

文章编号: 0253-2239(2006)05-0740-6

## TDICCD 焦平面的机械交错拼接\*

张星祥<sup>1,2</sup> 任建岳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130031)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 大视场高分辨力成像是遥感器发展的一个重要方向, 成像焦面长度也越来越大, 时间延时积分型电荷耦合器件(TDICCD)以良好的成像性能在遥感器上得到广泛的应用, 对 TDICCD 探测器拼接以获得大焦面就变得越来越重要。一般光学拼接方法长度受到材料和胶合制约, 且引入色差, 而直接拼接方法有成像缺陷, 为此提出了可消除这些缺陷的 TDICCD 机械交错拼接的新方法。在长工作距显微镜光学放大, 电十丝校准, 精密负压吸附气浮导轨和精密滑台移动定位的拼接装置上, 对空间上相互错开的两行 TDICCD 用机械微调的方法实现了 400 mm 长的焦平面上 TDICCD 间的位置拼接精度  $2.9 \mu\text{m}$ , 保证了成像时各片 TDICCD 间精确的位置关系, 通过电子学对接的图像移位处理方法, 达到了无缝的成像效果。

**关键词:** 光学仪器; 长焦平面; 机械交错拼接; TDICCD

中图分类号: TH74; TN29 文献标识码: A

## Mechanical Interleaving Assembly of TDICCD Focal Plane

Zhang Xingxiang<sup>1,2</sup> Ren Jianyue<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** There is a developing trend of wide field of view and high resolution for the remote sensor, and the imaging focal plane is longer and longer. TDICCD has been widely used in the field of the remote sensor with its good imaging performance, and it is more and more important to achieve large focal plane for TDICCD assembly. The conventional optical assembly length is limited by glass material and glass glue, moreover it introduces chromatic aberration, and the directive assembly will descend the imaging quality. A new assembly method called mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane, which eliminates the above defects, is put forward. Using mechanical tangent-screws adjusting method, the assembly of two TDICCDs staggered in space is finished on the apparatus which is composed of a long work-distance magnifying microscope, a fine collimating reticle, a negative-pressure adsorption air float guide and precision slidway. The assembly focal plane length reaches 400 mm and the measuring error is not greater than  $2.9 \mu\text{m}$ . The relationship of positions of TDICCDs is ensured, and the image displacement disposed method of electronic abutting joint zero clearance imaging picture is achieved.

**Key words:** optical instrument; long focal plane; mechanical interleaving assembly; TDICCD

### 1 引 言

自 20 世纪 70 年代开始研发成功 CCD 探测器开始, CCD 已被广泛地应用于光学遥感器领域。随着遥感器应用技术的发展, 对遥感器高分辨力和大视场成像的要求, 一般需要焦距较长、反射式光学系

统, 相对于传统的透射式相机系统来说具有谱段宽、质量轻的优点, 且反射系统不产生色差。同时就有需要较大成像视场与 CCD 探测器有限像数(即有限 CCD 探测器线阵长度或宽度)的矛盾存在, 特别是大视场推扫成像相机, 这个问题更加突出。当单片

\* 国家重大创新项目(ZB99I14H)和国家重大预研项目(Z01Q15)资助课题。

作者简介: 张星祥(1977~), 男, 云南大理人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事光学测试、空间相机光机分析的研究工作。E-mail: zxxiang488@sina.com

收稿日期: 2005-04-28; 收到修改稿日期: 2005-09-07

CCD 的像元总长度不能满足成像的视场长度时,需要将多片 CCD 连接成一个大视场 CCD 探测器阵列,称为 CCD 的拼接<sup>[1]</sup>。

时间延时积分型电荷耦合器件(TDICCD)是一种面阵结构、线阵输出的新型 CCD,具有多重级数延时积分的功能,在低照度和平稳运动状态下具有较好的成像性能<sup>[1]</sup>,绝大多数的航天相机都采用 TDICCD 探测器成像。从其结构来看,像元在线阵方向和积分级数方向呈矩形分布。对于长焦距大视场相机成像焦面长度很长,必须对多片 TDICCD 探测器进行拼接以达到成像焦平面的长度。

为了满足相机视场的成像要求,设定相机的焦平面长度为 400 mm,采用的 TDICCD 的每片长度为 2048 pixel( $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$ ),就必须对 15 片 TDI CCD 探测器进行拼接,为此我们采用新型技术实现途径,即机械交错拼接。

## 2 CCD 拼接技术及 TDICCD 机械交错拼接原理

CCD 拼接包括机械拼接、光学拼接等多种方式。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。光学拼接的棱镜是由两块  $45^\circ$  的棱镜胶合而成的,CCD 分别粘贴在拼接棱镜的两个面上,从入射光方向看,拼接 CCD 形成一个等效的较长 CCD 探测器阵列<sup>[2~7]</sup>。光学拼接法的精度较高,但拼接棱镜时会产生色差,一般多用于透射式光学系统,可以使拼接的棱镜与透镜组合进行色差校正,但对于全反射系统,将直接引入色差,降低像质;并且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<sup>[7]</sup>,也限制了该种拼接方法在大视场相机上的应用。

机械直接拼接是将几个 CCD 在首尾处用机械方式连结在一起,结构紧凑,但需要对 CCD 进行特殊加工,而且每个搭接处会损失一些成像像元,并存在较大的拼接缝。在成像时,拼接缝处会出现空白,降低局部像质<sup>[2,3]</sup>。

机械交错拼接是将 TDICCD 装配成双列交错式焦面形式,即第二行的 TDICCD 正好填充由第一行 TDICCD 所形成的间隙,首尾的像元分别对齐,但在相机飞行方向上(图像积分方向)两行错开一定

位置。它的优点是由于没有棱镜,所以没有引入附加的色差。机械交错拼接示意图如图 1 所示。机械交错拼接的图像处理是采用电子学对接的方法,对于 TDICCD,积分方向(即相机飞行方向,图 1 中  $x$  方向)可看作是只有一个像元,地面物点经多次曝光后成像输出,所以实际未处理成像图像是相互错开的方齿型的图像,通过编程以及加入特殊的图像信号处理电路,将 TDICCD1、TDICCD3、……TDICCD15 的图像信号滞后一精确的时间间隔输出(与两行 TDICCD 间隔大小,TDICCD 输出速率,积分时间,相机飞行速度等有关),就可处理成一幅完整大视场图像。

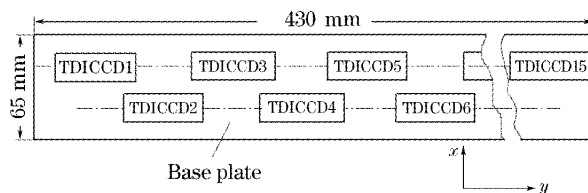


图 1 机械交错拼接原理示意图

Fig. 1 Principle of mechanical interleaving assembly

机械交错拼接在结构上把拼接 TDICCD 片分成两行交错平行的阵列,保证两行 TDICCD 在纵向上相互平行且各自保持在同一直线上,在横向上相邻的 TDICCD 首尾相切,相互错开。机械交错拼接在相邻的两片 TDICCD 边缘上可做到没有重叠像元,达到无缝拼接的效果,既保证系统的成像质量,又有利于后期的图像处理。为了达到宽覆盖和高分辨力的成像效果,TDICCD 机械交错拼接必须满足精度要求,就是对 TDICCD 空间相对位置的要求,即主要有以下四项<sup>[6]</sup>:

### 1) 搭接要求

指上一个 TDICCD 片的最后一个有效像元与下一个 TDICCD 片的第一个像元在  $y$  方向(垂直于相机飞行方向)的偏离误差。

### 2) 直线性要求

就单条直线而言,第一行 TDICCD(奇数行 TDICCD1~TDICCD23)或第二行 TDICCD(偶数行 TDICCD2~TDICCD22)上像元偏离各自中心基准直线的直线度误差。

### 3) 平行度要求

指第一行 TDICCD(奇数行 TDICCD1~TDICCD23)或第二行 TDICCD(偶数行 TDICCD2~TDICCD22)像元中心所形成的两条直线间的平行度误差。

#### 4) 共面性要求

所有的 TDICCD 器件的光敏面在同一平面内的平面度误差,即它们都应在光学系统的焦平面上,也就是必须保证所有 TDICCD 的光敏面在光学系统的焦深范围以内。

其中前三项技术要求,主要由导轨、显微镜、成像 CCD 相机和监视器误差来决定。最后一项主要由拼接基板的平面度来保证,选用高稳定低变形的材料,经精细加工可以保证长方向( $y$  方向)430 mm、交错方向( $x$  方向)65 mm 的焦平面基板的平面度达到  $1.8 \mu\text{m}$ ,完全可以达到绝大多数相机的成像焦深的要求<sup>[9]</sup>。

### 3 TDICCD 机械交错拼接装置

TDICCD 拼接是在专门设备上进行的。TDICCD 拼接装置由高倍率长工作距的显微镜、照明系统、CCD 摄像机、计算机和监视器、精密负压吸附导轨、精密支撑工作平台等组成。其原理框图见图 2 所示。

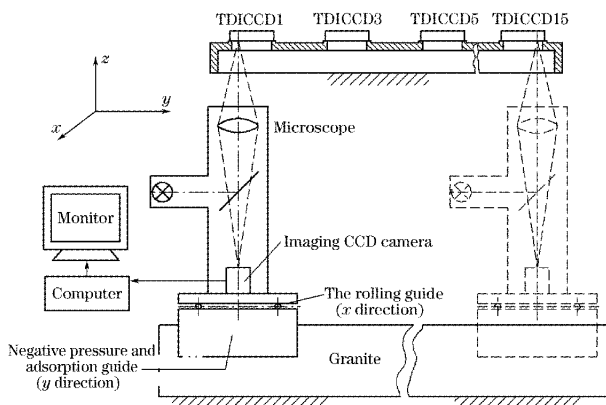


图 2 机械交错装置的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanical interleaving assembly apparatus

对于 TDICCD 器件的焦平面拼接,我们采用的是修研、胶粘的方案,用相对比较测量法实现 TDICCD 探测器的机械交错拼接和固定。机械交错拼接装置是装配工具也是检测设备,其关键部分是  $x$ - $y$  精密负压吸附导轨及长工作距的显微镜检测装置。在光学校镜拼接中,一般焦平面较短,在拼接检测设备上,通常移动拼接焦平面(焦平面组件或拼接基板),固定长工作距大倍率的光学显微镜系统和成像 CCD 相机<sup>[2~7]</sup>。机械交错拼接与光学拼接正好相反,为了达到大视场成像的要求,TDICCD 的焦平面很长(400 mm),并且在拼接时为了保证 TDICCD

的焦平面基板的大刚度和稳定性,我们则把 TDICCD 焦平面基板调整好并固定,在精密负压吸附导轨上移动光学显微镜和 CCD 成像系统组件。减轻了移动部分的重量,在拼接过程中有利于位置的控制和精度稳定性;也不会像光学拼接一样,由于人工操作引起拼接焦平面组件(滑台)的微动,将人为的误差引入到焦平面中,影响拼接的精度。

为了使 TDICCD 拼接基板有较高的面形精度,就必须满足一定的结构尺寸<sup>[10,11]</sup>,经过有限元分析,拼接基板在 430 mm 上要达到  $1.2 \mu\text{m}$  左右的变形量,其厚度达到 32 mm 左右。故光学显微镜必须具有较长的工作距离;同时为保证拼接测量的精度和分辨力,显微镜必须有足够大的数值孔径和放大倍率。我们设计一个满足要求的显微镜<sup>[3,11]</sup>,主要技术指标是:前工作距离为 35 mm,显微镜物镜放大倍率  $M=20$ ,数值孔径  $NA=0.35$ 。显微镜的摄像系统与计算机显示器相连,图像在显示器上显示的组合放大倍率可达 800 倍以上。

$y$  方向导轨采用高精度负压吸附导轨副<sup>[13]</sup>,其利用负压吸附式平面气垫在工作表面上不同区域同时存在正压(浮力)和负压(吸力)的特点,使运动滑块和承载花岗岩导轨之间形成一定厚度的均匀气体膜。气膜厚度为  $1\sim 1.8 \mu\text{m}$  之间可根据承载进行调整,花岗岩导轨在 430 mm 长度上平面度和直线度为  $1.1 \mu\text{m}$ ,所以在整个长度方向上负压吸附导轨副的动态精度小于  $1.8 \mu\text{m}$ 。 $x$  方向采用十字交叉滚柱导轨平台,该导轨比线性滚珠有极高的刚度,在 60 mm 行程上可以达到  $0.5 \mu\text{m}$  的线性精度。 $x/y$  导轨都装有高精度光栅尺,该光栅尺分辨力为  $0.1 \mu\text{m}$ ,光栅定位精度为  $3 \mu\text{m}/\text{m}$ ,通过多点线性插补可达到  $1 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

拼接时,将拼接基板用三维调整工装安装在稳定平台上。调整三维调整工装,使 430 mm 长 TDICCD 拼接基板焦平面与花岗岩负压吸附导轨面平行度达到  $1 \mu\text{m}$ ,然后固定在调整工装上。用计算机控制驱动  $x$ - $y$  方向的电机,带动安装在  $x$ - $y$  平台上的光学放大系统和成像系统进行监测拼接。先调整好第一块 TDICCD 片(在监视器上,TDICCD 的两个直角与定位十字丝完全重合),其余 TDICCD 片以第一片为基准,其中每一个 TDICCD 片的 5 个自由度方向用机械微调工装进行精确调整,而焦深方向靠修磨 TDICCD 的保持架垫片来保证。在首尾像元拼接时,考虑到 TDICCD 在积分方向上长度的离散性很小,所以取相邻的两个 TDICCD 片的两

个直角边处的首尾像素来对准<sup>[2]</sup>;在进行直线性调整时,由于 TDICCD 像元尺寸的离散性,故只调整一行中的像元和基准 TDICCD 的同一级像元在同一直线上,即可使得整个阵列都满足直线性要求。安装好 TDICCD 保持架,固定好。

在拼接之前,还必须对 TDI CCD 进行测试,挑选出几何特性和光电参量相近的芯片。几何特性主要包括表面平面度及其分布,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<sup>[5]</sup>。

图 3 是在 TDICCD 拼接过程中的照片,图 3(a)是 TDICCD 的一个直角处,图 3(b)是 TDICCD 的 Y 方向的另一个直角处。照片表明,拼接的直线性很好,误差小于一个像元尺寸的 1/3,即可以充分利用 TDICCD 的有效成像像元。图 4 是全部拼接完成后的拼接焦平面基板组件的部分照片。

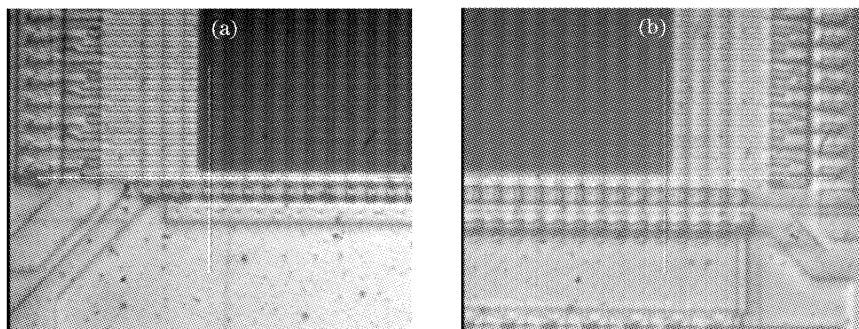


图 3 (a) 拼接 TDICCD 的一个直角处, (b) 拼接 TDICCD 的另一个直角处

Fig. 3 (a) One right angle of the TDICCD, (b) another right angle of the TDICCD

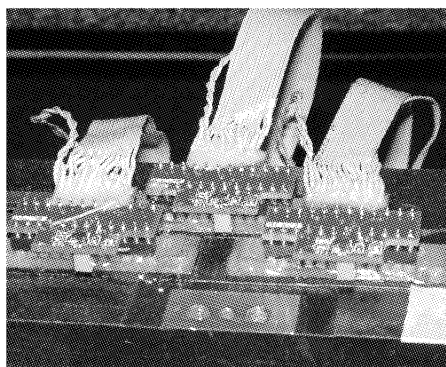


图 4 拼接焦平面板照片(部分)

Fig. 4 Picture of the part focal plane assembly

拼接精度是由拼接装置的各项部组件误差因素来决定的。其中影响拼接误差的主要因素<sup>[5]</sup>见表 1。其中导轨直线误差、导轨平面度误差、拼接基板平面度误差是形状误差,由直接测量得到。拼接基板等高误差和拼接基板与  $x-y$  导轨的平行度误差属于位置误差,通过装调可测出误差的大小。其余误差均为系统固定误差,可计算出误差值的大小<sup>[5]</sup>。

表 1 中各方向上的总误差根据公式  $\Delta H =$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{11} \Delta H_i^2}$$

计算,其中  $\Delta H_i$  分别为  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  和  $\Delta Z_i$ 。则 TDICCD 拼接装置的各方向上的系统误差为  $\Delta X=2.02 \mu\text{m}$ ,  $\Delta Y=2.87 \mu\text{m}$ ,  $\Delta Z=2.61 \mu\text{m}$ 。

表 1 机械交错拼接装置的误差分析表

Table 1 System errors of the mechanical interleaving assembly apparatus

Error type	X direction / $\mu\text{m}$	Y direction / $\mu\text{m}$	Z direction / $\mu\text{m}$
Linearity error of guide	$\Delta X_1=0.5$	$\Delta Y_1=1.0$	$\Delta Z_1=0.5$
Coplanar error of guide	$\Delta X_2=1.0$	$\Delta Y_2=1.0$	$\Delta Z_2=1.0$
Coplanar error of base plate	$\Delta X_3=1.0$	$\Delta Y_3=1.0$	$\Delta Z_3=1.0$
Parallel error between base plate and guide	$\Delta X_4=1.0$	$\Delta Y_4=1.8$	$\Delta Z_4=1.0$
Utmost alignment error of microscope	$\Delta X_5=0.18$	$\Delta Y_5=0.18$	$\Delta Z_5=0.18$
The resolution error of the monitor	$\Delta X_6=0.46$	$\Delta Y_6=0.46$	$\Delta Z_6=0.46$
Pixel matching error between TDICCD size and imaging CCD size	$\Delta X_7=0.2$	$\Delta Y_7=0.2$	$\Delta Z_7=0.2$
Linearity of linear encoder	$\Delta X_8=0.2$	$\Delta Y_8=0.2$	$\Delta Z_8=0.2$
Electric cross-hair error	$\Delta X_9=0.5$	$\Delta Y_9=1.2$	$\Delta Z_9=0$
The utmost error of focal depth	$\Delta X_{10}=0.52$	$\Delta Y_{10}=0.52$	$\Delta Z_{10}=1.5$
The error of TDICCD holder	$\Delta X_{11}=0$	$\Delta Y_{11}=0$	$\Delta Z_{11}=1.0$
Total error	$\Delta X=2.02$	$\Delta Y=2.87$	$\Delta Z=2.61$

### 4 机械交错拼接试验与结果

采用上述的方法,实现了 15 片 TDICCD 器件的机械交错拼接。选用拼接 TDICCD 器件的有效像元数目是 2048,像元大小为  $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$ ,拼接时使有效像素互相搭接,没有重合像元。拼接部件的总有效像元达到 30720 个,实际焦平面长度达到 400 mm。

对于 TDICCD 拼接,基板的共面精度将直接影响系统的成像调焦范围和成像质量,对于长方向(Y 方向)430 mm、交错方向(X 方向)65 mm 的焦平面基板,进行平面度检测精度达到  $1.8\ \mu\text{m}$ ,如图 5 所示,可以满足相机的成像焦深的要求。

为了验证拼接数据的稳定性和可靠性,经过几天后再进行复测,检测误差原理如图 6,检测数据<sup>[7]</sup>

见表 2。

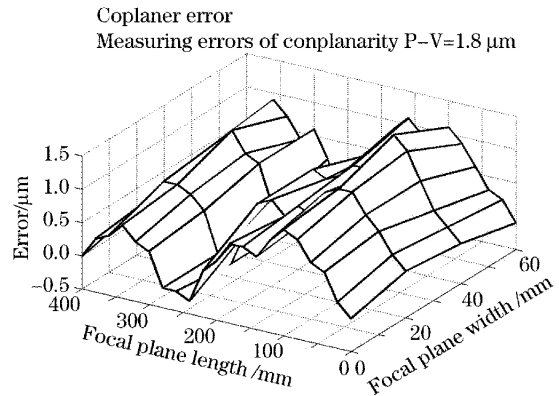


图 5 拼接基板共面性检测结果  
Fig. 5 Testing result of baseplate coplanarity

表 2 焦平面拼接检测结果误差表

Table 2 Measuring errors of the focal plane assembly result

TDICCD number (odd number/even number)	Error between two TDICCD in Y direction $\Delta Y_{oe_i}$	Error of one odd—number TDICCD in X direction / $\mu\text{m}$		Error of one even—number TDICCD in X direction / $\mu\text{m}$	
		Front $\Delta X_{o_i}$	Rear $\Delta X_{o_{i+1}}$	Front $\Delta X_{e_i}$	Rear $\Delta X_{e_{i+1}}$
1/2	1.2	1.2	-0.5	2.6	2.0
3/4	-1.9	-1.2	-1.0	2.3	1.6
5/6	-0.1	-1.6	-0.8	1.9	2.1
7/8	2.9	-0.5	0.5	1.8	2.0
9/10	-2.2	0.7	-0.3	2.3	2.6
11/12	-1.7	0	-0.6	2.4	1.7
13/14	2.8	0.6	1.3	2.6	2.8
15		1.4	0.8		
Average error	0.15 (Neighboring)		-0.1		1.84
P-V error	2.9 (Neighboring)	2.4 (With fitting slope $K_1$ )		2.8 (With fitting slope $K_2$ )	

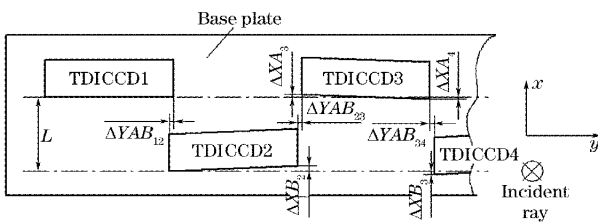


图 6 拼接结果检测原理  
Fig. 6 Principle of testing assembly result

根据表 2 中的数据,两行的搭接平均误差 ( $\Delta X_{B_j}$ ) 分别为  $0.15\ \mu\text{m}$ ,峰谷误差(P-V)分别为  $2.9\ \mu\text{m}$ 。同时采用最小二乘法求解奇数行 TDICCD 的 X 方向偏差 ( $\Delta X_{A_i}$ ) 直线的斜率  $K_1 = 3.5 \times 10^{-6}$ ,同理求解偶数行 TDICCD 的 X 方向偏差 ( $\Delta X_{B_j}$ ) 直线的斜率  $K_2 = 0.7 \times 10^{-6}$ ,则两行交错 TDICCD 的拼接平行度最终误差为  $400 \times (K_1 - K_2) = 1.1\ \mu\text{m}$ ,也就是奇数行 TDICCD 和偶数行 TDICCD 的平行度误差。求解结果如图 7 所示。则

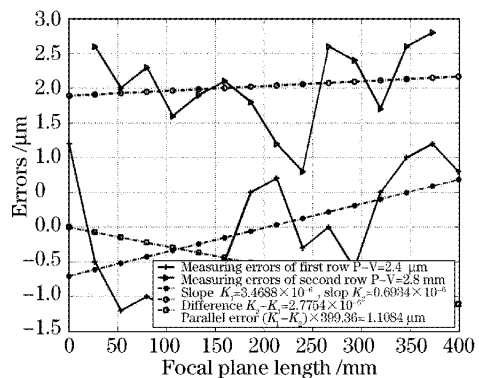


图 7 检测结果曲线图  
Fig. 7 Curve of measuring result of assembly  
两行 TDICCD 的线性平均误差分别为  $-0.1\ \mu\text{m}$  和  $1.84\ \mu\text{m}$ ,线性性峰谷误差为  $2.4\ \mu\text{m}$  和  $2.8\ \mu\text{m}$ 。拼接的各项精度误差均小于  $3\ \mu\text{m}$ 。这些误差值与系统的误差综合值趋于一致且稍大,主要是由于在拼接过程中一些随机误差,如温度变化、气流影响等。

## 5 结 论

拼接检测结果表明,该种机械交错拼接方法是成功的。本文所述的 15 片 TDICCD 拼接成的焦面组件经 CAD 有限元分析和地面成像实验,并没有发现质量上明显的变化,证明了该拼接装置设计合理可行,结构简单紧凑,使用灵活,效果好。在更大规模集成度的 TDICCD 问世以前,机械交错拼接方法完全可用来解决大视场和高分辨力的相机成像要求。对于不同型号的航天相机,其焦平面结构也各不相同,只要结构设计合理,就可利用该拼接装置拼接满足大视场要求的焦平面阵列。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Hua, Guo Yue, Fu Rimin. Study on diel butting of TDICCD[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(2): 226~228 (in Chinese)  
杨桦,郭悦,伏瑞敏. TDICCD 的视场拼接[J]. *光学技术*, 2003, **29**(2): 226~228
- 2 Liu Xiping, Wang Hu, Wen Desheng. Optical focal plane assembly of linear CCD array for subpixel imaging camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 781~784 (in Chinese)  
刘新平,王虎,汶德胜. 亚像元线阵 CCD 焦平面的光学拼接[J]. *光子学报*, 2002, **31**(6): 781~784
- 3 Sun Dongyuan, Zhang Yun. Optical focal plane assembly of linear CCD remote reconnaissance systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1993, **22**(2): 161~165 (in Chinese)  
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
- 4 Shen Mangzuo, Chen Xu'nan, Wang Jin *et al.*. Optical focal plane assembly of linear CCD image sensors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1991, **18**(2): 1~7 (in Chinese)  
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
- 5 Li Chaohui, Wang Zhaoxun, Wu Keyong. Optical assembly of CCD focal plane for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(3): 213~216 (in Chinese)  
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
- 6 Ma Wenli, Ye Baozhu, Zou Dechun *et al.*. High accuracy optical focal plane assembling of ten piece of plane array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, **21**(5): 17~22 (in Chinese)  
马文礼,叶宝珠,邹德春等. 高精度 10 片面阵 CCD 光学焦平面拼接[J]. *光电工程*, 1994, **21**(5): 17~22
- 7 Desheng Wen, Xiping Liu, Wei Qiao *et al.*. Novel subpixel imaging system with linear CCD sensors[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4563**: 116~122
- 8 Wang Zhijing. *Optical Technique Manual* (2) [M]. 1994. 202~214 (in Chinese)  
王之江. *光学技术手册*[M]. (下册), 1994. 202~214
- 9 David Mason, Scott Horner, Earl Aamodt. Mosaic focal plane development[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4849**: 275~282
- 10 John A. Sultana, B. O. Mark Neill. Design, analysis and testing of CCD array mounting structure[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1532**: 27~38
- 11 Paul R. Jordan, David G. Morris, Peter J. Pool. Technology of large focal planes of CCDs[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5167**: 72~82
- 12 Yuan Xucang. *Optics Design* [M]. Beijing: Science Press, 1983 (in Chinese)  
袁旭沧. *光学设计*[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- 13 Zhang Xingxiang, Ren Jianyue. Method off calculating negative pressure-and-adsorption air cushion annular slide[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(5): 481~485 (in Chinese)  
张星祥,任建岳. 负压吸附式环形气垫导轨的计算方法[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(5): 481~485