

文章编号 1004-924X(2014)11-2908-06

600 mm 长焦平面时间延迟积分 CCD 的交错拼接

孙 斌*, 李景林, 张星祥, 任建岳

(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: 为了满足空间宽幅相机大视场的需求, 研究了对多片 CCD 器件进行拼接以获得超长焦平面组件的方法。使用长线阵时间延迟积分(TDI)CCD 拼接仪, 按照设计位置和精度要求把 17 片 TDICCD 器件拼接到焦平板上, 用销钉定位, 获得了长为 600 mm、像元为 69 000 个的超长焦平面。然后, 对完成拼接的焦平面组件进行了高低温循环试验、热真空试验和振动试验。实验结果表明, 焦平面组件的结构设计和材料选取满足力学/热学要求。对完成拼接的 600 mm 长焦平面组件进行了 TDICCD 拼接精度的检测, 检测结果显示拼接误差小于 3 μm 。将该超长焦平面组件用于遥感相机, 通过成像实验获得了清晰的无缝宽幅图像。上述结果证明 600 mm 长焦平面组件满足空间宽幅相机的应用需求。

关键词: 空间遥感; 遥感相机; 时间延迟积分 CCD; CCD 拼接; 视场交错拼接; 超长焦平面

中图分类号: TN386.5; V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.2908

Interleaving assembly of TDICCDs on 600 mm focal plane

SUN bin*, LI Jing-lin, ZHANG Xing-xiang, REN Jian-yue

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

* Corresponding author, E-mail: sunbin231@126.com

Abstract: A method to assemble multi-chip CCD devices together for a long focal plane assembly was proposed to meet the need of a space wider format camera for large field of view. By using a long array Time Delay Integration CCD(TDICCD) mosaic apparatus, 17 TDICCD devices were stitched onto the focal plan board with an interleaving assembly method according to the accuracy requirements, and fixed by plugs, then an extra long focal plane with a length of 600 mm, pixels of 69 000 was obtained. The experiments on the completed focal plane assembly were performed by a temperature cycling test, a vacuum thermal test and a vibration test, and the results show that structure design and material selection of the focal plan assembly meet the mechanical and thermal requirements. The accuracy measurement result of focal plane shows that the stitching error is less than 3 μm . The extra long focal plane was applied to a remote sensing camera, and the seamless wider format image was captured. These results testify that the 600 mm long focal plane assembly meets the application needs of wide format remote sensing cameras.

Key words: space remote sensing; remote sensing camera; Time Delay Integration(TDI) CCD; CCD assembly; FOV interleaving assembly; extra long focal plane

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-10-23.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

1 引 言

随着空间遥感技术的发展,宽视场、高分辨率的空间相机逐渐成为研究重点。为了使空间相机具有宽视场,单片 CCD 器件尺寸已经不能满足要求,需要对多片 CCD 器件进行拼接,形成一个等效的大尺寸焦平面。CCD 拼接技术是一种能够有效满足空间相机宽视场要求的专项技术。国内外的空间遥感器研制机构一直都很重视 CCD 拼接技术,如 E2V 公司已经实现了 40 片面阵 CCD 的直接拼接^[1]。中科院长春光机所已实现了 9 片面阵 CCD 的数字拼接、3 片时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI) CCD 的光学拼接、600 mm 长焦平面的交错拼接等^[2-4]。其中,600 mm 长焦平面的交错拼接首次在国内应用,并取得了良好的效果。

TDICCD 的交错拼接是将 TDICCD 在同一平面内装配成两行交错的焦面形式,即第二行的 TDICCD 在图像积分方向上正好填充由第一行 TDICCD 所形成的间隙,交错相邻的两片 TDICCD 首尾的重叠像元满足搭接要求,但在相机飞行方向上(图像积分方向)两行错开一定位置^[3]。相对于光学拼接方法,它的优点是没有引入附加的色差,而且有足够的空间对 TDICCD 进行固定,结构简单可靠。实际得到的成像图像是起始处相互错开的方齿型图像,通过图像处理,用电子学对接的方法便可得到一幅完整的宽幅图像。

本文采用低体分 SiC/Al 复合材料设计了 600 mm 长的焦面板,其质量轻、刚度高、导热性能好并具有良好的结构稳定性,能够保持装调好的 CCD 拼接精度。在长线阵 TDICCD 拼接仪上,将 TDICCD 部件按照设计位置和精度要求拼接到焦面板上并用销钉定位。最后在焦面板上安装定标组件、保护罩组件及相关电路板,使整个焦平面组件满足空间相机的使用要求。

2 拼接精度要求

为了使空间相机具有良好的成像效果,焦平面 TDICCD 的交错拼接必须满足一定的精度要求,即满足拼接 TDICCD 器件之间相对位置的要求^[5-8]。

2.1 直线性要求

第一行 TDICCD 或第二行 TDICCD 像元偏

离各自中心基准直线的直线度误差不能超过 1/3 像元。

2.2 平行度要求

第一行 TDICCD 和第二行 TDICCD 像元中心所形成的两条直线间的平行度误差一般不能超过 1/3 像元。

2.3 两行 TDICCD 间隔要求

两行 TDICCD 实际拼接间隔相对于设计值的误差一般不超过 0.01 mm,设计时尽量使两行 TDICCD 的间隔最小。

2.4 搭接要求

指交错相邻的两片 TDICCD 之间,上一片 TDICCD 的最后一个有效像元与下一片 TDICCD 的第一个有效像元在图像积分方向的实际搭接距离与设计值之间的误差。搭接像元数则要根据相机轨道高度、在轨姿态、两行 TDICCD 间隔等参数计算获得。

2.5 共面性要求

所有的 TDICCD 器件的光敏面在同一平面内的共面精度,即所有 TDICCD 像元都能调整到光学系统的焦深范围内并留有一定余量,共面精度要根据光学系统的焦深来确定。

另外,在进行 TDICCD 拼接之前,还需要对 TDICCD 进行筛选,挑选出几何特性、辐射参量和光谱参量相近的 TDICCD 进行拼接。

3 焦平面组件的设计

本文采用 17 片像元数为 4 096 的 TDICCD 设计了两行交错拼接的焦平面组件,第一行 9 片 CCD,第二行 8 片 CCD。两行 CCD 之间错开一定距离,让过 CCD 的封装尺寸,两行 CCD 相互平行且与焦面板侧面的基准平行,交错相邻的两片 TDICCD 满足搭接要求,在长度方向上有效像元的总长达到了 600 mm。焦平面组件结构见图 1。

由于遥感器要经历发射过程中恶劣的振动环境,焦平面组件必须具备防止冲击和过载的能力,TDICCD 器件应该能够保持很好的位置精度,并且焦面组件的自振频率要远高于可能出现的振动频率。

作为主要的支撑件,焦面板不但要具有较高的刚度,还要尽量减小温度变化对焦面组件的影响,保证成像质量。焦面板的材料选择了质

量轻、刚度好、导热性能突出的低体份 SiC/Al 复合材料,其良好的结构稳定性能够使 TDICCD 保持地面装调好的拼接精度。

每片 TDICCD 分别固定在一个 CCD 座里面,然后再按照设计位置交错排列在焦平面上。CCD 座与焦平面之间设计了可修研垫片,用以

调整像元的共面性,CCD 座与焦平面之间采用螺钉固定并使用销钉定位。电路板、定标灯、保护罩等其它零部件按顺序合理地装到焦平面上,形成一个整体。整个焦平面组件安装到调焦机构上,使 17 片 TDICCD 感光面与空间相机光学系统的像面重合,从而实现成像。

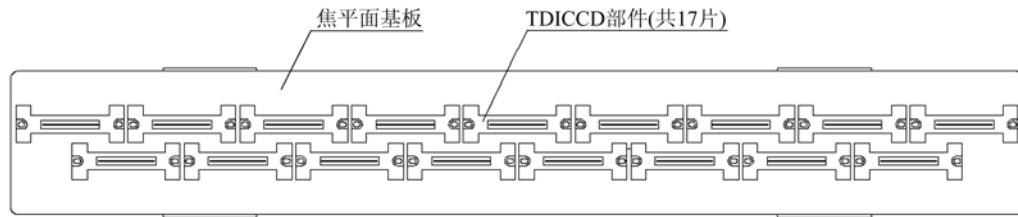


图 1 17 片 TDICCD 焦平面组件

Fig. 1 Focal plane assembly including 17 TDICCDs

4 TDICCD 交错拼接的实施

TDICCD 焦平面的交错拼接在专用的长阵列 TDICCD 拼接仪上完成。拼接仪由高倍显微镜系统、照明系统、CCD 摄像机、计算机和监视器、支撑平台、精密导轨、焦面板调整台、CCD 部件微调装置等组成^[3,9],其结构示意图见图 2。其中,拼接仪垂直于图像积分方向的导轨采用直线度小于 $1.8 \mu\text{m}$ 的负压吸附导轨副^[3],图像积分方向上采用直线度小于 $1.5 \mu\text{m}$ 的十字交叉滚柱导轨, X/Y 导轨光栅尺的分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$,光栅定位精度为 $3 \mu\text{m}/\text{m}$,通过多点线性插补可达到 $1 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

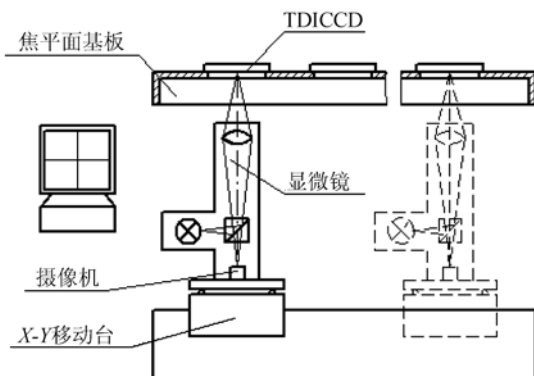


图 2 长阵列 TDICCD 拼接仪结构示意图

Fig. 2 Sketch of TDICCD interleaving instrument

拼接时,通过调整焦平面板与高倍显微镜的相对位置,使拼接 TDICCD 像元的像直接显示在监视器上。能够精密定位的导轨载着显微镜头在水平面内移动到预定位置,TDICCD 感光面的蝴蝶结定位标记与十字丝进行定位对齐。所选 TDICCD 的第一列像元和最后一列像元分别对应一组蝴蝶结定位标记。单行 TDICCD 的直线度及两行之间的平行度以每片 TDICCD 第一级像元为对象进行对齐,见图 3。搭接精度是指以所选用 TDICCD 的蝴蝶结标志为对象,根据搭接像元数计算出的交错相邻的两片 TDICCD 首尾蝴蝶结之间的横向距离,见图 4。图 3、图 4 是检测过程中对像元放大 800 倍的监视图片。图片表明,检测设备的显微系统成像清晰,十字丝定位精度高。采用上述方法,完成了总长度为 600 mm 的长焦平面 TDICCD 的交错拼接,完成拼接的焦面组件如图 5 所示。

拼接完成后,采用拼接 CCD 像元直接监视法检测焦面的拼接精度。固定焦平面组件,移动显微镜头,拼接 CCD 的像元在显微镜和成像系统的监视下,通过镜头上面的十字丝进行定位对齐。镜头移动时,用导轨上面的光栅尺测量镜头的移动距离,从而获得拼接精度。

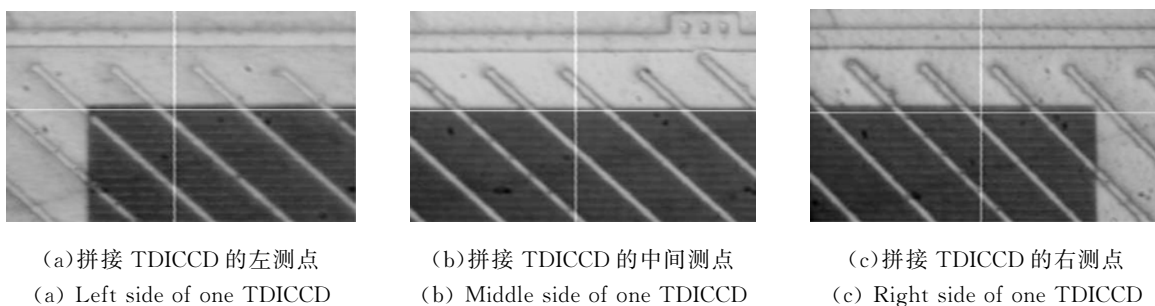


图 3 平行度调整的监视图片(800×)

Fig. 3 Monitoring pictures of parallel adjustment(800×)

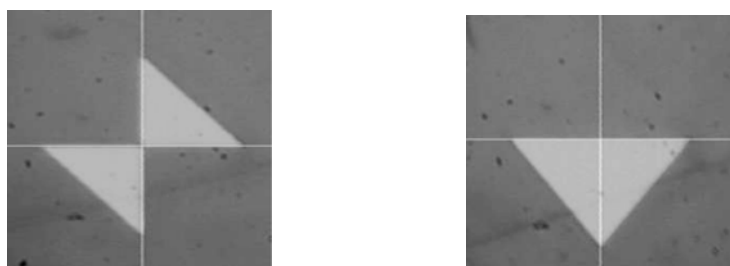


图 4 TDICCD 组件拼接图处(800×)

Fig. 4 Pictures of TDICCD assembly(800×)

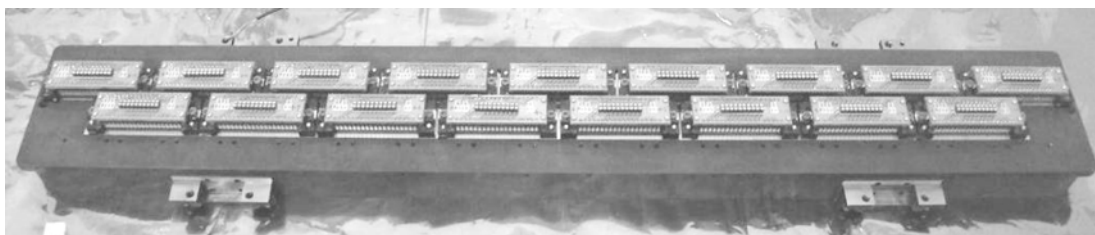


图 5 完成 TDICCD 交错拼接的焦平面组件

Fig. 5 Picture of focal plane assembly

精度检测的误差是测量过程中一系列误差因素 共同作用的结果。拼接仪的系统误差分析见表 1。

表 1 检测装置的误差分析

Tab. 1 Error analysis of measuring instrument

| 误差种类 | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 导轨直线误差 | $\Delta X_1 = 0.5$ | $\Delta Y_1 = 1.0$ | $\Delta Z_1 = 0.5$ |
| 导轨平面度误差 | $\Delta X_2 = 1.0$ | $\Delta Y_2 = 1.0$ | $\Delta Z_2 = 1.0$ |
| 拼接基板平面度误差 | $\Delta X_3 = 1.0$ | $\Delta Y_3 = 1.0$ | $\Delta Z_3 = 1.0$ |
| 拼接基板与 X/Y 导轨的平行度误差 | $\Delta X_4 = 1.0$ | $\Delta Y_4 = 1.3$ | $\Delta Z_4 = 1.0$ |
| 显微镜对准极限误差 | $\Delta X_5 = 0.18$ | $\Delta Y_5 = 0.18$ | $\Delta Z_5 = 0.18$ |
| 由显示器分辨率产生的误差 | $\Delta X_6 = 0.46$ | $\Delta Y_6 = 0.46$ | $\Delta Z_6 = 0.46$ |
| 拼接 TDICCD 像元与成像 CCD 相机像元的匹配误差 | $\Delta X_7 = 0.2$ | $\Delta Y_7 = 0.2$ | $\Delta Z_7 = 0.2$ |
| 电十字刻度误差 | $\Delta X_8 = 0.2$ | $\Delta Y_8 = 0.2$ | $\Delta Z_8 = 0.2$ |
| 光栅定位误差 | $\Delta X_9 = 0.5$ | $\Delta Y_9 = 1.2$ | $\Delta Z_9 = 0$ |
| 显微镜的调焦误差 | $\Delta X_{10} = 0.52$ | $\Delta Y_{10} = 0.52$ | $\Delta Z_{10} = 1.5$ |
| TDICCD 保持架垫片的误差 | $\Delta X_{11} = 0$ | $\Delta Y_{11} = 0$ | $\Delta Z_{11} = 1.0$ |
| 总系统误差(ΔH) | $\Delta X = 2.02$ | $\Delta Y = 2.59$ | $\Delta Z = 2.61$ |

表 1 中各方向上总的系统误差根据公式

$\Delta H = \sqrt{\sum_{i=1}^{11} \Delta H_i^2}$ 计算, 其中 ΔH_i 分别为不同方向上的误差。TDICCD 拼接仪各方向上的系统误差分别为 $\Delta X = 2.02 \mu\text{m}$, $\Delta Y = 2.59 \mu\text{m}$, $\Delta Z = 2.61 \mu\text{m}$ 。

结合拼接仪测得的结果对各项误差进行合成, 得到焦平面总的拼接误差。它们分别为: 奇数行直线度误差 $2.7 \mu\text{m}$, 偶数行直线度误差 $2.8 \mu\text{m}$, 平行度误差 $1.1 \mu\text{m}$, 17 片 TDICCD 像元共面误差 $5 \mu\text{m}$ ^[5,10]。

5 热试验、振动试验、成像试验

焦平面组件完成拼接后需要按照试验大纲进行组件级相关热试验和振动试验, 以检验设计工艺的合理性, 验证焦面组件是否达到规定功能以及经受各种环境时的适应能力, 从而保证空间相



图 6 焦平面组件热真空试验

Fig. 6 Vacuum thermal test of focal plane assembly

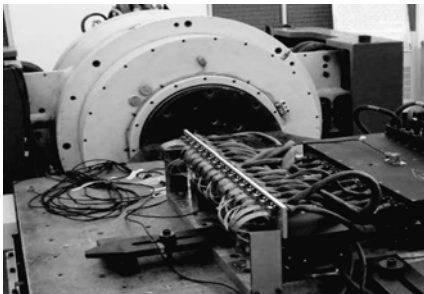


图 7 焦平面组件振动试验

Fig. 7 Vibration test of focal plane assembly

机的可靠性。热试验照片见图 6, 振动试验照片见图 7。热试验后对焦面 TDICCD 的拼接精度进行了检测。检测结果表明, 焦面拼接精度没有发生变化, 与拼接完成时保持一致。

振动试验结果表明, 焦平面组件具备防止冲击和过载的能力, 并且一阶频率高于 300 Hz , 发射和运行过程中不会发生共振。振动试验之后同样需要检测焦平面组件 TDICCD 的拼接精度。检测结果表明, 焦面的拼接精度与拼接完成时保持一致。

在完成各项组件级试验之后, 将焦平面组件安装到相机光学镜头上进行整机的成像试验, 经过图像处理获得了清晰、均匀的宽幅图像^[11]。成像试验照片(目标建筑距离为 10 km)如图 8 所示。



图 8 外场成像试验照片

Fig. 8 Image of outdoor imaging experiment

6 结 论

本文采用 TDICCD 视场交错法完成了 600 mm 长焦平面组件的拼接, 其结构简单可靠、刚度高、稳定性好, CCD 拼接操作易于控制精度, 拼接误差小于 $3 \mu\text{m}$ 。完成拼接的焦平面组件在进行热真空和振动试验后, 安装到光学镜头上并配套电子学成像系统进行了成像试验, 获得了清晰的无缝宽幅图像。试验结果表明, 600 mm 长焦平面组件完全可以满足宽视场遥感相机的空间应用。

参考文献:

- [1] JORDEN P R, MORRIS D G, POOL P J. Technology of large focal planes of CCDs[J]. *SPIE*, 2003, 5167:72-82.
- [2] 马小梅,董吉洪,李延春,等.空间光学遥感器 CCD 焦面组件的设计与分析[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(7):321-324.
MA X M, DONG J H, LI Y CH, *et al.*. Design and analysis of CCD focal plane of space optical remote sensor [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(7):321-324. (in Chinese)
- [3] 张星祥,任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接 [J]. *光学学报*, 2006, 26(5):740-745.
ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5):740-745. (in Chinese)
- [4] 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.
LI ZH H, WANG ZH X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3):213-216. (in Chinese)
- [5] 任建岳,孙斌,张星祥,等. TDICCD 交错拼接的精度检测[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1852-1857.
REN J Y, SUN B, ZHANG X X, *et al.*. Precision measurement of TDICCD interleaving assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1852-1857. (in Chinese)
- [6] 郭疆,龚大鹏,朱磊,等.测绘相机焦平面 CCD 交错拼接中重叠像元数计算[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5):1251-1257.
GUO J, GONG D P, ZHU L, *et al.*. Calculation of overlapping pixels in interleaving assembly of CCD focal plane of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1251-1257. (in Chinese)
- [7] 吕恒毅,刘杨,郭永飞.遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5):1041-1047.
LÜ H Y, LIU Y, GUO Y F. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):1041-1047. (in Chinese)
- [8] 叶钊,刘则洵,李宪圣,等.用于宽视场空间相机的 CCD 光谱特性筛选装置[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(2):265-270.
YE ZH, LIU Z X, LI X SH, *et al.*. Screening device of CCD spectral conformation for wide field of view space camera [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(2):265-270. (in Chinese)
- [9] 徐盛林.长线阵 CCD 拼接仪的设计[J]. *机械工程师*, 2003, 2:39-41.
XU SH L. Design of work table for arraying CCD [J]. *Mechanical Engineer*, 2003, 2:39-41. (in Chinese)
- [10] 杨利红,张星祥,孙斌,等.图像配准在 TDICCD 拼接焦面精度检测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7):1934-1940.
YANG L H, ZHANG X X, SUN B, *et al.*. Application of image registration in precision detection of TDICCD butting focal plane [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7):1934-1940. (in Chinese)
- [11] 宁永慧,郭永飞. TDICCD 拼接相机的像元响应非均匀性校正方法[J]. *中国光学*, 2013, 6(3):386-393.
NING Y H, GUO Y F. Correction of pixel response non-uniformity in TDICCD mosaic camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):386-393. (in Chinese)

作者简介:



孙 斌(1983—),男,辽宁丹东人,硕士,助理研究员,2006 年于吉林大学获得学士学位,2009 年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事空间光机系统、CCD 拼接等方面的研究。E-mail:sunbin231@126.com



李景林(1963—),男,吉林长春人,研究员,1987 年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间遥感器光机系统的研究。E-mail:aq0183@126.com