

轻小型立体相机光学系统研制

孟庆宇,董吉洪,王 栋,赵伟国

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要: 针对民用低成本立体成像的应用需求,设计了一种轻小型立体成像相机光学系统,旨在于在 250 km 轨道高度地面实现像元分辨率为 50 m 的立体成像,该光学系统在焦面探测器配合下,既可实现立体成像,又可实现大画幅面阵成像。该系统焦距 $f'=32$ mm,视场角 $2\omega=66^\circ$,相对孔径 $D/f'=1:6.8$,工作谱段 450~750 nm。光学系统设计中,采用反远距系统与消色差显微物镜两种光学结构组合的形式,最终全视场光学传递设计值优于 $0.49@78$ lp/mm,几何畸变小于 0.1%,边缘视场与中心视场照度比 0.83,边缘视场与主光线入射角小于 15° 。光学系统采用精密定心装配,并对成像质量进行了检测,装调后相机光学系统传递函数的测试值均优于 $0.4@80$ lp/mm,满足实验室静态传递函数优于 0.2 的指标。该光学系统在成像幅宽、几何畸变数值等方面的指标均优于国内外典型立体相机。

关键词: 光学设计; 立体成像; 光学遥感; 定心装调

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0418002

Minitype optical system development of stereo camera

Meng Qingyu, Dong Jihong, Wang Dong, Zhao Weiguo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A minitype optical system used in stereo camera was designed based on civilian low cost stereo imaging requirement, the optical system aimed to achieve 50 m ground sampling distance at 250 km orbit altitude. This optical system can both achieve stereo imaging function and large format array imaging function combined with a CMOS. The system has a focal length of 32 mm, a field of view of 66° , an F -number of 6.8 and a working wavelength range of 450–750 nm. The optical system consists of two parts of optical configurations—retrofocus lens and apochromatic microscope. The system design value of MTF achieves $0.49@78$ lp/mm, distortion value less than 0.1%, the relative illumination of marginal field of view achieves 0.83, principal ray incoming angle in image plane of marginal field less than 15° . The testing result after optical mounting centering alignment shows that the MTF of each field of view all achieve $0.4@80$ lp/mm, which meets the static MTF requirement in laboratory. This optical system has better performances in imaging width and distortion value compared with other international famous stereo cameras.

Key words: optical design; stereo imaging; optical remote sensing; centering alignment

收稿日期:2015-08-05; 修订日期:2015-09-07

基金项目:航天支撑基金(JZ20140151)

作者简介:孟庆宇(1986-),男,助理研究员,硕士,主要从事空间遥感器光学系统设计与研制方面的研究。

Email:mengqy@ciomp.ac.com

0 引言

从第一次世界大战开始,欧洲国家就已经开始了航空测绘相机的研制工作,1915年 Oskar Messter 研制的测绘相机在 3 000 km 飞行高度、不大于 1.5 h 飞行时间内即可获得 400 平方公里,比例为 1:10 000 的地图^[1]。经历整整 100 年的发展,光学成像测绘技术已被世界各国广泛应用于地形测绘、军事测量、城市规划等领域^[2-3]。随着应用理论、设计方法与制造水平的不断进步,测绘相机也发生了巨大飞跃,其发展趋势已从传统的平面测绘技术转向立体测绘技术^[4-5]。

高精度立体测绘相机相比一般侦查相机设计难度大、装配精度高、生产周期长,造价往往是侦查相机的几倍。但在地质勘探、地形地貌普查、智慧城市规划、深空探测等一些民用测绘领域通常不过高追求测量精度,在后期数据校正能力大大提高的同时,他们在掌握立体地形、构建地表三维模型等立体成像方面有较多应用需求,在这些领域应用高精度的立体测绘相机将带来较高的应用成本。针对民用级立体成像的应用需求,如何能够降低成本,设计一款性价比较高的立体成像相机成为许多光学遥感器设计者的研究方向。

文中针对立体成像,设计了一款焦距 $f'=32$ mm、相对孔径 $D/f'=1:6.8$ 、工作谱段 450~750 nm、全视场 $2\omega=66^\circ$ 的光学系统,并予以实现。光学系统采用反远距物镜与消色差显微物镜两种光学结构组合的形式完成像差校正,设计畸变小于 0.1%,设计中校正了广角镜头边缘照度,边缘视场与中心视场照度比为 0.83,解决了大视场光学系统照度均匀性不良的问题。系统装配后,全视场测试传递函数均优于 0.4@80 lp/mm,满足实验室静态传递函数优于 0.2 的指标。该系统焦平面采用 CMOS 探测器,不仅具有面阵画幅成像功能,完成比例尺成图,同时还兼具立体成像功能。大视场指标有益于宽幅成像与立体成像基高比的实现,在 250 km 轨道高度,该相机可实现对地 50 m 分辨率、幅宽 256 km×192 km 的立体成像。

1 设计思想

20 世纪 70 年代,德国科学家首先研究并应用三线阵 CCD 相机进行立体测绘,三线阵 CCD 立体相

机由具有一定交会角的前视、正视和后视三个线阵 CCD(Charge-coupled Device)相机构成,正视相机沿飞行方向垂直对地成像,前视相机向前倾斜成像,后视相机向后倾斜成像,前、后视相机具有一定的交会角^[1]。测绘时,相机分别推扫出正视、前视与后视图像,通过确定测绘时相机的外方位元素与内方位元素计算出相机的像点坐标,从而得到地面的物点坐标,完成测绘成像。三线阵测绘相机相比面阵凝视相机,因其可获得三个视角的透视图,可以很好地进行三维重建,实现立体成像。

用于高精度测绘的多线阵立体测绘相机造价成本非常高,主要原因在于高精度测绘需求,导致相机对设计、制造、装调都有很高的精度要求,同时多线阵立体测绘相机通常由多台相机组成,各台相机间的空间关系又有着较高的制造装配精度^[6]。以田铁印等人设计的三线阵测绘相机为例,系统由三部相机组成,光学系统采用像方远心结构,焦距在 700 mm 左右,设计畸变值均控制在 2×10^{-5} 量级^[7],光学系统单镜装调精度要求最高达到了偏心公差 5",镜间隔公差 ± 0.01 mm^[8]。由此看出,降低系统生产装配难度、减少立体相机数量是降低立体相机成本的关键。基于应用领域,所要实现的立体相机不会对生产装配有过高精度要求,减少立体相机中子相机的数量成为降低系统难度与复杂度的重要途径。经过调研分析,设计一款大视场角光学系统,采用一部相机的多个视场角实现正视、前视与后视功能,可有效实现一部相机的立体成像功能。

目前,国内外基于该设计思想的立体相机研究已取得一定进展,最具代表性的为 2003 年欧空局发射的火星快车(Mars Express)上搭载的高分辨率立体成像相机 HRSC(High-resolution Stereo Camera)^[9-10]。该相机光学系统采用复杂化天塞(Apo-Tessar)结构,焦距 175 mm,相对孔径 1:5.6,视场角 $2\omega=40^\circ$,畸变值小于 1%,相机焦面由九条 TDI-CCD(九个成像通道)拼接而成,如图 1 所示,分别为 ND(Nadir)通道, S1(Stereo 1)和 S2(Stereo 2)通道, P1(Photometry 1)和 P2(Photometry 2)通道, IR(Near-Infrared)通道, GR(Green)通道, BL(Blue)通道以及 RE(Red)通道。其中 S1 与 S2 成像通道占用 $\pm 18.9^\circ$ 线视场, ND 通道完成星下点成像,相机运用这三个通道完成了立体成像,取得了较好效果^[11]。国内于 2007 年和 2010 年发射的

嫦娥 1 号和嫦娥 2 号可见光立体相机采用了与 HRSC 一样的设计思路, 其中嫦娥 1 号卫星 CCD 立体相机在面阵 CCD 前增加一个带有三条狭缝的金属面罩, 三条平行狭缝对准三行 CCD; 嫦娥 2 号卫星 CCD 立体相机为了降低数据率, 在焦平面上配置了两条 TDI-CCD^[4,12], 它们的光学系统畸变数值均在 0.5% 量级, 虽不能满足高精度测绘需求, 但均可满足对月立体成像, 并取得了良好的效果。

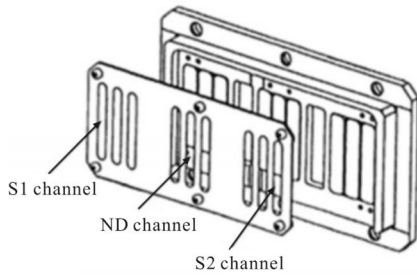
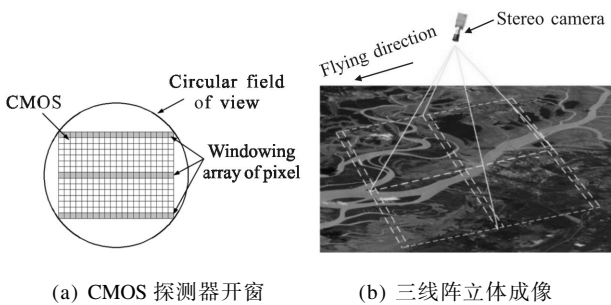


图 1 HRSC 相机焦面

Fig.1 Image plane of HRSC

文中研制的光学系统结合国内外立体成像方法, 亦计划采用在面视场像面上选取多个线阵视场成像的方法完成立体成像。不同的是, 相机焦面采用面阵 CMOS 器件, 通过电子学设计, 兼具两种成像模式: 第一种模式为常规的面阵画幅成像, 可在广角镜头的配合下完成大画幅成像; 第二种模式是在 CMOS 探测器某几行像元上进行“开窗”处理, 读取面阵探测器特定某几行像元的信息, 实现线阵功能, 完成立体成像, 如图 2 所示, 在“开窗”立体成像过程



(a) CMOS 探测器开窗

(b) 三线阵立体成像

(a) CMOS windowing pattern (b) Three-line array stereo imaging

图 2 立体成像示意图

Fig.2 Schematic diagram of stereo imaging

中, 可以根据工况需求选取 CMOS 面阵探测器不同位置的三线阵或双线阵进行成像。该相机设计指标为在 250 km 轨道高度为地面像元分辨率 Ground

Sampling Distance(GSD)实现 50 m, 设计畸变值优于 0.1%。

2 光学参数确定

2.1 焦距

选定焦面探测器为像元尺寸 $6.4 \mu\text{m}$ 、像元数量 5120×3840 的 CMOS 面阵探测器。在已知探测器像元尺寸的情况下, 为实现 $GSD=50 \text{ m}$ 指标 (轨道高度 $H=250 \text{ km}$), 光学系统焦距应满足:

$$f' \geq \frac{Ha}{GSD} = 32 \text{ mm} \quad (1)$$

式中: H 为轨道高度, 250 km ; a 为像元尺寸, $6.4 \mu\text{m}$ 。

2.2 视场角

在选定探测器的基础上, 为最大效率利用探测器面积, 实现最大对地幅宽, 光学系统视场角满足:

$$2\omega \geq 2\arctan\left(\frac{m/2}{f'}\right) = 65.24^\circ \quad (2)$$

式中: m 为面阵探测器对角线长度, 40.96 mm ; f' 为光学系统焦距, 取 32 mm , 留取设计余量, 取镜头全视场角 66° 。

根据分析得出的系统焦距值和视场角, 配合选定探测器, 相机在 250 km 轨道高度可实现 $256 \text{ km} \times 192 \text{ km}$ 的宽幅成像, 同比国内外知名立体相机, 嫦娥 1 号立体相机成像幅宽为 $60 \text{ km} @ 200 \text{ km}$, 嫦娥 2 号立体相机成像幅宽为 $43 \text{ km} @ 100 \text{ km}$, HRSC 立体相机成像幅宽为 $53 \text{ km} @ 250 \text{ km}$, 该相机的成像幅宽具有明显优势。

2.3 有效孔径

主要从以下两个角度分析光学系统有效孔径。

2.3.1 衍射极限分辨力

具有口径 D 的光学系统的衍射极限分辨力用角分辨率 α 表示如下:

$$\alpha = \frac{140''}{D} = \frac{140}{206265 \cdot D} \quad (3)$$

因为该相机需要的 Nyquist 频率 $f_N = 1/2a = 78.1 \text{ lp/mm}$, 相机角分辨率 $\alpha = f_N^{-1} f'^{-1} = 3.77 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 400 \mu\text{rad}$:

$$\alpha = 400 \mu\text{rad} = \frac{140}{206265 \cdot D} \quad (4)$$

故相机的口径应大于 1.70 mm 。

2.3.2 调制传递函数(MTF)

当光学系统的像差校正到衍射极限时, 光学系

统的调制传递函数决定于光学系统的相对孔径。用 f_c 表示传递函数的截止空间频率,则:

$$f_c = \frac{1}{\lambda F} \quad (5)$$

式中: λ 为参考波长; $F=f'/D$ 。

根据衍射极限光学系统的传递函数曲线,当确定 Nyquist 频率 f_N 处的传递函数 $MTF(f_N)$ 时,可求得 f_N 和 f_c 的关系,如: $MTF(f_N)=0.5$ 时, $f_N=0.4f_c$; $MTF(f_N)=0.4$ 时, $f_N=0.49f_c$ 。故 $MTF(f_N)=0.5$ 时, $f_c=195$ lp/mm, 设 $\lambda=600$ nm, 则 $F=(\lambda f_c)^{-1}=8.55$, $D=f'/F=3.74$; 又当 $MTF(f_N)=0.4$ 时, $f_c=159$ lp/mm, $F=10.48$, $D=3.05$ mm。

由于该相机光学系统视场大,视场角达 60° 以上,为广角型系统,设计中较难做到近衍射极限成像,综合分析,为保障光学系统传递函数及相机综合要求,取光学系统有效口径 5 mm。限于电子学水平,通常探测器及电子学平均传递函数实现值为 0.5,在此条件下,装配后的光学系统需实现特征频率下传递函数优于 0.4,综合可保证相机静态传递函数优于 0.2 的要求。

3 光学系统设计

3.1 结构分析

光学结构形式的选择需要根据相机的焦距、相对孔径与视场角来确定。目标设计的光学系统焦距 $f'=32$ mm,相对孔径 $D/f'=1:6.8$,视场角 $2\omega=66^\circ$,这种广角系统采用反射式系统是很难实现的,笔者采用自由曲面设计的离轴三反光学系统的视场角也仅为 $10^\circ \times 4^{0.131}$,即便反射式系统能够实现广角成像,通常其造价成本也高于透射式系统,不易作为该设计首选。透射式系统结构形式多样,优化自由度丰富,非常适用于实现短焦距广角光学系统。但对于文中要设计的光学系统,探测器特征频率为 78 lp/mm,该数值远远高于嫦娥 1 号立体相机的 36 lp/mm 和嫦娥 2 号立体相机的 50 lp/mm,亦高于 HRSC 立体相机的 71 lp/mm,如表 1 所示,要在这样高的特征频率下实现该广角光学系统($2\omega=66^\circ$)装调后全视场传递函数均优于 0.4,单从实现光学系统设计传递函数的角度考虑就具有一定难度。此外,该光学系统还具有工作谱段宽(450~750 nm)、畸变数值小(0.1%)等要求,这给系统的设计与优化带来较大难度。

表 1 指标对比

Tab.1 Index contrast

Index	Chang'e-1 stereo camera	Chang'e-2 stereo camera	HRSC stereo camera	Stereo camera in this paper
Focal length /mm	23.33	144.3	175	32
Field of view /($^\circ$)	40	42	40	66
Imaging width ($H=250$ km)	75	107.5	53	256
Relative aperture	1:5.13	1:9	1:5.6	1:6.4
Spectrum band / μm	500-750	450-520	400-1000	450-750
Spectrum band width/ μm	250	70	600	300
Pixel size/ μm	14	10	7	6.4
Nyquist frequency /lp·mm $^{-1}$	36	50	71	78
Distortion	<0.5%	<0.5%	<1%	<0.1%
GSD/m ($H=250$ km)	150	17	10	50

3.2 光学系统设计

经过多种结构的选型分析,系统决定采用两种光学结构组合的形式,由于镜头视场角大,将孔径光阑设置在系统中部,使前后具有一定对称性,便于横向像差的校正,孔径光阑前部为反远距光学形式,作为光学系统的前组,它将大入射角度的光线降低出射角后进入光阑后部的小倍率消色差显微物镜结构,其作为光学系统的后组。后组的消色差显微物镜为倒置结构,设计时物面为探测器焦面,像面在孔径光阑前靠近系统前部方向,前后两组分别设计,最终整合在一起优化校正像差。

后组像差校正中,采用成都光明玻璃 H-TF3L(负光焦度)与 H-FK61(正光焦度)形成前一组双胶合透镜(靠近光阑)用于校正色差,采用 HTF3L(正光焦度)与 HFK61(负光焦度)形成后一组反常双胶合透镜,补偿了系统的高级像差。光学系统结构如图 3 所示。

设计中的一个难点为大视场光学系统边缘光能量问题^[14-15]。没有斜光束渐晕时,随着像方视场角的

增加,像面光照度数值随着像方视场角余弦的 4 次方降低,像面边缘光线大角度入射的光学系统,光束口径在入瞳上的透镜即便渐晕系数为 100%,其截面积也较小,造成光照度不足,这是设计广角照相物镜的主要困难之一。此外,由于该相机选用 CMOS 探测器自身性能的原因,光线在探测器上的入射角度直接影响探测器的相对响应值,如图 4 所示。综上所述,边缘视场能量及光线在探测器上的入射角度问题在本系统中尤为重要。设计中,特别控制了主光线在像面上的入射角度,并且引入负渐晕,最大值达到了-45%。设计完成后,边缘视场主光线像面入射角为 15°,边缘视场相对照度值为 83.8%,远高于余弦 4 次方关系边缘视场照度值 49.5%,如图 5 所示。综合探测器响应,最终相机的焦面相对照度响应如表 2 所示。

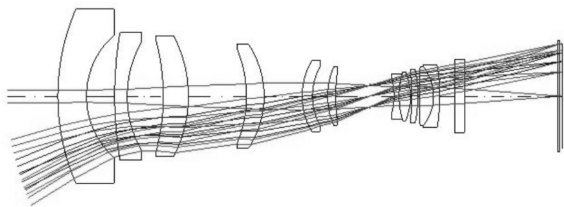


图 3 光学系统结构

Fig.3 Optical system configuration

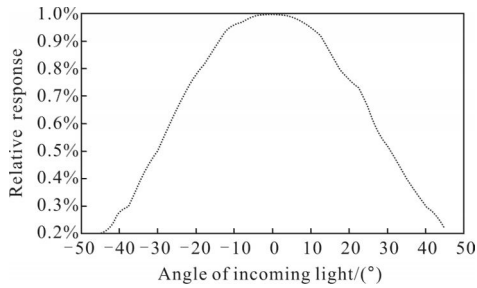


图 4 探测器光学入射角度相对响应

Fig.4 Angular response

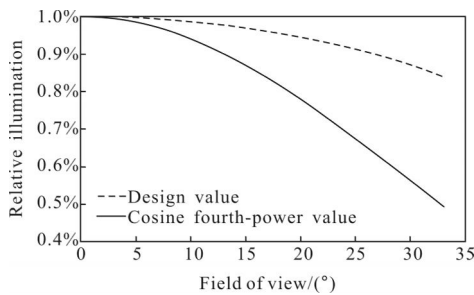


图 5 光学系统焦面相对照度

Fig.5 Relative illumination of optical system image plane

表 2 焦面相对照度

Tab.2 Relative illumination of image plane

Field of view/(°)	cos ⁴ ω value	Design value	Principal ray incident	CMOS angular response	Multiple response
0	1	1	0	1	1
3	0.995	0.999	1.27	1	0.999
6	0.978	0.995	2.54	0.99	0.985
9	0.952	0.990	3.82	0.99	0.980
12	0.915	0.981	5.12	0.98	0.961
15	0.871	0.970	6.42	0.98	0.951
18	0.818	0.956	7.75	0.97	0.927
21	0.760	0.940	9.11	0.96	0.902
24	0.696	0.920	10.5	0.96	0.883
27	0.630	0.897	11.94	0.94	0.843
30	0.563	0.870	13.43	0.90	0.783
33	0.495	0.838	15.00	0.87	0.729

考虑制造与装调成本,设计未采用非球面,经过设计优化后,光学系统传递函数设计值,全视场均优于 0.49@78 lp/mm,平均值优于 0.53@78 lp/m(如图 6、表 2),最大畸变出现在带光视场处,几何畸变小于 0.1%,满足预期指标,如图 7 所示。

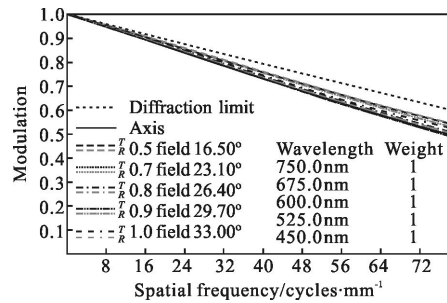


图 6 光学传递函数

Fig.6 Modulation transfer function

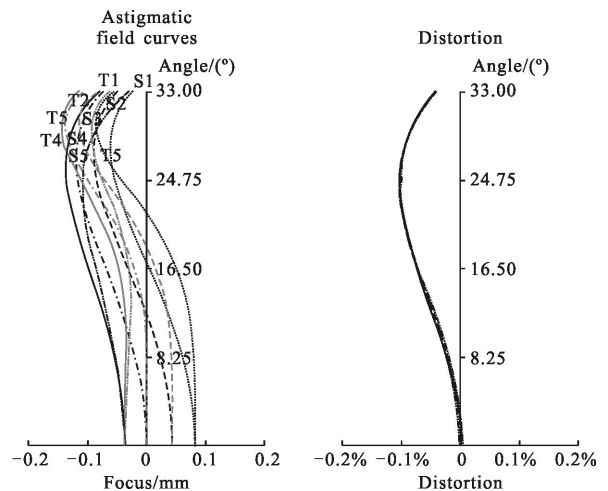


图 7 光学系统场曲与畸变

Fig.7 Astigmatic field curves and distortion

4 公差分析

该相机工作谱段宽,视场角大,探测器特征频率高,畸变要求严格,这些因素综合决定该光学系统具有相对较高的装调精度要求,运用光学设计软件 CODE V^[16]对系统进行公差分析,光学系统制造公差如表 3 所示,光学系统装调公差如表 4 所示。表 3 与表 4 中: N 为光圈数, Δd 为厚度公差, χ 为透镜偏心公差, Δnd 为材料折射率公差, Δvd 为材料色散公差。在此公差下,光学系统的 MTF 表现如图 8 所示,系统

表 3 光学系统制造公差

Tab.3 Manufacture tolerance of optical system

Lens	Surface	Manufacture tolerance				Glass tolerance	
		N	RMS	$\Delta d/mm$	$\chi/(\prime)$	Δnd	Δvd
1	1	1	1/60	0.02	30	0.0005	0.5%
	2	1	1/60				
-	-	-	-	-	-	-	-
10	23	1	1/60	0.02	30	0.0005	0.5%
	24	1	1/60				

表 4 光学系统装调公差

Tab.4 Alignment tolerance of optical system

Lens	Surface	Alignment tolerance			
		$\Delta d/mm$	Tilt/ (\prime)	Group decenter /mm	Bonding decenter / (\prime)
1	1	0.02	20	0.01	-
	2				
-	-	-	-	-	-
10	23	0.02	20	0.01	-

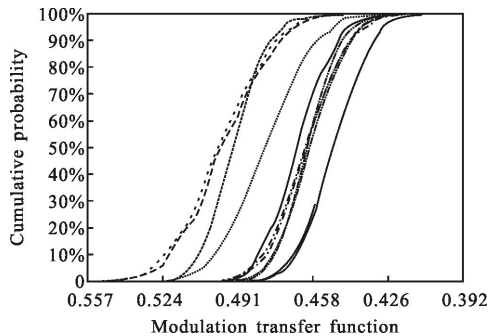


图 8 光学传递函数公差表现
Fig.8 MTF tolerance performance

MTF 值 97.7%(2σ) 的概率均优于 0.41@78 lp/mm,在电子学 $MTF=0.5$ 匹配下,可以满足相机实验室静态传递函数优于 0.2、动态传递函数优于 0.1 的指标要求。

5 实测结果

根据公差分析数据,透镜光轴方向间隔公差在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 量级,透镜偏位在 $20\prime$ 量级,该透镜所需的装调精度是压圈法不能实现的,光学系统装调采用精密定心方案^[17-18],将透镜放入镜座,用镜座缘包裹住透镜,操作过程中保证无应力产生,不破坏透镜面形。滚边后,对已和镜座胶合为一体的透镜进行面形检测,如图 9 所示,如面形超出允许范围,则需重新进行滚边。光机系统采用三段筒结构,每段镜筒在定心仪上完成定心装配,再将三段镜筒定心连接,最终系统偏位值控制在 $20\prime$ 内,完成装配的镜体如图 10 所示,采用光学传递函数测试仪对装配后的镜体进行 MTF 测试,得到实测结果如图 11 所示。全视场光

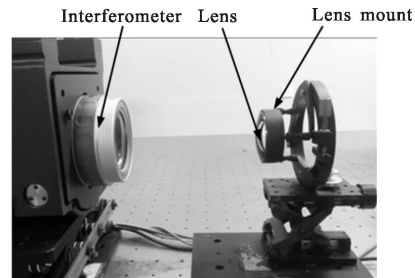


图 9 对滚边后的透镜进行面形检测

Fig.9 Shape error testing of mounted lens

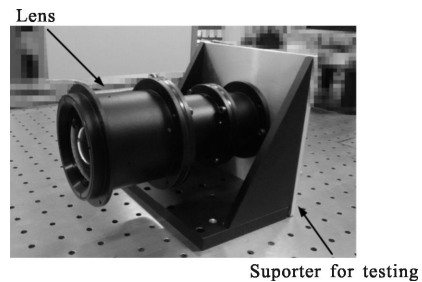
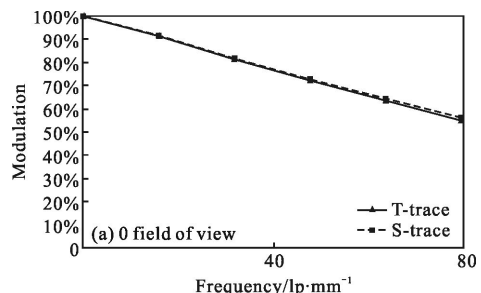


图 10 完成装配的镜头

Fig.10 Alignment completed lens



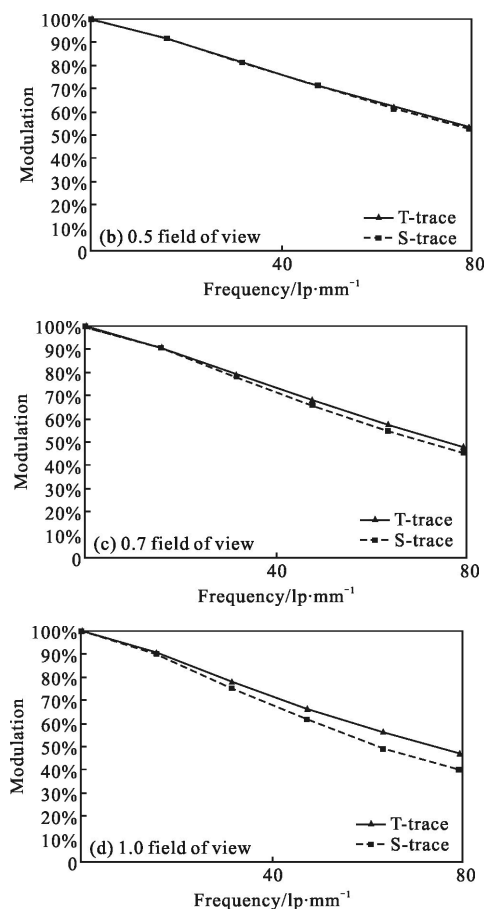


图 11 光学传递函数测试曲线

Fig.11 MTF tested curves of optical system

学传递函数 MTF 均优于 0.4@80 lp/mm, 可以满足相机实验室静态传递函数优于 0.2 的指标。

6 结论

根据民用低成本立体成像的应用需求, 设计了小型立体成像相机光学系统, 该系统具有视场大、工作谱段宽、畸变小、像元尺寸小、边缘照度要求高等设计难点。系统设计采用反远距结构与消色差显微结构相结合的光学形式, 最终实现了 $f=32\text{mm}$, $D/f=1:6.8$ 、工作谱段 $0.45\sim 0.75\ \mu\text{m}$ 、 $2\omega=66^\circ$ 的光学系统, 该系统几何畸变小于 0.1%, 全视场主光线像面最大入射角为 15° , 光学系统边缘视场相对照度值为 83.8%, 全视场光学系统传递函数设计值均优于 0.49@78 lp/mm, 平均值优于 0.53@78 lp/mm, 系统采用精密定心装配后, 全视场调制传递函数均优于 0.4@80 lp/mm, 指标实现预期设计目标。该光学系统在 250km 高度轨道可实现幅宽为 $256\text{ km}\times 192\text{ km}$ 的

立体成像。该相机光学系统在焦面 CMOS 探测器的配合下既可完成立体成像, 又可实现大画面阵成像, 应用方式灵活, 其主要应用指标均优于目前国内外公开的立体相机。该相机的研制对立体成像相机的研究具有一定的指导性作用, 在航空航天领域具有一定的应用前景, 其研制过程具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Rainer Sandau. Digital Airborne Camera [M]. Germany: Springer, 2009: 1-30.
- [2] Yang Bingxin. The developmnt survey of foreign space reconnaissance camera and mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1998, 19(2): 16-24. (in Chinese) 杨秉鑫. 国外航天侦察相机和测绘相机发展概况[J]. 航天与遥感返回, 1998, 19(2): 16-24.
- [3] Cui Tengfei, Chen Shengbo, Wang Jingran. Three-dimensional modeling of the Lunar surface based on stereo camera onboard chang'e orbitor [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009, 4(82): 31-34. (in Chinese) 崔腾飞, 陈圣波, 王景然. 基于嫦娥卫星三线阵 CCD 立体相机的月球表面三维建模[J]. 国土资源遥感, 2009, 4(82): 31-34.
- [4] Zhao Baochang, Yang Jiangfeng, Wen Desheng, et al. Design and on-orbit measurement of Chang'E-1 satellite CCD stereo camera[J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(1): 30-36. (in Chinese) 赵葆常, 杨建峰, 汶德胜, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的设计与在轨运行[J]. 航天器工程, 2009, 18(1): 30-36.
- [5] Zhao Baochang, Wen Desheng, Yang Jianfeng, et al. Two bore-sight stereo mapping with single lens, TDI CCD pushing model imaging and compensations of the speed-to-height rate-Chang'e-2 CCD camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 126-133. (in Chinese) 赵葆常, 汶德胜, 杨建峰, 等. 单镜头两视角同轨立体成像、TDI CCD 自推扫和速高比补偿——嫦娥二号 CCD 相机技术[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 126-133.
- [6] Zhi Xiyang, Zhang Wei, Hou Qingyu. Effects of geometric specification difference on stereoscopic mapping for dual-linear-array CCD Camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4): 425-429. (in Chinese) 智喜洋, 张伟, 侯晴宇. 两线阵 CCD 相机几何指标差异对立体测绘的影响[J]. 光子学报, 2012, 41(4): 425-429.
- [7] Tian Tiejin, Wang Hong, Gu Fengang, et al. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J].

- Opt Precision Eng*, 2009, 17(11): 2692–2698. (in Chinese)
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.
- [8] Wang Hong, Tian Tiejun. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(7): 1444–1450. (in Chinese)
王红, 田铁印. 三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1444–1450.
- [9] Jaumann R, Neukum G, Behnke T, et al. The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission [J]. *Planetary and Space Science*, 2007, 55: 928–952.
- [10] European Space Agency. Mars Express: The Scientific Payload[S]. 2004.
- [11] Jaumann R, Tirsch D, Hauber E, et al. Quantifying geological processes on Mars—results of the high resolution stereo camera (HRSC) on Mars express [J]. *Planetary and Space Science*, 2015: 1–45.
- [12] Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng, et al. Chang'e-2 Lunar orbiter CCD stereo design and validation [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(1): 14–21. (in Chinese)
赵葆常, 杨建峰, 汶德胜, 等. 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机设计与验证[J]. *航天器工程*, 2011, 20(1): 14–21.
- [13] Meng Qingyu, Wang Wei, Ma Hongcai, et al. Easy-aligned off-axis three-mirror system with wide field of view using freeform surface based on integration of primary and tertiary mirror[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(14): 3028–3034.
- [14] Smith W J. Modern Optical Engineering [M]. Zhou Haixian, Chen Yunfang translated. Beijing: Chemistry Industry Press, 2011: 140–164. (in Chinese)
沃伦 J.史密斯. 现代光学工程 [M].周海宪, 程云芳, 译. 北京: 化学工业出版社, 2011: 140–164.
- [15] Meng Qingyu, Dong Jihong, Qu Hongfeng, et al. Research on light optical system design with wide spectral band, large field of view for deep space exploration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0122001. (in Chinese)
孟庆宇, 董吉洪, 曲洪丰, 等. 用于深空探测的宽谱段大视场小型光学系统设计[J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 0122001.
- [16] Code V Reference Manual. Synopsys, Inc, 2012 [Z].
- [17] Chen Shiping. Space Camera Design and Experiment [M]. Beijing: China Astronavigation Press, 2003: 89–96. (in Chinese)
陈世平. 空间相机设计与试验 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 89–96.
- [18] Yoder P R. Opto-Mechanical System Design [M]. Florida: CRC Press, 2006: 160–167.