

文章编号 1004-924X(2013)10-2574-07

航空相机镜筒全程快速无超调位置控制

黄 浦^{1*}, 修吉宏¹, 李 军¹, 李友一¹, 杨秀丽²

(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:为消除航空相机镜筒在位置控制过程中的超调,本文提出采用跟踪微分器对阶跃输入信号进行处理,通过合理设计过渡过程来实现镜筒位置控制的快速无超调响应。首先,阐述了跟踪微分器理论,分析其工作特性。然后,以 90°位置阶跃响应为例,进行了过渡过程设计,并与无过渡过程设计的控制效果进行了比较。实验结果表明,合理设计过渡过程能完全消除镜筒位置响应的超调,同时减小调节时间。在 90°阶跃输入时,超调量由 24.1%减小为零,同时调节时间缩短 28.8%。此外,采用最小二乘法拟合阶跃输入量与过渡过程快速因子的函数关系,控制过程中根据阶跃输入量计算最优过渡过程参数,实现了镜筒位置的全程快速无超调控制。该方法已经在航空相机镜筒中进行了实际应用,取得了良好的效果,有效改善了系统的动态性能。

关键词:航空相机;镜筒;位置控制;跟踪微分器;过渡过程设计;超调;曲线拟合

中图分类号:TP273;V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2574

Fast position control of the lensbarrels of aerial cameras without overshoots in omnirange

HUANG Pu^{1*}, XIU Ji-hong¹, LI Jun¹, LI You-yi¹, YANG Xiu-li²

(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: To eliminate the overshoot of lensbarrel of an aerial camera in process of position control, a tracking differentiator was used to process step signals and to design a position transient process to control accurately the lensbarrel position without overshoots. First, the theory of the tracking differentiator was described and its characteristics were expatiated. And then, by taking position step response with a 90°input as an example, the transient process was designed and compared with that of no transient process design. Experiment results show that the position overshoot of lensbarrel can be eliminated completely through the appropriate transient process design, and the regulation time is reduced also. In the case of 90°step input, the system overshoot is reduced from 24.4% to zero and the regulation time is shorten by 28.8%. Furthermore, the fast positioning control of the lensbarrel was re-

收稿日期:2013-04-18;修订日期:2013-06-10.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010AA010102)

alized with non-overshoot in omnirange, in which the least square method was used to fit a curve of step input and a speedability parameter in transient process. The optimum parameter of the transient process was calculated according to the step input in control process. This method has been used in the lensbarrels of aerial cameras, and it obtains a good effect and provides significant and practical values for improving the dynamic performance of systems.

Key words: aerial camera; lensbarrel; position control; tracking differentiator; transient process design; overshoot; curve fitting

1 引言

航空相机镜筒是相机光学组件和其它机构的支撑。在摆扫式航空相机中,镜筒控制系统的主要功能是保证成像期间的摄影扫描和扫描结束后的位置返回;在其他一些航空相机中,镜筒也用于视轴指向与瞄准、定位及像移补偿^[1]。因此,位置控制是镜筒的基本工作方式。对位置控制的要求除稳态定位精度外,位置过渡过程响应的速度和超调量也是衡量系统性能的重要指标。

在经典控制理论中,要加快过渡过程,必然要增大调节器增益,使系统阻尼减小,但这会使响应过程产生超调,即系统响应速度与超调之间是矛盾的^[2]。在减小或消除超调方面,经典控制一般采用微分控制和测速反馈等方法来增大系统阻尼,从而减小超调,但改善程度非常有限^[3];目前采用较多的是预测控制方法^[4-5]、自参数整定方法^[6]和模糊PID控制方法^[7]等,这几种方法存在控制器设计难度大、参数整定复杂等缺点,有些方法仅停留在理论研究和仿真分析方面。超调产生的本质原因是设定值和当前值的初始误差过大,使增益较大时导致控制量过大引起的。从这个角度看,如果能够降低起始误差,在不改变系统阻尼的情况下就有可能用较大的增益来加快过渡过程。具体办法是:在对象的承受能力范围内,根据控制目标值设计一个合适的过渡过程,让系统的实际行为跟踪这个过渡过程来达到控制目的^[8]。这种安排过渡过程的方法对于实现无超调快速跟踪控制目标很有效,并能使系统的闭环稳定性提高。跟踪微分器就是基于这种思想产生的。

跟踪微分器是自抗扰控制器的重要组成部分。对常值输入信号,跟踪微分器存在如下响应

特征:在有限时间内单调地跟踪输入信号,并提取此跟踪过程的微分信号,即其阶跃响应将以有限时间无超调的进入稳态^[9]。这一特性能被很好地用于阶跃响应的过渡过程设计。本文以一种航空相机的镜筒为研究对象,采用跟踪微分器对阶跃输入信号进行处理,通过合理设计过渡过程来实现位置控制的快速无超调响应。结合多点跟踪微分器参数,采用最小二乘方法拟合位置阶跃量与过渡过程快速因子的函数关系,自动调整过渡过程参数,实现了镜筒工作范围内的全程快速无超调定位。

2 跟踪微分器理论

对于二阶积分器串联型系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u, \quad |u| \leq r \end{cases} \quad (1)$$

该系统的时间最优控制是 Bang-Bang 控制(开关控制),以原点为终点的快速最优控制综合函数为:

$$u(x_1, x_2) = -r \operatorname{sign}\left(x_1 + \frac{x_2 |x_2|}{2r}\right) \quad (2)$$

设给定值为 $v_0(t)$,为实现 x_1 对 $v_0(t)$ 的跟踪,将式(2)中的 x_1 改为 $x_1 - v_0(t)$,则:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -r \operatorname{sign}\left(x_1 - v_0(t) + \frac{x_2 |x_2|}{2r}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)解的分量 $x_1(t)$ 在加速度受到限制 $|\ddot{x}_1| \leq r$ 的情况下,最快地跟踪输入信号 $v_0(t)$,且 r 越大跟踪越快。当 $x_1(t)$ 充分的接近 $v_0(t)$ 时,解的另一分量 $x_2(t) = \dot{x}_1(t)$ 即为输入信号 $v_0(t)$ 的近似微分。因此,可以把式(3)称为非线性跟踪微分器^[10]。

式(1)的离散形式为:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tu, \quad |u| \leq r \end{cases}, \quad (4)$$

文献[8]给出了离散系统的最速控制综合函数,记做 $fhan(x_1, x_2, r, h)$,并给出了基本算法公式为:

$$u = fhan(x_1, x_2, r, h)$$

$$\begin{cases} d = rh \\ d_0 = hd \\ y = x_1 + hx_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan = - \begin{cases} r \text{sign}(a), & |a| \geq d \\ r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

这种算法有效地解决了系统进入稳态后的高频颤振现象。根据该函数,可以得出离散系统的最速跟踪微分器形式,即最速跟踪微分器的离散形式:

$$\begin{cases} u = fhan(x_1(k) - \nu(k), x_2(k), r, h) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tu \end{cases}, \quad (6)$$

这种非线性的跟踪微分器简称为 TD (Tracking Differentiator)。在函数 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 中,参数 r 用于调整过渡过程跟踪输入的快慢,因此 r 叫做快速因子。 r 越大则跟踪速度越快。参数 T 是积分采用的步长,参数 h 可看成滤波因子,当 $h < T$ 时,稳态时的微分信号存在颤振和超调,且 h 比 T 小得越多,颤振幅值越大。一般取 $h \geq T$,增大 h 能有效的增强滤波效果。由于阶跃信号为无噪声污染的输入信号,因此一般情况下,令 $h = T$ 时 TD 就能取得非常好的效果。

设 T_0 为期望的系统阶跃响应结束时间,系统设定阶跃输入值为 s ,则 TD 安排的阶跃输入信号具有如下特征:

(1) 在时间区间 $\left[0, \frac{T_0}{2}\right]$ 内,系统以 $+r$ 为加速度沿抛物线上升到 $\frac{s}{2}$,即 $\frac{r(T_0/2)^2}{2} = \frac{s}{2}$,速度

达到最大值 $\frac{rT_0}{2}$;

(2) 在时间区间 $\left[\frac{T_0}{2}, T_0\right]$ 内,系统以 $-r$ 为加速度减速,并达到设定值 s ,此后上升速度变为 0,在 T_0 时刻以后加速度变为 0。此后,TD 的输出值保持为阶跃输入值 s 。

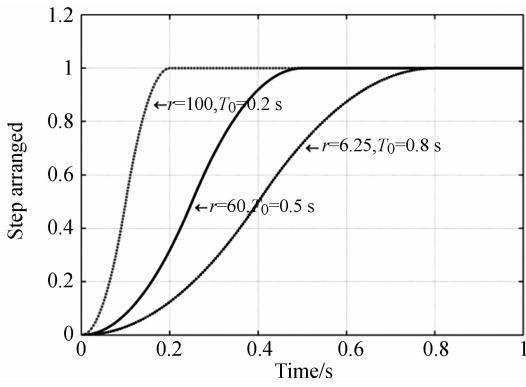
通过以上分析,最大加速度 r 与期望过渡过程时间 T_0 之间关系为:

$$T_0 = 2\sqrt{\frac{s}{r}}. \quad (7)$$

采用这种非线性的离散跟踪微分器,不仅可以对输入信号进行准确跟踪,而且能够提取出输入的微分信号。TD 对阶跃输入具有如下响应特征:在有限时间内单调地跟踪输入信号,并给出该过程的微分信号,使阶跃输入能在有限时间内进入稳态且无超调。因此,TD 可以用于对阶跃输入进行过程安排过渡,根据所需要的过渡过程时间,通过调整快速因子 r 来实现期望和实际的过渡过程时间匹配。

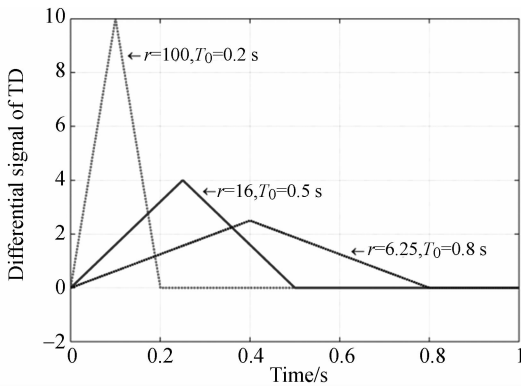
为分析 TD 的阶跃响应特点,图 1 给出了选取参数 $h = T = 0.001$,分别取期望过渡过程时间 $T_0 = 0.2, 0.5, 0.8$ s 时,TD 的阶跃响应曲线及输出的微分信号,3 个不同的 T_0 值对应的快速因子分别为 100, 16 和 6.25。从图中可以看出,TD 能够以无超调的方式根据期望过渡过程时间安排过渡过程,并给出所安排的输入信号的比较准确的微分信号。

在控制系统中,阶跃输入是一种最严格的输入信号,而实际上任何的控制系统都不可能很好地从零初态跟踪阶跃信号,这样就使实际系统的动态性能受到限制。采用 TD 安排过的输入信号对实际的阶跃信号进行了缓慢给定处理,处理后的输入信号降低了对系统的要求。航空相机镜筒工作于位置方式时,一般要求系统快速低超调或无超调定位至指定位置,甚至要求在系统工作范围内,任意大小的位置阶跃输入都能实现快速无超调响应,即全程快速无超调响应。采用跟踪微分器对位置过渡过程进行合理设计是解决这一问题的新思路。



(a) TD 阶跃响应

(a) Step response of TD



(b) TD 输出的微分信号

(b) Differential signal output of TD

图 1 TD 阶跃响应特性

Fig.1 Step response characteristics of TD

3 过渡过程设计与实验

自抗扰控制技术已经在一些光电系统和工业过程控制中得到了应用^[11-13]。以某航空相机镜筒机构为研究对象,选用光纤速率陀螺作为测速元件,光电编码器作为角度测量元件,采用 TMS320F28335 作为处理器,采用文献[1]中的自抗扰控制算法对镜筒进行位置控制。实验过程中,镜筒的初始角位置均为 90°。

与镜筒位置过渡过程设计相关的参数如下:

- (1) 快速因子 r ;
- (2) 系统采样周期 T_s ;
- (3) 运算步长 T ;
- (4) 滤波因子 h ;
- (5) 阶跃输入量 s ;
- (6) 设计过渡过程时间 T_0 。

作为过渡过程的快速因子, r 越大响应越快。但 r 越大,处理后的输入信号越接近阶跃信号,因此随着 r 的增大,系统逐渐产生超调,并越来越大。反之, r 越小,则系统无超调或低超调,但响应速度也会变慢。采用 TD 进行过渡过程设计的关键在于 r 值的合理选取。

由于光纤陀螺数据更新周期为 0.002 5 s,本系统选取采样周期为 $T_s=0.002 5$ s。运算步长 T 和滤波因子 h 可以独立于系统采样周期,也可与之相等。一般对阶跃输入系统而言,为简化 TD 设计参数,选取 $h=T=T_s$ 即可。

以镜筒位置阶跃输入 90° 为例,当对阶跃输入信号不采取任何处理时,位置响应曲线如图 2 所示。从响应曲线可以看出,系统存在明显超调,超调量为 24.1%,同时存在多次振荡,动态过程性能较差。以阶跃输入值的 $\pm 2\%$ 误差范围来定义调节时间,系统调节时间为 3.61 s。

采用 TD 对阶跃输入信号进行处理,对过渡过程进行设计。调试过程中,采用逐步增加 r 值来提高系统响应的快速性,并保证响应的动态过程平稳无超调。经过多次调试,选取快速因子 $r=600$,进行过渡过程设计后,系统动态响应如图 2 中所示。系统调节时间为 2.57 s,提高约 28.8%,超调量为 0。系统调节时间得到改善的原因也得益于无超调设计,无超调设计使镜筒位置进入误差带后不会产生振荡现象,从而缩短了调节时间。

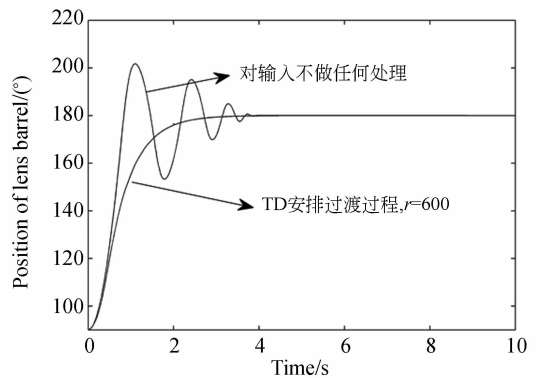


图 2 镜筒 90° 位置阶跃响应

Fig.2 Step response of lens barrel with 90° input

快速因子 r 的选取取决于被控对象的承受能力和可提供的控制能力。对象的承受能力和可提供的控制能力越大, r 可取的值就越大,安排的过渡过程也越接近参考阶跃输入形式。而实际系统

承受能力和控制能力有限,因此 r 只能增大到一定程度。继续增大时,系统响应将会逐步产生抖振或超调。比如,对镜筒而言,位置阶跃输入为 90° ,分别取 $r=600$ 和 $r=700$ 时,光纤陀螺输出的镜筒角速度信号如图 3 所示。

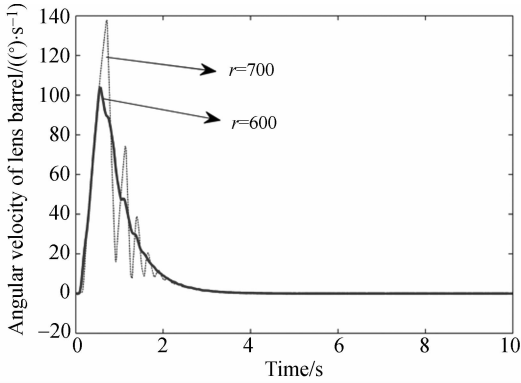


图 3 不同 r 值时的镜筒角速度

Fig. 3 Angular velocity of lens barrel with different r value

从图 3 中可以看出,取 $r=600$ 时,镜筒位置动态响应过程平稳无超调。取 $r=700$ 时,速度曲线多次振荡,表现为响应的动态过程不平稳,存在急减速或急加速现象,但由于速度值始终未反向,因此不存在位置反向振荡问题。但如果继续增大 r 值,则系统会逐渐产生超调和振荡。此外,从调节时间看,相比 $r=600$ 时的响应结果, $r=700$ 时并不能减小系统的调节时间。因而,镜筒阶跃输入为 90° 时,系统可承受的 r 的最大值应在 600 附近。

4 全程快速无超调设计与实验

针对固定的镜筒位置阶跃输入进行了过渡过程设计,在提高系统调节时间的同时,彻底消除了系统超调。但是,镜筒在实际的位置方式工作过程中,每次输入的阶跃量大小可能不同,一组过渡过程参数不能适应不同大小的阶跃输入。快速因子过大,系统会出现抖振甚至超调;快速因子过小,系统响应变慢。因此,对不同的阶跃量,使系统尽可能快地达到稳态,且动态过程平稳无超调时对应的快速因子 r 值不同。为使被控对象在动态过程无超调的前提下,响应速度尽可能快,应首先根据阶跃输入量和系统性能要求选取快速因子 r 初始值,在实验过程中逐步增大 r ,直至系统出现抖振或振荡。在此基础上适当减小 r 值使系统

动态过程平稳,以该值作为该阶跃输入下的最佳参数,保证动态响应的平稳性和快速性。

镜筒机构的工作角度为 $0\sim 180^\circ$ 。为观测不同位置输入下系统可达到的合适快速因子 r 值变化趋势,对镜筒设定不同的位置阶跃输入,经过多次实验,不同阶跃输入对应的合适的快速因子 r 值及稳态时间如表 1 所示。

表 1 不同阶跃输入下的过渡过程参数

Tab. 1 Transient process parameters in different step inputs

阶跃输入/ $^\circ$	r 值	稳态时间/s
5	920	2.14
10	920	2.15
20	900	2.21
40	770	2.41
60	710	2.36
80	620	2.55
90	600	2.57
100	560	2.49
120	500	2.53
140	450	2.59
160	360	2.73
180	320	2.82

将表 1 中的数据以平滑曲线进行连接,如图 4 中的实际曲线,可知阶跃输入值与 r 值呈较好的线性关系。需说明的是,由于不同系统的性能参数和特性不同,将离散点的实验数据采用平滑曲线连接后,所呈现的曲线形式也不同,有可能更接近线性形式,或更接近其它不同类型的非线性形式。为保证镜筒工作范围内任何阶跃输入时均能达到最优的动态性能,将阶跃量 s 与快速因子 r 的关系拟合固定曲线,并应尽可能选取与平滑曲线接近的目标曲线拟合形式。每次镜筒位置数据更新后定位开始时根据阶跃输入变化计算最佳快速因子 r 值。

根据表 1 及实际绘制的 s 与 r 的关系,选取期望函数形式为:

$$r = A + Bs. \quad (8)$$

采用最小二乘法,拟合出的位置阶跃量 s 与快速因子 r 值的函数关系为:

$$r = 934.23 - 3.57s. \quad (9)$$

阶跃输入量 s 与过渡过程快速因子 r 的实际曲线与拟合出的曲线如图 4 所示。

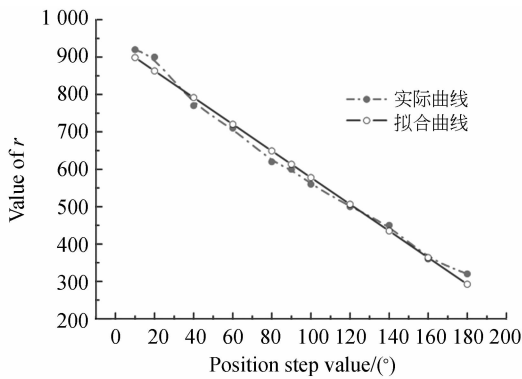


图4 阶跃输入与快速因子的实际曲线与拟合曲线

Fig. 4 Actual and fit curves of step input and speedability parameter

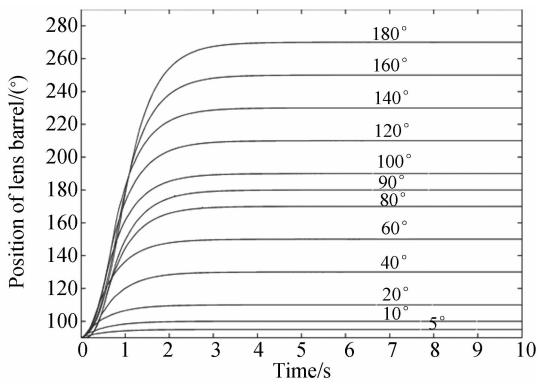


图5 不同阶跃输入时的镜筒位置响应

Fig. 5 Position responses of lensbarrel in different inputs

为验证这种拟合的效果,采用该函数关系,对表1中镜筒工作范围内的不同阶跃输入进行了位置控制实验。镜筒不同位置的阶跃响应曲线如图5所示。从图5中可以看出,在所选参数下,系统均能以无超调的方式到达指定位置。实验结果表明,采用曲线拟合方式,根据阶跃输入自动调整过渡过程快速因子的方法有效,可用于镜筒位置全程的快速无超调过渡过程设计。

5 结论

为消除航空相机镜筒在位置控制过程中的超调,本文针对阶跃输入信号,采用跟踪微分器设计了位置过渡过程,明显改善了系统的动态性能。实验结果表明,通过合理设计过渡过程,能完全消除镜筒位置响应的超调;无超调设计使系统动态响应过程无振荡现象,因此调节时间也相应减小。以 90° 阶跃响应为例,系统超调量由24.1%减小为零,调节时间缩短了28.8%。

此外,采用曲线拟合法拟合了阶跃输入量与过渡过程快速因子的函数关系,在算法执行过程中针对阶跃输入量计算最优过渡过程参数,实现了镜筒位置的全程快速无超调控制。该方法已在航空相机中得到了实际应用,取得了良好的效果,具有较高的实用价值。

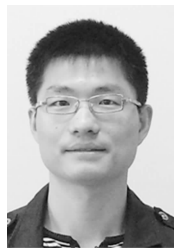
参考文献:

- [1] 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.
HUANG P, XIU J H, LI J, *et al.*. Disturbance estimation and compensation of position control of lensbarrels in aerial cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 803-810. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2007.
HU SH S. *Auto Control Principle* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [4] 孙明玮,陈增强,袁著社.典型工业过程的无超调预

- 测控制设计[J].控制与决策,2000,15(2):213-216.
SUN M W, CHEN Z Q, YUAN ZH ZH. Non-overshoot predictive control design for typical industrial process [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(2): 213-216. (in Chinese)
- [5] 慈宇红,杨华,李英辉.输入平稳的快速无超调预测控制算法[J].控制工程,2006,13(5):407-412.
CI Y H, YANG H, LI Y H. Smoothing input fast non-overshooting predictive control algorithm [J]. *Control Engineering of China*, 2006, 13(5): 407-412. (in Chinese)
- [6] 刘玉贞.无超调PID控制器的设计[D].杭州:杭州电子科技大学,2010.
LIU Y ZH. *Design of PID Controller without Overshoot* [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2010. (in Chinese)
- [7] 董瑞洪,梁磊,任旭鹏.温度控制系统的无超调模糊PID控制器设计[J].科学技术与工程,2009,9(2):267-271.

- DONG R H, LIANG L, REN X P. Design of non-overshoot fuzzy PID controller for temperature control system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(2): 267-271. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 马中华. 跟踪微分器在信号处理中的应用及其相关理论研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
MA ZH H. *Tracking Differentiator in the Application of Signal Processing and Theory Research* [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [10] HUANG P, GE W Q, LI J, *et al.*. Nonlinear control design for system with mechanical resonance based on two tracking-differentiators [C]. *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2010: 1713-1717.
- [11] 邱晓波, 窦丽华, 单东升, 等. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(1): 220-226.
QIU X B, DOU L H, SHAN D SH, *et al.*. Design of active disturbance rejection controller for electro-optical tracking servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 220-226. (in Chinese)
- [12] 黄浦, 葛文奇, 李友一, 等. 航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(4): 812-818.
HUANG P, GE W Q, LI Y Y, *et al.*. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 812-818. (in Chinese)
- [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, St. Louis, 2009*: 5552-5557.

作者简介:



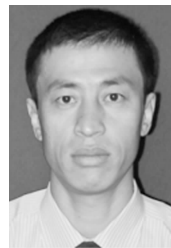
黄 浦(1981—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 助理研究员, 2011 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事航空成像与测量技术及数字控制技术研究; E-mail: hpu8@163.com



修吉宏(1976—), 女, 吉林白山人, 博士, 副研究员, 2005 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研究; E-mail: xiuji hong0809@yahoo.com.cn



李 军(1979—), 男, 辽宁葫芦岛人, 博士, 助理研究员, 2012 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数字控制技术研究; E-mail: junly8076@163.com



李友一(1968—), 男, 辽宁抚顺人, 研究员, 硕士生导师, 2001 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位, 主要从事航空成像技术的研究。E-mail: lyy_980205@yahoo.com.cn



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, 主要从事机械结构设计与有限元分析研究; E-mail: yangxl0@163.com