

全计算机化红外、电视、电影经纬仪 总体研制报告

李继勋 王家祯

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 本文从总体角度首先阐述了在研制全计算机化电影经纬仪过程中所需解决的关键技术问题及其途径, 表明了工程实践结果并指出了有待改进的问题。

关键词: 电影经纬仪; 计算机化; 总体设计; 红外; 电视

1 前 言

1.1 任务的提出

该项研制任务是在为用户所研制的260激光、电视、电影经纬仪的基础上进行的。根据用户提出的新的技术要求, 经双方商定, 重新确定了技术指标, 提出了需要重新研制的主要分系统及对光机结构、布局更改的主要方面。

1.2 主要技术指标

1.2.1 测角精度

仪器以角速度为 $20^\circ/\text{s}$, 角加速度为 $7^\circ/\text{s}^2$, 在高角为 $-5^\circ\sim 65^\circ$ 时, 投影到水平面和垂直面的方位和高低角动态测角误差的均方值为:

摄影事后测量: $\sigma_A = \sigma_E \leq \pm 10''$

电视实时测量: $\sigma_A = \sigma_E \leq \pm 25''$

红外实时测量 $\leq \pm 15''$

1.2.2 作用距离

对歼七飞机或携带30~50万支烛光曳光管的导弹, 在下列条件下:

(1) 大气能见度 $\geq 20\text{km}$

(2) 大气抖动均方值 $\leq 2''$

(3) 太阳高角 $\geq 5^\circ$

(4) 观测方位与太阳夹角 $\geq 30^\circ$

(5) 胶片反差系数 ≥ 1.5

主摄影系统作用距离大于45km。

电视自动跟踪测量作用距离大于35km。

1.2.3 摄影物镜系统

有效口径:230mm

焦 距:1250mm,2500mm

摄影视场:50',25'

相对孔径:1/8,1/11

透过率: $\geq 40\%$

摄影鉴别率:中心 $\geq 45\text{lp/mm}$

边缘 $\geq 40\text{lp/mm}$

设置全自动调光装置和自动调焦装置。

1.2.4 摄影记录系统

采用全数字化摄影控制系统

摄影频率:4、10、20、40、100、200帧/秒

画幅尺寸:18×18.8(mm)²

片盒容量:180m

点阵内容:地址码、方位角、高低角、绝对时间、状态码及附加信息。

同步精度:当摄影频率 ≤ 40 帧/秒时, $\leq \pm 5^\circ$

当摄影频率 ≥ 100 帧/秒时, $\leq \pm 10^\circ$

同步时间: $\leq 3\text{s}$

1.2.5 瞄准望远镜

放大倍率:8倍,24倍

视场角:8.5°,3°

分辨率:10",2"

焦 距:286mm,700mm

有效口径: $\varnothing 40\text{mm}$, $\varnothing 82\text{mm}$

1.2.6 角度测量系统

绝对式23位光电轴角编码器

角分辨率:0.15"

测角精度:均方值 $\sigma \leq 1''.5$

调零方式:电调零

1.2.7 跟踪伺服系统

采用全数字化跟踪伺服系统

跟踪方式:半自动跟踪,电视,红外自动跟踪,数引随动跟踪

跟踪范围:方位工作角度不限,高低工作角度为 $-5^\circ \sim 185^\circ$

最小角速度:0.02°/s

最大角速度:35°/s

最大角加速度:50°/s²

跟踪精度:当仪器在数引方式及电视、红外自动跟踪方式下,以角速度20°/s,角加速度7°/s²工作时,其方位、高低角跟踪的系统误差最大值 $\leq \pm 3'$,随机误差的均方值 $\leq 30''$

1.2.8 电视跟踪测量系统

跟踪测量方式:应具有边缘、重心和相关三种跟踪测量方式

物镜口径: $\varnothing 130\text{mm}$

焦距: $1000\text{mm}, 2000\text{mm}$

相对孔径: $1/7.5, 1/15$

视场: $20', 10'$

设置自动调光和太阳快门强光保护装置。

1.2.9 红外跟踪测量系统

物镜口径: $\varnothing 140\text{mm}$

视场: $\geq \pm 13'$

线性段: $\geq \pm 10'$

静态测量误差:均方值 $\leq 5''$

1.2.10 可靠性

整机平均无故障间隔时间 $\text{MTBF} = 60$ 小时,信息误码率为 10^{-5} 。

1.2.11 环境温度和湿度

工作温度: $-35^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$

相对湿度: 98% (25°C)

1.3 研制过程

研制工作共分两个阶段,第一阶段,根据用户提出的技术要求,对一些新的关键技术进行方案论证,方案试验及产品设计加工、调试阶段。

在该阶段中,我们主要就全数字化跟踪伺服系统,全数字化高速摄影机控制系统,以及全数字化相关电视跟踪测量系统的研制,开展了大量的工作,并在光学机械方面,对仪器的结构、布局进行了修改以适应新的技术要求。

目前,国内靶场应用的各种光测设备中的自动、随动跟踪伺服系统,均采用了模拟控制系统,它以经典的控制理论和控制方法为依据,设计方案上,全部采用以线性集成电路为核心的硬件放大及校正电路。

微机技术的迅速发展,推动了现代控制理论的应用进程。以现代控制理论和控制方法为依据,以微机及接口电路为核心,用软件校正方法构成的全数字化(全计算机化)的新型控制系统以其方法先进,硬件简单(用编码器直接进行数字测速,革除了容易出故障的机械式高灵敏度测速机),软件灵活、无漂移、可靠性高等一系列突出的优点必将取代传统的模拟控制方案。

国外从八十年代中期开始出现采用这种控制方案的光电测量仪器。如 Contraves 公司生产的 skytrack 电影经纬仪;国内引进的 ASKANIA 电影经纬仪以及八十年代末期美国 Vitro 公司推出的 OTS-600 光学跟踪测量系统均采用了这种新型的控制方案,但除了见到一些说明书外,未见有关于这方面的详细技术报导。

我们从1983年开始这项研制,于1985年底成功地实现了位置回路的校正工作,为进一步开展此项研究打下了基础。

1986~1988年,用86/360 16位系统机先后在实验室的大模型上完成了全数字化控制系统的方案试验,取得了令人满意的效果,并进行了初步的工程设计,以两块86/30单板计算机为核心组成其硬件结构。以后,又进行了工程性的完善工作,并使该项研究成果进入了实用阶段。

在进行这项研制工作的同时,我们针对原来的摄影控制系统的某些不足,又提出了在高速摄影控制系统上采用全数字化方案的想法,经过两年多的精心设计和试验,于1990年完成了工程样机。该控制系统采用了在现代控制理论上发展起来的滑模变结构积分控制方法,在结构上,以单片高速信号处理器 TMS32010为核心,配以适当的外围电路,并用机械式光栅盘既做测速又兼测相,取代了过去所用的测速、测相电机,实现了一个无论从控制方法上还是硬件结构上都是全新的高速摄影控制系统。

相关电视跟踪器是八十年代中期在国外光电测量系统上出现的一种电视跟踪测量方式。它的出现,使在复杂背景下,对所感兴趣的目标进行跟踪测量成为可能。它采用模板匹配原理,用前一场跟踪窗内的景物做为模板,与当场的实时图象进行比较,用一个相关函数值来度量两幅图象的相似度,并以最高的相似度来确定最佳匹配位置。实现相关跟踪的难点,在于它的实时性,整个相关计算、搜索匹配都要在一场时间内完成,必须有专门设计的软、硬件结合的系统才能实现这一要求。

我们从1987年开始这项研制工作,到1989年底基本上研制成功,并参加了在长春大房身机场进行的外场校飞试验,取得了圆满成功。其后,又经过多方改进,生产了四台,装备于电影经纬仪上。

上述三项关键技术以及其他相应技术的研制开发成功,使整台仪器达到了一个全新的技术水平。这三项技术的应用在国内各基地的测量设备中均属首次。由于其技术先进,性能优异、可靠性高,获得了使用部门的一致好评。这也表明,本仪器在控制技术,图象处理技术及计算机应用技术方面达到了一个新的水平,缩短了与国外的差距。

其后,在长春光机所人员参加下进行了外场校飞,精度测试,参加并圆满地完成了用户下达的试验任务,使用部门对仪器的性能及所完成任务的情况表示满意,做为测量设备在基地实现了一次检测验收成功并正式移交用户使用,至此,完成了研制任务的全过程。

2 光机总体介绍

本仪器的光机部分基本上沿用了已有结构,但是,为了改进存在的不足之处,我们进行了如下的修改。

2.1 电控箱布局的改动

原机上电控箱大部分配置在外转台上,经试验证明,这些箱子的刚度、质量以及它的配置的位置直接影响到光机总体的刚度,即机械谐振峰的位置。由于本仪器取消了激光测距系统,采用了全数字化跟踪伺服系统方案,使之硬件结构大为减化,为向有利于提高机械刚度方向修改设计提供了可能。经修改后,使机械谐振峰从原来的22Hz 提高到25Hz。

2.2 加大方位力矩马达功率

将方位力矩马达的堵转力矩由原来的30公斤·米加大到45公斤·米,这样,仪器方位的最大加速度由原来的 $53^\circ/\text{s}^2$,增加到 $64^\circ/\text{s}^2$ 。

2.3 改进瞄准镜传动结构

原来的瞄准镜,通过齿轮桥与水平轴相连接,尽管在齿轮桥上采用了弹性消间隙结构以保证其传动精度,但这种结构给瞄准镜与主镜视轴平行度的调正带来困难,并不容易保证其稳定性。由于本仪器取消了高低测速机。于是,有可能采用曲轴直接进行刚性连接的结构,克服了上

机,其中的一块用于实现方位、高低调速回路的数字测速、数字放大、校正及调宽波的形成。另一块用于实现高低、方位的半自动跟踪,数引跟踪,红外、电视自动跟踪位置回路的校正、放大,以及工作方式转换,正割补偿计算等功能。两块单板机采用多总线双端口 RAM 通讯方式进行信息交换。

在工程研制中,采取了以下技术措施

(1)提高数字测速精度减少测速噪声

首先是采用了分辨率为 $0.15''$ 的23位绝对式光电轴角编码器,根据调速回路带宽的要求,调速回路采用了 200c/s 采样频率,编码器电路采取了相应的措施保证了快速响应的要求,在计算方法上采用了线性回归及数值外推算法,解决了数字测速的噪声及纯滞后问题。获取了高质量的速度信息。

(2)用数字窗函数陷波器滤除机械谐振峰

由于方位机械谐振频率较低,谐振峰又比较高,必须用滤波的方法加以补偿。过去在模拟系统中采用了双 T 滤波网络,对于数字系统则用软件建立一个数字窗函数陷波器模型,通过调正两个参数即可改变其中心频率、陷波幅度及频带宽度,满足了实际应用的要求。

(3)在单杆半自动跟踪系统中,为使系统具有良好的低速性能,在计算机内,用一个非线性抛物函数比例校正代替了以往的比例校正。这样,使仪器的最低速度降到目前的 $0.001^\circ/\text{s}$,比指标要求小20倍,且不影响高速性能,经实际操作取得了良好的效果。此外,用数字正割补偿计算取代了过去所用的正割电机,简化了结构。

(4)在数引位置回路的校正中对大小偏差采用了不同的控制算法。这样,在保证跟踪精度的前提下,使系统能以最短时间和无振荡过程捕获目标;提高了系统的响应速度。

(5)在红外、电视位置回路中,运用状态观测器理论,采用非线性跟踪误差微分状态反馈方法成功地解决了极限环振荡问题。

由于计算机的应用,通过编码器角度值与电视脱靶量值计算出目标的实际速度实现了速度预测,代替了过去所使用的来自测速机的速度滞后补偿信号,取得了明显的使用效果。

此外,系统由具有不同采样频率的各种环节组成,如调宽波输出为 400c/s ,调速回路采样频率为 200c/s ,位置回路校正为 100c/s ;而数引采样为 20c/s ,电视采样为 50c/s ,红外采样为 80c/s ,通过采用插值,外推等数学方法保证了它们之间的平稳衔接。

全数字化方位数引随动系统(高低品质优于方位、从略)的品质参数整定为:

$$\text{等效速度品质因数: } K_v = 20001/\text{s}^{-1}$$

$$\text{等效加速度品质因数: } K_a = 2501/\text{s}^{-2}$$

室内检测结果:

在方位、高低的角速度为 $20^\circ/\text{s}$,角加速度为 $7^\circ/\text{s}^2$ 的运动条件下。

$$\text{方位跟踪误差的最大值: } \Delta A_{\max} \leq 1'38''$$

$$\text{方位跟踪随机误差的均方值: } \delta_a \leq 15''.2$$

$$\text{高低跟踪误差的最大值: } \Delta E_{\max} \leq 1'36''$$

$$\text{高低跟踪随机误差的均方值: } \delta_e \leq 18''.3$$

对于电视自动跟踪系统,其调速回路与数引随动系统相同,其方位电视自动跟踪系统的品质参数确定为:

$$\text{等效速度品质因数: } K_v = 2900$$

等效加速度品质因数： $K_a^* = 500$

室内检测结果：

在方位角速度为 $11^\circ/\text{s}$ ，角加速度为 $7^\circ.1/\text{s}^2$ ；高低角速度为 $10^\circ.2/\text{s}$ ，角加速度为 $7^\circ.4/\text{s}^2$ ，电视望远镜焦距为 $f=2\text{m}$ 的条件下。

方位跟踪误差的最大值： $\Delta A_{\max} \leq 2'2''.5$

方位跟踪随机误差均方值： $\delta_A \leq 20''.5$

高低跟踪误差最大值： $\Delta E_{\max} \leq 2'18''$

高低跟踪随机误差的均方值： $\delta_E \leq 22''.1$

上述所例举的系统品质因数及检测结果表明，跟踪系统的主要技术指标都优于用户的要求值。

3.2 全数字化相关电视跟踪器

在全数字化边缘、重心、相关电视跟踪器的研制中，解决了以下的技术问题

(1)实现了由软、硬件结合的实时图象处理系统

以 TMS32010 高速信号处理器为 CPU 构成一个微型实时图象处理系统，该系统实现了重心跟踪、相关跟踪的算法，解决了在复杂背景下目标分离的问题，能在 25 毫秒内，对目标特征进行采集、分析并输出有关的数据。

(2)采用软件同步机增强了通用性能

同步脉冲由软件产生，硬件接口电路输出，简化了硬件结构，提高了可靠性，特别是便于摄像机更新换代；一旦摄像机改动，只要更改硬件即可解决。

(3)用计算机控制解决了应用中的某些具体问题

比如，以仪器的角度变化为判据，在电视自动跟踪状态下，当被跟踪的目标——飞机拉烟时，保证使仪器始终跟踪飞机；以目标数量及位置为判据实现了当飞机发射导弹时，由跟踪飞机自动转到对导弹的跟踪——机转弹的跟踪。

(4)采用了高灵敏度的 CCD 像机提高了作用距离。

通过所采取的上述一系列技术措施，对该电视跟踪器进行的室内外检测结果表明：它不仅可靠地实现了重心和相关跟踪方式，其各项技术指标也远远超出了使用要求。

特别值得提出的是，它跟踪飞机的作用距离达到了 50km，远远超出了使用部门所要求达到的 35km 的技术指标，这在国内光测仪器中也处于领先水平。

3.3 全数字化高速同步摄影控制系统

在这项研制工作中，将滑模变结构积分控制方法用于速度回路和相位回路。变结构滑模控制是一种特殊的非线性控制，它除了具有很好的静态和动态性能外，对系统参数的变化和外界扰动具有很强的适应能力。在硬件方面，建立了 TMS32010 高速信号处理器为核心，辅助以外围接口电路的控制器结构，并且用机械式光栅盘做测速、测相，取代了机械式测速和测相电机。

由于采用了先进的控制方法和硬件结构，并且对主驱动电机与收片电机进行协调控制，可靠地解决了长期存在的高速摄影在收片量较大的情况下，重新启动时，容易出现堆断片的问题，不仅实现了可以在任何收片量下启动工作，不会产生堆、断片现象，而且能做到在摄影过程中可以在 2~240 帧之间任意改变频率。

此外，在摄影同步精度及同步时间这两项技术指标方面，比过去有很大提高，大大超过了用户的要求，对比情况见表 1

表1

摄影频率(c/s)		2	4	10	20	40	100	200	240
同步精度 (度)	要求值		<±5	<±5	<±5	<±5	<±10	<±10	
	实测值	<±2	<±2	<±2	<±2	<±2	<±2	<±3	<±4
同步时间 (秒)	要求值		<3	<3	<3	<3	<3	<3	
	实测值	<4	<3	<2	<2	<2	<2	<2.5	<3

由于系统中采用了中大规模集成电路,软件上设计了自检程序,给使用和维护带来方便,同时还设置了轮片阻尼控制等保护和控制措施,使其可靠性大大提高。经过一年多的实际应用,受到使用部门的好评。

4 技术进步及存在的问题

4.1 技术进步

依据任务书的要求,我们认真地完成了用户委托的研制任务,仪器已交付用户使用。室内检测验收,外场验收试验及实际使用的结果表明:本仪器改进了原来存在的某些不足之处,对主要电控系统进行了重新研制,它不仅全部满足了使用部门提出的各项技术要求,在技术先进程度,使用性能及可靠性方面都达到了一个新的水平。其技术进步主要表现在以下几方面:

(1)新研制的全数字化跟踪伺服系统,全数字化“边缘”,“重心”,“相关”电视跟踪器以及全数字化高速摄影控制系统等三个主要的电控系统在国内靶场各类光测仪器中均属首次应用,它们是现代控制理论及数字图象处理技术与计算机应用相结合的产物,以此先进的控制方法和图象处理方法,全新的硬件结构,优良的技术性能以及高可靠性处于国内领先地位,并达到了国外八十年代末期水平。

(2)整台仪器实现了全计算机化,所属的九个电控分系统均以计算机为核心构成。其中有的分系统,如跟踪伺服系统,电视系统等,本身就是由多个单板机、单片机组成的多CPU系统。计算机的全面应用,标志着仪器在控制、数据处理方法上的革新以及结构上的大为减化,同时也提高了自动化、智能化的程度。据我们了解,在一台经纬仪上如此全面的应用计算机技术,这在国内靶场光测设备中也是独一无二的。

(3)仪器的可靠性又有了进一步提高,原来许多由硬件实现的功能改由软件来实现,简化了硬件结构,改进了某些容易出故障的环节,如取消了测速机,重新研制了摄影控制系统并按照军工产品质保体系的要求,加强了研制过程中,可靠性工艺、可靠性试验工作,保证了仪器可靠性的要求。

根据基地所提出的整机平均无故障工作时间的上限为60小时的要求,经双方商定按定时截尾法进行最终的可靠性试验。其中鉴别比为 $d=2$,双方风险率各为20%,据以计算出累计试验时间为234小时,允许整机发生的失效次数 ≤ 5 次。

实际试验是采用多台累积时间的方法,四台仪器同时连续试验了三昼夜,结果只出现了一次失效的情况,说明仪器的可靠性水平比同类仪器有大幅度提高。

仪器经两年多的使用,以其优异的性能和高可靠性受到好评。

4.2 仪器存在的问题

该仪器在下述两方面尚存在不足之处。

(1)时码终端工作可靠性较差,经我们分析认为是由于个别单元电路设计不够合理,通风设计不好,以及电学工艺比较粗糙所造成。

(2)全数字化跟踪伺服系统的跟踪精度虽然已满足了指标要求,且这样的跟踪精度在数控系统中来说是比较高的,但比起模拟系统来说仍然偏低,表现在调转时跟踪误差比模拟系统大。经分析认为主要是由于数字测速的灵敏度与机械式高灵敏度测速机相比偏低,导致仪器在调转时,调速回路刚度不好所造成的。

通过选用运算速度更高的计算机,采取细分的方法进一步提高数字测速的灵敏度等措施,将使这一问题得到较好的解决。

参 考 文 献

- [1][日]绪方胜彦著,现代控制工程.北京:科学出版社,1980
- [2]GJB299—87电子设备可靠性预计手册.北京:国防科工委出版社
- [3][美]W·Q·亨利著,电子系统噪声抑制技术.北京:人民铁道出版社,1978.
- [4]周明德,微型计算机硬件软件及其应用.北京:清华大学出版社,1982.
- [5]iSBC 86/30 Signal Board Computer Hardware Manual. Intel Corporation, 1982

Full Computerized Infrared and Television Cinetheodolite

Li JiXun, Wang Jiazhen

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

Abstract

The paper expounds firstly required resolving key technical problems and ways in the developing process of full computerized cinetheodolite, and shows the practical engineering results, and points to the problem to be improved.

Key words: Cinetheodolite, Computerization, Overall design, Infrared detection, Television