

文章编号:1004-4213(2010)12-2229-5

集成式双线阵立体测绘相机光学系统设计*

姚罡¹,傅丹膺²,黄颖¹

(1 北京空间机电研究所,北京 100076)

(2 航天东方红卫星有限公司,北京 100094)

摘 要:针对双线阵立体测绘相机光学系统设计指标的要求,设计了一种三反离轴光学系统,并针对该光学系统的特点,对像质进行了分析.光学系统设计传递函数在 0.6 左右(在 50 lp/mm 处),相对畸变小于 3×10^{-4} ,校正绝对畸变小于 20 μm ,相机在成像质量方面达到立体测绘的要求.同时,为了使相机在体积尺寸小、结构紧凑及轻量化等方面满足卫星平台的要求,采用了一种新型的光学系统布局,在减小双线阵立体测绘相机的体积、材料及减轻重量等方面,具有独特的优势;光学系统可以安装在同一机械结构体内,以利于采取有效的热控措施,将主镜以一定的交会角在同一基准上支撑、装调,所以它具有尺寸稳定性好,温度敏感度低等优点.

关键词:双线阵 CCD 相机;光学设计;离轴三反;畸变

中图分类号:TP73;V447.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103912.2229

0 引言

随着空间遥感技术的发展,卫星遥感图像的分辨率逐渐提高,且获取遥感图像的成本逐渐降低,利用星载相机进行立体测绘在其效益、效率及适应性等方面的优势越来越突出.目前在轨运行的双线阵立体测绘卫星有法国的 SPOT 系列卫星,其中 SPOT-5 配有两台 HRG 相机,光学系统采用准施密特型式,相机焦距 1 082 mm,相对孔径 3.5,垂直轨道视场 $\pm 2.1^\circ$.印度的双线阵立体测绘卫星 IRS-P5 搭载有两台 CARTOSAT-1 相机,它采用三反离轴光学系统型式,相机焦距 1 980 mm,相对孔径 4.0.国外传输型立体测绘相机发展已经相当成熟,我国传输型立体测绘相机的研究工作虽然刚刚起步,但已经成功发射的探索 1 号及嫦娥 1 号表明我国传输型立体测绘相机已经取得突破性进展^[1].

立体测绘相机的光学系统决定了相机的外形尺寸和布局,根据光学系统的指标要求,设计了一种三反离轴光学系统,满足双线阵立体测绘的指标要求,并采用了一种新型的光学系统布局,它具有小型化、集成度和功能密度比高、轻量化及热稳定性好等特点.

1 双线阵立体测绘相机工作原理

在摄影测量系统中,如果知道 CCD 摄影测量相

机所摄数字影像的六个外方位元素($X, Y, Z, \varphi, \omega, \kappa$),即摄影中心在地面或地心坐标系中的位置和姿态角,同时知道 CCD 相机的内方位元素,即相机的主距 f 、主点坐标(x_0, y_0)和相机间的夹角 α ,那么地面上任一物点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 在两个相机坐标系中的像点坐标就可以完全确定了.

反之,如果能够求出对应 P_i 点的像点坐标,则可以计算出 P_i 点的地面坐标(X_i, Y_i, Z_i),这就是 CCD 相机进行立体摄影测量的基本原理^[2].

双线阵 CCD 立体测绘相机由两台单部相机构成,沿航天器飞行方向,向前倾斜成像的相机为前视相机,而向后倾斜成像的相机为后视相机.前、后视相机具有一定的交会角,沿航天飞行器飞行方向同时对地推扫成像,如图 1,前、后视相机对同一地区所成的图像,结合星敏感器及其它姿态测量部件对航天器所测量的六个外方位元素,可以形成两幅具

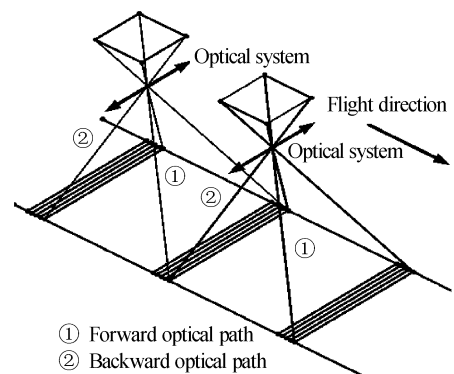


图 1 双线阵立体测绘相机工作原理
Fig. 1 Principle diagram of dual-line array stereoscopic mapping camera

有一定视角且相互重叠的两线阵航带影像,建立高程模型并完成地形图的绘制。

2 光学系统的参量选择

为了实现 1 : 25 000 比例尺测绘图像,要求相机的地面分辨率(GSD)为 2 m. 基线高度比(B/H)为 1,要求前、后视光学系统的交会角度为 $\pm 25^\circ$. 光学系统的焦距通过式(1)计算

$$f' = a \times H / \text{GSD} / \cos(25^\circ - \beta) \quad (1)$$

式中, f' 为光学系统焦距, a 为 CCD 器件像元尺寸, H 为轨道高度 300 km,GSD 为地面像元分辨率, β 为光学系统的离轴角. 由于该光学系统光线离轴使用,离轴视场角 β 为 7.0° 和 7.5° ,计算时取均值 7.25° ,相机 CCD 像元尺寸 a 为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ (耐奎斯特频率为 50 lp/mm). 经过计算,取该光学系统的焦距为 $f' = 1\ 600 \text{ mm}$.

为了达到 $W = 20 \text{ km}$ 的对地覆盖范围,光学系统的视场角 2ω 由式(2)确定

$$W = 2 \times H \times \tan \omega \quad (2)$$

经过计算光学系统的视场为 $\pm 2^\circ$.

若使测绘相机可以生产出中等比例尺(1 : 25 000)的测绘图像并具有较强的对地覆盖范围,则要求光学系统具有较长的焦距(大于 1 m)、较大的视场角. 反射式光学系统具有焦距较长,传递函数接近衍射极限且温度敏感度低等特点. 采用三反共轴系统(共轴是指三个反射镜的球心在一条直线上),通过进一步加大离轴视场角,将中心遮拦从孔径中消除,可以进一步提高光学系统的传递函数,为加工和装调留出更多的余量,于是形成了视场和孔径都离轴的系统,即三反离轴系统^[3-4]. 对称单部光学系统如图 2,为了使像面照度均匀并且减小焦面移动对成像质量的影响,采用像方远心光路。

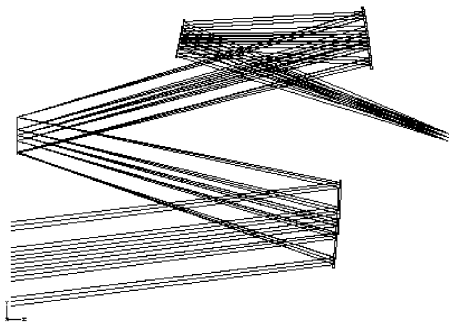


图 2 单部光学系统
Fig. 2 Diagram of the single optical system

3 光学系统构型设计

双线阵立体测绘相机通常采用两台相机(分别为前视和后视相机),以一定的交会角对地进行成

像,图 3 为进行双线阵立体测绘的两台相机的机械结构. 通过支撑板,两台相机与底板(基板)成一定的角度进行安装固定. 由于底板支撑的两台相机的重量较大,且与底板的连接面积较大,导致温控点较多,温度控制较难。

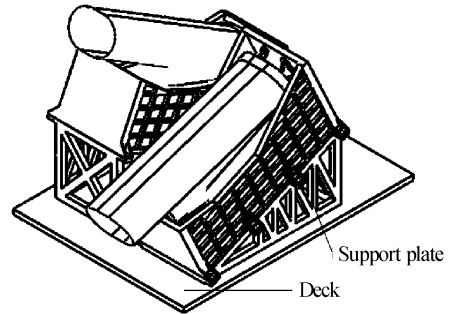


图 3 两台立体测绘相机的机械结构
Fig. 3 The mechanical structure of two cameras for stereoscopic mapping

基于飞行器平台尺寸的限制,期望缩小相机的体积和减轻重量,就要求光学系统的体积尽可能小,结构尽可能简单. 利用两个离轴反射式光学系统,并将其中的一个光学系统相对于另一个进行翻转、对称,为满足一定的基高比将两个光学系统相互以一定的角度倾斜,统一地固定、装调和支撑,并将它们安装于同一个机械结构体内(如图 4).

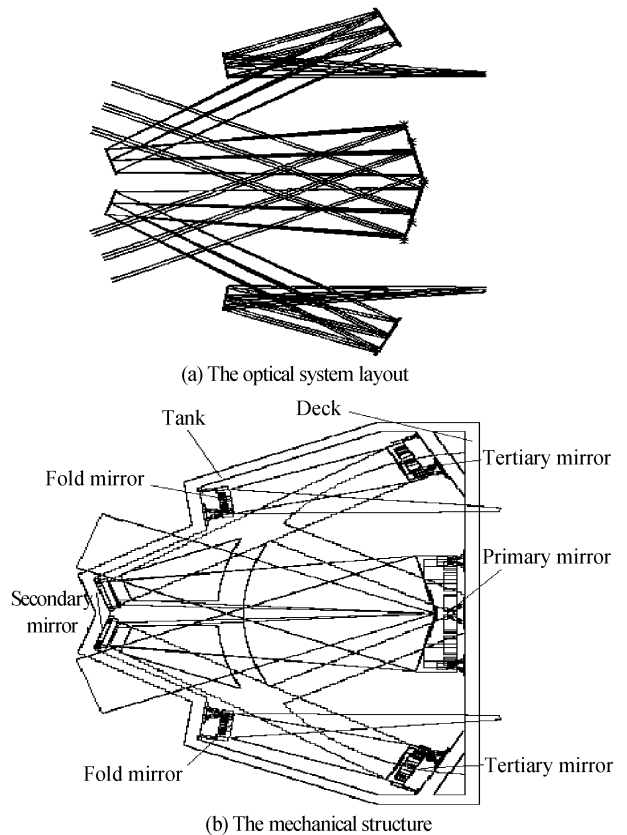


图 4 集成式双线阵立体测绘相机光学系统及其机械结构
Fig. 4 The optical and mechanical structure layouts of the integrated dual-line array stereoscopic mapping camera

这样易于采取有效的热控措施,使相机内部温度场比较均匀,光学系统的尺寸稳定性好.两个主镜相互以一定的角度直接支撑于底板上,减小了底板支撑的重量,从而使该双线阵立体测绘相机的交会角比较稳定.由直接安装在底板上的星敏感器等部件所测量的外方位元素直接与相机的内方位元素进行关联,从而缩小了尺寸链误差^[5].

表 1 为具有相同光学系统指标的集成式立体测绘相机与两台立体测绘相机的重量及体积尺寸的对比,通过对比可以看出集成式双线阵立体测绘相机将两台相机集成为一台相机,相机的总体尺寸减小;由于减少了结构材料,总质量小于 200 kg;由此可见,该种光学系统构型在减小相机体积重量、提高温度稳定性等方面具有独特的优势.

表 1 两种构型的重量及体积尺寸对比

	The integrated layout	Two cameras' layout
Weight/kg	196.5	293.8
Length/mm	1 267.42	1 100
Width/mm	420	934.09
Height/mm	908.66	1 039.64
	Mirrors	SiC
Material selection	Bipods	Invar
	Others	High-silicon aluminum alloy

4 光学系统像质评价

首先确定要评价的视场点,如图 5,在线条视场上找 6 个点:A(0.0°,7.0°),B(1.4°,7.0°),C(2.0°,7.0°),D(0.0°,7.5°),E(1.4°,7.5°),F(2.0°,7.5°).

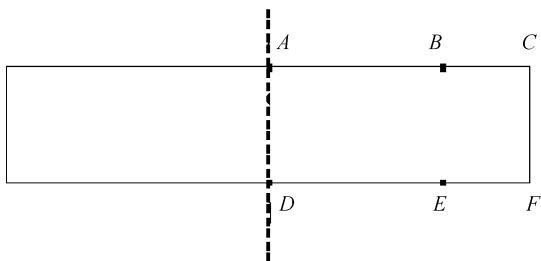


图 5 条形视场像质评价取点

Fig. 5 Points selection of view field for judging the image quality

4.1 光学系统传递函数

图 6 为光学系统的传递函数,该光学系统在频率 50 lp/mm 处的传递函数 MTF_{design} 如表 2,弧矢和子午方向各视场均值为 0.561,接近衍射极限,且各视场子午和弧矢方向的传递函数比较一致.

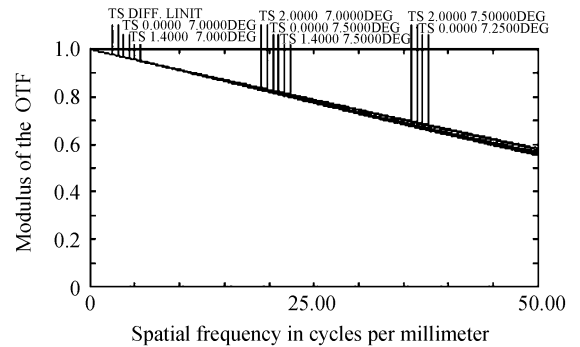


图 6 光学系统 MTF 曲线

Fig. 6 The MTF curves of the optical system

表 2 在 50 lp/mm 处各视场 MTF 值

Table 2 The MTF values at 50 lp/mm of each field of view (FOV)

FOV	Sag MTF	Tan MTF
Diffraction limit	0.583	0.577
0.0°,7.0°	0.565	0.554
1.4°,7.0°	0.564	0.558
2.0°,7.0°	0.564	0.551
0.0°,7.5°	0.571	0.561
1.4°,7.5°	0.572	0.555
2.0°,7.5°	0.570	0.546
Average of each direction	0.568	0.554
Average of all directions	0.561	

相机的实验室静态传递函数 MTF_{STA} 主要由光学系统的传递函数 $MTF_{optical}$ 和 CCD 器件的传递函数 MTF_{CCD} 的乘积确定.光学系统的传递函数 $MTF_{optical}$ 由光学设计传递函数 MTF_{design} 和加工装调引起的传递函数 MTF_{align} 的乘积确定,即 $MTF_{optical} = MTF_{design} \times MTF_{align}$,所以 $MTF_{STA} = MTF_{design} \times MTF_{align} \times MTF_{CCD}$ ^[6].取 $MTF_{CCD} = 0.5$,通过对该光学系统的公差分析取 $MTF_{align} = 0.8$,得 $MTF_{STA} = 0.5 \times 0.8 \times 0.56 = 0.22 > 0.2$.满足相机实验室静态传递函数大于 0.2 的要求.

4.2 光学系统的畸变

对于离轴的光学系统,由于采用轴外视场,需要对轴对称系统的畸变公式进行修改.对于偏视场的光学系统,畸变量要相对于视场中心进行评价,畸变在数值上定义为相对于中心视场,近轴像高和主光线与理想像面相交的实际像高之差,近轴像高由 $f_c \cdot \tan(\varphi)$ 计算,其中 f_c 为校准焦距, φ 为相对于视场中心 7.25° 的视场角, $\varphi = \theta - 7.25^\circ$.定义校准焦距 f_c 的公式为

$$f_c = \Delta h / \tan(\Delta\theta) \quad (3)$$

式中,相对于视场中心的小的视场角增量为 $\Delta\theta$,它

所对应的小的像高增量为 $\Delta h^{[7]}$.

畸变如图 7, 相对畸变小于 3×10^{-4} , 图 8 为该光学系统各视场的校正绝对畸变图, 最大校正绝对畸变为 $15.7 \mu\text{m}$ (在 $-2^\circ, 7.5^\circ$), 小于校正绝对畸变指标 $20 \mu\text{m}$, 在轨图像可以较容易地通过畸变修正曲线进行校正.

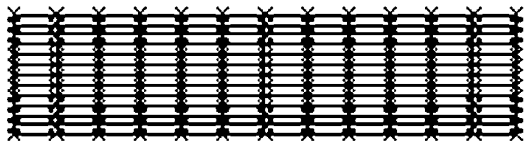


图 7 光学系统畸变图

Fig. 7 The grid distortion of the optical system

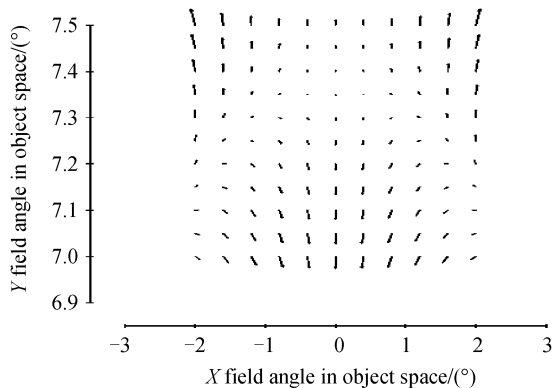


图 8 光学系统各视场的校正绝对畸变图

Fig. 8 The field map of the optical system (calibrated image distortion vs. field angle in object space)

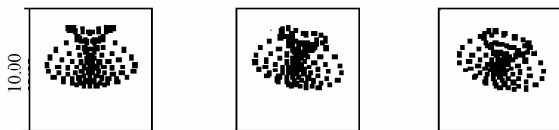
该光学系统所选视场点的斯特列尔数 (S. D.) 如表 3, 各视场点的斯特列尔数均大于 0.9, 成像质量优良. 点列图如图 9, 各视场光线所成像点弥散斑

表 3 所选视场点的斯特列尔数 (S. D.)

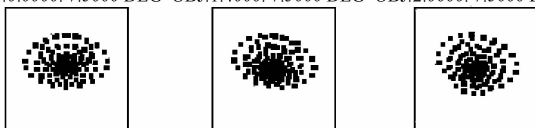
Table 3 The Strehl Ratio (S. D.) of the optical system

Field of view/(°)	0.0°, 7.0°	1.4°, 7.0°	2.0°, 7.0°
S. D.	0.946	0.955	0.962
Field of view/(°)	0.0°, 7.5°	1.4°, 7.5°	2.0°, 7.5°
S. D.	0.971	0.973	0.974

OBJ:0.0000, 7.0000 DEG OBJ:1.4000, 7.0000 DEG OBJ:2.0000, 7.0000 DEG



IMA:0.000, 95.825 MM IMA:39.113, 95.829 MM IMA:55.889, 95.833 MM
OBJ:0.0000, 7.5000 DEG OBJ:1.4000, 7.5000 DEG OBJ:2.0000, 7.5000 DEG



IMA:0.000, 110.036 MM IMA:39.117, 110.040 MM IMA:55.894, 110.046 MM

图 9 光学系统的点列图

Fig. 9 The spot diagrams of the optical system

的半径均方根值以及几何半径都在 $5 \mu\text{m}$ 以内, 成像质量接近衍射极限 (如图 9, 黑色方块代表 CCD 器件像元尺寸大小).

5 结论

针对光学系统设计指标的要求, 设计了一种离轴三反光学系统, 并针对该光学系统的特点, 对像质进行了分析. 光学系统设计传递函数接近 0.6 (在 50 lp/mm 处), 相对畸变小于 3×10^{-4} , 成像质量符合测绘相机的指标要求. 采用了一种新型的光学系统布局, 它在减小双线阵立体测绘相机的体积、材料及减轻重量等方面, 具有独特的优势; 并且它可以将主镜以一定的交会角统一固定在同一基准上, 并装在同一机械结构体内, 所以它具有稳定性好, 温度敏感度低等优点, 适应星载测绘相机平台要求. 该光学系统已申请国家专利《基于集成式共用主镜的双视场立体成像光学系统》, 受理号: 200910243273.8.

参考文献

- [1] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, LI Zhao-hui. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1051-1056.
王智, 张立平, 李朝辉. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 1051-1056.
- [2] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, YAO Hui. Design on optical lens of three-linear tridimensional mapping camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 227-232.
王智, 张立平, 姚惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 227-232.
- [3] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工、检验 [M]. 2 版. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 第五章, 第六章.
- [4] SHI Guang-hui. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(1): 16-24.
史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题 [J]. *光学精密工程*, 1999, **7**(1): 16-24.
- [5] HU Xin, CAO Xi-bin. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-mirror array CCD images [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(5): 695-699.
胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘准确度分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(5): 695-699.
- [6] TIAN Tie-yin, WANG Hong. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2692-2698.
田铁印, 王红. 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.
- [7] OWEN R C. Easily fabricated wide angle telescope [C]. *SPIE*, 1991, **1354**: 430-433.

Optical System Design of an Integrated Dual-line Array Stereoscopic Mapping Camera

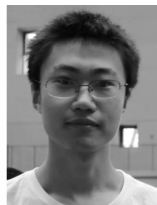
YAO Gang¹, FU Dan-ying², HUANG Ying¹

(1 *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China*)

(2 *DongFangHong Satellite Co. Ltd., Beijing 100094, China*)

Abstract: To conform the design requirements of optical system for dual-line array stereoscopic mapping camera, an off-axis three-mirror reflective system was designed and its image quality was analyzed. The MTF of the optical system is near 0.6 (at 50 lp/mm), relative distortion is less than 3×10^{-4} , and the calibrated absolute distortion is less than 20 μm . The optical design was optimized to meet the nominal optical performance. At the same time, in order to meet the dimensional requirements, mechanics constraints and low mass required for space application, a new layout of optical systems was adopted, which has the unique merits of miniaturization and lightening. The optical systems could be assembled in the same mechanical structure, of which the primary mirrors were assembled and aligned on the same deck with the required intersection angle, so it has advantages of highly structure stabilization and environment adaptability.

Key words: Dual-line array stereoscopic mapping camera; Optical design; Off axis TMA; Distortion



YAO Gang was born in 1986, and received his B. S. degree from Changchun University of Science and Technology, in 2008. Now he is pursuing the M. S. degree at Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, and his research interests focus on optical system design of remote sensor.



FU Dan-ying was born in 1965, and received his Ph. D. degree from Tsinghua University. As a professor and Doctoral Supervisor, his research interests focus on the design of optical remote sensor and spacecraft.