

宽波段折反射式航空相机设计

陈炳旭^{1,2}, 杨旭³, 张智强³, 袁晓宇³, 蒋锐⁴

(1. 中国科学院成都光电技术研究所, 四川 成都 610200; 2. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610200;
3. 吉林东光集团有限公司, 吉林 长春 130033; 4. 江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214028)

摘要: 为了在 15000 m 平流层实现对地全天候观测, 满足工作波段 470~1500 nm 对地分辨率达到 0.1 m 的要求, 设计了一种长焦距折反式高分辨率 CCD 航空相机。通过使用 H-ZK7 与 ZF6 搭配, 对长焦距和大孔径产生的二次光谱进行校正, 倍率色差控满足设计要求。通过对光学系统热分析, 分析出系统在不同高度下温度变化对成像质量的变化曲线。探测器采用徕卡公司 M9 全画幅 CCD 探测器, 其单像元为 8 μm, 靶面尺寸为 48 mm×36 mm; 系统在 100 lp/mm 时达到衍射极限, 满足系统成像要求。

关键词: 光学系统设计; CCD 高分辨率; 二级光谱; 折反式结构; 宽波段

中图分类号: TN202 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)08-0864-08

Wide-Band Folded-Reflective Aerial Camera

CHEN Bingxu^{1,2}, YANG Xu³, ZHANG Zhiqiang³, LUAN Xiaoyu³, JIANG Rui⁴

(1. Chengdu Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610200, China;
2. Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610200, China;
3. Jilin Dongguang Group Co. LTD., Changchun 130033, China;
4. Jiangsu North Huguang Optoelectronics Co. LTD. Wuxi 214028, China)

Abstract: To achieve all-weather observations in the 15000 m stratosphere and meet the ground resolution of 470–1500 nm, a long-forward charge-coupled device (CCD) aerial camera was proposed. By correcting the secondary spectra generated by the long focal length and large aperture using H-ZK 7 with ZF6, the rate color difference control meets the design requirements. The temperature curve of the system at different heights was analyzed via thermal analysis of the optical system. The detector adopted a full-frame CCD detector with a single image element of 8 μm and a target surface size of 48 mm × 36 mm; the system reached the diffraction limit at 100 lp/mm, fulfilling the imaging requirements of the system.

Key words: optical system design, CCD high resolution, secondary spectrum, folded-reflective structure, wide band

0 引言

空中遥感技术作为获取全面的地面信息重要技术手段, 表现形式多种多样, 其中航空相机是航空遥感的最主要的表现形式。航空相机被广泛应用于军事侦察、地形测绘、资源普查等领域。根据航空摄影机的结构、图像传输方式、用途、光谱范围和使用条件的不同, 航空相机可分为多种类型^[1]。航空相机有如下分类方式, 即按照结构分类可以分为: 画幅式相机, 缝隙式相机以及全景式相机 3 类; 按照图像传输方式分类可以分为: 胶片回收式相机以及图像传输式相机;

按照用途分类可以分为: 勘察用相机以及测绘式相机; 按照工作光谱分类: 可见光相机, 红外相机以及多光谱相机; 按照使用条件分类: 昼间相机, 夜间相机以及通用相机。

国外的航空相机发展较早, 其中典型的航空相机有: 美国侦察与光学公司的 CA-295 航空相机^[2]、Goodrich 公司的 DB-110 航空相机^[3]、Raytheon 公司在全球鹰无人机上搭载的可见光/红外 (EO/IR) 载荷^[4]、以及柯林斯航空航天系统公司最新的产品 MS-177A/B 航空相机^[5]。我国的航空相机研制工作开始在 20 世纪 70 年代由国营江南光学仪器厂研制 HS88/23、

收稿日期: 2023-03-24; 修订日期: 2023-05-16.

作者简介: 陈炳旭 (1994-), 女, 工程师, 从事先进光学系统设计方面工作。E-mail: 18143096012@163.com。

HS152/23 航摄仪^[6]; 金陵光学仪器厂研制的 BKZ-307 型航空相机, 中国兵器 228 厂以美国 KA-112A 航空相机为原型研制的 XXX 型航空相机^[7]。对现有国内外航空相机进行简单梳理, 大多数航空相机采用折射式光学系统, 要满足长焦距这一要求必然会增大相机的横向尺寸, 增大相机的载荷重量, 对观测飞机的核定载荷是一个挑战。与此同时, 采用折射式光学系统对于系统色差的校正提出了一系列的挑战, 因此提出了一款折反射结构, 同时采用成本较低的材料进行配对设计, 以满足像移补偿要求。该设计既能满足光学系统的成像要求, 又能通过折反射式结构大大缩小航空相机的横向尺寸, 减低航空相机载荷重量, 实现小型化与低成本化设计的要求。

1 系统结构及其参数确定

本设计基于极限飞行高度 15000 m 的飞机上使用的航空相机, 能够在地面上区分 0.2 m 的目标。高空航空相机分辨能力除了受自身的光学系统性能影响之外、还受到外界的大气温度、压力、飞行器振动、飞行姿态和 CCD 接收器接收机性能等因素的干扰^[8]。因此, 为了满足航空相机的成像质量, 光学系统的分辨率应限制在 0.1 m。因此, 有必要从接收机尺寸、工作波段、系统焦距、相对孔径、视场角等方面对系统进行分析, 以确定系统结构。

1.1 工作波段

目前通过对文献[2-7]梳理, 航空相机的工作波段主要以可见光和红外波段为主。可见光波段航空相机天气影响较大, 晨昏时段以及阴雨时段无法精准地获得大面积的对地影响, 红外相机因其探测器分辨率不高以及探测范围小的问题导致航空相机的应用上产生掣肘, 设计一款 450~1500 nm 宽波段共焦航空相机具有其实际意义。

1.2 航空相机的焦距的计算

分辨率是航空相机成像质量优良的重要指标, 分辨率和系统的焦距和地面分辨率具有一定的数学关系。采用长焦距的光学设计方案, 能够达到系统分辨率 0.1 m 的要求。

全画幅 CCD 探测器宽高比为 4:3, 由两块靶面尺寸为 24 mm×36 mm CCD 拼接而成 48 mm×36 mm, 单个像元尺寸为 8 μm, 根据飞机飞行高度 $H=15000$ m, 结合设计要求, 系统焦距可通过公式(1)得到:

$$\frac{f}{H} = \frac{\text{单像元大小}}{\text{地面分辨率}} \quad (1)$$

式中: f 为航空相机焦距; H 为航空相机飞行高度。

通过公式(1)计算后, 航测比例尺为 1:12500。

1.3 相对孔径

航空相机物镜的相对孔径由两个因素决定: ①光学系统的分辨率; ②图像像面照度。

光学系统分辨率:

$$N = \frac{D/f'}{\lambda} \quad (2)$$

像面照度:

$$E' = \frac{1}{4} \pi L' \tau \left(\frac{D}{f'} \right) \quad (3)$$

式中: D/f' 系统的相对孔径; λ 为光波长; L' 为像面光亮度; τ 为光学系统透射比; 光学系统相对孔径是决定系统图像的表面照度的重要因素^[9]。结合到 CCD 接收器相关分辨率特性以及航空相机在使用时的照明条件, 选用相对孔径 $D/f'=1/8$ 的系统进行设计。

1.4 视场角

选择大靶面 CCD, 其靶面尺寸为 36 mm×48 mm, 其对角线长度:

$$A = \sqrt{36^2 + 48^2} = 60 \text{ mm} \quad (4)$$

根据无穷远物体的像高公式^[10]:

$$y = f' \tan \omega \quad (5)$$

计算得出视场角为:

$$2\omega = 2 \arctan \left(\frac{y}{f'} \right) = 2.8^\circ \quad (6)$$

通过上述计算后得出航空相机参数如下: 系统焦距 1200 mm; 相对孔径 1/8; 视场角 $2\omega=2.8^\circ$; 光学系统总长 760 mm; 系统工作波段 450~1500 nm; 畸变小于 0.5%; 飞行高度为 15000 m 在成像质量上, 每毫米 100 线对时, MTF 大于 0.2。光学系统参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Table 1 Optical system parameters

Parameters	Parameter values
System focal length/f/mm	1200
Relative aperture	1/8
Angle of field/(°)	2.8
Distortion	<0.5%
Total length of optical system/mm	760
MTF/(lp/mm)	>0.2@100
Flying height/m	15000

2 航空相机光学系统设计

2.1 光学系统结构的选取

通过对光学系统的焦距、相对孔径、视场和工作波段的分析, 航空摄像机的光学系统结构采用了折射结构、折反射结构和反射结构^[11]。由于航空相机焦距

长这一特点，折射式系统导致系统的体积增大，飞机的载荷过重；反射式系统为了达到更好的成像质量，需要进行非球面设计，增加了光学加工成本以及检测和装调难度；而采用折反射结构既可以满足轻量化设计，又不会增加设计以及加工难度。在系统中反射结构可以有效的校正畸变的同时，反射结构不会产生色差且会承担系统大部分光焦度，小光焦度的折射透镜组产生较小色差，使色差也得到有效抑制^[12]。图1为航空相机系统结构简图，以卡式系统为蓝本加入反远距系统，在满足增大视场角的前提下，又保证了系统的成像质量。宽波段折反式航空相机光学系统参数见表1。

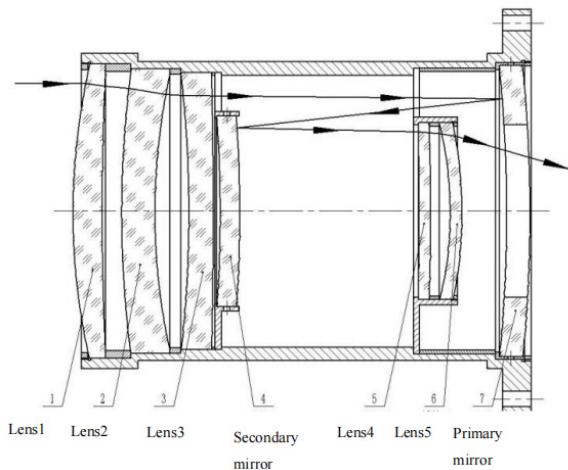


图1 航空摄像系统结构图

Fig.1 Structural diagram of the aerial camera system

2.2 二级光谱的校正

由于航空相机具有长焦距、大光圈和宽工作带的特点，因此在设计中必须对二级光谱进行校正，这也是本次设计的难点。校正二级光谱的方法有4种方法：应用二级光谱校正器校正二级光谱，采用等效玻璃方式校正二级光谱，采用反射式光学系统校正二级光谱，采用衍射元件校正二级光谱^[13]。

对于密接的双薄透镜，二级光谱由两个透镜的相对色散和阿贝数比值相关，与自身结构无关；对复杂的光学系统而言，对于光学系统中每个透镜的材料的相对色散与阿贝数确定，二级光谱的数值也基本确定。因此在校正二级光谱的时候，需要选择相对色散差值较小，阿贝数差值较大的材料。由于本设计工作波段在470~1500 nm，根据公式(7)(8)计算相应的玻璃的P、v值：

$$P = \frac{N_{\lambda_3} - N_{\lambda_2}}{N_{\lambda_1} - N_{\lambda_2}} \quad (7)$$

$$v = \frac{N_{\lambda_3} - 1}{N_{\lambda_1} - N_{\lambda_2}} \quad (8)$$

式中： N_{λ_1} 为波长为 λ_1 的折射率； N_{λ_2} 为波长为 λ_2 的折射率； N_{λ_3} 为波长为 λ_3 的折射率； v 为阿贝常数； P 为相对色散。

选取国内具有代表性的玻璃材料，分别计算其相对色散 P 和阿贝常数 v 如表2所示。

表2 几种有代表性的玻璃材料的色散特性

Table 2 Dispersive properties of several representative glass materials

Trademark	n_{λ_1}	Abbe constant v	Relative dispersion P
H-ZK7	1.60	60.38	0.586
H-QF3	1.57	11.06	0.827
H-BAF5	1.60	11.80	0.824
ZF6	1.73	27.54	0.805
H-BAK2	1.54	16.62	0.802
H-K7	1.51	16.88	0.800
H-FK61	1.49	23.01	0.799
CaF ₂	1.43	26.95	0.804

通过计算及比较代表性玻璃材料的相关色散特性。选择 H-ZK7 ($P=0.586$, $v=60.38$) 与 ZF6 ($P=0.805$, $v=27.54$) 进行配对来进行消色差系统的设计。

2.3 环境适应性分析

由于该相机采用折反式结构，需要考虑反射结构的主镜，次镜以及主次镜的间隔问题；随着温度升高，主镜的变化使得光学系统的后截距变长^[14]，次镜和主次镜镜筒使得光学系统的后截距变短。因此针对该系统的无热化设计从主次镜和镜筒的材料选择展开。其中微晶玻璃、碳化硅、锻铝合金常作为航空相机反射镜材料；铝合金、铁镍合金、钛合金作为航空相机镜筒的常用材料。表3表示0~15000 m 不同海拔的温度^[15]。通过光学材料手册^[16]以及光机系统设计手册^[17]分别从反射镜、镜筒材料的密度以及材料力学的性能进行比较分析，表4为航空相机反射镜常用材料的性能；表5为航空相机镜筒常用材料性能，其中 ρ 为反射镜及镜筒密度， E 为反射镜及镜筒材料弹性模量， ϵ 为反射镜及镜筒材料泊松比， β 为反射镜及镜筒材料导热率， α 为反射镜及镜筒材料线膨胀系数。

其中通过对表4和表5分析，选用碳化硅(SiC)作为航空相机反射镜材料，铁镍合金作为航空相机的

镜筒材料作为组合具有良好的温度适应性,但是从产品的轻量化以及成本出发,铁镍合金的密度为钛合金的1.8倍,铝合金的2.9倍,就加工难度以及加工成本而言,锻铝合金的成本远远低于碳化硅的成本。因此选用锻铝合金作为反射镜材料,钛合金作为镜筒材料是一种相对经济的组合。通过仿真软件分别从环境温度以及外界应力状态,对镜筒为钛合金材料进行分析,图2为 $-60^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 镜筒温度的变化值。可以明显看出钛合金作为镜筒材料受到温度影响较小。

图3~5分别为镜筒的应力分析、静态位移以及静态应变,可以看出钛合金作为镜头所受到的应力产生的最大静态位移 2.598×10^{-3} mm,静态位移量非常小,

足以保证光学系统光机结构的稳定性。

表3 0~15000 m 不同海拔的大气温度^[15]

Table 3 Atmospheric temperature at different elevations from 0 to 15000 m^[15]

Above sea level/m	Temperature /°C
0	15
3000	-4.5
6000	-24
9000	-43.1
12000	-56.5
15000	-56.5

表4 航空摄像机常用材料性能^[16]

Table 4 Performance of commonly used materials for aerial camera mirrors^[16]

Material	$\rho/\text{g/cm}^3$	E/GPa	ε	$\lambda/\text{W/m}\cdot\text{°C}$	$\alpha/\text{°C}$ (10^{-6})
Zerodur	2.5	92	0.22	1.6	0.05
Wrought aluminium alloy (6061)	2.73	68.9	0.33	155	23.6
Silicon carbide (SiC)	3.05	400	0.25	185	2.4

表5 航空摄像机镜筒常用材料^[17]

Table 5 Common materials for aerial camera mirror tubes^[17]

Material	$\rho/\text{g/cm}^3$	E/GPa	ε	$\beta/\text{W/m}\cdot\text{°C}$	$\alpha/\text{°C}$ (10^{-6})
Aluminium alloy (7A09)	2.8	71	0.33	142	23.0
Titanium alloy (TC4)	4.44	109	0.29	7.4	9.1
Ferro-nickel iron (4J36)	8.1	141	0.25	13.9	2.5

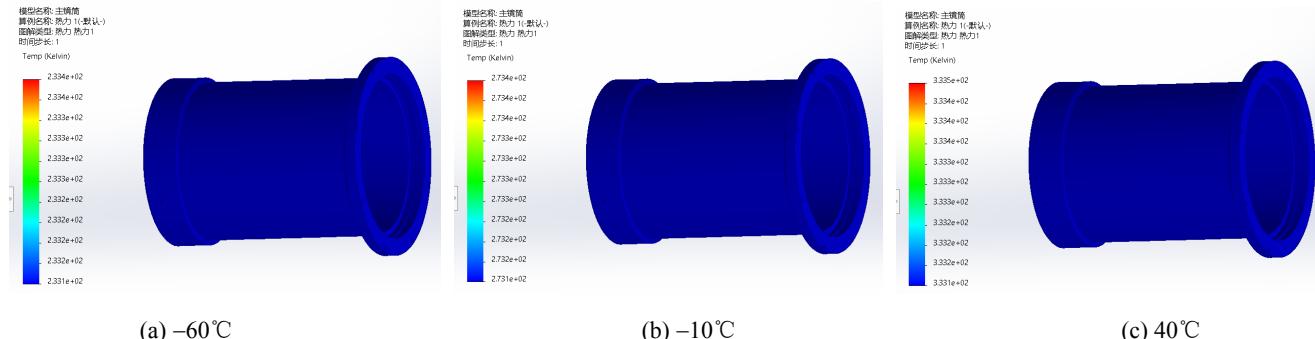


图2 镜筒的温度变化范围 ($-60^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$)

Fig.2 Temperature variation range of mirror cylinder from -60°C to 40°C

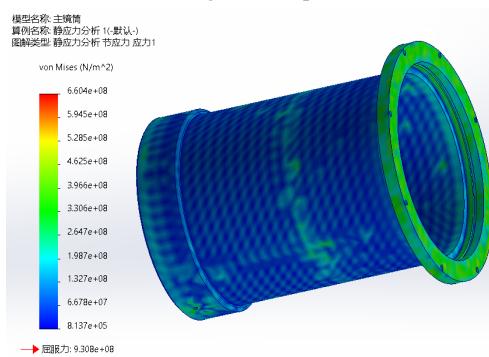


图3 镜筒静应力分析

Fig.3 Static stress analysis of the mirror cylinder

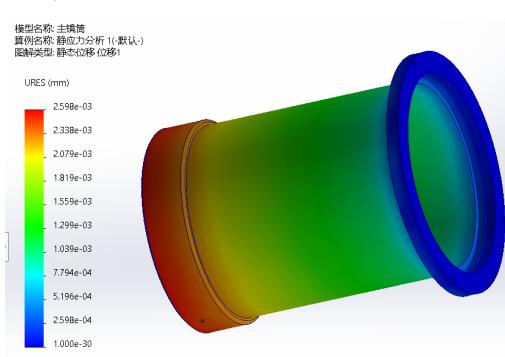


图4 镜筒静态位移分析

Fig.4 Static displacement analysis of the mirror cylinder

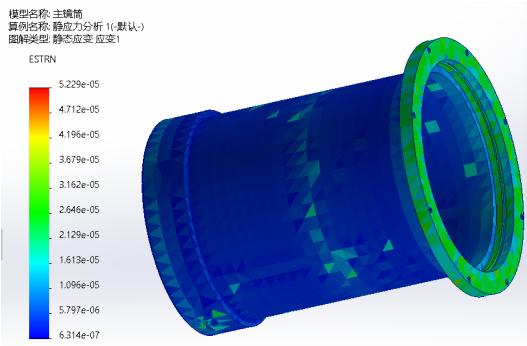


图 5 镜筒静态应变分析

Fig.5 Static strain analysis of the mirror cylinder

2.4 设计结果和图像质量评估

通过航空相机结构的初步计算后, 将初始结构输入 Zemax 软件, 用像差平衡对光路设计进行优化, 光学系统图见图 6。该折反结构系统总长 757 mm, 满足光学系统小型化的要求。

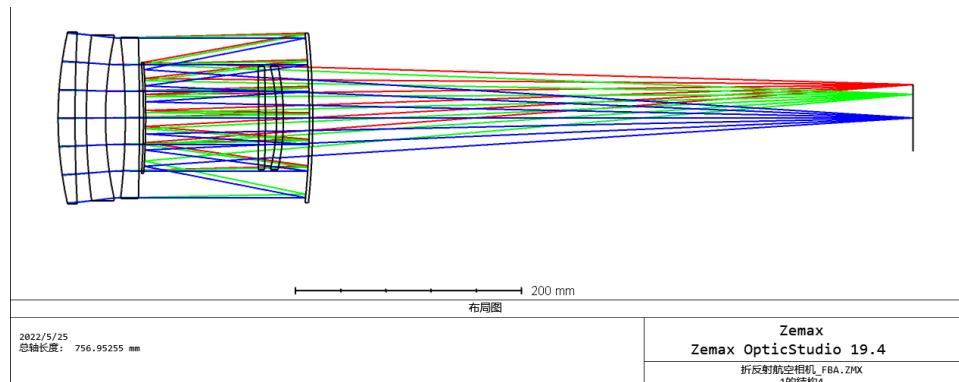
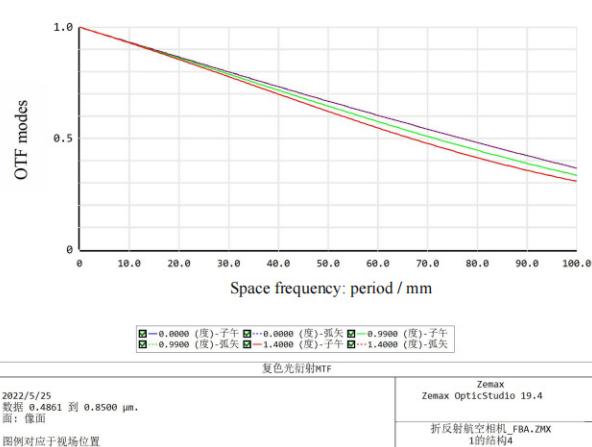
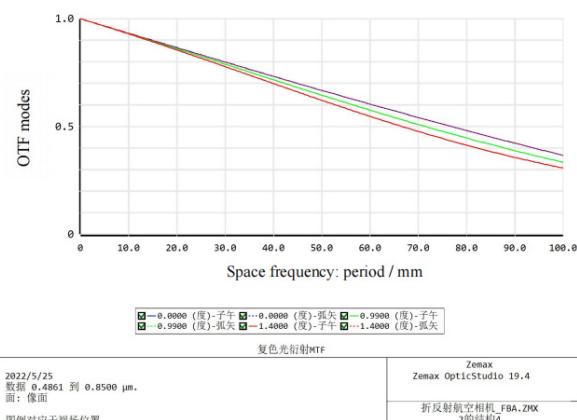


图 6 光学系统图

Fig.6 Optical system diagram



(a) -60°C MTF curves



(b) -20°C MTF curves

调制传递函数(MTF)可以充分反映光学系统的成像质量, 能否达到或接近光学仪器衍射极限是判定高像质光学仪器的主要依据^[18]。该光学系统调制传递函数如图 7 所示。由于系统采用的是单像元尺寸为 $8 \mu\text{m}$ 的高分辨率 CCD 接收器, 且在 15000 m 高空中工作, 应当考虑系统的工作温度, 即工作温度在一 $60^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内, 系统在 100lp/mm 处, $\text{MTF} > 0.2$ 。

从图 8 可以看出, 4 个波长在不同温度下的倍率色差曲线实现了对二次光谱的校正, 径向像差也很小, 满足了系统的成像质量要求。

图 9 为系统不同温度下的场曲与畸变, 系统在一 $60^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 畸变均小于 0.1% 。

图 10 为系统波像差曲线。由于系统的相对孔径大, 视场小, 基于瑞利准则的波差曲线也可用于评估成像质量。从图 10 中可以看出 PV 值约等于 0.04λ , 远小于瑞利判据所要求的 $W < \lambda/4$ 的条件。

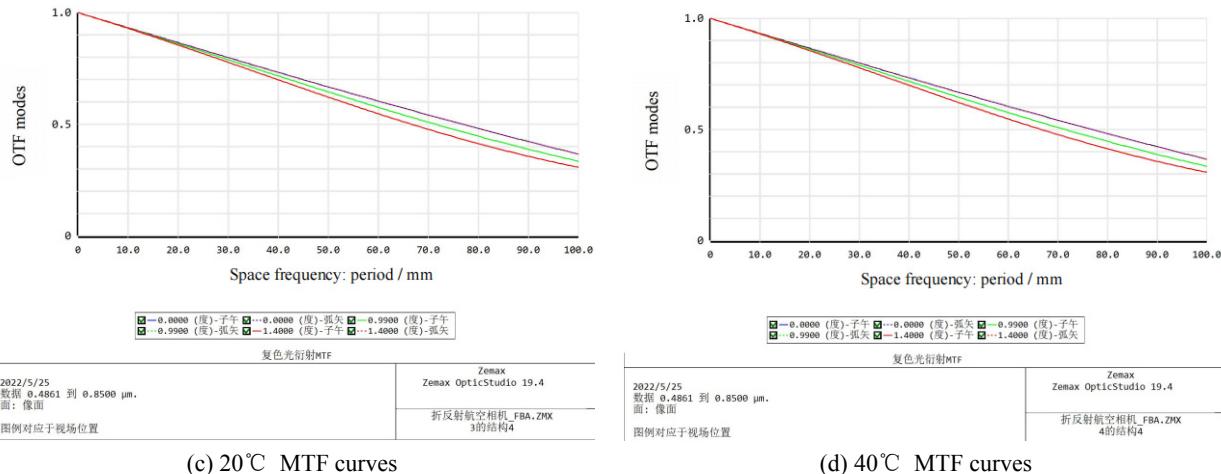


图7 不同温度下的 MTF 曲线

Fig.7 The MTF curves at different temperatures

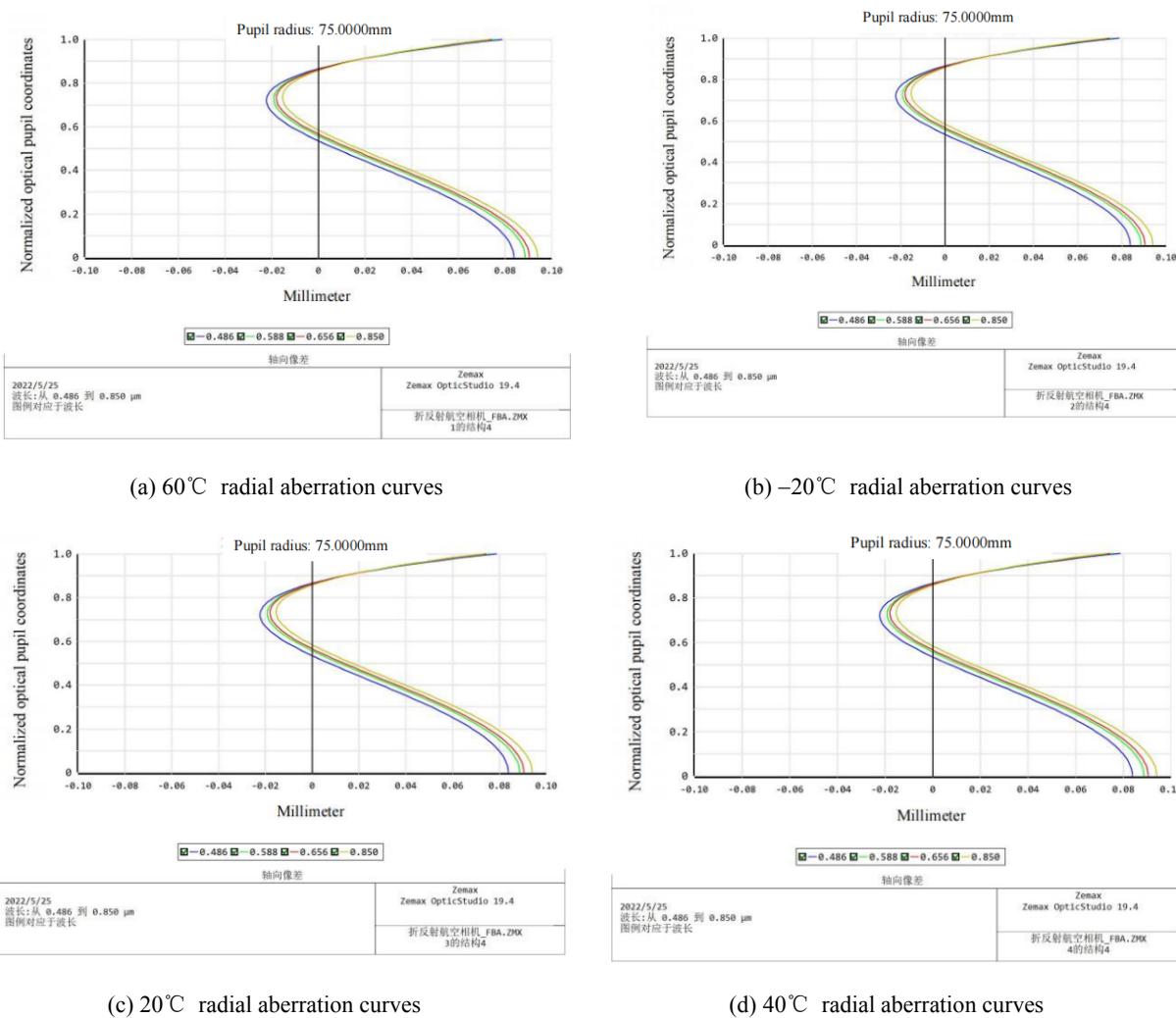
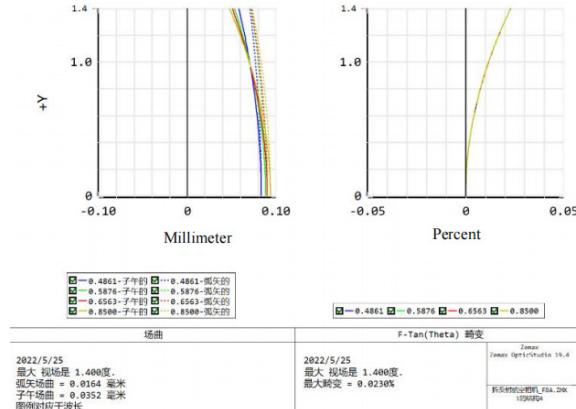


图8 不同温度下的倍率色差曲线

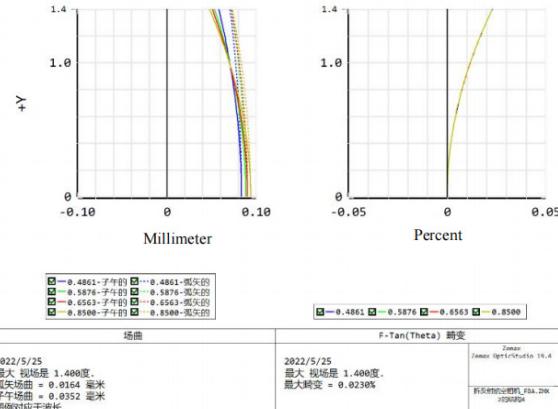
Fig.8 Radial aberration curves at different temperatures

3 性能测试

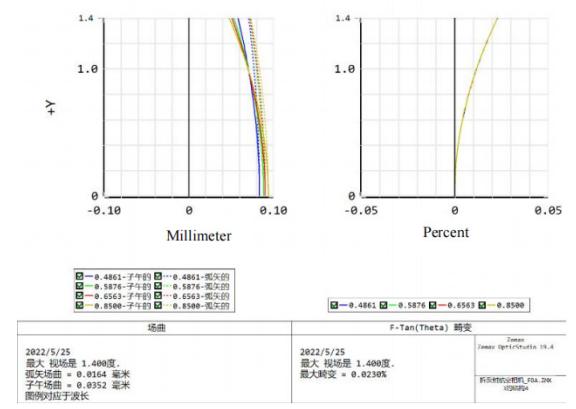
在实验室内，利用靶标板对航空相机光学系统进行测试，测试结果如图 11、12 所示，图 11 为 2000 mm 平行光管可见光波段渐变率板图像，图 12 为 2000 mm 平行光管近红外波段渐变率板图像。从图 11 和图 12 可以光学系统成像无论在可见光波段和近红外波段都有着良好的成像质量，满足设计要求。



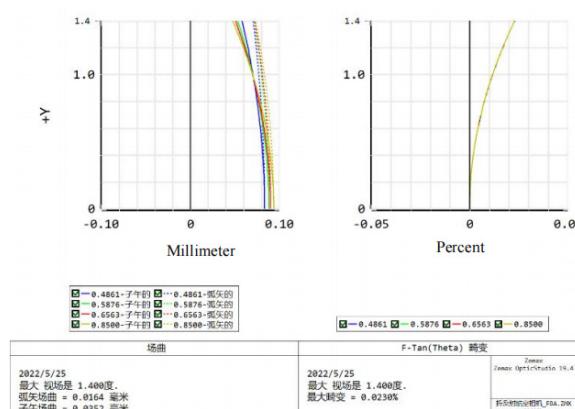
(a) -60°C field curve/distortion curves



(b) -20°C field curve/distortion curves



(c) 20°C field curve/distortion curves



(d) 40°C field curve/distortion curves

Fig.9 Field curve/distortion curves at different temperatures

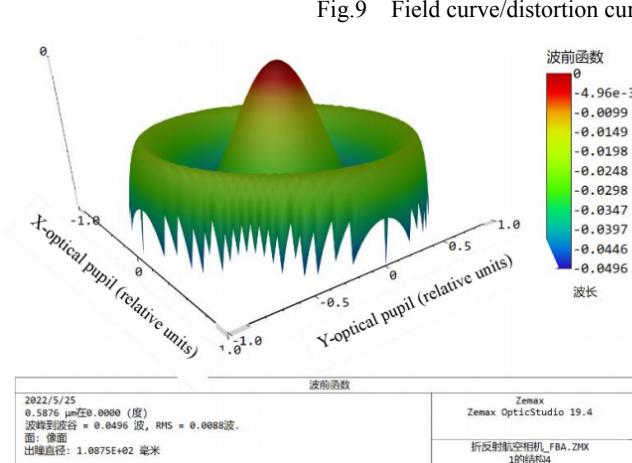


图 10 航空相机系统波像差

Fig.10 System wave aberration

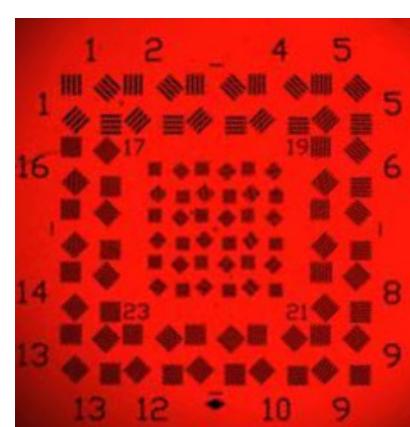


图 11 实验室可见光波段测试图像

Fig.11 The visible light band test image in the lab

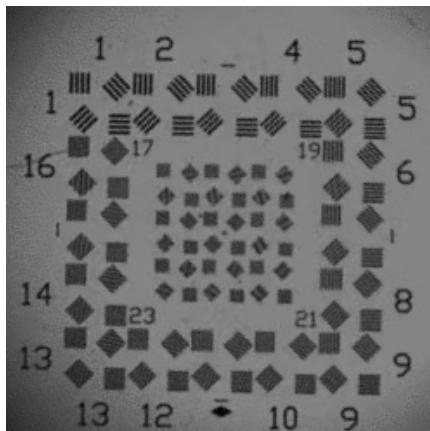


图12 实验室近红外波段测试图像
Fig.12 Laboratory NIR band test images

4 结论

近年来,航空侦察相机在防灾救援、边境缉私、国家基础测绘、环境遥感等方面发挥着越来越重要的作用。航空相机物镜是航空侦察相机的主要组成部分。对于高空的航空相机,利用长焦距光学系统实现分辨率为0.1 m地面目标进行观测。由于长焦距与大口径导致光学系统的体积过大与二级光谱校正等问题,本文采用折反射系统进行设计,缩短了系统光路横向尺寸解决了系统体积过大的问题。通过详细分析计算及多次迭代优化,选取成本较低的常用玻璃来校正二级光谱,系统在470~1500 nm宽波段进行工作,测试结果表明,设计的航空相机光学系统成像质量优良,有利于全天候观测工作的开展。

参考文献:

- [1] 焦明印, 张勇, 王一力. 用于光学像移补偿的红外望远光学系统[J]. 激光与红外, 2020, 50(10): 1223-1227.
JIAO Mingyin, ZHANG Yong, WANG Yili. An optical system of infrared telescope used for optically compensation of image motion[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(10): 1223-1227.
- [2] 刘海英, 王跃, 王英, 等. 大视场航空相机光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 980-986.
LIU Haiying, WANG Yue, WANG Ying, et al. Design of optical system for large-field of view aerocamera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 980-986.
- [3] CHEN Xueli, GAO Xinbo, QU Xiaochao, et al. Generalized free-space diffuse photon transport model based on the influence analysis of a camera lens diaphragm[J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49: 5654-5664.
- [4] Lee J H, Jung Y S, Ryoo S Y, et al. Imaging performance analysis of an EO/IR dual band airborne camera [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(2): 174-181
- [5] 彭建伟, 陈卫宁, 张高鹏, 等. 低照度宽幅航空相机系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 321-329.
PENG Jianwei, CHEN Weining, ZHANG Gaopeng, et al. Design of wide view aerial camera system in low-light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210312.
- [6] 赵育良, 李明珠. 机载航空相机前移像移补偿技术[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(1): 40-43, 59.
ZHAO Yuliang, LI Mingzhu. Forward image motion compensation technology for airborne aerial camera[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2024, 44(1): 40-43, 59.
- [7] 赵建川, 张润琦, 王杰, 等. 航空相机成像技术研究[J]. 红外技术, 2020, 42(2): 101-114.
ZHAO Jianchuan, ZHANG Runqi, WANG Jie, et al. Research on aerial camera imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(2): 101-114.
- [8] LI Yanwei, YUAN Guoqin, XIE Xinwang, et al. Multilayer thermal control for high-altitude vertical imaging aerial cameras[J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61: 5205-5214.
- [9] YU Chunfeng, CHEN Zhichao, JIA Ping, et al. Analysis of the effect of lens shutter on image motion in aerial camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 616-626.(doi: 10.3788/CO.2019-0127)
- [10] 徐迪孟, 王平, 付海双, 等. 双视场航空相机光机优化设计[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 853-857.
XU Dimeng, WANG Ping, FU Haishuang, et al. Optic-mechanical optimization design of dual FOV aerial camera[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(7): 853-857.
- [11] 赵育良, 王颖颖, 刘建东. 某型航空相机快门模拟装置设计与实现[J]. 现代电子技术, 2023, 46(10): 37-40.
ZHAO Yuliang, WANG Yingying, LIU Jiandong. Design and implementation of the shutter simulation device for a certain type of aerial camera[J]. *Modern Electronic Technology*, 2023, 46(10): 37-40.
- [12] Grey D S. Athermalization of optical systems[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38(6): 542-546
- [13] Epps H W, Fabricant D G. Athermalizing refractive optics with fluid lenses[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2002, 114: 1252-1259
- [14] 张欣婷, 亢磊, 姚清华, 等. CCD航空相机动态分辨率检测系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 683-686.
ZHANG Xinting, KANG Lei, YAO Qinghua, et al. Dynamic resolution detection system design of CCD aerial camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 683-686.
- [15] 刘伟毅, 徐钰蕾, 石磊, 等. 航空低温温度对自准直检焦系统的影响[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1226-1235.
LIU Weiyi, XU Yulei, SHI Lei, et al. Influence of aviation low temperature on auto-collimating focusing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1226-1235.
- [16] Moriaki Wakaki, Keiei Kudo, Takehisa Shibuya. *Manual of Optical Materials*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [17] Paul R Yoder Jr. *Optical System Design*[M]. Beijing: Mechanics Press, 2007.
- [18] 王生. *应用光学*[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
WANG Wensheng. *Applied Optics*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010.