非单调推理 人工智能 数据库 (4)

计算机科学 1995Vol. 22№. 4

14-17

计算机科学 1

非单调推理的研究现状*)

刘瑞胜 刘叙华 TP18
（吉林大学计算机科学系 长春 130023）

摘 要 In this paper, we review the past and current situation of nonmonotonic reasoning. We also discuss the problems in nonmonotonic reasoning, and give the future directions of research on nonmonotonic reasoning.

关键词 Nonmonotonic reasoning, Default reasoning, Circumscription, Autoepistemic logic, Open logic.

一、引 言

早在1959年，McCarthy[1]就发现常识和常识推理很难处理，因为在常识推理中，当前得出的结论，可能会由于以后新事实的加入而被取消，这就是所谓的"非单调性"。

非单调推理在AI中很普遍、很自然。比如，在专家系统中基于不完备知识推出的结论，会由于以后新知识的加入而被否定。在Prolog中，在对NOT谓词的"失败即否定"的语义下，可证目标可能会由于向知识库中加入新的事实而不再成立。同样，在概率推理和模糊推理中，导出事件的概率或模糊程度也会由于知识库中加入新的事实而完全改变。

1975年，Minsky[2]指出，传统逻辑缺乏处理非单调推理的手段，都是单调的，即若A，B是公式集，那么A⊨B蕴涵着任给公式集C，A∪C⊨B。因此，研究非单调推理是必要的。

非单调推理的研究始于七十年代。对常识，歧义性等的探讨，导致了知识表示的研究，非单调逻辑这种知识表示方法可以改善传统逻辑描述不完备知识时的不足。Reiter[3]曾就数据库理论中的知识表示问题提出了"封闭世界假定"，即所有相关的正的信息都显式地表示出来。如果一个正的信息在数据库中没有显式地表示，就假定它的否定成立。对于关系数据库来说这是足够的，但对于演绎数据库，处理起来比较复杂，因为一个事实可能是由演绎推出来的。同时，随着对非单调推理研究的深入，人们认识到还需要一个称为真值维护的理论，利用新的信息去修正已得出的结论，取消某些假设。Doyle[4]的真值维护系统(TMS)就是用来完成这个过程的，然而信念修正的过程非常复杂。所有这一切都使得对非单调推理进行形式化的要求越来越迫切。

自从1980年，McCarthy，McDermott和Reiter分别发表了他们著名的非单调推理形式化系统以后，对非单调推理形式化的研究越来越受到关注，并且提出了许多形式系统。下面我们对各种成果做简要的介绍。

二、限制推理(Circumscription)

McCarthy[5,6]提出的限制推理是著名的非单调形式系统之一。限制推理基于极小模型的方法，基本出发点是认为已知的具有某种性质的客体，就是具有这种性质的客体的全部，并将这种认识应用到推理当中，直到遇到具有这种性质的新客体时才进行修正。限制推理可以通过公式限制、域限制等引入限制公理，从而在传统逻辑的框架内进行推理。例如，对 $T=\{\forall x Bird(x) \wedge \sim Ab(x) \rightarrow Fly(x), Bird(Tweety)\}$ 中异常谓词Ab进行限制，向T加入Ab的限制公理就可以推出Fly(Tweety)；而当得知Ostrich(Tweety)及∀x Ostrich(x)→Ab(x)后，就不能再推出Fly(Tweety)。当然，限制推理在具体实施时是很复杂的。

*)本文得到国家自然科学基金、863计划及攀登计划的资助。刘瑞胜 博士生，研究方向为人工智能。刘叙华 教授，博士生导师，研究方向为人工智能。

三、非单调逻辑

McDermott 和 Doyle[7]提出的非单调逻辑也是一种很有影响的非单调推理系统，是一种基于相容性的方法。它在一阶逻辑中引入了模态算子 M，Mw 的意义是"w 相容"。对鸟会飞的例子，在非单调逻辑中表示为$\forall x\ Bird(x) \wedge MFly(x) \rightarrow Fly(x)$。这个公式的直观意义是："对所有 x，如果 x 是鸟，且 x 会飞是相容的，那么 x 会飞"。对相容这个概念的理解很重要。McDermott 和 Doyle 对 Mw 的定义是"如果不能推出～w，则推出 Mw"。由此，一个非单调理论 A 的定理集 T 被定义为如下的不动点：

$$T = Th(A \cup \{Mw \mid \sim w \notin T\})$$

M 算子的这种语义是有问题的，它不能全面反映相容概念的直观。比如，非单调理论{MC，～C}是相容的。McDermott[8]试图基于标准模态逻辑 T，S_4 和 S_5 引入非单调模态逻辑来克服这些缺点。他发现形式化相容概念的最适宜的系统是非单调 S_5。然而非单调 S_5 会衰退为(collapse)标准的单调 S_5。

四、自知(Autoepistemic)逻辑

Moore[9]分析了非单调逻辑的困难，讨论了非单调逻辑的语义，提出了自知逻辑。自知逻辑是基于相信而不是相容的。自知逻辑中引入了算子 L，其意义是"被相信"，它对应于 McDermott 和 Doyle 的～M～。对于一个 agent 来说，LP 为真当且仅当 P 在它的信念集中。对于给定的前提集 A，A 的稳定扩展(stable expansion)是公式集 T：

$$T = Th(A \cup \{LP \mid P \in T\} \cup \{\sim LP \mid P \notin T\})$$

其中：{LP|P∈T}用于 agent 的完全的正自省(perfect positive introspection)，若 w 在信念集中，则相容 w，因而 Lw 在信念集中。{～LP|P∉T}用于 agent 的完全的负自省(perfect negative introspection)，若 w 不在信念集中，则 agent 不相信 w。而 McDermott 和 Doyle 的定义等价于：$T = Th(A \cup \{\sim LP \mid P \notin T\})$，那么按照自知逻辑对 L 的解释，McDermott 和 Doyle 的 agent 知道他们不相信什么，却可能不知道他们相信什么。

Konolige[10]深入研究了自知逻辑，发现它存在着一些不合理的性质。比如，{LP→P}有两个 Moore 的稳定扩展，其中一个包含 P 和 LP，另一个不包含 P 包含～LP。第一个扩展是不直观的，因为它相当于一个 agent 可以随便相信一个信念 P，并把 LP 加入他的信念集中；而第二个扩展是符合直观的，因为没有任何理由相信 P，因而把～LP 加入信念集中。为了消除这种不合理性，Konolige 引入了强基扩充(strongly grounded extension)的概念。令 A 是自知逻辑的公式集，T 是 A 的扩展。令 A′是 A 中纯一阶的部分，那么 T 是强基的，当且仅当

$$T = \{w \mid A' \cup LA' \cup \sim L\bar{T}_0 \models w\}$$

其中：T_0 是 T 中纯一阶的部分，$\bar{T}_0$ 是所有不在 T 中的纯一阶公式。强基扩充有一个很有用的性质，推出 Lw 的唯一途径是 w 可独立地推出，因此由 $Lw \rightarrow w$ 不能推出 w。这样，T 是 A 的强基扩充当且仅当 T 是 $A \cup Lw \rightarrow w$ 的强基扩充。这种性质称为自省等幂性(introspection idempotency)。

五、缺省逻辑

Reiter[11]的缺省逻辑是又一种基于相容性的方法。由于缺省逻辑表示的简单和直观，因而受到许多学者的关注。

在缺省逻辑中，一个缺省理论包含一个事实集和一个缺省规则集。缺省规则是如下形式的表达式：

$$\frac{\alpha(x) : \beta(x)}{\gamma(x)}$$

其意义是："若 α(x)成立，假定 β(x)是相容的，那么可以推出 γ(x)"。缺省规则可以看成是一类特殊的推理规则。知识库中包含的知识通常是不完全的，缺省规则可以用来帮助添补知识库中的空白，从而得到这个理论的一个更完备的扩充。鸟会飞在缺省逻辑中可以表示为：

$$\frac{Bird(x) : Fly(x)}{Fly(x)}$$

如果这样一个不完备的理论中包含 Bird(Tweety)，并且 Fly(Tweety)与这个理论相容，那么就可以利用这条缺省规则推出 Fly(Tweety)。

与非单调逻辑类似，在缺省逻辑中，缺省理论(D，W)的扩充也被定义为一个算子 Γ 的不动点。对任意一阶公式集 S，定义 Γ(s)是满足如下性质的最小集合：

(1) $W \subseteq \Gamma(S)$；

(2) $Th(\Gamma(S)) = \Gamma(S)$；

(3) 若 $\alpha : \beta/\gamma \in D$，$\alpha \in \Gamma(S)$ 且 $\sim\beta \notin S$，则 $\gamma \in \Gamma(S)$。

E 是缺省理论(D，W)的扩充，当且仅当 $E = \Gamma(E)$。

一个缺省理论可能没有扩充，比如$(\{\frac{:\sim A}{A}\},\varnothing)$，也可能有多个扩充，比如$(\{\frac{E:C}{\sim D},\frac{F:D}{\sim C}\},\{E,E\to F\})$有两个扩充$Th(\{E,E\to F,\sim D\})$和$Th(\{E,E\to F,\sim C\})$。对于多个扩充，缺省逻辑认为任一扩充都是一个agent的可能的信念集，因而是大胆的；而McDermott和Doyle的非单调逻辑是谨慎的，它只承认所有扩充的交集是一个agent的信念集。

Reiter还特别讨论了正规缺省理论。形如

$$\frac{\alpha(x):\beta(x)}{\beta(x)}$$

的缺省规则称为是正规的。正规缺省理论有许多好的性质，比如，总存在扩充，有半单调性，并且还可以给出证明理论。然而正如Reiter和Criscuolo[12]指出的，正规缺省规则的表达能力是有限的。他们提出使用形如

$$\frac{\alpha(x):\beta(x)\wedge\gamma(x)}{\gamma(x)}$$

的半正规缺省规则来表达缺省规则间的相互影响。遗憾的是，半正规缺省理论可能没有扩充，也没有半单调性。目前，我们只知道半正规缺省理论存在扩充的一个充分条件：有序有限的半正规缺省理论存在扩充[13,14]。对于必要条件，我们还一无所知。

Lukaszewicz[15]认为，缺省理论没有扩充的原因是对缺省规则的使用限制太少，迫使一些不该使用的"可用"的缺省规则被强制使用。Lukaszewicz给出了如下的使用缺省规则的标准：

"如果一个缺省规则的前提被相信，它的相容条件(justification)与信念相容，并且把这条缺省规则的结论加到信念集中既不会导致不相容，也不会与这条或其他已用缺省规则的相容条件矛盾，那么就相信这条缺省规则的结论。"

在Lukaszewicz的修正的缺省逻辑中，定义了两个算子Γ_1和Γ_2，对任意公式集对(S,U)，$\Gamma_1(S,U)$和$\Gamma_2(S,U)$分别是满足下列条件的最小集合：

(1)$W\subseteq\Gamma_1(S,U)$

(2)$Th(\Gamma_1(S,U))=\Gamma_1(S,U)$

(3)若$\alpha:\beta/\gamma\in D$，$\alpha\in\Gamma_1(S,U)$且对所有$w\in U\cup\{\beta\}$，$S\cup\{\gamma\}\not\vdash\sim w$，则$\gamma\in\Gamma_1(S,U)$且$\beta\in\Gamma_2(S,U)$。

E是缺省理论(D,W)的扩充，当且仅当$E=\Gamma_1(E,F)$且$F=\Gamma_2(E,F)$。Lukaszewicz证明了每个缺省理论都存在扩充，有半单调性。

但是，在Reiter和Lukaszewicz的系统中还存在着一些不直观性。如$(\{\frac{:usable(x)\wedge\sim broken(x)}{usable(x)}\},\{broken(leftarm)\vee broken(rightarm)\})$在Reiter的缺省逻辑和Lukaszewicz的修正的缺省逻辑中都有唯一的一个同时包含usable(leftarm)和usable(rightarm)的扩充。这是与leftarm和rightarm至少有一个是broken的直观不相符的。产生这种问题的原因是没有考虑缺省规则的相容条件之间的相互影响。

为了减少不直观的结果，Brewka[16]提出了累积的缺省逻辑CDL。累积性是指：如果$W\vdash y$，那么$W\vdash x$当且仅当$W\cup\{y\}\vdash x$。Makinson[17]的研究表明，累积性是非单调推理应具备的一般性质之一。在CDL中，使用形如$<P:\{s_1\cdots,s_n\}>$的断言，来代替一般的一阶公式P，$s_1,\cdots,s_n$称为P的支持。$Th_s(A)$被定义为满足下面性质的最小集合：

(1)$A\subseteq Th_s(A)$

(2)若$<P_1:J_1>,\cdots,<P_k:J_k>\in Th_s(A)$且$P_1,\cdots,P_k\vdash q$则$<q:J_1\cup\cdots\cup J_k>\in Th_s(A)$。

CDL缺省理论的扩充定义为算子Γ的不动点。对任意断言集S，$\Gamma(S)$是满足下列性质的最小集合：

(1)$W\subseteq\Gamma(S)$

(2)$Th_s(\Gamma(S))=\Gamma(S)$

(3)若$\alpha:\beta/\gamma\in D$，$<\alpha:J>\in\Gamma(S)$且$\{\beta,\gamma\}\cup\{P\mid<P:J>\in S\}\cup\{s\mid<P:\{s_1,\cdots,s,\cdots,s_n\}>\in S\}$相容，则$<\gamma:J\cup\{\beta,\gamma\}>\in\Gamma(S)$。

对于前面提到的例子，CDL将得到两个扩充，分别包含usable(leftarm)和usable(rightarm)。每个CDL缺省理论都存在扩充，并且CDL有半单调性和累积性。Brewka认为半单调性是一个不好的性质，因为它损失了非正规缺省规则的表达能力。Brewka进一步定义了保持优先性的扩充，来"过滤"掉不合期望的扩充。然而这种保持优先性的扩充并非总存在，这也是为了用半正规缺省规则来表达优先性而不得不付出的代价。

Guerrerio等人研究了非单调推理的证明理论，指出，存在扩充和有半单调性是定义一个可靠的完备的证明理论的必要条件[18]。为了在保证半单调性的前提下，得到符合期望的扩充，刘叙华和刘瑞胜[19]在缺省理论中引入了初始假设集，同时严格限制了缺省规则的使用条件，得到了带有假设的缺省逻辑ADL。一个ADL缺省理论是一个三元组(D,W,A)，其中D,W是Reiter意义下的缺省规则集和事实集。

A 是一阶公式集,称为初始假设集。A 的作用是用来描述推理的期望、猜想、假设、观念等等,A 中的公式只用来检查相容性,而不能以它们为前提进行推理。在 ADL 中定义了两个算子 Γ_1 和 Γ_2,对任意公式集对(S,U),$\Gamma_1(S,U)$和 $\Gamma_2(S,U)$分别是满足下列性质的最小集合:

(1)$W \subseteq \Gamma_1(S,U)$;

(2)$A \subseteq \Gamma_2(S,U)$;

(3)$Th(\Gamma_1(S,U)) = \Gamma_1(S,U)$;

(4)若 $\alpha : \beta/\gamma \in D$,$\alpha \in \Gamma_1(S,U)$且 $S \cup U \cup \{\beta,\gamma\}$ 相容,则 $\gamma \in \Gamma_1(S,U)$且 $\beta,\gamma \in \Gamma_2(S,U)$。

E 是(D,W,A)的扩充,当且仅当 $E = \Gamma_1(E,F)$ 且 $F = \Gamma_2(E,F)$。

对于 broken-arm 的例子,若 $A = \varnothing$,那么在 ADL 中也会得到分别包含 usable(leftarm)和 usable(rightarm)的两个扩充。如果认为 broken(leftarm)更符合期望的话,那么把它加入到 A 中就会得到唯一的包含 usable(rightarm)的扩充。ADL 缺省理论都存在扩充,并且有半单调性和累积性。

缺省逻辑缺少一个清晰的语义。Konolige[10]讨论了缺省逻辑和自知逻辑的关系,给出了缺省逻辑的语义。Konolige 把缺省规则 $\alpha : \beta/\gamma$ 转换成自知逻辑公式

$$L\alpha \wedge \sim L \sim \beta \to \gamma$$

从而把缺省逻辑嵌入到自知逻辑中。进而,Konolige 指出自知逻辑和缺省逻辑的表达能力是相同的,缺省逻辑的扩充对应着自知逻辑的强基扩展。姜云飞[20]在相信逻辑中引入相信解释和相信模的概念,从语义上把相信逻辑改造成非单调的逻辑,一个缺省理论可以转换成一个相信逻辑理论,缺省理论的扩充的模集就是对应相信理论的模,从而为缺省理论提供了一种简便的语义。Shoham[21]基于择优逻辑间接地给了缺省逻辑的语义

另外,姜云飞[22]提出了用格论研究缺省推理的方法。缺省理论的扩充对应于缺省格的相容集合的 D-极大值,因此可以使用缺省格求出缺省理论的所有扩充。

六、开放逻辑

李未[23]提出的开放逻辑是一个可以刻画知识的增长、更新以及假说的进化的逻辑理论。开放逻辑可以同外部环境交互,接收新的东西——新假说和事实反驳。A 是 T 的新假说当且仅当存在两个模型 M 和 M′,使得 $M \models T$ 及 $M \models A$,$M' \models T$ 及 $M' \models \neg A$ 均成立。设 $T \models A$,称模型 M 为 A 的事实反驳当且仅当 $M \models \neg A$。当接收新假说时,认识进程表现的是单调性,当受到事实反驳,认识进程呈现出非单调性。通过对假说的重构,可以解决知识的增长和修正问题。特别地,李未还讨论了认识进程的极限,证明了任何关于某一特定问题的经验模型都是一认识进程的极限。开放逻辑可以用来为非单调推理(比如限制推理和缺省逻辑)提供语义[23,24]。

七、结 论

研究非单调推理的方法还有很多,比如,Delgrande[25,26]的条件逻辑等,限于篇幅,不再具体介绍。

应当指出,对于非单调推理的形式化存在着一些争议。Israel[27]认为逻辑本身应当是单调的。Poole[28]也认为非单调性不是逻辑本身的问题,而是如何使用逻辑的问题,如果允许进行假设推理,就没有必要定义一种新逻辑来处理非单调推理。另一个争议在于概率推理和非单调推理的关系。对于用概率方法处理非单调推理[29,30],McCarthy 和 Reiter 都认为这是误解了非单调推理的本意,McCarthy[31]认为概率和非单调逻辑是相互补充的,非单调方法用于形式化命题,概率是附加于这些命题之上的。我们认为对这两种方法的结合的研究是非常有意义的。邓安生和刘叙华[32]使用布尔算子模糊逻辑[33]研究了非单调推理,给出了对信念进行修正的方法,从另一个角度说明了用模糊逻辑描述非单调逻辑的可能性。

尽管对非单调逻辑存在着争议,但人们对非单调推理研究的热情表明这是一个很有发展前途的研究方向。McCarthy[4]和 Reiter[31]都阐明了非单调推理在处理框架问题(frame problem)上的优势。Nilsson[34]在 1987 年说,处理框架问题的最经济方式似乎需要非单调推理。非单调推理的研究还很不成熟,在前进的道路上还存在着许多困难,但已显示出这是一个充满挑战,令人激动的研究领域,突破传统的纯逻辑的限制,展现在我们面前的将是一个广阔的新天地。(参考文献共 34 篇略)