

深空探测人工智能技术应用及发展建议

叶培建¹, 孟林智², 马继楠², 王强², 李莹², 杜宇², 王硕¹

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094;
2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 深空探测任务的探测目标距离地球越来越远, 测控延时逐步增大, 并且目标的先验知识有限, 在遥远、未知、不确定环境下开展科学探索对探测器的自主性能需求日益强烈。随着人工智能技术的快速发展并逐步实用, 在深空探测领域中应用人工智能技术提高和改进航天器自主性也将成为必须和可能。简要介绍了人工智能技术的发展历程, 分析了航天领域中人工智能技术的应用实例, 重点结合规划的深空探测任务特点和应用场景, 梳理分析了各具体任务对人工智能技术应用的潜在需求, 并提出了对深空探测人工智能技术应用的一些看法和发展建议。

关键词: 深空探测; 人工智能; 应用需求; 发展建议

中图分类号: V476.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)04-0303-14

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.04.001

引用格式: 叶培建, 孟林智, 马继楠, 等. 深空探测人工智能技术应用及发展建议[J]. 深空探测学报, 2019, 6 (4): 303-316.

Reference format: YE P J, MENG L Z, MA J N, et al. Suggestions on artificial intelligence technology application and development in deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (4): 303-316.

引言

深空探测一般指对月球及以远的天体进行探测的活动。中国的深空探测起步于月球探测, 按照探月工程“绕”“落”“回”三步走的规划, 自2003年启动探月工程一期研制以来, 已成功实施了5次探测任务, 取得了系列科学和技术成果。除此之外, 目前中国正在按计划进行探月工程三期和首次火星探测任务的研制工作, 即将在今后两年内发射实施^[1]。

国务院新闻办公室于2016年12月发表的《2016中国的航天》白皮书中明确指出:“深空探测……开展火星采样返回、小行星探测、木星系及行星穿越探测等的方案深化论证和关键技术攻关, 适时启动工程实施, 研究太阳系起源与演化、地外生命信息探寻等重大科学问题”^[2]。后续探测任务将面临未知的环境, 任务过程更加复杂, 测控延时将大大增加, 采用传统的地面遥控指令控制方式已远远无法满足任务要求。面对未知、复杂多变的环境, 探测器需要具备更高的自主性能和更强的适应能力。

新一代人工智能技术的兴起, 为深空探测未来实现自主化、智能化提供了一定的技术途径, 但也看到, 作为人工智能技术基础的“大数据、多层神经网络、高性能并行计算”等技术, 在深空探测任务中受器上资源等多方面的约束限制, 需结合具体任务的应用场景, 权衡性能提升与系统资源消耗之间的关系, 深入分析具体的应用方向和发展措施。

络、高性能并行计算”等技术, 在深空探测任务中受器上资源等多方面的约束限制, 需结合具体任务的应用场景, 权衡性能提升与系统资源消耗之间的关系, 深入分析具体的应用方向和发展措施。

1 人工智能技术发展趋势

人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的核心目的是用机器模拟人的思维过程, 进而代替人完成相应的工作。目前对人工智能的定义尚无统一的意见, 主要分歧在于对“智能范畴”的理解不统一, 但基本可概括为:“使机器可以像人类一样地感知世界、思考、认知、行动, 让机器做只有人类的智能才可以做的事情。”人工智能技术的发展几经起伏, 近年来, 随着计算机等技术的飞速发展, AI被视为能够引起社会巨变的新兴领域, 各行各业的研究人员聚焦此技术, 取得了系列应用成果。

1.1 发展历程

1956年, 达特茅斯会议标志着人工智能学科的正式诞生, 以冯·诺依曼、图灵为首的科学家试图通过符号化编程实现人工智能。20世纪60年代以来, 人工智能研究随着技术水平的发展, 在瓶颈与突破中曲折前进。20世纪末, 由于硬件能力不足、算法缺

陷等原因,人工智能技术陷入发展低迷期。进入21世纪以来,大数据、云计算等信息技术给人工智能技术发展带来了新的机遇,成本低廉的“大规模并行计算、大数据、深度学习算法、人脑芯片”等催化剂使得人工智能技术的发展出现上升趋势,同时人工智能

技术的发展也给新一代信息技术与工业各领域渗透融合提供了新的动力。纵观60多年来历程,可以看出人工智能技术发展起伏(如图1所示)、应用广泛、现状火热、进步很大,但仍有局限,其前景应慎重对待与深入分析。

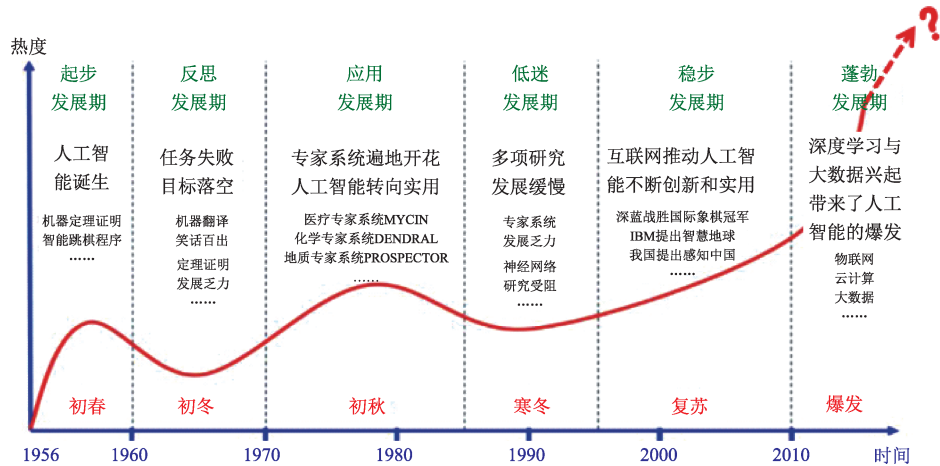


图1 人工智能技术发展历程

Fig. 1 Development of artificial intelligence technology

1.2 成功案例

当今时代,人工智能技术正逐步向“实用”转变,在多个领域中取得了成功的应用,推动了社会的进步和科技的发展。

1) 博弈领域

博弈一直是人工智能技术尝试应用的第一战场,从人工智能诞生之初的跳棋程序,到20世纪末“深蓝”战胜国际象棋冠军,围棋成了人类坚守的最后一个壁垒;而在2016年3月,AlphaGo对李世石围棋赛的完胜,不仅突破了 this 壁垒,还引发了人工智能技术的浪潮,从那个时候起,似乎人人都在谈论“人工智能”。

DeepMind公司研发的AlphaGo之所以能够在围棋博弈中战胜人类,在于它摒弃了以往记忆棋局知识库的方式,而采用了结合深度强化学习和自我博弈训练得到策略网络与价值网络,并结合蒙特卡洛树搜索来学习。在这种方式下,AlphaGo实际上是将记忆人类棋局和自我博弈积累的棋局结合起来进行自我训练,海量的对局使AlphaGo实现了自我进化,初步具备了“直觉感知”“棋局推理”和“新颖落子”的能力^[3]。

2) 无人驾驶汽车

美国高速公路安全管理局将自动驾驶等级分为5个层次,其中前3个层次还有人参与其中;第4个层

次为具有有限条件的无人驾驶,在大部分情况下,汽车自动检测环境并自主判断、执行动作,遇到特殊情况,再把控制权返回给驾驶员;第5个层次为无人驾驶或“全自动驾驶”汽车,即在任何时刻,都由程序进行驾驶。无人驾驶技术的实现主要分2种:①基于个体驾驶行为学习的、有监督的无人驾驶技术;②基于整体驾驶环境大数据分析的无人驾驶技术,分别以特斯拉和谷歌为代表。

特斯拉的无人驾驶目前为半自动驾驶^[4],以车为中心,对周围环境进行全监督模式识别,通过各类感应器感应车辆周围物体,判断其形状、移动速度,在有人监督的情况下学习人类的操作步骤,形成对这些环境的处理方法,并通过软件进行记忆及学习,进而形成无人驾驶的控制参数,实现无人驾驶。谷歌的无人驾驶技术来源于Google-X项目^[5],原型系统由美国斯坦福大学研发,该技术除了在汽车个体上安装各种传感设备了解周围的交通状况外,还通过谷歌的数据中心来处理汽车收集的周围地形的大量信息,在无人驾驶行驶过程中,将车辆信息与周边环境的感应数据进行比对,结合交通规则计算出行驶轨迹,控制车辆前进。

目前国内高新技术企业也已加大对无人驾驶汽车研发和生产的布局。虽然目前处于原型验证阶段,距离量产和应用还有一段距离,但无人驾驶汽车技术正

逐渐成熟。

3) 智能机器人

智能机器人是当前人工智能技术的研究热点。20世纪40年代中后期至今,机器人研究从简单的自动控制系统,逐渐进入人工智能时代。所谓“智能机器人”,一般需具有3个基本要素:①“感觉”用来感知外界环境,采集机器人外部的环境信息;②“运动”用来执行机器人需要发出的动作;③“思考”由计算机来承担大量的数据运算,完成机器人的智力活动。这些要素实质上就是相当于人的眼、鼻、耳等器官,它们的功能可以利用诸如摄像机、图像传感器、激光器、压电元件、行程开关等机电元器件来实现。对运动要素来说,智能机器人需要有一个无轨道型的移动机构,以适应各种不同的地理环境,它们的功能可以借助轮子、履带、吸盘、气垫等移动机构来完成。在运动过程中要对移动机构进行实时控制,这种控制不仅要包括有位置控制,而且还要有力度控制、位置与力度混合控制、伸缩率控制等^[6]。

随着社会发展的需要和机器人应用领域的扩大,人们对智能机器人的要求也越来越高。智能机器人所处的环境往往是未知的、难以预测的,涉及到的是多传感器信息融合、导航与定位、路径规划、机器视觉等技术。近年来上述技术在融合了人工智能技术后,都取得了飞速发展,给机器人装上“大脑芯片”^[7],使其智能性更强,在认知学习、自动组织、对模糊信息的综合处理等方面将会前进一大步。

除上述应用外,人工智能技术还在语音处理、图像处理,交通、机器人、智能穿戴、搜索引擎以及新闻写作等多方面有所应用。当前,“智能+”已经逐步取代“互联网+”成为高科技产业的新业态。

1.3 现状小结

目前,引入深度学习的人工智能技术已经取得了长足的发展,并逐步转向实用,而实用性又推动了其快速发展。从前述的应用实例,可见目前人工智能技术最大的优点在于:①人工智能系统训练时间长,但优化后实际处理问题时间少;②人工智能系统参数设置不需要专业人员,并且其意义并不明确,但处理效果基本会符合事前预期。

同时也注意到,人工智能技术距离好用、易用仍有一定差距,主要差距体现在:

1) 现阶段人工智能算法并非通用算法,特定算法仅在特定领域或应用场景有较好的效果;

2) 人工智能技术的成熟度较低,由于不需要专业人员设计系统参数,对参数意义不了解,对可能造

成重大影响的参数事前控制能力不足;

3) 大数据、复杂的算法使其在应用中对资源的需求较大,限制了其应用场景;

4) 在有人参与的系统中,人工智能的控制权限设置过高,导致人机协同出现问题。如近期的波音737-MAX事故中,飞行员在面临故障时只能检测而无法接管控制权,导致悲剧的发生。

正是因为上述的局限性,人工智能技术的发展和应用仍有很多待研究的内容和进步空间,也存在较大的困难。

2 人工智能技术在航天领域的应用

先进航天国家早在20世纪80年代就着手发展航天器智能自主技术,并在自己的空间探测计划中逐渐增大了对智能自主技术的投入力度。人工智能技术在航天领域的应用主要体现在地面系统和航天器系统的局部应用。

2.1 地面系统中的应用

人工智能技术在地面系统中的应用主要有两方面:一是图像处理与目标识别;二是对卫星的任务规划。

1) 空间天文数据分析

2017年12月14日,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)宣布采用谷歌提供的AI模型对开普勒探测器拍摄的天文图像进行分析,发现了第2个太阳系。科学家用开普勒望远镜之前观测到并确认的1.5万个恒星数据对AI模型进行训练,得到一个卷积神经网络,采用此AI模型辅助判别行星的准确率高达96%^[8]。研究人员把一个从2009—2013年观测到670颗恒星的数据包交给AI识别,结果经过研究人员的研究和验证,确认了2颗新的行星,从而发现了前述的新“太阳系”。

2) 自主任务规划系统

NASA、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)分别在卫星任务规划的应用方面取得了一定的研究成果。其中比较著名的是航天任务规划调度系统(Automated Scheduling and Planning ENvironment, ASPEN)^[9],它是由NASA研制的一种地面任务规划系统,该系统不仅已应用于卫星等航天器任务规划,还应用于航空器、舰艇等领域的任务规划,应用范围广、扩展性好。

2.2 航天器系统中的应用

国际上,在一些航天器任务中已开展了自主技术

和自主规划系统的在轨验证和应用,取得了很多成果。国内多个单位在自主任务规划领域也开展了不同程度研究,但根据目前公开的资料显示,还没有在具体的型号任务上实现星载的实际应用。

2.2.1 地球轨道卫星

1) 地球观测1号

“地球观测1号”(EO-1)是NASA于2000年发射的一颗地球观测卫星^[10],装载了自动科学规划软件(ASE)。该软件对航天器及任务约束进行建模,并在约束范围内针对科学事件进行基于局部探测的任务规划。EO-1卫星可以自动地检测到地球上发生的科学事件,并及时做出响应和自主规划观测任务,来获得更高分辨率的目标区域图像。

2) PROBA小卫星

PROBA小卫星是ESA于2001年10月从印度的斯里哈里科塔发射场搭载发射的星上自主项目(ProJect for On Board Autonomy, PROBA)技术卫星^[11],该卫星主要任务是验证星上资源管理、星上数据处理、卫星运行与控制以及科学数据分配等的自主技术,如星上任务规划、导航和故障探测等。PROBA系统是为实现星上自主能力而设计的一系列软硬件环境和功能的集合。星载仪器包括高分辨率成像光谱仪、轨道碎片分析仪、标准辐射环境监测器以及1个广角照相机和1个分辨率为10 m的相机。

PROBA的星上数据处理能力来源于存储器管理单元、星务管理单元、数据管理单元、资源安全使用单元、观测设备指控单元和观测数据分发单元。其使命阶段分为常规使命阶段(Nominal Phase)和应急使命阶段(Contingency Phase)。PROBA的任务规划能力按照自主程度可以划分为3个层次:①传统的地面规划与指令上注模式,规划方案的执行情况由星上和地面一起实施监控;②半自主模式:地面和星上共同制定观测方案,方案在实施之前必须经过地面的确认;③完全自主模式:地面对来自不同用户的观测需求进行筛选,然后将观测需求上注给卫星,结合星上的实际设备状态进行观测活动的自主规划。

2.2.2 深空探测任务

1) 深空1号

“深空1号”(DS-1)是NASA新千年计划中的一个技术验证项目,它验证了部分自主技术,包括自主导航技术、自主远程决策技术、自主软件测试技术等,开展了一定程度的自主规划、诊断和恢复能力技术验证。

DS-1的自主控制结构体系^[12-13]中最重要的是远程

智能体,它包含4个组成部分:规划与调度模块(Planning and Scheduling, PS)、智能执行体(EX-ECutive, EXEC)、模式识别与故障恢复(Model Identification and Recover, MIR)和任务管理器(Mission Manager, MM)。探测器运行时,PS模块将地面的任务级指令通过一定的算法分解成具体计划,EXEC模块将计划转换分解为更为具体的自主控制指令,并分发给各系统,MIR模块负责识别探测器的飞行状态,确保各阶段、各模块对指令的正确执行,一旦出现故障可及时对系统进行重构。

2) 着陆探测

着陆探测是深空探测的重要方式,能够获取更有科学研究价值的信息,而地形复杂的区域中存在大量的障碍,这会给探测器的安全着陆带来很大的威胁。在遥远天体上,探测器无法完全依赖地面测控和人工干预,需要自主导航、检测与规避障碍,实现安全软着陆。

在已实施的行星着陆任务中,行星表面障碍检测与识别主要依靠环绕飞行阶段获得的光学及表面高程信息,绘制分布图并选择安全着陆区域。2001年,NASA提出在火星着陆器中设计“自主障碍检测与规避系统”^[14],通过探测器拍摄的火星表面主、被动视觉图像信息,在预定的大范围着陆区内自主在线完成障碍检测并选择着陆区,实现自主、安全着陆。此外,日本的“隼鸟号”采样返回探测器^[15]在近地小行星采样过程中采用了基于人造陆标图像的相对导航技术方案。

我国探月工程中“嫦娥3号”的核心任务是实施高可靠高安全的月面软着陆,要求着陆器必须具备自主障碍识别与规避能力。“嫦娥3号”于2013年12月2日发射,经过5天的飞行到达月球并进入环月轨道,最终于12月14日成功着陆月球正面虹湾地区,世界上首次成功实现了利用机器视觉的地外天体软着陆自主避障^[16]。

2019年1月3日上午成功软着陆在月球背面南极-艾特肯盆地冯卡门撞击坑的“嫦娥4号”,因为任务选择的着陆区域高山峡谷交错,整体地形忽高忽低,地形起伏达到了6 000 m。要求“嫦娥4号”必须要有更高的着陆精度,从“粗放型”的着陆方式向“精细化”升级。为了保证着陆的安全,“嫦娥4号”探测器采用了复杂环境动力下降智能自主控制技术,首次完整实施了“智能避障”控制,机器视觉智能感知、位姿机动智能决策、变推力实时执行,“粗精”复合避障优于几百米量级,世界上首次实现了月背软

着陆控制^[17]。

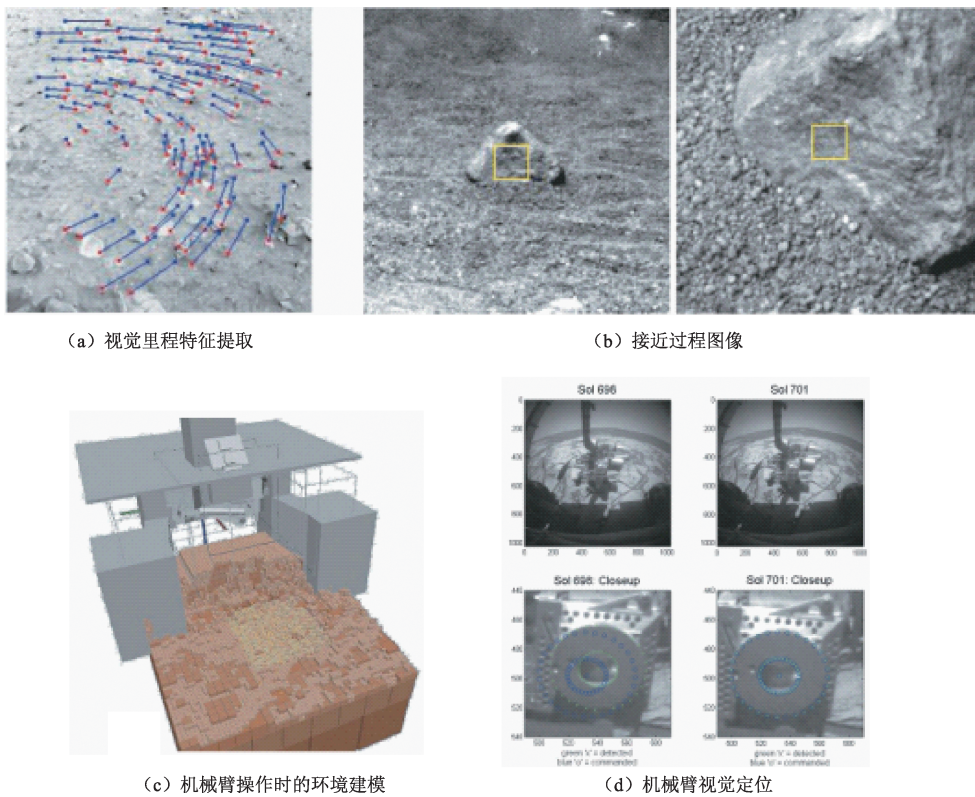
近年来，随着机器视觉以及人工智能技术的发展，人们开始尝试将深度学习、稀疏表示等技术应用于行星探测中，目标检测技术由基于底层的像素、纹理及其他形态学特征发展到更加抽象的高层表示属性。针对面向行星着陆的目标检测而言，这些理论研究展现了巨大的应用潜力，如何结合前沿的人工智能技术构建适合行星障碍物检测的理论体系是未来行星探测的关键技术之一。

3) 巡视探测

经过长达半个世纪的发展，行星巡视探测器（也称行星车）由最初的遥控控制逐步向智能化发展，未来的行星车将具有更强的自主能力，包括更强的探测能力、更快的移动速度、更好的地形适应

能力等。

行星车实现巡视探测的前提是突破环境感知技术，目前常用的技术手段是激光雷达和立体视觉相机。由于立体视觉相机具备视场大、功耗体积小、成本低等优点，在深空探测任务中得到广泛应用。相比于“索杰纳火星车”（Sojourner）、“火星漫游者”（Mars Exploration Rover, MER）和“火星科学实验室”（Mars Science Laboratory, MSL）实现了全立体图像处理，能够进行精细的3D重构。Sojourner每步导航在三维空间中识别20个点，而MER每对图像可获取15 000~40 000个三维点。行星车基于立体图像完成周围环境感知，检测环境中的石块、陡坡及其它地貌特征，通过构建可通行性地图，选取最佳行驶路径，如图2所示。



(a) 视觉里程特征提取

(b) 接近过程图像

(c) 机械臂操作时的环境建模

(d) 机械臂视觉定位

图2 MER自主目标探测

Fig. 2 Autonomous target detection of MER

“嫦娥4号”携带的“玉兔2号”月球车配备了相机、激光点阵器、惯性敏感器和太阳敏感器等，可自主实现移动前及移动过程中的导航定姿定位、环境感知、避障规划、紧急避障、运动协调控制和安全监测等，确保月球车按照地面指令要求安全行驶到目标点。

从自主能力上看，美国MER和MSL的自主能力逐级提高，针对控制结果长时延反馈进行了特殊设计，但其工作约束条件不像“玉兔2号”环境苛刻，主要体现在：巡视区域较为平坦，不必考虑地形遮挡问题，尤其是地形遮挡对休眠唤醒的影响；器上资源较为丰富，器载计算机性能高于“玉兔2号”。

月球背面恶劣的工作环境以及受限的器上资源,使“玉兔2号”从器上自主能力和地面智能操控同时入手,进一步构建了天地一体化的智能设计架构^[19],解决了机构安全控制、可靠释放分离、安全移动、自主热控、休眠唤醒、高效工作等难题。截止到2019年6月,“嫦娥4号”携带的“玉兔2号”巡视器目前已成功完成第6月昼工作,完成了对目标点及移动车辙的科学探测,感知周围的环境和地形。

4) 科学探测

在轨自主科学操作技术是在航天任务功能复杂化和探测数据多样化的情况下提出的。深空探测由于通信距离远,数据传输速率低,数据传输存在很大的时间延迟,导致深空探测器错过一些重要的科学探测机会。例如“旅行者1号”探测器由于没有及时发现火山爆发这一短暂的科学现象,而错过了对“火卫1”火山爆发的观测机会;“伽利略”探测器飞越小行星Ida时发现其有自己的卫星“达克图”(Dactyl),但

却错过了对其进行详细拍摄测量的机会。此外,随着探测器上所携带的仪器数量增加以及探测任务时间的加长,所获得的科学数据量呈指数增长,这样大量的数据不可能全部通过深空网传回地面进行处理,因此探测器应具有科学现象自主识别与规划、科学数据初步分析和筛选的能力。

自主科学探测的研究重点包括在轨实时静态/动态特征识别以及科学观测任务在轨重新规划。1998年,NASA提出早期器载自主科学观测系统^[18],可以由火星车自主识别科学目标,并完成探测。2016年5月,NASA为“好奇号”火星探测器安装了一套器载智能软件(AEGIS)^[19],该软件能够从导航相机图像中识别出科学目标,与任务科学家指定的参数模型相匹配,并立即使用相机对其进行测量,全程无需经过与地球的往返通信。AEGIS提升了对岩石和土壤的探索能力,准确率达到了93%,并且大大缩短了任务时间,显著提高了相机数据收集的速度。

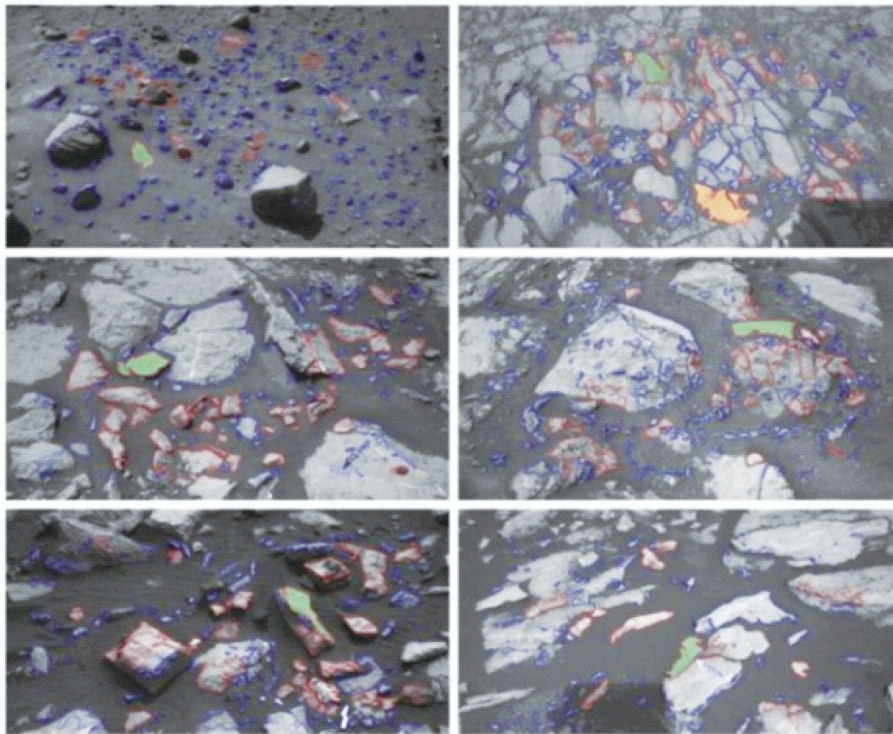


图3 AEGIS智能目标识别

Fig. 3 Intelligent target recognition of AEGIS

2.3 概念研究

除上述提到的在地面系统和航天器应用人工智能技术外,国际上还有一些专家和组织在群体智能、人机协同智能方面持续开展相关概念研究。

1) 群智能技术

空间群智能技术作为一个新概念任务,得到了以

NASA为代表的世界主要航天机构的重视。为了研究人工智能技术在未来空间活动中的应用,NASA戈达德空间飞行中心联合兰利研究中心共同启动了自主纳米技术群(Autonomous Nano-Technology Swarm, ANTS)项目^[20],该项目主要研究如何将群技术应用于航天器和行星车等任务中。小行星勘探任务是

ANTS项目提出的一个典型的智能体协同任务^[21]。该任务计划向小行星带发射1 000颗左右的皮卫星组成任务群，对感兴趣的科学目标进行群智能观测（如图4所示）。

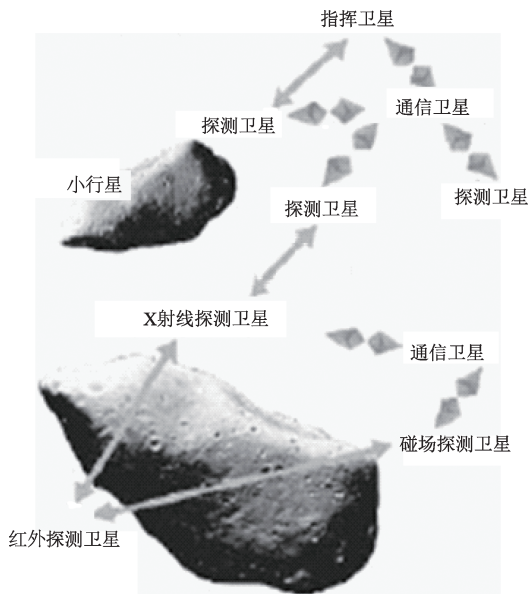


图4 NASA提出的ANTS任务概念
Fig. 4 An overview of NASA's ANTS mission

根据探测需求，任务群中皮卫星包括3类：大约80%的皮卫星为探测类卫星，它们搭载专用仪器，仅收集指定的数据类型，如红外、X射线等；部分皮卫星为指挥类卫星，负责确定任务规则，明确对哪类小行星和数据进行探测收集，协调各探测卫星的分工；第3类是皮卫星是通信类卫星，其任务是协调各卫星之间以及卫星与地面任务控制系统之间的通信活动。3类皮卫星均需要具备完全的自主性才能成功，主要包括自我感知、自我监视、自我调整、自我配置、自我优化、自我修复、自我保护。

ANTS任务软件开发是一项异常复杂的工作，要使成万个交互的航天器具有一定的智能，必须在软件开发方面实现一系列突破，才能实现任务目标。系统的全面自主需求，意味着软件开发可能要采用适应群的社会属性的启发式方法，人工智能是可行的技术途径之一，例如涉及的遗传算法、模糊逻辑和星上规划等技术。

2) 人机交互技术

人机交互技术被美军视为一项重要的颠覆性技术。人机自主协同是指有人系统与无人系统之间在组织、决策、规划、控制、感知等方面既各自进行独立的计算、存储、处理，又通过自发且平等的交互共

融，达成共同目标的群体行为^[22]。

与单纯的无人系统相比，在人机协同系统中，人类智能与机器智能的平行交互与融合有利于实现有人系统与无人系统的双向互补，使系统在执行复杂任务时能够更好地适应人类目标导向而产生更优的性能。人机系统的自主协同研究可对未来战争模式产生颠覆性变革。通过深入研究分布式控制与优化、多智能体系统、网络化系统信息安全等技术，有可能大幅提高人机系统自主协同的指挥与控制效率，满足未来协同作战需求，并推动与促进计算机、人工智能等多学科在基础、技术与应用多层面的交叉融合与协同创新。

2.4 小结

综上，国外航天器的自主化技术发展起步较早，但可称之为人工智能应用，还相对处于初级阶段。目前人工智能技术在航天领域，特别是深空探测的主要应用特点如下：

1) 从技术本身来说，基于深度学习的人工智能技术是未来深空探测应用的发展方向之一，使深空探测器能够更大程度上自主完成探测任务；

2) 人机交互是未来信息技术和人工智能技术研究的重要目标，特别是在未来载人深空探测中，人机交互技术必将发挥重要的作用。

3 深空探测中人工智能技术应用的内涵

3.1 相关术语及定义

目前公开发表的文献中，出现的人工智能、智能体、自动、自主等概念比较多，文章在给出深空探测人工智能技术应用内涵之前，需要将易混淆的术语给出目前的理解。

2001年，NASA自主技术组报告中提出，什么是自主？自主远高于自动化，是一种老练的系统级决策，可以应对不可预期的形势。自动化，是一种低级的机械的决策，针对固定环境设计^[23]。2007年，NASA的Ames研究中心提出，探测器的自主能力，远高于一般的人工智能，能够处理带噪声的传感器数据、不确定环境、有限的资源、复杂的系统、专门的行为等^[24]。自主技术主要包括：规划的同时，要充分考虑时间和资源、不确定性推理、自主学习、人工智能等^[24]。在调研和分析基础上，对自动、自主及人工智能技术有以下理解：

1) 自动是实现自主的基础，自动是利用机械或电子设备替代人类劳动的一种方式，自动并不会自行做出决定，是系统忠实执行预设指令的过程；

2) 自主的最主要特征在于有限度的自行决定和自给自足, 在任务过程中能够利用自身携带资源按任务目标完成任务, 而不需要规定完成任务的具体步骤;

3) 人工智能技术是实现自主的一种技术途径, 但并不是唯一技术途径, 人工智能技术的发展能够较大幅度促进系统自主能力的提升。

3.2 应用内涵分析

深空探测任务不同于近地轨道探测, 它的主要难点和需求体现在^[25]: ①飞达遥远目标开展探测, 受运载能力的约束, 探测器重量规模受限较大; ②器上能源受限, 即使采用核动力, 受规模限制, 可产生的能源依然有限; ③飞行环境严酷, 器上处理器和存储器均需要加固设计, 性能与地面相比差距较大; ④远离地球飞行, 探测器与地面之间的测控数传能力大幅降低, 无法实时测控。

针对深空任务的特点和实际需求, 任务中具体应用人工智能技术, 不仅要考虑是否在该应用方向上, 系统需要具备自主能力, 还要考虑应用人工智能技术带来的自主能力提升所面临的资源消耗代价和整体评估。在上述对自动、自主以及人工智能技术的理解上, 认为深空探测领域中人工智能技术的应用内涵为: “在深空探测任务规模、测控、能源等器上资源

受限的条件下, 采用人工智能技术使探测器具备一定的学习能力和推理能力, 在陌生、未知的不确定环境中实现或提升局部自主功能。”

从上述描述中可知, 人工智能技术在深空探测中的应用是解决探测器局部自主能力的实现和提升, 其应用方向是探测器需要实现自主功能的方向中, 权衡资源约束条件得到的有应用价值的方向。

探测器自主能力需求主要集中在以下方面: ①决策制定要求的速度超过了通信约束(延时、带宽及通信弧段); ②决策时效性强(控制、健康和生命维持), 需由器载系统决策; ③利用器载丰富数据能够获得更好的决策; ④器载决策能够促进鲁棒性并降低系统结构复杂性; ④能够降低系统消耗或提升性能。

结合对空间探测技术路线体系的梳理与分析, 可以总结潜在应用人工智能技术的应用场景主要集中于以下4个方向: ①探测器自身状态感知和管理; ②探测器外部环境感知和建模; ③任务规划、调度; ④群智能体协同操作。

具体而言, 以NASA的2015年空间技术发展路线图^[26]为例, 其中总计16大项中有7项46类技术、101个子项提出了对自主能力的需求, 经梳理分析, 认为其中可潜在应用人工智能技术的共34个子项, 按4个方向应用分类, 如图5所示。

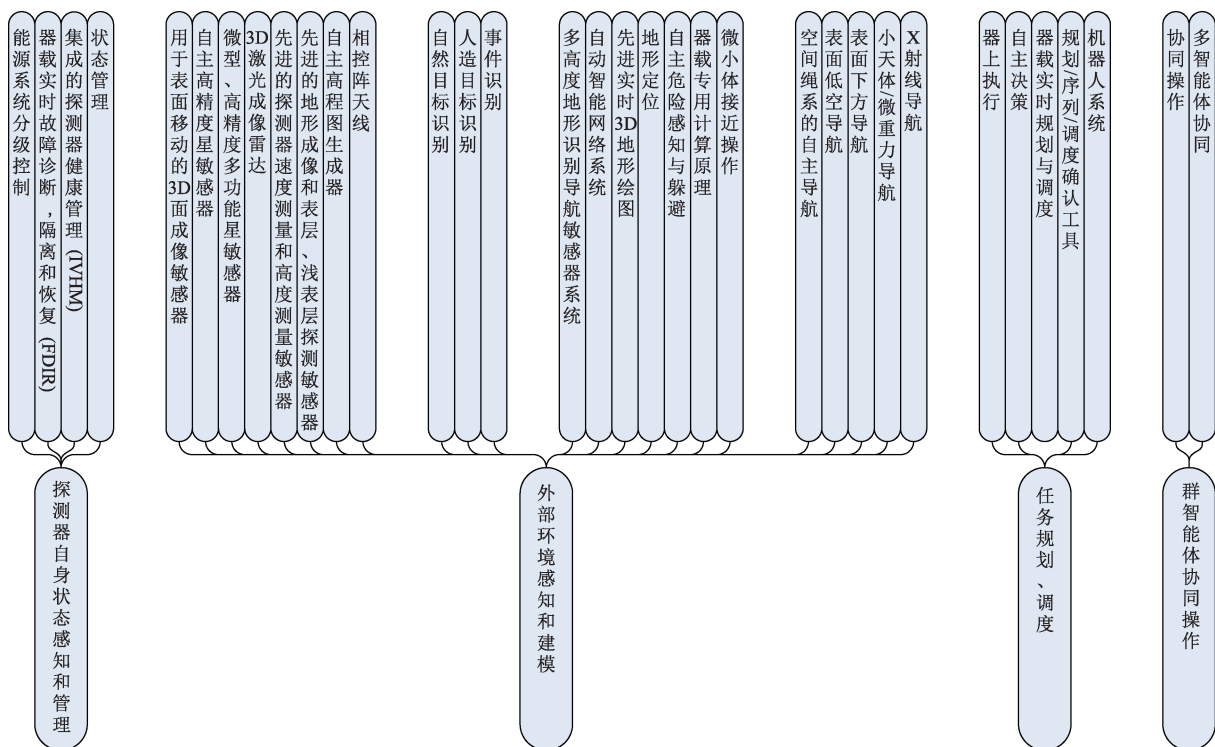


图5 深空探测人工智能技术应用方向梳理
Fig. 5 Artificial intelligence technology application scenarios in deep space exploration

4 深空探测任务对人工智能技术的需求

我国未来深空探测任务将重点建立月球科研站,以便对月球极区开展探测,并开展小行星采样返回探测、火星采样返回探测、木星系及行星际穿越探测等一系列深空探测活动。更远景的任务还包括天王星、海王星、太阳系边际探测等。随着这些任务的实施,将进一步开拓我国深空探测的深度和广度,有必要提前开展后续任务对人工智能技术应用的需求分析,并系统结合任务规划的实施时间,逐步建立我国深空探测人工智能技术发展体系。

4.1 后续月球探测

我国后续将择机发射“嫦娥5号”月球探测器,实施区域软着陆及采样返回任务,全面实现月球探测工程三步走战略目标^[5]。与此同时,也正在规划后续的无人月球探测任务,整体目标是瞄准月球极区,通过多次工程任务的实施建成月球科研站基本型。整个工程将由轨道器、中继星、着陆器、机器人等若干探测器组成,多探测器进行协同工作,可维护、可扩展,具备长期自主运行、短期有人参与的能力,持续开展月球科学研究、技术验证和资源开发利用。

月球后续探测任务复杂性高,探测器数量不断增加,且交互程度高,这必将对地面测控资源需求等带来多方面的压力。解决途径之一就是多个探测器实行智能化组网,在各探测器具备一定程度的自主能力基础上,将信息流汇总,再与地面实施通信;另一方面,科学探测需求往往具有一定的偶然性和不确定性,无法完全预估探测器在未知环境下将会遇到什么样的情况,由于器上能源及测控资源等多方面的限制,远期发展来看,探测器还需具备像人一样的识别科学问题和风险规避能力。

月球科研站的建造和任务实施中,经分析梳理,对人工智能技术的潜在需求体现在3个方面:①快速机动机器人在短时间内完成大范围月面飞跃、缓冲着陆、移动、采样分析等复杂过程,需探测器具备自主避障、自主决策、自主路径规划和智能操作等功能;②智能勘察巡视机器人承担极区月面恶劣地形环境下的大范围移动、载荷布置、精细操作等任务,为完成这些任务机器人需具备较高的智能化能力;③月球极区将有多个探测器同时工作,需选取一个或多个探测器作为智能中枢或中枢备份,对各器进行月面组网、信息互联与控制。

载人月球探测是目前各个航天大国关注的焦点,是在卫星应用和载人航天取得重大成就的基础上,向

更广阔的太阳系空间进行的探索活动。《2016中国的航天》中也明确提出,我国将开展关键技术攻关和相关技术试验验证,提升载人航天能力,为载人探索开发地月空间奠定基础^[2]。

载人月球探测是规模庞大的综合性航天系统工程,难度极大,还需发展各种不同的新能力、新技术、新手段。目前世界各国还没有公布明确的载人探测任务,但在行星表面着陆避障、长时间深空飞行环控生保等方面都保持着持续的研究投入。

从未来机器人及人工智能的发展角度来看,人机协同探测将是未来相当长一段时间内载人月球探测任务的主要特征。以无人为先导,以有人为目标,无人与有人融合发展是必然的选择,人机联合作业是实现模式^[27],人机联合作业可以充分发挥人和机器(机器人、车辆和作业设备)各自的优势,以人为主,充分发挥航天员的主观能动性,机器辅助人类航天员完成各类复杂的地外天体探测作业任务,提升探测系统的判断力、决策力和执行力,扩大深空探测活动的综合效益。载人月球探测人机联合作业方面,对人工智能技术的潜在需求体现在智能机器人与自主控制技术方面,需重点研究图灵智能感知机器人、“类脑”智能机器人等技术^[27],主要技术需求包括:①图灵智能感知机器人技术,主要体现在智能机器人系统感知与测量技术领域,重点包括语音智能感知技术、视觉感知与测量技术、力觉/触觉感知与测量技术、多传感器融合技术等;②“类脑”智能机器人技术,主要研究人脑认知和人工智能领域的相关问题,重点包括人脑神经的运作机理、“类脑”机器人神经启发式模型、“类脑”机器人泛化学学习技术以及基于神经模型的机器人高精度控制技术。

4.2 小行星探测

2019年4月18日,国家航天局面向国内外正式发布了《小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告》,明确了中国深空探测规划中的小行星探测任务目标和方式,即通过一次发射实现一次近地小行星取样返回和一次主带彗星绕飞探测。探测器携带科学载荷,对近地小行星2016HO3开展绕飞探测,随后择机附着小行星表面并采集小行星样品,之后返回地球附近释放返回舱,将小行星样品送回地球,这一过程大约在3年内完成。上述过程完成后,探测器经地球、火星借力,经历约7年时间飞行到达小行星带,对主带彗星133P开展绕飞探测。小行星探测任务将探测2个新的未知天体,面临诸多技术挑战,主要体现在:①地面观测不能获得目标详细信息且不确定性

较大；②小天体弱引力环境下不能建立稳定的自然绕飞轨道；③小天体尺寸较小、地形复杂，要求高精度定点着陆；④小天体距离遥远，任务实施对全自主操控要求极高。

参考目前在轨正在实施采样任务的日本“隼鸟2号”探测器和美国“欧西里斯”小行星探测器，由于各自的目标小行星引力微弱，表面特征存在很大不确定性，因此无论是控制策略和方案设计，都要求有更大的裕度和更高的鲁棒性，以适应其不确定性带来的影响。目标小行星直径很小，星历存在一定的偏差，随着星地距离的增加，地面测定轨的精度将显著降低，特别是在小行星接近和绕飞段，仅依赖地面测定轨结果难以满足探测器与小行星交会绕飞的任务需求。综上，为了保证探测器准确接近、安全附着到小行星表面，探测器应具备高适应性、高鲁棒性和高精度的相对导航与控制能力。此外，由于测控延迟大(30 min以上)，小行星附着取样过程中，地面人为干预困难，小行星探测器设计对强自主能力、高精度能力等提出了更高的要求，小天体着陆采样探测需要解决以下关键问题。

1) 导航设备对目标小天体表面特性的感知能力问题

小天体的表面特性主要包括形态、组成成分、地形地貌和动力学参数等。表面特性既是探测器着陆的依据，又是科学探测的目标，其中小天体的形态、地形地貌、运动学参数直接影响探测器的制导、导航和控制。人类对小天体运行规律、物质组成与分布规律等基础信息的掌握是不全面、不准确的。小天体探测的科学研究需要解决这些问题，而且只有通过近距离探测或着陆探测才能解决这些问题。但是这些问题的答案又是传统导航的前提条件。目标小天体不确定因素多，先验知识少，相对测量导航方式误差来源复杂且多源传感器的数据存在一致性差，所以可通过机器学习的方式，形成对目标和环境的“认知”，以“感知”，而不是“测量”方式获得探测器与目标之间的相对状态及自身信息，提升探测器对环境、目标不确定运动状态和地形地貌的适应性。

2) 导航设备在下降着陆过程中的制导决策能力问题

着陆点选择和向着陆点接近的制导决策是在探测器着陆安全性约束下的科学探测价值最优化问题。构造安全性约束条件需考虑多种因素，如地形粗糙度、岩石尺寸和分布、表面温度、目标小天体的自转轴方向和自转角速度、区域的可见性和显著性等，而且这

些因素随着照明条件、探测器距离小天体表面的距离变化而变化。导航设备在下降和着陆过程中的制导决策能力表现为自主着陆点选择能力、多因素组合优化形成实时轨道规划能力和制导。

近年来，国内外研究机构针对目标特性未知的小天体探测的制导、导航和控制问题开展了研究和试验工作^[12-16]。虽然从观测数据获取设备的构成和原理角度讲，国外研究机构还是在现有的成像模型基础上开展环境感知和相对导航研究工作，但视觉技术已经成为对表面特性未知的小天体接近和着陆过程中相对导航的一种重要手段。机器学习在小天体探测下降和附着段可能将发挥重要作用。这种模式在探测目标物性信息未知和不确定环境中的空间操作具有一定的可行性和灵活性。

针对小行星表面的精细探测及识别，探测器接近、附着、起飞过程的自主导航、制导与控制，多个任务的关键环节对人工智能技术有潜在需求，如：基于多源观测信息的高精度自主导航技术、自主抵近与附着、取样等主动操控技术、自主环境感知与障碍识别技术、精确定点着陆自主控制技术、系统级自主故障诊断与重构技术。

4.3 火星取样返回

火星取样返回任务被认为是1969年阿波罗登月计划以后，最具技术挑战性的空间探索任务。迄今为止，人类尚未实现火星样品的取样返回。

火星取样返回任务意义重大，工程上成功实现火星取样返回，是掌握地外有大气天体上取样返回技术的标志，是一个国家或地区深空探测最高能力和水平的体现。科学上，受着陆设备质量、能源、通信以及工作环境等限制，原位探测的深度和范围有限。如果能将火星岩石或土壤样品带回地球，利用地球实验室丰富的研究手段，将预期获得大量科学成果。

火星取样返回任务与月球取样返回不同，将经历更为复杂的火星大气进入下降与着陆、表面取样、火星表面上升等环节。考虑到火星表面和大气环境的不确定性，对火星表面智能取样、火星上升系统设计提出了新的挑战^[28-30]。该任务将首次尝试一体化智能机器人多点取样，突破复杂未知环境下高效移动、可适应多取样形式的轻巧型模块化设计等一系列机器人、智能控制技术，任务如成功实施将标志着我国完全具备远距离地外天体资源开发和利用的能力，为后续更为复杂的无人/有人深空探测任务提供先进的技术途径和技术储备。关键的任务环节主要有以下几个方面。

1) 样品取样环节

火星样品是火星取样返回任务最核心的成果，需要设计精巧的火星样品自动取样封装装置、转移机构、样品密封容器等设备，既需要它们能够自动精确配合，又要满足火星样品的选择、分类、存放和转移等功能。由于火星环境复杂性及测控条件的约束，探测器需具备智能取样封装能力，探测器在轨根据地面指定的取样目标任务，自主根据工作环境和自身状况进行智能判断自我进行目标修订和任务决策，在保证安全的前提下完成取样封装任务。

2) 交会对接环节

火星轨道交会是火星取样返回任务的必要环节，不同的系统技术路线均需要在环火轨道完成样品容器与轨道器的自主交会环节。其面临的主要技术难点有：①火星与地球距离遥远、地面测控能力有限、存在较大的通信时延，所以交会任务需依靠火星环绕器自主完成，要求轨道器具备极高的自主能力；②轨道器需具备较大的轨道调整能力，上升器的动力系统在技术途径选择上，固体发动机和液体发动机等方案均可满足工程任务要求，但无论采用何种推进方式，受限于上升器的重量规模等限制，入轨的部分无轨控能力并且仅具备姿态微调能力，所以都需要轨道器主动、自主地完成与上升器的定位与交会；③交会方式需采用无对接捕获机构，控制精度要求高，受上升器规模的限制，上升器无法安装完整的交会对接机构，仅能安装交会过程合作目标引导信标等设备，将导致对接初始条件要求较高，对逼近靠拢段的测量和控制精度要求较高。

火星取样返回任务计划在2030年前后才实施，具体方案也尚在深化论证中，还有时间对任务中可应用人工智能技术的环节进行识别与系统规划，针对上述关键环节和技术难题，潜在的人工智能技术应用需求主要包括：①移动巡视采样，可配置更高精度用于自主表面巡视和科学目标识别的三维成像传感器、先进的地形成像和表层/浅表层探测传感器，依靠这些传感器要自主实现自然目标识别、事件识别、实时三维地形地图建模、自主危险感知与躲避等功能；②样品采集、封装与传递，可配置用于精细操作和结果评估的传感器单机设备，实现人造目标识别和建模，为样品传递确定环境信息，通过器上自主决策和规划调度系统，确定样品采集的位置、方式、数量及传递路径。

4.5 木星系及更远边际探测

我国已规划了2030年前后实施木星系及行星穿

越探测任务^[2]，为实现木星及其以远行星穿越探测的使命，需要经历地木转移段，在抵达木星前木星探测器和行星穿越器相分离；行星穿越器在木星借力后向天王星飞去，木星探测器制动减速后被木星捕获开始木星系环绕；木星探测器对木星进行环绕探测后，同时对“木卫1”“木卫2”“木卫3”“木卫4”进行飞越探测，然后通过木星系内借力飞行抵达“木卫4”，被“木卫4”制动捕获后开展环绕“木卫4”探测。

后续远景的太阳系边际及其附近区域是距离人类最近的天际区域，是人类开始恒星际探测的第一步^[3]。为直接观测这些离子的相互作用，发射探测器到达太阳系边际进行科学探测是最直接、最有效的手段。太阳系边际探测具有飞行距离远、任务周期长、探测环境未知多变、能源与动力要求高等特点，实施难度极大，国际上尚未专门针对太阳系边际开展探测活动。部分深空探索任务在预定目标完成后，进行了任务拓展，继续飞往更遥远的太阳系边际，包括美国的“先驱者10号”（Pioneer 10）、“先驱者11号”（Pioneer 11）、“旅行者1号”（Voyager 1）和“旅行者2号”（Voyager 2）以及“新视野号”（New Horizon）等。

与月球、火星等探测任务相比，木星距离地球更远，造成木星探测任务的通信时延更大，在最大地木距离时单程通信时间可达约53 min，关键飞行阶段地面无法对探测器进行实时控制，需要器上自主完成特定动作。此外，由于太阳、地球、木星和探测器4者相对位置变化，存在天体遮挡、日凌等器地通信链路中断的情况。因此，木星以远乃至太阳系边际的探测，将面临超远距离、超长时间飞行探测的难题。对于这类远距离深空探测任务，探测距离远、探测目标远、任务周期长、所处环境动态多变、与地面通信存在较大时延，利用地面测控站进行探测器的遥测和遥控已经很难满足探测器操作控制的实时性和安全性要求。为了实现太阳系边际探测在轨自主运行和管理，必须突破自主任务规划、自主导航、自主控制、自主故障处理等系列核心技术。

此外，对于这些探测距离遥远的任务，仅能提供极低的星地测控带宽，超长的测控距离及延时，难以满足任务过程中执行复杂任务控制及数据回传的需求，也无法及时处置在轨故障，严重威胁到整器的安全；而且任务规划、任务执行、定期自检、故障检测及隔离，能源管理、整器热控等控制如果完全依赖地面，需要消耗巨大的人力物力。因此，针对未来距离遥远的这类深空探测任务需重点开展探测器自主运行与管理技术研究，确保探测器具有整个任务段的自主

管理、自主导航能力。主要研究方向是在器上计算机能力足够的前提下，采用基于目标天体成像和自主轨道外推的自主导航定位策略，开展探测器的自主定位与导航，从根本上解决上下行时间延迟、天体遮挡、日凌等条件对天地交互过程带来的风险，减少地面测定轨较大误差时存在的风险，保证轨道安全。此外，需利用人工智能技术使探测器能够自主发现可能出现的、有意义的科学现象，自主开展科学观测，并能够进行长周期的自主科学任务规划，让探测器具有未知环境中的科学探索能力，丰富任务的科学内涵。

4.6 小结

随着深空探测器对安全性、自主性的需求增长，

对自主运行技术的需求越来越明显。NASA 已经宣称：在下一个 10 年里所有类型的探测器都将引入更多的先进集成管理技术，使探测器越来越智能，能够实现执行系统级自评估、规划并执行其任务、管理自身健康并确定修复措施、与探测器上或地面人员交互和/或提供建议等功能^[12]。

我国在深空探测领域取得了一些进展和突破。展望未来，随着我国科技水平的不断提升，深空探测的深度和广度将不断拓展。后续已规划了 2030 年前的多个探索任务，针对各项任务对人工智能技术的需求，结合任务实施时间与难度，梳理了各次任务中潜在应用人工智能技术的环节及层级，具体如图 6 所示。

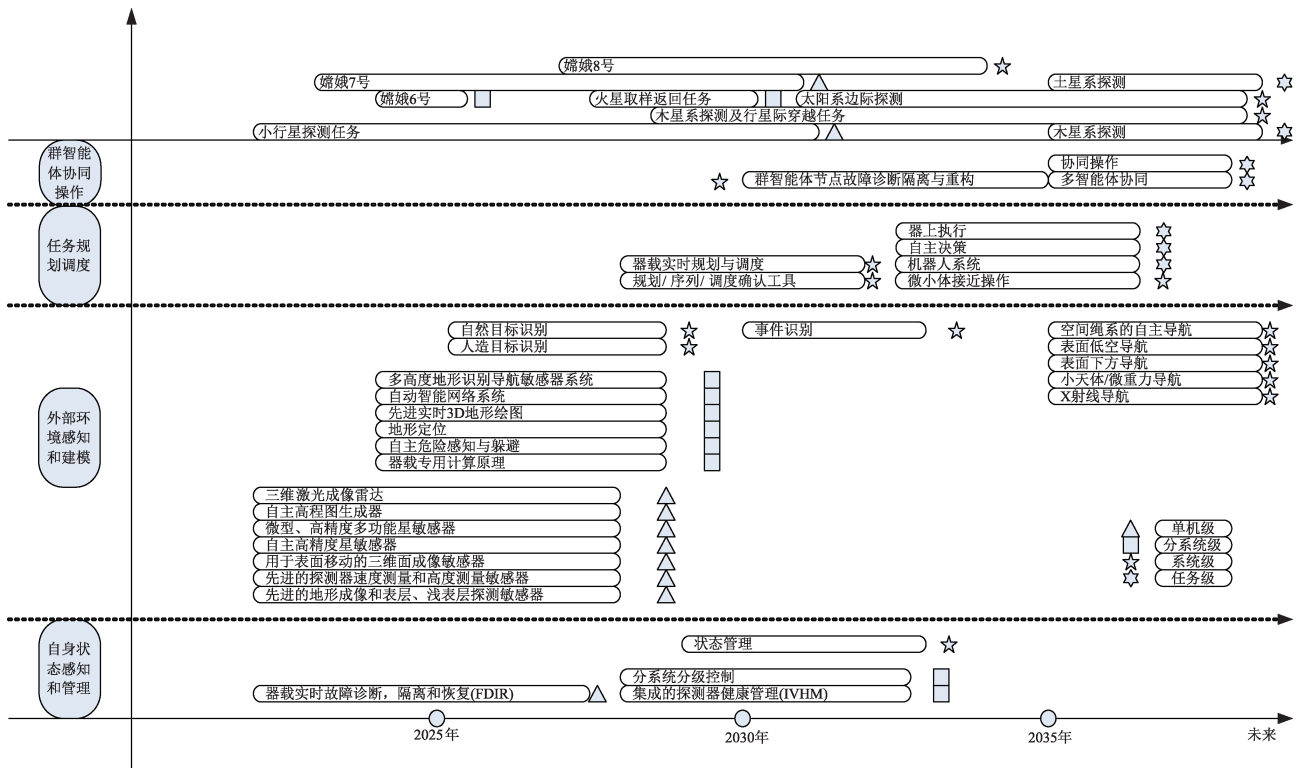


图6 深空探测领域人工智能技术应用需求梳理

Fig. 6 Application demand of artificial intelligence technology in deep space exploration

5 发展建议

人工智能技术经过 60 多年的发展，取得了重大进步，但总体上还处于初级阶段。我国人工智能技术提出得早，发展前慢后快，已有诸多成功应用实例，但距离“好用、全面用”还有诸多瓶颈技术问题，特别是在航天领域应用相对较弱，面临很多使用约束。

深空探测是当今世界高新科技中极具挑战性的领域之一，是众多高新技术的高度综合。随着深空探测任务数量的增加和科学任务的复杂化，传统航天器的

操作和控制技术受到越来越多的限制，要求探测器具有一定的自主能力，具有响应环境不确定性的能力，即面对危险时能够自主拓展人的先验知识完成探测任务。自主技术是深空探测任务实现面临的一个核心、共性关键技术，涉及的要素有“人、地面自动化设备、器上智能自主设备以及探测环境”等。针对人工智能技术的具体结合及应用，需要充分分析实际需求，结合任务剖面，综合考虑器上硬件资源、软件能力和地面协同能力等，深入梳理、分析具体需应用

的环节和过程，系统评估人工智能技术带来的效果、好处和代价，有所为有所不为，使人工智能技术应用得到良好的发展。为此，建议发展如下几个方面。

1) 稳步提高探测器自主性能

深空探测器后续的主要需求还是自主化，具体聚焦于环境感知、状态感知、任务规划等方向。探测器系统设计之初就必须从任务需求出发，根据先验知识和对任务过程中不确定性的预估，优化设计环境和状态感知探测设备，使之能够适应探测器的自主性能需求，更有效地支持相关软件和算法。

2) 利用专业优势，适度发展应用深度学习算法

以深度学习算法为代表的人工智能算法，其特点在于由计算机总结特征，有足够“大”样例即可，不需要太多专业人士的人力，能够总结出大量人类认识不到的特征，准确率高，但需要大量样例。深空探测领域应用人工智能，应充分利用深空探测多年来国内外的专业经验和专业知识，采用传统算法处理各系统中确定的部分，采用深度学习算法处理不确定的部分。降低算法的复杂程度和对样例的需求。

3) 牵引器载软/硬件能力的协同发展

深空探测器应用人工智能最主要的技术瓶颈在于器载设备的性能约束。在采用专业知识和适当降低精度的方式简化算法的同时，应充分利用深空探测器对人工智能技术应用的需求，牵引器载软/硬件设备的能力提升，解决深度学习神经网络大规模计算量问题。

4) 充分借鉴地面人工智能技术发展经验，探索“通用-专用-通用”的发展应用路线

深空探测任务中应用人工智能技术，应充分借鉴地面人工智能技术应用的成果和发展经验，首先利用地面发展成熟的人工智能芯片，根据深空探测任务约束和具体需求，对地面人工智能算法简化、移植、应用于探测器；即将地面应用的“通用成果”转化为深空探测器专用的器载软硬件；并逐步发展专门适用于探测器的软硬件，使其由地面转化的专用软硬件，转化为普遍可适用于深空任务的通用化探测器软硬件。

5) 充分积累深空探测数据样本，构建地面数据支撑与仿真验证平台

目前人工智能技术发展主要是大数据的支持，深度学习利用的神经网络模型越庞大，需要的数据量就越大。而实际深空探测任务的数量及种类却相对匮乏，全世界范围内也很有限，后续建议围绕深空探测任务实际需求，争取国际合作，尽可能利用现有的资源，逐步建立覆盖系统、分系统、单机、部组件的设

计数据、地面测试和试验数据、在轨飞行数据的全周期、全流程、全要素的数据支撑平台。在探测任务执行之前充分利用地面或空间望远镜获取探测目标特性数据，逐步建立接近真实任务场景，获得大量样本供人工智能系统学习，以更好地支撑任务设计与实施。

参 考 文 献

- [1] 叶培建, 邹乐洋, 王大铁, 等. 中国深空探测领域发展及展望[J]. 国际太空, 2018, 478(10):6-12.
YE P J, ZOU L Y, WANG D Y, et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. Space International, 2018, 478(10):6-12.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 《2016中国的航天》白皮书[EB/OL]. (2016-12-27)[2019-7-2]. <http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/34102/35723/35727/Document/1537102/1537102.htm>.
- [3] CHEN X J. The Evolution of computing: alphago[J]. Computing in Science and Engineering, 2016, 18(4):4-7.
- [4] BEIKER S. History and status of automated driving in the United States[M]. Switzerland: Springer, Cham, 2014.
- [5] LUO J, YAN B, WOOD K. Inno GPS for data-driven exploration of design opportunities and directions: the case of google driverless car project[J]. Social Science Electronic Publishing, 2017, 139(11): 111416.
- [6] 孟庆春, 齐勇, 张淑军, 等. 智能机器人及其发展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, 34(5):831-838.
MENG Q C, QI Y, ZHANG S J, et al. Intelligent robots and development[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(5): 831-838.
- [7] 辰序. 芯片植入大脑思想控制电脑[J]. 科学之友旬刊, 2004(11): 22-22.
- [8] SHALLUEC J, VANDERBURG A. Identifying exoplanets with deep learning: a five-planet resonant chain around Kepler-80 and an eighth planet around Kepler-90[J]. Astronomical Journal. 2018, 155(2): 1-21.
- [9] ESTLIN T, FISHER F, MUTZ D, et al. Automated planning for a deep space communications station[C]//Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit: IEEE, 1999.
- [10] UNGAR S G, PEARLMAN J S, MENDENHALL J A, et al. Overview of the Earth observing one (Eo-1) mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1149-1159.
- [11] BURNS R, MCLAUGHLIN C A, LEITNER J, et al. TechSat 21: formation design, control, and simulation[C]//Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2002.
- [12] 王大铁, 孟林智, 叶培建, 等. 深空探测器的自主运行技术研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(6):1-10.
WANG D Y, MENG L Z, YE P J, et al. Research of autonomous operation technology for deep space probe[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(6):1-10.
- [13] BERNARD D, DOYLE R, RIEDEL E, et al. Autonomy and software

- technology on NASA's Deep Space One[J]. IEEE Intelligent Systems and their Applications, 1999, 14(3): 10-15.
- [14] JOHNSON A, CHENG Y, MONTGOMERY J, et al. Realtime terrain relative navigation test results from a relative environment for Mars landing[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Kissimmee: AIAA, 2015.
- [15] LAURETTAD S. Application of machine-learning algorithms for on-board asteroid shape model determination[R]. CA, USA: JPL, 2018.
- [16] 叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 543-558.
YE P J, HUANG J C, SUN Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. Scientia Sinica Technological, 2014, 44(6): 543-558.
- [17] 叶培建, 孙泽洲, 张焯, 等. 嫦娥四号探测器系统任务设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(2): 6-19.
YE P J, SUN Z Z, ZHANG H, et al. Mission design of Chang'e-4 probe system[J]. Sci Sin Tech, 2019, 49(2): 6-19.
- [18] CASTANO R, JUDD M, ESTLIN T, et al. Autonomous onboard traverse science system[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana: IEEE, 2004.
- [19] 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 & Technology, 2012, 3(3): 1-19.
- [20] CURTIS S A, TRUSZKOWSKI W F, RILEE M L, et al. ANTS for the human exploration and development of space[C]//In Proceeding IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana: IEEE, 2003.
- [21] CLARK P E, CURTIS S A, RILEE M L. ANTS: applying a new paradigm to lunar and planetary exploration[C]//In Proceeding Solar System Remote Sensing Symposium. Pittsburgh, Pennsylvania: Solar System Remote Sensing, 2002.
- [22] WORK O R, BRIMLEY S. 20YY: preparing for war in the robotic age[R]. USA: Center for a New American Security, 2014.
- [23] BEN S. The role of autonomy in space exploration, manager, NASA report, autonomy technology program[R]. USA: NASA, 2001.
- [24] RANDOM C, SCHUH V S. Lunar and Mars exploration: the autonomy factor[R]. USA: 2008 SAE International, 2008.
- [25] FONG T. Autonomous system NASA capability overview[R]. USA: NASA, 2018.
- [26] NASA. Technology Roadmaps[EB/OL]. (2015) [2019-7-2]. <https://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html>.
- [27] 叶培建, 果琳丽, 张志贤, 等. 有人参与深空探测任务面临的风险和技术挑战[J]. 载人航天, 2016, 22(2): 143-149.
YE P J, GUO L L, ZHANG Z X, et al. Risks and challenges of manned deep space exploration mission[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(2): 143-149.
- [28] 孟林智, 董捷, 许映乔, 等. 无人火星取样返回任务关键环节分析[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 114-120.
MENG L Z, DONG J, XU Y Q, et al. Analysis of key technologies for unmanned Mars sample return mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 114-120.
- [29] 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.
- [30] 饶炜, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星着陆探测任务关键环节技术途径分析[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 121-128.
RAO W, SUN Z Z, MENG L Z, et al. Analysis and design for the Mars entry, descent and landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 121-128.
- [31] 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): 1-16.
WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the solar system boundary[J]. Science Sinica Information, 2019(49): 1-16.
- [32] LORENZ A D, OLDS R, MAY A, et al. Lessons learned from OSIRIS-REx autonomous navigation using natural feature tracking [C]//2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2017.
- [33] MARIO C, DEBRUNNER C. Robustness and performance impacts of optical-based feature tracking to OSIRIS-Rex[C]//39th Annual AAS Guidance and Control Conference. USA: AIAA, 2016.
- [34] GASKELL W R. Optical navigation near small bodies[J]. Spaceflight Mechanics, 2011(140): 1705-1717.
- [35] United States Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap, FY2013-2038 report[R]. USA: United States Department of Defense, 2013.
- [36] CURTIS A S, MICA J, NUTH J, et al. ANTS (autonomous nanotechnology swarm): an artificial intelligence approach to asteroid belt resource exploration[C]//In Proceedings of International Astronautical Federation, 51st Congress. [S.l.]: IAF, 2000.
- [37] TRUSZKOWSKI F W, RASH L J, ROUFFA C, et al. Asteroid exploration with autonomic system[C]//In Proceedings of 11th IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS), Work-shop on Engineering of Autonomic Systems (EASe). Brno: IEEE, 2004.
- [38] JONSSON K A, MORRIS A R, PEDERSEN L. Autonomy in space exploration: current capabilities and future challenges[C]//2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2007.
- [39] COCAUD C, KUBOTA T. Autonomous navigation near asteroids based on visual SLAM[C]//Proceedings of the 23rd international symposium on space flight dynamics. Pasadena, CA: JPL, 2012.
- [40] BIESIADECKI J J, MAIMONE W M. The Mars exploration rover surface mobility flight software: driving ambition[C]//2006 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2006.
- 作者简介:
叶培建(1945-), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要研究方向: 飞行器总体、图像处理、模式识别等。
通信地址: 北京市 2417 信箱 1 分箱(100094)
电话: (010)68197051
E-mail: evan3210@sina.com;
王强(1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 深空探测总体设计。
本文通信作者。
通信地址: 北京市 5142 信箱 112 分箱(100094)
电话: (010)68745341
E-mail: 17746590307@126.com

Reconfigurability Evaluation and Autonomous Reconfigurable Strategy of Deep Space Probes

XU Heyu¹, WANG Dayi², LIU Chengrui¹, LI Wenbo¹, FU Fangzhou¹, ZHANG Kebei¹

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In view of the severely limitation of resources (including computing resources, hardware resources and energy resources) and unmaintainable characteristics in the process of deep space exploration, the comprehensive evaluation method and autonomous reconfigurable strategy of deep space probes are studied. In this paper, the reconfigurability of the deep space probe control system is considered in the ground design stage, and the quantitative comprehensive evaluation index of the system reconfigurability is given.

The autonomous reconfigurable strategy is given based on the proposed evaluation index, which improves the operation of the control system of the deep space probe from the perspective of design and achieves the goal of autonomous fault handling and autonomous operation of deep space probes.

Key words: deep space probes; reconfigurability evaluation methods; autonomous reconfigurable strategy

High lights:

- The operation of the control system of the deep space probe is improved from the perspective of design and the goal of autonomous fault handling and autonomous operation of deep space detector is achieved.
- A comprehensive quantitative reconfigurability evaluation method is proposed, which takes the effects of system controllability, tracking performance and robustness on the reconfigurability into consideration.
- The autonomous reconfigurable strategy of self-healing control method is designed based on the comprehensive reconfigurability evaluation index.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]

(上接第316页)

Suggestions on Artificial Intelligence Technology Application and Development in Deep Space Exploration

YE Peijian¹, MENG Linzhi², MA Jinan², WANG Qiang², LI Ying², DU Yu², WANG Shuo¹

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The detection target of deep space exploration mission is further and further away from the earth, the time-delay of TT&C increases gradually, and the priori knowledge of the target is limited. Therefore, the autonomous performance of the explorer is increasingly required to implement scientific exploration in a distance, unknown and uncertain environment. With the development and application of artificial intelligence technology, it is necessary and possible to apply artificial intelligence technology to improve spacecraft autonomy in the field of deep space exploration. In this paper, the development of artificial intelligence technology is introduced briefly, the application of artificial intelligence technology in the field of space flight is analyzed. According to the characteristics and application scenarios of the future planning of deep space exploration, the potential demands on the application of the artificial intelligence technology in the task are analyzed, and some views and development suggestions of the applications of artificial intelligence technology to deep space exploration are proposed.

Key words: deep space exploration; artificial intelligence technology; application demands; development proposal

High lights:

- Point out the essential requirements of improving the autonomous capability of the follow-up deep space exploration missions.
- Summarize the connotation of artificial intelligence technology application in deep space exploration.
- Summarize the application requirements of artificial intelligence in deep space exploration.
- Put forward some suggestions on artificial intelligence technology application in deep space exploration.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]