

778 光电经纬仪 200帧/秒摄影机控制系统

肖天明 付承毓

【摘要】 本文叙述了778光电经纬仪用200帧/秒间歇式摄影机控制系统的工作原理、性能指标、设计和研制的最后结果。

一、引言

间歇式摄影机快门同步控制系统在电影经纬仪中已有广泛应用。一般其调速范围均在10倍左右,同步精度要求也不太高。但象本系统这样,同步摄影频率从4帧/秒~200帧/秒,实际使用调速范围宽达50倍,同步精度要求高达 $\pm 1.4\text{ms} \sim \pm 0.3\text{ms}$ 之间的系统还很少见。调速范围宽,同步精度要求高,是本系统的特点。特别是要保证系统的低速同步精度以及在允许的同步误差范围小的情况下,缩短同步时间,对于一般的系统来说是难于达到的。此外,由于摄影机的最高摄影频率高达200帧/秒,因此,系统的安全保护措施必须考虑得尽可能周到。

根据778光电经纬仪的要求,设计了摄影频率为4~200帧/秒的间歇式摄影机快门同步控制系统。本文着重介绍系统的设计考虑和实验情况及结果。

二、用途与主要技术指标和要求

该摄影机在778光电经纬仪上用来记录空间飞行目标的姿态、事件及运动轨迹的参数,以便事后判读。并可作为永久性的资料保存。系统的主要技术指标如下:

1. 同步摄影频率:

4, 10, 20, 40, 80, 200帧/秒六种。

2. 同步精度(最大瞬时误差):

$\Delta t \leq \pm 6\text{ms}$ 对于4帧/秒(兼顾);

$\pm 1.4\text{ms}$ 对于10帧/秒; $\pm 0.7\text{ms}$ 对于40、80帧/秒;

$\pm 1.0\text{ms}$ 对于20帧/秒; $\pm 0.3\text{ms}$ 对于200帧/秒;

3. 同步(过度过程)时间: ≤ 3 秒(4帧/秒除外);

4. 环境温度: $-30^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$

5. 在不同步或超差时给出音响指示讯号, 并在胶片上给出同步标记; 在发生故障时也给出音响报警。

6. 在照相过程中能随意停机和开机拍照。

需要说明的是, 4 帧/秒频率在总体指标中是没有的, 后根据用户的需要增加的, 并明确了该频率各项指标不检测。其同步精度是根据现有经纬仪上使用的摄影机的指标 $\pm 10^\circ$ (即 $\pm 7\text{ms}$) 来确定的。本系统将其同步精度误差门限装定为 $\pm 6\text{ms}$ 。此外, 20 帧/秒的同步精度指标总体定为 $\pm 1\text{ms}$, 但装定同步精度门限种类太多, 实现有困难, 故仍按 $\pm 0.7\text{ms}$ 装定。

三、工作原理与主要的一些设计考虑

该摄影机在电影经纬仪上的主要任务是记录空间飞行目标的姿态、事件及运动的轨迹参数。在多台经纬仪同时应用时, 为了精确地获得采样瞬间的空间目标位置数据, 故要求快门开口角中心与时统站送来的指令 (采样) 脉冲精确地同步。为此, 在快门轴上设置一个检测盘, 在盘上对应于快门开口角中心位置打一个小孔, 用光电检测方式将快门开口角中心位置信号检出。此信号即为相位回答信号。再通过锁相环路, 便可实现指令脉冲与快门开口角中心位置同步。系统原理方框图示于图 1。

整个系统由速度回路和相位回路 (锁相环) 两部份组成。其余辅助电路在图 1 中未示出。

鉴相器是本系统的重要组成部份之一。采用数字电路作为鉴相器, 不仅电路简单, 而且使系统不存在系统相位误差。因此, 也就不需要引入消除系统误差的延迟补偿电路, 比较经济、省事。

锁相伺服系统是采样控制系统, 对于象

本系统这样低的采样频率来说, 是很难捕获的, 就更没有什么好的动态性能可言了。但是, 采用了调速回路 (连续系统), 不仅使系统有了良好的动态性能, 而且还可以通过调整速度基压 V_R 来装定速度, 使相位环路的开环频差尽可能小。这样, 不仅解决了系统的捕获问题, 还可以大大缩短环路的捕获时间。速度基压相当于随动系统的速度反馈信号, 它有助于提高系统的精度和稳定性。

系统的锁相误差 $\Delta\theta$ 与开环频差 $\Delta\omega$ 及环路的开环增益 K , 之间的关系为:

$$\Delta\theta = \Delta\omega / K,$$

显然, 当 K 、一定时, $\Delta\omega$ 越小, $\Delta\theta$ 就越小, 即系统的锁相精度就越高。 $\Delta\omega$ 中应包括速度装定误差与速度瞬时误差以及速度基压的漂移引起的误差。瞬时误差 (即速度波动) 直接在快门轴上引起相位抖动, 这种抖动成份无论属于环路带宽以内的还是以外的, 都基本上取决于速度的波动。理论和实践证明, 使速度回路具有尽可能好的性能是非常重要的。本系统的稳速精度可达 $\pm 1\%$ 。

采用 CYH7-1 型永磁直流测速发电机作为测速元件。该测速机灵敏度高, 体积小, 重

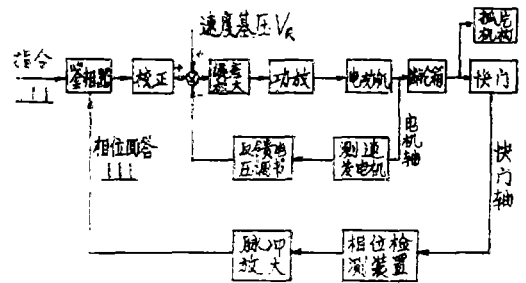


图 1 系统原理方框图

量轻，能满足本系统要求。其性能参数如下：

测速灵敏度：7 伏/千转/分，

额定转速：3000 转/分，

最高转速：12000 转/分，

线性度：±0.1%，

输出阻抗：600 欧。

测速机与主伺服电动机的速比为1:1，通过皮带连接。除在 200 帧/秒为 7300 转/分，超过额定转速外，其它频率均在额定转速范围内。由于本系统工作于某几个固定转速，故对测速机的线性度要求是不高的。

为了满足在50倍的调速范围内保证同步精度的要求，在机械结构方面采用了变速齿轮箱，把调速范围分成高、低两档。这在保证低温低速时的同步精度尤其重要，并为进一步扩展摄影机的频率范围创造了有利条件。

摄影频率分档如下：

低档：4c/s, 10c/s, 20c/s,

高档：40c/s, 80c/s, 200c/s。

采用了 11SZ07 型直流电动机作为主伺服电动机。其额定参数为：

$P_H = 500$ 瓦， $V_H = 110$ 伏

$I_H = 6.4$ 安， $n_H = 10000$ 转/分。

该电机的功率驱动除 200 帧/秒采用可控硅半控桥外，其余各频率均采用脉冲调宽方式。这两种方式通过继电器来切换。该电机具有较大的功率余量。

本系统采用无源相位滞后——超前校正网络，其优点是简单，成本低，无漂移影响等。虽引入较大衰减，但系统的实际增益余量较大，足以补偿。校正网络如图 2 所示。它的传递函数为：

$$W_c(s) = \left(\frac{T_1 s + 1}{T_1 s + 1} \right) \left(\frac{T_2 s + 1}{\beta T_2 s + 1} \right)$$

式中 $T_1 = R_1 C_1$ $T_2 = R_2 C_2$, $\beta \approx R_1 / R_2$

电路元件参数为： $R_1 = 200K\Omega$, $R_2 = 20K\Omega$,

$C_1 = 2\mu F$, $C_2 = 340\mu F$

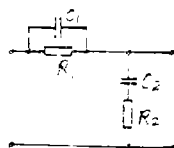


图 2 校正网络

把上述考虑付诸工程实践，最后获得已校正系统的开环传递函数 $W_0(s)$ 和方框图如图 3 所示。

已校正系统的开环传递函数为：

$$W_0(s) = \frac{K_H K_0 W_R(s)}{S(1 + T_m' s)(1 + T_0 s)}$$

$$= \frac{K_v (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{S \left(\frac{T_1}{\beta} s + 1 \right) (\beta T_2 s + 1) (T_m' s + 1) (T_0 s + 1)}$$

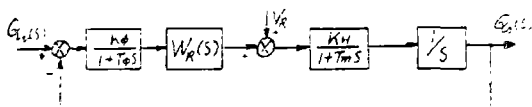


图 3 已校正系统方框图

式中 $K_v = K_H K_\phi = 345$ 1/秒——为环路开环增益。

$T'm = 0.015$ 秒——速度回路闭环机电时间常数。

$T_c = 0.2$ 秒——鉴相器的滤波时间常数。

代入数值后得：

$$W_0(S) = \frac{345(6.8S+1)(0.4S+1)}{S(68S+1)(0.2S+1)(0.04S+1)(0.015S+1)}$$

已校正系统具有足够的稳定裕量，校正后的系统是稳定的。

四、收片和供片轴的控制

1. 收片控制

收片电机应该是软特性的，但目前的软特性电机的力矩、转速和体积都不能满足使用要求。为此，不得不采用硬特性电机在其电枢回路中串入电阻，使之特性变软的办法来实现。这种方法简单，但消耗功率大、效率低是它的缺点。不过跑片时间不长，较大功率消耗是允许的。根据某些使用需要，在跑片过程中有中途任意启停摄影的要求。又本机的装片容量为300米。这样，当收片轴上的片量大而摄影频率又很高时，若再次启动，就要求收片电机有足够的功率来加速收片负载，使之很快达到收片速度。由于断片保护触点采用了非常灵敏的微动开关，收片不能有滞后。否则，在中途启动过程中会造成“断片”停机的误动作。亦即因收片速度未能很快地跟上供片（输片）速度而使微动开关脱开，发出假的“断片”信号而引起停机。要解决这个问题可有两种方法：一是降低系统的启动速度，但要受到同步时间需小于3秒这一指标的限制；其二是加大收片电机功率。显然，本系统只能采取加大收片电机功率这一途径。为此，选用了S368W交直流两用不可逆串激电机作为收片电机，它的额定参数如下：

$$P_H = 200 \text{瓦}, V_H = 110 \text{伏}, I_H = \begin{matrix} 2.9 \text{A} = \\ 3.2 \text{A} \sim \end{matrix}$$

$$n_H = 12000 \text{转/分}$$

电路图如图4所示。 R_1 为使收片电机产生张力所加的。 J_I 为启动继电器，当系统启动后， J_I 吸合，通过电阻 R_2 进一步增加收片力矩，使胶片卷绕紧密。在200帧/秒时，由于输片速度快，收片电机转速也就高，通过继电器 J_V 把 R_3 并在 R_2 上，使收片力矩更进一步增加。此力矩增大有利于较大的收片量时再次启动。但是，增加过大，不仅使收片过紧，而且会造成第一次启动时（即收片量很小/时）发生断片，尤其在低温干燥的环境更为严重。因此，须折衷考虑。经过调试，在200帧/秒及80帧/秒以下各频率，可允许在收片轴上分别已有150米和200~250米片量时，仍能任意启停摄影。收片负载与片基厚度有关。

2. 供片轴的控制

供片轴仅采用电磁制动，方法也很简单。电路图如图5所示。停机时，继电器 J_{II} 将 R_2

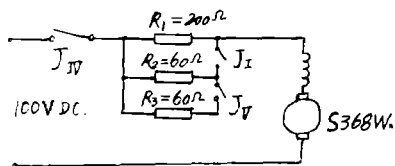


图4 收片电机控制原理图

短路，制动力矩大。跑片时， J_{II} 触点断开，制动力矩小，以便为供片提供一个适当的阻力矩。阻力矩的大小也要折衷考虑。它既要保证 200 帧/秒跑片时，供片不因过冲而松散，也不要供片轴片量小时因阻力矩过大而断片，使最后一段胶片不能充分利用。供片过冲松散同样要产生断片。这种控制方法虽简单，但调试时应特别注意。尤其是在高速情况下。

制动力矩和阻力矩的大小可通过调整电阻 R_1 和 R_2 的阻值大小来调节。

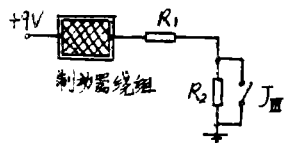


图 5 供片轴控制

五、实验结果

本系统在精心设计、调试的基础上，经过高低温例行实验证明，在环境温度 -35°C $\sim +40^{\circ}\text{C}$ 范围内，工作正常。实验在 -33°C $\sim -38^{\circ}\text{C}$ 保温 3 小时 24 分，然后在 90 分钟左右升温到 $+40^{\circ}\text{C}$ ，并保温两小时。在整个过程中对系统工作情况进行了连续观察，未发现异常。

就目前所了解的情况来看，本系统的实际同步精度是比较高的。现将 1984 年 4 月 13 日室内总检时的结果抄录于表 1。同步时间用 5 只秒表同时记录取平均值。同步精度用同步示波器 SBT—5 观察测得。以上结果达到了设计指标要求。

表 1

频率	同步精度误差	同步时间
4C/S	$\pm 1.53\text{ms}$	5 s
10C/S	$\pm 0.4\text{ms}$	2.8s
20C/S	$\pm 0.2\text{ms}$	2.7s
40C/S	$\pm 0.2\text{ms}$	1.3s
80C/S	$\pm 0.1\text{ms}$	1.5s
200C/S	$\pm 0.1\text{ms}$	1.6s

本系统经过几个月外场实验和实战使用，证明系统工作稳定可靠。

六、几点改进意见

总的来说，本系统的设计是成功的。但是，还可以通过一些改进使之更加完善。

①主伺服电机功率驱动级，200 帧/秒时也可采用脉冲调宽方式，以改善调速系统性能，并使系统简化。

②采用收片量计数器，用收片量来控制收片力矩的变化，以解决第一次启动容易断片、收片过紧和能实现在大收片量时中途启动这一要求之间的矛盾。但要增加成本。

③辅助电路部份，有的还可适当简化。并可采用中规模数字组件，以提高可靠性。但成本也会有所增加。

在本系统的实验过程中得到了黄国瑞等机械结构设计同志的密切配合，还得到王学忠、陶炳金等师付的帮助，谨此致谢！

The Control System of the 200 F/S Intermittent Camera of the Photoelectric Theodolite 778

Xiao Tanming and Fu Chengyi

Abstract

The paper describes the operational principle of the 200 f/s intermittent camera control used in photoelectric theodolite 778. The final designed and developed results are given.