

文章编号 1004-924X(2008)12-2465-08

TDI-CCD 全景航空相机前向像移 补偿的数字实现方法

王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 刘志明, 张雪菲

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高航空相机的照相分辨率, 必须对航空相机拍照时飞行方向上景物与感光介质之间存在相对运动产生的前向像移进行补偿, 以使景物与感光介质在拍照过程中相对静止。分析了 TDI-CCD 全景航空相机产生前向像移的原因、像移补偿精度与伺服系统指标之间的关系, 以及补偿机构—反射镜的工作方式; 然后, 提出了一种基于定点数字信号处理器的控制系统来实时实现前向像移补偿的算法。深入讨论了数字伺服控制系统中的补偿精度、算法选择、相位计算、时间约束等关键问题, 并给出了一种适合于工程实际的硬件结构与软件流程。实验结果表明, 速度环的稳速误差为 0.85%, 带来的像移为 0.425 μm , 位置环的归位时间为 0.8 s, 满足系统总体要求。

关键词: 航空相机; 前向像移补偿; 数字信号处理

中图分类号: V475.3; V241.53 **文献标识码:** A

Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera

WANG De-jiang, KUANG Hai-peng, CAI Xi-chang, LIU Zhi-ming, ZHANG Xue-fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For compensating the forward motion caused from the relative movement between scene and sensitive medium when photographing by a aerial camera, a digital compensation method is presented to keep a relative still for the scene and the sensitive medium to improve image resolution. The causes of image forward motions and relationship between compensation precision and requirements for servo control system are analyzed and the working of compensation structure-scanning mirror is discussed. Then, a real time forward motion compensation system based on digital signal processing chip is proposed to implement the control algorithm digitally. Some critical issues in servo control system, such as compensation precision, algorithm selection, phase calculation and time constrains are intensively studied. Finally, a hardware architecture and a software flow chart suitable for engineering are presented. Experiment results indicate that the error of velocity loop stabilization is 0.85%, the image motion is 0.425 μm , and the time used to go back to the original position is 0.8 s, which can meet the

收稿日期: 2008-08-15; 修订日期: 2008-10-14.

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目 (No. O70Y32R070)

requirements of the system.

Key words: aerial camera; forward motion compensation; digital signal processing

1 引言

TDI-CCD (Time Delay and Integration Charge-Coupled Devices) 是一种特殊的线阵 CCD 器件,它利用时间延迟积分技术,可在低照度的条件下,获得高灵敏度、高空间分辨率的图像,利用机械或光学拼接技术还可获得大视场的图像,因此该器件被广泛应用于航空、航天相机中^[1]。

与地面拍照不同,在航空相机摄影时,由于振动、飞机的前向飞行以及相机的摆动等,被照景物与感光介质间存在相对运动,这会带来图像的拖尾效应,导致图像模糊,给后续的图像判读工作带来极大的困难^[2]。全景式航空相机像移主要分为以下几类^[3]:飞机前向飞行带来的前向像移;飞机的飞行姿态(俯仰、偏航和滚动)带来的像移。像移的补偿方式主要分为以下几种:光机式补偿,电子式补偿和图像式补偿。光机式补偿根据光学原理利用机械结构使景物与感光介质在摄像期间保持相对位置不变,其中控制系统的精度对补偿效果起决定性影响^[4];电子式补偿主要针对飞机的前向飞行引起的像移,它利用感光介质(主要是 CCD 器件)的电荷转移驱动技术使景物与相机同步,其中输入给 CCD 的行转移频率准确性对补偿的效果起决定性影响;图像式补偿是利用图像处理技术,从拍摄到的照片中恢复原信号,该方法主要有两种实现手段:(1)预先知道像移量的大小,然后恢复,这种方法恢复的效果尚可;(2)盲信号恢复,恢复的效果依赖于图像的内容。

航空相机实际的像移补偿方式主要为光机式补偿与电子式补偿,控制系统的稳态精度对补偿的效果具有决定性影响。

本文主要讨论 TDI-CCD 全景式航空相机的前向像移补偿以及 DSP(Digital Signal Processing)实现方式。介绍了 TDI-CCD 全景式航空相机像移的产生原因以及对伺服控制系统的要求;描述了前向像移补偿机构—反射镜的工作方式;讨论了使用 DSP 实现伺服控制中遇到的 3 个问题,包括算法的选择,相位的延迟,时间的约束等;最后给出了系统的软硬件结构与试验结果。

2 TDI-CCD 全景式航空相机的前向像移

如文章^[5-7]所述,前向像移是 TDI-CCD 全景式航空相机的一种主要像移,严重影响照相的分辨率,本节分析了前向像移的产生原因以及对伺服系统的要求。

2.1 前向像移

如图 1 所示,在相机曝光时间内,由于飞机以速度 v_s 飞行,地面景物 A 点相对于飞机向后运动到 A_1 点,于是像点变成了一条短线,使景物模糊不清。其中 X 轴为飞机的飞行方向。

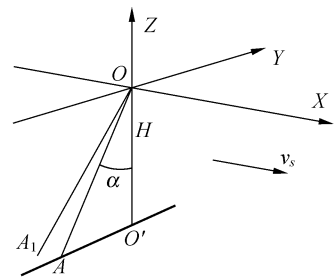


图 1 前向像移示意图

Fig. 1 Diagram of forward motion

消除此像移通常是利用扫描反射镜在照相过程中产生一个附加的旋转运动来实现。例如飞机向前飞行,假若反射镜沿像移相反方向以某一角速度作旋转运动,使图 1 中短线 AA_1 等于零,则可达到完全补偿的目的。

假设飞机不动,地面景物点 A 相对飞机以速度 v_s 向后运动,此时 A 点相对反射镜的角速度为: $\frac{v_s}{H} \cdot \sin \alpha$,其中 v_s 为飞机飞行速度, H 为飞行高度, α 为扫描角。由于反射光线的转角两倍于平面反射镜的转角,因此反射镜的补偿角速度为:

$$\omega_{\text{Fwc}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_s}{H} \sin \alpha. \quad (1)$$

一般情况下飞机的飞行速度与飞行高度由飞机控制系统给出,而扫描角可通过正弦电位计给出。

2.2 前向像移的补偿误差

如果补偿系统提出的指标过高,可能导致控制系统稳定性变差,机械加工难度增大,反馈原件的成本几十倍提高。因此必须合理的分配每个像移补偿系统的误差范围。

伺服系统的稳态误差决定了前向像移补偿系统的残差大小,一般认为补偿后的像移残差不超过 $1/3$ 像元时,不影响成像的质量。

对于工程上广泛使用的滞后超前校正算法,稳态误差的大小与系统的开环放大倍数成反比^[9],在工程设计中,应在满足系统稳定的前提下,将开环放大倍数调至最大,这样即保证了伺服系统稳态的精度,也增强了系统的刚度,有利于克服各种干扰。

文章^[5]给出前向像移残差表达式为:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_s}{H} \sin \alpha \cdot f \cdot t \cdot \delta_1, \quad (2)$$

其中 f 为焦距, t 为曝光时间, δ_1 为反射镜速度控制系统的补偿误差。设 $\frac{v_s}{H} = 0.05$, $\alpha = \frac{\pi}{2}$, $f = 1 \text{ m}$, $t = 2 \text{ ms}$, 像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 。如果反射镜不补偿,即 $\delta_1 = 100\%$,带来的像移残差为 $50 \mu\text{m}$,远大于 $1/3$ 像元 ($3.3 \mu\text{m}$) 的基本要求。

一般的速度环开环放大倍数 > 1000 ,这是比较容易实现的,假如放大倍数取 1000 ,像移残差仅为 $0.05 \mu\text{m}$,这给其它系统的设计装调带来较大的余量。

3 反射镜工作方式

如文献^[5]所述,相机在工作时,镜筒以飞行方向为轴进行摆扫成像。来自地物的光线与水平光轴成 45° 扫描反射镜,光线被扫描镜折转 90° 后射入照相物镜,再经照相物镜后最终成像在焦面上。

拍照时反射镜与镜筒均工作在速度环,回扫时工作在位置环。对于任何控制系统,如达到某一速度并稳速,需要一定的时间,因此镜筒与反射镜在达到照相速度前均需要一定的启动时间^[8-9],在二者都达到摄影速度后,开始摄影;完成摄影后,反射镜与镜筒均需回到照相起始位置,由于超

调的影响,为保证位置精度,在起始位置点需保持一定的时间。

在摄影开始时刻,反射镜所需的起始补偿速度如式(1)所示,由于速高比与镜筒的扫描角均为时变的量,因此每次反射镜的摄影起始补偿速度是不同的,而镜筒拍照的扫描速度为定值,所以镜筒的摄影起始速度为固定的。

图 2 为一个速度系统的阶跃响应,速度在 t_1 时刻达到稳速,针对反射镜系统,为了精确的补偿,摄影同步信号应发生在 t_1 时刻后。镜筒在摄影同步信号发生时,速度亦应稳定在给定固定摆扫速度上,设镜筒在 t_2 时刻达到稳速,则摄影同步信号发生时刻为 $\max(t_1, t_2)$ 。

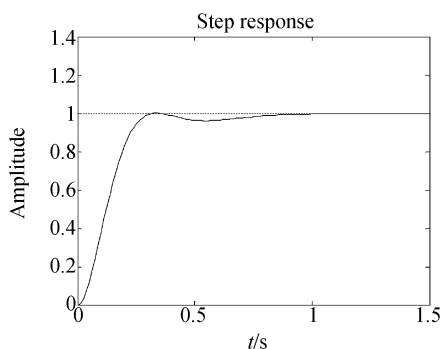


图 2 速度回路阶跃响应曲线

Fig. 2 Step response of velocity loop

对于镜筒,不同的速高比对应着不同的扫描角,为了保证照片的覆盖宽度,镜筒摆扫的起始角应为:不同速高比对应的起始角加上零时刻至 $\max(t_1, t_2)$ 时刻镜筒扫过的角度,该角度可表示为:

$$\phi_1 = \int_0^{\max(t_1, t_2)} \omega_1(t) dt, \quad (3)$$

$\omega_1(t)$ 为镜筒的瞬时角速度,因为镜筒摄影时,镜筒转速是一定的,因此 ϕ_1 是一个定值。

对于反射镜,为使反射镜正下方的景物摄入 CCD 内,在摄影同步信号发生时,反射镜面应稳定在与水平线成 45° 的夹角上,因此反射镜的起始扫描角为 45° 加上零时刻至 $\max(t_1, t_2)$ 反射镜扫过的角度,如式(4)所示:

$$\phi_2 = \int_0^{\max(t_1, t_2)} \omega_2(t) dt, \quad (4)$$

$\omega_2(t)$ 为反射镜瞬时速度,因为反射镜在摄影起始时刻,角速度是不同的,因此 ϕ_2 也是不同的。工

程实际中可以测量单位阶跃响应(如反射镜起始速度为 $1^\circ/\text{s}$ 的情况)在零时刻至 $\max(t_1, t_2)$ 扫过的角度,设该角度为 ϕ ,则对于其它的摄影起始角速度,如 ω' ,零时刻至 $\max(t_1, t_2)$ 反射镜扫过的角度应为:

$$\phi_2' = \frac{\omega'}{\pi} \cdot 180^\circ \cdot \phi. \quad (5)$$

在此种情况下反射镜的起始角位置应 $45^\circ + \varphi_2'$ 。

综上所述,镜筒、反射镜的同步工作过程可以描述为:(1)DSP 计算镜筒、反射镜起始扫描角位置;(2)DSP 发出镜筒,反射镜速度开始命令;(3)在 $\max(t_1, t_2)$ 时刻发出摄影同步脉冲信号,(4)在镜筒到达摆扫结束角时,将速度环切换到位置环;(5)在位置环时间结束后进行下一个拍照周期。

4 DSP 伺服系统中的关键问题

4.1 控制算法的选择

反射镜像移补偿系统的核心为速度环的设计,要求速度环稳态精度高、动态响应快、刚度好。

传统的校正算法为超前滞后法,为保证稳定性通常将速度环设计成 0 型系统。以该算法为核心,衍生了一系列的优化方法。为了减小稳态误差,文章^[9]在超前滞后校正装置后加了一个积分器,因此该系统对阶跃输入的稳态误差为零,但由于积分器的相位为 -90° ,因此该种结构的稳定性差,内部的积分环节非常容易饱和,从而失去校正作用,所以必须辅以精密的限幅电路才能正常工作。为了提高系统的刚度,文章^[10]采用高阶超前滞后校正算法,即在超前滞后校正环前再加一级滞后环节,该方法亦降低了系统的稳定性。文章^[11]采用双环控制策略,速度内环采用陀螺作为反馈软件,速度外环采用编码器作为速度反馈元件,由于高精度的编码器的价格比较昂贵,限制了该方法在工程实际中的应用。新型的控制策略,如自适应控制、变结构控制、模糊控制和专家控制虽然在某些特定的仪器中获得应用,但缺乏普遍性,可以说理论上讨论的多些,实际中缺乏可操作性。

综合考虑算法的稳定性、设计成本以及本相机对伺服控制系统的要求,此次设计采用传统的滞后超前算法,如图 3 所示。

其中 $G_v(s)$ 为超前滞后校正器, K_{vs} 为放大倍

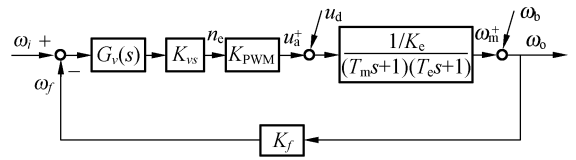


图 3 速度环控制框图

Fig. 3 Block diagram of velocity loop

数, K_{PWM} 为 PWM(Pulse Width Modulation) 传递函数, $\frac{1/k_e}{(T_ms+1)(T_es+1)}$ 为电机传递函数, K_f 为陀螺的传递函数。实验表明该方法能够满足航空相机的反射镜像移补偿的指标要求。

4.2 影响相位裕度的因素

采用超前滞后校正算法,相位裕度直接影响到系统的稳定性,一般设计中相位裕度应在 40° 以上。采取 Matlab 软件仿真即可得到速度开环在剪切频率处的相角,图 4 为速度开环频率响应与相位响应,剪切频率处时的相位裕度为 55° 。

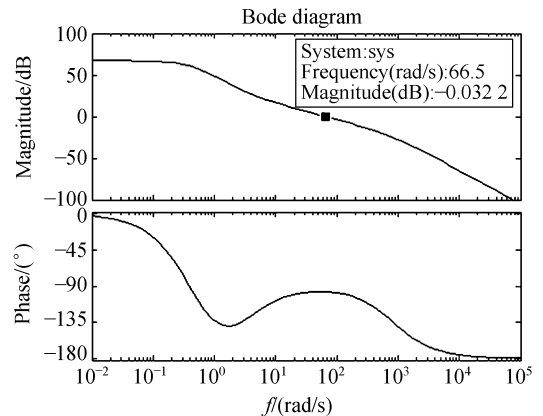


图 4 速度回路开环波特图

Fig. 4 Bode diagram of velocity open loop

通常认为这就是系统开环的相位裕度,这种判断是不准确的。因为采用的反馈元件(如陀螺),滤波电路,ADC 采集电路对相位均有一定的延迟,下面逐一进行分析。一般的陀螺在 50 Hz 频率有 -90° 的相位延迟,通常速度环的开环剪切频率 $< 15 \text{ Hz}$ 。因无法准确建立陀螺的数学模型,需给陀螺预留一定的相位裕度,本次设计中选取 10° 。

航空相机的工作环境是比较恶劣的,因此反馈元件的输出往往夹杂了众多噪声,通常的做法是对这些信号进行预滤波。由于 IIR(Infinite

Impulse Filter)所需的运算量远小于 FIR(Finite Impulse Filter),且 IIR 滤波器有模拟实现电路,因此广泛采用 IIR 滤波进行滤波。一阶 IIR 滤波器可表示为:

$$H(s) = \frac{1}{(RCs+1)} \quad (6)$$

在频率 $1/RC$ 处,相位延迟为 -45° ,对于高阶的滤波器,相位延迟更大。控制系统设计中,滤波器带来的相位延迟比滤波效果更为重要,如果相位延迟过大,则会导致系统不稳定,即使滤波效果再好,也是不可取的,因此,需要在滤波效果与相位延迟之间进行折衷。工程设计中为了保持系统的稳定,一般仅能选择一阶 IIR 滤波器,且滤波器的截止频率应做的高,以免造成相位延迟过大,本次设计中一阶 IIR 滤波器的 RC 时间常数取 1.64 ms ,在速度开环 15 Hz 处带来的相位延迟不超过 5° 。对于反馈元件的噪声,根本的抑制办法是降低供电电源的噪声,减少连接线的长度以及减少线间的干扰。

一般的 AD 芯片从发出 AD 转换开始信号到接收 AD 转换完成信号所需的时间是微秒级的,在这个时间内 CPU 是不能进行校正运算的,这占用了 DSP 一个校正周期内的运算时间。本设计采用如下方式解决:在上一次校正结束后发出 AD 转换开始信号,在下一次校正时直接读取 AD 转换后的陀螺、电位计值等,优点是每一次校正运算时 DSP 不需要等待 AD 转换占用的时间,缺点是带来了相位延迟。

模数转换相当于一个采样保持环节,传递函数为:

$$H_1(s) = \frac{1 - e^{-\tau_0 s}}{s} \quad (7)$$

相位延迟为 $-\omega\tau_0/2$,假设系统的带宽为 15 Hz ,则 $\tau_0 = 1.25 \text{ ms}$,在该点引起的相位延迟为 3.3° ,这对系统的稳定性影响非常小,工程实际中可以忽略不计。

4.3 数字校正的时间约束

本设计将反射镜伺服控制系统用一块 DSP 处理器 TMS 320 F 281 2 实现。TMS 320 F 281 2 是定点 32 位数字信号处理器,浮点加法或浮点乘法运算需要调用库函数,大约需要 80 条指令。虽然该 DSP 的工作频率为 150 MHz ,但由于内部 FLASH 存储器的限制,实际中 DSP 的等效工作

频率为 $80 \sim 90 \text{ MHz}$,因此完成一次浮点加法或浮点乘法所需的时间为 $1 \mu\text{s}$ 。

一个轴的超前滞后校正需要的浮点乘法、加法运算不超过 50 次,因此所需的校正时间不超过 $50 \mu\text{s}$ 。一般认为数字校正系统采样频率大于系统闭环带宽 10 倍时不影响校正的精度,本次设计中每个伺服系统的带宽均不超过 20 Hz ,取校正采样频率为 800 Hz ,远大于控制系统的带宽,对校正精度的影响可以忽略不计。此时一个校正周期为 $1250 \mu\text{s}$,即使附加上一些逻辑判断、命令语句等,所占用的运算时间也不超过 $1/10$ 个校正周期。

5 反射镜伺服控制系统的 DSP 实现与试验结果

5.1 伺服控制系统的组成

本伺服系统的组成如图 5 所示。直流力矩电机具有转速低、力矩大、力矩波动小、机械特性大、线形度好的优点,可以在低转速,甚至堵转下长期工作,因此反射镜电机选择直流力矩电机。为了增强系统的精度,电机与被控系统要选择同轴的机械结构,避免使用齿轮传动系统。

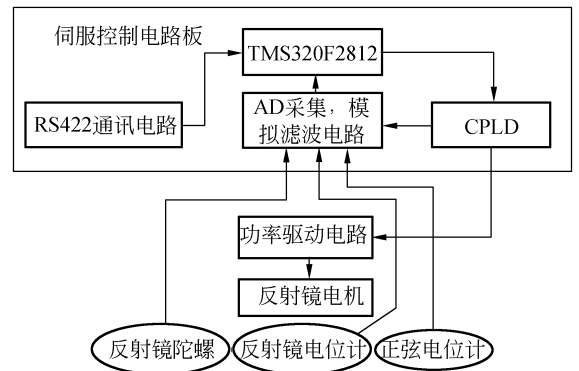


图 5 控制系统连接关系图

Fig. 5 Connection diagram of control system

功率驱动电路为经典的 H 型双极模式 PWM 驱动电路。陀螺为角速度反馈元件,电位计为位置反馈元件,二者均为模拟输出。

伺服控制电路板主要有以下几部分组成, TMS 320 F 281 2, RS 422 通讯电路, ADC(Analog Digital Conversion) 采集、模拟滤波电路,

CPLD(Complex Programmable Logic Device)逻辑控制电路。RS 422 通讯电路负责主控与伺服控制器的通讯,上行与下行信息通过该电路传输,AD 采集电路负责将速度反馈元件(陀螺),位置反馈元件(电位计)的模拟值进行模数转换,CPLD 负责完成组合逻辑运算。

图 6 为本文试验的工作环境及装置。实验流程为:主控向伺服控制器(TMS 320 F 281 2)发送工作命令,伺服控制器根据命令的类型进行判断,完成主控发来的各种命令,如自检、准备、拍照等,同时伺服系统按照约定向主控反馈工作状态。使用示波器实时观测反射镜速度环、位置环的工作状态。

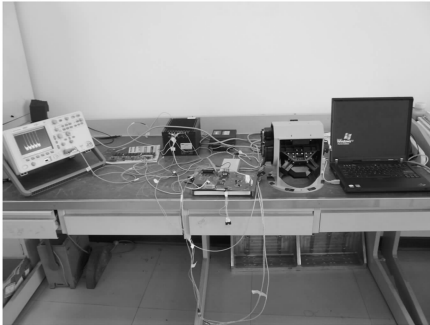


图 6 DSP 伺服系统试验装置

Fig. 6 Experiment equipment of DSP servo control system

5.2 伺服控制系统的程序流程

由于相机在拍照的过程中环境比较苛刻,因此对嵌入式软件的可靠性要求比较高。本伺服系统程序主要分为 3 个大的模块:(1)主程序如图 7

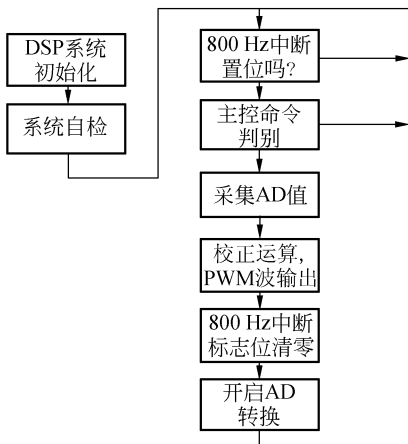


图 7 主程序流程图

Fig. 7 Flow chart of main program

所示,完成系统的初始化,自检和校正运算等,(2)串口中断子程序:负责完成伺服控制系统与主控之间的通讯;(3)800 Hz 通讯中断子程序:该子程序负责产生校正运算所需的 800 Hz 中断,为尽量避免中断嵌套带来的麻烦,该中断服务程序只对一个标志位置位,然后退出,在主程序中,查询该中断标志位,如置位,则进入校正程序。

5.3 试验结果与讨论

反射镜的工作过程分为像移补偿与回摆,像移补偿过程为速度环,控制系统的精度直接影响到像移补偿的效果;回摆过程为位置环,只要反射镜在规定的时间内回到初始位置即不影响下一次拍照。长春光机所在光电经纬仪、光电侦查平台研制方面处于国内领先水平,本文选择其中有代表性的两套设备:设备 1^[8],设备 2^[10]作控制系统性能上的对比。

5.3.1 速度环的测试与试验结果

速度环的测试分为两步,(1)速度环对阶跃输入达到稳速所需的过渡时间。为了保证照片覆盖宽度,要求稳速过程不超过 0.5 s。综合考虑超调量与稳速时间,通过实测系统的稳速过程不超过 0.3 s,表 1 为本系统与两套设备速度环稳速时间的对比。

表 1 速度环阶跃响应所需稳速时间的对比

Tab. 1 Comparison of stabilization time in velocity loop step response

	设备 1	设备 2	本文
实测稳速时间	<0.7 s	<0.3 s	<0.3 s

(2)在像移补偿过程中,由于本文的速度环校正环节采取 0 阶结构,实际速度与给定速度必然有一定误差,因此需要测量速度环对阶跃输入的稳态误差,这直接影响到像移量的大小。图 8 为



图 8 速度稳定回路阶跃响应试验结果

Fig. 8 Experimental result of step response of velocity-stabilized loop

实测的反射镜速度环阶跃响应,反馈元件为陀螺,由于电源噪声等影响,一次测量并不能真实反映系统性能。经多次测量,速度环在补偿阶段的稳态误差不超过 0.85%,按照第 2 章的推导,由此带来的像移量为 $0.425 \mu\text{m}$,满足总体对反射镜分系统的要求。

5.3.1 位置环的测试与试验结果

与设备 1、设备 2 位置系统不同,反射镜的位置环仅起到一个摆扫过程后归位的功能,总体要求在 1 s 内完成此操作即可,且反射镜摆扫角度不大,最大仅为 2.8° 。因此位置环较为容易实现,实测反射镜在 0.8 s 内即可完成位置归位。

6 结 论

本文深入分析了 TDI-CCD 全景航空相机前

向像移的产生原因,像移补偿精度与伺服系统指标之间的关系,提出了一种基于定点 DSP 芯片的像移补偿控制系统,将前向像移的补偿算法用 DSP 芯片实时实现。结合工程实践,本文深入讨论了 DSP 伺服控制系统中的补偿精度、算法选择、相位计算、时间约束等关键问题,最后给出了一种适合于工程应用的硬件结构与软件流程,试验表明该位置环补偿误差不超过 0.85%,带来的像移为 $0.425 \mu\text{m}$,位置环归位时间为 0.8 s,满足总体要求。由于软硬件设计中都采用模块化的设计思想,能够较容易地应用到多轴伺服控制系统中。

参考文献:

- [1] 杨秉新. TDI CCD 在航天遥感器中的应用[J]. 航天返回与遥感, 1997, 18(3): 15-18.
YANG B X. Application of TDI CCD in space image sensor[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 1997, 18(3):15-18. (in Chinese)
- [2] 贾平, 张葆, 孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 697-703.
JIA P, ZHANG B, SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 697-703. (in Chinese)
- [3] 刘明, 匡海鹏. 像移补偿技术综述[J]. 光电与控制, 2004, 11(4): 46-49.
LIU M, KUANG H P. Survey on the image motion compensation technology[J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(4): 46-49. (in Chinese)
- [4] MAHEUX J, CRUICKSHANK J, SEVLGNY L. Video-rate image stabilization system[J]. *SPIE*, 1998, 3414: 232-238.
- [5] 吴宏圣, 潘凝. TDI CCD 全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6): 545-549.
WU H SH, PAN N. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 545-549. (in Chinese)
- [6] 翟林培, 刘明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 490-494.
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 490-494. (in Chinese)
- [7] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 203-207.
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordination transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 203-207.
- [8] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪伺服系统捕获跟踪快速运动目标技术的研究[D]. 长春:中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
WANG J L. *Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)

- [9] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 3 版. 国防工业出版社, 1994.
HU SH S. *Principle of automatic control*[M]. 3rd ed. National Defense Industrial Publishing Company, 1994. (in Chinese)
- [10] 毕永利, 刘洵, 葛文奇, 等. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. 光电工程, 2004, 31(2): 16-18.
BI Y L, LIU X, GE W Q, *et al.* Design of velocity-stabilized loop for airborne multi-frame gyroscope stabilized platform[J]. *Opto-electron. Eng.*, 2004, 31(2): 16-18. (in Chinese)
- [11] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究[D]. 长春中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
Wang L M. *Study on stabilization and track control techniques of airborne opto-electronic platform*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)

作者简介: 王德江(1981—), 男, 黑龙江双鸭山人, 主要研究方向为基于 DSP、FPGA 的航空相机系统设计。E-mail: wangdj04@live.cn

● 下期预告

基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器的 磁悬浮飞轮主动振动控制实现

刘 彬, 房建成, 刘 刚

(北京航空航天大学 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100083)

为了抑制磁悬浮飞轮的振动, 分析了磁悬浮飞轮的振动源, 针对磁悬浮飞轮最主要的振动源—不平衡振动, 给出了一种基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器的磁悬浮飞轮主动振动控制实现方案。介绍了所采用的主动振动控制方法、数字控制器的硬件组成和功能原理, 并给出了 DSP 中主动振动控制算法实现和 FPGA 中多任务管理及外设控制等。实验结果表明, 采用本实现方案进行主动振动控制后, 磁悬浮飞轮的不平衡振动衰减至 3.2%。本实现方案对飞轮转子不平衡振动取得了很好的抑制效果, 对于增加磁悬浮飞轮姿态控制的稳定性, 提高对地观测分辨率具有重要意义与应用价值。