

潜望式空间光电目标捕获终端 脉冲控制方法研究

周彦平,付 森,于思源,王 健,宋义伟

(哈尔滨工业大学航天学院,黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 潜望式光电终端由于其光学系统不在回转机构中,可以大大减少系统的重量,所以近年来被广泛地用在空间光电系统中.但是其非对称式结构会因为空间环境中的低温、真空条件发生冷焊现象而引起终端中转台的摩擦力矩呈非线性状态,进而影响控制器对转台的控制精度.针对该问题,本文提出了一种利用软件方法实现的“动态润滑”的概念,通过高频脉冲叠加 PID 控制方法,在闭环控制器的输出端叠加高频脉冲因子,使得系统处于动态稳定的状态,实现对转台轴承的动态“润滑”,补偿了摩擦力矩,使控制器输出无死区,从而有效地保证控制器输出的线性度.最后还通过利用高低温环境试验验证了该控制方法的实际效果.试验中实测得转台在温度由 -30°C ~ 50°C 期间的定位精度均小于 $10\mu\text{rad}$,正弦曲线跟踪精度小于 $28\mu\text{rad}$,并且分布较为均匀.实验结果表明,采用高频脉冲叠加 PID 控制方法达到了补偿摩擦力矩的效果,实现了在温度环境变化较大的条件下对光电终端进行高精度、稳定控制,满足对在空间任务中的瞄准和跟踪要求.

关键词: 光电系统; 潜望式结构; 摩擦力矩; 高频脉冲控制; PID; 动态润滑

中图分类号: TN929.11, TP273.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 11-2610-05

Pulse Control Method Design for Periscopic Structure Terminal in Spatial Optical Target Acquisition System

ZHOU Yan-ping, FU Sen, YU Si-yuan, WANG Jian, SONG Yi-wei

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Due to the optical system is not in the rotating mechanism which can greatly reduce the weight of system, Periscopic Structure has been widely used in recent years in photoelectric terminal. But its periscope asymmetric structure always faces the phenomenon of cold welding, non-linear friction torque which caused by the low-temperature vacuum in space environment. In order to solve these problems and also to improve the control precision, a “dynamical lubricate” conception is proposed in this dissertation, which based on the dual-loop PID control, it includes position-loop and velocity-loop controller and a high-frequency pulse controller. The controller can lubricate the bearing and make the system in a dynamically status by using “soft” algorithm. The friction torque is compensated and the range of the controller linearity is ensured. At last a space temperature simulation experiment was held to test the effect. The temperature range was set from -30 degree to 50 degree. The positioning accuracy in the experiment is less than $10\mu\text{rad}$, sinusoidal tracking accuracy is less than $28\mu\text{rad}$. This result shows that by using the new control algorithm, an high-precision control needs is achieved during the great range of temperature and the tracking errors are distributed evenly.

Key words: optical system; periscopic structure; friction torque; high-frequency pulse controller; PID; “dynamical lubricate”

1 引言

近年来,光电跟踪系统在广泛的领域中得到了应用,例如:在民用卫星上,用来识别地球资源和确定其他星球表面物质;在军事侦查卫星上,用来获得地面的战场情况;在空间卫星光电对抗(天基攻防)和卫星激光通

信的应用中,用于实现高精度瞄准、捕获和跟踪(PAT).由于直流力矩电机具有力矩系数大、过载能力强和可靠性强等优点^[1],通常被应用于光电跟踪系统中,用以实现高精度的控制跟踪.

在空间卫星光电对抗和卫星激光通信中,潜望式结构的好处是可以将光学系统放在星内,使得转动部件重

量大大降低,有利于减小对电机的力矩要求.然而,潜望式终端的非对称式结构将导致终端转台的摩擦力矩呈非线性状态,从而影响转台的控制精度.此外,由于真空低温环境造成的冷焊、系统机械磨损以及卫星平台振动等因素的影响,转台摩擦力矩在实际系统运行中将不断发生改变^[2,3],导致控制精度下降.通过选用高精度轴承以及对关键部件进行温度控制等方法可以对此类问题引起的控制精度变化起到一定程度上的改善作用.另外,也可以通过优化和选择先进的控制方法进行设计.

空间中低温环境对转台的影响将使得在地面调整好的控制器不再满足高精度要求,给转台的控制带来较大的影响,如果控制器的适用带宽不够或者当要求的精度较高时,就可能会导致瞄准、跟踪任务的失败亦或是导致整个终端丧失功能.

很多学者就不同环境提出了各种补偿的方法,如自适应鲁棒控制器处理库仑、粘滞加 Stribeck 项摩擦模型;S Lee 等^[4]研究了抖动信号同系统各环节传递函数之间的关系,由此得出最优抖动信号的参数确定方法.S Yang 等^[5]提出一种控制方法,在低速时采用脉冲控制,并自适应调整脉冲宽度.但是无论何种模型,其本质上都是在前期对摩擦力矩进行观测后,选择不同的补偿曲线^[6],这样的问题首先是适用范围比较有限,当卫星在发射时产生剧烈振动,造成系统较大形变时,就可能会使地面调整好的控制器模型失效.其次,目前大多数补偿算法都存在计算复杂,实现困难,难以适应工程应用等问题.

本文针对在真空、低温环境中的摩擦力变化提出了基于位置环、速度环的双闭环 PID 控制器的结构,在控制器输出环节中加入一个高频脉冲控制调节信号,并对其输出进行保护.通过在 PID 输出指令上叠加抖动信号,由于信号的频率高于系统的响应带宽,所以物理上伺服机构不会真正的产生位移,但是会存在“启动”的趋势,机构始终存在“动态”的状态,从而可以对机构产生润滑的作用.能够在一定程度静摩擦下,平滑控制器在低速时的不连续性.在某项目中的真空高低温实验中测试,利用本方法获得了较好的跟踪效果.

2 潜望式终端结构及双闭环控制算法原理分析

2.1 潜望式终端结构

对于采用了潜望式结构光电终端系统^[7]如图 1 所示的仿照 TerraSAR-X 激光通信系统中的转台示意,在采用潜望式结构的机构中,光学系统没有在回转机构里,所以可以大幅减少回转机构的重量,因此近年来被很多系统所采用,可以看出潜望式结构由于采用了非

对称结构,有可能会引起在不同的角位置的摩擦力矩为非线性,并且由于两轴互相耦合,还会使得摩擦力矩具有随机特性.本文设计了一种 PID 控制器和低频叠加控制相结合的控制算法,采用本算法可以适应摩擦阻力很大的系统,并且不需要进行死区去除,在变化比较大的环境中具有较稳定的适用性,能较好的适用于宇航应用中长期在轨工作的回转机构的控制.

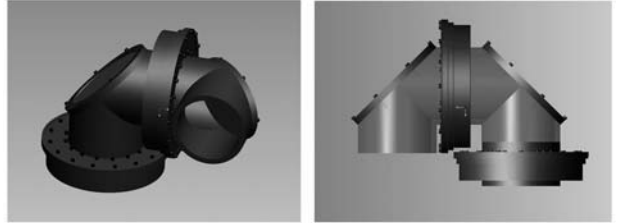


图1 潜望式终端结构示意图

2.2 位置、速度环 PID 控制器工作原理

首先介绍本系统,采用双闭环 PID 控制方法:外环采用位置环、PID 控制方法,有外环比例 K_p 、外环微分 K_d 和外环积分 K_i 三个系数;内环为速度环,采用 P 控制,有内环比例系数 lnK_p 和速度环反馈系数 τ .其原理框图如图 2 所示.

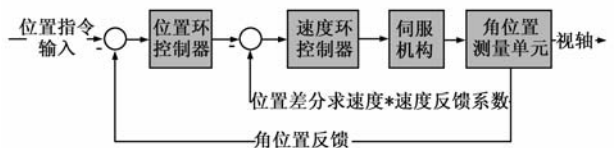


图2 本系统PID控制算法原理框图

PID 控制算法是最早发展起来的控制策略之一,由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高,且有很好的综合动态特性和稳态特性,被广泛应用于伺服控制系统中.本系统也采用了这种控制算法.

一般的 PID 控制算法公式如下^[8]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其离散形式如下:

$$u(k-1) = KP + KI + KD \quad (2)$$

其中,设:

$$KP = K_p e(k-1) \quad (3)$$

$$KI = K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) \quad (4)$$

$$KD = K_d [e(k-1) - e(k-2)] \quad (5)$$

就控制效果而言,位置式和增量式 PID 控制算法并无本质区别,但增量式 PID 控制算法有着不需要对 $e(k)$ 累加,工作量小,且计算误差对控制量影响不大、可靠性高等优点.当控制器发生故障时,只会影响控制增量而不会产生执行机构位置的突变,所以本系统采用的是增量式 PID 算法,根据递推原理可得如下公式:

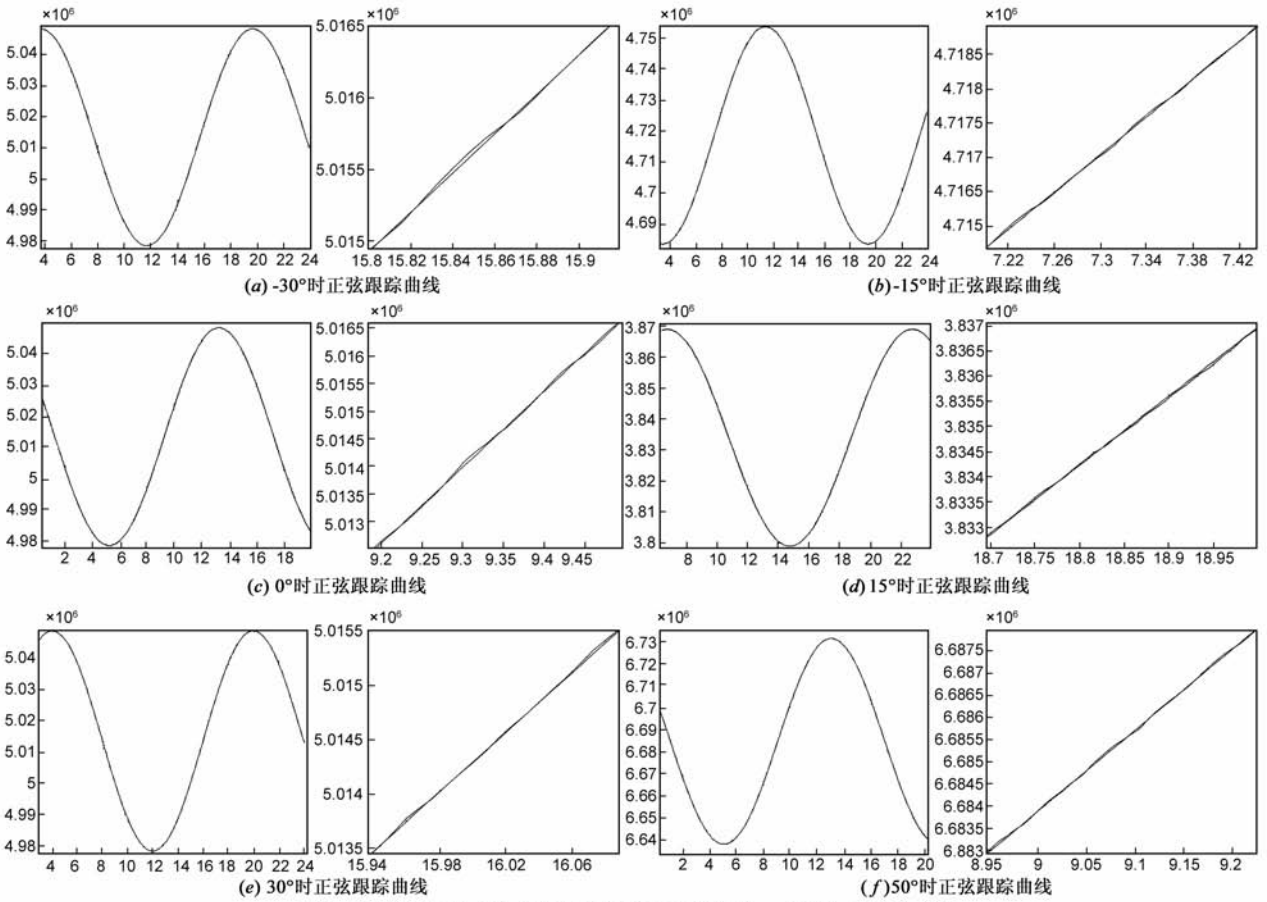


图8 不同温度时正弦跟踪曲线(左图为跟踪曲线,右图为局部放大图)

表 1 不同温度下跟踪精度(单位: μrad)

Temperatures ($^{\circ}\text{C}$)	- 30	- 15	0	15	30	50
Tracking Error(1σ)	26.5	22.4	27.5	27.6	25.0	27.0

5 结论

本文以对转台的控制中的摩擦补偿为目标,采用了基于位置环、速度环双闭环 PID 控制器叠加高频脉冲控制器的方法,对机械转台中轴承起到了动态“润滑”的作用,保证了控制器的控制线性度和稳定度.并对其可行性,使用效果进行了验证,通过利用某型号转台在温度试验中的验证,试验中转台在 $-30^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内实现了定位精度达到 $1\sigma \leq 10\mu\text{rad}$,正弦曲线跟踪精度 $1\sigma \leq 28\mu\text{rad}$.从实验结果可以看出,采用新的控制算法后,有效实现了在较大温度变化范围条件下的稳定、精确控制,满足了型号项目中要求的高精度位置跟踪控制要求.

参考文献

[1] Yu Si-yuan, Gao Hui-de, Ma Jing, Dong Yun-hua, Ma Zu-guang. Selection of acquisition scan methods in intersatellites optical communications [J]. Chinese Journal of Lasers B,

2002, B11(5):364 – 368.
 [2] 范大鹏,张智永,范世■,李岩.光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J].光学精密工程,2006,4(14):673 – 680. Fan Da-Peng, ZhANG Zhi-Yong, FAN Shi-Xun, LI Yan. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 4(14): 673 – 680. (in Chinese)
 [3] 于志伟,曾鸣,乔大鹏.采用复合控制的直流力矩电机摩擦补偿[J].电机与控制学报,2008,5(12):539 – 544. YU Z W, ZENG M, QIAO D P. Complex control for friction compensation in DC motors[J]. Electric Machines and Control, 2008, 5(12): 539 – 544. (in Chinese)
 [4] 陈娟,张淑梅,黄艳秋,张袅娜.电机波动力矩的重复学习控制补偿[J].光学精密工程,2003,4(11):390 – 393. CHEN J, ZHANG S M, HUANG Y Q, ZHANG N N. Repetitive study control to compensate motor moment fluctuation[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 4(11): 390 – 393. (in Chinese)
 [5] Lee S, Meerkov S M. Generalized dither[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 50 – 56.
 [6] Yang S, Tomizuka M. Adaptive pulse width control for precise position in gunder influence of sticktion and coulomb friction [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and

Control, 1988, 110(3): 221 – 227.

- [7] Renny F, Carl L, Robert W, Josef W, David K, John J, Brian H, Gerd M, Wayne S, Uwe S, Ralph K, Rolf M. NFIRE to TerraSAR X laser communication results satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7330: 73300Q-1-73300Q-15.
- [8] Brian A, David N, Todd K. New results in NPID control: tracking, integral control, friction compensation, and experimental results [J]. IEEE Transactions on control systems technology, 2001, 2(9): 399 – 406.

- [9] 窦慧晶, 王树勋, 汪飞. 乘性和加性噪声相关背景下的二维谐波频率估计 [J]. 电子学报, 2004, 32(1): 83 – 86.
DOU Hui-Jing, WANG Shu-xun, WANG Fei. Two dimensional frequency estimation in correlative multiplicative and additive noise [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 83-86. (in Chinese)
- [10] 郭汝江, 袁业术, 权太范. 高频地波雷达飞行小目标跟踪方法研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1586 – 1589.
GUO R-J, YUAN Y-S, QUAN T-F. Study of anti-weak aerial target tracking for high frequency surface wave radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1586 – 1589. (in Chinese)

作者简介



周彦平 男, 1956 年 8 月出生, 西安人. 教授、博士生导师、中国电子学会会士、中国宇航学会会士、IEEE 高级会员. 现就任于哈尔滨工业大学光通信研究所, 主要从事卫星激光通信、空间环境分析与空间对抗等方面的研究工作.



付 森 男, 1980 年 9 月出生, 黑龙江省哈尔滨市人. 2003 年于哈尔滨工业大学获工学学士学位. 2003 年起至今在哈尔滨工业大学光通信研究所攻读硕博连读学位, 主要从事卫星激光通信、空间目标捕获与跟踪等技术的研究工作.
E-mail: fusersam@126.com