

# 全数字化高速同步摄影控制系统

葛文奇 刘新群 李向学 王石戎

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

**摘要** 介绍了国内较为先进的260M电视电影经纬仪上的全数字化高速同步摄影控制系统, 给出了系统工作原理和控制器的设计方法以及实验结果。

**关键词:** 全数字化, 高速同步摄影, 控制系统

## 1 概述

高速同步摄影控制系统是电影经纬仪的重要组成部分, 它的好坏直接影响整个设备的性能。

高速同步摄影控制系统用于驱动高速摄影机, 使其按时统给定的摄影频率, 对目标飞行姿态及有关实时数据实现同步摄影, 达到记录的目的。

我们从一九八九年开始, 针对原控制方案的固有不足, 提出了全数字控制方案, 经过精心设计与试验, 于一九九零年完成工程样机, 并进行了跑片试验, 经检验满足任务书要求, 并生产了四台, 经室内及外场验收、交付使用近二年时间里, 已充分证明了该系统方案先进, 控制性能优良, 且可靠性高, 受到有关领导及用户的好评。

## 2 系统组成及工作原理

摄影机是电影经纬仪中的重要记录仪器。长期以来, 存在着同步精度低, 摄影频率范围窄, 工作不可靠等缺点, 影响了整个经纬仪的使用性能, 针对以上问题, 我们提出并设计了一种全数字化高速同步摄影控制系统, 其简化结构如图1所示。

该系统以单片高速信号处理器 TMS32010 为核心, 配以适当的外围电路, 完成摄影频率的测量, 摄影机速度和相位的检测, 变结构控制算法的实现, 调宽波信号的产生, 收片电机的控制以及附加安全连锁控制等功能。控制器输出的控制信号经 PWM 功率放大器放大驱动高速直流伺服电机, 使摄

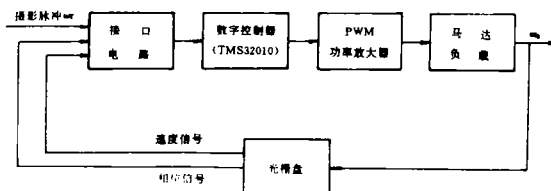


图1 系统简化方框图

影机快门开口角中心线与时统给定摄影脉冲前沿同步,并用机械式光栅盘即作测速又作测相,产生两种反馈信号。

### 3 系统控制回路分析

为了提高控制系统的性能,本系统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,其特点不仅是具有优良的静态和动态性能,而且对系统参数变化和扰动具有很强的适应能力。

图2给出了摄影机系统控制对象的等效传递函数方框图

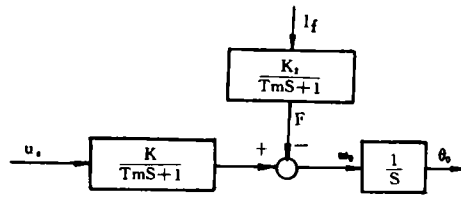


图2 等效传递函数方框图

#### 3.1 离散变结构滑模控制器

我们熟知,对连续时间系统

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + bU(t) \quad (1)$$

其中  $X(t) \in R^n$ ,  $U(t)$  为标量控制输入,  $(A, b)$  为可控对, 变结构控制的形式为

$$U(t) = \begin{cases} U^+(t); S(X) > 0 \\ U^-(t); S(X) < 0 \end{cases}$$

其中切换函数为  $S(X) = C^T X(t)$ ,  $C \in R^n$  为常向量,  $S(X)$  的系数  $C_i$  由系统期望的动态响应决定, 则控制器参数由滑模存在的条件  $S(X)\dot{S}(X) < 0$  决定。

对于离散系统情况, 将系统(1)离散化, 得对应的离散化状态方程为:

$$X(K+1) = A_d X(K) + B_d U(K) \quad (2)$$

切换函数的离散化形式为  $S(K) = C^T X(K)$ , 取离散变结构控制的形式为:

$$U(K) = \begin{cases} U^-(K); S(K) > 0 \\ U^+(K); S(K) < 0 \end{cases}$$

则离散变结构控制器切换超平面上准滑模存在的条件为:

$$\begin{cases} [S(K+1) - S(K)]S(K) < 0 \\ [S(K+1) + S(K)]S(K) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

#### 3.2 相位回路的离散变结构积分控制器

相位回路的结构框图如图3所示, 将离散变结构控制环节与积分环节串联构成离散变结构积分控制器。

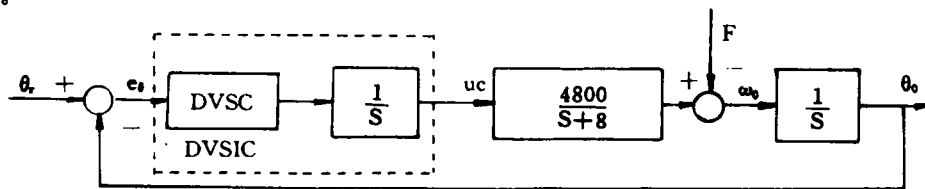


图3 相位回路结构框图

为了确定变结构积分控制器的参数, 将控制对象和控制器的积分环节一起看作一个广义的控制对象, 如图4所示。

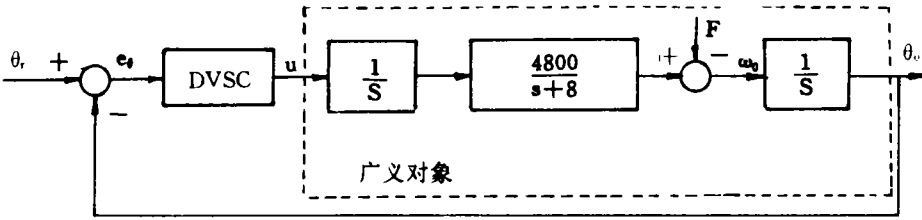


图4 确定变结构积分控制器参数的广义控制对象图

不考虑负载扰动,取系统偏差及其各阶导数为状态变量:

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= e_\theta(t) \\ x_2(t) &= \dot{x}_1(t), x_3(t) = \dot{x}_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则此回路的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 4800 \end{bmatrix} U(t) \quad (5)$$

对系统进行零阶保持采样,采样周期  $T_s = 1.2288\text{ms}$ ,则得其对应的离散时间系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} x_1(K+1) \\ x_2(K+1) \\ x_3(K+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.0012288 & 0.000000752 \\ 0 & 1 & 0.001222779 \\ 0 & 0 & 0.990217768 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(K) \\ x_2(K) \\ x_3(K) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.00000148 \\ 0.0036096 \\ 5.8693392 \end{bmatrix} U(t) \quad (6)$$

用二次型最优方法设计变结构控制器的切换函数,可得

$$S_p(K) = 400x_1(K) + 40x_2(K) + x_3(K) \quad (7)$$

取离散变结构控制为:

$$U(K) = \begin{cases} \alpha_p x_1(K); & x_1(K)S_p(K) > 0 \\ \beta_p x_1(K); & x_1(K)S_p(K) < 0 \end{cases}$$

由离散变结构准滑模存在的条件(3)可取

$$\alpha_p = 30 \quad \beta_p = -30$$

由于控制器中存在一积分环节,故由恒值负载扰动引起的稳态相位误差为零。

速度回路变结构积分控制器的设计与相位回路相似,在此不再赘述。

### 3.3 系统控制技术

锁相控制系统的总体结构图如图5所示

为了使系统达到快速锁相的目的,控制器按如下规则动作。

a. 先接通软开关  $K_1$ ,进行变结构积分调速;

b. 调速稳定后,断开  $K_1$ ,接通软开关  $K_2$ ,进行变结构积分锁相,上述控制算法均由软件实

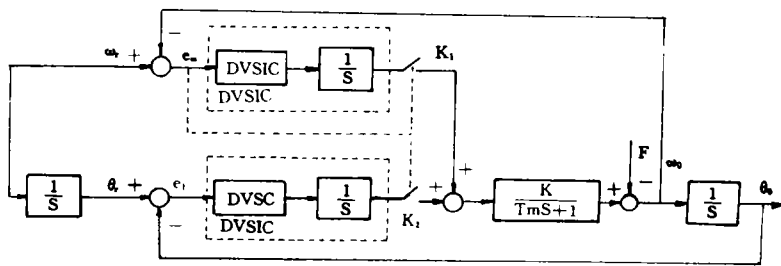


图5 锁相控制系统的总体结构图

现。

### 3.4 实测结果及说明

经总检组对四台仪器测试,系统在各种频率下的运行结果如下表所示。

摄影频率	2	4	10	20	40	100	200	240
同步精度(度)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<3	<4
同步时间(秒)	<4	<3	<2	<2	<2	<2	<2.5	<3

从前面变结构积分控制器的设计中已知,在恒定摄影频率、恒值负载扰动下,系统的稳态相位误差为零。但实际上,由于系统的固有因素,如光栅盘槽数,摄影频率波动、以及机械摩擦等,系统的同步精度不可能为零,各种动态扰动如电网电压波动,负载动态扰动等,也会使同步误差增大,由于鉴频需要时间,为协调主电机和收片电机转速需柔性启动,都使同步时间有所增加。总之,理论分析和实测结果是一致的。

## 4 系统特点与结论

### (1) 全数字化

本系统全部采用数字电路,既无 A/D 变换器,也无 D/A 变换器,不仅精度高,而且无漂移,成本低,同时经改变软件设计又有进一步扩充功能的余地。

### (2) 摄影频率连续可调且在摄影过程中可以任意改变。

由于本系统能对给定摄影频率进行实时准确测量,在控制上采用了自适应变结构控制算法,从而使系统不仅能在2~240帧/秒间任何频率上工作,而且可在摄影过程中任意改变工作频率,特别在高速摄影时(大于100帧/秒),可以在任何收片量下启动工作,而不会产生堆片和断片现象,为使用提供了方便,解决了多年来一直存在的难题,这在国内也是前所未有的。

### (3) 同步精度高

由于系统采用了滑模变结构积分算法,增强了系统对参数变化和各種扰动的抵抗能力,从而提高了摄影机的同步精度。

### (4) 可靠性高

系统中采用了中大规模集成电路,在软件上设计了自检程序,给使用和维护提供了方便。同时还设置了堆断片报警和停机保护、不同步报警、轮片阻尼控制以及自动加温电路等;使该系统具有很高的可靠性。

## 参 考 文 献

- [1]V. I. Utkin, Variable Structure Systems with Sliding modes. IEEE Trans. Automat. Contr. , 1977, 22: 212—222
- [2]B. Drazenovic, The Invariance Conditions in Variable Structure Systems. Automatica, 1969, 5: 287—295
- [3]S. Z. Sarpturk, *et al.*, On the Stability of Discrete Time Sliding Mode Control Systems. IEEE Trans. Automat. Contr. , 1987, 32: 930—932

- [4]Xinqun Liu, *et al.*, Quasi-sliding Mode Discrete Variable Structure Control of a Fully Digital DC Position Servo System Based on a Single-Chip Microcomputer. Proceedings of International Conference on Signal & Systems, 1990, 13: 1-9

## Fully Digital Control System for High-speed Synchronous Cameras

Ge Wenqi, Liu Xinqun, Li Xiangxue and Wang shirong  
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

This paper introduces a fully digital control system for high-speed synchronous cameras, Which are used in the advanced cinetheodolite 260M. The constitution of the system and the design method of the controller are discussed. The running results of the system is also given.

**Key words:** Fully digitalization, High-speed synchronous cameras, Control System