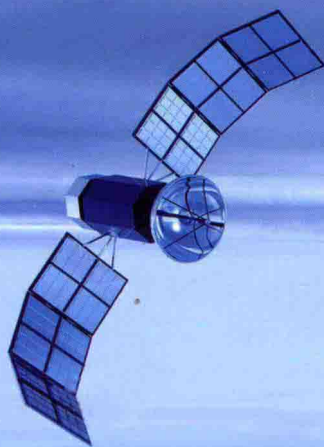


“十二五”国家重点图书出版规划项目

组网成像卫星协同任务规划方法

ZUWANG CHENGXIANG WEIXING
XIETONG RENWU GUIHUA FANGFA

姜维 庞秀丽 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

组网成像卫星协同任务规划方法

姜 维 庞秀丽 著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书对组网成像卫星协同任务规划方法进行研究,阐述成像卫星组网运行时任务规划系统的体系结构、设计方法、技术原理。书中相关理论和技术可以直接用于解决具体应用任务规划系统的问题。本书包括7章:成像卫星任务规划问题、卫星任务规划总体框架、卫星任务协同规划模型与求解、提高卫星服务寿命的任务规划、卫星群任务规划方法、基于 Multi-Agent 的动态任务规划、卫星数传规划模型与算法。本书针对任务规划的理论和技术的研究,阐述了包括滚动式规划、交互式动态规划等规划理论方法,通过仿真实验验证和评价了模型与求解算法。本书包括理论、技术、系统设计和仿真实验,既适合理论方法的学习,又适合工程实践。

本书可作为相关专业的研究生和高年级本科生教学用书,也可用于卫星运控系统研制者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

组网成像卫星协同任务规划方法/姜维,庞秀丽著. —
哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016.3

ISBN 978-7-5603-5900-7

I. ①组… II. ①姜… ②庞… III. ①遥感卫星-卫星控制 IV. ①V474.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 058338 号

责任编辑 杨秀华
封面设计 刘长友
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 10.5 字数 249 千字
版 次 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-5900-7
定 价 45.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

随着航天技术的发展,组网成像卫星的资源在类型、数量和功能上都有着新的变化,这既为更好提供服务提供能力,同时也为任务规划研究带来新的挑战。作为卫星系统运控的关键技术,卫星协同任务规划属于资源的有效分配问题,卫星任务规划面临着管理问题和优化技术问题,其关系到卫星系统的整体工作效益。尤其是在卫星数量和种类增多的情况下,如何进行协同规划更是当前卫星系统建设面临的一个重要研究课题。

本项目受国家自然科学基金(No. 71271066, No. 71202168)和总装备部某项目的支持,基于多年来在卫星任务规划相关项目的支持下,结合规划技术发展和已有研究成果的积累,本书阐述组网成像卫星协同任务规划方法。

本书以学术研究角度关注其中的规划问题,对于实际卫星工作过程、任务规划约束条件等内容适当简化,以期突出重点。实际的卫星和载荷工作的具体参数有所不同,避免军事敏感性内容,本书只关注其中的科学问题,实验数据来自于仿真数据,突出下述内容:

- (1) 任务规划总体过程,以使读者能够宏观掌握卫星任务规划的总体过程;
- (2) 阐述成像卫星滚动规划的若干关键技术,包括工作流程、规划模型和算法;
- (3) 阐述了基于 Multi-Agent 的交互式动态规划的系统设计、模型与算法;
- (4) 求解算法由 Matlab 实现,多种求解算法在同一运行环境进行对比评价;
- (5) 以一些典型约束作为代表,以突出关键问题本身。具体卫星的约束条件较多,各卫星的约束还有差异,可参考本书形式加以补充。

卫星任务规划既涉及技术问题,又涉及管理问题。科研上可以专门针对其中某一个具体问题单独研究,然而在实际工程中,卫星任务规划属于一个整体优化过程,例如观测任务规划与数传规划是一个整体优化过程,甚至区域目标分解、任务聚类过程也应该结合具体卫星进行。本书在内容组织上将一些优化过程先分开来阐述,最后通过一体化规划方法集成来整体优化任务规划过程。

实际工程中,运控系统采用 C++编写全部代码,算法进行了多角度精心优化。由于各种算法都有其适用的问题,例如基于规则的算法求解速度快,改进的智能优化算法经一段时间优化后可获得高质量的任务规划方案,所以实际系统中需要提供多种求解算法,再由运控系统使用者根据实际需求加以选择。工程实现上,另一部著作《分布式网络系统与 Multi-Agent 系统编程框架》提供了配套的 C++编程框架库,可为实际项目研究提供直接支持。

本书内容包括任务规划总体框架(第 1、2 章)、静态任务规划方法(第 3、4、5 章)、动态任务规划方法(第 6 章)、数传规划(第 7 章)。

感谢课题组成员的支持,包括郝会成博士、庞中华、姜薇、张丽秋、袁子清、陈永抗、任宴冬硕士。科研中存在相互借鉴过程,本书撰写过程中也参考了国内外同行的研究成果,在此表示感谢。任务规划的需求不断变化,规划技术也持续发展,书中存在错误和不足之处,敬请各位专家与学者批评指正。

配套网站上共享着技术资料、书籍勘误表、最新研究文档、常见问题、在线研讨、作者联系方式等。网址:<http://www.jiangw.cn>, <http://www.jiangw.com>。

著者
2016 年 1 月

目 录

第 1 章 成像卫星任务规划问题	1
1.1 任务规划问题提出	1
1.2 任务规划常见模型与算法分类	6
1.3 任务预处理过程	10
1.4 任务规划中的关键技术分析	22
第 2 章 卫星任务规划总体框架	27
2.1 成像卫星典型工作过程	27
2.2 任务规划总体框架	37
2.3 基于 Multi-Agent 的资源建模总体设计	48
第 3 章 卫星任务协同规划模型与求解	54
3.1 成像卫星协同规划建模	54
3.2 模型求解问题及遗传禁忌求解算法	63
3.3 高低轨卫星协同任务观测建模	71
3.4 组合遗传模拟退火的求解算法	78
第 4 章 提高卫星服务寿命的任务规划	84
4.1 提高卫星服务寿命模型	84
4.2 邻域贪心扩展的遗传禁忌求解算法	91
4.3 仿真实验与分析	94
第 5 章 卫星群任务规划方法	100
5.1 规划系统流程与资源的辅助群分配方法	100
5.2 协同任务表示及任务分配	103
5.3 层次任务群规划模型	105
5.4 高低阶特征结合的遗传求解算法	111
5.5 仿真实验与分析	115
第 6 章 基于 Multi-Agent 的动态任务规划	120
6.1 对地观测卫星任务规划总体设计	121
6.2 卫星任务规划的模型	127
6.3 基于诚信多层嵌套解约的合同网求解	132
6.4 任务规划仿真实验与评价	138
6.5 应急任务的交互式规划	141
第 7 章 卫星数传规划模型与算法	144
7.1 卫星数传的工作过程	144
7.2 数传规划模型研究	148
7.3 模型求解算法研究	152
7.4 仿真实验与分析	154
参考文献	159

第 1 章 成像卫星任务规划问题

对地观测卫星在各种航天器中占有很大的比重,其主要任务是利用包括可见光、红外线、SAR 等星载传感器,获取地面目标的图像和信号等信息,并将这些信息传回地面站,供分析判别使用。它是在地球表面之外,利用空间的位置优势对地球进行观测的活动,目的是能够获取有关地球体系及其各组成部分的详细数据或信息。对地观测是国防建设的需要,如制空权、制海权、制天权、制信息权等,对国民经济和社会的发展,如环境保护、国土普查、抗震减灾等有着重要的作用,已成为一个国家综合实力的重要标志^[1]。

对地观测卫星上搭载的传感器不同,所能完成的观测任务也有所不同。例如,光学传感器是将收集到的地面反射光在感光元器件上直接曝光成像,而光电类型的传感器将收集的电磁波能量,通过仪器内的光敏或热敏元件等转变成电能后再记录存储。实际卫星任务规划的约束往往较多,一些传感器执行任务的约束条件或者约束形式相似,故本书对各种类型传感器的卫星规划也有借鉴意义。

多星多任务统筹规划用于制定卫星任务执行的规划方案,它影响着卫星系统的整体工作效益。多星多任务统筹规划研究既涉及技术问题,又涉及管理问题,它可看作是在技术的支撑下如何有效地进行管理的问题。

1.1 任务规划问题提出

1.1.1 成像卫星系统发展的特点

图 1.1 展示卫星系统的组成示意图,依据功能和作用可划分为三种类型对象:观测卫星、数传资源与观测目标。观测卫星部署在大气层上方的太空中,卫星的轨道有着多种选择,卫星可部署高轨、中轨和低轨上,对应着高轨卫星、中轨卫星和低轨卫星。高轨道卫星由于距离地球较远,可形成大视场观测,少量的卫星就可形成对地球的大面积覆盖;低轨道卫星利用轨道低、距离地面较近的优势,容易获得目标物高分辨率图像,但若需要全球覆盖,则往往需要同时部署更多的卫星;相比较,中轨道卫星则做以适当的折中。除了按照轨道的高低进行划分外,还有其他划分方法。依据观测卫星携带传感器类型的不同,成像卫星可以分为可见光、多光谱、合成孔径雷达(SAR)、红外线、超光谱、高光谱、地表电磁探测等多种类型;按照卫星平台大小,可分为常规卫星、小卫星、皮星和纳星等。

典型的数传资源地面接收站、移动接收站、极地站以及中继接收等。特别是中继卫星的部署,极大地降低了观测数据传输的延迟,为大范围实拍实传工作提供了直接支持。几个航天大国都已经实现多颗中继星组网,这为卫星指令上传、观测数据下传等星地通信提供了重要支持。极地站的建设也能为只采用国内数据接收站接收数据提供有益补充。移动站的部署具有更大的灵活性,例如将搭载数据接收设备的船只部署在海洋上,也可以实现扩大实时数据接收范围,相比较这是一种非常灵活的部署方式。

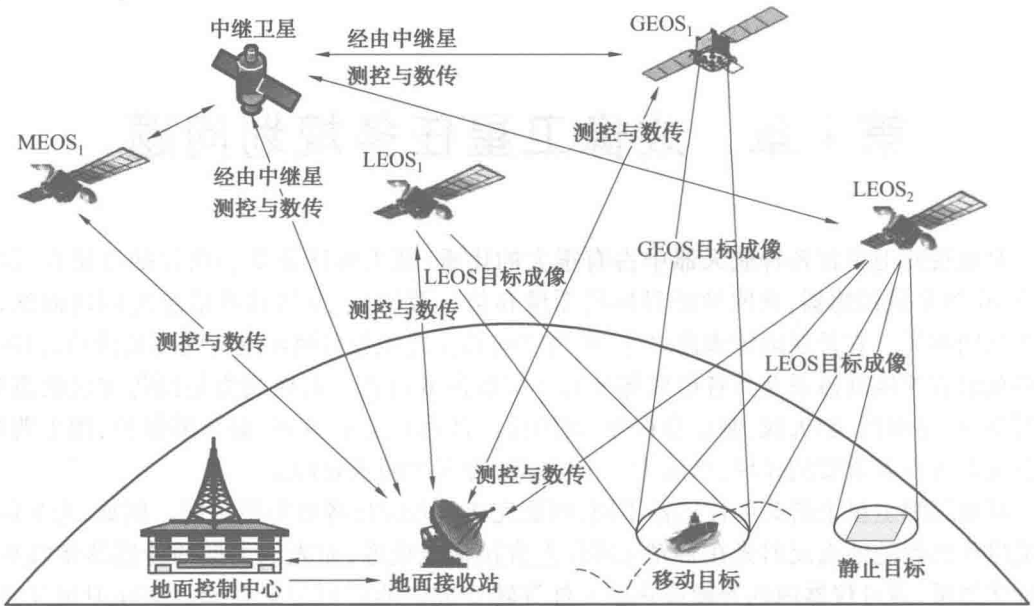


图 1.1 卫星系统组成示意图

观测目标一般分为两类:静止目标和移动目标。静止目标包括地面固定点目标或者固定区域目标。对于气象观测卫星来说,是指对带有云层的区域进行摄像。移动目标通常是指集群目标或者大型海洋一定目标等。一般来说移动目标应该是观测卫星所拍摄图像的分辨率能够辨识的目标,所以在现有卫星分辨率的限制条件下,能够跟踪的目标应该足够大以便能够利用图像进行跟踪。

卫星造价昂贵,研制周期长,卫星资源显得尤为宝贵,随着在轨卫星数量的增多,卫星种类的增加,卫星的组网建设要求必须依靠计算机技术解决多卫星资源、多用户任务下的任务规划与资源优化调度问题。特别是随着卫星技术的发展,任务需求与卫星资源都在增多,手工操作或单星独自规划模式已完全不能满足现有发展的需求,为此各航天大国都已深入地开展多星多任务统筹规划的研究。

卫星系统中的资源建设呈现出如下特点,它们影响着任务规划的功能需求:

(1)高中低各轨道上的卫星类型和数量都较多。一般来说,高轨卫星轨道高、覆盖面大,少量卫星可以覆盖地球较大面积,卫星载荷的视场和照相幅宽都较大,但分辨率较低。低轨卫星因轨道低故覆盖面小,需要多星组网部署实现连续观测,卫星载荷的视场和照相幅宽都较小,但分辨率一般较高。

(2)敏捷卫星与敏捷相机具有三维调整能力,动作更加灵活,模式较常规卫星多,因而增加了任务观测能力,例如可以前后视、可以单星立体成像。

(3)小型卫星、皮纳卫星等新一代卫星的部署方便快捷,进一步增强了组网成像卫星系统的观测能力。

(4)各轨道各类型卫星可以协同工作,既可执行简单任务,又可执行复杂任务观测。

(5)卫星数量多、天线类型多、图像的数据量相对要大,增加了数传工作量。

(6)中继星的引入为全天候近实时观测提供了可能,对数据的快速下载,特别是在实拍实传和移动目标交互跟踪过程中发挥着重要作用。

(7) 卫星系统的管理追求着“功能强、一体化、易扩展、资源规模大、规划快、灵活配置、智能化”等多方面的性能。

1.1.2 协同任务规划作用与应用举例

受卫星轨道、星载传感器物理特性、目标物理特征等因素的影响,越来越多的成像任务需要多颗不同种类的成像卫星相互协作、共同完成。相比于单颗卫星成像,多星协作具有更加强大的观测能力和突出的观测优势。

(1) 观测区域更广泛。对于较大区域的观测目标,受限于卫星轨道及星载传感器观测幅宽的限制,单颗卫星很难在短期内完成对目标区域的完全覆盖,而通过将目标区域划分成多个可一次成像的子任务并由多颗卫星对各子任务进行成像,可以在更短的时间内完成目标区域的观测。

(2) 观测时效性更强。由于卫星运行轨道的限制,单颗卫星对于同一区域的回访呈现一定的周期性,相应的,单颗卫星对于同一目标进行多次观测时要间隔一个或多个回访周期。回访周期的限制使得单颗成像卫星难以满足时效性非常强的观测目标的持续观测要求。而通过多颗卫星的相互配合,可以大大缩短目标的持续观测周期,实现对目标的持续观测,这更有利于协同任务观测,如周期性任务、立体成像任务等。

(3) 观测数据类型的多样化。部分复杂的成像观测需求需要可见光、高光谱、多光谱、SAR 等多类观测数据,而受限于卫星运载工具、卫星能量供应等的限制,单颗卫星只能携带少量传感器载荷,因而只能收集目标某些类型的观测数据。因此,有时需要通过多颗带有不同载荷的卫星对同一目标收集多种类型的观测数据,以期利用信息增强或从多种角度更好地完成目标判别、状态分析等工作。

通过多颗携带不同种类传感器载荷的成像卫星相互配合,多星协同工作可以完成更加复杂的对地观测任务。一些协同观测的应用举例如下:

(1) 区域目标的协同观测与普查。依据目标是否可以通过单颗卫星的一次成像完成观测,成像任务可以分为点目标和区域目标。规划系统通过将区域目标划分为多个点目标并交给不同的卫星进行观测,从而能更快地完成对整个区域的覆盖,如图 1.2 所示。

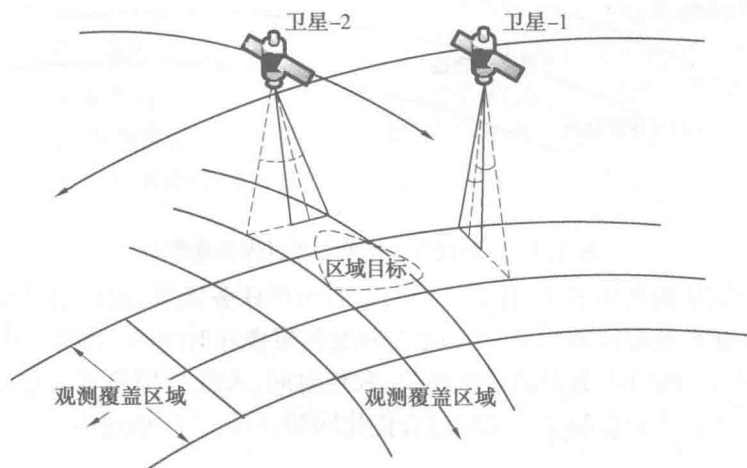


图 1.2 卫星对区域目标覆盖示意图

(2) 机场、港口等重点目标的周期性成像。通过多类卫星对机场等目标的持续周期性成像,可以完成目标状态变化的监测,并借助多类成像数据对目标当前状态进行详细的判别。重访周期是利用卫星的侧摆快速拍摄同一地点时所需要的时间^①。多星协同观测可以更好地克服一个卫星因重访周期的限制而影响到周期性任务的观测。

(3) 立体成像观测的需求。有些卫星如敏捷卫星可以再一次经过目标时通过前后视完成立体成像,而传统只允许侧摆的卫星往往需要通过异轨观测实现立体成像。考虑到卫星轨道的限制,多颗星协同观测能够提高立体成像的观测效率。

(4) 多元信息收集。希望获得某一区域多种图像类型的信息时,可由多星协同观测实现,例如伪装识别可能需要可见光、SAR 与电子侦察观测等;森林大火可由红外判别是否着火,由可见光或 SAR 判别过火面积等。

(5) 移动目标的搜索与跟踪。相比于固定点目标,移动目标大多数时间都在进行位移,其运动方向、速度等都难以预测。采用单颗卫星难以对移动目标进行搜索、确认和持续监测,需要多星配合执行。例如利用高低轨卫星的观测特点,由高轨卫星做初步观测,再由低轨卫星做精细观测,形成引导式目标观测。

1.1.3 卫星任务规划问题

图 1.3 展示允许侧摆的成像卫星观测示意图。值得注意的是,各类型卫星的成像工作过程虽然总体相似,但具体工作细节往往存在一些差异,即使同一类型卫星也可能因为相机工作方式不同而具体动作参数有所差别,因而一颗具体卫星的工作模型需依据该卫星本身的专门要求来制定。例如许多卫星只是允许侧摆,而敏捷卫星具有俯仰、滚动、偏航三维方向上的动作^[2]。

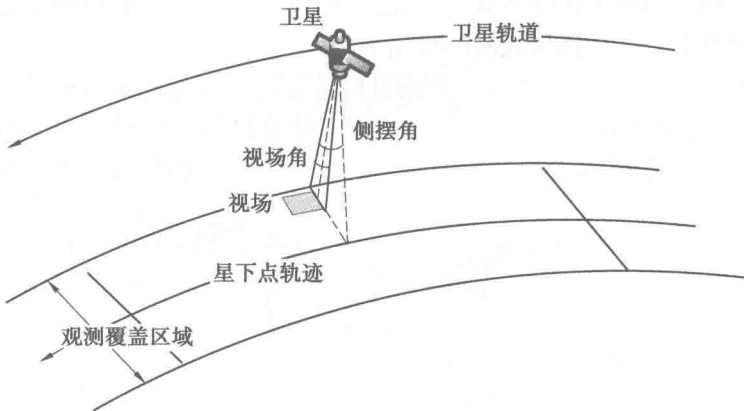


图 1.3 一般成像卫星的工作过程示意图

卫星任务规划是指利用卫星资源,针对大量的用户任务需求,制订最佳任务执行计划,即在满足卫星观测和数据传输约束下,为卫星和数传资源在时间轴上制定动作序列,如载荷工作的起始时间、结束时间、载荷的动作参数、数传时间、天线的仰角等。它是多资源、多任务、多时间窗口、多优化目标和多约束的组合优化问题,可形式化描述为:

^① 重复周期是指卫星不经过侧摆再次拍摄同一地点所需要的时间。

$$STSP = \{S, G, R, \Phi, \Sigma, sts, ste\} \quad (1.1)$$

其中 S 表示场景中的执行用户任务的卫星集合,属性包括用于执行观测任务的卫星的轨道参数、卫星有效载荷参数等; G 表示各类地面站资源,包括常规地面站、极地站、移动站等; R 表示中继星资源; Φ 表示用户任务需求,包括图像要求(类型、分辨率、云层厚度等)、地理位置、时间约束等; Σ 指外部环境,如气象条件、人工约束等; sts, ste 表示任务规划的开始和结束时间。从任务规划本身来看,其主要特点为:

(1) 多资源。从任务角度,执行观测任务可选卫星较多,一些任务需要多星协同工作;从资源角度,卫星同一时刻可能存在多个候选观测任务。

(2) 多任务。在规划周期内往往有大量的用户任务,多任务存在优化的可能。大量的用户任务在满足任务规划约束条件情况下,存在较大的优化空间。

(3) 多时间窗口。星载传感器与任务之间往往存在多个可见时间窗,受多种约束限制,任务通常会在部分观测时间窗上存在冲突,因而存在着执行时间窗的优化选择决策问题。

(4) 多任务类型。任务按照紧迫程度可分为应急性和常规性任务。观测任务按照所需图像类型分为可见光、SAR 等任务。按照拍照次数可分为简单任务和复杂任务,协同任务属于复杂任务。

(5) 多优化目标与多约束。优化目标可从任务收益角度和资源利用等角度提出多个优化目标,而卫星实际执行任务中受多种约束条件制约,如可见性、载荷类型、资源能量限制、太阳高度角等。

(6) 观测过程与数传过程需一体化规划的特点。图像观测与图像传输是任务从观测到传回地面站的两个重要阶段,这两个阶段的有效衔接是图像顺利观测的有效保障,特别是对于实拍实传与交互式移动目标跟踪任务,及时下传观测数据至关重要。

(7) 规划中存在不确定性,如任务变动、气象条件等,这要求观测方案的制定应尽可能降低风险。

1.1.4 任务规划过程的主要阶段

卫星任务规划过程如果按照工作流程来划分阶段,可分为任务执行指令上传阶段规划、观测阶段规划和数传阶段规划。任务执行指令上传阶段规划是指地面测控站,将卫星执行的动作指令通过测控设备传输给卫星;观测阶段规划,又可称作卫星任务观测规划,主要研究如何为各个任务合理地分配卫星资源执行任务观测;数传阶段规划,又可称作星地数传规划,主要研究如何有效地分配地面站、中继星等数据接收设备资源,将卫星拍摄的图像数据接收到地面站。上述三个主要阶段完成卫星任务执行,如图 1.4 所示。

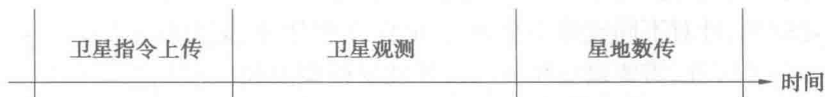


图 1.4 卫星调度中的三类规划

按照上述三个阶段,对于卫星规划研究问题也大致分为卫星指令上传规划研究、卫星任务观测规划研究、星地数传规划研究。由于卫星指令上传规划过程有似于数传规划过程,所以在技术上存在相互借鉴的地方,于是很多情况下现有卫星规划研究主要指观测规划和数传规划。考虑到观测和数传过程存在一个先后顺序关系,在研究过程中有时候分开来研究,

有时二者合在一起进行规划,但最终系统实现时应该属于综合规划的过程。

任务规划过程如果按照任务规划研究问题又可分为四个阶段:任务预处理、模型构建、算法求解、评估,如图 1.5 所示。

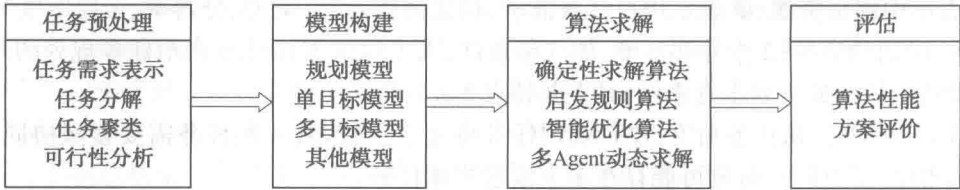


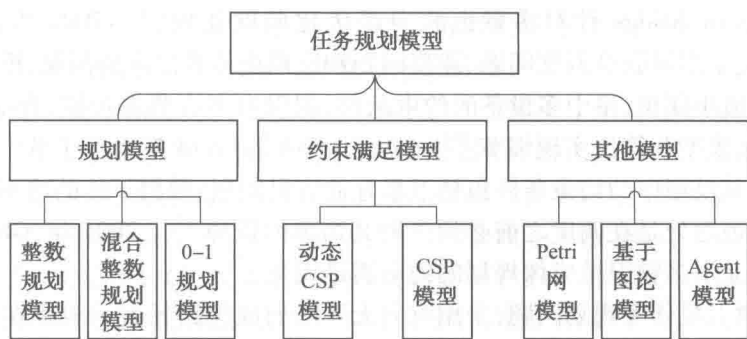
图 1.5 任务规划的四阶段流程图

在任务预处理阶段,主要研究用户的用户任务需求的统一形式化表示、任务分解、任务聚类以及可行性分析方法。在模型构建阶段,主要研究如何对规划问题进行建模,现有研究主要分成三类模型,包括规划模型、约束满足模型、其他模型,其中其他模型包括 Agent 模型、Petri 网模型、图论模型等。在算法求解阶段,主要研究针对所建模型如何求解获得最佳任务规划方案,求解算法不仅受到所建模型的影响还受到任务规划规模的影响,例如对于规划模型,当任务数量少的时候,可以使用确定性求解算法,但当任务规划规模变大时,确定性求解算法往往太慢,需要借助其他求解算法。求解算法依据规划时属于静态规划还是动态规划的求解,还可分为静态求解算法,例如智能优化算法、动态求解算法和多 Agent 求解算法。这里动态求解主要是求解速度快,可较好地满足规划过程的实时性需求,例如交互式规划过程,要求求解速度快。评估阶段包括求解算法性能评估和任务规划方案评估。

当然整个任务规划属于一个整体,而进行阶段划分一方面 is 问题研究的需要,将问题分解来看待有助于深入研究每个子问题,另一方面,也是规划管理过程的阶段需要。这种阶段划分可以依据实际需要而有其他划分方法,例如任务输入还可以包括任务审核过程^[3],群规划中还可以包括群用户规划过程^{[4][5][6]},周规划中还包括短期规划过程^[7],如果数传分开研究还包括数传过程^[8],任务预处理过程还可包括需求建模^{[9][10]}等。此外,如果在具体系统研制中还需要依据管理需要,设置相应处理过程^[11]。

1.2 任务规划常见模型与算法分类

成像卫星任务规划调度问题是一个多目标约束满足问题,是一个求解如何在有限的资源、有限的时间和空间等多约束条件下,能够提高卫星工作效率的问题。该问题属于一个复杂的组合优化问题,针对不同成像卫星种类、面向常规任务、应急任务的类型以及基于静态和动态的任务属性,需要建立相应的任务规划模型及相应问题的求解算法。由于各类卫星工作模式设计有所不同,所以任务规划的具体约束条件甚至会有较大区别;由于卫星运控管理的目标策略不同,卫星规划的优化目标也不尽相同。约束与目标不同,这使得相应的模型、算法往往不具有直接的可移植性,也就产生了多种不同类型的任务规划模型及算法。从国内外现状来看,任务规划问题大致可分为单星任务规划和多星规划问题,所建立的模型可划分为:整数规划模型、混合整数规划模型、0-1 规划模型、约束满足问题模型,动态约束满足模型, Petri 网模型,基于图论的模型及基于 Agent 模型等,如图 1.6 所示。



1.2.1 单星任务规划模型

单星调度主要是针对一颗卫星的情况下对任务需求的规划调度研究。随着用户任务需求的日益增加、卫星组网规模的增大,单星规划调度已远远不能满足需求,但单星调度模型构建及求解技术可为多星调度问题研究提供重要借鉴。

针对 SPOT5 单星规划问题,法国的 Bensana 分析了 20 个代表性的问题,然后建立了整数规划模型,模型中没有考虑数据传输任务这一约束条件,但考虑了存储容量的限制^[12];法国的 Vasquez 等将 SPOT5 规划问题映射为 0-1 背包问题,按照背包问题理论建立了约束满足模型,其模型中没有考虑数据传输任务这一约束条件,但考虑了存储容量的限制^[13];法国的 Gabrel 等讨论了类似 SPOTS 的单颗规划问题,并基于图论和数学规划方法建立了整数规划模型,但既没有考虑数据传输任务的限制,也没有考虑存储容量的限制^[14]。以上模型都是在不考虑一些实际的约束条件下构建的简化模型。

美国的 Wolfe 等将调度问题看作带时间窗约束的背包问题,并建立整数规划模型^[15]。美国的 Song 等研究了单星在一个地区内有多个任务相互冲突时怎样选择场景,最大每个可见时间窗的收益,建立了非线性规划模型^[16]。美国的 Pemberton 等人建立了约束满足问题模型^[17],法国的 Michel Lemaitre 研究了敏捷卫星区域分割与成像技术,对敏捷卫星进行成像调度,建立了约束满足问题模型^[18]。

整数规划模型是一类比较成熟的模型,可以利用运筹学方法进行求解,同时其具有明确的目标函数和约束条件,对问题形式化描述精确,描述问题清楚简洁,但该方法一般需对实际问题简化来建立整数规划模型;而约束满足模型结构层次清晰,从决策变量、变量值域、约束条件对问题进行描述,可实现用数学语言难以描述的约束,故可用于较大规模调度问题,但模型求解往往需借助智能优化算法。

1.2.2 多星任务规划模型

多星规划调度问题更加复杂,问题的组合爆炸特征十分明显,已经被证明了是 NP-hard 问题。多星规划模型的构建大多作适当简化假设^①,考虑规划中的主要约束条件,忽略次要约束条件。针对不同类型卫星任务规划问题,因建模目的不同,假设的约束条件侧重点不同。

① 在问题研究中作以适当简化,是为了有助于研究关键问题。具体工程实现时需要考虑全部约束。

美国的 Burrow Bridge 针对多颗低轨卫星优化调度建模^[19]。2002 年美国 NASA 的 Globus 等人研究了多星联合调度问题、建模问题和应用遗传算法求解问题,模型中考虑了任务优先级、卫星最小摆角、星中多设备的约束条件,但没有考虑数据传输、存储容量等约束,且文献没有给出模型和算法实现细节^[20]。美国 NASA 的 Frank 等设计了基于约束的模型表示和描述方法,其模型中的约束条件包括卫星存储容量限制、数据下传的速率限制以及任务的优先级等,不足之处是在调度之前必须声明其需求的资源^[21]。2004 年, Globus 比较了几种规划方法,建立了多颗卫星成像规划的约束满足模型^[22]。

Gabrel 针对卫星任务规划问题,采用有向无环图的成像路径表示卫星在多个任务间转换方式,构建了加权有向无环图,研究了最短路径算法进行求解^[23]。Vasquez^[13]建立了带有时间窗口约束的多维背包模型。Zufferry 运用了图论知识建立多星测控规划调度模型,并设计了着色技术算法求解^[24]。王远振^[25]构建了多星-地面站调度的 Petri 网模型,通过对对象着色和时间着色技术反映了系统的调度流程,进一步通过方案库所生成和存储调度方案。关于更多模型总结已阐述在文献[1]中。

与常规任务规划不同,应急性任务体现出时间紧迫性,故需插入已有执行方案,由于观测或资源的约束关系,可能需对方案调整。除应急性任务外,资源状态变动、任务属性变动、气象条件等都可能導致执行方案的调整。对任务方案的调整通常采用动态规划调度模型。刘洋采用了基于动态约束满足问题理论和方法,构建了多星联合调度问题的概念模型^[26]。贺川将多星协同调度问题分解为任务排序主问题和资源匹配子问题,以任务收益为优化目标构建问题的约束满足模型,并应用粒子群算法进行求解^[27]。

1.2.3 规划求解算法

对地观测卫星任务规划调度算法研究主要集中在确定性算法和不确定性算法两方面,其中不确定性算法主要包括启发式算法和搜索算法,确定性算法通常只适用于小规模问题的解决,而面对大规模求解时主要采用不确定性算法,其中搜索算法应用更为广泛。典型的算法如图 1.7 所示。

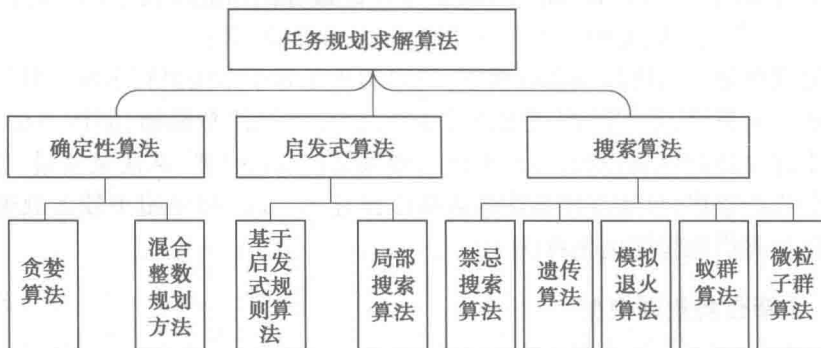


图 1.7 任务规划求解算法分类图

确定性算法有确定性的求解步骤,能在多项式时间内求得最优解,算法稳定强、效率高,多次计算对同一输入具有相同的输出。然而对于实际问题,一方面简化建模且设计出一种确定性算法是非常困难的,况且若模型过度简化将较大影响其实际应用的价值;另一方面实际求解空间复杂度高,所以确定性算法实用性差。Rivett 等开发了多个卫星线性规划算法,

实验结果显示出求解时间较长^[28]。Lin 等人针对 ROCSAT-II 的日常调度问题,构建了整数规划模型,研究了拉格朗日松弛和线性搜索技术求解技术^[29]。

由于求解问题属于NP-hard 问题,现有的研究工作倾向使用启发式算法和搜索算法进行求解,而且一些学者还针对不同的算法进行了比较研究。Lemaitre 等人针对敏捷卫星规划问题研究比较了约束规划、贪婪算法、动态规划与局部搜索算法,实验表明完全搜索在卫星调度问题中效率不高,而在适应性和灵活性上,约束规划方法较强;在求解效率和求解效果上,局部邻域搜索算法较好;在考虑线性约束的情况下,局部搜索算法在考虑所有约束的情况下性能表现最好,而动态规划算法表现出速度快、效果好,相比较,约束规划算法性能却较差,而贪婪算法求解速度较快,但是效果却一般^[18]。Bensana 等人对 SPOT5 卫星调度问题,比较研究了动态规划、深度优先搜索、Russian Doll Search 和禁忌搜索、贪婪搜索在不同规模问题实例下的计算性能^[30]。其研究结果表明,当任务规划问题小规模时,采用完全搜索算法可以在短时间内得到最优解,而规模较大时,完全搜索算法表现欠佳,在合理的时间范围内采用禁忌搜索算法可得到满意解。美国 Wolfe 等人实验比较了前向功能的构造算法、优先级调度构造算法及遗传算法三种不同算法,结果表明,遗传算法可以大幅提高贪婪算法的求解性能^[15]。

Frank 等人在EO-1 系统的应用中,基于随机搜索的启发式算法求解,每天只规划4个任务,只能对较小规模的规划问题求解^[21]。在面向点目标的成像卫星调度问题中 Globus 等人对比了模拟退火、爬山法和遗传算法等求解算法性能^[22]。此外,Wang 研究了启发式信息及决策支持系统规划方法^[31],许多学者探索了多种求解算法。

求解算法的选择除了根据卫星自身的特点构建的模型外,还应根据任务需求规模,即搜索空间的大小来确定。在任务规划调度算法研究中,通常可以得出这样的结论:启发式算法由于运行过程简单,运行速度快,所以适合较大规模问题,启发式算法具有特定的适用范围,针对不同的问题需要专门设计出启发式规则,有的问题启发式信息不能保证一定会获取。此外其能够充分利用问题的启发式信息来构造算法,对最优解的获取基本能够得到保证。搜索算法分为一般搜索算法和智能优化搜索算法。一般搜索算法关键在于搜索策略的设计,智能搜索算法设计较复杂,有些问题需要经过转化才能设计此类算法;一般搜索算法设计简单,求解速度快,适合较大规模的问题;缺点是搜索效率低,容易陷入局部最优。智能搜索算法具有通用性强,不依赖于特定问题,搜索效率高,具有内在的并行搜索能力,适用于大规模求解问题;缺点是若只利用一种求解算法,易于出现早熟现象、陷入局部最优,为此常用组合智能搜索算法。从研究的趋势上来看,一般搜索算法正逐步被智能搜索算法取代。

1.2.4 星地数传规划模型

现有的数传规划模型大致可分为约束满足模型、启发式模型、整数规划模型、图模型等^[8]。Rojanasoonthon^[32]研究了两个时间窗口约束的中继卫星多址链路调度问题,建立了一个基于混合整数规划的中继卫星调度模型,并应用分支-定界算法求解。该模型考虑了任务的优先级,其调度的优化目标是在规划的时间段内,分配中继卫星的天线资源使得完成的用户任务数量最多。方炎申等^[33]研究了中继卫星链路调度模型,应用贪婪随机自适应搜索算法求解。

在星地数传研究方面,Barbulescu^[34]针对低轨卫星的多资源(多地面站天线)规划调度问题,提出了一种贪婪算法。Sylvain Damiani^[35]将卫星数传规划调度问题视作一个独立于

卫星侦察调度的卫星数据下载决策问题,建立了数传任务调度的动态规划模型,并用贪婪算法求解。李云峰研究了卫星数传调度模型,提出了基于试探性启发式调度算法^[36]。

如图 1.4 所示,星地数传是卫星观测图像后将图像传给地面站的阶段。卫星观测图像的下传通常有两种类型:存储转发和实拍实传。存储转发是指观测卫星拍摄图像之后可以存储在卫星内的存储器中,等待数据接收资源可用时再传输到地面站。实拍实传常指观测卫星拍摄图像后直接经由数传资源传输到地面站,有时实拍实传是指在指定的短延时将数据传输到地面站,此时数据可能会在卫星内有短暂的存储过程,但其实效性,即限制最大允许延时是非常重要的。

卫星数传规划也存在着与数据接收站、与中继星通信的有效利用问题,因此数传规划也应该建立相应的规划模型,该模型需要从多种角度优化数传性能,例如哪些任务优先下传,优先选择中继星还是直接传输给数据接收站,当多个数据接收站即将可用时^①,优先选择哪个数据接收站等等优化问题。现有一些数传规划模型类似于观测任务规划模型,一般包括基于约束满足的模型、数学规划模型等。考虑到在实际卫星系统设计时,对地面数据接收问题已经深入分析论证,所设计的地面站一般有足够能力去接收现有卫星观测的图像数据,因此,数传规划的优化过程相比卫星观测规划来说,相对容易些,甚至一些基于启发式规则的求解算法就能够获得较高的性能。在卫星任务规划的实际应用系统中,观测规划与数传规划应该在一起进行,然而在科研中为了深入研究某一问题,有时将二者分离开来将其作为相对独立的问题加以研究。

1.3 任务预处理过程

1.3.1 用户任务描述与任务表示

用户任务可按多种分类标准进行划分,如表 1.1 所示。明确任务的类型是必要的,因为不同类型的任务有不同的属性和参数,任务预处理过程也存在较大差别,规划系统必须在明确用户任务的类型并获得完备的任务属性和需求参数时,才能进一步处理。

表 1.1 用户任务的划分类型

分类标准	类 型
时间紧迫性	应急任务、常规任务
目标范围	点目标任务、区域目标任务
采样多少	简单任务(一次性任务)、复杂任务(多次观测任务,如立体成像,周期性任务等)
观测目标的运动性	静止目标任务、移动目标任务
图像类型	可见光、多光谱、SAR 等

(1) 按时间紧迫性,用户任务可分为应急任务和常规任务两大类,应急任务因其时间紧迫性要求,需要尽量优先预处理,所得元任务优先规划。

(2) 按目标范围大小,用户任务可分为点目标任务和区域目标任务,区域目标任务经任

^① 例如,极地站接收后需要传输到国内,这需要考虑传输代价、时效性、安全性等问题,因此若传输任务不紧迫且存在多个即将可用的数据接收站,往往选择地面处理代价较小,时效安全等较优的地面站。

务分解后,得到一系列具有约束关系的元任务^①。

(3) 按采样多少,可分简单任务和复杂任务。简单任务是指一次成像观测就可以完成的任务;复杂任务是指需要多次成像才能完成的任务,如立体成像和周期性任务。复杂任务应分解为多个具有时序和逻辑关系的一次性任务,每次观测可用同一资源执行成像,也可能需要不同类型的卫星和传感器协同观测。周期性任务可看作一种特殊的多次观测任务,各次观测之间有时间间隔要求。

(4) 按观测目标的运动性,可分为静止目标任务和移动目标任务。静止目标的位置不随时间而变动,而移动目标可能会随时间而变动。移动目标的观测往往需要依据所了解的或估计的运动轨迹分析其候选观测区域,然后再实施观测。移动任务的处理包含区域目标任务的处理需求,且为寻找目标有时需要进行多次观测,但对移动目标潜在区域的分解不同于一般的区域目标分解,而是对潜在区域各候选拍摄执行相应选择机制,例如概率估计每次候选子区域拍摄能够找到目标的最佳概率。

(5) 按图像类型,可分为可见光、多光谱、SAR 等类型。图像的类型指明了所需要的卫星载荷类型,它是定制任务的需求中需要指明的一个要素。

一次成像就能完成的任务可称为简单任务,需要多次成像才能完成的任务又可称为复杂任务。复杂任务本身的多次成像往往存在关联约束,形成协同观测过程,如区域目标任务、立体成像任务、周期性任务、多类型协同任务等。协同任务需要依据协同需求自动生成或者用户指定的多次观测的资源类型需求、图像参数需求、任务间的时序等多种约束关系^②。协同模式挖掘有助于构建用户任务输入模版,也有助于任务规划过程。

为了便于用户对各类任务的输入,也有助于规划系统准确理解用户的任务需求,通常系统提供各类型任务的输入模版,用户只需要填写任务模版就可指明任务需求。当准确理解用户任务需求后,再按照图像类型细化形成各次观测任务,如可见光、多光谱、SAR 等,如一次性可见光观测任务模版、周期性 SAR 观测任务模版、可见光立体成像任务模版。系统需要规范化用户任务的描述,可以使用层次化任务网络(Hierarchy Task Network, HTN)实现对任务的描述,借助于领域相关知识将抽象复杂的需求分解成一系列基本任务进行描述或者使用可扩展标记语言(Extensible Markup Language, XML)工具对卫星系统观测需求及任务格式进行标准化描述。图 1.8 展示一个任务模版举例。任务模版是从任务需求角度来对任务目标和约束条件进行限定,它可以通过 HTN 实现任务描述或者通过 XML 形成任务描述。

通过任务模版的描述,可以明确任务目标和任务约束,其中任务目标对应运控中的用户任务目标需求,而任务约束,则形成任务规划中的约束条件。例如一个具体任务的部分 XML 源码如下:

```
< 执行约束 >  
  < 纬度 > 45.742905 < / 纬度 >  
  < 经度 > 126.631906 < / 经度 >  
  < 高度 > 180 < / 高度 >
```

① 元任务是指可以一次观测就可以完成成像的任务,点目标任务本身就是元任务。

② 具有智能辅助分析系统,可以在用户对任务的描述中,分析出隐含协同关系来确定任务协同方式。

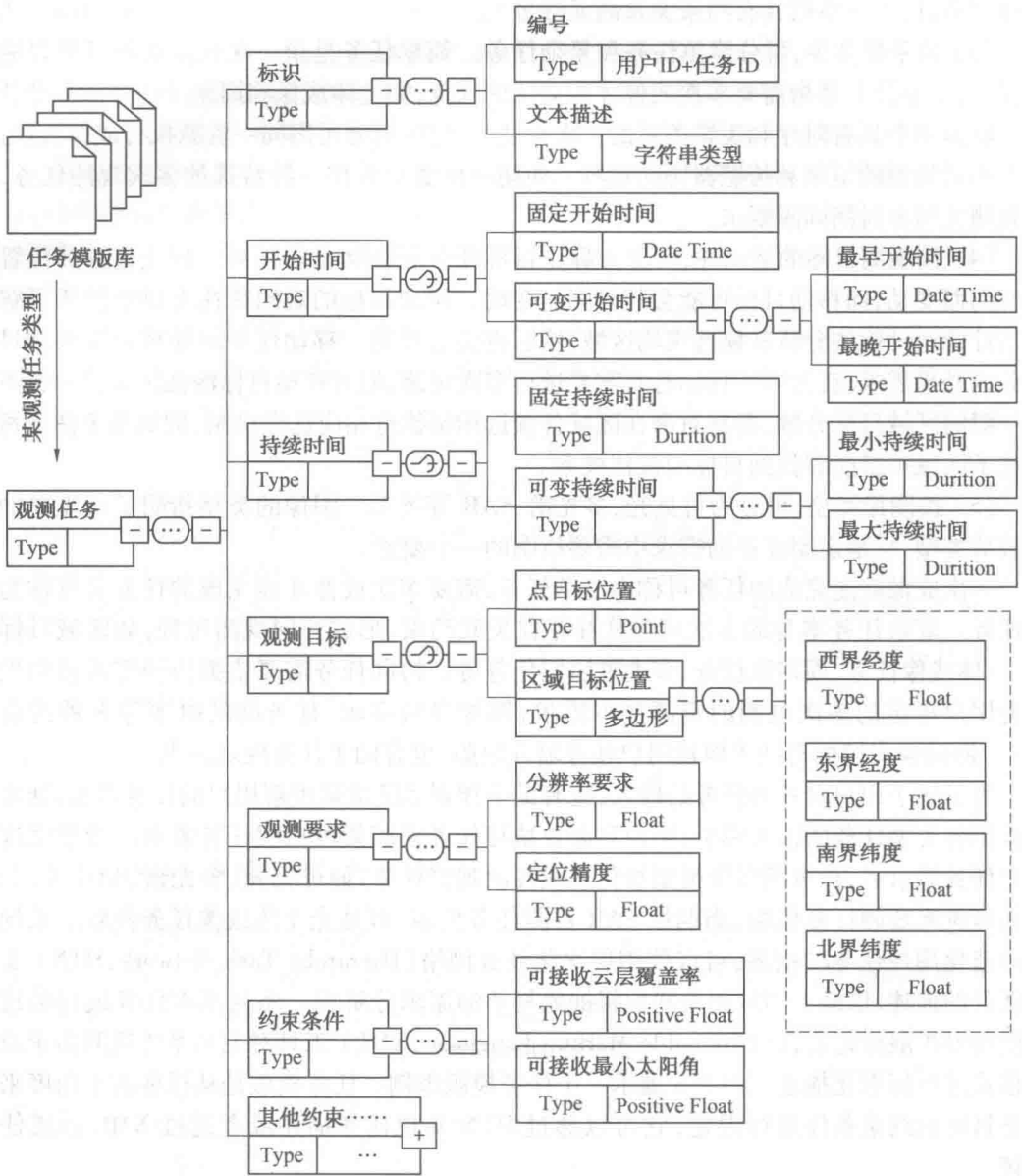


图 1.8 观测任务模版示意图

- < 最早开始时间 > 2015 - 05 - 03 05: 15: 00 < / 最早开始时间 >
- < 最迟结束时间 > 2015 - 05 - 10 05: 15: 00 < / 最迟结束时间 >
- < 任务执行频率 > 1 < / 任务执行频率 >
- < 最大云层覆盖率 > 0. 6 < / 最大云层覆盖率 >
- < 可接受最小太阳角 > 45 < / 可接受最小太阳角 >
- < / 执行约束 >

其中的“最大云层覆盖率、可接受最小太阳角”等约束可直接用作任务规划约束。在图 1.8 所示的任务输入模版中,任务信息中通常包括:

(1) 观测任务的地理位置。任何观测任务请求都需要目标的具体地理坐标信息。对点