

基于自由曲面的大相对孔径大视场光学探测系统

马子轩^{1,2**}, 李旭阳^{1,2*}, 任志广^{1,3}, 褚楠清^{1,2}

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

²中国科学院大学光电学院, 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 为了实现空间碎片探测对探测光学系统灵敏度、探测时效性、孔径和总长等的需求,设计了一种大相对孔径大视场空间光学探测系统,并依据探测器指标与目标特性,确定了系统的设计参数,实现了 12.5 等星的探测。系统采用非对称双高斯透镜组光学结构,工作波段为 450~850 nm,视场角为 20°, F 数为 1.05,入瞳口径为 150 mm。采用 XY 多项式自由曲面设计了系统中的一个透镜前表面,分析结果表明,该系统弥散斑均处于 2×2 个探测像元内,全视场在 2×2 个像元内的包围能量占比在 86% 以上,最大畸变小于 1.4%。该探测系统结构紧凑,孔径合理,探测效果好,探测灵敏度高,时效性强;所使用的材料性能满足空间使用条件,且与光学加工能力匹配。所设计的探测系统可用于空间碎片的精确探测。

关键词 光学设计; 探测系统; 大相对孔径; 大视场; 自由曲面; XY 多项式

中图分类号 TN202

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1722002

Freeform-Surface-Based Optical Detection System with Large Relative Aperture and Large Field of View

Ma Zixuan^{1,2**}, Li Xuyang^{1,2*}, Ren Zhiguang^{1,3}, Chu Nanqing^{1,2}

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

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

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

Abstract In order to realize the requirements of the sensitivity, detection timeliness, aperture and total length of an optical detection system in the space debris detection scenario, we design a space optical detection system with a large relative aperture and large field of view. Moreover, based on the detector index and target characteristics, we determine the design parameters and realize the detection of 12.5 magnitude stars. The system uses an asymmetrical double Gaussian lens group optical structure and has the working band of 450-850 nm, field of view of 20°, F number of 1.05, and entrance pupil diameter of 150 mm. We design the front surface of a lens in the system based on an XY polynomial freeform surface. The design and analysis results show that the diffuse spot of the system is within the 2×2 detection pixels, the surrounding full field-of-view energy ratio within the 2×2 detection pixels is larger than 86%, and the maximum distortion is less than 1.4%. The optical detection system possesses a compact structure, a reasonable aperture, good detection effect, high detection sensitivity, and strong timeliness. The performance of the adopted materials meets the conditions of space use and matches up with the optical processing capability. The designed detection system can be used for the accurate detection of space debris.

Key words optical design; detection system; large relative aperture; large field of view; freeform surface; XY polynomial

OCIS codes 220.4830; 220.3620; 080.3620

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-05-16; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61427811)

* E-mail: lixuyang2004@126.com; ** E-mail: ma7772013@163.com

1 引 言

光学探测系统在空间探测中的应用广泛。由于空间碎片的光学探测对探测光学系统的灵敏度与时效性有很高的要求,因此设计具有大视场和大相对孔径的光学探测系统具有重要的意义。大视场可以保证该光学系统在工作时有足够大的探测空间,大相对孔径可以保证光学系统有充足的光照度。在满足大视场的条件下设计具有大相对孔径的光学系统存在诸多挑战^[1-2]。

光学系统的艾里斑半径与波长成正比但与相对孔径成反比。对于宽光谱光学探测系统,为了提高其分辨率及探测效率,需要设计具有大相对孔径的光学系统。因此,研究小 F 数(相对孔径的倒数)的光学系统具有重要意义。

孟庆宇等^[3]设计了具有 30° 视场角的探测光学系统,相对孔径为 $1/7.5$;杜康等^[4]设计了相对孔径为 $1/1.3$ 的光学系统,全视场角为 17° ;孟祥月等^[5]设计了相对孔径为 $1/1.25$ 的光学系统,视场角为 $8.45^\circ \times 8.45^\circ$ 。以上各光学系统在视场角足够大时相对孔径一般较小,而相对孔径较大时视场角又不尽如人意。

本文将具有多设计自由度的自由曲面应用于非对称双高斯透镜组的设计,设计了一个基于 XY 多项式的自由曲面光学探测系统,实现了 $1/1.05$ 大相对孔径及 20° 大视场的探测,提升了空间碎片的探测能力。系统具有探测灵敏度高、时效性强、结构紧凑等优点。

2 大相对孔径大视场光学系统

2.1 初始结构选型

大视场光学探测系统通常有折反式和透射式两种形式。折反式光学系统虽然具有很大的孔径,但其中的次镜等反射镜的存在导致系统的视场(FOV)受到一定的限制,不利于光学探测系统灵敏度的提高且难以保障探测的时效性。对于透射式光学系统,由于透镜对不同波长的光具有不同的折射率,因此系统会出现色散现象,但是不存在遮拦现象,且色散可以通过双胶合透镜或高折射率低色散的玻璃进行优化,同时一些特殊的透射式结构可以合理地扩大视场^[6-7]。

因此,考虑到系统整体的探测性能,选择双高斯透镜组作为初始结构对该光学系统进行初步设计。双高斯透镜组是一个具有大孔径和中等视场的对称

透镜组。双高斯透镜组通过后透镜校正正负球差,半个系统由一个单透镜和一个双胶合透镜组成,另一半系统与其完全对称。

双高斯透镜是个对称的系统,因此几乎不存在垂轴像差。设计这种系统只需要考虑校正球差、场曲、像散和色差。在双高斯透镜组中,利用厚透镜结构的变化可以对场曲进行校正,通过改变薄透镜表面曲率半径可以对球差进行校正,通过合理选取孔径光阑的位置可以校正像散,把厚透镜分离成正负透镜的组合可以实现色差的校正^[8-13]。

双高斯透镜组可以同时满足大口径和大视场的要求,但其光学性能指标的提高受到球差与高阶像散的限制。当焦距一定时, F 数越小,光学系统的设计就越难,当 F 数小于 2 时,双高斯透镜组的结构复杂化。在本文所设计的光学探测系统中,为了解决球差与高阶像散的矛盾,选用高折射率低色散的玻璃作为正透镜,加大它的曲率半径并把厚透镜分成多个透镜的组合,使每一个透镜的负担减小,同时使透镜的孔径加大。

经过以上处理,透镜组变成非对称的形式。利用光学设计软件进行简单的优化设计,通过像差数据分析得知,像散和畸变是最影响能量集中的像差。将初始结构中的两个双胶合透镜分离,在前半部增加一片透镜以分担光焦度,在后半部增加一个双胶合透镜以校正色差,因此得到一个由 9 片透镜组成的系统结构。考虑到慧差和高阶像散,选用基于 XY 多项式的自由曲面,对光阑后的第一片透镜的前表面进行设计,在满足能量平均集中的前提下实现系统总长度的大幅缩短和系统质量的减小。

2.2 基于 XY 多项式的自由曲面

光学自由曲面指非旋转对称的光学曲面。与传统光学曲面相比,自由曲面具有更高的像差校正能力和更多的设计自由度,能更好地校正边缘视场像差,扩大视场角^[14-15]。

基于 XY 多项式的自由曲面表达式为

$$Z = \frac{cr_1^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r_1^2}} + \sum_{j=2}^N C_j X^m Y^n, \quad (1)$$

式中: (X, Y, Z) 为曲面上的点坐标; r_1 为点 (X, Y, Z) 处的曲率半径, $r_1 = \sqrt{X^2 + Y^2}$; C_j 为 XY 多项式的系数; N 为 XY 多项式的阶数; c 为曲面顶点处的曲率半径; k 为二次曲面常数; $j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1$; m 和 n 为非负整数,分别为 x 和 y 的阶数。在光学设计软件中, XY 多项式的阶

数受到一定的限制,通常取 $m+n \leq 10^{[5]}$ 。

XY 多项式具有非旋转对称性,便于校正非对称像差,与其他自由曲面面型相比,其更易于检测与加工。因此,本文利用基于 XY 多项式的自由曲面进行大相对孔径大视场光学探测系统的设计。

3 光学设计

3.1 探测目标星等

空间中的碎片本身不发射光,探测系统需要通过捕捉其反射的太阳光进行探测。为合理描述空间碎片的亮度,一般不直接使用照度公式,而是采用天文学中的星等来进行描述。星等数字越大,目标照度越小。星等的计算公式为

$$\lg E_0 - \lg E_m = 0.4m, \quad (2)$$

式中: E_0 为零等星的辐照度,规定 $E_0 = 2.068 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$; E_m 为目标在系统入瞳处的照度; m 为目标星等值。

将空间碎片简化为球体,系统入瞳处的照度为

$$E_m = \frac{2}{3} \rho E_s r^2 \frac{(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha}{d^2}, \quad (3)$$

式中: ρ 为探测目标的表面光谱反射率; E_s 为太阳光谱辐照度; r 为目标半径; d 为目标与探测系统间的探测距离; α 为太阳角,即太阳-目标连线与太阳-系统连线的夹角。在本文中,假定 $\alpha = 130^\circ$, $E_s = 910.5 \text{ W/m}^2$, $\rho = 0.25$, $r = 5 \text{ m}$, $d = 60000 \text{ km}$, 计算得到系统入瞳处的辐照度为 $2.16 \times 10^{-13} \text{ W/m}^2$, 探测目标的星等值为 12.5。当系统的探测星等高于探测目标的星等值时,探测系统才能探测到该目标。

3.2 入瞳直径计算

入瞳直径由目标的辐射特性和探测器的信噪比决定,其计算公式^[16]为

$$D \geq \sqrt{\frac{R_{\text{SNth}}^2 + \sqrt{R_{\text{SNth}}^4 + 4R_{\text{SNth}}^2(B + N_c^2)}}{2E_m \frac{\pi}{4} \tau t \frac{1}{E_{\text{ph}}} Q_E}} \times \frac{l_2}{l_1}, \quad (4)$$

式中: τ 为光学探测系统的透过率; t 为探测器的积分时间; E_{ph} 为单个光子的能量; Q_E 为探测器的量子效率; R_{SNth} 为信噪比阈值; B 为非抑制杂光辐射在单个像元上的信号电子数; N_c 为系统噪声; l_1 为像元边长; l_2 为单视场像点直径。在本文中, $\tau = 0.85$, $t = 0.02 \text{ ms}$, $E_{\text{ph}} = 3.4 \times 10^{-19} \text{ J}$, $Q_E = 55\%$, $R_{\text{SNth}} = 6$, $B = 8$, $N_c = 12$, 将上述各值代入(4)式,求

得系统最小入瞳直径为 142 mm,为使系统获得充足的入射能量,取 $D = 150 \text{ mm}$ 。

3.3 设计参数

依据系统设计的要求,合理的设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	450-850
Focal length /mm	158
Entrance pupil /mm	150
F number	1.05
Field of view /($^\circ$)	20
Pixel size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	10 \times 10
Detector size /($\text{mm} \times \text{mm}$)	40 \times 40

3.4 设计结果

根据前文基于自由曲面的非对称双高斯透镜组设计原理及初始结构的设计思路,利用光学设计软件进行优化和像差校正。为了获取良好的光学系统探测性能,以点列图和包围能量分布为基准优化系统。系统结构图如图 1 所示,系统数据如表 2 所示,其中 CDGM 代表成都光明公司,其前面的符号为玻璃型号, special 表示特种材料,本系统使用的特种材料为熔石英(Silica)和氟化钡(BaF_2)。

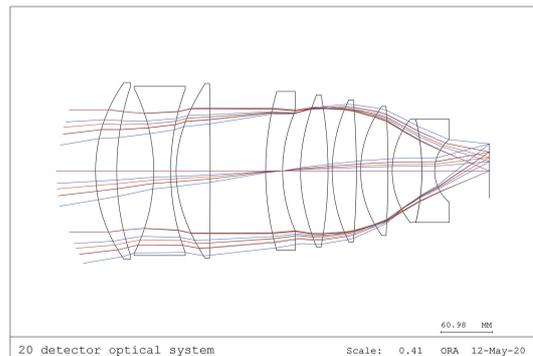


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of system

本文设计基于 XY 多项式的自由曲面时,选用 2 阶及以下的 XY 多项式,仅对含有 X 和 Y 偶次项的面型参数进行优化,这样可以使系统视场关于 X、Y 轴对称。优化时,为了减少计算量,仅对视场 1~10 进行优化,系统视场图如图 2 所示。各视场对应的视场角如表 3 所示。同时,由于 Y 的一次项直接影响曲面的偏心与倾斜度及系统焦距^[17],因此不使用 Y 的一次项面型参数,最后优化得到的自由曲面面型参数如表 4 所示,面型图如图 3 所示。

表 2 系统数据
Table 2 System data

Surface	Surface type	Radius of curvature /mm	Conic constant	Thickness /mm	Material	Aperture /mm
Object	Standard	Infinity		Infinity	Air	
1	Standard	192.67		25.00	Silica_special	210.84
2	Standard	340.08		43.62	Air	204.91
3	Standard	-234.44		20.00	HBAK4_CDGM	201.76
4	Standard	301.16		6.49	Air	200.50
5	Quadric	165.90	-1.33	41.20	BaF ₂ _special	208.61
6	Standard	-6255.80		65.39	Air	207.58
7	Standard	373.09		20.00	HZF6_CDGM	189.23
Stop	Standard	190.02		21.10	Air	146.79
9	XY polynomial	161.90	-1.77	31.46	BaF ₂ _special	181.10
10	Standard	-530.65		5.00	Air	180.21
11	Standard	204.17		29.50	BaF ₂ _special	168.98
12	Standard	-1068.73		5.00	Air	165.26
13	Standard	157.87		32.23	BaF ₂ _special	153.27
14	Standard	-1608.91		5.00	Air	149.03
15	Standard	105.36		35.00	BaF ₂ _special	122.04
16	Standard	-282.20		15.00	HLAK67_CDGM	110.55
17	Standard	52.27		64.75	Air	77.00
Image plane	Standard	Infinity		0		66.52

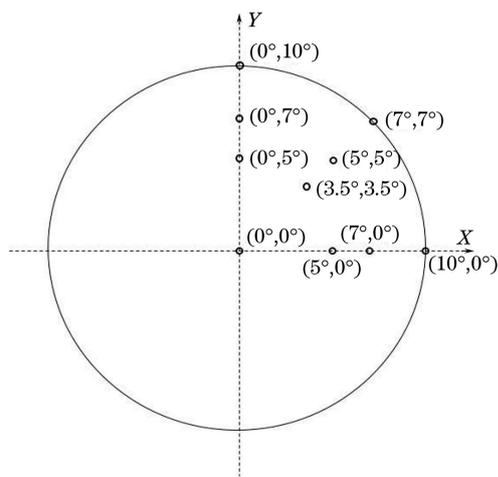


图 2 系统视场图
Fig. 2 Field of view of system

4 系统分析评价

4.1 系统探测性能的分析

自由曲面的运用使得系统不再具有旋转对称性,单纯地使用像差曲线已不能准确评价光学系统,点列图、包围能量分布图及场曲与畸变图的综合判断可以很好地反映系统的探测性能。

为保证内插精度及确保探测器的有效探测,通常要求弥散斑 80%~85%的能量落在 2×2 或 3×3 个像元范围内^[18]。本文基于以上考虑,选择占据 2×2 个像元的弥散斑。本文的设计系统选用的探测器尺寸为 10 μm×10 μm,点列图如图 4 所示,其中蓝色、绿色和红色的点分别表示 450,650,850 nm 波长的光。

表 3 视场对应的编号

Table 3 Corresponding number of field of view

Field No.	1	2	3	4	5
Field of view	(0°, 0°)	(0°, 5°)	(3.5°, 3.5°)	(5°, 0°)	(0°, 7°)
Field No.	6	7	8	9	10
Field of view	(5°, 5°)	(7°, 0°)	(0°, 10°)	(7°, 7°)	(10°, 0°)

表 4 XY 自由曲面参数

Table 4 Parameters of XY freeform surface

Item	Coefficient
X ²	-0.000755341578837755
Y ²	-0.000755341617671267

从点列图中可以看出,系统视场弥散斑的均方根(RMS)直径最大值为 13.809 μm,满足弥散斑覆盖 2×2 个像元的要求。

包围能量分布图可以完整地反映系统能量弥散的

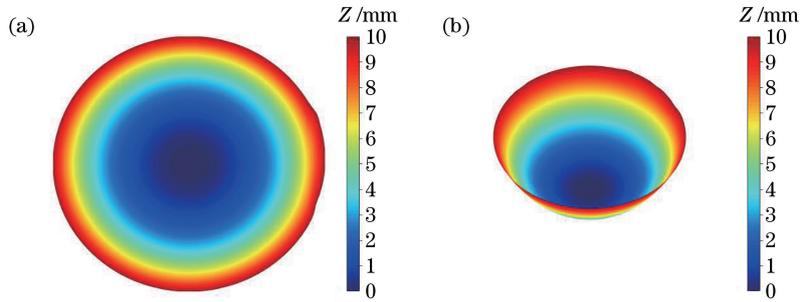


图 3 自由曲面面型。(a)二维;(b)三维

Fig. 3 Shape of freeform surface. (a) Two-dimensional; (b) Three-dimensional

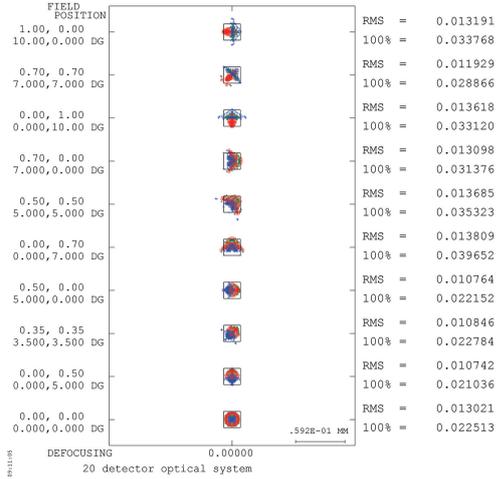


图 4 点列图

Fig. 4 Spot diagram

位置,本系统各视场的包围能量分布图如图 5 所示。

由系统包围能量分布图可知,各视场能量都集中在边长为 $17.326 \mu\text{m}$ 的正方形内,正方形尺寸小于两个像元尺寸,各个视场在 2×2 个像元内的包围能量占比均高于 86% ,系统能量集中度高。

场曲与畸变图及畸变网格可以直接反映系统场曲与畸变在各个视场下的情况。本文系统的场曲与畸变图及畸变网格分别如图 6 和图 7 所示,其中图 6 左图中的实线和虚线分别代表切向与弧矢方向三个特征波长的光,右图中的三条线分别代表三个特征波长的光。

由场曲与畸变图及畸变网格可知,系统视场的最大场曲小于 0.05 ,最大畸变小于 1.4% ,场曲与畸变不影响系统的探测性能。

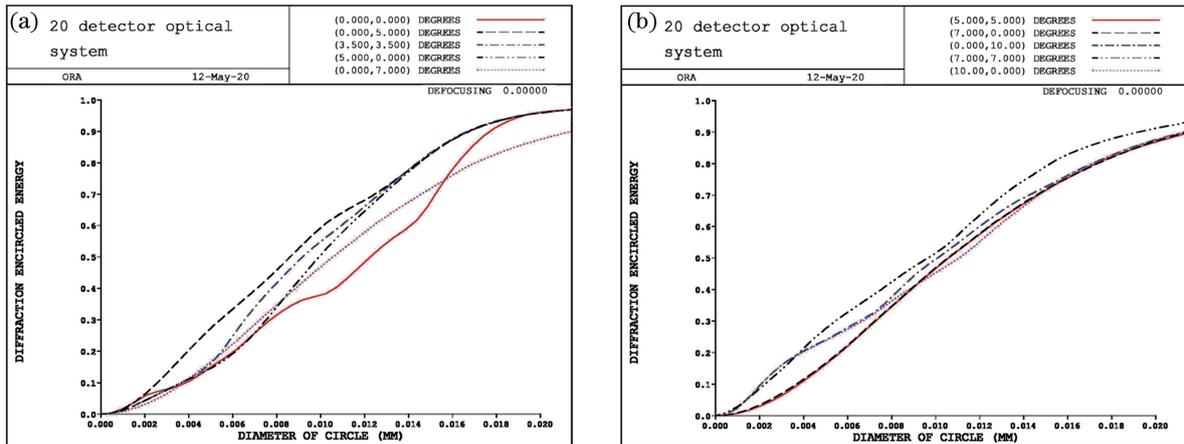


图 5 包围能量分布图。(a)视场 1~5;(b)视场 6~10

Fig. 5 Surrounding energy distributions. (a) FOV 1-5; (b) FOV 6-10

综上所述,系统能量集中度高,探测性能良好。

4.2 系统探测星等分析

系统探测星等范围的数学评估模型^[6]为

$$m \leq \frac{5}{2} \lg \frac{2E_0 \frac{\pi}{4} D^2 \tau t \frac{1}{E_{ph}} Q_E}{R_{SNth}^2 + \sqrt{R_{SNth}^4 + 4R_{SNth}^2 (B + N_c^2)}} \quad (5)$$

将 3.1 节与 3.2 节中的各参数代入(5)式进行计算,得到系统探测星等范围为 $m \leq 12.6$ 。因此该光学探测系统最多可以探测到 12.5 等星。

4.3 系统公差分析

通过合理分配系统中所有光学元件的制造公差,并进行性能误差预测,可以准确地预估光学性能的期望水平,确保以合理的成本实现系统所要求的

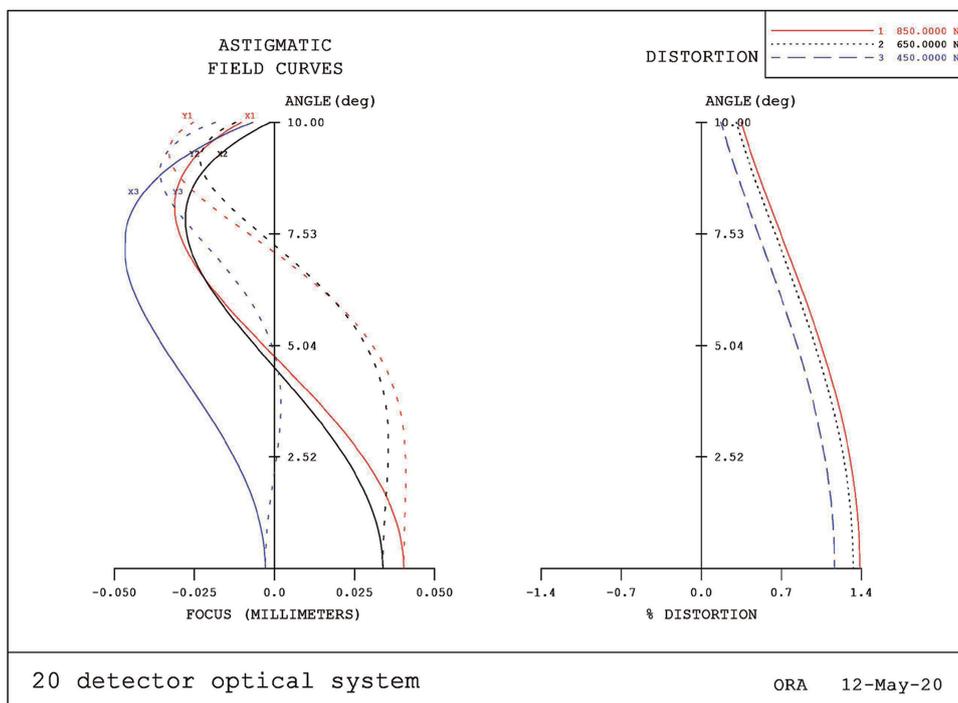


图 6 场曲与畸变图

Fig. 6 Field curvature and distortion

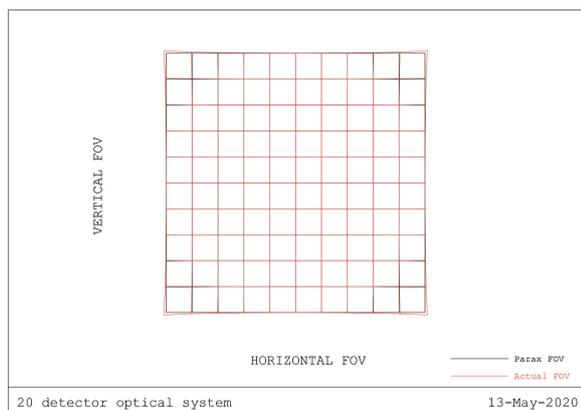


图 7 畸变网格

Fig. 7 Distortion grid

光学性能。在该系统的公差分析过程中,需要给所有光学元件分配合理的公差,使光学探测系统的探测性能达到要求,并使光学元件的成本及装配和校准的成本达到最低。

该光学系统的公差参数包括透镜的厚度、倾斜度、偏心、楔角、光圈、二维不规则度,非球面的曲率半径、二次曲面常数、随机 RMS 表面误差,空气间隙,材料的折射率和阿贝数以及自由曲面的两个参数等。为了衡量光学系统的实用性,先使用公差计算程序计算光学系统内除自由曲面参数外的各公差对光学探测性能敏感度,再评估自由曲面参数变化对系统探测性能的影响,最后基于探测性能的要求及制造、检

测和装配的能力,确定光学系统的最终公差。

利用光学设计软件,在较宽松的工艺条件下,按照经验给出探测系统各结构参数的公差预定值,如表 5 所示。以第一面镜为基准,将光学系统的后截距作为补偿量进行敏感度光学分析,得到光学系统的 80%包围能量分布预估,如图 8 所示。

表 5 预定公差

Table 5 Predetermined tolerance

Tolerance type	Tolerance value
Lens thickness and air gap	0.02 mm
Lens tilt angle	0.001 rad
Lens offsetting distance	0.02 mm
Lens wedge angle	0.0003 rad
Lens aperture	2
Two-dimensional irregularity of lens	0.2
Curvature radius (aspherical)	0.01 mm
Quadric surface constant	0.001
Random RMS surface error (aspherical)	0.025
Refractive index of material	0.0001
Abbe number of material	0.002

对设计结果进行公差分析,找出特别敏感的公差,并给出期望值,如表 6 所示。

对修改后的公差重新进行灵敏度分析,得到光学系统 80%包围能量分布预估,如图 9 所示。由图 9 可见,除自由曲面参数外,光学系统的公差已经满足探测质量要求。

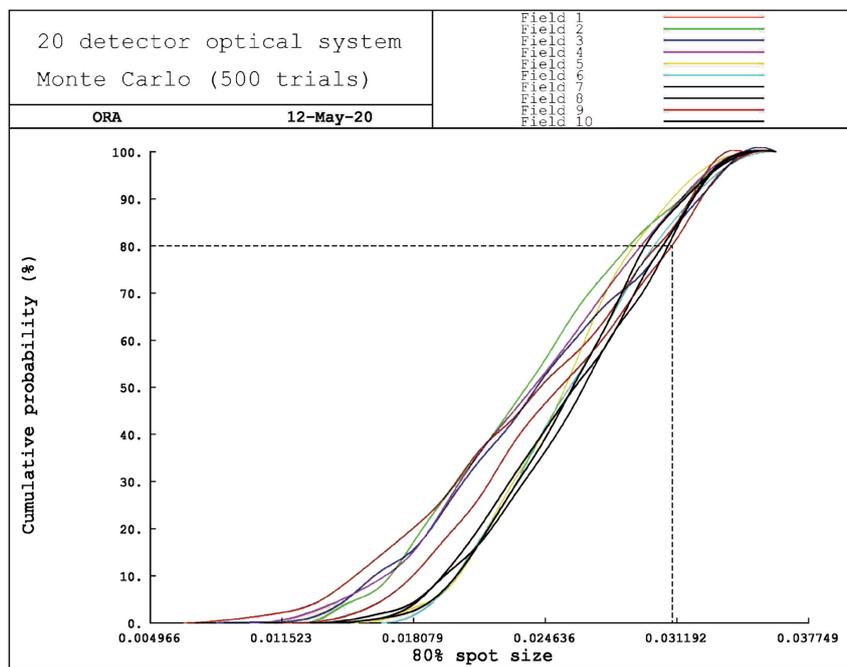


图 8 预定公差下的 80%包围能量分布预估

Fig. 8 80% surrounding energy distribution estimation under predetermined tolerance

表 6 敏感公差

Table 6 Sensitive tolerance

Tolerance type	Active surface	Expected tolerance
Lens tilt angle	3 and 7	0.0003 rad
Lens offsetting distance	All	0.01 mm

使自由曲面参数在 $\pm 0.5\%$ 范围内变化,仍使用后截距作为补偿量,得到变化后系统的 80%包围能量分布对应的最大包围正方形边长预估,如表 7 所示。分析表 7 可知,自由曲面参数须在 $\pm 0.3\%$ 范围内变化。

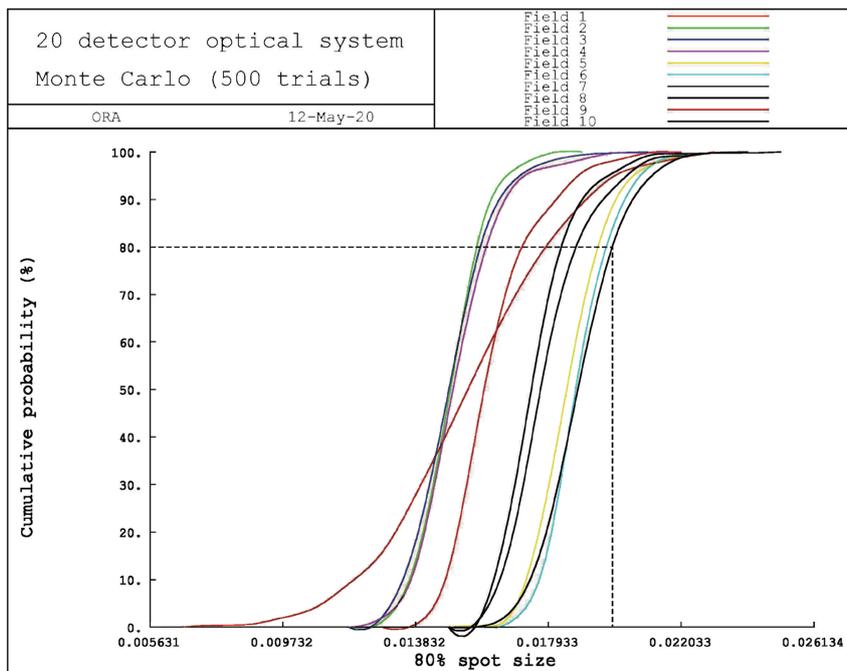


图 9 公差修正后的 80%包围能量分布预估

Fig. 9 80% surrounding energy distribution estimation after tolerance correction

表7 80%包围能量分布对应的最大包围正方形边长预估
Table 7 Estimated maximum enveloping square side length corresponding to 80% surrounding energy distribution

Proportion of change /%	Maximum enveloping square side length / μm
-0.50	20.719
-0.40	20.241
-0.30	19.849
-0.20	19.546
-0.10	19.351
0	17.326
0.10	18.627
0.20	18.815
0.30	18.883
0.40	19.363
0.50	19.949

通过以上分析可知,光学系统的公差满足探测质量的要求,且与光学加工、检测和装配的能力匹配。

5 结 论

基于非对称双高斯透镜组设计原理,确定了初始结构;将基于XY多项式的自由曲面运用于透射式光学系统中,设计了工作于450~850 nm,焦距为158 mm,视场角为20°,F数为1.05的全透射式探测光学系统。系统探测性能分析结果表明,该系统全视场在2×2探测像元内的包围能量占比均高于86%,系统最大畸变小于1.4%,最大探测星等为12.5,各项指标均满足设计要求。所设计系统的结构紧凑,探测性能良好;所使用的材料均满足空间使用条件,与光学加工能力匹配。所设计系统可用于空间碎片的精确探测。

参 考 文 献

- [1] Meng Q Y, Zhang W, Long F N. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2079-2084.
孟庆宇, 张伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2079-2084.
- [2] 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.
- [3] Meng Q Y, Dong J H, Qu H F, et al. Light optical system design with wide spectral band, large field of view for deep space exploration[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0122001.
孟庆宇, 董吉洪, 曲洪丰, 等. 用于深空探测的宽波段大视场小型光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0122001.
- [4] Du K, Liu C Y, Xie Y Q, et al. Lens design of micro star sensor with large aperture based on aspheric surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 96-103.
杜康, 刘春雨, 谢运强, 等. 基于非球面的大相对孔径微型星敏感器镜头设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 96-103.
- [5] Meng X Y, Wang Y, Zhang L, et al. Lens design of star sensor with large relative aperture and wide spectral range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 0718005.
孟祥月, 王洋, 张磊, 等. 大相对孔径宽光谱星敏感器光学镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0718005.
- [6] Ni D W, Li X Y, Yang M Y, et al. Large field of view space-based optical detection system based on freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1122003.
倪栋伟, 李旭阳, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场天基探测光学系统[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1122003.
- [7] Ren Z G, Li X Y, Ni D W. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0922001.
任志广, 李旭阳, 倪栋伟. 大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0922001.
- [8] Shi S S. Research on optical design schemes for push-broom imager[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016:43-55.
史珊珊. 推帚式成像光学系统技术方案探究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 43-55.
- [9] Wu J. Three-dimensional high precise optical positioning technique and its clinical application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 45-49.
吴剑. 三维高精度光学定位技术及其临床应用[D]. 北京: 清华大学, 2004: 45-49.
- [10] Bao S S. Research of spatial spectrophotometer based on imaging sphere principle[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014: 17-22.
鲍思思. 基于成像球原理的空间分光光度计的设计[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014: 17-22.
- [11] Ni L T, Cheng P, Wei D. Design of aspheric photographic lens based on ZEMAX[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012, 35(11): 1510-1513.

- 倪绿汀, 程萍, 位迪. 基于 ZEMAX 的非球面摄影镜头的设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(11): 1510-1513.
- [12] Chen B Y. Optical design with fast relative aperture for digital X-Ray radiography system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 26-40.
陈宝莹. 大相对孔径数字化 X 射线成像系统的光学设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 26-40.
- [13] Yang L H, Fan X W, Zou G Y. Design of large-aperture camera lens working in wide spectral range[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 925-928.
杨利华, 樊学武, 邹刚毅. 宽谱段大口径透射式摄影镜头设计[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 925-928.
- [14] Meng Q Y, Wang H Y, Wang K J, 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.
- [15] Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field of view based on freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0808001.
操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0808001.
- [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): S229004 .
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): S229004.
- [17] Wang W. Design of freeform off-axis reflective optical system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 28-30.
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: 28-30.
- [18] Zhao Y. New type reflective optical system design for a star sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 16-17.
赵阳. 新型反射式星敏感器光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 16-17.