

文章编号:1007-1180(2011)07-0046-04

弹道相机面阵 CCD 焦平面的光学拼接

孟庆华

(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: 随着科学技术的发展, 弹道相机也向着高分辨率、大视场方向发展。由于现有 CCD 不能满足大视场的要求, 因此需要多个 CCD 进行拼接。本文研究了面阵 CCD 光学拼接技术, 阐述了弹道相机光学拼接的原理和焦平面结构, 对拼接误差进行了分析, 并针对弹道相机采用两片 $1\text{ K}\times 2\text{ K}$ 面阵 CCD 进行了拼接实验。实验结果表明, 该方法的搭接误差 $< 2\ \mu\text{m}$, 共面误差 $< 4\ \mu\text{m}$, 基本满足弹道相机大视场和高分辨率弹道测量。

关键词: 面阵 CCD; 光学拼接; 焦平面

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112807.0046

Optical Assembly of Area Array CCD Focal Plane for Ballistic Camera

MENG Qing-hua

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

Abstract: With the rapid development of technology, the ballistic camera is also developing in the direction of high resolution and large field of view. Because the existing CCDs can not meet the requirement of large field of view, it is necessary to assemble more CCDs together. In this paper, the technique of optical assembly with area array CCD was studied. Its principle and structure of focal plane were described. The measuring error was analyzed. The assembly experiment was made on two $1\text{ K}\times 2\text{ K}$ area array CCD for ballistic camera. The experimental results showed that the method had a stitching error of less than $2\ \mu\text{m}$ and a coplanar error of less than $4\ \mu\text{m}$. It could meet the requirements for measurement of ballistic camera in large field of view and high resolution.

Keywords: area array CCD; optical assembly; focal plane

1 引言

随着科技的不断发展, CCD 电荷耦合器件的应用日益广泛, 尤其是光学技术与电子技术的飞速发展, 靶场、航空和航天光学遥感器等测量与控制领域对 CCD 提出了越来越高的要求。弹道相机也在向高分辨率、大视场、实时传输的方向不断发展。为了提高光学系统分辨率和扩大视场, 可采用缩小 CCD 像元尺寸和增加 CCD 像元位数的办法, 但由于受制造工艺和技术条件的制约, 位数不能做得太高。为解决这一难题, 需要对现有的 CCD 进行拼接, 即 CCD 拼接技术^[1-4], 因此, CCD 拼接技术也成为了弹道相机研究的关键技术之一。国外在拼接 CCD 研究方面的技术已比较成熟, 法国 SPOT 卫星的 HRV 相机就是成功地使用 CCD 拼接技术的实例。国内多家单位在线阵 CCD 拼接方面做了很多工作。面阵 CCD 拼接和线阵 CCD 拼接有相似之处, 但技术上也有所区别^[5-7]。我们在自研制的拼接仪上, 针对弹道相机, 选取两片 1 K×2 K 面阵 CCD 进行了焦平面拼接试验, 拼接出了相当于 2 K×2 K 的焦平面结构, 并经过了多次外场使用验证。

2 焦平面拼接方式

CCD 拼接方式主要有外拼接和内拼接。

外拼接是通过外视场分光的方法, 多个光学系统和 CCD 器件独立成像, 分别占据视场的一部分而组成整个视场。外视场拼接的优点是光学系统结构简单, 成像质量好, 缺点是存在视差和死区。

内拼接主要有机械拼接和光学拼接。机械拼接是将 CCD 器件首尾搭接。由于普通 CCD 器件都有封装结构, 有一定的几何尺寸, 直接拼接时 CCD 器件之间会产生缝隙, 成像时有盲区, 使数据丢失。近几年有一些可供进行拼接的 CCD 器件出现, 这些 CCD 器件引脚都在一侧, 光敏面以外的边缘也很小, 但这样的 CCD 芯片不容易制作, 也无法达到无缝隙拼接目的。光学拼接是通过光学系统分光的方法进行 CCD 拼接, 主要有光束分光和光路分光两种形式。

光束分光的成像系统是一种两次成像系统, 将一次像面上的光分成多束, 再通过透镜将各束光分别成像在第二像面上, 从而组成大视场。光路分光是通过分光棱镜把光路分成多路, 利用棱镜的分光形成一对光程相等的共轭面, 把 CCD 放在这一对等光程的共轭面上进行搭接, 从而组成大视场。分光棱镜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, 但这种方法大部分像元会受渐晕影响使信噪比下降。半反半透分光棱镜光能利用率低, 但易于拼接和装配, 具有很高的精度, 成本低, 在现有技术条件下容易实现。面阵 CCD 拼接相比线阵 CCD 拼接来说难度增大, 需要在两个方向进行搭接, 需要合理的焦平面结构设计和较好的装调方法, 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 (其原理如图 1 所示), 由两片 1 K×2 K 面阵 CCD, 像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$, 组装出 2 K×2 K 的焦平面。

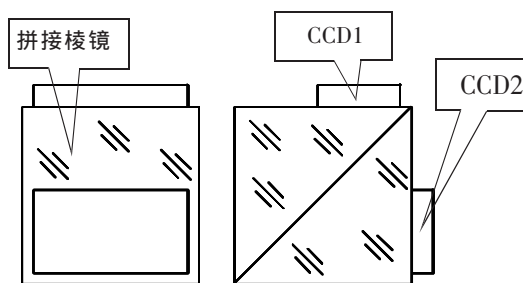


图1 光学拼接原理图

3 焦平面组件结构设计

焦平面组件由半反半透分光棱镜、棱镜座、两片面阵 CCD 和 CCD 座等组成, 结构如图 2 所示。分光棱镜是实现拼接的重要零件, 对分光棱镜的材料、角度公差和分光比例有一定的要求, 尤其要保证透射光与反射光等光程, 从而保证 CCD 的共面性和光学系统的成像质量。

结构设计中主要考虑 CCD 焦平面组件的使用环境。满足温度从零下几十度到零上几十度的工作范围, 还要能够承受运输过程中受到的冲击和振动,

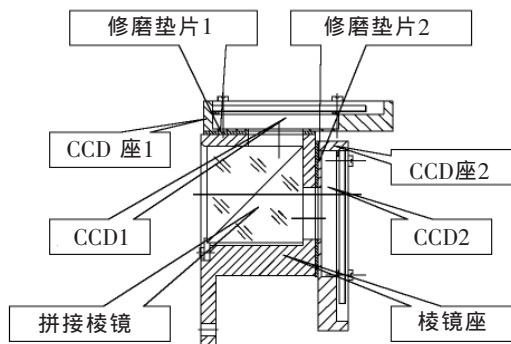


图2 CCD焦平面机械结构图

具有良好的结构稳定性,以保证实验室装调好的精度指标。我们采取以下相应技术措施:尽量提高部件的刚度和固有频率,避开外界可能振源的频率;分光棱镜座和CCD座用钛合金制造,钛合金具有刚度高、重量轻、抗化学腐蚀性好等优点,与分光棱镜和CCD封装的线胀系数相匹配。棱镜座进行喷砂、镀黑铬和特殊消光漆的处理,降低杂散光,从而保证拼接和光学系统的成像质量。面阵CCD的拼接需要合理的焦平面组件结构设计、精细的装调和相关检测才能实现几个微米的拼接工作。

4 CCD拼接与误差分析

4.1 CCD拼接

面阵CCD拼接主要是保证CCD器件的相对位置关系要求。取一个面阵CCD为基准,这个基准CCD和分光棱镜有一定的平行性要求。另一个面阵CCD相对于基准CCD的位置要求主要有搭接要求和共面性要求。

面阵CCD的拼接需要在专门设备上进行。我们研制的面阵CCD拼接仪由长工作距高倍显微物镜、同轴落射光纤照明系统、摄像头、显示器、精密二维移动平台和六维调节架等组成。其原理框图见图3。拼接仪的主要技术指标:工作距离为54mm,高倍显微物镜放大倍率为20×,数值孔径为0.35,系统放大倍率1000倍(含电子放大倍率),精密二维移动平台X-Y导轨误差为1μm。

用千分表把分光棱镜座基准面与X导轨调平行,

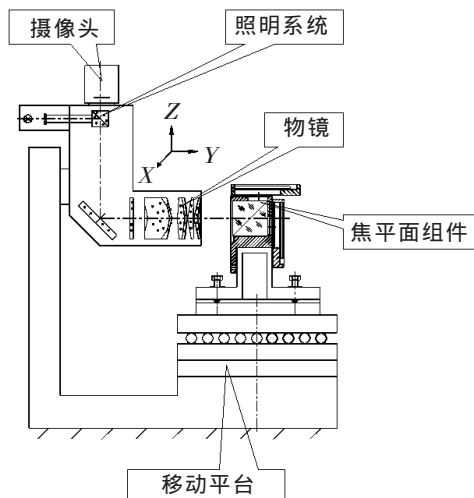


图3 CCD拼接装置示意图

然后固定。先调整一块面阵CCD,使其感光面与基准面平行,以此面阵CCD为基准,通过拼接仪测出其他面阵CCD的偏差,通过修磨调整垫使各面阵CCD共面。由于拼接仪所观察的视场有限,两片面阵CCD一端搭接和对准调整后,通过移动二维工作台进行另一端的搭接和对准,需反复多次移动工作台进行监测调整。调整后,点胶进行固化处理。弹道相机通常搭接5~10个像元,通过重叠部分进行细分标定,建立各CCD之间的坐标关系,以进行高精度的弹道测量。

4.2 误差分析

在拼接的过程中,不可避免地会引入拼接误差。分析各项误差的产生原因,可采取有效措施提高精度。影响拼接误差的主要因素有:显微镜调焦误差、显微镜对准误差、显微镜放大率误差、显示器的分辨率误差、光栅尺测量误差、导轨直线度误差、装调误差、千分表测量误差和研磨修磨垫片误差等。

(1)显微镜的调焦误差通过调整工作台使CCD的像素成像清晰,由于焦深带来的极限误差为 Δ_1 :

$$\Delta_1 = \sqrt{(\alpha \times f / 2NA)^2 + (\lambda / 3NA)^2} \quad (1)$$

其中, α 为人眼的极限分辨角,通常取1';焦距 $f=250/\Gamma$; Γ 为显微镜的组合放大率,取1000;数值孔径NA为0.35,则 $\Delta_1=\pm 1.5\mu\text{m}$ 。

(2) 显微镜的对准误差 Δ_2 :

$$\Delta_2 = \frac{250 \times 10^3}{f} \times \delta \quad (2)$$

其中, 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, δ 取 $2'$, 则 $\Delta_2 = \pm 0.15 \mu\text{m}$ 。

(3) 显微镜放大率误差。显微镜放大率的测量误差为系统误差, 可以精确测量加以校正, 若校正后的残差为 2%, 一个像素为 $14 \mu\text{m}$, 则误差为 $\Delta_3 = \pm 0.28 \mu\text{m}$ 。

(4) 显示器的分辨率误差。如果用 800 线 \times 600 线的 14 in 显示器, 其分辨率为 0.35 mm, 产生的对准误差为 $\Delta_4 = \pm 0.35 \mu\text{m}$ 。

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

(6) 导轨直线度误差。导轨直线度为 $\pm 2''$, 工作范围 ± 100 mm, 产生的误差为 $\Delta_6 = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

(7) 装调误差。面阵 CCD 两端搭接对准时, 互相会有微量干扰, 对经验丰富的操作人员来说, $\Delta_7 = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

(8) 千分表测量误差 $\Delta_8 = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

(9) 研磨修磨垫片误差 $\Delta_9 = \pm 2 \mu\text{m}$ 。

影响 X 方向误差的主要因素有显微镜对准误差 Δ_2 , 显微镜放大率误差 Δ_3 , 显示器的分辨率误差 Δ_4 和装调误差 Δ_7 等。

$$\Delta_x = \pm \sqrt{2\Delta_2^2 + 2\Delta_3^2 + 2\Delta_4^2 + 2\Delta_7^2} = \pm 1.2 \mu\text{m} \quad (3)$$

影响 Y 方向误差的主要因素有显微镜对准误差 Δ_2 , 显微镜放大率误差 Δ_3 , 显示器的分辨率误差 Δ_4 和装调误差 Δ_7 等。

$$\Delta_y = \pm \sqrt{2\Delta_2^2 + 2\Delta_3^2 + 2\Delta_4^2 + 2\Delta_7^2} = \pm 1.2 \mu\text{m} \quad (4)$$

影响 Z 方向共面度误差的主要因素有显微镜调焦误差 Δ_1 , 光栅尺测量误差 Δ_5 , 导轨直线度误差 Δ_6 , 千分表测量误差 Δ_8 和研磨修磨垫片误差 Δ_9 等。

$$\Delta_z = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2} = \pm 3.5 \mu\text{m} \quad (5)$$

在影响拼接精度的各项因素中, 导轨直线度误差、光栅尺测量误差、显微镜调焦误差、装调误差和研磨修磨垫片误差起重要作用, 面阵 CCD 的拼接过程复杂且难度大, 需要由经验丰富和工作细心的人员来操作, 可大大减小调焦、装调和修磨误差。

5 结 论

对于不同类型和型号的弹道相机, 其焦平面的结构也各不相同, 应根据相机的成像原理与特点设计相应的焦平面结构。本文结合某型号弹道相机的成像特点, 采用了棱镜式光学拼接方式, 经外场试验, 证明了该组件结构设计合理, 形式简单, 刚度高, 稳定性好, 满足弹道相机的使用要求。可在其他种类相机的研究与实践中推广使用。

参考文献

- [1] Sultana John A, Neill Mark B O. Design, analysis and testing of a CCD array mounting structure[J]. *SPIE*, 1991, 1532: 27-38.
- [2] 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.
- [3] 周继稳. JC-1 型精密测角仪主体与传动机构设计[J]. *光电工程*, 1991, 18(2): 42-51.
- [4] Jordan P R, Morris D G, Poo1 P J. Technology of large focal planes of CCDs[J]. *SPIE*, 2004, 5167: 72-82.
- [5] 李朝辉, 王肇勋. 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.
- [6] 何昕, 魏仲慧, 郝志航. 基于单心球面系统的九块面阵 CCD 数字拼接 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(4): 421-424.
- [7] 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.

作者简介: 孟庆华 (1963-), 男, 吉林长春人, 硕士, 研究员, 主要从事光谱仪器和光电经纬仪设计和研究。

E-mail: changguang suo@yahoo.com.cn