

# 视频光学传递函数测试中的系统参数设置

马卫红<sup>1,2</sup> 马 臻<sup>1</sup> 贺 丽<sup>1</sup> 李英才<sup>1</sup>

(1 中科院西安光精密机械研究所空间室, 西安 710068)

(2 西安工业学院, 西安 710065)

**摘 要** 通过对针孔像的处理和分析, 获得了被测系统的光学传递函数, 分析了采样频率对测试精度的影响, 提出了用栅条板标定频率换算尺度和针孔像采样频率的方法. 对 50 mm 焦距平凸标准物镜的测试结果表明, 系统参数的标定和输入直接影响测试精度, 采用本文提出的标定方法准确可靠, 可以在测试组件参数未知的情况下, 获得影响空间频率换算的参数, 进而准确获得被测系统的光学传递函数.

**关键词** 光学传递函数; 空间频率; 图像分析; 测试精度

**中图分类号** O348.1 **文献标识码** A

## 0 引言

目前, 光学传递函数已在像质评价方面占有主导地位, 并已广泛地应用于光学设计过程及光学系统的检验, 因为它能克服过去一些评价标准的明显不足, 从而使光学系统的设计和检验建立在更加可靠的基础上<sup>[1,2]</sup>. 基于图像分析的光学传递函数测试技术, 由计算机完成对特征目标物成像的预处理及分析, 获得被测系统的光学传递函数<sup>[3]</sup>, 测试采用正光路, 不需要扫描机构, 结构简单, 测试结果可实时显示, 整个测试过程不存在原理性误差, 因而近年来发展很快. 以针孔作为特征目标物, 可以同时获得子午和弧矢两个方向的光学传递函数<sup>[4,5]</sup>, 值得注意得是, 针孔必须足够的小, 对于被测透镜, 在物平面即有足够丰富的频谱, 又要在像平面有足够的能量分布. 光学传递函数是基于针孔物、像平面频谱的比值得到的, 在计算过程中应该进行正确的频率转换. 因此测试的重点集中在以下两方面: 一、针孔在物平面的频谱必须正确获得, 对于一定直径的针孔来说, 换算到像平面的针孔直径是获得正确物频谱的关键. 二、通过对针孔像正确的采样, 处理和分析, 获得针孔像的频谱. 因而采样间隔的正确标定直接影响测试结果. 由于测试过程中数据的处理和修正都由计算机完成, 物频谱的计算和采样频率的换算及对应都是按输入的测试系统设置自动完成的, 因此要求准确标定和输入<sup>[4]</sup>. 本文从理论上分析了系统设置对测试结果的作用及误差来源, 给出了物、像平面空间尺度变化的标定方法, 通过对 50 mm 平凸标准物镜的测试实验, 研究了系统标定误差对测试精度的影响, 以及正确的数据处理方法.

## 1 系统参数对测试精度的影响

图 1 表示了基于针孔像分析的光学传递函数测

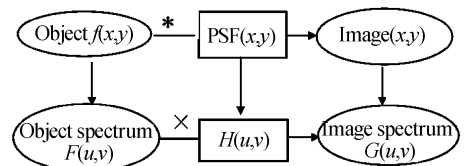


图 1 测试原理图

Fig. 1 Test principle diagram

试的基本原理. 具有特征频谱  $F(u, v)$  的针孔由被测透镜成像, 输出图像的谱为  $G(u, v)$ , 根据线性不变系统理论, 很容易得到被测透镜的传递函数  $H(u, v)$

$$H(u, v) = G(u, v) / F(u, v) \quad (1)$$

目标物的频谱可事先由其光能分布  $f(x, y)$  经过傅里叶变换得到, 像分析器接收目标像的光能量分布, 由计算机进行预处理, 再经由傅里叶变换获得其频谱  $G(u, v)$ , 这样, 由式(1)即可得到被测透镜的光学传递函数. 由于得到的目标像经过了被测系统和测试系统的共同作用, 在空间分布上有了尺度变化. 根据傅里叶变换性质, 空域的伸展相当于频域的压缩. 因此上, 在计算被测透镜传递函数时, 应注意频率的转换, 否则就会带来测试误差<sup>[5]</sup>.

具体测量装置如图 2, 非相干光源照射目标物, 目标物放置在平行光管焦平面上, 经由准直物镜构成来自无穷远的目标, 经过被测透镜成像, 中继物镜放大, 由 CCD 接受能量分布, 计算机完成数据的分

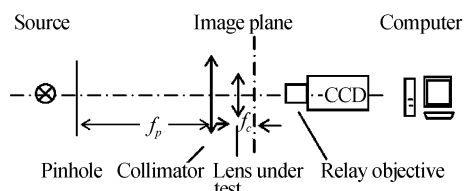


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Test system schematic

析、处理和结果的显示. 实验中, 测试光源波长 546.1 nm, 被测透镜为 50 mm 平凸标准透镜, 实际焦距 50.732 mm, 测试相对孔径 F8, 针孔直径 80  $\mu\text{m}$ , CCD 像元尺寸 8.7  $\mu\text{m}$  \* 8.7  $\mu\text{m}$ , 平行光管焦距 1196.59 mm.

以针孔为目标物, 可以一次完成子午和弧矢两个方向的 OTF 测试<sup>[3,4]</sup>, 而且具有丰富的频谱, 为了计算方便, 直接将频率对应到像平面, 针孔的频谱为

$$F(u, v) = D_x \frac{J_1(2\pi D_x \sqrt{u^2 + v^2})}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (2)$$

$$D_x = D_w \frac{f_c}{f_p} \quad (3)$$

式中,  $D_w$ 、 $D_x$  分别为针孔的直径及按几何光学折算到像平面的直径,  $f_p$  为平行光管焦距,  $f_c$  为被测透镜焦距. 从式(3)可以看出, 平行光管焦距和被测透镜焦距及针孔直径直接影响物频谱的计算结果.

图3是根据式(2)绘制的不同孔径的针孔归一化频谱, 从图中可以看出, 当换算到像面的针孔直径大于 12  $\mu\text{m}$  时, 在 100 lp/mm 附近就截止了, 因此, 在选择针孔时, 根据测试透镜焦距和平行光管物镜焦距的比值, 换算到像面直径的针孔截止频率应至少高于测试要求的最大频率. 由式(1), MTF 测试值是像频谱与物频谱的比值, 因此, 低的物频谱将会放大由针孔像能量分布计算像频谱的测试误差, 因而在能量满足的情况下, 针孔直径应尽可能小. 按照实验的测试条件,  $D_x = 80 * 50.732 / 1196.59 = 3.392 \mu\text{m}$ , 从图3可以看出, 在测试频率范围小于 100 lp/mm 时, 有足够的频谱, 在 OTF 计算中不会引入太大误差.

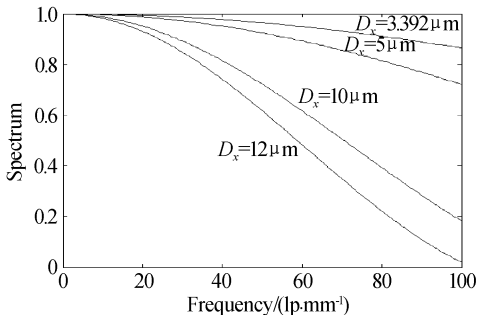


图3 不同直径针孔的归一化频谱  
Fig.3 Normalized frequency spectrum of pinhole with varies diameters

由于针孔像一般非常小, 对于 CCD 成像器件而言, 需要中继物镜放大, 才能获得良好的采样. 这样, 采集到的像在空间上被放大了, 需要确定正确的采样间隔

$$\Delta = F_m a$$

式中,  $F$  是中继物镜的放大倍数,  $a$  是 CCD 的像素间隔. 由傅里叶变换性质, 空间的伸展相当于频域的

压缩, 因而采样间隔的正确标定也是影响测试精度的重要因素. 也就是说, 在基于特征目标像分析的光学传递函数测试中, 除了要求测试中的各组件自身尽可能具有较高的传递函数外, 测试结果与平行光管焦距, 小孔直径, 被测系统焦距、中继物镜倍率和 CCD 采样间隔有关, 而这些参数都是事先设置, 由计算机自动完成相应修正和计算的, 因此, 正确的标定和输入这些参数十分重要.

## 2 系统参数标定和测试实验

从实验系统和上节的分析来看, 测试系统整体放大倍率  $F$  由两部分组成, 一部分是由被测透镜成像形成, 一部分是中继物镜放大的结果.

$$F = \frac{f_c}{f_p} F_m$$

因而平行光管焦距, 被测透镜焦距和中继物镜放大倍数是影响测试系统放大倍率的因素主要. 这些参数都可以事先进行严格标定并在测试中准确输入, 每次更换设置或测试时都必须首先获得这些参数. 然而分别对这些参数进行标定是很费时间的, 有些还需要专门的设备. 本文针对测试系统特点, 提出了采用栅条板标定的方法, 在测试系统调试完成后, 只需要取出针孔, 换上如图4的已知间隔的栅条板, 由 CCD 采集到的栅条图像, 计算出像的栅条间隔  $b_1$  即可换算出系统的放大倍数  $F = b_1/b$ , 同时通过调节像分析器的左右移动微分尺, 可以读出像平面栅条板的实际间隔  $b_2$ , 由此可以得到中继物镜的放大倍数  $F_m = b_1/b_2$  及目标物、像放大倍率  $f_c/f_p = b_2/b$ . 因为这种标定与测试方法对应, 考虑了 CCD 采样间隔的影响, 具有很好的标定精度. 相对于事先分别标定来说, 可大大减少时间, 并与传递函数测试直接对应, 更有效.

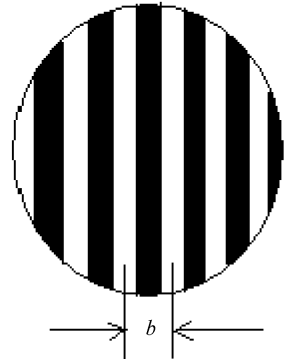


图4 测试系统参数标定用栅条板  
Fig.4 Bar pattern designed for test system parameter calibration

实验中, 栅条板中栅条间隔  $b = 2.250 \text{ mm}$ , 由采集到的栅条图像分析得到  $b_1 = 1.3485 \text{ mm}$ , 得到测试系统总放大倍率  $b_1/b = 0.5993$ . 进而左右旋转像

分析器微分尺,使采集像面范围横向移动  $50\ \mu\text{m}$ ,对应图像移动  $722.1\ \mu\text{m}$ ,由此可以推算出中继物镜放大倍率为 14.442,与标称的 10 倍相差 1.444 倍. 进一步可以得到:  $f_c/f_p = 0.0415$ . 这与严格标定的  $f_c/f_p = 50.732/1196.59 = 0.0424$  相差 0.009,对于 80

$\mu\text{m}$  的针孔,由几何光学推算的针孔在像面上的直径分别为  $3.320\ \mu\text{m}$  和  $3.392\ \mu\text{m}$ ,相差  $0.072\ \mu\text{m}$ . 对于目标物频谱计算精度的影响,如表 1,在 0.6% 以下,证明采用这种标定方法是正确可靠的.

表 1 不同孔径针孔的频谱

空间频率	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$F(D_x = 3.320)$	1.0000	0.9983	0.9938	0.9864	0.9763	0.9635	0.9481	0.9301	0.9097	0.8870	0.8620
$F(D_x = 3.392)$	1.0000	0.9984	0.9940	0.9870	0.9773	0.9650	0.9502	0.9330	0.9134	0.8915	0.8676

表 2 是输入不同中继物镜倍率的测试结果,从表中可以看出,中继物镜输入误差直接影响 MTF 测试精度,当输入的中继物镜放大倍率有 7% 的误差时,100 lp/mm 的 MTF 测试误差接近 5%. 因此,为了提高测试精度必须严格标定中继物镜放大倍率,实验结果表明,标定误差应不大于 2%,才能将 MTF 测试误差控制在 1% 范围内,而对于其它一些被测

透镜,MTF 值在测试频率范围内有明显拐点,可能引起的误差就更大,就需要更高的标定精度. 因此在光学传递函数测试仪的设计中,除了根据透镜测试要求,配置测试组件外,还应准确标定这些测试组件的参数,使得 MTF 测试值对应正确的空间频率.

表 2 依据不同中继物镜放大倍率输入的 MTF 测试结果

空间频率 lp/mm	MTF 测试值 输入 $F_m = 15.44$		MTF 测试值 输入 $F_m = 14.44$		MTF 测试值 输入 $F_m = 13.44$		理论值
	S	T	S	T	S	T	
	0	1	1	1	1	1	
10	0.944	0.942	0.941	0.940	0.935	0.934	0.939
20	0.889	0.887	0.877	0.876	0.865	0.863	0.876
30	0.839	0.836	0.814	0.810	0.795	0.791	0.814
40	0.791	0.789	0.754	0.750	0.725	0.721	0.755
50	0.743	0.741	0.697	0.693	0.663	0.657	0.698
60	0.691	0.689	0.641	0.637	0.600	0.596	0.640
70	0.639	0.637	0.586	0.582	0.545	0.541	0.589
80	0.586	0.582	0.533	0.531	0.494	0.491	0.537
90	0.535	0.528	0.481	0.477	0.441	0.440	0.486
100	0.487	0.482	0.433	0.429	0.397	0.394	0.440

### 3 结论

在基于针孔像分析的光学传递函数测试过程中,系统放大倍率直接影响空间频率的对应. 平行光管焦距、被测透镜焦距是影响小孔直径校正的主要因素;中继物镜放大倍数是影响针孔像采样频率的主要因素,在这些组件没有严格标定的情况下,可以采用在平行光管焦平面上放置栅条板,根据采集图像来计算系统设置参数的方法,标定不改变系统设置,不会给测试带来额外负担,是一种简捷、有效的方法. 如果平行光管焦距严格标定,采用这种方法还可以测定被测试系统的焦距. 以 50 mm 焦距标准物镜作为测试透镜,实验结果表明,系统参数的标定方法可靠,可以在被测透镜、平行光管焦距和中继物镜放大倍率没有严格标定的情况下,准确获得被测透镜的光学传递函数.

#### 参考文献

1 庄松林,钱振帮. 光学传递函数. 北京:机械工业出版社,

1981

- Zhuang S L, Qian ZH B. Optical transform function. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981
- 2 江孝国,吴廷烈,王婉丽,等. 台阶测量 MTF 的误差分析. 光子学报, 2000, **29**(Z1): 185 ~ 190  
Jiang X G, Wu T L, Wang W L, et al. Analyze MTF errors in the step target radiography system. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(Z1): 185 ~ 190
- 3 Optikos Corporation. How to measure MTF and other properties of lenses. www.optikos.com, 1999
- 4 Glenn Boreman. Transfer function in optical and electro-optical systems. *SPIE Press*, 2001, TT52
- 5 Reimann David A, Jacobs Holly A, Samei Ehsan. Use of Wiener filtering in the measurement of the two-dimensional modulation transfer function. *Proceedings of SPIE*, 2000, **3977**: 670 ~ 680
- 6 Leger Dominique, Duffaut Joel, Robinet Francoise. MTF measurement using spotlight. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 1994: 2010 ~ 2012

## System parameter setting in video OTF test

Ma Weihong<sup>1,2</sup>, Ma Zhen<sup>1</sup>, He Li<sup>1</sup>, Li Yingcai<sup>1</sup>

1 *Space optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068*

2 *Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710065*

Received date: 2004-04-26

**Abstract** OTF of under test lens was tested with pinhole image processing and analyzing, the influences of sampling frequency on test precision were analyzed, and a calibration method of frequency conversion scale and sampling frequency on image plane was presented. The test results on 50 mm focus standard lens showed that the accurately calibration and import of system setting parameter effect on test precision directly, calibration method in this paper are accurate and reliable, and can acquire parameter of effecting on spatial frequency calibration and OTF of lens under test accurately, without knowing subsystem parameter.

**Keywords** OTF; Spatial frequency; Image analysis; Measurement precision



**Ma Weihong** was born in 1976. She received the B. S. and M. S. degree from Xi'an Institute of Technology in 2000. Now she is a teacher in Optoelectronic Engineering Department, Xi'an Institute of Technology and is studying for her Ph. D. in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her major interests include optical testing and digital image processing.