

太阳系边际探测任务人工智能技术研究

张 哲^{1,2}, 唐玉华², 郑祚修¹, 乔 栋¹, 陈 辉³, 张天柱⁴

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 深空探测实验室, 北京 100089; 3. 上海航天技术研究院, 上海 201109;
4. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 合肥 230026)

摘 要: 太阳系边际探测对取得重大科学发现, 推动战略性、前瞻性技术突破和提升人类空间探索能力均具有重要的意义。在介绍太阳系边际探测任务定义内涵和规划的基础上, 就任务特点进行分析, 对当前面临的需求与技术挑战进行研究, 并对其有待突破的探测数据智能处理, 环境、事件及状态智能感知与控制, 探测任务智能规划, 轻量化与可靠性智能算法等太阳系边际探测任务的人工智能技术进行了系统论述, 可为中国太阳系边际探测等深远空间探测任务的规划论证与研制实施提供参考。

关键词: 太阳系边际; 人工智能; 任务特点; 技术挑战

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)06-0523-15

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20220100

引用格式: 张哲, 唐玉华, 郑祚修, 等. 太阳系边际探测任务人工智能技术研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(6): 523-537.

Reference format: ZHANG Z, TANG Y H, ZHENG Z X, et al. Research on artificial intelligence technology for Solar system boundary exploration missions[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(6): 523-537.

引 言

深空探测是指发射卫星或探测器, 对月球及以远天体或空间开展的探测活动。它是人类探索宇宙和生命起源与演化、开发和利用深空资源、拓展生存空间的必然途径。世界各国的深空探测都遵循由近及远、由易到难的发展规律, 经历了从月球到火星和金星为代表的近地行星探测, 再到木星、小行星、彗星等系内其它天体的探测, 逐渐到系外恒星际空间探测的发展历程^[1-2]。太阳系边际及其附近区域是人类开始恒星际探测的第一步, 也是认识宇宙的新窗口, 因此太阳系边际探测作为前沿科技领域备受关注^[2-5]。与一般航天任务不同, 对于太阳系边际这一极远、极暗、极寒的未知区域, 探测任务面临环境更复杂且不确定、任务距离更遥远且周期长、测控时延更大且数传速率低等实际工程约束, 传统探测无法满足太阳系边际探测任务的需求。

近年来, 国内外逐渐深入研究以深度学习为代表的人工智能技术, 可为面临众多挑战的太阳系边际探测任务提供良好的支撑^[6]。值得注意的是, 传统人工智能算法存在训练能耗大、时间长、样本多、算力负担重等问题, 太阳系边际探测任务难以构建复杂环境和

突发事件的离线训练场景, 且可供探测器在线训练的能耗、时间、样本、算力十分有限; 同时, 传统智能算法多为黑箱算法, 直接应用于深远空间的太阳系边际探测任务风险较大。

针对太阳系边际探测任务需求, 亟需突破以人工智能技术为基础的工程应用问题, 使探测器具备更高的自主性与更强的适应能力。本文在概述相关定义内涵的基础上, 针对太阳系边际探测任务特点梳理现有技术所面临的挑战, 分析了该领域有待重点突破的人工智能关键技术。

1 太阳系边际探测

1.1 太阳系边际探测定义

人类早期以行星轨道为界定义太阳系边际, 自 17 世纪哥白尼提出日心说后, 不断发现的行星改变了太阳系的范围, 太阳系边际的概念随着人类认知水平的提升而不断演变^[4]。根据不同因素的影响范围, 目前国际上对太阳系边际的定义主要有两种: 一是考虑太阳风的影响, 太阳系边际位于日球层边缘, 距太阳约为 80~150 AU (日地平均距离, 约 1.5 亿 km); 二是考虑太阳引力的影响, 太阳系边际位于奥尔特云附

近, 距太阳约为5~10万AU^[2]。

目前太阳系边际探测主要针对的是第一种定义的区域, 如图1所示。太阳系边际一般包括日球层顶、日球层鞘和终止激波。太阳风发生作用的区域即日球层, 日球层顶作为太阳风与星际等离子体的交界面, 构成太阳风与星际介质间的压力平衡结构; 超声速太阳风在接近日球层顶时开始减速, 并在其内侧变为亚声速而形成终止激波, 由此标志着太阳系边际的形成; 日球层顶与终止激波之间的区域则称为日球层鞘^[2-3]。日球层的边界随着太阳风的变化而动态变化, 相应的变化幅度据估计达10 AU^[7]。

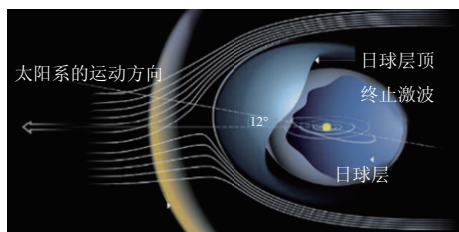


图1 太阳系边际^[2]
Fig. 1 Solar system boundary^[2]

1.2 太阳系边际探测任务

由于太阳系边际探测任务实施难度大, 国际上仅美国有少数探测器在完成预定计划后得以开展更远空间的拓展任务, 抵近太阳系边际进行探测, 相关的探测器如图2所示。但这些均不是针对太阳系边际开展探测的专项计划, 受到轨道设计与有效载荷配置的限制^[4]。

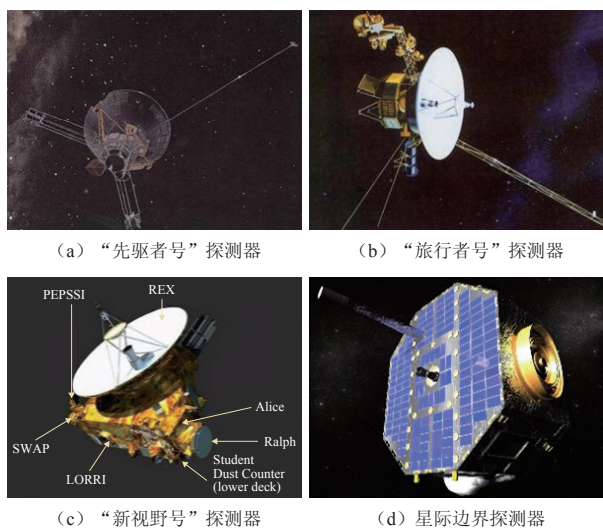


图2 实施太阳系边际探测相关任务的航天器^[2,8]
Fig. 2 Spacecraft related to Solar system boundary exploration^[2,8]

“先驱者10号”(Pioneer 10)和“先驱者11号”(Pioneer 11)作为美国开展的第一次日球层空间探测任务, 在完成飞临主带小行星、木星和土星的设计任

务后向更远的深空飞行, 分别于2003年1月(约80 AU)和1995年9月(约43 AU)与地面无线电通信中断, 实现了对木星、土星等外太阳系天体的首次飞掠探测^[9-11]。“旅行者1号”(Voyager 1)和“旅行者2号”(Voyager 2)同样在完成飞临太阳系行星的设计任务后穿过太阳系边际, 截至2023年8月分别进入约161 AU和约133 AU的临近星际空间, 完成了对外太阳系行星的探测, 为研究宇宙射线、太阳风与恒星际物质的相互作用提供了第一手数据, 预计2025年左右因电力供应不足而与地面中断联系^[12-16]。“新视野号”(New Horizons)搭载了7种科学载荷探测冥王星、冥卫一与柯伊伯带(Kuiper Belt)天体, 实现了冥王星近距离的探测, 预计于2038年飞临日球层边缘^[4,17-18]。除就位探测外, 地球轨道航天器还被用于实施对太阳系边际的遥感探测, 2008年10月发射的星际边界探测器(Interstellar Boundary Explorer, IBEX)捕获了提供有关太阳系边际信息的高能中性原子, 并绘制了太阳系边际的完整影像^[19-20]。

1.3 太阳系边际探测计划

仅通过拓展任务对太阳系边际进行探测, 并不能满足探索未知深远空间的需求。为更准确全面地认识太阳系边际, 设计并开展针对性的太阳系边际探测计划十分迫切。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)等均着手开展并积极推进相关概念研究与探测任务实施^[2-3]。2009年, Wimmer-Schweingruber等^[21]提出星际日球层顶探测器/日球层边界探索计划(Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric boundary Explorer, IHP/HEX)的国际合作项目, 以日球层顶、氢壁和弓激波等日球层外部边界区域为主要科学探索目标, 探测器计划在25年内到达200 AU。2014年, NASA发布《2014—2033年日球物理科学技术路线图(Heliophysics Science and Technology Roadmap for 2014—2033)》, 将太阳系边际作为高优先探测任务之一^[22]。2018年, NASA确定了星际测绘和加速探测器(Interstellar Mapping and Acceleration Probe, IMAP)科学任务, 将对从星际空间边缘流向地球的粒子采样、分析和测绘, 同时研究高能粒子的加速和太阳风与星际介质的相互作用^[23]。2018年, NASA还提出星际探测器(InterStellar Probe, ISP)的研究, 旨在探索和表征日球层和星际空间, 借助下一代放射性同位素热电发电机, 探测器在发射后将持续运行50多年^[24]。

中国同样关注太阳系边际探测任务, 积极布局开展了相关规划论证与预先研究工作。2015年, 中国科学

院空间科学战略性先导科技专项的空间科学预先研究第三批项目启动了星际快车 (Interstellar Express) ——“神梭”探测计划初步方案设计, 中国国家航天局也启动了太阳系边际探测计划的预先研究并联合多家单位开展探测; 2017年, 中国工程院在咨询研究项目中支持了相关探测的研究; 2019年, 民用航天“十三五”技术预先研究项目进一步支持外日球层空间探测系统的关键技术研究^[2-3]。2018年, 在北京召开以“太阳系边际探测的前沿关键问题”为主题的第639次香山科学会议学术讨论会; 2019年, 在北京召开的以“外日球层和临近星际空间探测”为主题的ISSI-BJ国际论坛, 通过相关课题研究和学术会议探讨等方式, 科学目标论证和任务顶层设计等工作不断深化并持续推进^[3]。2020年, 国家航天局正式组织启动了太阳系边际探测工程实施方案的论证。

2 太阳系边际探测任务挑战

作为极远、极暗、极寒的未知区域, 太阳系边际为人类的探测活动带来众多技术挑战。不同于一般近地航天或深空探测任务, 太阳系边际探测具有环境未知、任务复杂、科学载荷多样、探测目标不确定和飞行过程较长等一系列鲜明的特点。太阳系边际探测的任务特点与技术挑战如图3所示。

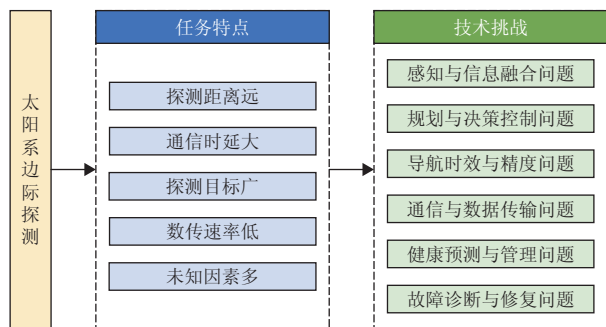


图3 太阳系边际探测任务特点与技术挑战

Fig. 3 Characteristics and technical challenges of solar system boundary exploration mission

2.1 太阳系边际探测任务特点

2.1.1 探测距离远

不管考虑哪种定义方式, 太阳系边际的探测距离都相当遥远。中国太阳系边际探测的近期目标是在2049年前后到达100 AU以远, 远期目标是到21世纪末挑战1 000 AU级的飞行距离, 未来发展的愿景目标则是对5~10万AU的太阳系引力边际开展恒星际探测^[2]。由此可见, 太阳系边际探测的距离远大于目前常规空间任务所涉及的范围, 并将不断向人类从未涉足的更深远空间拓展。受超远探测距离的影响与深空推进技

术的制约, 一般需要数10年的超长任务周期, 这对探测器的设计提出了更高的要求。

2.1.2 通信时延大

作为天地信息交互的唯一手段, 深空测控通信系统为深空探测器的正常运行及充分发挥其应用效能提供不可或缺的重要保证^[1]。及时可靠的通信传输是地面监督探测任务顺利实施并提供规划控制的前提, 其中科学探测数据的传输是研究重大前沿科学问题的基础, 而超远的探测距离使得探测器与地面之间具有比其它探测任务更大的通信时延。当探测器抵达100 AU处时, 单向时延将达到约14 h, 若仅依赖地面设备完成探测器的遥测遥控与通信, 难以满足太阳系边际探测任务的实时性和安全性要求, 需增强探测器自身能力以实现有效操控^[25]。

2.1.3 探测目标广

人类有待通过太阳系边际探测解决众多的前沿科学问题, 这些重大发现需要大量观测数据的支持。目前, 有关太阳系边际探测的前沿科学问题包括太阳风在日球空间的减速与加热、异常宇宙线起源和加速机制、终止激波等日球层动力学和结构特性, 星际介质、星际磁场、星际风和星际尘云等临近星际空间的环境特性、冰巨星及其卫星系统、半人马族小行星、柯伊伯带天体等太阳系天体的特性, 同时广义相对论研究中期待的更多引力实验^[3]。解决这些问题依赖探测器所携带的丰富观测载荷, 其存储的科学观测数据为相关研究提供了必要条件。

2.1.4 数传速率低

太阳系边际探测任务通信距离遥远, 信噪比低且很长时间的任务周期内无卫星中继。尽管近年来随着深空探测数据传输量的加大和大口径天线等技术的发展, 深空通信的数传速率逐步得到了提高, 但由于地面接收设备与深空探测器的通信距离过于遥远, 所能接收到的数传信号十分微弱, 功率受限的问题在深空测控数传系统更为突出, 导致即使频带不受限也无法传输太高的码率^[26]。针对远距离、大时延的太阳系边际探测, 研究高速和中低速均可覆盖的通信传输技术十分必要。

2.1.5 未知因素多

太阳系边际探测任务具有较宽的覆盖面, 探测目标也因探测任务的不同呈现明显的多样性, 其中天体三维形貌、引力场与深空磁场等绝大多数环境参数复杂未知。此外, 太阳系边际探测过程中还可能出现无法预知的突发事件, 例如高价值动态目标和天体火山爆发、陨石撞击、太阳风暴、日冕抛射等珍贵科学事

件,为探测任务增加了更多的不确定性。“旅行者1号”就曾错过了观测木卫一火山爆发的机会^[12]。同时,由于探测任务周期长,探测器自身的状态不能得到绝对的保证,尤其是处于严苛的环境条件下时,存在出现复杂异常状态的可能性。

2.2 太阳系边际探测技术挑战

2.2.1 感知与信息融合问题

太阳系边际探测任务面临多样的探测目标,探测器将携带不同类型的科学载荷执行特定任务,一般可分为场、粒子和光学3类^[27]。由于探测器平台的自身能力与所携科学载荷的手段和精度仍存在不足,为实现有限条件下太阳系边际探测收益的最大化,多源传感器感知与信息融合技术不可或缺。然而,不同来源的传感数据普遍具有层次跨度大、粒度分布广、维度数目多等问题,难以有效融合多类感知信息,导致准确率与可靠性有限,未能深入挖掘探测目标多元特性的内涵。

考虑超远探测距离与超长通信时延,太阳系边际探测任务对探测器平台与科学载荷的功能、精度、体积、探测范围、灵敏度等均有更高的需求^[2]。为完成定位、导航等具体探测,需探测器准确辨识被感知环境、对象及任务特性,自主调整多类传感信息的组合感知策略和融合利用方法等^[6]。

2.2.2 规划与决策控制问题

现阶段的近地与深空探测任务,大多依靠地面监控与规划,地面发出决策与控制指令后由探测器接收并执行。由于太阳系边际所处环境复杂多变且距离较远导致通信时延大,地面无法全程实时掌握探测器的运行状态,从而无法按照地面规划执行复杂的探测,地面决策与控制也无法满足应急快速性、操作灵活性和多模式任务的要求。此外,探测中的不确定性因素对自主规划的信息利用、决策的规则制定与选择、控制的鲁棒性等也有较大的影响。

太阳系边际探测器在飞行过程中,面临资源、时间、并发性以及探测环境不确定、星上资源有限等制约^[28]。为减少对地面的依赖,需探测器根据当前的状态和目标任务做出实时的规划调整与决策,实现局部过程的自主控制;多类智能体还需依靠自主规划与决策协同,保证高效地执行任务^[6]。

2.2.3 导航时效与精度问题

地面无线电导航技术若应用在太阳系边际探测任务中,具有以下局限性:器地通信时延大,导航非实时;器地距离远,测控灵敏度要求高;需全球布置,保证测控不间断;需人工定期值班,但任务周期长^[29]。太阳系边际探测距离极远,地面无线电导航精度将大

幅下降,因此必须减少对地面无线电导航技术的依赖。近年来,随着卫星数量的不断增加及深空探测任务的日趋频繁,导致地面测控系统资源压力越来越大,对探测器自主智能导航需求也日益迫切。

针对地面无线电导航局限性,需太阳系边际探测器通过自身携带的传感器分析当前位置、速度、姿态以及与目标天体的相对关系,根据分析结果给出最小代价方案并对轨道修正,根据修正后的情况对感知模型、导航模型进行自适应优化,不断提高飞行过程中运动状态感知与轨道修正的准确性。

2.2.4 通信与数据传输问题

深空测控系统作为深空探测任务中探测器跟踪测量、监视控制和信息交换的专用系统,具有重要的作用^[30]。就太阳系边际探测任务而言,其测控通信具有信号空间衰耗大、传输时延长、传播环境复杂等特点。目前针对深空测控通信时延、深空测角与测控弧段等问题,国内外深空测控通信网相关研究均集中在加大深空站天线口径、提高射频频段、探索深空光通信技术,而建立深空探测中继站、构建行星际网络、采用量子通信技术等也是深空测控的发展方向^[31]。

针对太阳系边际超远测控通信,为提升整体测控能力和水平,需分析采用Ka频段或X/Ka双频段下行、高效信道编译、降低地面接收系统噪声等方法,突破大口径地面天线组阵、超远距离极弱信号捕获跟踪、高灵敏度极低码率接收解调、含先验知识的数据信息提取及高效压缩编码等关键技术^[2]。

2.2.5 健康预测与管理问题

探测器飞行过程中,硬件性能随时间的持续衰减会对任务造成很大的影响,一旦硬件性能衰减超过设计值,将导致探测器可靠性下降,故障发生的概率提高。目前各类深空探测任务一般不对硬件性能衰减处理,待故障发生后再进行修复。探测器健康预测与管理技术可有效地避免硬件性能的过度衰减,减少由此引起的故障。工程中常应用较为成熟的探测器健康状态监视和管理系统,如健康使用监控系统(Health and Usage Monitoring System, HUMS)和航天器健康管理系统(Vehicle Health Management, VHM)等,但都依赖人工总结专家经验^[32]。

结合太阳系边际探测自主智能需求,针对探测器健康状态,需通过飞行过程的环境数据和运行情况评估当前硬件状态,判断其相对设计估计值是否健康;针对探测器健康管理,需利用冗余和任务规划技术保护有较大健康风险的硬件,通过停机、低功耗模式或减少使用等方式,减缓硬件性能的衰减。

2.2.6 故障诊断与修复问题

太阳系边际探测器所处的环境复杂苛刻,同时面临温差变化大、辐射强烈、星体碎片横行、目标周围气候多变、引力场不规则等动态变化^[33]。这种不利条件可能导致探测器发生故障,影响太阳系边际探测任务的顺利实施。目前常用的自主故障处理方法是利用遥测信息判断探测器各系统的运行状态,诊断探测器的健康状况,并利用探测器冗余和容错技术实时处理^[1,28]。

由于重量、体积、功耗等受到严重限制,深空探测器用于故障诊断的解析冗余关系非常少,将面临有限资源约束下故障诊断不全面的问题,所以需在自主故障诊断算法设计前开展可诊断性的评价,其中基于解析冗余关系的方法是目前可诊断性评价的一个重要方向^[34]。太阳系边际探测无法依赖传统的地面遥测手段,有待结合自主智能技术实现鲁棒性更强且实时性更高的探测器故障检测与修复。

3 太阳系边际探测人工智能关键技术

3.1 探测数据智能处理

太阳系边际探测数据传输距离遥远、下行带宽有限,同时数据量又较大,且太阳系边际探测任务无法依赖地面,从而要求科学载荷的探测数据必须最大限度地在地面处理,在保证质量的情况下降低传输数据量^[2]。因此,研究探测数据的清洗、融合、压缩等智能处理技术十分必要。

3.1.1 原始数据智能清洗

数据的准确性、及时性、一致性、完整性指标在信息系统中得到满足的程度称为数据质量,其决定了从数据中得出的最终结论或规律^[35-36]。太阳系边际探测任务科学载荷获得的大量探测数据可能具有不准确或不一致的特点,将增加数据传输负担,甚至直接影响数据质量。结合数据分析和数据挖掘相关研究,应发展可清除错误和不一致的数据清洗技术,以便更好地找出数据间的互联关系并挖掘其内在价值。基于目前较成熟的数据清洗模型框架,太阳系边际探测的数据清洗步骤可分为^[35]:需求分析,根据不同科学探测目的和对象,明确有效探测数据格式,获得清洗目标;预处理,通过数据分析技术识别探测数据的逻辑错误与不一致等问题,整理归档任务的数据质量信息;规则确定,针对空值、异常、冗余等不同数据的情况,选择适合不同探测数据集特点的清洗规则;清洗与修正,备份探测数据后多次选择清洗规则并分析效果,从而决定是否重新清洗,根据最终结果修正探测任务

数据的质量信息;检验,验证清洗后的数据是否符合探测任务的预期要求,重新检验评估清洗结果。

就太阳系边际探测而言,原始探测数据的智能清洗体现在通过深度学习的方式实现在轨数据清洗目标检测、不同特点数据集下清洗规则选择、清洗结果检验评估等方面,从而完成数据分析修正以提高有效的数据传输质量。

3.1.2 多源数据智能融合

多源探测数据融合可实现信息的有效互补,消除数据间的冲突与不确定性,获取比单一数据源更准确可靠的信息^[37]。考虑太阳系边际探测任务的众多探测目标,多个传感器被用于通过多时相、多角度、多波段、主被动等方式获取多源探测数据,融合这些数据可有效提升探测信息获取的准确性和鲁棒性。受限于星地数传速率,太阳系边际探测任务无法采用传统地面融合处理探测器下传数据的工作方式,需使用多源探测数据在轨融合处理技术,将蕴含目标有无、目标类别、目标数量等关键信息的低维数据通过数传链路实现快速感知响应。以深度卷积神经网络为代表的人工智能算法可有效地提升多源探测数据融合处理的性能,但仍需借助轻量化网络和知识蒸馏等简化手段才可实现多源探测数据智能在轨融合计算^[37]。

针对太阳系边际探测数据的在轨融合问题,探测器资源受限条件下多源异构数据融合理论、在轨任务自主规划方法、基于专家知识的多源数据在轨智能融合处理算法、轻小型低功耗在轨融合计算策略等关键科学技术问题亟待突破^[37]。

3.1.3 繁杂数据智能压缩

作为信息处理的重要影响因素,繁杂数据的快速传输和高效储存十分重要,而数据压缩是解决这一问题的有效方法,即在保证信息完整性或重要信息不丢失的同时减少数据体积,从而提高其传输、存储和处理效率^[38]。由于太阳系边际探测数据体积大、结构复杂,通过建立模型和编码的传统数据压缩算法面临严峻的挑战。针对太阳系边际探测任务许多超文本的数据信息,为实现最佳压缩效果,需要采取多种不同的压缩技术来适应各子信息模块,因此有必要研究可充分调动各种手段以节省信号空间的智能数据压缩系统^[39]。考虑到类型众多的探测数据可能有不同的压缩要求,智能数据压缩算法具有广阔的应用前景。结合人工智能技术,可采取类似开放数据库互联(Open DataBase Connectivity, ODBC)^[40]结构的拓扑设计调用各种压缩部件,根据事先决定的规则对预压缩信息分析,判断信息种类和压缩要求并完成决策^[39]。

随着深度学习的不断深入研究,目前国内外在压缩算法领域利用人工智能方法取得了显著成果^[41-44]。针对太阳系边际探测任务,数据格式的多样性与复杂性、传统神经网络监督学习的标签依赖性等都是有待进一步解决的问题。

3.2 环境、事件及状态智能感知

太阳系边际探测任务面临探测距离远、探测目标与未知因素多等挑战,且探测器为无人系统,因此发展针对天体三维形貌、引力场与深空磁场等未知复杂空间环境参数、高价值动态目标信息,以及探测器自身飞行状态的智能感知技术至关重要。

3.2.1 未知复杂环境自主智能感知

太阳系边际环境动态变化,态势信息多样复杂且探测器距离地球十分遥远,无法通过地面观测精确感知复杂环境。因此,要求探测器具有适应未知环境的

能力,可基于多类传感器协同感知,实现对未知复杂环境的自主智能感知与识别。其难点主要是探测信息多样化且先验信息有限,地面无法提前预设。不同的感知任务需要获取不同类型的数据,包括二维图像、三维点云、星际尘埃热辐射和星光偏振特征、塞曼分裂谱线特征、同步辐射特征,以及相关相位、频率等信息,因此亟需发展基于光学、雷达、电磁等有效载荷获取的多类在轨科学探测数据准确识别、智能分析与异常检测等方法。可建立太阳系边际探测未知复杂环境自主智能感知框架,如图4所示。深度图生成模块基于三维点云数据产生二维深度图,特征学习模块分别学习二维图像与三维点云数据特征,目标识别模块融合感知结果并输出分类情况,异常检测模块判断异常目标,磁场和引力场感知模块预测场值并识别异常现象。

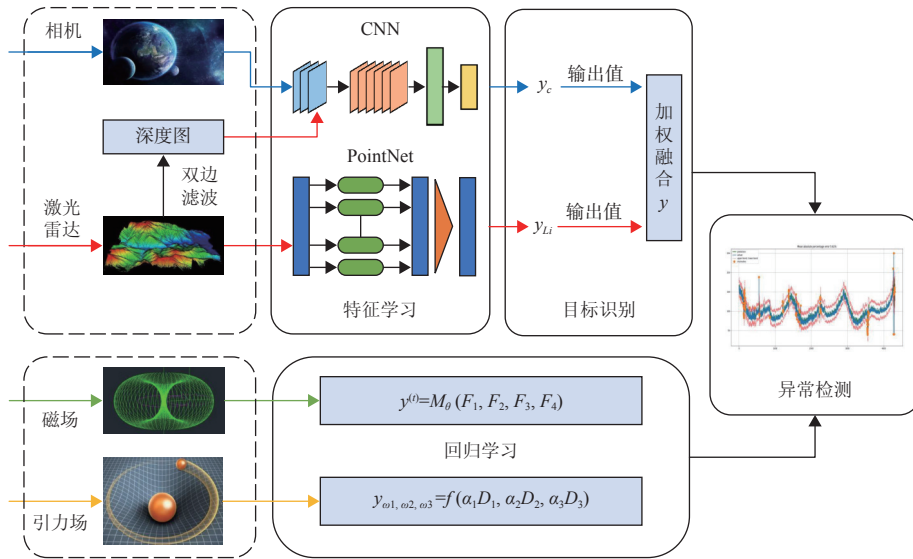


图4 未知复杂环境自主智能感知框架

Fig. 4 Framework of autonomous intelligent perception for unknown complex environment

通过信息组合和优化处理,建立不同探测数据模式识别体系,智能识别提取未知环境特征,从而构建太阳系边际复杂环境特征库,并通过环境特征的匹配与拼接,实现天体三维形貌、引力场和磁场等太阳系边际复杂环境的精细化建模与参数识别等智能感知。

3.2.2 突发珍贵科学事件自主智能感知

目前大部分智能感知方法之所以可在多种任务取得较好的结果,主要是依赖大量有标签的数据迭代训练深度模型,而庞大的训练数据需求也是目前智能感知方法的一个缺陷。就太阳系边际探测中天体火山爆发、陨石撞击、太阳风暴、日冕抛射等突发珍贵科学事件而言,获取相关数据的成本和标注难度均很高。

一方面,突发珍贵科学事件可获取的有标签数据量十分有限,难以累积大量研究数据用以训练模型;另一方面,对只有少量数据或少量标注数据的事件类别无标签数据标注,将消耗大量的时间和人力,这使得样本数量不足的问题成为阻碍快速智能感知珍贵科学事件的关键因素。与此相反,人类只需通过少量数据就能做到快速学习^[45]。受此启发,对于标签数据量较少的情况,可建立基于少样本与元学习^[46]框架的突发珍贵科学事件自主智能感知框架,如图5所示。该模型可充分挖掘少样本事件中丰富多样的细粒度信息,为全局突发珍贵科学事件感知和观测提供全方位多角度的信息参考。

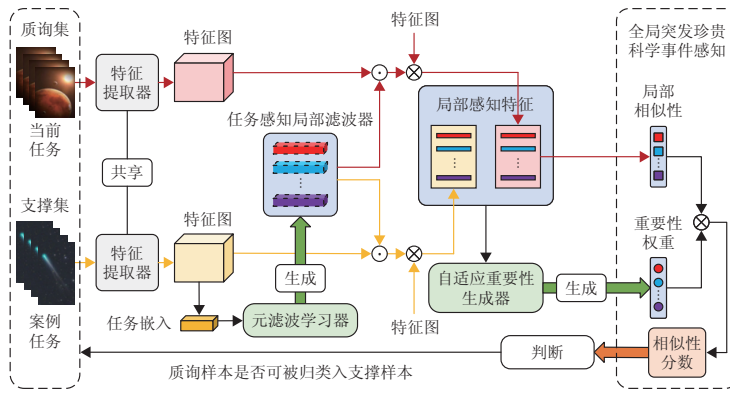


图 5 突发珍贵科学事件自主智能感知框架

Fig. 5 Framework of autonomous intelligent perception for sudden precious scientific events

基于预先建立的案例任务知识库,设计与案例任务具有相似性的当前任务计算策略,通过神经网络训练获得传感器观测量与突发事件及高价值目标类型的映射关系,在仅有少量样本的条件下进行快速迁移学习和自主泛化更新,从而实现突发珍贵科学事件在线智能感知匹配。

3.2.3 探测器状态自主智能感知

由于地面遥测遥控方式无法满足超远距离太阳系边际探测实时性的要求,所以需要探测器具备在轨智能感知自身状态的能力。环境复杂、导航测量信息缺乏、动力学时变非线性等因素,为探测器智能感知姿

轨状态信息带来众多挑战,导航信息获取与目标特征识别、多源信息融合与轨道快速自主智能估计等也是实现探测器状态智能感知亟待解决的技术难点^[1,28]。可建立太阳系边际探测器状态自主智能感知框架,如图6所示,通过反向传播(Back Propagation, BP)神经网络快速预测太阳系边际复杂环境下探测器的轨道状态,并利用卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)实现目标近距离光学观测的探测器姿态确定。此外,可基于自编码(Autoencoder)^[47]方法提取深空星图数据包含高价值信息的特征点,降低数据存储与传输成本,并由循环神经网络(Recurrent

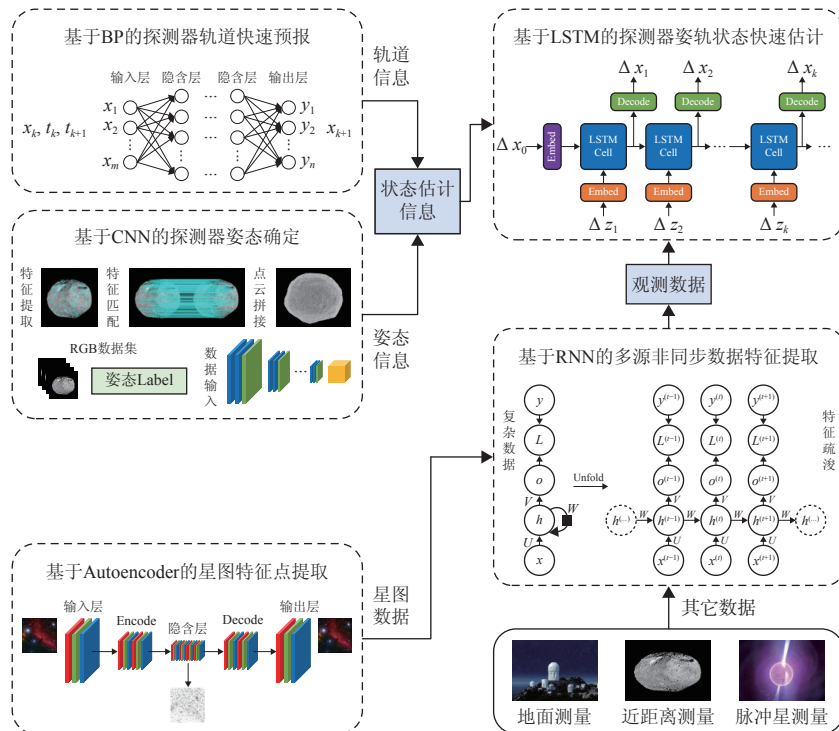


图 6 探测器状态自主智能感知框架

Fig. 6 Framework of autonomous intelligent perception for probe status

重要, 整个过程需依赖相应的自主智能跟踪观测技术。可建立太阳系边际探测突发珍贵科学事件自主智能控制框架, 如图8所示, 其框架核心为发展基于时空记忆网络的视觉跟踪^[49]方法。从历史帧和当前测试帧裁剪的目标和搜索图像块分别定义为内存图像和查询图像, 内存构造组件生成由内存键和内存值组成的内存单元, 特征提取组件在跟踪过程中提取查询图像的特征跟踪目标信息并生成对应的查询键和查询值。内存读取模块以内存及查询键值为输入, 检索自适应的内存键值, 内存键被用作在线学习预测模型, 预测查询键的在线得分图; 内存值被用来计算与查询值相关的特

征, 在此基础上构建离线训练预测模型。基于在线得分图和相关特征, 目标状态估计组件集成在线和离线预测模型以估计查询图像的目标状态。获得新的目标状态后, 使用相似性感知方案更新内存, 最终实现在感知到高价值动态目标和突发珍贵科学事件后, 对探测器的自主智能控制。

通过构建案例与目标任务具有相似度的计算策略, 基于太阳系边际探测高价值动态目标和突发珍贵科学事件的感知数据, 研究案例知识与当前控制任务映射方法, 从而实现基于视觉的跟踪控制, 并完成相应的探测器轨道或姿态调整及有效载荷调度控制。

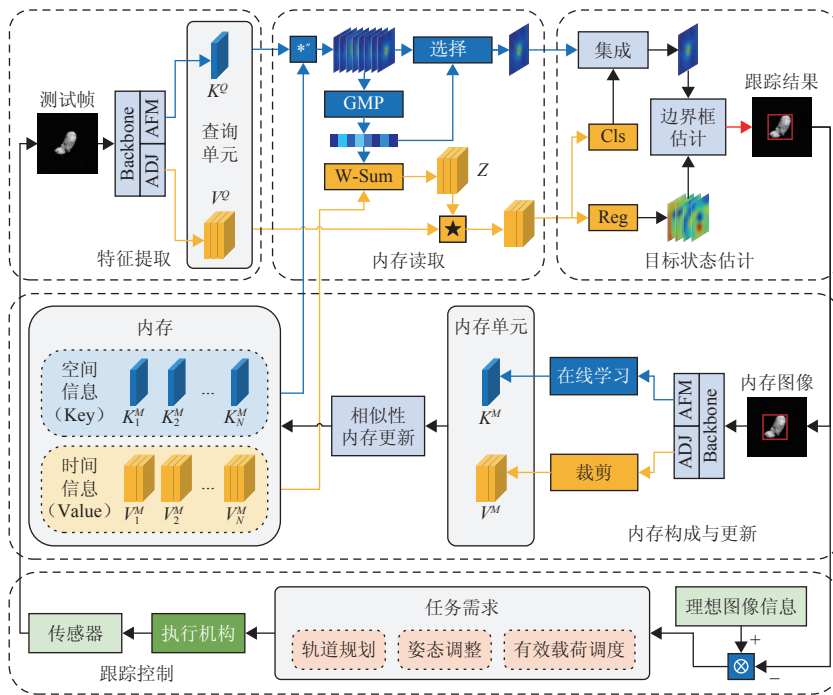


图 8 突发珍贵科学事件自主智能控制框架

Fig. 8 Framework of autonomous intelligent control for sudden precious scientific events

3.3.3 探测器异常状态自主智能控制

太阳系边际探测器工作在复杂未知、有大量突发事件的空间环境, 各元器件长时间工作的可靠性难以完全保证, 出现异常状态将导致自身寿命降低甚至探测任务失败, 因此必须有效实施控制策略以应对并解决异常。目前一般通过持续状态监测确定异常, 并通过异常诊断确定其产生的时间、地点和级别等类型^[50]。在明确具体的异常状态后, 探测器基于容错控制, 即通过系统的控制策略对异常实时补偿, 可保持系统的稳定性; 采取冗余备份使得各重要系统通过重构可恢复功能, 而系统重构依赖容错控制提供时间保证^[51-52]。可建立太阳系边际探测器异常状态自主智能控制框

架, 如图9所示。其中, 利用探测器的感知系统完成空间环境及自身各项状态的监测, 并将监测数据传输至器载智能计算体系, 用于异常预测及诊断等。当发现显性异常或通过异常预测发现潜在异常时, 基于专家系统和顶层任务智能决策, 可先利用容错控制器对系统实施稳定控制, 然后设法对系统进行重构以应对异常状态。

通过发展专家知识和数据混合驱动异常状态智能化任务决策方法, 基于探测器状态感知数据, 可更好地对探测器状态异常进行控制, 实现状态偏离评价与轨道智能修正控制, 从而完成相应的探测器姿态调整或有效载荷调度控制。

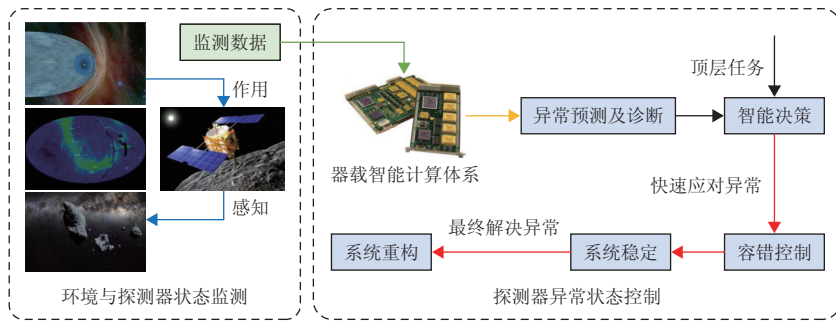


图9 探测器异常状态自主智能控制框架

Fig. 9 Framework of autonomous intelligent control for probe abnormal status

3.3.4 探测器健康状态自主智能预测管理

太阳系边际探测器所处环境复杂未知,对硬件性能有潜在损伤,各元器件长时间工作的性能衰减无法直接测量,因此必须借助健康预测专家系统,持续进行健康状态监测并评估其是否能够可靠稳定地工作。健康预测是通过任务期间对空间环境的测量、主要元器件工作状态的监控,从而评估和预测元器件的性能

衰减程度。可建立太阳系边际探测器健康状态自主智能预测管理框架,如图10所示。其中,利用环境数据并结合专家系统进行硬件健康状况筛选,对性能衰减程度严重的元器件,持续监测其健康状态,判断性能衰减趋势是否减缓;对无法减缓性能衰减速度的元器件,作为异常状态重点监测对象,在故障发生前实施应急处置,降低系统性的故障风险。

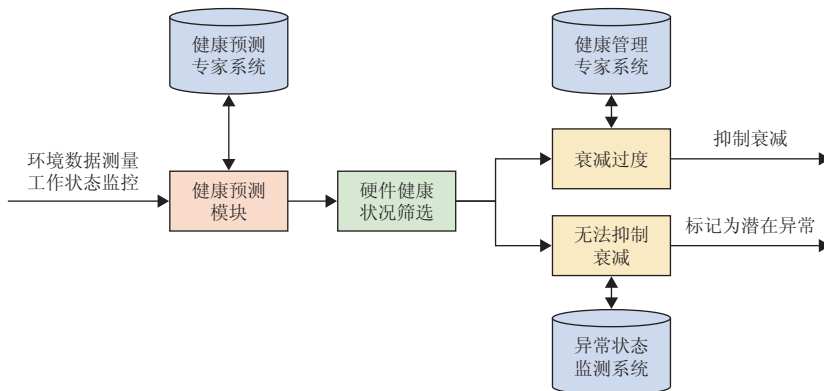


图10 探测器健康状态自主智能预测管理框架

Fig. 10 Framework of autonomous intelligent prediction and management for probe health status

通过发展专家知识和数据混合驱动的健康状态智能化预测管理方法,基于探测器状态感知数据,更好地对探测器健康状态监控,从而实现元器件性能衰减程度的评估与预测,并完成相应的衰减抑制或故障应急处置。

3.4 探测器智能规划

深空探测器自主规划问题面临约束耦合、资源有限、活动并行、任务目标复杂、不确定性强和实时性要求高等问题,对传统的自主任务规划技术提出了新的挑战^[53-54]。太阳系边际探测器是由多个子系统构成的复杂系统,可考虑建立探测器自主智能规划执行框架^[5]。为满足实际自主运行需求,需要构建高层决策的自主智能管理系统,向多维度多尺度建模、复杂环境在线快速规划、多约束多目标运动规划以及适应性精度系

统优化导航等技术方向发展^[53]。

3.4.1 多维度多尺度建模

考虑太阳系边际探测器系统受到的时间和资源等复杂耦合约束,难以通过目前单一的描述语言和约束表达方式充分建立任务规划知识模型,需要研究任务规划方面的多约束智能知识建模方法^[53,55]。经典规划领域的PDDL (Planning Domain Definition Language)^[56]作为标准化语言提供了良好的描述基础,但对于实际规划系统的时间、资源约束表达能力有限,面对复杂规划问题的规划解较长且搜索空间较大;基于时间线的表达方式方便描述并行活动及其各种复杂的约束,但若对于因果关系的描述不明确,面对后续规划搜索的计算需求较高。在现有规划知识建模方法的基础上,应研究综合描述语言和约束表达优势的多维度多

尺度建模技术, 通过建立可完整、统一、准确描述规划知识的智能表示方法, 提高规划解的可行性和规划算法的计算效率。

3.4.2 复杂环境在线快速规划

太阳系边际探测任务过程面临外界随机或自身异常产生的强动态性任务环境, 预先规划难以在不确定的条件下顺利执行, 需要研究规划修复方面的自适应智能重规划与规划修复方法^[53,57]。深空环境的未知性随着探测距离的增加而不断增强, 超远距离的太阳系边际探测还将导致系统在超长周期运行的可靠性逐渐降低, 影响动作执行; 探测器器载资源有限, 若综合考虑任务截止时间、现有执行序列、耦合约束条件、动作持续时间等多种因素, 在线重规划与规划修复方法求解缓慢。在现有任务重规划与规划修复方法的基础上, 应研究及时应对内外动态变化的复杂环境在线快速规划, 通过发展基于自适应规划知识模型的智能重规划与规划修复方法, 高效合理地解决规划失效情况下任务目标的实现问题, 并提升探测器的运行效能和鲁棒性。

3.4.3 多约束多目标运动规划

太阳系边际探测存在环境未知、约束复杂、资源有限等问题, 单目标的路径和轨迹规划难以满足众多不同工程任务的目标优化配置需求, 需研究运动规划方面的多目标智能规划方法^[53]。除时间和资源外, 太阳系边际探测器运动规划还面临运动学与动力学、碰撞和控制过程受限等诸多约束, 在不同任务与应用场景有所区别; 以考虑多约束和各性能指标为前提, 机动时间与燃料消耗等多任务目标的优化效率受器载资源限制, 进一步影响可行规划解的获得。在现有路径与轨迹规划方法的基础上, 应研究具有强搜索能力

且全局最优的多约束多目标运动规划, 突破智能运动规划技术, 在保证规划结果有效性的同时合理利用资源。

3.4.4 适应性精度系统优化导航

太阳系边际探测任务中, 探测器飞行状态易受导航精度、未知环境等影响而偏离预定状态, 因此需要研究星载智能导航方法。现有的星载自主天文导航系统包括图像获取、姿态控制和轨道控制等, 一般通过快速处理为姿控系统提供实时星历信息, 获取探测器的状态并转换成导航格式转发给自主导航系统。这一系统缺乏对星上剩余资源的统筹使用及自适应优化能力, 无法适应太阳系边际探测任务探测器资源有限、未知复杂环境与突发珍贵科学事件带来的资源紧张等问题。在现有星载自主天文导航系统的基础上, 应研究使用不同程度的资源进行适应性精度导航, 并根据导航结果实现系统级优化的智能导航技术。

3.5 轻量与可靠智能算法

3.5.1 智能算法轻量化

基于地面应用场景发展的人工智能算法存在较大的计算负担, 无法在计算资源受限的器载计算机应用, 这是人工智能技术在深空探测领域的深度应用、学科交叉融合过程中涌现出的新问题, 也是太阳系边际探测面临的关键技术问题, 其难点在于传统智能方法对算力的高度依赖与器载平台有限计算能力之间的矛盾。可建立神经网络轻量化剪枝框架, 如图 11 所示。针对网络残差模型的层间压缩与网络层参数的层内压缩, 分别采用基于稀疏深度残差模块剪枝^[58]和强化学习卷积核剪枝^[59]策略, 通过高效的神经网络结构优化, 解决资源受限的器载设备网络参数量下降时, 特征提取能力急剧下降的问题。

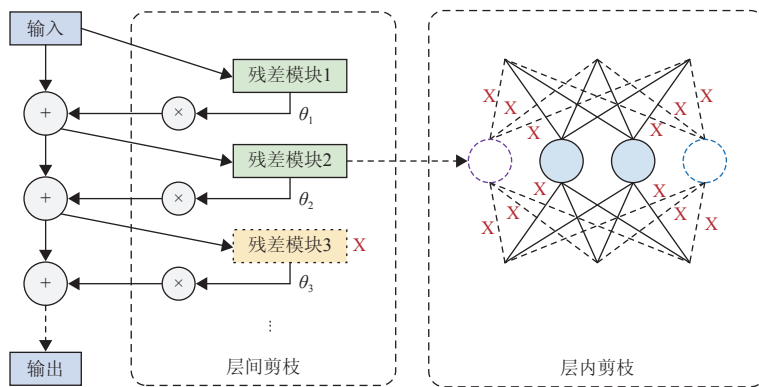


图 11 神经网络轻量化剪枝框架

Fig. 11 Framework of neural network lightweight pruning

通过探索神经网络卷积层的机理, 设计可高效计算的卷积模块, 同时针对太阳系边际探测任务的特殊

性, 利用自动搜索算法, 设计合理的代价函数和搜索策略, 可在轻量级卷积模块的基础上探索最优组合方

法,从而得到适合太阳系边际探测任务的特定神经网络。选取剪枝策略对不必要的卷积核裁剪,可进一步降低计算消耗,从而实现网络容量动态可调,并在实现轻量化网络的同时尽可能保证网络性能最优。

3.5.2 智能算法可靠性

当前国内外发展的人工智能算法多属于黑箱算法,人类专家无法理解、不可解释甚至无法控制。对长期在轨自主飞行的太阳系边际探测器存在较高的风险,亟需发展可理解、可解释、可控制的人工智能新算法,实现太阳系边际感知数据与知识深度融合的安全可控智能控制。传统的无模型强化学习过程依赖智能体与环境之间的相互作用,对反应时间、燃料消耗等有较为苛刻的要求,因此并不适用。为减少与环境的交互次数并获得一定程度的可理解可控策略,建立基于模型的强化学习引导策略搜索(Guided Policy Search, GPS)算法^[60]框架,如图12所示,其核心是利用基于模型的最优控制器指导智能体进行策略搜索。

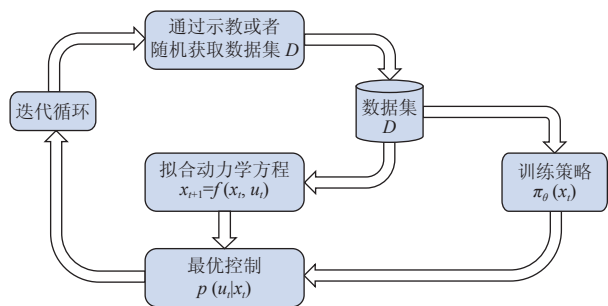


图12 基于模型的强化学习GPS算法框架^[61]

Fig. 12 Framework of model-based reinforcement learning GPS algorithm^[61]

利用结构分层、迁移学习等专家知识,优化基于模型强化学习的智能控制算法,即在数据和知识混合驱动智能算法收敛性和稳定性理论研究的基础上,针对非线性强、环境模型未知、目标变化快、易发生突发事件等未知复杂环境的智能控制问题,可发展应用于器载计算机的有模型强化学习智能控制算法。同时,针对突发事件应对需求,可结合先验专家知识和环境交互产生的优质数据集构建轻量型动力学模型,并利用该模型产生控制策略,从而实现智能自主控制。

4 结束语

极暗、极寒、极远的太阳系边际探测任务是目前深空探测的前沿热点领域,它有助于获得太阳系及行星的起源与演化、太阳系边际及邻近星际空间的结构与特性等空间天文重大科学发现,推动先进材料、电子元器件等基础技术进步和新型高效能源与推进、超远距离测控通信等前瞻性技术的跨越式发展,提升人

类探测器在太阳系全域到达及其恒星际空间探索的能力。

由于太阳系边际探测具有探测距离远、通信时延大、探测目标广、数传速率低、未知因素多等特点,同时面临感知与信息融合、规划与决策控制、导航时效与精度、通信与数据传输、健康预测与管理、故障诊断与修复等技术挑战,对人工智能技术的融合应用提出了迫切需求。为解决上述问题,需重点突破探测数据智能处理,环境、事件及状态智能感知与智能控制,探测器智能规划,轻量与可靠智能算法等关键技术,从而极大拓展太阳系边际探测的深度和广度。

参 考 文 献

- [1] 吴伟仁,于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报(中英文),2014,1(1):5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1):5-17.
- [2] 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]. Scientia Sinica Information, 2019, 49:1-16.
- [3] 王赤,李晖,郭孝城,等. 太阳系边际探测项目的科学问题[J]. 深空探测学报(中英文),2020,7(6):517-524,535.
WANG C, LI H, GUO X C, et al. Scientific objectives for the exploration of the boundary of Solar system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(6):517-524,535.
- [4] 王赤. 开启星际探测新征程[J]. 科技导报,2021,39(11):16-20.
WANG C. To start a new journey of interstellar exploration[J]. Science and Technology Review, 2021, 39(11):16-20.
- [5] 徐瑞,李世震,李朝玉,等. 太阳系边际探测器自主技术需求分析[J]. 宇航学报,2024,45(5):647-660.
XU R, LI S Z, LI Z Y, et al. Demand analysis on autonomous technology for probes to the boundary of the Solar system[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(5):647-660.
- [6] 于登云,张哲,泮斌峰,等. 深空探测人工智能技术与展望[J]. 深空探测学报(中英文),2020,7(1):11-23.
YU D Y, ZHANG Z, PAN B F, et al. Development and trend of artificial intelligent in deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1):11-23.
- [7] WANG C, BELCHER J W. The heliospheric boundary response to large-scale solar wind fluctuations: a gasdynamic model with pickup ions[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1999, 104(A1):549-556.
- [8] National Aeronautics and Space Administration. IBEX sheds new light on Solar system boundary[EB/OL]. (2015-10-20)[2024-02-26]. <https://www.nasa.gov/missions/ibex/ibex-sheds-new-light-on-solar-system-boundary/>.
- [9] HALL C F. Pioneer 10[J]. Science, 1974, 183(4122):301-302.
- [10] SMITH E J, DAVIS JR L, JONES D E, et al. Jupiter's magnetic field, magnetosphere, and interaction with the solar wind: Pioneer 11[J]. Science, 1975, 188(4187):451-455.
- [11] DYAL P, FIMMEL R O. Exploring beyond the planets: the Pioneer 10

- and 11 missions[J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1984, 37: 469-479.
- [12] DECKER R B, KRIMIGIS S M, ROELOFF E C, et al. Voyager 1 in the foreshock, termination shock, and heliosheath[J]. *Science*, 2005, 309(5743): 2020-2024.
- [13] RICHARDSON J D, BELCHER J W, GARCIA-GALINDO P, et al. Voyager 2 plasma observations of the heliopause and interstellar medium[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(11): 1019-1023.
- [14] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Voyager 1[EB/OL]. (2024-01-31) [2024-02-26]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Voyager1>.
- [15] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Voyager 2[EB/OL]. (2024-02-16) [2024-02-26]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Voyager2>.
- [16] 吴伟仁,王倩,任保国,等.放射性同位素热源/电源在航天任务中的应用[J].*航天器工程*,2013,22(2):1-6.
WU W R, WANG Q, REN B G, et al. Application of RHU/RTG in space missions[J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(2): 1-6.
- [17] FOUNTAIN G H, KUSNIERKIEWICZ D Y, HERSMAN C B, et al. The new horizons spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 140(1): 23-47.
- [18] STERN S A, BAGENAL F, ENNICO K, et al. The Pluto system: initial results from its exploration by New Horizons[J]. *Science*, 2015, 350(6258): aad1815.
- [19] MCCOMAS D J, ALLEGRINI F, BOCHSLER P, et al. Global observations of the interstellar interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX)[J]. *Science*, 2009, 326(5955): 959-962.
- [20] MCCOMAS D J, ZIRNSTEIN E J, BZOWSKI M, et al. Seven years of imaging the global heliosphere with IBEX[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 229(2): 1-32.
- [21] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, MCNUTT R, SCHWADRON N A, et al. Interstellar heliospheric probe/heliospheric boundary explorer mission: a mission to the outermost boundaries of the Solar system[J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 24(1): 9-46.
- [22] NASA. Our dynamic space environment: heliophysics science and technology roadmap for 2014-2033[EB/OL]. (2014)[2024-02-26]. https://explorers.larc.nasa.gov/HPSMEX/MO/pdf_files/2014_Helio-Roadmap_Final_Reduced_0.pdf.
- [23] PRINCETON UNIVERSITY. Interstellar mapping and acceleration probe[EB/OL]. (2018-06-18)[2024-02-26]. <https://imap.princeton.edu/>.
- [24] JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY. Interstellar probe, humanity's journey to interstellar space[EB/OL]. [2024-02-26]. <https://interstellarprobe.jhuapl.edu/>.
- [25] 房鸿瑞. 深空通信导航技术及其标准[J]. *遥测遥控*, 2009, 30(3): 1-9.
FANG H R. Technology and standard of deep space communications and navigation[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2009, 30(3): 1-9.
- [26] 高翔. 深空通信解调技术研究与应用[D]. 北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2010.
GAO X. Research and implement of deep space communication demodulation technology[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [27] 张爱兵,李晖,孔令高,等.太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究[J].*深空探测学报(中英文)*,2020,7(6):545-553.
ZHANG A B, LI H, KONG L G, et al. Scientific payloads proposal for Chinese Solar system boundary exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 545-553.
- [28] 高耀南,王永富. 宇航概论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2018.
GAO Y N, WANG Y F. Introduction of astronautics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018.
- [29] 方宝东. 火星探测捕获段组合导航方法及应用研究[D]. 长沙:国防科技大学,2019.
FANG B D. Research on multi-source combined navigation method and application of Mars orbit insert segment for Mars exploration mission[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [30] 李海涛. 中国深空测控网光通信技术途径分析与发展展望(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(5): 28-40.
LI H T. Technical approach analysis and development prospects of optical communication technology in China deep space TT&C network[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 28-40.
- [31] 于登云,马继楠. 中国深空探测进展与展望[J]. *前瞻科技*, 2022, 1(1): 17-27.
YU D Y, MA J N. Progress and prospect of deep space exploration in China[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(1): 17-27.
- [32] 杨笛笛. 基于工程数据的卫星健康状态预测技术研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心),2017.
YANG Y D. The prediction research of satellite healthy status based on engineering parameters[D]. Beijing: National Space Science Center, University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [33] 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[J]. *航空学报*, 2014, 35(1): 13-28.
CUI P Y, XU R, ZHU S Y, et al. State of the art and development trends of on-board autonomy technology for deep space explorer[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 13-28.
- [34] 刘文静,李文博,张秀云,等. 基于图论的深空探测航天器故障可诊断性评价[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(12): 2074-2084.
LIU W J, LI W B, ZHANG X Y, et al. Fault diagnosability evaluation of deep space exploration spacecraft based on graph theory[J]. *Control Theory and Applications*, 2019, 36(12): 2074-2084.
- [35] 廖书妍. 数据清洗研究综述[J]. *电脑知识与技术*, 2020, 16(20): 44-47.
LIAO S Y. A review of the development of data cleaning[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2020, 16(20): 44-47.
- [36] AEBI D, PERROCHON L. Towards improving data quality[C]// *Proceedings of the International Conference on Information Systems and Management of Data*. New Delhi: CiSMOD, 1993.
- [37] 李刚,刘瑜,张庆君. 多源卫星数据在轨智能融合技术[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(5): 708-712.
LI G, LIU Y, ZHANG Q J. On the development of on-board fusion of multi-source satellite data[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(5): 708-712.
- [38] 鲁玉江. 深度学习在数据压缩中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
LU Y J. Research on application of deep learning in data compression[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [39] 刁力力,黄厚宽. 用人工智能和神经网络的方法组建数据压缩系统[J]. *北方交通大学学报*, 1998, 22(2): 114-120.
DIAO L L, HUANG H K. Using AI and NN for establishing the data compressing system[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1998, 22(2): 114-120.

- [40] 徐波,熊萍. ODBC数据库互操作技术综述[J]. 计算机应用, 1998, 18(3):3-6.
XU B, XIONG P. An overview of ODBC database interoperability strategy[J]. Computer Applications, 1998, 18(3): 3-6.
- [41] 乔凯,智喜洋,王达伟,等. 星上智能信息处理技术发展趋势分析与若干思考[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1):21-27.
QIAO K, ZHI X Y, WANG D W, et al. Analysis and some thoughts on the development trend of the on-board intelligent information processing technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(1):21-27.
- [42] WANG B, GAO Y. An image compression scheme based on fuzzy neural network[J]. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), 2015, 13(1): 137-145.
- [43] HUSSAIN F, JEONG J. Exploiting deep neural networks for digital image compression[C]//Proceedings of 2015 2nd world symposium on web applications and networking (WSWAN). Sousse: IEEE, 2015.
- [44] VINAY A, SUBRAMANYAM N. Satellite image compression using ROI based EZW algorithm[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEED), 2017, 5(4): 369-371.
- [45] 赵凯琳,靳小龙,王元卓. 小样本学习研究综述[J]. 软件学报, 2021, 32(2): 349-369.
ZHAO K L, JIN X L, WANG Y Z. Survey on few-shot learning[J]. Journal of Software, 2021, 32(2): 349-369.
- [46] WU J M, ZHANG T Z, ZHANG Y D, et al. Task-aware part mining network for few-shot learning[C]//Proceedings of 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Montreal: ICCV, 2021.
- [47] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323(6088): 533-536.
- [48] 郭培森. 基于任务驱动的机器人作业智能决策方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
GUO P S. Research on mission-driven intelligent decision-making method of robot operation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [49] ZHOU Z, LI X, ZHANG T, et al. Object tracking via spatial-temporal memory network[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2022, 32(5):2976-2989.
- [50] 孙泽洲. 深空探测技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2018.
SUN Z Z. Technology of deep space exploration[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018.
- [51] 李波. 执行机构故障的航天器姿态容错与控制分配[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
LI B. Fault tolerance attitude control and control allocation for spacecraft with actuator failure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [52] 彭小辉. 空间推进系统故障诊断与自主管理技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
PENG X H. Study of fault diagnosis and autonomy techniques for spacecraft propulsion system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [53] 徐瑞,李朝玉,朱圣英,等. 深空探测器自主规划技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(2): 111-123.
XU R, LI Z Y, ZHU S Y, et al. Research progress of autonomous planning technology for deep space probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(2): 111-123.
- [54] TIPALDI M, GLIELMO L. A survey on model-based mission planning and execution for autonomous spacecraft[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 12(4): 3893-3905.
- [55] 王大轶,符方舟,孟林智,等. 深空探测器自主控制技术综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(4): 317-327.
WANG D Y, FU F Z, MENG L Z, et al. Research of autonomous control technology for deep space probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(4): 317-327.
- [56] GHALLAB M, HOWE A, KNOBLOCK C, et al. PDDL-the planning domain definition language[R]. New Haven, USA: Yale University, 1998.
- [57] 向尚,陈盈果,李国梁,等. 卫星自主与协同任务调度规划综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(2): 252-264.
XIANG S, CHEN Y G, LI G L, et al. Review on satellite autonomous and collaborative task scheduling planning[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(2): 252-264.
- [58] HUANG Z H, Wang N Y. Data-driven sparse structure selection for deep neural networks[C]//Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). Munich: ECCV, 2018.
- [59] 刘会东,杜方,余振华,等. 基于强化学习的无标签网络剪枝[J]. 模式识别与人工智能, 2021, 34(3): 214-222.
LIU H D, DU F, YU Z H, et al. Label-free network pruning via reinforcement learning[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2021, 34(3): 214-222.
- [60] LEVINE S. Motor skill learning with local trajectory methods[D]. Palo Alto: Stanford University, 2014.
- [61] 张阳康,孙晨,泮斌峰. 行星软着陆GPS有模型强化学习制导方法[J]. 飞控与探测, 2021, 4(5): 34-43.
ZHANG Y K, SUN C, PAN B F. Guidance method of planetary soft landing with GPS model-based reinforcement learning[J]. Flight Control & Detection, 2021, 4(5): 34-43.

作者简介:

张哲(1979-),男,研究员,主要研究方向:深空探测工程总体设计、深空智能航行技术。

通信地址:北京市海淀区东冉村9号 深空探测实验室(100089)

E-mail: cnclpzz@126.com

唐玉华(1973-),女,研究员,主要研究方向:探月工程总体技术、重大工程组织管理。**本文通信作者。**

通信地址:北京市海淀区东冉村9号 深空探测实验室(100089)

E-mail: tangyuhua2010@126.com

Research on Artificial Intelligence Technology for Solar System Boundary Exploration Missions

ZHANG Zhe^{1,2}, TANG Yuhua², ZHENG Zuoxiu¹, QIAO Dong¹, CHEN Hui³, ZHANG Tianzhu⁴

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Deep Space Exploration Lab, Beijing 100089, China;

3. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

4. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Solar system boundary exploration is of great significance to obtaining important scientific discoveries, promoting strategic and forward-looking technological breakthroughs, and enhancing human space exploration capabilities. On the basis of introducing the definition and future plans of Solar system boundary exploration missions, this paper analyzed the mission characteristics, studied the current mission requirements and technical challenges, and systematically discussed artificial intelligence technologies that need to be broken through, including intelligent processing of exploration data, intelligent perception of environment, event and state and control, intelligent planning of exploration missions, and lightweight and reliable intelligent algorithms. This paper can provide reference for the planning, demonstration, development, and implementation of Chinese Solar system boundary exploration missions.

Keywords: Solar system boundary; artificial intelligence; mission characteristics; technical challenges

Highlights:

- The mission characteristics of Solar system boundary exploration were summarized, including long detection distance, large communication delay, various detection targets, low data transmission rate and many unknown factors.
- The mission requirements and technical challenges of Solar system boundary exploration were explained, including perception and information fusion, planning and decision control, navigation timeliness and precision, communication and data transmission, health prediction and management, and fault diagnosis and repair.
- The key technologies of artificial intelligence in Solar system boundary exploration missions were given, including intelligent processing of exploration data, intelligent perception of environment & event and state and control, intelligent planning of exploration missions, and lightweight and reliable intelligent algorithms.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]