

光学研究的现状和远景

50年代在科学上似乎已成完局的成象光学,在最近几年中又经历了复兴期。从而真正开始了革命的发展阶段。由于在光学研究中使用了电子数据的处理。以激光做相干光源和新的介质。此外,根据科学仪器对光学提出的要求,即要有极高的分辨率和对比度强的大象场无畸变的多色修正,而引起了光学的飞跃。

1 光学系统的自动修正装置

大约直至1950年,光学系统的研究基础仍建立在电动台式计算机,或用对数表的光线追迹上。光学计算的熟练程度决定着计算的速度和其可靠性。这种原始的计算技术状态大多只限于对孔径光线和主光线以及包括象散在内的计算。一般不计算子午慧差和不交轴光线。因此,在光学研究中只修正了球面象差、畸变、象散、象场弯曲以及为补偿所欠缺的象场校正而作的等晕条件。变化表是辅助计算人员的一种手段,其中包括通过参量的变化求得象差变化。以图1a示出的三合透镜为例,指出了当时光学系统仍具有相当大的残余象差(除望远镜和显微物镜的研究之外),所以在修正光学系统时波动光学的考虑根本没有起到作用。只有显微物镜和望远镜物镜是小象场时,通过尽可能的等光程修正才可能趋向波动光学分辨率的极限[1]。除这种小象场成象物镜外,光学系统由于修正的限制,残余象差还很大,(定中心良好的(Z)和离中心的三合透镜(d)的象差曲线的偏差如图二所示),这里,由工艺误差造成的附加象差只被看作是较高级的干扰影响。所以在变化表中仅粗略地评价了结构参

数的公差。

1950年后,EDV开始只应用在提高计算速度和可靠性方面。60年代才明确地改变了光学研究的性质。由于从例行的光线追迹计算中解放出来,光学研究者可以有更充足的时间从事对光学系统的评价和对系统的安排及修正方法的科学研究工作。在光学研究工作这种形势的变化下(多数是逐渐形成的),光学计算人员就由光学设计人员代替。在这个时期里,光学设计人员的新一代全是从特许工程师、物理学家和数学家中成长起来的。

由于计算机能适于自己控制,因此通过把计算函数化为求极小,而进一步使修正过程实现了自动化。光学系统的自动修正原理在最简单的情况下是线性方程系,这就是

$$\partial \Delta y'_j = \sum_{i=1}^r \frac{\partial \Delta y'_j}{\partial e_i} \partial e_i + \sum_{i=1}^{r-1} \left\{ \frac{\partial \Delta y'_j}{\partial d_i} \partial d_i + \frac{\partial \Delta y'_j}{\partial n_i} \partial n_i \right\} \dots \dots \dots (1)$$

横象差的变化 $\partial \Delta y_j$;联系到曲率的变化 ∂e_i 、气间隔、玻璃光程变化 $\cdot sd_i$ 和折射率的变化 ∂n_i 。对难以计算的微商 $\partial \Delta y_j / \partial a_i$,人们实际上使用以参数变化简单确定的差商 $\Delta y'_j(\partial_i + \Delta \partial_i) - \Delta y'_j(e_i) / \Delta \partial_i$ 。

因为所有的象差 Δy_j 不可能同时消失,所以,按某一具体问题中各象差的相对重要性赋予一个权重因数 q_i ,而定义评价函数 φ 为其平方和,并根据衰减最小二乘法求其极[2][3]。

$$\partial \varphi = \partial \sum_{j=1}^n (q_j \Delta y'_j)^2 = 0 \dots \dots \dots (2)$$

通过计算机控制的自动修正光学系统,加上近十年来在光学组合上努力运用了新发展的介质,已可使几何光学残余象差减低至

衍射模糊的数量级。图 1D 的曲线 Z 指出，具有 8 个透镜的物镜的修正情况。与图 1a 所示曲线 Z 进行比较，可以看出，比之 1950 年以前的水平，现在研究中所取得的进步。

因此在如此小的象差中，几何光学不能判断有关图象平面上的强度分布，因此需要进行波动光学的修正。在本世纪初首先由 Sfreht 称为“中央效能”，这一概念做为图象质量的标准也就是清晰亮度

$$V = \left| \frac{1}{F_{AP}} \int_{AP} e_{i, KL} dF \right|^2 \dots\dots (3)$$

式中 L 表示波象差，FAP 表示出瞳的有效面积和，并对它求积分。由于在衍射极限的物镜内波象差很小，所以清晰亮度满足 Mare'ca L 的近似式 [5]。

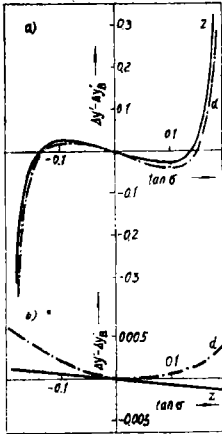


图 1 古典的几何光学三合透镜 (a) 与现代有 8 个透镜的高效率物镜 (b) 所作的轴向修正的比较 (Z 在对中心时; d 在右一个平面倾斜 0.1 度时)。

$$V \approx [1 - 0.5 K^2 \langle L^2 \rangle]^2 \dots\dots (4)$$

可以表示为波面均方偏差的函数

$$\langle L^2 \rangle = \frac{1}{F_{AP}} \int_{AP} l^2 \alpha F - \left(\frac{1}{F_{AP}} \int l \alpha F \right)^2 \dots\dots (5)$$

虽然早在 1932 年，当 Sfrehl 和 Pichr 从事显微镜波动光学研究时，就得出一种比

较简单的图表数字方法来测定清晰亮度，虽然 Nijboer[21]在 1942 年发表的博士论文中进一步研究了现代波动光学修正的基础，然而，直至 50 年代中期，计算技术的研究水平才根据清晰亮度对望远镜物镜和显微物镜做了一些修正。Pradel[6]对望远镜物镜做了波动光学的修正，而 Rieseberg [24]在显微物镜研究的领域里取得了成果。开始应用图表、数字方法[20]的情况下，应用精确的公式[3]，这样使工作相对来说复杂化了。此后，在一个时期内因为现代衍射极限的高效率光学系统的残余象差极小，于是计算就用 Marechal 的近似式 [4]。但是，自动修正过程中以满足公式[2]来操作，求清晰亮度为极大是不方便的，所以人们把波动的均方偏差做为控制函数 [5]、[6]。根据公式[7]平方合为

$$\langle L^2 \rangle = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(A_{2n,0})^2}{2n+1} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(A_{2n+m,m})^2 + (B_{2n+m,m})^2}{2(2n+m+1)} \dots\dots (6)$$

而系数 $A_{2n+m,m}$ 和 $B_{2n+m,m}$ 按 [7] 见于

$$i(e', \psi') = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{2n+m,m} R_{2n+m}^m (Q') \cos_{m\psi'} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{2n+m,m} R_{2n+m}^m (Q) \sin^{m\psi'} \dots\dots (7)$$

这是按照 Zernike 的圆多项式 $R_{2n+m}^m(Q')$ (Q') [8]，并按波象差的正交 $L(Q', Q')$ 的 Nijboer—方法展开。 Q' 和 ψ 是出瞳中与瞳半径有关的极坐标值。

把清晰亮度和与其相应的波面均方偏差做为图象质量的标准，将其应用在研究高分辨率的系统中，如在显微物镜中的应用[9]。这类新的大象场和高分辨率的物镜对用光刻法实现电子微型电路时，为了得到较大象角，将要截切入瞳面，并且使它形成椭圆

状, 因此对这类物镜来说, 要将原先只限于圆光瞳的修正公式得到进一步的推广。这个问题由于在1974年已被Dietzsch[11]解决, 所以根据波动均方偏差, 所有高分辨率光学系统可以自动地达到最佳化。对于不受衍射限制的高效率物镜(如摄影判图术、x屏图象摄影)的修正目标, 在于低空间频率W有高度的对称, 人们在计算这类系统时, 根据的是Hopkins[12]推导的几何光学调制传递函数的近似式。

$$T_g(\omega) = 1 - (\pi\omega)^2 \{ \langle \Delta x'^2 \rangle + \langle \Delta y'^2 \rangle \} \dots\dots\dots(8)$$

调制传递函数是极高斯矩的函数

$$\langle \Delta x'^2 \rangle + \langle \Delta y'^2 \rangle = \frac{1}{L_{AP}} \int_{AP} \{ \Delta x'^2 + \Delta y'^2 \} \dots\dots\dots(9)$$

就是几何光学横象差 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 的子午与弧矢的均方值。正如Lohmann[13]和Lukosz[14]指出的, 可以像均方的波前偏差那样, 将高斯矩做为自动修正时的评价函数, 从而求得低空间频率时对称强的成象。按照[7], 与公式(6)相似, 高斯矩可写成平方和:

$$\langle \Delta x'^2 \rangle + \langle \Delta y'^2 \rangle = \frac{1}{n'^2 \sin^2 Q'} \left\{ 8 \sum_{n=1}^{\infty} n (C_{2n,0})^2 + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+m) (2 - \delta_{n,0}) [(C_{2n+m,m})^2 + (D_{2n+m,m})^2] \right\} \dots\dots\dots(10)$$

系数 $C_{2n+m,m}$ 和 $2n+n \cdot n$ 是表示波象差的Lukosz氏推广式。

$$l(Q'\varphi') = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n+m,m} [R_{2n+m}^m(Q') - R_{2(n-1)+m}^m(Q')] \cos m\varphi' + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} D_{2n+m,m} [R_{2n+m}^m(Q') - R_{2(n-1)+m}^m(Q')] \sin m\varphi' \dots\dots\dots(11)$$

高斯矩做为控制函数在自动修正中的实际应用首先遇到的困难是, 因为光瞳不能得

到完全修正(主要在轴外情况下), 而且不成圆形。所以Dietzsch[15]提出一种方法, 来求得变化的局部光瞳的高斯矩, 这个方法要使其成为最小的控制函数, 将依赖于局部光瞳出现的象差和局部光瞳本身的大小, 而且要符合几何光学的传递下降。

根据以物理为基础的评价函数, 光学系统的自动修正得到系统化地深入研究, 将使准备中的第二代计算机的可能性几乎充分发挥出来。与工作有关的台式计算机和袖珍计算机的使用将补充大型装置EDV。这方面的意义深远, 因其进一步解放了从事计算工作的光学设计人员。还有一种新面貌是, 通过修正曲线、波动和点图象模型的显示技术可以直接考察[16]。

在一切的进步中(EDV为光学研究所提供的这些进步)人们仍必须注意到, 就是最快的计算机用最大的存储量, 也不可能代替光学设计人员的创造性的劳动。把光学研究引入到认为完善的计算方法就是一切的思想是危险的。必须认真对待。这里直至今日C·F Ganp的话仍然有效, 数学是反映具体的实际事物状态的; 没有数学部分人们完全不会有深刻认识, 就犹如数字计算中过分地追求精度一样。

2 高效率物镜的研究

作为根据以物理为基础的评价标准的清晰亮度和高斯矩的自动修正的成果是特高分辨率的物镜的发展, 属于这类高分辨率的物镜有: 用于微缩光刻术的大象场的准衍射限制的 μm —宽场物镜; 160/0.17系列的中间图象尺寸为28mm的平象场复消色差大象场显微物镜; 无畸变的高分辨率的和对称强的航空摄影物镜, 以及最高光强和极大象场角的摄影物镜。

由于象场尺寸的增长, 增长的象场尺寸是由现代高效率物镜以准衍射限造成的。仅分辨本领本身不再能满足对成象效率的评

价，因此必须利用光学系统的信道容量。这相应于光学成象中同时按其位置仍可区别物体数量细目的。并且算出物方视场 $2y$ 和分辨本领之积的平方

$$\bar{u}_0 = (2y \omega A)^2 \dots\dots\dots(12)$$

在公式12中对显微物镜使用了光学传递尺度。为了规范光刻物镜，将其与象空间量 $2y'$ 和 $\omega' A$ 联系起来更妥切些。

$$\bar{u}_0 = (2y' \omega' A)^2 \dots\dots\dots(12a)$$

由于象空间量与物空间量之间有如下关系

$$y' = \beta' y; \quad \omega' A = \frac{1}{\beta} \cdot \omega A, \dots\dots(13)$$

光学尺度的值自然对于物象变换保持不变。传递尺度在公式(12)中仅与单色成象发生联系，因此在复消色差成象时，不再反映与彩色修正质量有关的光学系统的真实效

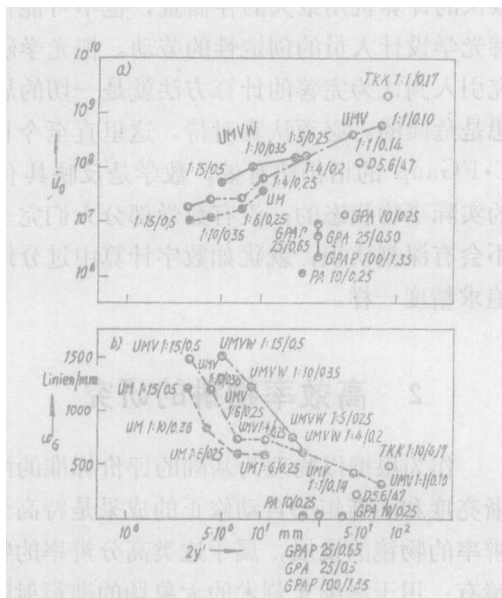


图2 用在显微光学上 (PA 平象场消色差镜; GPA 大平象场消色差镜; GPAP 大平象场复消色差镜) 微型胶卷技术(D Dokumar) 和摄影光刻(UM:UM物镜; UMV:UMV-物镜; UMVW:UMWM-物镜; 用于圆刻度复制的TKK物镜)的现代准衍射极限的蔡司—高效率物镜的传递尺度 \bar{u}_0 (a) 和分辨本领 W_a (b)

能。由于彩色信息和其分辨率，在各种相互不同的成象工作中不是等价的，所以要适当地推广传递尺度是困难的。可以这样做(如图2所示)，绘出有关图象直径 $2y'$ 的传递尺度。补充绘出分辨本领， $W A'$ 依赖于象场直径 $2y'$ 的关系 (图26)。

2.1 显微物镜

评价不断地客观化，这标志着显微镜的发展。显微照相术和其它客观的显微方法要求，继续不断地放大显微物镜的中间图象平面上可利用的直径 $2y'$ 。图3示出了不同的

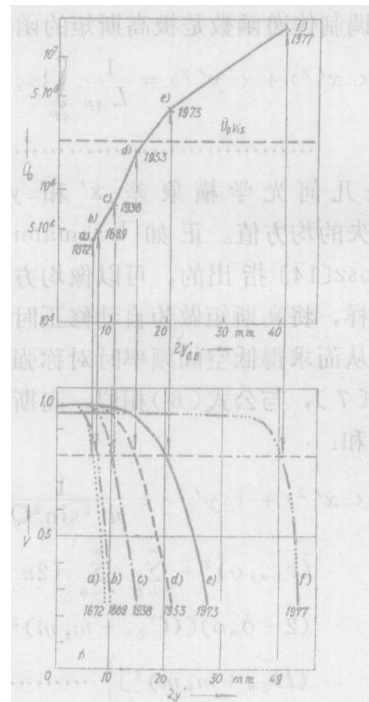


图3 在研究近似相同孔径和相同放大率的消色差和象场消色差的蔡司—物镜中，近100年来对扩大可利用平面象场 $2y_{0.8}$ 和提高传递尺度 $\bar{u}_0 = (2\varphi\omega 1G)^2$ 和图象 $2y'$ 中清晰亮度情况的比较。

- a) 消色差镜8/0.20(A型), 1872以前由蔡司工厂生产
- b) 1889年的消色差镜10/0,25
- c) Bcegeho 1d 1938年研
- d) 1973年的平象场消色差镜10/0.025
- e) 1973年的现代平象场消色差镜10/0.25
- f) 1977年大平象场消色差镜10/0.25

消色差物镜，在近似相同的放大率和数值孔径的情况下，明确了自阿贝以来所得的象场的提高，和与此相关的传递尺度〔25〕的提高。在这种意义下，Boegehold〔17〕在30年代对平象场消色差镜的研究，已经取得了决定性的进步。这类具有平坦象场的显微物镜，主要的修正元件在于厚弯月透镜。尽管它的焦距是正的，却有一相应于负透镜的 Petzval 总和，而使象场变平（图4）。Boegehold 能够提高可利用的中间象场而且可以把传递尺度大约提高至2.5倍。

根据清晰亮度标准，1950年 Rieseberg对显微物镜采用了波动光学的修正，从而实现了把中间象平面的可利用直径提高至15mm。中间象平面的可利用直径是由清晰亮度值 $v = 0.8$ 来规定的。为此达到的传递尺度符合目视情况下表现象场和必要的放大率所规定的界限，从 $0.6 \cdot 10^6$ 至 $2.3 \cdot 10^6$ 〔25〕。但是客观化的显微光学方法的进一步研究（显微光学方法在近几年中也已应用电视技术），要求要超越这个界限。因此要创造新一代的物镜—大象场的物镜。1973年人们掌握了20mm直径的平坦象场（图3）。

在这个期间通过大平象场复消色差系列160/0.17和相应的大平象消色差镜，使平面的象场达到28mm。在这个过程中所做的理论修正进一步发展了平面象场，从32至40mm直径。这类系统正如图2例举的大平象场消色差镜10/0.25的传递尺度那样已达 10^7 ，近于光刻用的UM—物镜。

因为传递尺度严格说来只适用于单色成象，没有考虑到色差修正，所以比较具有同样传递尺度的多色系统，（至少是消色差修正的显微物镜）对其成象效率要做出比单色系统更高的评价。由于使用萤石，钾矾和具有反常部分色散的特殊光学玻璃，在色修正方面取得了显著的成果。这一进步反映在大平象场消色差物镜的研究中（4图）

大平象场消色差镜几乎不存在高斯象差、第二级光谱和球面象差〔a〕。所以为了设

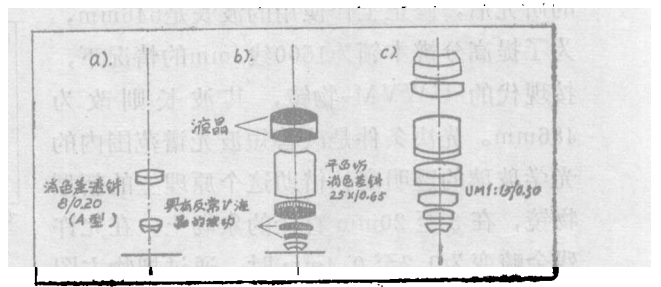


图4 消色差镜8/0.20（A型）的光学结构与现代蔡司—平象场消色差镜25×/0.65平象场用的厚弯月镜以及用反常部分色散的光学介质比较；还有与蔡司—um—物镜1:15/0.50（c）的比较。

计现代高效率物镜，基本的先决条件是，研究具有反常部分色散的光学介质。

如表1所示，现代显微物镜，这决定于其大孔径，具有一个大的物方分辨本领。如果人们要与其它的受衍射限制的系统作比较时，不能忽视这个事实，即在许多光学系统中分辨本领取自象方，否则就会导致出一个错误的估计。

象方的分辨本领的数量级大约是100线/mm。因为比起小孔径的系统，高分辨率系统必须适当地采用更强的放大率，所以现代系统的象方分辨本领在极粗略的近似值中应该看做是常数。分辨本领和放大率的联合作用使一个很高分辨率的显微物镜有稍小的传递尺度。

2.2 为光刻研制的高分辨物镜

与用多色光的显微物镜相反，同样为了大的象场根据衍射极限进行修正的光刻物镜，当产生微结构象时只是用单色光，目前可以用不同的波长并曝光。如图4所示，UM—物镜按类型属于显微物镜。由于在UM—物镜中既不需确定工作距离，也不需复消色差修正，所以这种类型比较简单。因此UM—物镜在大象场显微物镜的深入发展中并不是其出发点。

对于UM—物镜，自从大约10年前开始它

的研究后,修正工作使用的波长是546mm,为了提高分辨本领为1500线/mm的情况下,按现代的 UWVM-物镜,其波长则改为486mm。先决条件是改善短波光谱范围内的光学玻璃的透明度。借助这个原理上的新型物镜,在3至20mm直径的象场上,在允许残余畸变为0.2至0.4mm时,通过把物方图象缩小4至5倍,就出现了0.8至2mm的结构宽度。

实际上这类很小的细节成像,要求进一步压缩几何光学的象差。UM-物镜1:10/0.36(图5b)的球面纵象差,将其与一般的摄影用大孔径物镜的纵球差比较,指出上述物镜的残余象差小到怎样的程度。可见,UM-物镜的象差要比类似的摄影物镜的象差小一个数量级。对成像比例的变化,图5c和图5d示出了UM-物镜很高的敏感性。当成像比例为1:10时,经过修正成为受到衍射限制的高孔径物镜,在成像比例是1:6和1:4时,象差可以与惯用的摄影物镜的象差相仿。与对边缘修正了的摄影物镜不同(图5a),由于UM-物镜在图象质量中孔径象差是随着光瞳的高度 Q' 而增长的,所以在成像比例不适于修正的条件下,UM-物镜的象质是很低劣的。

为了在特殊修正的成像比例时,保持住成像结构中足够的边缘锐度,根据Schilling[18]实验的研究,最小成像的结构宽度为极限分辨本领的 $\frac{1}{3}$ 至 $\frac{1}{5}$ 。对于恰好以目视就能分辨的结构。人们却得不到可用的光刻微结构。而只有当结构宽度小于目视的极值分辨率之半时才行。这种情况在于高的空间频率 ω_y 受到不可避免的衬度下降(图6a)。在满足半极值频率的空间频率时(由于衍射产生不可避免的结构模糊),出现了超过50%的最低衬度损失。有些结构,其单元宽度相应于物镜的极限分辨本领,这类结构仍可以用目视加以识别,但是对于用光刻工艺制成的微结构,就不能以必要的边缘锐度成像。图6b说明不同孔径对1mm宽的结构造成的模糊程度。

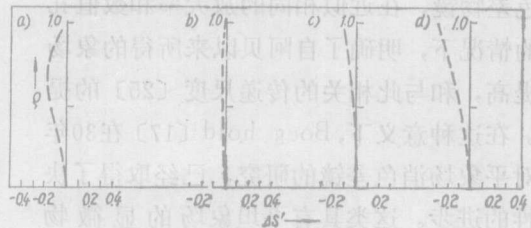


图5 在成像比例为 $\beta' = 1:10$ (b); $\beta' = 1:6$ (c); $\beta' = 1:4$ (d)的时候,一般成像所用的大孔径摄影物镜(a)与受衍射限制,对成像比例1:10修正的蔡司-UM-物镜1:10/0.56对纵球差 $\Delta S'$ (a')的比较

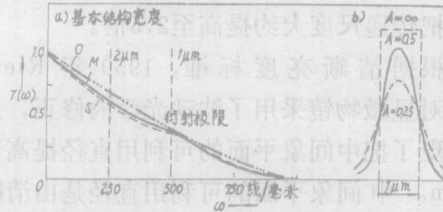


图6 (a) 受衍射限制的理想物镜 α 与实际的蔡司-UMVW物镜1:5/0.25做的衬度下降的比较。实际物镜的清晰亮度0.878,图象高度7mm,是对于径向(m)和切向(s)的空间频率 ω 作的。(b) 强度分布对1mm宽的方形强度分布的单元成像依赖于象方孔径的关系。

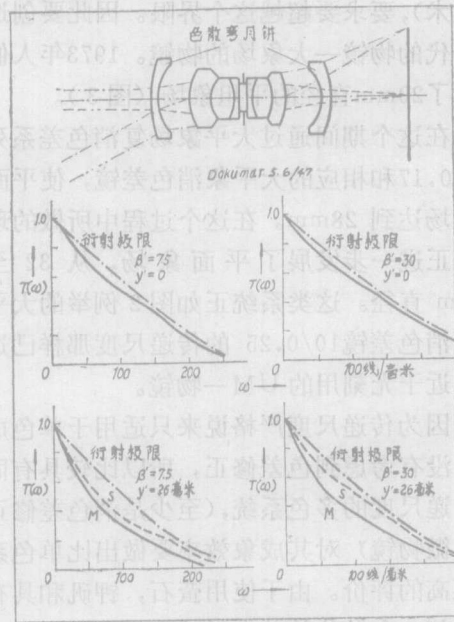


图7 蔡司的 Dokumar 5.6/47 结构,和在象中心($y' = 0$)的调制传递函数及对径向(m)和切向(s)的空间频率 ω 在象边缘($y' = 26$ 毫米)的调制传递函数,在图象比例 $\beta' = 3.5$ 和 $\beta' = 30$ 时,与纯衍射调制传递函数所做的比较

人们认识到,为了给定的单元宽度能产生一个非常有利的成象,就需要有一个起码的孔径,这个孔径要大于纯目视观察时所用的孔径。因此,光刻物镜不再象古典光学系统那样,成象过程与物体无关了。

微结构的高精度成象问题再加上局部相干照明,从而对成象结构起着假结构的作用,使其复杂化了。关于光的相干度对微结构成象的影响已由 Nitzsche 研究[19]。在近十年里用光刻法产生微结构的高分辨率物镜,从开始使用UM-物镜以来经过了UMV型物镜和UMUW型物镜,在同时提高传递信息密度的情况下,向着更高的分辨率和更大的象场发展(图2)。这种倾向仍将持续下去。直至1980年象场直径将提高到100mm,其中允许的残余畸变只能到微米的十分之几。

如表2所示,现代UMVW-物镜的物方分辨本领的数量级是100线/毫米,与此相应的是现代高效率显微镜的中间图象平面上的分辨本领。(参看图1)。

表1 东德蔡司厂制造的现代显微物镜,其物方和象方的分辨本领和象场

	ωG 线/毫米	$2y$ 毫米	ωG 线/毫米	$2y'$ 毫米
平面消色差透镜 10/0.25	1000	2.00	100	20
平面消色差透镜 25/0.50	2000	1.12	80	28
平面消色差透镜 100/1.35	5400	1.12	54	28
平面消色差透镜 25/0.65	2600	0.28	104	28

与显微物镜的中间图象平面可以进行对比的平面场做一下比较,UMVW-物镜的物方场一般要大9倍。

复制圆刻度的光刻特种物镜以TKK-物镜示出,此物镜按复制的刻度带进行修正。

表2 东德蔡司厂制造的UMVW-物镜,其物方和象方的分辨本领和象场

	ωG 线/毫米	$2y$ 毫米	ωG 线/毫米	$2y$ 毫米
1:5/0.25	150	85	750	17
1:10/0.35	120	85	1200	8.5
1:5/0.5	100	85	1500	3.2-5
1:4/0.2	150	85	600	21.2
	物方		象方	

根据这个道理,图29为物镜TKK 1: 1/0.17所示的传递尺度太高,因为从整个象场中只能利用所修正的区域。

2.3 高效率物镜在微缩胶卷技术中的发展

不是显微物镜,而是微缩胶卷技术中使用的物镜是光刻物镜的先驱,广角Dokumar 5,6/47标志着目前微缩胶卷技术中物镜的发展水平[27],根据图7,为了使图象中心的成象比例范围从1:7至1:30时几乎是受衍射限制的修正,它的结构几乎完全对称。这样,在理论上最大衬比的图象中心大大实现了大约是250线/毫米的理论分辨本领。在可利用的象场角 53° 时,调制传递函数,特别是中部的空间频率从50至100线/毫米时,较理论极限有所下降,分辨率减到150至200线/毫米,但仍根本上超过特殊文献记录胶卷的120线/毫米。

这种物镜的重要修正手段是,用发散的弯月镜做为外透镜。这就保证了象场成为平面,而且可以随着增长的象场角来扩大光瞳,因而补偿了亮度和分辨本领。因为这样一来,图象边缘的亮度损失不与 $\cos^4 QD$ 成比例,而只与 $\cos^3 ab$ 成比例,所以将象场角上的照明强度只降低至中间值的70%,由于对称的结构使在所有的成象比例时畸变小于 $\pm 5/\text{mm}$ 。

«Feingerätetechnik»1977年11月26卷483-487
(张联维译、卢寿桐校)