

# 不确定性理论的信任建模研究综述

徐 军

(江西财经大学 现代经济管理学院 南昌 330013)

E-mail: xujun1028@126.com

**摘 要:** 由于开放式网络环境具有模糊性、随机性和不确定性的特点,使用户在选择目标实体交互时面临了诸多风险.因此,设计有效的信任评估机制,在指导用户选择合适的交互对象、评估陌生实体、保障开放式计算系统的顺利运行等方面,具有重要的现实意义.归纳总结了信任关系的基本定义、主要特性和划分方法;讨论了信任建模的主要工作;根据采用的数学方法不同,深入分析了几类常见不确定性理论的信任建模方法,并选取典型的信任模型进行对比分析;最后探讨了现有研究中存在的问题,并展望了需要进一步研究的方向.

**关 键 词:** 开放式网络环境;信息安全;不确定性理论;信任评估

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2017)01-0099-08

## Survey of Trust Model Based on Uncertainty Theory

XU Jun

(Modern Economics & Management College Jiangxi University of Finance and Economics Nanchang 330013 China)

**Abstract:** Duo to the open network environment has the characters of fuzziness, randomness and uncertainty, customers confront lots of secure issues when selecting totally unknown object entities. So, it is necessary to design an effective trust mechanism to help user select appropriate object, evaluate unknown entities and ensure smooth running of the whole system. In this paper, firstly, the concepts, characteristics and classifications of trust relation are summarized and presented. Then, this paper presents the main works of trust evaluation based on the uncertainty theory. Subsequently, several main trust evaluation models are described in detail. And the results of comparative of several typical models are presented. Finally, the current problems and research trends in this field are discussed.

**Key words:** open network environment; information security; uncertainty theory; trust evaluation

## 1 引 言

随着计算机技术和信息通信技术的蓬勃发展,信息技术与人们的经济活动、日常生活的融合演进,整个社会步入了一个循环往复的刺激-响应螺旋.根据第36次《中国互联网络发展状况统计报告》显示<sup>1</sup>,截至2015年6月,网购用户规模达到3.74亿,社交网站用户规模为2.77亿;在网上预订过机票、酒店、火车票的用户规模达到2.29亿.可以说,互联网发展重心从“广泛”向“深入”转换,各项网络应用已渗透到网民生活的每一个角落.

任何事物都具有两面性,互联网应用环境也不例外.互联网为社会和商务的发展造就了开放、动态和便利的环境,但同时也存在诸多负面影响和潜在风险.在电子商务环境中,难以评估网上未知实体的可信度和区分服务质量的好坏,消费者处于冒险或易受攻击的位置.据中国电子商务投诉与维权公共服务平台统计数据显示,2015年上半年度共接到全国电子商务服务通过邮件、微博、微信等多种形式的投诉同比2014年上半年增长2.03%.在P2P资源共享网络中,由于网络的

开放和匿名特征,给恶意节点散发病毒、共享虚假文件提供了机会.另外,随着基于Web承载的、开放的、大规模分布式网络的发展,融合网络社区和Web服务应用的研究日益受到重视.服务表现为网络用户的交互协作和社会化特征.然而,在复杂的网络环境中,大量实体投入到社区服务的创建、组织和传播中,服务信息组织的主体、内涵、传播、利用及交互方式等发生新的变化,实体间的信任关系很难得到保障,导致网络中的欺诈行为屡见不鲜,从而降低服务的可靠性和可用性.

综上所述,选择有保证的服务、可靠的信息来源和可信的交互对象成为一个亟待解决的问题.而构建有效的信任评估机制,是保证网上交互活动顺利进行的有效途径之一.因此,如何度量实体间的信任关系已成为当前网络交互安全领域的研究热点.

## 2 信 任

### 2.1 信任定义

信任是人们进行交互活动的基石,是一项跨学科的综合交叉性课题.早期的信任研究国内外学者基本上是从心理学、

<sup>1</sup>中国互联网络信息中心.第36次中国互联网络发展状况统计报告[EB/OL].

<http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwxxzb/hlwjtbg/201507/P020150723549500667087.pdf>

社会学、经济学、管理学等角度展开。随着技术的发展,它又融入了供应链管理、博弈论、电子商务、社会网络等应用领域知识,不同学科侧重点也不同,至今莫衷一是。在计算机领域,大多学者<sup>[1-2,4]</sup>认为信任是主体对客体特定行为的主观可能性预期,取决于主体所掌握的经验,并随着客体行为的结果变化而不断修正。Yan 等<sup>[5]</sup>认为信任是一种经验或信念。这些定义将信任归类为一种可能性,体现了信任的不确定性特征。另外,从信任关系的建立方式看,信任可以是局部的或全局的<sup>[6]</sup>、一元的或多元的<sup>[7,8]</sup>等划分方式;从信任关系的度量角度看,信任具有衰减性、不对称性、受限传递性等特性,如图 1 所示。

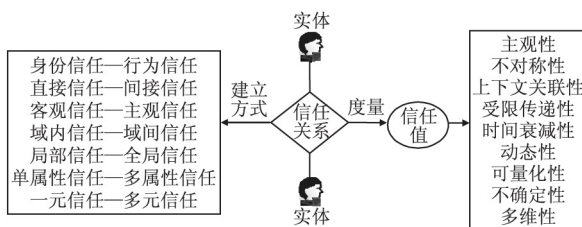


图 1 信任值、信任关系和信任特性的关系图

Fig. 1 Relation schema of trust degree, trust relationship and trust property

表 1 所示为不同学科和领域对信任的典型定义,其文献[1]的定义反映了多数学者的观点,在信任建模中被广泛接受。本文借鉴文献[1]的观点,给出信任定义如下。

表 1 不同学科和领域对信任的典型定义

Table 1 Typical definition of the different disciplines and fields

学科或领域	信任的定义
心理学 <sup>[9]</sup>	是个人的期待,这种期待的心理是以对被信任者善良意志的认可为基础的
社会学 <sup>[10]</sup>	在一个人际网络中,对个体合作行为的一种期望
组织学 <sup>[11]</sup>	为参与者提供在进行交易时缺乏保障前提的意愿
管理学 <sup>[12]</sup>	对履行职责、可预见性、非投机等行为的期望
供应链 <sup>[13]</sup>	行动前考虑行动对其他方产生影响的可能性
博弈论 <sup>[3]</sup>	在重复博弈中,承担风险是信任建立的必要机制
电子商务 <sup>[1]</sup>	对被信任者特定行为的主观可能性预期,该预期是以对方的历史交互为基础
社交网络 <sup>[4]</sup>	基于被信任者将来行为的正面期望的信念

**定义 1.** 信任是指信任者(也称主体、源实体、授信方)在给定的时间和上下文中,根据自身的经验(知识)或他人的推荐,主观判断被信任者(也称客体、目标实体、受信方)能否完成某项交互活动(提供资源或服务)的可能性预期,是一种实体对实体的主观行为。

## 2.2 信任的主要特性

根据信任的上述定义,结合当前网络应用环境的特征,可以看出信任的主要特性有以下几点<sup>[14]</sup>。

### 2.2.1 信任的主观性

信任是主体对客体的一种主观判断,体现了一定的主观性。主观性与随意性不同,它是主体以自身的意念或需求为基

础对待客体,往往存在信任的某些特定规律。因此,即便是在相同的背景、时间、行为下对待同一客体,不同的主体很有可能给出不同的可信判断。

### 2.2.2 信任的不对称性

信任的不对称性表示信任关系具有单向性,例如,实体 A 信任实体 B,但不能保证实体 B 也信任实体 A;再者,当实体间彼此都信任对方时,实体间彼此的信任程度是不等价的,即实体 A 信任实体 B 的程度不等于 B 信任 A 的程度。

### 2.2.3 信任的上下文关联性

信任必须依赖特定的上下文而存在。上下文可以是描述实体状态的任何信息,包括背景信息、时间信息、对象信息、历史信息等等。同一对实体,上下文环境不同信任程度也不同。如 A 相信 B 的售后服务,并不能保证 A 相信 B 的商品质量。因此,信任只有在特定的上下文环境下才有意义。

### 2.2.4 信任的受限传递性

信任的传递不是绝对的,不具有完全的传递性,如 A 信任 B, B 信任 C,并不能得出 A 信任 C 的结论,但可以将信任存在的推荐关系当作是可传递的,即信任的受限传递性。在实际生活中,人们常常以他人的推荐信息为参考,来判断对方是否可信,尤其是当交互双方为陌生实体时,他人的推荐就显得更加重要。这样建立的信任关系称为间接信任,也表明信任具备一定程度的传递性。

### 2.2.5 信任的时间衰减性

信任具有时间相关性,一个主体对客体的信任度会因时间的推移而发生变化,而且时间越长,衰减的越多。假设 A 在时刻 T 对 B 的某项服务评价很高,经过一段时间以后,由于它们长时间没有发生交互行为,导致 A 对 B 的认知程度下降,也就是说 A 不能确定 B 是否能同时刻 T 那样提供相同的服务质量,从而使 A 对 B 的信任评价下降。

### 2.2.6 信任的动态性

信任的动态性是指主体对客体的信任度的动态变化是由实体的自然属性决定的。动态性由内在和外在的因素引起。内在因素是指诸如心理因素、个性特点、知识或技能等内部因素,是隐式的,不能通过观察直接获得,只能估计;外在因素是指诸如环境影响、实体行为表现、规则、策略和协议等外部因素,是显式的,可通过直接观察获得。例如一个信任较差的实体近段时间行为表现很好,则该实体的信任度会上升。

### 2.2.7 信任的可量化性

在信任关系中,人类或机器可以掌控在特定时间获得的实体外部活动特征值,它们被认为是稳定和静态的,其计算的准确程度由采样的时间粒度决定。因此,信任虽然是一个模糊的量,但可以通过非精确的数学方法(如灰色系统理论的灰色值、传统模糊数学的隶属度、直觉模糊数等)进行量化。

### 2.2.8 信任的不确定性

在开放的计算环境中,信任的不确定性主要体现在两个方面:一是面临的环境是一个开放复杂的环境,具有不确定性,而信任表征为实体在这种不确定的环境下采取的行动;二是实体自身认识上的不足,导致主体对客体的信任具有不确定性。

<sup>2</sup><http://www.100ec.cn/zt/315/>

### 2.2.9 信任的多维性

信任是主体对客体的能力、意愿、善意等的认知现象,是多个可信准则的集合,而不是单一准则的集合。将信任当作一个整体是不切实际的,在很多情况下会产生不正确的结果。例如,如果一次信任结果的失败是因为对方的能力而不是善意或诚实,那么对方更容易被原谅。因此,有必要将信任的概念分解成若干可信准则。只有通过依据分解的信任准则建立的

信任关系,人们才能确信所选的方案是正确的。

### 2.3 信任关系

#### 2.3.1 信任关系的定义

根据上述分析,实体间的信任关系的形式化定义如下:

定义 2. 设  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  为所有实体的集合,则实体间的信任关系可以表示为

$$T: E \times E \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

表 2 信任关系分类

Table 2 The classification of trust relationship

划分方式	类别	含义
技术演化 <sup>[15]</sup>	身份信任	利用加密、认证等传统安全机制,对网络实体的身份的真实性进行授权和验证,也称静态信任
	行为信任	实体根据以往交互经验及时调整相互之间的信任关系,也称动态信任
信息来源 <sup>[16]</sup>	直接信任	实体 A 根据与实体 B 的直接交互经验而形成的 A 对 B 的直接信任
	间接信任	当实体间无直接交互经验,以其他实体提供的反馈信息为参考,根据自己的判断而形成的信任
表示方式 <sup>[17]</sup>	客观信任	基于凭证的,可以精确地描述、推理和验证,也叫身份信任
	主观信任	基于实体间的交互历史经验做出的主观判断,是基于信誉的信任关系,
所属组织 <sup>[18]</sup>	域内信任	利用本域的管理策略评价域内实体的信任程度
	域间信任	以域为单位,通过其它域评价该域内所有实体的整体行为
信任传播算法 <sup>[19]</sup>	局部信任	源节点通过信任传播算法计算对目标节点的信任度,它表示源节点对目标节点的信任度
	全局信任	将信任网络中所有节点对某节点的局部信任度综合后所得结果,它表示节点在整个网络中的信任度
属性数量 <sup>[20]</sup>	单属性信任	实体的属性只有一个,其它实体通过这一个属性评价该实体
	多属性信任	实体的属性有多个,其它实体通过综合考虑多方面的因素来评价该实体
描述维度 <sup>[21-23]</sup>	一元信任	仅用信任程度一个元素刻画信任度,一般采用经典的数学方法描述,如离散值、概率值、灰色值等
	多元信任	用信任、不信任和不肯定等多个元素刻画信任度,如信念值、直觉模糊值、双格等

### 2.3.2 信任关系的划分

信任关系是网络实体间进行交互活动的基础,是有强弱程度之分的。信任评价机制的目的,就是要刻画这种程度。目前为止,有许多学者依据不同的标准对信任关系做出了不同的划分,如表 2 所示。

## 3 信任建模的主要工作

由于信任本身的主观性和模糊性等不确定性因素,以及受实际交互环境、时间、范围和对象等相关因素影响,传统数学工具构建信任模型存在一定局限性。本文以不确定性数学方法为基础(如直觉模糊理论),研究信任建模的主要工作包括信任表示、信任获取、信任分配及信任决策 4 个方面。

### 3.1 信任表示

信任表示是信任建模的基础,只有确定了信任的表示,才能明确信任度的取值范围。一般采用直观的、可推导的数字化形式表示信任,有助于信任的刻画、推导和建模。在直觉模糊信任模型中一般采用直觉模糊数或区间直觉模糊数来刻画信任度。

### 3.2 信任获取

信任获取是指从证据中获取信任信息,并生成模型中定义信任表示形式。在 D-S 证据信任模型中称为信任获取。为了利用直觉模糊数刻画信任度,如何从证据中获取信任直觉模糊信息,是信任建模需要解决的最重要的问题。尤其在信任获取时,如何更好地抑制欺诈行为,是评价信任模型性能的重要依据。

### 3.3 信任分配

在信任评估中,直接信任和间接信任无疑是影响综合信任的两个关键因素,如何合理、科学的分配两者权重是信任建模的主要工作之一。

### 3.4 信任决策

如何基于获取的信任值对目标实体进行排序和择优是信任模型需要解决的关键问题。在直觉模糊信任模型中,由于目标实体的综合信任是一个直觉模糊数,所以信任决策的实质是对直觉模糊数进行比较。

## 4 信任建模方法

信任建模的主要工作是信任关系的度量和计算引擎的构建。近年来,国内外学者主要从贝叶斯理论、模糊逻辑、主观逻辑、云模型、证据理论、区间数理论和直觉模糊理论等非精确性理论角度,开展适合各种应用领域的信任建模研究,为信任管理的发展奠定了坚实的理论基础。以下为文献中常见不确定性理论信任建模方法的简单评述。

### 4.1 基于贝叶斯理论和模糊逻辑等传统数学工具的信任评估方法

#### 4.1.1 基于贝叶斯理论的信任评估方法

基于贝叶斯的信任评估方法是指利用贝叶斯网络来描述实体的不同信任因素,并指定先验概率分布,然后利用贝叶斯规则推测后验概率,从而可以将它们整合以度量实体可信度。如 Mui 等<sup>[24]</sup>构建了基于贝叶斯概率方法的信任模型,利用交易双方以往的交易信息和信誉信息通过 beta 概率密度函数的统计更新最终信誉值,适用于简化的并行社会网络;但该模型将二元的评价作为输入,只能表达肯定或否定,因而粒度较

粗,不能细腻刻画目标实体的行为,并且难以准确地初始化信誉变量,系统复杂度较高。田俊峰等<sup>[25]</sup>提出了一种基于贝叶斯网络的细粒子度信任模型,该模型将信任属性划分成多个等级,进一步细化了二元评价信息,考虑了领域间的包含和相交关系,可以度量同一节点在不同领域的信任度,可以避免来自其它领域恶意节点的攻击,利用贝叶斯网络计算节点的信任度,弱化了主观评价对可信度的影响;然而,在历史经验较少的情况下该模型预测准确度还有待提高。Teacy等<sup>[26]</sup>提出了一种分层贝叶斯信任推理模型,该模型从客体或信息源行为间可观察的相关性,来克服不可信实体用新的身份来掩饰其较差信誉的缺陷,有效地提高了模型的抗欺诈能力,同时,采用本原统计方法获取信任信息,使模型具有一定的鲁棒性;其不足之处是:①忽视了信任的时间相关性,②没有考虑信任初始化问题,③不能处理上下文信息慢,④缺乏惩罚机制。贝叶斯方法考虑了信任的随机不确定现象,其自动学习机制非常适合信任的动态建模需求,但须事先假定历史评价信息服从某类典型分布,且推理过程较复杂,需要较多的时空开销。

#### 4.1.2 基于模糊逻辑的信任评估方法

由于信任存在的主观模糊性,基于贝叶斯理论信任模型不能处理实体信任的模糊性,而基于模糊逻辑的信任评估方法常利用隶属度函数描述信任级别,并通过模糊逻辑推理规则产生模糊值,从而处理信息的模糊性,成为信任建模的重要工具之一。如 Song 等<sup>[27]</sup>引入任务成功率和入侵自我防御能力两因子制定模糊推理规则,并综合新的证据和历史因素来动态更新信任,可以较好地检测和抵御恶意实体。所提模型的不足之处是:①没有考虑时间因素,因而其动态适应能力有待商榷;②该模型的综合信任只依赖直接信任,不能反映信任值的全局可信性;③模糊推理规则一旦确定会影响信任建模的收敛性和系统的可扩展性;④隶属函数难以选择。Tajeddine 等<sup>[28]</sup>提出了一种实体信誉与模糊子系统相结合的信任模型(PATROL-F),其信誉综合考虑了实体的历史信誉、相似度、活跃度、流行度等4个参数,运用模糊子系统根据建立的信誉分析交易的重要性,以决定是否进行交互,算法复杂度小,便于自动化处理,但是上述参数的权重因子根据自身经验事行给定,使得计算结果具有较强的主观性。Xia 等<sup>[29]</sup>介绍了一种基于个体历史经验和逻辑规则预测方法的信任模型,并将节点的预测信任值引入到标准源路由机制中,建立了一种灵活可信的路由协议,以抵制不可信节点获得可靠路径传递路由和缓解恶意节点的攻击行为。同 DSR<sup>[30]</sup>和 TDSR<sup>[31]</sup>相比,该协议能够显著提高包提交率,并降低端到端延迟,但也存在以下不足:①不能识别节点的身份,容易受到女巫攻击;②信任要素只有通信成功率,没有考虑其它路由服务质量相关要素,所以结果不能完全反映节点的真实信任度;③算法复杂度高导致节点能耗相对较高。

### 4.2 基于主观逻辑和证据理论信任评估方法

#### 4.2.1 基于主观逻辑的信任评估方法

主观逻辑是由 Jøsang<sup>[32]</sup>在 D-S 证据理论的基础上提出的,其将不确定性引入到意见空间来描述信任的主观不确定性,可以更好地描述人们对客观事物的认知规律,因而受到信任建模领域的重视。Jøsang 模型<sup>[32]</sup>定义了合并、合意和推荐等主观逻辑算子,给出了信任传递和聚合的形式化表示方法;

其传递方法虽然满足信任的衰减特性,但灵活性较差,难以体现实体的个性化特征;其聚合方法虽然满足交换律和结合律,但意见空间的微小变化,会导致聚合结果发生剧变。王进和孙怀江<sup>[33]</sup>针对 Jøsang 模型<sup>[32]</sup>中聚合方法的缺陷和鉴别框架中的基本元素必须满足互斥性的不足,分别给出了改进措施。对于前者,提出了一种新的聚合方法,以满足信任聚合中的平滑和少数服从多数这两点规则;对于后者,借鉴与 DSmt (Dezert-Smarandache) 类似的广义鉴别框架,构建了一种新主观逻辑信任模型,可以同时处理不确定信息和矛盾信息。田俊峰等<sup>[34]</sup>针对 Jøsang 只给出二项式观点的传递公式的不足,结合实体信誉环境对信任融合操作的影响,提出了基于多项式主观逻辑的扩展信任传播模型。Liu 等<sup>[35]</sup>将主观逻辑中的不确定性进一步区分为先验(没有证据)和后验(证据失真),从而提出一种3值主观逻辑(3VSL)方法,并用于评估社会网络中实体间的信任关系,理论和现实场景实验表明,该方法能够明显提高 Jøsang 模型<sup>[32]</sup>的准确度。Cerutti 等<sup>[36]</sup>研究了基于主观逻辑的依赖上下文的信任决策和一系列折扣算子及其几何解释。综上所述,当前基于主观逻辑的信任建模研究主要是推广和改进 Jøsang 模型<sup>[32]</sup>,虽然在信任表示和推理方面有其独特的优势,仍存在以下不足:①其理论本身仍然存在一定的局限性,②不能适应动态变化的实际应用环境,③多数算法有效性的验证只给出实例缺少仿真,④不确定因子是固定不变的。

#### 4.2.2 基于证据理论信任评估方法

证据理论通过信任函数度量信任的不确定性,似然函数处理由于“不知道”引起的不确定性,且不必事先给出知识的先验概率,与主观 Bayes 方法相比,具有较大的灵活性。因此,基于证据理论信任评估方法得到了广泛的关注,其主要工作包括基本概率分配函数的建立、证据的合成和信任的评估计算。Yu 和 Singh<sup>[37]</sup>提出了分布式信任管理的证据模型,该模型通过节点评分建立的基本概率分配函数来表示信息中的不确定性;分析了信任传递的有效性,并利用 D-S (Dempster-Shafer) 证据合成规则聚合所有推荐者的证据,避免了不确定性在信任传递时丢失的问题,但该模型也存在一些不足,如信任评估值武断而不渐变、可信门限值改变较敏感、将无证据等同冲突证据等。针对上述不足, Wang 和 Sun<sup>[38]</sup>给出了一种新的基于 DSmt 证据信任模型,该模型表达的信任包括了不确定性和冲突,分析了基于半评估的概率分配函数计算方法,研究了信任传递及其规则;该模型的优点是:①在信任传递过程中保守实体会提高社区的质量和开销,②可以避免门限值的主观设定对局部信任度计算的影响,③计算过程简单,适合分布环境下的应用需求;该模型的不足是:①只用信任函数表示信任值,没有考虑不信任程度分量和不确定性程度分量对信任值的影响,②不能体现信任随着上下文和时间而变化的动态性。Jiang 等<sup>[39]</sup>提出了一种基于开放系统的证据信任模型,该模型的优点是:①在基本概率分配函数中融入了时间衰减函数解决直接交互的时效性,②利用多层证据推理技术获取间接信任可以有效过滤不诚实推荐行为,③通过扩展 D-S 理论处理未知和矛盾信息提高了模型的精确性和有效性;该模型的不足是:①基本概率赋值选取困难,②推荐信任融合时存在信息损耗或重复计算等问题,③没有风险评估机制及风险

建模和信任之间的联系。张琳等<sup>[40]</sup>利用持续可信(不可信/不确定)序列构建了具有激励奖惩机制的基本可信度函数,并提出了基于改进评估函数的信任评估方法,但信任获取时没有考虑评分的大小,不能区分同类服务(可信或不可信服务)的优劣对信任度的影响。

#### 4.3 基于直觉模糊理论等新的数学工具的信任评估方法

##### 4.3.1 基于直觉模糊理论的信任评估方法

直觉模糊理论是对传统模糊集的拓展,且同时包含肯定、否定和不确定这三方面信息,在处理信任的主观性和不确定性方面更具有直观性。因此,基于直觉模糊理论的信任评估方法值得深入研究。针对历史反馈信息包含定量和定性两种数据类型,以及存在恶意夸大或诋毁评分的行为,以电子商务环境为研究背景,文献[41]提出了基于直觉模糊信息的多维反馈信任模型。该模型基于直觉模糊数和区间数、语言变量的关系,利用混合加权平均算子,给出了集成两类属性信任直觉模糊数的方法;研究了基于直觉模糊熵的实体综合信任直觉模糊数融合方法;借助得分函数与风险偏好因子的关系,从定量的角度分析消费者风险偏好对实体信任评估的影响。通过实例和仿真实验,验证模型的有效性、表达能力和抑制诋毁和夸大行为的能力。该模型的不足是:①依赖于历史用户的反馈评分,然而在很多情况下,用户在交易完后不提供反馈评分,对待这类用户应该如何处理有待进一步研究;②用一个参数来代表某一类型消费者的风险偏好不能反映消费者的个体差异;③隶属函数和非隶属函数不易确定。徐军等<sup>[42]</sup>提出了一种基于直觉模糊理论的多维信任传递模型。为了解决复杂网络中陌生实体信任评估问题,同时避免信任传递中信任不确定性的丢失问题,该模型讨论了直觉模糊环境下基本的信任传播算子和聚合算子;经过综合考虑路径长度和信任质量对信任聚合的影响,研究了两种加权信任聚合算子,给出了基于社会网络分析的路径信任质量计算方法。该模型虽然在信任度量准确性方面有较大提高,但计算较复杂,且没有考虑恶意行为对信任预测的影响。

##### 4.3.2 基于区间数理论的信任评估方法

基于区间数理论的信任建模是指实体的信任度以区间形式表示。根据集值统计理论,建立评判矩阵来进行综合研究。由于区间数可以很好地刻画实体的变化情况,使得更易接近复杂不确定的实际场景,更符合人类的模糊思维习惯,所以,基于区间数理论的信任评估方法具有更佳的应用前景。Shakeri 和 Bafghi<sup>[43]</sup>考虑到评估节点对中间节点的信心水平会影响其对目标节点的信任评估,提出了一种信心感知区间信任模型,给出了信任区间的生成算法、信任区间的加法和乘法算子及其属性。随后在此基础上提出了一种信心感知信任管理系统的层次模型<sup>[44]</sup>。该层次模型的优点是:①具有系统全局观,将信任管理系统分为证据层、直接信任层、间接信任层和决策层 4 个层次,并给出了各层次的功能和关系;②接口定义清晰,能够提高层次之间的合作效率;③采用模块化工程思想,有助于组件开发、设计和维护,从而减小复杂度。该模型的不足是:①不能抵御恶意实体的不诚实反馈信息;②没有给出最优信心参数的合理解释。徐军和钟元生<sup>[45]</sup>提出了一种集成区间逼近理想点的主观信任模型;该模型引入信任择优子区间,利用区间值混合加权平均算子,集成属性信任区间,并借

鉴 TOPSIS 思想评估实体的信任水平;其优点是:①区间集成算法有效地减少了恶意推荐对集成属性值的影响;②避免了单一灰色关联度分析方法的局限性;③克服了多数模型仅计算实体在某一时间点的信任水平;其缺点是:①初始区间划分较主观;②时间衰减函数收敛过快;③当恶意节点比例过半时误差迅速增长。

##### 4.3.3 基于云模型的信任评估方法

云模型是在传统模糊集理论和概率统计的基础上提出来的。基于云模型的信任表示方法,可以通过信任云以正态云的形式描述实体信任关系的模糊性和不确定性<sup>[46]</sup>。张仕斌和许春香<sup>[47]</sup>利用云模型的期望和超熵量化客体的信任程度和不确定程度,并集成各反馈属性云得到综合信任云,然后计算与各标准信任子云间的相似度,确定实体的信任等级。同时,给出了特殊属性评价方法和基于价格的信任惩罚方法,达到了有效防止信用炒作和周期行骗的效果;该方法的不足是:①信任区间根据经验划分;②属性权重须预先指定;③不能防范信任诋毁攻击;④实际应用推广不强;⑤不适合软件自动处理。

##### 4.3.4 基于灰色系统理论的信任评估方法

文献[48]提出了一种灰色系统理论的主观信任模型,该模型以用户对实体反馈的评价为依据,通过灰色统计得出关键属性的灰类,并利用白化权函数对灰量进行量化,获得实体关键属性值序列,然后以相对优化原则构造参考序列,将属性值序列与参考序列的灰关联度定义为实体信任水平。其优点是样本量少、可操作性强和方便系统自动运行。其不足是:①未有识别和惩罚恶意实体机制;②仅计算某一时刻的实体信任水平;③没有考虑近期信任水平和交易价值对当前信任水平的影响。

此外,基于模糊多属性决策的信任模型<sup>[49]</sup>、基于集对分析理论的信任模型<sup>[50]</sup>等也分别从不同角度对信任进行了建模,并取得了丰硕的成果。当然,信任管理相关文献综述较多<sup>[5,14,16,51]</sup>。限于篇幅在此不作详论。

#### 4.4 各种模型比较

根据文献[51]中表 4 所给出的比较指标以及信任的特性,选择 17 种模型进行比较分析,如下页表 3 所示。

### 5 面临的问题与展望

#### 5.1 已有研究面临的问题

近年来,不确定性理论信任建模技术已经取得许多研究成果。然而,由于信任的不确定性本质,以往学者使用随机、统计或模糊分析等传统方法研究信任问题,也存在一定的局限性。因此,许多学者尝试利用 D-S 证据理论、直觉模糊理论、区间数和云模型表示信任,并已成为信任建模研究中的新热点。这些理论可以有效解决信任的不确定性问题,但仍处于发展起始阶段。尤其是直觉模糊理论作为新的不确定性数学方法,比精确数包含更多的信息,能更加细腻合理地反映客观事物的不确定性,为信任关系的研究提供了新方法、新思路。但基于直觉模糊理论的信任模型的研究成果匮乏,且深入不够,仍有很大的发展空间和研究价值,其中包括:如何获取信任信息?如何判断推荐信息的真实性?如何分配总体信任度聚合计算中的权重?如何解决信任计算过程中的不确定性丧失?如何评估陌生实体间的信任度等等。后继工作将以开放网络

中的信任评估为核心问题,引入直觉模糊理论,围绕上述挑战,展开创新性研究。

具体来说,现有多数信任模型存在以下问题,有待进一步思考。

1) 信任量化表示问题,即现有多数模型不能有效刻画信任的不确定性。由于不同用户的反馈信息所包含肯定、否定和犹豫的成分有很大的差异,只有在评估过程中对这些成分加以区分才能提高信任度评估结果的准确性。而直觉模糊信息能同时描述隶属度、非隶属度和犹豫度,鉴于此,现有研究缺乏有效算法从第一手资料中获取信任直觉模糊信息,并且抵制信任骗取、策略性欺诈、夸大或诋毁等行为。

2) 多数信任模型的自适应和激励机制较差。一是多数模型没有充分考虑到信任值的连续性和动态特征,不能有效激励可信服务,惩罚恶意实体。二是不能有效识别恶意推荐行为,减少恶意推荐信息对信任评估的影响。三是综合信任度聚合计算中权重分配多事先给定或采用主观的融合计算方法,如专家打分法、平均法等,使得模型具有较大的主观性,缺少自适应性和科学性。

3) 信任建模所依赖的原始信任评价信息的数据类型单

一。大多基于反馈评分的信任模型都基于一个假设,即所有的评分都是实数。然而,在实际的应用和生活环境中,人们所给出的评价信息可能包含多种数据类型。从电子商务的实际应用环境看,反馈信息包含数值型和语言变量;从信任的评价体系来看,评价信任的指标大多是主观的、定性的,用户或专家很难用精确数评价目标的信任指标。因此,如何从多种数据类型的信任评价信息中获取信任?有待今后进一步研究。

4) 以往信任建模研究都是从技术的某个角度来设计信任问题,缺乏心理学和行为学方面的理论指导,没有考虑评估实体的行为风险偏好和推荐者的信心水平在现实社会中对信任产生的作用。

5) 陌生实体间信任评估的准确性还有待提高。由于网络的稀疏性,并非所有实体都有过交互,因此,陌生实体必须依赖中间实体的信任传递才能完成信任状态评估。然而,基于不确定性理论的信任模型未能很好地解决信任衰减和路径聚合两个挑战,即不同长度和质量的路径,如何体现信任信息随路径传播的衰减?当实体间存在多条路径时,如何有效进行聚合?

## 5.2 展望

表3 典型信任建模方法的比较

Table 3 Comparison of typical modeling methods

	不确定性理论	上下文	多维性	动态性	不确定性	信心因素	历史交易	数据类型	时间衰减	自适应性	应用环境	扩展性	健壮性
Mui 等 <sup>[25]</sup>	贝叶斯理论	是	是	是	一般	是	是	实数	否	中等	社会网络	较高	中等
Teacy 等 <sup>[26]</sup>	贝叶斯理论	否	否	是	一般	否	是	实数	否	较好	开放系统	高	高
Song 等 <sup>[27]</sup>	模糊逻辑	是	是	是	较好	否	是	实数	否	中等	网格计算	中等	较高
Tajeddine 等 <sup>[28]</sup>	模糊逻辑	是	是	是	较好	否	是	实数	是	中等	分布式系统	中等	中等
Xia 等 <sup>[29]</sup>	模糊逻辑	是	是	是	较好	否	是	实数	是	较好	移动自组网络	较高	中等
田俊峰等 <sup>[34]</sup>	主观逻辑	否	否	否	好	否	否	观点	否	中等	社会网络	较高	中等
Liu 等 <sup>[35]</sup>	主观逻辑	否	否	否	好	否	否	观点	否	中等	社会网络	中等	中等
Cerutti 等 <sup>[36]</sup>	主观逻辑	是	否	否	好	否	否	观点	否	中等	社会网络	中等	中等
Yu 和 Singh <sup>[37]</sup>	证据理论	是	是	是	较好	否	是	实数	否	中等	电子商务	较高	中等
Wang 和 Sun <sup>[38]</sup>	证据理论	否	否	否	较好	否	是	实数	否	中等	开放社区	较高	较好
Jiang 等 <sup>[39]</sup>	证据理论	是	是	是	较好	否	是	实数	是	中等	开放社区	较高	好
张琳等 <sup>[40]</sup>	证据理论	是	是	是	好	否	是	实数	是	好	P2P 网络	高	很好
徐军等 <sup>[42]</sup>	直觉模糊理论	否	否	是	好	否	否	语言	否	较好	社会网络	较高	中等
Shakeri 和 Bafghi <sup>[44]</sup>	区间数理论	否	否	是	较好	是	是	实数	否	较好	分布式网络	较高	中等
张仕斌等 <sup>[47]</sup>	云模型	是	是	是	较好	否	是	混合	是	中等	电子商务	中等	较好
徐兰芳等 <sup>[48]</sup>	灰色系统理论	是	是	否	较好	否	是	实数	否	较好	电子商务	较高	中等
Ashtiani 等 <sup>[49]</sup>	模糊决策	否	是	否	较好	是	否	语言	否	中等	服务选择	较高	中等

基于不确定性理论的信任评估方法是当前信任管理领域的一个重要研究方向,正处于研究发展阶段,仍有大量工作亟待进一步探究和完善。

### 5.2.1 提高信任模型抵制恶意行为的能力

在开放式的网络环境中,实体可自由进出,使得有些实体可采取“合谋欺骗”、“搭便车”等行为攻击其它实体。因此,需要构建能够抑制多种恶意欺诈行为的信任模型来应对。同时,还需解决怎样在不泄漏用户私有信息的情况下实现信任评估的问题。

### 5.2.2 增强信任模型的鲁棒性和健壮性

大多不确定性信任建模方法侧重于理论和方法上的探

讨。但在实际应用中,模型应具有能处理多维海量复杂的反馈信息的能力,因此,如何让信任模型更加实用,还有待后续工作的实践验证和完善。

### 5.2.3 研究基于个体风险偏好的信任预测模型

在实际生活中,消费者的风险偏好存在个体的差异。对此,如何利用机器学习的方法,从历史行为中学习获得消费者的风险偏好,以建立基于个体风险偏好的信任预测模型,是今后值得研究的一个方向。

### 5.2.4 研究信心感知的信任模型

今后工作将从用户的信心角度出发,研究如何获取信任直觉模糊数、基于信心的信任传播算子和聚合算子,在此基础



上 构建信心感知的直觉模糊信任传递模型. 同时进一步丰富信心区间直觉模糊集成算子, 如信心区间直觉模糊加权几何算子、基于 Einstein 信心区间直觉模糊集成算子等.

### 5.2.5 研究面向移动社交网络的多源信任融合模型

面对大规模动态开放的移动社交网络, 现有的信任管理研究工作存在对信誉数据稀疏问题重视不够、信誉系统冷启动、信任评价的信息源单一等问题. 对此, 如何利用移动社交网络中丰富的多源信任信息, 包括直接经验、朋友推荐、移动情景、凭证信息及历史信誉等相关信任信息, 构建基于直觉模糊理论的多源信任融合模型, 对提高信任及信誉机制效能、增强在线社会网络可信性具有重要意义.

### References:

- [1] Gambetta D. Can we trust trust [J]. *Trust: Making and Breaking Cooperative Relations* 2000 1(13): 213-237.
- [2] Jelenc D, Hermoso R, Sabater-Mir J, et al. Decision making matters: A better way to evaluate trust models [J]. *Knowledge-Based Systems* 2013 52(11): 147-164.
- [3] Cook KS, Yamagishi T, Cheshire C, et al. Trust building via risk taking: A cross-societal experiment [J]. *Social Psychology Quarterly* 2005 68(2): 121-142.
- [4] Sherchan W, Nepal S, Paris C. A survey of trust in social networks [J]. *ACM Computing Surveys* 2013 45(4): 1-33.
- [5] Yan Z, Zhang P, Vasilakos A. V. A survey on trust management for internet of things [J]. *Journal of Network and Computer Applications* 2014 42(6): 120-134.
- [6] Gefen D. Reflections on the dimensions of trust and trustworthiness among online consumers [J]. *ACM Sigmis Database* 2002 33(3): 38-53.
- [7] Wang G, Wu J. Multi-dimensional evidence-based trust management with multi-trusted paths [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2011 27(5): 529-538.
- [8] Yao Y, Tong H, Yan X, et al. MATRI: A multi-aspect and transitive trust inference model [C]. In: *Proceedings of the 22nd international conference on World Wide Web, International World Wide Web Conferences Steering Committee* 2013: 1467-1476.
- [9] Rousseau DM, Sitkin SB, Burt RS, et al. Not so different after all: A cross-discipline view of trust [J]. *Academy of Management Review* 1998 23(3): 393-404.
- [10] Qu WG, Pinsonneault A, Tomiuk D, et al. The impacts of social trust on open and closed B2B e-commerce: a europe-based study [J]. *Information & Management* 2015 52(2): 151-159.
- [11] Zaheer A, McEvily B, Perrone V. Does trust matter? Exploring the effects of interorganizational and interpersonal trust on performance [J]. *Organization Science* 1988 9(2): 141-159.
- [12] McKnight D H, Chervany N L. What trust means in ecommerce customer relationship: an interdisciplinary conceptual typology [J]. *International Journal of Electronic Commerce* 2001 6(2): 35-59.
- [13] Melaye D, Demazeau Y. Bayesian dynamic trust model [M]. Berlin: Springer-Verlag 2005: 480-489.
- [14] Zhang Yu, Chen Hua-jun, Jiang Xiao-hong, et al. A survey of trust management for ecommerce systems [J]. *Acta Electronica Sinia*, 2008 36(10): 2011-2020.
- [15] Nagoorani S. D, Jalili R. TIRIAC: a trust-driven risk-aware access control framework for grid environments [J]. *Future Generation Computer Systems* 2016 55(2): 238-254.
- [16] Pinyol I, Sabater M. J. Computational trust and reputation models for open multi-agent systems: A review [J]. *Artificial Intelligence Review* 2013 40(1): 1-25.
- [17] Terzis S, Wagealla W, English C, et al. Preliminary trust formation model [J]. *Secure Project Deliverable* 2004 2(1): 231-243.
- [18] Deng S G, Huang L T, Xu G D. Social network-based service recommendation with trust enhancement [J]. *Expert Systems with Applications* 2014 41(18): 8075-8084.
- [19] Golbeck J, Hendler J. Inferring binary trust relationships in web-based social networks [J]. *ACM Transactions on Internet Technology* 2006 6(4): 497-529.
- [20] Liu F, Li X, Ding Y, et al. A social network-based trust-aware propagation model for P2P systems [J]. *Knowledge-Based Systems* 2013 41(3): 8-15.
- [21] Cock M D, Silva P P D. A many valued representation and propagation of trust and distrust [J]. Berlin: Springer-Verlag 2006: 114-120.
- [22] Josang A, Ismail R, Boyd C. A survey of trust and reputation systems for online service provision [J]. *Decision Support Systems*, 2007 43(2): 618-644.
- [23] Verbiest N, Cornelis C, Victor P, et al. Trust and distrust aggregation enhanced with path length incorporation [J]. *Fuzzy Sets and Systems* 2012 202(9): 61-74.
- [24] Mui L, Mohtashemi M, Halberstadt A. A computational model of trust and reputation [C]. In: *Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE*, 2002: 2431-2439.
- [25] Tian Jun-feng, Tian Rui. A fine-grain trust model based on domain and Bayesian network for p2p e-commerce system [J]. *Journal of Computer Research and Development* 2011 48(6): 974-982.
- [26] Teacy W T, Luck M, Rogers A, et al. An efficient and versatile approach to trust and reputation using hierarchical bayesian modeling [J]. *Artificial Intelligence* 2012 193(11): 149-185.
- [27] Song S, Hwang K, Kwok Y K. Trusted grid computing with security binding and trust integration [J]. *Journal of Grid Computing*, 2005 3(1-2): 53-73.
- [28] Tajeddine A, Kayssi A, Chehab A, et al. Fuzzy reputation-based trust model [J]. *Applied Soft Computing* 2011 11(1): 345-355.
- [29] Xia H, Jia Z, Li X, et al. Trust prediction and trust-based source routing in mobile ad hoc networks [J]. *Ad Hoc Networks* 2013 11(7): 2096-2114.
- [30] Johnson D, Maltz D. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks in: I. Tomasz, K. Hank (Eds.), *Mobile Computing*, first ed. [M]. Kluwer Academic Press 1996: 153-181.
- [31] Jensen C D, Connell P O. Trust-based route selection in dynamic source routing [C]. *Proceedings of International Conference on Trust Management* 2006: 150-163.
- [32] Josang A, Marsh S, Pope S. Exploring different types of trust propagation [M]. Berlin: Springer-Verlag 2006: 179-192.
- [33] Wang Jin, Sun Huai-jiang. A novel subjective logic for trust management [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010 47(1): 140-146.
- [34] Tian Jun-feng, Wu Li-juan. Multinomial subjective logic based extended trust propagation model [J]. *Journal on Communications*,

- 2013, 34(5): 12-19.
- [35] Liu G, Yang Q, Wang H, et al. Assessment of multi-hop interpersonal trust in social networks by three-valued subjective logic [C]. In: Proceedings of the International Conference on Computer Communications, IEEE, 2014: 1698-1706.
- [36] Cerutti F, Toniolo A, Oren N, et al. Subjective logic operators in trust assessment: an empirical study [J]. Information Systems Frontiers, 2015, 17(4): 743-762.
- [37] Yu B, Singh M. P. An evidential model of distributed reputation management [C]. In: Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems: Part 1, ACM, 2002: 294-301.
- [38] Wang J, Sun H J. A new evidential trust model for open communities [J]. Computer Standards & Interfaces, 2009, 31(5): 994-1001.
- [39] Jiang L, Xu J, Zhang K, et al. A new evidential trust model for open distributed systems [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 3772-3782.
- [40] Zhang Lin, Liu Qian-wen, Wang Ru-chuang, et al. Trust evaluation model based on improved D-S evidence theory [J]. Journal on Communications, 2013, 34(7): 167-173.
- [41] Xu Jun, Zhong Yuan-sheng, Zheng Ye-fu. A trust evaluation approach of multi-dimensional integrated intuitionistic fuzzy information [J]. Computer Engineering & Science, 2015, 37(9): 1777-1782.
- [42] Xu Jun, Zhong Yuan-sheng, Zhu Wen-qiang. A trust evaluation approach of multi-dimensional integrated intuitionistic fuzzy information [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(12): 2714-2718.
- [43] Shakeri H, Bafghi A. G. A confidence-aware interval-based trust model [J]. Journal of Information Security, 2012, 4(2): 1-15.
- [44] Shakeri H, Bafghi A. G. A layer model of a confidence-aware trust management system [J]. International Journal of Information Science and Intelligent System, 2014, 3(1): 73-90.
- [45] Xu Jun, Zhong Yuan-sheng. A subjective trust model based on integrated interval similarity to ideal [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(11): 2428-2433.
- [46] Wu T, Xiao J, Qin K, et al. Cloud model-based method for range-constrained thresholding [J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 42(2): 33-48.
- [47] Zhang Shi-bin, Xu Chun-xiang. Study on the trust evaluation approach based on cloud model [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(2): 422-431.
- [48] Xu Lan-fang, Zhang Da-sheng, Xu Feng-ming. Subjective trust model based on grey system theory [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2007, 28(5): 801-804.
- [49] Ashtiani M, Azgomi M. A. Trust modeling based on a combination of fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy VIKOR [J]. Soft Computing, 2016, 20(1): 399-421.
- [50] Tao Li-ming, Huang De-cai. Research of subjective trust valuation and decision-making based on multi-element connection number for open networks [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(6): 1202-1206.
- [51] Li Yong-jun, Dai Ya-fei. Research on trust mechanism for peer-to-peer network [J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(3): 390-405.

#### 附中文参考文献:

- [14] 张宇, 陈华钧, 姜晓红, 等. 电子商务系统信任管理研究综述 [J]. 电子学报, 2008, 36(10): 2011-2020.
- [25] 田俊峰, 田瑞. 基于领域和贝叶斯网络的 P2P 电子商务细粒度信任模型 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(6): 974-982.
- [33] 王进, 孙怀江. 一种用于信任管理的新主观逻辑 [J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(1): 140-146.
- [34] 田俊峰, 吴丽娟. 基于多项式主观逻辑的扩展信任传播模型 [J]. 通信学报, 2013, 34(5): 12-19.
- [40] 张琳, 刘婧文, 王汝传, 等. 基于改进 DS 证据理论的信任评估模型 [J]. 通信学报, 2013, 34(7): 167-173.
- [41] 徐军, 钟元生, 郑也夫. 一种多维集成直觉模糊信息的信任评价方法 [J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(9): 1777-1782.
- [42] 徐军, 钟元生, 朱文强. 一种基于直觉模糊理论的多维信任传递模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(12): 2714-2718.
- [45] 徐军, 钟元生. 一种集成区间逼近理想点的主观信任模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(11): 2428-2433.
- [47] 张仕斌, 许春香. 基于云模型的信任评估方法研究 [J]. 计算机学报, 2013, 36(2): 422-431.
- [48] 徐兰芳, 张大圣, 徐凤鸣. 基于灰色系统理论的主观信任模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(5): 801-804.
- [50] 陶利民, 黄德才. 开放网络环境下基于多元联系数的主观信任评估与决策研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(6): 52-56.
- [51] 李勇军, 代亚非. 对等网络信任机制研究 [J]. 计算机学报, 2010, 33(3): 390-405.