

高速 TDI CCD 空间相机焦平面设计与实验

贾学志^{1,2} 张雷^{1,2} 安源^{1,2} 金光^{1,2}

(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 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要 时间延迟积分(TDI)CCD焦平面组件是空间相机的重要组成部分,主要完成光电转换,输出模拟 CCD 视频信号,是影响相机成像质量高低的关键部件之一。现有 TDI CCD 的像素数量有限,不能满足大视场、宽覆盖的要求,需要对 CCD 进行拼接。从结构和热控两方面入手针对空间相机高速 TDI CCD 焦平面组件开展了设计工作,分析了影响拼接精度的因素,针对相机恶劣的发射条件和苛刻的在轨工作温度,设计了特殊的拼接结构来保证 TDI CCD 拼接精度。开展了动力学环境实验和热真空环境实验来验证拼接结构的可靠性,结果表明:焦平面组件完全能够克服相机力学环境,保证 TDI CCD 的拼接精度;在热真空实验中,TDI CCD 器件在 1.5 min 工作时间内最高温度为 30 °C,CCD 能够正常工作。动力学环境实验和热真空实验后对 TDI CCD 的拼接精度进行了检测,得到 TDI CCD 拼接的直线性精度 3.5 μm,搭接精度 4 μm,两行 TDI CCD 平行精度 3.5 μm,4 片 TDI CCD 共面精度 5 μm,拼接精度完全满足光学设计要求。外场成像实验得到的清晰图像进一步验证了焦平面组件设计的合理性和可行性,实现了 TDI CCD 的高精度拼接。

关键词 光学器件;遥感;空间相机;高速 TDI CCD;交错拼接;焦平面组件

中图分类号 V475.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0823004

Design and Experiment of Focal Plane for High Speed TDI CCD Space Camera

Jia Xuezhì^{1,2} Zhang Lei^{1,2} An Yuan^{1,2} Jin Guang^{1,2}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² National and Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Time delay integration (TDI) CCD focal plane assembly is one of the most important components for a space camera, which mainly fulfill photoelectric conversion and output video signal of analog CCD. Due to the hard condition resulted from the transportation and launch of a space camera, it is difficult to keep a TDI CCD with high interleaving precision. Therefore, in this work, we design a TDI CCD focal plane assembly with a good performance based on the optimization both on structural control and thermal control. According to the analysis of the factors that affect the interleaving precision of a TDI CCD focal plane assembly and the maximal error of three axes theoretically, we design an especial structure for a TDI CCD focal plane assembly to keep the high interleaving precision of a TDI CCD which can fit the hard condition for the transportation and launch of a camera and the harsh on-orbit operating temperature. The effectiveness of the modified TDI CCD focal plane assembly is supported by the results obtained from dynamic test and thermal vacuum test. For the dynamic test, the response result shows that the assembly can conquer the interference of dynamic environment and keep a high interleaving precision of TDI CCD. For the thermal vacuum test, thermal balance test indicates that the highest temperature of TDI CCD is 30 °C in 1.5 min, which can work properly. The interleaving precision of focal plane is done after the dynamic environment and thermal vacuum tests. The linearity error of the TDI CCD is 3.5 μm, the interleaving error is 4 μm, the parallelism error between two lines of the TDI CCD is 3.5 μm, and the coplanar error of 4 TDI CCD is 5 μm. These results satisfy the optical

收稿日期: 2014-04-17; 收到修改稿日期: 2014-06-19

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z113)

作者简介: 贾学志(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事空间光学遥感器结构设计与分析方面的研究。

E-mail: xuezhizhi0817@163.com

design very well. Therefore, the aforementioned course proves that this design is feasible and precise, and it can achieve a high interleaving precision for a TDI CCD.

Key words optical devices; remote sensing; space camera; high speed TDI CCD; interleaving; focal plane assembly

OCIS codes 230.0040; 230.5160; 350.4600; 350.6090

1 引 言

空间相机广泛应用于国民经济、军事活动、科学研究和社会生活等领域,对人类社会的发展产生了重大而深远的影响,成为世界各国研究的热点领域。时间延迟积分(TDI)CCD是一种新型光电成像器件,具有成像灵敏度高,对象面能量要求低等特点,能够大大降低空间相机的体积和重量,有利于空间相机向长焦距、大视场、传输型方向发展^[1-5]。

TDI CCD焦平面组件是空间相机的重要组成部分,是决定相机能否获得清晰图像的关键部件之一。TDI CCD焦平面组件的设计涵盖光、机、电、热等多学科领域,需要综合考虑各方面因素。焦平面组件设计的难点主要是由TDI CCD本身决定的。由于高速TDI CCD具有读出频率大、功耗高、发热量高的特点,而过高的工作温度将使CCD产生热噪声,降低CCD光电转换的能力,严重影响CCD器件的成像性能,因此结构设计要考虑CCD热控的需求^[6-9]。此外,空间相机发射和在轨工作环境较为恶劣,会对TDI CCD的拼接度产生较大影响,这就要求焦平面组件具有良好的力学和温度稳定性。综合上述原因,要求焦平面组件不仅能够经受恶劣力学环境的考验保证TDI CCD的拼接精度,而且还必须有良好的热控措施以满足TDI CCD正常工作的要求^[10]。

针对空间相机高速TDI CCD焦平面组件的上述问题,本文从结构和热控两方面入手设计了特殊的结构对CCD进行固定和导热,保证CCD的拼接精度在环境实验前后不产生变化,并分析了影响TDI CCD拼接精度的因素,通过环境实验验证了焦平面结构设计的合理性和可行性。

2 焦平面拼接精度要求

空间相机为了获得高分辨力和宽覆盖的成像效果,TDI CCD的交错拼接的直线度、平行度,以及4片TDI CCD各处像素共面性都必须有一定的精度要求^[10-12]。4片TDI CCD机械交错拼接的示意图如图1所示,拼接精度技术指标如下:

1) 搭接精度要求

搭接精度要求是指相邻两片TDI CCD在拼接处重叠像素在长度方向的误差,其精度应小于

0.005 mm。

2) 直线性精度要求

直线性精度要求是指同一行TDI CCD上同一级上的所有像素必须在同一条直线上,其精度应小于0.005 mm。

3) 平行度精度要求

平行度精度要求是指第一行TDI CCD同一级上的所有像素和第二行TDI CCD同一级上的所有像素中心所形成的两条直线间的平行度误差,要求其精度不超过0.005 mm。

4) 共面性精度要求

共面性精度要求是指所有的TDI CCD器件的像素位于同一平面上,光学设计要求其精度小于0.01 mm。

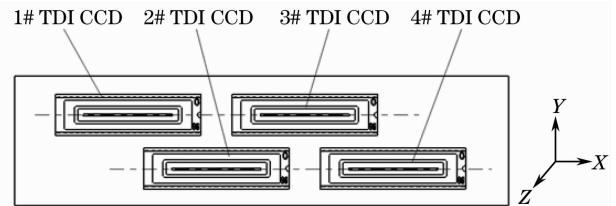


图1 TDI CCD交错拼接示意图

Fig. 1 Sketch of TDI CCD interleaving assembly

3 焦平面组件设计

3.1 CCD固定结构设计

根据上一节提出的设计要求,焦平面组件中TDI CCD在经历力、热工况后的相对位移变化量必须足够小以满足拼接精度要求^[8],为达到上述要求,首先设计了焦面基板作为整个拼接工作的基准,4片CCD通过固定结构固定于焦面基板上,CCD固定结构严格约束CCD 6个方向的自由度。设计的TDI CCD固定结构如下:将4片TDI CCD分别置于4个CCD座中,四周用D04胶固定后再用CCD压块压紧,从而约束TDI CCD 6个自由度,防止CCD实验过程中产生微位移;为了保证TDI CCD拼接的共面性的要求,在TDI CCD座与焦面基板之间设计了修整垫,通过研磨修整垫以达到调节TDI CCD像素共面性的目的;压块与TDI CCD座以及TDI CCD修整垫与焦面基板间采用螺钉联接,结构图如图2所示。

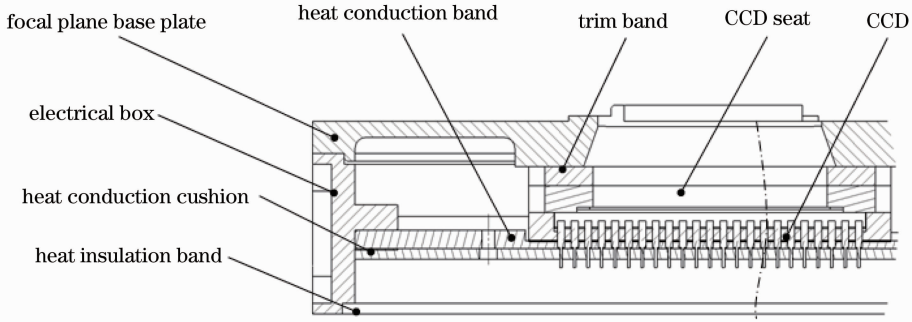


图 2 焦平面组件结构图

Fig. 2 Structure of focal plane assembly

3.2 焦平面组件热设计

为保证焦平面组件处于较小的温度波动范围内,对焦平面结构进行了详细的热设计,如图 2 所示,具体设计内容如下:

- 1) 对 CCD 焦面基板等关键部件采用表面染黑处理,以利于焦平面内部温度均匀;
- 2) 在热传递的路径上的各接触面均设置导热填料,以减小热阻,提高热传导效果^[4];
- 3) 将与 CCD 焦平面相邻的 CCD 成像电路组

件用隔热板进行热隔离,在隔热板面向成像电路的一面粘贴镀银反射膜来反射成像电路的热量,避免 CCD 成像电路的热量对焦平面的影响;

- 4) CCD 器件工作时产生的热量经由与器件背面贴合的铝质导热带传导到焦面电控箱箱壁上,再由箱壁辐射到外层空间。

3.3 焦平面组件热分析

按照上述的热设计方案进行设计之后,建立了 TDI CCD 器件的简化后的热阻分析模型,如图 3 所示。

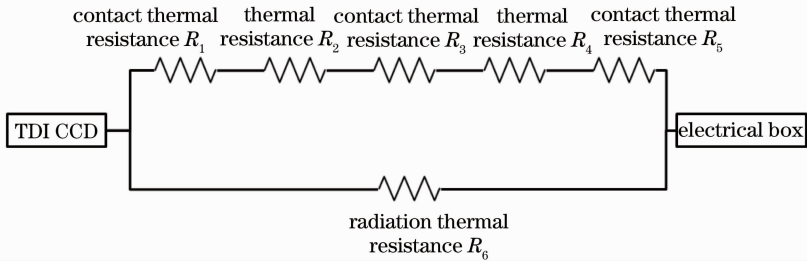


图 3 CCD 器件的导热路径

Fig. 3 Thermal transmission method of CCD device

根据图 3 的导热路径得到各个热阻的计算公式如下。

CCD 器件与压块之间的接触热阻 R_1 :

$$R_1 = 1/(A_1 \times h_1), \quad (1)$$

压块本身热阻 R_2 :

$$R_2 = D_1/(A_2 \times \lambda_1), \quad (2)$$

压块与导热带之间的接触热阻 R_3 :

$$R_3 = 1/(A_3 \times h_2), \quad (3)$$

导热带本身热阻 R_4 :

$$R_4 = D_2/(A_4 \times \lambda_2), \quad (4)$$

导热带与箱体外框之间的接触热阻 R_5 :

$$R_5 = 1/(A_5 \times k_3), \quad (5)$$

焦面组件的辐射热阻 R_6 :

$$R_6 = \epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (6)$$

A_1 为 CCD 器件与压块之间的接触面积, A_2 为压块

本身横截面积, A_3 为压块与导热带之间的接触面积, A_4 为导热带本身横截面积, A_5 为导热带与箱体外框之间的接触面积, D_1 为压块本身厚度, D_2 为导热带本身厚度, h_1 为 CCD 器件与压块之间的接触传热系数, h_2 为压块与导热带之间的接触传热系数, h_3 为导热带与箱体外框之间的接触传热系数, λ_1 为压块的导热率, λ_2 为导热带的导热率, ϵ 为箱体外框发射率,取 0.85, A 为箱体外框散热面积, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数,为 5.67×10^{-8} , T_1 为 CCD 的温度, T_2 为箱体外框温度^[13]。

根据实际设计结果, $A_1 = A_3 = 6.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_2 = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $A_4 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_5 = 4.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $D_1 = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}$, $D_2 = 3.5 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\lambda_1 = 7.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_2 = 140 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。CCD 器件与压块之间采取压紧的方式增强导热,压块与导热带

之间以及导热带与箱体外框之间均设计导热填料的方式增强导热,根据导热填料的特性,取 $h_1 = h_2 = h_3 = 2500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,根据(1)~(5)式可得:

$$R_1 = 1/(A_1 \times h_1) = 0.61 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W},$$

$$R_2 = D_1/(A_2 \times \lambda_1) = 0.12 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W},$$

$$R_3 = 1/(A_3 \times h_2) = 0.61 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W},$$

$$R_4 = D_2/(A_4 \times \lambda_2) = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W},$$

$$R_5 = 1/(A_5 \times k_3) = 0.8 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}.$$

CCD 器件的热指标为 $0 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 30 \text{ } ^\circ\text{C}$,按 CCD 的温度为 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 计算,箱体外框的温度为 $15 \text{ } ^\circ\text{C}$,则根据(6)式得到

$$R_6 = \epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) = 0.000318 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}.$$

由于 R_6 远远小于 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 ,在计算过程中可以忽略 R_6 的影响,因此整个热回路总热阻 R 为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 2.25 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}. \quad (7)$$

CCD 器件实际功耗 W_r 为 6 W ,因此 CCD 器件与组件外框之间的温差 ΔT 为

$$\Delta T = R \times W_{r0}. \quad (8)$$

根据上述计算,得到 TDI CCD 器件与电控箱外壁的温差为 $13.5 \text{ } ^\circ\text{C}$,大于 $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温差要求,可以满足 CCD 焦面组件降温散热的要求,并且还有一定的裕度,方案合理。

3.4 焦平面拼接及检测

拼接工作在高精度 CCD 拼接仪上开展,拼接仪的主要精度指标如下:前工作距离为 35 mm ,显微镜物镜放大倍率 $M=20$,数值孔径 $NA=0.35$,组合放大倍率 1000 倍,任意 200 mm 行程范围内, X, Y 方向导轨直线度小于 0.001 mm , Z (垂直方向)直线度小于 0.002 mm ,光栅尺测量误差 $0.002 \text{ mm}^{[11]}$ 。

拼接前测量出 CCD 压板与 TDI CCD 背面之间的间隙,通过修磨 CCD 压板,将 TDI CCD 压实。为避免 CCD 压板与 TDI CCD 间完全接触引起 TDI CCD 的变形,在 CCD 压板与 TDI CCD 间点少许的 GD414 硅胶。用千分表调整焦面基板位置,使焦面基板与拼接仪在 X, Y, Z 三个方向的平行度均优于 0.003 mm 。完成上述准备工作后,开始 TDI CCD 的拼接工作^[14-15]。首先进行 4 片 TDI CCD 共面性的拼接。用螺钉将 4 片 TDI CCD 组件与焦面基板相连,用拼接仪上倒置的显微镜监测各片 TDI CCD 的标记点清晰度,通过研磨相应的修整垫使 4 片 TDI CCD 的共面性误差在 0.005 mm 以内。

拼接好共面性后,进行 TDI CCD 的拼接,即进行像素标记点的拼接。首先以 1# TDI CCD 组件为基准,通过倒置显微镜监测 TDI CCD 的蝶形标记

点,如图 4 所示。将显微镜移到 TDI CCD 首部蝶形标记点位置,微调 TDI CCD 位置,使蝶形标记点中心与监视器上十字线重合,然后移动显微镜到 TDI CCD 尾部三角形标记点,微调 TDI CCD 使三角形标记点中心与监视器上十字线重合,此过程反复进行至整个 CCD 阵列满足直线性技术要求为止。

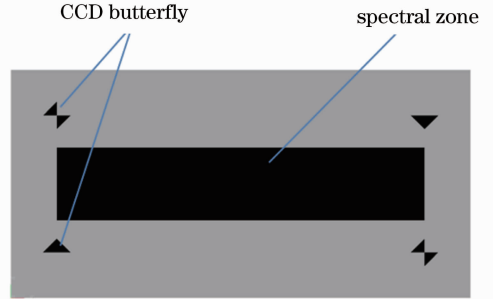


图 4 TDI CCD 的蝶形标记点

拼接好 1# TDI CCD 组件后,即开始对 2# TDI CCD 组件进行拼接。轻敲 2# TDI CCD 座,使 TDI CCD 蝶形标记点与监视器上十字线重合,反复进行该过程,保证 2# TDI CCD 组件达到如下位置要求:

1) X 方向上,2# TDI CCD 的像素位置标记点连线与 1# TDI CCD 的像素位置标记点连线平行,平行度误差在 0.005 mm 以内,且二者的搭接长度误差在 0.005 mm 范围内;

2) Y 方向上,2# TDI CCD 的像素标记点位置标记点连线与 1# TDI CCD 的像素位置标记点连线平行,平行度误差在 0.005 mm 以内;

3) 2# TDI CCD 的 Y 方向像素位置标记点连线与 1# TDI CCD 的相应的像素位置标记点连线的间距误差为 0.005 mm 。

依此类推,完成 3# TDI CCD 和 4# TDI CCD 的拼接。焦平面组件拼接现场如图 5 所示,图中完成了 4 片 TDI CCD 的拼接工作。

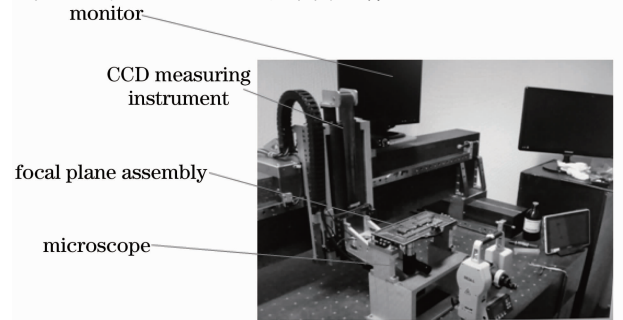


图 5 焦平面组件拼接现场示意图

Fig. 5 Picture of focal plane assembly and TDI CCD measuring instrument

4 拼接误差分析

对影响拼接精度的各项因素进行分析,有利于采取有效的措施来提高拼接精度。现将拼接过程中的各种导致误差的可能因素列于表 1 中,并对各种影响因素在 X,Y,Z 三方向的误差进行了合成^[9]。

X 方向误差主要是指 CCD 拼接时相互不平行所产生的误差,这种误差会引起 CCD 与推扫成像方向不垂直,使得 CCD 成像的积分时间与理论上的积

分时间不一致,造成成像模糊。

Y 方向误差主要是指 CCD 在拼接过程中,有效像素首尾搭接不重合所产生的误差,这种误差会使扫描出的图像在 CCD 拼接处产生错位,影响成像质量。

Z 方向误差主要是指 CCD 拼接时在焦深方向产生的误差。当 4 片 CCD 共面度误差过大时,会导致 CCD 感光面远离光学系统的实际焦平面,使相机不能清晰对焦,导致图像模糊^[16]。

表 1 焦平面拼接过程中各种影响拼接精度因素分析统计表

Table 1 Error analysis of measuring instrument during interleaving processing of focal phase

Name of error	Calculate method	Instruction	Error / μm	X direction	Y direction	Z direction
Utmost alignment error of microscope Δ_1	$\Delta_1 = \frac{250 \times 10^3}{\Gamma} \tan \delta$	Γ : total magnification of microscope, $\Gamma=1000$;	± 0.15	✓	✓	✓
		250: clear distance of human eyes;				
		δ : aligning error of human eyes, usually $\delta=60'' \sim 120''$				
Monito error Δ_2	$\Delta_2 = 0.35/1000$	0.35: Display resolution of monitor	± 0.35	✓	✓	✓
Magnification error of microscope Δ_3		System error	± 0.175	✓	✓	✓
Ruling error of microscope Δ_4		Half of the monito error	± 0.175	✓	✓	✓
Measurement error of grating Δ_5		System error of measuring instrument	± 2		✓	✓
Liner error of guide Δ_6		System error of measuring instrument	± 1		✓	✓
Utmost error of focal depth of microscope Δ_7	$\Delta_7 = \sqrt{\left(\frac{\alpha_e \cdot f'_{eq}}{2NA}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{3NA^2}\right)^2}$	α_e : Utmost distinguish angle of human eyes, usually $\alpha_e = 1', f'_{eq} = 250/\Gamma$	± 1.5			✓
Processing error of CCD Δ_8		Error of distance and parallel between pixels and package	± 2			✓
Error of trim band Δ_9			± 2			✓
			Error combination / μm	± 0.45	± 2.28	± 3.93

从表 1 中可以看到,焦平面组件在 X,Y,Z 三方向的误差分别为

$$\Delta_X = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2}, \quad (9)$$

$$\Delta_Y = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2}, \quad (10)$$

$$\Delta_Z = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^9 \Delta_i^2}. \quad (11)$$

计算得到: $\Delta_X = \pm 0.45 \mu\text{m}$, $\Delta_Y = \pm 2.28 \mu\text{m}$, $\Delta_Z = \pm 3.93 \mu\text{m}$,完全满足光学设计指标要求。

5 焦平面拼接实验与检测结果

完成 TDI CCD 焦平面结构与精度分析之后,需要开展环境实验对焦平面组件的结构稳定性

进行验证,考核焦平面组件在经历环境实验后能否保证 CCD 的拼接精度,主要开展了动力学环境实验和热真空环境实验。

5.1 动力学环境实验

针对拼接好的焦平面组件开展了动力学环境实验,重点关注了随机振动实验,这是因为随机振动主要是模拟噪声引起的振动,由于随机振动实验中各种频率产生的共振同时呈现,所以它是暴露产品故障和缺陷的重要手段。随机振动实验在相互垂直的三个方向进行,焦平面组件动力学环境实验现场如图 6 所示。实验结果列于表 2 中。

通过表 2 可以看到,焦平面组件的最大均方根

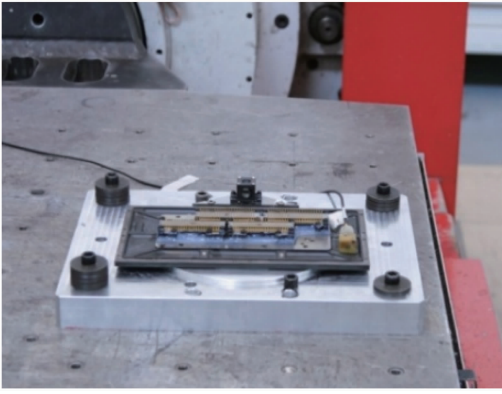


图 6 焦平面组件动力学环境实验现场图
Fig. 6 Scene diagram of dynamic environment test of focal plane assembly

(RMS) 加速度响应为 11.7 grms, 相对于输入的 11.2 grms, 其放大倍率小于 5, 表明焦平面组件结构可以经受住振动环境的考验, 充分证明结构足够稳定, 具备了经受该力学环境模拟实验的能力, 能够适应相机发射时的动力学环境。

表 2 焦平面随机振动响应结果

Table 2 Response result of random oscillation of focal plane

Direction	Input RMS /grms	Output RMS /grms	Magnification
X		10	0.9
Y	11.2	10.6	0.95
Z		11.7	1

5.2 热真空实验

为了验证所设计的焦平面组件能够满足 TDI

表 3 环境实验前后焦平面拼接精度检测结果

Table 3 Checking results of focal plane assembly before and after environment test

Test items	Parallel error		Linear error			Lapping error			Coplanar	
	No. of CCD	1, 2	2, 3	3, 4	1, 3	2, 4	1, 2	2, 3	3, 4	1, 2, 3, 4
Checking result before test / μm		3	1	2	3.5	3	3	3	2.5	2
Checking result after dynamic test / μm		2	3	3.5	2	3.5	4	4	4	5
Checking result after thermal vacuum test / μm		2	3.5	3	3	2	3	4	4	5

从表 3 可以看出, 经过动力学环境实验和热真空环境实验后, TDI CCD 的直线度 3.5 μm , 搭接精

度 4 μm , 两行 TDI CCD 平行度 3.5 μm , 4 片 TDI CCD 共面度 5 μm , 拼接精度完全满足光学设计要

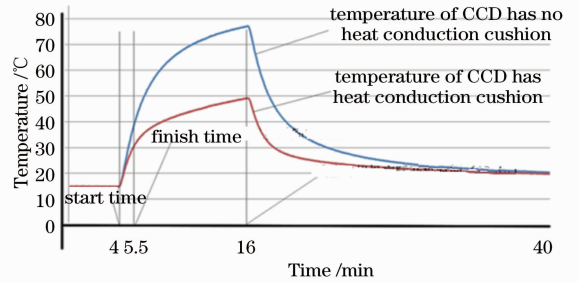


图 7 典型工况下 TDI CCD 的温度曲线

Fig. 7 Temperature curves of TDI CCD under representative load case

由图 7 的温度曲线可以看出: 在 TDI CCD 工作时间(1.5 min)内, 其最高温度为 30 $^{\circ}\text{C}$, 设计的被动热控方案满足了 TDI CCD 正常工作的需要; 从两条曲线的对比可以看出, 金属导热带对降低 TDI CCD 器件温度具有显著的作用, 在工作时间内, 将 TDI CCD 直接安装在电路板上比带有导热带安装时温度高出 10 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

TDI CCD 的拼接精度是检验结构设计成败的最重要指标, 每次实验前后都对 TDI CCD 的拼接精度进行检测, 检测结果列于表 3 中。



图 8 焦平面组件成像实验照片

Fig. 8 Photo of imaging test for focal plane assembly

求,这充分证明所设计的焦平面组件结构稳定,能够经受相机力学和温度环境考验而保持 CCD 的拼接精度,设计合理可行。

完成 TDI CCD 焦平面实验和精度检测后,将焦平面组件安装到相机光学镜头上进行整机的地面成像实验,得到了清晰的外场图片,成像实验照片(目标建筑距离 15 km)如图 8 所示。该图片的获得充分证明焦平面组件设计方案及拼接工艺完全满足设计指标要求。

6 结 论

针对高速 TDI CCD 器件拼接引起的结构和热控方面的问题开展了设计工作,并探讨了影响拼接精度的主要因素。动力学实验表明在 X, Y, Z 三个方向随机振动条件下最大的放大倍率为 11.7 grms,相对于输入的 11.2 grms,其放大倍率约为 1 倍,焦平面结构稳定性良好,能够保证 TDI CCD 的拼接精度;热真空实验说明所设计的热控方法降温效果显著,在 TDI CCD 工作时间(1.5 min)内,其最高温度为 30 °C,满足 TDI CCD 本身工作温度要求。在环境实验之后,对焦平面拼接精度进行检测,得到 TDI CCD 的直线度 3.5 μm ,搭接精度 4 μm ,两行 TDI CCD 平行度 3.5 μm ,4 片 TDI CCD 共面度 5 μm ,拼接精度完全满足光学设计要求;外场成像实验得到了期望中的清晰图片,充分证明焦平面组件设计合理可行,结构紧凑,可以将该方法推广到更多片 TDI CCD 的拼接工作中,以获取更大范围的视场。

参 考 文 献

- 1 Yang Hua, Guo Yue, Fu Ruimin. Study on field butting of TDI CCD [J]. Optical Technique, 2003, 29(2): 226-228.
杨桦,郭悦,伏瑞敏. TDI CCD 的视场拼接[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 226-228.
- 2 Cheng Shubo, Zhang Huige, Wang Zhebin, *et al.*. Nonlinearity property testing of the scientific grade optical CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0404001.
程书博,张惠鸽,王哲斌,等. 科学级光学 CCD 非线性特性测试[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0404001.
- 3 Liu Xinping, Wang Hu, Wen Desheng. Optical focal plane assembly of linear CCD array for subpixel imaging camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(6): 781-784.
刘新平,王虎,汶德胜. 亚像素线阵 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光子学报, 2002, 31(6): 781-784.
- 4 Cheng Xuan, Zhao Huijie. Dark-current calculation method of area CCD based on bad pixels detection in the scene [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0404002.
程宣,赵慧洁. 基于场景坏点检测的面阵 CCD 暗电流估计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0404002.
- 5 Cheng Shubo, Zhang Huige, Liu Hao, *et al.*. Performance measurement of mechanical shutter and dark current for scientific-grade optical CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2):

0204001.

- 程书博,张惠鸽,刘浩,等. 科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间响应特性测试[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0204001.
- 6 Han Dong, Wu Qingwen, Lu E, *et al.*. Thermal design of CCD focal plane assemblies for attitude varied space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2665-2671.
韩冬,吴清文,卢铎,等. 多姿态变化相机中 CCD 焦面组件的热设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2665-2671.
- 7 Zi Keming, Wu Qingwen, Guo Jiang, *et al.*. Thermal design of CCD focal plane assembly of space optical remote sensor [J]. Optical Technique, 2008, 34(3): 401-403.
訾克明,吴清文,郭疆,等. 空间光学遥感器 CCD 焦面组件热设计[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 401-403.
- 8 Sun Dongyan, Zhang Yun. Optical focal plane assembly of linear CCD remote reconnaissance systems [J]. Acta Photonica Sinica, 1993, 22(2): 161-165.
孙东岩,张云. 线阵 CCD 遥感侦察系统中 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光子学报, 1993, 22(2): 161-165.
- 9 Shen Mangzuo, Chen Xu'nan, Wang Jin, *et al.*. Optical focal plane assembly of linear CCD image sensors [J]. Opto-Electronic Engineering, 1991, 18(2): 1-7.
沈忙作,陈旭南,王晋,等. 线阵 CCD 图像传感器的焦平面光学拼接[J]. 光电工程, 1991, 18(2): 1-7.
- 10 Ren Jianyue, Sun Bin, Zhang Xingxiang, *et al.*. Precision measurement of TDI CCD interleaving assembly [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10): 1852-1857.
任建岳,孙斌,张星祥,等. TDI CCD 交错拼接的精度检测[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1852-1857.
- 11 Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Method of calculating negative pressure and adsorption air cushion annular slide [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(5): 481-486.
张星祥,任建岳. 负压吸附式环形气垫导轨的计算方法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 481-486.
- 12 Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Mechanical interleaving assembly of TDI CCD focal plane [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 26(5): 740-745.
张星祥,任建岳. TDI CCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报, 2001, 26(5): 740-745.
- 13 Guo Liang, Wu Qingwen. Thermal design and proof test of CCD component in spectral imaging apparatus [J]. Optical Technique, 2008, 34(s1): 58-62.
郭亮,吴清文. 某型光谱成像仪 CCD 组件热设计及实验验证[J]. 光学技术, 2008, 34(s1): 58-62.
- 14 Li Chaohui, Wang Zhaoxun, Wu Keyong. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 213-216.
李朝辉,王肇勋,武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 213-216.
- 15 Ma Wenli, Ye Baozhu, Zou Dechun, *et al.*. High accuracy optical focal plane assembling of ten piece of plane array CCD [J]. Opto-Electronic Engineering, 1994, 21(5): 17-22.
马文礼,叶宝珠,邹德春,等. 高精度 10 片面阵 CCD 光学焦平面拼接[J]. 光电工程, 1994, 21(5): 17-22.
- 16 Shi Lei, Jin Guang, An Yuan, *et al.*. Research on a mechanical interleaving stitching method of CCDs for remote sensing camera [J]. Infrared, 2009, 30(1): 12-15.
史磊,金光,安源,等. 一种遥感相机的 CCD 交错拼接方法研究[J]. 红外, 2009, 30(1): 12-15.
- 17 Wang Dong, Yan Yong, Jin Guang. Thermal control method and experiment study of high-speed TDI CCD focal plane used in space-based telescope [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(11): 45-49.
王栋,闫勇,金光. 空间相机高速 TDI CCD 焦面组件热设计与实验研究[J]. 光电工程, 2011, 38(11): 45-49.

栏目编辑: 韩峰