# 新型紧凑型大相对孔径可见光光学系统

# 王虎1,2,罗建军1

(1. 西北工业大学 航天学院,陕西 西安 710072;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

摘 要:针对空间碎片探测相机光学系统的使用要求,借助衍射光学元件特殊的消色差和消热差特性, 提出了一种结构紧凑、成像质量良好的大相对孔径空间碎片探测相机光学系统结构,解决了以往该类系 统相对孔径小、结构复杂等不足的问题,给出了100mm 焦距,1/1.5 相对孔径,6°对角线视场的设计实例, 并进行了像质评估,该结构可满足空间碎片探测相机光学系统对能量集中度、弥散斑直径、垂轴色差、畸 变、热差等像差的要求。结果表明,衍射光学元件的使用实现了系统轻量化、小型化、高像质的设计要求, 大大提高了该空间碎片探测相机的成像性能,为该类系统的设计提供了一种新的思路。

关键词:相机; 非球面; 衍射光学

中图分类号:TN216 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2014)03-0851-05

# A novel compact large relative aperture visible optical system

Wang Hu<sup>1,2</sup>, Luo Jianjun<sup>1</sup>

School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the special chromatic aberration and thermal aberration of diffractive optical element, which are used in optical system of visible camera for space debris, a novel compact and good image quality large relative aperture space debris camera optical system was designed. The novel system solved the problem that the conventional system had small relative aperture and complex structure. The novel system had an effective focal length of 100 mm, a relative aperture of F/1.5, a field of view of 6°. The system met the requirements of visible space debris camera in encirc energy, the dispersion spot diameter, lateral color, distortion, athermalization and so on. This novel system had light weight, compact structure and good image quality by using diffractive optical element, which provided a new idea for designing visible space debris camera optical system.

Key words: camera; aspheric surface; diffractive optics

收稿日期:2013-07-05; 修订日期:2013-08-03

作者简介:王虎(1975-),男,副研究员,博士生,主要从事空间光电探测、光学设计方面的研究。Email:optwangh@163.com 导师简介:罗建军(1965-),男,教授,博士,主要从事空天飞行器导航与制导方面的研究。Email:jjluo@nwpu.edu.cn

# 0 引 言

空间碎片探测是航天探测测控中的重要工作之一,空间探测能力的强弱是未来空间应用能力强弱的前提,是实现空间应用的重要基础。传统的空间碎片探测方式多利用雷达探测或无线电探测,这些方法的技术相对成熟,且成本较低,但有一定的局限性,在使用时往往会受气象、地理位置的影响。为了提高探测空间碎片的能力,很多国家都开展了空间碎片探测设备研制的研究,空间碎片探测设备可以在太空中对空间碎片进行跟踪捕获任务,可避开大气的干扰,能够精确地获得目标的尺寸、形状及轨道参量等重要的目标信息<sup>[1-4]</sup>。

结构紧凑、轻小型、相对孔径大是空间相机研制 的发展方向,但实际上这些要求是互相矛盾的,相对 孔径大可以得到更多的景物信息,但同时也增加了 系统的口径,增加了光学元件数量,这个和结构紧 凑、轻小型的要求是矛盾的。文中借助衍射光学元件 独特的消色差和消热差特性,有较多的优化变量可 增加设计的自由度,进而减小系统体积,减轻系统重 量,提高系统性能,提出了一种结构紧凑、成像质量 良好的大相对孔径空间碎片探测相机光学系统结 构,评估结果表明,该系统结构紧凑,成像质量良好, 各项参数达到满足设计要求。

## 1 设计参数

该类系统不仅要求体积小、而且要求结构紧凑, 因此接收器采用先进的 TDI-CCD 图像传感器,像 元尺寸为 10 μm×10 μm,系统设计参数如表 1 所示。

Fab.1	Parameters	of	system	

Parameter	Value	
Wavelength range/µm	0.5-0.8	
Primary wavelength/µm	0.65	
Focal length/mm	100	
Field of view/(°)	6	
<i>F</i> -number	1.5	
Optical transmission	>80%	
Back working length/mm	>10	

### 2 衍射光学元件的特性

#### 2.1 色散特性

衍射光学元件的本质是属于一类周期变化的光 栅,它可对不同波长的入射光进行分光,对波面进行 任意整形。

衍射光学元件的等效阿贝数 v<sub>λ...</sub>表达式如下:

$$v_{\lambda_1,\lambda_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3} \tag{1}$$

式中: $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 分别为工作波段的最小值、中心值、最大值。

由公式(1)可知, 衍射光学元件的色散特性只和工 作波段有关。对于工作波段为 0.5~0.8μm 的可见光系 统, 计算可知, 衍射光学元件的阿贝数为 ν<sub>λ-λ</sub>=-2.17。

基于衍射光学元件该种特殊的负色散特性,在系统中衍射光学元件和折射光学元件一起使用构成混合系统,可校正系统的色差,且衍射光学元件为浮雕结构形式,可用来简化系统结构,提高系统的紧凑性<sup>[5-10]</sup>。

#### 2.2 温度特性

通常利用光学材料的热膨胀系数来表征光学元 件的温度特性。

折射光学元件的热差系数 Tr 表达式如下:

$$T_r = a_{gr} - \frac{1}{n-1} \frac{d_n}{d_T} \tag{2}$$

式中:n、ag、dn/dr分别为折射光学元件材料的折射 率,线膨胀系数和折射率温度系数。

衍射光学元件的热差系数 T<sub>d</sub>表达式如下:

$$T_{d} = 2a_{gd} + \frac{1}{n_{0}} \frac{d_{n0}}{d_{T}}$$
(3)

式中:n<sub>0</sub>、a<sub>gd</sub>、d<sub>n</sub>/d<sub>T</sub>分别为介质折射率,衍射光学元件的线膨胀系数和折射率温度系数。

对比上述公式(2)和(3)可知,不同于折射光学元件、衍射光学元件的热差系数只和材料的线膨胀系数有关,和材料折射率无关。

#### 3 系统设计与像质评价

根据第1节中的设计参数设计了用于空间碎片 探测可见光相机的大相对孔径光学系统,设计结果 如图1所示,为三组五片结构,共使用了三种玻璃材 料,分别为LAF5,ZK14和ZF6。空间碎片探测可见 光相机光学系统的重量为755g,长度为119.4mm, 后工作距为 19.86 mm,该系统结构紧凑、体积小、重量轻。随着加工检测装配技术的进步,二次曲面在空间光学系统的应用中日益广泛。为校正空间碎片探测可见光相机系统中的球差、彗差和像散等像差,提高相机的成像性能,在第1面使用了一个二次曲面,其二次系数为-0.2431。与此同时,为了校正空间碎片探测可见光相机系统的色差和热差,并平衡各个轴外像差,在系统中同时使用了衍射光学面,为了减小衍射光学面的加工难度,衍射面选择设置在第3面上,衍射面基底为平面,同时为了提高该衍射光学面的加工精度,优化设计时只选用衍射光学面的前三项系数配合其他变量进行优化,最后优化完成后衍射光学面的三项系数分别为-6.25e-5、9.12e-9、2.98e-13,用金刚石单点车削工艺可制作出这样的衍射光学面。



图 1 光学系统的外形结构图 Fig.1 Layout of optical system

为了保证系统在轨探测性能,利用软件对该相 机系统的成像性能进行了评估,为全面评估相机系统 的成像性能,系统设置了0°、0.9°、1.5°、2.1°、3.0°5个 视场,0.5 μm、0.6 μm、0.7 μm、0.8 μm 4 个波长位置, 这样评估结果更客观,尤其对于宽波段成像系统。

图 2 为系统能量集中度曲线,由图可知,能量集 中度的分布较集中,5 个视场相差不大,在 80%能量 集中度处,0°、0.9°、1.5°、2.1°、3.0°5 个视场对应的 弥散斑直径分别为 3.7 μm、4.1 μm、4.3 μm、5.1 μm、



7.4 μm, 在 TDI-CCD 图像传感器一个像元内, 成像 性能优良。

图 3 为系统点列图,0°、0.9°、1.5°、2.1°、3.0°5 个 视场对应的 RMS 直径分别为 2.46 µm、2.65 µm、 2.95 µm、4.05 µm、5.83 µm,可知 5 个视场的 RMS 弥 散斑直径大小分布均匀,均小于一个像元尺寸。



图 4 为系统垂轴色差曲线,横、纵坐标分别表示 垂轴色差值和视场,表 2 给出了具体的垂轴色差值, 由图 4 和表 2 可知,5 个视场的最大垂轴色差仅为 1.75 μm,色差校正取得了较好的效果。



#### 表 2 垂轴色差值(单位:μm)

#### Tab.2 Parameters of lateral color(Unit:µm)

Parameter	Short-long wave	Short-reference wave
0°	0	0
0.9°	-0.19	0.42
$1.5^{\circ}$	-0.27	0.73
$2.1^{\circ}$	-0.24	1.08
3.0°	-0.03	1.75

图 5 为系统畸变曲线,0°、0.9°、1.5°、2.1°、3.0°5 个视场对应的畸变值分别为 0%、0.04%、0.112%、 0.223%、0.475%,系统畸变均小于 0.5%,满足实际使 用要求。



Fig.5 Distortion

对于工作环境复杂的空间光学仪器,温度影响 是必须考虑的因素,对于一个光学镜头,光学元件的 半径、厚度、折射率等参数都随温度变化而变化。利 用衍射光学元件特殊的色散特性和温度特性,在空 间光学镜头中引入衍射光学元件,配合其他折射光 学元件的材料和机械材料,在实现消色差的同时,还 可以实现消热差,大大提高了空间光学镜头的性能。 消热差设计时,光学系统必须同时满足光焦度、消色 差和消热差的要求,设计时采用了阿贝数相差较大 的 LAF5,ZK14 和 ZF6 三种玻璃材料,结构材料选用 线膨胀系数小的铟钢,引入了衍射光学面,利用其特 殊的色差和热差特性实现了使用简单、紧凑的结构 完成了整个系统像面位移的自适应温度补偿。

图 6 给出了消热差后的光学系统在不同温度下的能量集中度曲线,表 3 为不同温度下 80%能量集中度对应的直径,由图 6 和表 3 可知,80%能量集中







度处,系统在0℃、20℃、40℃时的各视场对应的直 径变化不大,即温度变化对光学系统的像质影响不 大,系统实现了消热差。

#### 表 3 各温度 80% 能量集中度的直径(单位:μm)

Tab.3 Diameter for 80% encircled energy

in different temperature(Unit:µm)

Temperature	0 °C	20 °C	40 °C
0°	4.0	3.7	5.2
0.9°	4.7	4.1	5.7
1.5°	5.9	4.3	6.8
$2.1^{\circ}$	7.3	5.1	7.7
$3.0^{\circ}$	8.5	7.4	8.3

#### 4 结 论

针对空间碎片探测可见光相机大相对孔径、结构紧凑、轻小型、高像质的要求,借助衍射光学元件特殊的消色差和消热差特性,给出了一种结构紧凑、 轻小型、成像质量良好的大相对孔径空间碎片探测 相机光学系统方案,与以往的空间碎片探测可见光 相机光学系统相比,该系统具有结构紧凑、体积小、 重量轻、相对孔径大、透过率高、消色差和消热差性 能好等优点,符合空间碎片探测可见光相机光学系 统轻量化、小型化、高像质的的发展方向。

#### 参考文献:

- [1] Yoshida K. Engineering test satellite VII flight experiment for space robot dynamics and cont rol: theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(5): 3212335.
- [2] Wilson J R. Satellite hopes ride on orbital express [J]. Aero Space America, 2007, 45(2): 30235.
- [3] Harrison David C, Chow Loseph C. The space-based visible sensor [J]. Johns Hopkins Technical Digest, 1996, 17(2): 226–236.
- [4] Stair Jr A T. MSX design parameters driven by targets and backgrounds[J]. *Johns Hopkins Technical Digest*, 1996, 17(1): 11–18.
- [5] Yan Peipei, Fan Xuewu, He Jianwei. Design of hybrid refractive-diffractive star sensor optical system with small F-

number [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2458–2465. (in Chinese)

- [6] Bai Yu, Xing Tingwen, Feng Cheng. Design of head-mounted display optical system with DOE [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2753–2758. (in Chinese)
- [7] Cui Qingfeng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 12–16. (in Chinese)
- [8] Xu Liang, Zhao Jianke, Zhou Yan. Design of 8x dual field of view zoom and large relative aperture infrared hybrid refractive-diffractive system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2173–2178. (in Chinese)
- [9] Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Miniaturization design of large zoom ratio MWIR zoom optical system [J]. *Journal* of Applied Optics, 2013, 34(2): 215–220. (in Chinese)
- [10] Zhang Nan, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Optical design of diffractive telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 106–108. (in Chinese)