

用点列图方法计算光学系统的传递函数

于 维 洲

应用光学系统的传递函数来评价光学系统的成像质量,是在最近一些年来发展起来的一种评价光学系统成像质量的新方法。它克服了过去的一些传统评价方法的缺点和局限性,能较客观地反映光学系统的成像质量。

本文是我们采用一种以几何近似为基础的传递函数计算方法编制在电子计算机上计算传递函数的程序的总结。

应用点列图方法计算光学系统的传递函数,在计算的处理上比较简单,因而计算的速度较快,不但可以在较大型的电子计算机上采用,而且也可以在一般的中、小型电子计算机上采用,其精度完全可以满足一般的照像物镜等光学系统的使用要求。

一、传递函数的基本计算公式

对于一个由非相干光照明的物体或自发光物体,经线性系统成像后,有如下的传递函数计算公式

$$D(s, t) = \frac{1}{A} \iint_S e^{-ik(W(u + \frac{s}{2}, v + \frac{t}{2}) - W(u - \frac{s}{2}, v - \frac{t}{2}))} dudv$$

式中 A 是整个光瞳的面积, W 是系统的波差函数, s, t 是空间频率, u, v 是系统的光瞳坐标, k 是一个常数,可由下式计算

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

其中 λ 是光的波长,上面的积分是对两个中心分别在 $(\frac{s}{2}, \frac{t}{2})$ 和 $(-\frac{s}{2}, -\frac{t}{2})$ 的光瞳重迭区进行(见图1)。

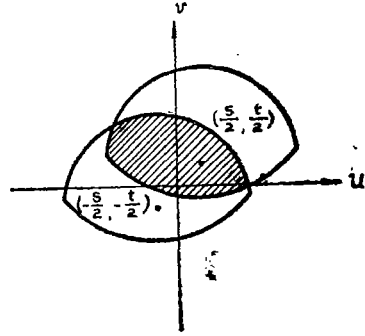


图 1

$D(s, t)$ 称为系统的传递函数。一般来讲,它是一个复数,包括模数和幅角两个部分。模数部分反映各个频率的正弦分量对比变化,称为对比传递函数,用 M, T, F 表示;幅角代表各个频率正弦分量的位相移动,称为位相传递函数,用 P, T, F 表示。

在上面的积分中,当 s 和 t 不大时,将系统的波差函数 $W(u + \frac{s}{2}, v + \frac{t}{2})$ 和 $W(u - \frac{s}{2}, v - \frac{t}{2})$ 对 s 和 t 做泰勒展开,并忽略掉二次方以上的小量,可得 $D(s, t)$ 的如下表达式

$$D(s, t) = \frac{1}{A} \iint_S e^{-ik(s \cdot \frac{\partial W}{\partial u} + t \cdot \frac{\partial W}{\partial v})} dudv$$

再根据波差与几何像差的关系,即

$$X = \frac{\partial W}{\partial u}, Y = \frac{\partial W}{\partial v}$$

其中 X, Y 是光线的点列图坐标,便可得到计算 $D(s, t)$ 的近似数值表达式

$$D(s, t) = \frac{1}{M} \sum' e^{-ik(s \cdot X_i + t \cdot Y_i)}$$

其中 M 是进入整个光瞳的光线数, \sum' 表示对进入 S 区的光线求和。对于 s, t, X_i, Y_i 应取规范化坐标,其计算公式如下

$$s = \frac{\lambda \cdot N}{n \cdot \sin U_x}, t = \frac{\lambda \cdot N}{n \cdot \sin U_y},$$

$$X_j = n \cdot \sin U_x \cdot X'_j, Y_j = n \cdot \sin U_y \cdot Y'_j$$

式中 U_x, U_y 分别是系统的弧矢和子午方向的孔径角, N 是实际的线频数, X'_j, Y'_j 为实际坐标。将上面的 s, t, X_j, Y_j 代入 $D(s, t)$ 的计算公式则得

$$D(s, t) = \frac{1}{M} \sum' e^{-i \cdot 2\pi N(X'_j + Y'_j)}$$

在进行实际计算时, 我们将只考虑 $s = 0, t \neq 0$ 和 $s \neq 0, t = 0$ 即 $D(0, t)$ 和 $D(s, 0)$ 两种情况。

上述近似可在实际空间频率 $N < 250/F\lambda$ (μ) (线/mm) 时采用, 式中 F 是镜头的相对孔径倒数, λ 是用微米做单位的光波波长。这时的误差不大, 所算得的传递函数值与实际情况很接近。

二、渐晕孔径和最大线度的求法

1. 渐晕孔径的求法

为了确定轴外情况的渐晕孔径, 我们追迹两条近轴光线, 一条是近轴边缘光线, 另一条是近轴主光线, 求出它们在各个面上的象高, 并给出对上、下遮拦起主要影影的面的净孔径。然后, 按如下公式求出上、下遮拦圆的圆心坐标和半径, 即

上遮拦圆:

$$\text{圆心坐标为 } (0, -r_o \cdot h_{p11}/h_{l1}),$$

$$\text{半 径 } r_a = r_o \cdot h_a/h_{l1}$$

下遮拦圆:

$$\text{圆心坐标为 } (0, -r_o \cdot h_{p12}/h_{l2}),$$

$$\text{半 径 } r_b = r_o \cdot h_b/h_{l2}$$

式中 r_o 为光瞳圆半径, l_1, l_2 分别为对上、下遮拦起主要影响的面的面数, h_a, h_b 为第 l_1 与 l_2 面的净孔径。

这样, 我们就求出了上、下两个遮拦圆。求出上、下两个遮拦圆以后, 这两个圆与光瞳圆的公共部分就是轴外情况的渐晕孔径 (见图 2)。

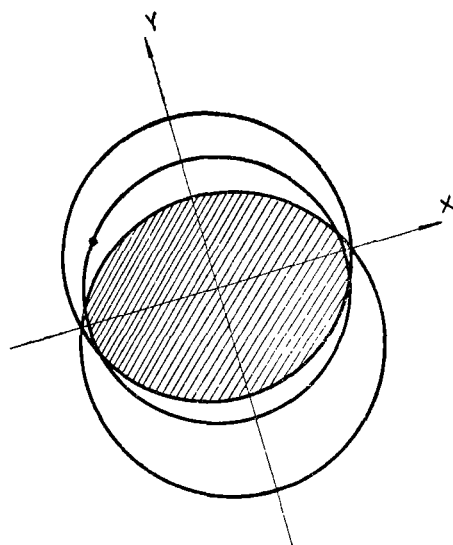


图 2

2. 最大线度的求法

① 子午方向

在上面图 2 中, 以 $(0, 0)$ 点为圆心的入瞳圆与以 $(0, a)$ 、 $(0, b)$ 为圆心的遮拦圆分别交 Y 轴于六点。它们的坐标分别是 $(0, r_o)$ 、 $(0, -r_o)$ 、 $(0, r_a - a)$ 、 $(0, -r_a - a)$ 、 $(0, r_b - b)$ 、 $(0, -r_b - b)$ 。在这六点中, 我们取上三点中的最下点与下三点中的最上点。则这两点间的线段的一半, 就是子午方向的最大线度。

② 弧矢方向

为确定弧矢方向的最大线度, 我们来看图 3。在图 3 中, S 为轴外渐晕孔径, X_o 为 X 轴上的一点。在实际计算时, X_o 点可取为以 O 点为圆心, 以 r_o 为半径的入瞳圆与 X 轴正方向的交点即 $(r_o, 0)$ 。 $X_o Y_o$ 为一与 X 轴垂直的直线。为求得弧矢方向的最大线度, 可使 $X_o Y_o$ 直线沿 X 轴向 Y 轴所在方

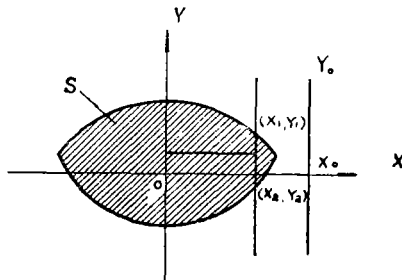


图 3

向平行移动，直至与渐晕孔径相切时（就是只有一个公共点）为止。这时，由切点到Y轴的距离就是弧矢方向的最大线度。

在实际计算时， X, Y 直线是不可能连续地移动的，而只能以一个较小的步长为步子“间断地跳动”，直至与渐晕孔径相交时为止。并且这时的交点可能不是一个，而是两个。设这两个交点的坐标为 (X_1, Y_1) 和 (X_1, Y_2) ，则可取坐标为 $(0, (Y_1 + Y_2)/2)$ 和 $(X_1, (Y_1 + Y_2)/2)$ 的两点间的线段作为弧矢方向最大线度的近似值（见图3），其误差不超过一个步长。当步长较小时，可得到最大线度的相当精确的近似值。

三、求和区域的确定

1. 对于 $t \neq 0, s = 0$ 的情况，即计算 $D(0, t)$ 时，求和区域是两个中心分别在 $(0, \frac{t}{2} \cdot Y_m)$ 和 $(0, -\frac{t}{2} \cdot Y_m)$ 的光瞳重迭区（见图4）。它可以由下面六个不等式确定，即

$$\begin{aligned} X^2 + (Y + t \cdot Y_m/2)^2 &\leq r_o^2, \\ X^2 + (Y - t \cdot Y_m/2)^2 &\leq r_o^2, \\ X^2 + (Y + t \cdot Y_m/2 + a)^2 &\leq r_a^2, \\ X^2 + (Y - t \cdot Y_m/2 + a)^2 &\leq r_a^2, \\ X^2 + (Y + t \cdot Y_m/2 + b)^2 &\leq r_b^2, \\ X^2 + (Y - t \cdot Y_m/2 + b)^2 &\leq r_b^2, \end{aligned}$$

在上面的不等式中， a, b 为上、下两遮拦圆的

圆心到光瞳圆圆心的距离， r_a, r_b 为上、下遮拦圆的半径， Y_m 为轴外渐晕孔径子午方向的最大线度。

2. 对于 $s \neq 0, t = 0$ 的情况，即计算 $D(s, 0)$ 时，则求和区域是两个中心分别在 $(\frac{s}{2} \cdot X_m, 0)$ 和 $(-\frac{s}{2} \cdot X_m, 0)$ 的光瞳重迭区（见图5）。它可以由下面六个不等式确定，即

$$\begin{aligned} (X + s \cdot X_m/2)^2 + Y^2 &\leq r_o^2, \\ (X - s \cdot X_m/2)^2 + Y^2 &\leq r_o^2, \\ (X + s \cdot X_m/2)^2 + (Y - a)^2 &\leq r_a^2, \\ (X - s \cdot X_m/2)^2 + (Y - a)^2 &\leq r_a^2, \\ (X + s \cdot X_m/2)^2 + (Y - b)^2 &\leq r_b^2, \\ (X - s \cdot X_m/2)^2 + (Y - b)^2 &\leq r_b^2 \end{aligned}$$

式中 a, b 仍为上、下遮拦圆的圆心到光瞳圆圆心的距离， r_a, r_b 为上、下遮拦圆的半径，而 X_m 为轴外渐晕孔径弧矢方向的最大线度。

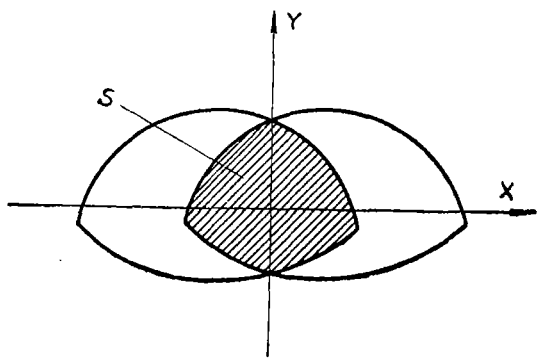


图 5

实际上，由于对称性，在进行计算时，在轴上点情况，只需对 S 区域中落入第一象限中的点求和。在轴外点情况，也只需对 $X > 0$ 的点求和。

四、关于程序的说明及实际计算的例子

用点列图方法计算光学系统的传递函数程序可同时计算四种色光，三个视场，五个

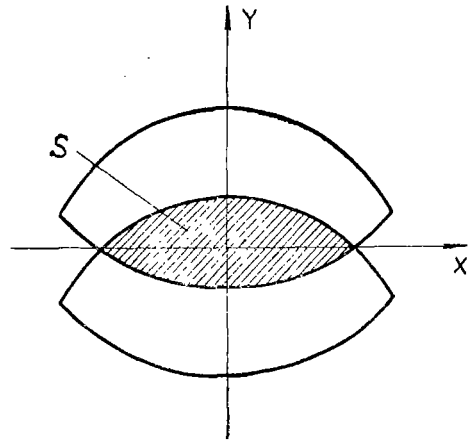


图 4

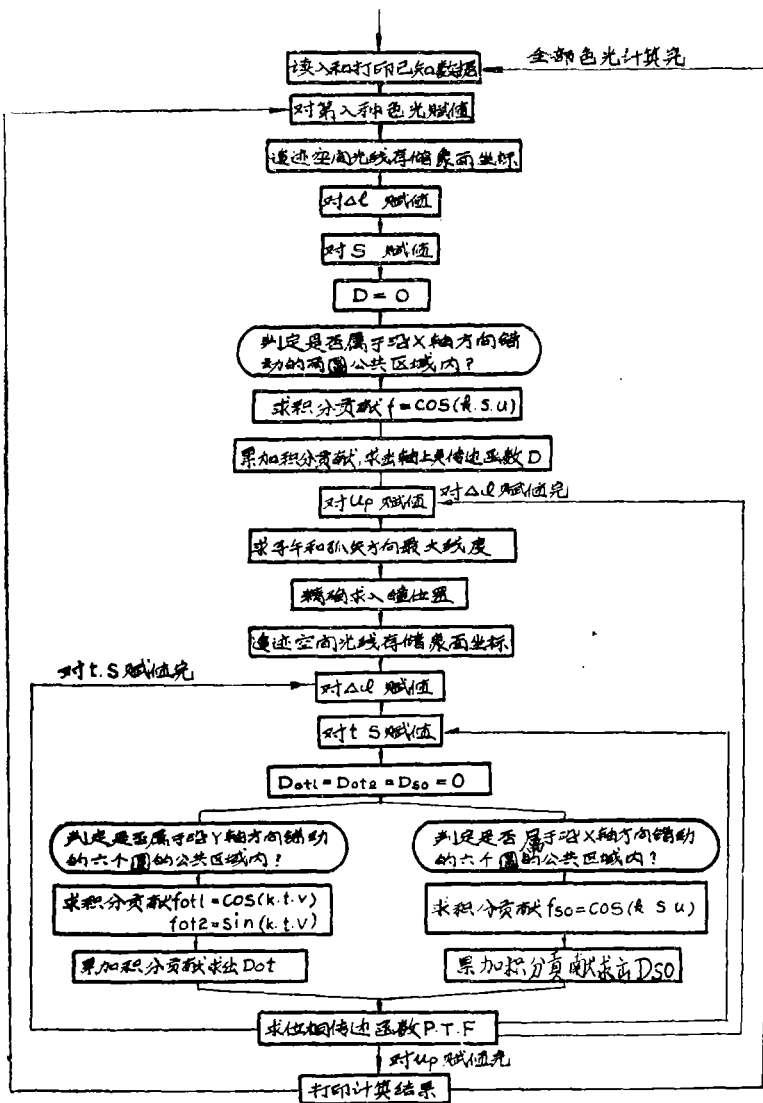


图 6

像面及五个频率的传递函数值。图 6 是编制这个程序的框图。

以一个十几个面的光学系统为例，若同时计算一种色光、三个视场、五个像面及五个频率的传递函数值，大约需二—三分钟（机器的计算速度为每秒七~八万次）。对于一个频率不太高的光学系统误差不大，可满足使用要求。

下面是以一个相对孔径为 $1/2.9$ ，焦距 $f' = 52$ 毫米，全视场角 $2W = 30^\circ$ 的照像物镜为例，采用此程序计算传递函数的结果。

镜头的结构参数为：

r	d	n
19.533	5.01	1
473.5	4.18	1.64102
-37.9	1.36	1
16.33	2.7	1.59675
0	1.34	1
225.66	1.06	1
18.942	6.64	1.51973
-28.4		1.68106
		1

传递函数值为:

	D $up = 0$ $\Delta l = -0.1$	$D_0, D_{s_0} P.T.F$ $up = 0.707$	$D_0, D_{s_0} P.T.F$ $up = 1$
5	0.939	0.977 0.914 0.111	0.965 0.899 0.056
20	0.453	0.809 0.196 0.365	0.695 0.174 0.172
	$\Delta l = 0$		
5	0.883	0.980 0.812 0.028	0.980 0.797—0.066
20	0.135	0.703—0.040 0.083	0.741—0.066—0.284
	$\Delta l = 0.1$		
5	0.766	0.932 0.662—0.056	0.953 0.651—0.187
20	0.069	0.222 0.097—0.333	0.385 0.043—0.586

(上接40页)

定的检验温度是25℃。问题在于:酸敏玻璃在胶合的时候,经过不可少的加热到达80℃时,粘胶中当时含有的酸加速了对玻璃的腐蚀。把对Schott玻璃所做试验结果与实际光学加工中已经众所周知的薄膜敏性玻璃加以比较示出很好的一致性。所有这种玻璃,如SK₁₆, SK₂₂, SK₂₄, BaSF₆, BaSF₈, SSK₅, SF₆和SF₅的斑点灵敏性是3级至5级。对苏联玻璃的研究用各种检验方法得出不同的结果。许多根据文献^[11]分为第三级的苏联玻璃示出一种对于斑点灵敏性有很大的区别。

4. 镀膜的玻璃表面的斑点灵敏性检验

镀低折射的光学薄膜(T涂层和T-3涂层),由于阻滞或降低了化学腐蚀而提高了光学元件的抛光玻璃表面的稳定性。但是并没有对将要受到腐蚀的玻璃层进行彻底的保护。不是任何情况下都能由于镀膜而提高耐化学腐蚀性。可由大气试验证明。

根据文献九对T和T3涂层的镀膜玻璃使用斑点灵敏性检验。由于玻璃的型号、化学状态及表面在涂敷之前的特性,镀膜表面示出了不同的情况。

译自“Feingerätetechnik” 75. 10. 436-439
(张联维译、卢寿枏校)