文章编号　1004-924X(2011)12-2837-07

改进的离轴三反光学系统的设计

赵文才*
(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:基于离轴三反光学系统(TMA)的一般设计方法,总结了设计要点。以两个基于三反光学系统的设计为实例,阐述了通过合理地安排光学结构、将次镜设计为球面反射镜、主镜和三镜在球面基础上改变高次非球面系数等,可使离轴三反光学系统的设计结果接近衍射极限,传递函数在 50 lp/mm 时都接近 0.6,Strehl 率由通常的 0.91 提高到 0.93。与传统离轴三反系统相比,相机加工公差和面形加工公差从原来的 λ/50 放宽到 λ/40,主、次、三镜的装调公差放宽了 4 倍。文中的设计降低了相机的加工及装调难度,有助于系统光学特性实现衍射极限,为三反光学系统的广泛应用提供了借鉴和实用参考。

关　键　词:空间光学遥感器;光学设计;离轴三反光学系统;光学加工;光学装调
中图分类号:TP73;TH703　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/OPE.20111912.2837

Design of improved off-axial TMA optical systems

ZHAO Wen-cai*

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: wencaizhao@yahoo.com.cn*

Abstract: The key design of off-axial Three-mirror Anastigmat(TMA) systems was summarized, and an improved design of the off-axial TMA optical systems was proposed with a new optical structure. By taking two designed systems for examples, the optical elements of the TMA system were reasonably arranged, the secondary mirror was designed as a spherical surface, and the primary and the third mirrors were optimized with high-order aspheric coefficients. Obtained results show that the Modulation Transform Function(MTF) curve of the designed system approaches to the optical diffraction limit with an improved value of 0.6 at the spatial frequency of 50 pl/mm. Compared with the common off-axial TMA optical system, the Strehl ratio can be increased from 0.91 to 0.93. The surface tolerance is relaxed from λ/50 to λ/40, and the assembling tolerances of the primary mirror, second mirror and the third mirror can be relaxed by a factor of 4. The improved design makes the manufacture and assembly of the off-axial TMA optical system much easier, and helps the system to achieve excellent performance in the level of optical diffraction limit. These are beneficial to the popularization of off-axial TMA optical systems.

收稿日期:2011-04-19;**修订日期**:2011-05-10.
基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20100524)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Key words: space borne remote sensor; optics design; off-axial Three-mirror Anastigmat(TMA) system; optical manufacture; optical assembling

1 引 言

无论在军事还是民用领域，高分辨率空间遥感都有广阔的应用前景，目前其主要形式仍是通过光学相机对地观测。由于大孔径折射和折反式光学系统都需采用特殊光学材料或复杂的结构来消二级光谱[1]，使其应用受到一定的限制。而反射光学系统由于具有不产生色差，适用于宽光谱成像；光路可折叠，便于缩短筒长使结构紧凑；各反射面可采用非球面，利于提高像质和减少零件数，实现系统轻量化；对温度变化不敏感，同时具有空气中和真空中焦面位置一致等特性，而特别适用于空间环境。因此，反射光学系统已经广泛应用于空间遥感器中[2-4]。尤其是离轴三反光学系统(Three-mirror Anastigmat，TMA)通过各反射面的非球面设计及其间隔等参数的调整，可以达到消像差和平像场的要求，而且系统的体积小、质量轻、热稳定性好且近年来加工和装调工艺日臻成熟，所以在空间遥感领域得到了广泛的应用。不过由于受到设计、加工和检测等方面的制约，离轴 TMA 系统的快速发展还是受到限制。如在抛光阶段必须通过补偿器和干涉仪控制其加工过程和最终检验，补偿器的加工和装调难度较大，尤其是凸非球面次镜的加工和检验更加困扰着科技工作者[5-7]。若次镜材料为透射材料，可以采用背部检测，但对材料的应力均匀性、稳定性都要求极高。为了提高反射镜材料的性能，近年来都采用 SiC 材料，但 SiC 材料只能采用 Hindle 或衍射光学方法检测，而 Hindle 球不仅加工困难，而且成本很高，用 Hindle 球检测次镜的光路调整也较繁琐和困难。如果采用衍射光学方法检测，中心光轴的调整又是一大难题[8]。

不难看出，三反系统的设计和加工有待改进和提高，本文提出了改进的三反系统的光学设计方法，在保证成像质量达到衍射极限的同时，使得系统中 3 个反射镜的加工和检测难度都大大降低，系统的装调也更加方便，从而为三反光学系统的广泛应用提供了借鉴和实用参考。

2 光学系统参数的确定

在空间光学遥感领域中，为了更多和清晰地获取地物信息，需要进一步提高光学系统的地面覆盖范围和地元分辨率。光学系统的地元分辨率与其角分辨率和卫星高度成比例。卫星的高度一定，增大光学系统的角分辨率就可以有效地提高地元分辨率；保持相对孔径一定，增长焦距使入瞳直径增大，从而提高地元分辨率。另一方面，光学系统的地面覆盖范围与卫星高度和视场角成比例，卫星高度一旦确定，增大光学系统的视场角可以使地面覆盖范围扩大。

遥感相机的地元分辨率由光电传感器的像元尺寸，轨道高度及光学系统的焦距决定，如下式所示：

$$GSD=\frac{Ha}{f'}\ , \tag{1}$$

式中：GSD 为地元分辨率；H 为轨道高度；f' 为光学系统焦距；a 为传感器的像元尺寸。由瑞利判据可得，光学系统的艾利斑由光学系统的 $F^{\#}$ 决定[9]，即

$$\psi=2.44\lambda F^{\#}\ , \tag{2}$$

式中 $F^{\#}$ 为光学系统的相对孔径的倒数，即：

$$F^{\#}=f'/D\ , \tag{3}$$

式中 D 为光学系统的口径。地面的覆盖宽度将由空间相机的有效视场角 2ω 决定，当轨道高度 H 一定时，地面覆盖宽度 Q 由式(4)决定：

$$Q=2\times H\times\tan\omega\ , \tag{4}$$

式中：Q 为地面覆盖宽度，ω 为半视场角。接收器像元大小 a 与光学系统的艾利斑大小 ψ 存在如下关系是允许的[10]，

$$a=(0.7\sim0.8)\psi\ . \tag{5}$$

对于共轴三反光学系统，在各种像差校正良好的情况下最大视场角基本在 3°左右。为避免中心遮拦，将主镜和第三镜进行了偏心和倾斜，以便扩大光学系统视场，从而增加地面覆盖宽度。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

卫星轨道高度为 1 000 km，像元分辨率为 5 m，像元大小为 10 μm，地面覆盖宽度为 268 km，并考虑光学系统采用推扫成像方式时，根据上述 5 个公式确定光学系统的主要参数如下：焦距 2 000 mm，相对孔径 1/8，视场角 17°，离轴角 4.5°；像面接收器在垂直方向采用线阵列 TDI CCD。

3　设计思想

离轴三反光学系统是在共轴三反光学系统初始结构参数的基础上，经离轴优化得到的，因而，要通过共轴三反光学系统求解初始结构参数，求解的步骤诸多文献都有介绍[11-12]，这里不再赘述。

光学系统结构简图如图 1 所示。全反射光学系统不产生色差，在系统中，共有 8 个变量（3 个反射面的半径，3 个二次非球面系数和 2 个镜面间隔）来校正 5 种像差：球差、彗差、像散、场曲和畸变，同时可兼顾其高级量的校正。场曲（S_{IV}）的校正是如下考虑的。由于在如图 1 所示的结构中，各面对 S_{IV} 的贡献量的大小只与各面的半径成反比，主镜和三镜产生的 S_{IV} 与次镜产生的 S_{IV} 符号相反，因此选择 3 个合适的半径 r_1, r_2, r_3，并使其满足下式关系，即可校正 S_{IV}。

$$1/r_1+1/r_2=1/r_3. \tag{6}$$

剩下球差、彗差和像散 3 种单色像差，是利用主镜、次镜和三镜的 3 个二次非球面系数来消除的，从而使所有像差都得到校正。加大各镜间隔及各镜焦距，有利于降低高级像差，但由此也加大了系统体积和重量，因此，要在满足结构要求的前提下来尽量控制高级像差[13-14]。

本文的两种设计其次镜均为球面，这是因为凸非球面的加工和检验一直困扰着加工者，是限制该系统应用的一个因素。而次镜设计为球面，不仅克服了凸非球面加工和检验的困难，同时也大大降低了装调的难度。文中第二种设计的加工工艺性和检测工艺性更佳，除了凸次镜为球面外，第一镜和第三镜均设计为偶次非球面，且二次圆锥曲面系数 k_1 和 k_3 为零，只保留高次四次和六次项，通过高次项间的平衡来保证成像质量。由于二次圆锥曲面系数 k_1 和 k_3 为零，大大放宽了加工和装调公差，从而降低了非球面加工和装调的难度，为很好地实现设计指标提供了保证。

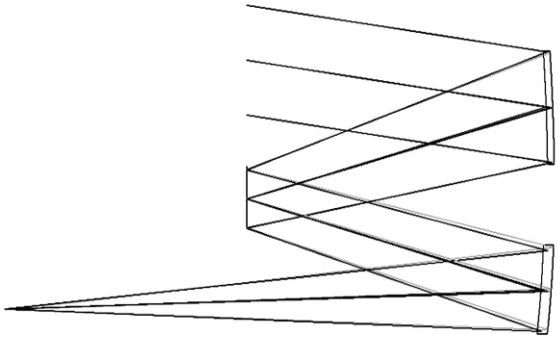


图 1　光学系统简图

Fig. 1　Schematic diagram of optical system

上述设计为一次成像系统，优化时，以 3 个反射镜的镜面参数和镜间隔为优化参数，根据结构约束设置边界条件。

4　设计举例

如上文所述，系统要求焦距 $f'=2\ 000$ m，相对孔径 $D/f'=1/8$，视场角为 17°，离轴角为 4.5°。系统的观测波段为可见光波段（0.5～0.7 μm），探测器为像元为 10 μm 的 TDI CCD。光学系统 1 的主要结构参数如表 1 所示。

表 1　光学系统 1 参数

Tab. 1　Parameters for optical system 1

	半径 R/mm	间隔 d/mm	材料	k	高次项系数（6th）	高次项系数（8th）
主镜	−4 335.30	−1 148.00	SiC	−1.72	1.60×10^{-19}	-3.49×10^{-25}
Stop	−1 388.60	1 148.00	SiC	0		
三镜	−2 006.60	−1 437.34	SiC	0.17	-1.59×10^{-18}	1.98×10^{-24}
像面	infinity					

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

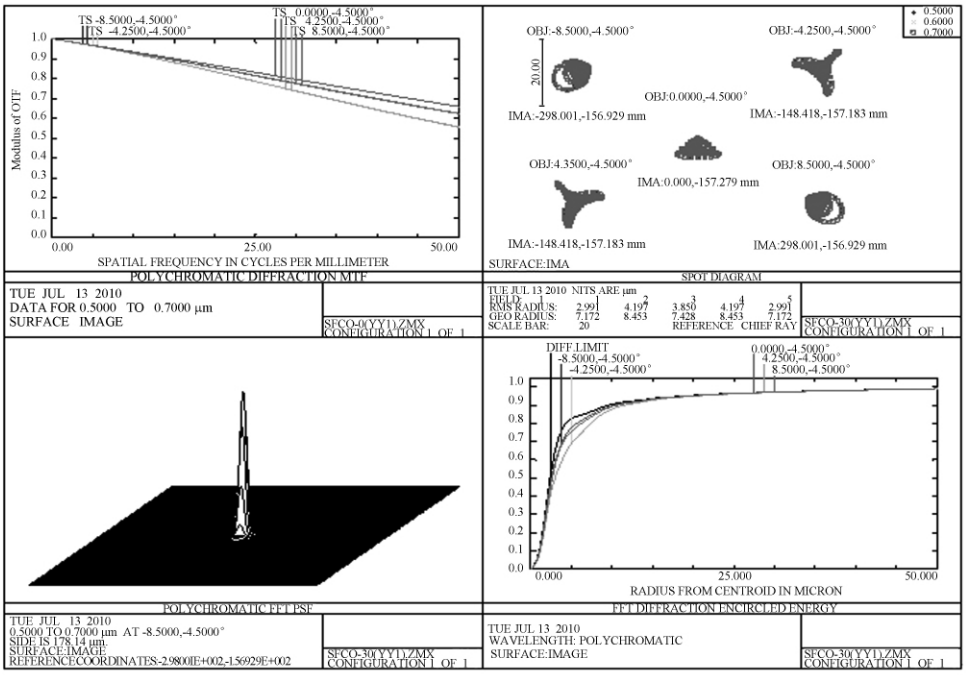


图 2 离轴系统 1 的性能曲线图

Fig. 2 Performance charts of off-axis system 1

系统中主镜和三镜均采用非球面，主镜为含六次项和八次项的高次双曲面，三镜为含六次项和八次项的高次扁椭球面，次镜为球面，因此容易加工和检验，同时会降低装调难度。

光学系统 1 的性能曲线如图 2 所示，可以看到在全谱段、全视场范围内，在 Nyquist 频率下，光学系统传递函数设计值接近 0.6，达到了衍射极限。从点列图、点扩散函数、能量分布图可以看出，能量比较集中，成像质量较好。

表 2 光学系统 2 参数

Tab. 2 Parameters for optical system 2

	半径 R/mm	间隔 d/mm	材料	k	高次项系数(4th)	高次项系数(6th)
主镜	−4 394.98	−1 275.00	SiC	0	1.96×10^{-12}	4.76×10^{-20}
Stop	−1 343.34	1 275.00	SiC	0		
三镜	−1 900.06	−1 273.09	SiC	0	-3.54×10^{-12}	-1.51×10^{-18}
像面	infinity					

进一步优化结构和参数后，可得到系统的第二种设计结果，系统主要结构参数如表 2 所示。可以看到，除保持次镜为球面外，主镜和三镜的二次圆锥曲面系数 k_1 和 k_3 为零，只保留四次和六次高次项。因此，可在球面基础上通过数控加工手段铣磨面型，铣磨面型后进行抛光，通过合理的工艺实施控制抛光过程，以保持铣磨的非球面面型不变；然后，用波前重构测量法进行面型检测，此时的面型精度不需要补偿器，可以直接用波前重构测量法进行检测，从而控制加工，进一步降低了加工和检测的难度，同时给装调提供了极大的方便，有助于使光学特性达到衍射极限。

光学系统 2 的性能曲线如图 3 所示，可以看到在全谱段、全视场范围内，在 Nyquist 频率下，光学系统传递函数设计值亦接近 0.6，系统达到了衍射极限，成像性能与系统 1 相同。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

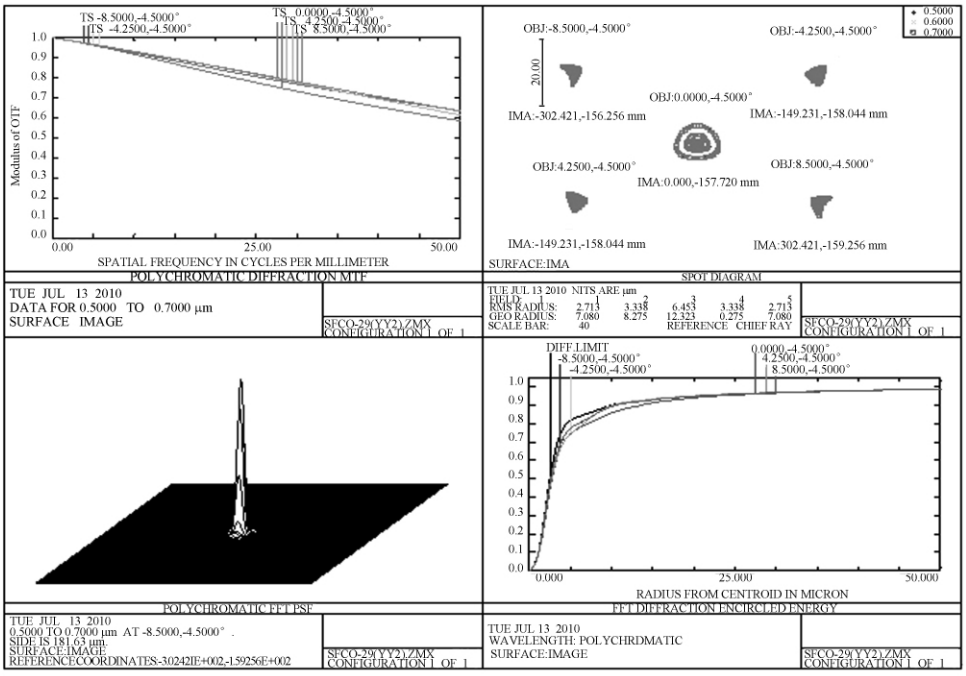


图 3　离轴系统 2 的性能曲线图

Fig. 3　Performance charts of off-axis system 2

5　相机加工和装调公差分析

表 3 列出了系统 1、系统 2 在相同技术指标下与常用离轴三反系统的光学元件加工公差的比较,可以看出,除了 ΔR 外,系统 1 和系统 2 的 Δk 和面形误差均方根值(rms)均比常用系统宽松,且加工难度有所降低。公差以传递函数作为评判标准,具体是以加入公差的系统传递函数值不低于原始系统传递函数值 0.01～0.03 作为标准。

表 3　光学元件加工公差比较

Tab. 3　Optical element machining tolerance of two TMA systems

光学元件	名称	面形参数公差		面形公差
		ΔR(mm)	Δk	均方根值 rms $\lambda=632.8$ nm
主镜	系统 1	±4.5	0.008	$\lambda/40$(子口径)
	系统 2	±2.0	0.003	$\lambda/40$(子口径)
	通常系统	±2.5	0.001	$\lambda/50$(子口径)
次镜	系统 1	±0.7	—	$\lambda/45$(子口径)
	系统 2	±1.2	—	$\lambda/45$(子口径)
	通常系统	±1.0	0.002	$\lambda/50$(子口径)
三镜	系统 1	±1.2	0.001	$\lambda/40$(子口径)
	系统 2	±0.7	0.000 6	$\lambda/40$(子口径)
	通常系统	±1.0	0.000 3	$\lambda/50$(子口径)

表 4 列出了系统 1、系统 2 及相同技术指标下常用系统的光学元件装调公差比较,可以看出,系统 1 和系统 2 的装配公差均比相同技术指标下常用系统宽松得多,亦即大幅度降低了相机装调难度。

图 4 和图 5 曲线分别表示了系统 1 和系统 2 的公差与光学系统传递函数的关系,横坐标为系统传递函数,纵坐标为公差累计概率。通过计算可知,这两个系统公差比较宽松,公差累计概率为 100%时,系统传递函数亦接近 0.6,说明可降低加工和装调的难度,有助于系统实现衍射极限。

系统 2 的优势是由于主镜和三镜在球面基础上加高次项,因而加工时其非球面顶点半径能够控制得非常准确,系统的结构参数也能够准确控制,对提高加工与装调效率和提高光学系统质量有很大优势。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表4 相机装调公差对比

Tab. 4 Optical element assembling tolerance of two TMA systems

光学元件	位置公差类型	系统装调公差		
		系统1	系统2	常规系统
主镜	X方向偏心公差	0.1	0.1	0.05
	Y方向偏心公差	0.1	0.1	0.05
	Z方向位置公差	1.5	2.5	0.20
	绕X轴倾角/(″)	10	10	6
	绕Y轴倾角/(″)	10	10	6
	绕Z轴旋转/(″)	20	50	6
次镜	X方向偏心公差	0.20	0.10	0.05
	Y方向偏心公差	0.20	0.10	0.05
	Z方向位置公差	1.5	1.1	0.20
	绕X轴倾角/(″)	10	10	8
	绕Y轴倾角/(″)	10	10	8
三镜	X方向偏心公差	0.1	0.2	0.05
	Y方向偏心公差	0.10	0.20	0.05
	Z方向位置公差	1.5	1.4	0.20
	绕X轴倾角/(″)	10	15	6
	绕Y轴倾角/(″)	10	15	6
	绕Z轴旋转/(″)	15	20	8

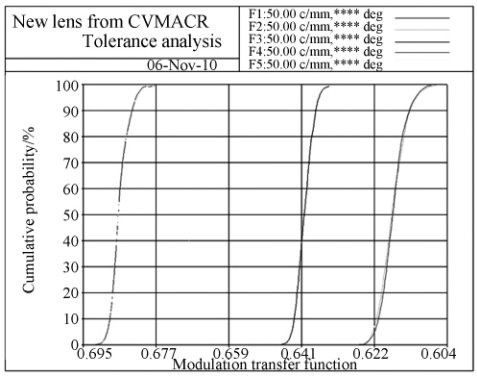


图4 系统1公差与传递函数曲线图

Fig. 4 Tolerance & MTF charts of TMA system 1

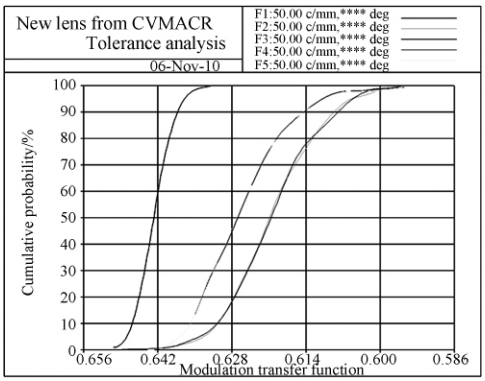


图5 系统2公差与传递函数曲线图

Fig. 5 Tolerance & MTF charts of TMA system 2

6 结 论

本文基于离轴三反光学系统的一般设计方法，讨论了设计要点，并给出了两个设计实例。系统采用离轴的方法，避开了中心遮拦，可以取得较好的像质。两个设计实例都含有球面，工艺性好、容易加工、特别是凸次镜设计为球面，减少了加工和检验的难度，有利于实现光学系统装调。其中第二个设计实例，进一步优化结构和参数后，主镜和三镜的二次圆锥曲面系数均为零，只保留四次和六次高次项，主镜和三镜可在球面基础上进行加工，加工和装调的难度进一步降低。设计结果表明，传递函数在50 lp/mm时都接近0.6，Strehl比率由通常完善设计的0.91提高到0.93。与常用离轴三反系统相比[2-3,12-13]，相机加工公差和面形加工公差从原来的1/50放宽到1/40，主、次、三镜的装调公差放宽4倍，从而有助于系统实现衍射极限，为三反射光学系统的广泛应用提供了借鉴和实用参考。

参考文献：

[1] 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(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 (2): 16-24. (in Chinese)

[2] 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 (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 (4): 315-318. (in Chinese)

[3] JURANEK H J, SAND R, SCHWEIZER J, *et al.*. Off axis telescope-the future generation of earth observation telescopes [J]. *SPIE*, 1998, 3439: 104-115.

[4] 刘磊，李景林，吕清涛，等. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. 光学 精密工程，2005(Z1)：134-137.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

LIU L, LI J L, LÜ Q T, *et al*.. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005(Z1): 134-137. (in Chinese)

[5] **王鹏,赵文才,胡明勇,等.离轴凸非球面的** Hindle **检测**[J]. **光学精密工程**, 2002(2): 139-142.
WANG P, ZHAO W C, HU M Y, *et al*.. Hindle testing of the off-axis convex asphere surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002(2): 139-142. (in Chinese)

[6] **赵文才,王鹏,何宗平,等.大口径凸球面透镜的补偿检验**[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2003(12): 1509-1512.
ZHAO W C, WANG P, HE Z P, *et al*.. Compensating test of large convex spherical lens [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2003(12): 1509-1512. (in Chinese)

[7] **郝沛明.凸非球面加工**[J]. **光学学报**, 1991, 11(10): 931-937.
HAO P M. Fabrication of the convex asphere surfase[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(10): 931-937. (in Chinese)

[8] **康果果,谢敬辉,张浩,等.非球面检测中衍射光学补偿器的校准定位研究**[J]. **光子学报**, 2009, 38(6): 1473-1476.
KANG G G, XIE J H, ZHANG H, *et al*.. Alignment of diffractive optical compens ator used for aspheric test[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1473-1476. (in Chinese)

[9] FISCHER R E. *Biljang Tadic-Galeb. Optical System Design* [M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 45.

[10] **林大建.工程光学系统设计**[M]. **北京:机械工业出版社**, 1987: 431-432.
LIN D J. *Engineering Optical System Design* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987: 431-432.

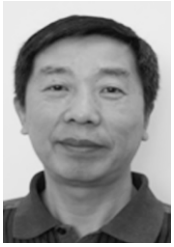
[11] **潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验**[M]. **苏州:苏州大学出版社** 2004: 130-138.
PAN J H. *Design, Fabrication and Testing of Optical Asphere* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 130-138. (in Chinese)

[12] **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(4): 706-709.
SONG Y F, SHAO X P, XU J. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008(4): 706-709. (in Chinese)

[13] **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)

[14] **韩昌元.高分辨力空间相机的光学系统研究**[J]. **光学 精密工程**, 2008(11): 2164-2171.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008(11): 2164-2171. (in Chinese)

作者简介:



赵文才(1963—),**男,吉林长春人,研究员**,1987 **年于长春理工大学获得学士学位**,1993 **年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位**,2004 **年于中科院研究生院获得博士学位,主要从事光学系统设计、加工和检验的研究**。E-mail: wencaizhao@yahoo.com.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net