

航天资源规划与调度

成像卫星学习型双层任务 规划理论及应用

Theory and Application of Learning-Based Bi-level Task Planning for Imaging Satellites

何永明 陈英武 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书创造性地提出了成像卫星学习型双层任务规划理论及应用。本书从成像卫星任务规划的发展趋势出发,详细阐述了成像卫星任务规划系统设计方法、学习型双层任务规划模型及求解框架,深入浅出地介绍了成像卫星运行控制和任务规划过程,便于读者快速理解本书的研究内容。针对任务规划问题的两个求解过程,分别设计确定性算法和强化学习算法,力求实现求解过程的通用性与高效性、求解效率与求解精度之间的有机统一。本书的研究成果可应用于实际工程问题中,理论分析过程也可为组合优化领域其他难题的求解提供思路与方法。

本书可作为系统工程、管理科学与工程、航空航天工程、运筹学、人工智能等专业学科的高年级本科生、研究生和高校教师的参考用书,也可供航天工业部门的工程技术人员、相关科研机构的研究人员,以及对卫星任务规划领域感兴趣的科技工作者阅读和参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

成像卫星学习型双层任务规划理论及应用 / 何永明, 陈英武著. —北京: 清华大学出版社, 2023.11

(航天资源规划与调度)

ISBN 978-7-302-64885-7

I. ①成… II. ①何… ②陈… III. ①卫星图像—研究 IV. ①TP75

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 214649 号

责任编辑: 陈凯仁

封面设计: 刘艳芝

责任校对: 薄军霞

责任印制: 沈 露

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 天津鑫丰华印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170mm×240mm 印 张: 13.25 插 页: 4 字 数: 247 千字

版 次: 2023 年 11 月第 1 版 印 次: 2023 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 元

产品编号: 101414-01

《航天资源规划与调度》编辑委员会

(2021年7月)

顾问:

段海滨 (北京航空航天大学)

王凌 (清华大学)

主编:

陈英武 (国防科技大学)

贺仁杰 (国防科技大学)

姚锋 (国防科技大学)

副主编:

邢立宁 (西安电子科技大学)

周忠宝 (湖南大学)

伍国华 (中南大学)

编委:

陈盈果 (国防科技大学)

刘晓路 (国防科技大学)

陈宇宁 (国防科技大学)

张忠山 (国防科技大学)

吕济民 (国防科技大学)

何磊 (国防科技大学)

常中祥 (湖南大学)

沈大勇 (国防科技大学)

王涛 (国防科技大学)

杜永浩 (国防科技大学)

王原 (国防科技大学)

罗绥芝 (湖南师范大学)

于静 (长沙理工大学)

清华大学出版社

丛书序言

F O R E W O R D

2021年9月15日，习近平总书记在驻陕西部队某基地视察调研时强调，太空资产是国家战略资产，要管好用好，更要保护好。人造地球卫星作为重要的太空资产，已经成为获取天基信息的主要平台，天基信息是大国博弈制胜的利器之一，也是各科技强国竞相角力的主战场之一。随着“高分辨率对地观测系统”“第三代北斗卫星导航系统”等国家重大专项工程建设及民营、商业航天产业的蓬勃发展，我国卫星呈“爆炸式”增长，为社会、经济、国防等重要领域提供了及时、精准的天基信息保障。

另外，受卫星测控站地理位置限制，我国卫星普遍存在的入境时间短、测控资源紧缺等问题日益突出；突发自然灾害、军事斗争准备等情况下的卫星应急响应已成为新常态；随着微电子、小卫星等技术的快速发展，卫星集成度越来越高、功能越来越多，卫星已具备一定的自主感知、自主规划、自主协同、自主决策能力，传统地面离线任务规划模式已无法适应大规模多功能星座发展和协同、高时效运用的新形势。这些问题都对卫星管控提出了新的更高要求。在此现状下，为应对飞速增长的卫星规模、有限的管控资源和应急响应的新要求，以现代运筹学和计算科学为基础的航天资源调度技术起到至关重要的作用，是保障卫星完成多样化任务、高效运行的关键。

近年来，在诸多学者与航天从业人员的推动下，航天资源调度技术取得了丰富的研究成果，在我国“北斗”“高分”“高景”等系列卫星为代表的航天资源调度系统中得到长期的实践与发展。目前，国内已出版了多部航天领域相关专著，但面向近年来发展起来的敏捷卫星调度、大规模多星协同、空天地资源协同调度、自主卫星在线调度等新问题，仍然缺乏详细和系统的研究和介绍。本套丛书涵盖航天资源调度引擎、基于精确算法的航天资源调度、基于启发式算法的航天资源调度、空天地资源协同调度、航天影像产品定价、面向应急救援的航天资源调度、航天资源调度典型应用等众多内容，力求丰富航天资源调度领域前沿研究成果。

本套丛书已有数册基本成形，也有数册正在撰写之中。相信在不久以后会有不少新著作出现，使航天资源调度领域呈现一片欣欣向荣、繁花似锦的局面，这正是丛书编委会的殷切希望。

丛书编委会

2021 年 7 月

清华大学出版社

前言

P R E F A C E

成像卫星平台的载荷能力逐渐加强、数量与日俱增，让成像卫星实现更广泛应用、产生更大社会效益的同时，也给成像卫星任务规划带来了新的挑战：综合管控精细化，导致问题中变量数目增加、决策维度升高、解空间变大，也对算法求解质量提出了更高的要求；快速响应常态化，导致用户对成像产品时间效率的期望不断提升，同时对算法运算效率和算法运行稳定性提出了更高的要求；约束条件复杂化，导致问题中变量之间的耦合关系加深，要求算法对不同类型、不同性质的成像卫星实现统一接入和有机整合，以提升对各类成像卫星的综合管控能力和统筹应用效果。正因为上述变化与需求，成像卫星任务规划过程中通用性与高效性之间、求解效率与求解精度之间的矛盾日益尖锐。鉴于此，本书介绍了成像卫星学习型双层任务规划理论及应用。主要内容展开为如下五个方面：

1) 提出了成像卫星任务规划系统设计的一般方法

面向新型成像卫星及其运行控制过程的特点，分析系统设计需求，梳理成像卫星任务规划系统的整体结构、划分成像卫星运行控制的业务流程、抽象任务规划系统模块之间的相互关系。围绕系统设计理念，确定整体设计思路与设计原则。以此为基本原则，利用面向对象的可视化建模技术实现对系统的详细设计，从而保证设计的一致性、模块的独立性、开发的敏捷性。研究内容遵循软件设计规范和基本原则，为相关研究者提供了一套可参考、易实施的方法论基础。

2) 提出了成像卫星任务规划问题的双层优化模型

基于对成像卫星运行控制过程的梳理与分析，确定成像卫星任务规划问题的标准化描述及基本假设。在综述成像卫星任务规划模型研究现状、分析成像卫星任务规划问题基本要素的基础上，提出成像卫星任务规划的问题分解方案和双层组合优化框架：任务分配过程为任务选择一个合适的可见时间窗，任务调度过程基于确定的任务分配方案来决策每个任务的具体执行时刻。在学习型双层组合优化框架下，针对任务调度过程和任务分配过程分别设计了数学规划模型和有限马尔可夫决策模型，并提出了集成强化学习与确定性算法的学习型双层任务规划求

解思路，以充分发挥强化学习和确定性算法的优势。这一部分研究内容是任务调度过程和任务分配过程分析与求解的基本依据，为实现不同卫星、不同场景的统一化建模与求解提供了方法论基础。

3) 提出了两种确定性算法求解任务调度问题

任务调度问题被考虑为数学规划模型，并将该模型中的约束条件分为四类，设计统一的约束表示方法和基于时间线推进机制的约束检查算法，从而实现对复杂约束的高效处理。根据问题特点及精确求解算法优势，该部分内容设计了基于剩余任务密度的启发式算法、基于任务排序的动态规划算法，求解过程的设计保证了结果的稳定性；复杂度分析过程说明了算法的运算效率，同时可通过理论推导证明这两种算法在满足不同特定条件时的最优性，保证了算法的求解质量。此外，这两种算法的运算过程与约束条件耦合度的降低，提高了算法在成像卫星任务调度问题中的通用性。通过仿真实验，验证了基于剩余任务密度的启发式算法的时间效率和运算稳定性具有明显优势，同时求解质量不亚于基于时间窗的构造启发式算法、学习型蚁群算法、自适应大邻域搜索算法这三种对比算法；基于任务排序的动态规划算法在可接受的时间内得到比基于剩余任务密度的启发式算法更高的任务完成率和任务收益率，尤其是在过度订阅场景中，任务完成率和任务收益率分别比自适应大邻域搜索算法平均提升约 26% 和 19%。

4) 改进了深度 Q 学习算法求解任务分配问题

在有限马尔可夫决策模型的基础上，进一步细化对该模型各要素的设计：考虑到任务分配问题的输入参数众多、关系复杂、信息密度低等特点，在确保动作空间和状态空间完备性的基础上，尽可能缩小动作空间和状态空间；同时配合领域知识设计短期回报函数的计算方法以及价值函数的表示方法，可有效缓解训练过程中由于稀疏回报等导致的训练效率偏低等问题。基于该模型设计了改进深度 Q 学习算法，该算法包含了面向随机初始状态的求解框架和基于领域知识和约束条件的动作剪枝策略，提升算法的训练效率。仿真实验中，对算法属性的消融性研究，讨论了算法中价值函数及属性配置、多类算法集成对求解效率和效果的影响，确定了求解成像卫星任务分配问题的深度 Q 学习算法参数与辅助函数配置方案。同时，通过对算法的训练和应用过程分析，证明了深度 Q 学习算法在求解任务分配问题中的可行性以及集成强化学习和确定性算法在任务规划问题中的优越性。

5) 研究成果在“高景一号”任务规划场景中得到验证

以实际项目背景出发，设计了“高景一号”任务规划系统，通过系统的内外外部接口设计和数据结构设计保证系统设计的合理性。建立了面向“高景一号”星

座的双层优化模型和集成规划算法，并用于求解对应的任务规划问题。系统、模型和算法的设计均遵循该星座的运控流程和行业规范，可以很好地与实际应用接轨。14 组“高景一号”星座日常任务规划场景中的仿真实验结果表明，本书所设计的两种集成算法的求解精度在所有场景中均优于对比算法，其在有限的计算资源下，能够求解的实验场景最多，说明所提出集成算法的计算效率很高。面向未来复杂应用场景，所提出的集成算法具有巨大的优势和潜力。

本书凝结了作者 2014—2023 年在国防科技大学系统工程学院求学与工作过程中不断积累的主要学术成果，一字一句都离不开作者导师陈英武教授的悉心指导以及课题组各位老师同学、航天工业部门的各位同仁在本书撰写过程中的大力支持，也离不开清华大学出版社陈凯仁编辑为本书出版的辛勤付出。另外，本书还得到了国家自然科学基金青年科学基金项目（72201273）资助。在此，作者由衷地感谢对本书给予支持与帮助的专家学者和老师同学们！

本书围绕成像卫星学习型双层任务规划系统、模型、方法、应用等开展了初步的研究工作，具有较高的学术研究价值和应用推广价值，其中许多科学问题值得进一步深入研究，作者渴望能够通过本书激发广大读者对相关科学问题的兴趣。虽然作者已尽全力提高内容质量，但由于水平有限，书中难免存在错误和值得改进之处，恳请各位读者提出宝贵意见，不胜感激！

作 者

2023 年 6 月于长沙

清华大学出版社

目录

C O N T E N T S

第 1 章 引言	1
1.1 成像卫星	1
1.1.1 基本分类	2
1.1.2 发展方向与挑战	3
1.2 成像卫星任务规划	5
1.3 研究动机与意义	9
1.4 本书特色与创新点	12
1.5 本书内容框架	14
第 2 章 成像卫星任务规划系统设计	15
2.1 术语解释	15
2.2 国外典型系统研究现状	17
2.3 系统需求分析	20
2.3.1 运控流程分析	20
2.3.2 协作关系分析	22
2.3.3 业务逻辑分析	23
2.3.4 功能结构设计	25
2.4 系统设计理念	26
2.4.1 整体设计思路	26
2.4.2 系统设计原则	27
2.5 系统 UML 建模	28
2.5.1 用例模型设计	28
2.5.2 结构对象设计	31
2.5.3 行为对象设计	34
2.6 本章小结	37

第 3 章 成像卫星任务规划问题分析与双层优化模型建立	38
3.1 成像卫星任务规划问题	38
3.1.1 问题定义	38
3.1.2 基本假设	40
3.2 成像卫星任务规划问题研究现状	41
3.2.1 专家系统模型	41
3.2.2 一般整数规划模型	42
3.2.3 经典规划问题模型	43
3.2.4 约束满足问题模型	44
3.3 成像卫星任务规划问题基本要素	44
3.3.1 输入参数	44
3.3.2 输出参数	46
3.3.3 目标函数	46
3.3.4 约束条件	48
3.4 问题分解与双层组合优化框架	50
3.4.1 问题分解	50
3.4.2 成像卫星任务调度问题定义	51
3.4.3 成像卫星任务分配问题定义	52
3.4.4 双层组合优化框架	53
3.5 学习型双层任务规划模型及求解思路	54
3.5.1 任务调度的数学规划模型	54
3.5.2 任务分配的 MDP 模型	57
3.5.3 学习型集成求解思路	61
3.6 本章小结	63
第 4 章 基于确定性算法的成像卫星任务调度问题研究	65
4.1 成像卫星任务调度算法研究现状	65
4.2 约束分析与约束检查	69
4.2.1 相关概念定义	70
4.2.2 成像质量约束分析	71
4.2.3 姿态转换时间约束分析	72
4.2.4 基于时间线推进机制的约束检查算法	72
4.3 基于剩余任务密度的启发式算法	75

4.3.1	求解思路	75
4.3.2	构造启发式函数设计	77
4.3.3	最优性证明	79
4.3.4	复杂度分析	81
4.3.5	算法优势与局限性	82
4.4	基于任务排序的动态规划算法	82
4.4.1	多阶段决策模型	83
4.4.2	主要计算过程	86
4.4.3	最优性证明	87
4.4.4	复杂度分析	88
4.4.5	算法优势与局限性	89
4.5	仿真实验	90
4.5.1	实验场景设计	90
4.5.2	实验结果及分析	94
4.6	本章小结	98
第 5 章	基于强化学习的成像卫星任务分配问题研究	100
5.1	相关研究现状	100
5.1.1	任务分配模型与算法	100
5.1.2	机器学习应用于组合优化	102
5.2	面向任务分配问题的 MDP 模型	105
5.2.1	逻辑结构	105
5.2.2	动作空间	106
5.2.3	状态空间	108
5.2.4	短期回报	110
5.2.5	价值函数	110
5.3	求解任务分配问题的改进深度 Q 学习算法	116
5.3.1	求解框架	117
5.3.2	剪枝策略	119
5.3.3	复杂度分析	120
5.4	仿真实验	121
5.4.1	任务分配算法性能分析	122
5.4.2	集成算法性能分析	135
5.5	本章小结	143

第 6 章 “高景一号” 成像卫星任务规划应用研究	145
6.1 “高景一号” 任务规划问题背景	145
6.1.1 “高景一号” 基本情况	145
6.1.2 “高景一号” 运控系统	148
6.2 系统设计	155
6.2.1 外部接口设计	155
6.2.2 内部接口设计	157
6.2.3 数据结构设计	158
6.3 问题建模与求解	160
6.3.1 双层优化模型	160
6.3.2 学习型规划算法	163
6.4 仿真实验	164
6.4.1 实验场景	164
6.4.2 单星规划实验结果	167
6.4.3 多星协同实验结果	170
6.5 本章小结	172
第 7 章 总结与展望	174
7.1 总结	174
7.2 展望	176
参考文献	178
附录 A 符号说明	191
附录 B 缩写词列表	193

第1章

引言

我国卫星工业飞速发展，促使航天器在高效管理和智能任务规划等方面的需求日益迫切。尤其是近二十年来，我国成像卫星数量和质量上的“双飞跃”促使任务规划问题的复杂程度陡然增加^[1]。如何合理配置卫星资源，使其实际效益最大化，逐渐成为组合优化领域和航空航天领域学者关注的热点问题之一。本章从成像卫星、成像卫星任务规划的基本概念出发，剖析成像卫星任务规划问题的特点与难点，分析成像卫星任务规划问题的现实需求，从而引出本书研究内容的研究动机与意义，进而总结本书的特色与创新点。

1.1 成像卫星

作为一类重要的天基信息获取工具，成像卫星通过其搭载的成像载荷获取太空视角的遥感数据，并由技术部门对这些数据进一步处理，生产有价值的图像或情报产品并分发给用户^[2]。由于卫星工作环境的特殊性，成像卫星在许多实际应用场景中有地基、空基信息获取工具无法比拟的优势，为国防、经济、社会等众多领域的工作和生产活动提供高效、可靠的信息支持，极大提升了社会生产力和国防实力^[3]。近年来，随着成像载荷与平台技术的不断突破，卫星数量的井喷式增长，成像卫星的应用领域也从宏观的“战略”层次保障向更加具体的“战术”和“战役”层次不断深入^[4-5]；亚米级分辨率卫星日益普及，使得成像卫星在高分辨率要求的场景中应用越来越广泛^[6]；卫星姿态机动能力逐步加强，卫星执行各类动作也越来越灵活，使得卫星能够在有限的时间内完成更多成像任务^[7-9]；在轨运行卫星规模有增无已，提升了成像卫星系统全天时全天候的工作能力，使得成像卫星的应用模式和适用场景不断扩展延伸^[10]。

作为遥感卫星大家族的重要组成部分，成像卫星的主要工作是基于成像载荷进行的。常见的成像载荷有光学载荷、合成孔径雷达载荷、红外成像载荷等，其通过不同类型的传感器接收并处理信号。这些信号通常被转化为电信号后结合图像信号处理等技术最终解析为遥感图像信息^[8]。卫星所能够获取的图像区域是由载荷视场角范围宽度与卫星轨道、卫星的姿态机动能力等因素共同决定的^[11]。成像卫星的基本工作过程如图 1.1 所示。图 1.1 中，方框代表需要成像的区域，其中的数字代表任务的编号。

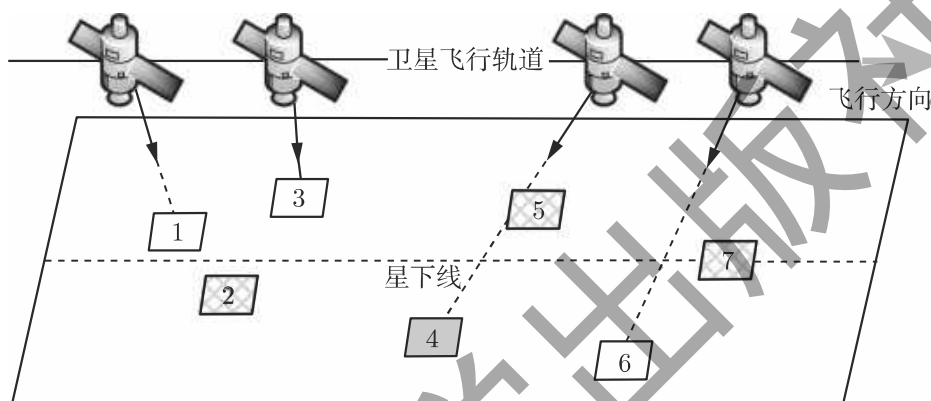


图 1.1 成像卫星的基本工作过程

1.1.1 基本分类

成像卫星的基本工作原理大致相同，但成像卫星可按照用途、轨道类型、载荷类型、姿态机动能力、管控方式等不同标准进行分类。

(1) 按照用途，成像卫星可以分为侦察卫星、预警卫星、测绘卫星、气象卫星等。其中，侦察卫星的功能是利用高分辨率成像载荷对地面、海面或空中目标进行侦察、识别、跟踪，获取尽可能详细的目标信息；预警卫星的主要功能是对潜在的战略威胁进行探测和监视，并为己方战略防御和反击提供可靠的情报支撑；测绘卫星主要利用宽幅成像载荷实现对区域内快速无缝影像覆盖，为国土资源规划、农林规划、城市交通规划等领域提供服务；气象卫星通过搭载各类气象遥感器收集处理各类气象信息，被广泛应用于环境监测、防灾减灾、大气科学等研究中。

(2) 按照轨道类型，成像卫星可以分为低地球轨道（low earth orbit, LEO）卫星、中地球轨道（medium earth orbit, MEO）卫星、高地球轨道（high earth orbit, HEO）卫星、地球静止轨道（geostationary orbit, GEO）卫星、椭圆轨道卫星等。低轨卫星通常是指轨道高度在 2000km 以下的卫星，目前绝大多数成像卫星都被设计在低轨道面工作，其优点是数据传输延迟短，相同的成像载荷可以

获得更高分辨率的数据产品。高轨卫星通常是指轨道高度大于 20000km 的卫星,其中一类特殊的高轨卫星是静止轨道卫星,其轨道高度是 36000km。高轨卫星的成像覆盖范围大,但是其分辨率通常低于低轨卫星,同时需要更大功率的配套设备来配合其完成成像和数据接收等工作。中轨卫星、椭圆轨道卫星则结合了低轨、高轨卫星的优缺点,根据实际需要灵活设计相应的卫星轨道。

(3) 按照载荷类型,成像卫星可以分为光学成像卫星、红外成像卫星、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像卫星等。光学成像卫星是主要采用可见光载荷实现成像的一类卫星,数据直观、后期处理难度小、分辨率高等特点使其成为应用最广的一类成像卫星。但是光学成像卫星的成像效果易受光照条件的影响,且被地物或云层遮挡后无法获取有效的图像产品。红外成像卫星和 SAR 成像卫星分别通过红外辐射、微波雷达信号来合成影像,其优点是受光照和气候等影响较小。

(4) 按照姿态机动能力,成像卫星可以分为敏捷卫星和非敏捷卫星。卫星的敏捷性是新型成像卫星的特点之一。传统的非敏捷型卫星由于卫星平台与成像载荷在卫星飞行过程中的俯仰角无法改变,所以卫星只能在特定的时刻才能对目标进行成像。随着卫星平台与载荷技术的发展,卫星具备了较强的姿态机动能力,这就使得卫星可以在一定时间区间内决策成像任务的执行顺序与实际执行时刻,提升了成像卫星的工作效率和任务规划方案的灵活性。成像卫星具备上述能力则称卫星具有敏捷性。成像卫星的敏捷性虽然提高了卫星的使用效率,但也给成像卫星的管控过程带来了一类更复杂的约束条件——时间依赖型约束^[12]。成像卫星的敏捷性如图 1.2 所示。图 1.2 中,方框代表需要成像的区域,其中的数字代表任务的编号。

(5) 按照管控方式,成像卫星可以分为自主卫星和非自主卫星。随着卫星平台和载荷能力的提升,成像卫星逐渐具备了从传统的“指令执行者”转变为具有一定智能性的“任务决策者”的条件。自主卫星可根据星上电量、存储、接收到的任务信息等动态调整其任务规划方案,从而实现对突发事件的快速响应、提升卫星资源的实际利用率等。

1.1.2 发展方向与挑战

随着我国成像卫星相关技术的快速发展,高性能新型成像卫星如雨后春笋般涌现,以满足日益迫切、复杂的情报保障和国土资源监测等需求。新型成像卫星所配备的全新技术特点和应用模式,扩展了卫星领域智能决策相关技术的内涵和外延,也为智能任务规划系统与模型算法设计带来了新的挑战:

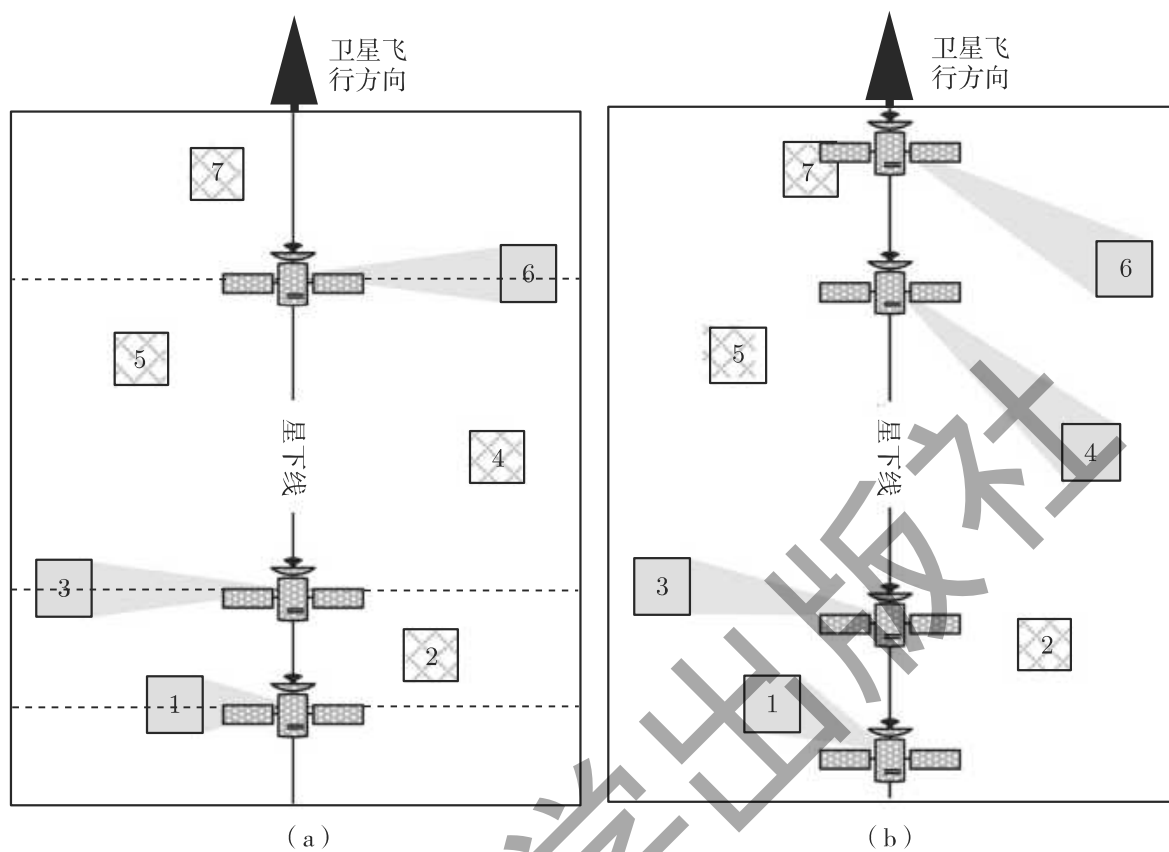


图 1.2 成像卫星的敏捷性

(a) 非敏捷卫星；(b) 敏捷卫星

1) 新型成像卫星的研制是提升复杂任务执行能力的物质基础

随着卫星平台与载荷技术的快速发展，新型卫星平台操控及任务模式更加复杂。“高分多模卫星”“试验二十号 C 星”等标志性卫星的升空，代表着我国正从航天大国向航天强国迈进。新型成像卫星让之前许多不可能实现的功能变为可能，例如对于立体成像、动中成像、非沿迹推扫等复杂任务，新型卫星能够直接完成。与此同时，每一项复杂任务的完成，都伴随更多影响因素和更复杂的约束条件，例如某型敏捷卫星的一个区域目标的实传任务需要数十条控制指令，由于指令之间存在复杂的逻辑关系，使得在执行这些任务的过程中不能突破客观条件限制。这些指令按照一定的规则和约束排列，其中任意一条指令出现错误，都会影响后续所有指令的执行。此外，卫星硬件能力的提升也给卫星在轨健康管理带来很大的风险，从而需要更加精准的状态监控方法，进而导致任务规划过程的数据处理压力增大。

2) 新型成像卫星的应用是缓解数据接收处理压力的有效途径

截至 2022 年年底，我国在轨卫星数量已接近 600 颗，其中遥感卫星领域的在轨卫星数量也超过 200 颗，居世界前列。一方面，卫星数据接续传输等新型应

用模式在一定程度上解决了传统卫星受测控资源限制等“瓶颈”问题，但低效的任务规划也会造成巨大的资源浪费，导致卫星综合效能大打折扣。另一方面，现行的任务规划过程仍然依赖相关工作人员的经验和技巧，需要地面操作人员了解不同卫星的操作细节及载荷使用方法。由于其容错性低，所以任务规划过程非常烦琐，通常需要操作人员付出大量的时间和精力去学习和理解卫星的基础知识和应用过程，学习成本很高。在运行保障过程中，操作人员还经常需要与卫星研制方对指令及参数进行校对确认，人力成本高，出错风险也很大。这显然不适应未来大规模星群的发展需要，急需采用智能化的手段提升卫星管控的效率。

3) 卫星智能任务规划是形成天基快速响应能力的关键

运用成像卫星来应对重大自然灾害、突发公共事件、打击违法犯罪、地区热点事件等潜力巨大，但是这些事件在时间和空间上具有很强的突发性和不确定性，借助成像卫星获取相关情报支撑对卫星的工作效率和精度均提出了很高的要求。目前成像卫星任务规划周期通常在一天到数天不等，规划方案制定完成后，生成相应的卫星指令，在星地时间窗口内将指令注入在轨卫星，卫星将严格按照方案实施对地观测。规划周期长除了硬件和管理方面的客观因素，还有一个重要的原因就是任务规划算法智能性不足，无法在不同场景下灵活选取合适的规划策略从而导致规划方案不能很好地满足需求，方案需要经过逐级审核，并不断地迭代和修正，导致卫星运行控制的全过程进度受到影响。因此，一方面需要改进成像卫星运行控制模式，包括改进测控过程中数据传输的内容，实现从基础的“指令级”信息传递到“使命、任务级”改变，力争用最少的数据量实现星地之间信息交互与同步的过程；另一方面需要提升算法的通用性，让成像卫星运行控制过程在不同场景下均能一次性输出稳定、满意的任务规划方案，减少重复性工作。

1.2 成像卫星任务规划

成像卫星任务规划（以下简称“任务规划”或“规划”）是成像卫星运行控制过程的核心决策过程，是卫星运行控制系统的“大脑”。它需要统筹考虑所有与卫星运行控制相关的资源（如卫星资源、测控资源、数传资源等）的能力与约束，利用科学计算的方法来产生合理的成像卫星任务规划方案^[13]。成像卫星任务规划方案主要包括所管控的成像卫星的工作计划和相关地面接收站的接收计划，但也要考虑测控方案的可行性。成像卫星任务规划过程必须遵循两大原则：

1) 必须保证各个资源安全稳定运行

成像卫星造价昂贵，必须严格满足所有约束条件，且尽量避免所形成规划方

案的不确定性。对成像卫星管控失误所导致的卫星非正常工作通常伴随巨大代价，因此实际工程项目中任务规划过程都尽可能避免使用随机性算法，保证计算结果的可解释性和稳定性。

2) 尽量提高卫星系统整体运行效率

要求算法在运算过程中统筹考虑各资源的实际情况，实现任务规划中整体计算过程“快”“准”“稳”，充分发挥成像卫星的信息获取能力，保证成像卫星任务规划过程在各类复杂环境中的计算效率和求解效果。

广大学者将成像卫星任务规划问题考虑为组合优化问题，并结合每一颗卫星的具体约束条件为任务规划过程订制特定的数学规划模型^[9]。这也让该问题由依赖管理者或决策者主观经验的“软管理”问题转变为运筹优化领域的科学问题：应用最优化理论和智能计算方法，在条件各异的成像卫星任务规划问题中利用有限的计算资源寻找满意的任务规划方案，为管理者和决策者提供决策依据，进而提高成像卫星运控系统的运行效率。面向成像卫星任务规划问题的组合优化模型基本形式如模型式 (1.1) 所示。

$$\begin{aligned} \min \quad & F(\mathbf{r}, \mathbf{es}) \\ \text{s.t.} \quad & G_k(\mathbf{r}, \mathbf{es}) \leq 0, k = 1, 2, \dots, g \\ & [\mathbf{r}, \mathbf{es}] \in \Omega \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中，目标函数 $F(\mathbf{r}, \mathbf{es})$ 用于评价方案的好坏； $\mathbf{r}$ 表示完成任务所对应的成像资源所构成的向量； $\mathbf{es}$ 表示所有任务的执行开始时刻组成的向量； $G_k(\mathbf{r}, \mathbf{es}) \leq 0$ 代表成像卫星任务规划问题的第 k 条约束； g 表示问题中的约束条目数； $[\mathbf{r}, \mathbf{es}]$ 表示决策变量 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{es}$ 所构成的矩阵，它代表一个解； Ω 代表解的可行域。该模型中，成像卫星任务规划问题中决策变量 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{es}$ 是由自然数组成的向量，且两者之间存在深层逻辑关系。考虑具体问题的背景和特点，绝大多数成像卫星任务规划问题的组合优化模型都可被证明是多项式复杂程度的非确定性问题（non-deterministic polynomial, NP）-难的。这类问题在多项式时间复杂度内无法保证求得最优解，其中最典型的的就是敏捷地球观测卫星调度问题（agile earth observation satellite scheduling problem, AEOSSP）^[14]。

不难发现，可根据决策变量将这类模型考虑为两个求解过程^[15]：

- (1) 每一个任务在哪一个资源上执行？（任务分配过程）
- (2) 每一个任务具体在何时执行？（任务调度过程）

如果仅关注决策过程本身，不讨论具体的约束条件，现实生活中许多行业（如生产、制造、交通、物流、航空航天、军事运筹等）普遍存在可被描述成形如模型

式 (1.1) 的组合优化问题^[16]，如车间作业调度问题 (job-shop scheduling problem, JSP)^[17]、带时间窗的旅行商问题 (traveling salesman problem with time window, TSPTW)^[18-19]、车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP)^[20-21] 等。此类问题具有很强的理论研究价值和应用前景，因此吸引了众多管理科学、系统科学、运筹学等相关领域专家的关注，针对这类问题所设计的求解方法近年来也如雨后春笋般涌现。

成像卫星任务规划问题曾经也常被映射为上述经典问题并采用对应的先进算法来求解^[22-23]。这种方式有利于问题模型标准化、求解过程程序化。然而，成像卫星硬件水平的稳步提升、管控方式的不断革新、卫星管控部门对卫星应用模式的深入思考，这些变化都让成像卫星任务规划问题日益复杂。一方面，将成像卫星任务规划问题通过各种手段映射为经典问题难度陡然加大；另一方面，经典问题也不一定能很好地描述复杂多约束条件下的成像卫星任务规划问题的本质特点。每一颗成像卫星的功能定位、平台与载荷能力、空间位置、管控方式等各不相同，其对应的任务规划问题的本质也各不相同^[24-26]。图 1.3 总结了影响成像卫星任务规划问题建模的主要因素。

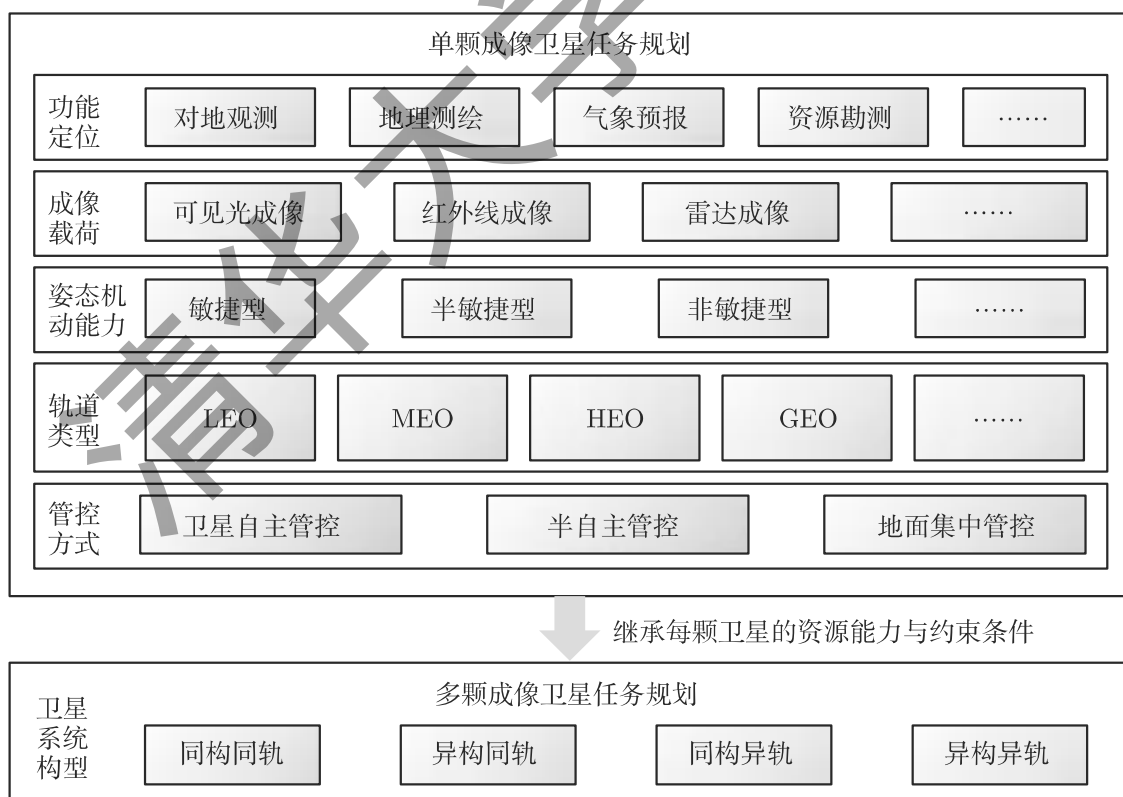


图 1.3 影响成像卫星任务规划问题建模的主要因素

仅改变一个约束条件,甚至改变约束的取值范围,问题的本质都有可能发生变化。例如当考虑卫星具有俯仰能力时,成像卫星任务规划问题是 NP-难问题,否则不是^[27]。正因为问题中用户需求、工作环境、载荷特点、管控模式等客观条件的多样性,导致了成像卫星任务规划模型的复杂性,进而导致了实际工程和理论研究中所讨论问题的鸿沟进一步拉大——许多在经典组合优化问题中表现很好的算法,在实际工程中求解成像卫星任务规划问题效果差甚至无法应用。具体而言,相较于经典组合优化问题,成像卫星任务规划问题具有如下三个方面的鲜明特点和难点:

(1) 成像卫星任务规划问题的解析性质难以被统一描述,从而很难人工设计合理的求解规则^[28-29]。由于成像卫星任务规划是复杂卫星管控系统中的重要环节,用户提出的成像需求需要经过一系列复杂运算才能转化为成像卫星任务规划模型的输入参数^[30]。这些运算很难用简单的函数或公式来表达,这给挖掘问题模型的内在特征并总结求解规则带来巨大阻力。

(2) 成像卫星任务规划问题的约束条件更加复杂,从而针对具体约束条件设计算法规则变得越来越困难^[31]。成像卫星任务规划问题的约束条件是参考卫星制造方、卫星管控方提供的卫星使用文档整理出来的,所以实际工程中,一颗卫星的约束条件可以多达数十条或上百条^[31]。同时,经典规划模型中的约束条件一般是数值约束,很少包含逻辑约束;成像卫星任务规划问题的约束项随参数的变化并不一定是线性的(如绝对值约束、二次项约束等),甚至可能是更为复杂的逻辑约束(如唯一性约束、非空约束等),复杂的约束形式给模型的约简和分析带来了很大的困难,需要深厚的运筹学功底,同时深入理解问题本质才能完成。

(3) 成像卫星任务规划模型的目标函数更加多元化^[32-33]。这主要是根据各成像卫星系统面向的应用场景和使命,结合决策者的偏好共同确定的。实际问题中不同的应用目标导致了数学模型中不同的优化目标,在这种条件下,为了能够采用尽可能少的运算时间得到满意的任务规划方案,就需要对任务规划算法中的规则和策略进行针对性的调整。经典的组合优化问题中,较少考虑决策者的偏好对模型与求解过程的影响。

由于成像卫星任务规划问题与模型具有上述特点和难点,目前工业部门解决成像卫星任务规划问题基本上还停留在“一颗卫星一套系统”的局面,即根据成像卫星的设计方案与使用约束,来构建卫星任务规划系统以及对应的模型和算法,难以做到对成像卫星任务规划系统、模型和算法的标准化设计与统一管理。同时,成像卫星任务规划算法会面临更大的挑战:随着问题复杂度的提升,算法求解效率与求解精度之间的矛盾会更加突出。

在卫星数量快速增长、卫星运行环境和约束条件日益复杂的今天，继续采用这种模式来开发成像卫星任务规划系统不仅需要投入更多的成本来进行系统和算法的开发维护，还更难保证所开发系统的可靠性和稳定性。成像卫星任务规划系统之所以难以做到统一开发，主要原因是成像卫星不断迭代更新，导致成像卫星任务规划问题的约束条件和目标函数难以统一描述。因此，为了减小成像卫星运行控制系统的研发和维护压力，提高成像卫星系统整体应用效率，研究能够统一描述和处理各类约束条件的成像卫星任务规划模型，设计稳定、高效的算法势在必行。

1.3 研究动机与意义

本书着眼于缓解成像卫星任务规划问题中两对日益突出的矛盾——数学模型的通用性与高效性之间的矛盾、求解算法的运算效率与求解精度之间的矛盾，充分考虑成像卫星任务规划问题与经典组合优化问题之间的共性与特性，致力于探究一种更加通用且高效求解成像卫星任务规划问题的方法体系。首先，基于对系统设计方案的理解，提出对各要素统一化描述的成像卫星任务规划模型，最大限度将具体问题中不同的背景、约束条件等内容与决策过程解耦合，摆脱目前“一颗卫星一套系统”的开发现状，以缩短卫星工业中任务规划系统的开发周期和维护成本。其次，在此模型的基础上，设计合理的求解算法，在保证求解精度的前提下，提升卫星任务规划算法的普适性、智能性、快速响应性，最终实现成像卫星在各类复杂多变的环境中的规划过程“又快又好”。

长期以来，成像卫星任务规划问题被描述为最优化模型，并设计确定性算法或随机性算法来解决^[30,34]。确定性算法（deterministic algorithm）是指算法运算过程中不存在随机变量，其决策依据是某一确定性的策略，如动态规划算法^[35]、分支定价算法等均属于典型的确定性算法；与之相对的随机性算法（如遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等智能优化算法）则是利用算法中的随机参数实现算法在解空间中的搜索过程。这两种算法各自的优劣也非常明显：确定性算法的收敛方向明确，不需要反复迭代，因此其计算效率通常较高；随机性算法看似可以实现求解过程的通用性，但是由于随机性算法的本质特征，其求解质量和求解效率之间的矛盾很难调和。此外，随机性算法的求解质量不如确定性算法稳定，这与1.2节介绍的第一条原则相违背。因此，在实际工程中的成像卫星任务规划问题更倾向于选择确定性算法进行求解，而不是采用更热门的智能优化算法。

但是面对复杂的问题背景和大规模应用场景，确定性算法通常也难以在可接

受的短时间内保证算法的最优性：在该问题日益复杂化的背景下，如果将成像卫星任务规划问题简单地建立为模型式 (1.1) 的形式并采用单一的确定性算法来求解这个问题，会导致所建立的数学模型冗长复杂，模型的普遍适用性降低。同时对模型进行化简、变形等处理的难度增大，从而导致求解该模型的算法设计成本增加，并且所设计算法的效率与求解质量难以保证^[27,36]。因此，立足于当前和未来的卫星工业发展水平，这种求解思路不利于成像卫星任务规划问题的理论研究及大规模推广应用。

作为机器学习领域中擅长于决策问题的一类范式，强化学习（reinforcement learning, RL）近年来逐渐受到规划调度领域专家的关注，并将其成功地应用于 JSP、VRP 等经典调度问题中^[37-39]。强化学习的基本原理：通过研究决策时刻的状态、动作和相应回报之间的关系，利用“探索”（exploration）和“挖掘”（exploitation）的手段训练得到类似人类专家经验的知识。由于强化学习算法的设计过程无须对问题的背景知识深入研究，训练过程无须提前准备标注好的数据辅助训练，所以逐渐受到组合优化领域专家的青睐。然而，强化学习也存在明显的局限性^[40]：随着任务规划问题求解规模的增大，其训练效率陡然降低甚至无法收敛。不同的问题选择不同的训练算法和策略，训练效果也存在天壤之别。

由上述分析可得，无论是组合优化领域主流的数学规划算法、启发式算法、元启发式算法，还是近几年热度不减的强化学习，从已知公开的研究成果来看，都很难独立求解复杂的成像卫星任务规划问题。因此，合理分解问题，并针对不同求解过程的特点设计对应的算法，可以更加有效地发挥不同算法的优势，达到“1+1>2”的效果。分层求解成像卫星任务规划问题的思路应运而生。大量复杂组合优化问题的求解经验表明：将原问题分解为若干个具有逻辑先后关系的求解过程，并分层求解这些问题，可以有效降低原问题的复杂性，进而保证求解质量和求解效率^[41-43]。

本书从实际应用情况出发，梳理了卫星运行控制过程，并利用统一建模语言设计了基本的成像卫星任务规划系统框架，分析了其运行流程、功能模块、数据结构等，为进一步理解和定义成像卫星任务规划问题提供了基础。

在设计成像卫星任务规划系统的基础上，如何对成像卫星任务规划问题分层？如何对每一层中的求解过程建模并分析？能否找到相对通用的方法来保证成像卫星任务规划问题解的质量？这些问题是本书关注的重点问题。本书考虑将成像卫星任务规划问题建立为双层优化模型：上层为任务分配过程，决策每一个成像任务执行所对应的可见时间窗口；下层为任务调度过程，决策每一个成像任务在确定的可见时间窗口内的具体执行时刻。

在该模型中, 基于任务分配过程的结果, 可以将任务调度过程建立为一类复杂度较小的组合优化问题。该问题面临的主要挑战来自约束条件的复杂性。约束条件的种类繁多、数量巨大, 这一特点在经典组合优化问题中考虑较少。本书通过梳理成像卫星任务规划问题中的约束条件, 对约束条件进行分类并对每类约束分别处理, 提出了一种高效的约束建模与约束检查方法; 基于此约束检查方法, 设计了两种确定性算法对任务调度过程进行求解; 通过理论分析, 证明了所设计的两种算法在特定条件下的最优性。这两种算法在主流程中均不包含针对特定约束条件的设计, 最大限度保证了算法在不同工程问题中的通用性和可靠性。

相对于任务调度过程, 任务分配过程很难独立采用传统的最优化理论进行求解, 这是因为很难找到独立的目标函数来评价分配过程的好坏, 分配方案的质量最终由任务调度结果评价, 它不仅与任务分配过程考虑的约束条件、分配算法等相关, 还与任务调度的求解过程密不可分。通过强化学习方法训练得到任务分配的经验公式来指导分配过程, 是提升任务分配过程精准性、快速性的有效途径^[44]:

(1) 任务分配过程可以被描述为一类序贯决策问题^[45]: 根据任务队列和资源的具体情况, 资源逐一选择合适的任务, 并在每一次分配之后更新任务队列和资源的信息。通过将这一过程描述为有限马尔可夫决策过程 (finite Markov decision process, MDP), 通过强化学习算法能得到满意的求解效果。

(2) 卫星的约束条件和能力参数等十分复杂, 但是在卫星任务规划场景中这些条件不会发生改变。采用传统的运筹学算法绕不开对这些复杂条件和参数的分析, 而在强化学习所擅长解决的问题中, 这些因素对应 MDP 模型中的环境 (environment) 部分, 算法只需要根据所作决策调用环境部分的输出结果, 不需要对其内部的原理进行讨论^[46]。

(3) 任务分配过程的优化目标很难用显式数学公式表达, 但是其决策变量、目标函数等是明确的。也就是说, 经过一系列复杂运算, 每一个分配方案有唯一的目标函数值与之对应。因此, 上层任务分配过程被描述为 MDP 模型比建立为数学规划模型更有优势。

综上所述, 上层任务分配过程的研究重点就是如何为该问题设计合理且高效的 MDP 模型、如何设计并改进强化学习算法, 以提高其在任务分配过程中的求解效率。

在综合考虑成像卫星任务规划问题的难度、深入分析经典优化算法和强化学习方法的优势和不足后, 研究集成确定性算法和强化学习来求解成像卫星任务规划问题。将上层任务分配过程建模为一个 MDP 过程, 并采用强化学习算法进行求解; 下层任务调度过程建模为数学规划模型, 并设计确定性算法进行求解。

如何合理搭建双层优化模型和集成确定性算法和强化学习的求解框架来求解复杂的成像卫星任务规划问题,是本书研究的关键与基础。通过结合强化学习算法和运筹学中的确定性算法来解决成像卫星任务规划问题,探究所设计的方法在求解复杂问题时的一般性规律,对促进强化学习和运筹学领域理论研究和卫星任务规划领域工程应用都具有重大意义。本书的研究意义可总结为以下四个方面:

(1) 双层优化模型打破了常规的单颗成像卫星任务规划模型和多星协同任务规划模型之间的界限,通过将任务分配过程设计为对任务可见时间窗的选择,实现了对单星和多星任务规划问题的统一描述。既规范了任务分配过程的决策变量,也降低了任务调度过程的求解难度,有利于对两个过程中的问题开展研究。相较于广泛使用的混合整数规划模型,该模型为成像卫星任务规划问题的标准化描述提出了一种更合理的方案。

(2) 对求解任务调度问题的确定性算法深入讨论,证明了算法在特定条件下的最优性。基于所证明的结论,成像卫星任务调度问题可进一步被简化,为成像卫星任务规划领域研究者的后续研究工作提供理论基础。另外,第4章给出的算法最优性证明过程可以借鉴到类似问题的证明过程中,为组合优化领域中其他实际问题的研究者提供一种可行的思路。

(3) 在集成确定性算法和强化学习的任务规划算法的全过程均实现了决策过程与具体约束的解耦,即具体约束条件可以完全看作一个黑箱模型,整个集成算法的求解过程不对具体约束进行分析和处理,仅需要在检查约束、计算收益等过程中调用相关函数读取输出结果即可。这种求解思路可最大限度保证算法的通用性,也规范了问题的描述,不仅有利于各种实际问题的统一建模求解,还可以促进该领域理论研究的标准化。

(4) 长期以来,成像卫星任务规划领域理论研究与实际应用之间存在巨大的鸿沟:实际应用由于需要考虑过多约束条件和现实因素,大多数理论研究成果很难应用于实际问题中,或者先进的算法在实际问题中无法得到好的求解效果。第6章通过综合运用本书所有的研究成果,实现了集成确定性算法和强化学习的组合优化算法在“高景一号”任务规划问题中的应用,证明了该方法在求解实际问题时的有效性,缩小了成像卫星任务规划领域理论研究与实际应用之间的鸿沟。

1.4 本书特色与创新点

本书的研究工作从实际成像卫星运行控制过程出发,研究该问题的一般化建模与求解方法。内容由浅入深,从系统设计、问题分析、学习型双层优化求解框

架建立、任务调度与任务分配过程的数学模型建立与求解、工程应用等方面展开研究,逐步揭示成像卫星学习型双层任务规划技术的科学规律与应用结论。本书的创新点可总结如下:

(1) 设计了成像卫星任务规划系统,实现了对成像卫星运行控制过程中的工作流程、协作关系、业务逻辑、功能结构等标准化描述,并基于软件设计通用的可视化建模技术实现了对系统的用例、结构对象和行为对象进行详细分析设计,为卫星管控人员、系统开发人员和科研工作者理解、改造、研究成像卫星任务规划系统提供了一个有效的范式。

(2) 提出了面向成像卫星任务规划问题的双层优化模型。首先通过对成像卫星任务规划问题的描述与定义,提出了本书研究过程的基本假设。其次对问题的输入、输出、目标函数和约束条件进行了详细的分析,实现了对问题的分解,并提出了面向成像卫星任务规划问题的双层优化模型。

(3) 提出了集成确定性算法和强化学习算法的求解框架。该框架集成了确定性算法和强化学习算法,其中,确定性算法用于求解任务调度问题,强化学习算法用于求解任务分配问题。通过这两个算法模块的不断交互,产生训练数据,从而实现最终用于任务分配问题的价值函数的训练过程。

(4) 针对任务调度问题,提出了基于剩余任务密度的启发式算法和基于任务排序的动态规划算法。两种算法都可以通过理论证明其特定条件下的最优性,并利用复杂度理论分析算法的时间、空间效率,对约束的处理保证了算法在面对不同的复杂约束时的普适性。实验结果表明,两种算法各具优势,其中基于剩余任务密度的启发式算法在运算效率方面较基于任务排序的动态规划算法以及其他元启发式算法具有显著优势,基于任务排序的动态规划算法在绝大多数场景中的求解精度占优。

(5) 针对任务分配问题,提出了改进深度 Q 学习算法。首先基于问题特点,建立了面向任务分配问题的 MDP 模型,然后设计了深度 Q 学习算法,并采用领域知识和约束对其进行剪枝,以提高训练效率。从实验结果分析,该算法可以在很少的迭代次数内收敛,并在不同的测试数据中具有较好的泛化能力。

(6) 研究成果在“高景一号”商业遥感卫星星座的仿真规划场景中得到验证。通过梳理实际工程问题的接口与数据结构,结合对具体约束条件的分析,可以提炼出对应工程中的成像卫星任务规划问题。将研究成果应用于“高景一号”商业遥感卫星星座,并对算法在日常规划场景中的各项性能分析,可得本书所提出的方案在求解复杂的实际工程问题时可以稳定得到较高的方案总收益,证明了学习型双层任务规划理论与方法具有较高的工程应用价值。

1.5 本书内容框架

本书研究了集成确定性算法和强化学习的学习型双层优化方法及其在成像卫星任务规划领域的应用，组织架构如图 1.4 所示。

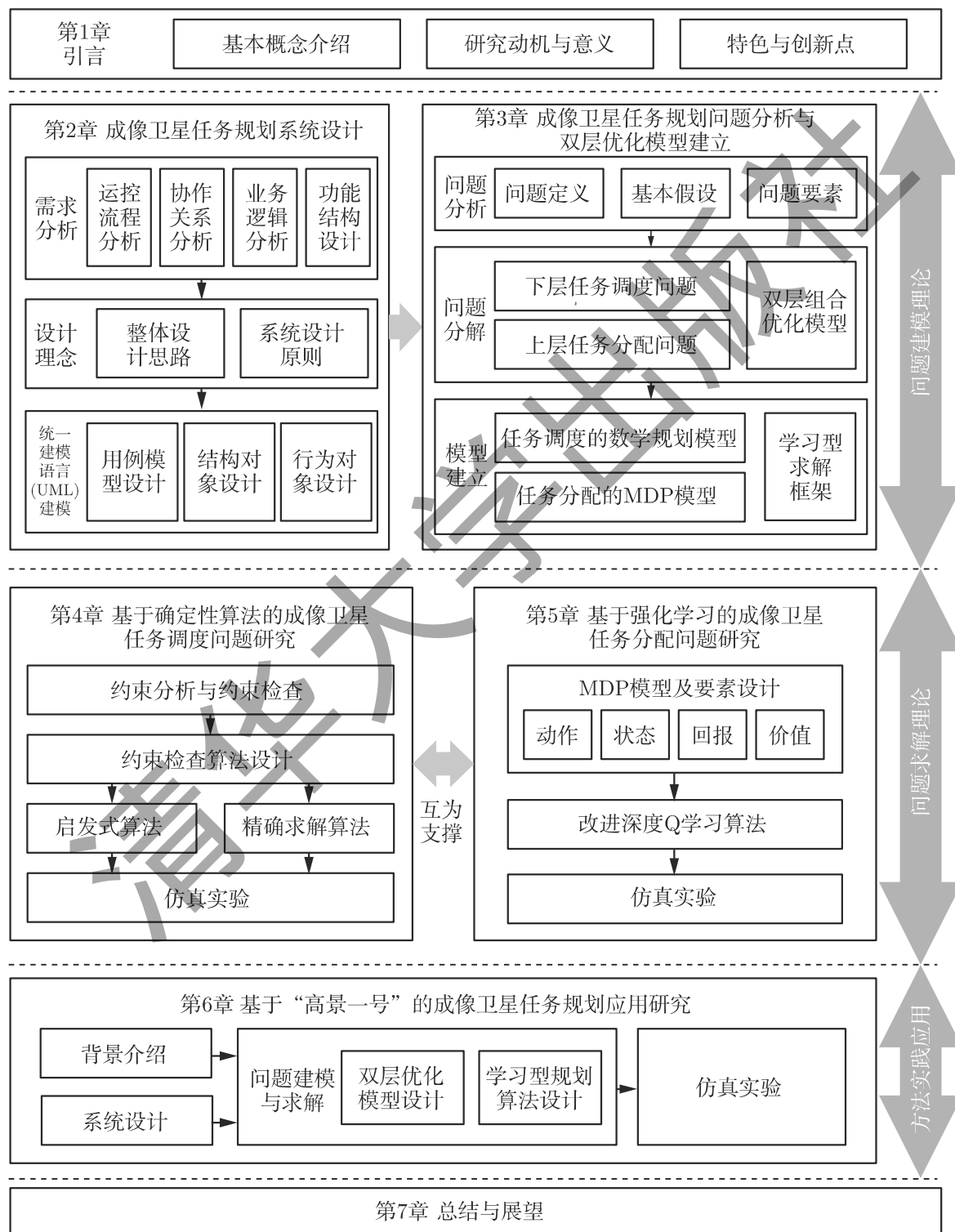


图 1.4 本书组织架构

第2章

成像卫星任务规划系统设计

本章通过对成像卫星任务规划中各要素的系统建模来帮助初学者快速理解成像卫星任务规划过程，并基于对实际工程应用中成像卫星任务规划系统特点的分析，提出了一套兼容当前主流管控模式并适应卫星工业未来发展趋势的通用任务规划系统及其相关功能架构。首先，给出了与成像卫星任务规划过程相关的术语及其定义，调研了国际典型卫星任务规划系统和研究项目；其次，从成像卫星的运控流程、协作关系、业务逻辑、功能结构四个方面的整体情况出发研究成像卫星任务规划系统的特点和功能需求；再次，提出成像卫星任务规划系统的设计理念和原则；最后，利用软件开发中通用的可视化建模技术——统一建模语言（unified modeling language, UML）对系统的用例模型、结构对象和行为对象等进行详细设计，深入剖析系统内部各组成部分的相互关系、基本特点及其内涵，为成像卫星任务规划问题分析奠定基础。

2.1 术语解释

由于成像卫星任务规划具有较强的专业性，本章首先对本书涉及的主要专业术语进行定义。

(1) 成像需求^[47-48]：成像需求是用户为了获取遥感图像而向运控中心提交的相关信息，包含目标属性集和成像要求属性集两大部分。目标属性集是为了确定需求的地理位置，其中，目标点的经纬度是目标属性集中最基本的属性；成像要求属性集是为了确定用户对图像产品其他方面的要求，如成像质量要求、成像时间要求、成像角度要求、观测模式要求、成像需求收益等。

(2) 成像任务^[49-50]：成像任务是一个数据集合，是任务规划阶段的主要输入之

一, 包含对应的可见时间窗口集合、完成该任务后的收益等必要属性。其中, 可见时间窗口是根据需求的目标属性结合卫星轨道参数、卫星载荷能力等信息进行综合计算, 并根据所有成像需求进行裁剪, 最终得到的一个时间区间。该时间区间被定义为“时间窗”。

(3) 成像元任务: 元任务是本问题中决策对象的基本单元。一个元任务的属性包含时间窗口、成像持续时间等属性, 对应描述成像任务单个成像机会的必要属性。由于卫星轨道的周期性, 一个任务可能存在多次成像机会, 所以也就对应多个元任务。因为对应单次成像机会, 所以一个元任务中仅包含单个成像窗口, 需要决策的内容是在成像窗口中的实际成像开始时间。

(4) 轨道根数: 轨道根数是用来描述卫星空间轨道的一组参数, 当这一组参数确定后, 卫星轨道的位置唯一确定。在卫星运控领域, 有两种方式来唯一确定一颗人造地球卫星的轨道: 一是轨道六根数 (即半长轴 a 、偏心率 e 、轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω 、近地点角 ω 以及平近点角 M); 二是两行轨道根数 (two line elements, TLE)。其中, 轨道六根数简洁明了, 通常用于仿真实验中; 两行轨道根数 (TLE) 所记录的数据更多, 通常应用于实际工程项目中。第 4~5 章开展的仿真实验采用的是轨道六根数来刻画卫星轨道以简化相关描述, 而第 6 章应用实例采用国际通用的两行轨道根数 (TLE) 来描述卫星轨道信息。

(5) 轨道圈次: 成像卫星在围绕地球运转时是在特定轨道上飞行的。除地球静止轨道外, 其他卫星飞行轨道都具有周期性。将卫星连续两次以同一方向 (升轨或者降轨) 经过同一纬度所对应的的时间组成的区间称为一个轨道圈次。

(6) 任务预处理^[29,51]: 广义上的任务预处理包括各类卫星从用户需求转化为成像任务的所有过程, 包括区域目标分解、点目标合成等。本书所涉及的任务预处理过程主要是指将结构化、规范化描述的成像需求结合卫星的能力与约束, 通过一系列计算处理成任务规划模型所需要的任务集合, 以便后续计算。任务预处理的大部分过程是面向具体输入的数值计算, 这些计算过程结合卫星工业的行业标准与要求, 经过长时间的发展和沉淀, 已经形成了一套成熟的计算方法和流程^[30]。

(7) 卫星工作计划: 卫星工作计划是指卫星在一段时间内被安排的任务以及每个任务的成像参数配置方案。任务的成像参数配置过程既包括调用对载荷要求、工作模式等输入信息, 也包括对任务开始与结束时间等的决策。通常一颗卫星在一个规划周期内唯一对应一个工作计划, 单颗卫星的任务规划方案与该卫星的工作计划可相互转化, 任务规划方案必须保证满足任务规划模型中的所有约束条件。

(8) 卫星控制指令: 卫星控制指令是卫星设计方在充分考虑卫星平台与载荷特点、工作模式与环境等基础上, 设计的一种机器语言格式。目前绝大多数成像