

# 基于本体的多星测控调度问题模型研究<sup>\*</sup>

凌晓冬<sup>1)</sup> 刘 冰<sup>1)</sup> 武小悦<sup>2)</sup> 吴金美<sup>1)</sup>

(中国卫星海上测控部<sup>1)</sup> 江阴 214431)(国防科学技术大学信息系统与管理学院<sup>2)</sup> 长沙 410073)

摘 要 针对多星测控调度问题中存在的模型众多、交互困难的不足,引入本体工具分析了多星测控调度问题中各种对象及对象之间的关系,给出了多星测控调度问题中概念本体的构建方法,建立了多星测控调度问题模型框架,为准确表述领域知识、实现模型及数据的重用和交互打下基础。最后利用示例描述说明了模型框架的兼容性。

关键词 多星测控; 调度; 本体; 模型框架

中图分类号 TP18

## An Ontology-based Model of Multi-Satellite TT&C Scheduling Problem

Ling Xiaodong<sup>1)</sup> Liu Bin<sup>1)</sup> Wu Xiaoyue<sup>2)</sup> Wu Jinmei<sup>1)</sup>

(China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department<sup>1)</sup>, Jiangyin 214431)

(School of Information Systems and Management, NUDT<sup>2)</sup>, Changsha 410073)

**Abstract** Pointed to the difficult interaction among different models in Multi-Satellite TT & C scheduling problem, Ontology is introduced to illustrate the objects and its relations. The concept ontology of MuSTSP is constructed and the ontology model framework is also build in this paper, which may be helpful to describe the domain knowledge exactly and provide a basis for reuse and interaction of models and datum. Finally a descriptive sample is given to validate the compatibility of this ontology framework.

**Key Words** multi-satellite TT & C, schedule, ontology, model framework

**Class Number** TP18

### 1 引言

多星测控调度问题 ( Multi-Satellite TT & C Scheduling Problem, MuSTSP) 是指针对各种类型卫星及航天器的众多不同测控需求,通过科学分配测控资源以更好地满足其对测控服务支持的要求。随着航天事业的发展,该问题日益成为研究的热点,而作为基础的模型研究,更是受到了学者们广泛关注。

从 20 世纪 80 年代开始,各种描述多星测控调度问题的模型不断被提出:1985 年,Dr Arabi<sup>[1]</sup> 建立了问题的混合整数规划模型,随后 Gooley<sup>[2]</sup>、Schalck<sup>[3]</sup> 等人对这一模型进行了发展和补充,Arabi 还引入 VRP 模型对该问题进行说明;2000 年前后,美国及其他部分国家和组织的研究人员们针对多星测控

调度问题的模型展开了新一轮研究,以美国克罗拉多州立大学、欧空局、印度航空航天局等机构为代表<sup>[4]</sup>;在国内,针对多星测控调度问题的模型研究则更加广泛,国防科技大学、西安卫星测控中心、北京跟踪与通信技术研究所的一批学者<sup>[5~8]</sup> 将 Petri 网技术、约束满足规划技术 ( Constraint Satisfied Planning, CSP)、启发式方法等引入多星测控调度问题的描述过程,建立了不同的问题模型,这些模型大都从不同的角度及各自的研究领域和需求出发提出的,基本满足了其描述测控调度问题的需要。

然而,由于用户所掌握的领域信息不同,用于描述资源和数据交换的词汇表与术语不同,因此这些研究存在着语义和理解上的混淆,不能提供标准的数据结构和术语供调度过程和数据交换所用,导致

<sup>\*</sup> 收稿日期:2010 年 4 月 17 日,修回日期:2010 年 5 月 10 日  
作者简介:凌晓冬,男,博士,工程师,研究方向:卫星测控总体、资源调度理论及方法等。  
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

相同的需求可能存在多种描述方法和模式,而基于不同描述模型开发的系统也成了孤立的“烟囱”式系统,在数据共享和交互过程中存在较大障碍,限制了技术的重用,也导致了人力和技术资源的浪费。因此,从软件模块化和重用的角度来看,需要引入有效的知识表示工具建立多星测控调度问题的模型框架,全面准确地描述多星测控调度领域知识。

本体(Ontology)作为语义表达和知识建模的工具已经得到较为广泛的应用,并显示出良好的性能。而将本体用于描述调度类问题,也有学者进行过相关研究并证明了其适用性。如: Hori<sup>[9]</sup> 等提出了生产调度领域的任务分配本体; Rajpathak<sup>[10]</sup> 建立了通用的任务本体; Smith 等<sup>[11]</sup> 提出了一般调度领域的调度本体的概念,详细定义了资源和任务两类重要对象,并给出了调度领域本体对用户导向的解释方法; Smith<sup>[12]</sup>、Frankovic<sup>[13]</sup> 分别建立了一般调度问题的本体框架模型等。因此,本文将研究利用本体工具对多星测控调度领域中相关内容和知识进行建模的方法,通过建立航天测控调度领域中通用的术语、概念和规范,构建该问题的基本知识框架,为其提供统一的、规范的、可计算的知识基础,以达到充分利用资源、实现模块化开发的目的。

## 2 建立多星测控调度问题本体模型框架

依照领域依赖程度,可以将本体分为四个层次:顶层本体、领域本体、任务本体和应用本体。其中领域本体描述特定领域中的概念和概念之间的关系,主要用于通讯、互操作等,满足建立多星测控调度问题框架的要求,因此本文对多星测控调度领域本体模型进行研究。

定义 1 卫星测控调度领域本体:  
定义卫星测控调度领域本体(Satellite TT & C Scheduling Area Ontology, 标记为 STSAO)

$STSAO = \{ConceptSet, RelationSet\}$  (1)  
其中  $ConceptSet$  表示测控调度领域中的概念集,包含多个概念本体  $Concept$ ,  $RelationSet$  表示概念之间关系的集合,描述不同概念之间存在的各种关系。

定义 2 卫星测控调度概念本体:  
定义卫星测控调度问题领域本体模型中的概念本体为三元组

$Concept = \{C\_Name, C\_AttributeSet, C\_RelationSet\}$  (2)

其中  $C\_Name$  表示概念的名称,  $C\_AttributeSet$  表示概念拥有的属性集合,  $C\_RelationSet$  表示概念拥有的关系集合。

综合多种研究文献,可从多星测控调度问题中抽象出以下基本概念类:测控需求(REQUEST)、调度目标(OBJECTIVE)、测控资源(RESOURCE)、测控服务(SERVICE)、调度约束(CONSTRAINT)、调度规则(RULE)、调度方案(SCHEDULE)。进而可利用本体概念将多星测控调度问题归纳为:以测控服务为调度对象,利用调度规则,在调度约束的限制下,为测控服务分配测控资源,并最终输出满足用户测控需求的调度方案。图 1 所示为基本概念本体及其相互关系。

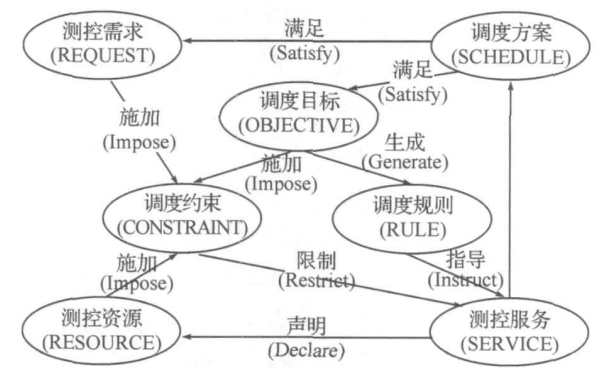


图 1 多星测控调度问题中的主要概念类和相互关系

图中: 测控需求为用户的输入需求,声明了对特定资源和服务的要求,并通过最终生成的调度方案评估是否满足; 调度目标反映了用户对调度方案的偏好; 调度方案由测控服务组成,测控服务声明利用特定测控资源完成测控,约束和规则对调度方案的最终生成进行了限制。这些概念和相互关系构成了基本的测控调度问题本体模型的框架。

## 3 多星测控调度问题的概念类本体

基本概念类本体包含两项关键内容: 1) 基本概念属性集; 2) 概念及属性之间关系集。以下选择能够反映多星测控调度问题特点的 4 个核心概念(测控需求、测控服务、测控资源、调度规则),给出其概念类本体详细定义,其余概念亦可采用类似方法进行分析。

### 3.1 测控需求(REQUEST)

概念定义: 测控需求是卫星对于测控服务提出的要求,包括测控服务的时间、次数、频度、资源等内容,测控需求将给卫星测控问题带来一系列必须遵循的约束。调度问题中所有卫星的所有测控需求共同构成了调度问题的输入。测控需求概念本

体模型的形式化定义如下

$\{ REQUEST = Request\_Name, Request\_AttributeSet, Request\_RelationSet \}$  (3)

其中:

- Request\_Name*: 测控需求的唯一标记;
- Request\_AttributeSet*: 测控需求的属性集合, 部分属性由其基本概念组成, 其余部分属性构成扩展部分。测控需求概念本体包含如下属性:
  - 相关资源(RESOURCE), 指拥有需求的卫星资源对象, 用 is-Belong 表示;
  - 开始时间(STAR-TIME), 为满足测控需求而执行的测控服务最早可以开始的时间;
  - 结束时间(DUE-TIME), 为满足测控需求而执行的测控服务必须结束的最晚时间;
  - 偏好(PREFERENCE), 强调测控需求对测控服务所占用的时间区间或测控资源的特别要求;
  - 优先级(PRIORITY), 强调测控需求相对于其他测控需求的重要程度, 基于所有测控需求的优先级可以生成整个测控需求集合的偏序;
  - 测控服务集(SERVICEST), 可以为该测控需求的满足做出贡献的测控服务的集合。集合中的元素需要基于测控需求以及相应的测控资源, 通过一定的初始化算法生成;
  - 需求内容(REQCONTENT), 确定测控需求对测控服务的具体要求内容, 如测控的频率、总次数、总时间等。

*Request\_RelationSet*: 测控需求之间可能存在的关系集合。包括:

- 逻辑关系(LOGIC-RELATION), 测控需求与其它测控需求之间的因果关系(cause、because);
- 时序关系(TEMPORAL-RELATION), 测控需求与其它需求之间存在的时序上的相互关系, 如在...之前(IsBefore)、在...之后(IsAfter)等。

3.2 测控资源(RESOURCE)

概念定义: 测控资源是多星测控调度本体模型中的核心概念之一, 定义为能够为测控服务的执行提供支持的实体或对象。测控资源一般是有限的, 并且常常受到各种额外的限制(如测控设备故障等), 因此测控资源对于多星测控调度所施加的约束常常是主要而强烈的。其形式化定义如下:

$RESOURCE = \{ Resource\_Name, Resource\_AttributeSet, Resource\_RelationSet \}$  (4)

其中 *Resource\_Name* 表示测控资源的名称, 唯一标识; *Resource\_AttributeSet* 标识测控资源的属性集合;

*Resource\_RelationSet* 与资源相关的关系集合。

根据测控资源的类型, 进一步将其分成实体资源和虚拟对象资源两大类。实体资源指由具体实物对象构成的资源, 如卫星、载荷、测控站、测控设备等。虚拟对象资源则主要指星站可见时间窗口。对这两种类型的测控资源的属性和关系分别进行分析:

- 1) 实体资源的属性集
  - 资源类型(TYPE), 用于描述测控资源的种类, 如卫星、载荷、测控站、测控设备、测控中心等;
  - 资源状态(STATE), 描述资源在特定时刻的具体状态, 状态之间存在一定的转换顺序约束, 如测控设备必须经过双向捕获状态后才能转入自动跟踪状态等;
  - 资源能力(CAPABILITY), 对资源能否遂行指定类型任务进行说明, 如测控设备具备进行数传、遥控的能力, 或是单一功能测控资源;
  - 资源容量(CAPACITY), 说明资源同时执行多个测控任务的能力, 如指明测控设备能够同时为两颗过境的卫星提供服务;
  - 资源性能参数(PARAMETER), 主要用于说明影响资源性能的参数, 如资源准备时间(Set-upTime)、资源释放时间(ReleaseTime)等;
  - 资源使用约束(USAGE-CONSTRAINT), 指定用于描述其它影响资源使用的约束, 如累计服务时间, 持续服务时间等。

2) 实体资源的关系集

- 泛化(Generalization), 对应于 is-Kind-of;
- 聚集(Aggregation), 对应于 is-Part-of;
- 关联(Association), 表示资源之间存在相关的关系, 当不同的资源需要协同才能完成测控调度任务时, 称资源之间存在关联关系, 记为 is-Associate-with;
- 相似(Alike), 针对调度问题能够得到基本接近的调度结果的不同资源, 称其具有相似关系, 记为 is-Alike-with;
- 等同(Equivalent), 针对调度问题能够得到完全相同的调度结果, 称其具有等同关系。等同的资源可以互换使用而不影响调度结果, 记为 is-Equivalent-with。

3) 虚拟对象资源(可见时间窗口)的属性集

- 关联资源(Related-Resource), 与形成虚拟对象资源有关的实体资源, 包括卫星和测控设备;
- 开始时间(StartTime), 可见时间窗口的开

始时间;

- 持续时间(Duration), 可用时间窗口的实际持续时间。

4) 虚拟对象资源的关系集

- 等同(Equivalent), 指不同的虚拟对象资源在完成测控服务的效果是相同的, 记为 is-Equivalent-with;
- 冲突(Conflict), 当不同虚拟对象资源对应的实体资源之间存在资源争用的现象时, 称在这些虚拟对象资源之间存在冲突关系, 记为 is-Conflict-with。

3.3 测控服务(SERVICE)

概念定义: 测控服务被定义为可以在规定的时间区间中被执行的过程。测控服务的成功执行必须要得到测控资源的支持, 同时也会对资源以及整个调度过程产生影响, 并最终影响调度方案。因此测控服务是多星测控调度问题本体建模中最重要的概念。本文的本体模型就是以测控服务为中心对象建立的, 测控调度过程也以测控服务为调度对象, 同时最终的调度方案也是由测控服务构成的无冲突集合。测控服务概念本体的形式化定义为:

$$\{SERVICE = ServiceID, Service\_AttributeSet, Service\_RelationSet\} \tag{5}$$

其中: *ServiceID* 表示服务的唯一标识; *Service\\_AttributeSet*, 测控服务的属性集合。

测控服务类相关的属性有:

- 开始时间、结束时间, 对应测控服务要求的开始和结束时间;
- 关联资源( ASSIGNED-RESOURCE), 测控服务声明所需要的相关资源, 包括实体资源和虚拟对象资源;
- 持续时间( DURATION), 声明测控服务所需最短的持续时间要求;
- 测控需求( REQUEST), 在初始化生成测控服务所对应的测控需求, 测控服务被声明用来为满足该需求而服务;
- 服务状态(SERVICE-STATE), 包括等待处理、调度成功、未调度等几种服务状态;
- 相互关系( RELATION), 不同的测控服务之间可能存在相互关系, 比如可选( 指定测控服务集中的任意测控服务都可以达到目的)、合作( 需要多个测控服务一起完成才能实现目标) 。

3.4 调度规则(RULE)

概念定义: 调度规则被定义为在分配资源以及

生成调度方案的过程中提供指导的意见和信息。在启发式方法建模和求解过程中, 调度规则占据十分重要的地位。其形式化定义如下:

$$RULE = \{Rule\_ID, Rule\_AttributeSet, Rule\_RelationSet\} \tag{6}$$

其中 *Rule\_ID* 是标识调度规则的唯一编号;

*Rule\\_AttributeSet*, 调度规则所包含的属性集合。规则所包含的属性主要是规则内容(*Rule-Content*), 如优先调度资源灵活度较高的测控服务等;

*Rule\\_RelationSet*, 调度规则之间以及调度规则与其它概念之间的关系集合; 主要关系有:

- 包含(Include), 指规则 A 中显性包含规则 B 所有的内容。与之对应, 存在规则的被包含(Be-Include) 关系;
- 推导(Infer), 指规则 A 不明确包含规则 B, 但是由 A 成立可以隐性推导出 B 也同样成立。被推导(Be-Infer) 是与推导对应的另一种关系;
- 冲突( Rule-Conflict-To), 当规则 A 的内容要求与规则 B 的内容要求之间存在矛盾时, 称规则 A 与规则 B 之间存在冲突。

显然调度规则的冲突关系满足互反性。即当  $RULE\ A\ Rule-Conflict-To\ RULE\ B \Leftrightarrow RULE\ B\ Rule-Conflict-To\ RULE\ A$ 。如规则 A 的规则内容为“尽量最大限度提供测控服务”, 即要求更多的测控资源提供服务, 而规则 B 的规则内容为“用尽量少的测控设备提供服务”, 显然规则 A 与规则 B 之间存在冲突关系。当存在冲突的规则同时起作用时, 需要采用折衷的方法执行规则, 如可采用定义加权优先度的方法完成测控调度。

4 多星测控调度问题的本体描述示例

以下以一个测控需求为例, 给出由 XML 模型向测控调度概念本体转化的方法, 并利用 OWL 描述语言进行描述, 验证本文提出的本体模型框架与其他模型的兼容性。

设给定某卫星测控需求的 XML 描述模型如图 2 所示。

```
< Req> reqName= REQ1, reqID= 1, ACName= “ AC1”, Req-
Type= “ 抽象测控需求”, reqContent= reqContent1, Priority= 5
< / Req>
< reqContent> reqST= “ 2007-05-01 00: 00: 00”, reqET= “ 2007-
05-02 00: 00: 00”, 每天升轨测控圈数 true 2 圈, 每天降轨测控圈
数 true 2 圈< / reqContent>
```

图 2 多星测控调度问题的 XML 测控需求示例  
利用 OWL 将上述需求转化成测控需求概念

本体如下:

```
<owl:Class rdf:ID=" 测控需求">
  <owl:DatatypeProperty rdf:ID=" 需求名称"> // 定义属性集
    <rdfs:range rdf:resource=" REQ1"/>
    <owl:cardinality> 1</owl:cardinality> // 唯一标识
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:ObjectProperty rdf:ID=" isBelong">
    <rdfs:domain rdf:resource=" REQ1"/>
    <rdfs:range rdf:resource=" AC1"/>
  <owl:cardinality> 1</owl:cardinality>
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:ID=" 开始时间">
    <rdfs:range rdf:resource=" 2007-05-01 00: 00: 00"/>
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:ID=" 结束时间">
    <rdfs:range rdf:resource=" 2007-05-02 00: 00: 00"/>
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:ID=" 优先级">
    <rdfs:range rdf:resource=" 5"/>
  </owl:DatatypeProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:ID=" 需求内容">
    <rdfs:range rdf:resource=" 每天升轨测控 2 圈, 每天降轨测控 2 圈"/>
  </owl:DatatypeProperty>
</owl:Class>
```

由此可知 XML 需求模型可以方便地转换到本体模型框架, 说明了该模型良好的兼容性。

5 结语

通过引入本体概念, 建立描述多星测控调度问题统一的模型框架, 可以满足多星测控调度领域中不同研究需求和不同的应用系统之间数据交互和语义共享的需要, 为实现模型及数据的重用和交互构建了基础, 也便于实现计算机统一处理。希望本文的工作可以为其它研究工作提供一定的借鉴。

参 考 文 献

[ 1 ] Arbabi, Mansur, Garate J A. Interactive Real Time

Scheduling and Control[ C] // Proceedings of the 1985 Summer Simulation Conference. Chicago, 1985: 271 ~ 277

[ 2 ] T. D. Gooley. Automating the Satellite Range Scheduling Process[ D] . Air Force Institute of Technology, 1993

[ 3 ] S. M. Schalck. Automating Satellite Range Scheduling [ D] . Air Force Institute of Technology, 1993

[ 4 ] 凌晓冬,陈峰,武小悦. 多星测控调度问题综述[ J] . 飞行器测控学报, 2008, 27(2): 17 ~ 22

[ 5 ] 张娜,冯祖仁,冯远静,等. 多星测控资源优化调度模型研究[ C] // Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China, 2006: 7400 ~ 7404

[ 6 ] 金光,武小悦,高卫斌. 卫星地面站资源调度优化模型及启发式算法[ J] . 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1839 ~ 1841

[ 7 ] 刘洋,贺仁杰,谭跃进. 基于约束满足的多卫星调度模型研究[ J] . 系统工程与电子技术, 2004, 26( 8): 1076 ~ 1079

[ 8 ] 李云峰. 卫星-地面站数传调度模型及算法研究[ D] . 长沙: 国防科学技术大学, 2008

[ 9 ] Hori M, Nakamura Y, Satoh H. Knowledge-level Analysis for Eliciting Composable Scheduling Knowledge[ J] . Artificial Intelligence in Engineering, 1995, 9(4): 253 ~ 264

[ 10 ] Rajpathak D, Motta E, Roy R. A Generic Task Ontology for Scheduling Applications[ C] // Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence (IC-AI2001). Las Vegas, USA, 2001: 1037 ~ 1043

[ 11 ] Smith S F, Cortellessa G, Hildum D W. Using a Scheduling Domain Ontology to Compute User-Oriented Explanations [ C] // Planning, Scheduling, and Constraint Satisfaction: From Theory to Practice. 2005. IOS Press

[ 12 ] Smith S F, Becker M A. An Ontology for Constructing Scheduling Systems [ C] // Working Notes of AAAI-97, Spring Symposium on Ontological Engineering. Stanford, CA, 1997

[ 13 ] Frankovic B, Budinska I, Tung D T. Creation of Ontology for Planning and Scheduling[ C] // 3rd International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence. Budapest, Hungary, 2002