

地外星表探测器着陆-巡视自主导航技术研究进展

李茂登^{1,2}, 张兴华¹, 丁运来¹, 范项媛¹, 张兵¹, 徐超², 张天柱^{1,3}, 杨文飞³

(1. 深空探测实验室(天都实验室), 合肥 230000; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100094;
3. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 合肥 230026)

摘要: 结合国内外天体探测工程实践经验, 详细分析了地外星表探测与科研任务对自主导航技术的迫切需求。基于这些需求, 回顾了月球、火星及小天体探测器在着陆与巡视任务的相关工程实践, 并针对这些任务中存在的极端光照干扰、粉尘遮蔽效应、复杂地貌特征等环境挑战, 深入探讨了着陆-巡视自主导航技术的难点。在此基础上, 对自主导航涉及的障碍检测、自主定位和轨迹规划等关键技术进行了系统归纳与总结, 并展望了地外星表探测器着陆与巡视导航技术的发展趋势。

关键词: 多源信息融合自主导航; 探测器着陆与巡视; 障碍检测; 自主定位; 轨迹规划

中图分类号: V448.22+4

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)02-0110-14

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2025.20240085

引用格式: 李茂登, 张兴华, 丁运来, 等. 地外星表探测器着陆-巡视自主导航技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(2): 110-123.

Reference format: LI M D, ZHANG X H, DING Y L, et al. Research progress on autonomous navigation technology for landing and roaming of extraterrestrial surface detectors[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(2): 110-123.

引言

深空探测是人类探索未知世界、追求科学真理的重要实践。近年来, 中国深空探测事业持续取得了重大突破, 已完成月球与火星的探测任务, 并正在开展小天体及更远深空目标的探索。2013年12月14日, “嫦娥三号”利用变推力发动机精准控制在月球虹湾区实现首次软着陆; 2019年1月3日, “嫦娥四号”通过“鹊桥”中继星构建地月L2通信链路, 完成世界首个背面陨石坑软着陆; 2020年12月17日, “嫦娥五号”首次完成钻采复合作业并实现月球轨道对接技术, 回收1 731 g月壤, 标志着“绕”“落”“回”全周期技术体系的建成; 2021年5月15日, “天问一号”运用悬停避障技术实现火星乌托邦(Utopia)平原软着陆, 第一次完成了“绕”“落”“巡”的全流程探测, 标志着深空探测开启新阶段; 2024年5月, “嫦娥六号”实施全人类首次月球背面采样返回任务, 完成采样、上升、轨道交会对接与再入返回等关键环节, 推动月球采样技术向高可靠、高自主方向发展; 2025年5月“天问二号”将前往近地小行星

“2016HO3”, 通过双段飞掠与附着采样相结合的方式, 开展小天体物质采样及返回任务, 标志着中国深空探测能力从行星级扩展至更复杂的低引力目标。

巡视探测是“天问一号”等任务的重要组成部分。作为深空探测的关键环节, 着陆与巡视探测能够获取精细的异星地质信息及多样化物质样本, 对于揭示天体演化历史、水文过程特征及潜在生命迹象具有重要的科学价值。在此背景下, 探测器作为承担探测任务的核心载体, 具备在复杂环境自主执行科学任务的能力。自主导航技术则是指探测器依靠自身携带的测量设备实现自身定位与环境感知的能力体系。在着陆阶段, 该技术主要专注于探测器状态自主确定以确保安全着陆; 在巡视阶段, 则进一步涵盖轨迹规划等功能, 使探测器能够自主规划行驶路径并持续探测任务。该技术体系是保障探测器实现着陆与巡视采样任务顺利开展的核心技术支撑。通常可拆解感知、定位、规划等功能模块, 每个模块基于人工预设的规则与接口进行开发, 具有功能边界清晰、独立调试性强和问题溯源便利等工程优势。

收稿日期: 2024-12-18 修回日期: 2025-03-04

基金项目: 民用航天技术预先研究项目(D040103); 国家自然科学基金(62394354, 62394355, 62394350); 国际月球科研站智能信息系统方案研究(GC06L02001ZC3XT-2325); 国际月球科研站远程运输系统方案研究(GC06L05001ZC3WL-2325); 空间碎片与近地小行星防御专项(KSJP2023020302)

探测器通常可分为着陆器与巡视器两类,按照执行任务的不同阶段,其自主导航系统架构可对应划分为着陆导航与巡视导航两个阶段。着陆导航需实时获取探测器的状态(位置、速度以及姿态等信息),并基于预定的目标点进行制导与控制。巡视导航需根据巡视器的估计状态建立三维导航地图,从而进行路径规划。星表环境下探测器着陆与巡视过程如图1所示。当前地外天体探测任务大多是以惯性导航系统^[1](Inertial Navigation System, INS)为主的半自主导航。以火星探测为例,从1960年前苏联发射的首颗火星探测器开始至今,人类共实施了超60次火星探测任务,其中在火星表面成功软着陆的19次任务均采用以惯性导航为主的方法。然而惯性导航存在误差随时间而累加不可避免的难题^[2]。如何结合多源信息融合技术,提升探测器的着陆导航与巡视导航能力,逐渐成为世界航天强国的研究热点。

为加速着陆及巡视多源信息融合自主导航技术发展,本文首先回顾了目前地外天体探测器着陆及巡视任务的实施情况;然后,分析星表探测任务自主导航的共性技术特点与核心难点;最后,围绕星表探测任务和自主导航技术难点,提出了着陆-巡视导航需解决的关键技术,为未来地外天体探测任务提供参考。

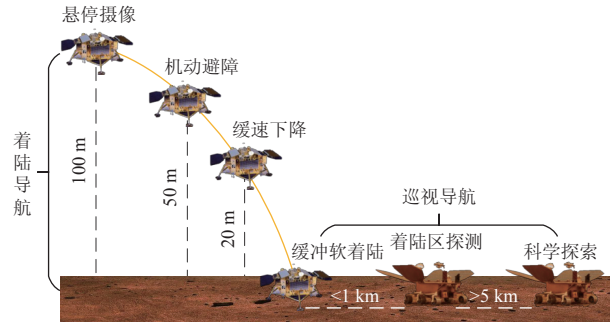


图1 星表环境下探测器着陆与巡视过程的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of landing and patrol process of detector on celestial surface

1 探测器着陆及巡视任务回顾

地外天体探测是航天及深空探测领域的重要任务。全球纷纷加大了对深空探测研究的支持力度,并在月球、火星以及小天体(通常包括小行星和彗星)的着陆导航和巡视导航技术取得了一定进展,表1系统列举了各国探测器在月球、火星及小天体成功着陆与巡视的代表性任务,概括了导航方式、巡视里程及任务时长等关键信息。探测器自主导航是天体探测领域的重点研究方向,其技术可靠性不仅直接影响任务的成功率,更是在复杂地外环境探索效能的核心保障。

表1 成功着陆地外星表的部分探测器

Table 1 Successful landings of cruisers on celestial bodies

目标天体	着陆器	巡视器	国家	导航方式	行驶总里程/km	任务执行时长
月球	月球17号	月球行者1号	前苏联	惯性-雷达组合着陆导航/人工指令巡视导航	10.54	322 d
	改进型“猎鹰”	阿波罗月球车3号	美国	多普勒雷达-惯性着陆导航/人机协同巡视导航	35.89	75 h
	嫦娥三号	玉兔号	中国	数字表面模型-惯性着陆导航/半自主巡视导航	0.12	972 d
	嫦娥四号	玉兔二号			1.60	5年11个月
火星	火星探路者号	旅居者号	美国	多普勒雷达-惯性着陆导航/立体视觉辅助巡视导航	0.10	96 d
	MARS 2020着陆器	毅力号			2.17	2021-02-18至今
	天问一号	祝融号	中国	数字高程模型-惯性着陆导航/轨道器-巡视器融合导航	1.20	368 d
小天体	隼鸟2号	密涅瓦二号	日本	激光雷达-相机-IMU融合着陆导航/多模式融合跳跃导航	—	16 h

1.1 月球探测任务

月球探测作为深空探测的关键领域,对揭示月球环境特性及推进地外资源开发具有双重的科学价值^[3]。截至2024年,全球累计实施月球探测任务逾140次,但成功实现月面软着陆的国家仅5个:前苏联(“月球9号”等)、美国(“勘察者1号”等)、中国(“嫦娥三号”等)、印度(“月船3号”等)及日本(“智慧一号”等)。其中具备天体表面巡视探测能力的国家缩减至4个,具体表现为:前苏联通过月球行者(Lunokhod)系列探测器实现无人巡视;美国依托“阿波罗15~17号”任务月面漫游车(Lunar Roving Vehicle, LRV)完成载人巡视;中国凭借“玉兔号/玉兔二号”月球车达

成长期半自主无人探测;印度则由“普拉吉安号”(Pragyaan)月球车实现南极区域巡视探测。

在此期间,前苏联1970年11月发射的“月球17号”着陆器采用变推力推进系统与惯性-雷达组合导航,成功实施月表雨海区软着陆^[4]。其导航系统由“测控数据回传→地面弹道解算→发动机指令上行”的直接链路构成,为后续深空着陆器闭环控制奠定基础。所载的“月面步行者1号”(Lunokhod 1)巡视器通过集成全景相机、激光测距及机械陀螺仪构成了一套有效的环境感知系统,依赖人工解析图像并手动绘制地形高程图建立可通行域,经通信链路发送分段移动指令完成巡视器导航。该巡视器累计运行322 d、行驶10.54 km,验

证了月面遥操作导航技术的工程可行性。

在1971—1972年,美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)的“阿波罗15~17号”任务中,改进型“猎鹰”(Falcon)月球着陆器搭载阿波罗月球车系列漫游车着陆在月面,首次实现载人月面机动探测^[5]。该任务着陆器采用多普勒雷达辅助惯性导航系统,配合先验着陆区高程地图,构建月面本体坐标系实现在着陆区匹配并定位。月面漫游车基于多模态人机协同的导航技术体系,整合宇航员视觉判读、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、里程计及太阳罗盘的多源异构传感器融合架构,结合陨石坑形态特征与太阳方位角观测实现地靶匹配导航^[6]。其提出的传感器时空对齐模型,为嫦娥工程“玉兔”系列月球车的视觉-惯性组合导航系统提供了技术参考。但该系列及早期的其它月球车都不具备自主目标识别、地图构建和障碍规避的能力。

月球探测范式的战略转型始于1994年美国“克莱门汀”(Clementine)轨道器对月球极区永久阴影区氢异常信号的首次确证,这一发现推动国际航天界将原位水资源勘探确立为深空探测优先级目标^[7]。在此背景下,美国、俄罗斯、欧洲、印度、日本、以色列等国家相继制定了系统性月球探测计划,涵盖极区挥发物原位分析、氦-3资源评估等关键领域。与此同时,中国“嫦娥”工程的系统性实施,有效加快了人类月球探测的进度,并成为继苏联、美国之后第3个实施月球探测的国家。

“嫦娥三号”着陆器^[8]首次实现地外软着陆的全自主

控制,采用以惯性导航为核心的自主导航系统,并通过飞行过程中自旋增强系统可观性,完成陀螺全系数的在轨标定,有效抑制惯导误差积累;在避障控制方面,提出并实现了融合光学图像与三维激光的接力避障方法,构建“远距离光学粗识别-近距离激光精识别”的双级障碍检测框架,完成了地外天体的自主避障着陆^[9]。“嫦娥四号”着陆器在“嫦娥三号”的基础上进一步完善了软着陆控制技术,面向月球背面崎岖地形,集成同轴多光谱避障相机,通过立体视觉构建数字表面模型(Digital Surface Model, DSM),在高动态振动与复杂地形条件下实现了高精度自主避障与着陆控制^[10]。“嫦娥五号”着陆器在实现高精度软着陆控制方面进一步实现了突破,采用多子样圆锥效应补偿算法,抑制高动态环境下惯性导航系统发散的趋势,并提升着陆段末端姿态与速度控制的精度^[11-12]。“玉兔”系列月球车通过装备导航相机、IMU、避障相机、激光点阵器等传感器构建多模态感知系统,通过回传图像在地面进行大范围的地形重建、定位和探测目标选取^[13-14],其技术框架如图2所示。针对月面弱纹理区域导航难题,采用轨道器提供的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)与月表实时感知信息支撑建立全局-局部分层决策机制,有效提升月面障碍规避能力;开发光照自适应图像增强算法,在月背极低照度环境仍可提取有效特征点。“玉兔”系列月球车的成功着陆,标志着中国在月面导航探测领域实现重大技术跨越,为后续载人登月乃至月球基地建设提供技术储备。

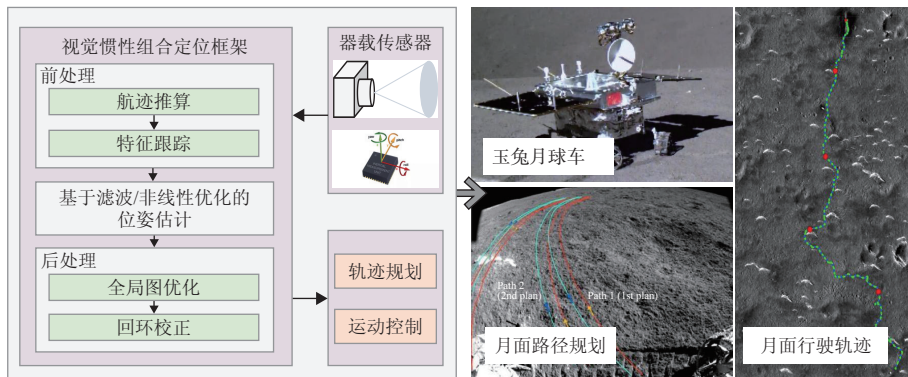


图2 “玉兔号”视觉惯性组合定位技术框架

Fig. 2 Visual-inertial integrated localization technology framework of the Yutu lunar rover

1.2 火星探测任务

火星作为太阳系与地球自然环境最为接近的地外天体,其表面探测对揭示行星演化规律、探寻生命迹象、拓展人类生存空间具有重要的科学价值^[15-16]。相较

于月球探测任务,火星探测面临稀薄大气层与剧烈尘暴干扰、极端温度交替环境、大通信延迟等多重技术挑战^[17],使得火星着陆探测成为深空探测领域最具挑战性的任务类型之一。

自1997年“火星探路者”(Mars Pathfinder)着陆器搭载“旅居者”(Sojourner)巡视器着陆火星以来, 累计成功着陆并巡视的任务共6次。其中, “火星探路者”着陆器采用弹道式进入-弹跳着陆架构, 集成IMU和多普勒雷达实现融合导航, 将弹道修正误差限制在预定着陆椭圆区范围内。“旅居者”作为人类首个实现火星表面移动的巡视器, 其技术架构包含双目立体视觉系统及5组激光条纹式障碍物检测单元^[18]。该巡视器采用基于地面遥操作系统的短距离路径规划策略, 仅能接收1~2 m的安全路径指令。该导航模式的有效工作范围被严格限制在着陆器周边10 m × 10 m的区域, 导航精度误差约为位移矢量的10%。研究团队尝试通过融合立体视觉与激光测距数据提升定位精度, 但因激光组件存在机械可靠性低及功耗过高等固有缺陷, 促使NASA在后续火星任务全面采用纯立体视觉三维地形重构技术, 并由此建立了火星表面高分辨率DEM的标准技术路线。

在后续火星任务中, “勇气号”(Spirit)与“机遇号”(Opportunity)自主导航技术进行了重大升级。在着陆阶段, 采用改进型弹道式进入-气囊缓冲着陆模

式, 配备三冗余IMU与多普勒雷达, 有效缩小了着陆椭圆区^[19]。触地后着陆器通过安装于四面坡道的加速度计自动判别姿态, 并利用预设的数字高程模型进行位置粗校准。基于着陆器导航基准, 巡视器通过配备一对导航相机、一对全景相机和两对避障相机, 结合视觉测程法和立体影像特征点追踪修正车轮打滑误差^[20], 但单次定位需3 min, 且仅支持15 m范围内的局部定位。

“毅力号”(Perseverance)火星车^[21]在“好奇号”(Curiosity)的基础上, 引入了增强型自动导航系统, 通过整合深空通信、能源管理及自动化操作体系, 其任务数据可通过NASA深空网络传输至地球, 同时支持通过3D可视化系统远程监控并优化探测路线。“毅力号”同时搭载了优先科学目标自主探索系统^[22](Autonomous Exploration for Gathering Increased Science, AEGIS), 通过导航相机采集图像, 利用边缘检测器来识别目标并检测局部边界轮廓。根据目标优先级对识别的目标排序, 并根据当前巡视器位姿估计目标的朝向, 引导全景相机对其进行高分辨数据采集, 从而实现科学目标的自主识别与探测, AEGIS系统的处理流程如图3所示。

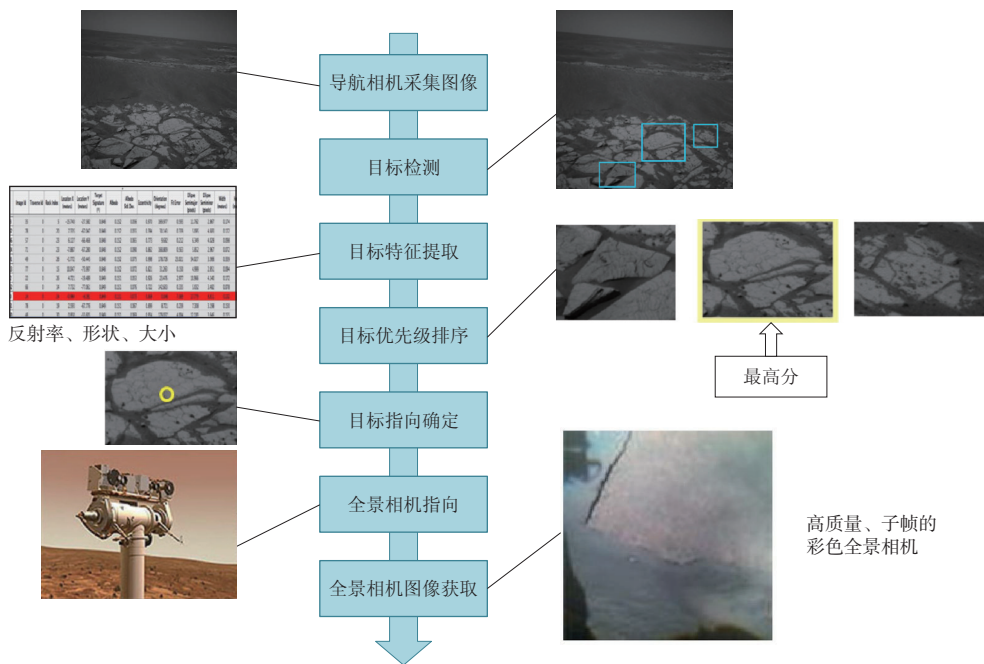


图 3 AEGIS系统处理流程

Fig. 3 AEGIS system processing flow

与已有的火星着陆探测任务相比, “天问一号”是国际首个通过单次任务实现“绕”“落”“巡”全流程探测的火星任务, 展现了中国深空探测任务的高目标和高起点。针对火星复杂环境下着陆导航的精度与鲁棒性要求, “天问一号”任务构建了一套以惯性导航为核心

的自主导航系统^[23]。通过在飞行过程中引入主动旋转以增强系统可观性, 实现了对惯性器件包括安装误差、零偏与刻度系数在内的全系数在轨标定, 抑制了惯性误差对导航精度的累积影响^[24]。为解决着陆段高动态振动条件下惯导解算精度下降的问题, “天问一

号”提出了多子样圆锥效应补偿算法以降低姿态发散速率,并针对火星着陆器角速度连续变化的动力学特性,构建了递归多子样大动态惯性导航方法,通过多项式拟合角速度并通过旋转效应进行补偿,进一步提升了姿态解算的精度。考虑到惯性导航作为绝对导航方式难以获取相对运动的信息,系统引入着陆雷达的测距与测速数据对惯导修正,构建以惯导为主、雷达为辅的容错组合导航结构,同时针对波束数量变化对滤波性能的影响,提出基于波束监测的自适应阈值调整算法,实现多波束信息源的故障识别与优化选取,增强了系统的稳定性与可靠性。进一步针对开伞阶段存在的喘振扰动等问题,“天问一号”基于雷达测量的导航基准重构机制与引力修正方法,有效提升了系统在未知扰动环境的导航性能,为火星着陆任务提供了高精度、高鲁棒性的导航支撑^[25]。“祝融号”火星车^[26]构建了基于多模态感知融合的自主导航定位体系,配置了由三组双目立体视觉单元构成的异构感知阵列:前向配置宽基线导航地形相机实现地形重建,前后双避障相机形成360°全向立体覆盖,各相机组通过像素级立体匹配算法生成高精度视差图。其定位系统采用分层递进架构,首先通过轨道器高分相机影像的尺度不变特征变换匹配实现千米级粗定位,进而融合IMU与视觉里程计的相对定位数据,构建基于扩展卡尔曼滤波(Extend Kalman Filter, EKF)的松耦合状态估计模型,通过地面控制网绝对坐标约束实现定位误差收敛,最终在缺乏全球导航卫星系统的火星表面实现高精度定位与半自主导航。

1.3 小天体探测任务

小天体探测是研究太阳系形成与演化的重要手段,对防御近地小天体撞击以及验证最新的航天技术具有重要价值^[27]。

自20世纪70年代起,人类已经开展了16次小天体探测任务,其中“近地小行星交会”(Near Earth Asteroid Rendezvous, NEAR)、“隼鸟号”(Hayabusa)、“罗塞塔”(Rosetta)和“欧西里斯”(OSIRIS-REx)任务成功实现了小天体表面软着陆^[28]。

美国NEAR任务“舒梅克”(Shoemaker)探测器于1996年2月17日发射,于2000年2月14日进入爱神星(Eros)小行星绕飞轨道,经过一年的环绕探测后,于2001年2月12日成功附着于Eros星表面,成为人类首个在小行星表面附着的探测器。NEAR探测器起初并没有软着陆Eros表面的设计,也没有软着陆相关机构,依赖前期对Eros质量、形状和引力场分布的精确测量,最终经过开环着陆设计成功实现相对速度约

1.3 m/s的软着陆^[29]。

日本于2003年发射了“隼鸟1号”(Hayabusa 1)探测器,2005年11月成功完成了对小行星糸川(Itokawa)的触碰采样,2010年成功将采集样本送回地球,成为人类首个实现小行星采样返回的探测器;随后于2014年发射了“隼鸟2号”(Hayabusa 2)探测器,并于2019年2月完成了对小行星龙宫(Ryugu)的触碰采样,于2020年成功将采集样本送回地球。“隼鸟号”任务附着过程分为接近段和最终下降段,在接近段由地面进行精确的导航解算和控制,当探测器下降到约30 m高度时转为最终下降段,在该阶段探测器采用了基于人工陆标的光学图像测量和多波束激光测距的自主导航与6自由度自主控制技术,最终实现了小行星表面触碰采样^[30]。“隼鸟号”着陆过程如图4所示。

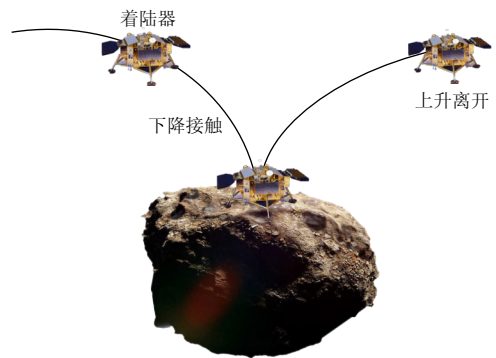


图4 “隼鸟2号”着陆过程

Fig. 4 Landing process of Hayabusa 2

2014年11月,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射的Rosetta探测器成功释放着陆器“菲莱”(Philae),Philae通过无控弹道方式下降,正常情况下下降过程不进行导航和控制,下降轨道由分离时的相对速度确定,最终Philae首次实现了彗星表面着陆,但由于冷气推进与锚定装置发生故障,着陆过程中经过2次反弹后附着于67P/Churyumov Gerasimenko彗星表面阴影区,在电池电量耗尽后无法充电而进入休眠状态^[31]。

美国“欧西里斯”探测器于2016年9月8日发射,其任务是对贝努(Bennu)小行星进行探测和采样,并于2020年10月20日成功在Bennu小行星实现触碰采样,于2021年5月10日开始返回地球,并在2023年9月将样本送回地球。“欧西里斯”探测器在附着过程中主要依赖基于自然陆标光学图像测量的自主导航,虽然其也配备了激光雷达敏感器,但并不直接用于导航^[32-33]。

2022年中国正式立项小行星探测“天问二号”任务,计划对近地小行星2016HO3进行采样返回探测,

并对主带彗星311P进行环绕探测,目前该任务正按计划顺利推进。

2 探测器自主导航技术难点分析

已实施的地外星表着陆与巡视探测任务依托于IMU、测距测速雷达、光学相机等提供的多源信息实现探测器自身状态估计和目标天体三维形貌重构,为地外资源开发利用奠定工程基础。然而,地外星表极端光照、弱纹理地形^[34]、粉尘遮蔽^[35]、形貌复杂^[36]、缺乏先验信息等共性特点,在障碍感知、自主定位和规划算法适应性等方面给着陆巡视的自主导航技术带来了以下技术难题。

1) 星表形貌特征多样导致的障碍识别问题

地外天体形貌复杂,着陆导航和巡视导航需具备针对陨石坑、岩石等障碍的可着陆、可通行域的判读能力。星表障碍包括宏观尺度(大于10 m)的陨石坑和峡谷、介观尺度(0.1~10 m)的岩石块和沟壑以及微观尺度(小于0.1 m)的松散风化层。以月面为例,根据月球勘测轨道器高分辨率影像数据,月球正面每平方千米范围内平均存在3~5个直径大于10 m的陨石坑,而直径超过1 m的微陨石坑密度高达数百个。以“阿波罗11号”着陆区为例,其周边100 m范围内识别出超过200处地形障碍,包括陨石坑、岩块和裂隙。这些特性对探测器障碍检测能力提出了较高的要求。

2) 定位信息不足引起的误差累积问题

天体表面缺乏卫星信号覆盖、地外天体探测距离地球遥远,因此需采用以IMU为核心的多传感器融合导航系统,而这种依赖运动学参数递推的非完备观测体系,其轨迹误差呈现出显著的累积特性:首先,绝对姿态基准的匮乏导致定位误差难以被有效观测和校正;其次,异构传感器在弱纹理环境呈现互补失效现象,月岩撞击坑稀疏分布区域视觉匹配成功率不足、激光雷达点云密度不足易引发算法退化,进一步降低定位的可靠性;此外,由于星表巡视和着陆过程通常为单向进行,定位系统的累积误差无法通过闭环修正进行消除。这些问题相互叠加,制约了星表探测自主定位的长期稳定性。“机遇号”在执行火星表面巡视任务期间,由于地形相对平坦、视觉特征单一,其视觉里程计系统频繁出现匹配失败,导致定位误差逐步积累。在部分路径仅依赖惯性测量单元与轮速计估计位移,视觉导航系统无法提供有效位移信息,最终导致累计误差超过10 m。

3) 不同天体环境差异大带来的算法适应性问题

当前星表轨迹规划技术在应对多天体环境异质性

时具有较强的局限性,现有算法框架未能建立针对目标天体引力梯度场分布特性与地形结构参数等因素的耦合响应机制。当处于小天体弱引力场时,刚体-环境作用机理引发的运动学模型与传统惯性坐标系解算策略失配;而行星级地形突变区域中,固定参数的表面特征解析机制易与局部突变地貌形成较大的匹配偏差。这一系列问题的根源在于轨迹规划预设参数与运动学约束的固化设计模式,既无法自主感知天体物理场特征的空间梯度变化,又缺乏对地形要素的本征参数提取能力。因此,轨迹规划算法迁移至新任务时,需通过重设参数阈值才能避免动力学方程发散,凸显出现有技术在参数自适应调节能力的不足。“隼鸟2号”在接近和着陆小行星龙宫(Ryugu)期间,由于该天体质量小、引力极弱,其运动学环境显著偏离月球和火星等探测场景。传统的轨迹预测和推进器控制模型在接近过程中出现多次偏离目标轨道现象,需实时更新轨迹规划和推进控制参数以适配目标天体的非球形引力场特性。这一过程充分暴露出传统轨迹规划框架在面对小天体复杂环境时缺乏自适应建模能力的问题。

3 探测器自主导航的关键技术

基于对星表自主导航技术难点的深入分析,学者们近年来围绕地外天体自主导航展开了系统研究。为提升探测器在着陆与巡视任务的安全性及成功率,本文梳理了星表自主导航需重点攻克的关键技术环节,包括障碍检测、自主定位与轨迹规划。障碍检测依托多模态感知手段,实现对障碍物的准确分类与导航标志物的高效提取,是构建环境认知的基础;自主定位通过多传感器紧耦合算法,协同完成高精度地图构建与实时位姿估计,以建立稳定的空间基准;轨迹规划则结合环境感知、自身位置与地图信息,动态生成全局最优路径并实现实时避障,从而保障任务执行的智能性与鲁棒性。

3.1 障碍检测技术

障碍检测作为地外星表自主导航的基础环节^[37],决定着探测器着陆点选择的安全性及巡视路径的可通行性。当前障碍检测技术主要分为主动感知与被动感知两类:主动感知通过激光雷达、毫米波雷达等传感器主动发射信号获取地形信息;被动感知则依赖光学成像与雷达测量,无需主动信号发射。两种方式在不同的环境条件下各具优势,亦存在感知盲区和数据噪声等问题。

主动式障碍检测的核心技术在于高精度信号处理

与智能地形解析。该技术起源于美国阿波罗时期的初代测距系统^[38]，随着半导体激光器和高速处理芯片的发展，现代系统已实现厘米级测距精度与毫秒级响应能力。典型应用包括“火星2020”任务着陆器视觉系统的激光雷达，采用波长为1 550 nm的光纤激光器和64线扫描架构，通过改进的迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法和随机抽样一致 (Random Sample Consensus, RANSAC) 平面拟合方法，在200 m高度即可构建分辨率优于15 cm的数字高程模型^[39]。欧洲航天局ExoMars项目创新性地 将飞行时间法 (Time of Flight, ToF) 与多普勒频移分析结合，不仅能识别静态障碍，还可检测沙尘暴等动态威胁^[40]。近年来的研究突破主要体现在深度学习辅助的点云语义分割，如PointNet++网络^[41]对月面玄武岩障碍的分类准确率达92%，以及传感器时序融合算法，“嫦娥五号”任务激光测距仪与IMU的紧耦合数据处理^[42]，有效克服了探测器机动过程的运动畸变问题，为复杂地形条件下精准避障提供了新的技术思路。然而主动式障碍检测传感器依赖电磁波回波接收，在强磁场与高辐射噪声环境下难以实现精确测量。同时，受限于硬件特性，其分辨率普遍较低，信息获取能力有限，仅适用于近距离天体探测场景。

被动式障碍检测技术作为深空探测安全着陆的重要保障手段，通过分析天体表面反射的自然光或热辐射实现地形感知，具有系统结构简单、无主动发射源、能耗低等优势。20世纪70年代“海盗号” (Viking) 火星探测器首次搭载单目成像系统进行探测，随着CCD/CMOS传感器和计算机视觉算法的进步，现代被动数采系统结合高分辨率的月球地形图，包括数字高

程模型和数字正射影像图 (Digital Orthophoto Map, DOM)，进行先验目标导向弱纹理障碍的检测。在DEM和DOM的基础上，进行特征点匹配和光束平差法来优化图像参数，并构建三角不规则网络以获得精确的3D坐标。Dunlop等^[43]提出了一种结合多尺度特征的岩石检测和分割方法，通过使用规范化切割策略将图像分割成超像素，然后合并相似区域来寻找最可能的超像素组合，最后使用支持向量机方法对岩石外观进行评分，进而识别出整个岩石。Furlan等^[44]以U-Net为主干网络，构建了一种新型卷积神经网络用于类行星表面环境的岩石检测，显著提升了神经网络的推理速度，并实现了78.5%的检测精度。Ishida等^[45]则提出一种基于视觉的地形导航系统，针对距月球表面50 m的近地场景开展精确障碍物检测，可在导航相机视野范围内有效识别安全着陆区域。该系统已成功应用于日本的智慧一号 (smart 1) 任务，验证了其在实际任务的可行性与有效性。Cheng等^[46]提出一种新的陨石坑检测算法用于探测器导航，该算法包括边缘检测、撞击坑锚点检测、边缘分组、椭圆拟合、椭圆细化和撞击坑置信度评估等6个步骤，能有效地从图像中检测出撞击坑。传统视觉感知方法依赖图像处理技术，如边缘检测、区域分割等，实现障碍物识别，虽然在处理速度具有优势，但在复杂环境精度受到限制。汤子旋等^[47]提出了FSG-YOLO算法，针对月面障碍物检测任务，通过引入FasterNet作为主干网络，结合SimAM注意力机制和Giou损失函数，实现了对陨石坑和月面岩石的高效检测，其算法框架如图5所示。在多模态融合和零样本学习^[48]的基础上，Giannakis等^[49]提出了一种基于SAM的新型通用撞击坑检测框架，该框架能够实现跨

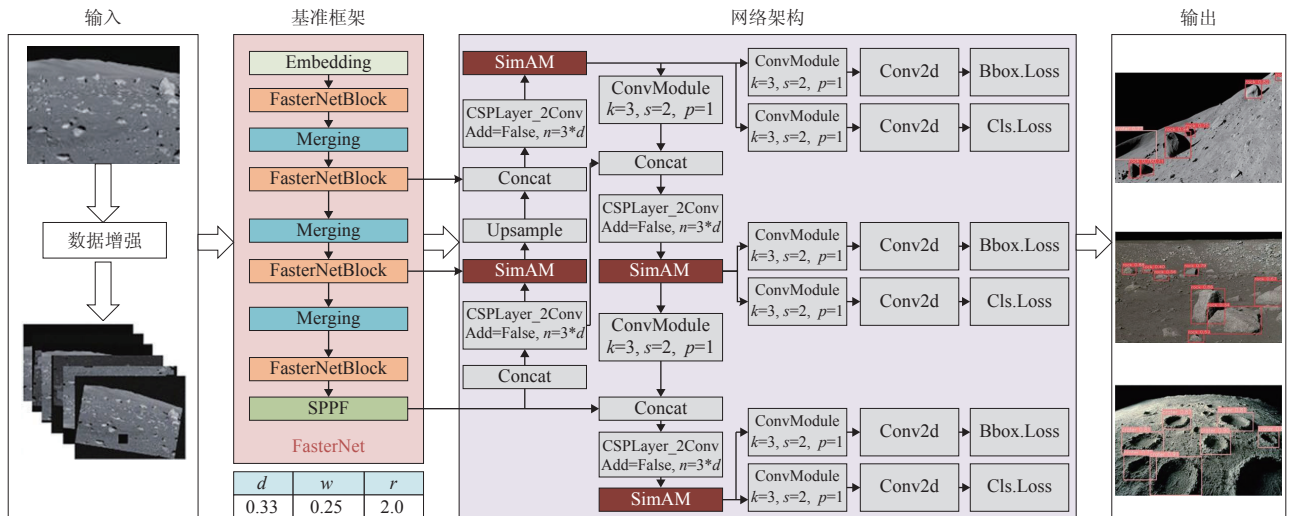


图5 FSG-YOLO算法框架

Fig. 5 Pipeline of FSG-YOLO algorithm

天体、跨数据类型进行自动化的撞击坑识别和尺寸分析。通过椭圆拟合技术提取撞击坑特征,展现了深度学习在行星科学领域的应用潜力。

尽管单一传感器环境感知技术能实现基础的障碍物辨识,但其存在覆盖盲区显著、地形危险性误判率高等固有缺陷,难以适应深空探测任务对地形感知精度与可靠性的严苛要求。针对这一技术瓶颈,多源异构数据融合方法通过协同处理光学、激光与惯性测量单元等多模态传感数据,构建了互补增强的障碍检测体系。中国“嫦娥五号”与“天问一号”着陆器创新性地采用“光学粗筛-激光精测”的双层异构感知架构^[50],前者通过宽视场成像实现大范围障碍初筛,后者借助三维点云重构完成障碍特征提取,这种协同感知机制将着陆区地形建模精度提升至工程实用化水平。

在实现高置信度障碍检测的基础上,探测器将多源融合感知结果与自主导航参数进行时空对齐,结合障碍物空间位置及分布,为自主定位和轨迹规划技术奠定了基础。

3.2 自主定位技术

天体探测初期通常无卫星信号支持,缺乏先验基准,着陆器和巡视器必须依赖器载传感器测量信息实现自身位姿解算,这使得其自主定位系统的鲁棒性与精度直接决定着科学探测任务的成败。当前星表探测器以相对定位技术为主,包含航迹推算、惯性定位、视觉定位三大实现路径^[51-52]。其中,航迹推算基于惯性测量单元实现无卫星信号环境的探测器定位,但累积误差需定期校正。惯性定位可在较短的时间内提供高精度定位,但受传感器噪声与积分误差积累的影响,其定位精度快速衰减,需构建异质信息校正机制。视觉定位是目前地外星体导航中主流的定位方式,通过在立体视觉图像中提取环境特征和深度信息进行探测器位姿估计。但当月球极区太阳高度角低于 5° 等弱光低纹理环境下,特征点失效率较高,极大降低了定位算法的精度与稳定性。

近年来,面向地外天体表面的自主定位技术取得了显著进展,国内外学者在视觉定位、惯性定位、多传感器融合定位等方面提出了具有代表性的解决方案。卡内基梅隆大学的“流浪者”(Nomad)原型车^[53]。引入双基线立体视觉传感器,通过特征点三角化生成三维环境约束,在模拟月球工况下实现1 078 m连续自主导航。“嫦娥三号”导航系统创造性地构建了航迹推算-视觉紧耦合框架。该框架基于卡尔曼滤波融合IMU角速度与里程计数据,生成6自由度位姿先验估计,作为导航相机光束平差法的初始值,通过加速稳

健特征(Speeded-Up Robust Features, SURF)匹配建立跨帧几何约束,有效抑制了长程定位误差^[54]。“月船3号”探测器搭载的激光惯性参考和加速度计组合定位系统^[55],通过激光陀螺仪与加速度计的Allan方差补偿机制以实现姿态校准,并配合多光谱相机的光谱-几何平差算法,保证月昼/月夜转换工况下的定位连续性。Grenier等^[56]提出了一种面向月球通信与导航的专用潜在实施系统,通过对典型月面着陆器的性能参数进行建模,采用方差-协方差分析方法,对着陆器在最终下降段的实时定位精度及着陆点定位准确性进行了评估。Maass等^[57]提出一种基于地形的绝对导航系统,该系统通过将图像中识别出的陨石坑与全球月球陨石坑地图进行匹配,实现高精度的导航定位。所提出的陨石坑导航系统具备较强的自适应能力,融合了3种针对航天器下降过程中不同导航场景设计的陨石坑匹配算法,可作为一个独立的导航传感器模块,与着陆器的制导、导航与控制系统深度集成,从而在整个下降过程中提供稳定可靠的绝对定位能力。Zhang等^[58]提出变耦合导航系统,面向非结构化星表模拟场景,采用6自由度位姿解耦架构,建立了自适应环境映射模块,实现低漂移、高弹性的状态估计,大幅提升了系统的定位精度和稳定性,仿星表场景的重建地图与估计轨迹如图6所示。在将mVLINS方法与传统的紧耦合与松耦合方法进行定量对比时发现,在星表等非结构化环境中,由于激光雷达点云匹配算法性能退化,松耦合和紧耦合方法均难以实现高精度的自主定位。而mVLINS方法依托其变耦合系统架构,在感知退化条件下可有效融合多模态信息,持续保持稳定的定位与建图性能,充分体现出其在复杂环境的鲁棒性与优越性。

天文导航定位方式也在月表探测进行了应用,其通过观测恒星的位置和运动,确定探测器的位置和姿态^[59]。“阿波罗15~17号”月球车配置了手动恒星六分仪,航天员通过观测恒星方位实施绝对定位校正。“嫦娥四号”中继星搭载星敏感器实现地月空间定向,确认当前探测器的姿态^[60]。但天文定位方式极易受到天体位置遮挡、恶劣气候等条件的影响,难以满足星表探测持续且实时的要求。迄今为止,星表探测器尚未采用自主天文定位系统作为主要导航支撑。此外,“天问一号”火星探测任务首创轨道器图像与星表视觉惯性定位的融合技术模式^[61]。通过轨道器的高分辨率遥感影像与着陆巡视器的视觉里程计技术相结合,在火星表面短距离行驶任务中实现了高精度的自主定位。这一技术突破主要体现在多模态传感器(可见光相机、激光雷达、惯性测量单元)的深度耦合,以及基于轨道

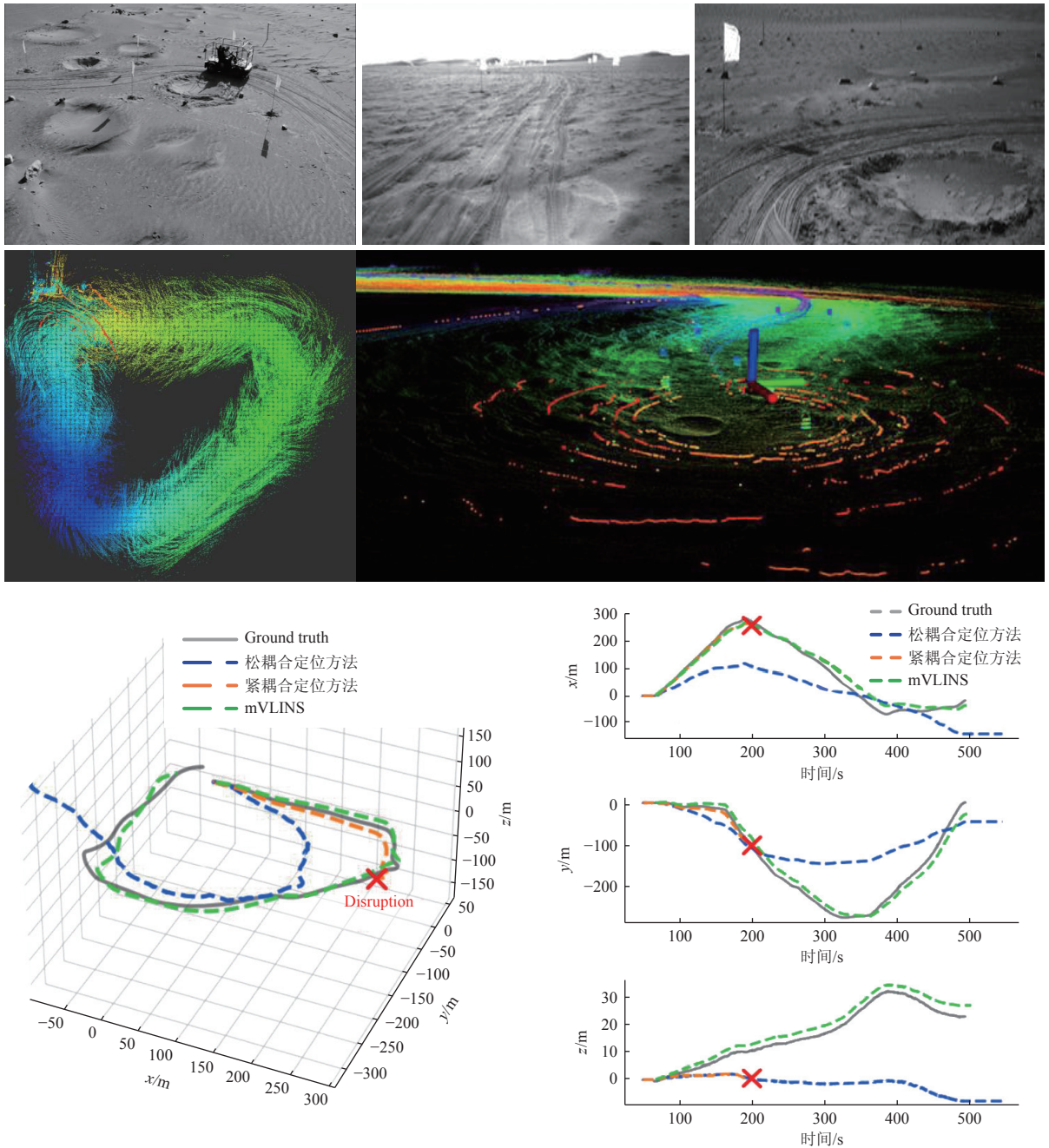


图 6 变耦合导航系统在仿星表环境下的定位与建图^[58]

Fig. 6 Localization and mapping of the variable-coupling navigation system in Pseudo-stellar environments^[58]

器全球测绘数据构建的地形匹配数据库，在无卫星导航信号的火星表面为巡视器提供绝对位姿解算能力。综合以上研究，星表自主定位可聚焦轨道器图像、天体方位解算与激光-视觉-惯性里程计协同的技术方向，通过利用陨石坑图像、测量恒星/行星角距和局部重建地图，实现星表极端环境的高精度自主定位，突破地外环境无导航信号、极端光照变化、细密沙尘遮挡的约束限制。

在地外天体着陆导航领域，围绕提高探测器定点

着陆精度与着陆过程安全性的关键需求，国内研究团队提出了一系列具有代表性的导航与状态估计方法。针对月球探测器的高精度着陆任务，崔平远等^[62]提出基于三维地形匹配的自主导航方法，将高程方差图中的局部极值点提取为地形特征，并构建特征之间的相对位置与角度不变量，引入基于投票的匹配策略实现对月面地形的准确识别与位姿解算。同时结合Sage-Husa噪声估计算子与迭代卡尔曼滤波器，实现对测量噪声的在线估计，有效抑制了滤波性能下降与发散风

险,提升了系统鲁棒性与导航精度,对行星着陆导航具有重要理论价值。在此基础上,团队进一步提出基于陨石坑边缘椭圆曲线特征匹配的导航方法^[63],通过构建陨石坑观测量与着陆器位姿之间的几何映射关系,实现了绝对导航与相对导航的融合,从而实现着陆器绝对位姿的连续估计。在小天体探测方面,针对附着过程易出现的倾覆与反弹问题,该团队创新性地提出“柔性附着”概念^[64],突破了传统刚性附着方式的限制,为提升附着任务的安全性与成功率提供了新路径。进一步地,围绕柔性附着过程中的状态估计问题,构建柔性着陆器近似模型,提出“等效面”表征与姿态近似表示方法,进而建立柔性附着状态的协同估计框架,并通过数值仿真验证了其有效性,为小天体柔性附着控制与导航提供了关键技术支撑。

3.3 轨迹规划技术

轨迹规划是提升地外天体探测器在未知地形条件下着陆及巡视安全性的关键技术。当前,探测器轨迹规划技术与高精度定点着陆技术及自主巡视检测技术深度融合,实现探测器的动态避障和局部路径优化。这一技术路线已被多国探测器验证^[65-66],例如“月船3号”的百米级着陆、“智慧一号”着陆器的精准避障系统,以及“祝融号”采用的立体视觉避障与路径重规划技术。

基于障碍检测与自主定位技术的信息传递,星表轨迹规划技术通过处理障碍信息和自身位置信息进行障碍规避。星表探测器轨迹规划研究通常将连续运动方程离散化为最优控制问题求解^[67]。受限于星载计算机的运算能力与存储容量,现有工程实践中普遍采用“离线优化-在线跟踪”的架构:地面站通过伪谱法等数值优化算法预先生成满足终端约束的标称轨迹,探测器在轨运行时采用滑模控制或参数自适应控制^[68]进行轨迹跟踪。但该方法存在显著局限性:其一,固定轨迹无法响应实时感知的环境变化,当激光雷达检测到未建模障碍物时易引发紧急制动;其二,实际动力学特性与地面建模的偏差,包括推力器安装误差、惯量参数漂移等,可能导致控制量超出执行机构饱和阈值^[69],增大姿态失稳的风险。

为提升动态环境适应性,星表机器人领域借鉴地面移动平台的路径规划理论,发展出基于Dijkstra系列算法的动态重规划方法。Dijkstra算法^[70]采用广度优先搜索的思想提出的最短路径求解算法,通过建立局部代价更新机制,仅对受环境变化影响的路径段进行增量式优化,通常用于解决有向图的最短路径问题,但随着节点数量增加,其计算复杂度也会相应增加。后

续演进的持续规划算法、D* Lite等算法^[71-73]引入启发式搜索策略,将规划效率提升至 $O(n)$ 复杂度。特别是D* PO算法^[74]通过构建多目标帕累托约束优化路径安全性、能耗和时间成本等指标,为小天体附着、行星着陆与巡视任务提供了多约束优化框架。然而,与地面机器人仅需考虑运动学约束相比,深空探测器还需满足严格的动力学边界条件,包括推力幅值限制导致轨迹曲率连续性要求、最大下降速度约束引发的路径平滑度需求,以及终端姿态角的精度要求^[75-76]。仿真研究表明,在考虑火星大气密度随机扰动与惯导系统测量噪声的条件下,传统规划算法生成的路径跟踪误差可能累积较大偏移量,超出安全着陆椭圆范围。

新一代轨迹规划算法需内置鲁棒性设计,在路径点序列生成阶段时考虑不确定扰动和环境突变,构建具有抗干扰裕度的安全走廊。Deaconu等^[77]提出了一种创新性的航天器机动规划框架,该研究聚焦于探测器近距离操作中同时满足视线角约束与安全距离要求的脉冲式最优控制问题。首先,通过引入轨迹参数化技术对连续机动间的相对运动进行数学表征,实现了脉冲控制与动力学连续性约束的系统性整合;其次,基于该参数化方法构建了所有可行轨迹的有限维凸集描述,创新性地将轨迹连续性约束转化为多项式空间中的非负性约束条件;最终,通过建立半定规划(Semidefinite Programming, SDP)优化模型,将复杂的非线性约束最优控制问题转化为可计算性强的凸优化问题。这种基于凸松弛的求解策略不仅保证了理论的全局最优解,同时显著提升了复杂空间任务中的实时计算效率。David等^[78]针对小天体邻近空间环境中动力学特性呈现的高度敏感性、非周期性及强非线性特征,提出了基于抽象化处理的预测控制框架。该研究采用状态空间维度压缩技术,通过构建任务目标的抽象化表征空间,在保留关键动力学约束的前提下,将原始高维非线性规划问题映射至低维优化域。此方法通过设计分层优化策略,在抽象空间内实施多尺度控制序列搜索,最终生成满足复杂动力学约束的次优轨迹配置方案。针对四旋翼飞行器在火星探测任务中所面临的非凸空间、复杂动力学模型及障碍物密集等挑战,Jiang等^[79]提出了一种基于直接配点法的分布式优化算法,用于求解非凸空间的轨迹优化问题。该方法引入惩罚函数机制,将非凸可行域转化为凸优化问题,并结合一种基于初值选择的迭代优化策略,有效提升了算法的收敛效率与求解稳定性,增强了系统在复杂火星环境的任务执行能力。乔衍迪等^[80]针对月球表面大范围转移任务中运载器面临的垂直起降动力学耦合、

多阶段机动协同及高精度着陆约束等复合技术挑战,构建了基于分层凸优化架构的轨迹规划方法。通过建立6自由度质心运动方程,整合了初始/终端位姿约束、速度边界条件及推力限制,构建具有全任务剖面适应性的非线性最优控制模型,引入松弛变量与二阶锥约束转化技术,将各飞行阶段动力学方程重构为凸优化子问题,并基于内点法实施轨迹求解。

此外,深度神经网络、强化学习及迁移学习在深空探测领域展现出的较好的应用前景。此类算法通过构建模型-数据混合驱动架构,具备多维环境特征在线辨识与自主决策能力,特别适用于地外天体着陆过程中存在未知地形扰动、非结构化障碍物分布等复杂工况。以深度强化学习为核心的学习型制导系统,能够实现传感器数据流到控制指令的端到端映射,通过在线增量学习机制持续优化避障策略,相较于传统基于物理模型的轨迹规划方法,在动态环境适应性、实时在线决策能力等方面展现较强的优势,为未来深空探测任务的安全着陆与巡视提供了新技术路径。综上,地外天体着陆巡视导航技术正朝着更高智能化、适应性和可靠性方向演进,为后续深空探测任务奠定了坚实的技术基础。

4 结束语

地外星表探测器的多源信息融合自主导航技术是实现天体探测任务的关键支柱。本文系统梳理了星表探测器导航技术的研究现状与发展趋势,为地外星表探测器导航技术的创新与工程化实施提供参考,助力星表探测智能化发展。当前,中国正在牵头论证实施国际月球科研站,其中月面运输与科研作业分系统分别以建设全球性月球运输服务系统和国际化月面活动支撑系统为战略目标。这些复杂工程任务对星表自主导航能力提出了更高的要求,尤其需要多系统协同以提升导航系统在未知异质环境下的鲁棒性与场景适应能力。

参考文献

- 崔平远,高锡珍,朱圣英,等.行星着陆复杂地貌特征匹配与自主导航研究进展[J].*宇航学报*,2022,43(6):713-722.
CUI P Y, GAO X Z, ZHU S Y, et al. Progress in complex topography feature matching and autonomous navigation for planetary landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(6): 713-722.
- ANDOLFO S, PETRICCA F, GENOVA A. Visual odometry analysis of the NASA Mars 2020 Perseverance rover's images[C]//Proceedings of 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). Pisa, Italy: IEEE, 2022.
- 徐西宝,白成超,陈宇燊,等.月/火探测软着陆制导技术发展综述[J].*宇航学报*,2020,41(6):719-729.
XU X B, BAI C C, CHEN Y S, et al. A survey of guidance technology for Moon/Mars soft landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(6): 719-729.
- 邢琰,滕宝毅,刘祥,等.月球表面巡视探测GNC技术[J].*空间科学学报*,2016,36(2):196-201.
XING Y, TENG B Y, LIU X, et al. Guidance, navigation and control technology for lunar surface exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, 36(2): 196-201.
- 张云,钱九悦,洪中华,等.欧月月球GNSS规划现状分析综述[J].*导航定位与授时*,2024,11(3):1-15.
ZHANG Y, QIAN J Y, HONG Z H, et al. Review of lunar GNSS planning in European and America[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2024, 11(3): 1-15.
- CHRISTIAN J A, HONG L, MCKEE P, et al. Image-based lunar terrain relative navigation without a map: measurements[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2021, 58(1): 164-181.
- 王霄,张杰.美国重启登月计划解析[J].*载人航天*,2018,24(1):136-142.
WANG X, ZHANG J. Analysis of U. S. resumption of Lunar landing program[J]. *Manned Spaceflight*, 2018, 24(1): 136-142.
- LIU Z Q, DI K C, LI J, et al. Landing site topographic mapping and rover localization for Chang'e-4 mission[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(4): 170-181.
- 张洪华,梁俊,黄翔宇,等.嫦娥三号自主避障软着陆控制技术[J].*中国科学:技术科学*,2014,44(6):559-568.
ZHANG H H, LIANG J, HUANG X Y, et al. Autonomous hazard avoidance control for Chang'E-3 soft landing[J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 44(6): 559-568.
- 张洪华,关轶峰,程铭,等.嫦娥四号着陆器制导导航与控制系统.中国科学:技术科学,2019,49(12):1418-1428.
ZHANG H H, GUAN Y F, CHENG M, et al. Guidance navigation and control for Chang'E-4 lander [J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 49: 1418-1428.
- 张洪华,李骥,于萍,等.嫦娥五号月面起飞上升制导导航与控制系统[J].*中国科学:技术科学*,2021,51(8):921-937.
ZHANG H H, LI J, YU P, et al. Guidance navigation and control technology for the lunar ascent vehicle of the Chang'e-5 mission[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 51(8): 921-937.
- 张洪华,李骥,关轶峰,等.嫦娥三号着陆器动力下降的自主导航[J].*控制理论与应用*,2014,31(12):1686-1694.
ZHANG H H, LI J, GUAN Y F. Autonomous navigation for powered descent phase of Chang'E-3 lunar lander[J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(12): 1686-1694.
- 吴伟仁,周建亮,王保丰,等.嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥控操作中的关键技术[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 the teleoperation of Chang'E-3 "Jade Rabbit" rover[J]. *Scientia Sinica(Informationis)*, 2014, 44(4): 425-440.
- 王保丰,周建亮,唐歌实,等.嫦娥三号巡视器视觉定位方法[J].*中国科学:信息科学*,2014,44(4):452-460.
WANG B F, ZHOU J L, TANG G S, et al. Research on visual localization method of lunar rover[J]. *Scientia Sinica(Informationis)*, 2014, 44(4): 452-460.
- 崔平远,赵泽端,朱圣英.火星大气进入段轨迹优化与制导技术研究进展[J].*宇航学报*,2019,40(6):611-620.
CUI P Y, ZHAO Z D, ZHU S Y. Research progress of trajectory

- optimization and guidance techniques for mars atmospheric entry[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(6): 611-620.
- [16] 张元勋,黄靖,韩亮亮. 星表移动探测机器人研究现状综述[J]. *航空学报*, 2021, 42(1): 62-79.
ZHANG Y X, HUANG J, HAN L L. Research status of planetary surface mobile exploration robots: review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(1): 62-79.
- [17] 崔平远,高艾,于正湜. 火星着陆自主导航方案研究进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2014, 1(1): 18-27.
CUI P Y, GAO A, YU Z S. Research progress of autonomous navigation scheme for Mars landing[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 18-27.
- [18] 邸凯昌,王镓,邢琰,等. 深空探测车环境感知与导航定位技术进展与展望[J]. *测绘学报*, 2021, 50(11): 1457-1468.
DI K C, WANG J, XING Y, et al. Progresses and prospects of environment perception and navigation for deep space exploration rovers[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(11): 1457-1468.
- [19] 邢琰,魏春岭,汤亮,等. 地外巡视探测无人系统自主感知与操控技术发展综述[J]. *空间控制技术与应用*, 2021, 47(6): 1-8.
XING Y, WEI C L, TANG L, et al. Development of autonomous sensing and control technology for extraterrestrial mobile exploration unmanned systems[J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(6): 1-8.
- [20] 郭延宁,冯振,马广富,等. 行星车视觉导航与自主控制进展与展望[J]. *宇航学报*, 2018, 39(11): 1185-1196.
GUO Y N, FENG Z, MA G F, et al. Advances and trends in visual navigation and autonomous control of a planetary rover[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(11): 1185-1196.
- [21] MAKI J N, GRUEL D, MCKINNEY C, et al. The Mars 2020 engineering cameras and microphone on the perseverance rover: a next-generation imaging system for Mars exploration[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216: 1-48.
- [22] ESTLIN T A, BORNSTEIN B J, GAINES D M, et al. AEGIS automated science targeting for the mer opportunity rover[J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2012, 3(3): 1-19.
- [23] 李茂登,黄翔宇,徐超,等. 天问一号火星探测器EDL过程自主导航技术[J]. *宇航学报*, 2022, 43(1): 11-20.
LI M D, HUANG X Y, XU C, et al. Autonomous navigation technology of Tianwen-1 Mars probe during EDL process[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(1): 11-20.
- [24] LI M D, HUANG X Y, WANG D Y, et al. Radar-updated inertial landing navigation with online initialization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(5): 3360-3374.
- [25] LI M D, HUANG X Y, XU C, et al. Velocimeter-aided attitude estimation for Mars autonomous landing: observability analysis and filter algorithms[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(1): 451-463.
- [26] 陈建新,邢琰,李志平,等. 祝融号火星车自主环境感知与避障技术[J]. *中国科学:技术科学*, 2022, 52(8): 1186-1197.
CHEN J X, XING Y, LI Z P, et al. Autonomous environment perception and obstacle avoidance technologies of Zhurong Mars rover[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2022, 52(8): 1186-1197.
- [27] 崔平远,张成宇,朱圣英,等. 小天体柔性附着技术[J]. *宇航学报*, 2023, 44(6): 805-816.
CUI P Y, ZHANG C Y, ZHU S Y, et al. Technologies for flexible landing on small celestial bodies[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(6): 805-816.
- [28] 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.
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.
- [29] ANTREASIAN P G, CHESLEY S R, MILLER J K, et al. The design and navigation of the NEAR-Shoemaker landing on Eros[R]. US: NASA, 2001.
- [30] OGAWA N, TERUI F, MIMASU Y, et al. Image-based autonomous navigation of Hayabusa 2 using artificial landmarks: the design and brief in-flight results of the first landing on asteroid Ryugu[J]. *Astrodynamics*, 2020, 4: 89-103.
- [31] GARMIER R, CEOLIN T, MARTIN T, et al. Philae landing on Comet Churyumov-Gerasimenko: understanding of its descent trajectory, attitude, rebound and final landing site[C]//Proceedings of 2015 International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD). Munich: ISSFD, 2015.
- [32] WILLIAMS B, ANTREASIAN P, CARRANZA E, et al. OSIRIS-REx flight dynamics and navigation design[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214: 1-43.
- [33] LORENZ D A, OLDS R, MAY A, et al. Lessons learned from OSIRIS-REx autonomous navigation using natural feature tracking[C]//Proceedings of 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2017.
- [34] 梁子璇,鲁冰洁,崔平远,等. 小天体智能附着技术研究进展[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2024, 11(3): 213-224.
LIANG Z X, LU B J, CUI P Y, et al. Research progress of technologies for intelligent landing on small celestial bodies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, 11(3): 213-224.
- [35] 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.
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.
- [36] 朱圣英,杨贺,黄翔宇,等. 地外天体着陆自主避障制导技术研究进展[J]. *宇航学报*, 2023, 44(12): 1785-1796.
ZHU S Y, YANG H, HUANG X Y, et al. Research progress of autonomous hazard avoidance guidance technologies on extraterrestrial body landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(12): 1785-1796.
- [37] 崔平远,胡海静,朱圣英. 火星精确着陆制导问题分析与展望[J]. *宇航学报*, 2014, 35(3): 245-253.
CUI P Y, HU H J, ZHU S Y. Analysis and prospect of guidance aspects for Mars precision landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(3): 245-253.
- [38] JOHNSON A E, KLUMPP A R, COLLIER J B, et al. Lidar-based hazard avoidance for safe landing on Mars[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, 25(6): 1091-1099.
- [39] RESTREPO C I, CHEN P T, SOSTARIC R R, et al. Next-generation NASA hazard detection system development[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2020 Forum. US: AIAA, 2020.
- [40] WITTE L. Stochastic modeling of a hazard detection and avoidance maneuver-The planetary landing case[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2013, 119: 259-269.
- [41] QI C R, YI L, SU H, et al. Pointnet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space[C]//Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems. Long Beach: MIT Press, 2017.
- [42] 黄翔宇,徐超,郭敏文. 地外天体软着陆自主导航与控制技术研究进

- 展[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(1): 3-15.
- HUANG X Y, XU C, GUO M W. Research progress of autonomous navigation and control technology for extraterrestrial soft landing[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, 11(1): 3-15.
- [43] DUNLOP H, THOMPSON D R, WETTERGREEN D. Multi-scale features for detection and segmentation of rocks in Mars images[C]// *Proceedings of IEEE Conference On Computer Vision And Pattern Recognition*. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2007.
- [44] FURLÁN F, RUBIO E, SOSSA H, et al. Rock detection in a Mars-like environment using a CNN[C]// *Proceedings of Pattern Recognition: 11th Mexican Conference, MCP R 2019*. Querétaro, Mexico: Springer, 2019.
- [45] ISHIDA T, FUKUDA S, KARIYA K, et al. Vision-based navigation and obstacle detection flight results in SLIM lunar landing[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 226: 772-781.
- [46] CHENG Y, JOHNSON A E, MATTHIES L H, et al. Optical landmark detection for spacecraft navigation[C]// *Proceedings of 13th AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting*. Ponce, Puerto Rico: [s. n.], 2003.
- [47] 汤子旋, 张伟, 李俊麟, 等. FSG-YOLO: 基于 YOLOv8 改进的轻量化月面障碍物检测算法[J]. *载人航天*, 2024, 30(5): 666-675.
- TANG Z X, ZHANG W, LI J L, et al. Lightweight front vehicle obstacle detection algorithm based on improved YOLOv8s[J]. *Manned Spaceflight*, 2024, 30(5): 666-675.
- [48] KIRILLOV A, MINTUN E, RAVI N, et al. Segment anything[C]// *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. [s. n.]: IEEE, 2023.
- [49] YANG Y J, ZHOU T Y, LI K X, et al. Embodied multi-modal agent trained by an llm from a parallel textworld[C]// *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Seattle, WA, USA: IEEE, 2024.
- [50] 满海钧, 曹建峰, 鞠冰, 等. “天问一号”探测器轨道确定及精度评估[J]. *测绘学报*, 2024, 53(7): 1288-1297.
- MAN H J, CAO J F, JU B, et al. Orbit determination and accuracy evaluation of Tianwen-1 probe[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2024, 53(7): 1288-1297.
- [51] DAFTRY S, CHEN Z L, CHENG Y, et al. LunarNav: crater-based localization for long-range autonomous lunar rover navigation[C]// *Proceedings of 2023 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT: IEEE, 2023.
- [52] WANG Y K, YAO W R, ZHANG B, et al. MCLIVO: A low-drift LiDAR-inertial-visual odometry with multi-constrained optimization for planetary mapping[J]. *Measurement*, 2025, 240: 115551.
- [53] BELL III J F, SQUYRES S W, HERKENHOFF K E, et al. Mars exploration rover Athena panoramic camera (Pancam) investigation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, 108(E12): 1-30.
- [54] LIU W, LIU C K, CHENG Z H, et al. A general model and application analysis of spatial resolution on large space navigation imaging of Yutu 2 lunar rover[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(4): 4023-4034.
- [55] GHOSH R, GVP B K, SUMITHRA K. Rover attitude determination using kinematics model and its applications in pragyán operations[C]// *IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*. New Delhi, India: IEEE, 2024.
- [56] GRENIER A, GIORDANO P, BUCCI L, et al. Positioning and velocity performance levels for a lunar lander using a dedicated lunar communication and navigation system[J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2022, 69(2): 1-24.
- [57] MAASS B, WOICKE S, OLIVEIRA W M, et al. Crater navigation system for autonomous precision landing on the Moon[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2020, 43(8): 1414-1431.
- [58] ZHANG B, YAO W R, WANG Y K, et al. mVLINS: a multilevel visual-lidar-inertial navigation system with completely decoupled odometry and adaptive environmental mapping[J/OL]. (2024-3-4) [2025-3-1]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10457028/citations#citations>
- [59] 颜旭, 王鼎杰, 张洪波, 等. 基于LS-SVM的精确星光折射导航观测模型[J]. *中国空间科学技术(中英文)*, 2024, 44(4): 20-28.
- YAN X, WANG D J, ZHANG H B, et al. Precise starlight refraction navigation observation model based on LS-SVM[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2024, 44(4): 20-28.
- [60] LIU Z Q, DI K C, LI J, et al. Landing site topographic mapping and rover localization for Chang'e-4 mission[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63: 1-12.
- [61] 赵宇, 袁利, 王晓磊, 等. 天问一号着陆巡视器进入舱GNC系统设计与实现[J]. *宇航学报*, 2022, 43(1): 1-10.
- ZHAO Y, YUAN L, WANG X L, et al. Design and implementation of GNC system for entry capsule of Tianwen-1 probe[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(1): 1-10.
- [62] 崔平远, 冯军华, 朱圣英, 等. 基于三维地形匹配的月球软着陆导航方法研究[J]. *宇航学报*, 2011, 32(3): 470-476.
- CUI P Y, FENG J H, ZHU S Y, et al. 3D terrain feature matching based navigation for lunar soft landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(3): 470-476.
- [63] CUI P Y, GAO X Z, ZHU S Y, et al. Visual navigation based on curve matching for planetary landing in unknown environments[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 261-274.
- [64] 崔平远, 陆晓萱, 朱圣英, 等. 小天体柔性附着状态协同估计方法[J]. *宇航学报*, 2022, 43(9): 1219-1226.
- CUI P Y, LU X X, ZHU S Y, et al. Cooperative state estimation method for small celestial body flexible landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(9): 1219-1226.
- [65] 崔平远, 秦同, 朱圣英. 火星动力下降自主导航与制导技术研究进展[J]. *宇航学报*, 2020, 41(1): 1-9.
- CUI P Y, QIN T, ZHU S Y. Progress in autonomous navigation and guidance technology for mars powered descent landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(1): 1-9.
- [66] 高多志, 龚有敏, 郭延宁, 等. 考虑导航误差的火星探测器动力下降段鲁棒轨迹优化[J]. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 2025, 55(2): 174-186.
- GAO D Z, GONG Y M, GUO Y N, et al. Robust trajectory optimization for Mars lander powered descent considering navigation errors[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2025, 55(2): 174-186.
- [67] YANG H W, BAI X L, BAOYIN H X. Rapid generation of time optimal trajectories for asteroid landing via convex optimization[J]. *Journal of Guidance Control Dynamics*, 2017, 40(3): 628-641.
- [68] 袁旭, 朱圣英, 崔平远. 小天体自主附着多滑模面鲁棒制导方法研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2015, 2(4): 345-351.
- YUAN X, ZHU S Y, CUI P Y. Study on robust multiple sliding surface guidance method for autonomous small celestial body landing[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 2(4): 345-351.
- [69] GE D T, CUI P Y, ZHU S Y. Recent development of autonomous GNC technologies for small celestial body descent and landing[J]. *Progress*

- in *Aerospace Sciences*, 2019, 110: 100551.
- [70] DUERI D, BEHÇET A, SCHARF D P, et al. Customized real-time interior-point methods for onboard powered-descent guidance[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2016, 40(2): 197-212.
- [71] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, CA, USA: IEEE, 1994.
- [72] 胡粒琪, 曾维, 陈才华, 等. 基于改进 D*Lite-APF 算法的巡检机器人路径规划[J]. *现代电子技术*, 2024, 47(5): 155-159.
HU L Q, ZENG W, CHEN C H, et al. Inspection robot path planning based on improved D*Lite-APF algorithm[J]. *Modern Electronics Technique*, 2024, 47(5): 155-159.
- [73] 郭聚刚, 于军琪, 冯春勇, 等. 基于改进 A* 算法的机器人不平坦地形全局路径规划[J]. *计算机工程与应用*, 2025, 47(5): 309-322.
GUO J G, YU J Q, FENG C Y, et al. Global path planning for robots on uneven terrain based on improved A* algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2025, 47(5): 309-322.
- [74] KOENIG S, LIKHACHEV M. Fast replanning for navigation in unknown terrain[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3): 354-363.
- [75] LU P. Theory of fractional-polynomial powered descent guidance[J]. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2020, 43(3): 398-409.
- [76] CUI P Y, QIN T, ZHU S Y, et al. Trajectory curvature guidance for Mars landings in hazardous terrains[J]. *Automatica*, 2018, 93: 161-171.
- [77] DEACONU G, LOUEMBET C, THÉRON A. Designing continuously constrained spacecraft relative trajectories for proximity operations[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(7): 1208-1217.
- [78] SUROVIK D A, SCHEERES D J. Abstraction predictive control for chaotic spacecraft orbit design[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2015, 48(23): 178-184.
- [79] JIANG H, CHEN K, CHAI R, et al. Trajectory planning and control of multiple quadcopters for mars exploration[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2024, 37(4): 04024038.
- [80] 乔衍迪, 张泽旭. 基于双层凸优化模型的月面运载器大范围转移最优轨迹规划方法[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2023, 10(5): 470-480.
QIAO Y D, ZHANG Z X. Large-scale lunar transportation trajectory optimal programming method based on the bilevel convexification model[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(5): 470-480.

作者简介:

李茂登(1985-), 男, 研究员, 主要研究方向: 航天器自主导航与航天工程总体设计。

通信地址: 北京市5142信箱139分箱(100094)

E-mail: mdengli@foxmail.com

张兵(1996-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向: 多源信息融合定位与导航。本文通信作者。

通信地址: 安徽省合肥市深空探测实验室(230000)

E-mail: zhzh_bing@163.com

Research Progress on Autonomous Navigation Technology for Landing and Roaming of Extraterrestrial Surface Detectors

LI Maodeng^{1,2}, ZHANG Xinghua¹, DING Yunlai¹, FAN Xiangyuan¹, ZHANG Bing¹,
XU Chao², ZHANG Tianzhu^{1,3}, YANG wenfei³

(1. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230000, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China;

3. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China)

Abstract: Drawing on the practical experience of celestial body detection projects at home and abroad, the urgent need for autonomous navigation technology in the tasks of extraterrestrial surface exploration and development was analyzed in detail. Based on this requirement, the relevant engineering practices of lunar, Mars, and small celestial body detectors in the landing and roaming missions were reviewed. And in view of the environmental challenges such as extreme illumination interference, dust occlusion effect, and complex terrain features in these tasks, technical difficulties of landing and roaming autonomous navigation were deeply discussed. On this basis, key technologies involved in autonomous navigation, including obstacle detection, autonomous localization, and trajectory planning, were systematically summarized and concluded. Moreover, the development trends of landing and roaming navigation technologies for extraterrestrial surface detectors were prospected.

Keywords: multi-source information fusion autonomous navigation; detector landing and roaming; obstacle detection; autonomous localization; trajectory planning

Highlights:

- Investigate the current research status of autonomous navigation in lunar, Martian, and small body exploration missions.
- Analyze the difficulties and challenges faced by autonomous navigation technologies in current engineering missions.
- Summarize key technologies for autonomous navigation on extraterrestrial bodies, including obstacle detection, autonomous localization, and trajectory planning.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]