

测量近红外焦平面传递函数的全反射光学系统

许中华^{1,2} 王 敬¹ 赵龙成² 王培纲¹ 方家熊¹

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 针对近红外 InGaAs 焦平面(FPA)调制传递函数(MTF)的测量要求,设计了一种全反射式 Offner 光学系统,由两块共轴的球面反射镜构成,1:1成像, F 数为 4。在焦平面工作波长 $1.7\ \mu\text{m}$ 下对光学系统进行优化,设计结果显示,在 $8\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$ 的宽视场(FOV)内任一点,空间频率 $20\ \text{lp/mm}$ 处(对应光敏元尺寸 $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$ 的焦平面的 Nyquist 频率),光学系统的 MTF 在 $1.7\ \mu\text{m}$ 达到 0.82,接近衍射限。Zygo 激光干涉仪在 $0.6328\ \mu\text{m}$ 波长下的测量结果显示,系统的波前差均方根(RMS)值在 $0.6328\ \mu\text{m}$ 约为 $1/20\ \lambda$, $20\ \text{lp/mm}$ 处 MTF 在 $0.6328\ \mu\text{m}$ 达到 0.93。将测量得到的波前差数据代入 CODEV 中计算,结果表明波长 $1.7\ \mu\text{m}$ 下系统在 $8\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$ 的视场内任一点,空间频率 $20\ \text{lp/mm}$ 处的 MTF 实验值仍高于 0.8,满足要求。

关键词 近红外;焦平面调制传递函数;全反射光学;Offner

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s116002

An All-Reflective Optical System for the Modulation Transfer Function Measurement of Near-Infrared Focal Plane Arrays

Xu Zhonghua^{1,2} Wang Jing¹ Zhao Longcheng² Wang Peigang¹ Fang Jiaxiong¹

(¹ State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To measure the modulation transfer function (MTF) of near-infrared InGaAs focal plane arrays (FPA), an all-reflective Offner optical system is designed and fabricated, which consists of two co-axial spherical mirrors, operating as a 1:1 imager with $F/\# = 4$. After optimization at the FPA working wavelength $1.7\ \mu\text{m}$, a nearly diffraction limited field of view (FOV) up to $8\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$ is obtained. The MTF at a space frequency of $20\ \text{lp/mm}$ (referring to the $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$ device's Nyquist frequency) is above 0.8 in the FOV. After fabrication and calibration of the optical system, a Zygo interferometer is used to check its performance, finding that the root mean square (RMS) of wavefront error is about $1/20$ wave at $0.6328\ \mu\text{m}$, and the $\text{MTF}@20\ \text{lp/mm}$ ($0.6328\ \mu\text{m}$), is above 0.93. Then the measured wavefront data is inputted into CODEV to calculate the MTF at $1.7\ \mu\text{m}$. The result shows that, the value of $\text{MTF}@1.7\ \mu\text{m}, 20\ \text{lp/mm}$ is still above 0.8.

Key words short wave infrared; modulation transfer function of focal plane arrays; all-reflective optics; Offner

OCIS codes 110.3080; 120.3620; 120.482; 040.3060

1 引 言

近年来,随着航天遥感和民用夜视领域的升温,红外焦平面的需求量越来越大,对器件成像质量的要求也越来越高。红外焦平面正逐步从线列发展到面阵,光敏元尺寸越来越小,规模越来越大。用于评价器件性能的传统参数,如串音、探测率、不均匀性

等,已不能很好地反映器件的综合成像性能。在可见光成像领域,调制传递函数(MTF)被广泛用于评价成像光学系统的成像质量;焦平面作为系统中一种特殊的光电元件,也可以用 MTF 来衡量^[1]。焦平面的 MTF 不仅可以反映其在成像系统中的传递特性,还与器件底层工艺参数有直接联系^[2~6]。从

收稿日期: 2011-07-11; **收到修改稿日期**: 2011-09-05

作者简介: 许中华(1986—),男,博士研究生,主要从事红外焦平面成像和测试等方面的研究。

E-mail: xzh08@mail. sitp. ac. cn

导师简介: 方家熊(1939—),男,中国工程院院士,主要从事光传感方面的研究。E-mail: jxfang@mail. sitp. ac. cn

20 世纪 90 年代起,国外已开始逐步研究用 MTF 来评价 CCD 器件^[4~7]和红外焦平面^[8,9];而国内在这方面尚处于起步阶段^[10~14]。

测量红外焦平面(FPA)的 MTF 对测试仪器的光学系统有着很高的要求:1) 成像质量要足够高,使狭缝、频率板等特征目标尽可能理想的成像在待测器件上;2) 截止频率要高于待测器件的特征频率(Nyquist 频率);3) 视场要足够大,使其能覆盖当前的近红外 InGaAs 线列探测器和未来几年面阵的测量需求;4) 易加工,易维护,测量操作简便。根据这些要求,选择由两块共轴球面反射镜构成的全反光学,即 Offner 结构^[15~17],作为成像光学系统。它是 Offner 先生为了满足半导体掩模投影成 1× 高清晰像的需要而发明的消除了三级和五级像差的光学投影系统。由于其良好的成像特性,目前被广泛用于凸面光栅成像光谱仪中。

本文针对近红外 InGaAs 焦平面调制传递函数的测量需求,研制了由共轴的一块凸面反射镜和一块凹面反射镜组成的 Offner 全反光学系统。

2 Offner 结构的成像特性

Offner 系统的光学结构如图 1 所示。主镜为凹面镜,球心为 C_p ,半径为 R ;次镜为凸面镜,球心为 C_s ,半径为 r ; C_p 和 C_s 之间距离为 δ 。1:1 成像,物和像关于光轴对称,主光线偏离光轴的距离记为 h 。 α 为入射孔径角。像面与球心所在平面略有错开,以优化像差;像面距主镜球心的距离记为 L_1 ,距次镜球心的距离记为 L_2 。主镜口径记为 D ,次镜口径记为 d 。

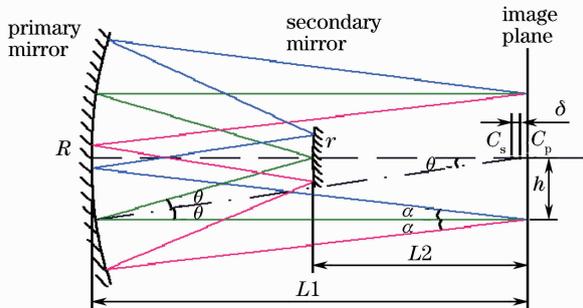


图 1 Offner 系统的光学结构

Fig.1 Optical structure of Offner relay

由于是实物成实像,在入射光线到光轴的距离 h 一定时,一束光线中仅有主光线的入射光线与出射光线平行。此时,在半径为 h 的圆环上系统理想成像。对孔径角为 α 的过物点的任意光线,其出射光线不再平行于入射光线。由于主光线垂直于物像平面,当 α 很小时,这种不平行的偏离量是很小的,

可以看作近似平行。这样就存在一个像差非常小的细环视场(FOV),即 Offner 结构的“无”像差环形视场^[18],如图 2 所示,其中心圆位置同主光线偏离光轴的距离 h 给出。在测量焦平面 MTF 时,将狭缝等特征目标放置在图 2 所示的一个矩形视场内,在相对光轴对称的另一个矩形视场内用待测器件接收特征目标的像进行分析。Offner 结构适用于对细长的像进行扫描。

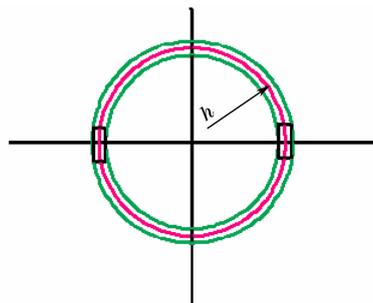


图 2 Offner 系统的视场

Fig.2 FOV of Offner relay

图 1 中,根据几何关系,有

$$\cos \theta = \frac{R/2}{r - \delta}, \quad (1)$$

$$h = R \sin \theta = R \sqrt{1 - \left(\frac{R}{2r - 2\delta}\right)^2}, \quad (2)$$

对主次镜球心略有错开的 Offner 结构,通常取 $r = R/2$,于是有

$$h = R \sin \theta = R \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R - 2\delta}\right)^2}. \quad (3)$$

在 R 确定后,选定 δ ,则 h 唯一确定。

3 Offner 光学结构设计实例

待测的 InGaAs 焦平面规格如表 1 所示。

根据上述待测器件的工作波长,选定 $1.7 \mu\text{m}$ 作为光学系统的工作波长进行结构设计。根据光敏区尺寸,为满足未来几年长线列和小规模面阵的测量需求,要求系统视场达到 $30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,使线列和面阵器件的全部光敏元置于系统的衍射受限视场内。待测的芯片中,光敏元尺寸最小为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$,对应的 Nyquist 频率为 20 lp/mm ;为保证成像质量,要求系统在视场内的任一点,空间频率 20 lp/mm 处的 MTF 高于 0.8。数值孔径(NA)值的选取要考虑两方面的因素,如果 NA 值过小,则系统衍射斑会比较大会,入射到待测芯片上的能量也会不够;如果 NA 值过大,会使得主镜的口径变大,增加面型加工和质量控制的难度,成本也会剧增。

表 1 待测的几种 InGaAs 芯片参数
Table 1 Parameters of several InGaAs FPAs to be measured

FPA	Type	Work wavelength /		Resolution	Pixel size /	Active area /
		μm				
linear	front illumination	1.7		256×1	50×50	12.8×0.1
linear	back illumination	1.7		512×1	25×25	12.8×0.05
linear	back illumination	1.7		800×1	25×800	20×3
linear	back illumination	1.7		256×1	35×500	9×1
linear	front illumination	1.36-1.39	1.58-1.64	8×1	100×100	0.8×0.2
staring	back illumination	1.7		64×16	50×50	3.2×0.8

综合考虑,选择系统的入射孔径为 1/8。

根据上述要求,使用 CODEV 软件进行光学设计。根据焦平面 MTF 测试系统对成像光学结构的尺寸要求,并考虑加工能力的限制,选择一个合适的 R 和 $r=R/2$ 作为初始结构,把次镜位置和像面位置作为变量进行设计。期间不断变换视场,反复进行优化,直到系统的视场大小和 MTF 满足设计要求。得到系统的最终结构参数为: $R=700\text{ mm}$, $r=350\text{ mm}$, $L_1=703.72\text{ mm}$, $L_2=357.57\text{ mm}$, $D=386\text{ mm}$, $d=88\text{ mm}$ 。 $\delta=3.85\text{ mm}$,由(3)式可得,细环视场的中心位置 $h=102.98\text{ mm}$ 。Offner 系统的矩形视场内,上下对称的视场点像质是相同的,选择有代表性的 9 个点作为视场点分析系统的最终性能,如图 3 所示。

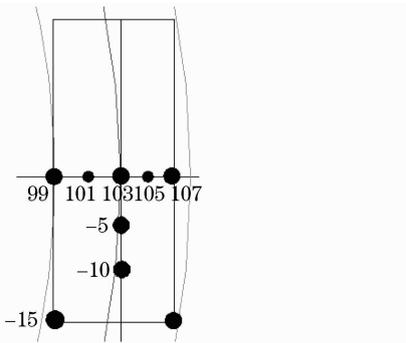


图 3 Offner 系统视场
Fig. 3 FOV of Offner relay

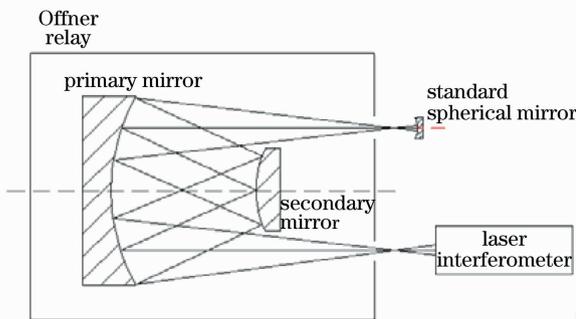


图 5 激光干涉仪测量系统波前差
Fig. 5 Measurement of wavefront error by a laser interferometer

系统的 MTF 如图 4 所示。可以看到,30 mm×8 mm 的视场范围内任一点,波长 1.7 μm 下的系统 MTF 均接近衍射限,且在空间频率 20 lp/mm 处高于 0.8,径向和切向的 MTF 差别很小,符合设计要求。

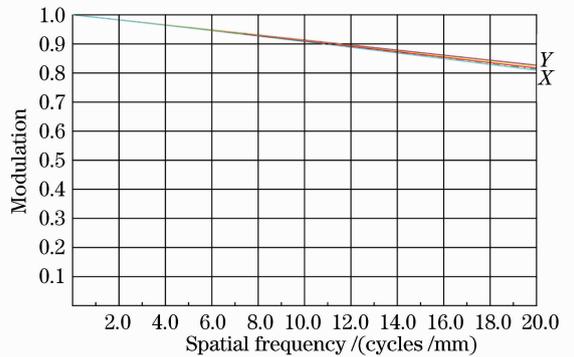
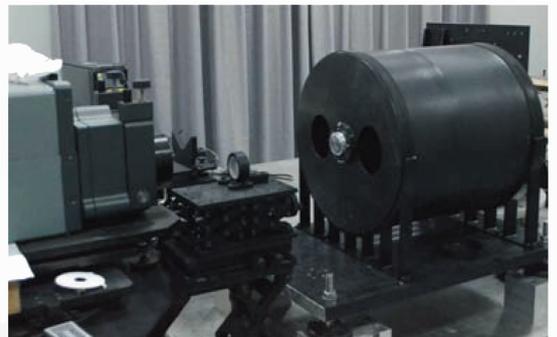


图 4 调制传递函数曲线
Fig. 4 Modulation transfer function curve

4 Offner 光学结构的 MTF 实测结果

4.1 波长 0.6328 μm 下的测量结果

利用 Zygo 公司的激光干涉仪测量光学系统的波前差,如图 5 所示,测量波长 0.6328 μm 。在实验中,不同的人操作,同一个人多次操作以及周围环境的变化,都会造成标准球面镜、Offner 系统及激光干涉仪相对位置的微小改变,带来测量结果的偶然误差。为消除偶然误差,重复测量多次。每次测量时,调整标



准球面镜和激光干涉仪的相对位置,使光学表面最高与最低处的差值[峰谷(PV)]的结果达到当次测量的最优,记录下该次的测量结果。之后,将标准球面镜和激光干涉仪的位置随机打乱,以保证接下来的测量与该次的测量不相干。测量结果如表 2 所示。表 2 中第 2 组和第 3 组数据分别代表了 9 次测量中最好和最差的结果。比较图 6(a)和图 6(b)的 MTF,可以看到,虽然两组结果的 PV 值差别显著,但 MTF 值非常接近。在空间频率 20 lp/mm 处,Offner 系统的 MTF 在 0.6328 μm 高于 0.93。

表 2 测量结果

Table 2 Results of the measurement

No.	PV / λ	RMS / λ
1	0.367	0.055
2	0.365	0.054
3	0.525	0.071
4	0.465	0.065
5	0.485	0.063
6	0.444	0.060
7	0.392	0.062
8	0.427	0.057
9	0.463	0.065

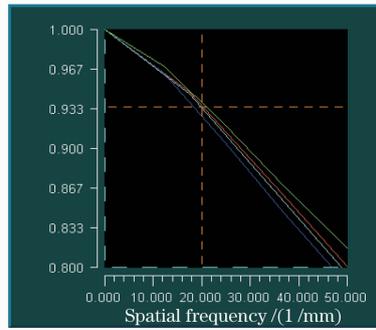
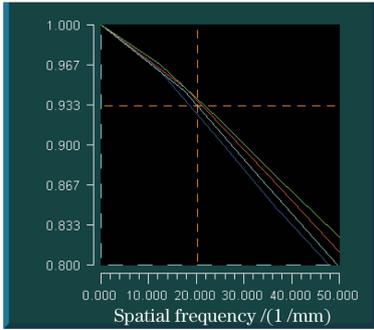


图 6 (a) PV 为 0.365 时的 MTF 曲线,(b) PV 为 0.525 时的 MTF 曲线

Fig. 6 (a) MTF curve when PV is 0.365, (b) MTF curve when PV is 0.525

4.2 波长 1.7 μm 下的 MTF 数值

对波长 0.6328 μm 下的 MTF 测试数据进行换算,来得出波长 1.7 μm 下的 MTF 实验数值。

对反射式系统,由于无色差存在,波长 1.7 μm 下的系统波前差与波长 0.6328 μm 下的波前差数据一致。将激光干涉仪测得的 9 组出瞳波前差数据(.INT 文件)输入到 CODEV 软件中,换算成波长 1.7 μm 下的等效波前差数据后加在出瞳上,就可以算出波长 1.7 μm 下光学系统加工装校后的实际 MTF 数据。

从图 7 中可以看到,各视场处的 MTF 接近衍射限,空间频率 20 lp/mm 处的 MTF 高于 0.8。与

图 4 列出的设计结果相比,不同视场间的差别略有增大,径向和切向的 MTF 差别亦有增大,可能是因为装校位置和 design 位置有微小偏移导致像差增大所致。总体而言,装校后的系统满足当前的测量要求。

根据特征目标相对 Offner 系统的实际安装位置,在矩形视场中间位置选择一视场($X=103, Y=5$)的 MTF 作为参考 MTF,如图 8 所示。在测量器件 MTF 时,将该组 MTF 从总的测量结果中剔除,以消除光学系统的影响。

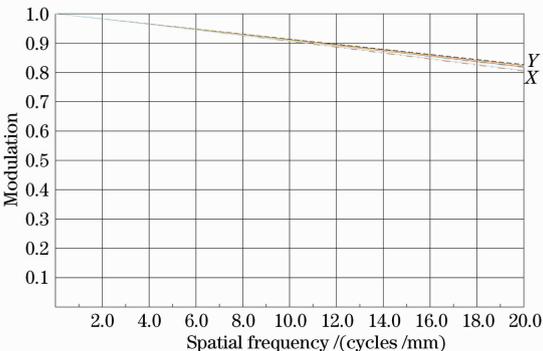


图 7 在 1.7 μm 测得的 MTF

Fig. 7 Measured MTF at 1.7 μm

L/RE	DIFFRACTION LIMIT		FOCUS POSITION	
	Formula	Actual	X	Y
0.999	.999	.999	.999	.999
1.991	.951	.991	.991	.991
2.983	.983	.983	.983	.983
3.974	.974	.974	.974	.974
4.966	.965	.965	.965	.965
5.957	.957	.957	.956	.956
6.948	.948	.948	.947	.948
7.940	.939	.939	.939	.939
8.931	.931	.931	.930	.930
9.923	.922	.922	.921	.922
10.914	.913	.913	.912	.913
11.906	.905	.905	.903	.904
12.897	.896	.896	.894	.896
13.888	.888	.888	.885	.887
14.880	.879	.879	.877	.878
15.871	.870	.870	.868	.870
16.863	.862	.862	.859	.861
17.854	.853	.853	.850	.852
18.846	.844	.844	.841	.843
19.837	.836	.836	.832	.835
20.829	.827	.827	.823	.826

图 8 $X=103, Y=5$ 视场下在 1.7 μm 处的 MTF
Fig. 8 MTF of the field $X=103, Y=5$ at 1.7 μm

5 结 论

本文针对近红外 InGaAs 线列和面阵焦平面 MTF 的测量需求,研制了由共轴的一块凸面反射镜和一块凹面反射镜组成的 Offner 全光学系统。设计结果表明,对于 $1.7\ \mu\text{m}$ 波长,在 $30\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$ 的宽视场内,空间频率 $20\ \text{lp/mm}$ 处的光学系统 MTF 大于 0.8,接近衍射限。对加工组装后的镜组进行检验,其波前差均方根(RMS)值约为 $1/20\ \lambda$ (在 $0.6328\ \mu\text{m}$ 下)。在 $30\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$ 的宽视场内, $1.7\ \mu\text{m}$ 波长下的 MTF 实验值在空间频率 $20\ \text{lp/mm}$ 处高于 0.8,与设计结果一致。该全反射式 Offner 光学系统已使用于在建的 InGaAs 焦平面 MTF 测试系统中。

参 考 文 献

- 1 A. H. Lettington, Q. H. Hong, J. Macdonald *et al.*. Measurement of the MTF and the MRTD for focal plane arrays[J]. *SPIE*, 1993, **1969**: 217~224
- 2 M. Estrieau, P. Magnan. Pixel crosstalk and correlation with modulation transfer function of CMOS image sensor[J]. *SPIE*, 2005, **5677**: 98~108
- 3 S. G. Chamberlain, D. H. Harper. MTF simulation including transmittance effects and experimental results of charge-coupled imagers[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1978, **ED-25**(2): 145~154
- 4 D. H. Seib. Carrier diffusion degradation of modulation transfer function in charge-coupled imagers[J]. *IEEE Electron Devices*, 1974, **ED-21**(3): 210~217
- 5 E. G. Stevens. A unified model of carrier diffusion and sampling aperture effects on MTF in solid-state image sensors[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1992, **ED-39**(11): 2621~2623
- 6 Wolf Buchtemann. Modulation transfer function of extrinsic Si-detector arrays affected by optical crosstalk[J]. *IEEE Electron Devices*, 1980, **ED-27**(1): 189~193
- 7 B. M. Lambert, J. M. Harbord. Experimental methods for measurement of the modulation transfer function (MTF) for time-delay-and-integrate (TDI) charge coupled device (CCD) image sensors[J]. *SPIE*, 2009, **7405**: 74050M1
- 8 M. M. Coakley, G. D. Berthiaume, E. J. Ringdahl *et al.*. Optical performance measurements of large IR focal plane arrays for GOES[J]. *SPIE*, 2000, **4135**: 129~139
- 9 A. Lengwonus, P. Erichsen. MTF measurement of infrared optical systems[J]. *SPIE*, 2009, **7481**: 74810V
- 10 Gong Faquan. Study on optical modulate transfer function of CCD and its measuring method [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002
公发全. CCD 光学调制传递函数及检测方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002
- 11 Zhang Zhiheng. Study on measurement system and technique of infrared focal plane arrays[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2004
张志恒. 红外焦平面阵列 MTF 测试系统和技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004
- 12 Ma Weihong. Study of MTF measurement technique based on image analysis[D] Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005
马卫红. 基于图像分析的光学传递函数测试技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005
- 13 Chen Bing. Study on measurement technology of cooled HgCdTe Infrared focal plane arrays[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2002
陈冰. HgCdTe 致冷红外焦平面阵列 MTF 测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002
- 14 Wang Xiaoguo, Tan Zhao, Li Zeren *et al.*. The study on the factors effecting CCD modulated transfer function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 830~833
江孝国, 谭肇, 李泽仁等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 830~833
- 15 A. Offner. New concepts in projection mask alligners[J]. *Opt. Engng.*, 1975, **14**: 130~132
- 16 A. S. Complete. Analysis of a two-mirror unit magnification system, part 1 and 2[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**: 3943~3956
- 17 R. J. Chambers, D. J. Lawrie, D. W. Warren *et al.*. Reimaging system for evaluating high-resolution charge-coupled device (CCD) arrays[J]. *SPIE*, 1991, **1488**: 312~326
- 18 Huang Yuanshen, Ni Zhengji. Research of the concentric three-reflection optical system[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(2): 42~46
黄元申, 倪争技. 同心三反射镜光学系统研究[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(2): 42~46

栏目编辑: 殷建芳