

语义网的一阶逻辑推理技术支持*

徐贵红^{1,2}, 张健¹⁺

¹(中国科学院 软件研究所 计算机科学国家重点实验室,北京 100190)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

First-Order Logic Reasoning Support for the Semantic Web

XU Gui-Hong^{1,2}, ZHANG Jian¹⁺

¹(State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: zj@ios.ac.cn

Xu GH, Zhang J. First-Order logic reasoning support for the semantic Web. Journal of Software, 2008, 19(12):3091-3099. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/3091.htm>

Abstract: This paper investigates reasoning support for the semantic Web based on the first-order logic. The key reasoning tasks of the semantic Web can be reduced to deciding the satisfiability of formulas. The first-order logic theorem prover is efficient and complete for unsatisfiability, while finite model searcher finds models for satisfiable formula. This paper proposes to use a theorem prover and a finite model searcher concurrently in the semantic Web reasoning. The experiments show that the method can make up the deficiencies of the description logic reasoner and complement the theorem prover for satisfiable formulas.

Key words: semantic Web reasoning; first-order logic; description logic; ontology; satisfiability

摘要: 研究了一阶逻辑推理工具对语义网的推理支持.语义网的关键推理问题可以化为公式的可满足性判定问题.一阶逻辑的自动定理证明器可以证明不可满足性,而有限模型查找器为可满足的公式在有限域内构造模型.提出在语义网的推理中,同时使用定理证明器和有限模型查找器.实验结果表明,这样可以解决描述逻辑工具的不足,并可以弥补定理证明器对可满足的公式推理的不完备性.

关键词: 语义网推理;一阶逻辑;描述逻辑;本体;可满足性

中图法分类号: TP301 **文献标识码:** A

语义网(semantic Web)是当前 Web 的一个延伸,目标是为基于 Web 的应用提供更高级的能力,例如更准确的信息搜索和自动的数据处理,从而使 Web 应用具有一定的智能^[1].语义网实现的基础是知识表示和自动推理技术.知识表示是 Web 上信息的逻辑建立过程,实现对信息的意义和使用方式的统一理解.对资源进行元数据描述,用资源和资源之间的关系来体现 Web 内容的含义,元数据使用的术语由领域本体提供,这些描述是机器可理解的.例如,一条文本信息“X is a student of Y Laboratory”所具有的含义是“X is-a Person, Person is-a Class, Student is a subclassOf Person, X belongsTo Y-Laboratory”,可以用语义网标记语言来表示.W3C 从 1999 年开始

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60673044 (国家自然科学基金)

Received 2007-08-27; Accepted 2007-10-26

相继发布了语义网标记语言 RDF/RDFS,OWL 等一系列推荐标准,并给出了这些语言的形式化语义^[2].

语义网上关键的推理问题都可以化为可满足性问题,对于 OWL DL(Web 本体语言的描述逻辑子集)描述的本体,可以通过描述逻辑(description logic,简称 DL)的推理工具完成.不过,现有的描述逻辑推理工具还不支持 OWL DL 全集上完备的推理.而且,OWL DL 的表达能力对有些应用是不够的,例如没有提供丰富的关于属性的构造符,需要扩充一些描述逻辑的构造符、Horn 规则甚至是任意的一阶逻辑规则.但是对扩充了这些成分的语言,或者不存在判定过程,或者相应的判定过程还没有在描述逻辑推理工具中得到有效实现.

描述逻辑的表达能力及其推理工具的局限性促使人们开始研究如何用一阶逻辑推理工具支持描述逻辑以及更丰富表达能力语言的推理.定理证明器大都使用基于消解原理的否定法,对于不可满足的公式,推理是完备的,也称为反演完备;但对于可满足的公式,推理过程不一定终止.有些证明器使用了一定的策略,保证可满足的情形终止,但是效率往往很低.

对于公式的可满足性判定,自动推理研究者们从另一个途径出发,为可满足的公式构造有限模型即有限模型查找.我们曾指出^[3],可以用定理证明和模型查找作为两个并发的进程模拟一个“判定过程”,模型查找和定理证明是相互补充的.在本文中,我们将把一阶逻辑的自动定理证明器和模型查找器结合起来,共同用于语义网推理,分析其对语义网的关键推理任务的表现.

本文第 1 节介绍描述逻辑工具和一阶逻辑工具的相关工作,基于描述逻辑工具的局限性和一阶逻辑工具推理的特点,简要说明我们的方法.第 2 节介绍本体语言 OWL、描述逻辑和一阶逻辑之间的对应关系,以及与语义网的推理任务相对应的一阶逻辑公式可满足性问题.第 3 节通过相关的推理实例,说明一阶逻辑工具推理的功能性和效率等.最后对本文的工作进行总结.

1 相关工作和我们的方法

目前,主要有两类工具用于语义网的推理:基于描述逻辑和基于一阶逻辑的推理工具.这些工具使用了不同的算法,在语义网推理中表现出了不同的完备性和效率.

1.1 基于描述逻辑的推理工具

描述逻辑的推理工具主要有 FaCT++^[4],Racer^[5],Pellet^[6],分别实现了描述逻辑 *SHIF(D)*,*SHIQ(D)*,*SHIN(D)*^[7]的判定过程.在这些语言上,公式的可满足性是可判定的,工具基于 Tableaux 算法,提供完备的推理服务.针对描述逻辑的不同语言成分、术语库(TBox)和事实库(ABox)上的推理任务,工具采用了大量的优化技术,具有很高的效率.

这些描述逻辑工具可用于 Web 本体语言 OWL DL 的推理,但是对类表达式中出现的 nominals(在类表达式中使用的命名了的个体),FaCT++和 Racer 将 nominal 近似为原子概念,本体中不能出现涉及 nominal 的个体之间的关联,Pellet 虽然没有使用近似,但关于 nominal 的推理支持仍是不完备的.

而且,由于描述逻辑不能表示 Web 上的一些复杂应用,例如 Web 服务组合^[8]时的组合过程和各个部件的关系以及部件之间的属性关系等,知识表示所需扩充的丰富的构造符的推理支持,需要不同的推理算法,新算法的实现可能需要重新实现支持高效推理过程的数据结构.加入有些构造符,例如属性复合“o”后的描述逻辑以及扩充的 Horn 规则或者一阶逻辑规则,例如扩充了类-Horn 规则的 SWRL 或者扩充了任意一阶逻辑公式的 SWRL FOL^[9],可满足性问题不再是可判定的,不能使用现有的描述逻辑工具进行推理.

1.2 基于一阶逻辑的推理

目前已有成熟的一阶逻辑自动定理证明工具,例如 Vampire^[10],Prover9^[11,12]等.这些定理证明器对各种应用背景下的问题有各自不同的效率.对于 OWL 推理,出现了一些基于定理证明器的 OWL 推理器,如基于 Vampire 的 Hoolet、基于 Otter 的 Surnia 等.定理证明器基于消解法,针对寻找矛盾进行了优化,对公式可满足的情形不是非常有效,推理过程甚至不终止.还有一些 OWL 推理引擎的实现基于一阶逻辑子集的推理器,比如 Jena, F-OWL,ConsVisor 等,它们基于 Horn 逻辑以及逻辑程序设计技术.另外,KAON 基于 disjunctive Datalog 程

序,推理使用了演绎数据库技术.这些推理引擎也都不能提供完备的推理支持.

Tsarkov 等人^[13]曾使用一阶逻辑自动定理证明器 Vampire 进行 OWL 本体上的推理尝试,比较了 Vampire 和 FaCT++在 本体分类、一致性检查、本体蕴含检查时的时间效率.对于复杂的本体,由于定理证明器固有的弱点,大部分需要判断公式是可满足的用例都是失败的.对不可满足的情形,Vampire 的效率也不如专门的描述逻辑推理器.但是显然,一阶逻辑推理工具可以弥补描述逻辑工具对表达能力较强的语言支持的不足,比如可以支持 SWRL 的推理.Libig^[14]考察了 FaCT++,Racer,KAON,Hoolet 这 4 个系统对 OWL 的推理支持.基于 Vampire 的 Hoolet 对概念是可满足的大部分用例,推理都出现了超时.

仅就 OWL 本体上的推理而言,如果只使用定理证明器,一阶逻辑工具对推理支持的完备性远不及描述逻辑工具,我们需要为公式的可满足的情形寻找其他的判定工具.

1.3 我们的方法

语义网的关键推理问题都可以化为可满足性判定问题.使用一阶逻辑推理技术面临的问题是,一阶逻辑是不可判定的,即不存在完备的算法判定任意的一阶逻辑公式是否可满足.一阶逻辑公式的可满足性判定可以通过两种途径:一方面是对公式的不可满足性判定,对应了自动定理证明的否定法,即要从 A 推出 B,就证明 $A \wedge \neg B$ 是不可满足的;另一方面是通过模型查找判定可满足性,即如果找到了一个模型,就说明公式是可满足的.

一阶逻辑公式的有限模型查找(finite model searching)技术已经有了很好的发展,代表性的模型查找工具有 Mace^[11]和 SEM^[15]等.有限模型查找是指在一个有限域上,为一阶逻辑公式构造模型,如果模型存在,则说明公式是可满足的.我们用效率较好的模型查找器来处理公式是可满足的情形.

由于自动定理证明和模型查找两种途径对于可满足性判定问题是相互补充的,我们将这两种方法结合使用,以判定公式的可满足性.

在本文中,我们选用了定理证明器 Prover9 以及模型查找器 Mace4,SEM 和 Paradox^[16].Prover9 的前身 Otter 在以往的自动定理证明器竞赛(<http://www.cs.miami.edu/~tptp/CASC/>)中有较好的性能表现.Prover9 中加入了一些新的策略,如语义指引、变量排序等.Mace4 受 SEM 的影响,使用了带有 LNH(least-number heuristic)的特殊判定过程以及 negative 推理规则,克服了早期版本在原始问题具有多个变量或者有嵌套很深的项时,引起的转换爆炸.Paradox 使用一些新技术改进了 Mace-风格的查找器.

2 基于描述逻辑的本体语言 OWL 和一阶逻辑之间的关系

OWL 的子语言 OWL Lite 和 OWL DL 的逻辑基础是描述逻辑^[2].描述逻辑是以个体、概念(个体的集合)、角色(关联两个个体)为基本元素的概念描述语言^[7].通过使用构造符,构造复杂的概念和角色,由于构造符集合的不同,形成了不同表达能力的描述逻辑子语言.描述逻辑使用不含变量的语法,具有形式化的、基于逻辑的语义,是一阶逻辑的子集.OWL、描述逻辑(DL)、一阶逻辑(FOL)术语之间的对应关系^[17,18]如图 1 所示.

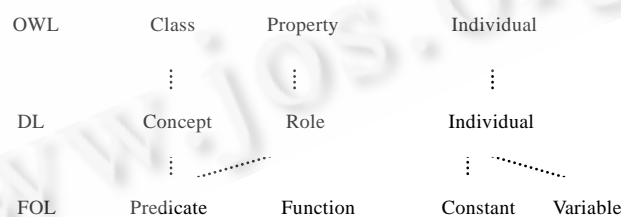


Fig.1 Relationship of the terms of OWL, DL and FOL

图 1 OWL,DL,FOL 的术语对应关系

2.1 Web本体语言OWL和描述逻辑

基于推理实现的考虑,Web 的本体语言 OWL 划分为 3 个子语言:OWL Lite,OWL DL,OWL Full.关于 3 个子语言的详细情形见文献[2].OWL DL 的语义可以通过描述逻辑的语义定义,OWL DL 对应于描述逻辑 $SHOIN(D)^{[18]}$, $SHOIN$ 是可判定的,可满足性问题具有指数时间复杂性.OWL Full 允许一个概念或角色可以同时是一个个体,超出了描述逻辑推理器的限制,本文中我们没有考虑这样的情形.

我们记 OWL DL 到描述逻辑 $SHOIN$ 的映射为 σ ,这里,不考虑数据类型(datatype),表 1 列出了 OWL DL 与 $SHOIN$ 的构造符之间的对应关系,其中 A 是类名, C 和 D 是类表达式, R 和 S 是属性, T 表示传递属性的集合.从 OWL DL 的类和属性到描述逻辑的概念和角色的对应是平凡的,即有 $\sigma(A)=A, \sigma(R)=R$,而类表达式是由表 1 的构造符递归构造的任意表达式,因此表中略去 σ .

Table 1 Mapping from OWL DL to $SHOIN$

表 1 OWL DL 到 $SHOIN$ 的映射

OWL DL	$SHOIN$	
Class(A)	A	
Thing	\top	
ObjectProperty(R)	R	
TransitiveProperty(R)	$R \in T$	
intersectionOf($C D$)	$C \sqcap D$	S
unionOf($C D$)	$C \sqcup D$	
complementOf(C)	$\neg C$	
Restriction(R someValuesFrom(C))	$\exists R.C$	
Restriction(R allValuesFrom(C))	$\forall R.C$	
subPropertyOf($R S$)	$R \sqsubseteq S$	\mathcal{H}
oneOf($o_1 o_2 \dots o_n$)	$\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$	\mathcal{O}
inverseOf(R)	R^{-}	\mathcal{I}
Restriction(R minCardinality(n))	$\geq n R$	\mathcal{N}
Restriction(R maxCardinality(n))	$\leq n R$	

描述逻辑 $SHOIN$ 的知识库 \mathcal{K} (knowledge base)包括 Tbox \mathcal{T} (terminological axioms 集)和 ABox \mathcal{A} (assertional axioms 集)两部分, $\mathcal{T} = \{C_i \sqsubseteq D_i | 1 \leq i \leq n_1\} \cup \{C_j \sqsupseteq D_j | 1 \leq j \leq n_2\} \cup \{R_k \sqsubseteq S_k | 1 \leq k \leq m_1\} \cup \{R_l \sqsupseteq S_l | 1 \leq l \leq m_2\} \cup \{R_m \in T | 1 \leq m \leq m_3\}$, $\mathcal{A} = \{C_j(a_i) | i, j \in I\} \cup \{R_k(a_i, a_j) | i, j, k \in I\} \cup \{a_i = b_j | i, j \in I\} \cup \{a_k \neq b_l | k, l \in I\}$,其中 I 是下标集.

映射 σ 将 OWL DL 本体翻译为 $SHOIN$ 的知识库 \mathcal{K} ,记 OWL DL 本体为 O ,则有 $\sigma(O) = \mathcal{K} = \mathcal{T} \cup \mathcal{A}$.本体的每个类和属性公理及事实翻译为知识库 \mathcal{K} 中的一个或多个公理,例如下面两个用 OWL 抽象语法表示的类公理的翻译:

$$\begin{aligned}
 \text{Class(A partial } C_1 C_2) & \quad A \sqsubseteq C_1 \sqcap C_2 \\
 \text{DisjointClasses}(C_1, C_2, C_3) & \quad C_1 \sqsubseteq \neg(C_2 \sqcup C_3) \\
 & \quad C_2 \sqsubseteq \neg C_3
 \end{aligned}$$

2.2 描述逻辑和一阶逻辑的关系

Borgida^[19]分析了描述逻辑和一阶逻辑的语义联系和表达能力,给出了描述逻辑到一阶逻辑的直接翻译,将原子概念对应到一元谓词,角色对应于二元谓词.

定义. 假设 π 是描述逻辑到一阶逻辑的翻译,一个概念 C 与一阶逻辑公式 $\pi(C)(x)$ 是等价的,当且仅当对于所有的解释 $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$,有 $C^{\mathcal{I}} = (\pi(C)(x))^{\mathcal{I}}$.

这里, \mathcal{I} 同时表示了描述逻辑和一阶逻辑(只含有一元和二元谓词符)语言上的解释, $\Delta^{\mathcal{I}}$ 是非空论域, $\cdot^{\mathcal{I}}$ 是解释函数. $\pi(C)(x)$ 表示一阶逻辑公式 $\pi(C)$ 带有一个自由变量 x ,对一阶逻辑的解释函数 $\cdot^{\mathcal{I}}$ 进行扩展, $\pi(C)(x)$ 的含义 $(\pi(C)(x))^{\mathcal{I}}$ 定义为 $(\pi(C)(x))^{\mathcal{I}} = \{a | a \in \Delta^{\mathcal{I}}, (\pi(C)(a))^{\mathcal{I}} = \text{True}\}$.

我们直接使用原子概念名和角色名表示相应的谓词符,用 x, y 表示变量,将概念表达式翻译为带有一个自

由变量 x 的一阶逻辑公式,概念和角色公理及关于个体的断言则对应为一阶逻辑闭公式.描述逻辑 \mathcal{SHOIN} 的各种构造符和公理的翻译见表 2.

Table 2 Translation from \mathcal{SHOIN} to FOL表 2 \mathcal{SHOIN} 到 FOL 的翻译

Constructors/axioms/assertions	DL syntax	Translation π
Atomic concept A	A	$A(x)$
Role R	R	$R(x,y)$
Individual o	o	o
Inverse role R^-	R^-	$R(y,x)$
Concept conjunction	$C \sqcap D$	$\pi(C)(x) \wedge \pi(D)(x)$
Concept disjunction	$C \sqcup D$	$\pi(C)(x) \vee \pi(D)(x)$
Concept negation	$\neg C$	$\neg \pi(C)(x)$
Oneof	$\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$	$x=o_1 \vee x=o_2 \vee \dots \vee x=o_n$
Exists restriction	$\exists R.C$	$\exists y(R(x,y) \wedge \pi(C)(y))$
Value restriction	$\forall R.C$	$\forall y(R(x,y) \rightarrow \pi(C)(y))$
Atleast restriction	$\geq n R$	$\exists y_1 \dots \exists y_n (\wedge_{i \neq j} y_i \neq y_j \wedge \wedge_i R(x, y_i))$
Atmost restriction	$\leq n R$	$\forall y_1 \dots \forall y_{n+1} (\wedge_{i \neq j} y_i \neq y_j \rightarrow \vee_{i=1}^n \neg R(x, y_i))$
Concept inclusion	$C \sqsupseteq D$ or $C \equiv D$	$\forall x(\pi(C)(x) \rightarrow \pi(D)(x))$ or $\forall x(\pi(C)(x) \leftrightarrow \pi(D)(x))$
Role inclusion	$R \sqsupseteq S$ or $R \equiv S$	$\forall x \forall y(R(x,y) \rightarrow S(x,y))$ or $\forall x \forall y(R(x,y) \leftrightarrow S(x,y))$
Role transitivity	$R \in T$	$\forall x \forall y \forall z(R(x,y) \wedge R(y,z) \rightarrow R(x,z))$
Concept assertion	$C(a)$	$\pi(C)(a)$
Role assertion	$R(a,b)$	$R(a,b)$
Individual equality	$a=b$	$a=b$
Individual inequality	$a \neq b$	$a \neq b$

使用翻译 π , 一个描述逻辑公理如 $C \equiv D \sqcap \exists R.(E \sqcup \forall S.F)$ 对应于下面的一阶逻辑公式:

$$\forall x(\pi(C)(x) \leftrightarrow \pi(D)(x) \wedge \exists y(R(x,y) \wedge (\pi(E)(y) \vee \forall z(S(z,y) \wedge \pi(F)(z))))).$$

相应地, OWL DL 本体 O 对应的一阶逻辑知识库为 $\pi(\sigma(O)) = \pi(\mathcal{K}) = \pi(\mathcal{T}) \cup \pi(\mathcal{A})$, 其中,

$$\pi(\mathcal{T}) = \{ \pi(C_i \sqsubseteq D_i) | 1 \leq i \leq n_1 \} \cup \{ \pi(C_j \equiv D_j) | 1 \leq j \leq n_2 \} \cup \{ \pi(R_k \sqsubseteq S_k) | 1 \leq k \leq m_1 \} \cup \{ \pi(R_l \equiv S_l) | 1 \leq l \leq m_2 \} \cup \{ \pi(R_m \in T) | 1 \leq m \leq m_3 \},$$

$$\pi(\mathcal{A}) = \{ \pi(C_j)(a_i) | i, j \in I \} \cup \{ R_k(a_i, a_j) | i, j, k \in I \} \cup \{ a_i = b_j | i, j \in I \} \cup \{ a_k \neq b_l | k, l \in I \}, I \text{ 是下标集.}$$

例如, 对本体 $O = \{ \text{Class}(A \text{ partial } C_1 C_2), \text{DisjointClasses}(C_1, C_2, C_3), \text{individual}(a, \text{type}(C_1)) \}$,

$$\pi(\sigma(O)) = \{ \forall x(A(x) \rightarrow C_1(x) \wedge C_2(x)), \forall x(C_1(x) \rightarrow \neg(C_2(x) \vee C_3(x))), \forall x(C_2(x) \rightarrow \neg C_3(x)), C_1(a) \}.$$

2.3 推理任务

语义网上关键的推理问题大体分为两个方面:一是本体上的推理,包含在本体设计时的一致性检查、类的可满足性检查、确定类之间的包含关系、本体之间的蕴含关系检查等;二是应用所涉及的查询,例如判断一个个体是否满足一个查询表达式,或者检索满足给定查询表达式的所有个体.

本体的一致性是指本体中的类和属性公理以及所有事实的协调性,类的可满足性检查是为了发现新定义类是否有意义或者相对于已定义的本体是否存在矛盾,类之间的关系包括父类-子类关系和等价关系等.下面从一阶逻辑的观点,较为形式化地定义这些特性.

本体的一致性.本体 O 是一致的,当且仅当公式 $\pi(\sigma(O))$ 是可满足的,即至少有一个模型.

类的可满足性.类 C 相对于本体 O 是可满足的,当且仅当公式 $\pi(C) \wedge \pi(\sigma(O))$ 是可满足的.

类的包含(subsumption)关系.相对于本体 O ,类 C 包含于类 D ,即类 C 是类 D 的子类,当且仅当公式 $\pi(C) \wedge \neg \pi(D) \wedge \pi(\sigma(O))$ 是不可满足的.

本体内部分类(classification)需进行类包含关系检查,其中绝大部分是非包含关系,即公式 $\pi(C) \wedge \neg \pi(D) \wedge \pi(\sigma(O))$ 是可满足的.

本体的蕴涵关系.两个本体 O_1, O_2, O_1 蕴涵 O_2 即 $O_1 | = O_2$ 当且仅当公式 $\pi(\sigma(O_1)) \wedge \neg \pi(\sigma(O_2))$ 不可满足,其中 A 是 O_2 的任意公理或事实.

实例检查.个体 a 是本体 O 中类 C 的一个实例,即 $O | = C(a)$,当且仅当公式 $\pi(\sigma(O)) \wedge \neg \pi(C)(a)$ 不可满足.

检索类的实例.找到本体 O 中 C 的所有实例,即找到所有满足 $O | = C(a)$ 的 a .

3 推理实例

当本体翻译成一阶逻辑公式后,可以使用一阶逻辑的工具进行推理.前面已经指出,我们将结合运用定理证明器和有限模型查找器来判断公式是否可满足.

首先我们利用本体的一致性检查实例,考察了不同的模型查找器对本体推理的性能.对概念的可满足性检查,用定理证明器和模型查找器同时进行推理,比较了与描述逻辑工具、单独使用定理证明器的一阶逻辑工具的差异.最后通过两个例子说明了一阶逻辑工具对 *nominals* 的支持.我们的实验在 IBM x3755 机器(AMD Opteron 双核 8220SE CPU/30GB/Linux)上进行.

3.1 可满足性判定的并发过程

可满足性判定的并发过程包含定理证明过程和模型查找两个并发成分,分别调用 *Prover9* 和 *Paradox1-0* 实现,前者试图推导出矛盾而得出公式集不可满足,后者则试图构造有限模型从而说明公式集可满足,下面是类并发 *Pascal* 语法描述的可满足性判定过程:

```

process P1 begin 调用 Prover9; if 出现矛盾 then kill(P2); end
process P2 begin 调用 Paradox1-0; if 找到模型 then kill(P1); end
cobegin
  P1;
  P2;
Coend

```

3.2 本体一致性检查

W3C WebOnto 工作组定义了一组用于 *OWL* 的测试用例[<http://www.w3.org/TR/owl-test/XXL#I4.5-001>],其中大部分来源于其他测试集,比如 *DL* 测试集以及 *OWL* 指南中的 *Wine* 本体.用例包含了各种推理任务及预期结果,如一致性、不一致性、蕴含等.不同用例主要针对不同的语言特征,除了 *Miscellaneous* 测试组的用例(*Wine* 本体)之外,其他大部分用例包含的语言特征单一,并且规模较小.

我们考虑 *OWL DL* 本体的一致性检查用例,除去涉及 *XML* 数据类型 *Literal* 的两个用例外,对剩余的 50 个用例使用有限模型检查器 *SEM2004*,*Mace4(LADR0507)*,*Paradox1-0* 判断一致性.3 个查找器对其中的 34 个用例都能在 0.01 秒内得到结果,12 个用例在运行时间和内存使用上有较大差别.对其中的 4 个含有较大的 *cardinality* 约束或者大量不同个体的用例,3 个查找器都没有结果(时间过长或内存分配失败).总的结果好于文献[13]中只使用 *Vampire* 的情况.

在 3 个模型查找器中,*Paradox* 对所有用例的表现是最好的.由于对所有的类在一个论域上解释,并没有体现出 *SEM* 的可处理多种类逻辑的优势.但是本体在没有进行分类关系操作前无法确定每个类所属的子域,所以不能用处理多种类逻辑的方法设定子域.

3.3 概念的可满足性检查

Liebig^[14]为考察不同系统对 *OWL DL* 的推理支持,选择了 30 个 *OWL DL* 本体,基本涵盖了描述逻辑不同的语言成分,规模较小(包含的类和属性个数较少),结构比较复杂,即类和属性的包含或等价公理个数较多且描述复杂.

对 30 个本体中相关概念的可满足性检查,*Liebig* 测试了 *FaCT++1.1.3*,*Racer1.9.0*,*Pellet1.3b*,*KAON2* 和 *Hoolet(Vampire6)* 的时间效率.其中 *Pellet* 对这些用例的表现没有超出 *FaCT++* 和 *Racer*,而 *KAON2* 逊于这些描述逻辑工具,因此表 3 没有关于 *Pellet* 和 *KAON2* 的数据.基于一阶逻辑定理证明器 *Vampire* 的 *Hoolet*,主要弱点是对概念可满足的情形产生了超时和超内存.

在此,我们同时使用定理证明器 *Prover9* 和模型查找器 *Paradox1-0*,即第 3.1 节的并发判定过程,对 *Liebig* 的 30 个用例进行测试,表 3 列出了结果差别较大的用例.其中,Description 列是本体的主要语言特征,Satisfiable 列

的 Y(N)表示判断概念是可(不可)满足的.表中的“+”表示 $\leq 1s$ ，“-”表示错误结果，“—”表示超时($\leq 600s$)，“- -”表示超内存($\leq 600M$)，“[]”表示近似，“?”表示没算出.

Table 3 Test results of satisfiability checking of concepts
表 3 概念可满足性检查的测试结果

Cases	Description	FaCT++ 1.1.3	Racer 1.9.0	Hoolet (Vampire6)	Prover9 & Paradox1-0(s)	Satisfiable
1a	Cardinality merging	+	+	—	0.5	Y
1b	Cardinality merging	7	—	—	—	N
2a	Cardinality merging	+	+	—	121.3	Y
2b	Cardinality merging	120	+	—	—	N
4	Cycle/inverse blocking	+	+	—	0.00	Y
10a	Role filler merging	+	110	—	0.1	Y
10b	Role filler merging	+	110	?	0.2	Y
13	Individual merging	+	[-]	75	0.0	Y
14	nominals	+	[-]	+	0.0	Y
27	Sub-property reasoning	-	[-]	-	0.0	N
28	And-branching test	+	16	--	0.6	Y
29a	Cardinality merging	+	+	70	0.0	Y
29b	Cardinality merging	-	+	8	0.07	N
30	List-representation	28	[+]	--	1.7	Y

对含有 nominal 和个体的用例 13、用例 14,Racer 使用近似,结果错误,Prover9&Mace4 的结果较好.所有的描述逻辑推理器和 Hoolet 都不支持用例 27 的子属性推理,但 Prover9&mace4 可得到结果.这些结果表明,描述逻辑推理器对某些 OWL DL 的语言成分的推理支持不完备,如 nominal、子属性推理等.

1a,10a&b,29a&b 的结果说明,对较复杂的结构,Prover9&Paradox1-0 也可得到比描述逻辑工具更好的结果.

对于“概念是可满足的”用例,与 Hoolet 不同,Prover9& Paradox1-0 在较短的时间内对所有用例得到结论,说明同时使用定理证明器和模型查找器比单独使用定理证明器会得到更充分的结论.

由于用例 1b,2a&b 的个体含有较大的 cardinality,Prover9&Paradox1-0 的结果不如描述逻辑推理器.

3.4 Nominals

在 OWL 的枚举类和 hasValue 定义中会使用 nominal 这样命名了的个体.现有的描述逻辑推理器,如 FaCT++,Racer 等将 nominals 近似为不相交的原子概念处理,关于 nominal 的推理支持是不完备的(在第 3.3 节的测试用例中也已提到).当类描述中出现的个体以同样的名字被放在事实库中,应用涉及个体之间的关系或者由个体表示的概念之间的关系时,描述逻辑推理器得不到结果,见如下两个例子.

例 1:对个体之间关系的推理.

假设有描述逻辑语法表述的个体如下:

$$C \sqsubseteq \exists R. \{j\} \quad (1)$$

$$i:C \quad (2)$$

对于概念 C 的实例 i ,由概念公理(1)可知, R 关于 i 存在一个关联物 j .但是,当查询 i 关于 R 的关联物时,用描述逻辑推理器 Racer 或者 Pellet 得不到确定的结果(为 NIL),FaCT++不支持.

如果将该个体转化为一阶逻辑公式,

$$\forall x(C(x) \rightarrow \exists y(R(x,y) \wedge y=j))$$

$$C(i)$$

使用 answer 谓词进行查询,

$$R(i,x) \rightarrow \text{answer}(x)$$

由一阶逻辑定理证明器 Prover9 实现查询回答,即可得到 i 的关联物是 j .

例 2:概念之间关系的推理.

假设某个个体中有下面的概念定义:

$$\text{Chinese} \sqsubseteq \text{Person} \sqcap \exists \text{citizenOf}.\{\text{China}\},$$

描述逻辑推理器将 *China* 作为原子概念,则

由 $Person \sqcap \exists citizenOf.China$ 不能推得 $Person \sqcap \geq 1 citizenOf$, 即一个中国人至少有一个国籍.

若将 $Person \sqcap \exists citizenOf.China$ 转化为一阶逻辑公式:

$$\forall x(Person(x) \wedge \exists y(citizenOf(x,y) \wedge y=China)) \quad (3)$$

而 $Person \sqcap \geq 1 citizenOf$ 对应的一阶公式为

$$\forall x(Person(x) \wedge \exists y(citizenOf(x,y))) \quad (4)$$

用一阶逻辑定理证明器可以得到(3) \models (4).

4 总 结

语义网应用要求具有丰富表达能力的语言和有效的推理支持,由于以描述逻辑为基础的本体语言表达能力的不足和描述逻辑推理工具的局限性,以及一阶逻辑定理证明器对可满足问题的低效率,我们提出在语义网推理中,将一阶逻辑定理证明器和有限模型查找工具结合起来使用.这样做,一方面可以解决现有描述逻辑工具的不足,另一方面可在较大范围内弥补定理证明器对可满足的公式推理的不完备性.

一阶逻辑工具相对于现有的描述逻辑工具而言,可以支持 OWL DL 的诸如 nominals、子属性推理,以及更复杂的描述逻辑构造符,也可以支持在 OWL DL 之上扩充了任意的一阶逻辑规则的语言的推理,如 SWRL, SWRL FOL 等.由于实际应用中大部分公式具有有限模型,有限模型查找器与定理证明器的结合使用,比以往单独使用定理证明器能够得到更完善的结果.

但是,一阶逻辑工具是用于通用目的的推理器,没有针对语义网应用进行优化,如较大规模的本体.在 OWL DL 本体上,对于同样都可以处理的绝大部分问题,专门的描述工具性能较好.我们在文中使用的直接翻译的方法在 cardinality 值较大时会引入大量的变量和不等式,使得现有的一阶逻辑工具不能处理.另外,尽管模型查找工具使用了完备的方法,当搜索空间很大时,限于内存和运行时间,有些问题得不到模型.对于只有无限模型的公式,模型查找过程不终止,但在实际应用中,这样的公式本身可能意味着应用建模错误.

一阶逻辑的强表达能力适用于语义网复杂应用的描述.一阶逻辑工具尽管对多方面的推理是高度优化的,但需要针对语义网这样的新的应用场合(超出描述逻辑表达能力的大规模本体、快速的查询回答)进行优化,实现一定的预处理过程,对大量已经存在的运行参数进行合适的设置.研究一阶逻辑对语义网的推理支持,可以作为描述逻辑推理的另一种选择,也可以在描述逻辑工具的推理能力之外的更复杂的应用中使用.

References:

- [1] Lee TB, Hendler J, Lassila O. The semantic Web. Scientific American, 2001,284(5):34-43.
- [2] <http://www.w3.org/TR/>. 2004.
- [3] Zhang J. Deciding the Satisfiability of Logical Formulas—Methods, Tools and Applications. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese).
- [4] FaCT++. 2007. <http://owl.man.ac.uk/factplusplus/>
- [5] Haarslev V, Möller R. RACER system description. In: Proc. of the IJCAR 2001. LNCS 2083, 2001. 701-705.
- [6] Pellet. 2007. <http://pellet.owldl.com/>
- [7] Baader F, Calvanese D, McGuinness D, Nardi D, Patel-Schneider PF. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [8] Martin D, Burstein M, Hobbs J. OWL-S: Semantic markup for Web services. 2006. <http://www.ai.sri.com/daml/services/owl-s/1.2/overview/>
- [9] <http://www.daml.org/>. 2005.
- [10] Riazanov A. Implementing an efficient theorem prover [Ph.D. Thesis]. Manchester: University of Manchester, 2003.
- [11] Prover9 and mace4. 2007. <http://www.cs.unm.edu/~mccune/prover9/>
- [12] McCune W. Semantic guidance for saturation provers. In: Calmet J, Ida T, Wang D, eds. Proc. of the 8th Int'l Conf. on Artificial Intelligence and Symbolic Computation. LNCS 4120, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 18-24.

- [13] Tsarkov D, Riazanov A, Bechhofer S, Horrocks I. Using vampire to reason with OWL. In: McIlraith SA, Plexousakis D, van Harmelen F, eds. Proc. of the 2004 Int'l Semantic Web Conf. (ISWC 2004). LNCS 3298, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 471–485.
- [14] Liebig T. Reasoning with OWL—System support and insights. Technical Report, TR-2006-04, Ulm: Ulm University, 2006.
- [15] Zhang J, Zhang H. SEM: A system for enumerating models. In: Mellish CS, ed. Proc. of the 14th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-95). Morgan Kaufmann, 1995. 298–303.
- [16] Claessen K, Sörensson N. New techniques that improve MACE-style finite model finding. In: Baumgartner P, Fermueller C, eds. Proc. of the CADE-19 Workshop: Model Computation-Principles, Algorithms, Applications. 2003. <http://citeseer.ist.psu.edu/claessen03new.html>
- [17] Horrocks I, Patel-Schneider PF. Three theses of representation in the semantic Web. In: Hencsey G, White B, eds. Proc. of the 12th Int'l World Wide Web Conf. (WWW 2003). New York: ACM Press, 2003. 39–47.
- [18] Horrocks I, Patel-Schneider PF. Reducing OWL entailment to description logic satisfiability. In: Fensel D, *et al.*, eds. Proc. of the 2003 Int'l Semantic Web Conf. (ISWC 2003). LNCS 2870, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 17–29.
- [19] Borgida A. On the relative expressiveness of description logics and predicate logics. *Artificial Intelligence*, 1996,82(1-2):353–367.

附中文参考文献:

- [3] 张健.逻辑公式的可满足性判定——方法、工具及应用.北京:科学出版社,2000.



徐贵红(1969—),女,博士生,讲师,主要研究领域为语义网,数据库.



张健(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为自动推理,约束求解,程序分析,软件测试.