

文章编号 1004-924X(2012)07-1492-08

## 线阵-面阵 CCD 三线阵立体测绘相机 焦平面组件的研制

周怀得<sup>1\*</sup>, 刘金国<sup>1</sup>, 张立平<sup>1</sup>, 乔克<sup>1</sup>, 陈佳豫<sup>1</sup>, 孔德柱<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 130033;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**介绍了线阵-面阵 CCD(LMCCD)制式相机的相关原理,提出实现 LMCCD 相机的关键在于相机焦平面组件的研制。给出了 LMCCD 相机焦平面组件在研制过程中的关键技术,如 LMCCD 像面基板与 CCD 的高精度拼接,焦平面组件电子学部分的低噪声、高集成度设计,焦平面组件在真空环境下的热噪声抑制和热传导设计,以及焦平面组件的装配和焊接等。最后,给出了研制和测试结果。LMCCD 拼接的共面精度优于  $5\ \mu\text{m}$ ,平移量和平行度均优于  $2\ \mu\text{m}$ ;在典型工作情况下,实验室测试信噪比优于 90;在 15 min 的工作周期下,焦面组件的温度控制在  $30^\circ\text{C}$  以下。这些结果满足 LMCCD 制式相机关于 CCD 拼接、焦面温度控制和信噪比的要求。

**关键词:**卫星摄影测量;三线阵立体测绘相机;线阵-面阵 CCD;焦平面;拼接

**中图分类号:**V447.3;TN431.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1492

## Development of focal plane module for three-line LMCCD mapping cameras

ZHOU Huai-de<sup>1\*</sup>, LIU Jin-guo<sup>1</sup>, ZHANG Li-ping<sup>1</sup>, QIAO Ke<sup>1</sup>,  
CHEN Jia-yu<sup>1</sup>, KONG De-zhu<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)*

\* *Corresponding author, E-mail: gjszhd@sohu.com*

**Abstract:** This paper introduces the working principles of Line-Matrix CCD( LMCCD) mapping cameras firstly and points out that the key step to realize the LMCCD camera is to develop focal plane modules. Some pivotal techniques used in the reality process of a LMCCD mapping space camera are introduced, such as stitching line and matrix CCDs together on an image base board in high precision, designing elements in high density and very low noise, controlling dark noises related to the temperature and the heat produced by the CCD under a vacuum environment, assembling the circuit board and the focal plane and soldering the CCD. Finally, it gives developing and experimental results of the

收稿日期:2012-04-17;修订日期:2012-05-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA121803)

LMCCD mapping camera. The results show that the stitching precision of line and matrix CCDs in coplanarity is better than  $5\ \mu\text{m}$ , and both the amounts of moving and parallelism are better than  $2\ \mu\text{m}$ . The Signal to Noise ratio(SNR) tested in laboratory is better than 90 under a typical working condition(the solar incidence angle is  $30^\circ$  and the reflectivity of the earth's surface is 0.3). Furthermore, the temperature of the focal plane module can be controlled under  $30^\circ\text{C}$  in a working period of 15 min. All of these results satisfy the requirements of the LMCCD for the CCD stitching, temperature control and the SNR.

**Key words:** satellite photogrammetry; three line CCD mapping camera; Line-Matrix(LM)CCD; focal plane; stitching

## 1 引言

三线阵 CCD 航天立体摄影测量相机是 20 世纪 80 年代初出现的新一代传输型数字立体摄影测量相机。该相机具有在轨立体成像和能够基于摄取的影像重构外方位元素的特点,受到各国航天摄影测量学家的重视,并成为 20 世纪 90 年代后期国际摄影测量与遥感领域的重点研究项目之一<sup>[1]</sup>。

20 世纪 80 年代,三线阵 CCD 相机曾在 MOMS-02/2D、MOSM-2P/PRIRODA 工程中得到了成功的应用,本世纪也有工程拟采用此类相机。德国学者曾对三线阵 CCD 影像的摄影测量做过深入研究,模拟实验得出<sup>[2-4]</sup>:为保证三线阵 CCD 影像单航线四控点空中三角测量解算的几何稳定度,要求航线长度保持  $B \geq 4$ ,控制点应布设在两线交会点处(航线首末端一个基线范围内为两线交会区),平差结果只取三线交会区的数据,两线交会区的精度太低应去掉等等。

长期以来,三线平行排列的三线阵 CCD 相机的设计思想没有发生根本性的变化,期间德国学者 Hofman<sup>[5]</sup>曾提出将前、后视线阵相对正视阵列在像平面内旋转一个角度(约  $12^\circ$ ),能起到空中三角测量稳定解的作用。后来“定向片”法采取定向片间距与基线之比为非整数的方法,解决了稳定解的问题,且平差精度与非平行排列相当<sup>[6]</sup>。因此,非平行排列的设计思想没有得到进一步的应用。

我国科学家在 20 世纪 80 年代初即开始跟踪该项技术的发展,在其构象理论和影像的摄影测量处理等方面进行了相应的研究工作,并提出了

以“等效框幅”影像进行 CCD 影像空中三角测量的思想<sup>[1]</sup>。

西安测绘所的相关专家在文献[6-7]中指出了利用线阵-面阵 CCD(Line-Matrix CCD)混合配置的 LMCCD 制式立体测绘相机能进一步提高动态摄影利用影像本身进行空中三角测量的效能。本文在对线阵-面阵混合配置的 LMCCD 制式立体测绘相机进行深入研究的基础上,重点介绍了 LMCCD 立体测绘相机原理及其焦平面组件的研制情况,并给出了研制结果。

## 2 LMCCD 立体测绘相机原理简介

与传统结构的三线阵立体测绘相机 CCD 配置相比较,LMCCD 立体测绘相机最大的不同是在三线阵正视相机线阵 CCD 阵列两侧各设置 2 片面阵 CCD,而前、后视相机线阵 CCD 阵列保持不变,如图 1 所示。

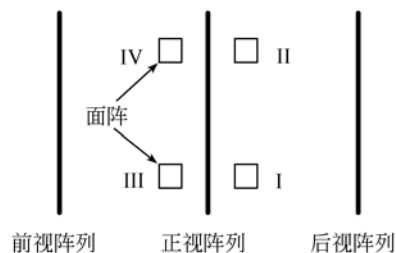


图 1 LMCCD 三线阵立体测绘相机 CCD 探测器配置示意图

Fig. 1 CCD detector configuration of three-line LM-CCD mapping camera

摄影测量时,面阵 CCD 用于摄取空中三角锁之间的连接点真中心投影坐标,起到“等效框幅”

(EFP)法像片上联接点作用,如图 2 所示。

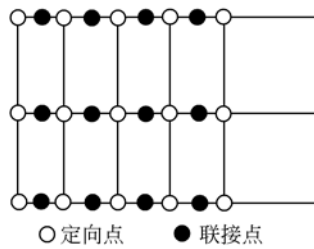


图 2 EFP 像片上的定向点和联接点

Fig. 2 Orientation points and connection points of EFP photo

为了摄取连接点,面阵 CCD 和正视线阵 CCD 之间具有严格的几何关系,如图 3 所示。设面阵中心到正视线阵 CCD 阵列中心距离为  $d_x$ ,按 EFP 法光束法平差规定<sup>[7]</sup>,每一基线按 10 等分选定 EFP 时刻,则面阵 CCD 有效像元中心距正视线阵  $d_x$  为:

$$d_x = f \times \tan \alpha / 20, \quad (1)$$

式中,  $f$  为正视相机焦距,  $\alpha$  为正视相机与前、后视相机的交会角。

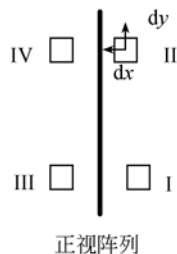


图 3 正视相机线阵-面阵 CCD 几何关系示意图

Fig. 3 Dimensional relationship about line and matrix CCD of nadir camera

面阵 CCD 有效像元数要顾及从 EFP 时刻到摄取连接点时刻姿态角的变化、相机飞行高度等的作用,导致连接点在面阵上成像与面阵中心的偏移量,以及影像匹配时取匹配窗口的大小等因素,面阵采用  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$  已够实用。在图 3 中,  $d_y$  是指空中三角测量选取定向点时定向点与线阵端头的距离。参考文献<sup>[8]</sup>给出:

$$d_y = 200 \times a. \quad (2)$$

由于  $d_y$  尺寸越小,面阵 CCD 越靠近线阵 CCD 端头,呈对角摆放的 2 片面阵 CCD 之间的距离也越大,用于安放 CCD 器件的像面基板的尺寸也随之增大,导致整个焦平面组件重量和尺寸

的增加。当呈对角摆放的 2 片面阵 CCD 有效像元的距离超过线阵 CCD 有效像元的长度后,相机光学视场也将增加,进一步导致光机结构系统设计上的困难<sup>[9]</sup>。因此在实际实施时,综合考虑线阵 CCD 像元尺寸大小、线阵 CCD 端头和面阵 CCD 有效像元数及面阵 CCD 的外形尺寸情况,将  $d_y$  的大小调整为:

$$d_y = 800 \times a. \quad (3)$$

这样,既不会增加光学视场大小,也不会增大像面基板尺寸和重量。式(2)和式(3)中,  $a$  为线阵 CCD 像元尺寸。

LMCCD 立体测绘相机推扫摄影与传统的三线阵立体测绘 CCD 相机相似,但在推扫中,每相隔  $(f \cdot \tan \alpha / 10) / a$  周期,需要记录 4 个面阵 CCD 影像数据,如图 2 所示,且此周期时刻也要记录,用于序后空中三角测量时将其确定为 EFP 时刻。在这一时刻,不但有前、正、后视相机 3 片线阵 CCD 的 3 条影像,还含有正视相机 4 片面阵 CCD 的属于中心投影的影像。利用这些面阵 CCD 的附加影像,应用 EFP 法光束法进行平差,单航线四控点空中三角测量可得到与具有相同参数的框幅像片空中三角测量基本相同的性能。

从上面介绍中可以得出,LMCCD 三线阵立体测绘相机应具有比传统三线阵 CCD 立体测绘相机更高的效能。为了实现 LMCCD 立体测绘相机的工作方式和性能指标,严格按照 LMCCD 立体测绘相机摄影要求完成在轨成像,必须研制出符合几何关系和精度要求的 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件。

### 3 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件研制

#### 3.1 LMCCD 立体测绘相机 CCD 焦平面组件关键技术分析

根据 LMCCD 立体测绘相机相关原理,结合前、正、后视相机的设计参数情况,首先对 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件的相关设计参数进行分析,进而确定相机焦平面组件研制中需要重点把握的设计参数和技术。设:

正视相机焦距  $f = 650 \text{ mm}$ ; 线阵 CCD 像元尺寸  $a = 6.5 \mu\text{m}$ ; 正视相机与前、后视相机交会角  $\alpha = 25^\circ$ 。

从而得出式(1)和式(3)的值:

$$dx = f \times \tan \alpha / 20 = 15.155 \text{ mm}, \quad (4)$$

$$dy = 800 \times a = 5.2 \text{ mm}. \quad (5)$$

相对于线阵 CCD,面阵 CCD 与其位置关系可以用 CCD 拼接时线阵一面阵 CCD 间光敏面的共面度和平行性 2 个指标进行约束。

共面度指 5 片 CCD 感光面共面度,约束了 5 片 CCD 感光面在焦平面上垂直于光轴方向的位置,保证了相机在轨成像时所有 CCD 均能获得清晰的影像。共面度要求与相机的焦深有关,当相机的焦深较大时,可以放宽共面度的要求,反之,则需要严格的共面度要求。在本文中,相机的  $F\# = 5$ ,全色谱段成像,取  $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$ ,则相机的焦深  $\delta = \pm 30 \mu\text{m}$ 。由于相机的焦深较小,4 片面阵 CCD 与线阵 CCD 的感光面具有严格的共面度要求。

平行性则保证了在轨摄像时得到的面阵影像与线阵影像之间不存在位置形变,有利于影像的后续处理。

根据式(1)和(3),LMCCD 立体测绘相机焦平面组件 CCD 之间在拼接时具有严格的几何位置关系。考虑到拼接时 CCD 感光面之间共面度的要求和平行性要求,需要对 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件的高精度拼接进行详细论述,同时对焦平面组件高集成度低噪声电子学设计技术、热真空环境下焦平面组件的热传导设计和热噪声抑制技术、焦平面组件的装配和焊接进行详细讨论。

### 3.2 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件 CCD 高精度拼接技术

LMCCD 立体测绘相机焦平面组件支撑结构是像面基板,用于拼接摆放 CCD 和安装支撑焦平面线路板。

前、后视相机 CCD 焦平面组件只有 1 片线阵 CCD,不涉及多片 CCD 相对位置关系,在拼接时只需保证其 CCD 不出现歪斜和倾斜即可,故拼接较为简单,这里不进行介绍。

正视相机的像面基板上安装有 1 片线阵 CCD 和 4 片面阵 CCD,各 CCD 间有严格的相对几何位置关系。根据式(4)和(5)的结果,拼接后的效果如图 4 所示。

由于像面基板空间狭小,且需要拼接 5 片 CCD,所以操作相对困难。考虑到 5 片 CCD 各自

的几何参数、感光面平面度等各有差异,在进行拼接时,为了保证 5 片 CCD 感光面的共面度,需要不断研磨像面基板上 CCD 的拼接面。由于不同 CCD 的感光面高低不同,要想通过要研磨像面基板上 CCD 的拼接面来保证共面度,则要对每片 CCD 的拼接面分别进行研磨来实现,这是很困难的。所以在实际进行 CCD 拼接时,没有采用研磨像面基板的方法,而是另外采用了片盒加调整垫的方法。

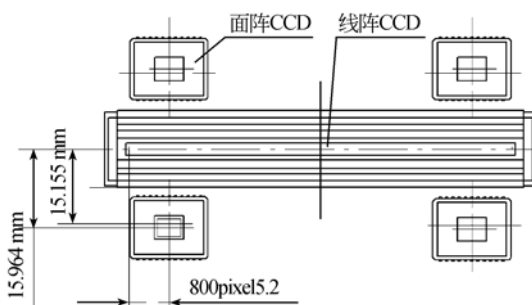


图 4 正视相机线阵 CCD 器件和面阵 CCD 器件几何关系图

Fig. 4 Dimensional relationship of line and matrix CCDs of nadir camera

在开始 CCD 拼接前,首先对像面基板上 5 片 CCD 的拼接面进行研磨,保证所有 CCD 的拼接平面处于同一平面,共面度优于  $2 \mu\text{m}$ 。其次,对 4 片面阵 CCD 设计了片盒和调整垫,如图 5 所示,调整垫位于面阵 CCD 片盒和像面基板之间。拼接前,将面阵 CCD 装在各片盒里并固定。

拼接时,首先将线阵 CCD 拼接到位,保证线阵 CCD 处于像面基板上的中心位置,然后开始逐一拼接面阵 CCD。拼接面阵 CCD 时,如发现该片面阵 CCD 的感光面与线阵 CCD 感光面的共面度不满足精度要求,则通过单独研磨该片面阵 CCD 片盒下的调整垫来调整它与线阵 CCD 感光面的共面度。

采用调整垫具有 2 个好处:(1)不用研磨像面基板的 CCD 拼接面,保证了已经拼接完毕的 CCD 的拼接精度;(2)避免了研磨过程中操作不当对 CCD 带来的物理损坏和静电积累带来的静电损伤。

在保证线阵 CCD 和面阵 CCD 的平移量和平行性时,通过测量面阵 CCD 两端端头感光像元靠近线阵 CCD 阵列的距离来确保面阵 CCD 和线阵

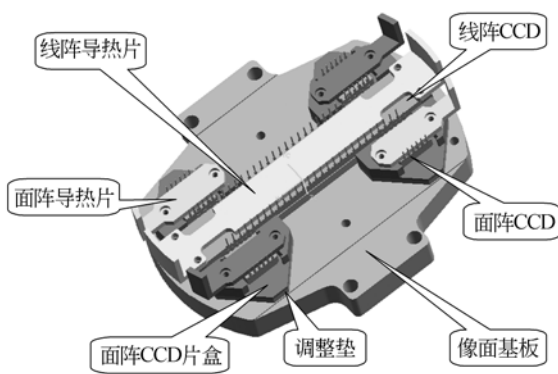


图 5 正视相机焦面结构图

Fig. 5 Structure of focal plane of nadir camera

CCD 感光面平行度精度。

### 3.3 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件的高集成度、低噪声电子学设计<sup>[10]</sup>

为了保证相机信噪比,尽可能提高成像质量,电子设计时,需要将成像及处理电路靠近 CCD。但考虑电子学部分的装配、调试,以及后端调焦机构工作稳定可靠性等,电子学设计时将相机成像部分分为了 CCD 焦平面组件部分和视频信号处理部分。CCD 焦平面组件部分位于 CCD 后面紧挨 CCD 器件,完成 CCD 器件的驱动和 CCD 输出模拟视频信号预放;视频信号处理部分单独构成一个电箱,完成模拟视频信号转换为数字图像信号、数据传输以及和控制系统的通讯等。CCD 焦平面组件部分和后端视频处理部分的连接采用了柔性线路板。

调焦时采用焦面调焦。由于采用了柔性线路板,调焦部分的载荷仅为焦平面组件,而与后端视频处理电箱无关,保证了调焦时质量轻和很好的力学特性。

采用柔性线路板是相机电子学设计中的关键环节,不仅解决了焦平面组件和后端处理电路的连接问题,同时起到了信号传输、抗干扰、电磁屏蔽等作用。柔性线路板在设计中,可以增加单独的地层、以及在信号间增加屏蔽地,有效防止柔性带上信号串扰并起到信号屏蔽作用,保证了 CCD 驱动信号和输出视频信号的传输质量。

LMCCD 立体测绘相机的前、后视相机焦平面组件只有 1 片线阵 CCD,电子学在设计时将 CCD 的驱动和预放部分电路设计成一块柔性线路板,安装在 CCD 后面,并采用柔性带和后端视

频处理电箱相连。

针对正视相机焦平面组件,由于具有 1 片线阵 CCD 和 4 片面阵 CCD,不可能像前、后视相机那样将所有的驱动和预放电路设计到 CCD 后端。由于面阵 CCD 驱动复杂,而线阵 CCD 驱动相对简单,故采取了将线阵 CCD 的驱动和面阵 CCD 的部分驱动电路设计在 CCD 焦平面组件线路板上。同时,为了更好地完成 CCD 视频信号的匹配,将 5 片 CCD 的视频信号预放电路也设计在 CCD 焦平面组件线路板上。视频预放电路可以完成 CCD 输出阻抗匹配,增强视频信号传输和驱动能力。

设计完成后,正视相机焦平面线路板为 2 块柔性板,靠近 CCD 的第一块线路板主要完成 4 片面阵 CCD 视频信号的预放和 CCD 安装焊接,第二块线路板主要完成线阵 CCD 的驱动、视频信号预放以及部分面阵 CCD 的驱动。后端视频处理电箱输出给焦平面组件线路板上的所有的驱动时序信号、视频信号和电源均通过这 2 块柔性线路板上的柔性带进行传输。

正视相机焦平面组件的 2 块柔性线路板集成了线阵 CCD 和面阵 CCD 的驱动,为了降低其驱动信号之间的串扰,设计时在驱动器的输出端增加了限流电阻来降低驱动信号的过冲,抑制信号之间的干扰。

### 3.4 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件在真空环境下的热控设计<sup>[11]</sup>

相机实际工作环境近似真空状态,为了保证连续摄像周期内,相机焦平面组件的功耗带来的温度变化不会对 CCD 的成像质量产生严重影响,尤其是 CCD 本身功耗对成像质量的影响,对 LMCCD 焦平面组件的温度提出了明确要求: CCD 焦平面组件的温度,特指 CCD 器件的壳温,要求在 15~30 °C。该项指标重点考察线阵 CCD 器件的温度,通过测量 CCD 器件侧面和像面基板的温度来判断。

LMCCD 立体测绘相机的前、后视相机像面基板各装配有 1 片线阵 CCD,正视相机像面基板共装配有 5 片 CCD。各相机在轨摄像时,前、后视相机 CCD 功耗可达 2.8 W,正视相机 5 片 CCD 的总功耗即可达 3.2 W 左右,还不包括 CCD 驱动和视频预放电路的功耗。如不采取散热措施,CCD 温度将会在短时间内迅速上升,大大增加了 CCD 的暗

电流噪声,降低信噪比从而影响图像质量。

相机在轨工作时处于近似真空环境,CCD 工作产生的热量只能通过传导或辐射的方式进行散热。由于相机 CCD 焦平面组件位于镜筒内部,空间狭小,辐射散热的效率较低,故采取了热传导方式,将 CCD 工作时产生的热量通过导热铜条传导到相机镜筒壁上。从图 5 中可以看出正视相机焦平面 5 片 CCD 的导热方式,在每片 CCD 背后均压接 1 片导热片,导热片端头有立耳与相机镜筒壁紧密接触,将 CCD 工作时产生的热量传导到相机镜筒壁上。由于相机镜筒具有很大的热容,能够吸收焦面的绝大部分热量而不会引起焦平面组件温度的快速上升。前、后视相机焦平面只有 1 片线阵 CCD,其导热方式和图 5 中的线阵导热片完全相同。在每片 CCD 上都设计的导热铜条不仅起到导热作用,还兼顾起到压紧 CCD 芯片的作用。

相机装配完毕后通过地面系统的热真空试验对 LMCCD 相机焦平面组件传导散热的方式进行了考核,确认相机在工作周期内,焦平面组件温度变化满足。

### 3.5 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件的装配和焊接

LMCCD 立体测绘相机在像面基板与 CCD 拼接完成后,还需要将带 CCD 的像面基板安装到相机镜头的最佳焦平面位置,完毕后再进行 CCD 与焦平面电子学部分的焊接工作。

首先进行的是像面基板与相机镜头的装配。在装配过程中通过不断研磨像面基板与镜头安装凸耳之间的调整垫厚度,保证安装完毕的像面基板上的 CCD 感光阵列正好位于光学系统的最佳焦平面上。LMCCD 立体测绘相机的前、正、后视相机像面基板与光机结构的装配过程相同。

其次进行像面基板 CCD 和焦平面电子学部分的装配。前、后视相机像面基板上只有 1 片线阵 CCD,其焦平面线路板与 CCD 的安装相对容易。正视相机像面基板上则有 5 片 CCD,总共具有 144 只引脚。这 144 只引脚需要同时插入焦平面线路板上的 CCD 元器件位置,这是一项非常细致的工作。安装完毕的线路板用螺钉与像面基板固定在一起。

最后进行线路板和 CCD 的焊接。CCD 器件属于静电敏感器件,焊接时,采用断电焊接的方式,防止带电焊接损坏 CCD。

### 3.6 LMCCD 立体测绘相机焦平面组件研制结果

LMCCD 立体测绘相机在像面基板拼接完成后进行了拼接精度检测,检测结果表明,前、后视相机线阵 CCD 感光阵列直线度优于  $2\ \mu\text{m}$ ,正视相机焦面 5 片 CCD 感光面平面度优于  $5\ \mu\text{m}$ ,4 片面阵 CCD 在沿线阵 CCD 方向与线阵 CCD 的平行性均优于  $2\ \mu\text{m}$ 。

LMCCD 立体测绘相机焦平面组件的装配焊接在防静电洁净工作间进行,保证了装配焊接过程不会对 CCD 等静电敏感器件产生影响。在装配焊接完成后及时进行了电检,确认相机 CCD 工作正常。

LMCCD 立体测绘相机装配完成后进行了辐射定标试验。辐射定标试验测试了相机在典型工作条件下(太阳高角  $30^\circ$ 、地面反射率 0.3)的信噪比,测试结果为 LMCCD 立体测绘相机的前、正、后视相机线阵 CCD 图像信噪比优于 95,正视 4 片面阵 CCD 的信噪比均优于 100。

LMCCD 立体测绘相机以整机方式进行了热真空试验,考核了相机在轨工作期间内热控实施工作情况,其中包含相机焦平面组件温度的控制情况。在所有的测试工况下,LMCCD 立体测绘相机焦平面组件的最低温度为  $21.93\ ^\circ\text{C}$ ,最高温度为  $26.81\ ^\circ\text{C}$ ,温度变化小于  $10\ ^\circ\text{C}$ 。

## 4 结 论

LMCCD 立体测绘相机关于 LMCCD 相机焦平面组件实现的关键点在于像面基板与 CCD 的拼接、焦平面组件电子学的设计和热控的实施以及焦平面组件的装配和焊接。像面基板线阵 CCD 的拼接直线度优于  $2\ \mu\text{m}$ ,平面度优于  $5\ \mu\text{m}$ ,面阵 CCD 和线阵 CCD 的平行性优于  $2\ \mu\text{m}$ ,保证了相机在轨摄影时影像的对应关系和地面影像处理时的平差精度;焦面电子学设计和热控实施关系到影像的质量,在典型工作条件下线阵 CCD 图像信噪比优于 95,面阵 CCD 图像信噪比优于 100,在整个工作过程中,焦平面温度变化小于  $10\ ^\circ\text{C}$ ;装配焊接过程在相机镜头后面进行,由于空间狭小,具有很高的实现难度,且装配精度对相机成像指标和质量具有一定的影响;焊接过程的可靠性直接关系到电子学部分工作的稳定性,尤其

是针对 CCD 这类静电敏感器件的焊接,需要严格注意焊接过程的静电防护,保证器件不被损坏。

#### 参考文献:

- [1] 王家骥,贾平,郝志航,等. 三线阵 CCD 立体测绘技术及其应用[M]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2004.  
WANG J Q, JIA P, HAO ZH H, *et al.*. *Mapping Technology of Three Line CCD and Its Applications* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [2] ZHANG S L. Adjustment scheme and accuracy analysis for three-line linear array sensed data[J]. *Journal of Wu Han Technical University of Surveying and Mapping*, 1988,13(4): 60-69.
- [3] EBNER H, MUELLER E H, ZHANG S L. *Studies on Object Reconstruction from Space Using Three Line Scanner Imagery* [C]. Kyoto: ISPRS com, I(C), 1988:242-249.
- [4] LI R. Potential of high-resolution satellite imagery formational mapping products [J]. *PERS*, 1998, 64 (12): 1165-1170.
- [5] HOFMANN O, MULLER F. *Combined Point Determination using Digital Data of Three Line Scanner Systems* [C]. Kyoto: ISPRS com, III (C), 1988:567-577.
- [6] 王任享,胡莘,杨俊峰,等. 卫星摄影测量 LMCCD 相机的建[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 117-120.  
WANG R X, HU X, YANG J F, *et al.*. Proposal to use LMCCD camera for satellite photogrammetry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,

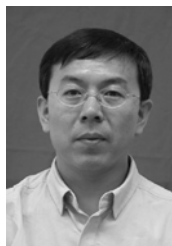
LMCCD 立体测绘相机焦平面组件的研制成功,为实现卫星的摄影测量精度提供了保证。

- 2004, 33 (2) :117-120. (in Chinese)
- [7] 王任享. 卫星三线阵 CCD 影像光束法平差研究[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2003, 28(4): 379-384.  
WANG R X. Three-line array CCD image star bundle adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan university*, 2003, 28(4): 379-384. (in Chinese)
- [8] 王任享,王建荣,王新义,等. LMCCD 相机卫星摄影测量的特性[J]. 测绘科学, 2004, 29(4):10-12.  
WANG R X, WANG J R, WANG X Y, *et al.*. LMCCD characteristics of satellite photogrammetry camera [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(4):10-12. (in Chinese)
- [9] 田铁印,王红,谷凤安,等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.  
TIAN T Y, WANG H, GU F A, *et al.*. Optical system design of three line array stereoscopic mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (11):2692-2698. (in Chinese)
- [10] ZHOU H D, LIU J G, WU X X, *et al.*. The imaging system design of three-line LMCCD mapping camera [J]. *SPIE*, 2011, 8194: 81941N1-8.
- [11] 黎明,吴清文,江帆,等. 三线阵立体测绘相机热控系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1367-1373.  
LI M, WU Q W, JIANG F, *et al.*. Design of thermal control system for three-linear array mapping cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (6):1367-1373. (in Chinese)

#### 作者简介:



周怀得(1975—)男,四川射洪人,博士,副研究员,1999 年于东北师范大学获得学士学位,2004 年于吉林大学获得硕士学位,2007 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间传感器成像和数字图像处理方面的研究。E-mail: gjszhd@sohu.com



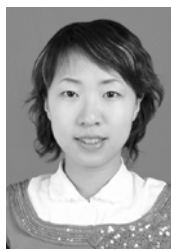
刘金国(1968—),男,吉林蛟河人,研究员,主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn



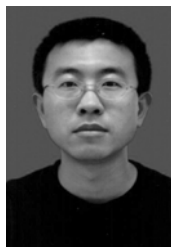
张立平(1957—),男,吉林长春人,研究员,主要从事航天光学遥感器的研制。E-mail: zhang\_lp2005@163.com



乔克(1961—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事高精度光电角位移传感器、极紫外相机和测绘相机光机结构设计方面的研究。E-mail: qiaoke09@163.com



陈佳豫(1977—),女,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事软件工程、计算机控制等方面的研究。E-mail: jiayuy\_a@163.com



孔德柱(1980—),男,黑龙江肇东人,助理研究员,主要从事航天器电子学设计、航天器软件设计、基于FPGA的SOPC开发等方面的研究。E-mail: shangguanren8405@sina.com

## ● 下期预告

# 折反式眼底相机光学系统设计

李 灿<sup>1,2</sup>, 孙 强<sup>1</sup>, 刘 英<sup>1</sup>, 李 淳<sup>1</sup>, 李小虎<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 130039)

为解决传统眼底相机杂光和鬼像的控制问题,设计了一款具有大视场和大工作距离的折反式眼底相机光学系统。设计了离轴反射式网膜物镜,引入自由曲面以校正其离轴像差;成像物镜中采用2个自由曲面对网膜物镜的剩余像差进行校正;建立了一种离焦眼模型,用于成像光路的优化,消除人眼像差对成像的影响,同时得到不同视度缺陷眼的成像光路;照明光路中使用3个相邻的环形光阑,以避免眼球光学系统反射的杂光。系统工作距离为48 mm,视场角为40°;成像光学系统在 $-10\sim+10\text{ m}^{-1}$ ,物方各视场分辨率为33 lp/mm,系统畸变小于8.5%;照明光学系统在不产生鬼像的前提下,可均匀照明眼底,照度非均匀性在15%以内。设计结果表明,引入自由曲面的折反式眼底相机,有效地消除了杂光和鬼像,并满足大视场和大工作距离的要求。