

用光学传递函数精确测定 CCD 列阵最佳成像位置*

刘明华 余模智 何平安 何对燕

(武汉测绘科技大学电子信息工程与精密机械学院, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

摘 要 提出一种直接采用 CCD 作为光电转换元件, 以几何尺寸精密的 CCD 列阵作为狭缝, 进行高精度、高密度的自动采样, 扫描“刀刃扩展函数”(ESF)。再配用微型计算机技术, 以数字付里叶分析方法测量光学传递函数(OTF)。基于 CCD 测试 OTF 的实现, 可直接精确判定 CCD 列阵的最佳成像位置。

关键词 CCD 列阵; 光学传递函数; 空间传感器; 最佳成像位置

分类号 TP73

空间光学传感器 CCD 列阵焦面位置的装调严重影响着成像质量, 因而精确测定最佳成像面的位置(简称为定焦)有着特别重要的意义。用光学传递函数(OTF)评价成像系统的像质是目前公认的最有效的评价方法之一, 但由于记录介质的局限, OTF 的测试多采用间接方式, 影响了定焦精度。本文将具有严格几何尺寸的 CCD 列阵作为狭缝, 以刀刃为目标物, 运用高科技计量技术, 高精度、高密度快速扫描由待测物镜形成的“刀刃扩展函数”(ESF), 再配用计算机技术, 以数字付里叶分析方法求得该系统的 OTF^[1~4]。

1 数学模型

用 CCD 列阵狭缝扫描刀刃测量 OTF 的原理如图 1 所示。刀刃 1 作为一个阶跃函数输入该系统, 则输出为“阶跃响应”或“刀刃扩展函数”(ESF), 即为线扩展函数 LSF(x) 与刀刃函数 STEP(x) 的卷积:

$$\text{ESF}(x) = \text{LSF}(x) * \text{STEP}(x) \quad (1)$$

在输出面上安置 CCD 列阵, 其方向严格平行于刃口方向。当刀刃在物面上沿垂直于光轴方向扫描移动时, 其像 ESF(x) 亦作一维扫描移动, CCD 列阵像元作为狭缝, 被刀刃扩展函数扫描, 记录下一维分布的光强, 即 ESF(x) 曲线。故(1)式可重写为:

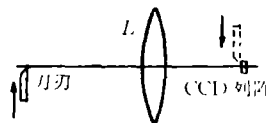


图 1 OTF 测试原理图

$$I(x) = \text{ESF}'(x) = \int_{-\infty}^x \text{LSF}'(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

由式(2)可得出:

$$\text{LSF}'(x) = \frac{d[\text{ESF}'(x)]}{dx} \quad (3)$$

根据一维光学传递函数定义,可得到:

$$\text{OTF}'(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{LSF}'(x) \exp(-i2\pi ux) dx \quad (4)$$

需要特别指出的是,在实际测试过程中,CCD 列阵像元尺寸(即狭缝)总有一定宽度,设其宽度为 $2d$,如图 2 所示。将狭缝处光通量定义为缝宽函数:

$$s(x) = \text{RECT}(x/2d) \quad (5)$$

扫描刀刃扩展函数狭缝时,在某一点 x_0 的采样值,实际上是狭缝自身宽度内的空间积分的结果,显然将产生系统误差。因而,在像面上得到的采样函数 $\text{ESF}'(x)$,实际上是刀刃扩展函数 $\text{ESF}(x)$ 与缝宽函数 $s(x)$ 空间卷积的结果:

$$\text{ESF}'(x) = \text{ESF}(x) * s(x) \quad (6)$$

即 CCD 探测到的像分布被“光滑化”。所以由 $\text{ESF}'(x)$ 对应所测得的光学传递函数 $\text{OTF}'(u)$ 是待测镜头的传递函数 $\text{OTF}(u)$ 与狭缝缝宽函数的付里叶谱的乘积:

$$\text{OTF}'(u) = \text{OTF}(u) \cdot S(u) \quad (7)$$

故测得的 $\text{OTF}'(u)$ 需经下式修正:

$$\text{OTF}(u) = \frac{\text{OTF}'(u)}{S(u)} \quad (8)$$

$$\text{式中,} \quad S(u) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x) \exp(-i2\pi ux) dx = \frac{\sin(2\pi ud)}{2\pi ud} \quad (9)$$

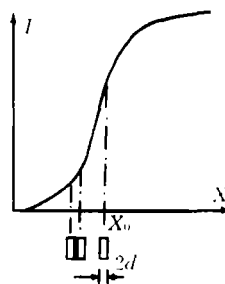


图 2 CCD 列阵对刀刃扩展函数的光强采样

2 装置结构

实验装置结构如图 3 所示。由光源发出的光经聚光镜和滤色片聚集在积分球内,在积分球输出窗口上获得一均匀视场,目标物刀刃置于该视场中,在无限共轭方式下,刀刃经准直物镜(焦距 1 200~2 000mm)和待测物镜而成像。借助于精密调整机构调整刀刃,使刀刃像与 CCD 列阵狭缝方向严格平行。微型计算机在工作程序控制下发出扫描控制信号,经扫描驱动装置,启动刀刃在准直物镜的焦面上作垂直于光轴方向的一维扫描移动,并进行自动采样。其位移间隔由高精度位移传感器获取位移模拟量,经高速数字采集卡转换成位移数字模拟信号(14~16bit)输入计算机。CCD 列阵采集刀刃像的光强信号,经图像采集卡转换成灰度模拟信号(8bit)输入计算机。这样,将采集到由待测物镜传递并由 CCD 列阵积分采样的 $\text{ESF}'(x)$,经平滑滤波、数值计算,便可精确快速地测算出 MTF 和 PTF 值。

系统软件包括自动扫描、采样、滤波、计算输出、保存、自动测试及重新初始化等各项测试功能,每项功能还包含若干子程序。操作人员可根据需要组合成一个测试步骤,完成测试过程。另外还附有诊断与调试程序,当测试参数输入或测试状态不符合要求或超限时,将会显示警告或错误信息。程序用 C 语

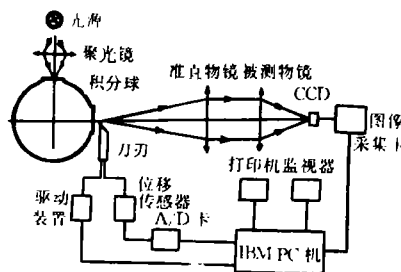


图 3 实验装置结构示意图

言编写。

3 测试结果

光学传递函数测试仪必须进行仔细校核和精度标定。对此,选用焦距 $f=50\text{mm}$ 的通用标准镜头进行测试比对。测试条件如下。

共轭方式:物处于无限远;准直透镜:焦距 $f=1\,600\text{mm}$;测试波长:546nm;

空频范围:0~100lp/mm;测试次数:3次;待测物镜: $f=50\text{mm}$, $D/f=1/8$ 。

测试数据及理论计算数据列于表1。

表1 测试数据及理论数据比对

测试空间频率(lp/mm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
理论计算值	0.943	0.876	0.815	0.756	0.705	0.650	0.597	0.546	0.496	0.449
实际测试值	0.948	0.873	0.792	0.727	0.684	0.621	0.579	0.572	0.524	0.478

经多次测试其结果表明,MTF 值测试的不重复精度优于 ± 0.01 , 不确定度优于 ± 0.03 (轴上)^[5]。

对于应用 OTF 进行定焦,我们认为定焦精度主要取决于 MTF 测量值的重复性,而可以不考虑 MTF 测量值的正确性(即不确定度)。

从过焦曲线族中选择空间频率为 40lp/mm 的曲线作为定焦依据,如图4所示,该曲线斜率变化较快。曲线横坐标为离焦量,以 $\lambda/4$ 瑞利标准所对应的焦深 $\Delta z=2\lambda F^2$ 为单位。如果 MTF 测量的不重复性在 0.01 范围内,若按 MTF 峰值调焦,当 MTF 值变化 0.01 时,对应离焦量为 0.765 ($2\lambda F^2$),即

$$\Delta = 0.765(2\lambda F^2) = 1.53\lambda F^2 \quad (10)$$

这与目视调焦精度差不多,是由于 MTF 曲线在峰值处的变化比较缓慢的缘故。因此,必须在曲线斜率最大的地方,即峰值下降一半的位置附近定位。同样 MTF 变化 0.01 时,对应的离焦量为 0.054 ($2\lambda F^2$),则调焦精度估计为:

$$\Delta = 0.054(2\lambda F^2) = 0.108\lambda F^2 \quad (11)$$

若 $F=8$, $\lambda=0.5\mu\text{m}$,则调焦精度估计可达 $3.5\mu\text{m}$ 。若选取焦前焦后由对称位置来确定中间位置的最佳成像面,精度估计还可提高一倍。

4 讨论

研究结果表明,本装置有如下特点:

1)对待测系统的测试与检校过程与其实际使用状态一致,无间接转换环节,因此具有较高的测试与检校精度。

2)利用刀刃作为目标物,在概念上和实验上都较为简单,易于处理,且有足够大的能量输入到光电转换器上。对于缝宽影响,通过数值运算进行严格修正,克服了系统误差的影响。

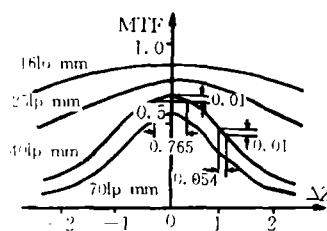


图4 标准透镜($f=50\text{mm}$)的过焦 MTF 曲线

3) 采样窗口重叠, 可进行高分辨率扫描采样, 不受像元几何结构效应带来的截止频率的限制。

4) 固定的 CCD 列阵与刀刃像精确平行扫描, 可消除 CCD 各像元灵敏度不均匀性的影响。

5) 由于 CCD 具有集成度高、几何尺寸精确、光敏元狭小、灵敏度高等特点, 本装置选用 CCD 列阵代替传统测试仪器中所使用的光电倍增管, 使得整个装置结构简化, 体积小型, 测试方便, 结果精确, 稳定可靠, 实时快速。整个装置可架设在大型光具座上, 可作为大型光具座附件配套使用, 成本低廉, 经济实用。

参 考 文 献

- 1 麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- 2 庄松林. 光学传递函数. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- 3 Wong H. Effect of Knife-edge Skew on Modulation Transfer Function Measurements of Charge-coupled Device Imagers Employing a Scanning Knife edge. Opt. Eng., 1991(30)
- 4 Leo L, Richard H A. Tables of the Modulation Transfer Function of a Defocused Perfect Lens. Appl. Opt., 1968, 7(5)
- 5 GB4315-4. 光学传递函数测量准确度. 国家技术监督局, 1991.

Precision Determination of the Best Imaging Position of CCD Array of Space Camera with Optical Transfer Function

Liu Minghua Yu Mozhi He Ping'an He Duiyan

(School of Electronic Information Engineering & Precision Mechanics, WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract A measurement method of optical transfer function (OTF) is described in this paper, in which charge-coupled device (CCD) in space camera, with an image sampler joined up with a PC, is used directly as an optoelectronic element. Knife edge scanning with high precision and high sampling density and digital Fourier analysis method is adopted. After measuring the defocal MTF curve of space camera, the best imaging position is determined precisely.

Key words CCD array; optical transfer function; space camera; best imaging position