

doi: 10.3788/gzxb20144304.0422004

# 对焦式着陆探测相机光学系统设计

贺应红, 杨建峰, 马小龙, 吕娟, 薛彬, 李婷, 焦莹

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710072)

**摘要:**根据深空探测任务中对着陆器相机要求宽探测范围的需求,设计了一种对焦结构可见/近红外相机光学系统.系统采用准远心光学结构,由前固定组和后对焦组组成,前固定组属于一个无焦系统,后对焦组放于固定组后,当对远近目标成像时,移动对焦组可在像面上获得清晰成像,并且不同距离的目标对焦过程中,系统的焦距不发生改变.实验测得系统焦距为 50 mm,  $F$  数为 8, 谱段范围为 400~1 000 nm, 能实现探测范围从 0.8 m 到无穷远目标的清晰成像;成像质量高,光学传递函数接近衍射极限,畸变优于 1%.对光学系统的公差进行了分析,表明该光学系统公差在现有加工水平下均能保证良好的成像性能,具有工程可实现性.研究表明该光学系统可应用于月球、火星、小行星等深空探测中着陆器的中等焦距的立体测绘相机.

**关键词:**深空探测;光学设计;对焦系统;宽光谱;测绘相机

中图分类号:O435

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)04-0422004-6

## Optical System Design of Lander Camera with Focusing Type

HE Ying-hong, YANG Jian-feng, MA Xiao-long, LÜ Juan, XUE Bin, LI Ting, JIAO Ying  
(Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** A optical system of lander optical payload was designed for the requirement of focusing on objects. A novel focusing type was made that the optical system could keep fixed focal length during focusing. An approaching telecentric optical structure is designed, the optical system was made up of front fixing lens unit and rear focusing lens unit. The front fixing lens is a kind of afocal optical system. The rear focusing lens is at the back of fixing lens unit. The optical can image objects from 0.8 m to infinity in focus by moving rear focusing lens unit. The optical system with spectral range from 400 to 1 000 nm, fixed focal length of 50 mm and  $F$  number of 8 can focus on objects located within the range of 0.8 meter to infinity. At last, The modulation transfer function of the optical system can reach to diffraction limit, and distortion is less 1%. The image quality can meet the requirement to the optical system. By the analysis of optical system tolerance, the optical system can keep good imaging quality after fabrication. The optical system can be used to explore moon, mars and asteroids.

**Key words:** Deep space exploration; Optical design; Focusing system; Wide spectrum range; Mapping camera

**OCIS Codes:** 220.0220; 080.3620; 120.3620; 120.4820

## 0 引言

在深空着陆探测任务中,光学相机作为最为直观的遥感设备,以及近距离观测特性,对完成地形地貌的探测具有重要的作用.纵观国内外着陆探测相机,光学系统多采用定焦结构,主要考虑因素是简化系统结构

和避免使用运动部件.随着航天探测技术的进一步发展,对分辨率的要求有了进一步提高,要求光学相机的探测范围通常从近几米到无穷远,而定焦系统只能获得较小景深目标的高质量成像,离焦使用会大大降低成像质量.因此,光学系统需要对焦功能来实现大景深目标的清晰成像.美国的一系列火星探测任务<sup>[1-5]</sup>及

基金项目:国家重大专项嫦娥三号工程项目资助

第一作者:贺应红(1977-),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为空间光学及成像光学系统设计. Email: heyingshong@opt.ac.cn

收稿日期:2013-07-12;录用日期:2013-10-09

<http://www.photon.ac.cn>

2011年发射的“好奇号”漫游车上装载的桅杆相机均采用了对焦系统,而2003年发射的“勇气号”和“机遇号”全景相机采用的是定焦系统.随着我国航天事业的发展,航天材料、工艺都取得了较大的进步,运动部件的可靠性有很大的提高,因此,在未来的航天应用上,研制可对焦相机具有重要的意义和可实现性.

本文根据深空探测中着陆器相机的应用要求,设计了一种可对焦的可见、近红外谱段宽谱段光学系统,其谱段范围从400~1 000 nm,探测范围从0.8 m到无穷远目标.光学系统特点是在对焦过程中,光学系统的焦距不发生改变,可作为测绘使用,并可应用于月球、火星、小行星等深空探测的着陆器及巡视器上的地形相机.

## 1 光学系统设计

### 1.1 设计指标要求

文献[6-8]研究了光学系统在月球着陆器中探测相机、着陆区远近月表形貌、地质构造调查月表物质成份和资源勘察中的使用.相机要求对着陆区进行水平 $\pm 180^\circ$ 、俯仰 $\pm 60^\circ$ 旋转拍照,成像范围包括0.8 m到无穷远目标成清晰像,相机光谱范围为400~1 000 nm,并进行多光谱成像,空间角分辨率 $\alpha$ 优于0.15 mrad.

光学系统指标需要根据所选择的探测器规格参量来确定,而探测器种类、规格参量则根据任务电子学指标决定.设计中选择某厂家生产的CMOS探测器,像元数 $n_1 \times n_2$ 为 $2\ 352 \times 1\ 728$ ,像元尺寸 $d$ 为 $7.4\ \mu\text{m}$ .因此,光学系统的焦距可由式(1)确定

$$d/f \leq \alpha \quad (1)$$

计算得知,光学系统的焦距值为50 mm,视场角为

$$2\omega = \arctan \frac{\sqrt{n_1^2 + n_2^2} \cdot d}{2 \times 1000 \cdot f} = 24.4^\circ \quad (2)$$

光学系统 $F$ 数的选择与探测目标的能量以及相机要求的极限传函有关. $F$ 数越小,能量越足,传递函数值越高,但相应透镜的口径变大,相机的重量、体积增大.参考同类型相机,如美国机遇号火星探测用全景相机 $F$ 数( $F20$ )以及好奇号 $F$ 数( $F8$ )方案,设计光学系统的 $F$ 数选定为8.对于不同太阳高度角下探测目标能量强弱变化,在相机电子学方案中增加了多档曝光时间功能,因此,可以保证相机的探测能力.

光学系统的设计指标为:光谱波段范围:400~1 000 nm;焦距:50 mm;相对孔径:1:8;视场角(对角线): $24.4^\circ$ ;成像范围:从0.8 m到无穷远成清晰像.

另外,为了减轻相机重量,多光谱相机的分光方案不采用常用的滤光轮形式,拟采用像面附近加滤光片分光模式<sup>[9]</sup>.滤光片对入射角有一定要求,入射角太大,会引起波长漂移,因此光学系统结构要求像方准远心.

### 1.2 光学系统对焦结构原理

为了满足任务需求中探测范围宽的特点,光学相机必须具备对焦功能,而实现对焦功能的光学系统常用的有内调焦和外调焦<sup>[10-11]</sup>结构.

图1为相机外调焦结构原理图.其特点是根据目标物体的远近,光学镜头整体前后移动,使目标在像面上清晰成像,整个过程焦距不发生变化且像平面位置不动.为了在像平面获得清晰的成像,像平面不动,而光学镜头整体从位置1向前移动到位置2.

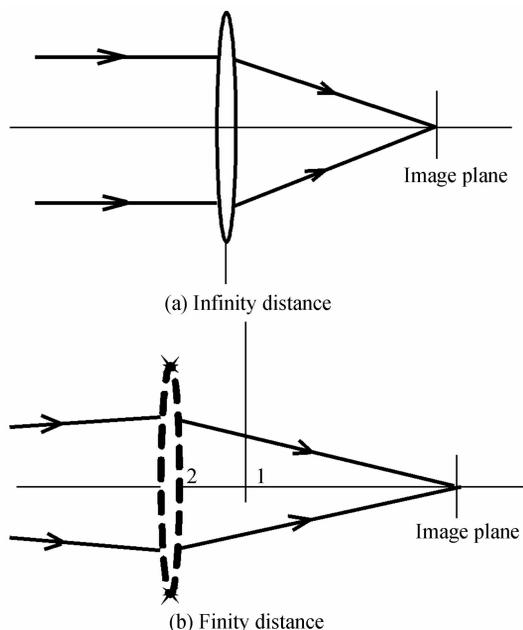


图1 不同距离目标成像外调焦结构  
Fig. 1 External focus layout on different distance object

图2为相机内调焦结构原理.结构特点是根据不同远近距离的目标,前后移动部分光学组件,使目标在

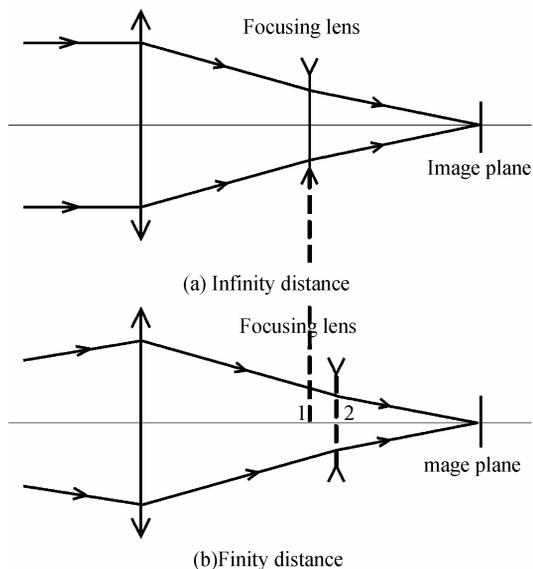


图2 不同距离目标成像内调焦结构  
Fig. 2 Internal focus layout on different distance object

像面上清晰成像,整个过程保持像平面不动,焦距有一定量的变化.为了在像平面上获得清晰的成像,保持像平面不动,移动对焦镜组从位置1向后移动到位置2.

两种结构形式相比有不同的优缺点.外调焦结构设计简单,对焦过程中焦距不发生改变,但缺点是移动部件重量大,将会增加驱动电机的功耗和影响对焦准确度.内调焦结构优点在于移动部件少,重量轻,可以快速的移动,并且减小了电机驱动功耗,缺点是设计更复杂,在对焦组移动过程中焦距会发生变化.

航天相机在设计过程中除了满足成像性能要求外,系统轻量化、可靠性也是非常重要,因此内调焦结构形式在航天相机的成像光学系统中占有优势.但是由于内调焦过程中焦距会发生一些变化,因此在地形地貌测量用的光学系统中使用带来不便.本文设计了一种对焦光学系统结构,系统由固定组和对焦组两部分组成,固定组属于一个无焦系统,当对远近目标成像时,移动对焦组可在像面上获得清晰的成像,其原理如图3.

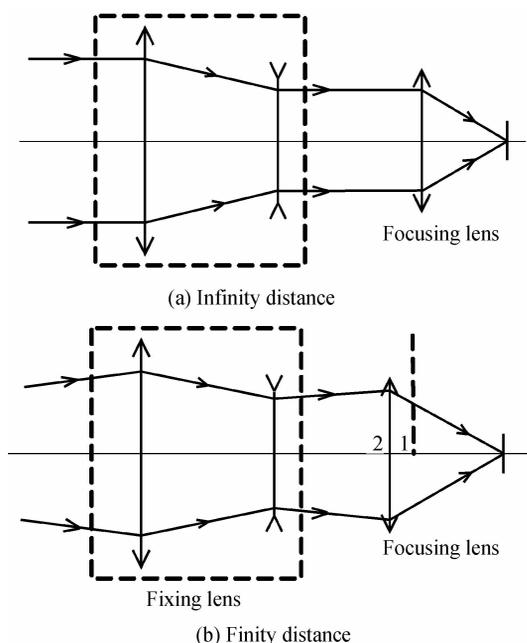


图3 光学系统对焦结构原理图

Fig.3 Principle of Focusing structure on difference distance object

如图3中前固定组是一个无焦光学系统,假设前固定组的放大倍率为 $\Gamma$ ,对焦组的焦距为 $f_1$ ,总系统焦距为

$$f = \Gamma \cdot f_1 \quad (3)$$

当对焦组前后移动时,从式(3)可以看出,系统的焦距不会发生变化.因此,这种结构形式通过移动部分镜组既可以满足远近目标清晰成像的要求,还可以满足航天相机测量用焦距不能发生改变的要求.

### 1.3 光学系统结构设计

根据图3对焦结构原理,在光学结构设计中先要进

行前固定组压缩比的确定和后对焦组的光焦度分配.

无焦前固定组压缩比的选择主要考虑两点.第一是结构轻量化考虑.在航天相机中,由于资源紧张,设计中尽量使系统短、镜片少而减轻重量,因此在保证有足够后工作距离的基础上要尽量减小整个系统的长度.由式(3)可以看出,随着压缩比的增加,后对焦组的焦距减小,因此后组的结构长度会减小,但过量增大压缩比,会使前固定组复杂化.从这个角度来看,适当地增大压缩比,减小后对焦组焦距会有益于减小光学系统的长度,减轻重量.第二是从成像质量考虑.提高压缩比、减小后对焦组焦距的同时会增大后对焦组的视场,那么后对焦组在移动过程中,光线高度会发生比较大的变化,不同距离的目标轴外视场成像质量不能同时兼顾.综合这两点考虑,确定无焦系统的压缩比为1.67,后对焦组焦距为30.1.

宽波段复消色差<sup>[12-15]</sup>也是设计过程中的重点.由于技术指标的光谱波段范围很宽(400~1 000 nm),涵盖了近紫外、可见以及近红外,并且在短波附近,光学透镜的折射率变化明显,光学系统的二级光谱会很大,因此,在选择玻璃材料的时候,选择特种玻璃材料TF3和FK51,可以大大减小二级光谱和色差.设计中第二、第四片透镜采用TF3材料,第一、第三片透镜采用ZK10,主要完成光学系统的二级光谱的校正,第五片透镜材料采用FK51,其高的阿贝数有利于校正系统的色差.

通过优化设计,0.8 m、1.5 m、2.5 m以及无穷远目标成像所对应的光学系统如图4.

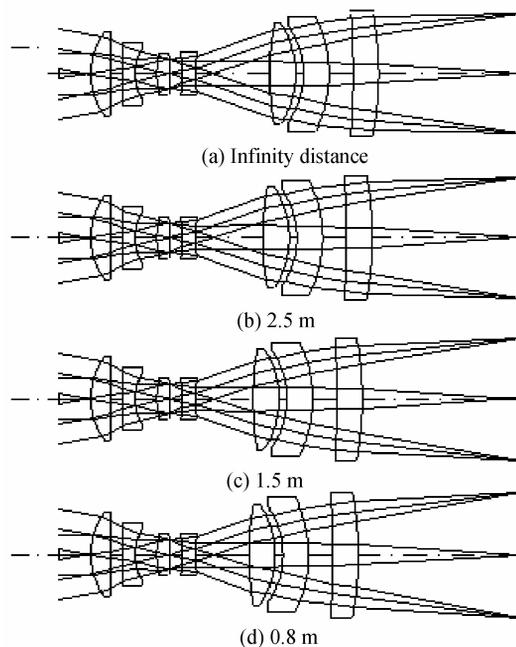


图4 光学结构

Fig.4 The optical system layout of imaging on different distance object

图4中所有光学零件均为球面,总系统长度为67.28 mm,光学系统在四个位置的焦距值均为50 mm,结构参量如表1.

表1 光学系统结构参量  
Table 1 The parameter of lens

Number	Radius/mm	Space/mm	Material
1	10.359	3	ZK10
2	62.432	1.9	
3	261.425	2	TF3
	7.387	3.2	
5	10.928	2	ZK10
6	-57.702	0.18	
Stop	Infinity	1.9	
7	-18.464	2	TF3
8	16.707	d1	
9	50.067	5.1	FK51
10	-13.948	0.4	
11	50.067	5.1	FK51
12	-13.948	0.4	
13	-12.998	4.6	ZF2
14	-19.583	1.9	
Image plane	-172.613	5.1	ZF6

表2列出了四个不同目标位置对应的 $d_1$ 、 $d_2$ 值, $d_1$ 为后对焦组第一片透镜与固定组最后一块透镜的距离, $d_2$ 为后对焦组最后一块透镜与焦平面的距离.

表2 透镜组移动间隔  
Table 2 The distance of moving lens

Object distance/mm	Space/mm	
	$d_1$	$d_2$
Infinity	10.336	23.664
2.5	9.327	24.673
1.5	8.652	25.348
0.8	7.166	26.834

当目标从无穷远变化到0.8 m,后对焦组相对前固定组移动的距离如图5,后对焦组移动距离为3.17 mm.

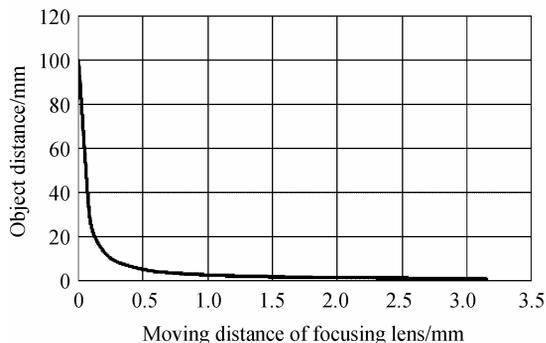


图5 目标在不同位置对应对焦组移动的距离

Fig. 5 The moving distance of focusing unit to different distance object

## 2 光学系统成像质量评价

对目标在无穷远、2.5 m、1.5 m以及0.8 m四个

位置的光学系统调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)进行仿真分析,如图6.

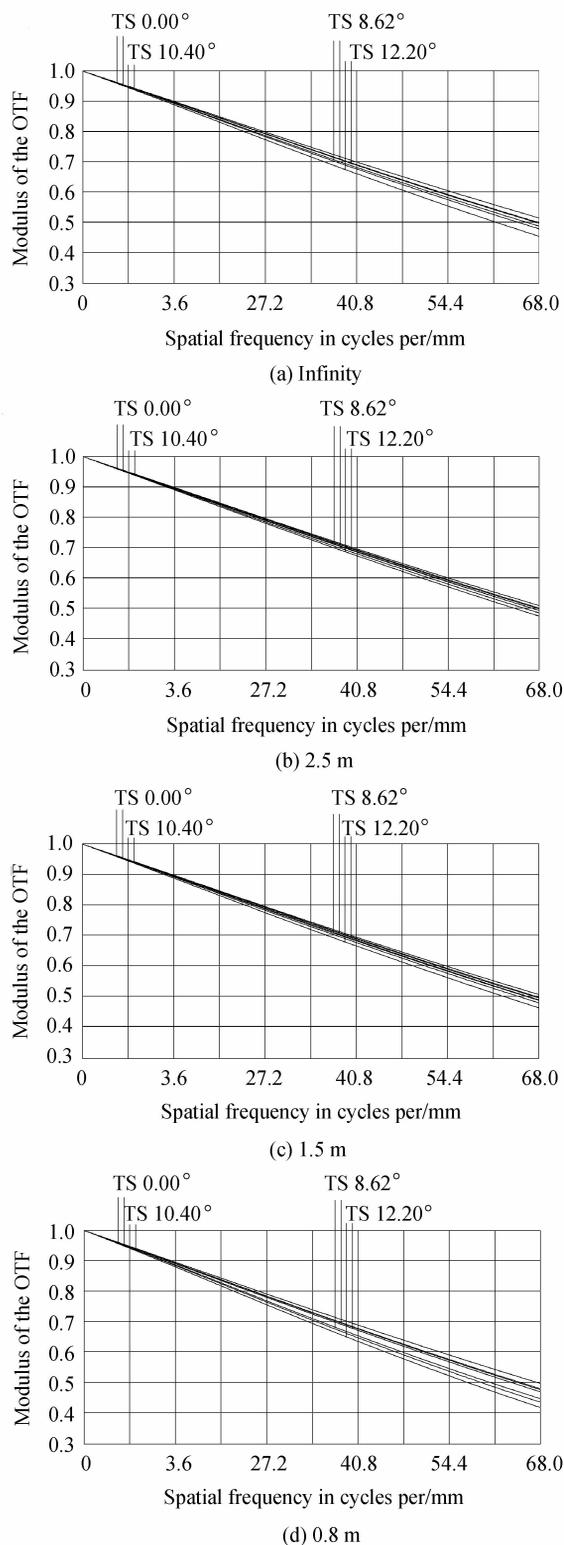


图6 不同距离目标光学系统传递函数

Fig. 6 MTF of lens for different distance object

因此,对无穷远目标到0.8 m的近距离目标,在奈奎斯特频率68 cycles/mm处,视场平均传递函数达到0.5,能满足成像质量要求.

对目标在无穷远、2.5 m、1.5 m以及0.8 m四个

位置的光学系统的相对畸变进行分析,如图7,畸变小

于8‰,满足相机测量使用的要求.

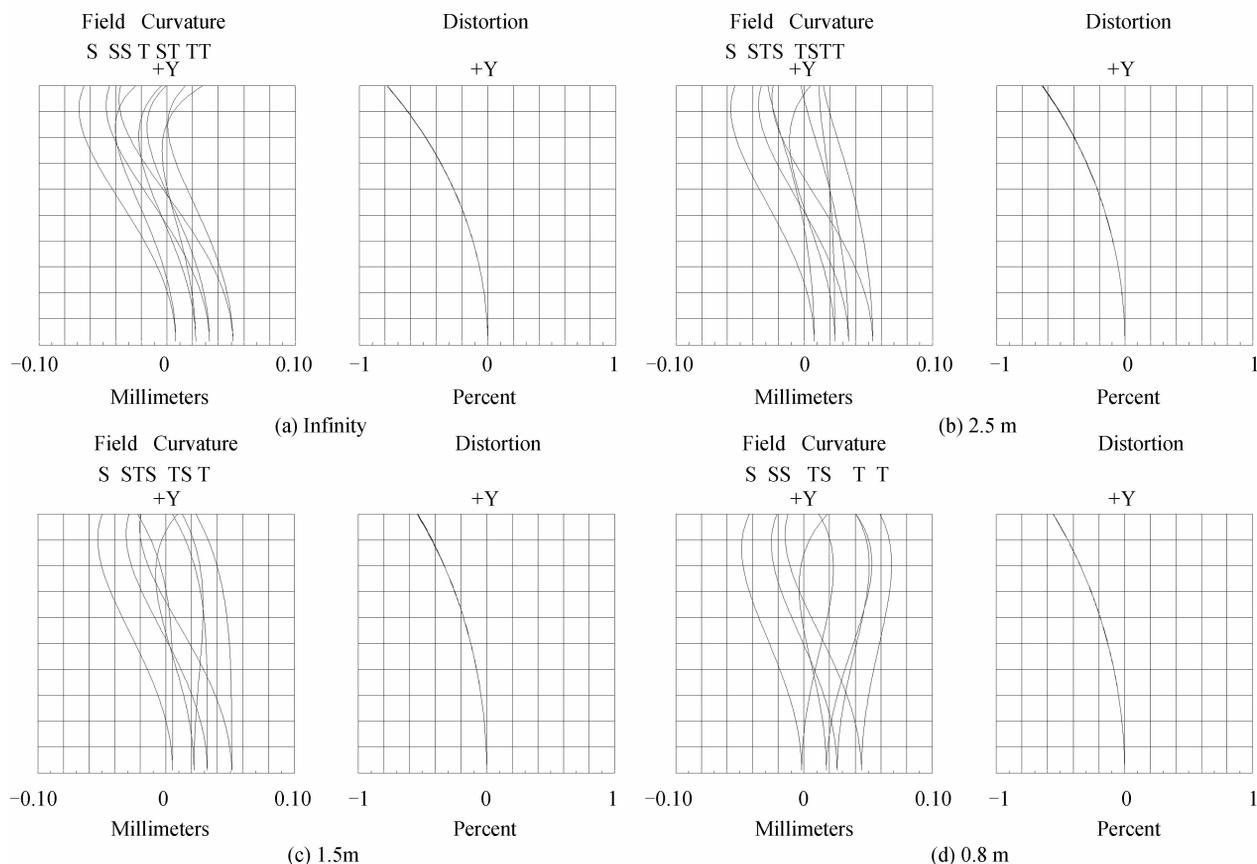


图7 不同距离目标光学系统畸变曲线

Fig. 7 Distortion and filed curve at different distance object

### 3 公差分析

为了衡量该光学系统的工程实现性,对所有透镜的材料、制造、装配公差进行了容限计算.公差参量包括透镜的半径、厚度、空气间隙、透镜倾角、透镜偏心以及材料折射率和阿贝数等.参照目前的透镜加工经验以及工艺,各参量的公差预定值如表3.

表3 各参量公差预定值

Table 3 The preliminary tolerance of all construction parameter

Tolerance parameter	Tolerance value
Surface error/ $N$	1
Surface irregular/ $\Delta N$	0.2
Lens thickness error/mm	0.02
Surface decentration/mm	0.015
Surface tilt/ $^{\circ}$	0.02
Lens space error/mm	0.02
Lens decentration/mm	0.015
Lens tilt/ $^{\circ}$	0.02
Refraction index error	0.000 5
Abbe number error	0.5%

利用ZEMAX软件,按照表3的公差值对设计结果进行公差分析.镜头综合性能的最佳度量方法和预

测性能的最可靠方法是借助蒙特卡罗分析法.计算了50个蒙特卡罗样本,每一个蒙特卡罗样本实际上就是一个模拟制造的系统.每个单独参量都按照标准概率分布在其最小值和最大值之间变化.采用MTF作为系统的评价指标,其分析结果如表4.

表4 光学系统装配后传递函数预估

Table 4 MTF estimation of the optical system with fabrication error

Object distance/mm	MTF		
	Average	90% lens	50% lens
Infinity	0.446	0.38	0.452
2.5	0.456	0.407	0.461
1.5	0.455	0.41	0.455
0.8	0.438	0.396	0.448

根据表4,在公差允许范围内,装配完成后的90%镜头的光学传递函数在0.4左右,能满足要求.

### 4 结论

本文根据深空探测任务中对着陆器相机要求宽探测范围的需求,设计了一种对焦型可见及近红外谱段的多光谱相机光学系统,其谱段范围为400~1 000 nm,能实现探测范围从0.8 m到无穷远目标的清晰成像.系统设计中采用对焦结构形式,在对不同距

离的目标对焦过程中,光学系统的焦距不发生改变;采用准远心光学结构,可适用于焦平面前滤光片分色的多光谱方案.仿真表明,该光学系统的成像质量达到了衍射极限,畸变优于1%,可应用于月球、火星、小行星等深空着陆探测的地形相机.

## 参考文献

- [1] SMITH P H. Imager for Mars Pathfinder experiment (IMP) a multispectral stereo imaging system[C]. SPIE, 1998, **3295**: 4-9.
- [2] SMITH G H, HAGEROTT E E C, SCHERR L M, *et al.* Optical designs for the Mars '03 rover cameras[C]. SPIE, 2001, **4441**: 118-131.
- [3] GHAEMI F. Design and fabrication of lenses for the color science cameras aboard the Mars Science Laboratory rover[J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(10): 1-15.
- [4] REYNOLDS R O, SMITH P H, CROWE D G, *et al.* Design of a stereo multispectral CCD camera for Mars pathfinder[C]. SPIE, 1995, **2542**: 197-206.
- [5] EISENMAN A, LIEBE C C, MAIMONE M W, *et al.* Mars exploration rover engineering cameras[C]. SPIE, 2001, **4540**: 288-297.
- [6] ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, HE Ying-hong, *et al.* Lunar exploration optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 461-467.  
赵葆常, 杨建峰, 贺应红, 等. 探月光学[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 461-467.
- [7] OUYANG Zhi-yuan, LI Chun-lai, ZOU Yong-liao, *et al.* The scientific object of the first phase project of Chinese lunar exploration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2005, **14**(1): 1-5.  
欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 我国月球探测一期工程的科学目标[J]. 航天器工程, 2005, **14**(1): 1-5.
- [8] OUYANG Zhi-yuan. Effect of lunar exploration for the development of science and technology [J]. *Spacecraft Engineering*, 2007, **16**(6): 5-8.  
欧阳自远. 月球探测对推动科学技术发展的作用[J]. 航天器工程, 2007, **16**(6): 5-8.
- [9] PINETA P, CERRONIB P, JOSSETC J. The advanced Moon micro-imager experiment (AMIE) on SMART-1: Scientific goals and expected results[J]. *Planetary and Space Science*, 2005, **53**: 1309-1318.
- [10] LI Xiao-yan, ZHONG Bo-liang. Optical design of telephoto lens with inner focusing[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(4): 299-301.  
李晓艳, 钟伯亮. 内调焦望远镜的光学设计[J]. 光学技术, 2002, **28**(4): 299-301.
- [11] LI Kai-duan, ZHAO Yu-liang, LI Ying-jie, *et al.* Study on automatic focusing technique based on planar array CCD for aerial camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(5): 22-24.  
李开端, 赵育良, 李英杰, 等. 面阵 CCD 航空相机的自动对焦技术研究[J]. 光电工程, 2002, **29**(5): 22-24.
- [12] LIU Ying-qi, LONG Fu-nian. Optical design of apochromatic objective of wide spectral and long focal [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 419-425.  
刘莹奇, 龙夫年. 宽光谱长焦距物镜的复消色差设计[J]. 光学技术, 2009, **35**(3): 419-425.
- [13] LI Yu-yao, TANG Yong, LIN Zhao-heng, *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.
- [14] CHEN Li-wu, YANG Jian-feng, HONG Qi-hua, *et al.* Wide bands long focal refracting lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1123-1126.  
陈立武, 杨建峰, 洪庆华, 等. 宽谱段折射式长焦光学镜头[J]. 光子学报, 2004, **33**(9): 1123-1126.
- [15] CHEN Li-wu, ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, *et al.* Analysis on increment of index of glass and increment of secondary spectrum of the wide bands FT lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1355-1358.  
陈立武, 赵葆常, 杨建峰等. 折射率、色散变化量与宽谱段傅氏镜二级光谱变化量的分析[J]. 光子学报, 2005, **34**(9): 1355-1358.