

光电跟踪自抗扰控制技术研究

王婉婷^{1,2}, 郭 劲¹, 姜振华¹, 王挺峰¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了实现对快速运动目标高精度跟踪, 对光电跟踪系统中的自抗扰控制技术进行了研究。根据速度闭环传递函数, 利用三阶非线性扩张观测器估计系统状态变量, 实现对不确定性因素的补偿, 通过改变位置环被控对象传递函数提高系统的跟踪精度。对系统进行仿真与实验研究, 分析自抗扰控制对光电跟踪系统动态和稳态性能的影响, 与 PI 控制相对比, 结果表明: 对于高速运动目标, 利用自抗扰控制技术可以将系统的跟踪精度提高 7 倍左右; 对于低速运动目标, 由于摩擦和系统噪声的影响, 系统的跟踪精度仅提高了 4 倍左右。若在控制回路中引入相位超前环节, 可以将系统的超调量降低 40%, 进一步改善了系统的动态性能, 该技术的实现对于高精度跟踪控制的研究具有重要的应用价值。

关键词: 光电跟踪; 自抗扰控制器; 三闭环控制; 相位补偿

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0217003

Study on photoelectric tracking system based on ADRC

Wang Wanting^{1,2}, Guo Jin¹, Jiang Zhenhua¹, Wang Tingfeng¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problem of tracking fast moving targets, the control technique based on active disturbance-rejection controller (ADRC) of photoelectric tracking was studied. A third-order nonlinear expansion observer was designed based on the speed closed-loop transfer function to achieve a compensation of uncertainties, and the tracking error was improved by transforming the position transfer function. The performance of ADRC was demonstrated by numerical simulation and experiments. Compared with PI controller, the ADRC method shows better performance in the steady-state tracking error, the results indicate that the tracking error is improved by 7 times while the system tracks fast moving targets. Because of friction and noise, the tracking error is only improved by 4 times while the system tracks low moving targets; If phase compensation is introduced in control loops, the overshoot will decline by 40%, which shows higher practical value for the study of high-precision tracking control system.

Key words: photoelectric tracking; active disturbance rejection control; three-closed loop control; phase compensation

收稿日期: 2016-06-17; 修订日期: 2016-07-19

基金项目: 十二五预研项目(2015syhz0023)

作者简介: 王婉婷(1990-), 女, 博士生, 主要从事伺服控制, 系统辨识方面的研究。Email: wangwanting0907@163.com

导师简介: 郭劲(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: guojin_1964@126.com

0 引言

在光电跟瞄系统中,跟踪精度和响应速度是跟踪系统的核心问题,传统的控制算法通过提高位置环控制器增益来提高系统的跟踪精度^[1-2],但是会使系统的动态性能变差,对捕获过程极为不利,因此,传统的控制算法已不能满足高精度的跟踪要求。在速度环带宽一定的情况下,系统的跟踪精度主要取决于位置环控制器,因此,可以从控制算法角度出发,设计位置环控制器,以进一步提高系统的跟踪精度,该方法的实现对于高精度跟踪系统具有重要的研究意义和实用价值。

针对传统控制算法在跟踪精度和动态性能方面存在的问题,前人已进行了大量的研究,并提出了一系列的改进措施,主要分为两大方面,一是在传统的控制算法基础上,通过引入前馈和反馈支路来改善系统的性能,如:预测滤波^[1],速度和加速度滞后补偿^[2]等,在一定程度上提高了系统的跟踪精度;二是在控制回路中引入智能控制算法,以改善系统的动态和稳态性能,如:模糊控制^[3],滑模变结构控制^[4]等。考虑到智能算法设计复杂,运行时间长,实际中较多采用第一种方法。

近几年,有人将自抗扰控制引入光电跟踪系统中,但研究的侧重点不同。王帅^[5]等人将其用于光电跟踪系统的速度环,以补偿和抑制望远镜跟踪系统存在的饱和、摩擦等非线性问题,改善了系统的低速平稳性;李贤涛^[6]等人在航空稳定平台的速度环引入自抗扰控制,分析了其对抗扰动的抑制能力;李锦

英^[7]等人在运动平台的速度环引入自抗扰控制,分析了自抗扰控制器的稳定跟踪能力和抑制扰动能力;邱晓波^[8]等人利用脱靶量信息设计自抗扰控制器,提高了系统的跟踪精度。

文中将自抗扰控制引入位置环控制回路中,根据编码器测得的位置量,利用非线性扩张观测器对位置、速度和不确定因素进行估计,并利用估计值修正PI控制器输出,从而实现对不确定性因素的补偿。利用实际系统参数进行仿真与实验研究,并分别从动态和稳态性能角度分析自抗扰控制对高、低速目标的跟踪效果,与经典PI算法对比,自抗扰控制可以有效地提高系统的跟踪精度,实现了对快速目标高精度跟踪。

1 自抗扰控制器设计

自抗扰控制^[9-13](Active Disturbance Rejection Controller, ADRC)是韩京清先生在发扬PID控制的技术精髓,并吸取现代控制理论成就的基础上提出的一种基于误差反馈的非线性控制方法,该方法主要由非线性跟踪微分器(NTD),扩张状态观测器(ESO)和非线性反馈控制器(NPD)3部分组成。其核心思想是构造扩张观测器补偿系统的未建模动态和扰动,将系统的被控对象化为标准的“积分串联型”^[9]。受该核心思想的启发,文中在位置环引入自抗扰控制技术,即利用非线性扩张观测器实时估计位置、速度和系统的未建模动态和扰动量,并利用未建模动态和扰动量的观测值修正位置环控制器的输出,实现对不确定性的补偿,对应的控制系统框图如图1所示。

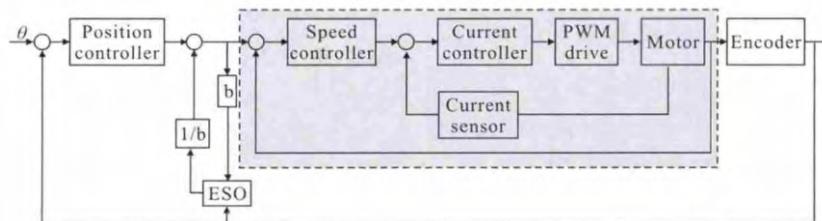


图1 基于自抗扰控制的位置环简化框图

Fig.1 Simplified position-loop diagram based on ADRC

图1中,虚线框部分为电流和速度闭环控制,电流环的引入主要目的是以下两个方面:一是提高系统的抗干扰能力,降低反电势影响;二是改变速度回路被控对象特性。文中在控制回路中引入电流传感器,将电枢电流反馈至控制器,以实现数字式电流闭

环控制。速度环控制器设计的主要目的是保证系统的带宽和稳定裕度满足要求,采用超前滞后校正设计速度环控制器,在低频段,速度闭环传递函数可近似等效为一阶惯性环节,考虑到编码器的传递函数可等效为积分环节^[2],位置环被控对象可表示为:

$$G_p = GG' = \frac{1}{s(T_v s +)} G' \quad (1)$$

式中: G' 包括零极点相互抵消的环节和小时间常数惯性环节。

将公式(1)化为状态方程形式,如公式(2)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{T_v} u - \frac{1}{T_v} x_2 + d \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_1 为位置量; x_2 为速度量; u 为观测器控制量; d 为系统未建模动态和不确定性部分。由于速度量 x_2 不可测,因此利用位置量设计非线性扩张观测器,将 $-\frac{1}{T_v} x_2 + d$ 作为被扩张的状态变量 x_3 ,即 $x_3 = -\frac{1}{T_v} x_2 + d$,其导数为 $m(t)$,则系统(2)可扩展为一个新系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = bu + x_3 \\ \dot{x}_3 = m(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

扩张观测器主要是根据被控对象输出 y 和控制量 u 对系统的状态变量进行估计,采用韩京清设计的三阶非线性扩张观测器^[9]实现对位置、速度和扩张状态 x_3 的观测,如公式(4)所示:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: z_1 、 z_2 、 z_3 为位置、转速和不确定性的估计值, y 为被控对象输出,即编码器采集的位置量。 β_1 、 β_2 、 β_3 为观测器增益,且满足 $(s + w_0)^3 = s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3$, w_0 为观测器带宽, w_0 越大,估计精度越高,但系统噪声越大,因此应结合实际进行合理选择。采用非线性函数 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 可以实现对状态变量的准确估计,其参数通常取为 $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.25$ 。非线性函数 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 还可以对观测值进行滤波,主要通过 δ 体现出来, δ 值越大,滤波性能越强, δ 值越小,滤波性能越差。

在数字控制系统中,通常将公式(4)设计为离散形式,如公式(5)所示:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + T[z_2(k) - \beta_1 e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + T[z_3(k) - \beta_2 \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + bu(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - T\beta_3 \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: T 为系统的采样时间。

考虑到微分环节对系统噪声比较敏感^[5],因此位置环采用 PI 控制器,利用非线性扩张观测器的估计值 z_3 对位置环控制器的输出进行修正,则对应的方程为:

$$\begin{cases} u_0 = \left(K_p + K_i \frac{1}{s} \right) (r - y) \\ u = u_0 - \frac{z_3}{b} = u_0 - T_v z_3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_0 为位置环控制器输出; r 为位置环输入。

由公式(3)、(6)得:

$$\ddot{y} = \frac{1}{T_v} u - \frac{1}{T_v} x_2 + d = \frac{1}{T_v} u_0 - \frac{1}{T_v} x_2 + d - z_3 \approx \frac{1}{T_v} u_0 \quad (7)$$

由公式(7)可知,忽略 z_3 对不确定部分的估计误差,采用非线性扩张观测器对系统不确定性的补偿改变了位置环被控对象的传递函数,将位置环被控对象化为标准的“积分串联型”,与公式(1)相比,既提高了控制系统增益,又提高了被控对象的型别,最终提高系统跟踪精度。

2 仿真及结果分析

为了评价 ADRC 算法对运动目标的跟踪能力,以光电跟踪系统的方位轴为例进行仿真分析,在相同带宽的情况下对比 ADRC 与 PI 控制结果。控制器参数: $T_i = 0.0116$, $K_p = 29$, $K_i = 347$ 。自抗扰控制器参数设置如表 1 所示。

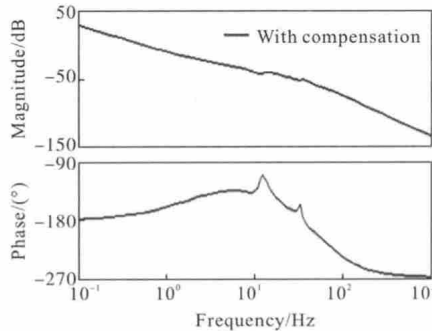
表 1 自抗扰控制器参数

Tab.1 Parameters of ADRC

β_1	β_2	β_3	δ	α_1	α_2
30	300	1 000	0.003	0.5	0.25

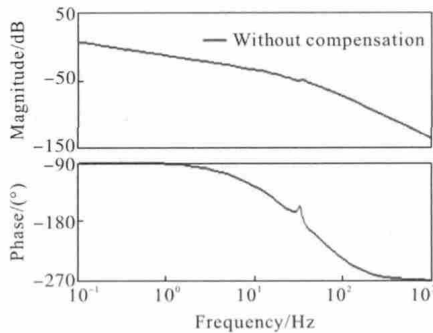
加观测器补偿和未加观测器补偿的频率特性曲线分别如图 2(a)、(b)所示。在低频段,由幅频曲线的对比结果知,图 2(a)中低频段增益高于图 2(b),说明观测器补偿提高了系统被控对象增益;由相频曲线的对比结果知,加观测器补偿后,被控对象的起始相

角由 -90° 变为 -180° ,从而说明观测器补偿将系统被控对象化为积分环节,提高了系统的型别。与 1 节中的理论分析结果一致。



(a) 加入补偿的幅相图

(a) Bode diagram of plant with compensation



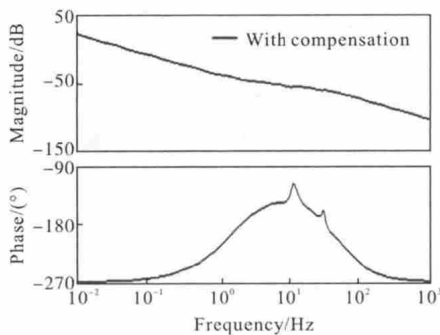
(b) 未加补偿的幅相图

(b) Bode diagram of plant without compensation

图 2 被控对象幅相图

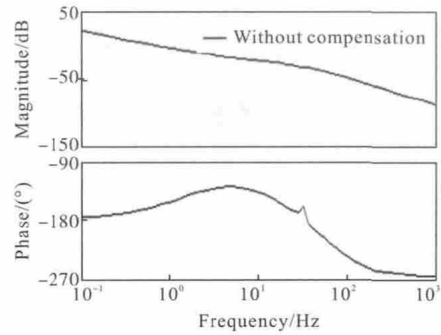
Fig.2 Bode diagram of plant

加入补偿和未加补偿的开环频率特性曲线分别如图 3(a)、(b)所示,由图 3(a)、(b)知,系统的开环剪切频率均为 32.1 rad/s 。由图 3(b)的相频曲线知,加入观测器补偿后,系统的相角裕量由 50.7° 降至 26° ,说明观测器补偿降低了系统的相位裕量,最终影响系统的动态性能。



(a) 加入补偿的位置开环幅相图

(a) Bode diagram of open loop with compensation



(b) 未加补偿的位置开环幅相图

(b) Bode diagram of open loop without compensation

图 3 系统开环幅相图

Fig.3 Bode diagram of open loop

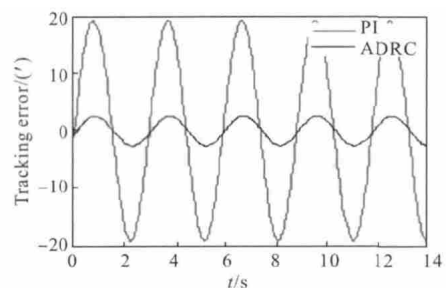
2.1 跟踪精度分析

为了分析自抗扰控制对运动目标的跟踪能力,利用表 2 中的目标信号进行仿真分析,并给出了位置跟踪误差的对比结果,如图 4 所示。由图 4 可知,ADRC 算法作用下的位置环跟踪误差均明显小于 PI

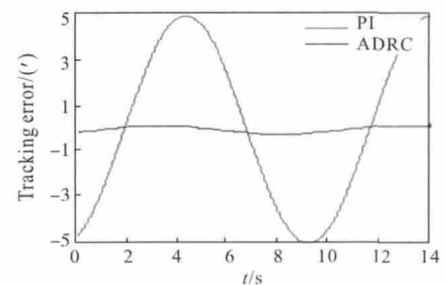
表 2 运动目标

Tab.2 Moving target

Speed/($^\circ$) $\cdot$ s $^{-1}$	Acceleration/($^\circ$) $\cdot$ s $^{-2}$	Function/rad
60	120	$\theta=0.52\sin(2t)$
50	30	$\theta=1.426\sin(0.6t)$
30	10	$\theta=1.57\sin(0.33t)$
30	30	$\theta=0.52\sin(t)$
15	7.5	$\theta=0.52\sin(0.5t)$



(a) $\theta=0.52 \sin(2t)$



(b) $\theta=1.426 \sin(0.6t)$

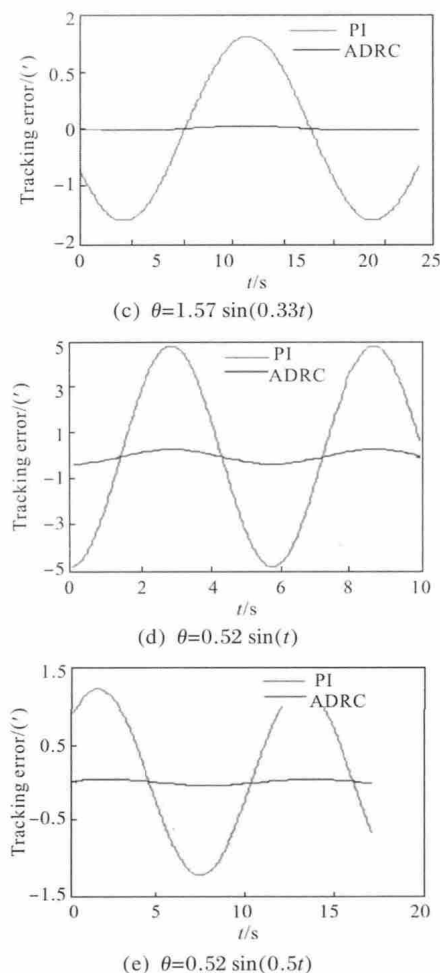


图 4 位置跟踪误差

Fig.4 Position tracking error

控制算法。说明位置环采用 ADRC 算法,系统的跟踪精度得到了明显改善。

表 3 给出了系统最大跟踪误差 Error 和跟踪误

表 3 PI 和 ADRC 算法对比结果

Tab.3 Comparison results between PI and ADRC

Moving target/rad	Algorithm	Error/(°)	Std/(°)
$\theta=0.52 \sin(2t)$	PI	19.328 3	13.706 2
	ADRC	2.584 4	1.819 9
$\theta=1.426 \sin(0.6t)$	PI	4.888 0	3.385 8
	ADRC	0.402 9	0.140 6
$\theta=1.57 \sin(0.33t)$	PI	1.598 0	1.130 8
	ADRC	0.190 1	0.026 1
$\theta=0.52 \sin(t)$	PI	4.852 7	3.411 6
	ADRC	0.329 0	0.231 2
$\theta=0.52 \sin(0.5 t)$	PI	1.214 3	0.830 8
	ADRC	0.041 3	0.028 3

差的标准差 Std 的对比结果。由表 3 的对比结果知, PI 控制作用下, 系统最大跟踪误差分别为 19.328 3'、4.888 0'、1.598 0'、4.882 7'、1.214 3'。而 ADRC 控制作用下, 系统最大跟踪误差分别为 2.584 4'、0.402 9'、0.190 1'、0.329 0'、0.041 3'。可见, 系统的跟踪精度分别提高了 7.47、12.13、8.4、14.74、29.40 倍。显然, ADRC 算法能有效地提高系统的跟踪精度, 且对低速目标信号的改善程度好于高速目标信号。

2.2 动态性能分析

为了分析自抗扰控制对光电跟踪系统动态性能的影响, 图 5 给出了单位阶跃响应的对比结果。由图 5 可知, 采用 PI 控制, 系统的超调量为 25%, 而采用 ADRC 控制, 系统超调量达到了 60%, 在目标跟踪过程中, 目标容易跳出探测器的视场, 从而失去对目标的跟踪。超调量过大主要是因为非线性扩张观测器在改变系统被控对象传递函数的同时降低了系统的相位裕量。与图 3 中的理论分析结果相同。

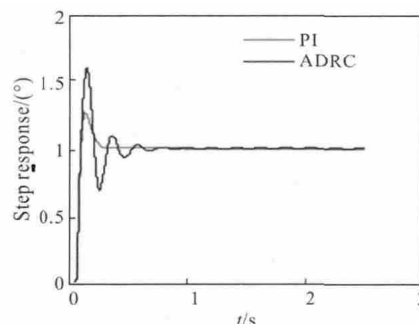


图 5 阶跃响应

Fig 5 Step response

3 实验及结果分析

为了验证仿真分析的正确性及为高精度跟踪控制系统设计提供理论依据, 对实际光电跟踪系统进行实验研究。实验系统原理图如图 6 所示, 主要由 DSP 控制板、光电跟踪转台、计算机和编码器等组成。绝对式圆光栅编码器采集位置数据, 并传送至 DSP; 霍尔传感器采集电枢电流, 经采样模块传送至 DSP; 根据接收的电流和位置数据, 利用 DSP28335 控制器设计位置、速度和电流环控制器, 并根据电流控制器输出结果的大小调节 PWM 的占空比, 经光耦隔离, PWM 驱动电路后输出直流电压控制电机转动。

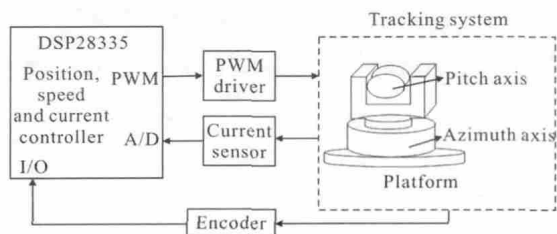
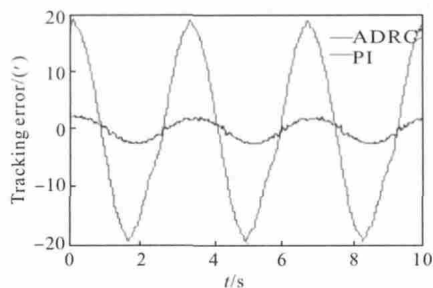


图6 实验原理图

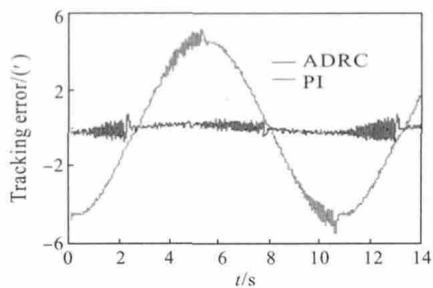
Fig.6 Schematic diagram of experiment principle

3.1 跟踪精度分析

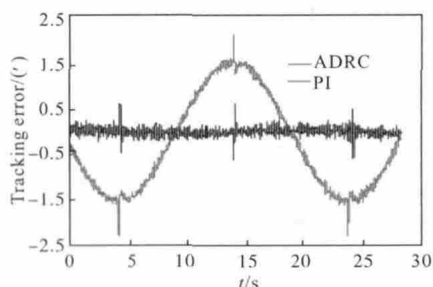
利用表2中的目标信号进行实验研究,并给出了光电跟踪转台位置跟踪误差的对比结果,如图7所示。由图7可知,位置环采用ADRC算法,系统的跟踪精度得到了明显提高。由图7(b)、(c)可知,在速度接近零的位置,随着目标速度的降低,跟踪误差的波动幅度逐渐增大,说明低速时,跟踪精度受系统摩擦的影响较大。与图4相比,若忽略系统噪声和摩擦等非线性因素的影响,跟踪误差曲线基本一致。



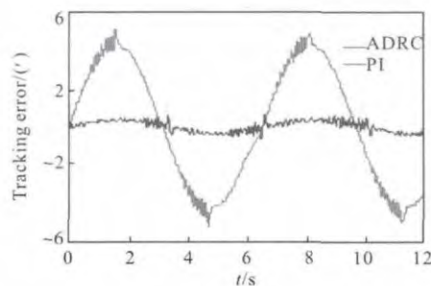
(a) $\theta=0.52 \sin(2t)$



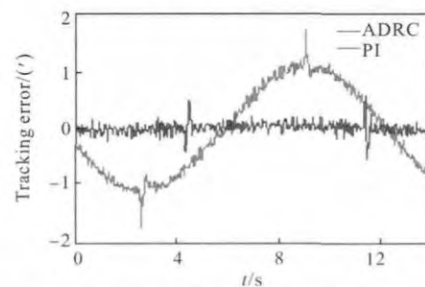
(b) $\theta=1.426 \sin(0.6t)$



(c) $\theta=1.57 \sin(0.33t)$



(d) $\theta=0.52 \sin(t)$



(e) $\theta=0.52 \sin(0.5t)$

图7 位置跟踪误差

Fig 7 Position tracking error

表4给出了系统最大跟踪误差 Error 和跟踪误差的标准差 Std 的对比结果。由表4可知,与PI控制相比,采用ADRC算法后,对于高、低速目标信号的目标,系统的跟踪精度分别提高了7.43、7.14、3.68、7.98、3.13倍。与表3相比,在低速情况下,误差区别较大,这主要是由摩擦和系统噪声等非线性因素造成的。在高速情况下,仿真结果与实验结果基本一致。

表4 PI 和 ADRC 算法对比结果

Ta.4 Comparison results between PI and ADRC

Moving target/rad	Algorithm	Error/(°)	Std/(°)
$\theta=0.52 \sin(2t)$	PI	19.404 0	12.833 9
	ADRC	2.61	1.593 1
$\theta=1.426 \sin(0.6t)$	PI	5.442 0	3.156 9
	ADRC	0.762 0	0.242 7
$\theta=1.57 \sin(0.33t)$	PI	2.322 0	1.040 4
	ADRC	0.630 0	0.098 4
$\theta=0.52 \sin(t)$	PI	5.351 8	2.945 0
	ADRC	0.670 4	0.282 1
$\theta=0.52 \sin(0.5t)$	PI	1.759 1	0.791 7
	ADRC	0.561 5	0.091 6

3.2 动态性能分析

图8给出了系统单位阶跃响应的实验结果。由

图 8 可知,采用 PI 控制,系统的超调量为 25%;采用 ADRC 控制,系统超调量达到了 60%左右,与图 5 相比,实验曲线与仿真曲线基本一致。

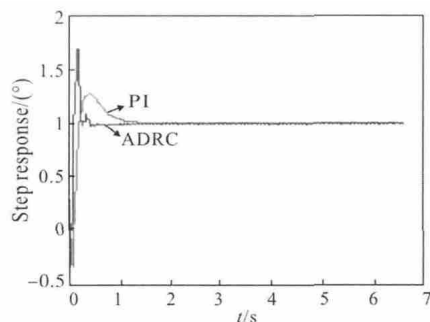


图 8 阶跃响应

Fig.8 Step response

为了保证系统跟踪精度的同时减小系统超调量,可以在控制回路中加入相位超前环节。此时对应的单位阶跃响应如图 9 所示,由图 9 可知,加入超前环节后,系统的阶跃响应超调量降至 20%左右,明显改善系统的动态性能。针对最大角速度为 $60(^{\circ})/s$,最大角加速度为 $120(^{\circ})/s^2$ 的目标,对应的跟踪误差曲线如图 10 所示,此时系统的最大跟踪误差为 $2.91'$,与表 4 中数据相比,跟踪误差基本一致。

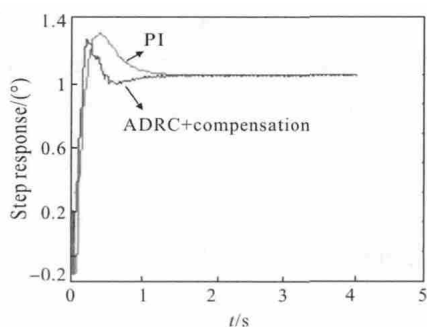


图 9 阶跃响应

Fig.9 Step response

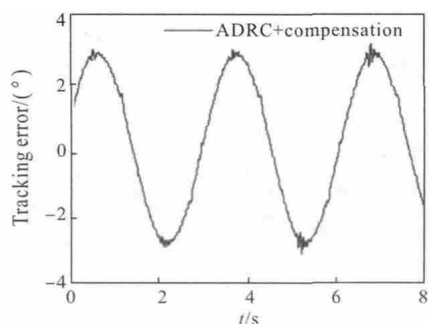


图 10 跟踪误差

Fig.10 Tracking error

由上述分析可知,在基于自抗扰控制的三闭环

控制回路中,加入相位超前环节,既能提高系统的跟踪精度,又能改善系统的动态性能,为光电跟瞄系统中的捕获跟踪系统设计奠定了理论基础。

4 结 论

文中设计了基于自抗扰控制的三闭环光电跟踪控制系统,并通过仿真与实验分析了自抗扰控制技术对系统动态和稳态性能的影响。结果表明:采用自抗扰控制可以有效地提高系统的跟踪精度,但是由于系统本身的噪声和摩擦等非线性因素的影响,对高、低速目标跟踪精度的提高程度不同。若在控制回路中加入相位补偿环节,可以有效改善系统动态性能,同时仍能保证系统具有很高的跟踪精度,动态性能的改善对于光电跟瞄捕获过程研究具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Wang Qiuping. Study on the space target Kalman prediction technology for O-E theodolite [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
王秋平. 光电经纬仪运动目标 Kalman 预测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008.
- [2] Wang Hongxuan, Gao Huibin, Zhang Shumei. High-precision TV auto-tracking system of photoelectric theodolite [J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(4): 107-109. (in Chinese)
王红宣, 高慧斌, 张树梅. 光电经纬仪的高精度电视自动跟踪[J]. 电光与控制, 2006, 13(4): 107-109.
- [3] Peng Shuping, Li Bo, Jiang Runqiang, et al. Dual mode control for electro-optical tracking systems [J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(2): 335-342. (in Chinese)
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.
- [4] Geng Guangxiao. Optimized design of satellite laser communication coarse pointing control system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
耿光晓. 卫星激光通信粗瞄控制子系统优化设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [5] Wang Shuai, Li Hongwen, Meng Haoran, et al. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 19(10): 2442-2449. (in Chinese)

- 王帅, 李洪文, 孟浩然, 等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J]. 光学 精密工程, 2012, 19(10): 2442–2449.
- [6] Li Xiantao, Zhang Bao, Shen Honghai. Improvement of isolation degree of aerial photoelectrical stabilized platform on ADRC [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (8): 2223–2231. (in Chinese)
- 李贤涛, 张葆, 沈宏海. 基于自抗扰控制技术提高航空光电稳定平台的扰动隔离度 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22 (8): 2223–2231.
- [7] Li Jinying, Fu Chengyu, Tang Tao, et al. Design of active disturbance –rejection controller for photoelectric tracking system on moving bed [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 955–958, 964. (in Chinese)
- 李锦英, 付承毓, 唐涛, 等. 运动平台上光电跟踪系统的自抗扰控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(7): 955–958, 964.
- [8] Qiu Xiaobo, Dou Lihua, Shan Dongsheng, et al. Design of active disturbance rejection controller for electro –optical tracking servo system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 220–226. (in Chinese)
- 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.
- [9] Han Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900–906.
- [10] Huang C E, Li D, Xue Y. Active disturbance rejection control for the ALSTOM gasifier benchmark problem [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(4): 556 – 564.
- [11] Ran Maopeng, Wang Qing, Dong Chaoyang. Stabilization of a class of nonlinear systems with actuator saturation via active disturbance rejection control [J]. *Automatica*, 2016, 63: 302–310.
- [12] Zheng Q, Gao L Q, Gao Z. On validation of extended state observer through analysis and experimentation[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2012, 134 (2): 224–240.
- [13] Zhang Chao, Zhu Jihong, Gao Yakui. Order and parameter selections for active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31 (11): 1480–1485. (in Chinese)
- 张超, 朱纪洪, 高亚奎. 自抗扰控制器的阶次与参数的选取[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1480–1485.