

基于自由曲面的大视场离轴四反光学系统设计

黄辰旭^{1,2}, 刘欣², 潘枝峰², 陈建发², 张红刚²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009; 2. 中国航空工业洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要:反射系统具有体积小、重量轻、无色差、成像性能优良等特点,广泛应用于航空机载领域。本文基于矩阵光学理论,并以此建立非线性方程组,用数学软件求解得到满足要求的初始结构。优化过程中不断调整系统各镜的偏心和倾斜,消除系统的中心遮拦。在光学系统中引入自由曲面,提升了光学系统的轴外像差平衡能力,增大系统视场角。设计了焦距100 mm,视场角 $20^\circ \times 20^\circ$,相对孔径为 $F/7$ 的离轴四反射镜光学系统。结果表明,该光学系统具有较大的成像视场,结构紧凑,无中心遮拦,成像质量接近衍射极限。

关键词:光学系统设计;离轴四反;大视场;自由曲面

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.03.017

Design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view based on free-form surface

HUANG Chen-xu^{1,2}, LIU Xin², PAN Zhi-feng², CHEN Jian-fa², ZHANG Hong-gang²

(1. Science and Technology on Electro-optical Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: Reflective optical systems have small size, lightweight, and excellent imaging performance, which make it very popular in airborne field. A nonlinear equation group was built based on the matrix optics theory, the initial construction parameters of the optical system can be obtained by deriving this equation group. And during the design process, decenters and tilts of mirrors were adjusted continuously to eliminate the obscurations. The free-form surface was introduced to improve the balance capacity of optical aberration and enhance system field of view. Then an off-axis four-mirror optical system with effective focal length of 100 mm, FOV of $20^\circ \times 20^\circ$, and relative aperture as $F/7$ is designed. This system has large imaging field of view, tight structure, acentric obstruction and imaging qualities approaching diffraction limit.

Key words: optical system design; four-mirror optical system; wide field of view; free-form surface

1 引言

随着现代军事技术的进步,对目标进行探测和识别的要求越来越高,机载光学系统正朝着多波段、大口径、小型化和轻量化方向发展。当机载系统飞行高度和探测器像素尺寸一定时,地面像元的分辨率与焦距成正比,探测范围与视场角的正切成正

比^[1]。但系统尺寸会随焦距增加而增大,不利于实现小型化的设计。在保证足够分辨率的同时增大光学系统的视场角可以获得更加丰富的目标特征,提高系统的目标探测和识别能力^[2-3]。

相较于反射式光学系统,透射系统色差的校正将导致系统结构的复杂化,而且红外材料有限,价格

作者简介:黄辰旭(1991-),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计。E-mail:huchxu@163.com

收稿日期:2015-10-19;修订日期:2015-11-23

昂贵。反射式光学系统无色差、光路折转的特点使得其在高像质、轻量化、多波段的设计中具有明显的优势^[4-6]。当系统长度和焦距的比值小于0.25左右时,三反系统很难满足设计要求^[7]。四反射镜光学系统是在三反射镜系统的基础上增加一片反射镜,再进行适当的离轴以消除中心遮拦。目前离轴系统一般是线阵成像,视场角在弧矢方向可以很大,但子午方向的视场角一般较小^[8-9]。因此,基于自由曲面的研究已经成为新一代高性能机载光学系统发展的重要方向。自由曲面具有非对称结构形式,提供了更多的优化自由度,增强了光学系统的轴外像差平衡能力,成为改善光学系统视场能力的关键。

本文利用矩阵光学理论,通过研究离轴四反光学系统结构特点,并基于自由曲面光学技术,完成了主镜为自由曲面的离轴四反光学系统设计,使光学系统获得更大的成像视场,系统结构更加紧凑。

2 共轴四反光学系统研究

离轴四反射镜光学系统是在共轴四反射镜系统的基础上,通过一定的光阑离轴或视场离轴,得到非对称光学系统,以消除共轴系统的中心遮拦问题并有效校正像差。

利用矩阵光学理论计算共轴系统的初始结构参数。用近轴 ABCD 矩阵表示含有四个光学表面的共轴光学系统,每个光学元件可以用 2×2 矩阵表示:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_1 & 1 \end{bmatrix}, Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_2 & 1 \end{bmatrix} \\ Q_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_3 & 1 \end{bmatrix}, Q_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -p_4 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, f_1, f_2, f_3, f_4 为各元件的光焦度。各元件的空气间隔分别表示为:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, d_1, d_2, d_3 为各元件间隔。整个光学系统的近轴矩阵 M 为各矩阵按相反顺序做矩阵乘法运算,即:

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = Q_4 \cdot P_3 \cdot Q_3 \cdot P_2 \cdot Q_2 \cdot P_1 \cdot Q_1 \quad (3)$$

其中, a, b, c, d 可表示为 $a = M(1,1), b = M(1,2), c = M(2,1), d = M(2,2)$ 。

从矩阵光学理论可知:

$$f' = -\frac{1}{c} \quad (4)$$

$$l'_F = -\frac{a}{c} \quad (5)$$

式中, f' 是整个系统的焦距; l'_F 是第四个表面到达像面的距离,即系统的后焦截距。

光学系统的前焦面到后焦面的光线传输矩阵为:

$$\begin{aligned} N &= \begin{bmatrix} 0 & f' \\ -1/f' & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -a/c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot M \cdot \begin{bmatrix} 1 & -d/c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & b - ad/c \\ c & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

矩阵 N 的第一行第二项就是系统焦距值,即:

$$f' = b - ad/c \quad (7)$$

按照所设计的光学系统要求,系统一般都会给出系统总长度 l 和后截距 l'_F , 为了使得系统更加紧凑,三镜间隔一般大致相等, $|d_1| = |d_2| = |d_3| < l$, 且满足 $d_1 < 0, d_2 > 0, d_3 < 0, l'_F > 0$ 。同时为了保证给探测器留有足够大的位置空间,还应满足 $l'_F > d_2$ 。

为使光学系统满足满足匹兹万条件,实现平像场,要求初始结构中各个光学元件的光焦度应满足以下条件,即:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 0 \quad (8)$$

由式(4)~(8)建立非线性方程组,若已知系统总焦距 f' 、元件间隔 d 和后截距 l'_F , 根据上述公式可求出系统各反射镜的光焦度,以获得较大相对孔径下的初始结构参数。进一步优化校正球差、彗差和像散,进而得到符合设计要求的共轴四反射镜光学系统。

3 离轴四反光学系统设计

同轴四反光学系统最大缺陷就是有无法避免的中心遮拦,系统能量的减少会严重影响成像质量。在同轴系统优化设计初步完成后,为了避免中心遮拦,需引入适量的偏心和倾斜,直到系统像质满足设计要求。设计得到了无遮拦离轴四反射镜光学系统,焦距为 100 mm, F 数为 7, 视场角为 $12^\circ \times 1^\circ$ 。

随着离轴光学元件制造技术的不断进步,自由曲面加工和检测技术的逐渐成熟,使其成为光学系统提高视场能力的关键。传统光学系统中,轴外视场的像质和照度都会随视场的增大而降低。为增大另一方向的视场角,获得更宽更大的视场范围,在光学系统中引入 Zernike 自由曲面多项式以校正轴外像差。Zernike 多项式各项是相互正交的,与像差理

论中的初级像差存在一定的对应关系,可以与 Seidel 像差函数建立联系,以便有选择地处理各像差系数,其方程表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \phi) \quad (9)$$

式中, c 为曲率半径; k 为圆锥常数; r 为径向半径; A_i 为 Zernike 多项式系数。

相较于传统旋转对称形式的非球面, Zernike 多项式拓展了设计自由度,在成像系统中能够更好地校正球差、彗差等离轴像差,获得更大的视场和更好的成像质量。

本文所设计光学系统中的各镜面结构在 X 方向是对称的,都是 $Y-Z$ 面内的倾斜和偏心,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。为降低加工和装调难度,光学系统三镜设置为平面镜。系统次镜为凸非球面,加工和检测难度较大,为了保证反射镜面型的可加工性,故分别尝试在主镜和四镜处引入 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贡献量较大。将主镜处的非球面换成 Zernike 自由曲面,利用 CODEV 软件对系统再次进行优化。由于 Zernike 多项式自由曲面为非旋转对称曲面,会使光学系统存在一定程度的矢对称,优化过程中通过设置多个视场点,避免各个视场的成像质量不一致。同时,为了防止优化过程中反射镜曲率与二次项系数的变化引起畸变增大,优化过程中要对其进行严格控制。结果表明,自由曲面具有很好的校正大视场离轴像差的能力,实现了多波段大视场离轴四反光学系统设计。

4 设计结果

由矩阵法计算共轴四反光学系统初始结构,取 $f' = -100$, $|d_1| = |d_2| = |d_3| = 50$, $d_4 = 120$,代入上述方程组求出系统各反射镜的光焦度 p_1, p_2, p_3, p_4 ,再适当调整反射镜间距从而获得合理的共轴系统初始结构。初始结构详细计算结果如表 1 所示。

表 1 初始结构参数(单位:mm)

结构参数	r_4	r_4	r_4	r_4	d_1	d_1	d_1	l'_F
参数值	1800	750	200	1000	200	110	110	80

根据上述离轴四反光学系统的设计方法,取合适的初始结构参数,利用光学设计软件 CODEV 把各元

件倾斜和偏心设置为变量进行优化,使光路避开中心遮拦,优化设计得到视场角为 $20^\circ \times 20^\circ$ 的宽视场离轴四反光学系统。光学结构系统图如图 1 所示。

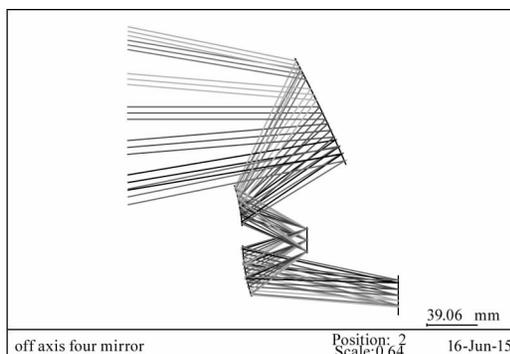


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Optical system layout

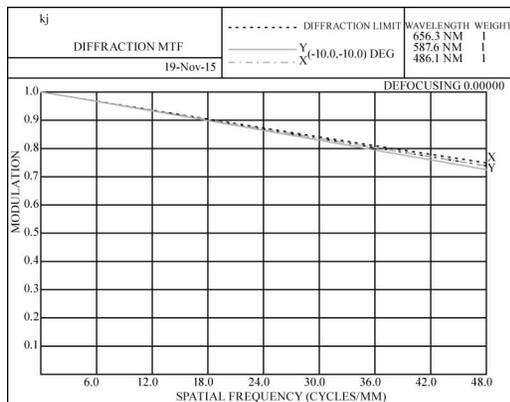
该系统成像质量良好,无中心遮拦,结构紧凑,工作波段为可见光到红外波段。优化后系统的结构参数如表 2 所示。

表 2 优化后系统的结构参数

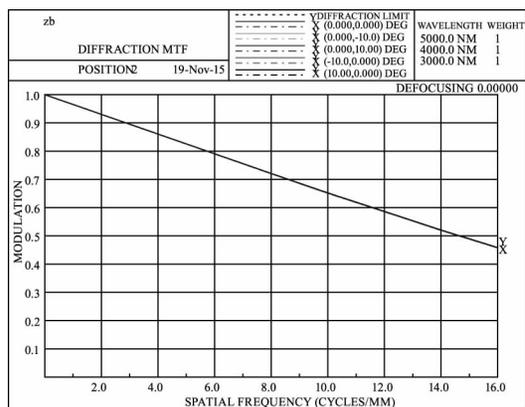
Tab. 2 System parameters after optimized

Surface number	Surface type	Radius/mm	Thickness/mm
1	Zernike polynomial	-1075.5985	-80.1456
2	Conic	-173.7568	50.64690
3	Sphere	Infinity	50.64690
4	Asphere	153.20764	120.77467

如图 2 所示,(a)和(b)分别为可见波段、中波红外($3 \sim 5 \mu\text{m}$)下的传递函数曲线,在可见波段 50 lp/mm 空间频率下 $\text{MTF} > 0.7$,在中波波段 16 lp/mm 空间频率下 $\text{MTF} > 0.4$,系统在各波段成像质量良好。光学系统的点列图如图 3 所示,最大弥散斑半径小于 $5 \mu\text{m}$ 。自由曲面的应用使光学系统具有很好的像差平衡能力,提高了成像质量,实现了大视场多波段光学系统设计。



(a) 可见波段



(b) 中波红外

图2 光学系统 MTF 图

Fig.2 MTF curves of the system

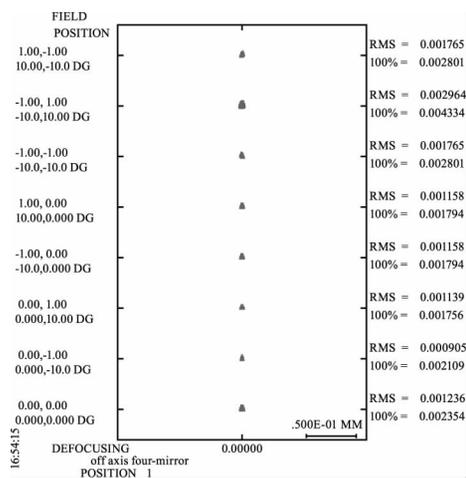


图3 系统点列图

Fig.3 Spot diagram of the system

5 结论

现代机载光学系统对成像性能的要求日渐提高,仅使用球面、非球面的传统光学系统面临巨大挑战。本文采用矩阵光学理论方法建立共轴四反系统的初始结构,研究了自由曲面多项式引入光学系统带来的优势,并在离轴系统的主镜处引入 Zernike 自由曲面,有效校正了系统的离轴像差,设计了视场角为 $20^\circ \times 20^\circ$ 的宽视场离轴四反系统。该系统结构紧凑、像质优良,可以实现较大相对孔径的面阵成像,更好地满足机载探测的使用要求。随着计算机辅助装调技术的不断发展,基于自由曲面的新型四反光系统将成为航空机载光学系统研究领域的重要方向。

参考文献:

- [1] CHANG Jun, WENG Zhicheng, JIANG Huilin, et al. Design on three-reflective-mirror system used in space [J]. ActaOpticaSinica, 2003, 23(2): 216-219. (in Chinese)
常军, 翁志成, 姜会林, 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计 [J]. 光学学报, 2003, 23(2): 216-219.
- [2] HAN Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera [J]. Opt. Precision Eng., 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese).
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, 16(11): 2164-2172.
- [3] JIN Guang, ZHANG Liang, HU Fusheng. Investigation on space optical system of high resolution [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 155-159. (in Chinese)
金光, 张亮, 胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 155-159.
- [4] LI Ronggang, ZHANG Xingde, SUN Changfeng, et al. Development and analysis of off-axis reflection optical system [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 128-131. (in Chinese)
李荣刚, 张兴德, 孙昌锋, 等. 离轴反射式光学系统的研究进展与技术探讨 [J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 128-131.
- [5] SHI Yali, GAO Yunguo, DENG Weijie. Model for computer-aided alignment of reflective optical system [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(4): 427-430. (in Chinese)
史亚莉, 高云国, 邓伟杰. 反射光路的计算机辅助装调模型 [J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 427-430.
- [6] PAN Junhua. The design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004, 130-141. (in Chinese)
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.
- [7] GUO Yongxiang, LI Yingcai, LIANG Tianmei, et al. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view [J]. ActaOpticaSinica, 2010, 30(9): 2680-2683. (in Chinese)
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] LG COOK. Compact four-mirror anastigmat telescope; US. 6767103B2 [P]. 2004: 07-27.
- [9] DING Xuezhuan, WANG Xin, LAN Weihua, et al. Design of four-mirror reflective anastigmat optic system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 319-321. (in Chinese)
丁学专, 王欣, 兰卫华, 等. 离轴四反射镜光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 319-321.