

文章编号 1004-924X(2012)12-2619-07

# 双向大视场消畸变低温红外目标模拟光学系统设计

赵文才\*, 马 军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了选择合适的低温红外目标模拟光学系统,针对国内现有离轴三反射光学系统多存有弧矢视场较大,子午视场很小的问题,本文基于光学系统对称性法则,设计了子午和弧矢都为 $5^\circ$ ,波长为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的矩形双向大视场离轴三反系统,其焦距为 $400\ \text{mm}$ , $F\#$ 为 $8$ 。利用光学系统结构参数和反射镜的非球面系数,调整三镜的偏心及倾斜来消除畸变及其它像差,系统光学传递函数在 $6.5\ \text{lp/mm}$ 时优于 $0.71$ ,全视场均方根波像差达到 $\lambda/250$ ,均方根最大弥散斑半径不超过 $7.0\ \mu\text{m}$ ,达到衍射极限。另外,系统在各个谱段全视场范围内的最大畸变量小于 $0.04\%$ 。设计的系统可用于红外及可见波段,成像质量均良好。

**关键词:**红外目标模拟;光学设计;离轴三反射系统;大视场;消畸变

**中图分类号:**TH703;TN216 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2619

## Design of cryogenic infrared target simulation system with bidirectional and wide field for eliminating distortion

ZHAO Wen-cai\*, MA Jun

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

\* Corresponding author, E-mail: wencaizhao@yahoo.com.cn

**Abstract:** To overcome the shortcomings of off-axis Three Mirror Anastigmatic (TMA) optical systems in larger sagittally FOVs and smaller meridionally FOVs, this paper designs a bidirectional TMA optical system for cryogenic infrared target simulation system based on the symmetric rule of optical system. Both the sagittally and meridionally FOVs are  $5^\circ$ , the larger FOV optical system at  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  has a focal length of  $400\ \text{mm}$  and a  $F$  number of  $8$ . By using the structural parameters of the optical system and the non-spherical coefficients of the mirrors to adjust and correct the eccentric and tilt of the three-mirror and to eliminate distortion and other aberrations, the system shows that the MTF is better than  $0.71$  at  $6.5\ \text{lp/mm}$ , the aberration of the whole FOV is  $\lambda/250(\text{RMS})$  and the maximum radius of diffuse point is less than  $7.0\ \mu\text{m}(\text{RMS})$ , which achieves diffraction limit. Moreover, the maximum distortion in the whole FOV is less than  $0.04\%$ . Finally, it proves that the optical system has good imaging quality both in the visible and infrared spectral regions.

**Key words:** infrared target simulation; optical design; off-axis Three Mirror Anastigmatic(TMA) system; wide field; eliminating distortion

收稿日期:2012-07-21;修订日期:2012-08-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20100524);科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

## 1 引言

红外目标模拟系统主要是将红外模拟目标及复杂背景通过光学系统成像为无穷远目标,以研究目标在不同速度及轨迹下的运动规律。由于该系统通常工作在真空低温(100 K)环境中,其光学系统的透镜材料和机械结构易发生收缩,透射材料的折射率亦会减小,这些对光学系统的成像质量影响很大,其中影响最大的是材料折射率。例如:锗的  $dn/dt$  为  $0.000\ 396/^\circ\text{C}$ ,BK7 玻璃的  $dn/dt$  为  $3.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。对比可知,红外透射材料的  $dn/dt$  要比普通玻璃高两个数量级,因此,低温环境下不适合应用红外透射系统。同轴反射系统的视场受其结构的限制,致使其观测的画幅太小;同时,系统的中心遮拦会导致调制传递函数(MTF)急剧下降,从而影响系统的分辨率<sup>[2-4]</sup>。

离轴反射系统因具有大视场,无遮拦,高系统分辨率,同时可抑制杂光等优点而备受业界推崇,已经成为空间遥感领域的研究热点<sup>[5-7]</sup>。国际上,已有的离轴三反射光学系统基本都采用长条形视场,即弧矢视场较大,子午视场很小,其中,美国 Santabra 研究中心所设计的离轴三反光学系统<sup>[8]</sup>的视场角为  $1.5^\circ \times 0.6^\circ$ ,法国 3S 项目采用的三反光学系统<sup>[9]</sup>的线视场角为  $8.4^\circ$ 。国内西安光机所设计的大视场离轴三反射面非共轴光学系统<sup>[10]</sup>视场为  $16^\circ \times 2^\circ$ 。近年来,成像光谱仪的前置光学系统也采用了离轴三反光学系统,具有代表性的有美国海军 NEMO 卫星上应用的 COIS<sup>[11]</sup>,其线视场角为  $2.5^\circ$ ;英国 Sira 公司的 CHRIS<sup>[12]</sup>,其线视场角为  $0.553^\circ$ ,国内的离轴三反光学系统<sup>[13-14]</sup>线视场角可达  $10^\circ$ ,但这些光学系统的子午视场都很小,即使是圆形视场,其视场角一般也不超过  $3^\circ$ <sup>[15-17]</sup>,其原因是子午视场的像差非常难于校正。

本文基于离轴三反光学系统设计了一个矩形双向大视场、消畸变低温红外目标模拟光学系统,系统的谱段为  $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ ,子午和弧矢都为  $5^\circ$ ,其成像质量可以达到衍射极限。

## 2 应用要求和指标确定

红外目标模拟系统的技术指标要求如表 1 所示。

表 1 红外目标模拟系统的技术指标要求  
Tab. 1 Technical requirements of infrared target simulation system

技术参数	设计要求
光谱波段	$3 \sim 5\ \mu\text{m}$
应用环境	低温 100 K
视 场	$5^\circ \times 5^\circ$
角分辨率	$< 0.25\ \text{mrad}$
畸 变	$< 0.1\%$
通光口径	50 mm

首先确定系统的相对孔径,主要考虑以下条件:(1)受艾里斑大小及入射能量的限制,相对孔径不能太小;(2)受光学系统结构尺寸及设计难度的制约,相对孔径也不宜过大。

艾里斑的物理直径计算公式为:

$$\phi = 2.44\lambda F^\#, \quad (1)$$

式中: $\phi$ 为艾里斑的物理直径, $\lambda$ 为波长, $F^\#$ 为光学系统相对孔径的倒数。这里取  $F^\# = 8$ ,因此相对孔径为  $1/8$ 。根据相对孔径计算系统的焦距为  $f' = 400\ \text{mm}$ 。

艾里斑的角直径可以由式(2)表示:

$$\gamma = \frac{2.44\lambda}{D}, \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为艾里斑的角直径, $\lambda$ 为波长, $D$ 为光学系统的通光口径<sup>[1]</sup>。

根据系统的技术指标要求,取  $\lambda = 4\ \mu\text{m}$ ,通过公式(2)可计算出  $\gamma = 0.195\ \text{mrad}$ ,可知满足角分辨率  $\theta$  小于  $0.25\ \text{mrad}$  的要求。

根据艾里斑角直径和系统焦距,确定系统的分辨率为  $78\ \mu\text{m}$ 。因此,光学系统的 Nyquist 频率为  $6.5\ \text{lp/mm}$ 。

为满足表 1 中的技术指标要求,本系统采用离轴三反光学系统的设计。

### 3 光学系统设计及设计结果

#### 3.1 初始结构设计

$5^\circ \times 5^\circ$  的矩形大视场给光学系统的设计带来了很大难度,因为视场越大,彗差、场曲、像散、畸变等影响越大,尤其是畸变量,它与视场角的 3 次方成正比。另外,随着视场的增大,子午视场方向上的轴外像差会急剧变大,这也是到目前为止离轴三反光学系统的圆视场最大为  $3^\circ$  的主要原因<sup>[18-19]</sup>。

根据文献[2]和[20],以共轴三反光学系统成像理论为基础求解光学系统的初始结构参数,如表 2 所示。此时,6.5 lp/mm 的 MTF 在 0.3 左右,畸变为 2%,但存在较大的彗差和像散。

表 2 光学系统初始结构参数

Tab.2 Initial parameters of optical system

s	R/mm	d/mm	Conic
Primary	-826.5	-192.5	-2.64
Secondary	-275.95	195.7	-0.428
Tertiary	-414.3	-327.46	0.21

#### 3.2 光学系统设计及优化

根据初始结构参数,经过反复摸索对光学系统进行设计及优化。

次镜设为系统光阑位置,尽量使主镜和三镜与光阑结构对称。当主镜和次镜的间隔与三镜和次镜的间隔趋于相等时,彗差、像散和畸变都有不同程度的改善。然后,为 3 个反射镜选择合适的半径,不但可校正场曲  $S_N^{[2]}$ ,而且可消除部分像散,半径关系为:

$$1/r_1 + 1/r_3 = 1/r_2. \quad (3)$$

由于每个非球面系数对某种像差相对敏感,每个非球面系数的变化对系统像差的影响都是关联的,因此,利用二次非球面系数  $k_1$  来控制子午球差,用  $k_2$  来控制子午彗差和场曲的平衡,  $k_3$  来控制彗差和像散的平衡。

调整主镜和次镜到合适间隔,以控制高级球差和高级像散,因它们是相互矛盾的。

根据以上设计方法,选择一次成像三反射光

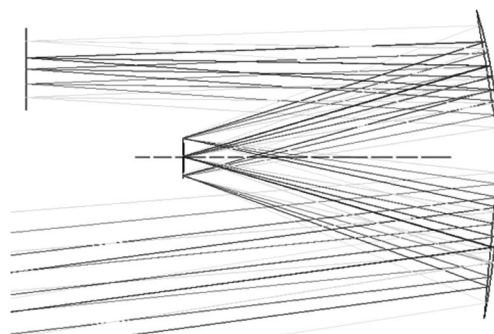


图 1 光学系统图

Fig.1 Structure of optical system

学系统的初始结构,然后根据技术指标要求和成像质量评价逐步优化,得到光学系统的最终结构如图 1 所示,系统的参数如表 3 所示。

由此可知,系统成像质量在空间频率 6.5 lp/mm 处,MTF 优于 0.71,均方根波像差为  $\lambda/250$ ,最大畸变接近 0.05%,像元弥散斑的均方根半径均小于  $7.0 \mu\text{m}$ 。

表 3 光学系统结构参数

Tab.3 Parameters of optical system

s	R/mm	d/mm	Conic	Sixth order coefficient
Primary	-651.255	-170	-2.107	$8.023 \times 10^{-11}$ , $-1.979 \times 10^{-15}$
Secondary	-238.658	170	-1.118	—
Tertiary	-370.826	-254.69	0.494	$1.183 \times 10^{-14}$ , $1.225 \times 10^{-14}$

#### 3.3 影响像质及畸变的几个主要参数

影响像质和畸变的参数很多,本文只分析倾斜、偏心及非球面高次项系数的影响。为说明问题又能表达实质,本文所述像质以最大视场  $2.5^\circ \times 5^\circ$  (子午和弧矢) 的 MTF 为代表,畸变以中心波长畸变为主。

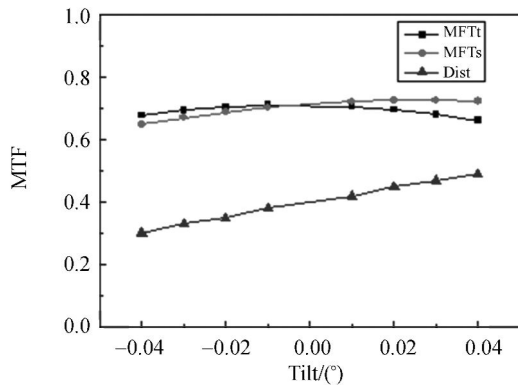
倾斜、偏心及非球面高次项系数对像质和畸变会有不同程度的影响。在设计中发现, X 轴的倾斜对像质的影响较小,对畸变的影响较大,如图 2(a) 所示,而 Y, Z 轴的倾斜对像质和畸变几乎无影响; X 轴的偏心对像质影响较大,对畸变无影响, Y 轴的偏心对弧矢方向的 MTF 稍有影响,对子午方向的 MTF 和畸变影响都很强烈,如图 2

(c)和(d)所示;主镜非球面高次项系数的影响不明显,但三镜非球面四次项系数对弧矢方向的 MTF 稍有影响,且对子午方向的 MTF 和畸变影响较大,如图 2(b)所示。

### 3.4 光学系统设计结果

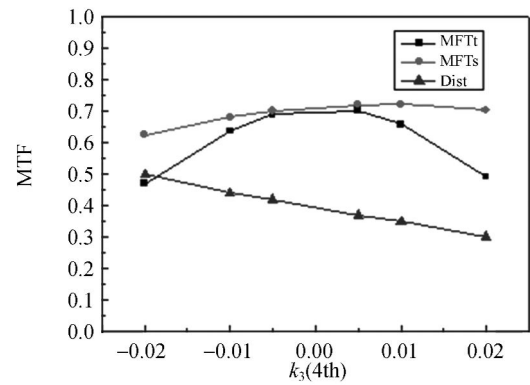
综上所述,由于不同参数对像质和畸变的影响可以相互补偿,因此通过平衡各参数可再次提高像质,最终确定 Y 轴偏心为 0.25 mm, X 轴倾斜  $0.03^\circ$ ,三镜四次方系数由 1.183 变化为 1.178,六次项也做了相应调整,由 1.225 变化为 1.260。由图 3(a)可知,系统的 MTF 在整个波段和全视

场范围内能达到衍射极限,在空间频率 6.5 lp/mm 处,MTF 优于 0.714。从图上也可看出,各谱段各视场的传递函数曲线非常集中,这说明系统的像差几乎消除。由图 3(b)可知,系统在整个波段和全视场范围内的均方根波像差为  $\lambda/250$ ,成像完善。从光学系统畸变场分布图 3(c)可知,在整个波段和全视场范围内光学系统的最大畸变小于 0.04%,远低于技术指标要求的 0.1%。由系统各个视场的弥散斑分布图 3(d)可知,光学系统的像元弥散斑的均方根半径最大为  $6.6 \mu\text{m}$ ,远远小于艾里斑半径  $19.5 \mu\text{m}$ ,可以说是完善成像。



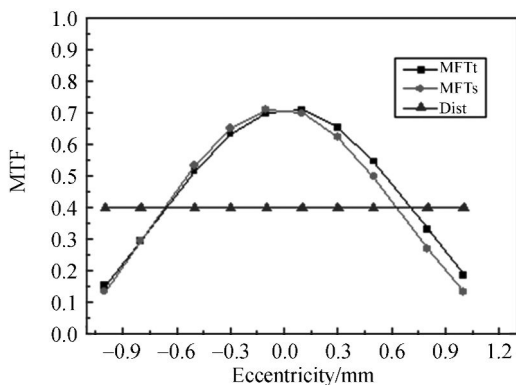
(a) 像质和畸变随 X 轴倾斜的变化

(a) Changing of imaging quality and distortion with X axis tilt



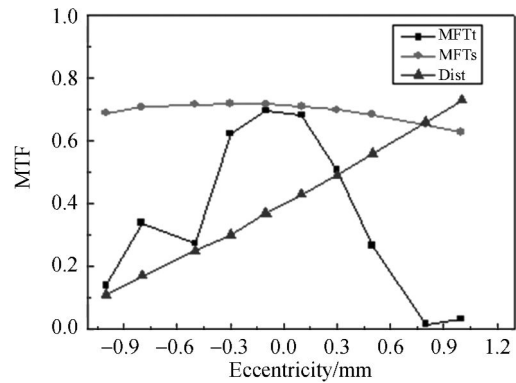
(b) 像质和畸变随非球面高次项的变化

(b) Changing of imaging quality and distortion with aspherical higher order terms



(c) 像质和畸变随 X 轴偏心的变化

(c) Changing of imaging quality and distortion with X axis eccentricity

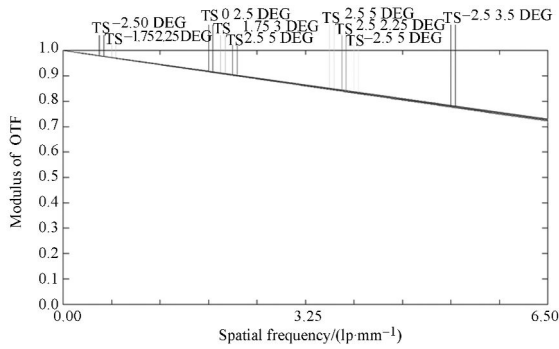


(d) 像质和畸变随 Y 轴偏心的变化

(d) Changing of imaging quality and distortion with Y axis eccentricity

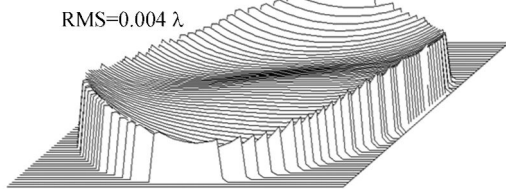
图 2 像质和畸变随参数的变化

Fig. 2 Changing of imaging quality and distortion with parameters



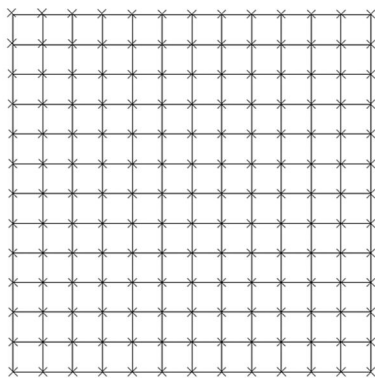
(a) 光学系统的 MTF 曲线

(a) MTF curves of optical system



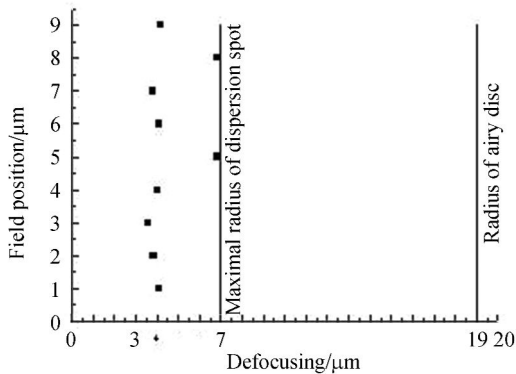
(b) 边缘视场波像差图

(b) Wave front map in margin of FOV



(c) 网格畸变

(c) Grid distortion



(d) 不同视场的弥散斑分布

(d) Dispersion spot distribution in different FOVs

图 3 光学系统成像质量

Fig. 3 Imaging quality of optical system

与光学系统初始结构相比,优化后系统的成像质量有大幅度的提高。

在光学系统结构参数相同的条件下,将光谱波段 3~5 μm 变为可见光波段 0.48~0.65 μm,光学系统的 MTF 在空间频率 44 lp/mm 时大于 0.714,如图 4 所示,与红外波段的 MTF 几乎相当。在整个波段和全视场范围内,光学系统波像差最大为 λ/40,其畸变和弥散斑没有任何变化,这说明此系统在可见光波段也能完善成像。

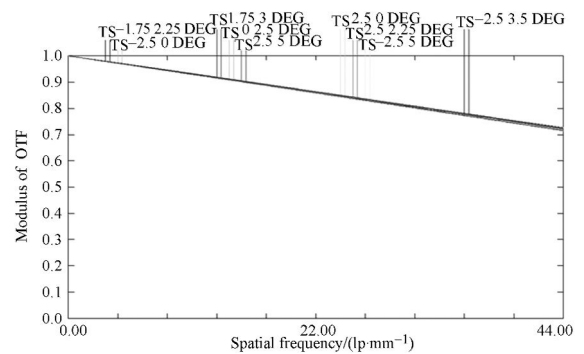


图 4 可见光波段的传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of optical system in visible light

### 4 结 论

本文采用离轴三反射光学系统完成了双向大视场消畸变低温红外目标模拟系统的设计。根据光学系统对称性法则,利用光学系统结构参数和反射镜的非球面系数,调整三镜的倾斜和偏心以消除畸变及其它像差,设计出了子午和弧矢双向均为 5°的大视场光学系统。设计的光学系统在各个谱段全视场范围内光学系统的成像质量优良,能达到衍射极限,畸变小于 0.04%,完全满足系统的技术指标要求。由于该系统在低温、红外谱段使用,基于其反射光学系统的特点,其光学镜坯和支撑结构需采用相同的材料,以减小折射率随温度的巨大变化及透镜和结构的相对膨胀对成像质量的影响。

## 参考文献:

- [1] FISCHER R E, TADIC-GALEB B. *Optical System Design* [M]. McGraw-Hill, 2000:43-47,250-254.
- [2] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004:21-37,130-141.  
PAN J H. *Design, Fabrication and Testing of Optical Asphere* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004:21-37,130-141. (in Chinese)
- [3] 史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. 光学精密工程, 1999, 10(2):16-24.  
SHI G H. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 10(2):16-46. (in Chinese)
- [4] 吴煜, 薛鸣球. 长焦距反射式光学系统研究[J]. 光学学报, 1991, 11(7):646-650.  
WU Y, XUE M Q. Study of long focal length all reflective optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(7):646-650. (in Chinese)
- [5] 刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6):0622004-1-4.  
LIU X M, XIANG Y. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6):0622004-1-4. (in Chinese)
- [6] 郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9):2680-2683.  
GUO Y X, LI Y C, LIANG T M, *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9):2680-2683. (in Chinese)
- [7] 赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(12):2837-2843.  
ZHAO W C. Design of improved off-axial TMA optical systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2837-2843. (in Chinese)
- [8] FIGOSKI J W. Development of three-mirror wide-field sensor from paper design to hardware [J]. *SPIE*, 1989, 1113:126-133.
- [9] BRCT-DIBAT T, ALBOUYS V, BERTHON J, *et al.*. Yest of a high resolution three mirror anastigmat telescope [J]. *SPIE*, 2000, 3870:128-137.
- [10] 杨建峰, 安葆青, 薛鸣球. 大视场三反射面非共轴光学系统研究[J]. 光子学报, 1997, 26(3):277-281.  
YANG J F, AN B Q, XUE M Q. Study on uncoaxial all-reflective system with large field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(3):277-281. (in Chinese)
- [11] WILSON T, DAVIS C. Naval earth map observer (NEMO) satellite [J]. *SPIE*, 1999, 3753:2-11.
- [12] CUTTER A M, HILL S. Compact high-resolution imaging spectrometer(CHRIS) design and performance [J]. *SPIE*, 2004, 5546:2-11.
- [13] 李欢, 向阳. 10°远心离轴三反消象散望远系统的 光学设计[J]. 光子学报, 2009, 38(9):2256-2259.  
LI H, XIANG Y. Design of 10° FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9):2256-2259. (in Chinese)
- [14] 薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大市场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8):0822001-1-6.  
XUE Q SH, HUANG Y, LIN G Y. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8):0822001-1-6. (in Chinese)
- [15] LAMPTON M L, SHOLL M J. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes [J]. *SPIE*, 2007, 6687:66870S-1-8.
- [16] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4):315-318.  
CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4):315-318. (in Chinese)
- [17] 卜江萍, 田维坚, 杨小君, 等. 一种新型离轴三反式光学系统的设计[J]. 光子学报, 2006, 35(4):608-610.  
BO J P, TIAN W J, YANG X J, *et al.*. A novel design of off-axis three-mirror reflective optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(4):608-610. (in Chinese)
- [18] 王虎, 苗兴华, 惠彬. 短焦距大视场光学系统的畸变校正[J]. 光子学报, 2001, 30(11):1409-1412.  
WANG H, MIAO X H, HUI B. The distortion correct of short focus wide-angle optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11):1409-1412. (in Chinese)
- [19] 李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9):2657-

2661.

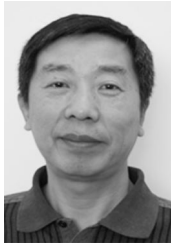
LI X Y, LI Y C, MA ZH, *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9):2657-2661. (in Chinese)

[20] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军. 离轴三反射镜光学系统研

究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4):706-709.

SONG Y F, SHAO X P, XU J. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4):706-709. (in Chinese)

#### 作者简介:



赵文才(1963—),男,吉林长春人,博士,研究员,主要从事光学系统设计、加工和检验等方面的研究。E-mail: wencaizhao@yahoo.com.cn



马 军(1961—),男,吉林长春人,研究员,主要从事精密光学检测、光学仪器设计等方面的研究。E-mail: majun@ciomp.ac.cn

#### ●下期预告

## 多级投影式集成成像三维显示视场角拓展技术

张 雷,杨 勇,赵 星,方志良,袁小聪

(南开大学 现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

提出了一种基于多级投影方法的大视场角三维集成成像系统。该系统利用多个投影仪并联投射不同级次的元素图像阵列,并进行三维重构,从而获得大视场角的集成成像再现像。与传统的集成成像视场角拓展技术相比,本文所提方法具有系统结构简单、无需场镜等辅助光学器件、可用于大尺寸集成成像显示系统的优点。光学实验结果表明,提出的多级投影式集成成像显示系统的再现像视场角为 $\pm 35^\circ$ ,而传统的集成成像系统的视场角仅为 $\pm 12^\circ$ ,本文所提方法获得的视场角是传统方法的 2.92 倍,视场角拓展效果明显。