

一种基于云模型的主观信任评价方法*

王守信¹⁺, 张莉¹, 李鹤松²

¹(北京航空航天大学 软件工程研究所,北京 100191)

²(北京航空航天大学 软件开发环境国家重点实验室,北京 100191)

Evaluation Approach of Subjective Trust Based on Cloud Model

WANG Shou-Xin¹⁺, ZHANG Li¹, LI He-Song²

¹(Software Engineering Institute, BeiHang University, Beijing 100191, China)

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

+ Corresponding author: E-mail: shouxin_wang@126.com

Wang SX, Zhang L, Li HS. Evaluation approach of subjective trust based on cloud model. *Journal of Software*, 2010,21(6):1341-1352. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3501.htm>

Abstract: The trust decision-making is very important to people in Electronic Commerce transactions. The approaches that assist people to finish trust decision-making become a basic issue that researcher must face and solve imminently in the field. A new quantificational subjective trust evaluation approach based on the cloud model is presented. The expected value and hyper entropy of subjective cloud is used to evaluate the reputation of trust objects, and a trust change cloud model is designed to depict the reputation change style of trust objects in order to provide additional evidence. The result of simulating experiments shows the validity and effectiveness of this approach.

Key words: subjective trust; cloud model; trust decision-making; trust change

摘要: 如何通过直观、简单和有效的评价方法,辅助消费者完成网上交易中的信任决策,已成为该领域需要面对和解决的一个基本问题.在信任云的基础上,提出一种基于云模型的主观信任量化评价方法.使用主观信任云的期望和超熵对信任客体信用度进行定量评价,进而设计一种信任变化云刻画信任客体信用度的变化情况,为进一步的信任决策提供依据.对实验数据的分析表明,该方法能够有效地支持信任主体的主观信任决策过程,对主观信任评价研究进行了有益的探索和尝试.

关键词: 主观信任;云模型;信任决策;信任变化

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

随着互联网应用领域的不断扩大和各种服务功能的完善,网络应用正由封闭式向开放式发展,电子商务和网上交易(B2B,C2C,B2C)、网络社区、即时消息等基于互联网的应用越来越丰富和普及.这些应用呈现出不同于局域网络的特点,即用户数量众多且不能预先确定、用户之间可以充分交互等.这使得互联网用户呈现出社会化的趋势,用户不再是一个个相互孤立的个体,而是依托于一定的网络应用,形成了错综复杂的网络人际关

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2007CB310803 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2008-04-07; Accepted 2008-11-13; Published online 2009-04-07

系,一个用户可以通过网络直接接触成千上万的其他用户并与他们进行交易.在这种情况下,传统的基于注册、认证和鉴权的安全机制已经不能充分满足众多网络应用的要求^[1,2],需要更加灵活的安全机制,这就是基于信任的安全机制.信任关系被认为是比授权关系更加本质的安全关系,人类社会之所以能够平稳健康地运行,很大程度上得益于个人、团体和组织之间的信任关系.在面向大众用户的网络环境中,研究基于信任关系的主观信任评价方法以保证分布式环境下的用户交易满意度已成为一个基础性的课题.

当前,关于信任关系的研究包括两种相互关联的信任关系^[3,4],即客体信任和主观信任.其中,客体信任中的客体是指排除人类主观因素的对象或实体.客体及客体间的关系可以通过恰当的证据加以充分验证,是一种基于证据的方法,可以精确描述、推理和验证.基于假设的推理证明是客体信任的基本研究方法,如 BAN 逻辑^[5]等安全协议分析中的信任关系.主观信任中的信任主体指的是由人或代理人(如软件 Agent)所构成的个体或群体,主观信任(简称信任)是一种人类的认知现象,是对信任客体的特定特征或行为的特定级别的主观判断,而这种判断相对独立于主体的特征和行为.从某种非形式化的角度来看,信任主体 A 对信任客体 B 的信任意味着 A 相信 B 在某种特定的环境中必会执行某个动作^[6].本文主要针对主观信任关系下的信任决策问题进行研究,并给出主观信任评价方法.

众多研究者已经开展了关于主观信任建模、推理等问题的研究,并取得了一定成果.文献[7-12]提出了多种基于概率模型的不同信任评估和推理方法,包括概率论、Dempster-Shafer 理论.但其不足之处在于没有考虑信任本身的模糊性,其推理建立在纯粹的概率模型之上,表现出一种“过度”形式化的趋势,远离了信任管理的实际.文献[3,4]考察了主观信任的模糊性,构造基于模糊集理论的主观信任管理模型,并将语言变量和模糊逻辑引入主观信任推理研究.模糊数学需要预先定义隶属度函数,并且一旦确定隶属度函数后,某个数值对于特定概念的隶属程度就不能改变,缺乏一定的灵活性^[13].针对基于信念的主观信任关系所具有的主观性、不确定性和模糊性,北京航空航天大学提出一种基于云模型的主观信任表示方法,该方法较好地解决了信任表达中的模糊性和不确定性难题^[14].

本文在文献[14]的基础上,考虑客体信用度变化对信任决策的影响,提出一种基于主观信任云和信任变化云的主观信任量化评价方法,用于解决基于主观信任的网上交易应用中商业客户对商家的主观评价问题.该方法能够结合商家信用度历史信息分析,较好地解决网上交易过程中商业客户的信任决策问题.

本文第 1 节介绍网上交易应用的主要特点及交易过程中的信任决策问题.第 2 节给出与本文所提方法相关的云模型知识.第 3 节详细说明基于云模型的主观信任评价方法.第 4 节对该方法的应用进行实验说明,验证了方法的有效性和合理性.最后对全文进行总结,并指出进一步的研究方向.

1 网上交易

网上交易是一种互联网技术在商业领域的代表性应用,是一种新生的依赖于信息技术的商业模式.典型的、最简单的网上交易模式涉及 3 类商业角色,即交易平台提供者(简称交易平台)、商业客户(称为信任主体,简称主体),以及商业服务提供者(称为信任客体,简称客体),客体可以是个体的人、商业集团或者商品本身.交易平台作为网上交易过程的中介者,为主体和客体间完成基本商业活动提供基础保障.注册后的主体可以从交易平台获取客体信息,对多个客体进行权衡后发起交易.从交易发起时刻起,主体与客体在交易平台的协调下完成整个网上交易过程.

由于网上交易发生在开放的互联网环境下,致使存在大量提供不同服务或同类服务的客体.对于主体而言的一个至关重要的问题是,发起网上交易前如何正确、合理地判别最终交易对象并选择客体,我们称之为信任决策.一些大型网上交易平台如 Amazon 等,提供商业信用度评分机制,可以对主、客体双方信用度进行历史评价.这里,信用度评价可以从两个视角反映主体对客体的信任,即对客体和客体能力的信任:前者是对客体进行交易意图的判断,后者考察的是客体满足主体服务需求的能力,即客体的服务可满足性.本文不区分这两种含义,认为二者在描述信任关系时等价.客体信用度为主体的信任决策提供了有利的参考价值,如淘宝网、阿里巴巴网的 3 级评分机制,以及 Amazon 的 5 级评分机制,见表 1.

Table 1 Example of reputation evaluation from Amazon
表 1 Amazon 信用度评价表

Ranking	95	50	51	74	1 756
---------	----	----	----	----	-------

当前,基于用户评分机制的推荐技术是用于解决信任决策问题的一种有效方法,包括协同过滤技术^[15,16]、聚类技术^[17,18]、关联规则技术^[19]、Hortig^[20]图技术等。其中,协同过滤推荐技术是解决此类问题较成功的技术之一。协同过滤推荐方法的基本假设是:如果用户对一些项目的评分比较相似,则他们对其他项目的评分也会比较相似。算法的基本思想是:目标用户对未评分项目的评分,可以通过其最近邻居对该项目的评分来逼近^[15]。

交易平台的推荐系统为主体的信任决策提供较有价值的参考。然而,实际服务大众的网上交易系统,尤其是以 Amazon、淘宝网为典型代表的 C2C 及阿里巴巴的 B2C 交易中,作为大众网上交易消费者的商业用户,更多地倾向于将客体历史信用度评分的主观判断作为依据,选择交易对象。即使得到推荐系统的推荐交易支持,主体依然会面临对众多被推荐客体的主观信任决策问题。由于主观信任的本质是基于主观信念的^[7,8],具有随机性、不确定性的特点。此外,开放互联网环境下,信任客体信用度会随着时间而发生变化,客体信用度的量化评价必须考虑这种变化。因此,通过对客体历史信用度主观评价数据的分析,为主体提供当前交易对象选择支持,从而提升对当前交易满意度的指导方法,已成为服务大众网上交易系统中的一个基础性问题。

本文提出一种基于云模型的主观信任评价方法,使用主体对客体信用度的历史评分信息,为主体合理完成交易对象选择提供指导。为简化对该方法实现的讨论,给出如下商业环境假设:

- 1) 网上交易系统存在大量交易主体和客体;
- 2) 交易平台至少提供对客体进行评价的评分机制;
- 3) 交易平台提供有效避免恶意和虚假评价的机制;
- 4) 为便于讨论,采用 5 级评分标准,对本文提出的信任决策方法进行说明和实验验证。

2 云模型简介

如文献[21]所指出的,人类在完成对客观世界的主观认知的过程中,随机性和模糊性是不确定性认知的两个重要特征,二者常常同时存在并且很难加以区分。云模型是在随机数学和模糊数学的基础上,用于统一刻画语言值随机性、模糊性及二者间的关联性的一种方法。此外,云模型可以实现语言值表述的定性概念与其定量数值描述间的不确定性转换。为了便于对本文提出的主观信任评价方法的理解,本节介绍云模型基本知识,给出了基本信任云定义。

定义 1(云和云滴^[22])。设 U 是一个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。如果概念对应的论域是 n 维空间,那么可以拓广至 n 维云。

定义 1 的云具有下列重要性质:(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,而是对于 X 的任意一次实现 $\forall x \in U, x$ 有一个确定度,并且该确定度也是一个随机变量,而不是一个固定的数值;(2) 云由云滴组成,云滴之间无次序性,一个云滴是定性概念在数量上的一次实现,云滴整体才能反映出概念的特征。云滴数目越多,越能反映这个定性概念的整体特征;(3) 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,这与人们的主观理解相一致。

云模型所表达概念的整体特性可以用云的数字特征来反映,云用期望 Ex (expected value)、熵 En (entropy)、超熵 He (hyper entropy)来整体表征一个概念。 Ex 是在论域空间最能够代表定性概念的点,或者说这是这个概念量化的最典型样本。熵 En 代表定性概念的可度量粒度,熵越大,通常概念越宏观,也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。一方面, En 是定性概念随机性的度量,反映能够代表这个定性概念的云滴的离散程度;另一方面,又是定性概念亦此亦彼性的度量,反映了在论域空间可以被概念接受的云滴的取值范围。超熵 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 3 个数字特征表示的定性概念的整

体特征记作 $C(Ex, En, He)$, 称为云的特征向量.

定义 2(一维正态云^[22]). 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 上的分布称为正态云. 文献[23]对正态云用于不确定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, 本文所涉及的云模型均为一维正态云模型.

根据定义 2 可知, 云滴的定量值由标准正态分布函数决定; 而云滴的确定度函数则采用模糊集合论中广泛使用的正态隶属函数. 因此, 正态云模型是在概率论和模糊集合论的基础上发展起来的全新模型, 兼具概率理论中的随机性和模糊集合论中的模糊性的特点.

云模型所描述的定性概念, 通过大量定量概念值及其确定度的二元组形式 (x, μ) 得以表达, 利用正向和逆向云发生器可以完成定性概念与定量数值间的互转换. 本文对无确定度逆向云生成算法进行扩展完成客体可满足性的云表示, 使用正态正向云生成算法完成实验数据仿真及主观信任评价方法的最终信任决策. 云模型的正向发生器和无确定度逆向发生器算法请参考文献[22].

3 基于云的主观信任评价方法

文献[14]用云模型表示定性信任概念, 较好地解决了信任表达中的模糊性和不确定性难题, 并根据云推理方法实现实体间直接或间接的信任推荐. 本文提出一种基于云的主观信任评价方法, 旨在提供一种直观、有效的辅助主体完成信任决策过程的方法, 解决网上交易过程中的信任决策问题.

信任决策是在众多候选信任客体中完成择优选取的问题, 理解和区分不同候选者之间的差异是确定优选的关键. 本文所述互联网环境下, 在线交易过程中的信任决策过程是指当信任主体面对一组候选信任客体集合 $Objs = \{obj_1, obj_2, \dots, obj_n\}$ 时, 基于客体历史信用度评价数据, 通过给定的决策约束, 辨别候选客体间信用度差异, 生成规模较小的候选信任客体集合 $Objs' = \{obj_1, obj_2, \dots, obj_m\} (m < n)$, 以缩小信任客体选择范围. 决策约束是决策过程的核心, 决策约束给出区分客体信用度潜在的差异性准则. 公式(2)给出信任决策过程的形式化描述:

$$Transform(Objs) \xrightarrow{\text{constraint}} Objs' \quad (2)$$

信任决策方法是指在主体信任决策过程中, 对决策约束进行定性或定量刻画, 基于决策约束区分客体信用度间潜在的差异性, 并根据这种差异性的分析, 辅助主体完成客体选择的一种手段. 本文依据云模型, 使用主观信任云和信任变化云定量刻画决策约束, 分别用于辨别多客体间信用度平均水平和信用度变化方式的差异.

3.1 主观信任云

主体面对众多客体提供的服务时, 面临的一个重要问题是如何完成信任决策. 直观、简单、有效的信任决策辅助支持方法, 可以提升网上交易的准确性和主体的满意度. 针对多级主观评分机制, 一个较为简单的方式是使用平均值的方法计算信任度, 如 OnSale 使用评价等级的平均值评价商家信用度^[24], 从而可以选取信任度期望值较大者进行交易. 表 2 展示了来自 Amazon 的 5 个提供同类服务的客体信用度评价信息. 根据主体对客体信用度评价的历史信息, Amazon 给出了每个客体的综合信用度. 除客体 A 之外, 其他 4 个客体具有相同的综合评价价值. 因此, 在没有其他辅助信息的情况下, 主体很难合理、有效地进行信任决策, 从而选择交易客体发起交易. 统计方法能够有效地反映主观评分的随机性, 却不能表述主观不确定性的另一重要特征, 即模糊性. 对于主观评分而言, 无论是多级评分, 还是连续数值空间的定量评分都存在明显的模糊性. 例如, 从主观的角度很难区分 5 级评分机制中 4.5 级和 4 级间的本质差异, 或者综合评价值均为 4.5 级的不同客体间的明确区别, 打分过程中随机性和模糊性同时存在. 因此, 采用云模型表示主观信任的定性概念无疑是一种合理的选择, 并且根据云模型将随机性和模糊性相结合的知识表达特点, 可为主体信任决策提供更合理、更有效的支持.

这里, 我们给出主观信任云的相关定义.

定义 3(主观信任度空间). 主观信任度空间 STD 是定量论域区间 $[0, n]$ 的一个有序数值集合, 记为 $[[0, n]]$,

该集合可以由连续或离散单调数值构成.其中,有序集合中每个数值表示主体对客体的信任程度, n 为任意正整数,分别称 0 和 n 为STD的信任度下限和上限.并且,主观信任度越接近 0 ,则代表客体主观信用度越低;越接近 n ,则代表客体主观信用度越高.

Table 2 Reputation evaluation of objects from Amazon

表 2 Amazon 客体信用度评价信息

Trust objects	Aggregation					
A	174	77	89	154	589	4
B	55	29	46	90	732	4.5
C	14	20	62	137	788	4.5
D	16	26	49	121	734	4.5
E	58	60	161	380	2 348	4.5

定义 4(主观信任空间). 主观信任空间 STS 是一个定性表述主观信任的有序概念集合,用以使用定性概念表达主观信任程度.可以为 STS 预设 1 或者多个信任等级,也可以忽略信任等级的设定.

定义 5(主观信任云). 是用云模型表示的主观定性信任概念,由若干云滴组成,把信任度空间 $STD = \llbracket 0, n \rrbracket$ 作为云的定量论域 $U, e \in STS$ 是信任空间上的主观定性信任概念, $x \in STD$ 是定性概念 e 的一次定量信任评价, x 对 e 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数: $\mu: STD \rightarrow \llbracket 0, n \rrbracket, \forall x \in STD, x \rightarrow \mu(x), x$ 在论域 U 上的分布称为主观信任云,记为云 $STC(X)$. 每一个 x 称为一个云滴.

主观信任云是对文献[14]中信任云的一种扩展,当 STD 的论域空间为 $[0, 1]$ 时,二者等价.主观信任云定量信任度可以是 $[0, n]$ 闭区间任意数值构成的有序数值,STD 的有序数值可以由表示信任度的一组连续或离散数值构成.信任度空间的扩展使基于云的主观信任评价方法具有更好的普适性:首先,在不需要引入额外数据处理方法的情况下,即可适用于离散值或连续值信用度评分机制;其次,能够有效体现云的定性、定量转换及定性概念提升的特点.当信任度为连续数值空间时,主观信任云表达的是主观定性信任概念与定量论域间的定性、定量转换关系.信任度为离散数值空间时,则可认为主观信任云表达的定性概念是对论域空间内细粒度概念的一种提升,即定性概念与论域空间的数值形成概念层次.

主观信任云的另一个特点是,主观信任云并不强制要求对信任空间内定性概念进行排序及规定信任等级.主观信任云表达的定性信任概念,仅使用云的数字特征对概念进行表述.但可以通过对主观信任云的数字特征值的比较,辅助支持信任决策的完成,即通过比较 $\langle Ex, He \rangle$ 对客体信用度进行综合评价, $\langle Ex, He \rangle$ 称为主观信任特征向量.当使用云模型进行定性知识表述时,需要根据实际环境为其数字特征赋予合理而有意义的物理含义.本文使用主观信任云的 Ex 作为客体主观信用度评价的典型值,即客体信用度的平均信用度水平;使用 He 表示客体信用度与平均信用度的偏离程度,可以认为 He 体现了客体信用度的稳定性.当 Ex 较大时,可以认为客体对主体所需服务的可满足性较大,反之较小;当 He 较小时,可以认为客体可满足性较稳定,反之其稳定性较差.

3.1.1 主观信任云设计

利用主观信任云进行客体信用度量化评价的第 1 步是根据对客体评判的需要,对 STD 的区间范围进行设计.STD 设计的目的是确定信任度空间的信任度上限和下限,以及选择信任度的离散性或连续性.本文以 Amazon 的 5 级评分机制为例给出一种可能的 STD 设计方式.当 STD 为离散空间时,每个离散信任度实质上可以被视为一种定性概念.见表 1,可以视为由 5 个离散值构成的 STD 空间,在不进行任何数据处理的情况下,信任度空间可设计为 $STD = \llbracket 1, 2, 3, 4, 5 \rrbracket$ 或 $STD = \llbracket 0, 1, 2, 3, 4 \rrbracket$, 本文采用前者作为离散 STD 的表示方式.

3.1.2 生成主观信任云数字特征值

客体信用度会随时间不断地发生变化,客体信用度与其历史信用度和时间紧密相关^[25].因此,主观信用度评价数据具有一定的时效性,评分时刻距当前信任决策时刻越远的数据,其正确反映客体信用度的有效性随之下降.为了较为准确地评价客体当前信用度,本文对文献[22]中的无确定度逆向云生成算法进行扩展,设计一种加权逆向云生成算法.该算法根据信用度评价时刻距当前信任决策时刻的距离,为不同时间区间的信用度评价数据赋予不同的权重,以抑制具有较长时间值的数据对当前评价结果的影响.确定加权逆向云生成算法中的权值的基本原则是,信用度评价时刻与信任决策时刻越近,则权值越大,反之权值越小.为了有效理解加权逆向云算

法,本文首先对信用度时效性模型及权值确定的基本原则进行了说明.

设信用度时效性模型 $M=\langle X, t_c, t_b, T \rangle$:

1) $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是客体历史信用度评价数据的全集,对于任一评价数据 x_i , $Time(x_i)$ 代表信用度评价时刻.

2) t_c 表示当前信任决策时刻,作为时间原点, t_b 为正向时间轴上的某时刻,作为判断信用度评价数据有效性的时间阈值.

3) $T=\{t_1, t_2, \dots, t_{m-1}\}$ 由 t_c 和 t_b 间 $m-1$ 个时刻值组成的有序集合,对于任意一个 $t_i, d_i=|t_i-t_c|$,称为 t_i 到 t_c 的时间距离,且满足:

- $\forall d_i(1 \leq i \leq m-1) \rightarrow d_i \leq |t_c - t_b|$;
- $\forall d_i, d_j(1 \leq i < j \leq m-1) \rightarrow d_i < d_j$.

根据 $Time(x_i), t_b$ 可以将 X 分解为两个子集 X'_1 和 X'_2 , 且满足以下条件:

- 1) $X = X'_1 \cup X'_2$, 且 $X'_1 \cap X'_2 = \emptyset$;
- 2) $\forall x_i \in X'_1(1 \leq i \leq n) \rightarrow (|Time(x_i) - t_c| \leq |t_c - t_b|)$;
- 3) $\forall x_i \in X'_2(1 \leq i \leq n) \rightarrow (|Time(x_i) - t_c| > |t_c - t_b|)$.

集合 X 的分解以 $|Time(x_i)-t_c|$ 和 $|t_c-t_b|$ 的差值为依据, t_c 为时间原点, $|t_c-t_b|$ 为信用度评价数据有效性的时间阈值. 根据 $|t_c-t_b|$ 将 X 分解为子集 X'_1 和 X'_2 . X'_1 中任意元素与 t_c 的时间距离都小于或等于阈值, 而 X'_2 中任意元素与 t_c 的时间距离都大于阈值. 因此, 可以认为 X'_2 中信用度数据的评价时间距当前决策时刻较远, 不能正确反映当前时刻的客体信用度; X'_1 中包含所有参与客体信用度评价的数据.

集合 T 将 t_c 和 t_b 构成的时间区间分隔成 m 个子区间, 称为时间窗口, 记为 W_i . 时间窗口将 X'_1 分隔为 m 个信用度评价数据子集, $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}$, 且满足以下条件:

- 1) 任一时间窗口 $W_{t_i} = \langle t_{low}^i, t_{sup}^i \rangle$, t_{low}^i 为 W_{t_i} 的时刻下限, t_{sup}^i 为 W_{t_i} 的时刻上限, 且满足 $|t_{low}^i - t_c| < |t_{sup}^i - t_c|$; $|W_{t_i}| = |t_{sup}^i - t_{low}^i|$ 称为 W_{t_i} 的窗口长度;
- 2) $X'_1 = X_{t_1} \cup X_{t_2} \cup \dots \cup X_{t_m}$, 且 $\forall X_{t_i}, X_{t_j}(1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m) \rightarrow (X_{t_i} \cap X_{t_j}) = \emptyset$;
- 3) $\forall y \in X_{t_i}, z \in X_{t_j}(1 \leq i < j \leq m) \rightarrow |Time(y) - t_c| < |Time(z) - t_c|$.

在设计集合 T 时, 应综合考虑 $|t_b - t_c|$ 的时间跨度和 $|t_b - t_c|$ 内信用度评价数据的总数. 集合 T 将 X'_1 进一步分解为 m 个子集, 且根据 X'_1 的各个子集所属时间窗口, $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}$ 间具有严格的时间顺序. 时间值在相同时间窗口内的信用度数据, 具有相同的时效性权值, 可为 X'_1 的任一子集 $X_{t_i}(1 \leq i \leq m)$ 赋予一个时效性权值 w_{t_i} , w_{t_i} 表示 X_{t_i} 中的信用度评价数据对客体整体信用度评价结果的影响程度, 且需满足式(3)和式(4)的约束条件.

$$\forall x_i \in X_{t_k}, x_j \in X_{t_l}(1 \leq k < l \leq m) \rightarrow (w_{t_k} < w_{t_l}) \tag{3}$$

$$\left(\sum_{i=1}^m w_{t_i} \right) = 1 \tag{4}$$

根据式(3)和式(4)的约束条件, 本文提供一种满足式(5)的简单权值确定方法. 该权值确定方法假设, 随着信用度评价数据时间值与 t_c 间的时间距离的增加, 信用度评价数据的时效性衰减较快, 且采用等比率下降的方式表达这种衰减趋势.

$$\frac{w_{t_{i-1}}}{w_{t_i}} = \frac{w_{t_i}}{w_{t_{i+1}}} \quad (2 \leq i \leq m-1) \tag{5}$$

为客体信用度评价数据设置时效性权值, 能够抑制具有较长时间值的数据对当前评价结果的影响. 依据时效性确定信用度评价数据范围及其权值后, 可应用如下加权逆向云生成算法, 计算主观信任云的 3 个数字特征值 Ex, En, He .

加权逆向云生成算法.

输入: N 个云滴的集合 $X'_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 及云滴的权值集合 $\{w_1, w_2, \dots, w_N\}$;

输出: N 个云滴所表示的定性概念的期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He .

步骤:

(1) 根据 x_i 及其权值计算样本均值 $\bar{X} = \sum_{i=1}^N w_i x_i$, 一阶样本绝对中心矩 $\sum_{i=1}^N w_i |x_i - \bar{X}|$, 样本方差:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \bar{X})^2 .$$

(2) Ex 的估计值为 $\hat{Ex} = \bar{X}$.

(3) He 的估计值为 $\hat{En} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^N w_i |x_i - \hat{Ex}|}$.

(4) En 的估计值为 $\hat{He} = \sqrt{|S^2 - \hat{En}^2|}$.

3.1.3 信任决策

得到主观信任云的 3 个数值特征后,即可根据主观信任特征向量进行信任决策.根据 $\langle Ex, He \rangle$ 的物理含义,应选择 Ex 较大且 He 较小的客体作为交易对象.式(6)给出了基于主观信任云的信任决策过程的形式化描述.

$$Transform(Objs) \xrightarrow{\langle Ex, He \rangle} Obj's' \tag{6}$$

表 3 给出表 2 中 5 个信任客体的信用度主观信任云数字特征值.

Table 3 Representation of reputation with numbers of subjective trust cloud

表 3 信用度的主观信任云数字特征

Trust objects	Ex	En	He
A	4.418 28	0.443 229	1.144 36
B	4.739 5	0.177 728	0.817 017
C	4.814 89	0.088 382 2	0.587 492
D	4.808 67	0.099 363 8	0.618 112
E	4.809 77	0.098 298 7	0.617 918

如表 3 所示,客体 A 的 Ex 明显低于其他客体,可以认为 A 的可满足性低于其他客体.此外,客体 B 的 He 高于除 A 以外的其他客体,可以认为,B 的可满足性的稳定性低于 C,D,E. Ex 和 He 的高低可由主体进行主观判断或预设表示 Ex, He 差异的阈值,如当 Ex 间差值大于 0.3 时,认为 Ex 差异较为显著.实际判别中可以由主体自身决定如何使用 Ex 和 He 进行信任决策,如当 He 较小时,即使 Ex 也较小,某主体依然可以认为其可满足性较好.

主观信任云使用 $\langle Ex, He \rangle$ 作为决策约束,通过客体历史信用度平均水平及其稳定性,对客体信用度差异进行分析,并生成新的候选信任客体集合 Obj' .然而,当出现下述情况时,主观信任云将无法有效地进一步区分客体信用度差异.因此,在主观信任云的基础上,需要额外的方法为主体提供进一步信任决策支持.

1) Obj' 集合规模过大,即 m 值较大,表示仍然存在数目过多的候选信任客体(此时,实际上并没有充分地解决信任决策问题);

2) Obj' 中信任客体的 Ex 和 He 很接近,并且主体希望进一步对客体信用度的差异进行区分.

3.2 信任变化云

互联网技术与商业领域相结合而取得的成功并不是一蹴而就的,而是经历一个产生、发展、成熟的过程.主观信任关系的建立和发展是一个长期且不断变化的过程.信任主体随着时间变化,不断地对信任进行持续的确认^[26],在此过程中,客体信用度并非一成不变.信任主体的主观信念的改变及信任客体某时间阶段服务质量的变化,都将影响主体对客体信用度评价的最终评分结果.在相邻两个时间区间内,不同客体信用度的变化不尽相同,例如客体 A,B 的信用度得到提升,且 A 提升速度较快,而客体 B 提升的稳定性较差,客体 C 的信用度稍稍下降,而客体 D 的信用度下降得较明显.客体信用度变化与信用度本身都是需要关注的重要因素,可为主体对客体信用度评价提供另一种考察视角.

由于信任主体以主观的方式对信任客体信用度进行评价,信用度的变化也具备不确定性的特点.为了克服主观信任云在信任决策过程中的不足,本文引入客体信用度变化方式,从客体信用度变化的角度辅助主体完成信任决策.为了合理地表达信用度变化中的随机性和模糊性,本文设计一种信任变化云,用于表达信用度的变化方式.

定义 6(信任度变化空间). 信任度变化空间 $ETD=(-\infty, \infty)$ 是实数轴 $-\infty$ 到 ∞ 的开区间. 且有 $\forall x \in ETD, x=0$ 表示信任度无变化, $x<0$ 表示信任度下降, $x>0$ 表示信任度提升.

定义 7(信任变化空间). 信任变化空间 ETS 是一个定性表述信任变化的概念集合, 用以表达主观信任变化情况. 可以为 ETS 预设 1 或多个信任等级, 也可以忽略信任等级的设定.

定义 8(信任变化云). 这是用云模型表示的主观信任度变化的定性概念, 由若干云滴组成, 把信任度变化空间 $ETD=(-\infty, \infty)$ 作为云的定量论域 $U, e \in ETS$ 是信任变化空间上的定性概念, $x \in ETD$ 是定性概念 e 的一次定量评价, x 对 e 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数: $\mu: ETD \rightarrow (-\infty, \infty), \forall x \in ETD, x \rightarrow \mu(x), x$ 在论域 U 上的分布称为信任变化云, 记为云 $STEC(X)$. 每一个 x 称为一个云滴.

信任变化云的思想是, 客体信用度随时间而发生变化是信任关系的本质特征, 同时也是信任决策过程中需要考虑的重要因素. 主体与客体间信任关系的建立和发展是一个长期的过程, 这种思维方式符合以人为中心的日常信任关系的客观规律. 所谓信任度变化是指相邻时间窗口间客体信任度 Ex 值的变化率, 可以通过式(7)计算信用度变化.

$$Ex_{rate} = \frac{\Delta Ex}{\Delta t} = \frac{Ex_{t+1} - Ex_t}{t_{i+1} - t_i} \quad (7)$$

本文假设在某特定时间窗口内, 客体信用度相对稳定. 因此, 仅考虑不同时间窗口内客体信用度平均水平的变化. Ex_{t+1} 和 Ex_t 分别表示相邻两个时间窗口内, 客体信用度的主观信任云的期望值, 本文将 t_{i+1} 和 t_i 设置为时间窗口的时刻下限.

通过合理表达信任度变化率的随机性和模糊性, 可以对信用度的历史变化趋势及其稳定性进行量化评价. 可以根据主观信任云的 Ex 值, 得到信任变化云的输入云滴数据, 即历史信任度变化数据. 根据加权逆向云生成算法, 得到信任变化云的 3 个数值特征, (Ex_E, En_E, He_E) . 依据信任变化云的二元组 $\langle Ex_E, He_E \rangle$, 辅助完成主体信任决策, $\langle Ex_E, He_E \rangle$ 称为主观信任变化特征向量. 信任度变化率生成算法如下:

信任度变化率生成算法.

输入: $N+1$ 个带时间标记的主观信任云期望值集合 $SetEx = \{Ex_0, Ex_1, \dots, Ex_N\}$;

输出: N 个在 $(-\infty, \infty)$ 开区间内的表示信任度变化的云滴 $Drops = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$.

步骤:

- (1) 根据 $\{Ex_0, Ex_1, \dots, Ex_N\}$ 生成新的数据集合 $SetEx' = \{Ex_0, Ex_1, \dots, Ex_N\}$, 且 $Time(Ex_i) < Time(Ex_j), 0 \leq i < j \leq N$. $time()$ 为 $Ex_i \rightarrow t_i$ 的函数, t_i 为 Ex_i 的生产时间;
- (2) $num=1, low=0, sup=1$;
- (3) 通过公式 $d_{num} = \frac{(Ex_{sup} - Ex_{low})}{(Time(Ex_{sup}) - Time(Ex_{low}))}$, 计算两个相邻主观信任云期望值的变化率;
- (4) $num=num+1, low=low+1, sup=sup+1$;
- (5) 重复步骤(3)、步骤(4), 直到 $num > N$ 为止.

根据上述算法可知, 集合 $SetEx$ 中元素间的时间间隔不需要严格相等, 但必须保证时间间隔使用相同的时间度量单位. 获取信任度变化的云滴集合 $Drops = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 后, 可以根据无确定度逆向云生产算法或加权逆向云生成算法, 得到信任变化云的 3 个数字特征, 在使用加权逆向云生成算法时, 同样需要对 $Drops$ 的时效性权值进行设置. 主观信任变化特征向量的物理意义为:

(1) Ex_E 表示客体信用度的变化方式, 当 $Ex_E=0$ 时表示信用度无变化; 当 $Ex_E<0$ 时表示信用度下降, 且 Ex_E 绝对值越大表明下降得越明显; 当 $Ex_E>0$ 时表示信用度提升, 且 Ex_E 绝对值越大表示提升得越明显.

(2) He_E 表示客体信用度变化的稳定性, He_E 越小表示信用度变化越稳定, 反之则越不稳定.

表 4 为表 3 中客体 C, D, E 的信任变化云的数字特征.

如表 4 所示, 客体 C 的 Ex_E 低于客体 D 和 E , 且 $Ex_E<0$, 可以认为, 客体 C 的信用度下降. 客体 D 的 He_E 大于 E 的 He_E , 可以认为, 即使客体 D 和 E 的信用度均得到提升, E 的提升较之 D 也更稳定. 因此可以得出结论, 主体选择

客体 E 作为当前交易对象较为合适.

Table 4 Numbers of trust change cloud

表 4 信任变化云数字特征值

Trust objects	Ex_E	En_E	He_E
C	-0.485 57	0.051 155 4	0.544 758
D	0.488 661	0.102 311	0.595 073
E	0.485 57	0.051 155 4	0.544 758

根据信任变化云 Ex_E 和 He_E 的物理含义,信任决策时,主体应选择 Ex_E 较大,同时 He_E 较小的客体.式(8)给出基于信任变化云的信任决策过程的形式化描述.

$$Transform(Obj') \xrightarrow{\langle Ex_E, He_E \rangle} Obj'' \tag{8}$$

Obj'' 为依据决策约束 $\langle Ex_E, He_E \rangle$,对集合 $Obj's'=\{obj_1, obj_2, \dots, obj_m\}$ 进行信用度差异区分后生成的客体集合 $Obj's''=\{obj_1, obj_2, \dots, obj_k\}$,且有 $k \leq m$.

主观信任云和信任变化云,分别从客体信用度平均水平和变化方式的角度对客体信用度间的差异进行区分,并将原始候选信任客体集合 $Obj's$ 转化为 $Obj's'$ 和 $Obj's''$.在集合 $Obj's''=\{obj_1, obj_2, \dots, obj_k\}$ 中,信任客体的平均信用度水平及变化方式均相接近.此时我们认为,可以选取其中任一客体进行交易.为了保证本文所提方法对主体信任决策支持的完整性,当出现多个客体的 $\langle Ex, He \rangle$ 和 $\langle Ex_E, He_E \rangle$ 均较相似的情况时,可以利用正态正向云生成算法随机地为每个主观信任云生成 1 个云滴,取其中 x 和 μ 均较大的客体作为交易对象.

4 实验与分析

由于当前多数网上交易站点不能明确地提供关于信用度评价的时间信息,另一方面,本文所提供实验的目的是验证基于云模型的信任决策方法的有效性,因此,采取基于真实数据进行仿真的方法,验证本文提出的信任决策方法.根据 Amazon 网站的真实客体信用度评价数据,共收集 14 个提供同类服务的客体信用度评价数据,且每个客体的累计主观信用度评价次数大于 700.

基于主观信任云的信任决策仿真实验方法如下:

- 1) 以当前决策时刻为时间原点,共设计 4 个时间窗口: $\{W_1, W_2, W_3, W_4\}$;
- 2) 以 W_1 的窗口长度为单位窗口长度,其他时间窗口的窗口长度的计算方法为

$$|W_i| \times 2^{i-1} = |W_1| (i=2,3,4);$$

- 3) 根据式(4)和式(5),计算每个时间窗口的时效性权值;
- 4) 为了简化仿真实验,本文假设单位窗口长度内的评价数据数量相同.随机地选取原始评价数据,重新填充到每个数据窗口.

根据上述仿真实验方法得到的评价数据及时效性权值,通过加权逆向云生成算法生成 14 个客体的主观信任云数字特征值及主观信任的云表示,见表 5 并如图 1 所示.

表 5 列出 14 个客体中具有代表性的 5 个客体,编号分别为 A, B, C, D, E .综合列是 Amazon 网站给出的对 5 个客体的综合评价,客体 A 的综合评价价值低于其他客体,然而,除 A 以外的其他 4 个综合评价价值相同.这种情况给主体的主观信任决策带来困难.通过生成客体的主观信任云数字特征值,能够较直观、简单且有效地克服依据单一综合评价价值完成信任决策的缺点.表 5 中列出 5 个客体的主观信任云数字特征值,其中,客体 Ex 值能够与综合评价价值很好地吻合,即综合评价较低的客体其 Ex 值也较小,反之亦然.客体 A 的 Ex 明显低于其他客体,可以认为, A 的可满足性低于其他客体.客体 B, C, D, E 的 Ex 十分接近,仅根据 Ex 无法进一步对客体信用度进行判断.然而,客体 B 的 He 高于客体 C, D, E ,可以认为, B 的可满足性的稳定性低于 C, D, E .

客体 C, D, E 的 $\langle Ex, He \rangle$ 十分接近,用户可以直接随机选择其中任一客体进行交易.如需进一步对 3 个客体信用度差异进行判别,则需要构造 3 个客体的信任变化云并计算其数字特征值.下面给出基于信任变化云的信任决策仿真实验方法.

- 1) 根据 $\{W_1, W_2, W_3, W_4\}$ 中的每个时间窗口中的评价数据,生成 4 个主观信任云的数字特征 Ex, En, He ;
- 2) 根据每个主观信任云的数字特征,使用正向云生成算法为每个时间窗口生成若干云滴.4 个时间窗口生成的云滴数目分别为 160,320,560,960,共 2 000 个云滴;
- 3) 重新划分 $\{W_1, W_2, W_3, W_4\}$ 中的每个时间窗口,使得每个新时间窗口中包含 40 个云滴,共生成 50 个新时间窗口;
- 4) 为每个新时间窗口生成主观信任云的数字特征,使用信任度变化率生成算法,生成信用度变化数据.

Table 5 Reputation ranking and the numbers of subjective cloud of objects

表 5 客体评价数据及其主观信任云

Trust objects						Aggregation	Ex	En	He
A	174	77	89	154	589	4	4.418 28	0.443 229	1.144 36
B	55	29	46	90	732	4.5	4.739 5	0.177 728	0.817 017
C	14	20	62	137	788	4.5	4.814 89	0.088 382 2	0.587 492
D	16	26	49	121	734	4.5	4.808 67	0.099 363 8	0.618 112
E	58	60	161	380	2 348	4.5	4.809 77	0.098 298 7	0.617 918

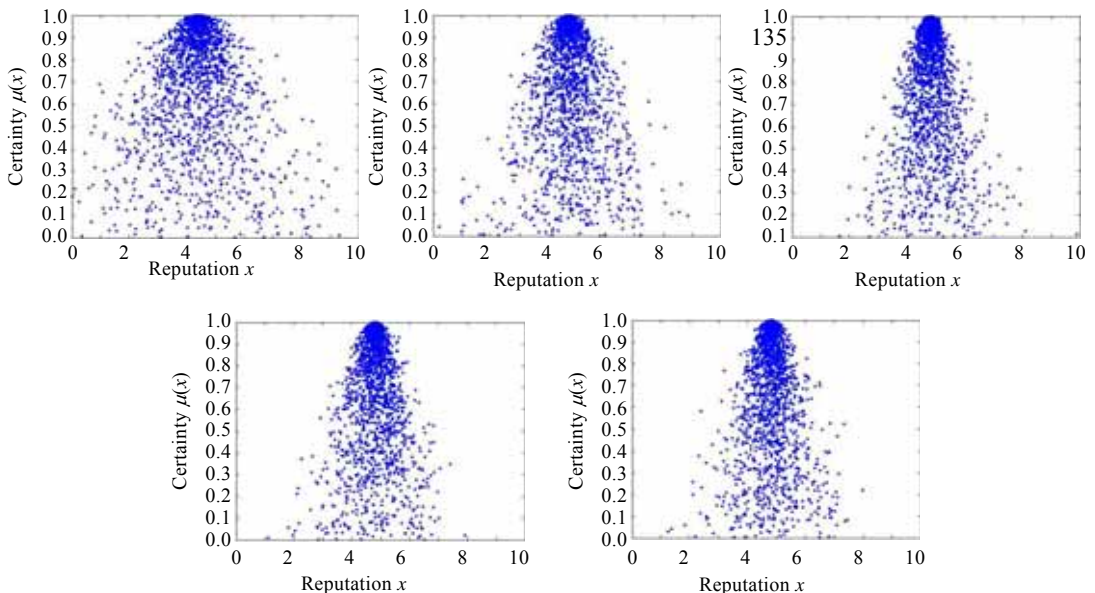


Fig.1 Subjective trust cloud of trust objects A,B,C,D,E

图 1 客体 A,B,C,D,E 主观信任云

根据此方法得到客体 C,D,E 的信任变化云数字特征值及信任变化的云表示,见表 4 并如图 2 所示.

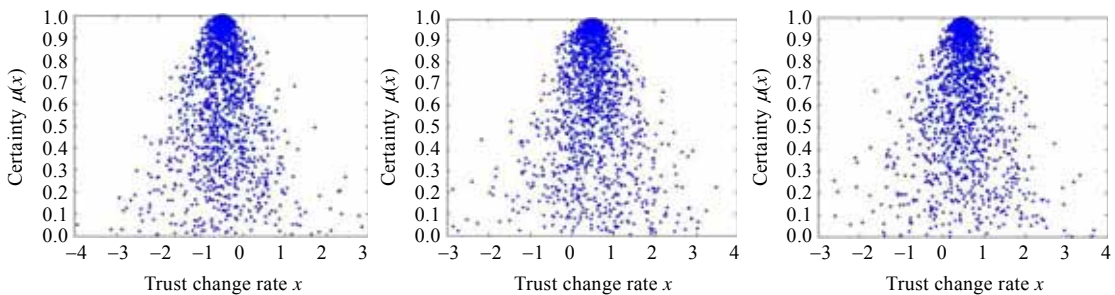


Fig.2 Trust change cloud of trust objects C,D,E

图 2 客体 C,D,E 信任变化云

表4中, C 的 Ex_E 值小于0,说明其信用度变化呈下降趋势; D,E 的 Ex_E 值均大于0,说明二者信用度变化呈上升趋势.然而 D,E 的 Ex_E 值依然很接近,为了合理地选择交易对象,需要进一步比较二者的 He_E 值. E 的 He_E 值小于 D ,说明二者在信用度变化总体趋势相似的情况下,客体 E 的信用度上升变化趋势更加稳定,因此,主体与客体 E 进行在线交易更为可靠.

5 总 结

云模型克服了模糊数学用精确、唯一的隶属函数严格表示模糊概念的缺点.基于云模型的主观信任表示方法,能够较好地解决信任表达中模糊性和不确定性难题.本文在信任云的基础上,提出一种基于主观信任云和信任变化云的主观信任评价方法.该方法使用云模型数字特征中的期望和超熵,对具有随机性和模糊性的客体主观评价信息进行评判.通过对真实数据及模拟数据的实验分析,本文提出的方法能够有效地对主体信任决策进行辅助支持.信任变化云的构造需要主观信任云的历史信息,尽管目前很少有网上交易平台记录这些历史信息,但随着网上交易应用的发展和完善,尤其是大众消费者对交易满意度的日益关注,对客体的信用度变化进行评价将成为一种新型且有效的用以完成辅助信任决策的方法.此外,如何将基于云模型的主观评判方法推广应用于其他相关领域;如何设计和验证新的信用度时效性权值等都有待于进一步研究.

References:

- [1] Blaze M, Feigenbaum J, Ioannidis J, Keromytis AD. The role of trust management in distributed systems security. In: Proc. of the Secure Internet Programming: Issues for Mobile and Distributed Objects. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 185–210. <http://cs-www.cs.yale.edu/homes/jf/BFIK-SIP.pdf>
- [2] Khare R, Rifkin A. Trust management on World Wide Web. World Wide Web Journal (S1085-2298), 1997,2(3):77–112.
- [3] Tang W, Chen Z. Research of subjective trust management model based on the fuzzy set theory. Journal of Software, 2003,14(8): 1401–1408 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1401.htm>
- [4] Tang W, Hu JB, Chen Z. Research on a fuzzy logic-based subjective trust management model. Computer Research and Development, 2005,42(10):1654–1659 (in Chinese with English abstract).
- [5] Burrows M, Abadi M, Needham RM. A logic of authentication. Technical Report, The Royal Society of London, DEC Systems Research Center, 1989. 39.
- [6] Blaze M, Ioannidis J, Keromytis AD. Experience with the KeyNote Trust Management System: Applications and Future Directions. iTrust. New York: Springer-Verlag, 2003. 284–300. <http://www.springerlink.com/content/aq8v28ryxrh4ykx/fulltext.pdf>
- [7] Blaze M, Feigenbaum J, Keromytis AD. KeyNote: Trust management for public-key infrastructures. In: Christianson B, Crispo B, William S, *et al.*, eds. Proc. of the Cambridge'98 Security Protocols Int'l Workshop. 1998. 59–63.
- [8] Beth T, Borcherding M, Klein B. Valuation of trust in open networks. In: Proc. of the European Symp. on Research in Security (ESORICS). Berlin: Springer-Verlag, 1994. 3–18.
- [9] Yahalom R, Klein B, Beth T. Trust relationships in secure systems—A distributed authentication perspective. In: Proc. of the 1993 IEEE Symp. on Research in Security and Privacy. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1993. 150–164. <http://eprints.kfupm.edu.sa/73440/1/73440.pdf>
- [10] Liu SK, Liu XT. A new method of elevation of confidence level of large-scale perplexing simulation system. Journal of System Simulation, 2001,13(5):666–669 (in Chinese with English abstract).
- [11] Jøsang A. A logic for uncertain probabilities. Int'l Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems (S0218-4885), 2001,9(3):279–311.
- [12] Yuan W, Li JS, Hong PL. Distributed peer-to-peer trust model and computer simulation. Journal of System Simulation, 2006,18(4): 938–942 (in Chinese with English abstract).
- [13] Meng XY. Research and implement on trust model and trust evaluation system based on cloud model [MS. Thesis]. Beijing: BeiHang University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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).
- [15] 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]

- [16] Zhang GW, Kang JC, Li HS, Liu CY, Li DY. Context based collaborative filtering recommendation algorithm. Journal of System Simulation, 2006, 18(2):595-601 (in Chinese with English abstract).
- [17] Zan H, Hsinchun C, Daniel Z. Applying associative retrieval techniques to alleviate the sparsity problem in collaborative filtering. ACM Trans. on Information Systems, 2004,22(1):116-142.
- [18] Thiesson B, Meek C, Chickering DM, Heckerman D. Learning mixture of DAG models. Technical Report, MSR-TR-97-30, 1997. <https://eprints.kfupm.edu.sa/48217/1/48217.pdf>
- [19] Sarwar B, Karypis G, Konstan J, Riedl J. Analysis of recommendation algorithms for E-commerce. In: Proc. of the 2nd ACM Conf. on Electronic Commerce. New York: ACM Press, 2001. 158-167. <http://www.research.ibm.com/iac/ec00/>
- [20] Aggarwal CC, Wolf J, Wu KL, Yu PS. Horting hatches an egg: A new graph-theoretic approach to collaborative filtering. In: Proc. of the 5th ACM SIGKDD Int'l Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 1999. 201-212. <https://eprints.kfupm.edu.sa/44183/1/44183.pdf>
- [21] 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>
- [22] Li DY, Du Y. Artificial Intelligence with Uncertainty. Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group, 2008.
- [23] Li DY, Liu CY. The universality of normal cloud model. Engineering Science, 2004,6(8):28-34 (in Chinese with English abstract).
- [24] Zacharia G, Maes P. Trust management through reputation mechanisms. Applied Artificial Intelligence, 2000,14:881-907.
- [25] Maximillien Em, Singh MP. Conceptual model of Web services reputation. ACM SIGMOD (Special Section on Semantic Web and Data Management), 2002,31(4):36-41.
- [26] Montaner M, Lopez B, Lluís J, de la Rosa. Opinion-Based filtering through trust. In: Proc. of the 6th Int'l Workshop on Cooperative Information Agents, Vol.6. 2002. 164-178. <http://eia.udg.es/~mmontane/montaner-cia02.pdf>

附中文参考文献:

- [3] 唐文,陈钟.基于模糊集合理论的主观信任管理模型研究.软件学报,2003,14(8):1401-1408. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1401.htm>
- [4] 唐文,胡建斌,陈钟.基于模糊逻辑的主观信息管理模型研究.计算机研究与发展,2005,42(10):1654-1659.
- [10] 柳世考,刘兴堂.一种有效评估大型复杂仿真系统可信度的新方法.系统仿真学报,2001,13(5):666-669.
- [12] 袁巍,李津生,洪佩琳.一种 P2P 网络分布式信任模型及仿真.系统仿真学报,2006,18(4):938-942.
- [13] 孟祥怡.基于云模型的信任模型及信任评估系统的研究与实现[硕士学位论文].北京航空航天大学,2007.
- [14] 孟祥怡,张光卫,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.
- [15] 张光卫,李德毅,李鹏,康建初,李鹤松.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]
- [16] 张光卫,康建初,李鹤松,刘常昱,李德毅.面向场景的协同过滤推荐算法.系统仿真学报,2006,18(2):595-601.
- [21] 李德毅,刘常煜,杜鹃,韩旭.不确定性人工智能.软件学报,2004,15(9):1583-1594. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1583.htm>
- [23] 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.



李鹤松(1970 -),男,博士生,主要研究领域为人工智能,数据挖掘.



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.