

# 时空本体及其逻辑基础研究现状与展望<sup>\*</sup>)

王生生<sup>1</sup> 刘大有<sup>1</sup> 李 昕<sup>2</sup> 姜新雷<sup>3</sup> 袁旻昱<sup>1</sup>

(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)<sup>1</sup> (吉林大学软件学院 长春 130012)<sup>2</sup>

(中国建设银行股份有限公司 北京 100032)<sup>3</sup>

**摘 要** 总结了时空本体及其逻辑基础——时空描述逻辑的研究工作。指出了时空本体和时空描述逻辑的主要问题是复杂度过高(一般情况下不可判定)、不支持多元的时空关系和时空关系复合推理。解决方案是将时空推理和描述逻辑、本体充分结合,建立表达和推理能力更强的时空本体。

**关键词** 时空本体,时空描述逻辑,时空推理

## Status and Prospect of Spatio-temporal Ontologies and Logic Foundation

WANG Sheng-sheng<sup>1</sup> LIU Da-you<sup>1</sup> LI Xin<sup>2</sup> JIANG Xin-lei<sup>3</sup> YUAN Min-yu<sup>1</sup>

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)<sup>1</sup>

(Software College of Jilin University, Changchun 130012, China)<sup>2</sup> (China Construction Bank, Beijing 100032, China)<sup>3</sup>

**Abstract** The researches of spatio-temporal ontologies and spatio-temporal description logic which is the logic foundation of spatio-temporal ontologies were summarized. The major problems of spatio-temporal ontologies and spatio-temporal description logic were pointed out, i. e. they are undecidable in the general case, they can not support multi-aspect spatio-temporal relations and spatio-temporal relations composition reasoning. The solution was also pointed out, that is building the spatio-temporal ontologies which are more powerful at representation and reasoning by combining description logics and ontologies with spatio-temporal reasoning.

**Keywords** Spatio-temporal ontologies, Spatio-temporal description logic, Spatio-temporal reasoning

## 1 引言

现在的 Internet 以 HTML 为基础,称为 Web 1.0,其功能基本上是单向的信息发布和接收。社会网(Social Web)又称为 Web 2.0,它可以通过标签等方式实现信息交换,在现有 Internet 基础上有小规模应用,但也存在诸多问题。而 Tim Berners-Lee 等提出的语义 Web (Semantic Web)提供了解决“语义鸿沟”等难题的美好前景,它称为 Web 3.0。尽管其前途充满波折,但各领域的语义 Web 研究仍然在积极进行中,并已取得了大量成果。

正如十几年前我们认识到地理信息系统(GIS)是信息化建设中不可缺少的部分,时空(包括空间)语义 Web 在当代也具有同样重要的意义,它几乎能应用到各个领域。本体是构建语义 Web 的核心技术之一,但是目前时空(包括空间)本体的研究还不够成熟。时空本体又分为两大类(部分文献细化为更多类,但本质上仍然是两大类):第一类是反映时空本质的本体,同具体领域无关,仅对时空概念、时空关系建模,例如 SNAP/SPAN;第二类是同具体领域相关的时空本体,实际上它是一种领域本体,其中涉及时间、空间的概念、属性,地理本体 GeoOntologies 是一个典型实例。此前曾有文献对地理本体进行了综述<sup>[1]</sup>,但对第一类时空本体及其逻辑基础的综述和展望,此前还未见报道。

本体的描述语言多种多样,甚至可以使用自然语言。但无论从工程应用还是理论研究角度,简洁严谨、支持推理的本

体语言都是必要的,因此逻辑系统是本体语言的最佳选择。其中描述逻辑(Description Logics)是首选的本体描述语言,此外框架逻辑、一阶逻辑和霍尔逻辑等逻辑系统也有部分应用。由此可见,时空描述逻辑自然成为时空本体的基础理论。目前时空本体及其逻辑基础研究还不够成熟,本文归纳了现有的主要相关研究工作,总结了存在的主要问题,并指出了研究思路。

## 2 时空描述逻辑

### 2.1 描述逻辑

描述逻辑是知识表示的一种形式化语言,适合表示关于概念和概念层次结构的知识,因此也称为概念表示语言和术语逻辑。描述逻辑统一了基于框架、语义网络、面向对象的表示以及语义数据模型系统的逻辑基础,并给出一种形式化的、基于逻辑的语义。描述逻辑(DLs)研究可以追溯到 1984 年 Brachman 等讨论了描述语言的表示能力和推理复杂性之间所存在的矛盾<sup>[2-4]</sup>。

描述逻辑使用术语“概念”、“角色”和“个体”来描述领域知识。概念是论域中的类,相当于谓词逻辑的一元谓词。个体是论域中的事物实例,相当于谓词逻辑的常量。角色表示性质、属性或关系,相当于二元谓词。简单的概念和角色可以通过构造符来生成复杂的概念和角色。论域中的概念、角色、个体必须满足相应的公理。

描述逻辑包含一簇逻辑,每种描述逻辑的主要区别是使

<sup>\*</sup>)基金项目:国家自然科学基金重大项目(60496321),国家自然科学基金项目(60603030,60773099,60573073),国家 863 高技术研究发展计划项目(2006AA10Z245),吉林省科技发展计划重点项目(20060213),欧盟项目 TH/Asia Link/010 (111084)。

用的构造符和公理。最基本的一种描述逻辑称为  $ALC$  (Attributive Language plus Complement), 其构成是: 原子概念、原子角色;  $\top$  (全集)、 $\perp$  (空集)、构造符  $\wedge$  (合取)、 $\vee$  (析取) 和  $\neg$  (否定); 角色限定约束:  $\forall$  (全称量词) 和  $\exists$  (存在量词)。在基本描述逻辑  $ALC$  的基础上可以扩展, 构成新的描述逻辑。

描述逻辑系统提供了不同种类的推理服务, 可以将它们定义为逻辑推理。首先讨论对概念的推理, 然后是有关  $TBox$  和  $ABox$  的推理。这些都可归结为  $ABox$  的一致性检测。

一般情况下, 描述逻辑是一阶逻辑的一个可判定子集, 因而能够构造出完全可靠的 Tableau 算法<sup>[5]</sup>, 用于判定系统的推理问题。描述逻辑的 Tableau 算法最早由 Sattler 等提出, 被广泛用于各种描述逻辑中, 以判定概念的可满足性或概念间的包含关系。各种优化的 Tableau 算法已在实用推理机中得以实现。

## 2.2 时空描述逻辑

时空逻辑一直是逻辑研究的热点, 其中对时态逻辑的研究已经比较完备。在空间和时空逻辑方面, 模态和一阶逻辑片段的研究工作较丰富, 也较成熟, 但时空描述逻辑的研究还不够成熟。

应该说, 描述逻辑始终将对时空概念和关系的描述和推理作为主要研究目标之一。在很多描述逻辑文献中, 都将 RCC8 空间关系和区间代数时态关系作为示例。但由于描述逻辑自身还处于发展和完善阶段, 时空描述逻辑还有很多根本性问题没有解决。下面对这方面的主要工作给予简要介绍。

1999 年, Haarslev 等<sup>[6]</sup> 通过对支持具体域的描述逻辑  $ALC(\mathcal{D})$  进行扩展, 将其中的概念谓词构造算子扩充为角色构造算子, 建立了  $ALCRP(\mathcal{D})$  描述逻辑。也就是通过具体域上的谓词和从具体域到抽象域映射的特征 (feature) 来定义抽象域中的角色, 而在  $ALC(\mathcal{D})$  只允许通过这种映射来定义概念。但是增加角色构造算子后, 完全的  $ALCRP(\mathcal{D})$  被证明是不可判定的, Haarslev 等给出了三条约束规则, 也就是对  $TBox$  中概念和角色的定义进行了限制。对于满足这些条件的知识库, 其可满足性问题是可判定的。 $ALCRP(\mathcal{D})$  可以用来表达时空知识, 它能通过空间具体域到抽象域的映射来表达 RCC (区域连接演算) 拓扑关系, 并且能通过空间域和时态域的混合来表达初步的时空关系。2002 年, Kaplunova 等<sup>[7]</sup> 在  $ALCRP(\mathcal{D})$  的基础上提出了能表达三元关系的  $ALCRP^3(\mathcal{D})$ , 即将二元角色推广为三元角色, 并基于  $ALCRP^3(\mathcal{D})$  描述了方向空间关系。 $ALCRP^3(\mathcal{D})$  同样在不加限定的情况下是不可判定的。

2000 年, Wessel<sup>[8]</sup> 提出了能表达 RCC 拓扑关系的  $ALC_{\text{Space}}$  描述逻辑, 能描述 RCC5, RCC8 等空间关系, 并且能支持复合空间关系推理, 其中  $ALC_{\text{Space}1}$ ,  $ALC_{\text{Space}2}$ ,  $ALC_{\text{Space}3}$  是可判定的,  $ALC_{\text{Space}4}$  和  $ALC_{\text{Space}5}$  是不可判定的。2003 年, Wessel 将描述逻辑组件应用于 GIS 系统, 实现了对非空间描述和空间描述的混合推理<sup>[9]</sup>, 并用汉堡市地图生成了包含所有空间关系的实例库, 进而用 RACER (著名的描述逻辑推理机) 实现了实例查询。

2007 年, Lutz<sup>[10]</sup> 提出了结合具体域和通用  $TBox$  的描述逻辑, 它是可判定的, 能分别表达区间代数和 RCC8 模型。

## 3 时空本体

### 3.1 本体

本体方法目前已经成为计算机科学中的一种重要方法, 在语义 Web、搜索引擎、知识处理平台、异构系统集成、电子商务、自然语言理解、知识工程等领域有重要应用。尤其是目前随着对语义 Web 研究的深入, 本体论方法受到了越来越多的关注, 人们普遍认为它是建立语义 Web 的核心技术。

语义 Web 被认为是 Web 未来的发展方向。在语义 Web 上, 信息都带有显式的含义, 使其易于机器自动处理和 Web 信息集成。W3C 已经提出了一系列与语义 Web 有关的建议, 包括 XML, XML 模式, RDF, RDF 模式, DAML+OIL, OWL 等。XML 为结构化文档提供了基本的语法, 但对文档的含义并未施加任何语义上的限制; XML 模式是一种约束 XML 文档结构的语言; RDF 是一个关于对象 (或资源) 和它们之间关系的数据模型, 并为这个数据模型提供了简单的语义, 这些数据模型使用 XML 语法表示; RDF 模式是描述 RDF 资源中属性和类的词汇表, 并带有这些属性和类的泛化层次的语义; 网络本体语言 OIL 和随后的 DAML+OIL 提供了超越 RDF 模式的语义表达能力, OWL 是从 DAML+OIL 基础上发展而来的最新标准, 增加了更多的词汇, 但这两种语言的主要部分是相同的。OWL 有 3 个表达能力递增的子语言: OWL Lite, OWL DL 和 OWL Full, 其中的 OWL DL 直接与描述逻辑系统对应。

OWL 是当前最有发展前景的本体表示语言。2002 年 7 月 29 日, W3C 组织公布了本体描述语言 (Web Ontology Language, OWL) 的工作草案 1.0 版, 目前工作草案的最新更新为 2004 年 2 月 10 日的版本。

OWL 分为 3 个子语言: OWL Full 使用描述逻辑  $SHOQD = ALC + \mathcal{F} + \mathcal{H} + \mathcal{I} + \mathcal{N}$ ; OWL DL 相当于描述逻辑  $SHOIN(\mathcal{D})$ ; OWL Lite 相当于描述逻辑  $SHOFL$ 。OWL DL 忽略对 RDFS 的兼容性, 主要针对概念、性质、个体的描述, 保证强大的语言描述能力, 能够保证可判定推理和强大的语义表达能力; OWL Lite 是 OWL DL 的简洁版本, 它降低了 OWL DL 的公理约束, 可以保证高效的推理过程; OWL Full 与 RDF (S) 完全兼容, 它将 RDF (S) 扩展为一个完备的本体语言, 但 OWL Full 消除了基数限制中对传递性质的约束, 因此不能保证可判定推理。除 OWL 外, 其他两者比较常用的本体语言是 KAON<sup>[11]</sup> 和 DOGMA<sup>[12]</sup>。

### 3.2 时空本体

时空本体正在成为空间信息集成、图像/视频语义检索等方向的研究热点, 近年来这方面的研究工作有:

2000 年, Zhou 和 Fikes<sup>[13]</sup> 定义了一种考虑时间点和时段的时间本体。2000 年, Córcoles<sup>[14]</sup> 基于 XML 定义了时空查询语言, 该语言包含 8 种空间算子和 3 种时态算子, 用于表达时空关系。2003 年, Grenon<sup>[15]</sup> 基于一阶谓词逻辑定义了时空本体, 给出了时空本体的 20 条公理。2003 年, Bittner 等<sup>[16]</sup> 提出了描述复杂时空过程和持续实体的形式化本体。该理论将本体分为两类: 元本体和表示本体。元本体刻画了表示本体之间的关系; 表示本体又分为范围型 (SPAN) 本体和快照型 (SNAP) 本体两类, 分别定义连续过程和持续实体。2005 年, 黄茂军<sup>[17]</sup> 进行了构建地理本体的尝试, 他给出了构建地理本体的三元组和七元组结构, 将空间关系公理加入 OWL 建模原语中, 实现了基于 OWL 的地理本体, 并建立了

城市机场查询、地图查询服务等简单地理本体应用示例。2005年,景东升<sup>[18]</sup>基于描述逻辑研究了地理本体构建、语义标注和本体查询等问题,初步建立了面向语义的土壤地理信息系统,实现了土壤分类图表达、土壤本体查询、不同土壤分类系统参比等功能。2005年,Harry等<sup>[19]</sup>研究了基于本体的地形数据集成,通过本体定义、数据过滤和语义关系对应3个步骤实现了地形数据集成,在本体定义中包括对空间关系的描述。2005年,Fu等<sup>[20]</sup>实现了基于本体的空间信息检索,并应用于SPIRIT(基于Internet的空间信息检索)项目中,具体方法是将空间位置关系描述加入本体库中,并在SPIRIT查询中增加空间关系注脚。2006年,Kwan-Sang等<sup>[21]</sup>研究了基于 $ALCPR(D)$ 和空间本体的多媒体信息检索,基于 $ALCPR(D)$ 定义了RCC8关系,将9交集模型表示的19种区域-线关系和常用运动动词联系起来,基于OWL构建了空间本体,应用于语义图像检索和运动视频检索。2006年,Kokou等<sup>[22]</sup>提出了基于本体的语义仲裁(Mediation)方法,用于Web空间信息集成。语义仲裁是最新的数据库集成技术,并逐渐开始在空间信息领域应用。Kokou等定义了语义角色,使用了全局、协作和本地3层本体,在此基础上提出了松散耦合的语义仲裁框架。2006年,Lutz等<sup>[23]</sup>将本体方法用于空间信息基础设施中服务发现和空间信息检索,并应用到跨国河流水位查询中,解决了异构语义问题。

#### 4 存在问题及解决方案

时空本体及时空描述逻辑已经取得了一些研究成果,但还不够成熟。体系相对完整的时空描述逻辑只有 $ALCPR(D)$ 和 $ALC_{free}$ ,其中 $ALCPR(D)$ 更实用,一些时空本体是基于 $ALCPR(D)$ 实现的。但它们还存在以下问题:

(1)时空关系推理能力弱。复合推理是最基本的时空关系推理问题,它指由 $R(a,b),R(b,c)$ 推导出 $R(a,c)$ ,是解决关系可满足问题(RSAT)的基础,RSAT问题是定性时空关系的典型推理问题。 $ALCPR(D)$ 只能通过角色构造算子定义时空关系,不支持时空关系的复合推理,也就不能解决RSAT问题。 $ALC_{free}$ 通过增加RBox公理能支持复合推理,但它对RCC5和RCC8关系(最简单的两类空间关系模型)都是不可判定的。

(2)复杂度过高。 $ALCPR(D)$ 在不加限定情况下是不可判定的, $ALC_{free}$ 在解决最简单的RCC5关系时都是不可判定的。而真正有效的推理算法应该在可处理(多项式时间)的范畴内。对于不可处理的问题,需要界定出其最大可处理子集,然后采用分治法将其分割为可处理的子集进行处理。从复杂性方面来看,现有的时空描述逻辑还不够完善。

(3)不支持多元的时空关系。现实世界的时空关系是多元化的,即多种关系同时存在,比如拓扑、方位、距离关系需要同时考虑。 $ALC_{free}$ 本质上排斥多元关系,因为它对基本关系做了互斥假设。虽然, $ALCPR(D)$ 允许时间具体域和空间具体域复合,但Haarslev等并未给出综合多元空间关系的处理方法。

描述逻辑是本体的形式化表达和推理的基础。上述问题不仅仅是 $ALCPR(D)$ 和 $ALC_{free}$ 本身的问题,也是今后时空描述逻辑和时空本体研究中不能回避的问题。由于时空问题本身的复杂性和特殊性,上述问题的解决不能单纯依赖提高描述逻辑和时空本体的运算能力。将时空推理(spatio-temporal reasoning)同描述逻辑和本体研究充分结合,充分借鉴时空推

理已有研究成果,是解决这些问题的根本途径。

近年来,时空推理已成为十分活跃的研究方向,是规划、GIS、自治机器人导航、自然语言理解、时空数据库、移动计算、计算机视觉、图像理解、图形数据库、CAD/CAM、工程设计和常识推理等研究领域的重要研究内容之一。国际上成立了许多专门从事时空推理研究的协会和联盟,许多大学和研究机构纷纷建立了时空推理网站。国际权威计算机期刊上的时空推理文章呈逐年增加的趋势。近几年,IJCAI,AAAI等重要国际学术会议都设立了时空推理Workshop;以时空推理为专题的国际会议逐年增长,从2001年起,FLAIRS(Florida AI Research Society)每年与AAAI联合举办“时空知识表示与推理”方面的专题会议。

近年来清华大学、吉林大学、中科院地理所、国家基础地理信息中心、解放军信息工程大学、武汉大学等在时态GIS、时空数据模型、时空拓扑、时空数据库等领域开展了大量研究工作。其中吉林大学是国内最早开展时空推理研究的单位之一,从20世纪90年代初至今已取得重要的理论及应用成果。

在时空推理领域,已经能较好地解决以上3方面问题。RSAT是典型的时空推理问题,针对很多模型已有成熟的算法。已经提出了几十种空间、时态和时空结合关系模型,对单一模型的研究已经比较成熟,多元时空关系的模型的研究正在开展。这些关系模型都是在可判定的前提下进行研究,主要工作是寻找模型的可处理子集(能在多项式时间内处理的片段)。

这些模型基本上都是在模态或一阶等逻辑系统内实现的,因此基于时空推理解决以上问题有下面两种途径:

方式一,在 $ALCPR(D)$ 基础上改进或者开发新的时空描述逻辑,设法将时空推理研究领域中空逻辑系统的公理和算子加入描述逻辑,在描述逻辑中建立起类似的公理系统,从而将时空推理研究成果引入描述逻辑。

方式二,描述逻辑处理关系的能力弱,从本质上不适宜处理时空关系。我们可以考虑以时空推理中空模态逻辑为基础构建时空本体。但本体描述语言和工具都需要独立开发,工作量比较大。

本文侧重归纳总结了反映时空本质的时空本体,并对其逻辑基础-时空描述逻辑进行了分析,指出了现有工作中存在的主要问题,并给出了解决这些问题的研究思路。本文对相关研究的人员了解背景知识,选择研究方向和技术路线有一定借鉴作用。

#### 参考文献

- [1] 陈建军,周成虎,王敬贵.地理本体的研究进展与分析.地学前缘,2006,13(3):81-90
- [2] Brachman R J,Levesque H J. The tractability of subsumption in frame-based description languages//Proceedings of the 4th National Conference of the American Association for Artificial Intelligence (AAAI-84). Austin, TX, 1984: 34-37
- [3] Baader F, Nutt W. Basic description logic//Baader F, et al, eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications. Cambridge University Press, 2002
- [4] Baader F, Horrocks I, Sattler U. Description logics as ontology languages for the semantic web//Hutter D, Stephan W, eds. Festschrift in honor of Jörg Siekmann, Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer, 2003
- [5] Baader F, Sattler U. An Overview of Tableau Algorithms for

- Description Logics. *Studia Logica*, 2001, 69: 5-40
- [6] Haarslev V, Lutz C, Muoller R. A description logic with concrete domains and a role-forming predicate operator. *Journal of Logic and Computation*, 1999, 9: 351-384
- [7] Kaplunova A, Haarslev V, Möller R. Adding ternary complex roles to ALCRP(D) // *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL2002)*. Toulouse, France, 2002: 45-52
- [8] Wessel M, Haarslev V, Möller R. ALCRA-ALC with Role Axioms // *Proceedings of the International Workshop in Description Logics 2000 (DL2000)*. Aachen, Germany, 2000
- [9] Wessel M. Some Practical Issues in Building a Hybrid Deductive Geographic Information System with a DL-Component // *Proceedings of the 10th International Workshop on Knowledge Representation meets Databases 2003 (KRDB 2003)*. Hamburg, Germany, 2003
- [10] Lutz C, Milicic M. A Tableau Algorithm for Description Logics with Concrete Domains and General TBoxes. *Journal of Automated Reasoning*, 2007
- [11] Motik B, Maedche A, Volz R. A Conceptual Modeling Approach for Semantic-Driven Enterprise Applications // Meersman R, Tari Z, et al, Eds. *Proceedings CoopIS/DOA/ODBASE*. Springer-Verlag, LNCS 2519. 2002: 1082-1099
- [12] Jarrar M, Demey J, Meersman R. On Using Conceptual Modeling for Ontology Engineering // *Journal on Data Semantics*, Spacapietra S. Ed. Springer, LNCS 2800. 2003: 185-207
- [13] Zhou Q, Fikes R. A Reusable Time Ontology. Technical Report, KSL-00-01. Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, 2000
- [14] Corcoles J E, Garcia-Consuegra J, Peralta J, et al. A spatio-temporal query language for a data model based on XML // 6th EC-GI & GIS Workshop. Lyon, France, 2000
- [15] Grenon P. The spatio-temporal ontology of reality and its formalization // *AAAI Spring Symposium on Foundations and Applications of Spatio-Temporal Reasoning (FASTR)*. 2003
- [16] Bittner T, Smith B. Granular spatio-temporal ontologies // *AAAI Spring Symposium on Foundations and Applications of Spatio-Temporal Reasoning (FASTR)*. 2003
- [17] 黄茂军. 地理本体的形式化表达机制及其在地图服务中的应用研究. 博士学位论文. 武汉大学, 2005
- [18] 景东升. 基于本体的地理空间信息语义表达和服务研究. 博士学位论文. 中国科学院研究生院, 2005
- [19] Uitermark H T, van Oosterom P J M, Mars N J I, et al. Ontology-based integration of topographic data sets. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7: 97-106
- [20] Fu F, Jones C B, Abdelmoty A I. Building a Geographical Ontology for Intelligent Spatial Search on the Web // *Proceedings of IASTED International Conference on Databases and Applications (DBA2005)*. 2005
- [21] Na Kwan-Sang, Kong Hyunjang, Cho Miyoung. Multimedia Information Retrieval Based on Spatiotemporal Relationships Using Description Logics for the Semantic Web. *International Journal of Intelligent Systems*, 2006, 21: 679-692
- [22] Kokou Yétongnon, Seksun Suwanmanee, Djamel Benslimane, et al. A web-centric semantic mediation approach for spatial information systems. *Journal of Visual Languages and Computing & Computing*, 2006, 17: 1-24
- [23] Lutz M, Klien E. Ontology-based retrieval of geographic information. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, 20(3): 233-260

(上接第 4 页)

- [26] Lee J, Liu K F R, Wang Y C, et al. Possibilistic Petri nets as a basis for agent service description language [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, 144(1): 105-126
- [27] Lee J, Liu F K R, Chiang W L. Modeling uncertainty reasoning with possibilistic Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man Cybernetics: Part B*, 2003, 33(2): 214-224
- [28] 赵龙文, 候义斌. 合作 agent 的能力描述 [J]. *小型微型计算机系统*, 2003, 24(2): 220-224
- [29] 蒋运承, 张海俊, 董明楷, 等. 多主体系统中的动态服务匹配 [J]. *电子学报*, 2004, 32(3): 457-461
- [30] Baader F, Calvanese D, McGuinness D, et al. *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002
- [31] 胡军, 高济, 李长云. 多主体系统中基于本体论的服务相容匹配机制 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, 18(5): 694-701
- [32] Christensen E, Curbera F, Meredith G, et al. *Web Services Description Language (WSDL) 1.1*, 2007. <http://www.w3.org/TR/wsdl>
- [33] 史忠植, 蒋运承, 张海俊, 等. 基于描述逻辑的主体服务匹配 [J]. *计算机学报*, 2004, 27(5): 625-635
- [34] Zhang Z L, Zhang C Q. An improvement to matchmaking algorithms for middle agents [C] // *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. New York, USA: ACM Press, 2002: 1340-1347
- [35] 蒋运承, 史忠植. QoS 驱动的主体服务匹配 [J]. *小型微型计算机系统*, 2005, 26(4): 687-692
- [36] 蒋运承, 王驹. 多主体系统中的模糊匹配 [J]. *智能系统学报*, 2006, 1(1): 79-83
- [37] Singh N. A Common Lis PAPI and Facilitator for ABSI [R]. Technical Report; Report-Logic-93-4. USA: Computer Science Department, Stanford University, 1993
- [38] Kuokka D, Harrada L. On using KQML for matchmaking [C] // *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems, ICMAS95*. Cambridge, MA: MIT Press, 1995: 239-245
- [39] Bayardo R J, Bohrer W, Brice R, et al. InfoSleuth: Agent-based Semantic Integration of Information in Open and Dynamic Environments [C] // Huhns M N, Singh M P, eds. *Readings in Agents*. St Louis: Morgan Kaufmann Press, 1998: 205-216
- [40] Paolucci M, Niu Z D, Sycara K, et al. Matchmaking to Support Intelligent Agents for Portfolio Management [EB/OL]. <http://www.cs.cmu.edu/softagents/a-match/>, 2007
- [41] Lu H E. Agent Services Description and Matching [C] // *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications*. Nevada, USA, 2003: 1040-1048
- [42] Lu H E. Agent Services Matchmaking for Cooperation [C] // *Proceedings of the 2003 International Conference on Cyberworlds*. 2003: 274-278
- [43] 蒋运承, 史忠植. 一种基于本体的主体服务快速匹配算法 [J]. *计算机工程*, 2004, 30(20): 28-29
- [44] 蒋运承. 基于主体的智能 Web 中的服务研究 [D]. 博士论文. 北京: 中科院, 2004