

中国首次火星探测任务火星车有效载荷定标试验

张宝明¹, 朱岩¹, 王连国¹, 杨建峰², 周斌³, 徐卫明⁴, 孙树全⁵,
蔡治国⁶, 徐欣锋¹, 杜庆国¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068;
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100190; 4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 6. 北京遥测技术研究所, 北京 100076)

摘要: 我国首次火星探测任务火星车配置了多光谱相机、火星车次表层探测雷达、火星表面成分探测仪、火星表面磁场探测仪、火星气象测量仪等科学探测有效载荷。为保证在轨获得科学数据的有效性, 有效载荷完成了地面定标试验, 确定仪器的性能指标, 获取在轨科学数据量化应用必需的定标系数。介绍了有效载荷的定标试验项目、方法和结果。试验结果表明, 各仪器性能指标具有良好的一致性、稳定性, 为实现科学探测目标奠定了坚实基础。

关键词: 火星探测; 火星车; 有效载荷; 定标试验

中图分类号: V416.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)05-0481-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200043

引用格式: 张宝明, 朱岩, 王连国, 等. 中国首次火星探测任务火星车有效载荷定标试验[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 481-488.

Reference format: ZHANG B M, ZHU Y, WANG L G, et al. Calibration of Mars rover's payloads for China's first Mars exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 481-488.

引言

我国首次自主火星探测任务将通过一次发射任务, 实现火星环绕和着陆巡视探测, 对火星开展全面科学探测。

火星探测任务的科学目标如下^[1-4]:

- 1) 研究火星形貌与地质构造特征;
- 2) 研究火星表面土壤特征与水冰分布;
- 3) 研究火星表面物质组成;
- 4) 研究火星大气电离层及表面气候与环境特征;
- 5) 研究火星物理场与内部结构。

火星探测器由环绕器和着陆巡视器组成, 着陆巡视器由进入舱和火星车组成。火星车巡视探测科学任务着眼于火星局部地区, 开展高精度科学探测。火星车上配置的有效载荷包括: 多光谱相机、火星车次表层探测雷达、火星表面成分探测仪、火星表面磁场探测仪和火星气象测量仪^[5-6]。有效载荷探测任务和功能如表1所示。

本文主要介绍火星车有效载荷研制过程中进行的定标试验, 对试验项目、方法和结果进行了描述。

1 有效载荷定标试验目的

有效载荷在进行工程应用之前除了进行各种规定

的环境试验、系统测试和验收测试之外, 还要进行定标试验, 确保产品性能满足任务要求, 获得定标数据, 用于科学数据处理。

有效载荷定标工作是保证有效载荷能够完成科学目标的重要试验, 为了保证有效载荷设备的测量精度和探测数据的准确性, 消除仪器设备的各种误差和不一致性, 使探测数据更准确更一致, 有效载荷要进行一系列的定标试验, 对仪器的参数进行标定。通过对正样产品的定标, 获得载荷设备的定标参数, 用于在轨采集的科学数据处理。有的载荷可以进行在轨定标, 有的载荷无法进行在轨定标, 对于无法在轨定标的载荷而言, 地面定标试验就尤为重要。

2 有效载荷定标试验项目

有效载荷工作原理不同, 定标试验项目也不同。对于光学载荷而言, 需要对本底暗电流、工作参数与输出DN值(Digital Number像元亮度值)之间关系、各像元的畸变情况等标定, 利用标定的系数矩阵对获得的科学数据进行校正, 来获得正确的科学数据分析结果; 对于光谱分析类仪器设备, 需要对光谱的位置和分辨率进行标定, 利用标定的参数对获得的科

表1 有效载荷科学探测任务和功能

Table 1 Scientific tasks and main function of payload

载荷名称	科学探测任务	功能要求
多光谱相机	1) 获取着陆区及巡视区多光谱图像; 2) 获取火星表面物质类型分布。	1) 能够获取巡视区高分辨率图像; 2) 能获取火星表面可见光、近红外波段的多光谱图像; 3) 具有自动和遥控调节曝光能力; 4) 具有自动和遥控调焦功能; 5) 具有在轨定标功能。
火星车次表层探测雷达	1) 探测巡视区表面土壤厚度、冰层结构获取火星地表和次表层超宽带全极化回波数据; 2) 探测巡视区次表层结构, 获取次表层地质结构数据。	1) 探测火星表面土壤厚度及其分层结构; 2) 探测火星次表层内水冰/干冰, 分析冰层厚度及其分层结构。
火星表面成分探测仪	1) 火星表面物质的化学元素组成分析; 2) 火星表面矿物分析和岩石识别。	1) 对目标进行激光诱导击穿光谱探测(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS), 获取目标等离子体的紫外至近红外谱段的高分辨率光谱特征信息; 2) 对探测目标具有显微成像功能, 图像能辨识激光点的位置; 3) 具有二维指向功能, 可以精确指向标样位置、火星车前方较大范围内的探测目标; 4) 具有激光测距功能; 5) 在短波红外谱段内, 获取指定目标点的反射光谱数据; 6) 携带标样, 具有在轨定标功能。
火星表面磁场探测仪	1) 探测研究着陆区火星磁场, 确定火星磁场指数; 2) 与环绕探测配合, 探测研究火星空间磁场, 反演火星电离层发电机电流, 研究火星电离层电导率等特性; 3) 尝试利用天然磁场跃变, 探测火星内部局部构造。	对火星磁场进行矢量测量。
火星气象测量仪	1) 对火星表面环境温度和大气压力进行测量; 2) 对火星表面风场参数进行就位测量; 3) 对火星表面声音进行监测。	1) 对火星表面环境温度和压力进行测量; 2) 测量火星表面风速、风向; 3) 拾取并记录火星表面声音。

学数据进行处理和分析, 获得正确的分析结果, 多光谱相机和火星表面成分探测仪既属于光学载荷又属于光谱分析类仪器。火星车次表层探测雷达、表面磁场探测仪和气象测量仪定标试验, 主要是对性能指标进行标定, 确保指标能够满足要求, 另外需要对仪器的工作稳定性进行标定。

2.1 多光谱相机定标

1) 整机暗电流采集

整机暗电流采集是在没有光辐射输入的情况下, 测量多光谱相机所有像元的输出, 得到暗电流系数矩阵, 之后在正式图像中将暗电流影响消除, 提高图像对比度。影响暗电流的参数主要是曝光时间和温度^[7]。

测试结果表明: 温度不变时, 暗电流采集结果不随曝光时间变化; 在相同曝光时间下, 温度小于30℃时, 暗电流变化范围在11.5~14.1之间(像元亮度最大值1024), 但当温度大于30℃时, 暗电流随温度升高而变大, 从30℃时的12.8增大到48℃时的28.8。

2) 相对辐射定标

相对辐射定标是为了消除相机图像传感器各像元间响应的不一致性。多光谱相机系统线性很好, 在不同工作模式下, 得到的修正系数仅有很小的差异, 因此, 相对定标修正矩阵简化为同一的修正系数矩阵。

利用定标结果对图像像元响应进行校正, 得到正确的科学数据。

试验中采用积分球作为光源, 对不同的输入辐亮度、曝光时间进行组合, 多光谱相机进行图像采集, 然后对数据进行处理, 去掉暗电流影响后, 得到相对辐射定标数据。

经过数据处理, 多光谱相机相对辐射修正后的最大残差为1.77%。

3) 绝对辐射定标

多光谱相机绝对辐射定标, 是获得不同光谱通道、调焦位置、曝光时间下的相机数据DN值与辐亮度的关系。使用积分球作为光源, 光谱辐射度计测量其输出光谱辐亮度, 对于多档亮度, 多光谱相机采用多档曝光时间、不同调焦位置, 不同光谱通道等多种工作模式采集图像, 数据处理后得到不同模式下的多光谱相机DN值输出与光谱辐亮度的标定系数。

考虑光源不确定度、多光谱相机不确定度、平场矫正残差、归一化残差、标准具不确定度(光谱辐射度计)等因素, 多光谱相机绝对辐射不确定度为3.8%。图1为同一光亮度情况下, 不同工作模式采集图像后处理得到的光谱辐射亮度。

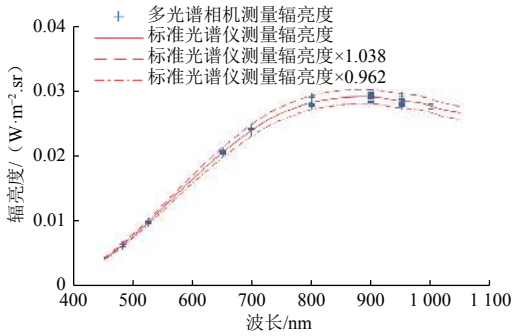


图 1 多光谱相机测量值与光谱辐射计测量的对比
Fig. 1 MSCam data and spectrometer data

4) 光谱定标

将单色仪的波长位置与设备DN值对应，并做归一化处理，得到光谱相对响应。读取其中的中心波长及半高宽，得到光谱信息。测量波长不确定度取决于光谱辐射度计波长稳定性和采样间隔，光谱辐射度计的采样间隔1.5 nm，波长稳定性优于1 nm，因此波长不确定度优于2.5 nm。表2为各通道光谱实测结果。

表 2 各通道光谱实测值
Table 2 Spectral wavelength and half-width of each channel

通道编号	标称值		实测值	
	中心波长	半高全宽	中心波长	半高全宽
TD1	525	20	524.5	24.5
TD2	480	20	480.7	20.1
TD3	650	12	649.1	13.8
TD4	700	15	697.3	14.8
TD5	800	25	798.2	22.5
TD6	900	30	897.1	25.5
TD7	950	50	948.2	40.2
TD8	1 000	50	997.9	45.0

5) 彩色定标

在室内，相机对放置在标准光源灯箱中的标准色卡成像，同时应用光谱辐射度计对标准色卡中的每一标准色谱，根据标准色卡给出的标准光照下的红绿蓝标准值，对拍摄图像进行标定。图2为彩色校正后的色板。

6) 几何定标

通过建立已知物点、像点对应的关系模型，计算成像系统的内外几何关系，从而获取相机参数^[8]，即相机内外方位元素。

试验中，对8个光谱通道和6个调焦位置的内方位

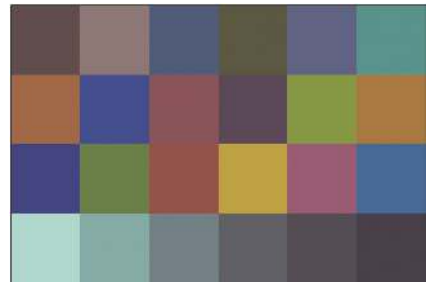


图 2 三通道彩色校正后的效果
Fig. 2 Color picture after calibration

元素进行了测试和计算，获得了各组合下的内方位元素。几何定标的主要误差来自于主点误差，优于0.3 像元。

2.2 表面成分探测仪定标

1) 光谱定标

火星表面成分探测仪包括两个光谱仪组件：①激光诱导击穿光谱（Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS）仪组件，波长范围覆盖240~850 nm，采用光栅分光方式分为3段，依次是240~340 nm波段，340~540 nm波段，540~850 nm波段；②短波光谱仪组件，波长范围覆盖850~2 400 nm，采用AOTF（Acousto-Optic Turnable Filter）分光方式^[9]。

LIBS光谱定标采用汞氙灯、锌灯、镉灯和氩灯作为标准光源，通过光纤接入，LIBS模式采集这些光源的光谱数据，获得光谱范围、各个像素通道的光谱波长和光谱分辨率^[10]。根据各通道内峰值位置所对应波长情况，采用二次函数来进行拟合，其像元到波长的转换关系为 $\lambda = ax^2 + bx + c$ ，得到各通道内由像元到波长的转换关系及系数，如表3所示。通过转换后光谱特征尖峰与标准光源特征波峰间比较分析，第1、第2和第3通道的波长标定分辨率分别为0.067 nm、0.132 nm和0.203 nm。

表 3 LIBS 3个通道的光谱波长转换系数
Table 3 Coefficient of LIBS Spectral wavelength

通道序号	像元到波长的转换关系 $\lambda = ax^2 + bx + c$		
	a	b	c
① 240~340 nm	-8.6263×10^{-7}	0.068 2	223.498 0
② 340~540 nm	-1.0150×10^{-6}	0.137 9	77.711 9
③ 540~850 m	-1.9926×10^{-10}	0.221 3	-255.002 9

短波光谱仪采用AOTF分光方式，需要标定探测波长与驱动频率的关系、光谱分辨率与驱动频率间的关系。首先利用AOTF性能测试系统对AOTF性能特性进行精确测量，然后用精确标定的单色仪作为光源，测

试光谱仪的光谱响应函数;两者结合获得短波光谱的光谱范围、探测波长与驱动频率的关系、光谱分辨率与驱动频率间的关系,如图3所示。

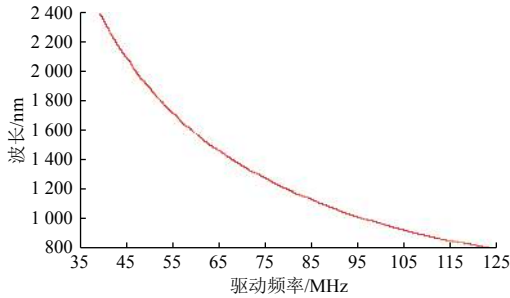


图3 驱动频率和长定标结果

Fig. 3 The relationship of wavelength and driving frequency

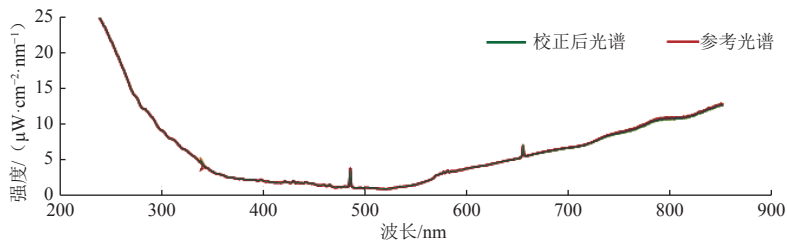


图4 LIBS标定系数校正后的光谱

Fig. 4 LIBS spectrum after calibration

3) 绝对辐射定标

采用积分球作为火星表面成分探测仪进行绝对辐射定标的标准面光源,积分球能级的辐射亮度已知,火星表面成分探测仪短波红外通道分别对积分球的多个能级进行数据获取,得到不同光谱辐射亮度下的系统输出,由此确定火星表面成分探测仪短波红外通道的输入输出之间的关系。

对于LIBS光谱的绝对辐射定标,采集不同能量级辐照条件的光谱曲线,通过比较分析辐射强度和采集的光谱曲线,得到辐射标定系数及标定精度。各像元响应DN值经过辐射标定系数校正后,LIBS光谱曲线与参考光谱曲线基本一致。定标结果表明,第1、第2和第3通道的标准差分别为0.54%、3.12%和0.41%。短波红外辐射定标综合计算误差为5.59%。

4) 几何定标

火星表面成分探测仪通过二维指向镜旋转来对火星车后方定标样品和前方探测目标进行精确指向。首先需要确定二维指向镜坐标系和火星车坐标系两者间的相对位姿关系,然后通过二维指向镜的旋转来控制主光轴精确指向任何位置上的探测目标。另外,通过激光束的焦距变化来对目标表面进行精确探测,其焦距的调节参数与探测距离存在一定转换关系。几何定标的主要内容有:①二维指向镜观测目标时的输出角

2) 相对辐射定标

采用标准光源对火星表面成分探测仪进行相对辐射定标,利用均衡稳定的辐射光源,建立仪器输出信号和观测目标物理量之间的传递关系,通过归一化后的光谱DN值与辐射强度间的转换关系,得到不同通道多个像元间的响应一致性。

对于LIBS光谱的相对辐射定标,通过与已知辐射强度比较,将采集到的不同积分时间下的光谱信号,经过与积分时间相比后,得到各波长对应相对辐射标定系数,并统计改正后偏差的标准差为标定精度,各像元响应DN值经过辐射标定系数改正后的光谱曲线与参考光谱曲线具有很好的一致性,如图4所示。

度值,及其真实角度间偏差的改正参量;②激光束的焦距调节参数与探测距离间的转换关系。

角度定标结果,得到水平角和垂直角的均方根误差分别为0.043°和0.148°。

距离定标结果,根据激光束焦距调节参数获得探测距离与实际距离间偏差的均方根误差为0.56 cm。

2.3 火星车次表层探测雷达定标

1) 雷达性能和系统特性参数定标

常温条件下,测试了雷达工作频率、中心频率、发射功率和波形、时窗、系统噪声、系统灵敏度、线性动态范围、系统增益参数等特性指标^[1]。

不同温度条件下(-40~+55℃)进行的测试项目和结果为:

(1) 发射机输出调频信号的频率线性度和功率,低频功率:大于27.16 dBm,高频功率:大于27.31 dBm;

(2) 不同工作温度下的系统幅相特性;

(3) 不同工作温度下接收机最小可检测功率测试,低频:优于-96.82 dBm,高频:优于-115.48 dBm。

针对高低频天线,测试天线电压驻波比、天线方向图和增益:低频天线驻波比小于3.0,增益 ≥ -10 dBi @ 55 MHz;高频天线驻波比小于2.0,增益 ≥ 2 dBi @ 1 300 MHz。

系统无反射回波定标：将雷达安装在模拟火星车上，低频通道天线展开，使用热气球将模拟火星车吊离地面200 m，同时模拟火星车距离热气球200 m，达到无反射的试验状态，采集回波信号，获得此状态下的探测数据。利用无反射状态下的科学数据，分别对低频通道和低频通道数据进行去背景处理。

系统全反射回波定标：将雷达安装在模拟火星车上，低频通道天线展开，在开阔场地的金属地面上开展探测，进行全反射状态下信号采集。

2) 系统稳定性定标

雷达开机工作后，检测系统特性参数随时间变化的情况，得到雷达系统稳定性结果，包括：

- (1) 时钟稳定性：开机4.7 min后，晶振稳定性优于0.1 ppm；
- (2) 发射机输出功率稳定性：开机后即稳定，不随时间变化；
- (3) 接收机幅频响应稳定性：开机后即稳定，不随时间变化。

2.4 火星表面磁场探测仪定标

1) 量程、线性度、三轴正交度定标

将待标定表面磁场探头和标准磁强计置于磁场线圈环绕的磁空间中，对表面磁场探头进行线性加场试验，外加磁场范围-65 000~+65 000 nT，检测表面磁场探头每轴的线性度和量程、测量范围、三轴正交度等^[12-13]。

- (1) 表面磁场探头量程：± 65 000 nT；
- (2) 测量范围：± 2 000 nT；
- (3) 线性度：优于0.020%；
- (4) 三轴之间正交度：优于0.3'。

2) 噪声、分辨率、精度定标

将表面磁场探测仪探头放置在磁屏蔽筒内，内部噪声小于0.1 pT，表面磁场探测仪工作，采集各轴向磁场数据，对测试数据进行FFT分析，获得磁场噪声、分辨率指标。

- (1) 三轴噪声：小于0.010 nT/√Hz；
- (2) 分辨率：优于0.01 nT。

3) 温度稳定性定标

将表面磁场探测仪探头放在温控箱工作区，使工作区磁场环境为零场，改变温箱温度，温度从-60 ~ +55 °C升高，每间隔5 °C作为一个测试点，获得磁场探测数据，通过计算，去除本底磁场变化后，得到温度对磁场探测结果的影响，如表4所示。

表4 各轴向的温度稳定性

Table 4 The temperature stability of each axis						
轴向	探头 1-X	探头 1-Y	探头 1-Z	探头 2-X	探头 2-Y	探头 2-Z
温度稳定性/ (nT·°C ⁻¹)	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005

2.5 火星气象测量仪定标

1) 气温测量参数定标

气温测量探头采用3个PT1000铂电阻作为气温测量敏感元件，标定过程主要是确定输出电压值和铂电阻阻值的关系，确定电阻值与温度之间的关系，如图5所示，最终获得温度计算模型和系数^[14]。

- ①温度范围：-130~+70 °C；
- ②定标后温度准确度：优于0.34 °C；
- ③分辨率：0.1 °C。

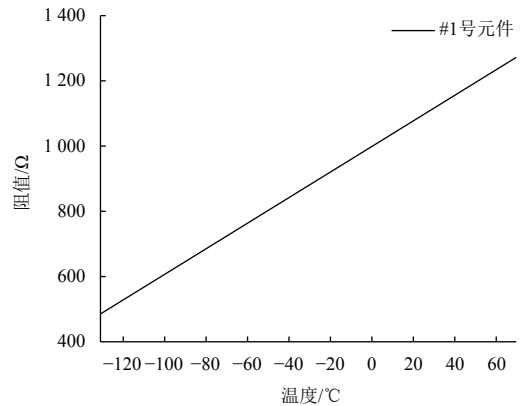


图5 温度传感器分度数据
Fig. 5 Temperature sensor indexing data

2) 气压测量参数定标

气压测量采用MEMS电容式微压传感器，传感器的测量范围为1~2 000 Pa，传感器的定标方式为：测试传感器在不同温度点、不同压力点的信号输出，利用曲面数值逼近拟合的方式，对传感器进行补偿，得到补偿计算数学公式及参数。

定标完成后，在1~2 000 Pa，-40~+55 °C范围内对传感器进行测试，并依据GB/T 15478-1995压力传感器性能测试方法的相关要求，计算传感器的性能指标。

- ①量程：1~2 000 Pa，过压105 kPa；
- ②准确度：0.812%；
- ③分辨率：0.084 9 Pa。

3) 风场测量参数定标

风场测量采用的是热膜式风场传感器，通过测量流体中的热源和流体间的热传导间接测量流体的流速。风场测量模块的输出为加热功率P，加热功率P与

风速 V 之间的关系为

$$P = (A + B\sqrt{V})\Delta T$$

其中： ΔT 为探头温度和环境温度的温差； A 和 B 为与流体介质成分和探头结构相关的常数。因此地面定标需要确定 A 、 B 两个系数。因为火星大气成分和探头结构已知，采用定标装置获得风速与功率的关系，然后通过多项式拟合获得 A 、 B 两个系数。

将不同测量点输出值折算到1 000 Pa气压环境下，获得传感器输出功率随风速的变化关系曲线，如图6所示。

①风速量程：70 m/s，准确度：风速0~10 m/s时，准确度优于0.56 m/s；风速为10~20 m/s时，准确度优于0.96 m/s；风速为20~70 m/s时，准确度优于1.06 m/s；

②风向量程：0~360°；风向准确度：11.8°。

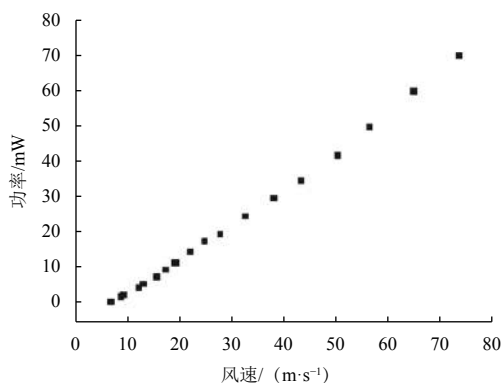


图6 输出功率与风速关系曲线

Fig. 6 The relationship of power and wind speed

4) 声音测量参数定标

①灵敏度标定：使用比较法声学校准系统，将声校准器置于参考频率及额定的声压级后开启电源，待腔内声压稳定后，声音传感器采集声信号，可得到声音传感器灵敏度，结果为68.14 mV/Pa；

②频率响应标定：使用比较法声学校准系统测试传感器频率响应，设置测试频率250 Hz，声压级设置为额定声压级，20 Hz~20 kHz范围内，逐频点测量并记录声音探头的模拟信号输出值；

③声音传感器动态范围：利用消声系统对声音探头的动态范围下限进行定标，将动态范围上限值与下限值相减即得动态范围，结果为96.12 dB；

④声压灵敏度温度响应标定：声音传感探头放置于高低温箱内，采用声音导管将标准活塞发生器产生的声音导入，待测声音探头进行信号采集，改变温度(-60~+55 °C范围)后进行测试，温度区间内响应度

偏差在±2.35 dB内。

3 结束语

我国首次自主火星探测器“天问1号”于2020年7月23日成功发射，预计2021年5月着陆火星，火星车有效载荷将在火星表面进行科学探测，有效载荷定标数据将用于科学数据反演和处理。

火星车多光谱相机相对于“嫦娥3号”全景相机增加了多光谱功能，定标项目中增加了光谱定标，同时，在辐射定标和几何定标中，增加了不同光谱波段下的数据采集和定标。

火星表面成分探测仪将用于LIBS探测的可见光谱仪与红外光谱探测中的短波光谱仪合二为一，通过两种方式相结合实现在原子和分子两个层面对物质信息进行分析，仪器谱段覆盖范围宽，在240~850 nm范围内光谱分辨率0.1~0.3 nm（美国“好奇号”（Curiosity）化学相机对应谱段的光谱分辨率为0.15~0.65 nm），采用特征光谱定标法，在光谱定标过程中使用汞灯、钠灯等4组标准灯的发射谱线进行标定，光谱分辨率标定结果为0.067 nm，不同谱段之间具有重叠区域，实现无缝覆盖全谱段范围，定标数据更精确准确。

火星气象测量仪为中国首次用于气象测量的深空探测有效载荷，参考国家校准规范，结合火星环境条件，制定了火星气象测量仪的定标试验方案和试验条件。针对风场测量定标方案，建立了风场计算模型，由于火星大气与地球大气密度差异，建立了大气密度与风速测量对应关系模型，采用雷诺数进行修正后，定标结果覆盖了风场测量性能指标。

相对于我国以往航天任务，火星车有效载荷均为新研产品，同时火星探测也是我国首次，火星的各项环境条件均为未知，有效载荷在产品研制和定标过程中针对火星的各种环境条件进行了分析，包括温度、大气、光照、光谱、引力、物质成分等等，针对各种环境条件制定了合适的定标试验方案，顺利完成了定标试验。

在深空探测任务中，面对不同的星球，科学探测使用的有效载荷设备有一定的相似性，我国火星探测有效载荷的定标试验方法和经验可以为后续行星探测任务提供参考。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远, 邹永廖. 火星科学概论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2015.
- [2] 王赤, 张贤国, 徐欣锋, 等. 中国月球及深空空间环境探测[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(2): 105-118.

- WANG C, ZHANG X G, XU X F, et al. The lunar and deep space environment exploration in China[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(2): 105-118.
- [3] 耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 399-405.
- GENG Y, ZHOU J S, LI S, et al. A brief introduction of the first Mars exploration mission in China[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 399-405.
- [4] 李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 406-413.
- LI C L, LIU J J, GENG Y, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 406-413.
- [5] 朱岩, 白云飞, 王连国, 等. 中国首次火星探测工程有效载荷总体设计[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(6): 510-514.
- ZHU Y, BAI Y F, WANG L G, et al. Integral technical scheme of payloads system for China Mars-1 exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 510-514.
- [6] 王连国, 沈卫华, 上官芝, 等. 着陆巡视器有效载荷分系统出厂研制总结报告: MARSYZT-1-ZX JB149[R]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2020.
- WANG L G, SHEN W H, SHANGGUAN Z, et al. The summary report of Mars rover's payloads: MARSYZT-1-ZX JB149[R]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Science, 2020.
- [7] 薛彬, 陶金有, 乔卫东, 等. 着陆巡视器有效载荷分系统多光谱相机正样产品定标与地面验证总结报告: SKZ19-MARS-02[R]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2019.
- XUE B, TAO J Y, QIAO W D, et al. The summary report of multispectral camera's ground calibration and verification test: SKZ19-MARS-02[R]. Xi'an: Xi'an Institute of Optic and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [8] 关昭, 乔卫东, 杨建峰, 等. 火星多光谱相机的地面几何标定研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 465-471.
- GUAN Z, QIAO W D, YANG J F, et al. Ground geometric calibration of Mars multispectral camera[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 465-471.
- [9] 舒嵘, 徐卫明, 付中梁, 等. 深空探测中的激光诱导击穿光谱探测仪[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 450-457.
- SHU R, XU W M, FU Z L, et al. Laser induced breakdown spectroscopy detector in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 450-457.
- [10] 刘向锋, 张长兴, 徐卫明, 等. 着陆巡视器有效载荷分系统火星表面成分探测仪正样定标与地面验证试验总结报告: M 0ARSY30-1-ZXJB187[R]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2019.
- LIU X F, ZHANG C X, XU W M, et al. The summary report of Mars surface composition detector's ground calibration and verification test: M 0ARSY30-1-ZXJB187[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [11] 柳青, 沈绍祥, 周斌, 等. 着陆巡视器火星车次表层探测雷达正样件定标试验总结报告: KDZ-MARSY20-1-ZXSB19[R]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2019.
- LIU Q, SHEN S X, ZHOU B, et al. The summary report of Mars rover penetrating radar's ground calibration and verification test: KDZ-MARSY20-1-ZXSB19[R]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [12] 赵琳, 孙树全, 张莹, 等. 火星表面磁场探测仪定标总结报告: MARSY40-1-ZXJB47/Z[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2018.
- ZHAO L, SUN S Q, ZHANG Y, et al. The summary report of Mars Rover Magnetometer's ground calibration and verification test: MARSY40-1-ZXJB47/Z[R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [13] 赵琳, 杜爱民, 乔东海, 等. 火星车磁通门磁强计技术[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 472-477.
- ZHAO L, DU A M, QIAO D H, et al. The rover fluxgate magnetometer[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 472-477.
- [14] 蔡治国, 张雷博, 冯洪亮, 等. 着陆巡视器有效载荷分系统火星气象测量仪正样产品定标与地面验证总结报告: MARSY50-1-ZXSB17[R]. 北京: 北京遥测技术研究所, 2019.
- CAI Z G, ZHANG L B, FENG H L, et al. The summary report of Mars climate station's ground calibration and verification test: MARSY50-1-ZXSB17[R]. Beijing: Beijing Research Institute of Telemetry, 2019.
- 作者简介:
张宝明(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 空间科学探测有效载荷技术。
通讯地址: 北京市中关村南二条1号(100190)
电话: (010)62586431
E-mail: baoming@nssc.ac.cn

Calibration of Mars Rover's Payloads for China's First Mars Exploration Mission

ZHANG Baoming¹, ZHU Yan¹, WANG Lianguo¹, YANG Jianfeng², ZHOU Bin³, XU Weiming⁴,
SUN Shuquan⁵, CAI Zhiguo⁶, XU Xinfeng¹, DU Qingguo¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Xi'an Institute of Optic and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China;

3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

5. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

6. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: China's Mars rover's payloads consist of five devices, including multispectral camera, Mars rover penetrating radar, Mars surface composition detector, Mars rover magnetometer and Mars climate station. To ensure the validity of the scientific data obtained onboard, calibration should be carried out on the ground. Through calibration, the instruments' performance can be determined and the calibration coefficients can be obtained, which are necessary for the quantitative analysis of scientific data. The calibration contents and results are introduced. The test results show that the performance of each instrument is stable and consistent, and lay a solid foundation for achieving scientific goals.

Keywords: Mars exploration; Mars rover; payload; calibration

Highlights:

- China's Mars rover's payloads include multispectral camera, Mars rover penetrating radar, Mars surface composition detector, Mars rover magnetometer and Mars climate station.
- The purpose, contents and results of the payloads calibration are introduced.
- The calibration results show that the performance of each instrument is stable and consistent.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]