

基于线阵 CCD 的弹道同步式狭缝摄影系统

李金珂^{1,2}, 陈良益¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用高速线阵 CCD 代替传统的胶片, 提出了一种新型的狭缝摄影系统, 并对系统的原理及组成进行论述。当被测弹体速度小于 500m/s, 弹体长度大于 500mm, 章动角不小于 5° 时, 系统测角精度达 0.9‰, 可满足靶场弹道测量要求。实现了弹道参数测量的自动化, 对改进靶场测量具有重要的意义。

关键词:狭缝摄影; 线阵 CCD; 弹道测量

中图分类号: TB872 **文献标识码:** A

A Slit Photography System Based on Linear CCD

LI Jin-ke^{1,2}, CHEN Liang-yi¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

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

Abstract: Analyzed an electronic high speed slit camera system with linear CCD instead of traditional film and discussed the principle and structure of the whole system. It can measure motional parameters, such as leeway, nutation angle, spin angle and velocity, of high speed cannonball. The measuring precision of angle is 0.9‰, which can satisfy the demand of ballistic trajectory measuring. And the automatic measuring system is significant for the gunnery range measurement.

Key words: slit photography; linear CCD; ballistic trajectory measuring

1 引言

弹丸在发射过程中, 其外弹道初始段的姿态和运动参数对于炮弹的整个飞行过程都有直接影响。因此, 对弹丸外弹道初始段参数的测量在常规武器试验中具有重要意义。

在常规武器试验中, 目前还是采用胶片式狭缝摄影机将弹丸飞行过程拍摄下来, 然后对胶片进行人工定性和定量的计算与分析。这一过程费时费力, 而且对仪器操作者以及胶片判读人员的实际经验要求较高, 已不能满足现代武器试验的需要。

针对胶片式狭缝摄影机的这一缺陷, 本文提出了一种新型的全电子式高速线阵 CCD 狭缝摄影系统。它以高速电荷耦合器件 CCD 作为图像传感器, 采用大容量的集成快速缓存芯片作为存储媒介, 结合经典的狭缝摄影技术, 与计算机构成新型测量系

统, 能够实现对快速运动弹体的偏航、章动、自旋、飞行速度等多种运动参数的实时测量。

2 工作原理

狭缝摄影是一种特殊的摄影技术, 它是利用成像面的运动来补偿目标的高速运动(通过成像面附近的狭缝控制底片的感光), 从而获得一幅大尺寸、清晰的运动目标的扫描图片, 供观察者分析。这种扫描是两维的, 其中一维坐标反映目标的空间信息, 另一维反映目标的时间信息。

线阵 CCD 狭缝摄影机的工作原理与经典的胶片式类似, 都是利用被测弹体自身的运动形成一维时间扫描信息, 故两者前端的光学系统也相同。不

作者简介: 李金珂(1984-), 女, 在读硕士, 研究方向为光电探测及靶场测量。E-mail: keer4555@163.com

收稿日期: 2008-09-02

同点在于经典的胶片式狭缝摄影机是通过机械装置带动胶片运动来进行另一维扫描,获取弹体空间信息。而线阵 CCD 系统则不需要机械扫描系统,CCD 的自扫描功能将实现另一维空间信息的获取。由线阵 CCD 代替胶片来实现光电转换从而读取弹体像面上的空间信息,并将电信号输出至存储器。当一幅图像扫描完后,再将存储器中的信号按时序排列,构成一幅完整的弹体图像,供计算机处理。

其具体工作原理如图 1 所示,可分为两步:

第一步:弹丸图像扫描阶段。弹丸以速度 v 垂直飞过线阵 CCD 视场,弹丸的截面 aa' 经物镜成像在 CCD 的光敏像元上,经光电转换和二值化处理,得方波信号,由数据采集系统将这些信号采集并存储;下一个 CCD 扫描周期,弹丸 bb' 截面进入 CCD 狭缝视场,CCD 相机将 bb' 的像存储下来。这样一条条弹体截面的拍摄,直到弹丸全部飞离 CCD 视场为止,共存储 n 条弹丸截面影像的信息,可以组成一个完整的弹丸图像。

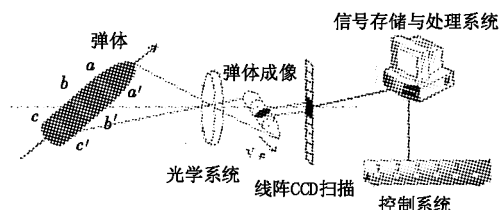


图 1 线阵 CCD 扫描原理示意图

第二步:弹形再现及参数计算阶段。数据采集卡将 CCD 对飞行弹丸扫描所得的信息、数据全部存储后,传输给计算机,由计算机对数据分析、处理,再现弹丸轮廓。纵坐标为像元阵列,横坐标为扫描时间。先取第一截面线 aa' ,再取第二截面线 bb' ,依次类推至最后截面线 nn' ,然后,将截面线的上下端点依次平滑连接,便初现弹丸的轮廓。接着对纵、横坐标进行变换,并对图像进一步处理,便可重现弹丸影像。由计算机对这些图像信息进行运算、处理,得到最后所需的飞行参数。

3 系统设计

系统的组成如图 2 所示。

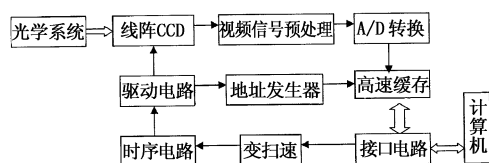


图 2 系统组成框图

3.1 线阵 CCD 芯片

由于被测对象自身进行着高速运动,所以要求我们在选取线阵 CCD 芯片时要考虑以下几个参数:工作速率、分辨率、灵敏度和动态范围。要能记录快速运动的目标,就要求 CCD 有很高的扫描速度;要测量目标运动姿态,就要求摄影系统有较好的扫描图像细节再现能力,因此 CCD 应有较高的分辨率;另外,由于器件工作频率高,故光积分时间短,只有选用灵敏度高,动态范围大的 CCD 才能保证输出视频信号不被淹没于暗电流噪声中,确保扫描图像的质量。

本系统选用美国 EG&G Reticon 公司生产的超高速线阵 CCD 芯片 RL1288D。它具有 1024 个有效像元,像元尺寸为 $11\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$,行扫描周期 $4.86\mu\text{s}$,最大像面扫速为 3.7m/s ,每个通道的最高读出频率为 15MHz ,16 路并行视频输出通道,高达 240MHz 的等效读出速率。

3.2 光学系统

根据系统的技术指标要求,要能够捕捉到高速运动弹体,光学系统必须具有大视场。若物方视场按机械式狭缝相机的指标取 2.5m ,可算出镜头的放大率为: $\beta = \frac{2.5}{1024 \times 18 \times 10^{-6}} \approx 135.63$ 。则由 RL1288D 可达到的最大像面扫速 3.7m/s ,能推算出系统在同步扫描的情况下可记录炮弹的最快速度为 $v = 3.7 \times \beta \approx 502\text{m/s}$ 。同时,对于速度越高的弹体,CCD 的光积分时间越短,像面所需要的照度也就越大,光学系统应具有高透过率。适当的时候还应加入主动照明装置。

3.3 芯片驱动及信号采集系统

主要包括时序电路、驱动电路、视频信号预处理、高速缓存及变扫描。

其中,时序电路用于提供 CCD 正常工作时所需的一组时序脉冲,以保证把 CCD 像元中的信号电荷按一定的规律转移到输出端,并在输出端形成视频信号电压;驱动电路是时序电路与 CCD 传感器之间的电学接口,它把各路时序脉冲转变为 CCD 正常工作要求的波形和幅度;通过视频信号预处理对 CCD 输出的原始信号进行必要的处理和适当的放大,以使输出信号具有一定的信噪比和幅度;经视频预处理后的 CCD 一维模拟信号,必须经过高速的图像采集转换为数字信号,才能输入计算机进行处理;另外,由于狭缝摄影原理中重要的一点是被摄目标在扫描相机像面上的移动速度要与线阵 CCD 的像面

扫速保持一致,只有这样,才能得到一张目标按一定比例缩小的像,否则,所得到的扫描图像将会失真。因此需要操作人员根据被摄目标的不同运动特征通过变扫描来调整 CCD 扫描频率(通过改变主时钟频率)。

3.4 计算机及其外围设备

通过计算机对采集的 CCD 图像数据进行存储、分析、计算等处理,同时对系统进行控制和监测,并显示、打印扫描图像和测量结果。

4 高速数据采集系统设计

由于本系统要求最高达到 15MHz 的转换速率,并且 16 路同步采集,因此数字信号的采集和存储部分是系统能够实现的关键。图 3 为 16 路处理系统中一路的结构,其他 15 路与此结构基本相似,只是控制信号不同。

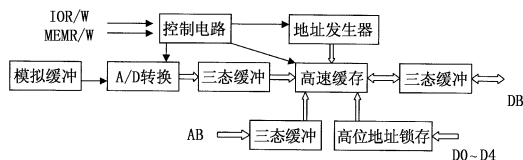


图3 数据采集系统原理框图

在超高速的采集系统中,数据的采集速率大于 PC 系列微机系统总线的最高传送速率,在这种情况下必须在系统采集电路中加入存储器缓存,即采用帧存储方式实现 CCD 视频信号的高速采集。该方法是由硬件控制 A/D 转换,快速将视频信号转换为数字量后,先暂存在外部存储器里,待全部数据采集完成后,再由微机从缓存中读出所需数据,去作进一步处理。

本系统中采用三存储区结构,一个区接收新采集数据,一个区与处理系统相连正在进行处理,还有一个区向主机内存到数据。下一个时间间隔三区轮转,新数据转到与处理系统相连,处理后的数据转到系统总线,向主机导入数据,已空的存储区转到采集电路,接收新的数据。可以满足高速实时数据采集。

同时,由于本系统采用的 A/D 转换器需要负极性的模拟输入信号,且范围在 $-2.0 \sim 0V$ 之间,而前级视频预处理的输出信号在极性和幅值上与其均不匹配,故在采集系统前端还应加一个反向放大器。在本系统中,可选用 AD 公司的高速低功耗运算放大器 AD817。

5 弹丸参数计算及精度分析

通过上述方法得到高速运动弹丸的图像后,具体的弹道参数计算方法与传统的胶片式狭缝高速摄影系统类似。现以章动角的计算为例,对系统的理

论精度进行分析。

所谓章动角(如图 4 所示),即飞行中弹丸的轴线与其质心速度方向的夹角。章动角越小,弹丸飞行稳定性越好;随着章动角的增大,弹丸落点散布增大。因对章动角的测量成为弹丸飞行姿态研究中的重要任务。

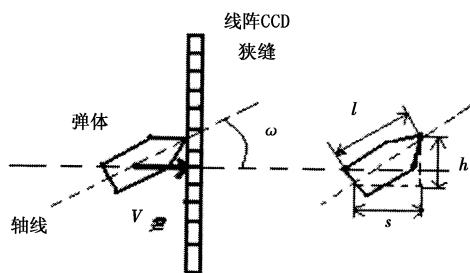


图4 章动角原理图

本系统采用弹道同步式扫描摄影法,所选取的高速 CCD 芯片其有效像元数 $n = 1024$,像元尺寸为 $11\mu m \times 18\mu m$,像元中心距为 $18\mu m$,在保证线阵 CCD 狭缝与像速度方向垂直,且 CCD 扫描速度与像速度相等的情况下,假设弹丸的章动角为 ω ,弹丸的标准像长为 l ,水平投影为 s ,垂直投影为 h ,则:章动角为:

$$\omega = \arctan \frac{h}{s} \quad (1)$$

对式(1)微分,得:

$$\begin{aligned} d\omega &= \frac{1}{1 + (h/s)^2} \left(\frac{1}{s} dh - \frac{h}{s^2} ds \right) \\ &= \frac{1}{s^2 + h^2} (s dh - h ds) \end{aligned} \quad (2)$$

由此可得,章动角的测量误差均方值为:

$$\sigma_\omega = \frac{\sqrt{(s\sigma_h)^2 + (h\sigma_s)^2}}{s^2 + h^2} \quad (3)$$

将 $s = l \cos \omega$, $h = l \sin \omega$ 代入式(3),可得相对误差为:

$$\frac{\sigma_\omega}{\omega} = \frac{\sqrt{(s\sigma_h)^2 + (h\sigma_s)^2}}{l^2 \omega} \quad (4)$$

其中,弹丸像的水平 and 垂直方向长度误差 $\sigma_s = \sigma_h = 18\mu m$,摄影放大率 $\beta = 135.63$ 。

当章动角为 10° 时,章动角测量相对误差与弹长的关系如表 1 所示。

表1 弹长与测角精度的关系

(单位:mm)

弹长	200	300	400	500	600	800	1000	2000	3000
测角精度/%	1.2	0.81	0.61	0.49	0.41	0.31	0.24	0.12	0.08

图 5 为在章动角取 $0.5^\circ \sim 15^\circ$,弹长取 100 ~ 3000mm 时,系统测角相对误差的三维图。

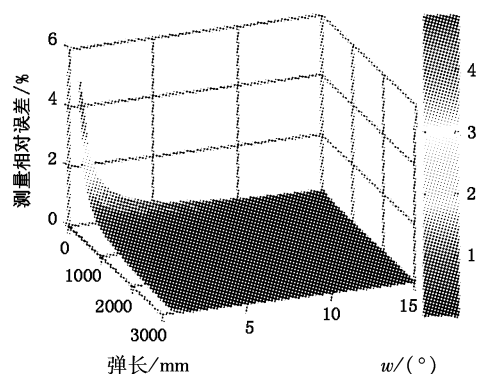


图5 不同章动角和弹长时测角相对误差

可见,随着弹长的增加,系统的测角精度越来越高,当弹长大于 500mm 后,精度提高的速率逐渐放缓;同时,章动角的大小对测量精度也有着很大影响,章动角越大,测量精度越高,当章动角大于 5° 后,测量精度基本保持不变,主要受 CCD 像元尺寸制约。

4 结 论

本文提出的线阵 CCD 狭缝摄影系统可以弥补传统狭缝摄影的缺陷,能快速准确的获取运动弹丸图像,实现了弹道初始参数的自动测量。在弹长大于等于 500mm,章动角大于等于 5° 的情况下,测角

精度达 0.9‰,能满足靶场弹道测量要求。但由于系统的测量精度受到 CCD 像元尺寸以及扫描速度的限制,在一定的芯片扫描速度内,只能有效测量 $v \leq 500\text{m/s}$ 的运动弹体。若进一步提高 CCD 芯片扫描速度,减小像元尺寸,可以拓展本系统的应用范围,进一步提高精度。

参考文献:

- [1] 张三喜,薛以辉,卢宇. 狭缝摄影胶片图像运动参量测量和处理[J]. 光子学报,1999,25(12):9-12.
- [2] 安振军,王敏,胡绍林,等. 外弹道测量数据采集与处理技术[J]. 飞行器控制学报,2005,18(2):55-58.
- [3] 刘文,苏秀琴. CCD 测量系统实现及其实时性讨论[J]. 光子学报,2002,31(6):774-777.
- [4] 李华,雷蕾,常和民,等. CCD 立靶对暗弱高速飞行弹丸的捕获研究[J]. 光子学报,2008,37(6):1238-1241.
- [5] 李江昊. 线阵 CCD 信号采集与处理系统研究[J]. 微处理器,2008,2:138-143.
- [6] 艾莉莉,袁峰,丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标姿态测量系统[J]. 光学精密工程,2008,16(1):161-165.