

跟踪测量电视系统

宋建中 王廷杰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 本文是全计算机化红外、电视、电影经纬仪中电视分系统的研制报告。介绍了跟踪测量电视系统的主要技术指标、工作原理、系统的构成、室内外检测结果及今后改进的意见。

关键词: 电视系统; 全计算机化; 电影经纬仪; 跟踪测量;

1 概 述

1.1 本文所叙述的跟踪测量电视系统是车载移动式光电捕获跟踪定位系统的一个分系统。它本身也是一个数字化的通用的跟踪测量电视系统。它是中国科学院长春光机所研制的一种具有90年代国内先进水平的跟踪测量电视系统。

该系统由图像传感器、图像予处理、图像分析、图像显示、同步机、实时输出、字符产生、跟踪窗口和实况记录等九大部分组成。采用 CCD 摄像机做图像传感器,对进入视场的目标能自动捕获,自动跟踪,精确地自动测量目标的脱靶量并能实时输出,对跟踪测量的实况进行假彩色显示和录像。跟踪方式有“边缘”、“重心”、“相关”、“抗飞机拉烟”和“机转弹”五种方式。对从 2×2 象元到超出视场的大小目标均可以进行跟踪测量,相对于背景是亮的或是暗的目标也都可以跟踪测量。系统自动化程度高,操作简便,可靠性好。

为了满足用户特殊要求,还设计了具有4位台站号码和精度为10ms的时间码的显示功能。

该系统已随“车载移动式光电捕获跟踪定位系统”一起通过了室内、外检测验收并已正式移交给用户使用。

1.2 主要技术指标

1.2.1 光学系统

口径 $D=130\text{mm}$; 焦距 $f=1\text{m} \quad 2\text{m}$ 两档。

1.2.2 电视摄像机

CCD 像元数: $500(\text{H}) \times 528(\text{V})$

光敏面尺寸: $8.8(\text{H}) \times 6.6(\text{V})(\text{mm}^2)$

灵敏度: 靶面最低工作照度 0.25lX

扫描体制: 场频 50Hz ; 行频 15625Hz

1.2.3 电视测量性能

静态测量精度 $\sigma < 15''$ (均方值);

脱靶量纯滞后 25ms

非线性失真(全视场) $< 0.39\%$

1.2.4 电视跟踪目标的极限

目标像点在靶面上移动的最大线速度 $\leq 41.4\text{mm/s}$

1.2.5 跟踪方式

“边缘”;“重心”;“相关”;“抗拉烟”;“机转弹”

2 工作原理

2.1 电视测量的基本原理

电视视场中的景物和目标通过光学系统成像在电视摄像机的靶面上,这个光学图像是一个随时间 t 和波长 λ 变化的光强空间分布图,它可以表示为 $F(x, y, t, \lambda)$ 。由于电视摄像机的光电转换特性和光栅式扫描的原理,该光学图像被转换成按时间顺序传送的电信号 $f(t)$,并与行场同步、行场消隐信号混合成全电视信号由摄像机输出。在全电视信号中,只有消隐脉冲的正程才有图像信息输出。所以,电视测量的有效视场对应消隐脉冲的正程。若在靶面上以其中心为原点建立一个 $x-y$ 直角坐标系,并使电视视轴垂直于靶面,并通过原点,那么目标在视场中的角位置就与它的像点在靶面上的位置相对应。测出目标像点的位置 p 就可以得到目标偏离视轴的角度 $\Delta\theta$,这就是电视测量的基本原理。

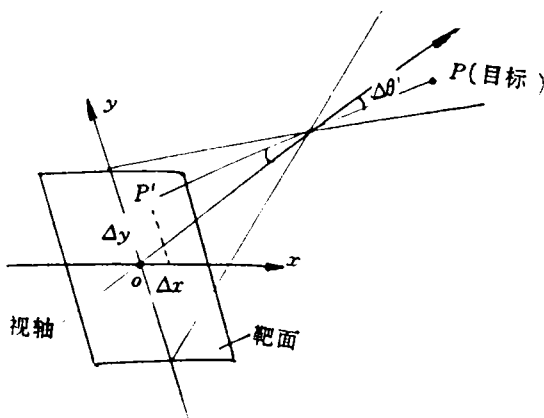


图1 电视测量原理示意图

2.2 电视跟踪的基本原理

如果目标偏离视轴一个 $\Delta\theta$ 角度,相应地在靶面上的像点 p 会有一个脱靶量 $(\Delta x, \Delta y)$ 。如果把这个脱靶量经过校正后送给经纬仪的伺服系统,控制经纬仪向减小这个偏差的方向转动,目标就会被拉到视轴附近。如果目标运动,经纬仪就会自动跟踪目标。

由于电视摄像机的扫描过程、信号处理和脱靶量计算都需要时间,所以电视测量系统的特性可以综合成一个有滞后的零阶采样保持电路特性(见图2)图中 Δt 为输出相对输入的滞后时间。

在自动跟踪过程中,电视测量系统是做为误差检测元件闭合在整个电视跟踪系统中(见图3)如果纯滞后为 Δt ,电视测量系统的等效传递函数为:

$$G(s) = k \cdot \frac{e^{-\Delta t s} (1 - e^{-Ts})}{s} \quad (1)$$

电视测量系统的这一滞后特性,对电视跟踪的性能影响很大,必须进行校正。

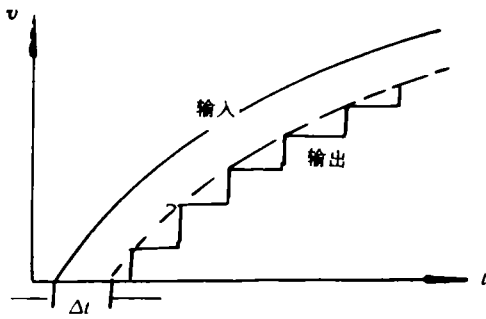


图2 有滞后的另阶采样保持特性

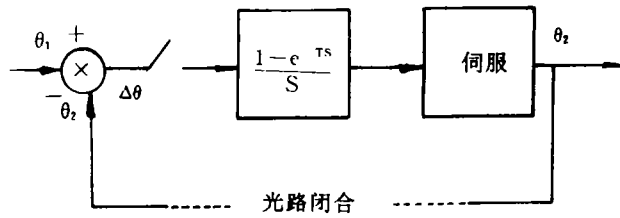


图3 电视跟踪系统示意图

电视跟踪时,跟踪点选在目标的不同位置,构成了不同的跟踪方式,从而具有不同的跟踪性能。本文介绍的电视跟踪有“边缘”、“重心”、“相关”、“抗飞机拉烟”和“机转弹”五种跟踪方式。

2.2.1 边缘跟踪

以目标信号的前沿或后沿或边缘上某一点为跟踪点的跟踪方式叫边缘跟踪方式。边缘跟踪的优点是脱靶量计算简单、响应快,在某些场合(如要求跟踪目标的左上角或右下角等)有其独到之处。缺点是跟踪点容易受干扰,跟踪随机误差大,不适合跟踪复杂背景中的目标。在本系统中,边缘跟踪方式用于捕获目标。

2.2.2 重心跟踪

以目标图像的灰度分布重心为跟踪点的跟踪方式叫重心跟踪方式。若在 $N \times N$ 像元的图像中,目标像在 (x, y) 点的灰度值为 $f(x, y)$, 则目标图像的灰度重心由(2)式给出:

$$x_c = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N x \cdot f(x \cdot y)}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x \cdot y)}, \quad y_c = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N y \cdot f(x \cdot y)}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x \cdot y)} \quad (2)$$

因为计算重心的过程是统计平均的过程,它算出的跟踪点是整个目标图像中所有像元灰度加权平均的位置,所以重心跟踪方式比边缘跟踪方式的随机误差小,测量精度高。

当目标图像二值化之后, $f(x, y)$ 取值只有0或1,这时按(2)式算出的是目标像的轮廓所构成的图形的几何中心,也叫形心。一般说形心与重心略有差别(如图4所示)。图中 x_c 为重心, x_0 为形心, V_0 是二值化阈值。

2.2.3 相关跟踪

相关跟踪方式采用模板匹配原理,以匹配点为跟踪点。相关跟踪的特点是在目标处于复杂背景中,难以很好地与背景分离时,能有效地自动跟踪目标。比如从空中俯视地面时,操作手可以指定一个包含于定目标的参考图,采用相关跟踪方式对予定目标进行自动跟踪。实时图由 $(M-N)^2$ 个与参考图大小一样的子图构成。用参考图在实时图中搜索,如果在某个位置上与一个子图的相似度最高,就叫这个位置为匹配点。两幅图像的相似度是用一个相关函数值来度量的。

设实时图由 $M \times M$ 个像元构成,参考图由 $N \times N$ 象元构成,如图5所示。相关函数取:

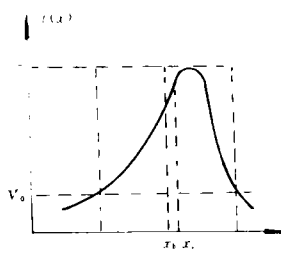


图4 重心与形心的差别

$$E(u, v) = \min \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N |x(j+u, k+v) - y(j, k)| \quad (3)$$

其中, $x(j+u, k+v)$ 是实时图象元, $y(j, k)$ 是参考图象元, (3) 式表示参考图在 (u, v) 处与实时图的一个子图比较完毕后产生的误差累加和最小。 (u, v) 点就是匹配点。

在本系统中, 第一幅参考图(设在第 N 场)由操作人员指定, 然后, CPU 以第 $(N+1)$ 场图像为实时图进行相关处理。再后以第 $(N+1)$ 场匹配点处的子图为参考图, 以第 $(N+2)$ 场图像为实时图, 进行相关处理, 以此类推自动进行下去。参考图尺寸为 32×32 象元。由专门设计的硬、软件结合方法, 搜索匹配、相关计算都在一场时间内完成。

2.2.4 “抗飞机拉烟”跟踪

飞机拉烟时, 在空中形成一条长长的烟柱, 从电视中看就是一个很长、很亮的带。以飞机为头, 后面拖着一个越来越宽的大尾巴, 其大小已超出视场(见图6)。

这时, 如果采用边缘跟踪, 跟踪点会激烈跳动, 使经纬仪抖动得很厉害, 甚致无法跟踪下去。如果采用重心跟踪, 跟踪点会顺烟爬走。

本系统利用经纬仪编码器的数据, 计算出目标运动的方向, 一旦飞机拉烟, 就使跟踪点向飞机运动方向修正, 直到将飞机拉回到视场中心为止。这个方法在外场试验中得到了验证, 效果很好。

2.2.5 “机转弹”跟踪

在多目标跟踪时, 要求先跟一个, 当第二个出现时, 转向跟踪第二个目标。比如从飞机上发射导弹, 先跟飞机, 当导弹发射后自动转到跟踪导弹。

本系统采用三种方法确保“机转弹”跟踪的可靠性。第一种方法是在跟踪飞机时, 由计算机查询是否有第二个目标(导弹)出现, 一经出现, 即刻转向跟踪第二个目标。第二种方法是预先给出的第二目标抛射的方向, 对跟踪点的移动方向进行预置, 一旦第二目标出现, 跟踪点就自动转到第二目标上。第三种方法是采用相关跟踪方式, 当导弹射出后, 人工指定切换跟踪点。这三种方式在外场均得到验证, 工作可靠。以第二种方式反应最快, 效果最好。

3 跟踪测量电视系统的构成

跟踪测量电视系统由十个大的部分组成(如图7所示)。其中光学系统包括调光、调焦、光轴校准等分系统(本文不做介绍)。

下面对构成本系统的主要部分, 分别加以介绍。

3.1 图像传感器

本系统用黑白 CCD 摄像机做图像传感器, 选择 CCD 摄像机的依据是技术指标中的测量精度、跟踪精度和作用距离三项指标。体现在电视摄像机的技术指标上, 就是分辨率、几何失真、惰性、灵敏度、场频和光谱特性。由于 CCD 无几何失真, 无惰性, 光谱特性合适, 兼有体积

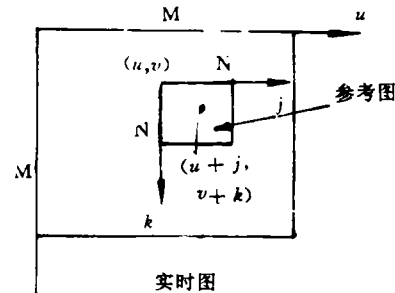


图5 相关匹配示意图

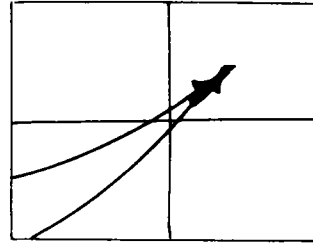


图6 飞机拉烟示意图

小、重量轻等优点,所以本系统采用 CCD 摄像机做图像传感器,其分辨率和灵敏度的选择是基于以下分析:

3.1.1 灵敏度

电视摄像机的灵敏度应该能保证配上适当的光学系统后,在要求的作用距离内能给出足够对比度的目标信号。

设光学系统口径为 D ,焦距为 f ,透过率为 $\tau_{光}$,大气透过率为 $\tau_{大气}$,目标发光强度为 I ,作用距离为 L ,天空亮度为 $B_{\text{空}}$,目标在靶面上成像为以 r 做半径的圆。则目标和天空分别在靶面上产生的照度由(4)、(5)式给出:

$$E_{\text{目}} = \frac{I}{4r^2} \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^2 \cdot \tau_{光} \cdot \tau_{大气} \quad (4)$$

$$E_{\text{空}} = \frac{\pi}{4} \cdot B_{\text{空}} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \tau_{光} \quad (5)$$

本系统中, $D=0.13\text{m}$, $f=1\text{m}$ 和 2m , $L=50\text{km}$, $\tau_{光}=0.45$, $\tau_{大气}=0.08$, $2r=0.05\text{mm}$, $I=10$ 万烛光, $B_{\text{空}}=600$ 尼特,则由(4)式和(5)式计算结果如下:

$$E_{\text{目}} = 9.71\text{x}, \quad E_{\text{空}} = \begin{cases} 3.58\text{lx}, & f = 1\text{m} \\ 1.79\text{lx}, & f = 2\text{m} \end{cases}$$

所以,只要所选的 CCD 的最低工作照度低于 1.71x 就可以保证给出良好的目标与背景的对比度。

3.1.2 CCD 的分辨率

根据指标要求,静态测量精度(均方值) $<15''$,测量分辨率的最大值 $<5''$ 应该可以。焦距为 1 米时,视场为 $20'$ 左右(焦距和 CCD 靶面大小决定了视场)。所以测量分辨率的要求只相当于视场的 $1/240$,对 CCD 分辨率要求不高,选择一般的产品就能满足要求。

本系统选用的 CCD 摄像主要指标如下:

象元数 $500(H) \times 528(V)$

靶面尺寸 $8.8(H) \times 6.6(V)(\text{mm})$

灵敏度 靶面最低工作照度 0.25lx

光谱响应 $450 \sim 1000(\mu\text{m})$,峰值 $550(\mu\text{m})$

体制 CCIR 场频 50Hz ,行频 15625Hz

3.2 图像预处理

来自摄像机的全视频信号包括图像信息和时基信息。图像信息又包括背景信息和目标信息。时基信息包括行、场同步和行、场消隐。图像预处理的任务是先把图像信息与时基信息分开,然后再把目标从背景中分离出来。图像预处理的框图如图8所示。

3.3 图像分析

目标图像送入由中央处理器(TMS32010)和图像存储器等构成的专用微型实时图像处理系统。(见图9)由中央处理器对目标图像信息进行分析,求出目标的特征和脱靶量。

帧存1和帧存2是二片高速存储器,用来存储图像数据。在 CPU 读取其中之一的数据时,

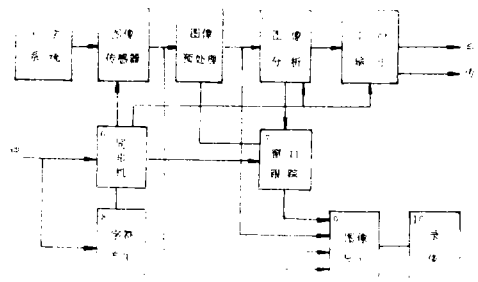


图7 跟踪测距电视系统框图

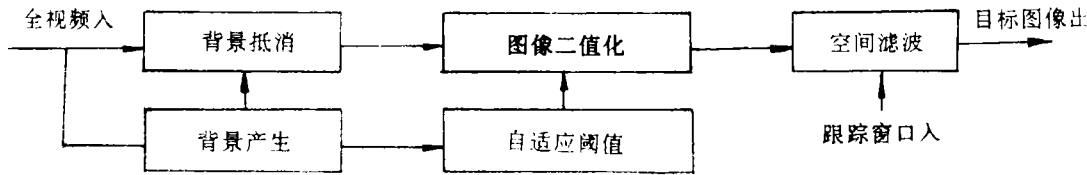


图8 图像预处理框图

另一片正在采集图像数据,在同步期间二者交换读、写功能。在数据采集过程中无需 CPU 干预,由地址发生器和数据脉冲共同完成。这种设计是为了满足电视跟踪测量系统的实时性要求。脱靶量计算和跟踪方式转换的软件流程图如图10所示。

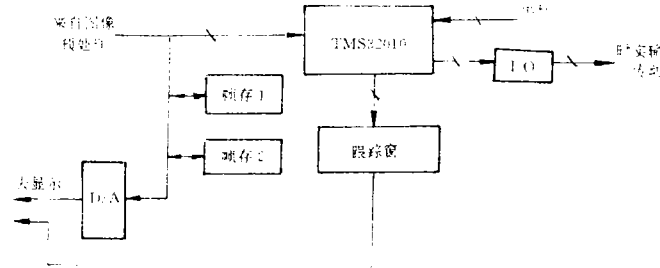


图9 由32010构成的微型实时图像处理系统

3.4 图像显示

显示部分包括显示电路和监视器,把电十字丝、视场刻度线、跟踪窗、信号提取指示、时间码、台站号等都混到图像中,一起显示在监视器的屏幕上。不仅起到实况监视的作用,也提供了系统自检信息,跟踪的质量信息和故障判断信息。它是电视测量系统中一个重要的人机接口,是必不可少的一部分。

本电视系统的显示部分有两路输出,一路送测量台站的控制台,一路送指挥中心。控制台显示是假彩色显示,它对黑白电视信号进行彩色编码,将参考信号,背景图像及目标图像付予不同颜色。由于人眼对黑白电视图像灰度的分辨能力只有十几级(黑白监视器只有十级左右的灰度),而人眼对颜色的分辨能力有上百种,所以采用假彩色显示对操作人员及时发现低对比的目标有好处。

送指挥中心的一路,传输距离远,要考虑电缆的匹配和补偿。

3.5 同步机

本系统采用的是软件同步机。用32010做CPU,它的BIO脚与场同步相接,每次场同步到来时,重复执行相同的时序。CPU把要产生的各种波形看成是一列脉冲序列,定时地发出不同信

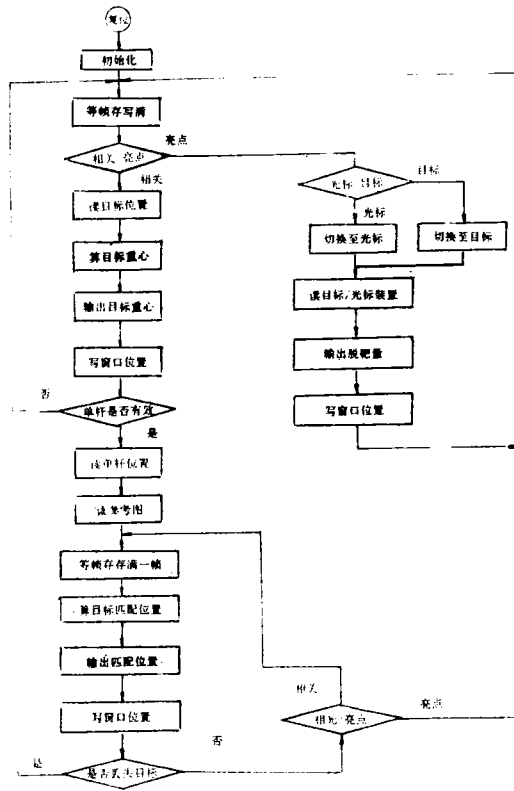


图10 脱靶时计算和跟踪方式转换流程图

号电平,组成各种不同波形后锁存到锁存器中。

本系统的同步机共输出八种信号,有场同步、行同步、复合同步、复合消隐、50Hz、15625Hz,十字丝及刻度线、有效视场。

为了确保电视系统的各种同步信号与外时统具有稳定的相位关系,采用 L564与时统100K 信号锁相质量。跟踪窗口的大小为64×64像元,产生窗口的框图如图11所示。

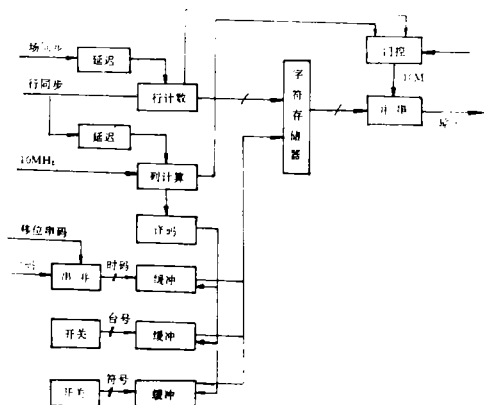


图11 时间码台站号发生器框图

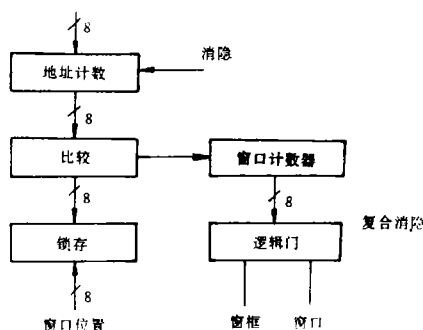


图12 窗口产生框图

3.6 实时输出

用8098单片机为 CPU 组成一个小系统,它完成脱靶量的坐标变换、接收 x,y 16位脱靶量,以40Hz 和50Hz 的串码分别输出。50Hz 的一路送给数字随动系统进行电视自动跟踪。40Hz 的一路与外时统同步送系统机去指控中心进行实时数据处理。

脱靶量由8098的串行口送出,传送方式 O,波特率100kC。

3.7 字符产生

字符发生器接收来自时码钟的时间码和用户自己设置的台站号码,将它们通过译码,变成字符存储器的地址去读取相应的字符点阵,然后组成全电视信号送显示器显示。字符点阵由32×16像元组成,字符发生器的工作基频为10MHz,其原理框图如图11所示。

3.8 窗口跟踪

跟踪窗的作用有二个,一个是送给图像预处理进行空间滤波,另一个是显示在监视器上供操作人员判断跟踪的。

3.9 实况录像

本系统的录像不仅将执行任务时的实况记录下来,同时还录下了参考信号、时间码和台站号。执行任务的情况、时间、观测地点都可以事后重放出来。由于记录的图像中混有精确的时间码(精确到10ms)和精确到分级的视场刻度,所以重放录像时,可以逐帧检查、分析仪器工作状态、判断故障和为改进设计、提供重要依据。

3 室内、外检测数据

1992年11月,由用户和研制单位共同组成的检测验收小组对4台全计算机化红外,电视、电影经纬仪进行了室内检测,对跟踪测量电视系统的检测结果如表1所示。

1993年9月21日~11月11日,在外场进行了试验,并一次验收移交成功。用户认为:电视跟

踪稳定、可靠,标定后无需调整,作用距离超过原指标要求。试验数据整理如表2所示。

表1 室内检测结果

检则项目	技术指标	检测结果								
		焦距	第1台		第2台		第3台		第4台	
			方位	高低	方位	高低	方位	高低	方位	高低
静态测量误差	均方值 $\leq 5''$	1 (m)	3.33''	1.89''	3.11''	4.64''	1.96''	3.44''	2.59''	4.72''
		2 (m)	2.36''	2.92''	1.87''	2.57''	1.03''	1.89''	0.95''	1.39''
跟踪精度	最大值 $\leq 3'$	1 (m)	2'.17''	2'	2'2.5''	2'18''	2'09''	2'51''	1'51''	2'44''
		2 (m)	2'54''	2'			1'56''	2'56''	1'46''	2'38''
动态测量误差	均方值 $\leq 25''$		8.75''	7.45''	18''	13.6''	11.2''	10.36''	11.45''	9.73''
视轴平行度	$< \pm 10''$		合格		合格		合格		合格	
视频图像	1. 图像清晰		合格		合格		合格		合格	
	2. 符合国标		合格		合格		合格		合格	
	3. 色彩适中		合格		合格		合格		合格	

表2 由视外场试验数据

试验项目	目标	天气	试验结果	说明
作用距离	27°飞机	白天(晴)	作用距离50公里	飞机银灰色,白目标
	27°飞机	白天(阴)	作用距离35公里	黑目标
机转弹跟踪	27°飞机 8°导弹	白天(晴)	以“相关”方式机转弹成功,全程跟踪,弹靶遭遇清晰	长弹道打靶
	27°飞机 8°导弹	白天(晴)	以“后沿”方式机转弹成功,全程跟踪,弹靶遭遇清晰	长弹道打靶
	27°飞机 8°导弹	白天(晴)	全自动机转弹成功	长弹道打靶
动态切换	27°飞机	白天(晴)	半自动转电视跟踪,平稳可靠	目标在视场边缘就可以转
	27°飞机	白天(晴)	数引转电视,平稳可靠	目标在视场边缘就可以转
拍星	三等星	夜 21~1点	拍摄60次,57次稳定捕获,3次不稳	天空在不同高角位置有薄云存

5 结论及改进意见

本跟踪测量电视系统是80年代末90年代初研制的,采用了当时国内外最先进的元器件和技术,在设计上达到了当时国内外的先进水平。本系统的突出特点规纳如下:

(1)采用高速信号处理器做CPU构成一个微型实时图像处理系统,解决了以往的图像处理系统受到计算速度、体积和成本的限制,不能满足电视跟踪系统的要求。本系统总重量5公斤,耗电10瓦,能在20毫秒内对目标图像进行采集、分析并输出脱靶量。不仅适用靶场实时跟踪测量的要求,也能满足机载或空载的要求。

(2)采用2片32010和1片8098构成多CPU系统,并行工作,速度快,功能强。

(3)在国内靶场上,第一个实现了相关跟踪方式,提高了光测设备应付复杂背景和多目标的能力。

(4)根据实际需要,首创了“抗飞机拉烟”和“机转弹”跟踪方式。

(5)采用 CCD 图像传感器做电视摄像机,无几何失真、无惰性、体积小、重量轻、无需调整、可靠性高。

(6)采用软件同步机,稳定可靠,而且与 1024×1024 像元的高分辨率摄像机兼容,升级时只需改变软件、硬件不必改动。

(7)脱靶量测量精度高,整数和小数分别存储,可进行浮点运算,使脱靶量精确到 $1/2$ 像元。

(8)采用了坐标平移方法,使捕获跟踪平稳可靠。

(9)采用了自适应背景抵消方法,使目标提取不受背景亮度影响。

(10)全系统数字化,设计中考虑了电路优化、降额、温度补偿等措施,使用中无需调整,操作简便,可靠性好。

该系统目前的水平已将 TMS32010 芯片用到了极限,若进一步增加新的功能和提高运算速度,应将 CPU 换成 TMS320C25 或时钟更高的芯片。

参 考 文 献

- [1]孙仲康,沈振康,数字图像处理及其应用. 北京:国防工业出版社,1985
- [2]宋建中,王毅,魏忠和,电视跟踪. 全国仪器仪表会议,1979
- [3]宋建中,节洪魁,用于电视跟踪的微型实时图像处理系统. 第一届全国实时图像处理研讨会,1988
- [4]A. Gilbert *et al.*, Areal-time video tracking system. IEEE Trans., on PAMI, 247 (Jan. 1986)
- [5]Bruce. G. Batchelor. Pattern Recognition
- [6]天津大学电视研究室,电视原理. 北京:国防工业出版社,1981
- [7]杨宜禾,周维真,成像跟踪技术导论. 西安:西安电子科技大学出版社,1991
- [8]王积分,张新荣,计算机图象识别. 北京:中国铁道出版社,1988
- [9]J. Song *et al.*, A TV tracker for multiple moving objects in a complex background. Proc. of SJSEO, 1992

Tracking and Measuring Television System

Song Jianzhong, Wang Yanjie

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper is a research technique report of the TMTV (Tracking and Measuring Television) system which is a subsystem in the full computerized, infrared TV Cinetheodolite. The main specifications, operation principle, constituents and text results inside and outside of the TMTV system are given in this paper with a idea of how to improve this TMTV system.

Key words: Full computerized cinetheodolite, Tracking measurement, Television system