

# 基于广义相关系数的多 Agent 系统交互作用研究<sup>\*</sup>

王 澜 何华灿

(西北工业大学计算机学院 西安710072)

**摘 要** 对于多 Agent 系统(MAS)的研究逐渐成为人工智能和其它相关领域以及应用领域中研究的热点。而对多 Agent 之间交互作用的研究又是 MAS 研究领域中的一个重要方向。现有的研究成果主要致力于对交互作用中某个方面进行深入探讨,例如对协作(合作)关系、协商关系、竞争关系等方面的论述。但这些研究之间彼此独立、分散,有时甚至产生混淆。本文将泛逻辑中描述命题之间关联性的广义相关系数  $h$  引入到对 MAS 交互作用的研究中,形成交互作用的统一框架。提出表面上分散的各种作用关系,其实都可以根据 Agent 间的相关性纳入到这一框架之下,并对所有可能的交互作用进行分类与量化,为对其进行更深入的研究奠定了基础。同时,对研究较少的敌对关系进行了补充说明。

**关键词** 多 Agent 系统,交互作用,泛逻辑,广义相关系数

## Interaction of Multi-Agent Based on Generalized Correlativity

WANG Lan HE Hua-Can

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072)

**Abstract** The research on multi-agent system (MAS) has been more and more popular in artificial intelligence and related area. One of the important aspects of MAS research is the interaction among agents. The main effort of the interaction is focused on cooperation, negotiation and some other isolated region. In this paper generalized correlativity in universal logic is introduced to represent the interaction among agents. Proposed an uniform framework of the interaction and made a classification and quantification of it. We can describe the interaction more clearly and accurately by using this framework.

**Keywords** Multi agent system, Interaction, Universal logic, Generalized correlativity

## 1 引言

近年来,对于 Agent、多 Agent 系统(MAS)的研究逐渐引起人们的广泛关注。由于 MAS 可以用于模拟人类社会甚至整个生态环境中的众多现象,体现社会智慧,属于一种动态、开放的环境,因此得到越来越多的研究。而在对 MAS 的研究中,Agent 之间的交互作用(Interaction)则是其核心问题之一。

在现有的大量工作中,对 Agent 之间交互作用的研究主要集中在协作(Cooperation)、协商(Negotiation)、冲突解决(Conflict Resolution)、竞争(Competition)等方面。在研究上是彼此孤立,而在内容和方法上却又有所交叉。研究者仅仅是从自身的目的和应用出发,从不同的方面对交互作用中某一部分的概念、结构与实现等进行了深入探讨。

另外,现有对于多 Agent 交互作用的研究主要集中在两方面,一个是对合作/协作关系——多 Agent 的目标是共同完成某项任务——方面;另一个是对具有局部目标的自治 Agent 的行为的研究。同时对在这些过程中可能产生的冲突加以解决。然而,与人类社会类似,在 Agent 的交互作用中也应存在着对抗的关系,即一方的目标就是要限制、制约另一方的发展或生存。而纵观现有的研究,在这一方面,基本上是一片空白。

因此,使用一种更为清晰、条理的方法,对 Agent 交互作用的概念进行总括、区分,提出在更广泛意义上的 Agent 交互作用框架,将协作、竞争、对抗等概念包涵于一个整体的范围之内,对于更进一步的研究工作是十分必要的。而何华灿教授在其《泛逻辑学原理》中提出的用于描述命题之间关联性的广义相关系数  $h$ ,为这一工作的实现提供了有力的工具。利用该系数,就可以将多 Agent 系统中表面上分散的各种作用关系,根据其相关性,纳入到一个整体框架之下。

本文第2节介绍了现有的对 MAS 交互作用的研究以及分类,并指出其不足之处,第3节详细论述了泛逻辑学中广义相关系数  $h$  的概念及其意义,第4节将  $h$  引入到多 Agent 系统交互作用研究中,形成基于广义相关系数的交互作用体系框架,并进行分类,最后是结论。

## 2 多 Agent 交互作用概述

在对 Agent 间交互作用的研究中,研究者们主要致力于对协作现象的研究。在文[2]中,对协作的定义为:非对抗主体之间保持行为协调的一个特例。在文[7]中,将分布式问题求解系统中的协作分为三类:全协作系统、无协作系统和半协作系统。而在文[1]中,更进一步地根据主体之间目标的关系以及协同的程度,对多 Agent 协作进行了如下划分:

1. 完全协同型:MAS 中的主体都围绕一个共同的全局

<sup>\*</sup> 本文受国家自然科学基金项目(60273087)、北京市自然科学基金项目(4032009)和国家863计划(2002AA412020)资助。王 澜 博士生,研究方向是人工智能理论,多智能体系统。何华灿 教授,博士生导师,研究方向是人工智能和泛逻辑学。

目标,各主体并没有自己的局部目标,主体间全力以赴地进行合作。

2. 协同型:MAS 中的主体具有一个共同的全局目标,同时,各主体还有与全局目标一致的局部目标。

3. 自私型:MAS 中不存在共同的全局目标,各主体为自己的局部目标工作,而且目标之间可能会存在冲突。

4. 完全自私型:MAS 中不存在共同的全局目标,各主体为自己的局部目标工作,并且不考虑任何协作行为。

5. 协同与自私共存型:MAS 中即存在一些共同的全局目标,某些主体也可能还具有自己的与全局目标没有直接联系的局部目标。

除了协作关系,也有一些对非协作关系的探讨,其中大部分都是基于博弈理论。在文[8,9]中,研究了自治 Agent 在协商集为空和非空情况下(分别被称为非协作域和协作域)的协商理论模型。而在文[10,11]中,则分别讨论了在市场领域和空中交通管制领域中的非协作冲突解决。

由此可以看出,在众多的研究中,主要考虑了 Agent 间的协作,或者是竞争,以及在这一过程中可能产生的冲突。也就是说,在主体之间,要么为了共同的目标而进行协作;要么为了各自的目标,独立解决或是发生竞争。却并没有涉及 Agent 间的对抗情况,在这种状态下,Agent 的目标不再是合作解决问题,也不仅仅是解决因为自私行为而产生的冲突(一般这种冲突可通过协商、协调解决),而是要在一定程度上阻碍、制约,甚至是消灭对手,以扩张自己的生存空间。事实上,人类的交互一般在纯冲突与无冲突之间,或者说在纯协同与不协同之间<sup>[2]</sup>。如果说在某种程度上,对多 Agent 系统交互关系的研究是类似于对人类组织、团体、甚至是社会结构、关系的研究的话,那么其中必不可少地应该包括对于对抗范围内的研究。这在现实中也有大量的实例:如体育比赛的双方、市场竞争中的对手、军事中的敌对关系(如恐怖行为与反恐行为)等等,只是它们具有不同的对抗程度。因此,对 Agent 相互关系的研究应该更加广泛与全面。

此外,更重要的是,在实际的 Agent 交互中,其之间的关系应该是可以随着环境、条件、局部及全局目标的变化而进行改变的。比如当完全自私型方式下的多 Agent 系统无法完成某一任务时,它们可能会根据需要进行转变或协同与自私共存,甚至是协同型。那么,是否存在一个变化因子,能够反映由协作到独立,到竞争甚至是对抗(或者相反)这一变化过程呢?如果存在这一变化因子,就可以根据它来将 MAS 中的交互作用进行分类,及适当地量化,建立起交互作用的整体框架,以适应不同的应用与研究。这正是本文主要探讨的问题。

### 3 泛逻辑的关系柔性

为了更好地理解我们要引入的广义相关系数,在这里首先对泛逻辑的关系柔性进行简要的论述<sup>[3]</sup>。

对于传统的二值逻辑(经典逻辑),其命题真值域为{0,1}二值,这对于现在的科学研究产生了巨大的限制,因为现实中的逻辑不全是非真即假、非0即1的刚性逻辑。在现实世界中还存在着大量的不精确、不完全信息,仅仅靠二值逻辑是无法描述的,因而出现了三值逻辑、多值逻辑、Fuzz 逻辑等非经典逻辑,它们对命题真值域进行了扩充,出现了多种命题真值的表达方式,如将真值域扩展至[0,1],并引出了相应的与、或、非、等价、蕴涵等逻辑运算。

何华灿教授所提出的泛逻辑学(Universal Logics)是研究逻辑一般规律的科学。泛逻辑学认为,现实中的逻辑应该是能够反应不精确、不完全信息,以及相互关系与相互推理的柔性逻辑。在泛逻辑的研究中,不仅包括了命题真值域的柔性(其真值域为[0,1]),更重要的是包括了命题连接词的柔性,即关系柔性。

具体说来,关系柔性体现为广义自相关性和广义相关性。广义自相关性是由命题真值的测量误差引起的,用自相关系数  $k \in [0,1]$  来刻画,反映测量误差从最大可能的负误差到最大可能的正误差连续地变化,当  $k = 0.5$  时,真值测量误差为 0;另外,广义相关性由命题之间的关联性引起,用广义相关系数  $h \in [0,1]$  来刻画。相关系数  $h$  的变化,会影响逻辑运算的结果。在这里,我们主要讨论广义相关系数  $h$ 。

在何华灿教授所著《泛逻辑学原理》中指出,广义相关性包括相生相关( $h \in [0.5, 1]$ )和相克相关( $h \in [0, 0.5]$ )。相生相关是一种相互包容和共生的关系,由吸引力和排斥力相互作用而产生;而相克相关则是一种相互抑制和敌对的关系,由杀伤力和生存力相互作用而产生。其中, $h = 0.5$  是广义相关性的重要转折点,是相生关系和相克关系的分界。当  $h$  从 1 连续变化至 0.5 时, $X, Y$  之间的相生关系从最大相吸经过独立相关到达最大相斥;当  $h$  从 0.5 连续变化至 0 时, $X, Y$  之间的相克关系从最小相克经过僵持到达最大相克。在这一过程中,存在几个特殊的状态(以  $X, Y$  两个命题为例):

$h = 1$ :  $X, Y$  间最大相吸

$h = 0.75$ :  $X, Y$  间独立相关

$h = 0.5$ :  $X, Y$  间最大相斥或最小相克

$h = 0.25$ :  $X, Y$  间僵持

$h = 0$ :  $X, Y$  间最大相克

广义相关性的提出,使命题间的各种逻辑运算不再是单一的,而成为一个运算簇。根据  $h$  的不同,具有不同的运算结果。以下为泛逻辑中的一些基本逻辑运算公式:

泛与:

$$T(x, y, h) = \Gamma^h[(x^m + y^m - 1)^{1/m}]$$

泛或:

$$S(x, y, h) = 1 - \Gamma^h[(((1-x)^m + (1-y)^m - 1)^{1/m})]$$

泛蕴涵:

$$I(x, y, h) = \text{ite}\{1 | x \leq y; 0 | m \leq 0 \text{ 且 } y = 0 \text{ 且 } x \neq 0; \Gamma^h[(1-x^m + y^m)]\}$$

其中,  $m = (3 - 4h) / (4h(1 - h))$

当  $h$  取特殊值时,以上的逻辑运算简化为一些特殊的逻辑运算操作数,如模糊操作数、概率操作数、有界操作数等。对于泛逻辑运算进一步的探讨已超出本文的范围,在这里仅给出几个基本运算。进一步详情请参阅文[3]。

### 4 基于广义相关系数的 MAS 交互作用

利用泛逻辑这一有利工具,我们从广义相关性的概念出发,对多 Agent 间的交互作用进行系统研究,就可以将原先模糊、孤立、不完全,有时甚至是错误的关系梳理清楚,建立一个交互作用的整体框架,并对这些作用进行适当量化,以方便后续更深入的研究。

在 MAS 中,Agent 间的交互作用从大的方面来说,可以分为协作关系(Cooperation)与非协作关系(Noncooperation)。在协作关系中,Agent 之间可以是为了共同的全局目标进行合作,也可以是为了各自的局部目标独立解决,如果

仅依靠自身的能力无法解决时,将诉求协作解决;非协作关系时,不存在全局目标,Agent 之间相互竞争、制约,甚至对抗,在这一过程中,甚至会出现虚假信息等。相应于这两类的关系,其广义相关系数  $h$  分别为:

$h \in [0.5, 1]$  协作关系

$h \in [0, 0.5]$  非协作关系

在 Agent 间的交互作用中,协作部分(即  $h \in [0.5, 1]$ )是最受关注的。众多的实例研究、理论研究均是在这一范围内进行的。因此,对这一部分的广义相关系数应该进行更细致的划分与定位。在第2节中提到的一种分类方式是根据 Agent 间目标的关系以及协同程度进行的,将协作(即当  $h \in [0.5, 1]$ )分为了5种类型。在这里,我们可以根据广义相关系数对其进行粗略的量化,并与前述方法进行对比:

1.  $h = 1$ , 完全协同型;

2.  $h = 0.75$ , 协同与自私共存型,如某品牌连锁店之间的关系;

3.  $h = 0.5$ , 完全自私型,如 Internet 环境中的多 Agent 的应用,汽车自动驾驶;

4.  $0.75 < h < 1$ , 协同型;

5.  $0.5 < h < 0.75$ , 自私型。

另外,对于研究较少的 Agent 间的非协作关系,  $h \in [0, 0.5]$ , 也可以根据竞争的力度进行类似的量化:

6.  $h = 0.5$ , 相持型;

7.  $h = 0.25$ , 竞争型,充分扩大自己,抑制对方,如商业中的竞争,拍卖会;

8.  $h = 0$ , 完全敌对型,目标就是消灭对方,如战争中的极端情况,军事双方的较量;

9.  $0.5 > h > 0.25$ , 竞争关系;

10.  $0.25 > h > 0$ , 敌对关系。

图1表示出广义相关系数  $h$  与 Agent 交互作用之间的关系。

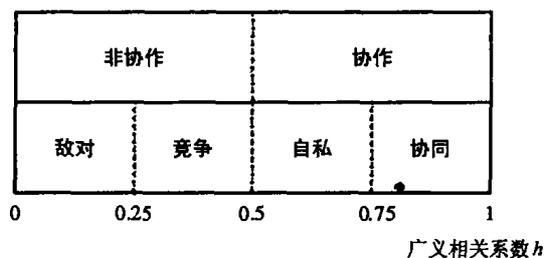


图1 广义相关系数与 Agent 交互作用关系

在下面的论述中,将已有研究工作中的 Agent 协作、协商、竞争、对抗等实例模型与本文以广义相关系数进行分类量化的 Agent 交互作用框架进行对比,进一步说明该框架可以包括多 Agent 系统中所有交互作用类型:

协同型( $0.75 \leq h \leq 1$ )的情况多存在于如分布式问题求解、智能协作系统等应用中。在这一过程中,各个 Agent 之间互相配合、协作,通过任务分配、规划,来共同实现目标。在协作方法中,有具有中心管理机制的合同网,结果共享,FA/C,队模型等。

在文[6]中,认为自治的 Agent 可以接受或拒绝其它 Agent 提供的目标,采取何种行为取决于实现该目标是否对自己有利,称之为协作关系(Cooperation);而非自治 Agent 则直接将其它 Agent 提供的目标作为自身的目标,称之为委托关系(Engagement)。对目标的取舍态度可以说明该 Agent 是

自治的,或者是非自治的。在我们的框架中,可以分别归为“协同型”和“自私型”,准确地说,即非自治 Agent 的广义相关系数  $h = 1$ ;而对于自治 Agent,根据协同及自私的程度, $0.75 \leq h < 1$ 。

对应于自私型( $0.5 \leq h \leq 0.75$ )作用,研究主要采用的理论为协商,博弈论等。在文[11]中研究了空中交通管制问题,即对飞行器自主飞行进行仿真。每一个飞行器作为一个自主 Agent,根据当时的天气、地形、自身状态及其它飞行器状态等环境信息,提出飞行计划,并检测是否产生冲突。如果有,则通过协商来解决;如果无法解决,则提交控制中心进行重新安排。在这种情况下,每一个自主 Agent 的广义相关系数范围为  $0.5 \leq h < 0.75$ , 即其交互作用关系可以看作是自私型的。在该系统中不存在全局目标,各个 Agent 根据自身的要求与获得的环境信息自主活动,在必要时进行协商以达成各自的局部目标。

对于非协作( $0 \leq h \leq 0.5$ )环境中,Agent 有不同的目标,且目标之间相互发生冲突。如不让其它 Agent 获得成功,阻止其它 Agent 的行为等<sup>[5]</sup>。采用的研究方法多为博弈论。在文[12]中,描述了一种“恶意对抗”机制,在该状态下,双方 Agent 为了实现交互的公平性,允许表现出恶意行为。作者应用博弈论,在完美信息及不完美信息的情况下,分析和证明了公平交互的可行性。一般说来,在非协作过程中,需要考虑更多的虚假信息,如提供关于自己、环境、其它 Agent 的错误信息;恶意行为,如访问其它 Agent 的受保护信息等。在协作关系中不会出现的问题。

此外,根据非协作的程度,交互关系从竞争到敌对连续变化。对于极端的  $h = 0$  的情况,现有研究的模型和实例比较少。在文[13]中论述的在红蓝双方海上编队对抗背景下的 MAS 系统,仅在系统中考虑了单一方的 Agent 系统,即仅考虑了在动态环境下,红方对应于蓝方的行为,通过 MAS 协同计划产生智能决策,并没有将模拟的交战双方全部纳入到该系统中。这就提出了另一个研究方向:如何将战争中的双方均以 MAS 系统表示出来,形成一个对抗环境下的更大的 MAS 系统,如果战争的要求是一方的完全消灭才是另一方胜利,则此时双方的广义相关系数为  $h = 0$ 。

综上所述,可以看出,在众多的研究中,研究者只是将这些不同程度的概念对不同的应用、要求进行细化,或者重新定义。而我们提出这样一个统一的框架,在其下,可以包括所有这些概念。从以上分析可以看出,在多 Agent 系统中引入广义相关系数  $h$ ,可以对研究其间交互关系进行量化,显式地描述在某一特定情况下的作用方向和力度。此外,当 Agent 间的交互作用发生变化时,广义相关系数也可以连续地反映这种过程。

最后我们以机器人足球赛为例,每一个参赛队员可以看作是一个 Agent,这是多 Agent 系统的典型应用。比赛分为两队进行,队内 Agent 的关系为协作关系( $h \in [0.5, 1]$ ),它们互相配合,进行传球、掩护等;队间 Agent 的关系为非协作关系( $h \in [0, 0.5]$ ),进行拦截、防守等。另外,根据目标(消极保守或者积极进攻等)、环境(所处的位置或者队员的布局等)、条件(自身能否射门或者带球)的不同,在不同时刻,自主的 Agent 可以通过学习,连续调节它与其它 Agent 的相关系数,在此基础上,进行决策与规划,比如单独行动或是与队员组织配合等,以期更好地完成协作,达到目标。

结论 本文基于泛逻辑广义相关系数,对 MAS 中 Agent

间交互作用进行了整体研究。描述了各种关系状态,并作了初步量化。进一步的研究为,将广义相关系数  $h$  引入 MAS 模型,建立基于广义相关系数 Agent 模型及 MAS 系统框架,即在其 Agent 结构中嵌入相互作用  $h$  因子,对多 Agent 系统中的协作、非协作关系以及之间的相互转换进行深入探讨,并建立相应的运算体系。同时,对研究中较少的对抗型交互关系进行深入探讨。

## 参考文献

- 张维明. 智能协作信息技术. 北京: 电子工业出版社, 2002
- 史忠植. 智能主体及其应用. 北京: 科学出版社, 2000
- 何华灿. 泛逻辑学原理. 北京: 科学出版社, 2001
- Oliveira E, Mouta F, Rocha A P. Negotiation and conflict resolution within a community of cooperative agents. In: Proc. Intl. Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 1993
- Denzinger J. Foundation of Multi-Agent Systems. <http://www.cpsc.ucalgary.ca/~denzinge/>, 2002
- Luck M, d'Inverno M. Engagement and cooperation in motivated agent modeling. In Distributed Artificial Intelligence: Architecture and Modeling, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 1087, 70-84. Springer-Verlag, 1996
- 史忠植. 高级人工智能. 北京: 科学出版社, 1998
- Zlotkin G, Rosenschein J S. Cooperation and conflict resolution via negotiation among autonomous agents in noncooperative domains. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1991, 21(6): 1317~1324
- Zlotkin G, Rosenschein J S. Negotiation and task sharing among autonomous agents in cooperative domains. In: Proc. Eleventh Int. Joint Conf. Artificial Intell., Detroit, MI, Aug. 1989. 912~917
- Tomlin C, Pappas C J, Sastry S. Noncooperative conflict resolution. In: Proc. 36<sup>th</sup> Conf. Decision & Control., 1997. 1816~1821
- Rong J, Geng S, Valasek J, Ioerger T R. Air traffic conflict negotiation and resolution using an onboard multi-agent. In: Digital Avionics Systems Conf., 2002, 2: 7B2-1~7B2-12
- 毛卫良, 王晓东, 盛焕焯. 一个基于“恶意对抗”的公平交互机制的研究. 计算机学报, 2001(11)
- 徐润萍, 王树宗, 顾健. 兵力协同计划方案智能决策系统研究. 系统仿真学报, 2002(11)
- Borgida A. Language features for flexible handling of exception in information systems. ACM Transactions on Database System, 1985, 10(4): 536~603
- Weber A. Updating propositional formulas. In: Kerschberg L, ed. Proc. of the 1st Conf. on Expert Database Systems. Menlo Park: Benjamin Cummings, 1986. 487~500
- Forbus K D. Introducing actions into qualitative simulation. In: Sridharan NS, ed. Proc. of the Intl. Joint Conf. on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1989. 1273~1278
- Winslett M. Reasoning about action using possible models approach. In: Mitchell TM, Smith RG, eds. Proc. of the 7th National Conf. on Artificial Intelligence. California: AAAAI Press, 1988. 89~93
- Alchourron C E, Gardenfors P, Makinson D. On the logic of theory change: partial meet contraction and revision functions. The Journal of Symbolic Logic, 1985, 50(2): 510~530
- Gardenfors P. Knowledge in Flux: Modeling the Dynamics of Epistemic States. Cambridge: The MIT Press, 1988
- Gardenfors P, Makinson D. Revisions of knowledge systems using epistemic entrenchment. In: Vardi M Y, ed. Proc. of the 2nd Conf. on Theoretical Aspects of Reasoning About Knowledge. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1988. 83~95
- Katsuno H, Mendelzon A O. Propositional knowledge base revision and minimal change. Artificial Intelligence, 1991, 52(3): 263~294
- Nebel BA. Knowledge level analysis of belief revision. In: Brachman R J, Levesque H J, Reiter R, eds. Proc. of the 1st Intl. Conf. Principles of Knowledge Representation and Reasoning. San Francisco: Morgan Kaufman, 1989. 301~311
- Hansson S O. New operators for theory change. Theoria, 1989, 55: 114~132
- Fuhrman A. Theory contraction through base contraction. Journal of Philosophical Logic, 1991, 20: 175~203
- Rott H. A nonmonotonic conditional logic for belief revision I. In: Fuhrman A, Morreau M, eds. The Logic of Theory Change. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 135~181
- Williams M. Two operators for theory base change. In: Adams A, Sterling L S, eds. Proc. of the 5th Australian Joint Conf. on Artificial Intelligence. Singapore: World Scientific, 1992. 256~265
- Wobcke W R. A belief revision approach to nonmonotonic reasoning. In: Adams A, Sterling L S, eds. Proc. of the 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. Singapore: World Scientific, 1992. 278~283
- Li W. A open logic system. Science in China (Series A), 1993, 22(10): 1103~1113
- Li W, Shen N C, Wang J. R-calculus: a logical approach for knowledge base maintenance. Intl. Journal of Artificial Intelligence Tools, 1995, 4(1-2): 177~200
- Darwiche A, Pearl J. On the logic of iterated belief revision. Artificial Intelligence, 1997, 89(1-2): 1~29
- Boutilier C. Revision sequences and nested conditionals. In: Bajcsy R, ed. Proc. of the 13th Intl. Joint Conf. on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993. 519~525
- Dixon S E. Belief revision: a computational approach. [PhD Thesis]. Sydney: University of Sydney, 1994
- Dixon S E. A finite base belief revision system. Australian Computer Science Communications, 1993, 15(1): 445~451
- Dixon S E, Wocke W R. The implementation of a first-order logic AGM belief revision system. In: Bajcsy R, ed. Proc. of the 13th Intl. Joint Conf. on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993. 534~539
- Williams M A. Towards a practical approach to belief revision: reason-based approach. In: Aiello LC, Doyle J, Shapiro SC, eds. Proc. of the 5th Intl. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, San Francisco: Morgan Kaufmann, 1996. 412~420
- Damasio C V, Nejd W, Pereira L P. REVISE: an extended logic programming systems for revising knowledge bases. In: Doyle J, Sandewall E, Torasso P, eds. Proc. of the Intl. Conf. on Knowledge Representation and Reasoning. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994. 607~618
- Sullivan J W, Tyler S W. Intelligent User Interfaces. New York: ACM Press, 1991
- 栾尚敏. 信念归结及其应用. [北京航空航天大学博士学位论文]. 1999
- Luan Shangmin, Dai Guozhong. A Programmable Approach to Revision of a Finite Belief Set. Journal of Computer Science and Technology, 2003, 18(1): 102~108
- 栾尚敏, 李未. 信念修正的典型方法之比较. 计算机科学, 1999, 26(7): 8~13
- Gallier J H. Logic for Computer Science, Foundations of Automatic Theorem Proving. New York: John Wiley & Sons Inc., 1987

(上接第102页)

- Borgida A. Language features for flexible handling of exception in information systems. ACM Transactions on Database System, 1985, 10(4): 536~603
- Weber A. Updating propositional formulas. In: Kerschberg L, ed. Proc. of the 1st Conf. on Expert Database Systems. Menlo Park: Benjamin Cummings, 1986. 487~500
- Forbus K D. Introducing actions into qualitative simulation. In: Sridharan NS, ed. Proc. of the Intl. Joint Conf. on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1989. 1273~1278
- Winslett M. Reasoning about action using possible models approach. In: Mitchell TM, Smith RG, eds. Proc. of the 7th National Conf. on Artificial Intelligence. California: AAAAI Press, 1988. 89~93
- Alchourron C E, Gardenfors P, Makinson D. On the logic of theory change: partial meet contraction and revision functions. The Journal of Symbolic Logic, 1985, 50(2): 510~530
- Gardenfors P. Knowledge in Flux: Modeling the Dynamics of Epistemic States. Cambridge: The MIT Press, 1988
- Gardenfors P, Makinson D. Revisions of knowledge systems using epistemic entrenchment. In: Vardi M Y, ed. Proc. of the 2nd Conf. on Theoretical Aspects of Reasoning About Knowledge. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1988. 83~95
- Katsuno H, Mendelzon A O. Propositional knowledge base revision and minimal change. Artificial Intelligence, 1991, 52(3): 263~294
- Nebel BA. Knowledge level analysis of belief revision. In: Brachman R J, Levesque H J, Reiter R, eds. Proc. of the 1st Intl. Conf. Principles of Knowledge Representation and Reasoning. San Francisco: Morgan Kaufman, 1989. 301~311
- Hansson S O. New operators for theory change. Theoria, 1989, 55: 114~132
- Fuhrman A. Theory contraction through base contraction. Journal of Philosophical Logic, 1991, 20: 175~203
- Rott H. A nonmonotonic conditional logic for belief revision I. In: Fuhrman A, Morreau M, eds. The Logic of Theory Change. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 135~181
- Williams M. Two operators for theory base change. In: Adams A, Sterling L S, eds. Proc. of the 5th Australian Joint Conf. on Artificial Intelligence. Singapore: World Scientific, 1992. 256~265
- Wobcke W R. A belief revision approach to nonmonotonic reason-