

# 一种高分辨力空间相机的光学设计

王孝坤

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对某一种光学设计指标要求的高分辨力空间相机, 在计算分析光学系统参数的基础上, 利用Zemax光学设计软件设计了同轴三反射镜(TMC)系统, 二次成像离轴三反射镜(Cook TMA)系统和一次成像离轴三反射镜(Wetherell TMA)系统3种光学系统, 均满足了指标要求。对比分析了三种光学系统的优缺点, 在综合考虑光学系统的加工、检测和装调能力以及空间相机技术发展先进性的基础上选定了将Wetherell TMA系统作为最终方案, 相机外形尺寸为1600 mm×1230 mm×545 mm, 系统焦距为4375 mm, 相对孔径为1:9.94, 视场角为2°。对该光学系统的性能进行了模拟和验证, 计算分析了光学系统的传递函数、像差、畸变等, 各项指标性能优异, 最后对该系统的光阑和杂光消除进行了分析并对光学系统的公差进行了合理的分配。

**关键词** 光学设计; 空间光学; 高分辨力空间相机; 三反系统; 光学传递函数

**中图分类号** TH703; V475.3

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0122001

## Optical Design of a High Resolution Space Camera

Wang Xiaokun

*Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** For a kind of high resolution space camera, on the basis of calculation and analysis of the optical system parameters, three kinds of optical system: coaxial three mirror (TMC) system, two imaging off-axis three mirror (Cook TMA) system and one imaging off-axis mirror (Wetherell TMA) system have been designed by Zemax software, and they can satisfy the requirements of the indicators. The advantages and disadvantages of the designed optical systems are analyzed, on the basis of considering of the fabrication, testing, calibration and the technology development of space camera, the Wetherell TMA system is selected as the final plan. The shape size of the camera is 1600 mm×1230 mm×545 mm, the focal length of the system is 4375 mm, the relative aperture is 1:9.94, and the viewing angle is 2°. The property of the optical system is simulated and validated, the optical transfer function, aberration and distortion are calculated and analyzed, each indicator is excellent. Finally, the system aperture and stray light elimination are analyzed and the tolerance of the optical system is allocate reasonably.

**Key words** optical design; space optics; high resolution space camera; three mirror system; optical transfer function

**OCIS code** 220.4830; 350.6090

## 1 引言

空间遥感能够在距离地面200 km以上的轨道对地面目标或空间目标进行光学信息获取, 并进行成像。先进的空间遥感技术, 能够准确预报森林火灾、测绘地图、估计农作物的产量、测定大气与海洋污染等, 其成

收稿日期: 2014-04-02; 收到修改稿日期: 2014-05-12

基金项目: 国家863计划(08663NJ090)、国家973计划(2011CB0132005)、国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 王孝坤(1980—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光学超精加工和检测技术等方面的研究。

E-mail: jimwxk@sohu.com

果可广泛应用于农业、测绘、气象、环境和灾害监测、交通选线等众多国民经济领域<sup>[1-4]</sup>。

随着空间光学技术的不断发展,对空间遥感的成像分辨率和幅宽提出了越来越高的指标要求,如美国的 GeoEye-2 卫星相机地面成像分辨率将达到 0.25 m,美国的高分辨商用卫星对地成像的幅宽一般可达 15 km 左右<sup>[5-8]</sup>。

在光学系统  $F^\#$  一定的前提下,增大光学系统入瞳的直径,可以提高相机的衍射极限分辨率和成像分辨率。但是受空间环境中力学、热学、压力等因素的影响,当入瞳直径增大到 200 mm 以上时,光学系统一般采用反射式或折反射式设计方案<sup>[9]</sup>。由于对幅宽的要求变高,使得光学系统的视场变大,从而导致与视场相关的轴外像差尤其是轴外高级像差变得很大,为了更好地平衡轴外像差、改善像质和简化光学系统,空间相机大都采用三反系统(同轴三反系统或离轴三反系统),且系统中包含非球面反射镜<sup>[10-11]</sup>。

随着磁流变加工、离子束抛光等光学超精加工技术和计算全息补偿检验、子孔径拼接测量等精密检测技术的不断发展<sup>[12-19]</sup>,高精度非球面反射镜甚至离轴非球面反射镜的制造已不再是难题。由于离轴三反消像散非球面光学系统(TMA)具有组件较少、视场大、焦距长、波段宽、调制传递函数高、抑制杂光能力强等优异特性,因此该系统在空间相机中得到了广泛应用<sup>[20-21]</sup>。

针对某空间相机总体技术要求,本文在计算分析光学系统参数的要求下,利用光学设计软件 Zemax 对空间相机光学系统进行了详细的设计,设计并比对了三种光学系统,最终采用的一次成像离轴三反射镜系统各项性能优异,满足了指标要求。

## 2 总体技术指标

需要设计的空间相机与光学系统有关的技术指标如下:

- a) 谱段范围:0.5~0.8  $\mu\text{m}$  ;
- b) 地面像素分辨率: $\leq 1.0$  m(500 km 轨道高度);
- c) 相机视场角: $\geq 2^\circ$ ;
- d) 光学设计传递函数(MTF): $\geq 0.45$ (奈奎斯特频率);
- e) 相机静态传递函数: $\geq 0.20$ (奈奎斯特频率);
- f) 可成像轨道:250~1000 km;
- g) 信噪比: $\geq 30$  dB;
- h) 相机外形尺寸: $\leq 2.0$  m $\times 1.4$  m $\times 1.0$  m;
- i) 像素尺寸:8.75  $\mu\text{m}$  时间延迟积分(TDI) 4096 $\times$ 96 级

## 3 光学系统参数分析和计算

光学系统的主要参数包括焦距  $f$ 、视场角(FOV)、相对孔径  $D/f$  ( $D$  为光学系统口径)等。当 CCD 像素尺寸  $a$  为定值时,上述参数在很大程度上决定了相机的设计传递函数、地面像素分辨率(GSD)、成像幅宽(SW)、信噪比(SNR)等重要性能指标。这些参数的确定要综合考虑以下因素:首先要满足用户提出的指标;然后是考虑可以获得的 CCD 器件的性能;此外还得权衡现有的加工、检测、装调和系统集成能力。

### 3.1 确定焦距

由几何光学可以得出,地面像素分辨率  $G_{\text{SD}}$  与焦距  $f$ 、CCD 像素尺寸  $a$ 、轨道高度  $H$  之间存在下列关系:

$$f = \frac{aH}{G_{\text{SD}}} \quad (1)$$

本项目规定采用的 TDI CCD 的像素尺寸为 8.75 mm,根据用户指标要求 500 km 轨道地面像素分辨率优于 1 m,估算相机焦距  $f \geq 4.375$  m。

### 3.2 确定相对口径( $D/f$ )和信噪比

相对口径应考虑以下两个因素:

- a) 衍射分辨率和传递函数

为了能清晰地获得所需的地面像素分辨率,要求光学系统的口径  $D$  所确定的衍射角分辨率满足如下关

系：

$$1/D \leq G_{sd}/H, \tag{2}$$

据此可估算出该相机光学口径应大于 350 mm。

b) 足够的曝光量(即信噪比)

根据国内外类似相机的研制经验<sup>[3]</sup>,并考虑相机整体的加工、检测与装调难易程度,其相对口径一般取 1:10 左右。

### 3.3 信噪比计算

根据本相机 CCD 参数和其他技术指标,经过复杂计算得到当相对孔径为 1:10 时,相机以 dB 为单位的信噪比为 49.981 dB,其大于指标要求的 30 dB,并根据(2)式有

$$D=f/F^\#, \tag{3}$$

估算出相机绝对孔径约为 440 mm。

### 3.4 静态传递函数计算

由定义可得奈奎斯特频率为

$$v_n = \frac{1}{2a}, \tag{4}$$

当  $a=8.75$  mm 时,  $v_n=57.143$  lp/mm。定义光学系统静态传递函数为  $M_{jt}$ ,光学系统设计传递函数为  $M_{sj}$ ,CCD 几何尺寸决定的传递函数为  $M_{jh}$ ,CCD 电子学方面决定的传递函数为  $M_{dz}$ ,光学加工决定的传递函数为  $M_{jg}$ ,静态传递函数为其他传递函数的乘积:

$$M_{jt} = M_{sj}M_{jh}M_{dz}M_{jg}. \tag{5}$$

考虑加工装配等因素,一般取  $M_{jh}=0.5$ , $M_{dz}=0.98$ , $M_{jg}=0.80$ ,将其代入(5)式,并令  $M_{jt}=0.2$ (本相机要求静态传递函数为 0.2 以上),计算可得  $M_{sj}$  为 0.51,因此,要求光学系统在奈奎斯特频率处的设计传递函数大于 0.51。

## 4 光学系统设计

### 4.1 三反射镜系统方案

三反系统具有组件少、消像散、无色差、结构紧凑等优点,其在空间相机光学系统中得到了广泛的应用,结合国内外三反相机成功的先例<sup>[5,10]</sup>,并根据以上参数计算利用光学设计软件 Zemax 设计分析了三套三反光学系统方案,均可满足指标要求,具体设计如下。

#### 4.1.1 同轴三反射镜系统

设计的同轴三反射镜(TMC)光学系统和结构参数如图 1 所示。 $D=700$  mm,  $f=4375$  mm,  $F^\#=6.25$ ,  $F_{ov}=2^\circ$ 。与光轴的偏斜角  $T_s=0.8^\circ \pm 0.15^\circ$ 。全视场平均传递函数  $M_{TF}(57.2$  lp/mm) $>0.51$ 。各镜尺寸为:主镜  $\Phi 703$  mm(圆形口径,中心遮拦  $\Phi 145$  mm),次镜  $\Phi 235$  mm,三镜  $\Phi 331$  mm $\times$ 192 mm(矩形口径,离轴量 66 mm),调焦镜  $\Phi 102$  mm $\times$ 66 mm(矩形口径,离轴量 -17 mm),光学系统总尺寸约为:1510 mm $\times$ 700 mm $\times$ 700 mm。

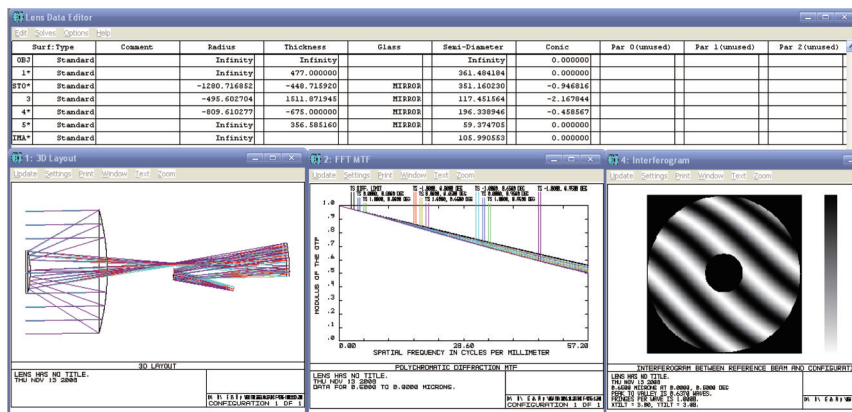


图 1 同轴三反射镜系统设计结果

Fig.1 Design results of TMC optical system

该系统主镜为孔径光阑,可将视场光阑放置在第一次成像面上来消除杂光。平面折叠反射镜可作为像面的调焦镜。另外由于整个系统的出射光瞳位于折叠镜上,而入瞳与出瞳的缩小比很大,所以折叠镜的外形尺寸可以很小,并且可以很好的消除杂光。与离轴TMA系统相比,总的光学系统尺寸较小,且装调相对容易,但视场角不能太大,且存在中心遮拦,故相对孔径较大。

#### 4.1.2 二次成像离轴三反射镜系统

二次成像离轴三反射镜(Cook TMA)系统设计结果如图2所示。光学系统结构参数为: $D=445\text{ mm}$ ,  $f=4375\text{ mm}$ ,  $F^\#=9.83$ ,  $F_{OV}=2^\circ$ 。与光轴的偏斜角  $T_3=-0.3^\circ\pm 0.2^\circ$ 。全视场平均传递函数  $M_{TF}(57.2\text{ lp/mm})>0.51$ 。各镜尺寸为:主镜 $\Phi 448\text{ mm}$ (圆形口径,离轴量 $-325\text{ mm}$ ),次镜 $\Phi 103\text{ mm}\times 73\text{ mm}$ (椭圆形口径,离轴量 $-51.5\text{ mm}$ ),三镜 $\Phi 330\text{ mm}\times 156\text{ mm}$ (矩形口径,离轴量 $49.5\text{ mm}$ ),光学系统总尺寸约为: $1200\text{ mm}\times 680\text{ mm}\times 450\text{ mm}$ 。

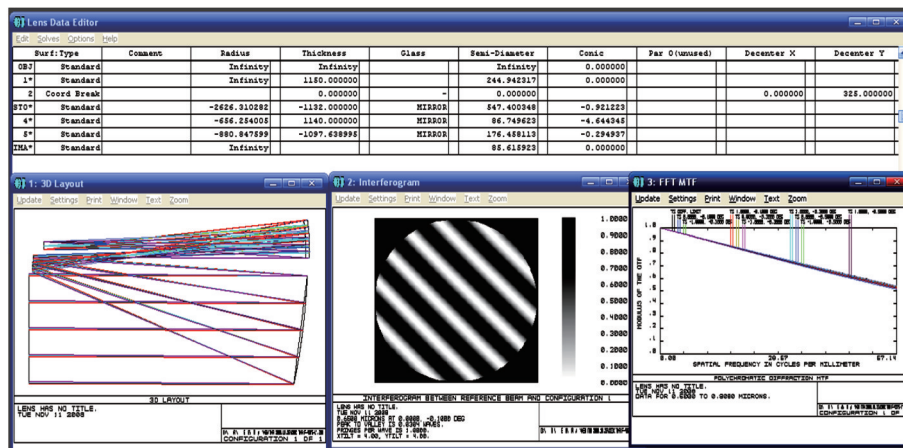


图2 二次成像离轴三反射镜系统设计结果

Fig.2 Design results of Cook TMA optical system

该系统在主反射镜上设置孔径光阑,主镜与入瞳重合,系统为二次成像系统,可将视场光阑放置在第一像面上来消除杂光,此外,由于出射光瞳位于第三镜和像面之间,入瞳与出瞳的缩小比很大,可放置较小的孔径光阑来消除杂光。与TMC系统相比该系统无中心遮拦,在传递函数相同的情况下,相对孔径可以更小,且视场角比TMC系统大。但是其总的外形尺寸比TMC系统大,次镜的非球面度较大,且离轴,所以加工检测难度加大。此外,由于孔径光阑在主镜上,光学系统很不对称,所以视场角不能做的太大。

#### 4.1.3 一次成像离轴三反射镜系统

一次成像离轴三反射镜(Wetherell TMA)光学系统和结构参数设计如下图3所示。 $D=440\text{ mm}$ ,  $f=4375\text{ mm}$ ,  $F^\#=9.94$ ,  $F_{OV}=2^\circ$ 。与光轴的偏斜角  $T_3=6.3^\circ\pm 0.2^\circ$ 。全视场平均传递函数  $M_{TF}(57.2\text{ lp/mm})>0.51$ 。各

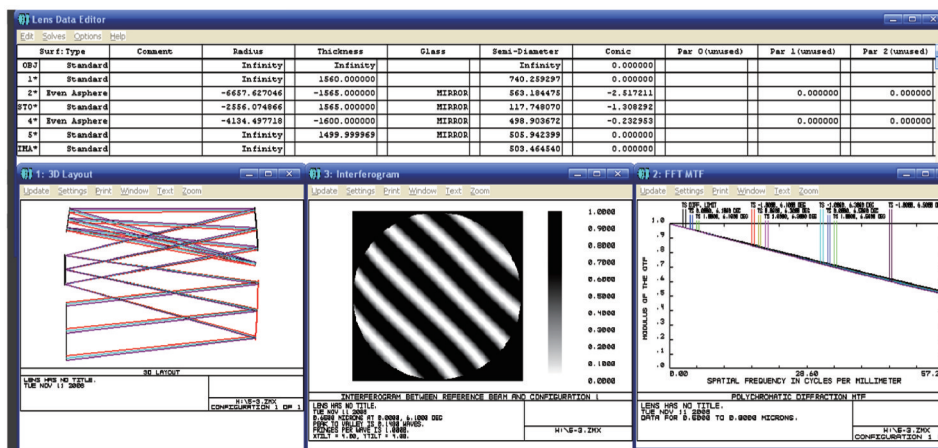


图3 一次成像离轴三反射镜系统设计结果

Fig.3 Design results of Wetherell TMA optical system



镜尺寸为:主镜 $\Phi 544\text{ mm}\times 464\text{ mm}$ (矩形口径,离轴量 $-327.5\text{ mm}$ ),次镜 $\Phi 236\text{ mm}$ (圆形口径),三镜 $\Phi 414\text{ mm}\times 331\text{ mm}$ (离轴量 $330\text{ mm}$ ),调焦镜 $\Phi 285\text{ mm}\times 182\text{ mm}$ (矩形口径,离轴量 $410\text{ mm}$ ),光学系统总尺寸约为: $1600\text{ mm}\times 1230\text{ mm}\times 545\text{ mm}$ 。

该系统为一次成像的离轴三反射镜系统。由于次镜为孔径光阑,光学系统相对比较对称,视场角可以设计得很大,成像质量较好,且可设计成像方远心光路。由于该系统次镜为孔径光阑,视场角增大时主反射镜和第三镜沿穿轨方向的尺寸也变得很大,且主镜和三镜都含有高次项非球面系数,因此加工难度增加,另外消杂光能力也不如二次成像系统。

#### 4.2 设计方案选定

虽然在本项目中三种光学系统设计均可满足指标,但是同轴三反系统的口径和相对口径都比较大,给加工带来了很大的难度;二次成像离轴三反光学系统结构不对称,装调比较困难,且次镜加工检测难度较大。随着空间光学技术的发展,空间相机技术指标要求满足大视场、宽覆盖、长焦距、高分辨的要求,而一次成像离轴三反光学系统在这些指标要求中具有明显的优势,此外该系统可以采用共基准加工和检测技术,为了顺应空间相机的发展趋势,在综合考虑空间技术发展的传承性和先进性以及相机整体的加工、检验与装调能力的基础上,决定采用一次成像离轴三反光学系统作为最终方案。

##### 4.2.1 光学系统参数

选定的 Wetherell TMA 光学系统具体参数如表 1 所示,光学系统如图 4 所示。

表 1 Wetherell TMA 光学系统参数

Table 1 Parameters of the Wetherell TMA system

Mirror	Aperture /mm	Radius /mm	Conic constant $K$	Off-axis /mm
Primary mirror	544×464	-6657.627046	-2.517211	-327.5
Second mirror	236	-2556.074866	-1.308292	0
Tertiary mirror	414×331	-4134.497718	-0.232953	330
Focusing mirror	285×182	Infinity	0	410

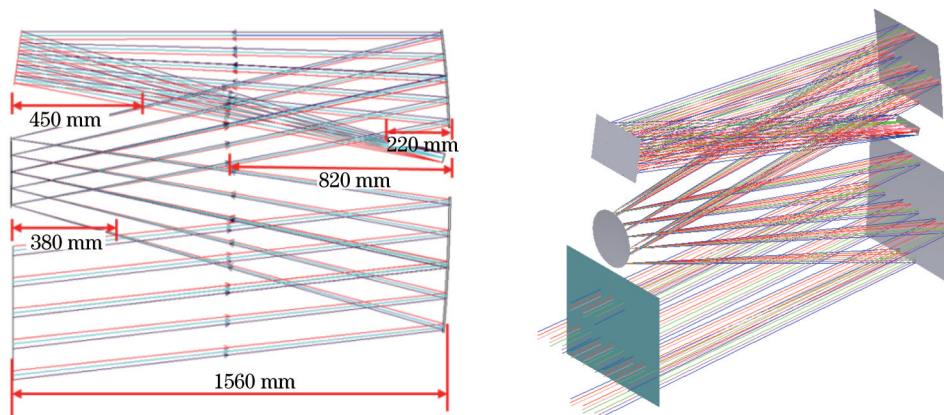


图 4 Wetherell TMA 光学系统图

Fig.4 Diagram of the Wetherell TMA system

##### 4.2.2 光学系统性能模拟和验证

利用光学设计软件 Zemax 对该系统进行了详细优化设计,光学传递函数设计结果见图 5,可以看出全视场,全波段在奈奎斯特频率处传递函数都优于 0.51,满足了设计要求。

模拟了光学系统各视场干涉图如图 6 所示,各视场波像差的峰谷值(PV)都接近  $1/10\lambda$ ,满足了设计要求。

此外,计算了光学系统的畸变如图 7 所示,系统最大畸变小于千分之二,能满足成像要求。本系统孔径光阑在次镜上,限定次镜的有效口径可以很好的限制成像光束。相机的杂光基本上有三种:第一种杂光,它是由视场外光线没有经过成像光路直接进入像面形成的;第二种杂光是由于视场外光线经过镜筒等构件表面反射和散射光进入像面而致;第三种杂光是由视场内光线,由于成像光学元件镜面不完善而产生的杂散

光<sup>[22]</sup>。第一种杂光危害最大,必须全部抑制,由图8可以看出,在入光口设置光栏(遮光罩),在主镜组件与三镜组件之间和次镜下侧放置拦光板,可以很好地消除第一种杂光;第二种杂光的抑制方法是在光路内壁涂覆反射率低的涂层,并在外罩内壁加上加强筋;通过减小光路中反射镜表面的粗糙度来降低第三种杂光的影响,反射镜镜面的粗糙度控制在2 nm以内。

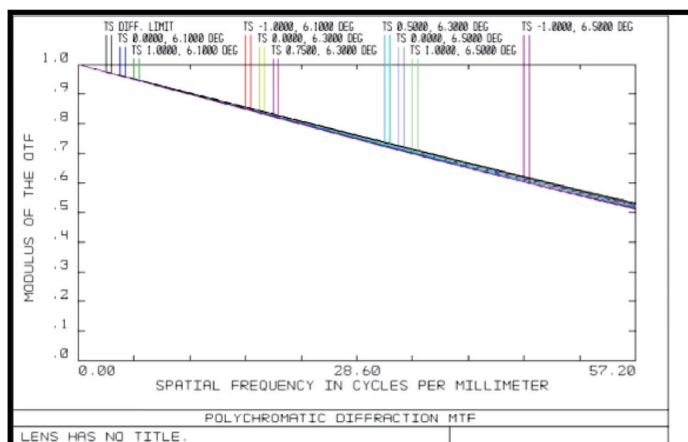


图5 MTF曲线(全视场,全波段,57.14 p/mm)

Fig.5 MTF curves (full field, full wave-band, 57.14 p/mm)

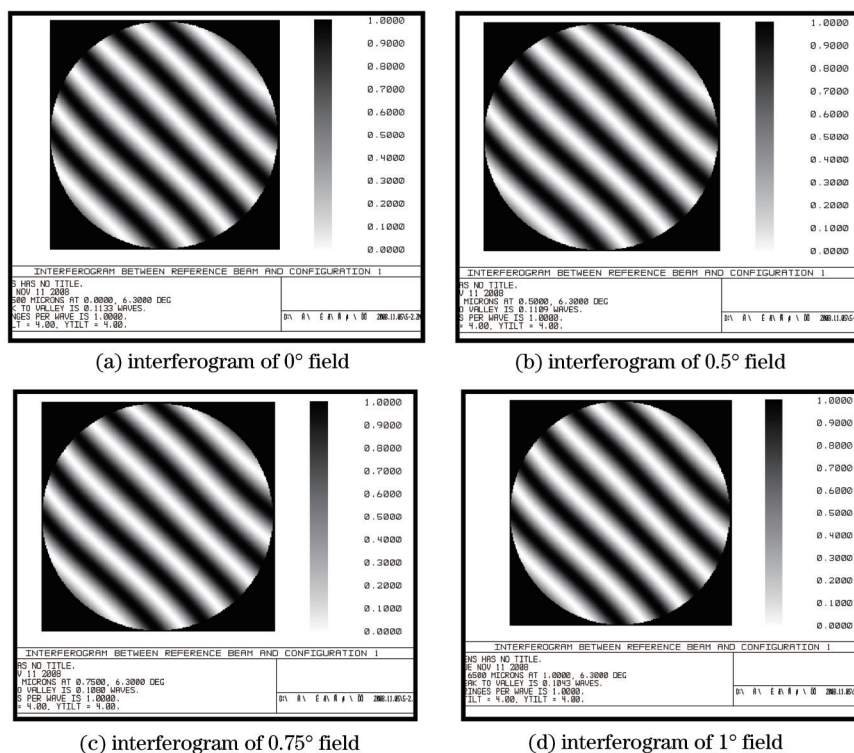


图6 光学系统各视场干涉图

Fig.6 Interferogram of each field of optical system

### 4.2.3 光学系统公差分配

根据技术指标要求以及现有的加工、装调能力,选择57.14 p/mm空间频率处,以允许传递函数下降量小于10%为准则制定了光学系统公差。光学公差主要包括以下几个方面:

- 1) 光学参数(顶点曲率半径 $R$ 、二次曲面常数 $K$ 、非球面系数、离轴量等)的加工公差;
- 2) 面形误差,用均方根(RMS)波长表示;

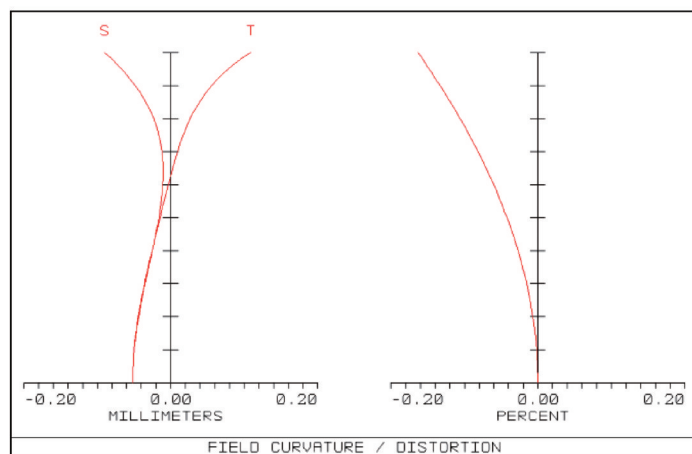


图 7 光学系统畸变图

Fig.7 Distortion curves of the optical system

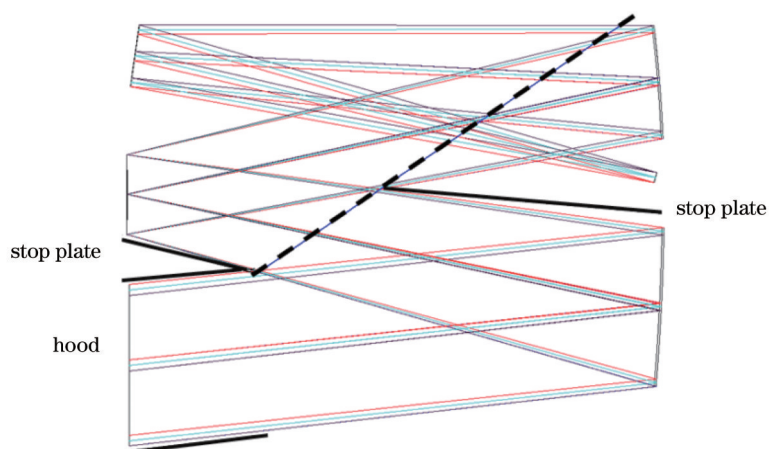


图 8 光学系统杂光消除图

Fig.8 Diagram of eliminating stray light of the optical system

表 2 光学公差分配表

Table 2 Tolerances of the optical system

Error	Displacement	Primary mirror	Second mirror	Tertiary mirror	Focusing mirror
Line displacement	$\Delta X$ /mm	0.05	0.08	0.1	0.2
	$\Delta Y$ /mm	0.05	0.08	0.1	0.2
	$\Delta Z$ /mm	0.1	0.15	0.5	0.8
Angular displacement	$\theta_x$ (arc sec)	6	10	20	30
	$\theta_y$ (arc sec)	6	10	20	30
	$\theta_z$ (arc sec)	40	-	60	80
Optical parameter	$\Delta R$ /mm	$\pm 4$	$\pm 2$	$\pm 3$	-
	$\Delta K$	$\pm 0.003$	$\pm 0.002$	$\pm 0.001$	-
Figure error	RMS	1/50	1/50	1/50	1/50
	Roughness( $Ra$ nm)	<2	<2	<2	<2

3) 各镜面与像面的位置和取向误差。

表 2 列出了光学公差分配结果。相机传递函数全视场设计平均值为 0.513, 存在上述误差后衰减为 0.462, 满足了光学设计传递函数小于等于 0.45 的指标要求。

## 5 结 论

针对指标要求的 500 km 轨道,成像分辨力为 1 m 的某空间相机,提出了三种设计方案,均采用三反光学系统,设计的系统具有组件少、消像散、无色差、结构紧凑等优点。在综合考虑相机整体的加工、检测与集成装调能力以及空间光学技术发展的传承性和先进性的基础上,选择了一次成像离轴三反射镜系统作为最终方案,计算分析可得该系统全视场,全波段在奈奎斯特频率处的传递函数都优于 0.51,各视场波像差的 PV 值都接近  $1/10\lambda$ ,系统最大畸变小于千分之二,各项性能指标优异,满足了设计要求。

## 参 考 文 献

- 1 R B Huxford. Wide FOV head mounted display using hybrid optics [C]. SPIE, 2004, 5249: 230-237.
- 2 D D Walker, A T H Beaucamp, R G Bingham, *et al.*. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation [C]. SPIE, 2003, 4842: 73-84.
- 3 Pan Baozhu, Cheng Haobo, Wen Yongfu, *et al.*. Establishment of an equation of Schmidt corrector plate with large aperture based on wavefront aberration functions [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222001.  
潘宝珠,程灏波,文永富,等.基于波像差函数建立大口径施密特校正板方程[J].光学学报,2012,32(2): 0222001.
- 4 Zhang Xuemin, Han Juan, Duan Jiayou, *et al.*. Alignment method of coaxial eccentric-pupil three-mirror system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 36(4): 0416003.  
张学敏,韩娟,段嘉友,等.共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法[J].中国激光,2012,36(4): 0416003.
- 5 Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2164-2172.  
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.
- 6 T L Zobrist, J H Burge, H M Martn. Laser tracker surface measurements of the 8.4 m GMT primary mirror segment [C]. SPIE, 2009, 7426: 742613.
- 7 J A Connelly, B J Bosa, P S Davil, *et al.*. Optical metrology and alignment of the James Webb space telescope integrated science instrument module [C]. SPIE, 2008, 7068: 70680F.
- 8 Xue Mingqiu, Shen Weiming. Optical Design of Light Weight and Compact High Resolution TDI CCD Camera [M]. Beijing: Science Press, 2005.  
薛鸣球,沈为民.轻小型高分辨率TDI CCD相机的光学设计[M].北京:科学出版社,2005.
- 9 Wang Lingjie, Zhang Xin, Zhang Jianping, *et al.*. Free-form surface space optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1040-1046.  
王灵杰,张新,张建萍,等.自由曲面空间光学系统设计研究[J].应用光学,2012,33(6): 1040-1046.
- 10 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors [J]. Opt Precision Eng, 2001, 9(4): 315-318.  
常军,翁志成,姜会林,等.长焦距空间三反光学系统的设计[J].光学精密工程,2001,9(4): 315-318.
- 11 Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Li Xinglong, *et al.*. Manufacture and test of Cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 764-767.  
付联效,吴永刚,李兴隆,等.大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J].光学学报,2008,28(4): 764-767.
- 12 J H Burge, S Benjamin, D Caywood. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces [C]. SPIE, 2009, 7426: 692-697.
- 13 X J Zhang, Z Y Zhang, Z L Li. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror [C]. SPIE, 2007, 6721: 672109.
- 14 A Shorey, W Kordonski, M Tricard. Magnetorheological Finishing and sub-aperture stitching interferometry of large and lightweight optics [C]. SPIE, 2004, 5494: 81-90.
- 15 R Geyl, A Rinchet, E Rolland. Large optics ion figuring [C]. SPIE, 1999, 3739: 161-166.
- 16 Y J Qi, P Wang, J H Xie. A novel method of measuring convex aspheric lens using hologram optical elements [C]. SPIE, 2005, 6024: 60241F.
- 17 P Murphy, J Fleig, G Forbes. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [C]. SPIE, 2006, 6293: 62930J.
- 18 C Y Zhao, J H Burge. Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface [C]. SPIE, 2008, 7063: 706316.
- 19 X K Wang, L G Zheng, B Z Zhang, *et al.*. Test of an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry [C]. SPIE, 2009, 7283:



72832J.

20 X J Zhang J L Cao. Manufacturing of a three mirror anastigmat telescope [C]. SPIE, 2003, 4829: 884-885.

21 J H Burge, S Benjamin, D Caywood, *et al.*. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces [C]. SPIE, 2009, 7426: 74260L.

22 Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light interfered optical remote sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0928002.

李 岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.

栏目编辑: 韩 峰