

## 空间遥感器线阵与面阵探测器共基板焦面组件设计

王克军, 董吉洪, 李 威, 王晓宇, 周平伟, 姜 萍

(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:** 空间遥感器的焦面组件是空间遥感器的一个关键部组件, 完成光信号到电信号的转变功能, 要求其具有高拼接精度、高稳定性和高度轻量化的性能。针对某深空探测遥感器兼具推扫成像和凝视成像的功能需求, 设计了一种线阵面阵探测器共基板的焦面组件, 主要包括焦面基板、CCD 组件、CMOS 组件和视频处理电路板等。通过合理的布局, 在一块焦面基板上完成了三片 CCD 芯片和两片 CMOS 芯片的布局设计, 结构紧凑, 散热效果好, 同时利用铜片分割和电箱结构覆盖的手段提升了焦面组件的电测兼容性能。完成焦面组件的拼接, CCD 探测器的搭接误差优于 $\pm 2 \mu\text{m}$ , 各个探测器的共线和平行度误差优于 $\pm 2 \mu\text{m}$ , 共面度误差优于 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 。最终, 对焦面组件开展了力、热环境试验, 探测器的共线、平行度和共面度误差均无变化, 表明焦面组件具有足够高的拼接精度和稳定性, 焦面组件的基频为 135 Hz, 具有足够高的动态刚度, 同时, 还对整机进行了电磁兼容试验, 性能良好。

**关键词:** 空间遥感器; CCD 探测器; COMS 探测器; 共基板设计; 电磁兼容

**中图分类号:** TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190454

## Design of focal plane assembly of linear array and area array detector based on one substrate of space remote sensor

Wang Kejun, Dong Jihong, Li Wei, Wang Xiaoyu, Zhou Pingwei, Jiang Ping

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

**Abstract:** Focal plane assembly of space remote sensor is a key component of space remote sensor, which is used to finish the transition function of the light signal into electrical signal. The focal plane assembly should have the characteristics of high splicing accuracy, high stability and high lightweight performance. In view of the function requirement of a deep space remote sensor with push-scan imaging and staring imaging, a focal plane assembly whose substrate was common with CCD detector and CMOS detector was designed, the focal plane assembly included focal plane substrate, CCD component, CMOS component, video processing circuit board, and so on. With a reasonable layout, the focal plane assembly was designed with three pieces of CCD and two pieces of CMOS, which was a compact structure and had a good heat dissipation effect. Moreover, the electromagnetic compatibility performance of focal plane assembly was improved obviously with the means of copper segment and box structure covering. After the assembling of focal plane assembly, the lapping error of CCD detector was better than  $\pm 2 \mu\text{m}$ , the collinearity and parallelism error of detector of CCD and CMOS was better than  $\pm 2 \mu\text{m}$ , the coplanarity error was better than  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ . Finally, the force and thermal tests were carried out for the focal plane assembly, and the collinearity, parallelism and coplanarity errors of the detector did not change, indicating that the focal plane component has high enough splicing accuracy and stability. The fundamental frequency of the focal plane assembly is 135 Hz, which had sufficient dynamic stiffness. At the same time, the electromagnetic compatibility test was carried out on the space remote sensor, with good performance.

收稿日期: 2020-02-01; 修订日期: 2020-03-29

作者简介: 王克军 (1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间遥感器光机结构设计等方面的研究。Email: wangkejun1@163.com

**Key words:** space remote sensor; CCD detector; CMOS detector; common substrate design; electromagnetic compatibility

## 0 引言

焦面组件是空间遥感器的关键部组件,其主要功能是将光信号转变为电信号,一般来讲,当前主流的空间遥感器的焦面组件上的功能元器件是 CCD 图像传感器或者面阵 CMOS 图像传感器。CCD 是电荷耦合器件,是一种用于探测光信号的硅片,由时钟脉冲电压来产生和控制半导体势阱的变化,实现存储和传递电荷信息的固态电子器件。CMOS 是互补金属氧化物半导体,它是指制造大规模集成电路芯片的一种技术或用这种技术制造出来的芯片<sup>[1-2]</sup>。

两种图像传感器,都采用感光元件作为影像捕获的基本手段,其感光元件的核心都是一个感光二极管,该二极管在接受光线照射之后能够产生输出电流,电流的强度与光照成正比。CCD 的量子效率高、信噪比高,而 CMOS 器件允许的电源电压范围宽,方便电源电路的设计、逻辑摆幅大,使电路抗干扰能力强、静态功率低、驱动能力强。

在光学遥感器领域,一般的,CCD 图像传感器为线阵,用于推扫成像,CMOS 图像传感器为面阵,用于凝视成像。

鉴于某深空高轨探测遥感器的推扫成像和凝视成像的功能需求,设计了一种线阵和面阵探测器共基板的焦面组件。该组件结构紧凑、质量轻,各个探测器之间具有很高的共线、平行和共面的精度指标,具有很高的力、热稳定性和动力学性能,并且具有优良的电磁兼容性能<sup>[3-5]</sup>。

## 1 焦面组件设计指标

光学参数中与焦面组件设计相关的参数:视场角  $2\omega=2^\circ$ (9 km 幅宽对应视场角:  $2\omega=1.95^\circ$ );像面长度  $2x>157.90$  mm(对应星下点 9 km 幅宽);像面宽度  $2y=56.13$  mm。

依据上述光学设计指标以及 TDI CCD 和 CMOS 的结构参数,确定焦面组件的设计及拼接指标如下:

- (1) CCD 的线视场长度要大于等于 157.90 mm;
- (2) CCD 和 CMOS 的像面宽度小于等于 56.13 mm;
- (3) CCD 探测器之间搭接像元 116 个,搭接误

差  $\pm 2 \mu\text{m}$ ;

(4) CCD 及 CMOS 器件的共线度误差优于  $\pm 2 \mu\text{m}$ ;

(5) CCD 及 CMOS 器件的平行度误差优于  $\pm 2 \mu\text{m}$ ;

(6) CCD 及 CMOS 器件的像面共面度误差优于  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ ;

(7) 组件基频大于 120 Hz。

要求上述指标在力、热环境试验后仍旧满足上述指标,具有高度的稳定性。

## 2 焦面组件方案设计

### 2.1 探测器选型及布置

依据焦面组件的功能需求和指标要求,采用三片 TDI CCD 探测器和两片 CMOS 探测器。探测器的布局图见图 1。

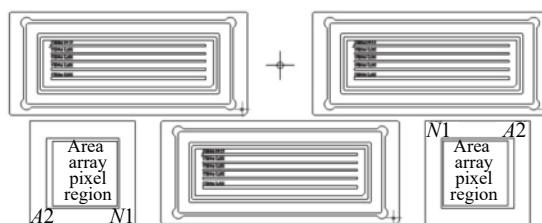


图 1 像面探测器布局

Fig.1 Detector layout of focal plane

线阵 CCD 探测器全色像元个数为 6 144 个,像元大小  $8.75 \mu\text{m}$ ,三片交错搭接,搭接像元个数为 116 个;面阵 CMOS 探测器两片对称布置在视场边缘处,像元位数  $2\ 048 \times 2\ 048$ ,像元大小为  $11 \mu\text{m}$ 。探测器布局完成后,像面长度 159.25 mm,像面宽度 56.03 mm。

### 2.2 焦面组件结构设计

焦面组件主要用于固定 TDI CCD 和 CMOS 探测器器件,进行拼接和配准,提供成像和 TDI CCD、CMOS 器件的光电接口,要求具有良好的力学、热以及电子学特性。焦面组件主要由焦面基板、TDI CCD 组件、面阵 CMOS 组件、基准棱镜、前置电路板和楔形垫块等组成<sup>[6-10]</sup>。前置电路板包括 TDI CCD 视频处理板、CMOS 板和 CCD 板。详细布局见图 2 和图 3。

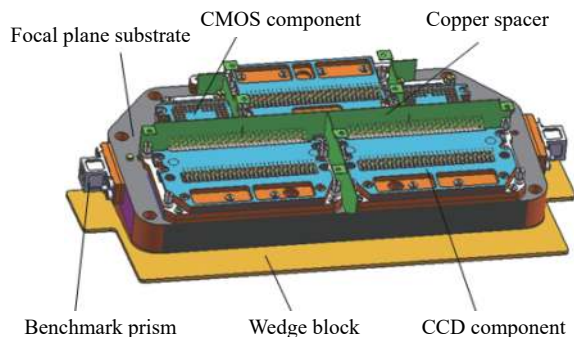


图 2 焦面组件结构布局(去除电路板)

Fig.2 Structure layout of focal plane component(circuit board removed)

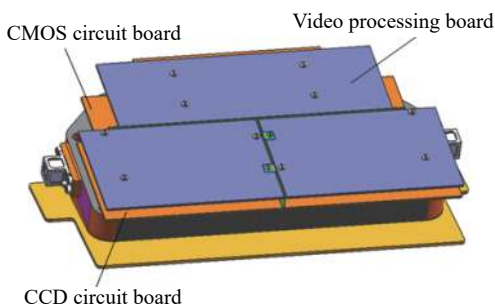


图 3 焦面组件结构布局

Fig.3 Structure layout of focal plane component

在轨期间工作时,当温度在一定的范围内变化时,要求焦面组件保持原始的拼接精度,即要求焦面组件具有很好的热稳定性;在结构上要求焦面系统的质量要足够轻,导热性能良好,且能要承受运载过程中的冲击与振动。在进行设计时,结构件的选材是一个必须考虑的因素。对材料的选取做了如下考虑:

(1) 为保证焦面组件重量轻和导热性能良好的设计指标,焦面组件上的主要结构件:焦面基板、楔形垫块、修研垫、导热块等均采用导热系数大、热容高、密度小和温度均匀性好的铝合金材料。

(2) 考虑了 TDI CCD 座的线胀系数与探测器本身封装材料线胀系数之间的匹配关系。如果材料的线胀系数与探测器本身封装材料线胀系数相差较大,当组件承受较大的温度载荷时,会产生很大的温度应力导致变形,影响尺寸稳定性和成像质量。因此,在设计时对与 TDI CCD 相接触主要零件—CCD 座的材料做了充分的考虑,以尽量减小因温度变化而产生的尺寸不稳定性。CCD 座采用高体分铝基复合材料,其线胀系数( $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )相对铝合金的线胀系数( $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )小了很多,大大缓解了 CCD 器件封装材料陶瓷的线

胀系数( $0.35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )与铝合金材料的线胀差,同时高体分铝基复合材料弹性模量高,导热性能良好,有航天应用经验,提高了焦面组件力学及热学稳定性。

焦面基板是探测器组件的承载体,TDI CCD 探测器采用机械交错搭接的方式固定在焦面基板上,两片面阵 CMOS 器件位于中间 TDI CCD 组件的两侧。工作时,TDI CCD 器件和 CMOS 器件产生的热量通过导热压块和 TDI CCD 座和 CMOS 座传导至焦面基板上,由焦面基板作为辐射散热源,将 TDI CCD 和面阵 CMOS 产生的热量缓慢散掉一部分,其余部分热量通过与焦面基板连接的框架传导出去。

考虑到质量指标的限制,在保证使用性能要求的情况下,尽量缩小了焦面基板的外形尺寸并采取了减重措施。为保证 TDI CCD 和面阵 CMOS 能够成像,在焦面基板上相应位置设置了通光孔,焦面基板结构见图 4。



图 4 焦面基板结构

Fig.4 Structure of focal plane substrate

为保证 TDI CCD 和面阵 CMOS 器件的像面与相机的实际成像面重合,同时填补焦面组件与后框架上的楔形空间,在焦面组件上与后框架连接的位置设计了一个楔形垫块,该楔形垫块同时具备焦面组件修研垫的功能,材料选择与焦面基板相同的铝合金。楔形垫块结构形式见图 5,为保证质量指标要求,对楔形垫块进行了轻量化设计。

为实现对探测器的固定,同时保证探测器器件在振动和运行过程中不发生位置变化,进而影响相机的精度和成像质量,设计了 TDI CCD 座和面阵 CMOS 座。先将探测器器件固定在相应的座内,而后作为组件再与焦面基板进行连接。这样连接时只连接 TDI CCD 座和面阵 CMOS 座,不会对探测器造成损伤。为保证探测器器件与相应座的位置尽量固定,在二者装配时采用小间隙配合,通过胶和压块固定。TDI

CCD 座如图 6 所示。

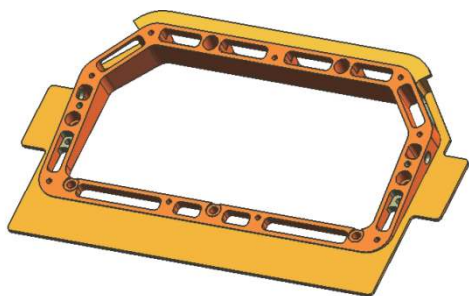


图 5 楔形垫块结构

Fig.5 Structure of wedge block

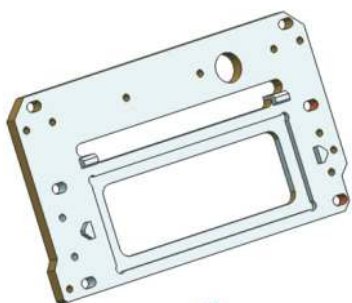


图 6 CCD 座

Fig.6 CCD substrate

TDI CCD 组件结构组成见图 7, 组件包括修研垫、CCD 座、CCD 探测器、导热压块和 CCD 板。其中导热压块同时具有导热功能, 固定 TDI CCD 器件的同时, 还可以起到散热的作用。由于 TDI CCD 器件和 CMOS 器件都存在加工制造误差, 为保证各个探测器的像面拼接的共面性, 在每个 TDI CCD 组件和面阵 CMOS 组件与焦面基板的连接处设计了修研垫。通过对修研垫高度和角度的修整, 保证各个探测器器件的共面性。面阵 CMOS 组件的结构组成及布置形式与 TDI CCD 组件基本一致。

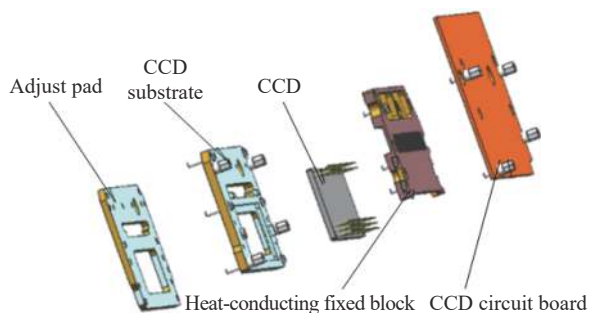


图 7 CCD 组件

Fig.7 CCD component

TDI CCD 组件和面阵 CMOS 组件拼接完成后通过螺钉固定在焦面基板上, CCD 板和面阵 CMOS 板分别采用支撑柱安装在 TDI CCD 座和面阵 CMOS 座上并与探测器针脚焊接, 其中 TDI CCD 板通过刚柔板与成像控制箱的驱动电路板连接, 面阵 CMOS 板通过刚柔板与成像控制箱的成像控制电路板连接; TDI CCD 视频处理板位于焦面组件的上层, 采用支撑柱与焦面组件固定在一起, 通过刚柔板与成像控制箱的成像控制电路板连接。

在焦面基板上设置了两块基准棱镜, 用以标定像面坐标系与相机整体坐标系的相对位置关系。

### 2.3 电磁兼容性设计

空间环境中的各种高能粒子及空间辐射都容易对焦面组件电子元器件造成破坏。再就是, 焦面组件各路探测器的电路之间也容易互相造成电磁干扰, 造成功能破坏。抑制辐射和耦合对电控系统造成破坏的有效方法就是空间分离。对该焦面组件的设计也采用了空间隔离的手段。如图 3 和图 5 所示, 楔形垫块设计了“飞边”结构, 楔形垫块安装于主基板, 焦面组件安装于楔形垫块上, CCD 电控箱覆盖于焦面组件上, 形成“围包”结构, 在电控箱的底部设计了止口, 与楔形垫块上设计的“飞边”结构形成止口搭接, 实现焦面组件与外部空间的隔离, 示意图见图 8, 有效地避开了空间辐射, 同时也抑制了焦面组件电磁信号对外部其它载荷的干扰。针对各路探测器的电路之间的电磁干扰问题也采用了空间隔离的手段, 如图 2 所示, 在三片 CCD 探测器和两片 CMOS 探测器之间放置了隔离铜片, 将五个探测器隔离开, 有效地解决了焦面组件的内部电磁干扰问题<sup>[1]</sup>。

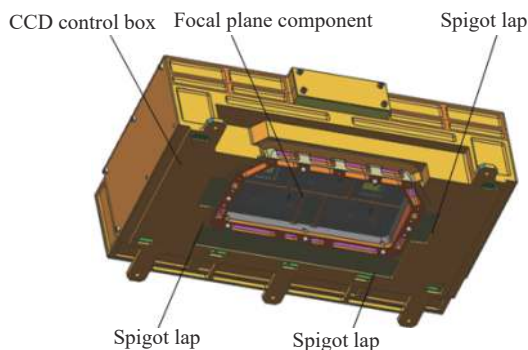


图 8 CCD 控制箱与楔形垫块止口搭接示意图

Fig.8 Spigot lap schematic diagram of CCD control box and wedge block

### 3 焦面组件拼接装配

探测器拼接可分为机械拼接和光学拼接两种。光学拼接中的分光棱镜又可采用半透半反式或全透全反式。全透全反式光能利用率高,但这种方法要求连接起来的探测器之间的边界必须与相应的全透全反表面的边界对齐,而且当从一个阵列渐渐向相邻阵列跨越时,相对照度减少,大部分像元受渐晕影响,从而使信噪比下降。半透半反式能量损失大。该方案采用机械拼接的方法,将三片 TDI CCD 和两片面阵 CMOS 器件交错排列固定焦面基板上,既保证全视场内成像质量,又能满足能量要求<sup>[12]</sup>。

拼接的技术要求主要是三片 TDI CCD 器件和两片面阵 CMOS 器件的相对位置的精度要求,如图 9 所示。取 TDI CCD2 为基准,首先拼装 TDI CCD2,保证其对焦面基板达到一定的平行性等技术要求。然后按 TDI CCD3、TDI CCD1、面阵 CMOS A、面阵 CMOS B 次序逐个拼接,使它们相对于 TDI CCD2 的位置达到以下三项指标(这里以全色 TDI CCD 像元为准)。

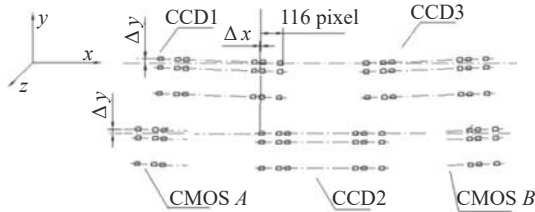


图 9 探测器布局及搭接示意

Fig.9 Schematic diagram of detector layout and lap

#### (1) 搭接要求 (x 方向)

相邻 TDI CCD 首尾像元搭接。由于每片 TDI CCD 总像元数为 6 144,同光学设计及电子学相关人员协商沟通,确定搭接时交错的像元数限制在 116 个像元以内。

搭接处像元的对准误差:  $\Delta x \leq \pm 2 \mu\text{m}$ ;

#### (2) 直线性和平行性要求 (y 方向)

第一行的 TDI CCD1、TDI CCD3 的同一级的所有像素必须在同一直线上,其非直线度误差为  $\Delta y \leq \pm 2 \mu\text{m}$ ;第二行的 TDI CCD2、面阵 CMOS A 和面阵 CMOS B 的同一级的所有像素也必须必须在同一直线上,其非直线度误差为  $\Delta y \leq \pm 2 \mu\text{m}$ 。

第一行 TDI CCD 与第二行 TDI CCD 必须平行,

其不平行度误差  $\Delta y \leq \pm 2 \mu\text{m}$ ;

#### (3) 共面度要求 (z 方向)

三片 TDI CCD 和两片面阵 CMOS 芯片的所有像素必须在同一焦平面上,其不共面误差为  $\Delta z \leq \pm 2.5 \mu\text{m}$ 。

整个拼接和组装过程在特殊研制的拼接设备上。通过研磨垫片保证共面性要求;通过专用工装及装调设备微调 TDI CCD 及面阵 CMOS 芯片,保证五片探测器在 x、y 方向的技术要求。装调好后,涂胶固定。然后依次安装导热块、线路板等,并用压线板将电缆压紧,防止扯动已拼接好的 TDI CCD。图 10 为拼接焦面组件。

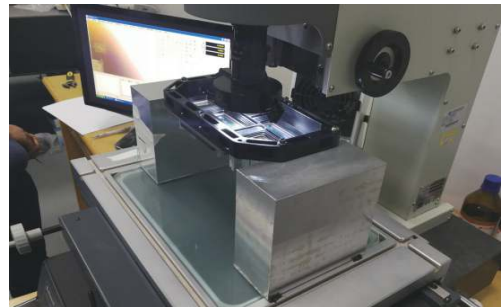


图 10 焦面组件拼接

Fig.10 Splicing of focal plane component

## 4 实验及试验测试

焦面组件拼接完成后,要对焦面组件的设计和拼接指标进行测试,并开展温度试验和动力学环境试验,验证焦面组件各项指标的环境试验稳定性。

### 4.1 设计及拼接指标测试

对拼接完成的焦面组件静置,测试焦面组件的设计和拼接指标。

实测线阵 CCD 探测器的线视场为 159.25 mm,拼接宽度为 56 mm,满足设计指标要求。

拼接指标共面度检测的实测值见图 11。拼接指标平行、共线度检测的实测值见图 12。

-0.000 5	0.001	+0.000 5	+0
	1#		3#
0.001	-0.000 5	+0	+0.000 5
-0.001 5	-0.002	0	0.000 5
	A		0
-0.001 5	-0.001 5	+0.001	2#
		+0.001	B
			-0.000 5
			-0.000 5

图 11 焦面组件共面度测试数据

Fig.11 Coplanarity test date of focal plane component

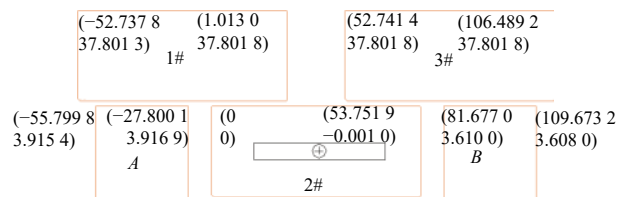


图 12 焦面组件平行、共线度测试数据

Fig.12 Parallelism and colinearity test date of focal plane component

图 11 和图 12 测试数据表明, 焦面组件的 CCD 探测器的搭接 116 个像元, 误差优于 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ , 共线、平行度指标优于 $\pm 2 \mu\text{m}$ , 共面度指标优于 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 。

#### 4.2 力、热动力学力学分析

为验证焦面组件的抵抗力、热环境能力, 对焦面组件开展动力学试验和高低温循环试验<sup>[13-15]</sup>。图 13

为焦面组件开展动力学实验, 表 1 和表 2 为力学振动试验的试验条件。图 14 为焦面组件开展高低温循环试验, 表 3 为焦面组件开展高低温循环试验的试验条件。



图 13 焦面组件动力学试验

Fig.13 Dynamics test of focal plane component

表 1 焦面组件正弦振动试验条件

Tab.1 Sine vibration test condition of the focal plane component

Direction	x		y		z	
	Frequency/Hz	Magnitude	Frequency/Hz	Magnitude	Frequency/Hz	Magnitude
Parameters	5-18	5.36 mm(O-P)	5-20	6.21 mm(O-P)	5-15	6.62 mm(O-P)
	18-80	7 g	20-60	10 g	15-60	6 g
	80-100	10 g	60-100	8 g	60-100	10 g
Scan frequency	2 oct/min					

表 2 焦面组件随机振动试验条件

Tab.2 Random vibration test condition of the focal plane component

Direction	x		y		z	
	Frequency/Hz	Magnitude	Frequency/Hz	Magnitude	Frequency/Hz	Magnitude
Parameters	20-100	+6 dB/oct	20-100	+6 dB/oct	20-100	+6 dB/oct
	100-240	0.06 g <sup>2</sup> /Hz	100-200	0.07 g <sup>2</sup> /Hz	100-180	0.06 g <sup>2</sup> /Hz
	240-360	0.03 g <sup>2</sup> /Hz	200-330	0.03 g <sup>2</sup> /Hz	180-320	0.03 g <sup>2</sup> /Hz
	360-500	0.06 g <sup>2</sup> /Hz	330-500	0.07 g <sup>2</sup> /Hz	320-500	0.06 g <sup>2</sup> /Hz
	500-2 000	-12 dB/oct	500-2 000	-12 dB/oct	500-800	-12 dB/oct
					800-1 000	0.001 g <sup>2</sup> /Hz
		250-300 1e-5 g <sup>2</sup> /Hz	250-300 1e-5 g <sup>2</sup> /Hz	1000-2 000	-12 dB/oct	
Total rms acceleration/grms	5.52 g		5.93 g		4.93 g	
Testing time/min	2					

综上, 焦面组件基频是 135 Hz, 具有足够的动态刚度; 在经历动力学、热学试验后, 焦面组件的搭接精度、共面度, 平行度和共线度指标基本没有变化, 分别

满足优于 $\pm 2 \mu\text{m}$ 、 $\pm 2.5 \mu\text{m}$  和 $\pm 2 \mu\text{m}$  的指标要求, 具有极高的稳定性。



图 14 焦面组件高低温循环试验

Fig.14 Temperature cycle test with high and low temperature of focal plane component

表 3 焦面组件高低温循环试验条件

Tab.3 High and low temperature cycle test condition of the focal plane component

Parameter	Test conditions	Note
Temperature range	-40~+75 °C	
Rate of temperature range	≥5 °C/min	
Temperature tolerance	High temperature 0~+4 °C Low temperature -4~0 °C	
Cycle index	2.5	One cycle: 4 h, including 1.5 h staying at high temperature, 2 h staying at low temperature

## 5 结 论

针对某深空探测遥感器同时具有推扫和凝视的功能需求,完成了线阵和面阵探测器共基板的焦面组件的设计,结构紧凑,质量轻,同时具有优良的电磁兼容性。CCD 的线视场为 159.25 mm,大于 157.90 mm; CCD 和 CMOS 的像面宽度 56.03 mm,小于 56.13 mm; CCD 探测器件的搭接像元个数 116,搭接精度优于 ±2 μm; CCD 及 CMOS 器件的共线度误差优于 ±2 μm; CCD 及 CMOS 器件的平行度误差优于 ±2 μm; CCD 及 CMOS 器件的像面共面度误差优于 ±2.5 μm; 组件基频 135 Hz,高于设计要求的 120 Hz,具有优良的动态刚度特性;并且整机的电磁兼容试验表明焦面组件电磁兼容特性优良,CCD 及 CMOS 探测器共基板的焦面组件的各项指标均满足使用需求。

### 参考文献:

[1] Li Yanchun, Dong Jihong, Chen Liheng, et al. Design and

assembly for a multispectral compact focal plane of space optical remote sensor [J]. *OME Information*, 2010, 28(7): 47-52. (in Chinese)

[2] Liu Chaoyang, Liu Liyuan, Wu Nanjian. Imaging system based on CMOS terahertz detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0125001. (in Chinese)

[3] Nick Nelms, John Dowson, Oliver Blake, et al. A composite focal plane assembly for the GERB instrument [J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59(6): 1117-1122.

[4] Karsten Schindler, Matthias Tschentscher, Alexander Koncz, et al. An innovative concept for the AsteroidFinder/SSB focal plane assembly [J]. *Acta Astronautica*, 2012, 75(12): 51-62.

[5] Ma Xiaomei, Li Yanchun, Dong Jihong, et al. Design and analysis of CCD focal plane for space optical remote sensor [J]. *Computer Simulation*, 2010, 28(7): 47-52. (in Chinese)

[6] Yao Na. Research on key technologies of low altitude UAV borne multi-head and wide-angle composite cameras and their performance evaluation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)

[7] Gong Dapeng. Research on focal plane technology of space remote-sensing camera [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

[8] Hu Feng. Research on inner FOV stitching theories and algorithms for sub-images of three non-collinear TDI CCD chips [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese)

[9] Qiu Zhenwei, Hong Jin, Chen Dihui, et al. Study on opto-mechanical design of focal plane assembly in optical remote sensors [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(4): 287-291. (in Chinese)

[10] Zhang Jie. Research on heat sink with phase change materials for focal plane assembly of a aerial camera [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[11] Wang Kejun, Dong Jihong, Xuan Ming, et al. Structure design of electric cabinet for space remote sensor [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 38(2): 13-17. (in Chinese)

[12] Sun Wen, Yu Jun, Zhang Lei. Integrated technology of miniature infrared detector assembly and its application [J]. *Infrared*, 2017, 38(4): 1-6. (in Chinese)

[13] Cheng Liheng, Li Yanchun, Luo Zhitao, et al. Thermal design and testing of CCD for space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2117-2122. (in Chinese)

[14] Wang Zhongsu, Wu Qingwen, Guo Quanfeng, et al. Design of anti-shock vibration isolation for detector module of space optics load [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2098-2105. (in Chinese)

[15] Li Zongxuan. Analysis and test on the response of primary mirror flexure under random vibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(s): 101-107. (in Chinese)