

大线视场自由曲面离轴三反光学系统设计

孟庆宇¹,汪洪源²,王 严¹,纪振华¹,王 栋¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 设计了一款大线视场离轴三反光学系统, 系统焦距 1 200 mm, 相对孔径 1:12, 视场角 $30^\circ \times 1^\circ$ 。设计中, 第三反射镜应用了 x - y 多项式光学自由曲面提升系统设计自由度, 为便于装调, 保证关于子午面像质对称, 对 x - y 多项式自由曲面表达式进行了修正。设计结果得出, 该系统光学传递函数均优于 $0.45@50$ lp/mm, 工作视场内, 系统最大波像差为 0.056λ , 平均波像差 RMS 值为 0.036λ , 最大畸变值为 0.8% , 像质相对于子午面完全对称。系统进行了合理的公差分配, 蒙特卡罗分析结果显示, 该光学系统最终可实现平均波像差优于 $\lambda/14$ 的成像质量。该系统的设计对空间遥感器光学系统的设计具有一定的参考价值, 适合作为大幅宽推扫成像系统。

关键词: 光学设计; 自由曲面; 大线视场; 离轴系统

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1018002

Off-axis three-mirror freeform optical system with large linear field of view

Meng Qingyu¹, Wang Hongyuan², Wang Yan¹, Ji Zhenhua¹, Wang Dong¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An off-axis three-mirror system with large linear field of view was designed. The system is with a focal length of 1 200 mm, a F -number of 12, a linear field of view of $30^\circ \times 1^\circ$. In the system, x - y polynomial freeform surface was applied as the tertiary mirror surface type to increase the system design degree of freedom, furthermore, in order to bring considerable convenience to alignment, and obtain an axial symmetrical imaging quality about the tangential plane, the x - y polynomial was modified. The design results show that system modulation transfer function value is above $0.45@50$ lp/mm, wavefront error maximum value is 0.056λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), RMS wavefront error value is 0.036λ , maximum distortion value is 0.8% , and the imaging quality is symmetrical about the tangential plane. The realizable tolerance values are allocated, and based on Monte Carlo analysis method the tolerance analysis results show that the system RMS wavefront error is less than $\lambda/14$. The off-axis three-mirror system has a certain reference value for remote sensor optical system design, and it is suitable for wide swath linear pushbroom imaging system.

Key words: optical design; freeform surface; large linear field of view; off-axis system

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 航天支撑基金(JZ20140151)

作者简介: 孟庆宇(1986-), 男, 助理研究员, 主要从事空间遥感器光学系统设计与研制方面的研究。Email:mqyzx@163.com

0 引言

反射式光学系统由于具有良好的热特性、无色差、易实现长焦距、可获得大口径材料等优点被广泛应用于空间遥感领域。由同轴反射式系统演变的离轴反射式系统更由其可实现大视场、无中心遮拦等优势受到越来越多的关注^[1-2]。目前,以 SPOT-5、QuickBird、ALOS-2、CARTOSAT-1 为代表的一大批国际知名遥感相机的光学系统均采用了离轴反射式系统^[3-5]。

然而,采用简单面形的离轴反射式光学系统由于有限的设计自由度很难实现较大视场,成像幅宽受到了限制。随着计算机运算能力和光学制造水平的提升,近年来,具有强大的像差校正能力,可以提供丰富设计自由度的自由曲面被越来越多地应用于高指标的成像光学系统中,光学自由曲面为光学系统高质量像质的实现带来了极大的便利^[6-7]。国外一些知名光学项目中,光学自由曲面已经获得了成功应用:如 EAS 对地中波红外观测项目 IRLS^[8-9];英国宇航技术中心项目 SCUBA-2 中,自由曲面均对光学系统像质提升起到了重要作用。目前国内科研机构在自由曲面设计、制造与检测方面也开展了很多工作:如清华大学与天津大学在 2014 年设计并制造出了入瞳 $\Phi 100\text{ mm}$,相对孔径 1:1.38,方视场 $4^\circ \times 5^\circ$ 的离轴 TMA 光学系统^[10];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的离轴反射式光学系统中应用了自由曲面,使系统实现了 76° 视场角^[11]。

根据笔者前期的研究工作^[12],设计了一种基于 $x-y$ 自由曲面的大线视场离轴三反光学系统,并给出了详细的设计数据。该系统对空间遥感器光学系统设计具有一定参考价值,适合作为大幅宽推扫对地成像光学系统。

1 光学系统设计

1.1 初始结构求解

离轴三反光学系统初始结构较为简单的求解方法可以由求解出一个同轴三反光学系统结构开始,获得结构后,添加反射镜孔径离轴量、视场离轴角等参数完成进一步设计^[12]。同轴三反射式光学系统的三级像差公式如公式(1):

$$\begin{bmatrix} S_I \\ S_{II} \\ S_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(\beta_1, \beta_2) & B_1(\beta_1, \beta_2) & C_1(\alpha_1, \alpha_2, \beta_2) \\ A_2(0) & B_2(\alpha_1, \beta_1, \beta_2) & C_2(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \\ A_3(0) & B_3(\alpha_1, \beta_1, \beta_2) & C_3(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -k_1 \\ -k_2 \\ -k_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \\ D_2(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \\ D_3(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_I, S_{II}, S_{III} 分别为赛德尔球差、彗差、像散的三级像差系数; $-k_1, -k_2, -k_3$ 为主镜、次镜与三镜的二次非球面系数; $A_i, B_i, C_i, D_i (i=1, 2, 3)$ 是 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 的函数。 α_1 为次镜对主镜的遮拦比; α_2 为三镜对次镜的遮拦比; β_1 为次镜放大率; β_2 为三镜放大率。

$$S_I = \frac{1}{4} [(-k_1-1)\beta_1^3\beta_2^3 + k_2\alpha_1\beta_2^3(1+\beta_1)^3 - k_3\alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)^3 + \alpha_1\beta_2^3(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2 - \alpha_1\alpha_2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2] \quad (2)$$

$$S_{II} = \frac{k_2(\alpha_1-1)\beta_2^3(1+\beta_1)^3}{4\beta_1\beta_2} - \frac{k_3[\alpha_2(\alpha_1-1)+\beta_1(1-\alpha_2)]}{4\beta_1\beta_2} \cdot (1+\beta_2)^3 + \frac{(\alpha_1-1)\beta_2^3(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1)+\beta_1(1-\alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2} \quad (3)$$

$$S_{III} = \frac{k_2\beta_2(\alpha_1-1)^2(1+\beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{k_3[\alpha_2(\alpha_1-1)+\beta_1(1-\alpha_2)]^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} \cdot (1+\beta_2)^3 + \frac{\beta_2(\alpha_1-1)^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{1}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} \cdot [\alpha_2(\alpha_1-1)+\beta_1(1-\alpha_2)]^2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2 - \frac{1}{\alpha_1\beta_1} \cdot \beta_2(\alpha_1-1)(1+\beta_1)(1-\beta_1) - \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1)+\beta_1(1-\alpha_2)]}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} \cdot (1+\beta_2)(1-\beta_2) - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \quad (4)$$

根据成像方式,三反系统可分为无中间像面、次三镜间有中间像面、主次镜间有中间像面与两次中间像面几种形式, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 取不同数值时,可求解出四种不同形式的光学系统初始参数。孔径光阑位于次镜的三反系统,由于主镜与三镜相对于次镜具有对称性,有利于垂轴像差的校正,便于快焦比、大视场光学系统的实现。初始结构求解过程中,根据公式(1),在无中间像系统允许取值范围内迭代 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 数值,求出使 S_I, S_{II}, S_{III} 数值较小且同时系统结构尺寸较为合适的解,获得同轴三反系统初始结构,如图 1 所示,在此基础上添加离轴角,形成离轴三反初始结构,如图 2 所示。择优选择 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1,$

β_2 的输入值,可以获得较为合适的初始结构,这有利于光学系统的后期设计,初始结构求解中, $\alpha_1=0.5$, $\alpha_2=2$, $\beta_1=\beta_2=1$,获得 $S_I=0$, $S_{II}=0$, $S_{III}=-0.000\ 017$ 的同轴三反初始结构;添加 -3° 的离轴角后,获得 $S_I=0$, $S_{II}=0$, $S_{III}=-0.069$ 的离轴三反初始结构。目前大量文献与资料均有对同轴三反与离轴三反系统初始结构求解的论述,这里不做过多说明。

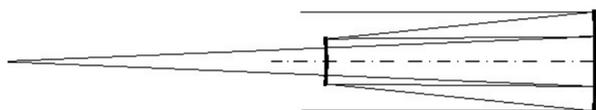


图 1 同轴初始结构

Fig.1 Coaxial initial configuration

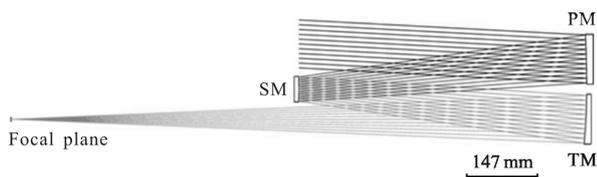


图 2 加入离轴角后的初始结构

Fig.2 Initial configuration with off-axis angles

1.2 自由曲面分析及应用

自由曲面^[13]是一类非旋转对称面型的集合,与传统光学面形相比,因其丰度的设计自由度,具有强大的像差校正能力。目前随着制造水平的提高,光学自由曲面已逐渐越来越多地用于成像与非成像光学系统。

Zernike 多项式面型、Splines 面型、Gauss 多项式面型和 $x-y$ 扩展多项式面型为几种常用的光学自由曲面面型。这些面型各有特点,Zernike 多项式在圆域内正交,所以各项不会造成耦合干扰;Splines 样条具有较好的加工性,但优化难度大;Gauss 多项式具有较好的像差平衡能力; $x-y$ 多项式面型与数控光学车床的加工表达式一致,最适合确定是加工,经过理论推导也可以与 Zernike 多项式面型之间完成转换^[14],反射镜加工中,传统离轴非球面面型在数控光学车床系统坐标系下也可以被理解成一种自由曲面。基于前期研究工作^[15],设计中选择了 $x-y$ 扩展多项式面型进行系统设计,面型表达式如公式(5):

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

式中: c 为基圆曲率; r 为径向坐标; k 为二次圆锥系数; N 为 $x-y$ 多项式序列; A_i 为 $x-y$ 多项式无量纲系数; E_i 为 $x-y$ 多项式子项。

在光学系统空间坐标系中, x 代表光学系统的弧矢方向, y 代表光学系统的子午方向。离轴三反光学系统易于在弧矢方向实现较大的线视场,使光学系统在 TDI-CCD 的配合下完成推扫成像。采用传统面型的光学系统,由于面型的旋转对称,像面像质也完全对称,有利于光学系统的装调,为系统的失调特性判别以及计算机辅助装调提供了便利。自由曲面由于为非旋转对称面型,面型自由度完全放开,设计像质也会随之完全失去对称性,工程应用中,加之后期其他误差项的引入,光学系统非对称性的像质将会对装调工作带来一定难度。

基于分析,在自由曲面具体应用中构建对称像质,只应用了 $x-y$ 扩展多项式中含有 x 偶次幂的项,去除了 x 的奇次幂的项,如公式(6):

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_{01}x^0y^1 + A_{20}x^2y^0 + A_{02}x^0y^2 + A_{03}x^0y^3 + \dots + A_{00}x^0y^0 + \dots \quad (6)$$

基于此修正后的 $x-y$ 多项式自由曲面面型,所设计像质将会相对于子午面对称,为光学系统装调带来便利。

在自由曲面应用中,较少有文献分析自由曲面各项与像差的对应校正关系,基于此,采用定性的方式分析了 $x-y$ 自由曲面的像差校正能力。根据正负像差相消的补偿理论,一个面型若有产生某种正像差的能力,即可以消除该种负像差的能力。在自由曲面像差校正能力的定性分析过程中建立了一套单反射镜系统,通过在该反射镜上添加 $x-y$ 自由曲面项的方式采样系统像场产生的像差类型,据此归类自由曲面的像差校正能力。为了避免像差干扰,仅对 0° 视场进行分析,且反射镜二次曲面常数取 -1 。像差表现如表 1 所示。

从定性像差采样分析中得出 $x-y$ 自由曲面的像差校正特性如下:

(1) 当 x 项与 y 项的幂指数为奇数时,曲面可校正 $\pm 45^\circ$ 像散;

(2) 当 x 项幂指数为奇数, y 项幂指数为偶数,曲面可校正 x 向畸变, x 向彗差, x 项三叶;当 x 项幂指数为偶数, y 项幂指数为奇数,曲面可校正 y 向畸

表 1 像差表现

Tab.1 Aberration performance

No.	Item	x power	y power	Coef- ficient	Fringe Zernike item										
					1 piston	2 Tilt-x	3 Tilt-y	4 defocus	5 Astig-0°	6 Astig-45°	7 Coma-x	8 Coma-y	9 Spherical	10 Trefoil	11 Trefoil-y
1	X ¹ Y ⁰	1	0	1e-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	X ⁰ Y ¹	0	1	1e-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	X ² Y ⁰	2	0	1e-5	-4.9386	0	0	-4.9356	-9.8757	0	0	0	0.0030	0	0
4	X ¹ Y ¹	1	1	1e-5	-0.0001	0	0	-0.0001	0	-9.8752	0	0	0	0	0
5	X ⁰ Y ²	0	2	1e-5	-4.9386	0	0	-4.9356	9.8757	0	0	0	0.0030	0	0
6	X ³ Y ⁰	3	0	1e-7	0	-2.4692	0	0	0	0	-1.2332	0	0	-1.2345	0
7	X ² Y ¹	2	1	1e-7	0	0	-0.8231	0	0	0	0	-0.4111	0	0	-1.2344
8	X ¹ Y ²	1	2	1e-7	0	-0.8231	0	0	0	0	-0.4111	0	0	1.2344	0
9	X ⁰ Y ³	0	3	1e-7	0	0	-2.4692	0	0	0	0	-1.2332	0	0	1.2345
10	X ⁴ Y ⁰	4	0	1e-9	-0.1543	0	0	-0.2313	-0.4624	0	0	0	-0.0767	0	0
11	X ³ Y ¹	3	1	1e-9	0	0	0	0	0	0	-0.2313	0	0	0	0
12	X ² Y ²	2	2	1e-9	-0.0515	0	0	-0.0773	0	0	0	0	-0.0259	0	0
13	X ¹ Y ³	1	3	1e-9	0	0	0	0	0	-0.2315	0	0	0	0	0
14	X ⁰ Y ⁴	0	4	1e-9	-0.1543	0	0	-0.2314	0.463	0	0	0	-0.077	0	0
15	X ⁵ Y ⁰	5	0	1e-9	-0.0006	-9.6498	0	-0.0014	-0.0026	0	-7.7141	0	-0.0011	-7.7189	0
16	X ⁴ Y ¹	4	1	1e-9	-0.0001	0	-1.9293	-0.0002	-0.0002	0	0	-1.5423	-0.0001	0	-4.6297
17	X ³ Y ²	3	2	1e-9	0	-1.9293	0	-0.0001	0	0	-1.5423	0	-0.0001	1.5432	0
18	X ² Y ³	2	3	1e-9	0	0	-1.9293	-0.0001	0	0	0	-1.5423	-0.0001	0	-1.5432
19	X ¹ Y ⁴	1	4	1e-9	-0.0001	-1.9293	0	-0.0002	0.0002	0	-1.5423	0	-0.0001	4.6297	0
20	X ⁰ Y ⁵	0	5	1e-9	-0.0006	0	-9.6498	-0.0014	0.0026	0	0	-7.7141	-0.0011	0	7.7189
21	X ⁶ Y ⁰	6	0	1e-11	-0.603	0	0	-1.085	-2.1697	0	0	0	-0.6022	0	0
22	X ⁵ Y ¹	5	1	1e-11	0	0	0	0	0	-0.7237	0	0	0	0	0
23	X ⁴ Y ²	4	2	1e-11	-0.1206	0	0	-0.217	-0.1455	0	0	0	-0.1204	0	0
24	X ³ Y ³	3	3	1e-11	0	0	0	0	0	-0.4338	0	0	0	0	0
25	X ² Y ⁴	2	4	1e-11	-0.1206	0	0	-0.217	0.1455	0	0	0	-0.1204	0	0
26	X ¹ Y ⁵	1	5	1e-11	0	0	0	0	0	-0.7237	0	0	0	0	0
27	X ⁰ Y ⁶	0	6	1e-11	-0.603	0	0	-1.085	2.1697	0	0	0	-0.6022	0	0

变, y 向彗差, y 项三叶。基于该条件, 交换 x 项与 y 项的幂指数, 曲面可产生等量像差, 但像差方向发生改变(x, y 方向互换);

(3) 当 x 项幂指数与 y 项幂指数为不相同的偶数, 曲面可校正场曲、像散与球差; 当 x 项幂指数与 y 项幂指数为相同的偶数, 曲面可校正场曲与球差。

基于该条件, 交换 x 项与 y 项的幂指数, 仅像散方向发生改变。

此外, 微小调整 x-y 自由曲面项也会校正其他微小量初级像差或高级像差, 但校正关系模式不明显。

基于以上分析, 可以一定程度上获得定性的 x-y 自由曲面像差校正关系, 该定性分析对自由曲面的

应用具有一定的指导意义。定量分析工作会在后续工作中完成。

2 设计结果与系统分析

2.1 设计结果

基于前文求解的初始结构,应用已修正的 $x-y$ 多项式光学自由曲面面型,设计了一种孔径光阑放置于次镜的离轴三反光学系统,如图 3 所示,光路图如图 4 所示。该系统焦距为 1 200 mm,相对孔径

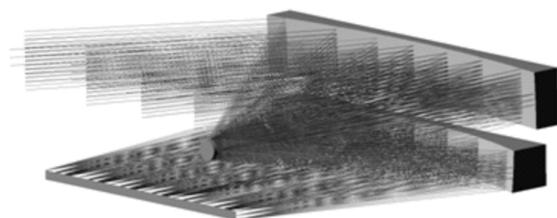


图 3 光学系统结构

Fig.3 Optical system configuration

1:12,视场角为 $30^\circ \times 1^\circ$ 。系统面型设计中,主镜采用了高次非球面面型,三镜采用了自由曲面面型,校正了光学系统的设计残差,由于自由曲面丰富的设计

自由度,次镜(凸镜)采用球面面型设计,降低了次镜的检测难度,结构参数如表 2 所示,三镜自由曲面面型参数如表 3 所示。

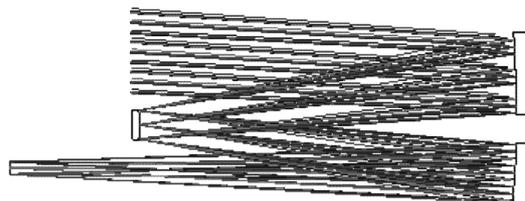


图 4 光路图

Fig.4 System imaging optical path

表 2 光学系统结构参数

Tab.2 Configuration parameters of optical system

	Surface type	Radius /mm	Distance /mm	Conic	Mirror size/mm
PM	Even asphere	-2 521.8	-645	-1.908	900×135
SM	Sphere	-845.4	-645	0	Φ50
TM	XY polynomial	-1 208	-865	0.685	810×100

表 3 三镜自由曲面参数

Tab.3 Polynomial parameters of freeform tertiary mirror

No.	Item	Coefficient A_{ij}	No.	Item	Coefficient A_{ij}	No.	Item	Coefficient A_{ij}
1	X^1Y^0	0	10	X^1Y^0	$-3.365\ 3e-013$	19	X^1Y^4	0
2	X^0Y^1	$-4.345\ 9e-005$	11	X^3Y^1	0	20	X^0Y^6	$-2.255\ 4e-013$
3	X^2Y^0	$-2.337\ 5e-007$	12	X^2Y^2	$-2.452\ 0e-012$	21	X^6Y^0	$-7.053\ 7e-019$
4	X^1Y^1	0	13	X^1Y^3	0	22	X^5Y^1	0
5	X^0Y^2	$-9.893\ 6e-007$	14	X^0Y^4	$-6.637\ 4e-011$	23	X^4Y^2	$8.321\ 3e-019$
6	X^3Y^0	0	15	X^5Y^0	0	24	X^3Y^3	0
7	X^2Y^1	$-5.585\ 2e-010$	16	X^4Y^1	$9.191\ 6e-016$	25	X^2Y^4	$-3.405\ 2e-018$
8	X^1Y^2	0	17	X^3Y^2	0	26	X^1Y^6	0
9	X^0Y^3	$-9.972\ 6e-009$	18	X^2Y^3	$-1.066\ 8e-015$	27	X^0Y^6	$-3.147\ 2e-016$

2.2 像质分析

设计结果给出,系统光学传递函数 MTF 均优于 0.45@50 lp/mm,如图 5 所示,系统最大波像差为 0.056λ,平均波像差 RMS 值为 0.036λ,如图 6 所示,

设计中采用了视场离轴,弧矢有效视场为 $-15^\circ \sim 15^\circ$,子午有效视场为 $-3^\circ \sim 4^\circ$,在此有效矩形视场内,最大网格畸变值为 0.8%,如图 7 所示。由于采用了经过修正后的自由曲面面型,所实现的像质相对于子午

面完全对称, 见图 8 所示。

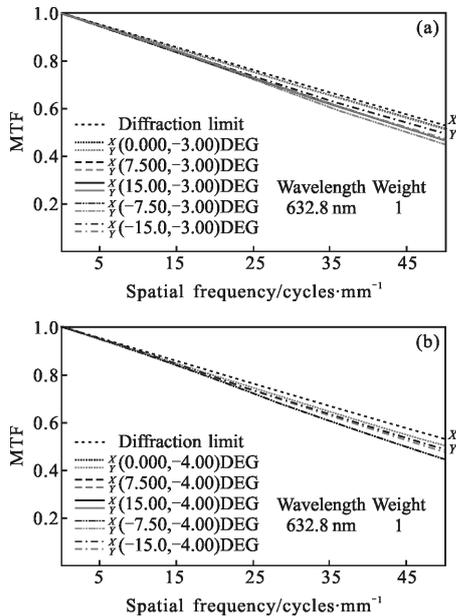


图 5 调制传递函数

Fig.5 Modulation transfer function

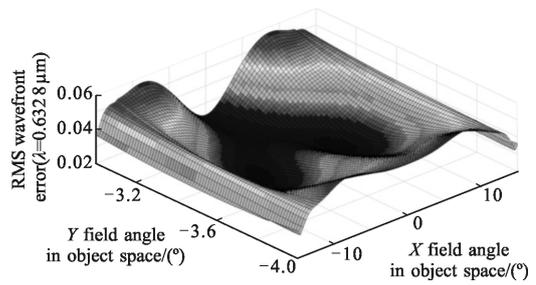


图 6 系统波像差

Fig.6 Wavefront error

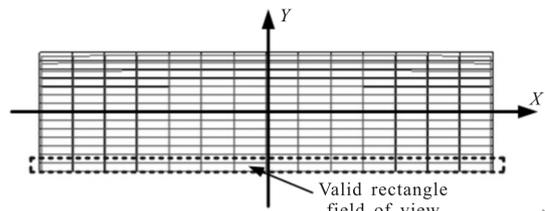


图 7 有效视场及网格畸变

Fig.7 Valid rectangle field of view and grid distortion

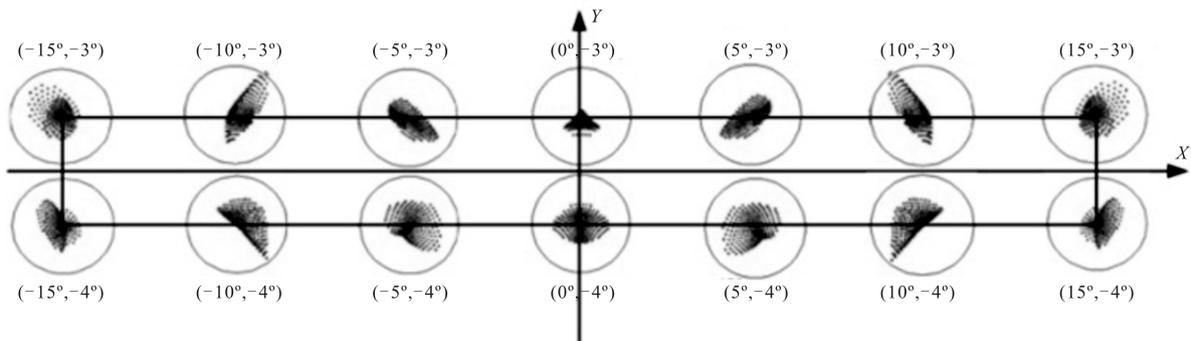


图 8 点列图

Fig.8 Spot diagram

针对该光学系统的镜面检测, 主镜可采用 offner 型补偿器检测, 次镜面型为球面, 可直径放置在干涉仪光路中检测, 自由曲面三镜可采用 CGH (Computer-Generated Hologram) 完成, 目前 CGH 的检测方法在高精度自由曲面面形检测中已成熟应用^[16], 其设计精度可达 $\lambda/10\,000$, 制造后的波前精度可优于 $\lambda/100$, 具备可实现性。

2.3 公差分析

系统设计后, 采用 Monte-Carlo 方法进行了公差分析, 试验 500 次, 以图 8 中的视场点作为特征点进行分析, 以马歇尔判据作为公差分配依据。公差项

包含镜面制造公差与系统装调公差。装调时拟以主镜作为系统基准, 调整次镜、三镜以及像面的位置量完成装调, 公差项如表 4 所示, 公差分析结果如表 5

表 4 公差分配数值

Tab.4 Tolerance value

	Manufacture tolerance		Alignment tolerance			
	Shape error RMS/ λ	Radius/mm	Conic	Decenter /mm	Tilt/($''$)	Rotation /($''$)
PM	1/50	$\pm 0.5\%$	± 0.002	Reference	for alignment	
SM	1/60	$\pm 0.5\%$	-	± 0.1	± 10	± 10
TM	1/50	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.000\,7$	± 0.1	± 10	± 10

所示。结果显示,在可实现的公差分配下,系统最大波像差为 0.0763λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), 14 个采样视场点的平均波像差 RMS 值为 0.0699λ , 优于 $\lambda/14$ 。在单机的精密装调过程中,位置量公差会得到较好的补偿,系统像质会有更好的表现。

表 5 系统公差表现

Tab.5 Tolerance performance

Field number	Sagittal direction	Tangential direction	Design value/ λ	Design & tolerance value/ λ
1	0	-3	0.023 1	0.059 7
2	0	-4	0.050 0	0.074 0
3	5	-3	0.045 9	0.071 0
4	5	-4	0.053 5	0.076 1
5	10	-3	0.055 1	0.076 3
6	10	-4	0.053 3	0.074 9
7	15	-3	0.037 2	0.062 1
8	15	-4	0.035 8	0.062 1
9	-5	-3	0.045 9	0.070 9
10	-5	-4	0.053 5	0.076 1
11	-10	-3	0.055 1	0.076 3
12	-10	-4	0.053 3	0.075 0
13	-15	-3	0.037 2	0.062 3
14	-15	-4	0.035 8	0.062 3

3 结 论

设计了一种基于 $x-y$ 自由曲面的大线视场离轴三反射式光学系统。系统主镜采用了高次非球面型,三镜采用了自由曲面面型完成设计,次镜采用了球面型,在使系统性能得到提升的同时,降低了凸面反射镜的检测难度。为便于系统装调,修正了 $x-y$ 多项式自由曲面面型的奇偶项,使设计的像质相对于子午面完全对称。经设计与优化,最终系统实现了 $30^\circ \times 1^\circ$ 的大线视场,最大畸变 0.8%,光学系统传递函数与系统波像差均表现良好。系统设计后完成了公差分析,在合理的公差分配下,系统全视场平均波像差优于 $\lambda/14$ 。

采用该光学系统配合 TDI-CCD 的空间遥感器可实现很大的成像幅宽,具有很好的应用价值,该系统的设计对空间遥感器光学系统设计具有一定参考

价值,系统较适用于对地宽幅推扫式成像相机。

参 考 文 献 :

- [1] Mei L D, Geng Q X, Li Z. Optimization design for mainsupporting structure of the off-axis TMA space remote sensor[C]//International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, IEEE, 2010: 252-254.
- [2] Lampton M L, Sholl M J, Levi M E. Off-axis telescopes for dark energy investigations[C]//SPIE, 2010, 7731: 77311G.
- [3] Figoski J W. Alignment and test results of the QuickBird telescope using ball optical system test facility [C]//SPIE Conference on Advanced Telescope Design, Fabrication, and Control Denver, 1999: 99-108.
- [4] Nagamitsu Ohgi, Akira Iwasaki, Takahiro Kawashima, et al. Japanese hyper-multi spectral mission [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, 2010: 3756-3759.
- [5] Hariharan V K, Shanmuga Sundaram N, Dayashankara K S, et al. Assembly, integration and testing of Cartosat-1 [C]// Electro Magnetic Interference and Compatibility, Proceedings of the 9th International Conference, 2006: 60-66.
- [6] Xu L, Chen K, He Q, Jin G. Design of freeform mirrors in Czerny-Turner spectrometers to suppress astigmatism [J]. *Appl Opt*, 2009, 48: 2871-2879.
- [7] Zheng Z, Hao X, Liu X L. Freeform surface lens for LED uniform illumination[J]. *Appl Opt*, 2009, 48: 6627-6634.
- [8] Thomas Peschel, Christoph Damm, Sebastian Scheiding, et al. An amorphotic telescope for earth observation in the mid-infrared range [C]//International Conference on Space Optics (ICSO), 2014.
- [9] Saunders I J, Ploeg L, Dorrepaal M, et al. Fabrication and metrology of freeform aluminum mirrors for the SCUBA-2 instrument[C]//SPIE, 2005, 5869: 586905.
- [10] Jun Zhu, Wei Hou, Xiaodong Zhang. Design of a low F -number freeform off-axis three-mirror system with rectangular fieldof-view [J]. *Journal of Optics*, 2014, 17: 015605.
- [11] Zhang Xin, Zheng Ligong, He Xin, et al. Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces [C]//SPIE, 2012, 8486: 848607.
- [12] Meng Qingyu, Wang Wei, Ji Zhenhua, et al. Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 578-582. (in Chinese)

- 孟庆宇, 王维, 纪振华, 等. 主三镜一体化离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 578-582.
- [13] Herbert Gross. Advanced Lens Design Lecture 8: Aspheres and freeforms[EB/OL]. [2014-12-09](2016-02-05) <http://www.iap.uni-jena.de>.
- [14] Meng Qingyu. Easy-aligned off-axis three-mirror system with super large linear field of view based on $x-y$ polynomial freeform surface [J]. *JOSK*, 2015, 19: 6.
- [15] Meng Qingyu, Wang Wei, Ma Hongcai, et al. Easy-aligned off-axis three-mirror system with wide field of view using freeform surface based on integration of primary and tertiary mirror[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(14): 3028-3034.
- [16] Matthias Beier, Johannes Hartung, Thomas Peschel, et al. Development, fabrication, and testing of an anamorphic imaging snap-together freeform telescope[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3530-3542.