

基于描述逻辑的模糊 ER 模型*

蒋运承^{1,2+}, 汤庸¹, 王驹²

¹(中山大学 计算机科学系, 广东 广州 510275)

²(广西师范大学 数学与计算机科学学院, 广西 桂林 541004)

Fuzzy ER Modeling with Description Logics

JIANG Yun-Cheng^{1,2+}, TANG Yong¹, WANG Ju²

¹(Department of Computer Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

²(College of Mathematics and Computer Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-773-5853310, Fax: +86-773-5812383, E-mail: jiangyc@ics.ict.ac.cn, http://www.sysu.edu.cn

Jiang YC, Tang Y, Wang J. Fuzzy ER modeling with description logics. *Journal of Software*, 2006,17(1):20-30.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/20.htm>

Abstract: The relationship of description logic ALNUI and ER model is analyzed, especially how to translate ER model into ALNUI knowledge bases for reducing the reasoning on ER model to model reasoning on ALNUI knowledge bases is investigated, and the problem of fuzzy ER modeling with description logic is further studied. Aiming at the characteristics and requirement of fuzzy ER model and based on the description logic ALNUI, the description logic ALNUI is generalized through fuzzy logic. And a kind of new description logic, i.e., fuzzy description logic FALNUI (fuzzy ALNUI), is presented. The fuzzy ER modeling with description logic FALNUI is studied to translate fuzzy ER model into FALNUI knowledge bases. The reasoning problem of satisfiability, redundancy, and subsumption relation of fuzzy ER model may reason automatically through reasoning mechanism of fuzzy description logic FALNUI, and the correctness of these reasoning problems is proved.

Key words: fuzzy database; fuzzy ER model; description logic; fuzzy description logic

摘要: 分析了描述逻辑 ALNUI 与 ER 模型的关系,特别是如何将 ER 模型转化为 ALNUI 的知识库,从而利用 ALNUI 的推理机制对 ER 模型进行自动推理的有效性,在此基础上,进一步研究了基于描述逻辑的模糊 ER 模型.针对模糊 ER 模型的特点和需求,在描述逻辑 ALNUI 的基础上,对描述逻辑 ALNUI 进行了模糊化推广,提出了一种新的描述逻辑,即模糊描述逻辑 FALNUI.研究了基于 FALNUI 的模糊 ER 模型,即研究了如何将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库,并利用 FALNUI 的推理机制研究了模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等自动推理问题,证明了这些推理问题的正确性.

关键词: 模糊数据库;模糊 ER 模型;描述逻辑;模糊描述逻辑

中图法分类号: TP301 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60373081, 60473005, 60573010 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2003AA115220 (国家高技术研究发展计划(863)); the Natural Science Key Foundation of Guangdong Province of China under Grant No.04105503 (广东省自然科学基金)

Received 2005-06-22; Accepted 2005-08-15

描述逻辑(description logic,简称 DL)是基于对象的知识表示的形式化工具,它吸收了 KL-ONE 的主要思想,是一阶谓词逻辑的一个可判定子集^[1,2].它与一阶谓词逻辑不同的是,描述逻辑系统能够提供可判定的推理服务.描述逻辑的重要特征是,它具有很强的表达能力和可判定性,在众多知识表示的形式化方法中,描述逻辑 10 多年来受到人们的特别关注,主要原因在于:它有清晰的模型-理论语义;对概念性知识的处理,特别是对概念分层的处理非常有效;最为重要的是,它提供了很有效的推理服务.

目前,国内外许多学者对描述逻辑进行了深入研究,特别是描述逻辑的应用研究.例如:针对多语种文本自动生成领域,Liebig 等人使用描述逻辑 LOOM 来刻画动作间的层次关系,把动作以概念的形式加以定义,取得了很好的效果^[3];Ian Horrocks 等人以描述逻辑理论为依据,研究了语义 Web 本体语言的形式语义,提出了与语义 Web 本体语言 DAML+OIL 或 OWL DL 等价的描述逻辑 SHOIQ(D)或 SHOIN⁺(D)^[4,5];Franz Baader 等人研究了语义 Web 的本体语言问题,并明确指出描述逻辑可以作为语义 Web 的本体语言^[6];史忠植等人利用描述逻辑来描述主体服务,提出了基于描述逻辑的主体服务匹配机制^[7];Tommaso Di Noia 等人针对电子市场的匹配问题,利用描述逻辑理论研究了服务的 Abductive 匹配,即利用描述逻辑来描述服务,然后将服务匹配问题转化为描述逻辑的 Abduction 问题^[8]等.

尤其值得一提的是,针对数据库的模式设计问题,Alex Borgida 和 Diego Calvanese 等人分别提出了描述逻辑 DLR 和 ALNUI,研究了如何将数据库的 ER(entity relationship)模型转化为描述逻辑 DLR 和 ALNUI 的知识库,从而可以利用描述逻辑 DLR 和 ALNUI 的推理机制,对 ER 模型的相关问题进行自动推理(这也是为什么要用描述逻辑来描述 ER 模型的主要原因),包括实体的可满足性、关系的可满足性、ER 模型的冗余性等^[9-11].但描述逻辑 DLR 和 ALNUI 只能表示和推理精确知识,不能表示和推理模糊、不精确知识,即不能对模糊 ER 模型进行表示和推理.另外,针对模糊知识处理,Umberto Straccia 结合模糊逻辑对传统描述逻辑 ALC 进行了扩充,提出了一种模糊描述逻辑 FALC,从而使得描述逻辑能够表示和推理模糊或不精确知识,但 FALC 的表达能力非常有限,不能对模糊 ER 模型进行表示和推理^[12,13].

基于上述原因,本文针对模糊数据库^[14]的特点,特别是模糊 ER 模型的需求,在描述逻辑 ALNUI^[10,11]的基础上提出了一种模糊描述逻辑 FALNUI,给出了基于 FALNUI 的模糊 ER 模型,即将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库,并利用 FALNUI 的推理机制研究了模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等自动推理问题.

1 模糊 ER 模型

1.1 ER模型

ER 模型^[15]是一种数据库设计工具,它把客观世界抽象为实体和实体间的联系.每个实体由一个名称标识,并具有自己的各种属性,这些属性的取值有一个预定义的论域.实体间可以有各种联系把各种实体联结成一个系统.每个联系也有一个标识,表示联系的语义.实体间可以有继承(ISA)关系,表示包含关系.实体与联系之间的连接称为 ER 角色,并具有一个约束值或约束范围.下面给出 ER 模型的形式定义^[10].

定义 1. 给定两个有限集合 X 和 Y ,其中假设 X 有 k 个元素,一个从 X 到 Y 的函数 T 如果满足: $\forall x_i \in X$,有 $T(x_i)=y_i \in Y$,则称 T 为 Y 上的 X 标记的元组(X -labeled tuple over Y),并记为 $T(X,Y)$ 或者 $[x_1:y_1, \dots, x_k:y_k]$.

例如,假设 $X=\{x_1, x_2, x_3\}$, $Y=\{y_1, y_2, y_3, y_4\}$,则函数 T (其中 $T(x_1)=y_1, T(x_2)=y_3, T(x_3)=y_4$) 是 Y 上的 X 标记的元组.

定义 2. ER 模型是一个五元组 $S=(L_S, \leq_S, att_S, rel_S, card_S)$,其中:

(1) $L_S=E_S \cup A_S \cup U_S \cup R_S \cup D_S$,其中 E_S 是实体符号的集合, A_S 是属性符号的集合, U_S 是角色符号的集合, R_S 是联系符号的集合, D_S 是论域符号的集合,并且每个论域符号 D 都有一个预定义的基本论域 D^B .

(2) $\leq_S \subseteq E_S \times E_S$ 是 E_S 上的一个二元关系.

(3) $att_S: E_S \rightarrow T(A_S, D_S)$ 是从 E_S 到 $T(A_S, D_S)$ 的一个函数,即对 E_S 中任意实体 a , att_S 将实体 a 映射为 D_S 上的 A_S 标记的元组.

(4) $rel_S: R_S \rightarrow T(U_S, E_S)$ 是从 R_S 到 $T(U_S, E_S)$ 的一个函数,即对 R_S 中任意联系 r , rel_S 将联系 r 映射为 E_S 上的 U_S 标记的元组,并满足

- 每个角色只能属于一个联系,即对任意 $r, r' \in R_S, r \neq r'$, 如果 $rel_S(r)=[U_1:E_1, \dots, U_k:E_k], rel_S(r')=[U_1':E_1', \dots, U_k':E_k']$, 则 $\{U_1, \dots, U_k\} \cap \{U_1', \dots, U_k'\} = \emptyset$.
- 对每个角色 $u \in U_S$, 存在一个联系 r 和一个实体 a , 使得 $rel_S(r)=[\dots, u:a, \dots]$ 成立.

(5) $card_S: E_S \times R_S \times U_S \rightarrow N_0 \times (N_0 \cup \{\infty\})$ 是从 $E_S \times R_S \times U_S$ 到 $N_0 \times (N_0 \cup \{\infty\})$ 的一个函数, 并满足: 给定联系 $r \in R_S$, 并且 $rel_S(r)=[U_1:E_1, \dots, U_k:E_k]$, 如果 $card_S(E, R, U)$ 有定义, 仅当 $U=U_i, i \in \{1, \dots, k\}$ 和 $E \leq_S^* E_i$ 成立, 其中 \leq_S^* 表示 \leq_S 的自反传递闭包. $card_S(E, R, U)$ 的第 1 个成分记为 $cmin_S(E, R, U)$, 第 2 个成分记为 $cmax_S(E, R, U)$. 如果没有说明, 则 $cmin_S(E, R, U)=0, cmax_S(E, R, U)=\infty$.

有关 ER 模型的详细情况见文献[10,15], 下面介绍模糊 ER 模型.

1.2 模糊ER模型

模糊 ER 模型是传统 ER 模型的模糊化推广, 包括实体的模糊化、关系的模糊化、角色的模糊化和属性的模糊化, 是模糊数据库的一种设计工具. 下面是模糊 ER 模型的形式化定义.

定义 3. 模糊 ER 模型是一个五元组 $FS=(L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$, 其中:

(1) $L_{FS}=E_{FS} \cup A_{FS} \cup U_{FS} \cup R_{FS} \cup D_{FS}$, 其中: E_{FS} 是模糊实体符号的集合; A_{FS} 是模糊属性符号的集合; U_{FS} 是模糊角色符号的集合; R_{FS} 是模糊联系符号的集合; D_{FS} 是所有模糊集符号的集合. 并且, 每个模糊集符号 D 都有一个预定义的基本论域 D^{FB} .

(2) $\leq_{FS} \subseteq ER_{FS} \times ER_{FS}$ 是 ER_{FS} 上的一个模糊二元关系, 其中 $ER_{FS}=E_{FS} \cup R_{FS}$, 即 \leq_{FS} 是 E_{FS} 或 R_{FS} 上的一个模糊二元关系.

(3) $att_{FS}: E_{FS} \rightarrow T(A_{FS}, D_{FS})$ 是从 E_{FS} 到 $T(A_{FS}, D_{FS})$ 的一个模糊函数, 即对 E_{FS} 中任意模糊实体 Fa , att_{FS} 将模糊实体 Fa 映射为 D_{FS} 上的 A_{FS} 标记的模糊元组.

(4) $rel_{FS}: R_{FS} \rightarrow T(U_{FS}, E_{FS})$ 是从 R_{FS} 到 $T(U_{FS}, E_{FS})$ 的一个模糊函数, 即对 R_{FS} 中任意模糊联系 Fr , rel_{FS} 将模糊联系 Fr 映射为 E_{FS} 上的 U_{FS} 标记的模糊元组, 并满足

- 每个模糊角色只能属于一个模糊联系, 即对任意 $Fr, Fr' \in R_{FS}, Fr \neq Fr'$, 如果 $rel_{FS}(Fr)=[FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k], rel_{FS}(Fr')=[FU_1':FE_1', \dots, FU_k':FE_k']$, 则 $\{FU_1, \dots, FU_k\} \cap \{FU_1', \dots, FU_k'\} = \emptyset$.
- 对每个模糊角色 $Fu \in U_{FS}$, 存在一个模糊联系 Fr 和一个模糊实体 Fa , 使得 $rel_{FS}(Fr)=[\dots, Fu:Fa, \dots]$ 成立.

(5) $card_{FS}: E_{FS} \times R_{FS} \times U_{FS} \rightarrow N_0 \times (N_0 \cup \{\infty\})$ 是从 $E_{FS} \times R_{FS} \times U_{FS}$ 到 $N_0 \times (N_0 \cup \{\infty\})$ 的一个函数, 并满足: 给定联系 $Fr \in R_{FS}$, 并且 $rel_{FS}(Fr)=[FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k]$, 如果 $card_{FS}(FE, FR, FU)$ 有定义, 仅当 $FU=FU_i, i \in \{1, \dots, k\}$ 和 $FE \leq_{FS}^* FE_i$ 成立, 其中 \leq_{FS}^* 表示 \leq_{FS} 的模糊自反传递闭包. $card_{FS}(FE, FR, FU)$ 的第 1 个成分记为 $cmin_{FS}(FE, FR, FU)$, 第 2 个成分记为 $cmax_{FS}(FE, FR, FU)$. 如果没有说明, 则 $cmin_{FS}(FE, FR, FU)=0, cmax_{FS}(FE, FR, FU)=\infty$.

下面给出模糊 ER 模型的语义. 与 ER 模型的语义^[10]类似, 模糊 ER 模型的语义可以用与模糊 ER 模型所表示的信息结构相一致的模糊数据库状态(FDBS)来刻画.

定义 4. 与模糊 ER 模型 $FS=(L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$ 对应的模糊数据库状态 $FDBS=(\Delta^{FB}, \bullet^{FI})$, 其中 Δ^{FB} 是所有模糊集的集合, 模糊函数 \bullet^{FI} 为:

- 对任意模糊集符号 $FD \in D_{FS}$, 函数 \bullet^{FI} 将 FD 映射为一个基本论域, 即 $FD^{FI} \in D^{FB}$.
- 对任意模糊实体 $FE \in E_{FS}$, 函数 \bullet^{FI} 将 FE 映射为 Δ^{FB} 的一个子集, 即 $FE^{FI} \subseteq \Delta^{FB}$.
- 对任意模糊属性 $FA \in A_{FS}$, 函数 \bullet^{FI} 将 FA 映射为 $\Delta^{FB} \times \bigcup_{FD \in D_{FS}} FD^{FB}$ 的一个子集, 即 $FA^{FI} \subseteq \Delta^{FB} \times \bigcup_{FD \in D_{FS}} FD^{FB}$.
- 对任意模糊联系 $FR \in R_{FS}$, 函数 \bullet^{FI} 将 FR 映射为 Δ^{FB} 上的 U_{FS} 标记的模糊元组的一个集合, 即 $FR^{FI} \subseteq T(U_{FS}, \Delta^{FB})$.

$FE^{FI}, FA^{FI}, FR^{FI}$ 中的元素分别称为 FE, FA, FR 的实例.

如果一个模糊数据库状态 FDBS 满足模糊 ER 模型中的所有约束, 则该 FDBS 是可以接受的. 因而有下面的

定义:

定义 5. 给定模糊 ER 模型 $FS=(L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$, 相对于 FS , 一个模糊数据库状态 $FDBS$ 是合法的, 当且仅当该 $FDBS$ 满足下列条件:

- 对任意模糊实体 $FE_1, FE_2 \in E_{FS}$, 如果 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$, 则 $FE_1^{FI} \subseteq FE_2^{FI}$.
- 对任意模糊联系 $FR_1, FR_2 \in R_{FS}$, 如果 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$, 则 $FR_1^{FI} \subseteq FR_2^{FI}$, 即令 $FR_1^{FI} = T_1(U_{FS}, \Delta^{FB}) = [x_1:y_1, \dots, x_m:y_m]$, $FR_2^{FI} = T_2(U_{FS}, \Delta^{FB}) = [x_1:y_1, \dots, x_n:y_n]$, 则 $\{x_1:y_1, \dots, x_m:y_m\} \subseteq \{x_1:y_1, \dots, x_n:y_n\}$.
- 对任意模糊实体 $FE \in E_{FS}$, 如果 $att_{FS}(FE) = [FA_1:FD_1, \dots, FA_h:FD_h]$, 则对实例 $e \in FE^{FI}$, $i \in \{1, \dots, h\}$, 有: (1) 只存在一个元素 $a_i \in FA_i^{FI}$, a_i 的第 1 个成分是 e ; (2) a_i 的第 2 个成分是 D_i^{FB} 的一个元素.
- 对任意模糊联系 $FR \in R_{FS}$, 如果 $rel_{FS}(FR) = [FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k]$, 则 FR 的所有实例的形式为 $[FU_1:Fe_1, \dots, FU_k:Fe_k]$, 其中 $Fe_i \in FE_i^{FI}$, $i \in \{1, \dots, k\}$.
- 对任意模糊联系 $FR \in R_{FS}$, 如果 $rel_{FS}(FR) = [FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k]$, 对任意 $i \in \{1, \dots, k\}$ 和 $FE \in E_{FS}$, 有 $FE \leq_{FS} FE_i$ 成立, 则对 FE 的任意实例 Fe , 有

$$cmin_{FS}(FE, FR, FU_i) \leq \#\{Fr \in FR^{FI} | Fr[FU_i] = Fe\} \leq cmax_{FS}(FE, FR, FU_i).$$

由上述分析可以看出, 模糊 ER 模型的语义是 ER 模型的语义^[10]的推广.

2 模糊描述逻辑

描述逻辑 ALNUI 是 ER 模型的形式化工具, 即 ER 模型可以转化为描述逻辑 ALNUI 的知识库, 从而可以利用描述逻辑 ALNUI 的推理机制对 ER 模型进行自动推理^[10]. 为了对模糊 ER 模型进行有效的自动推理, 有必要对 ALNUI 进行模糊化推广, 即需要一种新的描述逻辑, 也就是模糊描述逻辑 FALNUI (fuzzy ALNUI).

2.1 语法

模糊描述逻辑 FALNUI 的语法与描述逻辑 ALNUI 的语法相同, 即 FALNUI 有两个基本元素: 概念 (concept) 和关系 (role). FALNUI 的语法如下:

$$C, D \rightarrow T | \perp | A | \neg C | C \sqcap D | C \sqcup D | \forall R. C | \exists R. C | \geq n | \leq n | R.$$

$$R \rightarrow P | P^-.$$

也就是说, FALNUI 的概念 (用 C, D 表示) 由原子概念 (用 A 表示) 和关系 (用 R 表示) 通过构造符组成, 其中 FALNUI 的构造符有 $\neg, \sqcap, \sqcup, \forall, \exists, \geq n, \leq n$ 等 7 种. 可见, 描述逻辑 ALNUI 是描述逻辑 ALC 的扩展.

下面介绍模糊描述逻辑 FALNUI 的语义.

2.2 语义

模糊描述逻辑 FALNUI 的语义是根据 Lotfi A Zadeh 对模糊集的语义解释方法^[16]和传统描述逻辑的语义解释方法^[1]来给出的.

论域 U 上的一个模糊集 S 通过隶属函数 $\mu_S: U \rightarrow [0, 1]$ 来刻画, 即对任意 $u \in U, u$ 对 S 的隶属度 $\mu_S(u)$ 表示 u 属于 S 的程度. 例如, 如果 $\mu_S(u) = 0.8$, 意味着 u 属于 S 的程度是 0.8, 即: u “很可能” 属于 S . 并且, 对任意的 $u \in U$, 以及 U 上的模糊集 S_1, S_2 , 隶属函数要满足下列 3 个约束: $\mu_{S_1 \cap S_2}(u) = \min\{\mu_{S_1}(u), \mu_{S_2}(u)\}$, $\mu_{S_1 \cup S_2}(u) = \max\{\mu_{S_1}(u), \mu_{S_2}(u)\}$ 和 $\mu_{\bar{S}_1}(u) = 1 - \mu_{S_1}(u)$, 其中 \bar{S}_1 表示模糊集 S_1 的补集 (相对于 U).

模糊描述逻辑 FALNUI 的语义将概念解释为一定论域的模糊子集, 关系是该论域上的模糊二元关系. 即在 FALNUI 中, 概念 C 被解释为一个模糊集, 因而概念是模糊或不精确的; 关系也是模糊或不精确的; 对于断言 “ a is C ”, 即 $C(a)$, 将有一个 $[0, 1]$ 上的真值, 表示个体 a 属于概念 C 的隶属度. 下面给出 FALNUI 的语义的形式定义.

定义 6. 一个模糊解释 $FI = (\Delta^{FI}, \bullet^{FI})$, 其中 Δ^{FI} 是解释论域, \bullet^{FI} 是解释函数, 并且解释函数 \bullet^{FI} 满足:

- 对任意个体 a 和 b , 如果 $a \neq b$, 则 $a^{FI} \neq b^{FI}$;
- 对任意概念 C , 解释函数 \bullet^{FI} 将 C 映射为一个隶属函数, 即 $C^{FI}: \Delta^{FI} \rightarrow [0, 1]$;
- 对任意关系 R , 解释函数 \bullet^{FI} 将 R 映射为一个隶属函数, 即 $R^{FI}: \Delta^{FI} \times \Delta^{FI} \rightarrow [0, 1]$.

也就是说,概念 C 的模糊解释 C^{FI} 是相对于 FI 的模糊概念集 C 的隶属函数,即如果 $d \in \Delta^{FI}$ 是论域 Δ^{FI} 的一个个体,则 $C^{FI}(d)$ 表示在模糊解释 FI 下个体 d 属于模糊概念 C 的程度.对于关系 R, R 的模糊解释 R^{FI} 是相对于 FI 的模糊关系集 R 的隶属函数,即如果 $d_1, d_2 \in \Delta^{FI}$ 是论域 Δ^{FI} 的两个个体,则 $R^{FI}(d_1, d_2)$ 表示在模糊解释 FI 下个体 d_1 和 d_2 满足模糊关系 R 的程度.于是,可以给出 FALNUI 的语义如下(对任意 $c, d \in \Delta^{FI}$):

- $\top^{FI}(d)=1$;
- $\perp^{FI}(d)=0$;
- $(C \cap D)^{FI}(d)=\min\{C^{FI}(d), D^{FI}(d)\}$;
- $(C \cup D)^{FI}(d)=\max\{C^{FI}(d), D^{FI}(d)\}$;
- $(\neg C)^{FI}(d)=1-C^{FI}(d)$;
- $(\forall R.C)^{FI}(d)=\inf_{d' \in \Delta^{FI}}\{\max\{1-R^{FI}(d, d'), C^{FI}(d')\}\}$;
- $(\exists R.C)^{FI}(d)=\sup_{d' \in \Delta^{FI}}\{\min\{R^{FI}(d, d'), C^{FI}(d')\}\}$;
- $(\geq n R)^{FI}(d)=\sup_{c_1, \dots, c_n \in \Delta^{FI}} \bigwedge_{i=1}^n R^{FI}(d, c_i)$;
- $(\leq n R)^{FI}(d)=\inf_{c_1, \dots, c_n \in \Delta^{FI}} \bigvee_{i=1}^n \neg R^{FI}(d, c_i)$;
- $(R^-)^{FI}(c, d)=R^{FI}(d, c)$.

说明:(1) 对于概念 $C \cap D, C \cup D, \neg C$ 的语义解释容易理解,是直接根据模糊逻辑的合取、析取、否定操作的语义^[14,16]给出的.

(2) 因为概念 $\forall R.C$ 和 $\exists R.C$ 可以分别转化为一阶逻辑公式 $\forall y. \neg F_R(x, y) \vee F_C(y)$ 和 $\exists y. F_R(x, y) \wedge F_C(y)$, 其中 $F_C(y)$ 和 $F_R(x, y)$ 分别表示将 C 和 R 映射为等价的一阶逻辑所得到的公式,而全称量词 \forall 表示论域元素上的合取,存在量词 \exists 表示论域元素上的析取,因而,概念 $\forall R.C$ 和 $\exists R.C$ 的语义可以如上解释.

(3) 因为概念 $\geq n R$ 和 $\leq n R$ 可以分别转化为一阶逻辑公式 $\exists y_1, \dots, y_n. F_R(x, y_1) \wedge \dots \wedge F_R(x, y_n)$ 和 $\forall y_1, \dots, y_n. \neg F_R(x, y_1) \vee \dots \vee \neg F_R(x, y_n)$, 因而,概念 $\geq n R$ 和 $\leq n R$ 的语义可以如上解释.

定义 7. 给定两个概念 C 和 D , 对任意的模糊解释 FI , 如果有 $C^{FI}=D^{FI}$, 则称 C 和 D 模糊等价, 记为: $C \equiv D$.

例如, 在论域 $[0, 150]$ 上, 概念 C =青年职工, 概念 D =年轻职工, 并且 C 和 D 的隶属函数 μ 相同, 即当 $0 \leq x \leq 25$ 时, $\mu(x)=1$; 当 $25 < x \leq 150$ 时, $\mu(x)=1/(1+((x-25)/5)^2)$, 则有 $C \equiv D$.

定义 8. 模糊断言公式是下列形式的表达式: $\langle \alpha \geq n \rangle$ 或 $\langle \alpha \leq m \rangle$, 其中 α 是描述逻辑 ALNUI 的断言公式, $n \in (0, 1], m \in [0, 1)$. 模糊断言公式用 $\varphi, \psi, \pi, \dots$ 表示.

模糊断言公式的语义如下:

- 一个模糊解释 FI 满足公式 $\langle C(a) \geq n \rangle$, 当且仅当 $C^{FI}(a^{FI}) \geq n$;
- 一个模糊解释 FI 满足公式 $\langle C(a) \leq m \rangle$, 当且仅当 $C^{FI}(a^{FI}) \leq m$;
- 一个模糊解释 FI 满足公式 $\langle R(a, b) \geq n \rangle$, 当且仅当 $R^{FI}(a^{FI}, b^{FI}) \geq n$;
- 一个模糊解释 FI 满足公式 $\langle R(a, b) \leq m \rangle$, 当且仅当 $R^{FI}(a^{FI}, b^{FI}) \leq m$.

定义 9. 一个模糊解释 FI 满足模糊断言公式 φ , 则称 FI 是模糊断言公式 φ 的模型.

定义 10. 给定模糊断言公式 φ 和 ψ , 如果对任意的模糊解释 FI , 满足条件:(1) 如果 FI 满足 φ , 则 FI 满足 ψ ;(2) 如果 FI 满足 ψ , 则 FI 满足 φ ; 则称 φ 和 ψ 模糊等价, 记为 $\varphi \equiv \psi$. 例如, $\langle \neg C(a) \geq n \rangle \equiv \langle C(a) \leq 1-n \rangle$. 又如, $\langle \text{青年职工(张三)} \geq 0.8 \rangle \equiv \langle \neg \text{青年职工(张三)} \leq 0.2 \rangle$.

定义 11. 模糊概念公理有两种: $C \subseteq D$ 和 $C \equiv D$, 分别表示概念包含和概念等价.

模糊概念公理的语义如下:

- $C \subseteq D$, 当且仅当对任意 $d \in \Delta^{FI}$, $C^{FI}(d^{FI}) \leq D^{FI}(d^{FI})$;
- $C \equiv D$, 当且仅当对任意 $d \in \Delta^{FI}$, $C^{FI}(d^{FI}) \leq D^{FI}(d^{FI})$ 和 $D^{FI}(d^{FI}) \leq C^{FI}(d^{FI})$, 即对任意 $d \in \Delta^{FI}$, $C^{FI}(d^{FI}) = D^{FI}(d^{FI})$.

由上可得, $C \equiv D$, 当且仅当 $C \subseteq D$ 和 $D \subseteq C$.

例如, 在论域 $[0, 150]$ 上, 概念 C =临时职工, 它的隶属函数 ρ 为: 当 $0 \leq x \leq 20$ 时, $\rho(x)=1$; 当 $20 < x \leq 150$ 时, $\rho(x)=1/(1+((x-20)/5)^2)$. 而对于概念 D =年轻职工, 它的隶属函数 μ 为: 当 $0 \leq x \leq 25$ 时, $\mu(x)=1$; 当 $25 < x \leq 150$ 时,

$\mu(x)=1/(1+((x-25)/5)^2)$,则有:临时职工 \sqsubseteq 年轻职工.

定义 12. 一个模糊解释 FI 满足模糊公理 φ ,则称 FI 是模糊公理 φ 的模型.

定义 13. 模糊知识库 $FKB=(T,A)$ 由两部分组成: $Tbox T$ 和 $Abox A$.其中 $Tbox$ 是一个模糊概念公理的有限集合. $Abox$ 是一个模糊断言公式的有限集合.

如果模糊知识库 FKB 的 $Tbox T=\emptyset$,即 $Tbox T$ 为空集,则模糊知识库 FKB 记为 FKB_A .

如果模糊知识库 FKB 的 $Abox A=\emptyset$,即 $Abox A$ 为空集,则模糊知识库 FKB 记为 FKB_T .

对于模糊知识库 FKB ,有如下性质:

- 一个模糊解释 FI 满足模糊知识库 FKB ,当且仅当对任意元素 $\varphi \in FKB, FI$ 满足 φ, FI 满足模糊知识库 FKB ,也称 FI 是模糊知识库 FKB 的一个模糊模型.
- 一个模糊知识库 FKB 模糊蕴含模糊断言公式 ψ (记为 $FKB \models_F \psi$),当且仅当 FKB 的每个模型满足 ψ .
- 给定两个概念 C, D 和没有 $Abox$ 的模糊知识库 FKB_T ,相对于 FKB_T, D 模糊包含 C (记为 $C \sqsubseteq_T D$),当且仅当对 FKB_T 的任意模糊模型 FI 和任意 $d \in \Delta^{FI}, C^{FI}(d^{FI}) \leq D^{FI}(d^{FI})$ 成立.

上面介绍了模糊 ER 模型和模糊描述逻辑 FALNUI.下面介绍如何将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库,从而利用 FALNUI 的推理机制对模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等问题进行自动推理.

3 基于描述逻辑的模糊 ER 模型

为了利用模糊描述逻辑 FALNUI 的推理机制对模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等问题进行自动推理,需要解决两个问题:(1) 将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库,并证明这种转化的正确性;(2) 将模糊 ER 模型的推理问题转化为 FALNUI 的推理问题,也需证明这种转化的正确性.下面分别介绍这两个问题.

3.1 模糊ER模型与FALNUI

与 ER 模型和 ALNUI 的知识库之间的对应^[10]类似,模糊 ER 模型与 FALNUI 的知识库之间的对应是通过一个转化函数 φ 来实现的,下面给出该转化函数 φ 的定义.

定义 14. 给定一个模糊 ER 模型 $FS=(L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$,与 FS 对应的模糊描述逻辑 FALNUI 的知识库 $\varphi(FS)=(FA, FP, FT)$ 按下列规则得到:

(1) $\varphi(FS)$ 的原子模糊概念集合 FA 由下列元素组成:

- 对任意模糊集符号 $FD \in D_{FS}, \varphi(FD)$ 是一个原子模糊概念.
- 对任意模糊实体符号 $FE \in E_{FS}, \varphi(FE)$ 是一个原子模糊概念.
- 对任意模糊联系符号 $FR \in R_{FS}, \varphi(FR)$ 是一个原子模糊概念.

(2) $\varphi(FS)$ 的原子模糊关系集合 FP 由下列元素组成:

- 对任意模糊属性符号 $FA \in A_{FS}, \varphi(FA)$ 是一个原子模糊关系.
- 对任意模糊联系符号 $FR \in R_{FS}$,如果 $rel_{FS}(FR)=[FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k]$,则 $\varphi(FU_1), \dots, \varphi(FU_k)$ 都是原子模糊关系.

(3) $\varphi(FS)$ 的模糊公理集合 FT 由下列元素组成:

- 对任意模糊实体 $FE_1, FE_2 \in E_{FS}$,如果 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$,则 $\varphi(FE_1) \sqsubseteq \varphi(FE_2)$ 是模糊公理.
- 对任意模糊联系 $FR_1, FR_2 \in R_{FS}$,如果 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$,则 $\varphi(FR_1) \sqsubseteq \varphi(FR_2)$ 是模糊公理.
- 对任意模糊实体 $FE \in E_{FS}$,如果 $att_{FS}(FE)=[FA_1:FD_1, \dots, FA_h:FD_h]$,则 $\varphi(FE) \sqsubseteq \forall \varphi(FA_1). \varphi(FD_1) \sqcap \dots \sqcap \forall \varphi(FA_h). \varphi(FD_h) \sqcap (=1 \varphi(FA_1)) \sqcap \dots \sqcap (=1 \varphi(FA_h))$ 是模糊公理.
- 对任意模糊联系 $FR \in R_{FS}$,如果 $rel_{FS}(FR)=[FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k]$,则 $\varphi(FR) \sqsubseteq \forall \varphi(FU_1). \varphi(FE_1) \sqcap \dots \sqcap \forall \varphi(FU_k). \varphi(FE_k) \sqcap (=1 \varphi(FU_1)) \sqcap \dots \sqcap (=1 \varphi(FU_k))$ 和 $\varphi(FE_i) \sqsubseteq \forall (\varphi(FU_i))^- . \varphi(FR)$,其中 $i \in \{1, \dots, k\}$,都是模糊公理.
- 对任意模糊联系 $FR \in R_{FS}$,假设 $rel_{FS}(FR)=[FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k]$,并且对任意模糊实体 $FE \in E_{FS}$,有 $FE \leq_{FS}^* FE_i$ 成立,其中 $i \in \{1, \dots, k\}$,则
 - 如果 $m = cmin_{FS}(FE, FR, FU_i) \neq 0$,则 $\varphi(FE) \sqsubseteq (\geq m (\varphi(FU_i))^-)$ 是模糊公理.
 - 如果 $n = cmax_{FS}(FE, FR, FU_i) \neq \infty$,则 $\varphi(FE) \sqsubseteq (\leq n (\varphi(FU_i))^-)$ 是模糊公理.

- 对任意模糊符号 $X_1, X_2 \in E_{FS} \cup R_{FS} \cup D_{FS}$, 如果 $X_1 \neq X_2$, 并且 $X_1 \in R_{FS} \cup D_{FS}$, 则 $\varphi(X_1) \sqsubseteq \neg \varphi(X_2)$ 是模糊公理.

说明:(1) 由于模糊描述逻辑 FALNUI 的语法与描述逻辑 ALNUI 的语法相同, 所以从形式上看, 上述转化函数 φ 与文献[10]的转化函数类似. 但由于上述转化函数 φ 是将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库, 因而上述转化函数 φ 是文献[10]的转化函数的模糊化推广.

(2) 由于模糊 ER 模型不涉及个体实例, 所以, 由模糊 ER 模型 FS 转化得到的 FALNUI 的知识库 $\varphi(FS)$ 没有 *Abox*.

下面给出上述转化函数 φ 的正确性证明, 即: 证明上述转化函数 φ 能够正确地将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库. 与文献[10]类似, 通过建立两个映射, 即从模糊数据库状态 $FDBS$ 到 $\varphi(FS)$ 的映射和从 $\varphi(FS)$ 到模糊数据库状态 $FDBS$ 的映射, 来证明上述转化的正确性.

定义 15. 给定模糊 ER 模型 $FS=(L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$, $\varphi(FS)$ 是按定义 14 的规则将 FS 进行转化得到的知识库, $\varphi(FS)$ 的一个模糊解释 FI 称为联系描述(relation-descriptive)模糊解释, 如果 FI 满足下列条件:

如果对任意模糊联系 $FR \in R_{FS}, rel_{FS}(FR)=[FU_1:FE_1, \dots, FU_k:FE_k]$, 并且对任意 $d, d' \in (\varphi(FR))^{FI}$, 则 $(\bigwedge_{1 \leq i \leq k} d'' \in \Delta^{FI}. ((d, d'') \in (\varphi(FU_i))^{FI} \leftrightarrow (d', d'') \in (\varphi(FU_i))^{FI})) \rightarrow d = d'$ 成立.

说明: 因为在模糊数据库状态 $FDBS$ 中, 联系被映射为模糊元组的一个集合, 即对任意模糊联系 $FR \in R_{FS}$, 函数 \bullet^{FI} 将 FR 映射为 Δ^{FB} 上的 U_{FS} 标记的模糊元组的一个集合, 即 $FR^{FI} \subseteq FT(U_{FS}, \Delta^{FB})$ (见定义 4), 而集合 $FT(U_{FS}, \Delta^{FB})$ 不能有重复元素. 上述联系描述模糊解释表示的就是这种约束. 下面是两个与文献[10]类似的结论.

引理 1. $FS=(L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$ 是一个模糊 ER 模型, $\varphi(FS)$ 是将 FS 转化为 FALNUI 的知识库, FC 是 $\varphi(FS)$ 的一个模糊概念, 如果 FC 是一致的, 则 $\varphi(FS)$ 存在一个联系描述模糊解释 FI , 使得 $FC^{FI} \neq \emptyset$.

定理 1. 对任意模糊 ER 模型 $FS=(L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$, FS 对应的模糊数据库状态 $FDBS=(\Delta^{FB}, \bullet^{FI})$, 以及将 FS 转化为 FALNUI 的知识库是 $\varphi(FS)$, 则存在两个映射 α_{FS} 和 β_{FS} , 其中 $\alpha_{FS}: FDBS \rightarrow \varphi(FS)$ 的模糊解释, $\beta_{FS}: \varphi(FS)$ 的联系描述模糊解释 $\rightarrow FDBS$, 满足:

- (1) 对 FS 的任意合法数据库状态 FB , $\alpha_{FS}(FB)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型, 并且对任意符号 $X \in E_{FS} \cup A_{FS} \cup R_{FS} \cup D_{FS}$, 有 $X^{FB} = (\varphi(X))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 成立.
- (2) 对 $\varphi(FS)$ 的任意联系描述模糊解释 FI , $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS 的一个合法数据库状态, 并且对任意符号 $X \in E_{FS} \cup A_{FS} \cup R_{FS} \cup D_{FS}$, 有 $(\varphi(X))^{FI} = X^{\beta_{FS}(FI)}$ 成立.

由于模糊描述逻辑 FALNUI 与描述逻辑 ALNUI^[10] 的语法相同, 以及模糊数据库状态(见定义 4)与数据库状态^[10]的语法相似, 即进行了模糊化推广, 因而上述引理 1 和定理 1 的证明分别与文献[10]的引理 4.7 和命题 4.8 的证明类似, 即从形式上看, 它们的证明过程相同, 但由于模糊描述逻辑 FALNUI 与描述逻辑 ALNUI 的语义解释不同, 所以从语义上看, 上述引理 1 和定理 1 分别是文献[10]的引理 4.7 和命题 4.8 的推广.

定理 1 的意思是模糊 ER 模型所对应的模糊数据库状态 $FDBS$ 与模糊 ER 模型所转化的 FALNUI 的知识库 $\varphi(FS)$ 的模型之间可以建立对应关系, 从而保证了转化函数 φ (见定义 14) 的正确性, 即转化函数 φ 能够正确地将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库.

为了理解如何将一个模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库, 下面举一个简单的例子.

图 1 是一个模糊 ER 模型 FS .

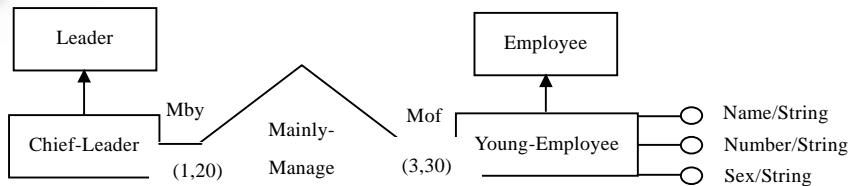


Fig.1 Fuzzy ER model FS

图 1 模糊 ER 模型 FS

根据定义 14,可以将上述模糊 ER 模型 FS 转化为 FALNUI 的知识库 $\varphi(FS)$:

$$\begin{aligned} \varphi(FS) = & \{ \text{leader} \sqsupseteq \text{chief-leader} \\ & \text{employee} \sqsupseteq \text{young-employee} \\ & \text{chief-leader} \sqsubseteq \text{leader} \sqcap \forall \text{Mby} . \text{mainly-manage} \sqcap (\geq 1 \text{ Mby}) \sqcap (\leq 20 \text{ Mby}) \\ & \text{mainly-manage} \sqsubseteq \forall \text{Mby} . \text{chief-leader} \sqcap (= 1 \text{ Mby}) \sqcap \forall \text{Mof} . \text{young-employee} \sqcap (= 1 \text{ Mof}) \\ & \text{young-employee} \sqsubseteq \text{employee} \sqcap \forall \text{Mof} . \text{mainly-manage} \sqcap (\geq 3 \text{ Mof}) \sqcap (\leq 30 \text{ Mof}) \sqcap \forall \text{name} . \text{string} \sqcap (= 1 \text{ name}) \sqcap \forall \\ & \text{number} . \text{string} \sqcap (= 1 \text{ number}) \sqcap \forall \text{sex} . \text{string} \sqcap (= 1 \text{ sex}) \} \end{aligned}$$

下面介绍模糊 ER 模型的推理问题,即如何利用 FALNUI 的推理机制对模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等问题进行自动推理.

3.2 模糊 ER 模型的推理

模糊 ER 模型的推理主要包括模糊实体的可满足性、模糊联系的可满足性、模糊 ER 模型的冗余性、模糊实体的包含关系和模糊联系的包含关系等推理问题.一般情况下,目前在模糊数据库设计时设计者需要对手工对上述推理问题进行推理,这种方法存在很多不足,例如,推理效率和可靠性都不高,完备性等得不到保证.

在本文介绍的基于描述逻辑的模糊 ER 模型中,可以将一个模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库,从而可以利用 FALNUI 的推理机制对模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等问题进行自动推理,克服目前模糊 ER 模型推理中存在的不足.下面介绍将模糊 ER 模型的推理问题转化为 FALNUI 的推理问题的有关方法.

首先,给出模糊实体的可满足性和模糊联系的可满足性的有关转化定理.

定理 2. 给定一个模糊 ER 模型 FS , FE 是 FS 的模糊实体, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过转化得到的 FALNUI 的知识库, 则 FE 是可满足的, 当且仅当 $\varphi(FS) \neq \varphi(FE) \sqsubseteq \perp$.

证明: 先证明 \Rightarrow , 因为 FE 是可满足的, 所以存在一个合法的模糊数据库状态 FB , 使得 $FE^{FB} \neq \emptyset$. 由定理 1 可得, $\alpha_{FS}(FB)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型, 并且有 $FE^{FB} = (\varphi(FE))^{a_{FS}(FB)}$ 成立. 因为 $FE^{FB} \neq \emptyset$, 所以 $(\varphi(FE))^{a_{FS}(FB)} \neq \emptyset$, 从而有 $\varphi(FS) \neq \varphi(FE) \sqsubseteq \perp$ 成立.

再证明 \Leftarrow , 因为 $\varphi(FS) \neq \varphi(FE) \sqsubseteq \perp$, 所以有 $\varphi(FE)$ 是一致的. 从而由引理 1 可得, $\varphi(FS)$ 存在一个联系描述模糊模型 FI , 使得 $(\varphi(FE))^{FI} \neq \emptyset$. 再由定理 1 可得, $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS 的一个合法数据库状态, 并且有 $(\varphi(FE))^{FI} = FE^{\beta_{FS}(FI)}$ 成立. 由 $(\varphi(FE))^{FI} \neq \emptyset$ 可知, $FE^{\beta_{FS}(FI)} \neq \emptyset$, 即存在一个合法数据库状态 $\beta_{FS}(FI)$, 使得 FE 是可满足的.

引理 2. $FS = (L_{FS}, \leq_{FS}, att_{FS}, rel_{FS}, card_{FS})$ 是一个模糊 ER 模型, $\varphi(FS)$ 是将 FS 转化为 FALNUI 的知识库, FR 是 $\varphi(FS)$ 的一个模糊联系, 如果 FR 是一致的, 则 $\varphi(FS)$ 存在一个联系描述模糊解释 FI , 使得 $FR^{FI} \neq \emptyset$.

该引理与引理 1 类似, 即引理 1 是关于模糊概念的, 而引理 2 是关于模糊联系的, 从而证明过程可以由引理 1 的证明类推得到.

定理 3. 给定一个模糊 ER 模型 FS , FR 是 FS 的模糊联系, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过转化得到的 FALNUI 的知识库, 则 FR 是可满足的, 当且仅当 $\varphi(FS) \neq \varphi(FR) \sqsubseteq \perp$.

证明: 先证明 \Rightarrow , 因为 FR 是可满足的, 所以存在一个合法的模糊数据库状态 FB , 使得 $FR^{FB} \neq \emptyset$. 由定理 1 可得, $\alpha_{FS}(FB)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型, 并且有 $FR^{FB} = (\varphi(FR))^{a_{FS}(FB)}$ 成立. 因为 $FR^{FB} \neq \emptyset$, 所以 $(\varphi(FR))^{a_{FS}(FB)} \neq \emptyset$, 从而有 $\varphi(FS) \neq \varphi(FR) \sqsubseteq \perp$ 成立.

再证明 \Leftarrow , 因为 $\varphi(FS) \neq \varphi(FR) \sqsubseteq \perp$, 所以有 $\varphi(FR)$ 是一致的. 从而由引理 2 可得, $\varphi(FS)$ 存在一个联系描述模糊模型 FI , 使得 $(\varphi(FR))^{FI} \neq \emptyset$. 再由定理 1 可得, $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS 的一个合法数据库状态, 并且有 $(\varphi(FR))^{FI} = FR^{\beta_{FS}(FI)}$ 成立. 由 $(\varphi(FR))^{FI} \neq \emptyset$ 可知, $FR^{\beta_{FS}(FI)} \neq \emptyset$, 即存在一个合法数据库状态 $\beta_{FS}(FI)$, 使得 FR 是可满足的.

下面介绍有关模糊实体的包含关系和模糊联系的包含关系的转化定理.

定理 4. 给定一个模糊 ER 模型 FS , FE_1, FE_2 是 FS 的两个模糊实体, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过转化得到的 FALNUI 的知识库, 则 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$, 当且仅当 $\varphi(FS) \neq \varphi(FE_1) \sqsubseteq \varphi(FE_2)$.

证明: 首先证明 \Rightarrow , 假设 $\varphi(FS) \neq \varphi(FE_1) \sqsubseteq \varphi(FE_2)$ 成立, 则 $\varphi(FE_1) \sqcap \neg \varphi(FE_2)$ 是一致的. 根据引理 1 可得, $\varphi(FS)$ 存在一个联系描述模糊模型 FI , 使得 $d \in (\varphi(FE_1))^{FI}$ 和 $d \notin (\varphi(FE_2))^{FI}$ 成立, 其中 $d \in \Delta^{FI}$. 再由定理 1 可得, $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS

的一个合法数据库状态,并且有 $(\varphi((FE_1))^{FI}=FE_1^{\beta_{FS}(FB)})$ 和 $(\varphi((FE_2))^{FI}=FE_2^{\beta_{FS}(FB)})$ 成立.由 $d \in (\varphi((FE_1))^{FI})$ 和 $d \notin (\varphi((FE_2))^{FI})$ 可知, $d \in FE_1^{\beta_{FS}(FB)}$ 和 $d \notin FE_2^{\beta_{FS}(FB)}$ 成立,即 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$ 不成立,与 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$ 矛盾.所以有 $\varphi(FS) \models \varphi(FE_1) \subseteq \varphi(FE_2)$.

再证明 \Leftarrow .假设 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$ 不成立,则存在一个模糊数据库状态 FB 和一个实例 $Fe \in \Delta^{FI}$,使得 $Fe \in FE_1^{FB}$ 和 $Fe \notin FE_2^{FB}$ 成立.由定理1可得, $\alpha_{FS}(FB)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型,并且有 $FE_1^{FB} = (\varphi(FE_1))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 和 $FE_2^{FB} = (\varphi(FE_2))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 成立.由 $Fe \in FE_1^{FB}$ 和 $Fe \notin FE_2^{FB}$ 可知, $Fe \in (\varphi(FE_1))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 和 $Fe \notin (\varphi(FE_2))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 成立,因此有 $\varphi(FS) \not\models \varphi(FE_1) \subseteq \varphi(FE_2)$ 成立,与 $\varphi(FS) \models \varphi(FE_1) \subseteq \varphi(FE_2)$ 矛盾.所以有 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$.

定理 5. 给定一个模糊 ER 模型 FS, FR_1, FR_2 是 FS 的两个模糊联系, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过转化得到的 FALNUI 的知识库,则 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$,当且仅当 $\varphi(FS) \models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$.

证明:首先证明 \Rightarrow .假设 $\varphi(FS) \not\models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$ 成立,则 $\varphi(FR_1) \cap \neg \varphi(FR_2)$ 是一致的.根据引理2可得, $\varphi(FS)$ 存在一个联系描述模糊模型 FI ,使得 $d \in (\varphi(FR_1))^{FI}$ 和 $d \notin (\varphi(FR_2))^{FI}$ 成立,其中 $d \in \Delta^{FI}$.再由定理1可得, $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS 的一个合法数据库状态,并且有 $(\varphi((FR_1))^{FI}=FR_1^{\beta_{FS}(FB)})$ 和 $(\varphi((FR_2))^{FI}=FR_2^{\beta_{FS}(FB)})$ 成立.由 $d \in (\varphi(FR_1))^{FI}$ 和 $d \notin (\varphi(FR_2))^{FI}$ 可知, $d \in FR_1^{\beta_{FS}(FB)}$ 和 $d \notin FR_2^{\beta_{FS}(FB)}$ 成立,即 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$ 不成立,与 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$ 矛盾.所以有 $\varphi(FS) \models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$.

再证明 \Leftarrow .假设 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$ 不成立,则存在一个模糊数据库状态 FB 和一个实例 $Fe \in \Delta^{FI}$,使得 $Fe \in FR_1^{FB}$ 和 $Fe \notin FR_2^{FB}$ 成立.由定理1可得, $\alpha_{FS}(FB)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型,并且有 $FR_1^{FB} = (\varphi(FR_1))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 和 $FR_2^{FB} = (\varphi(FR_2))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 成立.由 $Fe \in FR_1^{FB}$ 和 $Fe \notin FR_2^{FB}$ 可知, $Fe \in (\varphi(FR_1))^{\alpha_{FS}(FB)}$, $Fe \notin (\varphi(FR_2))^{\alpha_{FS}(FB)}$ 成立,因此有 $\varphi(FS) \not\models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$ 成立,与 $\varphi(FS) \models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$ 矛盾.所以有 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$.

下面介绍有关模糊 ER 模型冗余性的转化定理.先给出模糊 ER 模型冗余的定义.

定义 16. 在模糊 ER 模型 FS 中,如果存在两个模糊实体 FE_1 和 FE_2 ,使得 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$ 和 $FE_2 \leq_{FS} FE_1$ 成立,或者存在两个模糊联系 FR_1 和 FR_2 ,使得 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$ 和 $FR_2 \leq_{FS} FR_1$ 成立,则称模糊 ER 模型 FS 存在冗余,或者 FS 是冗余的.

定理 6. 给定一个模糊 ER 模型 FS, FE_1, FE_2 是 FS 的两个模糊实体, FR_1, FR_2 是 FS 的两个模糊联系, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过转化得到的 FALNUI 的知识库,则 FS 是冗余的,当且仅当下列两式至少有一个成立:(1) $\varphi(FS) \models \varphi(FE_1) \subseteq \varphi(FE_2)$ 和 $\varphi(FS) \models \varphi(FE_2) \subseteq \varphi(FE_1)$;(2) $\varphi(FS) \models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$ 和 $\varphi(FS) \models \varphi(FR_2) \subseteq \varphi(FR_1)$.

证明:首先证明 \Rightarrow .由 FS 是冗余的可知,存在两个模糊实体 FE_1 和 FE_2 ,使得 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$ 和 $FE_2 \leq_{FS} FE_1$ 成立,或者存在两个模糊联系 FR_1 和 FR_2 ,使得 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$ 和 $FR_2 \leq_{FS} FR_1$ 成立.如果 $FE_1 \leq_{FS} FE_2$ 和 $FE_2 \leq_{FS} FE_1$ 成立,根据定理4可知, $\varphi(FS) \models \varphi(FE_1) \subseteq \varphi(FE_2)$ 和 $\varphi(FS) \models \varphi(FE_2) \subseteq \varphi(FE_1)$ 成立.如果 $FR_1 \leq_{FS} FR_2$ 和 $FR_2 \leq_{FS} FR_1$ 成立,根据定理5可知, $\varphi(FS) \models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$ 和 $\varphi(FS) \models \varphi(FR_2) \subseteq \varphi(FR_1)$ 成立.

再证明 \Leftarrow .如果 $\varphi(FS) \models \varphi(FE_1) \subseteq \varphi(FE_2)$ 和 $\varphi(FS) \models \varphi(FE_2) \subseteq \varphi(FE_1)$ 成立,则根据定理4可知, $FE_1 \leq_{FS} FE_2$ 和 $FE_2 \leq_{FS} FE_1$ 成立,从而 FS 是冗余的.如果 $\varphi(FS) \models \varphi(FR_1) \subseteq \varphi(FR_2)$ 和 $\varphi(FS) \models \varphi(FR_2) \subseteq \varphi(FR_1)$ 成立,则根据定理5可知, $FR_1 \leq_{FS} FR_2$ 和 $FR_2 \leq_{FS} FR_1$ 成立,从而 FS 是冗余的.

在实际应用中,如何利用上述定理来指导实践呢?由上述定理可以看出,模糊 ER 模型的推理问题可以转化为模糊描述逻辑 FALNUI 的推理问题.由于 FALNUI 具有自动推理机制,从而在基于描述逻辑的模糊 ER 模型中,可以利用 FALNUI 的推理机制对模糊 ER 模型的推理问题进行自动推理.这也是本文为什么要研究基于描述逻辑的模糊 ER 模型的动机和应用背景.

至于如何利用描述逻辑 FALNUI 的推理机制对模糊 ER 模型的推理问题进行自动推理,应该主要考虑两个问题:(1) 实现定义14给出的转化方法,即将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库.实际上,定义14可以看成是一个算法.(2) 实现描述逻辑 FALNUI 推理机.与描述逻辑 FALC^[12]的推理算法一样, FALNUI 推理机也是基于 Tableaux 算法的.而 FALNUI 的 Tableaux 算法可以从对 FALC 的 Tableaux 算法推广得到.具体实现时,可以采用不同的编程语言(如 Java, VC 等)及数据结构(如数组列表 ArrayList 等).

4 相关工作

Alexander Borgida^[17]首先研究了描述逻辑与数据库的关系,分析了描述逻辑在数据库中的各种应用,包括用描述逻辑来进行数据库的模式设计与集成(特别是数据库的概念设计)、查询、更改以及描述数据库的完整性约束等.指出了描述逻辑在数据建模中所具有的独特优势:能够正确表示数据的语义、能够验证数据模式的一致性、能够减少数据模式表示的冗余性等.Alexander Borgida 的工作为描述逻辑在数据库中的应用奠定了基础,指出描述逻辑不仅可以为知识表示定义术语,而且可用于信息系统中.但 Alexander Borgida 没有给出具体的描述逻辑来满足数据库的模式设计、查询、更改等需求.

针对时序 ER 模型的形式化表示和推理的需要,Artale 和 Franconi^[18]对描述逻辑 ALCQI 进行了时序扩充,提出了一种时序描述逻辑 ALCQIT.研究了如何将时序 ER 模型(包括隐式时序 ER 模型和显式时序 ER 模型)转化为时序描述逻辑 ALCQIT 的知识库,从而利用 ALCQIT 的推理机制对时序 ER 模型的推理问题进行自动推理.还研究了用 ALCQIT 的包含依赖来表示时序数据库的完整性约束.但 Artale 和 Franconi 是针对精确的时序数据库,没有研究如何用描述逻辑来表示和推理模糊 ER 模型.

Artale^[19]和 Calvanese^[10]等人研究了描述逻辑与面向对象数据库的关系,在术语层和断言层上建立了描述逻辑与面向对象数据库描述之间的映射,以及面向对象数据模型与描述逻辑 ALNUI 的知识库之间的映射,特别是 Calvanese 给出了如何将面向对象数据模型转化为描述逻辑 ALNUI 的知识库的方法,从而利用描述逻辑的推理机制对面向对象数据模型进行推理.但 Artale 和 Calvanese 的工作是针对面向对象数据库的.

针对数据库的模式设计问题,Alex Borgida 和 Diego Calvanese 等人分别提出了描述逻辑 DLR 和 ALNUI,研究了如何将数据库的 ER 模型转化为描述逻辑 DLR 和 ALNUI 的知识库,从而可以利用描述逻辑 DLR 和 ALNUI 的推理机制对 ER 模型的相关问题进行自动推理,包括实体的可满足性、关系的可满足性、ER 模型的冗余性等^[9-11].但描述逻辑 DLR 和 ALNUI 只能表示和推理精确知识,不能表示和推理模糊、不精确知识,即不能对模糊 ER 模型进行表示和推理.

针对模糊知识处理,Umberto Straccia 结合模糊逻辑对传统描述逻辑 ALC 进行了扩充,提出了一种模糊描述逻辑 FALC,给出了 FALC 的语法和语义,并研究了 FALC 的推理问题,提出了基于描述逻辑 Tableaux 算法的 FALC 的推理算法,从而使得描述逻辑能够表示和推理模糊或不精确知识,但 FALC 的表达能力非常有限,不能对模糊 ER 模型进行表示和推理^[12,13].

本文针对模糊数据库的特点,特别是模糊 ER 模型的需求,在描述逻辑 ALNUI^[10,11]的基础上,提出了一种模糊描述逻辑 FALNUI,给出了基于 FALNUI 的模糊 ER 模型,即将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库,并利用 FALNUI 的推理机制研究了模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等自动推理问题,克服了目前模糊 ER 模型推理中存在的不足(目前模糊 ER 模型的推理需要设计者手工对上述推理问题进行推理).

5 结束语

本文分析了描述逻辑 ALNUI 与 ER 模型的关系,特别是将 ER 模型转化为 ALNUI 的知识库进行自动推理的有效性,以及 ALNUI 不能处理模糊信息等存在的问题.针对模糊 ER 模型的需求,在描述逻辑 ALNUI 和模糊描述逻辑 FALC 的基础上,提出了一种新的描述逻辑,即模糊描述逻辑 FALNUI,研究了基于 FALNUI 的模糊 ER 模型,即研究了如何将模糊 ER 模型转化为 FALNUI 的知识库,并利用 FALNUI 的推理机制研究了模糊 ER 模型的可满足性、冗余性和包含关系等自动推理问题,证明了这些推理问题的正确性,从而基于描述逻辑的模糊 ER 模型克服了目前模糊 ER 模型推理中存在的不足.进一步的工作主要有:研究模糊描述逻辑 FALNUI 的推理机制、推理复杂性及推理优化等问题.

致谢 在此,向对本文提出宝贵意见的评审专家表示衷心的感谢.

References:

- [1] Baader F, Nutt W. Basic description logics. In: Baader F, Calvanese D, McGuinness D, Nardi D, Patel-Schneider P, eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 47-100.

- [2] Dong MK, Jiang YC, Shi ZZ. A description logic with default reasoning. Chinese Journal of Computers, 2003,26(6):729-736 (in Chinese with English abstract).
- [3] Liebig T, Rösner D. Action hierarchies in description logics. In: Brachman RJ, Donini FM, Franconi E, Horrocks I, Levy AY, Rousset MC, eds. Proc. of the 1997 Int'l Workshop on Description Logics. AAAI Press, 1997. 99-103.
- [4] Horrocks I. DAML+OIL: A description logic for the semantic Web. Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering, 2002,25(1):4-9.
- [5] Horrocks I, Patel-Schneider PF. Reducing OWL entailment to description logic satisfiability. In: Fensel D, Sycara K, Mylopoulos J, eds. Proc. of the 2003 Int'l Semantic Web Conf. (ISWC 2003). LNCS 2870, Springer-Verlag, 2003. 17-29.
- [6] Baader F, Horrocks I, Sattler U. Description logics as ontology languages for the semantic Web. In: Hutter D, Stephan W, eds. Mechanizing Mathematical Reasoning: Essays in Honor of Jörg Siekmann on the Occasion of His 60th Birthday. LNAI 2605, Springer-Verlag, 2005. 228-248.
- [7] Shi ZZ, Jiang YC, Zhang HJ, Dong MK. Agent service matchmaking based on description logic. Chinese Journal of Computers, 2004,27(5):625-635 (in Chinese with English abstract).
- [8] Noia TD, Sciascio ED, Donini FM, Mongiello M. Abductive matchmaking using description logics. In: Gottlob G, Walsh T, eds. Proc. of the 18th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2003). St. Louis: Morgan Kaufmann Publishers, 2003. 337-342.
- [9] Borgida A, Lenzerini M, Rosati R. Description logics for data bases. In: Baader F, Calvanese D, McGuinness D, Nardi D, Patel-Schneider P, eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 472-494.
- [10] Calvanese D, Lenzerini M, Nardi D. Unifying class-based representation formalisms. Journal of Artificial Intelligence Research, 1999,11(2):199-240.
- [11] Calvanese D, Giacomo GD, Nardi D, Lenzerini M. Reasoning in expressive description logics. In: Robinson A, Voronkov A, eds. Handbook of Automated Reasoning. Milan: Elsevier Science Publishers, 2001. 1581-1634.
- [12] Straccia U. Reasoning within fuzzy description logics. Journal of Artificial Intelligence Research, 2001,14(1):137-166.
- [13] Straccia U. A fuzzy description logic. In: Rich C, Mostow J, Buchanan BG, Uthurusamy R, eds. Proc. of the AAAI-98, 15th National Conf. on Artificial Intelligence. AAAI Press, 1998. 594-599.
- [14] He XG. Fuzzy Theories and Fuzzy Techniques in Knowledge Processing. 2nd ed., Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 321-354 (in Chinese).
- [15] Chen PPS. The entity-relationship model—toward a unified view of data. ACM Trans. on Database Systems, 1976,1(1):9-36.
- [16] Zadeh LA. Fuzzy logic—computing with words. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1996,4(2):103-111.
- [17] Borgida A. Description logics in data management. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 1995,7(5):671-682.
- [18] Artale A, Franconi E. Temporal ER modeling with description logics. In: Akoka J, Bouzeghoub M, Comyn-Wattiau I, Métails E, eds. Proc. of the 18th Int'l Conf. on Conceptual Modeling. LNCS 1728, Springer-Verlag, 1999. 81-95.
- [19] Artale A, Cesarini F, Soda G. Describing database objects in a concept language environment. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 1996,8(2):345-351.

附中文参考文献:

- [2] 董明楷,蒋运承,史忠植.一种带缺省推理的描述逻辑.计算机学报,2003,26(6):729-736.
- [7] 史忠植,蒋运承,张海俊,董明楷.基于描述逻辑的主体服务匹配.计算机学报,2004,27(5):625-635.
- [14] 何新贵.模糊知识处理的理论与技术.第2版.北京:国防工业出版社,1999.321-354.



蒋运承(1974 -),男,广西桂林人,博士,副教授,主要研究领域为描述逻辑,语义 Web,Web 智能.



王驹(1950 -),男,博士,研究员,主要研究领域为描述逻辑,数理逻辑,人工智能.



汤庸(1964 -),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为数据库,知识工程,CSCW.