

# 显微镜像差测定及其像质评价

向才新

刘 钧

(西北光学仪器厂)

**摘要:**介绍了我们研制的多功能显微镜波差测定仪的各种像差测定方法。测试了国内外显微镜。平视场物镜的波面像差、轴上 $<\lambda/4\sim\lambda/8$ , 视场边缘 $\sim\lambda/2$ ; 非平场的波面像差、轴上 $<\lambda/4$ , 边缘视场 $\sim 3\lambda$ 。波面像差作为设计装配检测是一种合适的质量判据。作为像质判据, 采用白光传递函数较为合适。

## 一、前 言

影响显微镜像质的主要因素: (1) 单色像差和色差; (2) 数值孔径; (3) 杂光; (4) 彩色还原性。国内外提出了多种显微镜像质评价方法。实际上常用的还是以星点法为主。

众所周知, 瑞利准则是历来通用的显微镜像质判断标准。而用干涉法测定波面像差是很方便的。干涉法具有直观易看、信息丰富、精密定量等多种优点。特别是目前, 干涉仪与光电采样系统、微机相结合可以检测各种有关像质评价参数, 便于设计、加工、装配质量的考查和评定。因而用干涉法检测显微镜的像质是比较现实的、有前景的。

国外早已开始采用干涉法来检测显微镜, 但国内大多数厂家仍采用星点法。这不利于显微镜的研制和生产。为此我们研制了用于检测显微镜的干涉仪。并测试了国内外多种物镜。通过测试, 了解了国内外镜头的像差情况, 证明了用干涉法检测显微镜是一种较为合适的方法。

## 二、仪器原理和结构

仪器原理和结构的示意图如下:

干涉棱镜(9)由一平凹透镜、分束立方棱镜和一平凸透镜所组成。平凹与平凸透镜的两球面同心。针孔(8)位于其曲率中心外, 该点也是被测显微镜(11)的像点位置, 与被测物镜的台肩距离为160mm。标准半球的曲率中心与被测显微镜的物点相重合。

来自氦—氖激光器(2)或白色激光器(1)的激光, (向里推或向外拉出转向平面反射镜(4)、使前者或后者进入到干涉仪), 经转向平面反射镜(3)、(6)或(5)、(4)、(6)、扩展镜(7)、针孔(8), 无像差、无色差的通过干涉棱镜, 在干涉仪参考面(10)处, 部分反射为参考光束; 部分通过为检测光束。检测光束通过被测显微镜, 和标准半球镜(12)、自准返回。参考光与检测光在干涉棱镜中分束立方棱镜的半反射面处反射、通过放大镜(16)、聚焦、重叠相干。位于放大镜会聚点处的人眼(17)、对焦于干涉棱镜参考面附近

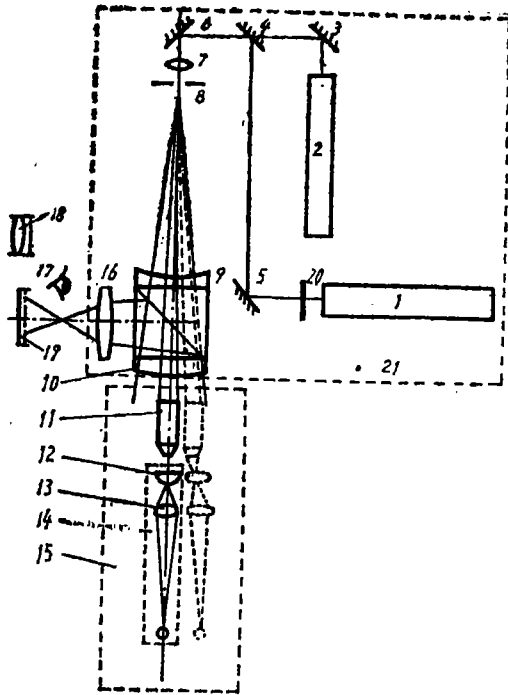


图1 仪器原理和结构示意图

- 1—白色激光器；2—氦—氖激光器；3、4、5、6—转向平面反射镜；7—扩展镜；8—针孔；9—干涉棱镜；10—干涉仪参考面；11—被测物镜；12—标准半球镜；13—监视镜；14—参考标志（图中下部的中圆圈）；15—联动夹持器；16—放大镜；17—人眼；18—测微目镜；19—照相机；20—滤光片；21—固定不动部分

处，目测波差值。或采用位于放大镜会聚点后方的测微目镜(18)、照相机(19)等测试系统来测定波差值。

参考标志(14)是位于与标准半球曲率中心共轭成像处的黑色小环。检测光束部分通过标准半球和监视镜(13)后、会聚于参考标志之中。并由此监视被测物镜轴上物点是否位于标准半球的曲率中心处。

放大镜把面积小的干涉场放大，便于观测。

激光器、诸转向平面反射镜、扩展镜、针孔、干涉棱镜、放大镜等件安装在同一固定的支架上。被测显微物镜、标准半球镜、监视镜和参考标志等件安装一联动夹持器上。在垂直于干涉棱镜的光轴方向、联动夹持器可作距离 $\pm 15\text{mm}$ 的横向移动。在联动夹持器中，标准半球镜、监视镜和参考标志三者形成一整体——半球反射组件，相对于被测显微物镜、可以作三维运动和微动。

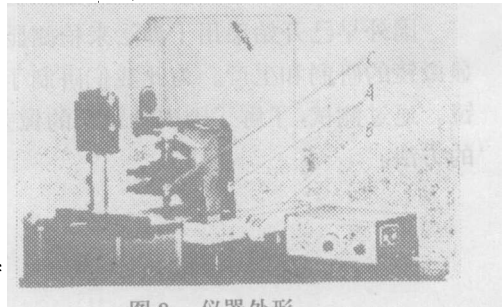


图2 仪器外形

### 三、测试方法

#### (1) 轴上单色波面像差测定

转动旋扭B，横向移动联动夹持器，至其定位标尺的“0”处。这时针孔联同干涉棱镜位于被测物镜的光轴上。转动二维微动旋扭C，使通过标准半球镜和监视镜的部份检测光束的会聚点位于参考标志中心处。转动旋扭A，垂直方向微动半球反射组件，直至“直条纹”干涉图的两侧边条纹比较对称时为止。这时为被测物镜最佳像点处的干涉图，如下图所示。



图 3



图 4

当被测镜头仅有球差时，干涉条纹为对称性分布的圆或轴对称的“弓”形线，如下图：

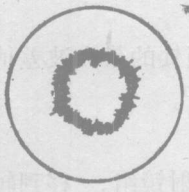


图 5



图 6



图 7

当被测镜头有彗差时，干涉条纹为非轴对称的“之”字形曲线或非轴对称分布的圆，(后者可微量纵向离焦得到) 如下图：



图 8

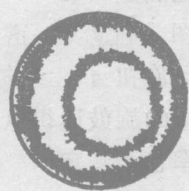


图 9

当被测镜头有像散时，干涉条纹则一头宽、另一头窄或成椭圆形，后者可微量纵向离焦得到)，如下图：



图 10

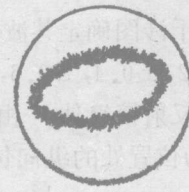


图 11

当被测镜头兼有像散和彗差时，则条纹为具有二者特征的复杂图形。如不均匀分布的“之”形线或非对称分布的椭圆，如下图：



图 12

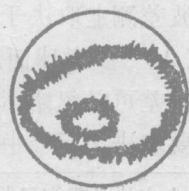


图 13

随着像散和彗差两者大小比值的变化,其中某一种像差特征将更显著。干涉图形随着像差种类、数值大小及纵横离焦的影,将出现多种多样不同的干涉图。为了较准确判断所测波差的种类,最好参照“直条纹”和微量纵向离焦“圆条纹”两者的图形特征\*。

对波差不太大的显微物镜,其波差峰谷值,用测微目镜测得条纹的矢高 $a$  ( $a'$ )与条纹间距 $A$  ( $A'$ ),由其比值来确定。当条纹为轴对称,如图4时:

$$V = \frac{a}{A} \times \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

当条纹为非轴对称,比如(图3)时:

$$V = \left( \left| \frac{a}{A} \right| + \left| \frac{a'}{A'} \right| \right) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

测得干涉图中弧矢、子午面内等间距各点处、或轴对称两等距处的最大波差值,把这些值代入波差方程,可以求得复杂干涉图的各种像差系数或波差值<sup>[1]</sup>。

### (2) 轴外单色波面像差测定

转动旋扭 $B$ , 横向移动联动夹持器, 把被测物镜连同半球反射镜组、移到轴外某待测点。转动旋扭 $C$ , 横向微动半球反射镜组, 使检测光束按原光路自准返回, 如(图1)中虚线位置所示。按上述轴上单色波面像差测定中的原则, 来确定轴外的波面峰谷值, 像差系数等像质参数。

### (3) 色差测定

根据干涉图, 确定某一谱线, 比如 $C$ 线的最佳像点后, 变换滤光片, 比如选用 $d$ 线作为照射光束。转动旋扭 $A$ , 纵向移动半球反射镜组件, 根据干涉图, 确定 $d$ 线的最佳像点位置。由旋扭 $A$ 上的旋鼓读得纵向移动距离, 即为所测 $C$ 、 $d$ 两谱线的沿轴色差。

### (4) 倍率色差测定

根据干涉图确定某一谱线, 比如 $C$ 线的最佳像点后, 变换滤光片, 比如选用 $d$ 线作为照射光束。转动旋扭 $C$ , 横向移动半球反射组件, 由干涉图确定 $d$ 线的最佳像点位置。由测微器读得此横向移动距离, 即为所测 $C$ 、 $d$ 两谱线的倍率色差。

### (5) 场曲测定

首先, 由干涉图确定其波长的轴上最佳像点位置。然后转动旋扭 $B$ , 横向移动半球反射镜组, 至 $\pm 0.2, \pm 0.4, \pm 0.6, \pm 0.8, \pm 1.0$ 诸位置处。在相应各视场位置处, 转动旋扭 $A$ , 纵向移动半球反射镜组件, 由干涉图确定各视场位置处的最佳像点位置。由旋扭 $A$ 上旋转鼓, 读得各视场位置处的纵向位置(相对于视场中心)改变量, 即为各视场位置处的场曲值。

## 四、仪器误差和测量精度

### 1. 轴上波差测定精度

轴上波差测定取决于光学系统误差。光学系统误差取决于: (1) 干涉棱镜系统的加工误差; (2) 参考球面局部误差; (3) 标准半球的球面面形差。干涉棱镜加工误差所引起的系统误差可以忽略不计。参考面的局部差, 由于使用面积小, 也可以忽略不计。光学系统误差主要取决于标准半球的球面面形差<sup>[2]</sup>。我们的标准半球的球面面形差, 即光学系统误

\* 以上方法是我们经验的总结。在《Optical shop testing》一书中, 有很多具有使用参考价值的干涉图。

差 ( $< \lambda/20$ )。

## 2. 轴外波差测定精度

轴外波差测定精度取决于光学系统误差和机械系统误差两者之和。机械系统误差有三：联动夹持器导轨与半球反射组件微动导轨两者直线性误差  $Q_1$ 、 $Q_2$ ，及其二者平行性误差  $Q_3$ 。前者改变像（物）距，后二者产生离焦误差。三者所衍生的波面差分别为<sup>[3]</sup>：

$$\Delta W_1 = \frac{1}{M^2 \cdot n} (N \cdot A)^2 \cdot L_1 \cdot Q_1 \quad (3)$$

$$\Delta W_2 = \frac{1}{n} (N \cdot A)^2 \cdot L_2 \cdot Q_2 \quad (4)$$

$$\Delta W_3 = \frac{1}{n} (N \cdot A)^2 \cdot L_3 \cdot Q_3 \quad (5)$$

式中， $(N \cdot A)$  为被测物镜的数值孔径， $n$  为物空间折射率， $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  为三者各自导轨的使用长度。由 (3)、(4)、(5) 式得到总的机械系统误差为：

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3 \\ &= \frac{(N \cdot A)^2}{n} \left[ \frac{L_1 \cdot Q_1}{M^2} + L_2 \cdot Q_2 + L_3 \cdot Q_3 \right] \quad (6) \end{aligned}$$

选取最大的像方视场直径  $l_1 = 28\text{mm}$  或物方视场直径  $l_2 = l_1/M$ 。此时有  $L_1 = l_1 = 28\text{mm}$ ， $L_2 = L_3 = l_2 = 28/M$ 。由 (6) 式，计算了高、中、低倍物镜、由于  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  所产生的  $\Delta W$  值，如下表。表中  $\Delta W_1$ 、 $\Delta W_2$ 、 $\Delta W_3$  和  $\Delta W$  值是以波长  $5 \times 10^{-4}\text{mm}$  为单位的。

表 1

| 倍率    | $N \cdot A$ | $n$ | $L_1$ | $L_2, L_3$ | $Q_1$ | $Q_2, Q_3$ | $\Delta W_1(\lambda)$    | $\Delta W_2$            | $\Delta W_3$             | $\Delta W(\lambda)$    |
|-------|-------------|-----|-------|------------|-------|------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| 100 × | 1.3         | 1.5 | 28    | 0.28       | 60"   | 5"         | 0.0019 ( $\lambda/526$ ) | 0.016 ( $\lambda/63$ )  | 0.016 ( $\lambda/63$ )   | 0.033 ( $\lambda/29$ ) |
| 60 ×  | 0.6         | 1.0 | "     | 0.47       | "     | "          | 0.0017 ( $\lambda/588$ ) | 0.085 ( $\lambda/118$ ) | 0.0085 ( $\lambda/118$ ) | 0.011 ( $\lambda/93$ ) |
| 20 ×  | 0.25        | 1.0 | "     | 1.4        | "     | "          | 0.026 ( $\lambda/38$ )   | 0.004 ( $\lambda/228$ ) | 0.004 ( $\lambda/228$ )  | 0.035 ( $\lambda/29$ ) |

由 (3)、(4)、(5) 式和表 1 可以看到：

(1) 对联动夹持器导轨直线性误差的要求，检测低倍物镜时比之检测高倍物镜时要严格，而对半球镜微调导轨直线性误差、和该导轨与联动夹持器导轨两者平行度误差的要求，则相反。

(2) 以下诸要求不难实现。即  $L_1 = 28\text{mm}$  范围，要求  $Q_1 \leq 60''$ ； $L_2 = L_3 = 0.28\text{mm}$ —— $1.4\text{mm}$  范围内，要求  $Q_2 \sim Q_3 \leq 5''$ 。因而仪器的总机械系统误差不难实现  $\Delta W < \lambda/20$ —— $\lambda/30$ 。

(3)  $\Delta W_2$ 、 $\Delta W_3$  具有相等的作用。有时为方便起见，在保持  $\Delta W_2 + \Delta W_3$  不变的情况下，可设计使  $\Delta W_3 > \Delta W_2$ ，以放松对  $Q_3$  的要求。

综上所述，联系到光学系统误差，轴外波差测定精度  $< \lambda/10$ 。

## 3. 色差、倍率色差和场曲的测定精度

根据干涉图确定各波长的最佳像点位置来确定色差、倍率色差和场曲等值。因而该几种

像差的测定精度取决于被测镜头的焦深、干涉法的灵敏度和机械系统误差。其精度小于或等于半倍焦深，不是困难的。

## 五、实测结果

实测了多种国内外显微物镜。下面是三种不同物镜的测试结果：

### (1) Nikon 物镜 (100×, PAPO)

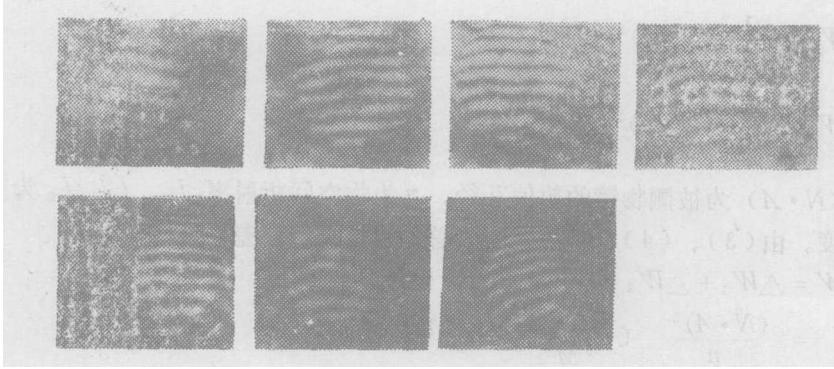
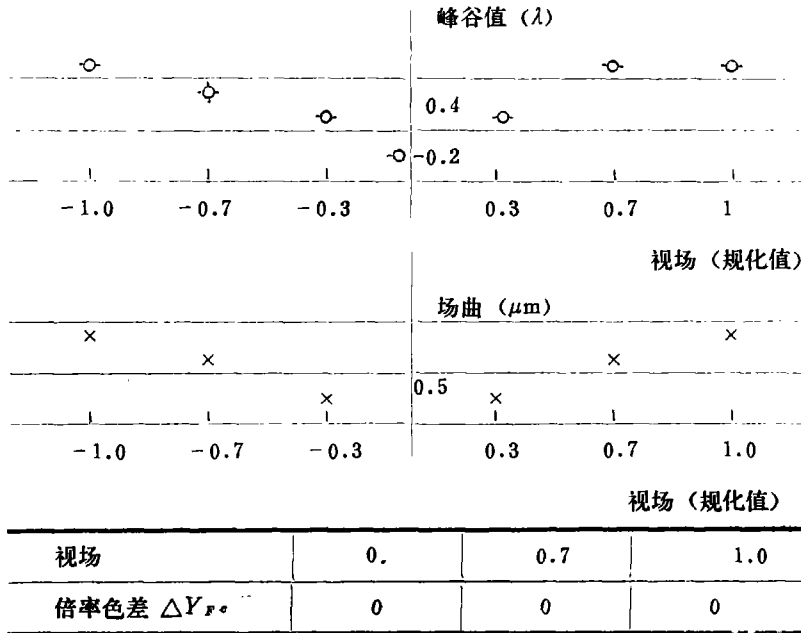


图14 不同视场处的干涉图

照片表示视场规范化值左起 (上): 0, 0.3, -0.3, 0.7 左起 (下): -0.7, 1.0, -1.0



轴向色差:  $\Delta l'_{F\sigma} = 0.6\mu\text{m}$ ;  $\Delta l'_{\sigma\sigma} = 0$

### (2) Olympus物镜 (100×)

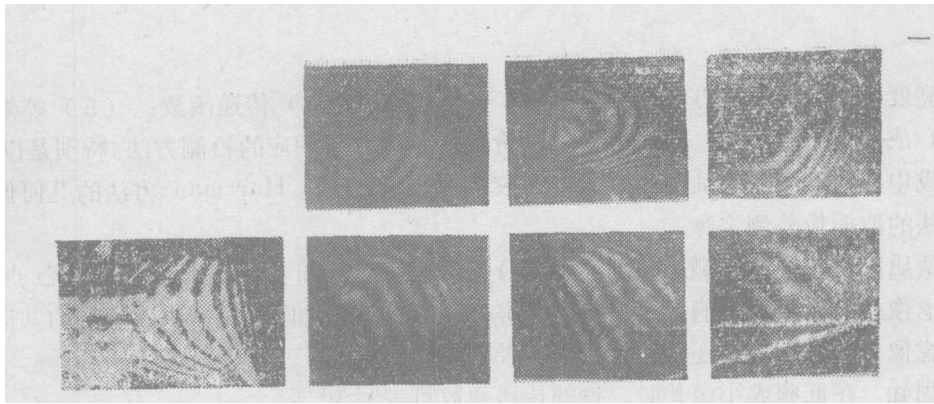
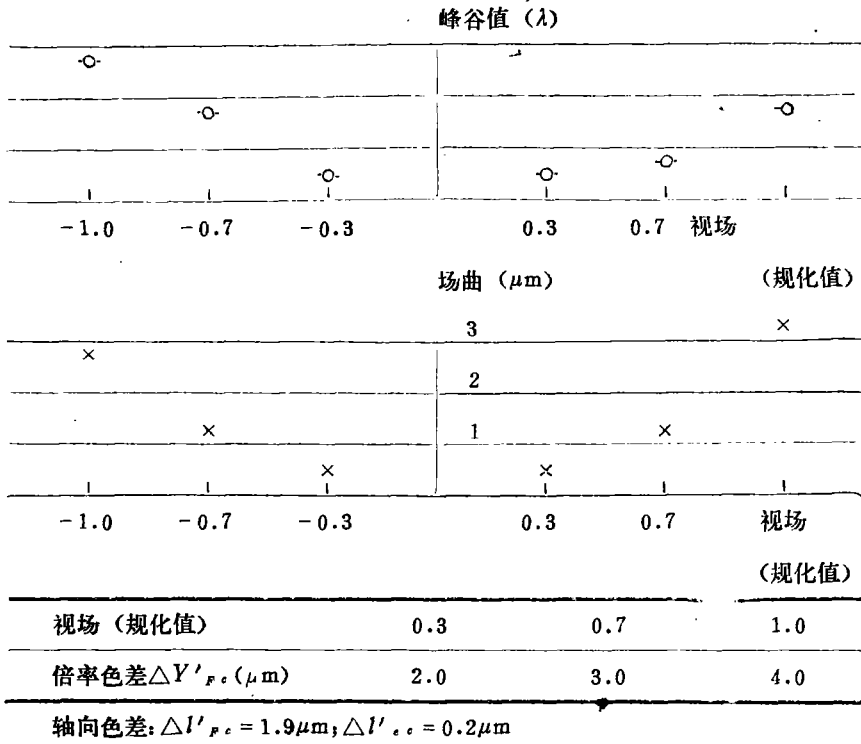


图15 不同视场位置处的干涉图

视场规范化值, 左起上: 0, 0.3, -0.3, 0.7 左起下: -0.7, 1.0, -1.0



(3) Zeiss 物镜 (16 $\times$ , 消色差) 轴内外两种不同波长的干涉图

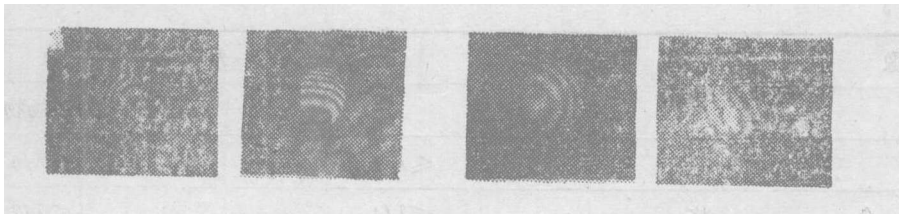


图16 轴上 (6360 Å 的干涉图) 轴外 (5378 Å 的干涉图)

## 六、像质评价

关于显微物镜像质评价标准, 到现在为止, 共约六种: (1) Rayleigh 准则, (2) 中

心点亮度比或广义中心点亮度比<sup>[4]</sup>；(3) 分辨率；(4) 传递函数；(5) 等效带宽<sup>[5]</sup>；(6) 成像逼真度<sup>[6]</sup>等。对应于各种评价标准，建立了相应的检测方法。特别是以 Rayleigh 准则或中心点亮度比为准的测试方法较多，如星点法、Hartman 方法的几何像差测定，干涉法的波面像差测定等。

像质评价标准或检测方法，原则上分为两类：一类如 Rayleigh 准则、中心点亮度比，仅考虑像差对像质的影响；另一类如分辨率、传递函数和以传递函数为基础的其他标准，除了考虑像差的影响外，还考虑了数值孔径对像质的影响。

众所周知：在低频或小像差时，振幅传递函数可表写为<sup>[7]</sup>：

$$MTF \leq 1 - 2 \left( \frac{\pi}{N \cdot A} \cdot g \right)^2 \left\{ \iint_s W^2 \cdot ds - \left( \iint_s W \cdot ds \right)^2 \right\} \quad (7)$$

式中  $W$ 、 $N \cdot A$ 、 $g \cdot s$  分别是被测镜头的波像差、数值孔径、空间频率和剪切光瞳面积。<sup>(7)</sup> 式表明：(1) 表征像质的  $MTF$  包含有影响像质的波差和数值孔径两种参数；(2) 大数值孔径有利于像质的提高；(3) 大数值孔径镜头容许有较大的波差值。我们对比了国内外（就我所现有几个厂家）镜头的像质，结果如下表：

表 2

| 厂 家     | 倍 率  | 波 像 差               | 数 值 孔 径 | 像 质 |
|---------|------|---------------------|---------|-----|
| 上 光 厂   | 40×  | $< \lambda/4$       | 0.80    | 较 差 |
| Olympus | 40×  | $< \lambda/4$       | 0.95    | 较 好 |
| 红 光 厂   | 100× | $< \lambda/4$       | 1.20    | 较 差 |
| Olympus | 100× | $< \lambda/4$       | 1.35    | 较 好 |
| 广 光 厂   | 20×  | $< \lambda/4$       | 0.4     | 较 差 |
| Zeiss   | 20×  | $\approx \lambda/2$ | 0.60    | 较 好 |

因此，后一类评价标准比之前一类标准能正确反映像质优劣。前一类标准只有在数值孔径相同条件下才可以作为像质评价标准。我们用干涉法检测了国内外多种物镜像差，观察了这些镜头对 600l/mm 光栅的像质。初步得到如下表所示的（在同一数值孔径条件下）像质评价标准：

表 3

| 像 质 等 级 | 像 差 值            |                  |
|---------|------------------|------------------|
|         | 轴 上              | 轴外（对平场物镜而言）      |
| 优       | $\leq \lambda/8$ | $\leq \lambda/4$ |
| 合 格     | $\leq \lambda/4$ | $\leq \lambda/2$ |
| 较 差     | $\leq \lambda/2$ | $\leq 1\lambda$  |
| 不 合 格   | $\leq 1\lambda$  | $\leq 2\lambda$  |

因此，星点法、干涉法是很有价值的。这些方法一直长期广泛用来检测显微物镜像质，其原因就在此。

为了比较全面正确反映镜头的像质, 测量传递函数是必要的, 国内外作了不少尝试, 多采用扫描法<sup>[8][9]</sup>。这种方法由于受狭缝宽度和光强的限制, 只能勉强测得 2500l/mm 以下的传函值。为了测得较高频率的传函数值, 我们建议采用干涉法。对同一物面处, 测得 C、D、F 诸波长的光瞳函数, 并用自相关法分别求得 C、D、f 诸谱线的传函值  $OTF_c$ 、 $OTF_D$ 、 $OTF_f$ 。根据各谱线的权重因子  $F_c$ 、 $F_D$ 、 $F_f$ , 按照下式, 求得白光传函值<sup>[10]</sup>:

$$OTF = \frac{0.225131 \cdot F_f \cdot OTF_f + 0.698257 \cdot F_D \cdot OTF_D + 0.076612 \cdot F_c \cdot OTF_c}{0.225131 \cdot F_f + 0.698257 \cdot F_D + 0.076612 \cdot F_c} \quad (8)$$

用  $OTF$  评价显微物镜像质优劣的准则, 李剑白<sup>[11]</sup>, 章蕾等人<sup>[5]</sup>提出了一些建议。我认为: 前者只是简单情况下理论上的一般推测, 后者只是根据有限个星点像的“好”、“坏”与有效带宽的对应关系所得的结果。且后者对不同的复杂的星点像没有指出孰者优劣, 特别是定量上。我认为: 只有根据大量的各种不同已知传函值的物镜的实际使用效果, 才能比较可靠地建立传函的像质优劣判断准则。

传递函数评价像质, 还有待发展。比如: (1) 杂光的影响。(2) 彩色还原性等等。

### 参 考 文 献

- [1] 向才新, 光学机械, 1981 5, 23.
- [2] 向才新等, 光学学报, 1987(7.9)812.
- [3] H.H.Hopkings, «Wave Theory of Aberrations», Oxford, 1950, p.14.
- [4] 杨健, 王之江, 科学通报, 1987, (3)223.
- [5] 章蕾, 沙定国, 宋菲君, 仪器仪表学报, 1987(8.No.2)216.
- [6] B.Henke, Feingratechnik, 1976, No.4, 159—161.
- [7] H.H.Hopkings, Proc.Phys.Soc., 1952, 65B, 934—942.
- [8] A.A.Арсеньев, н Др; ОМП, 1981(No.1)18—21.
- [9] 宋菲君, 曹根瑞, 光学技术, 1986, No.4, p.42.
- [10] 庄松林, 钱振邦, «光学传递函数», 机械工业出版社, 1981, p.276.
- [11] 李剑白, 光学机械, 1983 4, 53.

## Aberration Test and Image Evaluation of Microscope Objective

Xiang Caixin Liu Jun

### Abstract

This article describes the test method of various aberrations using multifunction interferometer for microscope objective. We have measured various kinds of objectives made at home and abroad. The wave aberration on-axis is  $< \lambda/4$ , but the wave aberrations at the full view field are  $\infty \lambda/2$  and  $3\lambda$  for plane and non-plane apochromatic objective respectively. Wave aberration is a good quality criterion available for optical design. White light OTF is a good image quality criterion for image evaluation.