



天问二号有效载荷科学数据产品的设计与验证

谭旭^{1,2}, 张晓霞^{1,2}, 陈王丽^{1,2}, 严韦^{1,2}, 任鑫^{1,2}, 苏彦^{1,2*}, 刘建军^{1,2}

1. 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100101

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

*联系人, E-mail: suy@nao.cas.cn

收稿日期: 2025-03-25; 接受日期: 2025-05-19; 网络出版日期: 2025-06-05

国家自然科学基金(编号: 62227901, 12461160265)资助项目

摘要 天问二号任务以近地小行星2016 HO₃和主带彗星311P作为探测对象, 搭载了11台载荷, 探测两个小天体的形貌、表面物质组分、内部结构和临近空间环境. 本文基于天问二号载荷的数据特性, 介绍了天问二号数据产品的处理过程和存储结构, 围绕数据产品生产的过程, 提出了各个阶段数据产品的验证方法. 本文将为天问二号数据的科学应用提供参考.

关键词 天问二号, 数据产品, 数据处理, 数据验证

PACS: 96.10.+i, 96.25.-f, 96.30.Ys

1 引言

天问二号(Tianwen-2)是中国的第一次小行星探测任务, 计划通过一次发射实现近地小行星2016 HO₃飞越、伴飞、附着与取样返回, 以及主带彗星311P伴飞等多目标、多任务探测. 天问二号任务的科学目标包括: (1) 测定近地小行星和主带彗星的轨道参数、自转参数、形状大小、热辐射特性等物理参数, 开展轨道动力学研究; (2) 开展近地小行星和主带彗星的形貌、物质组分、内部结构以及可能的喷发物等研究; (3) 开展返回样品的实验室分析研究, 测定样品物理性质、化学与矿物成分、同位素组成和结构构造, 开展小行星和太阳系早期的形成与演化研究^[1]. 为了实现天问二号任务的科学目标, 探测器上配置了可见红外

成像光谱仪、热辐射光谱仪、多光谱相机、中视场彩色相机、探测雷达、磁强计、带电粒子与中性粒子分析仪、喷发物分析仪、窄视场导航敏感器、激光一体化导航敏感器和旋转衍射高光光谱相机等11种有效载荷. 这些载荷产生的探测数据在行星科学的研究中扮演着重要的角色. 而一套可靠、规范且信息量丰富的高质量数据产品则是产出高质量科学研究成果的基石.

地面应用系统(Ground Research and Application System, GRAS)主要负责我国月球与行星探测任务有效载荷运行管理, 数据接收、处理、管理, 以及组织探测数据应用与研究^[2]. 为了与国际行星探测任务数据接轨, 从嫦娥一号开始, 我国的月球和行星探测任务的数据产品在美国宇航局(NASA)推出的行星数据

引用格式: 谭旭, 张晓霞, 陈王丽, 等. 天问二号有效载荷科学数据产品的设计与验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279515

Tan X, Zhang X, Chen W, et al. Design and validation of the payload scientific data products for Tianwen-2 mission (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 279515, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0122](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0122)

系统(Planetary Data System, PDS)^[3-6]中规定的存储规范的基础上,进行了适应性的修改,形成了月球和行星探测数据产品的分级、命名和格式的规范^[7]. 其中,嫦娥一号、嫦娥二号和嫦娥三号是基于PDS3 (Planetary Data System version 3)进行的数据存储. 随着数据量的不断增加,新类型的载荷数据的不断涌现以及国际合作越来越密切,在应用PDS3的过程中逐渐暴露了一些问题,例如,由于PDS3对数据格式的限制,使数据产品文件需要经过格式转换后才能被业内通用的数据处理软件解析. 除此之外,由于PDS3通过文本的方式使用ODL (Object Description Language)语言,即“keyword=value”,来描述科学数据,不利于数据产品在互联网中的传输以及元数据信息的检索,因此,需要制定和应用新的存储标准和规范.

PDS4 (Planetary Data System version 4)是NASA在互联网技术的推动下提出的新一代基于信息模型建立的面向对象的数据存储系统. 从嫦娥四号任务^[8,9]开始,地面应用系统便基于PDS4制定的存储格式规范不断地优化和升级各次任务的数据产品,到天问二号任务已经形成了较完善的数据生产线和产品体系规范.

本文将介绍天问二号任务11种有效载荷的数据产品的数据特点、处理过程、存储结构以及验证过程,为后续天问二号任务的数据应用和科学研究提供重要参考.

2 天问二号载荷和数据特性

天问二号探测任务选择地球准卫星2016 HO₃和主带彗星311P为探测对象,由于目前国际上对这两颗小天体轨道和基本物理属性的了解十分有限,本次任务配置了相机、光谱仪、探测雷达、磁强计以及空间环境类的载荷对近地小行星和主带彗星进行表面形貌、表面物质成分及热辐射特性、内部结构、临近空间环境的探测,以及对主带彗星尘埃的物理特性、主带彗星挥发分及游离气体分子的特征进行探测. 天问二号任务将获得目标小天体的热辐射状态、表面特征、成分和密度等探测数据,探测数据的内容如表1所示. 与前期月球和火星的任务相比,天问二号的探测数据具有以下特点.

(1) 目标特性不同: 不同于月球和火星探测,天问二号任务的探测目标更小,探测数据聚焦小行星的轨

道参数、自转参数、大小形状和热辐射等物理参数,需要建立全新的坐标系来描述探测数据,这对设计数据的几何信息以及几何定位处理提出了新的要求.

(2) 探测方式不同: 天问二号采用悬停探测为主的方式在不同的测站进行探测,探测距离在不断变化,为了便于用户使用,我们将每个地面天线接收到的数据按照探测周期重新进行了组织,定义在每一个测站完成一次完整科学探测所需的时间单元为一个探测周期.

(3) 数据具有多样性: 天问二号任务探测数据的类型包括图像数据,点云数据,光谱数据,雷达回波数据,磁场数据,带电粒子、中性粒子、尘埃粒子等粒子类探测数据以及气体和挥发分的数据. 丰富的探测数据类型涵盖了多个学科类型,因此在设计数据的存储结构、各级数据产品的元数据信息时,需要充分考虑不同的学科类型对探测数据的使用需求.

(4) 数据验证难度大: 天问二号任务是国际上首次对2016 HO₃和311P进行探测的任务,探测数据具有更高的分辨率和精度. 由于缺少历史的比对数据,在进行数据产品的验证时,需要充分设计地面验证试验和数据的分析验证方法.

基于上述对探测数据特征的分析,我们开展了以下数据产品和验证方法的创新型设计.

(1) 目标特性驱动的新型几何模型与小行星固连坐标系建立: 由于小天体形状不规则且自转复杂,传统天体固连坐标系(如火星的经度/纬度框架)不再适用. 天问二号任务需基于光学影像数据构建的小天体三维模型,建立自适应小行星固连坐标系. 除此之外,以转动惯量方向为基准轴,结合几何中心位置动态调整坐标系原点. 同时设计基于表面特征点匹配的定位算法,解决悬停探测中探测距离变化导致的几何畸变问题.

(2) 迭代式的数据产品更新机制: 由于小天体的轨道参数、自转参数、形状大小等物理参数既是载荷探测内容的一部分,又是探测数据重要的元数据信息,因此我们设计了数据产品的版本更新迭代机制来满足用户在不同时间对数据的需求,例如,由粗精度的几何定位信息向高精度的不同坐标系下的几何定位信息不断迭代.

(3) 无历史数据的对比验证方法: 不同于月球和火星探测任务,天问二号任务没有历史探测数据作为参

表 1 天问二号载荷和数据特性

Table 1 Tianwen-2 payloads and data characteristics

数据类型	配置载荷	数据内容	主要数据应用
图像数据	中视场彩色相机	小行星和主带彗星表面的彩色图像, 地元分辨率为 0.29 m@3 km, 光谱范围为430–760 nm, 全幅图像像元数量为5120×3840, 除此之外还包括开窗和像素合并的数据	测定小行星和主带彗星的自转参数、形状大小等物理参数, 探测小行星和主带彗星的形貌和表面物质组分, 获取小行星样品的背景信息
	多光谱相机	可见和近红外谱段的多光谱图像数据, 8个谱段的光谱范围(中心波长(半高宽))分别是479.5 nm (43 nm), 549.6 nm (35 nm), 649.8 nm (37 nm), 700.6 nm (36 nm), 747.1 nm (35 nm), 896.5 nm (65 nm), 946.5 nm (55 nm), 994.5 nm (50 nm). 全幅图像像元数量为2048×2048, 除此之外还包括开窗和抽样的数据	
	窄视场导航敏感器	可见谱段的全色及多谱段图像数据, 全色谱段的光谱范围为450–800 nm, 像元分辨率为2.4 cm@轨道高度3 km, 全幅图像像元数量为5120×3840	
点云数据	激光一体化导航敏感器	小天体地形三维点云数据, 激光测距精度优于3 cm, 成像分辨率为3.3 cm@轨道高度300 m	探测小行星采样区的形貌, 获取小行星样品的背景信息
光谱数据	可见红外成像光谱仪	小行星和主带彗星表面可见至红外谱段高分辨率光谱数据, 光谱范围为0.45–4.50 μm , 谱段数量为320. 最高像元分辨率为0.22 m@轨道高度3 km. 线阵成像, 最大像元数量为1024	探测小行星和主带彗星的表面物质成分、可能的水和有机物等, 以及热辐射物理特性, 获取小行星样品的背景信息
	热辐射光谱仪	热辐射光谱数据, 光谱范围为5.0–50 μm , 谱段数量为824. 像元分辨率为13.33 m@轨道高度3 km	
	旋转衍射高光谱相机	小行星和主带彗星表面高分辨率光谱数据, 光谱范围480–900 nm, 谱段数量为43. 像元数量为1024×1024	
雷达回波数据	探测雷达	小行星和主带彗星表层和次表层雷达回波数据, 低频通道的中心频率为150 MHz $\pm$ 500 kHz, 高频通道的中心频率为900 MHz $\pm$ 500 kHz	探测小行星及主带彗星的内部结构
磁场数据	磁强计	小行星和主带彗星磁场数据, 数据的分辨率优于0.01 nT, 采样率包括1, 10和128 Hz	
粒子或气体数据	带电粒子与中性粒子分析仪	热离子探测能谱数据, 能量范围为2.79 eV–32.03 keV, 能量分辨率为8.79%; 热电子探测能谱数据, 能量范围为1.07 eV–20.61 keV, 能量分辨率为14.29%; 太阳风离子探测能谱数据, 能量范围为5 eV–5 keV, 能量分辨率为4.23%; 主带彗星大气与电离层离子质谱数据, 质谱范围为1–350 amu, 质谱分辨率为 ≤ 0.17 amu@1–50 amu, ≤ 0.52 amu@51–150 amu, ≤ 1.22 amu@151–350 amu	探测小行星和主带彗星的临近空间环境信息, 包括: (1) 研究小行星可能的磁场分布; (2) 研究太阳风与小行星的相互作用; (3) 研究主带彗星大气层和电离层形成与演化、主带彗星的活动性驱动力起源和机制; (4) 研究主带彗星可能的气体分子种类和含量; (5) 探测主带彗星的尘埃物理、动态特性及其空间分布特征
	喷发物分析仪-挥发分分析仪	主带彗星挥发分及游离气体分子质谱数据, 质谱范围为1–150 amu, 质谱分辨率为 ≤ 0.25 amu@1–10 amu; ≤ 1 amu@11–150 amu	
	喷发物分析仪-尘埃分析仪	主带彗星尘埃粒子大小、质量、速度以及累计质量数据, 颗粒半径范围为0.5–500 μm , 颗粒质量范围为 1×10^{-10} – 4×10^{-1} g, 颗粒速度范围为0.2–500 m/s, 颗粒累计质量范围为 1×10^{-9} – 3×10^{-4} g/cm ²	

考数据进行比对分析, 因此根据不同载荷探测数据的特性模拟小天体环境和制备模拟样品, 然后通过地面验证试验进行一致性检验是主要的验证方法.

3 天问二号数据产品的处理

天问二号探测器下传的数据信号由地面天线接

收, 经地面解调、帧同步、解扰、译码、天线合成等处理过程后, 形成了完整的、字节对齐的数据帧序列, 定义为数传帧数据. 地面数据处理的目的是对数传帧数据进行解帧、解包等处理还原有效载荷的原始探测数据, 然后经过一系列的定标校正、几何定位处理后, 生成可用于科学研究的各级数据产品. 为了便于数据的正确性验证、存储和使用, 我们将数据的处理过程

划分为3个级别, 分别是0级处理、1级处理和2级处理, 通过不同级别的处理得到了不同用途的数据产品.

(1) 0级数据处理

天问二号任务有效载荷产生的原始探测数据, 经过探测器系统在星上的数据的采集、处理、存储、合路复接, 然后组帧组包处理成符合国际空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data System, CCSDS)标准建议的数据格式, 再经过信道编码、加扰处理, 形成物理信道访问单元(Channel Access Data Unit, CADU), 送到物理信道进行传输. 按照CCSDS定义的文件可靠传输协议(CCSDS File Delivery Protocol, CFDP)对有效载荷的数据进行组帧和组包, 能够有效保证文件的可靠传输, 组帧后的数据称为有效载荷源包. 0级数据处理是上述过程的逆过程, 即对数传帧数据进行解帧、解包的过程. 首先, 对数传帧数据进行解析, 根据虚拟信道标识符类型, 从每个虚拟信道中解析出有效数据, 生成有效载荷源包, 即0A级数据产品. 然后, 对有效载荷源包进行解析, 提取其中的有效数据, 生成有效载荷的科学数据和相关工程参数, 即0B级数据产品. 由于数传链路资源有限, 天问二号的多数载荷均具备数据压缩功能, 因此在0B级数据处理中还对压缩数据进行了解压缩处理.

(2) 1级数据处理

天问二号任务在不同距离的测站以悬停探测为主的方式获取探测数据, 由于一次数传得到的数据未必

能完全覆盖载荷一次探测所得到的数据, 为了便于后续数据的应用, 在1级处理中重新对载荷的数据进行了组织. 定义近距离探测之前一个地球日为一个探测周期, 近距离探测期间每个测站完成一次完整科学探测的时间为一个探测周期, 将每个载荷在一个探测周期内获取的数据组织为一个1级数据产品文件. 除此之外, 在1级处理中, 对各个载荷的探测数据进行了物理量的转换, 载荷后续处理中所需的一些辅助数据(例如工程遥测数据)也在这一级别与科学数据进行了时间匹配, 并添加到了科学数据中.

(3) 2级数据处理

2级数据处理是对载荷进行定标处理和几何定位等处理, 又细分为2A级处理、2B级处理和2C级处理.

2A级处理是载荷探测数据的定标处理, 其初始处理方法和参数基于载荷地面定标试验的结果确定. 但是, 经历长时间飞行, 载荷传感器以及电子学系统的响应可能会发生变化, 为了保证科学数据的可靠性, 天问二号的载荷配置有在轨定标设备或具备在轨定标工作模式, 可通过在轨定标结果修正处理模型和参数. 载荷的地面定标方法和结果在文献[10–16]中均有描述, 基于载荷地面定标结果的数据处理过程如表2所示.

2B级处理为探测数据提供几何定位信息, 基本原理是根据探测器的星历(或位置)参数、姿态参数、传感器参数等, 同时考虑小行星自转、形状等信息, 通过

表 2 天问二号载荷2A级数据处理过程

Table 2 Level 2A data processing process of Tianwen-2 payload

载荷	处理过程
中视场彩色相机 多光谱相机 窄视场导航敏感器 激光一体化导航敏感器 可见红外成像光谱仪 热辐射光谱仪 旋转衍射高光谱相机 探测雷达 磁强计	图像分幅、暗电流校正、相对辐射校正 距离校正、角度校正、点云解算、点云坐标系转换 盲元检测、盲元修复、暗背景扣除、相对辐射校正、绝对辐射校正 绝对辐射校正 图像分幅、暗电流扣除、光谱重建 回波信号幅度和相位校正处理 零偏修正、温漂修正
带电粒子与中性粒子分析仪	对热离子和热电子数据, 根据几何因子等定标参数将不同能道的计数值转换为微分通量; 对太阳风离子数据, 计算一个扫描周期内的扫描电压和监测电流; 对气体和离子的数据, 计算得到飞行时间, 以及气体或离子的计数
喷发物分析仪-挥发分分析仪	质量轴校准
喷发物分析仪-尘埃分析仪	单颗粒尘埃散射光通量、速度、动量信号的计算, 尘埃累积质量的计算

各个坐标系之间的转换, 计算观测点在空间中的指向、在天体表面的位置、载荷自身的观测几何以及其他相关几何信息. 天问二号任务中按照探测数据的类型和各类型载荷对几何信息的需求计算得到的几何信息如表3所示.

4 天问二号数据产品的存储

天问二号的数据产品通过文件的形式进行存储, 一个数据产品至少包括两个文件: 一个是科学数据, 另一个是数据标签. 除此之外, 为了便于后续的科学研究所, 与科学数据相关的一些辅助信息序列, 例如载荷的工作参数、几何信息等, 也存储为单独的文件, 称

为辅助数据.

数据标签是科学数据的说明文件, 使用可扩展标记语言(eXtensible Markup Language, XML)描述数据的元数据信息. 为了与国外行星探测数据兼容, 数据标签涵盖了PDS4.0信息模型中定义的描述行星探测数据的基本信息. 除此之外, 数据标签设计了与天问二号任务相关的信息类, 如表4所示.

科学数据是载荷的探测数据, 探测数据类型不同, 存储探测数据的数据结构便不同. 在天问二号任务中定义了5种存储结构, 分别是二进制型的表格(Table_Binary)、字符型的表格(Table_Delimited)、二维图像数组(Array_2D_Image)、三维图像数组(Array_3D_Image)以及三维光谱数组(Array_3D_Spectrum).

表 3 各类型探测数据的几何信息
Table 3 Geometric information of various types of detection data

数据类型	载荷	处理过程	几何信息
图像数据	中视场彩色相机、多光谱相机、窄视场导航敏感器	将像空间坐标系下的空间指向转到J2000惯性坐标系下的指向的过程	像面格网点的行列号、经纬度; 太阳入射角、太阳方位角; 仪器在4个角点和中心点的观测矢量; 影像的外方位元素
点云数据	激光一体化导航敏感器	将载荷基准镜坐标系下的三维坐标转到J2000惯性坐标系下的坐标的过程	点云在J2000惯性坐标系下的三维坐标
光谱数据	可见红外成像光谱仪、热辐射光谱仪、旋转衍射高光谱相机	将像空间坐标系下的空间指向转到J2000惯性坐标系下的指向的过程	像面格网点的行列号、经纬度; 太阳入射角、太阳方位角; 仪器入射角、仪器方位角、相位角
雷达回波数据	探测雷达		仪器的观测矢量; 太阳入射角、太阳方位角; 探测器的姿态、位置、速度; 探测器相对于小行星中心J2000惯性系的距离
磁场数据	磁强计	将仪器坐标系下的空间指向转到J2000惯性坐标系下的指向的过程	
粒子或气体数据	带电粒子与中性粒子分析仪、喷发物分析仪		

表 4 天问二号数据标签的信息
Table 4 Information of data label of Tianwen-2

数据标签	内容
数据产品属性	包括数据产品ID、数据产品版本、数据产品级别、载荷名称、探测周期编号等信息
工作模式参数	包括工作模式、曝光模式、曝光档位、曝光时间、压缩倍率、增益、载荷温度、采样时间间隔等参数
仪器参数	包括波段范围、焦距、像元尺寸、像元分辨率、像主点位置等参数
处理模型参数	包括数据处理模型、处理系数以及对数据处理模型的描述信息等
探测对象的位置信息	小天体表面探测点在给定坐标系下的位置信息, 例如经纬度
探测对象的方向信息	小天体表面的探测点、太阳、仪器之间的方向信息, 例如太阳入射角、太阳方位角、仪器入射角等
载荷的观测矢量	载荷传感器的观测矢量, 如果是面阵传感器, 则为4个角点和中心点的观测矢量
相机的外方位元素	包括相机投影中心、俯仰角、偏航角、滚动角等
探测器姿态	探测器姿态四元数或姿态角
探测器星历	探测器的位置、探测器的速度、探测器相对于小行星中心J2000惯性系的距离

辅助数据是指用于表征科学数据状态的关键工程参数, 或用于支持科学数据处理的必要辅助信息, 通过字符型的表格(Table_Delimited)存储, 格式为csv格式. 辅助数据不是一个数据产品的必要组成部分.

根据科学用户使用数据的需求, 对天问二号各载荷的存储格式进行如下设计.

(1) 中视场彩色相机、多光谱相机、窄视场导航敏感器的探测数据为图像数据, 通过图像类型的数组(Array_3D_Image, Array_2D_Image)来存储, 数据格式为Raw格式. 几何信息通过字符型的表格(Table_Delimited)存储为定位格网文件, 格式为csv格式.

(2) 热辐射光谱仪的探测数据为单点光谱数据, 几何信息和光谱数据通过字符型的表格(Table_Delimited)存储, 格式为csv格式.

(3) 可见红外成像光谱仪、旋转衍射高光谱相机的探测数据为三维光谱数据, 通过光谱类型的数组(Array_3D_Spectrum)存储, 数据格式为Raw格式. 几何信息通过字符型的表格(Table_Delimited)存储为定位格网文件, 格式为csv格式. 积分时间、温度等工作参数通过字符型的表格(Table_Delimited)存储为辅助数据文件, 格式为csv格式.

(4) 探测雷达的探测数据为雷达回波信号, 通过二进制型的表格(Table_Binary)存储, 数据格式为Raw格式.

(5) 磁强计的探测数据为磁场的矢量数据, 通过字符型的表格(Table_Delimited)存储, 格式为csv格式.

(6) 喷发物分析仪和带电粒子与中性粒子分析仪的探测数据为粒子的微分通量或气体挥发分计数值, 探测数据通过字符型的表格(Table_Delimited)存储, 格式为csv格式.

(7) 激光一体化导航敏感器的探测数据为点云数据, 通过二进制型的表格(Table_Binary)存储, 数据格式为Raw格式.

5 天问二号数据产品的验证

天问二号数据产品发布前需要经过充分的验证来保证产品的正确性, 验证的过程如下.

(1) 发射前对数据处理方法正确性的验证: 天问二号任务是国际上首次对2016 HO₃和311P进行探测的任务, 由于对这两颗小天体的已知特性了解十分有限,

因此对载荷的数据处理方法的研究也是不断迭代的过程. 尽管每个载荷在发射前都进行了定标, 确定了载荷系统内部的传递误差, 以及测量数据与实际物理量之间的定量关系. 但是由于目标小天体的空间环境和自身特性对数据的处理精度具有影响, 因此还需要开展地面的科学验证试验对载荷的定标处理方法及流程进行合理性和有效性的检验. 地面应用系统和载荷团队组织开展了每个载荷的地面科学验证试验, 验证试验完成后, 地面应用系统组织了科学同行研讨会, 对数据的处理方法和结果进行了确认, 参会者包括载荷团队、数据处理团队和科学应用专家.

(2) 发射前对数据产品正确性的验证: 为了保证数据处理方法实现正确, 处理结果满足正确性的要求, 我们使用器地对接试验和科学验证试验的数据, 对数据产品进行了正确性的验证, 验证的内容包括对数据产品的内容和格式两方面进行验证.

与参考数据进行对比分析是评估数据内容正确性的主要验证方法. 利用地面科学验证试验中获取的数据, 使用地面应用系统的数据处理软件(DPSA)进行处理, 与第三方软件处理的结果进行对比. 主要的对比方法包括统计分析和典型区域对比, 主要统计指标包括均方根误差(RMSE)、偏差等, 较低的RMSE和偏差表明数据处理性能较好. 典型区域对比主要通过时间信息找到典型的单采样点进行对比, 如果对比结果在允许的误差范围内, 则认为数据具有良好的一致性. 验证结果表明由DPSA处理得到的数据产品与地面验证试验中的处理结果一致.

对数据产品格式的验证主要是验证数据存储结构是否正确, 数据标签对探测数据的描述是否正确. 按照第4节对数据存储结构的描述, 我们开发了一种读取数据并进行格式验证的工具, 用于检查数据标签在语法和语义方面是否符合PDS规范的要求. 同时该工具可以对第4节所述的5种数据存储结构进行图形化显示, 并配备多种分析插件, 为验证提供支撑.

(3) 在轨数据质量评估: 由于在轨空间环境发生了变化, 另外探测器经过长时间飞行, 传感器的特性也会发生变化, 因此需要进一步对在轨的数据质量进行评估. 为了解决传感器在轨状态和地面试验状态的差异性问题, 天问二号的载荷配置了在轨定标设备或在轨定标模式, 经过一段时间的在轨运行后使用在轨定标的结果修正地面的处理方法和参数. 中视场彩色相机

和窄视场导航敏感器通过对深空暗背景成像获取相机的暗电流数据; 多光谱相机携带一块定标漫射板, 在每次正式探测前对定标漫反射板进行成像获取定标数据; 热辐射光谱仪探测期间会定期指向深空进行冷空间和黑体定标; 探测雷达配置了噪声测量模式和低频定标模式; 磁强计携带在轨定标线圈, 通过对定标线圈加电后产生的磁场进行探测确定探头方向. 除此之外, 喷发物分析仪和带电粒子与中性粒子分析仪也将在小行星转移段、返回转移段以及主带彗星转移段定期进行开机自检.

由于没有历史探测数据作为对比, 天问二号任务的在轨数据质量评估主要是基于地面验证试验的结

果, 与小天体的地基观测数据和载荷的在轨定标数据相结合, 综合评价数据产品的质量. 在数据下传后6个月内, 地面应用系统将完成数据产品的质量评价, 将符合发布条件的数据产品发布给用户.

6 总结

本文根据天问二号任务有效载荷科学数据的特性对科学载荷数据产品进行了设计, 前期的验证结果表明天问二号有效载荷科学数据的处理、组织和存储方法正确、合理、可靠. 随着探测器发射后进入在轨测试, 将进一步验证数据处理方法、评估数据产品质量.

致谢 感谢载荷研制团队在数据处理方法的确定和数据产品的验证中提供的帮助.

参考文献

- Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2024, 11: 304–310 [李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置. *深空探测学报*, 2024, 11: 304–310]
- Liu J J, Su Y, Zuo W, et al. Ground research and application system of China's first Mars exploration mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2018, 5: 414–425 [刘建军, 苏彦, 左维, 等. 中国首次火星探测任务地面应用系统. *深空探测学报*, 2018, 5: 414–425]
- Hughes J S, Crichton D, Hardman S, et al. PDS4: A model-driven planetary science data architecture for long-term preservation. In: *Proceedings of the IEEE 30th International Conference on Data Engineering Workshops*. Chicago: IEEE, 2014. 134–141
- Jet Propulsion Laboratory. Planetary Data System Standards Reference. Version 1.12.0. 2019, https://pds.nasa.gov/datastandards/documents/sr/v1/StdRef_1.12.0.pdf
- Jet Propulsion Laboratory. PDS4 Information Model Specification. Version 1.12.0.0. 2019, https://pds.nasa.gov/datastandards/documents/im/v1/index_1C00.html
- Jet Propulsion Laboratory. The PDS4 Data Provider's Handbook. Version 1.12.0.0. 2019, https://pds.nasa.gov/datastandards/documents/dph/v1/PDS4_DataProvidersHandbook_1.12.0.pdf
- Chinese Academy of Sciences. Hierarchy and Nomenclature of Lunar Exploration Data Products: GB/T 33996-2017 (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2017 [中国科学院. 月球探测数据产品分级与命名: GB/T 33996-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017]
- Li C, Zuo W, Wen W, et al. Overview of the Chang'e-4 mission: Opening the frontier of scientific exploration of the lunar far side. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 35
- Li C, Zhang R, Yu D, et al. China's Mars exploration mission and science investigation. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 57
- Yang J F, Tao J Y, Ge W, et al. Design and calibration test of Tianwen-2 multispectral camera (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279506 [杨建峰, 陶金有, 葛伟, 等. 天问二号多光谱相机设计与定标试验. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2025, 55: 279506]
- Li C H, Zhao C X, Tan X, et al. Verification of detection mechanism and design of dust multi-properties analyzer onboard Tianwen-2 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279512 [李存惠, 赵呈选, 谭旭, 等. 天问二号尘埃分析仪探测机理与设计验证. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2025, 55: 279512]
- Su B, Zhang A B, Kong L G, et al. Charged and neutral particle analyzer for Tianwen-2 mission (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279511 [苏斌, 张爱兵, 孔令高. 天问二号探测器带电粒子与中性粒子分析仪. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2025, 55: 279511]
- Liu G L, Qiao L, Zhou L, et al. Designing and validation of asteroid medium angle camera (AMAC) of Tianwen-2 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279503 [刘光林, 乔丽, 周黎, 等. 天问二号中视场彩色相机设计与验证. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2025, 55: 279503]

- 14 Liu R R, Xu H, Yang Y S, et al. Design and calibration of the volatiles ion trap analyzer for the Tianwen-2 mission (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279513 [刘冉冉, 许浒, 杨永帅, 等. 天问二号挥发分分析仪设计与地面定标. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279513]
- 15 Li S L, Li J W, Liu R D, et al. Design and validation of asteroid core scan radar (ACSR) of Tianwen-2 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279510 [李拴劳, 李佳威, 刘瑞冬, 等. 天问二号探测雷达的设计与验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279510]
- 16 Zhu F H, Zhang Y F, Zheng Y, et al. Design and verification of laser integrated navigation sensor for the Tianwen-2 probe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279505 [朱飞虎, 张运方, 郑岩, 等. 天问二号激光一体化导航敏感器设计与验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279505]

Design and validation of the payload scientific data products for Tianwen-2 mission

TAN Xu^{1,2}, ZHANG Xiaoxia^{1,2}, CHEN Wangli^{1,2}, YAN Wei^{1,2}, REN Xin^{1,2}, SU Yan^{1,2*} & LIU Jianjun^{1,2}

¹ Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

² National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

*Corresponding author (email: suy@nao.cas.cn)

The Tianwen-2 mission targets the near-Earth asteroid 2016 HO₃ and the main-belt comet 311P as its subjects of exploration. It is equipped with 11 payloads to investigate the topography, surface material composition, internal structure, and proximate space environment of these two small celestial bodies. Based on the data characteristics of the Tianwen-2 payloads, we discuss the whole process of data product generation from the data pipeline design to data validation. This paper can provide practical reference for Tianwen-2 data application.

Tianwen-2, data products, data processing, data validation

PACS: 96.10.+i, 96.25.-f, 96.30.Ys

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0122](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0122)