

## 新型空间相机偏流角调整方法

谷松,徐振

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心,  
吉林 长春 130033)

**摘要:** 针对目前国内光学成像侦察卫星成像模式单一、对曲线条带状目标侦察效率低下的现状,开展了以相机实时像移补偿技术为基础的一种新型空间相机偏流角调整方法的研究。介绍了新型空间相机偏流角调整方法的原理,并设计了一种可使空间相机实现实时像移补偿的偏流调整机构。区别于传统的 TDI-CCD 拼接后整体旋转调偏流方式,该机构实现了 TDI-CCD 分片旋转调偏流,以达到空间相机实时像移补偿的目的。最后,进行了偏流机构传动精度分析与测试,分析与测试结果均表明:所设计的偏流调整机构传动精度高,结构系统响应速度快,可满足相机敏捷成像侦查任务。

**关键词:** 空间相机; 偏流机构; 像移补偿

**中图分类号:** V475.2; V241.03    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0209-05

## New drift adjusting method of space camera

Gu Song, Xu Zhen

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** At present, there are some conditions in the research field of the space camera. For example, the imaging mode is single of the optical imaging reconnaissance satellite in our country. The detection efficiency of the satellite is very low for banded target curve. Therefore, it need to carry out a research about the new drift adjusting method of the space camera. This research requires a basis that is the real time compensation technology for the image motion of the camera. First, the theory of the new drift adjusting method of the space camera was introduced, and a drift adjusting mechanism was designed. This mechanism can make the space camera with the real time compensation technology for the image motion. At present, the traditional drift adjusting method is that making all of the TDI-CCDs which have been assembled running together. Know from this, the new drift adjusting method make the TDI-CCD running singly to achieve the time compensation. At last, the transmission accuracy of the flow deviation was analyzed and tested. The test results show that there are many advantages of the drift adjusting mechanism which designed in this article, such as the transmission accuracy is high, and the response speed of structure system is quickly. With this drift mechanism, the space camera can complete the agile imaging reconnaissance tasks.

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

收稿日期: 2014-10-12; 修订日期: 2014-11-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA121502)

作者简介: 谷松(1981-),男,副研究员,博士,主要从事星载一体化卫星结构设计与空间遥感器结构等方面的研究。

Email: gusong126@126.com

## 0 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>。由于高分辨力航天 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是高精度像移补偿。

空间光学相机在轨摄像期间,由于地球本身的自转使卫星的运动方向和相机的实际成像方向并不相同,两者之间的夹角即为偏流角<sup>[1-6]</sup>。TDI CCD 器件最突出的特点是能够利用多级光敏元对运动的同一目标多次积分曝光,而每个光敏元积分曝光获得的较弱信号可叠加为一较强信号输出,使光学相机的质量、体积、信噪比、动态范围等得到有效改善。因此,要想获得清晰的图像,必须在积分时间内保持对同一目标进行积分成像。而偏流角的存在会导致相机在积分成像过程中产生图像像移,影响相机的成像质量。因此,研究偏流角变化规律,对偏流角引起的像移进行分析,且研究一种新型的像移补偿方法对于提高 TDI CCD 相机的成像质量是十分必要的。

要提高空间光学相机的成像质量,必须设计精密的像移补偿机构以实现偏流角补偿。对于 TDI CCD 相机来说,调偏流机构是其重要组成部分,是决定 TDI CCD 相机成像质量的关键组件之一<sup>[7]</sup>。

## 1 调偏流机构方案概述

### 1.1 设计原则<sup>[7]</sup>

调偏流机构一般应满足以下要求:(1)能够自锁以保持像面稳定;(2)有足够高的精度以便于控制;(3)有足够的调偏流范围以便于控制;(4)有足够的稳定性。

### 1.2 方案确定

偏流机构是空间相机常用的一种像移补偿机构,但该方案设计的偏流机构与传统的偏流机构不同,传统的调偏流机构有以下特点:相机在拍摄前预先调好偏流角,拍照时偏流机构保持不动;全部 CCD 装在同一个调偏流机构上,只能共同调整同样的偏流角;往往以视场中心为基准计算偏流角,所以越远离中心偏流角调整误差越大,视场边缘处

最大。

传统调偏流模式如图 1 所示。

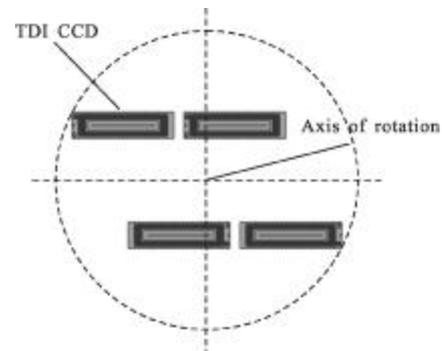


图 1 传统调偏流模式示意图

Fig.1 Diagram of traditional drift adjusting mode

针对传统调偏流机构存在的缺陷,该方案设计的调偏流机构具有以下优点:每片 CCD 分别装在不同的调偏流机构上,可以分别调整不同的偏流角;以每片 CCD 的中心作为像移补偿计算点,分别对每片 CCD 进行像移补偿,大大减少了 CCD 边缘的计算误差;相机在拍照过程中不断地更新信息,实时计算并进行像移补偿,消除累计误差;相机控制器与星务计算机共用一台计算机,可根据最新的姿态轨道信息计算像移进行补偿,无通讯延时。

文中的调偏流模式如图 2 所示。

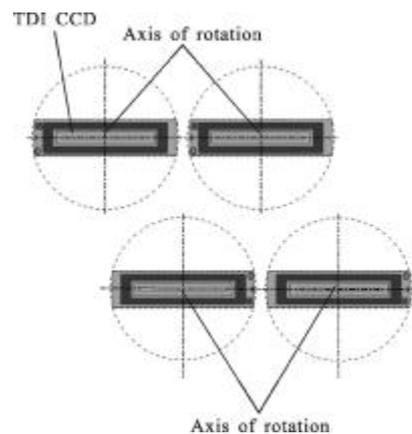


图 2 快速高精度相机调偏流工作模式

Fig.2 Working mode of fast high resolution camera

采用单片 CCD 分别调偏流的方式,具有以上优点,但是由于 CCD 尺寸小,要保证成像连续,光学系统对每片 CCD 之间的距离有严格的要求,每片 CCD 都有自己独立的旋转轴系与驱动单元,这无疑给结

构设计带来了巨大困难。为了满足质量与空间要求,提高传动精度。

### 1.3 系统组成

调偏流机构由 n 个调偏流子机构组成,每个调偏流子机构负责一片 TDI CCD 转动,该相机包括 5 片 TDI CCD,所以调偏流机构包括 5 个调偏流子机构。每个调偏流子机构具有完全相同的结构形式,包括驱动部件、CCD 及其电子学、调偏流控制、轴系与反馈部件,调偏流机构组成框图如图 3 所示。调偏流子机构组成图如图 4 所示。

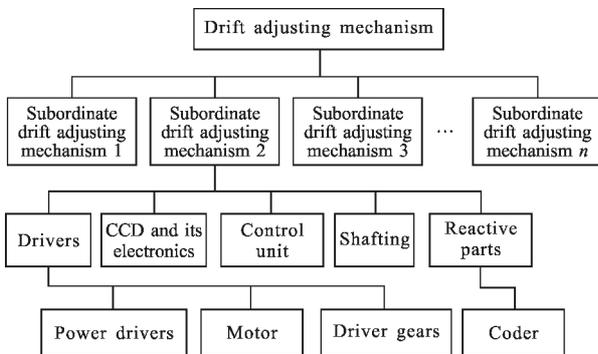


图 3 调偏流机构组成框图

Fig.3 Organization chart of drift adjusting mechanism

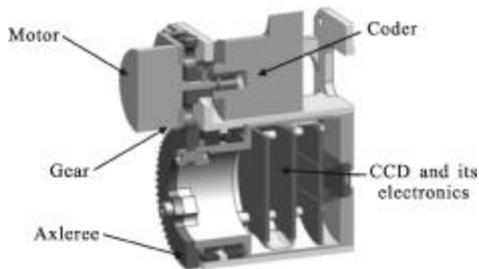


图 4 调偏流子机构组成图

Fig.4 Subordinate drift adjusting mechanism buildup figure

## 2 调偏流机构传动误差计算<sup>[8]</sup>

由于齿轮误差是随机的连续变量,各种误差源的分布都是相互独立的,齿轮误差的分布遵循正态分布,因此可以用数理统计的计算方法对各部分误差进行计算。

调偏流机构的传动误差主要为齿轮 6、齿轮 5 啮合处的传动误差。轴 S-1 和轴 S-2 之间的齿轮及装置具体误差参数及传动误差计算见表 1。

表 1 齿轮参数误差及装置误差

Tab.1 Gear parameter error and system error

Gear parameter and system error		Gear 1	Gear 2
Precision grade		5	5
Module of gear m		0.5	0.5
Number of teeth Z		40	60
$F_i' = F_p + F_f$		21	22
$F_i''$		18	19
$f_i' = 0.6(f_{pt} + f_i)$		6	6
$f_i''$		7	7
$j(J_n)$		0	0
$E_{ss}$		1	1
$E_{si}$		9	9
Gear parameter error / $\mu\text{m}$	Axes parallelism of X direction $\Delta f_x$	5	5
	Axes parallelism of Y direction $\Delta f_y$	3	3
	Pressure angle of reference circle $\alpha$	20°	20°
	Combine interval of two mesh gears S	0	0
	$f_a$	13	13
	Runout of axis which is used to install gear by radial direction	6	6
System error / $\mu\text{m}$	Eccentricity of ball bearing	2	2
	Interval between axis and bearing hole	1.5	1.5
	Runout of coder	4	0

因为齿轮传动误差主要是由齿轮固有误差和装置跳动误差引起的,所以齿轮传动误差主要是齿轮固有误差和装置跳动误差的综合。即:

$$E_{(传动)} = E_{(固有)} + T_{(装置)} \quad (1)$$

其中

$$E_{(固有)} = \frac{1}{2} (F_i' - f_i') \sin \theta + \frac{1}{2} f_i' \sin \theta \quad (2)$$

由公式(2)计算可得齿轮固有误差均值和方差分别为:

$$M(E) = 0 \quad (3)$$

$$D(E) = \frac{1}{36} [(F_i' - f_i')^2 + f_i'^2] \quad (4)$$

$$T_{Z(装置)} = \sum_{i=1}^K e_i \sin \theta \quad (5)$$

当取置信概率为 99.7%时公式(3)经计算可得装置跳动引起的传动误差的均值和方差分别为:

$$M(T_Z) = 0 \quad (6)$$

$$D(T_Z) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^K e_i^2 \quad (7)$$

传动误差计算见表 2。

表 2 传动误差

Tab.2 Transmission error

Error item		Gear 1	Gear 2
Mean and variance of gear intrinsic error / $\mu\text{m}$	$M(E)=0$ $D(E)=\frac{1}{36}[(F_1'-f_1')^2+f_1'^2]$	0	0
Mean and variance of driving error from system / $\mu\text{m}$	$M(T_z)=0$ $D(T_z)=\frac{1}{9}\sum_{i=1}^k e_i^2$	0	0
Mean and variance of one gear driving error / $\mu\text{m}$	$M(T_d)=0$ $D(T_z)=\frac{1}{9}\sum_{i=1}^k e_i^2$	6.47	4.69
Mean and variance of gear pair error / $\mu\text{m}$	$M(T_i)_3=M(T_d)_5+M(T_d)_6$ $D(T_i)_3=D(T_d)_5+D(T_d)_6$	0	26.52
Linear driving error $(T_i)_3=\pm\sqrt{D(T_i)_3}$ ( $\mu\text{m}$ )			$\pm 15.45$
Angle driving error $(\alpha T_i)_3=\pm\frac{180\times 60\times 60}{m_b Z_5 \pi \times 1000}(T_i)_3$ (")			$\pm 6.87$

综上，齿轮 1 与齿轮 2 之间的角值传动误差为  $\pm 6.87''$ ，则总的传动误差为：

$$T=(\alpha T_i)_3+\frac{Z_1}{Z_2} T_{\text{编码器}}=6.87+\frac{40}{50}\times 45=36.87'' \quad (8)$$

### 3 调偏流机构的模态分析

模态分析是考查结构动态刚度的主要方法，主要是提取结构低阶固有频率和相应的阵型，从而找出结构的薄弱环节。调偏流机构的有限元模型如图 5 所示。

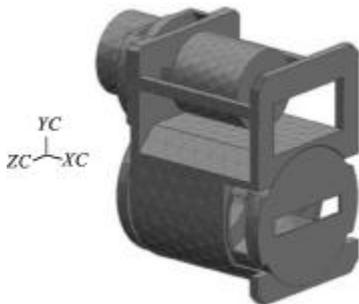


图 5 调偏流机构有限元模型

Fig.5 Finite element model of subordinate drift adjusting mechanism

分析结果表明调偏流机构前三阶基频全部高于 100Hz，其中：一阶 530Hz；二阶 670Hz；三阶 1157Hz。调偏流机构具有较高的刚度，前三阶阵型分别如图 6~图 8 所示。

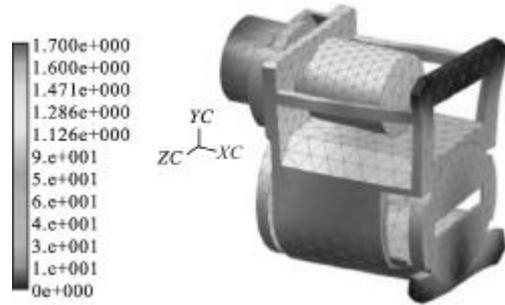


图 6 调偏流机构一阶模态阵型

Fig.6 First modal shape of subordinate drift adjusting mechanism

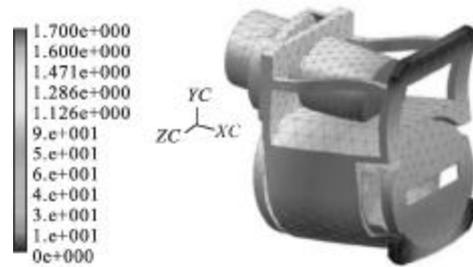


图 7 调偏流机构二阶模态阵型

Fig.7 Second modal shape of subordinate drift adjusting mechanism

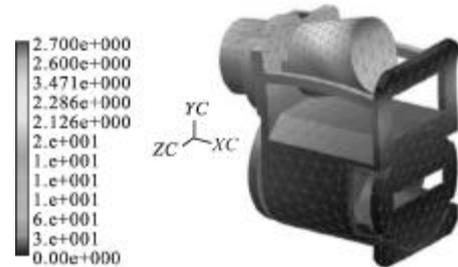


图 8 调偏流机构三阶模态阵型

Fig.8 Third modal shape of subordinate drift adjusting mechanism

### 4 调偏流机构传动精度检测试验

#### 4.1 试验方法

将调偏流机构固定于大理石平台上，将驱动与超声电机连接，将数显表与编码器连接，利用其读取机构中编码器角度值  $N$  在调偏流机构终端固定平面反射镜，使平面反射镜法线方向与旋转轴线垂直，用精度为  $0.5''$  的光电经纬仪测量机构转动的实际角度  $A$  驱动调偏流机构中超声电机转动，使调偏流机构旋

转,利用数显表读取编码器的实际角度,通过光电经纬仪测量平面反射镜的实际旋转角度,对两者的角度值进行数据处理,即为调偏流机构的传动机构综合误差  $\delta$ 。检测仪器及调偏流机构的相对位置如图 9 所示。

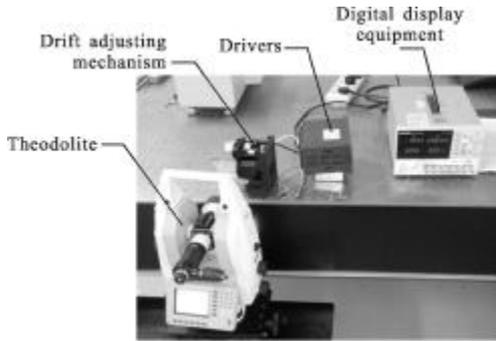


图 9 调偏流机构精度检测

Fig.9 Precision test of subordinate drift adjusting mechanism

4.2 试验数据

偏流机构传动精度检测试验结果如表 3 所示。调偏流机构传动精度综合误差为<sup>[9]</sup>:

$$\sum_{i=1}^n \delta = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} \quad (9)$$

式中:  $n$  为试验次数,  $n=16$ 。

将表 3 中的数据带入公式(9)可得:  $\sum_{i=1}^n \delta = 0.01^\circ = 36''$ 。

表 3 调偏流子机构精度检测数据

Tab.3 Precision test result of subordinate drift adjusting mechanism

Experimentation number	Coder value N×Reduction ratio i	Theodolite value A	Error $\delta$
1	0.896 851 852°	0.885 7°	0.011 152°
2	0.318 148 148°	0.315°	0.003148°
3	0.519 074 074°	0.514 8°	0.004 274°
4	0.445°	0.442 2°	0.002 8°
5	0.795 185 185°	0.798 3°	-0.003 11°
6	0.358 888 889°	0.360 4°	-0.00151°
7	-0.015 185 185°	-0.018 5°	0.003 315°
8	-3.334 629 63°	-3.321 7°	-0.012 93°
9	17.09851852°	17.076°	0.022 519°
10	-1.067592593°	-1.071 3°	0.003 707°
11	0.887 407 407°	0.881 6°	0.005 807°
12	9.597 9°	9.572 1°	0.025863°
13	5.211 296 296°	5.204 4°	0.006 896°
14	0.76°	0.764 6°	-0.004 6°
15	0.075°	0.074 7°	0.000 3°
16	0.588 518 519°	0.592°	-0.003 48°

则调偏流机构传动精度为 36'', 其结果优于理论分析所得出的 36.87'', 主要是因为调偏流机构实际需要的角度旋转范围为  $\pm 5^\circ$ , 在装配过程中选择了齿轮扇面较好的 10° 区间作为有效传动区, 提高了机构的实际传动精度。

5 结论

空间光学传感器快速高精度实时调偏流机构能够分别对每片 CCD 进行像移补偿, 大大减少了 CCD 边缘的计算误差, 提高成像质量; 由于每套机构只驱动一片 CCD 转动, 转子质量轻, 并且采用超声电机作为驱动元件, 系统响应速度快, 相机可以在调偏流过程当中成像, 实现了相机实时调偏流; 机构质量轻、体积小、结构形式简单, 可靠传动精度高。

参考文献:

- [1] Li Song, Zhang Liping. Design accuracy analysis for drift adjusting rotary axes of space camera[J]. Opt Precision Eng, 2004, 12(2): 142-146. (in Chinese)
- [2] Bao Hao, Yang Liwei, Jiang Xiaonan, et al. Design of draft adjusting mechanism for space optical camera [J]. Opt Precision Eng, 2012, 39(6): 22-26. (in Chinese)
- [3] Gu Song, Wang Shaoju. Design and control of drift adjusting mechanism in space camera[J]. Opt Precision Eng, 2009, 17(3): 616-619. (in Chinese)
- [4] Fan Chao, Li Yingcai, Yi Weihong. Analysis of drift angle on space camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(10): 216-220. (in Chinese)
- [5] Li Youyi. Control of drift angle on space camera [J]. Opt Precision Eng, 2002(4): 403-406. (in Chinese)
- [6] Fan Cao, Liang Yitao, Li Wei, et al. study on influence of drift angle on the space camera [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(11): 77-79. (in Chinese)
- [7] Li Youyi. Study of the drift angle control in space camera [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)
- [8] Zhang Hongwei. Research on the Auto-focusing technology for space camera [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [9] Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2003: 52-55. (in Chinese)