行星着陆点自主评估与选取研究进展

崔平远^{1,2,3}, 葛丹桐^{1,2,3*}, 朱圣英^{1,2,3}, 赵冬越^{1,2,3}

1. 北京理工大学深空探测技术研究所, 北京 100081;
2. 深空自主导航与控制工信部重点实验室, 北京 100081;
3. 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081

* E-mail: gedt@bit.edu.cn

收稿日期: 2020-06-08; 接受日期: 2020-08-17; 网络版发表日期: 2020-12-07

国家重点研发计划项目(编号: 2019YFA0706500)、国家自然科学基金项目(批准号: 61873302, 61973032)、国防基础科研项目(编号: JCKY2018602B002, JCKY2019602D022)、民用航天预研项目和中国博士后科学基金项目(编号: 2020M680388)资助

摘要 针对行星表面多样异构形貌对探测器着陆安全构成的潜在威胁, 对行星着陆点自主评估与选取方法的最新研究进展进行了系统性回顾. 首先总结了着陆点自主评估选取任务特点与面临的主要技术难题, 介绍了着陆点选取涉及的关键要素以及“安全因子”法选取流程与应用. 随后回顾了着陆点自主评估与选取方法研究进展, 重点从障碍检测、地形安全性评估、着陆点综合选取三个方面对以往任务与理论研究成果进行了归纳梳理. 最后结合未来行星探测任务智能化需求, 对相关技术发展趋势提出了思考与建议.

关键词 行星探测, 着陆点选取, 障碍检测, 自主规划, 安全因子

1 引言

行星着陆探测是破解生命起源、太阳系形成与演化等重大基础科学问题的主要途径, 对太空资源开发与利用、小行星撞击威胁防御等关键技术的突破也有重要意义^[1~3]. 近两年, 美国OSIRIS-REx任务与日本Hayabusa2任务掀起了新一轮小行星采样返回探测高潮^[4,5]. 与此同时, 美国、中国、阿联酋均计划2020年向火星发射探测器, 实现火星的环绕与着陆探测.

着陆探测是开展行星表面原位探测与科学研究的必要前提, 而评估选取任务着陆点则是实现行星表面安全着陆首先需要解决的关键问题. 一般来说在确定

任务着陆点时, 需要兼顾工程安全性与科学价值, 要求着陆点不仅是在已有测量数据与工程约束下探测器能够到达的最佳地点, 还是科学团队认为能够获取最高科学回报的区域^[6]. 以当前正在进行的OSIRIS-REx任务为例, 在开展采样附着任务前, 地面人员经过数月对小行星Bennu表面4个采样区域的筛选比较, 最终将位于北半球陨石坑内的Nightingale区域选取为探测器附着目标点, 并将Osprey作为备选采样区^[7].

在已有任务基础上, 研究人员多年来不断寻求提升行星探测器在线识别危险障碍与主动降低着陆风险能力的方法, 通过提出新的导航、制导与控制方法, 实现行星表面安全自主着陆目标^[8,9]. 在此基础上发展出

引用格式: 崔平远, 葛丹桐, 朱圣英, 等. 行星着陆点自主评估与选取研究进展. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1315–1325

Cui P Y, Ge D T, Zhu S Y, et al. Research progress of autonomous planetary landing site assessment and selection (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1315–1325, doi: 10.1360/SST-2020-0228

一系列安全着陆点自主评估选取策略, 其中Cui等人^[10]针对行星着陆点自主选取问题提出“安全因子”的概念, 应用最优控制、概率论等理论方法, 构建多指标综合评估模型, 通过对地形测量数据、探测器所受工程约束等多种要素进行融合处理分析, 得到满足任务需求的最优着陆点。该方法是对前期理论方法的凝练与拓展, 可根据应用背景进行灵活调节, 以适应不同行星动力学与形貌特征。这类方法的理论研究将有助于推动行星探测智能技术发展, 提升深空探测器自主探测与决策水平。

本文以“安全因子”概念为基础, 在总结分析了行星探测任务着陆点选取特点与面临的主要技术难题后, 介绍了着陆点选取的“安全因子”方法内涵, 并对其涉及的关键要素、在线选取流程以及任务应用进行了阐述。随后回顾了行星探测着陆点自主评估与选取相关技术在以往任务以及近年来的研究进展, 针对障碍检测、地形安全性评估、着陆点综合选取模型及算法进行了梳理与总结。最后展望了未来行星智能探测技术的发展趋势, 为我国行星探测任务设计与研发提供理论与技术支撑。

2 任务特点与面临的技术难题

结合环绕轨道器获取的高精度测量数据, 人类目前已对月球、火星的表面地形特征有较为清晰的认知。其中月球表面可分为月陆与月海, 月陆地形较为崎岖, 月海则相对平坦, 月球背面地形相较于正面更为复杂险峻^[11,12]。火星南北半球差异显著, 表面具有起伏的山峦与峡谷, 陨石坑和碎石较多^[13], 通常科学探索价值越高的区域地形越复杂、着陆难度更高。以往任务中, 除了嫦娥4号实现了人类月球背面首次着陆, 月球着陆任务大多将着陆点选取在月球正面赤道附近平坦的月海区域内, 火星着陆任务则主要将着陆点选取在地势相对平坦的北半球高程小于0 m的区域^[6]。与月球、火星相比, 小行星体积小、形状不规则且表面形貌崎岖多变^[14], 同时任务发射前地面能够获取的先验信息十分有限。为了选取任务着陆点, 需要探测器通过绕飞或悬停等方式对小行星表面进行近距离测量, 并将测量结果返回至地面, 地面人员进一步筛选得到满足任务控制精度与科学探测目标的最佳着陆区域^[15,16]。

考虑到行星与地面间的通信时延问题^[17], 地面远程控制探测器下降过程中难以应用实施。为了实现未来行星探测任务复杂地形精确自主着陆, 需要探测器具备在线测量与评估行星表面形貌威胁、结合工程约束预测着陆风险的能力, 自主规划并快速确定符合任务要求的最佳着陆点, 提高着陆任务的自主性与安全性。总的来说, 着陆点在线选取是在地面评估选取任务预定着陆区的基础上, 对着陆区开展的更为深入与细致的考量。与地面选取相比, 探测器自主选取任务着陆点受星上资源限制, 算法复杂度有限, 考虑因素相对较少, 但能够获取与分析的地形数据精度更高, 同时地面评估过程往往需要历时数周至数月, 星上选取着陆点则允许的时间更短。具体来说, 在进行行星探测着陆点自主评估与选取时, 面临的主要技术挑战包括以下几个方面。

(1) 星表形貌复杂多样。行星表面存在的陨石坑、碎石、陡坡、凸包等地形障碍对探测器着陆安全构成威胁^[18]。尤其在行星探测时, 受地面观测精度限制, 任务发射前难以准确获知行星表面形貌数据, 且不同小行星形貌特征差异显著^[19], 难以直接继承以往任务经验。在近期开展的Hayabusa2与OSIRIS-REx任务中, 目标小行星表面实际可行的附着区域大小均远远小于地面预设着陆椭圆, 对星上系统自主识别地形障碍与精确控制能力提出了极高要求。

(2) 动力学模型不确定性强。火星大气稀薄、不稳定, 且表面附近伴有突风^[20]。而小行星形状不规则、引力弱、自旋状态复杂, 太阳光压、第三天体引力等环境扰动对探测器作用明显^[21]。受引力场建模误差、环境扰动等因素共同影响, 探测器实际动力学模型存在一定不确定性^[22], 导致探测器实际运动可能与预设情况间产生偏差。在选取着陆点时, 未建模误差将影响星上对潜在着陆风险与转移代价的准确评估, 降低着陆状态预测精度以及着陆点选取结果的可靠性。

(3) 星上计算效率有限。当采用激光雷达等传感器对行星表面进行观测时, 获取的星表形貌测量数据往往密度较大, 为了评估选取符合任务要求的着陆点, 星载计算机需要对大量数据进行实时处理与优化。然而星上计算资源与处理速度有限, 难以满足在线复杂运算需求。为了易于工程实现, 降低星上运算成本, 要求实际采用的算法形式简单、计算量小^[23], 从而为着陆点在线评估与优化算法设计带来挑战^[24]。

3 着陆点选取关键要素与“安全因子”

3.1 关键要素

3.1.1 地形安全性

地形安全性是选取着陆点最为关键的要素之一。在着陆任务中, 行星表面的岩石、陡坡、陨石坑、凸包、裂谷等复杂地形障碍对探测器着陆安全构成显著威胁^[25]。一旦探测器在下降过程中与障碍发生碰撞, 或在着陆时发生倾倒、侧翻, 将导致整个探测任务失败。为保证着陆安全, 探测器应尽可能避开行星表面坡度较大、岩石密集以及阴影区域, 选取平坦地形进行着陆^[26]。常用的衡量地形安全的指标有局部坡度与表面粗糙度, 其中坡度由局部拟合平面法线方向与引力方向夹角决定, 表面粗糙度为实际高程数据与拟合平面间的残差^[27]。在任务设计过程中, 结合具体采用的着陆方式与着陆结构, 常对探测器所能容忍的最大坡度和表面粗糙度进行约束限制。

3.1.2 科学价值

在实现行星表面安全着陆的同时, 探测器还需完成一系列科学探测任务^[28]。以往行星着陆任务中, 设定的科学目标主要包括提供科学探测多样性、获取丰富地质信息、了解环境气候演化过程、提供水存在的证据、采集分析保存生命特征物质、验证已有假说等^[6,29]。在选取着陆点时, 对各像素点科学价值的判断主要依赖于任务提前选定的具有高科学探索价值的区域, 不同像素点的科学价值由其与这些选定区域的平均距离决定, 距离越小意味着探测器后续开展科学活动需要转移的范围越小。随着探测器自主化水平的提升与搭载科学仪器的完备, 未来任务还有望实现行星表面科学价值的星上自主评估^[23]。

3.1.3 速度增量

受探测器推进系统携带推进剂限制, 在选取着陆点时还应考虑探测器运动至不同目标点过程中的转移代价。深空探测任务中, 常采用速度增量对转移代价进行描述, 其大小可由各轴加速度积分得到^[30,31]。实际着陆过程中需要施加多大的速度增量由探测器当前状态、着陆点位置、动力学环境特性以及所采用的下降制导控制方法共同决定。速度增量越小, 探测器与目标状态越接近, 到达对应着陆点所需代价越小。当存

在环境扰动、引力场建模误差时, 施加的速度增量也会相应增大, 以保证探测器安全, 提高着陆过程的鲁棒性。

3.1.4 其他工程约束

除了上述常见要素, 着陆点选取还受探测器观测范围、转移能力、光照需求、通信需求、着陆性能等工程因素的制约^[28]。例如, 受相机视场角与姿态约束, 探测器仅能对预定着陆点附近有限范围内区域进行观测, 观测精度与探测器高度及采用的敏感器类型紧密相关^[32]。且受星上制导控制能力(如最小转弯半径、推力限制等)与导航误差影响, 探测器成功到达不同目标点的概率不同^[33], 因此需考虑探测器可达能力范围、转移时间上限及给定状态约束。此外, 考虑到光学导航敏感器及能源供给对光照的需求, 需选取地势较高、光照时间充足、满足太阳高度角约束的区域着陆^[34]。然而地势高意味着有效减速距离缩短, 对推力器最大推力设计带来挑战。对于精确着陆任务, 还可通过对探测器与行星表面接触的速度与姿态进行预测, 选取能够使着陆姿态尽量与局部坡度垂直、减速距离充分的区域作为任务着陆点^[35]。

3.2 “安全因子”法选取流程与应用

文献[10]中提出的“安全因子”法在选取着陆点时, 首先根据任务特点从以上关键要素中筛选出需要评估的要素, 在地形网格图上形成量化指标, 将着陆点选取问题转化为求解若干工程约束下的地形最安全像素点问题。为进一步减少在线计算量, 对各项指标进行归一化处理, 将其加权和作为安全因子综合评估指标, 权重由地面人员根据各项重要性提前选定或由星上计算机结合实际情况在线调整得到。下降过程中, 探测器的绝对或相对状态常采用扩展卡尔曼滤波器对动力学递推与敏感器测量结果进行融合得到^[36]。探测器根据敏感器实时测量信息, 对地形网格图像素点的安全因子取值进行计算, 生成反映不同区域着陆安全性高低的评估结果, 进而通过一维快速搜索全局最优点, 得到任务安全着陆点坐标与备选着陆点排序。“安全因子”法着陆点评估选取流程如图1所示。

在将“安全因子”法应用于不同行星着陆任务时, 由于任务需求不同, 进行量化评估的要素也不同。例如, 相较于火星等大行星, 小行星尺寸小且引力场较

图 1 (网络版彩图)基于安全因子的着陆点自主选取流程

Figure 1 (Color online) Process of safety index-based landing site selection.

弱, 导致任务着陆时间更长, 下降速度更小. 为了避免探测器在接触小行星表面后发生弹起或逃逸, 实际任务中一般对探测器的附着速度与姿态提出了更为严格的要求^[35], 在设计着陆点评估指标时也应加入对附着状态的考量. 同时, 探测器受外界环境扰动与系统误差影响更为显著, 导致实际飞行状态可能与标称轨迹间出现明显偏离^[37], 影响探测器整体着陆性能. 针对此类问题可通过设计鲁棒估计方法估计探测器附着状态, 降低模型不确定性对着陆安全的影响, 或在新的视野范围内重新选取着陆点^[38]等.

4 着陆点自主评估与选取研究现状

为了提高行星着陆任务的安全性, 降低复杂地形环境与不确定性因素对探测器着陆安全的影响, 近年来研究人员不断探索适用于深空任务的环境感知与自主决策方法, 在着陆点自主评估与选取方面, 发展出了障碍检测、地形安全性评估、着陆点综合选取等一系列方法. 以下针对各类方法的最新研究进展进行回顾, 并分析给出这些方法间的内在联系.

4.1 障碍检测方法

在行星着陆任务中, 探测器通过光学相机、激光雷达等敏感器获取行星表面光学图像或三维高程数据^[39,40], 并结合障碍检测算法实现对陨石坑、岩石、斜坡等障碍的识别与分析^[25,41]. 除了岩石高度、陨石坑半径等常见指标, 区分行星表面安全与危险区域还可根据局部平面的坡度与表面粗糙度. 坡度与表面粗糙度容忍上限由探测器结构决定, 认为同时满足探测器坡度与表面粗糙度约束的像素点为安全像素点, 否则为危险像素点. 在嫦娥3号任务下降过程中, 为了提高着陆安全性, 着陆器系统首先结合光学成像敏感器与三维成像敏感器测量结果, 进行粗略障碍识别并选取出较大面积的安全着陆区, 通过姿态机动调整推力方向转移至安全区域上方. 随后以悬停的方式对着陆区内的障碍开展精确识别, 区分出危及系统安全的小尺度障碍, 并通过小幅移动到达月球表面安全着陆点^[27].

在已有方法中, 光学相机由于质量小、功率低而得到了广泛应用. 当仅采用光学图像进行障碍检测时, Matthies等人^[42]分别提出了基于立体视觉的岩石与斜

坡检测算法以及基于阴影的岩石检测算法. 立体视觉方法通过匹配不同相机图像生成深度图, 实现对坡度的最小二乘拟合, 并在此基础上对拟合残差进行筛选聚集得到岩石高度与位置的近似. 而阴影分析则通过对图像中阴影区域进行提取与椭圆拟合, 结合光照角度、太阳高度信息, 对岩石高度与半径进行估计. 除了立体视觉、阴影形状, Woicke和Mooij^[32]还考虑了基于单相机运动的立体视觉在障碍检测中的应用, 通过匹配相机在不同时刻不同高度与角度拍摄的图像, 可同样得到像素点的高程信息. 针对陨石坑检测, Cheng和Adnan^[43]提出Canny算子用于提取图像中的陨石坑边缘信息, 并将属于同一陨石坑的边缘进行聚集, 得到陨石坑的拟合椭圆. 在此基础上, Yu等人^[44]将图像区域信息与Canny算子相结合, 提高了复杂纹理背景下陨石坑检测的准确性. 于正湜等人^[45]则采用基于背景的Hopfield网络对陨石坑边缘进行了提取, 并结合线性抗差估计得到重叠或不完整陨石坑的最小误差中值椭圆拟合. 最近, Moghe和Zanetti^[46]提出基于语义分割的障碍检测深度学习算法, 通过对环绕轨道器获取的真实地形图进行翻转处理并增加高斯噪声构建训练数据, 对卷积神经网络进行离线训练, 实现了下降过程中对实际输入图像各区域危险概率的快速估计.

另一方面, 激光雷达由于能够在不同光照条件下生成高分辨率三维数字高程地形图DEM, 在未来行星探测任务中具有更高的实用价值^[47]. 由美国航天局研发的自主精确着陆及障碍检测与规避技术, 又称ALHAT系统, 以行星探测为目标, 旨在使探测器具备自主检测陨石坑、岩石、斜坡等障碍以及自主选取着陆点并规避障碍的能力^[48]. 下降过程中ALHAT系统通过惯性导航、闪光激光雷达、多普勒激光雷达和激光高度计获取星表地图, 其中闪光激光雷达用于在任意光照条件下检测行星表面障碍, 多普勒激光雷达用于测量探测器高度和速度, 激光高度计负责提供高度信息, 保证探测器降落在选定区域范围内. 根据传感器适用范围, 星表数字高程图在距离着陆目标点1 km或更高的地方开始生成, 探测器在此基础上根据自身参数和所受约束对障碍进行识别并选取安全着陆点^[49]. 而在其最新的SPLICE计划中, 项目团队通过研制新型障碍检测激光雷达, 发展出了新一代障碍检测系统^[50]. 如图2所示, 障碍检测阶段开始后, 首先由障碍检测激

图 2 (网络版彩图)SPLICE系统着陆过程示意图^[50]

Figure 2 (Color online) Illustration of SPLICE system landing process [50].

光雷达在传感器坐标系中生成行星表面DEM, 并根据当前探测器状态估计将DEM转换至表面固连坐标系中. 随后, 星上障碍检测算法对各像素点的障碍与坡度信息进行计算, 结合探测器结构、DEM噪声等, 确定探测器下方所有安全区域, 并为制导系统筛选安全着陆点.

4.2 地形安全性评估方法

在障碍检测的基础上, 评估分析地形安全性并在线调整着陆点位置, 是探测器在星上计算能力受限下自主提高着陆安全性的有效手段. 地形安全性一般由着陆点安全半径与探测器着陆误差共同决定, 为了保证着陆区面积足够探测器安全降落在行星表面, 选定的任务着陆点安全半径应至少大于探测器着陆误差. 定义安全半径为安全像素点与附近危险像素点间的最小距离, 计算安全半径常采用螺旋搜索法^[27], 如图3所示, 着陆点安全半径越大, 其距离障碍越远, 越适宜着陆. 以往任务中常采用着陆误差椭圆对探测器着陆误差进行表征^[51]. 例如, 随着火星着陆自主导航、制导与控制技术水平的提升, 着陆误差椭圆从“机遇号”火星探测器约60 km缩小至“好奇号”探测器约12.5 km^[52]. 在分析探测器着陆误差时, 既可采用蒙特卡罗法对初始状态不确定性、环境扰动、导航控制误差等因素影响下的探测器着陆误差椭圆进行离线估计^[53], 也可通过混沌多项式对系统不确定性随非线性动力学的传播规律进行研究^[54], 或分析探测器在给定模型误差假设下的能控可达集, 得到能够到达指定着陆点的允许初始状态集合以及指定初始状态下的所有满足工程约束的末端状态集合^[33,55]. 其中, Long等人^[55]针对火星大

图3 (网络版彩图)用于确定安全半径的螺旋搜索法

Figure 3 (Color online) Spiral search algorithm for safe radius determination.

气进入段模型不确定性, 采用高斯伪谱法与序列二次规划求解轨迹优化问题, 分析了不同初始状态对着陆任务精度的影响. Arslantaş等人^[33]则将状态空间离散成等距离目标点, 通过直接法求解一系列最优控制问题, 得到月球着陆器在给定初始状态及飞行时间下的非凸可达集近似估计.

在分析地形安全性时, 还需考虑测量误差对着陆安全性评估准确性的影响. 对此, Ivanov等人^[56]针对下降过程中的传感器测量噪声与导航误差, 建立了表面粗糙度的概率模型, 并对各像素点的着陆安全概率进行了定义与评估, 同时在判断地形障碍时加入了探测器着陆腿几何结构对着陆地形坡度的要求, 提高了着陆点选取结果的可行性. Yuan等人^[57]搭建了基于探测器位置误差椭球的碰撞概率预测模型, 通过计算位置误差椭圆与危险区域的重叠体积大小, 对导航位置估计误差带来的潜在碰撞风险进行了估计. 为了进一步形成地形安全性评估指标, Witte^[58]采用马尔科夫链模型对障碍检测与规避过程进行了描述并对着陆点散布进行了估计, 结合探测器转移范围与传感器视野范围确定了着陆区像素点间的连通关系, 并在此基础上分析了地形图像测量误差在计算像素点安全评分过程中的传播规律, 为预测着陆任务成功概率提供了有效手段. 随后, Seraji和Serrano^[59]在对不同传感器获取的地形特征分别进行数据融合后, 输入给混合推理系统并生成了综合安全评估图, 其中对应最高安全分数的像素点即为地形最安全的区域. Ploen等人^[60]则针对理想情况下的两脉冲机动制导策略, 通过弹道分析得到了探测器动力下降段末端能够到达的行星表面椭圆边界解析表达式, 并在此基础上构造了基于模糊逻辑的推理机, 通过综合考量探测器可达范围与地形安全性, 形成着陆点性能衡量指标, 进而得到满足可达性的最佳着陆点.

4.3 着陆点综合选取方法

除了地形安全性, 选取着陆点时还应兼顾工程约束与科学回报. 以往行星探测任务的着陆点均是地面人员在行星表面信息不断丰富的基础上, 通过反复论证不同着陆区工程约束满足情况以及科学探测价值大小确定的. 例如, 在嫦娥4号任务设计过程中, 通过对月球背面地质地貌的科学研究价值、着陆安全性、工程可实现性等方面的综合权衡, 最终将着陆区选取在了

位于南极艾特肯盆地的冯·卡门撞击坑内^[12]。该区域高程较低,地势相对平坦,为月球背面巡视区内的科学活动奠定良好基础。在Hayabusa系列任务中,为了确定采样附着点,探测器首先在到达目标小行星附近后对小行星进行全局建模,通过评估比较不同区域的安全性、可行性、可采样性与科学价值,划定任务着陆区域^[5]。随后,探测器通过多次下降到指定区域上方附近,进行近距离测量获取高精度地形数据,为实际采样做准备。考虑到Hayabusa与Hayabusa2任务均在下降段采用向小行星表面投放人工信标的方法进行相对导航与位置姿态控制^[17],选取的附着点应与人工信标间的距离尽可能接近。此外,当同一任务中有多个探测器需要着陆在行星表面时,还需结合各探测器设计功能选取适宜着陆点,避免探测器间的相互干扰。例如,在Hayabusa2任务中,为了避免释放的MINERVA与MASCOT影响Hayabusa2的后续采样任务,选取着陆点时除了考察科学回报、地形安全,还需要其尽可能远离预定采样区域^[61]。

另一方面,为了自主选取符合多种任务目标的着陆点,研究人员在参考以往任务选取经验与要素的基础上,建立了着陆点选取的数学模型,为未来任务探测器在线自主选取着陆点打下基础。Serrano^[62]构造了着陆安全性与地形安全性、速度增量、科学价值三种指标间的贝叶斯网络,结合探测器当前状态对转移至不同目标点的燃耗进行了预测,并采用因果推理方法得到具有最优期望着陆性能的着陆点。针对相似的选取要素,Cohanim和Collins^[63]则是在考虑最小着陆面积的基础上对各要素进行量化评估,并将结果加权融合形成二维综合代价图,进而采用贪婪算法搜索得到综合代价最小的若干像素点作为备选着陆点。考虑到任务约束、着陆点可见性、探测器安全性与可达能力对着陆点的多重要求,Simoes等人^[64]构建了着陆点多指标动态评估模型,将粒子群优化算法与禁忌搜索算法相结合,搜索并跟踪下降过程中各时刻的最优着陆点,实现了搜索空间不断变化地形细节不断丰富情况下的着陆点快速确定。Parreira等人^[65]通过对下降过程中任务着陆点的实时评估,实现了探测器在可达范围内着陆点的在线更新。与已有方法相比,Cui等人^[10]提出的“安全因子”方法统一考虑了影响着陆点选择的综

合要素,以及环境扰动和系统误差对探测器着陆性能的影响,同时通过设定安全阈值实现对备选着陆点的初步筛选,提高了在线选取着陆点的计算效率。上述方法应用于实际任务中,将进一步提升探测器星上自主决策能力和任务的安全性。

5 展望

随着未来行星探测任务智能化水平的提升,要求探测器能够独立自主完成对未知行星环境的测量与分析,快速选取最符合给定任务科学目标的安全着陆点。具体来说,针对未来行星智能探测任务,还需从以下几个方面对着陆点自主选取技术开展进一步研究。

(1) 设计适用于新型探测结构或多探测器系统的着陆点选取方法。随着探测方式的不断丰富,未来探测任务将可能采用不同于腿式着陆器的新型探测结构或多探测器系统。对此,需考虑不同结构对着陆点地形安全性的独特需求,以及着陆过程中探测器间的相互位置制约关系,发展星上自主智能规划理论与方法,在保证工程可行性的前提下实现任务的科学探测价值最大化。

(2) 降低着陆点选取过程的不确定性,提高着陆点选取精度。针对下降过程中的地形测量误差,需发展多传感器多角度不同时间节点测量融合算法,采用粒子滤波、模糊逻辑等方法降低测量噪声与偶然误差对地形安全性评估的影响。此外为准确估计系统着陆误差、确定着陆区域最小半径,还可进一步发展基于自适应理论、马尔科夫决策模型等技术方法对环境扰动与系统误差进行估计建模,减小探测器状态的不确定性。

(3) 着陆点选取算法复杂度需与星上计算能力相匹配。地形测量数据点密集,在分析地形前首先需对数据进行简化处理,降低着陆点评估算法的算法复杂度,减少星上计算量。发展适用于小行星探测任务的人工智能方法,通过地面提前模拟训练不同着陆场景,保证算法实时可行性与计算结果可靠性。同时,星上计算机实时数据处理能力与计算能力也需进一步提升,以适应未来更复杂健全的着陆点选取算法。

参考文献

- 1 Sun Z, Jia Y, Zhang H, et al. Technological advancements and promotion roles of Chang'e-3 lunar probe mission. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 2702–2708 [孙泽洲, 贾阳, 张焱. 嫦娥三号探测器技术进步与推动. 中国科学: 技术科学, 2013, 43: 1186–1192]
- 2 Vardaxis G, Sherman P, Wie B. Impact risk assessment and planetary defense mission planning for asteroid 2015 PDC. *Acta Astronaut*, 2016, 122: 307–323
- 3 Cui P, Yuan X, Zhu S, et al. Research progress of small body autonomous landing techniques (in Chinese). *J Astronautics*, 2016, 37: 759–767 [崔平远, 袁旭, 朱圣英, 等. 小天体自主附着技术研究进展. 宇航学报, 2016, 37: 759–767]
- 4 Lauretta D S, Balram-Knutson S S, Beshore E, et al. OSIRIS-REx: Sample return from asteroid (101955) Bennu. *Space Sci Rev*, 2017, 212: 925–984
- 5 Watanabe S, Tsuda Y, Yoshikawa M, et al. Hayabusa2 mission overview. *Space Sci Rev*, 2017, 208: 3–16
- 6 Ge D, Cui P. Overview and prospect of planetary landing site selection (in Chinese). *J Deep Space Exploration*, 2016, 3: 197–203 [葛丹桐, 崔平远. 地外天体着陆点选择综述与展望. 深空探测学报, 2016, 3: 197–203]
- 7 X marks the spot: NASA selects site for asteroid sample collection. <https://www.asteroidmission.org/?latest-news=x-marks-the-spot-nasa-selects-site-for-asteroid-sample-collection>, 2019-12-12 [2020-6-2]
- 8 Cui P, Gao A, Zhu S. Autonomous Navigation and Guidance for Deep Space Spacecraft (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2016 [崔平远, 高艾, 朱圣英. 深空探测器自主导航与制导. 北京: 中国宇航出版社, 2016]
- 9 Yu D, Wu X, Wu W. Review of technology development for Chinese lunar exploration program (in Chinese). *J Deep Space Exploration*, 2016, 3: 307–314 [于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述. 深空探测学报, 2016, 3: 307–314]
- 10 Cui P, Ge D, Gao A. Optimal landing site selection based on safety index during planetary descent. *Acta Astronaut*, 2017, 132: 326–336
- 11 Lucey P. Understanding the lunar surface and space-moon interactions. *Rev Mineral Geochem*, 2006, 60: 83–219
- 12 Wu W, Wang Q, Tang Y, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission. *J Deep Space Exploration*, 2017, 4: 111–117 [吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计. 深空探测学报, 2017, 4: 111–117]
- 13 Ono M, Heverly M, Rothrock B, et al. Mars 2020 site-specific mission performance analysis: Part 2. Surface traversability. In: AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Orlando, 2018
- 14 Quadrelli M B, Wood L J, Riedel J E, et al. Guidance, navigation, and control technology assessment for future planetary science missions. *J Guidance Control Dyn*, 2015, 38: 1165–1186
- 15 Kawaguchi J, Fujiwara A, Uesugi T. Hayabusa—Its technology and science accomplishment summary and Hayabusa-2. *Acta Astronaut*, 2008, 62: 639–647
- 16 Boehnhardt H, Bibring J P, Apathy I, et al. The Philae lander mission and science overview. *Phil Trans R Soc A*, 2017, 375: 20160248
- 17 Tsuda Y, Yoshikawa M, Abe M, et al. System design of the Hayabusa 2-asteroid sample return mission to 1999 JU3. *Acta Astronaut*, 2013, 91: 356–362
- 18 Cui P, Qin T, Zhu S, et al. Trajectory curvature guidance for Mars landings in hazardous terrains. *Automatica*, 2018, 93: 161–171
- 19 Ulamec S, Biele J. Surface elements and landing strategies for small bodies missions—Philae and beyond. *Adv Space Res*, 2009, 44: 847–858
- 20 Cui P, Qiao D, Zhu S, et al. Research progress of dynamics and control for planetary landing (in Chinese). *Spacecraft Environ Eng*, 2014, 31: 1–8 [崔平远, 乔栋, 朱圣英, 等. 行星着陆探测中的动力学与控制研究进展. 航天器环境工程, 2014, 31: 1–8]
- 21 Cui P, Qiao D, Cui H, et al. Target selection and transfer trajectories design for exploring asteroid mission. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 1150–1158 [崔平远, 乔栋, 崔枯涛, 等. 小行星探测目标选择与转移轨道方案设计. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 677–685]
- 22 Yu Z S, Zhao Z D, Cui P Y. An observability-based trajectory optimization considering disturbance for atmospheric entry. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. San Diego, 2016
- 23 Cui P, Xu R, Zhu S, et al. State of the art and development trends of onboard autonomy technology for deep space explorer (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2014, 35: 13–28 [崔平远, 徐瑞, 朱圣英, 等. 深空探测器自主技术发展现状与趋势. 航空学报, 2014, 35: 13–28]
- 24 Dueri D, Açikmeşe B, Scharf D P, et al. Customized real-time interior-point methods for onboard powered-descent guidance. *J Guidance Control Dyn*, 2017, 40: 197–212
- 25 Huertas A, Cheng Y, Madison R. Passive imaging based multi-cue hazard detection for spacecraft safe landing. In: IEEE Aerospace Conference.

Big Sky, 2006

- 26 Wu W, Yu D. Key technologies in the Chang'e-3 soft-landing project (in Chinese). *J Deep Space Exploration*, 2014, 1: 105–109 [吴伟仁, 于登云. “嫦娥3号”月球软着陆工程中的关键技术. *深空探测学报*, 2014, 1: 105–109]
- 27 Zhang H, Liang J, Huang X, et al. Autonomous hazard avoidance control for Chang'E-3 soft landing (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 559–568 [张洪华, 梁俊, 黄翔宇, 等. 嫦娥三号自主避障软着陆控制技术. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44: 559–568]
- 28 Ye P, Sun Z, Zhang H, et al. Mission design of Chang'e-4 probe system (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 124–137 [叶培建, 孙泽洲, 张焱, 等. 嫦娥四号探测器系统任务设计. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49: 124–137]
- 29 Ouyang Z. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2004, 19: 351–358 [欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略. *地球科学进展*, 2004, 19: 351–358]
- 30 Wolf A A, Acikmese B, Cheng Y, et al. Toward improved landing precision on Mars. In: *IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, 2011
- 31 Wong E C, Singh G, Masciarelli J P. Guidance and control design for hazard avoidance and safe landing on Mars. *J Spacecraft Rockets*, 2006, 43: 378–384
- 32 Woicke S, Mooij E. Passive hazard detection for planetary landing. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. San Diego, 2016
- 33 Arslantaş Y E, Oehlschlägel T, Sagliano M. Safe landing area determination for a Moon lander by reachability analysis. *Acta Astronaut*, 2016, 128: 607–615
- 34 Ulamec S, Biele J, Blazquez A, et al. Rosetta lander-Philae: Landing preparations. *Acta Astronaut*, 2015, 107: 79–86
- 35 Witte L, Roll R, Biele J, et al. Rosetta lander Philae-Landing performance and touchdown safety assessment. *Acta Astronaut*, 2016, 125: 149–160
- 36 Yu Z, Cui P, Crassidis J L. Design and optimization of navigation and guidance techniques for Mars pinpoint landing: Review and prospect. *Prog Aerospace Sci*, 2017, 94: 82–94
- 37 Hu H, Zhu S, Cui P. Desensitized optimal trajectory for landing on small bodies with reduced landing error. *Aerospace Sci Tech*, 2016, 48: 178–185
- 38 Ge D, Cui P, Gao A. Rapid generation of Mars safe landing trajectory based on reachability set (in Chinese). *J Astronautics*, 2017, 38: 497–505 [葛丹桐, 崔平远, 高艾. 火星安全着陆轨迹快速生成的能控集法. *宇航学报*, 2017, 38: 497–505]
- 39 Ge D, Cui P, Zhu S. Recent development of autonomous GNC technologies for small celestial body descent and landing. *Prog Aerospace Sci*, 2019, 110: 100551
- 40 Cui P, Zhu S, Cui H. Autonomous optical navigation and guide method for soft landing on small bodies (in Chinese). *J Astronautics*, 2009, 30: 2159–2164 [崔平远, 朱圣英, 崔祐涛. 小天体软着陆自主光学导航与制导方法研究. *宇航学报*, 2009, 30: 2159–2164]
- 41 Cui P, Gao X, Zhu S, et al. Visual Navigation using edge curve matching for pinpoint planetary landing. *Acta Astronaut*, 2018, 146: 171–180
- 42 Matthies L, Huertas A, Cheng Y, et al. Stereo vision and shadow analysis for landing hazard detection. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, 2008
- 43 Cheng Y, Adnan A. Landmark based position estimation for pinpoint landing on Mars. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotic and Automation*. Barcelona, 2005
- 44 Yu M, Cui H, Tian Y. A new approach based on crater detection and matching for visual navigation in planetary landing. *Adv Space Res*, 2014, 53: 1810–1821
- 45 Yu Z, Zhu S, Ma D, et al. Detection and recognition method for irregular craters on planetary surface (in Chinese). *J Astronautics*, 2013, 34: 320–326 [于正湜, 朱圣英, 马冬梅, 等. 行星表面非规则陨石坑检测与识别方法. *宇航学报*, 2013, 34: 320–326]
- 46 Moghe R, Zanetti R. On-line hazard detection algorithm for precision lunar landing using semantic segmentation. In: *AIAA Scitech 2020 Forum*. Orlando, 2020
- 47 Johnson A E, Huertas A, Wemer R A, et al. Analysis of onboard hazard detection and avoidance for safe lunar landing. In: *IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, 2008
- 48 Crain T, Bishop R H, Carson J M, et al. Approach-phase precision landing with hazard relative navigation: Terrestrial test campaign results of the Morpheus/ALHAT Project. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. San Diego, 2016
- 49 Carson J M, Robertson E, Trawny N, et al. Flight testing ALHAT precision landing technologies integrated onboard the Morpheus rocket vehicle. In: *AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition*. Pasadena, 2015
- 50 Restrepo C I, Chen P T, Sostaric R R, et al. Next-generation NASA hazard detection system development. In: *AIAA Scitech 2020 Forum*. Orlando, 2020

- 51 Braun R D, Manning R M. Mars exploration entry, descent, and landing challenges. *J Spacecraft Rockets*, 2007, 44: 310–323
- 52 Prakash R, Burkhart P D, Chen A, et al. Mars science laboratory entry, descent, and landing system overview. In: IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2008
- 53 Subrahmanyam P, Rasky D. Entry, descent, and landing technological barriers and crewed MARS vehicle performance analysis. *Prog Aerospace Sci*, 2017, 91: 1–26
- 54 Fisher J, Bhattacharya R. Optimal trajectory generation with probabilistic system uncertainty using polynomial chaos. *J Dynamic Syst Measurement Control*, 2011, 133: 014501
- 55 Long J, Gao A, Cui P. Controllable set analysis for planetary landing under model uncertainties. *Adv Space Res*, 2015, 56: 281–292
- 56 Ivanov T, Huertas A, Carson J M. Probabilistic hazard detection for autonomous safe landing. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Boston, 2013
- 57 Yuan X, Yu Z, Cui P, et al. Probability-based hazard avoidance guidance for planetary landing. *Acta Astronaut*, 2018, 144: 12–22
- 58 Witte L. Stochastic modeling of a hazard detection and avoidance maneuver—The planetary landing case. *Reliability Eng Syst Saf*, 2013, 119: 259–269
- 59 Seraji H, Serrano N. A multisensor decision fusion system for terrain safety assessment. *IEEE Trans Robot*, 2009, 25: 99–108
- 60 Ploen S R, Seraji H, Kinney C E. Determination of spacecraft landing footprint for safe planetary landing. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2009, 45: 3–16
- 61 Charpentier A, Moussi A, Lafaille V, et al. 3D web visualization tool to support HAYABUSA2-MASCOT landing site selection process. In: 2018 SpaceOps Conference. Marseille, 2018
- 62 Serrano N. A bayesian framework for landing site selection during autonomous spacecraft descent. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006
- 63 Cohanin B E, Collins B K. Landing point designation algorithm for lunar landing. *J Spacecraft Rockets*, 2009, 46: 858–864
- 64 Simoes L F, Bourdarias C, Ribeiro R A. Real-time planetary landing site selection: A non-exhaustive approach. *Acta Futura*, 2012, 5: 39–52
- 65 Parreira B, Vasconcelos J F, Montaña J, et al. Hazard detection and avoidance in ESA lunar lander: Concept and performance. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Boston, 2013

Research progress of autonomous planetary landing site assessment and selection

CUI PingYuan^{1,2,3}, GE DanTong^{1,2,3}, ZHU ShengYing^{1,2,3} & ZHAO DongYue^{1,2,3}

¹ *Institute of Deep Space Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

² *Key Laboratory of Autonomous Navigation and Control for Deep Space Exploration, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China;*

³ *Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing 100081, China*

To address potential safety threats posed by various terrain conditions on the planetary surface, the recent development of autonomous planetary landing site assessment and selection methods is systematically reviewed in this paper. First, the mission characteristics and main technical challenges in landing site selection are summarized. Critical factors to be considered in landing site selection are introduced together with the selection process and applications of the Safety Index method. Then, an overview of the research progress of autonomous landing site assessment and selection methods is provided. Past missions and theoretical developments are analyzed from the aspects of hazard detection, terrain safety assessment, and comprehensive landing site selection. Lastly, based on the growing requirements of mission intelligence in future planetary exploration, several suggestions and recommendations with regard to landing site selection technology development trends are proposed.

planetary exploration, landing site selection, hazard detection, autonomous planning, safety index

doi: [10.1360/SST-2020-0228](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0228)