

运动平台上光电跟踪系统的自抗扰控制器设计

李锦英^{1,2}, 付承毓^{1,2}, 唐 涛^{1,2}, 李志俊^{1,2}, 于 伟^{1,2,3}

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院 光束控制重点实验室, 四川 成都 610209; 3. 徐州空军学院, 江苏 徐州 221000)

摘要: 针对运动平台上光电跟踪系统既要有很强的抗扰动性能, 又要能快速跟踪运动目标的特点, 设计了稳定平台的自抗扰控制器. 通过对闭环带宽的分析, 改进了自抗扰控制器的结构, 使闭环系统有较高的带宽. 设计了扩张状态观测器对平台的扰动进行观测、补偿, 并分析了系统鲁棒稳定性对扩张状态观测器的限制条件. 实验结果显示, 与采用PI控制相比, 自抗扰控制器的稳定跟踪能力和扰动抑制能力都有一定的提高. 其中, 对阶跃信号的稳态跟踪误差不到PI的一半, 而在2 Hz附近扰动抑制比有6 dB的提高.

关键词: 运动平台; 光电跟踪系统; 自抗扰控制; 鲁棒性; 扰动

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of active disturbance-rejection controller for photoelectric tracking system on moving bed

LI Jin-ying^{1,2}, FU Cheng-yu^{1,2}, TANG Tao^{1,2}, LI Zhi-jun^{1,2}, YU Wei^{1,2,3}

(1. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610209, China;

2. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610209, China;

3. Xuzhou Air Force College, Xuzhou Jiangsu 221000, China)

Abstract: To meet the requirements of strong disturbance-rejection and fast response in tracking moving targets for photoelectric tracking system on the moving bed, we design an active disturbance-rejection controller (ADRC). After investigating the closed-loop bandwidth, we rebuild the structure of ADRC to ensure a wider bandwidth. An extended state observer (ESO) is designed to observe disturbances and compensate them. Restrictions on robust stability of ESO are analyzed. Compared with the PI controller, ADRC show better tracking and disturbance-rejection capabilities in experimental results. Particularly, the steady-state tracking error for step-input signal is less than half of that of PI, and the disturbance-rejection ratio is improved by 6 db around 2 Hz.

Key words: moving bed; photoelectric tracking system; active disturbance-rejection control; robustness; disturbance

1 引言(Introduction)

随着光电跟踪系统在机载、车载等运动平台上的应用, 对控制器性能提出了更高的要求: 一方面要有很强的隔离载体运动的能力; 另一方面还要对运动目标进行精确跟踪, 这需要系统响应速度快、稳态误差小^[1-2].

针对惯性稳定平台中传统单速度环对扰动抑制能力不足的问题, 文献[3]采用了双速度闭环, 利用测速机构成速度内环反馈, 提高了平台克服低频段扰动的能力. 文献[4-5]采用了现代控制理论中的状态观测器来抑制系统中的扰动, 但对系统的先验知识要求较高, 需要在被控对象模型或扰动模型各参数已知的条件下设计, 或者通过复杂的算法估计得

到, 这限制了在实际系统中的应用.

自抗扰控制器继承了PID控制器的优点, 不依赖于对象的精确模型, 具有很强的鲁棒性^[6]. 另外由于采用扩张状态观测器(ESO), 把系统的内扰和外扰统一视为扩张状态而自动估计并给予补偿, 使系统具有很强的抗扰动能力. 自提出以来, 受到了学者的广泛关注^[7-12].

运动平台中, 速度稳定环和位置环均对载体角运动具有隔离作用. 但位置环由于采样频率低, 且跟踪传感器存在延迟, 带宽较窄, 只对极低频率的载体扰动才有隔离作用, 这种隔离作用是很有限制的. 系统中起主要隔离作用的仍是速度稳定环^[2]. 本文以单轴惯性稳定平台为被控对象, 针对系统扰动抑制

能力不足的问题,提出利用扩张状态观测器观测出扰动,进行扰动前馈的方案,并对扩张状态观测器的设计方法与鲁棒稳定性问题进行了详细分析.接着对PI算法和基于扩张状态观测器的PI算法在时域和频域进行了相关实验验证.

2 实验系统与控制器设计(Experimental system and controller design)

2.1 实验系统介绍(Introduction of the experimental system)

本文实验系统由稳定台(包括稳定台面和驱动电机)、扰动基座和角速率陀螺构成.稳定台面上安装角速率陀螺,为平台提供速度反馈信号;驱动电机为直流力矩电机;扰动基座为平台提供角速率扰动.具

体如图1所示.

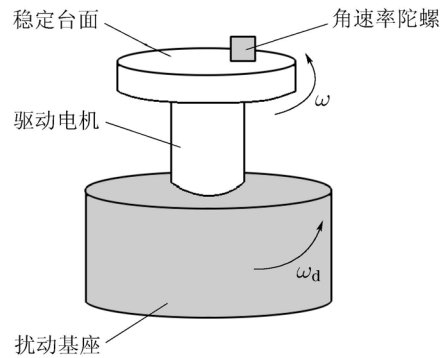


图1 实验平台示意图
Fig. 1 Structure of experimental platform

经辨识得到速度开环时的稳定台传递函数

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{2.8(4.788 \times 10^{-7}s^2 + 3.46 \times 10^{-5}s + 1)}{(0.0053s + 1)(0.0318s + 1)(4.398 \times 10^{-7}s^2 + 2.653 \times 10^{-5}s + 1)} e^{-0.0011s}, \quad (1)$$

其中: ω 为速度, u 为控制器输出.

2.2 自抗扰控制器设计(Design of ADRC)

忽略小时间常数惯性环节、谐振反谐振环节和纯延时环节,将式(1)简化为一阶惯性环节

$$G_n(s) = \frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{2.8}{0.0318s + 1}. \quad (2)$$

为便于自抗扰控制算法的设计,需要将式(2)写成状态方程的形式,并考虑摩擦力矩、基座扰动力矩等扰动的存在,得到如下方程:

$$\dot{\omega} = b_0 u + f_0 + f, \quad (3)$$

其中: ω 为速度, u 为控制器输出, $b_0 = 88.05$, $f_0 = -31.45\omega$, f 为摩擦力矩、基座扰动力矩等.

2.2.1 扩张状态观测器(Extended state observer)

自抗扰控制器的核心是扩张状态观测器

$$\Delta(s) = \frac{(4.788 \times 10^{-7}s^2 + 3.46 \times 10^{-5}s + 1)}{(0.0053s + 1)(4.398 \times 10^{-7}s^2 + 2.653 \times 10^{-5}s + 1)} e^{-0.0011s} - 1.$$

扩张状态观测器的带宽限制条件可以按照扰动观测器(DOB)的方法来分析^[10].补灵敏度函数

$$T(s) = Q(s) = \frac{\omega_0^2}{(s + \omega_0)^2}. \quad (4)$$

相应的鲁棒稳定性约束条件是

$$\|T(s)\Delta(s)\|_\infty \leq 1. \quad (7)$$

为了形象的显示由于乘性不确定性所带来的鲁棒稳定性约束,现将和不同的 ω_0 取值情况画于

(ESO),它能把系统的内扰、外扰实时估计出来.而与其他观测器(如扰动观测器(DOB)和未知输入观测器(UIO))相比,ESO具有计算效率高、便于调试、需要先验知识少的特点^[11-12].根据文献[12]提供的方法,设计如下扩张状态观测器(ESO):

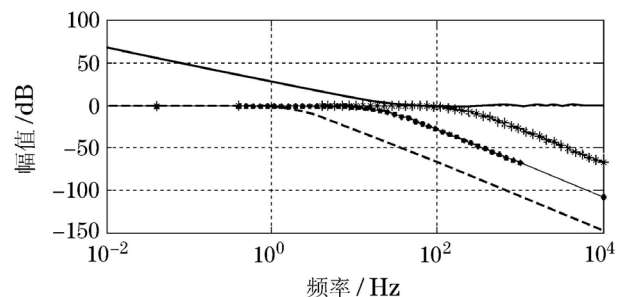
$$\begin{cases} e = z_1 - y, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e + f_0 + b_0u, \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02}e, \end{cases} \quad (4)$$

其中: z_1, z_2 为状态 ω 和 f 的估计值; y 为速度的量测信号; e 为误差信号; β_{01}, β_{02} 为待设计的参数,满足 $s^2 + \beta_{01}s + \beta_{02} = (s + \omega_0)^2$; ω_0 的选择需要考虑到对象的不确定性和系统的噪声.首先,用乘性形式来表示系统的不确定性:

$$G_p(s) = G_n(s)(1 + \Delta(s)), \quad (5)$$

其中:

图2中.



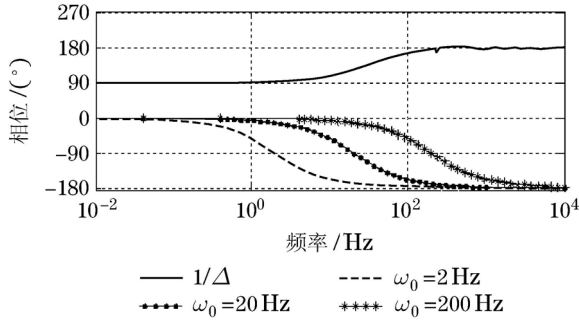


图2 扩张状态观测器的鲁棒性约束
Fig. 2 Robustness constraints of ESO

可以看出在 $\omega_0 = 20\text{ Hz}$ 时, 系统依然是稳定的, 但考虑到实际系统的噪声情况和留有一定的稳定余量, 实验中取

$$\omega_0 = 20 \text{ rad/s} = 3.18 \text{ Hz}.$$

2.2.2 误差反馈与扰动解耦(Error feedback and disturbance decoupling)

文献[6]中采用的是如下误差反馈律:

$$\begin{cases} e_1 = \omega^* - z_1, \\ u = f(e_1) - \frac{z_2}{b_0}, \end{cases} \quad (8)$$

其中: ω^* 为速度期望值, $f(e_1)$ 为误差的函数.

通过式(8), 可以实现扰动的解耦. 而系统的动态性能主要受 $f(e_1)$ 的影响. 文献[6]中指出扩张状态观测器, 可以消除静态误差, 所以不需要积分器. 但实验发现, 只有比例环节时, 系统的中频段增益很快下降到 -3 dB 以下, 系统带宽严重受限. 而单纯的提高增益, 虽然可以在一定程度上提高中频段的增益, 但系统谐振随之被放大. 所以, 考虑到光电跟踪系统需要有快速跟踪运动目标的能力, 即需要满足一定的带宽要求, 将 $f(e_1)$ 取为比例积分环节:

$$f(e_1) = K_p e_1 + K_i \int e_1 dt. \quad (9)$$

设计的开环传递函数如图3所示. 其中:

$$K_p = 2, K_i = 80.$$

由此得到系统的幅值裕度 15.5 dB , 相位裕度 41.2° .

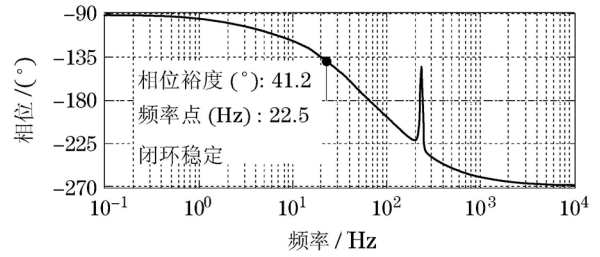
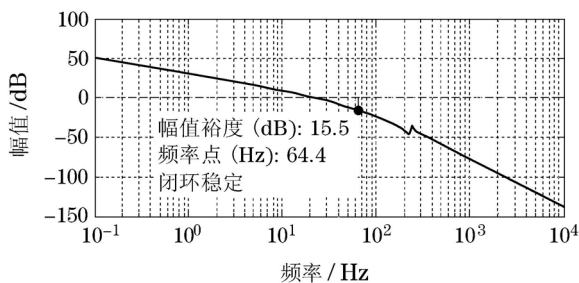


图3 开环传递函数幅相频图

Fig. 3 Bode diagram of open-loop transfer function

为评价ADRC对平台扰动角速率的抑制能力, 设计一款PI控制器作为对比. 为公平比较, 使二者速度环闭环带宽相同. 图4为理论分析的闭环带宽与实测得到的两种算法的闭环幅相频图.

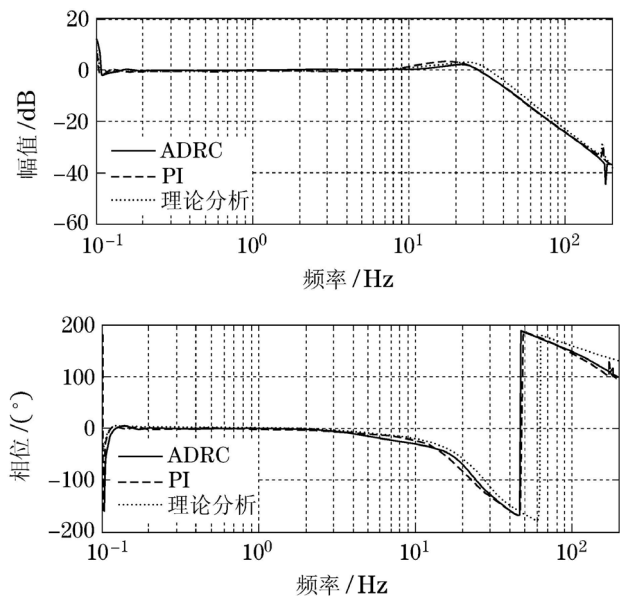


图4 系统闭环幅相频图

Fig. 4 Bode diagram of closed-loop transfer function

3 阶跃响应与平台扰动实验(Experiments of step response and platform disturbances)

3.1 阶跃响应实验(Experiment of step response)

为了评价系统对运动目标快速、稳定的跟踪能力, 安排了系统阶跃响应实验: 给定期望速度 $50^\circ/\text{s}$, 测量采用PI和ADRC两种算法的系统瞬态、稳态特性. 如图5所示.

由于两种算法的带宽相同, 它们的瞬态响应特性相差不大, 大约 0.05 s 可以进入稳态. 但二者稳态特性相差较大, 具体如表1所示.

表1中数据显示, ADRC的稳态误差的均值和标准差都比PI小 50% 以上. 这是因为在转台转动过程中, 摩擦并不是一个恒定的值, 而ADRC由于存在扰动解耦路径, 可以在带宽与PI相同的情况下, 有更强的扰动抑制能力和更小的跟踪误差.

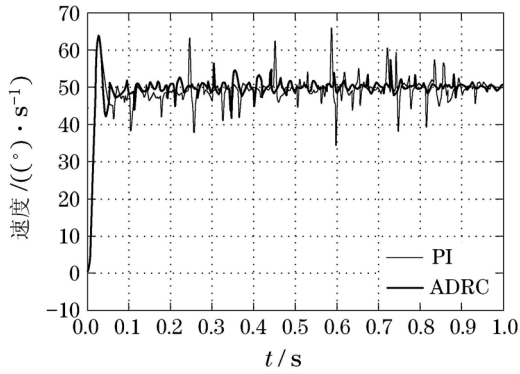


图5 速度阶跃响应

Fig. 5 Step response of speed

表1 两种算法的误差情况

Table 1 Errors of two algorithms

	mean(err)	std(err)	mean(abs(err))	std(abs(err))
PI	0.6838	2.7147	1.7510	2.1836
ADRC	0.0815	1.3053	0.8622	0.9829

注1 表1中: mean(err)表示误差的均值, std(err)表示误差的标准差, abs(err)表示误差的绝对值, 表中单位为($^{\circ}$)/s.

3.2 平台扰动实验(Experiment of platform disturbances)

以幅值为1 V, 频率范围为0.2~200 Hz的电压驱动扰动台转动, 测量扰动台角速度到稳定台角速度的抑制比特性. 得到图6所示结果.

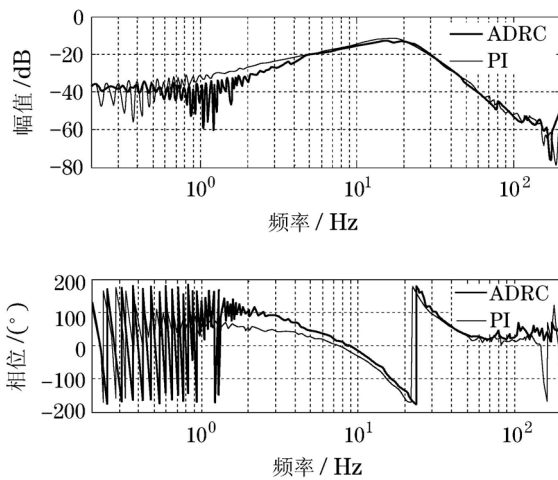


图6 扰动抑制比幅频图

Fig. 6 Bode diagram of disturbance rejection

可以看出, 在低频部分, 由于扩张状态观测器的存在, ADRC算法可以在一定程度上补偿扰动的影响, 所以扰动抑制能力比PI有一定程度的提高. 其中2 Hz附近, 有大约6 dB的提高. 在高频部

分, 受ESO带宽的影响, 已无法估计出扰动, 此时扰动抑制比主要受系统转动惯量的影响, 二者基本相同.

4 结论(Conclusions)

本文针对运动平台伺服系统的性能要求, 从频率域设计了速度环的自抗扰控制器. 为了解决中频段增益无法提高的问题, 加入了积分器, 使得速度环闭环带宽可以满足系统要求. 详细分析了扩张状态观测器的设计方法, 并提出状态观测器的鲁棒稳定性约束条件, 对设计鲁棒性扩张状态观测器有一定的指导意义. 在一维稳定平台上进行了实验表明, 文中所提供的方法与PI控制方法有相同的带宽与幅值相位裕度的情况下, 有更好的扰动抑制能力. 其中, 阶跃响应实验显示, ADRC具有更小的稳态误差; 而扰动平台的实验表明, ADRC对平台扰动具有更好的抑制特性. 这在实际系统的闭环带宽无法提高的情况下, 是一种很好的提高系统扰动抑制能力的方法.

但由于陀螺量测噪声较大, 扩张状态观测器(ESO)的带宽受到限制, 远没有达到鲁棒稳定性约束的上限. 如果能减小陀螺噪声对ESO的影响, 可以在满足鲁棒稳定性约束的条件下提高ESO的带宽, 进而更大程度地提高系统的扰动抑制能力.

参考文献(References):

- [1] 庞新良. 机载光电稳定平台数字控制关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
(PANG Xinliang. A study on key technology of digital control of airborne electro-optical stabilization platform system [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2007.)
- [2] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
(WANG Lianming. Study on stabilization and track control techniques of airborne opto-electronic platform [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002.)
- [3] 李志俊, 包启亮, 毛耀, 等. 惯性平台稳定回路多闭环串级控制 [J]. 光电工程, 2010, 37(5): 19-24.
(LI Zhijun, BAO Qiliang, MAO Yao, et al. Multi-closed loops cascade control for stabilization of inertia platform [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(5): 19-24.)
- [4] 王军平, 陈全世. 基于扰动观测器的伺服控制器设计及仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1825-1827.
(WANG Junping, CHEN Quanshi. Servo system controller design and simulation research based on a disturbance observer [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(8): 1825-1827.)
- [5] 周金柱, 段宝岩, 黄进. LuGre摩擦模型对伺服系统的影响与补偿 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 990-994.
(ZHOU Jinzhu, DUAN Baoyan, HUANG Jin. Effect and compensation for servo systems using LuGre friction model [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(6): 990-994.)

- [4] GHOMMAM J, MNIF F, DERBEL N. Global stabilization and tracking control of underactuated surface vessels [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(1): 71 – 88.
- [5] 李铁山, 杨盐生, 洪碧光, 等. 船舶航迹控制鲁棒自适应模糊设计 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 445 – 448.
(LI Tieshan, YANG Yansheng, HONG Biguang, et al. Robust adaptive fuzzy design for ships tracking-keeping control [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 445 – 448.)
- [6] 潘永平, 黄道平, 孙宗海. 欠驱动船舶航迹Backstepping自适应模糊控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(7): 907 – 914.
(PAN Yongping, HUANG Daoping, SUN Zonghai. Backstepping adaptive fuzzy control for track-keeping of underactuated surface vessels [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(7): 907 – 914.)
- [7] DO K D, PAN J. Global robust adaptive path following of underactuated ships [J]. *Automatica*, 2006, 42(10): 1713 – 1722.
- [8] DO K D, PAN J. Global tracking control of underactuated ships with nonzero off-diagonal terms in their system matrices [J]. *Automatica*, 2005, 41(1): 87 – 95.
- [9] POMET J B, PRALY L. Adaptive nonlinear regulation: estimation from the Lyapunov equation [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(6): 729 – 740.
- [10] 刘杨, 郭晨, 沈智鹏, 等. 欠驱动船舶路径跟踪的神经网络稳定自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 169 – 174.
(LIU Yang, GUO Chen, SHEN Zhipeng, et al. Stable adaptive neural network control of path following for underactuated ships [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 169 – 174.)
- [11] FOSSEN T I. *Marine Control Systems* [M]. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002.
- [12] ASHRAFIUON H, MUSKE K. Sliding mode tracking control of surface vessels [C] // *Proceedings of the American Control Conference*, New York: IEEE, 2008: 556 – 561.
- [13] ASHRAFIUON H, MUSKE K, MCNINCH L, et al. Sliding mode tracking control of surface vessels [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(11): 4004 – 4012.

作者简介:

- 朱齐丹 (1965–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为船舶控制、机器人控制、全景视觉等, E-mail: zhuqidan@hrbeu.edu.cn;
- 于瑞亭 (1984–), 男, 博士研究生, 研究方向为智能控制理论及应用, E-mail: ruitingyu@yahoo.com.cn;
- 夏桂华 (1962–), 男, 研究员, 研究方向为船舶控制、机器人控制、全景视觉等, E-mail: xiaguihua@hrbeu.edu.cn;
- 刘志林 (1977–), 男, 讲师, 研究方向为机器感知与智能控制技术、水面航行器预测控制, E-mail: liuzhilin@hrbeu.edu.cn.

(上接第958页)

- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
(HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [7] 雷春林, 吴捷, 陈渊睿, 等. 自抗扰控制在永磁直线电机控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 423 – 428.
(LEI Chunlin, WU Jie, CHEN Yuanrui, et al. Auto-disturbance-rejection controller used in permanent-magnet linear motor control system [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 423 – 428.)
- [8] 林炯康, 郑家伟, 柳明, 等. 基于线性模型跟随的风力发电功率解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 312 – 315.
(LIN Jongkang, ZHENG Jiawei, LIU Ming, et al. Power-decoupling control for wind energy conversion system based on linear model following control [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 312 – 315.)
- [9] 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 Xiaobo, DOU Lihua, DAN 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.)
- [10] CSANK J, GAO Z Q. Uncertainty reduction through active disturbance rejection [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2008: 3689 – 3694.
- [11] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2003: 4989 – 4996.
- [12] ROBERT MIKLOSOVIC, AARON RADKE, GAO Z Q. Discrete implementation and generalization of the extended state observer [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2006: 2209 – 2214.

作者简介:

- 李锦英 (1984–), 男, 博士研究生, 主要研究工作为电机驱动和伺服控制, E-mail: jyliok@gmail.com;
- 付承毓 (1952–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究工作为自动控制、精密测量与跟踪, E-mail: cyfu@ioe.ac.cn;
- 唐涛 (1980–), 男, 博士研究生, 主要研究工作为精密伺服系统控制、信号处理, E-mail: prettang@gmail.com;
- 李志俊 (1984–), 男, 硕士研究生, 主要研究工作为高精度跟瞄技术, E-mail: zhijunhome@sina.com;
- 于伟 (1975–), 男, 讲师, 博士研究生, 现从事光束控制技术研究, E-mail: yuwei2005@yeah.net.