

# 便携式调制传递函数测试仪的研制

袁 理<sup>1,2</sup> 张晓辉<sup>1</sup> 刘振江<sup>1</sup> 韩 冰<sup>1</sup> 聂真威<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了方便地对可见光镜头进行调制传递函数的测试以及打破国外的垄断,研制了一套体积小重量轻的便携式调制传递函数测试仪。该测试仪以圆孔作为目标物,它发出的光经平行光管准直后,再经过被测镜头,并在被测镜头像面上形成圆孔像,该像经显微物镜放大后被电荷耦合器件(CCD)接收并传入计算机,计算机对图像进行处理和计算,得到调制传递函数值。介绍了图像处理的过程,详细给出了调制传递函数的算法,对测试系统各组件的影响进行了分析与校正,并提出了误差和噪声的抑制方法。将该测试仪的测试结果与光学设计的理论值进行了比较,得到该测试仪的绝对精度为0.018,满足0.03的要求,达到了研制目的。

**关键词** 成像系统; 调制传递函数测试仪; 图像处理; 可见光镜头

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1111001

## Developing of Portable Modulation Transfer Function Tester

Yuan Li<sup>1,2</sup> Zhang Xiaohui<sup>1</sup> Liu Zhenjiang<sup>1</sup> Han Bing<sup>1</sup> Nie Zhenwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to measure modulation transfer function of visible light lenses conveniently and break the monopoly of foreign countries, a small and light and portable modulation transfer function tester is developed. The tester takes pinhole as target. The light from pinhole is collimated by collimator, and then passes through the lens under test, and forms the pinhole's image on the image plane of the lens under test. This image is magnified by microscope and received by charge coupled device(CCD) and given to computer. The computer processes the image and calculates the modulation transfer function. The image processing procedure is introduced. The algorithm of modulation transfer function is provided in detail. The influence of components of the test system is analyzed and corrected. The method of restraining error and noise is proposed. This tester's results are compared with the theoretical values. It indicates that the absolute accuracy is 0.018, which satisfies the demand of 0.03 and achieves the research purpose.

**Key words** imaging systems; modulation transfer function tester; image processing; visible light lenses

**OCIS codes** 080.3630; 110.4100; 110.4850; 220.4840

## 1 引言

调制传递函数(MTF)是定量、客观、全面地评价可见光镜头成像质量的重要指标<sup>[1-6]</sup>,已经得到了广泛应用。目前,国内真正得到实际应用的MTF测试仪主要是美国Optikos公司的产品和德国Trioptics公司的产品,这些产品结构复杂、体积大,所以都是固定在实验室使用,不可移动;而有的可见光镜头由于重量大、体积大,或者其他各种原因,难以搬运到实验室进行MTF测试。因此,研制便携的MTF测试仪成为了迫切需求,这一方面可以解决难以搬运的镜头的MTF测试问题,另一方面对于打破国外垄断,开发具有自主知识产权

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-06-01

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项基金(2014YQ120351)

作者简介: 袁 理(1983—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光学系统检测技术方面的研究。E-mail:yuanli83130@163.com

导师简介: 张晓辉(1967—),女,硕士,研究员,主要从事光学检测、像质评价技术等方面的研究。

E-mail: zhangxiaohui0123@163.com

权的产品具有重大意义。

MTF 的测试方法主要有扫描法、干涉法和图像分析法。早期的 MTF 测试多采用扫描法,这种方法需要高精度的扫描机构,结构复杂,成本高,测试速度慢,现已很少用于可见光镜头的 MTF 测试。干涉法通过测试镜头的波像差,利用波像差作自相关运算来得到 MTF,但是这种方法只能测试单色光的 MTF,不能测试复色光的 MTF。图像分析法通过电荷耦合器件(CCD)采集被测镜头所成的图像,并对图像进行处理和运算来得到 MTF,这种方法无需扫描,测试速度快,对单色光 MTF 和复色光 MTF 都可以进行测试,成为目前 MTF 测试的主流方法,因此不少学者对图像分析法进行了研究。陈珊珊等<sup>[7]</sup>用狭缝作为目标来测试光学镜头的 MTF,这种方法要求狭缝的方向必须严格平行于 CCD 像元的排列方向,否则将产生较大误差,这是较难调整的。孙崇尚等<sup>[8-9]</sup>用刃边作为目标来对镜头进行 MTF 测试,但是由于需要对刃边图像进行微分运算,所以这种方法受到噪声的影响很大,不易得到准确的结果。齐文雯等<sup>[10]</sup>以矩形靶标为目标,通过计算物与像的对比度传递函数来进行 MTF 测试,但是这种方法对每个频率点都需要制作相应的矩形靶标,工作量巨大,成本高。段亚轩等<sup>[11]</sup>提出了一种 MTF 测试过程中的自适应背景校正方法,但该方法成立的一个前提条件就是认为 MTF 曲线在零频处的斜率  $s$  为固定值,这是不正确的,因为  $s$  随着 MTF 曲线的不同而不同,不可能是固定值,所以使用该方法进行背景校正不能得到正确的结果。

综合以上各种方法的不足,本文以圆孔作为目标,采用图像分析法来进行 MTF 测试,该方法有如下优点:1) 无需扫描,结构简单,测试速度快;2) 对单色光 MTF 和复色光 MTF 都可以进行测试;3) 对圆孔目标无特殊调整要求;4) 无需作微分运算,抗噪性好;5) 一次测量即可得到所有频率点的 MTF 值,对靶标的数量要求不多;6) 采用了较好的背景和噪声消除方法;7) 体积、重量小,便携性较好。

## 2 测试要求、测试光路和系统组成

实验要求 MTF 测试的绝对精度优于 0.03。测试光路如图 1 所示,圆孔目标经平行光管和被测镜头所成的像,经显微物镜放大后被 CCD 接收并传入计算机进行处理和计算,得到 MTF 值。平行光管的作用是模拟无限远目标;显微物镜的作用是对像进行放大,提高 CCD 的采样频率。

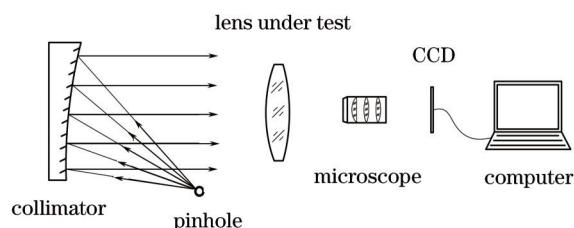


图1 测试光路

Fig.1 Light path of test

测试仪主要包含照明系统、平行光管、显微物镜、CCD 相机、三维平移调整机构和笔记本电脑。照明系统用于对圆孔目标进行照明,包括光源和照明光路。光源采用 Thorlabs 公司的 QTH10 型石英卤钨灯,光谱范围包含整个可见光波段,峰值波长 610 nm,可配合不同的滤光片使用。照明光路使用柯拉照明光路,以保证照明的均匀。平行光管采用 200 mm 口径的离轴反射式平行光管,焦距 2000 mm,并且配备了不同大小的圆孔目标板。显微物镜采用尼康公司的 20 倍和 40 倍的平场复消色差物镜,像质优良,数值孔径分别为 0.75 和 0.95,二者可根据需要选用。CCD 相机为 BASLER 公司的 Scout 相机,其 CCD 像元尺寸与间距均为  $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ ,填充率为 100%,在可见光波段有较高响应,峰值响应波长 545 nm。测试仪各个组件的体积和重量都不大,具有较好的便携性。另外,测试仪最好在隔振平台上使用,以尽量避免振动的影响。

## 3 MTF 测试原理与算法

### 3.1 图像处理

对于环境光和 CCD 暗电流的影响,采用减去背景图像的方法来消除;对于空气扰动、温度变化等原因带来的随机噪声,利用随机噪声的正负相消性,采用多幅图像平均法来消除。具体做法为:采集 10 幅圆孔图

像,作平均,得到图像 image1;遮挡被测镜头的入光口,采集 10 幅背景图像,作平均,得到图像 image2, image1 减去 image2 即得到最终的图像。

### 3.2 参数转换

设圆孔直径为  $d$ , 平行光管焦距为  $f_{col}$ , 被测镜头焦距为  $f_{lens}$ , 显微物镜放大率为  $M$ , CCD 在  $x, y$  方向的像元间距为  $d_x, d_y$ , 像元尺寸为  $a_x, a_y$ 。因为 MTF 是在被测镜头的像面上进行考察的, 所以所有参数都要换算到被测镜头的像面上。从物面到被测镜头像面的放大倍率  $\beta$  等于

$$\beta = \frac{f_{lens}}{f_{col}} \quad (1)$$

将圆孔直径、CCD 像元间距和像元尺寸换算到被测镜头像面上为

$$d' = \beta d, \quad (2)$$

$$d'_x = d_x / M, \quad d'_y = d_y / M, \quad (3)$$

$$a'_x = a_x / M, \quad a'_y = a_y / M. \quad (4)$$

同时, 把 CCD 的图像采集等效为直接在被测镜头的像面上进行, 只需按(3)、(4)式进行参数转换即可。

### 3.3 MTF 的基本理论

由光学传递函数理论<sup>[12]</sup>, 光学传递函数等于像的傅里叶变换与理想像的傅里叶变换的比值的零频归一化。理想像, 是指理想的没有任何像差和衍射效应的像, 它是物的简单放大。设被测镜头像面上的像分布为  $I(x, y)$ , 其傅里叶变换为  $G(f_x, f_y)$ ; 理想像分布为  $I_g(x, y)$ , 其傅里叶变换为  $G_g(f_x, f_y)$ , 则令  $H(f_x, f_y)$  等于

$$H(f_x, f_y) = \frac{G(f_x, f_y)}{G_g(f_x, f_y)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_g(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy}, \quad (5)$$

光学传递函数  $O(f_x, f_y)$  等于  $H(f_x, f_y)$  的零频归一化为

$$O(f_x, f_y) = \frac{H(f_x, f_y)}{H(0, 0)}, \quad (6)$$

而 MTF 的  $T(f_x, f_y)$  等于光学传递函数的模为

$$T(f_x, f_y) = |O(f_x, f_y)|. \quad (7)$$

### 3.4 MTF 计算

为了减小计算量, 通常只求出 MTF  $T(f_x, f_y)$  在  $f_y=0$  和  $f_x=0$  的两个互相垂直的截面上的分布, 这两个截面分别称为子午面和弧矢面。下面以  $f_y=0$  的计算为例进行说明, 而  $f_x=0$  的计算与之类似。

首先计算(5)式的分子, 将  $f_y=0$  代入, 得到

$$G(f_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) dy \exp(-j2\pi f_x x) dx. \quad (8)$$

可见, 对  $I(x, y)$  在  $y$  方向作积分, 再作一维傅里叶变换即得到  $G(f_x)$ 。  $I(x, y)$  经 CCD 采集后成为离散的图像, 表示为  $I(X, Y)$ , 其中  $X, Y$  分别为图像的列序数和行序数, 分别对应于  $x$  方向和  $y$  方向。(8)式中在  $y$  方向作积分就相当于把图像的各行相加, 即

$$I_1(X) = \sum_y I(X, Y). \quad (9)$$

设  $I_1(X)$  共有  $N$  个元素, 将(8)式中的连续傅里叶变换变为离散傅里叶变换<sup>[13]</sup>, 得到

$$G(k) = \sum_{x=0}^{N-1} I_1(X) \exp(-j2\pi kX/N) \quad (k = 0, 1, \dots, N-1), \quad (10)$$

上式在实际计算时, 按快速傅里叶变换算法来计算。上式的自变量是  $k$ , 需要把它转换为频率  $f_x$ , 由离散傅里叶变换的定义, 可以得到它们的关系为

$$f_x = \frac{k}{d'_x N} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1), \quad (11)$$

这样,  $G(f_x)$  就由(10)式和(11)式共同确定。

下面再计算(5)式的分母,直径为  $d$  的圆孔的理想像是直径为  $d'$  的圆孔,其傅里叶变换为<sup>[14]</sup>

$$G_g(f_x, f_y) = \frac{2J_1(\pi d' \sqrt{f_x^2 + f_y^2})}{\pi d' \sqrt{f_x^2 + f_y^2}}, \quad (12)$$

其中  $J_1$  表示一阶贝塞尔函数。取  $f_y=0$  的截面,得到

$$G_g(f_x) = \frac{2J_1(\pi d' f_x)}{\pi d' f_x}, \quad (13)$$

再由(5)~(7)式,并取  $f_y=0$ ,得到

$$H(f_x) = \frac{G(f_x)}{G_g(f_x)}, \quad (14)$$

$$T(f_x) = \left| \frac{H(f_x)}{H(0)} \right|. \quad (15)$$

### 3.5 测试系统各组件的影响分析与校正

前面计算出来的 MTF  $T(f_x)$  实际上包含了平行光管、显微物镜和 CCD 的影响,必须对这些影响进行校正。

#### 3.5.1 平行光管和显微物镜的影响

光学系统成像质量的下降由 2 个因素引起,一是衍射,二是像差,因此,光学系统的总 MTF  $T_{\text{tot}}$  等于衍射引起的 MTF  $T_{\text{diff}}$  与像差引起的 MTF  $T_{\text{aber}}$  的乘积<sup>[15]</sup>,即

$$T_{\text{tot}} = T_{\text{diff}} \times T_{\text{aber}}. \quad (16)$$

在 MTF 测试时,为了保证对被测镜头的全口径测试,必须满足以下要求:平行光管的出瞳直径大于被测镜头的入瞳直径,显微物镜的物方孔径角大于被测镜头的像方孔径角。前者容易实现,对于后者,配备的 20 倍和 40 倍的显微物镜的物方孔径角都较大,分别为  $48.6^\circ$  和  $71.8^\circ$ ,可以满足几乎所有被测镜头的测试要求。这样,平行光管和显微物镜都没有对光束起限制作用,即它们的衍射 MTF 不会对测试产生影响,因此,只需要校正平行光管和显微物镜的像差 MTF 即可。用 Optikos 公司的 MTF 测试仪分别测出平行光管和显微物镜的总的 MTF,然后可分别计算出像差 MTF 为

$$T_{\text{aber}}(f'_x) = \frac{T_{\text{tot}}(f'_x)}{T_{\text{diff}}(f'_x)}, \quad (17)$$

式中  $f'_x$  是平行光管焦面或者显微物镜像面处的频率,而衍射 MTF 可以计算出来,它等于

$$T_{\text{diff}}(f'_x) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{f'_x}{f_{\text{cut}}}\right) - \frac{f'_x}{f_{\text{cut}}} \sqrt{1 - \left(\frac{f'_x}{f_{\text{cut}}}\right)^2} \right], \quad (18)$$

式中  $f_{\text{cut}}$  是衍射极限截止频率,对于平行光管,它等于

$$f_{\text{cut}} = \frac{1}{\lambda F_{\text{col}}}, \quad (19)$$

式中  $F_{\text{col}}$  是平行光管的  $F$  数,  $\lambda$  是中心波长。而显微物镜是有限物距系统,它的  $f_{\text{cut}}$  等于

$$f_{\text{cut}} = \frac{2NA}{\lambda}, \quad (20)$$

式中  $NA$  为显微物镜的数值孔径。

需要把频率  $f'_x$  转换为被测镜头像面上的频率  $f_x$ ,然后才可以进行 MTF 校正。对于平行光管,转换关系为

$$f_x = \frac{f'_x}{B}, \quad (21)$$

对于显微物镜,转换关系为

$$f_x = f'_x M. \quad (22)$$

#### 3.5.2 CCD 的影响

CCD 的成像分为 2 个过程:一是像元积分过程,二是离散采样过程<sup>[16]</sup>。像元积分过程是指,像面上每一点的输出光强,等于以该点为中心,以  $a'_x$ 、 $a'_y$  为边长的矩形区域内的光强的总和。这个过程实际上就是将像分

布与矩形函数  $\text{rect}(x/a'_x, y/a'_y)$  作卷积, 它会使像变模糊, 它的 MTF 就等于该矩形函数的傅里叶变换, 即<sup>[17]</sup>

$$T_{\text{CCD}}(f_x, f_y) = \frac{\sin(\pi a'_x f_x)}{\pi a'_x f_x} \cdot \frac{\sin(\pi a'_y f_y)}{\pi a'_y f_y}, \quad (23)$$

取  $f_y=0$  截面, 得到

$$T_{\text{CCD}}(f_x) = \frac{\sin(\pi a'_x f_x)}{\pi a'_x f_x}. \quad (24)$$

离散采样过程是指, CCD 对经过像元积分后的图像以  $d'_x$ 、 $d'_y$  为间隔进行采样。这个过程必须满足采样定理的要求, 即 CCD 的奈奎斯特频率要大于被测镜头的截止频率。设被测镜头的  $F$  数为  $F_{\text{lens}}$ , 中心波长为  $\lambda$ , 则要求

$$\frac{1}{2d'_x} > \frac{1}{\lambda F_{\text{lens}}}, \quad \frac{1}{2d'_y} > \frac{1}{\lambda F_{\text{lens}}}. \quad (25)$$

选用的 CCD 的像元间距为  $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ , 对于 20 倍和 40 倍显微物镜, 其奈奎斯特频率分别为 1205 lp/mm 和 2410 lp/mm, 可以满足几乎所有镜头的测试要求。只要满足(25)式, 就不会发生频谱混叠, 从而不会对 MTF 产生影响。

另外, CCD 的暗电流以及一些电子学随机噪声的影响按 3.1 节的方法消除。

### 3.5.3 MTF 的校正

综上, 设未校正的被测镜头的 MTF 为  $T(f_x)$ , 平行光管和显微物镜的像差 MTF 分别为  $T_{\text{col-aber}}(f_x)$  和  $T_{\text{mic-aber}}(f_x)$ , 于是校正后的被测镜头的 MTF  $T_{\text{lens}}(f_x)$  等于

$$T_{\text{lens}}(f_x) = \frac{T(f_x)}{T_{\text{col-aber}}(f_x) \times T_{\text{mic-aber}}(f_x) \times T_{\text{CCD}}(f_x)}. \quad (26)$$

### 3.6 误差和噪声的抑制

下面对(13)式进行分析, 作出  $2J_1(\alpha)/\alpha$  的图像如图 2 所示, 当  $\alpha=0$  时, 其值为 1, 随着  $\alpha$  增大, 其值逐渐减小直至为负。由(14)式可知, 在计算过程中会用  $G(f_x)$  来除以(13)式, 如果(13)式的绝对值远小于 1, 那么  $G(f_x)$  将被放大很多倍, 这样  $G(f_x)$  中包含的误差和噪声也会被严重放大, 使结果不准确。经过多次实验发现, (13)式的值必须大于 0.9, 以保证结果的准确性。由图 2 可知当  $2J_1(\alpha)/\alpha > 0.9$  时,  $\alpha < 0.910$ , 即  $\pi d' f_x < 0.910$ , 当频率为  $f_x$  时也类似, 于是得到

$$d' < \frac{0.910}{\pi f_x}, \quad d' < \frac{0.910}{\pi f_y}. \quad (27)$$

可见, 圆孔的直径不能太大, 否则不能满足上式的要求; 圆孔的直径也不能太小, 否则会使光能太弱, 不利于测试。

同样, 作为除数的(24)式的值也必须大于 0.9。  $\sin\alpha/\alpha$  的图像如图 3 所示, 当  $\sin\alpha/\alpha > 0.9$  时,  $\alpha < 0.787$ , 即  $\pi a'_x f_x < 0.787$ , 当频率为  $f_x$  时也类似, 于是得到

$$f_x < \frac{0.787}{\pi a'_x}, \quad f_y < \frac{0.787}{\pi a'_y}. \quad (28)$$

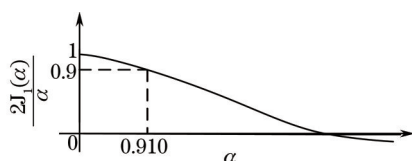


图 2  $2J_1(\alpha)/\alpha$  的图像  
Fig.2 Image of  $2J_1(\alpha)/\alpha$

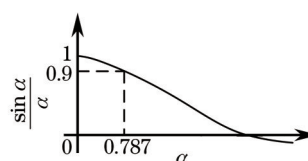


图 3  $\sin\alpha/\alpha$  的图像  
Fig.3 Image of  $\sin\alpha/\alpha$

## 4 测试步骤

总结一下 MTF 的测试步骤如下:



- 1) 确保平行光管的出瞳直径大于被测镜头的入瞳直径,显微物镜的物方孔径角大于被测镜头的像方孔径角。
- 2) 按(1)、(2)、(3)、(4)式进行参数转换。
- 3) 确保各参数满足(25)、(27)、(28)式的要求。
- 4) 按图1搭建光路,采集图像,并按3.1节的要求进行图像处理。
- 5) 首先计算 $f_s=0$ 的截面。依次按(9)、(10)、(11)、(13)、(14)、(15)式计算 $T(f_s)$ 。
- 6) 分别依次按(19)或(20)、(18)、(17)式计算平行光管和显微物镜的像差MTF,并按(21)或(22)式进行频率转换。
- 7) 按(24)式计算 $T_{\text{ccd}}(f_s)$ ,并按(26)式对 $T(f_s)$ 进行校正。
- 8) 然后按类似的过程计算 $f_s=0$ 的截面。

## 5 实 验

实验测试了2个镜头,一个像质较好,一个像质较差,将便携式MTF测试仪的测试结果、Optikos公司的MTF测试仪的测试结果以及光学设计的理论MTF值进行了比较。其中Optikos公司的MTF测试仪经过了计量检定并合格。实验结果如表1、表2所示,其中 $T$ 表示子午面的值, $S$ 表示弧矢面的值。

表1 像质较好镜头的测试结果  
Table 1 Results of test of the better lens

Frequency/ (lp/mm)	Our device		Optikos'device		Theoretical value	
	$T$	$S$	$T$	$S$	$T$	$S$
10	0.935	0.942	0.932	0.941	0.936	0.945
20	0.875	0.880	0.883	0.886	0.893	0.886
30	0.816	0.826	0.821	0.833	0.826	0.830
40	0.766	0.779	0.780	0.784	0.769	0.788
50	0.714	0.718	0.708	0.711	0.719	0.722
60	0.677	0.681	0.669	0.675	0.687	0.681
70	0.631	0.643	0.629	0.640	0.638	0.650
80	0.553	0.582	0.558	0.573	0.565	0.583
90	0.510	0.526	0.506	0.537	0.518	0.533
100	0.471	0.483	0.475	0.492	0.479	0.488

表2 像质较差镜头的测试结果  
Table 2 Results of test of the worse lens

Frequency/ (lp/mm)	Our device		Optikos'device		Theoretical value	
	$T$	$S$	$T$	$S$	$T$	$S$
10	0.537	0.608	0.541	0.615	0.544	0.616
20	0.258	0.371	0.265	0.381	0.266	0.381
30	0.160	0.280	0.148	0.279	0.165	0.289
40	0.085	0.216	0.090	0.223	0.099	0.219
50	0.065	0.190	0.059	0.181	0.071	0.198
60	0.037	0.150	0.041	0.152	0.048	0.157
70	0.024	0.128	0.030	0.128	0.027	0.134
80	0.028	0.112	0.022	0.109	0.035	0.117
90	0.008	0.091	0.013	0.095	0.009	0.099
100	0.002	0.090	0.009	0.085	0.007	0.095

由表可见,便携式MTF测试仪的结果与Optikos测试仪的结果的最大误差为0.014,即相对精度为0.014,精度较高;与理论值的最大误差为0.018,即绝对精度为0.018,满足0.03的要求。

## 6 结 论

研制了一套便携式MTF测试仪,它以圆孔为目标,圆孔经平行光管和被测镜头所成的像,经显微物镜放大后被CCD接收并传入计算机进行处理和计算,得到MTF值。该测试仪体积小重量轻,方便搬运到不同的地点进行MTF测试。将该测试仪的测试结果与光学设计的理论值进行了比较,结果表明,该测试仪的绝对精度为0.018,满足0.03的要求,证明了研制方法与过程的正确性,达到了研制目的。

- 1 Yang Yongming, Li Qingjun, Li Wenming, *et al.*. Modulation transfer function for color area CCD based on Bayer filtering[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1611-1618.  
杨永明, 李清军, 李文明, 等. 基于 Bayer 滤波的彩色面阵 CCD 调制传递函数[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1611-1618.
- 2 Zhang Yuanying, Ren Xuechang, Lu Qinghong, *et al.*. Optical system design of shelter holographic sight[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609005.  
张远颖, 任雪畅, 炉庆洪, 等. 潜式全息瞄准器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609005.
- 3 Yu Chunfeng, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Analysis of influence on the new type aviation lens shutter to the optical transfer function [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112005.  
于春风, 丁亚林, 惠守文, 等. 新型航空镜间快门对光学传递函数的影响分析[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112005.
- 4 Lü Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, *et al.*. Optical system design of sensor for space rendezvous and docking[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1216003.  
吕 博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 空间交会对接探测器光学系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1216003.
- 5 Yuan Gaobin, Li Binqiao, Xu Jiangtao, *et al.*. Research of MTF velocity mismatch model for time delay integration CMOS area image sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0104001.  
袁高斌, 李斌桥, 徐江涛, 等. 时间延迟积分型面阵 CMOS 图像传感器 MTF 速度失配模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0104001.
- 6 Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0116001.  
林剑春, 孙丽崑, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0116001.
- 7 Chen Shanshan, Xu Min. Modulation transfer function fast testing system for industrial lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 4(1): 051102.  
陈珊珊, 徐 敏. 工业用光学镜头调制传递函数快速检测系统[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 4(1): 051102.
- 8 Sun Chongshang, Wang Qi, Ding Yalin, *et al.*. Modulation transfer function measurement of image motion of aerial camera based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1212001.  
孙崇尚, 王 琦, 丁亚林, 等. 基于倾斜刃边法航空相机像移的调制传递函数测量[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1212001.
- 9 Li Jin, Xing Fei, Wang C hong. High-precision on-orbit assessment of MTF for space CCD camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211003.  
李 进, 邢 飞, 王 翀. 空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211003.
- 10 Qi Wenwen, Man Yiyun, Huang Qiaolin. Simulation on modulation transfer function measurement of CCD camera using low frequency bar method[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(3): 23-26.  
齐文雯, 满益云, 黄巧林. 低频靶标法测量 CCD 相机调制传递函数的仿真[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(3): 23-26.
- 11 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Zhao Jianke, *et al.*. A new adaptive background correction method based on pinhole image analysis in optical system modulation transfer function measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812008.  
段亚轩, 陈永权, 赵建科, 等. 一种基于针孔像分析的光学系统调制传递函数测量的自适应背景校正方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812008.
- 12 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999: 70-71 .  
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 70-71.
- 13 Zheng Junli, Ying Qiheng, Yang Weili. Signal and System[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 110-146.  
郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 110-146.
- 14 Tan Jiahai, Qu Youshan, Zhang Zhijun, *et al.*. Finite conjugate optical system transfer function measurement system design[J]. Electronic Test, 2014, 1(1): 13-15.  
谭家海, 屈有山, 张志军, 等. 有限共轭光学系统传递函数测量系统设计[J]. 电子测试, 2014, 1(1): 13-15.
- 15 Yu Qian. Research on MTF Testing Methods of Optical Inspection Lenses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 15-18.  
于 谦. 光学检查镜头的 MTF 测试方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 15-18.
- 16 He Xu, Ji Qi. Study on modulation transfer function measurement instrument with matrix for matrix CCD[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10): 1100-1108.  
何 煦, 姬 琪. 面阵 CCD 调制传递函数测试仪器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1100-1108.
- 17 Liu Yang, Hu Jun, Wu Weiping. Real-time measurement of transfer function based on high-resolution CCD camera[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(5): 745-748.  
刘 洋, 胡 君, 吴伟平. 高分辨率 CCD 相机传递函数的实时计算[J]. 半导体光电, 2011, 32(5): 745-748.