

超长焦距短结构光学系统设计

马洪涛 韩 冰 张晓辉 何 煦 聂真威

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 针对高分辨率长焦距光学系统的结构特点,在受到轨道舱直径 4 m 左右结构限制的情况下,长焦距光学系统的结构长度的减小显得非常重要。通过像差理论计算和 ZEMAX 光学设计软件的设计,在满足了超长焦距高分辨率和结构长度小于 4 m 的要求的情况下,设计了一个视场为 $1.5^\circ \times 0.3^\circ$ 、相对口径为 1/9、焦距长度为 23333 mm,结构长度做到了 3314 mm 的光学系统。系统采用了两个椭球面和一双曲面,还有两个平面折叠镜。其中平面折叠镜不仅可以缩短光路,还可以起到调焦作用。

关键词 光学设计;超长焦距;短结构;高分辨率

中图分类号 O0435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3503

Design of Hyper Long Focal Length in the Short Structure Optical System

Ma Hongtao Han Bing Zhang Xiaohui He Xu Nie Zhenwei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract According to high-resolution optical system with long focal length of the structure characteristics and structural constraints of the orbital module in diameter 4 m, the length of the optical system is considered one of the important factors for design. Therefore, a long focal length design of the structure above the optical system is particularly important. By the aberration theory and ZEMAX optical design software, the system to meet the ultra-long focal length and high-resolution requirements and the structure of the length is less than 4 meters. A system with a field of view $1.5^\circ \times 0.3^\circ$, the relative diameter of 1/9, the focal length 23333 mm length of the optical system and the length of the structure was 3314 mm was designed. Two ellipsoid, a pair of hyperboloid and two plane mirror to be the folding mirrors are used in the system. The folding mirror can not only shorten the optical path, but also play a role in focusing.

Key words optical design; hyper long focal length; short structure; hight resolution

1 引 言

目前在空间对地遥感和空间摄影领域中,无论军事还是民用领域都在努力发展高分辨率的空间相机。当空间相机轨道高度和 CCD 像元尺寸一定时,增长焦距可以提高对地面的像元分辨率,但是随着焦距的加长,系统的结构尺寸也会增大,体积大对航天相机非常不利。因此如何增大焦距,同时又在保

证成像质量的前提下尽量减小体积是目前空间光学研究的热点。折射式、折反射式光学系统本身的结构特点制约,很难做到长焦距而结构长度还很短。而反射式光学系统不产生色差,孔径可以做得很大,并可以轻量化,在抗热性能方面有较强的优势,使用非球面矫正像差,可以使结构简单,像质优良。因此本文采用反射式光学系统进行了研究设计^[1,2]。基于

收稿日期: 2009-02-16; **收到修改稿日期**: 2009-03-09

作者简介: 马洪涛(1980 —),男,硕士研究生,助理研究员,主要从事航天光机系统设计、检测、装调方面的研究。

E-mail: mht00311429@163.com

导师简介: 张晓辉(1967 —),女,硕士,研究员,主要从事航天光机系统设计、检测、装调方面的研究。

E-mail: zhangxiaohui0123@163.com(通信联系人)

高斯光学的基础上,尝试设计了焦距为23333 mm,视场为 $1.5^\circ \times 0.3^\circ$ 筒长只有3314 mm,保证了高分辨率同时,结构尺寸不会超过卫星轨道舱直径的要求^[3]。

2 光学系统分析

在无像差光学系统中或者系统像差足够小时,光学系统的口径的衍射决定了最高的分辨率,衍射系统的分辨率的影响由艾里斑直径 d 来表征^[4]:

$$d = 2.44\lambda F, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, F 为光学系统相对孔径的倒数。

光学系统的成像质量最好能做到衍射极限,即像斑最小直径为衍射极限。系统焦距由探测器像元尺寸和卫星轨道高度、分辨率来决定:

$$f' = \frac{\delta}{a} H, \quad (2)$$

式中 δ 为 CCD 像元尺寸, a 为地面像元分辨率, H 为卫星轨道高度。

地面覆盖宽度:

$$Q = 2H \times \tan \omega, \quad (3)$$

式中 Q 为地面覆盖宽度, ω 为光学系统的半视场角。

由(3)式可知,在波长、卫星高度和探测器尺寸 δ 确定后,空间分辨率与光学系统焦距有关。在相同的轨道高度条件下,增大焦距可以提高地面分辨率,增大系统的视场角可以扩大对地面的覆盖宽度。同时,增大系统的口径有利于提高空间光学系统的性能。但在研制长焦距甚至超长焦距光学系统时,较少采用大口径的折射和折反射系统。主要原因为二级光谱消除困难;其次大尺寸、高光学均匀性的材料较难熔炼、对加工与装调要求极高,而且对环境温度和压力的变化也特别敏感^[5~7]。相对而言,反射式系统具有以下优势:

1) 不存在任何色差,二级光谱也就不存在,因此可以用于很宽的谱段成像,特别适用于卫星遥感侦察和多光谱成像的光学系统;

2) 零件数相对较少,重量轻,可以设计成轻量化结构进一步减轻重量,这正是空间光学系统所需要的;

3) 设计型式非常灵活,可以借助折转反射镜来折叠光路使结构紧凑,还可以用非球面来获得大口径、大视场、长焦距等多种性能要求的系统。此类系统一般都要用到非球面^[9],以前由于非球面光学系统的加工、检测和装调工艺水平较低,使得反射式光学系统没有得到广泛应用。如今,随着计算机辅助加工非球面技术的日益成熟和计算机辅助检测与装

调技术的应用^[8];反射式光学系统得到了广泛的应用,出现了一些高质量、高性能的反射式系统,长焦距光学系统的研究也就自然转到反射系统上来。由3块反射镜组成的系统结构最简单,在满足消除4种初级像差的前提下,还有多余的参数可以用来安排系统结构,因此受到广泛的关注。

3 设计举例与性能分析

设计一个焦距 $f'=23333$ mm,结构长度3314 mm,相对孔径为 $1/9$,视场角为 $1.5^\circ \times 0.3^\circ$,谱段范围为可见与红外的光学系统,确定各光学表面和光学间隔的初始结构参数如表1所示。

表1 结构参数

Table 1 System parameter

	Primary /mm	Secondary /mm	Tertiary /mm
Radius	-8056.73	-2092.5	-3000.8
Thickness	-3313.5	2059.7	3304.7
Conic	-0.85	-2.31	-0.51

从表1中可以看出:主镜 L_1 ,三镜 L_3 为椭球面,次镜 L_2 为双曲面。将此初始结构带到光学软件中优化后,结构图如图1所示。其像质可以达到衍射限,传递函数曲线如图2所示,点列图如图3所示,能量分布如图4所示,系统的全长为 $f'/7$ 。

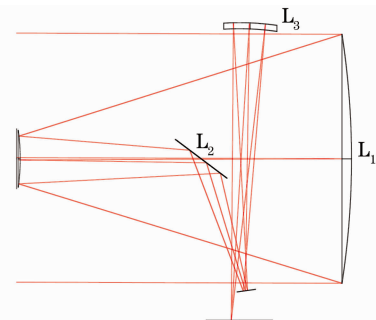


图1 系统结构图

Fig. 1 System layout

4 结 论

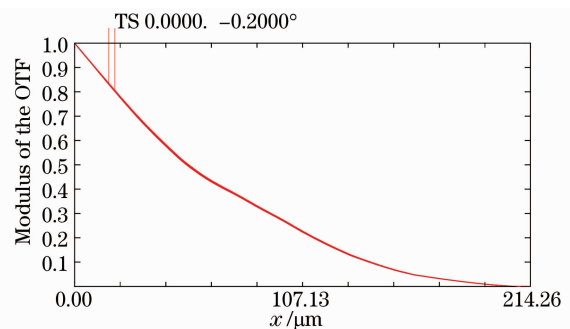


图2 传递函数曲线图

Fig. 2 MTF curves

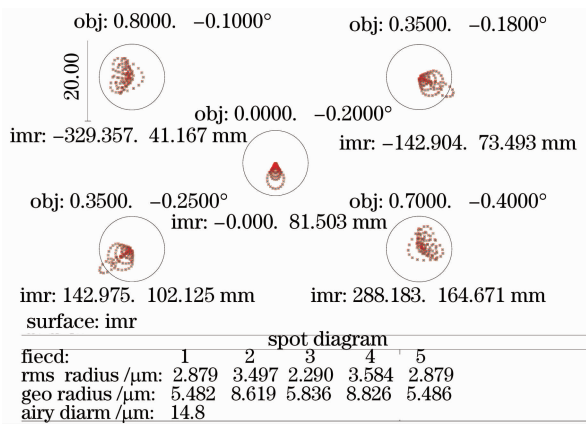


图 3 点列图

Fig. 3 Spot diagram

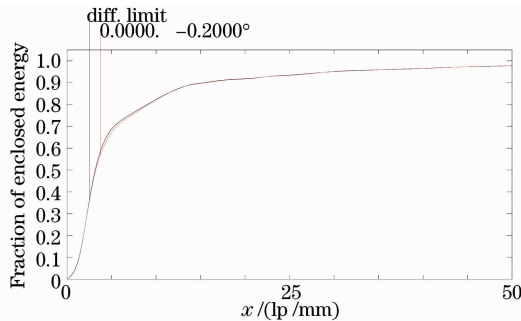


图 4 能量分布曲线图

Fig. 4 Encircled energy curve

通过设计和分析,所设计的系统有如下特点:

1) 光学系统结构形式采用全反射形式,用了三个二次曲面和两个平面反射折叠镜,主镜和三镜为椭球面,次镜为双曲面。

2) 采用了偏轴系统,这样保证了一个方向的全视场,另一个方向取部分视场,这样很好的避开了中心遮拦,通过主镜的大相对口径设计和折叠镜的应用,使结构长度达到 $f'/7$,满足了现在国内卫星轨道舱结构要求。

3) 所设计的系统相对折射式和折反射式光学系统从重量角度轻便数十倍。而离轴三反系统^[10]在大视场上存在着优势,但要做到长焦距、高分辨率时结构尺寸只能做到 $f'/4$ 。对焦距 $f'=23333$ mm,结构长度 5833.25 mm,这样的结构尺寸目前国内还无法发射。

由于设计使用的是矩形视场,适用于线阵的 TDI-CCD 接收器,通过推扫方法可得到成像。若 CCD 像元尺寸选择 $8.75 \mu\text{m}$,此系统放在 400 km 高轨道上,光学系统的分辨率可达到 0.15 m,其覆盖宽度可以达到 10.5 km,在航天遥感领域具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Shi Guanghui. Optical design of Cassagrain system with three aspherical surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2): 238~241
史光辉. 含有三个非球面的卡塞格林系统光学设计[J]. 光学学报, 1998, **18**(2): 238~241
- 2 Liu Jianfeng. Optical system design of spacesensor with wide field of view[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 187~192
刘剑锋. 大视场航天遥传感器的光学系统设计[J]. 光学技术, 2004, **30**(2): 187~192
- 3 Qian Lin, Wu Quanying, Wu feng *et al.*. Study on imaging of dual three sub-apertures design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1030~1035
钱霖, 吴泉英, 吴锋等. 复合三子镜的成像研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1030~1035
- 4 Pan Junhua. Optical System Design, Fabrication and Tesing [M]. Beijing Science Press, 1994. 157~167
潘君骅. 光学非球面的设计、加工和检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 157~167
- 5 Pan Junhua. Research on the field corrector design for the R-C system of the large telescope cassegrain focus[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3): 231~234
潘君骅. 关于大望远镜卡焦 R-C 系统视场改正镜设计的研究[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(3): 231~234
- 6 D. Korsch. Design and optimization technique for three-mirror telescopes[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(21): 3640~3645
- 7 P. N. Robb. Three-mirror telescope design and optimization[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(17): 2677~2685
- 8 Zhang Raoyu, Zhang Minhui Qiao Yanfeng. High-precision noneontact position measuring system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **10**(1): 41~44
张尧禹, 张明慧, 乔彦峰. 一种高精度非接触位置测量系统[J]. 光学精密工程, 2001, **10**(1): 41~44
- 9 Cui Xiangqun. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407
崔向群. 一种大口径非球面度天文磨制新技术[J]. 光学学报, 2005, **25**(3): 402~407
- 10 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