

文章编号 1004-924X(2009)03-0615-06

# 空间相机调偏流机构的设计与控制

谷 松<sup>1,2</sup>, 王绍举<sup>1,2</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 130031;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为了减小像移对空间相机成像质量的影响,提高相机分辨率,对空间相机像移补偿方法进行了研究。分析了偏流角产生的原因及调整原理,根据本相机自身特点,设计了高精密像移补偿机构。系统采用正弦机构作为传动形式,以 80C31 作为偏流角控制器,以步进电机为执行元件,以绝对式编码器作为偏流角测量元件,实现了偏流角位置的闭环控制。由于偏流角调整范围在  $-4^\circ \sim +4^\circ$  之间,以  $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ$  作为假想偏流角期望值,用编码器测得了 10 组偏流角调整实际数据。实验结果表明:偏流角控制系统精度可达到  $2'$ ,满足系统对控制系统精度  $< 3'$  的要求,可以实现高精度的像移补偿。

**关键词:**空间相机;调偏流机构;像移补偿;偏流角控制

**中图分类号:** V475.2; V241.03 **文献标识码:** A

## Design and control of drift adjusting mechanism in space camera

GU Song<sup>1,2</sup>, WANG Shao-ju<sup>1,2</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 reduce the effect of image motion on the image quality of space camera and to improve the resolution of camera, a compensation method of image motion to space camera is researched. The producing reason of drift angle and its adjusting principle are analyzed. Based on the characteristics of the camera, a fine compensation mechanism for motion image is designed. By taking a 80C31 as controller of drift angle, a step motor as actuating mechanism, and an absolute encoder as measuring component, the system realizes the closed-loop control of the drift angle position using transmitting form of sine agencies. Because the adjusting range of drift angle is between  $-4^\circ \sim +4^\circ$ , this paper measures and obtains ten groups of practical data by absolute encoder in choosing  $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ$  as the expectation values of drift angle. Experimental results indicate that the drift adjusting mechanism can implement the accurate image motion compensation, and the accuracy of the drift angle can reach  $2'$ , which can meet the accuracy requirement less than  $3'$  for control system.

**Key words:** space borne camera; drift adjusting mechanism; image motion compensation; drift angle control

收稿日期:2008-09-03;修订日期:2008-10-24.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113)

## 1 引言

随着空间科学技术的发展,空间遥感相机以其高分辨率及高可靠性等优点,在军事目标侦察,空间遥测等方面的作用日益突出<sup>[1]</sup>。由于高分辨率航天 TDI CCD 相机采用推扫成像方式,要想得到清晰的图像,必须解决的一个重要技术就是高精度像移补偿。空间相机的载体是在空间运动着的空间飞行器,像移的存在将严重影响成像质量,对于长焦距大孔径的高分辨率空间相机尤为严重。为了提高空间相机的分辨力,必须设计精密的像移补偿机构实现高精度的像移补偿。对于 CCD 相机来说,调偏流系统是 CCD 相机的重要组成部分,是决定 CCD 相机成像质量好坏的关键组件之一<sup>[2]</sup>。

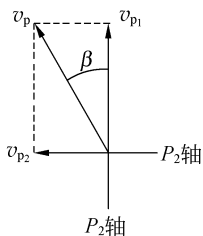
## 2 偏流角产生的原因与调整原理<sup>[2-7]</sup>

星载相机对星下点进行摄像时,被摄目标速度折合到像面坐标系上的像移速度为  $v_p$ ,将  $v_p$  在像面坐标系的  $P_1$  轴和  $P_2$  轴上投影,便得到 TDI CCD 推扫方向的像移速度  $v_{p1}$ ,和因地心自转等因素造成的与 TDI CCD 推扫方向垂直的横向像移  $v_{p2}$ ,它与 TDI CCD 推扫方向组成的角度为  $\beta$ ,如图 1(a)所示,即偏流角。

偏流角大小可由下式计算:

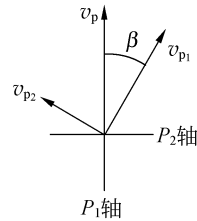
$$\beta = \arctan(v_{p2}/v_{p1}), \quad (1)$$

其中: $v_{p1}$ 、 $v_{p2}$ 为在空间相机像面上的前向和横向像移速度分量,其值与飞行器速度、地心轨道高度,被摄景物处地心距,星下点纬度和经度,飞行



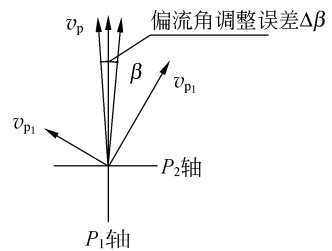
(a) 偏流角的存在

(a) Sketch map of drift angle



(b) 偏流角的调整

(b) Drift angle adjusting



(c) 偏流角的误差

(c) Error of drift angle

图 1 偏流角调整原理图

Fig. 1 Schematic diagrams of drift angle adjusting

器偏航、俯仰和横滚(包括侧摆角)姿态角及其姿态角速率,地球半径(克拉索夫斯基椭球半径),地球自转角速率,相机镜头焦距等值有关。将以上参数代入公式(1),得到调偏流角范围为  $\pm 4^\circ$ ,规定偏流角出现在面坐标系的第一象限时为正,第二象限为负。

由于偏流角的影响,存在与 TDI CCD 推扫方向垂直的横向像移,需要对 TDI CCD 平面进行调整。旋转 TDI CCD 平面与卫星运动速度方向成  $\beta$  角度,TDI CCD 运动如图 1(b)所示,使像面坐标系的  $P_1$  轴与像移速度方向尽量重合,在  $P_1$  轴上产生一个与像移速度值相等且方向相同的补偿速度即可以消除像移。换言之,偏流角调整本质上是消除横向像移速度,因此可以说偏流角调整是空间相机像移补偿的一部分。

在偏流角进行调整时,由于像移速度方向的估值误差、卫星偏航姿态角控制误差、相机像面坐标系与相机坐标系在偏航方向的装调误差、相机坐标系与 GNC 坐标系在偏航方向的装调误差等,使得偏流角的调整存在误差  $\Delta\beta$ ,如图 1(c)所

示,其值应满足:

$$\Delta\beta \leq \arcsin\left(\frac{b}{2 \cdot v_p \cdot \tau \cdot N}\right), \quad (2)$$

其中: $b$ 为TDICCD的相元尺寸; $V_p$ 为相移速度; $\tau$ 为行转移周期; $N$ 为TDICCD的级数; $\tau \cdot N$ 为曝光时间。

将相关参数代入公式(2),得到偏流角调整精度要求 $\leq 18'$ 。这个调整精度包括光学误差、机械误差、偏流角计算误差和偏流角控制误差等相关误差,要达到这个指标,偏流角控制系统必须满足位置精度 $\leq 3'$ 。

### 3 偏流机构设计

根据本相机自身特点,相面几何中心与旋转轴的水平距离为96 mm,故调偏流机构为一长摆臂系统。对于这种系统,回转中心与几何中心不重合,且距离较大,采用一般的齿轮等传动方式占用的质量和体积都较大,难以满足设计要求,而正弦机构则比较合适,其工作原理如图2所示。

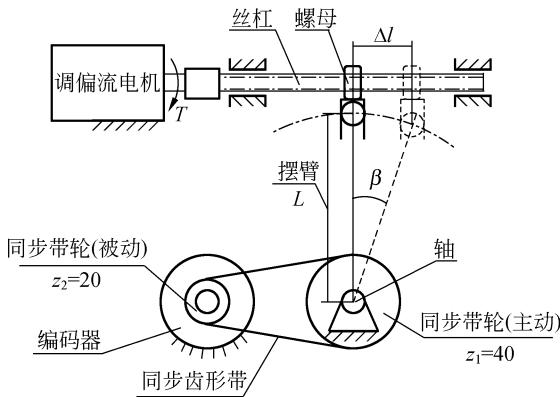


图2 偏流机构工作原理图

Fig.2 Driving structure of drift angle adjusting

系统采用滚珠丝杠作为传动部件,电机带动丝杠转动,丝杠推动螺母平动,螺母通过滑槽推动摆臂末端安装的轴承带动摆臂绕转动轴转动,此时轴承在滑槽中上下滑动,摆臂摆动角度 $\beta$ 即为调偏流角度,摆臂长175 mm。由于螺母的进给量 $\Delta l$ 、摆臂长 $L$ 和摆臂转角 $\beta$ 满足关系式:

$$\Delta l = L \cdot \sin \beta. \quad (3)$$

构成正弦关系,故称这种机构为正弦机构。

调偏流机构实物如图3所示。

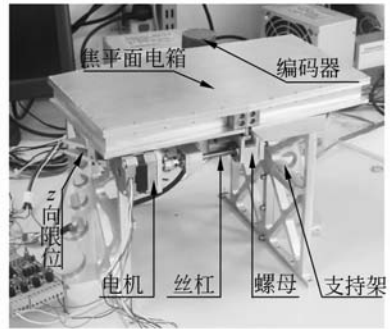


图3 调偏流机构实物图

Fig.3 Drift adjusting mechanism entity

将焦平面电箱直接作为传动部件,而不是传统设计中将其作为负载,免去了过渡环节,可以大大减轻系统质量。

为了增加系统的刚度,还增加了 $z$ 向限位组件,可以有效防止因摆臂过长而产生的 $z$ 向颤动,同时又不影响焦平面电箱绕轴转动。

偏流角控制执行元件为三相步进电机,根据正弦机构的特点,电机相对中心转动角度 $N \cdot \text{step}$ 与偏流角 $\beta$ 满足下式关系:

$$N = \frac{360}{\text{step} \cdot Ph} L \sin \beta, \quad (4)$$

其中:step为电机步距角;Ph为丝杠螺距。

支持架与相机主体结构固连,用于保证TDICCD平面与理论相面位置重合或在安装误差允许范围之内。

偏流角测量元件选用16 bit绝对式光电编码器,测量精度为 $80''$ ,编码器与输出轴通过同步齿形带传动,传动比为1:2。

### 4 偏流机构精度分析

调偏流机构精度受丝杠导程误差、螺母滑槽与摆臂末端轴承间隙、轴承径向跳动影响较大。

#### 4.1 丝杠导程误差引起的机构误差

丝杠导程误差是指螺母实际移动距离与理论移动距离之差,误差最大值为 $8 \mu\text{m}$ ,由公式(3)

得:

$$\Delta\beta_{1\max} = \arcsin \frac{\Delta l}{L} = \arcsin \frac{0.008}{175} = 9.4'' \quad (5)$$

#### 4.2 螺母滑槽与摆臂末端轴承间隙引起误差

由于螺母滑槽与摆臂末端轴承存在配合关系,如果采用过盈配合,则轴承被滑槽夹紧,导致摩擦力变大,甚至锁死;所以必须采用间隙配合,而间隙过大会引起较大的系统空回,因此必须合理选择配合间隙。

本机构给定间隙为  $5 \mu\text{m}$ ,考虑加工误差,配合间隙应在  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  之间,带入式(3),

$$\Delta\beta_{2\max} = \arcsin \frac{\Delta l}{L} = 6 \sim 12'' \quad (6)$$

#### 4.3 轴承径向跳动引起的误差

轴承径向跳动使得摆臂末端轴承与滑槽接触出现跳动,轴承径向跳动量最大值为  $3 \mu\text{m}$ ,带入式(3),

$$\Delta\beta_{3\max} = \arcsin \frac{\Delta l}{L} = \arcsin \frac{0.003}{175} = 3.5'' \quad (7)$$

综上所述,误差  $\Delta\beta_2$  为系统误差,可通过控制算法补偿,误差  $\Delta\beta_1$  与  $\Delta\beta_3$  为随机误差,综合以上结果调偏流机构的机械误差为:

$$\Delta\beta = \sqrt{\Delta\beta_1^2 + \Delta\beta_2^2} \quad \text{得} \quad \Delta\beta \leq 10'' \quad (8)$$

### 5 调偏流机构控制

偏流角控制系统的工作原理是:在偏流角控制器接收到相机控制器发来的控制命令和偏流角计算值后,判断电机是否需要转动、转动的方向及步数,电机需要转动的步数可由式(4)求出,然后通过功率驱动电路驱动偏流角执行单元工作。这时,电机带动滚珠丝杠转动,推动相机焦平面组件绕光轴转动,实现调偏流功能。调偏流控制系统原理框图如图 4 所示。

偏流角控制器采用了逐次逼近的算法,而不是一次到位,这样做的好处是可以有效地消除系统的空回。偏流角控制器的工作流程如图 5 所示。偏流角控制器首先读取相机控制器发来的偏流角计算值  $\alpha$ ,然后读取偏流角测量单元中编码器输出的偏流角测量值  $\beta$ ,计算偏流角偏差  $\alpha - \beta$ ,

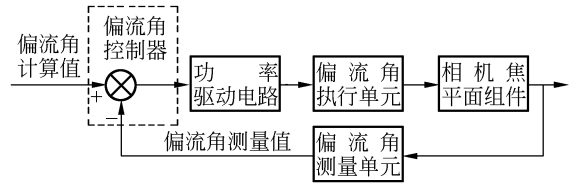


图 4 调偏流控制系统原理框图

Fig. 4 Schematic diagram of drift angle control system

即偏流角计算值与偏流角测量值之差,如果偏流角偏差为零或在误差容许范围内,则偏流机构不工作。反之,偏流角控制且判断电机转动方向,使步进电机向减小偏流角偏差的方向转动,即如果  $\alpha > \beta$ ,偏流角控制器控制电机转动,实现偏流机构顺时针转动  $\frac{1}{2}|\alpha - \beta|$ ;反之,偏流角控制器控制电机反向转动,实现偏流机构逆时针转动  $\frac{1}{2}|\alpha - \beta|$ ,再由编码器读取此时的偏流角测量值  $\beta$ ,重复以上过程,直到偏流角误差在误差容许范围内,电机停止工作,偏流角调整结束。

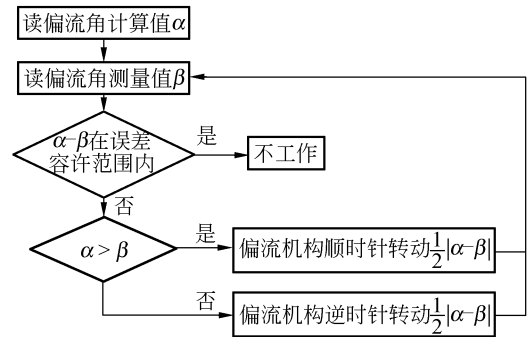


图 5 偏流角控制器工作流程

Fig. 5 Work flow of drift angle controller

### 6 实验结果

给定偏流角度为  $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ ,测试 10 次,测量结果如表 1 所示。

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  $\leq 1'40''$ ,满足相机要求的偏流角调整位置精度  $\leq 3'$  的要求,可以使用。

表1 实验结果

Tab.1 Results of experiment

次数	-4°	-2°	0°	2°	4°
1	-4°00'40"	-2°01'20"	0°01'00"	2°01'20"	3°58'40"
2	-4°01'20"	-2°00'40"	-0°01'20"	2°00'40"	3°59'20"
3	-3°59'20"	-2°01'20"	0°00'40"	1°59'00"	4°01'40"
4	-3°58'40"	-1°59'20"	0°01'20"	1°59'00"	4°01'20"
5	-3°59'40"	-1°59'00"	-0°00'40"	1°58'40"	3°59'40"
6	-4°01'40"	-1°58'40"	0°01'40"	2°01'20"	4°00'40"
7	-4°01'20"	-2°01'00"	0°00'20"	1°58'40"	4°01'00"
8	-3°58'40"	-1°59'40"	-0°01'00"	2°01'20"	3°58'40"
9	-4°00'20"	-1°58'40"	0°01'00"	2°00'40"	4°00'20"
10	-4°01'00"	-2°00'40"	-0°00'40"	1°58'40"	4°00'40"

## 7 结 论

偏流角调整机构作为一种高精度像移补偿机构,在提高空间相机成像质量方面具有重要的作用。本文采用正弦机构作为传动形式,具有以下几个优点:

(1)结构形式简单,质量体积小;

(2)传动精度高,机械传动精度为 $10''$ ,与传统偏流角调整机构传动形式相比有较大的提高,电气控制系统误差为 $1'40''$ ,这主要受航天器件选用的限制,如果选用更高精度的编码器,可以有效

提高电气控制系统的精度;

(3)传动比大,可有效提高系统灵敏度。本系统的传动比可达到1 000以上,而齿轮需要多级传动才能达到这一数字,这无疑会给质量和体积带来负担。

正弦机构作为一种典型的传动机构,凭借其精度高、质量轻、体积小、结构紧凑等优点在地面已得到广泛的应用,但是在空间应用尚属空白。文章采用正弦机构作为偏流角调整机构的传动形式,对减轻空间遥感器质量、缩小体积等具有重要意义,是一次全新的尝试。

## 参考文献:

- [1] 李松,张立平. 空间相机偏流调整旋转轴系的设计与精度分析[J]. 光学精密工程,2004,12(2): 141-144.  
LI S, ZHANG L P. Design and accuracy analysis for drift adjusting rotary axes of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 141-144. (in Chinese)
- [2] 李友一. 空间相机偏流角控制的研究 [D]. 中科院硕士论文,2001.  
LI Y Y. *Study of the drift angle control in a space camera* [D]. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)
- [3] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材,1998.  
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Teaching Material of Department

of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,1998. (in Chinese)

- [4] 刘明,吴宏圣,匡海鹏,等. 航空相机的像移补偿方法及应用[J]. 光学精密工程,2004,12(4):30-34.  
LIU M, WU H SH, KUANG H P, et al.. Method and application of image motion compensation in aerospace camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):30-34. (in Chinese)
- [5] 袁孝康. 星载 TDI-CCD 推扫相机的偏流角计算与补偿[J]. 上海航天,2006(6):10-13.  
YUAN X K. Calculation and compensation for the deviant angle of satellite borne TDI-CCD push scan camera [J]. *Aerospac Shanghai*, 2006(6): 10-13. (in Chinese)
- [6] 颜昌翔,王家琪. 航相机像移补偿计算的坐标变换法[J]. 光学精密工程,2000,8(3):203-207.  
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordinate transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system [J]. *Opt. Precision Eng.*,

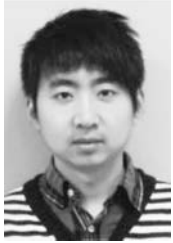
2000,8(3):203-207. (in Chinese)

- [7] MATHEWS B, ZWICKER T. Flight test results from the ultra high resolution, electro-optical framing camera for reconnaissance and other applications using a 9 216 pixel×9 216 pixel, wafer scale, focal plane array[J]. *SPIE*, 1999, 3751:133-144.

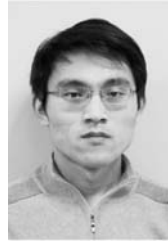
- [8] 李友一. 空间相机中的偏流角控制[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(4):402-406.

LI Y Y. Study of the drift angle control in a space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4):402-406. (in Chinese)

#### 作者简介:



谷 松(1981—),男,辽宁鞍山人,博士研究生,主要从事卫星结构设计、空间相机结构与机构等方面的研究。E-mail:gusong126@126.com



王绍举(1983—),男,山东人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,主要研究方向为星载计算机设计与管理。E-mail:wangshaoju@163.com

#### ● 下期预告

## 快速全天自主星图的识别

张 磊<sup>1,2</sup>, 魏仲慧<sup>1</sup>, 赵宝庆<sup>1</sup>, 何 昕<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 100049)

三角形识别算法是工程应用中较为成熟的算法,为了克服三角形因特征维数较低带来的冗余匹配问题,提出了一种基于三角形识别算法的改进算法。在利用标记法进行了三角形识别的基础上,引入三角形以外的第四颗星,并以其为顶点,与三角形构成假想的四面体,顶点与底面三角形 3 个点的角距既可作为识别特征量,也可用于检验识别的结果是否正确。识别算法以星对角距作为主要识别特征,增加星等差为辅助识别特征,减少了对冗余数据的存储,使导航特征库的容量仅有 0.4 Mb。在识别过程中,利用散列查找法对识别特征构造散列函数,减少了对导航特征库遍历比较的次数和时间开销,加快了识别过程,平均识别时间为 0.43 ms。仿真实验结果表明,该识别算法在较大位置和星等误差时具有较短的识别时间和较高的识别率。