doi:10.3788/gzxb20154401.0122001

用于深空探测的宽谱段大视场小型光学系统设计

孟庆宇，董吉洪，曲洪丰，王维，曹智睿
（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，长春 130033）

摘　要：设计了一种宽谱段、大视场、轻小型成像光学系统. 系统焦距为 35 mm，相对孔径为 1∶7.5，工作谱段为 0.4～0.9 μm，全视场为 $2\omega=60°$，采用复杂化双高斯结构，透镜面形均采用球面设计，实现系统总长 115 mm，在 70 lp/mm 处，最低光学传递函数大于 0.45. 利用负畸变法、像差渐晕法改善广角系统像面照度均匀性，使像面边缘视场照度达到中心视场的 80%. 像面照度不均匀性为 8%，系统热光学性能良好，在 0～40℃范围内均有较好的像质，满足深空探测需求.

关键词：光学设计；遥感；空间光学；光学系统；光学遥感器
中图分类号：V476.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004-4213(2015)01-0122001-6

Light Optical System Design with Wide Spectral Band, Large Field of View for Deep Space Exploration

MENG Qing-yu, DONG Ji-hong, QU Hong-feng, WANG Wei, CAO Zhi-rui
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: A light optical system with wide bands, large field of view and lightweight was designed. The focal length is 35 mm, *F*-number is 7.5, working wavelength range is 400～900 nm, and a view angle is 60°. A complex double-Gauss construction was applied in the designed system, and spherical surfaces were used in all lens, so that the total length could be 115 mm and minimum modulation transfer function could be greater than 0.45 at 70 lp/mm. Barrel distortion and aberration vignetting were used to improve illuminance distribution homogeneity, marking the margin field illuminance reach 80% and the image plane illumination uniformity be 8%. This optical system has a good thermo-optical properties, can achieve fine image quality at the working temperature range of 0～40 Celsius, which is suitable for the deep space exploration.

Key words: Optical design; Remote sensing; Space optics; Optical system; Optical sensors
OCIS Codes: 220.3620; 080.2740; 080.3620; 280.4788

0　引言

自 1958 年美国发射第一个月球探测器先驱者 0 号开始，随着航天技术的不断进步与成熟，人类已陆续开展了 200 多次深空探测活动，深空探测已成为航天领域的重要发展方向之一[1]. 光学遥感器作为重要的科学仪器，在深空探测中扮演了重要角色. 欧空局火星快车卫星（Mars Express）、美国火星轨道探测器（Mars Reconnaissance Orbiter，MRO）分别搭载了轨道相机 CTX、MARCI、HRSC 完成对火星观测[2]；日本“月神号”搭载了地形相机、高清电视摄像机，完成对月高分辨率立体成像[3]；我国深空探测起步较晚，但卓有成绩，先后于 2007 年、2010 年和 2013 年发射了嫦娥一号、二号、三号卫星，搭载了立体成像相机等科学仪器，完成了绕月探测[4-6]，并传回了清晰的月表图像. 印度也于 2013 年年末发射了火星探测卫星，搭载光学遥感器进行空间探测. 用于深空探测的空间光学遥感器逐渐成为研究热点.

基金项目：国家自然科学基金（No. 60507003）资助
第一作者：孟庆宇（1986－），男，助理研究员，硕士，主要研究方向为空间光学、遥感器光学系统设计. Email：mengqy@ciomp.ac.cn
收稿日期：2014-02-24；录用日期：2014-05-19

HRSC[2]为一台视场角 $2\omega=40°$的 10 通道推扫型线阵 CCD 相机，其中 1 个通道为超分辨率成像通道，其它 9 个通道同时进行高分辨率成像，在这 9 个通道中有 4 个通道在 4 个不同谱段成像，用于合成彩色图像，另 5 个通道以不同的视场角成像完成三维立体测绘，嫦娥 1 号，嫦娥 2 号卫星均搭载了立体相机，其中 1 号相机光学系统采用像方远心光路，工作谱段为 0.5～0.75 μm，视场角 $2\omega=40°$；2 号相机采用亚对称式光学系统，工作谱段为 0.45～0.52 μm，视场角 $2\omega=42°$. 1 号与 2 号相机从设计理念上属于宽幅成像与立体测绘一体化的可见光相机，其几何畸变＜0.5%，虽不是严格意义的立体测绘相机，但用于对月立体成像具有实际意义.

本文通过分析深空探测对光学遥感器的需求，设计一种 $f'=35$ mm，$D/f'=1:7.5$，工作谱段 0.4～0.9 μm，$2\omega=60°$的宽谱段、大视场、轻小型成像光学系统. 该系统大视场的特点有利于完成宽幅普查遥感，若遥感器工作在 400 km 轨道高度，成像幅宽可达 460 km；从可见光到近红外的较宽工作谱段使其可以获得丰富的光学信息；该光学系统结构紧凑，体积轻小，温度适应性好，在 0～40℃ 范围内均有较好像质；设计中采取了抗辐射措施，适用于深空探测.

1 光学系统设计

1.1 特性分析

深空探测的要求较严：1）为减轻重量，降低成本，轻小化是有效载荷的必然需求[1]；2）深空探测环境恶劣，在能源燃料有限的情况下，科学仪器需要具有更为稳健的环境适应性；3）光学遥感器应具有更大的视场，能在有限时间内获得更多信息；4）目前深空探测多为月球、火星等行星，由于这些行星表面矿物分布不同，自身具有不同的光谱特性，例如，火星表面覆盖着大量的铁辉石、层状硅酸盐、硫酸盐、橄榄石等矿物质，这些矿物成分的光谱高反射率区集中在 500～800 nm 谱段[7]，如图 1，因此为准确地获得探测对象信息，光学遥感器需具有较宽的工作谱段.

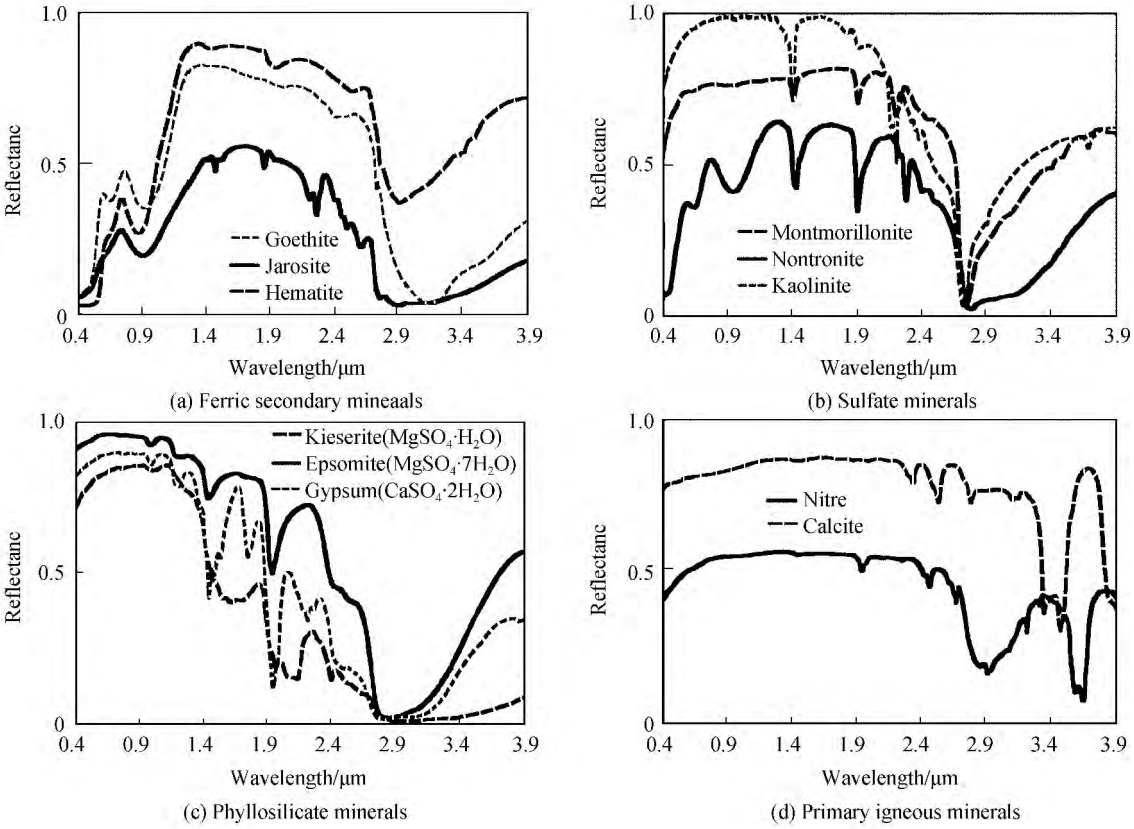

图 1 反射谱特征

Fig. 1 Reflection spectral

1.2 光学系统结构选型

对称式光学系统的左右半部镜组相对光阑对称，由像差理论知，在该型式下，系统彗差、畸变、倍率色差这三种垂轴像差可以自动消除，设计对称结构只需设计一个矫正了球差、像散、场曲和位置色差的半部系统，此时整个系统即可校正全部七种像差. HRSC 火星立体测绘相机[8]（如图 2）选用了对称的 Orthometar 物镜型式，如图 3，实现了全视场 $2\omega=40°$的设计.

双高斯物镜[9-0]亦是典型的对称式光学系统，应用广泛，衍生型式丰富，在嫦娥一号卫星 CCD 立体相机与嫦娥二号 CCD 立体相机光学系统均采用了复杂化的双高斯物镜结构.

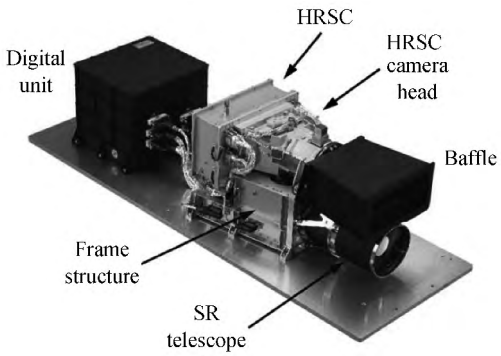

图 2　HRSC 火星立体测绘相机

Fig. 2　High-resolution Stereo Camera (HRSC)

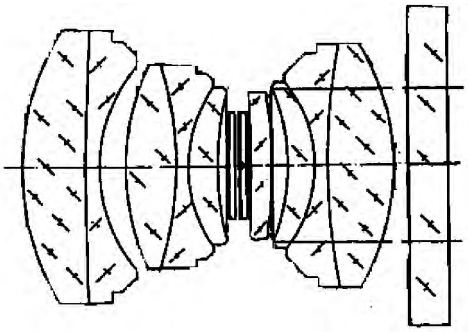

图 3　HRSC 火星立体测绘相机光学系统

Fig. 3　Optical system of HRSC

对称式光学系统的性质有利于大视场大相对孔径的实现，亦可使系统做到结构紧凑，满足空间应用需求.

1.3　像差平衡与优化设计

1.3.1　像差校正

双高斯物镜可实现相对孔径 1∶2～1∶1.7，视场角 40～50°，针对该设计，系统视场角大，工作谱段宽，需要在典型双高斯结构的基础上进行复杂化，以满足设计目标.

透镜复杂化是实现光学设计目标的重要途径之一，很多系统都是在经典镜头的基础上进行复杂化得到的，双高斯物镜亦是从对称型的 Hypogon 演变而来.

通过裂化透镜、加胶合面等复杂化方式使双高斯物镜共形成 9 组 11 片透镜. 通过裂化透镜，将一片透镜分裂为 2～3 片，减小单片透镜的光焦度及光线在每片透镜表面的入射角，以减小高级像差. 在透镜裂化后的优化设计中，避免裂化透镜间形成紧密的等效空气层，以免使光学系统公差过于敏感.

设计中采用了 TF3 ($P_{nd}=0.699\ 8$) 与 H-FK61 ($P_{nd}=0.693\ 4$) 的双胶合透镜，且胶合面背向光阑，使 i_p 增大，$S_{III}=S_I\ (i_p/i)^2$ 增大，产生了较大的像散，用像差互补的方式校正系统像散. 系统最后一片透镜采用弯月结构，校正系统匹兹瓦和.

1.3.2　照度均匀性设计

广角系统具有像面照度不均匀的特性. 根据应用光学理论，轴外视场像面照度与轴上视场像面照度比值随半视场角 ω 成余弦 4 次方关系，即

$$E_m=E_A\cos^4\omega \tag{1}$$

式中 E_m 为轴外视场像面照度，E_A 为中心视场像面照度，Ω 为视场角.

由式(1)可以看出，随视场角的增大，视场边缘像面照度下降很快，对于该广角镜头，半视场角 ω 为 30°，边缘视场像面照度仅为中心视场的 56.25%.

同时，光学系统的照度不均匀性被定义为

$$U_n=\frac{1}{V_{avg}}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(V_i-V_{avg})^2} \tag{2}$$

式中 U_n 为照度不均匀性，V_{avg} 为平均照度，V_i 为第 i 个视场点的照度.

从遥感器焦平面器件分析，CMOS 相比 CCD 具有低功耗、抗空间辐射能量强、电路结构简单、体积尺寸小等特点，应作为深空探测光学遥感器焦面器件的首选，但其动态范围性能低于 CCD，为此光学系统应具有良好的像面照度，在光学设计过程中必须采取措施改善像面照度，避免像面照度不均匀性对相机动态范围造成的不良影响.

近年来，研究人员针对广角镜头像面照度不均匀性问题提出了不同的解决方案. 文献[11]中提出采用渐变滤光膜的方案，即在滤光片上涂镀透过率不同的薄膜，中心的透过率低，从中心到边缘透过率逐渐增加. 这种方法的缺点是整体减小了进入系统的光能量，相当于缩小了原系统的相对孔径，影响到相机信噪比需求. 文献[12]提出使用中心遮拦产生的轴外斜光束截面积与轴上光束截面积之比对像面照度进行优化的思路，这同样影响了光学系统的整体能量. 也有设计者提出，采用像方远心光路，像方视场角为 0°，可以使像面照度均匀，中科院西安光机所的屈恩世等已证明这种假设是不成立的[13].

本文系统设计中，利用负畸变法、像差渐晕法改善像面照度均匀性问题.

负畸变法通过引入一定量的负畸变，使轴外视场物点成像被压缩. 减小轴外视场物点主光线在像空间与光轴的夹角，有利于缓解轴外像点照度的下降，从而改善像面照度的均匀性[14]. 对于面阵成像光学系统，允许一定数值的畸变，在后期图像处理中可以进行一定的校正.

像差渐晕法通过引入光阑彗差，在保证轴上点光束和轴外光束都充满孔径光阑的条件下，轴外光束在入瞳面的截面积大于轴上点光束在入瞳面的截面积，达到校正效果.

1.3.3　深空探测环境设计

深空探测的宇宙环境复杂，相比地球环境有很强的宇宙辐射. 普通无色光学玻璃在收到一定剂量的 X 射线、γ 射线照射后由于对短波光的吸收，玻璃会变暗

或着色，甚至完全失透，致使仪器无法工作[15]. 采用耐辐照玻璃是光学系统空间防护的有效措施，试验资料[16]显示，如表 1，采用 $Co^{60}\gamma$，剂量 7×10^4(Si)的辐射源对玻璃辐射前后的透过率进行测试，含铅耐辐照玻璃可以吸收辐射，保护系统透过率. 在本设计中，光学系统最前端放置一块 K509 防辐照平板玻璃，保护后端光学系统.

表 1 玻璃透过率实验数据

Table 1 Transmission of glass

Wavelength/nm	K9/(%)		K509/(%)	
	Normal	Irradiation	Normal	Irradiation
520	91.0	62.0	91.5	88
590	91.0	71.0	91.0	89.5
660	91.0	83.0	91.0	90.5
730	91.0	83.0	91.0	90.5
830	91.0	88.5	91.0	91.0

此外，深空环境温度复杂，设计中在 K509 耐辐照玻璃后，光学系统透镜前，放置两块平板熔石英材料，以减少光学系统热控耗能，保证系统工作环境温度稳定性.

1.4 设计结果

光学系统设计结果如图 4，参量如表 2，为降低光学系统制造成本与装调难度，设计中透镜面形均为球面，材料均选用成都光明国产玻璃，共采用 6 种玻璃材料，孔径光阑前放置一片 H-K9L 玻璃作为滤光片. 设计结果为调制传递函数(Modulation Transfer Function，MTF)>0.45@70 lp/mm，如图 5. 边缘视场

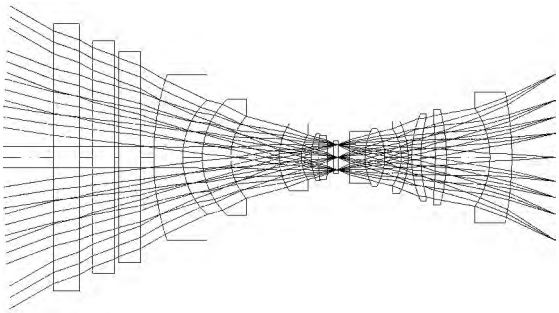

图 4 光学系统结构

Fig. 4 Optical construction

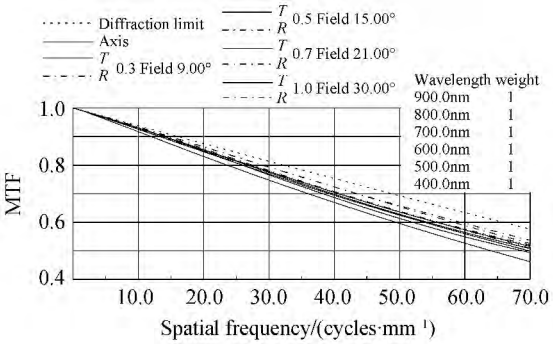

图 5 光学系统传递函数

Fig. 5 MTF

表 2 光学结构参量

Table 2 Optical parameters

Surface number	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Semi-diameter
1	Infinity	6.00	K509	30.00
2	Infinity	3.00		29.00
3	Infinity	5.00	F_SILICA	28.10
4	Infinity	1.00		25.20
5	Infinity	5.00	F_SILICA	23.40
6	Infinity	3.00		22.80
7	61.00	6.63	H-FK61	21.00
8	18.30	18.30		17.75
9	18.34	6.52	H-ZLAF52	13.15
10	14.30	11.10		12.25
11	13.94	5.10	TF3	6.90
12	9.62	2.23		5.15
13	12.83	1.70	H-FK61	4.70
14	45.82	2.00	TF3	4.40
15	−128.5	1.48		3.90
16	Infinity	1.00	H-K9L	3.20
17	Infinity	0.00		2.90
STO		2.68		2.90
19	−2 443.65	3.50	TF3	4.10
20	14.58	4.50	H-FK61	5.25
21	−13.1	3.76		5.90
22	−11.85	1.57	H-ZLAF52	6.60
23	−19.23	0.82		7.45
24	25.30	2.20	H-ZK9B	9.00
25	36.95	3.25		9.10
26	−106.00	2.53	ZF12	9.60
27	−44.10	1.00		10.00
28	−20.00	5.00	H-ZK9B	11.30
29	−76.05	10.063		13.90
IMA	Infinity	——		19.20

像面照度>0.8，如图 6，像面照度不均匀性为 8%. 边缘视场像面照度设计中，在采用像差渐晕法的同时，亦引入了一定的桶形畸变，压缩了边缘光线，以改善像面照度. 由于该系统不作为测绘相机使用，最终几何畸变为−5%，内接于圆形视场内的正方形面阵探测器的最

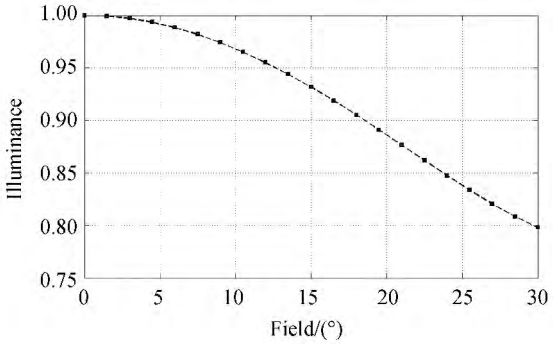

图 6 像面相对照度

Fig. 6 Relative illuminance

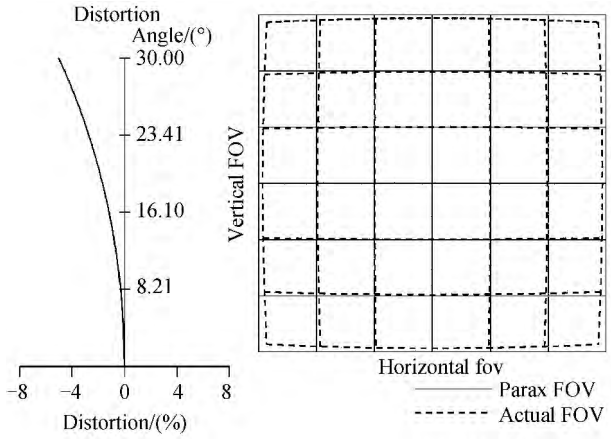

图 7　光学系统畸变

Fig. 7　Distortion

大网格畸变为 −4.48%，如图 7，畸变通过后期的处理，可以满足面阵成像要求.

1.5　环境特性分析

1.5.1　热光学特性

航天航空遥感器由于环境温度变化会引起光学系统与结构材料的热胀冷缩，从而影响光学元件面形、光学元件厚度与光学元件间隔. 最终导致光学系统产生热离焦，像质随之下降[17]. 通常光学遥感器采用平台热控保障与调焦机构保证光学系统正常工作. 对于深空探测任务，由于能量燃料因素，相机热控条件有限，从质量与可靠性等角度考虑，相机不能附带复杂的调焦机构，因此光学系统必须有良好的热光学特性.

光学系统设计中，采用小像差互补[18]方式，使每一个光学表面产生较小的本征像差与衍生像差，降低光学系统的公差敏感度. 光机结构设计中，镜筒材料采用铝，综合分析温度导致的光学系统面形改变与机械结构线涨，光学系统在 0～40℃ 范围内均有较好像质，最大视场($\omega=30°$) MTF>0.4@70 lp/mm，如图 8.

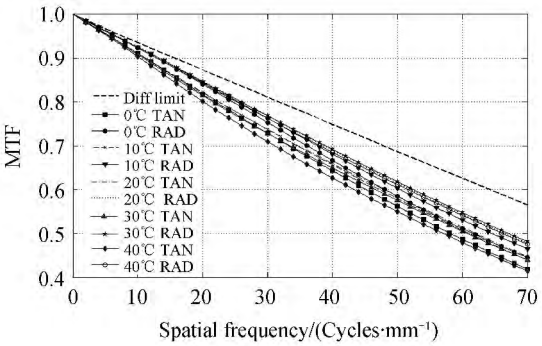

图 8　0～40℃ 环境下光学系统传递函数

Fig. 8　MTF at the working temperature range of 0～40℃

1.5.2　气压特性分析

航天光学遥感器工作在真空环境，气压基本为 0，但光学系统设计、加工与装调是按照 20℃ 常温、760 mm/Hg大气压进行的. 真空的折射率为 1，而装调过程中，空气折射率为 1.000 277，这会使系统光学玻璃材料相对折射率在空间应用时发生改化，导致系统产生真空离焦，对于多镜片的透射式镜头尤为明显. 若本系统工作于 20℃ 真空条件下，由于真空离焦的衍生，MTF 产生下降，如图 9，但由于系统 F 数大，焦深大，且在镜头设计中，光线偏折角小，MTF 下降不是非常糟糕. 经过CODEV软件计算，当系统补偿 −0.062 mm

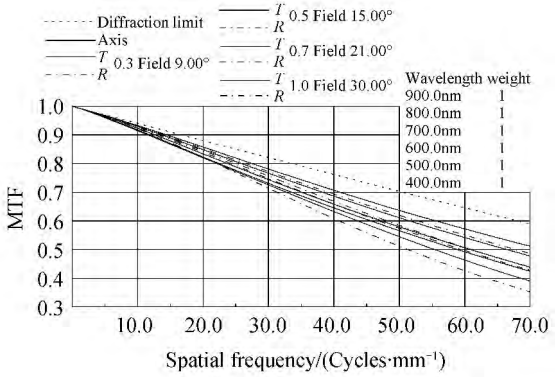

图 9　20℃，0 个大气压环境下光学系统传递函数

Fig. 9　MTF at the working temperature of 20℃ and atmospheric pressure of 0

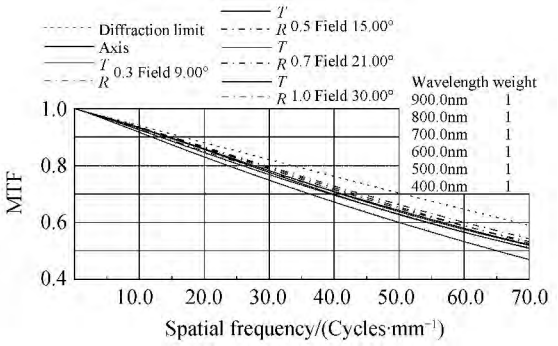

图 10　离焦后 20℃，0 个大气压环境下光学系统传递函数

Fig. 10　MTF at the working temperature of 20℃ and atmospheric pressure of 0 after defocusing of −0.062 mm

的离焦量后，即可实现 MTF 在 20℃，0 个大气压环境下数值不变，补偿后的 MTF 如图 10. 在遥感器发射前将装调好的光学系统通过焦面机械补偿的方式补偿一定的离焦量，并经过真空环境试验，即可保证系统在实际工作中排除真空环境的影响.

2　结论

大视场、轻小化是深空探测用光学遥感器的迫切需求，从深空探测应用需求出发，采用复杂化双高斯结构，设计了一种 $f'=35$ mm，$D/f'=1:7.5$，工作谱段 0.4～0.9 μm，$2\omega=60°$，系统总长 115 mm 的宽谱段大视场轻小型成像光学系统，系统面形全部采用球面，光学传递函数 MTF>0.45@70 lp/mm，边缘视场像面照度>0.8，像面照度不均匀性为 8%. 系统热光学性能稳定，光学系统在 0～40℃ 范围内均有较好像质. 该系统性能良好，符合深空探测对光学系统的需求，具有一

定应用前景.

参考文献

[1] ZHOU Feng, ZHENG Guo-xian, SU Yun. Development of optical remote sensors of deep space exploration abroad and its enlightenment[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(1): 16-22.
周峰，郑国宪，苏云. 国外深空探测光学遥感载荷发展现状与启示[J]. 航天返回与遥感，2012，**33**(1)：16-22.

[2] JAUMANN R, NEUKUM G, BEHNKE T, *et al*. The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars express: instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission [J]. *Planetary and Space Science*, **55**(2007): 928-952

[3] ZHENG Yong-chun, ZOU Yong-liao, FU Xiao-hui. Review of SELENE lunar mission and suggestion for China's lunar and planetary exploration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, **20**(2): 57-65.
郑永春，邹永廖，付晓辉. 月亮女神探月计划及对我国月球与深空探测的思考[J] 航天器工程，2011，**20**(2)：57-65.

[4] ZHAO Bao-chang, YANG Jiang-feng, WEN De-sheng. 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.

[5] YE Pei-jian, HUANG Jiang-chuan, ZHANG Ting-xin. Chang'e II satellite technology achievements and Chinese deep space exploration prospects[J]. *Science China Press*, 2013, **5**: 001.
叶培建，黄江川，张廷新，等. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望[J]. 中国科学：技术科学，2013，**5**：001.

[6] ZHAO Bao-chang, WEN De-sheng, YANG Jian-feng. Two bore-sight stereo mapping with single lens, TDI CCD pushing model imaging and compensations of the speed-to-height rate—Chang'E-2 CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 126-133.
赵葆常，汶德胜，杨建峰，等. 单镜头两视角同轨立体成像，TDI CCD 自推扫和速高比补偿——嫦娥二号 CCD 相机技术[J]. 光学学报，2011，**31**(9)：126-133.

[7] MURCHIE S. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars(CRISM) on Mars reconnaissance orbiter(MRO)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: E05S03.

[8] BETTINA MÖBIUS, MARION MAGERL. Optics for the high resolution stereo camera in the Mars-94 project [C]. SPIE, 2210: 571-581.

[9] WANG Hu, MIAO Xing-hua, WEN De-sheng. Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1822-1824.
王虎，苗兴华，汶德胜，等. 宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计[J]. 光子学报，2005，**34**(12)：1822-1824.

[10] SUN Xin, BAI Jia-guang, WANG Zhong-hou. Optical system design of an airborne multispectral camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3160-3164.
孙鑫，白加光，王忠厚，等. 一种机载多光谱相机的光学系统设计[J]. 光子学报，2009，**38**(12)：3160-3164.

[11] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne low-distortion and super-wide-angle aerosol imager [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 15-20.
薛庆生. 星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计[J]. 光子学报，2012，**41**(1)：15-20.

[12] ZHONG Xing, ZHANG Yuan, JIN Guang. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 209-214.
钟兴，张元，金光. 大视场光学系统像面照度均匀性优化[J]. 光学学报，2012，**32**(3)：209-214.

[13] QU En-shi, ZHANG Heng-jin, CAO Jian-zhong. Discussion of illuminance formula in optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1364-1368.
屈恩世，张恒金，曹剑中，等. 对光学设计中照度计算公式的讨论[J]. 光学学报，2008，**28**(7)：1364-1368.

[14] WANG Li-ping. Optical design for dual spectral panoramic imaging system applied in corona detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1770-1774.
王丽萍. 双谱段全景电晕探测光学系统[J]. 光子学报，2010，**39**(10)：1770-1774.

[15] **蔡立，耿素杰，付秀华. 光学零件加工技术[M] 兵器工业出版社**，2006.

[16] **赵雪，周彦平，刘海刚. 空间光学系统抗辐射设计的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报**，2004，**36**(3)：406-409.

[17] YAN A-qi, YANG Jian-feng, CAO Jian-zhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 222-225.
闫阿奇，杨建峰，曹剑中. 大面阵 CCD 航空数码相机光学系统设计[J]. 光学学报，2011，**31**(6)：222-225.

[18] ZHANG Yuan-jian, TANG Yong, WANG Peng. Method of tolerance sensitivity reduction of optical system design[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2011, **38**(10): 127.
张远健，唐勇，王鹏，等. 光学系统设计中降低公差灵敏度的方法[J]. 光电工程，2011，**38**(10)：127.