

第1章

绪 论

低轨电磁探测卫星之间以及与其他类型卫星的有效协同配合为在复杂电磁环境下满足各类用户需求、获取更强的信号源搜索和信号发现能力提供了足够的技术支撑手段。首先，本章从目前低轨电磁探测卫星协同任务规划难点出发，分析了现有规划技术与协同规划应用需求之间的差距；其次，分析了研究低轨电磁探测卫星协同任务规划问题的理论意义与现实意义；再次，梳理了电磁探测卫星任务规划模型、学习型进化算法、深度强化学习方法的国内外研究现状，梳理了研究的必要性；最后，介绍了本书的研究内容、主要创新点与组织结构。

1.1 研究背景

近年来，我国航天事业飞速发展，取得了一系列举世瞩目的成就，探月工程、载人航天、北斗卫星导航系统、高分辨率对地观测系统、火星探测等重大航天工程的成功实施，标志着我国航天从第二梯队迈入第一梯队，进入世界航天先进行列。探测卫星作为航天领域中最重要航天器之一，从第一颗卫星发射至今，已经对社会、经济、军事等各方面产生了深远影响，并在推动社会发展和科技进步上发挥着越来越重要的作用。探测卫星不仅能够获取位于地面、海上、空中及太空中有关于具体物体或环境的各类信息，而且能够对获取的数据进行专业处理生成相应的数据产品。作为一种天基平台，探测卫星具有很多其他信息收集平台难以比拟的独特优势，在国土探测、气象预报、海洋监测、精准农业、公共安全等领域日益发挥着难以替代的作用。

探测卫星是一类具备对海、陆、空中各类静止或移动物体利用其载荷探测并获得相应数据能力的卫星。探测卫星所能完成的任务与发挥的作用取决于自身搭

载的载荷,如光学探测卫星^[1]搭载的是可见光、红外成像设备;雷达探测卫星^[2]通过合成孔径雷达捕获有用信息;电磁探测卫星则依靠接收机和天线完成信号处理和传输。电磁探测卫星并不能够像光学探测卫星一样获得图像,而是通过星上搭载的天线与接收机设备从各类环境中获取物体电磁信号经过加工后生成数据产品。电磁探测卫星可以根据卫星轨道细分为同步轨道电磁探测卫星、中低轨电磁探测卫星。同步轨道电磁探测卫星只能获取固定区域内电磁信号,而低轨电磁探测卫星可以充分利用其探测范围广、重访周期短的特点对全球范围内的电磁信号进行探测。

低轨电磁探测卫星在正常运行的基础上要想顺利完成探测任务并为用户提供数据产品,需要依靠科学有效的任务规划做支撑。现阶段,我国存在多家电磁探测卫星管控单位,每一家管控单位拥有一定数量卫星的管理和使用权。但由于每一家单位是相对独立的体系,并且一颗卫星使用一套单独的管控系统,想要使用不同管控单位所管辖的卫星合作完成任务存在一定的困难。即使合作关系建立起来,也会在确定分工、业务沟通方面浪费时间,影响任务执行的效率。卫星探测产业蓬勃发展,伴随而来的是在轨卫星数量激增、模式多样且复杂的卫星平台和探测载荷、种类繁多的应用场景、用户更高的期望和探测要求,这些客观事实要求卫星应用朝着更加科学和智能的方向发展。如今的卫星管理与使用体制已经难以有效满足各类用户的需求。想要突破各卫星管控单位独自管理的卫星管理与使用体制所面临的瓶颈,统一化管控和协同规划势在必行。统一化管控能够对卫星资源统筹管理,及时了解每颗卫星的运行状态。协同规划则可以根据任务特点从众多卫星中选择最为合适的资源执行任务^[3]。我国卫星统一化管控体制正在逐步建立和完善,如何通过规划让卫星相互配合完成任务也将成为未来管控体制下的关键决策问题。协同规划虽面临规划资源多、任务复杂程度高等难点,但相比于卫星独立规划,协同规划完成任务探测的工作模式具有三个明显的优势。

(1) 突破卫星探测时长限制,实现对探测任务区域持续探测。低轨探测卫星都在各自预设的轨道绕地球飞行,只能探测到轨道下与轨道附近的区域。同时,低轨探测卫星需要足够的电量保证卫星正常运行,只有一部分时间可以用于区域探测^[4]。加之卫星存储容量限制与无法实时数据传输的现实条件,使得一颗卫星在一天内所能探测的范围极为有限。而通过卫星协同探测可以有效调动卫星资源,突破卫星探测时长限制,填补卫星探测区域的空白,实现全球高效覆盖^[5]。

(2) 资源相互补充,提升探测精确程度。电磁卫星探测效果很大程度上受探测任务区域附近电磁环境条件的影响。而光学探测卫星则不会受到电磁环境的影响,可以作为补充探测手段配合电磁探测卫星工作^[6]。同样,合成孔径雷达(synthetic

aperture radar, SAR) 探测卫星也可以与电磁探测卫星相互配合。多种类型卫星相互配合完成探测任务可以有效提升对任务区域探测的准确程度, 并可以通过图像数据与信号数据综合分析得到更有价值的信息。

(3) 增加卫星探测模式的组合形式, 完成复杂环境下的任务探测工作。单个卫星资源具有一定数量的探测模式, 这些探测模式在卫星建造时已经确定并且无法修改。当卫星需要执行任务时, 一个卫星载荷一次只能选择一种探测模式, 而单一的模式很有可能无法满足复杂任务的需要, 只能重复探测才可以达到任务预期的要求^[7]。采用多星协同工作完成任务的方式可以减少对目标探测的次数, 缩短完成探测任务所用的时间。

目前, 我国已经开展了一系列多种类型卫星协同探测的相关实验。在协同探测应用中, 通常需要完成三类现实业务: 静止目标探测业务、低速移动目标探测业务和高速移动目标探测业务。针对这三类现实业务, 需要解决三个规划问题: 面向静止目标的同构电磁探测卫星协同任务规划问题、面向低速移动目标的异构电磁探测卫星协同任务规划问题和面向高速移动目标的异构电磁探测卫星协同任务规划问题。现实业务与规划问题的对应关系如图 1.1 所示。其中, 同构协同是指只使用低轨电磁探测卫星; 异构协同是指使用电磁探测卫星的同时还使用光学探测卫星和 SAR 探测卫星。协同任务规划问题通常被考虑为组合优化问题, 能够运用运筹学和最优化理论, 构建模型并设计相应的求解算法, 在考虑资源能力与任务要求的前提下获得用户与决策者均满意的任务执行方案。由现实业务向科学问题的转变, 一方面需要对现实问题进行抽象、凝练、简化以便于算法求解, 另一方面则需要充分反映现实业务的核心特征, 着力解决实际工作中最为突出也最影响工作效率的问题。这就要求问题转化既要考虑与协同任务规划问题最为密切的资源、任务, 以及其他约束条件和影响规划的因素, 又要突出问题特点将其描述成为便于设计算法求解的模型形式。

在低轨电磁探测卫星协同任务规划问题中, 需要解决两个具体问题才可以得到卫星能够执行的任务探测方案。一是每一个探测任务由哪一个探测卫星资源执行, 二是每一个任务由探测卫星资源在什么时间执行。第二个具体问题也可以称为单个探测卫星任务规划问题, 该问题已经被证明是 NP-hard 问题^[8], 无法保证在多项式时间内找到最优任务执行方案。相较于单个探测卫星任务规划问题, 协同任务规划问题则面临着更多的探测卫星资源和探测任务, 问题的搜索空间更大, 使用算法找到高质量的解将会更加困难。卫星协同探测任务规划问题已有一系列研究成果, 与本书所研究的低轨电磁探测卫星协同任务规划问题均具有资源相互可替代、超额订购等特点。在具有与其他协同任务规划研究共性特征的同时, 低

轨电磁探测卫星协同任务规划问题还具有一些独有的特点。多种类型卫星协同完成探测任务是研究的协同探测任务规划问题中的一个重要特点,探测卫星资源类型不同,卫星执行任务需要满足的限制条件存在明显差异。想要构建任务规划模型并设计算法求解问题,需要厘清限制条件之间的关系,并采用相应的约束条件形式加以描述。约束条件的形式一致可以为构建使用部分协同资源的规划模型提供便利,能够根据规划问题中需要协同的卫星资源直接使用相应的约束条件,实现针对具体情况规划模型的快速构建。

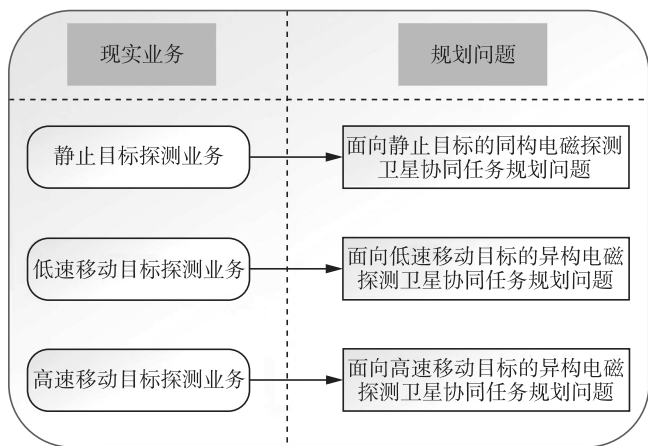


图 1.1 现实业务与规划问题的对应关系

本书提出的任务规划模型与规划算法是综合使用多种类型探测卫星资源,提升卫星综合应用效能的重要手段。多类型卫星共同完成探测任务需要考虑各种卫星载荷的工作能力与特性,从众多任务中选择容易获得高探测收益的任务去执行。高效率规划算法的应用将让卫星管控系统业务处理更为规范和科学,通过方案优选,从执行探测任务的候选方案中选出既能够满足用户需求又能够应对复杂电磁环境的最佳卫星任务执行计划。目前我国已有超过 500 颗卫星在轨运行,其中很大一部分为探测卫星,未来卫星数量将会更多,势必会造成卫星管控压力与难度的增大,只有通过统筹规划的方式才能实现卫星资源的综合管理与最佳应用,做到在保证系统正常运行与各类探测任务顺利完成的基础上推动卫星应用模式与应用场景的创新。

本书聚焦于我国卫星协同探测的重要现实需求,将协同探测中的三类现实业务凝练为科学问题并开展相关研究工作。通过模型构建与规划算法设计可以减小卫星管控系统的建设与运行压力,充分发挥电磁、光学、SAR 探测卫星探测优势,提升卫星资源的应用效率。本书能够为我国卫星探测事业的发展提供技术方法层

面的支持,对满足复杂而多样的用户需求进行技术铺垫,具有一定的实践意义。此外,本书所采用的研究思路与方法对于其他资源管控系统的资源协同规划与优化问题 also 具有很好的借鉴意义。

1.2 研究意义

低轨电磁探测卫星与其他类型探测卫星协同探测可以发挥不同类型卫星各自的探测优势,有效克服由于单颗卫星固定飞行轨道及载荷工作能力因素导致大量任务无法完成的情况。多星协同在保证任务完成的基础上还可以有效获取待探测目标的信号特征,提升信号探测精确程度,具有广阔的应用前景。因此可以看出,低轨电磁探测卫星协同任务规划问题无论是在理论研究层面还是在实际应用层面均具有深入研究的价值。

1.2.1 理论意义

低轨电磁探测卫星协同任务规划问题来自工程型号项目中所面临的关键问题。本书通过对问题进行概括、整理、分析、转化与简化、推理,将静止目标、低速移动目标、高速移动目标三类目标的协同探测问题使用数学语言描述为采用模型和算法求解的数学规划问题。低轨电磁探测卫星协同任务规划问题属于一类 NP-hard 问题,不仅需要对每一颗卫星制订任务计划,还需要考虑多颗卫星之间的协同关系。本书提出了协同探测任务规划基础模型,对目标函数、约束条件的基本形式和具体内容采用公式的形式进行描述。基础规划模型对协同探测规划问题有效解耦,可以根据具体所研究的问题灵活使用约束条件并进行模型扩展。模型中针对不同类型卫星的探测收益采用了一种统一化的收益表示形式,采用内外部因素区分并通过公式加以整合的方法,保证了方案决策的合理性与公平性。本书还对卫星任务规划问题的上界进行分析,推导出卫星在最优资源使用情况下所能完成的探测任务数量与任务探测的时间,有效实现解空间的缩减。本书提出的探测收益表示方式和规划问题上界分析方法不仅适用于低轨电磁探测卫星协同任务规划问题,还可适用于其他类型探测卫星任务规划的问题研究中,同时针对具体的多星协同探测任务规划问题从协同资源、探测任务角度展开深入而全面的研究。在对电磁信号规律和物体运动过程分析的基础上,本书分别提出了静止目标、低速移动目标和高速移动目标协同探测任务规划模型,以上三类目标分别存在需要持续探测、探测范围广、时效性要求高的特征,模型以约束条件的形式将问题特征准确地表示为可以使用算法求解的数学语言。

在协同探测任务规划问题求解方面,参考基础规划模型的构建思路提出了一种基于深度强化学习的进化算法框架。算法框架给出了多种深度强化学习方法与进化算法有效结合的形式,并且可以与其他局部搜索(local search, LS)策略结合使用提升算法的寻优能力。这种算法设计思路在保证好的搜索结果的基础上,有效提升了进化算法的泛化性能并增强了深度强化学习方法的可解释性。在学习型进化算法框架基础上,根据具体规划问题特点对算法进行扩展,分别针对静止目标、低速目标、高速目标协同探测任务规划问题设计了基于算子自适应选择的进化算法、混合型学习进化算法、基于参数自适应学习的进化算法,这三种学习型进化算法充分考虑了在种群搜索过程中兼顾探索与开发,融合知识驱动与数据驱动两种思路,实现搜索信息的充分利用。

通过研究,将多类型卫星资源统筹使用,共同完成复杂的探测任务,可以丰富多星协同任务规划理论,拓展多类型资源协同规划问题的研究思路。结合深度强化学习与进化算法的求解方法可以为求解其他卫星任务规划问题的算法设计提供指导,也对其他领域规划调度问题的求解具有一定的借鉴意义。

1.2.2 实践意义

需要解决的低轨电磁探测卫星协同任务规划问题聚焦于低轨电磁探测卫星实际应用需求,旨在通过研究,为实现低轨电磁探测卫星之间、低轨电磁探测卫星与其他类型探测卫星实现协同探测提供解决方案,提升卫星管控系统的管控水平和卫星综合应用效能。本书从实际应用的角度出发,提出了协同任务规划系统架构,在一种模型和一套算法框架的基础上有效解决了三种实际的低轨电磁探测卫星协同任务规划问题。所提出的任务规划模型目标函数、约束条件采用可灵活配置的形式,具有很强的根据实际业务需求快速调整能力。当任务执行要求、资源能力条件发生变化时,模型能够通过局部调整、快速构建的方式直接应用于新的应用场景中。管控系统采用提出的架构,可以满足日常协同任务规划的需要,并可根据系统建设与升级改造需要增加其他功能模块。

在实际管控系统中,卫星资源和任务需求在系统使用过程中均会出现不断增多的情况,这种情况是难以避免的,会给算法求解与生成方案造成很大的困难。算法能否应对大规模问题所带来的挑战就显得格外重要。本书提出的学习型进化算法能够以种群搜索的方式快速搜索解空间,可以有效解决大规模场景下探测卫星协同任务规划问题,找到令人满意的任务执行方案。学习型进化算法中使用的深度强化学习方法可以在新的任务数据到达时结合历史数据训练算法模型,提升算法对各种复杂情况的处理能力。算法中加入了搜索策略与改进机制,有效平衡

了探索与开发之间的关系,在保证种群多样性的同时增强算法的搜索表现。本书提出的算法具备全局搜索能力和局部搜索能力,可有效应用于具有大量任务和卫星资源的复杂应用场景,在快速获得可行方案基础上寻找最佳探测任务执行方案,做到任务和卫星之间的合理匹配,从而充分发挥卫星协同所能带来的探测优势,获得能够发挥实际效益的数据产品。

本书提出的低轨电磁探测卫星协同任务规划模型与问题求解算法可以很好地应用于多类型卫星探测任务规划方案编排过程之中,能够充分满足探测任务执行要求,并有效使用探测卫星资源。低轨电磁探测卫星可以通过与其他卫星协同完成任务尽可能获得最佳探测表现,以最少的探测次数即可满足各用户的探测需求。本书的模型和算法具有很强的问题适应性和扩展性,这种在一般形式基础上根据具体规划问题做相应改进的思路可以做到与实际工程项目开发过程高度契合,可以根据实际应用需要进行相应的调整。本书的内容可以提升卫星管控系统的资源统筹能力,提升卫星综合应用效能,为我国航天事业发展提供技术支持,具有一定的实践意义。

1.3 国内外研究现状

本节围绕电磁探测卫星协同任务规划问题的核心研究内容,从电磁探测卫星任务规划模型、学习型进化算法和深度强化学习方法三个方面对国内外相关研究的主要进展进行梳理和分析。

1.3.1 电磁探测卫星任务规划模型研究现状

规划模型将需要解决的问题表述成算法可以求解的数学形式,构建起实际问题与求解算法之间的联系。由于相关研究考虑的情况与算法设计等存在差异,研究者提出了一系列采用不同求解目标和不同约束条件的规划模型。首先,本节对现有电磁探测卫星任务规划模型进行梳理,并从不同维度对模型类型进行划分。电磁探测卫星任务规划模型划分方式是多样的,从资源与任务的角度可以将模型划分为根据资源能力选择任务的规划模型和根据任务情况分配给卫星资源的规划模型;从优化目标数量的角度可以将模型划分为单目标模型和多目标模型;根据问题中任务执行时间这一决策变量,可以将模型划分为连续时间规划模型和离散时间规划模型;而根据模型所参考的经典问题模型形式可以划分为整数规划模型^[9]、约束满足问题模型^[10]、经典规划调度模型^[11]等。下面本节将对电磁探测卫星任务规划模型相关研究现状进行详细介绍。

1. 整数规划模型

整数规划 (integer programming, IP) 模型是一类部分或者全部决策变量必须为整数的规划模型。其中, 混合整数规划 (mixed integer programming, MIP) 模型是求解卫星任务规划问题所采用的一种主要模型形式。一般而言, 求解卫星任务规划问题的整数规划模型主要包含两个决策变量, 一个变量用于确定是否为卫星安排任务, 另一个变量则用于确定被安排任务具体的开始时间。模型中如果存在额外的决策变量则通常为辅助变量, 用于表示任务之间的关系等内容^[12]。采用这样的模型形式可以从资源能力维度、任务要求维度清晰地表示各类约束条件。

较早采用 IP 模型对电磁探测卫星任务规划问题进行研究的是王慧林等^[13], 他们构建了以最大化任务收益、最大化区域覆盖、最小化能量消耗为优化目标的数学模型, 采用一种精英保留策略的改进进化算法, 算法中引入模拟退火思路, 提升经典进化算法的局部搜索能力。黄小军等^[14] 则对电磁探测卫星动态规划问题、协同探测规划问题展开研究, 模型均将最大化任务序列收益作为优化目标。最大化任务总体优先级与最小化任务最晚完成时间同样在相关研究中作为模型优化目标。数据下传与探测任务同时进行规划也是实际问题的一种解决思路, 但是所构建模型的假设条件与卫星平台默认设定存在一定程度的冲突^[15]。卫星平台的数据擦除方式、探测与数据下传优先关系、特殊情况处理规则作为模型硬约束更加符合实际情况。一部分研究者还考虑了电磁探测卫星之间、电磁探测卫星与其他类型探测资源协同执行探测任务的情况。光学探测卫星或地面探测资源与电磁探测卫星配合完成探测任务可以达到增大卫星探测范围与提升探测表现的效果。张冰^[16] 设计了启发式算法和进化算法解决新任务到达后重新分配的协同任务规划问题, 还分析了多类型探测卫星协同工作对任务区域的覆盖性能。宋彦杰等^[17] 则考虑电磁探测卫星和地面探测资源协同完成任务, 采用了一种改进人工蜂群算法规划获得协同探测任务计划。

采用整数规划模型可以很方便地构建卫星任务规划模型, 采用这种方式表示的约束条件不仅理解难度低, 还很容易将数学模型以程序语言形式描述并通过设计算法解决问题。整数规划模型存在的问题在于模型和问题耦合性强, 模型与问题场景需要存在明确对应关系, 不同问题之间可借鉴意义不大^[18]。整数规划模型还存在约束条件数量多且复杂、约束限制苛刻等特点, 需要采用问题约束松弛^[19]、罚函数^[20]、解码^[21] 等方式处理约束条件。这就要求如果采用这种模型建模求解, 需要对模型构建、约束处理、解空间分析、算法设计等方面均充分了解并可以灵活运用。

2. 约束满足问题模型

约束满足问题 (constraint satisfaction problem, CSP) 模型也是描述规划问题模型的一种重要形式, 模型中以约束的形式表示规划问题中的变量取值关系与范围。约束满足问题模型的优势在于描述约束条件容易, 并且通俗易懂, 扩展性强。约束满足模型具有一系列消解约束条件、简化问题模型的约束处理方法, 并有成熟的算法机制 (如局部搜索、回溯搜索) 找到问题的解决方案^[22]。不少学者在电磁探测卫星任务规划领域研究的模型构建部分采用 CSP 模型^[23-24]。

Harrison 等^[25] 构建了以最大化任务权重值为优化目标的数学模型, 并重点考虑了卫星与任务区域之间的角度关系对任务执行的影响。祝江汉等^[26]、邱涤珊等^[27]、李长春等^[28]、李耀东等^[29] 则分别针对应急规划、区域普查、移动目标探测、多区域覆盖问题场景, 采用 CSP 模型对问题进行数学形式表示。祝江汉等^[26] 针对电磁探测卫星应急任务规划问题构建了具有两级优化目标的 CSP 模型, 并根据任务插入前已有任务计划状态分别设计了三种启发式任务插入算法实现任务方案快速调整。邱涤珊等^[27] 构建了 CSP 模型用以表示面向普查任务的电磁探测卫星任务规划问题, 优化目标为最大化区域覆盖率与最大化探测任务收益。李长春等^[28] 虽然在研究中考虑了多个子任务之间的先后关系, 但并未考虑到子任务之间存在其他关系的情形。

约束满足问题模型成功构建了多类规划场景下的电磁探测卫星任务规划模型, 采用这种模型形式的早期研究相较于使用整数规划模型形式的相关研究更为深入且贴近实际工程应用。但随着问题约束条件趋于复杂、决策变量规模不断增大, 约束满足问题模型的优势并不明显。处理模型约束条件的过程变得复杂, 并且采用 CSP 的搜索算法求解效率不高。而相比之下, 启发式算法、元启发式算法则更加适用于复杂和大规模场景问题的解决。

3. 经典规划调度模型

在使用整数规划模型和约束满足问题模型构建卫星任务规划数学模型之外, 不少学者研究卫星任务规划问题采用对问题进行转化的思路, 尝试将这一问题以经典规划调度问题的方式构建模型和问题求解, 如车辆路径问题^[30] 和生产车间调度问题^[31], 并参照经典问题的求解思路方式构建模型和问题求解。

车辆路径问题 (vehicle route problem, VRP) 模型是一种基于图结构对车辆服务顾客路线规划的经典规划调度模型。在采用 VRP 模型描述的电磁探测卫星任务规划问题中, 卫星等同于车辆而任务则被视作是顾客。电磁探测卫星任务规划问题中的时间窗转化为顾客服务时间的限制。由于卫星在规划周期内会有多

个轨道圈次飞行,需要将整个飞行过程分为多个有向图求解,其中,每一张图对应一颗卫星飞行轨道圈次内待规划任务集合^[32]。最终得到的方案也可以很容易地表示为一条条从起点到终点的路径。具体的模型形式包括解决单颗卫星单轨道圈次任务规划问题的 VRP 模型和多颗卫星多轨道圈次任务规划问题的 VRP 模型两种。郭玉华等^[33]将考虑探测和数据下传的光学与雷达探测卫星任务规划问题视作 VRP 问题中一类带时间窗约束的车辆装卸货问题 (pickup and delivery problem with time windows, PDPTW) 并构建模型,提出了一种基于动态装载概率与估计装载容量的启发式算法。该启发式算法规划效果优于实际使用的多星任务规划系统。VRP 模型描述卫星任务规划问题的方式可以清晰地表示任务之间的顺序关系以及各类约束。并且由于 VRP 模型已经有很多成熟的解决大规模问题的求解算法,这些求解算法的思路可以有效借鉴到电磁探测卫星任务规划问题中。采用 VRP 模型存在的问题是模型表述复杂、变量数量过多,描述问题的同时还需要维护图结构,图结构的流量平衡是额外需要考虑的约束条件。VRP 模型变种类型众多,求解算法需要根据具体模型特点设计策略,容易花费大量精力。

生产车间模型也是表述电磁探测卫星任务规划问题的一种模型形式^[34]。在生产车间模型中,卫星任务规划被视作机器选择需要加工工件(工序)并指定每一个工件(工序)的开始加工时间。这种模型转化方式在一定程度上反映了卫星任务规划问题的特点。采用生产车间模型表述卫星任务规划问题的相关研究开展较早,Hall 等^[35]于 1994 年便提出了光学探测卫星任务规划的生产车间模型,并设计了一种包含启发式方法和上界求解的动态规划算法。参考该研究,李菊芳等^[36]进一步分析了卫星协同任务规划问题与生产车间调度问题的联系与区别,考虑了时间窗和数据存储约束,构建了生产车间调度模型并使用商业求解软件验证了模型求解效果。采用生产车间模型的优势在于以一种直观形式表示任务分配和任务执行过程,任务之间的关系,降低了构造卫星任务规划模型的难度。求解生产车间调度问题还有一系列成熟的规则与策略,可以借鉴在电磁探测卫星任务规划问题求解算法中^[37]。而生产车间模型对于复杂的任务难以通过简洁的形式表述,并且对卫星以及任务的特点反映不够充分。如一些考虑重复探测、周期性探测的任务采用生产车间模型表述需要通过模型假设对原始问题进行一定程度的简化。这种简化处理的方式很可能导致原始问题的特点体现不充分,难以获得有足够说服力的任务执行方案。