

文章编号 1004-924X(2010)07-1613-07

# 变结构 PID 在大型望远镜速度控制中的应用

张 斌<sup>1,2</sup>, 李洪文<sup>1</sup>, 郭立红<sup>1</sup>, 孟浩然<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 阴玉梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了满足大型望远镜对于速度控制响应快、超调量小、稳态精度高、低速运行平稳的要求, 在分析经典 PID 控制算法的基础上, 提出了一种变结构 PID 控制器。通过构造以控制误差为自变量的比例增益、积分增益、积分变增益和微分增益等函数, 变结构 PID 能够根据瞬时误差实时改变其结构和参数。针对某大型望远镜的传递函数模型, 仿真验证了变结构 PID 的作用, 并比较了经典 PID 与变结构 PID 的控制性能。实验结果表明, 该望远镜能够以最大加速度达到期望速度, 且无速度超调, 以  $20(^{\circ})/s$  运行时的最大稳态误差为  $0.0167(^{\circ})/s$ , 以  $10(^{\prime\prime})/s$  运行时的最大稳态误差为  $0.7(^{\prime\prime})/s$ 。仿真和实验结果均证明: 基于变结构 PID 控制器的速度控制系统能够满足大型望远镜的要求。

**关键词:** 大型望远镜; 速度控制; 变结构 PID 控制器; 控制误差

**中图分类号:** TH751; TP273.5      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1613

## Application of variable structure PID in velocity control for large telescope

ZHANG Bin<sup>1,2</sup>, LI Hong-wen<sup>1</sup>, GUO Li-hong<sup>1</sup>, MENG Hao-ran<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, Yin Yu-mei<sup>1</sup>

( 1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** In order to meet the requirements of velocity control systems of large telescopes for the fast response, small overshoot, high steady-state accuracy and smooth running, a Variable Structure PID (VSPID) controller was proposed based on analyzing of classical PID control algorithm. By constructing the functions of control errors, such as proportional gain, integral gain, integral variable gain and differential gain, the VSPID was able to modify its structure and parameters according to the instantaneous error. Based on the transfer function model of certain large telescope, the function of VSPID was verified and the performance of classical PID was compared with that of the VSPID by simulation. A velocity control experiment was performed on this telescope, which shows that the telescope can reach the desired velocity with maximum acceleration and without overshoot. The steady-state error is less than  $0.0167(^{\circ})/s$  at  $20(^{\circ})/s$ , and the maximum steady-state error is  $0.7(^{\prime\prime})/s$  at  $10(^{\prime\prime})/s$ . Simulation and experimental results prove that the velocity control system based on VSPID can meet the

**收稿日期:** 2009-11-09; **修订日期:** 2009-11-12.

**基金项目:** 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目; 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA8080202)

requirements of large telescopes.

**Key words:** large telescope; velocity control; Variable Structure PID(VSPID) controller; control error

## 1 引言

大型光电望远镜是集光、机、电于一体的综合系统,其主要作用是精确地跟踪目标并测量目标的位置和其它参数。伺服系统是望远镜的重要组成部分,它的性能会直接影响望远镜的跟踪、测量能力。大型望远镜的工作模式包括自动跟踪、位置引导、速度引导等,其中速度引导模式非常重要,在该模式下,要求速度控制响应快、超调量小、稳态精度高、低速运行平稳。

大型望远镜是大惯性系统,当其速度给定值或速度误差在较大范围内变化时,速度控制器很容易饱和,由此引起速度响应变差,出现较大的速度超调<sup>[1]</sup>。同时,作用在望远镜转轴上的摩擦力矩会影响望远镜的跟踪精度,还可能引起转轴的低速爬行<sup>[2-3]</sup>。

PID 控制是迄今为止最通用的控制方法<sup>[4]</sup>,其具有结构简单、可靠性高、易于实现等特点。理论分析和实际运行经验均表明,将 PID 用于大多数控制对象都能够得到比较满意的结果。但是,经典 PID 控制器的参数在整个控制过程中是固定的,对于大型望远镜这种存在大惯性、非线性等特性的控制对象,应用经典 PID 实施控制难以达到很好的控制效果。针对经典 PID 控制器存在的问题,近年来研究人员提出了各种非线性 PID 控制器以提高控制器的性能<sup>[5-9]</sup>。为了满足大型望远镜对速度控制的要求,本文提出一种变结构 PID 控制器,它能根据系统的瞬时误差实时改变控制器的结构和参数,从而在提高响应速度、减小超调量的同时,提高稳态精度和低速性能。

## 2 变结构 PID 控制算法

### 2.1 经典 PID 控制器结构的分析

经典 PID 控制器的控制规律在时域中可表示为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 为控制器的输出, $e(t)$ 为误差, $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为比例、积分、微分增益参数。从式(1)可以看出,在经典 PID 控制器内部有两层内容:(1)产生控制量  $u(t)$  的基本要素:误差  $e(t)$ 、其积分  $\int e(t) dt$  和微分  $\frac{de(t)}{dt}$ ; (2)由  $e(t)$ 、 $\int e(t) dt$ 、 $\frac{de(t)}{dt}$  产生控制量  $u(t)$  的组合形式——线性组合,即参数一经整定,在整个控制过程中就一直保持不变。理论分析和大量的实践表明,这种控制器很难同时满足跟踪参考输入和抑制扰动的要求,而且常引起快速性和超调量、静态性能和动态性能之间的矛盾<sup>[8-9]</sup>。

### 2.2 变结构 PID 控制器

考察 PID 控制器各参数在控制过程中的作用可以发现:(1)比例作用  $K_p$  使得控制器的输入与输出成比例关系,一有误差立即产生控制作用,当误差为 0 时控制作用也为 0。因此,比例控制是基于误差进行调节的,是有差调节,为了尽量减小误差同时也为了加快响应速度、缩短调节时间,就需要增大  $K_p$ ,但是  $K_p$  不能任意增大,否则会引起系统的不稳定。(2)积分作用  $K_i$  是为了消除稳态误差而引入的,只要系统存在误差,积分控制作用就不断积累,然而  $K_i$  的引入使得响应的快速性下降,稳定性变差,尤其在大误差阶段的积分往往使得系统产生积分饱和现象,导致响应出现过大的超调,调节时间变长。(3)微分作用  $K_d$  的引入使控制器能够根据误差变化的趋势作出反应,加快了对误差变化的反应速度,能够有效地减小超调,缩小最大动态误差,但同时使系统响应速度变慢,且容易受到高频干扰的影响。

依据上述分析,如果跳出 2.1 节所述的“线性组合”框架,根据误差的变化实时改变 PID 控制器的结构和参数,能够获得比经典 PID 更好的控制性能。

#### 2.2.1 比例增益

比例增益  $K_p$  在速度误差  $e$  较小(稳态值附近)时取较小值,在误差较大时取较大值,并且  $K_p$  的变化趋势与误差的变化趋势是相同的,这样既可提高响应速度,又可防止产生过大的超调量,同

时保证有很好的稳定性。按上述变化规律,构造如下函数:

$$K_p(e) = a_p + b_p(1 - \exp(-c_p |e|)), \quad (2)$$

式中: $a_p, b_p, c_p$  为正实常数。当误差  $e \rightarrow \pm \infty$  时,  $K_p$  取最大值为  $a_p + b_p$ ; 当  $e = 0$  时,  $K_p$  取最小值为  $a_p$ ;  $b_p$  是  $K_p$  的变化区间, 调整  $c_p$  的大小可调整  $K_p$  变化的速率。图 1 为  $K_p$  随误差  $e$  的变化曲线。

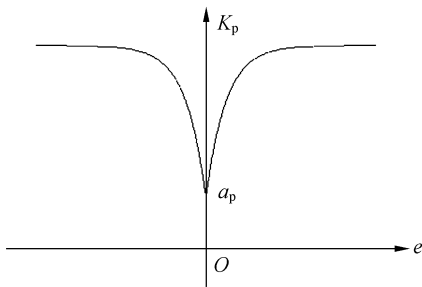


图 1  $K_p$  变化曲线

Fig. 1 Varying curve of  $K_p$

### 2.2.2 积分增益

积分增益由 2 个因子组成: 积分增益函数  $K_i$  和积分变增益函数  $K_{i0}$ , 二者都是速度误差的函数。  $K_{i0}$  在小误差范围内将  $K_i$  放大, 用于加强积分作用。

#### (1) 积分增益函数 $K_i$

当误差较大时, 希望  $K_i$  较小, 以防止产生振荡和积分饱和, 有利于减小超调量、缩短调节时间; 随着误差的减小, 希望  $K_i$  逐渐增大, 以消除稳态误差。据此, 构造出积分增益函数:

$$K_i(e) = a_i \exp(-c_i |e|), \quad (3)$$

式中: $a_i, c_i$  为正实数,  $K_i$  的取值范围为  $[0, a_i]$ ,  $c_i$  决定了  $K_i$  的变化速率。图 2 为  $K_i$  随误差  $e$  的变化曲线。

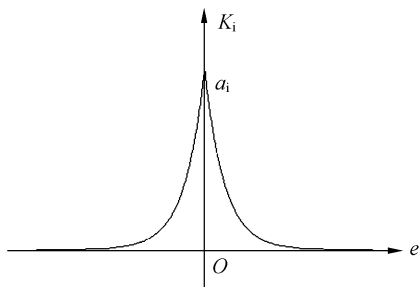


图 2  $K_i$  变化曲线

Fig. 2 Varying curve of  $K_i$

#### (2) 积分变增益函数 $K_{i0}$

为了减小摩擦力矩对低速性能的影响, 通常采用的方法有两种: 一是提高伺服刚度, 设计高增益的二型或三型系统, 提高系统对不确定性的鲁棒性, 但其影响系统的稳定性<sup>[2]</sup>; 另一种方法是将摩擦力矩的数学模型测试出来用于系统的补偿, 但摩擦是一种复杂的系统问题, 一般的数学模型不能完全反映出摩擦力矩的特性, 所以这种补偿效果不好<sup>[3,10]</sup>。文献[11]提出了一种变增益结构的控制方法, 该方法根据系统输入信号, 设定了一个死区, 在信号小于或等于死区信号时, 系统的前向通道放大倍数增加一倍。通过该方法确实能提高伺服系统低速性能, 但其放大倍数的变化是有级的、非平滑的, 因此会导致系统运动不平滑。文献[12]将速度回路的前向通道放大倍数设计为一个以系统输入速度为自变量的函数, 随着输入速度的变化而自动调整, 在提高低速性能的同时, 保证了系统运动的平滑, 但这种方式主要用于减小速度换向时的位置误差, 单独用于速度控制时, 易引起速度跳变。

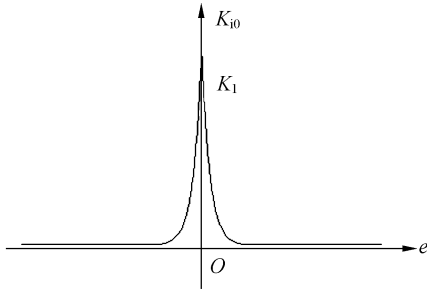
基于上述分析, 提出变增益函数  $K_{i0}$ , 用于小误差范围内加强积分作用。  $K_{i0}$  是速度误差  $e$  的函数, 如式(4)所示, 当  $|e| \geq e_0$  时,  $K_{i0}$  恒为 1, 不影响控制器的积分作用; 而当  $|e| < e_0$  时,  $K_{i0}$  将积分增益放大  $K_{i0}$  倍, 加强了积分作用。在设计时,  $e_0$  的值一般在  $0.1(^{\circ})/s$  和  $0.5(^{\circ})/s$  之间, 而系统低速运行时其速度误差必然小于  $e_0$ , 因此变增益函数的作用范围涵盖了低速运行阶段。积分控制的主要作用是消除稳态误差,  $K_{i0}$  在小误差范围内加强了积分作用, 能够提高系统的抗干扰能力, 尤其是低速运行时能够减小摩擦等干扰因素的影响, 提高了系统的低速性能。

$$K_{i0}(e) = \begin{cases} K_1 \exp(-K_0 |e|) & |e| \leq e_0 \\ 1 & |e| > e_0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $K_0, K_1, e_0$  为正实数, 由式(4)得到  $K_1, K_0$  和  $e_0$  之间的约束关系为:

$$K_1 \exp(-K_0 e_0) = 1. \quad (5)$$

为了保证  $K_{i0}$  是连续平滑变化的,  $K_1, K_0$  和  $e_0$  必须满足式(5)。  $K_{i0}$  随误差  $e$  的变化曲线如图 3 所示。

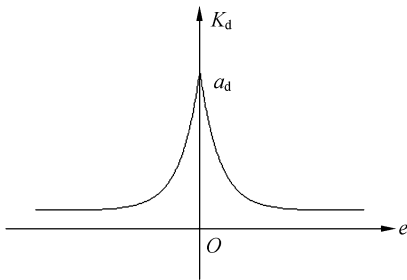
图 3  $K_{i0}$  的变化曲线Fig. 3 Varying curve of  $K_{i0}$ 

### 2.2.3 微分增益

当误差较小时微分增益取较大值,而误差较大时微分增益取较小值,这样有利于加快对小误差的反应速度,提高控制器对于干扰的灵敏度,出现干扰时能够及时进行调整。根据  $K_d$  的变化要求,构造了式(6)所示的函数。

$$K_d(e) = a_d - b_d(1 - \exp(-c_d |e|)), \quad (6)$$

式中,  $a_d$ 、 $b_d$ 、 $c_d$  为正实数,且  $a_d > b_d$ 。 $K_d$  随误差  $e$  的变化曲线如图 4 所示。

图 4  $K_d$  变化曲线Fig. 4 Varying curve of  $K_d$ 

### 2.2.4 变结构 PID 控制器

依据前面分析,由式(2)、(3)、(4)、(6)得到的变结构 PID 控制器,如式(7)所示。

$$u(t, e) = K_p(e)e(t) + K_{i0}(e)K_i(e) \int e(t) dt + K_d(e) \frac{de(t)}{dt}. \quad (7)$$

实际工程中,在 PID 调节方法中使用较多的是 PI 控制<sup>[13]</sup>,据此本文也只使用 PI 控制器,最终设计的变结构 PI 控制器的形式为:

$$u(t, e) = K_p(e)e(t) + K_{i0}(e)K_i(e) \int e(t) dt, \quad (8)$$

即:

$$u(t, e) = [a_p + b_p(1 - \exp(-c_p |e|))]e(t) + K_{i0}(e)[a_i \exp(-c_i |e|)] \int e(t) dt. \quad (9)$$

如果  $b_p$  和  $c_i$  恒为零、 $K_{i0}$  恒为 1,则式(9)退化为经典 PI 控制器,如式(10)所示:

$$u(t, e) = a_p e(t) + a_i \int e(t) dt. \quad (10)$$

变结构 PID 控制器的结构和参数是根据误差实时改变的,因此具有较强的鲁棒性,同时降低了对系统模型精确性的要求。

## 3 仿真分析

采用直流力矩电机直接驱动的望远镜,其输出速度与输入电压之间的传递函数模型为:

$$G_p(s) = \frac{K}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)}, \quad (11)$$

其中:  $T_m$  是机械时间常数,  $T_e$  是电气时间常数,  $K$  是增益<sup>[1]</sup>。

采用频率特性法<sup>[14]</sup>辨识出某大型望远镜俯仰轴的传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{0.25}{(2s + 1)(0.006s + 1)}. \quad (12)$$

针对该模型,设计了变结构 PI 控制器,如式(13)、(14)所示(误差单位:  $(^\circ)/s$ )。

$$u(t, e) = [640 + 640(1 - \exp(-18 |e|))]e(t) + K_{i0}(e)[320 \exp(-18 |e|)] \int e(t) dt, \quad (13)$$

$$K_{i0}(e) = \begin{cases} 148.413 \cdot 2 \exp(-50 |e|) & |e| \leq 0.1 \\ 1 & |e| > 0.1 \end{cases}. \quad (14)$$

针对式(12)所示传递函数,采用式(10)、式(13)和(14)所示控制器进行了仿真,得到图 5、图 6 所示曲线。图 5 为速度阶跃曲线,可以看出,与经典 PI 相比,采用变结构 PI 的阶跃响应无超调、调节时间短。图 6 是速度输入为  $r = \sin(0.4t)$  ( $^\circ/s$ ) 时的误差曲线,其中曲线 1 是未加入  $K_{i0}$  时的误差,曲线 2 是加入  $K_{i0}$  时的误差。图 6 表明,  $K_{i0}$  能够减小跟踪误差,提高低速性能。

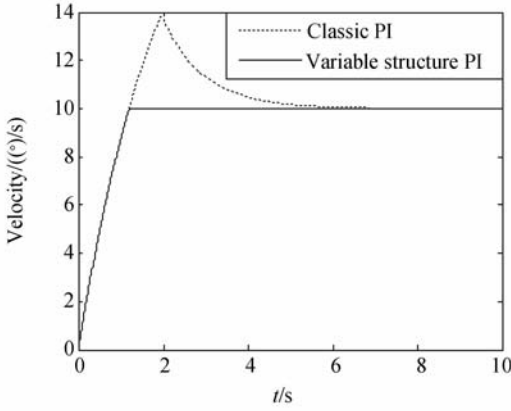


图 5 基于经典 PI 和变结构 PI 的速度阶跃响应

Fig.5 Velocity step response base on classic PI and variable structure PI

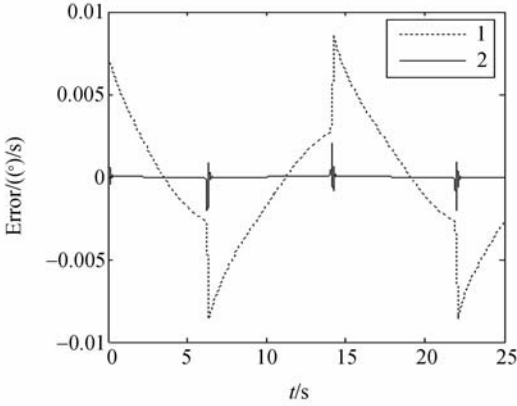


图 6 速度误差曲线

Fig.6 Curve of velocity error

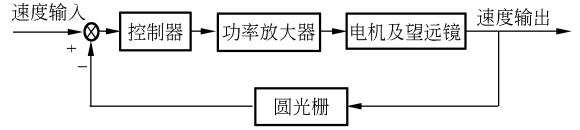


图 7 速度控制系统结构图

Fig.7 Structure of velocity control system

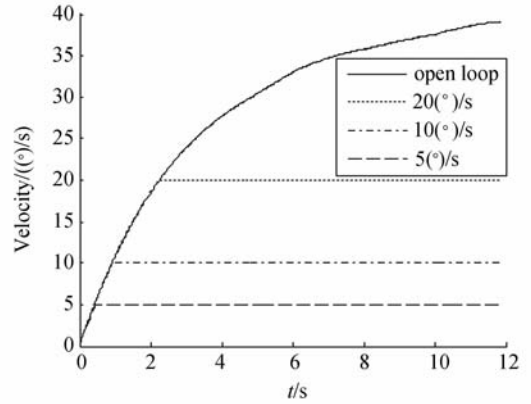


图 8 速度阶跃响应

Fig.8 Velocity step response

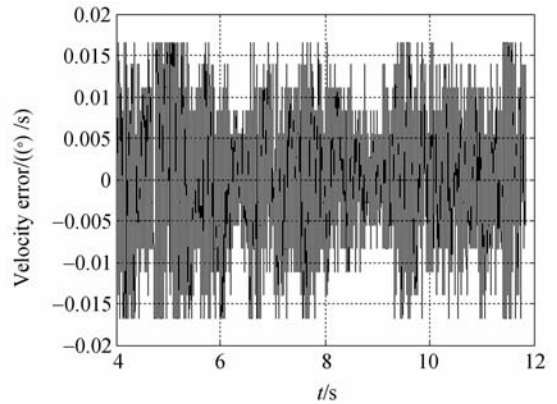


图 9 20°/s 时速度误差

Fig.9 Velocity error at 20°/s

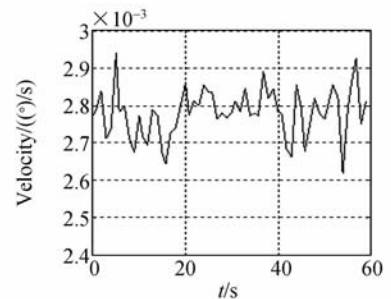


图 10 低速运行曲线

Fig.10 Low velocity curve

### 4 实验

应用变结构 PI 在某大型望远镜俯仰轴上进行了速度控制实验。该望远镜俯仰轴由力矩电机直接驱动,采用圆光栅差分获得速度反馈,以基于 PC104 总线的嵌入式计算机作为控制器,通过 PWM 功率放大器驱动电机,其速度控制系统结构如图 7 所示。系统的校正频率为 500 Hz,圆光栅的角分辨率为 0.02"、速度分辨率为 10(")/s。当望远镜低速运行时,以 1 s 采样周期计算速度误差。实验获得的数据曲线如图 8、9、10、11 所示。

图 8 为速度阶跃响应曲线,其中开环速度曲线是在最大输入电压下测得的,望远镜运行时以最大加速度加速,直到达到最大稳定速度。图 8

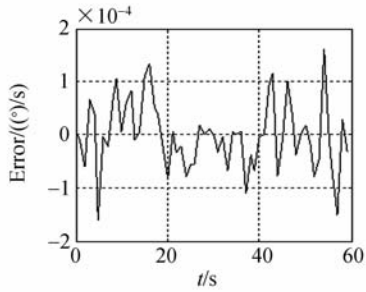


图 11 低速运行时速度误差

Fig. 11 Velocity error at low velocity

表明,采用变结构 PI 的速度控制响应快,无超调量,调节时间短。图 9 为望远镜以  $20(^{\circ})/s$  运行时的稳态误差,其最大稳态误差为  $0.0167(^{\circ})/s$ 。图 10、11 分别为以  $10(^{\circ})/s$  运行时的速度曲线和

误差曲线,其最大稳态误差为  $0.7(^{\circ})/s$ 。

## 5 结 论

本文提出了一种变结构 PID 控制器,并将其应用于大型望远镜的速度控制。该控制器能够根据速度误差实时改变其结构和参数,具有较强的鲁棒性,同时降低了对系统模型精确性的要求。仿真和实验结果表明:采用变结构 PID 控制器,大型望远镜的速度控制响应快、无超调,调节时间短,稳态精度高,低速运行平稳,以  $20(^{\circ})/s$  运行时最大稳态误差为  $0.0167(^{\circ})/s$ ,以  $10(^{\circ})/s$  运行时最大稳态误差为  $0.7(^{\circ})/s$ 。

## 参考文献:

- [1] 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)
- [2] ARMSTRONG B, AMIN B. PID control in the presence of static friction: a comparison of algebraic and describing function analysis[J]. *Automatica*, 1996, 32(5): 679-692.
- [3] ARMSTRONG B, DUPONT P, CANUDAS DE W C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. *Automatica*, 1994, 30(7): 1083-1138.
- [4] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.  
WANG W, ZHANG J T, CHAI T Y. A survey of advanced PID parameter tuning methods[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(3): 347-355. (in Chinese)
- [5] 肖永利, 张琛. 位置伺服系统的一类非线性 PID 调节器设计[J]. 电气自动化, 2000(1): 20-22.  
XIAO Y L, ZHANG CH. A nonlinear PID controller design for position servo system[J]. *Electric Automation*, 2000(1): 20-22. (in Chinese)
- [6] 钟庆昌, 谢剑英, 李辉. 变参数 PID 控制器[J]. 信息与控制, 1999, 28(4): 273-277.  
ZHONG Q CH, XIE J Y, LI H. PID controller with variable arguments[J]. *Information and Control*, 1999, 28(4): 273-277. (in Chinese)
- [7] 任永平, 李圣怡. 一种非线性 PID 控制器及其参数分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(4): 486-489.  
REN Y P, LI SH Y. Nonlinear PID controller and its parameter analysis[J]. *Information and Control*, 2005, 34(4): 486-489. (in Chinese)
- [8] 韩京清. 非线性 PID 控制器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487-490.  
HAN J Q. Nonlinear PID controller[J]. *Acta Autom Sinica*, 1994, 20(4): 487-490. (in Chinese)
- [9] 苏玉鑫. 一种新型非线性 PID 控制器[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 126-128.  
SU Y X. A new class of nonlinear PID controller [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(1): 126-128. (in Chinese)
- [10] 杨元恺, 朗需英. 精密转台中摩擦力矩的动态补偿[J]. 自动化学报, 1983, 9(4): 248-252.  
YANG Y K, LANG X Y. Dynamic compensation for friction moment in accurate test table[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1983, 9(4): 248-252. (in Chinese)
- [11] 张卯瑞, 梅晓榕, 庄显义. 高精度液压伺服系统改善低速性能的几项措施[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(4): 66-69.  
ZHANG M R, MEI X R, ZHUANG X Y. Several methods of improving performance of hydraulic servo system at low speed[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1998, 30(4): 66-69. (in Chinese)
- [12] 谢慕君, 王志乾, 李清军, 等. 一种提高转台伺服系

统精度的方法[J]. 光电工程, 2004, 31(7):12-14.

XIE M J, WANG ZH Q, LI Q J, *et al.*. A method of improving tracking accuracy of turntable servo system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(7):12-14. (in Chinese)

- [13] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

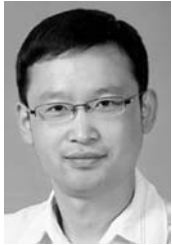
HU SH S. *Automatic Control Theory*[M]. Bei-

jing: Science Press, 2001. (in Chinese)

- [14] 王帅, 陈涛, 李洪文, 等. 光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1):78-84.

WANG SH, CHEN T, LI H W, *et al.*. Frequency characteristic test and model identification for O-E tracking servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):78-84. (in Chinese)

#### 作者简介:



张 斌(1981—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 2004 年于大连理工大学获得学士学位, 主要从事望远镜精密跟踪技术的研究。E-mail: zhbdu@ yahoo. com. cn



孟浩然(1980—), 男, 黑龙江五常人, 助理研究员, 2002 年于吉林大学获得学士学位, 2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光电设备的精密伺服控制、电子学设计工作。e-mail: ranokok@gmail. com



王建立(1971—), 男, 山东曲阜人, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp. ac. cn



阴玉梅(1960—), 女, 吉林长春人, 副研究员, 主要从事电子学装配、调试工艺的研究。E-mail: yinyumei@ciomp. ac. cn

#### 通讯作者:



李洪文(1970—), 男, 四川乐至人, 研究员, 主要从事伺服系统及自动化方面的研究。E-mail: lihongwen1970@yahoo. com

#### 导师简介:



郭立红(1964—), 女, 吉林舒兰人, 研究员, 博士生导师, 1986 年于长春理工大学获得学士学位, 1998 年、2003 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位, 主要从事计算机应用、天文惯导和星体自动化标校等方面的研究。E-mail: guolh@ciomp. ac. cn