

对地观测卫星 不确定任务规划

Uncertain Mission Planning of
Earth Observation Satellites

王建江 胡雪君 著

 科学出版社

对地观测卫星不确定任务规划

王建江 胡雪君 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

对地观测卫星在实际应用中面临大量不确定因素,如新任务提交、卫星资源故障、气象环境变化等,给卫星规划调度提出了新的挑战.针对此类问题,本书首先详细阐述了对地观测卫星的工作模式和 workflows,分析了卫星规划调度问题的特点和难点;其次,分析了观测需求、卫星状态和云层遮挡三类典型不确定因素及其对卫星规划调度的影响,在此基础上,分别介绍了需求、资源、云层遮挡不确定条件下对地观测卫星调度技术,包括问题建模、算法设计和实验分析;最后,展望了对地观测卫星未来的一些应用前景和发展方向.

本书适合航天工程实践、运筹学、管理科学与工程、资源规划调度等相关领域的科研人员、工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业高年级本科生、研究生及高校教师等的参考用书.

图书在版编目(CIP)数据

对地观测卫星不确定任务规划 / 王建江, 胡雪君著 — 北京: 科学出版社, 2020.3

ISBN 978-7-03-062676-9

I. ①对… II. ①王… ②胡… III. ①测地卫星—研究
IV. ①V474.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第233659号

责任编辑: 李静科 李 萍 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年3月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2020年3月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 161 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

对地观测卫星在获取地面图像方面具有覆盖范围广、信息获取精度高、不受空域国界限制、不涉及人员安全等优势,成为空间对地观测的主要平台,受到各航天大国的重视,得到了快速发展.我国目前已经研制和发射了资源系列、环境系列、高分系列等多颗对地观测卫星,其广泛应用于国土测绘、灾害防治、环境保护、军事侦察、农作物监测等领域,在经济发展和国防建设中发挥了重要作用.

信息获取能力是影响对地观测卫星应用效果的关键,而调度是提升信息获取能力的重要手段.虽然随着航天事业的高速发展,对地观测卫星的数量逐渐增多且种类日益丰富,但是相对于“爆炸性”增长的对地观测需求,其数量还是有限的,难以满足不同用户的多类型对地观测需求.如何合理进行对地观测卫星调度并制订对地观测计划,充分利用卫星强大的观测能力,提高对地观测系统效能,成为亟待解决的关键问题.

对地观测卫星调度是指在满足卫星使用约束的基础上,为提高卫星观测效率、降低运行成本,将卫星有效载荷、地面站等有限的资源按照时间分配给不同的观测任务,生成卫星观测计划的全过程.传统的对地观测卫星调度集中在具有一定调度周期的静态调度范围内,例如卫星观测日计划、周计划制订,一般假定调度相关信息和参数是完全确定的,调度方案一旦生成就不再变动.然而,由于环境的复杂性,对地观测卫星执行过程中面临着诸多的不确定性,例如用户提交的观测需求改变、卫星资源状态失效、已安排的观测任务被云层遮挡等,传统的确定性调度模式不再适用,需要研究不确定环境下的对地观测卫星调度方法.

对地观测卫星调度的研究目前还是主要针对确定性问题,针对不确定条件下的对地观测卫星调度研究还十分有限,并且国内鲜见介绍不确定卫星调度的书籍.依托国家高分重大专项、国家安全重大基础研究计划、武器装备预研重点基金、国家自然科学基金等项目,作者所在课题组围绕不确定条件下对地观测卫星调度问题开展了深入研究,近些年在运筹管理、航空航天领域知名期刊和会议上发表了多篇高水平研究论文,得到了国内外同行的认可和高度评价.本书融合了课题组的代表性研究成果,介绍了不确定条件下对地观测卫星调度方法,分别针对需求、资

源、云层遮挡三类典型不确定因素,重点介绍了对地观测卫星不确定调度问题建模和求解方法,为不确定条件对地观测卫星调度提供了新思路.全书共10章,可分为五部分,内容自成体系.第一部分为问题概述,包括:第1章介绍不确定条件下对地观测卫星调度问题的研究背景、研究意义及国内外研究现状;第2章介绍对地观测卫星相关背景知识,详细分析和阐述了不确定条件下对地观测卫星调度问题.第二部分介绍需求不确定条件下对地观测卫星调度方法,包括:第3章阐述需求不确定条件下对地观测卫星应急调度技术,基于任务合成策略,建立观测调度多目标数学规划模型,设计多星动态应急调度算法;第4章介绍需求不确定条件下多星动态实时调度技术,考虑任务动态合成策略,建立实时调度多目标优化模型,提出新的实时调度算法.第三部分介绍资源不确定条件下对地观测卫星调度方法,包括:第5章介绍一种面向容错的对地观测卫星观测任务调度模型,采用主版本/副版本技术可以实现对任意时刻单颗卫星失效时的容错,提出容错调度算法.第四部分介绍云层遮挡不确定条件下对地观测卫星调度方法,包括:第6章采用随机期望值模型对问题建模,设计了问题求解分支定价算法;第7章采用机会约束规划模型对问题建模,分别设计了问题求解分支割平面算法和列生成启发式求解算法;第8章采用鲁棒优化模型对问题建模,分别设计了问题求解的精确算法和多个启发式算法;第9章介绍云层遮挡不确定条件下反应式调度模型及启发式求解算法.第五部分为研究展望,包括:第10章介绍不确定条件下对地观测卫星调度领域未来新的研究方向.

本书由王建江制定提纲,第1—6,10章由王建江撰写,第7—9章由胡雪君撰写.此外,课题组陈黄科、霍离俗、邱文博、霍离俗参与了部分章节内容的编写和全书的整理校对工作,在此一并向他们表示感谢.衷心感谢国防科技大学谭跃进教授、邱涤珊教授、祝江汉教授、马满好副教授、朱晓敏副教授、李志猛副教授、刘进副教授和李卫丽博士,他们悉心的指导和有益的建议使得本书得以一步步完善.感谢科学出版社的大力支持,感谢参与研究的课题组全体博士研究生和硕士研究生.本书的研究工作得到了国家自然科学基金(71801218,71701067)、湖南省自然科学基金(2019JJ50039)、国防科技大学科研计划(ZK18-03-16)等项目的资助,在此深表感谢.

由于作者水平有限,本书许多内容还有待完善和深入研究,对于不足之处,诚望读者批评指正.

作者

2019年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 对地观测卫星调度问题研究的背景和意义	1
1.2 对地观测卫星调度研究概述	2
1.2.1 对地观测卫星确定调度问题研究现状	2
1.2.2 不确定条件下对地观测卫星调度问题研究现状	9
1.2.3 不确定条件下调度理论方法研究现状	11
参考文献	14
第 2 章 不确定条件下对地观测卫星调度问题	28
2.1 对地观测卫星工作原理	28
2.1.1 有效载荷和成像方式	28
2.1.2 卫星轨道和对地覆盖	31
2.1.3 对地观测卫星工作流程	32
2.1.4 对地观测约束条件分析	33
2.2 对地观测卫星调度问题	35
2.2.1 概述	35
2.2.2 基本假设及简化	37
2.2.3 基本要素	38
2.3 不确定因素影响分析及建模	40
2.3.1 需求不确定性	41
2.3.2 资源不确定性	41
2.3.3 气象环境不确定性	42
2.4 不确定条件下对地观测卫星调度	44
2.4.1 不确定条件下对地观测卫星调度框架	44
2.4.2 不确定条件下卫星观测调度的特点和难点	45
参考文献	46

第 3 章 需求不确定条件下多星动态应急调度	49
3.1 引言	49
3.2 多星动态应急调度模型	50
3.2.1 任务、资源和观测机会	50
3.2.2 调度约束	51
3.2.3 调度目标	52
3.3 任务合成	53
3.3.1 合成约束	53
3.3.2 模型与算法	55
3.4 多星动态应急调度算法	58
3.4.1 任务插入	58
3.4.2 规则	60
3.4.3 算法描述	61
3.5 模拟测试结果与分析	62
3.5.1 测试方法与参数	63
3.5.2 任务规模对算法的影响	64
3.5.3 任务到达率对算法的影响	65
3.5.4 期望完成时间对算法的影响	67
3.5.5 有效完成时间对算法的影响	68
参考文献	69
第 4 章 需求不确定条件下多星动态实时调度	71
4.1 引言	71
4.2 多星动态实时调度问题	71
4.3 任务动态合成策略	75
4.4 动态实时调度算法	76
4.5 性能分析	80
4.5.1 仿真方法及参数	80
4.5.2 任务规模对算法性能的影响	81
4.5.3 任务到达时间间隔对算法性能的影响	83
4.5.4 任务截止期对算法性能的影响	84
参考文献	86

第 5 章 资源不确定条件下多星容错调度	87
5.1 引言	87
5.2 系统模型	87
5.2.1 任务模型	87
5.2.2 失效模型	89
5.2.3 调度目标	90
5.3 重叠设计与分析	90
5.3.1 BB 重叠	91
5.3.2 PB 重叠	93
5.3.3 PP 合成	95
5.3.4 合成约束	96
5.4 容错调度算法	97
5.4.1 主版本调度	97
5.4.2 副版本调度	101
5.5 性能评估	104
5.5.1 模拟方法和参数	104
5.5.2 任务数量对算法的影响	105
5.5.3 任务到达率对算法的影响	107
5.5.4 任务截止期对算法的影响	108
5.5.5 参数 u 对算法的影响	110
参考文献	111
第 6 章 云层遮挡不确定条件下期望值模型及求解算法	113
6.1 随机期望值模型	113
6.1.1 参数及符号定义	113
6.1.2 基于“流变量”的数学规划模型	114
6.2 分支定价求解算法	115
6.2.1 Set packing 主问题	116
6.2.2 列生成算法	117
6.2.3 定价子问题	118
6.2.4 动态规划算法	119
6.2.5 分支定价求解框架	123

6.3	实验与结果分析	125
6.3.1	测试问题实例构造	125
6.3.2	算法性能评估	126
6.4	随机期望值模型的不足	128
	参考文献	129
第 7 章	云层遮挡不确定条件下机会约束规划模型及求解算法	131
7.1	机会约束规划模型	131
7.1.1	机会约束规划指派模型	131
7.1.2	机会约束规划“流变量”模型	133
7.2	样本近似算法	134
7.2.1	样本近似问题模型	134
7.2.2	样本容量	135
7.3	分支割平面求解算法	135
7.4	列生成启发式求解算法	140
7.4.1	Set packing 模型	140
7.4.2	列生成算法	141
7.4.3	定价子问题	141
7.4.4	列生成启发式算法	142
7.5	实验结果与分析	143
7.5.1	测试问题实例构造	143
7.5.2	样本近似算法有效性验证	144
7.5.3	分支割平面算法不同求解策略性能分析	146
7.5.4	求解算法性能评估	147
	参考文献	149
第 8 章	云层遮挡不确定条件下鲁棒模型及求解算法	150
8.1	前摄式调度鲁棒模型	150
8.2	精确求解算法	151
8.2.1	方案选择主问题和枚举算法	152
8.2.2	路径规划子问题和动态规划算法	153
8.2.3	案例	154

8.3 启发式求解算法	157
8.3.1 随机采样	157
8.3.2 算法描述	158
8.4 实验结果与分析	164
8.4.1 测试问题实例构造	164
8.4.2 小规模问题算法性能分析	164
8.4.3 大规模问题算法性能分析	172
参考文献	177
第 9 章 云层遮挡不确定条件下反应式调度模型及求解算法	178
9.1 问题描述	178
9.2 反应式调度多目标优化模型	181
9.3 反应式调度机制及扰动事件分析	183
9.4 反应式调度启发式调整算法	184
9.4.1 单次调度任务观测失败	185
9.4.2 多次调度任务观测失败	186
9.4.3 多次调度任务观测成功	187
9.5 实验结果与分析	187
9.5.1 测试问题实例构造	187
9.5.2 反应式调度有效性验证	188
9.5.3 前摄式调度建模方法性能比较	191
参考文献	193
第 10 章 新领域分析与研究展望	194
10.1 不确定条件下敏捷对地观测卫星调度	194
10.2 两阶段/多阶段随机规划模型	197
10.3 机器学习对卫星调度问题的辅助	200
参考文献	201

第 1 章 绪 论

1.1 对地观测卫星调度问题研究的背景和意义

对地观测卫星是通过搭载的遥感器 (有效载荷) 对地球表面和低层大气进行探测以获取相关信息的一类卫星平台^[1-4]. 遥感器一般包括可见光、红外、多光谱、高光谱遥感器、微波雷达等, 其具有空间分辨率高, 能够获得高清晰、高质量影像, 并且获取的地面影像便于判读等优势^[5,6]. 近年来, 各个国家都在大力发展空间对地观测技术, 先后发射了多颗对地观测卫星, 例如美国的“锁眼”系列卫星、EO 系列卫星, 法国的 SPOT 系列卫星、Pleiades 星座, 我国的资源系列卫星、环境系列卫星、高分系列卫星等.

对地观测卫星被广泛应用于战场态势侦察、军事目标识别、地球资源探测、自然灾害监视、城市规划和农作物监测等领域^[1,7]. 尤其是现代战争中, 通过对地观测卫星从空间获取敌方情报信息是军事斗争的关键, 在军事斗争 OODA (Observation, Orientation, Decision, Action) 环路中发挥重要作用, 是支持军事作战指挥的有效手段. 例如, 现代战争中, 通过远程精确打击, 直接摧毁敌方战略目标成为一种新的作战样式, 具有重要战略意义. 要想摧毁敌方战略目标, 首先要确定目标位置, 了解目标情况, 但是敌方战略目标往往设置在后方, 我们很难直接侦察监视敌方目标. 对地观测卫星覆盖范围广、不受空域国界限制、不涉及人员安全等特点成功地解决了这一难题, 成为侦察敌方目标的重要手段. 在伊拉克战争中, 美国动用了包括“锁眼”KH-11、KH-12 在内的 50 余颗对地观测卫星, 严密监视伊拉克的军事行动及特定目标, 确保美英联军拥有信息优势, 为赢得战争胜利发挥了重要作用^[8,9]. 由此可见, 对地观测卫星在现代战争中应用广泛, 并发挥着举足轻重的作用. 此外, 对地观测卫星在民用领域的应用也具有重要意义, 汶川、玉树地震发生后, 对地观测卫星在灾害监测和灾情评估方面发挥了重要作用^[10].

对地观测卫星调度是指在满足卫星使用约束的基础上, 为提高卫星观测效率、降低运行成本, 将卫星有效载荷、地面站等有限的资源按照时间分配给不同观测任务, 生成卫星观测计划. 卫星运行于一定的轨道, 同一轨道圈次内有很多目标可

能被观测, 每个目标都具有相应的观测时间窗口. 为了充分利用宝贵的卫星资源, 获取最大数量、最优观测效果的地面目标影像数据, 需要对什么时间、以何种侧视角度、对哪些目标进行观测实施合理的规划调度^[5-7]. 因此, 研究对地观测卫星规划调度问题, 对于提高卫星资源使用效率, 满足用户需求具有重要意义.

传统的对地观测卫星调度假设环境信息和输入参数是已知的、完全确定的, 采用静态调度模式, 即调度方案一经生成, 就按部就班地执行, 中间不需要做任何调整. 然而在实际应用中, 由于外部环境的复杂性, 难以在调度初始时刻就获得完全准确的信息, 大量因素都是动态变化的、不确定的, 例如方案执行过程中用户观测需求改变、卫星资源状态变化, 以及云层遮挡的不确定性等. 诸多不确定因素的存在, 使得初始调度方案在执行过程中失效, 导致传统的确定性调度模式难以满足实际应用需求. 因此, 急需考虑卫星观测调度中的不确定因素, 研究不确定条件下对地观测卫星调度问题. 基于此, 本书围绕不确定条件下对地观测卫星调度问题开展研究, 阐述不确定条件下卫星观测调度技术, 为不确定规划问题的建模和求解提供新思路和新方法.

1.2 对地观测卫星调度研究概述

本节首先对对地观测卫星确定调度问题研究进行了系统的梳理和总结, 然后介绍了不确定条件下对地观测卫星调度问题研究现状, 最后对不确定条件下调度问题研究的一般理论方法进行了综述.

1.2.1 对地观测卫星确定调度问题研究现状

本小节首先从调度模型、求解算法和软件系统三个方面回顾了确定条件下国内外对地观测卫星调度问题研究.

1.2.1.1 调度模型

目前, 各国研究人员从不同视角对对地观测卫星调度问题进行建模, 产生了多种不同类型的卫星调度模型, 主要包括约束满足问题 (Constraint Satisfaction Problem, CSP) 模型、数学规划模型、背包问题模型、基于图论的模型以及其他模型等.

1) CSP 模型

卫星对地观测受到各种约束条件的限制, 国内外学者通过描述各种卫星观测约束条件及调度目标, 建立了约束满足问题模型. Bensana 等^[11,12] 对 SPOT-5 卫

星调度问题开展了研究,通过简化部分约束,建立了价值约束满足模型. Verfaillie 等^[13] 针对单星单轨调度问题,忽略卫星观测转换时间、存储容量、卫星能量等复杂约束,采用约束满足模型对问题建模. 此外, Lemaître 等^[14,15] 和 Verfaillie 等^[16] 考虑观测转换时间约束,忽略存储容量、卫星能量等约束,建立了单星单轨调度问题价值约束满足模型. 针对多星调度问题, Globus 等考虑了观测任务优先级以及每颗卫星搭载多个载荷的情况,建立了约束满足问题模型,但论文未考虑存储容量约束,也没有给出具体的求解算法^[17]. Pan 等^[18] 详细分析了卫星观测过程及约束,建立了观测调度时间约束满足模型. Wu 等^[19] 研究了合成孔径雷达卫星调度问题,考虑最大化观测收益、区域目标最大覆盖率等目标,建立了多目标约束满足问题模型.

贺仁杰在其博士学位论文中分析了对地观测卫星的工作原理和用户需求,在此基础上,对约束满足模型进行了扩展,将其应用到多星多轨调度问题^[7]. 李菊芳^[20] 综合考虑了卫星观测和数传,针对多星多地面任务调度问题,建立了混合约束规划模型. 靳肖闪综合考虑观测卫星资源和地面站资源,建立了约束满足问题模型,基于稳态进化和拉格朗日松弛设计了星地资源综合调度算法^[21]. 刘洋^[22] 分别针对卫星资源状态变化和新任务插入等情况,建立了基于动态约束满足理论的卫星重调度模型.

CSP 模型能够较为清晰地描述卫星对地观测相关约束和优化目标,便于对问题深入理解,以及便于采用约束传播和解空间搜索算法对问题优化求解,因此, CSP 模型在对地观测卫星调度领域具有广泛的应用.

2) 数学规划模型

相对于约束满足模型,卫星观测调度领域应用更为广泛的是数学规划模型. Habet 等^[23-25], Benoist 等^[26], Lemaître 等^[27], Harrison 等^[28] 针对单星单轨调度问题,考虑了卫星侧视能力及观测转换时间约束,建立了问题求解数学规划模型,其模型的不足之处是没有考虑卫星存储容量和卫星能量等约束. Tangpattanakul 等^[29-31] 考虑了敏捷卫星单星单轨调度问题,以最大化卫星对地观测收益和确保满足不同用户需求的公平性为目标,建立了多目标优化模型. Yuan 等^[32] 考虑观测时间窗口约束,建立了卫星观测调度数学模型,但是该模型既没有考虑观测转换时间约束,也没有考虑存储容量、卫星能量约束,难以满足实际应用需求. 显然,上述研究仅考虑了单星单轨调度问题,在此基础上, Liu 等^[33], Lin 等^[34] 和 Sarkheyli 等^[35] 研究了多星多轨对地观测卫星综合调度问题,建立了数学规划模型. Cho 等^[36] 针对多星观测、数传综合调度问题,建立了一个两阶段二元线性规划模型,

其中第一阶段考虑卫星与地面站的可见窗口,进行数传区间调度,得到的调度结果作为第二阶段的约束;第二阶段实施底层的观测、数传综合调度。

在卫星观测调度研究中,应用最为广泛的数学规划模型是整数规划模型。Bensana 等^[11], Bianchessi 等^[3] 分别针对单星调度和多星调度问题,建立了整数线性规划 (Integer Linear Programming, ILP) 模型。Hall 等^[37] 将单星调度问题描述为单机调度问题,采用整数规划模型对问题建模。Lin 等^[38-40] 和 Liao 等^[41,42] 等针对中国台湾的华卫二号对地观测卫星 (ROCSAT-II) 的调度问题开展研究,他们将观测调度的时间轴进行了离散化处理,基于“时间步长”描述,建立了整数规划模型,该模型的不足之处是模型中存在大量变量和约束,增加了问题的求解难度^[43]。类似于 Lin 等的研究,Marinelli 等^[44] 采用“时间步长”整数规划模型描述了卫星指令调度问题,该问题与卫星对地观测调度问题相似,不同之处在于卫星需要访问地面站,而不是访问观测目标。Li 等针对不确定环境下航天器观测调度问题,以最大化获取观测数据为目标,考虑观测时间约束和卫星资源约束,建立了航天器重调度整数规划模型^[45]。Wang 等^[46] 针对多成像卫星调度问题,考虑最大化观测收益和最小化资源消耗,提出了多目标整数规划模型。贺仁杰^[7,47] 将多星联合观测调度问题描述为具有时间窗口约束的并行机调度问题,考虑卫星资源约束、时间窗口约束和转换时间约束,以最大化观测收益为目标,建立了混合整数规划模型。Pinto 等^[48] 针对石油泄漏监测、森林保护监测、边境非法活动等典型应用场景,建立对地观测卫星观测、数传综合调度混合整数规划模型。Chen 等^[49] 研究了多星观测调度问题,定义和分析了可见时间窗口冲突指标,建立了混合整数规划模型。

采用数学规划模型描述卫星观测调度问题,可以充分利用现有商业优化软件工具 (如 CPLEX^[50], XPRESS-Optimizer^[51], LINGO^[52], Gurobi^[53] 等) 求解。但是由于问题自身的复杂性,当问题规模增加时,问题求解效率急剧下降,此时需要借助有效的分支定界策略和复杂问题分解方法,指导算法搜索,加快寻优过程。

3) 背包问题模型

Vasquez 等^[54,55] 针对 SPOT-5 卫星观测调度问题,考虑存储容量和卫星能量等多个维度的约束,以最大化调度任务优先级之和为目标,将问题描述成一个多维背包问题 (Multidimensional Knapsack Problem)。Wolfe 和 Sorensen^[56] 针对单星单轨调度问题,提出了带时间窗口约束的背包问题模型,该模型未考虑转换时间约束、存储容量约束和卫星能量约束。Vazquez 等采用背包问题模型描述了卫星指令调度问题^[57]。王炎娟^[58] 在其硕士论文中深入分析了对地观测卫星调度问题,以

观测任务为“物品”，把观测时间窗口总结为具有多重属性的“背包”，将问题描述为多维动态背包模型。背包问题模型能够表示多个维度的约束，并且形式简单，能够有效支持最优和近优求解。

4) 基于图论的模型

Gabrel 等^[59-62]将卫星观测调度问题表示成一个无环路有向图 (Directed Acyclic Graph, DAG) 模型 $G = (V, A)$ ，其中 V 为节点集合，表示待调度的观测任务，且每个节点对应一个权重，表示该观测任务的优先级或收益， A 为边集，如果 $(i, j) \in A$ ，表示任务 j 能够在任务 i 之后观测。问题的求解目标是在图 G 中寻找一条从起始节点 s 到终止节点 t 的加权最长可行路径。在 Gabrel 等研究的基础上，张帆^[5]基于图论思想提出了卫星调度多目标最短路径模型。王钧^[63]在其博士学位论文中采用无环路有向图描述了多星观测调度中单星层面的任务关系。郭玉华^[1]采用无环路有向图模型将卫星数传资源调度问题转化为路径搜索问题。Peng 等^[64]综合考虑单星观测、数传调度问题，建立无环路有向图模型，基于图划分和非支配子路径选择策略将问题分解为多个子问题。

Sarkheyli 等^[65]将卫星观测调度问题描述为经典的图着色问题，该问题已被证明具有 NP 难特性^[66]。Zufferey 等^[67]采用图着色问题模型表示了卫星指令调度问题。图论问题模型的优点是直观、便于理解，能够表达多个任务之间的时间顺序和冲突关系，存在成熟有效的求解算法。Wang 等^[68,69]采用复杂网络对卫星观测调度问题建模，将每个观测机会看作一个节点，分别定义了网络节点重要度和观测目标重要度指标。

5) 其他模型

为了提高规划效率，部分学者针对卫星调度问题的特点，采用其他专用模型对问题进行描述。Chien 等^[70]考虑卫星工作活动对观测的影响，建立工作状态模型，采用标准的模型描述语言对任务调度问题建模。Frank 等^[71]将卫星编队任务调度问题描述为约束优化问题，建立了基于 CBI(Constraint-Based Interval) 框架的调度模型。Sylvain 等^[72]针对观测需求的动态变化，建立了卫星观测调度序列决策模型。Li 等^[73]考虑星上自主调度问题，采用了线下学习和线上调度相结合的策略，建立了观测调度神经网络模型。

1.2.1.2 求解算法

现有研究大多将对地观测卫星调度建模为组合优化问题，然后设计相应的求解算法。目前，应用于卫星观测调度的优化求解算法基本上可以分为最优化精确求解算法、智能优化算法和基于规则的启发式算法三类。

1) 最优化精确求解算法

Bensana 等^[11], Agnèsè 等^[74] 针对 SPOT-5 卫星单星调度问题, 提出了深度优先搜索分支定界算法, 该算法能够求解得到小规模问题的最优解. Gabrel 等^[62] 针对卫星调度无环路有向图模型, 设计了一个分支定界求解算法. Chu 等^[75] 针对高分辨率敏捷卫星调度问题, 以观测目标选择为分支策略, 设计了一个实时分支定界求解算法. 在分支定界算法的基础上, Bensana 等^[11], Verfaillie 等^[16], Benoit 等^[26] 提出了卫星观测调度 Russian Dolls 搜索算法, 将问题描述为连续的、多重嵌套子问题, 在每个嵌套子问题上采用分支定界算法进行求解. 然后, 保留嵌套子问题搜索的最优解, 用来提高上一级嵌套子问题的下界, 提高算法搜索效率.

Lemaître 等^[27], Hall 等^[37], Gabrel 等^[59] 采用动态规划算法求解得到小规模单星单轨调度问题的最优解. 此外, Lemaître 等^[15,27], Pemberton 等^[76] 设计了约束规划 (Constraint Programming) 搜索算法求解卫星观测调度问题. 基于 Dantzig-Wolfe 分解原理, Bianchessi 等^[3], 贺仁杰^[7], Gabrel 等^[61,77] 将多星观测调度问题分解成一个主问题和多个子问题, 采用列生成算法求解得到原问题的线性松弛最优解. 实验证明, 相对于直接求解原问题的线性松弛问题, 列生成算法能够得到原问题更加“紧凑”的线性松弛上界. 基于列生成思想, 王沛等^[78,79] 提出了分支定价算法求解多星多站集成调度问题, 算法基本思想是将分支定界算法与列生成算法相结合, 在分支定界搜索树上的每个节点应用列生成求解算法, 当得到非整数解时进行分支, 最后得到问题整数最优解. Han 等^[80] 将多星观测调度问题描述为一个特定的间隔调度问题, 提出了基于列生成的求解框架, 其基本思想是采用列生成算法求解得到松弛问题最优解, 在列生成算法得到的“列”基础上求解整数规划问题, 得到原问题的可行解. Hu 等^[81] 针对多星观测、数传综合调度问题, 建立了混合整数规划模型, 提出了分支定价求解算法, 其中针对子问题求解分别设计了动态规划和启发式算法, 加快求解速度.

最优化精确求解算法的优点是能够得到问题最优解, 其不足之处在于求解效率低下, 尤其是针对大规模调度问题, 需要借助一些复杂问题分解方法, 如列生成、拉格朗日松弛、割平面等, 找到问题最优解的“紧凑”上界, 提高求解效率.

2) 智能优化算法

智能优化算法又称为元启发式算法, 它是模仿自然现象运行机制而产生的, 具有简单有效、普适性强的特点, 在对地观测卫星调度领域应用广泛. 目前, 在卫星观测调度领域, 应用最为广泛的智能优化算法是禁忌搜索算法. Bensana 等^[11], Agnèsè 等^[74] 针对 SPOT-5 卫星调度问题, 基于插入邻域和取消邻域, 设计了禁

忌搜索求解算法. Cordeau 等^[4] 针对单星单轨调度问题, 以最大化轨道观测收益为目标, 提出了禁忌搜索求解算法, 该算法基于任务插入、任务撤销、任务置换等邻域搜索策略. Bianchessi 等对 Cordeau 的算法进行了扩展, 将其应用到多星多轨多用户调度问题, 并采用列生成算法得到问题最优解的上界, 评估禁忌搜索算法的性能^[3]. 针对区域目标观测调度问题, Zhu 等^[82] 设计了一个三阶段求解策略, 其中第一阶段基于网格离散化对区域目标进行分解, 第二阶段采用动态贪婪算法进行观测条带预选择和区域目标覆盖优化, 第三阶段采用禁忌搜索算法进行观测条带调度. 此外, 应用禁忌搜索算法求解对地观测卫星规划调度问题研究还包括 [7], [23]—[25], [34], [38], [54], [65], [67], [83]—[86].

Wolfe 等^[56], Soma 等^[87] 采用遗传算法求解卫星对地观测调度问题. Wang 等基于解的支配关系, 采用多目标进化算法 SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) 来求解卫星调度问题, 以满足用户观测需求和降低资源损耗^[46]. Tangpattanakul 等^[29,30] 针对卫星观测调度问题, 设计了多目标遗传求解算法 BRKGA (Biased Random-Key Genetic Algorithm). Yuan 等^[32] 采用遗传算法求解敏捷卫星对地观测调度问题, 为了提高求解效率, 该算法采用混合随机启发式策略 (Hybrid Random Heuristic Strategy, HRHS) 生成初始种群. Niu 等^[88] 针对卫星观测动态调度问题, 提出了两阶段求解框架, 其中第一阶段考虑最大化观测收益、最大化方案鲁棒性、最小化观测时间等目标, 采用基于非支配排序的多目标进化算法 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 生成初始观测方案. 此外, 在对地观测卫星调度领域, 遗传算法研究还包括 [19], [89]—[99].

Liu 等^[33] 研究了多星观测调度问题, 在考虑观测任务合成的基础上, 提出了自适应蚁群求解算法. Wang 等^[100], Wu 等^[101] 针对多星多轨调度问题, 考虑将蚁群算法与局部搜索相结合, 在蚁群算法求解的基础上, 采用局部搜索策略对解进行改进, 提出了混合蚁群优化算法. 此外, Li 等针对不确定环境下航天器重调度问题, 提出了基于模糊神经网络和蚁群优化的求解算法^[45]. 对地观测卫星调度蚁群算法研究还包括 [102]—[107].

此外, 其他应用于对地观测卫星调度领域的智能优化算法还包括局部搜索算法^[13,15,27,31,108]、爬山法^[109—111]、模拟退火算法^[34,83,96,104,109—113]、大邻域搜索算法^[114,115] 等. 智能优化算法的优势是相对于精确算法, 求解效率较高, 能够求解精确算法无法求解的大规模问题, 其不足之处是往往难以得到问题的最优解, 甚至不能评判得到的解是否为最优解或者难以评估其与最优解之间的距离.