

79.84
558

光学设计文集

常 群 著

科学出版社

1976

内 容 简 介

本书共收集六篇光学设计方面的文章。三篇分别介绍了微缩镜头、变焦距镜头和制版物镜设计中需要考虑的问题、具体设计方法以及设计结果的评价。另外三篇介绍了用电子计算机自动校正象差方面的问题：用阻尼最小二乘法自动校正象差的方法及其举例；以光学传递函数作为控制光学系统质量的自动校正象差方法；最后对国外的光学系统自动设计作了介绍和评述。

本书可供光学仪器设计和科研人员参考使用。

光 学 设 计 文 集

常 群 著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976 年 3 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1976 年 3 月第一次印刷 印张：5 3/4 插页：1

印数：0001—6,850 字数：129,000

统一书号：15031·129

本社书号：697·15—4

定 价：0.62 元

限 国 内 发 行

目 录

微缩镜头的光学设计	1
一、微缩镜头的一般介绍	1
二、镜头的光学设计过程及结果	6
三、镜头的加工要求	12
变焦距镜头的光学设计	16
一、变焦距镜头的概况	16
二、变焦距镜头设计的一般方法	19
三、机械补偿法变焦距设计示例	50
四、变焦距镜头最佳象面位移的调整	72
五、变焦距镜头结构型式选择考虑方法	76
制版物镜的光学设计	82
一、制版物镜的概况	82
二、二级光谱及其校正——复消色差和超消色差	85
三、复消色差制版物镜的设计方法	92
用阻尼最小二乘法自动校正光学系统的象差	109
一、阻尼最小二乘法	109
二、权因子和阻尼因子	112
三、程序和框图	114
四、例	123
用光学传递函数作“价值函数”的尝试	129
一、OTF 的基本概念及基本计算公式	130
二、关于程序的描述	137
三、试验情况	142

国外光学系统的自动设计方法	146
一、序言	146
二、国外实用的光学系统自动设计方法	147
三、自动设计的一些问题	170

微缩镜头的光学设计

一、微缩镜头的一般介绍

由于微电子技术的发展,要求提出设计和制造超微缩复制镜头,来满足光刻技术中制作照象掩模版的需要。

超微缩镜头指缩小比 <100 倍的镜头。制作照象掩模通常分两步进行:第一步把原图缩制成中间的负版;第二步使中间负版再投影复制成预定缩小比的照象掩模。再用最终制成的照象掩模来制作电子线路和器件。微电子线路要求在较大面积中,能容纳更多更复杂的线路和更高精度的细小几何形状的器件,从而对超微缩镜头的象质提出了高度要求。

为完成初缩和精缩过程,需满足达到总倍率要求的两种微缩镜头,使 $\beta_1\beta_2=\beta$ 。根据使用单位要求设计了倍率为 $\beta_1=1/20$ 倍和 $1/40$ 倍(可代替 $1/50$ 倍用)的二个初缩镜头,和一个倍率为 $\beta_2=1/10$ 倍的精缩镜头。它们配合使用的总倍率 $\beta=1/200$ 倍和 $1/400$ 倍(或 $1/500$ 倍)。

微缩镜头具有不同于普通照象物镜的特点是:

1. 在整个成象面上要求有接近于衍射极限分辨本领的象质,即轴外点应与轴上点有同样高的分辨率。

例如,精缩的 $1/10$ 倍镜头,要求在视场 $\phi 8$ 毫米内,用超微粒干版照象时,能制出 2 微米宽的边缘平整的线条,线条的亮度分布如图 1 所示,亦即要求能制出边缘平整的 250 对线/毫米的掩模版。

根据衍射,镜头的理论分辨本领为:

$$N = \frac{1}{1.22 \lambda F_e^\#} \text{ (对线/毫米)} \quad (1)$$

式中, λ 是以毫米表示的波长值, $F_e^\#$ 是有效的 F 数. $F_e^\# = \frac{1}{2NA} = F^\#(1 + \beta)$, 其中 β 为缩小倍率, NA 为数值孔径.

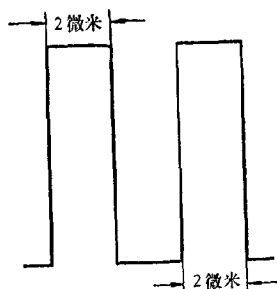


图 1

衍射理论所指的能够分辨

是指亮度分布的对比 $C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$

$= 1:0.75$ 的情形, 如图 2 所示. 实际上要做到边缘平整的黑白线条达到 250 对线/毫米, 对比至少要超过图 3 亮度分布情况. 对于超微缩镜头的质量

评价来说, 极限分辨的概念,

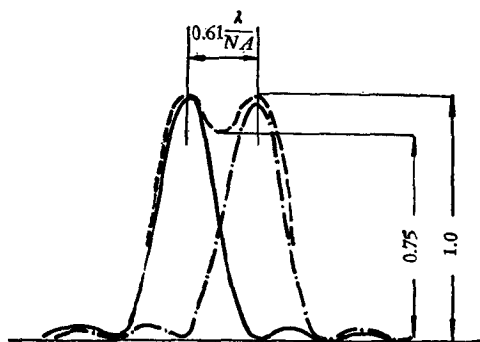


图 2

亮度为正弦分布图样的调制为 M_0 , 经镜头成象的调制为 M_i , 则镜头的调制传递函数为:

$$\text{MTF}(f_r) = M_i / M_0 \quad (2)$$

该比值是以频率为函数的^[1]。式中, $M = \frac{C-1}{C+1}$,

$$C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}.$$

对于一个完善的镜头, MTF是由衍射效果所决定, 如图4所示。

根据国外经验, 当使用 Kodak 公司超微粒干版照像时, $MTF \geq 0.35-0.4$, 则可以得到好的边缘清晰度的线条。如果残余象差相当于如图4所示的 $\lambda/4$ 的焦点误差, 则可以用分辨率接近于 $0.4f_{\text{lim}}$ 。

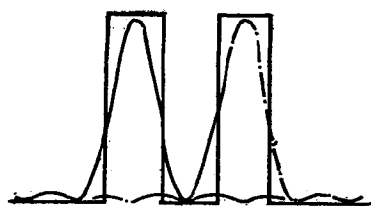


图 3

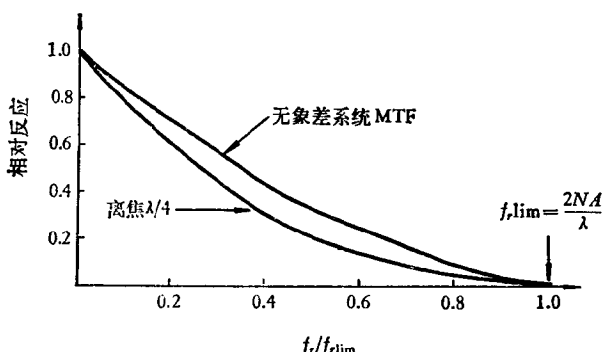


图 4 无象差系统及离焦 $\lambda/4$ 时的 MTF

数值孔径的确定就是根据所要求制造线条的宽窄, 按照上述方法求得的。例如做 2 微米的线条的精缩镜头, 若波差小于 $\lambda/4$, 则要求 $f_{\text{lim}} \geq \frac{250}{0.4} = 625$ 对线/毫米, 在取 e 光波长时, 就需要数值孔径 $NA \geq 0.21$ 。实际上, 这个数值会有变

化的。这是考虑到所使用的超微粒干版的质量，象差残余量校正程度，镜头加工的工艺水平以及使用时对焦的误差等。

数值孔径也关系到曝光时间和允许的对焦误差。焦深是象的轴向偏离，在这个偏离中，要保持象质满意。若允许光程差为 $\lambda/4$ (一个雷利极限) 变动，可容许的对焦误差是：

$$\Delta Z = \pm \frac{\lambda}{2 N' \sin^2 u'} \quad (3)$$

式中， λ 是该镜头所使用的光波长。最适宜的性 能要保持焦点在这个值的 $1/2$ 。

2. 在整个视场范围内不允许有渐晕。因为有轴外渐晕时，相当于降低了轴外象的分辨率，同时带来了视场边缘和视场中间的曝光量不一致。这对于制造微电子线路和器件，要求在整个面积上尽量有同样高的质量，所不允许的。

3. 要求有小的畸变。畸变是使一个象点的理想位置作线性位移。一般情况，既然不只一个照象系统用于制作光刻掩模版，为了保证套刻精度，那么各镜头的相对畸变就必须在线条宽度的一部分之中。根据使用单位提出，要求畸变小于万分之三到万分之五。也可以考虑几次缩小时，镜头与图、版之间的畸变配合，来降低单个镜头的畸变要求，保持最终结果的小畸变。

畸变要求这么高的镜头，设计精缩镜头时，应尽量使出瞳近于远心，以提高线条的对称性。

4. 波长的选择主要决定于跟镜头连用的超微粒干版的光谱感光度和所用的光源的光谱辐射的分布。目前，超微粒干版能分辨的最小线距为 1 微米到 1.5 微米。其光谱感光度，随产家不同略有差异。

初缩和精缩所用的超微粒干版和光源的光谱分布曲线，如示意图 5。

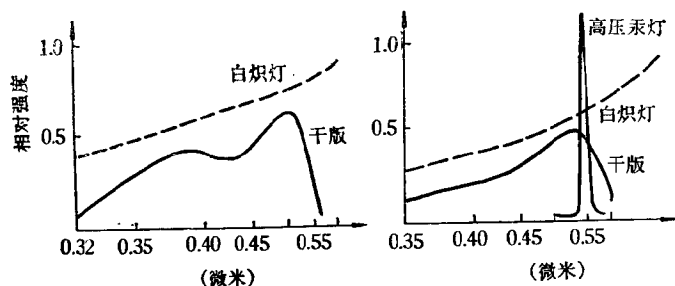


图 5 左图是初缩用的光源和干版的光谱分布曲线示意图；
右图是精缩用的光源和干版光谱分布示意图

用于初缩的新华干版，峰值在 5000—5200 埃。用于精缩的超微粒干版，峰值在 5200—5400 埃。有时初缩也用超微粒干版。照明用白炽灯和日光灯配合使用。

光学系统的分辨率反比于波长。波段宽度考虑镜头的残余色差所能接受的限度。结合我们所用的光源和超微粒干版光谱特性，在设计初缩镜头时，对波长 5250 埃消单色象差，消色差的波段选取从 4950 埃到 5600 埃。在精缩镜头设计中对 e 光($\lambda=5461$ 埃)消单色象差，消色差的波段选取从 5300 埃到 5600 埃。在镜头前配上相应的滤光片。

5. 视场的选择。视场应尽可能大，因为生产一定尺寸的掩模所需的分步时间和底图幅面尺寸的平方成反比。但是，设计大角视场的衍射极限性能的镜头的困难，线视场的增加意味着焦距的增加。结果，增大了镜头和整个设备的尺寸。残余象差也与焦距成正比增加。焦距长时视场中心的分辨率也有所下降。

根据上述原因，考虑折衷的方案。用于初缩的选择了 2.7 米导轨长度。根据倍率之要求，计算得到各镜头的焦距。设计开始，考虑尽量做大视场，取如下参数。

镜头	焦 距	缩小 倍率	相 孔 对 径	共 轭 距	角视场	线 视 场
(1)	27毫米	10 ×	1/1.8	315毫米	17°	象面 $\phi 8$ 毫米
(2)	52毫米	40 ×	1/4.7	2183毫米	27.2°	画幅 700 × 700 毫米 ²
		50 ×	1/4.7	2700毫米	27.2°	画幅 870 × 870 毫米 ²
(3)	122毫米	20 ×	1/5.6	2700毫米	25°	画幅 800 × 800 毫米 ²

标志着超微缩镜头的水平之一是能作在较大面积内容纳更多的线路内容。若取正方形的画幅象的宽度为 L 和可制作最小的线条宽为 W ，则最大的生产经济性就是 L/W 尽可能大，目前，我们努力的指标是 $L/W > 5000$ 。

二、镜头的光学设计过程及结果

用于初缩的光学结构，考虑较大相对孔径时，有较好的轴外宽光束成象质量，采用了双高斯型的物镜的结构型式。做出了满足上述指标要求的二个初缩镜头：(1) $F' = 122.01$ ， $F'/5.6$ ， $-\beta_1 = 1/20$ 倍， $2\omega = 25^\circ$ 和 (2) $F' = 51.21$ ， $F'/4.7$ ， $-\beta_1 = 1/40$ 倍(可代替 $1/50$ 倍用)， $2\omega = 27.2^\circ$ 。结构型式如图 6 所示。

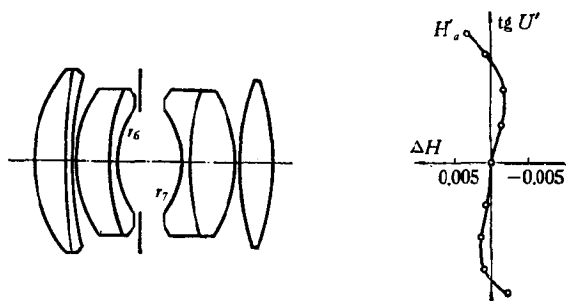


图 6 初缩物镜结构及象差曲线

在双高斯型中的两个厚透镜，不但可以实现平象场的要求，同时其内部的二个对称弯曲的小半径 r_6 ， r_7 和其所包括的空隙 $d_{\text{空}}$ 适当配合时，可以降低轴外球差^{[2]，[3]}。本设计当

$$\frac{d_{\text{空}}}{|r_6| + |r_7|} \geq 0.55 \text{ 时，轴外高级负球差降到半个焦深以下。}$$

在第一块用材料 LaK-3 做的正透镜上，胶合了一块与其等折射率大色散的玻璃 ZF-6 做负透镜。目的是使系统的光阑前半部和后半部各自独立消轴向色差时，增加一个变数，以降低轴外宽光束的高级色差。改变第二个厚透镜（在光阑后）中的胶合面位置，亦可控制一些高级色差。

根据上述想法，使初缩镜头的设计实现在较宽的波段范围（波长从 4950 埃到 5600 埃）内，做到了全视场内的波差小于 $\lambda/8$ 。本结构的主要缺陷是轴外高级负彗差 coma'_T ，即轴外宽光束的上边 L_a ，经光学系统后发散得快，使 H'_a 升高，如图 6 左边象差曲线所示。但由于系统的孔径角不很大， $2NA \leq 0.20$ ，所以象差仍在 $\lambda/8$ 范围内。

用于第二次缩小（ $-1/\beta_2 = 10 \times$ ）的超微缩镜头，轴外光束的孔径角较大， $2NA \geq 0.50$ ，应当有更好的成象质量。即，不仅在加大孔径角时，要降低轴外高级负球差，而且应当避免上述非对称性象差的出现。为此，光学系统的结构型式在采

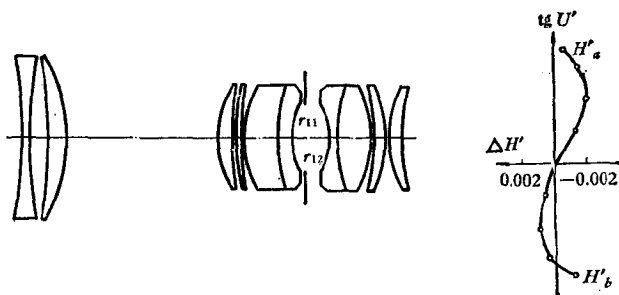


图 7 精缩物镜结构及象差曲线

取复杂化的高斯型式时，前组的光焦度要适当地往光栏后半部移。复杂化的双高斯型后半部的最后一块透镜是背向光栏弯曲的，如图 7 所示。目的是控制 L_a 光线的收敛度，同时产生较大的负象散。

在双高斯型物镜前头加一组无光焦度校正板，不但为了满足校正系统的畸变在万分之五以内的需要，而且还可以利用它的另一个变数，来校正轴外高级正彗差 coma'_T 。以校正初级象散 S_{II} 和初级畸变 S_V 的要求，来求校正板的弯曲 Q ，用下式进行。

$$\begin{aligned}\vec{Q}_1 - \overleftarrow{Q}_2 &= \frac{S_V - \frac{h_p}{h} S_{\text{II}}}{j h_p^2 \varphi^2 \left(\frac{n+1}{n} \right)} \\ \vec{Q}_1 + \overleftarrow{Q}_2 &= \left(\frac{n+1}{n+2} \right) \left\{ -\frac{j}{h_p h \varphi} \times \frac{\left(2 S_V - 3 \frac{h_p}{h} S_{\text{II}} \right)}{\left(S_V - \frac{h_p}{h} S_{\text{II}} \right)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{3n}{(n-1)(n+1)} + 4v \right\} \quad (4)\end{aligned}$$

式中， $\varphi = \varphi_1$ ， v 是规化的 u_1 值， $v = \frac{u_1}{h\varphi}$ ，各面之曲率半径为 r_1, r_2, r_3 和 r_4 ，用下式求得：

$$\begin{aligned}r_1 &= f'_1 / c_1, & c_1 &= c_2 + \frac{1}{n-1} \\ r_2 &= f'_1 / c_2, & c_2 &= \vec{Q}_1 + 1 \\ r_3 &= f'_2 / c_3, & c_3 &= -(\overleftarrow{Q}_2 + 1) \\ r_4 &= f'_2 / c_4, & c_4 &= c_3 - \frac{1}{n-1}\end{aligned} \quad (5)$$

由计算公式(4)和(5)知道,如果保持校正板 S_v 为定值,当其 S_{II} 变正时,则校正板的负、正二透镜同时背向光栏弯曲,正透镜的形势可以使轴外光束下光线 L'_b 之象点 H'_b 增高。使呈“鸭子”形之象差曲线(如图7左边所示)对称化。

根据上述想法,做出了一个结果。该结果轴上带球差为1.5倍焦深,相当于波差为 $\lambda/12$ 。光栏处 $\frac{d_{\text{空}}}{|r_{11}| + |r_{12}|} \geq 0.6$ 时,最大视场($2\omega = 16^\circ$)的轴外子午负球差 $LA'_T = -0.009$,取 $\kappa'_t = 0.009$ 与之配合,使象差曲线($H' - \text{tg} U'$)往右边转过一个角度,与小视场有同样的参考面位置情况下,在整个象面子午光线之波差 $W \leq \lambda/8$ 。

但是,一个隐存着的严重问题出现了。镜头在检测时分辨率版的一个方向线条,在全视场内均达800对线/毫米;另一个方向线条在 $\phi 6$ 时下降为650对线/毫米,在视场 $\phi 8$ 时,竟掉到430对线/毫米,结果只能在 $\phi 6$ 内,做2微米光刻线条用。

这是由于在复杂化的双高斯型中,尽管加大了光栏面处的空隙 $d_{\text{空}}$ 与其曲率半径 $|r_{11}|$ 和 $|r_{12}|$ 之比值。但由于系统的孔径角较大,在考虑各种象差同时校正时,尤其是高级正象散的校正,难以使视场角($2\omega = 16^\circ$)较大情况下的轴外高级负球差不超过1倍焦深。所以,当降低近光栏面处两半径所引起的轴外高级负球差到一定量时,考虑靠远离光栏面的前后两个的正透镜背向光栏弯曲以控制子午轴外光线的收敛,是有效的。但是弧矢的轴外负球差 LA'_s 就不能完全得到改善。结果,在视场 $2\omega = 16^\circ$ 时, $LA'_s = -0.032$,大光束的焦点误差为 $4 \times$ 焦深。也就降低了轴外象面弧矢方向线条的分辨率。所以计算空间光线是必要的。

改进的途径之一是尽量使结构在靠近光栏处的二面趋向于与光栏同心的同时,降低双高斯型的视场角,即把无光焦度

的校正板做为负的光焦度,甚至将其一块单正透镜的光焦度,给了后组的最后一块。则结构形式发展为反远距型^[1],如图8所示。

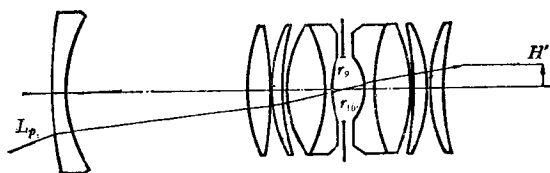


图 8 精缩物镜结构之二

该结构型式的特点是:用双高斯型能够做到大孔径下高分辨率。在双高斯型前引进负组元,使得系统视场角能够做到 17° ,且加大后工作距 L'_k 到 12.7 毫米。后组光焦度的增加,使出射光瞳近于远心。

基于上述的想法,从图7的结构型式演变为图8,用阻尼最小二乘法自动光学设计程序进行三次修改,每次10分钟,达到希望的程度。

该结果在 0.5 视场 ($H'=1.85$ 毫米) 内,波差 OPD_λ 小于 $\lambda/10$ 。在 0.7 视场 ($H'=2.73$ 毫米) 内,波差 OPD_λ 小于 $\lambda/5$ 。在全视场 ($H'=3.9$ 毫米) 孔径 0.9 带内波差 OPD_λ 为 $\lambda/4$ 。整个视场内,最大的畸变不超过 0.2 微米。图9中四个曲线图,表示四个视场计算的传递函数曲线。图中,实线 M 表示子午方向,虚线 S 表示弧矢方向。光学传递函数计算,取波长 $\lambda=5461$ 埃, $2NA=0.45$,最佳象面位置取 $\Delta L'_k=-0.008$ 时的四个视场(即轴上点,0.5 视场,0.7 视场和全视场)进行计算的。从计算结果得出,频率为 300 对线/毫米时,在 0.5 视场内 $OTF \geq 0.5$,在 0.7 视场内 $OTF \geq 0.45$,在全视场时 $OTF \geq 0.35$ 。

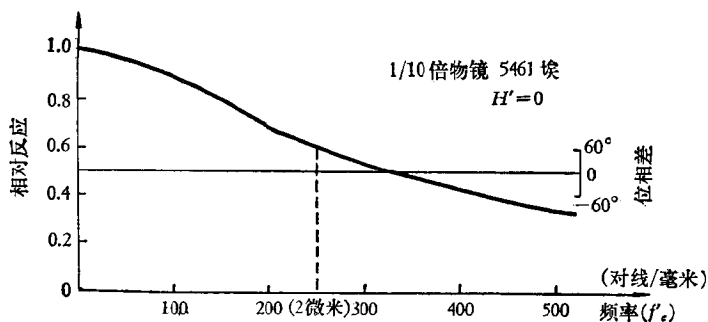


图 9a 1/10 倍精缩物镜的 OTF ($\lambda=5461$ 埃)

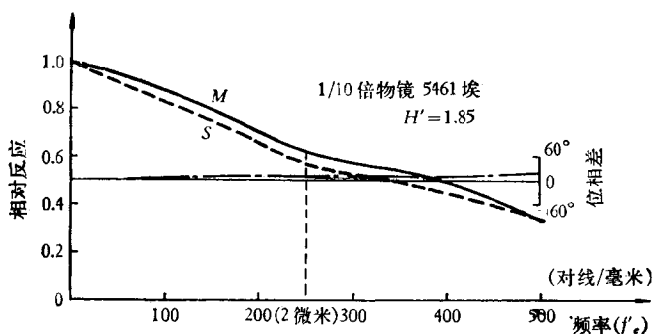


图 9b 1/10 倍精缩物镜 OTF ($\lambda=5461$ 埃)

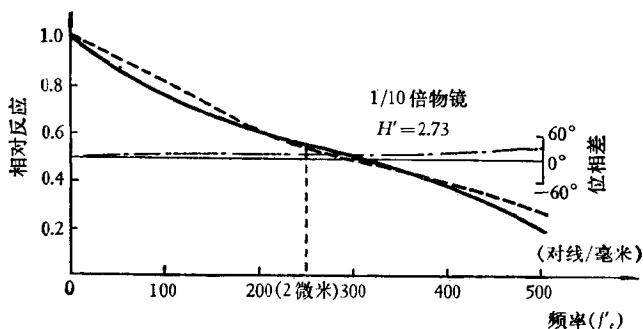


图 9c 1/10 倍精缩物镜 OTF ($\lambda=5461$ 埃)

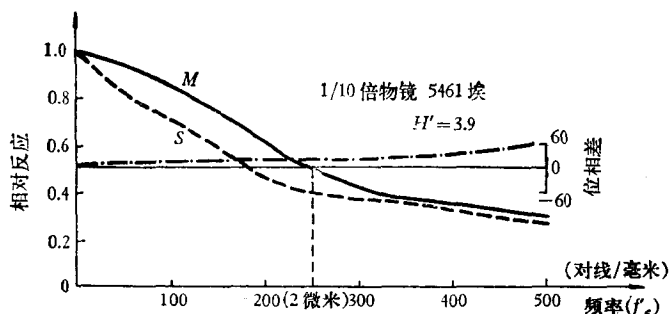


图 9d 1/10 倍精缩物镜 OTF ($\lambda = 5461$ 埃)

三、镜头的加工要求

高精度的超微缩镜头,加工的程序与一般镜头有所不同. 根据镜头的质量要求,若允许加工引起总波差变化为 $\lambda/8$,则有些零件加工公差就相当严了. 于是就采取了下列的步骤.

1. 进入精修象差时,根据所用的光学材料实测的数据进行设计.

要求在可见光谱范围内,测量四个单色波长 (A' , C , F , h 光)的折射系数. 测量的精度要求 $\Delta n \leq 2 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$. 其它波长的折射率,用 Herzberger 的色散公式^[4],进行内插计算,计算精度为 1×10^{-5} . 但由于目前测试设备一时还不能测出上述所要求的四个单色光的折射系数. 我们只得根据实测的材料色散系数 (δn_{CF}) 与玻璃表中标准数据的比例数,乘以标准材料用 Herzberger 的色散公式所算的消色差波段范围的色散值,作为实际材料色散的近似值.

2. 所用的样板必需有精测数据. 光学零件加工前,将实测的样板数据,放入自动校正象差程序中,修改部分镜片的厚度和空隙,以消除样板误差对质量的影响.

样板的测量精度一般是 $\frac{\Delta R}{R} \leq \pm 0.03\%$, 局部光圈为 $\Delta N = 0.1$ 。个别的半径(如精缩的近光栏的二个小半径 r_9 和 r_{10}), 要求还要高一倍。图形的精度要求这么高的零件, 样板检查的精度已不够了, 宜用高精度的干涉仪检查。

3. 偏心公差。根据中心彗差总允许量 $\Delta W \leq \lambda/8$ 和偏心子午畸变 $DT \leq 0.01\%$, 以概率分布方法配到各个面中去, 用下式求得各个面之偏心允许值 $\delta_m^{[5]}$ 。

中心彗差系数 $S_{2m} =$

$$= \delta_m \left\{ \left[\frac{\sum_{m=1}^K S_I}{y_m} + \frac{\sum_{m=1}^K S_{II}}{\eta_m} \right] - \left[\frac{\sum_{m=1}^K S_I}{y_{m+1}} + \frac{\sum_{m=1}^K S_{II}}{\eta_{m+1}} \right] \right\}$$

偏心子午畸变系数

$$S_{5m} = \delta_m \left\{ \left[\frac{\sum_{m=1}^K (3S_{III} + S_{IV})}{y_m} + \frac{\sum_{m=1}^K 3S_V}{\eta_m} \right] - \left[\frac{\sum_{m=1}^K (3S_{III} + S_{IV})}{y_{m+1}} + \frac{\sum_{m=1}^K 3S_V}{\eta_{m+1}} \right] \right\} \quad (6)$$

式中, δ_m 是指第 m 面的球心对光轴之偏心。从计算结果知道, 当精缩镜头的第 10 面偏心 $\delta_{10} = 0.002$, 或第 12 面偏心 $\delta_{12} = 0.004$ 时, 引起中心彗差的波差 $\Delta W_2 = \lambda/16$ 。其它面偏心公差 ≥ 0.005 。考虑同心度的保证, 在光学零件包边时, 靠精车外圆的一刀来实现(或对偏心要求特别高的某一个面考虑用调整对心办法来实现), 则对光学零件加工之要求, 可适当放宽一些。但镜头检验时, 星点图中, 不应有失对称的象差出现, 甚至视场边缘的星点也应接近于对称图形。