

非单调推理十年进展

林作铨 石纯一 (清华大学计算机系)

摘要

非单调推理是近年来AI的一个活跃研究分支,是AI进一步发展的核心问题之一。本文从一种统一的观点介绍与分析非单调推理十年来的基本研究结果,指出问题的实质及进一步研究方向,包括一些我们工作的结果。

一、前言

1 常识与非单调推理

直观上,常识是人们在现实世界中的日常生活知识,常识推理的一个共同特征是在不完全知识下的推理。AI用机器模拟人的智能以求对智能的一般原理的理解,对智能的一个普遍接受的观点是智能与知识密切相关,知识表示及推理属AI众多分支的基础研究,而如何做到常识表示及推理是一个核心问题,这是衡量一个智能程序系统是否达到人的智能程度的一般准则。理论上,知识是完全的,是指关于世界的任一命题或它的否定之一是可知;实际上,完全知识通常是可望而不可得的。不完全知识推理通常要求在作出一定假设下进行,这是对不知知识的一种猜测,而随着知识的累积,可能有新的证据要求改变冒险作出的假设和相应的结论,这样,一个理论推出的结论可能不再为另一个增大了的理论所推出,这就是推理的非单调性。非单调性是常识推理的最一般特征。一般地讲,现有计算的研究本质上囿于一阶逻辑范畴,而经典逻辑具有单调性;增加新公理决不会废除已有的定理,只有随公理的加入单调地增加可推出的定理。无论AI的理论或实践都本着更好地反映人的常识

推理,自然引出对非单调推理的研究。

非单调推理可看成是基于这样一种常识原理的不完全推理:将不完全知识用某种方式固定化;转换不完全知识到相对完全的知识状态。设 Γ 是一个初始信念集, Δ 是一个假设集,定义一个理论集 $\Sigma=\Gamma\cup\Delta$,使得对任一命题 α ,有 $\Sigma\vdash\alpha$ 或 $\Sigma\vdash\neg\alpha$ 。建立非单调推理方法就是要确保在 Δ 中相容地加入 α ,若发现不相容,则进行回溯,消除不相容,再建立新的假设集。换句话说,非单调推理方法是一种通过对矛盾的修订动态地进行相容性维护的知识保完全推理过程,这种对相容性与完全性的考虑是非单调推理研究的基本思想。

2 非单调推理的提出

非单调性概念是Minsky^[3]明确提出来的,他用一个“鸟会飞”例子作为对知识逻辑表示的挑战,马上引起了一些研究者的直接响应,他们基于各自对问题的理解,先后提出一些一般用途的非单调推理方法,其中大多数代表性工作集中在1980年AI杂志刊出的一个非单调推理专集^[1],这个1978年专题讨论会的结果,可以看成非单调推理作为一个研究分支的开始。此后,对非单调推理的研究出现增长趋势,1984召开了第一届国际非单调推理的Workshop,在各种AI会刊上不断报道这方面的研究成果,并引入教科

书^[6], 编成选集^[9]与写成专著^[8]。非单调推理研究引起了广泛重视并引向深入, 现有AI文献中至少有二千篇有关论文。

其实, 非单调推理的想法早在1956年Darimouth会议后就开始萌芽, 当时开展了各种一般问题求解系统的研究, 并已明确提出表示一般常识的目标。不过非单调推理早期研究历史是从70年代才明确开始的, 那时提出了一些特殊用途的非单调推理方法, 一个早期研究历史的文献见[2], Perlis给出一个较全面的参考文献^[9], 本文只限列出最基本的结果与文献^[1-9], 详参见[15]。国内对非单调推理的研究起步较晚, 但已有一些这方面的介绍与工作^[10-15]。

3 非单调推理的研究途径

一开始提出来的各种非单调推理方法代表了对非单调推理基础不同方面的理解^[13, 41], 以后进一步的发展是非单调推理研究进展的主线。我们沿这条主线从一种统一的观点介绍与分析十年来非单调推理的基本研究结果。

如所周知, AI研究中逻辑与过程表示理论之争是AI发展的一个内在动力, 体现在AI研究的各个方面。在非单调推理研究中也例外。大体上, 非单调推理研究可分成两种途径^[14]: 一是对逻辑的扩张, 指非单调推理的形式化方面, 可称非单调逻辑; 二是对推理模式的扩展, 指非单调推理的过程化(实现)方面, 可称非单调系统。

二、非单调逻辑

1 现存非单调逻辑

现有的AI文献中非单调逻辑大致可分两大类: 一类是基于最小化语义, 称最小化非单调逻辑; 另一类是基于定点定义, 称定点(fixed-point)非单调逻辑。

1.1 最小化非单调逻辑

最小化非单调逻辑可分基于最小化模型的与基于最小化知识的两种, 但两者本质上

是一致的, 前者主要是McCarthy的限制逻辑。限制也许是所有非单调推理方法中受到最充分研究与重视的, 在很大程度上代表了非单调推理研究的基本轮廓。

McCarthy[1980]提出的限制逻辑(简称限制CIRC)是作为一种非单调推理的形式化。其基本思想是: 限制是一个低阶公式A的所有 $\psi(P/Q)$ -最小化模型中为真的一个较高阶公式模式, 这里 ψ 是限制的对象, P/Q 是出现于A中相对于一定最小化准则的最小化参量(P)、可变化参量(Q)。限制存在多种变体, 但基本思想是一致的。我们打算选用一阶限制的一种形式谓词限制来说明最小化原理, 一阶限制是对变元x作为个体所作的一种最小化, 这时可视量词 $\forall x$ 作为限制对象, 各种限制用不同形式(P/Q)表达最小化。

形式上, 令A是一个包含P, Q的一阶句子, 其中 $P=(P_1, \dots, P_n)$, $Q=(Q_1, \dots, Q_m)$ 是谓词元组。考虑最小化准则为一个偏序 $\leq^Q$ 。定义如下: 令 M_i , $i=1, 2$, 是满足A的解释, 记 $p(M)=\{p \mid M \models p, p \text{ 是任一逻辑元素}\}$, $M_1 \leq^Q M_2$, 若 M_1 的语言L能扩张为 L' , M_1 扩展为相应于语言 L' 的解释 M_1' ,

$$1) p(M_1')=p(M_2)$$

$$2) P_i(M_1') \subseteq P_i(M_2), P_i \in P$$

称A的一个解释M是P/Q-最小化的, 当且仅当不存在A的其他解释 M' 使得 $M' <^Q M$ 。

语义上, A中限制P具有可变Q(即一阶限制), 记Circum(A; P, Q), 定义如下: $A \models \text{Circum } \varphi$ iff φ 相对于偏序 $\leq^Q$ 在A的所有最小化模型中都为真。直观上, Circum(A; P, Q)的作用就是做出P中尽可能多为假的 P_i 来保证最小化外延, 而允许Q中的 Q_i 进行变化。计算上, 限制可通过最小化模型有效地计算出来。

这一最小化语义由限制规则模式所刻画, 它是如下二阶句子:

$$A(P, Q) \wedge \cdot \forall pq [\forall x \cdot A(p, q) \wedge p(x) \rightarrow P(x)] \rightarrow \cdot [\forall x \cdot P(x) \rightarrow p(x)]$$

(*)

其中 $p=(p_1, \dots, p_m)$, $q=(q_1, \dots, q_n)$ 是一阶谓词公式, $A(p, q)$ 是 A 中以 p, q 元素分别替换 P, Q 元素的结果, $\forall x(p(x) \rightarrow P(x))$ 表示 $\forall x_1 \dots \forall x_m [(p_1(x) \rightarrow P_1(x)) \wedge \dots \wedge (p_m(x) \rightarrow P_m(x))]$, 对 $p_i(x_i)$ 可有不同于 $P_i(x_i)$ 的自由变元数 ($i=1, \dots, m$)。

这一限制模式容易导出各种等价形式, 其中 P, Q 常见情形是单个谓词, 即 $i=1$, 若 $i>1$, 可称并行限制; 如果没有可变 Q , 则在限制式中省去, 记如 $\text{Circum}(A; P)$ 。表示上, 还可规定出固定谓词元组 Z , 即当两个模型可比时, 它们的外延不变; 但DeKleer, Konolige(1989)证明了理论上固定谓词是不必要的, 它们可限制为一种最小化。最先是McCarthy提出域限制形式, 它可表成谓词限制的一种特殊形式。谓词限制本来没有可变 Q , 后来McCarthy增加了可变 Q 与一种二阶模式, 并用公式 $E(P, x)$ 与 $E(p, x)$ 分别代替 $P(x)$ 与 $p(x)$, 称公式限制, 这几方面各自增强了限制的表达能力。一阶限制还可以给出其它变体形式, 其中最主要的是Lifschitz的优先限制形式, 定义 $p < P$ 为 $\forall p P \cdot p < P \equiv \forall x \cdot p(x) \rightarrow P(x)$, 则优先限制表示如下: $A(P, Q) \wedge \neg \exists p q [A(p, q) \wedge p < P]$, 优先限制的基本想法是提供一种对 $P_i \in P$ 进行一定优先排序的机会。理论上优先限制可以化成并行限制, 但表示上它增强了处理冲突情形的能力, 进一步还可以引入一定的时序概念。实际上, (*)式包含几部分内容, 一般说来, 公式限制的理论能力等价于谓词限制, 二阶模式包含一定模型论信息, 具备集的表达能, Perlis^[9]给出一种一阶集限制形式, 具有二阶模式的能力, 但没有可变 Q ; 可变 Q 实质上增强了限制能力, 可从限制中分出具有可变 Q 的一阶部分: $A(p, q) \wedge \forall x p(x) \rightarrow P(x) \rightarrow P(x) \rightarrow p(x)$ 称为可变限制, 它可有一阶逻辑的半可判定等性质, 便于对限制的理论研究。进一步, Perlis(1988)分析了 $P(x) \rightarrow p(x)$ 可有一种内

涵意义, 并给出一种自限制形式。

一般地, 各种形式限制具有可靠性定理: 即每一个解释 M 是 $\text{Circum}(A; P, Q)$ 的模型, 指它是对于 $\langle \mathcal{P} \rangle$ 的最小化模型。但限制缺乏完全性结果, 这是限制面临的主要困难。关于完全性问题包含两方面理解: 一方面是存在多个或没有最小化模型, CIRC没有完全性定理, 对这方面的研究有: 一种是寻找一定的特殊理论保证CIRC相容性, 另一种是弱化限制模式来保护相容性; 另一方面是存在直观上合理的常识推理, 可能有最小化模型, 而一定的限制形式却做不出结论或做出反常结论, 为此寻求更一般的限制形式。它们可称为限制悖论。

Davis(1980)给出一个限制不具有完全性定理的反例, 证明了限制一个相容理论可能产生一个不相容理论。Mott(1987)进一步指出, 产生限制悖论的情形大多出自任意引入最小化的新变元以及递归使用了限制谓词, 并引入一种一致的封闭与非递归的可变限制形式, 但Besnard等(1989)给出一组反例证明了封闭限制与非递归限制都大大地削弱了限制能力。Bossu, Siegel(1984)通过一种优先关系研究了一类具有相容性的限制理论, 这一结果推广到一类相当一般的所谓几乎全称限制理论。Perlis, Minker(1986)证明了有限模型(以及一些简单推广)都是最小化模型, 得到一类限制理论的部分完全性结果。但是, 可以找到一些例子使得各种弱化或部分完全的限制理论都不足以捕捉常识推理。如何寻求一种具有足够丰富表达能力而相容的限制形式是一个待研究的问题。

限制具有一阶逻辑推理能力, 如何化归限制的二阶句子是一个重要的研究问题, 它直接关系到限制的实现问题, Rabinov(1989)给出一个限制可化归性的部分结果。一般地, 限制是不可判定的, 因此限制的实现通常都在一定条件下才能做到, Ginsberg给出各种限制证明器, 能解决很大一类限制理论的自动证明, Przymski(1989)把一类

限制转换为一种推广的失败即否定规则, 得到一个证明算法, 现在, 有一些工作倾向于转化限制到已经实现的系统上 (如Prolog)。

限制表示的特点是根据环境决定最小化内容, 不然会产生无个体结论, 另外, 限制不能处理等词问题, 这些都是限制本身所决定的, 现有的一些处理办法都还不够。McCarthy[1986]应用限制来形式化常识及其推理, 提出一个“简单不规范理论”, 希望解决一般常识表示问题。通常, 个别事实都有某一方面是不规范的, 不规范是特殊、罕见的, 通过引入一个二阶谓词 ab 代表“不规范性”, 则可一般地限制 $ab\ z$, z 是具有不规范性的谓词元组, 于是非单调的规范事物可用 $\neg ab\ z$ 来表达。这样, 非单调的 ab 谓词可以作为限制的统一表示理论, 应用起来非常方便。顺便指出, ab 谓词在非单调推理研究中被广为运用, 其做法也能用来处理其它谓词。

最后, 我们指出限制可以直接用到其它一些逻辑, 也能推广为其他逻辑形式 (如模态与多值逻辑, [15])。值得提出的是, 限制通过在一阶逻辑上增加一条推理规则达到处理非单调性的目的, 这一思想对扩张一阶逻辑来处理各种AI逻辑问题很有吸引力。限制已成为AI与逻辑的一个重要工具, 可以预料, 它还将是非单调推理研究的一个热点。

严格基于最小化模型的逻辑主要是限制以及一些相关的最小化后承研究。此外, Poole[1988]提出的理论也可归入这一研究。

基于最小化知识的最小化非单调逻辑, 可称忽略逻辑IL。设 K 表示一主体的知识算子, IL是一种 K -最小化, 即知识最小化 (或最大忽略)。一般地, IL语义后承的最小化模型对应于偏序 $\langle K \rangle$, 定义如下: 记 $K(M, S) = \{p \mid M \models Kp, p \in S\}$, 则 $M_1 \leq K M_2$ 若 $K(M_1, S) \subseteq K(M_2, S)$ 。Shoham的非单调时态逻辑CI是IL的一种特殊形式, CI表明对某类特殊的理论存在唯一的最小化模型且能有效计算出来。寻求最小化模型的存在性与

唯一性无疑是相当重要的, 这是CI的主要贡献。

限制的思想可直接推广到模态情形, 从而对忽略逻辑作出相应的模态限制形式, 把两种最小化非单调逻辑统一起来。另外, Levesque在相干语义下研究了同样的问题, 这些逻辑与自知逻辑的关系比较密切, 但还没有关系的结果。

有一些知识逻辑中形式化“仅知道”概念作为 K -最小化能力, 但它们都有非单调语义的困难, 还不是一般意义的非单调逻辑。如何在基础认知逻辑中直接形式化最小化知识还有待进一步的研究。

1.2 定点非单调逻辑

定点非单调逻辑主要指默认逻辑与自知逻辑, 而失败即否定规则可看作它们的特殊形式。

McDermott, Doyle[1980]提出的非单调模态逻辑NML旨在研究非单调逻辑的一般基础, 是一种一般默认逻辑, 他们用模态算子 M 表示“相容”来刻画非单调可证性。非单调逻辑的推理形式是在单调逻辑基础上增加相应的非单调推理规则: 若 $\vdash / \neg p$ 则 $\vdash Mp$ 。但这条规则本身是一种循环论证, 实质上是一种改变理论的元规则形式。从逻辑定点看, 非单调逻辑的最终效果是可推出定理集的情况, 而非单调定点是非单调推理规则作用的结果。设 A 是一阶理论, 定义最小化的非单调定点:

$Th(A) = \bigcap FP(S) = \bigcap \{S \mid NM(A, F)(S) = S\}$ 这里 $NM(A, F)(S) = Th(A \cup AS(A, F)(S))$ 是非单调算子, 其中 $AS(A, F)(S) = \{Mp \mid p \in A \wedge \neg p \in S\}$ 表示相对于 F 从 S 做出的非单调假设集, $Th(A)$ 是 A 的重言闭包 (即单调定点)。McDermott, Doyle直接定义 F 为NML的一阶语言, 对语言的解释基本上是一种证明论语义, 并给出命题级的一种证明过程, Shvants[1989]给出一个有限命题证明过程的形式化。一般情形下对相容性测试不是递归可枚举的, NML是不可

判定的。

非单调逻辑NML的语义太弱了,未能捕捉非单调推理的内在性质,会导致不相容理论。McDermott[1982]提供一种非单调模态语义,不幸的是最适合捕捉非单调系统的S5却不比单调系统强,因此,非单调模态语义并不适合于默认推理。Lukasiewicz指出这一困难是指示理论的相容性问题,非单调假设实质上说明了理论的一个增广,使它包含一定的先验假设如: $\{Mp | p \in F\}$, 因此, F 是非单调推理映射理论 A 的结果 f : $A \rightarrow F$, 即 $F = f(A)$ 。据此转换语义,可得到相应完全性结果。对非单调逻辑 $f(A)$ 的选择是相当困难的,但对一定特殊形式的默认理论却比较容易看到,如集 D 包含公式形如: $A \wedge MB_1 \wedge \dots \wedge MB_n \rightarrow C$, 则 $F = \bigcup d \in D \{B_1, \dots, B_n | d \in D\}$, 这就是Reiter的默认逻辑。

NML所定义的条件是相当弱的,目的是做出尽可能多的假设,这也使它具有最一般性意义,但NML的描述语义是困难的,也很难找到合适的可判定证明论。文献中还有一些进一步改造非单调模态语义的工作与批评,但没什么实质性进展。

Reiter[1980]的默认逻辑DL是对默认规则的一阶形式化,由于DL是一种基于规则的逻辑,有一阶模块化的清晰表达能力,研究比较深入并广为运用。

一个默认理论 Δ 是一个二元组 (W, D) , 其中 W 是一阶公式集, D 是一个默认规则集,每一条默认规则 d 具有形式如: $p(x) : q_1(x), \dots, q_n(x) / r(x)$ 其中 $x = x(x_1, \dots, x_n)$ 是出现 d 中自由变元组, $p(x), q_1(x), \dots, q_n(x), r(x)$ 是一阶公式, $p(x)$ 是前题公式, $q_1(x), \dots, q_n(x)$ 是验证公式, $r(x)$ 是默认结论。直观上, d 扩充包含于公理中的知识。一个默认规则称为闭的,指 $p, q_1, \dots, q_n, r$ 中不含自由变元;一个默认理论是闭的,指任一 $d \in D$ 都是闭的;否则,称为开的。开默认理论可通过范化为闭的处理,因此,只需研究闭理论。特别地,当默认规

则形如: $p:r/r$ 称为规范的,相应理论称规范默认理论。

一个一阶公式集 E 是一个默认理论 $\Delta = (W, D)$ 的扩充,若 $E = \bigcup E_i$, 其中 $E_i, i = 1, 2, \dots$, 归纳定义如下:

$$1) \quad E_1 = W$$

$$2) \quad E_{i+1} = Th(E_i) \cup \{r | (p:q_1, \dots,$$

$$q_n/r) \in D, p \in E_i, \neg q_1, \dots, \neg q_n \in E_i\}$$

默认扩充是一种最小化定点,可刻画为增加默认结论后的单调闭包,一般地,一个默认理论存在多个或没有扩充,这称扩充存在性问题。因此考虑对规则的特殊情形。规范默认理论有许多良好性质,如规范理论是半单调的。DL的证明论其实是在增加默认结论下的单调证明,Reiter提供一个规范DL基于归结的证明过程,但对一般默认理论的证明则是不可判定的。

规范默认理论在表示一些相互作用的默认时会产生反常扩充情形,本着尽可能保持规范性,Reiter, Crisuolo[1981]进一步提出一种半规范默认理论形式。一个默认理论是半规范的,指它的每条默认规则都是半规范,形如 $p:q \rightarrow r/r$ 。但是半规范默认理论失去规范理论一些性质,如半单调性,可以猜测,半规范理论证明论问题仍然是不可判定的,而且能否找到一个半规范理论扩充存在性的充要条件也仍是未解决的问题。换句话说,如何寻求一种具有足够表达能力而又保证扩充唯一存在性的默认理论仍是一个努力的目标。Etherington[1987]提出一种有序(偏序)默认理论往这方面推进了一步。

默认理论的另一个重要研究问题是它的描述语义问题,这是DL的本质困难,因为DL规则是元理论操作,不能在理论自身语言表达。Etherington[1987]首先给出一个DL语义,但这一语义太复杂了,而且存在一定问题。如何得到更直观的DL描述语义还是一个主要目标。此外,DL表示上也有某些困难,如难于表示各种条件或嵌套默认,如何推广开默认规则到一阶形式(如 $(p(x):$

$q_1(x), \dots, q_n(x)/r(x)$ 也是一个重要而有趣的问题。文献中还有一些其它形式的默认逻辑, 但本质上都是共同的。

Moore[1983]提出的自知逻辑AE是克服McDermott, Doyle非单调逻辑语义困难的一种改进, AE把默认作为理想主体自我信念的反映, 体现主体的自知之明的一种内省。由于AE与DL有密切关系, 而且具有良好的可能世界语义, 已引起广泛兴趣。

AE语言用模态算子L表示“相信”, 称L-公式是任何含L的公式, 一个自知理论T是一个L-公式集。一个L-公式集S是T的一个稳固扩张(或称AE扩充), 若 $S = \text{Th}(T \cup \{L_p | p \in S\} \cup \{\neg L_p | p \in /S\})$ 。Konolige[1988]证明了: 对任一公式集T, 存在一个L-公式集T', 使得 (a) 一个集S是T的稳固扩张 iff 它是T'的稳固扩张; (b) T'中每一公式都具有如下规范形式:

$$L_p \wedge \neg L_{q_1} \wedge \dots \wedge \neg L_{q_n} \rightarrow r$$

其中p, $q_1, \dots, q_n, r$ 都是基式, $n \geq 0$, L_p 可略。进一步, 可以证明: 一个集S是T的稳固扩张 iff $\text{BASE}(S) = S_2$, 这里BASE(S)是S中的基式集, $S_i, i=1, 2$, 定义如下:

1) $S_1 = \{p | p \in T \text{ 是一基式}\}$

2) $S_2 = \text{Th}(S_1 \cup \{r | L_p \wedge \neg L_{q_1} \wedge \dots \wedge \neg L_{q_n} \rightarrow r \in S, \text{ 其中 } p \in \text{BASE}(S), q_1, \dots, q_n \in / \text{BASE}(S)\})$

Moore是在命题级上研究AE, Konolige[1989]把它推广到量词情形, 基本上对应于开默认规则形式, 但还不是完全的一阶形式。不难看出, AE与DL有密切联系, AE扩充与DL扩充一样都是非构造性, 也有扩充存在性问题。类似于限制的优先性考虑, 一些研究者正尝试建立一类AE与DL(以及其他)的分层理论, 以求更好的计算特性。

失败即否定规则NF是一条非单调推理规则, 基本想法是通过默认 $\neg p$ 作为一个理论T的假设若 $T \vdash /p$, 使得T在某一种信念状态下获取知识的完全化。由于NF实现的有效性, 倍受青睐。一种一般化的NF规则也许

可成为非单调逻辑的统一实现基础。Reiter[1978]的封闭世界假设CWA与Clark的谓词完备化COMP都是NF规则的形式化, 两者能力上基本一样。NF规则通常在逻辑程序中表示为一种可靠与完全的有限失败归结。

一般地, 限制比NF强, 如Reiter[1981]指出COMP可由CIRC导出, Lifschitz[1985]证明一定条件下的CIRC可等价于CWA, Gelfond等给出了推广CWA与弱化CIRC的等价关系, 并提供一种算法来统一实现。NF形式化也可看成DL与AE理论的一个子类。下面设S是具有NF规则逻辑程序, 形如:

$A_0 \leftarrow A_1, \dots, A_m, \neg A_{m+1}, \dots, \neg A_n$ 其中 $n \geq m \geq 0$, A_i 是原子公式, 那么, 一个公式集E是S的一个解扩充, 若 $\Gamma(E) = E$, 这里 $\Gamma(E)$ 是满足以下性质的最小集: 若 $A_0 \leftarrow A_1, \dots, A_m, \neg A_{m+1}, \dots, \neg A_n \in S, A_i \in \Gamma(E) (1 \leq i \leq m), A_i \in /E (m+1 \leq i \leq n)$, 则 $A_0 \in \Gamma(E)$ 。

E等价于如下规则翻译的DL(AE)扩充, $A_0 \leftarrow A_1, \dots, A_m, \neg A_{m+1}, \dots, \neg A_n \Rightarrow (A_1, \dots, A_m; \neg A_{m+1}, \dots, \neg A_n / A_0)$

现有的AI文献中还有其他一些非单调逻辑, 这些工作或许是在不同单调逻辑上发展起来, 或许是把非单调推理方法应用到一些单调逻辑上, 但大多可以归入基于定点证明论或最小化模型论的传统非单调逻辑研究中。Delgrade[1988]提出一种基于条件逻辑的非单调形式, 能捕捉如“在规范情形下p推出q”这种非单调性质, 与传统非单调逻辑不一样的地方是, 它的语义解释不需指示性而且能表示一些DL难以表达的规则形式, Ginsberg[1986]的反事实条件句逻辑也是这种类型的, 更一般地, 可以用相干逻辑或多值逻辑来做。Ginsberg, Smith[1988]提出一种有效计算的可能界算法途径, 其基本做法是构造一个最近的可能世界, 它是一个世界描述的最大相容集, 能捕捉非单调变化过程。

另一方面,非单调性一般也是一种不确定性,因此有许多用不确定方法来形式化非单调推理的工作,此外,还有许多其它理论可能用来处理非单调推理,如近似方法,数学规划,决策理论等等,这里不准备一一指出了。

2 非单调逻辑的相互关系与统一基础

2.1 相互关系

近来,一部分工作集中在对各种非单调逻辑之间相互关系的比较研究上,以求取长补短,限制,默认与自知是三种主要的非单调逻辑,对它们之间关系的研究比较充分而且重要。

DL与AE有密切的联系,Konolige[1988]给出DL到AE的如下转化关系:

$$p:q_1, \dots, q_n/r \Rightarrow L_p \wedge \neg L_{q_1} \wedge \dots \wedge \neg L_{q_n} \rightarrow r$$

并证明:若E是一个DL扩充,T是一个稳固集使得BASE(T)=E,则T是对应AE的AE扩充;但是,反之不然。这说明DL扩充是比AE扩充强的概念,对特殊情形可能等价,如 Δ 是一个无前提公式的默认理论。AE为表示如条件默认等一些DL难以表达的规则提供一种手段,尽管如此,AE语义并不解决DL语义问题。

限制与默认都是一阶逻辑形式上的非单调扩展,其最小化语义与定点定义有很大差异性,最富于代表性,可称作标准非单调逻辑。一般地说,CIRC比DL强,有较好逻辑性质,但两者并不能直接进行定理意义下的相互翻译,这是因为CIRC与DL各自都有一些对方不能表达的因素,Imielinski[1987]通过一种模块化翻译方法证明了DL到CIRC的一般转换是不可能的,增强了这种观点。一些部分结果如Grosz[1984]给出一个翻译规范DL到CIRC的结果。一般地,我们通过细化命题能够翻译CIRC进入DL。Circum(A, P, Q)由下面翻译规则等价于 $\Delta=(W, D)$,

1) 若 $\phi \in A$, 则 $\phi \in W$

2) 若Circum(A, P, Q) $\vdash \neg \phi$, $\phi \notin Q$, 则: $\neg \phi / \phi \in D$

3) 若Circum(A, P, Q) $\vdash \phi$, $\phi \in P \cup Q$, 则: $\psi / \psi \in D$

反之,也能通过细化命题翻译DL进入CIRC。Etherington[1987]与Konolige[1989]分别给出较好的CIRC与DL、AE关系的结果。

几乎各种非单调逻辑之间相互关系都有人在研究,如上面提到的NF与其它逻辑的关系。这方面工作的难度仍旧很大,有待进一步结果出现。

2.2 统一基础

最近,出现了一些建立非单调逻辑统一基础的工作,旨在探讨非单调推理的一般逻辑基础和更好地分析各种非单调逻辑之间的相似性与差异性。其主要工作如下:

Shoham[1987]与[14]中独立地提出一种优先逻辑作为非单调推理的统一逻辑基础,其基本想法是:设L是任一单调逻辑,语义上一个非单调逻辑是通过在L的单调模型上建立一个偏序 $<$ 来获得,其结果的逻辑语法不变,但语义后承改变: $\phi \models < \psi$ iff ψ 在 ϕ 相对于 $<$ 的所有优先模型中都为真, ϕ 的一个模型M称为优先模型,若不存在 ϕ 的其它模型M'使得M' $<$ M。确立不同的偏序 $<$,从而获得不同的非单调逻辑,优先关系实现了知识的完全化,体现了从单调逻辑到非单调逻辑的一般途径。某种意义上,优先逻辑解决了非单调推理的逻辑基础问题,由它容易作出各种需要的新的非单调逻辑,是一种非单调构造工具,有广泛应用,[14]与Bell[1990]分别给出优先逻辑的形式化。

Lin, Shoham[1989]提出一个论证系统能直接捕捉非单调推理的相容性维护与完全化过程。论证系统是完全基于规则的一种框架,包含论证结构与完全性定义。对大多数非单调逻辑S,令L是S的语言,可找到一定规则集R(S),定义R(S)的论证结构T对一定公式的 $\psi(S)$ 的S-完全性条件,则可证,若E

是 S 的定点(或模型),则存在一个 S -完全性论证结构 T ,使得 $WFF(T) \models E$ (或 M 满足 $WFF(T)$)。

Ginsberg[1988]提出一种广义多值逻辑可以统一实现很大一类的非单调理论,它基于一个偏序 $<R$ 对应于知识的完全化,使得对真值 x, y 有 $x < R, y$ 表示 y 包含至少象 x 一样多的信息。

我们也可以通过寻求某种中间形式来具体地翻译各种非单调逻辑作为特殊情形处理,从而获得一类更一般的非单调逻辑。如统一的认知与经验语义这类非单调逻辑就是这种做法^[15]。另外,考虑到限制是一种较强的非单调形式,可能把限制推广作为非单调推理的一种统一途径。

3 非单调逻辑待研究的问题

上述各种非单调逻辑都存在和面临一些问题与困难,但有一些问题却是基本与共同的。

Hanks, McDermott[1987]提出一个所谓“耶鲁枪击问题”作为对非单调推理的挑战,说明非单调逻辑做不出常识上合理的结论的反常扩充问题,这是因为各种非单调逻辑都有最小化模型或扩充存在性问题。Morris[1988]正确地指出这一实质,并注意到如TMS这类非形式化的有限推理却能选择到唯一正常的扩充。但对扩充存在性问题还没有满意的答案,也许我们应该进一步考虑含矛盾的常识推理形式化问题。

实际上,最小化模型或定点定义都是非构造性的,这自然引来一系列问题,一般地,非单调逻辑都是不可判定的,致使计算上很困难,这些正是非单调逻辑未能广泛应用的最主要原因。非单调逻辑研究要有实质性突破,必须研究这些基本问题,但任一方面的突破都是不容易的。

三、非单调系统

非单调系统通过对矛盾的检测进行信念

的修订来维护相容性,可称信任修订系统(或理由维护系统、真值维护系统TMS);另一种做法是通过设立一定的元知识机制实现非单调推理,可称元知识系统。

1 信任修订系统

TMS是一种基于理由的系统,每个事实的支持是直接产生它的命题。其中最有代表性的是Doyle[1979]提出的TMS。TMS具有一些良好的性质,而且实现为很多问题求解系统的一个推理子系统。

TMS中一个基本事实 A 表示形如:

$A[RL(in, out)]$

这里 $RL(in, out)$ 是理由表, in 与 out 是由一些事实(或规则)组成,表示 A 成立的理由。一个事实可能联系多个理由,它是 in ,若至少有一个有效理由;否则,它是 out 。称事实 A 是有效的iff它的每个 in 表中元素都是 in ,而每个 out 表中元素都是 out 。定义 out 表非空情形的 A 是一个假设,这样,假设是一个非单调论证,它一般是基于缺乏其它理由信任下做出的一种默认,同时,假设阻碍了循环论证而具有良现性。我们称一个事实是良现的,若其 out 表中元素都是 out ,而 in 表中元素都是良现的,实际上,良现性保护一种最小化。

形式上,我们可以归纳地定义一个事实 A 是以 A 为根的树,使得说明 A 成立的理由是它的子树,并且父母结点不出现于它的子树中,这样,就不会出现循环论证情形。其它规则形式可转化为 in 与 out 情形处理。

TMS可以生成一些结点表示现行信任集,当增删结点的理由时,TMS启动一个真值维护过程来更新信任状态,这是一个具有良现性的标记过程,相当于默认理论的扩充;当出现一个与事实 A 不相容的事实 $\neg A$,便存在一个标记为 in 的矛盾状态,这时引导一个直接回溯过程来检测与修订不相容假设,使矛盾结点为 out ,这基本是一种确定最大相容性的归谬过程。

TMS具有一些良好特性(如可避免反常

扩充),而且给出一种在不相容状态下推理的具体方法,因此值得进行多方面的研究。一方面是形式化TMS;另一方面,TMS有可能发展一种自动生成默认规则的方法。[12]中给出一种不确定TMS方法,可以同时处理由不确定因素产生的矛盾。TMS维护一种最大相容性,因此,计算上难以适合大型知识库的处理,虽有一些算法上改进,但还解决不了问题。

Dekleer[1986]的ATMS是一种基于假设的TMS,这里假设不是TMS定义的假设,而是指支持事实的基本假设集。ATMS的非单调过程可以刻画为环境间一般性的一个集意义下的偏序,ATMS的标记过程产生相应最小化环境。

ATMS比TMS有效,因为更新变动都只是相对于内容,也使转变状态变得容易。Dekleer, Reiter[1987]给出ATMS的一个形式化基础。

注意到,ATMS对矛盾的处理与TMS不同,ATMS把矛盾局部化并可产生多扩充并存情形,这在某些应用是方便的,但ATMS不能如TMS直接表示非单调说明并失去一些性质,这是正进行的一个工作方向。

Martins, Shapiro[1988]提出一种信念修订系统(MBR)也是基于假设的,但与ATMS不同,它是基于一种相干逻辑(SWM)基础上的TMS。类TMS系统已有实现的商用系统,其它一些文献与此相关。

2 元知识系统

FOL是Weyhrauch[1980]实现的一个元逻辑系统,旨在研究逻辑表示的认识合适性,有着广泛应用。FOL并不直接给出非单调推理规则的形式化,它的模拟结构作为不完全模型的计算解释,区别语言对象与理论以致元理论,元元理论等,并用一种语义附加过程作为联系,能直接实现默认设置,非单调性体现在改变形成新的模拟结构以及相应的附加过程上。FOL与其他非单调逻辑的关系还有待研究,一种做法是形式化FOL所

体现的元逻辑来处理非单调性,以及非单调元逻辑的形式化。其他一些类似的元理论实现系统(如LCF)也有同等能力。特别是,FOL所使用的附加过程被认为是逻辑与过程表示的一种良好折衷方案。

Winograd[1980]提出资源受限原则RL来处理非单调推理。广义的看,各种非单调推理系统都是某种资源受限的实现。其实,RL原则也可能在一些信念逻辑中直接体现,作为形式化的一部分。

有一些特殊实现的系统中具有非单调性质,但还没构成非单调系统处理。特别是,基于知识的系统中用到元知识机制还缺乏对非单调性的统一处理。

3 非单调逻辑与非单调系统的关系

正如知识的逻辑与过程表示一样,非单调逻辑与非单调系统也是相互联系、相互促进的。

一般地,非单调逻辑是非单调系统的理论基础,非单调系统是非单调逻辑的实现基础。特别是,非单调逻辑的基本结果正在进一步扩展的非单调系统中实现,非单调系统的基本结果也有进一步的形式化。在目前情况下,一个实践的知识系统最好还是联合各种非单调推理方法来争取尽可能一般而有效的处理,正如认识与启发合适性的考虑一般。

一般地讲,我们指望得到一种语言足够丰富的形式化,有完全独立内在的推理方法,并且能够得到适当的控制以保证可计算性。

四、非单调推理的应用

1 应用范畴

非单调推理达到了什么?也许存在的问题比我们能回答的问题要多,但我们毕竟已有足够有力的工具来解决面临的问题。非单调推理能用来建立一个不特殊领域问题的一般知识库。M. Carthy[1986]勾画出非单调推理的一般用途,主要思想是非单调性增加了表示一般常识及其推理的可能性。

、具体说来,非单调推理可有下面一些应用范围:

- 1) 作为一种约定。
- 2) 增加逻辑程序设计能力。
- 3) 作为一种猜测或归纳的形式化。
- 4) 作为不确定性的一种表示。
- 5) 作为定性推理,知识,信念与意识等推理的一种基础。
- 6) 作为考虑其他常识因素的一种机制。例如 Pearl[1988]用默认规则来表达一种因果关系。
- 7) 其他,非单调性可引伸出一些饶有兴趣的理论问题,并推动逻辑的发展。例如,传统条件逻辑与相干逻辑都会失去经典逻辑的良好性质,这特别使得难于在AI中应用,通过非单调处理可能克服这类困难, Priest[1988]给出一种简单的非单调超协调逻辑就有这种特点。

总之,非单调推理是AI推理研究的一个共同基础。

2 几个应用方面

一方面是应用问题可能促进非单调推理的进一步形式化,另一方面是如何把一般非单调推理方法应用到具体问题。

1) 行动 行动,规划等是常识推理的重要问题,也是非单调推理具体的处理对象。Lifschitz[1989]基于限制形式化了STRIP,并能一般地处理行动中的意外与惯性事件, Ginsberg, Smith[1988]直接给出一种非单调行动的途径,此外,也有一些基于TMS的行动理论。

2) 诊断 诊断也是定性推理的一个研究问题。Reiter[1987]给出一个基于ab谓词的形式化途径,具有更一般的诊断推理能力,其他一些非单调推理也具有好的性质来处理诊断推理。

3) 语义网 语义网是非单调推理的最早应用之一,如何对它形式化也是一个发展的主要目标。如继承推理决定某个体的性质时总是从一般框架性质的假设做出,近年来有许多对带有例外的多重继承推理方面的形式化工作。

4) 知识库 逻辑数据库(知识库)是数据库的一个研究主流,也是非单调推理的基础,几乎全部非单调推理方法都应用到数据库上,但还缺少成功的大型系统。

5) Prolog Prolog是一个已经实现的逻辑程序设计语言,对Prolog能力的扩展首先是处理非单调性,另一方面,许多非单调逻辑被考虑编译进

Prolog。

6) 其他应用 非单调推理还与其它AI研究分支有联系。我们只提到机器学习,因为机器学习有与非单调推理相似的目标,并且两方面正在相互作用,但机器学习缺少足够的形式化,致使两方面难以深入比较,从非单调推理方面看,如何表示从不完全知识到更完全知识的学习过程还是一个未考虑的问题。

非单调推理正进一步广泛应用到AI各种系统,一些想法在AI的问题求解与结构中也被采纳,像TMS系统早有几个商用产品及软件支撑环境。

五、结束语

1 什么是常识

常识的直观含义是好理解的,但什么是常识?要给常识下一个精确的定义决非易事,正如对计算的定义曾是一个困扰人的问题。非单调性使我们有一个比较明确的目标来认识常识。

实际上,我们可以对人的常识推理做一些正常合理的假设,从而得到一个基本的常识模型,那么,在这个模型中至少要考虑这样几点:(1)不完全性,(2)不相容性,(3)非单调性,(4)可计算性。例如,主体(人或机器)的知识总是不完全的并且充满矛盾,但主体在一定时间内照常作出符合规范的行为并完善知识。这个模型的逻辑基础的各个方面都是对经典逻辑的挑战,但这也或许是一个解法。

2 从非单调推理到常识推理

非单调推理还不足以完全解决一般知识表示, McCarthy[1987]提出形式化环境概念,非单调推理通过矛盾的检查来维护相容性,但一般地非单调逻辑也会产生矛盾,而必须考虑不相容状态下的推理,非单调推理的完全化过程是动态变化的,但并不能通过学习来累积知识,况且还有一个计算问题。所以这里面还有许许多多的工作有待解决。

常识推理的研究除非单调推理外,还有其它诸方面研究,如信念推理,定性推理,类比推理,不相容推理,因果推理等等,但还没走向统一。从非单调推理到常识推理还有一段很长的路,或许,我们又到了一个路口,下一步怎么办?毫无疑问,需要许多仁人志士走下去。

非单调推理的整个基础状态远未清楚,有如AI还缺乏理论基础,这也正是AI与非单调推理研

究的生动性。限于篇幅,这里所作的讨论远不全面,而且许多问题尚未讨论或理解不够,希望本文能对国内非单调推理研究起一个抛砖引玉的作用。

鸣谢 本工作得到云南省电力学校的支持,特此致谢。

参考文献

- [1] Bobrow D. (Ed.), *Special Issue on Non-Monotonic Reasoning*, AI 13, 1-2 (1980)
- [2] Doyle J., London. P., A selected descriptor-indexed bibliography to the literature on belief revision, *SIGART Newl.* 71 (1980), 7-23
- [3] Etherington D.W., *Reasoning with Incomplete Information*, (Morgan Kaufman, 1988)
- [4] Gallaire G., Minker J. (Eds.), *Logic and Data Base*, (Plenum, 1978)
- [5] Geneserth M., Nilsson N., *Logical Foundation of AI*, (Morgan Kaufman, 1987)
- [6] Ginsberg M.L. (Ed.), *Readings in Non-monotonic Reasoning*, (Morgan Kaufman, 1987)
- [7] McCarthy J., *Generality in artificial intelligence*, C. ACM 30, 12 (1987), 1030-5; (人工智能中的普遍性, 计算机科学, 1989)
- [8] Minsky M., *A framework for representing Knowledge*, MIT AI Lab, AIM-306, 1974; (P. Winston ed., *The Psychology of Computer Vision*, 1975, 211-77)
- [9] Perlis D., *Bibliography of Literature on Non-Monotonic Reasoning*, in: *Readings in Nonmonotonic Reasoning*, 1987
- [10] 马蒂文, 人工智能中的逻辑问题, *哲学研究*, 11 (1985), 33-39
- [11] 石纯一, 关于非单调推理, *计算机科学*, 6 (1988), 59-65
- [12] 任晓光, 石纯一, 一种语义描述的非单调不确定推理方法, *计算机学报*, 11(10)(1988), 622-626
- [13] 姜云飞, 关于非单调推理, *计算机科学*, 4 (1988), 56-58
- [14] 林作铨, 非单调逻辑的统一基础, *知识工程进展 (1990)*, 中国地质大学出版社, 1990
- [15] 林作铨, 石纯一, 非单调推理十年进展, 第一届中国人工智能联合学术会议资料, 1990, 长春

下期主要内容预告

John McCarthy谈人工智能研究途径
应用软件开发方法
线性逻辑导论
计算机科学的某些方向
机器学习
数据库技术的新进展
第三代数据库系统宣言
元知识与反射原理