

宽幅离轴三反光学系统研究

林 晶 崔庆丰 朱 浩

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 通过对离轴三反光学系统结构特点和像差特性的研究,在光学系统适当的位置引入了自由曲面,设计了焦距为 1000 mm, F 数为 7, 视场为 $20^\circ \times 10^\circ$ 的宽幅离轴三反光学系统。该系统在空间频率为 50 lp/mm 处的调制传递函数值均大于 0.49。与以往采用推扫成像的模式相比,该系统实现了画幅成像模式,使得探测器的选择更加广泛。该系统与其他三反射光学系统相比,主要优点是可以获得更宽的成像视场,可提升遥感器的成像质量。

关键词 成像系统;离轴三反;自由曲面;调制传递函数

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0722002

Research of Broad Width off-Axis Three Mirror Optical System

Lin Jing Cui Qingfeng Zhu Hao

(Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Through the study on the structural features and aberration characteristics of the off-axis three mirror optical system, a freeform surface is used in the appropriate location of the system. A broad width off-axis three mirror optical system is designed, with focal length of 1000 mm, F -number of 7, field of view of $20^\circ \times 10^\circ$. The modulation transfer function of this optical system is higher than 0.49 at spatial frequency of 50 lp/mm. Compared with the previous pushbroom imaging model, this optical system realizes frame imaging model, so the choice of detector is more extensive. Compared with other three mirror optical systems, the main advantage of this broad width off-axis three mirror optical system is that it can obtain a wider imaging field of view, enhancing the quality of remote sensor imaging.

Key words imaging system; off-axis three-mirror; freeform surface; modulation transfer function

OCIS codes 110.0110; 220.4830; 080.4035; 120.4820

1 引 言

相比于透射式、折反射式光学系统离轴三反光学系统不产生色差、可以做到大孔径且没有中心遮挡,具有光谱范围宽、光学系统可折叠、易于轻量化以及对温度和气压变化灵敏度低等特点,广泛应用在军事和民用领域^[1-3]。对于离轴三反光学系统,紧凑的结构和像质接近衍射极限的高性能设计是是必不可少的。离轴三反光学系统从 20 世纪 90 年代开始,在多个国家的卫星光学有效载荷中得到应用并快速发展起来^[4-5];特别是空间光学遥感领域,对光学系统分辨率的要求越来越高。因此对宽幅离

轴三反光学系统研究是十分必要的。

目前关于离轴三反光学系统的文献中,已经有相关学者提出了离轴三反光学系统初始结构的求取方法^[6-7]以及离轴三反光学系统应用于不同场合的优化设计^[8-9],但对宽视场离轴三反光学系统进行分析 and 讨论的报道不多。本文通过对离轴三反光学系统结构特点和像差特性的研究,设计了一个结构紧凑、像质优良的矩形视场离轴三反光学系统。此结构实现了画幅成像模式,更好地发挥了离轴三反光学系统的优势,为离轴三反光学系统的广泛应用提供了一定的参考。

收稿日期: 2013-01-09; 收到修改稿日期: 2013-03-13

作者简介: 林 晶(1986—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: linjing060212614@163.com

导师简介: 崔庆丰(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事衍射光学及光学设计等方面的研究。

E-mail: qf_cui@163.com(通信联系人)

2 共轴三反光学系统理论研究

离轴三反光学系统初始结构的设计是在共轴三反光学系统的基础上,通过光阑离轴、视场离轴或者镜面离轴、倾斜消除共轴三反系统的中心遮拦获得的^[10]。具有三个光学元件的共轴系统可以用近轴 ABCD 矩阵表示^[11],每个光学元件可以用一个 2×2 矩阵表示:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_1 & 1 \end{bmatrix}, & \mathbf{E}_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_2 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_3 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 p_1, p_2, p_3 , 为各元件的光焦度。各元件的间隔可以表示为

$$\mathbf{S}_1 = \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_2 = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 d_1, d_2 为元件间间隔。整个光学系统的近轴矩阵 \mathbf{M} 为各矩阵按相反顺序相乘,即

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{E}_1. \quad (3)$$

整理得:

$$\begin{cases} A = 1 - d_2 p_2 + d_1 d_2 p_1 p_2 - d_1 p_1 - d_2 p_1, \\ B = d_1 - d_1 d_2 p_2 + d_2, \\ C = -p_1 - p_2 - p_3 + d_2 p_2 p_3 + d_1 p_1 p_2 + d_1 p_1 p_3 + d_2 p_1 p_3 - d_1 d_2 p_1 p_2 p_3, \\ D = 1 - d_1 p_2 - d_1 p_3 - d_2 p_3 + d_1 d_2 p_2 p_3, \end{cases} \quad (4)$$

由(4)式可以求得后截距 t 和有效焦距 f' 分别为

$$t = -\frac{A}{C} = f'A = f'(1 - d_2 p_2 + d_1 d_2 p_1 p_2 - d_1 p_1 - d_2 p_1), \quad (5)$$

$$f' = -\frac{1}{C} = \frac{1}{p_1 + p_2 + p_3 - d_2 p_2 p_3 - d_1 p_1 p_2 - d_1 p_1 p_3 - d_2 p_1 p_3 + d_1 d_2 p_1 p_2 p_3}. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可以求得:

$$p_1 = \frac{-f' - d_2 f' p_2 + t}{f'(-d_1 - d_2 + d_1 d_2 p_2)}, \quad (7)$$

$$p_3 = \frac{d_2 - f' + t - d_1[-1 + p_2(d_2 + t)]}{t(d_1 + d_2 - d_1 d_2 p_2)}. \quad (8)$$

可以通过给定不同的 d_1, d_2, t 和 p_2 设计不同类型含有三个光学元件的光学系统。本文所设计的光学系统要求: $d_1 < 0, d_2 > 0, t < 0$ 。中间不成像的离轴三反光学系统,作为初始结构可以考虑先将前两面镜子设计成无光焦度结构,优化过程中将间隔设为变量即可得到中间不成像的三反系统,这样

$$d_1 = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2}, \quad (9)$$

由(5)式,(6)式和(9)式可求得 t 和 f' 分别为

$$t = \frac{1}{p_3}, \quad (10)$$

$$f' = -\frac{p_2}{p_1 p_3}. \quad (11)$$

三反光学系统中各个表面对系统场曲贡献量的大小只与各面的曲率半径成反比,为使光学系统实现平像场,要求初始结构中各个光学元件的光焦度之和为零,即

$$p_1 + p_2 + p_3 = 0. \quad (12)$$

由(10)~(12)式可求得 p_1, p_2

$$p_1 = \frac{1}{f' - t}, \quad (13)$$

$$p_2 = \left[t \left(\frac{t}{f'} - 1 \right) \right] - 1. \quad (14)$$

取 $f' = -1000, d_1 = -500$, 则 $t = -293$, 取 $d_2 = 295 \approx -t$, 这样可以缩短整个系统总长,由(12)~(14)式可以求出 p_1, p_2, p_3 。根据矢量像差理论,元件的倾斜和偏心对球差没有影响^[12],先使用光学设计软件 CODE V 对共轴三反光学系统的球差进行校正,设计出了光谱范围在可见光波段,有效焦距为 1000 mm, F 数为 7 的共轴三反光学系统。

以上阐述了一种求取中间不成像的共轴三反光学系统初始结构的更直接的方法,该光学系统的孔径光阑置于次镜上,系统由一个凹面主镜,一个凸面次镜和一个凹面三镜组成。

3 离轴三反光学系统设计

离轴三反光学系统的主要像差是彗差、像散和畸变,需要特别考虑校正。元件的倾斜和偏心对球差没有影响,如果球差不为零,由于元件的倾斜和偏心将会产生彗差;除了球差外,每一种像差由于偏心

和倾斜都会对其他单色像差产生影响,如偏心彗差对偏心像散、场曲和畸变有影响^[13]。

所设计系统在初始阶段已经将球差校正,系统主要像差为离轴像差,通过在远离光阑位置的主镜和三镜处引入偶次非球面,将光学系统的各镜面分别进行适当的倾斜和偏心,设计出了焦距为 1000 mm, F 数为 7, 视场为 $14^\circ \times 1^\circ$ 的无遮拦离轴三反光学系统。

为了获得更宽更大的视场范围,考虑在光学系统中引入自由曲面,分别尝试在主镜、次镜和三镜处引入 Zernike 自由曲面,优化后发现当主镜为自由曲面时对系统调制传递函数(MTF)贡献量比较大,所以将主镜处的偶次非球面换成自由曲面,再对系统进行优化设计。

系统中的自由曲面面型方程是基于 Zernike 自由曲面的多项式,其方程表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^{66} c_{j+1} z_j(\rho, \theta), \quad j \in Z, \quad (15)$$

式中 c 为曲率, k 为圆锥常数, r 为径向半径, c_{j+1} 为 Zernike 多项式系数。

自由曲面多项式面型方程在最初加工阶段一般要进行 Zernike 拟合,通过将理想面型方程进行 Zernike 拟合进而去倾斜的办法来减少材料去除量。因此,在相同工艺条件下,这种处理有效地减小了由基底平面向理想平面修整时材料的去除量,缩短了加工周期。合理地选择 Zernike 自由曲面多项式面型方程可以将面型方程中的倾斜量直接去除掉,实现了方程的精确拟合。

Zernike 多项式是由 ρ 和 θ 两个变量组成的无穷数量完全集多项式,它在单位圆内部是连续正交的。Zernike 多项式有着区别于其他正交多项式的特性,它是可以用 ρ 和 θ 极坐标表示的简单旋转对称多项式,正弦和余弦函数都是以 2π 为最小正周期的周期函数,并且满足坐标系统旋转一个角度 α 不改变多项式的形式,也就是:

$$f[\theta + \alpha] = f[\theta]f[\alpha], \quad (16)$$

这是利用了欧拉公式

$$\exp(i\theta) = \cos \theta + i \sin \theta, \quad (17)$$

将正余弦三角函数和指数函数进行转化得到的,其中 $f[\theta] = \exp(\pm im\theta)$ (m 为非负整数)。Zernike 多项式的正交性使得各多项式的系数之间相互独立,有利于消除系数之间的相互影响。

本文所设计光学系统中的各个镜面结构都是在

$Y-Z$ 面内的偏心和倾斜, X 方向是对称的,所以 X 项只取偶次幂,自由曲面关于 Y 轴的非对称性使得系统有足够的自由度来校正离轴像差。在设计过程中可以改变各项的系数,控制局部面型来达到校正像差的目的,提高了系统成像质量并且减少了系统加工和检测的难度。为了清楚地表示表面倾斜,倾斜表面应该与表面形状分开处理, y 项系数会直接影响曲面倾斜和偏心量,所以其系数取零^[14]。系统优化过程中,通过设置多个视场点来对系统像散加以控制,应用 Zernike 面型可以更好地减少波像差,光学系统的视场由 $14^\circ \times 1^\circ$ 增大到 $20^\circ \times 10^\circ$,设计结果表明本设计所用的自由曲面具有很好的校正大视场离轴像差的能力。

4 设计结果

光学系统的结构示意图如图 1 所示,主镜是凹 Zernike 自由曲面反射面,用以接收和反射远处光源的光;次镜是凸球面反射面的一部分,用以接收和反射从上述的 Zernike 自由曲面反射面反射的光;第三镜是凹偶次非球面反射面的一部分,用以接收从

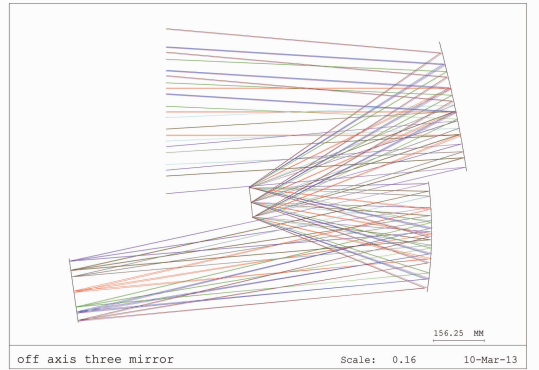


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Optical system layout

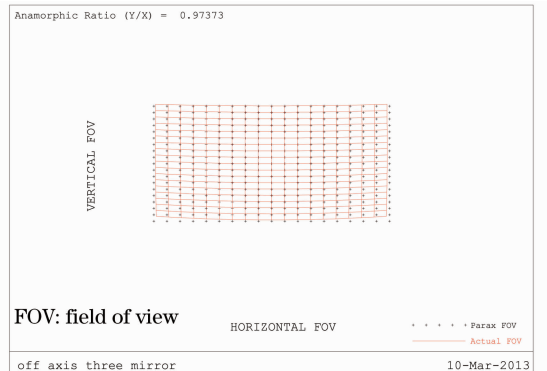


图 2 网格畸变

Fig. 2 Grid distortion

上述凸球面反射面反射的光到像面上。

利用 CODE V 光学设计软件进行优化,最终优化得到视场为 $20^\circ \times 10^\circ$ 的宽幅离轴三反光学系统,系统的结构参数如表 1 所示。自由曲面具有校正系统畸变的能力,系统在边缘视场($10^\circ, -5^\circ$)有最大

畸变,为 3.48%,如图 2 所示。光学系统的 MTF 曲线如图 3 所示。由图 3 可知在 50 lp/mm 处 MTF 值均在 0.49 以上。从成像质量来看,整个矩形视场内的成像质量良好,具有很好的像差平衡能力,满足了光学系统的性能要求,结构合理,无遮拦。

表 1 系统的结构参数

Table 1 System parameters

Surface number	Radius /mm	Surface type	Thickness /mm	Glass	Y decenter /mm
Object surface	Infinity		Infinity		
1	-2822.81205	Zernike polynomial	-491.81422	Mirror	623.86388
2 (Stop)	-932.48245	Sphere	543.80227	Mirror	139.00370
3	-1240.22743	Asphere	-1106.38130	Mirror	227.11691
Image	Infinity				0

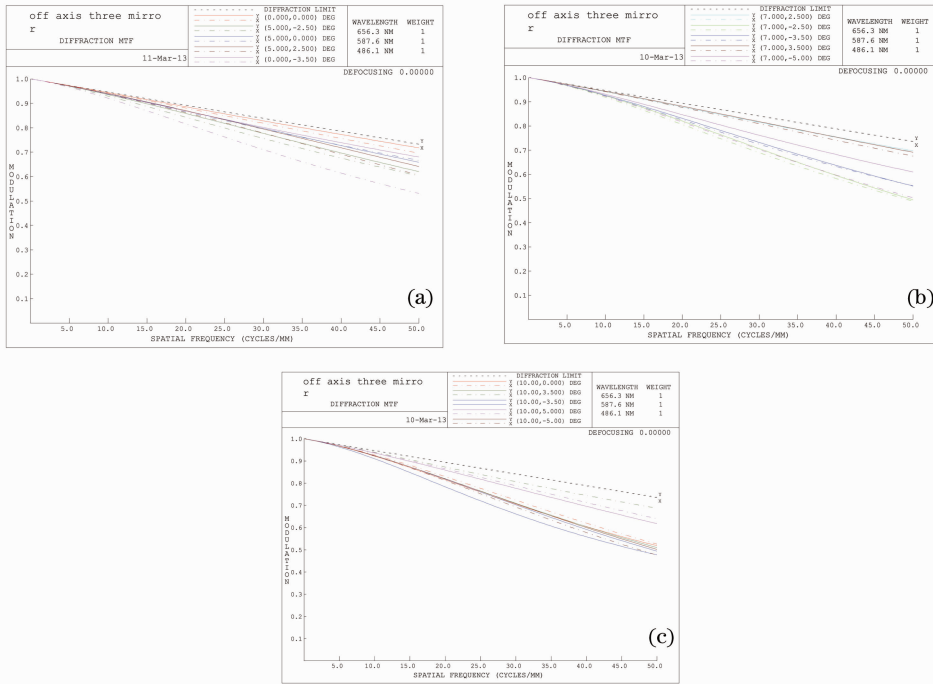


图 3 (a) 0.5 视场内 MTF 曲线; (b) 0.7 视场区域 MTF 曲线; (c) 视场边缘区域 MTF 曲线

Fig. 3 (a) MTF curves with a field of view of 0.5; (b) MTF curves with a field view of 0.7; (c) MTF curves of the edge of view field

5 结 论

采用近轴矩阵方法求得共轴三反系统的初始结构,并对离轴系统像差特性和离轴三反射光学系统结构特点进行了分析和总结,讨论了 Zernike 多项式区别于其他正交多项式的特性和系统应根据需要合理地选择多项式的各项。利用自由曲面能够很好地校正离轴像差的特点,在系统的主镜处引入 Zernike 自由曲面,有效地校正了系统的离轴像差,设计出了结构紧凑、像质优良的宽幅离轴三反光学系统。

设计结果表明,利用自由曲面设计出的宽幅离轴三反光学系统,达到了很好的成像质量。随着离轴光学元件制造技术的不断进步,以及自由曲面加工技术的快速发展,离轴三反光学系统中的所有光学元件都将是可制造的。本系统的视场为 $20^\circ \times 10^\circ$,实现了大画幅成像,可与一般感光胶片画幅相机配合使用,增大了探测器的选择范围,更好地发挥了离轴三反光学系统的优势,在军用到民用方面都有着一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122002.
刘晓梅, 向阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122002.
- 2 H. J. Juraneck, R. Sand, J. Schweizer, *et al.*. Off axis telescopes-the future generation of earth observation telescopes [C]. *SPIE*, 1998, 3439: 104-115.
- 3 G. Moretto, J. R. Kuhn. Off-axis systems for 4-m class telescopes [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(16): 3539-3546.
- 4 D. E. Lencioni, C. J. Digenis, W. E. Bicknell, *et al.*. Design and performance of the EO-1 advanced land imager [C]. *SPIE*, 1999, 3870: 269-280.
- 5 D. Chesters, D. Jenstrom. GATES-A small imaging satellite prototype for GOES-R [C]. *SPIE*, 1996, 2812: 30-37.
- 6 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical design of three-mirror-anastigmat with fold mirror for space camera [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(2): 335-340.
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 用于空间相机的折轴三反系统的光学设计[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 335-340.
- 7 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2680-2683.
郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2680-2683.
- 8 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0822001.
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视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.
- 9 Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3034-3038.
张庭成, 王涌天, 常军. 三反变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3034-3038.
- 10 Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design hybrid refractive and reflective optical system of long-wave infrared region imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1122005.
张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 折/反混合式长波红外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1122005.
- 11 K. Seidl, J. Knobbe, H. Gröger. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(21): 4097-4107.
- 12 T. S. Turner. Vector aberration theory on a spreadsheet analysis of tilted and decentered systems [C]. *SPIE*, 1992, 1752: 184-195.
- 13 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang, *et al.*. Aberration properties of the decentered and tilted optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1658-1662.
杨新军, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1658-1662.
- 14 A. Yabe. Representation of freeform surfaces suitable for optimization [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(15): 3054-3058.

栏目编辑: 张 腾