

# 星点像二维光强分布的定量测定

张 晓 辉

**摘要:** 本文介绍了测试显微镜星点像二维光强分布的实验方法、内容有实验原理、用微机进行二维快速离散傅立叶变换。数据拟合及软件系统的设计; 并讨论了如何选择测量的方位数及二维离散傅立叶变换的抽样间隔。

## 一、前 言

光学系统在设计过程中和设计完成之后, 需要对该光学系统进行像质评价。评价的依据是物空间的一个点物所发出的光经过光学系统后在像空间的光强分布情况。信息理论告诉我们: 点物在像空间的光强分布就是成像系统的点扩散函数, 而光学传递函数则是点扩散函数在频谱空间中相应的一种表示方法。虽然二者考虑问题的角度不同, 但是两者所包含的信息却是等价的, 它们都反映出成像系统的像质特征。

光学传递函数全面、客观、准确地反映了像质的优劣。因此, 国内外许多人研制出了各种光学传递函数测定仪。然而, 到目前为止, 各种光学传递函数测定仪仅限于对线扩散函数和一维光学传递函数的测试, 这并不能反映出光学系统二维像质的全部信息。各生产厂家和检验部门经常用的目视星点检验法, 虽然反映了光学系统的二维成像情况, 与二维的光学传递函数具有同等的效果, 但它不能定量, 而且与检验人员的主观因素有关。

本研究的结果还可用于激光聚焦后其光斑的二维光强分布的定量测定等。

## 二、实验的基本原理和方法

本实验利用“显微镜传递函数测定仪”, 对显微镜进行线扩散函数和一维光学传递函数测试, 并根据“从投影重构像”的理论, 即点扩散函数 $f(x, y)$ 在 $\varphi$ 方位方向的一维投影值 $f_{\varphi}(x')$  ( $\varphi$ 方向的线扩散函数) 的二维傅立叶变换频谱 $F(u, v)$  (二维的光学传递函数) 在 $\varphi$ 方位方向的分量值。利用光学传递函数测定仪对多个 $\varphi$ 方位方向 ( $\varphi$ 的范围为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ) 进行一维光学传递函数测试, 便可以得到二维光学传递函数在各个方位方向上的分量, 然后再对得到的二维频谱进行二维的傅立叶逆变换, 便可以得出点扩散函数的二维分布情况。

在计算机上进行二维的傅立叶变换或逆变换时, 都是采用离散傅立叶变换法, 这种方法要求被变换的数据在直角坐标系的 $x, y$  (或 $u, v$ ) 二个直角方向上被等间距抽样的, 而由测试仪所输出的却是径向 (极坐标系中半径方向) 上等间距的离散的线扩散函数和一维光学传递函数值。为此, 我们利用数学上的多项式拟合方法和最小二乘法, 根据已获得的光学传递

函数值求得参与离散傅立叶变换的直角坐标系等间距网格点上的数据。然后对这些数据进行二维的离散傅立叶逆变换，就可以获得点扩散函数的二维分布情况。

### 三、软件系统的设计

在AST-286型、时钟为10MHz的微机上，用编译Basic语言编制了计算程序。由于微机内存空间可用字节较少，故将整个程序分为四个部分，并将各部分都编制成子程模块形式。编制一个主程序，其功能是显示各部分的功能菜单，并能调用各个子程模块，子程模块的四个部分为：

获得离散数据（各个方位方向的OTF值）部分：这部分中取出测定仪输出的一维光学传递函数，并计算出各离散值所对应的谱面上的极坐标 $(\rho, \theta)$ 。

离散数据拟合部分：根据获得的离散数据，利用多项式拟合和最小二乘法原理，对OTF进行拟合，求出相应的拟合系数。

取等间距网格点上的数据部分：根据确定好的网格间距，利用拟合系数，求出参与二维傅立叶逆变换的OTF值。

二维快速傅立叶逆变换及绘制点扩散函数的三维立体图形部分：我们编写了长度为 $256 \times 256$ 的二维离散傅立叶逆变换程序。在容量较少的微机上进行长度较长的二维离散傅立叶逆变换程序时，我们将微机的外存贮器作为一个大容量的存数空间，采用联合使用微机内存空间和外存贮器的办法，实现了在微机上进行长度为 $256 \times 256$ 的二维离散傅立叶变换。这部分中，我们还编制了绘制三维立体图形的程序，这部分总的计算时间大约为60分钟。

### 四、分析讨论和结果

利用离散傅立叶逆变换代替连续傅立叶逆变换时，连续函数的抽样间隔必须满足抽样定理，即频谱面频率间隔 $\Delta f$ 满足：

$$\Delta f \leq \frac{1}{2x_c} \quad (1)$$

其中： $x_c$ 为点扩散函数的截止坐标

理论上点扩散函数的截止坐标 $x_c$ 是无限的。根据圆形理想光学系统的夫朗和费衍射理论，可知，衍射光强的84%光能量集中在爱里斑内，其余的16%的能量依次分布在其余各级亮环中，并且能量依次减弱。当到第五级暗环以外，光能量将微乎其微，可将第五级暗环的位置作为点扩散函数的截止坐标。根据镜头参数和光强衍射公式，推算出 $x_c = 52.4 \mu\text{m}$ ，根据(1)式可求出OTF的抽样间隔 $\Delta f \leq 9.54 \text{c/mm}$ 。

另外，在测试线扩散函数和一维的OTF时，只能测试有限个不连续的方位方向上的OTF值，这会使再生像质有所下降。我们利用抽样定理适当地选择测试方位数，可使再生像在 $x_c$ 的范围内与连续的全方向测试的再生像一致。理论上推算有：

$$M \geq 2\lambda p_c x_c \quad (2)$$

其中， $M$ 表示 $0^\circ \sim 180^\circ$ 方位方向上等间隔测试的方位方向数， $p_c$ 表示传递函数的截止

频率， $p_c = \frac{2 \cdot N.A}{\lambda}$ ， $N.A$ 为数值孔径。当 $N.A = 0.025$ ， $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ ，有 $p_c = 100 \text{c/mm}$ 。

当  $x_s = 52.4\mu\text{m}$ ,  $p_s = 100\text{c/mm}$ ,  $M \geq 33$ , 我们在实际测试时, 选取  $M = 36$ , 即以  $5^\circ$  为角度间隔进行测试。在以  $p_s$  为半径的圆域内, 离散点之间的最大间隔就是圆周上的弧长间隔。即为  $p_s \cdot \frac{\pi}{36} = 8.73\text{c/mm}$ , 为了不丢失信息, 我们选取  $\Delta f = 9\text{c/mm}$ , 以这个值为抽样间隔对 OTF 抽样, 可以计算出点扩散函数的截止坐标为  $x_s = 55.6\mu\text{m}$ , 点扩散函数的离散点的间距  $\Delta$  为:

$$\Delta = \frac{1}{N \cdot \Delta f} \tag{3}$$

$N$ : IDFT 的长度。

$\Delta f$  确定后,  $N$  取的越大,  $\Delta$  就越小, 越能反映出点扩散函数的真实情况。在微机的容量和计算时间允许的情况下, 选取  $N = 256$ , 则根据 (3) 式得  $\Delta = 0.434\mu\text{m}$ , 点扩散函数的离散间距完全满足测试空间频率为  $p_s = 100\text{c/mm}$  的 ( $10\times$ ,  $N.A = 0.25$  显微物镜的像面) 点扩散函数的抽样间隔, 即:  $\Delta < 5\mu\text{m}$ 。

在谱面上进行抽样时, 频谱范围为 ( $-100\text{c/mm}$ ,  $100\text{c/mm}$ ), 当以  $9\text{c/mm}$  进行抽样时, 频谱范围内是通过测得数据进行拟合而得到的, 抽样点不足 256 个, 我们将频谱范围以外的抽样点补零, 使抽样点数达 256。

我们对 10 倍, 数值孔径  $N.A = 0.25$  的显微物镜进行了轴上点的测试, 得到了显微物镜星点像的二维光强分布。 $10\times$ ,  $N.A = 0.25$  的显微物镜成像是比较理想的, 它的像面上理想衍射盘大小为  $24.4\mu\text{m}$  通过本实验, 实现了像面上光斑大小约为  $25\mu\text{m}$  的光强分布的定量测定。

#### 测试结果的误差来源

1. 使用仪器测试时, 由目视系统对星点调焦, 因受主观因素的影响, 导致对焦的不准确, 产生离焦现象, 给测试结果带来误差。

2. 当测试多个方位方向的线扩散函数和一维光学传递函数时, 需将狭缝转过一定的角度, 由于狭缝机构在转动时, 出现显微镜上下漂移现象, 使得已调好焦的星点像又出现离焦, 这会给每次测试带来较大的偏差, 给实验结果带来误差的一个主要原因。

3. 根据抽样定理, 如果对利用上述的测试条件所测得的数据直接进行傅立叶逆变换, 得到的结果将与连续角间隔测试  $\Delta\theta \rightarrow 0$  时, 所获得的结果完全一致。然而, 在利用微机进行离散傅立叶变换时, 所需要的等间距网格点上的数据是通过数据拟合的办法来得到的, 拟合本身是会给测试结果带来误差的。我们利用理想衍射受限系统的光学传递函数模拟测试的一维 OTF 进行数据拟合, 计算得拟合的最大误差为 2%。

## 五、结 束 语

本文提出了定量测试显微物镜星点像的二维光强分布的一种方法。对于不能采用逐点法进行测试的能量较弱的小星点像, 利用“从投影重构像”原理, 实现了对小星点像的定量测定。本实验方法不仅可以对显微物镜的星点像进行二维光强分布的定量测试, 还可用于对其他小光斑的二维光能量分布的定量测定。

参 考 文 献

- [1] 韩昌元,《信息光学基础理论及其应用》,长春出版社,1989  
[2] 馬場直志,投影からの像再生法とフィルタリングに関する研究,日本北海道大学,1980

The Quantitative Measurement of the Two Dimensional  
Intensity Distribution of Star Image

Zhang Xiaohui

Abstract

In this paper, a method is given to measure the two dimensional light intensity distribution of star image of the microscope objective. It includes the experiment principle, the computation of two dimensional FFT with conventional computer, data fitting and software design. It discusses how to select value of measuring azimuth as well as sampling interval of two dimensional FFT.