

火星探测高分辨率可见光相机光学系统设计

孟庆宇¹, 付中梁², 董吉洪¹, 王栋¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 探月与航天工程中心, 北京 100190)

摘要: 详细规划了首次火星探测有效载荷高分辨率可见光相机光学系统设计方案。阐述了火星探测高分相机的科学意义以及国外火星高分相机的发展趋势。据此对光学系统的选型进行了分析, 从应用优势角度选择了COOK式离轴三反系统完成光学系统设计, 光学系统焦距为4 600 mm, 相机对孔径1:12, 实现分辨率优于0.6 m@300 km, 视场角优于2°的光学系统。从工程可实现性角度, 完成了相机离轴非球面反射镜检测补偿器的设计。该光学系统可保证火星高分相机指标居国际领先水平。

关键词: 火星探测; 高分相机; 光学系统

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)05-0458-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2018.05.008

引用格式: 孟庆宇, 付中梁, 董吉洪, 等. 火星探测高分辨率可见光相机光学系统设计[J]. 深空探测学报, 2018, 5 (5): 458-464.

Reference format: MENG Q Y, FU Z L, DONG J H, et al. The optical system design of the high-resolution visible spectral camera for China Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5 (5): 458-464.

引言

20世纪中叶, 以美国为首的一些发达国家开始了深空探测活动, 1964年, 美国成功发射的飞行器Mariner4揭开了现代探索火星的序幕。从20世纪60年代到21世纪初期, 以美国为首的发达国家已成功发射数十枚火星探测器, 并且根据特定的任务需要, 将不同领域的高新技术进行组合、集成和再创新, 获得了大量珍贵的火星全貌和火星局部表面的高分辨率图像, 为研究火星大气成分、电离层、周围空间环境、火星磁场提供了宝贵资料, 为寻找火星表面的生命迹象及登陆地点提供了重要的影像依据。我国在深空探测方面已经开始了对月球的探测, 对火星的探测刚刚起步。

对火星的探测和研究, 涉及到诸多的技术领域和科学领域, 绝非单一的探测手段可以完成。在多种探测方式中, 火星遥感成像观测是非常基础和重要的一种手段。其他科学探测目标的选择, 很大程度上依赖于火星遥感观测的结果。高分辨率可见光相机对火星科学探测具有重要的科学意义, 高分相机可实现: ①火星表面重点区域精细观测; ②火表重点区域长期重访覆盖观测; ③辅助中分相机完成中等分辨率火星表面观测; ④着陆区域高分辨率观测等一系列科学观测任务^[1]。

国外目前成功发射的火星高分相机有3部, 分别为“火星全球勘探者号”(Mars Global Surveyor, MGS)搭载的窄视角相机、“火星快车”(Mars Express)搭载的(SRC)相机, 以及“火星侦查轨道号”(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)搭载的高分相机HiRISE^[2-4](见图1)。

1996—2003年, 从欧美发射的3个火星高分相机需求趋势看, 火星高分相机需要更大的视场角与更高的分辨率, 光学系统由简单构型的两反系统, 折反射系统(R-C加校正镜), 三反射系统发展而来, 参数如表1所示。与上述国外相机相比, 规划我国火星探测的高分相机: 在近火点300 km轨道高度地面的像元分辨率优于0.6 m, 明显优于MOC和SRC, 与美国的HiRISE量级相当, 为亚米级分辨率, 对火观测地面分辨率为世界领先水平; 在成像幅宽指标上, 规划光学视场角优于2°, 同轨道高度等效幅宽最大; 成像质量方面, 要求光学系统静态传递函数优于0.35, 畸变优于0.1%; 综合多项技术指标, 火星高分相机指标居世界领先水平。

1 光学系统选型

1.1 传递函数分析

高分相机光学系统从探测任务角度分析应为宽谱

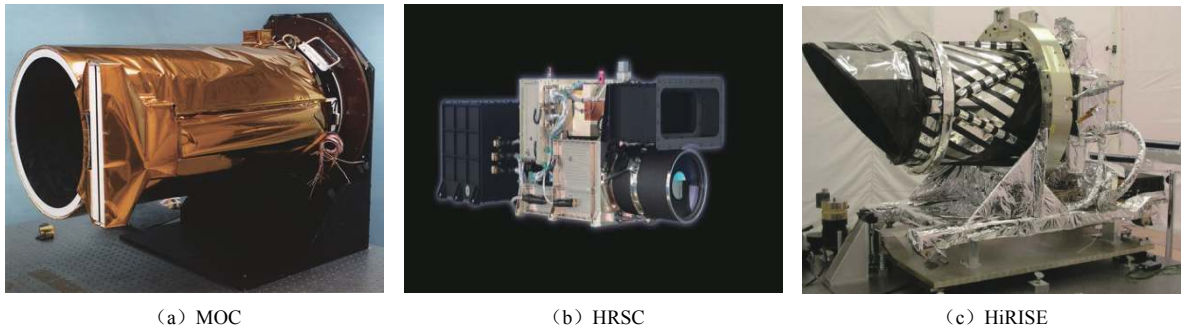


图 1 火星高分相机

Fig. 1 High-resolution camera for Mars exploration

表 1 国外火星探测高分相机光学技术参数比较

Table 1 Optical technical indicators of high-resolution cameras

探测器	“火星全球勘探者号”MGS	“火星快车”Mars Express	“火星侦查轨道号”MRO
发射时间	1996	2003	2005
运行轨道	正圆轨道380 km	椭圆轨道250 km × 10 142 km	椭圆轨道250 km × 320 km
相机型号	MOC窄视角相机	SRC	HiRISE
分辨率	1.4 m/380 km	2.3 m/250 km	0.3 m/300 km
光学系统形式	RC反射式	马克苏托夫-卡塞格林折反射式	同轴偏视场
焦距/mm	3 500	975	12 000
谱段/mm	500~900	400~900	400~1 000
视场角	0.466°	0.543°	1.142° × 0.175°
刈幅宽度	3 km	2.3 km (近火点)	4.98 km (近火点)

段、高分辨率、长焦距的光学系统，且应采用反射式光学系统完成设计；从结构简易的角度分析，光学设计首先考虑采用两反系统，即具有两个反射镜的光学系统，但由于其校正像差的自由度所限，不能满足较大视场的成像质量要求；三反射镜消像散（TMA）系统是高分辨率空间相机普遍采用的一种全反射光学系统，从目前广泛应用的型式上可以分为同轴三反和离轴三反两大类。

对比同轴三反系统与离轴三反系统，同轴三反系统存在次镜对主镜的中心遮拦。从工程实施经验可得出，次镜及其附属遮光罩等结构组件对主镜造成的线遮拦至少在30%以上（面遮拦9%），随着视场角的增大，该比例通常会更高，从物理光学角度分析，遮拦减小了实际有效通光口径，降低了系统能量收集能力，使光学系统传递函数（MTF）降低，系统信噪下降。图2以相对孔径为1:12的光学系统为例，给出了不同遮拦比下的系统衍射极限MTF对比，由图看出无遮拦的离轴光学系统在MTF表现上相比同轴系统具有明显优势。

1.2 杂散光抑制能力分析

在杂散光抑制性能方面，离轴TMA系统亦有杂散光抑制能力强的优点，可很好保障系统高信噪比的实现，

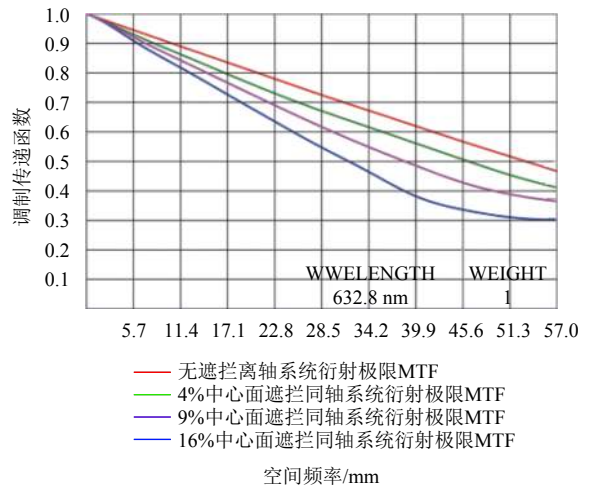


图 2 同轴、离轴光学系统衍射极限MTF对比（相对孔径1:12）

Fig. 2 Diffraction limitation MTF comparison of coaxial system and off-axis system (F-number = 12)

同轴系统与离轴系统杂散光示意图如图3~5所示，同轴系统为遮挡一次杂散光路径，通常需要较长的伸出相机本体的遮光罩，轴向尺寸长。NASA火星高分相机HiRISE采用了同轴三反系统，其遮光罩长度尺寸占据了相机长度尺寸的近1/3，如图4所示。为了压缩空间布局，

节省工程任务资源，有利于立方体型的空间布局，亦基于抑制杂散光需求，保证成像质量，从外形尺寸角度综合分析，火星高分相机应选用离轴三反消像散光学系统，该系统在能量收集能力，传递函数，杂散光抑制能力，空间尺寸布局等方面具有性能优势。

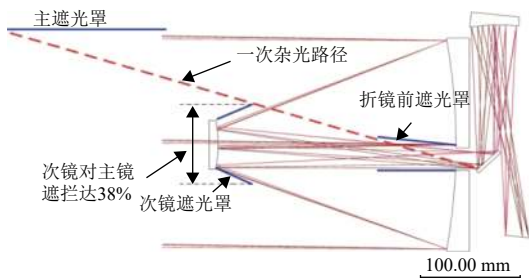


图3 同轴系统杂散光示意图
Fig. 3 Stray light suppression for coaxial system

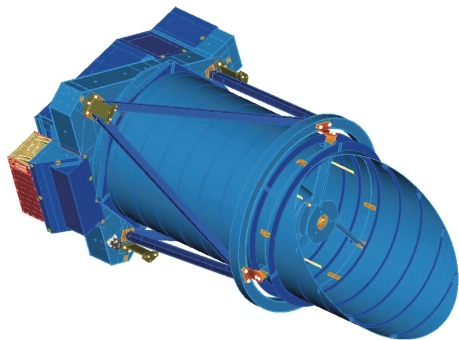


图4 HiRISE相机外形结构
Fig. 4 The outside view of HiRISE

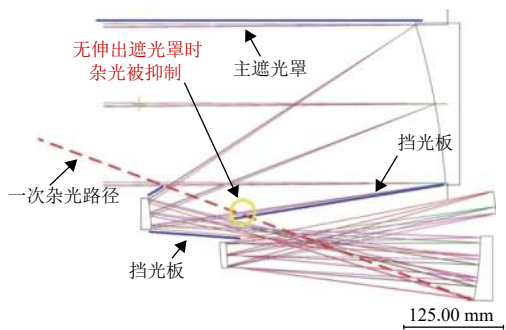


图5 离轴系统杂散光示意图
Fig. 5 Stray light suppression for off-axis system

1.3 光学结构选型

离轴三反TMA系统的应用通常有两种形式，即COOK TMA与Wetherell TMA^[5-6]。

COOK TMA光学系统如图6所示，美国的QuickBird卫星相机采用此系统，光学系统焦距 $f = 9\text{ m}$ ， $f/15$ ， $\text{FOV} = 2.1^\circ$ 。该系统的主镜、次镜和三镜都是离轴非球面的，没有中心遮拦，孔径光阑放在主镜上。这个系统的优点是因为没有中心遮拦，衍射极限传递函数

高，用第一次成像面加窄长的视场光阑方法消杂散光。其视场角相对较大，一般可实现 $\text{FOV} = 1.5^\circ \sim 3^\circ$ 。该型离轴TMA系统结构较为紧凑，摄远比一般可做到6左右^[7]。

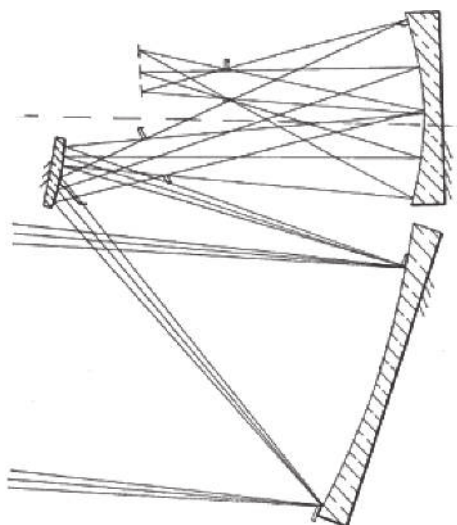


图6 离轴三反二次成像TMA系统 (COOK TMA)
Fig. 6 Realy off-axis TMA system (COOK TMA)

Wetherell TMA光学系统如图7所示。这个系统的优点是孔径光阑放在次镜上，主镜和次镜比较对称，可设计大视场光学系统，视场角可作到 $\text{FOV} = 3^\circ \sim 20^\circ$ 。另外这个系统可设计成像方远心光路，畸变也小，可用于测绘相机。缺点是主镜和三镜都是扁长的离轴非球面，加工难度较大，尺寸和重量也大。该型离轴TMA系统结构较大，摄远比一般在4~5左右^[8]。

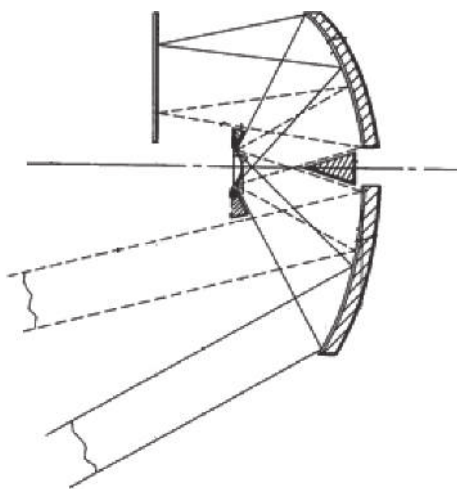


图7 离轴三反一次成像TMA (Wetherell TMA) 系统
Fig. 7 Nonrealy off-axis TMA system (Wetherell TMA)

火星探测距离远，卫星平台资源有限，相机需要做到轻巧紧凑，根据探测任务对视场等指标的要求，火星高分辨率相机决定采用COOK TMA离轴三反光学

系统完成设计，该型系统在离轴光学系统中摄远比大，体积重量小，其在前截距范围内具有实出瞳，可放置较小的平面镜用于系统调焦，该系统可实现的视场角适用于火星探测任务，满足任务需求。

2 光学系统方案

2.1 光学系统设计

根据设计指标，分析计算了各反射镜的光焦度分配，确定了光学系统的一阶参数。经优化，完成了光学系统设计，光学系统如图 8 所示。系统焦距 4 600 mm，相对孔径 1:12，反射镜轴向距离 750 mm，光学系统摄远比实现 1:6。

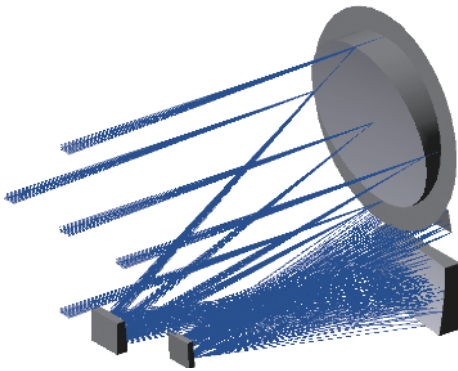


图 8 光学系统
Fig. 8 Optical system

光学系统焦面具有两个视场功能区，TDICCD推扫视场区域与CMOS面阵视频成像区域，如图 9。TDICCD推扫视场区域光学传递函数设计值在全频处均接近衍射极限，优于0.4@60l p/mm ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)，CMOS面阵视频成像区域光学传递函数设计值平均值优于0.5@40l p/mm ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)，如图 10所示。经系统公差分析，由光学系统加工装调引起的光学传递函数下降因子可控制在0.9，光学系统静态传递函数可优于0.35。光学系统具有较小的畸变值，全视场内绝对网格畸变优于0.03%，如图 11所示。多项指标分析表明，光学系统设计结果达到预期指标。

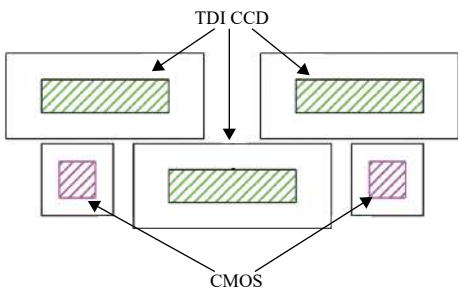
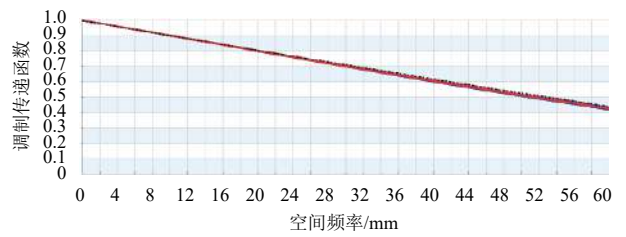
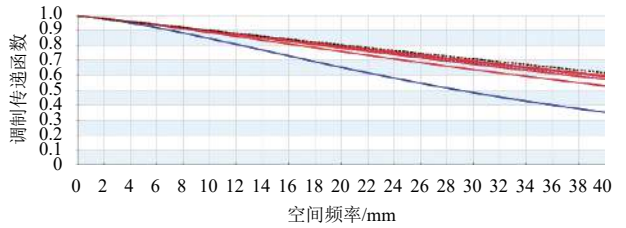


图 9 焦面探测器布局
Fig. 9 Detector layout on focal plane



(a) TDICCD 推扫视场区域



(b) CMOS 面阵视频成像区域

图 10 光学传递函数设计结果

Fig. 10 The MTF design result (a) TDICCD push-broom imaging FOV (b) CMOS imaging FOV

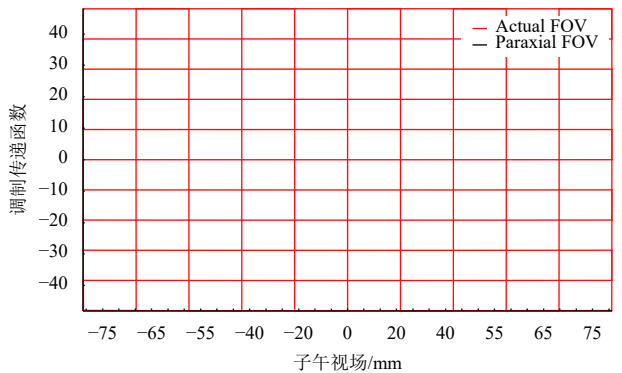


图 11 网格畸变

Fig. 11 Grid distortion

2.2 反射镜检测方案设计

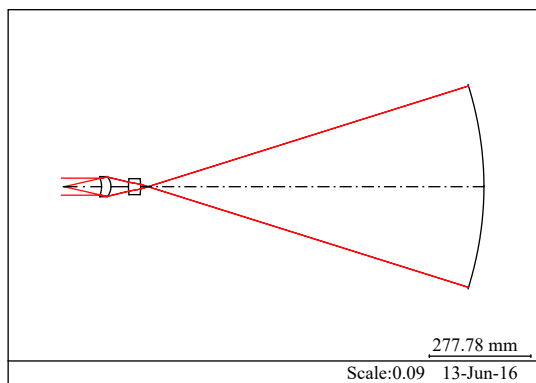
高分相机设计紧凑，摄远比大，反射镜光焦距与非球面梯度数值较大，光学系统实现难度大，同时对反射镜的加工提出了较高要求。为保证反射镜高面形精度的实现，需要设计合理可行的反射镜面形光学检测方案。

光学系统主镜与三镜为凹面离轴非球面反射镜，次镜为凸面离轴非球面反射镜。经分析，主镜和三镜要采用offner补偿器，图 12 (a) 和 (b) 分别为主镜与三镜的检测光路，补偿器距被检反射镜距离约等于反射镜曲率半径，主镜与三镜补偿器设计波前误差均优于0.003 0λ。

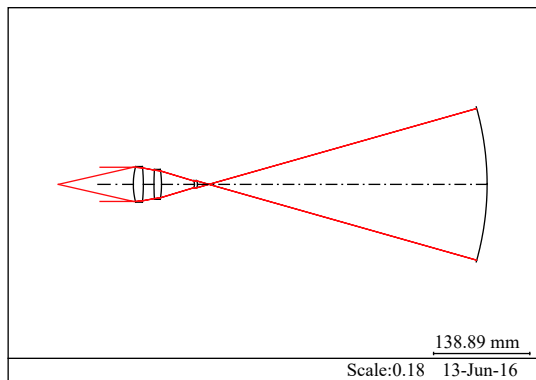
次镜为非球面凸镜，面形检验有多种方案：

首先分析Hindle球检测方案（见图 13），该方案技术成熟，需要一块尺寸较大的标准凹面球面反射镜与被检凸面非球面反射镜配合形成检测光路。外形尺寸的紧凑型设计导致火星高分相机光学系统次镜的非

球面度与相对孔径均较大，这些因素决定与其匹配的标准球面反射镜尺寸较大，经计算其尺寸在1 m左右，该反射镜属于专用设备，通用性较差，成本高，所以不作为次镜检测方案。



(a) 主镜检测光路



(b) 三镜检测光路

图 12 主镜、三镜检测补偿器
Fig. 12 Offner compensator for PM and TM

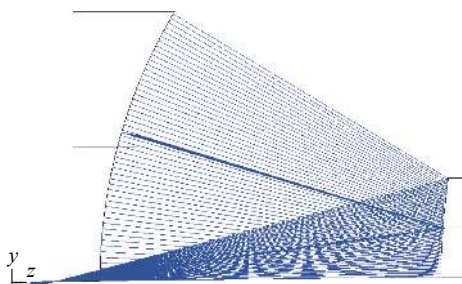


图 13 Hindle检验方法
Fig. 13 Hindle testing method

再者分析同主镜、三镜相同的反射面正面检测offner方案，如图14所示，同样由于次镜非球面度与相对孔径因素的影响，该方案的补偿器至少需要4片透镜构成，且每片透镜的尺寸均在Φ200 mm左右。用于补偿器制造的光学材料要求具有非常高的光学均匀性，大口径高均匀性光学玻璃成本很高，且大口径透

镜系统，热稳定性较差，温度的波动对出射波前影响较大，用该补偿器进行反射镜加工检测，需要环境具有较高的稳定性。综合分析，此补偿器制造成本高，补偿稳定性不占优势，实现难度大，不宜作为次镜检测方案。

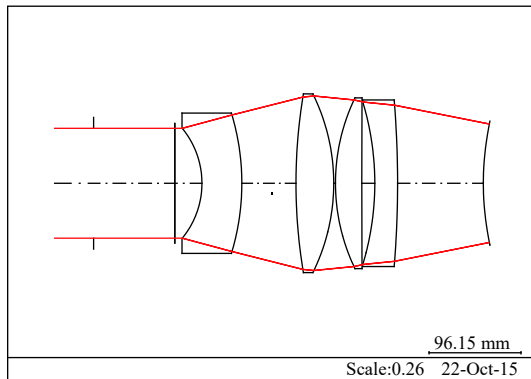


图 14 次镜正面检测offner方案
Fig. 14 Offner testing method from the front of mirror

次镜的第3种检测方案为多透镜补偿检测方案，如图15。该方案中的次镜采用透射型光学材料，设计中，将次镜背部的另一面设计成球面，与另一块透镜组成检测光路，检测中，干涉仪出射的汇聚光波经过次镜与透镜组成的检测光路出射平面波，平面波经过一块与检测光轴垂直的平面镜反射回检测光路，再次经过次镜与透镜组成的光路形成球面波，与干涉仪发出的球面波进行剪切干涉。该种检测方法较前两种方法简单易行，但除了加工一块尺寸较大的透镜外，还需将次镜的另一面加工成高精度球面。

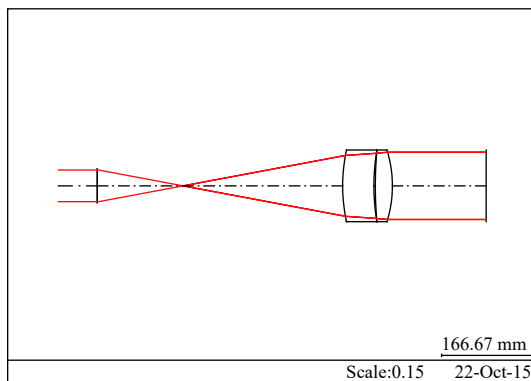


图 15 次镜多透镜补偿检测方案
Fig. 15 Compensation testing method based on multi-lens

次镜检测的第4种方案为次镜背部检测offner方案，如图16所示，该种方案的次镜仍采用透射型材料制造，次镜背部加工成平面工艺面，检测时采用与主镜、三镜相同的offner型补偿器方案，该检测方案中，

补偿器由两块尺寸较小的透镜构成，检测精度高，检测成本低。

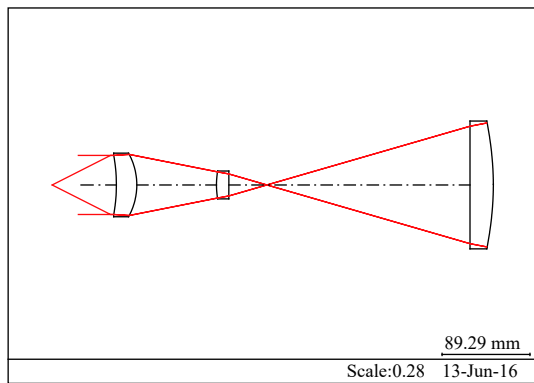


图 16 次镜背部检验offner方案

Fig. 16 Offner testing method from the back of mirror

经分析，次镜补偿器采用背部检测方案，其设计波像差优于 $0.003\ 0\lambda$ 。

3 结 论

根据国际火星探测高分相机的发展趋势，展望规划了首次火星探测有效载荷高分辨率可见光相机光学系统设计。选择COOK式离轴三反光学系统完成火星高分相机光学系统设计，光学系统焦距4 600 mm，相对孔径1:12，实现分辨率优于 $0.6\ \text{m}@300\ \text{km}$ ，视场角优于 2° 的光学系统，光学系统综合指标位于国际领先水平。光学成像质量方面，在TDICCD推扫成像视场，成像质量达到了衍射极限光学系统的要求。选择了合理可行的检测方案，完成了光学反射镜检测补偿器。

火星高分相机光学系统可保证火星高分相机指标居国际领先水平。

参 考 文 献

- [1] MALIN, MICHAEL C, AND KENNETH S. Edgett Mars global surveyor Mars orbiter camera: interplanetary cruise through primary mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 23429-23570.
- [2] NEUKUM, GERHARD, JAUMANN R. HRSC: The high resolution stereo camera of Mars Express[J]. *Mars Express: The Scientific Payload*, 2004: 1240.
- [3] MCEWEN, ALFRED S. Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment(HIRISE)[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112: E5.
- [4] GALLAGHER, DENNIS, et al. Overview of the optical design and performance of the high resolution science imaging experiment(HIRISE)[J]. *Proc. Spie.*, 2005: 5874.
- [5] COOK L G. Three mirror anastigmatic optical system[S]. U. S. patent 4265510, 1981.
- [6] WETHERELL W B, WOMBLE D A. All-reflective three element objective, U. S. patent 4240707 [P]. 1980.
- [7] MENG Q Y, WANG H Y, WANG K, et al. Off-axis three-mirror freeform telescope with a large linear field of view based on an integration mirror[J]. *Applied optics*, 2016: 8962-8970.
- [8] MENG Q Y, WANG W, MA H, et al. Easy-aligned off-axis three-mirror system with wide field of view using freeform surface based on integration of primary and tertiary mirror[J]. *Applied optics*, 2014: 3028-3034.

作者简介:

孟庆宇(1986-),男,助理研究员,主要研究方向:光学系统设计方法与设计理论。

通信地址:长春市东南湖大路3888号中国科学院长春光机所(130033)

E-mail: mengqy@ciomp.ac.cn

The Optical System Design of the High-Resolution Visible Spectral Camera for China Mars Exploration

MENG Qingyu¹, FU Zhongliang², DONG Jihong¹, WANG Dong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Lunar Exploration and Space Program Center, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, the optical system design of the high-resolution visible spectral camera for China first Mars exploration mission is planned. Firstly, the scientific meaning and the development trend of the Mars high-resolution camera is proposed. And then, by analyzing the application advantages of various optical systems, the Off-axis Cook system is selected to apply for the China Mars high-resolution camera. Besides, the aspherical mirror testing plan is proposed. By using the optical system, the optical system can guarantee the high-resolution camera reach the international advanced level.

Key words: Mars exploration; high-resolution camera; optical system

High lights:

- Plan the optical system for China first Mars exploration high-resolution camera.
- The indicators of the Mars exploration high-resolution camera is in the world's leading level.
- It is the first Mars exploration high-resolution camera which applies off-axis TMA optical system.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]