

空间相机 CCD 焦平面的光学拼接

李朝辉,王肇勋,武克用

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130021)

摘要:为满足空间相机在大视场、高分辨率下进行测量,研究了多片线阵 CCD 拼接技术,阐述了光学拼接的原理、装调、检测方法和焦面结构。在由长工作距显微镜和精密 X-Y 导轨组成的拼接设备上,采用分光棱镜、机械微调的方法完成了三片 TDI CCD 的光学拼接,搭接误差不超过 1/3 像素。光学拼接具有结构简单,成本低和使用灵活的优点。

关键词:TDICCD; 光学拼接; 焦平面

中图分类号:V445.8 **文献标识码:**A

1 引言

CCD 被广泛地应用于航空、航天光学遥感器,以及测量、控制等领域,为了扩大视场或增大测量范围,需要增加像元数,增加像元数最简单有效的途径就是将多片 CCD 组装在一起,即 CCD 拼接。法国 SPOT 卫星的 HRV 相机就是成功地使用 CCD 拼接技术的实例。

2 焦面拼接方案

CCD 拼接主要有机械拼接、电子学拼接和光学拼接。机械拼接就是将 CCD 首尾相连,使之在同一直线上,这就要求每片 CCD 两端处的像元必须是有效的,否则在对接处会有漏失的像元,这样的 CCD 芯片不容易制作。电子学拼接是使两片 CCD 在图象运动方向上错开一定位置,并且首尾像元对齐,然后通过电子学延时处理,使两片 CCD 所成的图象拼成一幅,这种拼接法要求对数据进行再处理以及大的存储容量,给电学处理带来困难。光学拼接就是利用分光棱镜形成一对光程相等的共轭面,其中透射面处的 CCD1、CCD3 和反射面处的 CCD2 首尾搭接,其原理如图 1 所示,利用这种方法制造大视场或多谱段的焦面阵列成本低,在现行技术条件下易实现。

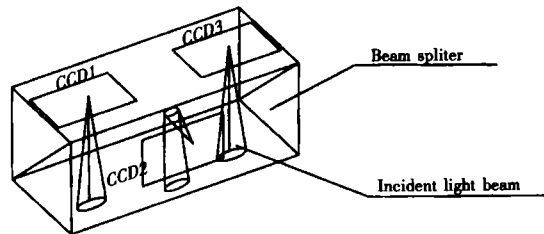


Fig. 1 The principle of assembly

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 CCD 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。半反半透分光棱镜光能利用率低,但易于装配,如果采用 TDI CCD(Time Delay Integration),可解决能量不足的问题。对于一般线阵 CCD,如 TCD106C,像元尺寸为 $7 \times 7 \mu\text{m}$,两片拼接精度已达到如下指标:线性误差 $\Delta y \leq 3.5 \mu\text{m}$,共面性误差 $\Delta z \leq 10 \mu\text{m}$,相邻像元搭接误差 $\Delta x \leq 3.5 \mu\text{m}$ 。^[1]对于 TDI CCD,由于其具有面阵 CCD 的特性,拼接起来难度增大,采用三片以上 TDI CCD 进行拼接需要合理的结构设计和装调方法,以及特殊的测试设备。我们在实验室条件下,采用半透半反式光学拼接方法,组装出由三片 TDI CCD,像元尺寸为 $13 \times 13 \mu\text{m}$ 共 6144 个像素的长行焦面阵列,当然,根据需要还可以进行多片拼接。

3 焦面组件结构设计

焦面组件由半反半透分光棱镜、滤光片、3片 TDI CCD、定标组件、半导体致冷器及温度传感器组成。结构如图 2 所示。

其中,分光棱镜是实现拼接的关键零件,因此对分光棱镜的光学材料、角度误差、透射光与反射光的波段、分光比例均有一定的要求。尤其要使透射光与反射光等光程,以保证 CCD 的共面性。另外,为了使整个视场照度均匀,在滤光片上镀渐变中性减反膜,然后将滤光片与分光棱镜胶合在一起。

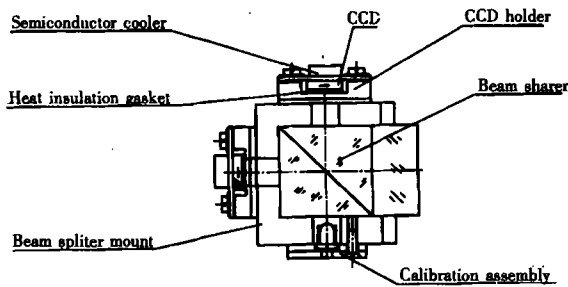


Fig. 2 Sketch of CCD focal plane structure

在结构设计上主要考虑 CCD 焦面组件的工作温度范围为 $-50^{\circ}\text{C} \sim +30^{\circ}\text{C}$, 还要能够承受相机发射时的冲击和振动, 具有好的结构稳定性以保持地面装调好的精度。同时还要求在 6 个自由度上精确调整 CCD, 然后精确定位。因此我们采取如下措施: 尽量提高各部件本身的刚度, 让部件本身的自然频率远大于外界可能的振动源的频率; 分光棱镜座用钛合金制造, 与分光棱镜的线胀系数相匹配; CCD 座用殷钢制作, 使之与 CCD 封装的线胀系数相匹配; 为了使 CCD 工作在恒定温度下, 采取了温控措施, 将银丝编织带的一端固定在 CCD 的背面, 另一端固定在半导体致冷器的冷端, 将热量散发出去; 为了减小热负载, 用隔热材料把 CCD 隔离, 使半导体致冷器只对 CCD 器件进行温控。除了合理的设计, 还要有精确的装调才能实现微米量级的拼接工作。

4 CCD 拼接与精度分析

4.1 CCD 拼接

1) 拼接的技术要求

光学拼接的技术要求, 主要是三片 CCD 器件的相对位置要求, 如图 3 所示。我们取 CCD2 为基准, 这个基准 CCD 对分光棱镜有一定的平行性要求。这时, CCD1、CCD3 相对于 CCD2 的位置要求共有三项:

- 搭接要求。CCD1 或 CCD3 的每一级的第一个有效像素与 CCD2 相应级的最后一个有效像素在 x 方向的距离必须等于 CCD 像素的像元间距, 其误差为 Δx 。
- 直线性要求。CCD1、CCD2 和 CCD3 的同一级的所有像素必须在同一直线上, 其误差为 Δy 。
- 共面性要求。从棱镜前方看, 三片 CCD 的所有像素必须在同一焦平面上, 误差为 Δz 。

拼接时要注意使图象在 TDI CCD 上的扫描方向与积分方向保持一致, 由于分光棱镜只反射一次, 所以透射面处的每片 CCD 与反射面处的 CCD 摆放位置正好相反。

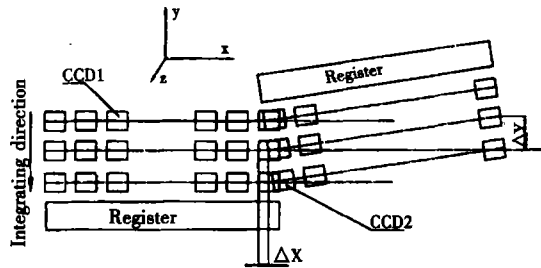


Fig. 3 The lapping linear error of TDI CCD assembly

2) CCD 拼接及拼接装置

在拼接之前, 首先要对 CCD 器件进行测试, 挑选那些几何特性和光电参数相近的芯片, 各项指标在 CCD 综合测试仪上进行测试。几何特性主要包括表面不平度及其分布, 沿 TDI 级数方向长度的离散性, 像元尺寸的离散性等。光电特性主要包括光电响应的一致性, 暗电流的不均匀性等。

CCD 拼接是在专门设备上进行的。我们研制的 CCD 拼接仪由一架高倍工具显微镜, 照明系统, CCD 摄像机和精密 X-Y 导轨的工作台等组成。其原理框图见图 4。

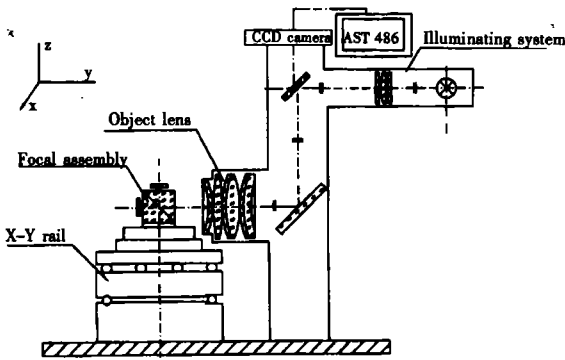


Fig. 4 Block diagram of CCD mosaic instrument

拼接仪的主要技术指标:前工作距离(包括棱镜) $>45\text{mm}$,显微镜物镜放大倍率 $M=20\times$,数值孔径 $NA=0.35$,加上电子图象放大后组合倍率达 1000 倍,X-Y 导轨误差 $\leq 1\mu\text{m}$ 。

首先用千分表将分光棱镜座与 x 导轨调平行,然后固定在定位板上。拼接时先调整一块 TDI CCD,其余 2 片 CCD 以其为基准,在六个自由度方向均应精确调整,其中焦深方向靠修磨垫片来保证。移动工作台进行监测,在首尾像元搭接时,考虑到 CCD 在积分方向上长度的离散性很小,所以只取几行的首尾像素来对准,即可保证其余行的搭接误差在要求的范围内;在进行直线性调整时,由于 CCD 像元尺寸的离散性,所以只能调整一行中的几个像元和基准 CCD 的同一级像元在同一直线上,其余像素应尽量对称分布在这一基准直线附近,使得整个阵列都满足直线性技术要求;同理可进行共面性的调整,调好后涂胶固死。拼接精度见表 1。

Table 1 Practical measuring accuracy of CCD mosaic

lapping error Δx	linear error Δy	coplanar error Δz
1 μm	3 μm	5 μm

4.2 误差分析

分析拼接时的各项误差因素,有利于采取有效措施来提高装调精度。

1) 影响 X 方向搭接误差的主要因素有:

a) 显微镜的对准极限误差,

$$\Delta_1 = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2} = \pm 3.9 \mu\text{m}$$

$\Delta_1 = \frac{250 \times 10^3}{\Gamma} \cdot \delta \mu\text{m}$,式中 Γ 为显微镜的组合放大率, $\Gamma=1000$,250 为人眼的明视距离, δ 为人眼的对准误差,采用压线对准方式时, $\delta = 60'' \sim 120''$,则算得 $\Delta_1 = \pm 0.15 \mu\text{m}$ 。

b) 显示器的分辨率产生的误差,如果用 800×600 线的 14 寸黑白显示器,其分辨率为 $\sigma_2 = 0.35 \text{ mm}$,产生的对准误差为 $\Delta_2 = 0.35/1000 = \pm 0.35 \mu\text{m}$ 。

c) 显微镜放大率的测量误差所引起的搭接误差,该项误差为系统误差,可以精确测量加以矫正,如果矫正后的残差为 2%,测量长度为一个像素距离即 $13 \mu\text{m}$,则其误差为 $\Delta_3 = \pm 0.26 \mu\text{m}$ 。

d) 刻度误差,微机在显示器上设置刻度时,每个刻线距离只能为显示器分辨率的倍数,用四舍五入的原则,其刻度误差为分辨率的一半,即 $\Delta_4 = 0.17 \mu\text{m}$ 。这样, Δ_x 的总测量误差为

$$\Delta_x = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2} = \pm 0.5 \mu\text{m}$$

2) 影响 Y 方向直线性误差的主要因素除上述三项外,还有

e) 光栅尺在 100 mm 范围内测量误差为 $\Delta_5 = \pm (1 + L/100) = \pm 2 \mu\text{m}$

f) 导轨不直度为 $\pm 2''$,工作范围 $\pm 100 \text{ mm}$,产生的误差为 $\Delta_6 = \pm 1 \mu\text{m}$,则 Δ_y 的总测量误差为

$$\Delta_y = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2} = \pm 2.3 \mu\text{m}$$

3) 影响 Z 方向共面性误差的因素除与 Y 方向相同外,还有

g) 显微镜的调焦误差,拼接时通过调整工作台使 CCD 的像素成像清晰,由于焦深带来的极限误差为:

$$\Delta_7 = \sqrt{\left(\frac{\alpha_e \cdot f'_{\text{obj}}}{2NA}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{3NA^2}\right)^2}$$

式中 α_e 为人眼的极限分辨角,通常取 $\alpha_e = 1'$, $f'_{\text{obj}} = 250/\Gamma$,则算得 $\Delta_7 = \pm 1.5 \mu\text{m}$ 。

h) 在 CCD 综合测试仪上检测 CCD 感光面到封装面之间的距离和平行度,检测误差为

$$\Delta_8 = \pm 2 \mu\text{m}$$

i) 研磨修磨垫片的误差为 $\Delta_9 = \pm 2 \mu\text{m}$ 。则 Δ_z 的总测量误差为

在各项影响拼接精度的因素中,导轨误差、光栅尺误差、调焦误差和修磨误差起决定作用,应尽量提高导轨和光栅尺精度,如果由经验丰富的测量人员来操作,综合运用多种对准技术,可大大减小调焦和修磨误差。为证实测量数据的稳定性和可靠性,经过几天后再进行复测,各项精度指标与原来数据的平均偏差仅为 $0.01\ \mu\text{m}$ 。

不相同,但只要结构设计合理,就可利用 CCD 拼接仪制作满足视场要求的焦面阵列。本文所述的由三片 TDI CCD 拼接成的焦面组件经 CAD 有限元分析和环境实验,并没有发现质量上明显的变化,证明了该组件结构设计合理以及光学拼接方法具有成本低,使用灵活,效果好等优点。因此,拼接技术将会被愈来愈多的部门所认识和应用。

5 结 论

对于不同型号的航空相机,其焦面结构也各

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Sadowski Henry. Large time delay and integration focal plane assembly with an optically contiguous pixel format [C]. Proc. SPIE,1980,217:111-117.
- [3] Sultana John A,Neill Mark B O. Design,analysis and testing of a CCD array mounting structure[C]. Proc. SPIE,1991,1532:27-38.
- [4] 苏大图主编. 光学测量[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

Optical assembly of CCD focal plane for space camera

LI Zhao-hui, WANG Zhao-xun, WU Ke-yong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to apply space camera to the measurement in large field of view and high resolution, the technique of optical assembly with several CCDs is discussed. Its principle, methods of adjusting and testing as well as the structure of focal plane are described. The assembly with three TDI CCDs is finished on the facility which is composed of a long work-distance microscope and a precise X-Y rail, using the method in which the beam-splitter and the mechanical adjusting are applied. The measuring error is less than one third pixel, the optical assembly has the advantages of simple constitution, low cost and good adaptability.

Key words: optical assembly; focal plane; TDI CCD

作者简介: 李朝辉(1969—),男,吉林省双辽县人,毕业于长春光学精密机械学院光电工程系光学仪器专业,现为中科院长春光机所在职博士生,主要从事空间光学遥感器的结构设计工作。