第 1 卷第 1 期　　　　智 能 系 统 学 报　　　　Vol.1 №1
2006 年 3 月　　　　CAAI Transactions on Intelligent Systems　　　　Mar. 2006

论第 2 次数理逻辑革命

何华灿[1] ,何智涛[2] ,王　华[1]

(1. 西北工业大学 计算机学院,陕西 西安 710072;2. 北京航空航天大学 计算机学院,北京 100083)

摘　要:人工智能理论危机暴露了经典数理逻辑的局限性,各种非经典数理逻辑的大量涌现表明,第 2 次数理逻辑革命已经开始. 为了使各种逻辑能在统一的泛逻辑学框架内协调一致地发展,为人工智能提供新的逻辑理论基础,提出了第 2 次数理逻辑革命的总纲领:实现部分辨证逻辑的数学化,建立可包容各种不确定性、矛盾和演化的柔性逻辑学;根据总纲领和逻辑学 4 要素,提出了革命的若干具体纲领,并指出当前最重要的任务是建立柔性命题逻辑,它是建立整个柔性逻辑学的基石. 根据纲领建立了柔性命题逻辑学,表明它可包容或生成各种命题逻辑.

关键词:数理逻辑革命;柔性逻辑学;泛逻辑学;不确定性;新自然法则

中图分类号:TP18　**文献标识码**:A　**文章编号**:1673-4785(2006)01-0029-09

On the second revolution of mathematical logic

HE Hua-can[1], HE Zhi-tao[2], WANG Hua[1]

(1. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Computer Science, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The theoretical crisis of artificial intelligence exposed the limits of classical mathematical logic. At present, the second revolution of mathematical logic, which was revealed by the establishment of various nonclassical mathematical logics, have begun. In order to make all kinds of logic develop in the unified universal logics framework and provide the new logic foundation for AI, firstly, the general creed of this revolution was proposed to make some dialectical logic mathematicalized, and to establish flexible logics which contained various uncertainty, contradiction and evolvement; Secondly, regarding the general creed and four elements of logic, the concrete creed of the revolution was proposed and it was pointed out that the current important task was to establish flexible propositional logics, which was the footstone of the entire flexible logics. The flexible proposition logic, which could contain or generate various proposition logics, had been established regarding the creed.

Keywords: revolution of mathematical logic; flexible logics; universal logics; uncertainty; new law of nature

逻辑是智能科学中的基本科学问题,数理逻辑是人工智能的基础理论,这是在人工智能学科诞生时就已经确立的基本信念. 20 世纪 80 年代中期爆发的人工智能理论危机,暴露了经典数理逻辑的局限性,随后兴起的计算智能开辟了人工智能研究的新途径,于是有人认为按照可否应用经典数理逻辑,人工智能研究可分为逻辑的和非逻辑的 2 大类. 这是一种消极的退却,积极的态度应该是进一步探索人工智能新的数理逻辑基础. 因为经典数理逻辑是一种狭义的逻辑,广义地讲,思维是客观世界的反映,智能是思维的能力,逻辑是思维的法则. 当把思维的语义内容抽去后,留下来的语法规则就是逻辑. 因此逻辑在思维和智能中无处不在.

逻辑学是一门古老而又充满活力的学科,早在 2 300 多年前亚里士多德就集前人之大成,把逻辑从哲学中分离出来,建立了第一个演绎推理系统,创立了古希腊逻辑. 后来黑格尔等人把它推向完善,系统总结了推理中的各种概念和规则,使演绎推理有章

收稿日期:2006-02-02.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60273087,60373016);国家高技术研究发展计划项目(863 计划,2002AA412020,2004AA113030);北京市自然科学基金资助项目(4032009).

可循,形成了欧洲中世纪的古典逻辑.从研究对象上分,逻辑学粗分为形式逻辑和辩证逻辑 2 部分:形式逻辑研究具有内在同一性和外在确定性的概念、命题之间的必然联系;辩证逻辑研究具有内在矛盾性和外在不确定性的概念、命题之间的必然联系.传统的逻辑都是用自然语言描述的,它便于人的理解和掌握,但自然语言的多义性也影响了逻辑学的严谨性和在机器中的应用.

1 第 1 次数理逻辑革命

290 多年前开始的第 1 次数理逻辑革命,历时 250 余年,使逻辑学的描述发生了质的改变,由自然语言描述过渡到数学语言描述. 18 世纪德国大数学家莱布尼茨提倡用“通用符号和推理演算”改造逻辑学,标志着这场革命的开始;到 20 世纪初德国大数学家弗雷格和希尔伯特、皮亚诺等人共同建立命题演算和一阶谓词演算,标志经典数理逻辑已经初步形成;随后出现的公理集合论、递归函数论、证明论和模型论,标志经典数理逻辑已经成为一个完善的理论体系[1-2],简称为“两算四论”.

经典数理逻辑形成的原动力主要来自数学中的公理化运动.这个运动试图从少数公理出发,根据演绎规则推导出数学定理,从而把整个数学构造成一个严格的演绎大厦,一劳永逸地证明数学体系的可靠性和完备性,其结果就是逻辑研究的高度数学化,这表现在:1) 逻辑专注于研究在数学的形式化过程中提出的问题;2) 逻辑采纳了数学的方法论,像数学那样用严格的形式证明去解决问题.经典数理逻辑用精确的数学方法研究形式逻辑,彻底改变了古典形式逻辑的哲学式研究和论述风格,将形式逻辑的概念、规则和推理过程的自然语言描述,转化为抽象的符号语言描述和符号演算,把推理的形式和内容严格地区分开来,使形式逻辑的表达有了严谨的数学形式,使推理的全过程有了严格的数学保证,这大大促进了形式逻辑研究的深入、完善和广泛应用,并对整个近代科学特别是数学、哲学、形式语言、计算机科学和人工智能产生了重要的影响.经典数理逻辑实现了大部分形式逻辑的数学化,在描述真理的绝对性和永恒性方面十分有效.现在数理逻辑不仅被公认为数学的一个重要分支,不少人还认为它是整个数学的基础,数学只不过是应用数理逻辑而已.经典数理逻辑的创立适应了信息处理机械化时代的需求.

2 经典数理逻辑的局限性

数学形态的经典数理逻辑便于机器理解和执行,因而促进了人工智能的诞生和早期发展,但后来的事实证明,许多现实世界的问题根本无法用经典数理逻辑解决.原因在于经典数理逻辑的立论基础是“封闭全息的确定性世界假设”,其中排除了一切形式的不确定性、矛盾和演化,这导致了经典数理逻辑的“三律一性”:

1) 二值律,$p \in \{0,1\}$ 命题的真值域是二值的,1 个命题要么为真,要么为假;

2) 矛盾律,$\sim p \wedge p = 0$ 命题和它的否定命题不能同时为真;

3) 排中律,$\sim p \vee p = 1$ 命题和它的否定命题必有 1 个为真;

4) 封闭性,推理的证据完全已知且固定不变.

“三律一性”决定了经典数理逻辑的适用范围是解决确定性世界中的封闭全息的二值类推理问题,这是对现实世界的一种近似描述,只能在理想化的确定性世界中(如数学定理证明)存在,所以称经典数理逻辑为刚性逻辑[3] (rigid logics). 许多数学家和数理逻辑学家并不认同经典数理逻辑存在局限性,他们认为:1) 理论上已经成熟的经典数理逻辑,可以圆满地解决确定性世界中的各种逻辑问题;2) 不确定性由认识不充分引起,应该由各个学科自己努力去解决,不在逻辑的研究范围之内.因此片面地认为,拥有“两算四论”的数理逻辑已经尽善尽美,“可以放之四海而皆准”,反对新的数理逻辑革命,并用“两算四论”的标准去评价或责难一些充满革命气息的数理逻辑新思想,几十年来模糊逻辑的遭遇就是一个佐证.反对的意见主要集中在一点:数理逻辑是严格精确和确定的理论,它容不得不确定性、矛盾和演化存在,也就是说,在不确定性、矛盾和演化中没有逻辑规律可言.这背离了信息处理智能化时代的需求.

3 第 2 次逻辑学革命

科学的发展是不以人们的主观意志为转移的. 20 世纪中叶前后,由于计算机科学和人工智能深入发展的需要,数理逻辑开始进入第 2 次革命时期,主要表现是越来越多的人试图从各个方面突破经典数理逻辑的“三律一性”,提出了许多有别于经典数理逻辑的非经典数理逻辑.例如:

第 1 个突破的方向是命题的{0,1}真值域. 1920 年 J. Lukasiewicz 就提出了包含不分明(vague)状态 u 的 Lukasiewicz 三值逻辑,以后又出现了包含不可知状态 u 的 Kleene 强三值逻辑和计算三值逻辑[2,4]. 1965 年 L. A. Zadeh 首先发现并阐明了模糊集合的概念[5],据此他提出了模糊逻辑,将模糊命题的真值域拓展为[0,1]区间. 在[0,1]上还有人提出过概率逻辑[6-7]. 命题真值域的连续可变性表明,在逻辑中需要引入真值柔性,以描述命题真值的不确定性.

纵观{0,1}上的二值逻辑,{0,u,1}上的三值逻辑和[0,1]上的模糊逻辑和概率逻辑,它们都是一维空间的线序逻辑. 为了描述多维偏序空间和伪多维偏序空间的逻辑规律,又出现了多维偏序逻辑,如 $\{0,1\}^2$ 上的四值逻辑,$\{0,1\}^3$ 上的八值逻辑[8],$[0,1]^2$ 上的灰色逻辑[9]和区间逻辑[10],$[0,1]^3$ 上的未确知逻辑[11]等. 还有一些问题涉及无定义状态或真值的附加特性,它们都超出了多维偏序空间,叫超序逻辑,如$\{\perp\}\cup\{0,1\}$上的超序二值逻辑即 Bochvar 三值逻辑,$[0,1]<a,b,c>$上的云逻辑[12]等. 这些逻辑都涉及到命题真值域空间维数的多样性,它们是正整数维偏序空间. 混沌科学涉及到分维偏序空间,其中的逻辑规律应该用分维偏序逻辑学来描述[3,13]. 命题真值域空间维数的连续可变性表明,在逻辑中需要引入维数柔性,以描述真值域空间维数的不确定性.

第 2 个突破的方向是命题连接词的运算模型和相应的推理规则集. 一部分非经典数理逻辑沿用了经典数理逻辑中的命题连接词,但赋予了新的含义,因而调整了相应的推理规则集. 如荷兰数学家 Brouwer(1981 - 1966)在 20 世纪 20 年代创立了直觉主义逻辑,他重新定义了命题连接词,在推理规则集中排除了排中律$\sim p\vee p$和$(p\to q)\vee(q\to p)$,$\sim\sim p\to p$等规则[2]. 在三值逻辑和模糊逻辑中,排中律也不成立. 三角范数理论还发现了可连续变化的命题连接词运算模型,命题连接词运算模型的不唯一性被揭露出来. 这些研究已触及到命题连接词运算模型的连续可变性,它表明在逻辑中需要引入关系柔性,以描述命题间关系的不确定性.

第 3 个突破的方向是引入新的量词. 在标准逻辑中只有约束个体变元的全称量词 $\forall$和存在量词 $\exists$,以后又引入了唯一存在量词 $\exists!$,这些量词的逻辑意义都是刚性的. 为了描述真实世界中的不确定性约束,一部分非标准逻辑引入了新的量词和相应的推理规则,如模态词 □和 ◇,范围量词 $\S$ 等[14-15]. 模态词 □和 ◇还可派生出多种含义,如时态逻辑,动态逻辑,知道逻辑等[16-17]. 还有修饰模糊谓词的量词,如"十分","不太"等,它们的实际作用是影响模糊谓词在个体变域 U 上的真值分布,改变其过渡特性的急缓程度. 这些研究已经触及到了量词含义的连续可变性,它表明在逻辑学中需要引入程度柔性,以便描述对命题约束程度的不确定性.

第 4 个突破的方向是引入新的推理模式. 在标准逻辑中只有演绎推理模式,它是从一般到特殊的推理过程,即从已知的一般性知识(前提)出发,根据推理规则推出某个特殊性知识(结论). 如果这个结论是事先不知道的,如一个待证的定理,就获得了一个"新"的知识. 但严格地讲,这个特殊性的"新"知识已经逻辑地蕴含在已知前提和推理规则之中,所以演绎推理模式只能解决如何有效地运用已有知识的问题,它不能真正发现新的知识. 如果逻辑中包含了演绎推理以外的其他推理模式,则属于非标准逻辑. 在思维中使用最多也最基本的推理是归纳推理模式,它是从特殊到一般的推理过程,能根据某些已知的特殊性知识,归纳出未知的一般性知识. 如果这些特殊性知识已经直接或间接包含了未知的一般性知识的所有可能情况,则归纳推理的结论完全有效,是完全归纳推理,仍然属于形式逻辑;否则结论可能有效,也可能无效,是不完全归纳推理. 在人类思维中还经常使用类比推理模式和假设推理模式,类比推理是从特殊到特殊的推理过程,它根据相似性原理,由一个已知系统具有某些属性,猜想另一个未全知系统也具有这些属性,类比的结论可能有效,也可能无效,需要客观验证[18]. 假设推理模式是由于推理需要的前提知识不完全,不得不根据经验或信念加以补充,进行含有不一定可靠的假设性知识的推理,待获得新的知识或推出矛盾时再行调整[19-28]. 在信息不完全的情况下,推理必然会出现非单调性、次协调性和开放性. 不完全归纳推理、类比推理和假设推理模式,非单调推理、次协调逻辑和开放逻辑,都是能真正发现和完善新知识的逻辑,属于辩证逻辑. 在辩证逻辑中,上述推理模式的差别不是绝对的,它们可以在一定条件下相互转化. 这些研究已经触及到了推理模式的连续可变性,它表明在逻辑学中需要引入模式柔性,以便描述推理模式的不确定性.

如此全方位地对一个理论提出挑战,这是逻辑

学自诞生以来从来没有过的,更值得注意的是人们提出这些非经典数理逻辑时,都有着很强的应用背景,这充分显示出时代要求数理逻辑进一步革命,尽快从"封闭全息的确定性世界假设"和"三律一性"中解脱出来,以适应智能化的时代需求.

4 第 2 次数理逻辑革命的总纲领

造成经典数理逻辑局限性的原因有许多:

首先是逻辑学自身发展水平的限制.任何一个理论都有一个从简单到复杂的发展过程,开始由于缺乏理论基础和研究经验,不得不把问题高度简化,建立相应的初级理论,然后再逐步放宽约束条件,一步步丰富提高理论的水平,数理逻辑的发展也不例外. 200 多年前,为了方便实现古典形式逻辑的数学化,不得不用"封闭全息的确定性世界假设"和"三律一性"来缩小问题的范围,排除客观世界中处处存在的各种矛盾和不确定性,首先解决是非分明、信息完全、没有歧义和变化的确定性问题.所以经典数理逻辑只是在一定程度上近似地反映了客观世界逻辑规律的初等逻辑,第 2 次数理逻辑革命则是要建立能处理各种矛盾和不确定性问题的中等逻辑和高等逻辑.但是有的人看不到这一点,把经典数理逻辑中的某些规律绝对化,如"命题必须是可以判定真假的语句"、"命题连接词的运算模型必须唯一确定"、"矛盾律是逻辑学的基石"、"有效的推理必须是封闭和单调的"等.

其次是近 300 年来人们长期面对的是相对简单的问题,允许把它抽象为一个封闭、全息、静态的二值问题.经典数理逻辑是适应数学、力学、天文、物理、化学等类学科的需要而产生的,在后来出现的相对论、量子力学、分子生物学、原子能、计算机和空间技术的研究中得到了进一步的印证.这些系统大都是无生命的机械系统,其中的事物大多是界限分明的清晰事物,允许人们对它做出非此即彼的判断,进行精确的测量,并通过忽略次要因素和必要的近似达到"全部信息已知"的确定状态,因而适于用经典数理逻辑进行描述和处理.但在近 50 年来日益重要的生命科学、社会科学、思维科学、智能科学、生态系统、气象系统和各种关于复杂性的学科中,研究的对象大多是没有明确界限的模糊事物或混沌现象,既不允许对它做出非此即彼的判断,也无法进行精确的测量和准确的预测,它们本身还在不断地演化,经典数理逻辑对它们失去了效力,用整体的观点研究复杂性是现代科学发展新阶段的特点,是当今科学体系历史性变革的标志[29].在这样的大背景下,边界不分明的模糊对象、不确定性、混沌和演化,以多种形式普遍、经常地出现在学科的前沿,要求给出系统的说明和处理,建立与之相适应的科学理论体系和方法论框架[30].数理逻辑面临着新的发展需求,必须尽快从"封闭全息的确定性世界假设"和"三律一性"中解脱出来.

更主要的原因是受到当时占主导地位的自然观的影响. 17 世纪前,人类普遍认为自然界的一切都是神的意志和安排,上帝主宰一切,人唯一能做的是屈从神的意志和安排. 18 世纪后,以伽利略 - 牛顿 - 爱因斯坦为代表,发现了自然变化的客观规律,人类掌握和利用这些规律可以征服自然,这为近代科学技术体系的形成奠定了思想和理论基础.到 20 世纪中叶,近代科学技术体系基本形成,它们共同的基础是"还原论"和"因果决定论",认为世界的发展变化是由一些简单和确定的规律控制的,同样的原因会得到同样的结果,时间是可逆的,不确定性是一种无知、近似或错觉.用数学的语言说,不确定性是由于近似和边界条件不充分引起的,它会随着精确化和边界条件的完善而消失.所以科学家把精确性和确定性紧紧地联系在一起,认为足够的精确可以带来完全的确定.坚信在科学面前一切都应该精确确定,一切都能够精确确定,只是时间迟早的问题.科学方法论认为,建立在定量化和确定化基础上的数学化是各学科现代化的标志,精益求精更是科学家的美德.在这种思想影响下,愈来愈多的人认为只有精确确定的方法才是科学的,不确定的方法是不科学的或找到科学方法之前的权宜之计.经典数理逻辑是数学化的典型,它自然要排斥一切不确定性,并以真、假的完全对立为"严格"和"精确"的标志,这是时代造成的思想局限性.

20 世纪中叶以来,以普利高津(I Prigogine)等人为代表,发现了非平衡物理学和不稳定系统动力学的规律,确立了以演化为中心的新自然法则[13].新自然法则认为:自然界处在不断的演化过程中,处处存在涨落、不稳定性、多种选择和有限可预测性,客观规律仅仅表达了可能性或概率,时间是不可逆的,不确定性是常规,确定性是理想化或近似,所以我们应该将演化置于对自然认识的中心位置.这就是说,牛顿、爱因斯坦确立的老自然法则只是对客观规律的一种近似描述,在它基础上建立起来的"还原论"和"因果决定论"也是一种近似有效的理论.在处处存在涨落和

演化的自然界,追求绝对的精确和确定是不可能的,也是不科学的,人类需要用整体的和发展变化的自然观去认识和改造自然,需要重新审视近代科学技术体系和与之相联系的科学方法论的有效范围.新自然法则为以研究复杂性为主的新兴的现代科学技术体系的出现奠定了思想和理论基础.

新自然法则要求不再回避或忽略不确定性,而是正面研究各种不确定性和演化过程,重视时间之矢.20 世纪 80 年代中期出现人工智能理论危机的根本原因是人们发现:长期以来人工智能赖以存在的经典数理逻辑无法描述各种矛盾和不确定性,而现实世界的许多智能模拟问题又不允许忽略这些矛盾和不确定性.数理逻辑的"万能"和人工智能的"无奈",把人工智能学科推到了生死存亡的绝境.我们认为人工智能学科既不能因此而消亡,也不应该放弃数理逻辑这个重要的理论基础,出路只有一条,那就是数理逻辑与时俱进,突破"三律一性",进行第 2 次革命,以适应新兴的现代科学技术体系发展的需要.

目前,整个科学技术体系正处在从建立在"老自然法则"基础上的"近代体系",向建立在"新自然法则"基础上的"现代体系"过渡的转折时期,人们的宇宙观和方法论正在快速地发生质的改变,第 2 次数理逻辑革命正是在这样的大时代背景下爆发的.也就是说,在数理逻辑研究中正在发生"由排斥各种矛盾和不确定性,到精确研究各种矛盾和不确定性"的根本转变.

由此可见,第 2 次数理逻辑革命的总纲领是促使数理逻辑由"排斥一切矛盾和不确定性"的刚性逻辑向"包容各种矛盾和不确定性"的柔性逻辑学(flexible logics)过渡.柔性逻辑学将继承数理逻辑中"通用符号和推理演算"的数学化思想,但突破了刚性逻辑的"三律一性",是可包容各种矛盾和不确定性的、面向真实世界的、灵活的、自适应的逻辑学,它具有真实世界中不可忽视的一切属性,如多值性、相对性、时变性、演化性、开放性、不确定性、不完全性、非单调性、次协调性和多模式性等.柔性逻辑学将在描述真理的相对性和非永恒性方面发挥重要作用,实现部分辩证逻辑的数学化[3].

5　第 2 次逻辑学革命的具体纲领

第 2 次数理逻辑革命的总纲领是建立柔性逻辑学,实现部分辩证逻辑的数学化,但如何一步步实现这个总纲领呢?经典数理逻辑的理论框架是刚性的,它的各种逻辑学要素都固定不变.柔性逻辑学的理论框架需要将各种逻辑学要素柔性化,以包容各种矛盾和不确定性.

逻辑学告诉我们,研究辩证逻辑的基本方法是将具有内在矛盾性和外在不确定性的概念、命题之间的关系,通过划分和时空定位,将其转化为形式逻辑的概念、命题之间的关系.这就是说:1)虽然在绝对意义上的辩证逻辑数学化也许是不可能实现的,但通过某种划分和时空定位,可以在相对意义下实现部分辩证逻辑的数学化;2)由于划分和时空定位的方法不同,数理辩证逻辑的形态将是千变万化的.现在国内外学者提出的数十种不同形态的非经典数理逻辑,就是一个有力的证明,它们本质上都是试图在某个层次或侧面研究处理矛盾和不确定性问题的逻辑规律.

但是,从《哲学逻辑手册》[31]可以看出,许多逻辑是被孤立研究的,它们互不相容.为了推动第 2 次数理逻辑革命快速全面的发展,现在需要改变逻辑学的研究风格.受到泛代数的启发,提出了研究柔性逻辑学的新思路,就是从高层入手抽象出逻辑学的一般规律,在经典数理逻辑的基础上,建立能包容各种矛盾和不确定性的泛逻辑学理论框架,它最小的不变内核是刚性逻辑,各种柔性逻辑能根据需要自由伸缩变化在其中,但它们都必须能够退化到刚性逻辑,见图 1.也就是说,尽管泛逻辑学最小的不变内核仍然是刚性逻辑,但它在核外已经形成了允许各种矛盾和不确定性存在的柔性逻辑学要素.并不否定对真实世界的柔性逻辑规律进行分门别类的专门研究,专门研究确实有利于集中精力搞清一类规律,但如果没有统一的宏观理论指导,也容易造成片面性,使各种柔性逻辑互不相容.

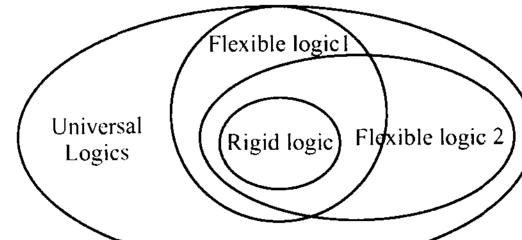


图 1　泛逻辑学对矛盾和不确定性具有最大的包容性

Fig. 1　Universal Logic has the maximum capability of containing contradictions and uncertainties

在分析现实世界中需要包容的各种矛盾和不

确定性的基础上,根据发现的逻辑学 4 要素,提出了第 2 次数理逻辑革命的具体纲领[3].

5.1 建立描述命题真值不确定性的柔性真值域

在刚性逻辑中,命题必须是可以判定真假的语句,命题的真值域只能是{0,1}.在柔性逻辑中这种传统思想需要突破.柔性命题是一个可以判定真假度的语句,真值域为连续系统[0,1],它可包容命题真值的不确定性.归纳现有的各种逻辑后发现,柔性真值域 W 的一般形式是任意的多维超序空间:

$$W = \{\perp\} \cup [0,1]^n < \alpha >, n > 0,$$

式中:[0,1]是 W 的基空间,它可以退化为离散值空间或{0,1};n 是 W 的空间维数,一般是 $n = 1, 2, \cdots$,但不排除 $n > 0$;⊥表示无定义或超出讨论范围,可以没有;α是有限符号串,可是空串 ε,它代表命题或谓词的附加特性.

5.2 建立描述命题间关系不确定性的柔性连接词运算模型

在刚性逻辑中,命题连接词运算模型是唯一确定的;在柔性逻辑中,这种传统思想需要突破.已经根据模糊测度的逻辑性质,研究得到了在 $W = [0,1]$上定义的泛非、泛与、泛或、泛蕴含、泛等价、泛平均和泛组合等命题连接词的运算模型簇,它可以描述柔性命题之间关系的不确定性(又称为关系柔性).关系柔性包括广义相关性(用广义相关系数 $h \in [0,1]$来刻画)、测度误差(用误差系数 $k \in [0,1]$来刻画)和偏袒性(用偏袒系数 $p \in [0,1]$来刻画)等.已经在 h, k 基础上建立了可交换的柔性命题逻辑,在引入 p 后可以得到不可交换的柔性命题逻辑,它们都属于命题泛逻辑学.

可交换的柔性命题逻辑是整个柔性逻辑的奠基石,因为从理论上讲它已经在命题真值域和命题连接词运算模型这 2 个最基本的逻辑学要素上实现了柔性化,可以包容有关的矛盾和不确定性.从实际上看已经证明,可交换的柔性命题逻辑已包容了常见的各种不确定性推理模型,如基于概率测度的推理模型(是 $h \in [0.5,1)$, $k = 0.5$; $h = 1$, $k \in (0,1)$时的特例)、基于信任测度的推理模型(是 $h \in [0.5,1)$, $k \in [0,0.5]$; $h = 1$, $k \in (0,1)$; $h \in (0.75,1]$, $k = 1$ 时的特例)、基于似然测度的推理模型(是 $h \in [0.5,1)$, $k \in [0.5,1]$; $h = 1$, $k \in (0,1)$; $h \in (0.75,1]$, $k = 0$ 时的特例)、基于必然测度的推理模型(是 $h = 1$, $k \in (0,1)$; $h \in (0.75,1]$, $k = 1$ 时的特例)、基于可能测度的推理模型(是 $h = 1$, $k \in (0,1)$; $h \in 0.75,1]$, $k = 0$时的特例)和基于 Zadeh 算子的经典模糊逻辑(是 $h = 1$, $k \in (0,1)$时的特例).目前正在研究将这些运算模型拓广到偏序空间和超序空间的拓序规则,利用这些规则可以生成各种命题逻辑.在柔性命题逻辑的基础上,可以建立柔性谓词逻辑.

5.3 建立描述约束程度不确定性的柔性量词运算模型

在经典数理逻辑中只有约束个体变元范围的全称量词 ∀和存在量词 ∃,在模态逻辑中有约束个体变元范围的必然量词 □和可能量词 ◇,在模糊逻辑中有约束个体变元指称范围的模糊量词 $\oint$在泛逻辑学中,将系统研究定义在多维超序空间 $W = \{\perp\} \cup [0,1]^n < \alpha >$, $n = 1, 2, 3, \cdots$上的标志命题真值阈元的阈元量词 $♂^k$,标志假设命题的假设量词 $\$^k$,约束个体变元范围的范围量词 $\oint^\alpha$,指示个体变元与特定点的相对位置的位置量词 $♀^\alpha$ 和改变谓词真值分布过渡特性的过渡量词 $\int^\alpha$等.k,α表示量词的约束条件,α的一般形式是 $x * c$,其中:x 表示被约束变元,$*$表示约束关系,c 表示约束程度值,它刻画了量词的程度柔性.例如:

阈元量词 $♂^k$ 指出后面命题真值的误差状况,$k \in [0,1]$的值表示阈元的大小.

假设量词 $\$^k$ 标志后面的判断是根据假设做出的,$k \in [0,1]$表示假设的可信程度.

范围量词 $\oint^{x \cdot c}$ 把谓词的个体变元 x 约束在一定的范围内,$c \in [0,1] \cup \{+, !\}$表示 x 论域 D 的全部或部分:$c = 1$ 表示 x 论域 D 的全部,与传统的全称量词 $\forall x$ 相当;$c \geq 0.5$ 表示 x 论域 D 的大部分,与传统的必然量词 $\Box x$ 相当;$c < 0.5$ 表示 x 论域 D 的小部分,与传统的可能量词 $\Diamond x$ 相当;$c > 0$ 表示在 x 论域 D 中存在,与传统的存在量词 $\exists x$ 相当,用特殊符号 $\oint^{x \cdot +}$ 表示;传统的唯一存在量词 $\exists !\, x$ 用特殊符号 $\oint^{x \cdot !}$ 表示.

位置量词 $♀^{x * d}$把 x 的论域 D,按相对于指定点 $d \in D$ 的位置不同,划分为 3 部分:$x < d$, $x = d$, $x > d$,即 $* \in \{<, =, >\}$.例如时序逻辑的"过去,现在和将来";空间逻辑的"左,中,右".

过渡量词 $\int^{x \cdot c}$ 将改变后面谓词真值在 x 轴上分

布的过渡特性,$c \in R_+ : c > 1$ 表示模糊集合的边缘将被锐化; $c < 1$ 表示模糊集合的边缘将被钝化; $c = 1$ 表示模糊集合的边缘保持不变.

这些量词都是柔性的,称为程度柔性,通过柔性量词可以描述各种约束条件的不确定性.

5.4　建立描述推理过程不确定性的柔性推理模式

在经典数理逻辑中只有演绎推理,它是单调的.在柔性逻辑中有在上述 3 要素基础上定义的演绎推理,归纳推理,类比推理,假设推理,发现推理,进化推理等推理模式.由于柔性命题连接词和柔性量词的存在,这些推理模式不是决然分开的,它们可以在一定条件下相互转化,由量变引起质变,称这种柔性为模式柔性,它可以描述推理模式的不确定性.

由于泛逻辑学中允许真值柔性、维数柔性、关系柔性、程度柔性和模式柔性的存在,可以描述矛盾的对立统一及矛盾的转化过程,描述认识的发生、发展和完善的全过程,这为辩证逻辑的数学化提供了可能性.

5.5　通过坐标变换可以得到其他真值域上的逻辑

W 的基空间 $[0,1]$ 有各种变种,如 $[0,100]$, $[0,b]$, $[0,\infty]$, $[-1,1]$, $[-5,5]$, $[-b,b]$, $(-\infty,\infty)$, $[a,b]$ $(b > a \geq 0)$ 等,通过坐标变换可以把 $[0,1]^n$ 中的各种模型和规律变换到它的各种变种中去,例如:

单向有限扩展 $[0,1] \to [0,b]: x' = bx$,中元 $e' = b/2$; 单向无限扩展 $[0,1] \to [0,\infty]: x' = x/(1-x)$,中元 $e' = 1$; 任意有限扩展 $[0,1] \to [a,b]: x' = (b-a)x + a$,中元 $e' = (b+a)/2$; 双向有限扩展 $[0,1] \to [-b,b]: x' = 2bx - b$,中元 $e' = 0$; 双向无限扩展 $[0,1] \to (-\infty,\infty): x' = (x-0.5)/x(1-x)$,中元 $e' = 0$.

5.6　建立柔性逻辑学的"新四论"

在经典数理逻辑中,最早出现的"两算",它们是从思维规律中抽象出来的可以在推理中直接使用的逻辑学,然后在"两算"的基础上进一步抽象,才有了逻辑学的数学基础"四论",这是符合人们的认识规律的.泛逻辑学研究的关键是建立柔性逻辑学,其中有许多新的辨证逻辑规律等待去发现,其研究的方法也应该是这样的:首先从现实世界中抽象出柔性命题的真值域、柔性命题连接词的运算模型簇和柔性量词的运算模型簇,根据这些运算模型簇证明它们的逻辑性质,建立可以在推理中直接使用的柔性命题逻辑和柔性谓词逻辑,然后再进一步抽象研究它们的数学理论."四论"为经典数理逻辑奠定了严格的数学基础,保证了它的可靠性和完备性.数理逻辑柔性化后,引入了表示各种不确定性的柔性逻辑要素,作为逻辑学数学基础的"四论"也要发生相应的变化,所以建立与柔性逻辑学相适应的"新四论"是一个十分重要的任务.应该特别注意到,集合、逻辑和代数是一个事物的 3 个方面:集合是事物的外延;逻辑是事物的内涵;代数则描述了集合和逻辑的共同数学性质,它们是三位一体的关系.一种特殊的逻辑,必然有一种特殊的集合和特殊的代数与之对应,充分利用这种三位一体的关系,可以加快集合、逻辑和代数理论的协同发展.

近 10 年来,在国际上也出现了泛逻辑学的研究[32],他们的方法基于抽象代数,即把逻辑中的命题连接词看成是具有某些性质的抽象的代数运算符号,不考虑它们的具体运算模型,从而得到相应的抽象逻辑,其研究的重点是抽象逻辑的数学性质.抽象逻辑是不能直接应用的,如果要在具体的推理中应用这些抽象逻辑,还需要寻找满足这些性质的代数运算符号的具体逻辑运算模型.

一般认为,这 2 种研究逻辑学一般规律的方法正好是互补的,该方法是自底向上,用外延的观点研究泛逻辑学,强调包容;国际上的方法是自顶向下,用内涵的观点研究泛逻辑学,强调共性.

由于柔性逻辑学已经在命题真值的连续可变性、信息的不完全性和命题真值空间的高维性等方面突破了经典数理逻辑,许多新的逻辑规律涌现出来,如在柔性命题逻辑中,常见的命题连接词运算模型 $\sim p$, $(p \wedge q)$, $(p \vee q)$, $p \to q$ 都是算子簇;而常见的公式 $\sim\sim p = p$, $\sim p \wedge p = 0$, $\sim p \vee p = 1$, $\sim p = p \to 0$, $p \to q = \sim p \vee q$, $\sim q \to \sim p = p \to q$, $\sim(p \wedge q) = \sim p \vee \sim q$, $\sim(p \vee q) = \sim p \wedge \sim q$ 和分配律都只是在特殊条件下成立;还增加了泛平均和泛组合等命题连接词.这些都为从泛代数出发研究泛逻辑提供了丰富的材料,所以认为当前应该重视自底向上的研究,特别是柔性命题逻辑的研究.

6　结束语

从上面的讨论已经明确:第 1 次数理逻辑革命的总纲领是突破古典形式逻辑依靠"自然语言"的局限性,实现形式逻辑的"数学化",建立依靠"通用符号和推理演算"的数理逻辑;第 2 次数理逻辑革命的总纲领是突破经典数理逻辑"排斥一切矛盾和不确定性"的局限性,实现数理逻辑由"刚性"向"柔性"的

转化,建立能“包容各种矛盾和不确定性”的柔性逻辑. 泛逻辑学则是能够包容刚性逻辑和柔性逻辑的统一而又开放的逻辑学理论框架.

在第 2 次数理逻辑革命中,最重要也是最基础性的工作是建立柔性命题逻辑,然后才能在它基础上建立柔性谓词逻辑和柔性逻辑的“新四论”.

已经根据纲领建立了柔性命题逻辑学,它可包容或生成各种已知的和有可能存在而目前尚未被人提出的命题逻辑,这表明泛逻辑学的思想和研究纲要是科学的,也是可以逐步被具体实现的.

科学的理念是黑暗中的灯塔,它照亮了人类文明之舟的前进方向.

新自然法则将指引人类走向更高级的科学文明,一切科学工作者应该积极投身到这场有划时代意义的伟大革命中去.

参考文献:

[1] 莫绍揆. 数理逻辑概貌[M]. 北京: 科学技术文献出版社,1989.
MO Shaokui. Survey of mathematical logic[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing, 1989.

[2] 张家龙. 数理逻辑发展史 ——从莱布尼兹到哥德尔[M]. 北京: 社会科学文献出版社,1993.
ZHANG Jialong. Phylogeny of mathematical - from Leibnitz to Godel[M]. Beijing: Social Science Academic Press, 1993.

[3] 何华灿, 王 华, 刘永怀, 等. 泛逻辑学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
HE Huacan, WANG Hua, LIU Yonghuai, et al. Universal logics principle [M]. Beijing: Science Press, 2001.

[4] 王元元. 计算机科学中的逻辑[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
WANG Yuanyuan. Logics in computer science[M]. Beijing: Science Press, 1989.

[5] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965(8): 338 - 357.

[6] KEYNES J M. A treatise on probability[M]. London: McMillan, 1921.

[7] REICHENBACH H. The theory of probability[M]. Berkeley: The University of California Press, 1949.

[8] 罗铸楷, 胡 谋, 陈廷槐. 多值逻辑的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
LUO Zhukai, HU Mou, CHEN Tinghuai. Theory and application of multi-valued logic[M]. Beijing: Science Press, 1982.

[9] 王清印. 灰色数学基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
WANG Qingyin. Basis of grey mathematics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.

[10] 蔡经球, 郭 红. IBARM:一种基于区间表示的不精确推理模型[J]. 计算机科学, 1991, 18(1): 21 - 24.
CAI Jingqiu, GUO Hong. IBARM - A uncertain reasoning model based on interval representation [J]. Computer Science, 1991, 18(1): 21 - 24.

[11] 刘开第, 吴和琴, 王念鹏, 李惠娟. 未确知数学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
LIU Kaidi, WU Heqin, WANG Nianpeng, LI Huijuan. Uncertain mathematics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1997.

[12] 李德毅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15 - 20.
LI Deyi. Subjection cloud and subjection cloud generator[J]. Computer Research and Development, 1995 32(6): 15 - 20.

[13] 伊利亚, 普利高津. 确定性的终结 ——时间、混沌和新自然法则[M]. 湛敏, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 1998.
YILIA, PRIGOGINE I. Termination of Certainty - Time, chaos and new law of nature[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing, 1998.

[14] 刘增良, 刘有才. 模糊逻辑与神经网络 ——理论研究与探索[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
LIU Zengliang, LIU Youcai. Fuzzy logic and NN - theoretical research and exploration[M]. Beijing: BUAA Press, 1996.

[15] 石生利, 刘叙华. 形式化模糊量词及推理[J]. 软件学报, 1993, 4(3): 8 - 14.
SHI Shengli, LIU Xuhua. Formal fuzzy quantifiers and reasoning[J]. Journal of Software, 1993, 4(3): 8 - 14.

[16] 赵沁平. 人工智能中的逻辑[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
ZHAO Qinping. Logics for artificial intelligence[M]. Beijing: Beijing University Press, 1990.

[17] 王克宏, 胡 篷, 石纯一. 情景逻辑与时态逻辑在知识处理中的应用[J]. 计算机科学, 1992, 19(2): 25 - 27.
WANG Kehong, HU Peng, SHI Chunyi. Application

of scene logic and tense logic in knowledge processing [J]. Computer Science, 1992, 19(2): 25 - 27.

[18] 伊　波,徐家福. 类比推理综述[J]. 计算机科学, 1991, 18(1): 1 - 8.
YI Bo, XU Jiafu. Survey of analogism[J]. Computer Science, 1991, 18(1): 1 - 8.

[19] 李英华,叶天荣,张虹霞. 计算机非传统推理导论[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
LI Yinghua, YE Tianrong, ZHANG Hongxia. Introduction to computer non-traditional reasoning [M]. Beijing: Space Navigation Press, 1992.

[20] 刘瑞胜,刘叙华. 非单调推理的研究现状[J]. 计算机科学, 1995, 22(4): 14 - 17.
LIU Ruisheng, LIU Xuhua. Research status of non-monotone reasoning[J]. Computer Science, 1995, 22(4): 14 - 17.

[21] 林作铨. 容错推理[J]. 计算机科学, 1993, 20(2): 18 - 21.
LIN Zuoquan. Fault-tolerance reasoning[J]. Computer Science, 1993, 20(2): 18 - 21.

[22] 林作铨,石纯一. 非单调推理十年进展[J]. 计算机科学, 1990, 17(6): 15 - 31.
LIN Zuoquan, SHI Chunyi. Progress of non-monotone reasoning in recent 10 years[J]. Computer Science, 1990, 17(6): 15 - 31.

[23] 李　未. 一个开放的逻辑系统[J]. 中国科学, 1992, A(10): 1 - 6.
LI Wei. An open logical system[J]. Science in China, 1992, A(10): 1 - 6.

[24] 李　未. 开放逻辑——一个刻画知识增长和更新的逻辑理论[J]. 计算机科学, 1992, 19(4): 1 - 8.
LI Wei. Open logic—a logical theory describing knowledge increasing and updating[J]. Computer Science, 1992, 19(4): 1 - 8.

[25] POOLE D. 缺席推理的逻辑框架[J]. 计算机科学, 1991, 18(3): 57 - 65.
POOLE D. Logical framework of absent reasoning[J]. Computer Science, 1991, 18(3): 57 - 65.

[26] 周生炳,戴汝为. 基于标记逻辑的非单调推理[J]. 计算机学报, 1995, 18: 641 - 656.
ZHOU Shengbing, DAI Ruwei. Non-monotone reasoning based on mark logic[J]. Computer Transaction, 1995, 18: 641 - 656.

[27] 金　芝,胡守仁. 限制推理及其应用[J]. 计算机科学, 1990, 17(6): 42 - 46.
JIN Zhi, HU Shouren. Restriction reasoning and application[J]. Computer Science, 1990, 17(6): 42 - 46.

[28] 贲可荣,王　戟,陈火旺. 关于不完全,不确定信息推理的基础探讨[J]. 计算机科学, 1993, 21(3): 1 - 6.
BEN Kerong, WANG Ji, CHEN Huowang. Fundamental discussion on incomplete and uncertain information reasoning[J]. Computer Science, 1993, 21(3): 1 - 6.

[29] 中国科学院《复杂性研究》编委会. 复杂性研究[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
China Academy of Sciences, Committee of Editor of research on complexity. Research on complexity[M]. Beijing: Science Press, 1993.

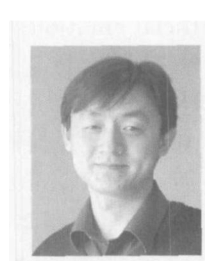
[30] 苗东升. 模糊学导引[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1987.
MIAO Dongsheng. Guide to fuzzy theory[M]. Beijing: China Renmin University Press, 1987.

[31] GABBAY D M, GUENTHNER F. Handbook of philosophical logic: 2nd ed[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001 - 2004

[32] BÉZIAU J Y. From paraconsistent logic to universal logic[J]. Sorites, 2001, 12(5): 5 - 32.

作者简介:

何华灿,男,1938 年生,教授、博士生导师,主要研究方向为人工智能基础及应用、泛逻辑学. 参与发起成立中国人工智能学会,先后任常务理事、副理事长. 人工智能基础专业委员会主任. 主持国家自然科学基金、省部级基金项目共 13 项,已发表论文 130 余篇.
E-mail: hehuac@nwpu.edu.cn



何智涛,男,1972 年生,工程师,硕士,毕业于北京航空航天大学,主要研究方向为计算机软件测试、信息理论、泛逻辑学. 参加国家自然科学基金项目 2 项、863 项目 1 项,已发表论文 5 篇.

王　华,女,1976 年生,毕业于西北工业大学,主要研究方向为人工智能及应用、泛逻辑学. 参加国家自然科学基金项目 1 项、省部级基金项目 1 项、863 项目 1 项,已发表论文 6 篇,参加编写专著《泛逻辑学原理》.