

支持自适应科学探测的星载任务规划方法初探

张峻巍^{1,2} 吕良庆¹ 卢广佑^{1,2}

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100000;

2. 中国科学院大学, 北京 100000

摘要: 本文以满足自适应科学探测的需求为背景, 梳理并分析了目前常见的星载自主任务建模方法与规划算法的特征, 提出了一种基于分层任务网络-时间线 (HTN-T) 的星载任务规划方法。该方法以任务级指令作为输入, 采用分层任务网络算法将任务级指令分解为可执行的指令, 并在时间线上实现任务的横向与纵向扩展、冲突消解及排序, 以此生成规划结果, 从而满足航天器自适应科学探测对任务分解和时间编排能力的需要。

关键词: 自适应科学探测 星载任务规划 分层任务网络 时间线

0 引言

航天器智能自主控制是在航天器中引入智能控制技术, 使航天器在不确定环境中也可以完全依靠其自身软硬件设备, 实现高精度、高可靠性、强适应性运行。“自适应科学探测”是指航天器可以不依赖于地面, 基于星上一些有限的力量、资源和知识做出航天器的自我决策, 以便完成已知或未知的科学探测任务的过程。其中, 航天器自主任务规划是研究的重点内容之一。在传统的科学卫星任务中, 往往是基于不同的任务目标对具体的科学探测和实验任务开展全面设计, 通过在执行任务前先行配置或卫星发射后遥控上行的方式, 将任务目标告知航天器。这种方式下, 任务的规划是由地面完成的。在航天器智能能力的框架下, 星载任务规划需要结合航天器的智能思考能力, 基于航天器自身的知识积累, 自主生成任务规划序列与程序, 从而自主决策当前目标是否适合开展探测活动。“自适应科学探测”概念的提出, 强化了航天器探测过程中对自主性与智能性的需要。

自适应科学探测需要在航天器上部署能够支持任务分解、时间编排的规划算法, 并且规划的结果能够与星载执行能力相衔接。任务分解根据目标和各种约束条件, 将较高级的任务分解为低级的、可执行的子任务, 并解决子任务之间的逻辑

顺序问题和资源冲突问题。在此基础上按照时间编排, 输出一个事件表。为此, 本文分析了常见的航天器任务规划方法与算法, 试图确定一个有效的星载任务规划解决方法。

1 常见航天器任务描述与自主规划方法分析

通常, 规划是指给定问题的初始状态和目标状态, 以及规划动作的描述, 要求能自动找到动作序列, 使系统能从初始状态转换为目标状态。对于具体的航天器自主任务规划问题, 大致可以分为“地面自主规划并上行至卫星执行”与“卫星自主规划并直接执行”两种类型。

对于“地面自主规划并上传至卫星执行”方式, 目前一般采用基于深度学习等相关主流人工智能技术实现。这是由于深度学习等方法对算力要求较高, 尚未有成熟的方案能够在星上直接执行深度学习模型的训练工作, 只能通过在地面训练完成模型之后移植到星上执行模型, 或者直接上传至地面端模型输出的任务序列。在该模式下, 航天器的健康运行仍然需要依赖与地面的通信, 因此这不能完全称为卫星的自主规划。

“卫星自主规划并直接执行”方式是自适应科学探测对卫星任务规划提出的新要求。通常,

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项有效载荷管控业务研究 (编号: XDA15060700)

作者简介: 张峻巍, 1998 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为航天软件工程, 星载任务规划。E-mail: zhangjunwei20@mails.ucas.ac.cn

该方式的规划需要有一种对任务的描述方法，还需要一种合适的任务规划算法。同时，在任务规划问题中，对任务级、载荷级指令等不同的主体，具有不同的自主任务规划方式。目前现有的任务描述和规划方法包括基于时间线、网络图等的规划算法。

1.1 基于谓词命题逻辑的描述方法

对于智能规划的描述，最早是基于组织严密的语言和逻辑来描述的。在航天领域外，最早存在一阶逻辑、情景演算等规划表示方法，此后，由 Nilsson 等人提出了 STRIPS 的规划描述方法。STRIPS 作为最早描述语言，侧重于表示动作之间的逻辑关系。但是其存在大量的代码冗余，且包括规划语言维护困难、无法表示动作之间的时间与资源关联等缺陷。

为了解决上述缺陷，Mc Dermott 等人在 1998 年提出了规划域定义语言 (Planning Domain Definition Language, PDDL) [5]。PDDL 通常将指定的计划任务分为域文件 (Domain File) 和问题文件 (Problem File)，一般是将实际场景转化为问题文件形式，并基于域文件中的操作方式定义来完成动作的规划和执行。PDDL 实质是智能规划模型的一种应用方式，但是，其主要针对传统领域设计，因此航天领域在使用该建模方式时，通常需要将模型转化为高级程序语言以便后续操作。

通常来说，PDDL 的优势在于对动作约束、载荷约束、资源约束等的定义和建模十分清晰，但是 PDDL 的一大劣势即为其对时间约束的描述较弱，需要通过其他手段进行辅助描述。虽然可以结合多种模型描述，但这种描述失去了工程的整体性原则，且对于航天的可靠性要求并不友好。

1.2 基于时间线的描述与规划方法

时间线是将任务通过一种直观的方式在二维的平面上排开，从而以时间为任务的执行主要标准来可视化和规划任务的一种描述方式。一般来说，时间线模型具备一条时间轴或多条并行的时间轴，之后任务和约束等在时间轴上依次排列，从左至右表示随着时间变化依次需要执行的任务或资源等约束的实时状态。以科学卫星对宇宙射线开展数据收集为例，一种时间线模型的可视化如图 1 所示。



图 1 基于时间线的科学卫星数据收集示意图

基于时间线的规划算法以时间线建模描述为主，对规划知识进行描述，一般需要重点考虑三个方面：任务的生成方式、排列顺序和冲突解决。

在任务的生成方式和排序方面，一般以时间线扩展为主要思想。通过对单条时间线任务的横向扩展，以及对于多条时间线任务的纵向扩展，对任务的执行时间进行规划。时间线横向和纵向扩展的主要步骤示意图如图 2 所示，其中，步骤①和②为时间线横向扩展，步骤③和④为时间线纵向扩展。

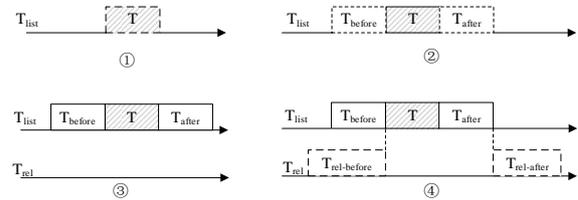


图 2 时间线扩展可视化示意图

基于时间线的扩展完成后，需要对任务的执行顺序排序并化解约束冲突。对于任务的冲突解决方式，美国的 ASPEN 系统早前进行过相关的研究，并将其设计的修复算法框架称为迭代修复规划。迭代修复的框架需要输入基于时间线的任务规划知识描述，并根据原有的冲突处理规则解决问题，问题解决后再次检查是否有新的冲突产生，直到所有冲突全部被找到并解决。

时间线模型以时间约束为主，约束简单、直观、易于理解，便于对任务进行排序，且对于后续的任务冲突处理、任务扩展较为友好，对于较低级的任务指令适配性强，特别适用于对并发需求较低且任务较为单一的卫星任务规划场景。然而，由于时间线对于任务之间逻辑和约束关系的表示有所欠缺，将时间线方式与其他描述建模方法结合也是一种常见的策略。

1.3 基于分层任务网络的描述与规划方法

常见的星上任务规划领域，约束关系和任务之间的描述一直是研究重点，并通常采用基于网络图的规划算法解决上述问题。该种算法主要通过考虑任务之间的关系约束对问题求解。网络图

的规划方法因其扩展性强、非领域化程度高，在实际应用和研究中一直很常见，且在多种实际工程背景中，也有着不同的网络应用方式。然而网络图在实际应用中的耦合度较高，不利于后期的高效扩展，因此有必要对数据的结构和表达方式开展进一步的更新和优化。通常而言，基于图的星上任务规划包括约束可满足问题求解算法（Constraint Satisfaction Problem, CSP）、规划空间规划、Petri 网络、放松图规划、分层任务网络等。

分层任务网络（Hierarchical Task Network, HTN）解决实际规划问题的核心是基于任务分解的思想，其与人类思考问题的过程比较相似。HTN 一般以初始状态、初始网络和领域知识为输入，以具体的行动序列作为输出。其中，初始状态主要用于描述状态空间的初始时刻状态；初始任务网定义了 HTN 需要解决的任务集合以及任务之间的各种关系；领域知识部分则主要是指方法集合与操作集合，用于记录指令的分解方式、执行任务的前提及执行之后的变化。图 3 描述了 HTN 的主要规划思想。

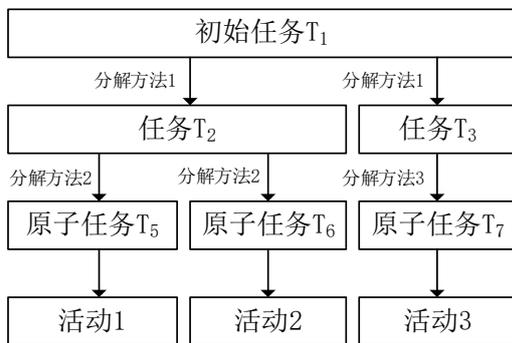


图 3 HTN 主要规划思想

HTN 能够满足航天中任务分解的实际需求，

其任务分解方式也可以扩展到时间线和形式描述上。其与 PDDL 相比更体现任务之间的逻辑层次性，但相比时间线而言，弱化了时间的约束表达。

1.4 基于可扩展标记语言的描述方法

可扩展标记语言是由文档对象模型 (DOM) 严格序列化的一种语言。此种标记可在计算机之间进行数据和数据类型的定义与传输，允许用户自行对语言规范进行定义。

借助 XML 描述航天器任务，具备多种优势。一方面，其基于面向对象的思想，具备强大的搜索能力和严格规范的语义，非常适用于对可靠性要求极高的航天领域。另一方面，较强的可扩展性也保证了数据传递的灵活性[10]。目前，随着航天器复杂度和对可靠性要求的提升，对航天器系统数据的解析和处理要求也随之不断提高。基于 XML 的任务建模描述方式凭借其自身优势，正处于快速迭代发展过程中。其不仅能通过构造标准文件模板规范化文档，并自定义数据结构和数据约束等表达，还可基于 XML 贯彻模型化和数据化的设计思想。为了解决航天器数据管理系统的设计重用困难等问题，空间数据系统咨询委员会（Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS）提出了航天器遥测与命令交换标准（XML Telemetric and Command Exchange, XTCE）和航天器接口业务（Space Onboard Interface Services, SOIS）的电子数据单标准（SOIS-EDS, SEDS），为不同机构和系统在航天任务各个阶段对航天器系统数据的有效交换提供支持。

1.5 对比分析

支持自适应科学探测的航天器星载任务规划，

表 1 航天器自主任务规划方法总结

规划方法	任务描述方法	规划前提条件	任务分解方法	星上算力占用
深度学习	可自定义方法	通常提前进行模型训练	基于学习经验分解	占用过大
基于谓词逻辑	基于 PDDL 语言，重点描述任务间的逻辑关系	需要事先规定语法规则，并定义解析器	基于任务关系分解	合理
基于时间线	基于状态时间线，重点描述多个分系统的时间约束	需要事先定义优先级和冲突处理规则	基于时间约束分解	合理
基于分层任务网络	可自定义方法	需要事先建立知识库并定义任务分解方式	可自定义分解方法	合理

在规划前需要详细地描述探测器系统的各种相关知识，包括资源描述方法、时间描述方法、相关约束等。因此，完成规划知识建模，确定任务在规划过程中的描述方式是必不可少的。同时，对于任务本身，也需要一种规划方法生成任务时间序列。结合上述技术路线的探讨，本文以自适应科学探测的实际需求为出发点，对上述方法的任务描述与建模方法、任务的层次分解方法、规划前地面需要完成的准备工作、星载规划长期独立运行的情况进行描述，总结如表 1 所示。

通过表 1 可以发现，对于任务描述方法，基于谓词逻辑和时间线对描述内容有所侧重，且有较大限制。对于任务分解方法，分层任务网络能事先确定自定义分解方法，并应用到实际分解过程中。在规划前的地面工作方面，各种方法均需要在前期建立该模型特有的判断规则或知识库，以便进行后续规划。而深度学习模型可能超出计算资源占用的限制，且模型需要定期基于地面开展多次迭代训练以调节模型准确度，无法保证星载

规划能稳定地长期独立运行。

综合上文的分析和总结，我们可以得出结论：由于需要地面的提前训练，基于深度学习的任务规划方法无法完全独立地开展星载运行。谓词逻辑、时间线和分层任务网络的任务分解方法可以事先确定，且星上的实际运行条件能支持算法运行。因此，结合自适应科学探测中的星载任务规划的实际需求，若能综合考虑时间约束和资源约束，一方面可以基于时间线描述满足时间约束，另一方面则可以基于分层任务网络满足任务之间的分解关系。将上述两种方法结合，并基于可扩展标记语言进行数据描述，则可以满足自适应科学探测中星载任务规划的需求。

2 基于分层任务网络-时间线的星载任务规划方法

为了构建支持自适应科学探测的规划方法，

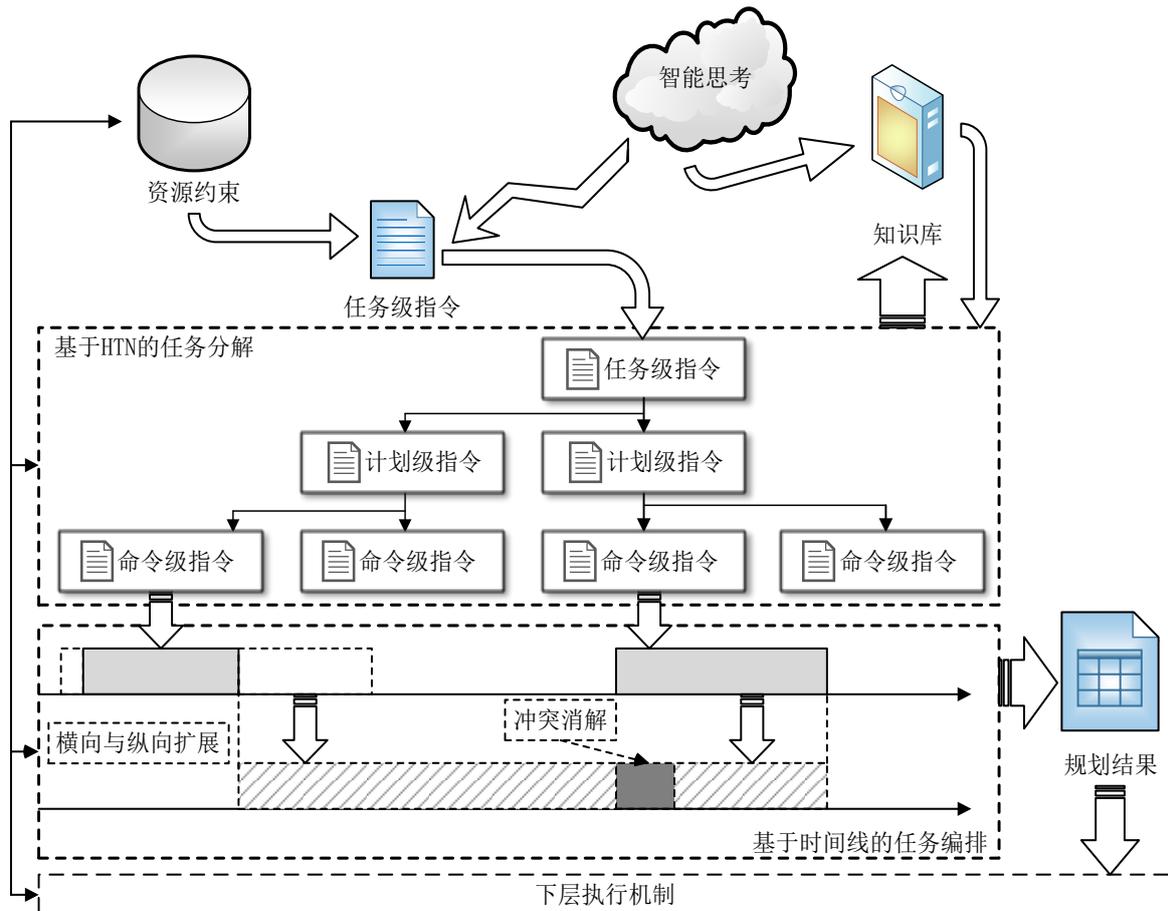


图 4 航天器上的自主任务规划场景示意图

本文结合星载任务规划的需求,对常见的方法进行整合与本地化处理,提出一种“分层任务网络-时间线”(HTN-T)任务规划模型,见图4。

对于指令本身,根据其表示任务层次从高到低,划分为任务级指令、计划级指令和命令级指令,高层次的任务可以分解为一个或者多个低层次的任务。航天器则基于自适应科学探测框架下的智能思考结果,并考虑航天器资源管理的实际约束,生成合适的任务级指令,主要包括任务目标、执行时间限制等信息。其次以HTN作为任务分解策略,基于知识库的内容,将较为高级的任务级指令逐级向下分解,直至分解至不可细分的指令级别。

分解完成后,以时间线横向与纵向扩展为任务编排策略,检查约束满足情况,并基于时间线进行冲突化解与顺序编排。当所有的约束全部满足后,即可输出时间线上的所有事件到规划结果。生成的规划结果输入至下层的执行机制,由航天器依次执行指令。

最后,由航天器的知识库完成知识的传递与交换,包括任务分解方法和分解经验等。航天器的知识库内容可以根据分解经验自主生成,也可以来源于智能思考模块。同时,部分的分解方法最初由人工进行规则定义,以此作为初始知识库的内容。

该方法的特点是将HTN和时间线方法结合使用。HTN以任务目标为导向,将动作序列之间的依赖关系以网络结构表示,并将粗粒度的规划任务逐层分解为小粒度的任务,以便实现目标的进一步细化。时间线方法将目标任务进行扩展与冲突消解,将目标转化为任务执行的时刻表。以此保证最终的规划结果满足时间约束、资源约束、逻辑约束等条件。

3 小结

本文以自适应科学探测为背景,提出一种基于分层任务网络-时间线的规划方法。该方法结合了HTN分层考虑问题与时间线方法的冲突消解能力,以满足自适应科学探测中星载任务规划所需要的任务分解、时间编排和星载执行的要求。该方法可以考虑采用CCSDS的XTCE与SEDS标准,解决任务规划中数据描述在地面的规范化问题,以便对星载规划所使用的各种数据进行统一设计

和管理。

参考文献 (References)

- Chen A X, Jiang Y F, Chai X L, 2008, Research on the Formal Representation of Planning Problem, Computer Science, 35(7):105-110 (陈蔼祥, 姜云飞, 柴啸龙. 规划的形式表示技术研究. 计算机科学, 2008, 35(7):105-110.)
- Du J W, 2012, modelling mission planning for imaging satellite based on coloured petri net, Computer Applications and Software, 29(12):324-328 (杜经纬. 2012, 基于有色 Petri 网的成像卫星任务规划建模. 计算机应用与软件, 29(12):324-328.)
- Fikes R, Nilsson N. 1971. STRIPS: A new approach to the application of the oremproving to problem solving. Artificial Intelligence, 2(3):189-203
- Gregg Rabideau, Russell Lee Knight, Steve Ankuo Chien, Alex Fukunaga, Anita Govindjee, 1999. Iterative repair planning for spacecraft operations using the ASPEN system. Proceedings of Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. 440:99
- Lv L Q, 2021. Research and development method of software on spacecraft. Journal of National University of Defense Technology. 43(02):61-65 (吕良庆. 2021, 航天器软件的研发路线. 国防科技大学学报, 43(02):61-65)
- Lv L Q, Huang Y H, An J S, 2018, Discussion on onboard data management system architecture based on CCSDS-SOIS (Journal of Nanjing University (Natural Science)). 54(3): 506-514 (吕良庆, 黄永辉, 安军社. 2018. 基于 CCSDS-SOIS 的航天器数据管理系统体系架构的探讨. 南京大学学报(自然科学版), 54(3): 506-514.)
- Lv L Q, Wu D, An J S. 2019. Construction of intelligent capability on spacecrafts. Journal of National University of Defense Technology, 41(05):1-7. (吕良庆, 吴迪, 安军社. 2019, 航天器智能能力的构建. 国防科技大学学报, 41(05):1-7)
- Malik G, Howe A, Knoblock C, 1998. PDDL-the planning domain definition language, version 1.2. CVC TR-98-003/DCSTR-1165, Yale Center for Computational Vision and Control.
- Shao T H, Zhang H J, Cheng K, Dai C Y, YU X H, Zhang K. 2020, Review of replanning in hierarchical task network, Systems Engineering and Electronics, 42(12):2833-2846 (邵天浩, 张宏军, 程恺, 戴成友, 余晓晗, 张可. 2020, 层次任务网络中的重新规划研究综述. 系统工程与电子技术, 42(12):2833-2846.)
- Wang X H 2017. Study on Autonomous Mission Planning Technology for Deep Space Explorer under Dynamic Uncertain Environment. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (王晓晖.)

2017.动态不确定环境下深空探测器自主任务规划方法研究.
南京航空航天大学)

Wu D,2019, Application Research on Spacecraft Based on HTN
Planning Technology. National Space Science Center , Chinese
Academy of Sciences(吴迪.2019.基于 HTN 规划技术在航天
器上的应用研究.中国科学院大学(中国科学院国家空间科学
中心),)

Xu R,Cui P Y.2018. Deep Space Probe Autonomous Mission Planning
Technology. Beijing: Higher Education Press 50-55(徐瑞，崔平
远.2018.深空探测器自主任务规划技术.北京：高等教育出版
社 50-55)