

文章编号 1004-924X(2010)08-1855-07

变结构 PI 控制器的设计及其在光电跟踪系统中的应用

熊 皑, 范永坤, 吴钦章

(中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 为了给光电跟踪系统提供高性能的伺服控制, 基于传统的 PI 控制器原理, 结合变结构的思想, 设计了一种变结构 PI 控制器(VSPI)。介绍了该控制器的工作原理并讨论了设计参数的选择。基于某型号光电跟踪系统, 分别对采用了 VSPI、抗积分饱和 PI 控制器(AWPI)和积分分离 PI 控制器(ISPI)作为位置回路控制器的伺服控制系统进行了仿真和实验。实验结果表明, 采用了 VSPI 的光电跟踪系统基本无超调, 上升时间为 0.378 s, 稳定时间为 0.488 s, 跟踪精度为 1.26"。该系统结构简单, 能实现嵌入式实时控制; 与其他两种控制器相比综合性能更好, 完全满足光电跟踪系统精度高、响应快的要求。

关键词: 光电跟踪系统; 变结构; PI 控制器; 抗积分饱和; 积分分离; 伺服控制

中图分类号: V556.5; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1855

Design of a variable structure PI controller and its application in photoelectronic tracking systems

XIONG Ai, FAN Yong-kun, WU Qin-zhang

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

Abstract: With the aim to provide a high performance servo control for photoelectronic tracking systems, a simple Variable-structure PI controller(VSPI) is presented by combining the traditional PI controller theory and the variable-structure idea, then the principles of the controller are introduced and its design parameter selection is also discussed. Based on the structure of a photoelectronic tracking system, the servo control systems by using VSPI, Anti-windup PI controller(AMPI) and Integral Separation PI controller(ISPI) are simulated, respectively, and the experiments on positioning tracking and equivalent sine tracking are also carried out. The experimental result shows that the system with VSPI controller has no overshoot and its rise time, settling time and tracking precision are 0.378 s, 0.488 s and 1.26", respectively. Compared with the systems using other two algorithms, the system with VSIP can complete real time control and can offer better comprehensive performance, which completely satisfies the requirements of photoelectronic tracking systems for high precision and fast response.

Key words: photoelectronic tracking system; variable-structure; PI controller; anti-windup; integral separation; servo control

收稿日期: 2009-09-24; 修订日期: 2009-12-28.

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目

1 引言

光电跟踪系统是一种对跟踪精度要求非常高的测量设备,同时它对于控制系统的快速性和稳定性要求也非常高,因此,高性能的伺服控制显得尤为重要^[1-2]。在工业领域中,90%的控制部件均采用 PID 控制器,这是因为其具有结构简单,功能清晰和使用方便等特点^[3]。但是, PID 控制器的微分环节对外界扰动特别敏感,因而对于光电跟踪系统而言,省去微分环节的 PID 控制器——PI 控制器显得更为合适。同时,随着模糊控制、神经网络和遗传算法等理论的发展,传统 PI 控制器和这些新思想的结合诞生了相当数量的新型控制器,如模糊 PI 控制器、单神经元 PI 控制器、内模 PI 控制器和滑模变结构 PI 控制器等^[4-7]。尽管这些新型控制器在一定程度上提高了控制系统的性能,但它们也同样存在运算量大、参数调节不方便和结构复杂等缺点,因而在对可靠性要求较高的光电跟踪系统中使用不普遍。伺服控制驱动器由于受物理条件限制,其控制量很容易变得饱和,而 PI 控制器的积分作用加深了这种饱和,抗积分饱和环节的引入在一定程度上缓解了这种问题,但仍然存在超调问题^[8]。PI 控制器积分环节动态分离方法很好地降低了系统的超调,但是动态切换过程中控制器参数的非连续性将导致仪器出现抖振现象,并增加系统的上升时间和稳定时间^[9]。文献[10]和[11]提出一种变结构 PI 算法,该方法无法满足光电跟踪系统的大范围转动需求,同时其控制器参数容易受到等效正弦测试中仪器调头瞬间产生的大误差的影响,并且设计参数较多不易调节。文献[12]中的变结构 PID 控制器主要针对仪器低速情况,没有考虑驱动器物理条件限制所导致的 PID 控制器积分饱和现象会导致仪器在大范围转动中发散。而另外一种变结构 PI 控制器的调节机制太过繁琐^[13],不太适用实际应用。

针对光电跟踪系统需求,结合 PI 控制器和变结构思想,本文设计了一种简单的变结构 PI 控制器算法,不仅结构简单、参数调节方便,同时能满足嵌入式实时控制要求。由于所设计的光电跟

踪系统伺服控制采用的是位置回路、速度回路和电流回路三闭环控制,为了比较方便,其速度回路和电流回路均采用抗积分饱和 PI 控制器。首先对位置回路采用了变结构 PI 控制器、抗积分饱和 PI 控制器和积分分离 PI 控制器的系统分别进行了阶跃响应,大角度转动响应和等效正弦响应仿真,然后在某型号光电跟踪系统实验平台上进行了实验验证。仿真和实验结果表明,在不降低系统跟踪精度的情况下,采用了变结构 PI 控制器作为位置回路控制器的系统在综合性能上有着最小超调量以及最短的上升时间和稳定时间。

2 变结构 PI 控制器

PI 控制器是一种线性控制器,它根据给定值与实际输出值构成控制偏差。PI 调节器的传递函数为: $K_p + \frac{K_i}{s}$,其中, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数。该调节器的模拟输出为 $K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$,式中, $e(t)$ 为调节器的偏差输入,即给定值与反馈值之差。

对于伺服控制系统而言,驱动器受物理条件限制很容易到达极限值,尤其是对于伺服控制运行在大范围运动情况下。当这种情况发生的时候,反馈回路被切断,伺服系统运行在开环情况下,驱动器将忽略被控对象输出而保持在限定值。这将导致仪器进入不稳定状态并最终无法完成预期工作。尤其是对于 PI 控制器,其积分作用的强弱更是直接影响到伺服控制系统的超调量、上升时间和稳定时间。

抗积分饱和的引入则是在驱动器输出进入饱和状态后,主动限制积分作用,加入了抗积分饱和环节的 PI 控制器就是抗积分饱和 PI 控制器(AWPI),如图 1 所示。但值得注意的是,本文采用的抗积分饱和环节和传统相比有细微区别,其误差量只经过了比例作用就直接加在了控制器输出上,而没有进行积分作用,这也是为了简化实际应用。

除了抗积分饱和 PI 控制器能起到抑制饱和作用,还可以通过动态地分离积分作用来达到要

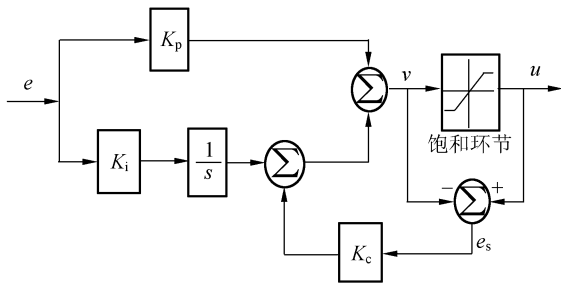


图 1 抗积分饱和 PI 控制器

Fig. 1 Anti-windup PI controller

求, 这就是积分分离 PI 控制器 (ISPI)。图 2 给出了积分分离 PI 控制器结构图, 它通过对输入误差的判断, 在控制器进入饱和阶段断开积分环节, 同时降低比例环节增益, 图 3 给出了比例系数的变化曲线, 其中 $0 < \beta < 1$ 。而当控制器即将推出饱和之前, 恢复比例环节增益并加入积分环节。由于动态切换会导致控制器参数非线性变化, 这就需要反复测试并选择切换阈值和比例环节变化曲线。

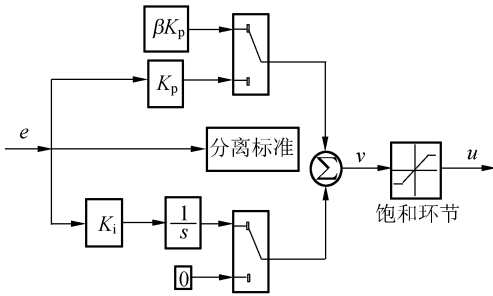


图 2 积分分离 PI 控制器

Fig. 2 Integral separation PI controller

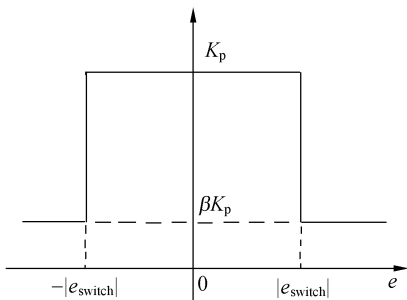


图 3 积分分离 PI 控制器比例变化曲线

Fig. 3 Proportion variation curve of ISPI controller

因此, 能动态改变 PI 控制器的比例和微分作用, 并使得系统具有最小的超调量和最短的上升时间和稳定时间的变结构 PI 控制器应运而生,

如图 4 所示。针对光电跟踪系统对小角度和大范围转动系统的稳态精度、等效正弦测试时候的动态跟踪精度和嵌入式实时控制需求, 设计了一种简单的变结构 PI 控制器 (VSPI), 其变化规则如下:

$$\begin{cases} K_p = (\alpha + (1 - \alpha) * \text{sech}(e * c_p)) K_{0p} \\ K_i = \text{sech}(e * c_i) K_{0i} \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $0 < \alpha < 1$, e 为误差, K_{0p} 和 K_{0i} 分别为比例和微分增益的最大值, c_p 和 c_i 分别为比例和微分增益的变化速率参数。

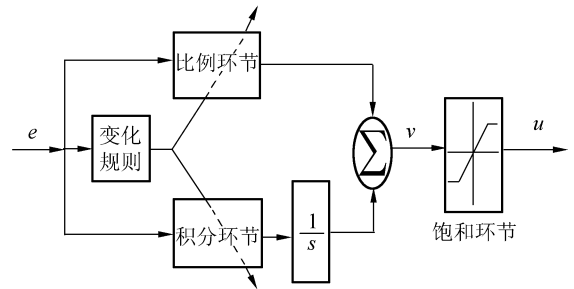


图 4 变结构 PI 控制器

Fig. 4 Variable-structure PI controller

图 5 给出了比例环节 K_p 的变化曲线, 通过调整 c_p 的大小调整 K_p 变化的速率。当误差信号较大时, 控制器很容易进入饱和状态, 此时应减小比例增益, 降低比例作用, 但比例增益应该大于最小值, 以保证整个过程中有一定的增益作用; 当系统在退出饱和的过程中, 为了保证其运行的快速性, 则需要动态地增加比例增益; 当误差信号较小时, 此时系统完全退出饱和状态, 就需要增大比例增益并最后逼近最大值, 从而保证系统稳态精度和无超调。

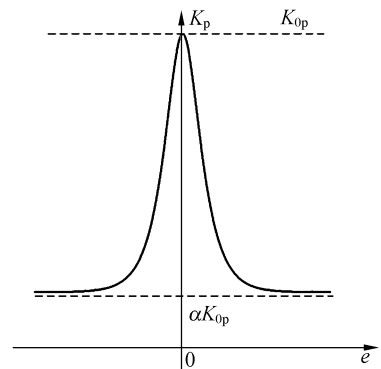


图 5 K_p 变化曲线

Fig. 5 K_p variation curve

图 6 给出了积分环节 K_i 的变化曲线,通过调整 c_i 的大小调整 K_p 变化的速率。当误差信号较大时,控制器处于饱和状态,为防止响应产生振荡,应该减小积分增益,从而有利于减小超调量;而当误差较小时,控制器处于非饱和状态,则希望增大积分增益,以消除系统的稳态误差。

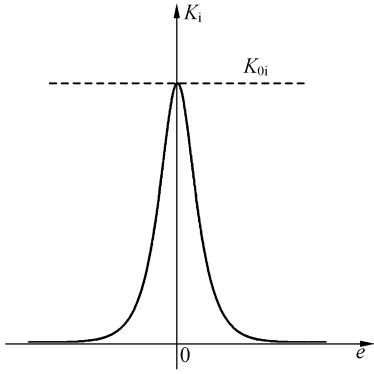


图 6 K_i 变化曲线
Fig. 6 K_i variation curve

3 仿真研究

图 7 给出了某型号光电跟踪系统的伺服控制结构图,它由位置回路、速度回路和电流回路三闭环回路构成,速度前馈的引入能够更好地降低系统跟踪误差。为了对比方便,速度回路和电流回路的控制器均采用 AWPI 控制器,而对位置回路分别采用 VSPI、AWPI 和 ISPI 控制器的光电跟踪系统进行仿真研究。

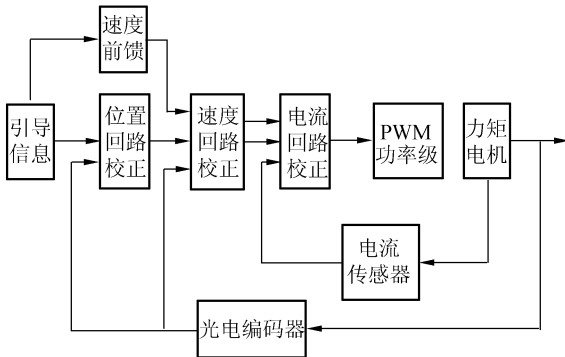


图 7 光电跟踪系统伺服控制结构图

Fig. 7 Diagram of servo control structure of photo-electronic tracking system

表 1 给出了 AWPI 控制器的参数,其中控制器最大最小值则根据实际系统驱动器能力设定。

ISPI 控制器的比例和积分增益和 AWPI 相同,而分离误差阈值为 $e_{\text{threshold}} = 0.04$,当 e 绝对值的误差大于 $e_{\text{threshold}}$ 时, $\beta = 0.5$,积分作用断开;当 e 绝对值的误差小于 $e_{\text{threshold}}$ 时,比例环节全部作用并加上积分作用。VSPI 的控制器参数设为 $\alpha = 0.5$ 、 $c_p = 10$ 、 $c_i = 40$ 、 $K_{op} = 12$ 和 $K_{oi} = 40$ 。

表 1 AWPI 控制器参数

Tab. 1 Parameters of AWPI controller

控制回路	K_p	K_i	K_c	OutMax	OutMin
电流回路	20	5 000	0.125	75	-75
速度回路	10	100	0.1	15	-15
位置回路	12	40	0.167	30	-30

3.1 定点响应仿真

图 8 给出了单位阶跃响应仿真图。表 2 列出了系统分别采用了 3 种不同位置控制器的系统性能指标,从中可以看出 VSPI 算法具有最小的超调量,并比 ISPI 有更短的上升时间,以及比 AWPI 有更快的稳定性能。

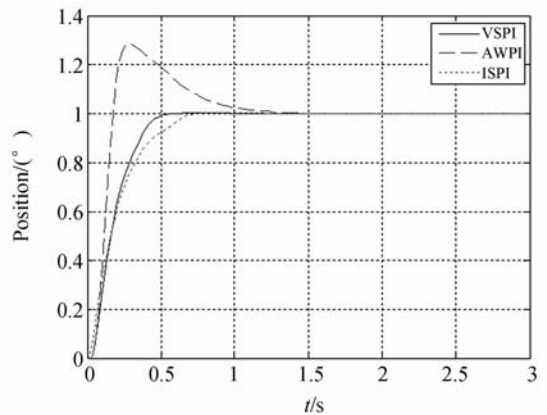


图 8 单位阶跃响应仿真图

Fig. 8 Diagram of step response simulation

表 2 单位阶跃响应仿真系统性能

Tab. 2 Performance of step response simulation

控制器	上升时间/s	超调量/%	稳定时间/s
VSPI	0.36	无	0.44
AWPI	0.16	28	0.95
ISPI	0.45	1	0.61

光电跟踪系统转台垂直轴的最大转动角为 360° ,如果采用最短路径方法,其最大转动范围为

180°, 图 9 给出了 180° 定点响应图。从图 9 中可以看出, VSPI 在上升时间和稳定时间上比其他两种算法具有明显优势。

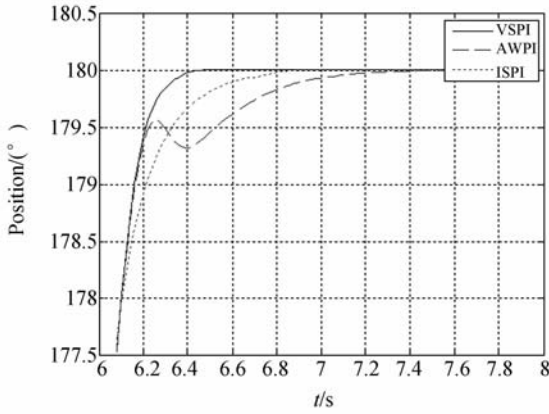


图 9 大范围转动响应仿真图

Fig. 9 Diagram of large-range setpoint response simulation

3.2 等效正弦响应仿真

为了测试光电跟踪系统的动态跟踪精度, 通过等效正弦信号 ($r(t) = 100\sin(0.2t)$) 对系统进行测试, 图 10 给出了等效正弦响应的系统位置误差图。从图 10 中可以看出, 当系统进入稳定跟踪以后, 跟踪精度没有太大差异, 这主要是因为进入稳态跟踪以后, 驱动器不会出现饱和现象, 因而

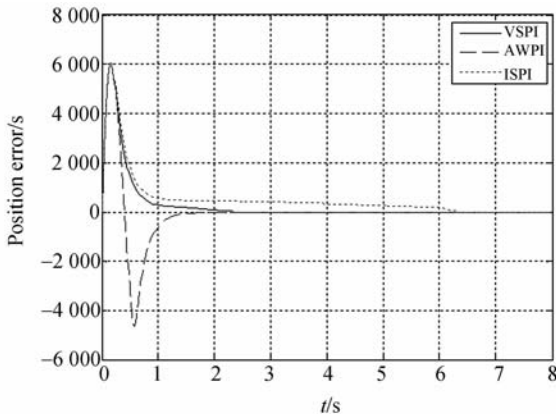


图 10 等效正弦响应仿真位置误差图

Fig. 10 Diagram of position error of sine response simulation

3 种算法将基本变得一致。但是采用 VSPI 的系统能保证系统最快进入到稳定跟踪范围内, 保证跟踪目标最快进入视场并一直锁定。

4 实验与结果

为了验证仿真结果, 在某型号光电跟踪系统垂直轴上进行实验。伺服控制系统选用的是为成都精密电机厂生产的 J430LYX09 型有刷直流电机, 其指标参数为力矩常数 $K_m = 23 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, 电枢电感 $L = 0.0154 \text{ H}$, 电枢电阻 $R = 2.46 \Omega$, 反电动势常数 $K_b = 47.7 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$, 整个伺服系统的转动惯量 $J = 150 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。电子平台为中国科学院光电技术研究所设计的基于 CPCI 架构的多路复合跟踪系统^[14], 选用 TI 公司的 TMS320F2812 芯片运行伺服控制算法, 而抗积分饱和控制器算法则直接使用的 TI 公司 DMC 库里面的 pid_reg3 算法。3 种算法的参数和仿真参数完全一致。

4.1 定点响应实验

图 11 给出了系统单位阶跃响应图, 表 3 列出了分别采用 3 种不同位置回路控制器算法的系统性能, 其结果和仿真基本一致。图 12 给出了大范围转动响应图, VSPI 算法的快速性优于其他两种算法。

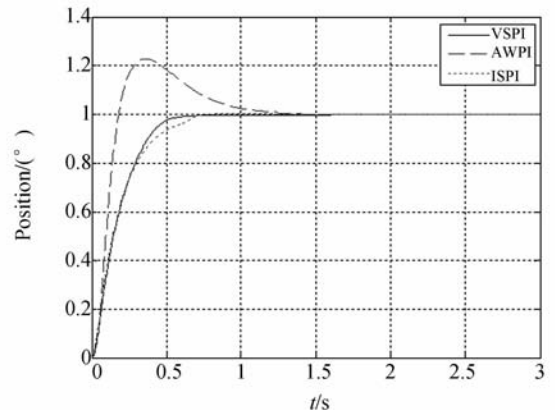


图 11 单位阶跃响应实验

Fig. 11 Diagram of step response experiment

表 3 单位阶跃响应实验系统性能

Tab. 3 Performance of step response experiment

控制器	上升时间/s	超调量/%	稳定时间/s
VSPI	0.378	无	0.488
AWPI	0.158	22.7	0.956
ISPI	0.425	0.3	0.635

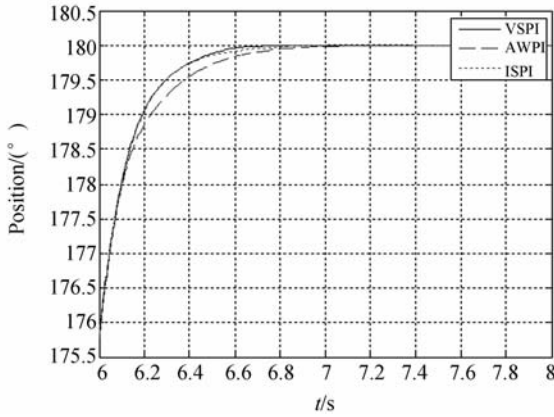


图 12 大范围转动响应实验图

Fig. 12 Diagram of large-range setpoint response experiment

4.2 等效正弦响应实验

图 13 给出了等效正弦响应实验图, VSPI 的进入稳态跟踪的效果明显好于另外两种算法, 并具有角秒的跟踪精度, 完全满足实际需求。

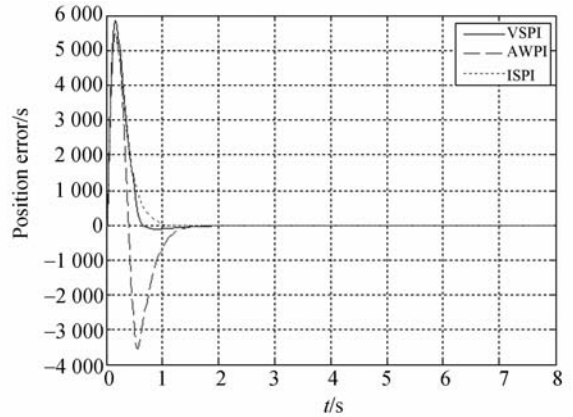


图 13 等效正弦响应实验位置误差图

Fig. 13 Diagram of position error of sine response experiment

5 结 论

本文根据光电跟踪系统跟踪精度高, 系统响应快的要求, 结合传统 PI 控制器原理和变结构的思想, 提出了一种简单的变结构 PI 控制器(VS-PI)算法, 并介绍了其工作原理。然后基于光电跟踪系统伺服控制结构对 VSPI、AWPI 和 ISPI 3 种算法分别运用在伺服控制的位置回路进行了仿真。最后在某型号光电跟踪系统垂直轴进行了定点跟踪和等效正弦跟踪实验。仿真和实验结果表明: 采用 VSPI 控制器的光电跟踪系统基本无超调, 上升时间为 0.378 s, 稳定时间缩短了 0.488 s, 跟踪精度为角秒, 完全满足实际系统要求。目前, 该算法已成功运用到实际光电跟踪系统中, 效果良好。

参考文献:

[1] DOWNEY G A. Electro-optical tracking considerations II[J]. *SPIE Acquisition, Tracking and Pointing Xvii*, 2003, 5082:139-153.

[2] 张智永, 范大鹏, 范世驹. 光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(4):681-688. ZHANG ZH Y, FAN D P, FAN SH X. Servo system design for E-O stabilization and tracking devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):681-688. (in Chinese)

[3] LI Y, ANG K, CHONG G C Y. Patents, software and hardware for PID control - An overview and a-

nalysis of the current art[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26(1):42-54.

[4] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996. LI SH Y. *Fuzzy Control · Neurocontrol and Intelligent Cybernetics* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)

[5] ASTROM K J, WITTENMARK B. *Adaptive Control*[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[6] SHAHNAZI R, SHANECHI H M, PARIZ N. Position control of induction and DC servomotors: a novel adaptive fuzzy pi sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008,

23(1):138-147.

- [7] 李洪文. 基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 327-332.

LI H W. Servo system of large telescope based on internal model PID control method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 327-332. (in Chinese)

- [8] ASTROM K J, HAGGLUND T. *Advanced PID Control*[M]. ISA, 2005.

- [9] 陈龙, 马伯渊, 张学峰. 智能 PID 控制在电石炉电极调节系统中的应用[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1544-1547.

CHEN L, MA B Y, ZHANG X F. Application of intelligent PID controller in CaC_2 furnace electrode adjustment system[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(7): 1544-1547. (in Chinese)

- [10] 汪达兴, 杜福嘉. 大型天文望远镜摩擦传动系统低速特性的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 274-278.

WANG D X, DU F J. Ultra-low speed research on friction drive for astronomical telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 274-278. (in Chinese)

- [11] MANCINI D, CASCONI E, SCHIPANI P. Telescope control system stability study using a variable structure controller[J]. *SPIE*, 1998, 3351: 331-341.

- [12] MANCINI D, BRESCIA M, CASCONI E, *et al.*. A variable structure control law for telescope pointing and tracking[J]. *SPIE*, 1997, 3086: 72-84.

- [13] 郭宏, 蔚永强. 基于变机构 PID 控制的直接驱动阀伺服控制系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(11): 58-62.

GUO H, YU Y Q. DDV servocontrol system based on variable-structure PID control [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(11): 58-62. (in Chinese)

- [14] 熊皓, 范永坤, 吴钦章. 嵌入式虚拟动态信号分析仪的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1026-1032.

XIONG A, FAN Y K, WU Q ZH. Design of embedded virtual dynamical signal analyzer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1026-1032. (in Chinese)

作者简介:



熊 皓(1980—),男,重庆忠县人,博士,助理研究员,2002年、2005年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,2008年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事光电跟踪系统伺服控制、自适应控制等方面的研究。E-mail: xiongai@hotmail.com



范永坤(1970—),男,辽宁锦州人,副研究员,博士研究生,1993年于西安公路学院获得学士学位,1999年于西安公路交通大学获得硕士学位,主要从事光电探测技术的研究。E-mail: fangle007@yahoo.com.cn



吴钦章(1955—),男,山东新泰人,研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪测量系统的自动识别、控制技术及软件工程研究。