

## 火星相机研制

张宇烽, 王红杰, 朱永红, 马 军, 于生全, 满益云, 王海涛, 高 龙

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 介绍了火星探测的进展及火星相机的科学目标, 分析了空间相机及火星相机的特点, 展现了课题组经过数年研究在火星相机工程样机的研制过程中取得的成果。研究内容包括: 火星表面物质的光谱特性、火星探测光学遥感器的谱段设置、近火弧段星下点光照条件分析、近火点太阳高度角随时间变化规律、火星表面高程的直方图分布特性分析、考虑火星表面高程因素速高比误差造成的像移、火星相机工程样机研制、火星相机工程样机外景成像试验等。总结了过去的工作, 为将来进一步研制火星相机打下基础。所研制的火星相机适用于在环火轨道对火星表面的观测成像。

**关键词:** 火星探测; 火星相机; 空间相机; 环火轨道; 观测成像

**中图分类号:** V443+.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0217007

## Research on Mars camera

Zhang Yufeng, Wang Hongjie, Zhu Yonghong, Ma Jun, Yu Shengquan, Man Yiyun,  
Wang Haitao, Gao Long

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The progress of Mars exploration and the science objective of Mars camera were presented. The characteristics of space camera and Mars camera were analyzed. The research achievements of the research group in the past several years on Mars camera were presented. Research contents include: spectrum characteristics of Mars surface material, spectral band setting of Mars exploration optical remote sensor, nadir illumination analysis at orbit arc near Mars, solar altitude angle changes with time at orbit point near Mars, histogram distribution characteristic analysis of Mars surface elevation data, image motion caused by velocity to height ratio error because of Mars surface elevation, Mars camera engineering model research, imaging experiment with Mars camera engineering model etc. It summarizes the past research and may facilitate further research on the Mars camera. The manufactured Mars camera fits for observation imaging of Mars surface on Mars orbit.

**Key words:** Mars exploration; Mars camera; space camera; Mars orbit; observation imaging

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-12-15

作者简介: 张宇烽(1970-), 男, 研究员, 主要从事空间遥感器总体设计、辐射定标等方面的研究。Email: 13901112991@sina.com

## 0 引言

火星是迄今为止除地球外研究程度最高的行星,人类真正探测火星的时代是从 20 世纪 60 年代开始的,迄今为止已经进行了近 40 次。依托探月工程一、二期技术,国内正在实施自主火星探测任务,从而实现火星探测。作为深空探测领域的热点,1996 年以后,在每两年一次的火星发射窗口期间,均有火星探测器发射。火星已成为 21 世纪深空探测任务中最重要的对象。目前,国内多家单位正在按计划快速推进火星探测项目,并取得了很好的进展。

## 1 火星探测的进展及火星相机的科学目标

### 1.1 火星探测的进展

2013 年底印度发射了火星探测器;紧接着有人从“好奇”那儿发现了“火星蜥蜴”。随后,美国“专家”也奔赴火星准备探测大气。2014 年 9 月份,美国“勇气号”、“好奇号”、“专家号”,欧洲的“火星快车”和印度的火星探测器协同作战,呈现五星并肩作战的局面,继续对火星地质、大气环境全面了解<sup>[1]</sup>。

印度火星探测器“曼加里安号”于当地时间 2013 年 11 月 5 日下午 2 点 38 分在印度东海岸斯里赫里戈达岛的航天发射场发射升空。印度这次火星探测活动将持续 300 余天,最终于 2014 年 9 月 24 日上午,成功进入火星轨道,印度成为全球第 4 个成功进行火星探测的国家或组织。这次探测主要任务是检测火星大气中甲烷的存在,以此来证明生命在火星上的存在<sup>[2]</sup>。

如图 1 所示,联合发射联盟公司的宇宙神 5-401 型运载火箭 2013 年 11 月 18 日在卡纳维拉尔角空军站发射了 NASA “火星大气与挥发物演化”(MAVEN)探测器。该探测器由洛克希德-马丁公司建造。含探测器建造、发射和 1 年的运行在内,MAVEN 项目共耗资 6.71 亿美元。它旨在研究火星的气候变化历史,认识这颗红色星球是如何从起码适于微生物生存的环境变成了目前寒冷、干燥而不宜居的环境的。这是印度于 2013 年 11 月 5 日发射其首个火星探测器“火星船”之后人类在不到 2 周内第二次向火星派出探测器。MAVEN 已经在 10 个月于北京时间 2014 年 9 月 22 日上午 10:24 成功进入环绕火星的轨道,比印度探

测器的抵达时间是早 2 天<sup>[3]</sup>。

2013 年 11 月 20 日,美国非营利空间探测机构激情火星基金会公布了其大胆的载人火星飞越任务的具体方案。按计划,拟在 2018 年 1 月发射的这项“美国使命”任务将把一对夫妇送往火星。两人将不会登陆火星表面,而将从距火星表面最近 160 km 处飞过,然后飞返地球,并在 2019 年 5 月回到地球。整项任务将历时 501 天。该机构希望能同 NASA 联合,利用 NASA 的设备和专长,并希望得到联邦政府的经费支持<sup>[4]</sup>。

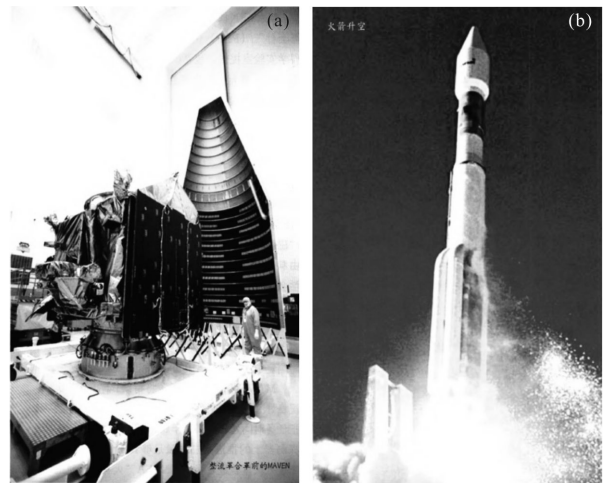


图 1 2013 年 11 月 18 日 NASA“火星大气与挥发物演化”(MAVEN)探测器发射

Fig.1 November 18, 2013, NASA Mars atmosphere and volatile evolution (MAVEN) launch

图 2 中,2015 年 8 月 5 日,NASA“好奇号”火星探测器第一次学会了低角度自拍,传回多张照片,帮助人们更多地了解火星。这些照片是“好奇号”在一



图 2 2015 年 8 月 5 日,NASA“好奇号”火星探测器火星表面自拍照片

Fig.2 August 5, 2015, NASA curiosity Mars detector self-shot photo on Mars surface

个叫做 Marias Pass 的地方从低角度拍摄,随后拼接在一起形成的,清晰地展现了它自己以及周围环境。它在出发之前就进行了类似训练,在地球上频繁练习了低角度自拍<sup>[5]</sup>。

### 1.2 火星相机的科学目标

国内的火星探测主要任务是开展火星土壤及水冰、形貌、表面岩石矿物和元素分布,以及行星际空间环境等探测,获取科学探测数据。

火星相机的科学目标是开展火星表面中分辨率、高分辨率成像,进行火星地形地貌及其变化研究。获取中分辨率大范围覆盖的影像数据和地形数据,开展火星地质构造、地形特点和地貌类型的研究;获取局部高分辨率影像数据,对火星的特殊地貌和预选着陆区进行详细探测和研究。

## 2 火星相机分析及研制

### 2.1 空间相机的特点

空间相机的特点大致有以下几个方面<sup>[6]</sup>:

(1) 相机能经受住发射等阶段产生的振动、过载冲击等恶劣力学环境影响的考验。入轨工作后适应卫星平台的姿态运动、高频抖动(颤动)等环境。在设计相机时通常采用比刚度高的铝合金、镁合金、钛合金和碳纤维复合材料等。结构件要进行优化设计,要求动态刚度高、连接紧固件要考虑特殊防松措施等。

(2) 为了达到一定的分辨率,在轨道上对较远目标观测的空间相机一般具有较长的焦距。

(3) 相机需采取适应空间环境特性的技术措施:

(a) 相机要在真空或低气压等条件下正常工作,需考虑大气与真空的折射率差异和压差,需计算和校正相机的离焦及相机窗口的变形。

(b) 活动部件在真空环境下,需进行防冷焊设计。

(c) 有机材料在真空环境下易挥发,可能污染光学表面及探测器,需考虑防污染问题。

(d) 轨道有大量的粒子辐射,需考虑防辐射设计。另外,还需要考虑防紫外措施。

(e) 需考虑完善的消杂光措施。

(f) 在地面调试相机,重力加速度为 1g,入轨后是微重力环境,这种相机的微重力变形,需要在设计和地面调试中采取措施补偿。

(g) 在轨道环境中,由于舱内温度场的变化对空

间相机光学系统和有关部件性能的影响,从而影响图像的品质,因而对空间相机要进行热分析和热设计并采取热控措施。

(4) 可靠性高。空间相机通常是一次性使用的不可维修产品,因此对可靠性有很高的要求。为此,应把提高系统可靠性工作贯穿到空间相机设计、生产、装配、试验等每一个环节中。如:选用优质材料、宇航级元器件,备份冗余技术等。

(5) 严格的体积、质量和功耗限制。由于航天器价格质量比很高,在空间相机的设计中,要尽量选用轻型材料,采取轻量化措施将质量轻、体积小、功耗低、功能密度高作为追求目标。

### 2.2 火星相机的特殊要求

火星相机除了具有普通空间相机的特点外,还有以下特殊要求:

(1) 根据科学探测任务和研究目标合理设置相机的分辨率、覆盖宽度、光谱谱段等参数,需充分考虑火星表面的光谱特性。

目前国外对火星的探测情况表明,如图 3~5 所示,火星上主要有红褐色尘土、含铁矿物、CO<sub>2</sub> 冰盖等物质。国外的火星探测经验表明,火星表面物质与地球上同类物质具有类似的光学特性。

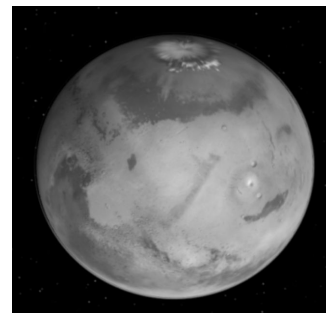
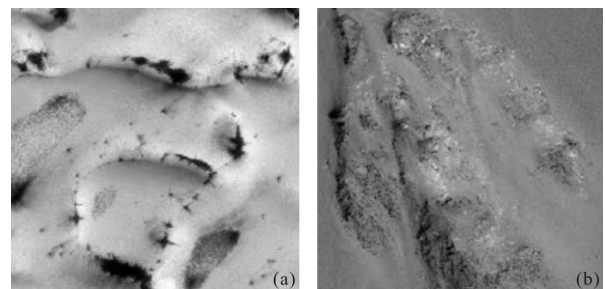


图 3 火星表面情况

Fig.3 Mars surface



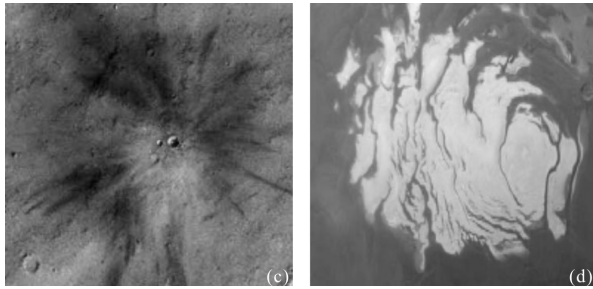


图 4 火星探测的表面物质

Fig.4 Mars surface material

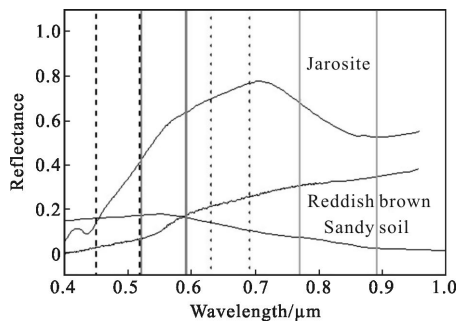


图 5 火星表面物质的光谱特性

Fig.5 Spectrum characteristics of mars surface material

从表 1 中 3 个遥感器的可见光近红外谱段设计来看, 逐渐形成了具有特色的谱段设计, HIRISE 上的 3 个谱段设计是以火星上主要矿物、冰和尘土等物质的识别和分类为目标, 而不针对具体矿物类型进行分类。

表 1 国外火星探测光学遥感器的谱段设置  
Tab.1 Spectral band setting of abroad Mars exploration optical remote sensor

Remote sensor	Visible near infrared spectral band setting
Odyssey/THEMIS(2001)	0.400–0.450 μm(blue) 0.515–0.565 μm(green) 0.629–0.679 μm(red) 0.724–0.774 μm(brown) 0.835–0.885 μm(purple)
EXPRESS/OMEGA(2003)	0.364–1.070 μm
MRO/HiRISE(2005)	0.55–0.85 μm 0.40–0.60 μm 0.80–1.00 μm

(2) 探测器在环火轨道运行时太阳高度角变化

范围较大, 要求相机有较大的动态范围, 相机工作参数能根据光照条件做出合理调整。

太阳照到火星的福照度约为  $595 \text{ W/m}^2$ , 约为地球的  $1/2.3$ 。根据轨道的初选结果(如图 6 所示), 在 1 个火星年内, 在近火弧段星下点太阳高度角变化情况如图 7 所示。探测器在环火轨道运行时近火点的太阳高度角如图 8 所示, 可以看出在近火点太阳高度角在  $20^\circ \sim 85^\circ$  之间变化。

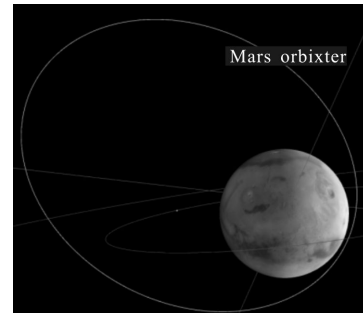


图 6 火星探测器的轨道示意图

Fig.6 Mars detector orbit diagram

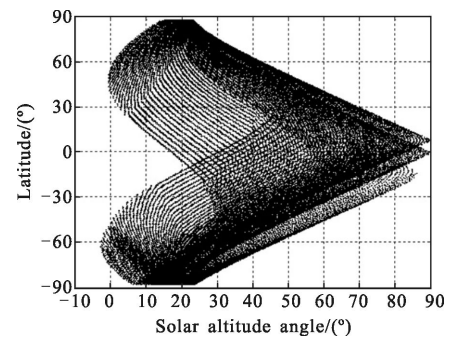


图 7 近火弧段星下点光照条件分析(1 火星年)

Fig.7 Nadir illumination analysis at orbit arc near Mars (1 Martian year)

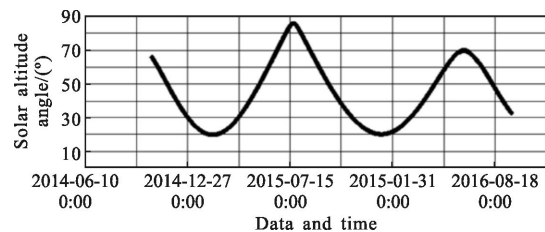


图 8 近火点太阳高度角随时间变化

Fig.8 Solar altitude angle changes with time at orbit point near Mars

(3) 探测器在椭圆形的环火轨道运行, 速高比变化范围较大, 要求相机在近火点、近火弧段一直到

1 000 km 轨道高度都具备成像能力;另外,火星表面高程从-8 177~21 171 m 之间变化。为了保证成像的同步特性,减小像移,保证图像质量,需要进行行频的较大范围调整。

(4) 火星探测器从发射开始到进入环火轨道相机开始工作,期间要经过 10 余月的时间,在此期间火星相机的温控分析、温控设计,采用的温控策略、可靠性需要全面考虑。

(5) 火星相机选用的元器件等级、元器件筛选需要全面考虑。

(6) 受火星探测器数传能力及数传资源的限制,火星相机需要具有图像存储功能,图像通过存储、压缩、信息提取、选择重点目标区域传输等手段,可以将图像通过星上数传传至应用系统。通过快拍慢放、选择输出的模式,解决数传瓶颈。

(7) 对火星相机体积、质量和功耗提出更苛刻的限制。

### 2.3 火星相机的研制

经过数年的研究,按照航天型号工程研制的要求,通过与用户、火星探测器总体、地面应用系统等单位深入协作,已经完成了火星相机工程样机的研制,完成了实验室测试及外景成像试验,并与总体单位确定了详细的接口协议。

文中以下仅展示部分火星相机研制过程中得到的成果,进一步详细的数据及分析会在后续相关文章中介绍。火星相机结构剖面如图 9 所示,工程样机如图 10 所示。由于火星表面高程变化剧烈,对火星

之间的地区约占 1.5%的火星表面,主要分布在火星的盆地;4.6~8 km 之间的地区约占 1.45%的火星表面,主要分布在火星的山脉,极高位置 21 km 是一处最高山峰的峰顶。



图 10 火星相机工程样机

Fig.10 Mars camera engineering model

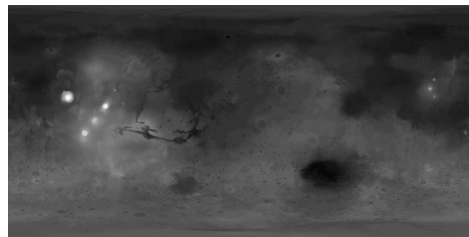


图 11 火星表面高程的电子地图

Fig.11 Mars surface digital elevation map

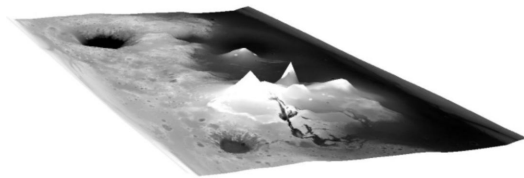


图 12 火星表面高程的三维图

Fig.12 Mars surface digital elevation 3D map

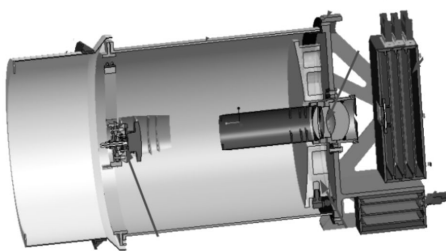


图 9 火星相机结构剖面图

Fig.9 Mars camera structure profile

表面高程数据进行了深入分析,部分分析结果见图 11~图 13 经过对火星表面高程图的统计分析,高程从-8 177~21 171 m 之间变化,其中高程在-5~4.6 km 之间的地区约占 97%的火星表面;-8~-5 km

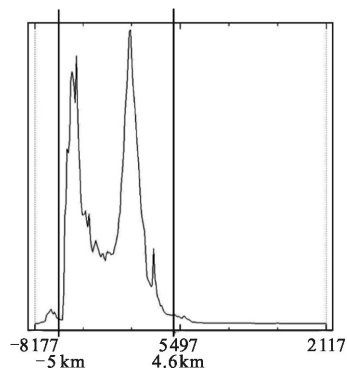


图 13 火星表面高程的直方图分布特性

Fig.13 Histogram distribution characteristic of Mars surface elevation data

考虑火星表面高程因素速高比误差造成的像移见表 2、表 3。

表 2 考虑火星表面高程因素速高比误差造成的像移(275 km)(单位: pixel)

Tab.2 Image motion caused by velocity to height ratio error because of Mars surface elevation(orbit height: 275 km)(Unit:pixel)

Mars surface elevation/km	Orbit height difference/km						
	-15	-10	-5	0	5	10	15
-8	0.025	0.007	0.011	0.029	0.047	0.065	0.084
-5	0.036	0.018	0.000	0.018	0.036	0.055	0.073
-1	0.051	0.033	0.015	0.004	0.022	0.040	0.058
0	0.055	0.036	0.018	0.000	0.018	0.036	0.055
1	0.058	0.040	0.022	0.004	0.015	0.033	0.051
4	0.069	0.051	0.033	0.015	0.004	0.022	0.040
4.6	0.071	0.053	0.035	0.017	0.001	0.020	0.038
15	0.109	0.091	0.073	0.055	0.036	0.018	0.000
20	0.127	0.109	0.091	0.073	0.055	0.036	0.018
21	0.131	0.113	0.095	0.076	0.058	0.040	0.022

表 3 考虑火星表面高程因素速高比误差造成的像移(1 000 km)(单位: pixel)

Tab.3 Image motion caused by velocity to height ratio error because of Mars surface elevation (orbit height:1 000 km)(Unit:pixel)

Mars surface elevation/km	Orbit height difference/km						
	-15	-10	-5	0	5	10	15
-8	0.007	0.002	0.003	0.008	0.013	0.018	0.023
-5	0.010	0.005	0.000	0.005	0.010	0.015	0.020
-1	0.014	0.009	0.004	0.001	0.006	0.011	0.016
0	0.015	0.010	0.005	0.000	0.005	0.010	0.015
1	0.016	0.011	0.006	0.001	0.004	0.009	0.014
4	0.019	0.014	0.009	0.004	0.001	0.006	0.011
4.6	0.020	0.015	0.010	0.005	0.000	0.005	0.010
15	0.030	0.025	0.020	0.015	0.010	0.005	0.000
20	0.035	0.030	0.025	0.020	0.015	0.010	0.005
21	0.036	0.031	0.026	0.021	0.016	0.011	0.006

课题组利用工程样机完成了实验室测试及外景成像试验,外景成像图像见图 14。

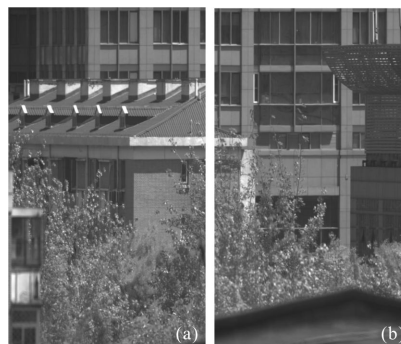


图 14 火星相机工程样机外景成像图像

Fig.14 Images of imaging experiment with Mars camera engineering model

### 3 结论

经过数年的研究,按照航天型号工程研制的要求,通过与用户、火星探测器总体、地面应用系统等单位深入协作,已经完成了火星相机工程样机的研制,完成了实验室测试及外景成像试验,并与总体单位确定了详细的接口协议。

研制的火星相机适用于在环火轨道对火星表面的观测成像。

#### 参考文献:

- [1] Bian Zhe. Five spacecraft to explore Mars side by side[J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2014, 6 (1): 30.
- [2] Zhang Xuesong. India becomes the first mars explorer in asia [J]. *Space Exploration*, 2014(11): 24-27.
- [3] Li Xiao. The United States launched a detector to study Mars Climate Change[J]. *Aerospace China*, 2014(2): 18-20.
- [4] Yang Guang. U.S. agencies announced the details of manned mission to Mars[J]. *Space Exploration*, 2014(2): 51.
- [5] Zhou Wu, Xue Tao. China's Mars exploration should be developed from high starting Point [J]. *Space Exploration*, 2015(3): 10.
- [6] Chen Shiping. Design and Experiment of Space Camera [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2009: 48-54. (in Chinese)
- [7] Niu Ye, Zhang Yufeng, Li Yongqiang. Influence on spectral band selection for satellite optical remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 25(3): 29-

- 35.
- [8] Niu Ye, Zhang Yufeng. Spectral bands for identification of meteorite and lunar soil [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(2): 34–37.
- [9] Shi Jiangkui, Liu Zhenxing. An analysis of results of the Mars exploration [J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(10): 64–65.
- [10] Li Zhiping. Explore red Mars [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2002 24(1): 47–48. (in Chinese)
- [11] Zhu Renzhang, Wang Hongfang. Overview of the U.S Mars surface missions(Part One)[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(2): 17–33. (in Chinese)
- [12] Li Dayao. On Mars exploration by space probe [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24 (3): 59–62. (in Chinese)
- [13] Li Xiaoyun, Du Wei. Analysis of image motion effect on satellite TDICCD camera image quality [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(3): 51–55. (in Chinese)