

文章编号 1004-924X(2009)11-2692-07

三线阵立体测绘相机光学系统设计

田铁印¹,王 红¹,谷凤安²,吴国栋¹,于淑琴²,张立平¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 长春奥普光电技术股份有限公司,吉林 长春 130031)

摘要: 光学系统结构决定了 CCD 相机的外形尺寸和布局,为保证相机的小型化、轻量化及稳定性,本文针对光学系统设计指标的要求,分析、比较了折射式、反射式及折反射式等光学系统的结构型式,综合考虑相机的空间环境适应性和结构布局等因素,采用像方远心光路,设计了一种兼具匹兹瓦型与对称型优点的新型光学系统结构。设计的光学系统成像质量好,在 Nyquist 频率为 77 lp/mm 时,正视相机全视场的平均传递函数为 0.613,前、后视相机全视场的平均传递函数为 0.578;正视相机畸变为 2×10^{-5} ,前、后视相机畸变为 2.4×10^{-5} 。装调完成后对光学系统成像质量进行了检测,各相机光学系统传递函数的测试值均在 0.451 以上,满足实验室静态传递函数 > 0.2 ,相对畸变 $< 3 \times 10^{-4}$ 的指标要求。

关键词: 三线阵 CCD 相机;测绘精度;光学设计;光学传递函数

中图分类号: TP73;V447.3 **文献标识码:** A

Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera

TIAN Tie-yin¹, WANG Hong¹, GU Feng-an²,
WU Guo-dong¹, YU Shu-qin², ZHANG Li-ping¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China; 2. Changchun UP Optotech Co., Ltd., Changchun 130031, China)

Abstract: The size and structure of a three-line array stereoscopic mapping camera are mainly determined by its optical system. To realize the miniaturization, lightening and high reliability of the camera, several kinds of optical system configurations, refraction, reflection and refracting-reflecting optical systems, are analyzed and compared by the requirements of the optical system. In accordance with the environment adaptability and structure layout of the camera, a telecentric system is adopted to design a new optical system to meet the requirement of stereoscopic mapping. The MTF value of each lens in designed optical system is close to the diffraction limit at Nyquist frequency of 77 lp/mm. The distortion of each optical system is less than 2.4×10^{-5} for the forward and backward sight cameras and 2×10^{-5} for the straight-sight camera. The tested result shows the MTF of each optical system can reach

收稿日期:2009-05-14;修订日期:2009-10-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

0.43 at Nyquist frequency of 77 lp/mm, which is 0.2 higher than a static MTF in laboratory and meets the requirements of the mapping camera for precision.

Key words: mapping camera; mapping precision; optical design; MTF

1 引言

目前许多国家在地球景物测绘中越来越重视中分辨率三线阵立体测绘相机的使用,由于它具有体积小、质量轻和功耗省等优点,已成为地外星球测绘测量的主要传感器。开展对三线阵立体测绘相机系统的研究,可为其在小卫星上的应用或对月进行传输型立体测绘奠定基础。80 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,至今,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,但是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]。

三线阵立体相机的光学系统决定了相机的外形尺寸和布局,因此综合考虑光学系统的结构对保证相机的小型化、轻量化及稳定性是十分必要的^[2]。本文根据光学系统设计指标要求,分析、比较了折射式、反射式及折反射式等光学系统结构型式,综合考虑空间环境适应性、结构布局等因素,采用像方远心光路,设计了一种兼具匹兹瓦型与对称型优点的新型光学系统结构,该光学系统成像质量优良,满足实验室静态传递函数 >0.2 ,相对畸变 $<3 \times 10^{-4}$ 的高质量指标要求。

2 三线阵 CCD 立体测绘相机工作原理

三线阵 CCD 立体测绘相机的光电扫描成像部分由光学系统焦面上的 3 个线阵 CCD 传感器组成,3 个线阵 CCD 相互平行排列并与航天飞行器飞行方向垂直。当航天飞行器飞行时,每个 CCD 以一个同步的周期 N 连续扫描地面并产生 3 条相互交迭的条带图像,这 3 个 CCD 的成像角度不同。垂直对地成像的相机称为正视相机,向前倾斜成像的相机为前视相机,而向后倾斜成像的相机称为后视相机。前、后视相机具有一定的

交会角。在测绘时,需要确定每个扫描时刻三线阵相机的外方位元素,即相机坐标系的原点在地球坐标系中的位置和姿态角,以及三线阵相机的内方位元素,即相机的主距、主点位置和交会角,从而可以确定地面上任一物点在 3 个不同时刻时在 3 条线阵 CCD 上的像点坐标;反之,如果能够求出对应的像点坐标,那么可以计算出地面上任一物点的坐标,这就是三线阵 CCD 相机进行立体测绘的原理^[3]。如图 1 所示。

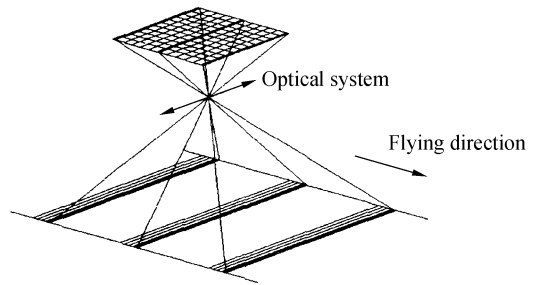


图 1 三线阵测绘相机工作原理图

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

3 光学系统设计

3.1 光学系统参数的确定

3.1.1 焦距和视场

焦距是光学系统的重要参数,它不仅直接影响系统的性能,而且决定了相机的体积和质量。

三线阵相机的 CCD 像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$, CCD 的像元尺寸确定后,它的大小与地面像元分辨率和轨道高度有关,焦距计算公式为:

$$f' = a \times H / \text{GSD}$$

式中, f' 为光学系统焦距, a 为 CCD 像元尺寸, H 为轨道高度, GSD 为地面像元分辨率。

CCD 像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m}$, 轨道高度为 500 000 m, 地面像元分辨率为 5 m, 那么正视相机光学系统焦距为:

$$f' = 0.0065 \times 500\,000 / 5 = 650.00 \text{ mm}$$

视场角为:

$$2\omega = 2\arctan(39/650) = 6.88^\circ$$

当交会角为 25° 时,其前、后视相机光学系统的焦距为:

$$f' = 650/\cos 25^\circ = 717.20 \text{ mm}$$

视场角为:

$$2\omega = 2\arctan(39/717.196) = 6.23^\circ$$

3.1.2 相对孔径

光学系统的相对孔径对信噪比起决定性作用。根据不同太阳高角时地面景物的照度、不同地物反射率、大气透过率、光学系统透过率及采用 CCD 的积分时间以及均方根等效噪声曝光量进行估算,得到了正视相机在 30° 太阳高角时的信噪比,取相对孔径分别为 $1/4$ 、 $1/5$ 和 $1/5.5$ 进行比较,其结果如表 1 所示(行积分时间为 0.708 ms)。

表 1 不同相对孔径时信噪比的估算

Tab.1 SNR estimation of different $F/\text{numbers}$

地面反射率 ρ	D/f'		
	1/4	1/5	1/5.5
0.5	180.797	143.129	129.377
0.4	155.966	123.263	111.280
0.3	127.841	100.800	90.882
0.2	94.956	74.615	67.145
0.1	55.509	42.594	38.213
0.05	29.721	23.124	20.697

总体指标要求当太阳高角为 30° ,地面反射率为 0.3 时,信噪比应大于 70 ,同时考虑到相机体积、质量和电子线路附加噪声的影响,光学系统的相对孔径为 $1/5$ 较为合理。

三线阵立体测绘相机光学系统参数确定如下:

焦距:正视 $f' = 650.00 \text{ mm}$

前、后视 $f' = 717.20 \text{ mm}$

相对孔径: $D/f' = 1/5$

视场:正视 $2\omega = 6.88^\circ$

前、后视 $2\omega = 6.23^\circ$

波段: $0.51 \sim 0.69 \mu\text{m}$

3.2 光学设计传递函数要求

在工程光学应用中,当光学系统视场角较小时,光学系统的传递函数 $\text{MTF}_{\text{optic}}$ 和由 CCD 接收器及电子线路决定的 MTF_{CCD} 近似于线性关系,所以相机的实验室静态传递函数可由 $\text{MTF}_{\text{optic}}$ 和

MTF_{CCD} 的乘积确定。同样, $\text{MTF}_{\text{optic}}$ 由光学设计的 $\text{MTF}_{\text{design}}$ 和加工装调引起的 $\text{MTF}_{\text{alignment}}$ 的乘积确定^[4],即 $\text{MTF}_{\text{optic}} = \text{MTF}_{\text{design}} \times \text{MTF}_{\text{alignment}}$,那么

$$\text{MTF}_{\text{static}} = \text{MTF}_{\text{design}} \times \text{MTF}_{\text{alignment}} \times \text{MTF}_{\text{CCD}},$$

其中,取 $\text{MTF}_{\text{alignment}} = 0.80$,所选 CCD 器件及电子线路的平均传递函数 $\text{MTF}_{\text{CCD}} = 0.50$,为了满足 $\text{MTF}_{\text{static}} \geq 0.2$ 的技术指标要求, $\text{MTF}_{\text{design}}$ 必须满足

$$\text{MTF}_{\text{design}} \geq 0.50.$$

所选 CCD 器件的像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m}$,其 Nyquist 频率为 77 lp/mm ,在这样高的频率下,相机静态传递函数要求 > 0.2 ,可见光学设计、加工、装调等难度均较大,加工装调后光学系统的传递函数要求 > 0.4 。

3.3 光学系统方案的比较

光学系统的结构型式是根据相机的焦距、相对孔径及视场角的要求确定的。三线阵立体测绘相机要求高成像质量的同时,还需权衡体积、布局 and 适应空间条件下的环境温度变化的影响。

有 3 种类型可供选择,即折反射式、全反射式和折射式。

3.3.1 折反射式

折反射中的施密特型式,可以做到大视场、高质量,但由平面反射镜所引起的长条形遮拦很严重,这样大的面遮拦比将严重损失能量和降低光学系统的传递函数,光学系统结构如图 2 所示。

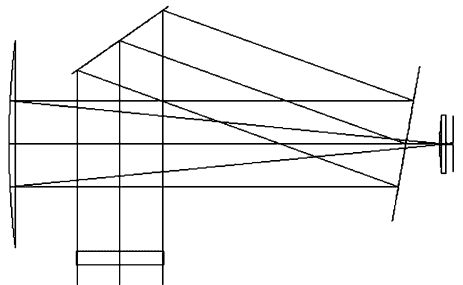


图 2 施密特折反射系统

Fig.2 Configuration diagram of Schmidt system

3.3.2 全反射式

如图 3 所示的全反射系统,可以满足较大视场角的要求,光学系统成像质量高,满足静态传函的要求,而且光学系统温度敏感度低^[5]。

但如果正视、前后视均采用三反结构,将使横

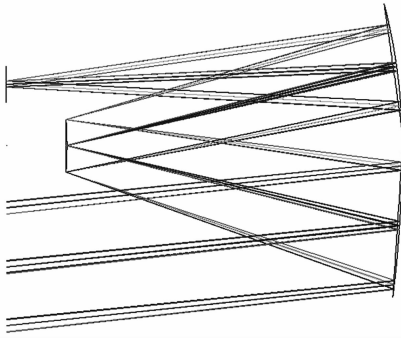


图 3 全反射光学系统

Fig. 3 Configuration diagram of TMA system

向尺寸增大,不利于结构布局,光机系统的稳定性不好保证。

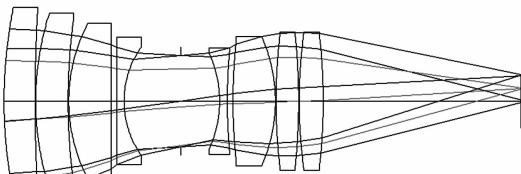
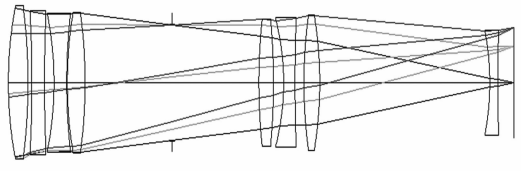
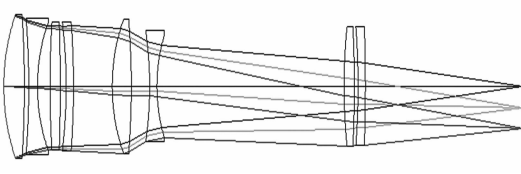
3.3.3 折射式

由于折射系统没有中心遮拦,加工、装调难度相对减小,虽然对温度和气压变化的适应性不如折反射和全反射式,但采用合适的结构型式和适当的温控措施,可以满足使用要求。

在折射式光学系统中,对可采用的型式进行了详细分析和比较,如表 2 所示。

表 2 不同型式的折射方案比较

Tab. 2 Different configuration forms for refractive systems

	结构型式	特点
对称型		<ul style="list-style-type: none"> a. 通光孔径适中 b. 光学筒长较短 c. 加工公差严 d. 非像方远心
匹兹瓦型		<ul style="list-style-type: none"> a. 通光孔径较大 b. 光学筒长较长 c. 加工公差较松 d. 非像方远心
亚对称型		<ul style="list-style-type: none"> a. 通光孔径较小 b. 光学筒长适中 c. 加工公差适中 d. 像方远心

匹兹瓦型光学系统各组的光焦度较小,具有良好的光学加工与装调工艺性,但光学筒长较长;对称型光学系统结构紧凑、环境适应性好,但各组的光焦度较大,不利于加工与装调。

3.4 光学系统设计

3.4.1 结构型式的确定

优化设计了一种亚对称型的光学系统结构,这种结构兼具匹兹瓦型与对称型的优点,并能够设计成像方远心光路,可满足测绘的精度要求^[6]。

前、后视相机的视场角小于正视相机,设计中减少一片透镜同样可以满足使用要求。正视相机光学系统结构如图 4 所示,前、后视相机光学系统如图 5 所示。

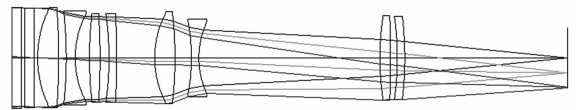


图 4 正视相机光学系统结构图

Fig. 4 Configuration diagram of optical system for straight-sight camera

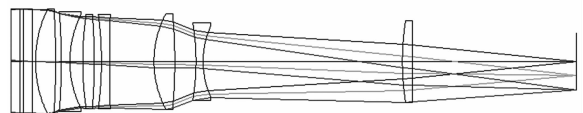


图 5 前、后视相机光学系统结构图

Fig. 5 Configuration diagram of optical system for forward-sight and backward-sight cameras

3.4.2 光学系统成像质量评价

表 3 为正视和前、后视光学系统的传递函数,图 6 为正视光学系统传递函数曲线,图 7 为前、后视光学系统的传递函数曲线,图 8 为正视相机光学系统的场曲和畸变曲线,图 9 为前、后视相机光学系统的场曲和畸变曲线。对于正视相机光学系统,畸变为 2×10^{-5} ;对于前、后视相机光学系统,畸变为 2.4×10^{-5} ,满足 $< 3 \times 10^{-4}$ 的指标要求。

表 3 正视和前、后视光学系统的传递函数

Tab.3 MTF values of each system of camera

	MTF ($f:77$ lp/mm)					
	0	0.5	0.71	0.85	1.0	平均
正视	0.624	0.619	0.617	0.617	0.589	0.613
前、后视	0.586	0.572	0.573	0.581	0.576	0.578

可见,正视和前、后视相机光学系统设计的传递函数均满足 $MTF_{design} > 0.50$ 的要求。

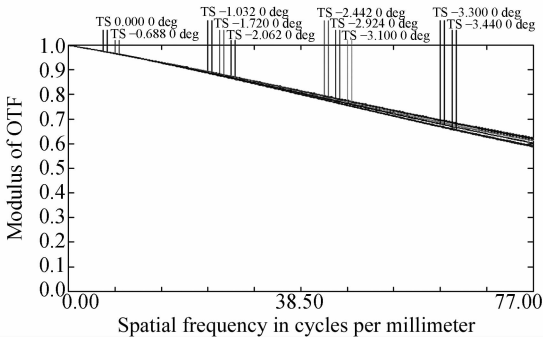


图 6 正视光学系统传递函数曲线

Fig. 6 MTF curves of optical system for straight-sight camera

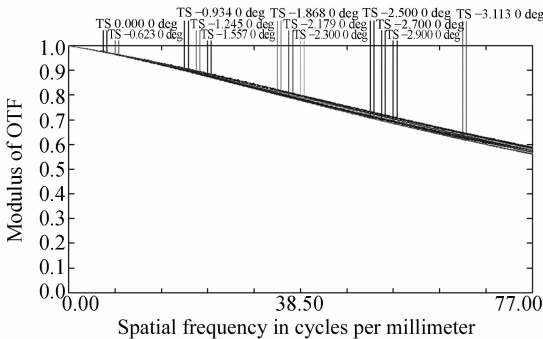


图 7 前、后视光学系统的传递函数曲线

Fig. 7 MTF curves of optical system for forward-sight and backward-sight cameras

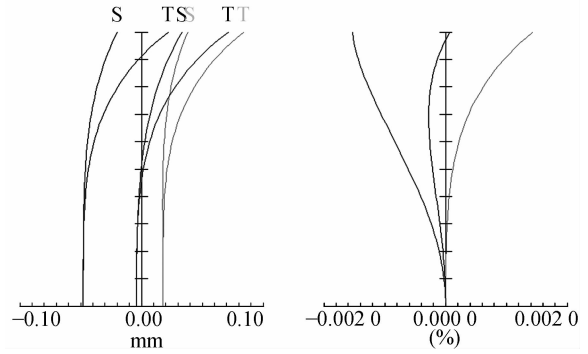


图 8 正视相机光学系统的场曲和畸变

Fig. 8 Image field curvature and distortion curves of optical system for straight-sight camera

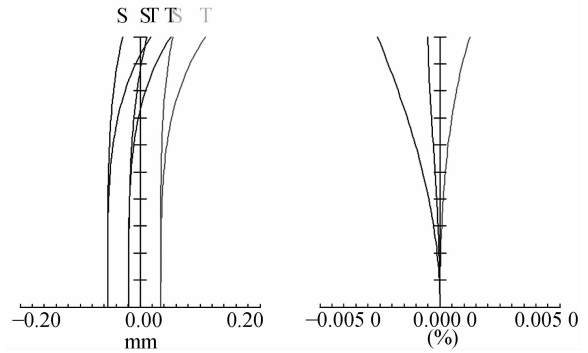


图 9 前、后视相机光学系统的场曲和畸变

Fig. 9 Image field curvature and distortion curves of optical system for forward-sight and backward-sight cameras

4 实测结果分析

各相机光学系统完成装调、注胶、振动后进行传递函数测量。采用 Optikos Corporation 的成像分析系统进行光学系统传递函数的测量,得到的实测结果如表 4 所示。图 10、图 11 和图 12 分别为正视、前视和后视相机光学系统轴上传递函数的测试曲线,由于轴上、轴外视场的传递函数比较一致,所以只给出轴上传递函数的测试曲线。

表 4 正视和前、后视相机传递函数实测结果

Tab.4 MTF tested results of each camera

	MTF ($f:77$ lp/mm)					
	0	0.5	0.71	0.85	1.0	平均
正视	0.463	0.449	0.465	0.432	0.447	0.451
前视	0.447	0.461	0.461	0.460	0.432	0.452
后视	0.488	0.452	0.459	0.443	0.444	0.457

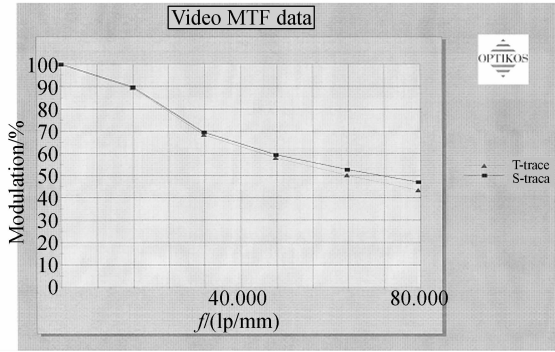


图 10 正视相机光学系统传递函数测试曲线

Fig. 10 MTF tested curves of optical system for straight-sight camera

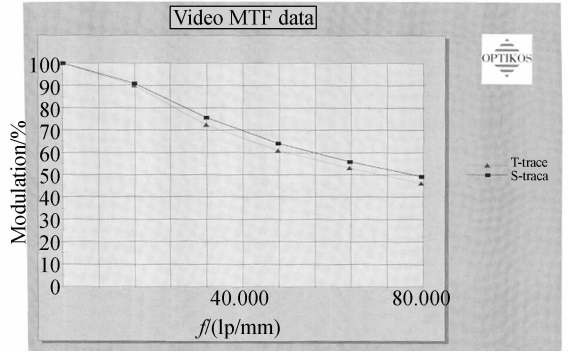


图 12 后视相机光学系统传递函数测试曲线

Fig. 12 MTF tested curves of optical system for backward-sight camera

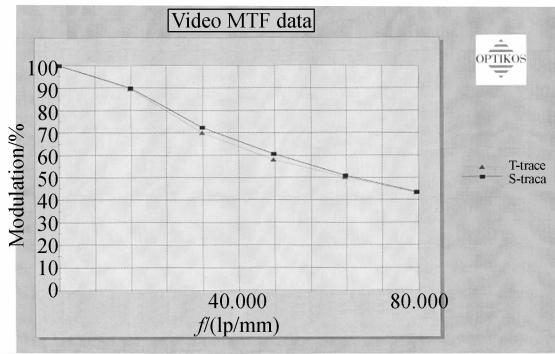


图 11 前视相机光学系统传递函数测试曲线

Fig. 11 MTF tested curves of optical system for forward-sight camera

5 结 论

通过对光学系统各种结构型式的比较和分析,设计了一种像方远心的亚对称光学系统。光学系统成像质量好。在 Nyquist 频率为 77 lp/mm 时,正视相机全视场的平均传递函数为 0.613,前、后视相机全视场的平均传递函数为 0.578。装调完成后对各相机光学系统传递函数进行了检测,正视和前、后视相机光学系统的全视场平均传递函数均在 0.451 以上,畸变均 $< 3 \times 10^{-4}$,满足测绘相机高成像质量的要求。

参考文献:

[1] 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.
WANG Z, ZHANG L P, LI ZH H. Design of focusing mechanism of space tridimensiona mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1051-1056. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 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)

[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] 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 C Y. Study on optical system of high resolu-

tion space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2165-2172. (in Chinese)

- [6] 胡莘,曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5):695-699. HU X, CAO X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images [J]. *Journal of Harbin institute of tech-*

nology., 2008, 40(5):695-699. (in Chinese)

- [7] WARREN J S. *Modern Optical Engineering: The Design of the Optical System* [M]. Second Edition. New York: McGraw-HILL, Inc., 1990.
- [8] FISCHER R E. *Optical System Design* [M]. New York: McGraw-HILL, Inc., 2000.

作者简介:



田铁印(1967—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作,研究方向为光学总体及光学设计。E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn



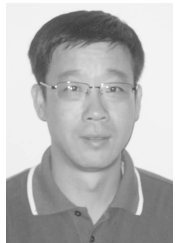
于淑琴(1969—),女,吉林长春人,高级工程师,主要从事光学遥感器的光机装调及其工艺技术的研究。E-mail: yushuqin@ciomp.ac.cn



谷凤安(1969—),男,吉林桦甸人,高级工程师,主要从事光学遥感器的光机装调及其工艺技术的研究。E-mail: gufengan@ciomp.ac.cn

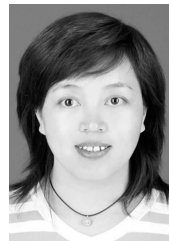


张立平(1957—),男,吉林长春人,研究员,主要从事航天遥感器的研制工作。E-mail: zhang_lp2005@163.com



吴国栋(1965—),男,辽宁阜新人,研究员,主要研究方向为光学遥感器像质评价及测绘相机的几何标定技术。E-mail: wuguodong586@163.com

通讯作者:



王红(1968—),女,吉林长春人,研究员,博士,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作,研究方向为光学设计。E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn