

火星探测飞行控制任务规划技术研究

金文马, 陈俊刚, 润冬, 程艳合, 赵兴乾

(北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘要: 针对火星探测超远测控距离、超大传输时延工况下飞行控制难题, 研究了火星探测大时延飞行控制任务规划技术, 构建了深空探测通用大时延飞行控制体系, 提出了基于行星际大时延模型的预测迭代飞行控制方法, 设计了深空测控上下行链路状态解耦合的控制模式, 实现了火星探测器复杂测控数传模式切换天地协同自动化调度以及不同器地距离遥控发令传输时延自适应动态修正, 测控资源优化配置, 飞控事件合理安排及冲突自动排解等功能, 解决了火星探测天地测控时延大、飞控工作模式新、器地状态协同难、应急处置要求高的难题。本研究有力确保了首次火星环绕探测和进入下降着陆(Entry, Descent and Landing, EDL)控制稳妥可靠实施。

关键词: 火星探测; 大时延; 飞行控制; 任务规划; 测控资源

中图分类号: V556

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)05-0485-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20220107

引用格式: 金文马, 陈俊刚, 润冬, 等. 火星探测飞行控制任务规划技术研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 485-495.

Reference format: JIN W M, CHEN J G, RUN D, et al. Mission planning technology for flight control of Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(5): 485-495.

引言

深空探测是当前和未来航天领域的发展重点之一, 也是一个国家综合国力和科技水平的重要体现^[1]。中国深空探测起步于月球探测, 探月工程已完成“绕、落、回”三步走圆满收官^[2], 为开展月球以远地外天体探测积累了宝贵经验^[3], 建成了较为完备的深空测控系统^[4]。相比于月球探测, 火星探测环境未知、难度更大、风险更高, 任务成功率较低, 大部分失败案例集中在制动捕获、进入下降与着陆(Entry, Descent and Landing, EDL)两个关键环节^[6-9]。

中国首次火星探测任务于2016年正式立项^[10], “天问”系列作为火星探测工程首发任务, 是中国航天器迈入深空探测领域的重要里程碑, 主要工程目标是实现火星环绕探测、安全着陆和巡视探测^[11-12], 获取第一手火星科学探测数据^[13]。“天问一号”火星探测器于2020年7月23日成功发射入轨, 于2021年2月10日成功实施火星捕获进入环火轨道, 通过两次近火制动进入火星停泊轨道后开展了着陆区成像探测, 于2021年5月15日成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区^[14], 火星车正常分离行驶至火面并完成工程可视化任务^[15]。

之后, 火星车持续开展火面巡视探测, 环绕器在中继轨道为火星车提供中继通信服务, 火星车设计寿命结束后, 环绕器择机进入遥感使命轨道, 继续开展火星全球遥感探测^[16]。“天问一号”在国际上首次通过一次发射成功实现火星环绕、着陆及巡视探测三大工程目标, 使中国成为世界第二个独立掌握火星软着陆技术的国家。

相比于月球探测, 火星探测对地面测控提出更高要求, 需解决远距离测控通信和大时延飞行控制等难题。地火超远测控距离导致通信链路衰减较大, 对测控系统能力指标提出了更高要求, 包括上行发射功率、测定轨精度以及火星EDL段高动态测控等方面^[4-5], 需采用大口径天线或下行多天线组阵技术, 实现对远距离微弱信号有效接收^[17-18]。火面着陆巡视器受能源和质量限制, 主要依靠火星环绕器提供器间中继通信服务进行对地通信, 需解决基于火星中继的多目标协同控制问题^[19-20]。特别地, 火星探测双向传输时延最多可达44 min^[21], 与月球探测秒级时延有本质变化, 地面无法实时监视状态和操作控制, 是首次执行真正意义上的深空探测任务, 亟需解决大时延飞行控制任务规划关键技术难题。

美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 是世界火星探测领跑者, 积累了丰富的火星探测飞控任务规划经验。“火星勘测轨道器” (Mars Reconnaissance Orbiter, MRO) 任务规划系统^[22]支持并行开展航天器平台工程任务和有效载荷科学探测规划, 支持基于时间线的规划结果可视化展示^[23]。“勇气号” (Spirit) 和“机遇号” (Opportunity) 地面飞控系统核心模块是事件规划与序列子系统 (Activity Planning and Sequencing Subsystem, APSS)^[24], 主要使用MAPGEN (Mixed-initiative Activity Plan GENerator) 规划器^[25], 可有效处理火面资源限制、安全准则和时间约束等约束条件, 支持APGEN (Activity Plan Generator) 图形界面^[26]和EUROPA (Extendable Uniform Remote Operations Planning Architecture) 约束推理^[27]。“好奇号” (Curiosity) 任务规划主要基于MAPGEN改进, 是基于资源调度的规划器, 具备复杂约束处理能力。JPL在火星中继服务方面积累了丰富经验^[19], 提出了深空测控网调度问题多目标最优化模型和方法^[28]。“火星快车” (Mars Express, MEX) 是欧洲

航天局 (European Space Agency, ESA) 首个火星探测器, 采用分层规划理念, 按规划周期划分为长期规划 (约6个月)、中期规划 (约1个月)、短期规划 (约1周) 和日规划^[29], 主要通过任务规划系统 (Mission Planning System, MPS) 生成规划结果, 规划工具包括调度架构、上行发令、一体化测站调度等。

本文结合“天问一号”火星探测器飞行控制需求, 深入分析火星探测飞行控制主要特点和难点, 重点针对火星探测大时延飞行控制难题, 构建火星探测大时延飞行控制体系, 突破深空探测通用大时延飞行控制关键技术, 在充分继承以往载人航天和月球探测任务飞控成功经验基础上, 研究提出火星探测大时延飞行控制任务规划理论与方法。

1 火星探测飞行控制任务特点难点

1.1 飞行控制过程概述

首次火星探测任务主要包括发射入轨段、地火转移段、火星捕获段、火星停泊段、火星停泊段、离轨着陆段、释放分离段和科学探测段等飞行阶段。图1给出了“天问一号”火星探测器主要飞控过程示意图^[16,21]。

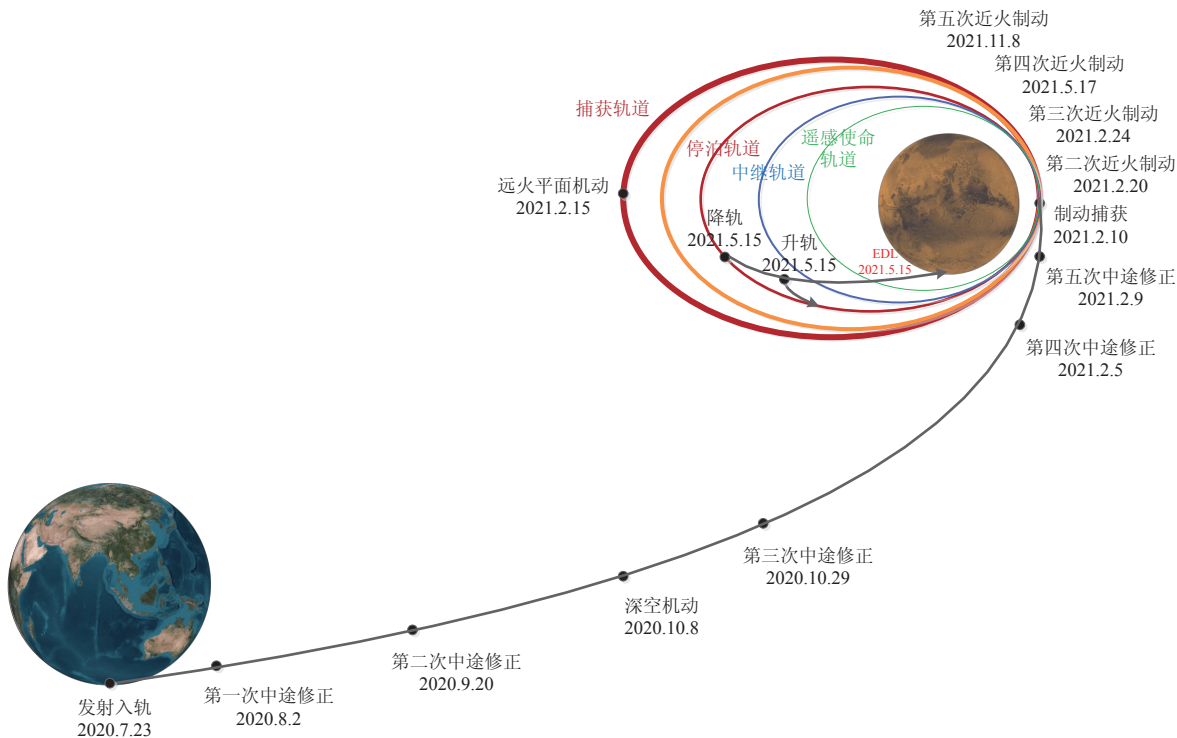


图1 “天问一号”首次火星探测任务飞行控制过程示意图

Fig. 1 Flight control process of Tianwen-1 first Mars exploration mission

1) 发射入轨段, 是指从运载火箭点火起飞至探测器与运载火箭分离之间的飞行过程。“天问一号”火星

探测器于2020年7月23日12时41分在海南文昌发射, 于13时17分准确进入预定地火转移轨道。

2) 地火转移段, 是指从探测器入轨至进入火星引力影响球之间的飞行过程。地火转移飞行时间约6.5个月, 计划安排4次中途修正控制和1次深空机动控制。期间定期开展探测器平台及有效载荷自检。

3) 火星捕获段, 是指从探测器进入火星引力影响球开始到第二次近火制动前的飞行过程。2021年2月10日, 探测器到达近火点时进行制动捕获, 成功进入环火大椭圆轨道, 运行到远火点时进行一次变轨, 调整至接近极轨轨道, 并调低近火点高度。

4) 火星停泊段, 是指从探测器第二次近火制动开始至离轨前的飞行过程。捕获轨道运行一圈再次到达近火点, 进行第二次近火制动, 进入停泊调相轨道; 第三次近火点制动后进入停泊轨道。期间需周期性进行停泊轨道维持, 并开展着陆区成像探测。

5) 离轨着陆段, 是指从探测器离轨至着陆巡视器着陆前的飞行过程。探测器运行到选定进入窗口后, 实施降轨机动转入进入轨道, 实施器器分离释放着陆巡视器。着陆巡视器经过渡段滑行, 运行至火星大气进入点, 成功完成EDL过程降落至预选着陆区。分离后环绕器升轨拉起返回停泊轨道, 为着陆巡视器EDL及火面初期工作提供中继通信支持。

6) 释放分离段, 是指从着陆巡视器着陆至火星车行驶至火星表面之间的过程。环绕器在拉起后的停泊轨道上运行一圈后到达近火点, 实施第4次近火制动进

入中继通信轨道, 根据需要周期性进行中继轨道维持。火星车正常分离行驶至火面后, 按计划完成国旗成像等工程可视化任务。

7) 科学探测段, 主要包括火星车火面巡视探测和环绕器遥感轨道探测。火星车设计寿命结束后, 环绕器实施第五次近火制动进入遥感使命轨道, 开展火星全球遥感探测, 兼顾为火星车提供中继服务。

1.2 飞控特点难点分析

下面简要分析火星探测飞行控制特点和难点, 梳理明确火星探测飞控任务规划复杂约束条件。

1) 空间环境未知因素较多。首次火星探测任务面临诸多未知空间环境因素^[10,21], 比如不同器日距离对应的太阳辐照环境变化对整器姿态控制及太阳翼控制策略影响、火星大气环境和风场环境对EDL弹道设计及控制策略影响^[9]等方面。飞控任务规划需充分考虑器日距离变化对整器温度工况影响, 对探测器飞行姿态也有潜在约束, 在EDL前需择机安排着陆区沙尘暴情况成像探测。

2) 器地传输时延显著增大。地火距离最远达4亿km, 约为地月距离的1 000倍^[12], 器地往返传输时延最多可达约44 min, 图2给出了地火转移以及环火飞行过程器地距离及双向传输时延变化情况。下行状态判读方面, 当前收到的遥测数据反映的是单向光行时(最多约22 min)之前的器上状态, 也即地面状态监

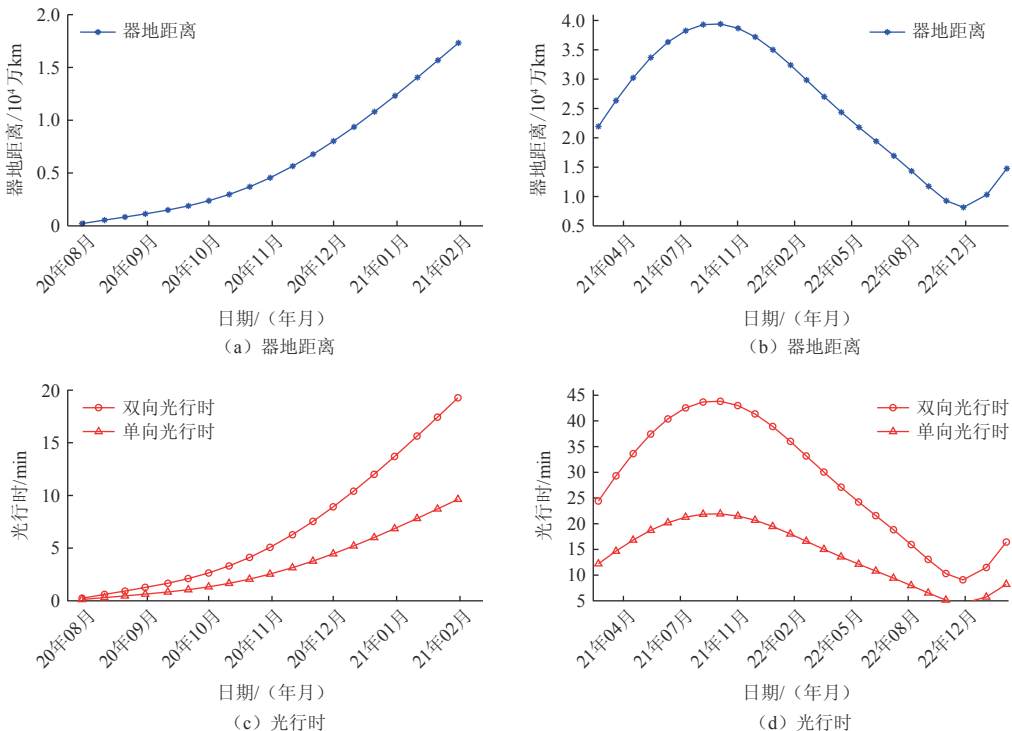


图2 “天问一号”地火转移及环火飞行过程器地距离及光行时变化情况示意图

Fig. 2 Illustration of the distance between Tianwen-1 Mars probe and the ground as well as transmission time delay variation

视判读具有一定的滞后性,异常情况下地面不能第一时间发现。上行遥控发令方面,从地面遥控指令发出到抵达探测器、器上执行后状态变化遥测返回地面最多需等待约44 min,无法第一时间获知器上指令接收、执行情况。飞控实施过程中,超大时延对轨道预报计算、测站跟踪引导、测控计划设计、遥控发令修正、遥测状态判读、应急处置实施等方面均有较大影响。

3) 测控数传设计状态复杂。火星环绕器配备多副不同增益天线,可实现不同器地距离可靠通信,采用测控数传一体化设计^[7],测控与数传模式均具有多档码速率,测控数传模式切换会导致下行中断及重新锁定,在大时延工况下对地面状态监视判读具有较大影响^[16]。多档码速率设计对地面测站跟踪提出了较高要求,飞控任务规划需解决大时延工况下测控数传工作模式切换前后天地状态协同难题。

4) 超低码速率遥控和遥测。火星探测器配备不同增益对地通信天线,适应不同器地距离及传输码速率,通常轨控等关键控制前后切为中低增益测控模式,下行遥测码速率在低档位下地面可以利用遥测信息极为有限;上行遥控超低码速率^[21]下发令修正以及遥控执行判读都更为困难,特别是应急情况下超低码速率上行遥控发令和地面站调制环节耗时较长,对地面应急处置时效性具有一定影响。

5) 能源平衡约束更加突出。由于太阳、地球和火星相对位置关系变化,不同方位关系下火星探测器太阳帆板充电效率不同。特别地,停泊轨道由于器日距离较远,整器能源较为紧张;中继轨道存在长火影弧段。另外,受时变光深和弱光照条件影响,着陆巡视器太阳翼发电功率存在不确定性,移动、感知、探测等主要活动工况通常集中在火星日光照最强条件下执行,能源约束直接影响地面任务规划。

6) 自主管理策略逻辑复杂。火星探测器飞行控制距离遥远、器地通信时延较大,制动捕获和器器分离等关键控制无法实时监控,且存在日凌现象,火星探测器从设计上具备更强的自主管理、自主控制以及自主规划能力^[7,16,21]。器上自主管理设计状态导致地面状态监视判读不确定性增大,故障入口判断和处置策略制定需充分考虑器上自主管理设计状态及切换逻辑。针对火星捕获、EDL等不可逆关键控制^[9],飞控事件安排需根据器上自主管理逻辑设计预留充分余量,便于地面应急介入有序衔接。

7) 跟踪和测定轨难度更大。火星探测器跟踪和测定轨主要采用基于地面无线电测量的测距、测速和甚

长基线干涉(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)测角3种手段,其中VLBI时延测量精度是提高火星探测定轨精度的关键环节之一,利用波束较窄地面站跟踪探测器需充分考虑光行时影响^[30]。

8) 火星中继通信服务需求。火星环绕器能够比受能源和质量限制的火星着陆巡视器提供更高的数据传输速率,因此火星着陆巡视器通常通过环绕器中继传实现与地面站之间的数据传输,需要解决中继服务模式设计的问题^[19]。

9) 火星时漂影响地面作息。火面工作的主要约束是能源,能源平衡情况与火星时相关,由于一个火星日相比一个地球日多约40 min,地火时差存在固定规律动态漂移,导致每日测控跟踪安排和器间中继通信弧段均存在固定漂移,对地面飞控值班安排及人员作息影响较大。

10) 日凌通信中断时间较长。首次火星探测任务会经历日凌,通信中断最长长达约30 d^[12,21,31],需解决进出日凌前后能源、姿态和通信管理等方面问题,确保长时间无地面测控支持期间探测器在轨安全,需研究设计日凌期间测控支持模式。

2 火星探测大时延飞控主要应对策略

“天问一号”首次火星探测任务是中国第一次执行真正意义上的深空探测任务,跟以往近地轨道和月球探测任务相比技术状态变化较大,针对火星探测飞行控制任务主要特点难点,需研究明确火星探测大时延飞控地面主要应对策略。

2.1 测控数传链路上下行分离模式设计

火星探测大时延飞行控制首先需要解决以往飞控任务中上下行测控链路耦合度过高的问题,避免下行遥测中断影响上行链路,需突破常规测控模式上行发令方式的瓶颈,采用上下行链路解耦合的开环控制模式。上行遥控指令发送执行和下行遥测数据接收判读均需要精确考虑光行时因素。测控计划设计需精确考虑光行时因素,主要原则是上行事件提前安排、下行事件滞后安排。

2.2 上行遥控发令自适应动态修正技术

与“嫦娥”系列探月任务不同,火星探测任务中器地距离最远达到4亿km,且变化幅度较大,在环绕器环火飞行阶段,空间链路时延在4.5~21.9 min之间变化,上行控制需要充分考虑时延的影响。针对火星探测超远测控距离、超大传输时延工况,地面遥控发令需考虑器地传输时延进行发令时刻修正,需要自适应不同遥控码速率上行需求。

2.3 测控数传模式切换天地协同自动化

为适应超远距离测控通信需求, 深空探测器不同飞行阶段和器地距离可采用不同测控数传工作模式及相应口径天线设备, 测控数传模式切换会导致地面下行中断及重新锁定, 在大时延工况下对地面状态监视判读具有较大影响, 也对天地协同提出了较高要求。针对深空探测器复杂测控数传模式切换天地协同技术难题, 提出一种深空探测复杂测控模式切换天地协同

自动化调度方法, 在轨测控数传工作模式切换事件发生后, 地面测控网需考虑信号传输时延协同完成上下行测控链路状态切换及测控设备工作参数调整, 通过采用计划驱动方式实现复杂测控模式切换天地协同自动化调度, 确保深空探测器测控数传工作模式切换前后天地状态的一致性。图3给出了火星探测大时延工况下高增益和中低增益测控模式切换天地协同工作流程示意图。

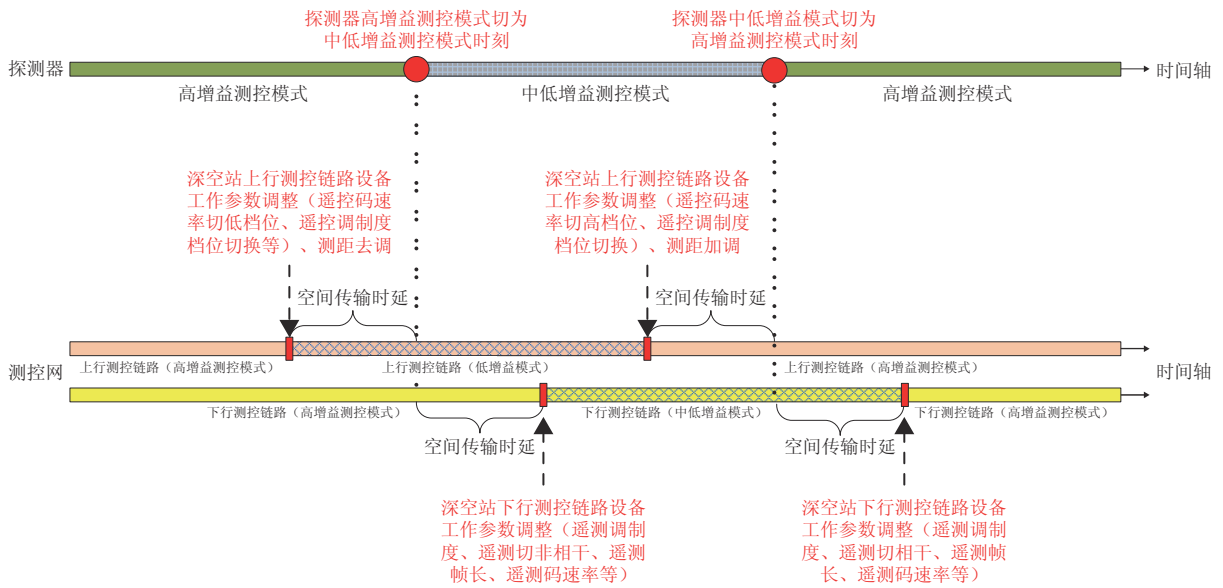


图 3 火星大时延工况高增益和中低增益测控模式切换天地协同示意图

Fig. 3 Probe-ground collaboration during switch between high and medium-low gain TT&C modes in Mars exploration with large time delay

2.4 火面段器间中继通信服务模式设计

火面着陆巡视器主要通过能够提供更高的数据传输速率的环绕器中继代传实现与地面站之间的数据传输。中继轨道段每个火星日最多有两个器间通信弧段, 根据通信弧段与火星距离远近分别称其为近火中继通信窗口和远火中继通信窗口。具体如图4所示。飞控实施过程中, 根据火星环绕器轨道预报及着陆巡视器火面位置, 分别计算每个火星日近火、远火中继通信窗口。根据每个中继通信窗口最前沿时刻, 确定对应的中继服务窗口最后沿时刻, 原则上必须在该中继服务窗口结束前完成相应中继通信窗口中继前向链路转发遥控指令及注入数据的上行发送以及内存下卸检查比对, 中继服务窗口选取需考虑上行发送时间、器地传输时延和地面状态判读等因素。相应地, 主要根据器间中继通信窗口漂移动态调整测控跟踪弧段。

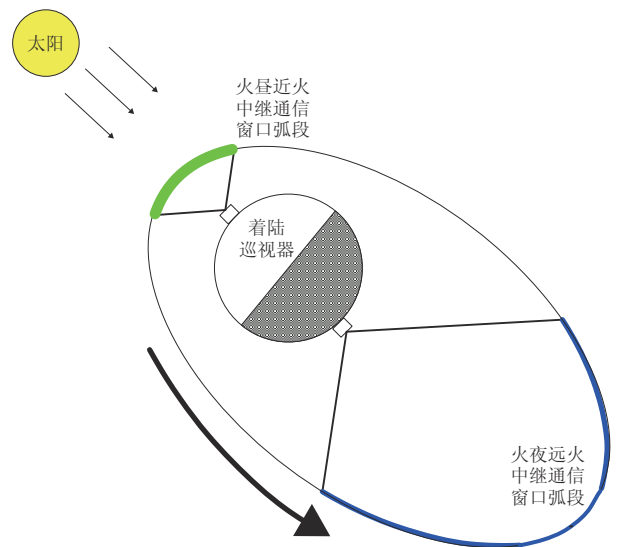


图 4 火星探测器器间中继通信窗口弧段类型示意图

Fig. 4 Illustration of the relay communication window between Mars probes

2.5 火星时预报计算及其任务规划应用

火星探测任务中, 火面工作模式开始、结束时刻通常使用火星地方时描述。太阳相对火星当地位置视

运动旋转一周为1个火星日, 一个火星日相比于地球日多约40 min, 地火时差按固定时差动态漂移。飞控任

务规划需引入火星时预报, 维持北京时和火星时两种时间信息。器间中继通信窗口通常安排在每个火星日特定火星时, 器间中继通信服务提供方和接收方需基于火星时协同规划。地面测控跟踪通常以火星时作为参考基准, 每日测控跟踪安排和器间中继通信弧段均存在固定漂移。

3 火星探测飞行控制任务规划方法

航天飞行控制任务规划是指依据航天器飞程序, 将整个飞行控制过程分解为一系列飞控事件, 并

在时间轴上确定飞控事件之间的相对时间关系, 然后合理调配天地测控资源, 制定统一、权威、有效的飞行控制计划, 完成特定飞行控制任务目标。简单来讲, 航天飞行控制任务规划就是如何在有效测控区间上合理安排飞控事件, 给出每个飞控事件中具体指令与时间坐标轴之间的映射关系, 以期使用有限的测控资源来完成对航天器的测量和控制。

3.1 分层规划理念

航天飞行控制任务规划按照自顶向下分为任务层、资源层、事件层三层结构, 具体如图5所示。

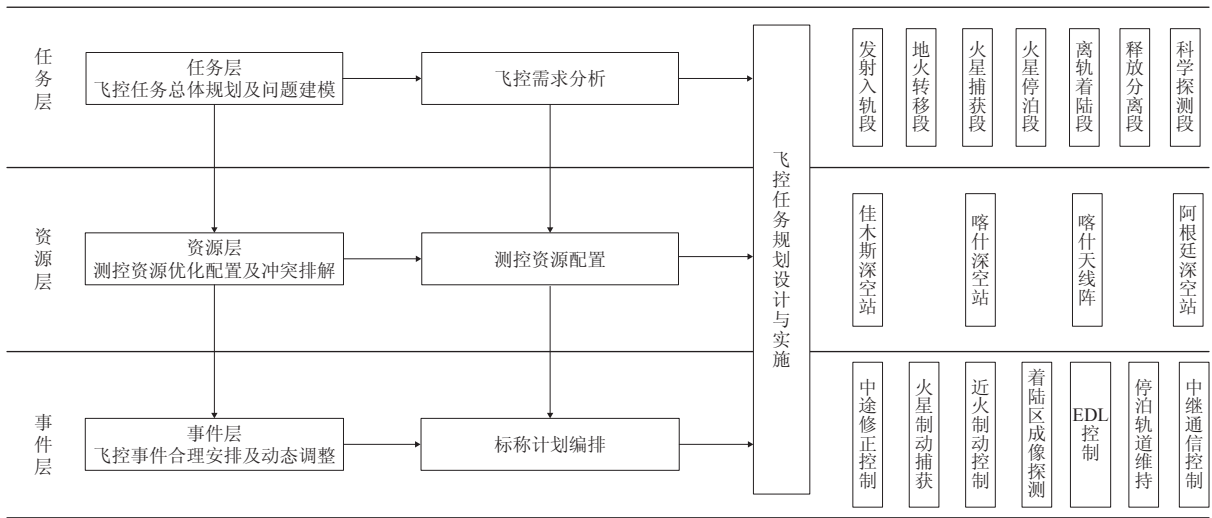


图5 火星探测飞控任务规划设计与实施示意图

Fig. 5 Design and implementation of flight control mission planning for Mars exploration

1) 任务层: 任务总体规划和飞控需求分析

按照工程总体文件要求和探测器全过程飞程序开展飞控需求分析, 明确飞行控制任务总体要求、飞控阶段划分以及飞控工作模式等相关要求。确定关键和一般飞控阶段, 并且明确不同阶段采用的飞控模式以及飞控事件等级划分。确定不同飞控工作模式下测控跟踪、人员值班要求等要素。任务层规划重点聚焦火星探测任务特点难点, 合理设计长周期深空探测任务飞控工作模式, 系统解决深空探测大时延开环控制等飞控任务规划领域关键技术难题, 梳理识别决定任务成败的关键飞控过程存在主要风险, 详细制定地面飞控决策判据及实施流程。

2) 资源层: 测控资源优化配置及冲突排解

通常不同飞控阶段和飞控模式采用不同测控网跟踪策略, 根据需要可采用月计划或周计划模式, 分阶段进行测控资源规划。按照不同飞控事件等级划分, 通过合理安排深空测控资源, 确保满足探测器各类飞控事件测控跟踪需求, 主要包括上行控制需求、下行

遥测接收需求、测定轨需求以及科学探测数据数传接收需求等。资源层规划主要根据测定轨精度指标要求和火星探测器平台管理、在轨试验等飞控需求, 分析明确任务全程测控工作模式和跟踪强度, 优化调度深空测控网和VLBI观测站、数传接收站等地面站网资源, 解决月球与深空探测多任务、多目标测控资源优化配置及冲突消解难题。

3) 事件层: 飞控事件合理安排及动态调整

根据探测器平台控制、载荷探测等飞控需求, 统筹调配深空站网测控资源, 进行飞控事件合理安排, 根据需要进行飞控事件动态调整。根据航天器飞行轨道分析测控条件, 按照测控条件合理安排飞程序指令, 控制航天器及测控系统在特定时间执行特定动作。事件层规划重点聚焦大时延工况下火星探测器在轨飞控事件安排, 精准计算飞控事件发生时刻信号传输时延, 根据深空测控资源优化配置结果, 按照上行相关事件提前安排和下行相关事件滞后安排的原则, 确保火星探测器测控数传工作模式切换前后天地链路

状态协同匹配。

3.2 测控资源调配

测控资源调配主要是合理安排深空站、VLBI观测站和数传接收站跟踪弧段, 确保满足火星探测器测控、定轨及数据接收需求。另外, 首次火星探测任务持续周期长、时间跨度大, 与“嫦娥五号”任务2020年窗口交叠, 月球与深空探测多任务、多目标测站跟踪几何可见弧段接近, 需解决月球及深空探测多任务、多目标测控资源配置问题。

1) 测控跟踪目标要求

首次火星探测任务测控通信链路规划如图6所示^[20]。环绕器和火星车均存在直接天地接口, 火星车主要通过环绕器中继前向转发上行, 应急情况下存在直接对地测控上行需求。火面着陆前, 仅环绕器测控应答机开机工作, 测控目标仅有环绕器; 火面着陆后, 火星车释放分离后定向天线展开且测控应答机开机工作, 测控目标为环绕器、着陆巡视器。

2) 测控资源配置实现方法

首次火星探测任务测控网配置中需明确测站跟踪

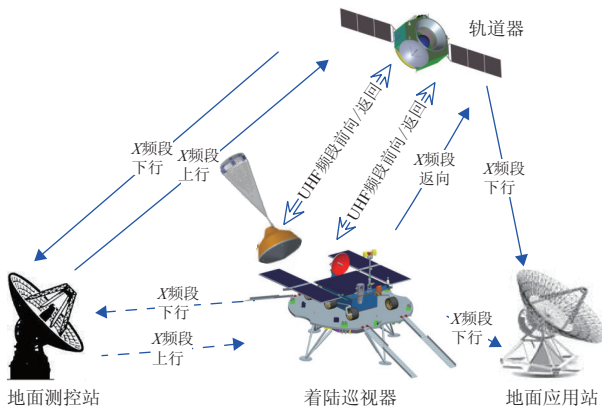


图 6 火星探测任务典型测控通信链路规划示意图

Fig. 6 Illustration of Mars exploration TT & C communication link

目标、圈次信息、起止时段、上下行链路状态及使用优先级等信息。根据指定时间段内的控制目标, 结合测控资源分配、预报、轨道参数、轨控策略等计算相应时间段有效发令时间区间及有效科学数据上传时间区间, 将各目标可用有效发令区间存入测控配置管理。图7给出了火星探测飞控过程深空测控资源优化配置流程, 相比于以往探月任务需充分考虑器地距离及传输时延影响。图8给出了测控资源配置结果(各测站具体测控时段)信息示意图。

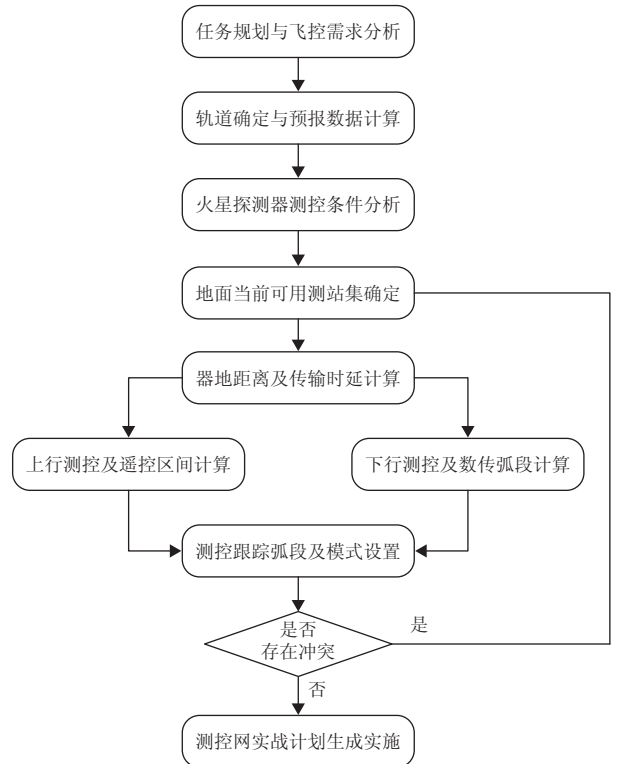


图 7 火星探测飞控任务规划深空测控资源优化配置流程示意图

Fig. 7 Deep space TT&C resource allocation and optimization process in flight control mission planning practice of Mars exploration

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
测站A																																		
测站B																																		
测站C																																		

图 8 火星探测飞控任务规划测控资源配置弧段示意图

Fig. 8 TT&C resource allocation diagram of flight control mission planning for Mars exploration

3) 测控资源调配小结

深空测控资源调配在火星探测飞控中发挥着基础性关键作用, 本节提出的测控资源配置方法, 能够有效满足“天问一号”首次火星探测任务测控需求, 并且解决了月球与深空探测多任务、多目标测控资源优化配置与冲突排解的难题。特别是“天问一号”飞控无现成经验可借鉴, 客观上增加测控资源配置实现难度。与NASA深空测控网资源调度采用多目标优化算法^[28]相比, 当前深空测控资源配置人工干预环节较多, 后续需进一步提升可视化、自动化水平。

3.3 飞控事件安排

根据探测器飞控需求, 结合测控资源情况, 合理安排飞控事件。飞控实施过程中, 将飞控事件进一步分解为具体指令序列, 并且根据轨道预报在测站跟踪弧段时间轴上合理安排指令序列, 从而达到控制探测器在预定时刻完成相应动作的目的。在计划工作模式下, 主要依据飞行程序、理论轨道, 汇集飞控相关需求, 在任务准备阶段编排飞控事件对应的标称计划, 在任务实施过程中根据实测轨道及相应预报数据、控制参数生成各类实战计划, 作为飞控实施的最终依据。

1) 飞控事件主要约束类型

飞控事件安排需要依赖于具体约束条件, 主要用于描述特定飞控事件控制目标、开始执行时刻及持续时间、执行测站等信息。火星探测飞控事件安排主要约束类型包括时间约束、测站约束、轨道约束、能源约束、中继通信约束以及逻辑约束等方面。

(1) 时间约束

时间约束是火星探测飞控事件安排最常用的约束之一。该类约束主要用于安排特定任务时间附近发生、每天特定时刻发生以及火星时某特定时刻发生的飞控事件。通过时间约束描述方式, 可以给出飞控事件最早开始执行时刻、最晚开始执行时刻及其持续时间等信息。根据飞控事件安排具体需求, 可以使用绝对北京时、相对北京时和火星时。其中, 火星时约束主要用于火面工作阶段, 任务实施过程中需计算与该北京时对应的火星时预报(火星日、时、分、秒), 通常使用火星当地真太阳时。

(2) 测站约束

测站约束也是火星探测飞控事件安排最常用的约束之一。该类约束主要用于安排特定测站跟踪弧段内发生的飞控事件及测控任务要求, 比如测站A进站10°时刻开始发送上行载波、测站A和测站B共视弧段开始后30 min开始进行姿态机动控制。另外, 测站需考虑火星探测器上下行多档码速率工况。

(3) 轨道约束

轨道约束主要用于安排特定轨道及姿态约束条件下的飞控事件, 比如测控跟踪安排及VLBI观测频度需充分考虑测定轨精度指标要求; 部分科学载荷探测需器火距离及器下点太阳高度角满足一定要求; 器间中继通信要求着陆巡视器与环绕器之间距离及着陆巡视器看环绕器方向仰角满足一定要求。

(4) 能源约束

能源约束主要用于安排与整器能源平衡相关的飞控事件。火星探测器中继轨道段存在长火影(火星遮挡太阳)圈次导致放电深度较大, 主要采用多圈能量平衡的策略, 需要定期关闭行放进行充电。行放开关安排对地面测控跟踪具有潜在影响。

(5) 中继通信约束

中继通信约束主要用于安排环绕器与着陆巡视器之间中继通信相关飞控事件, 比如中继通信前后姿态机动、UHF或X频段测控数传设备开关机等, 通过采用相同器间中继通信时间基准, 实现着陆巡视器与环绕器之间器间通信指令安排协同配合。

(6) 逻辑关联约束

逻辑关联约束主要用于安排存在逻辑约束关系的飞控事件。如飞控事件B必须在飞控事件A结束后1 h内开始实施; 探测器某些动作需要在整器充满电后方可实施。

2) 飞控事件安排冲突排解方法

飞控事件安排冲突主要可以划分为逻辑冲突、资源冲突、时间冲突等不同类型。飞控事件安排冲突排解的主要原则是按照飞控事件优先级排序, 原则上优先级较高的飞控事件优先安排。逻辑冲突主要是指飞控事件执行优先级或时序逻辑不符合预期, 比如探测器某项关键控制应该安排在整器充满电的工况下实施, 实际实施过程中出现指令安排在出火影后立即执行的情况, 需调整执行时间。资源冲突主要是指不同任务在相同时间存在使用同一测站的需求, 或者同一任务不同测控目标在相同时间存在使用同一测站的需求。时间冲突主要是指同一任务不同测控目标对应飞控事件指令执行时间交叠或同一测控目标不同飞控事件指令执行时间交叠。图9给出了飞控事件安排冲突排解流程示意图。

3) 飞控事件安排小结

根据火星探测任务飞控特点难点, 特别是针对超大变时延工况下飞行控制状态变化, 飞控任务规划中主要按照上行飞控事件提前单向光行时安排、下行飞控事件滞后单向光行时安排原则, 确保了大时延工况

下天地状态协同匹配。解决了深空探测大时延工况下复杂测控数传模式切换天地协同自动化调度难题, 实现了火星探测多目标协同控制及器间中继通信服务协同。考虑到首次火星探测任务工程层面风险, 飞控实施主要原则是确保任务圆满成功、稳妥可靠, 后续火星探测任务飞控实施可借鉴NASA和ESA在基于时间线的飞控事件可视化展示以及人工智能等新技术运用方面的成功经验。

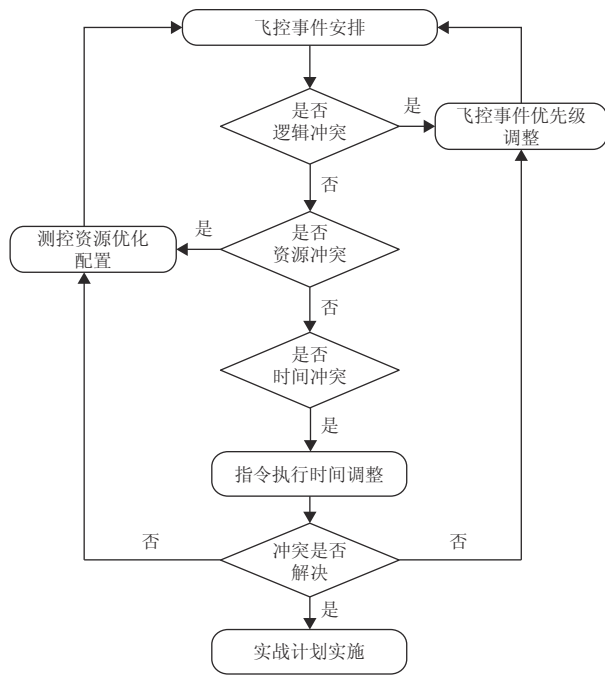


图 9 火星探测飞控事件安排冲突排解流程示意图

Fig. 9 Mars exploration flight control event scheduling conflict resolution process diagram

4 结 论

“天问一号”首次火星探测任务在国际上首次通过一次发射实现火星环绕、着陆及巡视探测三大目标, 工程技术跨度大、飞控实施风险高, 火星探测飞控任务规划技术在确保任务圆满成功方面发挥重要作用。本文深入分析了火星探测任务飞控主要特点和难点, 系统阐述了火星探测飞控任务规划理论与方法, 解决了测控资源优化配置、飞控事件合理安排及冲突自动排解等问题, 重点针对火星探测大时延飞控难点问题, 从测控链路上下行分离模式设计、上行遥控发令自适应动态修正、测控数传模式切换天地协同自动化、火面段器间中继通信服务模式设计、火星时预报计算及其应用等方面提出了有效可行的解决方案, 在“天问一号”火星捕获、进入下降、着陆等关键控制中得到全面有效验证。

继“天问一号”首次火星探测任务之后, 还将陆续实施小行星探测、火星取样返回、木星系及行星际穿越探测任务以及太阳系边际探测任务等系列深空探测任务^[32-33], 本文提出的火星探测飞行控制任务规划理论和方法可扩展应用至后续深空探测任务。按照国家关于工程与对科学深空探测“双轮驱动”的要求, 随着工程总体层面更加注重提升科学效益, 后续飞行控制任务规划需持续提升科学探测任务规划能力, 支持相关大学与研究机构进行分布式任务规划。当前飞控任务规划过程人工干预环节较多, 后续需发展元宇宙、机器学习、人工智能等先进飞控技术, 进一步提升可视化、自动化、智能化水平。

参 考 文 献

- [1] 吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2014, 1(1): 5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.
- [2] 叶培建, 于登云, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器的成就与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 323-333.
YE P J, YU D Y, SUN Z Z, et al. Achievements and prospect of Chinese lunar probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 323-333.
- [3] 孙泽洲, 孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 785-791.
SUN Z Z, MENG L Z. Current situation and sustainable development trend of deep space exploration in China[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(6): 785-791.
- [4] 董光亮, 李海涛, 郝万宏, 等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(2): 99-114.
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 99-114.
- [5] 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(1): 87-108.
WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2020, 50(1): 87-108.
- [6] 于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(2): 108-113.
YU D Y, SUN Z Z, MENG L Z, et al. The development process and prospects for Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 108-113.
- [7] 张玉花, 朱新波, 谢攀, 等. 火星环绕探测发展现状与趋势[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(1): 3-10.
ZHANG Y H, ZHU X B, XIE P, et al. Current situation and trend of Mars orbiting exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(1): 3-10.

- [8] 董捷, 饶炜, 王闯, 等. 国外火星探测典型失败案例分析与应对策略研究[J]. *航天器工程*, 2019, 28(5): 122-129.
DONG J, RAO W, WANG C, et al. Research on the typical failure cases and coping strategy of foreign Mars exploration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(5): 122-129.
- [9] 饶炜, 孙泽洲, 董捷, 等. 天问一号火星进入、下降与着陆系统设计与实现[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(8): 1162-1174.
RAO W, SUN Z Z, DONG J, et al. Design and implementation of the Mars entry, descent, and landing system for the Tianwen-1 mission[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2022, 52(8): 1162-1174.
- [10] 耿言, 张荣桥, 赫荣伟, 等. 首次火星探测任务的科技与管理创新[J]. *工程管理科技前沿*, 2022, 41(1): 3-8.
GENG Y, ZHANG R Q, HE Y W, et al. The science- technology and management innovation for China's first Mars exploration mission[J]. *Frontiers of Science and Technology of Engineering Management*, 2022, 41(1): 3-8.
- [11] 张荣桥, 耿言, 孙泽洲, 等. 天问一号任务的技术创新[J]. *航空学报*, 2022, 43(3): 626689(1-7).
ZHANG R Q, GENG Y, SUN Z Z, et al. Technical innovation of Tianwen-1 mission[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(3): 626689(1-7).
- [12] 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, 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.
- [13] 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.
- [14] WAN W X, WANG C, LI C L, et al. China's first mission to Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 4: 721-729.
- [15] TIAN H, ZHANG T Y, JIA Y, et al. Zhurong: features and mission of China's first Mars rover[J]. *The Innovation*, 2021, 2(3): 100121.
- [16] 张玉花, 王献忠, 褚英志, 等. 我国首次自主火星探测任务中环流器的研制与实践[J]. *上海航天(中英文)*, 2020, 37(5): 1-9.
ZHANG Y H, WANG X Z, CHU Y Z, et al. Development and practice of the orbiter in China's first Mars exploration mission[J]. *Aerospace Shanghai(Chinese & English)*, 2020, 37(5): 1-9.
- [17] 于志坚, 李海涛, 李小梅. 可扩充深空天线组阵技术研究与试验验证[J]. *遥测遥控*, 2015, 36(6): 1-7.
YU Z J, LI H T, LI X M. Research and experiment verification on extendable deep space antenna arraying techniques[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2015, 36(6): 1-7.
- [18] 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(中英文)*, 2018, 5(5): 414-425.
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.
- [19] EDWARDS C D. Relay communications for Mars exploration[J]. *International Journal of Satellite Communication and Networking*, 2007, 25(2): 111-145.
- [20] 孙泽洲, 韩宇, 白帆, 等. 天问一号火星探测器多节点、多体制中继通信系统设计与验证[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(2): 226-236.
SUN Z Z, HAN Y, BAI F, et al. Design and verification of the multinode and multisystem relay communication system for the Tianwen-1 Mars Probe[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2022, 52(2): 226-236.
- [21] 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(5): 649-657.
- [22] LOCK R E, XAYPRASEUTH P, JOHNSTON M D, et al. The Mars Reconnaissance Orbiter mission plan: D-22239[R]. USA: Jet Propulsion Laboratory, 2005.
- [23] JAI B. The Mars Reconnaissance Orbiter mission operations: architecture, approach and status[C]//Proceedings of American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 2006-5956: 1-10, SpaceOps 2006 Conference. Rome, Italy: AIAA, 2006.
- [24] KO A, MALDAGUE P, PAGE D, et al. Design and architecture of planning and sequence system for Mars Exploration Rover (MER) operations[C]//Proceedings of Space OPS 2004 Conference. Montreal, Quebec, Canada: [s. n.], 2004.
- [25] AI-CHANG M, BRESINA J, CHAREST L, et al. MAPGEN: mixed-initiative planning and scheduling for the Mars exploration rover mission[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2004, 19(1): 8-12.
- [26] BRESINA J, JONSSON A, MORRIS P, et al. Activity planning for the Mars Exploration Rovers[C]//Proceedings of the Fifteenth International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2005). Monterey, California, USA: ICAPS, 2005.
- [27] JEREMY F, JÓNSSON A. Constraint-based attribute and interval planning[J]. *Constraints*, 2003, 8: 339-364.
- [28] JOHNSTON M D. Deep space network scheduling using multi-objective optimization with uncertainty[C]//Proceedings of American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) SpaceOps 2008 Conference. Heidelberg, Germany: AIAA, 2008.
- [29] RABENAU E, PESCHKE S, DENIS M, et al. Mission planning experience gained from the Mars Express mission[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) SpaceOps 2006 Conference. Rome, Italy: AIAA, 2006.
- [30] 刘庆会. 火星探测 VLBI 测定轨技术[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2018, 5(5): 435-441.
LIU Q H. VLBI Orbit determination technology for Mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 435-441.
- [31] 张荣桥, 李海涛, 董光亮, 等. 太阳噪声对火星探测测控链路影响研[J]. *科学通报*, 2022, 67(35): 4289-4296.
ZHANG R Q, LI H T, DONG G L, et al. Solar noise influence on TT&C link of Mars exploration mission[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(35): 4289-4296.
- [32] 张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2019, 6(5): 417-423, 455.
ZHANG R Q, HUANG J C, HE R W, et al. The development overview of asteroid exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019,

6(5): 417-423, 455.

- [33] 吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(1): 1-16.

WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the solar system boundary[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2019, 49(1): 1-16.

作者简介:

金文马(1984-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 航天测控总体设计。

通信地址: 北京市海淀区5130信箱118分箱(100094)

E-mail: [wenmajin@sina.com](mailto:wenjiajin@sina.com)

Mission Planning Technology for Flight Control of Mars Exploration

JIN Wenma, CHEN Jungang, RUN Dong, CHENG Yanhe, ZHAO Xingqian

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: To tackle flight control difficulties in Mars exploration under the conditions of remote TT&C distance and large time delay, the mission planning technology for flight control of Mars exploration was investigated systematically. A flight control system for deep space exploration with large time delay was constructed. A predictive and iterative flight control methodology was proposed, based on the interplanetary large time delay model. The open-loop control mode for deep space exploration was designed, in which the states of TT&C uplink and downlink were decoupled appropriately. The automatic scheduling of complex TT&C mode switching and the adaptive correction of telecommunication time delay for telecommand were also realized, while important functions such as optimal allocation of TT&C resources, reasonable arrangement of flight control events and automatic conflict resolution were implemented. The difficulties encountered in flight control of Mars exploration, including TT&C with large time delay, innovative flight control mode, difficult state coordination between the probe and ground, and high requirements in emergency response, have been resolved effectively. This research guarantees the safe and reliable implementation of China's first Mars orbiting exploration and the critical Entry, Descent and Landing (EDL) process.

Keywords: Mars exploration; large time delay; flight control; mission planning; TT & C resources

Highlights:

- The flight control system for Mars exploration with large time delay was constructed, and universal key technologies for flight control with large time delay in deep space exploration were summarized.
- The flight control mission planning methodology was introduced systematically, including optimal allocation of TT&C resources, reasonable arrangement of flight control events and automatic conflict resolution.
- The difficulties encountered in Mars exploration flight control, including TT&C with large time delay, innovative flight control mode, difficult state coordination between the probe and ground, and high requirements in emergency response, have been resolved effectively.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]