

文章编号 1004-924X(2011)06-1213-08

离轴三反射系统的热光学分析和温控指标的制定

巩 盾*, 田铁印, 王 红

(1. 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:考虑空间环境中温度是光学系统成像质量的主要影响源,针对离轴三反射光学系统提出了一套由有限元分析到光学分析的热光学分析方法。在有效分析均匀温度场对系统影响的基础上,采用有限元分析得到温差影响下的镜面面形畸变,并用 Zernike 多项式拟合畸变面形;将 Zernike 系数代入光学设计软件 CODE V,理论分析了温差影响下的光学系统成像质量,提出了光学系统温控指标。以温控指标为依据对光学系统采用主动热控进行热光学试验,所得试验结果均达到 56 lp/mm 下光学系统全视场 MTF 值 >0.2 的光学参数要求,实验结果证明了理论分析的准确性和温控指标的合理性。

关键词:离轴三反射系统;热光学;有限元模型;调制传递函数

中图分类号:V248.3;V416.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1213

Thermal optical analysis of off-axis three-mirror system and its thermal control requirements

GONG Dun*, TIAN Tie-yin, WANG Hong

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

* *Corresponding author, E-mail: gongdun@sina.com*

Abstract: In the space, temperature is the key factor influencing the optical system imaging quality. To investigate the effect of temperature on the off-axis three mirror system, a thermal optical analysis method from finite element analysis to optical analysis was presented. On the basis of analysis results of the optical system in uniformly distributed temperature fields, the surface aberration of mirrors with temperature gradients was obtained by using a finite element analysis software, and the surfaces with aberration were fitted with the Zernike Polynomials. Then, the Zernike coefficients were carried into the software CODE V, the imaging qualities of the system with difference temperature gradients were analyzed, and thermal control requirements were determined. Finally, a thermal optical experiment was carried out to test the optical system with active thermal controls. Experimental results show that the MTF of full field in the optical system is more than 0.2 in 56 lp/mm, which means the optical parameters meet the requirements of optical system. Results also verify the correctness of the theory

收稿日期:2010-08-31;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

and the reasonability of thermal control requirements.

Key words: off-axis three mirror system; thermal optics; finite element model; Modulation Transfer Function(MTF)

1 引言

近年来,空间对地遥感对遥感图片地面分辨率的要求越来越高,由此对成像光学系统的要求也越来越高。反射系统由于不产生色差,孔径较大,宜于轻量化,结构简单,像质优良而在该领域得到广泛采用。其中共轴三反系统在大视场的情况下,中心遮拦过大,影响了进入系统的能量,同时也降低了光学系统的分辨率;而离轴系统具有无中心遮拦、成像质量好、视场大、结构紧凑等优点,是目前比较先进的空间相机光学系统的结构形式。

空间环境中,轨道外热流和周边物体温度的变化会造成相机温度分布不均匀,热应变会使光学元件之间产生相对位置变化和镜面变形,因而对不利的空间热环境是遥感器光学系统成像质量下降的主要干扰源。尤其是高分辨率空间相机多要求成像质量达到或接近衍射极限,任何微小扰动都会严重干扰成像质量,因此温度变化对遥感器光学系统的影响十分令人关注。

温度对遥感器的影响与其搭载方式有关,空间遥感器在航天器中有两种搭载方式:即遥感器裸露于太空中或在航天器内部。当其裸露于航天器外舱时,由于太阳辐射、地球辐射、阳光反照、冷黑空间及各个舱位与太阳帆板的遮挡,使遥感器朝向太阳的表面温度可高达 200°C ,温度分布十分不均匀。为了减小温度对空间遥感器的影响,遥感器多采用第二种搭载方式使其在航天器舱内受热控系统调节,从而温度变化较小,即便如此,各种温差仍会对光学系统产生影响。

离轴三反射光学系统主镜的口径大、各镜面形精度要求高、反射镜与镜筒材料匹配难度较大,在空间热环境的作用下易产生各种温差,引起几何尺度变化与面形畸变,使光学系统的成像质量不高,对该系统存在问题的研究表明,在光学设计阶段,对温度不均匀性对光学系统成像质量的影响予以分析和评价,通过热光学试验验证分析结果的准确性,提出合理的温控指标要求,对保证成

像质量是非常必要的^[1-5]。本文针对离轴三反射光学系统提出了一套由有限元分析到光学分析的热光学分析方法。分析了不同温度对光学成像质量的影响,并根据光学参数的要求提出了光学系统温控指标。

2 光学系统结构与像质评价

本文所研究的空间相机光学系统为 COOK 型离轴三反射光学系统。其光阑置于次镜上,通过视场的倾斜避免中心遮拦,光阑不离轴,这种结构型式有利于畸变校正,并能够设计为远心光路。主镜与三镜为矩形镜,次镜为圆形光阑,在三镜与像面间加入一片平面反射镜起到缩短光路和调焦的作用,系统结构如图 1 所示。

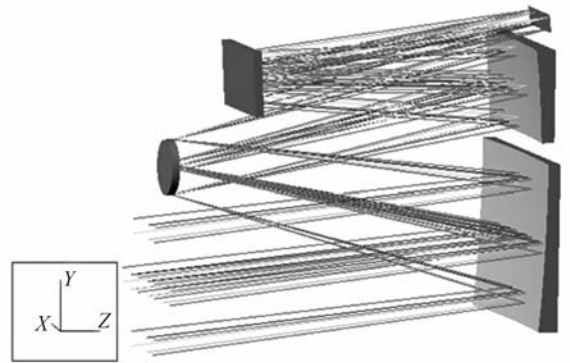


图 1 系统结构图

Fig. 1 Configuration of system

光学系统的焦距为 $2\ 200\ \text{mm}$,相对口径为 $1/9$,视场为 $6.88^{\circ}\times 0.66^{\circ}$,波段为 $500\sim 700\ \text{nm}$,Nyquist 频率为 $56\ \text{lp/mm}$,对于测绘空间遥感器光学系统,最重要的评价标准为传递函数与畸变,技术指标要求系统实验室静态传递函数在 Nyquist 频率下大于 0.2 ,畸变小于 0.01% 。

实验室静态传递函数主要由光学系统的传递函数、CCD 几何尺寸决定的几何传递函数和 CCD 电子学传递函数的乘积确定。光学传递函数除了和光学设计结果的传递函数有关外还和加工装调引起的误差有关。工程应用中,一般取

$MTF_{\text{processing}}$ 为 0.85, CCD 几何传递函数为 0.637, 经实测 CCD 电子学传递函数为 0.95。计算得:

$$MTF_{\text{static}} = MTF_{\text{design}} \times MTF_{\text{processing}} \times MTF_{\text{geometric}} \times MTF_{\text{electron}} = 0.85 \times 0.637 \times 0.95 \times MTF_{\text{design}} = 0.514 MTF_{\text{design}}$$

根据计算,要求在 56 lp/mm 空间频率下 MTF 设计 > 0.4 。表 1 为系统 56 lp/mm 时各视场的传递函数值与畸变,图 2 为各视场传递函数曲线。

表 1 系统 56 lp/mm 时各视场的传递函数值与畸变
Tab.1 MTF at 56 lp/mm and distortion of every fields

视场	MTF		畸变/%
	R	T	
0	0.618	0.614	0
0.7	0.616	0.613	-0.003 50
1.0	0.613	0.612	-0.003 10

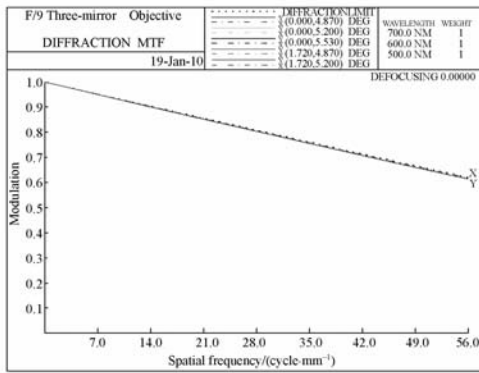


图 2 光学系统传递函数

Fig.2 MTF curve of optical system

3 均匀温度水平变化对光学系统成像质量的影响

均匀温度水平变化指光学系统经过一段时间后,从一个稳定的温度状态到另一个稳定的温度状态的变化,发生这种温度变化的区域也称为均匀温度场。

均匀温度水平变化下系统结构参数发生如下变化:

$$\text{半径: } r \rightarrow r + dr = r(1 + \alpha_g \cdot dt), \quad (1)$$

$$\text{厚度: } D \rightarrow D + dD = D(1 + \alpha_g \cdot dt), \quad (2)$$

$$\text{间隔: } S \rightarrow S + dS = S(1 + \alpha_m \cdot dt), \quad (3)$$

$$\text{折射率: } n \rightarrow n + dn = n + \beta_g \cdot dt. \quad (4)$$

式中, α_g 为光学系统元件材料的热胀系数, α_m 为镜筒材料的热胀系数, β 为折射率温度系数。由此得知,当均匀温度水平变化时,只改变光学元件的曲率半径而不改变光学元件的面形类型,即球面仍是球面、非球面仍是非球面。各物理量在均匀温度水平变化时只是 dt 的函数。

根据温度对元件参数的影响,反射镜材料需要选取温度稳定性高、均匀性好的材料;次镜为凸反射镜,为了面形检测需要必须选取透射材料。因此确定主镜、三镜材料为微晶,次镜材料为石英,镜筒采用钛合金,镜间支撑采用钢制。

将材料参数代入 CODE V 软件,分析均匀温度水平影响下的光学系统成像质量,温度为 $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$,以 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 步距计算像面位移与成像质量如表 2 所示。

表 2 各温度水平下的像面位移与成像质量

Tab.2 MTF and defocus of different temperatures

温度 / $^\circ\text{C}$	MTF(56 lp/mm)			像面位移/mm
	0 视场	0.7 视场	1 视场	
40	0.618	0.616	0.613	-0.059
35	0.618	0.616	0.613	-0.044
30	0.618	0.616	0.613	-0.029
25	0.618	0.616	0.613	-0.015
20	0.618	0.616	0.613	0.000
15	0.618	0.616	0.613	0.014
10	0.618	0.616	0.613	0.029
5	0.618	0.616	0.613	0.044
0	0.618	0.616	0.613	0.058

从表中可知,合理选择元件材料后,光学系统对均匀温度水平变化的敏感性较低,经过调焦后像质基本无变化,在 $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 内完全满足技术要求;并且温度变化时的离焦量基本呈线性变化,与热高斯光学理论完全一致,有利于选取合理简单的调焦结构。

4 光学系统温度梯度分布形式

遥感器舱内的光学系统在不同区域和同一区域的不同时刻有不同的温度场分布,主要形成 3 种形式的温度梯度分布,分别是轴向温差、径向温差和周向温差。

(1)轴向温差指学系统沿光轴方向上的温度场分布不均匀产生的温度差。可以分为光学元件自身的轴向温差和各反射镜间的轴向温差两种形式。

(2)径向温差指镜体在半径方向上的温度分布不均,根据所在温度场情况不同,可以是中心高于边缘,也可以是边缘高于中心。

(3)周向温差指光学元件沿圆周方向上的温度分布不均现象,会导致光学元件的面形发生不对称变化。

5 光学系统的有限元分析

根据光学系统的温度场分布和机械结构建立有限元模型,图 3~6 为光学系统、主镜、次镜和三镜的有限元模型。

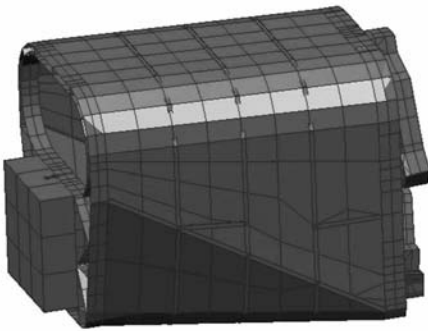


图 3 光学系统有限元模型

Fig. 3 Finite element model of optical system

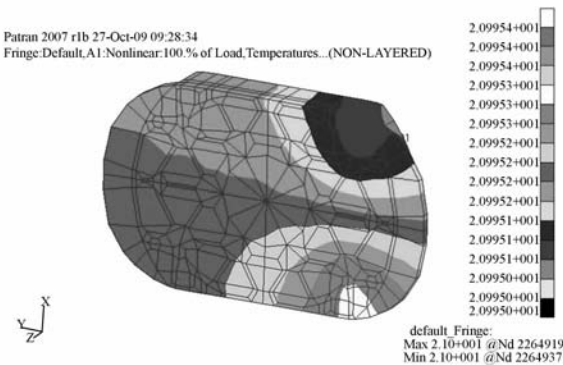


图 4 主镜有限元模型

Fig. 4 Finite element model of primary mirror

建立有限元模型后,就可以对各种温度梯度分布产生的镜面面形畸变进行分析,有限元分析后还要用数学方法描述这些热变形。Zernike 多

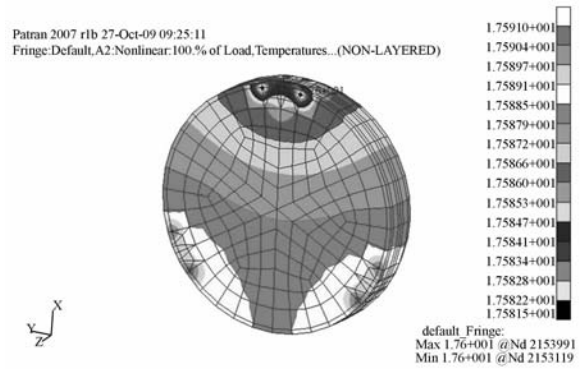


图 5 次镜有限元模型

Fig. 5 Finite element model of second mirror

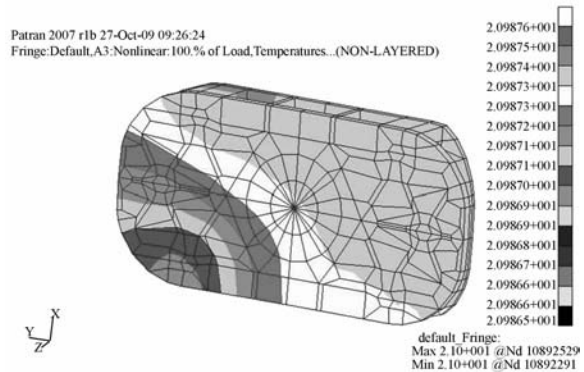


图 6 三镜有限元模型

Fig. 6 Finite element model of third mirror

项式是一组在单位圆内正交的线性无关基底函数系,它与光学设计理论中的 Sediel 像差系数有表 3 中的对应关系。

表 3 Zernike 多项式与 Sediel 像差的对应关系

Tab. 3 Relationship between Zernike coefficients and Sediel coefficients

No.	Polynomial	Meaning
1	1	Power
2	$\rho \cos \theta$	X tilt
3	$\rho \sin \theta$	Y tilt
4	$2\rho^2 - 1$	Focus
5	$\rho^2 \cos 2\theta$	Astigmatism 0° or 90°
6	$\rho^2 \sin 2\theta$	Astigmatism ± 45°
7	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	X Coma
8	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	Y Coma
9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Spherical and focus

因为有这样的对应关系,因此选用 Zernike 多项式对热变性后的面形畸变进行拟合。

6 光学系统的热光学分析

完成 Zernike 多项式拟合后要将 Zernike 系数代入 CODE V 软件分析光学系统在温度梯度影响下的成像质量。

Zernike 系数代入 CODE V 软件主要分 3 个步骤:坐标变换、口径选取和编辑文本。

(1)坐标变换:CODE V 中的光学系统模型采用相对坐标系,而有限元模型建模采用全局坐标系。为了便于在两个模型之间传输数据,建模时要将结构全局坐标系转换到 CODE V 所使用的相对坐标系,并确保全局坐标原点统一。CODE V 光学模型的直角坐标系与有限元软件建立的有限元模型坐标系有如下关系:CODE V 的 X 轴与有限元模型的 X 轴相同;Y 轴为有限元模型的 Z 轴;Z 轴为有限元模型的 Y 轴。

坐标系旋转变换有如下关系:CODE V 中光学模型绕 +X 轴旋转等于有限元软件中有限元模型绕 +X 轴旋转;CODE V 中光学模型绕 +Y 轴旋转等于有限元模型绕 -Z 轴旋转;CODE V 中光学模型绕 +Z 轴旋转等于有限元模型绕 +Y 轴旋转。

(2)口径选取:由于光学系统主镜、三镜为矩形镜,由最小二乘法计算得到的 Zernike 系数是在镜面为矩形镜的情况下求得的,矩形镜实际上为整个圆形通光孔径的子口径,这一计算过程相当于将在矩形镜上分布的面型畸变扩展到整个圆形全口径。子口径与全口径的关系如图 7 所示。

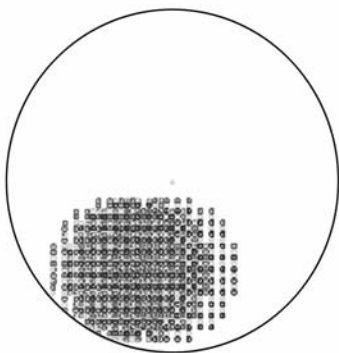


图 7 主镜子口径与全口径的关系

Fig. 7 Relationship between sub-aperture and full-aperture of primary mirror

CODE V 中的光学模型主镜、三镜仍为矩形,如果将矩形长边或对角线的半高度作为拟合半径就影响了拟合精度,直观的表现拟合后成像质量偏低。所以应将 CODE V 光学模型的主镜、三镜由子口径的矩形镜还原为全口径的圆形孔径后再进行拟合。

(3)编辑文本:代入前需要将 Zernike 系数转化为 CODE V 能够识别的文件格式,CODE V 所识别的数据传输格式为 .INT 文件,文件的编码必须为 ASC II。

将表征面形畸变的 Zernike 系数编制为 .INT 文件后输入 CODE V 软件分析成像质量。光学系统的温度梯度有多种分布形式,5℃ 反射镜间轴向温差的 Zernike 系数如表 4 所示。

表 4 5℃ 反射镜间轴向温差的 Zernike 系数

Tab. 4 Zernike coefficients of 5℃ axial temperature difference

序号	系数		
	主镜	次镜	三镜
1	-0.94×10^{-2}	0.11×10^{-2}	-0.95×10^{-2}
2	0.86×10^{-3}	-0.50×10^{-3}	-0.26×10^{-2}
3	-0.27×10^{-3}	-0.34×10^{-5}	-0.37×10^{-3}
4	0.89×10^{-4}	-0.39×10^{-5}	0.37×10^{-4}
5	-0.41×10^{-4}	0.72×10^{-6}	0.13×10^{-4}
6	0.34×10^{-5}	-0.49×10^{-7}	-0.43×10^{-6}
7	-0.19×10^{-5}	-0.94×10^{-8}	0.64×10^{-6}
8	-0.331×10^{-5}	-0.58×10^{-7}	0.29×10^{-5}
9	-0.17×10^{-4}	-0.94×10^{-6}	-0.72×10^{-5}

将以上 Zernike 系数用前述方法输入 CODE V,计算光学系统 MTF 曲线如图 8 所示。

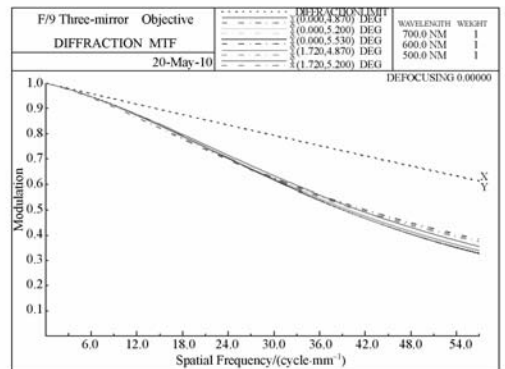


图 8 5℃ 反射镜间轴向温差的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curve of 5℃ axial temperature difference

7 光学系统温控指标的制定

光学系统温控指标是光学系统在空间环境中可以正常工作成像的温度范围,利用以上理论分析过程分别分析光学系统在轴向、径向和周向 3 种温度梯度分布形式下的 MTF 值,确定温控指标。频率为 56 lp/mm 下,光学系统 0.7 视场传递函数值计算结果如表 5~10 所示。

表 5 周向温差对光学系统的影响

Tab. 5 Influence of circle temperature difference on optical systems

温差/℃	MTF		
	主镜	次镜	三镜
1	0.507	0.520	0.593
2	0.382	0.501	0.558
3	0.233	0.466	0.501
4	0.160	0.447	0.465
5	0.102	0.402	0.430

表 6 径向温差对光学系统的影响(中心高于边缘)

Tab. 6 Influence of radius temperature difference on optical systems (center higher)

温差/℃	MTF		
	主镜	次镜	三镜
0.5	0.572	0.604	0.610
0.8	0.521	0.569	0.599
1.0	0.481	0.552	0.572
1.2	0.472	0.521	0.563
1.5	0.413	0.507	0.545

表 7 径向温差对光学系统的影响(边缘高于中心)

Tab. 7 Influence of radius temperature difference on optical systems(center lower)

温差/℃	MTF		
	主镜	次镜	三镜
0.5	0.565	0.598	0.607
0.8	0.542	0.562	0.597
1.0	0.488	0.543	0.570
1.2	0.472	0.520	0.563
1.5	0.410	0.498	0.542

表 8 反射镜自身轴向温差对光学系统的影响

Tab. 8 Influence of axial temperature difference in mirror on optical systems

温差/℃	MTF		
	主镜	次镜	三镜
0.5	0.568	0.607	0.608
0.8	0.517	0.536	0.561
1.0	0.462	0.524	0.541
1.2	0.426	0.486	0.522
1.5	0.411	0.443	0.458

表 9 反射镜间轴向温差对光学系统的影响

Tab. 9 Influence of axial temperature difference between mirrors on optical system

温差/℃	MTF
1	0.601
2	0.563
3	0.543
4	0.446
5	0.422

根据频率为 56 lp/mm 下光学系统全视场 MTF 值大于 0.2 的光学参数要求,制定光学系统温控指标为:初始环境温度 18 ℃,反射镜周向温差 1 ℃,主镜径向温差 1 ℃,次镜、三镜径向温差 1.5 ℃,反射镜自身轴向温差 1 ℃,反射镜间轴向温差 3 ℃。以温控指标为依据对光学系统采用主动热控进行热光学试验,所得试验结果均达到 56 lp/mm 下光学系统全视场 MTF 值大于 0.2 的光学参数要求,如表 10 所示。以上数据证明了分析的准确性和温控指标的合理性。

表 10 热光学实验结果

Tab. 7 Results of thermal optical experiment

温度指标	系统平均	MTF	MTF _{design}
低温 14	14.3	0.243	0.473
低温 15	15.2	0.243	0.473
低温 16	16.0	0.251	0.488
低温 17	17.1	0.251	0.488
低温 18	17.8	0.243	0.473
高温 18	18.1	0.236	0.459
高温 19	19.1	0.236	0.459
高温 21	21.0	0.220	0.428

8 结 论

本文提出了一整套由有限元分析到光学分析的离轴三反射系统热光学分析方法。分析了不同温度梯度影响下的光学系统成像质量,并根据光学参数要求提出了光学系统温控指标,为下一步

的光学系统热光学试验提供了理论依据。热光学试验结果均达到 56 lp/mm 下光学系统全视场 MTF 值大于 0.2 的光学参数要求,证明了分析的准确性和温控指标的合理性。以上分析对航天器有效载荷的热控及热设计具有重要的指导意义,在离轴三反射型空间相机研究领域有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 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.
CHANG J, WENG ZH C, JIANG H L, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4):315-318. (in Chinese)
- [2] 常军,翁志成,姜会林,等.宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J].光学精密工程,2003,11(1):55-58.
CHANG J, WENG ZH C, JIANG H L, *et al.*. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1):55-58. (in Chinese)
- [3] 张亮,安源,金光.大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J].红外与激光工程,2007,36(2):278-280.
ZHANG L, AN Y, JIN G. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2):278-280. (in Chinese)
- [4] 吴清文,卢泽生,卢镔,等.空间光学遥感器热分析[J].光学精密工程,2002,10(2):205-208.
WU Q W, LU Z S, LU E, *et al.*. Thermal analysis for a space optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2):205-208. (in Chinese)
- [5] 杨烽,张伟,陈时锦.基于集成分析法的光机热一体化设计[J].光学技术,2005,31(3):394-397.
YANG Y, ZHANG W, CHEN S J. Thermal/structural/optical concurrent design based on integrated analysis technique [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3):394-397. (in Chinese)
- [6] 郭永洪,沈忙作,陆祖康.离轴三反射镜系统研究[J].光电工程,1999,26:45-48.
GUO Y H, SHEN M Z, LU Z K. A study on off-axis three-mirror system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, 26:45-48. (in Chinese)
- [7] 张以谟.应用光学[M].北京:机械工业出版社,1987:375-378.
ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Machine and Industry Publishing Company, 1987:375-378.
- [8] 霍尔曼 J. P. 传热学[M].北京:人民教育出版社,2005:38-39.
HOLMAN J P. *Heat Transfer* [M]. Beijing: People Education Publishing Company, 2005:38-39.
- [9] 巩盾,王红,田铁印.温度对星载三线阵相机成像质量的影响与温控指标的制定[J].光学学报,2010,30(8):85-90.
GONG D, WANG H, TIAN T Y. Temperature effect on imaging performance of three-line CCD satellite camera and temperature indicators affirmed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8):85-90. (in Chinese)
- [10] 王淑岩,单宝忠,牛憨笨. Zernike 多项式拟合方法及应用[J].光学精密工程,2002,10(3):318-323.
WANG SH Y, SHAN B Z, NIU H B. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):318-323. (in Chinese)

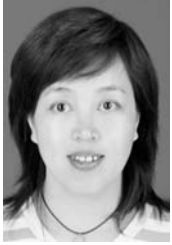
作者简介:



巩盾(1982—),男,吉林长春人,助理研究员,博士,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作,研究方向为光学设计。E-mail: gongdun@sina.com



田铁印(1967—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作,研究方向为光学总体及光学设计。E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn



王红(1968—),女,吉林长春人,研究员,博士,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作,研究方向为光学设计。E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn

●下期预告

空间太阳望远镜紫外波段成像检测中杂散光的测量和消除

杨林^{1,2},李达^{1,2},崔天刚^{1,2},陈波¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

极紫外空间太阳望远镜地面预先检测时,由于望远镜结构上缺少消杂光设计,紫外波段检测带来的杂散光将影响测量结果。为了确定杂散光影响的大小,针对望远镜长焦距的特点,建立了基于反射镜转动扫描原理的杂散光测量系统,测量得到了望远镜的点源透射率(PST)曲线。通过对比 PST 曲线和分析望远镜结构,得出杂散光的主要来源为小角度下的一级杂光,由此设计了主次镜遮光罩,并利用 Tracepro 软件建立望远镜的实体模型,在不同散射表面的双向散射(BRDF)值条件下计算了遮光罩的消杂散光效果。由 PST 实际测量结果表明,在 $0\sim 4^\circ$ 的小角度范围内,遮光罩使杂散光减少 3 个数量级,杂散光系数不超过 3.65%。在分辨率成像测量中,杂散光影响得到消除,检测结果表明系统分辨率接近衍射极限,满足地面上紫外光波段测量要求。