天问一号环绕器火星矿物光谱分析仪探测机理与仪器特性

何志平^{1,2*}, 吴兵^{1,2}, 徐睿¹, 刘成玉¹, 李春来¹, 袁立银¹, 吕刚¹, 金健¹

1. 中国科学院上海技术物理研究所, 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: hzping@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2021-09-22; 接受日期: 2021-12-13; 网络出版日期: 2022-02-10

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 火星矿物光谱分析仪(MMS)是天问一号环绕器载的主要科学载荷之一, 具备获取火星表面可见至红外谱段光谱图像的能力, 服务于火星表面矿物组成和分布及化学成分与演化历史研究. MMS设计在火星椭圆轨道的远火点定标及近火点探测火星表面的光谱和空间信息, 具备多点高光谱模式、多光谱成像模式等多种探测模式. 本文重点对MMS的功能性能、探测机理、仪器组成、定标与验证、在轨工作模式与数据特性进行简要介绍, 为火星相关科学研究提供参考.

关键词 火星矿物光谱分析仪, 天问一号, 高光谱探测, 环绕器

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 78.30.-j, 85.60.-q

1 引言

高光谱遥感探测一直是火星表面典型矿物类型识别和分布特征研究的主要手段^[1,2], 通过研究与分析火星岩石中的矿物组成和结构特征, 进而研究火星的起源与演化历史以及资源的分布状况等. 近年来, 火星快车上的可见光和红外矿物测绘光谱仪(OMEGA)^[3]和火星侦察轨道飞行器上的紧凑型火星勘测成像光谱仪(CRISM)^[4]获取的火星表面成像光谱数据, 为火星表面成分、极地沉积物、大气等相关研究积累了丰富的科学数据^[5-7]. 然而, 仍有如诺亚纪地壳中层状硅酸盐

沉积物的蚀变程度、重要地质单元的物质组成、准确的火星大气成分探测等科学问题不断涌现, 需要不断地去探测, 为进一步的研究提供支撑^[8].

火星矿物光谱分析仪(Mars Mineralogical Spectrometer, MMS)作为天问一号环绕器科学载荷之一^[9-11], 具备获取火星表面可见至红外谱段光谱图像的能力, 服务于火星表面矿物组成和分布分析、火星整体化学成分与演化历史研究、火星资源及分布区分析^[12]. MMS科学探测能力方面的特色主要表现在: (1) 光谱分谱率高, 能够对火星表面矿物进行精细光谱测量; (2) 定标精度高, 采用对日定标、积分球定标、冷空

引用格式: 何志平, 吴兵, 徐睿, 等. 天问一号环绕器火星矿物光谱分析仪探测机理与仪器特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 239503
He Z P, Wu B, Xu R, et al. Detection mechanism and instrument characteristics of the Mars Mineralogical Spectrometer for the Tianwen-1 orbiter (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 239503, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0265](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0265)

间成像等多手段定标获得精准的定标数据; (3) 数据量相对少, 适应数据下传限制和不同矿物类型的光谱特征差异, 通过空间维及光谱维的多维融合方式, 实现数据的优化利用^[13].

本文首先对MMS仪器设计与主要技术指标进行概述, 然后对仪器在轨工作模式与数据特点进行说明, 最后介绍了仪器关键探测参数与地面验证试验.

2 火星矿物光谱分析仪概述

国际上火星光谱分析典型载荷: OMEGA光谱范围为0.36–5.08 μm , 光谱采样间隔为7.5–20 nm, 总视场8.8°, 重29 kg^[3]; CRISM光谱范围为0.36–3.92 μm , 光谱采样间隔约7 nm, 总视场2.12°, 重32.92 kg^[4]. 相比而言, MMS重量更轻, 仅为7.26 kg; 光谱范围相对较窄, 但波段数方面与CRISM相当, 优于OMEGA, 光谱分辨率更高; MMS近火点空间分辨率为百米量级, 略优于OMEGA, 但低于CRISM. Carter等人^[7]指出, OMEGA和CRISM对含水矿物的各典型光谱吸收特征进行有效识别的波段数应至少为5–8个和9–15个, 而CRISM通过波段合并选取的72波段多光谱全球探测模式其光谱采样间隔约为56 nm, 如此宽的采样间隔会导致CRISM对含水矿物的典型光谱吸收特征进行识别的波段数 ≤ 4 , 从而使得CRISM全球探测模式下对含水矿物的精确探测和识别变得困难. 而MMS谱段设置的一个最大特点就是针对火星表面不同类型典型矿物的光

谱吸收特征, 设置了6种多光谱探测模式, 且光谱分辨率更优, 因此, MMS在探测时具备对火星表面主要矿物类型进行更准确识别和探测的能力. MMS如图1所示, 仪器由主体和保证温度状态的热控附件(TCA)两部分组成. 其主体由光学传感器单元、校准单元和电子学单元构成. MMS的具体光机系统构型如图2所示, 其中光学传感器单元包括可见-近红外(V-NIR)模块和近-中红外(N-MIR)模块. 两个模块均包含有望远镜、狭缝、光谱仪及校准附件. 校准附件通过光纤与积分球和太阳观测器的余弦接收器相连, 统称为校准单元. 电子学单元包括电源、主控制器、CCD驱动器、FPA驱动器、遥测和数据传输.

MMS的主要仪器性能指标如表1所示, 其V-NIR与N-MIR通道分别具有不同的光谱范围、采样间隔和光谱分辨率. V-NIR通道采用512列 $\times$ 255行26 μm 的CCD阵列探测器采集0.379–1.076 μm 光谱范围内的光谱图像, 光谱采样优于3 nm, 而N-MIR通道采用512列 $\times$ 320行25 μm 的碲镉汞焦平面阵列(MCT FPA)获得1.033–3.425 μm 范围内的光谱信息, 光谱采样优于8 nm. 两个通道的瞬时视场(IFOV)均设计为0.5 mrad, 视场(FOV)为12°. MMS探测器中的0–415列用于观测, 其余列用于采集参考暗电流用于校准.

MMS总体方案如图3所示, V-NIR和N-MIR通道相对独立获取光谱图像信息; 采用配有内部积分球、外部太阳观测器的校准单元进行定标校准; 电子单元实现信息的合并、压缩、储存、传递及各部分的调节控

图 1 (网络版彩图)火星矿物光谱分析仪主体和热控附件

Figure 1 (Color online) The main body of MMS and thermal control accessories.

图 2 (网络版彩图) MMS光机系统构型. (a) V-NIR通道; (b) N-MIR通道
Figure 2 (Color online) MMS optical mechanical system configuration. (a) V-NIR channel; (b) N-MIR channel.

表 1 MMS性能指标

Table 1 MMS performance indicators index

参数	技术指标
光谱范围	0.379–1.076 μm , 采样间隔2.73 nm/band @ V-NIR 1.033–3.425 μm , 采样间隔7.5 nm/band @ N-MIR
光谱分辨率	2.96–3.90 nm @ V-NIR 8.36–10.91 nm @ N-MIR
瞬时视场	0.50 mrad
总视场	12°(星下观测)
系统静态传函MTF	≥ 0.21 @ 19.2 lp/mm in V-NIR channel ≥ 0.21 @ 20 lp/mm in N-MIR channel
量化值	12 bits
信噪比	>45 @ V-NIR (405 @ 0.75 μm), >33 @ N-MIR (253 @ 2.3 μm), 日火距离1.52 A.U., 太阳入射角45°, 目标反照率15%
功耗	峰值44.9 W, 平均29.1W @ 光学工作温度 $\sim 15^\circ\text{C}$
重量	单机: 7.26 kg 热控附件: 0.83 kg

制. 方案特点如下. (1) 采用自由曲面结合闪耀光栅的全反射光路方案, 实现宽谱段、轻小型红外高效分光探测. (2) 在轨可编程实现: 针对多种矿物识别与分析模式的多光谱成像探测; 高空间分辨率探测或高光谱探测. (3) 采用光机精细控温抑制背景辐射的影响. (4) 采用太阳光与定标灯相结合的在轨定标方案, 提高数据的定量化水平.

3 火星矿物光谱分析仪工作模式

天问一号环绕器在2月20日成功实施第三次近火制动后, 进入280 km $\times$ 59000 km、周期2个火星日的火星停泊轨道. 随后环绕器逐步调整姿态进入绕火星265 km $\times$ 11943 km、轨道周期约7.8 h的科学探测轨道

进行火星科学探测工作. 根据大椭圆遥感设计, 在近地轨道, 即低于800 km, 最低可达265 km的高度, 探测将在不断变化的轨道高度上进行, 轨道高度每个轨道的有效探测时间约为26 min, 在远火点附近, 每月择机通过环绕器姿态调整进行在轨定标, 如图4(b)所示. 图4(a)显示了MMS在轨道器上的安装位置.

MMS在轨工作主要分为远火点定标和近火点探测两个部分. 远火点定标主要包括对日定标、积分球定标、冷空间成像. 如图5(a)所示, 在环绕器抵达远火点附近时, 环绕器通过姿态调整使太阳定标探头对准太阳, MMS采集太阳辐射数据, 实现对日定标. 定标像元响应太阳信号, 成像像元为暗背景. 对日定标数据采集完成后, 环绕器再次进行姿态调整使MMS背向太阳, MMS采集暗背景数据及内置积分球辐射数据, 实

图 3 (网络版彩图) MMS总体方案图

Figure 3 (Color online) MMS overall scheme diagram.

图 4 (网络版彩图)用于火星探测的轨道器(a)和遥感轨道(b)

Figure 4 (Color online) (a) Orbiter and (b) remote sensing orbit for Mars exploration.

现积分球定标、冷空间成像。通过远火点冷空间成像数据对暗背景系数进行检校, 给出更准确的暗背景系数。通过同一时段所获取的对日定标数据和积分球定标数据实现以太阳辐射亮度为基准对积分球辐射亮度进行校正, 可以克服因长时间工作等导致积分球辐射强度变化造成的定标系数偏移。

近火点对火星表面探测时, 如图5(b)所示, 暗背景监测区和定标区也会同步记录每一帧图像的暗背景监测区数据和积分球定标数据。通过暗背景监测区的数据和检校后的暗背景系数可以估算每一帧成像数据所对应的暗背景, 实现暗背景的去除。完成以上过程后, 结合通过远火点所获数据校正的积分球光谱, 采用定标区获取的积分球数据, 计算每一帧成像数据的绝对辐射定标系数。整合实验室绝对辐射定标系数和所计

算的每一帧成像数据的绝对辐射定标系数, 得出最终的有效绝对辐射定标系数。最后, 根据有效辐射定标系数将成像区非均匀校正图像转换成辐射亮度图像。

在综合考虑数据下传限制和不同矿物类型的光谱特征特点后, 对火探测采用实时数据处理中的多个像素合并方案, 在空间成像方向和卫星推扫方向, 可以通过 2×2 , 4×4 , 8×8 和 16×16 合并得到空间连续208单元光谱探测(MMS-D-208)、空间连续104单元光谱探测(MMS-D-104)、空间连续52单元光谱探测(MMS-D-52)和空间连续26单元光谱(MMS-D-26)探测4种探测模式。同时还包括从MMS-D-26探测模式中任意选取3单元进行探测的空间和不连续3单元光谱探测模式(MMS-D-3)。光谱维方面包含高光谱(576波段)和多光谱(72波段)两种模式, 其中全幅探测模式、空间连续

26单元光谱探测和空间不连续3单元光谱探测模式均采用576波段的高光谱探测方式, 而空间连续208单元光谱探测、空间连续104单元光谱探测、空间连续52单元光谱探测模式均具备6种不同波段组合的72波段多光谱探测能力. 在0.5 mrad IFOV能力和416个样本传感器阵列的最低点支持下, MMS的条带宽度在265 km的高度为55 km. 通过指向近火点的轨道器, MMS以全光谱分辨率(0.379–1.076 μm , 2.73 nm/band; 1.033–3.425 μm , 7.5 nm/band; 2.1 km/pixel at 265 km)执行多点高光谱模式. 对于感兴趣区域, 多光谱映射模式提供了额外的选项, 72个波段的子集合并到265 m/

像素的最大像素足迹将成为更高空间分辨率的产品(图6).

现有的火星探测研究结果表明, 火星大气的成分是二氧化碳(95%)、氮(3%)、氢(2%), 几乎没有氧气、水蒸气、一氧化碳、氖气、氩气和氙气, 其中 CO_2 和水蒸气有显著的强吸收. 火星是一颗富含铁的行星, 铁离子具有显著的可见近红外光谱特性. 火星矿物光谱分析仪的光谱范围覆盖0.4–3.4 μm , 包括火星表面铁矿石、碳酸盐、硅酸盐、硫酸盐、水冰和干冰等典型矿物的主要特征光谱^[14–16]. 所以, MMS可以通过反射光谱的遥感观测来分析铁矿石的分布、结晶

图 5 (网络版彩图)火星矿物光谱分析仪辐射定标. (a) 在轨定标流程; (b) 定标设计

Figure 5 (Color online) Radiometric calibration of MMS. (a) The in-flight calibration schedule; (b) design of calibration scheme.

图 6 (网络版彩图)火星矿物光谱分析仪探测示意图. (a) 轨道示意; (b) 像素合并

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of MMS detection. (a) Orbit; (b) pixel binned.

度、氧化程度和物理特性. 同时, Fe^{2+} 铁矿石、辉石、橄榄石以及风化物质 Fe^{3+} 矿石、赤铁矿、针铁矿和黄钾铁矾提供了分析红色星球环境变化历史的可能^[17]. 为了进行火星表面的详细矿物勘探, 以满足火星表面矿物类型、含量和空间分布探索的科学需要, 并且考虑到返回地球的数据量的工程限制, MMS除了能够检索高光谱数据外, 还应该能够获取火星表面的多光谱数据. 为了满足这一要求, 避免火星表面矿物的误判, 应设计MMS多光谱观测模式的波长位置. 本研究设计了6组波段组合, 每组由72个波段组成, 用于MMS的多光谱观测模式. 前5组可分别用于检测层状硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐、高氯酸、氧化铁和原生硅酸盐, 具有较高的准确度. 最后一组(多功能波段组)对每种典型矿物的光谱吸收特征至少有5个波段数据表征, 可用于检测所有矿物组, 但精确度稍低. 使用多光谱模式探测时, 默认多功能波段探测, 当预判想要获取的兴趣区矿物时, 探测将从这些波段组合中选择合适的波段组合, 以便在任务期间探测不同的目标. 6种组合的主要识别目标如表2所示. 表中主要波段位置范围表示的是, 在 $0.379\text{--}3.425\text{ }\mu\text{m}$ 的光谱范围内选择72个谱段位置, 除明显吸收特征谱段外, 在设定范围内选取相对较多的谱段信息以有效区分各类矿物. 例如层状硅酸盐组合, 在明显吸收特征的 $1.4, 1.9\text{ }\mu\text{m}$ 作为诊断依据外, 在 $1.25\text{--}1.3\text{ }\mu\text{m}$, $1.9\text{--}2.5\text{ }\mu\text{m}$ 区域之间选择相对更密集的谱段来更准确地区分矿物之间的不同^[18].

4 地面定标及验证实验

成像光谱仪需要在发射前进行光谱、辐射和几何定标, 以便将测量的量化强度值转换为光谱辐射数据

产品^[19]. 同时为了评估仪器数据质量, 演练数据处理方法, 验证MMS的光谱探测能力, 实验室也需要对仪器进行一系列地面实验. 以下先介绍光谱定标、辐射定标, 然后再简述对外进行成像和特征地物光谱获取对数据质量和探测能力进行的验证和评价.

为了准确测量不同矿物目标的光谱特征, 需要对MMS中各波段的光谱范围、采样步长和分辨率进行定标. 光谱定标的目的是测量MMS的光谱响应函数, 将单色仪出射狭缝放置于准直光路的焦面上, 设置出射狭缝宽度以确保输出光束的光谱带宽小于MMS设计的半峰全宽(FWHM)的1/10. MMS被放置在二维旋转台上, 通过调整方位轴实现不同视场之间的切换; 调整俯仰轴实现准确对准. 该光束由MMS接收, 单色点辐射成像在探测器阵列上, 通过单色仪的光谱扫描, 获得不同视场不同波段的光谱响应函数.

通过高斯曲线拟合分析探测器光谱维像元对应的中心波长和光谱分辨率, 如图7所示. 此外, 使用单色平行光, 得到探测器上的光谱smile效应特性如图8所示.

辐射定标的目的是获得暗背景估计系数、非均匀性校正系数和绝对辐射系数, 然后通过建立一个模型, 很好地去描述仪器对辐射的响应^[20]. 辐射定标系统主要由参考源、低温箱及其控制器组成. MMS被放置在低温箱中, 以模拟轨道上运行环境的温度, 抑制背景辐射, 并抑制气体吸收的影响. 参考源包括积分球和面阵黑体. 通过积分球从可见光到短波红外的灯组合, 以及中红外光谱不同温度的黑体, 产生不同辐射率能级的均匀面光源. 通过获取不同能级参考光源(积分球和黑体)的MMS数据立方体, 结合已知不同能级参考光源的辐射光谱, 可以确定MMS输入输出的关系, 实现绝对辐射定标.

表 2 各矿物群的多光谱波段组合

Table 2 Multispectral band set of each mineral group

多光谱波段设置	主要波段位置 (μm)	矿物类型
多功能波段组合	0.75–1.2, 1.3–2.4	层状硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐、高氯酸、氧化铁和原生硅酸盐
层状硅酸盐组合	1.25–1.3, 1.9–2.5	绿脱石、蒙脱石、伊利石、高岭石、皂石、绿泥石、蛇纹石
硫酸盐组合	0.8–1.3, 2.15–2.3, 2.4–2.7	石膏、黄钾铁矾、明矾石、硫酸镁石
碳酸盐组合	1.75–2.0, 2.25–3.0	菱铁矿、方解石、白云石、菱镁矿
高氯酸组合	0.45–1.0, 2.75–3.4	高氯酸镁、高氯酸钙、高氯酸钠、高氯酸钾、高氯酸铁、高氯酸铝
氧化铁和原生硅酸盐组合	0.75–1.18, 1.5–1.8, 2.60–2.90	针铁矿、赤铁矿、磁铁矿、水铁矿、镁橄榄石、铁橄榄石、斜长石、斜方辉石、单斜辉石

图 7 (网络版彩图) V-NIR (a)和N-MIR (b)通道的光谱特性(中心波长和光谱分辨率)

Figure 7 (Color online) Spectral characteristics (central wavelength and spectral resolution) of V-NIR (a) and N-MIR (b) channels.

图 8 (网络版彩图) MMS的光谱smile效应特征. (a) V-NIR通道; (b) N-MIR通道

Figure 8 (Color online) Spectral smile distribution characteristics of MMS. (a) V-NIR channel; (b) N-MIR channel.

比较线性、对数、指数和二次函数的效果后, 最终选择一次函数. 图9分别显示了V-NIR和N-MIR通道每个积分时间的辐射校准系数. 图10分别显示了V-NIR和N-MIR通道绝对辐射定标的误差曲线. V-NIR通道绝对辐射校准误差最大误差约为10.1%, N-MIR通道绝对辐射校准误差最大误差约为5.1%. 无论积分时间长还是积分时间短, 误差随波段的变化曲线都没有明显的趋势, 说明得到的辐射定标系数最大程度地显示

了DN值与辐射度之间的关系. N-MIR通道绝对辐射校准误差表明每个积分时间的辐射校准误差都在5.1%以下. 也说明减去暗背景后, 检测单元随时间推移引起的空间维度带状噪声和暗背景效应基本消除.

完成光谱定标和辐射定标后, 在地面通过实验对仪器进行性能评估. 实验装置如图11所示, 卤素灯光源负责对待测样品粉末或标准反射率板进行照明, MMS和标准比对光谱仪(ASD和DP 102F)同时在相同

图 9 (网络版彩图) V-NIR (a)和N-MIR (b)通道的辐射定标系数

Figure 9 (Color online) Coefficient of determinations in V-NIR region (a) and N-MIR channel (b).

图 10 (网络版彩图) V-NIR (a)和N-MIR (b)通道不同积分时间的绝对辐射定标误差

Figure 10 (Color online) Absolutely radiometric calibration errors of various integration times in the V-NIR (a) and N-MIR (b) channel.

光照探测几何条件下对待测样品或者标准反射率板进行反射信号测量. MMS放置在装有蓝宝石玻璃和内部充满氮气的低温室中来保持低温探测环境. 在该环境探测条件下, 完成所有预设单矿物样品和混合样品的MMS光谱及比对光谱数据获取, 如蒙脱石、超强石、针铁矿、绿泥石、磷灰石等.

根据MMS测量的光谱辐射率计算并联系样品的反射系数, 利用0.35–2.5 μm 的漫反射标准板和2.5–3.4 μm 的镀金标准板光谱进行归一化, 将粉末样品的光谱转换为反射系数. 两个探测器之间重叠光谱的拼接方法为以N-MIR通道为参考, 比较光谱的一阶

导数, 找到重叠光谱角(1.03–1.07 μm)中最相似的部分, 并计算V-NIR光谱的补偿系数. 图12(a)显示了使用具有高光谱分辨率的MMS的D-26操作模式获取的矿粉样品的反射系数. 紫苏辉石是一种典型的硅酸盐矿物, 具有宽带吸收特性. 图12(b)比较了紫苏辉石样品在不同操作模式下的测量结果. 所有5个多光谱波段集也可以描述光谱特性. 其中, 多功能集(多光谱集1)对于1.0和2.0 μm 附近的关键吸收位置具有更均匀的采样分布.

为继续验证数据处理的准确性, 将图11装置旋转方向, 使MMS探测目标转向对环境模拟实验室外, 进

图 11 (网络版彩图) MMS的地面验证测试装置

Figure 11 (Color online) The MMS's ground verification test in a laboratory environment.

行高光谱成像, 图13为成像地物及从辐射定标后的图像中提取的典型目标光谱曲线, 主要包括天空、建筑物表面、绿色植被。从光谱曲线可以看出, 经过辐射定标后所得到的光谱可以清晰地观察到在0.76, 0.82,

0.94, 1.1, 1.38, 1.87, 2.06 μm 等一系列 O_2 , H_2O , CO_2 气体的吸收特征。

由地面定标及科学验证实验可知, MMS性能指标均满足设计要求, 成纹理理清晰, 可以满足火星科学探测需求。

5 总结

MMS是一台多功能的覆盖宽谱段(0.4–3.4 μm)、大视场(0.5 mrad IFOV和12° FOV)的高光谱成像光谱仪, 本文介绍了天问一号火星探测任务搭载的火星矿物光谱分析仪的探测原理与仪器特性。MMS由可见近红外及短波红外两个独立的光学系统、在轨定标组件以及电子学组件构成, 以宽谱段紧凑型高效分光技术、在轨复合实时定标技术、红外宽谱段轻型探测器组件技术等手段实现了中国首次行星高光谱探测, 为火星资源考察及行星科学研究提供了数据保障。MMS在完成研制后在轨开展了测试、定标及探测实验, 实现了对仪器功能与性能的验证。在火星停泊轨道, 火星矿物光谱分析仪首先对火星指定预选着陆区进行了探测, 随后的科学轨道探测, 将不断获得科学数据用于识别火星表面的矿物质, 包括最重要的水合矿物质和水冰。MMS将通过持续的科学数据积累, 丰富人类对火星的认识, 为孕育新科学发现做出贡献。

图 12 (网络版彩图) (a) MMS在地面验证测试中得到的单矿物粉末样品的REFF, 添加0.5的偏移量来区分。 (b) MMS利用6个不同的多光谱波段集使用MMS-D-26模式和MMS-D-208模式得到的紫苏辉石的反射系数, 添加0.5的偏移量来区分

Figure 12 (Color online) (a) The REFF of monomineralic powder samples obtained by the EQM of MMS in the ground verification test, offset of 0.5 is added to distinguish. (b) The REFF of hypersthene obtained by the EQM of MMS used MMS-D-26 mode, and MMS-D-208 mode with 6 different multispectral band sets, offset of 0.5 is added to distinguish.

图 13 (网络版彩图) MMS假彩色立方体及特征地物光谱

Figure 13 (Color online) False color data cube and characteristic feature spectrum of MMS.

参考文献

- Farmer V C. The layer silicates. The Infra-Red Spectra of Minerals. London: European Mineralogical Union, 1974. 331–364
- Clark R N. Reflectance spectra. In: Ahrens T J, ed. Rock Physics Phase Relations: A Handbook of Physical Constants. Washington DC: American Geophysical Union, 1995. 178–188
- Bonello G, Bibring J P, Poulet F, et al. Visible and infrared spectroscopy of minerals and mixtures with the OMEGA/MARS-EXPRESS instrument. *Planet Space Sci*, 2004, 52: 133–140
- Murchie S, Arvidson R, Bedini P, et al. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). *J Geophys Res*, 2007, 112: E05S03
- Bakker W H, van Ruitenbeek F J A, van der Werff H M A, et al. Processing OMEGA/Mars Express hyperspectral imagery from radiance-at-sensor to surface reflectance. *Planet Space Sci*, 2014, 90: 1–9
- Murchie S L, Seelos F P, Hash C D, et al. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars investigation and data set from the Mars Reconnaissance Orbiter's primary science phase. *J Geophys Res*, 2009, 114: E00D07
- Carter J, Poulet F, Bibring J P, et al. Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: Updated global view. *J Geophys Res Planets*, 2013, 118: 831–858
- Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the martian surface. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42: 291–315
- Ye P J, Sun Z Z, Rao W, et al. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China. *Sci China Technol Sci*, 2017, 60: 649–657
- Jia Y, Fan Y, Zou Y. Scientific objectives and payloads of Chinese first Mars exploration. *Chin J Spac Sci*, 2018, 38: 650–655
- Li C, Zhang R, Yu D, et al. China's Mars exploration mission and science investigation. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 57
- Liu B, Ren X, Liu D, et al. Ground validation experiment and spectral detection capability evaluation of Mars Mineralogical Spectrometer

- (MMS) aboard HX-1 orbiter. *Space Sci Rev*, 2022, 218: 1
- 13 He Z, Xu R, Li C, et al. Mars Mineralogical Spectrometer (MMS) on the Tianwen-1 mission. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 27
- 14 Bishop J L, Pieters C M, Burns R G. Reflectance and Mössbauer spectroscopy of ferrihydrite-montmorillonite assemblages as Mars soil analog materials. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57: 4583–4595
- 15 King T V V, Ridley W I. Relation of the spectroscopic reflectance of olivine to mineral chemistry and some remote sensing implications. *J Geophys Res*, 1987, 92: 11457–11469
- 16 Liu Y, Wu X, Liu Z H, et al. Geological evolution and habitable environment of Mars: Progress and prospects (in Chinese). *Rev Geophys Planet Phys*, 2021, 52: 416–436 [刘洋, 吴兴, 刘正豪, 等. 火星的地质演化和宜居环境研究进展. *地球与行星物理论评*, 2021, 52: 416–436]
- 17 Clauser C, Huenges E. Thermal conductivity of rocks and minerals. In: Ahrens T J, ed. *Rock Physics and Phase Relations—A Handbook of Physical Constants*. AGU Reference Shelf Series 3. Washington DC: American Geophysical Union, 1995. 105–126
- 18 Liu D, Ren X, Zhang H, et al. Preliminary wavelengths selection for multispectral detection mode of Mars Mineral Spectrometer of China's first Mars exploration. In: *EPSC Abstracts*, EPSC2018-574-2, 2018
- 19 Rui X, Gang L, Ma Y H, et al. Calibration of Visible and Near-infrared Imaging Spectrometer (VNIS) on Lunar surface. In: *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2014. 9263
- 20 Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sens Environ*, 2009, 113: 893–903

Detection mechanism and instrument characteristics of the Mars Mineralogical Spectrometer for the Tianwen-1 orbiter

HE ZhiPing^{1,2*}, WU Bing^{1,2}, XU Rui¹, LIU ChengYu¹, LI ChunLai¹, YUAN LiYin¹,
LV Gang¹ & JIN Jian¹

¹ Key Laboratory of Space Active Optical-Electro Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The Mars Mineralogical Spectrometer (MMS) is the hyperspectral imager (0.379–1.076 μm at 2.73 nm/band, 1.033–3.425 μm at 7.5 nm/band) on China's first Mars exploration mission, the Tianwen-1 Mars Orbiter. In an elliptical orbit, MMS uses far-fire point calibration and near-fire point push-broom imaging to obtain spectral and spatial information on the surface of Mars. MMS can obtain visible and infrared images with high-resolution reflectance spectra of the key areas of the Martian surface and can map the global surface using its multispectral mode. It is equipped with the option of performing continuous spectral sampling and interval sampling of the entire spectrum. Additionally, it has the ability to perform in-flight calibration. The article introduces the instrument's structure and detection principle, as well as conducts laboratory calibration and ground verification to show that the instrument meets the detection requirements. Planetary scientists will utilize MMS to acquire spectral data from the surface of Mars and evaluate the types, contents, and geographic distribution of minerals on the surface of Mars, providing critical support for elucidating the evolution of Mars.

Mars Mineralogical Spectrometer (MMS), Tianwen-1, hyperspectral exploration, orbiter

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 78.30.-j, 85.60.-q

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0265](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0265)