

中国首次火星探测任务地面应用系统

刘建军^{1,2,3}, 苏彦^{1,2}, 左维^{1,2}, 任鑫^{1,2}, 孔德庆^{1,2}, 温卫斌^{1,2}, 张洪波^{1,2}, 李春来^{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;
3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 中国首次火星探测任务(HX-1)计划2020年通过一次发射实现火星环绕和着陆巡视,对火星开展全球性、综合性的环绕探测,在火星表面开展区域巡视探测。地面应用系统是首次火星探测任务工程五大系统之一,主要负责科学探测计划制定,有效载荷运行管理,探测数据的接收、处理、解译和管理,组织开展科学数据的应用和研究等任务。在分析国外类似系统和火星探测地面应用系统的特点和难点基础上,从系统的主要任务和技术指标出发,介绍了系统总体布局、分系统主要功能、组成和设计。

关键词: 火星探测; 地面应用系统; 系统组成; 分系统设计

中图分类号: V55

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)05-0414-12

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2018.05.003

引用格式: 刘建军, 苏彦, 左维, 等. 中国首次火星探测任务地面应用系统[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 414-425.

Reference format: LIU J J, SU Y, ZUO W, et al. Ground research and application system of China's first Mars exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 414-425.

引言

我国首次火星探测任务计划在2020年通过一次发射实现火星环绕和着陆巡视,对火星开展全球性、综合性的环绕探测,在火星表面开展区域巡视探测^[1]。我国首次火星探测任务科学目标包括:

1) 研究火星形貌与地质构造特征。探测火星全球地形地貌特征,获取典型地区的高精度形貌数据,开展火星地质构造成因和演化研究。

2) 研究火星表面土壤特征与水冰分布。探测火星土壤种类、风化沉积特征和全球分布,搜寻水冰信息,开展火星土壤剖面分层结构研究。

3) 研究火星表面物质组成。识别火星表面岩石类型,探查火星表面次生矿物,开展表面矿物组成分析。

4) 研究火星大气电离层及表面气候与环境特征。探测火星空间环境及火星表面气温、气压、风场,开展火星的电离层结构和表面天气季节性变化规律研究。

5) 研究火星物理场与内部结构。探测火星磁场特性。开展火星早期地质演化历史及火星内部质量分布和重力场研究。

为了实现上述科学目标,环绕器配置了7种有效载荷,包括中分辨率相机、高分辨率相机、环绕器次表层探测雷达、火星矿物光谱分析仪、火星磁强计、火星离子与中性粒子分析仪、火星能量粒子分析仪;火

星车配置了6种有效载荷,包括多光谱相机、地形相机、巡视器次表层探测雷达、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。

根据任务分工,工程分为探测器、运载火箭、发射场、测控和地面应用五大系统,在工程总体统一组织下完成工程任务。地面应用系统作为工程五大系统之一,主要负责有效载荷运行管理、数据接收、处理、管理和组织探测数据应用与研究,发挥着重要的作用^[2]。

地面应用系统是航天工程系统之一,是连接数据获取和应用的重要桥梁^[3]。在对地观测任务中,气象卫星、资源卫星、海洋卫星、环境卫星都有相应的地面应用系统^[4-14]。在月球和深空探测领域,欧州空间局(European Space Agency, ESA,以下简称欧空局)、美国都建立了相应的地面段系统。

为了全面介绍首次火星探测任务地面应用系统,本文分析了国外深空探测地面段系统的功能布局 and 我国首次火星探测任务的特点;从系统的主要任务和技术指标出发,介绍地面应用系统总体布局与组成,分系统主要功能、组成和设计。

1 深空探测地面段系统的特点

1.1 国外深空探测地面段系统

1) 欧空局深空探测地面段系统

地面段系统和任务运行是宇航任务的关键元素,

对于保证任务成功发挥着关键作用。欧空局发布了专门针对地面段和运行的标准^[15]，其规定的地面段及任务运行的基本规则、原理和要求已在欧空局宇航项目

中得到应用。地面段与空间段相对应，包括任务运行系统、载荷运行与数据系统、地面站系统和地面通信系统（见图 1）。

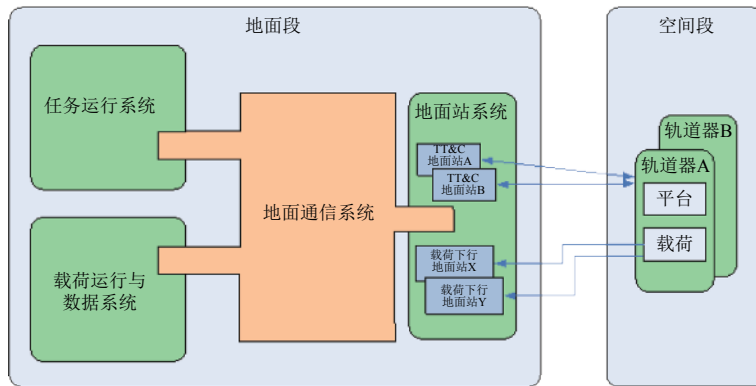


图 1 欧空局典型地面段系统组成^[15]

Fig. 1 Ground segment systems of ESA

“火星快车”项目由欧洲空间运行中心（European Space Operations Centre, ESOC）的任务运行中心（Mission Operations Centre, MOC）提供地面支持。科学运行的组织体系如图 2 所示，包括科学工作团队

（Science Working Team, SWT）、载荷支持团队（Payload Support Team, PST）、载荷运行服务团队（Payload Operations Service, POS），轨道器载荷首席专家团队（Orbiter PI Teams）^[16]。

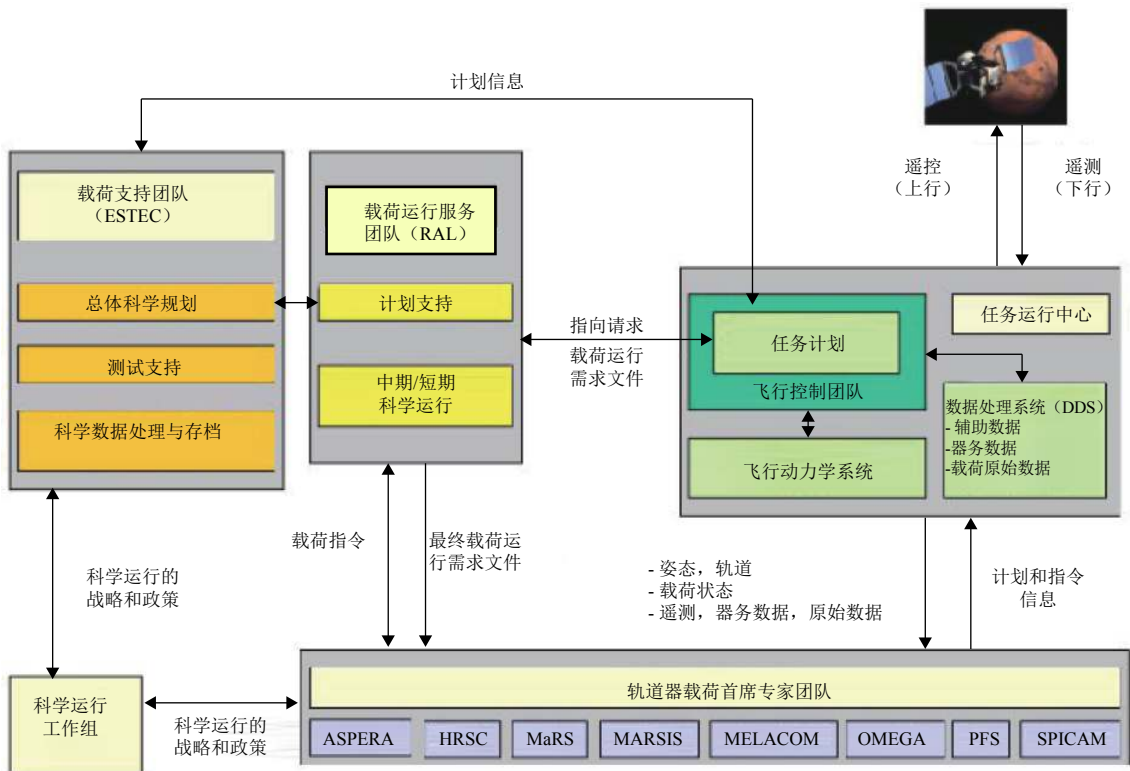


图 2 “火星快车”科学运行界面的整体组织^[16]

Fig. 2 Overall organization of the interfaces for the Mars express science operations

SWT向欧空局提供有关该任务的科学问题，并协助项目科学家制定科学战略，优化“火星快车”的科学

回报。SWT根据“火星快车”的科学需求和科学目标，通过科学运行工作组（Science Operations Working

Group, SOWG) 建立科学运行的政策、战略和指导方针。轨道器载荷首席专家团队负责在轨测试期间的载荷监视, 以及载荷计划和指令信息。测试结束后, 与MOC的交互逐渐减少。由位于欧洲航天技术中心(European Space Technology Centre, ESTEC)的PST, 以及位于英国卢瑟福阿普尔顿实验室(RPL)的POS, 共同完成有效载荷的运行管理和科学数据处理与归档。

“罗塞塔项目”(Rosetta) 地面段概况如图3所示, 包括地面站、任务运行中心(Rosetta Mission Operations Centre, RMOC)、科学运行中心(Rosetta Science Operations Centre, RSOC)、着陆器地面段

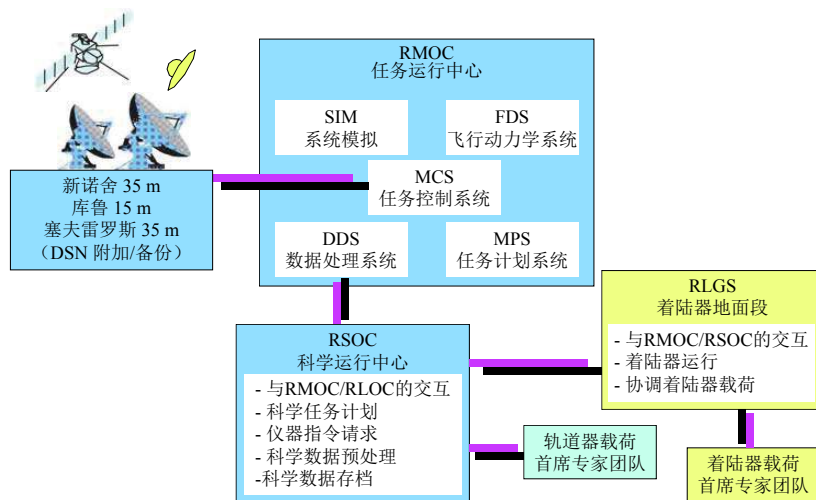


图3 “罗塞塔”地面段概况^[17]

Fig. 3 Rosetta ground segment overview

2) 美国深空探测地面段系统

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)对航天科学使命任务制定了系统运行使用架构^[18-19], 地面段系统通常包括: 地面站点、数据发布系统、使命任务运行管理中心、以及分布式的仪器科学运行中心(Science Operations Center, SOC)等(见图4)。

“火星全球勘探者”(Mars Global Surveyor, MGS)是由喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的“火星勘探者”飞行控制项目组(Mars Surveyor Flight Operations Project, MSOP)负责管理和执行飞行控制, 同时它也是火星气候轨道器和火星极地着陆器运行的实体部门。“勘探者”飞行操作的特点是通过JPL进行远程控制来实现科学仪器和探测器运行。科学团队分布在载荷首席专家、团队组长和跨学科科学家所在的研究机构。探测器的运行是由位于科罗拉多州

(Rosetta Lander Ground Segment, RLGS), 以及载荷首席专家团队(Principal Investigators, PIs)^[17]。

RMOC位于ESOC, 负责整个任务的监视和控制。整个任务寿命期间, RMOC为科学团队完成科学数据获取和任务执行提供设施和服务。RSOC负责进行有效载荷的操作控制, 支持科学探测计划和科学数据的快视。RSOC综合汇总载荷首席专家团队开展科学试验的数据注入指令请求, 并提交给RMOC。此外, RSOC负责科学数据的预处理和科学数据存档, 提供给科学团队使用。RLGS则负责支持着陆器的运行控制, 协调着陆器的科学探测计划和指令请求, 提交给RSOC。由RSOC负责整合“罗塞塔”的整体科学运行控制计划。

丹佛市的洛克希德·马丁公司负责, 勘探者探测器是由其建造和测试的。MGS项目在JPL执行任务管理、导航定位、数据管理分发和任务规划与指令序列开发。JPL利用工作站和电子通信链路等软硬件平台将科学家和工程师的任务规划、数据分析活动连接起来。下行数据则是通过深空通信网(Deep Space Network, DSN)进行接收和存储, 并由DSN组装和上行探测器的指令信息。MGS飞行操作的显著特点是分布式的运行控制。

在数据使用政策方面, MGS项目制定了数据权限策略, 规范了数据的使用和对外发布政策。载荷PIs对其科学仪器的数据获取、复原、分析、归档数据产品生产, 以及科学产出负首要责任。MGS项目发布数据到行星数据系统(PDS)上的时间, 取决于收集用于产品处理所需数据和信息的时间、生产数据产品的时间, 以及数据正确性检验的时间, 通常默认的期限是6个月^[20]。

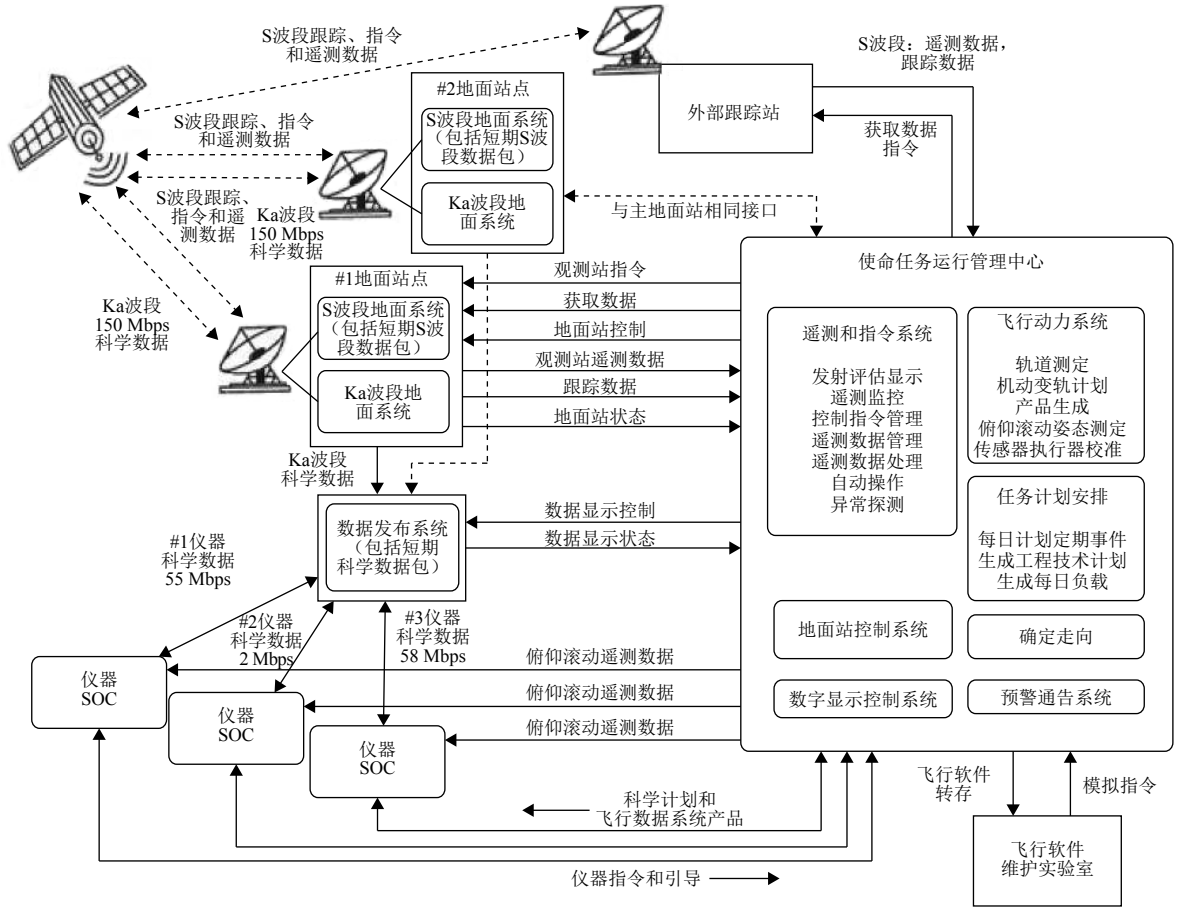


图 4 NASA 科学使命任务的系统运行使用架构示例^[9]

Fig. 4 System operational concept of NASA science missions

综合ESA和NASA深空探测地面段系统的分析，其功能布局特点主要表现在：

1) 地面段系统通常包括任务运行中心和科学运行中心，前者类似我国火星探测任务测控系统，后者与地面应用系统类似。

2) 地面段系统具有统一的、集中的数据管理和数据发布平台，制定了统一的数据产品标准。

3) 载荷首席专家团队属于地面段系统。在ESA有效载荷运行管理是相对集中的，通过统一的平台为载荷首席专家团队提供支持和运行服务；而NASA采取分布式的运行控制，由载荷首席专家团队所在单位的仪器科学运行中心SOC完成载荷管理。

4) 深空数据下传方面，一方面通过天线组阵，提高器地数传码数率；另一方面通过地面站全球布局或国际合作，增加器地数传时间，共同提升器地数传能力。

1.2 我国火星探测任务地面应用系统特点

相比探月工程和对地观测任务，我国火星探测地面应用系统有一些新的特点和难点。

1) 器地数传距离增大，数传能力要求更高。火星探测器距地球最远距离达4亿km，与探月工程地月最远距离40万km相比，地火距离是地月距离的1 000倍。信号传输的空间衰减从地月距离21 dB增大到81 dB，空间衰减增加了60 dB，需要利用天线组阵接收才能满足首次火星探测的数传任务要求。

2) 地面运行管理复杂程度提高。有效载荷运行管理方面，有效载荷类型多，探测方式多样。首次火星探测任务共配置13台有效载荷，其中环绕器7台有效载荷，火星车6台有效载荷，既有环绕器遥感探测，又有火星车的巡视探测。火星科学探测受轨道变化，太阳高度角变化和数传能力的约束，特别是火星车有效载荷探测数据由环绕器中继下传，且地火单程数传时间延迟最长约22 min，与探月工程、对地观测有效载荷运行管理都存在较大差异。如何进行科学探测任务规划，在有限探测时间内获得更多的科学数据，需要开展火星科学探测任务设计和仿真，合理规划整个任务期间的有效载荷工作模式。地面系统运行管理方面，涉及多天线组阵的运行管理和信号合成，也增大了任

务难度和复杂度。

3) 对火星先验知识的缺乏, 数据处理和反演难度加大。作为我国首个自主火星探测工程, 对火星的了解, 仅限于国外资料。由于缺乏先验知识和经验, 新研有效载荷的地面科学验证试验、探测数据处理和解译方面几乎还处于起步阶段, 需要有针对性开展相关研究。对于环绕器次表层探测雷达、火星磁强计、火星表面成分探测仪、火星表面磁场探测仪等有效载荷, 科学探测特色鲜明, 但数据处理没有先验知识, 数据标校、验证、处理和反演难度大。

2 地面应用系统任务要求和总体布局

2.1 主要任务

首次火星探测工程地面应用系统的任务是负责有效载荷在轨科学探测计划制定、在轨运行管理, 科学探测数据的接收、处理、解译和管理, 组织开展科学探测数据的应用和研究。主要包括:

- 1) 根据科学探测任务, 研究提出有效载荷配置需求。
- 2) 组织开展有效载荷地面科学验证试验, 评估科学探测数据质量。
- 3) 制定科学探测计划和有效载荷运行计划, 监视有效载荷在轨运行状态, 编制有效载荷控制指令和注入数据, 完成有效载荷在轨运行管理。
- 4) 接收科学探测数据, 完成本地存储和备份。
- 5) 完成科学探测数据的接收、处理、解译和管理, 组织开展科学探测数据的应用和研究。
- 6) 受工程总体委托, 管理科学探测数据并按规定分发数据产品。

2.2 主要技术指标

根据上述任务要求, 地面应用系统必须具备以下功能和性能:

1) 运行管理要求。对各分系统应用软件、服务器等设备的运行状态进行监控, 对地面站主要设备运行状态的关键指标进行监视。

对有效载荷进行在轨状态监视。

制定有效载荷在轨探测计划, 编制有效载荷控制指令和注入数据, 完成有效载荷在轨运行管理。

2) 数据接收要求。工作频率: X频段; 调制体制: BPSK, 码型NRZ-L; 编码方式: RS(255, 223)+伪随机化+卷积(7, 1/2)级联码, LDPC编码+伪随机化, 可切换; 码速率(信道编码后): 16、32、64、128、256、512、1 024、2 048及4 096 kbps; G/T值: 50 m天线 ≥ 50.6 dB/K ($E \geq 10^\circ$); 40 m天线

≥ 49.0 dB/K ($E \geq 10^\circ$); 天线组阵 ≥ 55.0 dB/K ($E \geq 10^\circ$); 接收误码率: $< 1 \times 10^{-6}$ 。

3) 数据处理要求。根据各有效载荷的数据性质和科学探测要求, 对数据进行处理, 生成0级、1级、2级等三级数据产品。

4) 数据管理要求。建立各级数据产品存储、归档、备份和发布的数据管理平台, 在线数据存储能力不小于60 TB。

5) 科学目标研究要求。围绕5大科学目标, 利用科学探测数据, 组织开展科学数据的应用和研究。

2.3 总体布局与组成

首次火星探测任务地面应用系统的总体架构充分继承探月工程前期的基础, 根据任务要求设置5个分系统, 包括运行管理分系统(OMS)、数据接收分系统(DAS)、数据预处理分系统(DPS)、数据管理分系统(DMS)和科学应用与研究分系统(SAS)(见图5)。

其中, 总部位于北京市朝阳区大屯路的中国科学院国家天文台, 包括计算机系统机房、运行控制大厅、遥科学探测实验室和相应的软硬件设备, 主要负责火星探测任务地面应用系统的业务运行管理、数据处理、数据管理和探测数据的应用研究。

数据接收分系统由3个地面站组成, 负责火星探测数据接收: ①密云地面站, 位于北京市密云区不老屯镇, 包括一面GRAS-1天线(口径为50 m)、一面GRAS-3天线(口径为40 m)及其相应的软硬件设备; ②昆明地面站, 位于云南省昆明市凤凰山的国家天文台所属云南天文台, 包括一面GRAS-2天线(口径为40 m)及其相应软硬件设备; ③武清地面站, 位于天津市武清区大良镇, 新建一面GRAS-4天线(口径70 m)及其相应软硬件设备。

3 地面应用系统设计

根据地面应用系统的任务分解, 结合火星探测任务特点, 分别对5个分系统的主要功能、组成和设计进行说明。

3.1 运行管理分系统

3.1.1 主要功能

运行管理分系统的主要功能包括环绕器和火星车有效载荷运行管理、地面应用系统业务运行调度两个方面的内容。

1) 有效载荷运行管理

①巡视探测区三维场景再现、探测点选择和参加巡视器的遥操作;

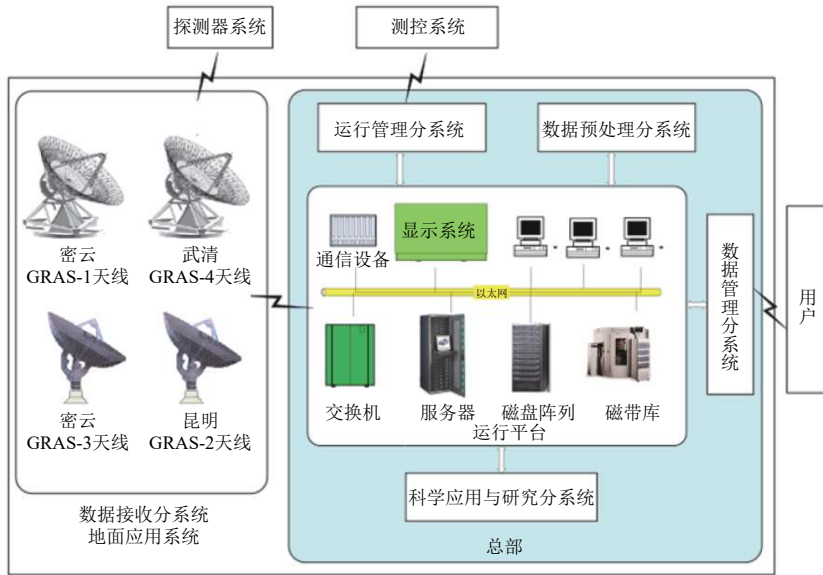


图 5 地面应用系统组成和系统内外部关联图

Fig. 5 The system composition and system association diagram of GRAS

- ②有效载荷遥科学探测任务的仿真分析及规划；
- ③有效载荷探测计划制定、上行控制指令与注入数据的生成；
- ④遥测数据和探测数据处理，监视探测器及其有效载荷状态。

2) 地面应用系统业务运行调度

- ①探测计划制定；
- ②业务计划制定与调度；
- ③业务运行状态监视；
- ④系统仿真测试。

3.1.2 分系统组成

根据分系统的功能需求，运行管理分系统设置了两个配置项：①运行管理应用软件配置项，包括业务运行管理子系统软件、有效载荷运行管理子系统软件和任务规划与遥科学探测辅助子系统软件，是涉及业务运行相关功能软部件的集合，用于完成业务运行期间的有效载荷运行状态监控、地面运行状态监控、系统接口测试、运行数据存储、火星车遥科学探测操作和地面验证等相关功能；②运行管理应用硬件配置项，包括业务整合服务器及仿真测试服务器、三维信息采集与输入设备、多通道立体投影显示平台和大屏幕显示系统，是业务运行管理的关键硬件设备的集合。

3.1.3 针对火星任务的分系统设计

针对火星探测有效载荷运行管理的特点，采用基于C/S架构的分布式处理、集中式监控模式，业务流程设计如图6所示。

通过提供客户端软件人机界面，以探测器系统和

测控系统的输入为约束，引入工程总体、首席科学家和载荷专家，共同完成科学计划的设计，作为运行的长期探测计划。在此基础上，地面应用系统生成中短期业务运行计划，调度各分系统运行。

设置任务规划与遥科学探测辅助子系统，建立遥科学探测仿真平台，对火星轨道和火星表面环境进行仿真，实现任务实施前的计划推演，任务实施过程中的状态监视和任务实施后的任务演示功能。建立沉浸式虚拟现实遥操作人机交互界面，实现火星表面特定地点的三维显示，进行遥科学探测任务的仿真分析和规划，辅助火星车有效载荷指令和计划仿真与制定。

3.2 数据接收分系统

3.2.1 主要功能

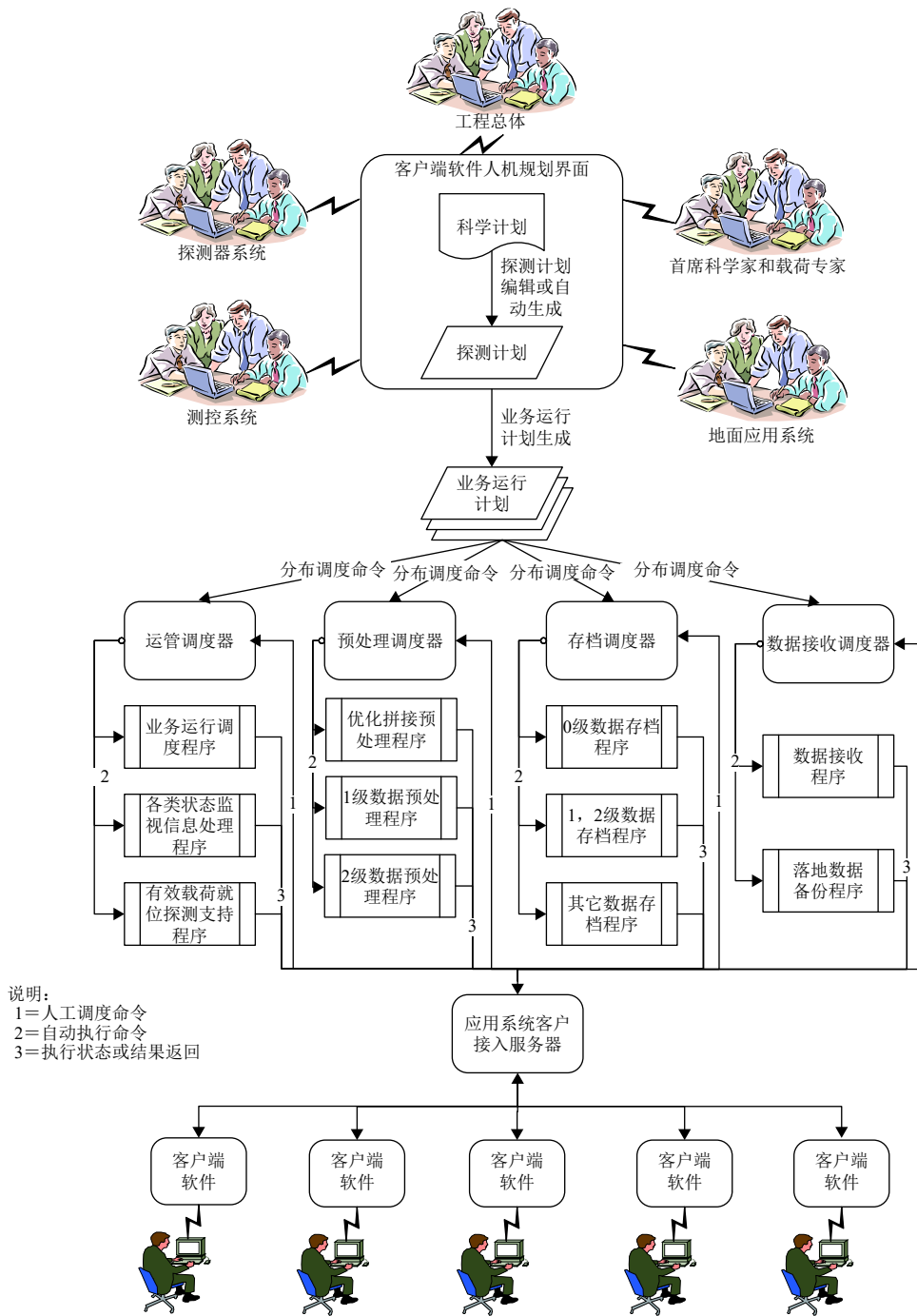
数据接收分系统的主要功能包括：

- ①依据业务运行计划，接收数传信道的下行数据；
- ②将接收到的探测数据实时发送到总部；
- ③将收到的探测数据实时进行本地存储。

3.2.2 分系统组成

地面应用系统提供探测器数传下行接收的通道。数据接收分系统由北京密云、云南昆明和天津武清站3个地面接收站4面天线组成。密云站GRAS-1天线、GRAS-3天线，昆明站GRAS-2和武清站GRAS-4天线可采用单天线单独工作，也可采用多天线组合模式工作，进行信号合成，提高接收能力。

数据接收分系统由天馈、高频信号接收、信号合成、解调与基带信号处理、地面站任务管理、站统、测试标校、运行保障等8个子系统组成。



说明：
 1=人工调度命令
 2=自动执行命令
 3=执行状态或结果返回

图 6 运行管理业务流程示意图
 Fig. 6 Workflow chart of operational management

3.2.3 针对火星任务的分系统设计

根据器地距离、数传能力和数据接收的实际需要，数据接收分系统设置多站单天线接收和多站天线组阵接收等工作模式，设置信号合成子系统实现多站天线组阵接收，进行天线组阵信号合成，实现更高的等效G/T值，提升接收能力。

1) 多站单天线接收工作流程。当至少有两面天线满足单天线解调条件时，采用多站单天线数据接收工

作流程。地面站任务管理子系统控制各设备处于任务状态，根据运行管理分系统先提供的探测器预报轨道坐标，控制地面站天线指向。探测器下传X频段信号经天线接收后，送入接在天线馈源输出端的低噪声放大器，信号经低噪声放大、下变频、BPSK解调、帧同步、解扰、译码后，形成以帧为单位的帧数据，经计算机网络实时发往地面应用系统总部。与此同时，解调输出的帧数据存入本地磁盘阵列（见图7）。

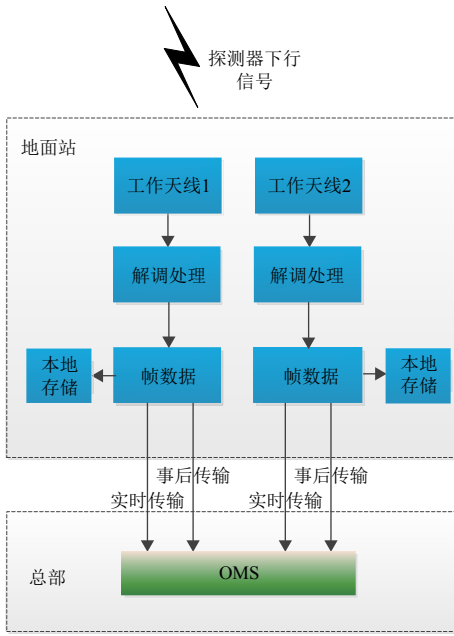


图 7 多站单天线接收工作流程图

Fig. 7 Workflow chart of multi-station single antenna reception

2) 多站天线组阵接收工作流程。当器地数传能力不满足单天线解调条件时，启动多站天线组阵工作流程。运行管理分系统根据探测器预报轨道状态和探测任务需求，调度相应地面站天线进入天线组阵模式。地面站任务管理软件根据OMS计划控制本站设备处于任务状态。探测器下传X频段信号经天线接收后，送入接在天线馈源输出端的低噪声放大器，信号经低噪声放大、下变频，经检前信号采集与分发设备处理后，经由专用网络将检前数据发往位于地面应用系统总部的组阵信号合成和解调设备，完成信号合成、解调、帧同步、解扰、译码后，形成以帧为单位的帧数据，经由网络发给OMS分系统。与单天线接收工作流程相比，多站天线组阵工作流程增加了检前数据传输和信号合成两个环节（见图8）。

通过新建武清站GRAS-4天线，与密云站GRAS-1天线、GRAS-3天线进行组阵接收，G/T值由单面50 m天线50.6 dB/K ($E \geq 10^\circ$)和40 m天线49.0 dB/K ($E \geq 10^\circ$)，提升至55.4 dB/K ($E \geq 10^\circ$)，合成损失小于0.5 dB，满足火星探测任务数传要求。

3.3 数据预处理分系统

3.3.1 主要功能

数据预处理分系统负责处理探测器下传的科学数据，生成标准数据产品，为科学研究提供数据支持。主要功能包括：

1) 根据有效载荷数据接口和数传格式，实现科学探测数据及其相关辅助数据的格式解译；

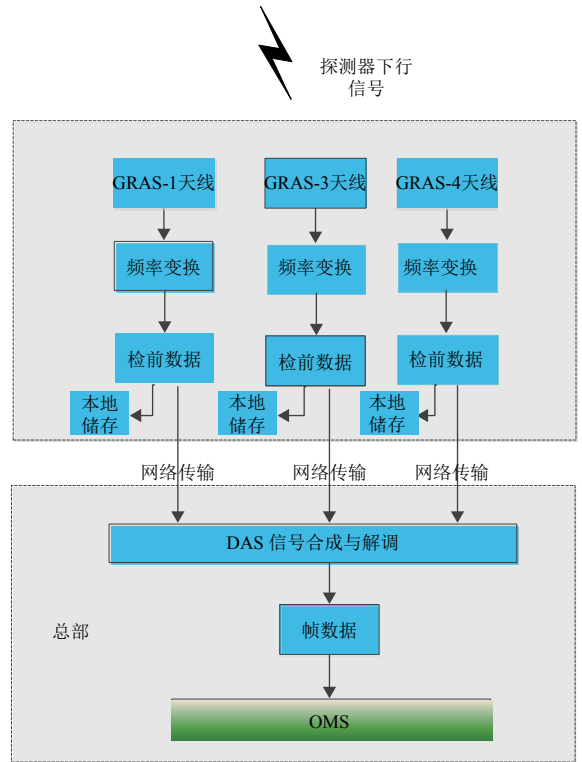


图 8 多站天线组阵接收工作流程图

Fig. 8 Workflow chart of multi-station antenna array Reception

2) 根据有效载荷的数据特点和科学研究要求，开展定标处理、几何定位处理，生成标准数据产品；

3) 研制支撑算法研究和产品生产的数据预处理软件，为科学研究提供支持。

3.3.2 分系统组成

预处理分系统设计了一个数据预处理工程化软件配置项和一个数据预处理硬件配置项。软件配置项用于实现数据产品生产调度，包括0级、1级、2级数据处理和预处理算法研究验证功能，硬件配置项是软件运行的支撑平台。预处理工程化软件主要功能包括：①数据产品生产调度的功能；②0级数据处理功能，完成有效载荷科学探测数据及其相关辅助数据的格式解译；③1级数据处理功能，完成各有效载荷参数物理量的转换、火星探测器轨道与姿态数据处理功能，并以探测周期为单位进行数据组织；④2级数据处理功能，完成定标、几何定位和高分辨率相机、中分辨率相机图像几何粗纠正功能处理；⑤预处理算法仿真与验证功能，完成数据模拟，并可以通过“可插拔”的方式实现算法的灵活设计，完成预处理算法的研究和升级。

3.3.3 针对火星任务的分系统设计

根据火星探测任务的需求以及科学数据的定义，设计了数据预处理流程，具体流程如图9所示。

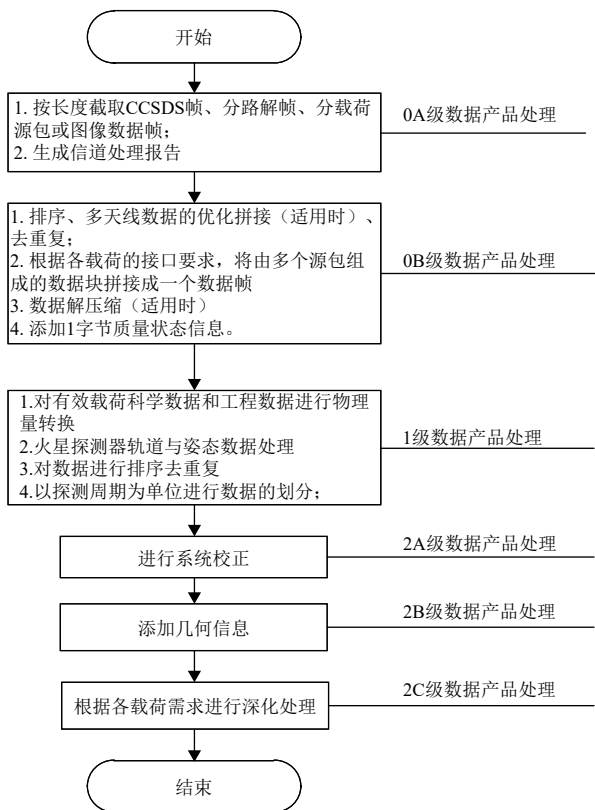


图9 数据预处理工作流程
Fig. 9 Workflow chart of data preprocessing

针对火星先验知识缺乏, 数据处理难的问题, 设计建立数据处理算法验证平台, 实现载荷探测数据模拟和算法的灵活设计。利用地面模拟试验形成的处理算法, 在验证平台上进行算法正确性验证, 形成算法库。

数据预处理工程化软件制定统一的接口标准, 支持符合接口标准动态库的加载和删除。按照“可插拔”的框架进行设计和开发, 经过验证后的算法库, 按照标准接口调用, 执行数据预处理任务。

3.4 数据管理分系统

3.4.1 主要功能

数据管理分系统的主要功能包括: ①提供探测数据接收、传输、处理、存档和发布数据所需的计算机系统资源和运行环境, 包括总部业务运行与仿真测试、总部数据发布与信息服务平台、密云站业务运行与灾备平台、武清站业务运行平台和昆明站业务运行平台; ②负责HX-1探测任务所有新生数据的存储与归档管理、备份与恢复; ③建立数据容灾备份系统, 保障数据的安全; ④建立所有数据及产品的信息发布系统, 提供授权产品的公众检索查询、浏览及下载服务; ⑤建立多个运行场所的局域网, 以及数据和语音

指挥调度通信链路。

3.4.2 分系统组成

根据任务需求, 数据管理分系统将在探月工程任务的基础之上, 依据HX-1探测的特点及任务的执行周期, 在原有的系统之上进行适应性改造, 在优先保证系统适用性和效率的同时, 最大限度地利用已有资源。

根据主要职能及部署区域的不同, 数据管理分系统由计算机公共基础平台、火星数据归档与管理、火星空间数据库及地图发布、火星数据发布与信息服务等4个子系统组成。

3.4.3 针对火星任务的分系统设计

在整个地面应用系统的业务流程中, 数据管理的业务流程主要涉及探测数据与产品的归档、存储、管理、备份、发布 (见图10)。设计服务于载荷运行管理、数据处理和管理的内网平台, 服务于数据发布和共享的外网平台。

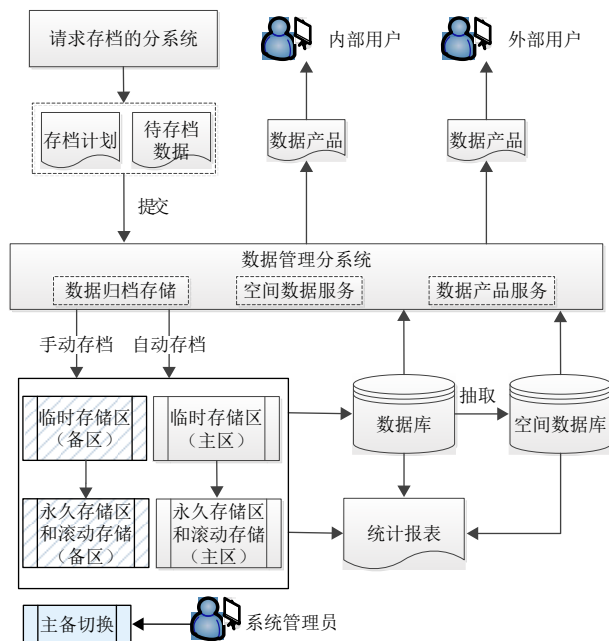


图10 数据管理业务流程图
Fig. 10 Workflow chart of data management

为了方便数据的使用和共享, 对火星探测数据产品的格式进行定义。科学数据产品分为2种格式。其中: 0级数据产品采用二进制文件格式存储; 1级和2级数据产品按照行星数据系统PDS4.0的规范进行存储。1级、2级数据产品由数据标签和数据对象组成, 数据标签用于描述数据对象内容和格式, 数据对象用于存储各个载荷的探测数据。

一个数据产品包含一个数据标签, 独立存储为

xml文件，在数据标签中可详细说明数据产品的特性、级联信息、观测信息以及与探测任务相关的属性；数据对象采用不同的数据结构来存储各载荷的探测数据，主要包括数组结构（Array）和表格结构（Table）两种。数组结构主要用来存储具有相同属性信息的二维或三维数组数据，例如图像数据、光谱数据；表格结构用来存储具有不同属性信息的表格数据，例如空间环境探测数据。

数据发布方面，根据2016年国家航天局印发《月球与深空探测工程科学数据管理办法》，探月与航天工程中心对科学数据实施管理，地面应用系统是业务支撑单位。地面应用系统主要职责是根据探月与航天工程中心技术评议情况，完成相应科学数据的准备和发放；在接收到原始探测数据后，经为期5~6个月的数据处理周期，形成首批科学数据；在首批科学数据形成后，科学载荷单机及以上的研制单位，经技术评议后可使用该载荷全部级别的科学数据，其他用户经技术评议后可以使用的1、2级科学数据；在首批数据处理期满12个月后，结合数据发布和研究等情况，探月与航天工程中心确定公开的科学数据种类。

3.5 科学应用与研究分系统

3.5.1 主要功能

科学应用与研究分系统的主要功能包括：①在科学目标的指导下，为探测器科学计划的制定、科学仪器的工作模式和探测计划确定提供指导性数据；②评估科学数据质量，进行应用数据产品的生产和探测数据的解译工作。

3.5.2 分系统组成

根据分系统的任务要求，分系统设置了科学计划制定、科学验证试验与数据检验、科学目标专题研究等三个子系统，在工程实施不同阶段完成相应的任务。

在发射前，根据科学目标，编制科学计划；开展有效载荷地面科学验证试验，制定出科学探测数据质量的评估标准。

在轨测试期间，对探测数据进行质量评估，判断其是否满足科学目标的要求，据此进行科学计划的适度修改和重新制定。

在科学探测期间，利用预处理数据产品，完成工程所规定的数据处理和解译任务，用于支持火星探测任务的科学研究。

3.5.3 针对火星任务的分系统设计

针对缺乏火星先验知识和经验，新研有效载荷的地面科学验证试验、探测数据处理和解译方面几乎还

处于起步阶段，需要有针对性开展专题研究。

1) 科学计划制定：根据科学目标，对探测器轨道、有效载荷工作模式和测控系统测定轨提出工作要求，制定环绕器遥感探测和火星表面巡视探测的科学计划；与相关科学探测仪器研制单位协作，进行地面模拟和仿真计算，分析有效载荷探测效果，提出有效载荷探测数据的质量评估方法。

2) 地面科学验证试验：主要利用仿真分析平台，模拟火星样品和类似火星环境，开展地面真实性检验。包括验证试验大纲和细则的制定，开展验证试验、对试验数据进行处理、分析和评价，进而达到验证目的等一系列过程。在探测器发射前，全面了解科学探测仪器的性能指标、定标精度、数据处理流程与方法、科学目标可实现程度等，为有效载荷技术状态确定提供支持，为探测数据的获取和数据产品的质量分析提供依据。

3) 科学数据质量评估：在轨测试期间，评估有效载荷科学数据的可用性，主要包括检验下行科学数据格式是否正确、检验科学数据是否有效和检验科学数据是否达到探测指标等内容。通过对有效载荷科学探测数据质量进行评估，可以了解数据的质量情况，为后期数据的处理、科学研究与应用提供参考依据。

4) 科学目标专题研究：通过技术协调会和研讨会的形式，组织有效载荷专家、火星科学家，开展科学目标专题研究。围绕首次火星探测任务科学目标，开展着陆区选择研究，从火星形貌与地质构造特征、火星表面土壤特征与水冰分布、火星表面物质组成、火星大气电离层及表面气候与环境特征和火星物理场与内部结构研究等5个方面，完成科学目标可实现程度分析。

4 结束语

首次火星探测任务将于2020年通过一次发射实现火星环绕和着陆巡视探测，工程难度大，地面应用系统也将面临诸多新的挑战。针对新的任务特点，地面应用系统目前已经完成了系统设计，正在开展软硬件的研制建设和科学目标相关研究。通过未来2年左右的建设，将完成运行管理、数据接收、数据预处理、数据管理和科学应用与研究等5个分系统的研制，为圆满完成首次火星探测既定任务，取得最大的社会效益和科学产出提供支撑。

参 考 文 献

- [1] YE P J, SUN Z Z, RAO W, et al. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China[J]. SCIENCE CHINA

- Technological Sciences*, 2017, 60: 649-557.
- [2] 吴伟仁, 裴照宇, 刘彤杰, 等. 嫦娥三号工程技术手册[M]. 中国宇航出版社, 2013.
- [3] 肖政浩, 汪大明, 温静, 等. 国内外星-空-地遥感数据地面应用系统综述[J]. *地质力学学报*, 2015, 21(2): 117-128.
XIAO Z H, WANG D M, WEN J, et al. Overview of the ground application system of satellite-aviation-ground remote sensing data at home and abroad[J]. *Journal of Geomechanics*, 2015, 21(2): 117-128.
- [4] 杨忠东, 卢乃锰, 施进明, 等. 风云三号卫星有效载荷与地面应用系统概述[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(4): 6-12.
YANG Z D, LU N M, SHI J M, et al. Overview of FY-3 payload and ground application system[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(4): 6-12.
- [5] 范天锡. 风云一号气象卫星地面应用系统[J]. *中国空间科学技术*, 1991(2): 39-45.
FAN T X. Introduction to FY-1 meteorological satellite data receiving and processing system[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1991(2): 39-45.
- [6] 许健民, 钮寅生, 董超华, 等. 风云气象卫星的地面应用系统[J]. *中国工程科学*, 2006, 8(11): 13-18.
XU J M, NIU Y S, DONG C H, et al. Ground segments for FY meteorological satellites[J]. *Engineering Sciences*, 2006, 8(11): 13-18.
- [7] 姬晨佳. 风云三号气象卫星地面应用系统[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
JI C J. The FY-3 meteorological satellite ground application system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [8] 卢乃锰, 董超华, 杨忠东, 等. 我国新一代极轨气象卫星(风云三号)工程地面应用系统[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(9): 10-19.
LU N M, DONG C H, YANG Z D, et al. Ground segment of the new general of Fengyun popoar orbit meteorological satellite (FY-3) and its data application[J]. *Engineering Sciences*, 2012, 14(9): 10-19.
- [9] 钱建梅, 施进明, 李小榕. 静止气象卫星地面应用系统概念设计[J]. *计算机工程与应用*, 2005(18): 224-228.
QIAN J M, SHI J M, LI X R. Conceptual design for geostationary meteorological satellite ground application system[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005(18): 224-228.
- [10] 蒋兴伟, 林明森, 张有广. HY-2卫星地面应用系统综述[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(6): 4-12.
JIANG X W, LIN M S, ZHANG Y G. An overview of HY-2 satellite ground application system[J]. *Engineering Sciences*, 2014, 16(6): 4-12.
- [11] 赵锦全. 中国海洋卫星2009年应用概况[J]. *中国航天*, 2010(7): 3-6.
ZHAO J Q. Applications of China's ocean satellites in 2009[J]. *Aerospace China*, 2010(7): 3-6.
- [12] 黄惠明. 我国第一代中继卫星地面应用系统发展建设的思考[J]. *飞行器测控学报*, 2012, 31(5): 1-5.
HUANG H M. Reflections on development of the ground system of the first generation CTDRSS[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2012, 31(5): 1-5.
- [13] 王桥. 环境一号卫星环境应用系统工程及其关键技术研究进展[J]. *环境监控与预警*, 2009, 1(1): 31-36.
WANG Q. The research progress of the environmental application systemic engineering and key technologies of environmental satellite[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2009, 1(1): 31-36.
- [14] 胡莘, 王新义, 杨俊峰. “天绘一号”卫星地面应用系统设计与实现[J]. *遥感学报*, 2012, 16(S1): 78-83.
HU X, WANG X Y, YANG J F. Design and implementation of ground application system for Mapping Satellite-1[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S1): 78-83.
- [15] BSI. ECSS-E-ST-70C, Space engineering—Ground systems and operations[S] UK: BSI Standards Publication, 2015.
- [16] MARTIN P. Mars Express: master science plan overview documentation, part II-Overview of mars express science operations[C]. // Planetary Mission Division, Research and Scientific Support Department, [S. l.]: ESA, 2004.
- [17] WARHAUT M, FERRI P, MONTAGNON E. Rosetta ground segment and mission operations[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128(1-4): 189-204.
- [18] ANSI/AIAA G-043-1992, Guide for the Preparation of Operational Concept Documents[S]. USA: [s.n.], 1992.
- [19] 朱一凡, 李群, 杨峰, 等. NASA系统工程手册[D]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
ZHU Y F, LI Q, YANG F, et al. NASA systems engineering handbook[D]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [20] ALBEE A L, ARVIDSON R E, PALLUCONI F, et al. Overview of the Mars Global Surveyor mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 16(E10): 23291-23316.
- 作者简介:
刘建军(1976-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 月球与行星科学、行星遥感等。
通信地址: 北京市朝阳区大屯路甲20号(100101)
电话: (010)64880602
E-mail: liujj@nao.cas.cn

Ground Research and Application System of China's First Mars Exploration Mission

LIU Jianjun^{1,2,3}, SU Yan^{1,2}, ZUO Wei^{1,2}, REN Xin^{1,2}, KONG Deqing^{1,2},
WEN Weibin^{1,2}, ZHANG Hongbo^{1,2}, LI Chunlai^{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;

3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: China's first Mars exploration mission (HX-1) is expected to launch Orbiter and Rover in 2020 to conduct a global and comprehensive exploration of Mars, and to carry out regional patrolling on the Mars surface. The Ground Research and Application System (GRAS) is one of the five systems of engineering system of the Mars exploration mission, which is mainly responsible for the scientific exploration plan formulation, payload operation management, data receiving, processing, interpretation and management, and organizing the application and research of the scientific data. Based on the analysis of similar systems and the difficulties of Mars exploration ground systems, the main tasks, technical indicators and overall layout of GRAS, and the main functions, composition and design of the subsystems are introduced.

Key words: Mars exploration; ground research and application system; system structure; subsystem design

High lights:

- The similar ground segment systems in the world are reviewed.
- The characteristics and difficulties of the Mars exploration GRAS are analyzed.
- The main tasks, technical indicators, overall layout of China's Mars exploration GRAS, and the main functions, composition and design of the subsystems are introduced.

[责任编辑：高莎，英文审校：朱恬]