

光学研究的现状和远景(之二)

2.4、不受衍射限制的摄影高性能物镜的研究

对任何情况下的古典光学来说,由于胶片物质的分辨能力不够,而不存在衍射极限的校正问题,通过自动校正的应用,使古典摄影光学得到进一步地发展。把高斯矩做为校正的标准,此种情况首先是在摄影稍加以注意的空间频率,直至50对线/mm获得成物角功。使对比有了显著的提高,此外,孔径和视场也显著地提高了。这样,通过小型物镜panelar1.4/50和Flektogon2.8/20达到一定的边界性能。由于焦深的变小使得较大的孔径比1:1.4失去意义。在广角物镜中焦距缩小在20毫米以下,只要人们不使用非球面,那么就意味着畸变变小的可能性减少了。

对于X射线萤光屏的照相,使用的是特种摄影物镜—超光强X光射线物镜。因为,在X射线萤光屏照相时焦深没有起作用,这里重要的是数值孔径的提高,使它接近于由阿贝正弦条件给出的理论值1:0.5,这对于提高光强来说意义重大。图8指出:近几年来在X光射线物镜(0.73/100)中由于使用了高斯矩,从而改善了对比度的程度。当空间频率范围在10至35对线/毫米时,可以部分地把对比度提高2倍至3倍。

现代摄影物镜所研究的较宽的峰值性能是分辨率高,畸变小的图象测量物镜,它应用于大地、航空图象和卫星照像术中。航空摄影物镜(lamegno5,6/300和lamegon1,4/150)如在400至900nm的光谱区中,在23cm×23cm的象场内,无畸变校正一直达到 $3\mu\text{m}\times$ 或 $5\mu\text{m}$ 。当整个象场上的平均分辨率是40对线/毫米的时候,两个物镜的中心分辨率达

到80及100对线/毫米。图9指出:由于在航空物镜上也应用了高斯矩,而使对比度有显著的提高,1975年与1973年的情况相比,lamegonPI 4.5/150的成象质量有所改善。同时还应该考虑到,1973年拍摄的传递曲线是对应于较大光阑值5,6;而1975年(轴外开始)经过努力拍摄的传递曲线则用了较小的光阑值4.6。

MKF6型多光谱照相机Pinatare4/125示出了现代图象测量摄影物镜的性能。该物镜的象场是81mm×56mm。残余畸变在 $3\mu\text{m}$ 以下,150对线/毫米的出色的中心分辨率在象角时则稍稍下降到120对线/毫米。该值仅适用于包括胶片的多光谱照像机的整个系统。没有胶片会达到分辨的250线/毫米[23]。

3、实现现代物镜的技术工艺问题

如同已经谈到和根据图1所解释的那样,现代的高性能光学受校正限制的剩余象

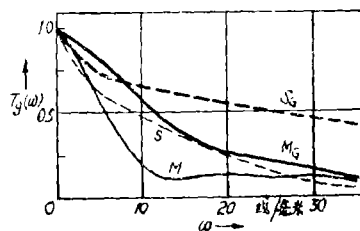


图8 蔡司x光射线物镜0.73/100的几何—光学接近于调制传递函数 $T_g(L)$ 的过程;并示出有关子午(M)和弧矢(S)的空间频率 ω ,对像高 $y' = 22\text{mm}$ 在高斯矩为最小的情况下校正前(细曲线)与校正后(G_g 粗曲线)的图示。

差很小（特别是受衍射限制的校正时），以至于该象差要在受工艺限制的附加象差的数量级之内。这种附加的象差来自于材料误差和加工误差。特别当接近于受衍射限制的系统时，此种不受校正限制的附加象差就不再作为较高级象差的影响而起作用。而是如同剩余象差本身一样，同样程度地损害着象质，并由此而决定性地限制了成象质量。除了材料不均匀性（如条纹〔29〕）、和折射梯度较小的大表面的折射率不均匀性，以及应力双折射之外，主要影响成象质量的还有对中心（定心）误差〔7〕，装配（调整）误差〔30〕和厚度误差及间距误差。在相干光学滤光片成象的系统中，如全息数据存储用的付里叶传递光学或物镜还附加汽泡〔31〕的干扰，因为相干的原故在汽泡中的杂散光导致影响干扰。

一般高性能物镜的公差要求很窄，通过下面的估计便足以明瞭，该估计是在一定假定条件下进行的，即通过离心和梯度很小的折射率不均匀性为先决条件而形成的一个不对称波面的波差为：

$$L_{31} = A_{31}(3\xi^{12} - 2\varphi') \cos\varphi' \\ = A_{31}R_3'(\xi') \cos\varphi' \quad (14).$$

当由于圆形配合误差形成的非球形波为：

$$L_{40} = 6A_{40}(Q' - Q_2' + \frac{1}{6}) = A_{40}R_4(\rho') \quad (15)$$

以及由于椭圆形配合误差所形成的像散波为：

$$L_{22} = A_{20}Q_1^2 \cos_2\varphi' = A_{22}R_2^2(Q') \cos_2\varphi' \quad (16)$$

方程式14至16示出一般波差研究〔7〕中的项数。折射面的表面光洁度可以直接在公式（4）中求得。与此同时，可以借助下式〔29〕估计条纹的公差为：

$$\Delta V_1 = -K^2 FR(1 - Fa)8Ls^2 \quad (17)$$

（FR是在出瞳处的相对条纹面； ΔLs 是经过条纹而产生的附加波差。）由厚度10mm，直径50mm和折射率1.5的透镜构成的一个理想地受衍射限制的系统（12/100），集光能力

根据公式（4），（6）和（17）下降5%，即在下述条件下当在此系统中一个玻璃—空气面倾斜 $30.8''$ 时；其透镜指示的折射率不均匀性的梯度为 10^{-5} 时；以及当一个表面具有0.3光圈的园配合误差，或者与0.3光圈相区别的在一个最好方向上为0.7光圈的椭圆配合误差，当一个表面不能再聚焦时，那么圆形配合误差便起决定性作用。占2.5%的出瞳

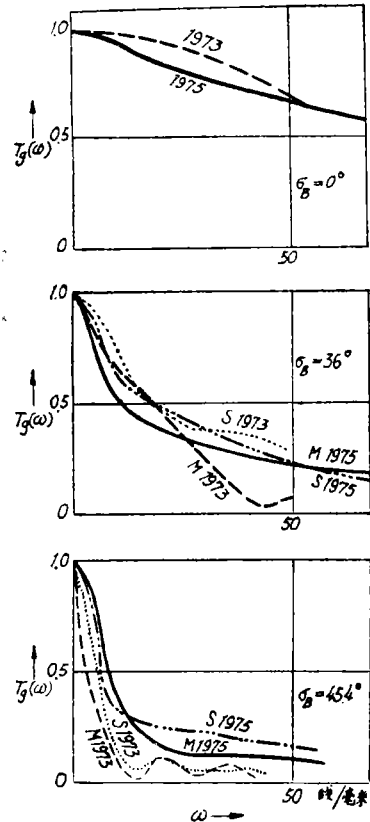


图9 蔡司航空摄影物镜LamegonPI4.5/150的几何—光学接近于调制传递函数 $Tg(W)$ 的过程。并示出有关于子午(M)和弧矢(S)的空间频率 W ；在高斯矩为最小情况下校正前(1973年)和校正后(1975年)的图示。

处的一条条纹将产生 0.2λ 的附加象差，或者产生 $\lambda/12$ 的均匀表面光洁度误差，这些误差同样会使聚光能力下降到95%。对于这种估计采用的是中间波长0.5mm。此外，按照Hopkins的观点〔32〕，将适于在任意表面上相应的波差变化，直至较高次项无畸变地

传递到象空间中。这个 $1:4/0.25[23]\mu\text{m}$ —物镜的例子指出, 确定现代高性能物镜的一个准确的公差是很困难的。该物镜由8片具有两组胶合件的透镜组成, 以此具有5个空气间隔。在这个系统中, 具有8种折射值, 14个半径, 8个透镜厚度, 5个空气间隔和14个倾斜面, 共计有49个结构参数的公差。后截距、成象放大率、畸变和集光能力均需做为被影响的量加以研究。如果集光能力总共允许下降10%, 如此对每个公差量是平均分配时, 则允许每一公差量引起下降的仅为集光能力的0.2%。这样严格的公差范围在技术上是不能实现的。因此, 人们必须在有意识地补偿误差前提下, 结合产品去花费时间和精力。

正如表3所示, 对 μm —物镜实际上必须许可没有折射率的波动。但由于在技术上实现不了, 所以要使用已熔炼的折射率进行组合计算。在组合计算中, 通过改变系统的其他参数实现折射率偏差的补偿。当然折射率需要使用高精度测量。对于 $1:4/0.25\mu\text{m}$ —物镜的折射表面, 当没有扩大配合时, 它的配合误差最多允许一个光圈, 厚度变化和空气间隔变化的作用是特别大的(表4)。根据图表看来, 在 $1:4/0.25\mu\text{m}$ —物镜时, 一个没有选择的透镜装置, 在考虑一个局部组合的情况下, 要求厚度公差本身为 $\pm 2\mu\text{m}$ 。如果采用合理的生产方法, 还不能满足的话, 就必须进行厚度配对, 使得在大量生产时, 其厚度配对满足加工所允许的公差。当生产量小, 要求严格的时候, 如对 μm —物镜所要求的那样, 厚度公差就很成问题, 并且要求测量精度为 $\pm 1\mu\text{m}$ 。借助空气间隔对透镜组进行装配, 空气间隔必须依照 $\pm 2\mu\text{m}$ 公差, 使其重新达到实际系统的性能。但这意味着, 在每个系统中厚度和空气间隔必须做互不相关的测量。当然, 高性能系统的一个合理加工禁止这类工艺。

对 μm —物镜 $1:4/0.25$ 的关键表面的定心公差共计为 $0.12''$ 。如此严格的定心公差

需要用特殊的装配方法来实现, 旋转对心必须是高精度的; 透镜定中心时必须放在专门的定心仪上。

表5示出: 对 μmVW —现代物镜与 μm —物镜在公差要求上进行比较与评价。据此这个特别精确的透镜部分, 对折射率公差和厚度公差要求很严, 而且对这些透镜部分的定心也有所提高。同时:

$$\Delta b = \frac{\Delta\theta}{r} \quad (18)$$

(18)表示为曲率半径中心点处的刻度值, 目前被控制在0.3。

$$\Delta_{\text{rad}} = 2h\Delta\theta \quad (19)$$

表示为半径行程, 应控制在 $2\mu\text{m}$ ($2h$ 透镜直径; r 表面半径)[34]。在装配中透镜调不准的数目在增多。今后折射率公差将超过 10^{-5} 达到 $5 \cdot 10^{-6}$; 而色散公差由 $5 \cdot 10^{-6}$ 控制到 10^{-6} 。因为接触面不再可能是光学检验的, 所以高精度的接触点也是成问题的, 同样在转动的套管内测量偏心时存在很大的困难。在现代大视场显微物镜中, 首先是厚度公差问题, 特别是当软玻璃的耐磨硬度 < 18 时, 和使用氟化钙(CaF_2)时, 厚度公差在工艺上要控制到 $0.01\mu\text{m}$ 以下还没有完全的把握。因为显微透镜的10%至20%具有0.01的中心厚度公差, 所以不合理的工艺公差显著地限制着生产件数。通过 $R\Delta$ —工艺, 使用旋转调整可以进一步控制显微物镜的定心。当然, 在胶合面的定心和多层膜的光学部分进行旋转调整时仍存在问题。在多层膜时反射象方法已不可行。

因为对于显微物镜制成薄的透镜在工艺上还没把握, 所以目前的显微物镜是比较密集而笨重的。在强光和广角摄影物镜时, 以及在图象测量物镜时其定心和调整是很成问题的。相反, 对于多光谱像机Pinatare却掌握了其难度较大的象质平衡。

同样, 在光学仪器中, 接触定心也有很大的困难。高折射率玻璃的很坏的加工性能也是个干扰, 由于这种玻璃具有软的性能,

并表现出很重的颜色，原因在于氟磷玻璃含铅为70%。

测量和检验的技术已跟不上提高了的工艺要求，特别是测量和检验的技术还继续根据主观的评价为指导，对于图象测量物镜，以及对于资料文件物镜的实验和图形的检验，狭缝图象分析的阐述很有进展。而在具有大视场的高分辨率的光学中存在问题。对于付里叶变换光学在视物中缺少对前平面检验的测定方法。所有公差检验方法目前还是纯属主观的工作。问题是还要提供菲涅耳透镜和非球面的检验。

4、光学研究的发展远景

当前光学研究的主要任务是，即通过新的工艺方法去制做光学介质，使它具有很好的均匀性，以及色散和折射率具有极端的稳定性，并通过对光学结构元件的合理的和精确的生产工艺以及对光学系统的相应的装配工艺来进一步扩大受工艺限制的性能极限。合理性的设计不允许降低精度和降低系统的性能。关键是定心和保持最小的厚度公差。

表3 对这个物镜的第4、5和6片透镜改变折射率时， μm 物镜1:4/0.25的集光能力 Δv 的变化

透 镜	Δn	Δv	Δn	Δv
4	$+2 \cdot 10^{-6}$	-0.14%	$+5 \cdot 10^{-6}$	-0.49%
5	$-2 \cdot 10^{-5}$	-0.29%	$-5 \cdot 10^{-5}$	-0.11%
6	$+2 \cdot 10^{-5}$	-0.41%	$+5 \cdot 10^{-5}$	-1.68%

表4 当变化物镜的空气中隔 d_4' 和 d_6' 时，其 μm 物镜1:4/0.25的集光能力 ΔV 的变化

空气中隔	$\Delta d' \mu\text{m}$	$\Delta V \%$	$\Delta d' \mu\text{m}$	$\Delta V \%$
d_4'	+ 2	-0.81	+ 5	-3.6
d_6'	+ 2	-1.38	+ 5	-6.67

表5 在 μm 物镜与 $\mu\text{m}\text{vw}$ 物镜中，公差灵敏透镜的百分比部分

公 差	透镜数量	
	μm -物镜 在%(1970)	$\mu\text{m}\text{vw}$ -物镜 在%(1977)
$\Delta n \leq \pm 5 \cdot 10^{-6}$	79	51
$\leq \pm 2 \cdot 10^{-6}$	21	49
$\Delta d \leq \pm 5 \mu\text{m}$	42	0
$\leq \pm 3 \mu\text{m}$	18	23
$\leq \pm 2 \mu\text{m}$	40	77
$\Delta b > 0.3$	74	49
$0.3 \leq \Delta b \leq 0.2$	20	42
$\Delta b < 0.2$	6	9
$\Delta \text{rad} > 2 \mu\text{m}$	62	64
$2 \mu\text{m} \geq \Delta \text{rad}$	38	18
$\geq 1.5 \mu\text{m}$		
$\Delta \text{rad} \leq 1.5 \mu\text{m}$	0	18

发展研究室和工厂使用的物镜高精度测量和检验方法，对于光学产品中其它工艺的渗透是起着决定性意义。这里，除了象质检验外，还需要重视定心和厚度误差的测量。但是，工艺问题的深入研究当然只不过是光学发展远景中一个很重要的方面。因为，目前的公差规定仅是通过非常粗略的近似值而得出，却没有考虑到统计学的生产检查和整个公差的藕合。所以，公差仍太主观和太大概了。有的情况下显得太狭窄了。因此，它必须是在波动光学的基础上，创立于实际光学系统的一个科学表达的公差理论。

但是；这只能是公差问题探讨范围中的第一步。因为，具体的光学系统附加的一个公差，基本上总是通过一个起始系统所确定的公差状况来求得其仅容许的一个，所以人们必须过渡到公差最集中的光学结构，在此结构中，公差特性被引进评价函数中。公差带不过是意味着选择一个可能宽的评价函数“波谷”。即评价函数的最小值。在最小值中的评价函数具有一个很小的曲率。正如图10例举的分辨能力指出的那样，问题在于探讨一个位置，使得处于此种位置的很宽的范围时，其象质和评价函数与参数变化无关。可是，因为公差主要是通过起始系统来确定，

所以探找一个起始系统附近的评价函数很宽的最小值是不够用的。因此这个必须依据公差的起始系统来探找。

由此得出，除了工艺的研究之外，具有较大的实际意义的光学系统的现代化，是光学研究远景的第二个主要任务。同时还必须将光线追迹最后过渡为波面追迹。必须研究相干度变化的影响，旋光色散和各向异性的影响，以及温度和压力对象质的影响。整个成像链的典型系例—光源、光学系统和接收器也是很重要的。更进一步的任务是，将工艺和经济方法关系代入系统评价中，并使初始系统的生产符合于性能要求。研究要求尽快地把最佳方法集中起来，并且在寻找尽可能多的评价函数最小值情况下，在较大参数范围中要求最佳化。

因为，对于受衍射限制的光学所许可的聚光能力不能直接测量，并且超过对比的没有直接的陈述，今后作为校正标准已不再够用。所以，必须找到高的空间频率范围的改善的且有说服力的象质标准。唯一的分辨率对于显微术和照相术已不再够用。因为被溶解的结构同样必须解决对比的程度。最终意味着，要求按照准确的调制传递函数的应用作为校正标准（图11）。

显然，为解决这些任务做广泛的工艺上的基础研究和有关测量方法的研究，以及光

学系统的现代化的基础研究是必要的，这些研究能够由工业方面和科学院及高等学校共同联合进行。

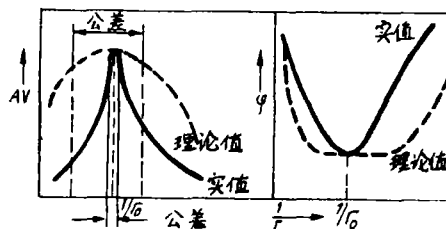


图10 一个常规公差校正的光学系统（实践）与一个公差最佳的校正光学系统其分辨能力 AV 和与评价函数 φ 依据于一个透镜表面曲率 $1/r$ 过程的图示。

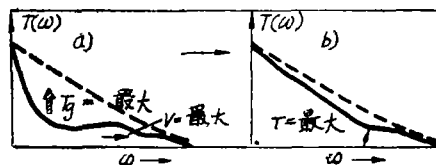


图11 图示说明在高斯矩最小和波面的中间面积的变形也为最小的情况下，目前的校正方法(a)以及远景必然的曲线(b)与传递曲线 $T(\omega)$ 的影响的过程有关，

译自“Feingerätetechnik”№12, P. 544. 1977

〔张联维译 卢寿栢校〕