

# 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计

常凌颖<sup>1,2</sup> 赵葆常<sup>1</sup> 杨建峰<sup>1</sup> 汶德胜<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 为使嫦娥二号卫星 CCD 立体相机在 100 km 高度的圆轨上能够获取地元分辨率为 7 m 的图像, 设计了一种两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统。介绍了两线阵立体测绘相机的工作原理。根据卫星总体的指标要求, 对光学系统的主要参数进行了详细计算, 确定系统的焦距为 144.4 mm, 视场角为 42°, 相对孔径为  $F/9$ , 光谱范围为 450~520 nm。光学系统采用 6 组 7 片型消畸变复杂化的双高斯结构形式, 在 50 lp/mm 奈奎斯特空间频率下平均调制传递函数为 0.67。给出了嫦娥二号卫星 CCD 立体相机在 100 km 高度的首轨图像和极区图像, 图像清晰、层次丰富, 表明该光学系统能满足任务要求。

**关键词** 光学设计; CCD 相机; 两线阵; 时间延迟积分 CCD

**中图分类号** TH761.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0816001

## Optical System Design of a Two-Linear Array Stereoscopic Mapping CCD Camera

Chang Lingying<sup>1,2</sup> Zhao Baochang<sup>1</sup> Yang Jianfeng<sup>1</sup> Wen Desheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to obtain the image of 7 m resolution with the Chang'E-2 CCD stereoscopic camera on the 100-km-altitude circular orbit, a two-linear array CCD camera stereoscopic mapping optical system is designed. The principle of two-linear array stereo mapping camera is described. According to the satellite requirements, the main parameters of the optical system are calculated detailedly. The focal length of the system is 144.4 mm, the view angle is 42°, the relative aperture is  $F/9$ , and the spectral range is 450~520 nm. The optical system adopts six groups of seven pieces type complicated double Gaussian structure with distortion elimination, for which the average modulation transfer function is 0.67 at 50 lp/mm Nyquist spatial frequency. The 100 km first rail images and polar region image of Chang'E-2 satellite CCD stereoscopic camera are obtained. The images are clear and rich of detail information, demonstrating the effectiveness of the optical system.

**Key words** optical design; CCD camera; two-linear array; time delay integration CCD

**OCIS codes** 110.6880; 220.3620; 220.4830

## 1 引言

科学家利用由相机获得的数字图像研究月球地质学构造, 绘制地质学纲要图, 进而研究月球的起源、演化、月面历史等。另外, 对月球的研究还可以为研究太阳系的起源与演化提供具有重要价值的信息<sup>[1]</sup>。所有这些研究的基础和可信度是靠月球立体

照片来证明的。

嫦娥二号卫星 CCD 立体相机的科学目标与嫦娥一号卫星 CCD 立体相机相同, 即获取全月三维立体图像。嫦娥一号卫星搭载的 CCD 立体相机采用一台大面阵 CCD 器件加广角摄影物镜, 达到普通三线阵 CCD 相机的作用, 目前已获取了齐全、清晰的

收稿日期: 2011-02-28; 收到修改稿日期: 2011-04-02

基金项目: 国家重大科技专项工程资助课题。

作者简介: 常凌颖(1977—), 女, 博士研究生, 主要从事光学设计、空间光学等方面的研究。E-mail: lychang@opt.ac.cn

导师简介: 汶德胜(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间相机方面的研究。E-mail: ven@opt.ac.cn

全月面立体图像<sup>[2,3]</sup>。为了提供更为精细的全月三维地形地貌图,以便对月球进行更详细的地质学研究,嫦娥二号卫星 CCD 立体相机的地元分辨率要求比嫦娥一号 CCD 立体相机大幅提高。为使嫦娥二号卫星 CCD 立体相机在 100 km 高度的月球圆轨上能够获取地元分辨率 7 m 的图像,设计了一种两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统。

## 2 两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( $X, Y, Z, \omega, \varphi, \kappa$ ),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  $\alpha$ ,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<sup>[4]</sup>。

嫦娥二号卫星 CCD 立体相机是两线阵立体测绘,采用的是一个较长焦距的广角准远心光学系统,在它的焦平面上平行配置两个 6144 pixel 的时间延迟积分(TDI)CCD,长度方向垂直于卫星飞行方向,卫星推扫获得两视角二维平面图像后合成立体图像,其原理见图 1。

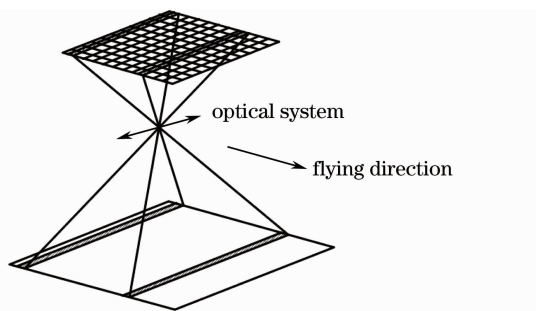


图 1 CCD 相机工作原理

Fig. 1 Working principle of the CCD camera

要获取物体(目标)的立体影像,实际上只要有对同一物体两个不同视角的平面图像即可。在嫦娥一号卫星 CCD 立体相机中使用了三个视角,即前视、正视和后视,其中正视图像用于制作正射照片,而前视与后视图像用于合成立体图像。由于数据量的限制,决定在嫦娥二号卫星 CCD 立体相机中采用前视与后视二视角方案获取全月立体影像,这样可以使数据量、功耗都减小 1/3,电控箱的尺寸也可以相应减小,两视角的配置为前视  $-8^\circ$ ,后视  $17.2^\circ$ ,基

高比 0.451,亦即两视轴夹角为  $25.2^\circ$ 。

## 3 光学系统主要参数的确定

### 3.1 计算依据

作为探月卫星的有效载荷,该立体相机光学系统参数的选择必须同探月卫星的总体系统参数实现严格匹配。根据总体要求<sup>[5]</sup>,选择如下参数作为确定相机光学系统参数的依据。轨道高度  $H=100$  km;月表像元空间分辨率  $D_s=7$  m;月表成像宽度  $L=43$  km;TDI CCD 器件像元尺寸  $10.1 \mu\text{m} \times 10.1 \mu\text{m}$ 。

### 3.2 光谱范围

由于月球基本是一个灰体,所以选择光学系统的工作波长范围为  $0.45 \sim 0.52 \mu\text{m}$ ,并且在该波段范围内 CCD 器件具有最高的对比度传递函数(CTF)。

### 3.3 最高空间频率

空间频率是空间周期函数在单位长度上的周数,最高空间频率  $N_{\text{max}}$ 是指对信号抽样无失真的最低频率,按此频率抽样的信号可以无失真地恢复。对于本系统来说,由于采用的 CCD 像元尺寸为  $10.1 \mu\text{m} \times 10.1 \mu\text{m}$ ,因此  $N_{\text{max}}=1/(2 \times 0.0101)=49.5 \approx 50(\text{lp/mm})$ 。

### 3.4 光学系统参数的确定

#### 3.4.1 月表像元空间分辨率 $D_s$ 的计算

因为要求月表成像宽度  $L=43$  km,而所选 CCD 像元数为 6144,所以月表像元空间分辨率  $D_s$ (正视、星下点)为

$$D_s = \frac{43 \text{ km}}{6144} = 6.998 \text{ m} \approx 7 \text{ m}.$$

#### 3.4.2 焦距计算

光学系统焦距  $f'$ 可表示为

$$\frac{H}{f'} = \frac{D_s}{\delta x},$$

式中  $H$  为轨道高度,  $D_s=7$  m;  $\delta x$  为 CCD 像元尺寸,  $\delta x=1.01 \times 10^{-5}$  m,有

$$f' = \frac{H \cdot \delta x}{D_s} = \frac{10^5 \times 1.01 \times 10^{-5} \text{ m}}{7} = 0.14429 \text{ m} \approx 144.3 \text{ mm}.$$

#### 3.4.3 视场角计算

根据轨道高度  $H=100$  km、月表成像宽度  $L=43$  km,计算<sup>[5]</sup>得到横轨方向(垂直于飞行方向)的视场角为  $\theta_{\text{up}\perp}=12.134^\circ$ ,它的像高为  $\eta' = 31.0272$  mm。同时根据基高比要求,计算沿轨方向的视场角  $\theta_{\text{up}\parallel}$ 。图 2 为两线阵 CCD 在焦平面上的

配置图。

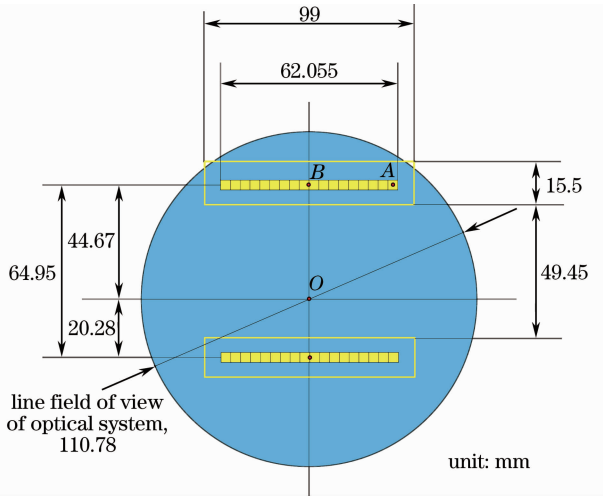


图2 焦平面配置图

Fig. 2 Diagram of focal plane configuration

根据前视与后视的基高比为 0.45 及前视  $-8^\circ$ 、后视  $17.2^\circ$  的要求,在像面上  $OB$ (图 2)为

$$OB = f' \times \tan 17.2^\circ = 44.6678 \text{ mm},$$

所以  $OA$  为

$$OA = \sqrt{OB^2 + \eta'^2} = 54.387 \text{ mm}.$$

由此可计算对角线半视场角  $\theta_{up}$  为

$$\arctan \theta_{up} = \frac{54.387}{144.3} = 0.3769,$$

$$\theta_{up} = 20.65^\circ.$$

为留有装配余量,光学系统按  $2\theta_{up} = 42^\circ$  设计。基高比与轨道高度无关。

#### 3.4.4 相对孔径的确定

一般光学系统相对孔径( $F$ 数)的选择主要考虑两个因素:像面照度(能量)以及衍射极限调制传递函数(MTF)。对于嫦娥二号卫星 CCD 立体相机而言,由于使用 TDI CCD,可以多级积分保证充足的能量,所以相对孔径的选择主要考虑 MTF 值,而图像清晰度决定于 MTF 与信噪比(SNR)之乘积,并且与线阵 CCD 相比,TDI CCD 的 SNR 将提高  $\sqrt{N}$  倍( $N$ 为级数),若  $N=16$ ,则 TDI CCD 的 SNR 比线阵 CCD 高 4 倍。根据光学设计软件程序计算,当奈奎斯特空间频率为 50 lp/mm 时,光学系统选择相对孔径为  $F/9$  时的衍射极限为 0.71,这样相对孔径轴上的点很容易做到衍射极限,轴外略有降低,再考虑加工装配误差及电子学系统的 MTF,能够达到全系统实际 MTF 值大于 0.2 的要求。

此外,在嫦娥二号卫星 CCD 立体相机中采用大  $F$  数(即小相对孔径)可以带来如下两方面的好处:1)减小了透镜口径,从而使光机系统实现小型化和

轻量化;2)对焦面离焦不敏感,在航天环境下,由于冲击、振动、温度变化等因素,焦平面变化是很难完全避免的,对于大相对孔径光学系统而言,图像清晰度对焦面变化十分敏感,而小相对孔径的光学系统情况则好得多。

## 4 光学系统设计分析

由以上的方案原理介绍及具体参数计算,可以确定相机光学系统的主要光学参数为  $f' = 144.4 \text{ mm}$ ,  $2\theta_{up} = 42^\circ$ ,相对孔径为  $F/9$ ,光谱适应范围为  $0.45 \sim 0.52 \mu\text{m}$ 。

CCD 立体相机的光学系统结构如图 3 所示,CCD 立体相机的三维模型如图 4 所示。

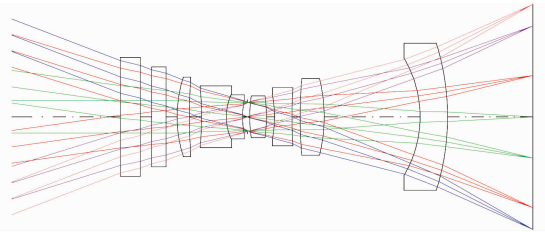


图3 光学系统结构

Fig. 3 Structure of the optical system

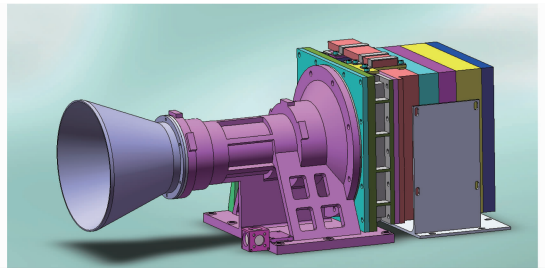


图4 CCD 立体相机的三维模型图

Fig. 4 3D model of CCD stereoscopic camera

CCD 立体相机采用的是一个较长焦距、小相对孔径、大视场的光学系统,应用折射式光学系统较为简单合理。如果没有其他约束条件,这样的系统是比较容易设计的。但在设计要求中,如下 4 条约束使设计变得比较困难:1)符合上星用的光学原材料非常有限,所以在光学系统设计时可供选择的材料受到限制;2)后工作距要求,从结构设计出发,需为 CCD 芯片的安装、加固、调整留有一定的空间尺寸,因此要求后工作距不小于 10 mm;3)在采用 CCD 为接收器的光学系统中,与 CCD 相机相对的一面,也就是 CCD 立体相机的最后一面的弯向对最终质量有较大影响,其原因是 CCD 敏感面有较强的反射率,如果最后一面的弯向不合适,就会出现一个很明显的晕斑,因此在设计中要求 CCD 立体相机最后一

面的曲率半径为负值,也就是说以凸面朝向 CCD;  
4)焦平面的特殊配置对光学系统  $8^\circ$  和  $17.2^\circ$  的 MTF 有较高要求。

综合以上因素,选择双高斯物镜作为光组基本结构形式<sup>[6]</sup>,然后对其进行复杂化设计。

在初始结构的基础上,用 CODE-V 软件进行自动设计,必要时进行人工干预,分析像差的变化,设置合适的变量及优化参数,以使设计结果朝希望的方向变化。

初始结构物镜中的高级像差产生的原因是光线在该透镜表面的入射过大。为了减小光线在透镜表面的入射角,可以用两个透镜来替代原来的一个透镜,这样在总的光焦度不变的条件下,使用两个透镜,透镜表面的半径增大,就有可能减少产生的高级像差。另外,透镜增多以后,每个折射面上的偏角减小,总的像差也就减小了,这样一方面容易校正,同时校正以后剩余的高级像差也必然小。系统的高级像差减小,也就有可能提高成像质量或光学特性。

上星用的光学系统应尽量减少胶合面,所以在

后组中将双高斯物镜中的胶合组拆开,变成空气间隔较小的分离曲面(两曲面半径近似相等)。对于胶合透镜,前后胶合面采用不等折射率的正常胶合,以进一步改善球差和像散以及轴外球差。复杂化后的结构仍然基本保持对称性,因而使垂轴像差能较好地得到校正。

### 5 设计结果

在通常的光学系统中,轴外点 MTF 相对于轴上点都会有不同程度的下降,有的甚至下降很多,在本设计中,从实现应用目标出发,使轴外点 MTF 几乎不下降。此外无论是对前视的  $8^\circ \sim 14.4^\circ$  与后视的  $17.2^\circ \sim 21^\circ$ ,其 MTF 均值相差不到 0.02;子午与弧矢均值的差值也都不到 0.015。均控制在 2% 之内,从光学设计角度来看,应该是一个最优化的设计<sup>[7,8]</sup>。

对光学系统的设计结果进行了分析评价,光学系统的像差和 MTF 如图 5 及表 1 所示。

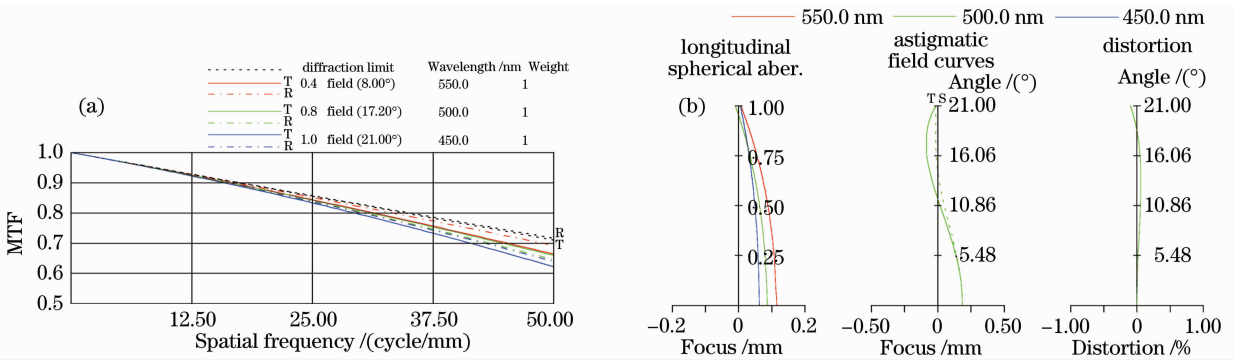


图 5 光学系统 MTF (a) 和像差曲线 (b)

Fig. 5 MTF (a) and aberration curve (b) of the optical system

表 1 50 lp/mm 时前、后视的设计 MTF 值

Table 1 Design MTF values for forward and back sights

Viewing field	Angle / (°)	MTF		
		Radial	Tangential	Average
Forward sight	$8^\circ$	0.6401	0.6744	0.679
	$10^\circ$	0.6787	0.7098	
	$12^\circ$	0.6906	0.6969	
	$14.4^\circ$	0.6847	0.6579	
Back sight	$17.2^\circ$	0.6689	0.6479	0.663
	$18.2^\circ$	0.6613	0.6706	
	$19.20^\circ$	0.6526	0.6924	
	$21^\circ$	0.6412	0.6675	

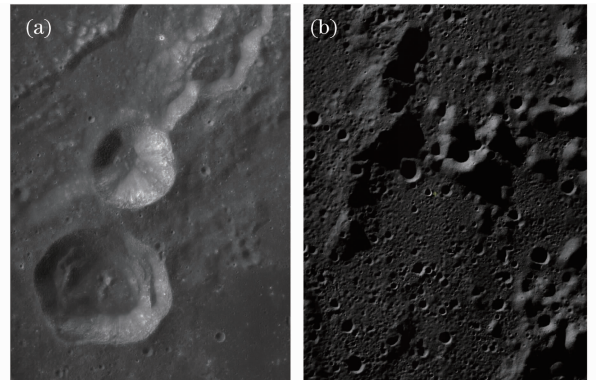


图 6 嫦娥二号立体相机 100 km 首轨图像(a)和首轨极区图像(b)

Fig. 6 (a) 100 km first rail image (local) and (b) polar region image of Chang'E-2 stereo camera

## 6 在轨图像

嫦娥二号卫星 CCD 立体相机首次开机后,在 100 km 高度的圆轨上进行试成像,经确认工程参数全部正常后,首先用 32 级、 $1\times$ 电子学增益获取了南北纬  $75^\circ$  间的图像,图像清晰、层次丰富;然后用 64 级、 $1\times$ 电子学增益及 32 级、 $2\times$ 电子学增益获得了目视观感效果极佳的极区图像,如图 6 所示。

## 7 结 论

为了减少数据量,方便卫星传输速率,嫦娥二号卫星 CCD 立体相机采用了两线阵 CCD 推扫成像。光学系统采用 6 组 7 片消畸变复杂化的双高斯结构形式,成像质量好。在奈奎斯特空间频率为 50 lp/mm 时,前、后视相机全视场的平均调制传递函数为 0.67,畸变  $\pm 0.1\%$ 。从设计研制的嫦娥二号卫星 CCD 立体相机获取的月面照片来看,图像清晰、层次丰富,圆满完成了预期的科学应用目标。

### 参 考 文 献

- 1 The Xi'an Branch of the Chinese Academy of Sciences. Magic Chang'E-2 Camera[OL]. [http://www.xab.ac.cn/gzdt/gzdt/201010/t20101027\\_2995439.html](http://www.xab.ac.cn/gzdt/gzdt/201010/t20101027_2995439.html), October 27, 2010  
中国科学院西安分院. 神奇的嫦娥二号相机[OL]. [http://www.xab.ac.cn/gzdt/gzdt/201010/t20101027\\_2995439.html](http://www.xab.ac.cn/gzdt/gzdt/201010/t20101027_2995439.html), October 27, 2010

- 2 Zhao Baochang, Yang Jianfeng, 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  
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
- 3 Chang Lingying. A new plane array CCD space three-dimensional photographic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1165~1168  
常凌颖. 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
- 4 Wang Zhi, Zhang Liping, 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
- 5 Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng *et al.*. Chang'E-2 lunar satellite CCD stereo camera design and validation [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, **20**(1): 7~14  
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): 7~14
- 6 Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Science Press, 1983  
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- 7 Li Yuyao, Tang Yong, Lin Zhaoheng *et al.*. Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3183~3185  
李玉瑶, 唐勇, 林昭珩等. 基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3183~3185
- 8 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679  
陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2674~2679