

模糊面向对象数据模型的描述逻辑表示与推理*

张 富¹, 严 丽², 马宗民¹⁺, 程经纬¹

¹(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

²(东北大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110819)

Representation and Reasoning of Fuzzy Object-Oriented Data Model with Description Logic

ZHANG Fu¹, YAN Li², MA Zong-Min¹⁺, CHENG Jing-Wei¹

¹(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

²(School of Software, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

+ Corresponding author: E-mail: mazongmin@ise.neu.edu.cn

Zhang F, Yan L, Ma ZM, Cheng JW. Representation and reasoning of fuzzy object-oriented data model with description logic. Journal of Software, 2012, 23(3): 594-612. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4037.htm>

Abstract: The relationships between description logics and object-oriented data models are analyzed, and the paper aims at investigating the representation and reasoning of fuzzy object-oriented data (FOOD) models with description logics. The FOOD models are investigated, and the formal definition and semantics of FOOD models are proposed first. Then, aiming at the characteristics and reasoning requirement of FOOD models, the fuzzy description logic f-ALCIQ is recalled. In particular, the considers the FOOD model and the corresponding database instances simultaneously, and translate them into f-ALCIQ knowledge base at both terminological (TBox) and assertional (ABox) levels, respectively. Furthermore, based on the translated f-ALCIQ knowledge bases, the reasoning tasks of FOOD models (e.g., consistency, subsumption, and redundancy) may be reasoned through the reasoning mechanism of f-ALCIQ. Finally, a fuzzy description logic reasoner based on f-ALCIQ called FRsQ is designed and implemented, so as the reasoning problems above may be reasoned automatically.

Key words: fuzzy object-oriented data (FOOD) model; fuzzy description logic; representation; reasoning; fuzzy description logic reasoner

摘 要: 通过分析描述逻辑与面向对象数据模型之间的关系,研究了基于描述逻辑的模糊面向对象数据(fuzzy object-oriented data,简称 FOOD)模型表示与推理.首先,进一步研究了 FOOD 模型,提出了 FOOD 模型的形式化定义和语义定义,以便更好地在 FOOD 模型与模糊描述逻辑之间建立对应关系;然后,针对 FOOD 模型的特点和推理需求,介绍了模糊描述逻辑 f-ALCIQ.在此基础上,研究了基于 f-ALCIQ 的 FOOD 模型表示与推理,包括:实现了从 FOOD 模型到 f-ALCIQ 知识库在结构层和实例层上的转化,即实现了从 FOOD 模型到 f-ALCIQ TBox 的转化,以及从 FOOD 模型相应的数据库实例到 f-ALCIQ ABox 的转化;进而,基于转化得到的 f-ALCIQ 知识库,研究了如何利用 f-ALCIQ 的推理机制对 FOOD 模型的推理问题(一致性、包含性和冗余性等)进行推理;最后,设计并实现了基于

* 基金项目: 国家自然科学基金(61073139, 60873010); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0288); 中央高校基本科研业务专项资金(N090504005, N090604012)

收稿时间: 2010-08-23; 定稿时间: 2011-04-19

f-ALCIQ 的模糊描述逻辑推理机(FRsQ 推理机),实现了对 FOOD 模型和 f-ALCIQ 模糊概念知识的自动推理。

关键词: 模糊面向对象数据(fuzzy object-oriented data,简称 FOOD)模型;模糊描述逻辑;表示;推理;推理机

中图法分类号: TP311 **文献标识码:** A

描述逻辑(description logics,简称 DLs)^[1]是一种适合表示关于概念和概念层次结构,并且具有形式化语义、很强表达能力和可判定推理算法的知识表示语言.基于其较强的表达能力和有效的推理服务,描述逻辑在语义 Web 中发挥着重要作用,已经成为语义 Web 表示知识和实现推理任务的逻辑基础.此外,基于描述逻辑推理机制的有效性,描述逻辑近年来在服务匹配、软件工程以及数据库等领域也得到了广泛的应用^[1,2].

对于描述逻辑在数据库中的应用问题,Baader^[1],Borgida^[3]以及蒋运承^[4]等人指出了描述逻辑在数据库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.如果能够将数据库模型转化为描述逻辑知识库,则可以利用描述逻辑的推理机制对数据库模型的相关推理问题(如 ER 模型中实体的可满足性、面向对象数据模型中类的包含关系等)进行自动推理,从而能够克服目前数据库模型推理中存在的不足(一般情况下,数据库模型的推理需要设计者手工进行,且推理效率和可靠性不高、完备性得不到保证等^[1,3-5]).

基于此目的,为了利用描述逻辑的推理机制对数据库模型的相关问题进行推理,许多工作研究了如何在描述逻辑和数据库模型(如 ER 模型^[1,5]、时序 ER 模型^[6]、EER 模型^[7]、XML 模型^[8]、UML 模型^[9]以及面向对象数据模型^[1,5]等)之间建立对应关系.针对面向对象数据模型的推理问题,文献[1,5]建立了面向对象数据模型和描述逻辑在概念层上的对应关系,其中,面向对象数据模型的一些重要特性(例如基数限制、属性的逆、数据库实例等)并未被考虑.有关各种数据库模型与描述逻辑之间的对应关系详见本文第 5 节.

在现实世界应用中,信息常常是模糊和不精确的.针对模糊知识处理,许多研究工作已经对传统数据库模型进行了模糊化扩展,提出了多种形式的模糊数据库模型,如模糊 ER 模型、模糊面向对象数据模型等(见综述文献[10,11]).同样,为了使描述逻辑能够表示和推理模糊和不精确知识,研究者提出了各种形式的模糊描述逻辑(fuzzy DLs),例如 f-ALC^[12],EFALCN^[13],EFALC_{R+}^[14],f-ALCIQ^[15],f-SHIN^[16],FSHOIQ^[17]等(见文献[18]).应当指出的是,目前虽然已经存在多种形式的模糊数据库模型和模糊描述逻辑,但有关如何利用模糊描述逻辑对模糊数据库模型进行表示和推理的研究却很少.上面提到的利用描述逻辑推理机制对数据库模型进行自动推理的研究工作,只能处理精确知识,不能处理模糊和不精确知识.

针对如何利用模糊描述逻辑对模糊数据库模型进行表示和推理,蒋运承^[4]和Zhang^[19]分别实现了从模糊 ER 模型到模糊描述逻辑 FALNUI 和 FDLR 知识库的转化.需要指出的是,作为一种重要的数据库建模方法,与传统模糊 ER 模型和模糊关系数据模型相比,模糊面向对象数据(FOOD)模型能够表示含不确定信息的更为复杂的对象以及对对象间的语义关系等,已经被广泛应用到数据与知识密集型应用领域(如多媒体技术、CAD/CAM 以及数据库等领域)^[20-29],同时也产生了如何有效推理 FOOD 模型的需求.但是,有关利用模糊描述逻辑对 FOOD 模型进行表示与推理的研究,目前尚未见到有文章发表.

为了实现对模糊面向对象数据库的自动推理,本文研究基于模糊描述逻辑的模糊面向对象数据(FOOD)模型的表示与推理问题.首先,进一步研究了 FOOD 模型,提出了一种 FOOD 模型的形式化定义和语义定义,以便更好地在 FOOD 模型与模糊描述逻辑之间建立对应关系.然后,针对 FOOD 模型的特点,介绍了模糊描述逻辑 f-ALCIQ^[15].在此基础上,实现了 FOOD 模型的 f-ALCIQ 表示,即实现了从 FOOD 模型到 f-ALCIQ 知识库在结构层和实例层上的转化,也就是从 FOOD 模型到 f-ALCIQ TBox 的转化,以及从 FOOD 模型相应的数据库实例到 f-ALCIQ ABox 的转化.进一步,基于转化得到的 f-ALCIQ 知识库,研究了如何利用 f-ALCIQ 的推理机制对 FOOD 模型的一致性、包含性和冗余性等推理问题进行推理,同时也给出了推理问题的正确性证明.最后,设计并实现了支持受限数量约束 Q 的基于 f-ALCIQ 的模糊描述逻辑推理机(FRsQ 推理机),与已有的推理机相比(详见第 4.2 节),FRsQ 能够直接支持 f-ALCIQ 概念知识和 FOOD 模型的自动推理.

本文第 1 节给出 FOOD 模型的形式化定义和语义定义.第 2 节介绍 f-ALCIQ.第 3 节实现从 FOOD 模型和

相应的数据库实例到 f-ALCIQ 知识库的转化.第 4 节利用 f-ALCIQ 的推理机制研究 FOOD 模型的推理问题,并设计与实现 FRsQ 推理机.第 5 节介绍相关工作.最后总结并提出下一步的工作.

1 模糊面向对象数据(FOOD)模型

本节在进一步研究 FOOD 模型的基础之上,给出了 FOOD 模型的形式化定义和语义定义,以便更好地在 FOOD 模型与模糊描述逻辑之间建立对应关系.本文不仅考虑了大多数研究工作中(例如文献[20,24,25,27-29]等)提到的 FOOD 模型的基本概念(例如类和继承等),还进一步考虑了基数限制、属性的逆、方法以及数据实例.

1.1 FOOD模型

FOOD 模型^[20-29]是对传统面向对象数据模型(OODM)的模糊化扩展,即对 OODM 中的对象、类、对象-类关系、继承关系等概念进行模糊扩展.下面简单介绍 FOOD 模型中的一些基本概念.

1.1.1 模糊对象

对象用于模拟现实世界中的实体,每一个对象都由一个对象标识(OID)唯一标识.一个对象是模糊的,由于其缺少信息^[28].形式上,模糊对象是指那些具有模糊属性值的对象.

1.1.2 模糊属性

一个对象可有其相应的属性(properties),包括描述该对象的静态结构属性(attributes)以及动态行为属性(methods).一个模糊对象的相应属性值是模糊的,可以用模糊集或可能性分布来表示^[24,25,28].例如,一个学生“Mary”的年龄可以用模糊集“年轻”或可能性分布 $\{20/0.5, 23/0.86, 25/1\}$ 来表示;或者一个方法的返回结果是模糊的^[27],如方法 `isCollege():String` 用于表示返回一个对象所在的学院,其中, `isCollege` 表示方法名,输入参数为空以及返回值为 `String` 类型.例如,对象 `Mary` 通过调用该函数返回值为“信息学院/0.8”,即 `Mary` 以大小为 0.8 的隶属度属于“信息学院”.

1.1.3 模糊类

具有相同属性的多个对象构成一个类.在 FOOD 模型中,一个类是模糊的,可能由于下面的原因^[25,28]所致:

- (1) 当一个类是由属于该类的对象定义而成时(外延类),若其中某些对象是模糊的,则该类可能是模糊类.也就是说,一个对象属于该类有一个隶属度 $u \in [0,1]$;
- (2) 当一个类是由一个属性集合以及这些属性的值定义而成时(内部类),若某些属性的值域是模糊的,则该类是模糊类;
- (3) 在子类/超类关系中,由一个模糊超类通过特化产生的子类 and 由一些模糊子类通过概化产生的超类都可能是模糊类.

图 1 给出了一个模糊类 `Young-Employee`,其中:

- (1) 属性 $u \in [0,1]$ 被引入,用于表示一个对象属于该类的隶属度,文献[24,25]给出了隶属度 u 的计算方法;
- (2) 模糊关键字 `FUZZY` 置于属性前表示该属性是模糊属性.

<i>Young-Employee</i>
Name: String
<i>FUZZY</i> age: Integer
<i>FUZZY</i> salary: Integer
u

Fig.1 A fuzzy class `Young-Employee` in a FOOD model

图 1 一个 FOOD 模型中的一个模糊类 `Young-Employee`

1.1.4 模糊继承关系

类继承(inheritance)是类概括(generalization)的一个特例,用于表示子类(subclass)和超类(superclass)之间的关系.由模糊类通过继承关系产生的类可能是模糊类,此时,子类/超类关系也是模糊的,即一个类是另一个类的

子类有一个隶属度.文献[24,25,28]给出了子类属于超类的隶属度的计算方法.多个继承关系构成了类的层次关系(如图2所示),图2表示 *Employee* 是由 *Young-Employee* 和 *Old-Employee* 构成.

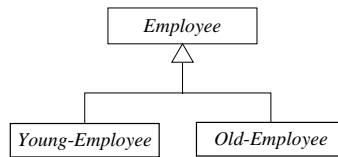


Fig.2 A fuzzy hierarchy relationship in a FOOD model

图2 一个 FOOD 模型中的一个模糊层次关系

1.1.5 FOOD 模型

一个 FOOD 模型是由上述基本概念构成的^[26].在 FOOD 模型中,存在 3 层模糊性^[25,28]:

- (1) 第 1 层是属性层,即属性的值域是模糊的.如雇员 Chris 的年龄值是一个可能性分布 {21/0.9,25/0.7};
- (2) 第 2 层是对象/类层,即一个对象属于一个类有一个隶属度;
- (3) 第 3 层是子类/超类层,即一个类是另一个类的子类有一个隶属度.

基于上面介绍的 FOOD 模型的基本概念,下一节提出 FOOD 模型的形式化定义.

1.2 FOOD模型的形式化定义

下面给出 FOOD 模型的一种形式化定义.在经典面向对象数据模型形式化定义^[1,5]的基础之上,本文进一步考虑了集合的基数限制、属性的逆、方法(method)以及数据库实例等.形式上,一个 FOOD 模型是一个类声明的有限集合,用于限制哪些对象是类的实例.

定义 1(FOOD 模型). 一个 FOOD 模型是一个三元组 $FS=(FC_{FS},FA_{FS},FD_{FS})$,其中:

- FC_{FS} 是一个模糊类符号的有限集合,用 FC 表示模糊类;
- FA_{FS} 是一个模糊属性符号的有限集合,用 FA 表示模糊属性;
- FD_{FS} 是一个模糊类声明的集合,且每个模糊类仅有一个声明,其中模糊类声明形式如下:

Class FC is-a FC_1, \dots, FC_n type-is FT ,

其中,*is-a* 表示子类/超类关系,*type-is* 是通过一个类型表达式 FT 来指派哪些对象是模糊类 FC 的实例. FT 根据下面的语法构成:

```

FT → FC |
    Union  $FT_1, \dots, FT_k$  End |
    Set-of  $FT ([m_1, n_1], [m_2, n_2])$  |
    Record  $FA_1:FT_1, \dots, FA_k:FT_k$  End |
     $f(\cdot):R$ .
  
```

其中,Union...End 表示 FC 是由 FT_1, \dots, FT_k 构成;Set-of 表示集合类型;Record...End 表示记录类型; $f(\cdot):R$ 表示方法,其中 f 为方法名(本文这里仅考虑参数为空的情形), R 为返回结果.

为了更好地解释定义 1 的含义,下面给出一个 FOOD 模型(如图 3 所示)以及该模型相应的数据库实例(如图 4 所示):

- (1) 图 3 给出了一个简化的 FOOD 模型 FS_1 ,用于模拟一个公司的部分信息.其中,
 - 模糊关键字 *FUZZY* 置于属性前表示该属性是模糊属性;
 - 集合 Set-of 类型的基数限制[(1,5),(1,1)]表示每个 *Chief-Leader* 可以管理至少 1 个和至多 5 个 *Young-Employees*,而一个 *Young-Employee* 由一个 *Chief-Leader* 所领导.
- (2) 图 4 给出与 FOOD 模型 FS_1 相应的数据库实例(仅部分数据),这能更直观地说明为什么图 3 中的 FOOD 模型 FS_1 是模糊的.在图 4 中,一个对象标识符 *OID(object identifier)*唯一地标识一个对象:

- 首先介绍第 1 层模糊性,即属性层.在图 4 中,年轻雇员 Chris 的 Age 和 Salary 是模糊的.假定目前并不知道 Chris 的 Age 确切是多大,其由一个可能性分布{20/0.9,25/0.8}来表示.类似地,对象 O_1 的属性 Manage 也是模糊的,用一个可能性分布{ $O_2/0.7, O_3/0.8$ }来表示;
- 其次,介绍第 2 层模糊性,即对象/类层.一个属性 $u \in [0,1]$ 被引入,用于表示一个对象属于一个类的隶属度.例如, $u=0.9$ 表示一个对象 Chris 以 0.9 大小的隶属度属于 *Young-Employee* 类;
- 另外,对于第 3 层模糊性,即子类/超类层的模糊性,文献[24,25,28]指出,子类/超类关系可以通过对象/类关系来评价(即任何对象属于子类的隶属度一定小于等于其属于超类的隶属度),并且间接给出了一个子类属于一个超类的隶属度的计算方法,因此,图 4 并没有给出该层的模糊性.

```

Class Employee type-is
  Union Young-Employee, Old-Employee
End
Class Young-Employee is-a Employee type-is
  Record
    Name: String
    FUZZY Age: Integer
    FUZZY Salary: Integer
  End
Class Chief-Leader is-a Leader type-is
  Record
    Number: String
    FUZZY Manage: Set-of Young-Employee[(1,5),(1,1)]
  End
    
```

Fig.3 A FOOD model FS_1 modeling part of the reality at a company

图 3 一个用于模拟某公司部分信息的 FOOD 模型 FS_1

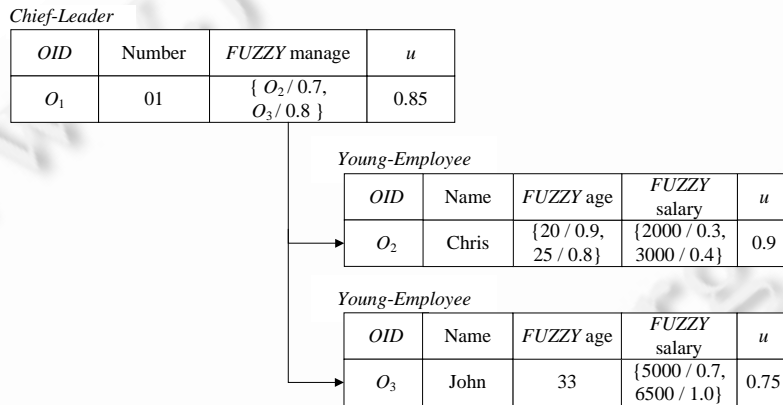


Fig.4 A fragment of a database instance w.r.t. the FOOD model FS_1 in Fig.3

图 4 一个数据库实例(相对于图 3 中的 FOOD 模型 FS_1)的部分表示数据

1.3 FOOD模型的语义

上一节给出了 FOOD 模型的形式化定义,下面给出其形式化的语义解释方法.一个 FOOD 模型的形式化语义可以通过模糊数据库状态 FJ(fuzzy database state)来给定,即通过指定哪些模糊数据库状态(即数据库实例,如图 4 所示)与相应的 FOOD 模型(如图 3 所示)相一致来给定.一个 FJ 用来处理两种数据:(1) 个体对象,且每个对象都有一个对象标识符 OID;(2) 对象所对应的属性值,也就是对象在数据库中的“真实状态”.下面给出 FJ 的形式化定义.

定义 2(FOOD 模型的语义). 与 FOOD 模型对应的模糊数据库状态 FJ 是由一个模糊解释 $FI_{FD}=(FV_{FJ}, \pi^{FJ}, \rho^{FJ}, \bullet^{FJ})$ 给出的:

- (1) FV_{FJ} 表示模糊对象所对应的一个有限值的集合,其中, $FV_{FJ}=FD\cup FO^{FJ}\cup FV_{FR}\cup FV_{FS}$:
- $FD = \bigcup_{i=1}^n FD_i$, 其中, FD_i 代表一个模糊域, $FD_i \cap FD_j = \emptyset, i \neq j$. 对于非模糊属性, 每个域由基本类型如 Integer, Real, String 等构成; 对于模糊属性, 每个域由可能性分布^[30,31]构成;
 - $FO^{FJ} = \{o_1/u_1, \dots, o_n/u_n\}$, 其中, o_i 表示一个对象, 且每个对象属于一个类具有一个隶属度 $u_i \in [0, 1]$;
 - FV_{FR} 是一个记录值(record-value)的集合, 集合中的每个记录形如 $[FA_1:FV_1, \dots, FA_k:FV_k]$. 其中, FA_i 表示属性, $FV_i \in FV_{FJ}, i \in \{1, \dots, k\}$;
 - FV_{FS} 是一个集合值(set-value)的集合, 集合中的每个元素形如 $\{FV_1, \dots, FV_k\}$. 其中, $FV_i \in FV_{FJ}, i \in \{1, \dots, k\}$;
- (2) 一个映射 π^{FJ} 将每个模糊类 FC 映射为一个 FO^{FJ} 的子集;
- (3) 一个映射 ρ^{FJ} 将 FO^{FJ} 中的每个模糊对象映射为一个 FV_{FJ} 中的值;
- (4) 一个模糊函数 \bullet^{FJ} 将 FOOD 模型中的模糊类型表达式 FT (见定义 1) 解释为:
- 如果 FT 是一个模糊类 FC , 则 $FT^{FJ} = FC^{FJ} = \pi^{FJ}(FC)$;
 - 如果 FT 是 Union FT_1, \dots, FT_k End, 则 $FT^{FJ} = FT_1^{FJ} \cup \dots \cup FT_k^{FJ}$;
 - 如果 FT 是一个 Record 类型或者 Set-of 类型, 则 FT^{FJ} 是一个与 FT 结构相一致的 FV_{FR} 值或 FV_{FS} 值的集合, 其中, 方法包括在 Record 类型中.

进一步地, 当一个 FJ 满足 FOOD 模型中所有完整性约束时, 则该模糊数据库状态 FJ 被认为是可接受的, 此时, 称该 FJ 为合法的模糊数据库状态(定义 3).

定义 3. 给定任意 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS}, FA_{FS}, FD_{FS})$, 与 FS 相对应的一个模糊数据库状态 FJ 是合法的, 当且仅当对每个类声明: Class FC is-a FC_1, \dots, FC_n type-is FT , 该 FJ 满足下列两个条件:

- (1) $FC^{FJ}(o) \leq FC_i^{FJ}(o)$, 其中, $o \in \pi^{FJ}(FC), i \in \{1, \dots, n\}$;
- (2) $\rho^{FJ}(FC^{FJ}) \subseteq FT^{FJ}$.

上面给出的 FOOD 模型的形式化定义和语义定义将有助于更好地在 FOOD 模型和模糊描述逻辑之间建立对应关系. 下一节针对上述 FOOD 模型的特点, 介绍相应的模糊描述逻辑 f-ALCIQ.

2 模糊描述逻辑 f-ALCIQ

为了利用描述逻辑对 FOOD 模型进行表示和有效的自动推理, 需要使用一种模糊描述逻辑. 考虑到需要在描述逻辑表达能力和推理复杂性之间进行权衡, 针对第 1 节中 FOOD 模型的特点和推理需求, 在文献[1,4,5,13,16,17,32]的基础上, 本文采用模糊描述逻辑 f-ALCIQ(fuzzy ALCIQ)^[15], 且在后面第 4 节, 本文将进一步实现基于 f-ALCIQ 的模糊描述逻辑推理机. 下面简单介绍 f-ALCIQ 的语法、语义、知识库以及推理问题等.

2.1 f-ALCIQ 语法

模糊描述逻辑 f-ALCIQ 是对 ALCIQ^[1]进行了模糊化推广, 其语法如下.

定义 4(语法). 假设 C, R, I 分别是 f-ALCIQ 的不相交的概念名、角色名以及个体名的集合. 假设 A 是 C 中的概念名, C 和 D 表示 C 中的任意概念, P 表示 R 中原子关系名, R 表示 R 中的任意关系, $n \in N$ (自然数集). f-ALCIQ 概念和角色按如下规则定义:

$$C, D \rightarrow \top | \perp | A | \neg C | C \cap D | C \cup D | \exists R.C | \forall R.C | \geq nR.C | \leq nR.C$$

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

2.2 f-ALCIQ 语义

模糊描述逻辑 f-ALCIQ 的语义是根据 Zadeh 对模糊集的语义解释方法^[30]和 ALCIQ 的语义解释给出的.

定义 5(语义). 模糊描述逻辑 f-ALCIQ 的语义是由模糊解释 $FI=(\mathcal{A}^{FI}, \bullet^{FI})$ 给出的, 其中, \mathcal{A}^{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 d ,解释函数 \bullet^{FI} 把 d 映射到 Δ^{FI} 的一个元素,即 $d^{FI} \in \Delta^{FI}$;
- 对概念名 A ,解释函数 \bullet^{FI} 将 A 映射为一个隶属函数,即 $A^{FI}: \Delta^{FI} \rightarrow [0,1]$;
- 对关系 R ,解释函数 \bullet^{FI} 将 R 映射为一个隶属函数,即 $R^{FI}: \Delta^{FI} \times \Delta^{FI} \rightarrow [0,1]$;

• f-ALCIQ 的语义解释如下(对任意个体 $c, d \in \Delta^{FI}$):

$$\begin{aligned} \top^{FI}(d) &= 1 & \perp^{FI}(d) &= 0 & (\neg C)^{FI}(d) &= 1 - C^{FI}(d) \\ (C \cap D)^{FI}(d) &= \min\{C^{FI}(d), D^{FI}(d)\} & (C \cup D)^{FI}(d) &= \max\{C^{FI}(d), D^{FI}(d)\} \\ (\forall R.C)^{FI}(d) &= \inf_{d' \in \Delta^{FI}} \{\max\{1 - R^{FI}(d, d'), C^{FI}(d')\}\} \\ (\exists R.C)^{FI}(d) &= \sup_{d' \in \Delta^{FI}} \{\min\{R^{FI}(d, d'), C^{FI}(d')\}\} \\ (\geq nR.C)^{FI}(d) &= \sup_{c_1, \dots, c_n \in \Delta^{FI}} \wedge_{i=1}^n \{\min\{R^{FI}(d, c_i), C^{FI}(c_i)\}\} \\ (\leq nR.C)^{FI}(d) &= \inf_{c_1, \dots, c_{n+1} \in \Delta^{FI}} \vee_{i=1}^{n+1} \{\max\{1 - R^{FI}(d, c_i), C^{FI}(c_i)\}\} \\ (R^-)^{FI}(c, d) &= R^{FI}(d, c) \end{aligned}$$

2.3 f-ALCIQ 知识库

一个 f-ALCIQ 知识库(记作 \mathbf{K})通常包含两个部分: TBox T 和 ABox A .

定义 6(TBox). 一个 TBox T 包含了应用领域的内涵知识,是模糊概念公理的有限集合.模糊概念公理包括概念包含 $A \subseteq C$ 和概念等价 $A \equiv C$,其中, A 表示概念名, C 表示任意概念.模糊概念公理用 ϕ 表示,其语义如下:

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

若上述 TBox 中的模糊概念公理不存在循环,则称该 TBox 为简单 TBox,其中,非循环是指在 $A \subseteq C$ 或 $A \equiv C$ 中不存在概念名 A 直接或间接引用其自身.此外,如果一个 TBox T 中含有 $C \subseteq D$ 或 $C \equiv D$,其中, C 和 D 都为任意概念,则该 TBox 被称为是一般 TBox^[1].

如果一个模糊解释 FI 满足模糊概念公理 ϕ ,则称 FI 是 ϕ 的模型.进一步地,如果 FI 满足 TBox 中的每一个模糊概念公理 ϕ ,那么 FI 满足 TBox,也称 FI 是 TBox 的一个模型.如果 TBox 存在一个模型,则称 TBox 是可满足的.

定义 7(ABox). 一个 ABox 包含了应用领域的知识,是一个模糊断言公式的有限集合.模糊断言公式包括:概念断言 $\langle C(d) \bowtie k \rangle$ 和角色断言 $\langle R(c, d) \bowtie k \rangle$,其中, $\bowtie \in \{ \geq, >, <, \leq \}, k \in [0, 1]$.模糊断言公式用 ψ 表示,其语义如下:

- 一个模糊解释 FI 满足公式 $\langle C(d) \bowtie k \rangle$, 当且仅当 $C^{FI}(d^{FI}) \bowtie k$;
- 一个模糊解释 FI 满足公式 $\langle R(c, d) \bowtie k \rangle$, 当且仅当 $R^{FI}(c^{FI}, d^{FI}) \bowtie k$.

如果一个模糊解释 FI 满足模糊断言 ψ ,则称 FI 是 ψ 的模型.进一步地,如果 FI 满足 ABox 中的每一个模糊断言 ψ ,那么 FI 满足 ABox,也称 FI 是 ABox 的一个模型.如果 ABox 存在一个模型,则称 ABox 是可满足的.

定义 8(知识库 \mathbf{K}). 一个 f-ALCIQ 模糊知识库 \mathbf{K} 由 TBox T 和 ABox A 构成,记作 $\mathbf{K} = \langle T, A \rangle$.一个模糊解释 FI 满足 \mathbf{K} (即 FI 是 \mathbf{K} 的一个模型),当且仅当 FI 是 T 和 A 的模型. \mathbf{K} 是可满足的,当且仅当存在 \mathbf{K} 的模型 FI .

2.4 f-ALCIQ 推理

下面介绍 f-ALCIQ 的常见推理问题.

定义 9(f-ALCIQ 推理问题). 对 f-ALCIQ 概念 C 和 D , f-ALCIQ 知识库 $\mathbf{K} = \langle T, A \rangle$ 常见推理问题主要包括:

- 概念可满足性(satisfiability):在 TBox T 的约束下,模糊概念 C 是可满足的,当且仅当存在 T 的模型 FI , 使得某个元素 $d \in \Delta^{FI}$ 满足 $C^{FI}(d^{FI}) > 0$;
- 概念包含(subsumption):在 TBox T 的约束下,概念 C 包含于概念 $D(C \subseteq D)$, 当且仅当任意 T 的模型 FI 都满足 $\forall d \in \Delta^{FI}, C^{FI}(d^{FI}) \leq D^{FI}(d^{FI})$;
- 知识库蕴涵(entailment):知识库 \mathbf{K} 蕴含模糊概念公理 ϕ 或模糊断言公式 ψ (记作 $\mathbf{K} \models \phi, \mathbf{K} \models \psi$), 当且仅当 \mathbf{K} 的任意模型 FI 都满足 ϕ 或 ψ ;
- 知识库/ABox 一致性(consistency):在 TBox T 的约束下, ABox A 是一致的,当且仅当存在 T 的模型 FI

也是 A 的模型,此时也称知识库 $K=(T,A)$ 是一致的;另外,若不考虑 $TBox$ T 约束或 $TBox$ T 为空时, A 是一致的,当且仅当存在 A 的模型 FI .

需要指出的是,这些推理问题之间可以相互转化.其中,概念可满足、概念包含以及知识库蕴涵问题都可以转化为知识库/ $ABox$ 一致性问题^[12,15,16].有关 f-ALCIQ 的推理算法已经在文献[15]中详细地介绍,本文在此不再赘述.此外,文献[19,32]也研究了在一般 $TBox$ 约束下的模糊描述逻辑推理问题.

基于上面提到的模糊描述逻辑 f-ALCIQ,下面第 3 节和第 4 节将详细介绍如何利用 f-ALCIQ 对 FOOD 模型进行表示以及自动推理.

3 FOOD 模型的 f-ALCIQ 表示

为了利用 f-ALCIQ 的推理机制对 FOOD 模型的一致性、包含性、冗余性等推理问题进行自动推理,首先需要在 FOOD 模型和 f-ALCIQ 知识库之间建立对应关系:(i) 实现结构层上的转化,即将 FOOD 模型转化为 f-ALCIQ 知识库中的 $TBox$ (见第 3.1 节);(ii) 实现实例层上的转化,即将与 FOOD 模型相应的数据库实例转化为 f-ALCIQ 知识库中的 $ABox$ (见第 3.2 节).

3.1 FOOD模型到f-ALCIQ TBox的转化

下面给出从 FOOD 模型到 f-ALCIQ $TBox$ 的形式化转化方法.在经典面向对象数据模型和描述逻辑 ALUN $TBox$ 对应关系^[1,5]的基础上,本文进一步将第 1 节提到的 FOOD 模型的所有约束(如类、属性、继承、基数限制、属性的逆、方法以及数据库实例等)转化为 f-ALCIQ 的知识库.

当在模糊描述逻辑和模糊面向对象数据模型之间建立对应关系时,必须考虑到由于模糊描述逻辑知识库的解释域是由原子对象组成,而模糊面向对象数据模型中的每个对象却对应着一个结构化的值.与文献[1,5]相类似,为了能够利用 f-ALCIQ 表示 FOOD 模型中的结构化信息,需要在 f-ALCIQ 知识库中引入如下的原子模糊概念、原子模糊关系以及相应的包含公理:(i) 原子模糊概念: $AbstractClass, RecType$ 和 $SetType$ 分别用于表示模糊类、记录类型(Record...End)和集合类型(Set-of...);(ii) 原子模糊关系: $value$ 用于模拟模糊类 FC 与其对应的模糊类型表达式 FT 之间的联系; $member$ 用于指派模糊类型表达式 FT 中集合类型中的元素;(iii) 假定表示类型的概念 $RecType$ 和 $SetType$ 是不相交的,且分别与表示模糊类的概念也不相交,那么所有这些约束可以用下面的包含公理表示:

$$AbstractClass \subseteq =1 \text{ value}; RecType \subseteq \forall \text{value}.\perp; SetType \subseteq \forall \text{value}.\perp \cap \neg RecType.$$

定义 10(结构转化). 给定一个 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS}, FA_{FS}, FD_{FS})$,与 FS 对应的 f-ALCIQ $TBox$ $\varphi(FS)=(FA, FP, FT)$ 按下列规则得到(为了表达清楚,在 f-ALCIQ $TBox$ 中,假设所有概念都以 $\varphi(\dots)$ 形式出现,如 $\varphi(FC)$ 等;而所有角色都省略掉 $\varphi(\dots)$,用字母直接表示,如 FA 等):

- (1) $\varphi(FS)$ 的原子模糊概念集合 FA 由下列元素组成:
 - 对每个模糊类 $FC \in FC_{FS}$,引入一个原子模糊概念 $\varphi(FC)$;
 - 对每个方法声明 $f(\cdot):R$ 中的 R ,引入一个原子模糊概念 $\varphi(R)$;
 - 引入上面提到的原子模糊概念 $AbstractClass, RecType, SetType$;
- (2) $\varphi(FS)$ 的原子模糊关系集合 FP 由下列元素组成:
 - 对每个模糊属性 $FA \in FA_{FS}$,引入一个原子模糊关系 FA ;
 - 对每个方法声明 $f(\cdot):R$,引入一个原子模糊角色 $R_{f(\cdot)}$,表示一个对象通过 $R_{f(\cdot)}$ 调用函数;
 - 引入上面提到的原子模糊关系 $value, member$.
- (3) $\varphi(FS)$ 的模糊公理集合 FT 由下列元素组成:
 - 引入上面提到的公理:
 - $AbstractClass \subseteq =1 \text{ value}$
 - $RecType \subseteq \forall \text{value}.\perp$
 - $SetType \subseteq \forall \text{value}.\perp \cap \neg RecType$;

- 每个模糊类 $FC \in FC_{FS}$ 相应的类声明 $\text{Class } FC \text{ is-a } FC_1, \dots, FC_n \text{ type-is } FT$ 对应着如下模糊公理:

$$\varphi(FC) \subseteq \text{AbstractClass} \cap \varphi(FC_1) \cap \dots \cap \varphi(FC_n) \cap \forall \text{value. } \varphi(FT).$$

其中,函数 φ 将每个模糊类型表达式 FT (见定义 1) 映射为一个 f-ALCIQ 概念表达式,规则如下:

- 每个模糊类 $FC \in FC_{FS}$, 被映射为一个原子模糊概念 $\varphi(FC)$;
- 每个类型表达式 $\text{Union } FT_1, \dots, FT_k \text{ End}$ 被映射为 $\varphi(FT_1) \cup \dots \cup \varphi(FT_k)$;
- 每个集合类型表达式 $FA \text{ Set-of } FT ([m_1, n_1], [m_2, n_2])$ 被映射为

$$\forall FA. (\text{SetType} \cap \forall \text{member. } \varphi(FT) \cap \geq m_1 \text{ member} \cap \leq n_1 \text{ member})$$

以及

$$\varphi(FT) \subseteq \geq m_2 FA^-. \varphi(FC) \cap \leq n_2 FA^-. \varphi(FC);$$

- 每个类型表达式 $\text{Record } f(\cdot):R \text{ End}$ 被映射为 $\forall R_{f(\cdot)}. \varphi(R) \cap \leq 1 R_{f(\cdot)}. \top$;
- 每个类型表达式 $\text{Record } FA_1:FT_1, \dots, FA_k:FT_k \text{ End}$ 被映射为

$$\text{RecType} \cap \forall FA_1. \varphi(FT_1) \cap = 1 FA_1 \cap \dots \cap \forall FA_k. \varphi(FT_k) \cap = 1 FA_k.$$

下面给出定义 10 的正确性证明,即通过在 FOOD 模型与转化后的 f-ALCIQ TBox 模型之间建立相互映射,来证明上述转化函数 φ 能够正确地将 FOOD 模型转化为 f-ALCIQ TBox.

定理 1. 给定任意 FOOD 模型 $FS = (FC_{FS}, FA_{FS}, FD_{FS})$, 若 FS 对应的合法模糊数据库状态为 FJ , 以及通过定义 10 将 FS 转化后的 f-ALCIQ TBox 为 $\varphi(FS)$, 则存在如下 4 种映射关系, 即, α_{FS} 是从 FS 对应的 $FJ \rightarrow \varphi(FS)$ 的模糊解释 FI, α_{FV} 是从 FJ 中的值 (该值属于 FV_{FJ}) $\rightarrow \varphi(FS)$ 的解释域中的元素 (该元素属于 Δ^{FI}); 相反, β_{FS} 是从 $\varphi(FS)$ 的模糊解释 $FI \rightarrow FS$ 对应的 FJ, β_{FV} 是从 $\varphi(FS)$ 的解释域中的元素 (该元素属于 Δ^{FI}) $\rightarrow FJ$ 中的值 (该值属于 FV_{FJ}), 且满足:

- (1) 对 FS 的任意合法模糊数据库状态 FJ , 存在 $\alpha_{FS}(FJ)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型, 并且对 FS 中任意类型表达式 FT 以及任意 $v \in FV_{FJ}, v \in FT^{FJ}$, 有 $\alpha_{FV}(v) \in \varphi(FT)^{\alpha_{FS}(FJ)}$ 成立;
- (2) 对 $\varphi(FS)$ 的任意模糊解释 FI , 存在 $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS 的一个合法模糊数据库状态, 并且对 $\varphi(FS)$ 中的任意概念表达式 $\varphi(FT)$ 以及任意 $d \in \Delta^{FI}, d \in (\varphi(FT))^{FI}$, 有 $\beta_{FV}(d) \in FT^{\beta_{FS}(FI)}$ 成立.

需要说明的是,通过定义 10 能够将 FOOD 模型转化为 f-ALCIQ TBox,而定理 1 能够在 FOOD 模型对应的合法模糊数据库状态与 f-ALCIQ TBox 的模型之间建立对应关系,从而保证了定义 10 的正确性.另外,定理 1 是文献[5]中命题 5.9 的模糊化扩展,其证明与命题 5.9 的证明类似,因此,本文不再给出定理 1 的详细证明过程.

为了更好地说明上述定义 10 的转化过程,例 1 给出一个从 FOOD 模型到 f-ALCIQ TBox 的转化实例.

例 1:对于图 3 中的 FOOD 模型 FS_1 ,通过定义 10 可以得到如图 5 所示的 f-ALCIQ TBox $\varphi(FS_1)$.

```
f-ALCIQ TBox  $\varphi(FS_1) = (FA, FP, FT)$ :
FA = {AbstractClass, RecType, SetType, Chief-Leader, Leader, Old-Employee, Young-Employee, Employee, String, Integer}
FP = {value, member, Name, Age, Salary, Number, Manage}
FT = {AbstractClass  $\subseteq$  = 1 value
      RecType  $\subseteq$   $\forall$  value.  $\perp$ 
      SetType  $\subseteq$   $\forall$  value.  $\perp \cap \neg$  RecType
      Employee  $\subseteq$  AbstractClass  $\cap$   $\forall$  value. (Young-Employee  $\cup$  Old-Employee)
      Young-Employee  $\subseteq$  AbstractClass  $\cap$  Employee  $\cap$ 
         $\forall$  value. (RecType  $\cap$   $\forall$  Name. String  $\cap$  = 1 Name  $\cap$   $\forall$  Age. Integer  $\cap$  = 1
        Age  $\cap$   $\forall$  Salary. Integer  $\cap$  = 1 Salary  $\cap$  = 1 Manage  $\cap$  Chief-Leader)
      Chief-Leader  $\subseteq$  AbstractClass  $\cap$  Leader  $\cap$ 
         $\forall$  value. (RecType  $\cap$   $\forall$  Number. String  $\cap$  = 1
        Number  $\cap$   $\forall$  Manage. (SetType  $\cap$   $\forall$  member. Young-Employee  $\cap$   $\geq$  1 member  $\cap$   $\leq$  5 member))}.
```

Fig.5 f-ALCIQ TBox $\varphi(FS_1)$ derived from the FOOD model FS_1 in Fig.3

图 5 相应于图 3 中 FOOD 模型 FS_1 的 f-ALCIQ TBox $\varphi(FS_1)$

基于上述转化得到 f-ALCIQ TBox,下面研究从 FOOD 模型相应的数据库实例到 f-ALCIQ ABox 的转化.

3.2 FOOD模型相对应的数据库实例到f-ALCIQ ABox的转化

在第 3.1 节的基础上,本节介绍如何建立从 FOOD 模型到 f-ALCIQ 知识库在实例层上的映射,即从 FOOD 模型相对应的数据库实例到 f-ALCIQ ABox 的映射.首先给出 f-ALCIQ ABox 和模糊面向对象数据库中实例的形式化表示形式,进而建立两者之间的对应关系.

一个模糊描述逻辑 f-ALCIQ 知识库中的 ABox 包含了应用领域的外延知识,用于表示知识库中的个体实例,是一个模糊断言公式的有限集合(见定义 7).模糊断言公式包括:概念断言 $\langle C(d) \bowtie k \rangle$ 和角色断言 $\langle R(c,d) \bowtie k \rangle$, $\bowtie \in \{ \geq, >, \leq, < \}$, $k \in [0,1]$.

一个模糊面向对象数据库通过利用对象(objects)、值(values)以及它们之间的相互关系来描述现实世界^[24,25,28],其存在 3 层模糊性(见第 1.1.5 节,即对象/类层、属性层以及子类/超类层).相对于 FOOD 模型的数据库实例可以形式化表示如下:

- (i) 模糊断言 $FO:FC:u$ 表示一个模糊对象 FO 属于一个模糊类 FC 的隶属度是 u ,其中, $u \in [0,1]$;
- (ii) 模糊断言 $FO:[FA_1:FV_1:k_1, \dots, FA_k:FV_k:k_k]$ 表示模糊对象 FO 对应的属性值,其中: FA_i 表示对象 FO 所属类 FC 中定义的属性; $FV_i \in FV_{F_i}$ (见定义 2), $k_i \in [0,1]$ 表示隶属度, $i \in \{1, \dots, k\}$.另外,由于一个属性 FA_i 的值可能是一个可能性分布,为了简化,上述断言式中的 $FV_i:k_i$ 仅仅表示可能性分布中的一个元素;
- (iii) 正如第 1.2 节中提到的,文献[24,25,28]指出子类/超类关系可以通过对象/类关系来评价(即任何对象属于子类的隶属度一定小于等于其属于超类的隶属度),并且间接给出了一个子类属于一个超类的隶属度的计算方法.于是,有关子类/超类关系的断言形式可以用上述两种断言形式来表示.

基于上面提到的方法,则给定任意 FOOD 模型相应的数据库实例,都可以用上述几种断言形式来表示.于是,给定一个 FOOD 模型 FS 和相应的数据库实例 FJ ,通过定义 10 可以将 FOOD 模型转化为 f-ALCIQ TBox,并通过定理 1 中的两个映射函数 α_{FV} 和 β_{FV} 可以在 FJ 对应的值 FV_{FJ} 和 f-ALCIQ 知识库的解释域 Δ^I 之间建立对应关系.在此基础上,下面定义 11 给出从 FOOD 模型到 f-ALCIQ ABox 在实例层上的映射规则.

定义 11(实例转化). 给定一个 FOOD 模型相应的数据库实例,相应的 f-ALCIQ ABox 按下列规则得到:

- (1) 数据库实例中的模糊对象 FO 被转化为 f-ALCIQ ABox 中的个体 FO ;
- (2) 任意模糊断言 $FO:FC:u$ 被转化为 ABox 断言 $\langle \varphi(FC)(FO) \bowtie' u \rangle$,其中, \bowtie' 表示 \geq 和 \leq ,即 $\langle \varphi(FC)(FO) \bowtie' u \rangle$ 表示 $\langle \varphi(FC)(FO) \geq u \rangle$ 和 $\langle \varphi(FC)(FO) \leq u \rangle$, $\varphi(FC)$ 见定义 10;
- (3) 对于模糊断言 $FO:[FA_1:FV_1:k_1, \dots, FA_k:FV_k:k_k]$,其中, FA_i 被映射为一个模糊角色(见定义 10),该角色的第 1 个成分是 FO ,第 2 个成分是 $FV_i \in FV_{F_i}$, $i \in \{1, \dots, k\}$,即被映射为断言 $\langle FA_i(FO, FV_i) \bowtie' k_i \rangle$,其中, \bowtie' 同上.此外,如果模糊角色 FA_i 存在逆角色,则需要建立相应的断言形式 $\langle FA_i^-(FV_i, FO) \bowtie' k_i \rangle$.

例 2 给出一个从 FOOD 模型相应的数据库实例到 f-ALCIQ ABox 的转化实例.

例 2:给定图 4 中的一个数据库实例(相对于图 3 中的 FOOD 模型 FS_1),通过上述定义 11,可以得到如图 6 所示的 f-ALCIQ ABox(相对于图 5 中的 f-ALCIQ TBox $\varphi(FS_1)$).为了简化,图 6 仅给出部分断言形式.

$Young-Employee(O_2) \geq 0.9$ $Young-Employee(O_2) \leq 0.9$ $Name(O_2, Chris) \geq 1$ $Name(O_2, Chris) \leq 1$ $Age(O_2, 20) \geq 0.9$ $Age(O_2, 20) \leq 0.9$ $Salary(O_2, 2000) \geq 0.3$ $Salary(O_2, 2000) \leq 0.3$ $Manage^-(O_2, O_1) \geq 0.7$ $Manage^-(O_2, O_1) \leq 0.7$ $Young-Employee(O_3) \geq 0.75$ $Young-Employee(O_3) \leq 0.75$	$Name(O_3, John) \geq 1$ $Name(O_3, John) \leq 1$ $Age(O_3, 33) \geq 1$ $Age(O_3, 33) \leq 1$ $Chief-Leader(O_1) \geq 0.85$ $Chief-Leader(O_1) \leq 0.85$ $Number(O_1, O_1) \geq 1$ $Number(O_1, O_1) \leq 1$ $Manage(O_1, O_2) \geq 0.7$ $Manage(O_1, O_2) \leq 0.7$...
--	---

Fig.6 f-ALCIQ ABox derived from the database instance in Fig.4

图 6 相应于图 4 中数据库实例的 f-ALCIQ ABox

通过前面章节的介绍可以看出,在 FOOD 模型和模糊描述逻辑之间确实存在对应关系,从而可以利用模糊描述逻辑的推理机制对 FOOD 模型的推理问题进行自动推理.下面介绍如何利用 f-ALCIQ 的推理机制对 FOOD 模型的推理问题进行自动推理.

4 基于 f-ALCIQ 的 FOOD 模型的推理

常见的有关 FOOD 模型的推理主要包括一致性、包含性以及冗余性等推理问题.一般情况下,目前在数据库设计阶段设计者需要手工对上述问题进行推理,其存在一些不足之处,例如推理效率和可靠性不高、完备性得不到保证等^[1,3-5,26].通过第 3 节,可以将 FOOD 模型以及相应的数据库实例转化为相应的 f-ALCIQ 知识库,从而可以利用 f-ALCIQ 的推理机制对 FOOD 模型的推理问题进行自动推理,克服目前 FOOD 模型推理中所存在的不足.

下面研究如何利用 f-ALCIQ 的推理机制对 FOOD 模型的推理问题进行自动推理,包括:(i) 将 FOOD 模型的推理问题转化为 f-ALCIQ 的推理问题;(ii) 实现基于 f-ALCIQ 的模糊描述逻辑推理机,从而实现对 FOOD 模型的自动推理.

4.1 FOOD模型的推理问题到f-ALCIQ推理问题的转化

下面研究如何将 FOOD 模型的推理问题(例如一致性、包含性以及冗余性等)转化为 f-ALCIQ 的推理问题.详细地,定理 2~定理 5 给出了将上述推理问题转化为 f-ALCIQ 推理问题的方法.

定理 2(数据库一致性). 给定一个 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS},FA_{FS},FD_{FS})$ 以及相应的数据库实例 $\mathbf{K}=(TBox,ABox)$ 是通过第 3 节给出的定义 10 和定义 11 转化后得到的 f-ALCIQ 知识库,则判断该数据库实例是否相对于 FS 是一致的,可以转化为判断在 TBox 约束下的 ABox 是否一致,即知识库 \mathbf{K} 是否一致.

定理 2 是根据第 3.1 节和第 3.2 节中的转化过程给出的,其证明实质上就是相应的转化过程(即从 FOOD 模型和数据库实例到 f-ALCIQ TBox 和 ABox 的转化过程).因此,这里不再给出定理 2 的详细证明过程.

定理 3(类一致性). 给定一个 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS},FA_{FS},FD_{FS})$, FC 是 FS 中的一个类, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过定义 10 转化后得到的 f-ALCIQ TBox,则 FC 是一致的,当且仅当 $\varphi(FS) \not\models \varphi(FC) \sqsubseteq \perp$.

证明:先证明 \Rightarrow .若 FC 是一致的,则存在一个合法的模糊数据库状态 FJ ,使得 $FC^{FJ} \neq \emptyset$,即存在 $v \in FV_{FJ}$ 且有 $v \in FC^{FJ}$.由定理 1 中的情形(1)可知, $\alpha_{FS}(FJ)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型,且有 $\alpha_{FV}(v) \in \varphi(FC)^{\alpha_{FS}(FJ)}$ 成立.即 $\varphi(FC)^{\alpha_{FS}(FJ)} \neq \emptyset$,而有 $\varphi(FS) \not\models \varphi(FC) \sqsubseteq \perp$.

再证明 \Leftarrow .若 $\varphi(FS) \not\models \varphi(FC) \sqsubseteq \perp$,即 $\varphi(FC)$ 是一致的,则存在一个模糊解释 FI 使得 $\varphi(FC)^{FI} \neq \emptyset$,即存在元素 $d \in \Delta^{FI}$ 且有 $d \in \varphi(FC)^{FI}$.由定理 1 中的情形(2)可知, $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS 的一个合法模糊数据库状态,且有 $\beta_{FV}(d) \in FC^{\beta_{FS}(FI)}$ 成立,即 $FC^{\beta_{FS}(FI)} \neq \emptyset$.也就是说,存在一个合法的模糊数据库状态使得 FC 是一致的. \square

定义 12(包含性). 给定一个 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS},FA_{FS},FD_{FS})$, FC_1 和 FC_2 是 FS 中的两个类,若对于 FS 中任意合法模糊数据库状态 FJ , FC_1^{FJ} 都是 FC_2^{FJ} 的一个子集,则称 FC_1 是 FC_2 的子类,记作 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$.

定理 4(类包含性). 给定一个 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS},FA_{FS},FD_{FS})$, FC_1 和 FC_2 是 FS 中的两个类, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过定义 10 转化后得到的 f-ALCIQ TBox,则 FC_1 是 FC_2 的子类(即 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$),当且仅当 $\varphi(FS) \models \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$.

证明:先证明 \Rightarrow .假设 $\varphi(FS) \not\models \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$,即 $\varphi(FC_1) \cap \neg \varphi(FC_2)$ 是一致的,则存在一个模糊解释 FI ,使得 $(\varphi(FC_1) \cap \neg \varphi(FC_2))^{FI} \neq \emptyset$,即存在元素 $d \in \Delta^{FI}$ 且有 $d \in \varphi(FC_1)^{FI}$ 和 $d \notin \varphi(FC_2)^{FI}$.由定理 1 中的情形(2)可知, $\beta_{FS}(FI)$ 是 FS 的一个合法模糊数据库状态,且有 $\beta_{FV}(d) \in FC_1^{\beta_{FS}(FI)}$ 和 $\beta_{FV}(d) \notin FC_2^{\beta_{FS}(FI)}$ 成立,即 FC_1 不是 FC_2 的子类,与 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$ 矛盾.所以, $\varphi(FS) \models \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$.

再证明 \Leftarrow .假设 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$ 不成立,则存在合法模糊数据库状态 FJ 和 $v \in FV_{FJ}$,使得 $v \in FC_1^{FJ}$ 和 $v \notin FC_2^{FJ}$ 成立.由定理 1 中的情形(1)可知, $\alpha_{FS}(FJ)$ 是 $\varphi(FS)$ 的一个模型,且有 $\alpha_{FV}(v) \in \varphi(FC_1)^{\alpha_{FS}(FJ)}$ 和 $\alpha_{FV}(v) \notin \varphi(FC_2)^{\alpha_{FS}(FJ)}$ 成

立,即 $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$ 成立,与 $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$ 矛盾.所以有 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$. \square

定义 13(冗余性). 给定一个 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS}, FA_{FS}, FD_{FS})$,若在 FS 中存在类 FC, FC_1 和 FC_2 ,使得 FC 为空或者 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$ 和 $FC_2 \leq_{FS} FC_1$ 成立,则称 FS 是冗余的.

定理 5(FOOD 模型冗余性). 给定一个 FOOD 模型 $FS=(FC_{FS}, FA_{FS}, FD_{FS})$, FC, FC_1 和 FC_2 是 FS 中的类, $\varphi(FS)$ 是 FS 通过定义 10 转化后得到的 f-ALCIQ TBox,则 FS 是冗余的,当且仅当下列两式至少有一个成立:

- (i) $\varphi(FS) \neq \varphi(FC) \sqsubseteq \perp$;
- (ii) $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$ 和 $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_2) \sqsubseteq \varphi(FC_1)$.

证明:先证明 \Rightarrow .若 FS 是冗余的,由定义 13 可知,则在 FS 中存在类 FC, FC_1 和 FC_2 ,使得 FC 为空或者 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$ 和 $FC_2 \leq_{FS} FC_1$ 成立.如果 FC 为空,即 FC 是不一致的,由定理 3 可知, $\varphi(FS) \neq \varphi(FC) \sqsubseteq \perp$;如果 $FC_1 \leq_{FS} FC_2$ 和 $FC_2 \leq_{FS} FC_1$ 成立,由定理 4 可知, $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$ 和 $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_2) \sqsubseteq \varphi(FC_1)$.

再证明 \Leftarrow .如果 $\varphi(FS) \neq \varphi(FC) \sqsubseteq \perp$,由定理 3 可知,即不存在合法的模糊数据库状态 FJ ,使得 $FC^{FJ} \neq \emptyset$,即 FC 为空;如果 $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_1) \sqsubseteq \varphi(FC_2)$ 和 $\varphi(FS) \neq \varphi(FC_2) \sqsubseteq \varphi(FC_1)$ 成立,由定理 4 可知, $FC_1 \leq_{FS} FC_2$ 和 $FC_2 \leq_{FS} FC_1$ 成立;从而 FS 是冗余的. \square

4.2 基于模糊描述逻辑 f-ALCIQ 的推理机 FRsQ

通过第 4.1 节将 FOOD 模型的推理问题转化为 f-ALCIQ 的推理问题之后,便可以利用 f-ALCIQ 的推理机制对 FOOD 模型的推理问题进行推理.为了实现自动推理,本节研究如何设计与实现基于 f-ALCIQ 的推理机.

近年来,国内外出现了一些模糊描述逻辑推理机,例如(按时间先后顺序),基于 f-SHIN 的 FiRE^[33]、基于 f-SROIQ(D)的 DeLorean^[34]、基于 f-ALC 的 GURDL^[35]和 GERDS^[36]、基于 f-SHIF(D)的 FuzzyDL^[37]和基于 f-ALC(G)的 FRESG^[38]等.其中,FiRE,GERDS,FuzzyDL 以及 FRESG 都是直接基于模糊描述逻辑 Tableau 推理算法实现的推理机;而 DeLorean,GURDL 是通过将模糊描述逻辑推理问题转化为经典描述逻辑实现的,正如文献 [37]指出,该类型推理机失掉了模糊描述逻辑本身的一些特点.然而,已存在的推理机并不能直接支持 f-ALCIQ 模糊概念知识的表示与推理(例如不能直接支持定义 6 中提到的一般 TBox 约束下的 f-ALCIQ ABox 一致性推理问题等),同样也不能完全支持 FOOD 模型的自动推理.因此,针对 FOOD 模型的特点和推理需求,本文设计并实现了能够直接支持受限数量约束 Q 的基于 f-ALCIQ 的模糊描述逻辑推理机,称为 FRsQ,它能够对 FOOD 模型和 f-ALCIQ 模糊概念知识进行自动推理.

FRsQ 推理机是基于模糊描述逻辑 f-ALCIQ 的 ABox 一致性检查算法^[15,32]实现的一个推理机,它的核心推理功能是用以检测在简单或一般 TBox 约束下的 ABox 一致性问题.需要指出的是,正如第 2.4 节提到的,由于概念可满足、概念包含以及知识库蕴涵等问题都可以转化为 ABox 一致性问题,因此 FRsQ 推理机同样可以检测概念可满足、概念包含、知识库蕴涵以及知识库一致性等推理问题.

与已存在的 FiRE^[33],FuzzyDL^[37]以及 FRESG^[38]推理机的实现过程相类似(都是直接基于模糊描述逻辑 Tableau 推理算法实现的推理机),下面简单介绍 FRsQ 推理机的设计与实现过程.

首先,图 7 给出 FRsQ 推理机的总体结构,其中包括 FRsQ 推理机的主要组成部分:推理转换(reasoning conversion)、编译器(compiler)、f-ALCIQ Tableau 推理机(f-ALCIQ tableau reasoner).FRsQ 推理机采用自顶向下的语法分析方法,全部代码在 VC 环境下编写,其中,推理转换部分能够实现将上文提到的推理问题转化为 ABox 一致性问题;编译器将面向用户的用 FRsQ 推理机语法(见表 1)表示的 ABox 文件转换为 f-ALCIQ Tableau 推理机可识别的用 f-ALCIQ 语法表示的 ABox 文件;f-ALCIQ Tableau 推理机能够对 f-ALCIQ 语法表示的 ABox 文件进行自动推理.

其次,对于 FRsQ 推理机语法(即用户输入 ABox 的语法规范),表 1 给出了 FRsQ 推理机中对概念和断言进行表示的语法以及对应的 f-ALCIQ 语法.其中, $\bowtie \in \{\geq, \leq, >, <\}$, $n \in N$ (自然数集), $k \in [0, 1]$,且 $\langle x: C, \bowtie, k \rangle$ 等价于定义 7 中的概念断言形式 $C(x) \bowtie k$, $\langle (x, y): R, \bowtie, k \rangle$ 等价于定义 7 中的角色断言形式 $R(x, y) \bowtie k$.

FRsQ 推理机语法有如下约束:(i) 所有的表示和声明都在括号内;(ii) 用“空格”间隔开不同的关键字;(iii) 用“ $\geq, \leq, >, <$ ”分别表示“大于等于、小于等于、大于、小于”;(iv) 用“;”表示模糊断言结束;(v) 在 FRsQ 推理机中输入 ABox 时,不必对将要用到的个体、变量、概念和角色等进行事先声明,FRsQ 推理机的编译环境支持直接编程输入知识库的知识;(vi) 用“|”表示 ABox 的输入结束;(vii) 用“;”表示注释.

Table 1 FRsQ reasoner syntax and the corresponding f-ALCIQ syntax

表 1 FRsQ 推理机语法以及对应的 f-ALCIQ 语法

FRsQ 推理机语法	f-ALCIQ 语法
Top	T
Bottom	\perp
A	A
(inverse R)	R^{-}
(not C)	$\neg C$
(and $C_1 \dots C_n$)	$C_1 \cap \dots \cap C_n$
(or $C_1 \dots C_n$)	$C_1 \cup \dots \cup C_n$
(some $R C$)	$\exists R.C$
(all $R C$)	$\forall R.C$
(at-least $n R$)	$\geq n R$
(at-most $n R$)	$\leq n R$
(at-least $n R C$)	$\geq n R.C$
(at-most $n R C$)	$\leq n R.C$
(instance $x C \bowtie k$)	$\langle x:C, \bowtie, k \rangle$
(related $x y R \bowtie k$)	$\langle (x,y):R, \bowtie, k \rangle$

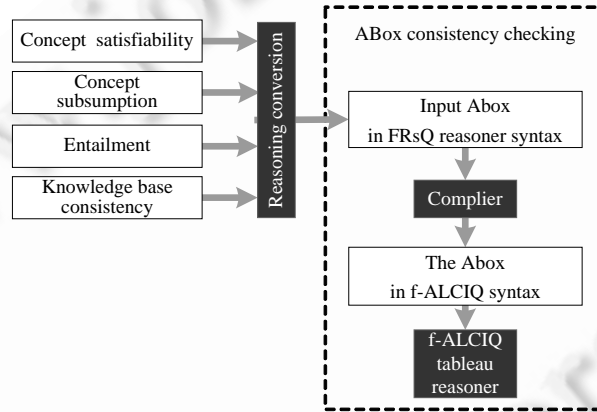


Fig.7 Architecture of FRsQ reasoner

图 7 FRsQ 推理机的结构框图

例 3:为了便于更好地了解 FRsQ 推理机语法,表 2 给出了例 2 中提到的 ABox 的 FRsQ 推理机语法表示形式(仅部分断言)以及对应的 f-ALCIQ 语法形式.

Table 2 FRsQ reasoner syntax of an ABox and the corresponding f-ALCIQ syntax

表 2 一个 ABox 的 FRsQ 推理机语法表示形式及其相应的 f-ALCIQ 语法

一个 ABox 的 FRsQ 推理机语法	相应的 f-ALCIQ 语法
(instance o_1 (all Age Integer) ≥ 0.9);	$ABox = \{$
(related o_1 21 Age ≥ 0.9);	$\langle o_1: \forall \text{Age.Integer}, \geq, 0.9 \rangle,$
(instance o_1 (all Salary String) ≥ 0.9);	$\langle (o_1, 21): \text{Age}, \geq, 0.9 \rangle,$
(instance o_1 (at-least 1 Salary) ≥ 0.9);	$\langle o_1: \forall \text{Salary.String}, \geq, 0.9 \rangle,$
(instance o_1 (at-most 1 Salary) ≥ 0.9);	$\langle o_1: \geq 1 \text{Salary}, \geq, 0.9 \rangle,$
(related o_1 2000 Salary ≥ 0.7);	$\langle o_1: \leq 1 \text{Salary}, \geq, 0.9 \rangle,$
	$\langle (o_1, 2000): \text{Salary}, \geq, 0.7 \rangle \}$

最后,f-ALCIQ Tableau 推理机能够实现对 ABox 的一致性检查.根据第 2.3 节,对于一个 f-ALCIQ 模糊断言集合 ABox,如果存在一个解释 FI 满足 ABox 中的所有断言,那么这个 ABox 是一致的,这样的解释 FI 叫做 ABox 的一个模型.f-ALCIQ Tableau 推理机就是通过 f-ALCIQ ABox 的一致性检查算法^[15]以及一般 TBox 约束下的模糊描述逻辑推理方法^[32]来寻找这样一个模型,具体如下:

- (1) f-ALCIQ Tableau 推理机首先根据编译器中输出的文件,将用 f-ALCIQ 语法表示的模糊描述逻辑知识存到相应的数据结构中.然后,f-ALCIQ Tableau 推理机根据已经在数据结构中存储的模糊描述逻辑知识,生成初始化森林 F .其中, F 中的每一个节点 x 有其相应的模糊断言公式 $\langle x:C, \bowtie, k \rangle$, 而用森林中的边来表示节点之间的关系,且两个节点之间的边表示模糊角色;
- (2) 然后,f-ALCIQ Tableau 推理机按照 $\sqsubseteq, \neg, \sqcap, \sqcup, \sqcup, \sqcup, \sqcap, \exists, \forall, \geq, \leq, \forall, \exists, \leq, \geq$ 规则的顺序,对 F 所有的节点穷尽使用 f-ALCIQ Tableau 扩展规则,直到 F 被扩充为完全森林^[15,32].由于不确定性规则如 \sqcup, \leq 等的使用,可能会产生若干个完全森林 $F_1, \dots, F_n (n \geq 1)$.其中,

$$\bowtie \in \{ \geq, >, \leq, < \}, \triangleright \in \{ \geq, > \}, \triangleleft \in \{ \leq, < \}.$$

- (3) 进一步,f-ALCIQ Tableau 推理机根据冲突判定条件^[15]对完全森林 F_1, \dots, F_n 进行判定,如果其中有一个 F_i 不包含冲突,那么说明存在关于 ABox 的一个模型,所以被检查的 ABox 是一致的;如果所有的完全森林都包含冲突,那么说明不存在关于 ABox 的一个模型,所以被检查的 ABox 是不一致的.最后,输出判定结果.

为了验证 FRsQ 推理机的正确性,限于篇幅,下面仅给出一个简单测试用例,即利用 FRsQ 推理机对图 3 中 FOOD 模型 FS_1 进行自动推理.根据第 3 节,可以将 FOOD 模型和相应的数据库实例转化为 f-ALCIQ 知识库.在此基础上,通过第 4.1 节,可以将 FOOD 模型的相关推理问题转化为 f-ALCIQ 的推理问题.而由第 2.4 节可知,概念可满足、概念包含以及知识库蕴涵等 f-ALCIQ 推理问题都可以转化为 ABox 一致性问题.基于此,下面例 4 将利用 FRsQ 推理机检查 f-ALCIQ TBox(例 1)约束下的 f-ALCIQ ABox(例 2)的一致性.

例 4:通过利用 FRsQ 推理机对图 3 中 FOOD 模型 FS_1 以及相应的数据库实例进行自动推理,即利用 FRsQ 推理机检查 f-ALCIQ TBox(例 1)约束下的 f-ALCIQ ABox(例 2)的一致性.图 8 所示的 FRsQ 推理机图形用户接口(GUI)给出其运行结果(部分),其中包括:FilePath 部分显示用 FRsQ 推理机语法表示的输入 ABox,且在初始化状态窗口中以树形结构显示;推理细节窗口显示了 f-ALCIQ Tableau 推理机应用 Tableau 扩展规则将初始化森林扩展为 28 种不同情形的完全森林,并分别对各种情形进行冲突判定的过程,且最后判定其中存在不包含冲突的完全森林(如情形 2、情形 16 等);终止状态窗口以树形结构显示了不同情形的完全森林,且最终结果显示“ABox 是一致的”.

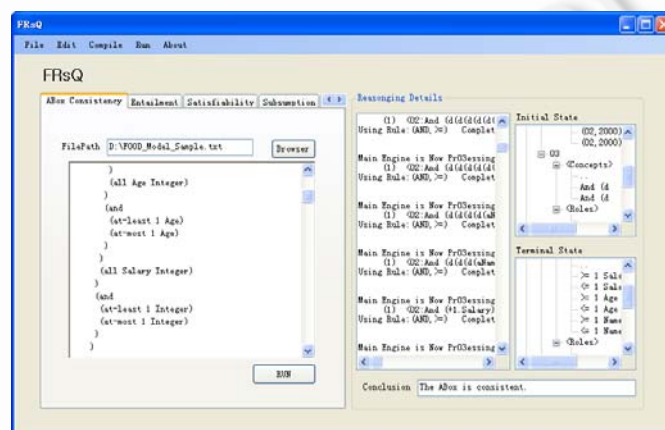


Fig.8 Running results of FRsQ reasoner

图 8 FRsQ 推理机的运行结果

从上面的内容可以看出,FRsQ 推理机能够对 FOOD 模型的相关推理问题进行自动推理,同时也能对 f-ALCIQ 模糊概念知识进行自动推理.下面对 FRsQ 推理机的性能进行简单测试.

4.3 FRsQ推理机性能分析

正如第 4.2 节提到的,不同的推理机具备不同的表达和推理能力,而且大部分现有的模糊描述逻辑推理机并不具有开放的源码和开发文档,且不支持 DIG 标准接口^[1](本文实现的 FRsQ 推理机目前还不能支持 DIG 标准接口),所以本文目前并没有实现能够将 FRsQ 推理机与现有的模糊描述逻辑推理机进行性能上比较的测试平台,这将是本文进一步的研究工作.本文下面将对 FRsQ 推理机自身的性能进行测试.

下面通过统计判定不同规模 ABox 的一致性检测问题所耗费的推理时间来测试 FRsQ 推理机的性能.表 3 给出了不同规模的 ABox 与其相应的推理时间之间的对应关系,其中,ABox 的规模(随机给出)用 ABox 中含有的知识断言的数量来定义,且 ABox 中的知识断言囊括了 f-ALCIQ 的所有构造算子,是根据文献[1,12,14-17,32]给出的(进行了适当的扩充和修改);Initial ABox size 表示在推理初始状态时的 ABox 大小;Terminal ABox size 表示在推理终止状态时的 ABox 大小.另外,本文的实验环境是:PC 机的基本配置是双核 1.8GHz Pentium CPU,1G 内存,Windows XP 操作系统.

Table 3 Relationships between the ABoxes with different sizes and the reasoning time

表 3 不同规模的 ABox 与相应的推理时间之间的对应关系

ABox	1	2	3	4	5	6
Initial ABox size	46	98	153	216	297	513
Terminal ABox size	408	803	1 210	1 607	2 409	4 008
Time cost (s)	0.002	0.017	0.036	0.049	0.092	0.197

5 相关工作

基于其有效的推理机制,描述逻辑已经被应用到数据库领域,尤其是许多研究者对如何利用描述逻辑对数据库模型进行表示与推理进行了深入研究,其中大致有 6 类问题与本文的研究工作相关:

针对描述逻辑在数据库中的应用问题,尤其是在关系数据库和面向对象数据库中,Bresciani^[39]研究了如何将描述逻辑管理系统(DLMS)和数据库管理系统(DBMS)联系起来,并提出了一种基于描述逻辑的查询语言,实现了对知识库和数据库的查询.Beneventano^[40]通过将面向对象数据库框架转化为描述逻辑 ODL_{RE} 知识库,提出了一种面向对象数据库语义查询的优化方法.详细地,Borgida^[3]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如数据建模、查询、更改等.

针对描述逻辑在数据建模中的应用问题,尤其是为了利用描述逻辑的推理机制对数据模型的相关问题进行自动推理,许多研究工作研究了如何在描述逻辑和数据模型(例如 ER 模型、EER 模型和 UML 模型、面向对象数据模型等)之间建立对应关系.

Calvanese^[5]实现了从 ER 模型到描述逻辑 ALUNI 知识库的转化,Baader^[1]研究了如何将 ER 模型转化为描述逻辑 DLR 知识库,从而可以利用 ALUNI 和 DLR 的推理机制对 ER 模型的相关问题(如实体的可满足性、ER 模型的冗余性等)进行推理.许卓明^[41]实现了从 ER 模型到 OWL DL 本体的转化,转化后得到的 OWL DL 本体等价于描述逻辑 SHOIN(D)知识库.

蒋运承^[6]研究了如何将时序 ER 模型转化为时序描述逻辑 ALCQI(D)_{US} 知识库.Franconi^[7]研究了扩展 ER 模型——EER 模型和描述逻辑之间的关系.Berardi^[9]研究了 UML 模型和描述逻辑之间的关系,分别实现了从 UML 模型到描述逻辑 DLR_{ifd} 知识库和描述逻辑 ALCQI 知识库的转化.

Baader^[1]和 Calvanese^[5]等人研究了如何将面向对象数据模型(OODM)转化为描述逻辑 ALUN TBox,从而利用 ALUN 的推理机制对 OODM 的相关问题(如类的一致性、类的包含关系等)进行推理,其中,面向对象数据模型的一些重要特性(例如方法、基数限制、属性的逆、数据库实例等)并未被考虑.

然而,上述研究工作只能处理精确知识,不能处理模糊和不精确知识.

针对在数据库中如何处理模糊知识的问题,多年来,许多研究者提出了多种形式的模糊数据库模型,如模糊 ER 模型^[4,10]、模糊面向对象数据模型^[20-29]等,同时也产生了如何有效推理这些模型的需求.尤其是针对面向对象数据模型的模糊化扩展,Ling^[23]详细介绍了模糊关系模型和模糊面向对象数据模型之间的区别和联系;George^[28]提出了一种模糊面向对象数据模型;Cross^[29]研究了如何为模糊面向对象数据模型建立统一的标准(FODMG);Ma^[25,26]详细研究了有关模糊面向对象数据模型的相关内容,给出了有关模糊对象、模糊类、模糊对象-类、子类/超类的定义;Nam^[21]和 Berzal^[22]也研究了模糊面向对象数据库的实现问题.有关模糊数据库和模糊面向对象数据模型的综述可见文献[10,11,26].

针对描述逻辑如何表示和推理模糊和不精确知识的问题,许多研究者提出了多种形式的模糊描述逻辑,Straccia^[12]结合模糊逻辑对描述逻辑 ALC 进行了扩充,从而得到了具有完整逻辑体系的模糊描述逻辑 FALC;运承^[4,32]提出了模糊描述逻辑 FALNUI,并给出了 FALNUI 的包含和可满足性推理算法;李言辉^[13]提出了一种支持数量约束的扩展模糊描述逻辑 EFALCN;康达周^[14]提出了扩展模糊描述逻辑 EFALC_{R+},给出了受限 TBox 约束下的 EFALC_{R+}推理算法;Stoilos^[16]提出了模糊描述逻辑 f-SHIN,并给出了检查 ABox 一致性的推理算法.蒋运承^[17]提出了面向语义 Web 表示的模糊描述逻辑 FSHOIQ;王海龙^[42]提出了一种能够表示含有自定义模糊数据类型的模糊描述逻辑 F-SHOIQ(G),有关模糊描述逻辑的综述可见文献[18].然而,虽然已经存在多种形式的模糊数据库模型和模糊描述逻辑,但有关如何利用模糊描述逻辑对模糊数据库模型进行表示和推理的研究却很少.

针对如何利用模糊描述逻辑对模糊数据库模型进行表示和推理的问题,蒋运承^[4]提出了模糊描述逻辑 FALNUI,实现了从模糊 ER 模型到 FALNUI 知识库在结构层上的转化.Zhang^[23]实现了从模糊 ER 模型到模糊描述逻辑 FDLR 知识库在结构层上的转化.另外,Zhang^[43,44]分别实现了从模糊 ER 模型和模糊 UML 模型到模糊 OWL DL 本体(等价于模糊描述逻辑 f-SHOIN(D)知识库)的转化.但是,有关利用模糊描述逻辑对模糊面向对象数据(FOOD)模型进行表示与推理的研究,目前尚未见到有文章发表.

针对描述逻辑推理机的实现问题,近年来,国内外出现了一些模糊描述逻辑推理机,如 FiRE^[33],DeLorean^[34],GURDL^[35],FuzzyDL^[37]等;同时,也出现了基于概率描述逻辑的用于处理不确定信息的概率描述逻辑推理机 PDL^[45];王海龙^[38]实现了基于模糊描述逻辑 F-ALC(G)的推理机;文坤梅^[46]提出了基于经典描述逻辑 ALC 的推理机;蒋运承^[6]提出了工资智能决策支持系统,该系统是基于经典时序描述逻辑 ALCQI(D)_{US}的推理机.

6 结束语

本文针对模糊面向对象数据(FOOD)模型的特点和推理需求,研究了基于模糊描述逻辑的 FOOD 模型的表示与自动推理问题.首先,在进一步研究 FOOD 模型之后,提出了 FOOD 模型的形式化定义和语义定义.在此基础上,采用模糊描述逻辑 f-ALCIQ,研究了基于 f-ALCIQ 的 FOOD 模型的表示与推理,实现了从 FOOD 模型以及相应的数据库实例到 f-ALCIQ 知识库(TBox 和 ABox)的转化;基于转化得到的 f-ALCIQ 知识库,本文进一步利用 f-ALCIQ 的推理机制研究了 FOOD 模型的一致性、包含性、冗余性等推理问题,从而 FOOD 模型的推理问题可以转化为 f-ALCIQ 的推理问题;最后,设计并实现了基于 f-ALCIQ 的模糊描述逻辑推理机 FRsQ,实现了对 FOOD 模型和 f-ALCIQ 模糊概念知识的自动推理.基于 f-ALCIQ 的 FOOD 模型的表示与推理研究,将有助于满足模糊数据库建模的需求,同时,描述逻辑作为语义 Web 的逻辑基础,本文的工作也为语义 Web 和数据库之间语义互操作的实现开辟了一条有效途径.

今后将对 FOOD 模型作进一步的扩展,考虑更多的 FOOD 模型特点;再者,将对 FRsQ 推理机的扩展和性能优化作进一步的研究,例如在 FRsQ 推理机的基础之上增加新的构造算子,实现更具表达能力的推理机等,并实现 DIG 标准接口,以便能够被其他推理机调用.

致谢 在此,向对本文提出宝贵意见的评审专家以及给予支持和建议的老师和同学表示衷心的感谢.

References:

- [1] Baader F, Calvanese D, McGuinness DL, Nardi D, Patel-Schneider PF, eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [2] 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).
- [3] Borgida A. Description logics in data management. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 1995,7(5):671–682. [doi: 10.1109/69.469829]
- [4] Jiang YC, Tang Y, Wang J. Fuzzy ER modeling with description logics. Journal of Software, 2006,17(1):20–30 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/20.htm> [doi: 10.1360/jos170020]
- [5] Calvanese D, Lenzerini M, Nardi D. Unifying class-based representation formalisms. Journal of Artificial Intelligence Research, 1999,11(2):199–240.
- [6] Jiang YC, Tang Y, Wang J, Ji GF. Description-Logic-Based temporal ER model with attribute dependencies. Journal of Computer Research and Development, 2007,44(10):1765–1773 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.1360/crad20071019]
- [7] Franconi E, Sattler U. A data warehouse conceptual data model for multidimensional aggregation. In: Proc. of the Workshop on Design and Management of Data Warehouses (DMDW'99). 1999. 55–65.
- [8] Toman D, Weddell G. On reasoning about structural equality in xml: A description logic approach. Theoretical Computer Science, 2005,336(11):181–203.
- [9] Berardi D, Calvanese D, De Giacomo G. Reasoning on UML class diagrams using description logic based systems. In: Proc. of the KI 2001 Workshop on Applications of Description Logics. 2001. 1–12. CEUR Electronic Workshop Proceedings. <http://ceur-ws.org/Vol-44/>
- [10] He XG. Fuzzy Database System. Beijing: Tsinghua University Press, 1994 (in Chinese).
- [11] Ma ZM, Yan L. A literature overview of fuzzy database models. Journal of Information Science and Engineering, 2008,24(1): 189–202.
- [12] Straccia U. Reasoning within fuzzy description logics. Journal of Artificial Intelligence Research, 2001,14(1):137–166.
- [13] Li YH, Xu BW, Lu JJ, Kang DZ. On computational complexity of the extended fuzzy description logic with numerical restriction. Journal of Software, 2006,17(5):968–975 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/968.htm> [doi: 10.1360/jos170968]
- [14] Kang DZ, Xu BW, Lu JJ, Li YH. Reasoning within extended fuzzy description logic supporting terminological axiom restrictions. Journal of Software, 2007,18(7):1563–1572 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1563.htm> [doi: 10.1360/jos181563]
- [15] Stoilos G, Stamou G, Kollias S. Reasoning with qualified cardinality restrictions in fuzzy description logics. In: Proc. of the 17th IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2008). Hong Kong: IEEE Computer Society, 2008. 637–644. [doi: 10.1109/UZZY.2008.4630436]
- [16] Stoilos G, Stamou G, Pan JZ, Zouvaras V, Horrocks I. Reasoning with very expressive fuzzy description logics. Journal of Artificial Intelligence Research, 2007,30(8):273–320.
- [17] Jiang YC, Shi ZZ, Tang Y, Wang J. Fuzzy description logic for semantics representation of the semantic Web. Journal of Software, 2007,18(6):1257–1269 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1257.htm> [doi: 10.1360/jos181257]
- [18] Lukasiewicz T, Stracciab U. Managing uncertainty and vagueness in description logics for the semantic Web. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2008,6(4):291–308. [doi: 10.1016/j.websem.2008.04.001]
- [19] Zhang F, Ma ZM, Yan L. Representation and reasoning of fuzzy ER model with description logic. In: Proc. of the 17th IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2008). Hong Kong: IEEE Computer Society, 2008. 1358–1365. [doi: 10.1109/UZZY.008.630549]
- [20] Ozgur NB, Koyuncu M, Yazici A. An intelligent fuzzy object-oriented database framework for video database applications. Fuzzy Sets and Systems, 2009,160(15):253–2274. [doi: 10.1016/j.fss.2009.02.017]
- [21] Nam M, Ngoc NTB, Nguyen H, Cao TH. FPDB40: A fuzzy and probabilistic object base management system. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2007). 2007. 1–6. [doi: 10.1109/FUZZY.2007.4295447]

- [22] Berzal F, Marín N, Pons O, Vila MA. Managing fuzziness on conventional object-oriented platforms. *Internat. Journal of Intelligent Systems*, 2007,22(7):781–803. [doi: 10.1002/int.20228]
- [23] Ling TC, Yaacob MH, Phang KK. Fuzzy database framework-relational versus object-oriented model. In: *Proc of the Intelligent Information Systems*. 1997. 246–250. [doi: 10.1109/IIS.1997.645241]
- [24] Koyuncu K, Yazici A. IFOOD: An intelligent fuzzy object-oriented database architecture. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering (TKDE)*, 2003,15(5):1137–1154. [doi: 10.1109/TKDE.2003.1232269]
- [25] Ma ZM, Zhang WJ, Ma WY. Extending object-oriented databases for fuzzy information modeling. *Information Systems*, 2004, 29(5):421–435. [doi: 10.1016/S0306-4379(03)00038-3]
- [26] Ma ZM. *Advances in Fuzzy Object-Oriented Databases: Modeling and Applications*. Idea Group Publishing, 2004.
- [27] van Gysegheem N, de Caluwe R. Fuzzy behaviour and relationships in a fuzzy OODB-model. In: *Proc. of the 10th Annual ACM Symp. on Applied Computing*. Nashville, 1995. 503–507. [doi: 10.1145/315891.316076]
- [28] George R, Srikanth R, Petry FE, Buckles BP. Uncertainty management issues in the object-oriented data model. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 1996,4(2):179–192. [doi: 10.1109/91.493911]
- [29] Cross V, Caluwe R, Vangysegheem N. A perspective from the fuzzy object data management group (FODMG). In: *Proc. of the 1997 IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems*. 1997. 721–728. [doi: 10.1109/FUZZY.1997.622800]
- [30] Zadeh LA. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965,8(3):338–353. [doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X]
- [31] Zadeh LA. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets Systems*, 1978,1(1):3–28. [doi: 10.1016/0165-0114(78)90029-5]
- [32] Stoilos G, Straccia U, Stamou GB, Pan JZ. General concept inclusions in fuzzy description logics. In: *Proc. of the 17th European Conf. on Artificial Intelligence*. 2006. 457–461.
- [33] Stoilos G, Simou N, Stamou G, Kollias S. Uncertainty and the semantic Web. *IEEE Trans. on Intelligent Systems*, 2006,21(5): 83–87. [doi: 10.1109/MIS.2006.105]
- [34] Bobillo F, Delgado M, Gómez-Romero J. Optimizing the crisp representation of the fuzzy description logic SROIQ. In: *Proc of the 3rd ISWC Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web*. 2007. 189–206. [doi: 10.1007/978-3-540-89765-1_12]
- [35] Haarslev V, Pai HI, Shiri N. Optimizing tableau reasoning in ALC extended with uncertainty. In: *Proc. of the 2007 Int'l Workshop on Description Logics (DL 2007)*. 2007. 307–314.
- [36] Habiballa H. Resolution strategies for fuzzy description logic. In: *Proc. of the 5th Conf. of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT 2007)*, Vol.2. 2007. 27–36.
- [37] Bobillo F, Straccia U. fuzzyDL: An expressive fuzzy description logic reasoner. In: *Proc. of the 2008 IEEE Int'l Conf. on Fuzzy Systems*. Piscataway: IEEE, 2008. 923–930. [doi: 10.1109/FUZZY.2008.4630480]
- [38] Wang HL, Ma ZM, Yin JF, Cheng JW. FRESG: A kind of fuzzy description logic reasoner. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(9):1488–1497 (in Chinese with English abstract).
- [39] Bresciani P. Querying databases from description logics. In: *Proc. of the 2nd Workshop KRDB'95*. 1995. 1–4.
- [40] Beneventano D, Bergamaschi S, Sartori C. Description logics for semantic query optimization in object-oriented database systems. *ACM Trans. on Database Systems*, 2003,28(1):1–50. [doi: 10.1145/762471.762472]
- [41] Xu ZM, Dong YS, Lu Y. Semantics-Preserving translation from ER schema to OWL DL ontology. *Chinese Journal of Computers*, 2006,29(10):1786–1796 (in Chinese with English abstract).
- [42] Wang HL, Ma ZM, Yan L, Cheng JW. Fuzzy description logic $F\text{-SHOIQ}(G)$ supporting representation of fuzzy data types. *Chinese Journal of Computers*, 2009,32(8):1511–1524 (in Chinese with English abstract).
- [43] Zhang F, Ma ZM, Lv YH, Wang X. Formal semantics-preserving translation from fuzzy ER model to fuzzy OWL DL ontology. In: *Proc. of the 2008 IEEE/WIC/ACM Int'l Conf. on Web Intelligence (WI 2008)*. 2008. 503–509. [doi: 10.1109/WIIAT.2008.46]
- [44] Zhang F, Ma ZM, Cheng JW, Meng XF. Fuzzy semantic Web ontology learning from fuzzy UML model. In: *Proc. of the 18th ACM Conf. on Information and Knowledge Management (CIKM 2009)*. 2009. 1007–1016. [doi: 10.1145/1645953.1646082]
- [45] Li L, Liu QL, Tao YF, Zhang L, Zhou J, Yu Y. Providing an uncertainty reasoning service for semantic Web application. In: *Proc. of the 8th Asia Pacific Web Conf. LNCS 3841*, Berlin: Springer-Verlag, 2006. 628–639. [doi: 10.1007/11610113_55]

- [46] Wen KM, Lu ZD, Wu JW, Li RX, Sun XL. Design and implementation of reasoning system based on description logic. Journal of Chinese Computer Systems, 2008,29(1):57-60 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [2] 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.
- [4] 蒋运承,汤庸,王驹.基于描述逻辑的模糊 ER 模型.软件学报,2006,17(1):20-30. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/20.htm> [doi: 10.1360/jos170020]
- [6] 蒋运承,汤庸,王驹,冀高峰.基于描述逻辑的带属性依赖时序 ER 模型.计算机研究与发展,2007,44(10):1765-1773. [doi: 10.1360/crad20071019]
- [10] 何新贵.模糊数据库系统.北京:清华大学出版社,1994.
- [13] 李言辉,徐宝文,陆建江,康达周.支持数量约束的扩展模糊描述逻辑复杂性研究.软件学报,2006,17(5):968-975. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/968.htm> [doi: 10.1360/jos170968]
- [14] 康达周,徐宝文,陆建江,李言辉.支持术语公理约束的扩展模糊描述逻辑推理.软件学报,2007,18(7):1563-1572. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1563.htm> [doi: 10.1360/jos181563]
- [17] 蒋运承,史忠植,汤庸,王驹.面向语义 Web 语义表示的模糊描述逻辑.软件学报,2007,18(6):1257-1269. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1257.htm> [doi: 10.1360/jos181257]
- [38] 王海龙,马宗民,殷俊夫,程经纬.FRESG:一种模糊描述逻辑推理机.计算机研究与发展,2009,46(9):1488-1497.
- [41] 许卓明,董逸生,陆阳.从 ER 模式到 OWL DL 本体的语义保持的翻译.计算机学报,2006,29(10):1786-1796.
- [42] 王海龙,马宗民,严丽,程经纬.支持模糊数据类型表示的模糊描述逻辑 $F\text{-SHOIQ}(G)$.计算机学报,2009,32(8):1511-1524.
- [46] 文坤梅,卢正鼎,吴杰文,李瑞轩,孙小林.基于描述逻辑的推理系统设计与实现.小型微型计算机系统,2008,29(1):57-60.



张富(1984—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,讲师,主要研究领域为语义 Web,描述逻辑,数据库建模.



严丽(1964—),女,博士,副教授,主要研究领域为数据库,语义 Web.



马宗民(1965—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为智能数据,知识工程.



程经纬(1974—),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为语义 Web,描述逻辑.