

文章编号: 0253-2239(2010)04-1140-04

环形孔径长焦距光学系统

张蕊蕊 沈为民

(苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 介绍一种可望用于空间相机的环型孔径长焦距光学成像系统,也是稀疏孔径的一种。光线通过最外面的环形孔径进入光学系统,经过一系列的同轴环形反射镜多次折转,最后通过补偿镜成像在光学系统的像面上。此类系统具有较大的遮拦比,可以在有效减少空间望远系统的厚度和体积的同时保持较好的成像质量,可望用于微小卫星高分辨率光学有效载荷。给出了光线经过6次反射的一种长焦距光学系统设计结果,并对其进行了像质评价和公差分析。

关键词 光学设计; 环形孔径; 长焦距; 空间相机; 非球面

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103004.1140

Long Focal-Length Optical System Using Annular Aperture

Zhang Ruirui Shen Weimin

(Institute of Modern Optical Technique, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A special kind of long focal-length optical system using annular aperture which is expected to be used in space cameras optical imaging system is introduced, it can also considered as a kind of sparse aperture system. Light enters the optical system through an outer annular aperture and is focused by a series of concentric annular reflectors and compensation lens to the image plane. They have large obscuration ratio. They have compactness and good image quality, which is expected to be used in micro satellite payload with high resolution. The result of a long focal length optics with six-fold reflection is introduced. Their performance evaluation and tolerance analysis are given and compared.

Key words optical design; annular aperture; long focal length; space remote-sensing camera; aspheric surface

1 引言

近年来,空间相机明显趋向小型化,甚至超小型化,并且在遥感领域获得了广泛的应用,主要包括:气象观测、资源调查和环境监测、海洋遥感、空间侦察和预警、空间物理现象的观测等^[1]。在空间对地遥感领域中,无论是军用还是民用,对遥感图片地面分辨率的要求都越来越高^[2]。当工作轨道高度和探测器尺寸一定时,增大焦距,可以提高对地面像元的分辨率,但系统尺寸也将随之增大,对航空和航天产品非常不利。因此,如何增大焦距,同时又在保证成像质量的条件下尽量减小体积,是目前空间光学

研究的热点^[3]。

本文介绍一种环形孔径长焦距光学系统的设计方法,将平板型超薄结构用于设计望远物镜^[4],并与补偿器相结合增大视场,是多次反射平板镜头^[5,6]与折射透镜的结合,为折反射系统。此种系统具有多个非球面反射镜且位于同一基底上,具有装调简单的优势,对于研究开发微小卫星高分辨率光学有效载荷具有重要的意义。

2 环形孔径长焦距光学系统的设计思想

空间相机光学系统是望远物镜成像光学系统。

收稿日期: 2009-05-21; **收到修改稿日期:** 2009-06-23

基金项目: 国家863计划(2007AA12Z103)和江苏省高校自然科学基金计划(06KJA14003)资助课题。

作者简介: 张蕊蕊(1984—),女,硕士研究生,主要从事光学设计和仪器光学等方面的研究。E-mail: aruiuser2@163.com

导师简介: 沈为民(1963—),男,研究员,主要从事光学设计和仪器光学等方面的研究。E-mail: swm@suda.edu.cn

(中国光学学会会员号: S0400200265)。

本文彩色效果详见中国光学期刊网。http://www.opticasjournal.net

以构造来分类,可分为折射式系统、反射式系统及折反射式系统 3 大类。增长焦距、增大口径、减小体积、减轻重量、增宽谱段、降低成本等,都需要用反射系统^[7,8]。环形孔径长焦距光学系统为折反射系统,一是利用反射镜折叠光路,以缩小空间相机镜头的体积和减轻重量;二是主要由反射镜产生所需的光焦度,反射镜不产生色差,因此二级光谱很小,不存在二级光谱校正问题。折反系统具有外形尺寸小、口径和视场较大的长处,同时光学系统结构比折射系统简单。

由于此系统结构半径最大的非球面反射镜产生的正场曲系数不足以同半径较小的两个非球面反射镜产生的负场曲系数抵消,总场曲系数为负值。可考虑在像方增加具有正光焦度的补偿器,由它产生正场曲系数来校正系统的场曲。为了装配方便,需要有一定长度的工作距离,因而补偿器和像面之间必然存在距离,这就需要校正色差,又考虑到视场较大,轴外像差校正困难,因此补偿器设计成由 3 块透镜组成^[9]。

环形孔径长焦距光学系统的通光孔径为环面疏孔径的一种,光学稀疏孔径系统是实现高分辨率天文目标成像观测的新手段,将多个小口径的光学元件或光学系统精确排列,使通过各个子孔径的光束在焦平面上满足一定的相位条件,实现干涉成像从而达到与之通光口径相当的大口径系统的衍射极限的分辨率。可避免加工大口径高精度的光学元件的困难,使超大口径遥感器的实现成为可能^[10~13]。

目前大口径非球面光学系统设计、加工、检验、装调已有较大的进步,光学系统的像质已接近衍射极限,所以系统中应用非球面是可行的。虽然在某些应用中可用球面校正板替代非球面,但对于相对孔径大的情况,复杂的球面校正系统似乎不如非球面。总的来说,宜采用非球面使光学系统厚度变薄,使大相对孔径成为可能。

3 环形孔径长焦距光学系统设计结果和像质评价

对光线经过 6 次反射的光学系统进行了具体的设计,并对其结果进行了像质评价和公差分析。优化设计得到的光学系统如图 1 所示,结构参数如表 1 和 2 所示。其焦距 f' 为 5000 mm,全视场角 2ω 为 2.4° ,外直径 D 为 1000 mm,从入射面到像面的总厚度为 1100 mm,平板部分厚度为 400 mm,遮拦比 α 为 0.80,有效直径为 600 mm,有效 F 数为 8.3,工作波段从 500~800 nm。

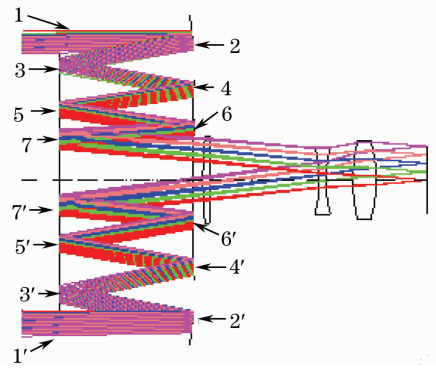


图 1 光学系统结构图

Fig.1 Configuration of the designed optics

表 1 优化设计得到光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system obtained from final optimization

	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Conic coefficient
Object	Infinity	Infinity		
(1,1')	Infinity	420		
Stop(2,2')	-4392.077	-420	Mirror	-3.499
(3,3')	Infinity	400		
(4,4')	16461.746	-400	Mirror	0
(5,5')	Infinity	400		
(6,6')	4122.347	-400	Mirror	13.655
(7,7')	Infinity	430		
8	1435.790	20	K9_CHINA	
9	4525.294	327.825		
10	-399.452	20	K9_CHINA	
11	392.246	80.225		
12	521.552	70	K9_CHINA	
13	-450.291	151.951		
Image	Infinity	-0.0028		

表 2 非球面系数值

Table 2 Coefficient values of aspherical surface

Coefficient	Surface sequence number		
	(2,2')	(4,4')	(6,6')
A	0	-3.003×10^{-11}	0
B	2.71×10^{-19}	1.497×10^{-17}	-1.186×10^{-16}
C	0	-8.583×10^{-24}	1.176×10^{-22}
D	0	2.222×10^{-30}	0

对于此环型孔径长焦距光学系统,光线通过最外侧的环形孔径(1,1')进入光学系统,通过后表面上的 3 个同轴环形非球面反射镜(2,2'),(4,4'),(6,6')和前表面平面镜上共 6 次反射,然后通过 3 块补偿镜,将目标成像在像面上。

图 1 中环形反射面(2,2')是双曲面型 6 次非球面^[14],(4,4'),(6,6')分别是二次曲面系数(Conic)为零的 10,8 次非球面。

非球面可由下式定义:

$$z = \frac{c r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 r^2}} + A r^4 + B r^6 + C r^8 + D r^{10} + E r^{12} + F r^{14} + G r^{16} + \dots,$$

其中 c 为顶点处的基本曲率; k 为圆锥曲线常数; r 为垂直光轴方向的径向坐标; A, B, C, D, \dots 为非球面系数。

图 2 是设计得到系统的点列图, 下列数字标示不同视场, 图中黑色圆形标示艾里斑的大小, 图 3 是系统的调制传递函数曲线, 其中黑色点线表示衍射极限(MTF)曲线, 可见系统的 MTF 曲线与其衍射极限接近。从点列图和 MTF 曲线可知设计得到的系统具有良好的成像质量。

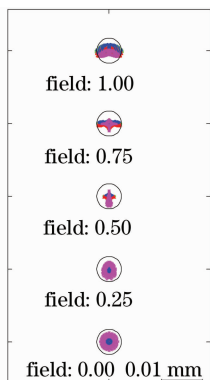


图 2 系统点列图

Fig. 2 Geometric spot diagram

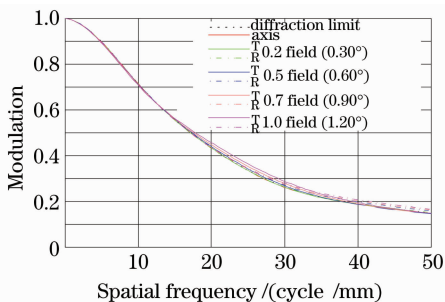


图 3 系统调制传递函数曲线

Fig. 3 MTF of the designed optical system

图 4 为系统的场曲和畸变曲线, 可以看到, 边缘视场的像散最大为 $50.17 \mu\text{m}$, 最大畸变为 0.64% 。根据焦深的计算公式 $\lambda / (n' \sin^2 Yu') = 65 \mu\text{m}$ 可知, 像散值小于焦深, 在像差容限范围内^[15]。

4 公差分析

利用 Code V 程序的交互式公差制订工具, 对设计结果进行公差分析, 使用像面移动和偏心作为补偿参数, 计算出每种公差对系统综合性能的影响。

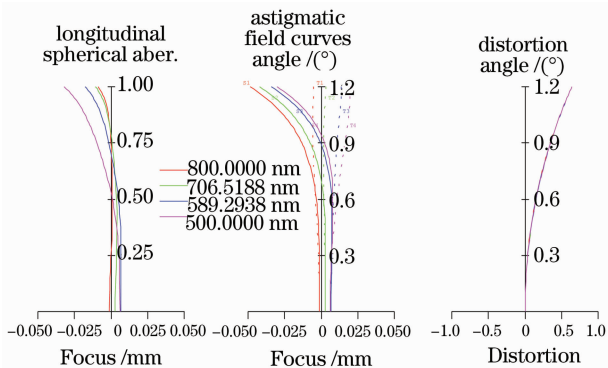


图 4 系统的场曲和畸变曲线

Fig. 4 Field curvature and distortion curves

系统较严的公差分配如下, 球面局部光圈为 0.1 ; 间隔公差为 $\pm 0.02 \text{ mm}$; 面 $3, 5, 7$ 的倾斜公差为 $\pm 0.00156 \text{ mm}$, 面 $2, 4, 6$ 的倾斜公差为 $\pm 0.0018 \text{ mm}$; 偏心公差为 $\pm 0.02 \text{ mm}$; 非球面随机面形误差 RMS 值的公差均为 $\lambda/50$; 面 $2, 4, 6$ 的顶点曲率半径公差 $\Delta R/R$ 分别为 $\pm 0.01\%$, $\pm 0.088\%$, $\pm 0.082\%$, 相当于矢高变化分别为 ± 0.003 , ± 0.0025 和 $\pm 0.0025 \text{ mm}$; 面 2 的 Conic 系数公差为 ± 0.01 ; 面 $2, 4, 6$ 的高次非球面矢高变化分别为 ± 0.536 , ± 0.253 和 $\pm 0.292 \mu\text{m}$; 像面移动补偿量为 $\pm 5 \text{ mm}$, 像面倾斜补偿量为 $\pm 0.5 \text{ rad}$ 。

图 5 为系统在奈奎斯特频率处的 MTF 受公差的影响, 横坐标表示传递函数在奈奎斯特频率处的 MTF 值, 纵坐标表示蒙特卡罗采样样本中 MTF 值达到的概率分布, 不同颜色的曲线代表了不同的视场情况。具体数据如表 3 所列, 可以看到概率为 84% 的系统 MTF 值大于 0.145 。

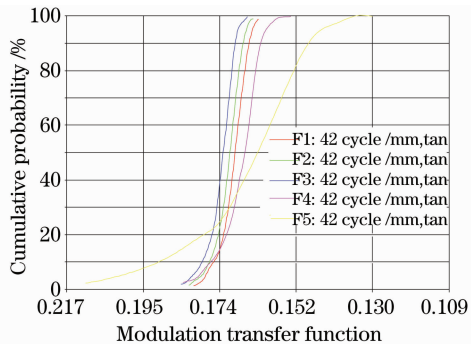


图 5 MTF 值对应的像质累计概率曲线

Fig. 5 Cumulative probability of the image quality versus MTF

环形孔径长焦距光学系统为折反系统, 具有多个高次非球面反射镜, 反射面面型加工精度的要求高, 经过公差分析可以看出, 反射环面的倾斜公差、非球面顶点曲率半径公差和非球面随机面形误差 RMS 值的公差较传统镜头严格。因此, 加工和装配

公差明显严于传统光学系统,给制造增加了难度,相应地提高了制造成本。

表 3 不同累计概率对应的 MTF 值

Table 3 MTF values of different cumulative probability

Field	Designed MTF values	97.7%	84%	50%
		systems' MTF values	systems' MTF values	systems' MTF values
(0,0.00)	0.174	>0.159	>0.164	>0.168
(0,0.25)	0.175	>0.161	>0.165	>0.170
(0,0.5)	0.177	>0.162	>0.167	>0.172
(0,0.75)	0.174	>0.152	>0.159	>0.166
(0,1.00)	0.180	>0.127	>0.145	>0.163

5 结 论

所研究环形孔径长焦距光学系统的通光孔径为环形,是环面稀疏孔径的一种,成像质量较好,应用于空间望远系统中,可达到与之通光口径相当的大口径系统的衍射极限的分辨率,有效地减少成像系统的体积和重量,达到小型化、轻量化的要求,避免加工大口径高精度的光学元件的困难,从而降低相机的制造成本。

参 考 文 献

- 1 Chen Shiping, Yang Bingxin, Wang Huaiyi *et al.*. Design and Experimentation of Space Camera [M]. China Astronautic Publishing House, 2003, **12**: 40~44
陈世平, 杨秉新, 王怀义等. 空间相机设计与试验[M]. 中国宇航出版社, 2003, **12**: 40~44
- 2 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three reflective mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
常 军, 翁志成, 姜会林等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(2): 216~219
- 3 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design of wide angle space optical systems of long focal length [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, **24**(1): 42~43
常 军, 翁志成, 姜会林等. 大视场、长焦距空间光学系统的设计[J]. 兵工学报, 2003, **24**(1): 42~43
- 4 Zhang Ruirui, Shen Weimin. Ultrathin cameras using annular folded optics[C]. *SPIE*, 2008, **7156**: 7156041~7156049

- 5 V. Draganov, D. G. James. Compact telescope for free space communications. current developments in lens design and optical engineering III[C]. *SPIE*, 2002, **4767**: 151~158
- 6 M. W. Haney. Performance scaling in flat imagers [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(13): 2901~2910
- 7 Mu Guoguang. Development of Modern Optics and Photonics: The Special Compile for Celebrating Academician Wang Daheng Engage Technology Activity 65 Anniveray[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2003. 243~265
母国光. 现代光学与光子学的进展——庆祝王大珩院士从事科研活动六十五周年专集[M]. 天津:天津科学技术出版社, 2003. 243~265
- 8 Xue Mingqiu, Li Pinxin, Wu Yu. Research on long focal optical system[J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1989, **18**(4): 289~293
薛鸣球, 李品新, 吴 煜. 长焦距光学系统研究[J]. 高速摄影与光子学, 1989, **18**(4): 289~293
- 9 Wu Feng, Shen Weimin. Design of a catadioptric system for star sensors with wide field of view [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 142~145
吴 峰, 沈为民. 折反式大视场星敏感器光学系统设计[J]. 光学技术, 2004, **30**(2): 142~145
- 10 Chen Xiaoli, Shen Hongbing, Yang Bingxin *et al.*. Review on sparse aperture imaging system [J]. *Space Craft Recovery & Remote Sensing*, 2006, **27**(1): 23~27
陈晓丽, 沈洪兵, 杨秉新等. 稀疏孔径成像系统发展概况[J]. 航天返回与遥感, 2006, **27**(1): 23~27
- 11 Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 187~192
吴泉英, 钱 霖, 沈为民. 复合三子镜稀疏孔径光瞳结构的研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 187~192
- 12 Zhang Wei, Deng Jian, Long Funian *et al.*. Image quality evaluation for segmented mirror synthetic aperture optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 687~691
张 伟, 邓 键, 龙夫年等. 子孔径合成光学成像系统像质评价研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 687~691
- 13 Wang Shengqian, Rao Changhui, Jiang Wenhan *et al.*. Analysis of spatial arrangement for optical synthetic aperture imaging system with four sub-apertures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 692~699
王胜千, 饶长辉, 姜文汉等. 四子孔径光学合成孔径成像系统空间排布性能分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 692~699
- 14 Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Science Press, 1994
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 科学出版社, 1994
- 15 Ji Yiqun, Liu Hongjun, Shen Weimin. Optical design of F- θ lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 73~75
季轶群, 刘红军, 沈为民. F- θ 镜头的光学设计[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 73~75