

文章编号:1002-2082(2015)01-0077-05

光电跟踪系统稳定精度测试方法研究

王科伟¹, 王小怡², 王 晶², 刘召庆², 王生让², 张魁甲²

(1. 总参陆航部驻西安应用光学研究所军事代表室, 陕西 西安 710065; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:针对光电跟踪系统稳定精度测试需求, 提出一种稳定精度动态测试方法。该方法基于光学自准直原理, 采用面阵 CCD 探测器, 结合图像求取质心算法, 实现被测系统的动态测试, 通过该装置获得了稳定精度测试结果。结果表明: 测试 50 μrad 级两轴两框架系统动态稳定精度, 通过该测试方法测出其稳定精度最大为 48 μrad 。

关键词:光电跟踪系统; 自准直仪; 稳定精度; 面阵 CCD 探测器

中图分类号: TN206

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201536.0103002

Test method of stabilization accuracy in EO tracking system

Wang Kewei¹, Wang Xiaoyi², Wang Jing², Liu Zhaoqing², Wang Shengrang², Zhang Kuijia²

(1. Military Representative Agency of General Staff Department of Aviation at Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: For the stability test requirements of precision optical tracking system, we presented a dynamic testing method of stability accuracy. According to the optical auto-collimation principle, we utilized the CCD array detector combined with the computation for center of image to realize the dynamic test, and we required the test results of stability accuracy by this device. Experiments results show that for the 50 μrad level two-axis two-frame system, the tested stability accuracy is up to 48 μrad by our method.

Key words: photoelectric tracking system; dynamic auto-collimating apparatus; stabilization accuracy; charge coupled device (CCD) array detector

引言

光电跟踪系统主要有瞄准线稳定系统、侦察系统、夜间飞行导航系统等。其中稳瞄系统最复杂, 并且其性能和精度最高。稳瞄系统用于隔离载机(直升机、车辆等)振动所引起的图像晃动, 保证光电传感器的分辨率和输出图像的稳定性。该类设备最重要的性能指标是稳定精度, 可通过载机振动的隔离残差表征。通常, 用于瞄准的稳瞄系统只需稳定方位和俯仰 2 个轴, 横滚方向不需要稳定。按结构形式划分, 稳瞄系统可分为两轴两框架系统和两轴四框架系统, 两轴两框架系统的

稳定精度一般约为 100 μrad ; 两轴四框架系统的稳定精度范围可达 20 μrad ~40 μrad 。未来发展方向是采用粗精组合稳定方式, 其精度可达 5 μrad ~10 μrad ^[1-5]。针对光电跟踪系统稳定精度测试需求, 提出一种稳定精度动态测试方法。该测试方法根据光学自准直原理, 搭建稳定精度测试平台。由安装于被测光电跟踪系统上的反射镜反映系统的振动状态, 通过反射镜反射光束至 CCD 探测器, 将被测系统 μrad 级的角位移变化放大并转换成光电探测器光敏面上可检测的光斑位置变化, 结合图像质心算法对图像数据进行处理, 最终获

收稿日期: 2014-06-17; 修回日期: 2014-09-16

基金项目: 国防支撑项目

作者简介: 王科伟(1980—), 男, 河南鹤壁人, 硕士, 工程师, 主要从事光电产品的质量监控工作。

E-mail: wangkw@mail@163.com

得系统稳定精度指标。

1 测量原理

光电跟踪系统稳定精度指标通常具有小的角度范围和高的测量精度要求,根据此属性,该测量系统采用了光学自准直原理,测量系统光路图如图1所示,光线通过位于物镜焦平面的分划板后,经物镜形成平行光。平行光被垂直于光轴的反射镜反射回来,再次通过准直镜头后由分光棱镜转折汇聚在位于共轭焦平面的 CCD 表面,形成分划板像。当反射镜倾斜一个微小角度时,反射回来的光束就产生一个倾角,位于 CCD 探测表面的分划板像就产生一个位移。通过 CCD 对分划板像位移的判读就可以得知反射镜的角位移。

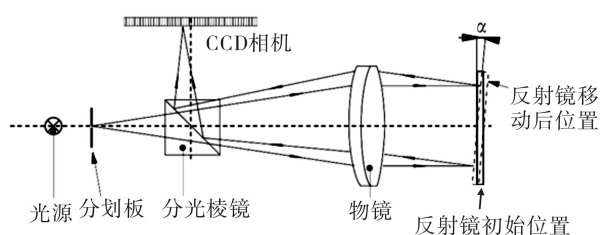


图1 测量系统光路图

Fig.1 Optical path of measurement system

测量原理示意图如图2所示。

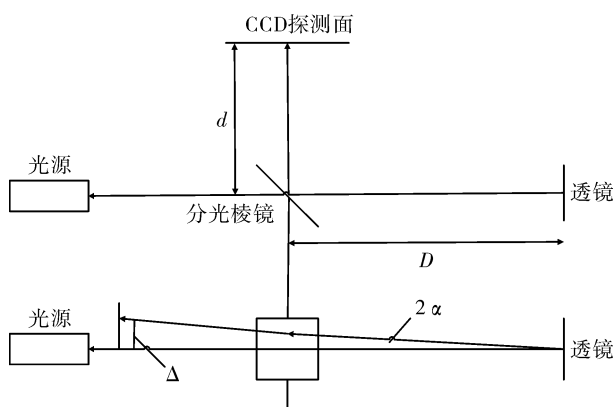


图2 测量原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of measurement

分光棱镜与反射镜之间的距离为 D , 分光棱镜与 CCD 探测面之间的距离为 d , 为便于说明, 图中将分光棱镜的反射光线沿平面镜的反射光路方向展开, 经稳定平台稳定后的反射镜角度改变为 α , 由此引起的 CCD 面上光斑的改变量为 Δ , 由图中容易看出:

$$\Delta = (D + d) \tan 2\alpha \quad (1)$$

因为 α 很小, 所以有:

$$\Delta = 2(D + d)\alpha \quad (2)$$

$$\alpha = \Delta / 2(D + d) \quad (3)$$

式中 D, d 均是可以根据光路布置确定的常数, 所以被测稳定平台的稳定精度 α 可以从 CCD 上的光斑偏移量 Δ 计算得出。

测试一个时间历程, 通过测量 CCD 靶面上的光斑偏移量 Δ , 可得到光电跟踪系统的稳定精度测试结果 σ 。

2 测量系统

测量系统由高速动态自准直仪、测试用计算机、测试软件和光源组成, 稳定精度测试系统示意图如图3所示。光源使用 LED 光源。高速动态自准直仪发出一束光, 被置于稳瞄光具座上的反射镜返回后成像在探测器上, 反射光偏转, 则反射角度偏转 2 倍, 探测器通过测量其上光学像的位置变化, 能够获得反射角度, 通过软件对该角度进行统计计算, 可获得系统的稳定精度。

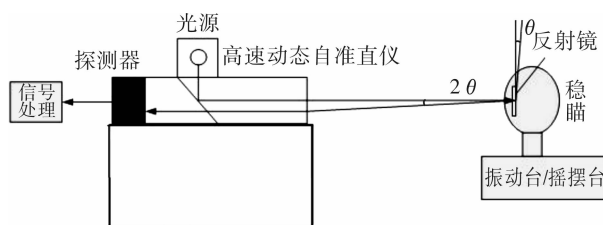


图3 稳定精度测试系统示意图

Fig.3 Framework for testing stability accuracy

2.1 高速动态自准直仪

根据测量系统方案, 初步选定西安光衡光电科技有限公司的高速动态自准直仪, 并针对系统的特性进行改进设计。此高速动态自准直仪使用了线阵 CCD 作为探测器, 在对光电稳定跟踪系统进行测量时, 线阵 CCD 是对方位和俯仰分别进行测量的。线阵 CCD 先对方位进行测量, 如果出现俯仰偏转, 这时线阵 CCD 是探测不到数据的, 再对俯仰进行测量时如若出现方位的偏转, 线阵 CCD 也是无法探测到的。基于此种原因, 必须将线阵 CCD 更换为面阵 CCD。该装置改用了 1/2 英寸 (1.27 cm) 格式大面阵 CCD 探测器, 型号为 FTM50, 具有高分辨率、高感光度, 抗晕性能好等特点。FTM50 型 CCD 的主要性能参数如表 1 所示。

表1 CCD产品(FT50M)相关特性参数

Table 1 CCD-related(FT50M)parameters

分辨率/像元	1 024×1 024
探测器类型	面阵 CCD
像素尺寸/ μm	5.6×5.6
数据率/MHz	2×60
最大帧速率/($\text{f} \cdot \text{s}^{-1}$)	100
响应率/($\text{V} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1700
动态范围	>67 dB,线性
操作温度	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~ +60 $^{\circ}\text{C}$

从表1可知,FT50M的像素尺寸为 $5.6 \mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$,高速动态自准直仪器的焦距是200 mm,结合测量精度要求,根据(3)式得到:

$$\alpha = 5.6 \times 10^{-6} / 2 \times 0.2 = 14 \mu\text{rad} \quad (4)$$

可以看到FT50M探测器达到 $14 \mu\text{rad}$ 级,再经过图像处理之后会更小。本文针对两轴两框架稳瞄系统的稳定精度测试需求开展研究工作,两轴两框架系统的稳定精度通常在 $50 \mu\text{rad} \sim 100 \mu\text{rad}$ 之间,稳定精度按 $50 \mu\text{rad}$ 考虑,所以远小于 $50 \mu\text{rad}$,此探测器满足要求。

2.2 信号处理

信号处理流程如图4所示。

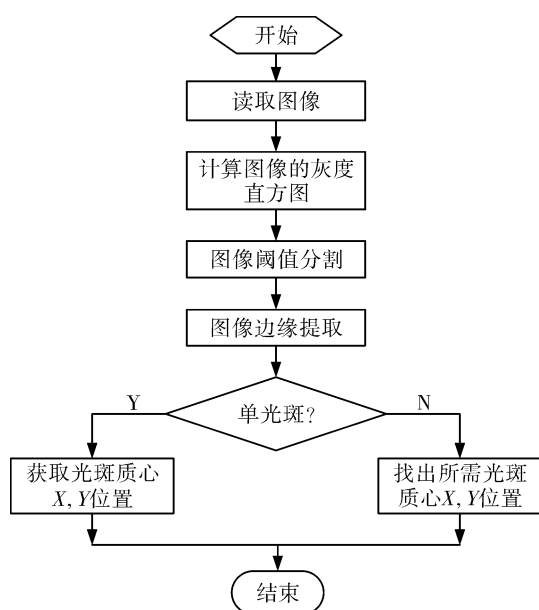


图4 信号处理流程图

Fig. 4 Flow chart of signal processing

质心法图像预处理算法一般包括:灰度值的计算、图像半阈值化、图像边缘提取,最后根据质心法计算质心。

1) 计算图像灰度值

对应于每个灰度值,求出图像中具有该灰度值像素数的图形叫做灰度值直方图。直方图是表达图像灰度级分布情况的统计表,但直方图不提示像素的具体位置。由于直方图能够直观地表征图像特性的信息,因此在图像处理中起着非常重要的作用,可以用来作为图像数字化的参数和确定分割图像阈值的依据。

2) 图像半阈值化

半阈值法,即将灰度级低于某一阈值的像素灰度变换为0,而其余的灰度级不变,仍保留原来的灰度值^[6-7]。其处理方法如下:

全局阈值是根据整幅图像 f 确定的:

$$B = B(f) \quad (5)$$

式中 B 为图像阈值。

设图像目标为 I , I 中的每一个像元 $I(i, j)$ 与阈值 B 相减,结果大于 B 值的像素灰度保持不变。结果小于 B 值的为“0”。设 $f(i, j) = I(i, j) - B$,则有:

$$f(i, j) = \begin{cases} f(i, j) & I(i, j) \geq B \\ 0 & I(i, j) < B \end{cases} \quad (6)$$

3) 图像的边缘检测

图像边缘提取是测量的基础和关键。首先,对经过半阈值化处理后的图像生产一幅矩阵数据表;随后,对这幅图表在 X 和 Y 方向各进行一次卷积,采用的算子为一种较为常用的Sobel算子,图5所示为Sobel算子,得到两组数据表;再将这两组数据进行相应取最大值运算,可用公式表示如下:

$$f_0(i, j) = \max[f_X(i, j), f_Y(i, j)] \quad (7)$$

式中: (i, j) 为数据表中的 X 和 Y 方向相应单元格坐标; $f_X(i, j)$, $f_Y(i, j)$ 分别为第一和第二组数据表中 (i, j) 处的数据。

-1	0	+1
-2	0	+2
-1	0	+1

f_x

+1	+2	+1
0	0	0
-1	-2	-1

f_y

图5 Sobel边缘检测算子

Fig. 5 Sobel edge detection operator

最后,查找到的一个最大的 $f_0(i, j)$ 必为边缘像素,取以 $f_0(i, j)$ 中心的3像素×3像素为单元,

对比 $f_0(i, j)$ 周边值, 找到其中的最大值作为下一个边缘点。如此下去, 直到边缘封闭为止。

4) 质心算法

本文采取传统质心求取算法。图像质心即图像灰度的重心, 设图像有 i, j 两个方向, m, n 分别为 i, j 方向像素的数量, $g(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的灰度值, 则图像质心位置坐标表达式如下:

$$x = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j) \times i}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)} \quad (8)$$

$$y = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j) \times j}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)} \quad (9)$$

3 试验结果

首先将自准直仪、计算机、电源等部件连接, 并将反射镜粘贴在被测系统上。其次, 测试前行初始对准, 必须通过调节安装夹具使红光激光束大致入射在测试反射镜几何中心位置, 以保证测试过程中入射光点始终落在测试镜上, 同时保证经过测试反射镜反射后的光点落在高速动态自准直仪 CCD 光敏面的中心点位置附近, 以确保测试光点的晃动落在器件线性度较好的区域。

对某型光电跟踪系统在室内进行动态稳定精度的测量, 并对其数据进行处理。对采集数据的处理分析: 首先对测量的图像数据进行了质心的求取; 其次将所有图像的质心作了线性拟合, 并对其去漂移过程; 再次, 将处理的结果作了一个均方根的计算, 得出稳定精度, 试验数据如表 3 所示。

表 3 结果数据表

Table 3 Datasheets of result

方向	方式	方位/urad	俯仰/urad
X 向	手动模式	20	15
	锁定模式	21	16
Y 向	手动模式	23	18
	锁定模式	37	32
Z 向	手动模式	38	24
	锁定模式	49	46

将各个方向两种工作模式下的方位和俯仰进行均方差处理, 即可以看出系统分别在 X, Y, Z 向

的两种工作模式下的稳定精度:

$$X_{\text{手}} = \sqrt{(20^2 + 15^2)/2} = 18 \mu\text{rad}$$

$$X_{\text{锁}} = \sqrt{(21^2 + 16^2)/2} = 19 \mu\text{rad}$$

$$Y_{\text{手}} = \sqrt{(23^2 + 18^2)/2} = 21 \mu\text{rad}$$

$$X_{\text{锁}} = \sqrt{(37^2 + 32^2)/2} = 35 \mu\text{rad}$$

$$Z_{\text{手}} = \sqrt{(38^2 + 24^2)/2} = 32 \mu\text{rad}$$

$$Z_{\text{锁}} = \sqrt{(49^2 + 46^2)/2} = 48 \mu\text{rad}$$

4 结论

本文提出一种以光学自准直原理为主要技术的稳定精度测试方法, 完成了基于光学自准直技术的测试研究。从实验结果可以看出, 测试 $50 \mu\text{rad}$ 级两轴两框架系统的稳定精度, 测出最大稳定精度为 $48 \mu\text{rad}$, 所以本测试系统能满足 $50 \mu\text{rad}$ 级两轴两框架系统的动态稳定精度测试需求。

参考文献:

- [1] Ji Ming. Research on high accuracy stabilization technology for integrated multi-spectrum electro-optical system[J]. Journal of Applied Optics, 1996, 17(3): 55-60.
纪明. 多频谱光电综合系统高精度稳定技术研究[J]. 应用光学, 1996, 17(3): 55-60.
- [2] Lu Peiguo, Shou Shaojun. High accuracy tracking technology and its application in ship-borne electro-optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 16(11): 21-23.
陆培国, 寿少峻. 舰载光电系统高精度跟踪控制技术[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 480-483.
- [3] Li Zhiqiang, Xu Zhaolin, Xu Jingshuo. Airborne electro-optical tracking control system design platform[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(11): 21-23.
黎志强, 徐兆林, 徐景硕. 机载光电跟踪平台的控制系统设计[J]. 电光与控制, 2009, 16(11): 21-23.
- [4] Liu Zhongjie. Military optical systems development review[J]. Laser Technology, 2009, 32(4): 28-32.
刘中杰. 军用光电系统发展综述[J]. 激光技术, 2009, 32(4): 28-32.
- [5] Chen Xilin, Fu Yusong, Yu Xunkai. Status airborne electro-optical targeting system and development[J]. Infrared Technology, 2004, 26(2): 52-55.
陈希林, 傅裕松, 尉洵楷. 机载光电瞄准系统的现状及发展[J]. 红外技术, 2004, 26(2): 52-55.
- [6] Xu Yan. Threshold segmentation method of micro-

- scopic image[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5):745-747.
- 许艳. 显微图像阈值分割算法的研究[J]. 应用光学, 31(5):745-747.
- [7] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image processing, analysis, and machine vision[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [8] Wu Zhengyi. Test technology and testing signal processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.
- 吴正毅. 测试技术与测试信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1991.
- [9] Bristow M P, Bundy D H. Signal linearity, gain stability, and gating in photomultiplier[J]. Application to Differential Absorption Lidars, 1995, 34(21):4437-4452.
- [10] Bristow M P. Lidar signal compression by photomultiplier gain modulation influence of detector nonlinearity[J]. Application to Differential Absorption Lidars, 1998, 37 (27):6468-6479.
- [11] Concannon B, Contarino V M, Curran T P. Adjustable dynamic signal compression by photomultiplier space charge control[J]. SPIE, 1990, 1302:421-432.
- [12] Billard B, Wilson P J. Sea surface and depth detection in the wrelads airborne depth sounder[J]. Applied Optics, 1986, 25(13):2056-2066.