# 航空相机大面阵 CCD 多自由度拼接方法研究

葛 明,许永森,沈宏海,徐钰蕾,刘伟毅

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室,吉林 长春 130033)

**摘 要**:随着科学技术的进步,航空相机向着高分辨率、大视场方向发展,现有单片 CCD 不能满足大视场的要求,高精度、多自由度的 CCD 拼接技术已成为当前发展的迫切需求。通过对比现有拼接技术的优劣,提出了一种新的大面阵 CCD 多自由度机械交错拼接技术,采用三点凸轮式多自由度拼接机构,取代传统修磨垫片方式,拼接时可在线实时调整。对拼接精度进行分析,结果表明,该方法的搭接误差<2 μm,共面误差<4 μm,满足航空相机大视场和高分辨率要求;对拼接结构进行模态仿真分析与模态测试实验,拼接机构一阶谐振频率大于 390 Hz,满足使用要求。

**关键词**:多自由度拼接; 大面阵 CCD; 拼接精度; 模态分析

**中图分类号**:TN386.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)03-0923-06

# Multiple degrees of freedom mechanical interleaving stitching method of CCDs for aero-camera

Ge Ming, Xu Yongsen, Shen Honghai, Xu Yulei, Liu Weiyi

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract**: With the rapid development of relative technologies, the aero-cameras are developing in the direction of high resolution and large field of view. The existing CCDs cannot meet the requirement of large field of view. So, high-precision, multi-degree of freedom stitching technology has become an urgent demand for the current development. By comparing existing stitching technology, a multiple degrees of freedom mechanical interleaving stitching method which was different from traditional mechanical stitching and optical stitching methods were designed. The multiple degrees of freedom stitching machine with three points of cam was used to replace the traditional way of adjusting shims. So stitching can be adjusted in real time online. The analysis result shows that the method has a stitching error of less than 2 μm, a coplanar error of less than 5 μm. It can meet the imaging requirement of the camera. Modal simulation and modal experiment show that the resonant frequency of the structure of the first order is greater than 390 Hz, it can meet the requirements.

**Key words**: multiple degrees of freedom stitching; large array CCD; stitching precision; modal analysis

**收稿日期**:2014-07-11; **修订日期**:2014-08-21

**基金项目**:国家自然科学基金(61304032)

**作者简介**:葛明(1984-),男,助理研究员,博士,主要从事光机集成设计与分析方面的研究。Email:geming10000@163.com

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

## 0 引 言

随着 CCD 探测器在光学遥感领域的广泛应用,遥感相机也向着高分辨率、大视场和多谱段的方向发展。由于受 CCD 制造工艺、技术条件和成本的限制,现有单片 CCD 总像元数很难满足遥感相机视场要求,就需要将多片 CCD 连接起来拼接成一个大视场探测器阵列[1]。随着大面阵 CCD 的出现,对其拼接技术也提出了更高要求。国外已有将多片面阵 CCD 拼接到一起的案例[2]。国内某单位也实现了在单心球面系统的九块面阵 CCD 数字拼接与交错拼接[3-4],但在焦平面的定位与调整时要不断地测量焦平面与基准的误差,计算修磨量,靠修磨垫片来完成,过程耗费时间且不易掌握调整精度。文中采用了一种新型的机械拼接方法,是以三点支撑的六自由度凸轮调整机构,代替传统面阵 CCD 拼接时靠修研垫片的方式来保证拼接精度[7-8],设计了 4 k×5 k 大面阵 CCD 多自由度机械交错拼接方案,并分析拼接精度,对样机模型做了模态实验测试。

## 1 焦平面拼接结构设计

到目前为止,CCD 焦平面的拼接方式已有很多种,主要可归为两大类,一类是光学拼接方式,另一类是机械拼接方式。光学拼接包括光学直接拼接和光学球面拼接等;机械拼接又有机械直接拼接和交错拼接等多种方式[4]。

光学拼接是利用拼接棱镜的分光原理,将成像平面分割成空间分离的两个像面,用以安置多个 CCD,并使每相邻两片 CCD 首尾像元重叠,在像方空间内形成大视场的探测器阵列。由于光学拼接长度受到拼接棱镜的材料、加工工艺和光学棱镜胶合剂性能的制约,一般拼接长度不易超过 220 mm,因此在一定程度上限制了该种拼接方法在大视场相机上的应用[5]。拼接示意图如图 1 所示。

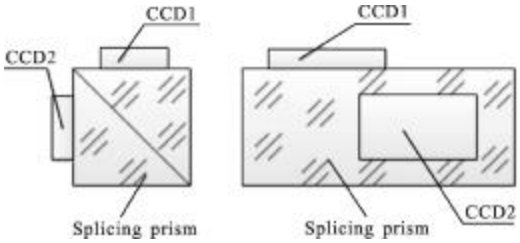


图 1 光学拼接及球面拼接示意图

Fig.1 Optical stitching and sphere stitching method

机械交错拼接方法是根据 CCD 相机的成像特点,可以将所要拼接的 CCD 元件错开一定尺寸平行地交错排列在焦平面上,让过 CCD 的外形封装尺寸,使其长度充满整个视场空间。拼接示意图如图 2 所示。交错机械拼接方法与光学拼接方法相比由于没有引入分光棱镜,因此不会产生色差,能量也不会分散[6]。

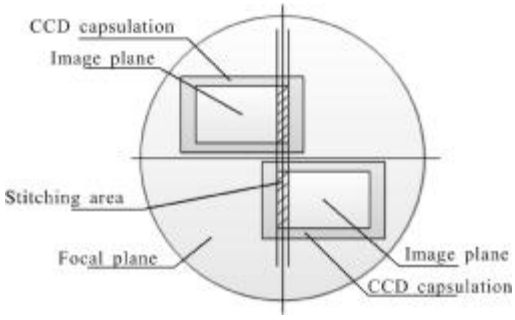


图 2 机械交错拼接示意图

Fig.2 Mechanical interleaving stitching method

文中为某大面阵相机项目的开展研究一种新的拼接方法,要组成 4 k×26 k 大面阵列成像平面,将选用六片面阵 CCD 进行拼接,每片像元数为4008×5344,采用机械交错拼接方式,每三个 CCD 等间隔排成一排组成一个焦平面,两排焦平面交错排列即可实现。将两个按各自规律拼接好的镜头,一起安装在相机基板上,保证安装后两镜头光轴平行,CCD 行或列相互平行,形成图 3 的六片 CCD 拼接后的等效像元数为 4 k×26 k 的面阵 CCD。避免拍照时信息丢失,拼接后 CCD 间相互有一定的像元数重叠区,尺寸为 n。

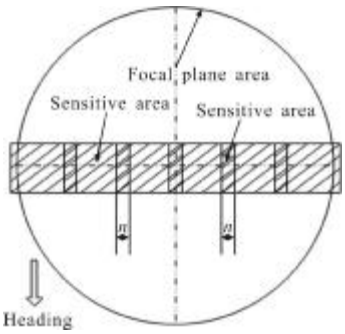


图 3 双镜头拼接后形成的等效面阵 CCD 示意图

Fig.3 Equivalent array of CCD dual lens formed after stitching

为研究方便,文中选取一个焦平面组件进行研究。每个焦平面组件主要由面阵 CCD1、CCD2、CCD3、

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

CCD 安装板、调整螺钉组件、基座、导轨等部件组成。

具体安装方法为，将每个 CCD 安装到 CCD 连接板上,如图 4(a)所示。连接板上三个位置开有尺寸相同方向不同的长槽,如图 4(b)所示,两个同侧长槽为 **X** 向,另一侧单长槽为 **Y** 向,每三个调整螺钉组件分别安装到连接板上的三个长条槽中,凸轮套在螺钉外,与长槽中滑动配合。这样三个 CCD 分别由调整螺钉连接并安装于支撑基座上组成焦平面调整组件。

凸轮调整螺钉组件的结构如图 4(c)、(e)所示,由锁紧螺钉、球面垫圈、0.5 mm 偏心凸轮、碟形弹簧及固定螺钉组成。锁紧螺钉用于调整 **Z** 向连接的预紧力及自由度,凸轮用于调整 **XY** 平面内自由度。球面垫圈与凸轮上面是球面配合,如图 4(d)所示,用于与凸轮调整的自由度解耦。每个凸轮与四片相互面对面或背对背放置的碟形弹簧通过锁紧螺钉串连在一起，合理选择碟形弹簧刚度及排列方式即可起到牢固预紧 CCD 及调整所需行程作用,选择了四个蝶形弹簧直列安装,组合后在最大 1 mm 位移量时每个调整螺钉组件可以提供轴向最大 960 N 的充足作用力,将 CCD 连接板与基座压紧在一起。

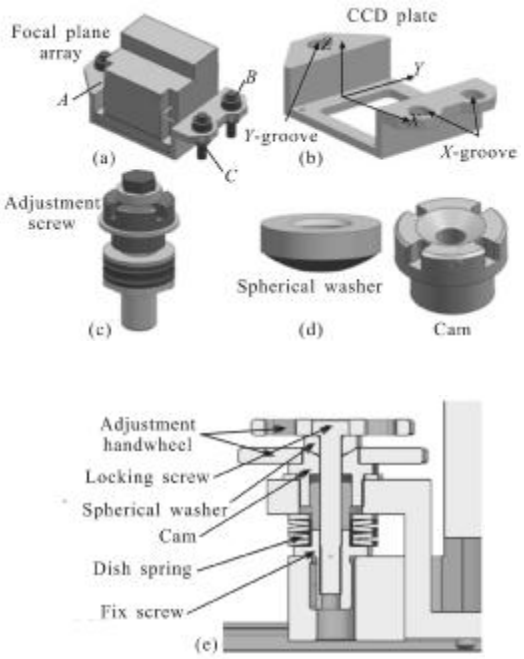


图 4 焦平面零件

Fig.4 Focal plane parts

调整过程为，通过下手轮旋转 **A** 处凸轮在 **Y** 向长槽中转动,由于其 **X** 方向为配合,因此可实现焦平面沿 **X** 轴平动微调;同理,同时转动 **B**、**C** 处凸轮可实现焦平面的 **Y** 向平移;通过上手轮同时旋转 **A**、**B**、**C** 处锁紧螺钉可实现 **Z** 向平移；单独旋转 **B** 或 **C** 处锁紧螺钉可实现绕 **X** 轴转动;若旋转 **A** 处或 **B**、**C** 处锁紧螺钉可使焦平面绕 **Y** 轴转动;**A**、**B**、**C** 处凸轮同时转动可实现绕 **Z** 轴转动;这样即可调整每个 CCD 焦平面在空间的六个自由度,将第一片 CCD 焦平面调整好后其余焦平面便可以第一个平面为基准依次调整。

三个焦平面组件安装到一个基座上就可组成一组焦平面。其结构如图 5 所示。

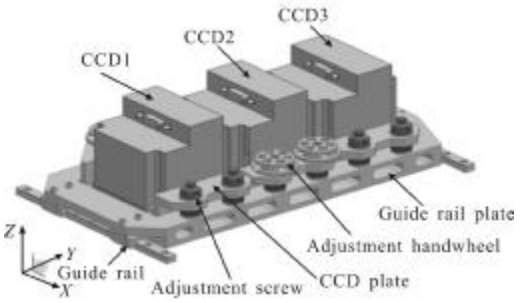


图 5 焦平面组件装配图

Fig.5 Focal plane assemble

## 2 拼接精度分析

拼接精度取决于拼接装置的各项组件误差因素,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，可以采取有效措施提高拼接精度。

### 2.1 共面度误差

共面度误差 $\Delta z$ 是指 CCD 拼接时在焦深方向产生的误差。当共面度误差过大时,CCD 感光面会远离光学系统的焦平面,使相机不能清晰对焦。共面度误差主要是指显微镜的调焦误差，拼接仪焦深为5 μm,采用螺钉螺距 0.5 mm 细牙螺纹调整焦深方向距离,调整焦深方向的移动分辨率为0.5 mm/360°=1.39 μm/(°),满足调整精度要求。

### 2.2 平行度误差

平行度误差 $\Delta x$，是指 CCD 拼接时每个焦平面之间的 **X** 边相互不平行,**Y** 边相互不平行所产生的误差。这种不平行会使 CCD 与扫描成像方向不垂直,拼接后相应区域的图像产生偏斜。平行度误差主

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

要由二维导轨平台在测量范围内的平行度误差引起的,导轨平台的移动平行度误差为 $\Delta_1=2\ \mu m$,且还要考虑平台的读数误差 $\Delta_2=1\ \mu m$ 和显微镜的对准误差 $\Delta_3=0.3\ \mu m$,总的平行度误差为:

$$\Delta x=\sqrt{\Delta_1^2+\Delta_2^2+\Delta_3^2}=2.08\ \mu m$$

### 2.3 像元搭接误差

像元搭接误差 $\Delta y$ 是指 CCD 在拼接过程中,有效像元首尾搭接不重合所产生的误差。文中焦平面排布方案是每个焦平面组件中三个 CCD,之间由封装隔开,两个组件交错放置时沿飞行方向等效于两焦平面组件中 CCD 相互搭接。具体就是控制两焦平面的 **Y** 向边之间距离为像元尺寸的整数倍。这种误差会使图像在 CCD 拼接处产生错位。搭接误差主要由导轨的移动平行度为 $\Delta_1=2\ \mu m$,读数误差 $\Delta_2=1\ \mu m$ 和显微镜的对准误差 $\Delta_3=0.3\ \mu m$ 引起,则总的搭接误差为:

$$\Delta y=\sqrt{\Delta_1^2+\Delta_2^2+\Delta_3^2}=2.08\ \mu m$$

此搭接误差小于面阵 CCD 像元(9 μm)的三分之一,说明搭接精度满足指标要求。

由以上分析可知文中所采用的 CCD 拼接方案可以满足指标要求。

## 3 拼接机构模态分析

对拼接机构进行整机模态分析,确定其结构的谐振频率和各阶振型,有助于结构特性研究,提高系统结构的谐振频率,避免由于频率太小而易受到外界扰动引起共振现象。作为航空环境面言,相机系统的载体多为无人或有人飞机,机上振动环境复杂,但经过减振器隔振后体现在相机系统上的振动主要是低阶频率振动,一般在 30 Hz 以下。由于低阶频率比较容易与外界条件耦合,低阶频率在很大程度上反应了结构的动态特性,因此,对结构进行模态分析时,通常只需要考虑前六阶的固有频率和振型。

为验证模型的准确性及为后续工作提供指导,文中将模态仿真分析结果与模态实验结果对比分析,确定系统各阶谐振频率及振型。简化结构,定义材料属性,CCD 连接板、基座、螺钉及蝶形弹簧为40 Cr,垫圈为黄铜,并将上述各件之间加以接触配对条件后划分网格,得到整机的有限元模型如图 6 所示。

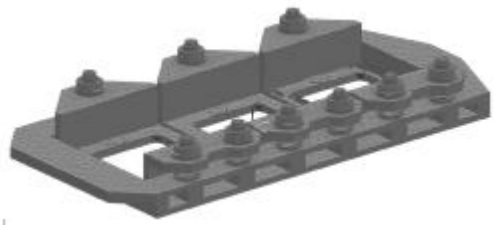

图 6 拼接机构有限元模型

Fig.6 Finite element model of stitching structure

通过自由模态分析可得到拼接机构的前六阶模态及振型图。如图 7 所示。数据见表 1。

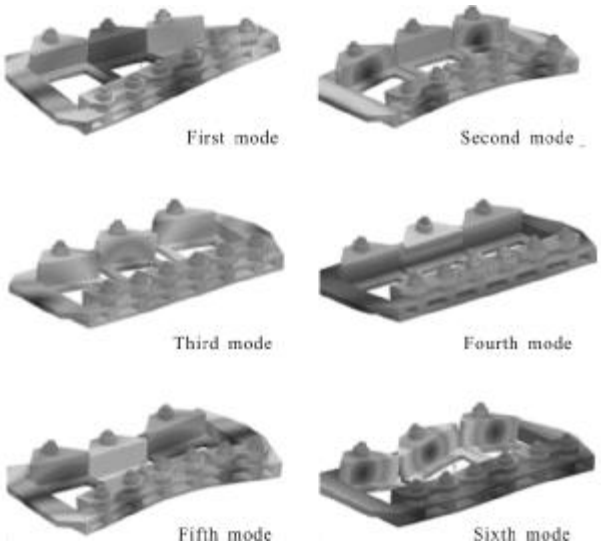


图 7 各阶振型图

Fig.7 Vibration model

**表 1 拼接机构前六阶模态**

Tab.1 First six modal of stitching structure

| Modal | First | Second | Third | Fourth | Fifth | Sixth |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Frequency/Hz | 411.2 | 556.5 | 718.7 | 801.4 | 992.1 | 1130.8 |

为测量系统的实际谐振频率,文中采用从欧盟引进的 LMS 公司 SCADAS Lab 模态测试仪进行整机模态测试,并得到系统的前五阶谐振频率。具体测试方案为:将拼接机构放置于厚软的海绵垫上以使系统的六个自由度放开,模拟自由模态状态,用三自由度传感器分别贴到拼接机构的基座与 CCD 连接板这两个比较有代表性的位置上,方向为 **Z** 向垂直于焦平面向下,用安装用塑料锤头的试验锤随机敲

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

击机构上不同点六次,采集点将各次锤击产生的振动数据采集到模态测试系统中,将采集到的数据进行处理后可得到每次各方向上的频率-加速度曲线及综合曲线。模态测试实验设备如图 8、9 所示。

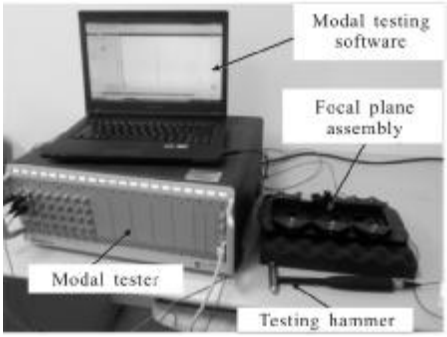


图 8 模态测试实验

Fig.8 Modal test experiment

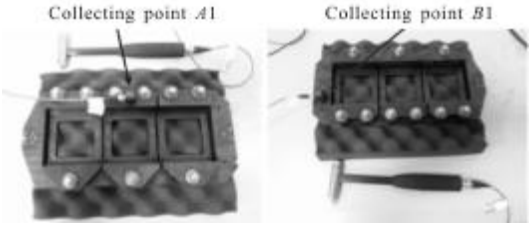


图 9 数据采集点位置

Fig.9 Data collection point

经过模态测试系统频谱分析后得到 **A1** 点与 **B1** 点的六次不同锤击位置的 **X**、**Y**、**Z** 各方向频率-加速度曲线，各方向叠加后就可得到 **A1** 点与 **B1** 点采集的综合频率曲线,如图 10、11 所示。

从以上 **A1**、**B1** 两点采集的综合曲线图可以看到两曲线都出现了五处加速度峰值，只是两曲线中每个峰值的大小不同，这是因为敲击不同点时结构的不同位置响应不同，但除去曲线最左端由于海绵垫本身的一个低频峰值,**A1** 点采集到的第一个大的谐振峰出现在 398.40 Hz,**B1** 点采集到的第一个大的谐

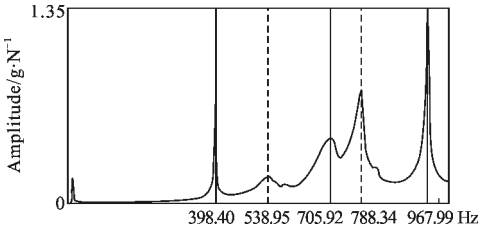


图 10 **A1** 点测试固有频率曲线

Fig.10 **A1** point natural frequency

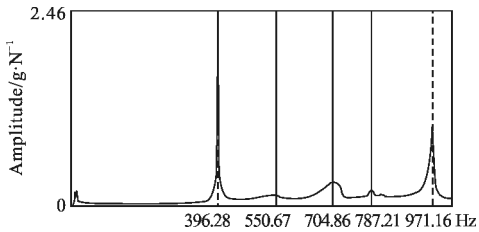


图 11 **B1** 点测试固有频率曲线

Fig.11 **B1** point natural frequency

振峰出现在 396.28 Hz,由此可知拼接机构的一阶谐振频率大概在 397 Hz 左右,远高于减振器作用后的 30 Hz 以下低频段,不会发生共振。其后两条曲线上出现的大小峰值所对应频率点差值都在 2~12 Hz 之间,且与模态仿真分析结果相差不大,说明仿真分析的可行性以及模型的正确性。

## 4 结　论

文中根据某航空相机的成像特点，结合所用焦平面结构,设计了一种机械交错拼接方法,采用三点凸轮式调整机构进行机械拼接，实现了每个焦平面的六自由度调整。与传统的光学拼接结构相比,用该方法拼接的光电器件,调整形式灵活,刚度高,便于装配与调整。对拼接结构进行模态仿真分析与模态测试实验验证,结果表明拼接机构具有足够的刚度,满足高谐振频率的要求。通过拼接精度的分析可知,此文所研究的拼接方法满足航空相机大视场和高分辨率要求，且为今后的机械拼接方法的研究提供了参考依据。

**参考文献:**

[1] Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 740-745. (in Chinese)
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.

[2] Besuner Robert W, Bebek Christopher J, Haller Gunther M, et al. A 260 megapixel visible/NIR mixed technology focal plane for space [C]//SPIE, 2011, 8155: 81550D-1.

[3] He Xin, Wei Zhonghui, Hao Zhihang. Digital stitching based on a single spherical system of nine plane array CCDs [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(4): 421-424. (in Chinese)

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

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.

[4] Shi Lei, Jin Guang, An Yuan, et al. Research on a mechanical interleaving stitching method of CCDs for remote sensing camera[J]. Infrared, 2009, 30(1): 12-15. (in Chinese)
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.

[5] San Bing, Wang Zhihong, Wang Shuxin, et al. Mechanical interleaving stitching method for multiple spectral CCDs camera[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 32(6): 584-587. (in Chinese)
伞兵, 王志宏, 王书新, 等. 多谱段相机面阵 CCD 交错拼接方法[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 584-587.

[6] Derek Edinger, Paul Mammini, Liz Osborne. Compact, lightweight, and athermalized mirror and ount for use on JWST's NIRCam instrument[C]//SPIE, 2005, 5877: 58770Q-1.

[7] Alison Nordt, Derek Edinger. Optical bench assembly for the near infrared camera [C]//SPIE, 2005, 5904: 590406-1.

[8] Paul R Jorden, David G Morris, Peter J Pool. Technology of large focal planes of CCDs [C]//SPIE, 2004, 5167: 72-82.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com