

基于自由曲面的大视场天基探测光学系统

倪栋伟^{1,2**}, 李旭阳^{1*}, 杨明洋^{1,2}, 任志广³

¹中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学应用研究室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119

摘要 设计了一种大视场空间光学探测系统, 结合空间目标特性及探测器性能指标计算了系统参数, 确定了系统的技术指标, 实现了对空间 255 km 处目标 9 等星的探测。系统采用离轴三反式光学结构, 工作波段为 400~900 nm, 焦距为 64 mm, 视场角为 30°×30°。系统的主镜和三镜分别采用 Zernike 多项式和 XY 多项式自由曲面进行设计, 对系统进行光线追迹获取了自由曲面的离散点数据, 利用 Matlab 对获得的离散点进行拟合, 得到了主镜和三镜的自由曲面面型。系统的能量集中度高, 成像质量良好。

关键词 光学设计; 探测系统; 大视场; 自由曲面; Zernike 多项式; XY 多项式; 离轴三反

中图分类号 V476.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1122003

Large Field of View Space-Based Optical Detection System Based on Freeform Surfaces

Ni Dongwei^{1,2**}, Li Xuyang^{1*}, Yang Mingyang^{1,2}, Ren Zhiguang³

¹Laboratory of Space Optics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract A spatial optical detection system with a large field of view is designed. The parameters of this system are calculated by combining the spatial target characteristics and the performance indexes of the detector. Thus, the technical indexes of this system are determined, and the detection of the ninth-magnitude star target 255 km away in space is realized. This system adopts an off-axis three-mirror optical structure with a spectral range of 400-900 nm, a focal length of 64 mm, and a field of view of 30°×30°. The primary and tertiary mirrors in this system are designed based on the Zernike and XY polynomial freeform surfaces. The ray tracing is performed and the discrete point data are obtained. These data are fitted by MATLAB to obtain the profiles of the freeform surfaces of these mirrors. This system has a high energy concentration and a good imaging quality.

Key words optical design; detection system; large field of view; freeform surfaces; Zernike polynomials; XY polynomials; off-axis three-mirror

OCIS codes 220.4830; 110.2970; 350.6090; 080.4035

1 引 言

随着航天技术的发展, 人类加快了对太空的探索, 越来越多的卫星被发射到太空。失效的卫星及其散落、碰撞、爆炸形成的空间碎片逐年增多, 严重威胁在轨航天器的运行安全。通过天基目标探测手段可以有效地获取空间目标信息, 在空间相对较近

的距离处进行探测, 同时可以避开大气的干扰, 精确地获得目标尺寸、形状及轨道参量等重要的目标信息^[1-3]。

空间目标探测的光学系统需要在天区内对目标进行快速、准确的搜索, 这要求系统具有较大的视场。相对于折射式系统, 反射式光学系统不产生色差, 结构简单, 质量轻便, 有良好的抗热特性, 被广泛

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-06-19; 录用日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61427811)

* E-mail: lixuyang2004@126.com; ** E-mail: nidongwei2016@opt.cn

地应用于空间光学领域^[4-5]。美国发射的中段实验卫星(MSX)上搭载天基可见光相机(SBV)进行空间探测,相机采用离轴三反光学系统,总视场角为 $1.4^\circ \times 6.6^\circ$ 。美国发射的天基空间监视系统(SBSS)卫星同样采用离轴三反光学系统,监视视场角为 $3^\circ \times 3^\circ$ 。加拿大用于空间监视的 Sapphire 卫星沿袭了 SBV 的光学结构特点,系统视场角为 1.4° 。国内研究者也在空间探测领域进行了相关研究,设计的空间碎片天基探测相机光学系统的视场角可达 $10^\circ \times 10^\circ$,但其采用双高斯结构,镜头数量多,结构复杂,视场角没有较大的提升。这些探测光学系统的视场角相对较小,卫星的探测能力较低。

为实现广域空间的目标探测,本文将具有更高像差校正能力和更多设计自由度的自由曲面应用于离轴反射式光学系统,设计了一种基于 Zernike 多项式和 XY 多项式的自由曲面离轴三反光学系统,实现了 $30^\circ \times 30^\circ$ 的大视场探测,提升了空间目标的监视能力。

2 大视场光学系统

2.1 初始结构设计方法

离轴三反光学系统是在同轴三反光学系统初始结构的基础上通过光阑离轴、视场离轴或镜面倾斜后优化得到的。假设 c_1, c_2, c_3 分别为主镜、次镜、三镜的曲率, d_1, d_2 分别为主镜与次镜、次镜与三镜间的距离, l_3' 为后截距。由系统的光焦度 ϕ 和场曲 $S_{IV} = 0$ ^[6-7]可得

$$\phi = 2c_3 l_3' \phi + 2c_1 - 2c_2 + 4d_1 c_1 c_2, \quad (1)$$

$$l_3' \phi = 1 - 2d_1 c_1 - 2d_2 c_2 + 2d_2 c_1 + 4d_1 d_2 c_1 c_2. \quad (2)$$

由初级像差理论可知,

$$S_{IV} = c_1 - c_2 + c_3 = 0. \quad (3)$$

由(1)~(3)式可知,主镜、次镜和三镜的半径由系统光焦度、各镜间距离及后截距决定。主镜为凸面的设计有利于扩大系统的视场,并使光束有效地会聚成像,系统的次镜和三镜为凹面设计,这就需要选择合适的镜间距及后截距,使主镜和次镜的曲率为正值,三镜的曲率为负值。当给定各镜间距离和后截距值时,可以通过(1)~(3)式求解出各镜的曲率半径。该初始结构的求解方法比用参量确定初始结构的传统方法更简单有效,主镜为凸面的设计扩大了系统的视场角。

2.2 自由曲面的描述形式

光学自由曲面是指非旋转对称的光学曲面,与传统的旋转对称球面和非球面相比,自由曲面具有更丰富的设计自由度,能更好地校正离轴边缘的视场像差,扩大视场角,提高成像质量^[8-9]。随着光学设计和加工水平的提高,自由曲面被越来越多地应用于成像和非成像光学系统的设计。

Zernike 多项式曲面、XY 多项式曲面、Gauss 多项式曲面是几种常见的自由曲面面型。多项式的通常形式^[10]为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{j=1}^N A_j P_j(\rho, \varphi), \quad (4)$$

式中 r 为光轴方向的半径高度;等号右侧第一项为圆锥曲面方程, c 为曲面顶点处的曲率, k 为圆锥曲面系数;等号第二项是用多项式描述的曲面部分, N 为多项式项数, A_j 为第 j 项多项式的系数, P_j 为所使用的多项式,其中 Zernike 多项式和 XY 多项式为最常用的两种多项式^[11]; ρ 为极坐标半径; φ 为极坐标方位角。

2.2.1 Zernike 多项式

Zernike 多项式可表示为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N C_i Z_i(x, y), \quad (5)$$

式中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为光轴方向的半径高度; C_i 为 Zernike 多项式的第 i 项系数; $Z_i(x, y)$ 为 Zernike 多项式的第 i 项。

通常,Zernike 多项式也可以用极坐标 (ρ, θ) 表示,即

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N C_i Z_i(\rho, \theta), \quad (6)$$

式中 $r = \sqrt{\rho^2 + \theta^2}$; ρ 为径向坐标; θ 为方位坐标。

Zernike 多项式在单位圆上正交,各项系数之间互不干扰,已被应用于光学元件加工和光学表面的干涉检测^[12],同时它与 Seidel 像差具有对应关系^[13]。利用极坐标系和直角坐标系描述了 Zernike 多项式与 Seidel 像差的对应关系,前 9 项结果见表 1。

表 1 Zernike 多项式与像差之间的对应关系
Table 1 Corresponding relationship between Zernike polynomials and aberration

No.	Polynomial		Aberration
	Polar coordinate system	Cartesian coordinate system	
1	1	1	Piston
2	$\rho \cos \theta$	x	x -tilt
3	$\rho \sin \theta$	y	y -tilt
4	$\rho^2 \cos(2\theta)$	$x^2 - y^2$	0° or 90° astigmatism
5	$2\rho^2 - 1$	$2(x^2 + y^2) - 1$	Defocus
6	$\rho^2 \sin(2\theta)$	$2xy$	45° astigmatism
7	$\rho^3 \cos(3\theta)$	$x(x^2 - y^2) - 2xy^2$	x -trefoil
8	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	$x[3(x^2 + y^2) - 2]$	x -coma
9	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	$y[3(x^2 + y^2) - 2]$	y -coma

2.2.2 XY 多项式

XY 多项式是以二次曲面为基底通过叠加泰勒多项式形成的,其表达形式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^N C_j x^a y^b, \quad (7)$$

$$j = \frac{(a+b)^2 + a + 3b}{2} + 1, \quad (8)$$

式中 a 和 b 为非负整数,分别代表 x 和 y 的阶数。在光学设计软件中,对 XY 多项式的阶数有一定限制,通常取 10 阶以内的多项式表征自由曲面,即 $a+b \leq 10$ ^[14]。

在设计优化过程中,利用 Zernike 多项式可对某一像差进行单独校正,由于其正交性,新添加或删减部分项并不会引起其他项系数的变化,使得优化更有针对性,能更好地校正球差、彗差及像散等各种像差,提高优化效率。XY 多项式具有非旋转对称性,能很好地校正非对称像差。虽然 XY 多项式不是正交多项式,但其面型表征能力与正交多项式的相同,并且与 Zernike 多项式具有相互转换关系。二者均可以有效地校正离轴像差,扩大系统视场角。与其他自由曲面面型相比,Zernike 多项式自由曲面和 XY 多项式自由曲面更易于检测加工。因此,基于 Zernike 多项式和 XY 多项式进行大视场光学系统的设计。

3 设计参数选择

天基探测相机的工作原理主要是通过光学系统生成星图,将星图与图像中的恒星进行匹配,排除不需要关注的恒星信息。在整个过程中,光学系统的设计指标由空间目标的特征、被测物体的光谱分布及所选取探测器的参数等因素决定^[15]。

3.1 空间目标等效星等

在太空中,空间目标本身不发光,主要通过太阳

光的照射产生亮度,探测系统主要通过目标的亮度进行观测。在天文学中,通常用星等描述目标的亮度。星等是指地球大气层外所接收到的星光照度,肉眼可见的恒星分为六个等级,6 等星最暗,大于 6 等的星肉眼不可见。零等星的辐照度规定为 $E_0 = 2.06 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ 。星等的数字越小,星等越高,目标的照度越大。星等的计算公式为

$$\lg E_0 - \lg E_m = 0.4m, \quad (9)$$

式中 E_m 为空间目标在入瞳处的照度; m 为星等值。

将目标简化为球体进行研究,其在入瞳的照度公式为

$$E_m = \rho_0 E_{\text{sun}} \frac{2}{3} r'^2 [(\pi - \beta) \cos \beta + \sin \beta] / d^2, \quad (10)$$

式中 ρ_0 为空间目标的表面光谱反射率; E_{sun} 为太阳光谱辐照度; r' 为目标等效半径; d 为目标与探测卫星之间的观测距离; β 为太阳到目标与太阳到探测卫星之间的夹角,即太阳角。

由于太阳角的变化,探测相同的空间目标时,系统入瞳处的辐照度和星等值都会产生变化。随着太阳角的增大,入瞳辐照度减小,星等值增大。假设太阳角的极限值为 $\beta = 145^\circ$, $E_{\text{sun}} = 910.5 \text{ W/m}^2$, $\rho_0 = 0.25$, $r' = 0.06 \text{ m}$, $d = 255 \text{ km}$,可以求得入瞳辐照度 $E_m = 5.5 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$,将其代入(9)式可以求出空间目标的等效星等值 $m = 8.9$ 。求出的入瞳辐照度可用于光学系统入瞳直径的计算,求出的空间目标的星等值可与系统的探测星等进行对比,当系统的探测星等高于空间目标的星等值时,系统才能探测到该目标。

3.2 系统焦距的计算

视场的大小也受到探测器尺寸的限制,为使探

测器尺寸满足视场需求,选用一款合适的互补性金属氧化物半导体(CMOS)探测器,其像元尺寸为 $12\ \mu\text{m}\times 12\ \mu\text{m}$,像元数为 2048×2048 。系统的焦距求解公式为

$$Y = f' \tan \omega, \quad (11)$$

式中 f' 为系统焦距; $\omega=15^\circ$ 为半视场角; Y 为探测器的半对角线长。由(11)式可以求出系统焦距 $f'=64\ \text{mm}$ 。

3.3 入瞳直径的计算

入瞳的直径由空间目标的辐射特性和探测器的信噪比决定,入瞳直径决定了入射系统能量的大小。经过推导可得入瞳直径的计算公式^[16]为

$$D \geq \left[\frac{f_{\text{SNR th}}^2 + \sqrt{f_{\text{SNR th}}^4 + 4f_{\text{SNR th}}^2(B + N_c^2)}}{2E_m \tau \frac{\pi}{4} t \frac{1}{E_{\text{ph}}} f_{\text{QE}}} \right]^{1/2} \times \frac{l_2}{l_1}, \quad (12)$$

式中 $f_{\text{SNR th}}$ 为信噪比阈值; B 为非抑制杂光辐射在单个像元上产生的电子数; N_c 为噪声电子数; E_{ph} 为单个光子的能量; τ 为光学系统的透过率; t 为积分时间; f_{QE} 为CMOS传感器的量子效率; l_1 为像元边长; l_2 为单视场像点直径。以所选用的CMOS探测器为例,其性能参数见表2。

表2 探测器性能参数

Table 2 Performance parameters of detector

Parameter	Value
B	8
N_c	46
τ	0.8
Integration time / s	0.02
$E_{\text{ph}}/(10^{-19}\ \text{J})$	3.4
$f_{\text{QE}}/\%$	55

系统捕获概率和虚警率的计算公式分别为

$$P_D = 1 - \phi' \left(\frac{T_h - \mu}{\delta} - f_{\text{SNR}} \right), \quad (13)$$

$$P_{\text{FA}} = 1 - \phi' \left(\frac{T_h - \mu}{\delta} \right), \quad (14)$$

式中 T_h 为灰度直方图中谷峰对应的灰度级; δ 为背景高斯噪声均值; μ 为背景高斯噪声的均方差估计值; f_{SNR} 为信噪比。

计算可得,当 $P_{\text{FA}}=10^{-5}$, $P_D=95\%$ 时,信噪比阈值 $f_{\text{SNR th}}=6$ 。在取太阳极限角的情况下,将探测器参数及信噪比阈值代入(12)式可求得入瞳直径。为使系统获得更多入射能量,取入瞳直径 $D=51\ \text{mm}$ 。

3.4 系统探测星等

系统探测星等范围的数学评估模型^[17]为

$$m \leq \frac{5}{2} \lg \frac{2E_0 \frac{\pi}{4} D^2 \tau t \frac{1}{E_{\text{ph}}} f_{\text{QE}}}{f_{\text{SNR th}}^2 + \sqrt{f_{\text{SNR th}}^4 + 4f_{\text{SNR th}}^2(B + N_c^2)}}. \quad (15)$$

通过计算可求出系统的探测星等范围 $m \leq 9$,即该系统可探测到9等星。在 $30^\circ \times 30^\circ$ 的大视场下,可以探测到的恒星平均数在2557颗左右。

系统探测距离与(9)、(10)和(15)式有关,假定(10)式中目标的几何特性参数和反射特性参数不变,当空间目标与探测卫星相距255 km时,由(9)式可计算出空间目标的星等值为8.9。根据(15)式计算出光学系统的探测星等为9,可见目标的星等值在系统的探测星等范围内,即该探测系统可对255 km处的目标实现9等星探测。当目标与探测卫星相距大于255 km时,由(9)式计算出的空间目标的星等值将大于系统的探测星等范围,即该系统最远能探测到255 km处的空间目标。该天基探测系统的主要技术指标见表3。

表3 天基探测光学系统的主要技术指标

Table 3 Main technical indexes of space-based optical detection system

System parameter	Value
Focal length / mm	64
Field of view / [$^\circ$] \times [$^\circ$]	30×30
Entrance aperture / mm	51
Equivalent visual magnitude	9
Spectral band / nm	400-900

4 含有自由曲面的光学系统设计

为得到更大的探测视场范围,将主镜设计为凸面,并将自由曲面运用到离轴三反光学系统中。根据所需要的技术指标,通过初始结构求解方法进行求解,光焦度 $\phi = -1/64\ \text{mm}^{-1}$ 。为使主镜为凸面,需要合理选择各反射镜间的距离。镜间距选择及由Matlab求解出的各镜半径见表4。

表4 光学系统的初始结构参数

Table 4 Initial structural parameters of optical system

Surface	Radius / mm	Thickness / mm
Primary mirror	175.4386	-150
Secondary mirror	333.3333	150
Tertiary mirror	-330.3704	-125

通过计算得到的初始结构为同轴三反光学系统,以此为设计起点,将光阑置于次镜上并将次镜设置为球面,以减小次镜的检测难度。主镜设置为

Zernike 自由曲面凸面镜形式,三镜设置为 XY 自由曲面凹面镜形式。通过视场离轴、元件偏心和倾斜得到离轴三反光学系统,再结合自由曲面进行优化。

对于主镜 Zernike 自由曲面,应先将低阶项设置为变量进行优化,再逐步增大高阶项变量进行优化。离轴三反系统的各反射镜在 YOZ 面偏心 and 倾斜,竖直方向是对称的,故对于 XY 自由曲面,X 项参数一般选取偶次项进行优化。先对只含有 Y 项的面形参数进行优化,再优化包含 X 项的面形参数。在此基础上,逐渐增大采样视场以控制系统像散,同时防止自由曲面发生局部突变。通过自由曲面的优化设计很好地校正了离轴像差,最终设计得到了符合要求的系统。系统光路如图 1 所示。

优化后系统各反射镜的设计参数及主镜、三镜的自由曲面面型参数分别见表 5、6、7。

在光学设计软件 CODE V 中仿真设计出 Zernike 多项式和 XY 多项式自由曲面后,就可以通

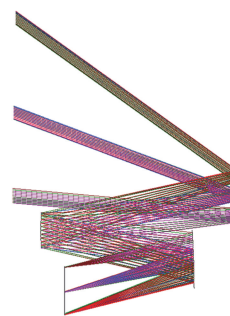


图 1 天基探测光学系统的结构图
Fig. 1 Structural diagram of space-based detection optical system

过自由曲面的描述形式得到设计的曲面面形。为直观形象地描述自由曲面面型,先在 CODE V 软件中对主镜和三镜进行大量光线追迹,获取自由曲面上的离散点数据。再在 CODE V 软件和 Matlab 软件之间建立通信连接,利用 Matlab 软件拟合光线追迹得到的离散点,最终得出主镜和三镜的自由曲面面型。曲面面型分别如图 2、3 所示。

表 5 优化后的光学系统反射镜参数

Table 5 Mirror parameters of optical system after optimization

Mirror	Radius /mm	Distance /mm	Constant of quadric surface	Y decenter /mm	x tilt /($^{\circ}$)
Primary mirror	398.39	-297.29	-2.73	117.55	22.60
Secondary mirror	1165.19	287.29	0	19.03	0
Tertiary mirror	-770.05	-267.70	-6.82	-22.21	3.15

表 6 主镜的 Zernike 自由曲面参数

Table 6 Parameters of Zernike freeform surface of primary mirror

No.	Term	Coefficient
1	Z_1	3.703732952805
2	Z_2	-0.005921378239
3	Z_3	1.074318956926
4	Z_4	-0.000844676164
5	Z_5	0.000225724509
6	Z_6	$-7.298797621080 \times 10^{-6}$
7	Z_7	$5.336916645650 \times 10^{-8}$
8	Z_8	$-2.419364792778 \times 10^{-8}$
9	Z_9	$2.566383909345 \times 10^{-6}$
10	Z_{10}	$-1.197484299545 \times 10^{-6}$
11	Z_{11}	$4.052592425289 \times 10^{-10}$
12	Z_{12}	$-2.946732238365 \times 10^{-9}$

表 7 三镜的 XY 自由曲面参数

Table 7 Parameters of XY freeform surface of tertiary mirror

Item	Coefficient	Item	Coefficient
Y	0.0657280763771848	X^4Y	$-1.508575293882 \times 10^{-13}$
X^2	0.000526216242287311	X^2Y^3	$-1.246876764365 \times 10^{-12}$
Y^2	0.000529147800335145	Y^5	$1.859610071502 \times 10^{-12}$
X^2Y	$-2.14467235342657 \times 10^{-8}$	X^6	$8.860132888429 \times 10^{-15}$
Y^3	$-3.04871515062429 \times 10^{-8}$	X^4Y^2	$2.549695693063 \times 10^{-14}$
X^4	$-1.89146570020516 \times 10^{-9}$	X^2Y^4	$1.780628633470 \times 10^{-14}$
X^2Y^2	$-3.7733664377066 \times 10^{-9}$	Y^6	$1.292338859180 \times 10^{-14}$
Y^4	$-1.69502835366705 \times 10^{-9}$	-	-

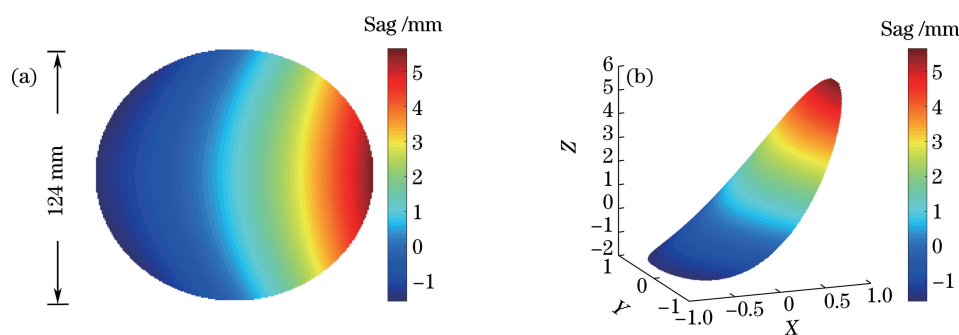


图 2 主镜 Zernike 自由曲面的面型。(a)二维;(b)三维

Fig. 2 Profile of Zernike freeform surface of primary mirror. (a) Two-dimensional; (b) three-dimensional

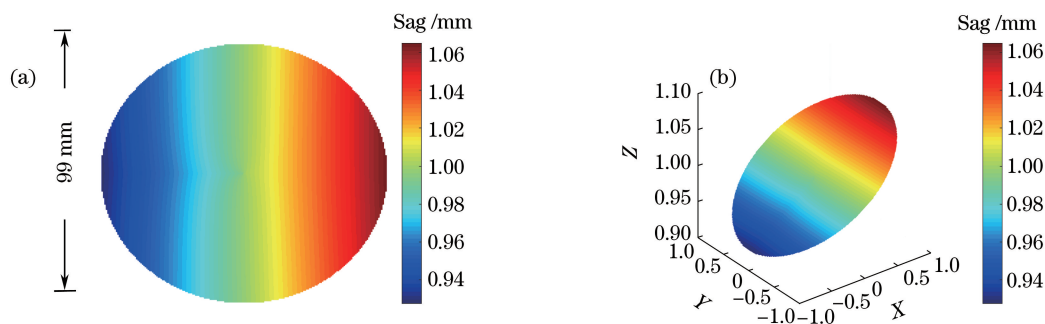


图 3 三镜 XY 自由曲面的面型。(a)二维;(b)三维

Fig. 3 Profile of XY freeform surface of tertiary mirror. (a) Two-dimensional; (b) three-dimensional

目前,自由曲面的检测与加工技术一直是阻碍其应用的技术难题,计算全息(CGH)法在非球面检测中得到了成功的应用,国内外的各大研究机构开始将 CGH 法广泛地应用于自由曲面的面型测量^[18]。该方法适用于小梯度变化的光学自由曲面元件,对于梯度变化非常大的自由光学面,加工难度和误差增大,检测精度下降。由图 2 和图 3 可知,系统主镜和三镜的面型连续变化,面型光滑,梯度变化

小,CGH 法适用。

5 成像质量分析

离轴反射式系统不具有旋转对称性,单纯看像差曲线并不能准确地反映系统的成像质量,点列图、能量包围分布图能更好地反映系统的成像质量。天基目标探测相机探测的主要依据是目标亮度,因此能量包围分布对于目标成像分析尤为重要。

图 4 所示为该天基探测光学系统的点列图,可以看出目标成像的弥散斑大小。为使目标像点能量均匀分布,通常选择弥散斑的大小为 2×2 个像元。点列图中各视场里弥散斑均方根(RMS)直径最大为 $15.416 \mu\text{m}$,小于两个像元尺寸,满足弥散斑覆盖 4 个像元的要求。

图 5 所示为该天基探测光学系统的能量包围分布图,能量集中度曲线反映出目标成像的能量分布

情况。探测系统通常需要在 2×2 个像元内集中 80% 以上的能量,图 5 中全视场内 85% 的能量都集中在直径为 $24 \mu\text{m}$ 的包围圆内,系统的能量集中度高。

以上成像质量分析结果表明,自由曲面的应用有效地校正了大视场目标探测光学系统的像差,在 $30^\circ \times 30^\circ$ 的大视场下,系统能量的集中度高,有很好的成像质量。

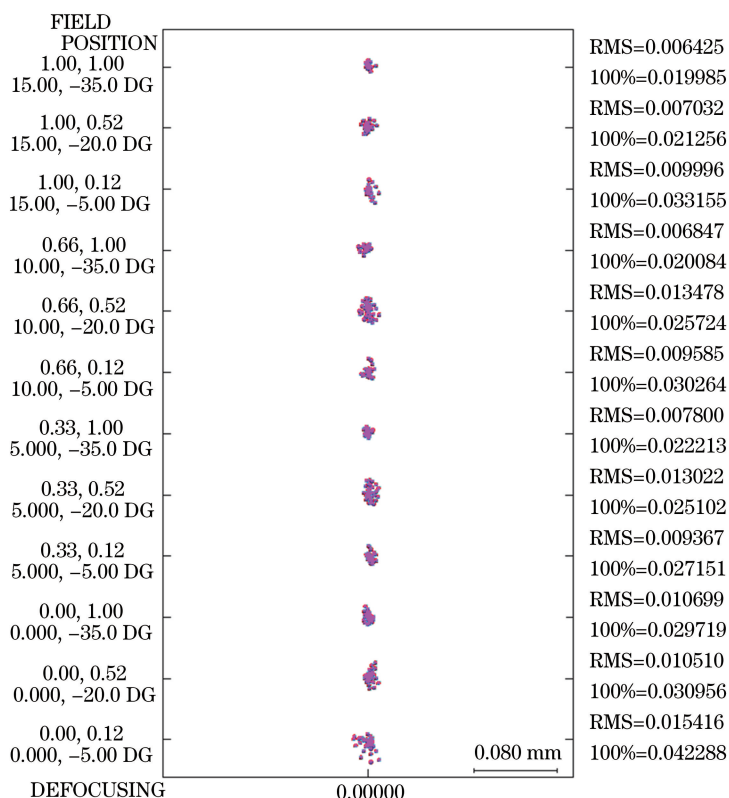


图 4 系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of system

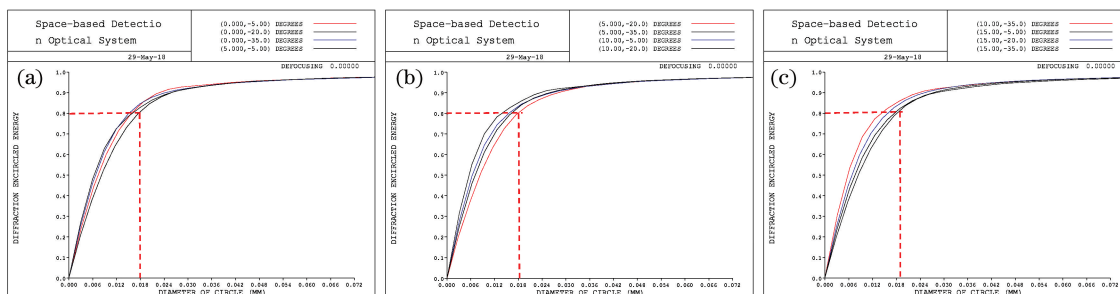


图 5 不同视场下的能量包围分布。(a) 0.5 视场;(b) 0.7 视场;(c) 视场边缘

Fig. 5 Encircled energy distributions under different field views. (a) Field view of 0.5; (b) field view of 0.7; (c) edge field of view

6 公差分析及自由曲面检测

6.1 光学系统的公差分配

光学系统的公差主要包括材料参数公差、加工公差和装调公差三类。该探测系统为反射式系统,故材料公差可不予考虑。系统要求弥散斑直径小于 2×2 个像元尺寸,根据现有的加工、装调能力,采用蒙特卡罗方法进行公差分析,以弥散斑的 RMS 直径作为系统性能衡量标准。公差项包含反射镜的制造公差和系统装调公差,公差分配结果见表 8,其中 ΔR 为顶点曲率半径的加工公差, ΔK 为二次曲面常数的加工公差, ΔY 为离轴量的加工公差。

表 8 系统公差分配

Table 8 Distribution of system tolerance

Mirror	Manufacture tolerance			Alignment tolerance		
	ΔR /mm	ΔK	RMS of shape error / λ	Decenter /mm	Tilt /rad	Displacement ΔY /mm
Primary mirror	0.02	0.01	1/50	0.02	3×10^{-4}	0.02
Second mirror	0.005	0.002	1/50	0.01	1.5×10^{-4}	0.02
Tertiary mirror	0.02	0.008	1/50	0.02	3×10^{-4}	0.08

表 9 系统公差表现

Table 9 Performance of system tolerance

Field No.	Sagittal direction /($^{\circ}$)	Tangential direction /($^{\circ}$)	Design value / μm	Design tolerance / μm
1	0	-5	0.015416	0.023123
2	0	-20	0.010510	0.018538
3	0	-35	0.010699	0.018867
4	5	-5	0.009367	0.016026
5	5	-20	0.013022	0.022765
6	5	-35	0.007800	0.014165
7	10	-5	0.009585	0.017063
8	10	-20	0.013478	0.021934
9	10	-35	0.006847	0.012299
10	15	-5	0.009996	0.018456
11	15	-20	0.007032	0.012354
12	15	-35	0.006425	0.016219

根据该探测系统的三镜参数,设计了 CGH 零位补偿器以检测系统三镜的自由曲面,检测光路如图 6 所示,CGH 元件的刻线密度及波像差如图 7 所示。CGH 元件的最大刻线密度约为 55 lp/mm,刻线密度相对较小,可以达到 CGH 的制作精度要求。检测系统的残余波像差峰谷(PV)值为 0.0086λ ,RMS 值为 0.0011λ ,可以满足系统自由曲面的面型公差要求及检测加工需要。

7 结 论

从近轴光学理论出发求解系统初始结构,选择

公差分析结果见表 9,在可以达到的公差分配下,全视场内系统最大的弥散斑直径为 $23.123\ \mu\text{m}$,满足系统弥散斑覆盖 2×2 像元的指标要求。

6.2 光学自由曲面补偿器设计

CGH 元件作为一种衍射光学元件,可以通过衍射产生任意形状的参考波前,相当于相位补偿器,可以用来替代复杂透镜组合。和传统补偿器相比,CGH 检测方法具有设计残差小、结构简单、测试精度高、调校方便等优点。CGH 元件的设计和制作可以是非旋转对称方式,因此将其作为零位补偿器可以实现自由曲面这类非旋转对称光学表面的补偿检测。

合理的三镜间距,将主镜设计为凸面,并将 Zernike 多项式和 XY 多项式自由曲面运用到离轴反射式光学系统中,使子午和弧矢方向都达到了 30° 的大视场。利用 Matlab 拟合出光学系统主镜和三镜的自由曲面面型,设计出的面型满足目前的检测与加工需要。系统的成像质量分析结果表明,自由曲面与离轴三反光学系统相结合不仅扩大了光学系统的视场,也提升了光学系统的成像质量。系统具有 9 等星探测能力,能够在 大天区对距离 255 km 处的目标进行探测。所设计的天基探测光学系统满足各项设计要求,大视场的探测范围适用于广域目标监视。

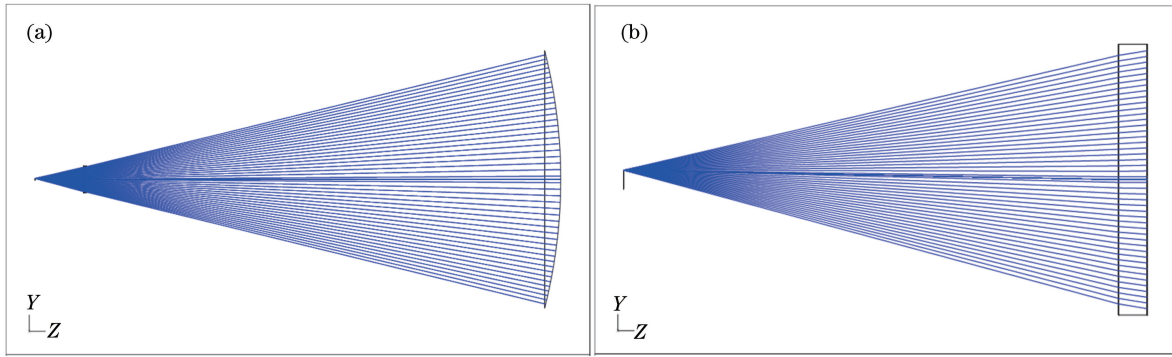


图 6 检测光路。(a)自由曲面的 CGH 检测光路;(b)检测光路中的 CGH 元件

Fig. 6 Detecting optical path. (a) CGH detecting optical path of freeform surface; (b) CGH unit in detecting optical path

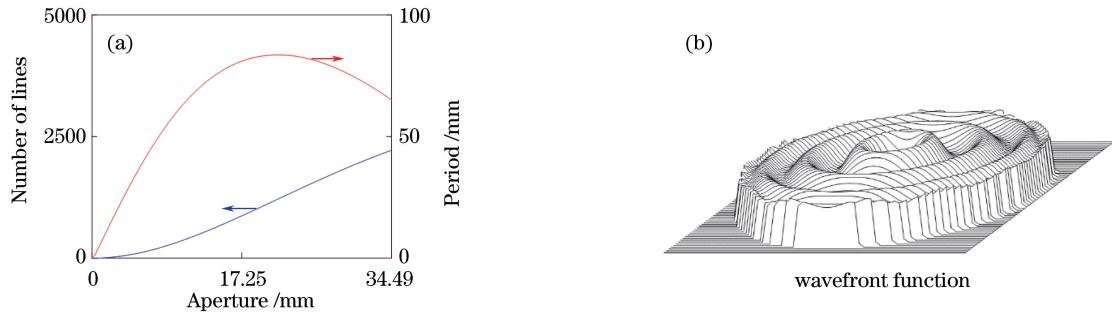


图 7 CGH 元件的刻线密度及检测系统的波像差。(a)刻线密度;(b)波像差

Fig. 7 Lithography linear density of CGH and wave aberration of detecting system.

(a) Lithographic linear density; (b) wave aberration

参 考 文 献

[1] Chang L Y, Chen R L, Wen D S, *et al.* Space-based optical combination detection system of space non-cooperative target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1232-1235.
常凌颖, 陈荣利, 汶德胜, 等. 空间非合作目标的天基光学组合探测系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1232-1235.

[2] Wang X H, Li J F, Wang Y R. Orbit determination and precision analysis of space object with space-based camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1394-1403.
王秀红, 李俊峰, 王彦荣. 天基照相机监测空间目标定轨方法及精度分析[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1394-1403.

[3] Sun X, Bai J G, Wang Z H, *et al.* Optical system design of visible-spectra camera for space-object capture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1548-1551.
孙鑫, 白加光, 王忠厚, 等. 一种用于空间目标捕获的宽视场可见光光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1548-1551.

[4] Li X Y, Li Y C, Ma Z, *et al.* Optical system design

of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2093-2097.
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2093-2097.

[5] Wang Y Q, Liu W Q, Fu H Y, *et al.* Optical design of space detailed survey camera in the middle or high orbit[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0116001.
王蕴琦, 刘伟奇, 付瀚毅, 等. 中高轨道空间详查相机光学设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0116001.

[6] Hou W, Zhu J, Yang T, *et al.* Construction method through forward and reverse ray tracing for a design of ultra-wide linear field-of-view off-axis freeform imaging systems [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(5): 055603.

[7] 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.
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.

[8] Meng Q, Wang H, Wang K, *et al.* Off-axis three-mirror freeform telescope with a large linear field of

- view based on an integration mirror[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 8962-8970.
- [9] Li N, Huang Y. Design of large-field and low-distortion freeform space optical system with 3D construction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0322001.
李娜, 黄颖. 基于三维构建法的大视场低畸变自由曲面空间光学系统设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0322001.
- [10] Liu J. Application of freeform surface in imaging optical systems[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 18-19.
刘军. 自由曲面在成像光学系统中的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 18-19.
- [11] Wang Q F, Cheng D W, Wang Y T. Description of free-form optical curved surface using two-variable orthogonal polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922002.
王庆丰, 程德文, 王涌天. 双变量正交多项式描述光学自由曲面[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922002.
- [12] Zhu H, Cui Q F, Piao M X, *et al.* Design of circular unobscured three-mirror optical systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 161-166.
朱浩, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 圆周式无遮拦三反射镜光学系统设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(10): 161-166.
- [13] Gong D, Wang H. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0722001.
巩盾, 王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反
射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(07): 0722001.
- [14] Wang W. The optical design of off-axis reflective system with freeform surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 11-12.
王伟. 自由曲面离轴反射式光学系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 11-12.
- [15] Xia C Q. The study on off-axis optical system with wide field of view for space-based detection camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 13.
夏春秋. 天基空间目标观测大视场离轴反射系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017: 13.
- [16] Tong J B, Zhang H W, Wu J F. Optical system design of space-based detection camera of space debris[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(s2): 48-55.
佟静波, 张宏伟, 吴建福. 空间碎片天基探测相机光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(s2): 48-55.
- [17] Jin Y Z. Research on optical detection and recognition method of space debris[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 15-22.
金玉竹. 空间碎片光学探测与识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 15-22.
- [18] Zhang L, Liu D, Shi T, *et al.* Optical free-form surfaces testing technologies [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299.
张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 283-299.