

# 778光电经纬仪跟踪控制系统

马佳光 尹义林

**【摘要】**778跟踪系统具有手动、电视、红外、激光跟踪及计算机引导五种跟踪手段。本文介绍了系统的主要性能,工作原理及主要特点,并给出了室内及外场实验结果。

## 一、概 述

778光电经纬仪跟踪系统是一多手段高精度跟踪系统,用以使经纬仪能对飞行目标进行精密跟踪和测量。该系统于1977年开始研制,1984年进行了室内鉴定和外场实验。鉴定与实验表明跟踪系统工作稳定可靠,达到了设计指标,满足了靶场需要。

跟踪控制系统的主要技术指标如下:

旋转角度:方位角无限制

高低角  $-5^{\circ} \sim +185^{\circ}$

角速度范围:  $0.01^{\circ}/S \sim 30^{\circ}/S$

最大工作角速度:  $20^{\circ}/S$

最大角加速度:  $60^{\circ}/S^2$

最大工作角加速度:  $3^{\circ}/S^2$  (实际为  $5^{\circ}/S^2$ )

随动与自动跟踪精度:最大误差小于  $3'$

线性范围阶跃信号过渡时间:小于2秒

外台随动系统同步误差小于  $15'$  (内台正常跟踪目标时)。

跟踪系统工作方式:

自动跟踪:电视自动跟踪、红外自动跟踪及激光自动跟踪

随动跟踪:计算机程序引导、雷达引导

半自动跟踪:单人操纵杆跟踪

## 二、跟踪控制系统的工作原理及主要特点

### 1. 跟踪系统组成及工作原理

跟踪系统由方位跟踪系统、高低跟踪系统及外台随动系统组成。

外台随动系统是跟随内台方位系统而运动的，它是用直线位移传感器测出内外台角偏差，然后由力矩电机驱动外台跟随内台转动。

方位与高低系统基本相同。图1为方位跟踪系统方框图，它有电视、红外和激光三种自动跟踪方式，这三种自动跟踪器输出经过信号处理电路及转换开关加到校正放大器中，再经正割补偿电路和高压输出级加到速度回路，最后由力矩电机驱动仪器跟踪目标。在自动跟踪时加有速度滞后补偿，构成近似的复合控制系统，以提高跟踪精度。在计算机（或雷达）引导

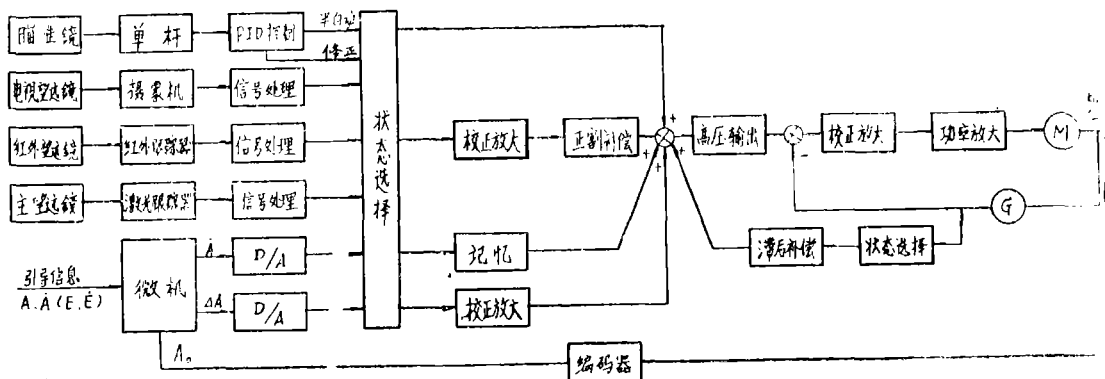


图1 跟踪系统方框图（方位）

时，编码器测出仪器位置 $A_0$ ，在微机中求出引导信息 $A_1$ 与 $A_0$ 之差 $\Delta A$ ，并将 $\Delta A$ 与速度信息 $A$ 进行D/A转换后加到随动放大器构成一典型的数字复合控制系统。在半自动跟踪时，操作手通过瞄准镜观察目标并操纵单杆，单杆输出电压经控制放大器加到速度回路以驱动电机跟踪目标。操作手可单独半自动跟踪目标，也可以在自动跟踪时进行半自动修正。

为确保各种状态间可靠切换，设置了切换记忆电路，既可由微机自动控制，也可人工选择。

## 2. 778角跟踪系统的主要特点

- (1) 设置外转台随动系统，减轻方位跟踪系统负担，提高跟踪精度。
- (2) 采用直流力矩电机及低速测速机组，提高结构刚度和调速性能。
- (3) 采用优质的晶体管脉冲调宽调速方式驱动电机。
- (4) 采用了复合控制及近似的等效复合控制技术，提高跟踪精度。
- (5) 采用正割补偿保证方位跟踪系统跟踪精度。
- (6) 采用运算放大器及直流放大校正方案。
- (7) 采用变参数校正，保证良好的捕获及跟踪性能。
- (8) 采用速度记忆，误差记忆及场效应管无触点开关，保证各种跟踪方式间平滑转换。

## 三、角跟踪系统设计特性

### 1. 速度回路的基本特性

对速度回路的要求主要为三点。一是满足系统所要求的速度范围；二是满足位置回路所要

求的动态特性，即时间常数在0.01秒以下，阻尼系数不低于0.6；三是满足力矩误差对速度回路的要求，即要有足够大的开环增益，较好的机械特性和调速特性。

为了满足上述要求，本系统采用优质的晶体管脉冲调宽调速方案，驱动直流力矩电机。其原理方框图如图2所示。图3为速度回路结构图。

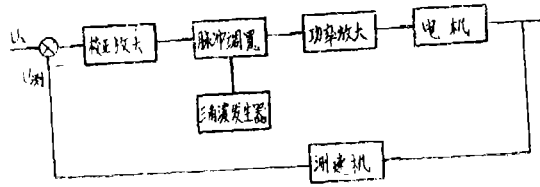


图2 速度回路方框图

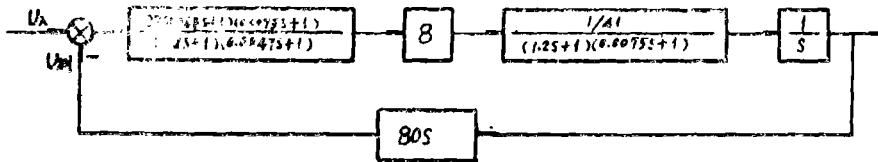


图3 速度回路结构图

系统的开环特性为：

$$W_{\text{开}}(s) = \frac{1358 (0.067s + 1)}{(1.2s+1)^2 (0.0047s+1)}$$

系统的闭环传递函数为：

$$W_{\text{闭}}(s) = \frac{0.013 (0.067s + 1)}{(1.2s+1)^2 (3.13 \times 10^{-6}s + 6.67 \times 10^{-4}) + (0.067s + 1)}$$

$$\approx \frac{0.013}{(0.01s + 1)^2}$$

图4为速度回路对数频率特性曲线。

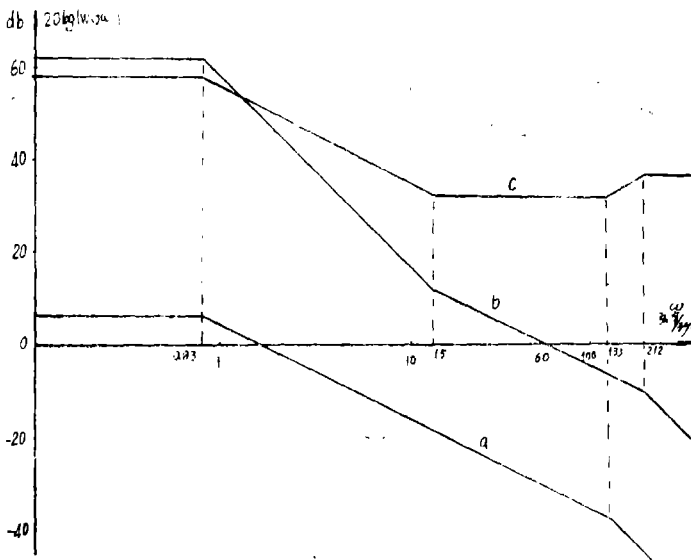


图4 速度回路对数频率特性曲线

- A: 未校正的特性;
- B: 校正后的特性;
- C: 校正网络特性。

## 2. 自动跟踪位置回路特性

778光电经纬仪有电视、红外和激光三种自动跟踪状态。它们的区别只是在于跟踪器，系统特性基本是一样的。

电视跟踪器主要特性如下：

电视跟踪器视场：± 9' (f = 2 m)

4'.5 (f = 4 m)

帧频：40c/s

输出斜率：0.5v/分 (f = 2 m)

1 v/分 (f = 4 m)

红外跟踪器主要特性：

探测器视场：± 30'

线性段：± 15'

输出斜率：0.5v/分

激光跟踪器主要特性：

探测器视场：± 14'

线性段：± 2'

采样频率：20c/s, 40c/s, 80c/s

输出斜率：0.5v/分

三种跟踪状态，系统参数（增益，校正参数）基本一致，所以下面就不分别介绍，只以电视跟踪系统为例，说明自动跟踪系统的位置回路特性。

电视跟踪系统结构图如图 5 所示。

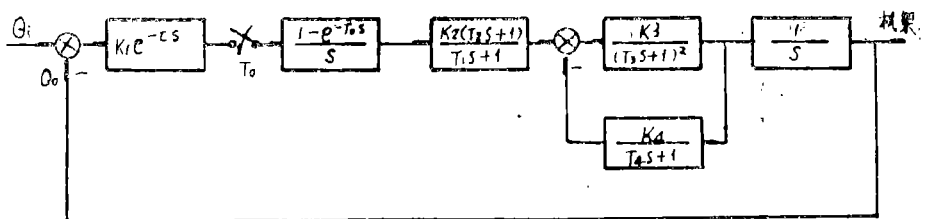


图 5 电视跟踪系统结构图

$K_1 = 1719\text{v/rad}$ ，为电视跟踪器增益。

$e^{-\tau s}$  为图象信号建立、扫描等多种原因形成的滞后环节， $\tau$  为滞后时间。当采用实时输出，即用波门后沿输出时  $\tau$  值很小，可以忽略。

$W_2(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s}$  是采样保持环节传递函数。

$W_3(s) = \frac{K_2(T_2s + 1)}{T_1s + 1} = \frac{8(0.3s + 1)}{4s + 1}$  是校正放大器传递函数。

$W_4(s) = \frac{K_3}{(T_3s + 1)^2} = \frac{0.013}{(0.01s + 1)^2}$  是速度回路闭环传递函数。

$W_5(s) = \frac{1}{S}$  是速度至角度变换环节的传递函数。

$W_0(s) = \frac{K_4}{T_4 S + 1} = \frac{0.7}{0.8s + 1}$  为速度滞后补偿回路的传递函数。

电视跟踪系统是一采样控制系统，由于系统开环截止频率 $\omega_c$ 满足下式：

$$\omega_c \cong \frac{M}{1+M} \cdot \frac{1}{\frac{T_0}{2} + \sum T_i}$$

所以可以近似用连续系统理论分析该采样系统。其中M为系统振荡指标 ( $M=1.4$ )， $T_0$ 为采样周期，即 $T_0=0.025$ 秒， $\sum T_i$ 为小于0.025秒的小时间常数的总合，这里  $\sum T_i=0.02$ 秒。

不加速度滞后补偿环节时系统开环传递函数为：

$$W_A(s) = W_1(s) W_2(s) W_3(s) W_4(s) W_5(s) \\ \cong \frac{178 (0.3s + 1)}{S(4s + 1)(0.01s + 1)^2}$$

上式中忽略了 $e^{-Ts}$ 及 $w_2(s)$ ，所带来的误差不大。

加速度滞后补偿后可以认为系统增加一微分和惯性环节：

$$W_B(s) = \frac{1}{1-K_4} \cdot \frac{T_4 S + 1}{(T_4 + \frac{K_4}{1-K_4}) S + 1} \cong 3.3 \frac{0.8s + 1}{3.1s + 1}$$

此时系统等效开环传递函数为：

$$W_c(s) = \frac{590 (0.8s + 1)(0.3s + 1)}{S(4s + 1)(3.1s + 1)(0.01s + 1)^2}$$

图6为 $w_A(s)$ 与 $w_c(s)$ 的对数频率特性曲线。(忽略了采样环节)。

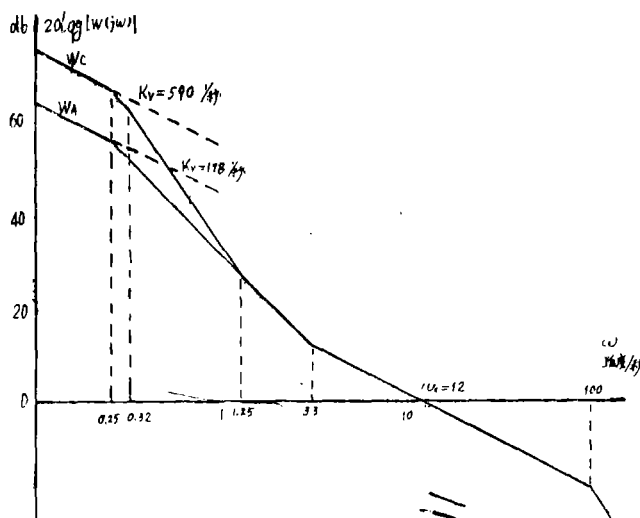


图6 自动跟踪系统对数频率特性

由图 6 可见增加了速度滞后补偿环节使系统的开环增益提高了 3.3 倍，使跟踪精度也相应提高，实验证明了这一点。

### 3. 数字引导系统特性

在数字引导状态时，由微机接收引导信号，并与编码器反馈码相比较，其差码由数模转换器变换成模拟电压，即误差电压，其斜率为： $K_1 = 40\text{mv}/20'' = 413\text{v}/\text{rad}$ 。

数模转换器包括符号位为 8 位，所以线性范围为  $\pm 42'$ 。

微机还接收目标速度信息，并经数模转换供给传动放大器，其斜率为：

$$K_4 = 11.46\text{v}/\text{rad}/\text{S}$$

图 7 为数字引导系统方框图，是典型的采样复合控制系统。当闭环部份开环截止频率满足下式时：

$$\omega_c \leq \frac{M}{1+M} \cdot \frac{1}{\frac{T_0}{2} + \sum T_i}$$

可以用连续系统特性近似代替采样控制系统特性。上式意义与电视部份相同。

闭环部份（除去顺馈  $U_A$  支路）开环传递函数为：

$$W(s) = \frac{(K_1 K_2 K_3) T_2 S + 1}{s(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)^2} = \frac{80(0.45s + 1)}{S(3.5s + 1)(0.01s + 1)^2}$$

$$K_v = 80 \text{ 1/s}, K_1 = 26 \text{ 1/s}^2, \omega_c = 10 \text{ 1/s}$$

加入顺馈后， $K_3 K_4 K_5 = 0.9$ ，则系统等效开环传递函数低频部份为：

$$W_D(s) = \frac{K_1 K_2 K_3}{1 - 0.9} \cdot \frac{1}{S(3.5s + 1)} = \frac{800}{S(3.5s + 1)}$$

$$K_v = 800 \text{ 1/s}, K' = 260 \text{ 1/s}^2$$

图 8 为数字引导系统对数频率特性。

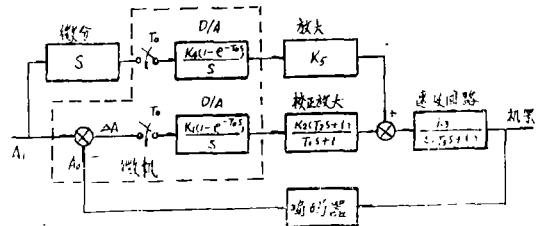


图 7 数字引导系数方框图

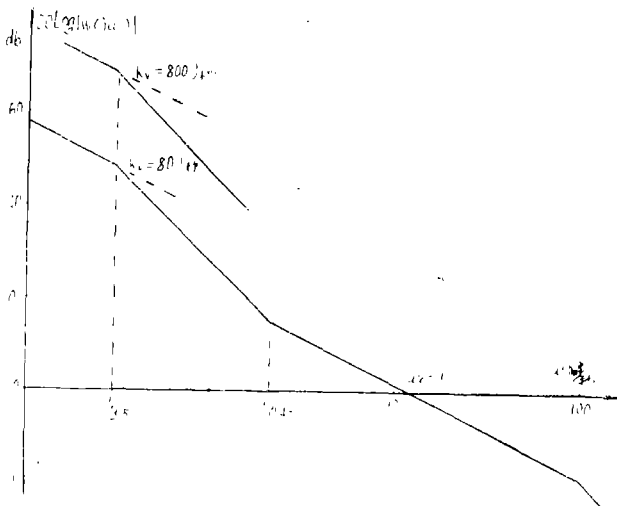


图 8 数字引导系统对数频率特性

#### 4. 半自动跟踪系统特性

半自动跟踪状态操作手可以通过瞄准镜操纵单杆跟踪目标。在自动跟踪或数字引导时操作手也可用单杆进行修正。

单杆是一个用弹簧复位的摆杆，它经扇形齿轮传动带动方位、高低两个方向电位计，电位计输出加到各自的PID（比例，积分，微分）调节放大器上，再经过高压输出级加到速度回路，驱动电机。图9为半自动跟踪系统方框图。

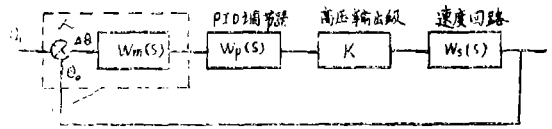


图9 半自动跟踪系统方框图

在半自动跟踪系统中，由于人是其中一个环节，具有极好的目标识别和学习能力，所以在许多情况下，尤其是在低速情况下有较高的跟踪精度。但人机系统也受到人的反应速度，动作速度等的限制，在设计时必须全面考虑，具体有下面几个方面。

(1) 操作手的传递函数为：

$$W_n(s) = \frac{K_m e^{-\tau s} (T_2 S + 1)}{(T_0 S + 1) (T_1 S + 1)}$$

其中  $K_m$  为增益， $\tau$  为人的反应时间延迟，一般取  $\tau = 0.15$  秒左右， $T_0$  为动作的时间常数，一般可取  $T_0 = 0.1$  秒。 $(T_2 S + 1) / (T_1 S + 1)$  是由操作手实现的校正特性即自适应特性，一般  $T_1$  在  $0 \sim 20$  秒之间变化， $T_2$  在  $(0 \sim 5)$  秒之间变化。虽然操作手可以实现这些特性，但一般还是尽量由电路实现较好。

(2) 由于人的反应速度有限，所以系统带宽不能太宽，一般开环截止频率在  $3$  弧度/秒左右，过大时人无法操作。

(3) 设计校正电路时应尽量使人的操作简化，并应设法补偿人动作的惯性  $1 / (T_0 S + 1)$ ，一般可以用微分校正  $(T_2 S + 1)$  实现。在跟踪等加速目标时，可以增加积分环节  $1/s$ ，使系统成为二阶无静差系统。前者称为PI调节，后者称为PID调节。在实际的校正电路中还包括有一般的引前与滞后补偿  $(TS + 1) / (TS + 1)$ 。

下面分别介绍两种调节器系统特性。PD调节器系统特性：

$$W_m(s) = \frac{385 (s + 1) e^{-0.15s}}{(10s + 1)(0.1s + 1)}$$

$$W_p(s) = 2 (0.2s + 1) \quad K = 4$$

$$W_c(s) = \frac{0.013}{S(0.01s + 1)^2}$$

系统开环特性为：

$$W_o(s) = \frac{40(s + 1)(0.2s + 1)e^{-0.15s}}{S(10s + 1)(0.1s + 1)(0.01s + 1)}$$

频率特性如图10所示。

上述特性是用人实现  $(s + 1) / (10s + 1)$  校正。PID调节器系统特性：

$$W_o(s) = \frac{38(s + 1)e^{-0.15s}}{0.1s + 1}$$

$$W_p(s) = \frac{2(0.2s + 1)}{s}$$

$$K = 4$$

$$W_c(s) = \frac{0.013}{s(0.01s + 1)^2}$$

系统开环传递函数为:

$$W_B(s) = \frac{4(0.2s + 1)(s + 1)e^{-0.15s}}{s^2(0.1s + 1)(0.01s + 1)^2}$$

上述特性也示于图10中, 由图可见系统是稳定的。

### 5. 外转台随动系统特性

外转台随动系统方框图如图11所示。

外转台用直线位移传感器测出与内台之间的角度偏差。该传感器是一400c/s的差动变压器, 输出灵敏度1.5v/cm, 折算成角灵敏度为  $k_1 = 103\text{v/rad}$ 。解调器灵敏度为  $k_2 = 0.2$ 。

速度回路与内台基本一致, 也是采用脉冲调宽电路驱动力矩电机, 只是由于电机要经过齿轮减速驱动外台, 外台刚度和结构谐振频率低一些, 所以闭环传递函数略有差别:

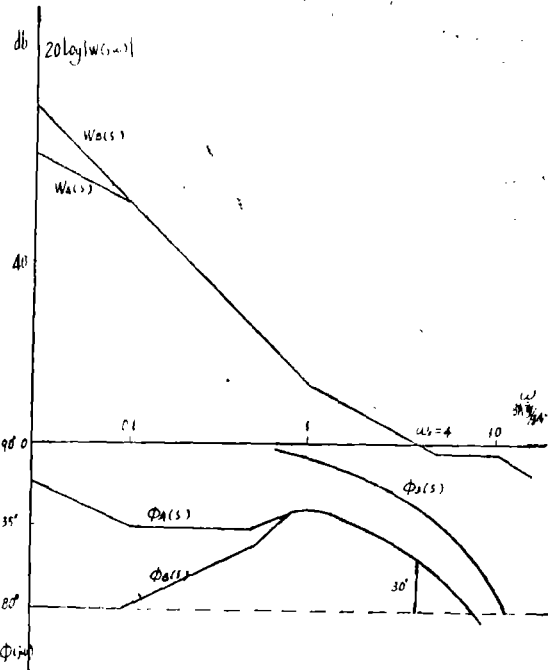


图10 半自动跟踪特性曲线

$\phi_A(s)$  为  $W_A(s)$  相位曲线

$\phi_B(s)$  为  $W_B(s)$  相位曲线

$\phi_3(s)$  为  $e^{-0.15s}$  相位曲线

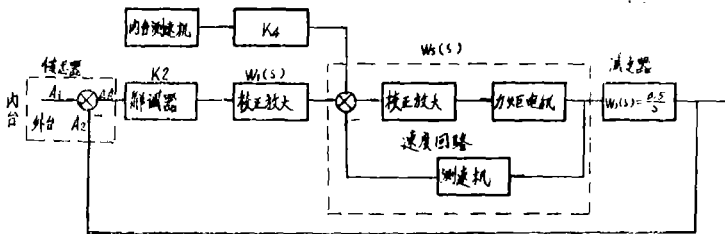


图11 外转台随动系统方框图

$$W_2(s) = \frac{0.055}{(0.05s + 1)^2}$$

校正网络参数为:

$$W_1(s) = \frac{50(0.88s + 1)}{4.56s + 1}$$

不加顺馈时系统开环传递函数为:

$$\begin{aligned} W(s) &= k_1 k_2 W_1(s) W_2(s) W_3(s) \\ &= \frac{28(0.88s + 1)}{s(4.56s + 1)(0.05s + 1)^2} \end{aligned}$$

加反馈后设补偿系数为0.9, 即  $K_4 \cdot 0.055 = 0.9$ , 对系统开环特性低频率部份近似为:

$$W_B(s) = \frac{280}{S(4.56s + 1)}$$

等效开环增益提高10倍, 外转台随动系统特性见图12。

## 四、跟踪系统的实验结果

### 1. 室内实验结果

#### (1) 数字引导:

方位系统, 高低系统可在任意范围内搜索捕获目标, 线性段内过渡时间小于1秒。

方位系统在  $80^\circ \sin 0.25 t$  引导程序下跟踪的最大误差  $\Delta A_{m_{ax}} \leq 2.5'$ 。

高低系统在  $60 \sin 0.25 t$  引导程序下跟踪的最大误差  $\Delta E_{m_{ax}} \leq 2.5'$ 。

方位系统引导系统误差曲线示于图13。

#### (2) 电视跟踪:

方位系统, 高低系统可在70%视场内捕获目标。在线性段内过渡时间小于1秒。在靶标速度  $\omega = 0.4 \text{ rad/s}$  下, 方位系统跟踪的最大误差为:

$$\Delta A_{m_{ax}} \leq 2.5' \quad (\text{焦距 } f = 2 \text{ m})$$

$$\Delta A_{m_{ax}} \leq 2.8' \quad (\text{焦距 } f = 4 \text{ m})$$

高低系统跟踪的最大误差为:  $\Delta E_{m_{ax}} \leq 2.5'$  (焦距  $f = 2 \text{ m}$ )

$$\Delta A_{m_{ax}} \leq 2.5' \quad (\text{焦距 } f = 4 \text{ m})$$

靶标速度  $\alpha = 0.41 \text{ rad/s}$  时相对应仪器的速度和加速度如下:

$$\dot{A}_{m_{ax}} = 10.^\circ 2/\text{s},$$

$$\ddot{A}_{m_{ax}} = 3.^\circ 16/\text{s}^2$$

$$\dot{E}_{m_{ax}} = 7.^\circ 8/\text{s},$$

$$\ddot{E}_{m_{ax}} = 3.^\circ 85/\text{s}^2$$

方位系统电视跟踪误差曲线示于图14。

#### (3) 红外跟踪:

方位系统, 高低系统可在全视场内捕获目标。在线性段内过渡时间小于1秒。

在靶标速度  $\omega = 0.4 \text{ rad/s}$  时, 方位系统跟踪的最大误差为:  $\Delta A_{m_{ax}} \leq 1.6'$

高低系统的最大误差为:  $\Delta E_{m_{ax}} \leq 2'$

方位系统红外跟踪误差曲线示于图15。

#### (4) 激光跟踪:

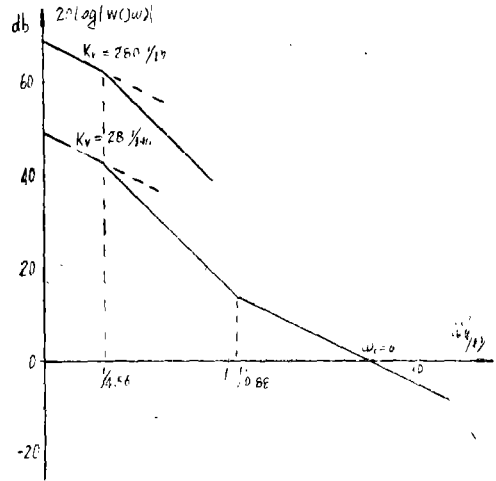


图12 外转台随动系统特性

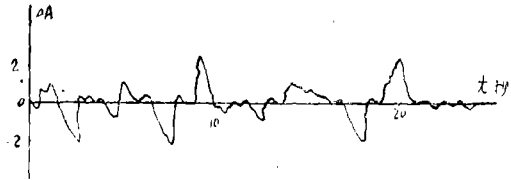


图13 方位引导误差曲线

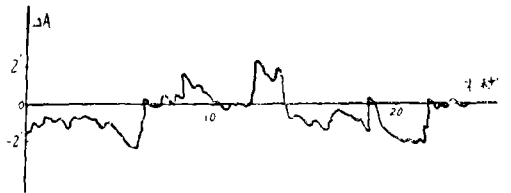


图14 方位电视跟踪误差曲线 ( $f = 2 \text{ m}$ )

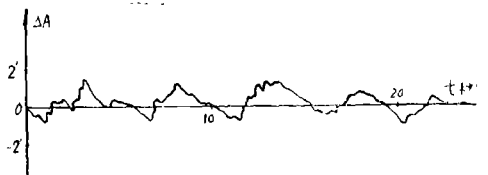


图15 方位红外跟踪误差曲线

方位系统，高低系统在  $\pm 12'$  视场内可以捕获目标。在线性段内过渡时间小于 1 秒。

在靶标速度  $\omega = 0.4 \text{ rad/s}$  时，方位系统跟踪的最大误差为： $\Delta A_{\text{max}} \leq 2.5'$

高低系统跟踪的最大误差为： $\Delta E_{\text{max}} \leq 2.5'$

方位系统激光跟踪的误差曲线示于图16。

### (5) 跟踪状态转换：

引导、电视、红外、激光各种跟踪方式，在靶标速度为  $\omega = 0.4 \text{ rad/s}$  时，均可顺利地互相切换，即可由人工手动切换，也可由微机自动切换，切换时间均在 2 秒以内。

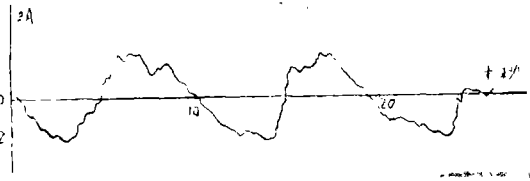


图16 方位激光跟踪误差曲线

## 2. 现场实验结果

778光电经纬仪于1984年7月底运到用户现场。进行现场装调，并执行了一次正式任务。整个任务在1985年3月11日结束。除激光跟踪系统因受条件及时间限制，只作了初步对接，调整外，其余项目均按计划顺利完成任务。

### (1) 单杆半自动跟踪：

当飞机相对经纬仪  $2^\circ/\text{s}$  的角速度和  $0.5^\circ/\text{s}^2$  的角加速度飞行时，操作手跟踪误差小于  $2'$ 。跟踪现场飞机（高度5000m, 10000m, 速度900km/h, 距离8~50km），最大误差都在  $3'$  以内。

### (2) 数字引导：

雷达通过717计算机引导经纬仪，执行任务十分可靠，误差都在  $3'$  以内。

### (3) 电视跟踪：

电视跟踪比斯靶机（高度10000m，速度约979km/h）跟踪最远距离56km。

电视跟踪歼7飞机水平航线（高度5000m，速度850km/h，距仪器水平投影距离11km）跟踪最大误差小于  $1'$ 。电视跟踪歼7方位误差曲线如下图17。

### (4) 红外跟踪：

红外跟踪轰5飞机最远距离72km。图18为红外跟踪歼6飞机的误差曲线（最大角速度约为  $2^\circ/\text{秒}$ ，最大角加速度约为  $1^\circ/\text{s}^2$ ）最大误差在  $1'$  以内。

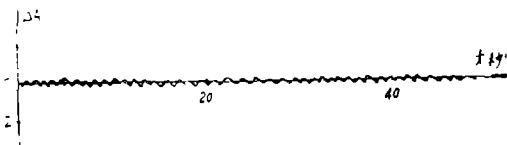


图17 电视跟踪歼7误差曲线（方位）

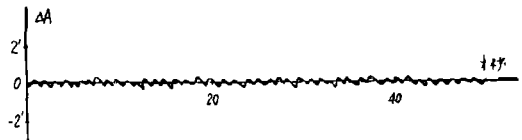


图18 红外跟踪歼2误差曲线（方位）

### (5) 跟踪状态转换：

在现场对实际目标（飞机）多次进行了跟踪方式切换。如雷达引导向半自动跟踪切换，半自动跟踪向红外、电视跟踪切换，红外跟踪与电视跟踪之间的切换等，实现了平滑可靠的切换。

图19为跟踪状态转换的过渡过程曲线。

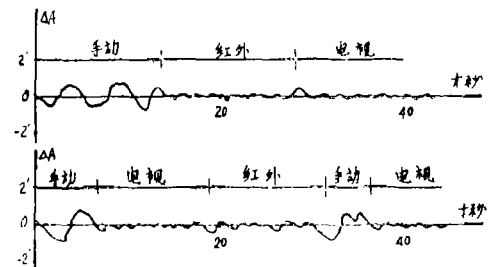


图19 跟踪状态转换过渡过程曲线

## 五、结束语

778跟踪控制系统通过室内及外场的检验工作是可靠的。达到了设计指标的要求。在产品中,为满足日益发展的靶场技术要求,我们将进一步完善跟踪控制系统的性能。

参加本职工作的还有叶步霞、李成山、杨文淑、王国祥、邓文火和王海清等同志。

### The 778 Tracking Control System

Ma Jiaguang Yin Yilin

#### Abstract

There are five tracking modes in the 778 Precise tracking system. They are: manual, video infrared, laser tracking and computer guiding. The principle, properties and characteristics of the system are introduced, and the experimental results in the field and the laboratory are also presented in the paper.

•