

胶片速度与张力控制系统

于前洋 李朝阳 刘伯翔 胡存举

摘要: SAR 光学处理器为获得高的动态分辨率,需要一套精密的输片机控制系统。它要保证数据胶片和图像胶片平稳、匀速而且同步地运动。为此,我们研制了胶片速度与张力控制系统,其中采用带有复合控制的锁相回路来控制胶片速度,并用同一具高稳定度的标准脉冲信号源来驱动两套输片机,从而使其速度的跟踪误差小于0.3%;还采用了用光电编码器作为位置传感器的张力控制系统,它使整个输片速度范围内的张力波动小于6.8 g。本文叙述了上述系统的工作原理、主要性能和达到的指标,给出了实测数据和曲线。

一、概 述

SAR光学处理器将 SAR 获得的数据胶片经过光学处理,在图像胶片上曝光而产生可见图像。为得到连续幅面的图像,已载有信息的数据胶片和等待曝光的图像胶片要作平稳、匀速而且同步的运动。任何胶片运动中的抖动和不均匀,将使图像模糊而降低动态分辨率。两胶片间运动的不同步,将改变图像的纵横比,从而造成图像畸变。为此,必须研制一套精密的胶片速度与张力控制系统。

使用锁相技术进行速度控制,是一种已经成熟的先进技术,由于它用基准频率脉冲与实际频率脉冲的相位差进行闭环控制,因此在同步时稳态频率误差为零。其相位误差的抖动分量构成系统的瞬态频率误差。通过提高系统的增益(K_V 值)可以减小这种误差。为适应较大的调速范围(速比100),并使系统有较快的响应,我们采用频率电压变换器,将输入的基准脉冲的频率,直接转换为电压信号,与相位误差信号叠加,从而构成开环控制通路。这种复合控制的锁相调速系统,响应快,同步频带宽,较好的满足了 SAR 光学处理器对输片控制的要求。

对胶片实现精密的张力控制的目的是有两个,其一是为了减小由于数据胶片和图像胶片沿运动方向的不平直和弹性变形而产生的处理误差,其二是为了减小对输片绞轴的力矩波动,从而减小速度控制系统的相位抖动。用张力杆与光电编码器组合成张力传感器,可将张力的变化转换成角位置的变化,这样就可用位置控制原理来控制张力。为适应胶片轮因载片量变化而产生的惯量变化,还采用了自动增益控制技术,解决了惯量改变时增益与稳定性的矛盾。

下面将分述这两种系统的工作原理、性能分析以及实测结果。

二、锁相式胶片速度控制系统

1. 结构框图与工作原理

速度控制系统的结构框图如图1所示。频率合成器1发出高稳定度、频率近乎连续可调

的基准脉冲信号，它一方面作为数据输片机速度控制系统的输入基准脉冲，另一方面送给频率合成器Ⅱ，经它作精密的分频后，作为图像输片机速度控制系统的输入基准脉冲。这样，两套输片系统的跟踪运动问题可得到合理的解决。进入锁相后，稳态跟踪误差为零，而瞬态跟踪误差则由控制系统的相位抖动以及机械部分的因素所决定。

直流力矩电动机、直流测速机和圆光栅同轴耦合，形成高精度、高刚度的测速、测角部件和执行部件的组合件。由测速机提供转速信号的速度反馈回路，将执行部件的响应带宽扩展，由圆光栅输入的正弦信号，经放大整形后形成代表角位置的脉冲信号进入相位鉴别器，由它检测出基准脉冲与反馈脉冲的相位差，用以控制力矩电机的转速，达到相位锁定的目的。这与通用的锁相系统相同，细节不再赘述。

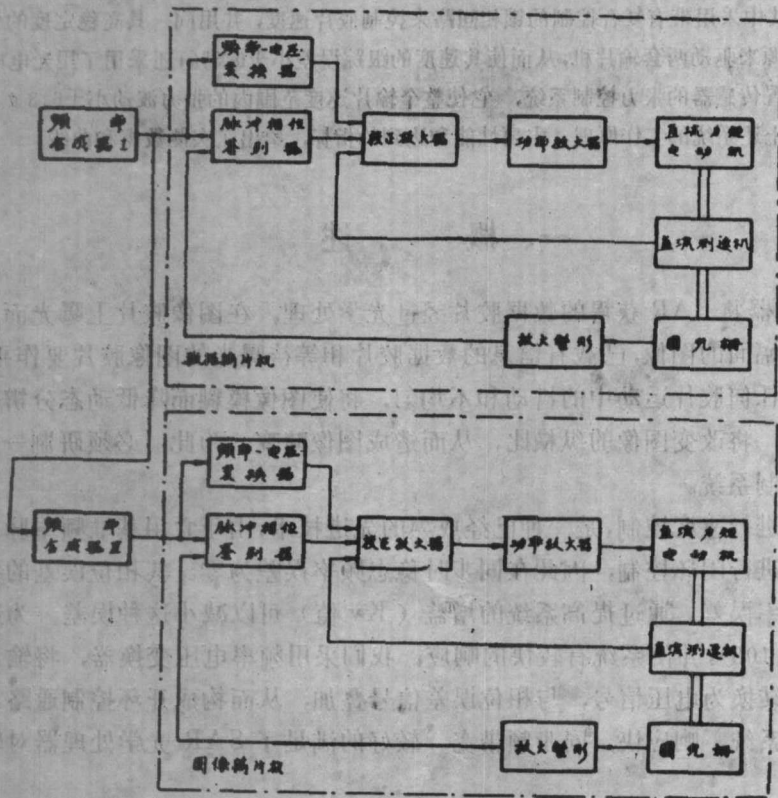


图1 锁相式胶片速度控制系统框图

频率合成器产生的基准脉冲，除用作相位鉴别以外，还有一路送到频率—电压变换器，将变换后的与频率成比例的电压信号，作为开环控制的输入量，直接加至驱动力矩电机的放大器上。这样，就构成了具有复合控制的锁相调速系统。

2. 实测结果与分析

系统的主要环节：

直流力矩电动机 SYL-30

直流测速机 CYD-11

圆光栅 10800对线/每转

功率放大器 比例式双向直流放大器

同步时间 0.2-0.4s

跟踪误差每 0.3%

三、胶片张力控制系统

1. 结构框图与工作原理

每台输片机有两套张力控制系统，分别控制供片盘和收片盘的张力，其结构框图见图4。它们实质上是两套位置伺服系统，把光电电位器 W_1 、 W_2 的动臂保持在固定的位置。在一定的前提下，胶片的张力可由张力杆 T_1 、 T_2 的摆动角度来测量。由于张力杆与光电电位器的动臂刚性联接，因此，系统将光电电位器的动臂位置保持恒定，就相当于将胶片张力保持恒定了。

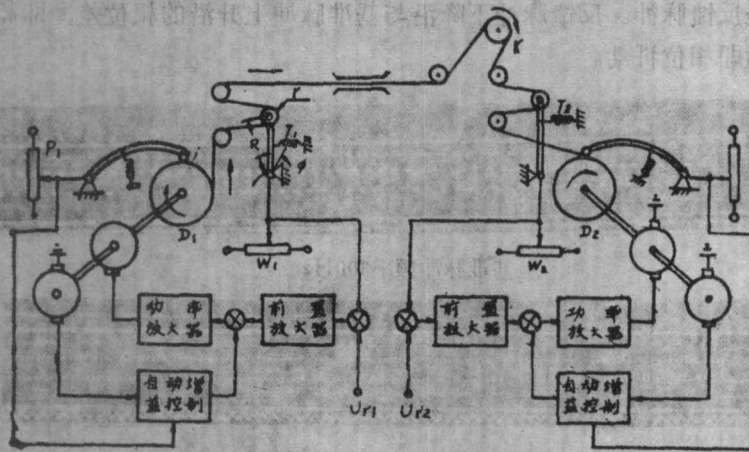


图4 张力控制系统结构框图

参考电压 U_{r1} 、 U_{r2} 使供片盘 D_1 和收片盘 D_2 产生转矩，它们从相反的两个方向张紧胶片。当输片辊 K 转动时，带动胶片沿箭头方向运动。输片过程中由于各种阻力矩的变化引起胶片张力的变化，使张力杆偏离初始整定位置，从而使光电电位器电压变化。这种反馈电压与参考电压 U_r 的差值，将使力矩电机产生附加转矩以补偿这种胶片张力的改变，使张力稳定在原先整定的值附近。

胶片较长时间的连续运动，使供片盘和收片盘直径变化。这就使系统的增益和惯量都发生变化。为使系统稳定，在速度反馈回路中设置了自动增益控制（AGC）电路。AGC的工作由片量指示电位器 P_1 、 P_2 控制，当片盘直径变大时，它使速度反馈加深，从而保持系统的增益和稳定性基本不变。

2. 系统性能分析

由系统各环节传递函数组成的框图见图5。其中：

k_1 前置放大器的放大倍数

k_2 功率放大器的放大倍数

k_3 速度反馈回路的传输系数

- a 张力杆—光电电位器的传输系数
 C_M 直流力矩电机的力矩系数
 L_s 直流力矩电机的电枢回路电感
 R_s 直流力矩电机的电枢回路电阻
 M_s 折算到电机轴上的阻力矩
 J 电动机、测速机、片盘组件的惯量
 f 电动机、测速机、片盘组件的粘滞摩擦系数
 r 片盘半径
 R 张力杆的回转半径
 ϕ 张力杆的摆动角度，在一定的条件下，胶片张力才与 ϕ 成比例。

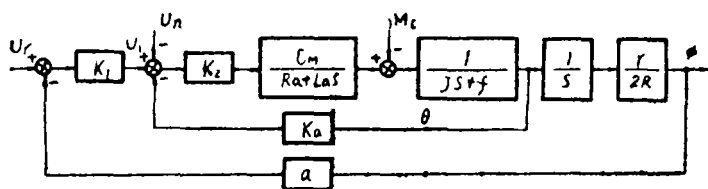


图5 张力控制系统框图

(1) 自动增益控制

当速度回路的开环增益足够大时，它的传递函数可简化为

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{k_s} \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1} \quad (1)$$

其中，速度回路的自然振荡频率 ω_n 和相对阻尼系数 ζ 分别为，

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_2 C_M}{L_s} \cdot \frac{k_s}{J}} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{R_s}{2} \sqrt{\frac{1}{k_2 C_M L_s} \cdot \frac{J}{k_s}} \quad (3)$$

这时，整个系统的开环增益

$$k = \frac{a k_1}{2R} \cdot \frac{r}{k_s} \quad (4)$$

可见，为使片盘半径 r 因输片而产生变化时，增益 k 不变，必须满足

$$\frac{r}{k_s} = \alpha = \text{const.} \quad (5)$$

这意味着，速度反馈的强度要随着片盘半径 r 的加大而增强。由(2)，(3)可见， k_s 的变化，将影响 ω_n 和 ζ ，即速度回路的性能也产生变化。

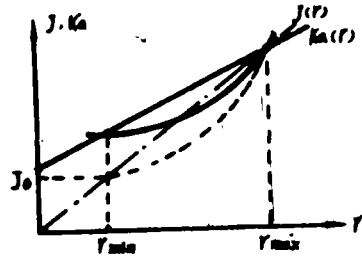
ω_n 和 ζ 与比值 k_s/J 有关。为此，必须使

$$\frac{J(r)}{k_a(r)} = \text{const.} \quad (6)$$

由于转动惯量 J 与片盘半径 r^4 有关,因此,当 k_a 满足(5)式时,比值 k_a/J 不可能在任何 r 时处处保持不变,而只能在某几点,例如片盘半径的两个极端值 r_{\min} , r_{\max} 处保持不变,如图6所示。

一般说来, $J(r)$ 曲线的两点 $J(r_{\min})$ 和 $J(r_{\max})$ 的连线不一定通过原点,因此(5)式不能满足。为此,可修改曲线 $J(r)$ 的形状,使这两个点的连线可通过原点,如图6点划线所示,这只要使

$$J_0 = C_1 r_{\min}^4 \cdot \left[\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right)^4 - 1 \right] / \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}} - 1 \right) \quad (7)$$



其中: C_1 为一系数

图6 惯量和速度反馈量与 r 的关系

实际系统的有关参数和计算结果见表1,由表1第6—8行可见,当片盘半径从3cm变到5.5cm时, ω_n 、 ζ 变化不大,而 k 值变化较大,这是由于(6)式满足得较好,而(5),(7)两式满足得不好的缘故。

(2) 张力稳定精度

研究参考电压 U ,不变时的张力稳定精度,这时,方框图可变换成图7。

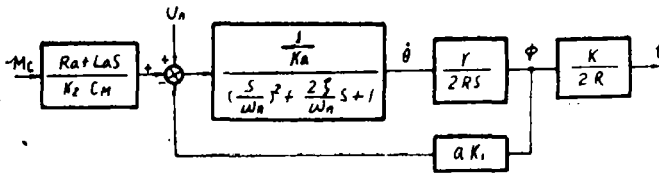


图7 变换后的张力控制系统框图

其中: K —比例系数

U_n —折算到功率放大器输入端上的干扰电压(包括测速机的纹波,前置放大器的噪声、漂移等)

由方框图可推出稳态张力误差

$$\Delta t_{s1} = \frac{K}{2R} \cdot \frac{1}{k_1 a} \left[U_n - \frac{R_0}{k_2 C_M} M_c \right] \quad (8)$$

当输片速度为 U [mm/s] 时,引起的稳态张力误差

$$\Delta t_{s2} = \frac{-K}{2R} \cdot \frac{k_a}{k_1 a r} \cdot U \quad (9)$$

表1第10行列出了 $U = 25$ mm/s时的稳态张力误差 Δt_{s2}

(3) 稳定性与带宽

系统开环幅频特性的渐近线,在剪切频率附近,如图8所示

表 1 系统参数和特性的计算值

项目	参数	量纲	供片盘		收片盘	
1	k_1		7.6		7.8	
2	k_2		9.6		9.5	
3	a	[V]	16		17	
4	r	[cm]	3	5.5	3	5.5
5	k_a	[V·s]	0.50	0.56	0.52	0.70
6	ω_n	[1/s]	235.7	234.9	248.5	257.9
7	ξ		2.12	2.13	1.92	1.86
8	$k = \omega_c$	[1/s]	91.2	149.3	95.6	130.2
9	K		4.23		2.70	
10	$\Delta t_{1,2}$	[g]	1.8	1.1	1.1	0.8
11	ω_c / ω_n		0.387	0.636	0.385	0.505
12	γ	[deg]	47.7	25.1	47.9	36.4

其中:

$$\omega_c = k = \frac{ak_1}{2R} \cdot \frac{r}{k_a} \quad (8)$$

剪切频率处的相角滞后为

$$\varphi(\omega_c) = -90^\circ - 2\text{tg}^{-1} \frac{\omega_c}{\omega_n} \quad (9)$$

当相角稳定裕度 $\gamma = 45^\circ$, 即 $\varphi(\omega_c) = -135^\circ$ 时,

$$\omega_c = 0.414\omega_n \quad (10)$$

为保证系统有 10db 的幅度稳定裕度, 必须使

$$\omega_c \leq 0.316\omega_n \quad (11)$$

当速度回路的相对阻尼系数 $\xi < 0.7$ 时, 由于 ω_c 处谐振峰的存在, 必须使 ω_c 取比 (11) 式更小的值。

实际系统的 ω_c , γ 的计算值见表 1 第 11, 12 行, 由于系统 $\xi > 0.7$, 故仍能稳定工作。

3. 系统的性能测试

(1) 精度

为测试系统的张力误差分量 $\Delta t_{1,2}$, 用 X-Y 记录仪记录了光电电位器的输出波形, 见图 9。供片盘和收片盘的光电电位器的灵敏度, 实测为 27.7mV/g 和 46.8mV/g, 因此 $\Delta t_{1,2}$ 分别为 1.2g 和 1g (注意, 张力杆的弹性恢复力 = $2t$), 这与表 1 的第 10 行数据基本相符。

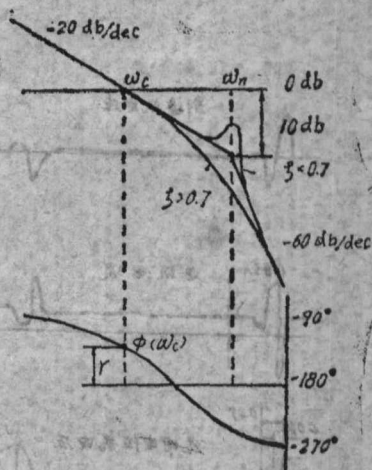


图 8 系统的开环幅相特性

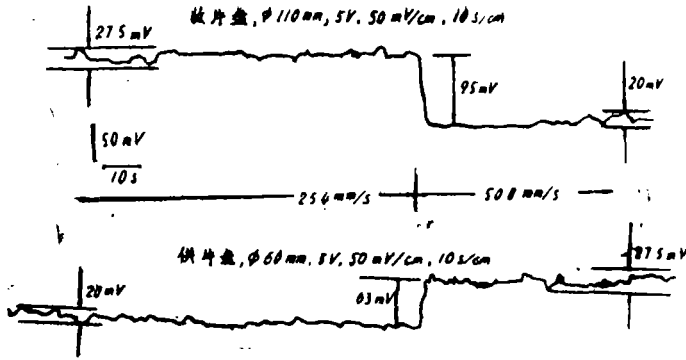


图9 张力误差的测试波形

(2) 动态性能

系统的阶跃响应及有关性能见图10和表2。从中可见，系统的响应速度与稳定性是可以满足工作要求的。

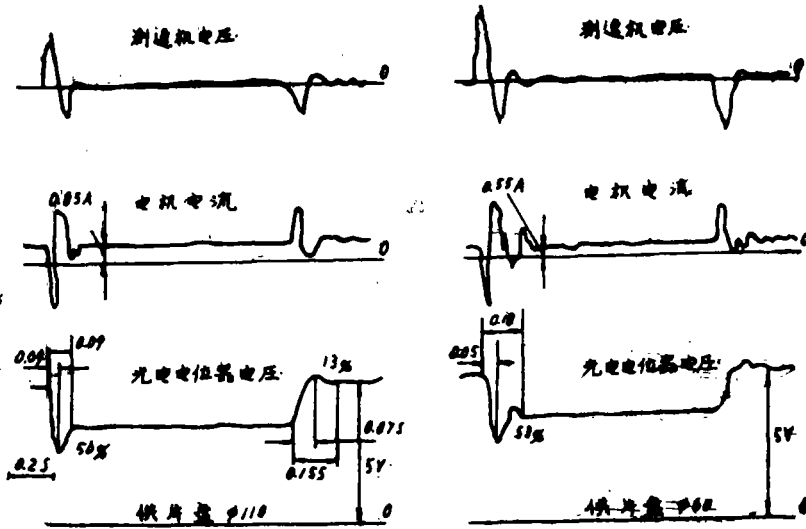


图10 系统的阶跃响应

(3) 自动增益控制的作用

为检验自动增益控制对系统的作用，测试了空盘 ($r=3\text{cm}$) 和满盘 ($r=5.5\text{cm}$) 时系统的阶跃响应，如图11所示。从图中可看出，无论是供片盘还是收片盘，由于自动增益控制 (AGC) 的作用，均使满盘时稳定性增强，空盘时响应速度加快。

表 2 张力控制系统的阶跃响应特性

			超调%	峰时间 s	调整时间 s
供片	r = 3cm	↑	17.6	0.09	0.14
		↓	53	0.05	0.18
盘 D ₁	r = 5.5cm	↑	13	0.07	0.15
		↓	56	0.04	0.09
收片	r = 3cm	↑	26	0.04	0.08
		↓	13	0.04	0.08
盘 D ₂	r = 5.5cm	↑	33	0.04	0.08
		↓	20	0.04	0.09

注: ↑ 表明阶跃施加方向为使张力增加
 ↓ 表明阶跃施加方向为使张力减小

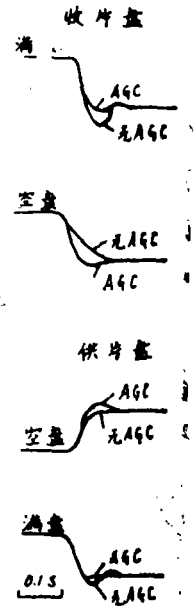


图11 AGC的效果

四、结 论

由上述速度和张力控制系统控制的两套输片机, 已应用到 HG-1 SAR 光学处理器中, 得到了动态分辨率 60lp/mm 和四通道处理时拼接效果很好的结果。带复合控制的锁相回路使系统具有高增益、大带宽和较宽的调速范围, 具有 AGC 的张力控制使系统具有很高的张力稳定精度和很快的响应。

The Film Velocity and Tension Control Systems

Yu Qianyang Li Chaoyang Liu Boxiang Hu Cunju

Abstract

The optical processor of SAR requires a set of precise control system for the film transport to obtain high dynamic resolution. The control system ensures a stabibized and synchronous motion of the data film and image film. We have developed a film velocity and tension control system, which controls film velocity using phase-lock loop with the complex control, and drives two set of film transport with a high stabibized pluse generator, so that the tracking error between the data film velocity and image film

velocity is less than 0.3%. The film tension control system, which uses position sensor of opto-electric potentiometer, makes the variance of tension in full velocity range less than 6.8g. This paper describes the operation principle, main performance and measured results of the control system.



图 1 速度-张力特性曲线

1.10	0.00	1.1
0.10	0.00	0.1
0.00	0.00	0.0
0.00	0.00	0.0
0.00	0.00	0.0
0.00	0.00	0.0
0.00	0.00	0.0
0.00	0.00	0.0
0.00	0.00	0.0
0.00	0.00	0.0

图 2 速度-张力特性曲线

结 论

本文研究了... 速度... 张力... 控制... 系统... 性能... 结果... 速度... 张力... 控制... 系统... 性能... 结果...

The Film Velocity and Tension Control System

The optical process of... The film transport... The control system... The film velocity and tension... The film transport with a high stabilized... The relation... between the film velocity and tension...