

文章编号 1004-924X(2008)02-0190-07

胶片摄影空间相机的动态成像质量评价

田 园^{1,2}, 韩昌元¹, 张晓辉¹, 马冬梅¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:采用光学调制传递函数(MTF)法对相机整机系统的像质及像面位置的准确标定进行了评价,并给出了详细的结果。由实验室实测均值 0.122 1 得到的在轨估计值 0.074 7 与实测均值 0.072 5 相符,证明了用胶片摄影法拍摄刀口阴影,经傅里叶变换等方法处理得到 MTF 的方法可以用来评价空间相机的动态成像质量。该方法是用实验室实测的相机动态 MTF 结果来预估相机在轨动态 MTF 及在轨摄影分辨率的有益尝试。

关键词:空间相机;动态成像;像质评价;调制传递函数(MTF)

中图分类号:V475.3 **文献标识码:**A

Evaluation of dynamic imaging quality of space film camera

TIAN Yuan^{1,2}, HAN Chang-yuan¹, ZHANG Xiao-hui¹, MA Dong-mei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: By analyzing the imaging theory of the visible light and high resolution space film camera, the imaging quality of a complete appliance system was evaluated and the position of imaging plane was exactly calibrated by a Modulation Transfer Function(MTF) method. By contrasting the theoretical value of 0.074 7 and the experimental data of 0.072 5, it is shown that the MTF method calculated by the Fractional Fourier Transfer(FFT) for knife edge shadow can be used to evaluate the dynamic imaging quality of the space camera.

Key words: space camera; dynamic imaging; imaging quality evaluation; Modulation Transfer Function (MTF)

1 引言

目前的空间相机通常有 CCD 和胶片两种摄影通道,对以胶片为图像载体的可见光高分辨率

空间相机来说,除光学系统本身的像质和胶片分辨率对相机的最终成像质量产生影响外,相机的像移补偿机构、像移速度控制系统、最佳成像焦面位置的确定等都对相机的最终成像质量产生影响,因而,进行可见光高分辨率相机最终成像质量

的评价时应应对相机整机系统(包括所有组成单元在内)进行综合像质评价。通常把采用动态摄影分辨率方法的胶片摄影成像系统的最终评价作为最终整机系统的评价指标。尽管相机的实验室动态摄影分辨率指标可以反映相机在实验室条件下的极限分辨指标,但对于相机在低空间频率下的成像质量如何并不能予以确认,尤其是不能确定特征频率下的像质情况^[1-5]。由于在轨摄影分辨率要低于实验室照相的极限分辨率,所以应该了解低空间频率下的特征频率 MTF,以便估计相机在轨照相分辨率。如何用实验室实测的相机 MTF 值预估相机在轨 MTF 是一项非常有实用价值的工作,本文对此进行了有意义的尝试,文中实验通过对刀口进行胶片摄影,采用数字傅里叶分析法计算出特征频率下的 MTF,对其整机系统做出像质评价。

2 实验方法

数字傅里叶分析法是通过测量线扩散函数 LSF(x)的一系列关于坐标 x 位置的离散抽样值,变成数字信号后,输入计算机进行傅里叶变换运算,从而求得光学传递函数的方法。获取线扩散函数 LSF(x)抽样值的方法有两种。一种方法是在像面处用一条很窄的狭缝对待测系统所成狭缝像进行扫描,透过它的光通量即为扫描到 x_k 位置处的 LSF(x_k) 值。如扫描狭缝沿 x 轴方向按间隔 Δx 进行抽样,即可得到一系列间隔为 Δx 的,位置在 x_0, x_1, \dots, x_{N-1} 处的线扩散函数抽样数据,利用这 N 个抽样数据,即可对 LSF(x) 作傅里叶变换的数值计算。获得线扩散函数的另一种方法是用刀口成像得到刀口分布函数 ESF(x),用 ESF(x) 作微分得 LSF(x)^[6-7]。

本文采用与第二种获得线扩散数值类似的方法对整机系统的动态传递函数进行测试。如图 1 所示,在实验室条件下,在平行光管焦面处,放置可移动的刀口目标,驱动控制系统可控制刀口目标的移动速度,使得刀口目标的移动速度与相机的像移补偿速度相匹配。

相机摄影后,对曝光胶片进行显影、定影及烘干等显像处理,选取曝光合适的胶片用微位移信号采样系统进行目标图像采样,可得到相机整机系统的离散刀口函数,对该离散刀口函数进行数据拟合、微分、滤波等计算,得到相机整机系统的

线扩散函数,然后对此线扩散函数进行傅里叶变换,最终可得到相机整机系统的传递函数曲线及离散的数据值。在传递函数曲线中,用插值的方法可计算出任意频率下的相机整机系统的动态传递函数值,并可由成像系统特征频率下的传递函数值确定相机的最佳焦面位置。

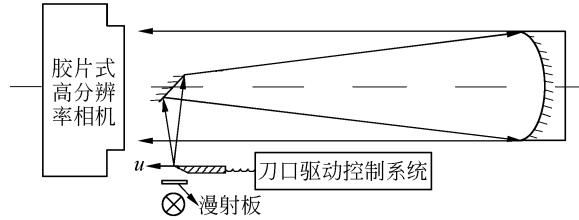


图 1 刀口摄影示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of the knife edge photography

3 数据处理

3.1 实验室胶片处理结果

选取曝光合适的胶片,用带有狭缝的微位移采样系统对胶片上的刀口图像以步长 $\Delta x = 1 \mu\text{m}$ 的距离进行灰度值采样,每移动 $1 \mu\text{m}$ 记录此时胶片上的一个灰度值,一共移动了 $80 \mu\text{m}$,有 $N = 80$ 个采样点,在实验室从 6 张刀口图像样片中取其中一片为例,其离散的灰度值经 30 阶多项式拟合后如图 2 所示。

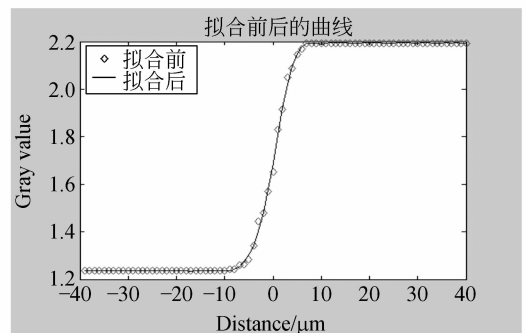


图 2 胶片上刀口函数的拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of knife edge object on film

此时得到了刀口分布函数 ESF(x),对 ESF(x) 微分则可得到此刀口的线扩散函数 LSF(x):

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

对刀口分布函数 ESF(x) 做微分、滤波等处理,得到的线扩散函数 LSF(x) 如图 3 所示。

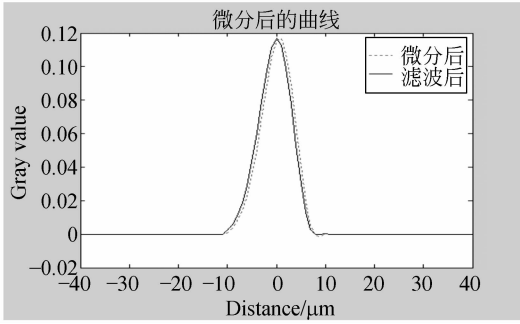


图 3 用刀口图像求得的线扩散函数

Fig. 3 LSFs by image of knife edge object

对此线扩散函数 $LSF(x)$ 做傅里叶变换,若沿 x 方向散布的线扩散函数的范围为 $x = N\Delta x$, 相应的空间频率 $\Delta f = \frac{1}{N\Delta x} = 12.5$, 则可以算出

Δf 的 n 倍空间频率 (f_n) 的光学传递函数

$$MTF(f_n) = \frac{1}{D} \sqrt{C_n^2 + S_n^2},$$

$$C_n = \sum_{k=0}^{N-1} LSF(x_k) \cos(2\pi \frac{nk}{N}),$$

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} LSF(x_k) \sin(2\pi \frac{nk}{N}), D = \sum_{k=0}^{N-1} LSF(x_k).$$

实验一共分析了 6 张刀口图像样片, 由此算出 MTF 曲线, 在所需要的 $0 \sim 125$ lp/mm 空间频率范围之内, 可按照二次线性插值或三次样条插值等方法计算出任意频率下的相机整机系统的动态传递函数值。图 4 给出了 6 张样片几个特征频率下的插值结果。

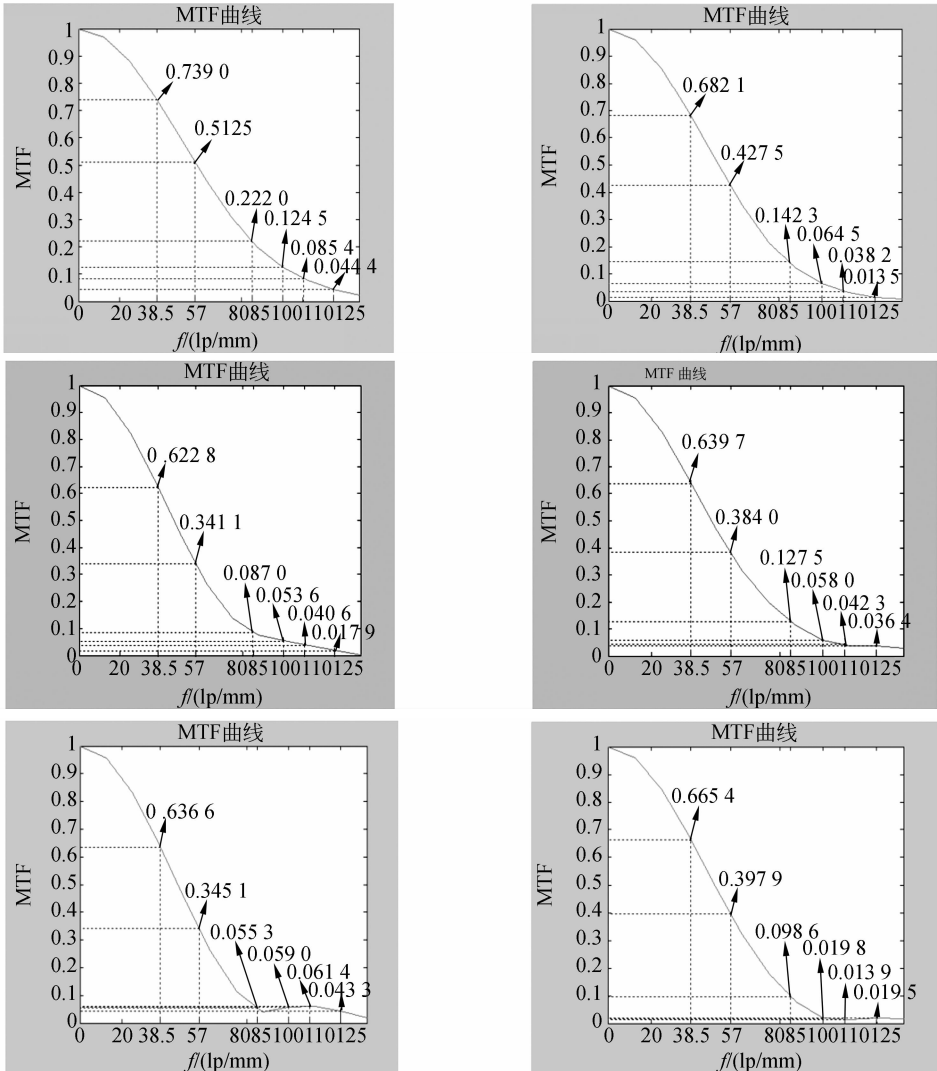


图 4 实验室动态摄影的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves of dynamic photography in a lab

6 张样片测试结果及其均值如表 1 所示,均值所拟合的 MTF 曲线如图 5 所示。MTF(38.5 lp/mm) = 0.664 2; MTF(57 lp/mm) =

0.401 3; MTF(85 lp/mm) = 0.122 1; MTF(100 lp/mm) = 0.063 2; MTF(110 lp/mm) = 0.046 9; MTF(125 lp/mm) = 0.029 2.

表 1 实验室样片测试结果
Tab.1 Testing results of samples

空间频率(lp/mm)	样片 1	样片 2	样片 3	样片 4	样片 5	样片 6	均值
38.5	0.739 0	0.682 1	0.622 8	0.639 7	0.636 6	0.665 4	0.664 2
57	0.512 5	0.427 5	0.341 1	0.384 0	0.345 1	0.397 9	0.401 3
85	0.222 0	0.142 3	0.087 0	0.127 5	0.055 3	0.098 6	0.122 1
100	0.124 5	0.064 5	0.053 6	0.058 0	0.059 0	0.019 8	0.063 2
110	0.085 4	0.038 2	0.040 6	0.042 3	0.061 4	0.013 9	0.046 9
125	0.044 4	0.013 5	0.017 9	0.036 4	0.043 3	0.019 5	0.029 2

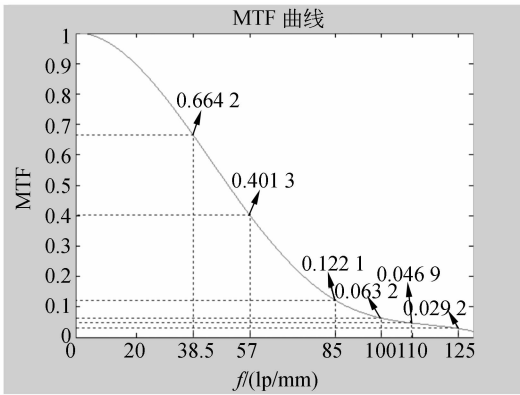


图 5 实验室实测均值的 MTF 曲线

Fig.5 Mean value MTF curve measured in a lab

在另一个焦面位置下,经过同样方法,可以得到其特征频率下对应的 MTF 值,由多个焦面的 MTF 比较,就可以得到像面位置的准确标定。

3.2 在轨胶片处理结果

用同样的方法,对相机在运行轨道中拍得的胶片进行处理,一共分析了 4 张样片,得到的 MTF 曲线如图 6 所示。

4 张样片测试结果与其均值如表 2 所示,均值所拟合的 MTF 曲线如图 7 所示。

表 2 在轨胶片测试结果
Tab.2 Testing result of films on track

空间频率(lp/mm)	胶片 1	胶片 2	胶片 3	胶片 4	均值
38.5	0.304 2	0.407 7	0.290 6	0.375 4	0.344 8
57	0.155 4	0.195 2	0.140 6	0.160 3	0.162 9
85	0.081 6	0.088 8	0.052 9	0.066 7	0.072 5
100	0.071 1	0.080 4	0.041 1	0.057 0	0.062 4
110	0.063 3	0.071 6	0.035 9	0.047 4	0.054 5
125	0.052 9	0.058 1	0.027 9	0.038 4	0.044 3

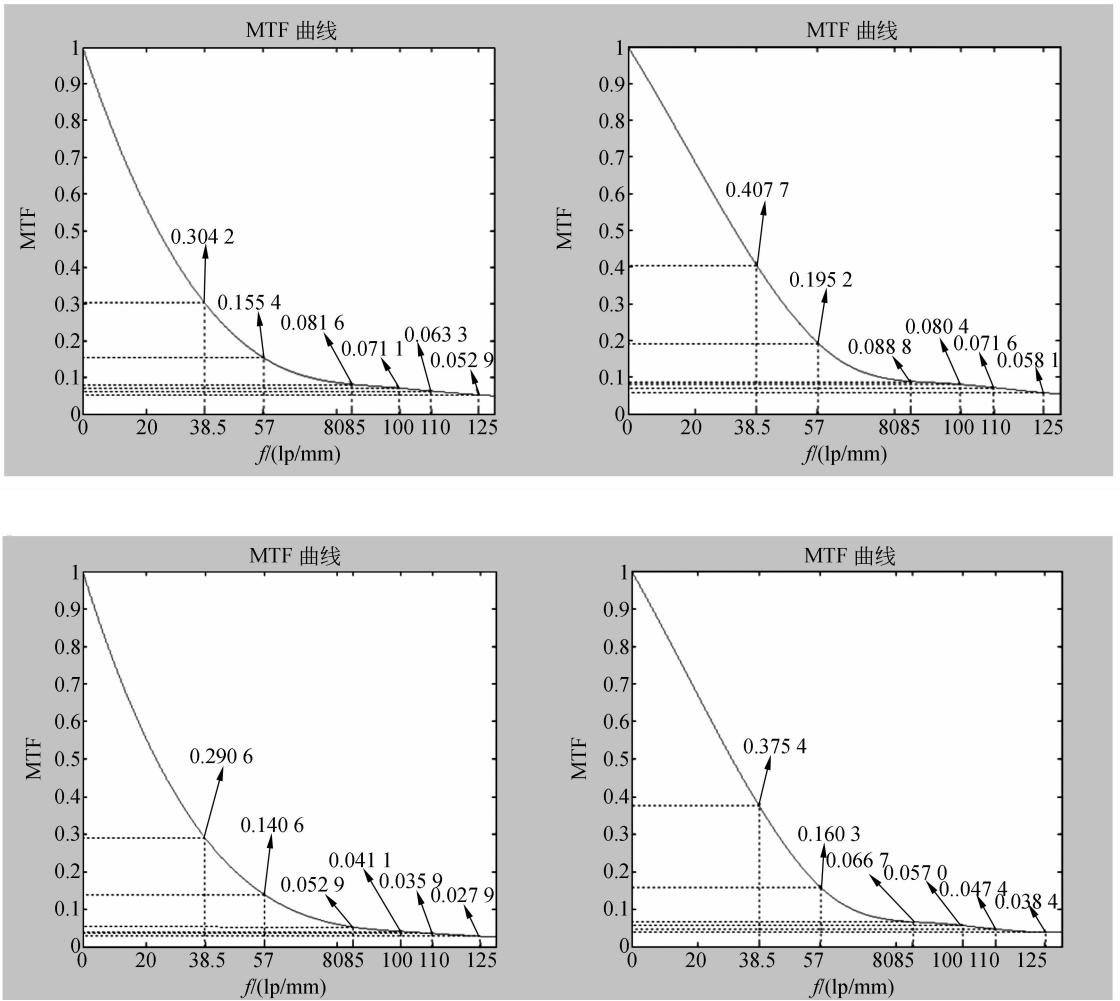


图 6 相机在轨胶片摄影 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves of film photograph on orbit

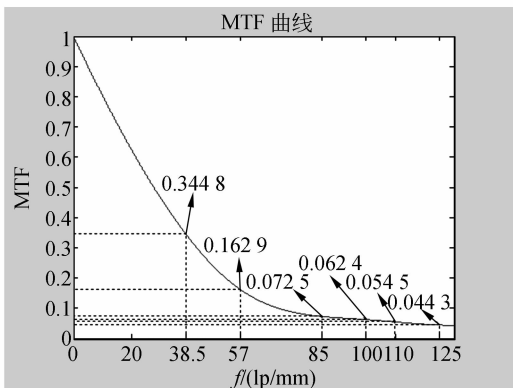


图 7 相机在轨胶片摄影均值 MTF 曲线

Fig. 7 Mean value MTF curve of film photograph on orbit

4 数据分析

相机光学设计的 MTF 曲线如图 8 所示。由于相机在轨时能够分辨 85 lp/mm, 因此需验证此空间频率下的 MTF 值。胶片成像系统相机的实验室动态传函估计值(MTF_{LE})表达式如下:

$$MTF_{LE} = MTF_{design} \cdot MTF_{process} \cdot MTF_{film} \cdot MTF_{drift} \cdot MTF_{defocus}$$

在空间频率 85 lp/mm 下, 如图 8 可得 $MTF_{design} = 0.4$, 而 $MTF_{process} = 0.85$ (经验值), $MTF_{film} = 0.53$ (实测值), $MTF_{drift} = 0.9$ (实践所得估算值), $MTF_{defocus} = 0.85$ (实践所得估算值), 因此, 相机估计的实验室动态摄影 MTF_{LE}

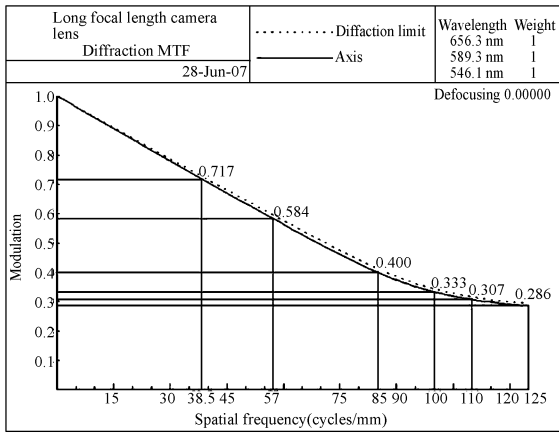


图 8 相机光学系统 MTF 的光学设计值

Fig.8 Optical design MTF value of camera optical system

(85 lp/mm)=0.4×0.85×0.53×0.9×0.85=0.1379。如图 5 所示,相机的实验室动态实测 MTF_{LM}(85 lp/mm)=0.1221(6 张样片平均值)。

相机在轨动态传递函数估计值 MTF_{OE} = MTF_L · MTF_{air} · MTF_{drift} · MTF_{defocus}

$$MTF_{air} = \frac{L_A}{L_A + L_R \cdot e^{\beta R}}$$

其中: L_A 为物体平均亮度; L_R 为霾光亮度; $\beta=3.91/V(\text{km})$; V 为大气能见度; R 为穿过大气层的厚度^[8-9]。在晴朗的天气条件下通常取 MTF_{air} = 0.8^[8-9],故在空间频率 85 lp/mm 下,由相机的实验室动态摄影估计值 0.1379 计算可得相机在轨摄影的 MTF_{OE}(85lp/mm)=0.1379×0.8×

0.9×0.85=0.0844。

又由相机的实验室动态摄影实测值 0.1221 计算可得相机在轨摄影的 MTF_{OE}(85 lp/mm) = 0.1221×0.8×0.9×0.85=0.0747。

如图 7 所示,在空间频率 85 lp/mm 下,相机在轨摄影实测的 MTF_{OM}(85 lp/mm)=0.0725。

综上可知,在空间频率 85 lp/mm 下,其由实验室所测的实测均值 0.1221 与实验室估计值 0.1379 基本相符;在轨摄影中,由实验室实测均值 0.1221 推算出的在轨估计值 0.0747 与在轨摄影的实测均值 0.0725 相符。因此,由本文所提出的评价和预估空间相机在轨动态成像质量的方法是基本可行的。

5 结 论

本文通过对胶片式可见光高分辨率相机整机系统的成像质量进行分析探讨,采用光学传递函数的方法进行相机整机系统的像质评价及像面位置的准确标定。文中说明的实验室检测可见光高分辨率相机的动态摄影传递函数及数据分析结果表明:此方法与理论估计值相符,与在轨实际拍摄值也相符,因此本文讨论的胶片摄影成像系统动态成像质量的实验室检测和评价的结果可作为预估相机在轨实测结果的依据。

参考文献:

[1] LI J ZH. Developments and achievements of optomechanical high-speed photography in China[J]. *SPIE*, 2007, 6279:62792B-1-12.

[2] SERGEEV P A, GOGOLEV Y A, ZVONKOVA V V, et al. . Collimator equipment of large optical test facility vertical for testing space telescope[J]. *SPIE*, 1995, 2478:348-358.

[3] FREDRICKSON H J. 72-inch long range oblique photography(LOROP)camera[J]. *SPIE*, 1980, 242:14.

[4] 王家骥,韩昌元. Present status of research on space optical remote sensors at CIOMP[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(3):213-222.

WANG J Q, HAN CH Y. Present status of research on space optical remote sensors at CIOMP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3):213-222.

[5] 王晓东,郝志航. 航空遥感相机成像质量的一种检验方法[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5):459-461.

WANG X D,HAO ZH H. Image quality evaluating method for the aerial remote camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(5):459-461. (in Chinese)

[6] 杨志文. 光学测量[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.

YANG ZH W. *Optical Measurement*[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,1995. (in Chinese)

[7] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春:长春出版社,1989.

HAN CH Y. *Fundamental Theory and Application of Information Optics*[M]. Changchun :Changchun Press, 1989. (in Chinese)

[8] 姜景山. 空间科学与应用[M]. 北京:科学出版社,2001.

JIANG J SH. *Space Science and Application*[M]. Beijing:Science Press,2001. (in Chinese)

[9] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,1987.

WANG ZH J. *Optical Technique Handbook*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,1987. (in Chinese)

作者简介:田 园(1978—),女,重庆江津人,博士研究生,主要研究方向为光学测试技术。E-mail:cherry_tian@yahoo.com.cn

●下期预告

小孔夫琅和费衍射法标定 CCD 光电响应特性

林晓钢¹,顾乃庭^{1,2},杨泽平²

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030;

2. 中国科学院 光电技术研究所,四川 成都 610209)

对现有的各种 CCD 光电响应特性标定方法进行对比分析后,引入小孔夫琅和费衍射的方法。推导了该法中 Airy 斑的理论相对光强分布 I/I_0 与 CCD 像素位置 n 之间的定量关系,完成了对特定面阵 CCD 光电响应特性标定实验。在数据处理过程中采用二次曲线拟合法准确获得了灰度曲线的峰值位置,实现了 Airy 斑归一化理论光强分布曲线与 CCD 实测灰度分布曲线对准,解决了这种方法的中心对准问题,得到准确的灰度峰值位置为 $n_0=404.6500$ 。获得了特定 CCD 的光电转换特性曲线。最终的标定结果经误差分析平均相对误差为 0.77%,拟合结果可靠。