

文章编号:1007-1180(2010)12-0162-05

# 导轨运动误差对 CCD 拼接影响分析

薛 闯, 高志良, 颜昌翔

(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:** 对于大视场、高分辨率空间 CCD 相机, 多片 CCD 拼接技术仍是目前解决单片 CCD 线阵像元数目及其长度不能满足需求的主要手段, 多片 CCD 器件的拼接精度直接影响 CCD 焦平面子系统的成像质量。焦平面 CCD 器件的拼接是在专用工具 CCD 拼接仪上完成的, CCD 拼接仪的综合拼接误差决定了 CCD 器件的拼接精度。本文基于三坐标测量机的测量误差空间数学模型, 推导出了由于直线导轨的运动误差引起的 CCD 拼接仪系统拼接误差的完整计算公式, 通过对公式进行分析并实例计算, 结果表明除了直线导轨的线位移运动误差外, 由于直线导轨的角位移运动误差引起的阿贝拼接误差也是 CCD 拼接仪系统拼接误差的重要组成部分, 而且由于 CCD 拼接仪的仪器构成特点以及三维空间工作特性, 很难通过优化仪器布局来同时消除所有方向的阿贝误差。通过对各种消除或减小 CCD 拼接仪系统拼接误差的方法进行探讨, 得出结论: 采用误差补偿技术是减小 CCD 拼接仪系统拼接误差的有效方法。

**关键词:** CCD 拼接仪; 焦平面; 直线导轨; 阿贝误差

**中图分类号:** TN386.5      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102712.0162

## Analysis of CCD Assembly Errors Induced by Linear Guides Motion Errors

XUE Chuang, GAO Zhi-liang, YAN Cang-xiang

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

**Abstract:** For wide fields of view and high resolution charge-coupled device (CCD) cameras dedicated to earth observation, due to the limited pixels of single CCD module, several CCD modules are always assembled to be a large focal plane array. The imaging function of CCD focal plane subsystem is impacted by the alignment errors of CCD modules. The assembly and integration of CCD modules are performed on CCD assembly apparatus. The alignment errors of CCD modules are dependent on the performance of CCD assembly apparatus. Based on the error model of coordinate

measuring machines(CMM), the CCD modules alignment errors due to the motion errors of linear guides of CCD assembly apparatus are researched and the equations to calculate the errors are deduced. From the equations, it can be inferred that, besides the linear displacement errors of linear guides, the Abbe errors due to angular displacement errors of linear guides also have an effect on the performance of CCD assembly apparatus. Because of the constitution and the function characteristics of CCD assembly apparatus, the Abbe errors in all directions can not simultaneously be eliminated by optimizing the apparatus configuration. Finally, the solutions to reduce the errors are discussed in this paper, and it is concluded that error compensation technology is an effective way to reduce the errors.

**Keywords:** CCD assembly apparatus; focal plane; linear guide; Abbe error

## 1 引言

在 20 世纪 80 年代的空间 CCD 相机中, 常用 CCD 线阵的像元数大约为 2 000, 长度在 26 mm 左右, CCD 线阵的长度满足不了相机视场要求; 因此, 发展了 CCD 拼接技术, 用数个 CCD 拼接成更长的线阵。近年来, 虽然由于 CCD 制造工艺的发展, CCD 线阵的像元数和长度都增长很快, 但仍然满足不了空间相机分辨率、视场的进一步发展要求, 因此, CCD 拼接技术在一定时期内仍会得到应用。

为了满足 CCD 焦平面的成像质量, CCD 器件的拼接必须保证 CCD 器件的空间相对位置精度要求, 主要的位置精度指标要求有以下 4 项: 不同行 CCD 相对有效像元的搭接要求、单行 CCD 的直线度要求、不同行 CCD 间的平行度要求及 CCD 共面性要求<sup>[1-3]</sup>。

CCD 器件的拼接是在专用工具 CCD 拼接仪上完成的, CCD 拼接仪的综合拼接误差决定了 CCD 焦平面的拼接精度。由于 CCD 拼接仪的工作原理类似于万能工具显微镜<sup>[3]</sup>, 因此, 产生拼接误差的因素有很多, 例如光学显微成像测量系统误差、直线导轨的运动误差、环境条件变化(主要指温度)等等。目前讨论 CCD 拼接仪拼接误差的文献<sup>[4-8]</sup>比较多, 但大部分文献对直线导轨的运动误差只关注了运动直线度的线位移误差, 忽略了由于角位移误差引起的阿贝误差。本文基于三坐标测量机的测量误差空间数学模型, 对由于直线导轨的运动误差引起的 CCD 拼接仪完整拼接误差公式进行了推导。

## 2 CCD 拼接仪工作原理

CCD 拼接仪主要由高倍显微系统、照明系统、CCD 摄像机、三维精密直线运动导轨、直线光栅尺测量系统、精密支撑平台、计算机及显示器等组成, 其原理图见图 1。

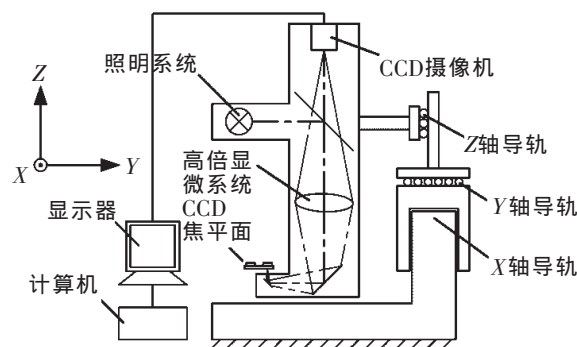


图 1 CCD 拼接仪的组成

CCD 拼接仪的工作原理: 沿 X 轴、Y 轴精密直线运动导轨移动高倍显微镜头, CCD 器件在高倍显微镜头监视下, 通过微调结构将每片 CCD 器件上面沿线阵方向两端的基准标志对准电十字丝, 实现单行上所有 CCD 器件沿 X 轴直线排列, 以此完成单行 CCD 的直线度拼接和不同行 CCD 间的平行度拼接; 当沿 Y 轴导轨移动高倍显微镜头时, 通过微调机构将不同行 CCD 相对应的有效像元沿 Y 轴直线排列, 可以同时完成搭接拼接。由于显微镜头的景深很短, 当沿 X 轴、Y 轴导轨移动显微镜头对准不同 CCD 器件时, 通过电子判读每个 CCD 器件的像元或基准标

志是否成清晰像来判断 CCD 器件是否共面, 如果某 CCD 器件成像不清晰, 则修整该器件与基板之间的垫片直至成清晰像, 以此来完成共面性拼接。

### 3 CCD 拼接仪拼接误差分析

由 CCD 拼接仪的工作原理可知, 沿  $X$  轴、 $Y$  轴导轨移动高倍显微镜头引起的拼接误差空间数学模型类似于三坐标测量机<sup>[9-10]</sup>, 高倍显微镜头相当于三坐标测量机的探针, 如果 CCD 拼接仪的三维直线导轨和高倍显微镜头按照图 2 所示布局, 则由于直线导轨的运动误差引起的拼接误差数学模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta x = & \delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z) - y\alpha_{xy} - z\alpha_{xz} - y\varepsilon_z(x) + z[\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y)] - \\ & L_y(x)\varepsilon_z(x) - L_y(y)\varepsilon_z(y) - L_y(z)\varepsilon_z(z) + L_z(x)\varepsilon_y(x) + \\ & L_z(y)\varepsilon_y(y) + L_z(z)\varepsilon_y(z) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta y = & \delta_y(x) + \delta_y(y) + \delta_y(z) - z\alpha_{xy} - x\alpha_{yz} - z[\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y)] + L_x(x)\varepsilon_z(x) + \\ & L_x(y)\varepsilon_z(y) + L_x(z)\varepsilon_z(z) - L_z(x)\varepsilon_x(x) - L_z(y)\varepsilon_x(y) - L_z(z)\varepsilon_x(z) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta z = & \delta_z(x) + \delta_z(y) + \delta_z(z) + y\varepsilon_x(x) - L_x(x)\varepsilon_y(x) - L_x(z)\varepsilon_y(z) - L_x(y)\varepsilon_y(y) + \\ & L_y(x)\varepsilon_x(x) + L_y(y)\varepsilon_x(y) + L_y(z)\varepsilon_x(z) \end{aligned} \quad (3)$$

为描述方便, 用  $U$ 、 $V$ 、 $W$  代表  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  中的任意一个, 下标中分别用  $u$ 、 $v$ 、 $w$  对应  $U$  轴、 $V$  轴、 $W$  轴。其中,  $\delta_u(u)$  为沿  $U$  轴运动在  $V$  向的线位移误差;  $\varepsilon_v(u)$  为沿  $U$  轴运动绕  $V$  轴的角位移误差;  $\alpha_{uv}$  为  $U$  轴和  $V$  轴间的垂直度误差;  $x$ 、 $y$  和  $z$  分别为显微镜头沿  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴移动的距离;  $L_v(u)$  为显微镜头和  $\varepsilon(u)$  角位移误差回转中心沿  $V$  轴的投影距离。

$\Delta x$  表示不同行 CCD 相对应有效像元的搭接误差,  $\Delta y$  表示单行 CCD 的直线度和不同行 CCD 间的平行度误差, 而  $\Delta z$  表示所有 CCD 器件的共面误差。虽然实际进行 CCD 器件拼接时, 并不需要沿  $Z$  向导轨移动显微镜头, 即  $z$ 、 $\delta(z)$ 、 $\varepsilon(z)$  都为 0, 但为了表示公式 (1)、(2)、(3) 的完整性, 在这些公式中依然包含与  $Z$  向运动有关的项。 $\Delta x$ 、 $\Delta y$  及  $\Delta z$  共同的特点是都由 3 类误差构成: 直线导轨的直线运动线位移误差、由于不同运动轴之间没有绝对垂直而引起的误差 (简称为垂直误差) 及由于直线导轨的直线运动角位移误差引起的阿贝误差。

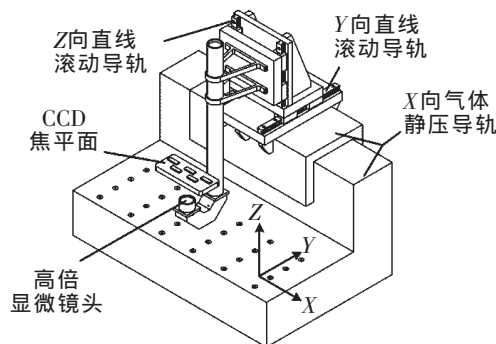


图2 三维直线导轨及显微镜头布局示意

#### 直线运动误差

按照机械运动学原理, 一个刚体在空间有 6 个自由度, 即沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴移动和绕它们转动。对于直线运动导轨, 必须仅保留运动件沿一个方向移动的自由度, 限制其他 5 个方向的自由度; 但由于存在制造、装配等误差, 运动件沿其他 5 个自由度方向仍然有微小线位移  $\delta_v(u)$  和角位移  $\varepsilon_v(u)$ 。

#### 垂直误差

当 CCD 拼接仪的某两根导轨轴之间没有绝对垂直 (即存在  $\alpha_{uv}$ ) 时, 如果沿一根轴移动距离  $s$ , 则在另一根轴上同时会发生微量位移  $s\alpha_{uv}$ 。公式 (1)、(2)、(3) 中的  $w\varepsilon_v(u)$  等项也归为此类误差, 原因是角位移  $\varepsilon_v(u)$  改变了  $U$  轴与  $W$  轴之间的夹角, 且角度变化量为  $\varepsilon_v(u)$ , 当显微镜头沿  $W$  轴行走距离  $w$  时, 伴随产生的沿  $U$  轴的微量位移为  $w\varepsilon_v(u)$ 。

#### 阿贝误差

由于直线导轨存在角位移误差, 当将显微镜头和角位移误差回转中心向导轨轴作投影时, 如果这两个投影间的距离不为 0, 则会产生阿贝误差。

如图 3 所示, 将显微镜头和  $\varepsilon_x(x)$  (即沿  $X$  轴直线运动时绕  $X$  轴的角位移误差) 的回转中心向  $Y$  轴作投影, 两投影间的距离为  $L_y(x)$ , 则当高倍显微镜头沿  $X$  轴导轨作直线运动时, 伴随其产生的沿  $Z$  轴微量线位移为  $L_y(x)\varepsilon_x(x)$ 。

实际上, 对于已经加工、装调完成的精密直线运动导轨, 很难确定运动件角位移误差  $\varepsilon_v(u)$  的瞬时回转中心, 而且随着运动件的移动, 角位移误差  $\varepsilon_v(u)$

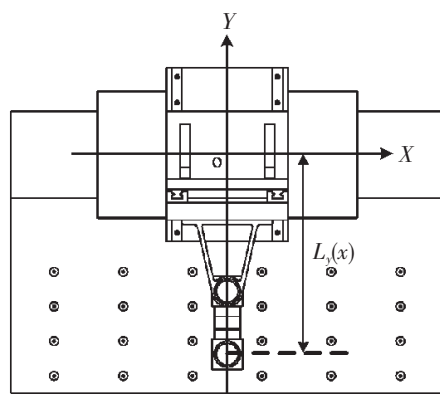


图3 阿贝误差计算

的瞬时回转中心位置也一直在变,这就使得公式(1)、(2)、(3)仅在理论上成立。为了使公式具在工程上有可用性,现做如下证明:

参考图4,假设整个线段AB做刚体移动,端点A点移到A'点,端点B点移到B'点,如果已知A点沿Y轴的位移 $y_A$ 、线段AB与X轴夹角 $\beta$ 及线段AB到线段A'B'的转角 $\alpha_z$ ,则可求得B点沿Y轴的位移为:

$$y_B = y_A + L_{AB}[\sin(\beta + \alpha_z) - \sin(\beta)] \quad (4)$$

如果 $\alpha_z$ 为小量,则

$$\sin(\beta + \alpha_z) - \sin(\beta) \approx \alpha_z \cos(\beta) \quad (5)$$

即

$$y_B = y_A + \alpha_z L_{AB} \cos(\beta) \quad (6)$$

由于精密直线运动导轨的角位移误差 $\varepsilon_i(u)$ 皆为小量,所以符合应用公式(6)的前提条件。根据公式(6),可以直接用电感测微仪测量CCD拼接仪每维直线导轨的直线度误差,用光电自准直仪测量每维

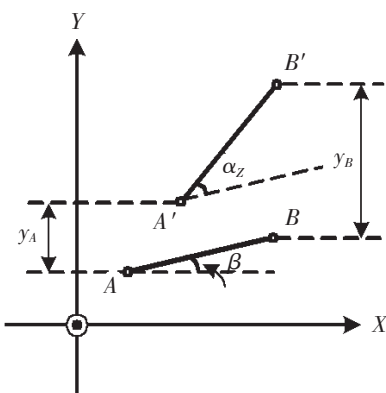


图4 刚体位移计算

直线导轨的俯仰、偏摆及滚动角位移误差,用卡尺测量电感测微仪测量头和高倍显微镜镜头沿每根导轨轴的投影距离,然后把这些测得的量带入公式(1)、(2)、(3),即可求得 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 及 $\Delta z$ 。

如前所述,利用CCD拼接仪进行CCD器件拼接时,并没有发生Z轴位移,且进行单行CCD直线度及不同行CCD间平行度拼接时,只需沿X轴导轨移动显微镜镜头,进行不同行CCD相对有效像元的搭接拼接时,只需沿Y轴导轨移动显微镜镜头,因此,公式(1)、(2)、(3)可进行简化:

$$\Delta x = \delta_x(y) - y\alpha_{xy} - y\varepsilon_z(x_0) - L_y(y)\varepsilon_z(y) + L_z(y)\varepsilon_y(y) \quad (7)$$

$$\Delta y = \delta_y(x) + L_x(x)\varepsilon_z(x) - L_z(x)\varepsilon_x(x) \quad (8)$$

$$\Delta z = \delta_z(x) + \delta_z(y) + y\varepsilon_z(x) - L_x(x)\varepsilon_y(x) - L_y(y)\varepsilon_x(y) + L_y(x)\varepsilon_x(x) + L_y(y)\varepsilon_x(y) \quad (9)$$

若分别将测量 $\delta_y(x)$ 、 $\delta_z(x)$ 、 $\delta_z(y)$ 电感测微仪的测量头与显微物镜的光轴置于以X轴为法线的同一平面内,可得 $L_x(x)$ 、 $L_x(y)$ 都为0,因此,公式(8)、(9)可进一步简化为:

$$\Delta y = \delta_y(x) - L_z(x)\varepsilon_x(x) \quad (10)$$

$$\Delta z = \delta_z(x) + \delta_z(y) + y\varepsilon_z(x) + L_y(x)\varepsilon_x(x) + L_y(y)\varepsilon_x(y) \quad (11)$$

根据以上推导,对于如图2所示的CCD拼接仪布局,由直线导轨的运动误差引起的拼接误差可以按照公式(7)、(10)及(11)进行计算。

## 4 运动拼接误差分析结果讨论

按照公式(7),对于搭接误差 $\Delta x$ ,通过调整显微镜镜头沿Z轴所处位置,使得 $L_z(y)$ 趋近于0,可以消除 $L_z(y)\varepsilon_y(y)$ 项;通过精调X轴与Y轴的垂直度,可以减小 $y\alpha_{xy}$ 项。由于X轴导轨为精密气体静压导轨、Y轴导轨为高精度直线滚动导轨,且进行搭接拼接时,沿Y轴行程较短,所以 $\delta_z(y)$ 项和 $y\varepsilon_z(x_0)$ 项也很小,因此, $\Delta x$ 主要由 $L_y(y)\varepsilon_z(y)$ 项的大小决定。实际上,对于图2中CCD拼接仪的拼接布局方式, $L_y(y)$ 很难设计得很小,一般都 $>300$  mm,这意味着如果 $\varepsilon_z(y) > 2''$ ,则 $L_y(y)\varepsilon_z(y)$ 项将 $>2.9 \mu\text{m}$ 。

对于直线度及平行度拼接误差 $\Delta y$ ,从公式(10)



可以看出,只要调整高倍显微镜镜头沿 $Z$ 轴所处位置,使得 $L_z(x)$ 趋近于0,可使该项误差完全由 $X$ 轴导轨的直线度误差 $\delta_{y(x)}$ 决定。

共面性误差 $\Delta z$ 与 $\Delta x$ 类似,大小主要由 $L_y(x)\varepsilon_x(x)$ 项及 $L_y(y)\varepsilon_x(y)$ 项决定,如果 $\varepsilon_x(x)$ 、 $\varepsilon_x(y)$ 都 $>2'$ , $L_y(x)$ 、 $L_y(y)$ 都 $>300$  mm,则

$$\sqrt{[L_y(x)\varepsilon_x(x)]^2 + [L_y(y)\varepsilon_x(y)]^2} > 4.1 \mu\text{m} \quad (12)$$

显然,显微镜镜头和3个直线导轨的布局对拼接误差的影响很大,但通过优化布局来减小误差的措施有时是相互矛盾的。例如,对于图5所示布局, $L_y(x)$ 、 $L_y(y)$ 可以设计得很小,非常有利于减小 $\Delta x$ 、 $\Delta z$ ,但该种布局的 $L_z(x)$ 很大,结果导致 $\Delta y$ 增大。

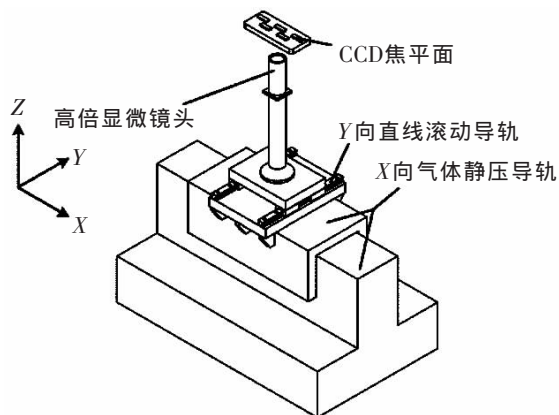


图5 三维直线导轨及显微镜镜头布局示意图

减小拼接误差的另外两个方法：一是提高导轨的直线运动精度，减小角位移误差，但该方法会使CCD拼接仪的研制周期、成本急剧增加；二是采用误差补偿技术，CCD拼接仪装调完成后，可以检测出 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 及 $\Delta z$ 曲线（自变量为 $X$ 轴坐标和 $Y$ 轴坐标），当显微镜镜头沿 $X$ 轴、 $Y$ 轴导轨各移动一段距离产生 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 及 $\Delta z$ 误差时，可以通过计算机驱动步进电机，使显微镜镜头分别沿 $X$ 轴、 $Y$ 轴及 $Z$ 轴导轨产生反向微位移，从而补偿掉 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 及 $\Delta z$ 误差。

## 5 结 论

本文给出了直线导轨运动误差引起的CCD拼接仪拼接误差的完整计算公式，通过对公式进行分析并结合工程研制实际情况，认为除了直线导轨的线位移误差外，由于直线导轨的直线运动角位移误差引起的阿贝误差也是CCD拼接仪系统拼接误差的重要组成部分，而且由于显微镜和直线导轨的布局设计不可能在三维空间里同时遵守阿贝原理，因此，阿贝误差不可避免。与其他减小或消除系统拼接误差的方法相比，误差补偿技术由于其经济性、有效性及在三坐标测量机中的成熟应用，更适用于CCD拼接仪。

## 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.
- [2] 杨桦, 郭悦, 伏瑞敏. TDICCD 的视场拼接[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 226-228.
- [3] 孟庆华. 面阵 CCD 拼接仪结构设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(11): 32-35.
- [4] 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.
- [5] 陈旭男, 马文礼, 杨亚涛, 等. 多片面阵 CCD 图像传感器焦平面光学拼接技术[J]. 光电工程, 1992, 19(4): 23-29.
- [6] 任建岳, 孙斌, 张星祥, 等. TDICCD 交错拼接的精度检测[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(10): 1852-1857.
- [7] 李英才, 刘亚男, 相宝林, 等. 提高线阵 CCD 拼接精度的研究[J]. 测试技术学报, 2002, 16(专刊): 430-434.
- [8] 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.
- [9] Zhang G X. Error compensation of coordinate measuring machines[J]. *Annals of CIRP*, 1985, 34: 445-448.
- [10] Harris J O, Spence A D. Geometric and quasi-static thermal error compensation for a laser digitizer equipped coordinate measuring machine[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44: 65-77.

作者简介: 薛闯 (1978-), 男, 汉族, 吉林长春人, 硕士, 助理研究员, 2006年于上海技术物理研究所获得硕士学位, 主要从事精密机械、光学仪器等领域的研制开发。E-mail: popxue@hotmail.com