

大面阵 CCD 航空数码相机光学系统设计

闫阿奇^{1,2} 杨建峰¹ 曹剑中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 充分考虑航空 CCD 相机工作环境和成像特点,设计了一款具有 5000 万像素的航空 CCD 数码相机光学系统,焦距 75 mm, F 数为 4,畸变小于 0.1%,工作温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过重点研究环境温度变化对数码相机光学系统成像质量的影响,提出通过无热优化的方法,保证相机在宽温度范围内具有良好的温度适应性。这种方法既能有效减小光学系统在不同温度下像面的热离焦,又有利于航空相机小型化、轻量化设计。

关键词 光学设计;航空数码相机;无热化;大面阵 CCD;热离焦

中图分类号 V245.6 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0622003

Optical Design of Aerial Digital Camera Based on Large Planar Array CCD

Yan Aqi^{1,2} Yang Jianfeng¹ Cao Jianzhong¹

(¹ Xi'an Institute 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 an aerial digital camera based on large planar array CCD with 50 million pixels is designed, considering aerospace environment and imaging quality. The focal length of aerial digital camera is 75 mm, F number is 4, and distortion is less than 0.1%. The required working temperature is between $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. After carefully research on the influence of temperature on imaging quality of optical system, a new approach is put forward. Aerial digital camera can reach excellent imaging quality when soaking in a large temperature change by this new technique. This approach can not only eliminate defocusing effect of optical system caused by temperature change, but also make the aerial digital camera be smaller and less weighty.

Key words optical design; aerial digital camera; athermalization; large planar array CCD; thermal defocus

OCIS codes 220.3620; 110.5200; 080.3620

1 引 言

航空相机是装载在飞机上以拍摄地表景物来获取地面目标信息的光学仪器。随着航空技术的发展,航空相机已经在军事情报领域和民用国土资源开发方面具有重要的作用^[1]。由于航空相机是以飞机或无人机为平台,航空相机成像质量受温度影响较大,在对流层中,飞机飞行高度每上升 100 m 温度将下降 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度变化引起像面离焦,这将严重影响相机成像清晰度和分辨率;因而提高航空相机

的环境温度适应能力,一直是光机系统设计者研究的重要课题^[2]。国内外学者对光学系统无热化做了大量的研究,提出了一些无热化的方法,例如机械式被动补偿无热技术、机电式无热技术和光学被动补偿无热技术。光学被动补偿无热技术,通过合理选择透镜材料以及镜筒、隔圈材料实现像面位置恒定,具有相对简单、可靠的优点,但存在高成像质量与无热化光学材料选择之间的矛盾,为了兼备两者,而使得相机尺寸、重量增加,不利于实现航空相机小型

收稿日期: 2010-09-27; 收到修改稿日期: 2011-02-24

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

化、轻量化设计^[3~7]。

本文设计了一款具有 5000 万像素的航空数码相机光学系统,重点研究了温度的变化对相机成像质量的影响,通过同时优化不同温度下的光学系统,以实现系统在宽温度范围内清晰成像,从而提高了航空数码相机对环境温度的适应性。

2 初步设计

根据设计任务书的要求,设计的航空数码相机焦距 75 mm, F 数为 4,畸变小于 0.1%,采用可见光黑白 CCD,像元大小 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$,视场角 $36.26^\circ \times 26.58^\circ$ (对角线视场角 44.56°),环境温度 $-40\ ^\circ\text{C} \sim 60\ ^\circ\text{C}$ 。

首先根据设计任务书,设计一个常温下符合要求的光学系统,如图 1 所示。考虑到光学系统使用环境和成像质量的要求,光学系统结构采用高斯型近似对称结构,以平衡系统的垂轴像差,尤其方便控制畸变。

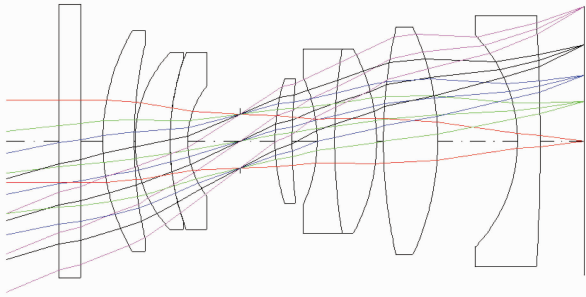


图 1 光学系统初步设计

Fig. 1 Preliminary design of optical system

由于光学系统需要在光阑位置安装可变光阑和中心快门,因此设计时在光阑附近留出较大间隔,保证有足够的空间。考虑到飞行环境以及各种振动、冲击等因素的影响,光学透镜在设计时,预留了较大的结构固定空间和透镜边缘厚度^[8]。此外,航空相机成像质量受大气影响较大,大气对短波的散射会形成薄雾现象,为减小大气散射对成像对比度和清晰度的影响,光学系统的前端采用黄色滤色镜 JB6,滤光片表面镀制全介质高增透宽带减反膜,以减小杂光干扰。

航空相机光学系统具有焦距较长、畸变小和分辨高等特点,但是,较长的焦距,使得光学系统成像质量对温度变化比较敏感^[9,10]。温度变化会引起光学零件外形尺寸和材料折射率变化,光学系统焦距越长,像面离焦量越大。对初步设计的光学系统进行温度分析,其中镜头结构件材料采用铝合金

LY12。光学系统在常温 $20\ ^\circ\text{C}$ 时的调制转换函数(MTF)曲线如图 2 所示。

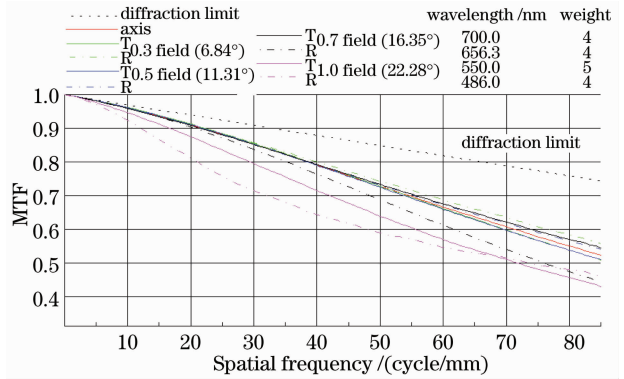


图 2 $20\ ^\circ\text{C}$ 光学系统 MTF 曲线

Fig. 2 Modulation transfer function (MTF) of optical system at $20\ ^\circ\text{C}$

在温度分析后发现,在 $-40\ ^\circ\text{C}$ 环境下,光学系统离焦量为 $0.0356\ \text{mm}$,超出系统焦深($0.024\ \text{mm}$)范围,其 MTF 曲线如图 3 所示。低温环境使光学系统离焦量增大,系统传递函数明显下降,这将严重影响系统成像质量。

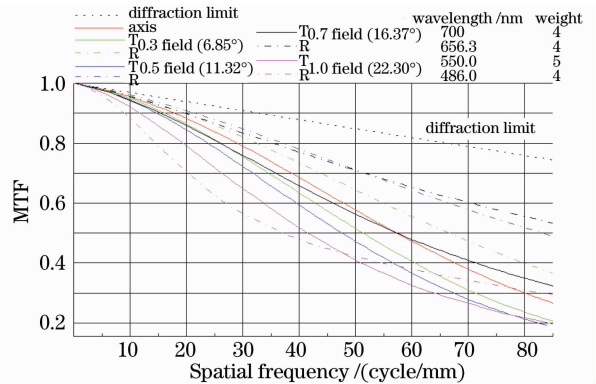


图 3 $-40\ ^\circ\text{C}$ 光学系统 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curve of optical system at $-40\ ^\circ\text{C}$

3 无热优化设计

同时优化不同温度环境下的光学系统,可以实现系统对温度变化不敏感。基本思路就是先设计好常温下的光学系统,然后在光学设计软件中将不同温度环境下的光学系统看作是不同光学结构(类似于变焦系统),并根据光学系统所处的温度环境,采用 ZOO 和 PICK UP 命令将光学材料的膨胀系数、尺寸、折射率以及结构件材料膨胀系数、尺寸等参数关联起来,从而形成在 $-40\ ^\circ\text{C}$, $20\ ^\circ\text{C}$ 和 $60\ ^\circ\text{C}$ 下的三重变焦结构,同时优化这 3 种温度环境下的光学系统,以实现无热化的设计。不同温度下光学材料的折射率通过在 CODE V 软件中编制宏命令

PRV 输入,优化时以常温 20 ℃ 的光学参量作为基准,将其设置成变量,其他环境温度下的参量与其保持 PICK UP 和 ZOO 的关系。

按照上述方法,将光学系统转变成三重结构,分别对应于-40 ℃,20 ℃和 60 ℃下光机参数,同时优化三重结构,并根据优化情况,适当改变某些光学材料。最终设计结果如图 4 所示。无热化后,光学系统在-40 ℃,20 ℃和 60 ℃的 MTF 曲线分别如图 5~7 所示。

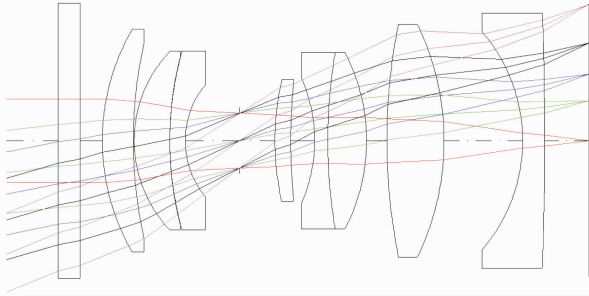


图 4 光学系统最终设计

Fig. 4 Final design of optical system

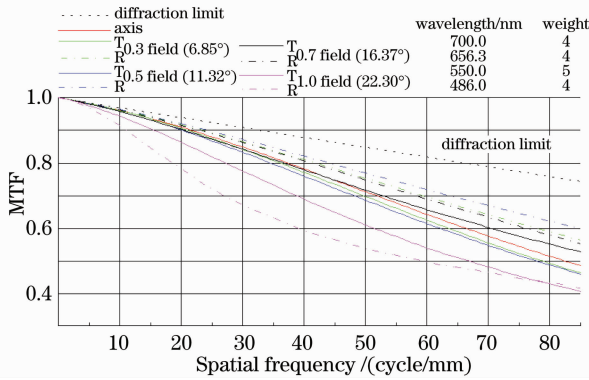


图 5 无热化后光学系统的 MTF 曲线(-40 ℃)

Fig. 5 MTF curve of the optical system at -40 ℃ after athermalization

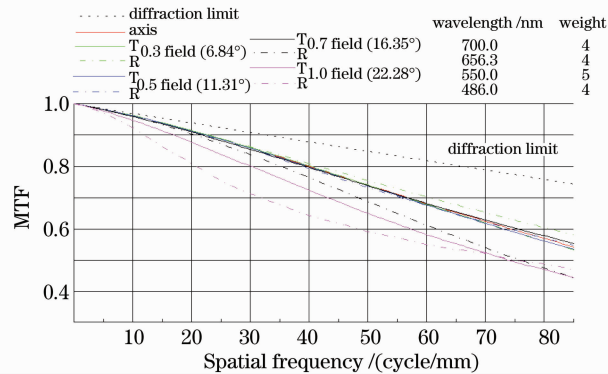


图 6 无热化后光学系统 MTF(20 ℃)

Fig. 6 MTF curve of the optical system at 20 ℃ after athermalization

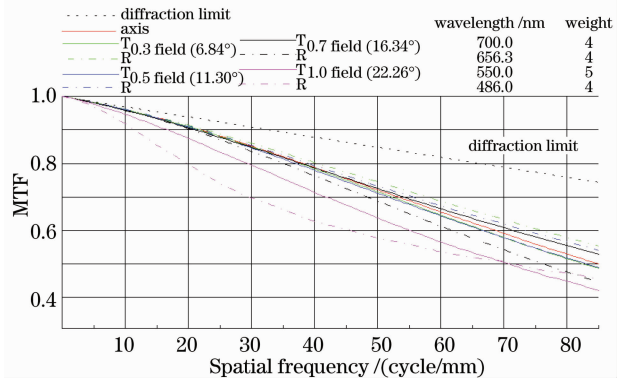


图 7 无热化后光学系统 MTF(60 ℃)

Fig. 7 MTF curve of the optical system at 60 ℃ after athermalization

从上图可以看出,光学系统在-40 ℃~60 ℃的 MTF 保持在 0.4 以上,与常温下光学系统 MTF 相比,变化很小。经过无热化设计后,航空数码相机光学系统在要求的温度范围内均能保持很好的成像质量。

系统在 20 ℃的像差曲线如图 8 所示。从像差曲线可以看出,光学系统球差和像散得到较好控制,最大畸变为-0.05%。

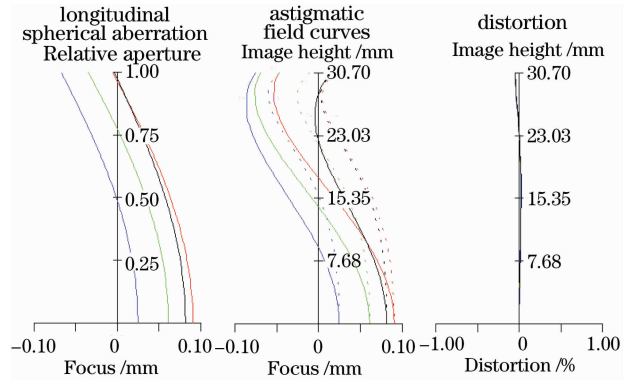


图 8 光学系统像差曲线

Fig. 8 Aberration curves of the optical system

经无热优化后,为了防止光学系统出现热场曲,对光学系统其他温度下系统离焦量进行计算,结果如表 1 所示。

表 1 环境温度造成的系统离焦量

Table 1 Defocus of the system caused by temperature

Temperature / ℃	Defocus / mm
-40	-0.0108
-30	-0.0103
-20	-0.0022
20	0
30	0.0011
50	0.0035
60	0.0046

由表 1 中可以看出,无热优化后的光学系统在不同温度下的离焦量远小于系统焦深(0.024 mm),较初始光学系统低温时的离焦量(-0.0356 mm)减小了很多,而且系统没有出现热场曲现象,整个温度范围内保持了良好的成像质量。

4 结 论

设计了一款大面阵航空数码相机的光学系统,设计中充分考虑各种因素的影响,重点研究了环境温度变化对这种长焦距系统成像的影响,通过采用变焦优化方法,大大减小了光学系统在-40℃~60℃温度范围内像面的离焦量,为相机获取高分辨率、高质量航空数码影像提供重要保证。

参 考 文 献

- 1 Li Yuyao, Tao Yong, Lin Zhaoheng *et al.*. Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3183~3185
李玉瑶,唐勇,林昭珩等.基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3183~3185
- 2 Liao Jingyu, Gao Xiaodong, Lan Gongpu *et al.*. Dynamic thermal/structural/optical analysis and design for aerial camera lens system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(7): 36~40
廖靖宇,高晓东,蓝公仆等.航空相机物镜动态光机热分析与设计[J]. *光电工程*, 2010, **37**(7): 36~40
- 3 Li Lin, Wang Xuan. Current status and prospects for thermal effects on optical systems and athermalisation techniques [J]. *Opt. Technol.*, 1997, **5**(9): 26~29
李林,王焯.环境温度对光学系统的影响研究及无热系统设计现状与展望[J]. *光学技术*, 1997, **5**(9): 26~29
- 4 Wang Xi, Xu Shiwen. Athermal design for visible diffractive-refractive hybrid optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1595~1597
王茜,许士文.可见光析/衍射混合光学系统消热差设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1595~1597
- 5 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
- 6 Guo Yonghong, Shen Mangzuo. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1392~1394
郭永洪,沈忙作.折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1392~1394
- 7 Hu Yuxi, Xiangli Bin, Yang Jianfeng. Athermalization of space optical system [J]. *Chinese 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
- 8 Yan Aqi, Zhu Qing, Cao Jianzhong *et al.*. Space optical system with large field of view and high resolution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1975~1977
闫阿奇,祝青,曹剑中等.用于航天的高分辨率大视场光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 1975~1977
- 9 Paul R. Yoder, Jr. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006. 659~725
- 10 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