

绪 论

作为空间图像采集的主要平台,对地观测卫星(earth observation satellite, EOS)的主要任务是根据用户需求获取地球表面的观测信息。由于其具有覆盖范围广、成像时间长、不受国境限制等优势,因而在经济发展、灾害救援和应急监测等任务中发挥着越来越重要的作用^[1]。对地观测卫星的运行依赖于卫星任务规划系统,该系统能够在满足航天资源系统的能力限制、不同任务的特殊要求的情况下,合理分配包括多卫星、多地面站等空间和地面资源,对信息获取、处理、传输的各种活动进行调度安排,从而生成卫星对地观测计划、数传计划、测控计划、地面站接收计划和地面数据传输与处理计划。卫星的任务规划系统具有分析用户需求、辅助指挥决策、协同星地资源、控制任务实施的作用,是保障卫星系统完成多样化任务、高效运行的关键。

卫星的观测任务调度问题是卫星任务规划系统中要解决的关键问题,其求解效率直接影响整个卫星任务规划系统的工作效率。由于卫星的数量以及观测能力有限,难以满足全部的任务需求,因而卫星的观测任务调度问题在数学本质上属于一类过载调度问题,其与运筹学领域的经典调度问题——订单接受与调度(order acceptance and scheduling, OAS)问题^[2]相似,即要求同时求解任务的选择问题和所选择任务的调度问题。具体来讲,卫星观测调度的主要目标是从元任务(指经过任务预处理,包括任务分解和计算可见时间窗口之后卫星能够一次性观测完成的单一任务^[3])集合中选出部分元任务,确定每个所选择元任务的开始时间,安排成像调度方案,从而最大化观测收益。由于元任务的选择问题和调度问题相互耦合,因此卫星观测任务调度问题十分复杂。

近年来,我国遥感卫星载荷能力的快速发展、卫星平台的机动能力的提高以及遥感应用的不断拓展,给对地观测系统带来了许多新的挑战:

首先,新一代敏捷对地观测卫星(agile earth observation satellite, AEOS)的出现,使得卫星的观测调度问题变得更加复杂。如图 1.1 所示,与传统非敏捷 EOS 相比,AEOS 具有三个自由度(即滚动、俯仰和偏航)^[4],这使得它们能够在通过目

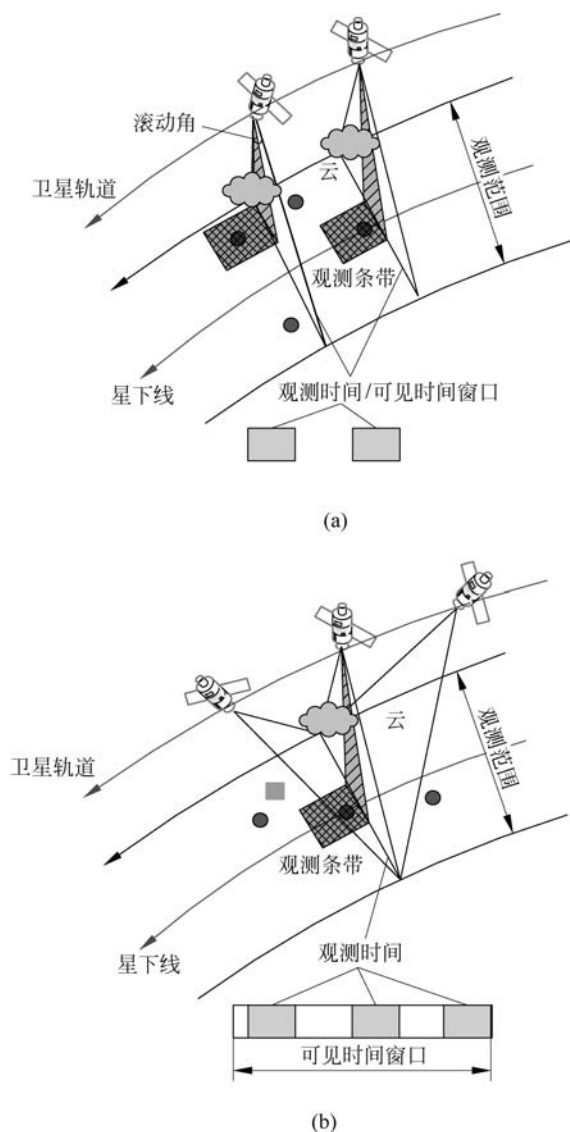


图 1.1 非敏捷 EOS 与 AEOS 区别

(a) 非敏捷 EOS; (b) AEOS

标正上方之前或之后观测目标,这种敏捷性极大地增强了卫星观测能力,使 AEOS 可以完成更复杂的任务,包括立体成像和大面积成像等,但 AEOS 的观测调度问题比传统非敏捷 EOS 的调度问题困难得多。传统 EOS 由于仅具有一个方向的自由度,仅能在飞到目标点上方时对目标进行观测,其观测的实际时间等于可见时间窗口,每个任务的观测开始时间固定,因此可以视作一类特殊的 OAS 问题,即订单的选择问题,无需进行任务调度^[5]。而对于 AEOS,由于其敏捷性,它们的可见时间窗口变得比需要的观测时间长得多,对任务的观测可以在可见时间窗口内的任

何时刻开始,这极大地增大了问题的解空间,属于带有时间窗口的 OAS 问题^[2]。AEOS 调度的另一个难点是它的时间依赖特性^[5]:卫星在两个相邻观测之间需要一定的姿态转换时间来调整其观测角度,不同的观测开始时间意味着不同的观测角度,这会影响相应的姿态转换时间;另外,根据 AEOS 的特性,不同的观测角度也会影响图像质量,因此图像质量也是时间依赖的。AEOS 的调度问题已被证明是一个 NP-hard 的组合优化问题^[5]。

其次,执行大面积区域监测、海洋移动目标跟踪等复杂任务时,需要多颗卫星协同完成观测。一般来讲,一颗单独的卫星能够实现的时间和空间覆盖率是极其有限的,同时,不同传感器具有不同的观测能力,每种传感器仅能获得目标的部分信息,无法满足面向大量不同观测目标的任务需求;此外,由于卫星故障、通信链路的不稳定性、反卫星武器威胁等因素的影响,单颗卫星(简称单星)能够完成观测任务的概率会大大降低。随着卫星数目的不断增加,需要通过多颗卫星(简称多星)与地面站的有效合作,实现资源共享和优势互补,充分发挥包含地面站在内的成像侦察卫星的整体效能,完成单颗卫星因轨道和能力限制无法完成的任务^[6]。当前多星协同调度通常在地面站进行,由地面站统一调度多颗卫星的任务,并将任务上传给不同卫星,属于一种集中式的协同方式。但是,随着卫星和任务规模的提升,当前的多星集中式的协同方法将为地面管控带来极大挑战,同时,在某些带有时间和通信限制的应用场景中,集中式的协同方法也难以满足时效性的要求。

最后,当前基于地面的卫星观测调度模式无法避免不确定性对观测带来的影响,例如紧急任务的随机到达、云层覆盖的变化、不确定的机器故障等。在观测过程中,卫星依轨道运行,由于地面站的部署受到地理条件和国界的限制,无法实现卫星与地面站之间信息的实时交互,星地之间只能采用一种周期式的通信方式。地面站在制订卫星的观测任务计划时,很难考虑未来发生的不确定性事件,容易导致地面站制订的调度计划无法执行,降低卫星的使用效率。以云层遮挡为例,据统计,我国的卫星每年因云层遮挡而造成的无效成像比例高达 60%^[7]。随着各行各业对卫星观测信息需求的不断增加,传统的基于地面的卫星管控模式面临着许多挑战:无法实现对紧急事件的快速响应;观测受到云层遮挡、卫星故障等不确定性的影响,降低了卫星的使用效能;随着卫星数量和测控信息量的迅速增加,整个基于地面的管控系统的控制、通信、协调都变得更加困难。

随着卫星技术的发展,新一代对地观测卫星开始具备星上计算和处理能力,使卫星管控中降低人为干预、实现星上自主决策成为可能。与传统卫星相比,这一类自主卫星具有更高的性能、更好的容错能力、更高的可靠性和更低的维护成本。当前针对自主卫星的研究,国外处于领先地位,已经有数颗正在服役的自主卫星,例如美国国家航空航天局(National aeronautics and space administration, NASA)的 Earth Observing-1(EO-1)^[8]是一颗自主卫星,能够自主发现地球表面的科学事

件,包括火山爆发、洪水灾害等,其自主管理能力可以每年节省超过一百万美元的管控费用,同时发现价值超过一百八十万美元的科学事件^[9]。其他较为知名的自主卫星还包括美国空军的 TacSat^[10]、德国航空航天中心(German aerospace center,DLR)的 FireBIRD^[11]以及法国国家空间研究中心(National center for space studies,CNES)的 PLEIADES^[12]等。我国针对自主卫星的研究仍处于起步阶段。在2008年汶川地震救援等非作战军事行动中,我国的观测卫星尽管发挥了重要作用,但缺乏对突发事件的快速响应能力,无法及时捕捉受灾地区的气象条件和受灾状况,导致信息获取更多地受制于国外的卫星系统^[13]。

随着“遥感20号”卫星的成功在轨应用,越来越多的敏捷卫星(星座)将被投入使用,如何高效地调度带有时间依赖的敏捷卫星,协同调度多颗敏捷卫星,实现敏捷卫星上自主任务协同,最大化发挥敏捷卫星的观测效能,成为一项值得研究的问题。本书围绕该主题,重点介绍了带有时间依赖的单颗敏捷卫星调度问题、带有时间依赖的多颗敏捷卫星协同调度问题、考虑时变云层遮挡的多颗敏捷卫星协同调度问题和考虑紧急任务的多颗敏捷卫星自主协同调度问题。本书的研究意义可以总结如下:

(1) 理论意义:敏捷卫星调度问题本质上属于一类组合优化问题,其特征与运筹学领域的经典问题——订单接受与调度问题十分相似。本书介绍的方法涉及精确求解方法、启发式搜索策略、随机过程等相关技术。算法同时考虑了通用性和可扩展性,对过载订阅问题、带有次序依赖和时间依赖特性的调度问题、大规模多机协同调度问题、考虑不确定性的在线分布式协同调度问题等相关的理论研究具有积极意义。

(2) 实践意义:本书的研究内容涉及我国敏捷卫星任务调度领域的多个亟待解决的问题。针对带有时间依赖的敏捷卫星调度问题的研究,能够最大化地发挥敏捷卫星的观测能力,提高卫星的使用效能;多星协同调度技术通过协同多颗卫星共同工作,可以完成规模较大、任务环境复杂的使命级任务;不确定性条件下卫星协同调度的研究,能够降低云层遮挡等不确定因素对成像的影响,提高卫星对不确定性突发事件的响应速度,及时获取突发事件的情报信息,为后续决策提供有力的信息保障;卫星进行星上自主分布式协同能够降低星间通信的成本和地面管控单位的压力。这些方法能够为我国卫星事业的发展提供技术支撑,具有一定的实践意义。

本书的组织结构图如图1.2所示,主要包括以下四点:

(1) 带有时间依赖的单颗敏捷卫星调度问题

能够高效求解单颗敏捷卫星调度问题,是良好地解决多颗敏捷卫星协同调度问题的关键。因此,本书首先对带有时间依赖的单颗敏捷卫星调度问题进行介绍,给出了一种结合自适应大邻域搜索算法和禁忌搜索算法的混合算法,算法包含多种禁忌规则、多个通用随机化邻域算子、一种部分序列支配策略、一种针对带有序

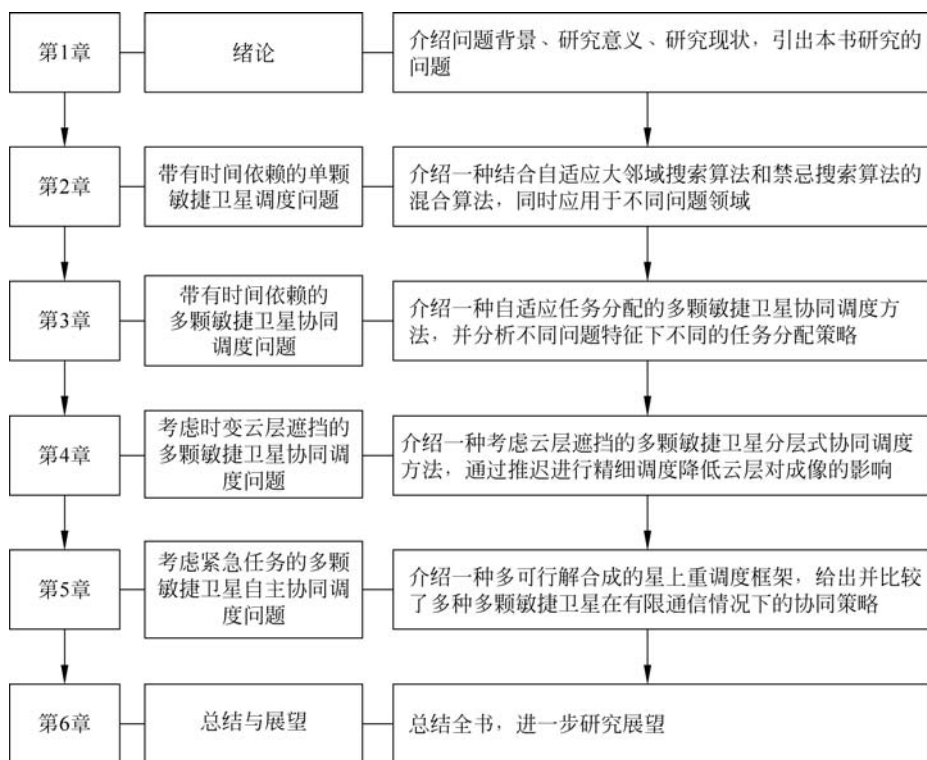


图 1.2 本书组织结构

列依赖和时间依赖调度问题的任务快速插入策略。该调度方法具有良好的通用性,在包括单颗敏捷卫星调度问题在内的三类不同问题上,均取得了比当前最优算法更好的效果。本书进一步分析了算法在具有不同特性的算例上的表现,得出了一些指导算法参数设置的通用结论。

(2) 带有时间依赖的多颗敏捷卫星协同调度问题

多星协同调度问题的主要难点之一是由于卫星数量增加而导致的解空间急剧增大。为了解决该问题,首先深入分析了针对多星协同调度问题进行任务分配的重要性;然后介绍了一种自适应任务分配策略,并将提出的自适应大邻域搜索算法扩展到多颗卫星协同调度的情况。该自适应分配方法考虑了多种任务分配方式,算法能够根据不同算例的特性自主调整各个任务分配算子的权重,从而实现自适应的任务分配。大量的计算结果表明,所提出的自适应任务分配机制比当前最新的多颗卫星协同调度处理方法更有效。在仿真实验中,分析了参数对算法性能的影响,并对不同算例进行了比较,得出了一些通用结论。

(3) 考虑时变云层遮挡的多颗敏捷卫星协同调度问题

针对如实时变化的云层遮挡这类可以预测的不确定性,介绍了一种介于全在线与离线之间的、用于实时调度问题的分层式协同调度方法。利用云层预报的准

确性随着预测提前时间的减少而提高的特性,该方法从一个简单的任务分配和粗略调度过程开始,随着任务观测开始时间的临近,对云层的预测准确性逐渐提高,逐步改善调度的精细度。本方法通过推迟调度时间,有效减少云层覆盖对观测的影响。同时,与传统的包含离线调度和在线重调度的两阶段调度方法相比,此方法中确定具体观测开始时间的精细调度仅执行一次,实现了更高的资源利用率。仿真结果表明,该算法可以在多种任务分布方式、调度范围、任务数量和卫星数量的算例上,降低计算成本、提高解质量,其解质量优于传统的包含离线调度和在线重调度的两阶段调度方法,特别是针对规模较大的算例。该框架和层次结构机制也可以应用于其他具有实时变化环境的大规模多机协同优化问题。

(4) 考虑紧急任务的多颗敏捷卫星自主协同调度问题

紧急任务是卫星系统在实际应用过程中经常遭遇的另一类不确定性事件,例如自然灾害、周边热点事件等。由于较大的时间和空间的不确定性,很难对这些紧急任务进行预测。针对此问题,提出一种多可行解合成框架,将复杂的星上调度问题转换为一个简单的可行解选择问题,实现在有限的计算资源和计算时间的约束下,快速生成一个质量较高的解。同时,给出多种不确定环境中的多星分布式协同调度方法,包含一种贪婪选择机制,一种基于多 Agent 马尔可夫决策过程的最优协同策略机制,以及一种基于混合整数规划的最优选择机制。这些多星协同方法使卫星可以根据策略快速做出独立决策,从而在不进行通信的情况下也能快速取得较高收益。通过多组仿真实验,验证了介绍的多解合成框架和分布式协同策略对于星上重调度问题的有效性。同时,介绍了不同协同策略对具有不同特征的算例的适应性。

本书采用一种由浅入深的脉络对敏捷卫星协同调度技术进行介绍,如图 1.3 所示,重点介绍多星协同与不确定性两个维度的关键问题:首先介绍最简单的确定性的带有时间依赖的单颗敏捷卫星调度问题,因为一个高效率的单星调度算法是研究多星协同以及考虑不确定性问题的基础;接着在单星调度基础上,介绍带

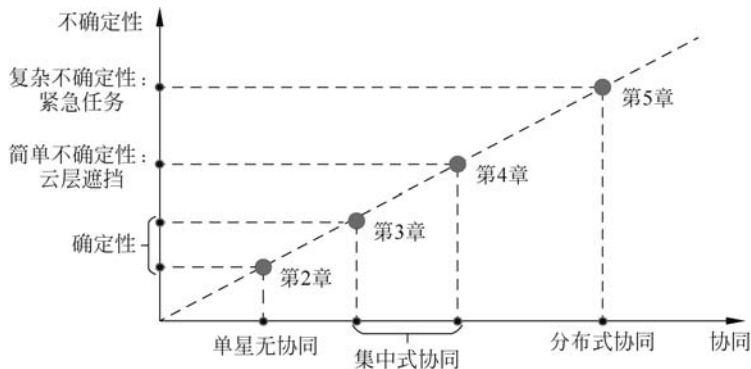


图 1.3 本书研究脉络

有时间依赖的多星协同调度方法；接下来，针对考虑两类不确定性的敏捷卫星观测调度展开研究：首先针对一类相对简单的可以预测的不确定性的处理方法，以实时变化的云层遮挡为例，给出一种集中式的协同调度方法；最后针对较复杂的难以预测的不确定性，以紧急任务的随机到达为例，给出一种分布式的协同调度方法，使得多颗卫星在有限信息通信限制下也能有效协同。其他本书未考虑的不确定性，如卫星故障、通信链路故障等，亦可以采取这种思路，归类为这两类不确定性，从而在建模与调度算法中，采用类似的求解方法。

第2章

带有时间依赖的单颗 敏捷卫星调度问题

由于敏捷卫星调度问题的复杂性,即使不考虑多星协同以及观测中可能遇到的不确定性,该问题仍然是一个 NP-hard 问题。能够在确定性环境下高效求解单星调度问题,是良好地解决多颗敏捷卫星协同调度问题和不确定性环境下敏捷卫星调度问题的关键。因此,本章首先针对确定性的带有时间依赖的单颗敏捷卫星调度问题进行介绍。

首先对研究的问题进行介绍。本章首次完整地定义了解决该问题的混合整数线性规划(mix integer linear programming, MILP)模型,与 Liu 等人^[14]的两阶段 MILP 模型相比,该模型避免枚举所有时间窗口组合,具有更低的复杂度,同时考虑了带有时间依赖的星上能量约束,更加贴近现实。然后介绍了一种结合自适应大邻域搜索(adaptive large neighbourhood search, ALNS)算法与禁忌搜索(tabu search, TS)算法的混合调度方法用于求解该问题,与现有技术相比,该混合算法可以在更少的计算时间里提供质量更高的解。禁忌机制的引入有助于避免 ALNS 算法搜索最近访问过的解。该方法中同时包含一种部分序列支配机制,它有助于收集和使用标准 ALNS 算法中忽略的过程信息,能够极大地提高 ALNS 算法的性能。特别是针对大规模算例,提出了一种考虑时间依赖转换时间的任务快速插入策略,可以快速判断任务是否可以插入可行解,提高搜索效率。最后,该算法属于一类通用算法,实验结果表明,该算法在多个不同问题领域的表现均超过了当前最先进的算法。同时,通过算法分析得到了一些有用的结论,用于指导在不同领域应用所提出的算法时,算法的参数设置。

2.1 问题描述与建模

带有时间依赖的多轨道敏捷卫星观测调度问题旨在从几个连续轨道中选择多个任务,并在不违反约束的情况下确定选择任务的观测序列和观测时间。轨道是

指卫星绕地球旋转的时间间隔,轨道的起点可以设置为卫星飞离地球地影或经过一个特定纬度或经度的时间,卫星能够从多个轨道观测给定任务,因此每个任务具有多个可见时间窗口。在本章所提出的 MILP 模型中,考虑但简化了星上内存和能量限制:针对这些星上的可再生资源,假设每个轨道使用的内存和能量不能超过一个预先规定的上限。最后,需要指出的是,本书仅考虑经过预处理的元任务(即带有可见时间窗口、卫星相机幅宽可以覆盖、一次过境完成观测的任务^[3])的调度问题,对于大区域目标、移动目标跟踪等任务,可以参考 Bunkheila 等人^[15]和任必虎等人^[16]介绍的方法将其划分为数个条带,转换成多个元任务进行观测。针对此类复杂任务的处理不在本书的研究范围内。

下面首先提供一种角度拟合方法来表示 MILP 模型中带有时间依赖的姿态转换时间,然后定义该 MILP 模型本身。

2.1.1 带有时间依赖的姿态转换

令 t_i 为元任务列表 T 中可以观测的一个目标。由于敏捷卫星的可见时间窗口很长,在同一个可见时间窗口内不同观测开始时间的图像质量会有所不同,在提交任务时,用户通常会对任务施加一定的图像质量约束(入射角和/或方位角范围)。根据 Liu 等人^[14]提供的公式,假设任务 t_i 的成像质量 q_i 必须高于用户规定的最低成像质量 c_i ,令 u_{ij} 为任务 t_i 在第 j 个时间窗口 w_{ij} 内的开始观测时间,成像质量 q_i 为 u_{ij} 的函数,由下式表示:

$$q_i = 10 - 9 \frac{\left| \frac{u_{ij} + v_{ij}}{2} - w_{ij}^* \right|}{\frac{l_{ij}}{2} - \frac{d_i}{2}} = 10 - 9 \frac{|2u_{ij} + d_i - 2w_{ij}^*|}{l_{ij} - d_i} \quad (2.1)$$

其中, v_{ij} 表示任务 t_i 在可见时间窗口 w_{ij} 中的观测结束时间; d_i 表示观测持续时间; $v_{ij} = u_{ij} + d_i$; l_{ij} 是整个可见时间窗口 w_{ij} 的长度; w_{ij}^* 为 w_{ij} 中成像质量最佳的成像时间。

在文献[14]中,成像质量被作为模型中的一个约束,规定卫星拍摄图像的成像质量必须高于用户规定的最小成像质量, $q_i \geq c_i$ 。在本书中,使用式(2.1)对可见时间窗口进行裁剪,使得不符合用户规定成像质量的部分被裁剪掉,同时,裁剪使得可见时间窗口变短,能够提高本节中所介绍的角度拟合的精度,从而建立问题的混合整数线性规划模型。

根据公式(2.1)以及 $q_i \geq c_i$,可行的成像开始时间是全部可见时间窗口的一部分。令 b_{ij} 和 e_{ij} 分别代表可见时间窗口 w_{ij} 的开始时间和结束时间, b_{ij}^* 和 e_{ij}^* 分别代表最早可行成像开始时间以及最晚可行成像开始时间,即

$$b_{ij}^* = \max \left(\frac{(l_{ij} - d_i)(c_i - 10)}{18} + w_{ij}^* - \frac{d_i}{2}, b_{ij} \right) \quad (2.2)$$

$$e_{ij}^* = \min\left(\frac{(l_{ij} - d_i)(10 - c_i)}{18} + w_{ij}^* - \frac{d_i}{2}, e_{ij} - d_i\right) \quad (2.3)$$

卫星对观测目标的可见时间窗口以及各时刻对应的卫星姿态通常在进行实际调度之前的预处理阶段完成,预处理阶段通过卫星的位置、地面目标的位置以及地球自转等因素,计算可见时间窗口以及可见时间窗口内卫星的姿态序列。尽管这些方程是非线性的,但这些卫星姿态角度以及所对应的时间,能够使用 b_{ij}^* 和 e_{ij}^* 之间的线性公式进行较好的拟合(如图 2.1 所示)。根据实验,在平均 200 个任务的算例中,可见时间窗口的长度约为 300s,然而使用该拟合方法计算的姿态转换时间的误差小于 0.5s,在可接受的范围内。

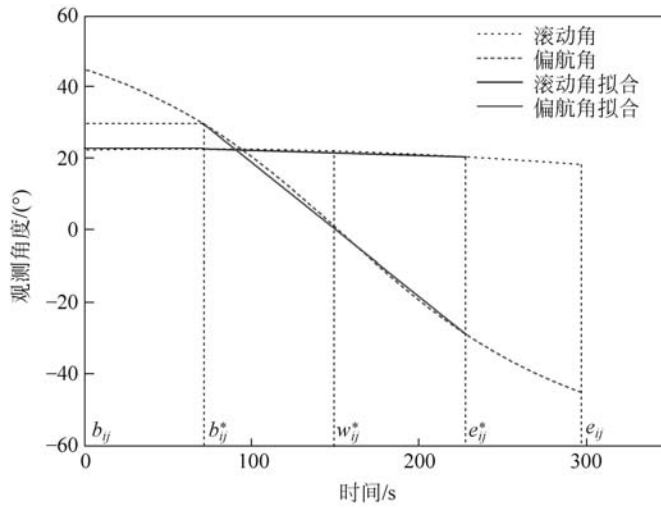


图 2.1 姿态角度拟合示例

2.1.2 混合整数线性规划模型

(1) 目标函数

任务 t_i 的收益由任务的优先级 g_i 决定, $g_i \in [1, 10]$ 。本模型的优化目标是最大化全部观测任务的收益之和,即

$$\max \sum_{i=1}^{|T|} \sum_{j=1}^{|W_i|} x_{ij} g_i \quad (2.4)$$

其中, W_i 是任务 t_i 的可见时间窗口集合; x_{ij} 是本模型的二元决策变量: 当且仅当 w_{ij} 用于观测任务 t_i 时 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$; 本模型的另一个决策变量为 u_{ij} , 表示任务 t_i 在可见时间窗口 w_{ij} 中的观测开始时间。

(2) 约束条件

约束(2.5)为唯一性约束,表示每个任务至多被观测一次,即