

认知描述逻辑 $ALCKR_+$: 描述逻辑的一个非单调扩展^{*})

曹 逸 徐德智 王建新

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘 要 描述逻辑是语义 Web 的逻辑基础,是形式化表达领域知识的工具。但是描述逻辑只能表达单调推理,不能处理不完全知识。认知描述逻辑因其非单调特性和良好的时间复杂度等特点在处理不完全知识方面有较好的优势。本文在认知描述逻辑 $ALCK$ 的基础上提出了新的认知描述逻辑语言 $ALCKR_+$,保留了描述逻辑原有的优点,加入传递角色属性,增强了表达能力,并通过认知查询拥有了非单调推理的能力。设计了 $ALCKR_+$ 的语法、语义以及表算法。

关键词 描述逻辑,认知描述逻辑,传递角色,认知查询

Epistemic Description Logic $ALCKR_+$: A Non-monotonic Extension of Description Logic

CAO Yi XU De-zhi WANG Jian-xin

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract Description logic is the logical foundation of semantic Web. It is the tool for formally expressing the domain knowledge. But description logic can only express the monotonic reasoning, it can not deal with the incomplete knowledge. The epistemic description logic has the advantage of dealing with the incomplete knowledge because of the non-monotonic features and the good computational complexity. The paper presents a new epistemic description logic $ALCKR_+$ based on the epistemic description logic $ALCK$, preserves the primary advantage of the description logic, adds transitive role to improve the expressivity, expresses the non-monotonic reasoning ability through the epistemic query. This paper designs the syntax, semantic and the tableau algorithm for $ALCKR_+$.

Keywords Description logic, Epistemic description logic, Transitive roles, Epistemic query

1 引言

语义 Web^[1]是对当前 Web 的扩充,它赋予 Web 上的资源以机器可理解的语义信息,使得机器可以自动对 Web 上的资源进行处理,提高人们使用 Web 的效率。语义 Web 的逻辑基础是描述逻辑^[2]。描述逻辑是一阶谓词逻辑的可判定子集,它有良好的表达能力和推理复杂度。描述逻辑适合对领域知识的概念术语进行建模。然而,描述逻辑是基于开放世界假设,只能进行单调推理,因此它只能处理客观、完全的知识,对于人们的主观和 Web 上到处存在的不完全知识就无能为力了。因此,在描述逻辑中增加非单调推理能力,可以让描述逻辑更好地满足应用需求。

Donini 等人^[3]在描述逻辑 ALC ^[4]的基础上加入了认知运算符 K ,得到了认知描述逻辑 $ALCK$,使得描述逻辑可以表达封闭世界查询以及完整性约束的能力,扩展了描述逻辑的非单调表达能力,而且推理的时间复杂度与原有描述逻辑 ALC 保持一致。Calvanese 等人^[5]提出了认知一阶谓词逻辑查询语言,将认知运算符 K 应用到没有函数符的谓词逻辑中,使一阶谓词逻辑也可以表达认知查询。

可是,认知描述逻辑 $ALCK$ 是基于基础描述逻辑 ALC 的,表达能力有限,不能很好地表达领域知识;而认知一阶谓词逻辑查询语言表达能力过强,不能保证它的可判定性,因此有必要对它们进行折衷。传递角色属性^[6]可以表达部分-整体关系以及用有限的方式来表达无限的情况,比如祖先-后代关系和朋友关系。因此,在 $ALCK$ 的基础上加入传递属性,可以很好地增强描述领域知识的能力。

本文在认知描述逻辑 $ALCK$ 的基础上,加入了传递角色属性,得到了扩展的认知描述逻辑 $ALCKR_+$,保留了描述逻辑原有的优点并增强了表达能力,同时拥有了非单调推理的能力。本文给出了认知描述逻辑 $ALCKR_+$ 的语法和语义以及表算法。

2 认知描述逻辑 $ALCKR_+$

2.1 语法

描述逻辑使用概念和角色表达领域知识,将概念解释成领域知识中个体的集合,将角色解释成个体间关系的集合。复杂概念和角色通过概念和角色构子组合原子概念和角色而成。

描述逻辑的知识库由 Tbox (Terminology box) 和 Abox (Assertion box) 组成,其中 Tbox 为术语断言的有限集合,表示领域知识的定义,表达形式有 $C \subseteq D, C \equiv D, C, D$ 表示概念名; Abox 为实例断言的有限集合,表示领域知识的具体实例,表达形式有 $C(a), P(a, b), C$ 为概念名, P 为角色名, a, b 为实例名。

定义 1 假设有两个不相交的字符集合 N_C 和 N_R , N_C 表示概念的集合,而 N_R 表示角色的集合。其中, N_C 集合中的 A 表示原子概念, C, D 表示复杂概念; N_R 又分为两个不相交的集合 N_P 和 N_{R+} , N_P 是原子角色的集合,而 N_{R+} 是传递角色的集合, P 表示原子角色, R_+ 表示传递角色, R 表示原子角色或传递角色。 $ALCKR_+$ 的语法定义如下:

$C, D \rightarrow A \mid$ (原子概念)

$T \mid$ (顶部概念)

^{*}) 本课题获湖南省自然科学基金(06JJ50142)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0683)资助。曹 逸 硕士研究生,研究方向为语义 Web、描述逻辑;徐德智 教授,研究方向为 Web 计算、语义 Web;王建新 教授,博导,研究方向为网络计算。

$\perp$ | (底部概念)
 $C \cap D$ | (概念的交)
 $C \cup D$ | (概念的并)
 $\neg C$ | (概念的非)
 $\exists R.C$ | (角色的存在量化)
 $\forall R.C$ | (角色的全称量化)
 KC (认知概念)
 $R \rightarrow P$ | (原子角色)
 R_+ | (传递角色)
 KP (认知角色)

其中, $K\beta$ 表示知道概念 β 或角色 β 为真。

2.2 语义

使用认知解释 $E = (I, W)$ 对认知描述逻辑语言 $ALCKR_+$ 的语义进行解释。其中, 解释 $I = (\Delta^I, \cdot^I)$, Δ 为 I 的领域(domain), 由无限可数的个体组成的集合; $\cdot$ 为 I 的解释函数, 将原子概念映射成 Δ^I 的子集, 将角色映射成 $\Delta^I \times \Delta^I$ 的子集; W 为 I 的集合。通过认知解释 E 得到 $ALCKR_+$ 的语义解释如下:

$$\begin{aligned}
 T^E &= \Delta \\
 \perp^E &= \emptyset \\
 A^E &= A^I \subseteq \Delta^I \\
 P^E &= P^I \subseteq \Delta^I \times \Delta^I \\
 R_+^E &= R_+^I = \bigcup_{n \geq 1} (R^I)^n \\
 (C \cap D)^E &= C^E \cap D^E \\
 (C \cup D)^E &= C^E \cup D^E \\
 \neg C^E &= \Delta \setminus C^E \\
 \exists P.C &= \{x \in \Delta \mid \exists y, (x, y) \in R^E \wedge y \in C^E\} \\
 \forall P.C &= \{x \in \Delta \mid \forall y, (x, y) \in R^E \rightarrow y \in C^E\} \\
 \exists R_+.C &= \{x \in \Delta \mid \exists y, (x, y) \in R^E \wedge y \in C^E\} \\
 \forall R_+.C &= \{x \in \Delta \mid \forall y, (x, y) \in R^E \rightarrow (y \in C^E \wedge (\forall R_+.C) \in C^E)\} \\
 KC &= \bigcap_{I \in W} (C^I, W) \\
 KP &= \bigcap_{I \in W} (P^I, W)
 \end{aligned}$$

其中, R_+^E 表示将传递角色解释为角色 R 的闭包; KC 表示解释集合 W 中每个解释 I 对概念 C 解释的个体集合的交集。直观地说, KC 表示的是在知识库中知道是概念 C 实例的集合; KP 的解释与 KC 类似。

在对知识库进行解释前, 假设认知解释 $E = (I, W)$ 中的每个解释 I 都有相同的领域 Δ , 也就是固定领域假设(constant domain assumption); 假设在不同的解释 I 中, 单射函数 α 对实例 a 的映射相同, 也就是固定赋值假设(rigid designator assumption)。

一个认知解释 $E = (I, W)$ 为概念 C 的认知模型, 当且仅当 C^E 为非空。如果概念 C 有认知模型, 则称 C 是可满足的, 反之, 则称 C 是不可满足的; 认知解释 E 为包含断言 $C \sqsubseteq D$ 的认知模型, 当且仅当对于每个认知解释 E , $C^E \subseteq D^E$ 。

令 O 为实例 $a, b, \dots$ 的集合。 α 为将 O 映射到 Δ 的单射函数。这样, 就可以对 $Abox$ 中的实例断言进行解释。实例断言 $C(a)$ 在认知解释 E 下是可满足的, 当且仅当 $\alpha(a) \in C^E$; 实例断言 $P(a, b)$ 在认知解释 E 下是可满足的, 当且仅当 $(\alpha(a), \alpha(b)) \in P^E$ 。

一个知识库 $KB = \langle Tbox, Abox \rangle$, 包括有限的术语断言和实例断言。认知解释 $E = (I, W)$ 为知识库 KB 的认知模

型, 当且仅当 E 满足 KB 中每条断言, 而且 W 为满足 KB 中每条断言的解释 I 的最大集合。如果 KB 有认知模型, 则称 KB 是可满足的; 反之, 则是不可满足的。认知查询是指有认知概念或认知角色的断言查询, 回答认知查询是检测知识库 KB 是否逻辑蕴涵断言 σ , 即断言 σ 是否在 KB 的每个认知模型中都成立, 记为 $KB \models \sigma$ 。

3 $ALCKR_+$ 的推理

描述逻辑的推理问题包括概念的可满足问题、概念间的包含问题以及实例检测问题, 这三个推理问题都可以转换为知识库的一致性问题^[7]。通过第2节可以知道, 回答认知查询实际上是检测知识库 KB 是否逻辑蕴涵断言 $C(a)$, 即 $KB \models C(a)$, 这个问题可以转换为检测知识库一致性问题, 即检测 $KB \cup \{\neg C(a)\}$ 是不可满足的。描述逻辑是用表算法解决知识库一致性问题的, 因为认知描述逻辑和描述逻辑的语义可以很好地兼容, 所以也可以用表算法来处理认知查询问题。表算法是对由变量、简单概念和角色组成的约束进行操作。

令 V 为变量 $x, y, \dots$ 的集合。令 $CS = O \cup V$, 成员为 w, z 的集合, 其中集合 O 的成员为个体常量 a, b 。一个约束的句法结构为以下两种形式之一: $w; C, wRz$ 。其中 C 为 $ALCKR_+$ 的概念, R 为 $ALCKR_+$ 的角色。约束系统 S 是以上形式的有穷集合。

为了给约束赋予意义, 需要对赋值函数 α 的定义加以扩展。令 α 为将 CS 映射到 Δ 的单射函数。当认知解释 $E = (I, W)$, α 为赋值函数。称 (E, α) 满足约束 $w; C$, 当且仅当 $\alpha(w) \in C^E$; 称 (E, α) 满足约束 wRz , 当且仅当 $(\alpha(w), \alpha(z)) \in R^E$ 。如果存在认知解释 E 和赋值函数 α 使约束 C 为非空, 则称约束 C 是可满足的; 如果认知解释 E 和赋值函数 α 满足约束系统 S 的每个约束, 则称约束系统 S 是可满足的。

称一个 $ALCKR_+$ 的概念为简单的, 当且仅当概念为原子概念 A 或逻辑非出现在概念前的形式为 $\neg A$ 或 $\neg KC$, 并且有 $\neg(C \cup D) = \neg C \cap \neg D$, $\neg(\exists R.C) = \forall R. \neg C$, 其中 C, D 为简单概念, R 为角色。每一个 $ALCKR_+$ 的概念都可以在多项式时间内转换为等价的简单概念, 本文后面部分的概念都为简单概念。

令描述逻辑知识库为 KB , 相应的约束系统 S 是将 KB 中的断言 $C(a)$ 改为约束 $a; C$, 将断言 $R(a, b)$ 改为约束 aRb 而得到。通过下面的定理, 可以将知识库的认知查询问题转换为约束系统的一致性问题。

定理 1 描述逻辑知识库为 KB , C 为 $ALCKR_+$ 概念, a 为个体名, S 为将 KB 中的断言改为相应约束形式的约束系统。 $KB \models C(a)$ 当且仅当 $S \cup \{a; \neg C\}$ 是不可满足的。

为了解决约束系统的一致性问题, 现给出相应的表算法规则。

$\cap$ 规则: 如果 $\{w; C_1 \cap C_2\} \in S$, 并且 $\{w; C_1, w; C_2\}$ 都不属于 S , 那么 $S \leftarrow \{w; C_1, w; C_2\} \cup S$;

$\cup$ 规则: 如果 $\{w; C_1 \cup C_2\} \in S$, 并且 $\{w; C_1, w; C_2\}$ 都不属于 S , 那么 $S \leftarrow \{w; D\} \cup S$, 其中, $D = C_1$ 或 $D = C_2$;

$\exists$ 规则: 如果 $\{w; \exists R.C\} \in S$, 并且没有 z 使得 $\{wRz, z; C\} \in S$, 那么 $S \leftarrow \{wRz, z; C\} \cup S$, 其中, R 为角色;

$\forall$ 规则: 如果 $\{w; \forall P.C\} \in S$, $\{wPz\} \in S$, $\{z; C\} \notin S$, 那么 $S \leftarrow \{z; C\} \cup S$, 其中, P 为原子角色;

$\forall_+$ 规则: 如果 $\{w; \forall R_+.C\} \in S$, $\{wR_+z\} \in S$, $\{z; C\} \notin S$, 那么 $S \leftarrow \{z; C, z; \forall R_+.C\} \cup S$, 如果使用 $\forall_+$ 规则后的约

束系统 S 是其祖先的子集,那么算法停止。其中, R_+ 为传递角色;

K 规则:如果 $\{x; KC, x; \neg KC, xKPw, wKPx\} \in S$, 并且 $a \in \Delta$, 那么 $S \leftarrow S[x/a]$, 其中 $[x/a]$ 表示用个体 a 代替约束系统中的变量 x 。

$\sqcap$ 规则、 $\exists$ 规则、 $\forall$ 规则、 $\forall_+$ 规则称为确定规则, 因为使用这些规则得到的后继节点是确定的; 而 $\sqcup$ 规则、 K 规则称为不确定规则, 因为使用这些规则可以得到多个分支节点。

在使用表算法进行推理时, 从约束系统 $S = \{w; C\}$ 开始, 逐步应用表算法规则进行扩展, 直到推出矛盾或从约束系统中得到一个解释能让概念 C 为非空为止。为了表示约束系统中的矛盾, 引入了冲突的概念, 它的定义如下:

定义 2 称约束系统 S 包含冲突, 当且仅当约束系统至少有以下几种形式之一:

- (1) S 包含约束形式 $w; \perp$;
 - (2) S 包含约束形式 $w; A, w; \neg A$;
 - (3) S 包含约束形式 wPz, wR_+z , 其中 P 为原子角色, R_+ 为传递角色;
 - (4) S 包含约束形式 $a; KC$, 且 $S \cup \{a; \neg C\}$ 是没有冲突的;
 - (5) S 包含约束形式 $a; \neg KC$, 且 $S \cup \{a; \neg C\}$ 是有冲突的;
 - (6) S 包含约束形式 $aKPb$, 且 $\{aPb\} \notin S$, P 为原子角色;
- 因为 $\sqcup$ 规则和 K 规则会产生多个分支, 所以要所有的分支都有冲突才能称约束系统是冲突的。

为了让约束系统是可满足的, 有如下定理:

定理 2 描述逻辑知识库 KB 以及相应的约束系统 S 。 S 是可满足的, 当且仅当 S 没有包含冲突。

为了解释认知查询的处理过程, 有下面的例子说明:

例 1 假设现有本体知识库为 $KB = \{\text{FRIEND}(\text{susan}, \text{john}), \text{male}(\text{peter}), \text{FRIEND}(\text{john}, \text{peter}), \exists \text{FRIEND. male}(\text{susan})\}$, 令角色 FRIEND 为传递角色。

对于查询 $Q = \exists \text{FRIEND. Kmale}(\text{susan})$, 为了检测 Q 的有效性, 将之转换为检测 $KB \cup \{\neg Q\}$ 的一致性问题。将 KB 转换为约束形式以及将 Q 转换为简单概念形式后, 可以得到:

$S = \{\text{susan FRIEND john}, \text{john FRIEND peter}, \text{peter; male, susan}; \exists \text{FRIEND. male, susan}; \forall \text{FRIEND. } \neg \text{Kmale}\}$ 。

根据相应的表算法规则以及传递角色语义, 可以得到相应的约束系统为

$S1 = \{\text{susan FRIEND john}, \text{john FRIEND peter}, \text{susan FRIEND peter}, \text{peter; male, susan FRIEND } x, x; \text{male, } x; \forall \text{FRIEND. } \neg \text{Kmale, } x; \neg \text{Kmale}\}$

对于所得的约束形式 $x; \neg \text{Kmale}, x; \forall \text{FRIEND. } \neg \text{Kmale}$, 要用实例来代替变量 x 。知识库中的实例有 $\text{susan}, \text{john}, \text{peter}$, 满足 $\text{susan FRIEND } x$ 约束的只有 $\text{john}, \text{peter}$ 。将 john 代入进去后, 得到 $\{\text{susan FRIEND john}, \text{john; male, john}; \neg \text{male john}; \forall \text{FRIEND. } \neg \text{male}\}$, 可以得到知识库是不一致的; 将 peter 代入进去后, 得到 $\{\text{susan FRIEND peter}, \text{peter; male, peter}; \forall \text{FRIEND. } \neg \text{male, peter}; \neg \text{male}\}$, 知识库也是不一致的; 还要用属于领域 Δ 但不是知识库中的实例进行代换, 即令 $a = \Delta \setminus O$, 代入后可得知识库仍是不一致的。因此查询 Q 是有效的。而知识库中只有约束 $\text{susan FRIEND peter. peter; male}$, 因此只有 peter 满足示例中的查询要求, 得

到 $Q = \exists \text{FRIEND. Kmale}(\text{susan})$ 结果为 peter 。

4 应用举例

语义 Web 服务^[8]是随着语义 Web 的发展而发展起来的。它使用语义信息对服务进行标注, 方便机器自动查找和整合服务, 达到自动处理商业交易过程的目的。语义 Web 服务使用本体描述服务信息, 用描述逻辑来表达查询。描述逻辑只能表达单调推理, 不能处理不完全知识, 认知描述逻辑可以很好地解决这一问题。

我们通过人们在旅行时查询旅行社提供的服务来进行说明。假设用户和旅行社使用同一个本体进行服务描述。

例 2 假设现有本体知识库 K 为 $B = \{\text{HunanCity} \sqsubseteq \text{ChinaCity}, \text{Journey} \sqsubseteq \exists \text{from. T}\}$, 用户的查询 $Q = \text{Journey} \sqcap \exists \text{from. HunanCity}$, 旅行社 A 提供的服务描述为 $A = \text{Journey} \sqcap \exists \text{from. ChinaCity}$, 旅行社 B 提供的服务描述为 $B = \text{Journey} \sqcap \exists \text{from. USCity}$ 。

将查询 Q 与服务 A 进行匹配, 因为术语断言 $\text{HunanCity} \sqsubseteq \text{ChinaCity}$, 可知返回结果为 YES, 但是用户仍然没有得到具体的信息, 如旅行社 A 到底提供了从中国哪个城市起飞的服务; 将查询 Q 与服务 B 进行匹配, 因为开放世界假设并且没有 HunanCity 和 USCity 不相交的信息, 因此返回结果也为 YES, 可是很明显不符合用户查询的需求。

现在将用户的查询用认知描述逻辑进行表达, 即用用户查询为 $Q' = \text{Journey} \sqcap \exists \text{from. KHunanCity}$ 。此时将认知查询 Q' 与服务 A 进行匹配, 因为 KB 中并没有实例满足查询要求, 所以结果为 NO; 将 Q' 与服务 B 进行匹配, 因为 KB 中没有说明 HunanCity 就是 USCity , 所以结果也为 NO。从例子可以看出, 认知描述逻辑可以很好地处理服务描述中的不完全信息, 可以更好地满足用户查询的需求。

结束语 本文在认知描述逻辑 ALCK 的基础上加入传递角色属性, 得到了扩展认知描述逻辑 ALCKR_+ 。保留了描述逻辑原有的优点, 加入传递角色属性提高了描述领域知识的表达能力, 同时通过认知查询拥有了非单调推理的能力。通过传递角色属性可以表达部分-整体关系以及角色闭包能力, 通过在原子角色和概念前加入认知运算符 K 来表达认知查询。文中给出了 ALCKR_+ 的语法和语义以及用于检测认知查询的表算法。因为文中对 ALCKR_+ 的语法进行了限制, 不允许 K 与传递角色属性直接交互使用。因此下一步的工作是研究 K 与传递角色属性的交互情况并设计新的表算法。

参考文献

- [1] Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The Semantic Web. Scientific American, 2001, 284(5): 34-43
- [2] 石莲, 孙吉贵. 描述逻辑综述. 计算机科学, 2006, 33(1): 194-197
- [3] Donini F M, et al. An epistemic operator for description logics. Artificial Intelligence, 1998, 100(1/2): 225-274
- [4] Schau M S, Smolka G. Attributive concept descriptions with complements. Artificial Intelligence, 1991, 48(1): 1-26
- [5] Calvanese D, et al. Epistemic First-Order Queries over Description Logic Knowledge Bases // Proc. of the 2006 International Workshop on Description Logic (DL 2006). Lake District, United Kingdom, May 2006: 51-61
- [6] Sattler U. A Concept Language Extended with Different Kinds of Transitive Roles // Proc. of the 20th Annual German Conference on Artificial Intelligence. Dresden, Germany, September 1996: 333-345
- [7] Donini F M, et al. Deduction in Concept Languages: From Subsumption to Instance Checking. Journal of Logic and Computation, 1994, 4(4): 423-452
- [8] McIlraith S A, Son T C, Zeng Honglei. Semantic Web Services. IEEE Intelligent Systems, 2001, 16(2): 46-53