

# 好奇心号巡视器及其特点分析

岳宗玉 邸凯昌

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘 要** “火星科学实验室”(Mars Science Laboratory, MSL)是 NASA 于 2011 年 11 月 26 日发射的火星探测器,其上的好奇心号(Curiosity)巡视器已经于 2012 年 8 月 6 日着陆火星;其主要科学目标包括研究火星存在生命的可能性、火星气候特征、火星地质过程,并为将来的载人着陆作准备;经过多次论证,其着陆区为盖尔撞击坑(Gale Crater)。与过去的火星巡视器相比,它携带了更加先进的科学仪器,能够精确分析采集样品的化学成分、光谱特征等;在科学工作小组的指导下,其运行模式包括行走、勘查、接近目标、接触目标与样品分析;通过上述工作,“火星科学实验室”将对火星生命及可居住性进行全面探测。

**关键词** “火星科学实验室”;好奇心号巡视器;科学目标;有效载荷;运行方式

中图分类号:V476.4 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2012.05.018

## Mars Curiosity Rover and Its Characteristics

YUE Zongyu DI Kaichang

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Mars Science Laboratory (MSL or Curiosity) is the Mars rover launched by NASA on November 26, 2011 and landed Mars on August 6, 2012. The principal scientific goals include studying the probability of the existence of life on Mars, the characteristics of Mars climate, the geological processes related with the habitability, and the preparation for future manned missions. Gale crater is selected as the landing site after extensive studies and comparisons. Compared with the past Mars rovers, MSL carries much more advanced scientific payloads, which enable more accurate analysis of the collected samples' composition and spectrum, etc. The operation modes include traverse, reconnaissance, approaching and contacting targets, and sample analysis. Through surface operation and investigation, MSL will comprehensively explore the possible existence of life and habitability of Mars.

**Key words:** MSL; Curiosity; scientific goal; payload; operation mode

## 1 引言

轨道器探测和着陆巡视器探测是火星探测的两类主要探测途径,在 1997 年“火星探路者”(Mars

Pathfinder)任务的“索杰纳”(Sojourner)巡视器及 2003 年“火星巡视器”(Mars Exploration Rover, MER)的勇气号(Spirit)和机遇号(Opportunity)任务成功实施后,美国国家航空航天局(NASA)的 MSL 中的好奇心号巡视器计划是目前最受瞩目的火星着

收稿日期:2012-08-06;修回日期:2012-09-07

基金项目:国家自然科学基金(41002120;41171355)

作者简介:岳宗玉(1980-),男,博士,副研究员,从事行星遥感研究。Email:yuezy@irsa.ac.cn.

陆巡视探测计划,该巡视器将比 MER 体积更大,质量更重,在火星表面行走距离更远,生命周期更长,科学探测能力更强,将在火星表面探测领域取得巨大进展,并为未来的样品返回使命铺平道路<sup>[1]</sup>。表 1 简要对

表 1 好奇心号与勇气号/机遇号巡视器一些重要技术指标对比

Table 1 Comparison of some important specifications between Curiosity and Spirit/Opportunity

技术指标		好奇心号	勇气号/机遇号
质量(发射/降落/巡视器)/kg		3 900/2 400/900	1 077/841/179
每火星日消耗电能(巡航/火星表面运行)/W		1 000/2 500	600/900
桅杆高度/车轮轴距/m		2.13/1.9	1.5/1.4
底盘高度/车轮直径/m		0.66/0.4	0.3/0.26
着陆点	椭圆大小	20 km × 20 km	150 km × 20 km
	最大高度(MOLA“大地水准面”)/km	2	1.3
	纬度范围/(°)	+60~-60	+10~-15
科学载荷质量/kg		75	6
最大行进距离		20 km	600 m(勇气号实际运行约 7.7 km; 目前机遇号已经超过 33 km)

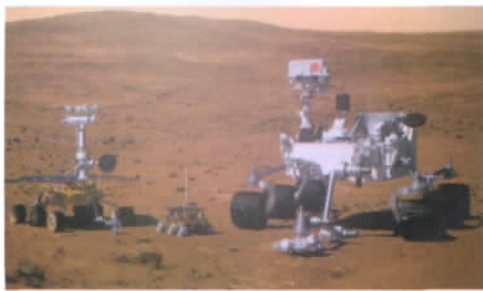


图 1 “索杰纳”(中)、勇气号/机遇号(左)、好奇心号(右)三代火星巡视探测器的对比图

Fig. 1 Comparison among Martian Rovers; Sojourner (middle), Spirit/Opportunity (left) and Curiosity (right)

MSL 在 2011 年 11 月 26 日成功发射,其好奇心号巡视器已经于 2012 年 8 月 6 日着陆火星。主要任务是探索目前寒冷、干燥、贫瘠的火星上是否有生命存在或存在过的迹象,或者现在是否仍存在有利于生命生存的环境。MSL 的主要科学探测任务均由好奇心号巡视器完成,好奇心号每个火星日(24 h 39 min 35 s)可运行 100~200 m,具有高速的计算能力与较大的数据存储能力,既可以与地球直接通信,也可以通过“火星勘测轨道器”(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)或“火星奥德赛轨道器”(Mars Odyssey, MO)作为中继卫星与地球联系;通常情况下,预计用于运行的数据量为 50~100 Mbyte,每天可传输的最大数据量为 800 Mbyte;好奇心号有 6 个独立的车轮进行驱动,并且每个车轮都有夹板,使其能够在松软的沙地中爬坡与刹车,而每个前轮与后轮都能够独立地掌握方向,在行进时随车保护措施可以避免车体倾斜超过 30°,而车体本身能够经受任何

比了好奇心号与勇气号/机遇号一些重要技术指标<sup>[2]</sup>,图 1 展示了 NASA 的“索杰纳”、勇气号/机遇号、好奇心号三代巡视器的外观对比<sup>[2]</sup>,从中可以直观地感受到 NASA 火星巡视探测器技术的发展。

方向 50°的倾斜,因此好奇心号具有良好的稳定性;车的底盘与地面的净高为 0.66 m,使其能够跨过 0.5 m 的障碍物;在平地上好奇心号的最大速度约为 4 cm/s,但在自主避障运行时其平均速度约为 1.5 cm/s。好奇心号的电力由放射性同位素产生,在着陆时的功率约为 115 W,日常工作约为 110 W,另外好奇心号还配备两块可充电锂电池,可在每个火星日多次充电,其容量为 42 A/h<sup>[3]</sup>。

MSL 主要用来探测火星是否有生命存在的迹象以及是否存在有利于生命的环境,据此初选了 59 个备选着陆点<sup>[4]</sup>;之后结合安全等工程方面的需要,综合考虑了高程、纬度、风及石块分布等多种因素,最终确定盖尔撞击坑作为着陆点。

盖尔撞击坑是位于火星南半球(4.6°S 137.4°E)的直径达 154 km 的撞击坑,形成该撞击坑的巨大撞击可能使撞击坑底部深达 17 km 地区都发生了熔融,熔融体积达 3 600 km<sup>3</sup>,而且在撞击坑底部还存在有这种撞击熔融物质<sup>[5]</sup>;撞击坑内部分布较厚的层状沉积物(与过去的流水活动有关),光谱分析表明底层以页硅酸盐矿物为主,向上逐渐变为硫酸盐矿物为主,对该地区进行实地考察将有助于研究流水活动在层状沉积物形成过程中的作用<sup>[6]</sup>,图 2 表示 MSL 的好奇心号着陆点的椭圆位置<sup>[7]</sup>(图中撞击坑为盖尔撞击坑,黄色椭圆表示着陆椭圆)。

好奇心号不仅携带了常规的科学相机等器材,而且携带了能够对收集的样品进行实时分析的仪器,使其能够采集有重要意义的样品并进行化学与矿物分析,是一个名副其实的“移动实验室”。



图2 MSL的好奇号巡视器着陆椭圆位置  
Fig. 2 Location of Curiosity landing ellipse

## 2 MSL 科学目标

### 1) 研究火星存在生命的可能性

MSL 将首先分析火星过去是否存在过适宜生命存在的环境,并进而推断火星过去是否存在过生命;现有研究表明液态水曾在火星表面存在过,而且火星过去曾出现过类似古地球的环境,因此有理由认为火星早期也可能产生过生命,MSL 将据此寻找火星生命存在的直接或间接证据<sup>[8]</sup>;所采取的方式包括研究生命所必需的碳、氢、氮、氧、磷与硫元素及其分布,分析火星自然环境特征,研究火星的碳循环与水循环及其随时间的变化规律。

目前,火星大气中已经发现了甲烷<sup>[9]</sup>,MSL 将测量火星大气中甲烷的含量,并通过加热所采集的火星样品,分析土壤中甲烷的含量,判断甲烷是否为有机成因<sup>[10]</sup>,进而判断火星是否存在过生命。

### 2) 研究火星气候特征

火星早期的气候较为温暖湿润,地貌学证据表明在诺亚纪(Noachian)火星表面存在湖泊与河流<sup>[11]</sup>,另外广泛存在的页硅酸盐以及低洼地区富氯化物的沉积都表明在火星早期历史中曾存在过温暖的条件<sup>[12]</sup>,这可能为火星微生物提供了较好的生存环境;然而目前火星大气稀薄,气候干旱而寒冷,大部分的水以冰(也可能部分为液态水)的形式储存在火星地表以下,MSL 将精确地测定火星大气的成分,并研究火星的天气变化模式,以及水、二氧化碳等在近地表的分布,同时测量表面辐射,这些测量的数据将对分析火星古气候特点以及火星气候变迁机制提供至关重要的信息。

### 3) 研究火星地质过程

MSL 将研究火星岩石与土壤中所保留的地质信息,集中研究与液态水存在相关的地质过程。火星在早期(前诺亚纪,Pre-Noachian)分异过程中产

生过大量的水,而且目前火星表面存在的海岸线表明火星早期曾形成了海洋<sup>[13]</sup>,火星表面大量的沟渠也证明火星早期历史中流水作用曾对其形貌产生过重要影响,因而与流水作用相关的地质过程将是MSL 研究的重要内容之一;除此之外,与火星表面液态水相关的地质过程还包括火山作用,它不仅将大量水分带到火星表面,而且在局部地区产生热液活动,为生命起源创造了良好的条件<sup>[13]</sup>;撞击作用也与液态水紧密相关,早期剧烈的撞击可能使火星表面温度较高,大量的水分蒸发到大气中甚至散失到太空中,从而影响火星总体的含水量,而后期零星的撞击也可能使火星表面局部温度增高,为液态水短期存在以及热液活动提供条件。

### 4) 为将来载人登火星作准备

MSL 的好奇号巡视器携带了体积较大、质量较重的载荷,可为将来载人登陆火星作了准备,精确着陆的方法也为将来载人登陆火星提供经验;另外,对火星进一步的了解会有助于评估火星环境对宇航员的潜在危害。

## 3 科学载荷

MSL 主要是围绕火星生命是否存在这一问题展开的科学探测,为实现科学目标,其好奇心号巡视器不仅装载了用以获取火星表面高分辨率影像的相机,还携带了粒子探测仪,以及结构复杂的、能采集样品并进行分析的化学与矿物分析仪等,图3表示了各种科学载荷的安装位置<sup>[3]</sup>;下面简要总结这些科学载荷的主要特点,为我们深入分析MSL 获取的数据提供便利条件。

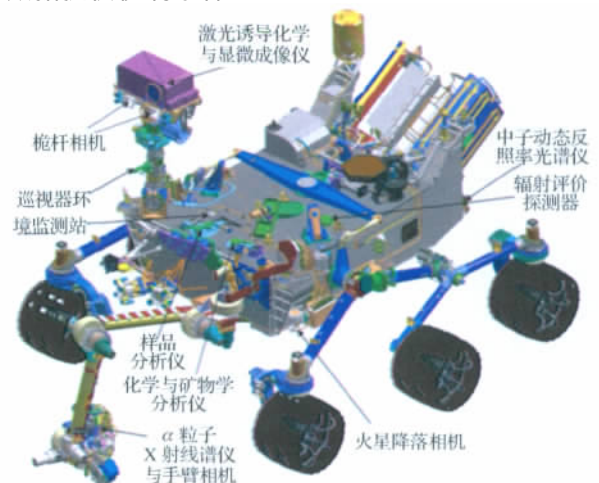


图3 好奇心号科学载荷的安装位置

Fig. 3 Installation locations of Curiosity scientific payloads

### 3.1 导航相机与避障相机

虽然导航相机与避障相机主要用在工程任务中,但它们获取的数据同样能够对科学研究提供重要帮助,因而这里仍将其列为一种科学载荷。

好奇心号共装载了4台(2对)导航相机以及8台(4对)避障相机,通常情况下只有1对导航相机与2对避障相机工作,其余相机与相关的电脑作为备份,只在主相机或主电脑出现故障时才使用。2对导航相机都架在与巡视器连在一起的桅杆上,光谱范围为600~800 nm;主导航相机架在桅杆顶部,高出地面1.99 m,备份导航相机在主导航相机下面5 cm处。两对导航相机的基线均为42.4 cm,桅杆可以将相机旋转360°,上下俯仰90°,导航相机主要用于导航,并用于地点选择,可以提供360°全景镶嵌影像,能够获取避障相机所不能观测地区的影像;导航相机的景深为0.5 m至无穷远,焦距长为14.67 mm,最佳聚焦点为1.0 m,视场角为45°×45°。

2对避障相机架在车体前面的面板上,高出地面68 cm,每对避障相机基线长16 cm,另外2对避障相机架在后面的面板上,高出地面78 cm,每对避障相机基线长10 cm;避障相机视场角为124°×124°,波长为600~800 nm,视场深度为0.1 m至无穷远,焦距长为5.58 mm,最佳聚焦点为0.5 m,避障相机提供的影像范围最好为近视场(<5 m),这些相机将通过立体影像测距提供车载避障探测。

### 3.2 巡视器手臂相机、火星降落相机与桅杆相机

巡视器手臂相机(Mars Hand Lens Imager, MAHLI)是一台架装在MSL机械手臂末端的彩色相机,其焦距可以自动调整,使其能够获取高质量的影像,而且配备2套可见光光源,可以在夜晚工作,除此之外还有2台紫外线(365 nm)光源,用以寻找在长波紫外照射下发出荧光的矿物;该仪器获取的影像达1600×1200像素,它可以获取的图像距离在20.5 mm~无穷远,图像的最高分辨率可达13.9 μm/pixel,而且能够获取其它相机拍摄不到的区域。

MAHLI的科学目标是获取放大镜尺度上的目标图像或者录像,这有助于解译火星岩石与土壤的结构和成分特征,对分析相应的地质过程具有重要意义,而且MAHLI得到的影像有助于为样品选择提供数据,并记录相应的特征。由于某些地质体形态距离镜头不同,近处的地质体可能不全部在整个影像中,对于这种情况,该相机将获取最多达8个聚焦影像,并用车载软件进行拼接,制成一幅最佳的聚

焦影像;随车携带的聚焦影像软件同时制作距离图像,用以测量微地貌的形态。

大多数MAHLI数据将以彩色JPEG格式返回地球,原始数据在24 h内将通过互联网发布,处理后的影像数据将按照行星数据系统(Planetary Data System, PDS)归档,根据MSL任务的时间表公布,公布的数据包括原始数据以及几何与辐射纠正后的数据。

火星降落相机(Mars Descent Imager, MARDI)是一种固定焦距彩色相机,其光轴指向地面,获取的影像为1600×1200像素;当着陆时好奇心号携带的软件发布指令使该相机开始工作,直至携带的软件确定安全着陆后停止工作,获取的数据实时写入闪存,随后发回地球。

MARDI瞬时视场为0.76 mrad,其聚焦距离在2 km高度时为1.5 m,在2 m高度时为1.5 mm,获取的影像范围分别为2.4 km×1.8 km与2.4 m×1.8 m,距离小于2 m时成像开始变得模糊。该相机的内部缓存为8 Gbyte,可使得该相机获取超过4000幅原始影像(相当于800 s,远大于实际降落时间);MARDI的主要任务是确定巡视器的着陆位置,由于在获取图像时相机有水平位移,因而也可以从该数据中得到降落地点的高程信息,并为早期的工作提供区域地质背景信息,但可能仅有部分数据传回地球。

桅杆相机(Mast Camera, Mastcam)由两套架在桅杆上的相机组成,其视轴高于地平面1.97 m,经过多次改进,所用到的相机为固定焦距(fixed-focal length, FFL),立体相机的基线长24.5 cm,其中一台相机焦距长34 mm(称为M-34),视场角为15°,影像为1200×1200像素;另一台相机焦距长为100 mm(称为M-100),影像为1200×1200像素。两台相机都可在2.1 m~无穷远处聚焦;M-100的瞬时视场为 $7.4 \times 10^{-5}$  rad,在1 km距离处产生的影像分辨率为7.4 cm/pixel,在2 m处成像空间分辨率为150 μm/pixel;M-34瞬时视场为 $2.2 \times 10^{-4}$  rad,在2 m处成像空间分辨率为450 μm,在1 km处成像分辨率为22 cm。每台相机的内存为8 Gbyte,能够存储5500幅原始影像,并且都能够简单地实时压缩影像。两种FFL相机都是彩色相机,采用Bayer模式。

Mastcam的主要科学目标是研究MSL着陆点的岩石特征以及地质历史信息,两台相机都能够获取全景与多波段影像,并且能够提供立体影像,从而得到MSL着陆点地形、地貌与地质背景信息。

### 3.3 辐射评价探测器

辐射评价探测器(Radiation Assessment Detector, RAD)是一台能量粒子分析仪,用以得到火星表面能量辐射环境特征,包括宇宙射线、太阳能量粒子、次中子,以及其它在火星大气与土壤中产生的粒子。

RAD的主要科学目标是:(1)得到火星表面能量粒子的光谱特征;(2)确定火星表面辐射环境对人体的影响;(3)验证火星大气传输模型;(4)分析火星表面对生命存在有害的辐射;(5)为分析火星表面和大气中的能量粒子的化学和同位素效应提供资料支持。

### 3.4 巡视器环境监测站

巡视器环境监测站(Rover Environmental Monitoring Station, REMS)用以测量与记录火星大气的6个参数:风速与风向、大气压力、相对湿度、大气温度、地面温度、紫外辐射。风速与风向根据6个二维的风感应器提供的信息进行推断,这6个风感应器分别装在两个支架上,相距 $120^\circ$ ,每个感应器都将记录局部的风速和风向,从而最终确定风速。测定水平风速范围为 $0\sim 70$  m/s,垂直风速测量范围为 $0\sim 10$  m/s,精度均为1 m/s,风向精度优于 $30^\circ$ 。地面温度将由热感应器测量,它通过测量地表的亮温来推断地表温度,测量范围为 $150\sim 300$  K,精度为10 K;大气温度测量范围是 $150\sim 300$  K,精度为5 K。

REMS的科学目标包括:①研究火星近表面中尺度的循环特征;②研究微尺度的天气系统;③局部水循环;④紫外辐射、沙尘的潜在危害,火星表面光解率与产氧率;⑤火星地表下环境的可居住性。

### 3.5 样品分析仪

样品分析仪(Sample Analysis at Mars Instrument Suite, SAM)将寻找有机化合物来分析碳元素的化学过程以及其它轻元素的化学状态,并通过研究与生命有关的分子与元素特征来分析火星目前与过去的可居住性。它包括样品处理系统(Sample Manipulation System, SMS)和化学分离和处理实验室(Chemical Separation and Processing Laboratory, CSPL),火星大气被CSPL所采样并处理与分析,火星固态物质则被筛选并放置在样品杯中,并送到SAM的一个烤箱中进行处理与分析。

SAM拟解决的科学目标包括:①调查碳化合物的来源并评价其形成与破坏机制;②寻找包括甲烷在内的与生命有关的有机化合物;③揭示对生命有

重要意义的化学元素及其同位素的状态;④探测大气成分,用以分析火星大气与土壤的相互作用;⑤优化火星大气与气候演化模型。

### 3.6 $\alpha$ 粒子X射线谱仪

$\alpha$ 粒子X射线谱仪(Alpha-particle X-ray Spectrometer, APXS)是MER勇气号与机遇号上携带的 $\alpha$ 粒子X射线谱仪的升级版,它使用 $^{244}\text{Cm}$ 测定元素成分。

此仪器主要由装在巡视器上的电子元件和机器臂上的感应头组成,利用感应头接近样品来完成测量,将感应头和样品接触或距离不超过2 cm,并在15 min $\sim$ 3 h内测量发射的X射线光谱,通过重复观测提高数据质量。测量结束后,巡视器获取了32 kbyte的数据,包括13个连续的光谱数据。

### 3.7 中子动态反照率光谱仪

中子动态反照率光谱仪(Dynamic Albedo of Neutrons, DAN)是一种主动/被动中子分光计,沿着巡视器路径测量1 m深处 $\text{H}^-$ 与 $\text{OH}^+$ 的丰度与深度分布;在主动模式,DAN测量来自表层以下中子流量的时间衰减曲线,这些中子是由14 MeV的中子源激发的。

DAN的科学目标包括:①探测与提供火星表面下H元素的定量估计;②调查表面下0.5 m内并确定含H矿物的成层结构;③通过周期性分析,探测表面下1 m以内深处H元素含量的变化;④通过周期性分析推导中子辐射环境的变化。

DAN可在巡视器行进时及停止时使用,短时间(不到2 min)的测量将提供H元素分布的概略估计,精度可达1%;长时间(约30 min)的测量可以提供H的垂直分布,精度可达 $0.1\%\sim 0.3\%$ 。

### 3.8 激光诱导化学与显微成像仪

激光诱导化学与显微成像仪(Laser-Induced Remote Sensing for Chemistry and Micro-Imaging, ChemCam)包括激光器与显微成像仪,激光器可以发射功率密度大于 $10$  MW/mm<sup>2</sup>的激光束,有效距离为7 m,照射在目标岩石或土壤的斑点直径为 $0.3\sim 0.6$  mm,使目标部分蒸发,而后分析岩石的元素成分,包括Na、Mg、Al、Si、Ca、K、Ti、Mn、Fe、H、C、O、Li、Sr、Ba等,从而能够研究机械臂无法触及的火星岩石。显微成像仪是一台 $1024\times 1024$ 像元的CCD相机,可以获取激光器采集样品的地质背景信息,其获取影像的波长范围为 $0.247\sim 1.0$   $\mu\text{m}$ ,其超高的分辨率能够使其识别岩石表面的激光点,并能获取其周围矿物成分信息。

### 3.9 化学与矿物学分析仪

化学与矿物学分析仪(Chemistry and Mineralogy, CheMin)是一台功率强大的 X 射线衍射仪,同时也具有 X 射线荧光的功能;CheMin 是 MSL 分析实验室的一个组成部分,在工作时 X 射线管发出的 X 射线照射到粉碎的样品中,对 X 射线敏感的 CCD 成像仪则位于样品的背面,根据 X 射线的衍射确定矿物的晶体结构,从而判断所测定矿物形成条件,最终帮助科学家进一步了解这颗红色星球过去的环境。

## 4 火星表面探测运行方式

为完成上述科学目标,MSL 制定了好奇心号巡视器的几种运行方式,包括:行进模式、勘查模式、接近模式、接触模式以及样品采集与分析模式。

行进模式是巡视器最主要的活动方式,一旦锁定科学目标之后,巡视器将采取适当的方式行进。与 MER 相似<sup>[14]</sup>,MSL 提供了 3 种模式的巡视器导航。其一是盲行驶,这种模式需要巡视器获取足够的影像数据下传至地球控制中心,再由工程师确定安全路线并上载行驶指令,可行驶的距离取决于在先前获取的影像中可视并可靠量测的距离;该模式下巡视器仅通过车轮的里程计测量行驶距离;这种方式巡视器运行速度最快,在平坦的沙地上最高可达 130 m/h。第二种模式称为避障加车轮打滑检查模式,巡视器结合避障相机获取的影像自主选择路径,可比盲行驶行进更长距离;在这种模式中,巡视器在指定的间隔(如 10 m)停止,然后获取图像,并与上一时间段获取的影像进行比较,寻找相似的特征以计算行进的距离,这种方法可以检测出车轮打滑因而提供较精确的距离。巡视器行进的第三种模式是避障加全程视觉测程模式,与第二种模式的区别在于巡视器每隔半个巡视器长度的距离就会停下来进行视觉测程分析,这种模式主要用于精确地接近目标时及在打滑严重的陡坡上行驶时。后两种行驶模式速度比盲行驶慢,在平坦的地上速度约 30 m/h。

其它几种运行模式在执行特定任务时才适用,其中勘查模式可以详细研究有重要意义的区域,并帮助规划下一步的行动,这种模式首先利用化学相机进行观测,然后利用巡视器手臂相机获取目标的三维影像,其余的探测活动包括获取全景影像与导航影像,或者进行成分探测;接近模式用来将目标与机械臂近距离接触,然后用光谱仪在接近过程中获

取多光谱数据;接触模式中利用机械臂中装载的仪器对目标体开展探测,机械臂携带的刷子首先将目标体的表面灰尘去掉,然后进行多次重复的观测,以获取其化学成分、影像等信息;样品采集与分析模式包括一系列的活动,包括收集、筛选与传递等,最终目的是将固体样品放到化学矿物分析仪与样品分析仪中进行处理与数据分析,这种模式可能需要数个火星日的时间。

## 5 小结与展望

美国已成功执行了 6 次火星表面探测使命<sup>[15]</sup>,即海盗-1(Viking-1)与海盗-2(Viking-2)着陆器,“火星探路者”着陆器与“索杰纳”(Sojourner)巡视器,勇气号(Spirit)与机遇号(Opportunity)巡视器,以及凤凰号着陆器(Phoenix)等,这些火星探测活动的科学目标总是围绕着生命问题展开,即过去是否存在过生命,现在是否还有生命活动,将来是否适合人类的居住。与前期的火星着陆、探测、巡视相比,在进行相关的科学探测时,MSL 具有如下特点:①巡视器携带的有效载荷越来越复杂;早期海盗号着陆器仅携带相机、气象与地震台,以及表面物质分析设备;Sojourner 携带了成像仪、 $\alpha$  粒子 X 射线谱仪以及大气结构与实验装置,勇气号与机遇号开始携带工程导航仪、全景相机与避障相机,并加载微型热光谱仪、 $\alpha$  粒子 X 射线谱仪、显微成像仪以及岩石摩擦工具等;而好奇心号则携带了 10 余种科学探测仪器,能够完成全面的地质调查工作。②巡视器的结构也越来越复杂,质量变得更重并由此带来一系列的技术革新;好奇心号的科学载荷质量是勇气号的 12.5 倍,可从图 1 中的对比中直观感受到巡视器的改进;巡视器的安全性也越来越高,好奇心号可以轻易的越过 0.6 m 的障碍;与此相对应,巡视器的耗电量也大幅增加,从而供电系统也由常规的太阳能供电变为核能供电。③巡视器装载的软件系统更加先进与成熟,数据获取能力也大大增强,而且通信技术也有很大提高;好奇心号既可直接与地球进行通信,也可通过中继卫星与地球通信,而且许多任务可以实时地自动化处理,例如在 MSL 的巡视器着陆过程中可以实时获取降落影像,而在早期的勇气号/机遇号任务中只能获取几幅降落影像,且只能在后期传回地球;由于好奇心号巡视器的运行速度与距离较早期的探测任务有很大提高,其获取的数据量也急剧增加,相应地其数据存储能力也有很大改进,

而且日传输数据量也有所加大,可达到 800 Mbyte。  
④着陆系统承重量加大,技术更加复杂;早期的着陆技术采用着陆腿系统与气囊系统,而 MSL 工程中则采用技术更为复杂、承载能力更重的空中吊机着陆系统,可以着陆的范围从纬度  $+10^{\circ}\sim-15^{\circ}$  扩大到  $+60^{\circ}\sim-60^{\circ}$ ,而且着陆点精度也有很大提高。可以说 MSL 是火星探测的一次技术革新,在任务实施过程中应用的多项科学与工程代表了未来火星巡视探测器发展的趋势。MSL 的科学探测成果令人期待,所获取和发布的各类数据将支持全世界的火星研究者开展更广泛、更深入的研究。

根据我国中长期月球探测规划,我国即将发射嫦娥三号月球探测器,其主要目标是实现月球软着陆和巡视探测任务,在巡游中抓取月壤进行分析,将得到的有关数据直接传回地球。月球与火星的地质环境不同,携带的有效载荷也应有所差异,但在任务实施中应用于巡视器的着陆、定位、供电、导航、探测、通信等方法值得我们借鉴;在任务后续工作中对获取的科学数据的处理、归档、发布以及为科研工作提供的其它服务也值得我们学习和借鉴。

#### 参考文献 (References)

- [1] 朱仁璋,王鸿芳,泉浩芳,等. 美国火星表面探测使命述评(下)[J]. 航天器工程,2010,19(3):7-27  
Zhu Renzhang, Wang Hongfang, Quan Haofang, et al. Overview of US Mars surface missions (part two)[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(3): 7-27 (in Chinese)
- [2] NASA. Curiosity rover[EB/OL]. [2012-07-31]. [http://smc.cnes.fr/MSL/GP\\_rover.htm](http://smc.cnes.fr/MSL/GP_rover.htm)
- [3] The MSL Project Science Office. Mars Science Laboratory participating scientists program proposal information package[EB/OL]. [2012-07-31]. <http://earthweb.ess.washington.edu/ess-306/MSL-PIP.pdf>
- [4] Grant J A, Golombek M P, Grotzinger J P, et al. The science process for selecting the landing site for the 2011 Mars Science Laboratory [J]. Planetary and Space Science, 2011, 59(11-12): 1114-1127
- [5] Schwenzer S P, Abramov O, Allen C C, et al. Gale crater: formation and post-impact hydrous environments [J]. Planetary and Space Science, 2012, 70(1): 84-95
- [6] Thomson B J, Bridges N T, Milliken R, et al. Constraints on the origin and evolution of the layered mound in Gale crater [J]. Icarus, 2011, 214(2): 413-432
- [7] NASA. Curiosity landing site[EB/OL]. [2012-09-05]. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/multimedia/gallery/pia14294-anno\\_prt.htm](http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/gallery/pia14294-anno_prt.htm)
- [8] Cabane M, Coll P, Szopa C, et al. Did life exist on Mars? Search for organic and inorganic signatures, one of the goals for SAM (sample analysis at Mars) [J]. Advances in Space Research, 2004, 33(12): 2240-2245
- [9] Krasnopolsky V A, Maillard J P, Owen T C. Detection of methane in the Martian atmosphere: evidence for life? [J]. Icarus, 2004, 172(2): 537-547
- [10] Webster C R, Mahaffy P R. Determining the local abundance of Martian methane and its  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and D/H isotopic ratios for comparison with related gas and soil analysis on the 2011 Mars Science Laboratory (MSL) mission [J]. Planetary and Space Science, 2011, 59(2-3): 271-283
- [11] Fassett C I, Head III J W. Valley network-fed, open-basin lakes on Mars: Distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology [J]. Icarus, 2008, 198(1): 37-56
- [12] Carr M H, Head III J W. Geologic history of Mars [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 294(3-4): 185-203
- [13] Maarry M R E, Dohm J M, Marzo G A, et al. Searching for evidence of hydrothermal activity at Apollinaris Mons, Mars [J]. Icarus, 2012, 217(1): 297-314
- [14] 邱凯昌. 勇气号和机遇号火星车定位方法评述[J]. 航天器工程,2009,18(5):1-5  
Di Kaichang. A review of Spirit and Opportunity rover localization methods [J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(5):1-5 (in Chinese)
- [15] 朱仁璋,王鸿芳,泉浩芳,等. 美国火星表面探测使命述评(上)[J]. 航天器工程,2010,19(2):17-33  
Zhu Renzhang, Wang Hongfang, Quan Haofang, et al. Overview of the US Mars surface missions (part one)[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(2):17-33 (in Chinese)

(编辑:张小琳)