



## “祝融号”火星车遥操作技术

张 辉, 卢 皓, 于天一, 谢 圆, 王 成, 鲍 硕, 胡晓东

### Teleoperation Technology of Zhurong Mars Rover

ZHANG Hui, LU Hao, YU Tianyi, XIE Yuan, WANG Cheng, BAO Shuo, and HU Xiaodong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210108>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 中国首次火星探测任务火星车有效载荷定标试验

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

深空探测学报(中英文). 2020, 7(5): 481-488

#### “祝融号”火星车图像压缩软件的设计与实现

Image Compression Software Design for Zhurong Mars Exploration Rover

深空探测学报(中英文). 2021, 8(5): 503-510

#### 火星车机构集成控制系统设计与实现

Design and Implementation of Integrated Control System for Mars Rover Mechanism

深空探测学报(中英文). 2020, 7(5): 450-457

#### 火星车系统动力学建模与仿真分析

Dynamics Modeling and Simulation Analysis of Mars Rover System

深空探测学报(中英文). 2020, 7(5): 437-444

#### 中国首次火星探测工程有效载荷总体设计

Integral Technical Scheme of Payloads System for Chinese Mars-1 Exploration

深空探测学报(中英文). 2017, 4(6): 510-514, 534

#### 火星车图像压缩存储系统与关键算法设计

Design of Image Compression Storage System and Key Algorithm for Mars Rover

深空探测学报(中英文). 2020, 7(5): 458-465



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

# “祝融号”火星车遥操作技术

张辉, 卢皓, 于天一, 谢圆, 王成, 鲍硕, 胡晓东

(北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

**摘要:** 受测控通信链路时延、通信带宽和中继通信弧段制约, 不同于地月空间, 行星际空间遥操作技术更加复杂。面向解决首次行星际空间遥操作技术难题, 针对火星车遥操作任务特点、技术难点以及飞行控制设计约束, 确立了火星车遥操作控制模式和关键技术体系, 提出了火星车遥操作系统总体设计方法与系统架构, 并设计了火星车遥操作飞控模式与实施流程。将其应用于“祝融号”火星车在轨测控中, 火星车始终保持高效移动探测, 百日遥操作里程突破千米, 验证了本文方法的正确性和有效性, 为后续行星际遥操作任务奠定了技术基础。

**关键词:** 火星探测; 火星车; 遥操作

**中图分类号:** V476.V529.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2021)06-0582-10

**DOI:**10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210108

**引用格式:** 张辉, 卢皓, 于天一, 等. “祝融号”火星车遥操作技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(6): 582-591.

**Reference format:** ZHANG H, LU H, YU T Y, et al. Teleoperation technology of Zhurong Mars rover[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 582-591.

## 引言

火星探测已成为国际最受瞩目的地外天体探测任务。2020年, 阿联酋“希望号”(Hope)火星探测器、中国“天问一号”(Tianwen-1)火星探测器、美国“毅力号”(Perseverance)火星车先后成功发射, 再次掀起了火星探测的高峰。当前火星探测模式主要包括环绕、就位和区域巡视探测。区域巡视火星探测主要依靠在火星表面生存、移动、探测和通信的空间机器人完成, 这种空间机器人称为火面巡视器或火星车<sup>[1]</sup>。截至2021年, 成功落火并开展巡视探测的火星车共6辆, 分别是美国“索杰纳号”(Sojourner)、“机遇号”(Spirit)、“勇气号”(Opportunity)、“好奇号”(Curiosity)、“毅力号”(Perseverance)和中国的“祝融号”(Zhurong)。

2021年5月15日, “天问一号”火星探测器“祝融号”火星车成功着陆火星乌托邦平原预定着陆区。地面遥操作控制“祝融号”于5月22日成功分离驶离至火星表面, 截至8月23日火星车在轨百日移动里程突破1 000 m, 获取了一大批极具价值的科学探测数据, 圆满完成了设计寿命期内的巡视探测任务, 为世界首次通过一次发射实现火星“绕”“着”“巡”三大目标<sup>[2]</sup>。

受测控通信链路时延、通信带宽和中继通信弧段制约, 不同于地月空间, 与传统的轨道飞行器地面控制技术不同, 火星车遥操作需结合自身的性能和获取的远端区域地图, 以及光照、星历、能源、温度和位置等信息, 为火星车制定任务层面的探测计划, 并在满足各种全局和能力约束的条件下进行行为规划, 最终通过指令序列控制火星车完成巡视探测<sup>[3]</sup>。空间遥操作建立在远端遥测、图像与探测数据反馈获取的基础上。地月空间遥操作具有近全时域测控、较高通信码速率和较小通信时延的任务特点, 具备支持实时遥控遥操作或手控遥操作条件<sup>[4]</sup>, 如空间站机械臂、“玉兔二号”“嫦娥五号”采样机械臂等遥操作任务。然而, 火星车遥操作任务中面临3方面的问题: 一是地火超远距离带来的测控链路超大时延以及较低的通信带宽, 非全时域非实时中继通信具有中继存储转发和每日有限中继通信弧段的特点, 地面不具备实施实时遥控遥操作或手控遥操作条件<sup>[5]</sup>; 二是受行星运行轨道影响和太阳翼发电能源与工作温度约束, 火星车一般基于火星时“作息”, 地面遥操作呈现昼夜交替特点<sup>[4-5]</sup>, 如“勇气号”和“机遇号”; 三是火面的大气、沙尘、弱变光照及复杂且缺少先验知识的地形等非结构化非刚性火面

环境,导致地面遥操作面临着任务约束增加、约束更加苛刻、技术难度大、实施风险高等新的难点与挑战。已有的地月空间遥操作系统与飞控模式不能满足火星车遥操作的任务要求,为此须设计开发出一套满足火面巡视探测任务的地面遥操作系统以及与之匹配的遥操作控制模式<sup>[6]</sup>。

美国火星车遥操作控制模式包括空间遥操作、地面遥操作、地面遥操作加半自主模式和地面遥操作加自主模式<sup>[7-8]</sup>。“索杰纳号”火星车控制模式为遥操作加半自主模式,受时延和通信带宽约束,地面不具备实时控制火星车条件,采用“启动-停止”方式每日规划遥操作,地面测控站与“索杰纳号”进行周期性通信<sup>[9]</sup>。“机遇号”和“勇气号”采用自主导航与地面遥操作结合控制模式,在地面遥操作系统支持下,以一个火星日为控制周期,规划火星车科学行为以及对应的工程行为,控制火星车在火面的长距离移动探测<sup>[10-12]</sup>。“好奇号”“毅力号”采用核动力驱动,自主能力显著提升,遥操作控制模式为地面遥操作加自主模式,具备“火星探测轨道器”和“火星奥德赛轨道器”两颗火星中继轨道卫星通信支持和较高水平的数据存储、分析与通信能力<sup>[13-15]</sup>。

本文分析了火星车遥操作的任务技术特点、技术难点以及飞控设计约束,针对首次行星际空间遥操作技术难题,研究了火星车遥操作控制模式和关键技术体系,提出了火星车遥操作系统总体设计方法与系统架构,并设计了火星车遥操作飞控模式与实施流程。结合在轨实施情况对本文方法的正确性和有效性进行了说明。

## 1 火星车遥操作技术特点

有别于月面巡视器遥操作,火星车遥操作受到天地距离远、操作时延大、先验信息少、火面环境复杂多变等因素影响,火星车遥操作特点及挑战主要体现在以下几个方面。

### 1) 通信时延长

火星与地球的距离在5 700万~4亿 km之间变化,受火地距离、信号传输时间等因素影响,地火回路时延6~44 min,相比地月增大1 000倍<sup>[16]</sup>。

### 2) 有限测控弧段

器上虽有直接对地通信能力,但资源消耗较大,且码速率较低,不具备数传能力,火星车一般基于环火轨道中继通信卫星实现与地面通信。每个火星日,器间中继通信弧段有限,下行数据量有限。

### 3) 可操作资源和任务寿命有限

火星车通过太阳翼发电提供能源供应。能源不仅用于火星车的动作执行、计算和载荷科学探测,还用于火夜温度维持的热供应;此外,器上能够存储以及能够下行的遥测和数传数据是有限的。以上这些资源必须要精确建模并基于地面规划软件进行合理的调度,以最大程度避免火星车操作风险。火星车设计寿命90个火星日,设计寿命和任务时间有限。

### 4) 有限运动工时

受能源功耗限制,火星车只能在火星当日最强光照条件下工作,夜间“睡觉”以保持能源平衡,火星车每个火星日有效工作时间有限。受火星车与中继卫星周期性通信约束,地面基于当次器间中继通信获取火星车远端遥操作反馈信息,地面控制人员完成火星车遥操作规划,控制数据必须要在下一次中继通信弧段前完成遥控上行,否则火星车当日将无法开展工作。地面遥操作工作存在起点时刻和后限时刻的工作区间约束。要求地面控制人员在有限的工作时间内,快速完成工况评估、遥现场重构、地面规划、序列生成和仿真验证。基于此,必须研发高可靠性、快速有效的地面遥操作系统。

### 5) 运动不确定性

火星车在火面地形交互运动过程(如移动、机械臂投放、石块钻取等)中地面无法精确建模,导致存在地面操作人员对火星车状态的掌握与认知的不足风险。

### 6) 需具备自主遥操作协同能力

受低码率和超大时延约束,火星车具备一定程度的自主能力。遥操作控制模式表现为地面遥操作加器上半自主模式,地面需解决遥操作与器上自主协同匹配。

### 7) 地面不具备实时监控条件

在高码速率、小时延条件下进行实时控制遥操作(如月球车)是可行的。地火超大时延、低码速率通信带宽以及周期性中继通信约束下,地面不具备实施实时监控条件。地面控制人员必须在没有实时监督控制的支持下,严格满足火星车全局约束和局部使用约束,完成遥操作规划控制。规划控制序列的错误将导致当天部分或全部的任务安排无法实施、将火星车置于风险地形、不必要的资源消耗或者硬件损伤<sup>[17]</sup>。基于此,地面控制序列需要合理规划、严格验证和评估。

### 8) 非结构化环境移动感知挑战

地面必须能够在时变光照、光深条件下通过火星

车感知周围地形,与可能存在的非完整信息地形进行移动交互,同时还需随时处理可能发生的感知信息不确定性或系统故障。非结构化实施远程遥操作控制环境下,需要满足严苛的约束条件以避免火星车陷入危险、损坏或丢失。

与传统轨道航天器相比,火星车遥操作面临着更加庞大、复杂的安全约束以及任务目标要求。有别于传统的航天器遥控控制,地面又不能事先进行长周期规划,而基于“发令-等待执行效果下行-评估-发令”效率低下,无法满足任务要求。火星车遥操作需要采用地面一次规划、一次上行一个工作日的控制序列、火星车存储并按照设计的指令时间执行,期间没有任何地面监督和状态确认操作。每一个火星日的地面规划建立在前一个火星日规划成功执行、地面对火星车当前状态具备全面认知的基础上。指令序列规划管理着火星车一整天的资源调度、科学探测、运动以及期间的器务管理。

## 2 火星车遥操作控制模式与关键技术

空间时延和通信带宽是影响遥操作控制模式设计与实施的关键因素<sup>[8, 17]</sup>。地月空间系月面巡视器遥操作、近地轨道空间机械臂遥操作,受时延和带宽影响较小,具备采用实时遥控遥操作模式的条件。行星际空间下受距离制约,空间链路时延增加,测控通信带宽降低,火星车遥操作任务中实时遥控遥操作控制模式不可行<sup>[16-17]</sup>。

### 2.1 遥操作控制模式

地面遥操作的前提是远端空间机器人状态和环境信息的反馈获取。在行星际空间环境下,受时延和带宽的制约,地面需通过时间的积累换取远端机器人反馈的信息<sup>[17]</sup>。受环火中继星轨道约束,火星车与环火中继星进行周期性通信<sup>[18]</sup>,中继段火星车与环绕器在每个火星日内进行两次器间通信,每次通信弧段时长不等。与近地轨道中继卫星(“天链”中继通信卫星)或月球轨道中继卫星(“嫦娥四号”中继星)“透明转发中继模式”不同<sup>[19]</sup>,环火中继卫星采用存储转发的方式为火星车提供上下行数据中继。宏观上,火星车遥操作时延已从空间链路“分钟级时延”衍生至周期性通信间隔下的“天级时延”。

地面一般采用延时指令控制的遥控遥操作模式,遥操作控制周期根据中继通信间隔和火星车工作区间确定。一般地,采用地面一次规划并遥控上行一个火星日的延时指令序列,由火星车在无测控支持下自主

执行,期间无地面监督干预<sup>[18, 20]</sup>。行为执行完毕后,基于中继通信下传过去24个火星时的延时遥测、感知与探测数传数据,地面获取火面远端的反馈信息,进行火星车行为执行结果评估(工程行为和科学行为)和火星表面遥现场重构,并完成下一个火星日的任务规划。

### 2.2 遥操作关键技术

#### 1) 绝对定位技术

基于工程可获取的着陆过程降落相机图像和火面高分相机底图,解决落点绝对定位;基于火星车站点局部感知或全局感知图像,匹配火面高分相机底图,解决火星车阶段移动后的绝对定位。

#### 2) 相对定位技术

基于火星车前后站点分别获取火面局部感知图像,完成火星车前后站点间的相对定位,即火星车移动后的站点视觉定位。

#### 3) 高精度图像融合与地形重构技术

接收处理远端不同类型的相机感知图像,综合火星车成像的配置参数,处理导航地形相机和避障相机的火面图像,进行火星车所处地形环境的三维重建和不同类型与不同站点的图像融合,完成火面远端遥现场重构。

#### 4) 基于批量延时遥测的工况自动评估技术

解决大批量延时遥测处理、显示以及基于批量延时遥测的火星车行为执行结果的自动快速判读,同时综合遥测和感知信息确认火星车状态,辨识并更新制约规划的约束项。

#### 5) 遥操作任务规划技术

遥操作任务规划技术核心为火星车遥操作多约束建模以及多约束规划问题求解。结合工程实施,按照分层任务规划的理念,通过不同层面的任务规划解决火星车全局约束到局部使用约束的行为规划(科学行为和工程行为)以及行为控制参数的规划求解,完成火星车指令计划集成与冲突排解,规划形成火星车一个火星日的控制指令序列。

#### 6) 活动机构规划技术

解决辅助相机成像(导航地形相机或多光谱相机)的桅杆指向运动规划、太阳翼对日最优指向规划以及定向天线通信指向规划。

#### 7) 路径规划技术

基于地形重构结果,结合工程上移动行为约束和火星车使用约束,建模生成火面移动综合代价图,采用智能寻优算法解决火星车移动路径规划。



### 8) 数字仿真验证与可视化技术

基于火星车超实时仿真验证火星车行为规划、策略规划和指令规划的正确性。基于三维可视化和虚拟现实等技术实现仿真预测数据和在轨遥测数据的可视化, 解决对任务规划结果和行为执行结果的空间和时间上的直观认知与状态确认。

## 3 “祝融号”遥操作总体设计

### 3.1 总体系统功能分析

#### 1) 遥现场重构与工况评估

地面基于器间中继通信弧段回放的火星车感知图像数据与延时遥测, 完成遥现场重构和工况评估。遥现场重构与工况评估是下一个火星日遥操作规划实施的基础和前提。需要集成火星车感知信息、遥测信息、预测仿真信息、专家支持、虚拟现实等, 在本地构建火面远端遥操作现场, 完成火面地形重构、视觉定位测量、工况执行评估以及火星车状态确认。

##### (1) 地形建立功能

综合火星车成像的配置参数, 对火星车导航地形相机、前后避障相机等设备的火面成像进行处理分析, 完成火星车所处地形环境的三维重建, 生成正射影像图和数字高程图等图像产品。

##### (2) 视觉定位功能

完成进入舱、火星车与火面指定点的绝对位置确定, 以及基于前后站点图像匹配的火星车相对位置确定。

##### (3) 姿态定位功能

提供火星车位置姿态的计算服务, 数据源包括延时、实时和图像处理数据。

##### (4) 工况评估功能

对火星车仿真预测数据和下行延遥数据进行自动化评估处理, 基于评估模型给出工况自动评估结果。同时, 通过数据曲线图、三维可视化、文本显示等多种方式, 辅助完成对火星车规划动作执行情况的工况评估, 整器能源、功耗执行及现状的评估, 各分系统工作状态的评估, 识别并确认下一个火星日的规划约束项。

#### 2) 状态预测

火星车遥操作任务采用周期性通信控制模式, 基于器间中继通信地面获取的火星车的当前状态变量, 给出规划初始时刻即未来时刻的火星车状态变量, 以预测状态作为任务规划中的火星车初始状态。同时考虑制约规划的火星车能源模型的时变性, 地面基于阶

段历史数据进行模型辨识与状态预测, 确保地面规划与验证的准确性。

#### 3) 多约束任务规划

火星车任务规划需根据火面环境、星历、地形图以及火星车的工作能力和约束条件, 给出实现科学探测目标的科学行为以及对应的工程行为, 通过延时指令序列控制火星车完成火面巡视探测任务<sup>[5, 21-22]</sup>。任务规划在满足多约束条件下规划火星车一个火星日内的移动、探测、感知、通信、太阳翼最优指向等行为计划和行为对应的控制参数, 生成火星车行为序列, 并最终输出一个火星日的完整指令控制序列和控制策略。考虑火星车自主能力和任务要求, 任务规划需综合器上自主和地面规划二者独立或者联合, 进一步优化扩展火星车行为, 在确保安全的前提下, 最大化科学探测目标。

#### 4) 路径与活动机构规划

路径规划基于感知获取的三维地形产品, 生成火面环境综合代价图等火面环境和约束建模。基于优化算法搜索最佳移动路径, 并根据移动方式完成移动策略规划。活动机构规划包括感知、太阳翼对日定向、(定向天线)对环绕器通信、(定向天线)对地通信以及主动悬架式移动机构控制规划等。

#### 5) 规划验证

火星车遥操作需按照“一次规划、一次上行、火星车自主执行”方式实施, 期间地面不具备监控干预能力。因此, 要求地面规划上行之前必须进行充分的可靠性、安全性验证<sup>[18]</sup>。规划验证功能包括策略层验证和指令层验证, 结合火星车移动特性、火面环境、器上自主性能, 对所有上行操作的执行效果进行仿真验证评估和约束满足性评估, 实现对任务规划结果的正确性和有效性验证。

#### 6) 可视化操控

可视化操控集成以上软件功能模块以及遥控软件配置项调用界面, 实现监控操控一体化与可视化, 同时提供每一阶段操作记录和产品输出, 提供全流程可视化管控界面, 实现基于业务和数据驱动的一键式流程管理。可视化表现为二维和三维信息可视化, 以图、表、三维形式解决时间和空间认知问题。

### 3.2 地面遥操作系统框架

如图1所示, 基于“遥现场重构+规划与验证+可视化操控”思路, 设计了火星车地面遥操作系统的框架系统, 框架表示系统各组成部分之间的基本关系和基本工作流程。

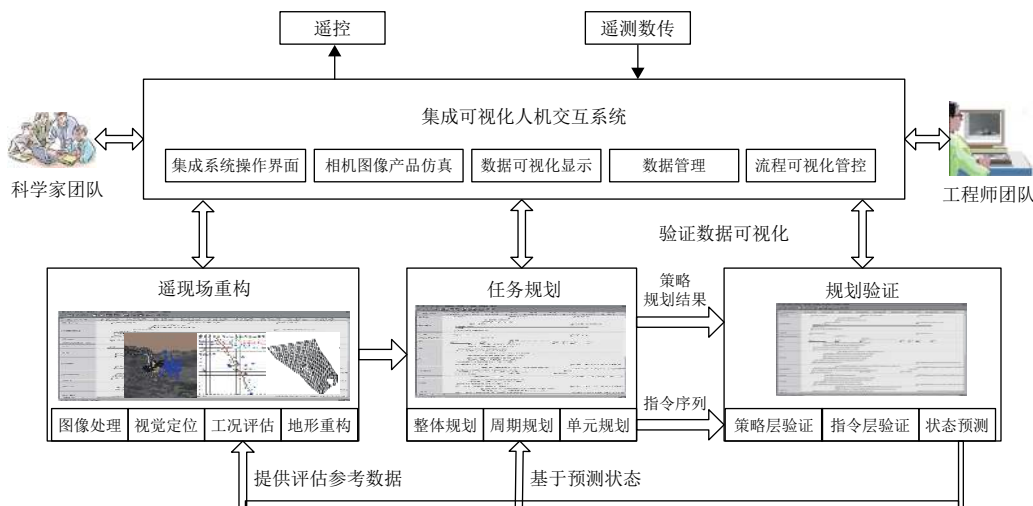


图1 火星车地面遥操作系统框架图

Fig. 1 Framework diagram of Mars rover ground teleoperation system

集成火星车感知信息、遥测信息、预测仿真信息、专家支持、虚拟现实等,在本地构建火面远端遥操作现场,完成火面地形重构、视觉定位测量、工况执行评估以及火星车状态确认。其中,工况评估通过将规划验证数据和遥测数据进行综合处理,构建分层树状自动评估模型和评估判据,并以图形化方式体现评估结果。针对火星车能源功耗等模式参数具有时变特征,在理论建模的基础上,基于阶段性历史遥测数据完成关键参数的模型辨识与修正。根据工况执行与状态评估结果,确定下一个火星日地面规划约束项,规划约束项通过约束管理单元集中管理。

火星当日遥测数传数据下行后,通过规划验证完成对器上已存储未执行的控制序列进行再次复核验证,同时将验证终点时刻的火星车状态(位姿、活动机构状态、剩余电量等)作为全局参数发布,作为任务规划火星车初始状态输入。

基于遥现场重构、状态预测以及工况评估环节识别的影响火星日规划约束项,在满足能源约束、性能约束、地形约束、数据量约束等多约束条件下,任务规划给出火星车一个巡视探测周期内的行为序列规划,通过调度路径规划和活动机构规划,生成移动控制参数和机构控制参数,集成生成一个火星日的火星车指令序列。针对“地面遥操作加器上半自主”遥操作控制模式,任务规划重构器上自主序列,在此基础上增加地面遥操作规划内容,解决地面遥操作与器上自主的协同匹配。下游规划验证环节对完整的器上自主和地面规划的全部行为序列进行仿真验证。规划验证包括策略层验证和指令层验证。通过图表、曲线、三维等多种手段,解决操作人员对规划结果的直观认知和快速评估,同时也为后续的工况执行评估提供数据

参考和空间时间认知基础。

集成可视化人机交互平台,作为地面遥操作的人机接口,提供软件各功能集成操作界面、集中流程管控调度、遥测及验证各类数据的曲线、二维图、三维视景显示、集中数据管理,实现监控操控一体化与可视化,实现遥操作流水线生产全流程可视化管控。

### 3.3 火星车遥操作实施流程

针对火星车遥操作的技术特点、约束和任务需求,结合工程实施,设计与地面遥操作系统匹配的合理可行的火星车遥操作飞控实施流程,是遥操作任务实施的关键。火星车遥操作飞控实施流程如图2所示。

1) 执行工况评估:火星车当日主要行为执行完毕后,通过与环绕器的器间通信弧段,采用事后下传的方式回放火星车过去24 h的延时遥测、图像数传数据和载荷探测数据。地面基于延遥及数传数据,完成火星车已执行行为的效果评估,确认火星车当前工况,识别直接下一步规划的约束项。考虑火面遥操作受火星表面环境影响,火星车行为执行结果具有一定的不确定性,行为执行结果将直接影响下一步规划。因此,完整而全面的工况执行评估是遥操作实施的基础。

2) 图像处理、视觉定位与地形建立:若火星车执行了感知工况,地面在接收到压缩图像后,启动图像处理、视觉定位、地形建立,否则,无此步骤。

3) 未来状态预测:计算预测给出终点时刻的火星车状态,包括位置、姿态、活动机构状态、剩余电量等。火星车预测状态写入未来站点,并作为规划的初始状态。

4) 规划目标设定:根据周期规划结果,明确当前规划火星日属性(移动/探测/感知/充电),根据火星日属性确定行为目标,行为目标需满足火星车科学探测需求和工程可行性约束。

5) 火星日单元规划：基于未来站点的火星车预测状态，按照规划目标设定，启动任务规划，完成一个火星日火星车行为序列规划与控制参数计算和规划验证。

6) 计划及数据会签：根据火星日单元规划结果，生成一个火星日延时指令计划、遥控指令计划和注入数据，组织完成计划与数据复核确认与仿真验证。

7) 遥控指令上行：在火星车指令上行窗口内（环绕器中继服务窗口，满足上行后限时要求）对环绕器发送火星车控制数据，内容为下一个火星日火星车控制指令序列。由环绕器接收后存储，并在随即的器间通信弧段中继上行至火星车。由火星车存储并按照延时指令序列自主执行，循环重复至步骤1。

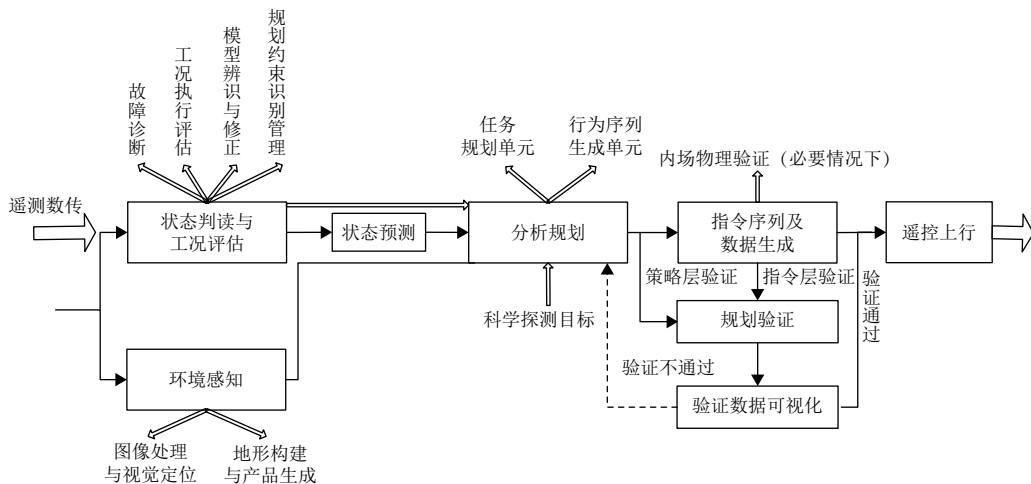


图2 火星遥操作实施流程

Fig. 2 Implementation process of Mars rover teleoperation

## 4 在轨实施验证

2021年5月15日，“祝融号”火星车成功着陆火星乌托邦平原预定着陆区，至2021年8月23日火星车在轨遥操作满100 d。地面基于构建地面遥操作系统遥操作火星车火星表面巡视探测，里程突破1 000 m，圆满完成了火星车分离驶离、对进入舱成像、释放WIFI分离拍摄相机并对火星车与进入舱成像以及火面较大范围的高效长距离巡视探测任务，获取了一大批极具价值的原始探测数据，实现了“高效移动、高效探测”的工程任务目标。

### 4.1 任务规划

火星车遥操作任务规划须在满足火星车能源、通信、地形和使用等各种约束的前提下，合理规划出火星车需到达的探测点以及探测点之间的行驶路线及需要完成的工程行为，以火星日为规划控制单元，确定火星车科学行为计划与工程行为计划，并最终转化为地面遥操作对火星车的控制指令。

基于分层规划理念<sup>[3]</sup>，火星车遥操作设计构建了“任务整体规划、探测周期规划、火星日单元规划”三层规划体系，解决了多约束条件下的资源调度、行为规划与冲突排解、指令计划与行为策略一键式规划等技术难题，实现了火星车整体性南向古海岸线巡视探测、每7个火星日一次探测周期规划、每个火星日单元

规划实现高效移动感知以及载荷移动探测。

以巡视探测阶段第6次探测周期规划为例。根据科学探测需求，确定第59火星日当前站点南向约100 m处沙丘为周期科学探测目标，如图3所示。第6探测周期规划在满足测控约束和能源约束的前提下，规划通过

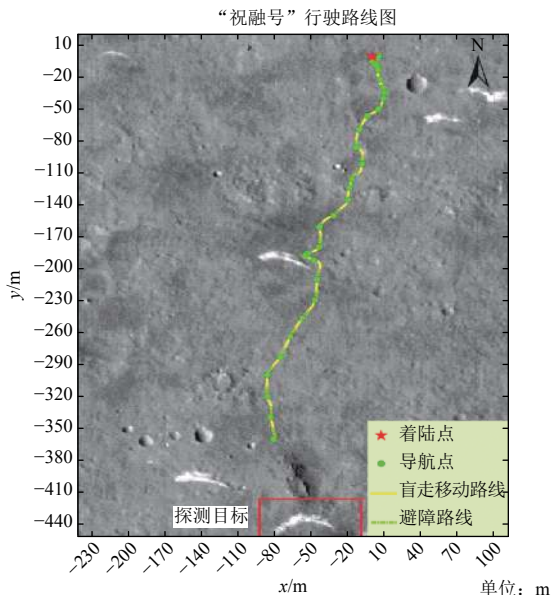


图3 火星车沙丘探测目标

Fig. 3 Sand dune exploration target of Mars rover



5个火星日高效移动感知后计划第65火星日抵达沙丘探测点, 并对沙丘进行载荷就位探测, 火星车每日移动

期间并行开展载荷移动探测, 探测周期规划结果如图4所示。

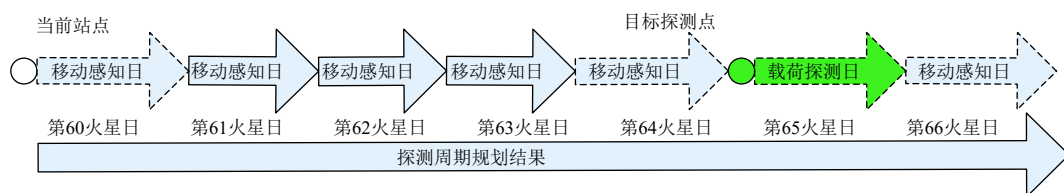


图4 火星车遥操作第6次探测周期规划结果

Fig. 4 Planning results of the 6th exploration cycle of Mars rover teleoperation

基于探测周期规划, 第65火星日载荷就位探测前的每个火星日, 地面完成火星车移动感知火星日单元规划, 按照地面规划盲走移动加器上自主避障移动结合模式, 保持每个火星日内火星车的高效长距离移动以及大范围载荷移动探测。其中, 导航地形相机图像地形重构精度范围内采用地面规划盲走移动, 精度范围外采用自主避障移动, 以最大化拓展每日巡视距离。每个导航点上, 基于局部感知获取移动目标的火星表面图像, 地面完成导航点视觉定位、火面地形重构, 计算移动综合代价图, 并完成火星车移动路径策略规划, 过程如图5所示。

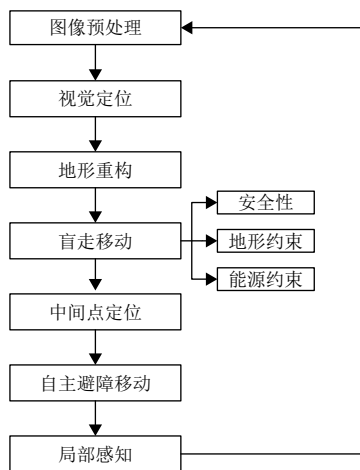


图5 火星车高效移动感知实施流程

Fig. 5 Implementation process of efficient mobile sensing of Mars rover

## 4.2 视觉定位

火星车视觉定位包括绝对定位和相对定位<sup>[23]</sup>。其中, 绝对定位通过火星车火面局部感知图像或进入舱降落相机图像匹配环绕器高分相机底图, 给出火星车火面绝对位置。相对定位通过前后站感知图像匹配, 采用光束法平差实现跨站相对定位。图6给出了基于相对视觉定位的火星车阶段移动里程图, 图7为高分相机拍摄的火星车火面移动轨迹图。

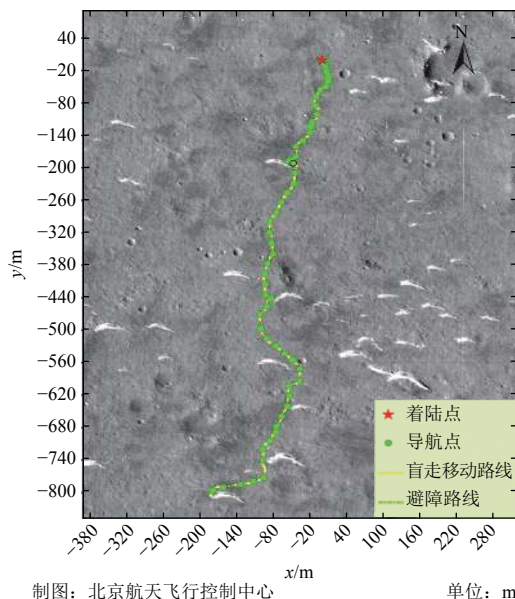


图6 火星车阶段移动里程图(基于视觉定位)

Fig. 6 Rover phase moving mileage map (based on visual positioning)

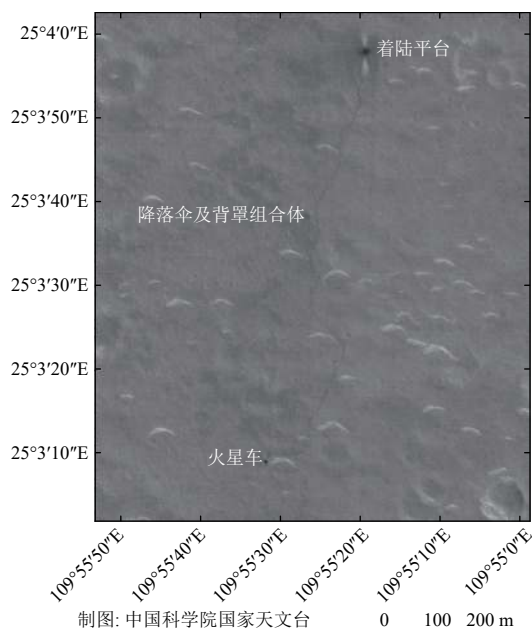


图7 “祝融号”火星车移动轨迹(高分相机图像)

Fig. 7 Zhurong Mars Rover moving track (high resolution camera image)



### 4.3 地形重构与导航单元规划

地面基于火面远端的感知图像完成本地端火面地形重构,计算生成火星车综合移动代价图,采用改进的启发式A\*搜索算法<sup>[23]</sup>完成火星车当前站点至下一步导航点的移动路径规划并生成移动控制策略。为实现在设计寿命期内最大化巡视探测成果,每个火星日采用地面规划盲走移动与器上自主避障移动结合,以拓展每个火星日火星车巡视探测范围。图8为地面规划的抵近沙丘移动路径规划结果,其中红色部分为地面规划盲走移动,蓝色部分为地面指定目标点的器上自主避障移动。图9为导航单元规划的路径反投影,其中黄色部分为地面规划的盲走轨迹,橘黄色曲线为器上自主避障移动轨迹预示,左右两侧各两条曲线表示火星车车轮里外边沿,中心曲线为火星车质心运动轨迹的火面投影。图10为基于后避障相机获取的车辙图像,火星车盲走移动和自主避障移动正常完成,火面车轮翅片碾压痕迹清晰可见,车轮无滑移,直观可见移动规划有效规避粗糙地形和石块区域。

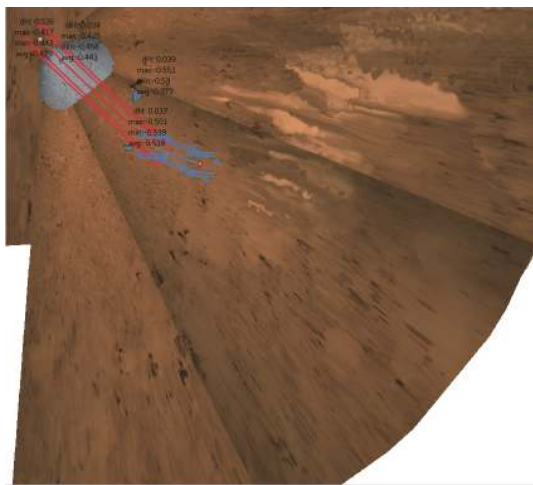


图8 火星车导航单元规划(抵近沙丘移动)

Fig. 8 Rover navigation unit planning (approaching sand dune movement)

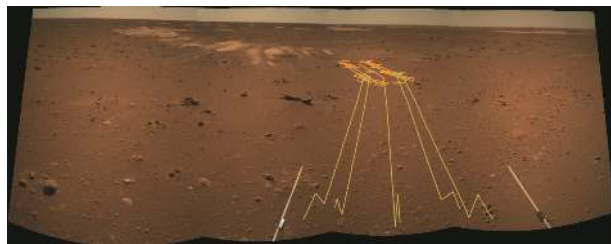


图9 火星车导航单元规划结果(路径反投影)

Fig. 9 Planning results of rover navigation unit (path back projection)

火星车每个火星日保持高效长距离移动以及移动期间的载荷探测。截至2021年8月30日,火星车向着陆

点以南方向累计行驶1 064 m。火星车整体移动轨迹如图6和图7所示。从图7的环绕器高分相机图像看,火星车移动轨迹清晰可见。

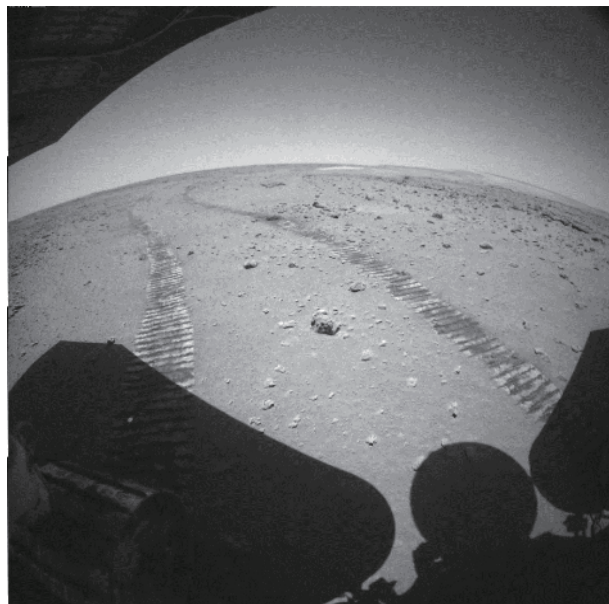


图10 火星车移动车辙(后避障相机图像)

Fig. 10 Rover moving track (rear obstacle avoidance camera image)

### 4.4 载荷探测

火星车载荷探测模式包括移动探测、就位探测和环境探测<sup>[24]</sup>。其中,导航地形相机每日对沿途地貌进行感知成像,移动行进过程中次表层雷达、气象测量仪、火星磁强计开机探测,抵达诸如沙丘、石块、撞击坑、泥火山等较高价值的科学探测点,通过规划控制表面成分探测仪、多光谱相机等开展载荷就位探测。

地面通过桅杆运动规划遥操作控制火星车导航地形相机对火面环境进行感知成像,图11给出了导航地形相机对一处沙丘的成像探测结果。通过桅杆指向规划遥操作控制多光谱相机完成对目标的精确探测,

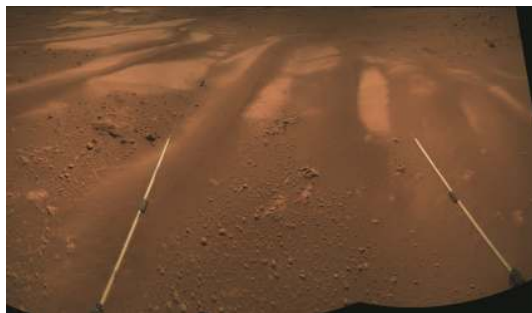


图11 沙丘成像探测(导航地形相机)

Fig. 11 Sand dune imaging detection (navigation terrain camera)

图12给出了多光谱相机对沿途一处石块精确指向探测结果。通过移动与载荷移动探测协同规划实现火星车移动行进过程中的匹配性载荷移动探测。



来源: 中国科学院国家天文台

图 12 石块精确就位探测 (多光谱相机)

Fig. 12 Accurate rock positioning detection (multispectral camera)

## 5 结 论

本文面向解决以火星车遥操作为代表的行星际空间遥操作飞控技术难题, 针对首次火星探测“祝融号”遥操作的任务特点、技术难点以及飞控设计约束, 设计了火星车遥操作控制模式和关键技术体系, 并在此基础上提出了火星车遥操作系统总体设计方法与系统架构, 最后设计给出了火星车遥操作飞控模式与实施流程。“祝融号”在轨实施情况说明了遥操作飞控模式设计、系统设计与实施流程设计的正确性和有效性, 为首次火星探测任务的工程圆满成功和“祝融”号火星车长期在轨测控提供了坚实支撑, 也为后续行星际空间遥操作任务奠定技术基础。

## 参 考 文 献

- [1] 贾阳, 陈建新, 申振荣, 等. 月面巡视探测器[J]. 航空制造技术, 2007(12): 44-47.  
JIA Y, CHEN J X, SHEN Z R, et al. Lunar rover[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2007(12): 44-47.
- [2] 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. China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 399-405.
- [3] 谢圆. 月球车遥操作中的任务规划技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.  
XIE Y. Research on mission planning technology in lunar rover teleoperation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [4] BIESIADECKI J, BAUMARTNER E. Mars exploration rover surface operations: driving opportunity at meridianiplanum[C]//Proc. IEEE Intl. Conference on Systems, Man and Cybernetics. [S. l.]: IEEE, 2005.
- [5] MAIMONE M, JEFFREY B. Surface navigation and mobility intelligence of the Mars exploration rovers[R]. Pasadena, CA: NASA Jet Propulsion Laboratory, 2006.
- [6] 贾阳, 张建利, 李群智, 等. 嫦娥三号巡视器遥操作系统设计与实现[J]. 中国科学: 技术科学, 2014(44): 470-482.  
JIA Y, ZHANG J L, LI Q Z, et al. Design and realization for teleoperation system of the Chang'E-3 rover[J]. *Chinese Science: Technical Science*, 2014(44): 470-482.
- [7] 孙泽洲. 深空探测技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.  
SUN Z Z. Deep space exploration technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.
- [8] 贾阳, 孙泽洲, 郑阳, 等. 星球车技术发展综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 419-427.  
JIA Y, SUN Z Z, ZHENG M, et al. Overview on development of planetary rover technology[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(5): 419-427.
- [9] GOLOMBEK M P, COOK R A, ECONOMOU T, et al. Overview of the Mars Pathfinder mission and assessment of landing site predictions[J]. *Science*, 1997, 278(5344): 1743-1748.
- [10] BRESINA J L, JONSSON A K, MORRIS P H, et al. Activity planning for the mars exploration rovers[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2005). Monterey: [s. n.], 2005.
- [11] NORRIS J S, POWELL M W, VONA M, et al. Mars exploration Rover operations with the science activity planner[C]//IEEE Conference on Robotics and Automation. [S. l.]: IEEE, 2005.
- [12] RANKIN A, MAIMONE M, BIESIADECKI J, et al. Driving curiosity: mars rover mobility trends during the first seven years[C]//2020 IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2020.
- [13] 岱宗玉, 邸凯昌. 好奇号巡视器及其特点分析[J]. 航天器工程, 2012(21): 110-118.  
DAI Z Y, DI K C. Mars Curiosity rover and its characteristics[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012(21): 110-118.
- [14] The MSL Project Science Office. Mars Science Laboratory participating scientists program proposal information package[EB/OL]. (2012-07-31)[2021-10-26]. <http://earth-web.ess.washington.edu/ess-306/MSL.pdf>.
- [15] FARLEY K A, WILLIFORD K H, STACK K M, et al. Mars 2020 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(8): 142.
- [16] 李群智, 宁远明, 申振荣, 等. 行星表面巡视探测器遥操作技术研究[J]. 航天器工程, 2008, 17: 29-35.  
LI Q Z, NING Y Y M, SHEN Z R, et al. Study on teleoperation of rover on planetary surface[J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 17: 29-35.
- [17] 王耀兵. 空间机器人[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.  
WANG Y B. Space robot [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.
- [18] MISHKIN A H, LIMONADI D, LAUBACH S L, et al. Working the

- Martian night shift—the MER surface operations process[J]. *Robotics & Automation Magazine IEEE*, 2006, 13(2): 46-53.
- [19] 张立华, 吴伟仁. 月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(6): 497-505.
- ZHANG L H, WU W R. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(6): 497-505.
- [20] NASA. NASA Curiosity rover [EB/OL]. [2021-10-26]. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html).
- [21] 王琮, 于登云, 贾阳. 星球巡视器任务规划技术发展综述[J]. *航天器工程*, 2014(23): 82-92.
- WANG Q, YU D Y, JIA Y. Review on mission planning technologies of planetary rover[J]. *Spacecraft Engineering*, 2014(23): 82-92.
- [22] 李群智, 贾阳, 彭松, 等. 月面巡视器任务规划顶层设计与实现[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(1): 234-242.
- LI Q Z, JIA Y, PENG S, et al. Top design and implementation of the lunar rover mission planning[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(1): 234-242.
- [23] 吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(4): 425-440.
- WU W R, ZHOU J L, WANG B F, et al. Key technologies in teleoperation of Chang'e-3 "YUTU" rover[J]. *Chinese Science: Information Science*, 2014, 44(4): 425-440.
- [24] JIA Y, ZOU Y, ZHU Y, et al. Development progress of China's first Mars exploration mission: its scientific objectives and payloads[J]. *Journal of Space Science*, 2020, 40(5): 693-697.
- 作者简介:  
张辉(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向: 航天测控、空间遥操作。  
通讯地址: 北京市5130信箱104分箱(100094)  
电话: (010)66367713  
E-mail: zh1521009216@163.com  
于天一(1980—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 航天测控、空间遥操作。本文通讯作者。  
通讯地址: 北京市5130信箱104分箱(100094)  
电话: (010)66366051  
E-mail: i\_am\_yty@sina.com

## Teleoperation Technology of Zhurong Mars Rover

ZHANG Hui, LU Hao, YU Tianyi, XIE Yuan, WANG Cheng, BAO Shuo, HU Xiaodong

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Restricted by the delay of TT&C communication link, communication bandwidth and relay communication arc, interplanetary space teleoperation technology is different from Earth Moon space teleoperation technology. The mission characteristics, technical difficulties and flight control design constraints of the Mars rover teleoperation are summarized. Aiming at solving the technical problems of the first interplanetary space teleoperation of China, this paper studied and established the Mars rover teleoperation control mode and key technology system, put forward the overall design method and system architecture of the Mars rover Teleoperation system, and designed the Mars rover teleoperation flight control mode and implementation process. The method proposed in this paper has been successfully applied to the teleoperation mission of Zhurong Mars rover. Zhurong Mars rover always maintains efficient movement and exploration, and the 100 d teleoperation mileage exceeds 1 kilometer, which verifies the correctness and effectiveness of this method, and lays a technical foundation for follow-up interplanetary space teleoperation missions.

**Keywords:** Mars exploration; Mars rover; teleoperation

### Highlights:

- The technical characteristics and design constraints of Zhurong Mars rover exploration mission were analyzed.
- The key technical requirements of Mars rover teleoperation were summarized.
- The overall design method and system architecture of Mars rover teleoperation system were proposed.
- The Mars rover teleoperation control mode and flight control implementation process were designed to solve the implementation problem of Mars rover teleoperation flight control under the condition of limited measurement and control arc and large time delay.
- The coordinated planning of ground planning movement and on-board autonomous navigation movement is realized for the first time, and the daily efficient long-distance movement of the rover and load detection during movement are realized.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]