ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.19, No.10, October 2008, pp.2498−2507
DOI: 10.3724/SP.J.1001.2008.02498

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

支持模糊隶属度比较的扩展模糊描述逻辑*

康达周[1]，徐宝文[1,2+]，陆建江[3]，李言辉[1]

[1](东南大学 计算机科学与工程学院,江苏 南京 210096)
[2](江苏省软件质量研究所,江苏 南京 210096)
[3](解放军理工大学 指挥自动化学院,江苏 南京 210007)

Extended Fuzzy Description Logics with Comparisons Between Fuzzy Membership Degrees

KANG Da-Zhou[1], XU Bao-Wen[1,2+], LU Jian-Jiang[3], LI Yan-Hui[1]

[1](Department of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)
[2](Jiangsu Institute of Software Quality, Nanjing 210096, China)
[3](Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)
+ Corresponding author: E-mail: bwxu@seu.edu.cn

Kang DZ, Xu BW, Lu JJ, Li YH. Extended fuzzy description logics with comparisons between fuzzy membership degrees. *Journal of Software*, 2008,19(10):2498−2507. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2498.htm

Abstract: The representation and application of fuzzy knowledge on the semantic Web often relate to the comparisons between fuzzy membership degrees. However, the current fuzzy extensions of description logics do not support the expression of such comparisons. This paper proposes an extended fuzzy description logic that supports the comparisons of fuzzy membership degrees and the concept constructors from description logic ALCN (attributive concept description language with complements and number restriction), written FCALCN (fuzzy comparable ALCN). FCALCN introduces new forms of atom concepts in order to support the comparisons between fuzzy membership degrees. A reasoning algorithm for FCALCN is proposed, and the complexity of the reasoning problems of FCALCN with empty TBox is proved to be PSpace-complete. FCALCN can represent expressive fuzzy knowledge involving the comparisons of fuzzy membership degrees on the semantic Web and enable reasoning of them.
Key words: semantic Web; knowledge representation; description logic; fuzzy; comparison; reasoning

摘 要: 语义Web模糊知识的表示和应用常常涉及模糊隶属度比较,但现有描述逻辑的模糊扩展缺乏描述模糊隶属度比较的能力.提出支持模糊隶属度比较和描述逻辑 ALCN(attributive concept description language with

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60425206, 60633010, 60403016, 60503033 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2002CB312000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20060286020 (高等学校博士学科点专项科研基金); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China under Grant No.BK2005060 (江苏省自然科学基金); the High Technology Research Project of Jiangsu Province of China under Grant No.BG2005032 (江苏省高技术研究项目)
Received 2006-11-30; Accepted 2007-04-02

complements and number restriction)概念构造子的扩展模糊描述逻辑 FCALCN(fuzzy comparable ALCN).FCALCN 引入新的原子概念形式以支持模糊隶属度比较.给出 FCALCN 的推理算法,证明了在空 TBox 约束下 FCALCN 的推理问题复杂性是多项式空间完全的.FCALCN 能够表达语义 Web 上涉及模糊隶属度比较的复杂模糊知识并实现对它们的推理.

关键词: 语义 Web;知识表示;描述逻辑;模糊;比较;推理

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

描述逻辑[1]是一种基于概念描述的知识表示语言,有易于理解的表示语法和形式化的逻辑语义,具有较强的表达能力和可判定的推理算法,存在快速、高效的推理器实现,是当前语义 Web[2]表示知识和实现推理任务的逻辑基础[3].语义 Web 的很多重要应用领域,如文本处理和多媒体信息检索等,都需要处理大量的模糊知识,但经典描述逻辑语义基于集合论,不适用于模糊知识的表示和推理,为此,需对描述逻辑进行模糊扩展.Straccia 等人提出模糊描述逻辑 FALC(fuzzy attributive concept description language with complements)[4].在此基础上,Hölldobler 等人引入模糊隶属度操纵算子[5],Sanchez 等人扩展了模糊关系的数量约束[6],Straccia 等人引入模糊具体域[7],Stoilos 等人给出支持模糊关系的传递、蕴涵、逆和非限定数量约束的模糊描述逻辑的推理算法[8].国内学者近年来也开展了对描述逻辑的模糊扩展的研究,胡鹤等人提出基于区间模糊理论的描述逻辑系统[9],蒋运承等人扩展了描述逻辑用于模糊 ER 模型[10].我们提出扩展模糊描述逻辑,克服模糊描述逻辑表达不够灵活的缺陷[11],分别给出支持数量约束和术语公理约束的扩展模糊描述逻辑 EFALCN(extended fuzzy ALCN(attributive concept description language with complements and number restriction))的推理算法[12].

模糊描述逻辑通过模糊集合解释模糊概念.在模糊集合论中,一个元素不一定完全属于或不属于一个模糊集合,而是以某个特定的程度属于模糊集合.这个程度称为模糊隶属度,取值为[0,1]区间上的一个实数.如“高个子”这一模糊概念被解释为模糊集合 Tall.模糊描述逻辑用 Tom:Tall≥0.8 和 Mike:Tall<0.8 分别描述 Tom 和 Mike 属于 Tall 的模糊隶属度范围,表达了 Tom 和 Mike 属于高个子的不同程度.但这种扩展不能描述涉及多个模糊隶属度的知识,如 Tom 属于 Tall 的模糊隶属度或者不小于 0.9 或者小于 0.1,即 Tom 不是很高就是很矮.为此,扩展模糊描述逻辑引入模糊概念的截集作为原子概念,如 $Tall_{[0.8]}$被解释为属于 Tall 的模糊隶属度不小于 0.8 的个体所属的概念,并可通过经典描述逻辑中的概念构造子构造复杂的概念.如 Tom 不是很高就是很矮可以表示为 $Tom{:}Tall_{[0.9]}\sqcup\neg Tall_{[0.1]}$.扩展描述逻辑的表达能力强于模糊描述逻辑.

但现有的描述逻辑模糊扩展都缺乏描述模糊隶属度比较的能力,即对模糊隶属度之间大小关系的描述,如“Tom 比 Mike 个子高”这句话表示 Tom 属于 Tall 的模糊隶属度大于 Mike 属于 Tall 的模糊隶属度.这类比较无法在模糊描述逻辑和扩展模糊描述逻辑中描述,因为其知识库中的描述都要求明确地给出模糊隶属度的值,而这里进行比较的两个模糊隶属度的值可能是未知的.在很多模糊知识应用中都需要进行模糊隶属度比较,如在模糊查询时,用户通常希望能够按照属于查询结果的模糊隶属度的高低顺序返回结果,而不关心模糊隶属度的具体值.为此,本文提出新的支持模糊隶属度比较的原子概念形式,将这些原子概念形式引入到扩展描述逻辑中,以支持模糊隶属度间的比较,从而能够表达涉及模糊隶属度比较的复杂模糊知识.本文在描述逻辑 ALCN 的基础上定义了支持模糊隶属度比较的扩展模糊描述逻辑 FCALCN(fuzzy comparable ALCN),并给出了 FCALCN 的推理算法.FCALCN 具有比现有 ALCN 模糊扩展更强的表达能力,而推理复杂性并没有增加,能够表达语义 Web 上涉及模糊隶属度比较的复杂模糊知识并实现对它们的推理.

1 支持模糊隶属度比较的扩展模糊描述逻辑 FCALCN

1.1 模糊概念的比较截集

最简单的模糊隶属度比较可分为 3 类:模糊隶属度和实数间的比较、不同模糊概念间的模糊隶属度比较以及不同个体间的模糊隶属度比较.由多个简单的模糊隶属度比较还可以构成复杂的涉及模糊隶属度比较的模

糊知识.模糊描述逻辑和扩展模糊描述逻辑仅部分支持第 1 类的比较,无法描述后两类及复杂的比较.本文提出模糊概念和模糊关系的比较截集来描述简单的比较:令 A 和 B 是模糊概念, $\bowtie\in\{<,>,\le,\ge\}$ 为一个不等号,$n\in[0,1]$ 为一个实数,a 是一个个体,对任意模糊概念 A 和个体 x,记 $A(x)$为 x 属于 A 对应模糊集合的模糊隶属度.

- 数值比较截集$[A\bowtie n]$描述模糊隶属度和实数间的比较,被解释为个体集合$\{x|A(x)\bowtie n\}$.如[Tall≥0.8]被解释为所有属于 Tall 的模糊隶属度不小于 0.8 的个体,表示个子较高的人.
- 概念比较截集$[A\bowtie B]$描述不同模糊概念间的模糊隶属度比较,被解释为个体集合$\{x|A(x)\bowtie B(x)\}$.如[Absolutist<Liberalist]被解释为属于 Absolutist 的模糊隶属度小于属于 Liberalist 的模糊隶属度的个体,表示比起专制主义更倾向于自由主义的人.
- 个体比较截集$[A\bowtie a]$描述不同个体间的模糊隶属度比较,被解释为个体集合$\{x|A(x)\bowtie A(a)\}$,其中,a 被称为参照个体.如[Tall>Mike]被解释为属于 Tall 的模糊隶属度大于 Tall(Mike)的个体,表示比 Mike 高的人.由于描述逻辑中概念名集和个体名集不相交,因此,概念比较截集和个体比较截集是可区分的.

这些模糊截集被解释为个体集合,因此可视为经典概念.可将它们作为原子概念,用描述逻辑的概念构造子构造更复杂的概念来描述复杂的、涉及模糊隶属度比较的模糊知识.如[Tall>Mike]⊓[Strong>Mike]表示或者比 Mike 个子高,或者比 Mike 身体壮的人.

经典描述逻辑中的关系被解释为个体对的集合,而模糊描述逻辑中的模糊关系则被解释为个体对的模糊集合.类似地,也可将模糊关系用比较截集表示:对任意模糊关系 P,$[P\rhd n]$是 P 的一个比较截集,其中,$\rhd\in\{>,\ge\}$ 为大于或大于等于符号.$[P\rhd n]$被解释为属于 P 的模糊隶属度大于(大于等于)n 的个体对集合,可视为经典关系,并用于构造复杂概念.如∀[friend≥0.9].[Tall<0.8]被解释为这样的人:如果他和某人属于 friend 的模糊隶属度大于等于 0.9,则那人属于 Tall 的模糊隶属度一定小于 0.8,即好友个子都不是很高的人.

但仅靠上述的比较截集和描述逻辑概念构造子难以表达出“全班最高的学生”这样涉及到不确定个体间模糊隶属度比较的模糊知识.为此,定义一种特殊的比较截集$[A\bowtie ?]$,其中,问号?表示一个不确定的参照个体.这种形式的比较截集主要用于存在约束和全称约束.如∀[classmate≥1].[Tall≤?]可表示全班最高的学生,即这样的人:如以他为参照个体 x,则他的所有同班同学都满足[Tall≤x].$[A\bowtie ?]$也可以和其他形式的比较截集一起使用,如∀[classmate≥1].([Tall≤?]⊓[Tall>Mike])表示所有学生都比 Mike 高的班里最高的学生.注意,由于$[A\bowtie ?]$包含不确定的参照个体,因此它不是一个独立的概念,除非被应用到存在约束或全称约束中时.

1.2 扩展模糊描述逻辑FCALCN

下面定义支持模糊隶属度比较的扩展模糊描述逻辑 FCALCN.FCALCN 原子概念形式为模糊概念和模糊关系的比较截集.由于$[A\bowtie ?]$的特殊性,在定义 FCALCN 语法时,用两步来定义 FCALCN 概念:首先定义比较截集通过概念构造子可写出的 FCALCN 比较式,然后定义其中$[A\bowtie ?]$都被约束的比较式为 FCALCN 的概念.在定义 FCALCN 语义时,不可避免地要将概念分解为比较式进行解释.为此,对任意比较式 C,都针对给定的元素 x 给出解释.如果 C 已经是概念,则 x 对解释没有影响;否则,将 x 作为参照个体替换一个或多个$[A\bowtie ?]$中的问号.

定义 1(FCALCN 语法和语义). 设个体名集 N_I、模糊概念名集 N_C 和模糊关系名集 N_R 为 3 个不相交的可数集,FCALCN 语法从这些名集出发定义概念和关系.对任何模糊关系名 P,称$[P\rhd n]$是一个 FCALCN 关系,常记作 R,其中,$\rhd\in\{>,\ge\}$ 为大于或大于等于符号,$n\in[0,1]$.FCALCN 概念通过由如下规则归纳构造的比较式来定义:

(1) 对任何模糊概念名 A 和 B,个体名 a,$[A\bowtie n]$, $[A\bowtie B]$, $[A\bowtie a]$ 和 $[A\bowtie ?]$ 是比较式;

(2) 对任何比较式 C 和 D,$\neg C$,$C\sqcap D$ 和 $C\sqcup D$ 也是比较式;

(3) 对任何关系 R 和比较式 C,$\exists R.C$,$\forall R.C$,$\ge pR$ 和$\le qR$ 是比较式,其中,p 是自然数,q 为非负整数.

对任何比较式 C,定义 C 的直接子式为

$$son(C)=\{C\}\cup\begin{cases}son(D), & C=\neg D\\ son(D_1)\cup son(D_2), & C=D_1\sqcap D_2 \text{ or } D_1\sqcup D_2\end{cases}.$$

如果比较式 C 的直接子式中不包含形如$[A\bowtie ?]$的比较式,则 C 是一个 FCALCN 概念.

FCALCN 语义由模糊解释给出.模糊解释是一个二元组 $I=(\Delta^I,\cdot^I)$,其中,论域Δ^I 是一个非空集合,解释函数$\cdot^I$将每个个体名 $a\in N_I$ 映射到Δ^I 中的一个元素 a^I,将每个模糊概念名 $A\in N_C$ 映射到函数 $A^I:\Delta^I\to[0,1]$,并将每个模糊关系名 $P\in N_R$ 映射到函数 $P^I:\Delta^I\times\Delta^I\to[0,1]$.表 1 将$\cdot^I$归纳地扩展到将任意比较式 C 映射为函数 C^I 使得对任何 $x\in\Delta^I$ 都有 $C^I(x)\subseteq\Delta^I$,并将任意关系 R 映射为 $R^I\subseteq\Delta^I\times\Delta^I$,表中#号表示取集合中元素个数的运算.

Table 1 Syntax and semantics of FCALCN

表 1 FCALCN 的语法语义

Name	Syntax	Semantics
Individual	a	$a^I\in\Delta^I$
Role	$[P\rhd n]$	$[P\rhd n]^I=\{(x,y)\mid x,y\in\Delta^I\wedge P^I(x,y)\rhd n\}$
Atomic comparison	$[A\bowtie n]$	$[A\bowtie n]^I(x)=\{y\in\Delta^I\mid A^I(y)\bowtie n\}$
	$[A\bowtie B]$	$[A\bowtie B]^I(x)=\{y\in\Delta^I\mid A^I(y)\bowtie B^I(y)\}$
	$[A\bowtie a]$	$[A\bowtie a]^I(x)=\{y\in\Delta^I\mid A^I(y)\bowtie A^I(a^I)\}$
	$[A\bowtie ?]$	$[A\bowtie ?]^I(x)=\{y\in\Delta^I\mid A^I(y)\bowtie A^I(x)\}$
Negation	$\neg C$	$(\neg C)^I(x)=\Delta^I\backslash C^I(x)$
Conjunction	$C\sqcap D$	$(C\sqcap D)^I(x)=C^I(x)\cap D^I(x)$
Disjunction	$C\sqcup D$	$(C\sqcup D)^I(x)=C^I(x)\cup D^I(x)$
Exists restriction	$\exists R.C$	$(\exists R.C)^I(x)=\{z\in\Delta^I\mid\exists y\in\Delta^I,(z,y)\in R^I\wedge y\in C^I(z)\}$
Value restriction	$\forall R.C$	$(\forall R.C)^I(x)=\{z\in\Delta^I\mid\exists y\in\Delta^I,(z,y)\in R^I\to y\in C^I(z)\}$
At-Least restriction	$\geq pR$	$(\geq pR)^I(x)=\{z\in\Delta^I\mid\#\{y\in\Delta^I\mid(z,y)\in R^I\}\geq p\}$
At-Most restrictio	$\leq qR$	$(\leq qR)^I(x)=\{z\in\Delta^I\mid\#\{y\in\Delta^I\mid(z,y)\in R^I\}\leq q\}$

根据表 1 中的语义可以证明,对任何 FCALCN 概念 C 和论域元素 x 和 y,必有 $C^I(x)=C^I(y)$.因为假设 $C^I(x)\neq C^I(y)$,则 C 必存在形如$[A\bowtie ?]$的子式使得$[A\bowtie ?]^I(x)\neq[A\bowtie ?]^I(y)$,$C$ 不是 FCALCN 概念.根据以上结论,不妨令解释函数$\cdot^I$将任意概念 C 映射为Δ^I 的一个子集 C^I,且对任意 $x\in\Delta^I$ 都有 $C^I=C^I(x)$.

通过如下的转化规则,可以将任何 FCALCN 比较式转化为不含$\neg$的正规形式:

$$\neg[A\bowtie X]\to[A\bowtie^- X],\neg\neg C\to C,\neg(C\sqcap D)\to\neg C\sqcup\neg D,\neg(C\sqcup D)\to\neg C\sqcap\neg D,$$

$$\neg(\exists R.C)\to\forall R.\neg C,\neg(\forall R.C)\to\exists R.\neg C,\neg(\geq pR)\to\leq(p-1)R,\neg(\leq qR)\to\geq(q+1)R,$$

其中,$<^-=\geq,>^-=\leq,\leq^-=>,\geq^-=<$.容易证明,转化之后的比较式和原比较式语义解释相同,即它们在语义上是等价的.下面在无特殊说明时,均假设比较式已经转化为正规形式.

定义 2(FCALCN 知识库和推理问题). FCALCN 用术语公理表达不涉及具体个体的一般性知识,用事实表达涉及具体个体的特殊性知识.FCALCN 知识库分为 TBox 和 ABox 两部分:TBox 是包含形如 $C\sqsubseteq D$ 的术语公理的有限集合,其中 C 和 D 都是概念.解释 I 满足 $C\sqsubseteq D$ 当且仅当 $C^I\subseteq D^I$.解释 I 是 TBox $\mathcal{T}$的模型当且仅当 I 满足$\mathcal{T}$中所有公理;ABox 是包含形如 $a\neq b$ 的个体事实、a:C 的概念事实和形如(a,b):R 的关系事实的有限集合,其中,$a,b\in N_I$.解释 I 满足 $a\neq b$ 当且仅当 $a^I\neq b^I$,满足 a:C 当且仅当 $a^I\in C^I$,满足(a,b):R 当且仅当$(a^I,b^I)\in R^I$.解释 I 是 ABox $\mathcal{A}$的模型当且仅当 I 满足$\mathcal{A}$中所有事实.对任意 FCALCN 知识库$\mathcal{K}=(\mathcal{T},\mathcal{A})$,模糊解释 I 是$\mathcal{K}$的模型当且仅当同时是$\mathcal{A}$和$\mathcal{T}$的模型.FCALCN 的常用推理问题有:

(1) 概念可满足性:概念 C 关于 TBox $\mathcal{T}$是可满足的,当且仅当存在$\mathcal{T}$的模型 I 使得 $C^I\neq\varnothing$;

(2) 知识库一致性:$\mathcal{A}$关于$\mathcal{T}$是一致的,或知识库$\mathcal{K}=(\mathcal{T},\mathcal{A})$是一致的,当且仅当存在$\mathcal{T}$的模型 I 也是$\mathcal{A}$的模型;

(3) 知识库推出:知识库$\mathcal{K}$可推出公理或事实φ,记作$\mathcal{K}\models\varphi$,当且仅当$\mathcal{K}$的任意模型都满足$\varphi$;

(4) 模糊隶属度边界:在知识库$\mathcal{K}$中,给定个体名 a 和模糊概念名 A,a 属于 A 的模糊隶属度最大下界为 $glb(\mathcal{K},a,A)=sup\{n\mid\mathcal{K}\models a:[A\geq n]\}$,最小上界为 $lub(\mathcal{K},a,A)=inf\{n\mid\mathcal{K}\models a:[A\leq n]\}$.

FCALCN 知识库一致性问题是最基本的推理问题,其他推理问题都可以通过转化为知识库一致性问题来解决.概念 C 关于$\mathcal{T}$是可满足的当且仅当$\mathcal{A}=\{a:C\}$关于$\mathcal{T}$是一致的,a 是任取的个体名;知识库$\mathcal{K}=(\mathcal{T},\mathcal{A})$可推出公理或事实$\varphi$,当且仅当$\mathcal{A}$关于$\mathcal{T}\cup\{\varphi\}$是一致的,或$\mathcal{A}\cup\{\varphi\}$关于$\mathcal{T}$是一致的;在求模糊隶属度边界时,由于边界值只能是

0,1 以及知识库中出现的模糊隶属度值,可将此问题转化为多个知识库推出问题.本文将给出 FCALCN 知识库一致性问题的推理算法.

FCALCN 具有很强的模糊知识表达能力,能够描述复杂的、涉及模糊隶属度比较的模糊知识.FCALCN 具有比现有 ALCN 模糊扩展更强的表达能力.扩展模糊描述逻辑 EFALCN 是现有 ALCN 模糊扩展中表达能力最强的语言[12].EFALCN 原子概念 $A_{[n]}$等价于 FCALCN 概念$[A\geq n]$.EFALCN 原子关系 $P_{[n]}$则等价于 FCALCN 关系$[P\geq n]$.通过替换原子概念和原子关系,任何 EFALCN 概念可以转化为等价的 FCALCN 概念.反之,FCALCN 描述的复杂的、涉及模糊隶属度比较的模糊知识不能用 EFALCN 表示.因此,FCALCN 的表达能力强于 EFALCN.由于已知 EFALCN 的表达能力强于模糊描述逻辑 FALCN,因此,FCALCN 的表达能力也强于 FALCN.

2 FCALCN 的推理算法

Tableau 算法是一种自动推理方法,由于其直观性和通用性,易于计算机实现,因此成为描述逻辑系统中最常用的自动推理方法[1].本文也采用 Tableau 算法实现 FCALCN 的推理,主要思路是:FCALCN 知识库一致性问题的实质是判断知识库是否存在模型,但 FCALCN 语义是从对原子名集中名字的解释出发,递归构造概念和关系的解释.这种自底向上构造的形式难以用于实用的推理算法.为此,定义 FCALCN 知识库的模糊 Tableau 作为对 FCALCN 知识库模型的规范描述,将 FCALCN 的语义约束以自顶向下分解的形式表达出来.然后,证明模糊 Tableau 的存在性与模型的存在性是等价的,从而将知识库一致性问题转化为模糊 Tableau 的存在性判定问题.为判定模糊 Tableau 的存在性,定义 FCALCN 的完备图(completion graph),可以通过按照一定规则构造完备图来判定模糊 Tableau 的存在性,从而实现 FCALCN 知识库一致性问题的可判定的推理算法.

2.1 FCALCN的模糊Tableau

FCALCN 的模糊解释由论域和解释函数两部分组成,其中,解释函数分别描述了论域中元素与模糊概念名、模糊关系名和个体名之间的关系.在下面定义的模糊 Tableau 中,用非空集合 S 对应论域,然后以 L,F 和 V 分别描述 S 中元素与概念、关系和个体名之间的关系,用形如$[A=n]$的式子确定模糊隶属度的值.

定义 3(FCALCN 的模糊 Tableau). FCALCN ABox $\mathcal{A}$关于 TBox $\mathcal{T}$的模糊 Tableau 是一个四元组(S,L,F,V):

- S 是一个非空集合;对任何 FCALCN 比较式 C 和 S 中元素 x,称 $C(x)$是一个受限比较式;
- L 将每个 S 中元素映射为受限比较式和形如$[A=n]$的式子组成的集合;
- F 将每个关系名 P 和实数 n 映射为 S 中元素对的集合;
- V 将$\mathcal{A}$和$\mathcal{T}$中出现的每个个体名 $a\in N_I$映射为一个 S 中元素.

对 S 中任意元素 x,模糊 Tableau 满足以下性质:

P1 如果$[A=n]\in L(x)$,则不存在$[A=m]\in L(x)$使得 $m\neq n$.

P2 对任何 $y\in S$,如果$(x,y)\in F(P,n)$,则不存在 $m\neq n$ 使得$(x,y)\in F(P,m)$.

P3 如果$[A \bowtie n](y)\in L(x)$,则$[A=m]\in L(x)$且 $m \bowtie n$.

P4 如果$[A \bowtie B](y)\in L(x)$,则$[A=m]\in L(x)$,$[B=n]\in L(x)$且 $m \bowtie n$.

P5 如果$[A \bowtie a](y)\in L(x)$,则$[A=m]\in L(x)$,$[A=n]\in L(I(a))$且 $m \bowtie n$.

P6 如果$[A \bowtie ?](y)\in L(x)$,则$[A=m]\in L(x)$,$[A=n]\in L(y)$且 $m \bowtie n$.

P7 如果$(C\sqcap D)(y)\in L(x)$,则 $C(y)\in L(x)$且 $D(y)\in L(x)$.

P8 如果$(C\sqcup D)(y)\in L(x)$,则 $C(y)\in L(x)$或 $D(y)\in L(x)$.

P9 如果 $(\exists[P \rhd n].C)(y)\in L(x)$,则存在 $z\in S$,使得$(x,z)\in F(P,m)$,$m \rhd n$ 且 $C(x)\in L(z)$.

P10 如果 $(\forall[P \rhd n].C)(y)\in L(x)$,则对任何 $z\in S$ 满足$(x,z)\in F(P,m)$,$m \rhd n$,都有 $C(x)\in L(z)$.

P11 如果 $(\geq p[P \rhd n])(y)\in L(x)$,则存在 $z_1,z_2,\ldots,z_p\in S$,使得对任意 $1\leq i\leq p$ 都有$(x,z_i)\in F(P,m_i)$,$m_i \rhd n$.

P12 如果 $(\leq q[P \rhd n])(y)\in L(x)$,则不存在 $z_1,z_2,\ldots,z_{q+1}\in S$,使得对任意 $1\leq i\leq q+1$ 都有$(x,z_i)\in F(P,m_i)$,$m_i \rhd n$.

P13 如果 $a\neq b\in\mathcal{A}$,则 $I(a)\neq I(b)$.

P14 如果 $a{:}C\in\mathcal{A}$,则 $C(y)\in L(I(a))$,其中 y 为 S 中任一元素.

P15 如果$(a,b){:}[P\rhd n]\in\mathcal{A}$,则$(I(a),I(b))\in F(P,m),m\rhd n$.

P16 如果 $C\sqsubseteq D\in\mathcal{T}$,则 $not(C)(x)\in L(x)$或 $D(x)\in L(x)$,其中,$not(C)$表示$\neg C$ 的正规形式.

下面的定理说明模糊 Tableau 的存在性与模型的存在性是等价的.

定理 1. FCALCN ABox $\mathcal{A}$关于 TBox $\mathcal{T}$是一致的当且仅当$\mathcal{A}$关于$\mathcal{T}$存在一个模糊 Tableau.

证明:先证明充分性.假设当$\mathcal{A}$关于$\mathcal{T}$存在一个模糊 $Tableau(S,L,E,I)$,则可以通过以下公式构造一个模糊解释 $I=(\Delta^I,\cdot^I)$,其中对任意 $a\in N_I,A\in N_C$ 和 $P\in N_R$ 有

$$\Delta^I=S,a^I=I(a),\ A^I(x)=\begin{cases}n, & [A=n]\in L(x)\\ 0, & \text{else}\end{cases},\ P^I(x,y)=\begin{cases}n, & (x,y)\in F(P,n)\\ 0, & \text{else}\end{cases}.$$

下面证明模糊解释 I 是$\mathcal{A}$和$\mathcal{T}$的一个模型.首先,P1 和 P2 保证了每个 $A^I(x)$和 $P^I(x,y)$的取值都是唯一的.由上述公式,对任何模糊概念名 A,如果$[A=n]\in L(x)$,则 $A^I(x)=n$;对任何模糊关系名 P,如果$(x,y)\in F(P,n)$,则 $P^I(x,y)=n$.然后可以归纳证明一个结论:对任何比较式 C,如果 $C(y)\in L(x)$,则 $x\in C^I(y)$,其中,C 可分为以下情形:

(1) 当 $C=[A\bowtie n]$时,由 P3 得$[A=m]\in L(x)$且 $m\bowtie n$;再由构造公式得 $A^I(x)=m\bowtie n$;根据表 1 可知,$x\in[A\bowtie n]^I(y)$.类似地,由 P4~P6 可证,当 $C=[A\bowtie B],[A\bowtie a]$和$[A\bowtie ?]$时都有 $x\in C^I(y)$.

(2) 当 $C=D_1\sqcap D_2$ 时,由 P7 得 $D_1(y)\in L(x)$且 $D_2(y)\in L(x)$;再由归纳得 $x\in D_1^I(y)$ 和 $x\in D_2^I(y)$;根据表 1 可知,$x\in D_1^I(y)\cap D_2^I(y)=(D_1\sqcap D_2)^I(y)$.同理,由 P8 可证,当 $C=D_1\sqcup D_2$ 时有 $x\in(D_1\sqcup D_2)^I(y)$.

(3) 当 $C=\exists R.D,R=[P\rhd n]$时,由 P9 得,存在 z 使得$(x,z)\in F(P,m),m\rhd n$ 且 $C(y)\in L(z)$;由构造公式得 $P^I(x,z)=m\rhd n$,即$(x,z)\in R^I$;再由归纳得 $z\in C^I(x)$;根据表 1 可知,$x\in(\exists R.D)^I(y)$.同理,由 P10~P12 可证,当 $C=\forall R.D,\geq pR$ 和$\leq qR$ 时有 $x\in C^I(y)$.

对任何 $a\neq b\in\mathcal{A}$,由 P13 得 $I(a)\neq I(b)$,再由构造公式得 $a^I\neq b^I$,I 满足 $a\neq b$.类似地,由 P14 和 P15 可证,对任何 $a{:}C\in\mathcal{A}$有 $a^I\in C^I(y)$,I 满足 $a{:}C$;对任何$(a,b){:}R\in\mathcal{A}$有$(a^I,b^I)\in R^I$,I 满足$(a,b){:}R$.因此,I 满足$\mathcal{A}$中的任意事实,是$\mathcal{A}$的一个模型.对任何 $C\sqsubseteq D\in\mathcal{T}$,由 P16 得 $not(C)(x)\in L(x)$或 $D(x)\in L(x)$,再由前面结论得 $x\in(\neg C)^I(x)$或 $x\in D^I(x)$;对任意 $x\in\Delta^I$ 都有 $x\notin(\neg C)^I(x)$或 $x\in D^I(x)$,即 $C^I(x)\subseteq D^I(x)$,再由 C 和 D 都是概念可得,$C^I\subseteq D^I$.因此,I 满足 $C\sqsubseteq D$,是$\mathcal{T}$的一个模型.由于$\mathcal{A}$和$\mathcal{T}$存在一个模型 I,$\mathcal{A}$关于$\mathcal{T}$是一致的.

再证必要性.假设$\mathcal{A}$关于$\mathcal{T}$是一致的,则$\mathcal{A}$和$\mathcal{T}$必存在一个模型 $I=(\Delta^I,\cdot^I)$,可以通过下面的公式构造一个模糊 $Tableau(S,L,E,I)$:

$$S=\Delta^I,I(a)=a^I,L(x)=\{[A=n]|A^I(x)=n\}\cup\{C(y)|x\in C^I(y)\},F(P,n)=\{(x,y)|P^I(x,y)=n\}.$$

类似地,可归纳证明这样构造出来的模糊 Tableau 是$\mathcal{A}$关于$\mathcal{T}$的一个模糊 Tableau. □

2.2 FCALCN的Tableau算法

由定理 1,FCALCN 知识库一致性问题可转化为模糊 Tableau 存在性问题.Tableau 算法通过按完备规则构造完备图来判定模糊 Tableau 的存在性.在 FCALCN 模糊 Tableau 中,模糊隶属度的值都是明确给出的,但在实际推理过程中,很多模糊隶属度的值是不确定的.为此,在定义完备图时,将所有的模糊隶属度都视为变量,引入公式集合 U 描述这些变量间的大小关系.本文的 Tableau 算法不考虑 TBox 或令 TBox 为空,此时的知识库一致性问题也称为 ABox 一致性问题.

对任意 FCALCN ABox $\mathcal{A}$,Tableau 算法构造完备图 $G=(S,E,L,\neq,U)$,其中:

- S 是图中节点的集合;
- E 是图中边(有向边,用边的起点和终点表示)的集合;
- L 将每一个节点映射为受限比较式的集合,将每一条边映射为关系的集合;
- $\neq$是 S 中元素间的不等关系,$\neq$关系是反自反和对称的;
- U 是描述模糊隶属度间大小关系的公式集合.U 中公式形如 $X\bowtie Y$,其中,X 和 Y 可以是实数 $n\in[0,1]$,也

可以是形如 $A(x)$的变量.U 中公式满足以下约束:

$$X<Y\rightarrow Y>X;\ X\le Y\rightarrow Y\ge X;\ X>Y\rightarrow X\ge Y$$

$$X>Y,Y\le Z\rightarrow X>Y;\ X\ge Y,Y>Z\rightarrow X>Z$$

$$X\ge Y,Y\ge Z\rightarrow X\ge Z.$$

对任意$(x,y)\in E$,称 y 为 x 的后继(successor),x 为 y 的前驱.定义祖先和后代分别是后继和前驱的传递闭包.如果$[P\ge n]\in L(x,y)$,则对任何关系 R 满足 $R=[P>m],m<n$ 或 $R=[P\ge m],m\le n$,称 y 为 x 的 R-后继;如果$[P>n]\in L(x,y)$,则对任何关系 $R=[P\triangleright m],m\le n$,也称 y 为 x 的 R-后继.

首先根据给定的 FCALCN ABox $\mathcal{A}$初始化 $G=(S,E,L,\neq,U)$:

- $S=\{a\in N_I|a$ 在$\mathcal{A}$中出现$\}$,$E=\{(a,b)|(a,b):R\in\mathcal{A}\}$,当前 S 中的节点称为有名节点;
- 对任意 $a\neq b\in\mathcal{A}$,令 $a\neq b$;
- 对任意 $a:C\in\mathcal{A}$,在 $L(a)$中添加 $C(y)$,其中,y 为 S 中任一元素;
- 对任意$(a,b):[P\triangleright n]\in\mathcal{A}$,在 $L(a,b)$中添加$[P\triangleright n]$;
- 对任意$\mathcal{A}$中出现的实数 m 和 n,如果 $m>n$,则在 U 中添加 $m>n$.

然后可对 G 反复作用表 2 中的完备规则.称一个完备图是完全的,当且仅当没有任何完备规则可以应用.如果完备图中有模糊隶属度 X 使得 $X>X\in U,X>1\in U$ 或 $X<0\in U$,则称图中存在冲突.

Table 2 Completion rules of FCALCN

表 2 FCALCN 完备规则

Name		Rule
Atomic rule 1	Condition:	$[A\bowtie n](y)\in L(x),A(x)\bowtie n\notin U$
	Action:	$U\rightarrow U\cup\{A(x)\bowtie n\}$
Atomic rule 2	Condition:	$[A\bowtie B](y)\in L(x),A(x)\bowtie B(x)\notin U$
	Action:	$U\rightarrow U\cup\{A(x)\bowtie B(x)\}$
Atomic rule 3	Condition:	$[A\bowtie a](y)\in L(x),A(x)\bowtie A(a)\notin U$
	Action:	$U\rightarrow U\cup\{A(x)\bowtie A(a)\}$
Atomic rule 4	Condition:	$[A\bowtie ?](y)\in L(x),A(x)\bowtie A(y)\notin U$
	Action:	$U\rightarrow U\cup\{A(x)\bowtie A(y)\}$
Conjunction rule	Condition:	$(C\sqcap D)(y)\in L(x),C(y)\notin L(x)$ or $D(y)\notin L(x)$
	Action:	$L(x)\rightarrow L(x)\cup\{C(y),D(y)\}$
Disjunction rule	Condition:	$(C\sqcup D)(y)\in L(x),C(y)\notin L(x)$ and $D(y)\notin L(x)$
	Action:	$L(x)\rightarrow L(x)\cup\{C(y)\}$, or $L(x)\rightarrow L(x)\cup\{D(y)\}$
Exists rule	Condition:	$(\exists R.C)(y)\in L(x)$, and x has no R successor z such that $C(x)\in L(z)$
	Action:	Add a new node z in S then let $L(x,z)=\{R\},L(z)=\{C(x)\}$
Value rule	Condition:	$(\forall R.C)(y)\in L(x)$, and x has an R-successor z such that $C(x)\notin L(z)$
	Action:	$L(z)\rightarrow L(z)\cup\{C(x)\}$
At-Least rule	Condition:	$(\ge pR)(y)\in L(x)$, and x has no R-successors $z_1,z_2,\ldots,z_p$ such that for any $1\le i<j\le p$, $z_i\neq z_j$
	Action:	Add p new nodes $z_1,z_2,\ldots,z_p$ in S and for any $z_1,z_2,\ldots,z_p$, $1\le i<j\le p$, let $z_i\neq z_j,L(x,z_i)=\{R\},L(x,z_j)=\{R\}$
At-Most rule	Condition:	$(\le qR)(y)\in L(x)$, and x has R-successors $z_1,z_2,\ldots,z_{q+1}$
	Action:	$merge(z_i,z_j)$, where z_i and z_j are from $z_1,z_2,\ldots,z_{q+1}$ such that $z_i\neq z_j$

最大基数规则中用 $merge(x,y)$合并两个节点,在合并两个节点时,规定总是将无名节点合并到有名节点,而不将有名节点合并到无名节点.$merge(x,y)$,称 y 合并到 x 的过程如下:

$merge(x,y)$

(1) $L(x)\rightarrow L(x)\cup L(y)$;

(2) 对任何 z 满足 $z\neq y$,令 $z\neq x$;对任何 z 满足$(z,x)\in E$,令 $L(z,x)\rightarrow L(z,x)\cup L(z,y)$;

(3) 如果 y 是有名节点,则对任何有名节点 z 满足$(z,x)\in E$,令 $L(x,z)\rightarrow L(x,z)\cup L(y,z)$;

(4) 从图中删除 y 及其所有非有名节点后继.

下面给出 FCALCN ABox 一致性的 Tableau 算法.

算法 1. FCALCN ABox 一致性的 Tableau 算法.

输入:FCALCN ABox $\mathcal{A}$;

输出:T 或 F.

1. 初始化 $G=(S,E,L,\neq,U)$;
2. 对 G 反复应用不添加新节点的完备规则直到无法再应用;
3. 对 G 反复应用完备规则直到无法再应用;
4. 如果上述过程中能得到一个完全的无冲突的完备图,则返回 T;否则,返回 F.

定理 2. 算法 1 是 FCALCN ABox 一致性问题的判定过程.

证明:下面从算法的可终止性、正确性和完备性 3 个方面证明算法 1 是 FCALCN ABox 一致性问题的判定过程.

首先定义比较式规模和子式,以描述算法输入的规模.对于任何 FCALCN 比较式 C,定义 C 的规模为写下 C 所需的符号数,记作 $size(C)$.规定每一个模糊概念名、模糊关系名、个体名以及连接符($\sqcap,\sqcup,\exists,\forall,\geq,\leq,>$和$<$)都对应一个符号,每一个实数 $n\in[0,1]$对应一个符号,整数 p 用一进制表示,对应 p 个符号.如比较式$\neg(\geq 5[P\geq 1])\sqcap\exists[P\geq 1].[A\geq 0.5]\sqcap[B>0.7]$的规模为 22.$C$ 的子式集 $sub(C)$定义为

$$sub(C)=\{C\}\cup\begin{cases}sub(D_1)\cup sub(D_2), & \text{if } C=D_1\sqcap D_2 \text{ or } D_1\sqcup D_2\\ sub(D), & \text{if } C=\neg D \text{ or } \exists R.D \text{ or } \forall R.D\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases}.$$

显然,对任何比较式 C,C 的子式数目不会超过 C 的规模,即$\#sub(C)\leq size(X)$.类似地,也定义 ABox $\mathcal{A}$的规模为写下$\mathcal{A}$中事实所需的符号数.

然后证明算法的可终止性,即对任何有限规模的输入$\mathcal{A}$,算法 1 可在有限时间内终止.令输入规模为 N,算法初始化可在 N 时间内完成,并生成初始的完备图 G.G 中节点数不超过 N 个,称为有名节点,且任意有名节点 x 的标签 $L(x)$中的受限比较式数目(记作$\#L(x)$)和比较式最大规模(记作 $l(x)$)都不超过 N.对 G 应用完备规则得到完备图 G',则 G'中新添加的节点都在以有名节点为根的子树中.对 G'中任意节点 x,由完备规则可知,$\#L(x)\leq N$ 和 $l(x)\leq N$,x 最多新添加 N 个子节点作为后继,且对任意子节点 y 都有$\#L(y)\leq N$,$l(y)\leq l(x)-1$.由此可知,G'有如下特征:G'中新节点所在的子树都以有名节点为根,这些子树的总数不超过 N 棵;子树中每个节点最多有 N 个子节点,即子树的最大出度不超过 N;子树中节点标签的比较式最大规模随着子树的深度增加而减少,由于根节点标签的比较式最大规模不超过 N,子树的最大深度为 $N+1$.因此,G'中新添加的节点数目最多为 $N\times N^{N+1}$,即对 G 反复应用完备规则得到的完备图的节点数目总是有限的.又因为对每个节点最多只能应用 N 次规则,算法 1 可在有限时间内终止.

其次证明算法的正确性,即对任何输入$\mathcal{A}$,如果算法返回 T,则$\mathcal{A}$是一致的.算法返回 T 当且仅当能得到一个完全的无冲突的完备图.令该完全的无冲突的完备图为 $G=(S,E,L,\neq,U)$,下面只需证明由 G 可构造出$\mathcal{A}$的模糊 $Tableau(S',L',F,V)$.构造过程如下:

- 令 $S'=S$;
- 对任何 $x\in S$,令 $L'(x)=L(x)$;
- 对所有 U 中出现的模糊隶属度赋值,使得它们满足 U 中的所有公式;由 U 中公式的约束条件和图中不存在冲突可知这样的赋值是存在的;
- 对任何模糊概念名 A 和 $x\in S$,令$[A=n]\in L'(x)$,其中,n 是赋给模糊隶属度 $A(x)$的值;
- 对任何模糊关系名 P 和$(x,y)\in E$,令$(x,y)\in F(P,m)$,其中,$m=\max\{0\}\cup\{n_i|[P\triangleright n]\in L(x,y)\}$;
- 对任何个体名 a,如果 $a\in S$,则令 $V(a)=a$;否则,a 一定直接或间接合并到有名节点 b,令 $V(a)=b$.

完备图的初始化过程和模糊 Tableau 性质 P13~P15 相对应,表 2 中的 9 条完备规则和模糊 Tableau 性质 P3~P12 是一一对应的.通过归纳法可以证明(S',L',F,V)确实是$\mathcal{A}$的模糊 Tableau.

类似地,可以证明算法的完备性,即对任何输入$\mathcal{A}$,如果$\mathcal{A}$是一致的,则$\mathcal{A}$存在一个模糊 Tableau,由此,一定可以通过算法 1 构造出完全的无冲突的完备图,算法返回 T.

综上所述,对任何输入的 FCALCN ABox $\mathcal{A}$,算法 1 可以在有限时间内终止并返回 T 或 F,且算法 1 返回 T 当且仅当$\mathcal{A}$是一致的,所以算法 1 是 FCALCN ABox 一致性问题的判定过程. □

由定理 2,算法 1 的复杂性是输入规模的指数时间.经过优化,可以将推理算法的复杂性约束在输入规模的多项式空间内.优化方式是按树的深度优先遍历方式构造完备图,对任意节点,如果以它为根的子树已经遍历完,则该节点及其相关的模糊隶属度都可以从算法储存空间中删去.由于完备图中子树的最大深度都是输入规模的多项式(见定理 2),在算法执行的任意时刻,只需要耗费多项式空间储存中间结果.这种优化方式与经典 ALCN Tableau 算法的优化方式[1]是相同的.因为 ALCN ABox 一致性问题已经是多项式空间完全问题[1].而 FCALCN 是 ALCN 的扩展,所以,FCALCN ABox 一致性问题的复杂性是多项式空间难的.又因为算法 1 经过优化可使得空间耗费不超过输入的多项式规模,可知,

定理 3. FCALCN ABox 一致性问题的复杂性是多项式空间完全的.

因此,FCALCN 引入的描述模糊隶属度比较的机制并没有明显增加推理的复杂性.

3 结 论

本文定义了支持模糊隶属度比较的扩展模糊描述逻辑 FCALCN,引入新的支持模糊隶属度比较的原子概念形式;并给出了 FCALCN 的推理算法,证明 FCLACN ABox 一致性问题的复杂性是多项式空间完全的. FCALCN 不仅能够描述模糊隶属度比较,而且具有良好的推理性能,可以作为语义 Web 表达涉及模糊隶属度比较的复杂模糊知识和实现推理任务的有效工具.今后的研究工作一方面将引入更多算子增强表达能力,研究相应的推理算法;另一方面将考虑在非空 TBox 约束下的推理算法.

References:

[1] Baader F, Calvanese D, McGuinness DL, Nardi D, Patel-Schneider PF. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

[2] Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The semantic Web. Scientific American, 2001,284(5):34−43.

[3] Horrocks I, Patel-Schneider PF. Reducing OWL entailment to description logic satisfiability. In: Ensel D, Sycara D, Mylopoulos D, eds. Proc. of the 2003 Int'l Semantic Web Conf. (ISWC 2003). LNCS 2870, Berlin: Springer-Verlag, 2003. 17−29.

[4] Straccia U. Reasoning within fuzzy description logics. Journal of Artificial Intelligence Research, 2001,14(1):137−166.

[5] Hölldobler S, Störr HP, Khang TD. The fuzzy description logic ALCFH with hedge algebras as concept modifiers. Int'l Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2003,7(3):294−305.

[6] Sanchez D, Tettamanzi G. Generalizing quantification in fuzzy description logic. In: Proc. of the 8th Fuzzy Days. Dortmund, 2004. http://mago.crema.unimi.it/pub/SanchezTettamanzi2004.pdf

[7] Straccia U. Description logics with fuzzy concrete domains. In: Proc. of the 21st Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence. Edinburgh, 2005. http://faure.isti.cnr.it/~straccia/download/papers/UAI05/UAI05.pdf

[8] Stoilos G, Stamou G, Pan J, Tzouvaras V, Horrocks I. Reasoning with very expressive fuzzy description logics. Journal of Artificial Intelligence Research, 2007,30(8):273−320.

[9] Hu H, Du XY. Description logics based on interval fuzzy theory. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2005,33(z1):275−277 (in Chinese with English abstract).

[10] 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

[11] Kang DZ, Xu BW, Lu JJ, Li YH. Two reasoning methods for extended fuzzy ALCH. In: Proc. of on the Move to Meaningful Internet Systems 2005, Part II, Agia Napa, Cyprus. LNCS 3761, Berlin: Springer-Verlag, 2005. 1588−1595.

[12] Li YH, Xu BW, Lu JJ, Kang DZ. On the computational complexity of the extended fuzzy description logic with numerical constraints. Journal of Software, 2006,17(5):968−975 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/968.htm

附中文参考文献:

[9] 胡鹤,杜小勇.一种基于区间模糊理论的描述逻辑系统.华中科技大学学报(自然科学版),2005,33(z1):275–277.

[10] 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

[12] 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.软件学报,2006,17(5):968–975. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/968.htm

康达周(1980－),男,江苏南京人,博士,主要研究领域为语义 Web.

陆建江(1968－),男,博士,副教授,主要研究领域为语义 Web,数据挖掘.

徐宝文(1961－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为软件工程,知识与信息获取技术.

李言辉(1981－),男,博士生,主要研究领域为语义 Web.