

文章编号 1004-924X(2001)04-0339-05

# 阵列式弹道测量系统

徐卫<sup>1</sup>, 张明慧<sup>1</sup>, 张尧禹<sup>2</sup>

(1. 空军长春飞行学院计算机教研室, 吉林 长春 130022;  
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:**叙述弹道测量阵列的构成原理及相应测量理论。主要介绍弹道光电测量系统、计算机控制系统的硬件实现。同时也阐明了系统的算法及软件编程思想。每个测量子系统自成体系,即可独立工作又可按使用要求组成阵列。根据测量对象信号的特点,本系统不采用A/D变换器。经实验证明该系统具有一定的实用价值。

**关键词:** CCD; 信号检测; 数字信号处理; 弹道测量  
**中图分类号:** TJ06 **文献标识码:** A

## 1 引言

对常规武器系统来讲,弹道及着靶点的测量是武器的研制和校验所必须的。在弹道测量中往往测出一些轨迹点加上弹着点就可以反映出弹道的特点、或用曲线拟和的方法求出弹道曲线。本课题正是基于这种思想以  $N$  个(可灵活地按要求增减)测试点组成测试阵列,各测试点协同工作来完成测试任务。

## 2 测量阵列的组成

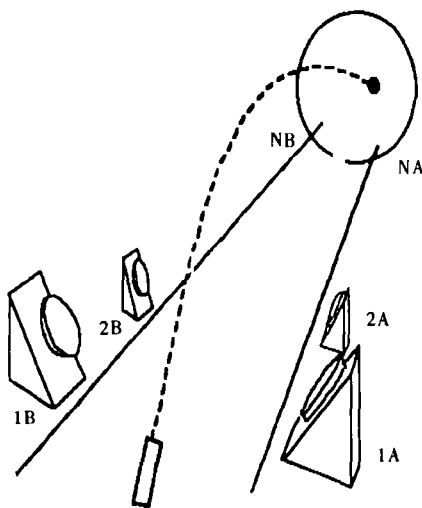


Fig.1 Overall arrangement of the measuring array

如图1所示,光电探头按弹头所经路径依次排开。其中探头1A和1B作为一对,属于测量子系统1;2A与2B为一对,属测量子系统2;依此类推。测量子系统之间是等间隔放置的,这样是为了数据处理比较方便。当然,也可以在射程内感兴趣的区域密集排列。系统采用实时采样,后期集中处理的数据处理方法。当弹头飞过某个子系统时,光电探头对它的位置进行采样,采样数据存入子系统的单片机中并在子系统中进行数据预处理。子系统的数据采集结束后,经485总线输送回主控计算机。主控计算机按时间顺序对采样数据进行排序,再进行曲线拟合,求出弹头的运动曲线。进行弹头的飞行动力学分析等。

## 3 测量系统的组成

### 3.1 测量系统总图

图2是主控计算机与测量子系统的通讯图,它给出主控机与测量子系统的通讯联系方式。主控计算机是一台通用计算机带一485总线通讯卡,该卡可连接多个测量子系统,最大通讯距离1200m。该系统可满足一般轻武器的弹道测量任务。当需要进一步扩大测量范围时,可采用线路中继器增大通讯距离。

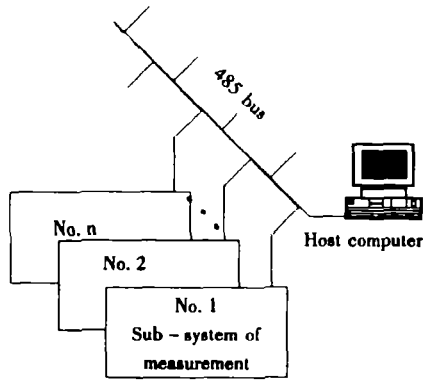


Fig.2 Communication diagram

### 3.2 测量子系统的组成

测量子系统包括光学系统、线阵 CCD 摄像机、视频信号处理电路、信号采集电路、DSP 单片机系统。单片机系统中设计了实时时钟电路,以便为系统采样数据按时间作标记。当单片机存储数据时,都后跟一个时间信息。因为弹头运动的连续性,在主机作数据处理时,可根据时间信息剔除部分干扰信号。

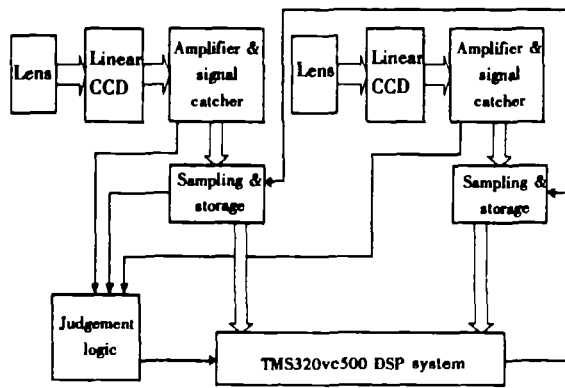


Fig.3 Measuring subsystem

测量子系统框图如图 3。测量子系统以一个 TMS320 系列 DSP 组成的单片机系统控制着 A、B 两个探头。一旦 A、B 探头同时发现目标,信号放大提取电路就会向判断逻辑电路发出信号,判断逻辑电路向单片机系统发出中断请求。单片机响应中断,记录实时时钟的时间,并启动采样存储电路工作。采样电路的采样点数可由单片机预置;达到数量后,采样电路向单片机发回结束信号,单片机将采样点数据由采样存储电路取回单片机系统。因不同的弹速及不同的弹道高度,各测量子

系统采得的有效采样点数是不同的,测量子系统的软件要对采样数据作预处理,最后将数据送回主计算机。

### 3.3 信号放大提取电路组成

试验一般是针对单发弹头进行的。分析表明,当线阵 CCD 的放置方向与弹头前进方向垂直时,有效采样行的行信号是在背景噪声下的一个单脉冲信号,如图 4 中信号 1 所示。此脉冲即弹头在 CCD 上的“像”。因为 CCD 摄像机都是按固定上仰角拍摄,晴天时天幕背景下弹头的“黑电平”脉冲非常突出。用一套放大、比较和整形电路很容易将其提取出来。信号放大提取电路的原理图见图 5。图 4 中的信号 1 是线阵 CCD 的视频输出,作为图 5 反向放大器  $A_1$  的输入  $V_{in}$ 。调节  $R_1$  和  $R_f$  可调节  $A_1$  的放大倍数。图 4 中信号 2 为  $A_1$  的输出,此信号加到比较器  $A_2$  的同向输入端。比较电压  $3(V_t)$  加入  $A_2$  的反向输入端。 $A_2$  是由运放组成的比较器,比较电压  $V_t$  可通过  $R_3$ 、 $R_4$  来调节。 $A_2$  同时担任电压转换作用,当  $V_{o1} > V_t$  时,输出接近电源电压  $V_{cc}$ ;当  $V_{o1} < V_t$  时,输出接近零电平。 $A_2$  的输出  $V_{o2}$  波形见图 4 信号 4。图 5 中  $G$  为一门电路,起整形作用,输出波形见图 4 信号 5。

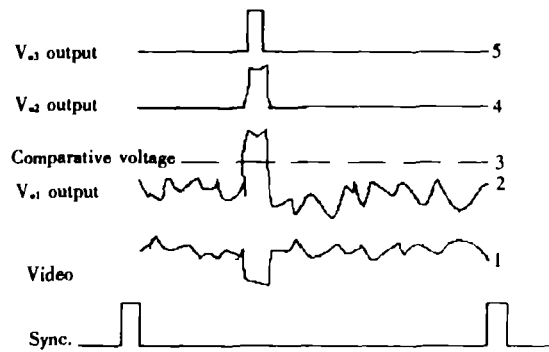


Fig.4 Waveform of video processing

### 3.4 采样存储电路的组成

对本系统有用的信号只是图 4 中信号 5 的单脉冲与行同步信号之间的相对位置,即测出脉冲信号在线阵 CCD 的第几个像素产生就完成了采样任务(详见测量原理部分)。线阵 CCD 采用松下 MN8061A, 2592 像素,主频 10MHz。CCD 视频信号经以上处理后,求其像素位置已变得简单。完全可以用一个运行在 10MHz 的 12 位同步计数

器将其测出。该计数器由两片 74F393 组成。行同步信号将其清零并开始计数,用信号 5 的单脉冲即可将像素位置锁存下来。再由硬件的存储器控制电路将此数据写入高速 RAM 中。此电路相当于每行 262.8s 采样一次。弹头在 CCD 一行内被采下多组数据并在 CCD 视场内被多次采样。RAM 采用两片 62128 (16k × 16bit) 作为一组。62128 读写时间为 70ns,一行内连续采样时,数据间隔是 100ns,完全可以满足要求。62128 的读写控制电路包含可预置地址发生器,由 4 片 74F161 同步计数器组成,经 DSP 单片机置数后,可控制采样次数。一行内的采样数据取中间值作为有效的数据,也就是求出弹头投影的中心点。

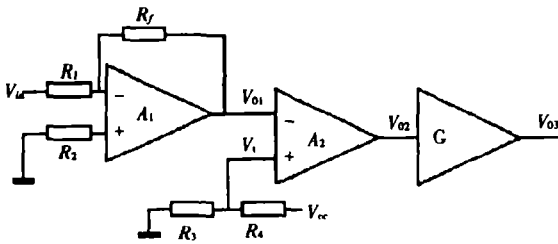


Fig.5 Amplifier & signal catcher

### 4 测量原理

测量原理见图 7。在坐标系 YOZ 中对称于 y 轴放置两个测头。其中 cd 表示线阵 CCD,ef 表示光学系统。 $h$  为弹头穿越 YOZ 平面时的空间位置。由光学镜头的成像原理可知,当  $h$  点位置发生变化时(只要不在  $g_1h$  直线上),它的像点  $h_1$  就会发生变化;同理,它在另一侧 CCD 摄像机上的像点  $h_2$  也会发生变化。在摄像机的视场角内,像点  $h_1$  在 cd 上的位置可反映  $h$  点的位置。本系统选择  $g_1$ 、 $g_2$  作为测量参考点,只要求出  $g_1h$  和  $g_2h$  两条直线方程,就可求出  $h$  点的平面坐标  $y$  和  $z$ 。

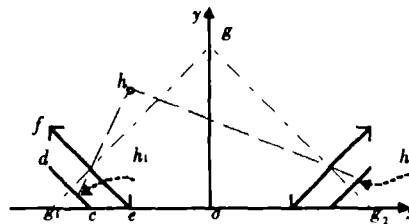


Fig.7 Schematic of measuring theory

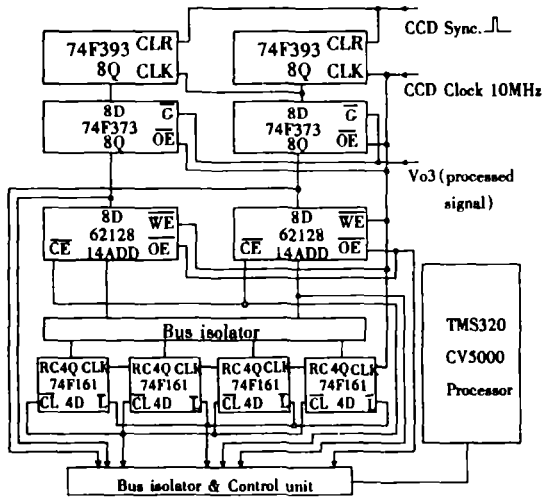


Fig.6 Sampling and storage circuit

采样存储电路原理框图由图 6 所示。采样结束后,数据存放在两片 62128 中,TMS320 计算机通过开放总线隔离器便能直接存取这两片 RAM。图 6 中只画出一个探头的电路,另一个探头的电路与之相同,TMS320 计算机对其处理方法也相同。TMS320 计算机通过对两探头采样数据的计算就可求出弹头的空间坐标。

因镜头成像的非线性, $h$  点位置与其像点  $h_1$ 、 $h_2$  的关系须由实验测得。为了方便,实验是在地面上进行的,原理仍可见图 7。这时  $y$ 、 $z$  两轴均贴于地面,两个摄像机按图示放置。用一红外光源沿着平行于  $z$  轴的方向步进,每进一步,CCD 采样一次。经多次实验和计算,可总结出像点  $h_1$  在线阵 CCD 上的位置与直线  $g_1h$  斜率的关系。同理可得直线  $g_2h$  的斜率。在 TMS320 计算机 ROM 中存放着像素位置与该参考直线斜率的表格,TMS320 计算机就是根据这一表格将采样数据变换成了参考直线斜率。

实际测量时,参考点  $g_1$ 、 $g_2$  的位置已固定,即参考直线的截距已知。根据两参考直线的截斜式方程可解出  $h$  点的坐标  $y$ 、 $z$ ,而  $h$  点的  $x$  坐标即发射点到测头的距离,是已知量。

设像点  $h_1$ 、 $h_2$  的采样数据分别为  $n_1$ 、 $n_2$ ,经查表得对应斜率为  $f(n_1)$ 、 $f(n_2)$ ;参考直线的截距分别为  $g_1$ 、 $g_2$ ;则  $h$  点坐标  $y$ 、 $z$  可由以下方程组 (1) 求得。

$$\begin{cases} y = f(n_1)z + g_1 \\ y = f(n_2)z + g_2 \end{cases} \quad (1)$$

## 5 数据处理方法

### 5.1 采样数据的抗干扰算法

本系统作为以 CCD 为基础的采样测量系统,首先要处理的问题是消除干扰。DSP 计算机系统要对多组采样数据进行筛选,因弹头运动的连续性,在一组采样数据中出现跳跃的数据显然是不可能的,应剔除这样的数据。前已述及每组采样系统的有效采样点个数是有差别的,而对每一个采样系统来说,采样点相对与测头都是扇型分布的,因此位于中间的采样点具有较高的可信度(更接近  $yoz$  平面上的  $h$  点)。这是由系统的结构和弹头的运动规律决定的。DSP 先对采样数据进行加权平均计算,对处于中心的采样点给予较大的加权值。加权运算按式(2)进行。

$$\begin{cases} n_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \\ y_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{ij} \\ z_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^n w_{ij} z_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

DSP 系统无法识别数据的真假,它只是将每一组采样数据进行计算,求出被测点的空间坐标,然后将其传给主计算机。主计算机需要对数据进行二次滤波,依据是弹头运动的连续性。当主计算机接收到全部的采样数据后,可根据数据的时间序列和空间序列的连贯性将假采样点滤掉。

### 5.2 采样点的曲线拟和

主计算机获得的数据包含弹头的  $x_i, y_i, z_i$  坐标和时间  $t_i$ 。由这些量可求得弹头的速度曲线  $v = f(t)$ ,地面的投影曲线  $z = g(x)$ ,弹头高度变化曲线  $y = h(x)$ [弹道图]等。这些曲线的求取依据线性最小二乘法原理。对弹道拟和来讲,拟和多项式

的阶次不宜太高,阶次太高会使积累误差增大或计算不稳定。对于射程较大的实验数据,可采用分段拟和的方法,以增加精度。由弹道学可知,对速度曲线  $v = f(t)$  又必须作分段拟和。

因弹头的运动受风、气流和其自旋等因素的影响,其运动轨迹一般不是平面曲线。为简化数据处理过程,不进行多维空间的曲线拟和。这是由于  $z = g(x), y = h(x)$  已能反映弹头运动的动力学特征。应用中,常做的拟和是分段的二次拟和。在此,仅以一段采样数据做  $y = h(x)$  的拟和。根据曲线拟和的最小二乘法,令弹道曲线为

$$y = h(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (3)$$

式(3)中,  $a_0, a_1$  和  $a_2$  由式(4)确定。

$$\begin{cases} S_0 a_0 + S_1 a_1 + S_2 a_2 = T_0 \\ S_1 a_0 + S_2 a_1 + S_3 a_2 = T_1 \\ S_2 a_0 + S_3 a_1 + S_4 a_2 = T_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S_{K+j} = \sum_{i=1}^9 x_i^{K+j} \\ Y_K = \sum_{i=1}^9 y_i x_i^K \end{cases} \quad (j = 0, 1, 2, K = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

Ballistic sampling point of the artilleries (m)

$i$	1	2	3	4	5
$x$	500	1000	1500	2000	2500
$y$	41.7	75.8	101.5	117.8	123.5

由以上算法求得弹道方程为

$$x = 0.2328y^2 - 15.9635y + 785.3038 \quad (6)$$

表中的采样数据是多次试验的平均值,这是针对弹道的分散性而采取的措施。

由于本系统不包含机械运动部分,所以测量中无机械运动误差及机械运行延时。这不仅提高了系统的测量精度、降低了成本,也是从系统的快速性方面考虑的。

### 参考文献:

- [1] 邵德奇,王伟. 线阵 CCD 测量技术及其在马钢连轧坯测量中的应用[J]. 光学精密工程, 1999, 7(1): 130 - 133.
- [2] 张光明,王建军,郭立红. 经纬仪的自动星体标校[J]. 光学精密工程, 1999, 7(4): 105 - 110.
- [3] 易大义,蒋叔豪,李有法. 数值方法[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1987.
- [4] 王以铭. 电荷耦合器件原理与应用[M]. 天津:天津科技出版社, 1987.
- [5] Eden R C. GaAs integrated circuits and CCD for high speed signal processing[J]. Opt. Eng, 1981, 20: 947.

## Trajectory measuring array system

XU Wei<sup>1</sup>, ZHANG Ming-hui<sup>1</sup>, ZHANG Yao-yu<sup>2</sup>

- (1. Department of Computer, Changchun Aviation Institute of Chinese Air Force, Changchun, 130022, China;  
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The paper describes a formation principle of the trajectory measuring array and its corresponding survey theory. The implementation of this photoelectric trajectory measuring system and the hardware design of its computer control system are mainly discussed, including algorithm and programming steps. Every independent subsystem not only works by itself, but also forms an array system according to the demand. In light of the distinction of the useful signal, it is unnecessary to use an A/D converter. The tests have shown that this system is of practical value.

**Key words:** CCD; signal detection, digital signal processing; ballistic trajectory measurement

作者简介:徐卫(1962-),女,吉林省长春市人,1984年毕业于吉林工学院自动化专业。主要从事教学、光电检测系统和自动控制仪器仪表的研究工作。

## 《发光学报》(季刊)

### ——物理学类核心期刊

《发光学报》是中国物理学会发光分科学会主办的学术会刊,由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所承办。该刊以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年和2000年连续三次被“中文核心期刊要目总览”评为物理学类核心期刊。2000年被评为中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年始;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(PK)自2000年始已定期收录检索该刊论文。本刊内容丰富、信息量大主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为季刊,大16开本,100页,国内外公开发行。国内定价:每册9.00元。全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市人民大街140号

《发光学报》编辑部

邮 编:130022

电 话:(0431)5684692-2534

E-mail: fgxb@ciomp.ac.cn

国内统一刊号:CN-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:8-173

国外发行代号:4863Q

http://www.ciomp.ac.cn