

跟踪伺服系统的工程研制及检测

王 毅 刘丽华 高伟志 王贵文

(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。

关键词: 跟踪; 伺服系统; 检测

1 概 述

1.1 系统的用途

该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。首台系统于1990年完成室内验收, 并于1991年完成外场交验。已交付使用四年多。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。

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

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。

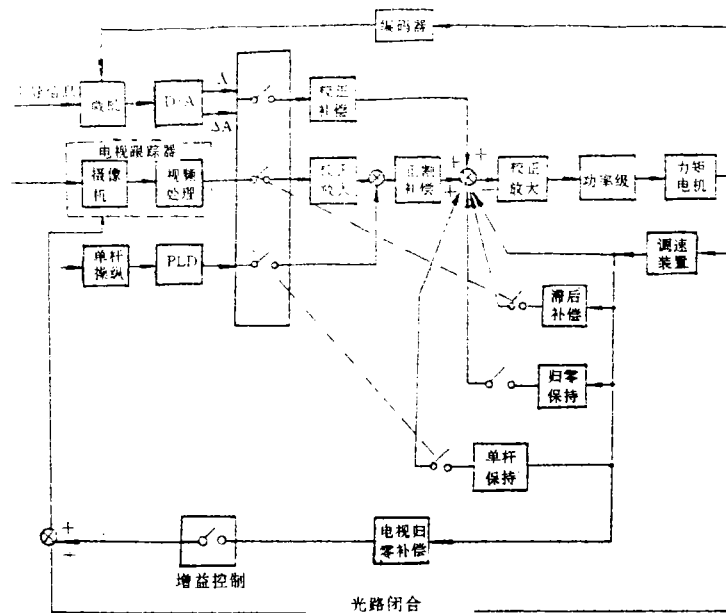


图1 跟踪伺服系统方框图

1.2 跟踪伺服系统的原理框图

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

2 跟踪伺服系统的设计及主要性能。

2.1 调速回路的设计

调速回路采用晶体管脉冲调宽驱动方案是为了获得较宽的调速范围,快速动态响应及较高的开环增益及性能。

经计算该调速回路,工程设计要求闭环带宽 $f_B \geq 12\text{Hz}$ 。因为仪器的方位结构谐振频率为 22Hz 。欲达到这一要求需采取措施。对此,采用双陷波串联反谐振补偿及适当增大系统阻尼办法^[1],并进行合理的回路校正。经设计和调试后该回路结构方框图如图2所示。

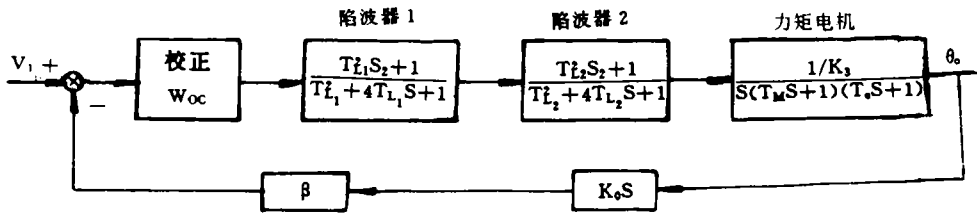


图2 方位系统调速回路结构框图

该回路的开环传递函数为:

$$W_G(s) = \frac{950(0.09s + 1)}{(3.9s + 1)(0.35s + 1)(0.0045s + 1)}$$

经推导简化获得其闭环传递函数:

$$\Phi_G(s) = \frac{0.03}{0.013s + 1}$$

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, $f_L = 40\text{Hz}$,其调速回路闭环带宽约为 18Hz , $\zeta = 0.9$ 。闭环传

递函数近似为: $\Phi_G(s) = \frac{K_H}{TmS + 1} = \frac{0.03}{0.009s + 1}$

由于方位调速回路带宽比高低系统低得多,以下着重叙述方位角跟踪系统及有关参量的设计。

2.2 电视自动跟踪系统

2.2.1 电视角跟踪伺服系统的设计

仪器的电视自动跟踪系统,采用形心电视跟踪器,(焦距 $f = 1\text{m}$ 或 $f = 2\text{m}$)。

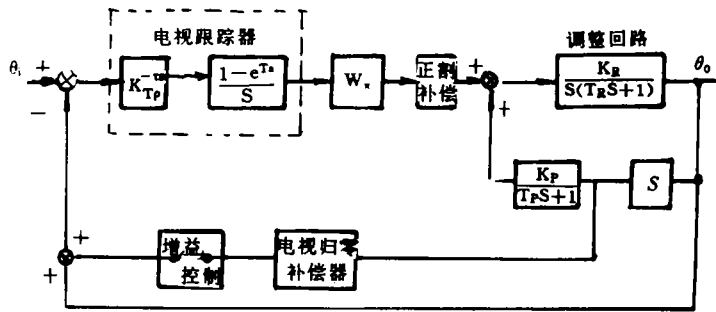


图3 电视跟踪伺服系统原理结构图

该跟踪伺服系统控制结构原理方框图如图3所示。

该系统位置回路采用串联双微积分校正,并引入速度滞后补偿提高系统跟踪精度^[2],补偿系数 $\alpha=3.5$ 。而无速度滞后补偿系统品质因数 $K_{\infty}=920(1/s)$ 、 $K_{\omega}=185(1/s^2)$ 。

采用准频率概念,令 $s=j\lambda$,用对数频率法综合具有一定纯滞后的数字采样系统,其开环断续频率传递函数近似为:

$$W_i(j\lambda) = \frac{3200 \cdot (1 + j\lambda 0.34)(1 + j\lambda 0.28)(1 + j\lambda 0.2)(1 - j\lambda 0.025)(1 + j0.12)}{j\lambda \cdot (1 + j\lambda 3.7)(1 + j\lambda 1.4)(1 + j\lambda)(1 + 0.025j\lambda)}$$

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4曲线 L_1 所示。校正后系统等品质因数: $K_v=3200(1/s)$ 、 $K_a=550(1/s^2)$ 。系统形环切频 $\lambda=W_c=12(1/s)$ 。该系统为条件稳定系统。

2.2.2 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量又

较大,就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。

为了消除这种系统自振荡,电视跟踪伺服系统采用了变参量变增益控制结构^[3],即当电视跟踪归零,系统转入低增益高阻尼工作状态,相应的开环断续频率传递函数为:

$$W_T(j\lambda) = \frac{25 \cdot (1 + j\lambda 0.28)(1 - 3\lambda 0.25)(1 + j\lambda 0.012)}{j\lambda \cdot (1 + j\lambda 0.29) \cdot (1 + j\lambda 0.025)}$$

按上式绘制其开环对数频率特性如图4曲线 L_2 ,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,零位自振荡消除。该措施简便可靠适于工程应用。

2.3 微机数学引导跟踪系统

系统在微机控制下转入数学引导跟踪状态,它同时具有单杠半自动修正功能,该跟踪伺服系统简化方框图如图5所示。

引导信息为20位,最高位为 180° ,最低位 $1''$.23。D/A 转换板(328板)通道12位,角差输出的线性范围 $\pm 42'$ 。

图5的数引跟踪系统是典型的数字采样复合控制系统,按常规进行设计。无顺馈系统速度品质因数 $K_{\infty}=210(1/s)$ 、 $K_{\omega}=32(1/s^2)$,

开环切频 $W_{\omega}=12(1/s)$,正向通路采用串联校正。除去顺馈、闭环部分的开环传递函数为:

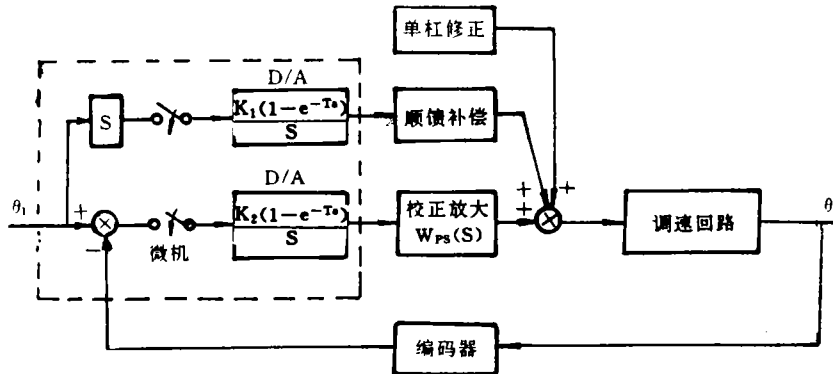


图5 数引跟踪伺服系统简化方框图

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

方位系统闭环部分的开环对数频率特性示于图6曲线 L_0 。

系统引入速度反馈,因在工程上无法保证全补偿条件,将按非全补偿设计,速度补偿系数 $\delta=10$ 。

经推导,校正后的非全补偿复合控制偏差调节的等效开环传递函数近似为:

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

相对应的等效开环对数频率特性如图6曲线 L_c 所示。系统等效品质因数: $K_v=2100(1/s)$ (计算与实测基本一致), $K_a=290(1/s^2)$ 。

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器跟踪目标。方位半自动跟踪系统原理方框图示于图7。

单杆半自动跟踪系统是

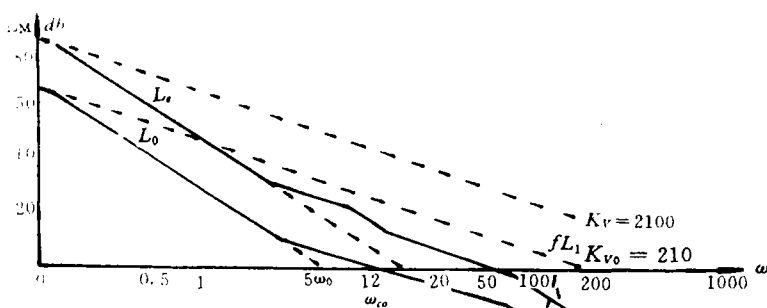


图6 数引跟踪系统开环对数频率特性

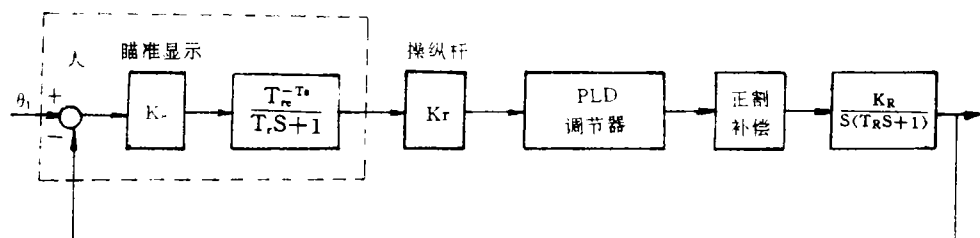


图7 单杆半自动跟踪系统方框图

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。按半自动跟踪系统基本设计原则^[4]进行工程设计。

系统设计两种半自动操纵特性,其一为PD调节特性,其辅助跟踪时间常数 $T_D=(0.25\sim 0.5)s$,该系统开环切频 $W_c \leq 5(1/s)$ 。考虑人的传递函数,具有PD调节器的单杆半自动系统的开环传递函数近似为:

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

其二为PID调节系统特性,考虑人的传递函数,具有PID调节器的单杆半自动系统的开

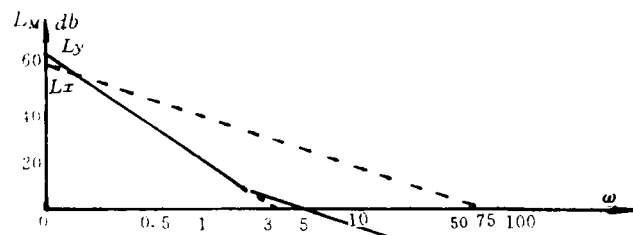


图8 半自动跟踪系统开环对数频率特性

环传递函数近似为:

$$W_Y(s) = \frac{3.5e^{-0.1s} \cdot (0.45s + 1)}{s^2(0.04s + 1)(0.013s + 1)}$$

上述两种调节器半自动系统开环对数频率特性示于图8的 L_r 曲线和 L_Y 曲线。

3 跟踪伺服系统的检测和实验。

3.1 室内检测验收

首台仪器于1990年5月进行室内检测,其结果如下所述。

3.1.1 系统运动参量

最大角速度:方位为 $38^\circ/\text{s}$

高低为 $37^\circ/\text{s}$

最低角速度:方位为 $0.02^\circ/\text{s}$

高低为 $0.016^\circ/\text{s}$

最大角加速度:方位为 $53^\circ/\text{s}^2$

高低为 $160^\circ/\text{s}^2$

低速爬行(30分钟): $2''.4$ (要求小于 $18'$)

3.1.2 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 $\leq 0.5\text{s}$ 。

系统在 $57\sin(0.35t)$ ($\theta = 20^\circ/\text{s}$, $\dot{\theta} = 7^\circ/\text{s}^2$)引导程序下的跟踪精度。

方位系统跟踪最大误差 $\Delta A_{\max} \leq 49''.2$, 随机误差 $\sigma_A \leq 8''.4$ 。

高低系统跟踪最大误差 $\Delta E_{\max} \leq 30''.6$, 随机误差 $\sigma_E \leq 16''.2$ 。

3.1.3 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,在其线性范围由过渡时间小于 0.5s ,在靶标旋转周期 $T = 10.8\text{s}$,仪器相应速度 $\theta_A = 11^\circ/\text{s}$; $\theta_E = 10.2^\circ/\text{s}$; $\theta_A = 7.1^\circ/\text{s}^2$; $\theta_E = 7.4^\circ/\text{s}^2$ 引导下,采用焦距 $f = 2\text{m}$,系统跟踪误差:

对于形心电视跟踪器构成的电视跟踪伺服系统,方位最大跟踪误差 $\Delta A_{\max} \leq 1'36''$,随机误差 $\sigma_A \leq 27''$,高低最大跟踪误差 $\Delta E_{\max} \leq 1'24''$ 随机误差 $\sigma_E \leq 8''$ 。

3.1.4 第二台跟踪伺服系统室内验收数据。

设备于1993年4月由用户进行室内验收,跟踪伺服系统主要检测数据如下:

a. 运动参量

最大角速度: 方位为 $40^\circ/\text{s}$

高低为 $37^\circ/\text{s}$

最低角速度: 方位 $< 0.01^\circ/\text{s}$

高低 $< 0.01^\circ/\text{s}$

最大角加速度: 方位为 $58^\circ/\text{s}^2$

高低为 $150^\circ/\text{s}^2$

爬行(30分钟) 方位为 $0.618''$ 即1个码。

高低不动。

b. 数学引导跟踪

系统在 $57\sin(0.35t)$ ($\theta=20^\circ/\text{s}$, $\dot{\theta}=7^\circ/\text{s}^2$) 引导程序下的跟踪精度。

方位系统跟踪最大误差 $\Delta A_{\max} \leq 22''$, 随机误差 $\sigma_A \leq 7''.8$ 。

高低系统跟踪最大误差 $\Delta E_{\max} \leq 30''$, 随机误差 $\sigma_E \leq 18''.4$ 。

c. 电视自动跟踪

由形心电视跟踪器构成的电视跟踪伺服系统, 采用焦距 $f=2\text{m}$, 在光学靶标旋转周期 $T=10.78\text{s}$ 引导下, 方位系统跟踪最大误差 $\Delta A_{\max} \leq 30''.2$, 随机误差 $\sigma_A \leq 7''.5$ 。

在光学靶标旋转周期 $T=10.53\text{s}$ 引导下, 高低系统跟踪最大误差 $\Delta E_{\max} \leq 42''$, 随机误差 $\sigma_E \leq 12''$ 。

3.1.5 跟踪伺服系统的可靠性

跟踪伺服系统不但跟踪精度高, 而且整机可靠性也很高。首台的跟踪系统于1989年用三个月时间在长春机场实验, 1990年二个月的室内检测验收和1990年三个月基地外场实验, 长达8个月的不连续运行, 没有出现一次故障, 没作任何调整, 系统始终工作稳定正常。系统可靠性要求 $\text{MTBF} \geq 79\text{h}$ 和 $\text{MTTR} \leq 0.5\text{h}$ 远被超过, 达到一个新水平。

3.2 基地外场交验

第一套260激光电视电影经纬仪于1990年10月开始, 经短时间现场调试, 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年月月结束, 交付用户使用。

3.2.1 电视自动跟踪

在对弹、对海和对空的多次跟踪测量中, 目标相对经纬仪的最大角速度约为 $6^\circ \sim 10^\circ/\text{s}$, 最大角加速度约为 $2^\circ/\text{s}^2$, 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)

3.2.2 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 $2'$ 。

3.2.3 数引跟踪

在外场交验中多次对准方位标及激光靶标测量中, 采用数引跟踪系统满足使用要求。

3.2.4 跟踪工作方式转换。

该跟踪系统, 在长春机场实验及基地外场交验过程中, 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时, 系统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

该仪器的跟踪伺服系统, 经室内和外场检测验收证明稳定可靠, 其主要技术指标都超过使用要求。在基地单站光测中, 由于获得测量数据全、精度高、工作稳定, 而受到称赞。

在工程设计和研制过程中, 由于采用了特殊的技术措施, 该光电跟踪系统, 在结构谐振频率过于接近所要求的系统带宽情况下, 仍获得了较好的系统品质因数, 其性能指标与同类设备相比, 居国内领先水平。

参 考 文 献

- [1]李连升, 液压伺服理论与实践. 北京: 国防工业出版社, 1990
- [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, 1978, (3): 13—20
- [3]S. M. 欣内尔斯, 现代控制系统理论及应用. 北京: 机械出版社, 1980

Development and Test of a Tracking Servo System

Wang Yi, Liu Lihua, Gao Weizhi and Wang Guiwen
(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes design considerations for the main performances of the tracking servo system with computer guiding and video and manual tracking modes, represents the results tested in both lab. and the field.

Key words: Tracking, Servo system, Test