

文章编号 1004-924X(2010)03-0623-07

空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计

郑耿峰^{1,2}, 张 柯¹, 韩双丽¹, 金龙旭¹, 梁 伟³

(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; 3. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

摘要:设计了一种空间 TDICCD(时间延迟积分电荷耦合器件)相机动态成像地面检测系统,用于模拟相对空间飞行器的地面像移,验证 TDICCD 相机的像速匹配能力和动态成像质量。系统采用精密转台和偏流转台模拟卫星绕地球运动和卫星受地球自转影响而在不同纬度产生不同的偏流运动。精密转台用永磁力矩电机驱动,用锁相锁频伺服控制策略控制稳速精度达到 0.029 7%。偏流转台用步进电机控制,偏流角的平均转角速率约为 0.02°/s,偏流角位置的数据引导跟踪精度优于±5′。设计的检测系统的精度满足 TDICCD 相机动态成像检测的指标要求,已在某型号空间可见光相机的研制中获得了应用。

关键词:TDICCD 相机; 动态目标; 像速匹配; 检测系统; 锁相控制

中图分类号:V557.4 **文献标识码:**A

Design of test system for motion images of space TDICCD cameras

ZHENG Geng-feng^{1,2}, ZHANG Ke¹, HAN Shuang-li¹, JIN Long-xu¹, LIANG Wei³

(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;*

3. *Air Force Aviation University, Changchun 130022, China)*

Abstract: A test system for dynamical images of Time Delay and Integration Charge Coupled Device (TDICCD) cameras in space was designed to simulate the ground image motion related to the space aircraft and to validate the capability of image speed matching and the quality of dynamical imaging of TDICCD cameras. The design adopted a precision table and a drift table to simulate the aircraft motion around the earth and its drift motion in different latitudes caused by the earth rotation. The precision table driven by a permanent magnet torque motor was controlled by a phase locked loop servo-control strategy and its steady speed error reaches 0.029 7%. The drift table was driven by a stepping motor and its average rotation speed is 0.02 (°)/s and trace precision of draft angle is better than ±5′. The experimental results show that the precision of designed system meets the test requirement for the dynamical images of TDICCD cameras, and has been applied to the development of a certain space visible light camera.

收稿日期:2009-06-08; 修订日期:2009-08-31.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划基金资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

Key words: Time Delay and Integration CCD(TDICCD) camera; dynamic object; motion image matching; test system; phase locked control

1 引言

卫星的运动有绕地球转动产生的地物相对运动,而地物运动又受到地球自转影响,对地球不同纬度具有不同的偏流方向,因此,存在一个空间光学 TDICCD 相机对相对运动的地物的成像问题。为保证 TDICCD 相机实现在轨高分辨成像能力,需要精确像速匹配。

对采用 TDICCD 的空间相机而言,其成像质量除设计、制造及空间力/热等环境条件影响外,还会由于卫星运动而产生地物像速与 TDICCD 图像电荷行转移速度不匹配而造成所谓像速失配的问题,即产生动态成像质量降低的问题。因此,需采用变速匹配技术来实现 TDICCD 的像速匹配,以消除 TDICCD 由于像速失配而造成的相机动态传递函数降低^[1-5]。为检测、验证 TDICCD 相机的像速匹配能力,需在地面实验室模拟其在轨的动态成像。

本文设计的动态成像检测系统可以用于产生匀速且考虑偏流影响的运动目标,以模拟相对空间飞行器的地面像移,检验空间相机的 TDICCD 像移匹配能力。

动态成像检测系统的控制主要是转台速率的控制。本文对转台速率控制系统总体方案进行了设计,根据转台速率控制系统性能指标的要求,采用通讯系统中的锁相环技术来设计整个速率控制系统的结构,并且采用 DSP 作为控制器,系统达到了很高的速度精度。

2 动态成像地面检测系统总体方案

TDICCD 相机动态成像地面检测的原理是通过转台带动目标图形做一定规律的运动,从而模拟了相对被测镜头的无穷远的地面动态目标。把动态目标图形做成鉴别率板的图形,在相机焦平面上就能够产生模拟一定目标速度和轨道倾角,并顾及轨道高度和姿态变化等因素的像移运动的分辨力图形。把所模拟目标的像移速度和偏流角值转换为 TDICCD 的像移扫描频率,调整卫星的

姿态,使相机的成像角度准确,同时控制 TDICCD 成像装置进行成像。分析处理图像,从而验证 TDICCD 相机的像速匹配能力和动态成像质量。

动态成像检测方案的原理框图如图 1。

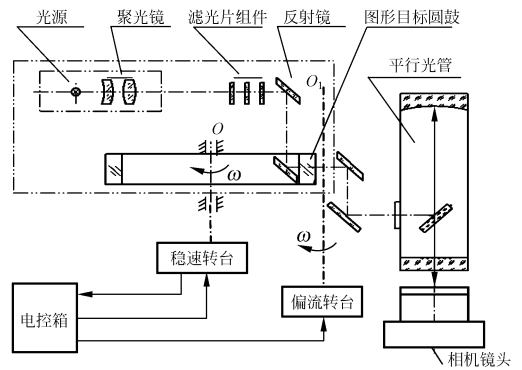


图 1 动态成像检测方案原理图

Fig. 1 Principle diagram of test project for dynamically imaging

光源通过聚光镜组及滤光片组件照明动态目标载体,位于焦面上的动态目标经平行光管及空间相机光学系统成像在相机焦面上。动态成像检测时,精密转台和偏流转台转动模拟卫星运动的姿态包括速度和偏流角,驱动动态目标载体垂直于光轴 O 以速度 v 匀速运动,并绕光轴 OB1B 转动。对拍照图像进行分析处理,鉴别可分辨的线对数,从而确定相机动态成像的分辨能力。

本文设计的动态成像地面检测系统由光学系统、光源照明系统、机械系统、电子学控制系统、标定检测系统等几部分组成。其系统组成见图 2。

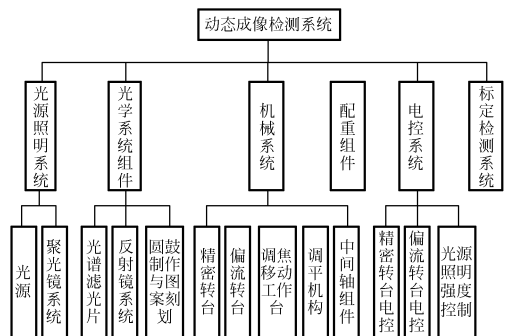


图 2 系统结构框图

Fig. 2 System structure

3 机械系统设计

空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的总体机械结构如图 3 所示。

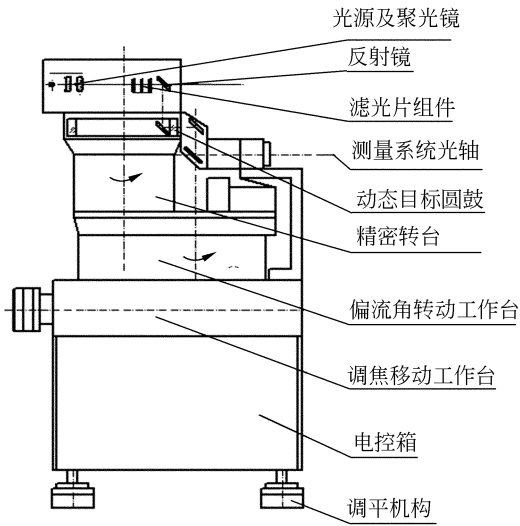


图 3 系统机械结构

Fig. 3 Mechanical structure of system

3.1 精密转台机械结构

精密转台的上轴端固定着动态目标圆鼓,下轴端固定着一组进口的直径为 100 mm 圆光栅编码器,中部安装力矩电机。

由于精密转台与力矩电机组成共轴传动系统,所以其精密转台自身的传动刚度和力矩电机、圆光栅编码器的联接刚度将直接影响到系统的传动刚度及稳速精度。因此,为精密转台选择了两个超精密的深沟向心球滚动轴承,并采用相应的加工精度要求及工艺措施,保证其位置精度和运动精度要求。同时采取提高精密转轴自身传动精度和联接刚度的措施,适当增加转轴的轴径,尽可能减少与力矩电机及圆光栅编码器的联接环节,同时注意提高各联接面的接触刚度。

3.2 偏流角转动工作台机械结构

偏流角转动工作台采用高精度的齿轮副传动,采用进口的交叉滚子轴承支承。末级齿轮副传动比为 1/12,总速比 $>1/1\ 000$ 。高精度淬火钢导轨和高精度钢球构成平面滚动副,降低摩擦系数,防止爬行,能够保证工作台转角运动的灵敏度。

3.3 调焦移动工作台机械结构

调焦移动工作台支承在镶钢低摩擦矩形滑动导轨副上,采用滑动丝杆副驱动上工作台携带系统其它部分移动。丝杆副导程 3 mm,掺石墨和青铜粉的聚四氟乙烯导轨带与镀磷镍合金的钢导轨板组成矩形滑动导轨副,能减小摩擦系数,防止爬行,保证调焦移动工作台运动平稳,并简化了导轨结构。工作台移动到合适的调焦位置,利用楔形锁紧机构锁紧。

4 电控系统设计

电控系统对动态成像检测系统的工作实施控制和管理。电控系统由 DSP 控制器、精密稳速转台子系统、偏流转台子系统、光源控制、人机界面、电源等组成。系统组成框图如图 4 所示。

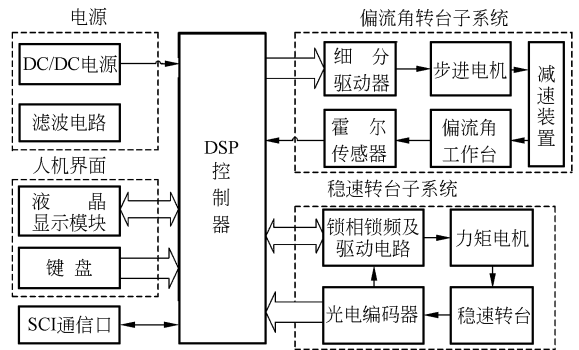


图 4 电控系统结构框图

Fig. 4 Structure of electrical control system

系统采用 TI 公司目前最新的 DSP 控制芯片 TMS320F28335^[6-7] 为核心的电动机控制方案。精密转台用永磁直流力矩电机驱动,偏流转台用步进电机驱动。光电编码器采用英国雷尼绍公司的 14 位增量式编码器,配 RGH20 读数头。

在控制策略上,主要采用锁频锁相伺服控制,锁频锁相控制策略可以达到很高的稳态精度^[8]。

设计的用于动态成像检测系统的锁频锁相控制策略数学模型如图 5 所示。图中, K_e 为电机反电动势系数, T_m 为系统机械时间常数, T_e 为电机电磁时间常数, K_A 功率放大器增益。

由图 5 可见,整个控制器主要由 3 个环节构成:比例环节、积分环节和重积分环节,反馈则是包含有相位信息的速度反馈。其中重积分环节及带有相位信息的速度反馈是锁相环的最重要的特

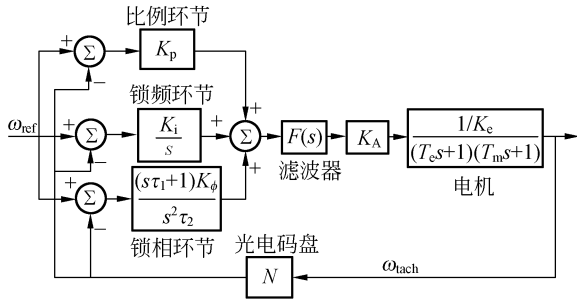


图 5 锁频锁相系统的数学模型

Fig. 5 Mathematics model of phase lock system

征。系统的工作过程如下：

系统上电后，以 DSP 给定频率 ω_{ref} 为标准，电机由静止状态开始加速，在其转速 ω_{tach} 未达到给定转速 ω_{ref} ，且误差大于设定的误差带 1（即 $\omega_{ref} - \omega_{tach} > \xi_1$ ）时，比较控制环节输出正值，使 PWM 加在电枢两端的平均电压升高，从而使电机迅速加速；当误差位于误差带 1 和 2 之间时，即 $\xi_2 < \omega_{ref} - \omega_{tach} < \xi_1$ 时，利用积分环节对系统进行控制使 PWM 加在电枢两端的平均电压继续升高，从而使电机缓慢升速，趋向给定值；当电机转速已超过其给定值，即 $\omega_{tach} > \omega_{ref}$ 时，则比较控制环节输出负值，使 PWM 加在电枢两端的平均电压降低，从而使电机减速，最终趋向给定值，其工作过程与升速类似。在稳态情况下， $\omega_{ref} = \omega_{tach}$ ，准确地说是当 $0 \leq |\omega_{ref} - \omega_{tach}| \leq \xi_2$ 时，二者之间只差一个固定的相位差，称之为“锁定”，系统进入锁相状态，此时选择重积分环节进行相位差的校正控制，使 PWM 加在电枢两端的平均电压继续升高/降低，电机在小范围内升/降速，最终趋向给定值。

5 主要参数分析与计算

5.1 偏流转台角速度的计算

在卫星的运行过程中，在某一时刻 t 卫星在轨道上的位置为 S_1 ，对应的星下点为 S_1' 。经过一段时间 Δt 后，卫星的位置为 S_2 ，对应的星下点为 S_2' 。假设相机的视线垂直向下，不考虑地球自转时，在 $t + \Delta t$ 时刻，相机扫过的地面点为 S_2' 。但由于地球的自转，原希望在 $t + \Delta t$ 时刻扫过的地面点 S_2' 漂移到了 S_2'' ，这样就造成在实际推扫成像过程中存在一个漂流角，即 $S_1'S_2'$ 与 $S_1'S_2''$ 之间的夹角 A 。

卫星的轨道要素为长半径 a 、偏心率 e 、轨道倾角 i 和近地点时刻 τ 。在某一时刻 t ，卫星的运动状态用地心距 r 、赤纬 δ 、速度 v 、速度倾角 θ 、方位角 A_v 和纬度幅角 u 。地球自转角速度为 ω_e 。椭圆卫星轨道的开普勒方程^[9]为：

$$E - e \sin E = (\mu/a^3)^{\frac{1}{2}}(t - \tau), \quad (1)$$

这里， $\mu = 398\ 613.5 \text{ km}^3/\text{s}^2$ 为开普勒常数， E 为偏近地角。根据上式可以计算出偏流角 A ：

$$A = \arctan\left(\frac{r\omega_e \cos \delta \cos A_v}{v \cos \theta}\right), \quad (2)$$

式中：

$$\delta = \arcsin(\sin i \sin u)$$

$$\cos A_v = \arctan \frac{\tan \delta}{\cos i} = \frac{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \delta}}{\cos \delta}$$

而偏流角的角速度 ω_p 通过式(2)对纬度 δ 微分求得：

$$\omega_p = \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\Delta A}{\Delta \delta} \frac{\Delta \delta}{\Delta t}, \quad (3)$$

式中：

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta t} = \frac{\sqrt{\mu a(1-e^2)} \sin i \sin u}{r^2 \sqrt{1 - (\sin i \sin u)^2}}.$$

在实际的检测中，将各项数据代入上述公式，并用 Matlab 通过数值计算得出偏流角的角速度作为偏流转台的转动角速度。

5.2 精密转台角速度的计算

精密转台做匀速运动，用来模拟卫星绕地球的转动。根据相机焦距、平行光管长度、动态目标载体的半径、CCD 像元尺寸和 CCD 扫描行频来确定目标像速，即精密转台的转动速度。

设 CCD 像元尺寸为 d ，CCD 扫描频率为 f ，焦距为 F ，像元移动速度为 v_a ，精密转台线速度为 v_m ，转速为 ω_m ，平行光管长度为 L ，动态目标载体的半径为 r ，则有：

$$v_a = d \times f, \quad (4)$$

$$v_a/v_m = F/L, \quad (5)$$

$$\omega_m = v_m/r. \quad (6)$$

由式(4)、(5)、(6)可得

$$\omega_m = d \times f \times L / (F \times r)$$

检测时，根据相机 CCD 的扫描行频，就可由上述公式求得精密转台的转动角速度。

6 试验结果分析

根据上述设计方案研制了动态成像地面检测

系统的样机,对样机系统进行了实验测试和误差分析。

6.1 稳速精度测量

稳速精度测量采用位置差分法(也称定时测角法)^[10]。稳速精度计算公式如下:

$$K_w = \frac{1}{\theta_g} |\bar{\theta} - \theta_g|, \quad (7)$$

式中, $\bar{\theta}$ 为给定速度下被测轴在规定的采样时间内实际转过角度的平均值。 θ_g 为给定速度下被测轴在规定的采样时间内转过角度的理论值。

在实际试验中,使用 DSP 内部的正交编码脉冲单元,对反馈脉冲计数。用通用定时器多次采样,计算固定时间内实际走过的脉冲数,与基准脉冲比较。

取行频为 0.90 kHz,转换为 DSP 的 QEP 单元编码器脉冲数,在 2 s 内应走过 218 880 个脉冲,实际采样结果 218 815 个脉冲,如图 6 所示。可得稳速精度为:

$$K_w = \frac{218\,880 - 218\,815}{218\,880} \times 100\% = 0.0297\%$$

即稳速精度接近万分之三。

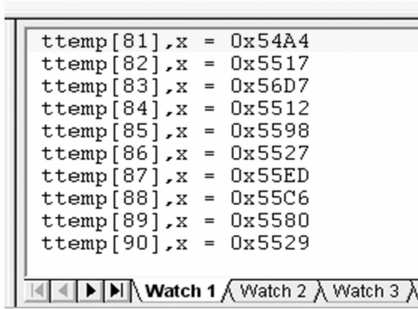


图 6 DSP 定时器采样

Fig. 6 Sampling by DSP timer

6.2 瞬时速度误差测量

采用瞬时速度误差测量方法在系统速度稳定状态下,测出波动时间间隔及最大相位差。用最大相位差角度除以在波动时间间隔内走过的角度,计算公式如下:

$$K_s = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t \times \omega_0} \times 100\% . \quad (8)$$

取行频值 1.31 kHz,基准频率 $F = 27.02$ kHz,基准频率周期 $T = 37.0 \mu s$ 。如图 7 所示,在示波器中测得直流电机平均波动时间间隔为 $\Delta t = 11.6$ ms,则一个波动周期内转动角度约为 $\Delta t \times \omega_0 = 810''$ 。

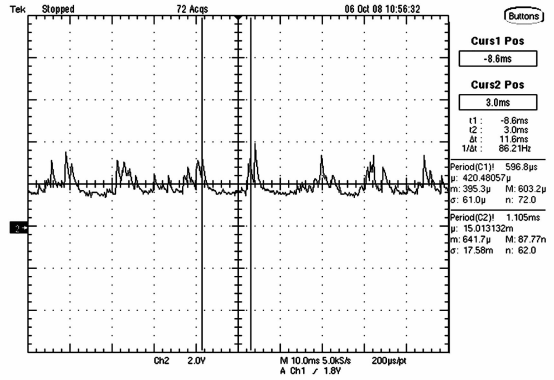


图 7 反电动势采样波形

Fig. 7 Sampling waveform of back electromotive force

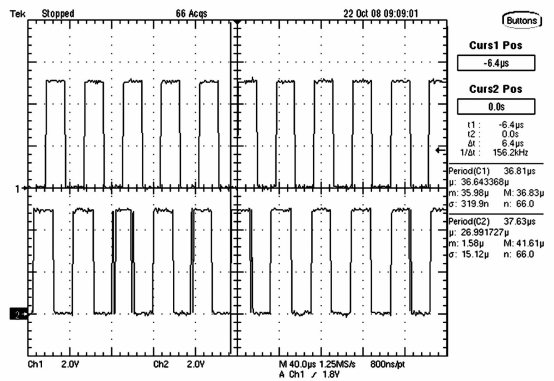


图 8 滞后最大相角采样波形

Fig. 8 Sampling waveform of the biggest lagging phase angle

测量 $\Delta\Phi$ 需要使用示波器两路探头,同时量取基准脉冲及反馈脉冲波形,经过多次采样,得到相位差最大的波形图,如图 8 所示。调整示波器时间轴测量光标得到两组脉冲上升沿滞后最大时间间隔为 $7.2 \mu s$;同样,测得超前最大时间为 $6.4 \mu s$;基准脉冲在时间轴上周期为 $41.79 \mu s$,相当于角位移 $1.65''$ 。通过换算,得:

$$\Delta\Phi = 13.6 \times 1.65 / 41.79 = 0.54''$$

由以上数据,得到瞬时速度误差 K_s 为:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t \times \omega_0} \times 100\% = \frac{0.54''}{810''} \times 100\% = 0.066\% .$$

从上面的试验结果可以得出,本系统具有良好的速度精度。

6.3 偏流角精度测量

偏流角给定角度为 $45, 90, 180, 270^\circ$,测试 10 次,测试结果如表 1。

表 1 偏流角试验结果

Tab. 1 Experimental results of draft angles

次数	角 度			
	45°	90°	180°	270°
1	45°04'20"	90°04'20"	180°03'20"	270°02'40"
2	44°57'20"	90°04'00"	179°57'40"	270°03'00"
3	45°03'00"	90°02'20"	179°58'00"	270°03'20"
4	45°02'40"	90°03'00"	180°04'20"	269°56'40"
5	44°57'40"	90°04'20"	180°02'40"	270°02'20"
6	45°03'20"	90°02'40"	180°03'00"	270°03'00"
7	45°02'20"	89°58'00"	179°57'00"	269°58'00"
8	44°58'00"	89°57'20"	180°03'20"	270°02'20"
9	45°02'20"	90°04'20"	180°02'20"	270°02'20"
10	45°04'00"	90°02'40"	179°57'20"	269°57'00"

参考文献:

- [1] 龙夫年, 张旺, 刘剑峰. 卫星姿态精度对 TDICCD 相机的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3):382-384.
LONG F N, ZHANG W, LIU J F. Effect of Satellite control accuracy on TDICCD cameras[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3):382-384. (in Chinese)
- [2] 王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 等. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12):2465-2472.
WANG D J, KUANG H P, CAI X CH, et al.. Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2465-2472. (in Chinese)
- [3] 闫得杰, 徐抒岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2199-2203.
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2199-2203. (in Chinese)
- [4] 樊超, 李英才, 易红伟. 速高比对 TDICCD 相机的影响分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(7):817-821.
FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence of velocity-height ratio of satellite on the TDICCD camera[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(7):817-821. (in Chinese)
- [5] 樊超, 李英才, 易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质

计算给定角度与测量角度的偏差, 得出偏流角控制平均误差 $< 5'$, 满足相机要求偏流角调整位置精度 $\leq \pm 5'$ 的要求。

7 结 论

本文设计了一种空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统, 并在实际系统中进行了试验验证。试验结果表明, 设计的系统具有良好的性能, 能满足实际系统的应用需要。根据本文方案研制的系统已在某型号空间可见光相机的研制中得到了实际应用。

的影响分析[J]. 光电工程, 2007, 34(9):70-73.

- FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence analysis of drift angle on image quality of TDICCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9):70-73. (in Chinese)
- [6] Texas. Instruments. TMS320x28xx, 28xxx DSP Reference Guider [Z]. *Literature Number: SP-RU566H. June 2003-Revised Match 2009.*
- [7] Texas. Instruments. TMS320F28335, F28334, F28332, F28235, F28234, F28232 Digital Signal Controllers [Z]. (Rev. F).
- [8] 赵岩. 高精度快速非陀螺寻北系统速度稳定性研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
ZHAO Y. *Study on the speed stability for the high precision fast nongyroscopic north seeking system* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [9] 郝晓宁, 王威. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.
XI X N, WANG W. *Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbit* [M]. Changsha: Defense Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 秦继荣, 沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 196-200.
QIN J R, SHEN A J. *Modern DC Servo Control Technology and System Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 196-200. (in Chinese)

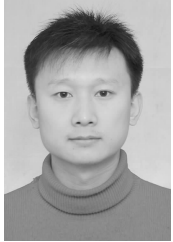
作者简介:



郑耿峰(1983—),男,福建泉州人,博士研究生,研究方向为自适应建模与控制。E-mail:GF.Zheng83@gmail.com



金龙旭(1965—),男,吉林延吉人,研究员,博士生导师,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,研究方向为空间相机智能控制。E-mail:jinx@ciomp.ac.cn



张柯(1979—),男,山东济南人,助理研究员,2003年于天津工业大学获硕士学位,研究方向为电机系统设计与控制。E-mail:zkdlm911@sohu.com



梁伟(1979—),男,吉林蛟河人,博士研究生,讲师,研究方向为光电跟踪与计算机控制。E-mail:liangweiafce@126.com



韩双丽(1968—),女,山东昌邑人,副研究员、硕士生导师,研究方向为空间光学遥感器热控制技术。E-mail:shuanglihan@yahoo.com.cn

●下期预告

用于大气遥感探测的临边成像光谱仪

薛庆生^{1,2},王淑荣¹,李福田¹,林冠宇¹,汪龙祺¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;

2.中国科学院 研究生院,北京 100039)

分析了大气临边成像光谱探测的原理,然后依据应用要求设计并研制了光栅色散型紫外/可见临边成像光谱仪原理样机。该样机采用宽波段折射式消色差前置望远光学系统与改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统匹配的结构型式,工作波段为 540~800 nm(一级光谱)和 270~400 nm(二级光谱),通过切换紫外、可见带通滤光片来实现两个波段分别探测,质量为 8 kg,体积为 450 mm×250 mm×200 mm。用该样机进行了实验室光谱实验,并对光谱分辨率进行了分析,测量了该样机的实际光谱分辨率。测量结果表明,该样机的实际光谱分辨率为 1.3 nm,接近其理论光谱分辨率 1.12 nm,满足设计指标 1.4 nm 的要求,并且具有体积小、质量轻等特点,适合空间遥感应用。