

第3章

卫星任务调度通用化建模方法

针对卫星任务调度模型通用性、灵活性不足问题和“一星一系统”的管控现状，本章遵循“立足实际、面向应用”的研究原则，提出了“决策—约束—收益”松耦合的卫星任务调度通用化建模方法，成功将遥感卫星、中继通信卫星、导航卫星和卫星测控等四类主要的卫星任务调度问题纳入一套统一的建模体系，开辟了一条卫星任务调度问题通用化、精细化建模的新思路，为卫星任务调度引擎提供了重要的通用模型支撑。

本章首先将卫星任务调度问题统一描述为一个包含任务集、资源集、评分集和决策矩阵的四元组，系统地、层次化地描述了卫星任务调度问题；其次，创造性地阐释了“任务集—资源集”之间，即“卫星事件—事件执行时机”之间存在的决策关系，构建了通用 0-1 混合整数决策模型，给出了遥感卫星、中继通信卫星、导航卫星和卫星测控等任务调度问题的决策模型示例，为松耦合的卫星任务调度引擎框架提供了“关键耦合点”；再次，分析、总结了卫星任务调度问题主要约束条件，通过约束对象、约束阈值和约束关系设计了通用的约束模板，并进一步设计了基于约束网络的约束值计算方法；最后，建立了各类卫星任务调度问题的收益函数模型，指明了卫星任务调度的优化方向。

3.1 卫星任务调度通用化建模流程

3.1.1 需求分析

如何系统地、完整地建立任务调度问题模型，厘清问题中存在的组合优化关系，是卫星任务调度求解的首要步骤。前文已对卫星任务调度研究中常用模型进

行了全面的综述,指出问题建模应当遵循“立足实际,面向应用”的基本原则。具体地,现阶段管控部门对卫星任务调度问题的建模主要有以下几方面的需求:

(1) 系统性、真实性和完整性需求。前文已指出卫星任务调度研究中的模型简化程度往往较高,导致诸多研究成果难以满足卫星管控实际需要。现阶段,我国卫星规模日益增长、功能日趋多元化、任务调度的复杂性激增。因此,系统地、真实地、完整地描述卫星任务调度实际问题是现阶段卫星管控部门对调度模型的首要需求。相关研究中的模型简化主要体现在两个方面:①决策关系的简化。例如,大部分遥感卫星任务调度研究仅决策成像事件,少数研究同时决策了成像、数传事件,均极少考虑固存擦除事件。这些简化模型无法真实、准确地反映遥感卫星任务调度的实际需求,无法满足管控部门的应用需要。②约束条件的简化。一方面,随着决策关系的简化,相关的约束条件将被忽略;另一方面,卫星管控中大量繁琐、复杂的业务性约束也常被简化。脱离了卫星管控的实际情况,相关研究成果往往与应用“脱轨”。由此,需系统地、真实地、完整地描述卫星任务调度的决策关系、约束条件等,还原问题的本来特征,为卫星任务调度问题提供切实可行的模型支撑。

(2) 通用性、可拓展性需求。在我国现行卫星管控体制下,管控部门往往需要同时管控多种型号、用途各异的卫星,甚至还需跨型号、跨部门地开展联合管控。因此,卫星任务调度模型能否兼容多种类型的卫星、能否适应多种任务调度场景也至关重要。值得注意的是,通用性并不代表用一个模型描述所有的卫星任务调度问题,而是体现为不同卫星任务调度问题在建模思想、方法上的统一;换言之,通过一套通用的建模方法格式化地描述主要的卫星任务调度问题。具体地,针对遥感卫星、中继通信卫星、导航卫星和卫星测控等四类主要的卫星任务调度问题,设计一套通用的建模方法,统一地描述其中存在的组合优化问题。基于此,各型号、各类型、各部门的卫星可以被灵活地、一体化地调度,满足现阶段灵活组网、快速响应的卫星管控新要求,有助于促进卫星任务调度系统的增量式研发与柔性拓展,推进我国卫星系统一体化管控的进程。

(3) 约束条件建模、管理的灵活性需求。模型的通用性通常也依赖于约束建模、管理的灵活性。各类卫星任务调度问题中约束条件不尽相同,这也是导致不同卫星的任务调度模型无法兼容、新型号卫星任务调度系统研发周期长的主要原因。同时,管控部门还可能针对某些卫星、任务甚至在某些特殊时候提出专门、个性化的约束要求,对此,管控部门急需一种灵活、自主的约束建模与管理的手段。长期实践表明,各类卫星任务调度问题中约束条件存在一些共性特征,可通过合理的分类、归纳实现统一的描述,从而降低建模复杂度、提升建模效率。同时,开放的、面向用户的约束条件建模环境也不可或缺,为卫星系统的长效管控提供良好环境支撑。

(4) 收益函数的合理性需求。卫星管控部门的优化需求可能是模糊的、不准确的,如何将管控部门主观的优化需求合理转换为客观的、可量化的收益函数,也是卫星任务调度问题建模中的重要环节。例如,遥感卫星管控部门在最大化卫星成像数量的同时,还希望提升成像的质量,获取成像数量与质量的综合优化效果。导航卫星管控部门在最小化星间链路平均延迟的同时,还希望不同时隙内链路的拓扑更加多样、星间测距更加频繁。因此,需充分理解、分析管控部门的优化需求,合理、准确地建立收益函数模型,为卫星任务调度模型指明优化方向。

3.1.2 流程设计

基于上述需求分析,本节提出了一种“决策—约束—收益”松耦合的卫星任务调度通用化建模流程,如图 3.1 所示。该流程包括以下四个方面。

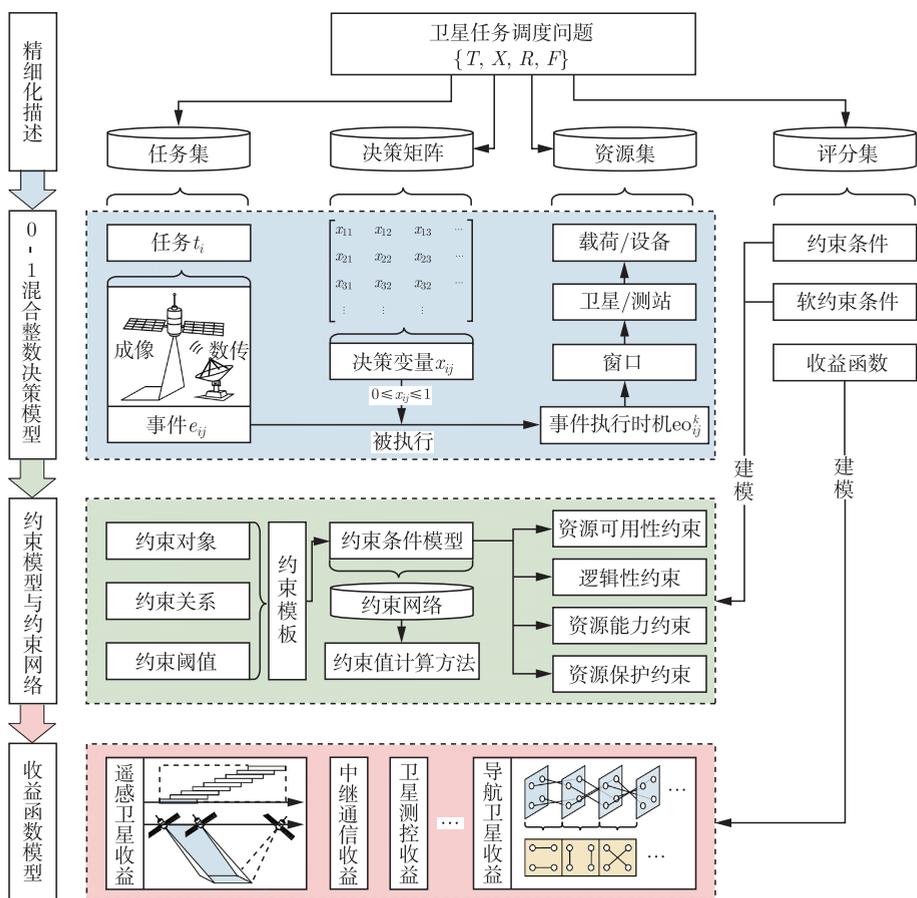


图 3.1 卫星任务调度通用化建模流程

(1) 精细化、层次化地描述卫星任务调度问题, 满足卫星任务调度模型系统性、真实性和完整性的需求。针对传统研究中模型简化程度高的问题, 将卫星任务调度问题统一地描述为一个包含任务集、资源集、评分集和决策矩阵的四元组, 系统地、精细化地描述卫星任务调度问题。特别地, 针对资源的复杂性、多样性, 阐明“事件执行时机”是卫星任务调度问题中最底层、最直接的资源, 整理出“自下而上”的资源结构关系, 为后续决策、约束与收益模型的构建提供客观依据。

(2) 构建通用 0-1 混合整数决策模型, 阐释“任务集—资源集”之间的决策关系, 满足卫星任务调度模型通用性、可拓展性的需求。针对传统卫星任务调度模型通用性不足的问题, 在卫星任务调度问题精细化描述的基础上, 创造性地阐释“任务集—资源集”之间, 即“卫星事件—事件执行时机”之间存在的决策关系, 构建卫星任务调度通用 0-1 混合整数决策模型。基于此, 给出遥感卫星、中继通信卫星、导航卫星和卫星测控等任务调度决策模型的具体示例, 为各类卫星任务调度问题提供一种新的、通用决策模型, 为后续通用约束、收益模型构建以及算法设计提供重要基础, 为本书松耦合的卫星任务调度引擎框架提供“关键耦合点”。

(3) 设计约束模板, 构建约束模型与约束网络, 提供通用、客观、灵活的约束描述手段, 满足卫星任务调度约束建模与管理的需求。基于通用 0-1 混合整数决策模型, 通过约束对象、约束阈值和约束关系等格式化描述卫星任务调度约束条件, 设计通用的约束模板, 给出详细示例及数学模型。在此基础上, 阐明上述约束条件中形成的约束网络, 并进一步设计基于约束网络的约束值计算方法, 为卫星任务调度方案提供通用的约束评价依据和高效的约束值计算方法, 为相关约束模型的实际应用与柔性拓展提供方法支撑。

(4) 构建卫星任务调度收益模型, 满足卫星实际管控的优化需要。针对卫星实际管控过程中的优化需要, 分别建立遥感卫星、中继通信卫星、导航卫星和卫星测控任务的收益函数模型, 特别介绍其中考虑成像质量的敏捷遥感卫星任务收益和导航卫星时延的计算方法, 为卫星任务调度方案提供评价依据, 为后续算法指明优化方向。

综上, 决策模型、约束模型和收益模型共同构建了卫星任务调度模型, 实现了“决策—约束—收益”松耦合、通用化的模型设计目的, 为卫星任务调度引擎提供重要的通用模型支撑, 为提升现阶段卫星任务调度模型通用性和可拓展性、推动我国卫星系统一体化管控进程提供了新思路。

3.2 卫星任务调度问题精细化描述

任务调度问题是一种典型的组合优化问题，通常包含任务、资源、约束、收益和决策关系等要素。对此，本节将卫星任务调度问题统一地描述为一个包含任务集、资源集、评分集和决策矩阵的四元组，系统地、层次化、精细化地描述了卫星任务调度问题。特别地，针对资源的复杂性、多样性，本节阐明“事件执行时机”是卫星任务调度问题中最底层、最直接的资源，构建了“自下而上”的资源结构关系，为后续决策、约束与收益模型的构建提供客观依据。同时，本节传达了实例化的、面向对象的建模思想，为基于本书研究成果的卫星任务调度系统设计与应用提供了参考依据。

3.2.1 四元组

卫星任务调度问题属于一类组合优化问题。为突出卫星任务调度问题的关键性元素，直观呈现其组合优化问题的特点，本节首先将卫星任务调度问题描述为由下式表示的一个四元组，即

$$\text{STSP} = \{T, R, X, F\} \quad (3-1)$$

式中，STSP 为卫星任务调度问题； T 为任务集； R 为资源集； X 为决策矩阵； F 为评分集。

可见，该四元组包含任务集、资源集、决策矩阵和评分集四个元素，各元素的含义如下：

(1) 任务集

任务集是卫星任务调度问题中待调度任务及其属性的集合，是卫星任务调度问题的输入之一。在本书研究背景下，任务集由卫星管控部门，即卫星任务调度问题的提出者直接、完整地提供。3.2.2 节将对其进行详细的阐述。

(2) 资源集

资源集是卫星任务调度问题中各层、各类资源及其属性的集合，是卫星任务调度问题的另一重要输入。在本书研究背景下，资源集也由卫星管控部门（预先处理、计算）直接、完整地提供。在该集合中，资源分为不同的层级、类型，既有卫星、测站等具体的、顶层性的资源，也有卫星轨道、时间窗口、事件执行时机等抽象的、底层性的资源。任务集和资源集的规模共同决定卫星任务调度问题的解空间规模，俗称问题规模，将显著影响任务调度问题的复杂度和求解效率。3.2.3 节将对该集合中各层、各类资源进行详细的阐述。

(3) 决策矩阵

决策矩阵是卫星任务调度问题中联系任务集和资源集的关键元素，用于描述“任务—资源”之间的决策关系，即建立二者之间的组合优化关系。决策矩阵为卫星任务调度问题的方案（解）提供了数学化描述手段；换言之，在任务集和资源集的基础上，一个决策矩阵代表了一个卫星任务调度方案，即卫星任务调度问题的一个解，是卫星任务调度问题求解与输出的对象。另一方面，决策矩阵也是问题求解过程中算法迭代搜索、优化的对象，为算法提供通用的编码方式和邻域结构，是算法、算子及策略设计的重要依据，是本书卫星任务调度引擎框架下衔接模型、算法的重要桥梁。3.3 节将详细阐述上述决策矩阵与决策关系，构建一种通用的卫星任务调度决策模型。

(4) 评分集

评分集包含了卫星任务调度问题中约束条件（含软约束条件）、收益函数等，以及由上述任务集、资源集和决策矩阵计算所得的当前调度方案的约束、收益情况。其中，约束条件、收益函数统称为评分函数，是卫星任务调度问题的另一重要输入；约束、收益情况统称为评分值，是该问题的另一输出。3.2.4 节将详细阐述相关的定义、分类；3.4 节、3.5 节将系统地构建卫星任务调度问题的约束模型与收益模型。

3.2.2 任务集

针对卫星任务调度问题四元组中的任务集，本节结合卫星管控实际情况，真实、准确地描述任务的组成要素，为卫星任务调度问题的建模提供客观依据。

首先，将卫星任务调度四元组中的任务集 T 及其中的任务 t_i 分别表示为

$$T = \{t_i | i = 1, 2, 3, \dots\} \quad (3-2a)$$

$$t_i = \{E_i, P_i^C, P_i^V\} \quad (3-2b)$$

式中， t_i 为第 i 个任务， i 为任务编号， $i = 1, 2, \dots$ ； E_i 为任务 t_i 的事件集； P_i^C 为任务 t_i 的属性集（常量）； P_i^V 为任务 t_i 的变量集。

为直观说明式中事件集 E_i 、属性集 P_i^C 和变量集 P_i^V 等任务组成，本节以“高景一号”遥感卫星任务调度问题为例，给出了如图 3.2 所示的卫星任务组成及相互关系示例，并依次阐明事件集、属性集和变量集的具体含义。

3.2.2.1 事件集

事件集即任务所包含的事件集合。任务 t_i 的事件集 E_i 可表示为

$$E_i = \{e_{ij} | j = 1, 2, \dots\}, i \leq |T| \quad (3-3)$$

式中, e_{ij} 为任务 t_i 的第 j 个事件, j 为事件编号 (从 1 开始); $|T|$ 为任务集 T 的模。

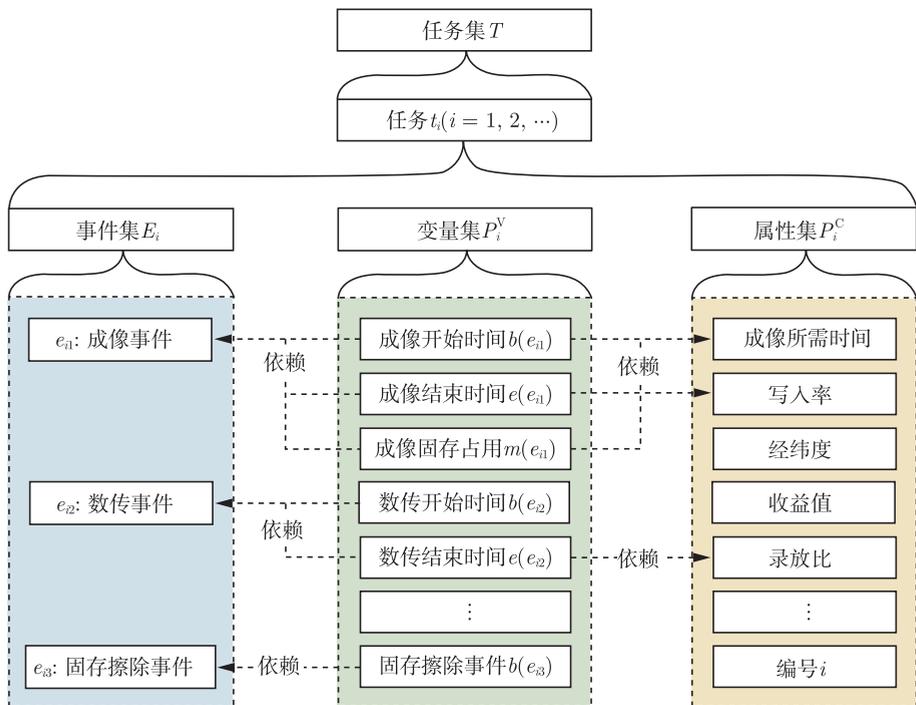


图 3.2 “高景一号”任务调度问题中任务集的组成及相互关系示例

在图 3.2 中, 遥感卫星任务 t_i 的事件集 E_i 包含成像事件 e_{i1} 、数传事件 e_{i2} 和固存擦除事件 e_{i3} 等。值得注意的是, 大部分遥感卫星任务调度研究仅考虑成像事件, 少数相关研究同时考虑了成像、数传事件, 极少有研究考虑固存擦除事件。这些研究虽然降低了卫星任务调度问题的复杂性, 但也因忽略数传、固存擦除事件及相关约束条件, 研究成果往往与应用“脱轨”。对此, 本节专门地将数传、固存擦除事件归入遥感卫星的任务中, 旨在客观、真实、完整地描述遥感卫星任务调度问题, 为管控部门提供切实可行的任务调度建模与求解技术。

3.2.2.2 属性集

属性 (property) 集即卫星管控部门预先赋予任务的固有属性 (常量) 的集合。在图 3.2 中, 遥感卫星任务 t_i 的属性集 P_i^C 包含任务编号 i 、收益值、目标经纬度、写入率、录放比、成像所需时间等元素。属性集通常包含元素众多, 且因问题而异, 这里不再详细介绍。

3.2.2.3 变量集

在卫星任务调度问题中, 还存在一些依赖属性变量与任务事件的变量 (variable), 由属性常量与任务事件共同决定。例如, 在图 3.2 中, 遥感卫星任务的成像事件 e_{i1} 决定了成像开始时间 $b(e_{i1})$, 其与成像所需时间共同决定了成像结束时间 $e(e_{i1})$, 与写入率共同决定了成像固存占用量 $m(e_{i1})$; 数传事件 e_{i2} 决定了数传开始时间 $b(e_{i2})$, 其与成像所需时间、录放比等共同决定了数传结束时间 $e(e_{i2})$; 固存擦除事件 e_{i3} 决定了固存擦除时间 $b(e_{i3})$ 等。可见, 上述变量的值将随着不同任务事件的组合而改变, 反映了任务调度问题组合优化的特点。由此, 本节将上述变量归入变量集, 旨在任务调度过程中提供开放式的访问接口和计算途径, 为任务调度方案的评价提供数据支撑。

3.2.3 资源集

任务调度问题的本质是为任务分配资源。如何清晰地、系统地描述各类型资源, 是任务调度问题建模与求解的重要环节。针对卫星任务调度问题四元组中的资源集 R , 本节首先将其进一步分为平台集、载荷/设备集、窗口集和事件执行时机集等, 即

$$R = \{P, Q, W, EO\} \quad (3-4)$$

式中, P 为平台集; Q 为载荷/设备集; W 为窗口集; EO 为事件执行时机集。

下面, 再次以“高景一号”任务调度问题为例, 本节围绕如图 3.3 所示的资源集 R 的组成及相互关系示例, 依次阐明平台集 P 、载荷/设备集 Q 、窗口集 W 、事件执行时机集 EO 以及各元素的具体含义与内在关系。

3.2.3.1 平台集

平台 (platform) 集是平台类资源的合集, 记为 P 。在本书中, 平台类资源指卫星和测站 (含承担测站功能的中继卫星), 是执行任务的主要载体。为方便后文建模, 这里将平台集 P 进一步分为卫星集 S 和测站集 G , 即

$$P = \{S, G\} \quad (3-5)$$

式中, S 为卫星集; G 为测站集。

进一步地, 卫星集 S 和测站集 G 可分别由下式表示:

$$S = \{s_i | i = 1, 2, 3, \dots\} \quad (3-6a)$$

$$G = \{g_i | i = 1, 2, 3, \dots\} \quad (3-6b)$$

$$s_i = \{Q(s_i)\}, i \leq |S| \tag{3-7a}$$

$$g_i = \{G(s_i)\}, i \leq |G| \tag{3-7b}$$

式中, s_i 为第 i 颗卫星, i 为测站编号 ($i = 1, 2, \dots$); g_i 为第 i 座测站, i 为测站编号 ($i = 1, 2, \dots$); $Q(s_i)$ 为卫星 s_i 所搭载的载荷/设备集; $G(s_i)$ 为测站 g_i 所配备的载荷/设备集。

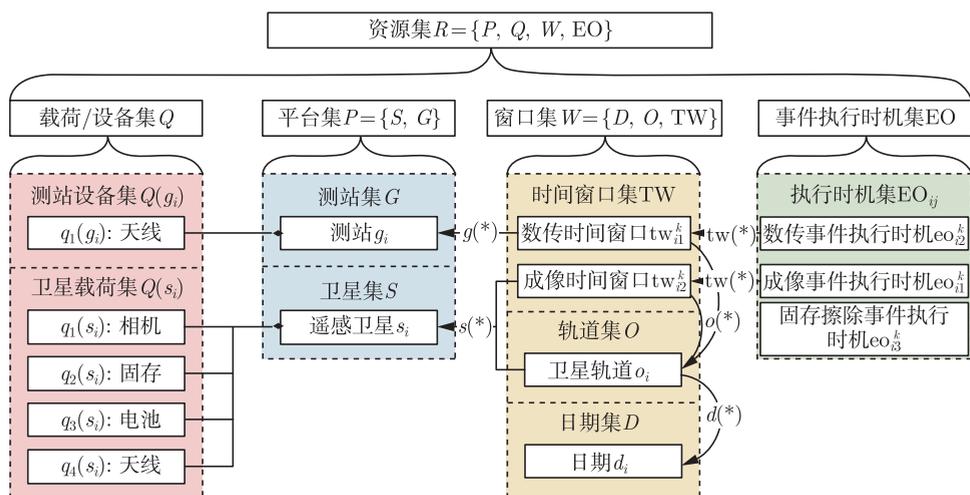


图 3.3 “高景一号”任务调度问题中资源集的组成及相互关系示例

例如, 在图 3.3 “高景一号”遥感卫星任务调度问题中, 平台集就包含了遥感卫星和测站等。通常情况下, 平台类资源是卫星任务调度问题中最顶层的资源, 是涵盖其他各类资源、执行卫星任务的一类整体性资源。

3.2.3.2 载荷/设备集

载荷/设备 (payload) 集是载荷/设备类资源的合集, 记为 Q 。在本书中, 载荷/设备类资源是指平台类资源搭载/配备的仪器、设施、分系统等, 是平台类资源的重要组成部分, 是执行任务的直接工具。卫星任务调度问题的载荷/设备集 Q , 以及卫星 s_i 、测站 g_i 各自的载荷/设备集 $Q(s_i)$ 、 $Q(g_i)$ 可分别表示为

$$Q = \bigcup_{i \leq |S|} Q(s_i) + \bigcup_{i \leq |G|} Q(g_i) \tag{3-8a}$$

$$Q(s_i) = \{q_j(s_i) | j = 1, 2, 3, \dots\}, i \leq |S| \tag{3-8b}$$

$$Q(g_i) = \{q_j(g_i) | j = 1, 2, 3, \dots\}, i \leq |G| \tag{3-8c}$$

式中, $q_j(s_i)$ 为卫星 s_i 所搭载的第 j 个载荷, j 为载荷编号 (从 1 开始); $q_j(g_i)$ 为测站 g_i 所配备的第 j 个设备, j 为载荷编号 (从 1 开始)。

例如, 图 3.3 中“高景一号”卫星包含了相机、电池、固存和数传天线等四类载荷资源, 分别承担着拍摄、供电、存储和数传等实际功能; 测站包含了数传天线等设备资源, 负责接收来自遥感卫星的数据。需要说明的是, 卫星与测站还包含了众多其他的载荷或设备, 如备用电池、备份固存、温度传感器等, 但与任务调度问题无直接关系, 在本书任务调度建模与求解过程中可不考虑。

3.2.3.3 窗口集

窗口 (window) 集是窗口类资源的合集, 记为 W 。在本书中, 窗口类资源是指一个包含开始时间、结束时间、所属平台类资源或上级窗口等信息的一个实例化的时间区间, 是卫星任务调度问题中的抽象资源之一。在卫星任务调度问题研究中, 任务在时、空、频域上的时间窗口往往是建模与求解的出发点, 但相关研究通常仅用开始、结束时间简单地描述一个时间窗口, 简化了窗口与其他类型资源之间存在的内在联系, 不利于复杂卫星任务调度问题的系统化建模。

对此, 根据以天、轨道为时间单位的卫星管控实际情况, 本节将窗口集 W 进一步分为了时间窗口集 TW 、卫星轨道集 O 和日期集 D , 即

$$W = \{D, O, TW\} \quad (3-9)$$

进一步地, 日期集 D 可以表示为

$$D = \{d_i | i = 1, 2, 3, \dots\} \quad (3-10)$$

式中, d_i 为卫星任务调度周期内的第 i 天 (从 1 开始)。

可见, 与仅涵盖一轨、一天的传统卫星任务调度研究相比, 本书对调度周期的考虑更加全面, 为实际卫星任务调度问题中以天、轨道为时间单位的相关约束建模与计算提供依据。

在此基础上, 轨道集 O 可以表示为:

$$O = \{o_i | i = 1, 2, 3, \dots\} \quad (3-11a)$$

$$o_i = \{b(o_i), e(o_i), d(o_i), s(o_i)\} \quad (3-11b)$$

式中, o_i 为第 i 条卫星轨道, i 为轨道圈号, $i = 1, 2, \dots$; $b(o_i)$ 为轨道 o_i 的开始时间; $e(o_i)$ 为轨道 o_i 的结束时间; $d(o_i)$ 为轨道 o_i 所属的日期, $d(o_i) \in D$; $s(o_i)$ 为轨道 o_i 所属的卫星, $s(o_i) \in S$ 。