

照相物镜传递函数和主观评价因子的测定

唐 小 平

摘要: 我们利用 CCD 扫描位于被测照相物镜前面的平行光管焦平面上的狭缝像, 采样数据通过 A/D 变换后输入计算机, 把这些数据进行快速傅立叶变换即可求出被测照相物镜的 OTF 值, 同样我们用 CCD 采样对数光栅目标物通过被测照相物镜后处于平行光管焦面上的像, 由于被测照相物镜的 SQF 可以表示为极坐标形式下系统 OTF 关于对数空间频率的积分, 它由采样得到的目标光栅像各个峰值归一后与各自相邻对数频率间隔的乘积累加得出。

我们测定照相物镜的传递函数是采用数字傅立叶变换法。采取逆光路安置。在被测照相物镜的焦面上, 安放宽度为 $10\mu\text{m}$ 的狭缝作为目标物。用 50W 卤钨灯照明该狭缝, 被测照相物镜前方安置焦距为 1600mm, 相对孔径为 1/10 的平行光管。目标狭缝经这一光学系统成像于平行光管的焦平面上。在这一焦面处安放 2048 单元, 光敏元间距为 $10\mu\text{m}$ 的 CCD 对狭缝像进行采样接收。CCD 接收到的信号在微机控制的外部时钟驱动下, 自扫描式地传出。经过采样保持, A/D 变换变成数字信号以 DMA 方式快速存贮于计算机内存中。前后由程序调出进行快速傅立叶变换 (FFT) 求出系统的 OTF。我们选取 512 个采样点进行快速傅立叶变换。采用编译 BASIC 的形式进行运算以提高速度, 全部计算结果和屏幕绘图可在一分钟之内完成。测定的 MTF 和 PTF 有下述关系式:

$$\begin{aligned}
 MTF &= MTF_{\text{狭缝}} \cdot MTF_{\text{CCD}} \cdot MTF_{\text{物镜}} \\
 &= \frac{1}{\sum_{k=0}^{n-1} x_k} \left\{ \left[\sum_{k=0}^{n-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi f \Delta l k}{m}\right) \right]^2 + \left[\sum_{k=0}^{n-1} x_k \sin\left(\frac{2\pi f \Delta l k}{m}\right) \right]^2 \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PTF &= PTF_{\text{物镜}} + PTF_0 \\
 &= \text{tg}^{-1} \left[\frac{\sum_{k=0}^{n-1} x_k \sin\left(\frac{2\pi f \Delta l k}{m}\right)}{\sum_{k=0}^{n-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi f \Delta l k}{m}\right)} \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中: x_k 、 Δl 、 n 、 m 分别表示狭缝像的采样值、采样间隔、采样点数及狭缝像被放大的倍数; $MTF_{\text{狭缝}}$ 、 MTF_{CCD} 、 $MTF_{\text{物镜}}$ 分别表示狭缝的传递函数, CCD 的传递函数和被测照相物镜的传递函数; $PTF_{\text{物镜}}$ 、 PTF_0 分别表示被测照相物镜的相位传递函数, 由于变换中心并非处于零点所引进的相位线性项, 它们分别为:

$$MTF_{i,i} = \sin c(2\pi fd) \quad (3)$$

$$MTF_{o,o} = \sin c\left(\frac{f}{f_m} \cdot \frac{\pi \Delta}{p}\right) \cdot \exp\{-ne[1 - \cos(\frac{\pi f}{f_m})]\} \quad (4)$$

$$PTF_0 = 2\pi f x_0 \quad (5)$$

其中: $2d$ 是狭缝目标物的宽度。

Δ 是 CCD 光敏元尺寸

p 是 CCD 每一单元尺寸

f 是空间频率。

$$f_m = \frac{1}{p}$$

ε 是每次传输的电荷损失率。

n 是传输的次数。

由(1)~(5)式可知, 被测物镜的传递函数 $MTF_{i,i}$ 由下式求得:

$$MTF_{i,i} = \frac{MTF}{MTF_{i,i} \cdot MTF_{o,o}} \quad (6)$$

但为了求得 $PTF_{i,i}$, 必须设法使 $PTF_0 = 0$, 即要求 $x_0 = 0$, 理论和实验证明^[1], 把狭缝扩散函数的矩心 x_0 作为变换中心时, 即 $x_0 = x_c = 0$, 可以消除 PTF_0 的影响, 而系统的 MTF 不变, 这时:

$$PTF_{i,i} = PTF$$

$$= \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\sum_{k=0}^{n-1} x_x \sin\left(\frac{2\pi f \Delta l k}{m}\right)}{\sum_{k=0}^{n-1} x_x \cos\left(\frac{2\pi f \Delta l k}{m}\right)} \right] \quad (7)$$

为了消除各种误差的影响, 提高测量精度, 除对光路进行细心的调整外, 我们还制作了实测均匀性达千分之几的均匀光源。利用该光源我们对 CCD 的灵敏度均匀性和暗电流进行了实时校正, 使之提高到 1.8%, 较之校正前实测 6.8% 提高很多。这样实验结果表明, 在相同的条件下, 对同一照相物镜分别在长春光机所大型传递函数仪上和本实验设备中进行测量, 其轴上最大差别不超过 4%, 测量的重复性也较好, 最大不超过 2%, 同目前国际测量精度 (轴上 1~2%) 比较相差不大, 而且这一差别可通过对整个光学系统机械部分及测试环境的完善而缩小。另外, 由于此方法速度快, 适用于照相物镜的线测量。在国内尚属少见, 有一定的实用价值。

照相物镜的主观评价因子 SQF 值可以用以下两式表示^[2]:

一维情况:

$$SQF = k \int_{10}^{100} |T(f)| d(\log f) \quad (8)$$

式中: $T(f)$ 是光学传递函数

f 空间频率。

$1/k$ 归化因子。

这里 f 的范围取 $10\sim 40\text{cycle/mm}$ 是由于人视觉系统的MTF在视网膜上 $10\sim 20\text{cycle/mm}$ 范围内具有峰值,因此具有带通特性,用 $10\sim 40\text{cycle/mm}$ 的矩形结构来模拟,利用对数频率作为积分变量,是对人眼感觉大小与刺激强度的对数成正比这一事实的模拟。

二维情况:

这时可以看成是一维情况在所有方位累加的结果,可以表述为:

$$SQF = k \int_{10}^{40} \int_0^{2\pi} |T(f, \theta)| d(\log f) d\theta \quad (9)$$

式中: θ 是方位角

f 是所处方位的空间频率。

$T(f, \theta)$ 是 θ 方位的传递函数。

为了使SQF因子能比较容易、客观、快速地测量,制作一对数光栅作为目标物,它的第 n 条明、暗缝的宽度可以表示为:

$$\log(\omega_n) = \log \omega_0 - n c \quad (10)$$

式中: ω_n 是第 n 条明、暗缝宽。

ω_0 、 c 是比例常数。

以(10)式为依据,给出的明暗缝宽画好光栅图后用缩微机进行拍摄,经显影、定影、凉干后得到目标物,对这一目标物的空间频谱计算表明:在SQF的带通范围内,目标物的空间频谱具有希望的对数空间频率权重。我们用50W卤钨灯照明对数目标物,把这目标物用质量优良的显微镜进行缩小,得到一个缩小的目标像,这目标像处于被测物镜的焦面上,经过被测物镜、平行光管后成像于后者的焦面上,CCD接收该像,得到的信号经采样保持,A/D变换后变成数字量存于计算机内存,由程序调出处理,可得到每一亮条纹的峰值,经过归一后由下式求出SQF值:

$$SQF = \sum_{i=0}^{15} x_i \Delta f_i \quad (11)$$

式中: x_i 归一化后的峰值。

Δf_i 相邻峰值间的对数空间频率间隔。

利用这一方法,我们分别对4个镜头的SQF值进行多次测量,它们分别为0.83、0.82、0.80、0.79(条件:0视场,1/2孔径),把这一结果与这4个镜头在同样条件下测量的MTF值以及用它们对同一物体在相同放大倍率下进行拍摄、冲洗所得的相片进行分析比较,得到的质量顺序是一致的,从而证明这一方法能较为真实地反映被测物镜的像质,该方法简单、客观,在国内尚属首次测量,有一定的实用和参考价值。

参 考 文 献

- [1] Ronald E. Jodoin; Appl. Opt., 25 No. 8, 1986, 1261~1264
 [2] Granger. E. M. and Cupery. K. N.; Photo. Sci. & Eng., 16, No. 3, 1972, 221~230

The Measurement of the OTF and SQF of the Photographic Lenses

Tang Xiaoping

Abstract

We measured the OTF of a photographic lens by digital Fourier Transform, using a CCD to scan the slit image in the focal plane of the collimator in front of the measured lens. The Fourier Transform of the sampled data of the image, after input into the computer through a A/D converter, gave the OTF value.

We measured the SQF of the lens using CCD to sample the logarithmic grating image formed by the measured lens and obtained the SQF from the integration of the system OTF expressed in polar coordinate and logarithmic frequency coordinate.