

航天鱼眼相机光学系统设计的研究

闫阿奇^{1,2} 杨建峰¹ 曹剑中¹ 祝青¹ 张志¹ 武登山¹ 王浩¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 充分考虑鱼眼相机应用的空间环境特点,设计了一款基于1/3 inch(1 inch=25.4 mm)CCD的航天鱼眼相机光学系统,系统焦距2.1 mm, F 数为4,视场角为 210° ,工作温度 $-40^\circ\text{C}\sim+60^\circ\text{C}$ 。重点研究了环境因素对鱼眼相机光学系统成像质量的影响,分别从抗空间带电粒子、抗紫外辐照、温度和气压适应性方面进行了分析和研究,给出了相应的解决思路和方法。相机在严峻的空间环境下具有良好的环境适应性,为在轨获得超广角空域信息提供了保证。

关键词 光学设计;鱼眼镜头;抗辐射;空间相机;超广角镜头

中图分类号 V445.8 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1022004

Optical System Design of Space Fisheye Camera

Yan Aqi^{1,2} Yang Jianfeng¹ Cao Jianzhong¹ Zhu Qing¹ Zhang Zhi¹

Wu Dengshan¹ Wang Hao¹

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Optical system of a space fisheye camera based on 1/3 inch (1 inch = 25.4 mm) CCD is designed considering the space environment. The focal length of the fisheye optical system is 2.1 mm, the F number is 4, and the field of view is 210° . The required working temperature is between $-40^\circ\text{C}\sim+60^\circ\text{C}$. After careful studying the influence of space environment such as the space γ radiation and ultraviolet radiation, temperature change and vacuum on the optical system, the technique for keeping image quality in space environment is put forward. The fisheye lens can reach excellent imaging quality in such an austere environment, and provide important guarantee for information capture with extreme wide-angle view on the orbit.

Key words optical design; fisheye lens; anti-radiation; space camera; extreme wide-angle lenses

OCIS codes 220.3620; 120.6085; 110.5200; 120.4820

1 引言

当今的信息化时代对信息的获取技术提出了越来越高的要求,人们不断追求全空域包含和全时域实时的信息获取,并竭力实现两者兼得。这不仅要求拥有凝视全空域的硬件设备,同时又需要超快速的信息处理和信号传输手段^[1]。鱼眼镜头可以实现凝视成像,获得半球甚至超半球空域的场景图像,实现完全无盲区“全向”、“实时”的信息提取,在安全监

视、防火监测、边防警戒、国防和军事等方面具有不可比拟的优势。虽然可以采用旋转/步进扫描技术和多镜头拼接技术获得超广角空域信息,但从体积、重量、功耗以及信息获取实时性等使用方面综合考虑,尤其是在天基、空基信息获取方面,单机超广角凝视技术是目前最有应用前景的实用技术,也是各国正竞相发展的先进技术。国内已有少量鱼眼相机应用于航天任务中,例如神舟七号任务中的舱外大

收稿日期: 2011-03-24; 收到修改稿日期: 2011-05-26

作者简介: 闫阿奇(1983—),男,博士研究生,主要从事极端环境下的光学成像与测量技术等方面的研究。

E-mail: yanaqi@opt.ac.cn

导师简介: 杨建峰(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学、光学测试和成像光谱等方面的研究。

E-mail: yangjf@opt.ac.cn

视场摄像装置。

本文介绍了一种用于航天的超广角可见光鱼眼光学系统设计。鉴于复杂的空间应用环境,着重讨论了鱼眼光学系统设计面对的相关问题(抗辐射、环境适应性和杂散辐射等)以及解决这些问题的方法和思路,最后完成了整个超广角可见光鱼镜头设计,保证整个摄像装置在空间严峻的环境下清晰成像,满足了实际任务要求。

2 鱼眼光学系统设计

根据任务要求,设计的超广角鱼镜头焦距为 2.1 mm, F 数为 4,采用 1/3 inch(1 inch=25.4 mm)彩色 CCD,像元尺寸 $6.25 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$,视场角为 $146.8^\circ \times 104.0^\circ$ (对角线视场角 210°),工作波段为可见光波段。

光学系统采用反摄远结构^[1,2],如图 1 所示。

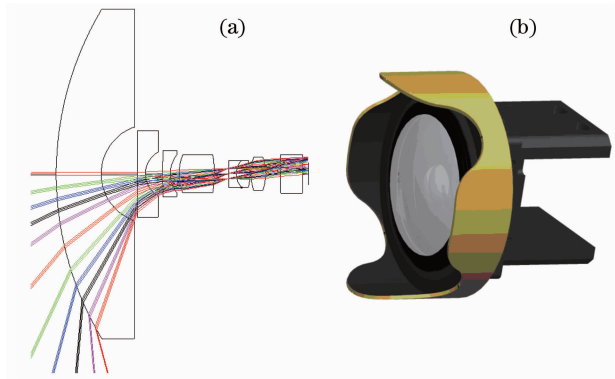


图 1 (a) 光学系统二维图; (b) 光机三维图

Fig.1 (a) 2D optical system plot and (b) 3D opto-mechanical plot

第 1 片透镜材料为光学石英玻璃 JGS1,具有耐高温、耐急冷急热和耐辐射等特性。系统中胶合镜所用材料为 ZF7 和 LAK2,这两种材料线热膨胀系数基本一致,分别为 $8.2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 和 $8.4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$,能保证透镜在空间快速高低温交替环境中不会因差分膨胀而碎裂^[3]。整个光学系统结构简单紧凑,体积小、重量轻、满足航天小型化设计要求。

下面给出鱼眼相机光学系统的主要像质评价曲线。20 °C 时的调制传递函数(MTF)曲线如图 2 所示。20 °C 时的像差曲线如图 3 所示。

3 光学系统抗辐射设计

3.1 光学系统抗带电粒子辐照设计

空间带电粒子辐照是航天器轨道上严重威胁航天活动的重要环境因素,主要有地球辐射带、太阳宇

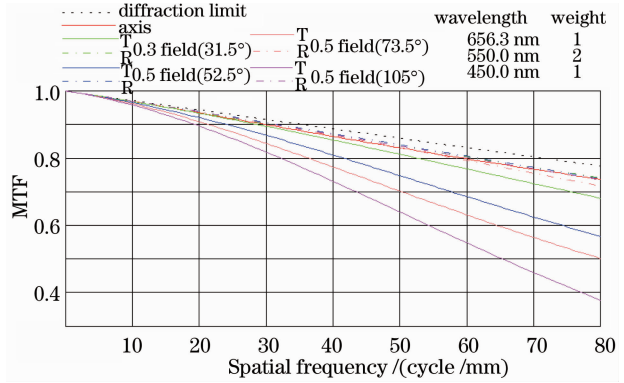


图 2 20 °C 时光学系统的 MTF 曲线

Fig.2 MTF of the optical system at 20 °C

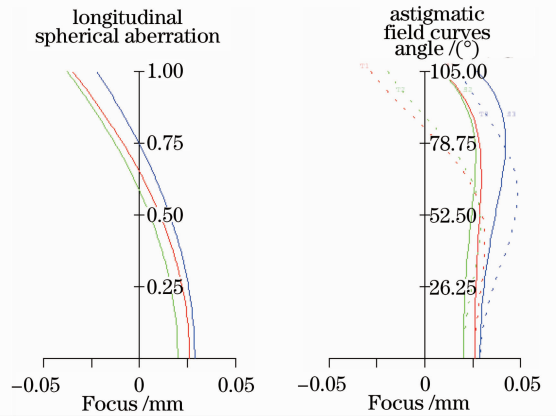


图 3 光学系统像差曲线

Fig.3 Aberration curves of the optical system

宙线、银河宇宙线、等离子体和太阳风等多个来源。高能带电粒子与航天器上的电子元器件及功能材料发生相互作用,产生各种辐射效应,从而对航天器产生不良影响。带电粒子入射到物体(吸收体)上时,将部分或全部能量转移给吸收体,带电粒子所损失的能量也就是吸收体所吸收的辐射总剂量,长期积累即对元器件和材料造成损伤。

空间相机由于直接暴露在外环境中,大多数用于相机光学系统的普通无色光学玻璃在较强辐射下会因外部辐射粒子与光学玻璃内粒子发生作用而改变颜色,从而极大地降低光学材料的透过率,影响图像信噪比和像质。对于全部采用光学透镜的折射式光学系统,这种影响将更加严重^[4,5]。

电离总剂量效应具有长期累积的特点,光学系统透过率持续下降无疑将对空间相机的使用寿命产生很大影响。因此,为了延长空间相机的使用寿命尤其是光学系统采用全折射式结构的相机的寿命,就必须采取较好的抗带电粒子辐射措施,保证相机在恶劣空间环境下能在任务时间内正常工作。

鱼眼相机在要求的寿命期内应承受的总吸收剂

量为 1.5×10^4 Gy,设计时考虑 2~3 倍设计余量。光学系统首片透镜采用光学石英玻璃(JGS1),中心厚度为 8.15 mm,即相当于为内部其他镜片材料提供最小 6.6 mm 的等效铝厚度。由某轨道飞行器辐射总剂量和屏蔽厚度的关系可知:在该轨道寿命期内,等效铝厚度为 6 mm 时,其他透镜只需满足 1.904 Gy 的设计剂量。根据 Co^{60} 实测数据,普通光学材料具有 5 Gy 以上的抗带电粒子辐射性能。

光学系统第 2 片透镜采用 1.5 mm 厚的 K9 光学玻璃, K9 光学玻璃也具有稳定的物理、化学性能以及较好的抗辐射性能。因此,前两片透镜尤其是光学石英玻璃 JGS1 可为内部的透镜提供辐射保护,整个光学系统抗带电离子辐射设计满足设计规范和实验要求。

此外,设计中将抗辐射性能较差的光学材料尽量后移,使抗辐射性能好的透镜提供更多的屏蔽厚度。

3.2 光学系统抗紫外辐照设计

紫外辐射环境依然是近地轨道航天器所要面对的。太阳是 115~300 nm 紫外辐射的重要光源,该波段位于绝大数光学材料的吸收带内。经紫外辐照后,容易产生不可逆变的光化学污染,使光学玻璃变色,使增透膜、干涉滤光膜和胶合剂性能降低。对于地物相机,由于其处在紫外的阴影区,可忽略这方面的影响,而对于观测太阳或者光轴指向深空的空间相机则必须采取防紫外措施^[6,7]。由于任务中太阳有可能短暂地进入视场以及光学系统光轴指向空间,因此应采取适当的紫外防护措施。

对于紫外辐照,鱼眼相机在轨工作时间内应承受的紫外辐射总剂量为 122.5 kcal/cm^2 。紫外辐照效应为表面效应,主要针对光学石英玻璃进行。以往多次对 JGS1 进行不同辐射剂量紫外辐照的实验数据表明,紫外辐照对光学石英玻璃 JGS1 透过率影响很小。

光学系统设计中采用了胶合透镜,由于空间紫外环境同样可能对胶合面产生影响,设计时应尽可能减小到达胶合面的紫外通量。胶合透镜采用环氧树脂胶合。一方面,考虑到光学材料本身对短波的吸收,尤其是设计中所用的 ZF7 材料对紫外波段有强烈的吸收作用;另一方面,根据镜头光机系统杂散光分析结果,确定在第 4 片透镜后表面镀制紫外截止膜,100~400 nm 紫外透过率小于 1%,420~700 nm 可见光平均透过率大于 98%。通过这两项措施使紫外对胶合面的影响减到最小。

4 光学系统温度和气压适应性设计

在空间中,环境温度急剧变化是不得不考虑的另一个问题。对于光学系统来说,温度变化一方面使材料热胀冷缩,改变材料的外形尺寸,包括厚度、半径;另一方面将改变光学材料的折射率。

气压对光学系统的影响主要在于改变空气折射率,空气与光学材料的相对折射率的变化将引起光学系统像面离焦。

对于光学系统结构件而言,温度变化引起结构件的热变形,当形变量与光学材料形变量不一致时,就会引起很大的热应力,特别是当内部存在温度梯度时,结构的变形更加严重。光机零件间的差分膨胀或收缩产生的径向间隙变化以及隔圈膨胀或收缩产生的轴向间隔变化,都将导致光学系统成像质量恶化。

设计时合理选择镜头结构,恰当地选择光学材料,对于温度折射率系数大的光学材料,在光学设计中给予较小的光焦度分配^[8~10]。

根据任务要求,对 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,1 个标准大气压和真空环境下的光学系统主要像质进行分析。镜筒材料和隔圈材料分别采用 TC4 和 LY12。 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时光学系统的 MTF 曲线如图 4,5 所示; $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 MTF 曲线如图 6,7 所示。表 1 给出了不同环境下的系统离焦量。

表 1 环境变化引起的系统离焦量(单位:mm)

Table 1 Defocus caused by temperature and pressure change (unit: mm)

Pressure /Pa	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	$+60 \text{ }^\circ\text{C}$
1×10^5	-0.0031	0	+0.0019
0	-0.0111	-0.0064	-0.0037

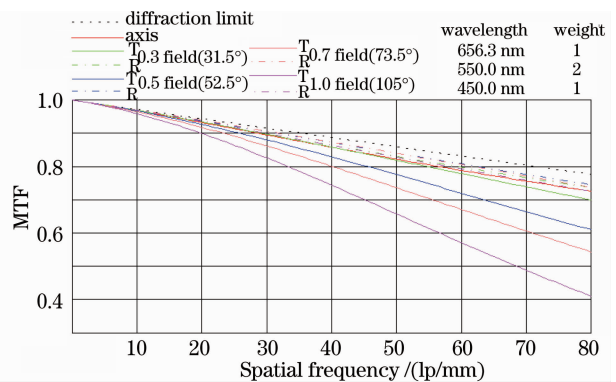


图 4 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 常压光学系统 MTF 曲线

Fig. 4 MTF of the optical system at $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \times 10^5 \text{ Pa}$

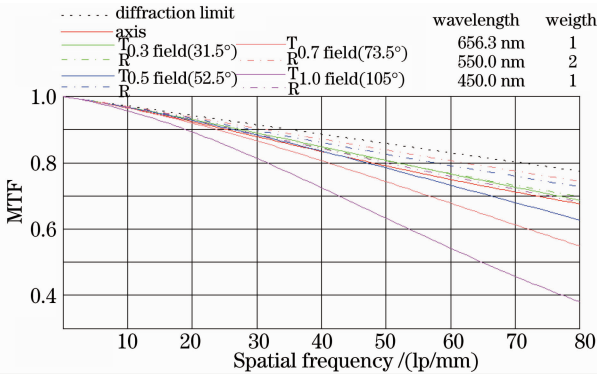


图 5 -40 °C 真空光学系统 MTF 曲线

Fig. 5 MTF of the optical system at -40 °C in vacuum

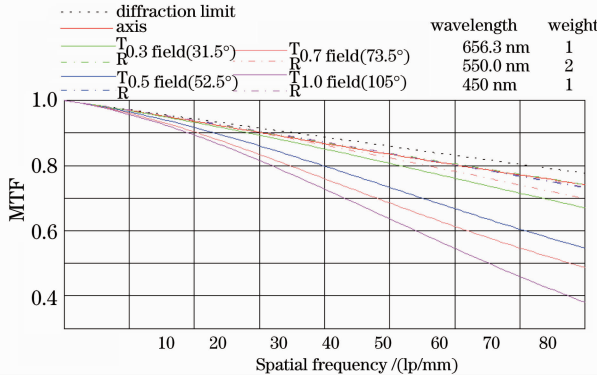


图 6 +60 °C 常压光学系统 MTF 曲线

Fig. 6 MTF of the optical system at 60 °C, 1×10^5 Pa

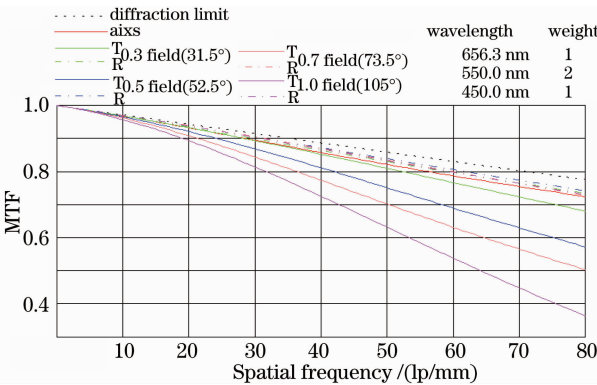


图 7 +60 °C 真空光学系统 MTF 曲线

Fig. 7 MTF of the optical system at 60 °C in vacuum

从图 4~7 可以看出,光学系统 MTF 随温度、气压变化较小,在 80 lp/mm 时,MTF 基本保持在 0.4 以上,与常温常压下光学系统成像质量无明显差异。从表 1 中也可以看到,环境变化对光学系统影响较小,像面离焦量小于光学系统的焦深(0.025 mm)。因此,光学系统对环境变化不敏感,可以保证在

-40 °C~60 °C 常压和真空环境下都具有良好的成像清晰度,系统具有很好的环境适应能力。

5 结 论

本文介绍了一种用于航天的超广角可见光鱼眼光学系统设计。系统焦距 2.1 mm, F 数为 4, 视场角为 210° 。该系统有较好的抗空间带电粒子能力、抗紫外辐照能力,同时具有较好的温度和气压适应性。系统的环境适应能力能保证整个摄像装置在严峻的空间环境下清晰地成像,满足实际工程任务要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Yongzhong. Fisheye Optical Design [M]. Beijing: Science Press, 2006. 4~12
王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 4~12
- 2 Chadwick B. Martin. Design issues of a hyper-field fisheye lens [C]. *SPIE*, 2004, **5524**: 85~92
- 3 Paul R. Yoder, Jr.. Opto-Mechanical Systems Design [M]. BocaRaton: CRC Press, 2006. 659~725
- 4 Yan Aqi. Space Optical System with Large Field of View and Low Distortion [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. 3~15
闫阿奇. 航天器用大视场低畸变光学系统的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008. 3~15
- 5 Zhao Xue, Zhou Yanping, Liu Haigang. Anti-radiation design of obactical optical system [J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2004, **36**(3): 407~409
赵雪, 周彦平, 刘海刚. 空间光学系统抗辐射设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, **36**(3): 407~409
- 6 Chen Shiping. Design and Experimentation of Space Camera [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2009. 48~54
陈世平. 空间相机设计与试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009. 48~54
- 7 Liu Yuming. Studies of ultraviolet irradiation effect [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, **24**(6): 359~363
刘宇明. 空间紫外辐射环境及效应研究[J]. 航天器环境工程, 2007, **24**(6): 359~363
- 8 Wang Xi, Xu Shiwen. Athermal design for visible diffractive-refractive hybrid optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1595~1598
王茜, 许士文. 可见光折/衍射混合光学系统消热差设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(12): 1595~1598
- 9 Hu Yuxi, Xiangli Bin, Yang Jianfeng. Athermalization of space optical system [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2000, **17**(3): 275~277
胡玉禧, 相里斌, 杨建峰. 空间光学系统无热化设计[J]. 量子电子学报, 2000, **17**(3): 275~277
- 10 Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Xiangli Bin *et al.*. Design of athermal optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1386~1391
胡玉禧, 周绍祥, 相里斌等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1386~1391