

复合式速高比计研究

葛 文 奇

摘要：本文提出了复合速高比计，并对其原理进行了分析，探讨了多狭缝空间滤波器各参数对滤波效果的影响，同时对其控制系统也做了分析。通过实验室模拟实验和室外飞行实验，证明该速高比计是成功的，并有实际应用价值。

一、前 言

近年来，在卫星相机和航空相机上，为消除曝光时间内像点在像面上移动产生的模糊量，提高摄影分辨率，像移补偿装置就成为保证摄影质量必不可少的组成部分。这一装置主要包括两个部分，一是直接测量像面上的像速，即飞行器在飞行过程中速度 v 对当时高度 H 之比的像速传感器或称速高比计，简记为 $\frac{v}{H}$ 计；二是能自动进行像移补偿的伺服机构。它的简化方框图如图 1 所示。

图中 1. 2. 3. 4 串联各环节，通过单位主反馈构成闭环速高比计，它是复合速高比计的主要部分。环节 5 为辅助开环速高比计，它采用了多狭缝空间滤波法测量像速，下面此部分称

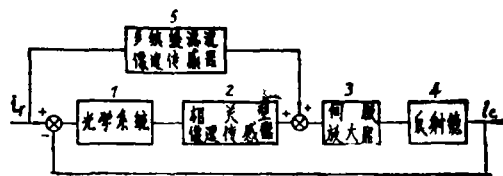


图 1

为多狭缝滤波像速传感器，是本文将讨论的重点。

二、多狭缝滤波像速传感器的原理及结构分析

(一) 测速原理

图 2 中虚线框内为多狭缝像速传感器的简单示意图。 L 表示物镜， h 表示多狭缝滤波器， ph 为光敏元件。

假定相机及其载体（卫星或飞机）以一定速度 v 在某一高度 H 处水平飞行，地面景物 O 成像在 h 上，记图像运动速度为 i ，由图不难证明，

$$i = F \frac{v}{H} \tag{1}$$

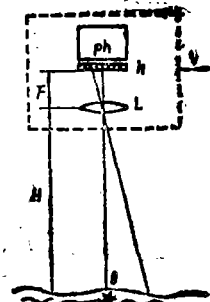


图 2

式中

- i — 像面上的像速度 (mm/s),
- v — 相机相对地面速度 (km/s),
- H — 相机相对地面高度 (km),
- F — 物镜焦距 (mm)。

因 F 为常数, 故

$$i \propto \frac{v}{H}$$

这也正是速高比计名称的由来。利用平行狭缝光栅的透光与挡光作用, ph 输出一交变电压信号, 信号频率正比于像速 i 。设这个频率为 f_s ,

$$f_s = \frac{i}{b} = \frac{F}{b} \frac{v}{h} \quad (2)$$

或
$$\frac{v}{h} = \frac{b}{F} f_s \quad (3)$$

式中 f_s — 输出信号的中心频率 (Hz),

b — h 的空间周期 (mm),

这样就把测量像速的问题转化为测量信号频率, 使问题的处理大为简化。

(二) 多狭缝滤波器的应用

1. 滤波器的应用

当像面上的图像不是点光源时, 其强度分布函数 $\varphi(x, y)$ 是一随机函数, 我们的任务就是确定多狭缝滤波器的传递函数及其几何参数, 以得到满意的光电信号。

考虑像速传感器相对于地面景物只在 x 方向运动, 在像面取如图 3 所示的二维直角坐标系, 假设多狭缝滤波器和像面完全重合, 透过狭缝的光能量会聚在光敏元件上, 用 $g(x, y, t)$ 表示透过狭缝的光强分布, 则

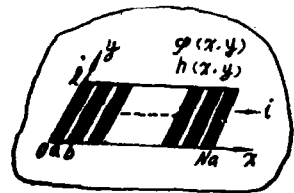


图 3

$$g(x', y, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - x', y) \varphi(x, y, t) dx dy \quad (4)$$

$$x' = it$$

$h(x, y)$ — 多狭缝滤波器的透过函数。 ph 输出的电信号为

$$u(t) = k_1 g(x', y, t)$$

$$= k_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - x', y) \varphi(x, y, t) dx dy \quad (5)$$

式中 k_1 — 由光学系统及光敏元件决定的常数, 这里忽略波长的影响。

进一步, $u(t)$ 又可表示为

$$u(t) = C \bar{u} + \tilde{u} \quad (6)$$

式中 \bar{u} 是像面背景产生的直流分量, C 是随背景平均照度变化而变化的系数, \tilde{u} 正是测速所需的交变分量。

设输入图像函数的功率谱函数为 $\Phi(\xi, \eta)$

$$\Phi(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} R_{\varphi\varphi}(x, y) e^{-j2\pi(\xi x' + \eta y')} dx' dy' \quad (7)$$

式中 ξ, η 分别为 x, y 方向上的空间频率

$$R_{\varphi\varphi}(x', y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, y) \varphi(x - x', y) dx dy \quad (8)$$

为 $\varphi(x, y)$ 的自相关函数。有了 (7) 和 (8) 式就可对 (4) 式求取功率谱，如用符号 $F\{\}$ 表示富氏变换，则有

$$F\{h(x, y)\} = H(\xi, \eta) \quad (9)$$

$$F\{E[g(x', y, t)g(x', y, t + \tau)]\} = G(\xi, \eta) \quad (10)$$

该滤波器为一线性系统，假定 $H(\xi, \eta)$ 已经得到，则 $|H(\xi, \eta)|^2$ 就是其功率传输因子，输出功率谱函数为

$$G(\xi, \eta) = |H(\xi, \eta)|^2 \Phi(\xi, \eta) \quad (11)$$

$$u(\xi, \eta, t) = K_1^2 |H(\xi, \eta)|^2 \Phi(\xi, \eta) \quad (12)$$

尽管 $\Phi(\xi, \eta)$ 只是形式地表示，可以确信地面上景物所含空间频率足够丰富，以致于

$$f_c = \frac{i}{b} = \xi i \quad (13)$$

有意义。

2. 滤波器各参数对滤波的影响

多狭缝滤波器如图 4 所示。它是在一块薄金属片或薄光学玻璃板上刻有长为 l ，宽为 a ，周期为 b 的 N 条明暗相间平行狭缝。其透过函数为 $h(x, y)$ ，是一可分离函数。

$$h(x, y) = h(x)h(y) \quad (14)$$

取 $h(y) = 1$ ，就矩形缝的情况，其透过函数为

$$h(x) = \begin{cases} 1 & nb < x \leq nb + a \\ 0 & nb + a < x \leq (n+1)b \end{cases} \quad (15)$$

$n = 0, 1, 2, \dots$ 整数。

因此多狭缝滤波器的传递函数为

$$\begin{aligned} H(\xi, \eta) &= F\{h(x, y)\} \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j2\pi(\xi x + \eta y)} dx dy \\ &= (lNb) \frac{\sin \pi \eta l}{\pi \eta l} \cdot \frac{\sin N \pi \xi b}{N \sin \pi \xi b} \cdot \frac{\sin \pi \xi a}{\pi \xi b} e^{-j\pi[\eta l + (N-1)\xi b + \xi a]} \end{aligned} \quad (16)$$

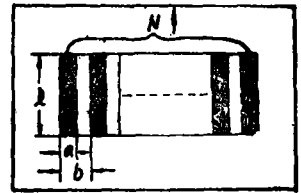


图 4

令 $A = lNb$, 则 A 为其面积, 由上式可得功率谱特性

$$|H(\xi, \eta)|^2 = A^2 |H_l(\eta)|^2 \cdot |H_N(\xi)|^2 \cdot |H_a(\xi)|^2 \quad (17)$$

式中 $|H_l(\eta)|^2 = \left(\frac{\sin \pi \eta l}{\pi \eta l} \right)^2 \quad (17a)$

$$|H_N(\xi)|^2 = \left(\frac{\sin N \pi \xi b}{N \sin \pi \xi b} \right)^2 \quad (17b)$$

$$|H_a(\xi)|^2 = \left(\frac{\sin \pi \xi a}{\pi \xi b} \right)^2 \quad (17c)$$

由上面分析不难看出, 各参数的影响如下。

(1) 缝长 l 的影响

前面已经假定运动只发生在 x 方向, 如果 $|H_l(\eta)| = 1$, 则 $|H(\xi, \eta)| = |H(\xi)|$, l 加长会使信号振幅增加, 但太长会影响滤波效果, 使输出信号变小, 甚至局部会消失。据实验, 一般选 l 长 4~12mm 为宜。

(2) 周期 b 的影响

把 $|H_N(\xi)|^2 b$ 对求导, 并令其等于 0, 得到

$$\begin{cases} \sin N \pi \xi b \cdot \sin \pi \xi b = 0 & (18) \\ N \cos N \pi \xi b \sin \pi \xi b - \sin N \pi \xi b \cos \pi \xi b = 0 & (19) \end{cases}$$

用图解法解上面方程, 且只看

$$\sin \pi \xi b = 0$$

得 $b = \frac{n}{\xi} = (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (20)$

令 $n = 1$ $b = \frac{1}{\xi}$ 代回 (17b) 中, 这时 $|H_N(\xi)|^2$ 取得极大值 $|H_N(\frac{1}{b})|^2 = 1$, 进一步又可求得 a 与 b 的最佳比例关系为

$$\frac{a}{b} = \frac{1}{2n} \quad (21)$$

通过给定不同的 a 值, 可得 $|H_a(\xi)|^2$ 特性, 如图 5 所示。

(3) 缝个数 N 的选择

N 数越多, $|H_N(\xi)|^2$ 的通频带越窄, 对空间频率的选择性越好。分别取 $N = 10$, $N = 60$, 在 $\xi = \frac{1}{b} = \frac{1}{0.5} = 2$ 的条件下, 作 $|H_N(\xi)|^2$ 的特性曲线, 如图 6 所示。

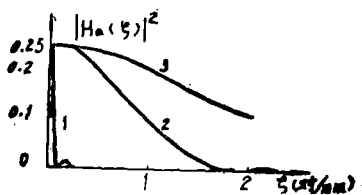


图 5 ① $a = 10\text{mm}$ ② $a = 0.5\text{mm}$
③ $a = 0.25\text{mm}$

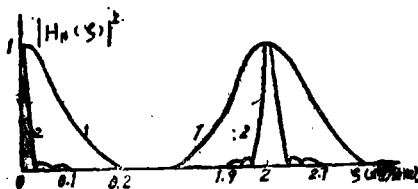


图 6 ① $N = 10$ ② $N = 60$

(4) 多狭缝滤波器的功率谱特性

把 $|H_N(\xi)|^2$, $|H_A(\xi)|^2$ 合起来, 并忽略 $|H_1(\eta)|^2$ 的影响, 得 $|H(\xi)|^2$ 特性, 如图 7 所示。

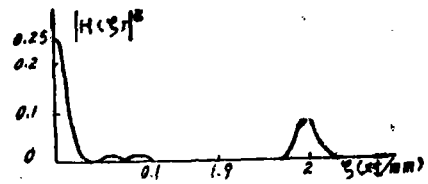


图 7

(三) 差动法提取信号

为提高信号振幅, 消除背景产生的直流分量及低频起伏, 采用差动法提取信号是一种行之有效的方法。所谓差动法, 其理论根据是, 把在空间相位上相差半个周期的两个多狭缝滤波器看成一个新的滤波器, 其透过函数为 $h_d(x)$

$$h_d(x) = h(x) - h(x + \frac{b}{2}) \quad (22)$$

令 $F\{h_d(x)\} = H_d(\xi)$

$$F\{h(x + \frac{b}{2})\} = H_2(\xi) = H(\xi)e^{i\pi\xi b}$$

则 $H_d(\xi) = H_1(\xi) - H_2(\xi) = H(\xi)(1 - e^{i\pi\xi b})$

$$|H_d(\xi)|^2 = (2\sin \frac{\pi\xi b}{2})^2 |H(\xi)|^2 \quad (28)$$

$$\begin{aligned} G_d(\xi) &= |H_d(\xi)|^2 \Phi(\xi) \\ &= (2\sin \frac{\pi\xi b}{2})^2 G(\xi) \end{aligned} \quad (24)$$

其功率谱特性如图 8 所示由实验得到在同样光强和地物下, 差动和非差动法得到两种信号如图 (9a) 和 (9b) 所示。

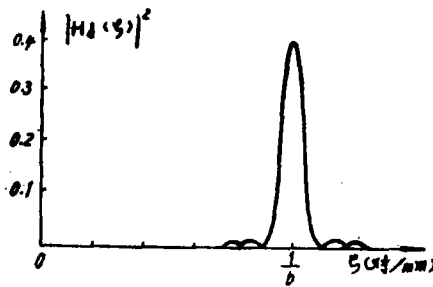
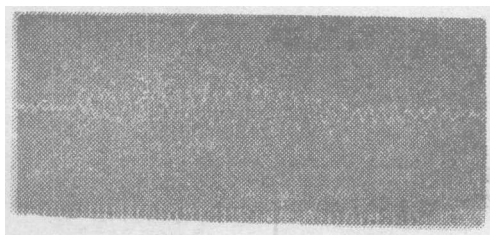
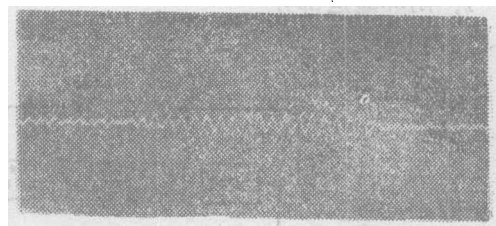


图 8



(a)



(b)

图 9

(四) 像速传感器组成及主要电路简介

多狭缝像速传感器由下列各部分组成，如图10所示。其工作过程是：光学头把地面景物聚焦在像面上，多狭缝滤波器精确置于像面位置，且使狭缝方向与图



图10

像运动方向垂直。透过的光能会聚在光敏元件上，转变为电压信号，经过前置放大、带通滤波及饱和放大，变成具有一定频率的方波信号，测出该信号的频率并用数字显示，或经频率电压转换电路，输出模拟电压，送到速高比计的控制系統上。这里以图11所示图片来说明电信号的处理过程。

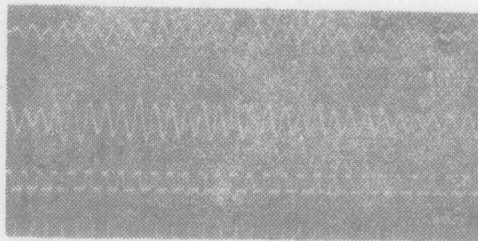


图11

(五) 像速传感器的误差

由(3)式， $\frac{v}{H} = \frac{b}{F} f_s$ ，令 $W = \frac{v}{H}$ ，则

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta f_s}{f_s} \quad (25)$$

滤波器及镜头一旦制作好，其绝对误差 ΔF 、 Δb 均为常数，且均比较小，引起测量误差的主要因素是 Δf_s ，因此应尽量减少 Δf_s 的影响。

三、复合式速高比计控制系统分析

这里的控制系统是指速高比计的伺服回路及执行机构。其简化方框图如图12所示。

(一) 各环节的传递函数

1. 闭环通道部分

(1) 扫描头

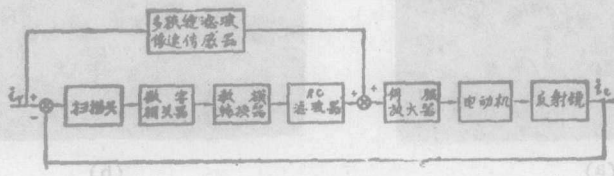


图12

$$\tau(s) = K_i \Omega_r(s) \quad (26)$$

$$K_i = \frac{T_s^2}{2\pi r}$$

T_s —扫描周期 (s),

r —扫描圆盘半径 (mm),

τ —像运动产生的时间延迟。

(2) 数字相关器

$$u_1^*(s) = K_1 \tau(s) \quad (27)$$

式中 $K_1 = 2\mu$

μ —输入随机信号过零时的平均变化次数。

(3) D/A 变换器

$$u_2(s) = \frac{1 - e^{-T_s s}}{s} u_1^*(s) \quad (28)$$

$u_2(s)$ —输出的直流电压

$u_1^*(s)$ —数字相关器输出的脉冲序列。

(4) RC 无源滤波器

$$u_3(s) = \frac{K_f}{T_f S + 1} u_2(s) \quad (29)$$

T_f —滤波器的时间常数 (s)。

(5) 伺服放大器

$$u_4(s) = K_{AP} u_3(s) \quad (30)$$

K_{AP} —系统放大倍数

(6) 直流伺服电机

$$\Omega_M(s) = \frac{K_\theta U_4(s)}{(T_m S + 1)(T_e S + 1)} \quad (31)$$

m —机械时间常数 (s),

e —电机的电气时间常数 (s),

(7) 反射镜

$$\Omega_\theta(s) = K_7 \Omega_M(s) \quad (32)$$

K_7 —反射镜放大倍数。

2. 开环通道部分

$$W_5(s) = \frac{K_5}{T_5 s + 1} \quad (33)$$

K_5 —频率电压转换增益,

T_5 —滤波时间常数 (s)。

(二) 系统的传递函数

有了各环节的传递函数, 可重画出系统传函方框图如图13所示。经过简化, 并令 $K_0 =$

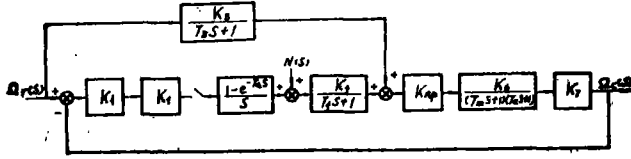


图13

$K_3(K_2 + K_5)$, $K_5 < 1$, K_2 较大, 近似认为 $K_D = K_3 \cdot K_2$, ρ 是 < 1 正数。等效传递函数

$$W_{oi}(s) = \frac{K'_D(\tau' s + 1)}{(T_f s + 1)(\tau' s + 1)} \quad (34)$$

$$K'_D = K_D / \rho \quad \tau' = \frac{K_5 T_f + K_2 K_5}{K_2 + K_5} \quad T' = \frac{T_m + T_5}{\rho}$$

四、实验结果及结论

实验分为两个内容:

(一) 提取可用光电信号

1. 模拟实验

在实验室内, 用摄有地面景物的航空胶片模拟地物, 并把光学头及光电装置放在一个伺服转台上, 获得电信号如图14所示。

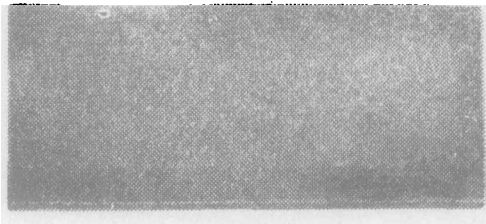


图14

2. 外景实验

把光学头放在安-2飞机上, 飞机以速度 $v = 150 \text{ km/h}$ 直线水平飞行, 其高度在 2000 m 左右, 所得光电信号如图15所示。

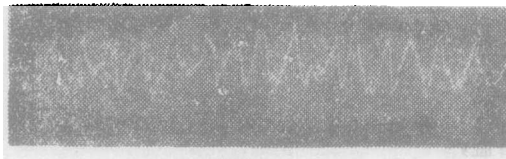


图15

(二) 开闭环复合测速实验

1. 实验参数

实验时系统传递函数及参数如图16所示。

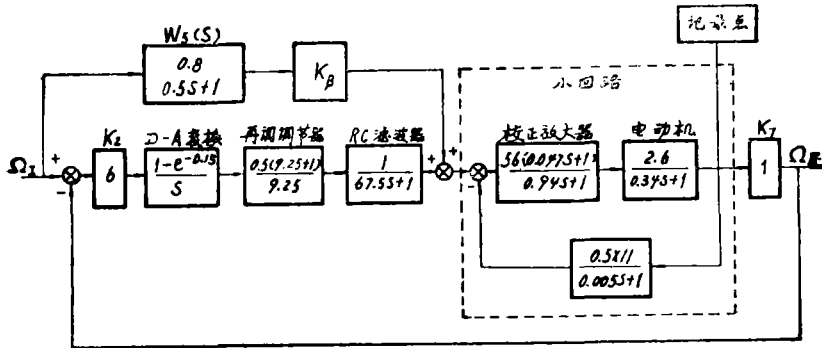


图16

2. 实验结果
实验结果如下表。

表1

工作方式	典型工作速度	测量精度	测速范围
闭环通道单独工作	15(mm/s)	5%	0.1~15(mm/s)
开环通道单独工作	70(mm/s)	2%*	10~100(mm/s)
开、闭环复合作	87.5(mm/s)	0.8%~1%	0.1~100(mm/s)
	115(mm/s)	0.9%	

(三) 结论

通过分析和实验，可以看出：

1. 无论在实验室模拟，还是飞行实验，均得到可用信号。
2. 该系统在捕获速度范围方面，响应时间上，还是稳态精度方面，都具有较好的性能。
3. 该速高比计在总体结构上是合理的，并具有实际应用价值。

参 考 文 献

[1] J.T.Ator; Image-Velocity Sensing with Parallal-Slit Reticles, JOSA., 1963, 53, No 12, 1416—1422

[2] 赵周伦等; 圆环扫描速高比计研究, 光学机械, 1985, No.6, 39—48

[3] 小林彬, 中山鸠夫, 山浦富雄等; 计测自动控制学会论文集, 1979, 15, No.1, 89—96

[4] B. A. 别塞克尔斯基; 自动调节系统的动态综合, 科学出版社, 1971, 177—182

A Consideration on Complex Velocity to Elevation Meter

Ge Wenqi

Abstract

This paper proposes a complex velocity to altitude meter (V/H meter) and analyses its principle. The effects of multi slits spatial filter on the filtering is discussed. Also its control system is analyzed. It has been shown by analog tests in laboratory and by flight tests that the V/H meter works and can be useful for practical use.