

## 《空间遥感技术》专题文章导读

任建岳

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

随着对空间遥感器成像性能要求的不断提高,高空间分辨率、高光谱分辨率和多波段通道成了空间遥感技术发展的方向和趋势。而 TDICCD 的拼接精度、电子器件的抗辐照性能、工作波段选择、系统噪声都是影响空间光学遥感器成像性能的重要因素,本专题论文对以上几个方面进行了研究分析,并均在工程实践中成功应用。

《TDICCD 交错拼接的精度检测》一文,采用对拼接 TDICCD 的像元进行直接监测的方法,对已完成拼接的 600 mm 长焦平面进行了精度的检测,检测结果表明其误差  $< 3 \mu\text{m}$ ,实现了长焦平面的高精度检测,验证了检测方法的可行性。

《空间光学遥感器中 Flash 存储器的辐射效应与加固》一文,分析了某空间光学遥感器中 Flash 存储器工作在空间环境下电离辐射(总剂量)效应造成器件失效的机理。对器件进行了  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线总剂量辐射实验,得出器件的失效阈值在 15~20 krad(Si)之间的结果,并提出了 N 模冗余、校验码、冷备份等抗辐射加固方法。

《探测海洋目标的光学遥感器工作波段选择》一文,针对海洋目标探测这种从大背景下探测小目标的应用,分析了限制目标探测的主要因素,计算了某型号遥感器在可见光谱区域内各个波段的目标/背景对比度和信噪比,并得出对于以海洋目标探测为主的宽波段遥感器的最佳工作波段为 0.5~0.9  $\mu\text{m}$  的结论。

《TDICCD 相机的低噪声视频处理技术》一文,建立了 TDICCD 相机系统的噪声模型,分析了 TDICCD 视频信号读出复位噪声的产生机理,讨论了相关双采样技术的工作原理,并设计了科学级 TDICCD 相机。

文章编号 1004-924X(2008)10-1852-06

## TDICCD 交错拼接的精度检测

任建岳<sup>1</sup>, 孙 斌<sup>1,2</sup>, 张星祥<sup>1</sup>, 陈长征<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**焦平面组件是遥感相机的重要组成部分,TDICCD 的交错拼接可以获得大尺寸的焦平面。由于 TDICCD 交错拼接的焦面长度一般较长,常规的检测方法很难获得准确的检测结果。本文采用对拼接 TDICCD 像元直接监测的方法,使用直线度  $< 2 \mu\text{m}/\text{m}$  的气浮导轨,搭载显微系统对像元进行空间位置检测,并对已经完成拼接的 600 mm 长焦平面进行了精度检测,得到的检测误差  $< 3 \mu\text{m}$ 。对遥感相机地面成像试验所得到的图像的分析表明,图像反映的拼接精度与检测所得到的结果吻合,从而验证了检测结果的准确性及检测方法的可行性,实现了长焦平面的高精度检测。

**关键词:**遥感相机;TDICCD;交错拼接;焦平面;精度检测

中图分类号:TP73;TN386.5 文献标识码:A

## Precision measurement of TDICCD interleaving assembly

REN Jian-yue<sup>1</sup>, SUN Bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing-xiang<sup>1</sup>, CHEN Chang-zheng<sup>1</sup>(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Focal plane is one of the most important components of remote sensing camera, and a long

收稿日期:2008-06-30;修订日期:2008-08-07.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

focal plane can be obtained by the interleaving assembly of TDICCD. Because of the assembly length of TDICCD focal plane, it is difficult to obtain the measuring precise of interleaving assembly by the conventional method. In this paper, the space positions of the pixels were obtained by monitoring directly the pixels of TDICCD using microscopic system carried on an air rails with linearity in less than  $2 \mu\text{m}/\text{m}$ . Then, the assembly precision of a 600 mm long assembled focal plane was measured, the result shows that the error is less than  $3 \mu\text{m}$ . According to analysis of the image obtained from the imaging test on ground, the assembly precision reflected from the image is coincident with that obtained from the accurate measurement well, it is proved that this method is precise, feasible and can achieve the high-precision measurement of long focal plane.

**Key words:** remote sensing camera; TDICCD; interleaving assembly; focal plane; precision measurement

## 1 引言

TDICCD 的交错拼接是将 TDICCD 在同一平面内装配成两行交错的焦面形式,即第二行的 TDICCD 在图像积分方向上( $x$  方向)正好填充由第一行 TDICCD 所形成的间隙,交错相邻的两片 TDICCD 首尾的像元满足搭接要求,但在相机飞行方向上(图像积分方向)两行错开一定位置<sup>[1]</sup>。它的优点是相对于光学拼接方法没有引入附加的色差,而且有足够的空间对 TDICCD 进行固定。实际得到未处理的成像图像是起始处相互错开的方齿型图像,通过编程进行图像处理,用电子学对接的方法便可得到一幅完整的宽幅图像。

拼接焦平面的精度检测是量化拼接误差的重要手段,对比每次环境试验前后焦平面检测的误差数据可以分析试验对焦面组件的影响,验证焦平面组件设计的合理性。对于长焦平面且 TDICCD 装配成两行交错形式时,一般的检测手段无法准确地检验拼接效果。为实现较长拼接焦平面的精度检测,可采用高精度气浮导轨和高倍显微系统对像元直接检测的方法来进行真实反映拼接精度的检测。

## 2 焦平面的精度要求

遥感相机为了达到宽覆盖和高分辨力的成像效果,焦平面 TDICCD 的交错拼接必须满足一

定的精度要求,即拼接 TDICCD 器件空间相对位置要满足以下要求<sup>[2]</sup>:

### 2.1 搭接要求

指上一片 TDICCD 的最后一个有效像元与下一片 TDICCD 的第一个有效像元在垂直图像积分方向( $y$  方向)的偏离误差。

### 2.2 直线性要求

就单条直线而言,第一行 TDICCD(奇数行)或第二行 TDICCD(偶数行)上像元偏离各自中心基准直线的直线度误差不能超过  $1/3$  像元,即  $\Delta x \leq 3 \mu\text{m}$ 。

### 2.3 平行度要求

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

### 2.4 共面性要求

所有的 TDICCD 器件的光敏面在同一平面内且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内。

## 3 TDICCD 拼接精度检测原理及检测实施

采用 TDICCD 像元直接监测法来进行焦平面的精度检测。通过高倍显微及成像系统直接将拼接 TDICCD 像元的像显示在监视器上,使用精

密导轨载着显微镜在水平面内进行二维移动来测量拼接 TDICCD 像元的空间位置,再通过数据处理从而得到焦平面的拼接误差。检测时为了保证 TDICCD 焦平面基板的位置稳定,将焦平面组件水平放置,位置调整后结实固定,移动显微镜头,这样既减轻了移动部分的重量,有利于位置的控制和精度稳定性,又避免了由于人工操作引起焦面组件的微动而引入的误差,影响检测的精度。

TDICCD 焦平面的精度检测是在专门的装置上进行的。检测装置由高倍显微系统、照明系统、CCD 摄像机、精密负压吸附导轨、精密支撑平台、计算机和监视器等组成。其原理图见图 1。

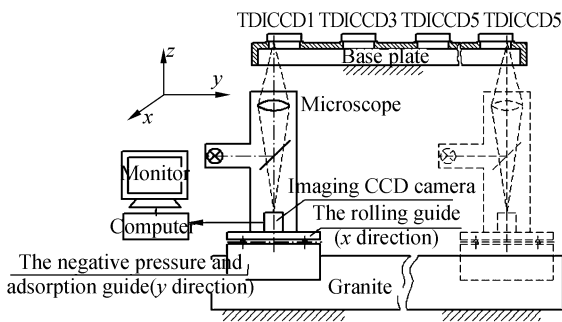


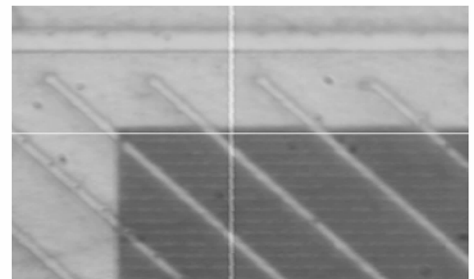
图 1 检测装置结构示意图

Fig. 1 Sketch of TDICCD measuring instrument

垂直图像积分方向 ( $y$  方向) 的导轨采用高精度负压吸附导轨<sup>[3]</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膜,气膜厚度可根据承载在  $1\sim 1.8\ \mu\text{m}$  之间进行调整,花岗岩导轨在  $650\ \text{mm}$  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  $< 1.8\ \mu\text{m}$ 。图像积分方向 ( $x$  方向) 采用十字交叉滚柱导轨平台,该导轨线性滚珠有极高的比刚度,在  $50\ \text{mm}$  行程上很容易达到  $0.5\ \mu\text{m}$  的线性精度。 $x/y$  导轨都装有高精度光栅尺,光栅尺分辨率为  $0.1\ \mu\text{m}$ ,光栅定位精度为  $3\ \mu\text{m}/\text{m}$ ,通过多点线性插补可达到  $1\ \mu\text{m}/\text{m}$ <sup>[1]</sup>。

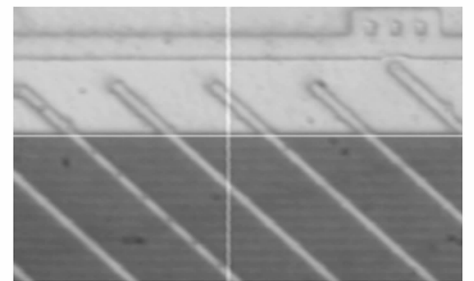
检测时,TDICCD 的像元在显微镜和成像系统的监视下,通过电十丝进行定位对齐,光栅尺进行长度测量,得出准确的数值。单行 TDICCD 的

直线度及两行之间的平行度是以每片 TDICCD 第一级像元为对象,分别选取左、中、右 3 点,记录各个被测点在图像积分方向的偏差值,见图 2。搭接精度是以所选用 TDICCD 的蝴蝶结标志为对象,测量交错相邻的两片 TDICCD 首尾蝴蝶结之间的横向距离如图 3 所示,进而计算出搭接像元数。图 2、图 3 是检测过程中对像元放大 800 倍的监视图片。图片表明,检测设备的显微系统成像清晰,电十丝定位精度高。



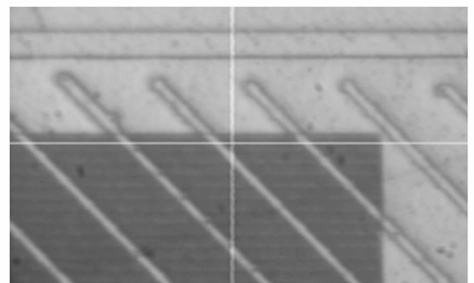
(a) 拼接 TDICCD 的左测点

(a) Left side of one TDICCD



(b) 拼接 TDICCD 的中间测点

(b) Middle side of one TDICCD

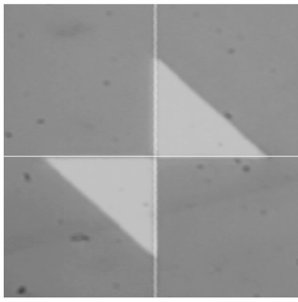


(c) 拼接 TDICCD 的右测点

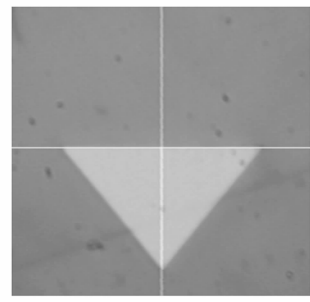
(c) Right side of one TDICCD

图 2 被测点在积分方向的偏差值

Fig. 2 Deviation values of measured point in integral direction



(a) 拼接 TDICCD 的一个蝴蝶结  
(a) One butterfly of one TDICCD



(b) 拼接 TDICCD 的另一个蝴蝶结  
(b) Other butterfly of one TDICCD

图 3 交错相邻的两片 TDICCD 的首尾蝴蝶结

Fig. 3 Two butterflies connected end to end of one TDICCD

### 4 检测数据分析及实验验证

采用上述方法,完成了长度为 600 mm 的 TDICCD 焦平面的精度检测。检测数据见表 1。

直线度误差的评定有两端点连线法、最小条件法、最小二乘法等,国家标准规定最小条件法是

评定形位误差的基本准则,它具有准确性和唯一性的特点<sup>[4]</sup>。主要任务就是求出实际直线相对理想直线  $l$  的最大变动量,

$$l: y=kx+b, \tag{1}$$

从而得到直线度误差。设有  $n$  个测点  $(x_i, y_i)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, n$ ; 将理想直线向上平移一个距离  $\Delta b$  使实际直线上所有的点都位于该直线的下方,

表 1 检测结果数据

Tab. 1 Data of checking results

TDICCD 编号	直线性精度			交错相邻 TDICCD 编号	TDICCD 编号	搭接像元数(个)
	被测点偏差( $\mu\text{m}$ )					
	起始像元	中间像元	尾部像元			
1	0	-0.6	-1	1 与 2		6.3
3	-0.8	-0.5	0	2 与 3		4.8
5	0	-0.4	-0.4	3 与 4		6
7	+0.5	0	-0.4	4 与 5		5
9	-1	-0.4	0	5 与 6		5.5
11	+1.2	+0.8	0	6 与 7		4.7
13	-0.4	-0.4	-0.6	7 与 8		5
15	-0.8	-0.7	-0.5	8 与 9		6.2
17	-1	-1	-1	9 与 10		5.2
2	-0.4	-0.4	-0.6	10 与 11		5.7
4	-1	-1.2	-1.2	11 与 12		4.8
6	-0.8	-1	-1	12 与 13		5
8	-0.4	-0.4	-0.5	13 与 14		6
10	0	-0.2	-0.2	14 与 15		5.7
12	-1	-1	-0.8	15 与 16		6.8
14	0	-0.6	-1	16 与 17		6.5
16	-0.2	0	0	平均搭接像元数		5.6

得到上包容直线  $l'$ :

$$l' : y' = kx + b', \quad (2)$$

同理可得到下包容直线,那么

$$f(k) = \max_1^n \{y_i - (kx_i + b')\} - \min_1^n \{y_i - (kx_i + b')\} \rightarrow \text{MIN}, \quad (3)$$

直线度误差的评定便转化为求函数  $f(k)$  的最小值问题<sup>[5]</sup>。

编写符合最小条件的 MATLAB 程序对测得的数据进行精确计算,求解结果如图 4 所示。其中,奇数行直线度为  $\Delta_{\text{odd}} = 1.8 \mu\text{m}$  ( $k_1 = -0.0006899$ ),偶数行直线度为  $\Delta_{\text{even}} = 1.1 \mu\text{m}$  ( $k_2 = 0.001128$ ),两行之间的平行度误差为:  $P_{\text{mea}} = (k_2 - k_1) \times 600 = 1.1 \mu\text{m}$ 。

精度检测的误差是测量过程中各个环节一系列误差因素共同作用的结果。检测装置的系统误差分析见表 2。其中导轨直线误差、导轨平面度

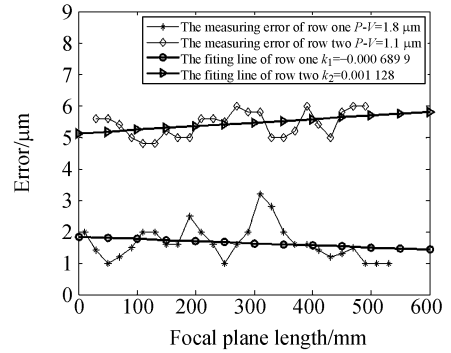


图 4 检测结果曲线图

Fig. 4 Curves of measuring results of assembly

误差、拼接基板平面度误差是形状误差,可直接测量得到。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>[6]</sup>。

表 2 检测装置的误差分析

Tab. 2 Error analysis of measuring instrument

误差种类	$x$ 方向( $\mu\text{m}$ )	$y$ 方向( $\mu\text{m}$ )	$z$ 方向( $\mu\text{m}$ )
导轨直线误差	$\Delta x_1 = 0.5$	$\Delta y_1 = 1.0$	$\Delta z_1 = 0.5$
导轨平面度误差	$\Delta x_2 = 1.0$	$\Delta y_2 = 1.0$	$\Delta z_2 = 1.0$
拼接基板平面度误差	$\Delta x_3 = 1.0$	$\Delta y_3 = 1.0$	$\Delta z_3 = 1.0$
拼接基板与 $x/y$ 导轨的平行度误差	$\Delta x_4 = 1.0$	$\Delta y_4 = 1.3$	$\Delta z_4 = 1.0$
显微镜的对准极限误差	$\Delta x_5 = 0.18$	$\Delta y_5 = 0.18$	$\Delta z_5 = 0.18$
显示器的分辨率产生的误差	$\Delta x_6 = 0.46$	$\Delta y_6 = 0.46$	$\Delta z_6 = 0.46$
拼接 TDICCD 像元与成像 CCD 相机像元匹配误差	$\Delta x_7 = 0.2$	$\Delta y_7 = 0.2$	$\Delta z_7 = 0.2$
电十字刻度误差	$\Delta x_8 = 0.2$	$\Delta y_8 = 0.2$	$\Delta z_8 = 0.2$
光栅定位误差	$\Delta x_9 = 0.5$	$\Delta y_9 = 1.2$	$\Delta z_9 = 0$
显微镜的调焦误差	$\Delta x_{10} = 0.52$	$\Delta y_{10} = 0.52$	$\Delta z_{10} = 1.5$
TDICCD 保持架垫片的误差	$\Delta x_{11} = 0$	$\Delta y_{11} = 0$	$\Delta z_{11} = 1.0$
总系统误差( $\Delta H$ )	$\Delta x = 2.02$	$\Delta y = 2.59$	$\Delta z = 2.61$

表 2 中各方向上总的系统误差根据公式  $\Delta H$

$= \sqrt{\sum_{i=1}^{11} \Delta H_i^2}$  计算,其中  $\Delta H_i$  分别为  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  和  $\Delta z_i$ 。则 TDICCD 检测装置各方向上的系统误差为  $\Delta x = 2.02 \mu\text{m}$ ,  $\Delta y = 2.59 \mu\text{m}$ ,  $\Delta z = 2.61 \mu\text{m}$ 。

对各项误差进行合成<sup>[7]</sup>,得到焦平面总的拼接误差为:

奇数行直线度误差为  $\Delta_{\text{odd, total}} = \sqrt{\Delta_{\text{odd}}^2 + \Delta x^2} = 2.7 \mu\text{m}$ ,

偶数行直线度误差为  $\Delta_{\text{even, total}} = \sqrt{\Delta_{\text{even}}^2 + \Delta x^2} = 2.8 \mu\text{m}$ ,

平行度误差  $P_{\text{total}} = 1.1 \mu\text{m}$ ,

焦深方向误差为  $\Delta Z_{\text{total}} = 2.61 \mu\text{m}$ 。

完成 TDICCD 焦面精度检测后,进行了一系列的环境试验,包括振动试验、冲击试验、热真空试验等,每次试验后对焦面进行精度的复检。焦面组件安装到调好的相机光学镜头上进行整机的地面成像试验,得到了依据检测数据所期望的图

像,成像试验照片(目标建筑距离 10 km)如图 5。



图 5 成像实验照片

Fig. 5 Photo of imaging test

## 5 结 论

完成拼接的焦平面组件需要进行大量的环境试验,每项试验之后,都要对焦平面进行精度的检测来分析和验证各项试验对焦平面稳定性的影响。用拼接 TDICCD 像元直接监测法对 600 mm 长焦平面的拼接精度的检测,得到了误差  $< 3 \mu\text{m}$  的检测结果,证明了该种检测方法对 TDICCD 交错拼接焦平面进行检测的准确性与可行性。

## 参考文献:

- [1] 张星祥,任建岳. TDICCD 焦平面的机械交错拼接[J]. 光学学报,2001,26(5):740-745.  
ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDICCD focal plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 26(5):740-745. (in Chinese)
- [2] 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.  
MA W L, YE B ZH, ZOU D CH, *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)
- [3] 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.  
ZHANG X X, REN J Y. Method of calculating negative pressure-and-adsorption air cushion annular slide[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5):481-485. (in Chinese)
- [4] 甘永立. 几何量公差与检测[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002.  
GAN Y L. *Geometry Tolerance and Detection*[M]. Shanghai:Shanghai Technology House, 2002. (in Chinese)
- [5] 陈国强,赵俊伟. 基于 MATLAB 的直线度误差精确评定[J]. 机床与液压,2006(2):154-155.  
CHEN G Q, ZHAO J W. Accurate linear error assessment based on MATLAB[J]. *Machine tool & Hydraulics*, 2006(2):154-155. (in Chinese)
- [6] 李朝辉,王肇勳,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.  
LI CH H, WANG ZH X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3):213-216. (in Chinese)
- [7] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007:68-70.  
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing:China Machine Press, 2007:68-70. (in Chinese)

作者简介:任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。

孙 斌(1983—),男,辽宁丹东人,硕士研究生,主要从事空间光机系统、精密机械等方面的研究。E-mail:sunbin231@126.com