

# 相机系统分析和设计回路

## 前 言

相机系统的设计和最佳化计算机程序最近已经发展。目前这个程序是建立在寻找在最大高度范围操作，具有最小体积，尚能达到某些指定的地面分辨率的相机系统。这个程序很容易改进使大多数任何其他参数最佳化，包括费用，或在限定的体积内达到最大限度的性能等。

为了便于讨论，除了相机和物镜外，相机“系统”包括隔震动分系统（包括噪喋空间设备），图象运动补偿，焦点控制和自动曝光控制。显然，有大量的但有限的相机结构和分系统可以随意从中选择。最佳化过程并非数学的，意味着没有物镜价值函数可用某种错综复杂的技术使它达到极小；而可以说这程序提供了用计算机作为帮助的换位探讨

方法，把输入的全部组合加以分析。这样，这个程序的最有价值的贡献是迅速消除探测的无效区域和达到最佳解决问题区域的能力。另外，在这个区域中计算机对它认为最佳相机系统做出初步式样的设计。

图1表示计算机程序一般化流程。如同所表示的那样，输入由工作任务/运载工具参数组成，包括最大高度  $H_{最大}$  和换位变数，相机和胶片的类型，物镜的  $f$  数等。输出由能达到要求性能的最小高度  $H_{最小}$ （这个限制由运动和周期速率来决定），物镜的焦距和准备选择相机系统的体积  $S$  组成。

体积的选择作为要最小化的参数引起几个换位问题。与常规尺寸相机比较时，在胶

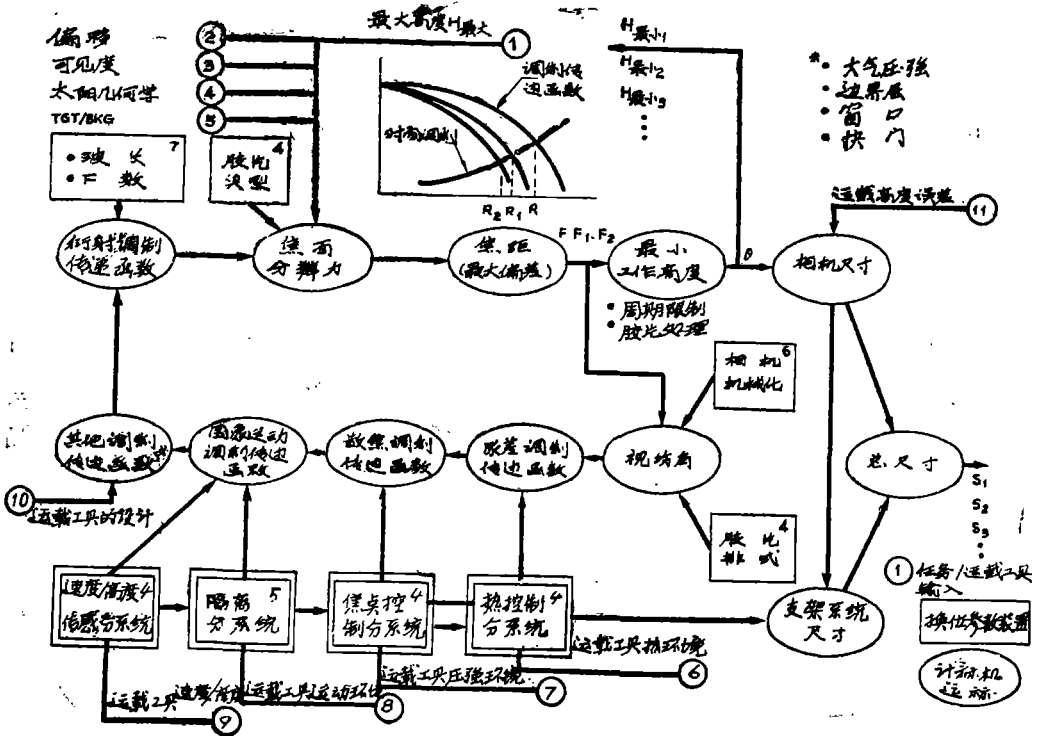


图1 相机程序方框图

片上检测和识别同样的地面目标时小型相机必须有较高分辨率。这意味着小型相机要求较高精确度的物镜和必须使用较精细晶粒的胶片（直到可利用的最细的胶片）。与精细晶粒伴随的是对光的低灵敏度，这就要求快速物镜和低快门速度相结合即焦面上的宽狭缝。低曝光速度和宽的狭缝引起各种广泛的运动问题直到运动会容易地成为主要降低质量因素的程度。对这大量参数之间的复杂相互作用计算机能理想地适当处理。

光学系统工程人员很通晓调制传递函数的分析技术和熟悉有害的大气影响，运载工具的窗口，湍流的边界层等。但是就性能方面能达到什么物镜的工艺水平和放在什么机械密封里面要由光学工程人员及物镜设计人员最好的解决。同样，各种相机结构的特性，向前运动的补偿，和隔离分系统相机设计人员是最清楚的。因此在程序叙述时物镜设计者和相机设计者对系统分析者的输入是达到成功的根本因素。这篇文章的 1.0 节详细地讨论这些输入。

任何系统一经计算机程序设计出来后，很明显首要问题是此设计能否实现。相机系统也不例外。如果所有输入是完整的和在程序进行中无误差回答应表示“是”。

在对这程序提出的第一个问题上，计算机表示需要两个相机才能概括所需高度范围（第 2.0 节）。两个相机都是全景相机。现在，全景相机物镜必须是本质上无畸变，而且许多结构中必须非常长的后焦距可以容许折叠。还由于柱形焦面，作业必须全在弯曲的视场上面其宽度等于快门狭缝宽度。这些问题的详细分析（总结在第 3.0、4.0 节中）表示计算机设计相机中应作修改，计算机模型应改进使能更适当地全面包括问题的范围（第 5.0 节）。改进后再搞模型实验，设计周期重新开始。这迭代过程反复重演直到所希望的解答收敛成经济、实用、高精确性的相机系统，每次使用程序输出的性质应有提高。

## 1.0 换位参数输入

计算机程序的可利用换位参数，在表 I 中可以识别。关于胶片的参数不说自能明了。显然在这程序中与包括其他胶片的类型是简单的事情。同样，可能为特殊任务要求用计算机确定最佳的胶片宽度。但是，由于操作，后勤和费用的原因可能最好与标准宽度相一致。表 I 的其他输入要求透镜设计人员和相机工程人员仔细检查。

表 I 系统换位参数

胶片类型:	EK3401 EK3400 EK3414 水平研究
胶片宽度:	5 吋, 70 毫米, 35 毫米, 16 毫米,
F/数:	1.0, 1.4, 2.0, 2.8, 4.0, 5.6, 8.0
相机类型:	画幅式, 具有旋转头的画幅式, 旋转物镜盘, 光棒盘, 双透镜盘, 棱镜盘。
热控制:	没有, 主动的
焦点控制:	没有, 开路温度和压强, 闭路自动准直仪, (ITEK), 焦点辐射能量运动 (FREM) (好年牌)
震动隔离支架:	橡胶减震器, 弹簧阻尼器, 电缆, 常平架
前进运动补偿:	飞机飞行 3%, 开路焦点辐射能量运动 0.5%, 闭路焦点辐射能量运动, 0.1%,

### 1.1 光学

作为相机系统分析、透镜分辨性能用多色光学传递函数是最有效的描述。实际上仅用这个复杂的光学传递函数的模数，调制传递函数。只是忽略掉相位项它是光学传递函数的随着场位置和取向的变化项。换句话说，就是用某种区域加权平均调制传递函数。甚至用了这些简化仍需用分析的方法从下面变数中某些最小数目中产生透镜的调制传递函数： $f$ /数，视场，焦点位置，焦距和光谱区域。另外，为了使相机系统最佳化，“透镜空间”可能应是连续区。几个使人信服的理由假设这程序中调制传递函数与焦距无关和假设光谱区域是常量。

从参考球面或平面波前畸变的最大( $\Delta$ )或均方根偏差是光学性质普通干涉仪量值。

在光学场中，大多数工作者对 1/4 波长系统认为有意义，至少如果给了些限制的时候。如果畸变的方式是已知道的，那么调制传递函数能直接从  $\Delta$  计算出。用这个程序，我们将任何透镜畸变的特性视为相当于焦点缺陷引起的。虽然散焦传递函数不能写成闭合式的，但能用数值积分法，近似法，或表中的内插法计算。

由于制造的缺陷，所有透镜将有非零点  $\Delta$ 。在光学设计中的缺陷也导致非零点  $\Delta$ 'S。在尺寸和价值限制的范围内，不可能设计一个低  $f$ /数复盖可观视场的完美物镜。看来可以用  $f$  和视场的函数  $\Delta^*$  标志现在工艺水平的物镜特征。 $\Delta^*$  是  $f$ /数和视场的函数（这波畸变  $\Delta^*$  包括设计和制造两个缺陷）。

这样的参数化在 II 中表示。大部分数据是基于实际的物镜和测量取得。在表 II 范围的任何物镜的  $\Delta^*$  能用内插法求得。用散焦定物镜大大简化相机系统分析，因为它允许在  $\Delta^*$  上加由于机械系统影响造成的任何真实散焦而得到一个  $\Delta_r$ ：

$$\Delta = \Delta^* + \Delta_r$$

和由此获得调制传递函数。注意使用一个衍射有限的物镜

$$\Delta_r = |d| / (8F\#^2)$$

其中  $|d|$  是实际物理散焦。可是在大半情况下我们必须采取

$$\Delta_r = f(d, \Delta^*)$$

表 II 光的  $\Delta^*$  波长

半场 (0)	F/数						
	1.4	2.0	2.8	3.5	4.0	5.6	8.0
3.5	—	—	0.30	0.30	0.25	0.20	0.20
5.5	—	0.35	0.35	0.35	0.30	0.25	0.20
8.5	0.75	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
11	0.9	0.65	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25
13	1.1	0.80	0.60	0.50	0.40	0.35	0.30
20.5	1.6	1.2	0.8	0.6	0.50	0.45	0.40
29	2.0	1.5	1.0	0.8	0.6	—	—
37	2.4	1.8	1.4	—	—	—	—
48	2.8	2.0	1.6	—	—	—	—
56	2.4	2.0	1.6	—	—	—	—
93	2.0	1.7	1.4	—	—	—	—

因为“次”透镜比好物镜有较大的焦深，这是人所共知的。

除了能预告透镜的性能外，这计算机程序必须能计算它的体积。为此目的，发展成若干个表和图解。例如，从焦距和  $f$  数计算一个透镜的前方顶点距离和直径发展成专门的程序。从这些输入，透镜的体积能确定。

（某些透镜的结构，例如 Petzval 必须作为例外处理。这程序趋向处理双高斯和 Plasmatt 型作为正常型）。

## 1.2 待选相机类型

为了计算真实体积，必须假设特殊相机类型。表 III 表示 6 种可能类型的小型相机，包括在计算机程序中。每个结合着从已知参数计算体积的子程序。例如图 2 中所示类型 4 光棒全景相机的几何模型。图内所包含的尺寸（用英寸数表示）仅仅表示模型的细节。详细的体积公式超过本文的范围。

胶片负载使战略侦察相机要占体积重要部分高达 20% 或 30%。这取决于焦距，比例尺，地面视野。图 3 是作为等量视野 6 吋地面分辨的四个标准胶片宽度所要求的胶片长度对摄影比例的标绘。胶片暗盒的类型也必须加进体积的计算。

表 III 相机类型

相机类型	传 输	向前运动补偿	快 门
画幅式 (如上所述那样但有多位瞄准头)	指数式	移动物镜式	旋转圆盘式
旋转物镜全景式	指数式	移动物镜式	运动狭缝式
光棒全景式	匀速运动式	轨道物镜式	运动狭缝式
棱镜全景式 (两个物镜)	匀速运动式	旋转光楔式	固定狭缝式
棱镜全景式	间歇式	移动物镜式	固定狭缝式

每个相机类型产生它自己的系统图象拖影。因此，包括子程序去计算系统图象拖影，用六种相机类型格式均方根作平均。由全景传输单元造成的图象拖影能达可观的量值，通过精心设计可使拖影全面减少但不能消

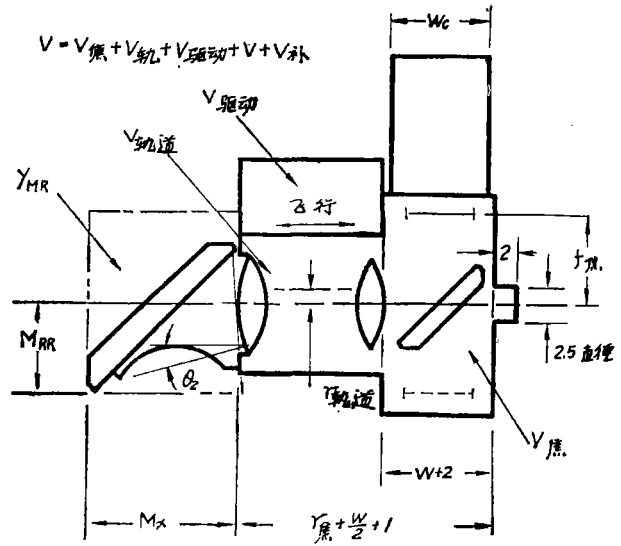
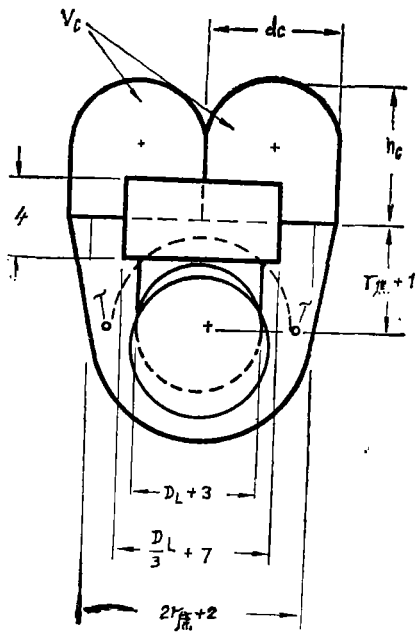


图2 类型4光棒全景相机

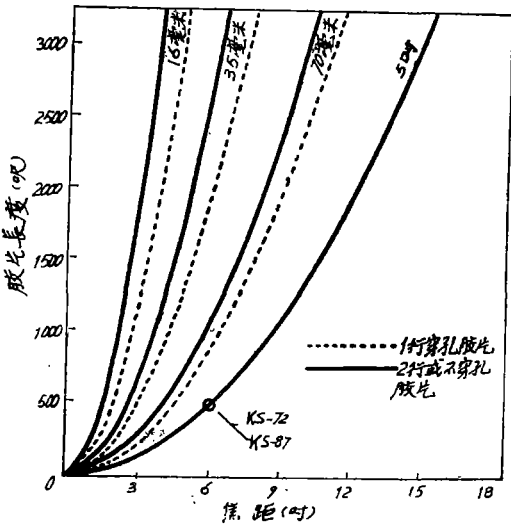


图3 等量视野、常距的胶片长度

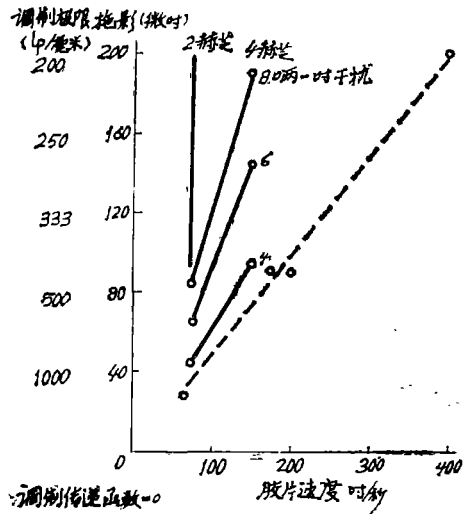


图4 胶片传输拖影数据

除。图4标绘出图象拖影和分辨极限作为全景相机在各种力矩干扰下胶片速度的函数。这些力矩干扰是由于前进运动的补偿，胶片向前运动，快门执行过程和画幅相机指针定标，所须停开机械化引起的还有机械缺陷如轴承停止等引起的。一个很明显的结论是连续传输比间歇传输产生显然小得多的拖影。

### 1.3 焦点/焦距

焦点变化引起图象模糊。加上焦距变化(失真是一种方式)导致全景相机图象拖影，因胶片运动与扫描作用调成同步，图象本质上冻结胶片上。这两种降低质量的起因必须包括在计算机程序系统的分析部分中。

空运相机焦点误差可由若干个因素产生，包括原始未调成一致，透镜温度变化，

可变物距，和焦点传感器（如果用的话）的误差。显然，焦点传感器，温度补偿和自动调焦机构带来体积限制的困难。这程序有两个对热控制的选择，用一个主动系统或不用。如果系统要求指定要任何主动系统，那么，在体积方面的牺牲必须忍受。

提供三种类型的焦点控制，这三种类型全是要求机械系统调整焦点位置。一个是从温度和压强测量计算调节焦点位置。另外两个是自准直望远镜和焦点辐射能量运动传感器是真正的自动调焦装置，这两种自动调焦方式很难在小型相机里实现。

### 1.4 运动/振动/声的隔绝

在高精度侦察相机系统中运动隔绝是最重要的。隔绝器明显地冲击性能，相机体积和空间要求。共计考虑17种隔绝器，从被动硬支架（没有）到与特殊设计的主动运动着的物镜/胶片组合范围内，计算机模型包括下面支架：弹性体、缆索，弹性阻尼器，主动隔离和常平架。

能得出某些一般的结论。具有硬支架的相机没有噪喋空间要求。具有弹性体支架（20—25赫芝）整个相机仅要求0.3寸噪喋空间。具有“好”隔绝，对整个相机噪喋空间要求大约围绕全机1吋的范围。再则，稳定器可要求占相机体积的0.04倍到10倍，这取决于类型。

在任何情况下，稳定性能的下限是约每轴 $1\sigma$ ，0.1毫弧/秒。不要求隔声空间，因为相对地说这不是关键。一般说来，相机自然共振频率低到只当装配透镜焦距大于300毫米时才需要某类绝缘。最后，相机机构可以很好地平衡，使内部产生的运动不至造成分辨率损失。

### 1.5 运动传感器

向前运动的补偿要求V/H（速度/高度）比可用作对相机的输入。速高比能从其他飞机传感器数据计算或直接测量，比方说，焦点

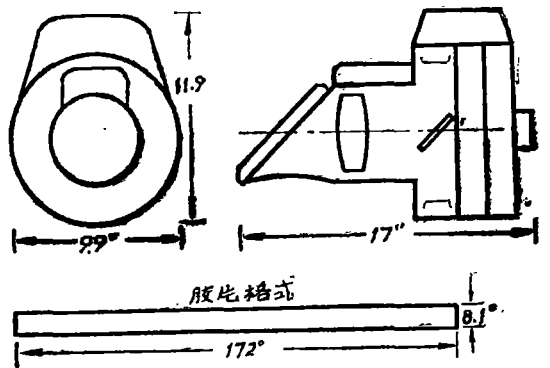
辐射能运动，Actron的HG453或Perkin-Elmer C型V/H传感器。再则V/H传感器包括在计算机的模型中两者均用性能和体积表达。只在传感器一定能达到足够精度时才把传感器装上相机。

## 2.0 最佳相机输出

简单地说，这程序首先计算一个最小的焦距长度。就在 $H_{\text{最大}}$ 要求分辨说明地面目标情况，除了大气路径以外不考虑任何降低质量因素。用迭代过程去修改（增加）焦距直到在所有降低质量因素都存在时达到所要求的分辨率。最低高度 $H_{\text{最小}}$ 是以循环率限制为基础的。

目标从对飞行路线的最大横向偏移和 $H_{\text{最小}}$ 唯一地确定横向视野角。相机体积从横向视野角，焦距，f数和格式的宽度计算。作为定尺寸循环的最后一步。隔绝系统的体积计算出来加到相机其他支架分系统体积上，获得整个系统的图1的尺寸S。作为下一步改变换位参数之一，重复整个焦距和定尺寸的循环的计算。

第一次实验其中的一个，这程序研究概括高度范围为300到20000呎的小型相机。一个直接的计算结果是个范围不能由一个相机系统所概括。要求两个相机代替，低高度系统包括300—2500呎和中等高度系统从1400—20000呎。图5表示计算机设计的毫米的中



常平稳定器，3%前进运动补偿，19立方分米体积，工作高度1400—20000呎  
图5 最佳相机，35毫米，中等高度，218毫米，F/2.0

等高度的光棒式全景系统的细节。低高度系统要求全景相机装备28毫米,  $f/1.4$ 的物镜和16毫米的胶片。较小的(不同的)格式是潜在的主要问题, 特别在放大器/印刷机和后勤方面。

### 3.0 实现计算机设计相机

光棒式全景相机的两个特点使它们难于小型化。这两个特点是柱形焦面和要求物镜后部光路折叠。为了减少机械复杂性和减少由胶片和图象速度不同步所引起图象拖影的可能性, 胶片应以恒定速度运动和物镜以恒定角速度旋转。只有旋转胶面有一个特殊的半径才能给出焦距, 和光路折叠点精确与胶片曲面中心重合。这表面半径可用下面公式计算。

$$r = \frac{f(2\pi n - \phi) - c}{2\pi n}$$

其中  $f$  是焦距,  $\phi$  是扫描角,  $c$  是各帧画幅之间的间隔,  $n$  是每次摄影旋转数(“跳跃扫描”系数)。如果  $n=1, \phi=\pi, c=0$ , 当扫描半径为  $r$ , 将正好是物镜焦距的一半。帧间间隔还可使扫描半径变为更小。长焦距系统视场相对的小时, 这不算问题或没有问题, 但焦距是可与结构尺寸相比较时, 这系统显得空间狭窄。这个限制可以用上面的公式和在图6中所示几何关系检查。

因

$$r = y/2 + \Delta = \frac{f(2\pi n - \phi) - c}{2\pi n}$$

所以

$$\begin{aligned} \tan\theta/2 &= y/2f \\ &= 1 - \frac{\phi}{2\pi n} - \frac{c}{2\pi n f} - \frac{S}{f} \end{aligned}$$

其中  $\theta$  是物镜视场角, 因此对于恒速光棒全景相机来说, 视场径迹受到全景扫描角  $\phi$ , 帧间的相对空间  $c/f$  和折叠反射镜或棱镜后面所需的相对空间  $S/f$  的限制。例如, 考虑这种情况扫描角是  $180^\circ$  或  $\pi$  弧度, 帧间的空间和余

隙空间都是焦距的10%。这时物镜视场限制到  $420^\circ$ 。对这结果从另外一角度去看是计算焦距与结构格式宽度的比率。在这种情况下, 这焦距必须是结构格式宽度的130%, 或许为了包括相当余隙或安全达150%。地面视场直接取决于胶片宽度和物镜焦距。因此, 给出一个特殊结构格式尺寸, 任务胶片的要求对光棒全景相机体积直接规定了一个下限。

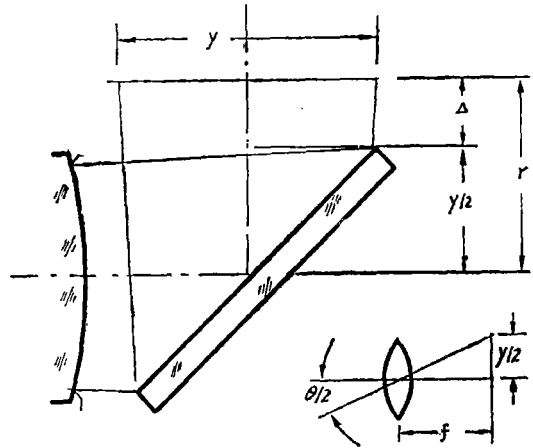


图6 折叠空间的限制

#### 3.1 柱形焦面

显然, 短焦距光棒式全景相机所结合的物镜设计问题是柱形的焦曲面。这焦面对光轴不是旋转对称的, 以及它的形状不能和常规球面各部分的图象相匹配。人们可以忽略这个问题, 试图用非常规物镜去匹配场和/或缩小狭缝宽度来减少场—图象失配的影响。中等高度的相机的计算机解答规定了  $F/2$  透镜, 狭缝宽度要求满足高分辨率胶片希望的曝光量是够宽的, 使柱形胶面或板在跨过狭缝时大部分时间花在离焦上。这效应对性能的影响可以求平均调制传递函数作为时间的函数来求得。专门物镜设计出来了满足这个计算机输出规范。在图7中举例说明为这物镜计算的按时间平均的调制传递函数。由于离焦引起的损失是很大的因而不能忽略。

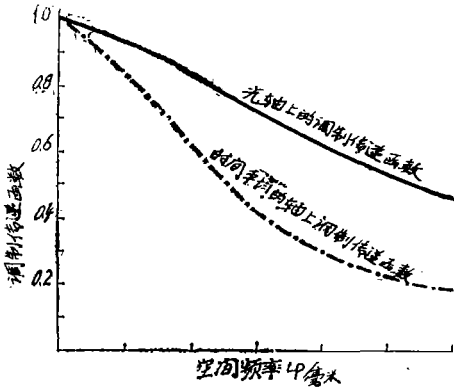


图7 F/2.0物镜的光轴调制传递函数和按时间平均的调制传递函数

做草率的尝试，设计使图象表面与柱形胶面相匹配的透镜，没有成功。由于不可消除的残留象散量和只做适当的校正便要求大量环形组元。切线视场能做到部分匹配，但只能带着径向的严重性能损失。

下一步设计是增加 F/1.4 物镜的速度。狭缝宽度减一半，因此焦点误差由 4 个因素引起。图 8 表示了这解答的按时间积分响应。性能下降是不小的，即使增加了孔径有关象差引起 F/1.4 物镜的轴上调制传递函数降低到较低，但是 F/1.4 物镜工作比 F/2.0 物镜跨过狭缝好。

缩小狭缝宽度有助于减少其他问题，如有限宽度狭缝的全景相机由于向前运动的补偿而产生的必然残留系统图象拖影。横向拖影长度减少一半，沿着飞行路线拖影减少到  $\frac{1}{3}$  以下。

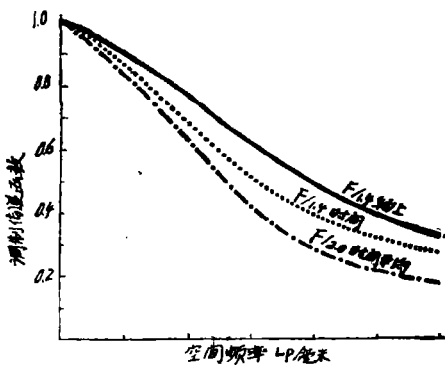


图8 F/1.4物镜轴上调制传递函数和时间平均调制传递函数

### 3.2 长后焦距

当反射镜或折叠棱镜引进光路时，必须特别注意光通过系统视场外面不被棱镜表面或壁反射掉而毫无阻碍地落到图象表面。这情况在图 9 中用棱镜的情况来说明。为了克服这缺点，常常必须采用棱镜或空气空间比间隙所要求的大。规定棱镜厚度， $t_p$  (看图 9) 的公式给出如下：

$$t_p = 2y_1 \tan \gamma' + (y_1 + y_2), y_1 \geq y_2$$

或

$$t_p = 2y_2 \tan \gamma' + (y_1 + y_2), y_2 \geq y_1$$

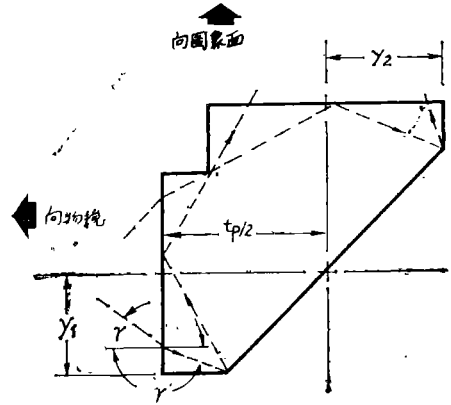


图9 棱镜鬼象问题

在系统上推算这限定对系统的影响，让  $y_1$  和  $y_2$  等于结构格式宽度  $y$  的一半，以及  $\gamma$  是玻璃里面的最大视场角。

因此

$$t_p = y(\tan \gamma' + 1) \cong 1.243y \cong 0.956f$$

即棱镜厚度必须几乎等于最小焦距。因为整个厚度必须占去物镜后焦距，物镜的样式必须有一个后焦距，它是等效焦距的很大部分。对物镜具有低的  $f$ /数，设计样式的选择限于选用反转远距离摄影类型。这些物镜类型经常用在宽角，特征是后焦距比等效焦距长。工作原理由图 10 说明。负组元或系统前半的组合减少表现尺寸和目标距离。正物镜于是在有限共轭处使较小的目标成象。这种设计不利处是与焦距比较趋向偏大，从小型

化观点出发，会引起体积实质上的增加。而且畸变也是个问题。反转望远镜型是计算机为最佳化小型相机规定短焦距光棒相机仅有可得解答。

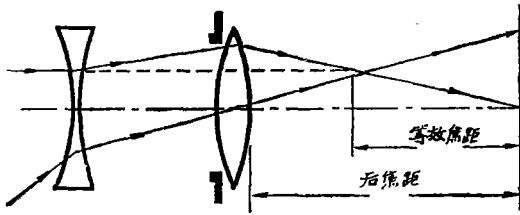


图10 反转望远镜原理

### 4.0新的设计结构

试图实现用计算机设计的光棒相机中，一个新的有兴趣的设计领域，过去计算机程序没有包括，现在被发现了。光棒设计要求后焦距几乎等于或大于焦距。因为可能制造后焦距稍微比焦距长一些的物镜。稍许努力就能设计一个后焦距是焦距长度的 1.6 倍到 1.7 倍。由于这样长的后焦距在物镜的后节点上可以折叠这系统。其结果是光棒——节点盘混合系统。

常规的节点——全景系统是设计成围绕节点旋转的物镜，并在具有等于物镜焦距的曲率半径的板上的稳定胶片“画出”图象。因为物镜在装有胶片的柱形里面旋转，胶片最后使全景扫描视场模糊，观察受到限制。见图11，可是从性能观点看，由于胶片是稳定的，所以在曝光时机械引起图象拖影的几率大大减少（除了前进运动补偿外）。这情况由图12表示。这混合结构克服了模糊问题，

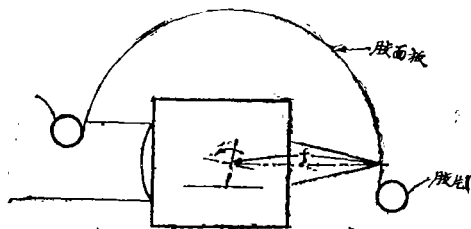


图11 节点盘模糊问题

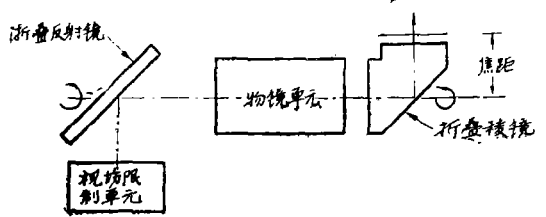


图12 光棒节点混合式结构

把扫描孔或光瞳放在含有胶片的柱面外面。这样这混合系统在两方面都是最好：节点盘的稳定性和光棒全部扫描能力。

### 5.0回路终结

现在能用计算机设计解答的实现中获得的信息去改进程序，以便在各种设计类型之间较有效的比较。例如，用计算机分析消除掉的一个设计型在图13中所示的棱镜盘相机。

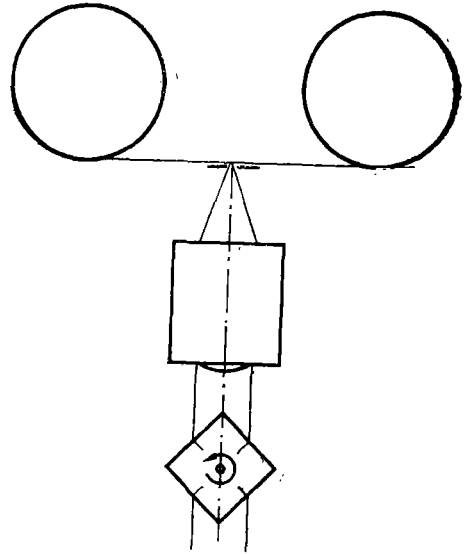


图13 棱镜盘简图

这种类型被摒弃的原图是它的体积比光棒型大，详细分析证明需要比预期大得多的物镜来完成光棒型和混合型。棱镜盘相机可以设计用较小的常规透镜，因为它不需要长的后焦距，在那里折叠光路。即使棱镜盘确有一套伴随问题，从现代程序得到的最佳化相机很可能是棱镜盘式的。

（下转第13页）

氯化钠晶体上进行了红外吸收光谱测定,其结果见图7。从图中可以看到,用真空法镀出的聚全氟乙丙烯在 $1210\text{cm}^{-1}$ 和 $1150^{-1}$ 左右有吸收峰,此吸收峰相当于 $\text{CF}_2$ 基团的振动谱,可知镀上去的膜层是全氟高分子。

## 四、小 结

经上述试验,我们初步得到如下结果:

1. 真空法镀 FS-46时,蒸发温度最好是在 $260^\circ\text{C}$ 到 $300^\circ\text{C}$ ,用眼睛看 FS-46料时,在该温度下可看出软化及熔化。

2. 在基底加温时进行蒸镀 FS-46,基底温度最好在 $140^\circ\text{C}$ 以上。但不能超过其分解点。

3. 固化温度必须在 $120^\circ\text{C}$ 以上,一般最好是在 $140^\circ\text{C}\sim 160^\circ\text{C}$ 。

4. 光性膜镀一层三防膜后,其机械牢固性,能提高几倍。

5. 我们所镀的 FS-46三防膜,在 $1210\text{cm}^{-1}$ 和 $1150\text{cm}^{-1}$ 左右有吸收峰。

6. 用 FS-46镀在 $n=1.7$ 的基底上可起增透作用,但厚膜部分的牢固性差。

伟大领袖毛主席教导我们:“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。”目前我们的光学三防膜的研究是初步的,我们将在毛主席革命路线指引下,努力奋斗,研究出更好的光学三防膜,为社会主义祖国作出更大的贡献。

## 参 考 文 献

1. 防霉防雾专题文集。  
云光技术1974年第5期
2. “Combination Moisture Resistant and Antireflection Plasma Polymerized Thin Films for Optical Coatings Appl. Optics, Vol. 13, No. 8, 1974, P1844.  
译文见:光学机械,1975年第2期
3. 用手涂法在 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgF}_2$ 为底膜镀乙基含氢硅油的实验报告
4. 光学三防膜真空制备法的研制。  
光学机械1976年第2期

(上接第36页)

## 6.0 结束语

在建立相机系统的分析/设计计算机程序中,很明显从光学和相机工程人员的输入是不可缺少的。像实际上所有计算机最佳化那样,必须特别注意为了实现进行对输出设计的估价。计算机设计的详细从光学和机械分析得来的结果将送回程序。事实上,不能想象程序会看作是完整的。

因为这程序能分析这许多情况(作为第

一次调定超过100,000),有这许多变数,程序的主要作用还是消除不包含有效解答的相机设计空间的那些区域。这允许光学和相机工程人员甚至在初步设计中,搞更多细节,因为(1)从最佳化着眼,已经限定他们的设计范围。(2)已经用计算机说明关键问题的范围

译自“Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers” Vol. 54, 1974, P. 32.

(吴桂英译)