

# 260<sup>#</sup>A 激光电视电影经纬仪 跟踪伺服系统的工程研制

王 毅

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 本文介绍具有计算机引导, 电视、手动跟踪方式的 260<sup>#</sup>A 跟踪伺服系统的主要性能和工程设计并给出室内及外场检测结果。工程实践表明该设计方法是行之有效的。

**关键词:** 计算机引导; 跟踪伺服系统; 电影经纬仪

## 1 概 述

### 1.1 系统的用途及主要技术指标

#### (1) 系统的用途

260<sup>#</sup>激光电视电影经纬仪跟踪系统是一种高精度、多功能、高可靠性的跟踪系统, 可用以对机载、舰船、陆基多种空中飞行目标实施平稳捕获、精确跟踪和测量。该系统于 1990 年完成了室内验收和外场交验。并已交付使用近二年。验收和实际应用表明: 该跟踪系统完全达到了设计技术指标, 满足靶场使用要求。

#### (2) 系统主要技术指标

##### 跟踪速度和加速度

最大角速度:  $35^{\circ}/s$ ; 最大角加速度:  $50^{\circ}/s^2$ ; 工作角速度:  $20^{\circ}/s^2$ ; 工作角加速度:  $7^{\circ}/s^2$ ;  
调速范围:  $0.03^{\circ}/s \sim 35^{\circ}/s$

##### 跟踪精度

伺服系统对于数引跟踪或电视自动跟踪工作状态, 在工作角速度和工作角加速度条件下, 系统最大误差  $\leq \pm 3'$ , 随机误差均方值  $\leq 30''$ 。

##### 跟踪工作方式

单杆半自动跟踪; 计算机数学引导跟踪; 电视自动跟踪。

##### 跟踪方式的切换

系统的跟踪方式, 在微机控制下能实现自动切换, 也可以由人工操作进行转换。

### 1.2 跟踪伺服系统的原理框图及主要特点

跟踪伺服系统由方位和高低跟踪系统组成, 方位与高低系统结构基本相同。图 1 为单杆

半自动，数学引导及电视跟踪组成的方位跟踪伺服系统的结构简化方框图 1。

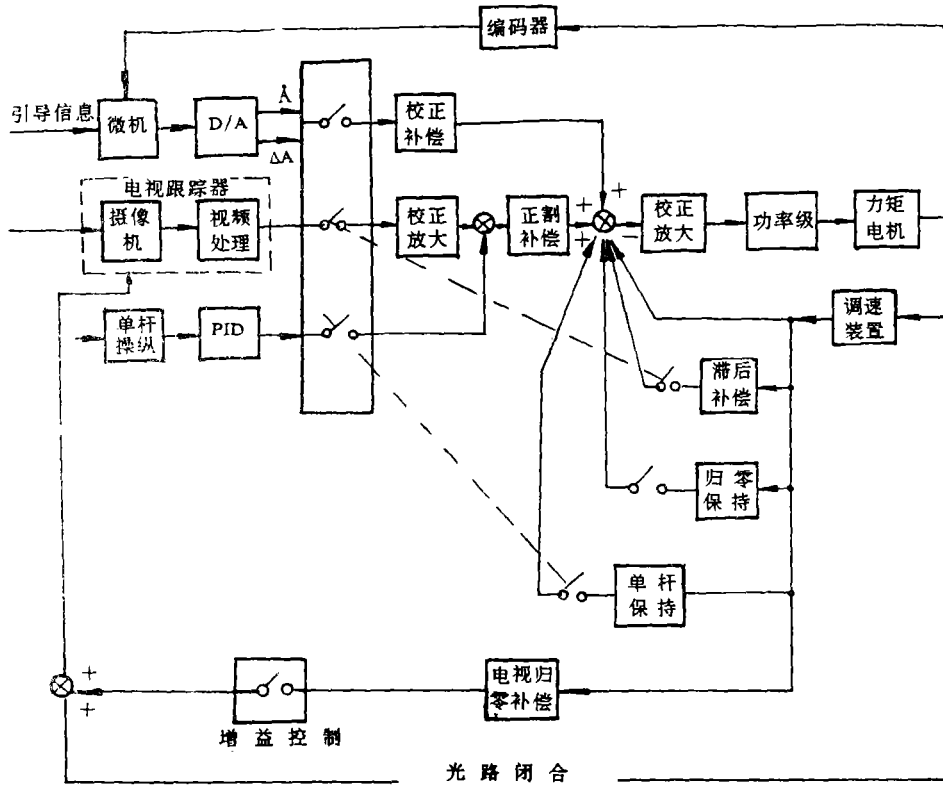


图 1 260<sup>mm</sup>跟踪伺服系统方框图

260<sup>mm</sup>A 光电跟踪伺服系统的主要特点：

1. 采用线性好、效率高、响应快的晶体管脉冲调宽功率级驱动直流力矩电机。
2. 采用加大阻尼与双串联反谐振电路、补偿较低结构谐振频率的影响，提高调速回路带宽，确保高跟踪精度的角跟踪系统的性能。
3. 采用速度滞后补偿法，即等效复合控制技术，有效的提高系统跟踪精度。
4. 采用变增益，变参量控制结构，消除因电视跟踪器纯滞后较大，系统在零位出现极限环自振荡问题，提高电视跟踪和测量精度。
5. 电视跟踪采用平稳转换控制措施，即随机定点跟踪。提高电视跟踪捕获可靠性。

## 2 跟踪伺服系统的设计及主要性能

### 2.1 调速回路的设计及性能

260<sup>mm</sup>调速回路采用线性好、效率高、响应快的晶体管脉冲调宽调速方案。

采用这种方案是为了使调速回路获得较宽的调速范围、快速动态响应及较高的开环增益等性能，从而保证其回路应具有高增益及较宽频带的特点。

根据文献和设计经验表明,伺服控制系统的内回路带宽  $f_L$  与其外回路带宽  $f_B$  的关系,一般应满足:  $f_L \geq 4f_B$  的要求。

经计算该调速回路,工程设计要求  $f_B \geq 12$  (Hz)。因为 260<sup>#</sup> 光电经纬仪的方位结构谐振频率约为 22Hz, 这样按常规调速回路带宽达到 12Hz 是困难的。对此,采用双陷波串联仅谐振补偿及适当增大系统阻尼办法<sup>[1]</sup>。该回路结构方框图如图 2 所示。图中回路校正环节传递函数的形式为:

$$W_{oc}(S) = \frac{K_{oc} \cdot (T_{a2}S + 1)(T_{a4}S + 1)}{(T_{a1}S + 1) \cdot (T_{a3}S + 1)}$$

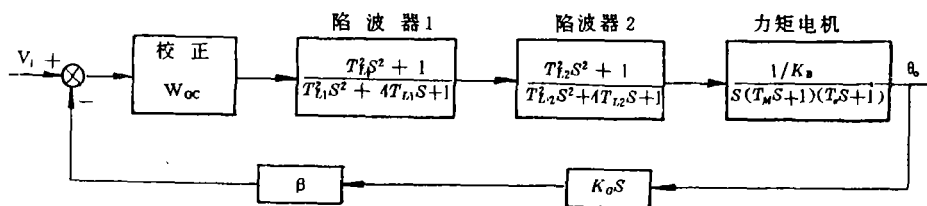


图 2 方位系统调速回路结构框图

调速回路经设计和调试,所具有的开环传递函数为:

$$W_c(S) = \frac{950 \cdot (0.097S + 1)}{(3.9S + 1) \cdot (0.35S + 1) \cdot (0.0045S + 1)}$$

根据上式,绘出该调速回路开环对数频率特性示于图 3。并求得剪切频率  $\omega_{oc} = 65$  (1/s)。

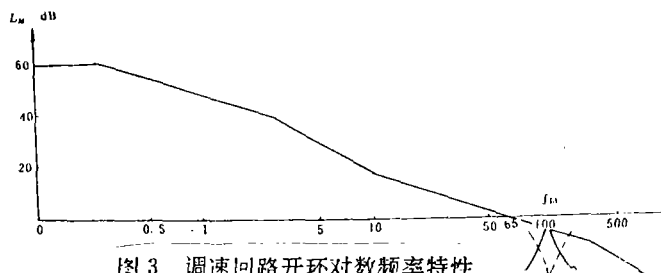


图 3 调速回路开环对数频率特性

根据调速回路的开环零、极点,可以绘出其闭环根轨迹,从中近似地求出闭环的零、极点,则获得其闭环传递函数<sup>[1]</sup>:

$$\Phi_c(S) = \frac{0.03}{0.013^2 S^2 + 2 \times 1.5 \times 0.013 S + 1} \doteq \frac{0.03}{0.013 S + 1}$$

理论计算和实测方位调速回路均为 12Hz 左右。阶跃响应近于非周期特性。

高低系统结构谐振频率较高,  $f_L = 40$  (Hz) 其调速回路闭环带宽约为 18Hz,  $\zeta = 0.9$ , 闭环传递函数近似为:

$$\Phi(S) \doteq \frac{K_H}{T_H \cdot S + 1} = \frac{0.03}{0.009 S + 1}$$

由于方位调速回路带宽比高低系统低得多,若实现高跟踪精度角位置系统还需采取相应措施,以下只论述方位角跟踪系统及有关参量的设计,高低系统不在赘述。

## 2.2 电视自动跟踪系统

260" 光电经纬仪的电视自动跟踪系统，采用形心和相关两种跟踪器（焦距： $f = 1\text{m}$  或  $f = 2\text{m}$ ）。

该跟踪伺服系统控制结构，原理方框图如图 4 所示。

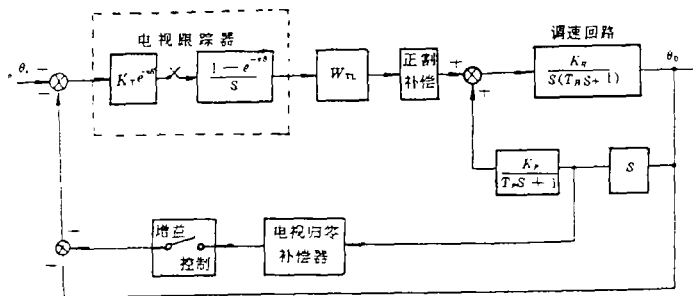


图 4 电视跟踪伺服系统原理结构图

该系统位置回路采用双微积分串联校正环节传递函数形式为：

$$W_{TC}(S) = \frac{K_{TC} \cdot (T_2 S + 1)(T_4 S + 1)}{(T_1 S + 1)(T_3 S + 1)}$$

采用速度滞后补偿方法，提高系统跟踪精度<sup>[2]</sup>，补偿系数  $\alpha = 3.5$ 。滞后补偿网络传递函数为：

$$W_P(S) = \frac{0.7}{0.28S + 1}$$

无速度滞后补偿系统品质因数  $K_{V0} = 920$  (1/s)。

电视跟踪系统，具有速度滞后补偿的开环等效传递函数为：

$$W_T(S) = \frac{K_V (0.34S + 1)(0.28S + 1)(0.2S + 1)}{S(3.7S + 1)(1.4S + 1)(S + 1)(0.13S + 1)}$$

等效后系统品质因数，

$$K_V = 3200(1/s)$$

$$K_a = 550(1/s^2)$$

采用准频率概念，令  $S = j\lambda$ ，用对数频率法综合数字采样系统，其开环断续频率传递函数近似为：

$$W_T(j\lambda) = \frac{3200(1 + j\lambda 0.34)(1 + j\lambda 0.28)(1 + j\lambda 0.2)(1 - j\lambda 0.025)(1 + j\lambda 0.012)}{j\lambda(1 + j\lambda 3.7)(1 + j\lambda 1.4) \cdot (1 + j\lambda)(1 + 0.025j\lambda)}$$

按上式绘出方位电视跟踪伺服系统开环对数频率特性如图 5 曲线  $L_T$  所示， $W_0 = 12(1/s)$ 。该系统为条件稳定系统。

数字采样系统，因采样过程的滞后，高频小时间常数  $T_s$  等影响，需用下式检查系统振荡指标  $M$  值。

$$\frac{T}{2} \leq \frac{1}{W_0} \frac{M}{M + 1} - T_s$$

关于变参量变增益控制结构

由于该电视跟踪伺服系统品质因数较高，如果电视跟踪器等产生的纯滞后质量又较大，将使方位伺服系统在零位产生严重的极限环振荡，影响跟踪及测量精度。

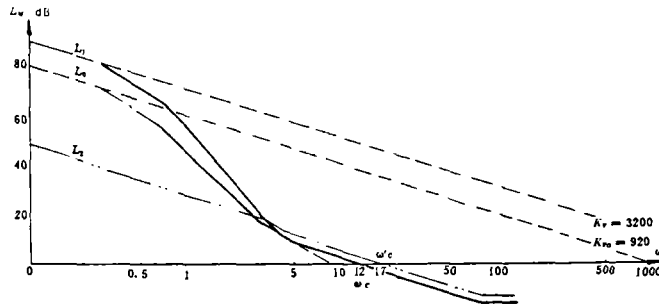


图 5 电视跟踪伺服系统开环对数频率特性

为了消除这种系统自振荡，260<sup>II</sup>电视跟踪伺服系统采用了变参量变增益控制结构<sup>[3]</sup>，即电视跟踪系统归零，同时接通增益控制开关和电视跟踪归零补偿器，系统转入低增益高阻尼工作状态。

速度滞后补偿量被显著减弱，该环节参量变为：

$$W_p(S) = \frac{0.018}{0.28S + 1}$$

这样，具有归零补偿器的电视跟踪系统的开环断续频率传递函数相应为：

$$W_T(j\lambda) = \frac{25 \cdot (1 + j\lambda 0.28)(1 - j\lambda \cdot 0.025)(1 + j\lambda 0.012)}{j\lambda \cdot (1 + j\lambda 0.29) \cdot (1 + j\lambda 0.025)}$$

按上式绘制具有归零补偿的电视跟踪系统的开环对数频率特性如图 5 曲线  $L_2$  所示。这时，系统主要参量变为：

$$K'_v = 25(1/s)$$

$$K'_a = 75(1/s^2)$$

$$\omega'_c = 17(1/s)$$

从图 6 曲线  $L_2$  可知，虽然跟踪系统的带宽略有增加，但是，由于系统增益大幅度下降，阻尼加大并且变为非条件稳定系统，零位自振荡被消除。该措施经实际使用证明消振效果好，简便可靠，适于工程应用。

### 2.3 微机数字引导伺服系统

系统在微机控制下转入数学引导跟踪状态。

数引跟踪具有单杆半自动修正功能。该跟踪伺服系统简化方框图如图 6 所示。

引导信息为 20 位，最高位为  $180^\circ$ ，最低位为 1.23 角秒。D/A 转换板（328 板）通道 12 位，最高位为符号位，余下 11 位为有效数据位，角差输出的线性范围  $\pm 42'$ 。

图 6 数引跟踪系统是典型的数字采样复合控制系统，闭环部份开环剪切频率应满足系统振荡指标  $M$  值要求，则可按连续系统设计闭环部份有关参量：

无顺馈系统速度品质因数： $K_{v0} = 210(1/s)$ 。

方位正向通路校正环节传递函数为：

$$W_{bc}(S) = \frac{K_{bc} \cdot (T_{b2}S + 1)}{(T_{b1}S + 1)(T_{b3+1})}$$

除去顺馈，闭环部份的开环传递函数为：

$$W_D(S) = \frac{210(0.39S + 1)}{S(8.4S + 1)(0.015S + 1)(0.013S + 1)}$$

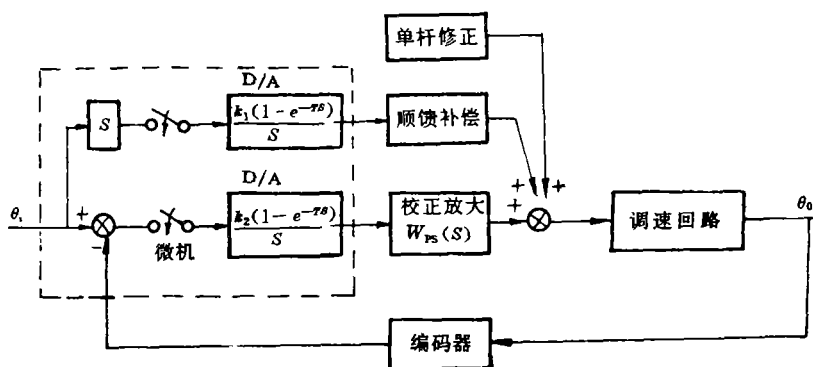


图6 数引跟踪伺服系统简化方框图

方位系统闭环部份开环对数频率特性示于图7。\$L\_0\$ 曲线。从图得知：\$W\_{CO} = 12(1/s)\$, \$K\_{uo} = 32(1/s^2)\$。

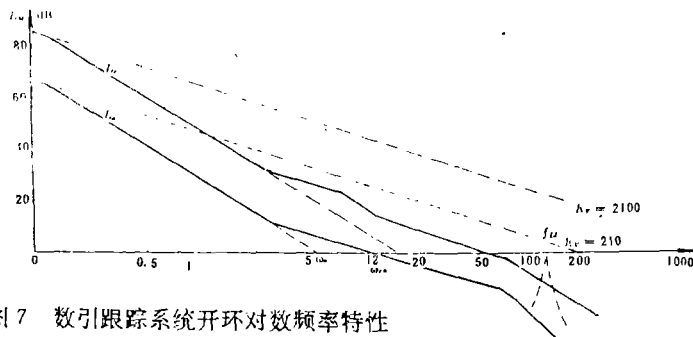


图7 数引跟踪系统开环对数频率特性

系统引入速度顺馈，全补偿条件 \$K\_{IL} \cdot K\_H = 1\$ 在工程中无法保证。将按非全补偿设计，则顺馈补偿系数为：\$\delta = \frac{1}{1 - K\_1 K\_H} = 10\$。

经推导，采用校正环节为 \$W\_{DC}(S)\$ 的非全补偿复合控制按偏差调节的等效开环传递函数近似为：

$$W_c(S) = \frac{2100(0.39S + 1)(0.09S + 1)}{S(8.4S + 1)(0.135S + 1)(0.015S + 1)}$$

顺馈非全补偿的采样复合控制系统，按偏差调节的等效开环对数频率特性为图中7的 \$L\_0\$ 曲线所示。系统等效品质因数：

$$K_v = 2100(1/s) \quad (\text{计算与实测基本一致})$$

$$K_a = 290(1/s^2)$$

速度顺馈全补偿的复合控制系统理论上是不影响系统的绝对稳定性。但非全补偿复合控制系统由于引入新的闭环零，极点，将对系统稳定裕度和动态性能产生一定影响。特别是对于谐振频率偏低、阻尼小的机械结构组成的跟踪系统，对于剪切频率右面靠近谐振点的高频区要加以必要的校正措施。

#### 2.4 单杆半自动跟踪系统

半自动跟踪系统是由人通过瞄准镜操纵单杆控制仪的跟踪目标。方位半自动跟踪系统原理方框图示于图8。

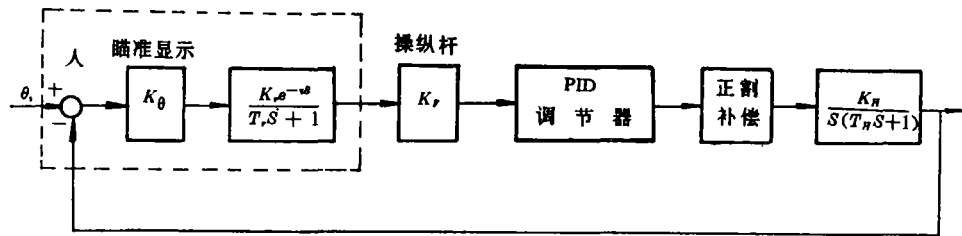


图8 单杆半自动跟踪系统方框图

单杆半自动跟踪系统是人参与控制的伺服系统，正确的处理人在半自动跟踪中的调节作用，恰当的选取 PID 控制器结构与参量，使操作手在跟踪时工作任务简单化。对此，半自动跟踪系统设计应考虑以下要点<sup>[4]</sup>：

### 1. 操作手的传递函数

人在系统中起检测角差的作用，从发现目标到手动作有一定延时，还具有低通滤波特性，为使系统稳定操作手应调节增益，或要有超前和高频滞后效应。则人的传递函数近似为：

$$W_m = \frac{K_m \cdot e^{-\tau s} (T_2 s + 1)}{(T_r s + 1)(T_1 s + 1)}$$

式中： $K_m = K_1 \cdot K_r$ ；

一般选取： $\tau = 0.15(s)$ ； $T_r = 6(s)$ ； $T_2 = 0.5(s)$ ； $T_1 = 0.04(s)$ 。

### 2. PID 调节器简化人的操作

上述人传递函数中的超前和高频滞后校正将由 PID 调节器完成，人只起放大和低频滞后作用。则人的传递函数简化为：

$$W_m(s) = \frac{K_m e^{-\tau s}}{T_r s + 1}$$

半自动跟踪在 PD 控制时，调节器参量应满足辅助跟踪时间常数（位置与速度灵敏度之比） $T_D = (0.25 \sim 0.5) s$ 。

对于跟踪大加速度目标，系统采用 PID 控制，文献指出，这时 PID 调节器参量选取使系统的位置，速度，加速度灵敏度之比为 1 : 4 : 8，较为适宜。

### 3. 半自动系统带宽的选取

由于人的响应不高，1Hz 以下，该系统带宽不宜取高，其开环剪切频率为 5 (1/s)，否则人很难操纵。要求调速回路等效时间常数 ( $T_H$ ) 小于 0.05 (s)。

按上述原则设计两种半自动操纵特性，其一为 PD 调节系统特性：

操纵杆比例系数：

$$K_r = 13V/\text{rad},$$

人的传递函数应为：

$$W_m^1(s) = \frac{65 \cdot e^{-0.15s}}{6s + 1}$$

PD 调节器的传递函数近似为：

$$W_b(s) = 3 \times \frac{0.45s + 1}{0.04s + 1}$$

这时，系统的开环传递函数近似为：

$$W_x(s) = \frac{75e^{-0.15s} \cdot (0.45s + 1)}{s(6s + 1)(0.04s + 1)(0.013s + 1)}$$

其二，PID 调节系统特性：

人的传递函数取为

$$W_m = \frac{3 \cdot e^{-0.15s}}{6s + 1}$$

PID 调节器传递函数近似为：

$$W_b = \frac{3 \cdot (0.45s + 1)}{s(0.04s + 1)}$$

则系统开环传递函数近似为：

$$W_Y(s) = \frac{3.5 \cdot e^{-0.15s}(0.45s + 1)}{s^2(0.04s + 1) \cdot (0.013s + 1)}$$

上述二种调节器半自动方位系统开环特性示于图 9， $L_x$  曲线和  $L_Y$  曲线。

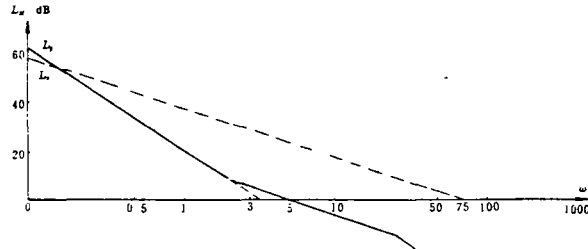


图 9 半自动跟踪系统开环对数频率特性

半自动跟踪系统，因存在  $e^{-ms}$  纯滞后环节，将影响系统的相频特性，经计算相角稳定裕度满足要求，系统稳定。

### 3 跟踪伺服系统的检测和交验

#### 3.1 室内检测验收

260" 光电经纬仪于 1990 年 5 月由使用部门，在长春进行室内检测验收，其结果如下：

系统运动参量

1. 最大角速度：38.2°/s
2. 最低角速度：0.02°/s
3. 最大角加速度：53°/s<sup>2</sup>
4. 低速爬行：2.4"（要求了 30 分钟 18'）

数学引导跟踪

该系统通过改变跟踪零位，可在任意范围内搜索捕获目标。在线性范围内过渡时间  $\leq 0.5s$ 。在  $57 \cdot \sin 0.35t$  ( $\dot{\theta} = 20^\circ/s$ ,  $\ddot{\theta} = 7^\circ/s^2$ ) 引导程序下，系统跟踪的最大误差  $E_{max} \leq 49''$ （远小于 3' 要求）。随机误差  $\Delta E_T \leq 8.4''$ 。

电视自动跟踪

电视跟踪系统在 2/3 视场内可以平稳的捕获目标，在其线性范围内过渡时间小于 0.5s。

在靶标旋转周期  $T = 10.8s$ , 此时仪器相对应角速度:  $\dot{\theta} = 11^\circ/s$ , 角加速度  $\ddot{\theta} = 7.1^\circ/s$  引导下, 方位系统跟踪误差:

$$E_{\max} = 1', 15''; \Delta E_r = 20'' \quad (f = 1m)$$

$$\Delta E_{\max} = 1'20''; \Delta E_r = 26'' \quad (f = 2m)$$

### 单杆半自动跟踪实验

按半自动系统设计原则构成 PID 调节器系统, 采用直流电位器操纵杆, 以正弦引导法进行了方位半自动模型跟踪实验。其跟踪误差的均方值如表 1 所列。

表 1

角速度 \ 角加速度 误差	$1^\circ/s^2$	$2^\circ/s^2$	$3^\circ/s^2$	$4^\circ/s^2$
$15^\circ/s$	1.1'	1.5'	1.8'	2.7'

实验证明在目标加速度较大时, 系统加入适当分量对跟踪有利。

### 跟踪伺服系统的可靠性

260<sup>#</sup>跟踪伺服系统不但跟踪精度高而且整机可靠性也很高。该跟踪系统于 1989 年用三个月的时间, 在长春机场实验, 1990 年用三个月的室内检测验收和 1990 年用二个月基地外场交验, 长达 8 个月的不连续运行, 没出现一次故障, 始终工作稳定正常。系统可靠性要求 MTBF  $\geq 113$  小时, 和 MTTR  $\leq 0.5$  小时远被超过, 达到一个新水平。

### 3.2 基地外场交验

260<sup>#</sup>光电经纬仪活动站于 1990 年 10 月开始, 经短时间现场整机调试, 开始外场交验工作, 先后进行了对多种目标的多次单站跟踪测量, 按要求较顺利地一次交验成功。于 1991 年元月结束, 交付使用部门。

#### 电视自动跟踪

在对多种目标的跟踪测量中, 目标相对经纬仪的最大角速度约为  $6^\circ/s$ , 最大角加速度约为  $2^\circ/s^2$ , 电视自动跟踪最大误差  $\Delta E_{\max} \leq 12''$  (电视脱靶量由微机记录求得)。

电视跟踪作用距离, 交验时能见度差, 为 28km。当能见度较好时对距离约 45km 的目标。可以闭合跟踪。

#### 单杆半自动跟踪

单杆半自动跟踪系统, 在外场的多次跟踪测量中系统跟踪误差小于 2'。

#### 数引跟踪

在外场交验中多次对准方位标激光靶标测量使用数引跟踪系统满足使用要求。

#### 跟踪工作方式转换

该跟踪系统, 在长春机场的实验, 基地的外场校正交验过程中, 系统跟踪状态转换, 在微机控制下平稳可靠, 每次均获得成功。

自动跟踪平稳转换措施是当目标进入电视视场阈值, 受微机控制进入随机定点跟踪, 而后按控制程序平滑转入正常跟踪。

## 4 结 束 语

260"光电经纬仪跟踪系统,经室内和外场的检测验收证明,其主要技术指标都超过使用要求。在几次重要测量任务中该仪器采用单站测量,都因获得测量数据全、精度高及稳定可靠。

在科研生产中,为满足国防光电工程跟踪技术发展的需要,我们在确保质量的同时,将使光电跟踪控制系统的性能和技术再上新台阶。

### 参 考 文 献

- [1] 李连升,《液压伺服理论与实践》,国防出版社,1990,11
- [2] 王毅、魏忠和,补偿伺服系统速度和加速度误差的方法,光学机械, No. 3, 1978
- [3] S. M. 欣内尔斯,《现代控制系统理论及应用》,机械出版社,1980.1
- [4] 唐九华,操纵人员连续参与的随动系统,长春光机所内部资料

## Development of a Tracking Servo System for the 260" A Cinetneodolite with Laser and Video

Wang Yi

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

### Abstract

This paper describes design considerations for and the main performances of the tracking servo system with computer guiding and video and manual tracking modes, developed for the 260" A cinetneodolite with laser and video, represents the results tested in both lab. and the field. Practical application shows that the design method given in the paper is correct and useful.

Key words: Computer guiding, Tracking servo system, Cinetneodolite