

文章编号:1004-4213(2011)12-1776-4

光学消像旋高精度位置控制系统的算法与实现

郭新胜¹,周仁魁²,谭名栋¹,雷海丽¹,冯婕¹

(1 中国兵器第二〇五研究所,西安 710065)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

摘 要:为了解决周视光电观瞄设备中光学消像旋齿轮传动所带来的误差大、间隙难以控制等不足,本文提出去掉光学消像旋的机械传动,将其变为无机传动的位置控制系统.结合现代控制理论,在分析了光学消像旋位置控制系统中被控对象模型的基础上,设计以比例-积分-微分控制器为主,非线性控制为辅的融合控制算法.以单片机 C8051 作为控制核心,编码器作为位置传感器,光电转台方位角度作为控制信号,组成位置控制系统并进行调试、试验测试,测试结果表明其实现的光学消像旋性能优于含有机传动的光学消像旋性能,最终实现光学消像旋高精度位置控制.

关键词:光学消像旋;位置控制;PID 控制;非线性控制

中图分类号:TG502.33;TP273+.3 **文献标识码:**A

doi:10.3788/gzxb20114012.1776

0 引言

光学消像旋的目的是为了消除潜望观瞄设备在跟踪瞄准时图像的旋转.目前,消像旋主要采用三种方式:光学消像旋、机械消像旋、电子消像旋.它们的优缺点决定其应用场合不同,完成消像旋所采取的方式原理也不同^[1].从目前的应用现状来看潜望式光学设备,采用较多的还是机械消像旋和光学消像旋,对于 CCD、热像等图像采用电子消像旋,对于其实现方式、算法等有很多专家^[1-2]进行了讨论,提出了数字消像旋实现途径.

通常周视潜望观瞄设备,其光学消像旋是依靠一系列齿轮组的传递,将方位回转平台的转动角度传递给消像旋的别汉棱镜组,并带动别汉棱镜组以二倍的关系运动,完成消像旋的功能^[2].由于齿轮传动的间隙和传动效率,影响其传递精度,调节减小齿轮组的间隙,易引起齿轮转动不平滑,增大了摩擦力矩,对转台的稳定反过来造成干扰,从而影响到整个系统的稳像精度.为了克服上述不足,取消掉原有的机械传动,设计了光学消像旋的位置控制系统,实现了无机传动的消像旋位置系统.通过分析其被控对象,提出了一种融合控制算法,实现了高精度的位置控制.光学消像旋系统具有精度高、可靠、对伺服影响小等优点.

1 建立光学消像旋的控制模型

1.1 结构描述

基金项目:总装备部装计(No. 20091001)和装陆(No. 2009454)资助

第一作者:郭新胜(1972-),男,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为反射镜稳定与控制技术. Email:8guo0xs@163.com

收稿日期:2011-04-15;修回日期:2011-09-07

原有光学消像旋的结构示意图如图 1. 取消了机械结构,齿轮组件 1、齿轮组件 2 及连杆机构,通过控制电机直接驱动别汉棱镜组件来完成光学消像旋的功能,如图 2 所示.

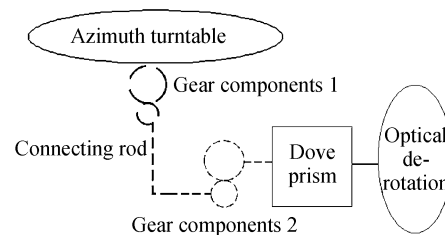


图 1 原有光学消像旋的结构示意图
Fig. 1 The original optical de-rotation structure

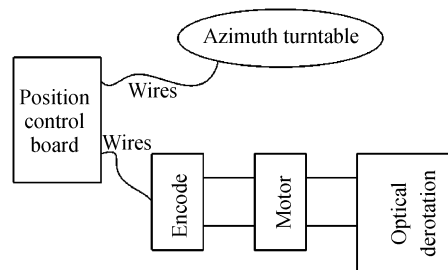


图 2 光学消像旋位置控制图
Fig. 2 Optical de-rotation position control structure

1.2 光学消像旋位置控制的原理

图 2 中依靠高精度绝对式编码器(RM22S)来感知别汉棱镜的位置,单片机将别汉棱镜的角度 θ_0 与方位旋转平台的解算角度 θ_r 相比较,得出两者之间的差值 $\Delta\theta$,再经过数字 PID 校正后,通过 12 位 D/A 转换驱动电机带动别汉棱镜旋转,同时也带动

编码器转动, 以消除两者的差值, 实现无机械传动的
光学消像旋, 克服机械传动对消像旋的影响. 其原理
框图如图 3 所示.

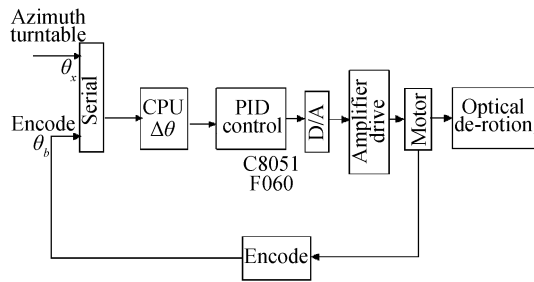


图 3 光学消像旋位置控制系统框图

Fig. 3 Optical de-rotation position control system diagram

1.3 建立控制对象的模型

在位置系统中, 电机和被控制对象的固有特性^[3], 是十分重要的.

1) 通过电机 (45LY005) 的常量, 如电机的堵转力矩 M_m 、电压 U_0 、电流 I_m , 和电机的空载转速 ω_0 , 及电机转子转动惯量 J , 绕组阻抗 R , 电机绕组电感 L_a 等分析、计算, 可以得到电机的传递函数为

$$G_{DJ} = \frac{\frac{\omega_0}{U_0}}{\left(\frac{JRI_m\omega_0}{M_m \cdot U_0}s + 1\right)\left(\frac{L_a}{R}s + 1\right)} = \frac{6.73}{(0.1485s + 1)(0.0042s + 1)} \quad (1)$$

2) 别汉棱镜组件的转动惯量为

$$J_B = 0.000945 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

计算可以得到被控对象的固有传递函数为

$$G_B = \frac{1}{J_B s + 0.01} = \frac{1}{0.000945s + 0.01} \quad (2)$$

2 算法的设计与实现

为了实现光学消像旋高精度的位置控制, 结合电机和被控对象模型, 提出采用比例-积分-微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 模型的控制
器与非线性控制器相结合的控制算法.

PID 算法是一种过程控制算法, 它能解决自动控制理论所要解决的最基本的问题, 即系统的稳定性、快速性、准确性. 通过调节 PID 的常量, 能够实现系统的稳定, 还能兼顾系统的带载能力和抗扰动的能力. 但是由于系统存在非线性、时变不确定性等因素, 应用常规的 PID 控制器不能达到理想的控制效果. 结合本位置控制系统的实际状态, 需要将传统的 PID 控制策略与非线性控制相结合, 才能达到理想的效果.

2.1 PID 控制算法的设计与优化

模拟 PID 控制系统原理图如图 4 所示. PID 控制器是一种线性控制器, 它根据给定值的 $\text{rin}(t)$ 与实际输出值 $\text{yout}(t)$ 构成控制偏差.

$$\text{error}(t) = \text{rin}(t) - \text{yout}(t) \quad (3)$$

模拟 PID 控制器完整的传递函数为: $G_c(s) =$

$$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (4)$$

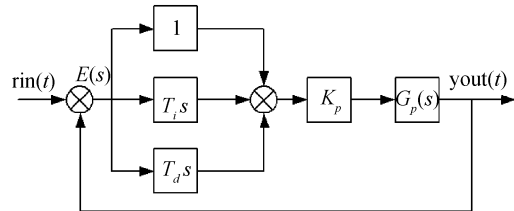


图 4 模拟 PID 控制系统原理图

Fig. 4 Simulation PID control system diagram

各校正环节作用如下: 1) 比例环节: 消除别汉棱镜与方位位置的静态偏差. 比例系数 k_p 越大, 则静态误差就会减小, 但是在本系统中比例系数不能无限增加, 越大容易引起系统震荡, 不稳定; 2) 积分环节: 能够完全消除别汉棱镜组件的静差, 降低系统的动态误差. 但是积分作用取决于积分时间常数 T_i , 其越大则积分作用越弱; 3) 微分环节: 调节了本控制系统对其偏差信号的变化趋势及变化速率, 在别汉棱镜组件的偏差信号变得太大之前, 引入早期修正信号, 提高系统的转动速度, 减少调节时间, 提高了系统的响应速度.

通过对 PID 控制算法离散化处理, 简化, 可以得到下列离散化的 PID 公式

$$pk = k_p * e(k)$$

$$pi = k_i * e(k) + pi1$$

$$pd = k_d * (e(k) - e(k-1)) \quad (5)$$

通过对控制对象的固有传递函数分析, 可以得到 $k_p = 35, k_i = 0.4 \times 10^{-6}, k_d = 15$.

2.2 非线性算法的融合

由于别汉棱镜组件自身的摩擦力矩较大, 使得低速跟随转台转动时, 造成系统的“死区”过大, 无法满足系统的性能要求, 上述传统的 PID 算法已不能完全满足系统的需要.

在传统的 PID 控制算法的基础上, 再根据误差的大小, 对信号进行分段非线性处理^[4]. 分为三个阶段, 对于小信号误差进行指数放大, 中信号按比例输出, 大信号以恒定最大值输出. 依据非线性函数的基础上, 再增加一项数据饱和处理, 最终形成的控制算法. 完成了“小误差, 大增益; 大误差, 恒增益”的数学拟合.

$$fal(x, \gamma, \delta) = \begin{cases} |e|^\gamma \cdot \text{sgn}(e), & |e| \leq a \\ e/\delta^{1-\gamma}, & b > |e| > a \\ m, & |e| \geq b \end{cases} \quad (6)$$

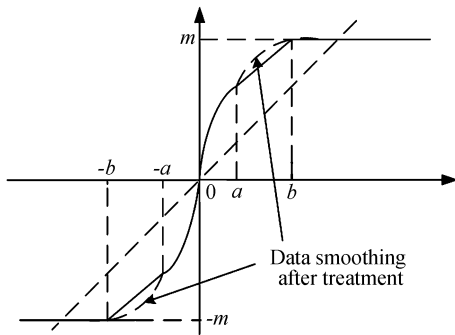


图5 非线性PID控制曲线
Fig. 5 Nonlinear PID control curve

分区原则,由于编码器的角度为4 096 码/圈,依据系统的性能要求,满足精度要求,在误差±30°区域里,将其作为小信号区间处理为,|e|≤400;在±30°至±90°的区域,将其作为中信号区间处理,400<|e|<1 000;超过±90°,大信号区间设为,2 048>|e|≥1 000.图5中的m=2 048,是D/A输出对应的最大值.在大、中信号的转折处,为了使得转动的速度不出现跳变,对于转折点的数据采取插值法进行平滑处理,再与当前的输出差值作比较,取平均值以达到数据平滑的目的,如图5中所示.非线性PID控制算法程序框图如图6.

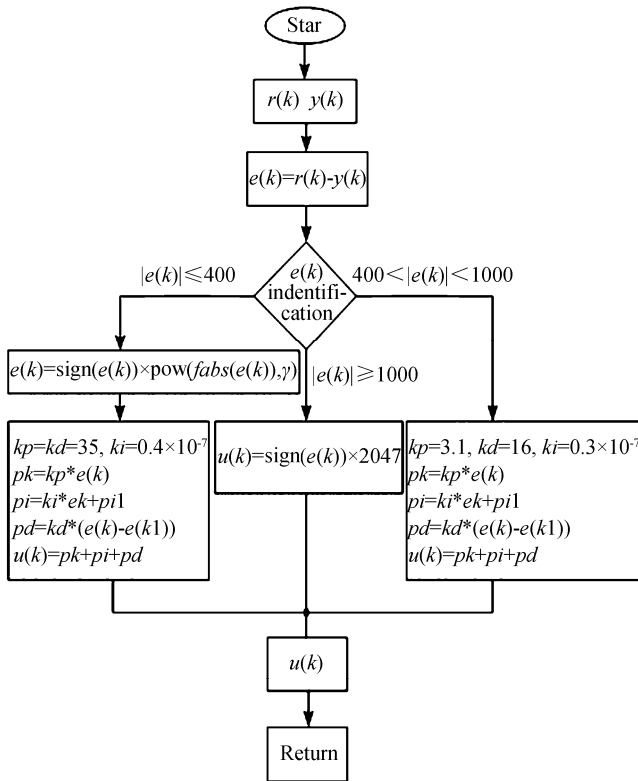


图6 非线性PID控制算法程序框图
Fig. 6 Nonlinear PID control algorithm flow chart

3 实验结果分析

3.1 软件调试

在调试的过程中,对于零位的处理是关键,采取同时记忆所采集的方位角度信号、编码器的角度信号,将所记忆的作为系统的零位,下一时刻方位的零位与记忆的零位比较,得到方位转台转动的角度,以这个差角作为别汉棱镜需要转动的角度,与编码器的零位代数叠加,即可得到编码器(别汉棱镜)要转到的位置.

在0°、180°时,D/A的输出需要出现换向的问题,在这时需要通过零位来判断,目前转台所处的位置,编码器所处的位置,再根据最短路程的原则,让别汉棱镜快速跟随.

3.2 结果测试与分析

系统调试好后,进行光学消像旋的像倾斜指标测试,像倾斜是消像旋的关键指标.由于方位是360°旋转,以5°为间隔,用像倾斜仪进行测试.测试的结果如图7所示,通过计算得到均方根误差^[5]为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = 10.56' < 45' \quad (7)$$

均方根误差远小于系统指标45'.而原有机械传动消像旋的像倾斜测试基本处于指标边缘.

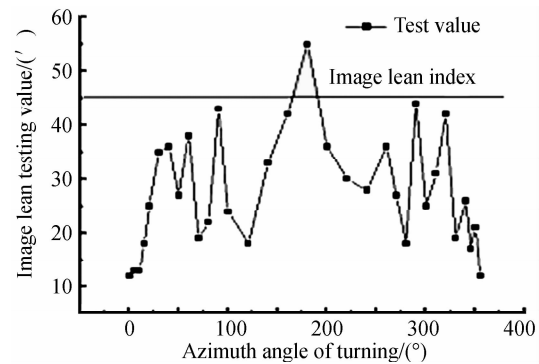


图7 像倾斜测试结果
Fig. 7 Image lean testing result diagram

从图7测试的结果来看,实现了光学消像旋高精度位置控制.在图7中,当方位转到180°时,出现了55'超指标的像倾斜值.经过检查测试,发现在此区域,别汉棱镜组件存在较大的摩擦力矩.

由于主控计算机方位数据的更新率约为10 ms,限制位置系统带宽的提高,制约了系统的性能.另外,减小摩擦力矩,既保证电机轴与别汉棱镜组件的旋转轴相互垂直还要保证别汉棱镜与光学瞄准轴的一致,结构设计还需再进一步研究分析.

4 结论

光学消像旋系统位置控制算法的应用,有效地提高了光学消像旋像倾斜的指标精度.光学消像旋位置控制系统的实现,有效地减小了方位伺服转台的摩擦力矩,对于伺服稳定精度的提高具有一定的帮助;而且改变了光学消像旋的调校方式,更简便,大大节省了时间.并为光学部件的运动控制提供了一种新的方式.

参考文献

- [1] LI Hong-wei, HUANG Zi-li, YUAN Si-hua. Design for imagerotation-elimination of digital video based on FPGA/DSP [J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2006, **35**(2):222-225. 李洪伟,黄自立,袁斯华.基于FPGA/DSP的数字视频消像旋系统设计[J].红与激光工程,2006, **35**(2):222-225.
- [2] YANG Rui, WAN Min, LI Zheng-dong. One hangy method to offset image rotation in reflecting detecting system [J]. *Electro-Optic Technology Application*. 2009, **24**(4):13-15. 杨锐,万敏,李正东.反射式探测系统中数字消像旋的简易方法[J].光电技术应用,2009, **24**(4):13-15.
- [3] ZENG Ming, ZHANG Dong-chun, SU Bao-ku. Bandwide design of high precision control system for servo turn table[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2001, **9**(5):55-59. 曾鸣,张东纯,苏宝库.伺服转台高精度控制系统带宽设计的探讨[J].中国惯性技术学报,2001, **9**(5):55-59.
- [4] WANG Yi, SU Bao-ku. A nonlinear compensator of high precision servo system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2001, **33**(3):406-409. 王毅,苏宝库.高精度伺服系统的非线性校正[J].哈尔滨工业大学学报,2001, **33**(3):406-409.
- [5] JI Ming. Simulation and error analysis of mirror stabilized system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, **21**(5):19-22. 纪明.反射镜稳定系统的仿真与误差分析[J].应用光学,2000, **21**(5):19-22.
- [6] VELLA F, CASTORINA A, MANCUSO M, et al. Digital image stabilization by adaptive block motion vectors filtering [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2002, **48**(3):796-801.
- [7] LI Hong-guang, SONG Ya-min, YU Yun-qi. Active disturbance rejection control for traching circuits of inertial platform on vehicle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **26**(4):13-15. 李红光,宋亚民,鱼云岐.车载惯性平台随动系统的自抗扰控制[J].应用光学,2009, **26**(4):13-15.
- [8] LIU Hui, FU Xi-quan, HOU Yan-chao. Control of high-power laser focal position in nonlinear media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2):267-271. 刘辉,傅喜泉,侯彦超.非线性介质中会聚高功率激光的焦点位置控制[J].光子学报,2011, **40**(2):267-271.
- [9] WANG Guo-fu, YU Fa-shan, WANG Xu-dong, et al. Study of image stabilizing algorithm for airborne electro tracking system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(sup):253-255. 王国富,余发山,汪旭东,等.机载光电跟踪系统的电子稳像算法研究[J].光子学报,2007, **36**(sup):253-255.
- [10] YANG Yue, GAO Xin-bo, FENG Jun. A fast frame rate up-conversion algorithm based on adaptive motion compensated interpolated interpolation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11):2336-2341. 杨越,高新波,冯珺.一种基于自适应补偿的快速帧速率上转换算法[J].光子学报,2008, **37**(11):2336-2341.

Algorithm and Realization for Optical De-rotation High-precision Position Control System

GUO Xin-sheng¹, ZHOU Ren-kui², TAN Ming-dong¹, LEI Hai-li¹, FENG Jie¹

(1 The No. 205 Institute, CNGC, Xi'an 710065, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to solve the problems of large error and uncontrollable clearance caused by optical de-rotation gear transmission in panoramic electro-optical observation and sighting equipment, a position control system is proposed in which the optical de-rotation mechanical transmission is removed and substituted with a position control system without mechanical transmission. Using modern control theory and on the basis of analyzing the subject model in the optical de-rotation position control system, the complex control algorithm is designed, dominated by Proportional-Integral-Differential (PID) controller and aided by nonlinear control. The position control system is established, adjusted and tested with the single chip processor C8051 served as the core of controlling, the coder as the position transducer, electro-optical stage azimuth as the controlling signal. The test results indicate that the optical de-rotation performance is better than that of the mechanical transmission, and the high precision position control is realized.

Key words: Optical de-rotation; Position control; PID control; Nonlinear control