

## 一种目标可满足性定性、定量表示与推理方法\*

王守信<sup>1+</sup>, 张莉<sup>1</sup>, 王帅<sup>1</sup>, 申菊芳<sup>1</sup>, 刘禹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(北京航空航天大学 软件工程研究所, 北京 100191)

<sup>2</sup>(北京航空航天大学 软件开发环境国家重点实验室, 北京 100191)

### Qualitative and Quantitative Representing and Reasoning for Goals Satisfiability

WANG Shou-Xin<sup>1+</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>, SHEN Ju-Fang<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Software Engineering Institute, BeiHang University, Beijing 100191, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory of Software Development Environment, BeiHang University, Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: shouxin\_wang@126.com

Wang SX, Zhang L, Wang S, Shen JF, Liu Y. Qualitative and quantitative representing and reasoning for goals satisfiability. *Journal of Software*, 2011, 22(4): 593-608. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3736.htm>

**Abstract:** Satisfiability representation and reasoning are important issues in goal-oriented requirements engineering. According to the uncertainty of subjective cognition during abstract qualitative concepts from quantitative universal set, this paper proposes a representation model based on the cloud model for goals satisfiability. The proposed model integrates randomness and fuzziness of subjective perception of goals satisfiability. It has qualitative semantic clarity as well as quantitative accuracy of goals satisfiability. On the basis of the model, the paper presents a reasoning approach based on the core idea of ordered weighted aggregation operators. This approach deduces satisfiability of parent goals between the minimal and maximal satisfiability of sub-goals which reflects the peculiarity of human thinking and avoids absolute reasoning results based on pure logic “and” and “or”. The main characteristics are analyzed through theorem proving and comparison experiments. Finally, conclusions are drawn and research directions are pointed out.

**Key words:** goal-oriented requirements engineering; satisfiability representation; goal satisfiability reasoning; cloud model; ordered weighted aggregation operators

**摘要:** 可满足性表示和推理方法是面向目标需求工程领域的重要研究内容.根据从连续定量论域抽取定性概念过程中的主观认知的不确定性特点,提出了一种基于云模型的目标可满足性表示模型.作为定性概念与其定量论域间的不确定性转换模型,云模型能够把主观认知的模糊性和随机性集成在一起,兼顾可满足性定性表示的语义明确性和定量表示的精确性,较好地实现可满足性定性、定量统一表示.在此基础上,设计了一种基于 OWA(ordered weighted aggregation)算子核心思想的目标可满足性推理方法,该方法避免了纯逻辑推理过于“偏执”的推理结果.同时,父目标满足程度介于子目标可满足性的最小和最大值之间,较好地反映出了人类一般思维的特点.采用定理证明和对比实验的方式,对推理方法的特点进行分析.最后进行总结,并指出进一步的研究方向.

**关键词:** 面向目标需求工程;可满足性表示;目标可满足性推理;云模型;有序加权聚合算子

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB310803); 国家重大研究计划“可信软件基础研究”(90818017)

收稿时间: 2009-05-07; 修改时间: 2009-08-26; 定稿时间: 2009-10-10; jos 在线出版时间: 2010-07-28

中图法分类号: TP311

文献标识码: A

面向目标需求工程(goal-oriented requirements engineering,简称 GORE)是需求工程的重要研究分支,目标是标识、组织和验证软件需求的一种逻辑机制.目标由商业、组织或系统的高层目的(objective)组成,捕获软件系统被构建的原因,并对不同层次的设计决策进行指导<sup>[1]</sup>.面向目标的需求建模从高层抽象目标开始,根据目标间纵向 *And,Or* 分解关系对抽象目标进行逐层精化,直到较低抽象层次的叶子目标,叶子目标可作为软件职责分配给不同 Agent 并实现<sup>[2]</sup>.除纵向分解关系外,文献[3,4]在分解关系的基础上增加横向二元关系 *Satisfy* 和 *Deny*,分别用于表达目标间的正向、负向影响关系.根据目标关系,给定叶子目标可满足性初始值,依据自下而上的可满足性推理方法,可推导出高层目标的满足程度.需求工程师和软件工程师根据高层目标的可满足性,检测需求模型的潜在冲突,并对可选的软件设计方案进行权衡,完成软件系统的各项设计决策<sup>[5]</sup>.

可满足性表示是设计可满足性推理方法的重要前提,可满足性可表示为连续数域区间的定量数值,或一组定性级别.定量表示能够满足表示精度的要求,却引入了主观认知的含糊性.例如,0.65 的本质含义是什么?目标被满足的程度是高还是低?概念的语义通常很难用简单的数值进行表述.定性表示能够区分不同级别的可满足性间的语义差异,易于在概念和认知层次理解目标被满足的程度.然而,定性表示却带来表示精度的损失,不能对可满足性进行细粒度的比较.例如,当目标  $g_1$  和  $g_2$  均属于“一般满足”,且  $g_1$  的可满足性大于  $g_2$  时,定性表示不能以定量的方式对目标可满足性间的差异进行细微的区分,也不利于量化分析方法的应用.此外,对于一组叶子目标的满足程度,很难统一地由定性概念或定量数值进行表示.例如,部分叶子目标可满足性无法精确计算得出,而常常依据用户或领域专家的主观经验和分析结果,以诸如“一般满足”、“非常满足”等语言值进行表达.目标模型作为需求分析、协商及软件设计、实现决策的重要载体,软件涉众往往希望能以不同的方式对目标的满足程度进行理解、分析和评价.当前,GORE 研究领域采取相互独立的定量或定性的可满足性表示方式,无法同时兼顾定量表示的精确性及定性表示的语义明确性.

目标可满足性推理是根据目标可满足性表示方式和目标关系的语义,完成不同目标间可满足性传递或合成的过程.可满足性是指目标可被满足的程度,若无特殊说明,下文中使用的术语“可满足性”和“满足程度”等具有相同含义.目标可满足性推理依赖于对目标间关系语义的理解.文献[6]从判定父目标满足程度的充分条件的角度对 *And,Or* 分解关系的语义进行解释.*And* 分解关系中,所有子目标的满足是判断父目标满足的充分条件;对于 *Or* 关系,任一子目标的满足均可作为评判父目标满足程度的充分条件.这种解释并未明确给出分解关系下实现可满足性推理的一般性原则,不同研究者根据各自对目标关系语义的理解,设计出不同的推理方法.文献[3,7]使用纯逻辑“与”、“或”操作完成定性推理,仅关注子目标可满足性最小或最大值对父目标的影响,这种方法没有考虑子目标间的“补偿”或“抑制”作用.例如,目标  $g$  被 *And* 分解为一组子目标  $g_1, \dots, g_n$ ,且除  $g_1$  为“一般满足”外,其他子目标均为“完全满足”.此时, $g$  的满足程度不应仅由  $g_1$  单独决定,适当地考虑其他子目标对  $g$  的满足程度的“补偿”作用,才能做出合理、全面的判断.文献[8,9]采用概率意义下的“与”、“或”操作完成定量推理,父目标的可满足性由所有子目标的满足概率共同决定.然而,基于概率的推理结果使得父目标的满足程度可能远小于或大于子目标可满足性的最小或最大值,上述推理方法的推理结果不能较好地反映现实环境中人的主观思维特点.事实上,具有主观判断能力的软件涉众并非以纯逻辑或概率的方式认知父目标的可满足性.相反,父目标的满足程度是以子目标可满足性作为证据,经过软件涉众的主观思考、分析后得到的直觉评判结果.一般而言,适当考虑子目标间的“补偿”或“抑制”作用,使父目标的满足程度介于子目标可满足性的最小和最大值之间,更符合人的主观思维模式.

针对上述目标可满足性表示和推理方法中存在的局限,本文设计一种基于云模型的目标可满足性表示模型,完成定性、定量相结合的目标可满足性统一表示.在该模型的基础上,提出一种基于 OWA(ordered weighted aggregation)算子核心思想的推理方法.该方法考虑子目标间补偿和抑制作用对父目标满足程度的影响,其推理过程能够较好地与人的主观直觉判断保持一致<sup>[10,11]</sup>.

本文第 1 节给出基于云模型的可满足性的定性、定量统一表示方法.第 2 节在分析目标关系语义的基础上

介绍基于 OWA 核心思想的推理方法,并对方法特点进行分析,同时给出推理方法的算法实现.第 3 节以交通领域中某目标模型为实例,对本文提出的推理方法进行实验分析.最后,对本文工作进行总结并指出进一步的研究方向.

## 1 基于云模型的可满足性表示

目标可满足性的定量或定性表示方式有着各自的优势和局限.作为两种研究手段,将二者相结合则能发挥各自的优势并弥补彼此的不足<sup>[12]</sup>.文献[13]采用界限分明的连续区间离散化方式将子区间与定性级别相对应,这种界限分明的划分无法反映人的主观认知特点.连续区间离散化可视为一种从连续定量数域抽取定性概念的知识发现过程,具有明显的主观性,即模糊性和随机性.相邻子区间的临近区域不一定严格隶属于某定性级别,这种亦此亦彼的认知现象反映了认知的模糊性.此外,对临近区域中的数值代表不同级别的认可程度往往不尽相同,表现为一种主观随机性.模糊数学<sup>[14,15]</sup>通过隶属函数刻画定量值与定性概念间的隶属关系,是处理认知模糊性的一种有效方法.然而,模糊数学用精确隶属函数定量刻画亦此亦彼现象,却忽略了隶属函数本身的不确定性<sup>[16]</sup>,不能合理反映认知的随机性.由李德毅院士提出的云模型<sup>[17]</sup>是一种研究随机性与模糊性间关联性的理论模型,能够有效克服模糊数学理论的上述局限.因此,本文将采用云模型建立定性概念及其定量论域间不确定性对应关系,实现目标可满足性的定性、定量统一表示.

### 1.1 云模型简介

云模型从定性概念入手,把握对量的认知的不确定性,建立概念与其定量论域间的不确定性关联关系.云模型及其相关理论与方法已广泛地应用于智能控制<sup>[18]</sup>、数据挖掘<sup>[19]</sup>、信任建模与推理<sup>[20,21]</sup>等领域.云和云滴的定义如下:

**定义 1**<sup>[17]</sup>. 设  $U$  是用数值表示的定量论域,  $C$  是  $U$  上的定性概念,若定量值  $x \in U$  是定性概念  $C$  的一次随机实现,  $x$  对  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0, 1]$  是具有稳定倾向的随机数,  $\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ , 则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为云, 记为  $C(X)$ . 每一个  $x$  称为一个云滴.

定义 1 具有下列关键性质:

- (1) 云是一个随机变量  $X$  在定量论域  $U$  上的分布, 但  $X$  并不是概率意义下的简单的随机变量, 对于  $X$  的任意一次实现  $x \in U$ , 均有一个确定度  $\mu$ , 且确定度也是一个随机变量, 而不是一个固定的数值;
- (2) 云滴的确定度可以理解为云滴能够代表该定性概念的程度, 云滴出现的概率越大, 云滴的确定度应当越大.

云模型所表达概念的整体特性由其数字特征来反映, 即期望  $Ex$  (expected value)、熵  $En$  (entropy)、超熵  $He$  (hyper entropy).  $Ex$  是在定量论域中最能代表定性概念的点, 用于表示概念的内涵;  $En$  是定性概念不确定性的度量, 由概念的随机性和模糊性共同决定, 用于表示概念的外延;  $He$  是熵的不确定性度量, 即熵的熵, 由熵的随机性和模糊性共同决定, 用于度量概念外延的不确定性.

**定义 2**<sup>[17]</sup>. 设  $U$  是一个用精确数值表示的定量论域,  $C$  是  $U$  上的定性概念, 若定量值  $x \in U$  且  $x$  是定性概念  $C$  的一次随机实现, 若  $x$  满足  $x \sim N(Ex, En^2)$ , 其中,  $En' \sim N(En, He^2)$ , 且  $x$  对  $C$  的确定度满足如下公式:

$$\mu = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En')^2}} \quad (1)$$

则  $x$  在论域  $U$  上的分布称为一维正态云.

文献[22]对正态云用于知识表示的普适性进行了深入的分析和讨论, 若不作特殊说明, 本文涉及的云模型均为一维正态云模型. 一维正态云的图形表示如图 1 所示, 其中,  $Ex=0.5, En=0.1, He=0.01$ .

由图 1 可知, 正态云的  $En$  可用于度量概念的外延, 即论域空间可被概念接受的云滴范围. 正态云的  $He$  衡量概念外延的不确定性, 使整个云呈现一种泛正态分布形态<sup>[22]</sup>, 其图形化表示为云带的宽度.

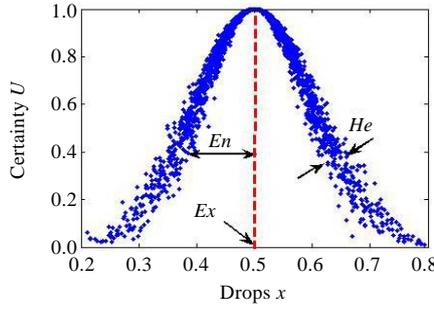


Fig.1 Representation graphically of one dimension normal cloud

图 1 一维正态云模型图形表示

1.2 可满足性的云表示

设  $U=[0,1]$  为目标可满足性的定量论域,与  $U$  对应的定性概念域见表 1.概念域中每个概念表示可满足性的一个定性级别,并与可满足性的某定量数值对应,定性级别间的全序关系为  $L_5>L_4>L_3>L_2>L_1$ .由于人们对同一概念域中不同定性级别的外延及其稳定性具有一致的认知,通常为不同定性级别赋予相同的  $En$  和  $He$ .此时,将表 1 中的定量数值作为云的期望  $Ex$ ,并为  $En$  和  $He$  赋予合适的数值(本文中, $En=0.1,He=0.01$ ),可建立可满足性定量值与其定性概念间的关联,如图 2 所示.此外,本文将 Completely unsatisfied 和 Completely satisfied 的定量论域设为不对称区间,由半云模型表示,其他概念则由对称云模型表示.可以根据实际表达的需求对半云或对称云的表示方式进行选取,以合理表达认知的语义.

Table 1 Qualitative and quantitative representation of goals satisfiability

表 1 目标可满足性的定性和定量表示

Satisfied level	Concepts	Satisfiability
$L_1$	Completely unsatisfied	0.00
$L_2$	Generally unsatisfied	0.25
$L_3$	Generally satisfied	0.50
$L_4$	Very satisfied	0.75
$L_5$	Completely satisfied	1.00

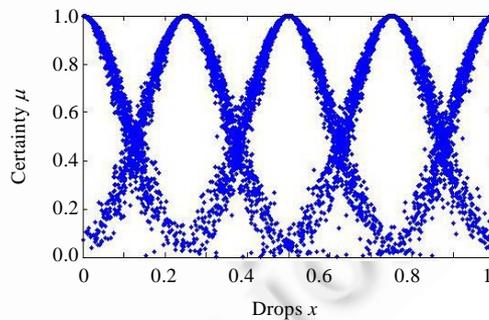


Fig.2 Representation of satisfiability based on cloud model

图 2 可满足性的云表示

如图 2 所示,横坐标为可满足性定量论域区间 $[0,1]$ ,纵坐标表示定量值属于某定性级别的确度 $\mu \in [0,1]$ .通过确度 $\mu$ ,可建立论域区间内数值与概念域中定性级别间的关联关系, $\mu$ 用于衡量关联程度的强弱.一方面, $\mu$ 反映了认知的模糊性,即定量数值并非绝对地隶属或不隶属于某定性级别;另一方面,对于任一  $x \in U, x$  到 $\mu$ 的区间 $[0,1]$ 的映射是一对多变换.与模糊数学中精确隶属度不同,确度 $\mu$ 是一个概率分布,而不是一个固定数值<sup>[17]</sup>,表达了认知的随机性.云模型为可满足性的定性、定量统一表示打下了良好的基础.据此,本文定义一种基于云模

型的目标可满足性表示模型,简称可满足性模型,其定义如下:

**定义 3.** 基于云的目标可满足性模型  $CSat=\langle L, X, \mu, CF_{LX}, CF_{XL} \rangle$ . 其中,  $L$  为由云的数字特征表征的定性级别,  $X$  为  $L$  所对应子论域  $U_L \subset U$  内任一可满足性定量值,  $\mu$  为  $X$  隶属于  $L$  的确定度.  $CF_{LX}: L \times \mu \rightarrow X, CF_{XL}: X \rightarrow L \times \mu$  是  $L$  和  $X$  间的映射方法, 用于实现二者间的相互转换.

$CSat$  中,  $L$  为定性把握目标的满足程度提供明确的语义基础, 取值范围为离散全序集合  $\{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\}$ . 根据目标可满足性所处定性级别的不同, 软件涉众可在概念和认知层次, 区分可满足性间的语义差异. 由  $X$  表达的可满足性定量值在保证语义明确性的基础上, 能够对可满足性进行细粒度的比较, 并且保障应用定量方法对可满足性进行精确分析的能力.  $\mu$  用于度量  $L$  和  $X$  间的关联强度, 辅助  $CF_{LX}, CF_{XL}$  完成  $L$  和  $X$  间的相互转换. 给定  $L_i, \mu_i$  表示可满足性处于  $L_i$  级别的证据充分性,  $\mu_i$  越大, 则可满足性处于  $L_i$  级别的证据越充分.  $CF_{LX}$  可由后件云发生器实现<sup>[17]</sup>, 其基本含义是,  $L_i$  的子论域中, 表达以充分性  $\mu_i$  处于  $L_i$  级别的可满足性定量值. 对于  $L_i$  子论域内任一定量值  $X_i, CF_{XL}: X \rightarrow \mu$  可由前件云发生器实现<sup>[17]</sup>, 其基本含义是, 根据定量值  $X_i$ , 目标可满足性处于  $L_i$  级别的证据充分性为  $\mu_i$ . 通过  $CF_{LX}, CF_{XL}$  能够实现  $L$  和  $X$  间的相互转换, 自然地建立定性级别与定量数值间的关联关系, 使  $CSat$  模型成为一个有机整体. 图 3 为基于  $CSat$  模型的目标可满足性表示示例, 其中, 定性级别为  $L_3, Ex=0.5, En=0.1, He=0.01$ .

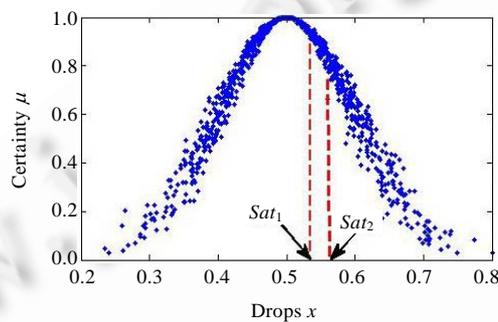


Fig.3 Satisfiability representation based on Csat

图 3 基于  $Csat$  模型的可满足性表示

假设存在目标  $g_1$  和  $g_2$ , 其可满足性定量值为  $Sat_1$  和  $Sat_2$  (如图 3 箭头所示). 由于云模型是定性概念与其定量论域间的不确定转换模型<sup>[18]</sup>, 因而能够自然地实现可满足性的定性、定量统一表示. 如图 3 所示,  $g_1, g_2$  的可满足性均隶属于相同级别  $L_3$ . 从概念和认知的角度来看,  $g_1, g_2$  的定性可满足性具有相同的语义, 即均隶属于概念“一般满足”. 在可满足性定性级别  $L_3$  的定量论域中, 可满足性值  $Sat_2$  大于  $Sat_1$ . 由于定量论域是一个连续数域区间, 虽然  $g_1, g_2$  的定性可满足性具有相同的语义, 但依然能够从定量角度对二者的可满足性进行定量的精确刻画, 并且具备对可满足性间的差异进行细微区分的能力. 因此, 在应用  $CSat$  模型进行可满足性表示时, 能够在保证定性表示的语义明确性的同时兼顾定量表示的精确性.

由于不同子论域间的连续性, 相邻级别间的云滴产生叠加, 形成亦此亦彼的过渡区域. 当给定一组  $Ex$  值时, 云的  $En$  和  $He$  将对过渡区域产生关键影响. 由定义 2 中  $En' \sim N(En, He^2)$  可知, 当  $En - 3He > 0$ , 即  $He < En/3$  时,  $P\{En - 3He < En' < En + 3He\} = 0.997$ . 此时, 99.7% 的云滴落入由曲线  $y_1 = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En+3He)^2}}$  和  $y_2 = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En-3He)^2}}$  所围区域内, 如图 4 所示.

图 4 为可满足性级别  $L_2, L_3, L_4$  的  $y_1$  和  $y_2$  曲线,  $L_3$  的云滴区域与  $L_2$  和  $L_4$  的云滴区域产生叠加. 当云滴位于区间  $[x_1, x_2]$  时, 其定量值唯一隶属于  $L_3$ , 称区间  $[x_1, x_2]$  为明确认知域. 由于超熵  $He$  的作用, 明确认知域中云滴并非以固定确定度隶属于某定性级别, 这种现象反映了模糊认知中的随机性. 与模糊数学不同, 相邻定性级别间的云滴叠加于两个区间  $[x_3, x_1]$  和  $[x_2, x_4]$  (称为模糊认知域), 而非两个点. 较之模糊数学而言, 模糊认知域能够更合理地表征对亦此亦彼过渡现象的主观认知的不确定性.

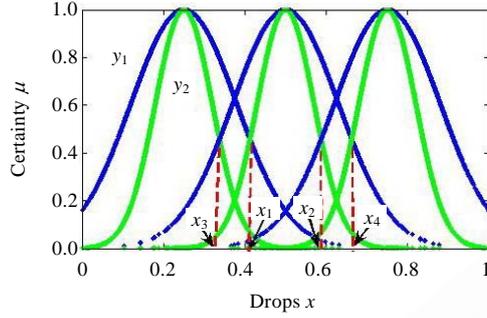


Fig.4 Quantification of transition areas among cloud drops

图4 云滴过渡区域的量化

根据云模型的数字特征,明确认知域和模糊认知域的区间范围由以下公式确定:

$$|x_2 - x_1| = \frac{Ex_4 - Ex_2}{2} - (Ex_4 - Ex_2) \times \frac{3He}{2En} \quad (2)$$

$$|x_4 - x_2| = (Ex_4 - Ex_3) \times \frac{3He}{En} \quad (3)$$

$$|x_2 - x_1| = (Ex_3 - Ex_2) \times \frac{3He}{En} \quad (4)$$

$En, He$  为数字特征熵和超熵,  $Ex_2, Ex_3, Ex_4$  为定性级别  $L_2, L_3, L_4$  所对应的期望值. 由公式(2)可知, 明确认知域为  $En$  的单调增函数是  $He$  的单调减函数. 当概念的外延变大, 或外延不确定性减小时, 明确隶属于该概念的云滴范围同时增大. 由公式(3)、公式(4)可知, 模糊认知域为  $En$  的单调减函数, 是  $He$  的单调增函数. 由于定量论域  $U$  的区间长度固定且等于所有明确认知域和模糊认知域的区间长度的总和, 当明确认知域变大时, 模糊认知域自然减小. 可见, 由  $En$  和  $He$  控制的定性概念及其定量论域间不确定性对应关系符合人的主观认知特点.

总之, 基于云模型的  $CSat$  模型能够兼顾可满足性的语义明确性和精确性, 能够把认知的模糊性和随机性集成在一起, 较好地实现了可满足性的定性、定量统一表示, 为软件涉众理解可满足性提供更加灵活的手段, 为可满足性推理提供合理的语义基础和精度表示.

## 2 可满足性推理

可满足性表示方法和目标关系语义是设计推理方法的关键依据. 本节首先对目标关系语义进行分析, 给出可满足性推理方法的约束条件. 然后, 根据第 1.2 节的可满足性云表示模型, 基于 OWA 算子核心思想介绍可满足性推理方法, 并对方法的特点进行分析. 最后, 给出方法的实现算法.

### 2.1 目标关系语义

目标模型可表示为二元组  $\langle G, R \rangle$ ,  $G$  是目标的集合,  $R$  是作用于  $G$  上的目标关系集合.  $R$  中包含 4 类可满足性关系, 即纵向 *And* 和 *Or* 分解关系, 横向 *Satisfy* 和 *Deny* 关系. 为了分析目标关系语义, 本文给出两个基本定义: 即局部上下文和证据上下文.

**定义 4(局部上下文).** 局部上下文由目标  $g$  自身及一组通过唯一一种目标关系与  $g$  连接且影响  $g$  的可满足性的目标组成.

根据定义 4, 共有 4 类局部上下文, 即 *And*, *Or*, *Satisfy* 和 *Deny* 局部上下文. 其中, *And* 和 *Or* 局部上下文统称为局部分解上下文. 局部分解上下文可符号化为  $And\langle g, \{g_1, \dots, g_n\} \rangle$  和  $Or\langle g, \{g_1, \dots, g_n\} \rangle$ . 根据文献[6]中目标分解关系的语义, 所有子目标的整体可视为其父目标可满足性的一个证据来源.

对于横向关系, 如果  $g_1, g_2$  存在 *Satisfy* 关系, 记为  $g_2 \xrightarrow{oS} g_1$ , 可认为  $g_2$  为  $g_1$  的满足提供积极证据,  $w$  表示  $g_2$

所提供的证据影响  $g_1$  的权重.类似地,如果  $g_1$  和  $g_2$  间存在 *Deny* 关系,记为  $g_2 \xrightarrow{wD} g_1$ ,则  $g_2$  的满足程度会对  $g_1$  的可满足性产生负面影响.*Satisfy* 和 *Deny* 局部上下文可形式化为  $Sat\langle g_1, g_2 \rangle$  和  $Den\langle g_1, g_2 \rangle$ .通过 *Satisfy* 或 *Deny* 关系与目标  $g_1$  连接的每个目标,都可为  $g_1$  的满足提供一个证据来源.不同证据来源对  $g_1$  的影响程度使用权值  $w$  表示,  $w \in [-1, 1]$ .横向关系的局部上下文中,证据来源的数量等于连接至目标  $g_1$  的目标个数的总和.

完成目标可满足性证据来源的标识后,可满足性推理则转化为不同证据来源的合成.为此,本文定义证据上下文,用以表述这种证据合成过程.

**定义 5(证据上下文).** 证据上下文由某目标  $g$  自身及所有其他包含于目标  $g$  的某一证据来源中的目标组成.

证据上下文可形式化表示为  $\langle g, \{e_1, \dots, e_n\}, W \rangle$ ,  $\{e_1, \dots, e_n\}$  是目标  $g$  的一组证据来源,  $W = \{w_1, \dots, w_n\}$  是一组表示每个证据对目标  $g$  可满足性的贡献强度的权值,权值的数域区间为  $[-1, 1]$ .允许权值为负数是因为 *Deny* 局部上下文提供对目标可满足性的负面影响,目标  $g$  的最终可满足性值将由其所有证据来源共同决定.

根据定义 4 和定义 5,本文给出以下目标建模的约束条件:

**约束 1.** 对于任一目标  $g$ ,可存在一个且仅一个局部分解上下文.

**约束 2.** 对于任何非叶子目标,其证据上下文中所有权值的绝对值之和为 1,这意味着该非叶子目标可被完全满足.

**约束 3.** 目标模型中的目标关系不存在环.

约束 1 用于保证目标模型与经典目标建模方法的一致性及目标关系的基本语义,即任一目标只能通过 *And* 或 *Or* 关系的一种分解为一组子目标.约束 2 用于保持证据上下文中,某目标最终可满足性由其所有证据来源共同决定的语义;此外,权值绝对值之和为 1,能够保证任意一个非叶子目标的可满足性均有可能达到完全满足.约束 3 用于保证在局部上下文和证据上下文语义情况下,目标推理过程不存在无限循环,从而能够在有限步骤内结束.

满足上述约束条件的目标模型的可满足性推理过程可分为两步完成:第 1 步,局部分解上下文中,根据子目标可满足性,推理得出父目标可满足性;第 2 步,证据上下文中不同来源的可满足性证据的合成.为此,本文定义  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子,实现局部分解上下文中 *And* 和 *Or* 分解关系下的父目标可满足性推理;定义  $F_{env}$  算子,完成不同来源的可满足性证据的合成.本文将在第 2.3 节详细介绍  $F_{and}$ 、 $F_{or}$  和  $F_{env}$  的实现方法.本节下面给出实现  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子的约束条件及其形式化定义,算子实现的约束条件包括:置换不变性、单调性和有序性.本文给出实现  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子实现约束条件的形式化描述如下:

**置换不变性.** 给定一组目标可满足性  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ ,  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$  是  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  的任意置换,则

$$F_{and}(b_1, b_2, \dots, b_n) = F_{and}(a_1, a_2, \dots, a_n) \text{ 且 } F_{or}(b_1, b_2, \dots, b_n) = F_{or}(a_1, a_2, \dots, a_n).$$

给定目标可满足性  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 称  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$  是  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  的任意置换是指,  $b_1, b_2, \dots, b_n$  是  $a_1, a_2, \dots, a_n$  的任意重新排列,即  $b_1, b_2, \dots, b_n$  与  $a_1, a_2, \dots, a_n$  元素相同,但元素排列次序不一定相同.

**单调性.** 设  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  和  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$  为任意两组目标可满足性,且对任意  $i$  有  $a_i \leq a_{i+1}$ ,  $b_i \leq b_{i+1}$ .若存在  $(a'_1, a_2, \dots, a_n)$ ,  $(b_1, b_2, \dots, b'_n)$  且  $a'_1 \leq a_1$ ,  $b'_n \leq b_n$ , 则  $F_{and}(a'_1, a_2, \dots, a_n) \leq F_{and}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ ,  $F_{or}(b_1, b_2, \dots, b_n) \leq F_{or}(b_1, b_2, \dots, b'_n)$ .

**有序性.** 给定一组目标可满足性  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ , 则有

$$\text{Min}(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq F_{and}(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq F_{or}(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq \text{Max}(a_1, a_2, \dots, a_n).$$

在局部分解上下文中,置换不变性用于保证目标推理的结果与子目标次序的无关性.单调性用于保证  $F_{and}$ 、 $F_{or}$  算子对推理结果进行细粒度区分的能力.即,在其他子目标满足程度保持不变的情况下,  $F_{and}$  或  $F_{or}$  算子分别是子目标可满足性最小或最大值的单调增函数.有序性使得推理结果能够与人的直觉评判保持一致,较好地反映了软件涉众的主观思考、判断的特点.一方面,推理结果能够对 *And* 和 *Or* 的关系语义进行区分,即保证  $F_{and}(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq F_{or}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ ;另一方面,能够表征子目标可满足性间的“互补”和“抑制”作用,即父目标满足程度介于基于纯逻辑“与”和“或”的推理结果之间.

容易验证,纯逻辑和概率“与”、“或”操作均满足置换不变性及单调性.然而,逻辑“与”、“或”的推理结果仅与子目标可满足性最小或最大值相关,纯逻辑推理不完全满足有序性约束;同时,概率“与”、“或”推理也不满足有

序性约束.由于可满足性推理结果的有序性是人的主观思维、直觉评判相符的重要特性,本文将采用 OWA 算子的核心思想实现  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子.

## 2.2 OWA算子

OWA 算子是 Yager<sup>[23]</sup>于 1988 年提出的一种介于最大与最小算子之间的信息聚合方法,被广泛应用于决策、神经网络、数据库系统、专家系统及图像压缩等领域<sup>[24,25]</sup>,OWA 算子的定义如下:

定义 6(OWA 算子). 实数域上的  $n$  维映射  $f:R^n \rightarrow R$ ,若

$$f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n w_j a_j \quad (5)$$

$W=[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$  是与  $f$  相关的权向量,满足  $w_i \in [0,1]$  和  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ .  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$  是  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  的一个置换,且对于任意  $i < j$  有  $b_i \geq b_j$ ,则称  $f$  为有序加权平均算子.

OWA 算子的特点是,对数据  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  按从大到小的顺序进行排序,权重  $w_i$  与元素  $a_i$  无关,只与重新排序后的第  $i$  个位置相关.特别地,若  $W=[1,0, \dots, 0]^T$ ,则  $f$  退化为最大化算子,即纯逻辑“或”;若  $W=[0,0, \dots, 1]^T$ ,则  $f$  退化为最小化算子,即纯逻辑“与”;若  $W=[1/n, 1/n, \dots, 1/n]^T$ ,则  $f$  退化为普通平均算子.

Yager 引入“或度(orness)”来度量 OWA 算子“或”的程度<sup>[23]</sup>,其计算公式如下:

$$orness(W) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n ((n-i)w_i).$$

最大化算子的或度为 1,最小化算子的或度为 0,平均算子的或度为 0.5.在或度的基础上,可以定义 OWA 算子的“与度(andness)”来表示 OWA 算子“与”的程度<sup>[25]</sup>,其计算公式如下:

$$andness(W) = 1 - orness(W).$$

OWA 算子通过对重排序后位置相关的权重参数的调整,实现从纯“与”到纯“或”的平滑过渡<sup>[23,25]</sup>.因此,在局部分解上下文的可满足性推理过程中,对权重参数的合理调整能够实现子目标可满足性间的适当“补偿”和“抑制”,避免出现基于纯逻辑“与”、“或”的过于“偏执”的推理结果,从而使依据子目标可满足性证据的父目标满足程度的推理过程能够较好地与人的直觉评判、主观思维特点相一致.

## 2.3 可满足性推理方法

根据第 2.1 节对目标关系语义的分析,基于  $CSat$  模型的推理方法由以下几个基本步骤组成:

步骤 1. 通过  $CF_{XL}, CF_{LX}$  对叶子目标可满足性进行预处理;

步骤 2. 使用  $F_{and}, F_{or}$  算子对局部分解上下文中父目标满足程度进行推理,形成父目标可满足性的一个证据源;

步骤 3. 使用  $F_{env}$  算子合成证据上下文中目标可满足性的不同证据源.

叶子目标的满足程度是可满足性推理的数据基础,可由定性或定量方式度量叶子目标的可满足性.然而,现实环境中很难以定性或定量的方式对所有子目标的满足程度进行统一表征.由于部分子目标自身的特点,其可满足性无法精确计算,只能以定性的方式对其满足程度进行近似评估;即使某些目标存在精确量化的公式或方法,定量表示也不便于软件涉众对可满足性的语义进行理解.为了保证可满足性的语义理解及精确表述能力,在进行可满足性推理之前,有必要对叶子目标可满足性进行预处理.具体而言,可根据  $CF_{XL}$  完成定性级别到定量值的转换;根据  $CF_{LX}$  实现定量可满足性到定性级别的转换,从而完成基于  $CSat$  模型的目标可满足性表示.

由于证据上下文中的可满足性证据间不存在“与”、“或”关系语义,本文将根据不同证据源的重要程度,使用一般加权平均算子实现证据合成算子  $F_{env}$ (如公式(6)所示),使用基于 OWA 的  $F_{and}, F_{or}$ (如公式(7)、公式(8)所示)算子完成局部分解上下文中父目标可满足性的推理.

$$F_{env}(e_1, e_2, \dots, e_n) = \sum_{i=1}^n \omega_i \times e_i, \text{ 其中, } \omega_i \in [-1,1] \quad (6)$$

$$F_{and}(g_1, g_2, \dots, g_n) = \sum_{i=1}^n \omega_i \times g_i, \text{ 其中, } \omega_i \in [0, 1] \quad (7)$$

$$F_{or}(g_1, g_2, \dots, g_n) = \sum_{i=1}^n \omega_i \times g_i, \text{ 其中, } \omega_i \in [0, 1] \quad (8)$$

由于 *CSat* 模型的二元性,对于任意  $e_i$  和  $g_i(1 \leq i \leq n)$ ,其可满足性可表示为二元组  $\langle L_i, X_i \rangle$ .其中,  $L_i$  为可满足性定性级别,  $X_i$  表示与  $L_i$  对应的可满足性精确定量值.然而,  $L_i$  和  $X_i$  具有不同的论域特征,前者为一组离散定性级别,后者的论域为连续实数区间  $[0, 1]$ .显然,应用公式(6)~公式(8),  $L_i \times \omega_i$  的结果既不属于  $L$ ,也不属于定量论域  $[0, 1]$ ,无法将  $L$  与权值  $\omega_i$  映射为一个新的有效论域.根据定义 3,  $L_i$  与  $X_i$  通过确定度  $\mu_i$  进行关联,使 *CSat* 模型成为一个有机整体.因此,根据 OWA 算子处理定性值的一般方法<sup>[26]</sup>,本文首先使用  $X_i$  计算  $F_{and}, F_{or}, F_{env}$  的推理结果,然后根据  $CF_{XL}$  建立定量推理结果与定性级别间的对应关系,并计算其隶属于该定性级别的确定度.本文将在第 2.3.1 节介绍  $F_{and}, F_{or}$  算子的实现,在第 2.3.2 节,根据推理约束条件对  $F_{and}, F_{or}$  算子的特点进行分析.

### 2.3.1 基于 OWA 的 $F_{and}, F_{or}$ 算子

给定实数向量  $A=(a_1, \dots, a_n)$  应用 OWA 算子的一般步骤如下:

步骤 1. 对  $(a_1, \dots, a_n)$  重新排序,生成新的实数向量  $B=(b_1, \dots, b_n)$ ;

步骤 2. 根据  $(b_1, \dots, b_n)$  生成权重向量  $W=(w_1, \dots, w_n)$ ;

步骤 3. 计算  $F(b_1, \dots, b_n)=W^T \times B$  的聚合结果,其中,  $W^T$  为  $W$  的转置.

文献[23]采用从大到小的方式对  $(a_1, \dots, a_n)$  重新排序.为了统一表述和分析  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子,本文采用从小到大的方式对  $(a_1, \dots, a_n)$  重新排序,即对于任意  $b_i, b_j \in B$ ,当满足  $i < j$  时,必有  $b_i \leq b_j$ .OWA 算子通过对权重参数的调整,控制  $(b_1, \dots, b_n)$  聚合的“与”、“或”程度.当  $w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_n$  时,  $orness(W) \geq 0.5$ ;当  $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n$  时,  $andness(W) \geq 0.5$ .可见,当为较大数值赋予较大权重时,OWA 算子成为 or-like 算子;当为较小数值赋予较大权重时,OWA 算子成为 and-like 算子.因此,给定  $And\langle g, \{g_1, \dots, g_n\} \rangle$  或  $Or\langle g, \{g_1, \dots, g_n\} \rangle$ ,  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子的权值确定方法如下:给定一组目标可满足性  $(x_1, \dots, x_n)$ ,其中,  $x_i \in [0, 1]$ ,且对于任意  $i$  和  $j$ ,满足  $i < j$  时,  $x_i \leq x_j$ .此时,对于任意  $x_i$ ,存在函数  $f(x_i) \geq 0$ ,且  $w_i$  由公式(9)确定:

$$\omega_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^n f(x_j)} \quad (9)$$

根据 OWA 确定 and-like 和 or-like 算子的上述原则及文献[6]中 *And* 和 *Or* 分解关系的语义解释,  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子的  $f(x_i)$  函数如公式(10)、公式(11)所示:

$$f_{and}(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i = 0 \\ (1/x_i)^\lambda, & x_i > 0 \end{cases}, 0 < \lambda \leq 1 \quad (10)$$

$$f_{or}(x_i) = (x_i)^\lambda, 0 < \lambda \leq 1 \quad (11)$$

公式(10)、公式(11)中的  $\lambda$  用于调节  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子对定量推理结果的区分精度.对于  $F_{and}$  算子, *And* 局部上下文中,所有子目标的满足是判断父目标满足的充分条件.因此,当  $x_i=0$  时,父目标满足的充分条件不成立,  $W=[w_1=1, w_2=0, \dots, w_n=0]$ .此时,  $F_{and}$  算子为纯逻辑“与”,且父目标可满足性等于 0.当  $x_i>0$  时,  $f_{and}(x_i)$  是  $x_i$  的减函数,即  $x_i$  越小,则其权重越大,与 OWA 的 and-like 原则保持一致.与之类似, *Or* 局部上下文中,任一子目标的满足均可作为评判父目标满足的充分条件.根据 OWA 的 or-like 原则,  $f_{or}(x_i)$  是  $x_i$  的增函数,即  $x_i$  越大,则其权重越大.

### 2.3.2 $F_{and}, F_{or}$ 算子的性质

本节对  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子与第 2.1 节给出的局部分解上下文中推理约束条件的符合性进行分析.根据文献[23]对 OWA 算子基本特性的分析,容易验证  $F_{and}, F_{or}$  算子满足置换不变性.本节通过定量证明的方式,重点分析  $F_{and}, F_{or}$  的单调性和有序性.当使用公式(9)~公式(11)确定  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子权重时,有如下定理成立:

**定理 1.** 设  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  和  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$  为任意两组目标可满足性,且对任意  $i$  有  $a_i \leq a_{i+1}, b_i \leq b_{i+1}$ .若存在  $(a'_1, a_2, \dots, a_n), (b_1, b_2, \dots, b'_n)$  且  $a'_1 \leq a_1, b'_n \leq b_n$ , 则  $F_{and}(a'_1, a_2, \dots, a_n) \leq F_{and}(a_1, a_2, \dots, a_n), F_{or}(b_1, b_2, \dots, b_n) \leq F_{or}(b_1, b_2, \dots, b'_n)$ .

证明:对于  $F_{and}$  算子,给定一组可满足性  $(x_1, \dots, x_n)$ . 因为  $\omega_i = \frac{(1/x_i)^\lambda}{\sum_{j=1}^n (1/x_j)^\lambda}$ , 所以

$$F_{and}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(1/x_1)^\lambda \times x_1}{(1/x_1)^\lambda + \sum_{j=2}^n (1/x_j)^\lambda} + \dots + \frac{(1/x_n)^\lambda \times x_n}{(1/x_1)^\lambda + \sum_{j=2}^n (1/x_j)^\lambda} \quad (12)$$

因为公式(12)中后  $n-1$  项为  $x_1$  的增函数,又因为第 1 项可化简为公式(13):

$$\frac{x_1}{1 + c \times x_1^\lambda}, c = \sum_{j=2}^n (1/x_j)^\lambda \text{ 为常数} \quad (13)$$

所以,当  $0 < \lambda \leq 1$  时,公式(13)为  $x_1$  的增函数.所以,  $F_{and}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为  $x_1$  的增函数.

故,当存在  $(a_1, a_2, \dots, a_n), (a'_1, a_2, \dots, a_n)$ , 且  $a'_1 \leq a_1$  时,  $F_{and}(a'_1, a_2, \dots, a_n) \leq F_{and}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ .  $\square$

对于  $F_{or}$  算子,证明过程同上,本文不再赘述.

**定理 2.** 给定一组可满足性  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 则有

$$\text{Min}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq F_{and}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq F_{or}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \text{Max}(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

证明:由文献[23]中 OWA 算子本身性质可知,  $\text{Min}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq F_{and}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  和  $F_{or}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \text{Max}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  成立,本文重点对  $F_{and}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq F_{or}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  进行证明.

因为任意  $x_i, x_j$ , 只要满足  $i < j$ , 则必有  $x_i \leq x_j$ ,

又因为根据公式(9)~公式(11)可得  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子的权向量  $(w_{and1}, \dots, w_{andn})$  和  $(w_{or1}, \dots, w_{orn})$ , 且有

对于任意  $i, j$ , 当  $i < j$  时, 有  $w_{andi} \geq w_{andj}, w_{ori} \leq w_{orj}$ ,

所以,存在正整数  $m (1 \leq m \leq n)$ , 使得:

- 当  $i \leq m$  时,  $w_{andi} \geq w_{ori}$ ;
- 当  $i > m$  时,  $w_{andi} \leq w_{ori}$ .

因为  $F_{or}$  和  $F_{and}$  的权向量之差为  $(w_{or1}, \dots, w_{orn}) - (w_{and1}, \dots, w_{andn}) = ((w_{or1} - w_{and1}), \dots, (w_{orn} - w_{andn})) = (w_1, \dots, w_n)$ ,

且当  $i \leq m$  时,  $w_i \geq 0$ ; 当  $i > m$  时,  $w_i \leq 0$ ,

又因为  $1 = \sum_{i=1}^n \omega_{andi} = \sum_{i=1}^n \omega_{ori}$ ,

所以,  $\sum_{i=1}^m \omega_i = -\sum_{i=m+1}^n |\omega_i|$ .

因为  $F_{or}(x_1, x_2, \dots, x_n) - F_{and}(x_1, x_2, \dots, x_n) = (w_1 x_1, w_2 x_2, \dots, w_n x_n)$ , 并且:

- 当  $i \leq m$  时,  $w_i x_i \geq 0$ ;
- 当  $i > m$  时,  $w_i x_i \leq 0$ .

所以,  $(w_1 x_1, w_2 x_2, \dots, w_n x_n) \geq x_{m+1} \times \sum_{i=1}^m \omega_i - x_m \times \sum_{i=m+1}^n |\omega_i| > 0$ .

故,给定一组可满足性  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 有  $F_{and}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq F_{or}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 即  $F_{and}, F_{or}$  算子满足有序性.  $\square$

由定理 1 和定理 2 可知,  $F_{and}, F_{or}$  算子满足单调性约束和有序性,能够对可满足性进行精确的定量区分,能够实现子目标可满足性间的适当“补偿”和“抑制”,其推理结果能够较好地符合人的一般思维方式.

#### 2.4 推理算法

为实现自动推理算法,本文将目标模型抽象为一个有向无环图,目标抽象为有向图的节点,目标之间的关系抽象为有向图的边.如目标  $g_1$  影响目标  $g_2$  的可满足性,则两个目标间存在一条由  $g_1$  指向  $g_2$  的有向边.由于目标模型的有向图中不存在任何环路,因此算法可在有限步内结束.

为了实现该算法,本文定义变量  $unComputeGoalList$  记录未计算出可满足性值的目标节点集合;为每个目标节点定义属性  $NumOfDep$ ,用于记录影响该目标可满足性计算,且其自身可满足性值未计算的目标数目.由于叶子目标节点的可满足性值是给定的,仅与叶子目标直接连接的目标节点的  $NumOfDep$  属性值为 0.算法的输入为给定可满足性值的叶子目标节点,输出为所有目标节点的可满足性值.

设目标模型  $(G, R)$  包含  $n$  个目标,其中  $k$  个叶子目标  $g_1, g_2, \dots, g_k, m = n - k$  个非叶子目标  $g_{k+1}, g_{k+2}, \dots, g_n$ . 目标  $g_i$

的可满足性记为  $sat_i, i=1,2,\dots,n$ , 则目标可满足性自动推理算法如下所示.

#### 目标可满足性自动推理算法.

输入: 目标模型  $\langle G, R \rangle$ , 所有叶子目标的可满足性  $sat_1, sat_2, \dots, sat_k$ ;

输出: 所有目标的可满足性  $sat_1, sat_2, \dots, sat_n$ .

步骤:

- (1) 将目标模型  $M$  中每个目标  $g_i$  的  $NumOfDep$  属性值设为  $g_i$  的入度, 并将所有目标加入到  $unComputeGoalList$ ;
- (2) 若  $unComputeGoalList$  为空, 即所有目标的可满足性值都已计算出来, 则算法停止; 否则, 转到步骤(3);
- (3) 对于  $unComputeGoalList$  中的每个目标  $g_i$ , 判断其  $NumOfDep$  属性值是否为 0. 若为 0, 表示该目标所依赖的所有目标的可满足性值都已计算出来, 则:
  - (a) 计算  $g_i$  的可满足性值  $sat$ : 若  $g_i$  存在局部分解上下文, 则通过  $F_{and}, F_{or}$  推理局部分解上下文中的父目标可满足性; 若存在多个证据来源, 则通过  $F_{env}$  进行证据的合成, 计算出目标可满足性;
  - (b) 将受  $g_i$  影响的所有目标的  $NumOfDep$  属性值减 1;
  - (c) 将目标  $g_i$  从  $unComputeGoalList$  中删除;
 若不为 0, 则不作处理. 所有目标处理完成后转步骤(2).

算法实现的伪代码如下所示. 其中,  $Current, Initial$  和  $Old$  是存储  $n$  个目标可满足性值的数组. 数组  $Initial$  包含目标可满足性初始值, 除叶子目标外, 其他目标的可满足性初始值均为 0.  $Current$  根据  $Initial$  初始化, 然后不断循环, 用函数  $ComputeSat$  来更新可计算的目标可满足性值, 直到所有目标可满足性都计算出来.  $ComputeSat$  中的目标可满足性按第 2.3 节给出的  $F_{and}, F_{or}$  和  $F_{env}$  算子进行计算.

```

1  item_array LabelGraph(graph(G,R), item_array Initial)
2  //初始化 NumOfDep, 并将所有目标加入到 unComputeGoalList
3  for each  $g_i$  in  $G$  do
4      NumOfDep[i]=InDegree((G,R),i); //目标  $g_i$  的 NumOfDep 属性值设为  $g_i$  的入度
5      unComputeGoalList.add( $g_i$ );
6  end for
7
8  Current=Initial;
9  while unComputeGoalList is not empty
10     Old=Current;
11     for each  $g_i$  in unComputeGoalList
12         if NumOfDep[i]=0 //目标  $g_i$  所依赖的所有目标的可满足性值都已计算出来
13             Current[i]=ComputeSat((G,R),Old,i); //计算  $g_i$  的可满足性值
14             for each  $g_j$  in unComputeGoalList
15                 if (Edge( $g_i, g_j$ ) in  $R$ ) and ( $g_j$  in unComputeGoalList) // $g_j$  未计算出来, 且  $g_j$  依赖于  $g_i$ 
16                     NumOfDep[j]=NumOfDep[j]-1;
17                 end if
18             end for
19             unComputeGoalList.delete( $g_i$ ); //删除已计算出的  $g_i$ 
20         end if
21     end for
22 end while
23 return Current;
```

```

24
25 item ComputeSat(graph<G,R>,item_array Old,int i)
26 //若存在局部上下文,则先计算局部上下文
27 if ExistAnd(<G,R>,i)
28     partSat=ComputeAnd(<G,R>,Old,i);
29 else if ExistOr(<G,R>,i)
30     partSat=ComputeOr(<G,R>,Old,i);
31 end if
32 //若存在证据上下文,则进行证据合成
33 if ExistEnv(<G,R>,i)
34     sat=ComputeEnv(<G,R>,Old,i,partSat);
35 else
36     sat=partSat
37 end if
38 return sat;

```

根据上述算法实现,将本文推理算法的特点和复杂度与 Tropos 的定量推理算法进行比较和分析. Tropos 定量推理算法中用基于概率“与”、“或”操作完成局部分解上下文的推理,当存在多个可满足性证据来源时,目标可满足性的最终值取决于最大正向或负向证据,应用本文推理算法中的  $F_{and}$  和  $F_{or}$  算子,能够使父目标满足程度介于子目标可满足性的最小和最大值之间,较符合人的一般思维方式的特点.此外,在进行证据合成时,  $F_{env}$  算子能够考虑不同证据来源对最终可满足性的共同影响.

算法复杂度方面, Tropos 定量推理的算法复杂度为  $O(n^3)$ . 对本文推理算法复杂度的分析包括:首先,以对目标节点的一次访问为单位,步骤(1)和步骤(3)(b)的复杂度为  $O(n)$ ;其次,步骤(3)中,  $unComputeGoalList$  中目标的个数小于等于  $n$ ,因此步骤(3)的复杂度为  $O(n^2)$ ;最后,由于目标模型不存在环,步骤(3)中每次至少有一个目标的  $NumOfDep$  值为 0,所以步骤(2)、步骤(3)至多进行  $n$  次循环.因此,本文推理算法的复杂度为  $O(n^3)$ .

可见,虽然本文算法与 Tropos 定量推理算法的可满足性计算方法不同,推理过程也不相同,但二者具有相同的算法复杂度  $O(n^3)$ .

### 3 实验及分析

本文的推理算法已用 Java 语言实现,本文使用交通领域的某目标模型作为实例,对本文推理方法进行实验分析,目标模型如图 5 所示.该模型包含目标间的纵向分解和横向关系,并区分目标的类型,即功能目标、非功能目标和叶子目标.功能目标使用带有 FG 标签的方框表示;非功能目标使用带有 NG 标签的椭圆表示;叶子目标也称为可操作目标,用带有 OG 标签的方框表示.

图 5 中的目标模型描述了完成交通出行规划的软件需求.目标模型通过不同的目标关系构成完整的软件需求,并对目标间可满足性影响关系加以刻画.例如,功能性目标 *ProvideTravelPlan* 被 *And* 分解为 5 个子目标,子目标 *GatherPreference* 是叶子目标,其他子目标为功能性目标.进一步地,子目标 *SearchDestination* 被 *Or* 分解为两个叶子目标 *SearchScense* 和 *SearchVenue*.目标模型中,两个非功能目标 *ShortestTime* 和 *LeastCost* 通过 *Satisfy* 关系(图 5 中双箭头线)与目标 *ProvideTravelPlan* 关联,表示二者为 *ProvideTravelPlan* 的满足提供正向证据.同理,非功能目标 *ShortestTime* 和 *LeastCost* 将从目标 *CreateByTime* 和 *CreateByCost* 获得自身可满足性的正向证据.为方便实验分析,本文依据图 5 中的目标位置,从上到下、从左到右为每个目标进行编号.例如,目标 *ProvideTravelPlan* 的编号为 3,目标 *CreateByCost* 的编号为 21.本文为 13 个叶子目标赋予初始值,并根据 *CSat* 模型中的  $CF_{XL}$  得到其对应的定性可满足性级别,见表 2.

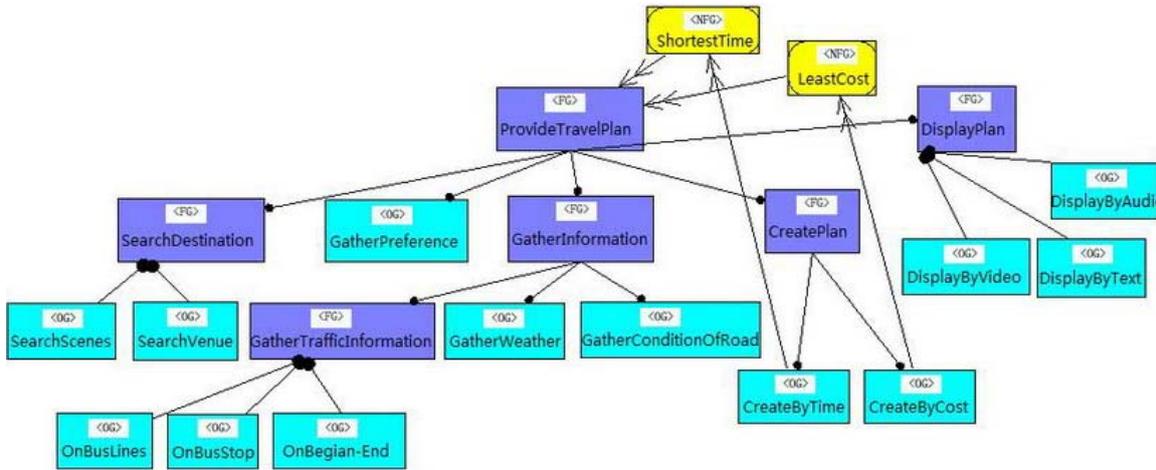


Fig.5 Example of goals model for planning travel  
图 5 出行规划软件目标模型示例

Table 2 Initial values of satisfiability of leaf-goals  
表 2 叶子目标可满足性初始值

Label	Satisfiability	Concept	Label	Satisfiability	Concept
$g_{17}$	0.3	Generally unsatisfied	$g_{15}$	0.33	Generally unsatisfied
$g_{18}$	0.6	Generally satisfied	$g_{16}$	0.8	Very satisfied
$g_{19}$	0.8	Very satisfied	$g_6$	0.7	Very satisfied
$g_{20}$	0.6	Generally satisfied	$g_9$	0.8	Very satisfied
$g_{21}$	0.5	Generally satisfied	$g_{10}$	0.52	Generally satisfied
$g_{12}$	0.8	Very satisfied	$g_{11}$	0.73	Very satisfied
$g_{13}$	0.55	Generally satisfied	—	—	—

为了与 GORE 中经典推理方法进行对比,本文应用 Tropos 推理框架中纯逻辑和概率“与”、“或”操作推理方法,基于表 2 中的初始可满足性完成非叶子目标可满足性的推导.Tropos 定性推理的核心推理规则如下:

定性推理规则 1.  $And(g_1, \{g_2, g_3\}) \rightarrow Sat(g_1) = \min(Sat(g_2), Sat(g_3))$ .

定性推理规则 2.  $Or(g_1, \{g_2, g_3\}) \rightarrow Sat(g_1) = \max(Sat(g_2), Sat(g_3))$ .

在 Tropos 定量推理方法中,以概率的形式表示目标满足的可能性.假设  $p_2$  和  $p_3$  为目标  $g_2$  和  $g_3$  的可满足性概率,则其核心定量推理规则如下:

定量推理规则 1.  $And(g_1, \{g_2, g_3\}) \rightarrow Sat(g_1) = p_2 \times p_3$ .

定量推理规则 2.  $Or(g_1, \{g_2, g_3\}) \rightarrow Sat(g_1) = (p_2 + p_3) - p_2 \times p_3$ .

Tropos 推理框架中,当目标  $g$  存在多个证据来源时, $g$  的最终满足程度等于最大正向或负向证据的可满足性.基于 Tropos 推理框架的非叶子目标可满足性的定性和定量推理结果见表 3.

Table 3 Reasoning results of satisfiability of non-leaf goals in Tropos  
表 3 Tropos 推理框架中非叶子目标可满足性推理结果

Label	Satisfiability	Concept	Label	Satisfiability	Concept
$g_3$	0.6	Generally satisfied	$g_8$	0.3	Generally satisfied
$g_4$	0.97	Very satisfied	$g_{14}$	0.94	Very satisfied
$g_5$	0.91	Very satisfied	$g_1$	0.6	Generally satisfied
$g_7$	0.23	Generally unsatisfied	$g_2$	0.5	Generally satisfied

基于逻辑“与”、“或”操作的推理结果,仅与子目标可满足性最低或最高定性级别相关.如表 3 所示, $And(g_7, \{g_{14}, g_{15}, g_{16}\})$ 中,即使  $g_{14}$  和  $g_{16}$  均为 Very satisfied, $g_7$  可满足性依然等于 Generally unsatisfied;类似地, $Or(g_{14}, \{g_{17}, g_{18}, g_{19}\})$ 中, $g_{14}$  定性满足程度为 Very satisfied,仅取决于  $g_{19}$ .基于概率“与”、“或”的实质是以原子概率事件为

元素的集合“交”、“并”操作,导致父目标满足程度可能远小于或大于子目标可满足性的最小或最大值.例如: $And(g_8, \{g_{20}, g_{21}\})$ 中, $g_8$  可满足性仅为 0.3,远小于  $g_{20}, g_{21}$  的可满足性 0.6,0.5; $Or(g_4, \{g_9, g_{10}, g_{11}\})$ 中, $g_9$  的满足程度为子目标可满足性最大值,等于 0.8,而  $g_4$  可满足性却高达 0.97,接近完全满足.如前所述,作为具有主观判断能力的软件涉众,并非以纯逻辑或概率“与”、“或”的思维方式认知父目标可满足性的推理结果.适当考虑子目标间“补偿”或“抑制”作用,使得父目标的满足程度介于子目标可满足性的最小和最大值之间,更符合人的一般思维.此外,由于 Tropos 推理框架中定性和定量推理依据不同理论基础,如果将基于逻辑和概率“与”、“或”的推理方法应用于同一目标模型,则可能导致推理结果的潜在不一致性.例如,在表 3 中, $g_8, g_5$  定量可满足性分别为 0.3,0.91,若根据本文 CSat 模型中定量值与定性级别间的对应关系,则  $g_8, g_5$  定性满足程度应为 Generally unsatisfied, Completely satisfied,而并非 Generally satisfied, Very satisfied.

下面,应用本文的  $F_{and}, F_{or}, F_{env}$  算子完成非叶子目标可满足性推理.首先,需要确定公式(10)、公式(11)中的调节参数 $\lambda$ .调节参数 $\lambda$ 用于控制  $F_{and}, F_{or}$  算子推理结果的区分精度, $\lambda$ 的取值并不破坏第 2.2.3 节中的定理 1 和定理 2.本文不对 $\lambda$ 取值进行深入讨论,实验过程中将 $\lambda$ 设置为 0.5.此外,在如图 5 所示的目标模型中, $g_3$  存在由  $\{\{g_4, g_5, g_6, g_7, g_8\}, g_1, g_2\}$  构成的三源证据上下文,本文为 3 个证据源赋予相同权值 1/3.至此,基于  $F_{and}, F_{or}, F_{env}$  算子的非叶子目标可满足性推理结果如表 4 中 Satisfiability 列所示.根据定量推理结果,应用  $CF_{XL}$  得到其定性可满足性级别,如表 4 中 Concept 列所示.

**Table 4** Reasoning results of satisfiability of non-leaf goals based on  $F_{and}, F_{or}$  and  $F_{env}$   
表 4 基于  $F_{and}, F_{or}, F_{env}$  算子的非叶子目标可满足性推理结果

Label	Satisfiability	Concept	Label	Satisfiability	Concept
$g_3$	0.58	Generally satisfied	$g_8$	0.55	Generally satisfied
$g_4$	0.69	Very satisfied	$g_{14}$	0.61	Generally satisfied
$g_5$	0.69	Very satisfied	$g_1$	0.6	Generally satisfied
$g_7$	0.54	Generally satisfied	$g_2$	0.5	Generally satisfied

如表 4 所示, $F_{and}, F_{or}$  算子考虑了子目标可满足性间“补偿”和“抑制”作用,避免出现基于纯逻辑“与”、“或”的过于“偏执”的推理结果,其推理过程能够较好地与人的直觉评判特点保持一致.同时,父目标满足程度介于子目标可满足性的最小和最大值之间,较符合人的一般思维方式的特点.此外,由于 CSat 模型将定性、定量可满足性作为统一整体,从不同粒度表征目标的满足程度,因此,其定性、定量推理结果能够保持一致.

#### 4 总 结

可满足性表示和推理是 GORE 领域的重要研究内容,是评判高层非叶子目标满足程度的重要手段.由于该领域对目标关系语义的解释并未明确给出实现可满足性推理的一般性原则,不同的研究者基于各自的理解和假设可设计出不同的可满足性推理方法,如基于逻辑和概率“与”、“或”的定性和定量推理方法.本文并不否定和排斥 GORE 领域中已有的可满足性表示和推理方法,相反,本文在已有研究成果的基础上,试图从以人为主体的软件涉众的角度出发,借鉴不确定性人工智能领域已有的研究成果,尝试设计满足人对可满足性认知要求及符合人类一般思维特点的可满足性表示和推理方法.首先,本文基于可满足性定性、定量表示的优势和局限,提出一种基于云模型的目标可满足性表示模型.该模型将定性、定量表示视为统一的整体,能够在保持语义理解能力的同时提供对可满足性进行细粒度区分的能力;其次,提出一种基于 OWA 算子核心思想的推理方法.该方法避免了基于纯逻辑“与”、“或”的过于“偏执”的推理结果,父目标满足程度的推理过程能够较好地与人的直觉评判特点保持一致;同时,父目标满足程度介于子目标可满足性的最小和最大值之间,较好地反映了人类一般思维的特点.

在未来的研究工作中,将尝试应用其他权值设定方法,完成目标可满足性的推理实验,并对结果进行分析.此外,将本文的推理方法应用于相关领域中更多的案例,进一步验证其有效性并进行改进,也是进一步研究工作的重点之一.

**References:**

- [1] Anton AI. Goal-Based requirements analysis. In: Proc. of the 2nd IEEE Int'l Conf. on Requirements Engineering. 1996. 136–144. <http://www2.computer.org/portal/web/csd/doi/10.1109/ICRE.1996.491438>
- [2] van Lamsweerde A. Goal-Oriented requirements engineering: A guided tour. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Symp. on Requirements Engineering. Toronto, 2001. 249–263. <http://biblio.info.ucl.ac.be/2001/173345.pdf>
- [3] Giorgini P, Mylopoulos J, Nicchiarelli E, Sebastiani R. Reasoning with goal models. In: Proc. of the Int'l Conf. on Conceptual Modeling. 2002. <http://brenta.dit.unitn.it/~rseba/papers/er02.pdf>
- [4] Sebastiani R, Giorgini P, Mylopoulos J. Simple and minimum-cost satisfiability for goal models. In: Proc. of the 16th Conf. on Advanced Information Systems Engineering. 2004. 20–35. <http://dit.unitn.it/~pgiorgio/papers/caise04.pdf>
- [5] Letier E, van Lamsweerde A. Reasoning about partial goal satisfaction for requirements and design engineering. In: Taylor RN, Dwyer MB, eds. Proc. of the 12th ACM SIGSOFT 20th Int'l Symp. on Foundations of Software Engineering. New York: The Association for Computing Machinery, 2004. 53–62.
- [6] Darimont R, van Lamsweerde A. Formal refinement patterns for goal-driven requirements elaboration. In: Proc. of the 4th ACM Symp. on the Foundations of Software Engineering. San Francisco, 1996. 179–190. <http://ing.de.soft1.googlepages.com/RefinementPatterns.pdf>
- [7] Giorgini P, Mylopoulos J, Sebastiani R. Goal-Oriented requirements analysis and reasoning in the Tropos methodology. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2005,18(2):159–171. [doi: 10.1016/j.engappai.2004.11.017]
- [8] Giorgini P, Mylopoulos J, Nicchiarelli E, Sebastiani R. Formal reasoning techniques for goal models. Journal on Data Semantics, 2003,1(1):1–20.
- [9] Aiello M, Giorgini P. Applying the Tropos methodology for analysing Web services requirements and reasoning about qualities of services. CEPIS Upgrade the European Journal of The Informatics Professional, 2004,5(4):20–26.
- [10] Almenárez F, Marín A, Campo C, García C. PTM: A pervasive trust management model for dynamic open environments. In: Proc. of the 1st Workshop on Pervasive Security, Privacy and Trust. 2004. [http://jerry.c-lab.de/ubisec/publications/PSPT04\\_PTM.pdf](http://jerry.c-lab.de/ubisec/publications/PSPT04_PTM.pdf)
- [11] Josang A, Daniel M, Vannoorenberghe P. Strategies for combining conflicting dogmatic beliefs. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. of Information Fusion. 2003. 1133–1140. <http://persons.unik.no/josang/papers/JDV2003-Fusion.pdf>
- [12] Johnson RB, Onwuegbuzie AJ. Mixed methods research: A research paradigm whose time has come. Educational Researcher, 2004, 33(7):14–26. [doi: 10.3102/0013189X033007014]
- [13] Marsh SP. Formalising trust as a computational concept [Ph.D. Thesis]. Department of Computing Science and Mathematics University of Stirling, 1994.
- [14] Zadeh LA. Fuzzy sets. Information and Control, 1965,8:338–353. <http://www-bisc.cs.berkeley.edu/Zadeh-1965.pdf> [doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X]
- [15] Zadeh LA. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and System, 1978,1:3–28. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=310820> [doi: 10.1016/0165-0114(78)90029-5]
- [16] Li DY, Liu CY, Du Y, Han X. Artificial intelligence with uncertainty. Journal of Software, 2004,15(9):1583–1594 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1583.htm>
- [17] Li DY, Du Y. Artificial Intelligence with Uncertainty. Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group, 2008. [http://www.ebookee.net/Artificial-Intelligence-with-Uncertainty\\_145002.html](http://www.ebookee.net/Artificial-Intelligence-with-Uncertainty_145002.html)
- [18] Li DY. The cloud control method and balancing patterns of triple link inverted pendulum systems. The Chinese Engineering Science, 1999,1(2):41–46 (in Chinese with English abstract).
- [19] Du Y, Song ZL, Li DY. Mining association rules based on cloud model. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000,1(1):29–35 (in Chinese with English abstract).
- [20] Meng XY, Zhang GW, Liu CY, Kang JC, Li HS. Research on subjective trust management model based on cloud model. Journal of System Simulation, 2007,19(14):3310–3317 (in Chinese with English abstract).
- [21] Zhang GW, Li DY, Li P, Kang JC, Chen GS. A collaborative filtering recommendation algorithm based on cloud model. Journal of Software, 2007, 18(10):2403–2411 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2403.htm> [doi: 10.1360/jos182403]

- [22] Li DY, Liu CY. The universality of normal cloud model. Engineering Science, 2004,6(8):28-34 (in Chinese with English abstract).
- [23] Yager RR. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1988,18(1):183-190. [doi: 10.1109/21.87068]
- [24] Chun M. A similarity-based bidirectional approximate reasoning method for decision-making systems. Fuzzy Sets System, 2001, 117(2):269-278. [doi: 10.1016/S0165-0114(99)00093-7]
- [25] Yager RR, Kacprzyk J. The Ordered Weighted Averaging Operators: Theory and Applications. Kluwer Academic Publishers, 1997. 347. <http://www.ebookee.net/The-Ordered-Weighted-Averaging-Operators-Theory-and-Applications-dl/>
- [26] Godo L, Torra V. On aggregation operators for ordinal qualitative information. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2000,8(2): 143-154. [doi: 10.1109/91.842149]

#### 附中文参考文献:

- [16] 李德毅,刘常昱,杜鹞,韩旭.不确定性人工智能.软件学报,2004,15(11):1583-1594. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1583.htm>
- [18] 李德毅.三级倒立摆的云控制方法及动平衡模式.中国工程科学,1999,1(2):41-46.
- [19] 杜鹞,宋自林,李德毅.基于云模型的关联规则挖掘方法.解放军理工大学学报,2000,1(1):29-35.
- [20] 孟祥怡,张光卫,刘常昱,康建初,李鹤松.基于云模型的主观信任管理模型研究.系统仿真学报,2007,19(14):3310-3317.
- [21] 张光卫,李德毅,李鹏,康建初,陈桂生.基于云模型的协同过滤推荐算法.软件学报,2007,18(10):2403-2411. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2403.htm> [doi: 10.1360/jos182403]
- [22] 李德毅,刘常昱.论正态云模型的普适性.中国工程科学,2004,6(8):28-34.



王守信(1979-),男,辽宁铁岭人,博士生,主要研究领域为需求工程,软件体系结构,MDA 相关技术.



申菊芳(1985-),女,博士生,CCF 学生会会员,主要研究领域为软件工程,软件体系结构.



张莉(1968-),女,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,需求工程,软件体系结构,过程建模和优化.



刘禹(1980-),男,博士生,主要研究领域为模式分类与不确定性人工智能.



王帅(1986-),男,硕士生,主要研究领域为软件工程,需求工程.