

紧凑型多光谱空间光学遥感器 焦平面的设计与拼接

李延春, 董吉洪, 陈立恒, 郭权锋

(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:为实现高分辨率、多光谱、宽覆盖的遥感测量,对空间光学遥感器由3片TDI CCD组成的焦面组件进行了设计,并提出了一种新的拼接方法。根据空间光学遥感器采用的多光谱TDI CCD外形尺寸较大、几乎占满整个结构设计空间的特点,对其焦平面进行了紧凑型的机械交错拼接设计;根据紧凑型多光谱焦平面的特点,结合图像处理技术进行了拼接,对由CCD拼接仪产生的图像进行了放大和处理,以尽量消除因人眼视觉误差对拼接精度产生的影响,提高拼接精度;最后进行了拼接验证。结果表明,该方法拼接出的焦面各片CCD之间的搭接误差 $<3\ \mu\text{m}$,两排CCD的平行度误差 $<3\ \mu\text{m}$,共面性误差 $<5\ \mu\text{m}$,满足空间光学遥感器的成像要求。

关键词:空间光学遥感器;焦平面;拼接;TDI CCD;图像处理技术

中图分类号:TH703

文献标识码:A

DOI: 10.3788/OMEI 20102708.0047

Design and Assembly for a Multispectral Compact Focal Plane of Space Optical Remote Sensor

LI Yan-chun, DONG Ji-hong, CHEN Li-heng, GUO Quan-feng

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

Abstract: A focal plane of the space optical remote sensor which was composed of three TDI CCD was designed and A new assembly method was proposed for achieving high resolution, multispectral, wide coverage of remote sensing images. The focal plane of space optical remote sensor was staggered lap compact mechanical design according to its characteristics such as multi-spectral shape, larger size TDI CCD which almost full design structure space. The mosaic images generated by the splicing CCD was amplified and processed to eliminate possible errors which due to

human visual impacting on the stitching accuracy and improve stitching accuracy based on the compact multi-spectral characteristics of the focal plane. Finally, the results of splicing were verified. The results showed that, based on the method of splicing, the focal plane of the CCD chip overlap error was less than $3\ \mu\text{m}$, the parallel error between two rows CCD less than $3\ \mu\text{m}$, the coplanar error less than $5\ \mu\text{m}$, and the imaging requirements of the space optical remote sensor could be satisfied.

Keywords: space optical remote sensor; focal plane; assembly; TDI CCD, image processing technology

1 引言

随着航空遥感技术的发展,尤其是光学技术与电子学技术的飞速发展,空间光学传感器也由低分辨率、单谱段、窄覆盖向高分辨率、多成像谱段、宽覆盖、实时传输的方向发展^[1-2]。为满足成像需要,所选用的光电耦合器件 CCD (Charge coupled devices) 也由单谱段、低像元数的 CCD 逐渐向多谱段、高像元数的 CCD 转换。目前,虽然单片 CCD 像元数超过 10 000 个,但仍不能满足现代航空航天领域对高分辨率和宽收容率的要求^[3]。受技术水平和工艺水平的限制,再次增加单片 CCD 的成像像元数是很困难的^[4]。在这种情况下,CCD 拼接技术应运而生,并在光学遥感侦察系统中得到了广泛的应用。目前,美国、法国、以色列、俄罗斯及我国在光学遥感系统、大画幅相机等领域都成功地采用了 CCD 拼接技术^[5]。本文讨论了各种拼接方法的特点及优越点,结合图像处理技术提出了一种新的拼接方法并进行了拼接验证。

2 CCD 拼接技术方法

CCD 拼接是将多片 CCD 的成像像元首尾相连,组成一个等效的视场 CCD 探测器,以满足相机视场覆盖宽度的要求。CCD 拼接主要有机械拼接、光学拼接、机械交错拼接(也称为电子学拼接)等方式^[6-7]。

传统的机械拼接是将 CCD 器件在机械上首尾相连,使之在同一直线上。为保证像元的有效性,实际操作时都拆除单片 CCD 的封装,将相邻 CCD 的有效像元首尾搭接。这种方式要求所有 CCD 首尾像元

都是有效的,且在实际操作中容易产生搭接缝隙,拼接精度极难保证,故只在一些专业的厂家或研究单位采用^[8]。

光学拼接是利用棱镜的分光效应,将像平面分割成空间分离的一对光程相等的共轭面,并将 CCD 交错分布于这一等光程的共轭面上,使每相邻的两片 CCD 首尾像元搭接,形成宽视场的像方空间。光学拼接原理图如图 1 所示^[6-7]。光学拼接采用的分光棱镜有半反半透型和全反全透型两种。全反全透型棱镜能量利用率高,但对 CCD 与棱镜相对位置要求严格,且大部分 CCD 像元受渐晕影响,使信噪比下降;半反半透式分光棱镜易于装配,但能量利用率低,在早期的光学系统上得到了广泛应用。然而,由于光学拼接会产生色差,且不适合于全反射系统,并且一般拼接长度不易超过 220 mm,因而限制了该拼接方法在大视场传感器上的应用^[9]。

机械交错拼接是将 CCD 装配成双列交错式焦面形式,即在同一平面上,利用第二行 CCD 正好填补第一行 CCD 所形成的间隙,相邻 CCD 的首尾像元对齐或重叠一定距离,在传感器飞行方向上两行 CCD 错开一定位置^[9]。机械交错拼接的图像处理是采用电子学对接的方法,通过积分延时处理产生清晰的宽幅大视场图像。该拼接方式结构简单,不会引入色

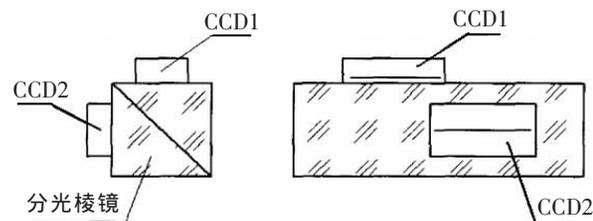


图 1 光学拼接原理图

差,能满足大视场的要求,在大视场空间光学遥感器中得到了广泛应用。机械交错拼接原理图如图2所示。

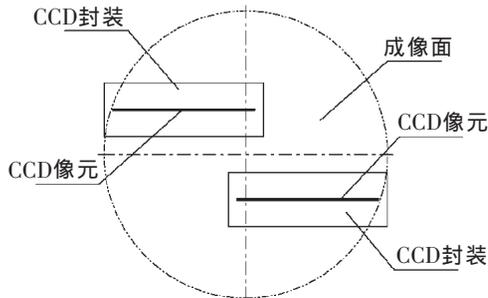


图2 机械交错拼接原理图

TDI CCD 是一种面阵结构、线阵输出的 CCD,具有多重级数积分演示功能,在低照度的情况下具有较好的成像性能。作为具有多级成像单元的器件,TDI CCD 的每一级成像单元都相当于一条线阵 CCD 成像器件,各级成像器件对同一景物的运动进行精密控制并同步演示曝光,通过对输出信号的积分处理获得高质量的目标图像。因此,在光学遥感器中得到了广泛应用。

3 焦面组件的设计与拼接

综合分析各种拼接方式的特点,在机械交错拼接的基础上,结合图像处理技术,提出了一种新的拼接方法。结合所选用的多光谱 TDI CCD 的外形尺寸与焦面成像区空间之间的关系,文中针对多光谱空间光学遥感器设计了由 3 片 TDI CCD 交错搭接组成的紧凑型焦面组件,并进行了拼接验证。

3.1 焦面组件设计

根据空间光学遥感器对遥感图像的要求(覆盖宽度 $<6\text{ km}$,地面全色分辨率 0.5 m ,彩色分辨率 2 m),结合光学设计的实际情况,选用由 3 片多光谱 TDI CCD 交错搭接组成的焦面做为相机的成像面。所选 CCD 为多光谱 TDI CCD,其全色像元尺寸为 $8.75\text{ }\mu\text{m}\times 8.75\text{ }\mu\text{m}$,单行像元数为 4 096,彩色像元尺寸为 $35\text{ }\mu\text{m}\times 35\text{ }\mu\text{m}$,单行像元数为 1 024,如图 3 所

示。综合分析 3 种拼接方式的优缺点,结合所选用的多光谱 TDI CCD 的外形尺寸与焦面成像区空间之间的关系,本文选用机械交错搭接的方式进行焦面组件的设计和拼接。

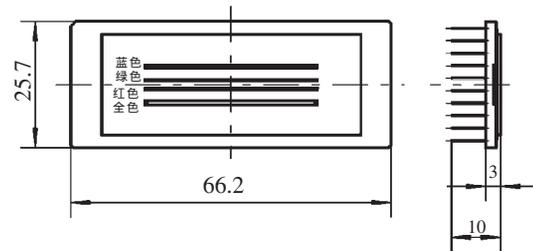


图3 TDI CCD 外形结构图

设计时,将焦面组件设计成由 3 片 TDI CCD 交错搭接组成的形式,即将 3 片 TDI CCD 以交错搭接的方式固定在焦面基板上,如图 4 所示。

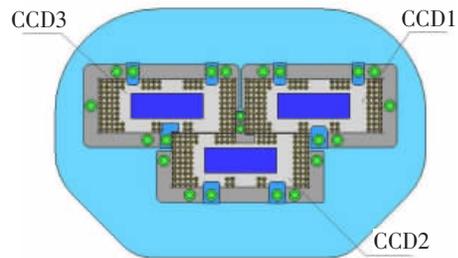


图4 焦面组件结构布局图

所选用的 TDI CCD 的外形尺寸为 $66.2\text{ mm}\times 25.7\text{ mm}$,其感光面上像元面的包络尺寸为 $35.84\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,成像面位置相对于 CCD 外形尺寸对称。依据光学设计要求,参考空间光学遥感器的偏航数据和偏流角,在保证图像不出现搭接缝隙的前提下,选取相邻 CCD 全光谱段处的像元搭接宽度为 12 个像元(0.105 mm),且相邻两排 CCD 第一行全色像元连线之间的距离为 26.5 mm 。确定 CCD 之间的相对位置关系后,发现 CCD1 与 CCD3 外边缘之间的距离为 5.27 mm ,而两排 CCD 外边缘之间的间隙仅为 0.8 mm ,尺寸空间均无法满足对 CCD 进行正常压接设计的要求,为此设计了紧凑型的焦面组件。

为保证焦面组件的结构稳定性,设计了用于固定 CCD 的 CCD 座。拼接前,通过压块和胶将 CCD

与相应的 CCD 座固定为一个 CCD 组件，每个 CCD 组件作为一个单元参与拼接，通过拼接相应的 CCD 组件达到拼接要求。同时，在 CCD 与 CCD 座之间增加了相应的压块，防止粘胶后 CCD 与 CCD 座之间产生相对位移变化，并在温度急剧变化时，减小因胶的热胀冷缩使 CCD 成像带相对成像面法线的大位移移动，减弱和消除外界环境变化对 CCD 像元共面性的影响。

为了在复杂的温度环境中保证 CCD 拼接精度的稳定性，设计时对与拼接精度有关的焦面组件机械件的材料进行了严格的筛选。经过分析计算，焦面基板及 CCD 座均选用与 CCD 封装具有近似相同线胀系数的 4J32 合金，以减少温度急剧变化过程中 CCD 器件本身的受力，使组件处于无应力状态，保持拼接精度。

为提高整个焦面组件的刚度和稳定性，针对每个参与拼接的 CCD 组件都进行了相应的设计，确保每个 CCD 组件的 4 个边均有螺钉与焦面基板固定在一起，如图 4 所示。设计时，充分考虑各种环境因素的影响，以 CCD2 为例，使其 CCD 座在靠近 CCD1/CCD3 的一侧伸出一个凸台，并用螺钉将凸台与焦面基板固定，以防止在冲击振动或温度急剧变化的环境中 CCD2 的像元相对整个光学遥感器的成像面倾斜。设计完成后，用有限元模态分析和均匀温升计算的方式，对设计的焦面组件的系统稳定性进行了验证。结果显示，系统的一阶固有频率 >200 Hz，高于外界可能的振动源的频率，具有防振动、冲击和过载的能力。均匀温升分析结果表明，当焦面组件的温升在常温 (20°C) 的 $\pm 30^{\circ}\text{C}$ 变化时，焦面组件的搭接及共面变化均 $< \pm 1.5 \mu\text{m}$ ，满足使用要求。

3.2 焦面组件拼接

结合几种拼接方法的优缺点，考虑紧凑型多光谱焦面组件的实际空间布局情况，在采用机械交错拼接方式的基础上，结合图像处理技术，提出了一种新的拼接方法，并对设计的焦面组件进行了拼接验证。

3.2.1 拼接精度要求

如图 5 所示，各 CCD 之间的拼接精度要求如下：

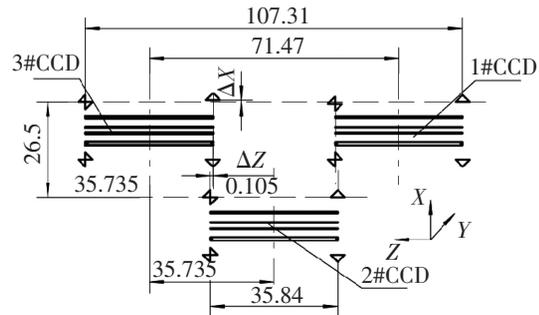


图5 CCD拼接参数示意图

(1) 搭接精度要求 (ΔZ): 相邻 CCD 首尾像元标记搭接，搭接长度为 12 个像元，允差 ± 0.005 mm。即搭接时交错的像元标记间距限制在 $0.105 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$ 之间。

(2) 直线性和平行性要求 (Z 方向): 第一行的 CCD1、CCD3 所有用于标记像元位置的像元标记的横线必须在同一直线上，其非直线度误差 ΔX 为 $\pm 2 \mu\text{m}$ ；第二行 CCD 与第一行 CCD 像元标记的连线必须平行，二者之间的距离为 26.5 mm，其不平行度误差 $\pm 2 \mu\text{m}$ (以 CCD1、CCD3 的像元标记连线为准)；

(3) 共面性要求 (Y 方向): 3 片 CCD 的所有像元标记必须在同一焦面上，其不共面误差为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

3.2.2 拼接前的准备

3.2.2.1 CCD 器件的检测与选取

在拼接之前，首先对 CCD 器件进行测试，选取那些几何参数及光电特性相近的器件进行拼接，各项参数均在 CCD 综合测试仪上进行测试。由于所选用的 TDI CCD 的成像像元表面覆盖一层滤光膜，无法看到具体的成像像元，在拼接仪上看到的成像区如图 6 所示。因此，检测时，主要检测每片 CCD 像元 4 个光谱成像带的共面性及每片 CCD 成像面处的像元标记点的共面性及其中心点的距离，如图中所示。因成像区 4 个角点处用于标记像元位置的像元标记的中心位置分别对应每片 CCD 的第一像元的前边缘和最后一个像元的后边缘，且每片 CCD 的 4 个像元标记组成的平面与相应的 CCD 成像带组成的面

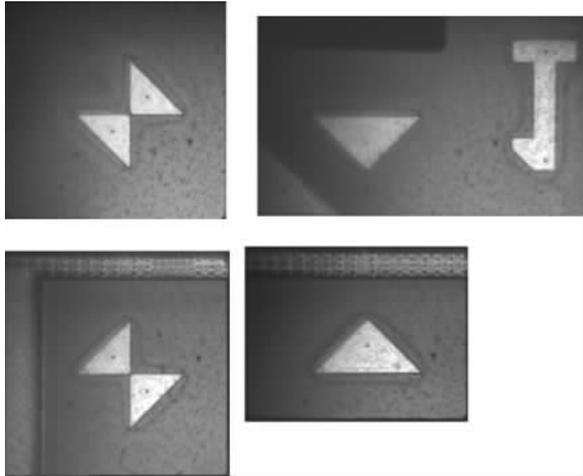


图6 CCD像元标记对应图

平行, 因此, 拼接时以 CCD 成像区 4 个像元标记作为拼接时的基准进行拼接。

3.2.2.2 CCD 组件的装配

焦面组件具有很好的抗冲击振动能力是其具有好的精度和稳定性的保证。为实现这一目的, 拼接前, 将每片 TDI CCD 与相应的 CCD 座通过压块和胶固定在一起, 作为一个组件参与拼接。各 CCD 组件的结构基本相同, 3#CCD 组件的结构如图 7 所示。

为保证拼接精度, 消除 CCD 与 CCD 座之间预留的装配间隙对相邻两片 CCD 搭接精度的影响, 实际操作时, 应根据实际拼接需要严格限定各片 TDI CCD 与相应的 CCD 座之间的相互位置关系。

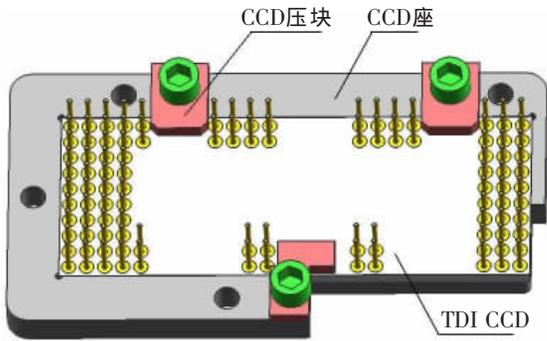


图7 3#CCD 组件

3.2.3 焦面组件的拼接

将焦面基板及拼接工装固定在一起, 而后整体固定在拼接仪的相应位置, 调平焦面基板, 使各拼

接基准相对理论位置的误差不 >0.001 mm, 否则调整拼接基准使之符合拼接要求。将 3 个 CCD 组件一次装配到焦面基板的相应位置, 通过调整各 CCD 座的位置, 使各 CCD 之间的搭接误差在 ± 0.005 mm 以内, 随后用力矩扳手将各 CCD 组件固定到焦面基板上, 完成焦面组件的预拼接。预拼接完成后, 进行共面性拼接。

共面性拼接时, 为消除传统拼接方式中因人眼直接进行焦深判读而产生的人眼读数误差, 保持测试结果的一致性, 采用了图像处理技术。如图 6 所示, 在读数时以各像元标记处的蝴蝶结或三角符号标记为准, 并编制了专门的图像处理软件, 按照不同的像元标记选取不同的图像采集区域, 运用差分原理计算该区域内像元标记区域内各微观凸起边缘长度的总和, 并将计算数值作为输出数据显示在显示器的数据判读区域。数据判断时, 以所得数据的最大值做为焦深的理论位置。经过多次反复测量对比, 这种新的焦深判读方式的重复性误差 <0.001 mm。分别测出每片 CCD 的 4 个角点位置的像元标记的焦深数值后, 将测得的 3 片 CCD 的焦深数据分别输入专用软件, 通过软件拟合出一个与 CCD 拼接面基准面平行且最靠近 CCD 成像面的平面, 算出 3 片 CCD 座修磨垫各角点相对于该拟合平面应修去的量, 而后通过修磨相应的 CCD 修磨垫使之达到计算要求。

修完依次修磨垫后, 将各 CCD 组件重新拼接到调整好的焦面基板上, 搭接精度 ± 0.005 mm, 复测各像元标记点的焦深。若各像元标记的共面性焦深范围在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内, 则进行下一步; 否则, 根据焦深实测值再次修研 CCD 修磨垫, 使之达到要求。经过两次修研后, 各像元标记的共面性误差实测数值为 $\pm 0.75 \mu\text{m}$ 。

共面性修研完成后, 进行焦面组件的拼接。通过微调各 CCD 组件的位置, 使之达到如下要求:

- (1) 1#CCD 与 2#CCD 的搭接长度范围为 $0.105 \text{ mm} \pm 0.001$ mm, 2#CCD 与 3#CCD 的搭接长度范围为

0.105 mm \pm 0.001 mm;

(2) 1#CCD、3#CCD的全色成像区域一侧的像元标记共线,其不共线误差不 $>$ \pm 0.001 mm;

(3) 两排 CCD的全色像元侧的像元标记连线平行,不平行的误差不 $>$ \pm 0.001 mm,且两行像元标记之间的距离为(26.5 \pm 0.001) mm;

拼接完成后,用力矩扳手紧定相应的螺钉。稳定 24 h 后,对拼接精度进行检测,各片 CCD 之间的搭接误差为 \pm 0.75 μ m,像元标记连线的直线度误差为 \pm 0.5 μ m,两行 CCD 的平行度误差为 \pm 0.5 μ m,各像元标记的共面性误差为 \pm 1 μ m。随后,进行了力学和高低温试验,进一步消除装配应力,并进行了最终检测,结果为:各片 CCD 之间的搭接误差为 \pm 1.25 μ m,像元标记连线的直线度误差为 \pm 0.75 μ m,

两行 CCD 的平行度误差为 \pm 0.75 μ m,各像元标记的共面性误差为 \pm 2 μ m。

4 结 论

本文对各种焦平面拼接方式进行了论述,并结合各种拼接方式的特点针对空间遥感器的紧凑型多光谱焦平面提出了一种新型的拼接方法。针对空间遥感器的具体要求设计了一套紧凑型多光谱焦面组件,并进行了拼接验证。图像分析技术的应用使拼接精度大幅提高,测试结果表明,该方式拼接出的焦平面各片 CCD 之间的搭接误差 $<$ 3 μ m,两排 CCD 的平行度误差 $<$ 3 μ m,共面误差 $<$ 5 μ m,均满足空间遥感器的成像要求,为今后焦平面的设计与拼接提供了借鉴和参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 毛洁娜,于龙,林莹莹.无人机遥感应用与红外载荷研究[J].红外,2007,28(2):32-35.
- [3] 马春庭.线阵 CCD 测距系统的类别方差数据处理[J].探测与控制学报,2008,30(1):32-35.
- [4] 岳俊华,李岩,吴学颖,等.多 TDI-CCD 拼接相机成像非均匀性的校正 [J].光学精密工程,2009,17(12):261-263.
- [5] 李英才,刘亚南,相宝林,等.提高线阵 CCD 拼接精度的研究[J].测试技术学报,2002,16(2):430-434.
- [6] 杨桦,郭悦,伏瑞敏.TDI CCD 的视场拼接[J].光学技术,2003,29(2):226-228.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 马小梅,董吉洪,李延春,等.空间光学传感器 CCD 组件的设计与分析[J].计算机仿真,2007,25(7):321-324.

作者简介:李延春(1979-),男,汉族,河南开封人,硕士,助理研究员,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器的设计。E-mail: feilong99031@yahoo.com.cn