

文章编号:1004-4213(2010)02-0227-6

# 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计\*

王智<sup>1</sup>,张立平<sup>1</sup>,姚惠<sup>2</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

(2 长春奥普光电技术股份有限公司,长春 130033)

**摘要:**为了提高测绘相机的立体测绘定位准确度,设计了一种透射式像方远心光路的光学镜头,并阐述了基于可测性设计的单镜组以及整镜头的装调理念.本文设计的光学镜头传函为 0.45 (@77 lp/mm);地面分辨率为 5 m;畸变为 3/10 000.检测及试验结果表明,各参量能够满足用户提出的指标要求.

**关键词:**三线阵 CCD 相机;像方远心光路;传函;可测性设计

中图分类号:TP702

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103902.0227

## 0 引言

随着遥感和航天技术的发展,摄影测量领域已由传统框幅式相机发展为由传感器实时获取立体影像,且由传感器获取立体影像的方式日渐复杂,有单线阵 CCD 传感器绕飞行方向侧摆(如 SPOT)和三线阵 CCD(如 MOMS)的方式获取立体影像,以及同轨多角度获取立体像对(如 Ikonos).

三线阵立体测绘相机是星载对地摄影测量最有效的方法和手段,它是由具有独立镜头的三个线阵 CCD 相机组成,并且三个相机保持一定的位置关系.随着三线阵立体测绘相机分辨率和焦距的提高,对相机光学系统的设计、光学镜头的设计、加工制造准确度,同时也对单镜组和整个光学镜头的装调提出了更高的要求.本文设计了一种透射式像方远心光路的光学镜头,阐述了基于可测性设计的单镜组以及整镜头的装调理念.检测的结果表明,各项参量均能够满足用户的指标.

## 1 三线阵立体测绘相机工作原理

三线阵立体测绘相机的工作原理图如图 1.正视相机垂直对地,沿飞行方向向前倾斜的是前视相机,向后倾斜的是后视相机,前、后视相机均与正视相机有相同的交会角.

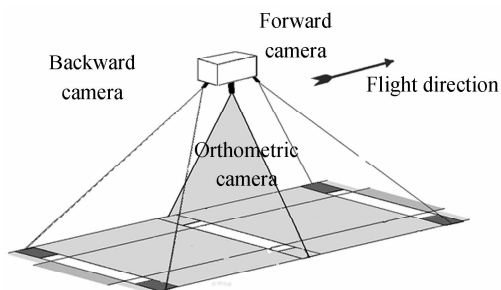


图 1 三线阵立体测绘相机工作原理  
Fig. 1 Operating principle of three-linear tridimensional mapping camera

设 A、B、C 分别是前视相机、正视相机和后视相机焦平面上的线阵 CCD 传感器,三个 CCD 阵列相互平行排列并且与卫星飞行方向垂直.当卫星在轨工作期间,每个 CCD 阵列以一个同步的周期  $N$  连续扫描地面而形成三条相互重叠的航带图像  $A_S$ 、 $B_S$ 、 $C_S$ ,推扫所获取的航带图像  $A_S$ 、 $B_S$ 、 $C_S$  是对同一个物体在不同时刻所成的不同视角的图像,从而可成物体的立体图像.

三线阵立体测绘相机的立体测绘原理如图 2.假设知道每一个扫描时刻  $N$  时三线阵立体测绘相机所摄数字影像的 6 个外方位元素 ( $X_N$ 、 $Y_N$ 、 $Z_N$ 、

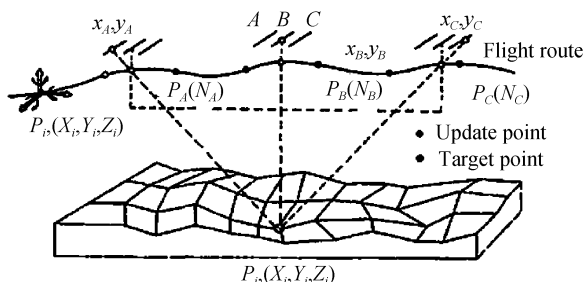


图 2 三线阵立体测绘相机摄影测量原理  
Fig. 2 Photogrammetric principle of three-linear tridimensional mapping camera

\* 中国科学院优秀博士学位论文和院长奖获得者科研启动专项资金资助

Tel:13844821046

Email:wz070611@126.com

收稿日期:2008-09-07

修回日期:2009-03-31

$\varphi_N, \omega_N, k_N$ ), (即摄影中心在地面或地心坐标系中的位置和姿态角), 同时知道三线阵立体测绘相机的内方位元素, 即相机的主距  $f$ , 主点位置  $(x_0, y_0)$  和交会角  $\alpha$ , 那么地面上任一物点  $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$  在三个不同时刻  $N_A, N_B, N_C$  在三条 CCD 阵列  $A, B, C$  上的像点坐标  $(x_A, y_A), (x_B, y_B)$  和  $(x_C, y_C)$  就可以完全确定了. 反之, 如果能够求出对应于  $P_i$  点的像点坐标  $(x_A, y_A), (x_B, y_B)$  和  $(x_C, y_C)$ , 则可以计算出  $P_i$  点的地面坐标  $(X_i, Y_i, Z_i)$ , 这就是三线阵立体测绘相机进行立体测绘的基本原理.

## 2 光学系统的设计与分析

### 2.1 光学系统参量的确定

三线阵立体测绘相机的光学系统技术指标见表1.

表1 三线阵立体测绘相机光学系统技术指标

Table 1 Technical index of optical lens of three-linear tridimensional mapping camera

Parameters	Technical index
Intersection angle	25°
Width of groundcover	≥60 km
Pixel resolution of ground	5 m
Orbit altitude	500 km
OTF	≥0.2(Nyquist Frequency)
Relative distortion	<0.03%
Total optical transmission	≥0.70(Full field)
Stray light of inhibiting ability	Stray light coefficient <5%

#### 2.1.1 焦距和视场

根据用户提出的相机光学系统的技术指标要求, 在确定所采用的 CCD 像元尺寸后, 便可根据它与地面分辨率和轨道高度的关系, 按式(1)计算出光学系统的焦距

$$f' = a \times H / \text{GSD} \quad (1)$$

相机线阵 CCD 选取像元尺寸  $6.5 \times 6.5 \mu\text{m}^2$ , 像元数为 12 000, 将数据带入式(1), 可得正视相机光学系统焦距为:  $f' = 0.0065 \times 500\,000 / 5 = 650.00 \text{ mm}$ ; 前、后视相机光学系统焦距为:  $f' = 650 / \cos 25^\circ = 717.196 \text{ mm}$ .

由靶面尺寸和光学系统焦距可计算出视场角

$$2\omega = 2\arctan(L/2f') \quad (2)$$

式中  $L$  为靶面尺寸,  $2L = 12\,000 \times 0.0065 =$

78 mm.

策划相机的视场角为:

正视相机

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

前、后视相机

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

#### 2.1.2 相对孔径

光学系统的相对孔径对信噪比起决定性作用, 根据系统技术指标要求, 估算相机在  $30^\circ$  太阳高角、地面反射率 0.3 时的信噪比, 同时考虑到相机体积、质量和电子线路附加噪音的影响, 光学系统的相对孔径确定为 1/5.

#### 2.1.3 传递函数

相机的实验室静态传递函数  $\text{MTF}_{\text{static}} = \text{MTF}_{\text{optics}} \times \text{MTF}_{\text{CCD}}$ , 而  $\text{MTF}_{\text{optics}} = \text{MTF}_{\text{design}} \times \text{MTF}_{\text{machine-ass}}$ , 所以  $\text{MTF}_{\text{static}} = \text{MTF}_{\text{design}} \times \text{MTF}_{\text{machine-ass}} \times \text{MTF}_{\text{CCD}}$ , 式中  $\text{MTF}_{\text{machine-ass}} = 0.89$ , 所选 CCD 器件的平均传函  $\text{MTF}_{\text{CCD}} = 0.50$ , 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:  $\text{MTF}_{\text{design}} \geq 0.45$ .

为了满足用户要求, 同时考虑满足空间环境的高像质、低畸变的要求, 我们设计的三线阵立体测绘相机光学系统结构形式如图 3(以正视镜头为例).



图3 相机光学系统结构

Fig. 3 Optical system of orthometric camera

### 2.2 光学系统分析

图 4~图 7 为以正视镜头为例进行分析所得的

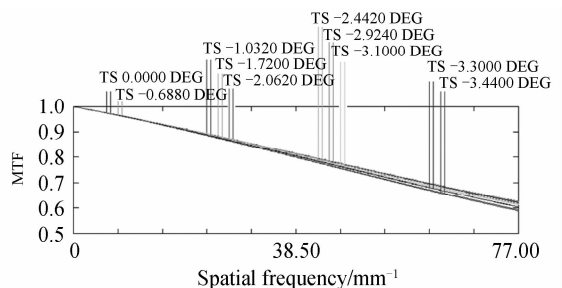
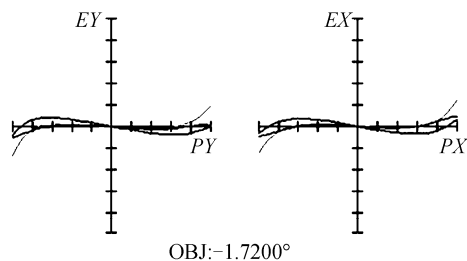
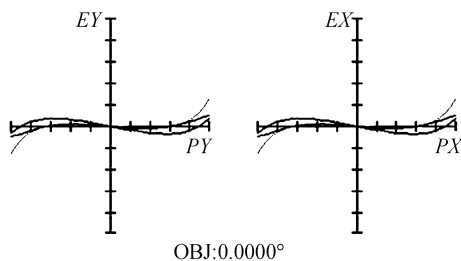


图4 光学系统的传递函数曲线

Fig. 4 MTF of the orthometric camera



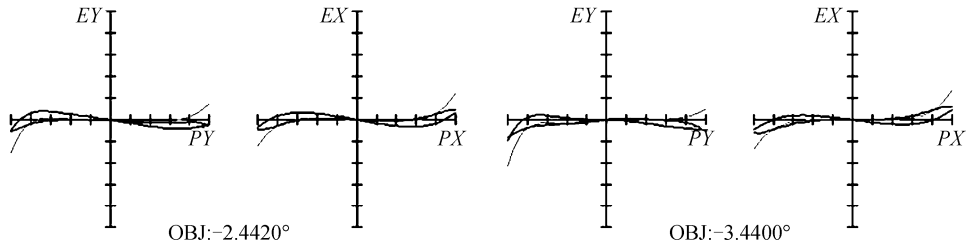


图5 相机光学系统各视场垂轴像差曲线

Fig. 5 Perpendicular aberration curves of camera optical systems

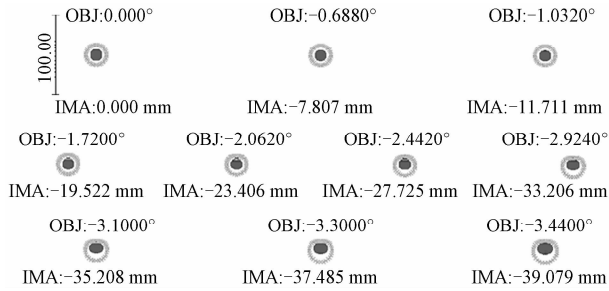


图6 相机光学系统各视场点列图

Fig. 6 Lattice chart of camera optical system

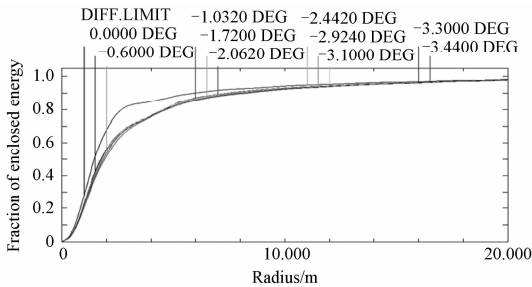


图7 相机光学系统能量集中度曲线

Fig. 7 Energy concentrative curve of orthometric camera optical system

实验结果,分析可见,正视相机光学系统设计的传递函数在各视场均满足  $MTF_{design} > 0.45$  的要求,正视相机光学系统的最大弥散斑半径为  $4.8 \mu m$ ,前、后视相机光学系统的最大弥散斑半径为  $5.0 \mu m$ ,成像质量接近衍射极限。

### 3 镜头结构设计

在确定光学透镜结构形式后,根据光学设计的数据,选择合适的材料和结构形式,设计出光学元件的载体(单镜组),组合装调后,构成整机镜头。

单镜组以及镜筒材料的选择要以其材料的线膨胀系数与透镜的线膨胀系数相接近为原则,以避免因温度变化影响成像质量及应力变化对透镜造成破坏,同时为了保证热控的易实施性,设计时,采用铸钛合金 ZTC4 作为机械结构的材料。

由于温度变化,光学镜片与镜座之间的间隙也会产生变化,在不影响成像质量的前提下,结构设计遵循温度间隙公式

$$\Delta X = D(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T \quad (3)$$

式中: $\Delta X$  为温度变化产生的间隙; $D$  为光学透镜直

径; $\alpha_1$  为光学透镜的线胀系数; $\alpha_2$  为支撑件的线胀系数; $\Delta T$  为温度变化值。

在镜头的设计中,光学镜片的最大直径为  $\Phi 146$  最小直径为  $\Phi 124$ ,当温度变化值为  $\pm 1.5^\circ$  时,由温度变化而产生的间隙分别为

$$\Delta X_1 = D_1(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T = 146(8.9 \times 10^{-6} / ^\circ C - 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ C) \times 3^\circ C = 0.613 \mu m$$

$$\Delta X_2 = D_2(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T = 124(8.9 \times 10^{-6} / ^\circ C - 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ C) \times 3^\circ C = 0.521 \mu m$$

由于透镜的尺寸及质量较大,发射时产生的冲击很大,所以透镜的轴向固定形式选取两种:对于凸透镜设计成透镜面与镜框接触处相切的结构(如图 8(a)),机械加工难度增大,为此,专门设计了修研镜框及压圈的球头研具;对于凹透镜我们设计成透镜非通光口径(平面)与镜框接触的平面接触形式(如图 8(b))。

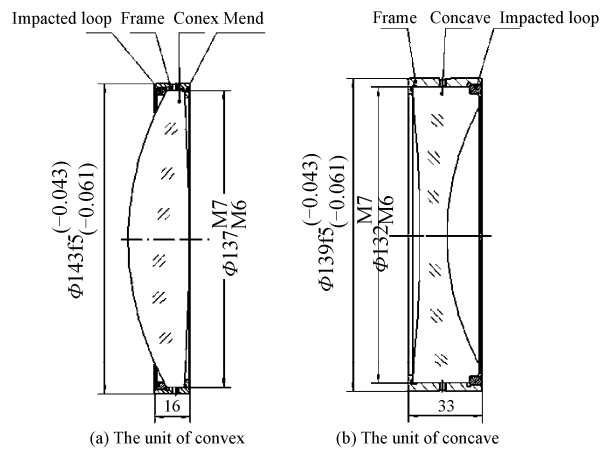


图8 单镜组结构设计图

Fig. 8 Structure of single lens group

三线阵立体测绘相机(以正视相机为例)的镜头部分分为遮光罩组件、镜头前组和镜头后组。遮光罩采用碳纤维复合材料,设计要求不遮拦相机视场,罩内设计有多层消杂光光阑,与镜头前镜筒采用紧定螺钉联接。为了保证各光学元件的同轴准确度和高准确度的轴向空气间隔,镜头的结构设计采取双层钛合金薄壳结构。镜头前、后镜筒的材料采用精密熔模铸造钛合金 ZTC4,零件整体外表面避免机械冷加工,镜筒内有多层消杂光光阑,镜筒外有交叉加强筋。正视相机光学镜头的结构设计如图 9。

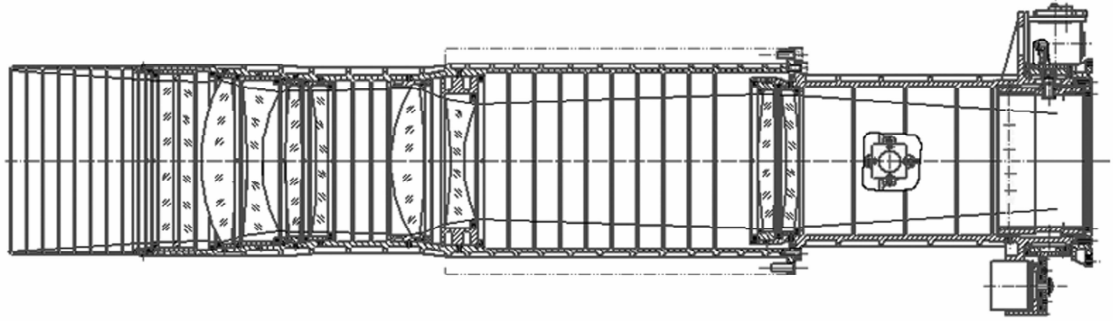


图 9 正视相机光学镜头结构设计  
Fig.9 Structural design drawing of orthographic camera lens

### 4 基于 DFT 的单镜组及整镜头装调

可检测性是衡量并确保产品功能质量的重要特征参量,运用 DFA/M (Design For Assembly/Design For Manufacturability)的思想,对立体测绘相机单镜组以及整镜头进行了基于可测性设计 (Design For Test, DFT)思想的装调,可大大提高装调质量及效率.

基于 DFT 的装调进程模型如图 10,按装调的技术要求,建立基于 UG 的装配模型,直接提供给基于 DFT 装调的专家系统分析后,根据分析结果,可能有两路:1)认为不合格,提出修改与建议,协助技术人员进行交互地重新装调,而后系统对于改进的装配做全面的 DFX(DFA/DFM)分析,直至系统认为合格,这时系统就最后输出检测工具进行检测,这样可使检测的次数减少,装配的效率更高,产品的合格率更高;2)直接认为装配是合格的,并直接输出至检测工具进行检测.

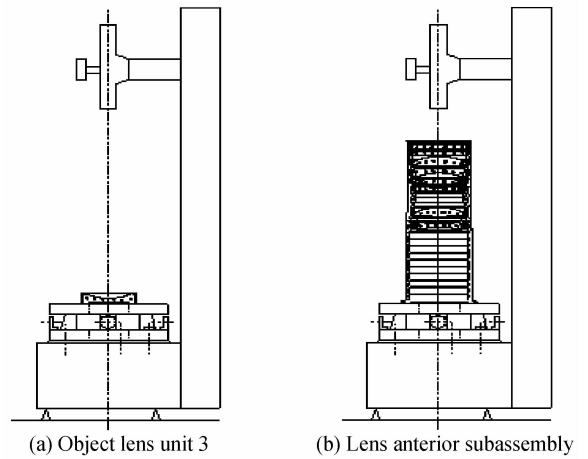


图 11 镜头装调  
Fig.11 Assembly of camera

整镜头的装调以正视相机前组为例,如图 11 (b).将正视相机前镜筒固定在定心仪转台上,调整转台使镜头内孔与转台基准轴同轴,镜筒上机械基准面与转台基准轴垂直,依次依序装入各单镜组,通过调整镜筒上周向顶丝以消除各单镜组径向偏心,通过修研各单镜组的修研端面(或隔圈)以消除其轴向面倾角偏心,保证各单镜组光轴与转台基准轴同轴,同时通过测量并修研各单镜组修研端面(或隔圈),保证各单镜组之间的光学间隔,最后注胶.整镜头的装调过程也是基于 DFT 的思想,整个过程以定心仪和干涉仪为检测工具进行实时监测,以保证高效高质量完成整镜头的装调.

上周向顶丝以消除各单镜组径向偏心,通过修研各单镜组的修研端面(或隔圈)以消除其轴向面倾角偏心,保证各单镜组光轴与转台基准轴同轴,同时通过测量并修研各单镜组修研端面(或隔圈),保证各单镜组之间的光学间隔,最后注胶.整镜头的装调过程也是基于 DFT 的思想,整个过程以定心仪和干涉仪为检测工具进行实时监测,以保证高效高质量完成整镜头的装调.

### 5 立体测绘相机光学镜头的检测

正视相机镜头的检测结果见表 2.

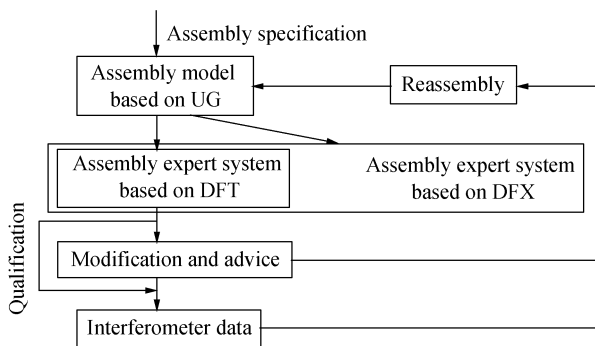


图 10 基于 DFT 的装调进程模型  
Fig.10 Assembly process model based on DFT

在进行单镜组装调时,以正视相机物镜组 3 为例,如图 11(a).将正视相机物镜组 3 的镜框固定在定心仪转台上,调整转台使镜框外圆与转台基准轴同轴,镜框的定位端面与转台基准轴垂直,带胶装入物镜并进行定心调整,保证物镜光轴与转台基准轴达到一定同轴度,在保证其同轴度不变的情况下压紧压圈,干胶过程中用干涉仪实时监测物镜两球面形准确度不变.

表 2 正视相机镜头检验结果  
Table 2 Test result of envisage camera lens

Number	Test items	Technical index	Test result	Test tool
1	System wave aberrations ( $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ )	The whole-field average is better than $\lambda/10$ (RMS) (Reference)	$\lambda/9$ (RMS)	Interferometer(P-V; $\lambda/10$ ) Standard plane mirror;(P-V; $\lambda/8$ )
2	MTF(77 lp/mm)	Whole field average MTF $\geq 0.45$ (S,T)	0.452	OFT tester(on axis 0.02, off axis 0.05)Installed by installer of lens
3	FOV	$2\omega \geq 6.88^\circ$	$6.88^\circ$	Theodolite(0.5")
4	Aperture	$D/f=1/5 \pm 1\%$	$D=131.0\ \text{mm}, D/f=1/5$	Measuring microscope(0.1 mm)
5	Transmittance	$\tau \geq 70\%$ (0.51~0.69 $\mu\text{m}$ )	74.6%	Spectra transmission tester(1%)
6	Miscellaneous coefficient	$< 5\%$	4.9%	Miscellaneous coefficient tester(1%)
7	Focal length	$f=650.000\ \text{mm} \pm 1\%$	649.885 3 mm	Website(0.001 mm); Turntable (0.5") Installed by installer of support system adjust
8	Distortion	$\leq 0.03\%$	The maximum absolute distortion of the whole field; 1.32 $\mu\text{m}$ , The maximum relative distortion of the whole field; 0.009 3%	Website(0.001 mm); Turntable (0.5") Installed by installer of lens support system adjust

## 6 结论

三线阵立体测绘相机的光学镜头是实现立体测绘工作的关键部件. 根据用户提出的光学系统的技术指标, 结合所选用的成像器件、地面分辨率、轨道高度, 设计了准像方远心光路的光学系统, 同时综合考虑相机材料的选用、工作环境、力学环境、热实施等因素, 对光学镜头的结构进行了最优设计, 同时在基于 DFT 的单镜组和整镜头的装调思想的指导下, 保证了相机镜头的装调质量及周期. 由相机光学镜头的检测数据表示, 本文设计的光学镜头达到了用户提出的各项指标要求.

### 参考文献

- [1] WANG Ren-xiang, WANG Jian-rong, WANG Xin-yi, et al. Satellite photogrammetry character of LMCCD camera[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, **29**(4): 10-12.  
王任享, 王建荣, 王新义, 等. LMCCD 相机卫星摄影测量的特性[J]. *测绘科学*, 2004, **29**(4): 10-12.
- [2] HU Xin. Photogrammetric issues in design of three-line-array camera[J]. *Mapping Institute Transaction of Chinese People's Liberation Army*, **19**(1): 41-45.
- 胡莘. 三线阵 CCD 相机设计中摄影测量问题[J]. *解放军测绘研究所学报*, **19**(1): 41-45.
- [3] TAO Jia-sheng, WANG Shi-tao. Analysis on large-scale space three-linear array camera precision sensitive factors [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 89-91.  
陶家生, 王世涛. 大型航天三线阵立体测绘相机准确度敏感因素的分析[J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 89-91.
- [4] EBNER H, OHLHOF T, TANG T. Photogrammetric restitution of Mars'94 three-line scanner imagery[C]. *SPIE*, 1993, **1943**: 19-32.
- [5] CHANG Li-ying, YANG Jian-feng. A new plane array ccd space three-dimensional photographic system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1165-1168.  
常凌颖, 杨建峰. 一种新型面阵 CCD 航天立体摄影测量光学系统[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1165-1168.
- [6] HAO Yun-cai, YANG Bing-xin. Image quality of CCD camera, push-broom image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(7): 639-644.  
郝云彩, 杨秉新. 航天线阵 CCD 相机推扫成像过程的象质研究[J]. *光子学报*, 1998, **27**(7): 639-644.

## Design on Optical Lens of Three-linear Tridimensional Mapping Camera

WANG Zhi<sup>1</sup>, ZHANG Li-ping<sup>1</sup>, YAO Hui<sup>2</sup>

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

(2 Changchun UP Optotech Co., Ltd, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to improve the positioning accuracy of mapping system, a design on optical lens of transmission semi-telecentric beam path in image space is expounded, and assembly method based on DFT (Design For Test) of single lens suit and whole optical lens are expounded. The results show that the proposed MTF of optical lens is 0.45 (@77 lp/mm), the ground resolution power is 5m, and the distortion is 3/10 000. The test results indicate that each parameter can satisfy user's qualification.

**Key words:** Three-linear CCD camera; Telecentric beam path in image space; MTF; DFT



**WANG Zhi** was born in 1978, and received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (CIOMP) in 2006. Now he is an associate professor, and his research interests focus on the development of space tridimensional mapping camera.