

文章编号 1004-924X(2018)09-2334-10

大视场三线阵航空测绘相机光学系统设计

姚 园*, 许永森, 丁亚林, 远国勤

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对大视场、高分辨率、低畸变和环境适应性要求高的三线阵航空测绘相机光学系统设计需求,开展新型光学系统结构形式设计:首先,根据总体方案要求以及稳定平台安装特点,确定了单镜头的技术方案;接着,分析计算了光学系统各项指标参数,光学系统拉氏不变量达到 9.5;然后,对比分析了非像方远心光路、像方远心光路和准像方远心光路的结构形式;最后,设计了一种航空环境适应性良好的双高斯复杂化失对称准像方远心光学系统结构形式。设计的光学系统成像质量好,在全光谱段内的 Nyquist 频率为 100 lp/mm,全视场调制传递函数均优于 0.36;分别在 R、G、B 谱段的 Nyquist 频率为 50 lp/mm,全视场调制传递函数均优于 0.6。光学系统全视场最大相对畸变优于 0.1%,在均匀温度 0~40 °C 范围内,全光谱段调制传递函数优于 0.3。实验室鉴别率板测试结果表明,相机静态分辨率达到 102 lp/mm;飞行验证试验结果表明,相机摄影分辨率达到 0.16 m@2 km 航高。光学系统设计完全满足大视场三线阵航空测绘相机环境适应性和分辨率的要求。

关键词:测绘相机;调制传递函数;机载环境适应性;光学设计;准像方远心

中图分类号:TH74;V248.1;O439 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182609.2334

Optical-system design for large field-of-view three-line array airborne mapping camera

YAO yuan*, XU Yong-sen, DING Ya-lin, YUAN Guo-qin

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yaoy@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to meet the design requirements of the optical system of a three-line array airborne mapping camera with large field-of-view, high resolution, low distortion, and high environmental adaptability, the structural design of a new optical system was developed. First, according to the overall requirements and the characteristics of stable platform installation, a single-lens technical solution was determined. Then, various parameters of the optical system were analyzed and calculated; the Lagrange Helmholtz invariant of the optical system reached 9.5. Then, the structural parameters of the non-telecentric, telecentric, and semi-telecentric optical system light paths were analyzed and compared. Finally, the structure of a complex semi-symmetrical double-Gaussian optical system with good airborne environment adaptability was designed. The designed optical system has

收稿日期:2018-05-03;修订日期:2018-07-02.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFB0503001);中国科学院科技创新基金资助项目(No. CXJJ-17S017)

good imaging quality. The full field-of-view modulation transfer function is better than 0.36 at a Nyquist frequency of 100 lp/mm in the VIS-spectrum and better than 0.6 at a Nyquist frequency of 50 lp/mm in the RGB-spectrum. The maximum relative distortion of the full field-of-view of the optical system is better than 0.1%. In the uniform temperature range of 0 to 40 °C, the full field-of-view modulation transfer function is better than 0.3. The test results of the laboratory gradient resolution board show that the static resolution of the camera reaches 102 lp/mm. The flight verification test results show that the camera photography resolution reaches 0.16 m at 2 km. The design completely satisfies the requirements of environmental adaptability and resolution of the large field-of-view three-line array airborne mapping camera.

Key words: mapping camera; modulation transfer function; airborne environment adaptability; optical design; semi-telecentric structure

1 引言

航空测绘相机是一种能够同时获得高分辨率立体影像和彩色多光谱影像的多功能遥感数字成像设备。采用测绘相机进行影像的数字获取和全数字处理,是一项获取基础地理信息数据的测绘技术^[1]。

由于相对于胶片相机有着诸多优势,2000年以来,测绘相机发展快速,国际上陆续出现了不同类型的数字航测相机,这些相机已经不同程度地投入使用,一类是以面阵探测器为主要特征,另一类则以线阵探测器为主要特征。两类相机各有其独特优势,都存在一些使用上的限制。面阵航测相机特点是像素小,精度高,满足大比例尺作业的要求,但面阵航测相机基高比小,高程精度较差,为了获得大重叠率,图像文件数量大,处理时间长;线阵相机的特点是单镜头,保证了严格的中心投影,像素显示是连续的,无须进行图像的拼接,没有快门,相机更加稳定,能生成质量更加统一的图像,线阵探测器生成的光谱文件数量少,占用空间少,可靠性高、航带覆盖宽,航摄效率高、作业过程简化,但线阵相机受飞行姿态影响大,需要高精度的 POS 系统配合使用^[2-5]。

国际方面,航空型面阵测绘相机的代表性产品分别有 DMC(德国和美国联合研制)和 Ultracam 系列相机(奥地利 Vexcel)。线阵探测器测绘相机的代表性产品有 Leica 公司的 ADS40/80 相机。2001 年,ADS40 相机正式发布

上市,成为国际首台线阵推扫式航空测绘相机;2008 年升级的第二代相机 ADS80 正式发布上市,目前全球有超过 100 套该航测相机,我国已进口数套。

国内方面,近几年,在国家相关计划的支持下,研制了几种面阵 CCD 的测绘相机,包括由中国测绘科学与研究所与河南理工大学共同研制 SWDC 相机;中科院长春光机所承研的轻型单镜头面阵 CCD 测绘相机和中面阵数字航空摄影相机;中科院光电所研制的大面阵彩色 CCD 数字航测相机;中科院遥感所研制的大面阵 CCD 数字相机系统等。

目前,我国的数字化航空测绘相机有了初步地发展,但无论是自动化程度,还是测量精度都与国外的先进水平航测相机存在较大差距,与国外在航空摄影相机系统的发展上也存在显著差距,数字高精度测绘相机主要依靠进口,而且三线阵航空测绘相机在国内还是空白。

大视场三线阵航空测绘相机光学系统是相机的核心组成部分,本文根据系统设计指标要求和总体方案要求,分析、比较了非像方远心光路、像方远心光路等光学系统结构型式,综合考虑航空环境适应性、探测器匹配、结构空间布局等因素,设计了一种航空环境适应性良好的双高斯复杂化失对称准像方远心光学系统结构形式,并完成了测绘相机光学系统的设计和研制工作,为大规模数字航空立体测绘相机的研制提供了一种有效可行的设计方案。设计的光学系统成像质量好,全光谱段在 Nyquist 频率为 100 lp/mm 时,全视场

调制传递函数均优于 0.36;RGB 谱段在 Nyquist 频率为 50 lp/mm 时,全视场调制传递函数均优于 0.6。光学系统全视场最大相对畸变优于 0.1%,在均匀温度 0~40 °C 范围内,全光谱段调制传递函数优于 0.3。完全满足大视场三线阵航空测绘相机环境适应性和分辨率的要求。

2 三线阵航空测绘相机工作原理及方案

2.1 相机工作原理

三线阵测绘相机共有 3 条探测器,通过光学系统投影在地面上,垂直对地成像的称为正视探测器,向前倾斜成像的称为前视探测器,而后向倾斜成像的是后视探测器,如图 1 所示。在摄影测量过程中,如果知道每一个扫描时刻三线阵相机的外方位元素(即相机在地球坐标系中的位置和姿态角)和相机的内方位元素(即相机的主距、主点位置和交会角),那么地面上任一物点在 3 个不同时刻在三条线阵探测器上的像点坐标就可完全确定了。反之,如果能够求出对应物点的像点坐标,则可以计算出物点的坐标^[6,8]。

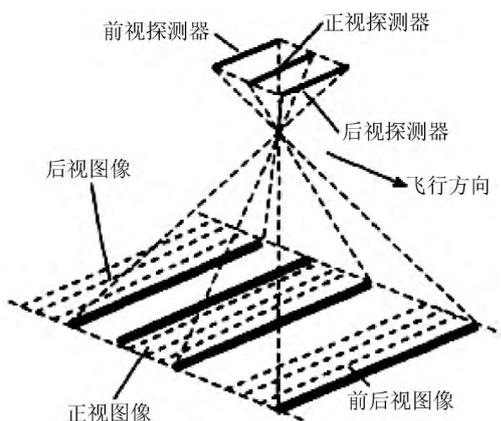


图 1 三线阵相机测绘原理图

Fig. 1 Surveying principle diagram of three-line array mapping camera

2.2 相机光学方案

根据相机要进行大视场三线阵立体成像的要求,方案考虑了单镜头方案和三镜头拼接方案,相机三维模型如图 2、图 3 所示。三镜头拼接方案的优势是相机的横向视场可以做得比较大,但 3

个镜头拼接的体积也很大,难以满足稳定平台安装要求;单镜头方案只有一个镜头,镜头能够布置在稳定平台的下方,不存在平台遮挡光线的现象,且单镜头方案相机的质量轻,需要配平的质量少,满足稳定平台载荷质量的要求。因此,经过上述分析比较,选择了单镜头相机方案。



图 2 单镜头方案相机模型图

Fig. 2 Model diagram of single-lens solution camera

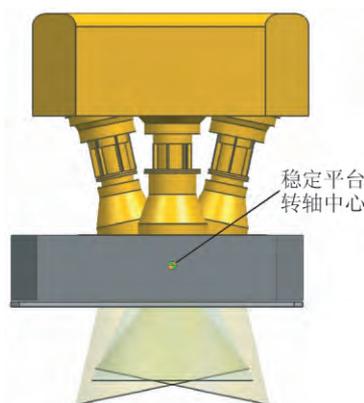


图 3 三镜头拼接方案相机模型图

Fig. 3 Model diagram of three-lens solution camera

大视场三线阵航空测绘相机采用了长焦距、大视场单镜头透射式光学系统和焦面布置多条不同角度的探测器的方案。三线阵航空测绘相机的光学焦面上布置有 6 条线阵探测器,其中 3 条为全色线阵探测器,3 条为 R、G、B 线阵探测器,这 6 条线阵探测器相互平行排列并与飞行方向垂直。当相机工作时,每个探测器以一个同步的周期连续扫描地面并产生 6 条相互交迭的条带图像,形成全色图像和多光谱图像,如图 4 所示。

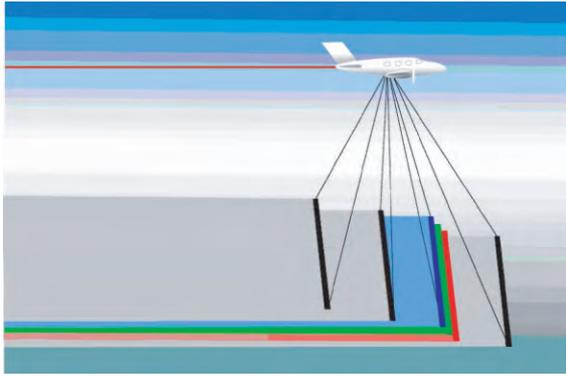


图 4 大视场三线阵航空测绘相机工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram of large field-of-view three-line array airborne mapping camera

3 光学系统设计

3.1 光学系统参数的确定

3.1.1 焦距

三线阵航空测绘相机的地面像元分辨率 GSD 要求在航高 2 000 m 时地面像元分辨率不低于 0.08 m, 光学系统焦距计算公式如式(1)所示。经计算, 选取相机光学系统的焦距为 130 mm;

$$f = \frac{H}{GSD} \cdot d, \quad (1)$$

其中: f 为光学系统焦距; H 为航高, 取值 2 000 m; GSD 为地面像元分辨率, 取值不大于 0.08 m; d 为探测器像元间距, 取值 $5 \mu\text{m}$ 。

3.1.2 视场角

对于三线阵航空测绘相机, 总视场角 α 与相机的横向视场角 β 和交汇角 γ 有关。三线阵航空测绘相机选择的最大交汇角为 29° , 横向视场为 62° 。光学系统总视场角计算公式如式(2)所示, 经计算, 光学系统的总视场角不小于 78.6° :

$$\alpha = 2 \arctan \sqrt{\left(\tan \frac{\beta}{2}\right)^2 + (\tan \gamma)^2}, \quad (2)$$

其中: α 为总视场角; β 为横向视场角, 取值 62° ; γ 为交汇角, 取值 29° 。

3.1.4 相对孔径

光学系统相对孔径直接关系到信噪比特性。根据实际使用情况要求, 在太阳高角大于 70° 、地面反射率大于 0.7 时, 相机信噪比大于 300; 在太阳高角大于 20° 、地面反射率大于 0.05 时相机信噪比大于 15。采用光电子形式的计算方程, 对这两种光照条件下相机的信噪比进行估算。

探测器靶面的照度 E_d 由多个因素共同决定, 计算公式如式(3)所示:

$$E_d = L_p \cdot \tau_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2, \quad (3)$$

其中: L_p 为光学系统入瞳处辐照度, 由大气仿真计算获得; τ_o 为光学系统透过率; D/f 为光学系统相对孔径。

信号光电子数 S_e 由探测器的响应特性决定的, 计算公式如式(4)所示:

$$S_e = \frac{E_d \cdot d^2 \cdot t}{h \cdot c / \lambda} \cdot \eta, t \approx \frac{GSD}{2v}. \quad (4)$$

其中: t 为曝光时间, 与 GSD 和 v 相关; v 为飞行速度; h 为普朗克常量, 取值 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速, 取值 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; η 为探测器量子效率。

信噪比 SNR 由探测器的噪声特性决定的, 计算公式如式(5)所示:

$$SNR = \frac{S_e}{N_e} = \frac{S_e}{\sqrt{N_{\text{散粒}}^2 + (N_{\text{暗电流}} \cdot t)^2 + N_{\text{量化}}^2}}, \quad (5)$$

$$N_{\text{散粒}} = \sqrt{S_e}.$$

其中: $N_{\text{散粒}}$ 为散粒噪声电子数, 与 S_e 相关; $N_{\text{散粒}}$ 为暗电流噪声电子数; $N_{\text{散粒}}$ 为量化噪声电子数;

选取相对孔径 D/f 为 1/5.6 时, 信噪比估算结果见表 1。其中最大辐亮度对应太阳高角 70° , 地面反射率 0.7; 最小辐亮度对应太阳高角 20° , 地面反射率 0.05。可以看出, 相机信噪比能够满足实际使用需要。

表 1 相机信噪比分析结果

Tab. 1 SNR analysis results of camera

探测器	入瞳处最大辐亮度 $/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$	入瞳处最小辐亮度 $/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$	最大 SNR	最小 SNR
下视全色	39.174 91	1.243 65	339.778	30.270
多光谱 R	7.291 01	0.260 39	316.794	29.712
G	14.254 22	0.437 63	317.766	31.757
B	8.802 79	0.220 92	316.574	17.857

3.1.5 调制传递函数

相机调制传递函数 MTF 计算公式如式(6)所示, 由光学系统调制传递函数设计值 $MTF_{\text{设计}}$ 、加工制造调制传递函数值 $MTF_{\text{制造}}$ 和探测器采样调制传递函数值 $MTF_{\text{探测器}}$ 共同决定^[9]。

$$MTF = MTF_{\text{设计}} \cdot MTF_{\text{制造}} \cdot MTF_{\text{探测器}}. \quad (6)$$

根据航空测绘实际使用要求, MTF 要求大

于0.1。根据制造经验 $MTF_{制造}$ 优于0.8,查询探测器手册 $MTF_{探测器}$ 为0.42。通过计算,光学系统调制传递函数设计值 $MTF_{设计}$ 优于0.3即可满足要求。

3.1.6 小结

光学系统设计指标要求,归纳如下。

- (1)光谱范围:450~700 nm;
- (2)焦距: $f=130$ mm;
- (3)视场: $2\omega=79^\circ$;
- (4)相对孔径: $D/f=1/5.6$;
- (5)调制传递函数: $MTF_{设计} \geq 0.3$;
- (6)畸变:全视场优于0.1%;
- (7)像方主光线入射角:全视场小于 10° 。

光学系统拉氏不变量达到9.5,全色谱段Nyquist频率为100 lp/mm,有畸变、主光线入射角和航空环境适应性的要求。可以看出,光学设计、加工、装调等难度均较大。

3.2 光学系统方案选型

对于大视场光学系统而言,准对称型复杂化双高斯物镜是首选,由于结构形式对称,视场增大带来的轴外像差相对较为容易平衡,特别是相对畸变,这也是传统胶片测绘相机选择准对称型复杂化双高斯物镜的主要原因。

随着航空测绘相机的数字化发展,这种准对称型复杂化双高斯物镜的应用存在局限性:(1)带微透镜阵列的数字探测器要求像面光线入射角处于较小的范围;(2)双高斯物镜各个视场相对照度变化大,呈 $\cos^4 \theta$ 衰减,这会影响整个系统的动态范围;(3)像方主光线入射角过大会使得各个谱段的响应率不同,造成不同视场的色差;(4)像方主光线入射角过大会压缩系统的焦深范围,使得相机的环境适应性变差;(5)像方主光线入射角过大时,光学系统焦面位置变化会造成系统内方位元素发生较大改变,这直接影响系统的测绘精度。

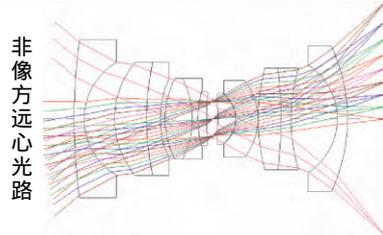
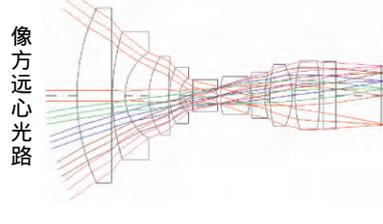
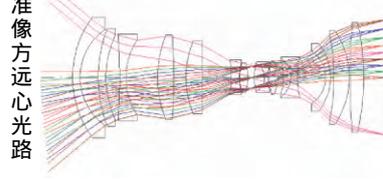
像方远心光学系统可以改善以上不利因素,而且数字几何校正技术使得光学系统的畸变要求得到放松。但是像方远心光学系统针对大靶面成像时,其光学元件口径过大,光学材料的牌号选型以及获取渠道极为受限,而且均匀性难以保证;同时,整体体积和重量与航空成像光学相机的轻小化目标相违背。

针对这个矛盾,兼顾考虑了主光线入射角、相对照度、畸变、体积尺寸等因素,优化设计了一种双高斯复杂化失对称准像方远心结构形式。该结

构形式具有探测器适应性广、相对照度大、畸变小、环境适应性好、体积尺寸适中优势。准对称复杂化双高斯结构形式、像方远心光路和准像方远心光路,优势对比如表2所示^[10-15]。

双高斯复杂化失对称准像方远心结构形式为大规模数字航空立体测绘相机的研制提供了一种有效可行的设计方案。

表2 光学系统方案对比分析
Tab.2 Comparison of optical system solutions

结构形式	特点
非像方远心光路	 <ol style="list-style-type: none"> 1. 体积尺寸较小 2. 相对孔径较大 3. 畸变小 4. 像面入射角大 5. 相对照度差
像方远心光路	 <ol style="list-style-type: none"> 1. 体积尺寸大 2. 相对孔径适中 3. 畸变较大 4. 像面垂直入射 5. 相对照度改善
准像方远心光路	 <ol style="list-style-type: none"> 1. 体积尺寸适中 2. 相对孔径适中 3. 畸变小 4. 像面入射角较小 5. 相对照度改善

3.3 光学系统设计

3.3.1 光学设计

光学设计以双高斯结构形式为基础进行失对称复杂化设计。靠近像面位置设置正组透镜,用于控制主光线入射角;前组元件远离光阑并复杂化设计尽可能平衡畸变;通过控制前组入瞳位置和光阑慧差,增加边缘视场相对照度;大折射率元件配合空气间隙提高系统相对孔径;由于谱段较宽,采用胶合镜组矫正色差,采用TF3特殊玻璃矫正二级光谱;通过选择合理正负光热膨胀率的玻璃材料组合,实现光学被动温度补偿。采用CODEV设计软件对大视场三线阵航空测绘相机光学系统进行优化设计,最终设计结果为15片13组双高斯复杂化失对称准像方远心结构,如图5所示。

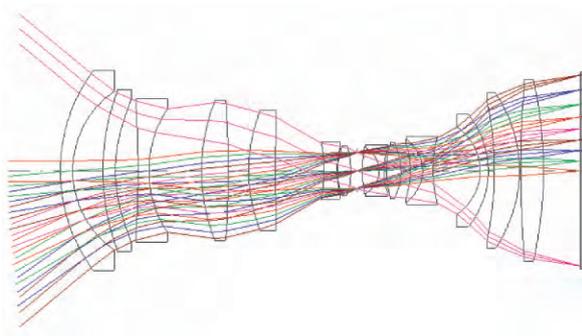


图 5 光学系统结构图

Fig. 5 Diagram of optical system structure

3.3.2 像质评价

光学系统全色谱段的空间采样 Nyquist 频率为 100 lp/mm, 全视场调制传递函数优于 0.36, 如图 6 所示; 多光谱 RGB 谱段的空间采样 Nyquist 频率为 50 lp/mm, 全视场调制传递函数优于 0.6, 如图 7 所示。

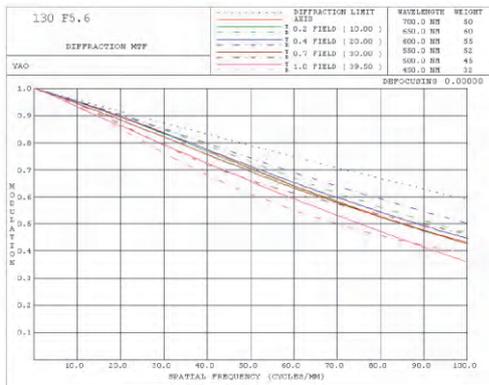
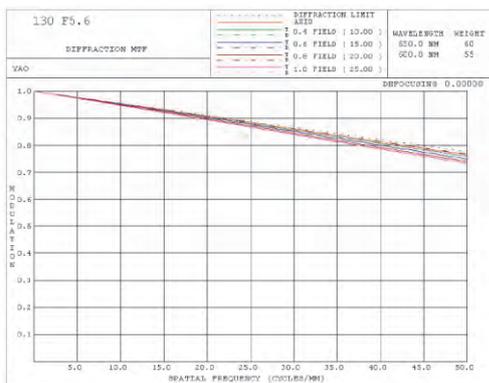


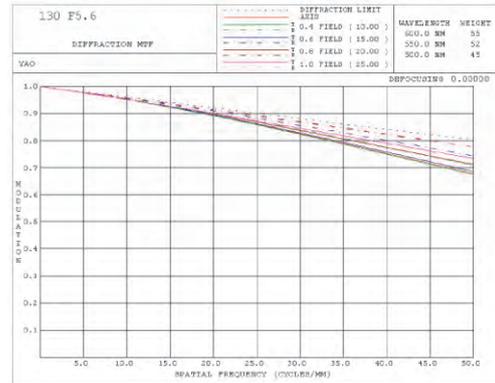
图 6 光学系统全色谱段调制传递函数曲线

Fig. 6 MTF curves of optical system in VIS-spectrum



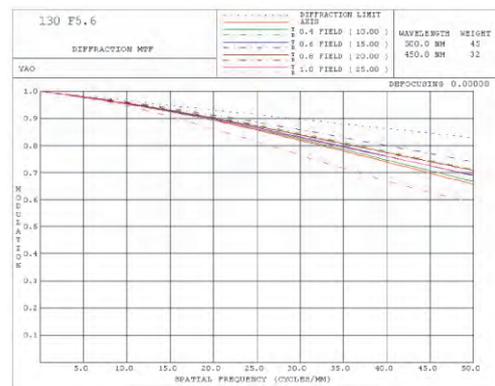
(a)R 谱段调制传递函数曲线

(a)MTF curves of optical system in R-spectrum



(b)G 谱段调制传递函数曲线

(b)MTF curves of optical system in G-spectrum



(c)B 谱段调制传递函数曲线

(c)MTF curves of optical system in B-spectrum

图 7 光学系统 RGB 谱段调制传递函数曲线

Fig. 7 MTF curves of optical system in RGB-spectrum

光学系统全视场相对畸变优于 0.1%, 场曲与畸变曲线如图 8 所示。

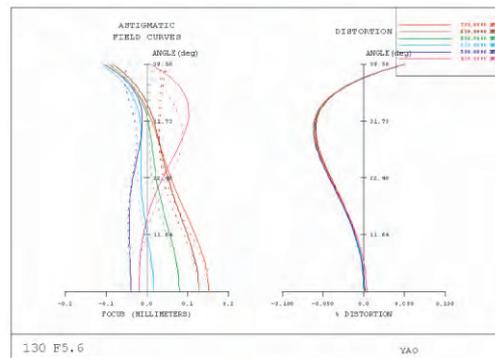


图 8 光学系统场曲与畸变曲线

Fig. 8 Image field curvature and relative distortion curves of optical system

光学系统全视场相对照度优于 57%, 相对照度曲线如图 9 所示。

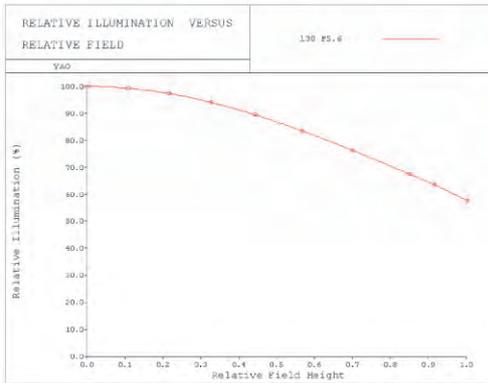


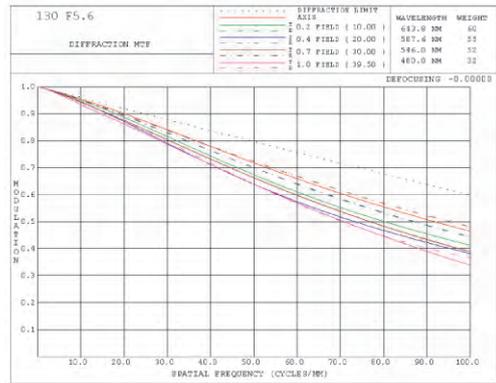
图 9 光学系统相对照度曲线

Fig. 9 Relative illumination curves of optical system

3.3.3 环境适应性

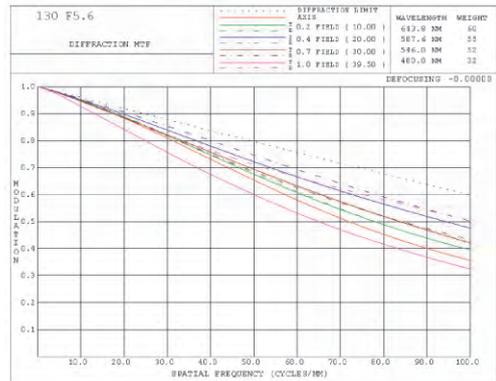
机载工作环境对光学系统的环境适应性提出了较高的要求,由于调焦运动对测绘相机内方位元素的精度带来较大影响,因此需要对光学系统的环境适应能力开展分析和设计工作。影响光学系统成像质量的主要因素包括温度和气压。光学系统气压适应性良好;针对温度适应性,采用了温控措施并开展了无热化设计。

无热化设计通过合理选取正负光热膨胀率的玻璃材料组合,配合空气间隔结构材料的选取,以实现光学系统较宽范围温度适应性。光学系统在均匀温度 0~40 °C 范围内,全视场 MTF 优于 0.3;均匀温度 -20~60 °C 范围内,全视场 MTF 达到 0.2,无需温度调焦。不同温度时,光学系统全光谱段调制传递函数曲线如图 10 所示。



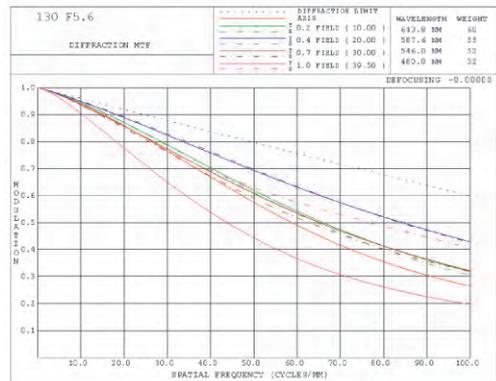
(b)0 °C 时调制传递函数曲线

(b)MTF curves at 0 °C



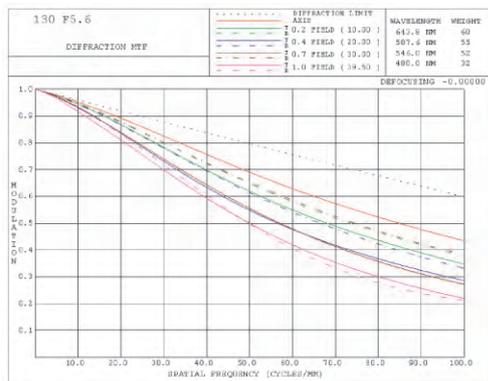
(c)40 °C 时调制传递函数曲线

(c)MTF curves at 40 °C



(d)60 °C 时调制传递函数曲线

(d)MTF curves at 60 °C



(a)-20 °C 时调制传递函数曲线

(a)MTF curves at -20 °C

图 10 不同温度时光学系统全光谱段调制传递函数曲线

Fig. 10 MTF curves of optical system in VIS-spectrum at different temperatures

4 实测结果分析

4.1 试验室鉴别率板测试

测绘相机整机配合推扫仿真转台的静态分辨率采用平行光管和鉴别率板进行检测。将测绘相机整机置于推扫仿真转台上,放在平行光管前,对

IV号鉴别率板成像,能够清晰分辨第6组的黑白靶标条纹,成像照片如图11所示。

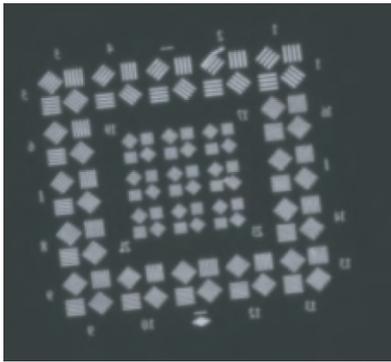


图 11 相机对IV号鉴别率板成像照片

Fig. 11 Photograph of #4 gradient resolution board imaging by camera

相机能够分辨的每毫米线对数 N 计算公式如式(8)所示:

$$N = \frac{N_0}{f} \cdot f_0, \quad (8)$$

其中: N_0 为可分辨的鉴别率板每毫米条纹数,取4号鉴别率板第6组,取值 8.34 lp/mm; f 为行光管焦距,取值 1 600 mm。

经过计算,相机可分辨的每毫米线对数 $N \approx 102$ lp/mm,达到设计值。

4.2 飞行靶标拍摄

光学系统通过飞行试验验证了航空环境适应性,实物照片如图12所示。飞机搭载相机对铺设靶标地面场景拍摄的照片,照片如图13所示。飞行验证试验中,飞行高度 2 000 m,靶标组右上角的横竖靶标条纹宽度为 80 mm,清晰可分辨,结果表明,相机光学系统能够适应复杂变化的航空温压环境。



图 12 大视场三线阵航空测绘相机实物照片

Fig. 12 Photo of large field-of-view three-line array airborne mapping camera



图 13 飞机搭载相机对铺设靶标地面场景拍摄的照片

Fig. 13 Photograph of ground scene where the target was laid imaging by camera in air

5 结 论

通过对比分析非像方远心光路、像方远心光路和准像方远心光路的结构形式,设计了一种航空环境适应性良好的双高斯复杂化失对称准像方远心光学系统结构形式。光学系统成像质量好,全色谱段在 Nyquist 频率为 100 lp/mm 时,全视场调制传递函数优于 0.36; RGB 谱段在 Nyquist

频率为 50 lp/mm 时,全视场调制传递函数均优于 0.6。光学系统全视场最大相对畸变优于 0.1%,在均匀温度 0~40 °C 范围内,全色谱段调制传递函数优于 0.3。实验室鉴别率板测试结果表明,相机静态分辨率达到 102 lp/mm;飞行验证试验结果表明,相机摄影分辨率达到 0.16 m@2 km 航高。光学系统设计完全满足大视场三线阵航空测绘相机环境适应性和分辨率的要求。

参考文献:

- [1] 田铁印,王红,谷凤安,等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.
TIAN T Y, WANG H, GU F A, *et al.*. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2692-2698. (in Chinese)
- [2] 王家骥. 三线阵立体测绘技术及其应用(译文集)[M]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
WANG J Q. *Three Line Array Stereoscopic Mapping Technology and Application (translated text)* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2004. (in Chinese)
- [3] 苗健宇,张立平,吴清文. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1648-1653.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1648-1653. (in Chinese)
- [4] 张晓辉,韩昌元,潘玉龙. 传输型 CCD 相机综合像质评价方法的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 697-701.
ZHANG X H, HAN CH Y, PAN Y L. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 697-701. (in Chinese)
- [5] 远国勤,丁亚林,惠守文,等. 彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及误差纠正[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 01280011-01280019.
YUAN G Q, DING Y L, HUI SH W, *et al.*. Analysis of Forward Image Displacement Compensation and Error Correction for Area Scan Color CCD Airborne Mapping Camera [J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2013, 33(1): 01280011-01280019. (in Chinese)
- [6] 孟庆宇,董吉洪,王栋,等. 轻小型立体相机光学系统研制[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 04180021-04180028.
MENG Q Y, DONG J H, WANG D, *et al.*. Mini-type optical system development of stereo camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 04180021-04180028. (in Chinese)
- [7] 崔穆涵,田志辉,周跃,等. 大相对孔径紫外成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 212-218.
CUI M H, TIAN ZH H, ZHOU Y, *et al.*. Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera. [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 212-218. (in Chinese)
- [8] 王超. 轻小型三线阵航摄影关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
WANG CH. *Research on The Key Technologies of Compact Three Line Array Aerial Camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2017. (in Chinese)
- [9] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2165-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2165-2172. (in Chinese)
- [10] 孙武,韩诚山,晋学飞,等. 推扫式遥感相机超满阱大动态范围成像[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 944-950.
SUN W, HAN CH SH, JIN X F, *et al.*. HDR imaging method of overcoming full well limitation for push-broom remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 944-950. (in Chinese)
- [11] 张景国,丁亚林,田海英,等. 一种彩色面阵 CCD 测绘相机前向像移的补偿方法[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 460-463.
ZHANG J G, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Compensation for forward image motion of color area array CCD mapping camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3): 460-463. (in Chinese)
- [12] 黎明,吴清文,江帆,等. 三线阵立体测绘相机热控系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1367-1373.
LI M, WU Q W, JIANG F, *et al.*. Design of thermal control system for three-linear array mapping cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1367-1373. (in Chinese)
- [13] 黄耀林,王敏,郭王凯. 一款 1600 万像素手机镜头设计[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 39-43.
HUANG Y L, WANG M, GUO W K. Design of a 16 mega-pixel mobile phone lens [J]. *OPTICAL INSTRUMENTS*, 2018, 40(1): 39-43. (in Chinese)
- [14] 桂立,丁学专,赵航斌,等. 可见近红外宽波段复消色差高光光谱物镜设计[J]. 激光与红外, 2018, 48(3): 384-388.

GUI L, DING X ZH, ZHAO H B, *et al.*. Design of apochromatic objective for visible and near infrared hyperspectral imager [J]. *Laser & Infrared*,

2018, 48(3): 384-388. (in Chinese)

[15] FISCHER R E. *Optical System Design* [M]. New York: McGraw-Hill, 2000, 11.

作者简介:



姚 园(1986—),男,安徽铜陵人,硕士,助理研究员,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航空光学成像仿真及光学系统设计等方面的研究。E-mail: yaoy@ciomp.ac.cn