMIRO S, BARBOSA J A T M, ISABEL S J. Effect of fractional orders in the velocity control of a servo system [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2010(59): 1679-1686.
- [9] RICCARDO C, GIOVANNI D, LIUGI F, *et al.*. *Fractional Order Systems-Modeling and Control Application* [M]. US: World Scientific, 2010: 3-4.
- [10] 黄永梅,张桐,马佳光,等. 高精度跟踪控制系统中电流控制技术的研究[J]. 光电工程,2005,32(1): 16-19.
HUANG Y M, ZHANG T, MA J G, *et al.*. Study on the control of a current loop in a high-accuracy tracking and control system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(1): 16-19. (in Chinese)

- [11] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 998-1004. (in Chinese)
- [12] 李旺. 分数阶系统辨识与控制器设计研究[D]. 合

肥:中国科技大学,2011.

LI W. *Fractional Order Identification and Controller Design* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)

- [13] RADEK M. Application of fractional order calculus to control theory [J]. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2011, 7(5): 1162-1169.

作者简介:



丁策(1983—),男,河北石家庄人,博士研究生,助理研究员,2006、2008年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机载光电平台伺服控制等方面的研究。E-mail: dingce1983@gmail.com

导师简介:



戴明(1965—),男,湖北人,研究员,博士生导师,主要从事对地实时观测系统信号获取、图像处理及控制工程研究。E-mail: daiming@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)