

多星多站集成调度 优化方法

Duoxing Duozhan Jicheng
Diaodu Youhua Fangfa

王沛 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

多星多站集成调度 优化方法

王 沛 著

國防工業出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

对地观测卫星在国民经济和国防建设等众多领域越来越凸显出重要的应用价值。随着国家高分辨率对地观测系统重大专项的稳步推进,对地观测卫星已经迈入多星联合观测的新阶段。多星联合采集的图像数据必须在地面站支持下才能顺利回传并最终交付用户,因此,多颗多类型卫星的成像任务和地面站配合的数传任务成为卫星地面管控部门统筹优化的对象,星地资源调度问题已成为航天领域一个崭新的管理科学问题。

本书主要着眼于多星多站集成调度问题,探讨对地观测卫星与地面站一体化工作流程,重点介绍多星多站集成调度问题的建模方法、多星多站集成调度的分支定价优化算法等相关关键技术,以及相应的应用实例和模型算法验证。本书的研究成果从理论上奠定了星地资源协同调度的技术基础,对提高我国以高分辨率对地观测系统、导航卫星系统等为代表的航天系统的应用能力和提升系统整体效益具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

多星多站集成调度优化方法/王沛著. —北京:国防工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-118-08937-0

I. ①多... II. ①王... III. ①卫星通信地面站 - 调度 - 最优化 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 167681 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6 字数 202 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

对地观测卫星从太空获取地面影像数据,具有覆盖范围广、持续时间长、不受空域国界限制等得天独厚的优势,已经成为认识和研究地球的重要手段,在现代农业、防灾减灾、资源环境和公共安全等许多领域发挥着越来越重要的作用。卫星对地观测过程中,目标观测活动需要在卫星与目标间的可见时间窗内进行,观测数据可以首先记录在星载存储器上,在卫星与地面站存在可见时间窗时再将数据传输到地面站。可见,一个完整的对地观测任务包括由卫星执行的观测活动和由卫星地面站配合执行的数传活动。因此,对地观测系统不仅包括观测卫星,还有配套的地面站数据接收资源。当观测卫星和地面站之间缺乏协调时,大量的观测数据难以被及时传回地面,容易造成星地资源的相对缺乏和浪费。地面控制中心作为管理控制对地观测系统的“大脑”,需要从全局角度分配卫星和地面站资源,统筹安排目标观测活动和数传活动,在卫星观测时或观测后的较短时间内,回传采集的目标数据,使得观测卫星增加或保持用以执行后续观测任务的观测能力。因此,星地资源调度问题不可避免地成为卫星对地观测应用中一个重要的研究课题。

翻开近年来国内外卫星调度领域的诸多文献,虽然多星联合调度文献呈逐年递增趋势,但是星地资源集成调度的研究并不多见,星地资源调度问题体现为两极化发展:一类是侧重观测过程的卫星观测调度,地面站接收资源的调度在观测调度完毕之后才开始进行;另一类侧重于地面站资源的调度,观测过程优化不在考虑之内。因此,现有研究的一个明显不足是卫星观测过程和数传过程的调度脱节,难以实现星地资源的整体优化使用。在问题建模及求解技术方面,

由于多数星地资源调度问题属于 NP 难解问题,列生成等完全算法仅适用于小规模的问题,多数研究采用启发式算法或超启发式算法。而启发式算法受限于其固有的理论体系不完整、容易陷入局部最优、参数设置困难、收敛速度不佳和缺乏有效迭代终止条件等缺陷,通常无法求得问题最优解,算法的性能评估也多采用基于不同启发式算法之间的大规模算例比较分析,无法准确估计近似最优解和问题最优解之间的最优间隙。

多星多站集成调度问题既区别于多卫星观测调度或多地面站数传调度问题,也不是两类问题的简单叠加,它比这两类问题更加复杂,因为该问题不仅要考虑观测卫星之间的任务分配和地面站之间的任务分配,还要将观测和数传作为完整的过程进行考虑。因此,在借鉴这两类问题研究成果的基础上,本书将建立能够反映观测和数传紧密衔接、卫星和地面站密切协同的数学模型,设计和实现一种被称为分支定价(Branch and Price)的更加高效的优化算法。该算法思想融合了数学规划技术中的列生成算法、分支定界算法和启发式算法的优势,在建立问题数学规划模型的基础上,借助整数规划理论中的 Danzig - Wolfe 原理来对问题分而治之,将问题划分为一系列子问题和耦合各子问题的主问题,主问题的解引导子问题的求解,子问题的解对主问题的解迭代改进,子问题求解过程中挖掘其中蕴含的特定结构,如最短路径问题、背包问题结构等,并利用这些结构上的高效算法,从而能够有效降低问题的求解复杂度;同时,通过启发式算法来不断改进原问题或子问题的当前最优解,以分支定界的思想来对搜索空间进行有效削减;另外,它还继承了数学规划能够对原问题给出精确上界(假定原问题为最大化问题)的特点,方便对算法所给出解的最优性的准确评估。

全书内容主要由列生成法与分支定价法、多星多站集成调度问题、多星多站集成调度问题模型及分支定价求解框架、含时间窗口和可补充资源约束的最长路径子问题及应用实例五部分组成。本书所提出的多星多站集成调度优化方法为航天任务规划领域复杂组合优

化问题的求解提供了一种新的思路,也为“高分辨率对地观测系统”和“中国第二代卫星导航系统”重大专项中的多星多站运行管理奠定了理论和方法基础,希望能够为管理科学与工程及遥感应用领域相关专业的研究生、科研工作者和工程技术人员提供有价值的参考。

在撰写本书的过程中,我们参阅了大量的文献,书中所附的主要参考文献仅为其中的一部分,在此向所有列入和未列入参考文献的作者们表示衷心的感谢!

本书受到了国防科技大学校庆 60 周年系列学术专著出版基金的资助,还受到了国家自然科学基金(71201171)、高等学校博士学科点专项科研基金(20124307120018)的资助,在此一并表示感谢!

限于作者的水平,书中难免有不妥与疏漏之处,敬请读者不吝赐教。

作者

2013.5

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外相关研究现状	8
1.2.1 成像调度研究现状	8
1.2.2 数传调度研究现状	16
1.2.3 星地集成调度研究现状	18
1.2.4 分支定价算法求解车辆路径问题的研究 现状	20
1.2.5 研究现状总结	26
1.3 本书主要内容和安排	28
第 2 章 列生成法与分支定价法	32
2.1 大规模线性规划问题与列生成法	33
2.1.1 Danzig - Wolfe 分解原理	33
2.1.2 列生成法	36
2.2 大型整数规划问题与列生成法	38
2.3 分支定界算法	43
2.3.1 分支定界算法基本流程	43
2.3.2 分支策略	46
2.3.3 节点选择策略	48
2.4 分支定价算法	49
2.4.1 分支定价算法的基本思路	51
2.4.2 算法初始化	53
2.4.3 分支策略	54

2.5 本章小结	57
第3章 多星多站集成调度问题	58
3.1 成像侦察卫星与地面站一体化工作原理	58
3.1.1 成像侦察卫星工作过程	59
3.1.2 地面站数据接收过程	70
3.1.3 成像数据获取的组织实施过程	74
3.2 多星多站集成调度问题	76
3.2.1 问题概述	76
3.2.2 成像数据集成调度策略	87
3.2.3 问题的基本假设及简化	89
3.2.4 问题输入输出要素	92
3.3 本章小结	97
第4章 多星多站集成调度问题模型及分支定价求解框架	98
4.1 问题数学模型	99
4.1.1 多星多站集成调度问题的数学模型	99
4.1.2 多星多站集成调度问题的无关子族主 问题模型	110
4.1.3 多星多站集成调度问题的定价子问题 模型	112
4.2 问题的分支定价求解框架	114
4.2.1 问题的完全分支定价求解框架	115
4.2.2 问题的近似分支定价求解框架	117
4.3 问题整数解的分支搜索方法	118
4.3.1 分支策略	120
4.3.2 节点选择策略	122
4.4 本章小结	123
第5章 含时间窗口和可补充资源约束的最长路径子问题	124
5.1 子问题特性描述	125
5.2 子问题复杂度的削减	128

5.3	子问题的双向动态规划	130
5.3.1	顶点状态	132
5.3.2	状态扩展	133
5.3.3	占优准则	137
5.3.4	算法流程	138
5.4	子问题的列生成启发式算法	140
5.4.1	列合并启发式	141
5.4.2	列调整启发式	145
5.5	本章小结	147
第6章	应用实例	148
6.1	随机算例的生成	148
6.2	模型和算法的验证	156
6.3	分支定价算法的性能评估	161
6.3.1	完全分支定价和近似分支定价的比较	161
6.3.2	分支定价算法和其他算法的比较	165
第7章	结论与展望	169
	参考文献	172

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

在现代战争中,从空间获取情报是成功进行军事作战的关键。侦察卫星可以全天候、大面积、及时准确地获取情报,已经成为支援战场作战行动的不可替代的手段。在海湾战争中,美国航天司令部统一指挥了约 70 颗卫星,支援陆、海、空作战,对多国部队迅速赢得胜利起到了重要的作用,海湾战争因此被誉为“第一次空间战争”。可见,卫星侦察在现代战争中起着举足轻重的作用。

侦察卫星包括成像侦察卫星、电子侦察卫星、导弹预警卫星、海洋监视卫星和核爆探测卫星等。在这些侦察卫星中,成像侦察卫星发展得最早,发射数量最多,所用技术也最为成熟,已成为当今世界航天大国越来越依赖的一种重要的技术侦察手段。自 1960 年 8 月美国成功发射世界上第一颗成像侦察卫星以来,随着成像侦察卫星在夺取战场信息优势、提高武器装备作战效能等方面发挥的作用越来越大,越来越多的国家热衷于发展成像侦察卫星技术^[1-6]。

成像侦察卫星上携带的是能够获取侦察目标图像数据的遥感设备。按照遥感设备的不同,成像侦察卫星可以分为光学成像侦察卫星和雷达成像(微波)侦察卫星两大类。光学卫星采用可见光、红外、多光谱相机成像,而雷达卫星采用合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)遥感器进行成像。它们具有各自不同的特点,光学卫星的优点是图像分辨率高,但通常不能全天候、全天时工作,而雷达卫星不受光照条件和气象条件的影响,并具有一定的云层穿透能力。

不同类型的多颗成像侦察卫星配合工作,一方面能够互相取长补短,满足更加复杂的侦察需求,如实现针对某一侦察目标的协同观测和立体观测,以提高图像情报的丰富性和准确性^[7];另一方面,多颗多类型侦察卫星组网或组成星座,能够应对数量更多的侦察需求。在轨侦察卫星的数量虽然也在扩充,但相比越来越多的侦察需求,卫星始终是一种稀缺资源,单颗侦察卫星已经难以满足大量的复杂侦察需求,多星联合对地侦察逐渐成为侦察卫星的重要应用模式。

成像侦察卫星任务的遂行,一般意义上包含对地成像和数据回传两个环节。对地成像是指卫星经过地面侦察目标上方时,利用星载遥感器采集目标的图像数据。卫星采集的数据在无法实时传回地面的情况下(地面接收站不可见或与其他卫星之间存在针对地面站的使用冲突),将被暂时记录存放在星载固态存储器中。数据回传则指在可行的条件下,利用卫星数传天线将采集或存储的目标图像数据直接传回或通过中继卫星转发至地面接收站^[8]。因此,卫星成像侦察的过程至少包含两类资源^[1]:

(1) 卫星:即在轨道上运行的成像侦察卫星及其携带的各种有效载荷,如不同类型的遥感设备、固态存储器、数传天线等。

(2) 地面接收站:即地面上固定或活动的用于接收卫星回传图像数据的相关设备和装置。

针对成像侦察卫星的日常管理过程如下:用户提交侦察需求,成像卫星地面指挥控制系统根据侦察需求属性、卫星资源属性、地面站资源属性和一系列资源使用约束对卫星和地面站进行任务规划与调度,制定卫星的成像计划、数传计划以及地面站的数据接收计划,并生成载荷控制指令,发送给地面遥控遥测系统,地面遥控遥测系统将指令发送给卫星和地面站,卫星按照指令执行对地侦察,并在地面站的配合下将侦察数据回传给地面站。上述卫星成像计划、数传计划和地面站数据接收计划的联合编制过程即为星地集成调度问题的由来。由于载荷工作计划编制过程在成像侦察卫星的日常管理中处于

核心地位,因此,星地集成调度问题一直以来都是成像侦察卫星管理控制中的关键问题,它的有效解决无论是从节约系统运行成本、提高成像收益上,还是从整个系统的统筹协调、安全高效运行的角度,都具有十分重要的现实意义。

星地集成调度具体是指:在综合考虑成像侦察卫星资源能力、地面站资源能力和成像侦察需求的基础上,将卫星资源和地面站资源分配给相互竞争的多个成像侦察需求对应的成像任务和数传任务,并确定各个任务的具体开始时间,以排除不同任务之间的资源使用冲突,并最大化地满足用户的成像侦察需求。该问题的难点在于用于释放存储资源的数传任务,其传输数据量取决于成像任务的安排和卫星存储器的占用,而卫星成像过程中侦察哪些目标以及什么时候侦察,在进行调度前是不确定的,这使得卫星存储器占用和传输过程无法准确预测,从而为问题的求解增加了复杂度。

如前所述,随着侦察需求数量和复杂度上的不断提升,成像侦察卫星的种类和数量也逐步增多,成像侦察卫星的应用模式逐渐从单独遂行侦察任务,向着多颗多类型卫星联合执行侦察转变。相应的,对于成像侦察卫星的管理控制,也从相对简单的单星自成体系的管理模式,向着多星多站的一体化集成管控迈进。这一方面是为了适应现实侦察需求的需要,另一方面也是为了充分发挥包含地面站在内的成像侦察卫星系统的整体效能。与此同时,这也导致星地集成调度问题难度进一步增加,主要体现在每个成像任务和数传任务的可选资源增多,任务执行机会大大增加,问题组合爆炸特征进一步加剧,多颗卫星还有可能针对同一地面站产生数传时段的冲突,这些新问题都必须在多星多站集成调度中加以解决。需要指出的是,由于卫星相比成像侦察需求,其数量的增长远远落后,即使多星编队组网、协同配合也往往无法满足所有的成像侦察需求。因此,在多星多站集成调度中,还含有从所有成像侦察需求中遴选一个子集的选择问题(针对每个候选成像侦察需求,需要决定是否满足该需求),从而

这里的调度是包含了规划和选择决策在内的广义的调度。

虽然目前已有一些与成像侦察卫星调度问题相关的模型和算法研究(有关这些研究将在下节详细介绍),但多数研究都存在一定的局限性,不能很好地满足应用需求。这些局限性主要体现在以下三方面:

(1) 通常采用了单星自成系统的任务规划和资源调度模式,不考虑不同卫星之间的配合和协作。这种方式只适用于早期单星独立使用或成像侦察任务明确指定了执行卫星的情况,显然已经难以适应和满足现今多星联合的成像侦察应用需求。小卫星技术飞速发展的今天,小卫星的便捷性和低成本,使得多颗小卫星联合编队组网在研发和部署方面,相比传统大卫星,具有越来越明显的优势,多颗小卫星彼此协同,可以更好、更高效地完成一颗传统大卫星的使命和任务,获得对目标的高频次、高质量、更及时的图像数据。然而多星联合成像侦察性能优势的发挥,亟需相应的多星多站集成调度问题的高效解决,需要相关调度理论和方法的改进和突破。

(2) 大量关于成像侦察卫星规划调度问题的研究都只考虑了对卫星成像任务的安排调度,并没有考虑卫星的数传任务。其原因大致如下:首先,由于数传任务是从卫星向着地面站进行的,如果从地面站的角度出发,可以把地面站的数据接收任务看作是卫星的数传任务的“镜像”,因此,在现实中,卫星的数传调度往往作为卫星测控调度的一部分,成为了地面站调度的一项重要内容。其次,鉴于成像调度和数传调度各自都具有较高的问题复杂度,如果将两者统筹兼顾,在一个整体内综合考量,那么相应调度问题的复杂度之高可想而知。因此不少学者退而求其次,采用分别考虑成像和数传的方式,虽然这种方式暂时规避了两者集成调度的复杂性,但是却人为割裂了两颗通过数据星上存储建立的固有联系,相应的研究也大多基于一些不太符合实际的假设(如存储容量没有限制,中继卫星时时可用等),容易造成调度方案 and 实际之间的脱节,导致要对生成的成像计

划进行调整才能同时满足卫星安全运行和地面站合理接收的约束条件,一定程度上损失了整个成像侦察系统的应用效能。特别对我国的成像侦察卫星而言,在可用地面站大多处于境内,且中继卫星不足的情况下,将采集的境外目标数据暂时记录存放在星上是不可避免的,相应地,对成像任务的合理安排必须考虑到星载存储器的容量限制,并通盘考虑对成像任务和数传任务的调度。如果在调度卫星的成像任务时,只考虑成像任务对于存储空间占用,不考虑与成像任务交替进行的数传任务所释放的存储空间,则很难想象能够制定出符合实际的好的成像计划。

图 1.1 所示为在一个有限的时间范围内,不同情况下单星的可行调度方案。其中收益表示侦察目标获得的收益值,任务关联存储空间中的数字代表了占用或释放存储空间的大小,星载存储容量为 4 个单位,假定在图示时间范围开始之前存储器为空。图 1.1 中成像和数传分解调度情况下,成像调度的最优解为侦察目标 3,收益为 5,随后数传调度的最优解为无任务完成,收益为 0,即整体收益为 0。

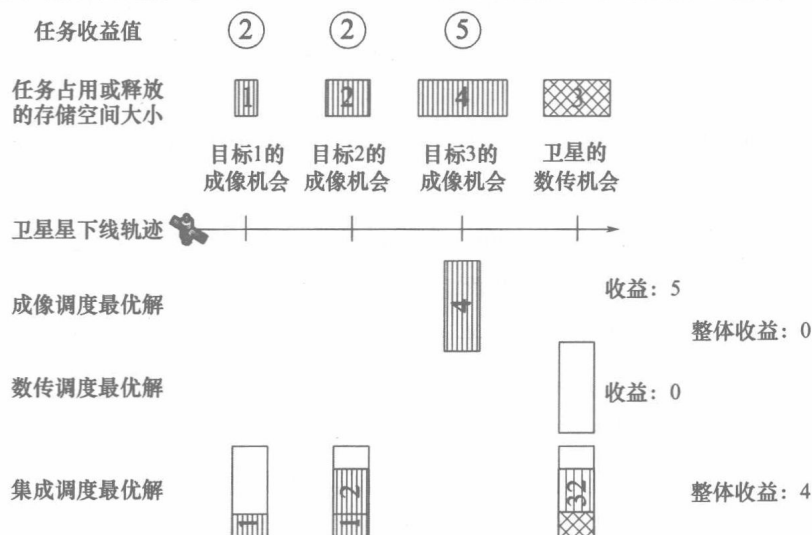


图 1.1 观测数传集成和非集成情况下的单星调度

对比之下,成像数传集成调度情况下,由于考虑到数传对成像的影响,最优解为成像目标 1→成像目标 2→数传目标 1 和目标 2,收益为 4。从这个简单的例子可见,星地资源集成调度更加符合问题实际,更重要的是,能够提高整个对地观测系统的综合收益。因此,在无法确保卫星采集的数据全部可以通过中继卫星或地面站实时回传的情况下,需要考虑成像侦察卫星的数据记录(只成像不数传)、实时成像(数传的同时进行成像)、实时数传(成像的同时进行数传)和数据回放(只数传不成像)这些不同的工作模式,相应的调度模型必须将目标的数据采集、存储和回传过程统一集成处理。

(3) 相关求解方法研究多采用启发式或超启发式算法,因此,算法抽象性和扩展性不强,难以对算法进行理论上的性能分析和比较,算法的寻优能力也差强人意。相关研究人员之所以采用启发式或超启发式算法来求解成像卫星调度问题,一定程度上是由问题的复杂性和规模所决定的。因为无论是单独考虑数据采集的成像调度问题,还是只考虑数据回传的地面站接收调度(或广义的地面站测控)问题,两者都已被学者证明为 NP-hard 问题。启发式算法虽然能在较短的时间内求得问题的满意可行解,但是其设计和实现多依赖于特定问题参数,对于问题约束的建模多采用硬编码方式,一旦问题稍有变动,算法相应的改动工作将比较大。另外,启发式算法的评估和比较,多采用不同启发式之间在大规模计算实例上的性能比较,从理论上稍显缺乏说服力。相对而言,列生成(Column Generation)、分支定界(Branch and Bound)、割平面(Cutting Plane)、分支定价(Branch and Price)和 Lagrangian 松弛(Lagrangian Relaxation)等完全搜索算法虽然在求解时间上和存储空间上有更高的要求,但它们在数学模型上更加结构化和抽象化,能够对约束分门别类地建模,并且有以单纯型法为代表的整数规划理论作为系统的理论支撑,即使在允许的计算时间上限内无法求出问题的最优解,仍可以依据算法(因计算时间或存储空间要求而被动)终止时的当前解,来估计出问题最优解的一

个紧凑上界(对应问题为最大化问题)或下界(对应问题为最小化问题)。该上界/下界既可以用于对其他算法,如启发式算法的评估,又可以作为问题最优解或近优解的启发式搜索起点,甚至该上界/下界本身可能就是问题的一个近优解,可能要比其他启发式算法得到的可行解更加优越。过去二三十年间计算机硬件性能飞速发展,与此同时,线性规划和整数规划优化软件的效能也不断提升,作为其理论支撑的整数规划理论研究也进展迅速,这都为完全算法的应用开辟了更为广阔的天地。尤其是完全算法在车辆路径问题、车间调度问题和生产运作规划问题等大规模实际规划调度问题上的成功应用,以及多星多站集成调度问题和这些问题之间在某些方面的相似之处,无疑增强了我们将完全算法应用于多星多站集成调度问题的信心。

未来战场态势瞬息万变,亟需多类型、多颗成像侦察卫星编队组网或组成星座协同完成对多目标的大范围、立体化、高频次、高准确性的侦察,同时也需要地面站做好数据接收服务,确保卫星采集的数据按期按量回传。与此同时,成像侦察卫星技术日益民用化,很多卫星身兼军民两用角色,在科学实验、资源勘探、环境监测和灾害预报等方面也发挥着越来越重要的作用,包括我国在内的很多国家对于高清晰度卫星影像的需求也越来越大。由此可见,如何发挥包含地面站在内的整个成像侦察卫星应用系统的效能,制定出更优越的成像计划和数传计划,获得更多更好的卫星影像,于军于民都具有重大的战略意义和经济意义。在这样一种背景下,本书运用分支定价这一完全算法来解决多星多站集成调度问题,一方面在问题上强调成像侦察调度过程的系统性和完整性,即综合考虑多星、多地面站等相关资源,统筹调度对应完整侦察任务的数据采集和数据回传环节;另一方面,在方法上突出完全搜索的特点,将分支定价算法应用于问题的整数规划模型,即将求解大规模线性规划问题的列生成法和求解整数规划最优解的分支定界框架相结合,力图在可接受的时间内得

到多星多站集成调度问题的最优解或近优解,从而提升卫星成像计划和数传计划的优度,提高整个成像侦察卫星系统的应用效能。从目前可获取的资料来看,将分支定价算法应用于多星多站集成调度问题的研究仍为空白。本书着力于从分支定价算法原理介绍、多星多站集成调度问题分析、数学模型建立、求解算法设计和效能评估这样一个思路来给出多星多站集成调度问题的解决之道。本书的研究为最大限度地发挥成像侦察卫星应用系统的平战应用效能提供了技术储备。

1.2 国内外相关研究现状

由于多星多站集成调度问题在可查阅的文献中并不多见,所以我们针对与其相关的成像调度、数传调度和星站集成调度分别进行研究现状的综述。另外,由于成像侦察卫星大多用于军事用途,在公开的文献中,大多数学者针对对地观测卫星,而不是针对成像侦察卫星展开研究。鉴于成像侦察卫星是对地观测卫星的一个子类,我们在文献综述中,对对地观测卫星调度和成像侦察卫星调度两种提法不做刻意地统一,在后续章节中,对于成像卫星和侦察卫星,对于成像需求和侦察需求也不做显著区分。再者,因为本书着眼于用分支定价这一完全算法来解决多星多站集成调度问题,而本书写作之时,尚未发现有将分支定价算法应用于卫星调度问题的文献,鉴于多星多站集成调度问题和含时间窗口的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)较为相似,所以本节的最后一部分也就分支定价算法在含时间窗口的车辆路径问题上的应用研究现状作了一个简要综述。

1.2.1 成像调度研究现状

不考虑数传环节的成像调度研究比较丰富,为了给读者提供一