

圆环扫描速高比计研究

赵周伦 钟太升 侯方源

摘要:介绍了圆环扫描速高比计(V/H计)的工作原理。给出了理论分析和实验结果。讨论了影响精度的原因和今后改进的方法。

一、前 言

在卫星像机和航空像机上,为补偿在曝光时间内像点在像面上的移动,提高摄影分辨率,越来越广泛采用像移补偿装置。像移补偿装置可分为两大部分。第一部分用于测定飞行体在飞行过程中的速度与高度的比值或底片上像移速度,简称速高比计;第二部分用于补偿像移。从控制系统上看,第一部分为检测机构,第二部分为执行机构。整个装置是一个光、机、电的组合体,两部分可通过电连接也可用机械方式连接。

速高比计是像移补偿装置的核心部分,依据的原理是“相关法测速”。相关法测速是利用对运动体表面获得的随机信号,通常叫做地物谱,经过相关处理求出相关函数,从而测出运动体的线速度。常用的相关法测速有两种方式:自相关方式与互相关方式^{[1][2]}。互相关法比较简单,精度低;自相关方式技术复杂,但精度高。相关法测速目前已广泛应用于轧钢、纺织、造纸、汽车以及空间摄影等部门^[3],特点是不需要接触而测出运动体速度。在国外,比较有代表性的相关法测速装置是美国阿波罗宇宙飞船上的速高比计。在国内,相关法测速特别是在像移补偿方面的应用,报导很少。但随着对空中摄影分辨率要求不断提高,不进行必要的像移补偿,像移终将成为障碍。

本文对圆环扫描速高比计进行了初步分析,为验证理论分析的正确性,进行了物理模拟实验。文中也给出了实验结果并指出影响精度的原因和改进办法等。

二、像移补偿装置及其组成部分的工作原理

1. 像移补偿装置的工作原理

像移补偿装置的简单示意图如图1所示。整个装置放在飞行体上。 L 表示摄影机或速高比计镜头。 P 为扫描盘(圆盘带一透明狭缝),由电动机 D_1 带动,作恒速旋转。 T_1 为动反射镜,转轴 O 垂直纸面, T_2 为固定反射镜, F 为光电倍增管, C 为相关器, D 为控制电机, O_1 及 O_2 为卷片机两个辊子。当透镜 L 处在1位置时(图中实线所示位置),地面上 A 点成像在摄影胶片 a 点上。反射镜 T_1 及 T_2 将地面上以 X 点为中心的圆环图像经过带狭缝的旋转扫描盘 P 成像在倍增管 F 上。 F 将地物光信号转换成随机电压信号并送至相关器 C ,相关器输出电压加至电动机 D , D 与卷片轴 O_1 、 O_2 及反射镜 T_1 机械地连在一起。假定飞行体不动,即飞行速度

$V = 0$ ， F 将永远接收以 X 为中心的地面圆环信息。此时相关器的输出将为零。电动机 D 不动，不进行像移补偿。当 $V \neq 0$ 时，胶片上的 a 点将移至 a_1 ，而地面 A 点将成像在 b 点，因而摄影分辨率降低。当补偿机构工作时， T_1 把中心在 Y 的圆环信息送至 F 。由于像机移动前后相关器 C 中所接收的中心在 X 及 Y 处圆环信息不同， C 的输出信号将不为零。这样，电动机 D 将转动，带动反射镜 T_1 及卷片机，直至胶片向飞行方向前进 $a_1 b$ 一段距离，反射镜重新瞄准 X 附近为止。此时 T_1 的转动速度即反映像移速度。

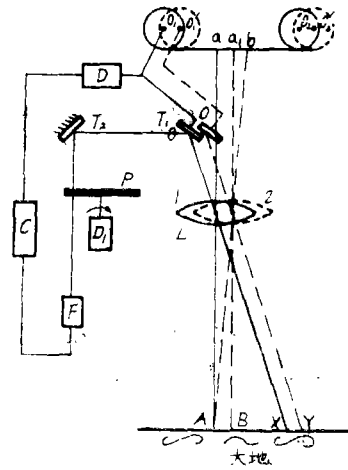


图 1

设飞行速度为 V ，飞行高度为 H ，摄影镜头焦距为 f ，则像移速度为

$$v = \frac{V}{H} f \quad (1)$$

对已设计好的镜头， $f = \text{常数}$

$$\text{故得 } v \propto \frac{V}{H} \quad (2)$$

不难看出，整个补偿装置可分为移动胶片补偿像移的机构和对像移速度的检测机构，又由公式(2)的理由，通常将后一部分叫速高比计。

2. 速高比计的工作原理

速高比计结构很多，但圆环扫描形式只用一组镜头，一组电路，因而比较简单且无对称性问题，比较实用，其原理如下：

当扫描盘以周期 T 旋转时，地面景物的空间位置变化及光电倍增管的输出随机电压波形如图2所示。如飞行速度 $V = 0$ ，则扫描轨迹为一圆环，信号 $f(t)$ 以 T 为周期重复，呈

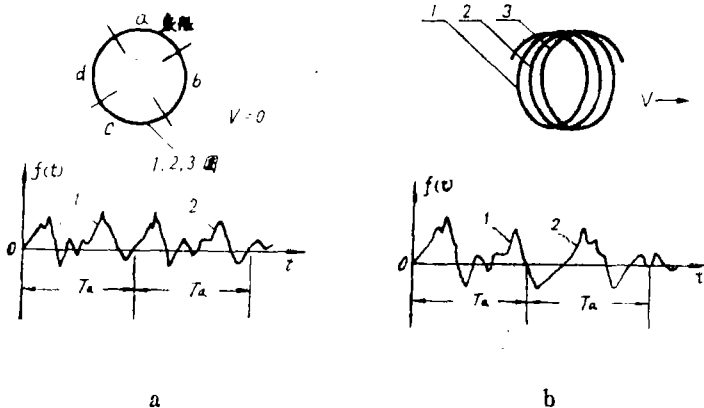


图 2

图2a。当 $V \neq 0$ 且依箭头所示方向飞行时，扫描轨迹将为螺旋状，信号不按扫描周期重复（图2b）。

相关器的方框图 3 所示。输入信号（来自光电倍增管） $f(t)$ 与延迟后信号 $f(t - T_0)$ 经相关运算电路后得出相关函数 $R(\tau)$ 。 $R(\tau)$ 再经变换电路转换成电压 u ，作为速高比计的检测信号。假定地面信息为平稳随机函数，则

$$R(\tau, T_0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(\tau, t) f(\tau, t - T_0) dt \quad (3)$$

当扫描频率较高且只用图 2a 中所示的圆环 a 象限信息时，则相邻两周的关系可看成两个接近的圆环（图 4）。相应的地物谱信号波形可认为一样，只差一个相位 τ ， τ 的大小对应 P 、 P' 两点间距离，而 P 与 P' 为相邻两周的扫描对应点，彼此在时间上相差一个扫描周期 T_0 。

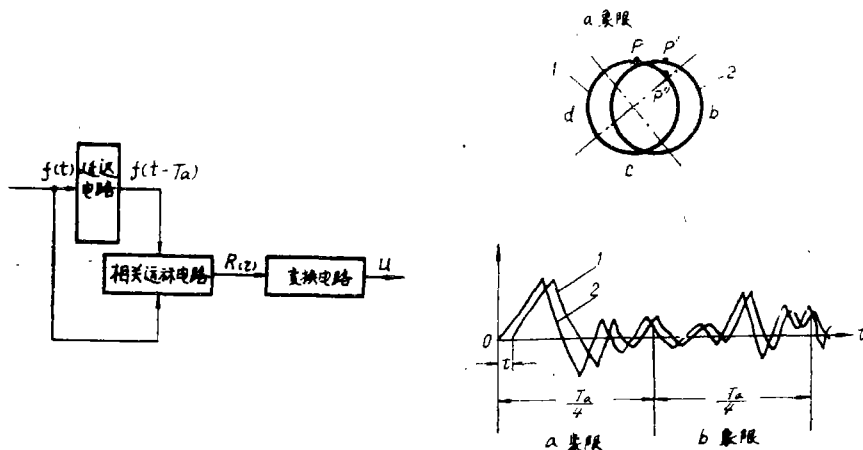


图 3

图 4

由图 4 可知，当两次扫描圆环相近时 P' 可认为在第一圆环上且与 P' 靠近的点 P'' ，因而有

$$f(\tau, t - T_0) = f(\tau, t - \tau) \quad (4)$$

将(4)代入(3)，得

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) f(t - \tau) dt \quad (5)$$

当 τ 值不太大时，可近似认为在 τ 时间内像移速度 v 近似不变，又因

$$\widehat{PP''} \approx \overline{PP'}$$

故得

$$vT_0 = \frac{2\pi r}{T_0} \tau$$

或

$$\tau = \frac{T_0^2}{2\pi r} v \quad (6)$$

将(6)代入(5)，得

$$R(v) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) f\left(t - \frac{T_0^2}{2\pi r} v\right) dt \quad (7)$$

这就是说相关函数与像移速度 v 值直接有关。

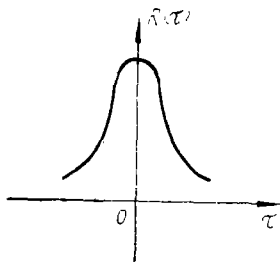


图 5

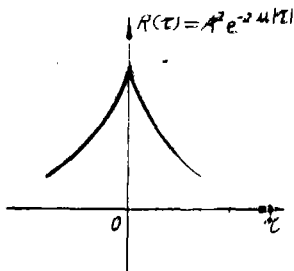


图 6

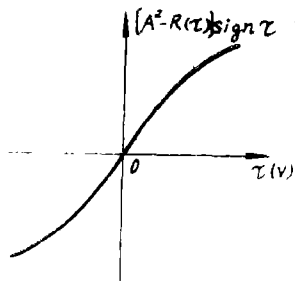


图 7

对于实际的记录曲线 $f(t)$ 与时间轴的交点可认为服从泊松分布，它的相关函数有图 5 所示形状。曲线在原点附近的陡度与记录时所使用的扫描方形狭缝的长宽比有关^[4]。

如只取 $f(t)$ 的符号函数 $\text{sign} f(t)$ 进行相关，则相关函数为

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \text{sign} f(t) \text{sign} f(t-\tau) dt \\ &= A^2 e^{-2\mu|\tau|} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 A 为 $\text{sign} f(t)$ 的幅值； μ 为单位时间内平均变号次数或平均频率。相关函数曲线如图 6 所示。依公式 (8) 设计相关器比公式 (7) 方便得多。

为使相关器输出信号与像移速度 v 成单值关系，即获得信号

$$u = [A^2 - R(\tau)] \text{sign} \tau = A^2 (1 - e^{-2\mu|\tau|}) \text{sign} \tau \quad (9)$$

式中 $A^2 = R(0)$ ，

以便于控制执行电机 D ，必须附加一个极值寻找环节，此部分相应于图 3 中的变换电路。公式 (9) 相应的函数曲线如图 7 所示。相关器的有关问题另有专文。

三、速高比计控制系统分析

速高比计的工作程序是间歇式的，如图 8 所示。图中 T_1 表示转动反射镜（参阅图 1）。

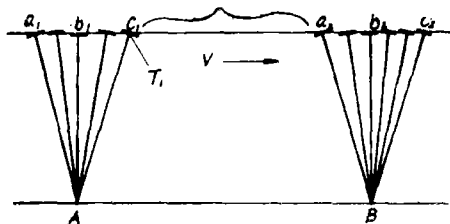


图 8

相关器在 A 点上空时， a_1 点附近进行速度调节， b_1 点附近摄影机胶片曝光。至 c_1 点附近，反射镜 T_1 复原至 a_1 的初始状态并与执行电机 D 脱开。时间间隔 $c_1 a_2$ 内，像移补偿装置停止工作。相关器 C 的输出断开通过保持电路保持 c_1 点电压，电机 D 恒速旋转。至 B 上空时，相关器从 a_2 点开始重新投入工作，程序与 A 点时相同。 AB 间隔由要求的重叠率而定。

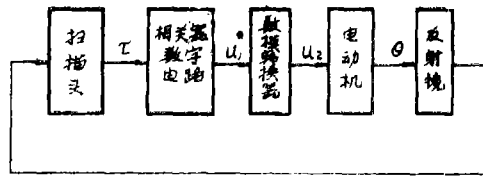


图 9

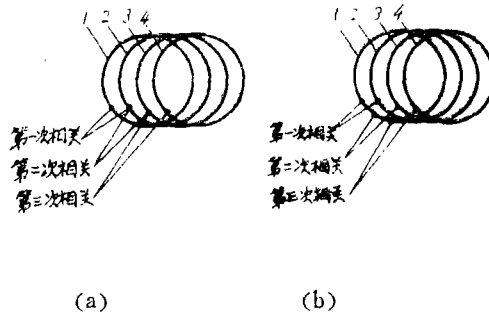


图 10

速高比计的结构方框图如图 9 所示。在工作时间内可采用相邻两周扫描信息相关方法(图 10a),也可采用各周都与第一周信息相关法(图 10b)。在原理上,前者为一调速系统,后者是位置伺服系统。对等速飞行而言,前者为有差系统,后者为无差系统。对调速系统的各部微分方程如下:

(1) 反射镜转角

$$\varphi = \varphi_{r} - \varphi_{e} \tag{10}$$

式中 φ_{r} —相关过程中前一次扫描时,反射镜偏角

φ_{e} —后一次偏角

φ —补偿剩余角误差。

(2) 像移速度

$$v = K_0 \frac{d\varphi}{dt} \tag{11}$$

当反射镜偏角范围不大时, K_0 可认为常数。

(3) 扫描头

由前面公式(6)可知

$$\tau = K_1 v \tag{12}$$

式中

$$K_1 = \frac{T^2 a}{2\pi r}$$

(4) 相关器

因 $e^{-2\mu|\tau|} = 1 - 2\mu|\tau| + 2\mu^2|\tau|^2 + \dots$

当 τ 较小时,公式(8)的线性化方程为

$$u = K_2 \tau \tag{13}$$

式中 $K_2 = 2\mu A^2$

对数字相关器而言, 输出端有一定的延迟 $T_L > \frac{1}{4}T_s$, 故有

$$u_1 = u(t - T_L) \tag{14}$$

数模转换器的模拟输出 (以第一个采样值为准) 为:

$$u_2 = u_1 * K_3 [1(t) - 1(t - \gamma T_s)] \tag{15}$$

式中参数如图11所示

(5) 平滑滤波器

为平滑掉数模转换器的输出高频电压, 通常加滤波器, 设时间常数为 T_f , 则

$$T_f \frac{du_3}{dt} + u_3 = K_4 u_2 \tag{16}$$

(6) 执行电机 D

$$T_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} = K_5 u_3 \tag{17}$$

$$\varphi_{*0} = K_6 \theta \tag{18}$$

式中 θ — 电机转角

$K_6 = f$ — 镜头焦距。

对公式(9)~(17)取拉式变换, 可得:

$$\varphi(S) = \varphi_{*0}(S) - \varphi_{*0}(S)$$

$$\nu(S) = K_0 S \varphi(S)$$

$$\tau(S) = K_1 \nu(S)$$

$$u(S) = K_2 \tau(S)$$

$$u_1(S) = u(S) e^{-\tau_L S}$$

$$u_2(S) = \frac{1 - e^{-\gamma T_s S}}{S} K_3 u_1(S)$$

$$\frac{u_3(S)}{u_2(S)} = \frac{K_4}{T_f S + 1}$$

$$\frac{\theta(S)}{u_3(S)} = \frac{K_5}{S(T_m S + 1)}$$

$$\varphi_{*0}(S) = K_6 \theta(S)$$

对应闭环系统的方框图如图12所示。一般 T_f 较大而扫描频率较高, 满足

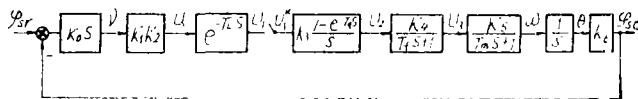


图12

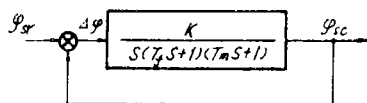


图13

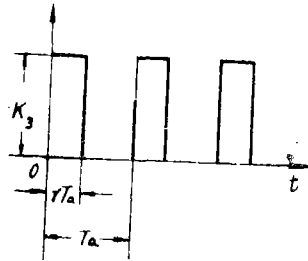


图11

$$\omega_e \leq \frac{2}{T_a} \tag{19}$$

式中 ω_e —系统的剪切频率 ω_e ，故系统可用连续模型代替，此时方框图如图13。图中 ω —电机角速度

$$\omega_{sr} = \frac{1}{K_0} S \varphi_{sr}$$

$K = K_0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6$ — 系统开环放大倍数。

系统为有差系统，当给定允许误差为 Δ 时。系统的 K 值必满足

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_{sr}} = \frac{1}{K} \leq \Delta$$

为使系统有较好滤波性能，时间常数 T_f 不应选得太小。另外，因速高比计工作在间歇状态，在每个起始点（见图8中的 a_1, a_2 各点）控制系统处于过渡过程，希望这个过程单调且不致太长，所以 T_m 值不能太大。为此最好加测速机校正。

当系统采用位置系统结构时，仿前面可得方框图为图14形式。

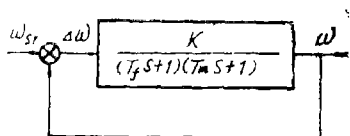


图14

当飞行体作等速运行时，在速高比工作范围内可认为 φ_{sr} 等速变化，理论上无速度误差，这就允许 K 值适当降低。但如果 K 值太小，可能使系统不能进入正常相关工作状态，从而使速高比计失灵。

最后必须指出，无论是速度系统还是位置系统，由于公式(12)中的 u 值是随机函数在长时间 T 内的一个平均量^[5]，所以在各次扫描周期 T_s 中彼此就不尽相同。粗略地说，在一个扫描周期内，随机变量的波数越多， u 值就越大。为保证速高比计的稳定工作，必须对 K 值加以限制，为此最好在系统中加自动增益控制或选频器等。

四、速高比计的动态模拟实验

模拟实验原理如图15所示。大转台1模拟飞行体，小转台2带动双面反射镜3模拟速高比计的转动部分。当大转台以速度 ω_1 转动时，转台2及反射镜3将以相同的角速度一起转动。此时光电扫描头中旋转狭缝将摄取模拟地物谱4中不同景物，数字相关器有输出。小转台的控制电路7驱动小转台以与 ω_1 相反的 ω_2 速度旋转（ ω_1 及 ω_2 皆对地而言）。如 $\omega_1 = \omega_2$ ，像移完全补偿。系统进入稳态后， $\omega_1 = \omega_2$ ，双面反射镜的另一面将分划板8的图像经平行光管9投入电影机10。由电影机各画幅底片上分划板的中心位置及相应的摄影频率即可推算出相对像移速度 $\frac{\Delta \omega}{\omega}$ 值。

将速高比计调至较好的工作位置（即图像较清楚地方），对 $\omega_1 = 4^\circ/s$ ，测得误差曲线如图16所示。从图可见，最大误差可达4%，一般在3%左右。当将模拟地物谱代换成如图17上

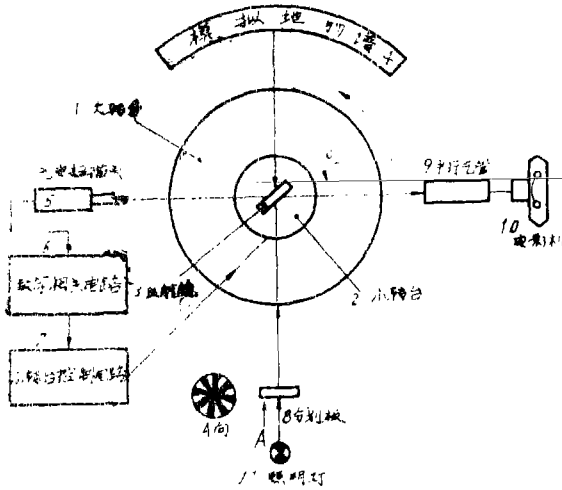


图15

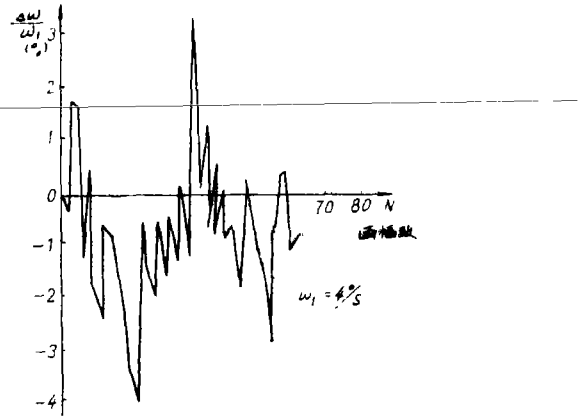


图16

所示的亮暗条形图案时，误差一般在2%左右（见图17下）。比较图16及图17可见，地物谱的形式对精度影响很大，这是因为信号有抖动而亮暗条形模拟谱受抖动影响较小的原故。

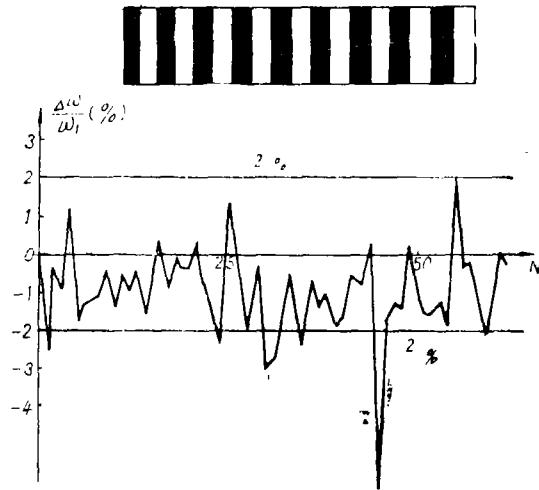


图17 (上、下)

其次，系统除恒定误差分量外，还包含较大的随机误差。这是由于转台特别是小转台2运行不够平稳造成的。这说明在研制速高比计中要注意相关器断开时传动部分的平稳性。

五、结 束 语

1. 公式 (7) 给出了圆环扫描速高比计能进行测量像移速度的理论依据。
2. $R(\tau)$ 是非线性的，要得到较好的相关测速结果，速高比计必须是闭路的。
3. 速高比计使用了自相关法。从结构原理上看有调速系统及位置系统之分，后一种为速度无差系统。两种方法各有特点。
4. 在实际的相关器中，用有限值代替了积分时间 $T \rightarrow \infty$ ，因此所测得的相关器最后输

出电压U不仅与像速 v 有关, 而且受 $\text{sign } f(t)$ 函数过零点的次数有关。为消除函数形状的影响, 在系统中最好加上自动增益控制。

5. 实验给出了设计速高比计系统的方向, 如扫描频率对捕获的影响等。
6. 存在问题是信号抖动对测速精度影响较大。

参 考 文 献

- [1] J.T.Ator, Image-Velocity Sensing with Parallel-Slit Reticle, J.O.S.A., 1963, No.12.
- [2] F.J.Bingley et al., Film and Television in Space Technology, SMPTE, 76, No.8.
- [3] 井戸川等, 相関を用いる自動車の速度測定, 計測自動制御学会论文集, 1975, 11, No.4.
- [4] С.Ф.Козубовский, Автоматические Корреляционные Измерители скорости, Киев, 1963.
- [5] Е.С.Вентцель, Теория Вероятности, Сризматиз, М, 1962.

Studies of V/H Sensor with Ring Scanner

Chao Choulun Zhun Taisheng How Fangyuang

Abstract

The principle of V/H sensor with ring scanner is described. Theoretical analysis and experimental results are given. The factors affecting the accuracy of sensor and the methods for improving it in the future are discussed.