

面阵 CCD 调制传递函数测试仪器研究*

何 煦 姬 琪

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要: 电耦合器件(charge coupled device, CCD)的成像质量直接影响新一代星敏感器的综合性能,现有 CCD 测试仪器受初位相对准偏差影响,重复精度较低。论文推导了基于条纹对比度原理的面阵 CCD 调制传递函数(modulation transfer function, MTF)表达式,分析初始位置偏差与 MTF 重复精度间的数学关系,提出初位置平均调制传递函数的概念与数据处理方法,据此改进条纹板设计,并对 CCD 测试仪器光学、机械、电控系统进行仿真设计。采用两片 Kodak KIA-4021 面阵 CCD 作为试样,在感光面不同区域对 MTF 进行多次重复测量,测试重复精度优于 0.025。实验结果表明,采用统计平均方法评价 CCD 成像质量,在感光面不同区域的测量结果一致性较好,重复精度优于极值算法。

关键词: 光电测量;面阵 CCD;调制传递函数;条纹对比度

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on modulation transfer function measurement instrument with matrix for matrix CCD

He Xu Ji Qi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The imaging quality of Charge Coupled Device (CCD) affects the comprehensive imaging performance of a new generation star tracker decisively. The existing measurement instrument has lower repeatability which is limited by deviation of initial position. The mathematical model of MTF based on the stripe-contrast method is deduced in this paper. And the function law between the repeatability precision of MTF measurement and the initial position is analyzed. Based on that, the design scheme of the instrument, the implementation methods of the optical, mechanical, electrical control and data processing system are proposed. Kodak array CCD modeled KIA-4021 is used as the prototype to measurement the 30 times of MTF in verification tests, and the repeatability precision of the measurement instrument is better than 0.025. The test data indicate that the MTF measurement at the different region shows better consistently than that of using statistic evaluation method.

Keywords: electro-optical measurement; array CCD; modulation transfer function; stripe-contrast method

1 引 言

星敏感器采用面阵 CCD 与光学系统对天球惯性坐标系中的恒星凝视成像,并将图像作为参考基准用于计算载体在惯性空间中的姿态信息。CCD 探测器的成像质量将直接影响星敏感器对恒星的定位精度,其评价与测试是第三代大视场航天星敏感器

研制过程中的关键技术之一。MTF 可反映光学遥感载荷的综合性能,目前广泛用于评价光学遥感载荷全部成像链路的成像质量^[1-2]。星敏感器作为一类特殊的空间相机,使用 MTF 作为评价方法,可以实现星敏感器设计、制造、试验、工作过程中成像质量评判标准的统一。而在星敏感器全系统测试前,需要首先解决的是其 CCD 探测器 MTF 的评价与测试。

CCD 是一种离散采样成像器件,它不满足光学传递函数(optical transfer function, OTF)理论中的线性空间不变假设。W. Wittenstein 等人首先对处于线性工作范围内离散采样成像系统的等晕定义进行扩展^[3],从而扫清了将 MTF 用于 CCD 成像质量评价的理论障碍。在此基础上,国内外科研人员对 CCD 探测器 MTF 的测试方法进行了大量理论与实验研究^[4-7]。宋敏、胡家升等人对激光散斑测量面阵 CCD 调制传递函数的方法进行改进,降低了重复测量偏差,还建立了基于干涉条纹获得余弦函数进行 MTF 测试的试验装置^[8-9]。Kenneth J. Barnard 等人采用激光散斑法对中波红外波段面阵 CCD 的 MTF 进行测试,并提出控制激光稳定性以提高 MTF 测试重复性的方法^[10]。张晓琳等对刀口法测量 X 射线 CCD 调制传递函数的数据处理算法进行改进,降低了 MTF 测量曲线的均方误差^[11]。Alfred D. Ducharme 等人提出利用“X”形光栏测试面阵 CCD 在 Nyquist 频域处 MTF 的方法^[12]。而对于大多数航天遥感器所采用的线阵 TDICCD, Bruce M. Lambert 等报道了测量其 MTF 的方法与试验装置^[13]。Horst Schwarzer 介绍了测量 TDICCD 动态调制传递函数的测试方法^[14]。杨永明等对影响 TDICCD 调制传递函数重复测试精度的因素进行了分析^[15]。

上述研究工作多关注 MTF 的理论分析与测试原理验证,探讨了很多提高测试精度的方法^[16-17],而对可应用于工程测试的 CCD 调制传递函数精密测试仪器的研究少有报道。为此,论文首先比较了目前用于 CCD 调制传递函数测试的主要方法,随后分析影响仪器重复测试精度的主要因素,并基于统计平均的思想提出改进的方波对比度 MTF 测试算法与目标图案。在仪器仿真设计部分提出了具体的解决方案,介绍了 MTF 测试仪器光学、机械及数据处理系统的设计方案。对面阵 CCD 调制传递函数的测试结果表明,与现有设备相比初位置平均调制传递函数评价方法可获得较高的重复精度。

2 测试原理

对于 CCD 调制传递函数的测试方法较多,主要差异在于目标类型及相应的数据处理方法。目前包含两种主要思路,即基于 Lindberg 理论^[18]的固定靶标法,其主要思想是利用点光源、刀口或图

形作为靶函数测量 MTF。另一个思路是由 G. Boreman 等提出的激光散斑法^[19-20],其基本思路是基于物像函数功率谱之间的傅里叶变换关系获得待测 CCD 的 MTF。优点在于无需成像光学系统即可实现 MTF 测试,缺点是影响测试重复精度的中间环节较多、波长单一、数据处理难度也较大。而对于论文中所讨论的 CCD 调制传递函数测试系统,激光散斑法则难以兼顾 CCD 像元几何形位误差的测试需求,无法仪器的工程化设计。

固定靶标法是测量 CCD 调制传递函数的常用方法。基于该原理, DALSA 公司还开发了采用扫描技术的线阵 TDICCD 调制传递函数商用测试仪器,但对于星敏传感器所采用的面阵 CCD,则难以应用扫描法进行测试。而对于星点、狭缝等静态目标,则需要相应的平行光管及成像系统,才可建立 MTF 测试光路,其中包含的多个光学元件与系统也将影响最终的测试精度。

而余弦或方波条纹靶板则可以直接通过光学系统投影在待测 CCD 感光面上,无需复杂的扫描与数据处理系统即可获得 MTF 测量结果。而该方法最大的优势在于测试光路简单,测试系统中所包含的光学链路较短,并且可以获得宽谱段范围内的 MTF 测试结果。

2.1 数学模型

面阵 CCD 采用面积分离散采样方式成像,包括像元积分与离散抽样两个连续过程。而各像元的采样方法理论上是一致的,所以像元积分采样过程可看作单个像元在被采样目标上连续移动而获得像元连续输出图像信息。

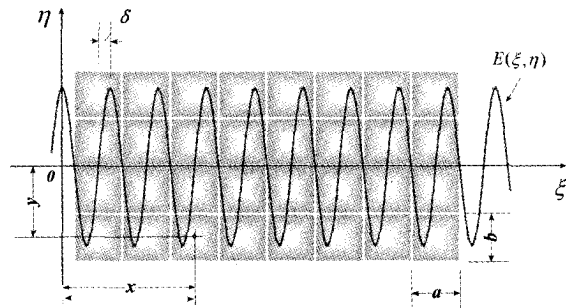


图 1 CCD 成像工作原理

Fig. 1 Working principle of CCD imaging

如图 1 所示的输入目标照射在 CCD 感光面

上,设 CCD 像元尺寸为 $a \times b$,则 (x, y) 处像元在目标函数坐标系下的积分采样输出强度可表示为:

$$G_0(x, y) = K \iint E(\xi, \eta) \text{rect}\left(\frac{\xi - x}{a}, \frac{\eta - y}{b}\right) d\xi d\eta \quad (1)$$

式中: $E(\xi, \eta)$ 表示输入物的光强分布函数, x, y 为像元中心点在目标函数坐标系内的坐标, K 表示比例系数。根据矩形函数性质, 式(1)可进一步简化为:

$$G_0(x, y, \delta) = KE(x, y, \delta) \text{rect}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}\right) \quad (2)$$

式中: 表示图 1 中 CCD 像元的积分采样过程, 其中 δ 表示初位置偏差。第二个过程是在积分采样的基础上对连续图像的离散抽样过程。设采样函数为 $S(x/X_0, y/Y_0)$, 采样在 Nyquist 频域内进行, 则可以得到 CCD 面阵上各像元的输出强度表达式:

$$G(x, y, \delta) = KE(x, y, \delta) \text{rect}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}\right) \cdot S\left(\frac{x}{X_0}, \frac{y}{Y_0}\right) \quad (3)$$

则根据 MTF 的调制度定义, 设输入空间频率为 f 的目标, 调制度为 M_0 。经 CCD 积分采样后输出函数的调制度为 M_i , 则 CCD 的调制传递函数可表示为:

$$MTF(f) = \frac{M_i(f)}{M_0(f)} \quad (4)$$

根据调制度定义与式(3), 式(4)可表示为:

$$MTF(f, \delta) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{\max i} - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{\min i}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{\max i} + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{\min i}} \cdot \frac{1}{M_0(f)} \quad (5)$$

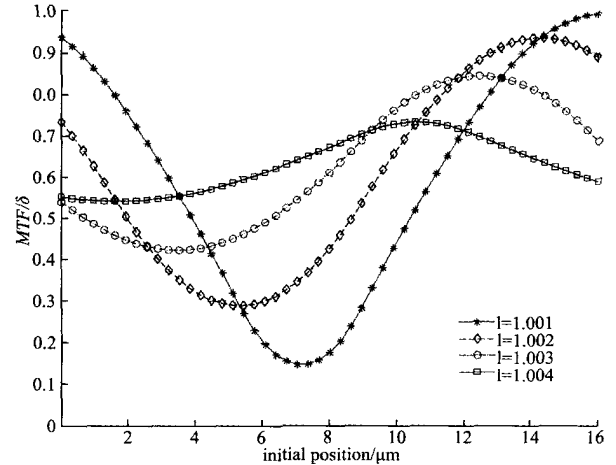
式中: $G_{\max}(x, y, \delta)$ 与 $G_{\min}(x, y, \delta)$ 分别表示像元输出强度信号的极大值与极小值, N, M 标示成对出现的极大值与极小值的像元个数。

2.2 初位相对准精度分析

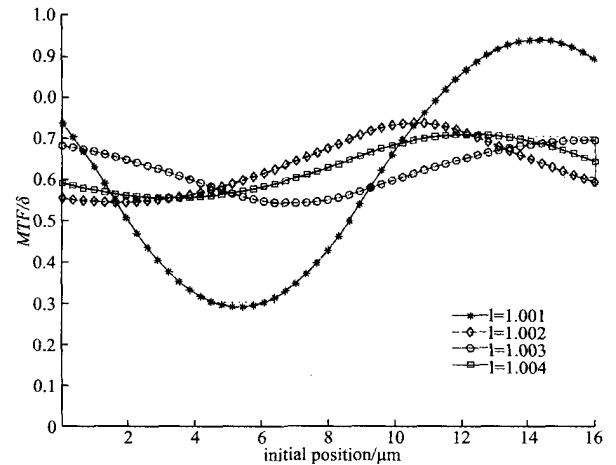
根据式(5), 当输入信号频率一定时, 输入信号初位置 δ 影响 CCD 像元输出调制度的收敛性。而且由于物函数周期很小, 且每个周期对应的像元位置一致, 所以 MTF 对相位极为敏感。若输入信号强度依照余弦函数分布为:

$$E(x, y, \delta) = 1 + \cos(2\pi f + \delta) \quad (6)$$

假设像元大小 $a = b = 8 \mu\text{m}$, 当输入光学信号频率 f 与 CCD 采样的 Nyquist 频率 f_N 之间的偏差比 l 分别等于 1.001、1.002、1.004、1.006, 在像元总数分别为 1024×1024 、 2048×2048 时, 根据式(3)、(5)、(6)计算得到 MTF 与初位置偏差 δ 之间的作用关系曲线如图 2 所示。



(a) $n=m=1024$ 像素
(a) $n=m=1024$ pixels



(b) $n=m=2048$ 像素
(b) $n=m=2048$ pixels

图 2 不同像元总数时 $MTF-\delta$ 随初位置变化曲线
Fig. 2 Curve of $MTF-\delta$ in different pixel number

图 2 中横坐标标示初位置, 纵坐标为 MTF , $l = f_N/f$ 。上述仿真结果表明, MTF 随初位置偏差周期振荡, 并且振荡幅值在 Nyquist 频率附件随频率差异的减小而增大。随 CCD 中所包含像元数的增加, MTF 振荡幅值减小。上述特性说明初位置偏差与

频率偏差是影响 MTF 测试重复精度的主要因素。

2.3 测试系统工作原理

仿真结果表明,目标的空间频率精度对 MTF 测试精度影响较大,若采用灰度余弦分布的光学图案作为物函数,其制作难度较大,空间频率不易达到较高制作精度。而采用强度矩形分布的方波作为输入物函数,可以获得较高的空间频率制作精度,降低频率偏差对测试精度的影响。

由于输入函数变化,实际测得的结果不再是 MTF,而是反映 CCD 对于方波函数响应输出的对比度传递函数(contrast transfer function, CTF)。而根据傅里叶级数展开公式,MTF 与 CTF 之间存在如下数学关系:

$$MTF(f) = \frac{\pi}{4} \left[CTF(f) + \frac{CTF(3f)}{3} - \frac{CTF(5f)}{5} + \frac{CTF(7f)}{7} - \dots \right] = \frac{\pi}{4} CTF(f) \quad (7)$$

式(5)也相应变为:

$$CTF(f, \delta) = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{\max i} - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{\min i}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{\max i} + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{\min i}} \right] \cdot \frac{1}{M_0(f)} \quad (8)$$

式中:像元输出强度 $G(x, y, \delta)$ 为方波函数作为输入,CCD 像元的输出信号强度。

此时 CTF 随初位置 δ 变化仍然会对重复测试精度造成较大影响。根据 CCD 采样成像原理,若初位置出现周期为 C ,在一个初位置周期内取 T 个不同初位置 δ_i ,这样将获得 T 个不同的 CTF 值,则可以定义初位置平均对比度传递函数以及与之对应的初位置平均调制传递函数,如式(9)所示。

$$\overline{CTF(f)} = \left\{ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{\max i}(\delta_i) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{\min i}(\delta_i)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_{\max i}(\delta_i) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{\min i}(\delta_i)} \right] \right\} \cdot \frac{1}{M_0(f)}$$

$$\overline{MTF(f)} = \frac{\pi}{4} \overline{CTF(f)} \quad (9)$$

依据式(9)统计平均思想计算得到的 CCD 调制传递函数不再是初位置偏差 δ 的函数,只是空间频率 f 的函数,具有较好的收敛性。

根据上述原理,制作如图 3 所示的矩形条纹靶板作为输入目标。其中对靶板图案进行相应改进,将空间频率同为 f 的 5 个相互错开 $C/5$ 的黑白条纹序列复制在同一玻璃基板上,可一次实现初位置周期内 5 个不同初位置处 MTF 测试。再依据式(9)对各像元输出信号强度进行数据处理即可获得初位置平均调制传递函数。此外,靶板上还制作了一对空间频率为 $f_N/128$ 的条纹板用来测量输入物函数的调制度 $M_0(f)$ 。

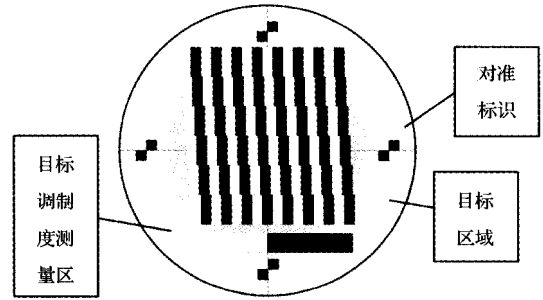


图 3 改进后的矩形条纹靶板示意

Fig. 3 Schematic diagram of improved reticle target

根据上述理论模型建立如图 4 所示的测试光路,将条纹目标成像在待测 CCD 感光面,再依据公式(9)对 CCD 采集图像进行相应的数据处理,可获得 MTF 测量结果。

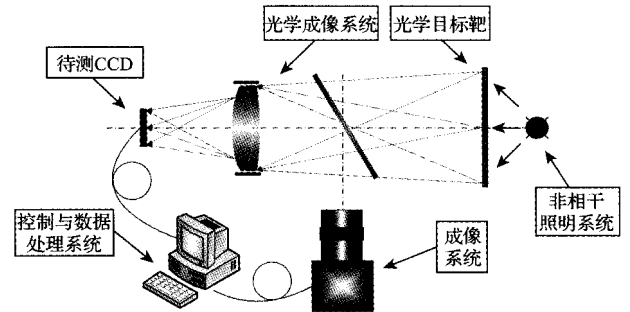


图 4 测试系统工作原理

Fig. 4 Working principle of measurement system

3 测试系统设计

3.1 测试系统总体设计

图 5 为面阵 CCD 调制传递函数测试仪的组成原理,该测试装置还可以兼顾面阵 CCD 平面度、直线度等几何形位误差测量。仪器由照明系统、目标靶切换系统、数码相机、显微成像物镜系统、待测

CCD 姿态调整系统、三轴位移系统、三轴精密测长系统、图像采集系统、三轴运动控制系统、数据处理与实时显示系统等部分组成。

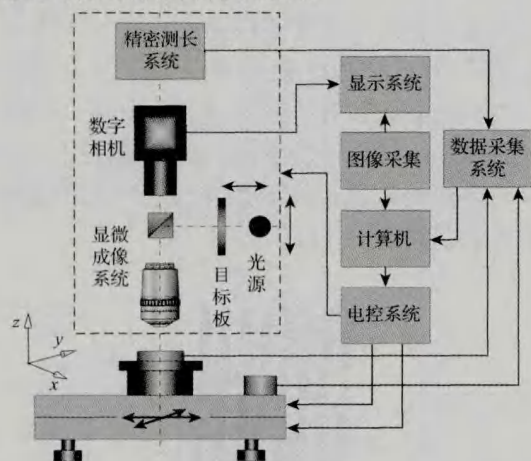


图 5 面阵 CCD 调制传递函数测试仪器组成原理

Fig. 5 Composition of MTF measurement instrument for matrix CCD

其具体的工作原理是,非相干照明系统出射宽谱段非相干均匀光束照明刻划有图 3 所示图案的光学分划板,经分束棱镜后由显微物镜成像至待测 CCD 感光面,CCD 成像并经图像采集系统、数据处理系统最终显示测得的 MTF 值。三轴位移系统由 x 、 y 、 z 3 个方向的平移导轨组成(坐标系定义如图 5 所示),其中 x 、 y 二维平移系统用于初位置坐标对准以及 CCD 表面不同测试区域间切换。 z 向平移机构用于显微成像物镜沿光轴方向调焦,以保证其物方焦面与 CCD 感光面重合。精密测长系统用于实现 x 、 y 、 z 三维位移量实时反馈。

当测试系统用于 CCD 几何误差测试时,开启位于显微成像系统像方的数字相机,获取由光源照亮的 CCD 表面像元图像,配合由三维精密测长系统反馈的测量数据,可以获得面阵 CCD 的直线度、平面度等几何误差。此外待测 CCD 姿态调整系统可消除待测 CCD 初始坐标系与测量系统坐标系之间的三维角度偏差。下文详细介绍各系统的设计方案。

3.2 光学系统设计

光学系统包括照明系统、分束棱镜以及显微成像系统。其中照明系统用来实现条纹分划板非相干照明。选择积分球与钨卤灯源共同构成非相干照明系统。

显微成像系统用于待测 CCD 器件位姿调整、MTF 测试以及几何参数测试。需要针对不同功能选择具有不同放大倍率的显微成像系统。考虑到设计具有变倍功能的单个光学系统,其设计、加工、装调难度较大,外形尺寸也难以满足需求,因此设计了 3 支具有不同倍率的物镜。其中 $3\times$ 物镜用于粗对准及 MTF 测试, $10\times$ 物镜仅用于 MTF 测试, $20\times$ 物镜用于 CCD 直线度、平面度测量。

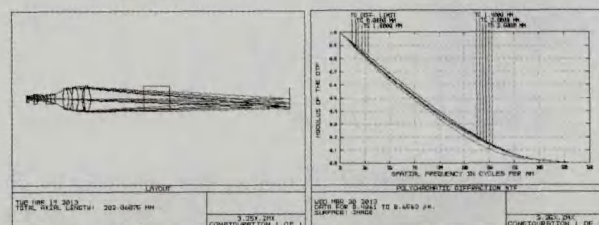
平场复消色差像物镜可矫正大场曲与像散,适用于 MTF 测试,按 N. A. 大小有 4 种主要结构形式。综合分析各种物镜的特点,选择 Lister 型设计 $3\times$ 物镜, Amici 型设计 $10\times$ 、 $20\times$ 物镜。根据待测面阵 CCD 的 Nyquist 频率、成像分辨率、景深、工作距等分别解算得到光学系统的焦距、视场角、数值孔径等初始指标,如表 1 所示。

表 1 显微成像物镜主要参数计算列表

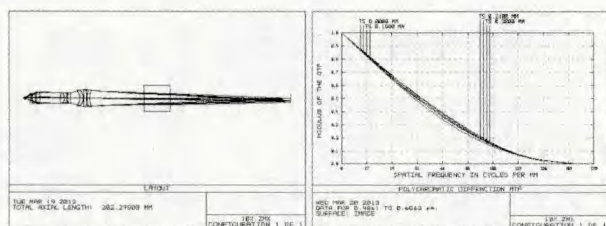
Table 1 Calculation parameters of microscope objectives

	NA	焦距 /mm	分辨率 / μm	景深 / μm	工作距 /mm
$3\times$ 物镜	0.2	35.4	1.7	6.25	6.32
$10\times$ 物镜	0.4	16.1	0.8	1.56	5.88
$20\times$ 物镜	0.55	8.8	0.61	0.8	5.75

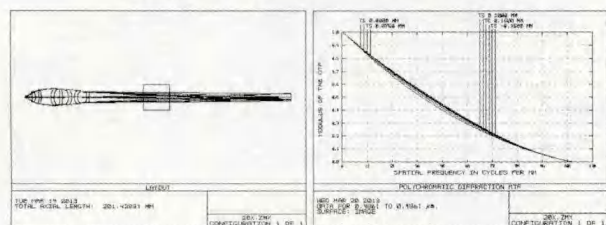
由于显微成像系统自身截止频率远高于待测 CCD 的 Nyquist 频率,因此可以基本忽略物镜截止频率对测试带来的低通滤波效应。而影响 CCD 调制传递函数测试精度的关键因素在于显微成像系统各项像差的矫正。其中 $3\times$ 物镜采用 Lister 形式物镜经过复杂化设计、 $10\times$ 与 $20\times$ 物镜采用 Amici 形式物镜复杂化设计。由于波长短物镜的景深小,所以 $20\times$ 采用蓝光波长、对称式设计。上述设计结果以及对应的传递函数优化结果如图 6 所示,光机系统设计如图 7 所示。



(a) $3\times$ 物镜仿真设计及对应 MTF 曲线
(a) Optical design and its MTF curve of $3\times$ objective



(b) 10°物镜仿真设计及对应MTF曲线
(b) Optical design and its MTF curve of 10° objective



(c) 20°物镜仿真设计及对应MTF曲线
(c) Optical design and its MTF curve of 20° objective

图 6 显微成像物镜仿真设计结果及对应 MTF 曲线
Fig. 6 Design results of three imaging microscope objectives and correspondence MTF map



图 7 显微成像物镜光机系统仿真设计结果

Fig. 7 Mechanical design of three imaging microscopes

3.3 机械系统设计

仪器机械系统组成与设计效果如图 8 所示。

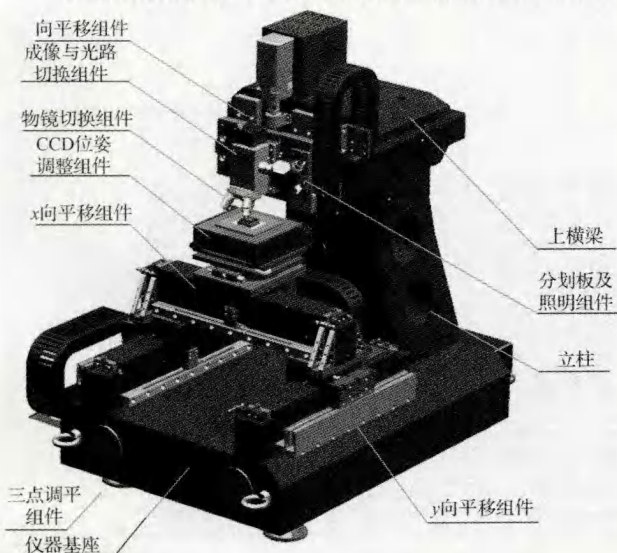


图 8 机械系统仿真设计结果

Fig. 8 Simulation design result of mechanic system

图 8 中的 z 向位移组件用于显微成像与照明系统整体沿光轴方向调焦。根据表 1 中的物镜景深,其调焦最小分辨率应优于 $0.4 \mu\text{m}$ 。选择步进电机与减速比 1/180 的多级行星减速机串联作为 z 向位移组件的动力执行单元。选择导程为 2mm 的精密滚珠丝杠作为传动组件,并与滚动直线导轨共同构成位移系统。根据电机输出精度,计算 z 向位移系统的分辨率可达到 $0.1 \mu\text{m}$,满足光学系统调焦需求。

x, y 向位移系统用于测试前的初位置对准、不同测试区域之间的切换,以及 CCD 几何误差测试。因此上述位移系统的精度是 MTF 与几何误差测试的关键。设计了直线精度、平面度、直线度均为 $0.1 \mu\text{m}$ 的气体静压导轨作为导向部件,并配合磁浮直线电机作为 x, y 向位移驱动单元。气浮导轨以气体薄膜支承替代平面支承和滚动支承,从而消除传统机械接触难以克服的摩擦影响,并且避免了磨损、润滑、油污等问题,非常适合电子元件制造与精密测量等应用。

x, y 向采用直线电机驱动,可以避免机械传动部件的使用,缩短传动链,具有极高的定位精度。

二维位移系统整体采用花岗岩材料,保证与仪器机架及主支撑结构之间材料统一,降低测试环境等因素对 MTF 测试精度的影响。

3.4 控制与数据处理系统设计

控制与数据处理系统采用模块化设计,使用标准板卡,可提高系统可靠性,电控系统工作原理如图 9 所示。



图 9 电控系统工作原理

Fig. 9 Block diagram of electrical control system

电控系统由 CCD 摄像机、直线电机、步进电机、直线光栅尺、电机驱动器、多轴电机运动控制卡、图像采集卡、Camera Link 采集卡、工控机等组成。

位置检测是高精度直线电机位置控制的关键,直接影响系统控制精度。选择增量式直线光栅尺作为电机位移检测部件。通过对精密直线光栅输出信号进行检测、处理与直线电机构成位置闭环。 x 、 y 、 z 向位移反馈元件使用精度为 $1\ \mu\text{m}$ 的 RENISHAW 光栅尺,将位置数据反馈给控制回路,形成闭环。

直线电机的伺服控制为闭环系统。在直线电机运动时,光栅传感器不断检测直线电机位移,产生正交编码脉冲信号作为位置反馈输入到控制系统,将直线电机预定位移和检测到的当前位移进行比较,由 PID 算法给出相应电压到功率放大器以驱动直线电机运动。

数据处理与控制软件包括任务控制、动作控制、采集控制、原始数据存储控制、数据计算处理、结果显示等功能模块,如图 10 所示。

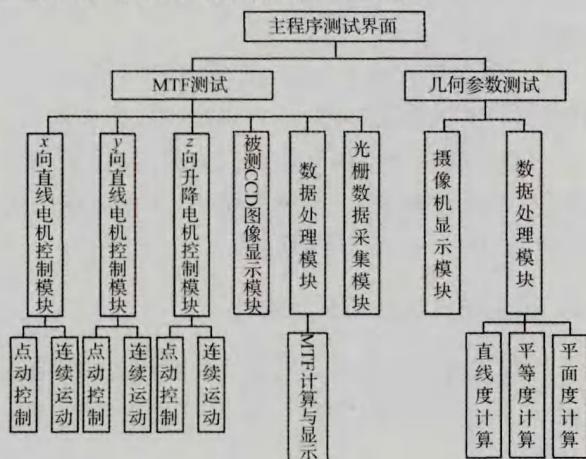


图 10 测试系统软件功能流程

Fig. 10 Flow chart of software function of test system

MTF 测试软件主要由图像显示模块、灰度显示模块、数据处理模块等组成。图像显示模块用于显示被测 CCD 采集的黑白条纹图像,并显示原图及放大图像。灰度显示模块用于在全域图像中实时显示某一像素点的灰度信息,以供查验。数据处理模块完成当前状态下 CCD 芯片获取图像中各像元对应灰度值的读出,并依照式(9)计算测试区域内对应空间频率处的 MTF,并显示测试区域灰度最大值、最小值的均值。

4 MTF 重复测试精度验证实验

仪器装配调试完毕后,其 MTF 测试精度可以通过与标定过 MTF 真值的 CCD 标准样片(包括驱动与处理电路)进行比对实验,并在数据处理软件中增加相应的修正因子而获得。因此影响仪器性能的主要指标是 MTF 测试的重复精度,主要由 CCD 初位置对准精度与数据解算精度共同决定。

为验证并检测仪器在测试同一片 CCD 时的重复精度,分别采用两片 Kodak KIA-4021 面阵 CCD 及驱动电路作为试样,在标校后的仪器上进行 MTF 测试,实验现场如图 11 所示。

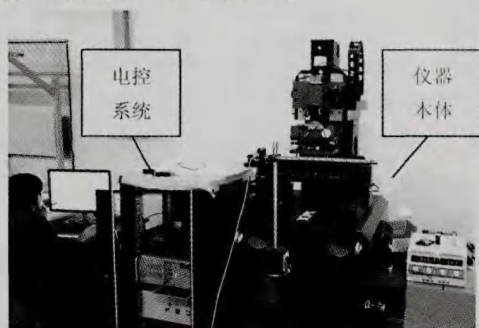


图 11 MTF 重复测试精度实验现场

Fig. 11 Experiment scene for repeatability test precision of MTF

利用软件的自动测量模式,设定每间隔 $5\ \text{mm}$ 在 CCD 面阵的不同区域共测量 30 次 MTF。每一次测量得到初位置周期内 5 个 CTF 测量值,再计算得到初位置平均调制传递函数作为一次测量值,其中测量软件控制界面如图 12 所示。

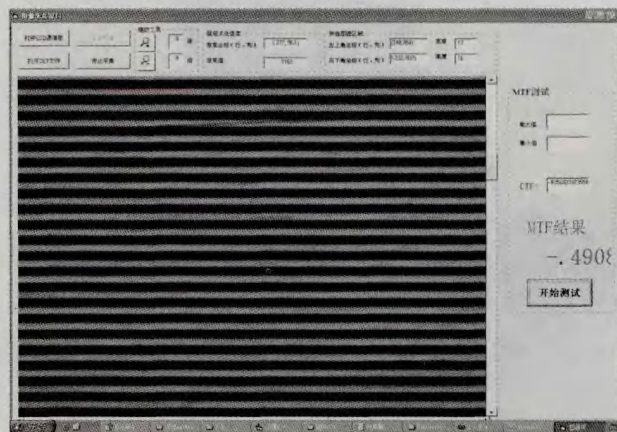


图 12 测量数据局部放大采集界面

Fig. 12 Part enlargement screen of data collected in repeatability precision testing

实验测得 2 片 CCD 各自对应的 30 组 MTF 测试结果,上述 30 次重复测量结果的分布如图 13 所示,横坐标为测量次数,纵坐标为初位置平均调制传递函数值。与图 2 中的仿真结果相比,CCD 的初位置平均调制传递函数并未随位置改变而发生大幅变化,具有较好的收敛性。此外实验结果表明,2 片 CCD 进行 30 次重复测量得到的初位置平均调制传递函数的平均值分别为 0.489 5、0.474 5,对应的测量结果极差分别为 0.021 7、0.022 3。上述实验数据表明,CCD 调制传递函数测试仪器的实际测试精度与理论分析和仿真设计结果比较吻合,其 MTF 测试重复精度与主要性能可满足新一代星敏感器研制过程中的测试需求。

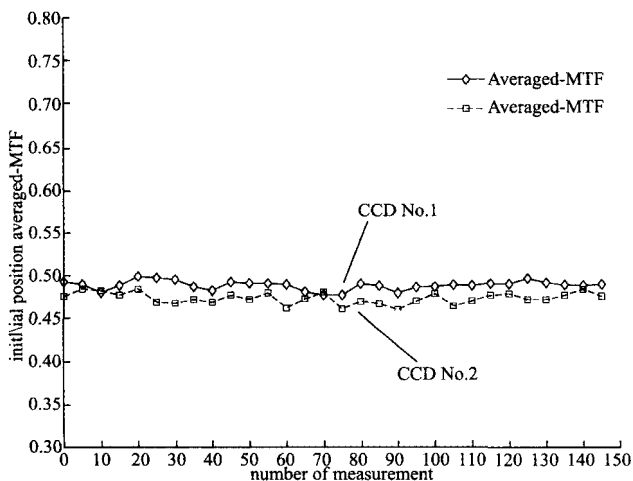


图 13 多次 MTF 测量数据分布

Fig. 13 Data distribution of multipoint in MTF testing

5 结 论

星敏感器采用面阵 CCD 凝视成像方式工作,MTF 可定量评判其探测器的成像性能。采用对比度法测量面阵 CCD 调制传递函数可靠性较高,有利于测试仪器的工程化设计。对基于对比度法的 MTF 数学模型进行分析,发现影响面阵 CCD 调制传递函数测试数据重复精度的主要因素是输入信号与像元初位置偏差引起 MTF 在固定空间频率处的数值发生改变,MTF 随初位置振荡。为此提出了初位置平均调制传递函数的概念,并且据此改进了目标靶板的设计,提出了对应的数据处理方法。

以上述统计平均思想为基础,提出了面阵 CCD 调制传递函数测试系统的工作原理与仪器设计方

案。并针对 CCD 初位置对准精度需求以及相应的自动化测试流程,提出采用气体静压导轨配合直线电机驱动、直线光栅反馈的仪器设计方案,并对三支显微成像物镜进行仿真设计。

验证仪器重复精度的实验结果表明,采用改进后的算法及论文提出的高精度导轨与位置反馈方案后,仪器对面阵 CCD 调制传递函数的测试重复精度优于 0.025。

参考文献

- [1] 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, 9(28):23-26.
QI W W, MAN Y Y, HUANG Q L. Simulation on modulation transfer function measurement of CCD camera using low frequency bar method [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 9(28):23-26.
- [2] 郑茹,张国玉,高越,等. 基于 LCOS 拼接技术的动态星模拟器光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2144-2150.
ZHENG R, ZHANG G Y, GAO Y, et al. Optical system design of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9):2144-2150.
- [3] WITTENSTEIN W, FONTANELLA J C, NEWBERY A R, et al. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging system [J]. Optica. Acta, 1982. 29(1): 41-50.
- [4] 李清军,刘志明,汪龙淇,等. 大面阵 CCD 相机图像信号模拟器的设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(10): 50-54.
LI Q J, LIU ZH M, WANG L Q, et al. Design of large area scan CCD camera signal simulator [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(10): 50-54.
- [5] 马飞,刘琦,尹娜,等. 多通道 CCD 信号模拟器实现方法研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(11): 94-96.
MA F, LIU Q, YIN N, et al. Research on design method of multi channel CCD signal simulator [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(9): 92-95.
- [6] 时丙才. 基于 LabVIEW 的半导体器件检测系统设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(11): 94-96.
SHI B C. Design of measurement system for semiconductor devices parameter based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(11):94-96.
- [7] 余达,周怀得,龙科慧,等. 一种面阵 CCD 的筛选测

- 试方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7):0708001-6.
- YU D, ZHOU H D, LONG K H, et al. Screening and testing method for area CCD[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7):0708001-6.
- [8] 宋敏, 胡家升, 李叶芳, 等. CCD 调制传递函数测量方法的改进[J]. 激光杂志, 1999, 20(3):55-57.
- SONG M, HU J SH, LI Y, et al. Improvement of the method for measuring modulation transfer function of CCD [J]. Laser Journal, 1999, 20(3):55-57.
- [9] 宋敏, 胡家升, 李叶芳, 等. 测量 CCD 传递函数的实验系统[J]. 中国激光, 1999, 26(4):327-331.
- SONG M, HU J SH, LI Y F, et al. Experimental system for measuring modulation transfer function of CCD [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(4):327-331.
- [10] BARNARD K J, ANISIMOV I, SCHEIHING J E. Random laser speckle based modulation transfer function measurement of midwires infrared focal plane arrays [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8), 083601:1-8.
- [11] 张晓琳, 杜国浩, 邓彪, 等. 刀口法高精度测量 X 射线 CCD 调制传递函数研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6):1680-1686.
- ZHANG X L, DU G H, DENG B, et al. High precision measurement of modulation transfer function for X-ray CCD with knife-edge method [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6):1680-1686.
- [12] DUCHAME ALFRED D, TEMPLE SARAH P. Improved aperture for modulation transfer function measurement of detector arrays beyond the Nyquist frequency [J]. Optical Engineering, 2008, 47(9), 093601:1-6.
- [13] LAMBERT B M, HARBOLD J M. Experimental methods for measurement of the modulation transfer function (MTF) for time-delay-and-integrate (TDI) charge coupled device (CCD) image sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7405, 74050M: 1-19.
- [14] SCHWARZER H, BOERNER A, DEGEN K H, et al. Dynamic PSF and MTF measurements on a 9k TDI CCD [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7106, 71061F: 1-7.
- [15] 杨永明, 李昕阳. 推扫式线阵 TDICCD 扫描调制传递函数分析[J]. 应用光学, 2011, 32(5):872-877.
- YANG Y M, LI X Y. Scanning modulation transfer function analysis of push-broom linear TDICCD [J]. Journal of Applied Optic, 2011, 32(5):872-877.
- [16] 程朋乐. 面向装配的微小型零件视觉检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2):151-154.
- CHENG P L. Micro-parts vision inspection technique for assembly [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(2):151-154.
- [17] 李志敏, 宋凝芳, 张倩, 等. 双路光学调频连续波干涉仪相位检测系统 [J]. 电子测量技术, 2013, 36(12):24-27.
- LI ZH M, SONG N F, ZHANG Q, et al. Dual optical frequency-modulated continuous wave interferometer phase-detection system [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(12):24-27.
- [18] LINDBERG P. Measurement of contrast transmission characteristics [J]. Opt. Acta, 1954: 80-89.
- [19] BOREMAN G. D, DERENIAK E L. Method for measuring modulation transfer function of charge coupled device using laser speckle [J]. Opt. Eng, 1986, 25(1): 148-150.
- [20] 王希军. 纳米磁微粒的激光散斑位移测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11):1018-1023.
- WANG X J. Laser speckle displacement measurement system for magnet nano-particle [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(11): 1018-1023.

作者简介

何煦, 1981 年出生, 中科院长春光机所获理学博士学位, 现为长春光机所副研究员, 主要研究方向为光电精密测试技术与现代光学测试仪器总体设计。

E-mail: 911max@sina.com

He Xu was born in 1981, and received Ph. D. from Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science (CIOMP, CAS). Now he is an associate research fellow in CIOMP. His main research field focuses on electro-optical measurement and modern optical testing instrument technology.